بررسی اثر جداگرهای لرزه ای بر جا به جایی‌های طبقات و تشکیل مفاصل پلاستیک

هاشم شریعتمدار [۱،*]، سید میثم کلانتری [۲]

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، پردیس فنی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

hshariatmadar@ferdowsi.um.ac.ir

(دریافت مقاله: مهر ۱۳۸۷، پذیرش مقاله: آذر ۱۳۸۷)

چکیده

*جداسازی لرزه‌ای یک روش طراحی لرزه‌ای مقاوم است که به جای افزایش ظرفیت لرزه‌ای سازه، مبتنی بر کاهش نیاز لرزه‌ای می باشد. در این مقاله سعی شده است اثر دو نوع عمده جداگر لرزه ای در کاهش برش پایه و برش طبقات سازه مورد بررسی قرار گیرد. ۴ سازه ۲ ،۵ ،۸ و۱۲ طبقه برای سه حالت با پای گیردار ، با جداساز لاستیکی- سربی و با جداساز پاندولی- اصطکاکی همراه با سختی‌های متفاوت ایزولاتورها مدل سازی شده است.مدل‌های فوق تحت زلزله های منجیل ،ناغان،طبس و السنترو به وسیله نرم افزار **DRAIN-2DX** آنالیز غیر خطی تاریخچه زمانی گردیده است . نتایج نشان می دهد که، جداگرهای لاستیکی- سربی عموماً جا به جایی بیشینه طبقات را در سازه‌های کوتاه نسبت به جا به جایی بیشینه بام این سازه‌ها در حالت گیردار افزایش می‌دهند. اما در مورد جداگرهای **FPS** نکته مثبتی که وجود دارد آن است که در اکثر موارد جا به جایی حداکثر آن ها از جا به جایی حداکثر سازه‌گیردار در بام بیشتر نمی‌باشد. با استفاده از ایزولاتورها، تعداد سیکل پاسخ تغییر مکانی سازه به خصوص در سازه‌های سخت‌تر(کوتاه‌تر) کاهش می‌یابد. در سازه‌های کوتاه‌تر ایزوله شده لرزه‌ای، کاهش بسیار بیشتری در درصد تشکیل مفاصل در اعضا نسبت به سازه گیردار مشابه، دیده می‌شود. عموما" استفاده از ایزولاتورها در سازه‌های کوتاه (به خصوص برای شتاب‌نگاشت‌های غالب ایران) بسیار مفیدتر است.*

واژگان کلیدی: جداسازی لرزه ای، جداگر لاستیکی- سربی، جداگر پاندولی- اصطکاکی، جا به جایی طبقات، جا به جایی نسبی.

---

*- عهده دار مکاتبات: گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد،
hshariatmadar@ferdowsi.um.ac.ir

مقدمه

جداسازی لرزه ای یک روش طراحی ساده سازه‌ای برای کاهش یا حذف پتانسیل خسارات زمین لرزه است. استفاده صحیح از این فن‌آوری سبب بهبود رفتار سازه‌ها شده و رفتار سازه در حین زمین لرزه‌های بزرگ ، عمدتاً در محدوده ارتجاعی باقی می‌ماند[۱و۲و۳].

چگونگی به حداقل رساندن تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای و شتاب‌های طبقات مهم‌ترین مسأله‌ای است که طراح باید در نظر بگیرد. تغییر مکان‌های بین طبقه‌ای زیاد سبب خسارت دیدن اجزای غیرسازه‌ای و تجهیزات وابسته به طبقات می‌شود. تغییر مکان بین طبقه‌ای را می‌توان با افزایش سختی سازه کاهش داد، اما این عمل سبب جذب و افزایش انرژی اعمال شده به سازه ناشی از زمین لرزه گردیده و منجر به خسارت دیدن تجهیزات حساس داخلی خواهد شد. شتاب‌های طبقات را می‌توان با نرم‌تر کردن سیستم کاهش داد، اما این کار منجر به تغییر مکان‌های بین طبقه‌ای بزرگی می‌شود. تنها راه عملی کاهش همزمان تغییر مکان بین طبقه‌ای و شتاب‌های طبقات، استفاده از جداسازی لرزه ای است؛ سیستم جداساز، با متمرکز کردن تغییر مکان‌های حاصله در تراز جداساز، نرمی مورد نیاز سازه را فراهم می‌کند.

تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه جدا سازی لرزه‌ای صورت گرفته است[۴و۵و۶]. اما از خصوصیات این پژوهش آن است که مقایسه‌ای کاربردی برای بهینه سازی رفتار سازه ایزوله شده در کاهش برش پایه و تغییرات جا به جایی طبقات در آن صورت گرفته است. همیشه تصور بر این بوده است که جداسازی لرزه‌ای باعث افزایش جا به جایی سازه می شود و از آن به عنوان یک عیب این گونه سازه‌ها یاد می‌شده‌است. اما در این پژوهش دیده می‌شود که همیشه این‌گونه نیست و می‌توان حالت بهینه ای بین این دو رفتار سازه برای طراحی انتخاب کرد.
تاکنون رفتار این جداسازها بارها به تنهایی مقایسه شده‌اند[۸]. اما در این مقاله رفتار دو نوع عمده جداساز لرزه‌ای در جهت کمک به طراح این‌گونه سازه‌ها برای انتخابی بهینه، با یکدیگر مقایسه شده است، که چنین مقایسه‌ای قبلا" صورت نگرفته است.

همان‌طور که می‌دانیم طبق آیین‌نامه برای طراحی سازه‌های جداسازی شده لرزه‌ای باید یک دوره طراحی معقول برای سازه ایزوله شده، فرض شود [۹و۱۱]. این دوره معمولا" بین ۲ تا ۳ ثانیه در نظر گرفته می‌شود. در پژوهش‌های قبل پیشنهادی به طراح این‌گونه سازها برای انتخاب بهترین پریود طراحی با توجه به شرایط مسئله دیده نمی‌شود. در این مقاله رفتار سازه با پریودهای مختلف طراحی با یکدیگر مقایسه شده اند تا به طراح برای انتخاب پریود طراحی بهینه جداساز، ایده‌ای مناسب دهد.
هم‌چنین در سازه‌های مختلف با دو نوع جداساز لرزه‌ای و با پریودهای متفاوت طراحی، روند تشکیل مفاصل پلاستیک نیز با یک دیگر مقایسه شده‌است.
در این مقاله چگونگی رفتار سازه های جداسازی شده با دو نوع عمده جداسازهای لرزه‌ای، در جا به جایی طبقات، تاریخچه زمانی جا به جایی‌ها و روند تشکیل مفاصل پلاستیک با یکدیگر، و هم‌چنین با سازه گیردار مشابه مقایسه شده است. برای ارائه مطلب و آشنایی با روند کارهای صورت گرفته ابتدا مشخصات این جداگرهای لرزه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. سپس نحوه مدل‌سازی این ایزولاتورها ومشخصات نرم افزار مورد استفاده به طور مختصر شرح داده شده است . در ادامه به مشخصات مدل‌ها وبررسی نتایج حاصل پرداخته شده است.

مشخصات جداگرهای لرزه ای

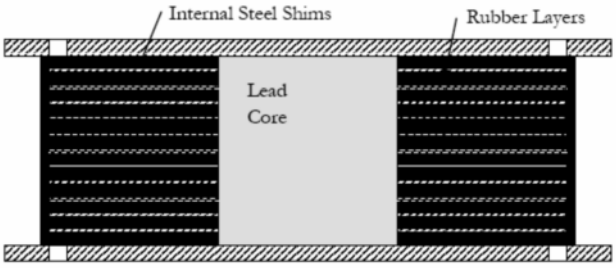
جداگرهای لاستیکی- سربی

بین جداگرها، دارای یک یا چند هسته سربی هستند که در سوراخ هایی قرار گرفته اند. صفحات فولادی به کار رفته در این سیستم سبب تغییر شکل هسته سربی در برش می‌شوند. این هسته‌های سربی در جریان برشی در حدود **MPa** ۱۰ (**psi** ۱۵۰۰) تغییر شکل فیزیکی داده و سبب ایجاد یک پاسخ دو خطی در جداگر می‌شوند. شکل ۱ جداگر با هسته سربی را نشان می دهد. هسته سربی باید کاملاً در جداگر الاستومری محکم شده باشد که برای این منظور، قطر هسته سربی را اندکی بیش از سوراخ در نظر گرفته و هسته را با فشار به داخل سوراخ می‌رانند. از آن‌جائی که، سختی و میرایی مؤثر جداگرهای با هسته

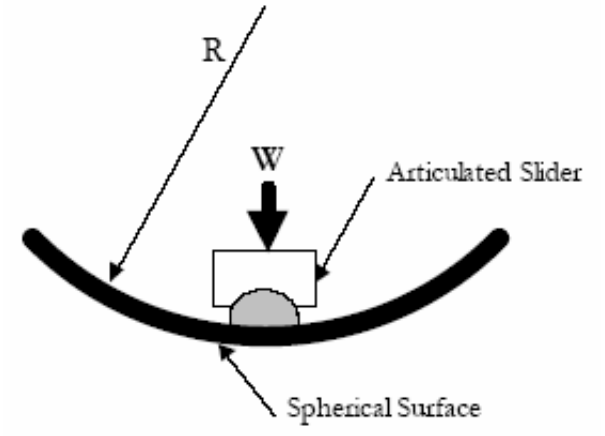
سربی وابسته به مقدار جا به جایی آن است، بنابراین باید تغییر مکان متناظر با مقدار میرایی لازم، مشخص شود.

جداگرهای پاندولی-اصطکاکی FPS

جداگرهای پاندولی اصطکاکی (**FPS**[1])، سیستم جداسازی اصطکاکی است که به وسیله هندسه خاص خود، عمل لغزش و نیروی بازگرداننده را فراهم می کند. جداساز **FPS** که به صورت نمادین در شکل ۲ نشان داده شده است، دارای یک قسمت لغزنده مفصلی است که بر روی یک سطح کروی از جنس فولاد ضد زنگ می‌لغزد. سطحی از این قسمت لغزنده مفصلی که در تماس با سطح کروی است، با موادی با اصطکاک کم پوشیده شده است. سطح دیگر این لغزنده نیز کروی بوده و با لایه ای از فولاد ضد زنگ پوشیده شده است. این سطح در یک شیار کروی که آن هم از ترکیباتی با اصطکاک کم پوشیده شده قرار می گیرد. با حرکت قسمت لغزنده از روی سطح کروی، جرم موجود از روی آن بلند شده که این امر سبب ایجاد نیروی بازگرداننده در سیستم می شود. اصطکاک بین سطح لغزنده مفصلی و سطح کروی نیز سبب ایجاد میرایی در جداسازها می‌شود. سختی مؤثر جداسازها و دوره تناوب سازه جداسازی شده به وسیله شعاع انحنای سطح محدب کنترل می شود.



شکل۱- جداگرهای با هسته سربی [11]



شکل۲- سیستم آونگ اصطکاکی FPS [11]

خواص مکانیکی جداگرهای لاستیکی با هسته سربی[6]

جداگرهای با هسته سربی همواره به صورت اجزای دو خطی مدل می‌شوند که خواص آن ها بر مبنای سه پارامتر $\mathbf{K_1}$ و $\mathbf{K_2}$ و $\mathbf{Q}$ (شکل۳) مدل می شود. اندازه‌گیری سختی ارتجاعی ($\mathbf{K_1}$) دشوار بوده و معمولاً به صورت یک ضریب تجربی از $\mathbf{K_2}$ (سختی پس از تسلیم) در نظر گرفته می‌شود. مقدار $\mathbf{K_2}$ را می‌توان با دقت مناسب از روی مدول برشی لاستیک و طرح جداگر به دست آورد. مقاومت مشخصه **Q**، محل برخورد حلقه پس ماند با محور نیرو بوده و بر مبنای مساحت هسته سربی به دقت تعیین می‌شود.

سختی مؤثر این نوع جداساز لرزه ای بر مبنای بارهای حداکثر تا حداکثر (حداکثر در جهت مثبت تا حداکثر در جهت منفی) تعریف شده و با افزایش تغییر مکان، مرتباً کاهش می‌یابد. مقدار سختی مؤثر را می‌توان برحسب پارامترهای پایه $\mathbf{K_1}$ و $\mathbf{K_2}$ و $\mathbf{Q}$ به صورت زیر نوشت:

$$K_{eff} = K_2 + \frac{Q}{D} \qquad \mathbf{D \geq D_y} \qquad (1)$$

که در آن $\mathbf{D_y}$ تغییر مکان حد تسلیم است. بسامد طبیعی ω نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\omega = \sqrt{\frac{K_{eff} g}{W}} = \sqrt{\omega_0^2 + \mu \frac{g}{D}} \qquad (2)$$

که در آن $\mu = \frac{Q}{W}$ و $\omega_0^2 = \sqrt{K_2 g / W}$ است. دوره تناوب مؤثر، **(T)** نیز برابر خواهد بود با:

1- Friction Pendulum System

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_{\circ}^{2} + \mu\frac{g}{D}}} \qquad (3)$$

مقدار میرایی مؤثر، (β_{eff}) به ازای $D \geq D_y$ به این صورت تعریف شده است:

$$\beta_{eff} = \frac{\text{سطح زیر حلقه منحنی پس ماند}}{2\pi K_{eff} D^{2}} \qquad (4)$$

مساحت حلقه پس‌ماند برابر است با $4Q(D - D_y)$. برای بیان β_{eff} برحسب این پارامترهای پایه‌ای، داریم:

$$D_y = \frac{F_y}{D_1} \qquad F_y = Q + K_2 D_y \qquad (5)$$

بنابراین :

$$D_y = \frac{Q}{K_1 - K_2} \qquad (6)$$

معمولاً مقدار سختی ارتجاعی (K_1) به صورت تجربی برابر K_2 ۱۰ در نظر گرفته می‌شود

خواص مکانیکی سیستم‌های آونگ اصطکاکی[6]

اگر بار وارده به یک جداساز **FPS** (سیستم آونگ اصطکاکی) **W**، تغییر مکان افقی آن **D** و ضریب اصطکاک μ باشد، آنگاه نیروی مقاوم **F** برابر است با:

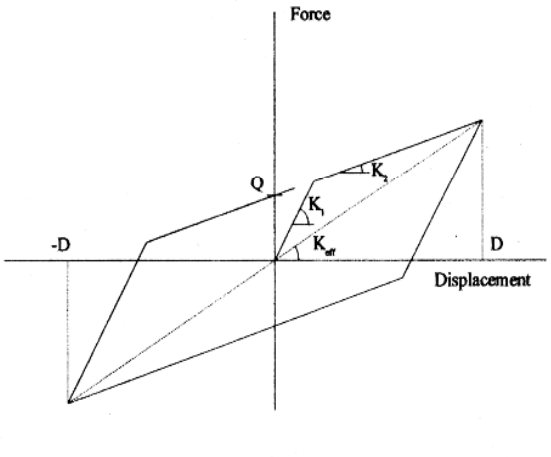
$$F = \frac{W}{R} D + \mu W (sgn\, D) \qquad (7)$$

که در آن **R** شعاع انحنای صفحه کوژ می‌باشد. عبارت اول در این رابطه، نیروی بازگرداننده ناشی از بلند شدن جرم بوده که سبب ایجاد سختی افقی برابر $K_H = \frac{W}{R}$ می‌کند. این سختی افقی، دوره تناوب سازه جدا شده، **(T)** را به صورت $T = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}}$ در می‌آورد که مستقل از جرم روی آن است. عبارت دوم، نیروی اصطکاک بین قسمت لغزنده و سطح برآمده می‌باشد. ضریب اصطکاک μ به مقدار فشار **P** و سرعت لغزش، بستگی دارد. شکل تیپ حلقه‌های پس‌ماند یک سیستم **FPS** که در یک آزمایش با استفاده از میز لرزان به دست آمده، در شکل ۳ نشان داده شده است [۵]. ماهیت بسیار خطی نیروی بازگرداننده، سختی زیاد پیش از وقوع لغزش و استهلاک انرژی ناشی از اصطکاک لغزشی، کاملاً در این شکل مشخص می باشد. سختی معادل از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$K_H = \frac{W}{R} + \frac{\mu W}{D} \qquad (8)$$

مدل‌سازی دو خطی جداگرهای لرزه ای

در عمل، تمام جداگرهای لرزه ای به صورت یک مدل دو خطی و براساس سه پارامتر K_1، K_2 و **Q** که در شکل ۴ نشان داده شده‌اند، مدل می‌شوند. سختی الاستیک K_1 را می‌توان از روی حلقه‌های پس‌ماند موجود جداگرهای الاستومری آزمایش شده به دست آورد و یا برای جداگرهای با هسته سربی یا جداگرهای آونگ اصطکاکی، به صورت ضریبی از K_2 تعریف کرد. مقاومت مشخصه **Q** برای جداگرهای با هسته سربی از تنش تسلیم و مساحت سرب و برای جداگرهای آونگ اصطکاکی از روی ضریب اصطکاک سطح لغزنده و بار وارده به جداگر، به دست می‌آید. برای هر سه نوع جداگر، سختی پس از تسلیم را می‌توان به دقت تخمین زده یا پیش‌بینی کرد.



شکل۳- رفتار دو خطی ایده‌آل[6].

مشخصات نرم افزارDRAIN-2DX [8] .

برنامه کامپیوتری **DRAIN-2DX**[1] از جمله برنامه هایی است که برای تحلیل استاتیکی و دینامیکی سازه های فولادی و بتنی دو بعدی در ناحیه خطی و غیر خطی تهیه شده است.

. این برنامه علاوه برتحلیل دینامیکی غیر خطی سازه های فولادی و بتنی توانایی تحلیل سیستم‌های غیر خطی دیگر نظیر سیستم های ایزولاسیون لرزه ای ، سیستم های جذب کننده انرژی ، سیستم های سازه ای با رفتار غیر خطی موضعی و ... را نیز دارا است.

نتایج تحلیل دینامیکی غیر خطی یک قاب بتنی دو طبقه با استفاده از این برنامه با نتایج آزمایش دینـــامیکـــی این قـاب روی میز لـرزان توافـق خوبی نشان داده است به عـلاوه این برنامه در طراحی بسیاری از سیستم های ایزولاسیون لرزه ای پایه مورد استفاده عملی قرار گرفته و نتایج آن با برنامه های کامپیوتری دیگر نظیر **ANSR-II COMBAT , NPAD** مقایسه شده است. به هر حال این نرم افزار کامپیوتری از سوی بسیاری از طراحان سازه به عنوان یک برنامه کامپیوتری استاندارد شناخته شده است.

در این برنامه برای مدل کردن جداگرهای لرزهای از المان‌های اتصال (**CONNECTION ELEMENT**) استفاده شده است . المان اتصال برای متصل کردن دو گره با مختصات یکسان به کار می‌رود. به عبارت دیگر طول این المان برابر با صفر است. با استفاده از این المان می‌توان درجات آزادی انتقالی و دورانی دو گره را به یک دیگر متصل کرد.

به منظور تعریف رابطه نیرو - تغییر مکان المان اتصال از یک رابطه دو خطی استفاده می‌شود. بنابراین با مشخص کردن سختی اولیه یا سختی الاستیک، سختی ثانویه یا سختی پلاستیک و سطح تسلیم المان رابطه نیرو - تغییر مکان المان اتصال تعریف می شود..

1-Dynamic Response Analysis of Inelastic plain (2DX) structures

مشخصات سازه‌های مورد مطالعه

سازه‌های مورد مطالعه عبارت است از چهار سازه ۲، ۵، ۸ و ۱۲ طبقه فلزی، که سیستم مقاوم آنها در برابر نیروی زلزله، قاب خمشی می‌باشد. این چهار سازه دارای ۴ دهانه، ۶ متری می‌باشند و ارتفاع تمام طبقات یکسان و برابر، ۳/۶ متر می‌باشد.. عرض بارگیر هر قاب برای بارگذاری ثقلی ۶ متر در نظر گرفته شده است.

هر کدام از این سازه‌ها برای دو نوع جداگر نام برده شده دوره های طرح ۲,۵،۲و۳ ثانیه تحت چهار رکورد زلزله طبس، ناغان، منجیل و السنترو تحلیل شده‌اند.

بنابراین در مجموع ۲۸ سازه مورد بررسی قرار گرفته است. در واقع۱۱۲ آنالیز غیر خطی صورت گرفته است.

طراحی جداسازهای لرزه ای

انتخاب ناحیه لرزه‌خیزی سازه

برای طراحی عمومی و اولیه جداسازها باید ابتدا ناحیه لرزه‌ای که سازه مفروض در آن قرار دارد مشخص شود. چون اصولاً سازه‌های ایزوله شده سازه‌های خاص در مناطق لرزه‌خیز هستند با توجه به **IBC 2003 [7]**، محل سازه در منطقه‌ای با لرزه‌خیزی بالا انتخاب می‌شود.

لازم به ذکر است تنها طرح اولیه جداسازها مد نظر است. طرح کلی و انتخاب جداسازها نیاز به تحلیل دقیق و آزمایش‌های مختلفی دارد که در آیین‌نامه **IBC 2003** تشریح آن آمده است.

روش طراحی جداسازها

هر چند تعریف رفتار المان‌های جداساز لاستیکی سربی و **FPS** برگرفته از رفتاری پیچیده می‌باشد اما شکل و الگوی رفتار این جداسازها تقریباً دو خطی است. بنابراین می‌توان با پذیرفتن تقریبی کم برای طراحی جداسازها از یک رفتار دو خطی کامل به صورت متوازی الاضلاع استفاده کرد. به عبارتی تعدادی از عوامل حاکم بر رفتار جداساز با فرض معقول باید در نظر گرفته شود. و سپس رفتار دو خطی باید به گونه‌ای کالیبره شود که عوامل مورد نظر در این رفتار به

دست آیند.

در این مقاله برای به دست آوردن عوامل معقول و متناسب با ناحیه انتخاب شده ،از روابط روش استاتیکی در ناحیه مورد نظر برای به دست آوردن جا به جایی استفاده می‌شود. فرض‌های اساسی در طراحی تمامی جداگرهای سربی - لاستیکی و **FPS** به شرح زیر است:

۱- میرایی معادل ویسکوز (معادل سطح داخلی چرخه هیسترسیس در جا به جایی طرح) برابر ۱۰٪ فرض می‌شود.

۲- دوره مدل‌ها با فرض رو سازه صلب برابر ۲، ۲/۵ . ۳ ثانیه فرض می‌شود.

۳- از زوال سختی جداگر صرف نظر می‌شود:
$K_{Dmin}=K_{eff}$

۴- نسبت سختی بعد از تسلیم به قبل از تسلیم (α) برای جداگرهای لاستیکی سربی برابر ۰/۱ و برای جداگرهای **FPS** برابر ۰/۰۱ است.

تحلیل نتایج به دست آمده

مشخصات شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده

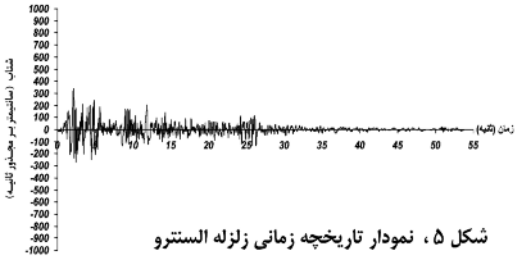
شتاب‌نگاشت سه زلزله طبس، ناغان و منجیل با محتوای فرکانسی متفاوت و هم‌چنین به منظور مقایسه جهانی، زلزله السنترو، با مشخصات زیر به عنوان ورودی به پایه سازه ها مورد استفاده قرار گرفته است.تاریخچه زمانی شتاب در اشکال ۵ تا ۹ ارائه شده است .

۱- زلزله سال ۱۳۵۷ طبس، با حداکثر شتاب **g** **PGA** = ۰/۹۳۳ و زمان تداوم ۲۵ ثانیه.

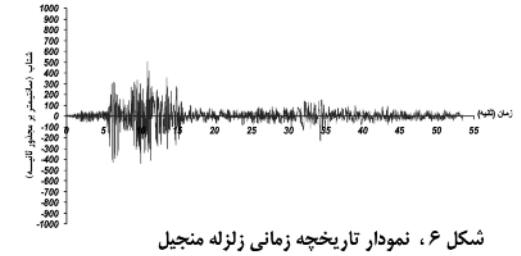
۲- زلزله سال ۱۳۵۶ ناغان، با حداکثر شتاب **g** **PGA** = ۰/۷۲۳ و زمان تداوم ۵ ثانیه.

۳- زلزله سال ۱۳۶۹ منجیل، با حداکثر شتاب **g** **PGA** = ۰/۵۱۴ و زمان تداوم ۵۳/۵۰ ثانیه.

۴- زلزله سال ۱۹۴۰ السنترو آمریکا، با حداکثر شتاب **g** **PGA** = ۰/۳۴۸ و زمان تداوم ۵۳/۷۴ ثانیه.

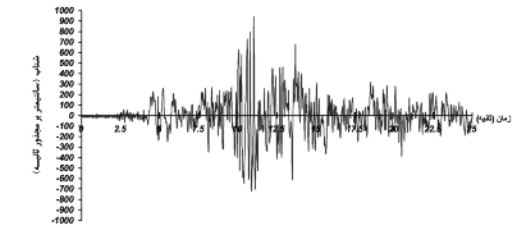


شکل ۵ ، نمودار تاریخچه زمانی زلزله السنترو



شکل ۶ ، نمودار تاریخچه زمانی زلزله منجیل

شکل ۷ ، نمودار تاریخچه زمانی زلزله ناغان



شکل ۸ ، نمودار تاریخچه زمانی زلزله طبس

برای این‌که تأثیر زلزله‌های فوق بر سازه‌های مورد مطالعه قابل مقایسه با یک دیگر هستند، حداکثر شتاب آن‌ها را در ضرایب مناسبی ضرب کرده تا همگی آن‌ها دارای شتاب حداکثر یکسان شوند. در این مقاله شتاب بیشینه زلزله‌ها به **g** ۰/۳۵ (شتاب سطح بهره برداری) هم پایه شده‌اند.

بررسی حداکثر تغییر مکان جانبی طبقات در سازه گیردار و سازه‌های ایزوله شده

در این قسمت برای بررسی رفتار دقیق جداسازها تحت زلزله‌های متفاوت جا به جایی حداکثر طبقات در سازه‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است. اما تنها نتایج جا به جایی

حداکثر طبقات برای جداسازهای لاستیکی- سربی و **FPS** با پریود طرح ۲/۵۰ ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است.
در اشکال (۶-۳۱ تا ۶-۴۶) حداکثر جا به جایی طبقات تحت رکورد زلزله‌های مختلف برای سازه‌های ۲ تا ۱۲ طبقه مورد بحث ، رسم شده است.

همان‌طور که در نمودارها مشخص است، تغییرات جا به جایی بیشینه طبقات در سازه‌های ایزوله شده بسیار کمتر است. اما این تغییرات با بیشتر شدن تعداد طبقات سازه بیشتر می‌شود. تا جایی که در سازه ۱۲ طبقه تغییرات جا به جایی بیشینه طبقات در سازه‌های ایزوله شده بر سازه‌گیردار نزدیک می‌شود. (اشکال۹ تا۲۴) این مهم‌ترین خصوصیت جداسازهای لرزه‌ای می‌باشد که باعث می‌شوند رو سازه به صورت صلب حرکت نموده و جا به جایی نسبی کمی به المان‌های سازه وارد شود، که خود منجر به کاهش تلاش‌های داخلی اعضا تیر و ستون در سازه خواهد شد.

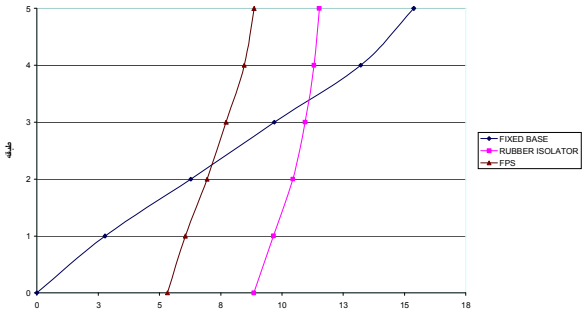
نکته دیگری که در این نمودارها دیده می‌شود، جا به جایی صلب بالای جداسازهای لاستیکی - سربی در سازه‌های کوتاه‌تر می‌باشد. این جا به جایی در سازه‌های ۲ طبقه تنها در زلزله منجیل (شکل۱۰) و در سازه‌های ۵ طبقه تنها در زلزله السنترو (شکل۱۳) از مقدار جا به جایی حداکثر سازه صلب در حالت گیردار کمتر است. اما در سازه‌های ۸ طبقه در زلزله‌های ناغان و السنترو (شکل‌های۱۷ تا۲۰)، و درسازه‌های ۱۲طبقه تحت تمامی زلزله‌ها (شکل‌های۲۱ تا۲۴)، جا به جایی حداکثر سازه‌ها با این ایزولاتورها از مقدار جا به جایی حداکثر سازه گیردار مشابه کمتر است. و این نشان می‌دهد در سازه‌های بلند مرتبه استفاده از این ایزولاتورها حتی جا به جایی حداکثر بام سازه را می‌تواند کاهش دهد. گرچه در ساختمان‌های بلند همان‌طور که دیده شد تأثیر زیادی در کاهش برش پایه سازه نخواهند داشت.

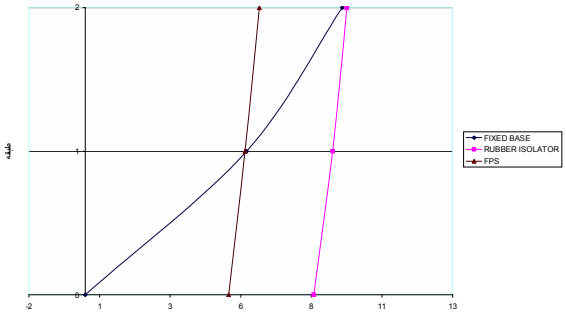
جداگرهای **FPS** همان‌طور که در نمودارها نشان داده‌شده‌است، جا به جایی کمتری نسبت به جداگرهای لاستیکی- سربی در سازه ایجاد می‌کنند. و فقط در سازه‌های ۱۲ طبقه چون رفتار این جداگرها به سازه‌گیردار نزدیک‌تر می‌شود، در تمام زلزله‌ها به جز طبس حداکثر جا به جایی بام آنها از ایزولاتور لاستیکی - سربی بیشتر است. در سازه‌های ۲، ۵ و ۸ طبقه میزان جا به جایی نسبی تراز روی ایزولاتورها و بام برای هر دو ایزولاتور تقریباً ثابت است. یعنی تقریباً رفتار صلب مشابهی را در این سازه‌ها با هر دو نوع ایزولاتور مشاهده می‌کنیم. اما در سازه ۱۲ طبقه رفتار سازه با ایزولاتور لاستیکی - سربی رفتاری صلب‌تر بوده در نتیجه خسارات کمتری را به سازه وارد می‌کند.

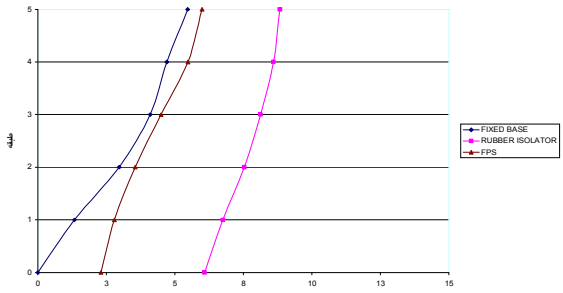
اما چیزی که به طور مشخص از این نمودارها و نمودارهای برش به دست می‌آید آن است که هر جا ساختمان حرکت صلب بیشتری داشته است، به همان نسبت درصد کاهش برش در سازه نیز بیشتر خواهد بود.

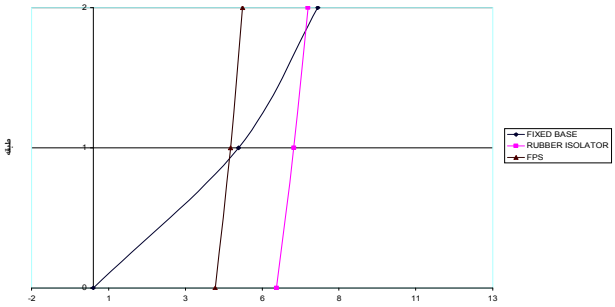
نکته مثبتی که جداگرهای **FPS** دارند آن است که در هیچ موردی (به جز سازه ۲طبقه تحت زلزله طبس (شکل۱۲) و سازه ۵ طبقه تحت زلزله منجیل (شکل۱۴)، جا به جایی حداکثر در بام برای سازه‌های ایزوله شده با این نوع جداگرها، از جا به جایی حداکثر سازه‌گیردار در بام بیشتر نمی‌باشد. یعنی تقریباً می‌توان گفت این ایزولاتورها جا به جایی جانبی سازه را کاهش داده‌اند. گرچه این جداگرها همانند جداگرهای لاستیکی - سربی برش سازه‌های بلند را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش نمی‌دهند. اما این مزیت جداگرهای **FPS** می‌تواند مسأله قابل توجهی برای طراح سازه باشد تا پس از بررسی‌های لازم توجیه کافی برای استفاده از این نوع ایزولاتورها داشته باشد.

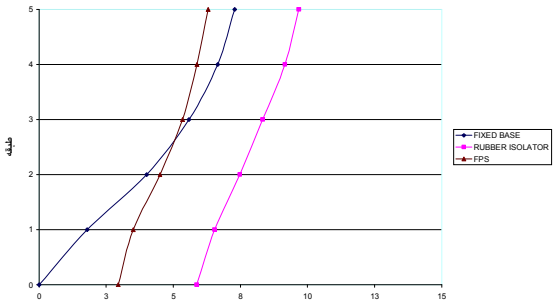
آن طور که نمودارها نشان می‌دهند، در بین رکوردهای مختلف زلزله بیشترین جا به جایی‌ها مربوط به زلزله‌های طبس و السنترو می‌باشد. در سازه‌های ۲ و ۸ طبقه بیشترین جا به جایی بام تحت زلزله طبس و در سازه با جداساز لاستیکی - سربی رخ داده است. اما در سازه‌های ۵ و ۱۲ طبقه بیشترین جا به جایی بام تحت زلزله السنترو در سازه‌گیردار به وجود آمده است که این نشان از محتوای بسامدی خاص این دو زلزله و تأثیر آن بر سازه‌های یاد شده دارد.

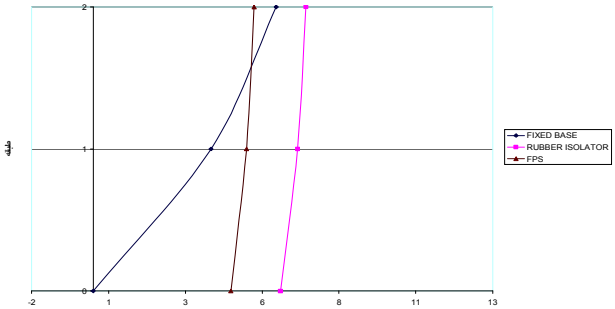

طبقه
FIXED BASE
RUBBER ISOLATOR
FPS

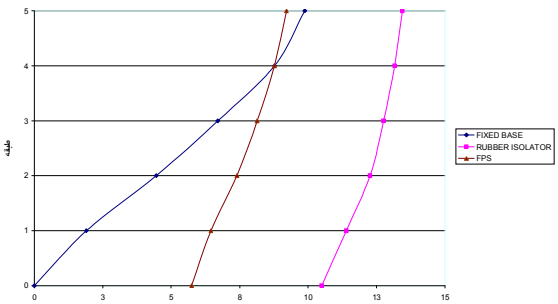

طبقه
FIXED BASE
RUBBER ISOLATOR
FPS

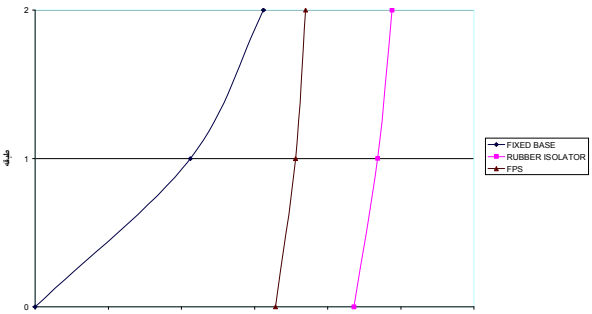

طبقه
FIXED BASE
RUBBER ISOLATOR
FPS

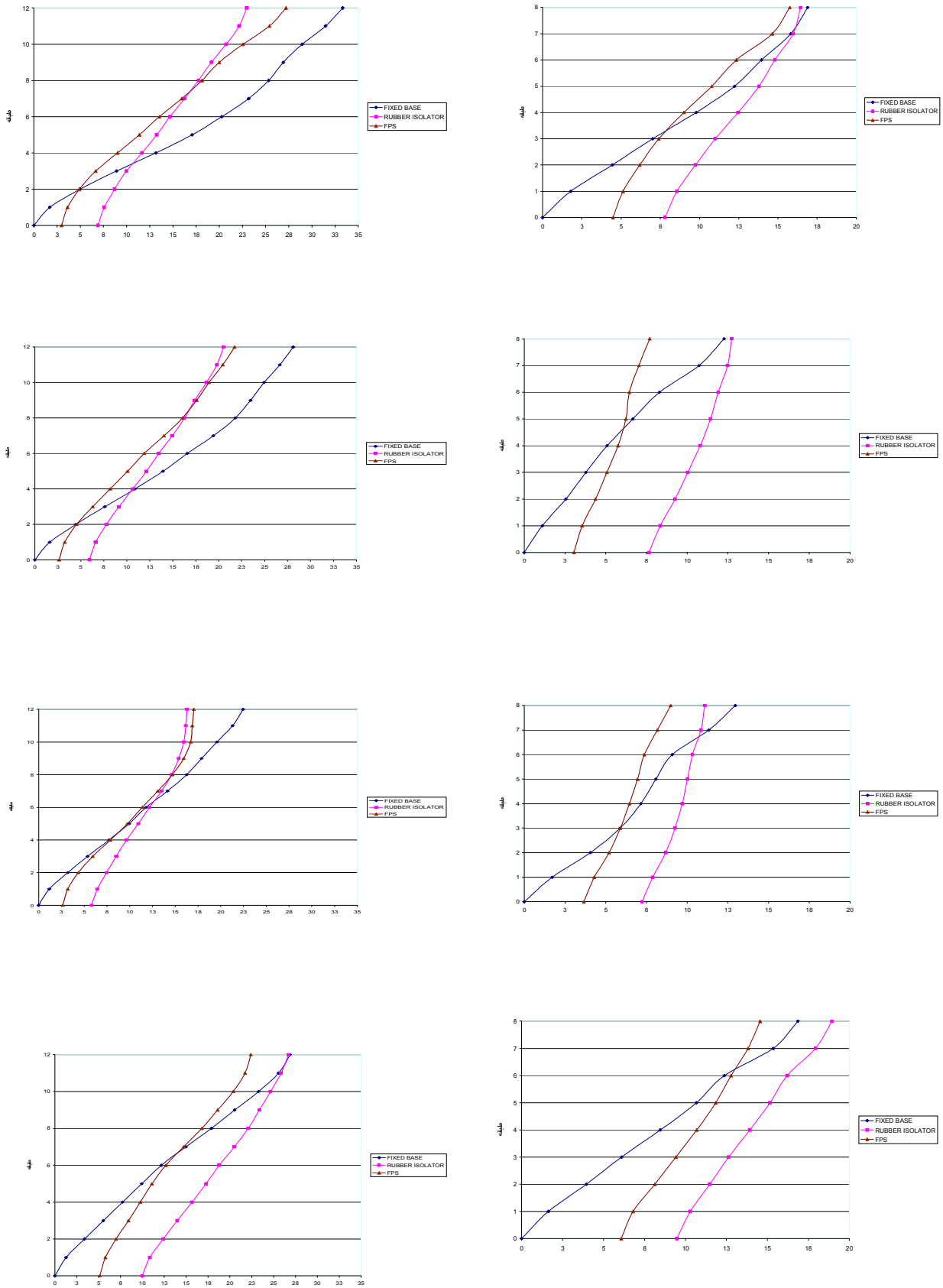

طبقه
FIXED BASE
RUBBER ISOLATOR
FPS


طبقه
FIXED BASE
RUBBER ISOLATOR
FPS


طبقه
FIXED BASE
RUBBER ISOLATOR
FPS


طبقه
FIXED BASE
RUBBER ISOLATOR
FPS


طبقه
FIXED BASE
RUBBER ISOLATOR
FPS



شکل۲۰ - جا به جایی ماکزیمم طبقات به سانتیمتر
برای سازه ۸ طبقه تحت زلزله طبس

مقایسه تاریخچه زمانی جابه‌جایی نقاط در سازه ایزوله شده و گیردار نظیر

در بخش گذشته جا به جایی حداکثر طبقات تحت زلزله‌های گوناگون مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش پاسخ دینامیکی تاریخچه دو نقطه در تراز روی بام و تراز روی ایزولاتور تحت شتاب نگاشت زلزله‌های مختلف با هم، و با جا به جایی تراز بام سازه‌گیردار مشابه مقایسه شده است. سازه‌های مورد بررسی در این قسمت سازه ۲ طبقه و ۸ طبقه می‌باشد. در ضمن سختی تمامی جداگرهای لاستیکی - سربی و **FPS** براساس دوره طراحی ۲/۵ ثانیه محاسبه شده و مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

پاسخ دینامیکی این سازه‌ها تحت زلزله‌های متفاوت برای دو نقطه فوق در اشکال ۲۵ تا ۴۰ باهم مقایسه شده‌اند.

همان‌طور که در این نمودارها مشخص است، پاسخ دینامیکی در سازه ۲ طبقه تحت رکورد زلزله‌های گوناگون در تراز بام و تراز روی ایزولاتورها به یک دیگر بسیار نزدیک می‌باشد. اما در سازه ۸ طبقه دیده می‌شود که برعکس پاسخ دینامیکی نقطه بام سازه ایزوله شده با جا به جایی نقطه بام سازه‌گیردار بسیار به هم نزدیک بوده و اختلاف پاسخ‌های تغییر مکانی در تراز روی جداساز و بام خیلی بیشتر از سازه ۲ طبقه دیده می‌شود.

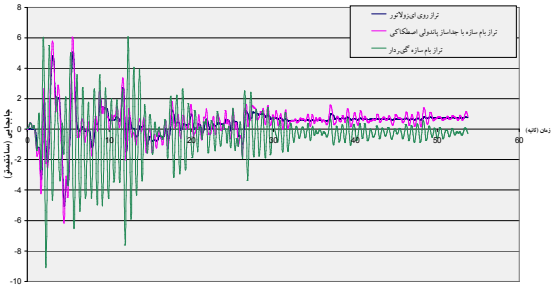
دلیل عمومی این رفتار و پاسخ دینامیکی، وابسته به صلبیت سازه می باشد که در سازه‌های ۸ طبقه به علت انعطاف پذیری سازه، پاسخ در تراز بام و تراز ایزولاتور یکسان نمی‌باشد و دیگر آن رفتار صلب مورد نظر در روی سازه دیده نمی‌شود. در واقع در سازه‌های بلندتر اثر مدهای بالاتر همان طور که در فصل دوم آورده شد، دیگر قابل صرف‌نظر نیست.

همان‌طور که در نمودارهای پاسخ تاریخچه زمانی تغییر مکان مشاهده می‌شود، برای تمامی سازه‌های ایزوله شده اختلاف جا به جایی تراز بام و کف در هر لحظه کاهش یافته است و این سبب می‌شود که آسیب‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای کمتری به سازه وارد شود.

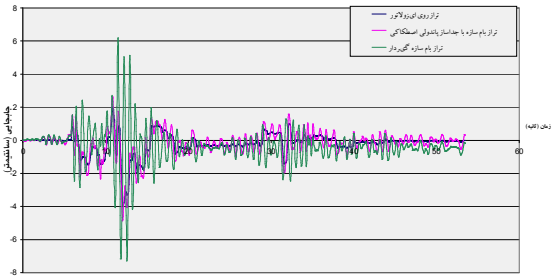
اما نکته قابل توجه در این نمودارها به خصوص در سازه‌های سخت (کوتاه)، کاهش تعداد سیکل پاسخ تغییر مکانی سازه تحت یک تحریک لرزه‌ای مشخص در اثر استفاده از ایزولاتورها می‌باشد. که ایزولاتورها باعث کاهش در اضمحلال مواد سازه‌ای به علت کاهش تعداد سیکل‌ها و در نتیجه کاهش خسارات وارده به سازه می‌شوند. در سازه‌گیردار به دلیل بالا بودن تعداد زیاد سیکل های پاسخ، مفاصل پلاستیک بیشتر و سریع‌تر تشکیل می‌شوند. اما در سازه ایزوله شده تحت همان تحریک پایه تعداد سیکل های پاسخ کاهش چشم‌گیری می‌یابد. این کاهش به خصوص در مواقع پیک شتاب زلزله‌های مورد بررسی بیشتر رخ می‌دهد. در واقع نیروهای دینامیکی لازم برای تشکیل مفاصل پلاستیک بزرگتر خواهند شد و ظرفیت پلاستیک سازه بسیار افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با زیاد شدن زمان زلزله و یا شتاب پیک زلزله **(PGA)** سازه این ظرفیت را دارد که علی‌رغم اتلاف انرژی بالا در ایزولاتورها، مقدار زیادی انرژی نیز با تشکیل مفاصل پلاستیک در سازه مستهلک نماید. و این یک مزیت بزرگ برای میل به طراحی سازه‌ها با ایزولاتورهای لرزه‌ای می‌باشد.

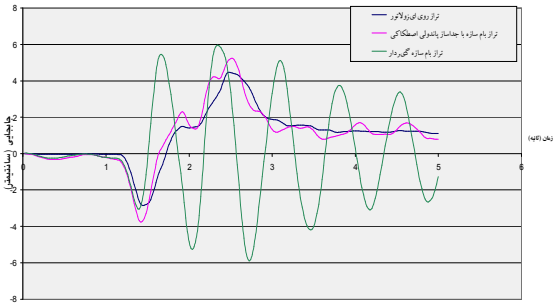
مسأله دیگری که باز هم در این نمودارها مشاهده می‌شود عملکرد بهتر ایزولاتورهای لاستیکی - سربی است. زیرا در سازه‌هایی که با این جداسازها در برابر زلزله ایزوله شده‌اند، اختلاف جا به جایی تراز بام و تراز روی ایزولاتورها کمتر از اختلاف جا به جایی تراز بام و تراز روی ایزولاتورها در سازه‌های ایزوله شده با **FPS** می‌باشد.

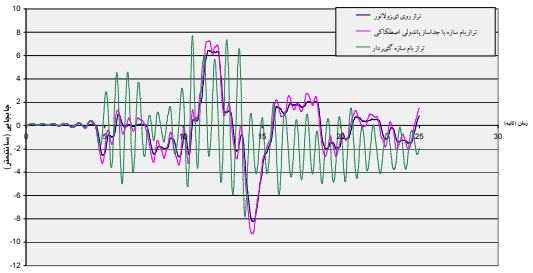
نکته جالب دیگری که در این نمودارها مشخص است، آن است که در جداگرهای **FPS** در بعضی لحظات با توجه به آن که شتاب زلزله در حدی نبوده که ایزولاتورها وارد محدوده پلاستیک شوند، جا به جایی سازه بسیار شبیه سازه مشابه گیردار است. نمونه بارز آن را در سازه ۸ طبقه تحت زلزله منجیل و السنترو می‌توان مشاهده نمود. اما در سازه‌های ایزوله شده با جداساز لاستیکی - سربی به دلیل وجود سختی اولیه کوچکتر، سازه سریعتر وارد رنج پلاستیک شده در نتیجه در آن لحظاتی که سازه‌های با جداساز **FPS** هنوز به حد پلاستیک نرسیده‌اند، این سازه‌ها دارای رفتار صلب‌تر و در نتیجه ایمن‌تری می‌باشند. و این نیز می‌تواند به مزایای این جداسازها اضافه شود. این مزیت را تنها در نمودارهای تاریخچه زمانی جا به جایی می‌توان مشاهده کرد.



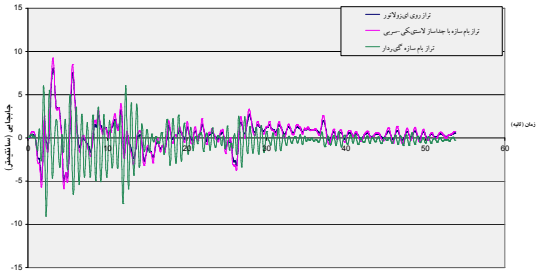
شکل ۲۵- مقایسه جا به جایی نقاط در سازه ۲ طبقه ایزوله شده با جداسازFPS و سازه گیردار مشابه تحت زلزله السنترو



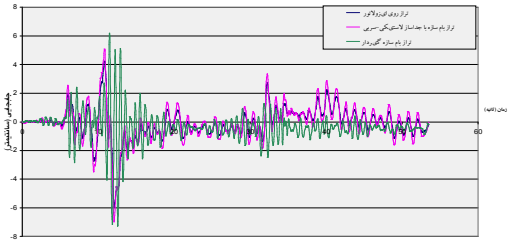




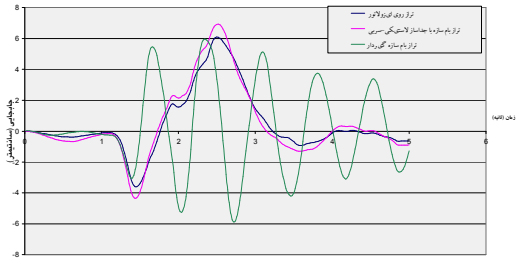
شکل۲۸- مقایسه جا به جایی نقاط در سازه ۲ طبقه ایزوله شده با جداساز FPS و سازه گیردار مشابه تحت زلزله طبس



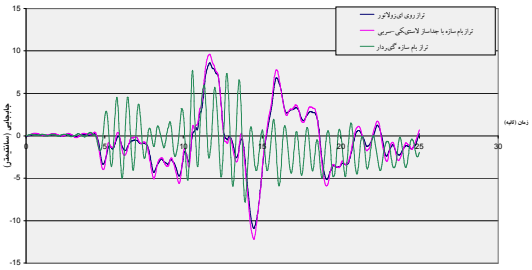
شکل ۲۹- مقایسه جا به جایی نقاط در سازه ۲ طبقه ایزوله شده با جداساز لاستیکی- سربی و سازه گیردار مشابه تحت زلزله السنترو



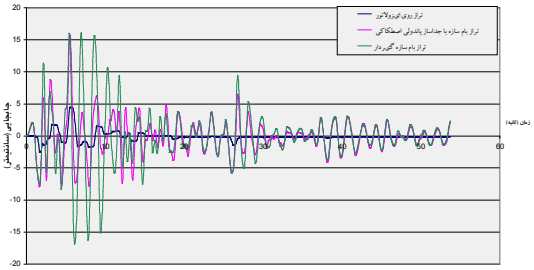
شکل ۳۰- مقایسه جا به جایی نقاط در سازه ۲ طبقه ایزوله شده با جداساز لاستیکی- سربی و سازه گیردار مشابه تحت زلزله منجیل



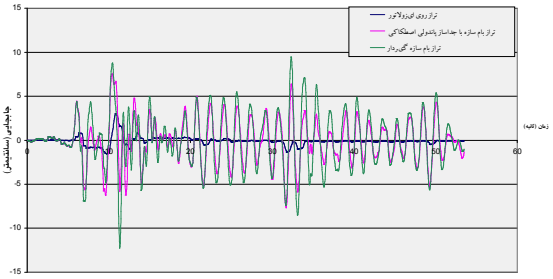
شکل ۳۱- مقایسه جا به جایی نقاط در سازه ۲ طبقه ایزوله شده با جدا ساز لاستیکی – سربی و سازه گیردار مشابه تحت زلزله ناغان



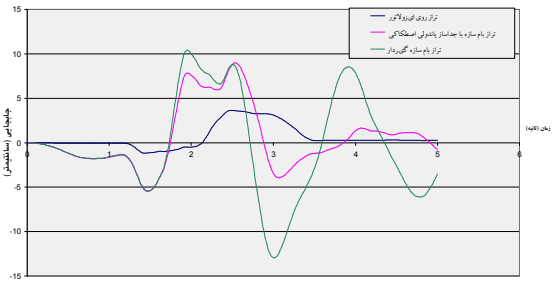
شکل۳۲- مقایسه جا به جایی نقاط در سازه ۲ طبقه ایزوله شده با جداساز لاستیکی- سربی و سازه گیردار مشابه تحت زلزله طبس



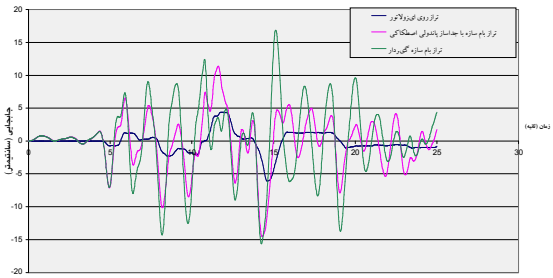
شکل ۳۳- مقایسه جا به جایی نقاط در سازه ۸ طبقه ایزوله شده با جداساز FPS و سازه گیردار مشابه تحت زلزله السنترو



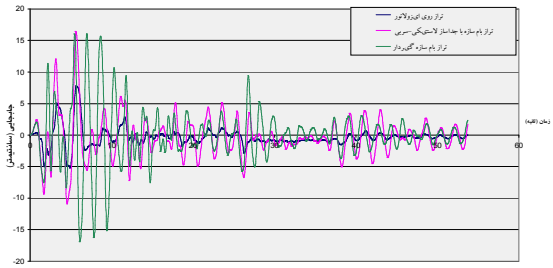
شکل ۳٤- مقایسه جا به جایی نقاط در سازه ۸ طبقه ایزوله شده با جداساز FPS و سازه گیردار مشابه تحت زلزله منجیل



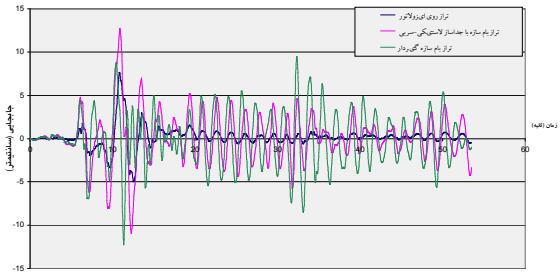
شکل ۳۵- مقایسه جا به جایی نقاط در سازه ۸ طبقه ایزوله شده با جداساز FPS و سازه گیردار مشابه تحت زلزله ناغان



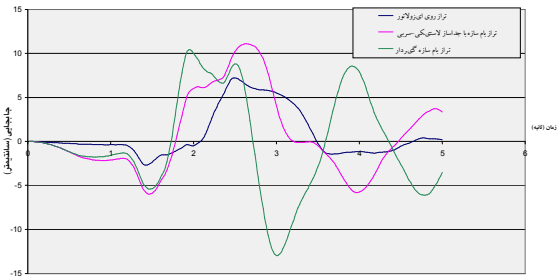
شکل ۳٦- مقایسه جا به جایی نقاط در سازه ۸ طبقه ایزوله شده با جداساز FPS و سازه گیردار مشابه تحت زلزله طبس



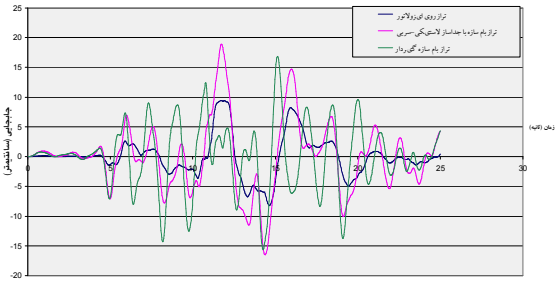
شکل ۳۷- مقایسه جا به جایی نقاط در سازه ۸ طبقه ایزوله شده با جداساز لاستیکی- سربی و سازه گیردار مشابه تحت زلزله السنترو



شکل ۳۸- مقایسه جا به جایی نقاط در سازه ۸ طبقه ایزوله شده با جداساز لاستیکی- سربی و سازه گیردار مشابه تحت زلزله منجیل



شکل ۳۹- مقایسه جا به جایی نقاط در سازه ۸ طبقه ایزوله شده با جداساز لاستیکی- سربی و سازه گیردار مشابه تحت زلزله ناغان



شکل ۴۰- مقایسه جا به جایی نقاط در سازه ۸ طبقه ایزوله شده با جداساز لاستیکی- سربی و سازه گیردار مشابه تحت زلزله طبس

بررسی مراحل تشکیل مفصل‌های خمیری

یکی از مهم‌ترین مواردی که در آسیب‌پذیری سازه‌ها تحت زلزله مطرح است، شناخت نقاط ضعف در اعضای سازه و تعیین موقعیت آنها می‌باشد. تعیین موقعیت و چگونگی ایجاد مفاصل و تغییر شکل های خمیری در واقع نقاط با اهمیت بسیار بالا را به طراح نشان می‌دهد و به تبع آن نحوه مطلوب تقویت و مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه را برای طراح مشخص می‌کند. به طوری که نقاط باید طوری طرح شوند که ضمن پلاستیک شدن بتوان با حفظ ظرفیت خمیری و بدون گسیختگی انرژی وارد به سازه را مستهلک نمایند. از این رو در این قسمت مقایسه‌ای بین مفاصل تشکیل شده در سازه‌های گیردار و ایزوله شده در زلزله سطح بهره‌برداری تحت رکوردها زلزله مورد بررسی صورت گرفته است.

در تحلیل های صورت گرفته در سازه‌های ایزوله شده تنها در تعدادی از ساختمان‌های دوازده طبقه مفاصل تشکیل شده‌اند. لازم به ذکر است که به دلیل تعداد زیاد سازه‌های گیردار تحت زلزله‌های گوناگون تنها محل تشکیل مفاصل در سازه‌های نظیر ایزوله شده که در آنها مفصل تشکیل شده است، آمده است. سازه‌های ایزوله شده‌ای که در آن ها مفصل تشکیل شده است به شرح زیر می‌باشند:

۱- سازه ایزوله شده ۱۲ طبقه با جداگر لاستیکی - سربی با پریود طراحی ۲ ثانیه تحت زلزله السنترو
۲- سازه ایزوله شده ۱۲ طبقه با جداگر پاندولی - اصطکاکی با پریود طراحی ۲ ثانیه تحت زلزله السنترو
۳- سازه ایزوله شده ۱۲ طبقه با جداگر پاندولی - اصطکاکی با پریود طراحی ۲/۵ ثانیه تحت زلزله السنترو
۴- سازه ایزوله شده ۱۲ طبقه با جداگر پاندولی - اصطکاکی با پریود طراحی ۳ ثانیه تحت زلزله السنترو
۵- سازه ایزوله شده ۱۲ طبقه با جداگر پاندولی - اصطکاکی با پریود طراحی ۲ ثانیه تحت زلزله منجیل
۶- سازه ایزوله شده ۱۲ طبقه با جداگر پاندولی - اصطکاکی با پریود طراحی ۲/۵ ثانیه تحت زلزله منجیل
۷- سازه ایزوله شده ۱۲ طبقه با جداگر پاندولی - اصطکاکی با پریود طراحی ۲ ثانیه تحت زلزله طبس
۸- سازه ایزوله شده ۱۲ طبقه با جداگر پاندولی - اصطکاکی با پریود طراحی ۲/۵ثانیه تحت زلزله طبس

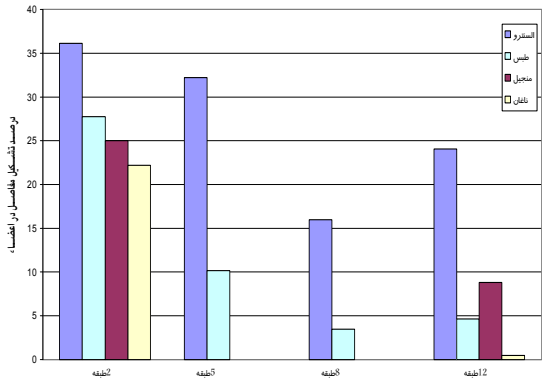
برای ۸ سازه - رکورد زلزله بالا، درصد تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضا به ترتیب عبارتند از: ۱/۳۹، ۵/۰۹، ۳/۷۰، ۱/۸۵، ۱/۸۵، ۰/۴۶، ۱/۸۵ و ۱/۳۹. آنالیزها تحت زلزله سطح بهره‌برداری برای ۹۶ سازه - رکورد زلزله (سازه‌های ۲، ۸ و ۱۲ طبقه، دو نوع جداگر هر کدام برای سه پریود طراحی و تحت ۴ رکورد زلزله) با ایزولاتور لرزه ای صورت گرفته است که در ۸۸ مورد آن این درصد تشکیل مفاصل صفر می‌باشد و تنها در ۸ سازه - رکورد نامبرده شده مفصل پلاستیک تشکیل شده است.

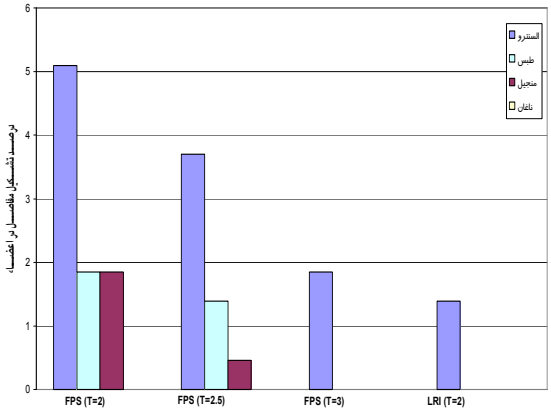
در شکل ۴۱ درصد تشکیل مفاصل در سازه‌های گیردار تحت زلزله‌های متفاوت آمده است. همان طور که در این شکل مشخص است در سازه‌های گیردار ۵ و ۸ طبقه تحت زلزله‌های منجیل و ناغان مفصلی تشکیل نشده است.

در شکل ۴۲ درصد تشکیل مفاصل در اعضاء برای سازه ۱۲ طبقه با دو ایزولاتور لاستیکی - سربی و پاندولی - اصطکاکی و پریودهای طرح متفاوت آمده است.

همان طور که در اشکال دیده می‌شود، ایزولاسیون لرزه‌ای سازه‌ها درصد تشکیل مفاصل در اعضاء را به شدت کاهش می‌دهد. این کاهش در سازه‌های کوتاه‌تر بسیار بیشتر دیده می‌شود. تا جای که در ۳۶/۱۱ درصد اعضاء سازه ۲ طبقه گیردار تحت زلزله السنترو مفصل تشکیل شده است در حالی که این درصد در سازه ۲ طبقه با هر ۶ نوع ایزولاتور (دوایزولاتور و سه پریود طراحی) به صفر رسیده است. اما در سازه ۱۲ طبقه تحت زلزله السنترو این درصد تنها از ۲۴/۰۷ تا ۵/۰۹ (در سازه ایزوله شده با **FPS** و پریود طرح ۲ ثانیه) کاهش یافته است.که باز هم نشان از مفیدتر بودن ایزولاتورها در سازه‌های کوتاه‌تر دارد. دلیل کاهش مفاصل پلاستیک در سازه‌های ایزوله شده را می‌توان (همان طور که در بخش۷-۸ گفته شد) در تعداد سیکل رفت و برگشت سازه ایزوله شده در یک بازه زمانی به خصوص در سازه‌های کوتاه‌تر (سخت تر) مشخص جستجو نمود. همان طوری که در اشکال۲۵ تا ۴۰ نشان داده شده است، ایزولاتورها تعداد سیکل رفت و برگشت در سازه به نقطه ابتدایی را در یک بازه زمانی کاهش می‌دهند. بنابراین در این سازه‌ها تعداد مفاصل پلاستیک کاهش بیشتری پیدا می‌کند.

نکته دیگری که از این نمودارها نشان می‌دهد تشکیل بیشترین مفاصل پلاستیک تحت رکورد زلزله السنترو می‌باشد که چه در سازه‌های ایزوله شده و چه در سازه‌های گیردار نمایان است و در اثر زلزله ناغان مفاصل بسیار کمی در سازه‌ها تشکیل شده است و یا در زلزله‌ای مثل منجیل تنها در سازه‌های ۲ طبقه و ۱۲ طبقه مفصل تشکیل شده است که دلیل آن را می‌توان در متفاوت بودن شدت، محتوای فرکانسی و مدت زلزله‌های مورد بحث و همین‌طور اثر آن ها بر عملکرد سازه‌های بررسی شده، جستجو نمود. اما چیزی که به طور مطلق باز هم نمودارها نشان می‌دهند عملکرد بهتر جداگر لاستیکی - سربی نسبت به پاندولی اصطکاکی در کاهش مفاصل پلاستیک سازه است. همین‌طور افزایش پریود طراحی در نتیجه کاهش سختی ایزولاتورها نیز باعث عملکرد بهتر سازه در کاهش تشکیل مفاصل پلاستیک شده است.





نتایج

۱- جداگرهای لاستیکی ـ سربی عموماً جا به جایی بیشینه طبقات را در سازه‌های کوتاه نسبت به جا به جایی بیشینه بام این سازه‌ها در حالت گیردار، افزایش می‌دهند. اما در سازه‌های بلندتر این جا به جایی یا کمتر از جا به جایی حداکثر بام سازه‌گیردار است و یا اختلاف چندانی با جا به جایی بیشینه بام در سازه‌گیردار ندارد. که می‌تواند بیانگر این باشد که مهمترین عیب این جداسازها که افزایش جا به جایی بیشینه مطلق سازه می‌باشد، در سازه‌های کوتاه بیشتر نمود پیدا می‌کند. در سازه‌های بلندتر گرچه مانند سازه‌های کوتاه برش پایه را کاهش نمی‌دهند، اما افزایش چندانی نیز در جا به جایی بیشینه سازه ندارند.

۲- در مورد جداگرهای **FPS** نکته مثبتی که وجود دارد آن است که در اکثر موارد جا به جایی حداکثر آن ها از جا به جایی حداکثر سازه‌گیردار در بام بیشتر نمی‌باشد. که نشانگر آن است که این جداسازها حتی در کاهش جا به جایی بیشینه سازه نیز مؤثر می‌باشند. گرچه همانند جداگرهای لاستیکی ـ سربی برش پایه سازه را کاهش نمی‌دهند، اما این مزیت می‌تواند مسأله قابل توجهی برای طراح سازه باشد تا پس از بررسی‌های لازم توجیه کافی برای استفاده از این نوع ایزولاتورها را داشته باشد.

۳- ایزولاتورهای لاستیکی ـ سربی دارای سختی اولیه پایین‌تری در مقایسه با ایزولاتورهای **FPS** هستند در نتیجه زودتر به حد پلاستیک می‌رسند. این نکته در نمودارهای تاریخچه زمانی جا به جایی دو نقطه روی ایزولاتور و در تراز بام، در مقایسه با جا به جایی ترازبام سازه گیردار قابل مشاهده می‌باشد. در نتیجه رفتار سازه با این ایزولاتورها در لحظاتی که ایزولاتورهای **FPS** هنوز به حد جاری شدن نرسیده‌اند، رفتاری صلب‌تر در نتیجه ایمن‌تری خواهد بود. که این مزیت می‌تواند به مزایای جداگرهای لاستیکی ـ سربی اضافه گردد.

۴- با استفاده از ایزولاتورها، تعداد سیکل پاسخ تغییر مکانی سازه به خصوص در سازه‌های سخت‌تر (کوتاه‌تر) کاهش می‌یابد. این کاهش در مواقع پیک شتاب زلزله بیشتر به چشم می‌آید. در واقع با استفاده از ایزولاتورهای لرزه‌ای ظرفیت سازه در تشکیل مفاصل پلاستیک افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند. که این ظرفیت ، علاوه بر افزایش ظرفیت تشکیل مفصل پلاستیک در سازه ایزوله به دلیل کاهش برش پایه به سازه می‌باشد. که این می‌تواند به عنوان مزیتی قابل توجه برای طراح مطرح باشد.

۵- مهم ترین مزیت جداگرهای لرزه‌ای کاهش جا به جایی نسبی طبقات می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده، جا به جایی نسبی طبقات با افزایش تعداد طبقات سازه ایزوله شده افزایش می‌یابد. بنابراین برای کاهش جا به جایی نسبی طبقات، ایزولاسیون لرزه‌ای در سازه‌های کوتاه‌تر می‌تواند بسیار مفیدتر باشد. همچنین سازه‌های جداسازی شده با جداگرهای لاستیکی ـ سربی عملکرد بسیار بهتری در کاهش جا به جایی نسبی طبقات در مقایسه با سازه‌های مشابه جداسازی‌شده با جداساز **FPS**، از خود نشان می دهند.

۶- در سازه‌های کوتاه‌تر ایزوله شده لرزه‌ای، کاهش بسیار بیشتری در درصد تشکیل مفاصل در اعضا نسبت به سازه گیردار مشابه، دیده می‌شود. دلیل آن کاهش هرچه بیشتر برش پایه در این سازه‌ها هم چنین کاهش تعداد سیکل پاسخ تغییر مکانی سازه در آن ها است. که بازهم نشان از مفیدتر بودن ایزولاتورها در سازه‌های کوتاه‌تر است.

مراجع

[۱] اسکینر،آ،روبینسون ،و، تهرانی زاده،م،حامدی،ف،(مترجم)،"جداسازی لرزه ای در مقابل زلزله "،پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی ومهندسی زلزله ،چاپ اول ۱۳۷۸.

[۲] "آیین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله" ، ویرایش دوم ،مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۷۸ .

[۳] مقدم ،ح، "مهندسی زلزله مبانی و کاربرد"،انتشارات فرهنگ،۱۳۸۱.

[۴] "دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمانهای موجود" پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی ومهندسی زلزله، خرداد۱۳۸۱.

[5] Chopra , A.K. Dynamics of Structures: Theory and Application to Earthquake Engineering (2nd edn), Prentice Hall of India, 200.

[6] Naeim , F. and Kelly, J.M., Design of Seismic Isolated Structures From Theory to Practice , John Willy & Sons, 1999.

[7] IBC2003 , International Building Code.

[8] Manual of DRAIN-2DX.

[9] Murat Eroz "Synthetic Ground Motion Evaluation in Consequence Based Engineering"

[10] http://www.nisee.berkeley.edu .

[11] Federal Emergency Management Agency, FEMA 274 Report, Washington, DC.