

## بررسی رفتار مدل یک طبقه برای سازه جداسازی شده با میراگر الحاقی

سامان گیدفر<sup>۱</sup> و منصور ضیائی فر<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

<sup>۲</sup> دانشیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

(تاریخ دریافت: ۸۵/۹/۴، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده: ۸۹/۹/۲۹، تاریخ تصویب: ۸۹/۱۱/۲۶)

### چکیده

در این تحقیق یک مدل تنوریک از سازه‌های جداسازی شده جرمی مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل مورد مطالعه مدلی یک طبقه با دو درجه آزادی است. در ابتدا معادلات دینامیکی مدل مورد بحث ارائه و فرم همگن معادلات حل شده و مقادیر مشخصه شامل ضرایب میرایی و فرکانس‌های ارتعاش طبیعی سازه تعیین شده‌اند. پس از آن معادلات دینامیکی سازه مورد نظر تحت اثر زلزله‌های مختلف تحلیل شده و نتایج آن با یکدیگر مقایسه شده‌اند. حاصل کار مبین آن است که در سازه‌های مورد بحث امکان ایجاد نسبت میرایی بالاتر از محدوده خاصی میسر نیست. همچنین نشان داده شد که استفاده از میراگر غیر خطی از حساسیت رفتار سازه نسبت به تغییرات ثابت میرایی می‌کاهد و از این طریق امکان طراحی بهینه سازه‌های فوق را فراهم می‌کند. علاوه بر آن نشان داده شد که میراگرهای کنترلی نسبت به سایر میراگرها می‌توانند سطوح عملکردی بالاتری را برای سازه فراهم سازند.

**واژه‌های کلیدی:** جداسازی جرمی، میرایی غیر کلاسیک، میراگر غیر خطی، کنترل نیمه فعال سازه‌ها

### مقدمه

روش‌های نوین طراحی لرزه‌ای نیز توجه شده است [۱،۲]. در این طبقه‌بندی این گونه مطرح شده است که روش‌های نوین طراحی لرزه‌ای در عمل با دو مکانیزم افزایش انعطاف‌پذیری<sup>۱</sup> و بالا بردن میرایی سازه می‌توانند به سطوح عملکردی بالاتر بدون نیاز به شکل‌پذیری دست یابند. شکل (۱) چندین نمونه از روش‌های نوین طراحی لرزه‌ای را نشان می‌دهد [۲].

در شکل (a-1) جرم تک تک طبقات از سازه اصلی توسط ایزولاتورهای لرزه‌ای جدا شده و این موضوع سبب افزایش پیروود سازه و ایجاد ظرفیت افزایش میرایی آن در محل اتصال سازه به جرم طبقات شده است. در شکل (b-1) سازه به دو قسمت سخت و نرم تقسیم شده که از این طریق پیروود سازه نرم افزایش یافته و از طریق میراگر، بین دو سازه سخت و نرم تغییر مکان‌ها، سازه نرم کنترل شده است. در شکل (c-1) نیز سازه به دو قسمت سخت و نرم تقسیم شده است، به نحوی که یک هسته سخت که در بام به یک خرپا متصل شده توسط کابل نقش تحمل وزن طبقات پائین را عهده‌دار است. بدین طریق طبقات آویزان شده به صورت آونگی عمل کرده و پیروود ارتعاشی بالایی خواهند داشت. این طبقات توسط میراگر به هسته سخت وصل شده‌اند تا تغییر مکان‌های آنها کاهش یابد.

روش‌های مرسوم طراحی لرزه‌ای سازه‌ها بر مبنای مقاومت و شکل‌پذیری است. بدین طریق زلزله‌های شدید در عمل سبب ایجاد مفاصل پلاستیک در عناصر سازه‌ای شده و این موضوع باعث تغییر مکان‌های غیر الاستیک زیاد و در نتیجه کاهش در عملکرد سازه می‌شود. این در حالی است که روش‌های نوین طراحی لرزه‌ای اغلب بر مبنای افزایش انعطاف‌پذیری و اتلاف انرژی ورودی زلزله به سازه (توسط ابزارآلات میرایی) عمل می‌کند. در این روش‌های طراحی امید آن است که سازه بعد از زلزله، سطح عملکرد بالاتری از خود نشان دهد. در این مطالعه به بحث و بررسی درباره این روش‌های طراحی پرداخته شده است. در این ارتباط نخست به معرفی یک مدل ساده دو درجه آزادی برای مطالعات رفتار عمومی اینگونه سازه‌ها اقدام شده، سپس فرآیند افزایش کارایی سازه‌های ذکر شده با استفاده از میراگرهای غیر خطی و یا کنترلی مورد بررسی قرار داده شده است.

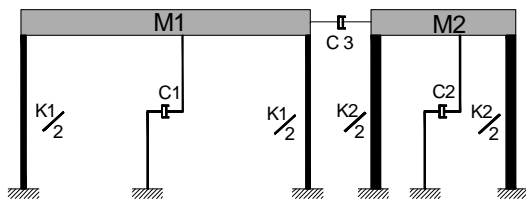
### سازه‌های جداسازی شده جرمی

در سال‌های اخیر توجه بیشتری به استفاده از روش‌های نوین طراحی لرزه‌ای انجام گرفته است. در این رابطه مفهوم جداسازی جرمی<sup>۱</sup> به عنوان نگرش پیشنهادی در این رابطه مطرح شده است. در این نگرش به طبقه‌بندی

در مسئله وارد نمی‌کند. ساده‌ترین نوع مدل برای این نوع از سازه‌ها مدل ماکسول سه عضوی است که جرم کل سازه را تنها در یک درجه آزادی متمرکز می‌کند [۴]. از آنجایی که جرم تکیه‌گاه عکس‌العمل میراگرهای الحاقی در اغلب موارد زیاد است، استفاده از مدل ماکسول در بسیاری از موارد دقت حل مسئله را کاهش می‌دهد. در این تحقیق یک مدل ساده دو درجه آزادی معرفی شده است که می‌تواند به عنوان مدل اولیه برای بررسی عملکرد این گونه سازه‌ها مد نظر قرار داده شود. مدل مزبور انعطاف‌پذیری، جرم و میرایی تکیه‌گاه عکس‌العمل میراگرهای الحاقی را به صورت یک درجه آزادی جدید در مسئله وارد کرده و از این رو با دقت بالاتری به مدلسازی سازه می‌پردازد.



شکل ۲: برخی سازه‌های موجود جداسازی شده جرمی [۳]

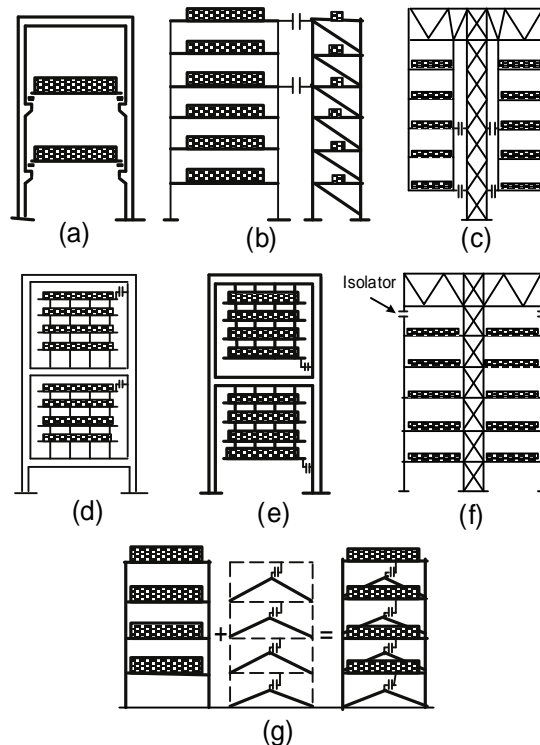


شکل ۳: مدل ساده شده سازه‌های جداسازی شده جرمی.

### مدل دوجرمی برای سازه‌های جداسازی شده

می‌توان مدل‌سازی سازه‌های جداسازی شده جرمی را از طریق مدل دوجرمی ذیل به انجام رسانید. در این مدل سازه به دو قسمت نرم و سخت تقسیم شده است، به نحوی که قسمت عمده جرم در سازه سمت چپ (زیر سیستم جرمی و یا سازه نرم) و قسمت عمده سختی در سازه سمت راست (زیر سیستم سختی و یا سازه سخت) متمرکز شده است. دو زیر سیستم یک درجه آزاد حاصله توسط میراگر ویسکوز  $C_3$  به یکدیگر متصل شده‌اند. میراگر مزبور برای کاستن از دامنه تغییر مکان‌های زیر سیستم جرمی به کار گرفته شده است. در این مدلسازی زیر سیستم سختی نقش تکیه‌گاه مکانیزم اتلاف انرژی  $C_3$  را دارد.

در شکل (d-1) و شکل (e-1) طبقات سازه در مجموعه‌ای بزرگ‌تر با پیوندهای بلند قرار داده شده‌اند و توسط میراگر به سازه اصلی (که سخت محسوب می‌شود) وصل شده‌اند. در شکل (f-1) هسته T شکل توسط میراگر به اجزای سازه‌های سخت (ستون‌های قائم) توسط میراگرها متصل شده است. در شکل (g-1) که شکل متداول در ساختمان‌ها است نیز دو قسمت سخت و نرم سیستم در داخل یکدیگر قرار دارند. قسمت سخت این سیستم مهار بندها هستند که توسط میراگر به سازه نرم متصل شده است و قسمت نرم قاب اصلی سازه است که رفتاری خمشی دارد. روش‌های گفته شده و چگونگی عملکرد و مزایای نسبی آنها قبلاً مورد بحث قرار داده شده است [۲]. شکل (۲) نمونه‌هایی از ساختمان‌هایی که بدین طریق ساخته شده‌اند نشان می‌دهد [۳].



شکل ۱: روش‌های مختلف جداسازی جرمی [۲].

در این مطالعه سعی بر آن است که به ارائه روشی ساده در مدل‌سازی و بررسی عملکرد این گونه سازه‌ها دست یافته شود. مدل متداول یک درجه آزادی در تحلیل و طراحی سازه‌ها نمی‌تواند برای سازه‌های جداسازی شده مناسب تلقی شود. این بدان سبب است که مدل مزبور انعطاف‌پذیری تکیه‌گاه عکس‌العمل میراگرهای الحاقی را

است.

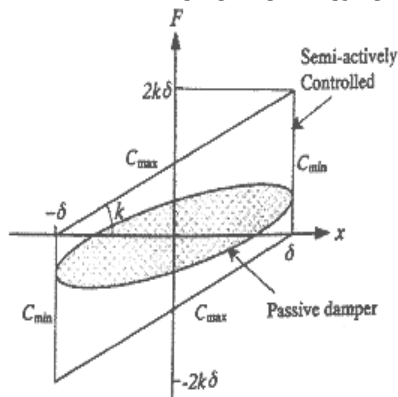
(۱) در مرحله نخست عملکرد سازه جداسازی شده هنگامی که میراگر  $C_3$  به صورت خطی عمل می‌کند مدنظر قرار گرفته است.

(۲) مرحله دوم، اختصاص به میراگر غیرخطی دارد و هدف آن بهبود در عملکرد سیستم حاصله از این طریق است.

(۳) در مرحله سوم میراگر  $C_3$  توسط یک الگوریتم کنترلی به صورت لحظه‌ای تنظیم می‌شود و عملکرد آن مورد بررسی قرار داده می‌گردد.

دلیل انتخاب این سه مرحله آن بوده است که در ادبیات فنی موجود، موارد متعددی قابل ذکر است که در آن کارایی میراگرهای غیرخطی و کنترلی مورد بحث قرار داده شده است. در این ارتباط اغلب دلیل اصلی در خصوص برتری سیستم‌های کنترلی و یا غیرخطی مزیت رفتار چرخه‌ای این میراگرها در مقایسه با میراگرهای خطی عنوان شده است. این منحنی‌ها در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده‌اند.

در شکل (۴) بیضی هاشورخورده رفتار میراگر خطی را نشان می‌دهد، در صورتی که متوازی‌الاضلاع مبین رفتار میراگر کنترل پذیر است. همان گونه که دیده می‌شود میراگر کنترلی در اتلاف انرژی ورودی مؤثرتر از میراگر خطی در این مورد خاص عمل کرده است [۵].



شکل ۴: مقایسه منحنی چرخه‌ای در میراگر خطی و کنترلی [۵].

شکل (۵) نیز منحنی چرخه‌ای یک میراگر غیرخطی سرعتی به فرم  $F_D = C\dot{x}^\alpha$  را نشان می‌دهد [۶]. سطح زیر منحنی رفتار این میراگرها به مستطیل نزدیک‌تر است و نسبت به حالت میراگرهای خطی انرژی بیشتری را مستهلک می‌کنند. با چنین پیش‌زمینه‌ای در این مقاله

در این رابطه مثال زیر مورد بررسی قرار گرفته است. در این مثال فرض شده است که سازه اصلی سازه‌ای کوتاه بوده و پریود ارتعاش آن در محدوده ۰.۵ ثانیه قرار داشته باشد. در این حالت با جداسازی قسمت نرم و سخت، دو سازه حاصل می‌شود، به نحوی که جرم سازه نرم  $M_2 = 150. Ton$  و جرم سازه سخت  $M_1 = 1000. Ton$  باشد، این دو سازه با میراگر  $C_3$  به هم وصل شده‌اند. فرض شده است که پریود سازه نرم  $T_1 = 2. Sec$  و سازه سخت  $T_2 = 0.2 Sec$  باشد. همچنین نسبت میرایی سازه سخت برابر  $\xi_1 = 5\%$  و سازه نرم  $\xi_2 = 2.5\%$  انتخاب شده‌اند. بدین ترتیب سختی سازه نرم عبارت خواهد بود از

$$k_1 = \frac{4\pi^2 m_1}{T_1^2}$$

$$C_1 = \frac{4m_1 \pi \xi_1}{T_1}$$

مقادیر  $K_2$  و  $C_2$  مشابه فوق به دست آمده است.

در مشابه‌سازی با سازه اصلی چنان فرض می‌شود که ثابت میرایی  $C_3$  به بی‌نهایت میل می‌کند، در این صورت دو سازه سخت و نرم به صورت صلب به یکدیگر متصل خواهند شد. در چنین حالتی پریود سازه حاصله عبارت خواهد بود از:

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{k_1 + k_2}} = 0.54 Sec. \quad (1)$$

همچنین نسبت میرایی سازه حاصله به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$\xi_{eff} = \frac{C_1 + C_2}{2(M_1 + M_2) \cdot \frac{2\pi}{T_{eff}}} = 0.02 \quad (2)$$

پریود  $T = 0.54 Sec$  و نسبت میرایی  $\xi_1 = 2\%$  نشانگر سازه‌های کوتاه در محدوده سازه چهار و یا پنج طبقه است. به عبارتی می‌توان گفت که با جداسازی قسمت نرم و سخت سازه اصلی، پریود سازه جداسازی شده به محدوده ۲ ثانیه رسیده است. این موضوع مبین آن است که از این طریق می‌توان تقاضای لرزه‌ای سازه را به محدوده سازه‌های با پریودهای بلند رسانید و از نیروهای حاصله به نحو مؤثری کاست.

### نقش میرایی در سازه‌های جداسازی شده

بررسی رفتار سازه‌های جداسازی شده جرمی و چگونگی بهبود عملکرد آنها در سه فاز مجزا انجام گرفته

حل آن پرداخته می‌شود. تغییر متغیر به کار رفته به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \ddot{u}_i &= \dot{g}_{2i} \\ \dot{u}_i &= g_{2i} \\ u_i &= g_{2i-1} \quad i=1,2 \end{aligned} \quad (۴)$$

با این تغییر متغیر به تعداد معادلات مسئله به شرح زیر افزوده می‌شود:

$$\dot{u}_i = \dot{g}_{2i-1} \quad i=1,2 \quad (۵)$$

بدین ترتیب شکل نهایی معادلات به ترتیب زیر به دست خواهد آمد:

$$\begin{cases} \dot{g}_1 = g_2 \\ \dot{g}_2 = -\ddot{u}g - \frac{(c_1 - c_3)}{m_1} g_2 - \frac{k_1}{m_1} g_1 - \frac{c_3}{m_1} g_4 \\ \dot{g}_3 = g_4 \\ \dot{g}_4 = -\ddot{u}g - \frac{(c_2 + c_3)}{m_2} g_4 - \frac{k_2}{m_n} g_3 + \frac{c_3}{m_2} g_2 \end{cases} \quad (۶)$$

معادلات بالا شکل تبدیل یافته مرتبه یک از معادلات مرتبه دو مسئله (معادله شماره ۳) است.

استفاده از میراگر غیرخطی به فرم  $F_D = C_3 \dot{u}^\alpha$  توان را به ترم سوم معادلات حرکت برای سیستم دو درجه آزاد وارد خواهد کرد:

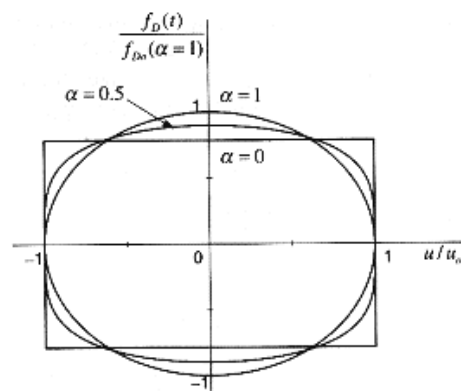
$$\begin{cases} m_1 \ddot{u}_1 + c_1 \dot{u}_1 + k_1 u_1 + c_3 (\dot{u}_1 - \dot{u}_2)^\alpha = -m_1 \ddot{u}_g \\ m_2 \ddot{u}_2 + c_2 \dot{u}_2 + k_2 u_2 - c_3 (\dot{u}_1 - \dot{u}_2)^\alpha = -m_2 \ddot{u}_g \end{cases} \quad (۷)$$

نمونه‌های معادلات غیر خطی به فرم بالا در مرجع [۶] قابل مشاهده است. در این حالت سرعت نسبی دوسر میراگر  $C_3$  با توان  $\alpha$  در معادلات شرکت یافته است. در معادلات بالا توان  $\dot{u}$  برای ثابت‌های میرایی  $C_1$ ،  $C_2$  برابر واحد انگاشته شده است. میراگرهای  $C_1$ ،  $C_2$  در عمل میرایی ذاتی سیستم را تشکیل می‌دهند و هدف تغییر در مشخصه‌های آنها نیست، ولی میراگر  $C_3$ ، میراگری است که به سازه به عنوان یک وسیله اتلاف انرژی اضافه شده است و می‌توان آن را برای کارایی بهتر غیرخطی و یا کنترل‌پذیر طراحی کرد.

در حالت میرایی غیرخطی برای آنکه حساسیت میراگر به سرعت کمتر شود، از توان کوچک‌تر از یک  $\alpha$  استفاده به عمل می‌آید. ( $\alpha$  معمولاً ما بین ۰.۳ و ۱ پیشنهاد می‌شود).

روابط ذکر شده در فرم معادلات درجه یک به صورت زیر نوشته می‌شود:

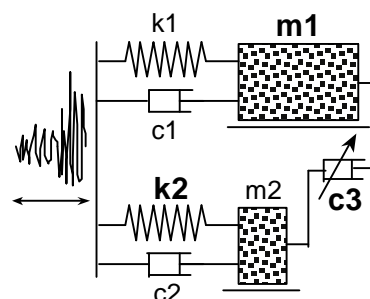
سعی شده است که برتری سیستم‌های غیرخطی و کنترلی از دیدگاه رفتار تاریخچه زمانی نیز مورد بحث قرار داده شود.



شکل ۵: مقایسه منحنی چرخه ای در میراگر خطی و غیرخطی [۶].

### مدل ریاضی سازه های جداسازی شده جرمی

نمودار دیاگرام آزاد سازه جداسازی شده جرمی در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶: دیاگرام آزاد سازه جدا سازی شده.

در فرض رفتار خطی برای میراگر، شکل عمومی معادلات دینامیکی سیستم به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{u}_1 + c_1 \dot{u}_1 + k_1 u_1 + c_3 (\dot{u}_1 - \dot{u}_2) = f_1(t) \\ m_2 \ddot{u}_2 + c_2 \dot{u}_2 + k_2 u_2 - c_3 (\dot{u}_1 - \dot{u}_2) = f_2(t) \end{cases} \quad (۳)$$

که در آن  $f_1(t) = -m_1 \ddot{u}_g$  و  $f_2(t) = -m_2 \ddot{u}_g$  نیروهای اینرسی ناشی از شتاب زمین ( $\ddot{u}_g$ ) هستند.  $m_1$  و  $m_2$  به ترتیب جرم زیر سازه نرم و سخت،  $\dot{u}_1$ ،  $\dot{u}_2$  شتاب زیر سازه نرم و سخت،  $\dot{u}_1$ ،  $\dot{u}_2$  سرعت زیر سازه نرم و سخت و  $u_1$ ،  $u_2$  تغییر مکان زیر سازه نرم و سخت هستند. برای حل این معادله در ابتدا معادله از مرتبه دو به یک تبدیل می‌شود (که به دنبال آن تعداد معادلات از ۲ به ۴ افزایش پیدا می‌کند) و سپس با استفاده از روش رانج کوتا [۷] به

حاصله را به یک سیستم غیرکلاسیک تبدیل می‌کند. به دست آوردن مشخصه‌های دینامیکی چنین سیستمی با سیستم‌های معمولی سازه‌ای (که با عنوان سیستم‌های کلاسیک مطرح هستند) متفاوت است. روش انتخابی برای تعیین مقادیر مشخصه سیستم جداسازی شده در این مطالعه به شرح زیر است [۹]:

ماتریس میرایی سیستم با توجه به شکل شماره ۳ (و یا ۶) به شکل زیر نوشته شده است:

$$[C] = \begin{bmatrix} (c_1 + c_3) & -c_3 \\ -c_3 & (c_2 + c_3) \end{bmatrix} \quad (10)$$

همان طور که مشاهده می‌شود، این ماتریس با ماتریس میرایی سیستم‌های کلاسیک که در آن ماتریس‌های میرایی متناسب با ماتریس سختی و یا جرم و یا مجموعه آنها است، متفاوت است. به عبارتی داریم:

$$C \neq \alpha [m] + \beta [k] \quad (11)$$

از این رو برای به دست آوردن مقادیر مشخصه چنین سیستمی (بر خلاف سیستم‌های کلاسیک) وجود ماتریس میرایی در به دست آوردن مقادیر مشخصه الزامی است.

شکل همگن معادله دیفرانسیل حرکت به صورت زیر نوشته شده است:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (12)$$

این معادله در فضای حالت به صورت رابطه زیر در خواهد آمد:

$$[A]\{\dot{z}\} + [B]\{z\} = \{0\} \quad (13)$$

که در آن بردار  $\{z\}$  و ماتریس‌های  $[A]$  و  $[B]$  عبارتند از:

$$[A] = \begin{bmatrix} [0] & [M] \\ [M] & [C] \end{bmatrix}, [B] = \begin{bmatrix} -[M] & [0] \\ [0] & [K] \end{bmatrix}, \{z\} = \begin{Bmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{u\} \end{Bmatrix} \quad (14)$$

معادله مشخصه سیستم در شکل اصلی معادلات همگن به صورت زیر خواهد بود:

$$(r^2 [m] + r [c] + [k])\{\psi\} = 0 \quad (15)$$

این معادله در فضای حالت به این شکل تبدیل خواهد شد:

$$r[A]\{Z\} + [B]\{Z\} = \{0\} \quad (16)$$

که در این روابط  $r$  مقادیر مشخصه بوده و  $\{\psi\}$  و  $\{Z\}$  بردارهای مشخصه سیستم به ترتیب در فضای اصلی و در فضای حالت هستند. بردارهای مشخصه در فضای حالت به شکل زیر خواهند بود:

$$\begin{cases} \dot{g}_1 = g_2 \\ \dot{g}_2 = -\ddot{u}g - \frac{c_1}{m_1}g_2 - \frac{k_1}{m_1}g_1 + \frac{c_3}{m_1}(g_2 - g_4)^\alpha \\ \dot{g}_3 = g_4 \\ \dot{g}_4 = -\ddot{u}g - \frac{c_2}{m_2}g_4 - \frac{k_2}{m_2}g_3 + \frac{c_3}{m_2}(g_2 - g_4)^\alpha \end{cases} \quad (8)$$

در فرض استفاده از میراگر کنترلی معادله دینامیکی حرکت برای سیستم دو درجه آزاد به فرم حالت خطی (معادله شماره ۳ یا ۶) مورد استفاده قرار گرفته شده است. در این حالت الگوریتم کنترلی پیشنهادی الگوریتم ساده‌ای انتخاب شده است که با عنوان Skyhook از آن نام برده می‌شود [۸]. منطق به کار رفته در این الگوریتم بر مبنای روابط ذیل است:

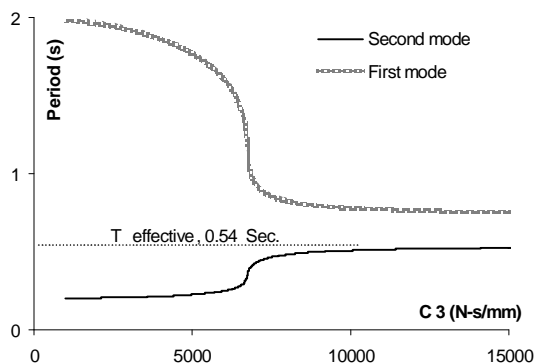
$$\begin{cases} c_3 = c_{3\max} & \text{if } \dot{u}_1(\dot{u}_1 - \dot{u}_2) > 0 \\ c_3 = c_{3\min} & \text{if } \dot{u}_1(\dot{u}_1 - \dot{u}_2) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

این روابط نشان می‌دهد که چنانچه جهت نیرو در میراگر، خلاف جهت حرکت سازه نرم ( $u_1$ ) باشد از ثابت میرایی بالا برای آن استفاده می‌شود و در غیر این صورت ثابت میرایی حداقل برای میراگر انتخاب خواهد شد. استفاده از این الگوریتم سبب می‌شود که تغییر مکان سازه نرم تحت کنترل قرار گیرد. در این الگوریتم  $c_{3\max}$  برابر با مقدار  $c_3$  انتخاب می‌شود. در حالی که  $c_{3\min}$  از طریق ضریب کاهش  $\beta$  برای  $c_3$  به دست می‌آید. در این مطالعه ضریب  $\beta$  برابر  $0.105$  و  $0.12$  انتخاب شده است که از این طریق مقدار  $c_{3\min}$ ، یکی از دو مقدار  $5$  و یا  $20$  درصد  $c_{3\max}$  خواهد بود.

### مطالعات مقادیر مشخصه

از آنجا که دانستن مشخصه‌های دینامیکی سازه از قبیل پریود و ضریب میرایی می‌تواند در فهم چگونگی رفتار سازه مؤثر باشد، در اینجا به آن پرداخته شده است. مدل سازه معرفی شده در شکل شماره ۳ (و یا ۶) دارای پریود و میرایی معین برای هر یک از زیرسازه‌های سخت و نرم است. سازه اصلی که از مجموع این دو زیرسازه تشکیل شده است، همان سازه‌ای است که از آن با عنوان سازه جداسازی شده جرمی نام برده شده است، این سازه به دلیل وجود میراگر  $c_3$  مقادیر مشخصه متفاوتی نسبت به زیرسازه‌های خود دارد. در عمل، وجود میراگر  $c_3$  سیستم

در صورتی که این نسبت برای مود اول به یک مقدار مشخص که در این مثال نزدیک به ۹۲ درصد است نزدیک شده و سپس با افزایش ثابت میرایی  $C_3$  از نسبت میرایی به شدت کاسته می‌شود. به عبارتی در عمل میزان نسبت میرایی در مود اول سازه محدود است و افزایش  $C_3$  نمی‌تواند همواره منجر به افزایش میرایی این مود شود. از آنجایی که قسمت عمده جرم سازه در این مود متمرکز است (مود اول)، می‌توان نتیجه گرفت که در عمل افزایش میرایی در چنین سازه‌هایی محدودیت دارد و نمی‌توان به بالاتر از میزان مشخصی از میرایی در این سیستم‌ها دست یافت. شکل (۸) نشان‌دهنده تغییرات پریود ( $T_i = 2\pi/p_i$ ) مودهای اول و دوم سازه در رابطه با تغییر در ثابت میرایی  $C_3$  است.



شکل ۸: تغییرات پریود دوم سازه بر حسب  $C_3$ .

درباره پریودهای ارتعاش سازه نیز نتایج حاصله جالب توجه است. همان‌گونه که در شکل (۸) نشان داده شده است، در ابتدا سازه دارای دو پریود کاملاً جدا از هم (مباین) پریودهای متناسب به سازه نرم ( $T_1 = 2.0 \text{ Sec.}$ ) و سازه سخت ( $T_2 = 0.2 \text{ Sec.}$ ) است، ولی با افزایش  $C_3$  این دو مقدار به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند. در محدوده نسبت میرایی حداکثر (که در جا از آن به عنوان نسبت میرایی بحرانی یاد می‌شود) در یک روند سریع‌تر، فاصله بین دو پریود ارتعاشی سازه به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند؛ به نحوی که به نظر می‌آید هر دو مود سازه دارای پریودهایی مشابه در محدوده پریود سازه مبنا ( $T_{eff} = 0.54$ ) هستند.

این بدان معنی است که در عمل مزیت جداسازی جرم که انتقال قسمت عمده جرم سازه به محدوده پریودهای بالا برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه است، از میان رفته است. این موضوع نشان می‌دهد که وجود ثابت‌های میرایی بالا در عمل نه تنها نمی‌تواند سبب بالا بردن ضریب

$$\{Z\} = \begin{Bmatrix} \{\Psi_j\} \\ \{r_j\} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

با حل معادله مشخصه بالا مقادیر مشخصه و بردار مشخصه  $\Psi$  به صورت اعداد و بردارهای مختلط به این ترتیب حاصل خواهند شد:

$$\left. \begin{matrix} \Psi_j \\ \bar{\Psi}_j \end{matrix} \right\} = \left\{ \phi_j \right\} \pm i \left\{ x_j \right\}, \quad \left. \begin{matrix} r_j \\ \bar{r}_j \end{matrix} \right\} = -q_j \pm i \hat{p}_j \quad (18)$$

که با استفاده از آنها می‌توان پریود و نسبت میرایی سازه را (چنانچه میرایی در حد میرایی زیر بحرانی قرار داشته باشد) از روابط زیر به دست آورد:

$$p_j = \sqrt{(q_j^2 + \hat{p}_j^2)} \quad (19)$$

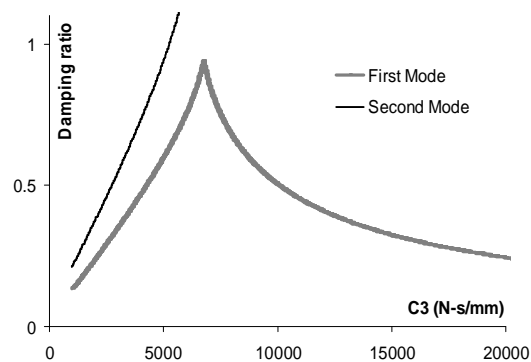
$$\xi_j = \frac{q_j}{p_j}$$

چنانچه یک و یا هر دو مود رفتاری سیستم در وضعیت میرایی بحرانی و یا فوق بحرانی قرار گیرند، روابط ذیل برای محاسبه پریود و نسبت میرایی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹]:

$$p^i = \sqrt{(r \cdot \bar{r})} \quad (20)$$

$$\xi_j = \frac{-(r + \bar{r})}{2\sqrt{r \cdot \bar{r}}}$$

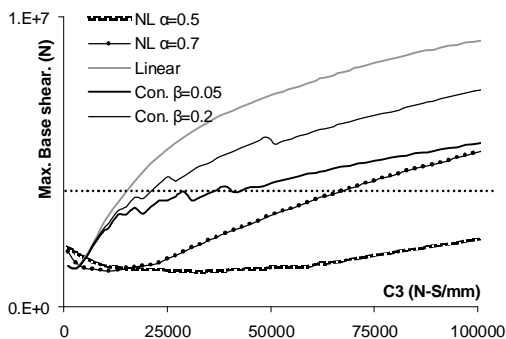
این مقادیر برای مثال معرفی شده در صفحات قبل به ازای تغییر در مقادیر  $C_3$  محاسبه شده و نتایج حاصله برای نسبت‌های میرایی سازه در شکل (۷) رسم شده‌اند. لازم به ذکر است که سازه جداسازی شده جرمی در عمل دارای دو مود رفتاری در ارتباط با سازه نرم و سازه سخت است.



شکل ۷: نمودار تغییرات نسبت میرایی بر حسب  $C_3$ .

همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، نسبت میرایی در مود دوم به سرعت به سمت مقادیر بالا میل می‌کند،

عکس‌العمل‌های میراگر  $C_3$  به آن انتقال می‌یابد) تحمل کند. این در صورتی ممکن خواهد بود که سازه سخت وارد مرحله تشکیل مکانیزم و یا تغییر مکان‌های پلاستیک بالا نشود. این ویژگی می‌طلبد که سازه مورد بحث با فرض تغییر شکل کمتر نسبت به سازه‌های شکل‌پذیر طراحی شود تا بتواند تحمل عکس‌العمل‌های میراگر  $C_3$  را داشته باشد و با مکانیزم شدن از حالت تکیه‌گاه این میراگر خارج نشود. از این رو طراحی سازه سخت باید در محدوده قبل از ایجاد مکانیزم مد نظر باشد که در این صورت ضریب رفتار برای طراحی این سازه در محدوده‌های  $R=2.0$  و یا کمتر از آن باید در نظر گرفته شود. در این مطالعه ضریب رفتار  $R=2.0$  برای سازه سخت در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن این موضوع که ضریب رفتار به طور متوسط در سازه‌های معمول برابر  $R=6.0$  است، می‌توان نتیجه گرفت که چنانچه برش پایه طراحی در سازه قبل از جداسازی و بعد از آن را مقایسه کنیم، نیروهای طراحی برای سازه جداسازی شده باید حداقل برابر با میزان نیروهای طراحی در سازه‌های متداول باشد تا مسئله از نقطه نظر اقتصاد طراحی مقبول باشد. در چنین حالتی باید نیروهای الاستیک در سازه جداسازی شده به میزان  $1/3$  نیروی الاستیک سازه در حالت غیر جداسازی شده باشد تا نیروهای طراحی حاصله (که از تقسیم نیروهای الاستیک بر  $R$  به دست می‌آیند) برابر شوند. بدین ترتیب خط مبنای نیروی طراحی خط  $1/3$  نیروی الاستیک در حالت سازه غیر جداسازی شده (هنگامی که دو سازه سخت و نرم با ثابت میرایی  $C_3 = \infty$  به صورت به هم چسبیده عمل می‌کنند) فرض شده است. این خط به صورت نقطه چین افقی در شکل (۹) نشان داده شده است. این شکل مبین بیشترین برش پایه سازه بر حسب ثابت میرایی  $C_3$  است. زلزله مورد استفاده در این حالت زلزله السنترو است.



شکل ۹: حداکثر برش پایه کل تحت اثر زلزله السنترو.

میرایی سیستم شود، بلکه با کاهش پیوند سازه در جهت افزایش پاسخ‌های سازه در برابر زلزله عمل خواهد کرد.

## مطالعات تاریخیچه زمانی

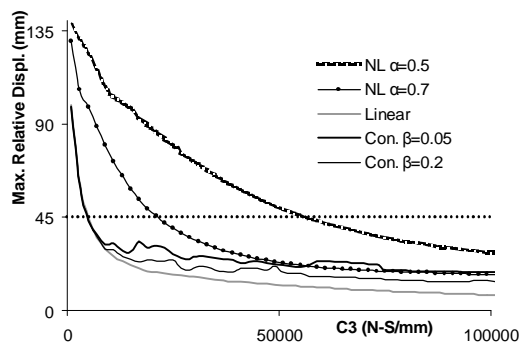
برای بررسی مسئله در بعد رفتار سازه در مقابل زلزله، یک سری مطالعات تاریخیچه زمانی با استفاده از شتابنگاشت‌های السنترو، هاجینوهه، تفت، کوبه، سن فرناندو، نورتریچ و سانتا‌باربارا<sup>۱۱</sup> روی نمونه مورد نظر انجام گرفته است.

این زلزله‌ها نسبت به زلزله السنترو و بر مبنای شتاب حداکثر ( $PGA$ ) آن همپایه شده‌اند. عوامل رفتاری سازه که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند، اغلب در مقایسه با رفتار سازه مینا که در آن دو قسمت نرم و سخت به صورت صلب به یکدیگر متصل هستند، مورد بحث قرار داده شده‌اند. روش به کار گرفته شده برای این مقایسه به این شرح است:

### الف- تعیین خطوط مینا

در روش‌های کلاسیک طراحی لرزه‌ای، سیستم سازه‌ای شکل‌پذیر فرض شده و نیروی به دست آمده از آنالیز الاستیک بر ضریب رفتار ( $R$ ) تقسیم می‌شود و نیروهای کوچک به دست آمده، برای طراحی مورد استفاده قرار داده می‌شوند. در این حالت، سازه با رفتاری غیرالاستیک و با داشتن مفاصل پلاستیک متعدد زلزله را از سر می‌گذرانند. بدین طریق سازه مورد بحث، سطح عملکرد مناسبی در زلزله‌های بزرگ نخواهد داشت و ممکن است بعد از زلزله قابل استفاده نباشد. در روش‌های نوین طراحی لرزه‌ای، مسئله عملکرد بالاتر سازه در مقابل زلزله مطرح می‌شود که بر این اساس سازه پس از زلزله باید در محدوده عملکرد بالاتری از سازه‌های شکل‌پذیر قرار داشته باشد. با این وجود انتظار می‌رود که سطح نیروهای طراحی سازه در روش‌های نوین طراحی لرزه‌ای بالاتر از روش‌های مبتنی بر شکل‌پذیری قرار نداشته باشد و یا حداقل به آن نزدیک باشد. در مدلی که اینجا برای سازه‌های جداسازی شده جرمی مطرح شده است، سازه سخت همانند روش‌های طراحی کلاسیک بر اساس نیرو (برش پایه) طراحی می‌شود. از آنجایی که این سازه به عنوان تکیه‌گاه برای عکس‌العمل میراگر  $C_3$  عمل می‌کند، در حین زلزله باید بتواند نیروهای ناشی از سازه نرم را (که از طریق

خطی، غیرخطی و کنترلی یکی از عوامل طراحی که تغییر مکان نسبی حداکثر بین دو سازه نرم و سخت است به عنوان ملاک مقایسه در نظر گرفته شده است. شکل (۱۱) مقادیر این عامل را بر حسب ثابت میرایی  $C_3$  برای همه حالات خطی و غیرخطی و کنترلی در زلزله الاسترو نشان می‌دهد.

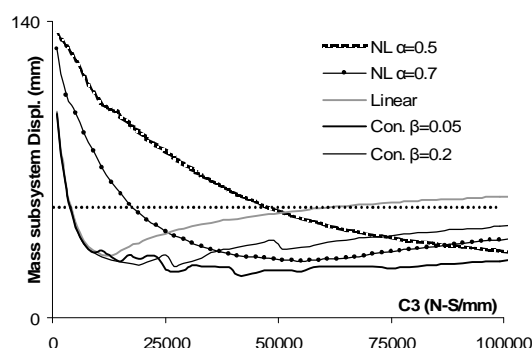


شکل ۱۱: حداکثر تغییر مکان نسبی دو زیرسازه در زلزله الاسترو.

در این رابطه عدد مشخصی برای حداکثر تغییر مکان نسبی دو سازه سخت و نرم ( $45 \text{ mm}$ ) فرض می‌شود و مقادیری از ثابت میرایی  $C_3$  که بتواند در هر یک از حالات خطی، غیرخطی و کنترلی این تغییر مکان نسبی را تأمین کند، برای هر پنج حالت گفته شده با استفاده از شکل (۱۱) به دست می‌آید.

پس از آنکه ثابت  $C_3$  در محدوده تغییر مکان نسبی دو سازه سخت و نرم برای حالات مختلف خطی و غیرخطی مشخص شد، مقادیر به دست آمده برای ثابت  $C_3$  در هر یک از حالات ذکر شده به صورت مجزا با دو عامل دیگر طراحی (برش پایه کل و تغییر مکان سازه نرم نشان داده شده در اشکال ۱۰ و ۹) کنترل می‌شود. در صورت قرار داشتن این ثابت در محدوده زیر خط  $1/3$  برای برش پایه و زیر خط  $2/3$  برای تغییر مکان سازه نرم عدد مزبور برای هر یک از حالات مختلف خطی، غیرخطی و کنترلی به عنوان ثابت طراحی  $C_3$  تثبیت می‌شود. لازم به ذکر است که ثابت بهینه  $C_3$  در هر شتابنگاشت متفاوت خواهد بود. جدول (۱) مقادیر ثابت  $C_3$  را برای ۷ شتابنگاشت مختلف (که از طریق بالا به دست آمده‌اند) نشان می‌دهد. جدول (۱) نشان می‌دهد که مقدار بهینه برای ثابت  $C_3$  در حالات خطی و کنترلی مشابه بوده، ولی در حالت‌های غیرخطی این ثابت مقادیر کاملاً متفاوتی را داشته است. این به دلیل آن است که در حالات غیرخطی ثابت  $C_3$  برای تأمین

معیار طراحی برای سازه نرم باید بر اساس کنترل تغییر مکان باشد، زیرا قسمت اعظم نیروی‌های لرزه‌ای در این قسمت از سازه از طریق میراگر به سازه سخت منتقل شده است. اگر تغییر مکان‌های الاستیک در سازه مینا را معیار طراحی این قسمت از سازه قرار دهیم، تغییر شکل‌های سازه نرم زیاد خواهد بود. ولی اگر انتظار طراح از سازه نرم عملکرد بالاتری نسبت به سازه‌های متداول باشد، باید این قسمت از سازه با شکل‌پذیری کمتری نسبت به روش طراحی سازه‌های متداول طراحی شود. بدین منظور خط مینای طراحی در  $2/3$  میزان تغییر شکل‌های الاستیک سازه مینا (برای سازه نرم) در نظر گرفته شده است. این خط به شکل نقطه چین افقی در شکل (۱۰) رسم شده است.



شکل ۱۰: حداکثر تغییر مکان زیر سازه جرمی در زلزله الاسترو.

در این شکل بیشترین تغییر مکان سازه نرم بر حسب ثابت میرایی  $C_3$  در زلزله الاسترو نشان داده شده است. در دو شکل گفته شده (اشکال شماره ۹ و ۱۰) مقادیر واقع در زیر خطوط مینا به عنوان مناطق مجاز طراحی انتخاب شده و مقدار ثابت میرایی بهینه به این مناطق محدود شده است. در اشکال بالا پنج حالت مختلف سازه جداسازی شده جرمی بر حسب نوع میراگر  $C_3$  نشان داده شده است. دو میراگر غیرخطی که در آنها توان سرعت  $\dot{u}$  برابر با  $0.5, 0.7$  فرض شده‌اند، در مقایسه با میراگر خطی و میراگرهای کنترلی ( $\beta = 0.05, 0.2$ ) قرار داده شده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در حالت خطی حساسیت پاسخ سازه به تغییرات ثابت  $C_3$  بسیار بالاست. در صورتی که در سیستم‌های غیرخطی و کنترلی این حساسیت پایین‌تر است.

#### ب- تعیین ثابت میرایی بهینه

برای یافتن نقطه مقایسه عملکرد بین روش‌های



### ج- بررسی نتایج مطالعات تاریخی چرخه زمانی

در رابطه با سیستم‌های کنترلی، همان گونه که نشان داده شده است، مقادیر  $C_3$  بهینه تفاوت چندانی با سیستم غیرخطی ندارند. همچنین با مراجعه به اشکال شماره (۹)، (۱۰) و (۱۱) مشاهده می‌شود که در عملکرد این سیستم‌ها، همان ویژگی عدم حساسیت به مقادیر  $C_3$  وجود دارد و مزیت‌های طراحی گفته شده برای سیستم‌های غیرخطی برای سیستم‌های کنترلی نیز قابل دستیابی است.

جدول (۲) نشانگر نسبت پاسخ‌های سیستم‌های پنج‌گانه گفته شده به پاسخ‌های سازه جداسازی نشده تحت زلزله السنترو است. مدل‌سازی عددی این سازه از طریق قرارداد ثابت میرایی  $C_3$  برابر با  $C_3 = \infty$  به دست آمده و از آن با عنوان سازه معادل نام برده شده است. سازه معادل دارای مشخصه‌های  $T_{eff} = 0.54$  و  $\xi_{eff} = 0.02$  است (که با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه شده‌اند).

نتایج نشان داده شده در این جدول، مبین آن است که تمامی پنج روش مطالعه‌شده در عمل نتایج تقریباً یکسانی برای پاسخ‌های اصلی سیستم ارائه می‌دهند. همچنین ملاحظه می‌شود که مقادیر برش پایه  $V_T^{Max}$  به حدود ۱۴ درصد و تغییر مکان سازه نرم  $u_1^{Max}$  به حدود ۶۰ درصد تغییر مکان سازه جداسازی نشده رسیده است که همه در محدوده‌های  $1/3$  و  $2/3$  تعیین شده هستند. علاوه بر آن، شتاب سازه نرم  $\ddot{u}_1^{Max}$  نیز در همان محدوده ۱۴ درصد سازه معادل است. این نسبت‌ها همگی نشانگر توانایی بالای ایزولاسیون جرمی در بهبود پاسخ‌های سازه است.

در جدول مربوطه نشان داده شده است که نیروی ایجاد شده در میراگر  $C_1$  در سازه نرم  $F_{C1}$  در محدوده ۳۰ درصد سازه جداسازی نشده است؛ در حالی که نیروی حاصله از تغییر مکان این زیرسازه  $F_{K1}$  در محدوده همان ۶۰ درصد است. این بدان معنی است که در سازه جداسازی شده پاسخ سرعت در زیرسیستم جرمی کمتر از پاسخ تغییر مکانی آن بوده است.

در جدول حاضر انرژی ورودی به سازه و سهم میراگر  $C_3$  در جذب این انرژی نیز نشان داده شده است. در این رابطه می‌توان گفت که سهم انرژی ورودی  $(E_{Input})$  به سازه جداسازی شده حدود ۵۰ درصد سازه جداسازی نشده است و در این ارتباط سهم میراگرهای  $C_1$

میرایی مؤثر باید مقدار بیشتری نسبت به سایر حالات داشته باشد. به عبارت دیگر در حالت غیرخطی نیروی حاصله از ثابت میرایی  $C_3$  برابر است با  $F_D = C_3 \cdot \ddot{u}^\alpha$  که با توجه به توان کمتر از یک برای  $\ddot{u}$  ( $\alpha < 1$ ) نیازمند ثابت میرایی ( $C_3$ ) بزرگی است تا میرایی حاصله بتواند در کنترل رفتار سازه و پایین آوردن تغییر مکان‌های آن مؤثر باشد.

جدول ۱: ثابت‌های میرایی بهینه برای میراگر C3.

Optimal C3	NL $\alpha=0.5$	NL $\alpha=0.7$	Linear	Con. $\beta=0.05$	Con. $\beta=0.2$
El Centro	59000	21000	5000	5000	5000
San Fern.	89000	27000	5000	5000	5000
Taft	73000	29000	7000	7000	7000
Santabar.	75000	29000	7000	9000	9000
Northridge	79000	23000	3000	3000	3000
Hachinohe	65000	25000	5000	7000	7000
Kobe	85000	29000	5000	7000	5000
Ave. C3	75000	26143	5286	6143	5857

ثابت میرایی حدود  $C_3 = 5000 \text{ N.s/mm}$  برای حالت خطی مبین آن است که سازه مورد بحث در محدوده میرایی زیر بحرانی (با نسبت میرایی حدود ۵۰ درصد نشان داده شده در شکل ۷) قرار گرفته است. در این حالت پیوندهای مودهای اول و دوم سازه با فاصله مناسب نسبت به یکدیگر ( $T_1 = 1.72 \text{ Sec}$  و  $T_2 = 0.22 \text{ Sec}$ ) قرار دارند. بدین ترتیب زیر سازه جرمی با پیوند بلند از نیروهای زلزله می‌کاهد و زیرسازه سختی نیز با ایجاد تکیه‌گاه برای عکس‌العمل میراگر  $C_3$  دامنه تغییر مکان‌های زیر سیستم جرمی را کنترل می‌کند.

در حالت‌های غیرخطی توان کمتر از واحد برای  $\ddot{u}$  از اثرات سرعت در ایجاد نیروی میرایی می‌کاهد ( $F_D = C_3 \cdot \ddot{u}^\alpha$ ) و از حساسیت سیستم نسبت به تغییرات  $C_3$  کم می‌کند. این موضوع در عمل طراحی سیستم را ساده‌تر می‌کند و وابستگی آنها را به مقادیر دقیق ثابت بهینه  $C_3$  برای تضمین کیفیت عملکرد آنها کاهش می‌دهد. این ویژگی در اشکال شماره (۹)، (۱۰) و (۱۱) قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که این مزیت در عمل از وابستگی ثابت  $C_3$  به نوع شتابنگاشت (که مسئله مهمی در طراحی این گونه از سازه‌ها در مسایل چند درجه آزادی و برای اثرات مودهای بالاتر است) نیز می‌کاهد.

و  $C_2$  بسیار ناچیز است ( $E_S$ ). بدین ترتیب قسمت اعظم انرژی ورودی توسط میراگر  $C_3$  اتلاف شده است ( $E_D$ ).

جدول ۲: نسبت پاسخ سازه جداسازی شده به جداسازی نشده.

$Iso/N. Iso.$	Linear	NL $\alpha=0.5$	NL $\alpha=0.7$	Con. $\beta=0.05$	Con. $\beta=0.2$
$\Delta x$	1	1	1	1	1
$V_T^{Max}$	0.14	0.12	0.12	0.13	0.13
$u_1^{Max}$	0.58	0.58	0.60	0.55	0.56
$u_2^{Max}$	0.14	0.13	0.12	0.13	0.13
$F_{C2}$	0.16	0.15	0.13	0.18	0.17
$F_{K2}$	0.14	0.13	0.12	0.13	0.13
$F_{C1}$	0.29	0.30	0.30	0.28	0.28
$F_{K1}$	0.58	0.58	0.60	0.55	0.56
$\ddot{u}_1^{Max}$	0.14	0.11	0.12	0.13	0.13
$E_{Input}$	0.52	0.53	0.51	0.52	0.52
$E_S$	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
$E_D$	0.49	0.49	0.48	0.48	0.48

جدول ۳: نسبت پاسخ روش‌های غیرخطی و کنترلی به خطی.

$NL \& Con./Lin.$	NL $\alpha=0.5$	NL $\alpha=0.7$	Con. $\beta=0.05$	Con. $\beta=0.2$
$\Delta x$	1	1	1	1
$F_{C3}$	0.78	0.84	0.96	0.97
$V_T^{Max}$	0.85	0.85	0.96	0.97
$V_1^{Max}$	1.01	1.04	0.95	0.97
$V_2^{Max}$	0.93	0.89	0.96	0.97
$u_1^{Max}$	1.00	1.03	0.95	0.96
$u_2^{Max}$	0.93	0.89	0.96	0.97
$\ddot{u}_1^{Max}$	0.81	0.86	0.96	0.97
$\ddot{u}_2^{Max}$	1.23	1.05	1.57	1.46
$E_2$	1.37	1.08	1.17	1.11
$E_1$	0.98	0.99	0.95	0.97
$E_{Input}$	1.01	0.98	0.99	0.99

جدول (۳) در همین ارتباط به مقایسه نزدیک‌تر روش‌های پنج‌گانه بالا در کاهش پاسخ سیستم پرداخته است. در این جدول روش‌های غیرخطی و کنترلی نسبت به روش‌های خطی مقیاس شده‌اند. نتایج حاصله مبین آن هستند که عملکرد همه روش‌ها مشابهت داشته‌اند، ولی روش غیرخطی با  $\alpha = 0.5$  در مجموع بهتر از سایر روش‌ها ارزیابی می‌شود.

در مقایسه انرژی‌های اتلاف شده، قابل ذکر است که در سازه مجهز به میراگر غیرخطی انرژی اتلاف شده در زیرسازه سختی ( $E_2$ ) نسبت به روش خطی بیشتر بوده و در محدوده تا ۱/۳۷ برابر آن قرار دارد. این بدان معنی است که زیرسازه سختی (ویا میراگر  $C_2$ ) تحت اثر سرعت و تغییرمکان بالاتری در سیستم‌های غیرخطی نسبت به سیستم خطی قرار دارد.

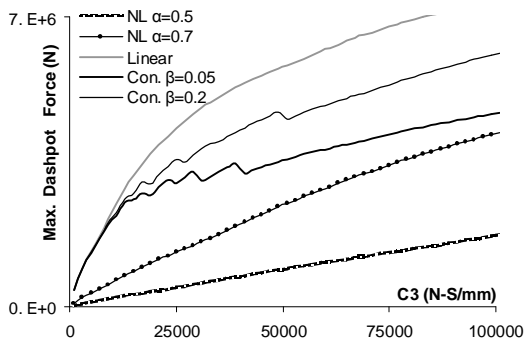
جدول ۴: میانگین پاسخ سازه جداسازی شده به جداسازی نشده.

$Iso/N. Iso.$	Linear	NL $\alpha=0.5$	NL $\alpha=0.7$	Con. $\beta=0.05$	Con. $\beta=0.2$
$\Delta x$	1	1	1	1	1
$V_T^{Max}$	0.22	0.21	0.21	0.23	0.23
$u_1^{Max}$	0.85	0.86	0.84	0.78	0.81
$u_2^{Max}$	0.21	0.20	0.20	0.22	0.22
$F_{C2}$	0.22	0.24	0.22	0.33	0.28
$F_{K2}$	0.21	0.20	0.20	0.22	0.22
$F_{C1}$	0.44	0.45	0.44	0.41	0.43
$F_{K1}$	0.85	0.86	0.84	0.78	0.81
$\ddot{u}_1^{Max}$	0.18	0.17	0.17	0.18	0.18
$E_{Input}$	1.17	1.12	1.14	1.13	1.16
$E_S$	0.08	0.08	0.07	0.07	0.08
$E_D$	1.09	1.04	1.06	1.06	1.08

جداول (۴) و (۵) میانگین پاسخ‌های سیستم موجود را برای همه ۷ زلزله گفته شده (در مشا بهت با جداول (۲) و (۳)) نشان می‌دهند. همان طور که در جداول نشان داده شده است، میانگین عملکرد سازه جداسازی شده در زلزله‌های گفته شده نسبت به هنگامی که سازه فقط تحت اثر زلزله السنترو بوده پایین‌تر بوده است. در این حالت برش پایه سازه  $V_T^{Max}$  حدود ۲۲ درصد (در مقایسه با ۱۴ درصد) و تغییرمکان سازه نرم به حدود ۸۵ درصد سازه جداسازی نشده (به جای ۶۰ درصد) رسیده است. این موضوع در بعد انرژی ورودی به سازه بیشتر نمایان است، به طوری که متوسط انرژی ورودی به میزانی بالاتر از ۲ برابر انرژی ورودی در زلزله السنترو رسیده است و از انرژی ورودی به سازه جداسازی نشده نیز بیشتر شده است (۱/۱۷ برابر).

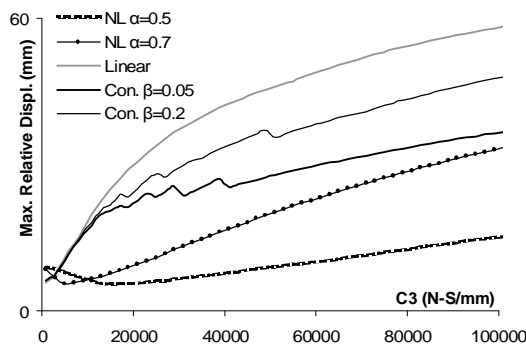
نتایج حاصله به وضوح نشان می‌دهد که اعداد به دست آمده برای ثابت‌های بهینه  $C_3$  در جدول (۱) سیستم را در خارج از محدوده نسبت  $2/3$  تغییر مکانی برای سازه

به تغییرات ثابت  $C_3$  دارد.



شکل ۱۲: حداکثر نیروی میراگر  $C_3$  در زلزله السنترو.

شکل (۱۳) تغییرمکان حداکثر سازه سخت را نشان می‌دهد. نتایج نشان داده شده در اینجا و در شکل قبلی نشانگر آن است که نیروی حاصله در میراگر  $C_3$  و همچنین تغییر مکان سازه سخت به شدت متأثر از ثابت بالا در سیستم خطی و تا حدودی در سیستم‌های کنترلی است. از آنجا که این دو عامل (نیروی میراگر  $C_3$  و تغییر مکان سازه سخت) هر دو از عوامل مهم طراحی این گونه سازه‌ها هستند (تغییر مکان سازه سخت در ارتباط مستقیم با نیروی برش پایه کل  $V_T^{Max}$  قرارداد) اهمیت موضوع بهتر مشخص می‌شود. همچنین شباهت نزدیک این دو شکل نشان می‌دهد که برش پایه کل، ارتباط مستقیم با نیروی ایجاد شده در میراگر  $C_3$  دارد و یا به عبارتی برش پایه کل اغلب از سازه نرم و از طریق میراگر  $C_3$  به سازه سخت منتقل می‌شود.



شکل ۱۳: حداکثر تغییرمکان زیر سازه سخت در زلزله السنترو.

با آنکه تفاوت زیادی بین سیستم‌های کنترلی با سیستم خطی در مقادیر بهینه به دست آمده در جدول (۱) و یا جداول (۲)، (۳)، (۴) و (۵) نیست، این نکته لازم به ذکر است که توانایی سیستم‌های کنترلی در مقایسه با سیستم خطی، نه در مقایره بهینه، بلکه در طراحی بر مبنای

نرم قرار داده است. ( $u_1^{Max} = 0.85 > 2/3$ ). این بدان معنی است که چنانچه رعایت محدوده  $2/3$  به صورت کامل مدنظر قرار داده شود، باید با افزایش در مقدار  $C_3$  (نسبت به مقادیر جدول ۱) از تغییرمکان سازه نرم کاست. این موضوع البته به افزایش نسبت برش پایه کل از میزان کنونی خود ( $V_T^{Max} = 0.22$ ) خواهد انجامید.

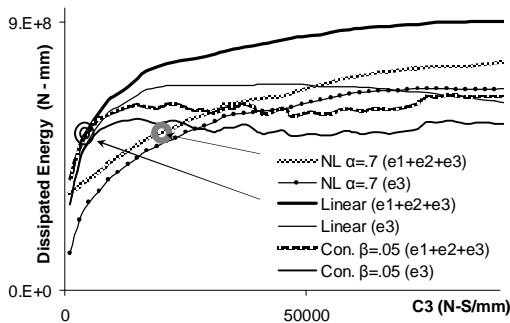
جدول حاضر نشان می‌دهد که عملکرد روش‌های کنترلی در مقایسه با عملکرد روش‌های خطی و غیرخطی مطلوب‌تر شده و توانسته است تغییرمکان سازه نرم را بهتر کنترل کند (تا محدوده ۷۸ درصد). این موضوع نشانگر توانایی انطباق‌پذیری سیستم‌های کنترلی با زلزله‌های مختلف است.

جدول ۵: میانگین نسبت پاسخ غیرخطی و کنترلی به خطی.

NL & Con./Lin.	NL $\alpha=0.5$	NL $\alpha=0.7$	Con. $\beta=0.05$	Con. $\beta=0.2$
$\Delta x$	1	1	1	1
$F_{C3}$	0.89	0.94	1.04	1.02
$V_T^{Max}$	0.94	0.95	1.02	1.01
$V_1^{Max}$	1.02	1.01	0.93	0.96
$V_2^{Max}$	0.98	0.97	1.04	1.02
$u_1^{Max}$	1.02	1.00	0.93	0.96
$u_2^{Max}$	0.98	0.97	1.04	1.02
$\ddot{u}_1^{Max}$	0.92	0.95	1.02	1.01
$\ddot{u}_2^{Max}$	1.28	1.09	2.29	1.80
$E_2$	1.64	1.27	1.51	1.29
$E_1$	0.96	0.94	0.87	0.92
$E_{Input}$	1.02	1.01	0.99	1.00

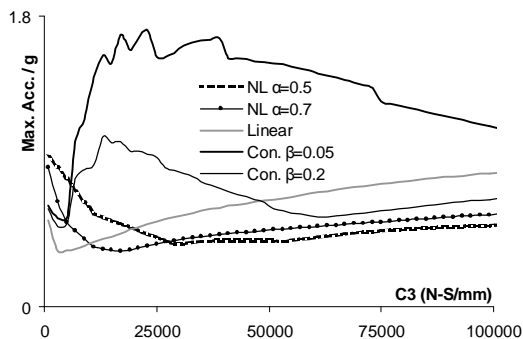
جدول (۵) نیز مؤید این نظریه است. نکته مهمی که در میان نتایج نشان داده شده در این جدول قابل ذکر است آن است که شتاب‌های زیرسازه سخت ( $\ddot{u}_2^{Max}$ ) در سیستم‌های کنترلی، بسیار بالاتر از شتاب حالت خطی و یا غیرخطی است. این موضوع مبین انتقال سریع نیرو از زیر سازه جرمی به زیرسازه سختی در اثر تغییر ناگهانی ثابت میرایی  $C_3$  است.

شکل (۱۲) نیروی ایجاد شده در میراگر  $C_3$  را بر حسب ثابت میرایی آن نشان می‌دهد. همان گونه که ملاحظه می‌شود، در سیستم خطی، میزان نیروی میراگر به شدت متأثر از ثابت  $C_3$  است؛ در صورتی که در سیستم‌های غیرخطی و کنترلی این نیرو حساسیت کمتری



شکل ۱۴: اتلاف انرژی در سازه (e1+e2) و در میراگر میانی e3 در زلزله السترو.

شکل بالا نشان دهنده انرژی اتلاف شده در قسمت‌های مختلف سازه جداسازی شده در حالت‌های خطی، غیرخطی و کنترلی است. در سیستم خطی با افزایش  $C_3$  روندی کاهشی در اتلاف انرژی در این میراگر مشاهده می‌شود که ناشی از کاهش دامنه سرعت نسبی دو سر میراگر است. در سیستم کنترلی مسئله به صورت دیگری نشان داده شده است و مبین آن است که افزایش  $C_3$  حتی به مقادیر بالای  $C_3 = 100,000$  هنوز نتوانسته است از سهم میراگر بالا در کاهش اتلاف انرژی زلزله بکاهد. علاوه بر آن شکل بالا نشانگر آن است که سیستم‌های کنترلی در سطوح عملکردی بالا (سیستم‌های فوق بحرانی) سطح انرژی ورودی به سازه را بر خلاف روش‌های خطی و یا غیرخطی ثابت نگاه می‌دارند.



شکل ۱۵: حداکثر شتاب سازه سخت در زلزله السترو.

شکل (۱۵) نشان دهنده حداکثر شتاب در سازه سخت است. در این شکل ملاحظه می‌شود که در روش‌های کنترلی این امکان وجود دارد که شتاب سازه سخت تحت اثر نیروها و یا ضربات ناشی از میراگر  $C_3$  (که نقش انتقال نیرو از سازه نرم به سخت را عهده‌دار است) به ناگاه افزایش پیدا کند. این موضوع در رابطه با عوامل طراحی چنین سازه‌هایی اهمیت چندانی ندارد و بالا بودن شتاب در این

عملکردهای بالا نشان داده می‌شود. به عنوان مثال اگر چنانچه کنترل تغییر مکان سازه نرم در محدوده‌ای کمتر از حد مطرح شده (۶۶ درصد) مد نظر باشد، با استفاده از شکل (۱۰) می‌توان نشان داد که تنها سیستم کنترلی است که می‌تواند به این مهم با  $C_3 > 25000$  نائل آید. همچنین با استفاده از شکل (۹) ملاحظه می‌شود که این دستاورد در عمل با افزایش قابل ملاحظه‌ای در برش پایه سازه نیز همراه نبوده و محدوده زیر خط مبنای  $1/3$  را حفظ خواهد کرد.

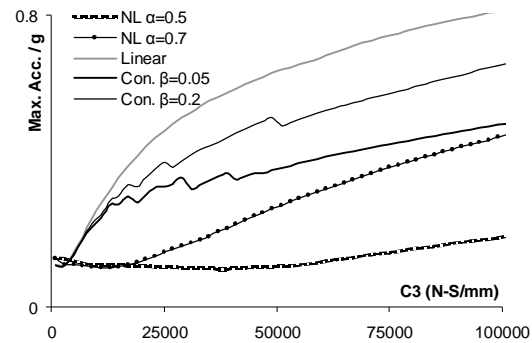
این ویژگی سیستم‌های کنترلی از آن جا حاصل شده است که این سیستم‌ها توانایی آن را دارند که بین دو سیستم زیر بحرانی  $0.05 \times 25000 < 7000 = C_3$  و فوق بحرانی  $25000 > 7000 = C_3$  به طریقی عمل کنند که متناسب با عملکرد مورد نظر طراح در کنترل نیرو و تغییر مکان قرار گیرند. به عبارتی چنانچه نظر طراح کاستن از تغییر مکان زیر سیستم جرمی باشد، با استفاده از ثابت میرایی حداکثر  $C_3 = 25000$  و سیستم فوق بحرانی حاصل (با پیروی نزدیک به سازه معادل  $T_{eff} = 0.54 \text{ Sec}$ ) تغییر مکان سازه را کنترل می‌کند، ولی به محض عوض شدن جهت حرکت با انتخاب ثابت میرایی حداقل  $C_3 = 0.05 \times 25000 = 1250 \text{ NS/mm}$  به یک سیستم زیر بحرانی تبدیل می‌شود و انرژی ذخیره شده در سازه سخت را در یک فرکانس سریع  $T_2 = 0.2 \text{ Sec}$  اتلاف کرده و از بازگشت آن به زیر سیستم جرمی و افزایش دامنه حرکت آن جلوگیری می‌کند.

این ویژگی به کاهش انرژی زیرسازه جرمی  $E_1$  منجر می‌شود که در جدول (۵) برای سازه‌های کنترلی قابل ملاحظه است (در این جدول چون از  $C_3$  بهینه استفاده شده بود شاید میزان کاهش انرژی چندان محسوس نباشد) بدین ترتیب می‌توان گفت در محدوده عملکردهای بالا برای طراحی سازه‌های جداسازی شده جرمی، می‌توان با استفاده از روش‌های کنترلی و سوپج کردن‌های متوالی بین سیستم‌های زیر بحرانی و فوق بحرانی به جوابی متناسب که در برگزیده عملکرد مورد نیاز باشد دست یافت.

البته لازم به ذکر است که الگوریتم کنترلی انتخاب شده در این تحقیق بسیار ابتدایی بوده و توانایی الگوریتم‌های دیگر کنترلی برای بهبود پاسخ‌های سازه‌ها، می‌تواند بالاتر از آنچه که در این تحقیق آمده است باشد.

سازه‌ها را از حد مشخصی افزون‌تر کند. در مثال بررسی شده در این تحقیق، حداکثر نسبت میرایی قابل حصول ۹۲ درصد نسبت میرایی بحرانی بوده است. برای بررسی رفتار سازه‌های جداسازی شده جرمی با استفاده از مدل پیشنهادی سه نوع مختلف از میراگرهای الحاقی برای به‌کارگیری در این گونه از سازه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این سه گروه عبارت بودند از میراگرهای خطی، غیرخطی و کنترلی. نتایج حاصله مبین آن بوده است که چنانچه دقت کافی در تعیین ثابت میرایی بهینه برای هر یک از این میراگرها به کار گرفته شود، می‌توان نتایج مشابهی از عملکرد هر سه گروه از میراگرها را انتظار داشت. میانگین عملکرد سازه جداسازی جرمی در تحلیل‌های تاریخیچه زمانی برای هر سه گروه میراگرها، مبین کاهش حداقل ۷۵ درصدی در برش پایه و ۱۵ درصدی در تغییر مکان سازه بوده است. بر پایه نتایج به دست آمده از این مطالعات، نشان داده شد که استفاده از میراگرهای غیر خطی و یا کنترلی، می‌تواند از حساسیت پاسخ سیستم به ثابت میرایی میراگر بکاهد و از این طریق در طراحی سیستم و عملکرد صحیح آن مؤثر باشند. علاوه بر آن نشان داده شد که چنانچه طراحی بر مبنای سطوح عملکردی بالا در این گونه سازه‌ها مدنظر باشد، میراگرهای کنترلی می‌توانند چنین خواسته‌ای را بهتر از سایر میراگرها فراهم کنند.

زیر سازه به خودی خود موضوع مهمی تلقی نمی‌شود. ولی از آنجایی که پایین‌بودن شتاب در سازه نرم، جزو عوامل مهم طراحی بر مبنای عملکرد است، همان‌گونه که در شکل (۱۶) نشان داده شده است، سیستم‌های کنترلی قابلیت دستیابی به چنین عملکردی را دارد.



شکل ۱۶: حداکثر شتاب سازه نرم در زلزله الاسترو.

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق به ارائه مدلی ساده‌شده از سازه‌های جداسازی شده جرمی پرداخته شده است. مدل معرفی شده به صورت یک سازه دو درجه آزادی است که می‌تواند به عنوان مدل مبنا برای مدل‌سازی همه روش‌های جداسازی جرمی به کار گرفته شود. با تعیین مقادیر مشخصه غیرکلاسیک برای مدل معرفی شده نخست مشخص شد که توانایی ایجاد میرایی در این گونه سازه‌ها محدود است و افزایش ثابت میرایی در عمل نمی‌تواند میرایی این گونه

## مراجع

- 1- Ziyaeifar, M. and Noguchi, H. (1998). "Partial Mass Isolation in Tall Buildings." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, No. 1, PP. 49-65.
- 2 - Ziyaeifar, M. (2002). "Mass Isolation Concept and Techniques." *European Earthquake Eng.*, Vol. 16, No. 2, PP. 64-76.
- 3 - Mezzi, M., Parducci, A. and Verducci, P. (2004). "Architectural and Structural Configurations of Buildings with Innovative Aseismic Systems." *Proc., 13th world conference on earthquake engineering*, Vancouver, Canada, Paper No. 1318.
- 4 - Yamada, K. (2008). "Dynamic Characteristics of SDOF structure with Maxwell Element." *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 28, PP. 396-404.
- 5 - Kurino, H., Tagami, J., Shimizu, K. and Kobori, T. (2003). "Switching Oil Damper with Built-in Controller for Structural Control." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, PP. 895-904.
- 6 - Constantinou, M.C. (1994). "Principles of friction, yielding steel and fluid viscous dampers: properties and design." *Passive and active structural vibration control in civil engineering*, Springer, Berlin, PP. 209-240.

- 7 - Hull, T.E., Enright, W.H. and Jackson, K.R. (1976). *User's guide for DVERK-a subroutine for solving non-stiff ODEs*, Department of computer science: Technical report 100, University of Toronto, Canada.
- 8 - Villaverde, R. and Koyama, L.A. (1993). "Damped Resonant Appendages to Increase Inherent Damping in Buildings." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 22, PP. 491-507.
- 9 - Veletsos, A.S. and Ventura, C.E. (1986). "Modal analysis of Non-classically Damped Linear Systems." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 14, PP. 217-243.

### واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Mass Isolation

2 - Flexibility

3- El-Centro, Hachinohe, Taft, Kobe, San-Fernando, Northridge, Santa-Barbara