

طراحی بهینه قاب های ساختمانی دارای میراگرهای ویسکوالاستیک

امیرمسعود علامی

کارشناسی ارشد سازه. پژوهشگر گروه فنی مهندسی پژوهشکده دانشگاه امام علی (ع).

نام نویسنده مسئول:

امیرمسعود علامی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۱

چکیده

طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، همواره مورد توجه مهندسين سازه بوده است. استفاده از سیستم‌های استهلاک انرژی یکی از راه‌های نوین کنترل سازه‌ها در برابر زلزله است. میراگرهای ویسکوالاستیک یکی از سیستم‌های استهلاک انرژی هستند که قادر به کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای در سازه می‌باشند. نحوه‌ی جانمایی بهینه‌ی میراگرها با توجه به تاثیر اندرکنشی خاک و سازه مسئله‌ایست که می‌تواند پاسخی صحیح در مورد طراحی بهینه‌ی میراگرها دهد و کمتر مورد توجه بوده است. تحقیق حاضر به کنترل پاسخ لرزه‌ای قاب‌های چندطبقه پرداخته است که با در نظر گیری اثرات برهم‌کنش خاک و سازه به طور بهینه به میراگرهای ویسکوالاستیک مجهز شده‌اند. سیستم، الاستیک فرض شده است و پاسخ‌های سیستم دامنه فراکنس برای تحریکات لرزه‌ای تصادفی ثابت به دست آمده‌اند. طراحی بهینه میراگرهای ویسکوالاستیک سازه از طریق الگوریتم ژنتیک و با مینیمم کردن مقادیر پاسخ حداکثر سیستم برای یک مقدار کل معلوم از مواد ویسکوالاستیک محاسبه شده است. دو نوع قاب ساختمانی چندطبقه الاستیک با نوع خاک و نسبت میزان مدفون بودن فنداسیون متفاوت برای فرایند بهینه‌سازی در نظر گرفته شدند و نشان داده شد که میراگرهای ویسکوالاستیک بهترین کنترل را در پاسخ سازه برای شرایط پایه گیردار دارند و کارایی آن با نرم تر شدن نوع خاک کاهش می‌یابد. جایگذاری بهینه انواع میراگرهای ویسکوالاستیک برای انواع خاک‌ها با یکدیگر متفاوت است و با کاهش سختی خاک مکان بهینه میراگرهای ویسکوالاستیک به سمت طبقات بالاتر میل می‌کند.

واژگان کلیدی: پاسخ لرزه‌ای قاب‌های ساختمانی، برهم‌کنش خاک و سازه، میراگرهای ویسکوالاستیک، الگوریتم ژنتیک.

مقدمه

میراگرها به منظور بهبود عملکرد سازه و هم‌چنین کاهش خرابی سازه در زلزله به کار برده می‌شوند [۱]. استفاده از میراگرها منجر به کاهش چشم‌گیر پاسخ سازه در برابر زلزله می‌گردد و علاوه بر تمرکز تغییر شکل‌های غیرارتجاعی هنگام زلزله در این سیستم‌ها، بهسازی و ترمیم سازه را بهبود می‌بخشد [۲].

میراگرهای ویسکوالاستیک (VE) یکی از انواع میراگرها می‌باشند که تاثیر به‌سزایی در کاهش ارتعاشات سازه‌ها در کلیه‌ی سطوح لرزش (شامل زلزله‌های بزرگ، باد، ارتعاشات ترافیکی و ...) دارند، میراگرهای ویسکوالاستیک انعطاف‌پذیری مورد نیاز سازه را به طور چشم‌گیری کاهش می‌دهند [۳ و ۴]. نیروی میرایی در میراگرهای ویسکوالاستیک متناسب با سرعت و رفتار ویسکوز آن‌هاست و استهلاک انرژی در آن‌ها از طریق تغییر شکل برشی است [۵]. مدل‌های رفتار دینامیکی میراگرهای ویسکوالاستیک، شامل مدل‌های کلونین و مکسول و ترکیب‌های آن‌هاست که توسط محققین مختلفی از جمله چانگ و لواندوفسکی ارائه شده‌اند [۶ و ۷].

به سبب پیچیدگی تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها با در نظرگیری تاثیرات برهم‌کنش خاک و سازه، اکثر تحقیقات با فرض فنداسیون صلب پیش می‌رود. تحقیقات نشان می‌دهد که اثرات برهم‌کنش خاک و سازه به طور چشم‌گیری خصوصیات دینامیکی سازه را تصحیح می‌سازد که عملکرد پاسخ لرزه‌ای کل سازه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. [۸ و ۹] در نظرگیری بستر انعطاف‌پذیر بر خلاف بستر صلب، باعث می‌گردد تا یک بخش از انرژی ارتعاشی به وسیله‌ی تشعشع امواج و نیز به‌وسیله‌ی عمل هیستریزیس در خاک زیر سازه مستهلک گشته و باعث تغییر شکل مودها و فرکانس‌های ارتعاشی می‌شود [۱۰]. از طرفی عملکرد یک میراگر ویسکوالاستیک تا حد زیادی به خصوصیات دینامیکی سازه، به‌خصوص فرکانس‌های سازه‌ای مرتبط است [۱۱] و بنابراین به طور غیرقابل اجتنابی توسط اثرات برهم‌کنش خاک و سازه تاثیر می‌پذیرد. علاوه بر این، تغییرات سختی و میرایی سیستم و اثرات برهم‌کنش خاک و سازه متقابلاً بر یکدیگر تاثیر می‌گذارند. [۱۰] بر این اساس، تحلیل لرزه‌ای سیستم میراگر-خاک-سازه یک مساله نسبتاً پیچیده است که با فرض فنداسیون صلب ممکن است یک عدم دقت در تحلیل حاصل شود و انحرافی قابل توجه در خاک‌های نرمی ایجاد شود که سازه بر روی آن بنا شده و در روی آنها از میراگر ویسکوالاستیک استفاده شده است.

علاوه بر ویژگی‌های و رفتار یک میراگر نحوه‌ی قرارگیری میراگرها و چینش آن‌ها در سازه، اثر قابل توجهی در توانایی کاهش پاسخ دستیابی به اهداف طراحی دارد و از این سو مطالعات طراحی بهینه میراگرها همواره مورد استفاده بوده است [۱۲]. الگوریتم‌های ژنتیک الگوریتم‌های بهینه‌سازی پر قدرتی هستند که بر روند تکامل ژن‌ها استوارند [۱۳]، و استفاده از الگوریتم ژنتیک در طراحی بهینه‌ی میراگرها در تحقیقات بسیاری مورد استفاده بوده است [۱۴ و ۱۵ و ۱۶]. اما طراحی بهینه‌ی میراگرهای ویسکوالاستیک با در نظرگیری اثرات اندرکنشی خاک و سازه کمتر مورد توجه بوده است.

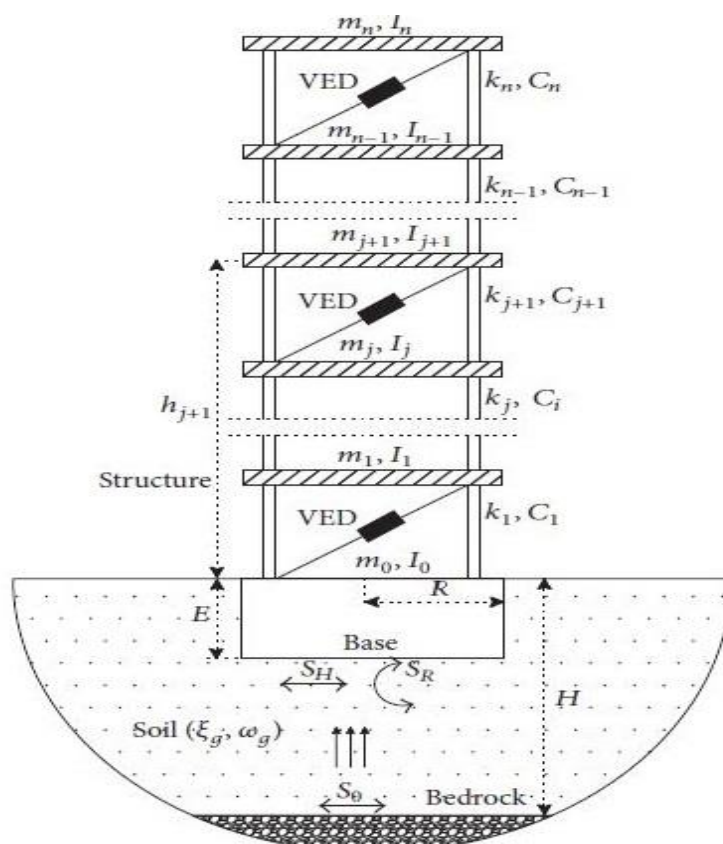
تلاش این مقاله بر این است که اثرات برهم‌کنش خاک و سازه را بر عملکرد میراگرهای ویسکوالاستیک ارزیابی سازد و محل بهینه قرارگیری میراگرهای ویسکوالاستیک را در قاب‌های ساختمانی مشخص نماید. به دلیل اینکه زلزله یک پدیده تصادفی است، یک روند پیچیده برای ارزیابی پاسخ لرزه‌ای سیستم استفاده شده است. یک الگوریتم ژنتیک به عنوان یک تکنیک جستجوی عددی برای پیدا کردن محل بهینه میراگرهای ویسکوالاستیک برای یک مقدار معین از مواد ویسکوالاستیک استفاده شده است. در نهایت دو نوع قاب ساختمانی الاستیک که تحت تاثیر حرکات زلزله قرار گرفته‌اند برای اثبات روند بهینه‌سازی عددی در نظر گرفته شد.

مدل ساده شده ساختمان چندطبقه مجهز به میراگرهای ویسکوالاستیک با در نظرگیری اثرات

برهم‌کنش خاک و سازه

قاب ساختمانی با N درجه آزادی الاستیک خطی، مجهز به میراگرهای ویسکوالاستیک با فونداسیون دایره‌ای مدفون در نیم‌فضای ایزوتروپ و ویسکوالاستیک یکنواخت در شکل ۱ نشان داده شده است. طبق تحقیقات کاسل حل این مساله می‌تواند به سه گام شکسته شود. اولین گام (برهم‌کنش سینماتیک) تعیین حرکت فنداسیون بی‌جرم، هنگامی که تحت حرکت آزاد قرار گرفته است می‌باشد. گام بعدی تعیین مقادیر آمپدانس فنداسیون است که توابعی پیچیده و فرکانس مستقل هستند که سختی

و میرایی خاک را در حالت ارتعاش گهواره ای و افقی نشان می دهند. در نهایت گام آخر شامل محاسبه پاسخ هر فرکانس از سازه است که تحت حرکت محاسبه شده در گام اول قرار گرفته است [۱۷].



شکل ۱- مدل قاب سازه ای مجهز به میراگرهای ویسکوالاستیک که بر روی فونداسیون مدفون قرار گرفته است.

موقعیت بهینه میراگرهای ویسکوالاستیک

طراحی بهینه میراگرهای ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن اثرات برهم کنش خاک و سازه تحت تحریکات زلزله تصادفی با استفاده از دو قاب سازه ای معمول به تصویر کشیده شده است. ارتفاع هر طبقه و عرض قاب به ترتیب ۳.۶ و ۱۰ متر در نظر گرفته شدند و جرم هر طبقه برای هر دو سازه ۱۲۰ تن در نظر گرفته شده است. در تمامی آنالیزها ماتریس میرایی ویسکوز روسازه، نسبت جرم به سختی سازه های قاب ساختمانی فرض گردید. دو مود اول نسبت میرایی ۰.۰۵ در نظر گرفته شده و پنج نوع شرایط ساختگاهی متفاوت در نظر گرفته شده است. نسبت پواسون خاک ۰.۳۳ و چگالی توده خاک ۱۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب تعیین می گردند.

کمیت های پاسخ مورد نظر، مقادیر پاسخ استاتیکی حداکثر برای جابجایی، شتاب مطلق، جابجایی درون طبقه سازه در دو حالت حضور و عدم حضور میراگرهای ویسکوالاستیک هستند. اثرات مستهلک سازی انرژی با نسبت کاهش R_0 ارزیابی می شود که به عنوان مقادیر پاسخ استاتیکی حداکثر سازه با میراگر ویسکوالاستیک تقسیم بر مقادیر پاسخ استاتیکی حداکثر سازه بدون میراگر ویسکوالاستیک تعریف می شود. بنابراین اثرات میرایی در حالتی که مقادیر R_0 کمتر باشد بهتر است [۱۸]. نسبت کاهش دریافت سازه ای R_θ ، نسبت کاهش جابجایی R_d ، نسبت کاهش شتاب مطلق R_a ، و نسبت کاهش مقادیر پاسخ میانگین R_{mean} به صورت زیر تعریف می شوند:

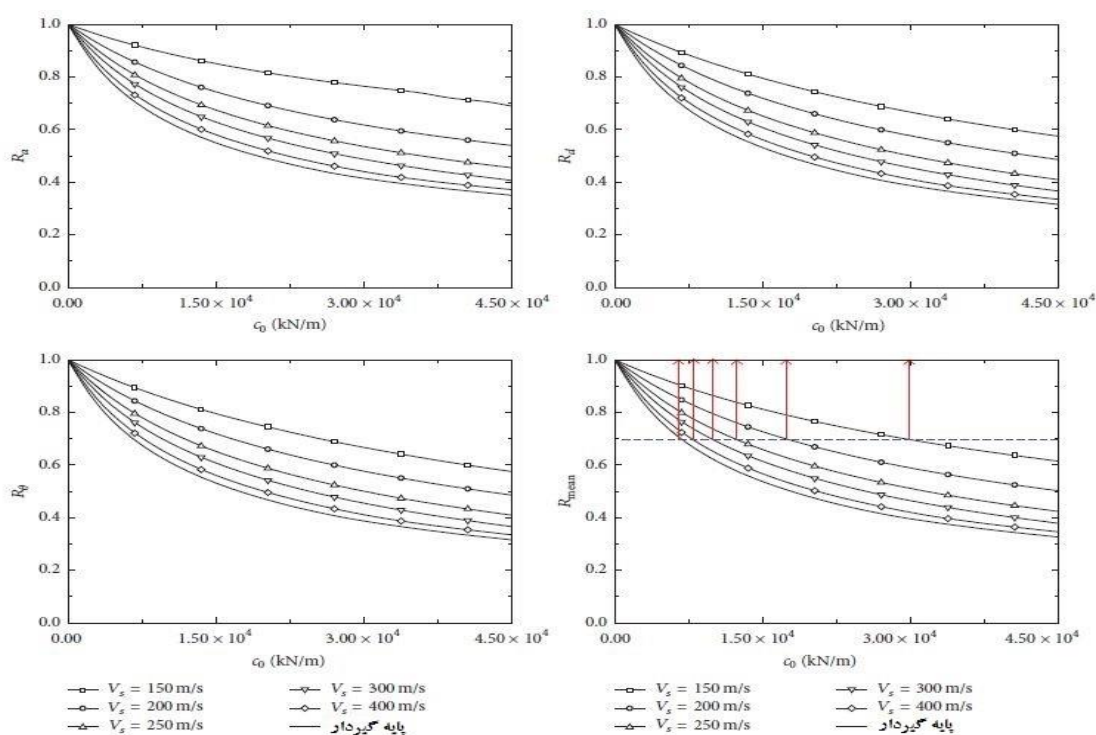
$$R_{\theta} = \frac{\max\{\mu_{\theta_j}\}_{VED}}{\max\{\mu_{\theta_j}\}_{No-VED}} \quad (1)$$

$$R_d = \frac{\max\{\mu_{U_j}\}_{VED}}{\max\{\mu_{U_j}\}_{No-VED}} \quad (2)$$

$$R_a = \frac{\max\{\mu_{A_j}\}_{VED}}{\max\{\mu_{A_j}\}_{No-VED}} \quad (3)$$

$$R_{mean} = \frac{R_{\theta} + R_d + R_a}{3} \quad (4)$$

به منظور تعیین مقدار کل مواد میراگرهای ویسکوالاستیک برای طراحی بهینه، در ابتدا میراگر به طور یکنواخت در ارتفاع سازه توزیع گردید و برای هر طبقه، مقدار مواد ویسکوالاستیک برابر است. پارامتر C_0 برای میراگر نقشی حیاتی در نیروهای میرایی میراگر بازی میکند که می تواند با تغییر در سطح برش A و ضخامت برش d برای میراگر تغییر کند. سپس پارامتر C_0 به عنوان یک پارامتر متغیر برای بهینه سازی در نظر گرفته شد. اشکال ۲ و ۳ متغیرهای R_{θ} ، R_d ، R_a و R_{mean} را با تغییر C_0 در انواع مختلف خاک نشان می دهد. در اشکال ۲ و ۳، ارائه دهنده مقدار مواد ویسکوالاستیک در هر طبقه است. نسبت مدفون فنداسیون برابر ۱ است و شتاب حداکثری زلزله ورودی ۳۵ گال است.

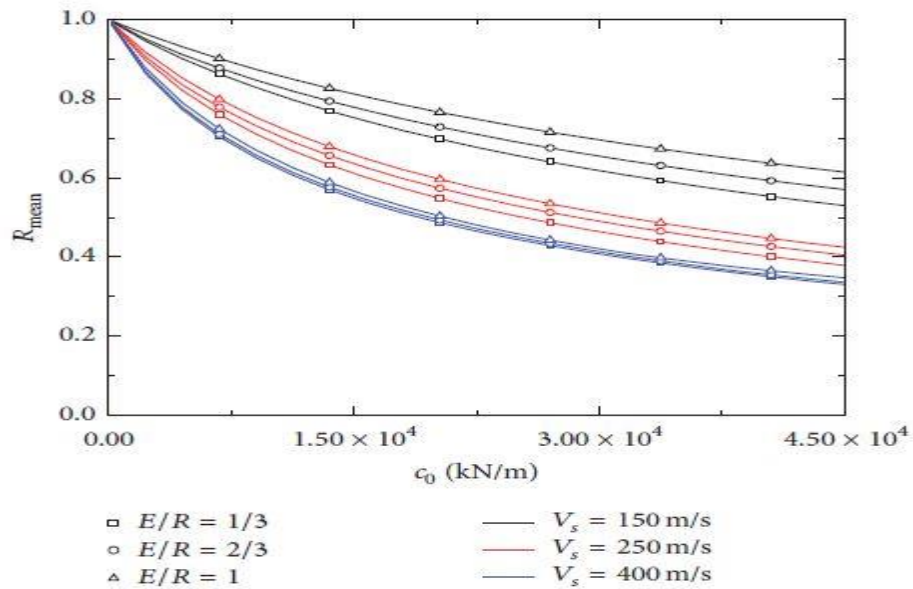


شکل ۲- نسبت‌های کاهش برای ساختمان سازه مدل ۱ (۱۰ طبقه)

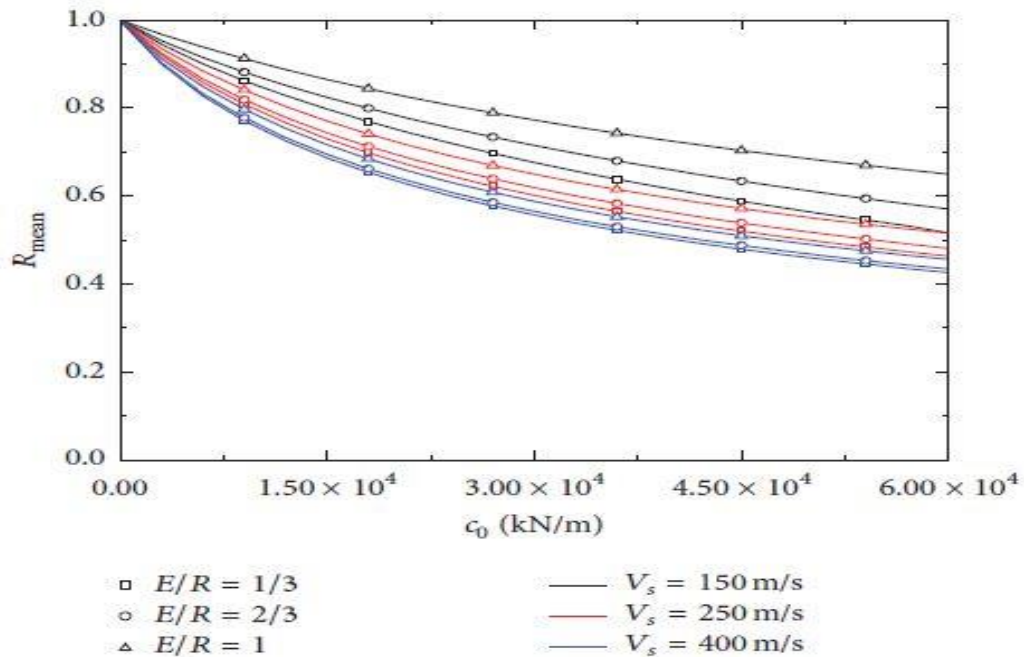
با توجه به اشکال ۲ و ۳ می‌توان نشان داد که با افزایش C_0 نسبت‌های کاهش دریافت، جابجایی و شتاب مطلق برای تمامی انواع خاک کاهش می‌یابند. میراگرهای ویسکوالاستیک در حالت پایه گیردار سازه دارای بهترین کنترل در پاسخ سازه می‌باشند و کارایی کنترل آنها در شرایط اثرات برهم‌کنش خاک و سازه کاهش می‌یابد. [۱۹] درجه کاهش کارایی این میراگرها با نرم شدن خاک بیش‌تر می‌شود.

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، هنگامی که $c_0 = 1.5 \times 10^4 \text{ kN/M}$ است، تقریباً ۵۰ درصد کاهش پاسخ میانگین R_{mean} حاصل می شود. این مقدار برای شرایط خاک نرم با در نظرگیری اثرات برهم کنش خاک و سازه حدود ۸۵ درصد است.

نسبت مدفون فنداسیون یک عامل مهم است که تحت شرایط در نظرگیری اثرات برهم کنش خاک و سازه تاثیر چشم گیری دارد [۲۰]، و بنابراین عملکرد میراگرهای ویسکوالاستیک را تحت تاثیر می گذارد. اشکال ۴ و ۵ نسبت کاهش میانگین R_{mean} را برای سه نسبت مدفون فنداسیون (یک سوم، دو سوم، کامل) با انواع خاک مختلف به تصویر کشیده است.



شکل ۴- نسبت کاهش میانگین برای سازه های با نسبت مدفون فنداسیون مختلف برای سازه مدل ۱ (۱۰ طبقه)



شکل ۵- نسبت کاهش میانگین برای سازه های با نسبت مدفون فنداسیون مختلف برای سازه مدل ۲ (۲۰ طبقه)

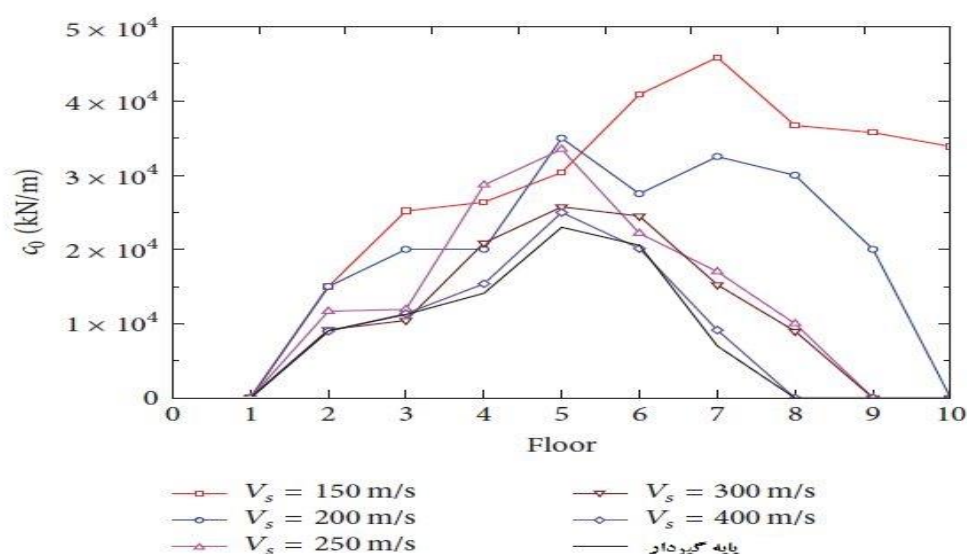
برای هر دو مدل سازه ای ۱۰ و ۲۰ طبقه، $R_{mean} = 0.7$ به عنوان یک کاهش هدف اولیه انتخاب شد. مقدار کلی مواد ویسکوالاستیک C_T برای توزیع مجدد جهت طراحی بهینه را می توان از شکل های ۲ و ۳ به دست آورد که نسبت مدفون پی آن برابر ۱ است. جدول ۱ مقدار کلی مواد ویسکوالاستیک را برای طراحی بهینه ارائه می دهد.

جدول ۱- مقدار کل مواد ویسکوالاستیک C_T برای طراحی بهینه

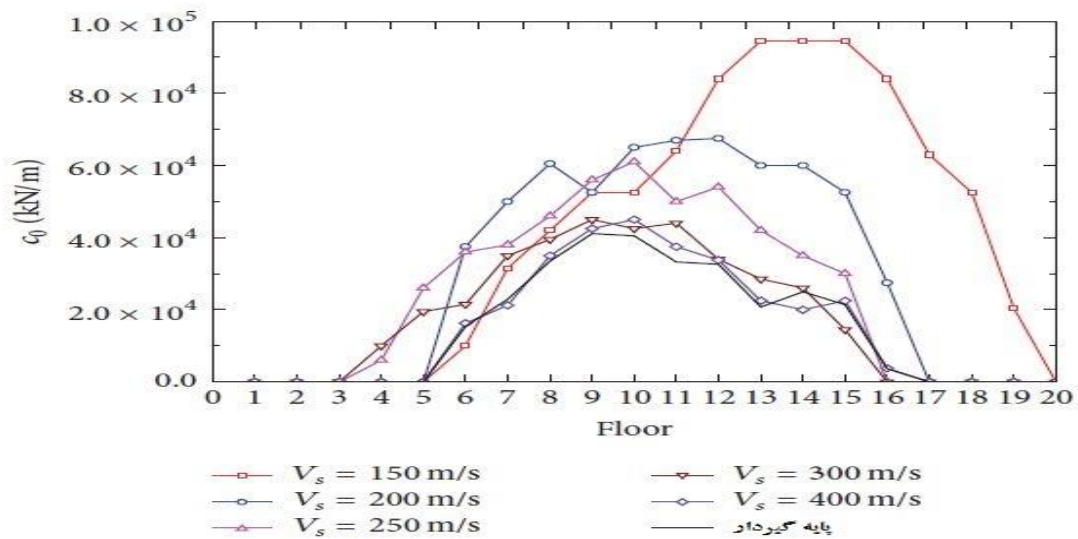
پایه گیردار	$V_s = 400$	$V_s = 300$	$V_s = 250$	$V_s = 200$	$V_s = 150$	نوع خاک
	$0.7E + 5$	$0.8E + 5$	$1.0E + 5$	$1.2E + 5$	$1.8E + 5$	C_T در مدل ۱ (۱۰ طبقه)
	$2.9E + 5$	$3.0E + 5$	$3.6E + 5$	$4.7E + 5$	$6.0E + 5$	C_T در مدل ۲ (۲۰ طبقه)

شکل های ۶ و ۷ نتایج به کار گیری الگوریتم ژنتیک جهت طراحی بهینه مقدار کلی مواد ویسکوالاستیک برای انواع مختلف خاک را نشان می دهد. به وضوح از این نتایج مشخص است که اثرات برهم کنش خاک و سازه تاثیر زیادی بر جای گذاری بهینه میراگرهای ویسکوالاستیک دارد. انواع مختلف خاک باعث تغییر در موقعیت های بهینه میراگرها می شود. برای سازه ۱۰ طبقه، جای گذاری بهینه میراگرهای ویسکوالاستیک در شرایط ساختگاهی خاک سخت ($V_s = 400 \text{ m/s}$) در طبقات ۴ تا ۶ متمرکز می شود؛ با کاهش سرعت موج برشی خاک، جای گذاری بهینه میراگرهای ویسکوالاستیک به سمت طبقات بالاتر میل می کند [۲۱]. هنگامی که $V_s = 150 \text{ m/s}$ ، میراگرهای ویسکوالاستیک عمدتاً در طبقات ۶ تا ۱۰ متمرکز می شوند. این وضعیت جای گذاری برای بهینه سازی موقعیت میراگرهای ویسکوالاستیک سازه ۲۰ طبقه برای شرایط ساختگاهی متفاوت به همین گونه است. هنگامی که $V_s = 400 \text{ m/s}$ ، میراگرهای ویسکوالاستیک عمدتاً در بازه طبقات ۶ تا ۱۵ قرار می گیرند. با کاهش در سرعت موج برشی، موقعیت بهینه به طبقات بالاتر میل می کند. هنگامی که $V_s = 150 \text{ m/s}$ است، میراگرهای ویسکوالاستیک عمدتاً در طبقات ۸ تا ۱۸ توزیع می شوند.

مطالعات پیشین توسط محققان دیگر نیز نشان می دهد که، با کاهش سختی خاک، مشارکت مود درجه اول سیستم بیشتر می شود [۲۲] و در این مود شکل سیستم همانند مثلث برعکس است و پاسخ هر طبقه با افزایش ارتفاع سازه افزایش می یابد. متعاقباً طبق نتایج بهینه سازی، میراگرهای ویسکوالاستیک با کار گذاری در طبقات بالاتر کارایی بیشتری خواهند داشت.



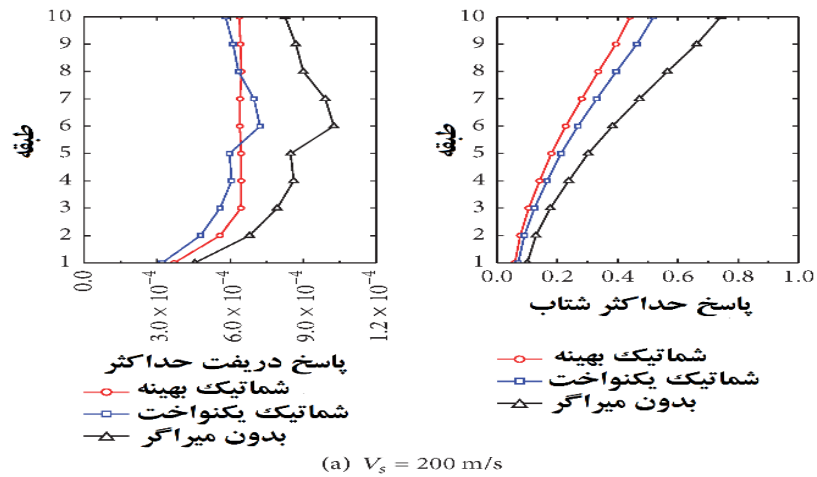
شکل ۶ مقایسه جای گذاری بهینه میراگرهای ویسکوالاستیک در انواع مختلف خاک (سازه ۱۰ طبقه)



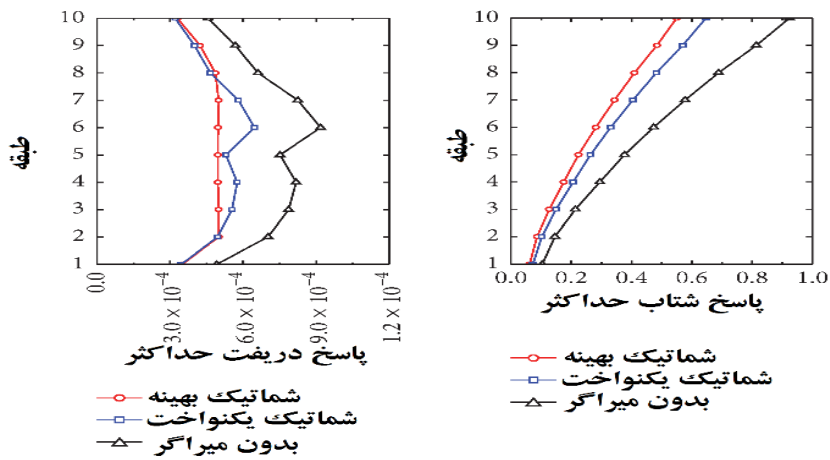
شکل ۷- مقایسه جایگذاری بهینه میراگرهای ویسکوالاستیک در انواع خاک مختلف (سازه ۲۰ طبقه)

پاسخ‌های حداکثر برای دررفت‌ها و شتاب برای جای‌گذاری یکنواخت و بهینه میراگرهای ویسکوالاستیک در اشکال ۸ و ۹ آورده شده‌اند. همانطور که در اشکال ۸ و ۹ مشخص است، جایگذاری بهینه میراگرهای ویسکوالاستیک پاسخ‌های کمتری برای دررفت‌ها و شتاب‌ها در مقایسه با جایگذاری یکنواخت میراگرهای ویسکوالاستیک برای تمامی موارد ایجاد خواهد کرد و اثرات بهینه‌سازی برای تمامی انواع خاک متفاوت است.

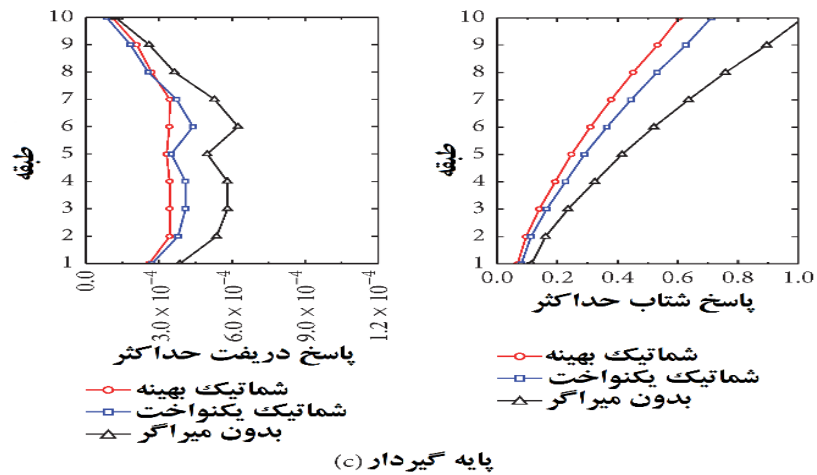
برای سازه‌های ۱۰ طبقه، پس از بهینه‌سازی در شرایط ساختگاهی $V_s = 150$ m/s حداکثر دررفت طبقه ۱۰.۵٪ و شتاب حداکثر ۱۲.۱٪ کاهش می‌یابد. با افزایش سختی خاک و در شرایط پایه‌گیردار دررفت حداکثر و شتاب به ترتیب ۲۱.۶٪ و ۱۸.۲٪ کاهش می‌یابند. برای سازه‌های ۲۰ طبقه، اثرات کنترلی میراگرهای ویسکوالاستیک برای انواع خاک مختلف مشابه حالت سازه ۱۰ طبقه است. هنگامی که $V_s = 200$ m/s، دررفت حداکثر طبقه ۱۴.۳٪ و شتاب حداکثر ۱۶.۵٪ کاهش می‌یابد. برای شرایط پایه‌گیردار، کاهش درجه‌های دررفت و شتاب به ترتیب ۱۹.۲٪ و ۲۰.۵٪ درصد است.



(a) $V_s = 200$ m/s

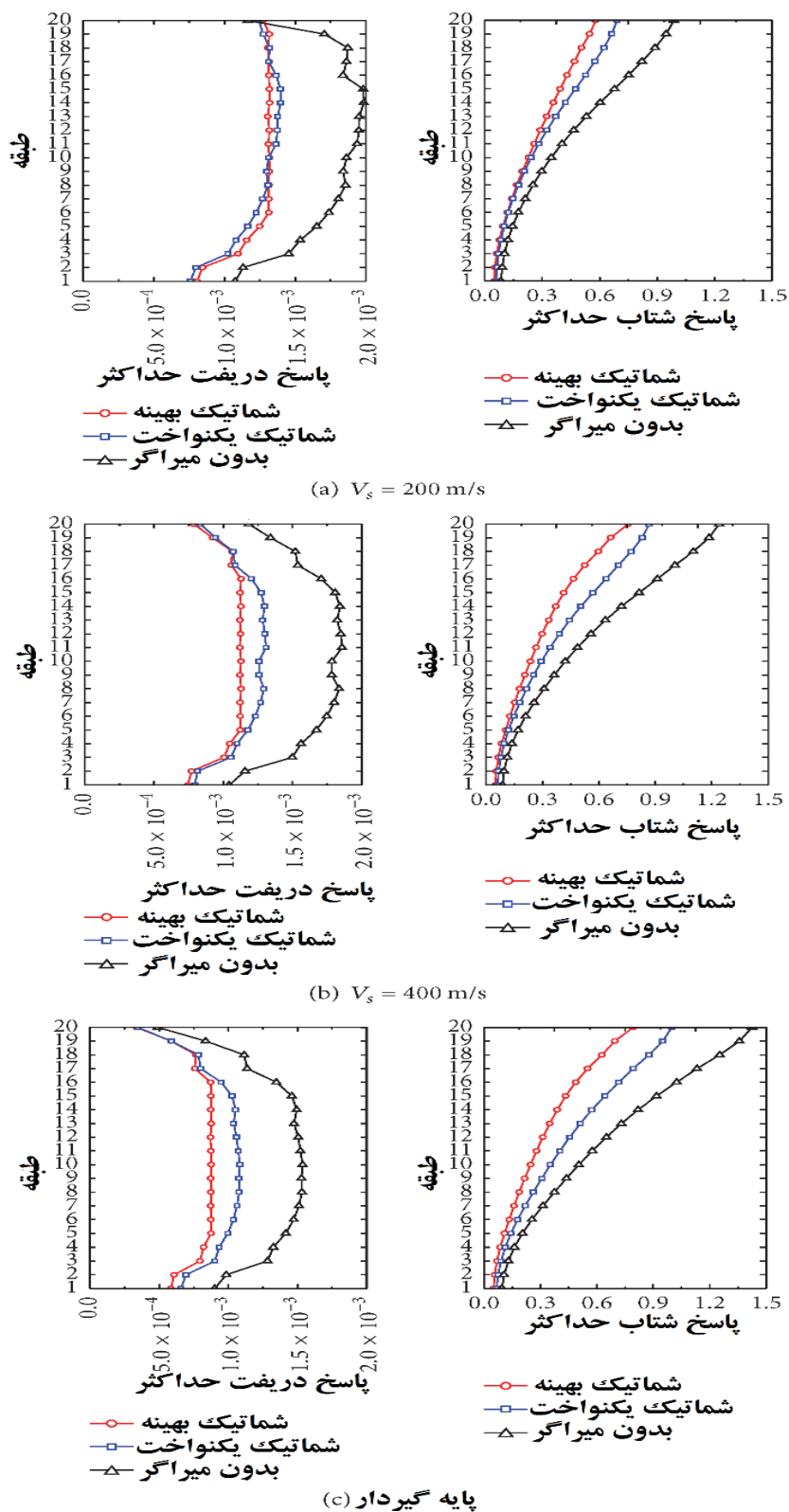


(b) $V_s = 400$ m/s



(c) پایه گیردار

شکل ۸- مقایسه پاسخ‌های سازه توزیع‌های مختلف میراگرهای ویسکوالاستیک (سازه ۱۰ طبقه)



شکل ۹- مقایسه پاسخ‌های سازه توزیع‌های مختلف میراگرهای ویسکوالاستیک (سازه ۲۰ طبقه)

نتایج

در این مقاله کنترل پاسخ لرزه‌ای قاب‌های ساختمانی چندطبقه الاستیک که میراگرهای الاستوپلاستیک در آن به صورت بهینه جایگذاری شده‌اند بررسی شد و علاوه بر این اثرات برهم‌کنش خاک و سازه در آن مورد بررسی قرار گرفت. پاسخ‌های سیستم با استفاده از تحلیل طیفی در قالب فرکانس غالب به دست آمدند. تحریکات زلزله با مقادیر میانگین صفر به صورت ثابت فرض شدند و حرکات ورودی فنداسیون به طور موثر تصادفی در نظر گرفته شدند و با تصحیح حرکات زمین در میدان آزاد بر اساس برهم‌کنش سینماتیک بین خاک و سازه به دست آمدند.

انواع مختلف نسبت نوع خاک و فنداسیون مدفون به عنوان پارامترهای اصلی موثر بر اثرات برهم‌کنش خاک و سازه در نظر گرفته شدند که بر اثرات برهم‌کنش خاک و سازه و کارایی میراگرهای ویسکوالاستیک تاثیر می‌گذارند. با استفاده از الگوریتم ژنتیک و تعیین مقدار کل مواد الاستوپلاستیک میراگرها، محل بهینه قرارگیری میراگرها مشخص گردید. دونوع قاب ساختمانی چندطبقه برای روند بهینه سازی در نظر گرفته شدند. طبق مطالعات عددی محدود، نتیجه گیری‌های زیر استنتاج گردیدند:

(۱) میراگرهای ویسکوالاستیک بهترین کنترل پاسخ سازه ای را در شرایط پایه گیردار دارند و تاثیرات آنها با نرم تر شدن خاک کم تر می شود.

(۲) نسبت مدفون فنداسیون تاثیر چشمگیری بر عملکرد میراگرهای ویسکوالاستیک دارد. برای شرایط خاک نسبتا نرم، با بیشتر شدن نسبت مدفون فنداسیون برهم‌کنش دینامیکی میان خاک و فنداسیون بهبود می یابد.

(۳) اثرات برهم‌کنش خاک و سازه تاثیر زیادی بر جایگذاری بهینه میراگرهای ویسکوالاستیک در قاب‌های ساختمانی دارد. برای شرایط خاک نسبتا سخت، موقعیت بهینه میراگرهای ویسکوالاستیک در طبقات میانی متمرکزتر است؛ با کاهش سختی خاک، موقعیت بهینه به سمت طبقات بالاتر میل می کند.

شماتیک جایگذاری بهینه میراگرهای ویسکوالاستیک پاسخ‌های کمتری از سیستم را در مقایسه با شماتیک جایگذاری یکتواخت دارد. با افزایش سختی خاک، تاثیرات بهینه سازی افزایش می یابد.

منابع و مراجع

- [1] Chan RW, Albermani F, Williams MS. Evaluation of yielding shear panel device for passive energy dissipation. *Journal of Constructional Steel Research*. 2009 Feb 1;65(2):260-8.
- [2] Di Sarno L, Elnashai AS. Innovative strategies for seismic retrofitting of steel and composite structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*. 2005 Jul;7(3):115-35.
- [3] Shen KL, Soong TT. Modeling of viscoelastic dampers for structural applications. *Journal of Engineering Mechanics*. 1995 Jun;121(6):694-701.
- [4] Chang KC, Soong TT, Oh ST, Lai ML. Seismic behavior of steel frame with added viscoelastic dampers. *Journal of structural engineering*. 1995 Oct;121(10):1418-26.
- [5] Wang SJ, Chiu IC, Yu CH, Chang KC. Experimental and analytical study on design performance of full-scale viscoelastic dampers. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2018 Oct;17(4):693-706.
- [6] Chang TS, Singh MP. Mechanical model parameters for viscoelastic dampers. *Journal of Engineering Mechanics*. 2009 Jun;135(6):581-4.
- [7] Lewandowski R, Chorążyczewski B. Identification of the parameters of the Kelvin–Voigt and the Maxwell fractional models, used to modeling of viscoelastic dampers. *Computers & structures*. 2010 Jan 1;88(1-2):1-7.
- [8] Spyrakos CC, Koutromanos IA, Maniatakis CA. Seismic response of base-isolated buildings including soil–structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2009 Apr 1;29(4):658-68.
- [9] Farshidianfar A, Soheili S. Ant colony optimization of tuned mass dampers for earthquake oscillations of high-rise structures including soil–structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2013 Aug 1;51:14-22.
- [۱۰] اسدی پور ا، لحاظ نمودن اثر اندرکنش خاک-سازه در تحلیل دینامیکی طیفی ساختمان‌ها. دانشگاه تربیت مدرس، کارشناسی ارشد، ۱۳۸۴
- [11] Hwang JS, Huang YN, Yi SL, Ho SY. Design formulations for supplemental viscous dampers to building structures. *Journal of structural engineering*. 2008 Jan;134(1):22-31.
- [12] Singh MP, Moreschi LM. Optimal placement of dampers for passive response control. *Earthquake engineering & structural dynamics*. 2002 Apr;31(4):955-76.
- [13] Holland JH. *Adaptation in natural and artificial systems*, University of Michigan press. Ann arbor, MI. 1975;1(97):5.
- [14] Ok SY, Song J, Park KS. Optimal design of hysteretic dampers connecting adjacent structures using multi-objective genetic algorithm and stochastic linearization method. *Engineering structures*. 2008 May 1;30(5):1240-9.
- [15] Arfiadi Y, Hadi MN. Optimum placement and properties of tuned mass dampers using hybrid genetic algorithms. *Iran University of Science & Technology*. 2011 Mar 10;1(1):167-87.
- [16] Pourzeynali S, Lavasani HH, Modarayi AH. Active control of high rise building structures using fuzzy logic and genetic algorithms. *Engineering Structures*. 2007 Mar 1;29(3):346-57.
- [17] Kausel E, Roesset JM. Soil structure interaction problems for nuclear containment structures. In *Electric power and the civil engineer* 1974.

- [18] Cu VH, Han B, Pham DH, Yan WT. Free vibration and damping of a taut cable with an attached viscous mass damper. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2018 May;22(5):1792-802.
- [19] Medina C, Aznárez JJ, Padrón LA, Maeso O. Effects of soil–structure interaction on the dynamic properties and seismic response of piled structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2013 Oct 1;53:160-75.
- [20] Beheshti M, Asadi P. Optimal seismic retrofit of fractional viscoelastic dampers for minimum life-cycle cost of retrofitted steel frames. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2020 May;61(5):2021-35.
- [21] Alam Z, Zhang C, Samali B. The role of viscoelastic damping on retrofitting seismic performance of asymmetric reinforced concrete structures. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2020 Jan;19(1):223-37.
- [22] Beheshti M, Asadi P. Lifetime performance assessment of ductile steel frame using fractional model of viscoelastic dampers considering uncertainty parameters. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2020 Jul 29:1-23.