

طراحی لرزه ای بهینه سازه‌های با میراگر پسماندی با در نظر گرفتن انعطاف پذیری خاک

بهنود گنجوی^{*۱}

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

چکیده

استفاده گسترده‌ی سیستم‌های اتلاف انرژی موجب شده است تا محققان به دنبال بهینه‌سازی مشخصه‌های مکانیکی این سیستم‌ها جهت بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها باشند. تا کنون تحقیقات قابل توجهی بر روی بهینه‌سازی سازه‌های پای ثابت دارای میراگرهای غیرفعال انجام شده است. از طرفی مطالعات اخیر نشان داده است که اثر اندرکنش خاک-سازه می‌تواند به طور قابل توجهی الگوی بار لرزه‌ای بهینه سازه‌های ارتجاعی و خصوصاً غیرارتجاعی را تحت تاثیر قرار دهد. در این تحقیقات الگوریتم‌های بهینه‌سازی جدیدی برای طراحی لرزه‌ای بهینه سازه‌های برشی با در نظر گرفتن اثر انعطاف پذیری خاک (اندرکنش خاک-سازه) ارائه شد. هرچند که مطالعات بسیار محدودی در رابطه با بهینه‌سازی لرزه‌ای اینگونه سازه‌ها با حضور میراگرها مطرح شده است. در این مطالعه، با ارائه‌ی یک الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر توزیع خسارت یکنواخت بر روی سازه‌های برشی معادل، اثر اندرکنش خاک-سازه بر توزیع بهینه میراگرهای پسماندی مورد مطالعه‌ی پارمتریک قرار می‌گیرد. بدین منظور سازه‌های برشی معادل، اثر اندرکنش خاک-سازه بر توزیع بهینه میراگرهای پسماندی مورد مطالعه‌ی تحت اثر ۱۶ شتابنگاشت زمین لرزه‌ی دور از گسل که بدون پالس می‌باشند بهینه شده و اثر پارمترهای موثر اندرکنشی در پاسخ بهینه مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج این مطالعه حاکی از آنست که استفاده از الگوریتم پیشنهادی برای دستیابی به توزیع بهینه میراگرهای پسماندی با احتساب اثر اندرکنش خاک-سازه، امکان آن را فراهم می‌آورد که با توزیع مناسب میراگرهای پسماندی، عملکرد لرزه‌ای سازه اولیه تا حد قابل توجهی افزایش یابد. همچنین نتیجه گرفته شد که اثر پارمترهای کلیدی اندرکنشی مانند فرکانس بی‌بعد و نسبت لاغری در نحوه‌ی توزیع الگوی بهینه کاملاً قابل ملاحظه است، به نحوی که افزایش اثر اندرکنش-خاک سازه موجب افزایش بار لرزه‌ای در پای سازه و خصوصاً در طبقه‌ی بام می‌شود که می‌تواند ناشی از افزایش انعطاف پذیری سیستم خاک-سازه نسبت به حالت پای ثابت و اثر قابل توجه مودهای بالاتر باشد.

کلمات کلیدی: میراگر پسماندی، طراحی بهینه، اندرکنش خاک-سازه، تغییر مکان نسبی غیرارتجاعی، الگوی بار لرزه‌ای

سابقه مقاله:

شناسه دیجیتال:

10.22065/JSCE.2018.139987.1604	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/JSCE.2018.139987.1604	۱۳۹۹/۰۴/۰۱	۱۳۹۹/۰۴/۰۱	۱۳۹۷/۰۹/۳۰	۱۳۹۷/۰۷/۰۶	۱۳۹۷/۰۴/۱۷

*نویسنده مسئول: بهنود گنجوی

پست الکترونیکی: b.ganjavi@umz.ac.ir

Comparison of simplified MVLEM model with Fiber model in nonlinear modeling of RC shear wall

Behnoud Ganjavi

Department of Civil Engineering, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

ABSTRACT

The widespread use of energy dissipation systems has led researchers to investigate the optimal mechanical properties of these systems for improving the seismic performance of a structure with the installation of such devices. So far, considerable researches have been conducted on optimum seismic design of fixed-base systems with passive dampers. On the other hand, recent studies have shown that effect of soil-structure interaction (SSI) can have remarkable effects on optimum seismic loading patterns of structures in both elastic and inelastic states. In these investigations, several new optimization algorithms were proposed for optimum seismic design of buildings considering soil-structure interaction effects. However, very rarer optimization studies have performed on soil-structures systems with dampers. In this paper, a new optimization algorithm based on uniform damage distribution of equivalent shear building model considering soil-structure interaction effect is developed. To this end, shear buildings models with hysteretic dampers located on flexible base soil are optimized under 16 far-fault earthquake ground motions without pulse, and the effect of key soil-structure interaction parameters on optimum response is investigated. Results of this study indicate that using proposed optimization algorithm for soil-structure systems with hysteretic dampers to achieve optimum distribution of dampers will lead to significant improvement of the seismic performance of the primary structure. In addition, it was concluded that the soil-structure key parameters such as dimensionless frequency and structural slenderness ratio can significantly affect the optimum load patterns such that increasing SSI effect will lead to increasing seismic load on base and top of the structure compared to the fixed-base systems. This can be attributed to the flexibility and higher modes effect of soil-structure systems when compared to the corresponding fixed-base system.

ARTICLE INFO

Receive Date: 08 July 2018

Revise Date: 28 September 2018

Accept Date: 21 December 2018

Keywords:

Hysteretic damper, Optimum Design, Soil-structure interaction, Inelastic inter-story drift, Seismic load pattern

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.139987.1604

*Corresponding author: Behnoud Ganjavi

Email address: b.ganjavi@umz.ac.ir

۱- مقدمه

سیستم‌های کنترل غیرفعال اتلاف انرژی می‌توانند یکی از روشهای موثر در بهبود عملکرد لرزه‌ای ساختمانهای جدید و یا مقاوم-سازی سازه‌های موجود طراحی شده بر اساس آیین‌نامه‌های لرزه‌ای از طریق اتلاف انرژی وارده به سازه و یا کاهش خسارت در اعضای سازه-ای باشد. در این راستا، تمایل فزاینده‌ای در توسعه ی تکینک‌ها و سیستم‌های جدید جهت بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی ایجاد شده است. از میان تعداد بسیار زیادی از این سیستم‌های اتلاف انرژی که توسط محققان پیشنهاد و توسعه یافته است [۱-۳]، میراگرهای پسماندی (هیسترتیک) وابسته به تغییر شکل، کاربرد بسیار گسترده‌ای در مهندسی سازه و زلزله دارد [۴-۶]. در واقع، هدف اصلی از نصب میراگرها، کنترل تغییرشکل (مانند رانش یا جابجایی نسبی طبقه) و همچنین جذب و اتلاف انرژی ارتعاشی تخریب کننده‌ی سازه ناشی از تحریک زمین یا همان زمین لرزه است که منجر به کاهش خسارت لرزه ای در اعضای سازه‌ای یک ساختمان می‌شود.

استفاده گسترده‌ی سیستم‌های اتلاف انرژی موجب شده است تا محققان نه تنها به تحقیق و توسعه‌ی اشکال مختلفی از این سیستم‌ها بپردازند، بلکه به دنبال بهینه‌سازی مشخصه‌های مکانیکی این سیستم‌ها جهت بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها باشند [۷-۱۳]. اغلب مطالعات گذشته در زمینه بهینه‌سازی سازه‌های دارای میراگر، نوعاً محدود به اثر سختی و مقاومت قاب ساختمانی بر عملکرد لرزه‌ای کل سیستم سازه‌ای شده است و لذا تحقیقات انجام شده بر نحوه توزیع بهینه‌ی سیستم‌های میراگر نسبتاً محدودتر می‌باشد. در مقاوم‌سازی یک ساختمان موجود، که مشخصه‌های سازه‌ای آن قبل از نصب میراگرها تعیین شده‌اند، سختی طبقات قاب به عنوان یک پارامتر بدون تغییر تلقی می‌شود. این پارمتری تعیین کننده در انتخاب یک مجموعه‌ی مناسب و مورد نیاز از میراگرها جهت دستیابی به یک معیار مقاوم‌سازی هدف می‌باشد. در مراجع [۱۴] برای یک توزیع سختی مشخص، نحوه تعیین موقعیت و ابعاد بهینه میراگرهای ویسکوز و ویسکو-الاستیک مورد بحث قرار گرفته است. در اغلب این تحقیقات به منظور تعیین جواب بهینه از سازه‌های برشی معادل با قاب اصلی استفاده شده است. در مرجع [۴] یک روش جدید برای طراحی بهینه سیستم‌های سازه‌ای دارای میراگرهای غیرفعال پیشنهاد شده است. روشهای ارائه شده توسط این محققان براساس نوع میراگر استفاده شده متفاوت می‌باشند.

در سالهای اخیر تحقیقات قابل توجهی بر روی بهینه سازی سازه‌های پای ثابت دارای میراگرهای غیرفعال انجام شده است [۱۹-۱۵]. محمدی و همکاران [۴] روشی برای طراحی بهینه لرزه‌ای قابهای برشی فولادی معادل با میراگرهای پسماند پیشنهاد کردند. در این مطالعه که بر روی سازه‌های پای ثابت بدون اثر انعطاف پذیری خاک انجام شده است، صرفاً به ارائه یک مثال کاربردی برای قاب ۵ طبقه فولادی تحت یک شتابنگاشت زلزله بسنده شد. در مطالعه‌ی دیگری، حاجی‌رسولپها و همکاران [۱۵] روشی برای بهینه سازی چند معیاره برای قابهای بتنی مسلح پای ثابت تحت اثر زمین لرزه‌هایی منطبق بر دو طیف طراحی پیشنهاد دادند. ایشان کارایی الگوریتم پیشنهادی خود را برای یک نمونه قاب ۱۰ طبقه بتنی مسلح با تغییر میزان آرماتورهای فولادی طولی و نحوی توزیع میراگرهای پسماند به عنوان قیود بهینه‌سازی اثبات کردند. همانگونه که پیشتر اشاره شد، تقریباً تمام مطالعات انجام شده بر روی توزیع بهینه‌ی سازه‌های با میراگرها، متمرکز بر سازه‌های پای ثابت بدون اثر انعطاف‌پذیری خاک که به بحث اندرکنش خاک-سازه معروف است، می‌باشد. در حالیکه مطالعات گذشته نشان داده است که خاک زیر سازه که باعث انعطاف پذیری سازه و در نتیجه تغییر در مشخصات دینامیکی سازه نظیر پریود طبیعی و میرایی می‌شود می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای پاسخهای ارتجاعی و غیرارتجاعی سازه ناشی از اثر حرکت زمین را تحت تاثیر قرار دهد [۲۰-۲۶]. در برخی از مطالعاتی که در سالهای اخیر انجام شده است، گنجوی و هاو [۲۷] و گنجوی و همکاران [۲۸] نشان داده‌اند که اثر اندرکنش-خاک سازه می‌تواند به طور قابل توجهی الگوی بار لرزه‌ای بهینه سازه‌های ارتجاعی و خصوصاً غیرارتجاعی را تحت تاثیر قرار دهد. در این تحقیقات الگوریتمهای بهینه‌سازی جدیدی برای طراحی لرزه‌ای بهینه سازه‌های برشی با در نظر گرفتن اثر انعطاف‌پذیری خاک (اندرکنش خاک-سازه) ارائه شد. هرچند که بحثی از بهینه سازی لرزه‌ای اینگونه سازه‌ها با حضور میراگرها مطرح نشده است. در این مطالعه، با ارائه‌ی یک الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر توزیع خسارت یکنواخت بر روی سازه‌های برشی معادل، اثر اندرکنش خاک-سازه بر توزیع بهینه میراگرهای پسماندی مورد مطالعه‌ی پارمتریک قرار می‌گیرد. بدین منظور سازه‌های برشی معادل با سازه‌های فولادی واقعی دارای میراگرهای پسماندی واقع بر بستر انعطاف‌پذیر تحت اثر ۱۶ شتابنگاشت زمین‌لرزه‌ی دور از گسل که بدون پالس می‌باشد بهینه شده و اثر پامترهای موثر اندرکنشی در پاسخ بهینه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- مدلسازی و فرضیات تحلیل

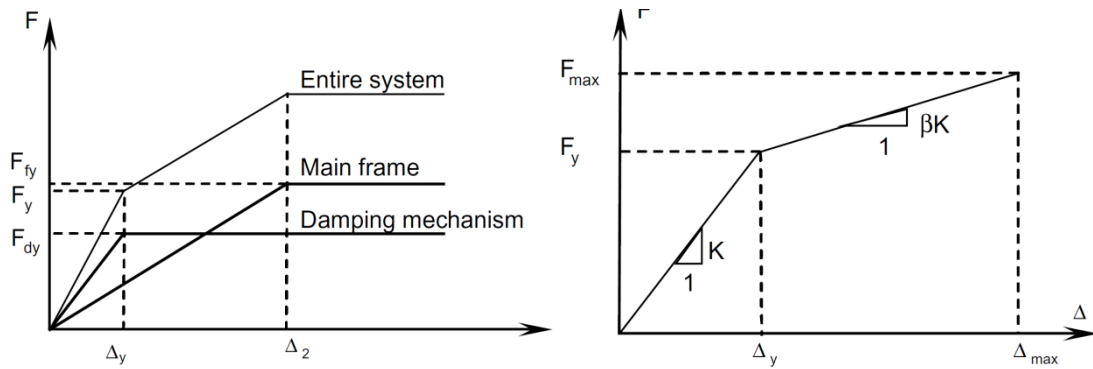
در طراحی متعارف سازه‌های بلند نوعاً به منظور کاهش درجات آزادی سازه واقعی، از مدل‌های برشی معادل با سازه اصلی استفاده می‌گردد. این معادل‌سازی زمانی قابل پذیرش است که مشخصات رفتاری نظیر سختی، مقاومت سیستم معادل، تاحد امکان به سیستم اصلی نزدیک باشد. در این موارد این امکان وجود دارد تا مشخصات میراگرهای استفاده شده در سازه نیز به شکل مناسبی به مدل سازه معادل ساده شده منتقل گردد. استفاده از سیستم‌های برشی معادل در بررسی رفتار سازه‌های دارای میراگر بسیار متداول می‌باشد [۳۲-۲۹]. از جمله کاربرد این مدل‌ها می‌توان به مهاربندهای متداول مهارشده در برابر کمانش اشاره کرد. در این سیستم‌ها عدم کمانش اعضا در برابر نیروهای فشاری سبب بهبود عملکرد آنها در برابر بارهای لرزه‌ای و افزایش قابلیت آنها در جذب انرژی زلزله می‌گردد. یکی دیگر از مزایای مهم استفاده از المانهای مهار شده در برابر کمانش آن است که با تغییر مشخصات هسته فولادی مرکزی، امکان کنترل مستقل سختی، مقاومت و جابجایی تسلیم این المانها فراهم می‌گردد. در این راستا می‌توان از تغییر سطح مقطع هسته فولادی، مقاومت فولاد و نیز طولی از هسته فولادی که می‌تواند تسلیم شود، استفاده نمود. این امر امکان آنرا فراهم می‌سازد تا ارتباط نیرو-جابجایی این المانها مطابق با نیاز طراح تنظیم گردد. در شکل (۱)، مدل رفتاری یک قاب دارای میراگرهای پسماندی نشان داده شده است. همانگونه که در شکل نشان داده شده است، اولین نقطه تسلیم در سازه زمانی اتفاق می‌افتد که میراگرها به نقطه تسلیم خود برسند. نقطه تسلیم دوم نیز در شرایطی روی می‌دهد که قاب تسلیم گردد. عموماً طراحی میراگرها به نحوی انجام می‌گردد که در زلزله‌های ضعیف و متوسط قاب در محدوده رفتار ارتجاعی باقی بماند هر چند ممکن است میراگرها در این حالت تسلیم گردند. این در حالیست که عملاً طراحی سیستم‌های سازه‌ای متعارف به نحوی که قاب حتی تحت اثر زلزله‌های بسیار شدید هم در محدوده رفتار ارتجاعی باقی بماند اقتصادی نخواهد بود. در تحقیق حاضر فرض شده است تا طراحی لرزه‌ای به نحوی انجام پذیرد که در زلزله‌های متوسط و قوی (ایمنی جانی) قاب در محدوده ارتجاعی باقی مانده و میراگرها تسلیم شوند و در زلزله‌های شدید (سطح فروریزش) قاب و میراگرها هر دو تسلیم گردند. در شکل (۱) نشان داده شده است که در صورتیکه رفتار میراگرها به صورت الاستیک-پلاستیک کامل در نظر گرفته شود، شیب خط دوم منحنی رفتاری سازه می‌تواند به صورت ضریبی (۸) از سختی اولیه تعریف گردد:

$$\lambda_i = \frac{k_{fi}}{k_{fi} + k_{di}} \quad (1)$$

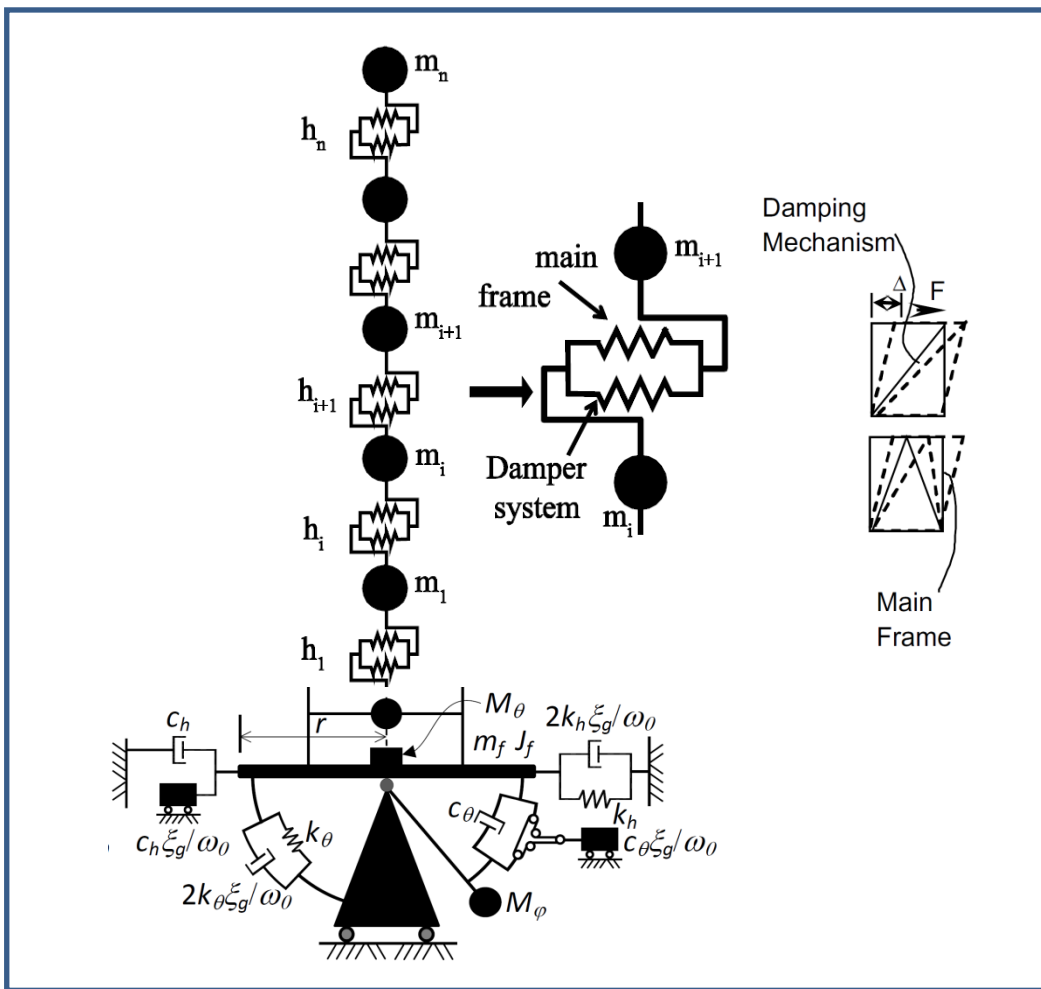
در رابطه فوق k_{fi} و k_{di} به ترتیب معرف سختی قاب و سختی میراگرها در طبقه i ام می‌باشند. پارامتر λ به نوعی بیانگر نسبت سختی میراگرهای استفاده شده به سختی قاب می‌باشد و تاثیر عمده‌ای در عملکرد لرزه‌ای کل سازه خواهد داشت [۴]. این ضریب می‌تواند در طبقات مختلف سازه متفاوت باشد. در این تحقیق تاثیر تغییرات این ضریب در طبقات مختلف سیستمهای خاک-سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین با داشتن توزیع بهینه سختی قاب معادل، مقادیر توزیع بهینه سختی قاب و میراگر به سادگی از روابط زیر تعیین می‌شوند:

$$\begin{aligned} K_i &= k_{fi} + k_{di} \\ k_{fi} &= \lambda_i K_i \\ k_{di} &= (1 - \lambda_i) K_i \end{aligned} \quad (2)$$

در رابطه فوق K_i سختی معادل طبقه در سیستم ساده شده قاب و میراگر می‌باشد. مقدار λ همیشه کوچکتر از یک می‌باشد و لذا سختی میراگر مطابق رابطه‌ی فوق همواره مثبت خواهد بود [۴]. در این مطالعه برای انجام تحلیلهای پارامتریک از سه سازه برشی معادل ۱۰، ۵ و ۱۵ طبقه استفاده شده که نمونه‌ای از آن در شکل (۲) نشان داده شده است. در مدل‌های استفاده شده فرض بر اینست که توزیع سختی متناسب با توزیع مقاومت باشد. نسبت میرایی برای دو مود اصلی نوسان برابر ۵ درصد میرایی بحرانی در نظر گرفته شد. توزیع جرم در طبقات سازه بصورت یکنواخت می‌باشد. همانگونه در بخشهای آینده توضیح داده خواهد شد، سازه مبنا به نحوی طراحی می‌شود که در زلزله طراحی به جابجایی هدف سطح عملکردی مورد نظر برسد.



شکل ۱: مدل رفتاری یک قاب با میراگر (چپ): مکانیزم مرکب قاب و میراگرها (راست)



شکل ۲: مدل تحلیلی اندرکنشی یک سیستم چند درجه آزاد معادل دارای میراگر پسماندی واقع بر بستر انعطاف پذیر

۳- مدل خاک و پارامترهای کلیدی اندرکنشی

مطالعات گذشته نشان داده است که خاک زیر سازه می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای پاسخهای ارتجاعی و غیرارتجاعی سازه ناشی از اثر حرکت زمین را تحت تاثیر قرار دهد [۲۰-۲۶]. در طراحی سازه‌های موجود اغلب فرض می‌شود حرکت اعمال شده بر پایه سازه، مساوی حرکت میدان آزاد زمین است (حرکت زمین در تراز فونداسیون، وقتی هیچ سازه‌ای موجود نباشد). این فرض در مورد سازه‌های ساخته شده بر سنگ بستر یا زمین سخت صحیح است. درحالی که سازه بر روی یک لایه خاک نرم قرار گرفته باشد، پاسخی کاملاً متفاوت با حالت سازه با پایه ثابت خواهد داشت. در واقع این موضوع همان مسأله‌ی اندرکنش خاک و سازه است. اثر اندرکنش خاک-سازه با اثر ساختمانی که در واقع تغییر حرکات دریافتی در سطح زمین در اثر تغییر دامنه و محتوای فرکانسی تحریکات زلزله به علت عبور امواج از لایه‌های خاک محلی است تفاوت دارد. در حالت اندرکنش خاک-سازه، پاسخ سازه متأثر از پاسخ لایه خاک و پاسخ لایه خاک نیز متأثر از حضور سازه بوده و خاک و سازه اثری متقابل بر پاسخ هم دارند. سیستم جدید در مقایسه با سیستم قرار گرفته روی بستر صلب دارای انعطاف بیشتری است. با افزایش انعطاف‌پذیری خاک رفتار سازه دچار تغییرات مهمی می‌گردد. همچنین علاوه بر میرایی مصالح خاک^۱، به دلیل انتقال بخشی از انرژی ارتعاشی امواج به سوی فضای نیمه بی‌نهایت، منبع جدیدی از میرایی به نام میرایی تشعشعی^۲ به وجود خواهد آمد که باعث تغییر در رفتار دینامیکی سازه می‌گردد. تغییرات ایجاد شده در پاسخ سازه‌های خطی پس از قرارگیری روی بستر انعطاف‌پذیر توسط پژوهشگران زیادی در طول سه دهه اخیر مورد بررسی قرار گرفته است [۳۲ و ۳۴]. همچنین اخیراً تأثیر اندرکنش خاک و سازه بر رفتار غیر ارتجاعی سازه نیز مورد توجه پژوهشگران واقع شده است [۲۲-۲۶]. با این حال تعداد مطالعات انجام شده بر روی توزیع بهینه خسارت با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک-سازه بسیار محدود باشد. از جمله کارهایی که در سالهای اخیر به صورت پارامتریک به آن پرداخته شد می‌توان به مطالعات گنجوی و هاو [۲۷] و گنجوی و همکاران [۲۸] اشاره کرد که نشان دادند که پاسخ بهینه سازه می‌تواند بسیار متأثر از انعطاف‌پذیری خاک زیر سازه باشد. نتایج این مطالعات منجر به ارائه الگوهای جدید بارگذاری برای سیستم‌های خاک-سازه شد.

در این مطالعه، برای در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه در پاسخ سازه بهینه دارای میراگر پسماندی تحت رکورد زلزله، از مدل گسسته زیرسازه مخروطی که توسط ولف [۳۵] ارائه شد استفاده می‌شود. این مدل گسسته توسط محققان بسیاری در سالهای اخیر مورد استفاده قرار گرفته است [۲۰-۲۸]. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، سیستم اندرکنشی خاک و سازه مفروض، دارای $n+3$ درجه آزادی می‌باشد؛ که n بیانگر درجات آزادی سازه و عدد 3 نشان‌دهنده تعداد درجات آزادی لازم برای مدل کردن خاک زیر شالوده می‌باشد. همچنین روسازه دارای میرایی مصالح ξ_s می‌باشد و به صورت دوخطی با کرنش سختی ۳ درصد مدل شده است. در روش زیرسازه، خاک و سازه جداگانه مدل گردیده و سپس با یکدیگر ترکیب می‌شوند [۳۵] و خاک به وسیله تعدادی فنر، جرم و میراگر برای هر دو حرکت افقی و گهواره‌ای از طریق مدل مخروطی^۳ و سازه نیز با یک فنر دوخطی و یک جرم و یک میراگر به همراه میراگر پسماندی که خود دارای سختی می‌باشد مدل می‌گردند. در نتیجه ترکیب دو مدل فوق، مدل خاک و سازه‌ای با $n+3$ درجه آزادی مطابق شکل (۲) خواهد بود. در این شکل با معرفی درجه آزادی داخلی ϕ و یک جرم دورانی (M_ϕ) وابستگی سختی دینامیکی خاک به فرکانس نیز در مسأله در نظر گرفته شده است [۳۵]. روش مخروطی که بر اساس تئوری انتشار موج یک‌بعدی است، پی صلب دایره‌ای را با جرم m_f و اینرسی دورانی I_f بر روی یک محیط نیمه بی‌نهایت همگن در نظر می‌گیرد [۳۶]. درجات آزادی افقی و گهواره‌ای به ترتیب برای حرکات انتقالی در جهت افقی و دورانی پی تعریف شده‌اند، ولی از حرکات پیچشی و انتقالی در جهت عمودی صرف نظر شده است. همچنین سختی و اتلاف انرژی خاک به ترتیب به وسیله فنرها و میراگرهایی مطابق شکل (۲) مدل‌سازی شده‌اند. لازم به ذکر است که با وجود رفتار هیستریزیس^۴ ذاتی میرایی مصالح خاک، این میرایی به صورت ویسکوز مدل شده است تا از پیچیدگی‌های بیشتر در حوزه زمان اجتناب شود. ضرایب فنرها و میراگرها برای حرکات نوسانی انتقالی و گهواره‌ای استفاده شده در شکل (۲) به صورت زیر خلاصه شده است:

¹ Material Damping

² Radiation Damping

³ Cone Model

⁴ hysteresis

$$K_h = \frac{8\rho v_s^2 r}{2-\nu}, \quad C_h = \rho v_s A_f \quad (3)$$

$$K_\theta = \frac{8\rho v_s^2 r^3}{3(1-\nu)}, \quad C_\theta = \rho v_p J_f \quad (4)$$

که K_θ ، C_θ ، K_h و C_h به ترتیب سختی افقی، میرایی ویسکوز افقی، سختی و میرایی گهواره‌ای خاک می‌باشند. شعاع معادل و مساحت پی استوانه‌ای به ترتیب با r و A_f نشان داده شده‌اند. به علاوه پارامترهای ν ، ρ ، ν_p و ν_s به ترتیب برابر با چگالی ویژه خاک، ضریب پواسون خاک، سرعت موج طولی و برشی خاک هستند. برای وارد کردن میرایی مصالح خاک، ζ_g ، در المان خاک و پی، هر فنر و میراگر به ترتیب به یک میراگر و جرم اضافی به صورت موازی متصل شده‌اند. همچنین برای اعمال اثر تراکم‌ناپذیری خاک، یک جرمی اضافی، M_θ ، که برابر با $0.3\pi(\nu-1/3)\rho r^5$ می‌باشد باید به پی برای مقادیر $\nu > 1/3$ اضافه شود [۳۵].

برای یک زلزله خاص، پاسخ دینامیکی سازه بر اساس میزان تأثیر عوامل مختلف بر روسازه و خاک زیر آن می‌تواند تفسیر شود. مطابق تحقیقات گذشته [۲۳-۲۰]، پارامترهای کلیدی اندرکنشی تأثیرگذار در پاسخ دینامیکی سیستم خاک و سازه عبارتند از:

- پارامتر فرکانس بی‌بعد^۵ به عنوان نسبت سختی سازه به خاک برابر است با:

$$a_0 = \frac{\omega_{fix} \bar{H}}{v_s} \quad (7)$$

که در آن ω_{fix} فرکانس طبیعی سیستم با پایه ثابت و \bar{H} ارتفاع معادل سازه می‌باشد. این پارامتر نشان‌دهنده میزان اثر اندرکنش خاک و سازه است (مقادیر ۱ و ۳ برای a_0 به ترتیب بیانگر سیستم با اثر اندرکنشی کم و زیاد می‌باشند).

- نسبت لاغری^۶ سازه که برابر است با نسبت ارتفاع سازه به بعد آن (H/r).
- نسبت جرم سازه به خاک زیر آن که برابر است با:

$$\bar{m} = \frac{m_{tot}}{\rho r^2 H} \quad (9)$$

که در آن m_{tot} و H به ترتیب برابر با جرم و ارتفاع کلی سازه می‌باشند.

و در نهایت میرایی مصالح خاک (ζ_g) و میرایی مصالح سازه (ζ_s) که معمولاً مقادیر متعارفی برای آنها در نظر گرفته می‌شود. دو پارامتر اول یعنی فرکانس بدون بعد a_0 و نسبت لاغری H/r معمولاً به عنوان دو پارامتر کلیدی در اندرکنش خاک و سازه مطرح هستند. به سایر پارامترها اغلب مقادیر متعارفی اختصاص داده می‌شود. در این پژوهش، سیستم سازه اصلی وابسته به فرکانس بوده و دارای ضریب پواسون ۰/۴، میرایی مصالح خاک و سازه ۵٪ و مدل آن وابسته به فرکانس و حاوی تمامی پارامترهای مطرح شده فوق یعنی J_f و I_m ، M_θ ، m_f می‌باشد.

در این تحقیق، از ۱۶ رکورد ثبت شده از ۹ زلزله با بزرگای ۶/۵ تا ۷/۶ در فاصله ۱۰ تا ۲۸ کیلومتری استفاده شده است. رکوردهای انتخابی براساس آیین‌نامه IBC2015 [۳۷] مطابق با ساختمانگه نوع D و یا خاک نوع III استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۳۸] می‌باشد، قرار دارند. تمام رکوردهای انتخاب شده دارای ماکزیمم شتاب بزرگتر از ۰/۲g و ماکزیمم سرعت بیش از ۱۵ سانتیمتر بر ثانیه می‌باشند. مشخصات اصلی رکوردهای انتخابی در مرجع [۳۹] ارائه شده است. تمام زلزله‌ها برای سطح خطر ایمنی جانی برای شتاب ۰/۴ حداکثر شتاب زمین مقیاس شده‌اند. همچنین جهت انجام تحلیل‌های دینامیکی خط و غیر خطی از برنامه OPENSEES [۴۰] و نرم افزار توسعه یافته OPTSSI برای تحلیل‌های پارامتریک اندرکنشی توسط گنجوی و هاو [۲۷] استفاده شده است.

⁵ Non-Dimensional Frequency

⁶ Aspect Ratio

۴- توزیع بهینه میراگرهای پسماندی با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک-سازه

در این بخش، الگوریتم توزیع بهینه‌ی میراگرهای پسماندی با اثر اندرکنش خاک-سازه ارائه می‌شود. نشان داده خواهد شد که با استفاده از توزیع یکنواخت خسارت (تغییرشکل‌های نسبی) امکان آن فراهم می‌گردد که با توزیع مناسب میراگرهای پسماندی، عملکرد لرزه ای سازه‌ی اولیه افزایش داده شود. در اغلب موارد و در توزیع میراگرهای پسماندی در طبقات سازه، پارامتر λ که در رابطه (۱) تعریف شده است، در طبقات مختلف سازه ثابت فرض می‌گردد [۴]. بنابراین در این قسمت این مقدر ثابت و برابر $\lambda = 0.3$ در نظر گرفته می‌شود. هرچند که در بخش‌های بعد، با بررسی زلزله‌های مختلف و الگوهای متفاوت توزیع ضریب λ در طبقات سازه، اثر این ضریب در جواب بهینه سازه-های اندرکنشی به صورت پارامتریک بررسی خواهد شد.

همانگونه که در تحقیقات گذشته نشان داده شد، اصولاً نحوه‌ی توزیع سختی و مقاومت در سازه‌ها متأثر از نحوه توزیع بار طراحی می‌باشد و بنابراین امکان آن وجود دارد تا با انتخاب یک الگوی مناسب برای توزیع این بارها و با داشتن وزن سازه‌ای یکسان، عملکرد لرزه-ای سازه افزایش داده شود [۲۸ و ۱۵ و ۴]. در این بخش از تحقیق، ضریب λ در تمام طبقات سازه ثابت فرض گردیده است. با استفاده از تئوری توزیع یکنواخت خسارت و به منظور تعیین الگوی توزیع بهینه میراگرها در سازه‌های واقع بر بستر انعطاف‌پذیر، الگوریتم زیر پیشنهاد می‌گردد: لازم به ذکر است که این الگوریتم در واقع توسعه‌ی روش ارائه شده برای حالت پای ثابت (بدون اندرکنش) در مرجع [۳۲] و همچنین مراجع [۲۷] و [۲۸] برای مدلسازی خاک می‌باشد، لذا جهت عدم تکرار و همپوشانی صرفاً توسعه‌ی روش مدلسازی توسط مؤلف در زیر ارائه شده است.

- ۱- ابتدا یک الگوی توزیع دلخواه برای سختی قاب و میراگرهای استفاده شده انتخاب می‌گردد. مطالعات انجام شده نشان داده است که توزیع اولیه سختی طبقات، تأثیری در جواب بهینه نهایی نخواهد داشت [۳۲ و ۲۸]. در این تحقیق برای مقایسه نتایج بهینه‌ی توزیع تغییر شکل با توزیع آیین‌نامه‌ای، توزیع اولیه سختی طبقات مطابق با الگوی آیین نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۳۸] در نظر گرفته شده است.
- ۲- با فرض مقادیری برای پارامترهای کلیدی اندرکنشی مانند فرکانس بی‌بعد a_0 و نسبت لاغری H/r ، جرم اولیه کل سازه محاسبه می‌شود. سپس جرم کل به صورت یکنواخت در طبقات توزیع می‌شود.
- ۳- با داشتن پارامترهای اندرکنشی و جرم کل سازه می‌توان مشخصات سختی و میرایی خاک را از روابط (۳) تا (۹) محاسبه کرد.
- ۴- به منظور ثابت نگه داشتن وزن سیستم سازه ای، سختی‌های بدست آمده در قاب و میراگرها به نحوی مقیاس می‌گردند که مجموع سختی با مقدار متناظر در سازه مبنای اولیه یکسان باشد.
- ۵- با مشخص بودن ضریب $\lambda = 0.3$ در تمام طبقات و با استفاده از رابطه (۲) سختی قاب و میراگرها در تمام طبقات محاسبه می‌گردند. مقاومت هر یک از طبقات نیز متناسب با سختی بدست آمده و با استفاده از جابجایی تسلیم قاب و میراگر قابل تعیین است.
- ۶- در این مرحله سازه در معرض تحریک هر یک از زلزله‌ها قرار می‌گیرد و حداکثر جابجایی نسبی طبقات محاسبه شده و با مقدار هدف مقایسه می‌گردد. با توجه به سطح خطر انتخاب شده، جابجایی نسبی هدف برابر 5cm فرض شده است. سپس ضریب تغییرات (COV) برای مقادیر جابجایی نسبی طبقات از رابطه (۱۰) محاسبه می‌گردد:

$$COV_{\Delta} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(\Delta_{max})_i - (\Delta_{ave})]^2}{n-1}}}{\Delta_{ave}} \quad (10)$$

که در آن $(\Delta_{max})_i$ بیانگر جابجایی نسبی حداکثر طبقه i ام، Δ_{ave} میانگین جابجایی نسبی در طبقات و n تعداد طبقات می‌باشد.

- ۷- اگر مقدار COV بدست آمده به اندازه کافی کوچک باشد، نحوه توزیع می‌تواند از لحاظ عملی بهینه به حساب آید و روند بهینه

سازی متوقف گردد. در غیر این صورت از حداکثر ظرفیت مصالح استفاده نشده است و لازم است تا روند محاسبات ادامه یابد. در این مطالعه ضریب تغییرات کوچکتر از ۰.۲٪ به عنوان معیار توزیع بهینه در نظر گرفته شده است.

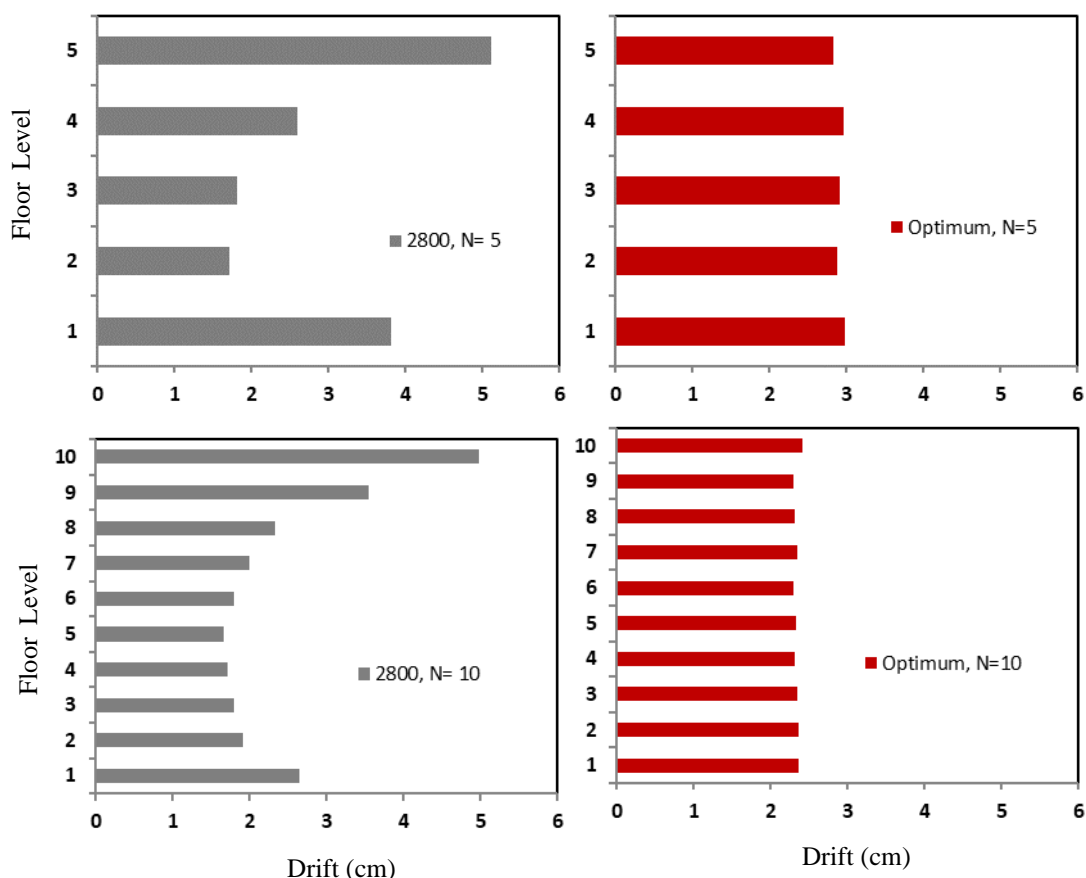
۸- در این گام لازم است تا نحوه توزیع مشخصات سازه‌ای برای حداکثر استفاده از ظرفیت آنها اصلاح و بازتوزیع گردد. بدین منظور لازم است تا بر اساس معیار توزیع تغییرشکل‌های نسبی یکنواخت، طبقاتی که جابجایی آنها کمتر از مقدار هدف می باشد تشخیص داده شده و سختی طبقات (و به تبع آن مقاومت طبقات) در آن نواحی کاهش یابد. نتایج بررسی های انجام شده در این تحقیق و همچنین مطالعات گذشته بیانگر آن است که برای رسیدن به همگرایی مناسب، لازم است این تغییرات به صورت تدریجی اعمال گردد [۲۸ و ۳۲]. برای نیل به این هدف جهت اصلاح توزیع سختی از رابطه (۱۱) استفاده خواهد شد [۳۲]:

$$[(K)_i]_{q+1} = [(K)_i]_q \left[\frac{\Delta_i}{(\Delta_{target})_i} \right]^\alpha \quad (11)$$

در رابطه فوق K_i مجموع سختی معادل طبقه i ام در سیستم ساده شده قاب و میراگر می‌باشد. همچنین Δ_i و $(\Delta_{target})_i$ به ترتیب بیانگر جابجایی نسبی نیاز و جابجایی نسبی هدف در طبقه i ام می‌باشند و q معرف شماره گام و ضریب α توان همگرایی نامیده می شود که بین صفر تا یک در تغییر است. نتایج این تحقیق بیانگر آن است که انتخاب مقدار ۱/۱ تا ۱/۱۵ برای این ضریب [۲۸ و ۱۵ و ۴] همگرایی مناسبی را تامین می نماید. با استفاده از رابطه (۱۱)، سختی و به تبع آن مقاومت تمام طبقات اصلاح شده و یک توزیع جدید بدست می آید. انتظار می‌رود که مقدار ضریب تغییرات متناظر با الگوی توزیع جدید از مقدار متناظر با الگوی قبلی کمتر باشد. این الگوریتم به همین نحو از گام پنجم تکرار می گردد تا مقدار ضریب تغییرات حاصله از رابطه (۱۰) به اندازه کافی کوچک شده و یک توزیع یکنواخت حاصل گردد. توزیع حاصله در این مرحله از لحاظ عملی یک توزیع بهینه می‌باشد.

در این قسمت به منظور بررسی کارایی روش بهینه سازی پیشنهاد شده در طراحی بهینه میراگرهای پسماندی سازه‌های اندرکنشی، دو سازه ۵ و ۱۰ طبقه طراحی شده اولیه با الگوی بار آیین‌نامه‌ای در نظر گرفته شده‌اند. هدف از طراحی این سازه‌ها آنست که با داشتن وزن سازه‌های یکسان، بتواند در برابر زلزله طراحی در سطح ایمنی جانی و یا اندکی فراتر از آن بهترین عملکرد را از خود نشان دهند. به منظور طراحی بهینه این سازه، الگوریتم بهینه سازی فوق اعمال گردیده است و میانگین نتایج توزیع جابجایی نسبی طبقات در سازه اولیه (آیین نامه ۲۸۰۰) و سازه نهایی بهینه حاصل از ۱۶ زلزله برای حالت اندرکنشی نسبتاً شدید با فرکانس بی بعد ۲ و نسبت لاغری ۳ در شکل (۳) با یکدیگر مقایسه گردیده است. نتایج بیانگر اینست که میانگین ضریب تغییرات در سازه‌های ۵ و ۱۰ طبقه به ترتیب برابر ۰/۴۷ و ۰/۴۳ برای توزیع اولیه‌ی آیین‌نامه‌ای و همچنین ۰/۰۲ و ۰/۱۵ برای توزیع نهایی سازه بهینه می‌باشد. این نتایج بیانگر کارایی بسیار مناسب روش بهینه سازی پیشنهاد شده در دستیابی به سازه‌های با توزیع یکنواخت خسارت در طبقات در حالت اندرکنشی می‌باشد. علاوه بر آن نتایج ارائه شده در این شکل نشان می‌دهد که حداکثر جابجایی نسبی طبقات در برابر زلزله طراحی، از ۵ سانتی‌متر در سازه طراحی شده توسط الگوی بار آیین‌نامه‌ای، به ترتیب به حدود ۳ و ۲/۳ سانتی‌متر در سازه‌های بهینه‌ی ۵ و ۱۰ طبقه رسیده است کاهش می یابد. این در حالیست که این دو سازه عملاً دارای وزن سازه‌های یکسانی می باشند.

به منظور بررسی بیشتر کارایی الگوریتم پیشنهادی، در جدول (۱) روند تغییرات میانگین حداکثر جابجایی نسبی طبقات و ضریب تغییرات (COV) جابجایی نسبی طبقات تحت اثر ۱۶ زلزله انتخابی در گامهای مختلف نمایش داده شده است. نتایج ارائه شده در این شکل، همگرایی بسیار مناسب الگوریتم پیشنهاد شده را نشان می دهد به نحوی که سازه اولیه بدون هیچگونه پرش یا انحرافی و در طی کمتر از ده گام برای سازه ۵ طبقه و شش گام برای سازه ۱۰ طبقه به جواب بهینه رسیده است. همانگونه که در جدول (۱) قابل مشاهده است. با داشتن وزن سازه‌های یکسان، حداکثر جابجایی نسبی طبقات در طی تنها ۵ گام بیش از ۴۴٪ و ۵۶٪ به ترتیب در سازه‌های ۵ و ۱۰ طبقه کاهش یافته است. از سوی دیگر نتایج بدست آمده بیانگر آن است که کاهش ضریب تغییرات جابجایی نسبی طبقات همواره با کاهش حداکثر جابجایی نسبی طبقات همراه بوده است. این نتیجه کاملاً سازگار با نتایج تحقیقات گذشته محققان در بحث بهینه‌سازی سازه‌های مختلف پای ثابت و اندرکنشی بدون حضور میراگر می‌باشد [۲۸ و ۳۲ و ۱۵ و ۴].



شکل ۳: میانگین توزیع حداکثر تغییر شکل نسبی در سازه اولیه و بهینه اندرکنشی دارای میراگر پسماندی ($a_0=2$, $H/r=5$)

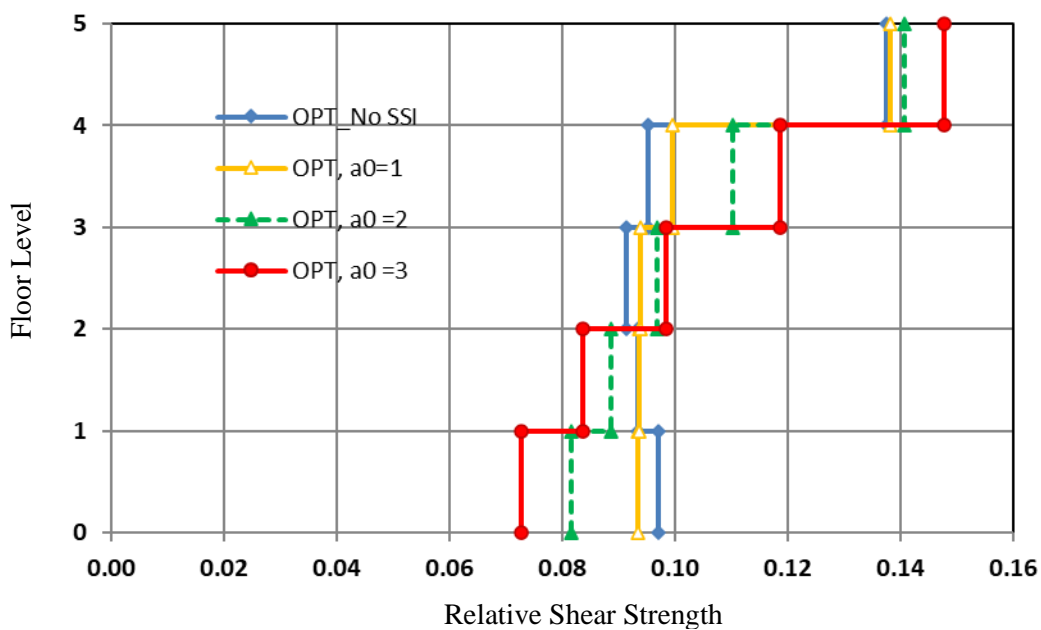
۵- اثر پارامترهای کلیدی اندرکنشی بر الگوی بهینه توزیع میراگرهای پسماندی

در بخشهای قبل اشاره شد که در سازه های برشی مقاومت و به تبع آن سختی هر یک از طبقات بر اساس نیروی برشی وارد به آن طبقه تعیین می گردد، لذا در اینگونه سازه ها همواره یک رابطه مشخصی بین الگوی توزیع بارهای طراحی لرزه ای با الگوی توزیع مقاومت وجود خواهد داشت. هدف از این بخش بررسی اثر پارامترهای کلیدی اندرکنشی شامل فرکانس بی بعد (a_0) که نشان دهنده نسبت سختی سازه به خاک است و همچنین نسبت لاغری H/r بر الگوی توزیع بار بهینه در سازه های دارای میراگرهای پسماندی می باشد. در این راستا، ابتدا الگوی بار بهینه سازه های با میراگر تحت اثر شرایط اندرکنشی مختلف ناشی از اثر هر یک از ۱۶ زمین لرزه طراحی با استفاده از الگوریتم بهینه سازی پیشنهاد شده در بخش قبل به دست می آیند. سپس میانگین الگوی بار بهینه حاصل از هر یک از حالات اندرکنشی با حالت متناظر آن در شرایط پای ثابت یعنی بدون اثر انعطاف پذیری خاک بررسی می شود. بدین منظور جهت بررسی دو پارامتر اندرکنشی فوق الذکر، میانگین الگوهای بهینه سازه های ۱۰ طبقه مبنای قبل که تحت بارگذاری آیین نامه ای قرار گرفته بود، استخراج و نتایج آن در اشکال (۴) الی (۶) ترسیم شده است. در اشکال (۴) و (۵) توزیع بهینه سازه های ۵ و ۱۰ طبقه برای چهار حالت شامل پای ثابت (No SSI)، نسبت های فرکانس بی بعد ۱، ۲ و ۳ که به ترتیب بیانگر اندرکنش کم، متوسط و زیاد به ازای نسبت لاغری ثابت ۳ می باشند ارائه شده است. همانگونه که در این اشکال مشاهده می گردد، اثر فرکانس بی بعد به عنوان یکی از مهمترین پارامترهای کلیدی اندرکنشی در نحوه توزیع الگوی بهینه کاملاً مشهود است؛ به نحوی که الگوی بار بهینه حالت پای ثابت با حالت اندرکنشی شدید کاملاً متفاوت است. این تفاوت به

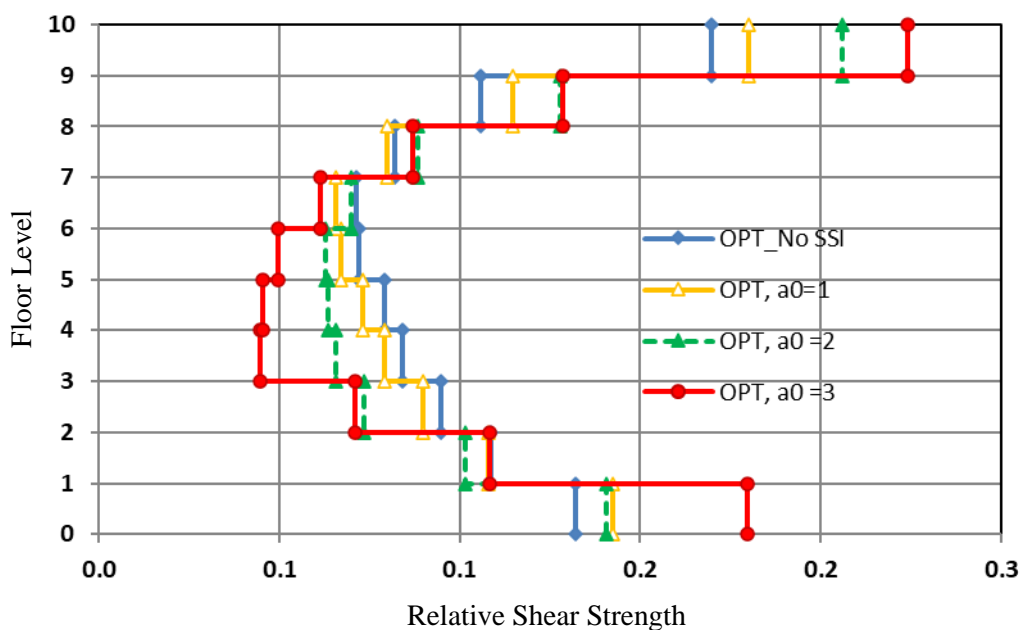
صورت افزایش بار لرزه‌ای در پای سازه و خصوصاً در طبقه‌ی بام مشهود است که می‌تواند به علت افزایش انعطاف‌پذیری سیستم خاک-سازه نسبت به حالت پای ثابت و اثر قابل توجه مودهای بالاتر باشد. لازم به ذکر است که با مقایسه شکل‌های (۴) و (۵) مشاهده می‌گردد که اثر فرکانس بی بعد برای سازه‌های ۵ و ۱۰ طبقه تا حدی برای طبقات پایین متفاوت است، به نحویکه در سازه ۵ طبقه برخلاف سازه ۱۰ طبقه افزایش فرکانس بی بعد کاهش نیروی برشی را به همراه خواهد داشت. هرچند که اثر آن بر طبقه بام مشابه حالت ۱۰ طبقه می‌باشد و موجب افزایش نیروی برشی نیاز می‌گردد. همچنین اثر نسبت لاغری نیز در شکل (۶) به ازای فرکانس بی بعد ثابت ۲ آورده شده است. در این شکل مقادیر نسبت‌های لاغری ۱، ۳ و ۵ به ترتیب بیانگر سازه‌های چاق (یعنی ارتفاع به بعد خیلی کم)، متوسط و لاغر می‌باشند. با توجه به اینکه نسبت لاغری تأثیری در سازه‌های پای ثابت ندارد از آوردن الگوی بهینه این حالت صرف نظر شده است. مشاهده می‌گردد که افزایش نسبت لاغری باعث کاهش بار لرزه‌ای در طبقات پایین و خصوصاً طبقات میانی و افزایش آن به سمت طبقه بام میشود که این موضوع نیز بیانگر اینست که نحوی توزیع الگوی بار بهینه بسیار متأثر از پارامترهای کلیدی مرتبط با پدیده‌ی اندرکنش خاک-سازه است که باید مد نظر قرار گیرد.

جدول ۱: روند تغییرات میانگین حداکثر دریفت طبقات و COV در گامهای مختلف بهینه‌سازی سیستم اندرکنشی با میراگر پسماندی ($a_0=2, H/r=5$)

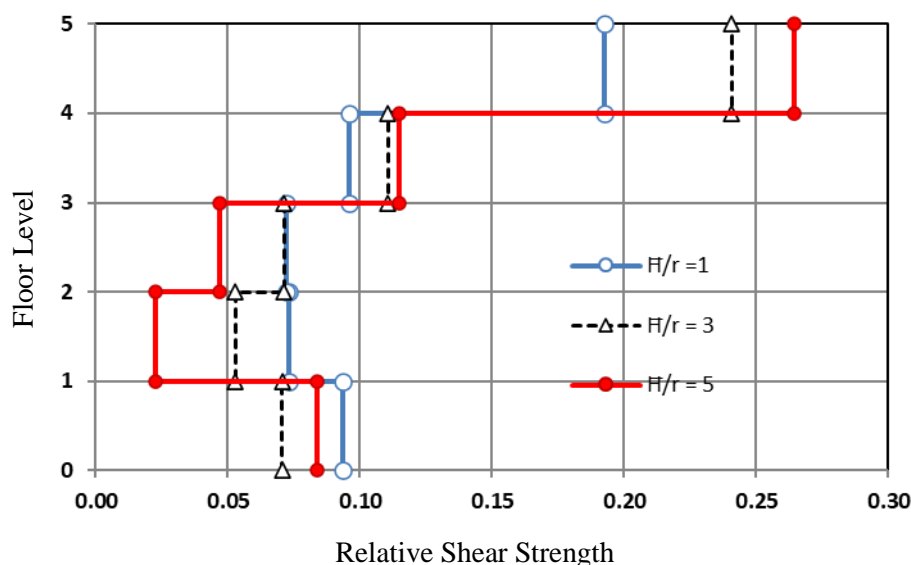
5-Story Building			10-Story Building		
Step	Drift (cm)	10 COV	Step	Drift (cm)	10 COV
1	5.120	4.954	1	4.900	4.393
2	4.120	2.842	2	3.980	1.853
3	3.213	1.766	3	3.230	0.875
4	2.920	0.973	4	2.620	0.494
5	2.910	0.640	5	2.340	0.297
6	2.890	0.448	6	2.320	0.174
7	2.880	0.269	7	2.310	0.115
8	2.870	0.224	8	2.280	0.100
9	2.850	0.211	9	2.270	0.090
10	2.840	0.195	10	2.250	0.085
11	2.830	0.185	11	2.240	0.080
12	2.825	0.180	12	2.200	0.078
13	2.823	0.175	13	2.190	0.075
14	2.822	0.15	14	2.18	0.072
15	2.820	0.140	15	2.175	0.072



شکل ۴: اثر فرکانس بی‌بعد بر الگوی بار بهینه سازه ۵ طبقه با میراگر پسماندی برای لاغری متوسط ($H/r=3$)؛ میانگین ۱۶ زلزله



شکل ۵: اثر فرکانس بی‌بعد بر الگوی بار بهینه سازه ۱۰ طبقه با میراگر پسماندی برای لاغری متوسط ($H/r=3$)؛ میانگین ۱۶ زلزله



شکل ۶: اثر نسبت لاغری بر الگوی بار بهینه سازه ۵ طبقه با میراگر پسماندی برای لاغری متوسط ($a_0=2$)؛ میانگین ۱۶ زلزله

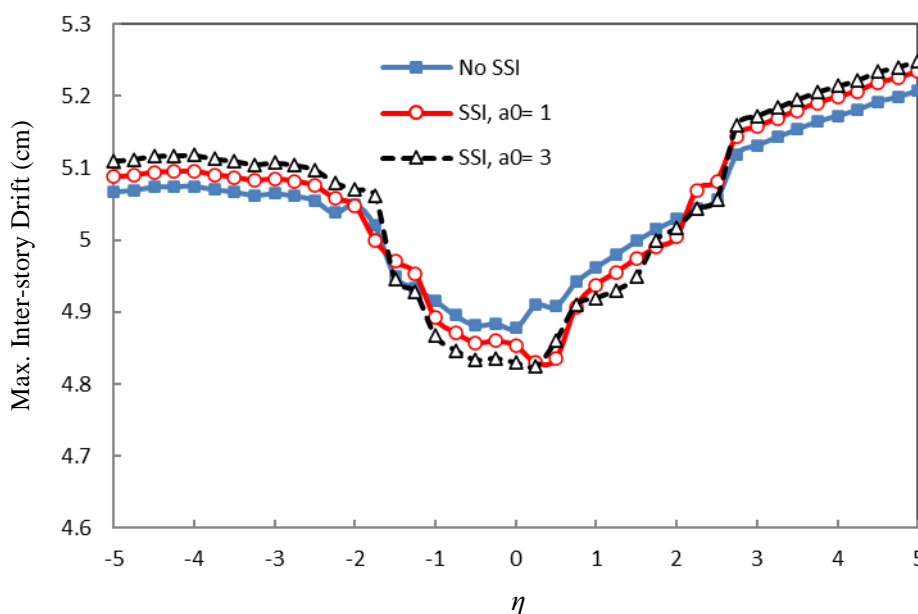
۶- اثر تغییرات نسبت سختی میراگر به سختی قاب در جواب بهینه سیستم‌های خاک-سازه

در تحلیل‌های انجام شده در بخش‌های گذشته، نسبت سختی میراگرها به سختی قاب در تمام طبقات سازه، ثابت فرض شده بود. در این بخش از تحقیق با بررسی الگوهای متفاوت برای توزیع ضریب λ در طبقات سازه، تاثیر تغییرات این ضریب در جواب بهینه سازه‌های پای ثابت و اندرکنشی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور به منظور توزیع ضریب λ در طبقه i ام سازه از رابطه کلی پیشنهادی توسط مرجع [۳۲] مطابق رابطه (۱۲) استفاده شده است:

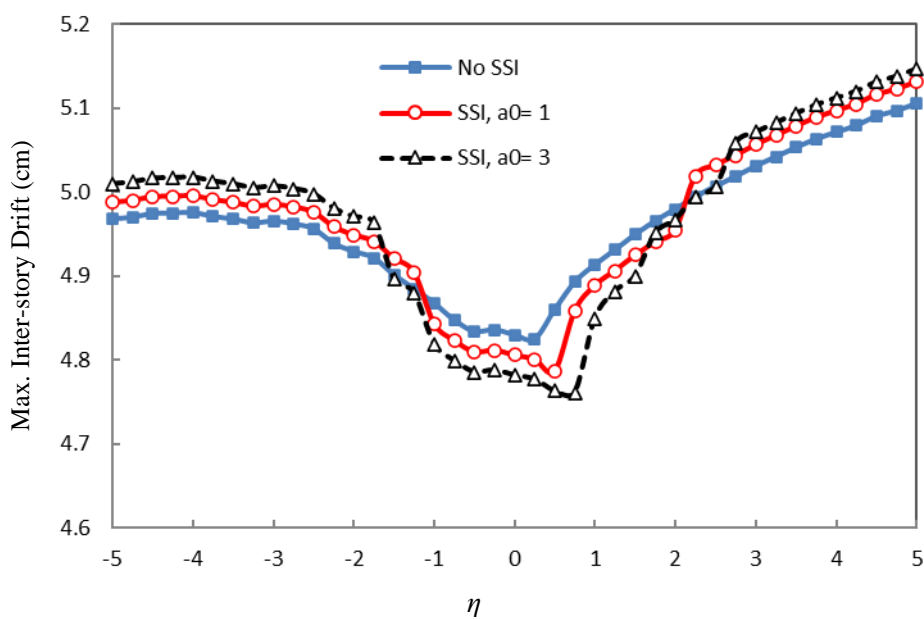
$$\lambda_i = bK_i^n = b(k_{fi} + k_{di})^n \quad (12)$$

در رابطه فوق K_i مجموع سختی معادل طبقه i ام در سیستم ساده شده قاب و میراگر می‌باشد، η معرف توان توزیع و b معرف یک ضریب ثابت می‌باشد که به علت مقیاس کردن مجموع سختی عناصر به منظور ثابت نگه داشتن وزن سازه‌ها، تاثیری در نتایج بدست آمده نخواهد داشت. به منظور اعمال نحوه توزیع ضریب λ در طبقات سازه، تنها کافیست که در گام پنجم الگوریتم ارائه شده در بخش قبل بجای استفاده از رابطه (۱) از رابطه (۱۲) استفاده شود. جواب نهایی بدست آمده در این حالت، دارای توزیع کاملاً یکنواخت حداکثر جابجایی نسبی طبقات می‌باشد و الگوریتم استفاده شده بدون توجه به طرح اولیه، همواره به یک جواب منحصر به فرد همگرا می‌گردد [۳۲]. لازم به ذکر است که با تغییر رابطه توزیع ضریب λ در طبقات سازه، هر چند همواره به یک جواب با توزیع یکنواخت جابجایی نسبی طبقات خواهیم رسید اما حداکثر جابجایی نسبی حاصل شده متأثر از نحوه توزیع ضریب λ می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که از بین توزیع‌های استفاده شده، توزیعی که به کمترین مقدار جابجایی نسبی طبقات منتهی گردد، بهترین توزیع نامیده می‌شود. به منظور بررسی تاثیر توزیع‌های مختلف ضریب λ در حداکثر جابجایی‌های نسبی به دست آمده، ۴۱ مقدار متفاوت بین ۵- تا ۵ برای توان η در رابطه (۱۲) در نظر گرفته شده است و در هر حالت با اعمال الگوریتم بهینه سازی پیشنهادی، الگوی توزیع بهینه میراگرهای پسماندی تعیین گردیده است. بدین منظور برای سه حالت مختلف شامل دو حالت اندرکنشی کم ($a_0=1$)، شدید ($a_0=3$) و حالت پای ثابت (No SSI) برای نسبت لاغری متوسط ۳ برای سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه تحت اثر ۱۶ شتابنگاشت بهینه‌سازی انجام شده است. بنابراین تعداد ۱۸۴۵ برای هر سازه با میراگر پسماندی و در مجموع ۵۵۳۵ سازه بهینه شده‌اند و نتایج میانگین حاصل از تمام زلزله‌ها در اشکال (۷) الی (۹)

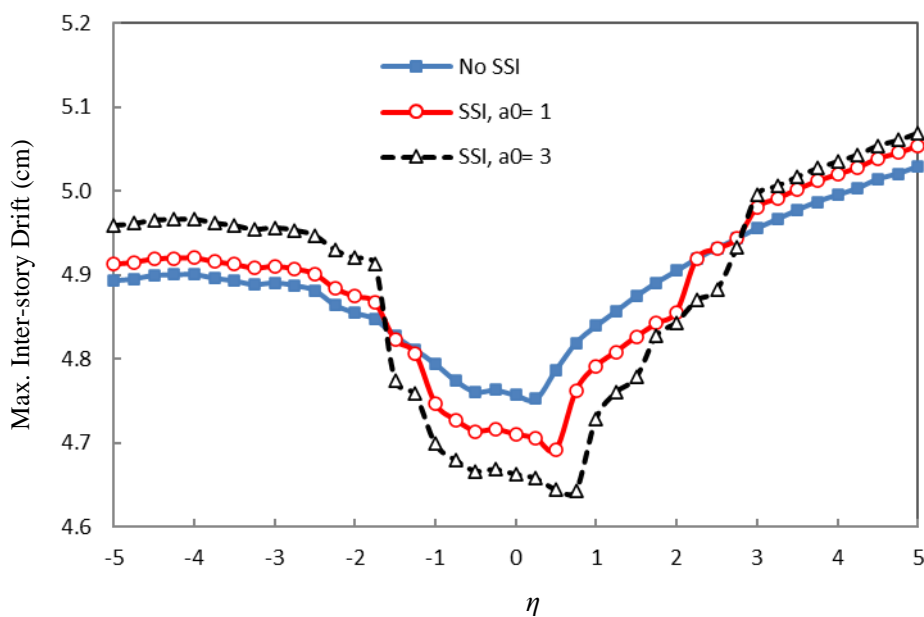
ترسیم شده‌اند. در این اشکال حداکثر جابجایی نسبی طبقات در سازه‌های بهینه بدست آمده بر اساس مقادیر مختلف توان η نشان داده شده است. هر یک از نقاط نشان داده شده در این اشکال بیانگر یک جواب بهینه با توجه به توزیع انتخاب شده برای ضریب λ می‌باشند. مقدار متناظر با $\eta=0$ بیانگر توزیع یکنواخت ضریب λ در طبقات می‌باشد. همانگونه که در این شکلها مشاهده می‌گردد نتایج بیانگر آن است که با انتخاب توزیع های متفاوت، می‌توان به جوابهایی مناسب‌تر از توزیع یکنواخت رسید. هرچند بهبود رفتار مشاهده شده چندان زیاد نمی‌باشد و اصولاً جوابهای بهینه بدست آمده با توجه به توزیع های مختلف تفاوت زیادی با یکدیگر ندارند. نکته قابل ملاحظه اینست که اگرچه با تغییر تعداد طبقات تغییر محسوسی در مقدار توان همگرایی بهینه ایجاد نمی‌شود، اما مشاهده می‌گردد که با افزایش تعداد طبقات اثر فرکانس بی‌بعد بر توان همگرایی تا حدی افزایش می‌یابد و موجب کاهش اندک حداکثر جابجایی می‌شود. همچنین مشاهده می‌گردد که اگرچه با افزایش اثر اندرکنش خاک-سازه (افزایش فرکانس بی‌بعد) مقدار ضریب η کمی افزایش می‌یابد اما این تغییر در کاهش حداکثر جابجایی بهینه چندان قابل ملاحظه نیست و کمتر از ۵ درصد است. بنابراین نتایج ارائه شده در این شکل بیانگر آن است که در حالت متوسط، توزیع یکنواخت ضریب λ از لحاظ عملی می‌تواند کاملاً قابل قبول دانسته شود و جواب بدست آمده چندان تفاوتی با بهترین جواب بهینه نخواهد داشت.



شکل ۷: اثر تغییرات نسبت سختی میراگر به سختی قاب در حداکثر جابجایی نسبی سیستم‌های خاک-سازه بهینه ۵ طبقه (میانگین ۱۶ زلزله و $H/r=3$)



شکل ۸: اثر تغییرات نسبت سختی میراگر به سختی قاب در حداکثر جابجایی نسبی سیستم‌های خاک-سازه بهینه‌ی ۱۰ طبقه (میانگین ۱۶ زلزله و $H/r=3$)



شکل ۹: اثر تغییرات نسبت سختی میراگر به سختی قاب در حداکثر جابجایی نسبی سیستم‌های خاک-سازه بهینه‌ی ۱۵ طبقه (میانگین ۱۶ زلزله و $H/r=3$)

۷- نتیجه گیری

در این مطالعه، با ارائه‌ی یک الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر توزیع خسارت یکنواخت بر روی سازه‌های برشی معادل، اثر اندرکنش خاک-سازه بر توزیع بهینه میراگرهای پسماندی مورد مطالعه‌ی پارمتریک قرار گرفت است. بدین منظور سازه‌های برشی معادل با سازه‌های فولادی واقعی دارای میراگرهای پسماندی واقع بر بستر انعطاف‌پذیر تحت اثر ۱۶ شتابنگاشت زمین‌لرزه‌ی دور از گسل که بدون پالس می-باشند بهینه شده و اثر پامترهای موثر اندرکنشی در پاسخ بهینه مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه نتایج این مطالع به شرح زیر قابل بیان است:

- الگوریتمی جهت توزیع بهینه میراگرهای پسماندی با اثر اندرکنش خاک-سازه با فرض داشتن وزن سازه‌ای ثابت ارائه شد و نشان داده شد که با استفاده از توزیع یکنواخت خسارت (تغییرشکل‌های نسبی) امکان آن فراهم می‌گردد که با توزیع مناسب میراگرهای پسماندی، عملکرد لرزه‌ای سازه اولیه افزایش داده شود.
- نتایج بیانگر اینست که میانگین ضریب تغییرات در سازه‌های ۵ و ۱۰ طبقه به ترتیب برابر ۰/۴۷ و ۰/۴۳، برای توزیع اولیه-ی آیین‌نامه‌ای و همچنین ۰/۰۲ و ۰/۱۵، برای توزیع نهایی سازه بهینه می‌باشد. این نتایج بیانگر کارایی بسیار مناسب روش بهینه‌سازی پیشنهاد شده در دستیابی به سازه‌های با توزیع یکنواخت خسارت در طبقات در حالت اندرکنشی می‌باشد. نتیجه گرفته شد که حداکثر جابجایی نسبی طبقات در برابر زلزله طراحی، از ۵ سانتی‌متر در سازه طراحی شده توسط الگوی بار آیین‌نامه‌ای، به ترتیب به حدود ۳ و ۲/۳ سانتی‌متر در سازه‌های بهینه‌ی ۵ و ۱۰ طبقه رسیده است کاهش می‌یابد. این در حالیست که این دو سازه عملاً دارای وزن سازه‌ای یکسانی می‌باشند.
- اثر پارامتر کلیدی اندرکنشی فرکانس بی‌بعد در نحوه‌ی توزیع الگوی بهینه کاملاً قابل ملاحظه است. افزایش اثر اندرکنش-خاک سازه موجب افزایش بار لرزه‌ای در پای سازه و خصوصاً در طبقه‌ی بام می‌شود که می‌تواند ناشی از افزایش انعطاف‌پذیری سیستم خاک-سازه نسبت به حالت پای ثابت و اثر قابل توجه مودهای بالاتر باشد. اثر فرکانس بی‌بعد برای سازه‌های ۵ و ۱۰ طبقه تا حدی برای طبقات پایین متفاوت است، به نحویکه در سازه ۵ طبقه برخلاف سازه ۱۰ طبقه افزایش فرکانس بی‌بعد کاهش نیروی برشی را به همراه خواهد داشت. هرچند که اثر آن بر طبقه بام مشابه حالت ۱۰ طبقه می‌باشد و موجب افزایش نیروی برشی نیاز می‌گردد.
- همچنین افزایش نسبت لاغری باعث کاهش بار لرزه‌ای در طبقات پایین و خصوصاً طبقات میانی و افزایش آن به سمت طبقه‌ی بام میشود. این موضوع نیز بیانگر اینست که نحوه‌ی توزیع الگوی بار بهینه بسیار متاثر از پارامترهای کلیدی مرتبط با پدیده‌ی اندرکنش خاک-سازه است که باید مد نظر قرار گیرد.
- با بررسی زلزله‌های مختلف و الگوهای متفاوت برای توزیع ضریب λ در طبقات سازه، تاثیر تغییرات این ضریب در جواب بهینه سازه‌های پای ثابت و اندرکنشی مورد بحث و بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آنست که اگرچه با افزایش اثر اندرکنش خاک-سازه (افزایش فرکانس بی‌بعد) مقدار ضریب λ کمی افزایش می‌یابد اما این تغییر در کاهش حداکثر جابجایی بهینه چندان قابل ملاحظه نیست و کمتر از ۵ درصد است. همچنین با افزایش تعداد طبقات اثر فرکانس بی‌بعد بر توان همگرایی تا حدی افزایش می‌یابد و موجب کاهش اندک حداکثر جابجایی می‌شود. بنابراین در حالت میانگین، توزیع یکنواخت ضریب λ از لحاظ عملی می‌تواند کاملاً قابل قبول دانسته شود و جواب بدست آمده چندان تفاوتی با بهترین جواب بهینه نخواهد داشت.

مراجع

- [1] Soong, T. T. and Spencer, Jr. B. F. (2002). Supplemental energy dissipation: State-of-the-art and state-of-the practice. *Engineering Structures*, 24 (3); 243-259.
- [2] Bozorgnia, Y. and Bertero, V. V. (2004). *Earthquake engineering: From engineering seismology to performance-based engineering*. Florida: The International Code Council and CRC Press.
- [3] Higashino, M. and Okamoto, S. (2004). *Response control and seismic isolation of buildings*. London and New York: Taylor & Francis.
- [4] Mohammadi RK, El Naggar MH, Moghaddam H. (2004). Optimum strength distribution for seismic resistant shear buildings. *International Journal of Solids and Structures* 41(22):6597-6612.
- [5] Shiomi Takuma. (2016). Explicit optimal hysteretic damper design in elastic-plastic structure under double impulse as representative of near-fault ground motion. *International Journal of Earthquake and Impact Engineering*. 1(1-2):5-19.
- [6] Yamazaki Shinsuke, Y., Usami, T., Nonaka T. (2016). Developing a new hysteretic type seismic damper (BRRP) for steel bridges. *Engineering Structures*. 124:286-301.
- [7] Jan, H., Hoffmeyer, D., Ejlersen C. (2016)Damping of Torsional Beam Vibrations by Control of Warping Displacement. *Journal of Vibration and Acoustics* 138(1):014501.
- [8] Symans MD, Charney FA, Whittaker AS,. (2008) Energy dissipation systems for seismic applications: current practice and recent developments. *Journal of Structural Engineering*. 134(1):3-21.
- [9] Takewaki I, Murakami S, Fujita K, Yoshitomi S, Tsuji M. (2011) The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake and response of high-rise buildings under long-period ground motions. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering* 31(11):1511-1528.
- [10] Xiang P, Nishitani A. (2014) Optimum design for more effective tuned mass damper system and its application to base-isolated buildings. *Structural Control Health Monitoring* 21:98-114.
- [11] Pietrosanti D, De Angelis M, Basili M. (2017) Optimal design and performance evaluation of systems with tuned mass damper inerter (TMDI). *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*. <https://doi.org/10.1002/eqe.2861>.
- [12] Brzeski P, Pavlovskaja E, Kapitaniak T, Perlikowski P. (2015) The application of inerter in tuned mass absorber. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 70:20-29.
- [13] Hu Y, Chen MZQ. (2015) Performance evaluation for inerter-based dynamic vibration absorbers. *International Journal of Mechanical Sciences*. 99:297-307.
- [14] Uetani, K., Tsuji, M., Takewaki, I., (2003). Application of an optimum design method to practical building frames with viscous dampers and hysteretic dampers. *Engineering Structures* 25 (5), 579-592.
- [15] Hajirasouliha I, Asadi P, Pilakoutas K (2012) An efficient performance-based seismic design method for reinforced concrete frames. *Earthquake Engineering and Structural Dynamic* 41:663-679.
- [16] Salvi J, Rizzi E. (2015) Optimum tuning of tuned mass dampers for frame structures under earthquake excitation. *Structural Control Health Monitoring*. 22:707-725.
- [17] Makris N, Kampas G. (2016) Seismic protection of structures with supplemental rotational inertia. *Journal of Engineering Mechanics*. 142 (11): 1-11.
- [18] Zhang S.Y, Jiang J.Z, Neild S.(2017) Optimal configurations for a linear vibration suppression device in a multi-storey building. *Structural Control Health Monitoring*. 24:e1887.
- [19] De Domenico D, Ricciardi G. (2017) An enhanced base isolation system equipped with optimal tuned mass damper inerter (TMDI). *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*. <https://doi.org/10.1002/eqe.3011>
- [20] Ganjavi, B., And Hao, H. (2012). A parametric study on the evaluation of ductility demand distribution in multi-degree-of-freedom systems considering soil-structure interaction effects. *Engineering Structures*, 43, 88-104

- [21] Ganjavi, B., And Hao, H. (2014). Strength Reduction Factor for MDOF Soil-Structure Systems. *The structural Design of Tall and Special Buildings*, 23 (3), 163-180.
- [22] Nik, F. A. And Khoshnoudian, F. (2014). Strength reduction factor for multi-story building-soil systems. *Earthquakes and Structures*, 6(3), 301-316.
- [23] Ahmadi, E., And Khoshnoudian, F. (2015). Near-fault effects on strength reduction factors of soil-MDOF structure systems. *Soils and Foundations*, 55(4), 841-856.
- [24] Cruz, C. And Miranda, E. (2017). Evaluation of soil-structure interaction effects on the damping ratios of buildings subjected to earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 100, 183-195.
- [25] Vahdani, S., Bitarafan M., Khodakarami M. I. (2016) Effect of the soil-structure interaction on performance assessment of the energy-based cumulative damage index in concrete reinforced frames. *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*. 8 (3); 16-29.
- [26] Ganjavi, B., Moosavi, S.R. (2017) Influence of frequency-dependent dynamic soil stiffness and interacting parameters on elastic and inelastic response of soil-structure systems. *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*. DOI: 10.22065/JSCE.2017.92297.1260
- [27] Ganjavi B, Hao H. (2013) Optimum lateral load pattern for seismic design of elastic shear-buildings incorporating soil-structure interaction effects. *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*. 42: 913-933.
- [28] Ganjavi, B. Hajirasouliha, I. And Bolourchi, A. (2016). Optimum lateral load distribution for seismic design of nonlinear shear-buildings considering soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 88, 356-368.
- [29] Takewaki, I., Sugimura, Y., Uetani, K., Tsuji, M., Okamoto, T., 2000. Frame design method based on reduced model-frame inverse transformation. In: Proceedings of 12th WCEE, Auckland, New Zealand. Paper No. 1206.
- [30] Takewaki, I., Yoshitomi, S., Uetani, K., Tsuji, M., (1999). Non-monotonic optimal damper placement via steepest direction search. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 28(6); 655-670.
- [31] Singh, M.P., Moreschi, L.M., (2002). Optimal placement of dampers for passive response control. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 31 (4), 955-976.
- [32] Hajirasouliha, I., (2006). Effects of structural characteristics distribution on the seismic response of structures. PhD. thesis. Sharif University of Technology, Tehran, Iran
- [33] Khalil, L. Sadek, M. And Shahrour, I. (2007). Influence of the soil-structure interaction on the fundamental period of buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(15), 2445-2453.
- [34] Veletsos, A. S. And Nair, V. V. (1975). Seismic interaction of structures on hysteretic foundations. *Journal of the Structural Division*, 101(1), 109-129.
- [35] Wolf, J. P. (1994). *Foundation vibration analysis using simple physical models*. Prentice Hall, 464.
- [36] Jennings, P. C. And Bielak, J. (1973). Dynamics of building-soil interaction. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 63(1), 9-48.
- [37] IBC-2015. (2015) *International Building Code*. ICC Birmingham AL.
- [38] Standard No. 2800. (2013) *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*, 4th Edition.
- [39] Bararnia M., Hassani, N, Ganjavi, B., Amiri, G.G. (2018), Estimation of inelastic displacement ratios for soil-structure systems with embedded foundation considering kinematic and inertial interaction effects, *Engineering Structures*, 159, (252).
- [40] OPENSEES (2016). Open System for Earthquake Engineering Simulation, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, Calif.