

Friction Damper Optimization based on Parallel Sensitivity Analysis for Self-centering Concrete Walls with Gravity Columns

Mahdi Ravanbakhshian Habibabadi

PhD student, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Mohsen Izadinia*

Assistant professor, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Hossein Tajmir Riahi

Assistant professor, Department of Civil Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Mohammad Hasan Meisami

Assistant professor, Daneshpajooan Higher Education Institute, Isfahan, Iran

Izadinia@iaun.ac.ir

DOI 10.30495/CIVIL.2023.702324

Keywords:

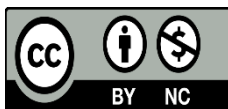
Jointed self-centering concrete walls, gravity column, friction damper, steel tendons, OpenSEES software

Abstract

In recent years, self-centering concrete walls have been utilized as mod structures. The mechanism of these structures is such that the focus of ene dissipation is on the dampers, and the role of the concrete wall and tendons is create stiffness and provide the self-centering capacity in the system resulted in reduction of residual deformation in the system. The jointed self-centering conc walls are a type of self-centering wall system where dampers are placed between t concrete wall panels. The most important point that should be considered in th structures is the optimal use of dampers in them. In the present research, a r system has been introduced, which is a combination of self-centering concrete w with gravity columns. In such a way that the friction dampers were placed in middle and side positions of the concrete wall. This research aimed to investigate optimal numerical value for the "slip load of friction dampers" in the middle and s positions of the Self-centering concrete wall based on the "amount of prestress force" in the friction screws of the dampers. In the current study, the resistance damper materials, their shape and dimensional size are not considered as varia parameters and they are considered without influence in determining the opti damping. In total, the optimal sliding load based on the prestressing force in friction bolts has been simultaneously determined by two-way sensitivity analy by OpenSEES software. Based on the results, applying the method of determin the percentage of the minimum response coefficient (R) based on parallel (two-w sensitivity analysis can be recognized as a very efficient method for determining most optimal friction damper in Self-centering jointed concrete wall syste Furthermore, the prestressed and optimal force for the dampers indicated that dampers located between the two walls (set of middle dampers) exhibit a spec optimal value and other dampers (set of side dampers) also present a differ optimal value.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).



بهینه یابی میراگر اصطکاکی بر مبنای آنالیز حساسیت موازی برای دیوارهای بتنی مرکزگرای متصل همراه با ستون‌های ثقیل

مهدی روان بخشیان حبیب آبادی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

محسن ایزدی نیا*

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

حسین تاجمیر ریاحی

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

محمد حسن میثمی

استادیار، گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی دانش پژوهان، اصفهان، ایران

Izadinia@iaun.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۲۴ خرداد ۱۴۰۲

تاریخ دریافت: ۱۵ اسفند ۱۴۰۱

چکیده

در چند سال اخیر، دیوارهای بتنی مرکزگرای متصل به عنوان سازه‌های نوین به کار گرفته شده‌اند. مکانیزم این سازه‌ها به نحوی است که تمرکز اتلاف انرژی بر روی میراگرها بوده و نقش دیوار بتنی و تاندون‌ها در آن به ترتیب ایجاد سختی و تامین‌کننده ظرفیت مرکزگرایی در سیستم است، به نحوی که باعث کاهش تغییر شکل باقیمانده در سیستم می‌گردد. دیوارهای بتنی مرکزگرای متصل، نوعی از سیستم دیوارهای مرکزگرا محسوب می‌شود که میراگرها در بین دو پانل دیوار بتنی قرار می‌گیرند. مهمترین نکته‌ای که در این سازه‌ها بایستی در نظر داشت استفاده از میراگر به صورت بهینه در آن‌ها است. در این مقاله به معرفی سیستم جدیدی که ترکیب دیوارهای بتنی مرکزگرای متصل به همراه ستون‌های ثقیل است پرداخته شده است. به نحوی که در آن میراگرهای اصطکاکی در موقعیت‌های میانی و کناری دیوار بتنی قرار گرفتند. تمرکز و هدف اصلی در این پژوهش بررسی مقدار عددی بهینه برای "بار لغزش میراگرهای اصطکاکی" در موقعیت‌های میانی و کناری دیوار بتنی مرکزگرا بر اساس "میزان نیروی پیش‌تنیدگی" در پیچ‌های اصطکاکی میراگرها است به نحوی که در مطالعه حال حاضر، مقاومت مصالح میراگرها، شکل و سایز ابعادی آن‌ها به عنوان پارامترهای متغیری در نظر گرفته نشده است و در تعیین میراگری بهینه، بدون تاثیر در نظر گرفته شده‌اند. در مجموع بار بهینه لغزش بر مبنای نیروی پیش‌تنیدگی در پیچ‌های اصطکاکی، به طور همزمان توسط آنالیز حساسیت دو طرفه توسط نرم‌افزار OpenSEES تعیین شده است. نتایج مقاله نشان داد که به کار گرفتن روش تعیین درصد ضریب پاسخ مینیمم (R) با تکیه بر آنالیز حساسیت موازی (دو طرفه) می‌تواند روش بسیار مناسبی برای تعیین بهینه‌ترین میراگر اصطکاکی در سیستم‌های دیوار بتنی متصل مرکزگرا تلقی گردد. همچنین نیروی پیش‌تنیده و بهینه برای میراگرها، نشان‌گر آن بود که میراگرهای قرار گرفته در موقعیت بین دو دیوار (مجموعه میراگرهای میانی)، یک مقدار بهینه مشخص و سایر میراگرها (مجموعه میراگرهای کناری) نیز عدد بهینه متفاوتی را نشان می‌دهند.

کلید واژگان: دیوارهای بتنی مرکزگرای متصل، ستون ثقیل، میراگر اصطکاکی، تاندون‌های فولادی، نرم افزار "اوپن سیس"

۱- مقدمه

تحقیقات گسترده‌ای در زمینه مهندسی زلزله در دهه های اخیر انجام شده است. تمرکز این تحقیق بر روی موضوعاتی مانند استحکام، پایداری جانبی و اتلاف انرژی بوده است. دیوارهای برشی بتن آرمه سستی (دیوار برشی معمولی) ، به عنوان یک المان مستحکم و با سختی بالا که در ساختمان‌ها استفاده می‌شود، نقش کلیدی و موثری در پایداری جانبی سازه ها ایفا می‌کند. اتلاف انرژی در دیوارهای برشی بتن مسلح معمولی و به اصطلاح، دیوارهای برشی سستی، به واسطه تشکیل مفاصل پلاستیک در موقعیت تکیه‌گاه دیوار بتنی به فونداسیون ایجاد می‌شود و باعث ایجاد تغییر شکل باقیمانده یا ماندگار در دیوار برشی بتنی پس از زلزله می‌شود. به عبارت دیگر پس از وقوع زلزله و حذف پارامتر نیرو از روی المان دیوار بتنی، شاهد تغییر شکل باقیمانده بر روی المان دیوار برشی بتنی از جمله کرنش‌های غیر ارتجاعی بر روی آرماتورها و خرد شدگی بتن دیوار خواهیم بود. وجود تغییر شکل باقیمانده^۱ بر روی دیوار بتنی، هزینه‌های اقتصادی به همراه اتلاف زمان را در پی خواهد داشت. امروزه وجود المان‌هایی مانند دیوارهای بتنی که بتوانند پایداری جانبی سازه را کنترل کند و در عین حال تغییر شکل باقیمانده را کاهش دهد و آسیب‌ها را به المان‌هایی غیر از سازه دیوار بتنی، متمرکز کند ضروری به نظر می‌رسد. قرار دادن ابزار اتلاف انرژی یا میراگرها بر روی دیوار بتنی به این دلیل است که در هنگام زلزله، آسیب‌ها و خسارات به جای دیوار بتنی (سازه اصلی)، بر روی ابزارهای اتلاف انرژی متمرکز شود به طوری که می‌توان پس از وقوع زلزله، این ابزارها را به سرعت تعویض کرد. به این ترتیب می‌توان خسارات مالی و جانی ناشی از زلزله‌های مکرر را به حداقل رساند.

در سال‌های اخیر، سیستم‌های دیوار بتنی جدیدی توسعه یافته‌اند که علی‌رغم پایداری و مقاومت در برابر نیروهای لرزه‌ای، می‌توانند تغییر شکل باقیمانده سیستم دیوار بتنی را کاهش دهد یا به طور کلی حذف کنند. همچنین اتلاف انرژی را به میراگرهای مورد استفاده در دیوار بتنی هدایت می‌کند. این سیستم‌ها، دیوارهای بتنی خود محور یا مرکزگرا^۲ نامیده می‌شوند. سیستم‌های دیوار بتنی توسعه یافته، پانل‌های بتنی پیش‌ساخته‌ای هستند که معمولاً توسط تاندون‌های پس کشیده^۳ به فونداسیون متصل می‌شوند. نقش تاندون‌ها، افزایش ظرفیت خود مرکزی دیوار بتنی است. به عبارتی باعث می‌شود پانل بتنی پس از حذف نیروی لرزه‌ای به حالت اولیه خود برگردد. همچنین قرار دادن میراگر بر روی دیوار می‌تواند میزان اتلاف انرژی در این سیستم‌ها را افزایش دهد. مطابق شکل ۱، همواره رفتار هیستریزیس دیوارهای مرکزگرا، رفتاری

باقیمانده سیستم دیوار بتنی را کاهش دهد یا به طور کلی حذف کنند. همچنین اتلاف انرژی را به میراگرهای مورد استفاده در دیوار بتنی هدایت می‌کند. این سیستم‌ها، دیوارهای بتنی خود محور یا مرکزگرا^۲ نامیده می‌شوند. سیستم‌های دیوار بتنی توسعه یافته، پانل‌های بتنی پیش‌ساخته‌ای هستند که معمولاً توسط تاندون‌های پس کشیده^۳ به فونداسیون متصل می‌شوند. نقش تاندون‌ها، افزایش ظرفیت خود مرکزی دیوار بتنی است. به عبارتی باعث می‌شود پانل بتنی پس از حذف نیروی لرزه‌ای به حالت اولیه خود برگردد. همچنین قرار دادن میراگر بر روی دیوار می‌تواند میزان اتلاف انرژی در این سیستم‌ها را افزایش دهد. مطابق شکل ۱، همواره رفتار هیستریزیس دیوارهای مرکزگرا، رفتاری پرچمی^۴ شکل را نشان می‌دهد به طوری که دیوارهای بتنی به همراه تاندون‌های فولادی وظیفه مرکزگرایی در سیستم و میراگرها وظیفه اتلاف انرژی^۵ را بر عهده دارند. ترکیب این دو رفتار، به منحنی پرچمی شکل می‌انجامد. دیوارهای بتنی خود محور به دیوارهای بتنی منفرد^۶ و دیوارهای بتنی متصل^۷ دسته بندی می‌شوند. سیستم‌های دیوارهای متصل سازه‌هایی هستند که در آنها دو دیوار بتنی منفرد با استفاده از اتصال دهنده های قائم که نقش میراگر را دارند به یکدیگر متصل می‌شوند. تحقیقات گسترده ای در مورد دیوارهای بتنی مرکزگرا انجام شده است، به عنوان مثال، Smith و همکاران بر اندازه گیری رفتار آزمایش یک نمونه دیوار بتنی پیش ساخته هیبریدی تحت بارگذاری جانبی چرخه معکوس متمرکز شدند [۱]. علاوه بر آن Kurama و همکاران، بر روی یک سیستم اتلاف انرژی غیرفعال تکمیلی برای دیوارهای پیش ساخته پس تنیده^۸ به استفاده از میراگرهای ویسکوز سیال خطی تمرکز کرد. او یک رویکرد طراحی برای سیستم اتلاف انرژی مکمل پیشنهادی معرفی کرد [۲].

⁶ Single concrete wall

⁷ Jointed concrete wall

⁸ Self-centering

⁹ Unbonded post-tensioned

¹ Residual deformation

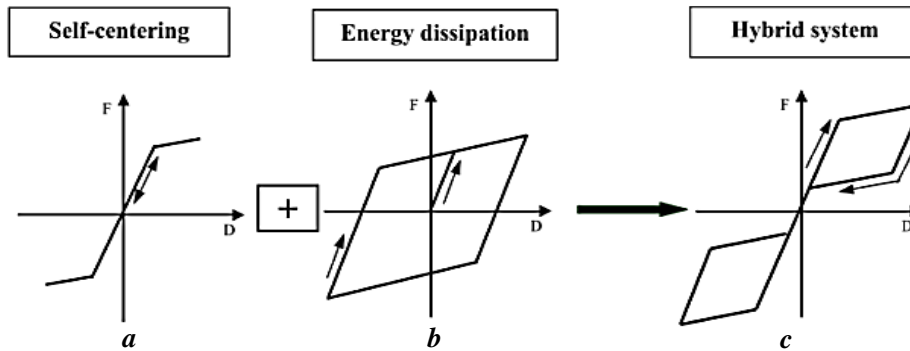
² Self-centering

³ Unbonded post-tensioned

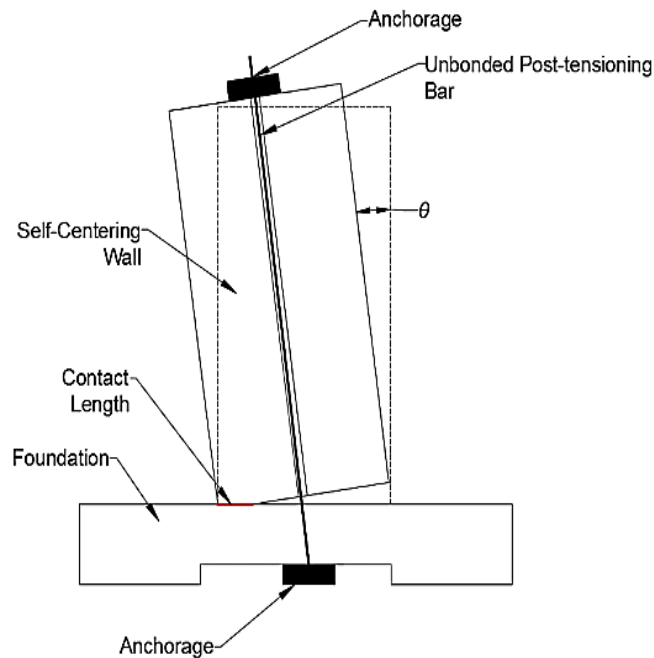
⁴ Flag-shaped behavior

⁵ Energy dissipation





شکل ۱ - رفتار پرچمی دیوارهای مرکزگرا [۳]



شکل ۲- دیوار بتنی مرکزگرای منفرد [۳]

را معرفی کرد که از نظر موقعیت تاندون‌های فولادی و طول شکاف بین دیوار و فونداسیون متفاوت بودند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که موقعیت تاندون‌های فولادی و میزان پیش‌تندگی اولیه کمترین تأثیر را بر اتلاف انرژی نمونه با طول شکاف کم دارد [۵]. LOO و همکاران جدیدترین تحقیقات را با موضوع اصلی دیوارهای برشی چوبی گهواره‌ای مرور کردند. آنها رویکرد جدیدی را برای تحقق آستانه لغزشی توصیف شده در اتصال

Sritharan و همکاران یک سیستم مقاومت لرزه‌ای متشکل از یک دیوار پیش‌ساخته مجهز به ستون‌های انتهایی و اتصال دهنده‌های O را توسعه دادند. برای تایید عملکردشان، آزمایش چرخه‌ای بر روی سیستم پیشنهادی اعمال کردند. نتایج آزمایش نشان داد که دیوار پیش‌ساخته با ستون‌های انتهایی عملکرد لرزه‌ای بالاتری نسبت به سیستم‌های تک دیوار بتنی ارائه می‌دهد [۴]. علاوه بر این، Lu و همکاران چهار نمونه از دیوارهای برشی

دیوار بتنی خود محور متصل به یکدیگر را معرفی کردند. در این سیستم، برای تحقق ظرفیت خود محوری، پانل های دیوار بتنی پیش ساخته مونتاژ شدند. به منظور ایجاد اصطکاک و اتلاف انرژی در سیستم از متصل کننده های اصطکاکی استفاده شد. با اعمال ۹ آزمایش بار چرخه ای بر روی نمونه ها، رفتار سیستم دیوار متصل به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سازه اصلی، زمانی که تحت ۹ آزمایش با نسبت دریافت ماکزیمم حدود ۲/۹۸ درصد قرار گرفت، انعطاف پذیری مناسبی از خود نشان داد. اگرچه پس از تعدادی بارگذاری معکوس وجود ترک در پوسته های بتنی در بخش های شرقی دیوار ظاهر شد. همچنین مشاهده شد که ساختار اصلی دیوار، پس از تست در حالت الاستیک قرار داشت و در نتیجه هیچ جابجایی باقیمانده در سیستم دیوار مشاهده نشد [۱۱]. هاشمیان و همکاران در تحقیقات خود، استفاده از سیستم دیوار چوبی چند لایه (CLT) را به عنوان دیوار متصل گهواره ای^{۱۳} مقاوم در برابر لرزش معرفی کردند. ایده نوآورانه آنها استفاده از اتصالات اصطکاکی لغزشی بود که مورد آزمایش سیکلی قرار گرفت [۱۲]. Wu و همکاران یک بتن مسلح فولادی خود محور جدید را ارائه کرد که به عنوان پانل های دیواری استفاده می شد. میراگر مورد استفاده در نمونه آن ها میراگر ADAS^{۱۴} با ظرفیت های متفاوت بود. نمونه های آنها شامل چهار نمونه تمام مقیاس بود که تحت بار جانبی چرخه ای قرار گرفتند. آنها بر جنبه های مختلف این نمونه ها از جمله فرآیند شکست، رابطه بار-تغییر مکان، ظرفیت جذب انرژی، تغییر شکل باقیمانده و نیروهای داخلی میلگردهای فولادی PT، تمرکز کردند. آن ها مشاهده کردند که سختی اولیه، حرکت گهواره ای دیوار ها و تغییر شکل باقیمانده در دیوارها به شدت تحت تاثیر پیش تنیدگی اولیه میلگردهای فولادی PT، قرار داشت. علاوه بر این، تغییر شکل های پلاستیک عمدتاً بر روی اتلاف کننده های انرژی انباشته شد. در نهایت، افزایش تعداد اتلاف کننده های انرژی منجر به افزایش ظرفیت جذب انرژی شد در حالی که ویژگی خود محوری تحت تاثیر منفی قرار گرفت. [۱۳]

دهنده های اصطکاک لغزشی ارائه کردند. آن ها نشان دادند که استفاده از اتصال دهنده های اصطکاک لغزشی برای جلوگیری از آسیب به سازه گهواره ای (چرخشی) یک رویکرد موثر است [۶]. Twigden و همکاران چهار سیستم دیوار بتنی پیش ساخته پس تنیده نچسبیده مختلف را مطالعه کردند که شامل دیوارهای گهواره ای منفرد و دیوار پیش ساخته با ستون های انتهایی (PreWEC)^{۱۰} بود. هدف آنها مطالعه تاثیر پارامترهایی نظیر نیروی کششی، ابعاد دیوار و جزئیات محصورشدگی در پاسخ چرخه ای بود. در روش آزمایشی مورد مطالعه، آزمایش چرخه ای شبه استاتیکی بر روی چهار دیوار انجام شد. مطالعه آن ها نشان داد که با فرض نسبت نیروی محوری کمتر از ۱۰ درصد، می توان منجر به طراحی کارآمد با کاهش خطر ترک خوردگی در پای دیوار شد [۷]. علاوه بر آن، در مطالعه ای توسط Hu و همکاران عملکرد لرزه ای قاب های بتنی مقاوم سازی شده با سیستم دیوار خود مرکز مورد بررسی قرار گرفت. نویسندگان یک مطالعه پارامتری را برای بررسی تاثیر سختی اولیه میراگرهای هیستریزیس و ارتباط حالت های مختلف تاندون ها بر روی پاسخ های لرزه ای دیوار هیبریدی (ترکیبی) خود مرکز انجام دادند. بر اساس نتایج به دست آمده می توان استنباط کرد که دیوار برشی خود مرکز، نقش کلیدی در کنترل و تسلط بر پاسخ لرزه ای قاب RC مقاوم سازی شده داشت [۸]. تانگ Guo و همکاران ارتقای لرزه ای سازه های قاب موجود را با استفاده از دیوار بتنی خود مرکز مجهز به میراگرهای اصطکاکی پیشنهاد کردند [۹]. Sritharan و همکاران یک سیستم دیوار پیش ساخته متصل را برای مناطق لرزه ای به عنوان بخشی از برنامه PRESS^{۱۱}، در ایالات متحده آمریکا ایجاد کردند. آن ها در این سیستم از دو یا چند دیوار پیش ساخته استفاده کردند که با استفاده از فولاد پس کشیده نچسبیده به فونداسیون متصل شده است. صفحات خمشی U شکل، که بین دیوار ها قرار می گرفت برای اتصال دیوار ها در جهت افقی استفاده کردند. آن ها نشان دادند که سیستم دیوار متصل، عملکرد عالی از خود نشان داد. با این حال ظرفیت تحمل بار سیستم دیوار پیشنهادی کمتر از دیوارهای بتنی مسلح درجا ریز بود [۱۰]. علاوه بر آن، Guo و همکاران یک سیستم

¹³ Rocking coupled wall

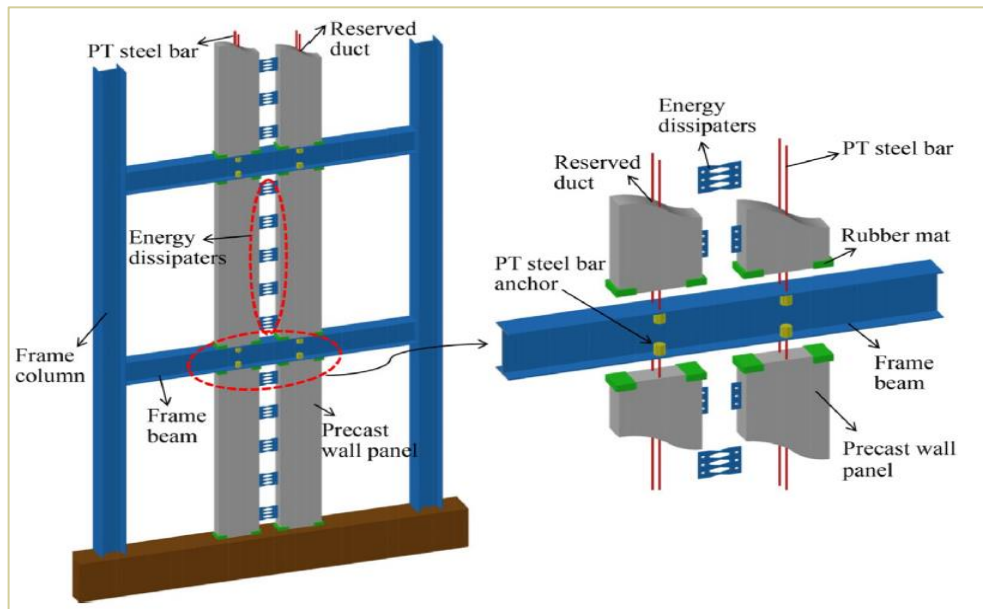
¹⁴ Added Damping And Stiffness

¹⁰ Precast wall With End Columns

¹¹ PREcast Seismic Structural Systems

¹² Cross laminated timber





شکل ۳- دیوار متصل بتنی به همراه میراگر تسلیمی ADAS [۱۳]

مقایسه شد [۱۱]. نرم افزار OpenSEES، یک نرم افزار متن باز است که در سال ۲۰۰۰ در دانشگاه برکلی کالیفرنیا توسط فرانک مک کنا و فنوس نوشته شده است. این نرم افزار یک نرم افزار قدرتمند در انجام تحلیل های غیر خطی است.

۲-۱- جزئیات نمونه آزمایشگاهی مورد بررسی

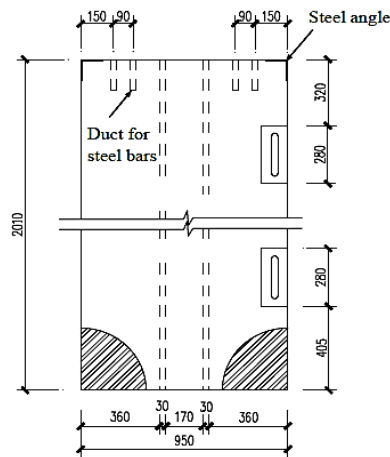
نمونه آزمایشگاهی انتخاب شده حاصل مقاله Guo و همکاران است [۱۱]. لازم به ذکر است جهت صحت سنجی، مشخصات آزمایشگاهی دیوار بتنی متصل تست شماره ۵ این مقاله انتخاب شد. نمونه انتخابی، جهت صحت سنجی، نمونه آزمایشگاهی مقاله مورد بررسی، دارای دو پانل بتنی مرکز گرای متصل به همراه میراگر های اصطکاکی می باشد. به نحوی که دو پانل بتنی به صورت متقارن هر کدام به طول ۹۵۰ ساخته شده است. ارتفاع موثر دیوارهای بتنی ۴۰۲۵ میلی متر از روی فونداسیون در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است پانل های بتنی در نظر گرفته شده توسط گائو و همکاران، به دو بخش پانل تحتانی به ارتفاع ۲۰۱۰ میلی متر و پانل فوقانی به ارتفاع ۲۱۹۰ میلی متر تفکیک و ساخته شده است. جزئیات دیوار های متصل بتنی در مطالعه Guo و همکاران، در شکل ۴، ارائه شده است [۱۱].

با این حال، اگرچه، اکثر مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در چند سال اخیر استفاده از دیوارهای مرکز گرای بتنی در انواع مختلف دیوار های منفرد، دیوارهای متصل و یا دیوار بتنی با ستون های انتهایی، بوده است ولی عمده تمرکز شان استفاده از میراگر های اصطکاکی متفاوت از نظر پیش تنیدگی و انجام تست آزمایشگاهی بر روی این نمونه ها بوده است. در پژوهش حاضر روشی را برای تعیین میراگر اصطکاکی بهینه در دیوارهای متصل به همراه ستون های ثقلی انتهایی بر مبنای مطالعات تحلیلی توسط نرم افزار OpenSEES^{۱۵} ارائه می کنیم. بدین منظور، ابتدا برای اطمینان از درستی مدل سازی عددی در نرم افزار OpenSEES، مدل آزمایشگاهی دیوار متصل مرکز گرای مورد مطالعه توسط Guo و همکاران، به کمک نرم افزار OpenSEES [۱۴]، مدل سازی شد [۱۱]. سپس نمونه معرفی شده توسط نرم افزار مدل سازی و تحلیل گردید و در نهایت روشی برای تعیین میراگر اصطکاکی بهینه بر مبنای آنالیز حساسیت موازی (دو طرفه)، برای دیوار های بتنی مرکز گرای متصل با ستون های ثقلی معرفی شد.

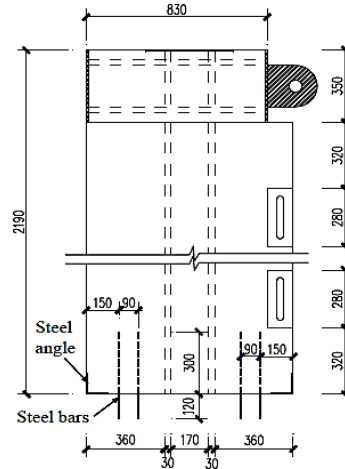
۲-۲- صحت سنجی بر مبنای مدل آزمایشگاهی

جهت اطمینان از درستی مدل سازی عددی انجام شده در این مقاله، مدل آزمایشگاهی در مقاله Guo و همکاران، در نرم افزار OpenSEES^{۱۶} مدل سازی شد و نمودار هیستریزس مدل آزمایشگاهی و مدل تحلیلی آن

¹⁵ Open System for Earthquake Engineering Simulation
¹⁶ Open System for Earthquake Engineering Simulation



ابعاد پانل بتنی تحتانی



ابعاد پانل بتنی فوقانی



(a) Base panel

پانل تحتانی



(b) Top panel

پانل فوقانی

شکل ۴- ابعاد نمونه آزمایشگاهی و مسلح کردن پانل‌ها به آرماتور طولی و عرضی

مرکزیت ۱۰۰ میلی متر قرار گرفته است. لازم به ذکر است در این مقاله کابل‌ها، با تنش اولیه به میزان ۰/۴۸ برابر تنش نهایی تاندون‌ها مورد پیش‌تنیدگی قرار گرفته‌اند. مشخصات اسمی کابل‌های پیش‌تنیده در مطالعه آزمایشگاهی Guo و همکاران، در جدول ۱ ارائه شده است [۱۱].

همچنین مطابق شکل ۴، آرماتورهای طولی و عرضی به کار رفته در پانل دیوار بتنی، به ترتیب دارای مقاومت تسلیم و نهایی ۴۶۷/۵ مگاپاسگال و ۶۰۷/۵ مگاپاسگال در نظر گرفته شده است. همچنین برای ایجاد ظرفیت مرکزگرایی در هر پانل دیوار بتنی، دو کابل پیش‌تنیده به قطر ۱۵/۲ میلی متر به صورت متقارن نسبت به مرکز دیوار با خروج از

جدول ۱- مشخصات اسمی کابل‌های پیش‌تنیده پس کشیده نمونه آزمایشگاهی (mm²&Mpa)

مساحت تاندون	قطر تاندون	تنش نهایی	تنش تسلیم	مدول الاستیسیته
۱۸۱/۴۵	۱۵/۲	۱۸۶۰	۱۴۹۸	۱۹۵۰۰۰

یک نیروی ثابت می‌رسد و نیروی ثابتی را تجربه می‌کند. لازم به ذکر است برای رسیدن به اتلاف مناسب توسط این ابزار به سطح اصطکاکی مناسبی با ضریب اصطکاک مناسبی نیاز است. در مطالعه Guo و همکاران این ضریب $\mu = 0.33$ در نظر گرفته شده است [۹]. همچنین سختی ابزار اصطکاکی جهت مدل کردن در نرم‌افزار OpenSEES عدد ۱۰۰۰۰۰۰ نیوتن بر متر در نظر گرفته شده است.

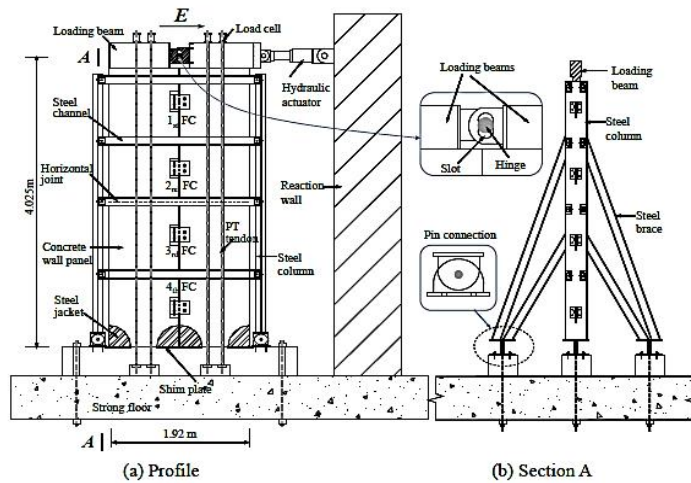
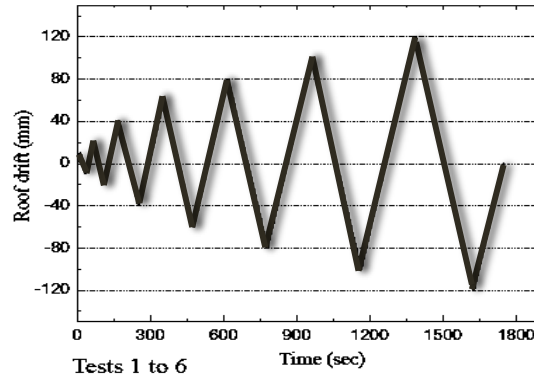
۲-۲- ابزار اتلاف‌کننده انرژی

یکی از مهمترین عواملی که باعث می‌شود نمودار هیستریزس سازه‌های مرکزگرا اصطلاحاً به سمت نمودارهای چاق میل کند استفاده از ابزارهای مستهلک‌کننده انرژی می‌باشد. ابزار اتلاف‌کننده انرژی به نحوی کار می‌کند که پس از وارد شدن به ناحیه غیر خطی در جابجایی‌های متعدد به

۳-۲- جزئیات بارگذاری

آزمایشگاهی ساخته شده توسط Guo و همکاران جهت صحت‌سنجی در نرم افزار OpenSEES نیز در شکل ۵ ارائه شده است [۱۱].

الگوی بارگذاری چرخه‌ای برای نمونه آزمایشگاهی شماره ۵ در مطالعه گائو و همکاران، به صورت شکل ۵ ارائه شده است. در مجموع، نمونه



شکل ۵- الگوی بارگذاری چرخه‌ای تست ۵ و جزئیات نمونه آزمایشگاهی ساخته شده در مطالعه Guo و همکاران [۱۱]

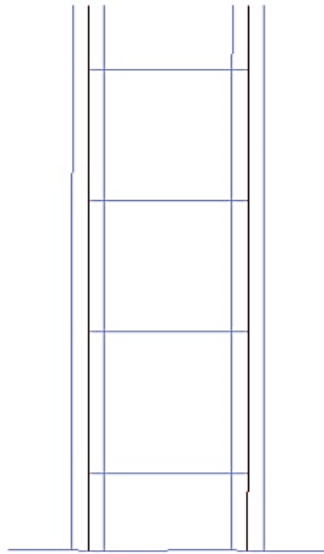
۴-۲- صحت‌سنجی مدل عددی

دیوار، توسط المان zeroLength مدل‌سازی شدند تا اندرکنش بین فونداسیون و بخش تحتانی دیوار بتنی اعمال شود. برای مدل‌کردن میراگرهای اصطکاکی در مدل‌سازی دیوار، ابتدا المان‌های افقی توسط المان Rigid یا سختی بالا به عنوان المان صلب مدل شدند پس از آن میراگرهای اصطکاکی در چهار نقطه مجزا توسط المان zeroLength مدل شدند. همچنین در نرم‌افزار OpenSEES متریکال Concrete02 در

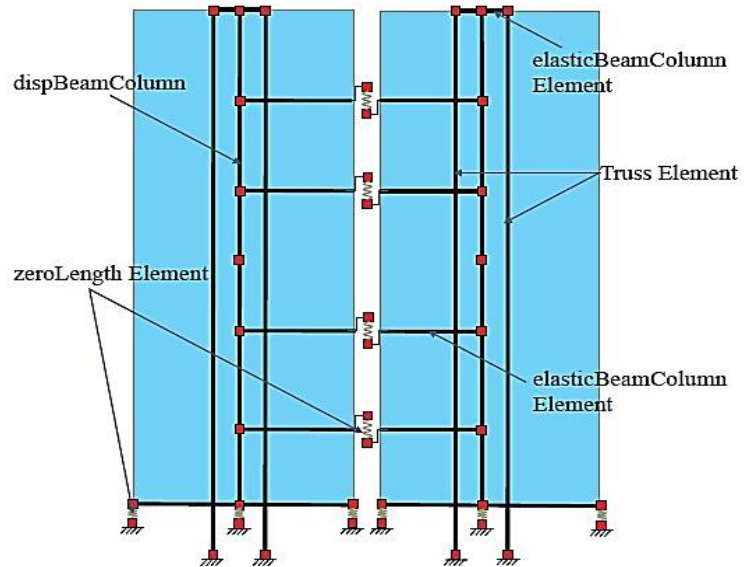
مدل نرم‌افزاری با استفاده از الگوی بارگذاری مشخص شده با استفاده از نرم‌افزار OpenSEES مورد تحلیل قرار گرفت. با توجه به این صحت‌سنجی با نرم‌افزار OpenSEES، دیوارهای مرکزگرا به وسیله المان dispBeamColumn که در محدوده مقاطع فایبر بود مدل‌سازی شد. کابل‌های پس‌تنیده توسط المان truss مدل‌سازی شدند تا بتوانند رفتار محوری تاندون‌ها را ایجاد کنند. فنرهای فشاری در بخش تحتانی

های اصطکاکی توسط مصالح Steel01 مدل شدند تا رفتار صحیح میراگر اصطکاکی مدل شود. تاندون ها توسط متریال Steel02 که دارای پارامتری به نام تنش اولیه است، مدل شدند. جزییات مدل سازی نمونه آزمایشگاهی مطالعه Guo و همکاران در نرم افزار OpenSEES در شکل ۶ ارائه شده است. [۱۱] همچنین رفتار همه متریال های استفاده شده در نرم افزار OpenSEES در شکل ۷ ارائه شده است.

دو حالت بتن محصور برای تعریف بتن هسته و بتن غیر محصور برای تعریف کردن بتن پوشش (کاور) مقطع دیوار مورد استفاده قرار گرفت. میلگرد های داخل دیوار بتنی، توسط متریال Reinforcingsteel مدل شدند. فنر های فشاری فونداسیون برای دیوار، توسط متریال ^{ENT} در نرم افزار OpenSEES مدل شدند تا رفتار خطی فونداسیون که دارای سختی زیاد در فشار و سختی صفر در کشش است، اعمال شوند. میراگر

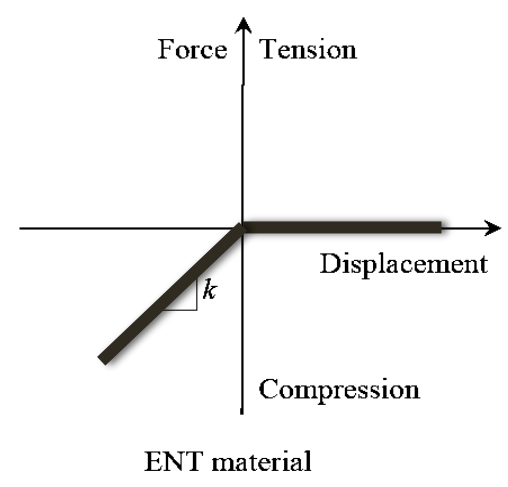
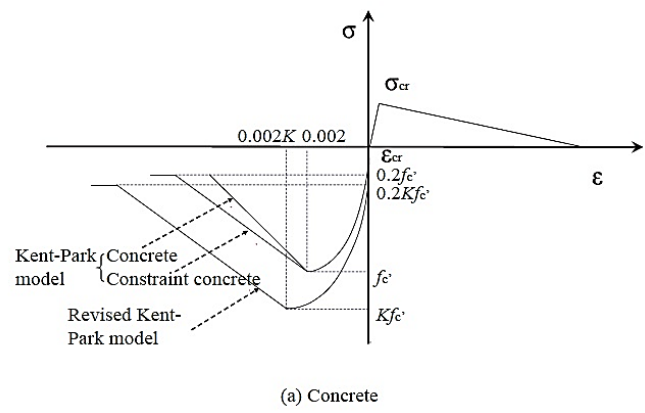


مدل تحلیلی در نرم افزار OpenSEES

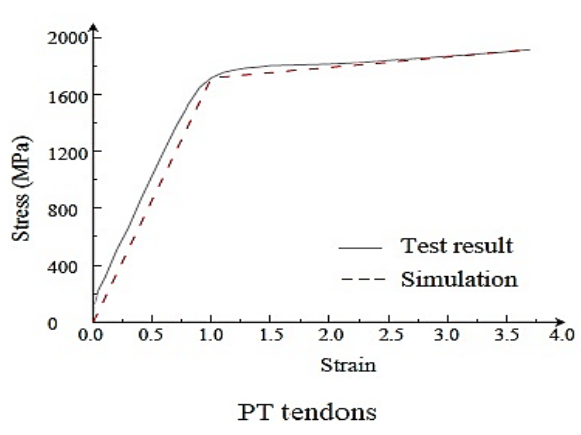


مدل ریاضی معرفی شده

شکل ۶. مدل سازی نمونه آزمایشگاهی تست ۵ مطالعه Guo و همکاران در نرم افزار OpenSEES [۱۱]

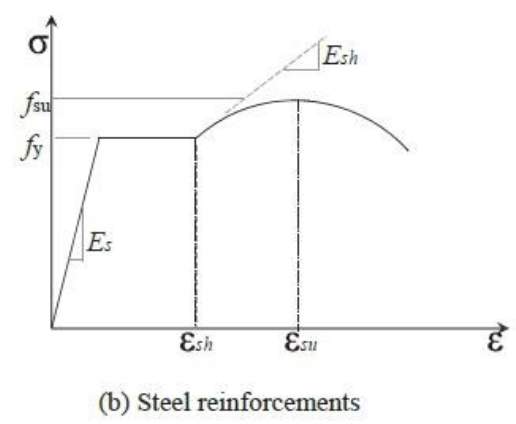


منحنی رفتار مصالح بتن در نرم افزار OpenSEES



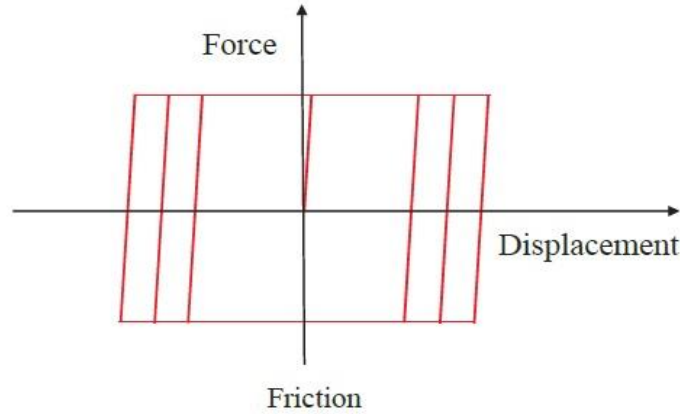
منحنی رفتاری اختصاص داده شده به کابل‌های پیش تنیده پس کشیده

منحنی رفتار برخورد دیوار با فونداسیون در OpenSEES



منحنی رفتاری اختصاص داده شده به آرماتورهای به کار رفته شده در مقطع فایبر دیوار برشی





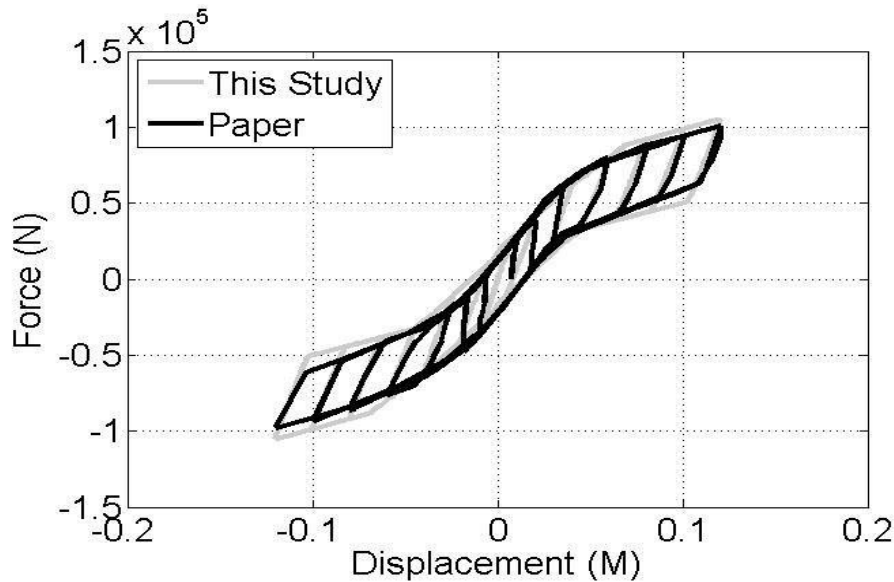
منحنی رفتار اختصاص داده شده به میراگر اصطکاکی

شکل ۷. رفتار مصالح به کار رفته در نرم افزار OpenSEES برای مدل سازی نمونه آزمایشگاهی Guo و همکاران [۱۱]

۲-۵- مقایسه پاسخ ها

پاسخ نیروی جانبی - تغییر مکان نمونه آزمایشگاهی مطالعه گائو و همکاران و نمونه عددی در شکل ۸ ارائه شده است. همان طوری که ملاحظه می شود دو نمونه مطابقت خوبی با یکدیگر دارند و هر دو منحنی به فرم پرچمی شکل هستند. سختی و مقاومت هر دو منحنی در حالت بارگذاری و باربرداری به یکدیگر بسیار نزدیک است و چنان چه اختلاف

جزیی در دو نمودار دیده می شود می تواند ناشی از لغزش دیوار در هنگام انجام آزمایش است که به صورت ناخواسته رخ داده است و این موضوع باعث اختلاف بسیار جزئی در نتایج عددی و آزمایشگاهی شده است. در مجموع نتایج مدل سازی عددی توسط نرم افزار OpenSEES از دقت قابل قبولی برخوردار است. بنابراین می توان جهت بررسی مدل عددی مورد نظر در بخش ۳، از نرم افزار OpenSEES برای دیوار بتنی مرکزگرای متصل با ستون های ثقلی استفاده نمود.



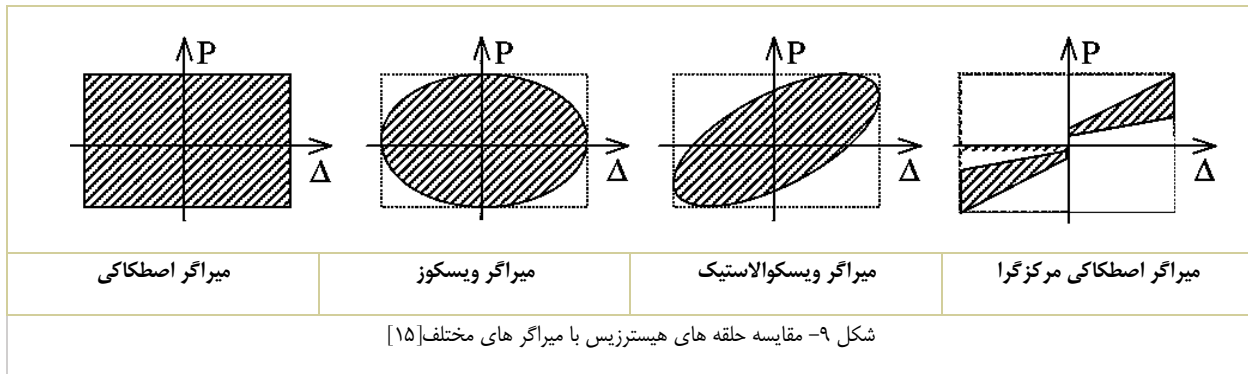
شکل ۸- مقایسه نمودار نیرو - تغییر مکان مدل سازی عددی و آزمایشگاهی مطالعه Guo و همکاران

به طوری که به عنوان یک میراگر وابسته به تغییر مکان شناخته می‌شود. بنابراین با روابط هیستریزس نیرو-تغییر مکان مدل می‌شوند. سطوح داخلی این منحنی‌ها، معرف میزان اتلاف انرژی در هر سیکل می‌باشد. شکل ۹، مقایسه حلقه هیستریزس میراگرهای مختلف را در مقایسه با میراگر اصطکاکی نشان می‌دهد.

۳- میراگر اصطکاکی بهینه ۱۸

۳-۱ مشخصات کاربردی میراگر های اصطکاکی

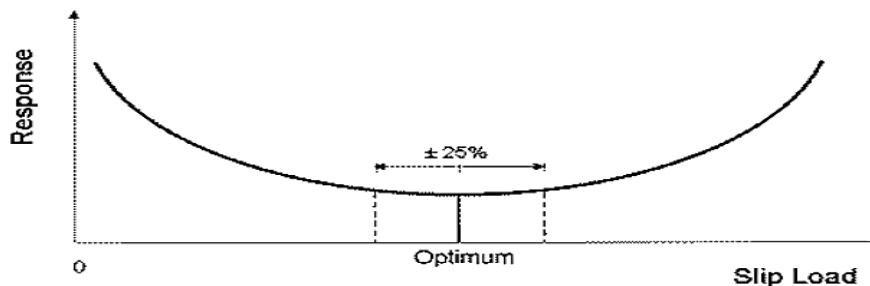
میراگر اصطکاکی، از طریق سطوح تماسی باعث اتلاف انرژی می‌گردد. اتلاف انرژی در این ابزار به نیرو و تغییر مکان داخلی آن‌ها بستگی داشته



باری است که بهینه‌ترین عملکرد میراگر در آن رخ دهد. بدین منظور نمودار تغییرات پاسخ کل سازه در مقابل بار لغزش را رسم کرده و بار بهینه لغزش را تعیین می‌کنیم. در شکل ۱۰، نمونه‌ای از منحنی بار بهینه‌ی لغزش برای یک سازه خاص نشان داده شده است. طبق مطالعات صورت گرفته در این زمینه تقریب ۲۵٪ در تعیین بار بهینه لغزش تأثیری در نتایج تحلیل و عملکرد میراگر نخواهد داشت.

۳-۲- بار لغزش^۹ برای میراگر اصطکاکی

بر اساس روش پیشنهادی Pall و همکاران، به منظور طراحی میراگر اصطکاکی می‌بایستی سازه مجهز به میراگر را برای بارهای لغزش مختلف، تحت تحلیل‌های غیر خطی قرار داد. [۱۵] محدوده انتخاب بارهای لغزشی مختلف را می‌توان درصدی از وزن سازه در نظر گرفت و برای هر بار لغزش، شاخص عملکرد میراگر را محاسبه کرد. بار بهینه لغزش



شکل ۱۰- پاسخ تغییر مکانی سازه به ازای تغییرات بار لغزش [۱۵]

مجهز به میراگر اصطکاکی با المان‌های الاستیک در رابطه $R = \frac{E_I - E_H}{E_I}$ تعریف نمود. در این رابطه، E_I انرژی ورودی سازه مجهز به میراگر اصطکاکی و همچنین E_H انرژی هیستریزس اتلاف شده توسط میراگر اصطکاکی را بیان می‌کند.

با توجه به شکل ۱۰، منظور از پاسخ تغییر مکانی سازه، در حقیقت درصد اتلاف انرژی کل سازه مستقل از میراگر است. بدیعی است هر چقدر این درصد پایین تر باشد، درصد اتلاف انرژی توسط میراگر در سازه، به مراتب بیشتر است. به عبارتی دیگر می‌توان این مفهوم را به صورت اختلاف انرژی کل و انرژی اتلاف شده توسط میراگر به انرژی کل برای سازه



۴- دیوار های مرکزگرا با حالت گهواره‌ای

۴-۱- مقایسه سختی دیوار برشی معمولی و دیوار بتنی

مرکزگرا با حالت گهواره‌ای

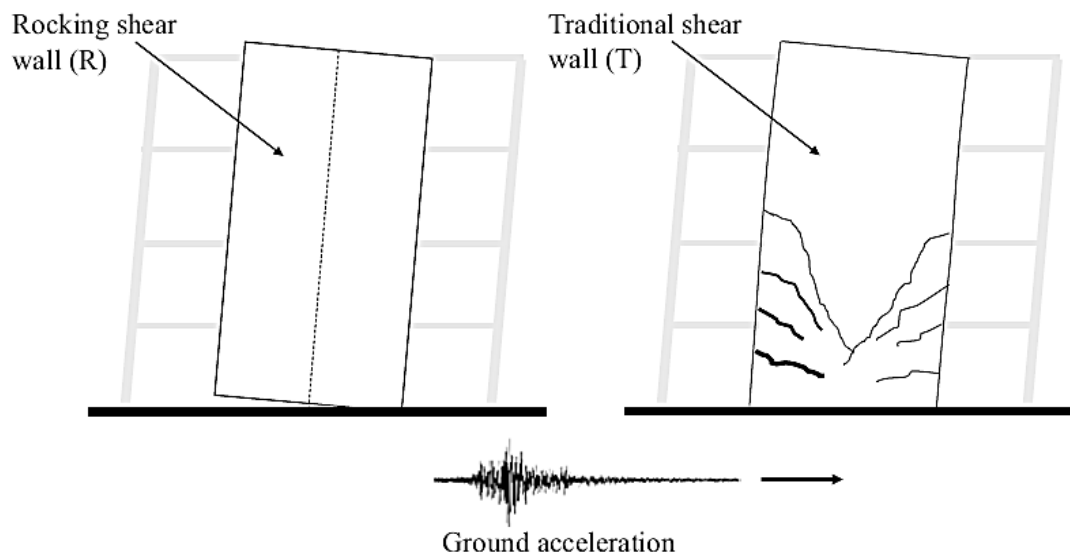
Aragaw و همکاران در سال ۲۰۲۰، مقایسه‌ای را بین دیوار های برشی معمولی و دیوار بتنی مرکزگرا با حالت گهواره‌ای انجام دادند. (شکل ۱۱- الف) آن‌ها نشان دادند که سختی دیوار های بتنی مرکزگرا با حالت گهواره‌ای به دلیل عبور نکردن آرماتور های طولی دیوار بتنی به داخل فونداسیون، ۲۰ درصد کمتر از دیوار برشی بتنی معمولی است. به نحوی که تمرکز شکل پذیری در دیوار های مرکزگرا با حالت گهواره‌ای به جای سازه اصلی (دیوار برشی بتنی)، بر روی "میراگرهای الحاقی" متصل به دیوار متمرکز شده است. و در مجموع می‌تواند گزینه لرزه ای مناسبی برای بهسازی سازه‌های ضعیف تلقی گردد. [۱۶]

۴-۲- معرفی نمونه دیوار بتنی مرکزگرای متصل به همراه

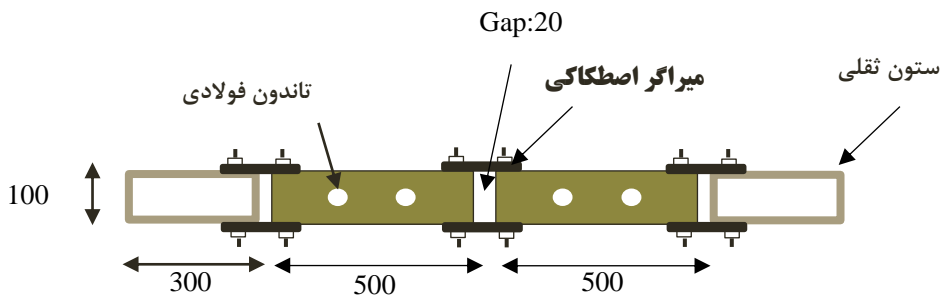
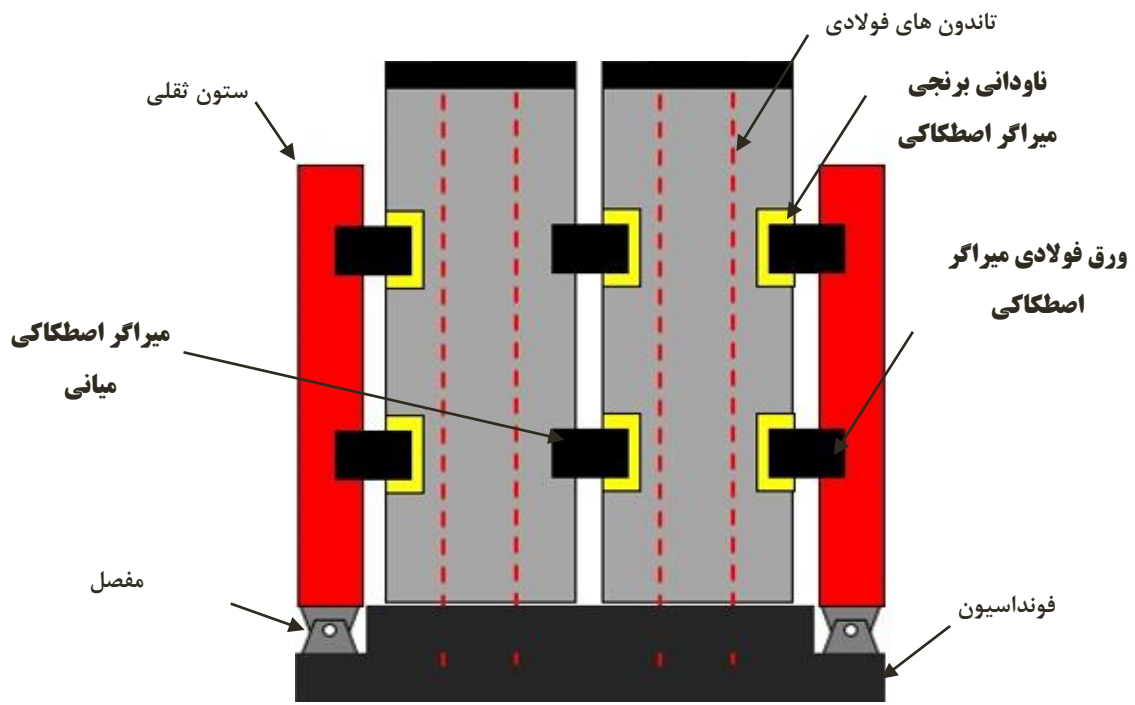
ستون‌های ثقلی

در این مقاله برای تعیین بار بهینه لغزش میراگر اصطکاکی نمونه دیوار بتنی مرکزگرای متصل به همراه ستون‌های ثقلی انتهایی انتخاب شد. نمونه انتخابی دارای دو پانل بتنی است که هر پانل بتنی دارای ابعاد عرض، ارتفاع و ضخامت ۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۱۰۰ میلی‌متر، می‌باشد. همچنین با توجه به شرایط بحرانی دیوار بتنی در حین چرخش، از آرماتور های تقویت

کننده طولی و عرضی در المان‌های مرزی دیوار استفاده شد. المان مرزی شامل قسمتی است که بار بر روی دیوار اعمال می‌شود. همچنین شامل قسمتی از دیوار تحت عنوان پاشنه دیوار^{۲۱} بتنی است که در هنگام حرکت گهواره‌ای دیوار، تنش فشاری زیادی را تجربه می‌کند. با توجه به اهمیت موقعیت المان مرزی، آرماتورهای عرضی در انتها و ابتدای دیوار با فاصله کمتری نسبت به سطح میانی دیوار بتنی قرار گرفتند. در راستای ارتفاع دیوار بتنی، برای بخش‌های ابتدایی و انتهایی دیوار، به طور مساوی از آرماتور عرضی به قطر ۸ میلی‌متر و فاصله ۳۷/۵ میلی‌متر استفاده شد. همچنین در نیمه میانی دیوار، از آرماتور عرضی به قطر ۸ میلی‌متر و فاصله ۷۵ میلی‌متر استفاده شد. به علاوه در همین ناحیه، از آرماتورهای طولی به قطر ۱۰ میلی‌متر استفاده شد. برای قسمت باقیمانده دیوار در این ناحیه، از آرماتور طولی به قطر ۸ میلی‌متر استفاده شد. موقعیت میراگر های میانی و کناری اصطکاکی در یک سوم و دو سوم ارتفاعی دیوار در نظر گرفته شد. همچنین ارتفاع در نظر گرفته شده برای ستون ثقلی، پایین‌تر از تراز دیوار بتنی و به ارتفاع ۱۶۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است وظیفه ستون ثقلی فقط نگهداری و کنترل میراگر اصطکاکی جهت اتلاف انرژی می‌باشد. جهت کنترل لهیدگی پاشنه دیوار بتنی حین حرکت گهواره‌ای دیوارهای بتنی مرکزگرا، از ژاکت‌های فولادی در مدل‌سازی استفاده شد. جزئیات نمونه معرفی شده در نرم‌افزار OpenSEES برای تعیین میراگر بهینه به صورت کامل در شکل (۱۱-ب) نشان داده شده است. همچنین جزئیات هندسی ابعاد میراگر اصطکاکی در شکل‌های (۱۱-ج) و (۱۱-د) ارائه شده است.

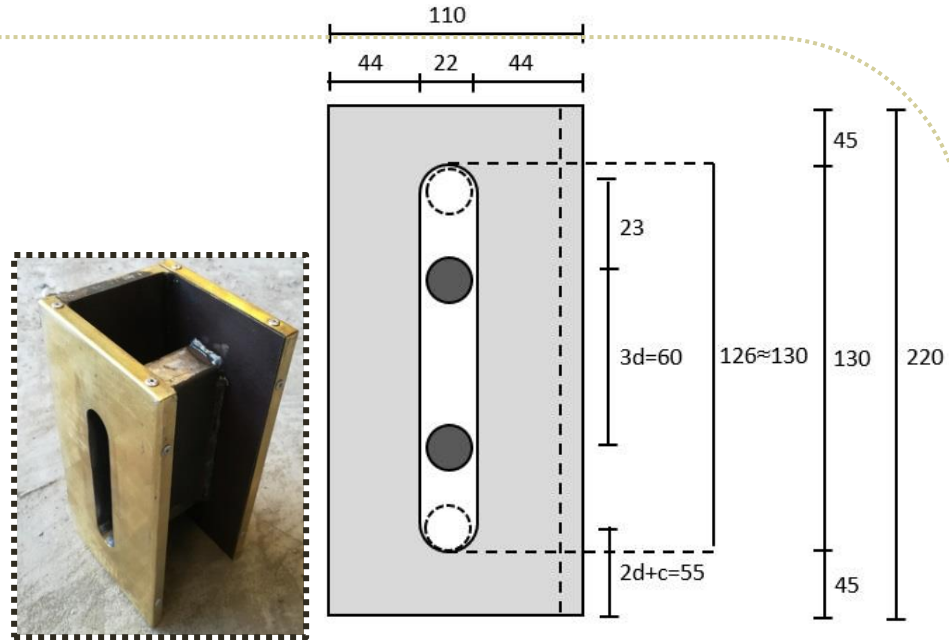


شکل ۱۱- الف. مقایسه دیوار برشی بتنی معمولی و دیوار بتنی مرکزگرا با حالت گهواره‌ای [۱۶]

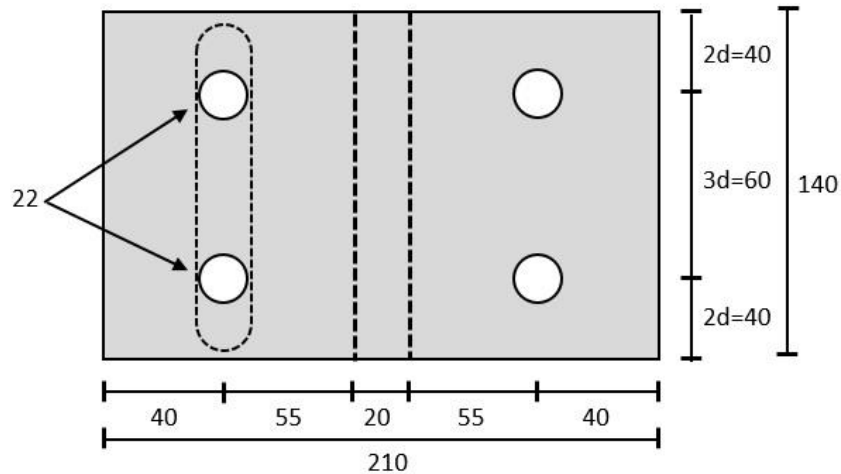


پلان نمونه

شکل ۱۱-ب. جزییات نمونه معرفی شده برای تعیین میراگر بهینه (ابعاد به میلی متر)



شکل ۱۱- ج. ابعاد هندسی نودانی برنجی میراگر اصطکاکی (ابعاد به میلی متر)



شکل ۱۱- د. ابعاد هندسی ورق فولادی میراگر اصطکاکی (ابعاد به میلی متر)

تاندون‌های فولادی در داخل پانل بتنی، بر پایه تغییر مکان مجاز ارائه شده توسط آیین‌نامه ACI ITG5.2 برای دیوارهای مرکزگرا و همچنین روابط تعادل موجود برای دیوارهای مرکزگرا تعیین می‌شود. تغییر مکان نسبی نهایی دیوار از رابطه ۱ مطابق با دستورالعمل ACI ITG-5.2 تعیین می‌شود [۱۷].

۵- محاسبات مربوط به قطر تاندون‌های فولادی

یکی از مهمترین المان‌ها در دیوارهای بتنی مرکزگرای متصل، طراحی تاندون‌های فولادی و رسیدن به قطری مناسب برای تامین ظرفیت مرکزگرایی سیستم دیوارهای متصل بتنی می‌باشد. قطر مناسب برای

$$\Delta_{wc} = 0.9\% \leq \left(\frac{H_w}{L_w}\right)0.8\% + 0.5\% \leq 3.0\% \quad (1)$$

$$\Delta_{wm} = 0.95\Delta_{wc}$$

در رابطه یک :

 H_w : ارتفاع دیوار بتنی

همچنین با در نظر گرفتن روابط تعادل دیوارهای بتنی مرکزگرای متصل، قطر مناسب تاندون‌های به کار رفته در دیوارهای متصل بتنی تعیین شد. جدول ۲ قطر مناسب تاندون برای دیوار متصل مرکزگرای بتنی جهت تحلیل در نرم‌افزار OpenSEES را نشان می‌دهد.

 Δ_{wc} : مینیمم ظرفیت تغییر مکان نسبی دیوار بتنی پیش ساخته

ترکیبی

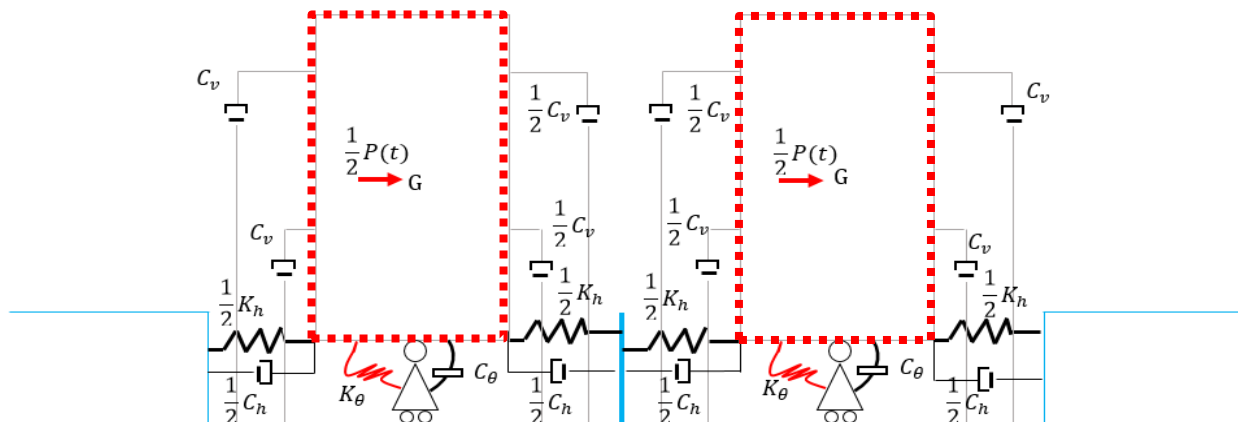
 L_w : طول دیوار بتنی

جدول ۲ - قطر و مساحت مناسب برای تاندون‌های فولادی در دیوار متصل مرکزگرا با ستون ثقیلی		
نوع سازه	قطر تاندون ها (mm)	مساحت تاندون ها (mm ²)
دیوار بتنی مرکزگرای متصل با ستون	۱۲/۷	۱۲۶/۶۷

۶- معادله ارتعاش سیستم دیوارهای مرکزگرای متصل بتنی به همراه میراگر اصطکاکی

۲ درجه آزادی، انتقالی و دیگری درجه آزادی دورانی برای مجموع پانل‌های بتنی مرکزگرای متصل می‌باشد. همان طوری که در شکل (۱۱-ب) مشاهده می‌شود، پایداری دورانی دیوارهای مرکزگرا از طریق لنگر مقاوم که توسط تاندون‌های فولادی، ایجاد می‌شود، تامین می‌گردد. بنابراین سیستم دیوار متصل به دلیل حضور تاندون‌های فولادی و حرکت گهواره ای دیوار و برخورد با فونداسیون بتنی، سختی دورانی (K_θ) و میرایی دورانی (C_θ) را در محل پاشنه تجربه می‌کند. مدل ارتعاشی نشان داده شده در شکل ۱۲، بیانگر رفتار ارتعاشی در سیستم دیوار بتنی مرکزگرای متصل می‌باشد.

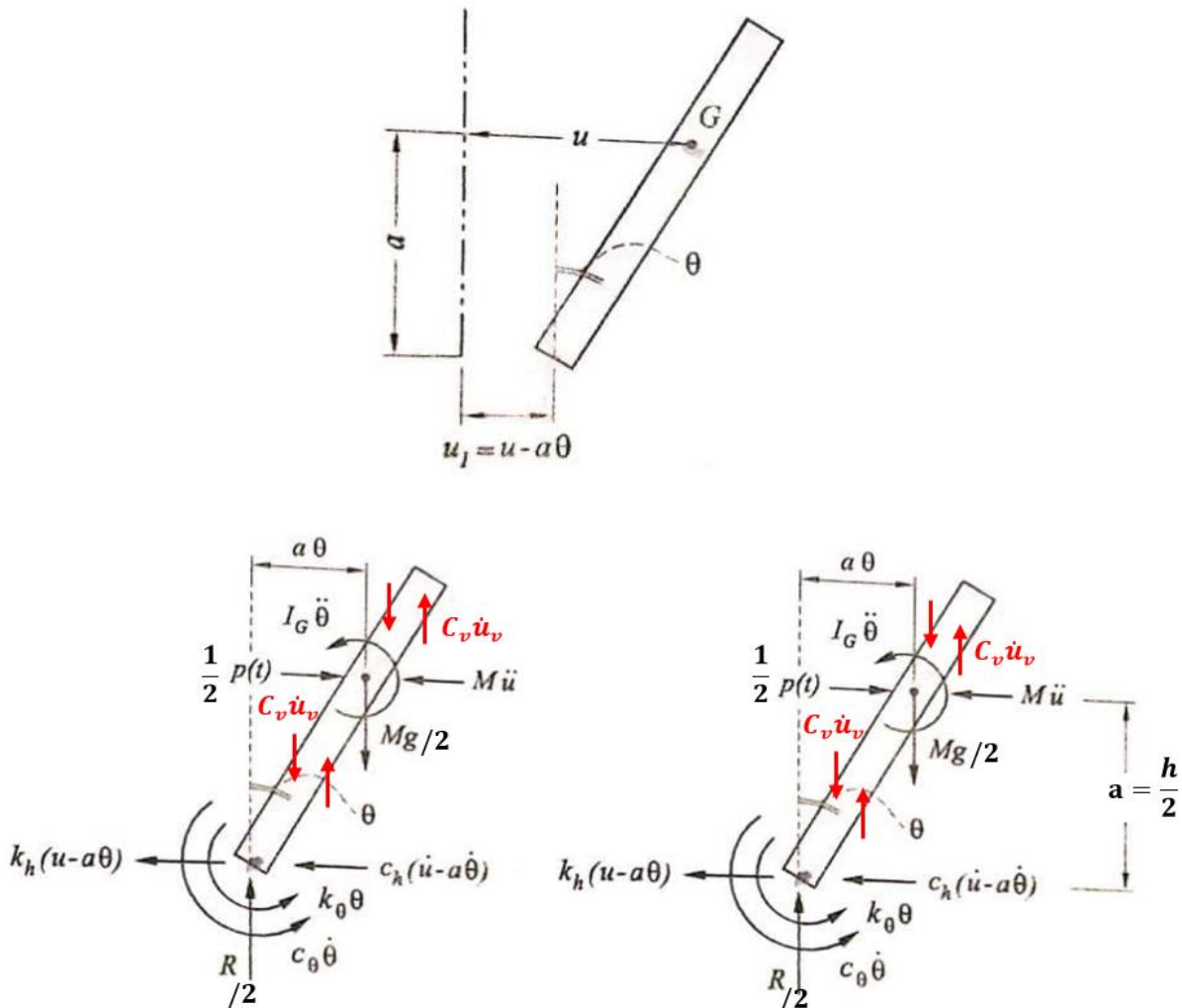
سیستم دیوار مرکزگرای متصل بتنی در شکل (۱۱-ب) را در نظر بگیرید. چنان چه فرض شود دیوارهای بتنی مرکزگرا روی یک لایه گروت در سطح فونداسیون بتنی قرار داشته باشد، پانل‌های بتنی علاوه بر چرخش، مقدار کمی حرکت افقی را تجربه می‌کنند که به واسطه گروت‌ها و اصطکاک با سطح فونداسیون بتنی میرا می‌گردد. بنابراین در سیستم دیوار مرکزگرای متصل، علاوه بر وجود میرایی قائم (C_v) به واسطه میراگرهای اصطکاکی خارجی، می‌توان شاهد سختی (K_h) و میرایی افقی (C_h) در سیستم باشیم. همچنین با فرض اتصال دو پانل دیوار بتنی به واسطه میراگرها به یکدیگر و تجربه جابجایی افقی و دورانی مشابه و یکسان در پانل‌های دیوار، می‌توان گفت سیستم از نظر "دینامیک ارتعاشی" دارای



شکل ۱۲ - مدل دینامیکی سیستم دیوار بتنی مرکزگرای متصل

به عنوان درجات آزادی مستقل اختیار کنیم، نمودار پیکر آزاد سیستم به صورت شکل ۱۳ خواهد بود.

با توجه به مدل دینامیکی ارائه شده در شکل ۱۲، سازه یک سیستم دو درجه آزادی می‌باشد. چنان چه تغییر مکان و دوران مرکز جرم سازه (G) را



شکل ۱۳ - نمودار پیکر آزاد سیستم دیوار بتنی مرکزگرای متصل

با توجه به شکل ۱۳، چنان چه ارتفاع پانل های دیوار h در نظر گرفته شود و طول هر پانل هر دیوار بتنی L در نظر گرفته شود، با توجه به معادلات تعادل دینامیکی، معادله انتقالی ارتعاش سیستم دیوار بتنی مرکزگرای متصل به صورت رابطه ۲ نوشته می‌شود.

$$2M\ddot{u} + 2Ch\left(\dot{u} - \frac{h}{2}\dot{\theta}\right) + 2K_h\left(u - \frac{h}{2}\theta\right) = P(t)$$

$$2M\ddot{u} + 2C_h\dot{u} - C_h h\dot{\theta} + 2K_h u - K_h h\theta = P(t)$$

(۲)

با توجه به هندسه پانل دیوار بتنی، رابطه بین جابجایی افقی بالای دیوار و جابجایی قائم محل میراگر های اصطکاکی به صورت رابطه ۳ نوشته می شود.

$$u_v = \frac{u_x \cdot L}{h} \rightarrow u_v = \frac{2u \cdot L}{h} = \frac{2\left(\frac{h}{2}\theta\right) \cdot L}{h} \rightarrow u_v = \theta L \quad (3)$$

با توجه به معادلات تعادل دینامیکی، معادله دورانی ارتعاش سیستم دیوار بتنی مرکزگرای متصل به صورت رابطه ۴ نوشته می شود.

$$2I_G \ddot{\theta} + 2C_\theta \dot{\theta} + 2K_\theta \theta - C_h \dot{u} + \frac{1}{2} C_h h^2 \dot{\theta} - K_h \cdot h \cdot u + \frac{1}{2} K_h \cdot h^2 \theta - \frac{3}{4} Mgh\theta - 2C_v (\dot{\theta}L)L = 0 \quad (4)$$

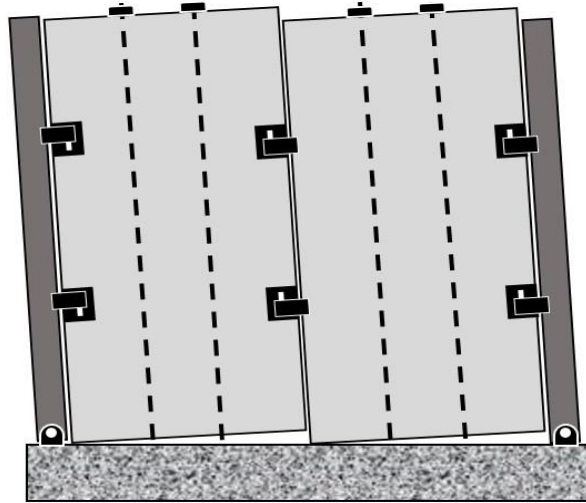
روابط ۲ و ۴ را می توان به فرم ماتریسی زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} 2M & 0 \\ 0 & 2I_G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (2C_h) & -hC_h \\ -hC_h & (2C_\theta + \frac{1}{2}h^2C_h + 2C_vL^2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (2K_h) & -hK_h \\ -hK_h & (2K_\theta + \frac{1}{2}h^2K_h + \frac{3}{4}Mg \cdot h) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P(t) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

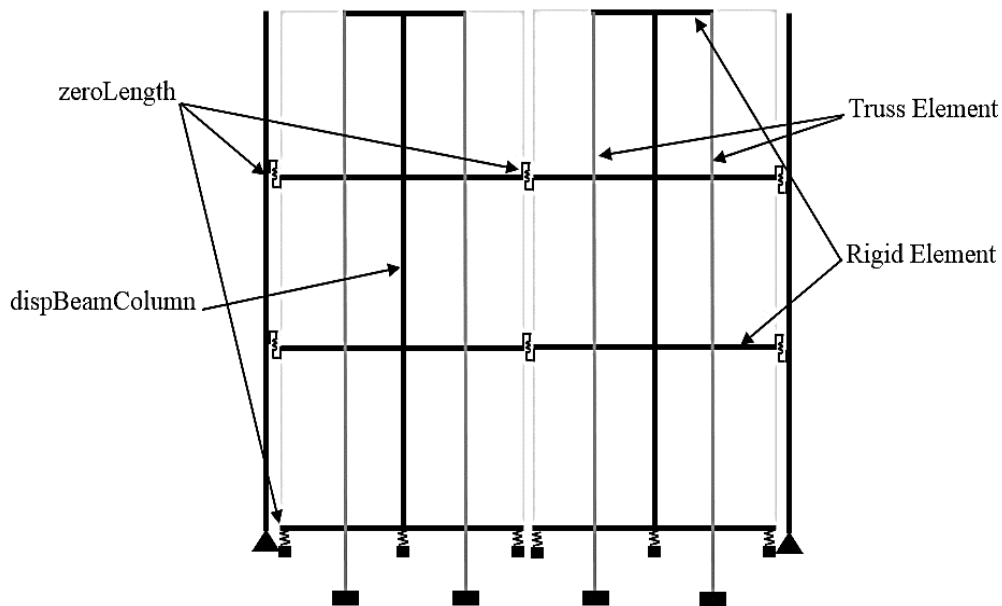
۷- مدل سازی نمونه دیوار بتنی مرکزگرای متصل به همراه ستون های ثقلی توسط نرم افزار OpenSEES

برای مدل کردن میراگر های اصطکاکی در مدل سازی دیوار، ابتدا المان های افقی توسط المان Rigid با سختی بالا به عنوان المان صلب مدل شدند پس از آن میراگرهای اصطکاکی در شش نقطه مجزا، (۲ نقطه برای میراگر میانی و ۴ نقطه برای میراگر کناری) توسط المان zerolentgh مدل شدند. همچنین در نرم افزار OpenSEES متریکال Concrete02 در دو حالت بتن محصور برای تعریف بتن هسته و بتن غیر محصور برای تعریف بتن پوشش مقطع دیوار مورد استفاده قرار گرفت. میلگردهای داخل دیوار بتنی، توسط متریکال Reinforcingsteel مدل شدند. فنرهای فشاری فونداسیون برای دیوار، توسط متریکال ENT در نرم افزار OpenSEES مدل شدند تا رفتار خطی فونداسیون که دارای سختی زیاد در فشار و سختی صفر در کشش است، اعمال شوند. میراگر های اصطکاکی توسط مصالح Steel01 مدل شدند تا رفتار صحیح میراگر اصطکاکی مدل شود. تاندون ها توسط متریکال Steel02 که دارای پارامتری به نام تنش اولیه است، مدل شدند. نمای شماتیک حرکت گهواره ای دیوار مرکزگرای بتنی در شکل ۱۴ ارائه شده است. همچنین جزئیات مدل سازی نمونه معرفی شده در نرم افزار OpenSEES در شکل ۱۵ ارائه شده است. رفتار همه مصالح استفاده شده در نرم افزار OpenSEES مشابه شکل ۷ در نظر گرفته شده است [۱۱].

در ادامه، ابتدا نمونه آزمایشگاهی توسط نرم افزار OpenSEES، مدل سازی شد و سپس نمونه مدل شده با تمام جزئیات در نرم افزار OpenSEES تحت بار سیکلی قرار گرفت. بار لغزش بهینه برای میراگر اصطکاکی، به وسیله تعیین نمودار پاسخی مشابه شکل ۱۰، برای نمونه مدل شده در OpenSEES و با توجه به استخراج منحنی رفتار هیستریزس کل سازه و منحنی رفتار هیستریزس میراگر اصطکاکی که حاصل عملکرد حرکت گهواره ای دیوار دارای میراگر اصطکاکی می باشد تعیین شد. لازم به ذکر است با توجه به وجود میراگر اصطکاکی در موقعیت های بین دو دیوار و بین دیوار بتنی و ستون فولادی (ستون های ثقلی)، تعیین بار لغزش یک بار با استفاده از روش سعی و خطا بر اساس عملکرد مجزا بین میراگر های میانی و کناری و بار دیگر بر اساس عملکرد همزمان دو میراگر اصطکاکی میانی و کناری توسط آنالیز حساسیت موری (دو طرفه) در نرم افزار OpenSEES، صورت گرفت. به منظور مدل سازی نمونه معرفی شده شکل ۱۱، در نرم افزار OpenSEES، دیوارهای مرکزگرا به وسیله المان dispBeamColumn که در محدوده مقاطع فایبر بود مدل سازی شد. کابل های پس تنیده توسط المان truss مدل سازی شدند تا بتوانند رفتار محوری تاندون ها را ایجاد کنند. فنرهای فشاری در بخش تحتانی دیوار، توسط المان zerolength مدل سازی شدند تا اندرکنش بین فونداسیون و بخش تحتانی دیوار بتنی اعمال شود.



شکل ۱۴ - نمای شماتیک دیوار مرکزگرای در حال حرکت گهواره ای



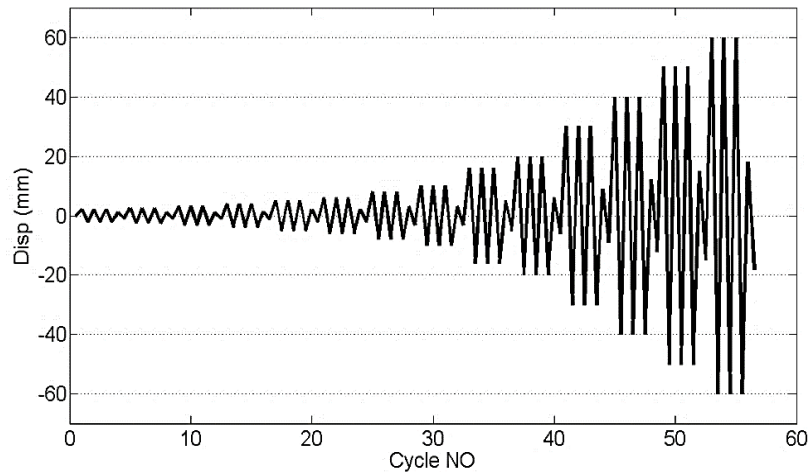
شکل ۱۵ - پیکربندی مدل در اوپن سیس

شده است) استفاده شد [۱۱]. به علاوه از تاندون‌های با قطر ۱۲/۷ میلی متر مطابق روابط موجود در آیین‌نامه ACI ITG5.2 و به ترتیب با تنش تسلیم و نهایی ۱۶۷۴ و ۱۷۷۰ مگاپاسکال ، در مدل‌سازی تاندون‌های دیوار استفاده شد. (محاسبات قطر تاندون بر اساس روابط موجود در بخش ۵ مقاله تعیین شده است) لازم به ذکر است که نیروی پس کشیدگی در تاندون ها ۵۵ درصد تنش نهایی تاندون ها در نظر گرفته شد. برای بررسی

علاوه بر آن ، جهت مدل کردن رفتار پانل بتنی در نرم‌افزار OpenSEES مقاومت فشاری و کششی بتن دیوار به ترتیب ۵۵ و ۱/۷ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. تنش تسلیم و تنش نهایی میلگردها به ترتیب ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. برای در نظر گرفتن اندرکنش بین پانل دیوار بتنی و فونداسیون فولادی از فنر های فشاری با سختی $2.9 \times 10^7 \text{ N/mm}$ (سختی فنر های فشاری ۴۰ برابر سختی محوری پانل بتنی در نظر گرفته

اساس رهنمود آیین‌نامه ACI برای معیار پذیرش در دیوارهای بتنی مرکزگرا تدوین شده آیین‌نامه ACI ITG 5.2، می‌باشد. [۱۷]

رفتار ساختار دیوار، یک تحلیل چرخه‌ای با توجه به پروتکل بار افزایشی نشان داده شده در شکل ۱۶ انجام شد. پروتکل بارگذاری جهت انجام تحلیل چرخه‌ای در نرم افزار OpenSEES، پروتکل انتخاب شده بر

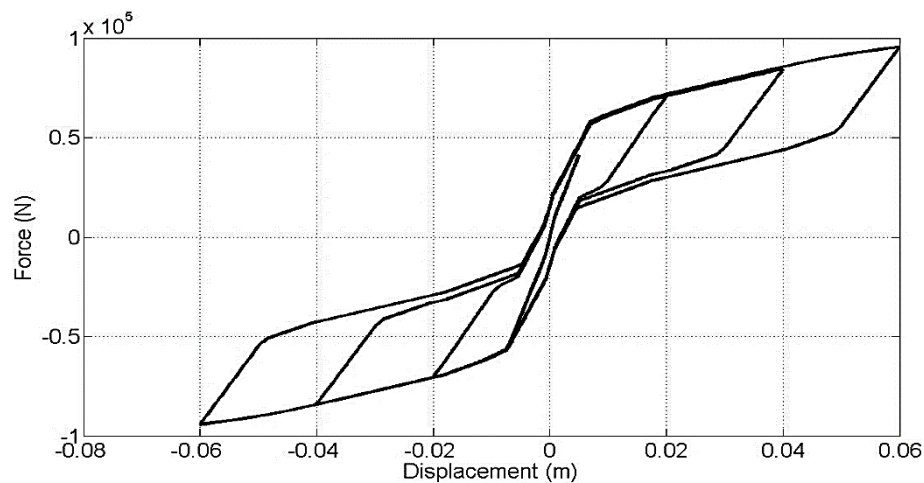


شکل ۱۶- پروتکل بارگذاری استفاده شده در تحلیل چرخه ای [۱۷]

۸- نمودارها و نتایج

دیوار بتنی مرکزگرا نشان داد. لازم به ذکر است در این نمودار محور عمودی برش پایه تجربه شده توسط کل سیستم دیوار در طول تحلیل را نشان می‌دهد و محور افقی جابجایی تجربه شده دیوار تا انتهای تحلیل چرخه‌ای را بیان می‌کند.

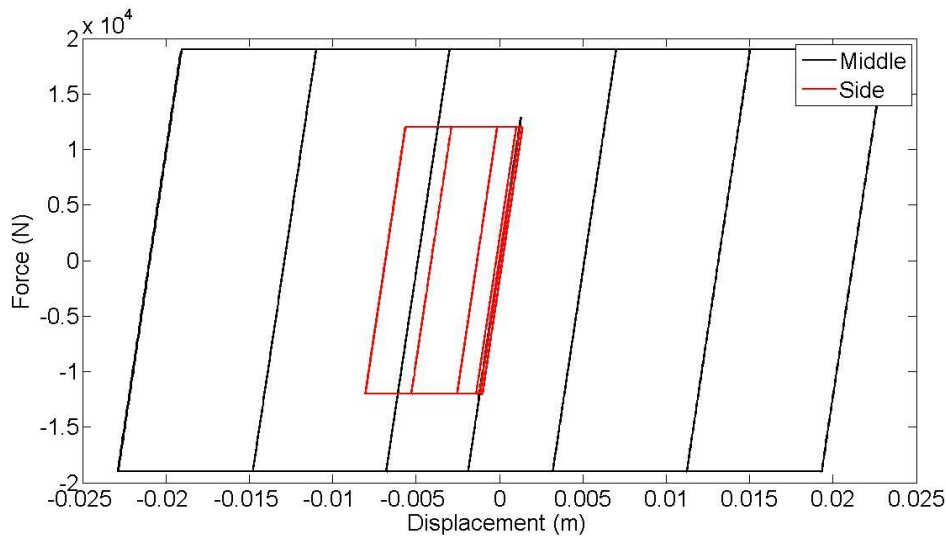
با اعمال پروتکل بارگذاری به نقاط میانی هر دیوار واقع در بالای دیوار بتنی، نمودار نیرو - جابجایی (نمودار هیستریزیس) ایجاد شده حاصل از تحلیل چرخه‌ای نمونه مدل شده در نرم‌افزار OpenSEES به صورت شکل ۱۷ تعیین گردید. این نمودار رفتاری کاملا "پرچمی شکل" را برای



شکل ۱۷- نمودار نیرو جابجایی کل سیستم نمونه معرفی شده حاصل از تحلیل چرخه‌ای

در طول تجزیه و آنالیز مدل در نرم افزار OpenSEES شد. بنابر این مطابق پیشنهاد Guo و همکاران، سختی فنر های فشاری ۴۰ برابر سختی محوری پانل بتنی مرکزگرا در نظر گرفته شد [۱۱]. به عبارتی دیگر فونداسیون مدل شده در نرم افزار OpenSEES، فونداسیونی انعطاف پذیر نسبت به واقعیت در نظر گرفته شد. این عمل باعث گردید که میراگر های میانی سهم بیشتری از جابجایی را نسبت به میراگر های کناری به خود اختصاص دهند و این امر باعث دور شدن از واقعیت می گردد چرا که در واقعیت سختی فنر های فشاری که معرف اندرکنش فونداسیون فولادی با دیوار بتنی می باشد، بسیار بالا می باشد. هر چقدر سختی فنر فشاری مدل شده در نرم افزار OpenSEES، به سختی واقعی فونداسیون نزدیک تر باشد، سهم میراگر های میانی و کناری از جابجایی عمودی به هم نزدیک تر می شود. بنابراین همان طوری که از شکل ۱۸ مشاهده می شود، میزان جابجایی عمودی تجربه شده در جهت مثبت و منفی میراگر های میانی و کناری، کمی بیشتر از واقعیت ثبت شده است و این نتیجه را می توان به انتخاب سختی پایین و غیر واقعی فنر های فشاری مدل شده در نرم افزار OpenSEES نسبت به سختی واقعی فونداسیون فولادی جهت اندرکنش بین دیوار و فونداسیون مرتبط کرد. لازم به ذکر است اختصاص دادن سختی بسیار بالا به این فنر ها مطابق با واقعیت، منجر به "عدم همگرایی" تحلیل در نرم افزار OpenSEES می گردد.

در طول این تجزیه و تحلیل میراگرهای اصطکاکی یک حلقه هیستریزس را نشان داده اند که در شکل ۱۸ بیان شده است. مطابق این شکل محور افقی جابجایی نسبی قائم میراگر اصطکاکی و همچنین محور قائم نیروی لغزش تجربه شده توسط میراگر اصطکاکی را نشان می دهد. در شکل ۱۸، یکی از حلقه های هیستریزس مرتبط با میراگر اصطکاکی کناری و دیگری مرتبط با میراگر اصطکاکی میانی است. همانطور که در شکل ۱۸ نشان داده شده است میراگر اصطکاکی میانی دارای رفتار متقارن در جهت مثبت و منفی است، اما میراگر کناری (جانبی) دارای رفتار نامتقارن است و این پدیده به دلیل هندسه مدل و موقعیت میراگر های جانبی ایجاد شد. چرا که میراگر های میانی به دلیل موقعیت قرارگیری خود بین دو پانل بتنی و جابجایی عمودی همزمان دو دیوار بتنی در مجاورت هم، جابجایی مثبت و منفی تقریباً مشابهی را تجربه می کنند و این در حالی است که در میراگر های کناری، به دلیل قرارگیری میراگر بین پانل بتنی و ستون فولادی و جابجایی عمودی متفاوت پانل بتنی نسبت به ستون فولادی، جابجایی مثبت و یا منفی تجربه شده توسط میراگر های کناری، کاملاً متفاوت و یکی بیشتر از دیگری است. این نتیجه را می توان به هندسه مدل و موقعیت میراگر ها مرتبط کرد. از طرفی دیگر جالب است بدانید که مدل سازی فنر های فشاری برای در نظر گرفتن اندرکنش بین فونداسیون و دیوار بتنی، با سختی بالا، منجر به عدم همگرایی تحلیل



شکل ۱۸- نمودار نیرو و جابجایی میراگر اصطکاکی میانی و کناری حاصل تحلیل چرخه ای

رساندن اثر میراگرهای اصطکاکی بر اتلاف انرژی دیوارهای بتنی مرکزگرای متصل است، کمترین اختلاف بین کل انرژی تلف شده توسط نمونه و انرژی تلف شده توسط میراگرها، بیشترین تأثیر بر عملکرد

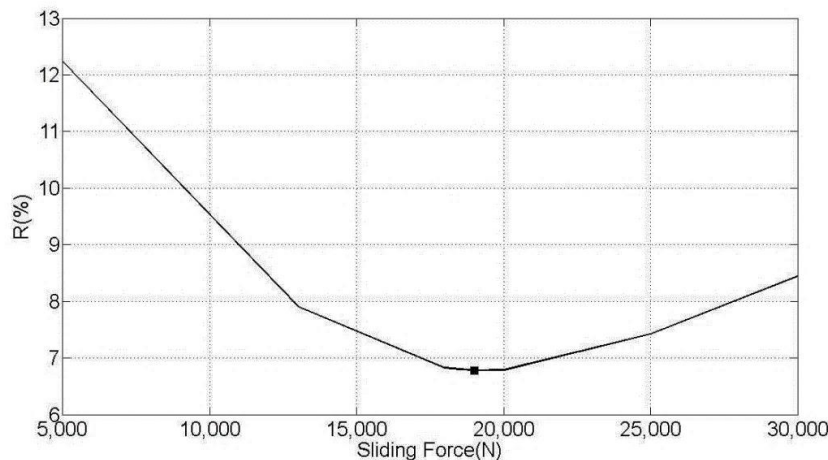
ناحیه احاطه شده حلقه هیستریزیک در شکل ۱۷ انرژی تلف شده کل سیستم را در طول تجزیه و تحلیل نشان می دهد. همان طوری که از شکل ۱۸ مشاهده می گردد، از آنجایی که هدف اصلی این مطالعه به حداکثر

میراگرهای اصطکاکی انتخابی را نشان می‌دهد. بهینه‌ترین حالت میراگرها با معرفی ضریب پاسخ (R) که با معادله رابطه ۶ تعریف می‌شود، تعیین شد. [۱۵]

$$R = \frac{E_{Total} - E_{Dampers}}{E_{Total}} \times 100 \quad (۶)$$

کناری، فرض گردید و با تغییر نیروی لغزش میراگر اصطکاکی میانی و با یک روند سعی و خطا، حداقل درصد R تعیین گردید. حداقل مقدار R، مقادیر بهینه را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، با در نظر گرفتن مقدار ثابت ۱۲ کیلو نیوتن برای نیروی لغزش میراگرهای کناری^{۳۲} و تغییر نیروی لغزش برای میراگرهای میانی^{۳۳} با روند سعی و خطا، پارامتر R تعیین گردید که در شکل ۱۹ ارائه شده است.

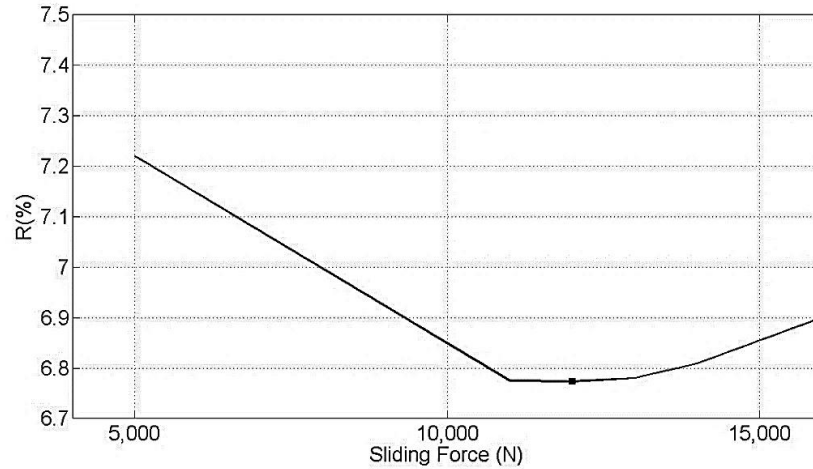
که در آن E_{Total} ، انرژی کل سیستم است که از منحنی هیستریزس شکل ... تعیین می‌گردد. $E_{Dampers}$ در حقیقت کل انرژی مستهلک شده توسط هر شش میراگر در طول تجزیه و تحلیل است که از منحنی هیستریزس شکل ۱۸ تعیین می‌شود. برای به دست آوردن بهینه‌ترین حالت نیروی لغزشی برای میراگرهای اصطکاکی، از دو راهکار استفاده شد. در راهکار اول یک مقدار ثابت به عنوان نیروی لغزش میراگر اصطکاکی



شکل ۱۹ - نیروی لغزش بهینه برای میراگرهای میانی

در این مورد نشان می‌دهد. حداقل مقدار R برابر با ۶/۷۷ است که با نیروی لغزش ۱۲ کیلو نیوتن برای میراگر کناری مطابقت دارد. لازم به ذکر است رسیدن به نیروهای لغزش برای میراگرها با انجام تحلیل‌های چرخه‌ای زیادی همراه بود.

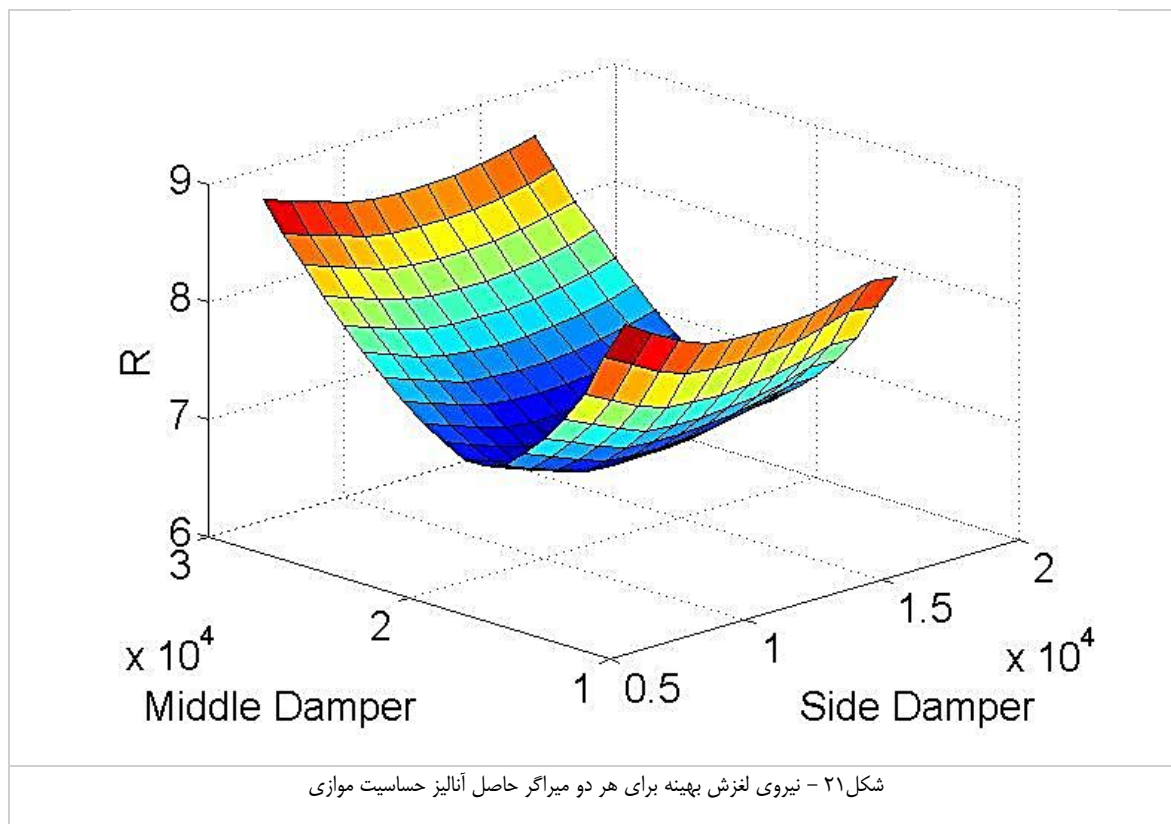
همانطور که در شکل ۱۹ نشان داده شده است، حداقل مقدار R برابر با ۶/۷۷ است که با نیروی لغزش ۱۹ کیلو نیوتن برای میراگر میانی مطابقت دارد. همچنین با در نظر گرفتن نیروی لغزشی میراگرهای میانی با مقدار ثابت ۱۹ کیلو نیوتن، روند سعی و خطا برای بدست آوردن مقدار بهینه برای میراگرهای اصطکاکی کناری ادامه یافت. شکل ۲۰، تغییرات مقدار R را



شکل ۲۰ - نیروی لغزش بهینه برای میراگرهای کناری

حساسیت موازی^{۳۴} برای تعیین نیروی لغزشی نهایی میراگرهای کناری و میانی انجام شد. در این نوع آنالیز، نیروی پیش تنیدگی پیچ‌های مرتبط با میراگرهای اصطکاکی میانی و کناری به طور موازی و همزمان فرض و تحلیل چرخه‌ای انجام گرفت. شکل ۲۱، نتیجه آنالیز موازی را به صورت گرافیکی نشان می‌دهد.

در راهکار اول با تعیین محدوده مقادیر نیروی لغزشی از طریق روند سعی و خطا با تغییر نیروی پیش تنیدگی مرتبط با پیچ‌های میراگر اصطکاکی، مقدار نیروی لغزش میراگر را تغییر داده و تحلیل‌ها تکرار شدند، در نهایت با یک روند سعی و خطا در نیروی لغزش بهینه، نیروی پیش‌تنیدگی یک میراگر ثابت فرض می‌شد و نیروی پیش‌تنیدگی میراگر دیگری توسط تحلیل چرخه‌ای تعیین می‌شد، در راهکار دوم به جهت اطمینان، آنالیز



۹. نتیجه گیری

در این مقاله با معرفی نمونه دیوار بتنی مرکزگرای متصل به همراه میراگرهای میانی و کناری، به ارائه روشی برای بهینه‌یابی میراگر اصطکاکی توسط دو روش سعی و خطا و آنالیز حساسیت موازی پرداخته شد. برداشت نکات مهم از نتایج به صورت زیر ارائه شده است:

OpenSEES، برای عملکرد صحیح سیستم مرکزگرایی دیوار در تحلیل چرخه ای امری اجتناب ناپذیر است. استفاده نکردن از این المان صلب موسوم به تیغه ماهی منجر عدم همگرایی تحلیل در دیوار های بتنی مرکز گرای متصل می شود.

- با توجه به نتایج بدست آمده در این مقاله برای تعیین میراگر اصطکاکی بهینه، می توان نتیجه گرفت که آنالیز حساسیت موازی در نرم افزار OpenSEES با تکیه بر روش تعیین ضریب پاسخ (R)، یکی از روش های جامع برای تعیین میراگر های اصطکاکی بهینه در سیستم دیوار های مرکزگرای متصل بتنی همراه با ستون های ثقیلی می باشد.
- همان طوری که نتایج تحلیل سیکلی روی نمونه از طریق نرم افزار OpenSEES نشان داد، تعیین میراگر اصطکاکی بهینه از طریق روند سعی و خطا و آنالیز حساسیت موازی (دو طرفه)، نتایج کاملا مشابهی را ثبت نمود. به عبارتی از این نتیجه می توان فهمید که ثابت فرض کردن

- در حین مدل سازی نمونه دیوار بتنی مرکزگرای متصل به همراه ستون های ثقیلی انتهایی توسط نرم افزار OpenSEES، برای قرارگیری و بسته شدن تاندون های فولادی در موقعیت بالای دیوار و همچنین برای قرارگیری میراگر های اصطکاکی میانی و کناری در موقعیت خود و ایجاد تحلیلی همگرا برای مدل، استفاده از المان صلب (Rigid element) در نرم افزار OpenSEES، امری اجتناب ناپذیر است. به کار نبردن این المان در مدل سازی در هر دو موقعیت گفته شده، منجر به عدم همگرایی تحلیل می گردد.
- استفاده از المان صلب موسوم به تیغه ماهی ها در موقعیت قرارگیری میراگر های اصطکاکی در نرم افزار

در میراگر اصطکاکی، از روش آنالیز حساسیت دو طرفه که روشی کاملاً وقت گیر از نظر تحلیلی است اجتناب نمود.

connectors." *Engineering Structures* 161. 2018; 192-206.

12. Hashemi A. "Seismic resistant rocking coupled walls with innovative Resilient Slip Friction (RSF) joints." *Journal of Constructional Steel Research* 129. 2017; 215-226.

13. Wu H. "Experimental investigation of self-centering steel reinforced concrete coupled wall panels with replaceable energy dissipaters." *Engineering Structures* 212. 2020; 110473.

14. Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSEES), <https://opensees.berkeley.edu/>.

15. Pall AS. "Energy dissipation devices for aseismic design of buildings." *Proceedings of a seminar and workshop on base isolation and passive energy dissipation*. Palo Alto, California: Applied Technology Council, 1986.

16. Aragaw L F, Calvi PM. "Comparing the performance of traditional shear-wall and rocking shear-wall structures designed using the direct-displacement based design approach." *Bulletin of Earthquake Engineering* 18.4. 2020; 1345-1369.

17. ACI Innovation Task Group 5 "Acceptance criteria for special unbonded posttensioned precast structural walls based on validation testing and commentary: an ACI standard". Farmington Hills, Mich: American Concrete Institute; 2007.

نیروی لغزش برای میراگر کناری و رسیدن به نیروی لغزش میراگر اصطکاکی میانی از طریق روش سعی و خطا، کاملاً قابل اعتماد بوده و می توان برای تعیین نیروی لغزش بهینه

مراجع

1. Smith, BJ, Yahya C, Kurama, Michael J. McGinnis. "Design and measured behavior of a hybrid precast concrete wall specimen for seismic regions." *Journal of Structural Engineering* 137.10 (2011); 1052-1062.

2. Kurama, YC. "Unbonded post-tensioned precast concrete walls with supplemental viscous damping." *ACI Structural Journal* 97.4 (2000); 648-658.

3. Henry R. *Self-centering precast concrete walls for buildings in regions with low to high seismicity*. Diss. ResearchSpace@ Auckland, 2011; 45-55.

4. Sriharan S. "Precast concrete wall with end columns (PreWEC) for earthquake resistant design." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 44.12 (2015); 2075-2092.

5. Lu X, Dang X, Qian J, Zhou Y. Experimental study of self-centering shear walls with horizontal bottom slits. *J Struct Eng* 2017;143(3):04016183

6. Loo W, Pierre Q, Chow N. "A low damage and ductile rocking timber wall with passive energy dissipation devices." 2015; 40-50.

7. Twigden KM, Sriharan S, Henry RS. "Cyclic testing of unbonded post-tensioned concrete wall systems with and without supplemental damping." *Engineering Structures* 140 2017; 406-420.

8. Hu X, Zhang Y, Nasim S, Moghaddasi B. "Seismic performance of reinforced concrete frames retrofitted with self-centering hybrid wall." *Advances in Structural Engineering* 15.12. 2012; 2131-2143.

9. Guo T. "Seismic resilience upgrade of RC frame building using self-centering concrete walls with distributed friction devices." *Journal of Structural Engineering* 143.12. 2017; 04017160.

10. Sriharan S, Sriram A. "Seismic design of jointed precast concrete wall systems." *The 4th International Conference on Earthquake Engineering, Paper*. No. 268. 2006.

11. Guo T. "Experimental and numerical investigation of jointed self-centering concrete walls with friction

