

## بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی اثر توزیع میراگر ویسکوز بر رفتار سازه نامتقارن

محمد رضا منصوری<sup>۱\*</sup>، حسن ناصری<sup>۲</sup> و عبدالرضا سروقد مقدم<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>استادیار گروه مهندسی زلزله دانشگاه آزاد اسلامی - واحد علوم و تحقیقات

<sup>۲</sup>دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی زلزله پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

<sup>۳</sup>استادیار پژوهشکده سازه پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

(تاریخ دریافت ۸۷/۱۲/۲۰، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۹/۴/۲۷، تاریخ تصویب ۸۹/۶/۳۰)

### چکیده

در سال‌های اخیر، بررسی کنترل پاسخ ساختمانها در زلزله با استفاده از تجهیزات استهلاک انرژی نظیر میراگرها همواره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده است. توزیع مناسب این تجهیزات در بین المان‌های سازه ای امکان کنترل پیچش و در نتیجه بهره برداری مضاعف را از آنها فراهم می کند. در این مقاله اثر توزیع میراگرهای ویسکوز بر رفتار پیچشی سازه به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار می گیرد. برای این منظور یک مدل نامتقارن یک طبقه فولادی با مقیاس ۱ به ۶ بر روی میز لرزان مورد آزمایش قرار گرفته است. دو میراگر از نوع ویسکوز با توزیعهای مختلف، دیافراگم سازه را به تکیه گاه متصل نموده و برای هر حالت توزیع میراگر تغییر مکان جانبی، شتاب جانبی و چرخش دیافراگم سازه برای ۶ شتابنگاشت ثبت شده است. همچنین آزمایش‌های بارگذاری چرخه ای به منظور تعیین مشخصات دینامیکی میراگرها انجام شده که وابستگی زیاد مشخصات آنها را به عواملی نظیر فرکانس و دامنه حرکت نشان می‌دهد. مقایسه نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی با مدل سازی عددی، همسانی مناسبی را در روند پاسخ‌های تاریخیچه زمانی در دو حالت نشان می‌دهد. بررسی‌ها بر روی نتایج نشان می دهد توزیعهای مناسبی از میراگرها وجود دارند که می توان تغییر مکان جانبی و چرخش دیافراگم را تا حد امکان کنترل نمود به گونه ای که رفتار سازه به حالت متقارن نزدیک شود. در حالی که برای کنترل شتاب جانبی و برش پایه، توزیع مناسبی حاصل نشده است.

**واژه های کلیدی:** پیچش سازه، میراگر ویسکوز، بارگذاری چرخه ای، تغییر مکان جانبی، لبه نرم، شعاع ژیراسیون

میرایی

### مقدمه

کنترل پیچش در سازه ها استفاده از تجهیزات استهلاک انرژی نظیر میراگرها با توجه به مزایای بسیار از جمله سطح عملکرد بالای سازه های شامل آنها می‌باشد. برای این منظور لازم است توزیع مناسبی از این تجهیزات در پلان و ارتفاع سازه ایجاد گردد تا ضمن کاهش کلی پاسخ در زلزله نامتقارنی پاسخ‌ها نیز به حداقل برسد. در این میان میراگرهای ویسکوز با توجه به اینکه نیروهای ناشی از آنها نسبت به نیروهای سایر المان‌های سازه غیر همفاز هستند در کنترل پاسخ سازه ها بسیار موثر می‌باشند. در این زمینه مطالعات تحلیلی زیادی صورت گرفته که در ادامه به آن پرداخته می شود، ولی بررسی ادبیات فنی نشانگر تعداد کم مطالعات آزمایشگاهی در این زمینه می‌باشد. طبعاً مطالعات آزمایشگاهی نقش مهمی در شناسایی رفتار سازه های نامتقارن و اعتبار سنجی مطالعات تحلیلی مربوطه دارند. در این مقاله نخست برخی از مطالعات گذشته بر روی سیستم‌های با انواع میراگر ذکر شده و معادلات حاکم بر

مطالعه آسیب‌های ناشی از زمین لرزه های گذشته نشان می دهد که در برخی مواقع نامتقارنی سازه ها یکی از دلایل اصلی گسیختگی آنها در زلزله بوده است [۱]. عوامل اصلی نامتقارنی در سازه ها شامل نامتقارنی جرمی، سختی و مقاومت در پلان یا ارتفاع سازه می باشد که هر کدام به نحوی در تشدید پاسخ سازه ها در زلزله نقش دارند. یک راه حل برای کاهش اثرات منفی پیچش سازه ها این است که کلیه خروج از مرکزیت‌های سازه حداقل گردد که با توجه به عوامل دیگر نظیر محدودیت‌های معماری قابل انجام نیست. از طرفی این روش در کنترل پیچش سازه های موجود نیز قابل استفاده نمی باشد. به همین دلیل در سال‌های اخیر مطالعات زیادی به منظور کنترل پیچش در حوزه رفتار فراالاستیک از طریق تعیین توزیعهای بهینه سختی و مقاومت در پلان و ارتفاع صورت گرفته است [۲، ۳]. به موازات این بررسی ها یکی از روش‌های پیشنهادی برای

انرژی هیسترتیک لبه سخت و نرم بوده است. نتایج این تحقیق نیز تأثیر قابل توجه توزیع مناسب میراگرها را بر کاهش تغییرمکان، شکل پذیری و استهلاک انرژی هیسترتیک در سازه های دارای میراگر نشان داده اند.

De La Llera و همکاران در تحقیقات خود از سال ۲۰۰۴ [۷،۸،۹،۱۰] مفهوم تعادل پیشگی جهت تعیین توزیع میراگرها برای بهینه کردن وضعیت پیشگی در سازه های نامتقارن ارائه نمودند. تعادل پیشگی وضعیتی از توزیع میراگرها (شامل میراگرهای ویسکوز، ویسکوالاستیک<sup>۲</sup> و اصطکاکی<sup>۳</sup>) در پلان است که موجب یکسانی مقدار میانگین مربع یک پاسخ سازه (نظیر شتاب، سرعت و تغییر مکان) در طول زلزله در نقاطی از دیافراگم می باشد که دارای یک فاصله از مرکز سطح دیافراگم هستند. بررسی های این محققان بر روی پاسخ تغییرمکان سازه های یک و چند طبقه نشان داده که چنین توزیعی از میراگرها بیشینه چرخش دیافراگم و تغییر مکان جانبی را به حداقل می رساند. همچنین در حالت خاص قرارگیری مرکز جرم در وسط دیافراگم نتایج این محققان با نتایج Goel همخوانی دارد. بیشتر این مطالعات در حوزه تحلیلی بوده اند که در این تحقیق سعی شده با تمرکز بر روی پارامترهای با اهمیت ذکر شده در این مطالعات نتایج در حالت آزمایشگاهی تعیین گردند.

منصوری و سروقدمقدم در سال ۲۰۰۹ [۱۱] تأثیر توزیع میراگرهای ویسکوز را بر پارامترهای دینامیکی و پاسخ های مختلف لرزه ای سازه های نامتقارن در حالت غیرخطی مورد بررسی قرار داده اند. نتایج حاصل نشان داده است که توزیع میراگرها تأثیر قابل توجهی بر درصد میرایی مودهای جانبی و پیشگی دارد. همچنین در این تحقیق توزیع های متفاوتی از میراگر ویسکوز جهت کنترل اثر پیشگی بر پاسخ شتاب جانبی و تغییرمکان جانبی تعیین شده اند.

## معادلات حاکم بر سازه های دارای میراگر ویسکوز

برای تدوین برنامه مطالعه آزمایشگاهی لازم است نخست برخی پارامترهای کلیدی و مؤثر بر رفتار پیشگی با توجه به مطالعات قبلی شناسایی گردند [۴]. برای این منظور پلان سازه یک طبقه با نامتقارنی یک جهته سختی و میرایی مطابق شکل (۱) در نظر گرفته می شود. در این شکل فرض شده است که فنرها به عنوان المان های دارای سختی و

سیستم های شامل میراگر ویسکوز در حوزه الاستیک مورد بررسی قرار می گیرند تا پارامترهای کلیدی مؤثر بر رفتار این گونه سازه ها شناسایی گردد. سپس مشخصات مدل آزمایشگاهی و پاسخ های آزمایشگاهی و تحلیلی حاصل با توجه به پارامترهای مشخص شده ارائه می گردد.

## مطالعات گذشته

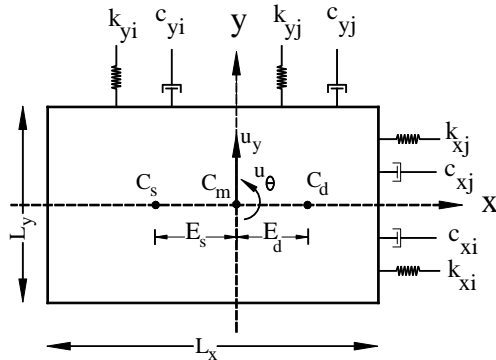
در طول دو دهه گذشته مطالعات زیادی درباره کنترل پاسخ سازه ها در زلزله با استفاده از تجهیزات استهلاک انرژی نظیر میراگرها انجام شده که به طور خلاصه برخی از آنها ذکر می گردند.

در سال ۱۹۹۸ Goel [۴] اثر میراگرهای ویسکوز الحاقی را بر پاسخ سازه های نامتقارن مورد بررسی تحلیلی قرار داده است. مدل مورد بررسی، مدل الاستیک یک طبقه با خروج از مرکزیت یک طرفه سختی بوده است. پارامترهای ضریب میرایی، خروج از مرکزیت میرایی و شعاع ژیراسیون میرایی نیز به عنوان پارامترهای کنترل کننده میراگر مطالعه شده اند که در بخش های بعدی تعریف می گردند. نتایج به دست آمده نشان داده است در صورتی که مرکز میرایی در سمت مخالف مرکز سختی نسبت به مرکز جرم و با فاصله ای برابر با خروج از مرکزیت سختی باشد تغییر مکان های لبه سخت و نرم در حد بهینه ای کاهش می یابد. از طرفی هر چقدر شعاع ژیراسیون میراگرها بیشتر باشد پاسخ در هر دو لبه نرم و سخت کاهش می یابد.

Goel در تحقیق دیگری در سال ۲۰۰۰ [۵] بر روی سازه یک طبقه نامتقارن تحت شتابنگاشت زلزله به این موضوع اشاره کرد که مقدار میرایی مود اول با افزایش فاصله مرکز میرایی از مرکز جرم در سمت مخالف مرکز سختی، افزایش می یابد و از آنجا که تغییر مکان لبه نرم نخست توسط مود اول کنترل می شود، چنان توزیعی از میراگرها موجب بیشترین کاهش در تغییر شکل لبه نرم می شود.

در سال ۲۰۰۱ Goel & Booker [۶] اثر میراگرهای ویسکوز الحاقی را بر پاسخ غیرالاستیک سازه های نامتقارن یک طبقه مورد بررسی تحلیلی قراردادند. پاسخ هایی که در حالت غیرالاستیک در نظر گرفته شده اند شامل تغییر مکان لبه سخت و نرم و

$$[K] = \begin{bmatrix} K_y & \frac{E_{sx}}{L_x} K_y \\ \frac{E_{sx}}{L_x} K_y & \frac{K_\theta}{L_x^2} \end{bmatrix} \quad (6)$$



شکل ۱: پلان سازه یک طبقه با خروج از مرکزیت سختی و میرایی یکجبهته.

در بررسی رفتار پیچشی سازه های نامتقارن نسبت فرکانس پیچشی به جانبی غیر همبسته از اهمیت برخوردار است به منظور تعیین فرکانس پیچشی لازم است سختی پیچشی حول مرکز سختی مطابق رابطه (۷) تعیین گردد:

$$K_{\theta,CS} = K_\theta - E_{sx}^2 K_y \quad (7)$$

در این صورت پارامتر  $\Omega_y$  (نسبت فرکانس پیچشی به جانبی غیر همبسته در جهت y) عبارت است از:

$$\Omega = \frac{\omega_\theta}{\omega_y} = \frac{\sqrt{K_{\theta,CS}/I}}{\sqrt{K_y/M}} \quad (8)$$

به منظور تعیین ماتریس میرایی باید ماتریس میرایی مربوط به خود سازه یعنی  $[C_0]$  و ماتریس میرایی مربوط به میراگرهای الحاقی ( $[C_{sd}]$ ) را جمع کرد. در صورتی که از قانون رایلی برای میرایی ذاتی سازه استفاده شود، ماتریس میرایی برابر است با:

$$[C] = [C_0] + [C_{sd}] = \alpha[M] + \beta[K] + [C_{sd}] \quad (9)$$

که در آن  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایب رایلی می باشند. با عملیاتی مشابه ماتریس سختی، خروج از مرکزیت میرایی و ماتریس میرایی میراگرها از روابط (۱۰) و (۱۱) تعیین می گردد.

$$E_{dx} = \frac{1}{C_y} \sum_i x_i c_{yi} \quad (10)$$

میراگرها به عنوان المانهای دارای میرایی بوده، همچنین  $C_s$ ،  $C_m$  و  $C_d$  به ترتیب مرکز سختی، مرکز جرم و مرکز میرایی دیافراگم می باشند. از آنجا که حرکت سازه در جهت x غیر همبسته و مستقل است از معادلات خارج شده و بنابراین سازه دارای دو درجه آزادی تغییر مکان در جهت y ( $u_y$ ) و پیچش حول محور قائم ( $u_\theta$ ) می باشد. اگر بردار تغییر مکان در مرکز جرم به صورت  $u^T = [u_x, L_x u_\theta]$  در نظر گرفته شود که  $L_x$  بعد سازه در جهت x است، معادله حرکت سازه تحت اثر زلزله عبارت است از:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{r\}\ddot{u}_g \quad (1)$$

که در آن  $[M]$ ،  $[C]$  و  $[K]$  به ترتیب ماتریسهای جرم، میرایی و سختی و  $\{r\}$  بردار تأثیر می باشد. ماتریس جرم  $[M]$  عبارت است از:

$$[M] = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I/L_x^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

که در آن M جرم دیافراگم و I ممان اینرسی جرمی دیافراگم حول مرکز جرم بوده که با فرض قرارگیری مرکز جرم بر مرکز دیافراگم مستطیلی و توزیع یکنواخت جرم برابر است با:

$$I = m \left( \frac{L_x^2 + L_y^2}{12} \right) \quad (3)$$

به منظور تعیین ماتریس سختی لازم است مقادیر سختی جانبی و پیچشی دیافراگم حول مرکز جرم مطابق روابط (۴) تعیین گردند.

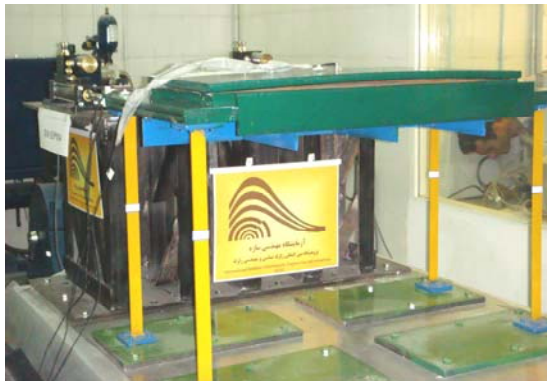
$$K_y = \sum_i k_{yi} \quad \text{و} \quad K_\theta = \sum_i k_{xi} y_i^2 + \sum_i k_{yi} x_i^2 \quad (4)$$

که در آن  $k_{yi}$  و  $k_{xi}$  به ترتیب سختی المانهای مقاوم i در جهت های x و y بوده  $y_i$  و  $x_i$  به ترتیب فاصله المانهای i ام در جهت های x و y تا مرکز جرم می باشد. در این صورت خروج از مرکزیت سختی در جهت x عبارت است از:

$$E_{sx} = \frac{1}{K_y} \sum_i x_i k_{yi} \quad (5)$$

ماتریس سختی طبقه نیز از رابطه (۶) تعیین می گردد.

جوش شده است و ورقی به همان وزن در طرف دیگر به منظور عدم ایجاد نامتقارنی در جهت عمود ( جهت X ) متصل شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۲: (الف) نمای سه بعدی مدل آزمایشگاهی به همراه خرابای صلب پشت آن و (ب) نمای خرابای صلب به تنهایی

دو ستون واقع در لبه سخت دیافراگم با سطح مقطع مستطیلی و به ابعاد  $۳۰/۳ \times ۸/۲$  میلی‌متر و دو ستون لبه نرم به ابعاد  $۲۹/۱ \times ۶/۲$  میلی‌متر می باشد. ارتفاع آزاد هر ستون  $۵۱۹$  میلی‌متر بوده که توسط دو ورق گیرداری در بالا و پایین به دیافراگم و میز لرزان پیچ شده است. با استفاده از آزمایش کششی که توسط دستگاه یونیورسال<sup>۵</sup> انجام شده است، مدول الاستیسیته فولاد ستون‌ها برابر  $E = ۲/۱ \times ۱۰^۷ \text{ kg/cm}^2$  و مقدار مقاومت تسلیم فولاد ستون‌ها برابر  $F_y = ۲۵۳۵ \text{ kg/cm}^2$  به دست آمده است. با توجه به ابعاد ستون‌ها و اتصال گیردار ستون به کف و دیافراگم صلب مقدار خروج از مرکزیت سختی مدل برابر  $E_{sx} = -۱۸/۷ \text{ cm}$  به دست می آید. جرم مؤثر لرزه ای سازه در جهت جانبی برابر  $۲۲۳$  کیلوگرم بوده و به دلیل

$$[C_{sd}] = \begin{bmatrix} C_y & \frac{E_{dx}}{L_x} C_y \\ \frac{E_{dx}}{L_x} C_y & \frac{C_\theta}{L_x^2} \end{bmatrix} \quad (۱۱)$$

پارامتر دیگری که در رفتار سازه های با میراگر دارای اهمیت است شعاع ژیراسیون میرایی<sup>۴</sup> می باشد. برای تعیین این پارامتر لازم است میرایی پیشگی حول مرکز میرایی مطابق رابطه (۱۲) تعیین گردد..

$$C_{\theta, CSD} = C_\theta - E_{dx}^2 C_y \quad (۱۲)$$

در این صورت شعاع ژیراسیون میرایی در جهت Y برابر است با :

$$\rho_{dy} = \sqrt{\frac{C_{\theta, CSD}}{C_y}} \quad (۱۳)$$

حال پس از بررسی اجمالی معادلات حاکم و پارامترهای مؤثر، در بخش بعد به معرفی مدل آزمایشگاهی پرداخته می شود.

## مشخصات مدل

مدل آزمایشگاهی، یک سازه یک طبقه فولادی با المان‌های ستون و دیافراگم صلب می باشد که براساس محدودیت‌های میز لرزان موجود در آزمایشگاه درمقیاس ۱ به ۶ طراحی شده است. شکل (۲-الف) نمای سه بعدی مدل را نشان می دهد. در پشت سازه اصلی یک خرابای صلب جهت قرارگیری میراگر بر روی آن تعبیه شده که در شکل (۲-ب) نشان داده شده و در ادامه مورد بحث قرار می گیرد. نامتقارنی موجود در سازه مدل به صورت نامتقارنی سختی در نظر گرفته شده و با توجه به محدودیت میز لرزان که از نوع تک مؤلفه‌ای می‌باشد و از طرفی ساده سازی مدل، نامتقارنی تنها در جهت عرضی دیافراگم ( جهت Y ) در نظر گرفته شده است. دیافراگم مدل شامل یک ورق فلزی به ابعاد  $۱۰۰۰ \times ۵۰۰ \times ۱۵$  میلی‌متر بوده که به منظور افزایش جرم آن دو ورق فلزی دیگر با مجموع جرم  $۸۵$  کیلوگرم بر روی آن جوش شده است. برای جلوگیری از تغییر شکل‌های خارج صفحه دیافراگم و صلبیت کامل آن سخت کننده هایی به صورت طولی و عرضی زیر آن اضافه شده است. از آنجا که میراگرها مستقیم به دیافراگم متصل می شوند به منظور اتصال آنها به دیافراگم تسمه ای به طول یک متر در یک طرف آن

نیروی هارمونیک  $P = P_0 \sin \omega t$  مدل سازی گردد، پاسخ ماندگار آن عبارت است از:

$$u = u_0 \sin(\omega t - \phi) \quad (14)$$

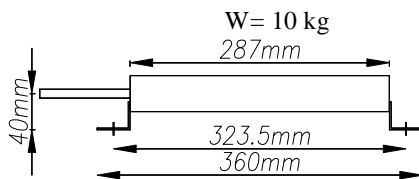
که در آن  $u_0$  بیشینه پاسخ،  $\omega$  فرکانس بار وارده و  $\phi$  اختلاف فاز پاسخ نسبت به فاز نیروی اعمالی است. برای یک سیستم میراگر ویسکوز خطی با ضریب میرایی  $c$  مقدار نیروی استهلاکی برابر است با: [۱۲]

$$f_D = c\dot{u} = c\omega\sqrt{u_0^2 - u^2} \quad (15)$$

رابطه (۱۵) قابل تبدیل به صورت رابطه (۱۶) می باشد:



(الف)



(ب)

شکل ۳: شکل و ابعاد میراگرهای استفاده شده در آزمایش.

$$\left(\frac{u}{u_0}\right)^2 + \left(\frac{f_D}{c\omega u_0}\right)^2 = 1 \quad (16)$$

که منحنی یک بیضی می باشد.

در صورتی که میراگر با رفتار ویسکوالاستیک مدنظر باشد نیروی مقاوم کل آن در نظر گرفته می شود که عبارت است از:

$$f = f_D + f_S = c\omega\sqrt{u_0^2 - u^2} + ku \quad (17)$$

که در آن  $k$  سختی سیستم می باشد. شکل (۴) منحنی رفتاری نیرو تغییر مکان را برای میراگرهای ویسکوز و ویسکوالاستیک نشان می دهد. همان طور که از منحنی رفتاری هر دو میراگر مشخص است در صورتی که بتوان برای یک فرکانس مشخص تحریک تغییرات نیرو بر حسب

متقارن بودن سازه در جهت  $x$  حرکت در این جهت غیر همبسته خواهد بود. جدول (۱) مشخصات دینامیکی مدل را نشان می دهد.

جدول ۱: مشخصات دینامیکی مدل.

مودهای غیر همبسته		
$T_x$ (sec)	$T_y$ (sec)	$T_\theta$ (sec)
۰/۰۸۷۴	۰/۳۴۳۸	۰/۱۱۶۹
مودهای همبسته		
$T_1$ (sec)	$T_2$ (sec)	$T_3 = T_x$ (sec)
۰/۳۵۱۶	۰/۱۱۶۶	۰/۰۸۷۴

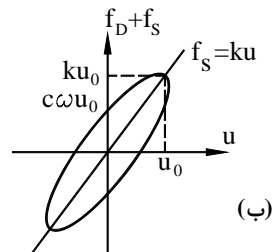
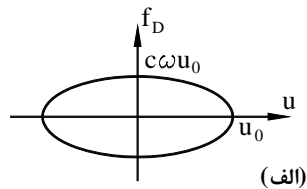
### مشخصات میراگرها و اتصال به مدل

تعداد دو میراگر ویسکوز از نوع سرعت گیر هیدرولیکی<sup>۶</sup> برای اتصال به سازه انتخاب شده اند. مشخصات دینامیکی میراگرها از طریق دو پیچ که جریان مایع را در حالت های کشش و فشار بین دو محفظه آن کنترل می کنند تا حد مشخصی قابل تغییر است.

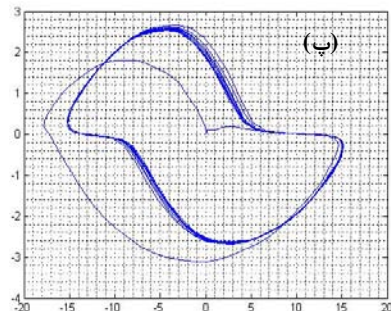
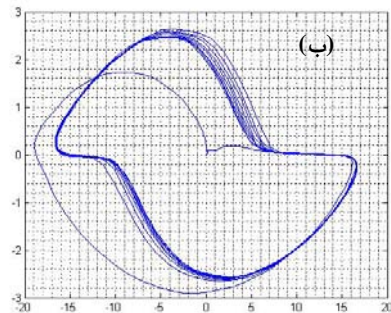
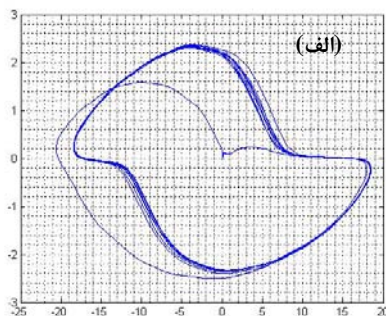
شکل (۳) نمای کلی و ابعاد میراگرها را نشان می دهد. با توجه به یک طبقه بودن مدل می توان میراگرها را به صورت افقی به دیافراگم متصل نمود به گونه ای که یک سر آن به دیافراگم و سر دیگر به تراز سقف یک سازه صلب هم ارتفاع با مدل که بر روی میز لرزان قرار می گیرد متصل گردد. این سازه صلب از ۴ خرپا با المان های دارای مقاومت جانبی زیاد تشکیل شده به طوری که تغییر مکان و شتاب سقف خرپاها عینا برابر تغییر مکان و شتاب میز لرزان است و در شکل (۲-ب) نشان داده شده است. این وضعیت قرار گیری میراگرها موجب می شود که در لرزش های خفیف زلزله تمام تغییر مکان دیافراگم به صورت مؤلفه افقی به دو میراگر اعمال شده و با توجه به تغییر مکان اعمالی بیشتر، میراگرها عملکرد بهتری داشته باشد.

### تعیین مشخصات دینامیکی میراگرها

به منظور تعیین ضریب میرایی میراگرها لازم است منحنی های حاصل از آزمایش آنها با منحنی های رفتاری آنها در حالت تئوریک تطبیق داده شود. با فرض اینکه میراگر به عنوان یک سیستم یکدرجه آزادی تحت



شکل ۴: منحنی رفتاری (الف) میراگرهای ویسکوز و (ب) میراگرهای ویسکو الاستیک.



شکل ۵: منحنی رفتاری به دست آمده برای میراگر شماره ۱ در فرکانس‌های (الف) ۳ هرتز (ب) ۳/۵ هرتز (پ) ۴ هرتز. (محور افقی تغییر مکان بر حسب میلی‌متر و محور قائم نیرو بر حسب کیلونیوتن می باشد).

تغییر مکان را از روی داده های آزمایشگاهی برای یک میراگر تعیین کرد، می توان ضریب میرایی را در آن فرکانس به سادگی تعیین نمود.

به منظور تعیین ضریب میرایی هر کدام از میراگرها، با استفاده از جک هیدرولیکی ۵ تن آزمایش‌های بارگذاری چرخه ای در فرکانس‌های تحریک مختلف ۱ هرتز تا ۶ هرتز بر روی میراگرها انجام شده است.

از آنجا که لازم است میراگرها در کشش و فشار رفتار مشابهی داشته باشند، درابتدای آزمایش برای یک فرکانس دلخواه چندین بار عملیات چرخه ای بر روی هر میراگر تکرار شده و با بررسی نتایج در هر مرحله سعی شده است با استفاده از پیچ‌های تنظیم رفتار کششی و فشاری میراگرها یکسان گردند.

در مرحله بعد برای هر فرکانس آزمایش چرخه ای به طور مجزا انجام شده و ضریب میرایی در آن فرکانس تعیین گشته است.

شکل (۵) منحنی های پاسخ نیرو- تغییر مکان میراگر شماره ۱ را در حالت فرکانس‌های ۳، ۳/۵ و ۴ هرتز نشان می‌دهد. قسمت صاف این منحنی ها نماینده لقی میراگر به دلیل اتصالات میراگر به جک بوده که در انجام محاسبات به منظور تعیین میرایی باید حذف گردند. همان‌طور که از نتایج مشخص است در فرکانس‌های مذکور میراگرها با دقت خوبی به صورت ویسکوز رفتار می کنند.

جدول (۲) ضرایب میرایی به دست آمده از آزمایش را در فرکانس‌های مختلف برای دو میراگر نشان می‌دهد. همان‌طور که از جدول مشخص است ضریب میرایی وابستگی زیادی به فرکانس دارد. مورد دیگری که بر ضریب میرایی تأثیر گذار است دامنه حرکت میراگر می باشد.

در آزمایشگاه با توجه به توان جک هیدرولیکی در هر فرکانس دامنه ماکزیممی تعیین شده است که آزمایش چرخه ای در آن دامنه به میراگرها اعمال شده است.

با توجه به عدم رفتار کامل خطی برای میراگرها در صورت تغییر دامنه بار چرخه ای ضریب میرایی نیز تغییر می کند.

**جدول ۲: ضرایب میرایی میراگرها.**

فرکانس (Hz)	$C_1(N.s/m)$	$C_2(N.s/m)$
۱	۸۴۸۸	۹۳۲۴
۲	۱۰۲۵۰	۱۲۰۱۲
۳	۸۲۱۴	۹۴۳۱
۳/۵	۸۷۵۷	۹۸۵۲
۴	۸۸۰۴	۹۸۵۲
۴/۵	۸۶۸۱	۹۱۹۵
۵	۸۱۱۶	۹۹۴۷
۶	۶۱۵۰	۷۶۹۲

با توجه به فرکانس اصلی سازه میانگین ضریب میرایی بدست آمده برای فرکانس تحریک ۳ هرتز به عنوان ضریب میرایی اسمی آن میراگر در آزمایش تعیین می گردد. از آنجا که ضریب میرایی هم به دامنه و هم به فرکانس بار وابستگی دارد به منظور مقایسه نتایج تحلیل و آزمایشگاهی لازم است ضریب میرایی میراگرها در مدل تحلیلی کالیبره شده و با مدل آزمایشگاهی مقایسه گردند.

**چیدمان میراگرها بر روی مدل**

در این تحقیق پنج حالت مختلف چیدمان میراگر بررسی شده اند که عبارتند از:

- (۱)- حالتی که مرکز میرایی نزدیک مرکز سختی باشد.
- (۲)- حالتی که مرکز میرایی نزدیک مرکز جرم در سمت نرم و دو میراگر در دو لبه باشند.
- (۳) و (۴)- حالتی که مرکز میرایی در طرف مقابل مرکز سختی نسبت به مرکز جرم باشد.
- (۵)- حالتی که مرکز میرایی در لبه نرم باشد.

تفاوت حالت‌های سوم و چهارم در شعاع ژیراسیون میرایی یعنی یکی از پارامترهای کلیدی رفتار می باشد که در بخشهای قبلی تعریف شده است. به گونه ای که در حالت سوم فاصله میراگرها از هم بیشتر و در نتیجه شعاع ژیراسیون میرایی بیشتر است.

به منظور اتصال میراگر به دیافراگم همان‌طور که ذکر شده تسمه سوراخ داری با ۱۴ سوراخ در یک سمت دیافراگم نصب شده و میراگرها نیز بر روی سقف سازه خرپایی قرار داده می شوند. شکل (۶) تسمه سوراخ دار را همراه با شماره سوراخ‌ها نشان می‌دهد. در این شکل سوراخ شماره ۱ در لبه سخت و سوراخ شماره ۱۴ در لبه نرم قرار دارد و مرکز جرم در وسط سوراخ‌های ۷ و ۸

می‌باشد. جدول (۳) نیز حالت‌های مختلف توزیع میراگرها را بر حسب شماره سوراخ‌ها نشان می دهد.

**جدول ۳: موقعیت میراگرها در حالات مختلف توزیع.**

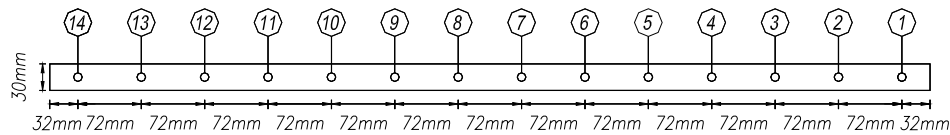
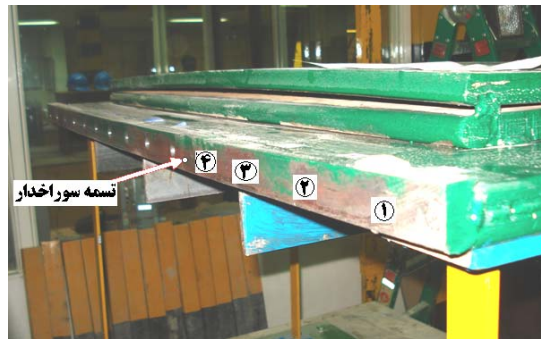
حالت	موقعیت میراگر اول	موقعیت میراگر دوم
۱	۹	۱
۲	۱	۱۳
۳	۶	۱۴
۴	۹	۱۱
۵	۱۲	۱۴

**شتابنگاشت‌ها**

به منظور اعمال لرزش به مدل، ۶ شتابنگاشت مطابق جدول (۴) انتخاب شده اند. محدودیت جابجایی میز لرزان (۳/۵ سانتی‌متر) از یک طرف و لزوم استفاده از شتابنگاشت‌های قوی به منظور وارد عمل شدن میراگرها باعث شده تا در انتخاب شتابنگاشت‌ها آزادی عمل زیادی وجود نداشته باشد. تعداد زیادی شتابنگاشت از سایت PEER [۱۳] انتخاب شده و طی چند مرحله با مقیاس شدن به شتاب ۱/۰g و فیلتر نمودن فرکانس‌های پایین، پردازش شده تا جابجایی بیشینه آنها به ۳/۵ سانتی‌متر محدود شود. در نهایت ۶ شتابنگاشت فوق‌الذکر برای اعمال به مدل آماده شده اند.

**نصب حسگرها**

به منظور اندازه‌گیری شتاب مطلق و تغییر مکان نسبی افقی سازه، چهار حسگر (سنسور) شتاب سنج مطلق یکی بر روی میز لرزان و سه تای دیگر در لبه های نرم، سخت و وسط دیافراگم نصب شده اند. همچنین سه تغییر مکان سنج نسبی نیز به ترتیب در لبه های سخت، نرم و وسط، بین دیافراگم سازه اصلی و سازه صلب نصب شده اند. به علت تغییر محل میراگرها در برخی حالات نیاز به جابجایی حسگرها بوده که با ثبت محل جابجایی و با استفاده از خاصیت صلب بودن دیافراگم، تغییر مکان‌ها و شتاب‌های لبه‌های سخت و نرم و مرکز جرم تعیین شده است. شکل (۷) چگونگی قرار گرفتن میراگرها بر روی سازه صلب را در یکی از حالت‌های توزیع میراگر (حالت ۲) به همراه محل حسگرهای شتاب و تغییر مکان نشان می دهد.



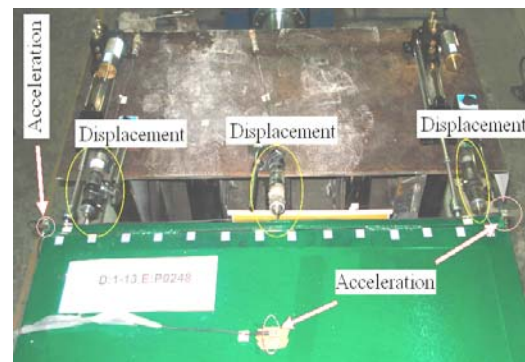
شکل ۶: نمای نسمه سوراخدار جهت اتصال میراگر به دیافراگم به همراه شماره گذاری سوراخ‌های نسمه

جدول ۴: مشخصات شتابنگاشت‌های اعمال شده به میز لرزان (پیش از مقیاس شدن).

	شماره رکورد*	نام	سال	PGA (g)	PGD (cm)
۱	P0746	Loma Prieta	۱۹۸۹	۰/۳۲۳	۳/۲۶
۲	P0248	Mammoth Lakes	۱۹۸۰	۰/۴۰۸	۶/۴۱
۳	P0885	Northridge	۱۹۹۴	۰/۲۱۷	۲/۷۷
۴	P0078	San Fernando	۱۹۷۱	۰/۳۶۶	۱/۶۵
۵	P0629	Whittier Narrows	۱۹۸۷	۰/۲۹۹	۰/۷۸
۶	P1041	Kobe	۱۹۹۵	۰/۲۵۱	۵/۸۳

\* شماره رکوردها بر اساس مشخصات ارائه شده در سایت PEER می‌باشد [۱۳].

شده است. با توجه به امکان وارد شدن سازه به محدوده غیرخطی مدل‌سازی با استفاده از المان‌های فایبر همراه با مشخصات اضافه شده برشی و پیچشی مقاطع ستون‌ها و مشخصات فولاد معادل با شرایط آزمایش ساخته شده است. با توجه به سختی زیاد دیافراگم نسبت به ستون‌ها، سازه بصورت یکطبقه برشی عمل نموده که در مدل‌سازی تحلیلی این موضوع مدنظر قرار گرفته است. به منظور دقت بیشتر، داده‌های شتاب حاصل از حسگر شتاب سنج واقع در روی میز لرزان پس از حذف فرکانس‌های بالای ناشی از ارتعاش محیطی به عنوان ورودی مدل تحلیلی انتخاب شده است. میراگرها به صورت المان‌های با طول صفر مدل‌سازی شده و محل آنها در حالات مختلف با مدل آزمایشگاهی کاملا تطبیق دارد. با توجه به پیچیدگی عملکرد میراگرها و وابستگی ضریب میرایی به عوامل مختلف، نتایج خروجی



شکل ۷: نحوه قرارگیری میراگرها روی سازه صلب در حالت دوم توزیع میراگرها به همراه محل قرارگیری حسگرهای تغییر مکان سنج و شتابسنج.

### مدل تحلیلی

به منظور کنترل بهتر نتایج آزمایش، مدل تحلیلی معادل با استفاده از نرم افزار Opensees [۱۴] ساخته



### تغییر مکان جانبی

شکل (۹-الف) میانگین بیشینه تغییر مکان جانبی لبه سخت، نرم و مرکز جرم سازه را تحت اثر ۶ زمین لرزه برای حالت‌های مختلف توزیع میراگر در مدل آزمایشگاهی و شکل (۹-ب) همین نتایج را برای مدل تحلیلی نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل‌ها مشاهده می‌شود تطبیق قابل قبولی بین نتایج تئوری و آزمایش وجود دارد. در هر دو شکل حالت‌های ۳ و ۴ توزیع میراگر که در آن مرکز میرایی در سمت مخالف مرکز سختی نسبت به مرکز جرم و با فاصله برابر با آن است به عنوان توزیع‌های مناسب تعیین شده است. زیرا در این حالات تغییر مکان لبه سخت و نرم تا حد امکان به هم نزدیک شده و از لحاظ مقدار کمترین حد می‌باشد که موجب می‌گردد نیروی وارد بر المان‌های مقاوم لبه سخت و نرم در یک حد و کمترین مقدار بوده و رفتار سازه بهبود یابد. در نتایج آزمایشگاهی حالت ۳ و در نتایج تحلیلی حالت ۴ به عنوان توزیع بهینه به دست آمده است. با توجه به اختلاف اندک این دو حالت و خطای موجود در آزمایش و تحلیل در مجموع می‌توان گفت در حالتی که مرکز میرایی در جهت مخالف مرکز سختی به مرکز جرم باشد از لحاظ کنترل تغییر مکان مناسبترین حالت می‌باشد.

### چرخش دیافراگم

شکل (۱۰-الف) میانگین بیشینه چرخش دیافراگم را تحت اثر ۶ زمین لرزه ذکر شده برای حالت‌های مختلف توزیع میراگر در مدل آزمایشگاهی و شکل (۱۰-ب) همین پاسخ را در حالت تحلیلی نشان می‌دهد. تطبیق نتایج تئوری و آزمایشگاهی غیر از حالت ۵ در بقیه حالات قابل قبول است. همان‌طور که از نمودارها مشخص است در حالت دوم توزیع میراگر که در آن مرکز میرایی نزدیک به مرکز جرم و متمایل به سمت نرم است و دو میراگر در دو لبه می‌باشند (ایجاد بیشترین شعاع ژیراسیون)، کمترین چرخش و در حالت ۵ که در آن دو میراگر در لبه نرم قرار دارند، بیشترین چرخش ایجاد می‌گردد. بنابراین توزیع مناسب میرایی که تغییر مکان جانبی را کنترل می‌کند لزوماً نمی‌تواند چرخش دیافراگم را کنترل کند و بالعکس.

اختلاف بین نتایج در حالت ۵ (تمرکز میراگرها در لبه نرم) بدلیل افزایش شدید ظرفیت میرایی در یک سمت و در نتیجه کاهش تغییر مکان افقی سازه در آن سمت می‌باشد که به نوبه خود موجب عدم عملکرد کامل ویسکوز میراگرها

تغییر مکان جانبی در مدل آزمایشگاهی و مدل تحلیلی در حالت دوم توزیع میراگرها و برای زلزله Loma Prieta با هم مقایسه شده و ضرایب میراگرها با توجه به آن کالیبره شده و به عنوان ضرایب میرایی در حالت تحلیلی برای کلیه حالات استفاده شده است. ضرایب کالیبره شده برای میراگر اول برابر  $C_1=3550 \text{ N.S/m}$  و برای میراگر دوم برابر  $C_2=4550 \text{ N.S/m}$  می‌باشد.

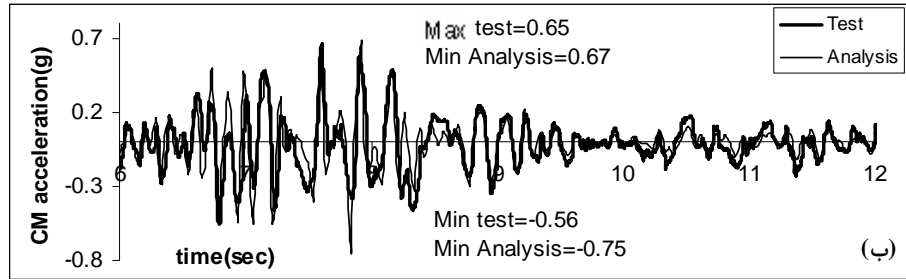
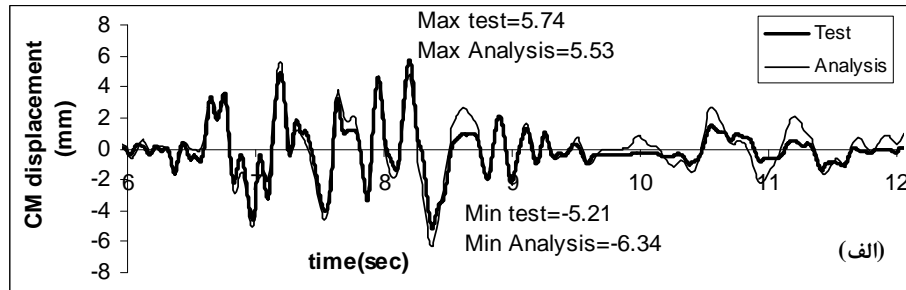
### مقایسه تطابق پاسخ‌های تحلیل و آزمایش

به منظور کنترل بهتر، تاریخچه زمانی پاسخ مدل تحلیلی و مدل آزمایشگاهی در حالات مختلف توزیع میراگرها با هم مقایسه شده اند. شکل (۸-الف) مقایسه تغییر مکان مرکز جرم سازه را برای زلزله Whittier Narrows در حالت سوم توزیع میراگرها (میراگرها در نقاط ۶ و ۱۴) بین مدل آزمایشگاهی و تحلیلی نشان می‌دهد. شکل (۸-ب) نیز مقایسه شتاب مرکز جرم سازه را در این حالت نشان می‌دهد. به منظور مقایسه بهتر تنها بخشی از تاریخچه زمانی در قسمت اوج شتابنگاشت نشان داده شده است.

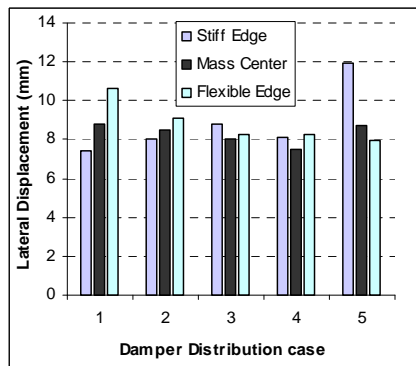
همان‌طور که از اشکال مشخص است تطابق قابل قبولی بین روند نتایج تئوری و آزمایشگاهی در هر دو پاسخ مشهود است ولی در حالت شتاب جانبی، خطای بیشتری در تخمین بیشینه مقادیر نسبت به تغییر مکان جانبی دیده می‌شود. از طرفی شکل (۸-الف) نشان می‌دهد در حالتی که شتاب زمین‌لرزه کاهش می‌یابد پاسخ مدل آزمایشگاهی نسبت به مدل تحلیلی کاهش پیدا می‌کند که نمایانگر عدم عملکرد صحیح میراگرها به دلیل دامنه کم تغییر مکان می‌باشد. در این حالت فرض رفتار ویسکوز برای میراگرها دچار خدشه شده و میراگرها بخشی از نیروی وارده را نظیر تکیه گاه تحمل می‌کنند. نتایج این شکل کم و بیش برای سایر زمین لرزه‌ها و حالت‌های توزیع میراگر نیز به دست آمده است.

### نتایج تحلیل و آزمایش

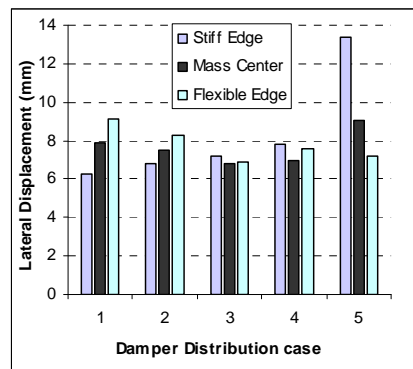
در این بخش میانگین نتایج حاصل از آزمایش سازه تحت اثر ۶ شتابنگاشت برای پاسخ‌های مهم سازه در هر کدام از حالات توزیع میراگر ارائه و با نتایج تحلیلی مقایسه می‌شود.



شکل ۸: مقایسه نتایج تئوری و آزمایشگاهی (الف) تغییر مکان و (ب) شتاب جانبی مرکز جرم سازه تحت زلزله Whittier Narrows برای حالت سوم توزیع میراگرها

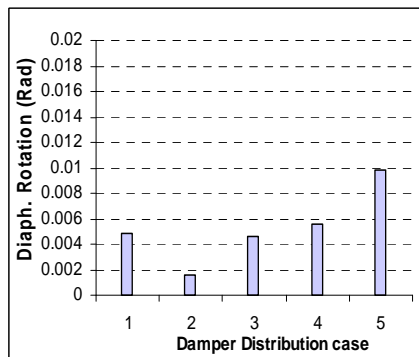


(ب)

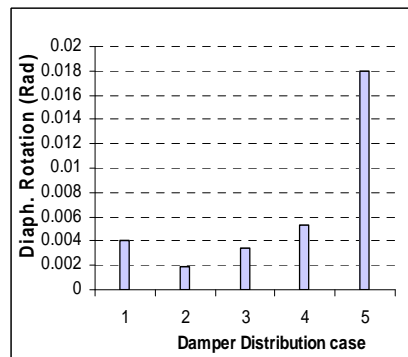


(الف)

شکل ۹: میانگین بیشینه تغییر مکان لبه سخت، نرم و مرکز جرم سازه تحت ۶ زلزله در (الف) مدل آزمایشگاهی و (ب) مدل تحلیلی.



(ب)



(الف)

شکل ۱۰: میانگین بیشینه چرخش دیافراگم سازه تحت اثر ۶ زلزله در (الف) مدل آزمایشگاهی و (ب) مدل تحلیلی.

است. با وجود اختلاف نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی در هر دو مورد حالت‌های ۱ و ۴ توزیع میراگر کمترین شتاب جانبی را ایجاد کرده اند. از آنجا که در حالت ۱ مرکز میرایی نزدیک مرکز سختی و در حالت ۴ در جهت مخالف مرکز سختی می باشد، نتیجه گیری می شود که با مدل تحلیلی و آزمایشگاهی ساخته شده نمی توان حالت یگانه ای را تعیین کرد تا وضعیت شتاب جانبی نقاط مختلف دیافراگم را به حداقل برساند و لازم است مشخصات مدل و میراگر به حالات واقعی نزدیک تر گردد. لازم به ذکر است نتایج حاصل برای برش پایه مانند نتایج شتاب جانبی مرکز جرم بوده و در این حالت نیز همسانی بین نتایج تحلیلی و آزمایش فراهم نشده است.

### نتیجه گیری

در این مقاله اثر توزیع میراگرهای ویسکوز بر رفتار پیچشی ساختمان‌های نامتقارن یک طبقه به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است. اعم نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

۱- ضریب میرایی میراگرهای ویسکوز به فرکانس و دامنه حرکت بار وارده بستگی زیادی دارد و لازم است ضریب تعیین شده در آزمایش میراگر هنگام تطبیق با نتایج تئوری با توجه به این عوامل کالیبره شود.

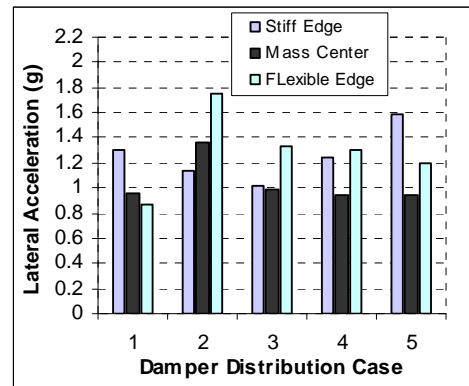
۲- نتایج تحلیلی و آزمایش برای پاسخ تغییر مکان جانبی تطبیق بیشتری نسبت به شتاب جانبی دارد. دلیل این امر حساسیت بیشتر حسگرهای شتابسنج به ارتعاشات مزاحم محیطی است که فیلتر کردن آنها در نتایج ایجاد خطا می کند.

۳- از بین توزیعهای مختلف در نظر گرفته شده برای میراگر در صورت قرارگیری مرکز میرایی در سمت مخالف مرکز سختی نسبت به مرکز جرم و با فاصله برابر با آن، حالت بهینه برای کنترل تغییر مکان جانبی بدست می آید به گونه ای که مقدار ماکزیمم تغییر مکان سمت سخت و نرم به هم نزدیک شده و هردو در حالت کمینه قرار می گیرند. این نتایج مطالعات قبلی [۴] را تصدیق می کنند.

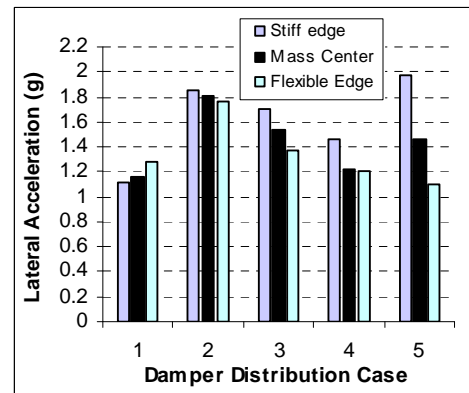
۴- در صورتی که مرکز میرایی نزدیک مرکز جرم اندکی به سمت نرم قرار گیرد و شعاع ژیراسیون میرایی حداکثر شود کمتری میزان چرخش ماکزیمم در دیافراگم اتفاق می افتد.

۵- با توجه به عدم تطابق قابل قبول نتایج تحلیلی و آزمایش برای پاسخ شتاب جانبی و برش پایه، امکان یافتن توزیع

شده و در واقع میراگرها تا حدی مانند تکیه گاه عمل کرده اند. بنابراین نتایج آزمایشگاهی در این حالت دچار خطا شده اند.



(الف)



(ب)

شکل ۱۱: میانگین بیشینه شتاب جانبی سمت سخت، نرم و مرکز جرم سازه تحت اثر ۶ زلزله در (الف) مدل آزمایشگاهی و (ب) مدل تحلیلی.

### شتاب جانبی و برش پایه

شکل (۱۱-الف) میانگین شتاب جانبی دیافراگم ناشی از ۶ زلزله را در لبه های سخت، نرم و مرکز جرم سازه برای حالت‌های مختلف توزیع میراگر در مدل آزمایشگاهی نشان می دهد. در شکل (۱۱-ب) نیز نتایج مربوطه در مدل تحلیلی ارائه شده است. بر خلاف تغییر مکان جانبی و چرخش دیافراگم، همسانی قابل قبولی بین نتایج تئوری و آزمایشگاهی وجود ندارد. این عدم تطابق را می توان به حسگرهای شتاب سنج نسبت داد. خروجی‌های شتاب به دست آمده از شتاب سنج‌ها دارای فرکانس‌های بالا و میانی ناشی از عوامل محیطی بوده که فیلتر کردن آنها خطای قابل توجهی را در مقادیر ماکزیمم تاریخچه زمانی شتاب جانبی نقاط ایجاد نموده

مناسب میراگر که بتوان شتاب جانبی سازه را در آن کنترل کرد و یا برش پایه را به کمترین حد رساند، در این تحقیق حاصل نشده است. ۶- مقایسه نتایج مدل‌سازی تحلیلی و آزمایشگاهی برای چرخش دیافراگم و تغییر مکان جانبی نشان می‌دهد

مدل‌سازی تحلیلی کفایت لازم برای محاسبه این پاسخ‌ها را دارد. در مورد پاسخ شتاب جانبی و برش پایه با توجه به میزان اختلاف لازم است خطاهای قرائت شتاب در مدل آزمایشگاهی برطرف تا نتیجه گیری صحیح حاصل گردد.

## مراجع

- 1 - De la Llera, J. C., Chopra, A. K. and Almazan, J. L. (2001). "Three-dimensional inelastic response of an RC building during the Northridge earthquake." *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, Vol. 127, No. 5, PP. 482-489.
- 2 - Paulay T. (2001). "A re-definition of the stiffness of reinforced concrete elements and its implications in seismic design." *Structural Engineering International*. Vol. 11, No. 1, PP. 36-41.
- 3 - Myslimaj, B. and Tso, W. K. (2002). "A strength distribution criterion for minimizing torsional response of asymmetric wall-type systems." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, No. 1, PP. 99-120.
- 4 - Goel, R. K. (1998). "Effects of supplemental viscous damping on seismic response of asymmetric-plan systems." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, No. 2, PP. 125-141.
- 5 - Goel, R. K. (2000). "Passive control of earthquake-induced vibration in asymmetric buildings." *Proceeding of 12<sup>th</sup> world conference on earthquake engineering*.
- 6 - Goel, R. K. and Booker C. A. (2001). "Effects of supplemental viscous damping on inelastic seismic response of asymmetric systems." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 30, No. 3, PP. 411-430.
- 7 - De La Llera, J. C., Almazan, J. L., Vial, I. J., Ceballos, V. and Garcia, M. (2004). "Analytical and experimental response of asymmetric structures with friction and viscoelastic dampers." *Proceeding of 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, paper No. 531.
- 8 - De La Llera, J. C., Almazan, J. L. and Vial, I. J. (2005). "Torsional balance of plan- asymmetric structures with frictional dampers: Analytical results." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 34, No. 9, PP. 1089-1108.
- 9 - De La Llera, J. C., Vial, I. J., Almazan, J. L. and Fighetti, E. C. (2006). "Balanced design of asymmetric buildings with energy dissipation devices." *Proceeding of the 8<sup>th</sup> National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, USA, Paper No. 1670.
- 10 - Vial, I. J., De La Llera, J. C., Almazan, J. L. and Ceballos, V. (2006). "Torsional balance of plan-asymmetric structures with frictional dampers: Experimental results." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 35, No. 15, PP. 1875-1898.
- 11 - Mansoori, M.R., Moghadam A.S. (2009). "Using viscous damper distribution to reduce multiple seismic response of asymmetric structures." *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65, No. 12, PP. 2176-2185.
- 12 - Chopra A. K. (1995). *Dynamics of structures: (Theory and applications to earthquake engineering)*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- 13 - Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). (2000). *Strong Motion Database*, University of California, Berkeley, Web page: <http://peer.berkeley.edu/smcat>
- 14 - McKenna F., Fenves G. L., Scott M. H. and Jeremic B. (2000). *Open System for Earthquake Engineering Simulation*. Web page: <http://OpenSees.berkeley.edu>.

---

**واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن**

- 1- Viscous dampers
- 2- Viscoelastic dampers
- 3- Frictional dampers
- 4- Damping radius of gyration
- 5- Universal
- 6- Hydraulic Speed Regulator