ارزیابی رفتار لرزه‌ای ساختمانهای بتنی مسلح مقاوم شده با میراگر فلزی جاری شونده براساس تحلیل دینامیکی غیرخطی

مهرتاش معتمدی،دانشجوی دکترای زلزله وکارشناس پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله،تهران*
فریبرز ناطقی الهی، استاد، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران**
هومن یوسف‌پور، کارشناس ارشد، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران
*تلفن: ۲۸۳۱۱۱۶-۰۲۱، نمابر: ۲۲۹۹۴۷۹-۰۲۱، پست الکترونیکی: *mehrtash@dena.iiees.ac.ir*
**تلفن: ۲۸۳۱۱۱۶-۰۲۱، نمابر: ۲۲۹۹۴۷۹-۰۲۱، پست الکترونیکی: *nateghi@dena.iiees.ac.ir*

چکیده

از تجربیات به دست آمده در زلزله‌های گذشته، چنین بنظر می‌رسد که بسیاری از سازه‌های بتنی مسلح کشورمان در برابر زلزله، آسیب‌پذیر می‌باشند. یکی از روشهای متداول در مقاوم‌سازی سازه‌های موجود، استفاده از میراگرهای جذب انرژی است. بکارگیری میراگرهای فلزی جاری شونده در نواحی لرزه‌خیز جهان به دلایلی چون کارائی مناسب، عدم حساسیت به حرارت و عوامل محیطی، رفتار مطمئن و پایدار و مقاومت مطلوب، مورد توجه قرار گرفته است.

در این مقاله به منظور ارزیابی رفتار لرزه‌ای ساختمانهای بتنی مسلح مجهز به میراگرهای فلزی جاری شونده از سه ساختمان با تعداد طبقات مختلف استفاده شده است. ساختمانهای مذکور بگونه‌ای که در برابر بارگذاری جانبی، ضعیف باشند، طراحی شده و سپس میراگر فلزی جاری شونده (TADAS) برای مقاوم‌سازی آنها طراحی و مورد استفاده قرار گرفته است. آنگاه رفتار لرزه‌ای ساختمانهای فوق در دو حالت با میراگر و بدون آن مقایسه شده است. بررسی‌های انجام شده عمدتاً براساس تحلیلهای غیرخطی تاریخچه زمانی می‌باشد.

برای تحلیل خسارت از شاخص خسارت پارک و انگ که بر مبنای تغییرشکل حداکثر اعضا و انرژی هیسترتیک تلف شده آنها می‌باشد، استفاده شده است. مطالعات انجام شده بیانگر آن است که میراگرهای فلزی جاری شونده عمدتاً باعث بهبود رفتار لرزه‌ای و کاهش پاسخهای دینامیکی ساختمانهای مجهز به آنها می‌گردند و همچنین شاخصهای خسارت را نیز اکثراً کاهش می‌دهند. بنظر می‌رسد استفاده از این نوع میراگرها برای مقاوم‌سازی ساختمانهای بتنی بلندتر و به ازای شدتهای بالا مناسبتر باشد.

کلید واژه‌ها: ***آسیب‌پذیری لرزه‌ای، ساختمانهای بتنی مسلح، میراگر فلزی، تحلیل دینامیکی غیرخطی.***

۱- مقدمه

کشور ایران یکی از مناطق لرزه‌خیز دنیا می‌باشد و در سالهای گذشته زلزله‌های بزرگ و ویرانگری را تجربه کرده است. نیاز به مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود، امری است که توجه جدی و گسترده مالکان و مهندسان را طلب می‌کند. یکی از روشهای مرسوم و مناسب در مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمانها استفاده از میراگرهاست. میراگرها اجزایی هستند که اغلب به منظور افزایش میرایی و مستهلک نمودن انرژی زلزله مورد استفاده قرار می‌گیرند. تحقیقات متعدد تحلیلی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که میراگرها می‌توانند بطرز مؤثری تغییرمکانهای ناشی از زلزله را کاهش دهند. بدین‌صورت عملکرد بیشتر اعضای باربر سازه، در محدوده ارتجاعی باقی می‌ماند. پذیرفتن تغییرشکلهای غیرارتجاعی که آئین‌نامه‌های طراحی بواسطه شکل‌پذیری سازه‌ها مجاز می‌دانند، به مفهوم ایجاد خسارت قابل توجه در اعضای سازه‌ای و غیر سازه‌ای می‌باشد. لذا بکارگیری میراگرها می‌تواند عامل کاهش خسارت از هر دو جنبه سازه‌ای و غیر سازه‌ای باشد و این مسأله در کاهش هزینه مقاوم‌سازی سازه‌های آسیب‌دیده از زلزله، تأثیر بسزایی دارد[۱-۳].

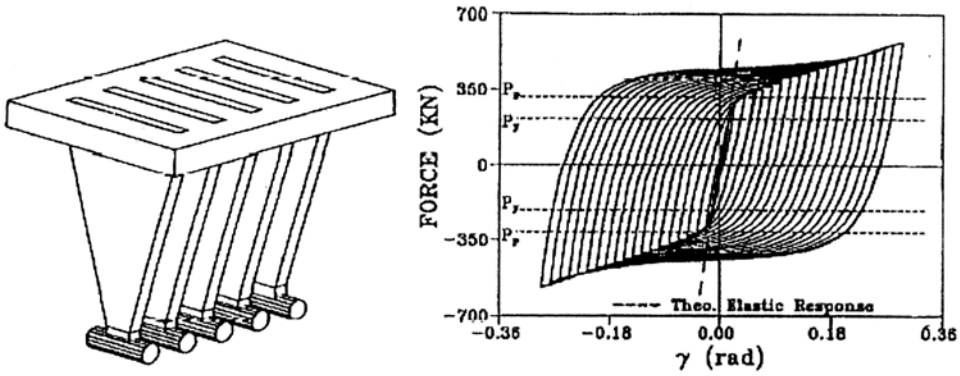
سیستم‌های اتلاف انرژی را می‌توان از مواد گوناگونی تولید نمود. ساختمان و مواد سازنده آنها بگونه‌ای است که می‌توانند در ارتقاء میرایی، سختی و مقاومت سازه‌ها مؤثر باشند. در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان آنها را به دو دسته تقسیم کرد. گروه اول، سیستم‌هایی هستند که قابلیت انتقال انرژی بین مودهای مختلف ارتعاشی را دارا می‌باشند. این گروه شامل میراگرهای جرم هماهنگ شده (*TMD*)، مایع هماهنگ شده (*TLD*) و مایع ستونی هماهنگ شده (*TLCD*) می‌باشد. از آنجائیکه فرکانس‌های طبیعی این سیستم‌ها با فرکانس‌های سازه‌ها، برابر و یا نزدیک به آنهاست، سیستم‌های هماهنگ شده (*Tuned*) نامیده می‌شوند. این سیستم‌ها احتیاج به منبع نیروی خارجی ندارند و در مسیرهای بارگذاری افقی و قائم سازه، اختلالی ایجاد نمی‌کنند و به آسانی در طراحی و مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمانها قابل استفاده می‌باشند.

گروه دوم میراگرهایی هستند که انرژی وارده را در درون خود، مستهلک می‌کنند. انرژی تلف شده در آنها به صورت حرارت، آزاد می‌شود. مکانیسم‌های گوناگونی برای اتلاف انرژی بکار گرفته شده است که مهمترین آنها عبارتند از: استفاده از اصطکاک در سطوح تماس (میراگرهای اصطکاکی)، استفاده از تغییرشکلهای ویسکوالاستیک جامدات (میراگرهای ویسکوالاستیک)، حرکات مایعات (میراگرهای ویسکوز) و بهره‌گیری از رفتار غیرخطی فلزات (میراگرهای فلزی). میراگر فلزی جاری شونده یکی از انواع میراگرهای فلزی است که به علت خواص مطلوبی چون کارایی مطلوب، عدم حساسیت به حرارت و شرایط محیطی، رفتار پایدار و مطمئن و مقاومت مناسب، مورد توجه قرار گرفته است.

میراگر *TADAS* (*Triangular Added Damping & Stiffness*) یکی از انواع میراگرهای فلزی جاری‌شونده است که از صفحات مثلثی موازی یکدیگر، تشکیل شده است. شرایط مرزی صفحات،

بگونه‌ای است که جلوی کمانش آنها در زیر بار قائم گرفته می‌شود. تصویر این میراگر و رفتار هیسترتیک آن در شکل (۱) آمده است.

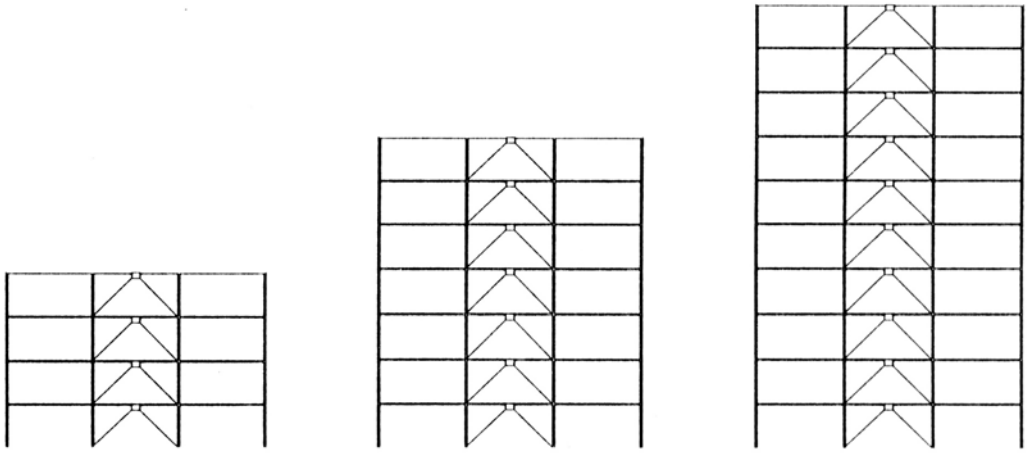
در مورد بکارگیری میراگرها در سازه‌های فولادی، تحقیقات متعددی انجام گرفته است ولی این موضوع در سازه‌های بتنی مسلح نیاز به بررسی‌های بیشتری دارد، لذا در این مقاله به گوشه‌هایی از آن پرداخته می‌شود.



شکل ۱: *میراگر TADAS و رفتار هیسترتیک آن*

۲- شرح ساختمانها و طراحی میراگر

در این مقاله به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری سازه‌های بتنی مسلح دارای میراگرهای فلزی جاری شونده از مدل سه ساختمان بتنی مسلح با تعداد طبقات مختلف (۴، ۷ و ۱۰ طبقه) استفاده شده است. فرضیات بکار رفته در طراحی و مقاوم‌سازی آنها به صورت یکسان انتخاب گردیده است تا نتایج تحلیلها هرچه بیشتر قابل قیاس باشند. این ساختمانها مشابه ساختمانهای متداول در ایران هستند. ظرفیت باربری جانبی آنها کمتر از ضوابط آئین‌نامه طراحی لرزه‌ای ایران (۲۸۰۰) لحاظ شده است تا ضرورت مقاوم‌سازی آنها بدیهی باشد. طراحی اعضای بتن آرمه براساس ضوابط آئین‌نامه *ACI* صورت گرفته است. تغییرمقطع اعضا در هر دو طبقه یکبار انجام گرفته است و فقط سه طبقه فوقانی سازه ۷ طبقه، مقاطع یکسانی دارند. مدل این سازه‌ها در شکل (۲) قابل مشاهده است.



شکل ۲: *مدل سازه‌های انتخابی*

برای طراحی میراگرها روشهای گوناگونی پیشنهاد شده است. در این پژوهش، روش پیشنهادی تسای و همکاران جهت طراحی میراگر *TADAS* بکار گرفته شده است[۴, ۵]. در این روش سختی المان میراگر (K_a) و تغییرمکان تسلیم آن (Δy_1) از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$K_a = SR \cdot K_f \qquad (۱)$$

$$\Delta y_2 \Big/ \Delta y_1 = 1 + \frac{(1+SR).(U-1)}{(1+SR \cdot SHR_A)} \qquad (۲)$$

در این روابط، SR نسبت سختی افقی المان میراگر به قاب تنها، K_f سختی جانبی طبقه، Δy_2 تغییرمکان تسلیم قاب تنها، U نسبت مقاومت و SHR_A نسبت سخت‌شدگی پس از تسلیم می‌باشد.

۳- تحلیلهای غیرخطی

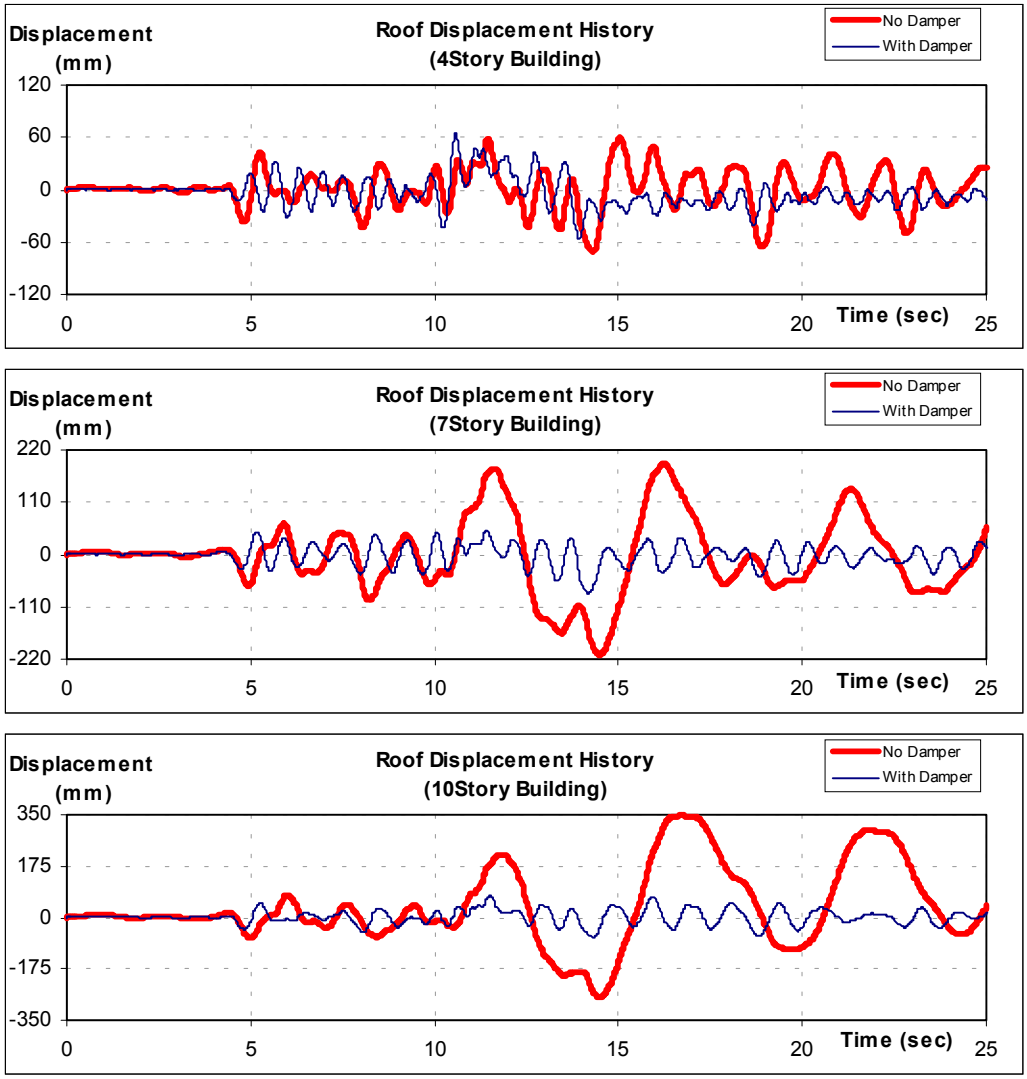
تحلیل آسیب‌پذیری ساختمانهای انتخابی به کمک نرم‌افزار *IDARC2D* نگارش چهار انجام گرفته است. این نرم‌افزار با درنظر گرفتن مدلهای ماکرو برای المان‌های ستون، تیر، دیوار برشی، ستون لبه و تیر عرضی، قادر به مدلسازی انواع سازه‌های بتنی مسلح بوده و می‌تواند پاسخهای دقیقتری نسبت به سایر نرم‌افزارهای غیرخطی همچون *DRAIN* و *SAFE* ارائه نماید[۶, ۷]. نگارشهای جدید این برنامه دارای توانایی‌هایی چون تحلیل استاتیکی غیرخطی، تحلیل دینامیکی غیرخطی، تحلیل شبه استاتیکی و شبه دینامیکی، مدلسازی انواع میراگرها، دیوارهای پرکننده، اثرات P-Δ، محاسبه شاخصهای خسارت و توانایی‌های دیگر می‌باشد.

برای ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمانها از تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی استفاده شده است. این تحلیلها شامل هر سه ساختمان و در دو حالت با میراگر و بدون آن می‌باشد. به این منظور از مؤلفه افقی

شتابنگاشتهای سه زلزله طبس، ناغان و السنترو و با شتابهای حداکثر زمین نرمال شده به مقادیر g ۰/۰۵، g ۰/۲۰، g ۰/۳۵ و g ۰/۵۰استفاده گردیده است. اثرات بارهای ثقلی و P-Δ نیز ملحوظ شده است.

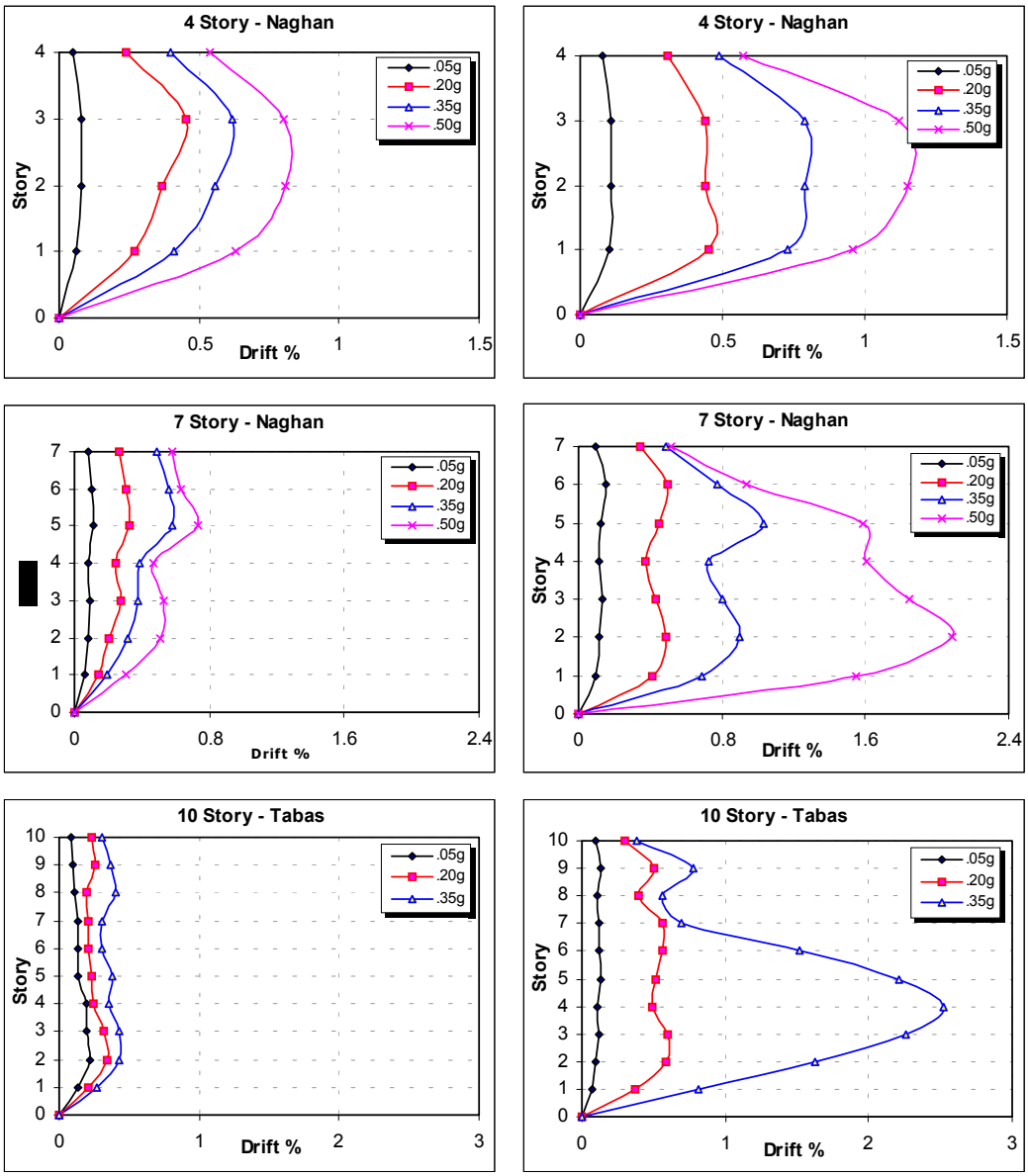
مدلی که برای بیان رفتار المان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، مدل سه پارامتری است. این مدل توانایی توصیف مناسب طیف وسیعی از المان‌های بتنی را دارا می‌باشد. پارامترهایی که در این مقاله بکار رفته‌اند مقادیر متوسط پیشنهاد شده در راهنمای نرم‌افزار است که معرف میزان متوسط در زوال سختی، زوال مقاومت و باریک‌شدگی می‌باشد. مدلسازی رفتار میراگر فلزی جاری شونده نیز توسط مدل هموار ون ـ بوس انجام گرفته است [۷] .

تاریخچه زمانی پاسخ تغییرمکان جانبی بام در شتاب g ۰/۳۵ برای سازه‌های با میراگر و بدون آن در شکل (۳) آورده شده است. در اینجا اثر میراگر در کاهش پاسخ تغییرمکان ملاحظه می‌شود. مشاهده می‌شود که تأثیرات جالب توجهی در پاسخ سازه مجهز به میراگر، نسبت به حالت بدون میراگر بوجود آمده است. پاسخ سازه‌های دارای میراگر، کاهش یافته‌اند و این کاهش در سازه بلندتر، محسوستر است. پریود سازه‌های دارای میراگر نیز کوچکتر شده است که علت آن، اثر میراگر در افزایش سختی می‌باشد. سازه‌های بدون میراگر نه تنها پریود بزرگتری نشان می‌دهند، بلکه در طی رخداد زلزله، خسارت قابل توجهی می‌بینند و نرمتر می‌شوند. این مطلب باعث بوجود آمدن سیکل‌های بازتر در میانه بارگذاری می‌گردد. اثر خسارت دیدگی در منتقل شدن محور نوسان به خطی فرضی موازی با محور افقی نیز تا حدی مشاهده می‌شود، که دلیل بر بوجود آمدن تغییرمکان ماندگار در سازه‌هاست . این مطلب باعث بزرگتر بودن پاسخ در انتهای بارگذاری نیز شده است.



شکل ۳: *تاریخچه زمانی پاسخ تغییرمکان جانبی بام (زلزله طبس)*

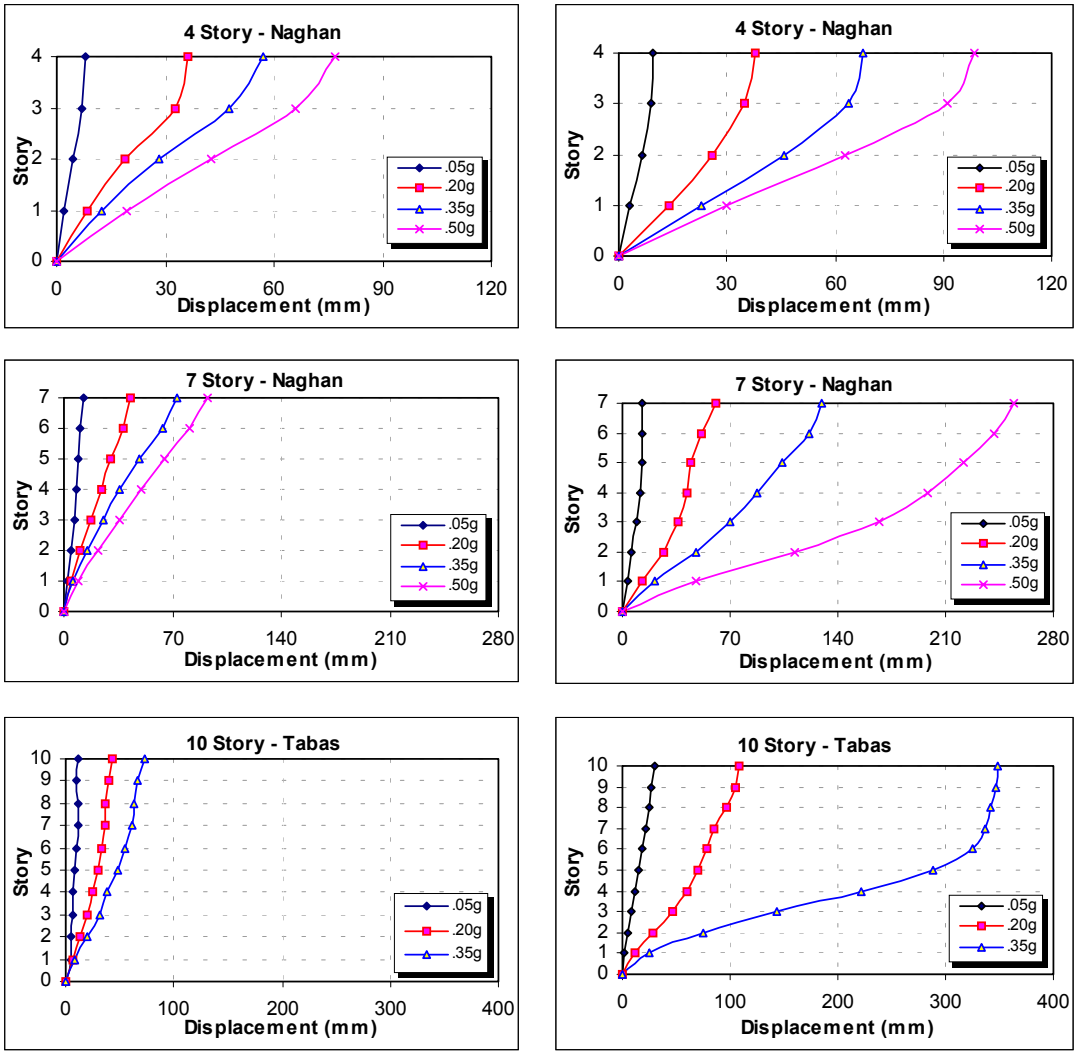
تغییرمکان حداکثر طبقات و تغییرمکان نسبی حداکثر آنها در PGAهای مختلف در شکلهای (۴) و (۵) ارائه شده است. آنگونه که از این شکلها پیداست، تغییرشکلها با افزایش PGA افزایش یافته است. در اینجا تأثیر میراگر در کاهش تغییرشکلها واضحتر است. این اثر در سازه‌های بلندتر، بیشتر است و با بالارفتن PGA مؤثرتر می‌گردد، و نیز در طبقات میانی، مطلوبتر است. حتی در PGA برابر g ۰/۰۵ اندکی افزایش تغییرمکان نسبی حداکثر مشاهده می‌شود که دلیل بر فعال نشدن میراگرها می‌باشد. جالب توجه آن است که تغییرمکان حداکثر بام در هیچ یک از حالات، بالا نرفته است. در نهایت بنظر می‌رسد تغییرمکانهای نسبی حداکثر در سازه‌های مجهز به میراگر، یکنواخت‌تر شده است.



(ب) (الف)

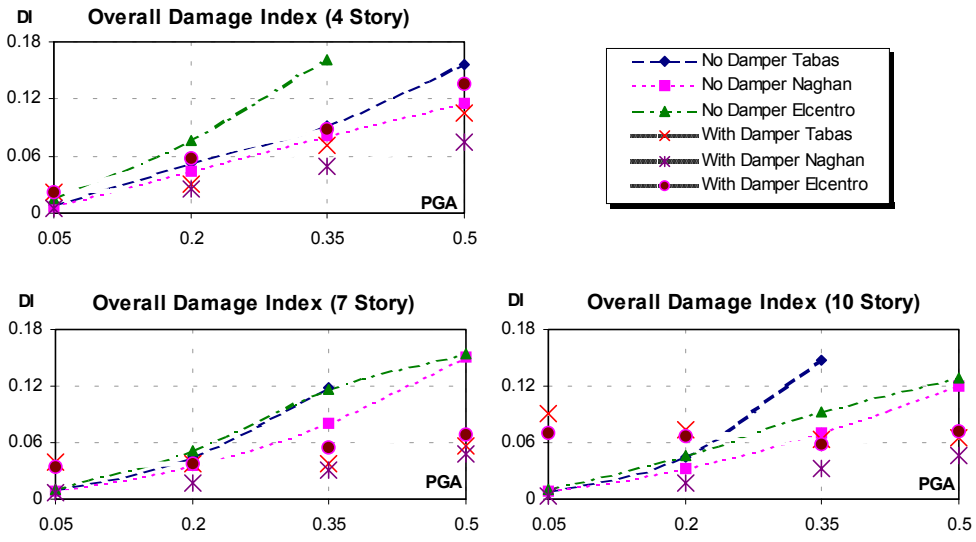
شکل ۴ : *تغییر مکانهای نسبی حداکثر طبقات : الف)بدون میراگر، ب)با میراگر*

مقادیر شاخص کلی خسارت پارک و انگ در شکل (۶) ملاحظه می‌شود. مطابق شکل، تأثیر میراگر در کاهش شاخص خسارت کلی سازه‌ها و خصوصاً در PGA بالا جالب توجه ومطلوب است. این کاهش در سازه‌های بلندتر، بهتر از سازه ۴ طبقه است. در PGA برابر g ۰/۲۰ بهبود شاخص خسارت در سازه ۴ و ۷ طبقه وجود دارد، ولی در سازه ۱۰ طبقه منحصر به زلزله ناغان است. این مطلب، وابستگی چگونگی تأثیر میراگر در شاخص خسارت به محتوی فرکانسی را نشان می‌دهد. این اثر در PGA برابر g ۰/ ۰۵ بیشتر شده است و در سازه ۴ طبقه، کمتر، در سازه ۷ طبقه اندکی بیشتر و در سازه ۱۰ طبقه بیشتر است. ولی بازهم در زلزله ناغان، هیچ افزایشی مشاهده نمی‌شود. لذا می‌توان گفت که در این پدیده محتوی فرکانسی زلزله، نقش بسزایی دارد[۸].



(ب) (الف)

شکل ۵ : تغییرمکانهای حداکثر طبقات: الف) بدون میراگر، ب) با میراگر



شکل ۶ : شاخص‌های خسارت پارک و انگ به صورت کلی

۴- نتیجه‌گیری

۱- کاهش تغییرمکان طبقات از اثرات مطلوب میراگر فلزی جاری شونده محسوب می‌شود. تغییرمکان ماندگار بطور چشمگیری کم شده و تغییرمکانهای نسبی حداکثر طبقات، عمدتاً کاهش یافته‌اند. در *PGA*های کوچک، امکان افزایش محدود تغییرمکان نسبی حداکثر، وجود دارد؛

۲- کارایی میراگر فلزی جاری شونده در ساختمانهای بلندتر، مطلوبتر است؛

۳- تأثیر میراگر فلزی جاری‌شونده در شاخص خسارت در خطر لرزه‌ای بالاتر، بهتر بوده و در نواحی با خطر لرزه‌ای پائین به محتوی فرکانسی زلزله بستگی دارد و می‌تواند اثر معکوس داشته باشد. این اثر در ساختمانهای کوتاهتر، کوچکتر است؛

۴- تأثیر میراگر فلزی جاری شونده در تغییرمکانها در *PGA* بالاتر، مطلوبتر است. این تأثیر در طبقاتی میانی سازه، بالاتر می‌باشد.

۵- مراجع

[1] Hanson, R.D., Aiken, I.D., Nims, D.K., Richter, P.J., and Bachman, R.E., "State – of – the Art and Practice in Seismic Energy Dissipation", *Proceeding, ATC* – 17–1 *Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control*, Applied Technology Council, San Francisco, California, March 1993.

[2] Sadeq, F., Mohraz, B., Taylor, A. W., Chung, R.M., "Passive Energy Dissipation Devices for Seismic Applications", *Technical Report NISTIR* – 5923, U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, November 1996.

[3] Soong, T.T., Dargush, G.F., "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering", *Wiley, Chichester*, UK and NewYork, 1997.

[4] Tsai, K.C., Chen, H.W., Hong, C.P., Su, Y.F., "Design of Steel Triangular Plate Energy Absorbers for Seismic Resistant Construction", *Earthquake Spectra* Vol. 9, No. 3, 505–528, 1993.

[5] Tsai, K.C., LI, J.W., Hong, C.P., Chen, H.W., Su, Y.F., "Welded Steel Triangular Plate Device for Seismic Energy Dissipation", *Proceedings, ATC* 17–1*, Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control*. Applied Technology Council, SanFrancisco, California, March 1993.

[6] Ramirez, O.M., Constantinou, M.C., Kircher, A.C., Whittaker, A.S., Johnson, M.W., Gomez, J.D., "Development and Evaluation of Simplified Procedures for Analysis and Design of Buildings with Passive Energy Dissipation Systems", *Technical Report MCEER* 00–0010, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, University at Buffalo, State University of NewYork, Buffalo, N.Y., December 2000.

[7] Valles, BR.E., Reinhorn, A.M., Kunnath, S.K., Li C., Madan, A., "IDARC2D Version 4.0: A Computer Program for the Inelastic Damage Analysis for Buildings", *Technical Report NCEER* 96–0010, National Center for Earthquake Engineering Research, University of NewYork, Buffalo, N.Y., June 1996.

[۸] یوسف‌پور، هومن؛ ناطقی الهی، فریبرز، *"ارزیابی آسیب‌پذیری سازه‌های بتنی مسلح مجهز به میراگر فلزی جاری‌شونده"*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۸۰ .