

اثر میراگرهای لزج مایع در طراحی و بهسازی ساختمان‌های بتن آرمه تحت زلزله

ابوالحسن وفائی (استاد)

شهاب‌الدین حاتمی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

همایون اسمعیل پوراستکانچی (استاد یار)

مهیار جاوید روزی (دانشجوی دکترا)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

نصب میراگر (های لزج (ویسکوز) مایع در ساختمان‌ها، یکی از روش‌های جدید بهسازی ساختمان‌های موجود یا طراحی ساختمان‌های نو در برابر زلزله است. تحقیقات انجام شده پیرامون این روش، که در حدود یک دهه عمر دارد، بسیار محدود بوده و لازم است در این رابطه تحقیقات جامعی که راه‌گشای مهندسین سازه برای استفاده از این شیوه باشد، صورت گیرد. در این نوشتار با استفاده از یک سری تحلیل‌های عددی بر روی مدل‌های غیرخطی ساختمان‌های بتن آرمه، تأثیر نصب میراگرهای لزج مایع در طبقات این ساختمان‌ها، مورد ارزیابی قرار گرفته و سعی شده است که با انتخاب مدل‌هایی با تعداد طبقات و عرض دهانه‌های مختلف و همچنین اعمال زلزله‌های گوناگون بر سازه، نتایج جامعی در این زمینه به دست آید.

از طریق نصب میراگرهایی با درصد میرایی مناسب، پارامترهایی نظیر جابه‌جایی نسبی طبقات، شاخص آسیب سازه و تغییر مکان مطلق طبقات کاهش چشم‌گیری می‌یابد و تغییر شکل‌های غیرخطی در عضوهای سازه به حداقل می‌رسد. همچنین علی‌رغم کاهش نیروها در عضوهای سازه‌ی، برش طبقات و برش پایه در مواردی، به‌ویژه در درصدهای میرایی بالا، افزایش می‌یابند. در این تحقیق همچنین در مورد میرایی الحاقی بهینه به منظور طراحی میراگرها برای قاب‌های مختلف بحث شده است.

مقدمه

زلزله پیش‌بینی کرد. در نتیجه رفتار رفت و برگشتی با تکرار چرخه‌های غیر خطی، موجب کاهش مقاومت عضوهای سازه‌ی در برابر زلزله می‌شود.

اخیراً روش‌هایی برای پاسخ به کاستی‌های روش مرسوم طراحی، و همچنین برای اصلاح و بهسازی ساختمان‌های قدیمی‌تر که مقاومت کافی در برابر زلزله‌های شدید ندارند و عموماً جزئیات شکل‌ناپذیر دارند، ابداع شده است. یکی از این روش‌ها که اخیراً مطرح شده، استفاده از ابزارهای مستهلک‌کننده انرژی یا میراگرها در ساختمان‌ها است که عملاً کمتر از یک دهه است که مورد استفاده قرار می‌گیرد. میراگرهای لزج مایع از جمله‌ی این ابزارها هستند، که بر اساس اتلاف انرژی از طریق عبور جریان مایع از میان مجراهای یک پیستون عمل می‌کنند.

به منظور تحقیق پیرامون عملکرد این میراگرها در ساختمان‌ها، برای اولین بار در سال ۱۹۹۲، آنها را در مدل‌های سازه فولادی یک طبقه و سه طبقه برای مقابله با بارهای لرزه‌ی مورد استفاده قرار دادند.^[۱] پس از آن، در سال ۱۹۹۵، پیرامون اثر این میراگرها در اصلاح مدل قاب بتن آرمه‌ی سه طبقه مطالعه شد.^[۲] شرکت تیلور نیز که عمده‌ترین تولیدکننده‌ی این نوع میراگرهاست، از آنها در اصلاح

روش مرسوم طراحی ساختمان‌ها بر این اصل استوار است که عضوهای سازه‌ی در زلزله‌های متوسط نباید آسیب مهمی ببینند. در زلزله‌های شدید ممکن است آسیب‌های قابل توجهی به سازه وارد شود، اما سازه باید پایدار بماند و جان ساکنین به مخاطره نیفتد. بنابراین با توجه به اینکه برای رعایت ملاحظات اقتصادی، زلزله‌های متوسط مبنای طراحی قرار گرفته‌اند، سازه در زلزله‌های شدید وارد تغییر شکل‌های غیرخطی خواهد شد؛ اما هرچه شکل‌پذیری سازه بیشتر باشد، این‌گونه تغییر شکل‌ها با ایمنی بیشتری از سر گذرانده خواهند شد و باعث خرابی سازه نمی‌شوند.

رفتار غیرخطی نوعاً در نواحی بحرانی خاصی از سازه — معمولاً در تیرها و نزدیک محل اتصال تیر و ستون یا در پای ستون‌ها — اتفاق می‌افتد. از آنجا که این اعضا، المان‌های اصلی حامل بار ثقلی نیز هستند، رفتار غیرخطی در این نواحی ضمن اینکه اتلاف انرژی محسوسی را ممکن می‌سازد، اغلب موجب وارد آمدن آسیب قابل توجهی به عضوهای سازه‌ی می‌شود. اگرچه مقررات زیادی به منظور طراحی و ساخت عضوهای سازه‌ی شکل‌پذیر در آئین‌نامه‌ها منظور شده است، به راحتی نمی‌توان رفتار شکل‌پذیر یک سازه را در برابر

تغییر شکل‌های محوری در برنامه با استفاده از یک فتر کشسان خطی مدل شده‌اند.

برنامه‌ی IDARC منحنی گشتاور-انحنای را برای هر مقطع بتن آرمه، از یک مدل لایه‌بندی و با توجه به خصوصیات غیرخطی بتن و فولاد در لایه‌های مختلف آن مقطع ارائه می‌دهد. ظرفیت نهایی تغییر شکل در این منحنی زمانی است که بتن به کرنش نهایی خود برسد، یا یکی از میلگردها به مقاومت نهایی فولاد برسد. تحلیل دینامیکی غیرخطی در این برنامه با استفاده از ترکیبی از روش انتگرالی *Newmark-Beta* و روش شبه نیرو انجام می‌شود. اثرات $P-\Delta$ نیز با اضافه کردن یک ماتریس سختی هندسی به ماتریس سختی عضوها در نظر گرفته می‌شود. [۴]

میراگرهای لزوج مایع

سیستم‌های مستهلک‌کننده‌ی انرژی را عموماً می‌توان به سیستم‌های هیسترتیک — که به تغییر مکان وابسته‌اند — و سیستم‌های لزوج — که به سرعت وابسته‌اند — تقسیم کرد. یکی از سیستم‌های لزوج، میراگرهای لزوج مایع‌اند. میراگرهای لزوج مایع با عبور جریان مایع از میان مجاری تعبیه شده در یک پیستون، باعث تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی گرمایی می‌شوند. این میراگرها تنها چند سالی است که به‌عنوان ابزار مستهلک‌کننده‌ی انرژی لرزه‌ی در ساختمان‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند که عموماً در بادبندهای قطری یا ۸ شکل نصب می‌شوند، اما پیش از این کاربردهای متعددی در زمینه‌ی ایزولاسیون ارتعاش و ضربه در تجهیزات نظامی و فضایی، و اخیراً نیز در سیستم‌های جداسازی لرزه‌ی داشته‌اند.

رفتار لزوج خطی، عدم حساسیت به تغییرات دما، ابعاد کوچک در مقایسه با نیروی متحمل شده، درجه‌ی اطمینان بالا و عمر طولانی برخی از مشخصه‌های جذاب این نوع میراگرها هستند. در شکل ۱ ساختار یک میراگر لزوج مایع و در شکل ۲ قابی که در آن میراگرهای لزوج به‌صورت قطری نصب شده‌اند، نشان داده شده است. این نوع میراگرها در محدوده‌ی فرکانس‌های طبیعی ساختمان‌های متداول، عموماً رفتار لزوج خطی دارند و نیروی تعادلی به‌صورت زیر از خود نشان می‌دهند:

$$F_d(t) = C u(t) \quad (1)$$

که در آن C ثابت میرایی میراگر و u سرعت نسبی حرکت دو انتهای میراگر است.

اگر میراگر تحت حرکتی همساز به‌صورت زیر قرار گیرد:

$$u(t) = u_0 \sin \Omega t \quad (2)$$

که در آن Ω فرکانس دورانی نوسان باشد، در این صورت نیروی

چند ساختمان در برابر بارهای لرزه‌ی استفاده کرده است [۳]. اما هنوز تحقیقات جامعی پیرامون کاربرد این میراگرها در ساختمان‌های مختلف، که راه‌گشای مهندسین سازه در این زمینه باشد، انجام نشده است و تحقیقات فوق‌عمدتاً در یک سازه‌ی مشخص و با میراگرهایی با خصوصیات معین صورت گرفته است.

در این تحقیق، تلاش شده است تا کارایی میراگرهای لزوج مایع در مقاوم‌سازی ساختمان‌های بتن آرمه در برابر زلزله مورد بررسی قرار گیرد و با تغییر پارامترهای مختلف اثرگذار بر آن، از جمله خصوصیات ساختمان بتنی، ویژگی‌های میراگر مورد استفاده و نوع زلزله‌ی تحمیلی، به نتایج به‌دست آمده جامعیت لازم داده شود. از آنجا که هدف این تحقیق، کاهش آسیب‌های ناشی از تغییر شکل‌های غیرخطی است، از روش تحلیل غیرخطی استفاده شده است. در ادامه، به چگونگی تحلیل غیرخطی ساختمان‌های بتن آرمه و میراگرهای لزوج می‌پردازیم.

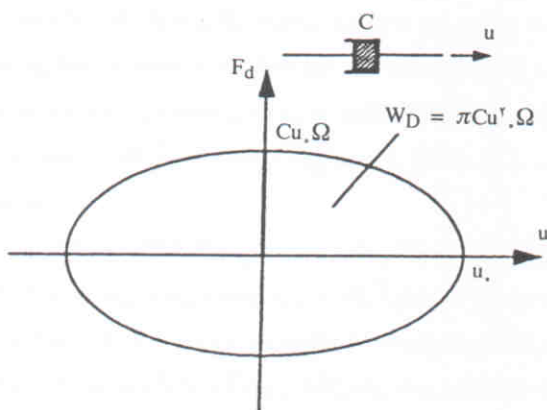
روش تحلیل دینامیکی غیرخطی ساختمان‌های بتن آرمه

در اینجا برای تحلیل غیرخطی مدل‌های مورد نظر از برنامه‌ی IDARC 4.0 استفاده شده است. این برنامه که عمدتاً در کارهای تحقیقاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد، در مقایسه با سایر برنامه‌های غیرخطی، از قابلیت‌های بالایی در تحلیل غیرخطی دوبعدی ساختمان‌های بتن آرمه برخوردار است و به‌کمک آن می‌توان میراگرهای مختلف را نیز در قاب‌ها مدل کرد. در این برنامه فرض بر این است که دیافراگم‌های کف طبقات به‌صورت پیوندهای صلب عمل می‌کنند. در نتیجه در هر طبقه تنها یک درجه آزادی مورد نیاز خواهد بود. بنابراین ساختمان به‌صورت تعدادی از قاب‌های عمودی که به‌وسیله‌ی دیافراگم‌های صلب افقی به هم مرتبط شده‌اند، مدل شده است.

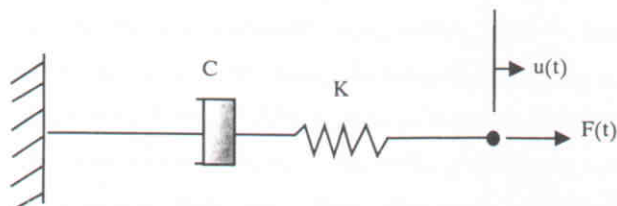
در برنامه‌ی IDARC می‌توان در عضوهای سازه‌ی، تغییر شکل‌های خمشی، برشی و محوری را در نظر گرفت، اما تنها در عضو تیر از تغییر شکل‌های محوری صرف نظر شده است. تغییر شکل‌های برشی و خمشی در یک فرمولاسیون شکل‌دهی خمیری گسترده با هم ترکیب شده‌اند. در این مدل، رفتار غیرخطی تنها به‌گروه‌های عضو اختصاص داده نمی‌شود بلکه مقاطع مختلف در طول عضو، بسته به میزان غیرخطی شدن، مشخصه‌های نرمی متفاوتی دارند. در این برنامه برای مدل کردن رفتار هیسترتیک عضوهای بتن مسلح در برش و خمش، از مدل سه‌پارامتری پارک — که به‌خوبی می‌تواند رفتار هیسترتیک عضوهای بتن آرمه‌ی مختلف را با تغییر در سه پارامتر نماینده‌ی کاهش مقاومت و اثر نوردکاری^۲ در مقطع مورد نظر مدل کند — استفاده شده است.

این مدل‌ها باید نماینده‌ی دو گروه از ساختمان‌ها باشند؛ یک گروه ساختمان‌هایی بتنی هستند که به‌علت عدم وجود مقررات دقیق آئین‌نامه‌ی برای طراحی لرزه‌ی در زمان ساخت، مقاومت و نرمی لازم برای تحمل ایمن زلزله‌های متوسط و شدید را ندارند، و دیگری ساختمان‌هایی که لازم است از ابتدا با کمک میراگرهای لزج در برابر بارهای زلزله طراحی شوند، در نتیجه خود ساختمان به‌تنهایی در برابر این بارها مقاوم نیست. برای این منظور در این تحقیق، قاب‌ها برای تمام بار ثقلی به همراه ۷۵٪ بار جانبی زلزله پیشنهادی آئین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ایران طراحی شده‌اند تا از این طریق مدل‌های ایجاد شده نیازمند اصلاح لرزه‌ی باشند. بازگذاری‌های ثقلی و زلزله براساس یک ساختمان مسکونی متعارف در منطقه‌ی با خطر نسبی بالا انجام گرفته‌اند. مصالح نیز از مصالح رایج در ایران انتخاب شده‌اند.

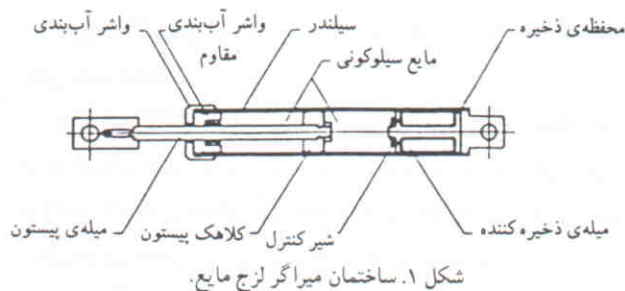
تحلیل کشسان مدل‌های اولیه به‌منظور طراحی این مدل‌ها با استفاده از برنامه‌ی آشنای SAP انجام شده و طراحی قاب‌ها نیز به کمک برنامه‌ی SAPCON و از روش مقاومت نهایی صورت گرفته است. در مرحله‌ی طراحی، نوع تیرها و ستون‌ها هر سه طبقه یک بار تغییر کرده و طرح ستون‌های داخلی و خارجی متفاوت است. به هر قاب یک شماره‌ی مشخصه تعلق گرفته که به‌صورت «عرض دهانه (m) - تعداد طبقات» نشان داده می‌شود. مثلاً منظور از قاب ۶-۵، قاب پنج طبقه با عرض دهانه‌ی ۶ متر است.



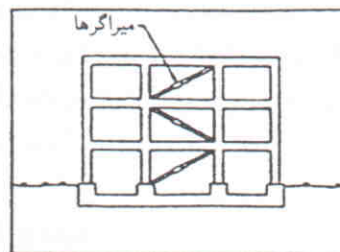
شکل ۳. ابزار میرایی خطی.



شکل ۴. مدل میراگر لزج و بادبند قطری.



شکل ۱. ساختمان میراگر لزج مایع.



شکل ۲. میراگرها در بادبندهای قطری.

میراگر برابر است با:

$$F_d(t) = C u_0 \Omega \cos \Omega t \quad (3)$$

با حذف زمان از رابطه‌های ۲ و ۳ رابطه‌ی بین نیرو و تغییر مکان به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\left(\frac{F_d}{C u_0 \Omega}\right)^2 + \left(\frac{u}{u_0}\right)^2 = 1$$

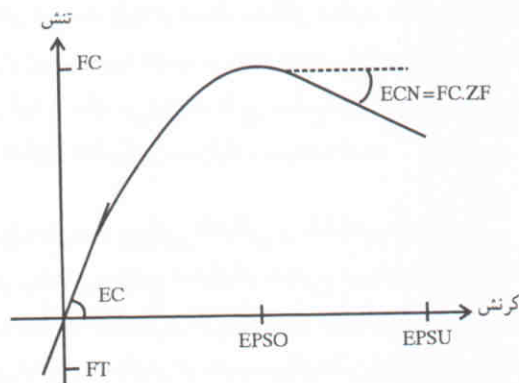
در نتیجه نمودار نیرو - تغییر مکان میراگر لزج خطی، به صورت نشان داده شده در شکل ۳ خواهد بود که در این شکل W_D انرژی مستهلک شده به‌وسیله‌ی میراگر در یک چرخه است. برای مدل کردن مجموعه‌ی بادبند قطری و میراگر نیز می‌توان از یک میراگر لزج خطی با ثابت میرایی C و یک فنر خطی با سختی K که به هم سری شده‌اند، استفاده کرد. (شکل ۴)

طراحی مدل اولیه‌ی ساختمان‌های بتن‌آرمه

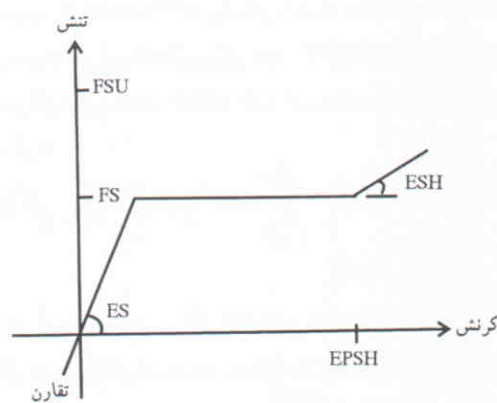
قدم اول در بررسی اثر میراگرها آن است که مدل‌هایی از ساختمان‌های بتن‌آرمه ایجاد کنیم تا بتوانیم اثرات زلزله را بر روی این مدل‌ها - با میراگرها و بدون آنها - بررسی کنیم. در این تحقیق ساختمان‌های بتن‌آرمه به‌صورت قاب‌های دوبعدی مدل شده‌اند که هر قاب تنها در صفحه‌ی خود تغییر مکان می‌دهد. تعداد قاب‌هایی که مبنای تحلیل قرار خواهند گرفت، ۹ عدد هستند که دارای تعداد طبقات و عرض دهانه‌های مختلف‌اند. این قاب‌ها شامل سه قاب یک طبقه، سه قاب پنج طبقه و سه قاب ده طبقه هستند که هر کدام دارای سه دهانه بوده و عرض دهانه‌ها در قاب‌های مختلف، ۴، ۶ و ۸ متر است. ارتفاع تمام طبقات نیز ۳ متر در نظر گرفته شده است.

مدل غیرخطی قاب‌های طراحی شده

بعد از آنکه قاب‌های مورد نظر طراحی شدند، باید به منظور انجام تحلیل غیرخطی در برنامه‌ی IDARC مدل شوند. در این تحقیق قاب‌های موازی در یک ساختمان مجهز به میراگر، به صورت یک در میان به میراگرهای لزج خطی مجهز شده‌اند و کف طبقات به صورت دیافراگم صلب فرض شده تا این قاب‌های موازی دارای تغییر مکان یکسان باشند. میراگرها در دهانه‌ی میانی قاب و در تمام طبقات آن با خصوصیات یکسان و به صورت قطری نصب شده‌اند. (شکل ۲)



شکل ۵. منحنی تنش-کرنش بتن.



شکل ۶. منحنی تنش-کرنش فولاد.

نوردکاری (γ) برای این مدل به ترتیب برابر ۲/۰، ۰/۱ و ۰/۵ اختیار شدند تا مدلی شبیه به مدل Takeda حاصل آید. [۶] مدل Takeda از مدل‌هایی است که تطابق بسیار خوبی با رفتار واقعی عضوهای بتن آرمه‌ی خمشی دارد. [۷]

در این تحقیق برای مدل کردن هر عضو قاب، به اندازه‌ی نصف بعد اتصال در هر طرف عضو، ناحیه‌ی صلب در نظر گرفته شده تا بدین وسیله اثر افزایش سختی عضوها در محل اتصالات منظور شود. اثرات P-Δ نیز در تحلیل‌ها در نظر گرفته شده است. درصد میرایی ذاتی (ξ) برای مود اول و دوم ارتعاش سازه برابر ۵٪ میرایی بحرانی در نظر گرفته شده که برای ساختمان‌های بتن آرمه‌ی بی‌که وارد محدوده‌ی غیرخطی می‌شوند، فرض مناسبی است. ماتریس میرایی ذاتی [C] از روش رالی، به کمک ماتریس‌های سختی و جرم، و براساس درصد میرایی ذاتی مودهای اول و دوم محاسبه می‌شود.

با توجه به فرضیات فوق، مدل غیرخطی قاب‌های بتن آرمه شکل می‌گیرد و تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی تحت زلزله‌های مختلف صورت می‌گیرد. در این تحقیق مؤلفه‌ی افقی سه زلزله‌ی السنترو (PGA=۰/۲۷۶g) و مکزیکوسیتی (PGA=۰/۳۴۸g)، اوکلند (PGA=۰/۲۷۶g) و مکزیکوسیتی (PGA=۰/۰۹g) مبنای تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی قرار

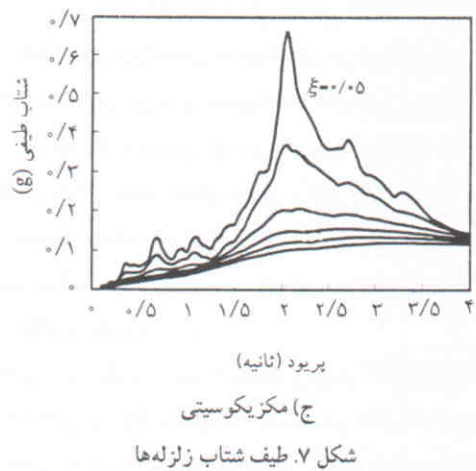
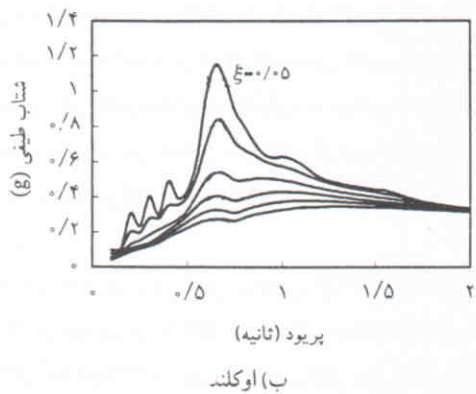
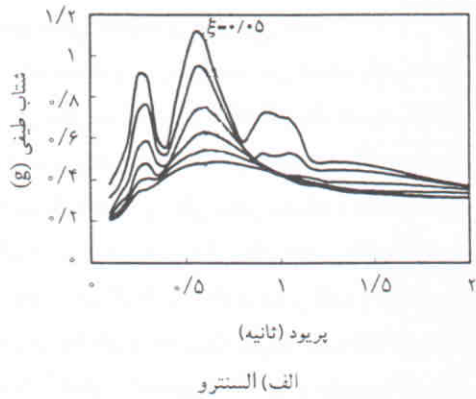
نمودار گشتاور-انحنای مقاطع تیر و ستون با استفاده از مدل لایه‌یی و با توجه به منحنی تنش-کرنش فولاد و بتن در هر لایه‌ی آن مقطع به دست آمده است. در شکل ۵ منحنی تنش-کرنش بتن برای بتن محصور در خاموت‌های مستطیلی، به روشی شناخته شده [۵] رسم شده است. در این تحقیق با استفاده از این منحنی که به خوبی رفتار بتن را مدل می‌کند، مقادیر منظور شده برای پارامترها به صورت زیر است:

مقاومت فشاری بتن غیر محصور $(f'_c)FC$ ؛ 28.0 kg/cm^2 ؛
مدول الاستیسیته‌ی بتن (EC) $2.05 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ ؛ مقاومت کششی بتن (FT) 34 kg/cm^2 ؛ کرنش بتن در حداکثر تنش فشاری (EPSO) برابر 0.002 ؛ و شیب شاخه‌ی نزولی منحنی (ZF) بسته به میزان محصور شدگی بتن و براساس خاموت‌های عرضی تعیین می‌شود. در قاب‌های مورد نظر، تیرها با خاموت‌های مستطیلی به قطر 10 mm محصور شده‌اند که فاصله‌ی آنها در نزدیکی اتصالات 10 cm است. ستون‌ها نیز دارای خاموت‌های مربعی با قطر 10 mm و به فاصله‌ی 35 cm هستند. نتیجه‌ی این نوع خاموت‌گذاری، قاب بتن آرمه‌ی بی‌شکل پذیری کم است که با شیوه‌ی اجرای بسیاری از ساختمان‌های موجود مطابقت بیشتری دارد.

منحنی تنش-کرنش مورد استفاده برای فولاد آرماتورها که یک تقریب سه‌خطی از رفتار واقعی فولاد است، در شکل ۶ نشان داده شده است. مقادیر پارامترهای مشخصه‌ی این منحنی عبارت‌اند از:

مقاومت تسلیم فولاد $(F_y)FS$ ؛ 40.0 kg/cm^2 ؛ مدول الاستیسیته‌ی فولاد (ES) $2.06 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ ؛ مقاومت نهایی فولاد (FSU) 56.0 kg/cm^2 ؛ مدول الاستیسیته در مرحله‌ی سخت‌شدگی (ESH) $1.35 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ ؛ و کرنش فولاد در شروع مرحله‌ی سخت‌شدگی (EPSH) برابر 0.03 منظور شده‌اند.

بعد از محاسبه‌ی منحنی گشتاور-انحنا در وجوه هر عضو باید رفتار هیستریتیک این مقاطع برای انجام یک تحلیل دینامیکی غیرخطی مشخص شود. همان‌طور که گفته شد، برنامه‌ی IDARC از مدل سه پارامتری پارک برای تعیین منحنی پسماند عضو استفاده می‌کند. پارامترهای کاهش سختی (α)، کاهش مقاومت (β) و اثر



شکل ۷. طیف شتاب زلزله‌ها

دهانه‌ی ۶ متر تحت زلزله‌ی السنترو مشاهده کنیم تا نحوه‌ی عملکرد میراگرها را در اصلاح رفتار لرزه‌ی ساختمان‌های بتن آرمه دریابیم. برای این منظور در تمام طبقات قاب‌های مذکور، میراگرهایی با ثابت میرایی $5 \frac{kN.S}{mm}$ نصب می‌کنیم. درصد میرایی الحاقی ناشی از نصب این میراگرها در قاب‌های پنج و ده طبقه براساس جدول ۱ به ترتیب در حدود ۳۰٪ و ۱۵٪ است.

الف) کاهش تغییر مکان‌ها

نصب میراگرهای لزج، تغییر مکان طبقات قاب‌ها را تا حد زیادی

گرفته‌اند. این سه زلزله از لحاظ حداکثر شتاب، مدت زمان لرزش، انرژی لرزه‌ی، پیروید تشدید و .. تفاوت‌های زیادی با هم دارند که با اعمال آنها به سازه می‌توان به نتایج جامع‌تری دست پیدا کرد. در شکل ۷ طیف شتاب این سه زلزله رسم شده است.

توصیف درصد میرایی الحاقی و شاخص آسیب

قبل از پرداختن به نتایج تحلیل‌ها، به شرح دو پارامتر که در نتایج کاربرد زیادی دارند، می‌پردازیم. یکی از این پارامترها، $\Delta \xi_i$ یا نسبت میرایی الحاقی به سازه بر اثر نصب میراگرها و رابطی آن با ثابت میرایی میراگرها (C) است. در برخی از منابع روشی برای محاسبه‌ی $\Delta \xi_i$ برحسب C ارائه شده^[۸] که براساس آن، در سازه‌ی مانند شکل ۲ می‌توان نسبت میرایی الحاقی برای مود "i" ($\Delta \xi_i$) را برحسب ثابت میرایی میراگرهایی که در طبقات قاب نصب شده‌اند، از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد:

$$\Delta \xi_i = C \left[\frac{\cos^2 \theta_j \Phi_{ij}^2 + \sum_{j=2}^J \cos^2 \theta_j (\Phi_{ij} - \Phi_{i(j-1)})^2}{\omega_i \sum m_j \Phi_{ij}^2} \right]$$

که در آن θ_j زاویه‌ی میراگر با افق در طبقه "j"؛ J تعداد طبقات؛ و Φ_{ij} شکل مودی "i" ام است. در جدول یک مقادیر درصد میرایی الحاقی مود اول ($\Delta \xi_i$) برحسب C ($\frac{kN.S}{mm}$) برای قاب‌های مورد مطالعه محاسبه شده‌اند.

پارامتر دیگر، شاخص آسیب پارک و انگ (Park & Ang) است که در این نوشتار از آن استفاده شده، و برای یک عضو سازه‌ی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$DI_{P\&A} = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta}{\delta_u P_y} \int dE_h$$

δ_m تغییر شکل بیشینه‌ی ایجاد شده در عضو؛ δ_u تغییر شکل نهایی عضو؛ و P_y مقاومت نهایی تسلیم عضو است، $\int dE_h$ کل انرژی هیسترتیک جذب شده توسط عضو و β پارامتر ثابت مدل است. بعد از محاسبه‌ی شاخص آسیب عضوها، می‌توان شاخص آسیب هر طبقه، یا کل ساختمان را به دست آورد.

در بخش‌های بعد، نتایج تحلیل‌های غیرخطی به طور خلاصه بیان شده است. لازم به ذکر است که در تمام تحلیل‌های انجام شده، مقاطع بادبندها به گونه‌ی در نظر گرفته شده‌اند که بادبند در برابر بارهای وارده دچار کماتش نشود و میراگرها بتوانند در تمام چرخه‌ها به طور مؤثر عمل کنند.

تأثیر میراگرها بر پاسخ‌های دینامیکی سازه

در بخش نخست نتایج، می‌خواهیم برای نمونه تأثیر میراگرهایی با خصوصیات مشخص را بر روی دو قاب پنج و ده طبقه با عرض

دهم در طول زلزله به کمتر از نصف حالت بدون میراگر تقلیل یافته است اما کاهش این پارامتر در طبقه‌ی طبقه‌ی سوم چندان زیاد نیست.

ب) کاهش انرژی هیسترتیک اعضا

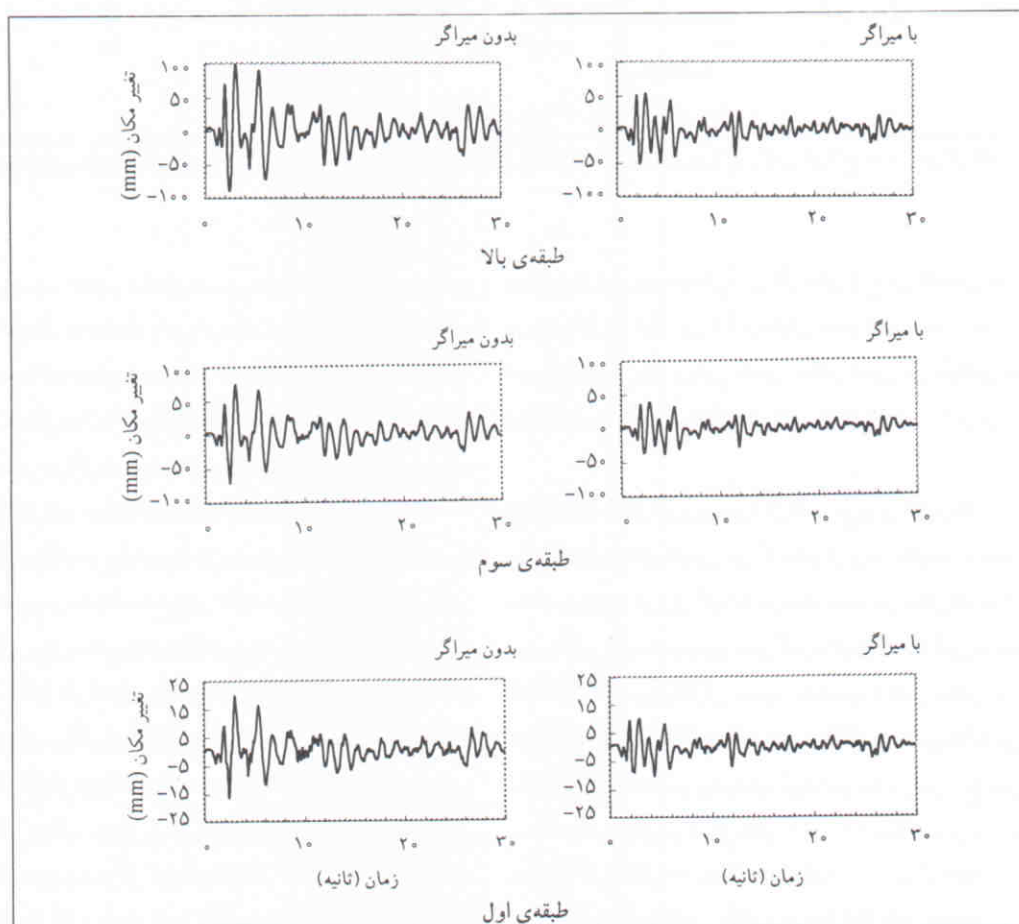
در شکل ۱۰ نمودارهای نیرو-تغییر مکان مکان طبقه‌ی سوم قاب پنج طبقه، برای برش طبقه، برش ستون‌ها و نیروی برشی میراگر رسم شده‌اند. در این شکل چگونگی عملکرد میراگر در کاهش آسیب وارد به عضوهای سازه به خوبی مشخص می‌شود. در نمودارهای پسماند «ب و ه»، مجموع برش ستون‌های طبقه، برحسب تغییر مکان نسبی طبقه به ترتیب برای قاب‌های بدون میراگر و با میراگر، رسم شده است. با مقایسه‌ی دو نمودار، مشخص می‌شود که تغییر شکل‌های غیر کشسان و اتلاف انرژی هیسترتیک در ستون‌ها که باعث آسیب دیدگی آنها می‌شود، در قاب مجهز به میراگر، بسیار کمتر از قاب بدون میراگر بوده و رفتار ستون‌ها پس از نصب میراگرها بسیار نزدیک به حالت خطی است. با توجه به نمودار «د» که مؤلفه‌ی افقی نیروی

جدول ۱ مقادیر α در قاب‌های مورد مطالعه ($\Delta\epsilon\% = \alpha C$)

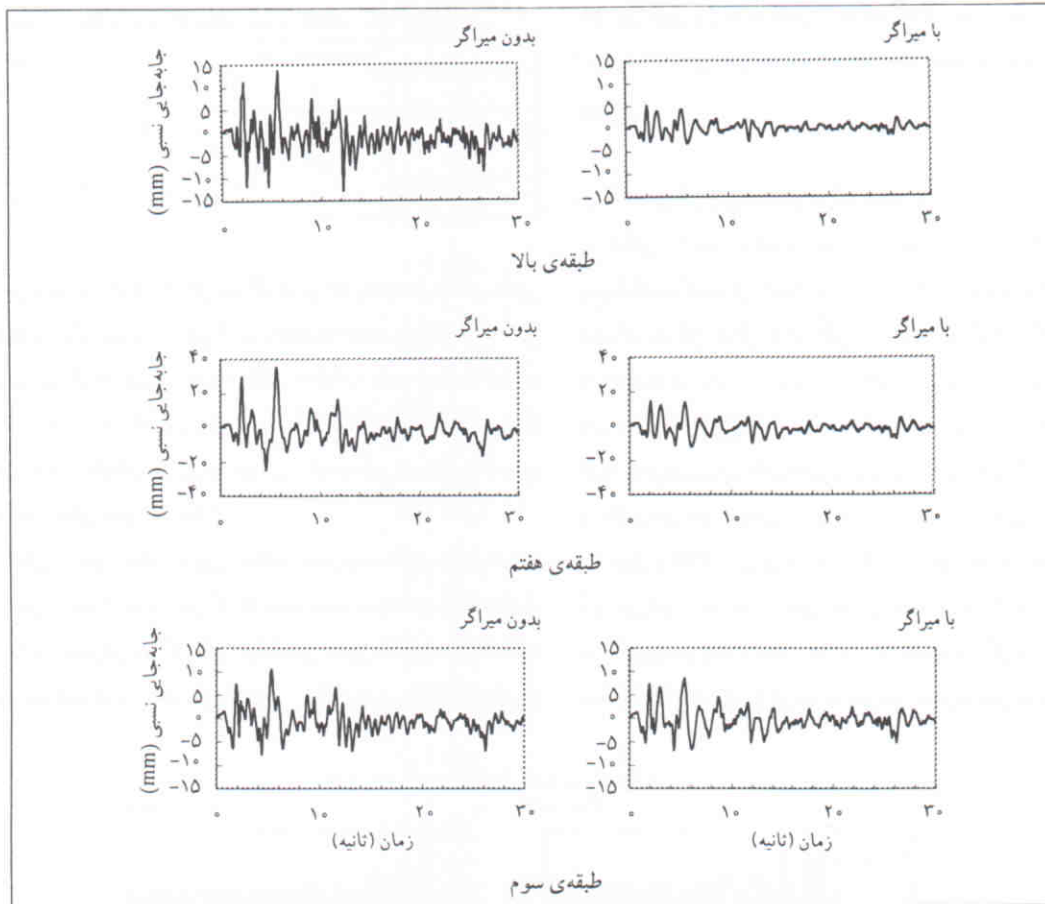
تعداد طبقات	عرض دهانه‌ها (متر)		
	۸	۶	۴
قاب ۱	۱۶/۶	۲۳/۴	۳۱/۵
۵	۴/۸	۵/۹	۷/۵
۱۰	۲/۵	۳	۳/۴

کاهش می‌دهد. در شکل ۸، اثر میراگرها بر تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان طبقات اول، سوم و پنجم قاب پنج طبقه دیده می‌شود. در این قاب نصب میراگرها تغییر مکان طبقات مختلف را به حدود نصف کاهش می‌دهد. آنچه که بیش از تغییر مکان مطلق طبقات اهمیت دارد، تغییر مکان طبقات نسبت به هم است که به طور مستقیم با آسیب وارده به عضوهای سازه مرتبط است.

در شکل ۹ تغییر مکان نسبی طبقات سوم، هفتم و دهم قاب ده طبقه، قبل و بعد از نصب میراگرها رسم شده است. در این شکل می‌توان تأثیر به‌سزای میراگرها را در کاهش تغییر مکان نسبی طبقات این قاب مشاهده کرد. به طوری که تغییر مکان نسبی طبقات هفتم و



شکل ۸. تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان طبقات اول، سوم و پنجم قاب پنج طبقه (۵-۶) در قاب بدون میراگر و قاب اصلاح شده با میراگر ($\Delta\epsilon\% = 30$) تحت زلزله‌ی سنسترو.



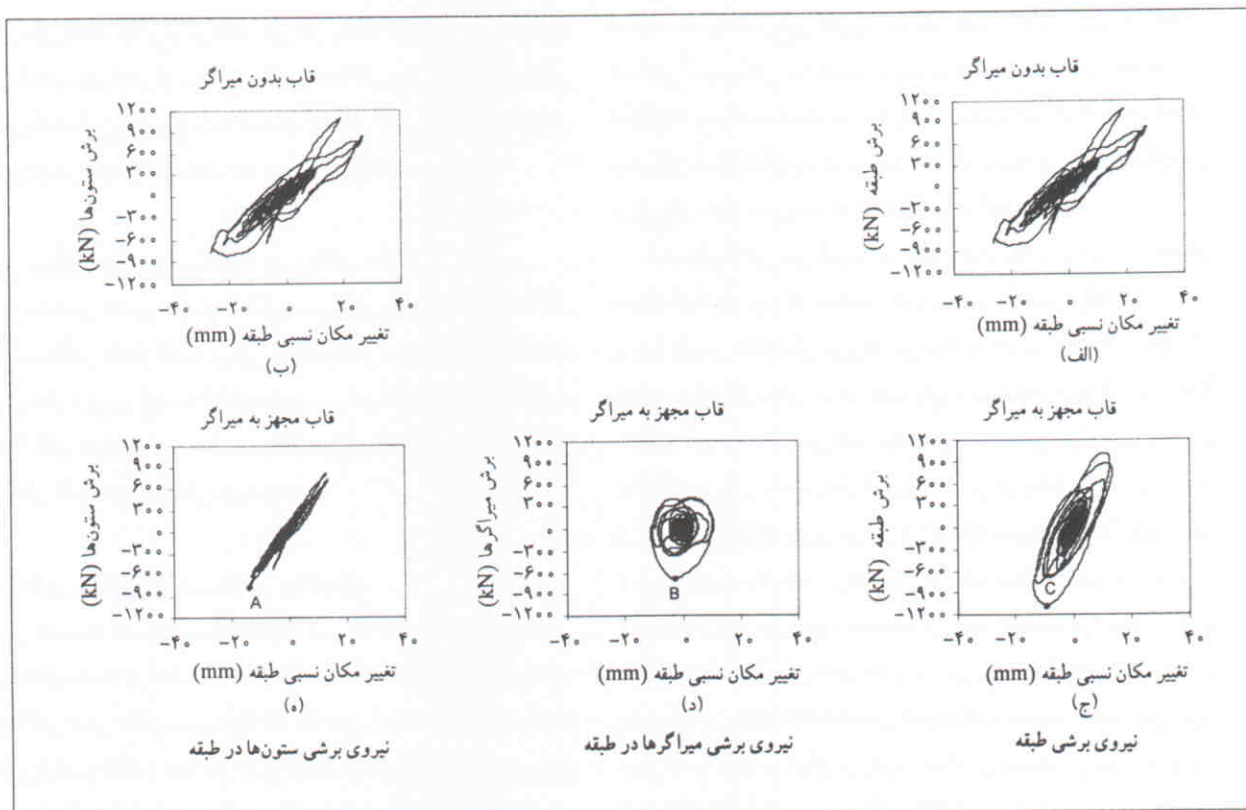
شکل ۹. تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان نسبی طبقات سوم، هفتم و دهم قاب ده طبقه (۶-۱۰) در قاب بدون میراگر و قاب اصلاح شده با میراگر ($\Delta t = 7.15\%$) تحت زلزله‌ی السترو.

دیگری از نحوه‌ی عملکرد میراگرهای لزج در کاهش آسیب وارده به اعضا، در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. در این شکل، نمودارهای نیروی برشی - تغییر مکان نسبی در طبقه‌ی هفتم قاب ده طبقه رسم شده است که نتایجی مشابه شکل ۱۰ در بردارد.

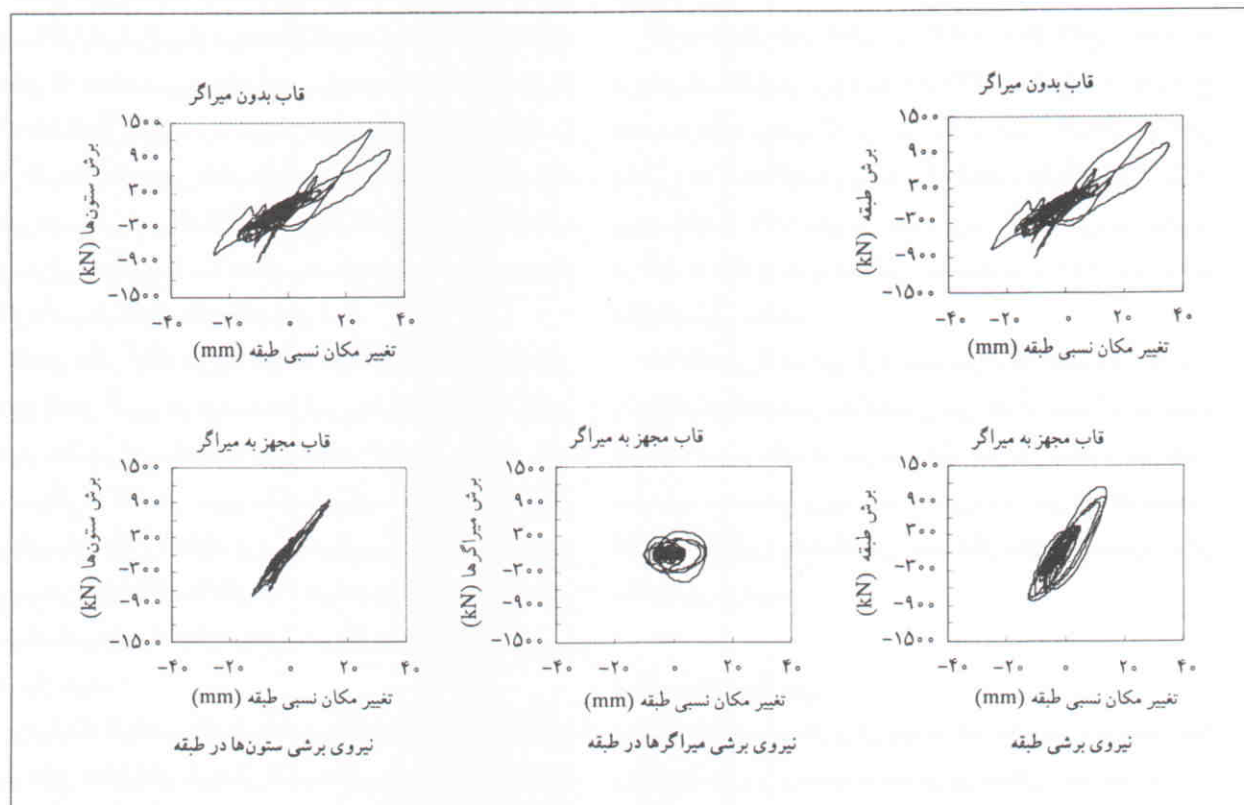
ج) اختلاف فاز نیروی میراگرها و نیروی اعضا
یکی از مزیت‌های اصلی میراگرهای لزج در مقایسه با سایر میراگرها، متناسب بودن نیروی آنها با سرعت است در حالی که در اکثر انواع میراگرها - همچون میراگرهای اصطکاکی و میراگرهای کشسانی - خمیری فلزی - نیرو متناسب با تغییر مکان است. در نتیجه در میراگرهای لزج، نیروی برشی و لنگر در ستون‌ها با نیروی میراگر اختلاف فاز داشته و بیشینه‌ی آن‌ها در یک زمان رخ نمی‌دهد. این مسئله را می‌توان در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده کرد. به عنوان مثال، چنان‌که در شکل ۱۰ مشاهده می‌کنید، در نمودار «ه» حداکثر نیروی برشی ستون‌ها در تغییر مکان بیشینه (نقطه A) رخ داده، در حالی که در نمودار «د» بیشینه‌ی نیروی برش ناشی از میراگرها، نزدیک به تغییر

میراگر لزج را برحسب تغییر مکان نسبی طبقه نشان می‌دهد و مقایسه‌ی آن با نمودار «ه» معلوم می‌شود که بخش عمده‌ی اتلاف انرژی لرزه‌یی، در قاب مجهز به میراگر، در میراگرها صورت می‌گیرد تا در عضوهای اصلی سازه؛ چراکه سطح محصور در نمودار «د» که انرژی تلف شده در میراگر است، بسیار بیشتر از سطح محصور در نمودار «ه»، یعنی انرژی هیسترتیک تلف شده در ستون‌ها است.

در نمودارهای «الف و ج» این شکل، برش طبقه برحسب تغییر مکان نسبی طبقه رسم شده است. برش طبقه در قاب بدون میراگر (نمودار الف) برابر برش ستون‌های طبقه بوده و در قاب مجهز به میراگر (نمودار ج) در هر لحظه برابر با مجموع برش ستون‌ها و مؤلفه‌ی افقی نیروی میراگر در آن طبقه است. سطح محصور در این دو نمودار، حاکی از کل انرژی تلف شده در طبقه است که مقدار آن در قاب بدون میراگر و قاب مجهز به میراگر، نزدیک به هم است، با این تفاوت که در قاب بدون میراگر این انرژی در عضوهای اصلی سازه تلف می‌شود ولی در قاب مجهز به میراگر، عمده‌ی اتلاف انرژی در میراگرهایی است که به همین منظور در سازه تعبیه شده‌اند. نمونه‌ی



شکل ۱۰. نمودارهای نیروی برشی - تغییر مکان نسبی برای طبقه سوم قاب پنج طبقه (۵-۶) تحت زلزله‌ی السنترو



شکل ۱۱. نمودارهای نیروی برشی - تغییر مکان نسبی برای طبقه هفتم قاب ده طبقه (۶-۱۰) تحت زلزله‌ی السنترو

مکان صفر (نقطه B) رخ می‌دهد. این امر باعث می‌شود که بیشینه‌ی برش طبقه بسیار کمتر از مجموع مقادیر حداکثر برش ستون‌ها و برش میراگر باشد. این موضوع با مقایسه‌ی حداکثر نیرو در نمودار «ج» و مقادیر آن در نمودارهای «د و ه» مشخص می‌شود.

تأثیر میزان میرایی میراگرها بر رفتار سازه

بعد از مشخص شدن نحوه‌ی عملکرد میراگرها در ساختمان‌های بتن‌آرمه، تأثیر مقدار ثابت میرایی میراگرها بر میزان کارایی آنها در بهبود رفتار لرزه‌یی این ساختمان‌ها بررسی می‌شود. برای این منظور، تمام ۹ قاب طراحی شده با درصد‌های میرایی الحاقی مختلف تحلیل غیرخطی تاریخچه‌ی زمانی می‌شوند.

الف) تغییر مکان‌ها و آسیب‌های ساختمان

در این قسمت، اصلاح ساختمان‌ها توسط میراگرها و کاهش آسیب‌های وارده به آنها، با سه معیار سنجیده شده است که عبارت‌اند از حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات، شاخص آسیب کلی ساختمان از روش پارک و انگ و حداکثر تغییر مکان طبقه‌ی آخر. این سه معیار برای تمام قاب‌های مورد مطالعه تحت زلزله‌ی السنتر و به ترتیب در شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ برحسب درصد میرایی الحاقی رسم شده‌اند. کاهش تغییر مکان‌ها و آسیب وارده به ساختمان در ابتدا سریع است و با افزایش میرایی، از سرعت آن کاسته می‌شود. به‌عنوان مثال، در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که آسیب وارده به قاب‌ها عمدتاً قبل از $\Delta\epsilon = 30\%$ کاهش می‌یابد و با افزایش میرایی بیش از این مقدار، در بیشتر قاب‌ها، به‌خصوص قاب‌های پنج و ده طبقه، آسیب سازه کاهش محسوسی نمی‌یابد. این موضوع از نکات مهم در انتخاب میزان میرایی الحاقی به ساختمان، به‌منظور بهره‌گیری بهینه از میراگرها و رعایت ملاحظات اقتصادی است.

نکته‌ی دیگر آن که هر چه طبقات قاب افزایش می‌یابد، بخش عمده‌ی کاهش آسیب در درصد میرایی پایین‌تری رخ می‌دهد. به‌عنوان مثال در قاب‌های با عرض دهانه‌ی ۶ متر، اگر بخواهیم با نصب میراگرها، شاخص آسیب ساختمان را به نصف برسانیم، در قاب‌های یک، پنج و ده طبقه، درصد میرایی الحاقی مورد نیاز به ترتیب در حدود ۴۵٪، ۳۵٪ و ۲۵٪ خواهد بود. البته این بدان معنی نیست که قاب‌های با طبقات بیشتر به میراگرهایی با ثابت میرایی کمتر نیاز دارند.

برای اینکه اثرات میراگرها را تحت زلزله‌های دیگر نیز مشاهده کنیم، نتایج تحلیل‌های غیرخطی قاب‌های پنج و ده طبقه تحت زلزله‌های اوکلند، مکزیکوسیتی و السنتر و در جداول ۲ و ۳ خلاصه

شده است. براساس این نتایج، حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات و شاخص آسیب کلی ساختمان برحسب درصد میرایی الحاقی در شکل ۱۵ رسم شده است. در تمام موارد، نصب میراگرها باعث کاهش چشم‌گیر آسیب‌های وارده به سازه در اثر زلزله می‌شود و با افزایش میرایی از حدی معین، روند کاهش آسیب کند می‌شود.

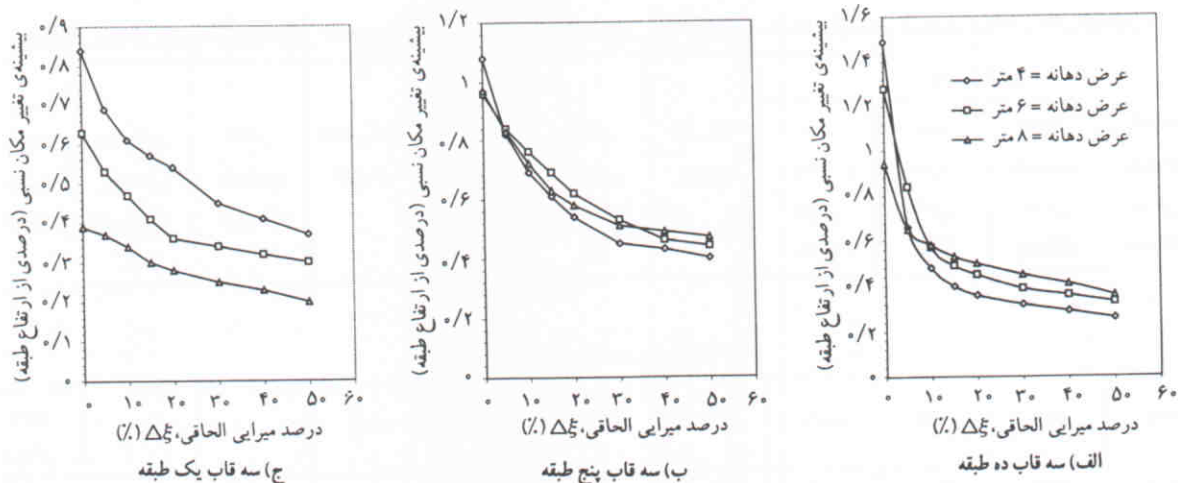
اما میزان تأثیر میراگرها در تمام قاب‌ها و تحت زلزله‌های مختلف یکسان نیست. عمده‌ی تفاوت‌ها به ماهیت فرکانسی زلزله و پریود طبیعی ساختمان مربوط می‌شود. به‌عنوان مثال، در شکل ۱۵ زلزله‌ی مکزیکوسیتی در دو قاب پنج و ده طبقه، عملکردی کاملاً متفاوت از خود نشان می‌دهد. بیشینه‌ی شتاب این زلزله از دو زلزله‌ی دیگر کمتر، ولی مدت زمان تحریک مؤثر آن بیشتر است. این زلزله در قاب پنج طبقه‌ی بدون میراگر ($\Delta\epsilon = 0$) نسبت به دو زلزله‌ی دیگر کمترین آسیب را ایجاد می‌کند ولی در قاب ده طبقه بیشترین خرابی را به همراه دارد. با این وجود مشاهده می‌کنیم که نصب میراگرها در قاب ده طبقه به شدت آسیب‌های ناشی از این زلزله را کاهش می‌دهد تا جایی که در $\Delta\epsilon = 50\%$ شاخص آسیب قاب ده طبقه تحت این زلزله کمتر از دو زلزله‌ی دیگر می‌شود. علت این مسئله آن است که پریود طبیعی قاب ده طبقه بدون میراگر $1/33s$ است که این پریود در جریان زلزله به سبب تغییر شکل‌های غیرخطی عضوهای سازه افزایش می‌یابد.

اگر به نمودار طیف شتاب این زلزله در شکل (۷ج) توجه کنیم می‌بینیم که با افزایش پریود سازه از $1/33s$ ، پاسخ سازه به پاسخ تشدید نزدیک می‌شود که این خود باعث تغییر مکان‌های غیرخطی بیشتر، و در نتیجه افزایش پریود سازه گشته و نهایتاً در پایان زلزله، پریود سازه به $2/3s$ یعنی در حدود پریود تشدید می‌رسد. بنابراین در قاب ده طبقه‌ی بدون میراگر، آسیب‌های سازه تحت زلزله‌ی مکزیکوسیتی زیادند.

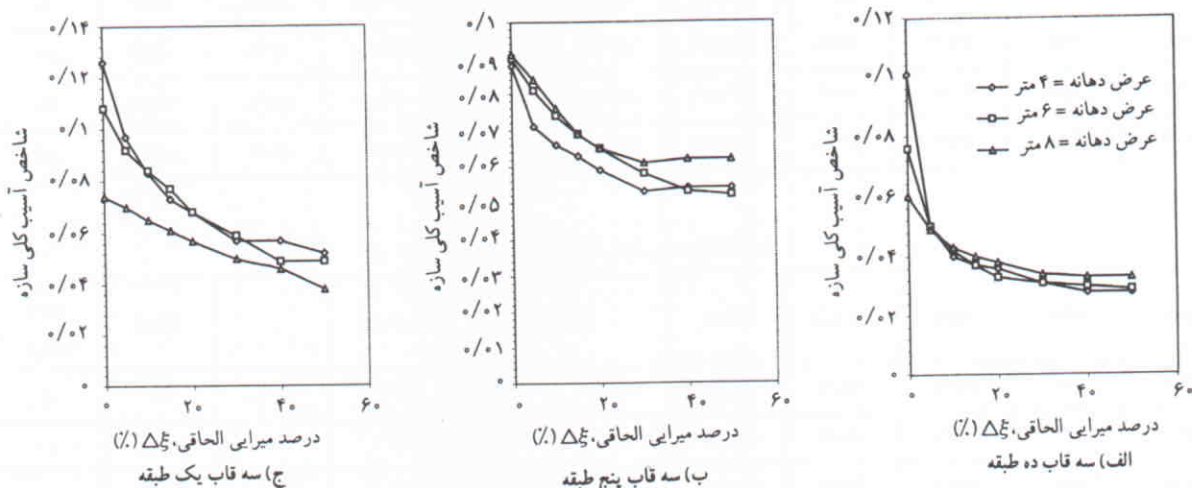
اما علت این‌که در این زلزله نصب میراگرها آسیب وارده به سازه را در قاب ده طبقه به سرعت کاهش می‌دهد آن است که با نصب میراگرها پریود سازه در جریان زلزله افزایش کمتری می‌یابد و سازه وارد محدوده‌ی پریود تشدید نمی‌شود. این مسئله به‌همراه اثر افزایش میرایی، باعث کاهش آسیب‌های سازه‌یی به میزان قابل ملاحظه‌یی می‌شود.

ب) نیروهای سازه‌یی

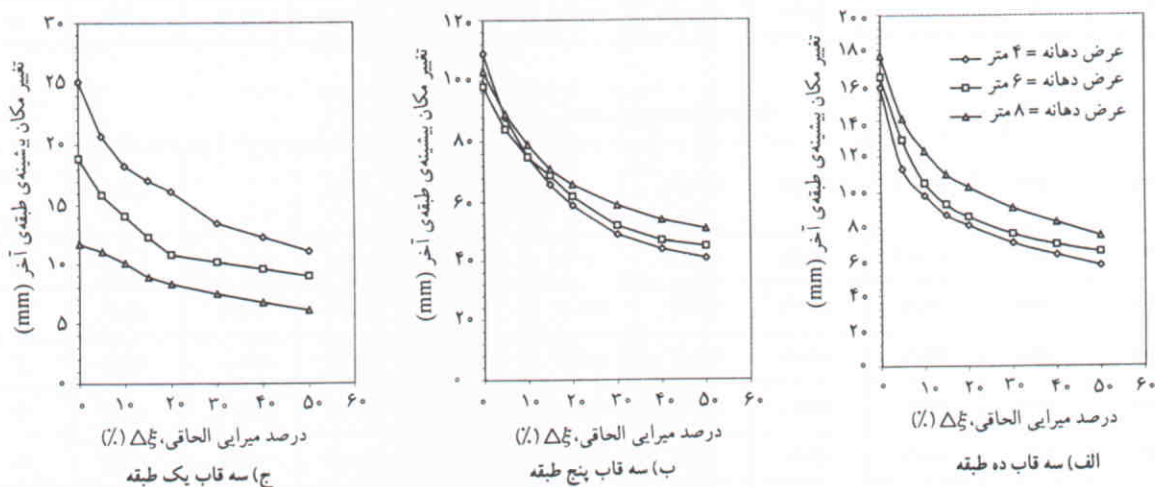
در شکل ۱۶ الف حداکثر برش پایه در قاب‌های پنج و ده طبقه، تحت زلزله‌ی السنتر و برحسب درصد میرایی الحاقی رسم شده است. در قاب‌های ده طبقه، برش پایه حتی در درصد‌های میرایی بالا، نسبت به



شکل ۱۲. تأثیر درصد میرایی الحاقی توسط میراگرها بر بیشینه‌ی تغییر مکان نسبی طبقات تحت زلزله‌ی سنترو.



شکل ۱۳. تأثیر درصد میرایی الحاقی توسط میراگرها بر شاخص آسیب کلی سازه تحت زلزله‌ی سنترو.



شکل ۱۴. تأثیر درصد میرایی الحاقی توسط میراگرها بر تغییر مکان بیشینه‌ی نسبی طبقه‌ی آخر زلزله‌ی سنترو.

جدول ۲. حداکثر پاسخ‌های دینامیکی قاب پنج طبقه (۵-۶) با درصدهای میرایی الحاقی مختلف تحت زلزله‌های سنترو، اوکلند و مکزیکوسیتی

پاسخ طبقه‌ی اول				برش پایه (kN)	کاهش جابه‌جایی طبقه‌ی بالا (mm)	شاخص آسیب کلی سازه	کاهش جابه‌جایی نسبی (%)	بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی (%)	درصد میرایی الحاقی
گشتاور بای ستون داخلی (kN.m)	گشتاور بای ستون خارجی (kN.m)	برش ستون داخلی (kN)	برش ستون خارجی (kN)						

زلزله‌ی سنترو (شتاب بیشینه = ۰/۳۴۸g)

۴۳۵	۳۵۲	۴۴/۴	۵۵/۲	۱۱۷۶/۴		۹۸/۷	۰/۰۹	۰/۹۶	بدون میراگر
۴۱۹	۳۳۷	۴۴/۰	۵۳/۱	۱۱۶۱/۴	۱۴/۲۹	۸۴/۶	۰/۰۸۱	۱۲/۵	۵
۴۰۰	۳۱۹	۴۳/۹	۵۱/۷	۱۱۷۷/۵	۲۳/۲۰	۷۵/۸	۰/۰۷۴	۲۰/۸	۱۰
۳۷۰	۳۰۹	۴۳/۵	۴۸/۳	۱۳۰۰/۴	۳۶/۷۸	۶۲/۴	۰/۰۶۵	۳۵/۴	۲۰
۳۵۴	۲۹۵	۴۲/۴	۴۴/۵	۱۵۵۴/۱	۴۶/۸۱	۵۲/۵	۰/۰۵۸	۴۴/۸	۳۰
۳۴۷	۲۸۹	۴۰/۲	۴۲/۳	۱۷۹۴/۰	۵۱/۵۷	۴۷/۸	۰/۰۵۳	۵۲/۱	۴۰
۳۴۶	۲۸۳	۳۷/۹	۳۹/۲	۱۹۷۸/۹	۵۴/۶۱	۴۴/۸	۰/۰۵۲	۵۴/۲	۵۰

زلزله‌ی اوکلند (شتاب بیشینه = ۰/۲۷۶g)

۵۰۷	۴۲۳	۶۵/۸	۱۰۱/۸	۱۳۵۵		۱۳۷/۱	۰/۱۰۸	۱/۳۷	بدون میراگر
۵۱۶	۴۲۷	۶۵/۵	۹۲/۹	۱۴۵۶/۳	۳/۸۷	۱۳۱/۸	۰/۱۰۴	۵/۱	۵
۵۲۰	۴۲۹	۶۵/۵	۸۶/۳	۱۵۲۴/۶	۸/۹۰	۱۲۴/۹	۰/۱	۱۰/۹	۱۰
۵۱۸	۴۲۰	۶۴/۴	۷۷/۷	۱۶۵۷/۸	۱۹/۲۶	۱۱۰/۷	۰/۰۹۸	۱۹/۰	۲۰
۵۰۷	۴۱۵	۶۲/۲	۷۴/۸	۱۸۱۶/۴	۲۹/۳۲	۹۶/۹	۰/۰۹	۲۷/۷	۳۰
۴۹۴	۴۰۳	۵۹/۲	۷۰/۵	۱۹۳۴	۳۷/۶۴	۸۵/۵	۰/۰۸۳	۳۵/۸	۴۰
۴۷۶	۳۹۰	۶۵/۵	۶۶/۷	۲۰۳۰/۴	۴۴/۵۷	۷۶	۰/۰۷۶	۴۳/۱	۵۰

زلزله‌ی مکزیکوسیتی (شتاب بیشینه = ۰/۰۹۰g)

۳۲۵	۲۷۴	۱۰۳/۸	۱۴۵/۶	۱۱۰۵/۹		۴۳/۵	۰/۰۳۸	۰/۴۲	بدون میراگر
۲۹۱	۲۵۱	۱۰۲/۲	۱۳۶/۵	۱۰۳۳/۴	۱۱/۹۵	۳۸/۳	۰/۰۳	۱۴/۳	۵
۲۷۴	۲۳۷	۹۹/۹	۱۲۷/۷	۹۹۹/۵	۱۹/۰۸	۳۵/۲	۰/۰۲۵	۲۱/۴	۱۰
۲۵۲	۲۱۸	۹۱/۰	۱۱۴/۷	۹۴۰/۴	۲۷/۸۲	۳۱/۴	۰/۰۲۴	۳۱/۰	۲۰
۲۳۵	۲۰۴	۸۲/۰	۱۰۵/۱	۹۰۸/۵	۳۵/۱۷	۲۸/۲	۰/۰۲۲	۳۸/۱	۳۰
۲۲۲	۱۹۲	۷۹/۶	۹۶/۶	۸۸۵	۴۰/۶۹	۲۵/۸	۰/۰۲۱	۴۲/۹	۴۰
۲۰۹	۱۸۲	۷۶/۷	۸۸/۱	۸۶۷/۷	۴۵/۷۵	۲۳/۶	۰/۰۲۱	۴۷/۶	۵۰

جدول ۳. حداکثر پاسخ‌های دینامیکی قاب ده طبقه (۶-۱۰) با درصدهای میرایی الحاقی مختلف تحت زلزله‌های السنترو، اوکلند و مکزیکوسیتی

پاسخ طبقه‌ی اول				برش پایه (kN)	کاهش جابه‌جایی طبقه‌ی بالا (%)	جابه‌جایی طبقه‌ی بالا (mm)	شاخص آسیب کلی سازه	کاهش جابه‌جایی نسبی (%)	بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی (%)	درصد میرایی الحاقی
گشتاور پای ستون داخلی (kN.m)	گشتاور پای ستون خارجی (kN.m)	برش ستون داخلی (kN)	برش ستون خارجی (kN)							

زلزله‌ی السنترو (شتاب بیشینه = ۰/۳۴۸g)

۵۴۴	۴۵۰	۲۵۹/۳	۱۸۴/۹	۱۷۸۵/۸		۱۶۴/۵	۰/۰۷۴		۱/۲۵	بدون میراگر
۵۲۵	۴۴۴	۲۵۹/۰	۱۹۲/۲	۱۸۱۷/۹	۲۱/۰۹	۱۲۹/۸	۰/۰۵۱	۳۲/۸	۰/۸۴	۵
۵۰۵	۴۲۹	۲۵۱/۱	۱۸۷/۶	۱۷۹۶/۱	۳۶/۱۱	۱۰۵/۱	۰/۰۴۲	۵۵/۲	۰/۵۶	۱۰
۵۰۹	۴۳۷	۲۴۹/۱	۱۸۷/۷	۱۸۵۵/۲	۴۷/۵۴	۸۶/۳	۰/۰۳۳	۶۴/۰	۰/۴۵	۲۰
۵۳۳	۴۴۴	۲۵۷/۵	۱۹۳/۷	۱۹۸۷/۳	۵۳/۰۷	۷۷/۲	۰/۰۳۱	۶۸/۸	۰/۳۹	۳۰
۵۳۱	۴۵۳	۲۶۴/۳	۱۹۹/۳	۲۱۰۵	۵۶/۹۰	۷۰/۹	۰/۰۰۳	۷۱/۲	۰/۳۶	۴۰
۵۳۹	۴۶۰	۲۶۹/۴	۲۰۴/۳	۲۲۱۲/۱	۵۹/۹۴	۶۵/۹	۰/۰۲۹	۷۳/۶	۰/۳۳	۵۰

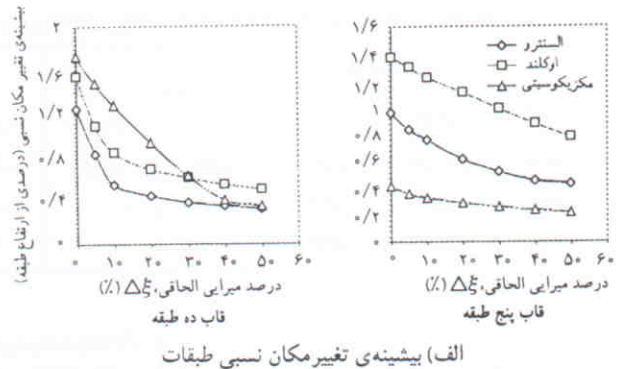
زلزله‌ی اوکلند (شتاب بیشینه = ۰/۲۷۶g)

۴۹۷	۴۲۷	۲۴۰/۸	۱۸۰/۸	۱۶۷۳/۱		۱۷۷/۴	۰/۰۹۸		۱/۵۲	بدون میراگر
۵۷۰	۴۷۴	۲۷۳/۸	۱۹۹/۲	۱۸۸۱/۸	۱۲/۰۶	۱۵۶	۰/۰۶۴	۲۹/۲	۱/۰۹	۵
۶۲۵	۵۰۶	۲۹۱/۶	۲۰۶/۴	۲۰۰۷/۳	۱۸/۹۴	۱۴۳/۸	۰/۰۵۳	۴۴/۸	۰/۸۵	۱۰
۶۹۷	۵۵۸	۳۱۷/۴	۲۲۳/۱	۲۲۶۲/۸	۲۷/۹۶	۱۲۷/۸	۰/۰۴۴	۵۴/۵	۰/۷	۲۰
۷۳۸	۵۹۲	۳۳۴/۱	۲۳۷/۰	۲۴۹۱/۴	۳۴/۰۵	۱۱۷	۰/۰۰۴	۵۹/۷	۰/۶۲	۳۰
۷۶۶	۶۱۴	۳۴۷/۶	۲۴۶/۱	۲۶۹۲	۳۹/۱۲	۱۰۸	۰/۰۳۹	۶۳/۶	۰/۵۶	۴۰
۷۸۱	۶۲۳	۳۵۷/۷	۲۵۳/۰	۲۸۷۳/۷	۴۲/۵۶	۱۰۱/۹	۰/۰۴۱	۶۶/۹	۰/۵۱	۵۰

زلزله‌ی مکزیکوسیتی (شتاب بیشینه = ۰/۰۹۰g)

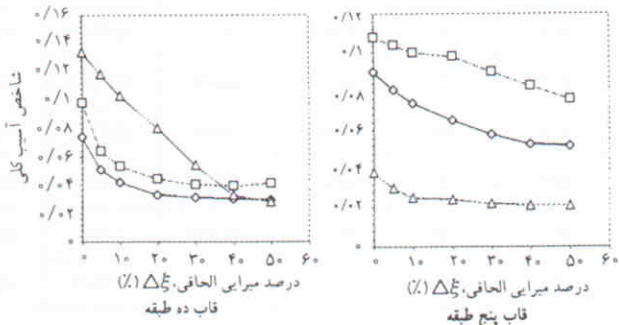
۶۶۴	۵۲۴	۲۷۳/۹	۱۷۸/۶	۱۸۱۲/۸		۲۷۱/۷	۰/۱۳۴		۱/۷۳	بدون میراگر
۶۵۵	۵۰۱	۲۶۶/۹	۱۷۷/۲	۱۷۹۸/۶	۱۳/۲۵	۲۳۵/۷	۰/۱۱۸	۱۴/۵	۱/۴۸	۵
۶۸۵	۵۲۶	۲۵۹/۸	۱۷۸/۳	۱۷۷۷/۲	۲۴/۴۸	۲۰۵/۲	۰/۱۰۳	۲۶/۰	۱/۲۸	۱۰
۷۱۷	۵۴۵	۲۵۹/۰	۱۷۹/۶	۱۷۵۶/۸	۳۹/۹۳	۱۶۳/۲	۰/۰۰۸	۴۵/۷	۰/۹۴	۲۰
۶۴۳	۵۰۰	۲۷۴/۳	۱۸۵/۱	۱۸۸۰	۵۷/۴۹	۱۱۵/۵	۰/۰۵۴	۶۳/۰	۰/۶۴	۳۰
۵۶۷	۴۶۳	۲۶۷/۴	۱۸۴/۹	۱۸۹۶	۶۹/۸۲	۸۲	۰/۰۳۳	۷۶/۳	۰/۴۱	۴۰
۵۳۳	۴۴۸	۲۵۷/۰	۱۸۵/۱	۱۸۶۸	۷۳/۸۷	۷۱	۰/۰۲۸	۷۹/۸	۰/۳۵	۵۰

در شکل ۱۷ الف دیده می‌شود که با افزایش میرایی میراگرها، برش پایه در زلزله‌های السنترو و اوکلند در هر دو قاب پنج و ده طبقه - افزایش یافته است. اما مقادیر برش پایه تحت زلزله می‌کنزیکوسی در قاب پنج طبقه و با نصب میراگرها، کاهش می‌یابد. در شکل ۱۷ ب برش داخلی دو قاب مذکور که عبارت است از مجموع برش ستون‌های طبقه اول قاب، برحسب درصد میرایی الحاقی رسم شده است که عمدتاً شاهد کاهش این مقادیر، بر اثر نصب میراگرها هستیم - مگر در قاب ده طبقه تحت زلزله اوکلند که با افزایش میرایی میراگرها، برش داخلی عضوها افزایش می‌یابد.



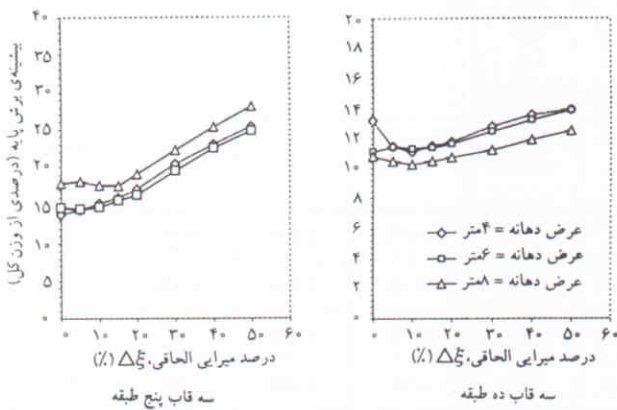
ج) درصد میرایی الحاقی بهینه

در این قسمت به این مسئله می‌پردازیم که در طراحی ساختمان‌های بتن آرمه با میراگرهای لزج، چه میزان میرایی الحاقی می‌تواند بهترین رفتار دینامیکی سازه را به همراه داشته باشد، ضمن آن‌که به بعد اقتصادی طرح نیز توجه شود. برای بررسی این مسئله باید به چند مطلب توجه داشت. اول آن‌که همان‌گونه که در قسمت الف این بخش

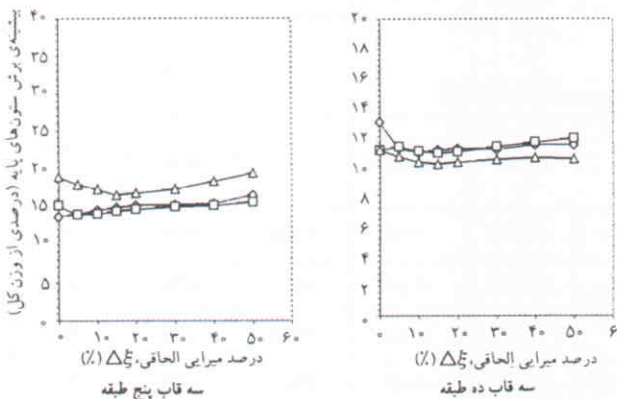


ب) شاخص آسیب کلی ساختمان

شکل ۱۵. تأثیر درصد میرایی الحاقی بر پاسخ قاب پنج طبقه و ده طبقه با دهانه‌هایی به عرض شش متر تحت زلزله‌های السنترو و اوکلند و می‌کنزیکوسی.



الف) بیشینه برش پایه



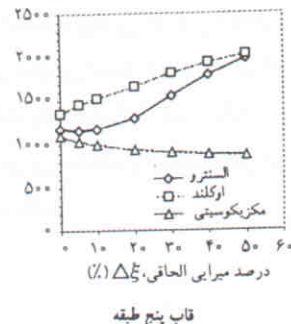
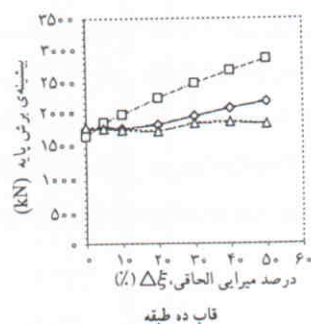
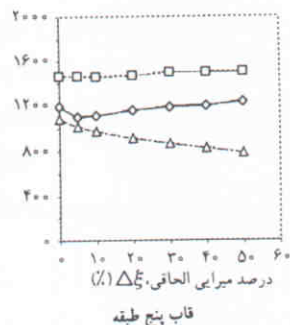
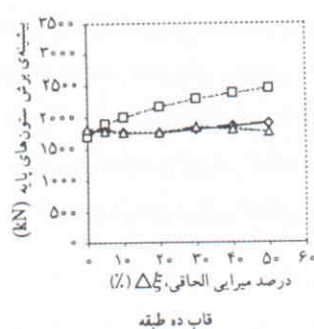
ب) بیشینه مجموع برش ستون‌های طبقه اول

شکل ۱۶. تأثیر میراگرهای ویسکوز بر نیروهای برشی طبقه اول قاب‌های پنج طبقه و ده طبقه تحت زلزله السنترو.

قاب بدون میراگر ($\Delta\delta = 0$) افزایش محسوسی نداشته و در بسیاری از موارد، به‌خصوص در قاب با دهانه ۴ متر، برش پایه با نصب میراگرها کاهش یافته است. اما در قاب‌های پنج طبقه، در درصد‌های میرایی بالا ($\Delta\delta > 20\%$) افزایش برش پایه ناشی از نصب میراگرهای لزج، قابل توجه است. ولی افزایش برش پایه، به معنی افزایش برش‌ها و نیروها در عضوهای سازه‌ی نیست؛ چراکه بخشی از برش پایه، ناشی از نیروی ایجاد شده در میراگرهاست که به پی منتقل می‌شود.

در شکل ۱۶ ب مجموع برش ستون‌های طبقه اول قاب‌های مذکور، برحسب $\Delta\delta$ رسم شده‌اند تا بتوان اثر میراگرها را بر برش عضوها مشاهده کرد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، تقریباً در تمام قاب‌های پنج و ده طبقه با درصد‌های میرایی الحاقی مختلف، نصب میراگرها باعث کاهش برش ستون‌ها شده است.

برای اینکه اثر زلزله‌های دیگر را نیز بر روی نیروهای سازه‌ی مشاهده کنیم، در شکل ۱۷ این نیروها برحسب $\Delta\delta$ ، برای سه زلزله رسم شده‌اند. این نتایج مربوط به قاب‌های پنج و ده طبقه با عرض دهانه‌های ۶ متر هستند.



الف) بیشینه‌ی برش پایه

شکل ۱۷. تأثیر درصد میرایی الحاقی بر پاسخ قاب پنج‌طبقه و ده‌طبقه با دهانه‌هایی به عرض شش متر تحت زلزله‌های السنتر، اوکلند و مکزیکوسیتی.

ب) بیشینه‌ی مجموع برش ستون‌های طبقه اول

ساختمان‌های بتن‌آرمه با میراگرهای لزج، بسته به نوع ساختمان و زلزله‌ی وارده، متغیر است؛ اما به‌طور کلی می‌توان گفت که مقدار آن غالباً در محدوده‌ی ۱۰ تا ۳۰ درصد میرایی بحرانی قرار دارد که باید برای هر سازه به‌طور جداگانه تعیین شود. در مورد قاب‌های مورد مطالعه در این تحقیق، می‌توان درصد میرایی الحاقی بهینه را برای قاب‌های پنج‌طبقه، ۲۰ تا ۳۰ درصد و مقدار آن را برای قاب‌های ده‌طبقه، ۱۰ تا ۲۰ درصد دانست.

بارجوع به جداول ۲ و ۳ که حداکثر پاسخ‌های دینامیکی قاب‌های پنج و ده‌طبقه تحت زلزله‌های مختلف در آنها درج شده است، میزان تغییر این پاسخ‌ها بر اثر نصب میراگرها در محدوده‌ی میرایی بهینه‌ی فوق، چنین است:

تغییر مکان طبقه‌ی آخر بین ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات بین ۳۵ تا ۵۵ درصد تقلیل یافته و شاخص آسیب کلی ساختمان از روش پارک و انگ بین ۲۵ تا ۴۵ درصد کم می‌شود. از طرفی برش پایه در مواردی تا ۴۰٪ افزایش یافته و در مواردی دیگر تا ۲۰٪ کاهش نشان می‌دهد؛ نهایتاً مقادیر برش و لنگر در اعضا بعضاً تا ۴۰٪ کاهش می‌یابند.

نتیجه‌گیری

نصب میراگرهای لزج در ساختمان‌های بتن‌آرمه می‌تواند به‌عنوان یک روش مؤثر در طراحی لرزه‌ی ساختمان‌های جدید و همچنین در بهسازی ساختمان‌های موجود برای مقابله با بارهای زلزله مطرح باشد. در این روش، اتلاف انرژی زلزله به‌جای آنکه در عضوهای اصلی سازه رخ دهد و باعث وارد شدن آسیب به این اعضا شود، در میراگرها که به‌همین منظور طراحی شده‌اند، صورت می‌گیرد و در نتیجه عضوهای اصلی سازه مانند تیرها و ستون‌ها که حامل بارهای ثقلی نیز هستند، از آسیب محفوظ می‌مانند.

نصب میراگرهای لزج، علاوه بر این‌که تغییر مکان‌های سازه در

ملاحظه شد، هنگامی که درصد میرایی الحاقی از حد معینی تجاوز می‌کند، اثر میراگرها در کاهش تغییر مکان‌ها و آسیب‌های سازه‌ی بسیار کند می‌شود. همچنین با افزایش طبقات ساختمان درصد میرایی الحاقی بهینه کاهش می‌یابد. دیگر آن‌که افزایش میرایی الحاقی در بعضی از موارد باعث افزایش در برش پایه و برش طبقات شده که این امر بستگی به خصوصیات دینامیکی سازه و زلزله دارد، که در قسمت ب به این موضوع پرداخته شد. در هر صورت چون خصوصیات زلزله‌ی وقوع آن محتمل است مشخص نیست، باید افزایش در برش پایه را بر اثر افزایش میرایی الحاقی پیش‌بینی کرد و به این نکته توجه کرد که نصب میراگرها باعث افزایش بیش از انتظار برش پایه و نیرو در اتصالات سازه‌ی نشود.

از سوی دیگر، با افزایش درصد میرایی الحاقی، نیروی ایجاد شده در بادبندها و میراگرها افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال با افزایش $\Delta\delta$ از ۲۰٪ به ۳۰٪، حداکثر نیرو در بادبندهای قاب پنج‌طبقه و ده‌طبقه با عرض دهانه‌ی ۶ متر، به ترتیب ۴۰٪ و ۳۵٪ افزایش می‌یابند که این مسئله نیز می‌تواند محدودکننده‌ی درصد میرایی الحاقی باشد. در نهایت، باید درصد میرایی در حدی باشد که طرح، بهترین توجیه اقتصادی را داشته باشد. در این زمینه شرکت تیلور که سازنده‌ی اصلی میراگرهای لزج مایع است، درصد میرایی الحاقی بهینه را در حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد ذکر می‌کند، ولی مؤثر بودن افزایش میرایی تا ۵۰٪ را نیز در صورت انجام بررسی‌های دقیق‌تر ممکن می‌داند. [۱۳]

همچنین یکی از محققان با جمع‌بندی عملکرد ابزارهای مختلف مستهلک‌کننده‌ی انرژی اظهار می‌دارد که تأمین ۱۰ تا ۲۰ درصد میرایی الحاقی می‌تواند یک پیشنهاد مناسب در استفاده از ابزارهای میرایی باشد. [۹]

با توجه به نتایج این تحقیق و در نظر گرفتن موارد فوق می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که میزان میرایی الحاقی بهینه برای طراحی

مسائل مهم در استفاده از این روش است به گونه‌ایی که هم کاهش مؤثری در تغییر مکان‌ها و آسیب‌های سازه‌یی ایجاد شود و هم این‌که طرح، بهترین توجیه اقتصادی را داشته باشد. در کنار این باید به افزایش احتمالی نیروها در اتصالات و پی ساختمان به‌خصوص در بهسازی ساختمان‌های موجود توجه داشت.

اثر زلزله را کاهش می‌دهند، در بسیاری از موارد نیروها و لنگرهای ایجاد شده در عضوهای سازه‌یی را نیز تقلیل می‌بخشند؛ اختلاف فازی که بین نیروی میراگر لزج با نیروهای برشی و لنگرها در اعضای سازه وجود دارد، به این امر کمک می‌کند. انتخاب درصد میرایی الحاقی بهینه در نصب میراگرهای لزج، از

پانوش

1. dampers
2. pinching
3. hysteresis

مراجع

1. Constantinou, M. C. and Symans, M. D., "Experimental and analytical investigation of seismic response of structures with supplemental fluid viscous dampers", NCEER-92-0032, SUNY/Buffalo, (1992).
2. Reinhorn, A. M., Li, C., and Constantinou, M. C., "Experimental and analytical investigation of seismic retrofit of structures with supplemental damping : Part 1-Fluid viscous damping devices", NCEER-95-0001, SUNY/Buffalo, (1995).
3. <http://www.taylordevices.com>, Sep 2000.
4. Valles, R. E., Reinhorn, A. M., Kunnath, S. K., Li, C., and Madan, A., "IDARC2D version 4.0: A computer program for the inelastic damage analysis of buildings," NCEER-96-0010, SUNY/Buffalo, (1996).
5. Kent, D. C., and Park, R., "Flexural members with confined concrete", *ASCE Journal of Structural Division*, **97** (ST 7), PP. 1969-1990, (1971).
6. Takeda, T., Soten, M., A., and Nielsen, N., N., "Reinforced concrete response to simulated earthquakes", *ASCE Journal of the Structural Division*, **96** (ST12), PP. 2557-2573, (1970).
7. Saiidi, M., "Hysteresis models for reinforced concrete", *ASCE Journal of the Sturctural Division*, **108** (ST5), PP. 1077-1087, (1982).
8. Lobo, R. F., Bracci, J. M., Shen, K. L., Reinhorn, A. M., and Soong, T. T., "Inelastic response of reinforced concrete structures with viscoelastic braces", NCEER-93-0006, SUNY/Buffalo, (1993).
9. Scholl, R. E., "Fundamental design issues for supplemental damping applications", *Earthquake Spectra*, **9**(3), PP. 627-636, (1993).