



بهینه‌سازی چندهدفه کنترل نیمه‌فعال سازه‌ها با استفاده از میراگرهای ویسکوز به کمک الگوریتم رقابت استعماری

مهدی بابایی^{۱*}، مصطفی مرادی^۲

۱- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان

۲- کارشناس ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان

* زنجان، صندوق پستی ۳۸۷۹۱-۴۵۳۷۱، mbabaei@znu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۸/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۰۷)

چکیده

سیستم‌های کنترل نیمه فعال و میراگرهای ویسکوز مایع نیمه فعال به عنوان زیر مجموعه‌ای از سیستم‌های کنترلی، قابلیت خود را در کاهش پاسخ‌های لرزه ای سازه ها نشان داده اند. از مزایای مهم این میراگرها، قدرت تطبیق با رفتار سازه به منظور غلبه بر نیروهای زلزله است. در این تحقیق، بهینه سازی چندهدفه عملکرد میراگرهای ویسکوز مایع نیمه فعال در کاهش پاسخ‌های لرزه ای سازه ها تحت اثر نیروهای زلزله، با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری مورد مطالعه قرار گرفته است. تعداد و موقعیت بهینه میراگرها به عنوان متغیرهای تصمیم گیری و پاسخ‌های سازه ای نظیر حداکثر شتاب طبقات، حداکثر جابجایی طبقه آخر و حداکثر جابجایی نسبی طبقات به عنوان شاخص‌های مورد نظر در نظر گرفته شده اند که باید حداقل گردند. نتایج اصل از این تحقیق نشان داده است که علاوه بر نقش میراگرها در کاهش پاسخ‌های سازه ای، نحوه چیدمان آنها نیز در عملکرد سازه بسیار مؤثر است.

واژگان کلیدی

کنترل نیمه‌فعال، میراگرهای ویسکوز، بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم رقابت استعماری

Multi-Objective Optimization of Semi-Active Fluid Viscous Dampers using Imperialistic Competitive Algorithm

M. Babaei, M. Moradi

Abstract

Semi-active control systems and semi-active fluid viscous dampers as a subset of these systems, have shown their ability to reduce seismic responses of building, one of the most important advantages of these dampers is ability of adjusting with structures behavior to overcome the earthquake forces. In this thesis, multi-objective optimization of operation of semi-active fluid viscous dampers in reduction of seismic responses of buildings subjected to horizontal components of earthquake accelerations is studied. The optimum number and position of dampers are considered as decision variables and structural responses such as maximum story acceleration, maximum last story displacement and maximum story drift are considered as objective functions, should be minimized. The optimal solutions show that although viscous dampers reduce the structural responses, however, a certain configuration of dampers in specific locations of the structure could be efficient for reduction of the structural responses.

Keywords

Semi-active control, Fluid viscous damper, Multi-objective optimization, Imperialistic competitive algorithm



هنگام وقوع زلزله انرژی بسیار زیادی به سازه وارد می‌شود و طراحی سازه به گونه‌ای که چنین انرژی عظیمی را در محدوده تغییرشکل‌های الاستیک به خود جذب و تلف نماید معقول نیست. زیرا علاوه بر غیر اقتصادی بودن، اغلب با شرایط معماری طرح نیز ناسازگار شده و سازه در عمل غیرقابل اجرا خواهد شد. لذا همواره تلاش مهندسان سازه و زلزله بر آن بوده که ساختمان‌هایی با توان اتلاف انرژی غیرالاستیک در برابر زلزله طراحی کنند؛ به طوری که هنگام اعمال نیروهای دینامیکی قوی نظیر زلزله، سازه از محدوده‌ی الاستیک خارج شده و به واسطه تشکیل مفاصل پلاستیک و وقوع تغییرمکان‌های چرخه‌ای غیرالاستیک در اعضا، انرژی وارده جذب و تلف شود.

در چند دهه اخیر تلاش‌های متنوعی در به کارگیری روش‌ها و تکنولوژی‌های نوین در زمینه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله انجام شده است. یکی از مهمترین این روش‌ها استفاده از سیستم‌های کنترلی در کاهش ارتعاشات لرزه‌ای سازه‌ها است. هدف اصلی سیستم‌های کنترلی، کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه به وسیله جذب انرژی منتقل شده به سازه و یا تغییر در فرکانس آن می‌باشد.

در این مقاله به منظور کاهش ارتعاشات لرزه‌ای ساختمان‌ها از میراگرهای ویسکوز مایع نیمه‌فعال استفاده شده و برای بهینه‌یابی تعداد و محل قرارگیری این میراگرها با هدف کاهش همزمان پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌ها نظیر تغییرمکان طبقه آخر، حداکثر شتاب طبقات و حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات از الگوریتم رقابت استعماری استفاده شده است.

از مزایای این میراگرها قدرت تطبیق با رفتار سازه به منظور غلبه بر نیروی زلزله است. تعداد و موقعیت بهینه میراگرها به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری و پاسخ‌های سازه نظیر تغییرمکان طبقه آخر، حداکثر شتاب طبقات و حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده‌اند که باید حداقل گردند. توابع فوق بصورت گروه اهداف سه‌تایی در بهینه‌سازی چندهدفه شرکت داده می‌شوند و هدف، یافتن چیدمان خاصی از تعدادی میراگر در موقعیت‌های معینی از سازه می‌باشد که بیشترین کاهش در پاسخ‌های سازه را داشته باشد.

مطالعه عددی روی دو سازه هفت و دوازده طبقه انجام می‌پذیرد که به صورت سه بعدی مدل شده‌اند. در نهایت نتایج حاصل بیانگر این امر است که علاوه بر نقش میراگرها در جذب انرژی و کاهش انرژی وارده به سازه، نحوه چیدمان آنها

در طبقات مختلف نیز، در میزان انرژی باقیمانده در سازه مؤثر است و می‌توان با تعداد کمتری میراگر پاسخ‌های مناسب‌تری گرفت که علاوه بر کاهش هزینه اولیه و بهبود عملکرد، در هزینه‌های نگهداری و تعمیرات سیستم نیز کاهش قابل ملاحظه‌ای خواهیم داشت.

۲- میراگر ویسکوز

میراگر ویسکوز مایع یکی از سیستم‌های جاذب انرژی می‌باشد که در مقایسه با اندازه فیزیکی خود از توانایی جذب انرژی بالایی برخوردار می‌باشد. بنابراین، این نوع میراگرها می‌توانند برای استهلاک انرژی ناشی از زلزله در سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرند. این میراگرها از یک سیلندر هیدرولیکی و یک میله پیستون از جنس فولاد ضد زنگ با کلاهک برنزی تشکیل شده‌اند. در کلاهک پیستون روزنه‌ای تعبیه شده است که وقتی میله پیستون حرکت داده می‌شود مایع با فشار از درون روزنه عبور داده می‌شود و منجر به اتلاف انرژی به صورت گرما می‌گردد.

در تلاش برای بهبود عملکرد میراگرهای ویسکوز، مدل‌های قابل کنترلی از این میراگرها به نام میراگر ویسکوز نیمه‌فعال ارائه شده است. این میراگرها بسیار شبیه به نوع غیرفعال آن می‌باشند با این تفاوت که میراگرهای ویسکوز نیمه‌فعال مجهز به یک حلقه عبوری خارجی می‌باشند که مایع داخل سیلندر هیدرولیکی را در طرفین کلاهک پیستون به یکدیگر مرتبط می‌سازد. این حلقه عبوری شامل یک دریچه قابل تنظیم می‌باشد که عبور جریان در داخل میراگر را کنترل می‌کند. بدین ترتیب، این میراگرها فشار داخل مایع را در هنگام حرکت پیستون افزایش داده و در نتیجه قادر به تولید نیروهای میرایی بسیار بزرگی می‌باشند.

از این رو می‌توانند میزان قابل توجهی از انرژی زلزله را مستهلک نمایند. یکی از ویژگی‌های این نوع میراگرها پویایی و قدرت تطبیق با رفتار سازه به منظور مقاومت در برابر نیروهای زلزله می‌باشد. بدین ترتیب که در لحظه وقوع زلزله نیروهای زلزله را تشخیص داده و مطابق با آن نیروهای لازم را اعمال می‌کنند. همچنین، در این میراگرها انرژی خارجی فقط برای تنظیم دریچه به کار می‌رود. بنابراین، این میراگرها به منبع بزرگ انرژی خارجی نیاز ندارند و از این جهت بسیار قابل اعتماد می‌باشند [۱]. ساده‌ترین مدل برای بیان رفتار این نوع میراگر، مدل ماکسول با یک ضریب میرایی وابسته به زمان می‌باشد [۲]:



درجات آزادی در راستای زلزله، ۱ و سایر مولفه‌ها صفر می‌باشند. همچنین $\ddot{x}_g(t)$ شتاب افقی زلزله است که از طریق شتابنگاشت‌ها حاصل می‌شود. f_i در رابطه بالا نیروی میراگر می‌باشد که برای یک میراگر که با زاویه α نسبت به افق قرار گرفته باشد برابر است با:

$$f_i = C_{aj}(t) \cos^2(\alpha) [-(\dot{u}_x)_{i-1} + (\dot{u}_x)_i - (e_{yz})_{i-1} (\dot{u}_\theta)_{i-1} + (e_{yz})_i (\dot{u}_\theta)_i] \quad (3)$$

با اندکی جابه‌جایی جملات رابطه بالا و نمایش ضریب f_i پس از انتقال به سمت راست معادله با $\{D\}$ داریم:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + kx = D\{f\} - M\{r\}\ddot{x}_g(t) \quad (4)$$

در این رابطه ماتریس D با توجه به موقعیت و تعداد میراگرها بدست می‌آید. بردار $\{f\}$ شامل نیروی میراگرها می‌باشد که با توجه به اینکه ضریب هر میراگر، $C_{aj}(t)$ ، نامعلوم و تابعی از زمان می‌باشد، بنابراین، درایه‌های این بردار نیز نامعلوم و تابعی از زمان خواهد بود:

$$f = \begin{Bmatrix} f_{x,1} \\ f_{x,2} \\ M \\ f_{x,m} \\ f_{y,1} \\ M \\ f_{y,k} \end{Bmatrix}_{(m+k) \times 1} \quad (5)$$

۴- بهینه‌سازی نیروهای کنترل نیمه‌فعال سازه با استفاده

از الگوریتم LQR

الگوریتم‌های کنترلی یکی از بخش‌های حائز اهمیت در سیستم‌های کنترل سازه‌ها هستند. در واقع، کنترل‌کننده هوشمند برای محاسبه نیروهای کنترلی مورد نیاز بر اساس اطلاعاتی که از حسگرها مخابره می‌شود، از الگوریتم‌های کنترلی استفاده می‌کند. در این مقاله از الگوریتم کنترل بهینه LQR برای محاسبه نیروهای کنترلی میراگر ویسکوز مایع نیمه‌فعال استفاده شده است. این الگوریتم بر روی متغیرهای فضای حالت که از معادلات دینامیک سازه به دست می‌آیند، عمل می‌کند.

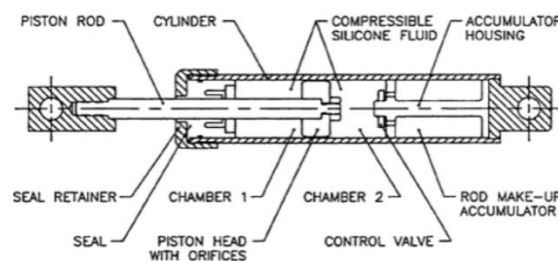
در روش LQR، نیروی کنترل بهینه طوری محاسبه می‌شود که شاخص کارایی J حداقل گردد. برای محاسبه مقادیر نیروهای کنترل نیمه‌فعال توسط این الگوریتم، ابتدا معادله (۴) در فضای حالت نوشته می‌شود [۵]:

$$\dot{u} = Au + Hf + Bw \quad (6)$$

در رابطه بالا $\{f\}$ بردار نیروی کنترلی و سایر متغیرها نیز

$$p(t) = C_0(t)\dot{u}(t) \quad (1)$$

در این رابطه $p(t)$ نیروی خروجی میراگر، $C_0(t)$ ضریب میرایی وابسته به زمان که با توجه به باز و بسته بودن دریچه کنترلی، بین دو مقدار حداکثر و حداقل قرار دارد و $\dot{u}(t)$ میزان سرعت حرکت کلاهک پیستون می‌باشد. شکل (۱) میراگر ویسکوز مایع تیلور را نشان می‌دهد. یکی از مزایای مهم این میراگرها عدم نیاز آنها به منابع انرژی بزرگ قابلیت اعتماد بالای آنها می‌باشد. سبکی و اندازه کوچک این میراگرها نیز امکان استفاده از آنها را به تعداد زیاد در سازه‌ها به منظور کاهش پاسخ‌های لرزه ای سازه، فراهم نموده است.



شکل ۱- میراگر سیال ویسکوز تیلور [۳]

۳- معادله حرکت سازه با میراگر ویسکوز نیمه‌فعال

برای نوشتن معادله حرکت سازه با حضور میراگر ویسکوز نیمه‌فعال، مدل میراگر به صورت یک فنر و یک میراگر که به صورت موازی با یکدیگر قرار گرفته‌اند، در نظر گرفته می‌شود. با فرض صلب بودن طبقات، معادله حرکت سازه با وجود یک میراگر j که در صفحه $x-z$ در فاصله $(e_{yz})_i$ از مرکز جرم طبقه i و بین طبقات $i-1$ و i قرار گرفته به صورت زیر می‌باشد [۴]:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + kx + \begin{Bmatrix} 0 \\ M \\ -1 \\ +1 \\ 0 \\ M \\ 0 \\ -(e_{yz})_{i-1} \\ (e_{yz})_i \\ 0 \\ M \\ 0 \end{Bmatrix}_{n \times 1} f_i = -M\{r\}\ddot{x}_g(t) \quad (2)$$

در رابطه (۲) ماتریس‌های M ، K و C به ترتیب ماتریس جرم، سختی و میرایی سازه و $\ddot{x}$ به ترتیب تغییر مکان، سرعت و شتاب سازه می‌باشند. در ماتریس $\{r\}$ مولفه‌های مربوط به



به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$H = \begin{bmatrix} 0 \\ -[M]^{-1}[D] \end{bmatrix}; \{z\} = \begin{Bmatrix} \{x\} \\ \{\dot{x}\} \end{Bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix}; w = -\{r\}\ddot{x}_g(t)$$

در روش LQR، نیروی کنترل بهینه $\{f\}$ طوری محاسبه می‌شود که شاخص کارایی J حداقل گردد:

$$J = \int_0^{\infty} [u^T Q u + f^T R f] dt \quad (8)$$

ماتریس‌های وزنی Q و R در رابطه بالا به صورت زیر تعریف می‌شوند [6]:

$$Q = \begin{bmatrix} Q_v & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; Q_v = \text{diag}(1); R = 10^{-q} \text{diag}(1) \quad (9)$$

در روابط بالا مقدار q مجهول است و با افزایش آن پاسخ‌های سازه کاهش و مقدار نیروی میراگرها افزایش می‌یابد. مناسب‌ترین راه تعیین آن انجام چند تحلیل با q های مختلف و مقایسه نتایج حاصل از تحلیل‌ها با یکدیگر می‌باشد تا مقدار q به گونه‌ای انتخاب شود که نیروی میراگرها از حداکثر مجاز (۱۰۰۰ کیلو نیوتن) تجاوز ننماید. با جایگذاری ماتریس‌های وزنی فوق در رابطه (۸) و حل آن معادله زیر که موسوم به معادله ریکاتی است، حاصل می‌شود:

$$PA + A^T P + Q - P H R^{-1} H^T P = 0 \quad (10)$$

از حل معادله ریکاتی بالا ماتریس P به دست آمده و بردار نیروهای کنترلی میراگرها به صورت زیر خواهد بود:

$$f = -R^{-1} H^T P u = -G u; G = [G_d \ G_v] \quad (11)$$

ماتریس G ، ماتریس فیدبک یا پس‌خور نامیده می‌شود و همانطور که مشخص است نیروهای کنترلی را بر اساس تغییرمکان و سرعت محاسبه می‌کند. با فرض اینکه اطلاعات دریافتی از حسگرهای سیستم کنترلی مورد بحث تنها شامل سرعت است، مقدار G_d در رابطه بالا برابر صفر بوده و ماتریس فیدبک به صورت زیر خواهد شد:

$$G = [0 \ G_v] \quad (12)$$

از جاگذاری معادله (۱۱) در رابطه (۶)، معادله دیفرانسیل زیر به دست می‌آید که با حل آن پاسخ‌های سازه حاصل می‌شوند:

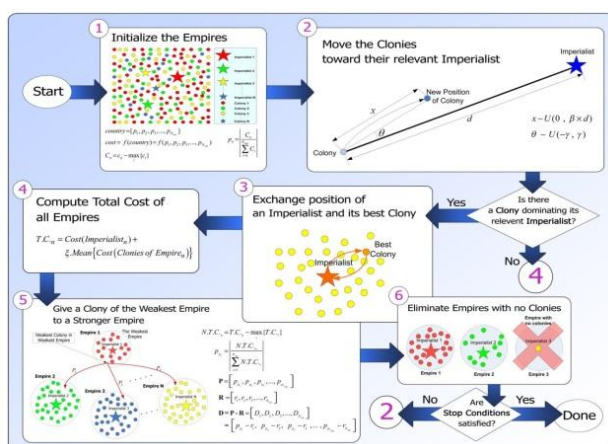
$$\ddot{u} = (A - H G) u + B w \quad (13)$$

۵- بهینه‌سازی تعداد و نوع آرایش میراگرهای ویسکوز با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری

با افزایش تعداد متغیرهای ورودی و خروجی و پیچیده‌تر شدن مسایل عملاً استفاده از روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی غیرمنطقی و زمان‌بر می‌باشد. الگوریتم‌های تصادفی و ابتکاری روشی مناسب، کارا و ساده برای بهینه‌سازی مسایل مختلف هستند که نیازی به مشتق‌گیری ندارند. یکی از جدیدترین قدرتمندترین روش‌های بهینه‌سازی الگوریتم رقابت استعماری می‌باشد که در سال ۱۳۸۷ توسط Atashpaz-Gargari مطرح شد [۷] و پس از آن توسط سایر محققین توسعه داده شد [۸].

این الگوریتم یک استراتژی جدید بهینه‌سازی بر مبنای فرآیند اجتماعی سیاسی پدیده استعمار است که از زمان معرفی آن، در حل مسایل مهندسی بسیار مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج حاکی از موفقیت آن دارد. همانند دیگر الگوریتم‌های تکاملی، این الگوریتم نیز با تعدادی جمعیت اولیه تصادفی که هر کدام از آن‌ها یک کشور نامیده می‌شوند، شروع می‌شود. تعدادی از بهترین عناصر جمعیت (معادل نخبه‌ها در الگوریتم ژنتیک) به عنوان کشور استعمارگر، انتخاب می‌شوند. باقیمانده جمعیت نیز به عنوان کشورهای مستعمره، در نظر گرفته می‌شوند.

استعمارگران بسته به قدرت‌شان، این مستعمرات را با سیاست‌های هم‌گون‌سازی، به سمت خود می‌کشند. قدرت کل هر امپراطوری، به هر دو بخش تشکیل دهنده آن یعنی کشور استعمارگر (به عنوان هسته مرکزی) و مستعمرات آن، بستگی دارد. شکل (۲) شمای کلی یک الگوریتم رقابت استعماری را نشان می‌دهد.



شکل ۲- فلوچارت الگوریتم رقابت استعماری [۷]

با شکل‌گیری امپراطوری‌های اولیه، رقابت امپریالیستی میان آن‌ها شروع می‌شود. هر امپراطوری که نتواند در رقابت

حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات و حداکثر شتاب، مربوط به سازه بدون کنترل می‌باشند.

۶- مطالعه عددی

میراگرهای ویسکوزماید با ظرفیت 200 kN.s/mm و حداکثر نیروی 1000 kN به عنوان نمونه انتخاب و برای کنترل نیمه فعال ارتعاش سازه به کار گرفته شده‌اند. دو سازه ۷ و ۱۲ طبقه برای نشان دادن تاثیر استفاده از میراگرهای ویسکوز در سازه مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

پاسخ سازه‌ها در برابر زلزله به مشخصات شتابنگاشت اعمالی نظیر محتوای فرکانسی، شتاب بیشینه و مدت زمان زلزله وابسته می‌باشد. از طرفی نوع خاکی که شتابنگاشت از روی آن ثبت شده و همچنین فاصله محل ثبت از گسل تولید زمین لرزه می‌تواند بر پاسخ سازه‌های مورد بررسی تاثیر بگذارد. بنابراین سعی شده است تا از مجموعه شتابنگاشت‌هایی از زمین لرزه‌های متنوع طبیعی رخ داده در ایران و جهان استفاده گردد. شتابنگاشت‌های انتخابی همگی دور از گسل و از روی خاک سخت (معادل خاک نوع ۱ بر اساس آیین نامه ۲۸۰۰) برداشت شده‌اند. مشخصات این شتابنگاشت‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات شتابنگاشت‌های مورد استفاده

زلزله	مقدار	PGA (g)	محل
چی-چی	۷/۶ (m)	۰/۴۱۰	تایوان
منجیل	۷/۴ (mw)	۰/۱۸۴	قزوین
امپریال ولی	۶/۵ (m)	۰/۳۴۸	السترو
کرن کانتی	۷/۴ (mw)	۰/۱۸۰	کالیفرنیا
پالم اسپرینگ شمالی	۶/۰ (m)	۰/۲۵۴	کالیفرنیا
نورت ریچ	۶/۷ (m)	۰/۲۵۶	لس آنجلس
پارکفیلد	۶/۰ (m)	۰/۳۵۷	پارکفیلد

لازم به ذکر است مدل‌سازی رفتار این میراگرها و سازه در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده در نرم افزار MATLAB صورت گرفته است. و در هر طبقه حداکثر امکان قرار گیری ۸ میراگر وجود دارد.

مثال اول سازه ۷ طبقه فولادی است که در منطقه با خطر نسبی خیلی زیاد و بر روی خاک نوع ۱ طراحی شده است. سیستم مقاوم آن در برابر نیروهای جانبی قاب مهاربندی شده هم محور فولادی می‌باشد، ارتفاع آن $22/4 \text{ m}$ و پلان آن دارای

استعماری، موفق عمل کرده و بر قدرت خود بیفزاید (و یا حداقل از کاهش نفوذش جلوگیری کند)، از صحنه رقابت استعماری، حذف خواهد شد. بنابراین بقای یک امپراطوری، وابسته به قدرت آن در جذب مستعمرات امپراطوری‌های رقیب، و به سطره در آوردن آنها خواهد بود. در نتیجه، در جریان رقابت‌های امپریالیستی، به تدریج بر قدرت امپراطوری‌های بزرگتر افزوده شده و امپراطوری‌های ضعیف‌تر، حذف خواهند شد. امپراطوری‌ها برای افزایش قدرت خود، مجبور خواهند شد تا مستعمرات خود را نیز پیشرفت دهند.

با گذشت زمان، مستعمرات، از لحاظ قدرت به امپراطوری‌ها نزدیک‌تر خواهند شد و شاهد یک نوع همگرایی خواهیم بود. حد نهایی رقابت استعماری، زمانی است که یک امپراطوری واحد در دنیا داشته باشیم، با مستمراتی که از لحاظ موقعیت، به خود کشور استعمارگر، خیلی نزدیک هستند.

برای طراحی بهینه میراگرهای ویسکوز مایع نیمه فعال لازم است تعداد و نوع آرایش میراگرها به طور بهینه انتخاب شوند [۹]. در حالیکه برای بهینه سازی سازه های فولادی یا بتن آرمه معمولاً تعیین سطح مقطع بهینه المانها مورد نظر می باشد [۱۰]. جهت افزایش کارایی سیستم کنترل نیمه فعال، بردار محل نصب میراگرها در طبقات سازه بر اساس حل یک مساله بهینه سازی تعیین می‌شود. برای انجام مساله بهینه سازی یک تابع هدف به صورت تابع هزینه شامل سه هدف در نظر گرفته شده است که باید مینیمم گردد. توابع هدف مورد نظر به ترتیب شامل نسبت حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات در حالت کنترل شده به کنترل نشده، نسبت تغییر مکان طبقه آخر در حالت کنترل شده به کنترل نشده و نسبت حداکثر شتاب طبقات در حالت کنترل شده به کنترل نشده، در نظر گرفته شده‌اند که باید به طور همزمان حداقل شوند.

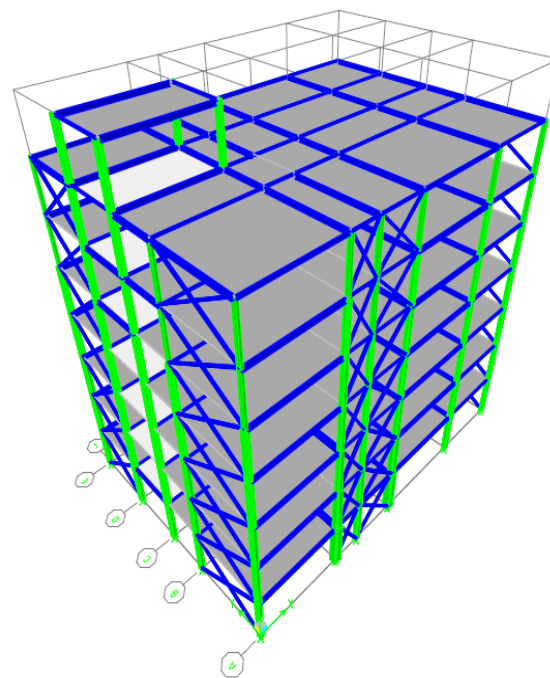
Find W

$$\text{Minimize } F(t) = \alpha \frac{\text{drift}_{\max}}{\text{drift}_{\max(\text{un})}} + \beta \frac{x_{\text{top}}}{x_{\text{top}(\text{un})}} + \gamma \frac{\ddot{x}_{\max}}{\ddot{x}_{\max(\text{un})}} \quad (14)$$

در روابط فوق W محل نصب میراگرها در طبقات سازه می‌باشد که به عنوان متغیر ورودی در نظر گرفته شده است. α ، β و γ مقادیر ثابتی هستند که در این پژوهش به ترتیب برابر $0/4$ ، $0/3$ و $0/3$ در نظر گرفته شده‌اند. x_{top} تغییر مکان طبقه آخر، $\text{drift}_{\max}$ حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات و $\ddot{x}_{\max}$ حداکثر شتاب سازه می‌باشند. همچنین $x_{\text{top}(\text{un})}$ ، $\text{drift}_{\max(\text{un})}$ و $\ddot{x}_{\max(\text{un})}$ به ترتیب تغییر مکان طبقه آخر،



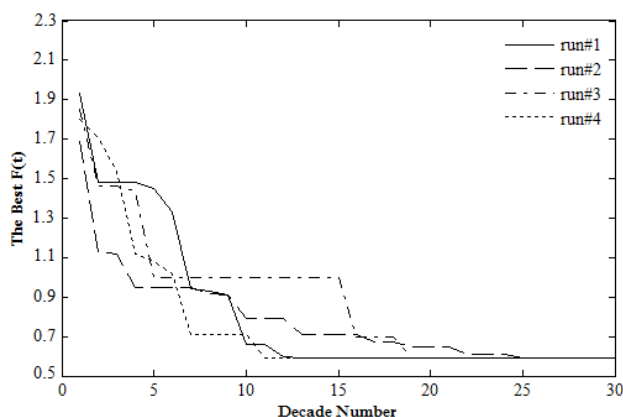
ابعاد $23/55 \times 16/5$ m می باشد. نمای سه بعدی و پلان این سازه در شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل ۳- نمای سه بعدی هفت طبقه

نسبت به حالت کنترل نشده به عنوان اهداف مساله بهینه سازی و معیار برتری دادن به یک کشور در نظر گرفته شده اند.

مساله بهینه سازی چند هدفی تحت این شتابنگاشت ها با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری تا تعداد ۳۰ دهه چندین بار برای سازه هفت طبقه حل و در هر بار اجرا برنامه مشاهده می شود که الگوریتم با سرعت همگرایی متفاوت به جواب یکسانی رسیده است. نحوه همگرایی الگوریتم رقابت استعماری تحت زلزله پارکفیلد برای چهار بار حل مساله بهینه سازی در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴- همگرایی الگوریتم رقابت استعماری در دهه های مختلف برای چهار بار حل مساله بهینه سازی تحت زلزله پارکفیلد

در نهایت پس از اجرای الگوریتم رقابت استعماری برای تمامی شتابنگاشت های انتخابی، نتایج مربوط به حالت بهینه تعداد و محل قرارگیری میراگرها در جدول (۲) نمایش داده شده است.

جدول ۲- حالت بهینه تعداد و محل قرارگیری میراگرها در سازه هفت طبقه

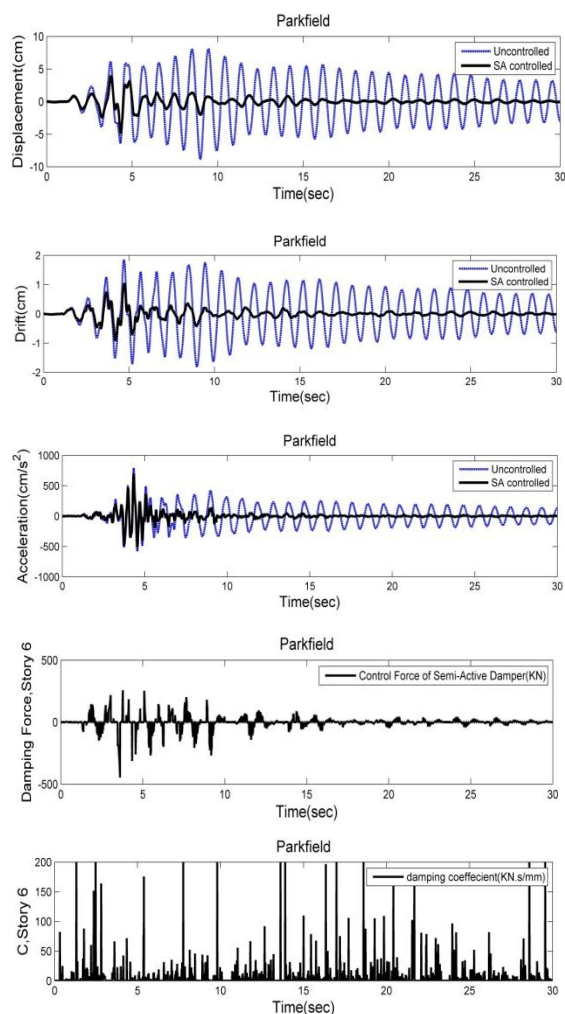
طبقه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
$W_{(چی-چی)}$	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱
$W_{(منجیل)}$	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱
$W_{(امپریال ولی)}$	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱
$W_{(کرن کانتی)}$	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱
$W_{(پالم اسپرینگ شمالی)}$	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰
$W_{(نورت ریج)}$	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱
$W_{(پارک فیلد)}$	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰

با توجه به چینش های بهینه به دست آمده برای هر شتابنگاشت مطابق جدول (۲)، مقادیر کاهش در پاسخ های

سازه مورد نظر به صورت سه بعدی در نرم افزار SAP مدل شده است و هر کف مانند یک دیافراگم صلب فرض شده که برای خمش خارج از صفحه دارای انعطاف پذیری است. با این فرض، درجات آزادی تمام گره های واقع در تراز کف به سه درجه آزادی حرکت کف صلب ربط داده می شود. بنابراین برای هر طبقه دو درجه آزادی انتقالی و یک درجه آزادی پیچشی در مرکز جرم طبقه تعریف شده است. بنابراین ماتریس های جرم و سختی سازه با ابعاد $3N \times 3N$ ، که در آن N شامل تعداد طبقات سازه می باشد، به دست می آیند.

برای بهینه سازی مساله مورد نظر، تعداد ۸۰ کشور به عنوان کشورهای اولیه انتخاب شدند که تعداد ۱۰ تا از آنها به عنوان استعمارگر و ۷۰ کشور به عنوان مستعمره، امپراطوری های اولیه را تشکیل می دهند. پس از تعریف کشورها باید معیاری جهت خوب یا بد بودن یک کشور تعیین شود تا به کمک آن، بهترین اعضا این جمعیت که همان کشورهای امپریالیست هستند، تعیین شوند و نهایتاً با شروع رقابت استعماری بین کشورهای ایجاد شده، به سمت کشورهای دارای کمترین مقدار تابع هزینه که همان بهترین چیدمان مورد نظر است، حرکت کنیم. در این مطالعه میزان کاهش به وجود آمده در مقادیر پاسخ های سازه ای



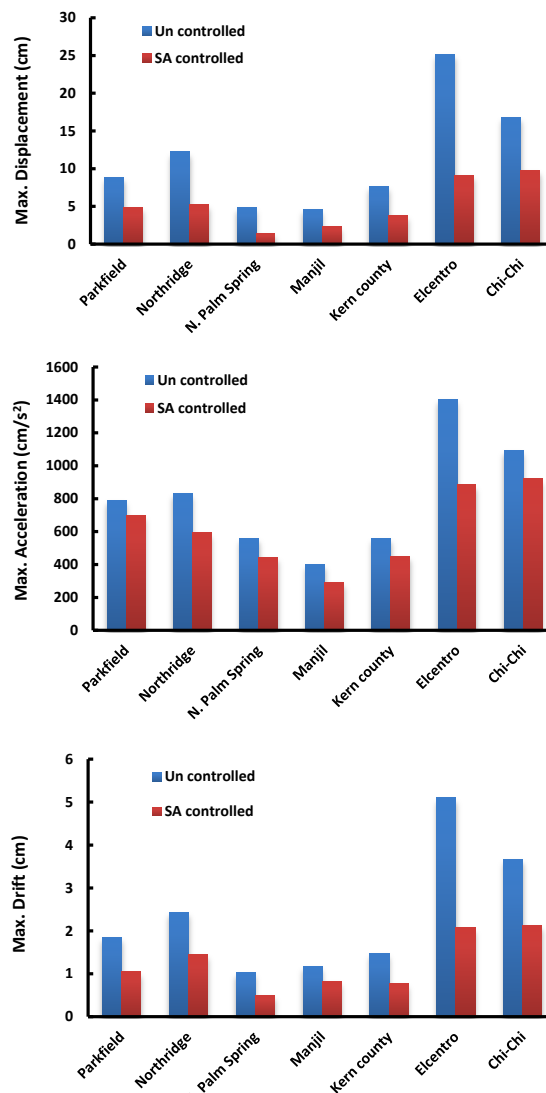


شکل ۶- نمودارهای تاریخچه زمانی پاسخهای سازه هفت طبقه برای زلزله پارکفیلد

با توجه به نمودارهای شکل (۵)، می‌توان مقادیر کاهش پاسخهای سازه کنترل شده با میراگر ویسکوز مایع نیمه‌فعال را نسبت به حالت کنترل نشده مشاهده کرد. همانطور که مشاهده می‌شود به طور مثال برای زلزله پارکفیلد، مقادیر تغییرمکان طبقه بام، حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات و حداکثر شتاب طبقات به ترتیب ۴۴.۹٪، ۴۳.۲٪ و ۱۱.۸٪ نسبت به حالت کنترل نشده کاهش پیدا کرده‌اند.

برای بررسی تاثیر اهداف مختلف مساله بر روی یکدیگر و پاسخهای سازه، از روش بهینه‌سازی مجموع میانگین وزنی استفاده شده است. با توجه به اینکه در روش بهینه‌سازی مجموع میانگین وزنی به زمان بسیار زیادی برای بهینه‌سازی احتیاج است، بدین منظور در این روش از ۴۲ عضو با چندین تکرار استفاده شده است.

لرزه‌ای سازه مطابق نمودارهای شکل (۵) حاصل شد.



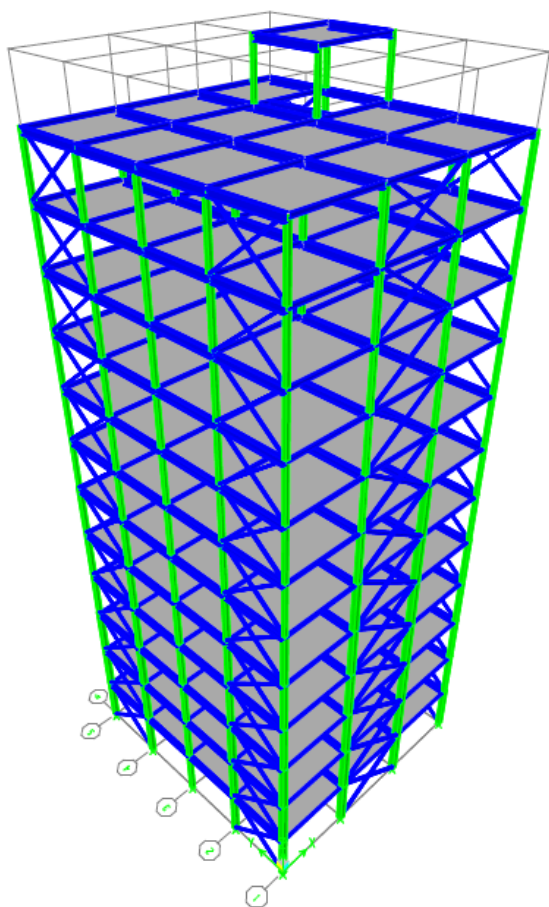
شکل ۵- نمودار مقادیر کاهش در پاسخهای سازه هفت طبقه

در شکل‌های زیر دیاگرام پاسخ تغییرمکان طبقه آخر، حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات و حداکثر شتاب طبقات در حالت کنترل شده و کنترل نشده برای سازه هفت طبقه، تحت اثر زلزله پارکفیلد نشان داده شده است. همچنین در سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال نیروی کنترلی هر میراگر به صورت تابعی از زمان از رابطه (۱۱) بدست می‌آید که به صورت یک بردار بوده و هر عضو این بردار نیروی یک میراگر می‌باشد. همچنین از روی نیروی هر میراگر ضریب میرایی آن از رابطه (۳) بدست می‌آید. به طور مثال این مقادیر برای میراگر واقع در طبقه ششم در شکل (۶) نمایش داده شده است.

نسبی خیلی زیاد و بر روی خاک نوع ۱ طراحی شده است. سیستم مقاوم آن در برابر نیروهای جانبی قاب خمشی به همراه مهاربندی هم محور فولادی می‌باشد، ارتفاع آن ۳۸/۴ m و پلان آن دارای ابعاد ۱۶×۱۵ m می‌باشد. نمای سه بعدی و پلان این سازه در شکل (۹) نمایش داده شده است.

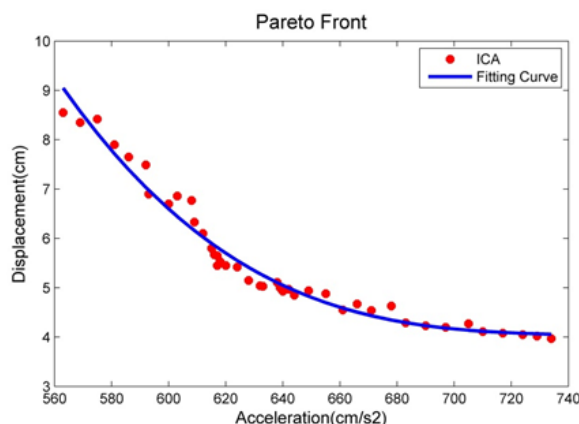
در هر طبقه حداکثر امکان قرار گیری ۸ میراگر وجود دارد. برای بهینه‌سازی مساله مورد نظر، تعداد ۱۰۰ کشور به عنوان کشورهای اولیه انتخاب شدند که تعداد ۱۰ تا از آنها به عنوان استعمارگر و ۹۰ کشور به عنوان مستعمره، امپراطوری‌های اولیه را تشکیل می‌دهند.

مساله بهینه‌سازی چند هدفی تحت این شتابانگشت‌ها با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری تا تعداد ۳۰ دهه چندین بار برای سازه دوازده طبقه حل و در هر بار اجرای برنامه مشاهده می‌شود که الگوریتم با سرعت همگرایی متفاوت به جواب یکسانی رسیده است. نحوه همگرایی الگوریتم رقابت استعماری تحت زلزله امپریال ولی برای چهار بار حل مساله بهینه‌سازی در شکل (۱۰) نشان داده شده است

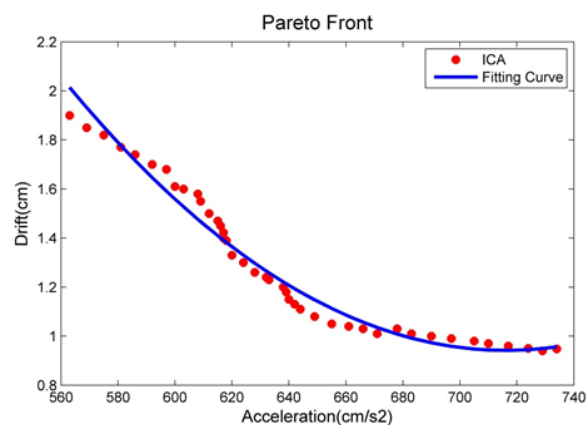


شکل ۹- نمای سه بعدی و پلان سازه دوازده طبقه

جبهه پارتوی بهینه برای حداکثر شتاب و جابجایی طبقه آخر در شکل (۷) نشان داده شده است و موازنه بین حداکثر شتاب و جابجایی نسبی طبقات نیز در شکل (۸) نشان داده شده است.



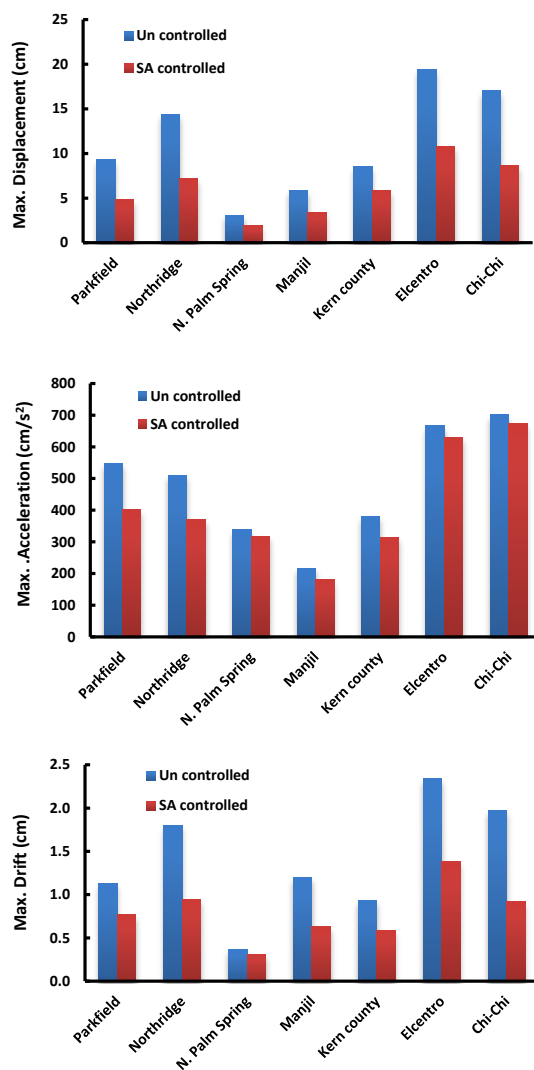
شکل ۷- جبهه بهینه پارتو برای حداکثر شتاب طبقات و حداکثر جابه‌جایی طبقه آخر



شکل ۸- جبهه بهینه پارتو برای حداکثر شتاب طبقات و حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات

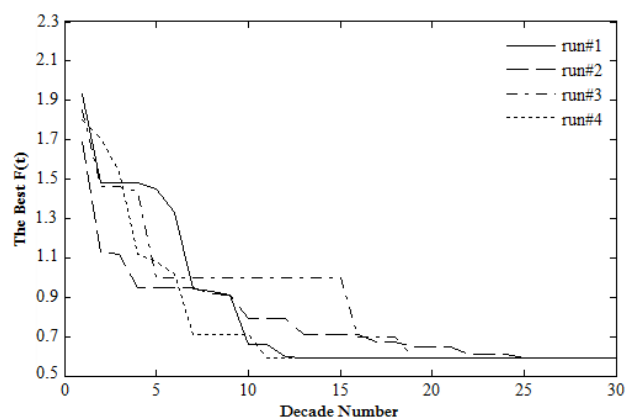
همانطور که مشاهده می‌شود در حالتی که ضریب وزنی مربوط به حداکثر شتاب طبقات را نزدیک به عدد یک در نظر می‌گیریم، با حل مساله بهینه‌سازی چینی از میراگرها بدست می‌آید که باعث کاهش زیادی در حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات و جابه‌جایی طبقه آخر نخواهد شد (حداکثر ۲۵ درصد). همچنین در حالتی که ضریب وزنی مربوط به حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات و جابه‌جایی طبقه آخر بهینه‌سازی چینی از میراگرها بدست می‌آید که باعث کاهش قابل توجهی در حداکثر شتاب طبقات نخواهد شد.

مثال دوم سازه ۱۲ طبقه فولادی است که در منطقه با خطر



شکل ۱۱- نمودار مقادیر کاهش در پاسخهای سازه دوازده طبقه

در شکل‌های زیر دیگرام پاسخ تغییرمکان طبقه آخر، حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات و حداکثر شتاب طبقات در حالت کنترل شده و کنترل نشده برای سازه دوازده طبقه، تحت اثر زلزله امپریال ولی نشان داده شده است. همچنین نمودارهای نیروی کنترلی، ضریب میرایی و نیروی کنترل نیمه‌فعال برای میراگر واقع در طبقه یازدهم در شکل (۱۲) نمایش داده شده است.



شکل ۱۰- همگرایی الگوریتم رقابت استعماری در دهه‌های مختلف برای چهار بار حل مساله بهینه سازی تحت زلزله امپریال ولی

در نهایت پس از اجرای الگوریتم رقابت استعماری برای تمامی شتابنگاشت‌های انتخابی، نتایج مربوط به حالت بهینه تعداد و محل قرارگیری میراگرها در جدول (۳) نمایش داده شده است:

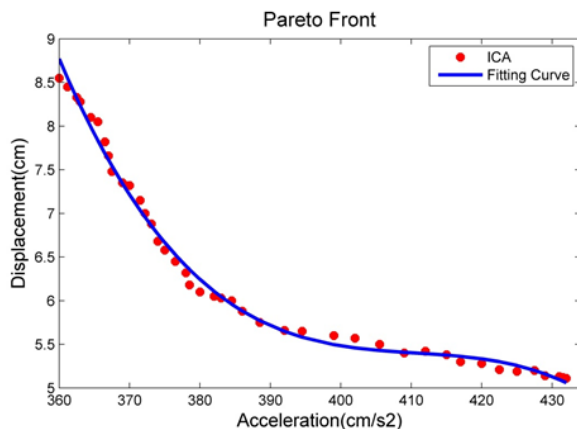
جدول ۳- حالت بهینه تعداد و محل قرارگیری میراگرها در سازه

دوازده طبقه

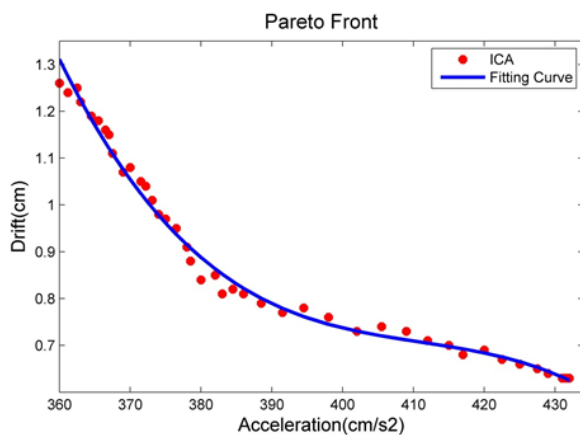
طبقه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
W (چی-چی)	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰
W (منجیل)	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰
W (امپریال ولی)	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱
W (کرن کانتی)	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱
W (پالم اسپرینگ)	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰
W (نورت ریج)	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰
W (پارک فیلد)	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰

با توجه به چینش‌های بهینه به دست آمده برای هر شتابنگاشت، مطابق جدول (۳)، مقادیر تغییرمکان طبقه آخر، حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات و حداکثر شتاب طبقات در دو حالت کنترل نشده و کنترل شده با میراگر ویسکوز مایع نیمه‌فعال مطابق نمودارهای شکل (۱۱) حاصل شد:

همانطور که مشاهده می‌شود در حالتی که ضریب وزنی مربوط به حداکثر شتاب طبقات را نزدیک به عدد یک در نظر می‌گیریم، با حل مساله بهینه‌سازی چینی از میراگرها بدست می‌آید که باعث کاهش زیادی در حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات و جابه‌جایی طبقه آخر نخواهد شد (حداکثر ۲۲ درصد). همچنین در حالتی که ضریب وزنی مربوط به حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات و جابه‌جایی طبقه آخر افزایش داده می‌شود، با حل مساله بهینه‌سازی چینی از میراگرها بدست می‌آید که باعث کاهش قابل توجهی در حداکثر شتاب طبقات نخواهد شد.



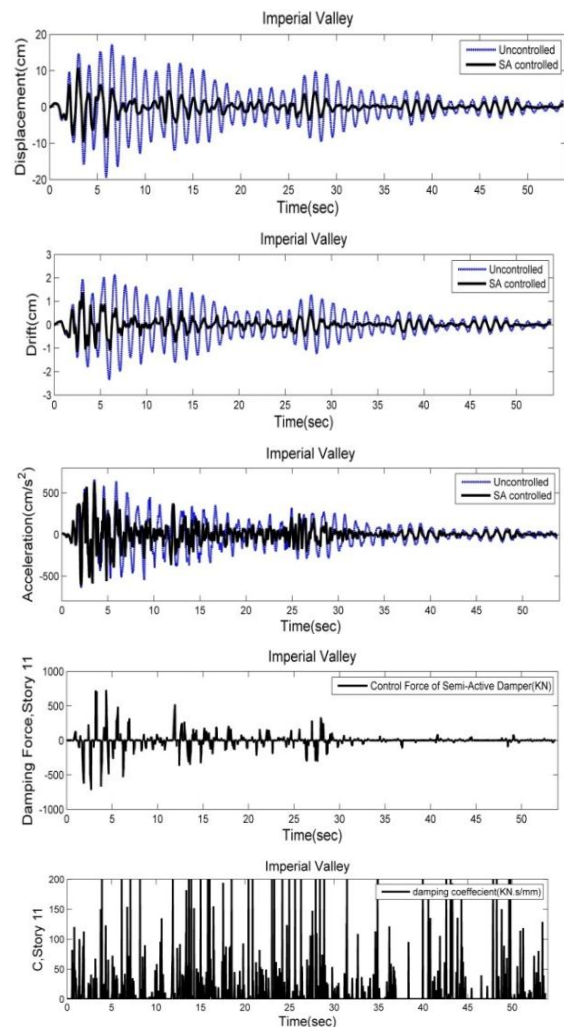
شکل ۱۳- جبهه پارتو برای حداکثر شتاب طبقات و جابه‌جایی طبقه آخر



شکل ۱۴- جبهه پارتو برای حداکثر شتاب و جابه‌جایی نسبی طبقات

۷- نتیجه گیری

به علت آن که با استفاده از بهینه‌سازی می‌توان با تعداد کمتر میراگر به سطح کنترلی مناسب‌تری رسید و وجود میراگر بیشتر الزاما باعث افزایش قابلیت جذب انرژی سازه نخواهد شد، بحث کنترل سازه‌ها همواره با بهینه‌سازی ارتباط تنگاتنگی دارد. تعداد



شکل ۱۲- نمودارهای تاریخیچه زمانی پاسخ‌های سازه دوازده طبقه برای زلزله امپریال ولی

با توجه به نمودارهای شکل (۱۱)، می‌توان مقادیر کاهش پاسخ‌های سازه کنترل شده با میراگر ویسکوز مایع نیمه‌فعال را نسبت به حالت کنترل نشده مشاهده کرد. همانطور که مشاهده می‌شود به طور مثال برای زلزله امپریال ولی، مقادیر تغییر مکان طبقه آخر، حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات و حداکثر شتاب طبقات به ترتیب به $4/44\%$ ، $9/40\%$ و $15/5\%$ نسبت به حالت کنترل نشده کاهش پیدا کرده‌اند. برای بررسی تاثیر اهداف مختلف مساله بر روی یکدیگر و پاسخ‌های سازه، از روش بهینه‌سازی مجموع میانگین وزنی استفاده شده است. بدین منظور در این روش از ۴۲ عضو با چندین تکرار استفاده شده است و در نهایت جبهه بهینه پارتو برای اهداف مورد نظر در شکل (۱۳) و (۱۴) ارائه شده است.



کمتر میراگر هزینه‌های بحث ایجاد سیستم کنترلی برای طرح سازه یا مقاوم‌سازی را به شدت کاهش می‌دهد.

در این مقاله از یکی از الگوریتم‌های قدرتمند بهینه‌سازی به نام الگوریتم رقابت استعماری استفاده شده است. تابع هدف نهایی شامل تغییر مکان طبقه آخر، تغییر مکان نسبی طبقات و شتاب طبقات می‌باشد که در همه موارد با حداقل تعداد میراگر ممکن بیشترین کاهش در پاسخ‌های سازه به دست آورده شده است.

نتایج حاصله نشان می‌دهد با توجه به درجه اهمیتی که برای هر یک از پاسخ‌های سازه در نظر گرفته‌ایم، بیشترین کاهش پاسخ‌های سازه در تغییر مکان طبقه آخر و تغییر مکان نسبی طبقات مشاهده می‌شود. در مورد شتاب، پاسخ‌ها هر چند کمتر ولی تا حد قابل قبولی کاهش یافته‌اند.

۸- مراجع

- [1] Symans, M.D. and Constantinou, M.C. (1999), "Semi-Active Control Systems for Seismic Protection of Structures: A State-of-the Review", *Engineering Structures*, Vol. 21, pp. 469-487.
- [2] Shames, I.H. and Cozzarelli, F.A. (1992), "Elastic and Inelastic Stress Analysis", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [3] Mathew, L. and Prabha, C. (2014), "Effect of Fluid Viscous Dampers in Multi-Storied Buildings", *International Journal of Research in Engineering & Technology*, Vol. 2, pp. 59-64.
- [4] Lee, D., Hong, S. and Kim, J. (2002). "Efficient Seismic Analysis of Building Structures with Added Viscoelastic Dampers", *Engineering Structures*, Vol. 24, pp. 1217-1227.
- [5] Liu, J., Xia, K. and Zhu, C. (2009), "Intelligent Control Method of Structural Vibration Based on MR Damper", *Future Information Technology and Management Engineering, FITME'09, Second International Conference on*, pp. 320-322.
- [6] Kurata, N., Kabori, T., Takahashi, M., Niwa, N. and Midorikawa, H. (1999), "Actual Seismic Response Controlled Building with Semi-active Damper System", *Earthquake Engineering and Structural dynamics*, Vol. 28, pp. 1427-1447.
- [7] آتش‌پز گرگری، ا. (۱۳۸۷)، "توسعه الگوریتم بهینه‌سازی اجتماعی و بررسی کارایی آن"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، تهران.
- [8] Kaveh, A. (2014), "Imperialistic Competitive Algorithm", *Advances in Metaheuristic Algorithms for Optimal Design of Structures*, Chapter 11, Springer International Publishing, pp. 349-368.
- [9] Cu, V.H., Han, B. and Nguyen, T.N. (2016), "Optimal Parameters of Viscous Damper for Hanged Cables in Arch Bridges", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 20, pp. 847-854.
- [10] Babaei, M. and Mollayi, M. (2016), "Multi-Objective Optimization of Reinforced Concrete Frames using NSGA-II Algorithm", *Engineering Structures and Technologies*, Vol. 8, pp. 157-164.