

کنترل ارتعاشات پل کالج در برابر زلزله با استفاده از الگوریتم ژنتیک و میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده چندگانه

اکبر بطهای^۱، میثم رضائی^۲، سید امیر کیوان قربانی تنها^{۳*}

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۱۲/۲۰]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۴/۶/۲۱]

ghtanha@ut.ac.ir

چکیده- یکی از شیوه‌های معمول کنترل غیرفعال سازه‌ها تحت اثر زمین‌لرزه بهره‌گیری از سیستم میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده است. ساختار این میراگرها متشکل از سه پارامتر اصلی یعنی جرم، میرایی و سختی می‌باشند. میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده غالباً با اثرگذاری روی یک مود، که معمولاً مود اول سازه است، سبب کاهش دامنه پاسخ‌ها می‌گردند. از آنجا که پارامترهای میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده در زمان ارتعاش ثابت است، تنظیم صحیح و بهینه آنها بسیار حائز اهمیت است. یافتن مقادیر بهینه پارامترهای میراگر جرمی چندگانه برای سازه‌های غیرخطی با استفاده از روش‌های عددی مستلزم انجام آنالیزهای دینامیکی غیرخطی متعددی است؛ در نتیجه حجم محاسبات لازم بسیار زیاد است. در این پژوهش سازه پل فلزی کالج در نرم‌افزار اجزاء محدود OpenSees مدل‌سازی شده است و برای کاهش حجم محاسبات به منظور یافتن مقادیر بهینه پارامترهای میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده چندگانه، از الگوریتم ژنتیک با هدف کمینه کردن تغییرمکان طولی بلندترین پایه پل استفاده شده است. نسبت جرمی بهینه میراگرهای تنظیم‌شونده چندگانه به منظور کنترل ارتعاشات پل فلزی کالج برابر ۴ درصد جرم سازه پل انتخاب شده است. بر اساس تحلیل‌های عددی انجام‌گرفته برای این نسبت جرمی، میزان کاهش بیشینه و نرم تغییرمکان افقی بلندترین پایه پل به وسیله میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده برای زلزله‌های السترو، کرن‌کانتی، کوبه و نرثریج به ترتیب برابر ۲۴/۹، ۳۴/۳، ۴۳/۵ و ۳۸/۷، ۳۰/۶ و ۴۰/۴ و ۱۳/۶ و ۲۸/۱ درصد است.

واژگان کلیدی: پل فلزی کالج، میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده چندگانه، الگوریتم ژنتیک، تحلیل‌های دینامیکی افزایشی.

۱- مقدمه

میراگرهای جرمی را معمولاً با فرکانس مود اصلی ارتعاشی سازه تنظیم می‌کنند. هنگامی که این مود سازه تحریک می‌شود، میراگر جرمی با حرکت غیر هم‌فاز خود نسبت به سازه، انرژی زلزله را جذب و میرا می‌کند. میراگر جرمی را می‌توان بسیار ساده نصب و اجرا نمود. حتی می‌توان از تجهیزات درون سازه، مانند دستگاه‌های تاسیساتی، به عنوان میراگر جرمی استفاده نمود. برخلاف سایر ابزارهای کنترل سازه مانند کنترل فعال، نگهداری میراگرهای جرمی هزینه زیادی ندارد.

یکی از موثرترین روش‌های کنترل سازه‌ها، استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده غیرفعال است. مفهوم میراگر جرمی برای نخستین بار به وسیله فرام در سال ۱۹۰۹ برای کاهش ارتعاشات بدنه کشتی ناشی از امواج دریا مطرح شد [۱]. این میراگر دارای جرمی در حدود ۱ تا ۵ درصد جرم کل سازه است؛ که به وسیله یک فنر و میراگر به محلی از سازه، که معمولاً دارای بیشترین تغییرمکان است، متصل می‌شود.

جرمی چندگانه در یک سازه نامیرا تحت تحریک هارمونیک پیشنهاد داد. این روش بر اساس کمینه کردن تغییرمکان سازه با روش جست‌وجوی عددی بود [۷]. چن^۳ و وو^۴ طراحی میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده چندگانه در سازه‌های چند درجه آزادی را تحت بارهای لرزه‌ای که در آن میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده چندگانه بر اساس چندین مود ارتعاشی سازه تنظیم شده بودند، مطالعه کردند [۸]. زو^۵ و نایفه^۶ با طراحی بهینه میراگر جرمی چندگانه با روش عددی، اثر تعداد میراگرهای جرمی و درصد جرمی میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده چندگانه بر چگونگی کارکرد سیستم چند درجه آزادی را بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که افزایش تعداد میراگرهای جرمی تا تعداد مشخصی در بهبود کارایی سازه موثر است؛ لیکن با افزایش تعداد میراگرهای جرمی قابلیت اعتماد و مقاوم بودن سیستم کنترلی در مقابل تغییر پارامترهای سازه افزایش می‌یابد [۹].

در بیشتر پژوهش‌های انجام شده در رابطه با طراحی بهینه میراگر جرمی تنظیم‌شونده چندگانه، عموماً روش‌های طراحی با یک سری فرضیات درباره‌ی پارامترهایی مانند توزیع جرم، سختی و میرایی میراگرهای جرمی و همچنین ارتعاش ورودی به سازه همراه بوده است. با توجه به تعداد زیاد متغیرهای مسأله در طراحی بهینه میراگرهای جرمی، استفاده از روش‌های معمولی بهینه‌سازی به حجم بالایی از محاسبات نیاز دارد؛ بنابراین استفاده از روش‌های جدید بهینه‌سازی مانند الگوریتم ژنتیک، می‌تواند مناسب‌تر باشد [۱۰ و ۱۱]. هادی و ارفیادی^۷ در سال ۱۹۹۸، برای اولین بار از الگوریتم فراکویشی ژنتیک برای پیدا کردن پارامترهای بهینه میراگر جرمی استفاده نمودند. آن‌ها میراگر جرمی را روی یک سازه برشی ۱۰ طبقه قرار دادند و با کمینه کردن تغییرمکان بیشینه طبقات، پارامترهای بهینه میراگر جرمی را برای بارگذاری زلزله به دست آوردند [۱۲]. محبی و همکاران در سال ۲۰۱۲، به بررسی تأثیر میراگر جرمی برای

نخستین تجربه موفق کاربرد میراگر جرمی تنظیم‌شونده برای بارهای لرزه‌ای، در سال ۱۹۷۳ به وسیله‌ی یائو و همکاران ارائه شد [۲]. گفتن این نکته بسیار مهم است که هنگامی می‌توان از بیشینه ظرفیت میراگرهای جرمی فعال و غیرفعال استفاده نمود که پارامترهای آن‌ها بهینه باشند [۳].

میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده چندگانه^۱ از چندین میراگر جرمی تنظیم‌شونده منفرد تشکیل شده است که این میراگرها می‌توانند به دو شکل موازی و سری طراحی و در سازه نصب شوند؛ همچنین این میراگرها در یک سیستم سازه‌ای به صورت مجتمع یا توزیع شده در سازه به کار می‌روند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که کارکرد میراگرهای جرمی چندگانه به مقدار جرم، تعداد میراگرهای جرمی، دامنه فرکانس طراحی و چگونگی توزیع آن‌ها بستگی دارد [۴]. میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده چندگانه برای مودهای مختلف قابل تنظیم است که برای افزایش کارایی لرزه‌ای، میراگرها در موقعیت‌های مختلفی در سازه اصلی کار گذاشته می‌شوند. تقسیم وزن میراگر و نصب آن در چند نقطه مختلف از سازه باعث می‌شود که وزن تک‌تک میراگرهای جرمی نسبت به تک میراگر جرمی معادل سبک‌تر باشد و تنظیم نامناسب احتمالی یک میراگر تأثیر قابل توجهی در پاسخ سازه‌ای نداشته باشد. همچنین کارایی میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده چندگانه حساسیت کمتری نسبت به عدم قطعیت پارامترهای سیستم سازه‌ای دارد [۵ و ۶]. در پژوهش‌های گذشته برای طراحی میراگرهای جرمی چندگانه روش‌ها و رویکردهای گوناگونی وجود داشته است. در مراحل اولیه طراحی میراگرهای جرمی چندگانه به منظور سادگی تحلیل و روند طراحی، محدودیت‌هایی مانند فرض جرم و نسبت میرایی یکسان برای میراگرهای جرمی در نظر گرفته شده است. با اعمال این محدودیت‌ها مطالعاتی برای بررسی اثر پارامترهای میراگرهای جرمی در کارایی سیستم در سازه‌های یک‌درجه آزادی تحت تحریک هارمونیک انجام شده است [۵]. جانگید^۲ با چشم‌پوشی از محدودیت‌های طراحی در مورد جرم و میرایی، روشی را برای تعیین پارامترهای بهینه میراگرهای

3 Chen
4 Wu
5 Zou
6 Nayfeh
7 Arfiadi

1 Multiple tuned mass damper
2 Jangid

مجموع جرم‌های انتخاب شده برای ۱۱ میراگر، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۴ و ۶ درصد از جرم کل پل مورد مطالعه است، که محل قرارگیری آنها در شکل (۱) مشاهده می‌شود. برای بهینه کردن فرکانس و میرایی این ۱۱ میراگر از الگوریتم فراکاوشی ژنتیک با هدف کمینه کردن تغییر مکان طولی بلندترین پایه پل استفاده شده است.

۲- مدل سازی پل فلزی کالج

پل فلزی روگذر کالج در خیابان انقلاب شهر تهران واقع شده است و از فراز تقاطع این خیابان با خیابان حافظ عبور می‌نماید. این پل در حدود سال ۱۳۵۴ به وسیله مهندسین بلژیکی اجرا شده است. نقشه‌های این پل از آن سالها باقی نمانده است، ولی در سال ۱۳۷۳ نقشه‌ای بر اساس وضعیت اجرا شده تهیه شده است. همان‌گونه که در شکل (۲) نشان داده شده است، طول پل فلزی کالج ۳۷۲ متر است، که شامل ۱۳ دهانه ۲۴ متری، (X2)، و یک دهانه ۱۲ متری، (X1)، است. دهانه‌ها به صورت ساده بوده و هر دهانه در راستای قائم به صورت جداگانه عمل می‌کند. دو دهانه ابتدایی و انتهایی روی کوله‌ها نشسته‌اند و ۳۲۴ متر از طول پل، روی پایه‌های فولادی قرار دارد. مطابق شکل (۳)، پایه‌ها از نوع تک‌ستونی با پای گیردار و کل ستون T شکل است. پایه‌های انتهایی متشکل از دو ستون با مقطع IPB700 است. جزئیات اتصال تکیه‌گاه پل فلزی کالج، جایی که عرشه پل بر روی کوله‌ها قرار می‌گیرد، در شکل (۴) نشان داده است.

کاهش پاسخ سازه‌ها با رفتار غیرخطی، تحت نیروهای زلزله پرداختند. آن‌ها پارامترهای بهینه میراگر جرمی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک توزیع شده به دست آوردند [۱۳].

در این مطالعه پل کالج تهران در نظر گرفته شده و به منظور طراحی بهینه میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده چندگانه برای آن با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای میراگرهای جرمی، یعنی جرم، سختی و میرایی، از الگوریتم بهینه‌یابی ژنتیک تحت بارگذاری خارجی زلزله استفاده شده است. به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ناشی از بار خارجی، از میراگرهای جرمی چندگانه استفاده شده است و پارامترهای میراگرهای نصب شده به صورت مستقل و بدون وابستگی به عملکرد یکدیگر تعیین شده‌اند. بدین منظور از ۱۱ میراگر جرمی تنظیم‌شونده که روی سازه پل فلزی کالج نصب شده‌اند، بهره گرفته شده است.

شکل (۱) مدل رایانه‌ای پل کالج و میراگرهای قرار گرفته روی آن

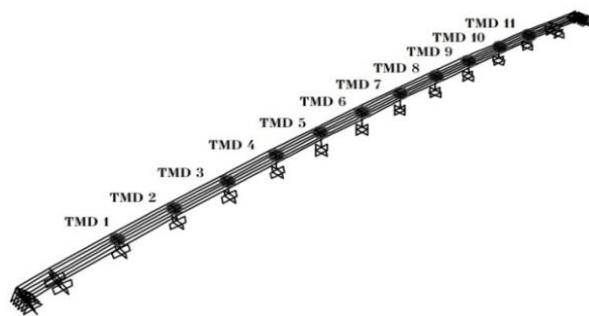


Fig. 1. Computer model of the College Bridge and mass dampers mounted on the bridge

شکل (۲) (الف) پروفیل طولی پل و (ب) دید از بالای پل

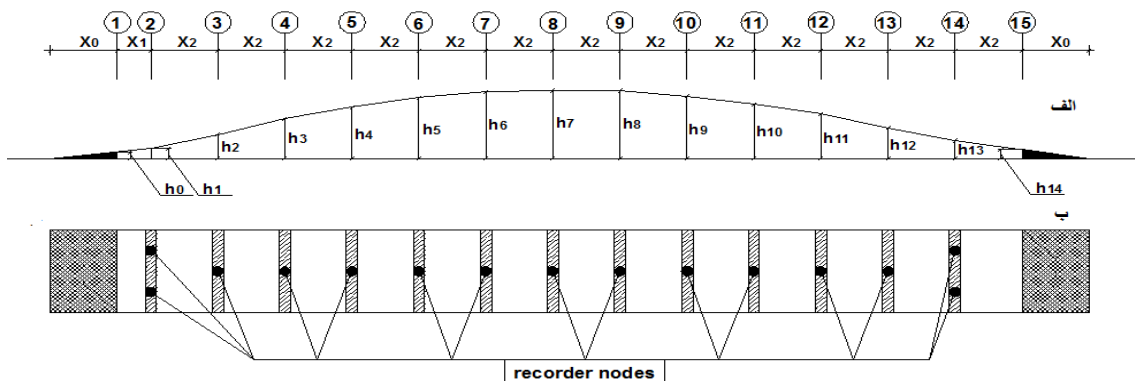


Fig. 2. (a) Longitudinal profile and (b) top view of the bridge

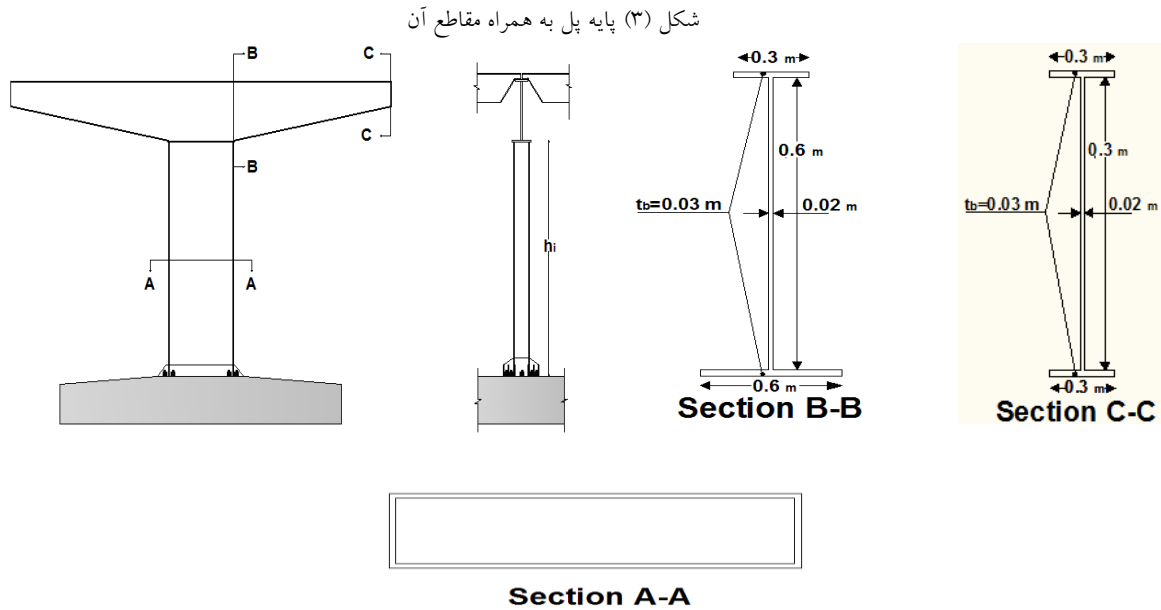


Fig. 3. Bridge pier and its cross sections

فاصله مرکز تا مرکز پشت‌بندها ۴۰ سانتی‌متر است و در مجموع ۲۴ عدد پشت‌بند در عرض پل جا داده شده است. به عبارتی دیگر، زیر بال هر شاه‌تیر چهار پشت‌بند قرار داده شده است. مقطع تیرهای عرضی ناودانی ۲۶۰ می‌باشد، که از داخل جان شاه‌تیرها عبور کرده و به صورت ساده روی جان شاه‌تیرها نشسته‌اند. در محلی که تیرهای عرضی روی شاه‌تیرها نشسته‌اند، سخت‌کننده‌هایی قرار داده شده است تا جان شاه‌تیرها دچار لهیدگی نشوند [۱۴]. فاصله اولین تیر عرضی تا سرستون برابر ۱/۵ متر و آنجا به بعد فاصله تیرهای عرضی از هم برابر ۳ متر است. در مجموع هشت تیر عرضی در هر دهانه وجود دارد. ستون‌های پل از مقطع قوطی ساخته شده که ابعاد آن ۴۵۰×۱۷۸۰ میلی‌متر است. ضخامت ورق‌های ستون برابر ۳۰ میلی‌متر و سرستون I شکل با مقطع متغیر است که بیشترین ارتفاع جان آن ۱/۵۶ متر است. ارتفاع ستون‌ها در دهانه‌های مختلف متفاوت و در بیشترین حالت خود ۵/۸۴ متر ارتفاع دارد [۱۴]. در محل پایه‌های هر دهانه فاصله‌ای بین شاه‌تیرهای دو دهانه متوالی به عنوان درز انبساط گذاشته شده است که این شکاف با نوعی لاستیک پوشانده شده است. همچنین در طول پل نیز درزهای انبساط بین ورقه‌های کف منظور شده است. شیب دهانه‌های مختلف بین ۰/۵ درصد تا ۵/۵ درصد متفاوت است [۱۴].

شکل (۴) جزئیات اتصال عرشه پل به کوله [۱۴]

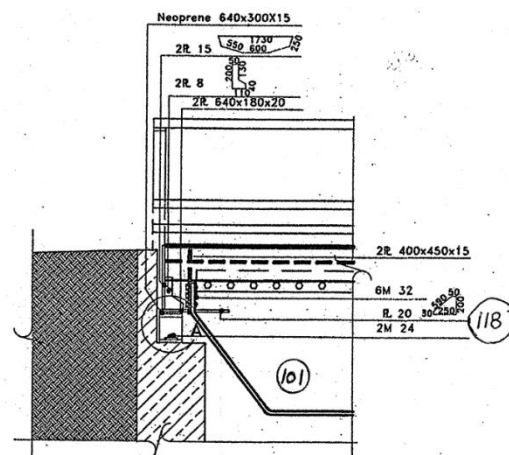


Fig. 4. Details of the connection of the bridge deck to the abutment [14]

عرض پل ۱۰/۵ متر است، که چهار خط عبوری از روی آن می‌گذرد. وزن کل پل شامل عرشه و پایه‌ها تقریباً ۱۱۹۴ تن است. همچنین وزن عرشه هر یک از دهانه‌های ۲۴ متری برابر ۷۷/۵ تن است. فولاد مصرفی در عرشه و پایه‌ها از نوع فولاد St52 است. عرشه پل از شش عدد شاه‌تیر I شکل و پشت‌بندهایی با مقطع HEA200 که در جهت ضعیف خود روی تیرهای عرضی قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است. عرض ورق‌ها ۱/۷۵ متر است. ابعاد ورق جان شاه‌تیرها ۱۰×۱۰۵۵ میلی‌متر و ابعاد ورق بال پایین ۲۰×۴۰۰ میلی‌متر است. ورق کف به لبه‌های بال‌های HEA200 به صورت ممتد جوش شده است.

شکل پل و اتصال مفصلی تیرهای عرشه به پایه‌ها، در صورت ممانعت از حرکت طولی پل احتمال کماتش تیرهای اصلی عرشه پل تحت اثر بارهای جانبی افزایش می‌یابد.

جدول (۱) مشخصات زلزله‌های انتخابی برای انجام تحلیل‌های تاریخیچه

Earthquake	Type	Station	PGA (g)
ElCentro	Far-feild	El Centro	0.35
Kern-County	Far-feild	1095 Taft Lincoln School	0.23
Kobe	Near-feild	KJM	0.83
Northridge	Near-feild	Sylmar-Olive	0.84

Table 1. Characteristics of the selected earthquakes

برای بررسی رفتار لرزه‌ای پل، تاریخیچه زمانی تغییر مکان انتهای بلندترین پایه پل (Node 9997)، که در شکل (۷) نشان داده شده است، در راستای طولی مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول (۲) بیشترین تغییر مکان طولی Node 9997 در هر دو نرم‌افزار و همچنین درصد اختلاف نتایج تحت اثر هر چهار زلزله گزارش شده است.

شکل (۷) موقعیت گره فوقانی بلندترین پایه پل (Node 9997)

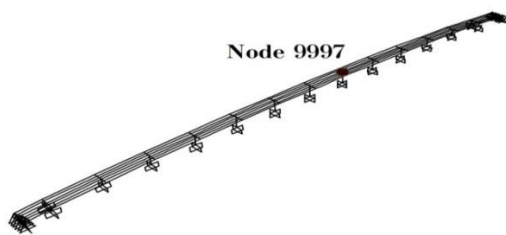


Fig. 7. Location of the top node of the tallest pier of the College Bridge (Node 9997)

جدول (۲) تغییر مکان حداکثر پایه بلند پل کالج

Earthquake	Maximum displacement SAP2000 (cm)	Maximum displacement OpenSees (cm)	discrepancy (%)
ElCentro	3.55	3.8	6.33
Kern-County	3.75	3.94	4.74
Kobe	12.38	12.83	3.47
Northridge	11.45	12.43	7.91

Table 2. The maximum displacement of the tallest pier of College Bridge

در این پژوهش، به منظور اعتبارسنجی مدل‌سازی عددی سازه پل، از نتایج نرم‌افزار تحلیل غیرخطی OpenSees و SAP2000 استفاده شده است، که مدل‌های ساخته‌شده در این نرم‌افزارها در شکل‌های (۵ و ۶) مشاهده می‌شود.

شکل (۵) مدل سازه پل کالج در نرم‌افزار SAP 2000



Fig. 5. SAP2000 model of the College Bridge

شکل (۶) مدل سازه پل کالج در نرم‌افزار OpenSees

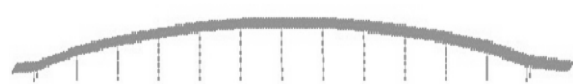


Fig. 6. OpenSees model of the College Bridge

برای اعتبارسنجی مدل‌های ساخته‌شده در دو نرم‌افزار، پیوند مود غالب سازه (مود طولی سازه) و پاسخ سازه تحت اثر چهار زلزله مختلف مقایسه شده است. دوره تناوب اصلی سازه پل در نرم‌افزار SAP2000 برابر 0.44 ثانیه و در نرم‌افزار OpenSees برابر 0.43 ثانیه به دست آمده است. پاسخ تغییر مکان افقی انتهای بلندترین پایه پل مدل‌سازی شده در هر دو نرم‌افزار، تحت اثر چهار زلزله در شکل‌های (۸ تا ۱۱) با یکدیگر مقایسه شده است.

با توجه به این‌که به جز یک دهانه، فاصله تمامی دهانه‌های پل فلزی کالج برابر ۲۴ متر و ارتفاع بلندترین پایه این پل نیز برابر ۵/۸۵ متر است، رفتار این سازه مانند سازه‌های صلب است. مقاطع پایه‌های پل در جهت طولی، مانند شکل (۳)، حول محور ضعیف خود قرار گرفته‌اند. اتصال عرشه پل روی کوله‌ها، مطابق شکل (۴)، با استفاده از ۱۲ بولت^۱ است؛ که هر کدام از تیرهای اصلی به واسطه ۲ بولت به کوله متصل است؛ بنابراین تکیه‌گاه‌های مورد نظر مقاومت کمتری در مقابل بارهای جانبی وارد شده از خود نشان می‌دهند که می‌توان آن‌ها را به صورت اتصال غلتکی فرض نمود و به همین علت مود غالب پل، مود طولی آن است. شایان گفتن است که با توجه به هندسه قوسی

این اختلاف اندک ناشی از عوامل زیر است:

۱- در نرم افزار OpenSees برای مدل سازی مقاطع فولادی از مقاطع فایبر^۱ استفاده شده است، اما در نرم افزار SAP2000 امکان استفاده از مقاطع فایبر وجود ندارد. استفاده از مقاطع فایبر درستی رفتار غیرخطی مدل را به نحو چشم گیری افزایش می دهد؛ زیرا، در صورت استفاده از این مقاطع دیگر نیازی به تعریف مفاصل پلاستیک نیست و در هر نقطه ای که ماده به حد خمیری خود برسد، به طور خودکار مفصل پلاستیک ایجاد می شود. برای تیر پیوند قائم نیز از مقاطع فایبر برای مدل سازی رفتار غیرخطی استفاده شده است.

۲- در OpenSees برای اعمال اثر غیرخطی بودن هندسی، علاوه بر لحاظ کردن اثر $P - \delta$ و $P - \Delta$ ، آثار تغییرات طول المان نیز لحاظ می شود، در حالی که در SAP2000 این گونه نیست.

۳- پارامترهای بهینه فرکانس و میرایی

میراگرها با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

الگوریتم های فرامکاشفه ای تکاملی به آن دسته از روش های جستجوی فرامکاشفه ای گفته می شود که مبتنی بر قانون بقا اصلح نظریه تکاملی داروین است. الگوریتم ژنتیک^۲ (GA) یکی از مهم ترین انواع الگوریتم های فرامکاشفه ای تکاملی است. الگوریتم ژنتیک به عنوان اولین الگوریتم برای شبیه سازی سیستم های مبتنی بر تکامل ژن ارائه شد. عملگرهای اصلی در الگوریتم های ژنتیک عبارتند از: انتخاب (برای مدل کردن قانون بقا اصلح) و تولید مثل از طریق عملگرهای بازترکیب و جهش (برای مدل کردن تولید مثل). الگوریتم های ژنتیک برای حل مسائل گسترده و وسیعی از دنیای واقعی به کار رفته است. مراحل الگوریتم تکاملی ژنتیک شامل هشت مرحله است:

مرحله اول تولید جمعیت اولیه است. در این مرحله یک جمعیت از کروموزوم ها یا همان پاسخ های مساله تولید می شود. بدیهی است که قبل از تولید جمعیت اولیه باید چگونگی نمایش کروموزوم ها، که گویای یک پاسخ برای مساله مورد بررسی است، تعیین شود. خروجی مرحله اول یک جمعیت از

شکل (۸) تغییر مکان افقی بلندترین پایه پل تحت اثر زلزله السترو

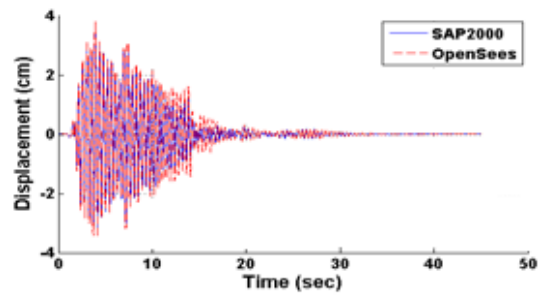


Fig. 8. Horizontal displacement of the tallest pier subjected to El Centro earthquake

شکل (۹) تغییر مکان افقی بلندترین پایه پل تحت اثر زلزله کرن کانتی

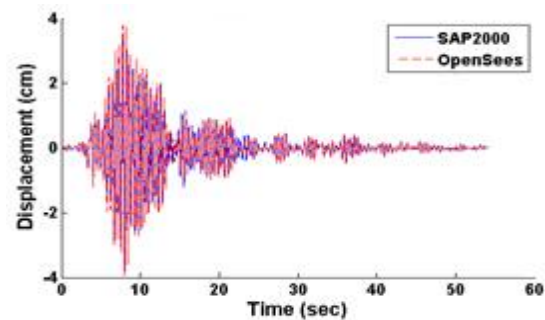


Fig. 9. Horizontal displacement of the tallest pier subjected to Kern-County earthquake

شکل (۱۰) تغییر مکان افقی بلندترین پایه پل تحت اثر زلزله کوبه

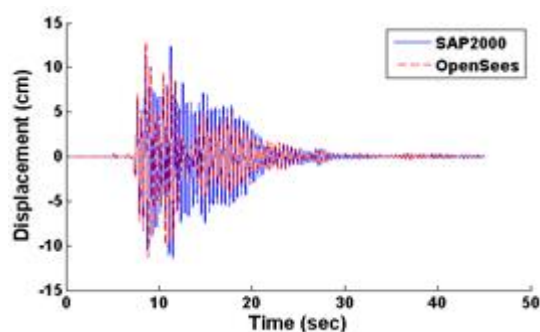


Fig. 10. Horizontal displacement of the tallest pier subjected to Kobe earthquake

شکل (۱۱) تغییر مکان افقی بلندترین پایه پل تحت اثر زلزله نورثریج

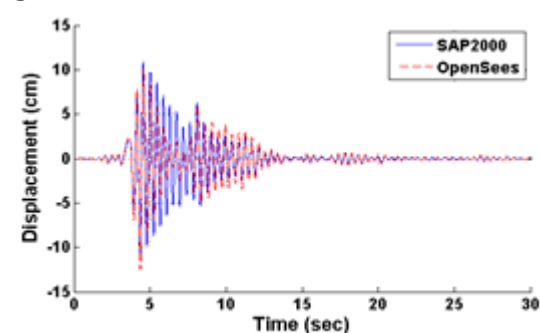


Fig. 11. Horizontal displacement of the tallest pier subjected to Northridge earthquake

1 Fiber

2 Genetic Algorithm

فرآیند تکاملی الگوریتم با رجوع به مرحله سوم ادامه می‌یابد؛ در غیر این صورت الگوریتم متوقف شده و بهترین پاسخ در آخرین نسل به عنوان حاصل جستجوی تکاملی در خروجی ارائه می‌شود [۳].

همان گونه که پیشتر گفته شد، مجموع جرم‌های انتخاب شده برای میراگرها ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۴ و ۶ درصد از جرم کل پل است، که در یازده نقطه از سازه پل جایگذاری شده‌اند. با توجه به این که جرم سازه پل فلزی کالج زیاد است، درصدی از جرم این سازه نیز جرم قابل توجهی است و متمرکز کردن آن در یک یا چند نقطه، مناسب نیست؛ به همین دلیل از تعداد ۱۱ میراگر جرمی در سرتاسر پل بجز پایه‌های کناری تکیه‌گاه‌ها استفاده شده است؛ تا علاوه بر جلوگیری از تمرکز جرم در سازه، ارتعاشات تمامی پایه‌ها تحت کنترل درآید و تاثیر عدم قطعیت‌های تنظیم میراگرها تاثیر کمتری در روند کنترل ارتعاشات سازه داشته باشند.

مقادیر فرکانس در نظر گرفته شده برای این میراگرها از 10 rad/s تا 16 rad/s و مقادیر میرایی از ۱ درصد تا ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است. برای بهینه کردن فرکانس و میرایی این ۱۱ میراگر از الگوریتم فراکاوشی ژنتیک با هدف کمینه‌کردن تغییر مکان طولی بلندترین پایه پل تحت شتاب زلزله 0.5 g استفاده شده است.

نمودار همگرایی پارامترهای میراگرهای جرمی برای نسبت‌های جرمی مختلف در شکل (۱۲) نشان داده شده است. با توجه به این نمودار می‌توان دریافت که با افزایش نسبت جرمی مقادیر تغییر مکان طولی بلندترین پایه پل کاهش یافته است؛ که برای نسبت جرمی بیشتر از ۴ درصد، که همان ۶ درصد است، مقادیر تغییر مکان طولی بلندترین پایه پل کاهش نداشته است. این بدان معنی است که با افزایش نسبت جرمی بیش از ۴ درصد تاثیری بر روی کاهش تغییر مکان طولی بلندترین پایه پل ایجاد نشده است. لازم به گفتن است که چون مقادیر فرکانس و میرایی برای میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده در یک محدوده تعریف شده تعیین می‌شوند افزایش نسبت جرمی بعد از ۴ درصد تاثیر به‌سزایی بر روی کاهش پاسخ تغییر مکان گفته شده ندارد. با توجه به شکل (۱۲) می‌توان گفت که الگوریتم ژنتیک

پاسخ‌ها است. مرحله دوم محاسبه برازش جمعیت ورودی می‌باشد. در این مرحله، برازش تک‌تک کروموزوم‌های جمعیت‌های تولیدشده، با توجه به تابع برازش تعیین شده، محاسبه می‌شود. خروجی این مرحله یک جمعیت از پاسخ‌ها ارزیابی می‌شود. مرحله سوم انتخاب برای تولید مثل است. در این مرحله آن دسته از اعضای جمعیت ورودی که برازش بالاتری نسبت به سایر اعضا دارند، برای تبیین قانون بقا اصلح داروین، انتخاب می‌شوند. خروجی این مرحله، جمعیتی از والدین برازنده است. مرحله چهارم مربوط به بازترکیب والدین است. در این مرحله با توجه به جمعیت والدین برازنده و با استفاده از عملگر بازترکیب، جمعیتی از فرزندان تولید می‌شود. اعمال عملگر بازترکیب، با توجه به یک پارامتر با نام احتمال بازترکیب^۱ (PCR) انجام می‌شود. خروجی این مرحله، جمعیتی از فرزندان تولیدشده می‌باشد. مرحله پنجم مربوط به جهش فرزندان تولید شده است. در این مرحله، فرزندان جدید مرحله قبل تحت عملگر جهش قرار می‌گیرند. البته عملگر جهش با یک احتمال روی دنباله ژنی فرزندان رخ می‌دهد. این احتمال با نام احتمال جهش^۲ (PM) شناخته می‌شود. خروجی این مرحله جمعیتی از فرزندان جهش‌یافته است. در مرحله ششم به محاسبه برازش جمعیت فرزندان پرداخته می‌شود. در این مرحله شایستگی فرزندان جهش‌یافته، با استفاده از تابع برازش، محاسبه می‌شود. خروجی این مرحله، جمعیت فرزندان ارزیابی شده است. در مرحله هفتم به انتخاب برای جایگزینی پرداخته می‌شود. در این مرحله، با توجه به جمعیت والدین (ورودی مرحله سوم) و جمعیت فرزندان ارزیابی شده (خروجی مرحله ششم)، یک جمعیت جدید برای نسل بعد (هر تکرار در این الگوریتم معادل یک نسل است) تولید می‌شود. بدیهی است که خروجی این مرحله جمعیتی است که در آن بخشی از والدین نسل قبل و تعدادی از فرزندان جدید تولیدشده نسل جاری وجود دارد. در مرحله هشتم به بررسی شرط توقف پرداخته می‌شود. در این مرحله، در مورد ادامه فرآیند تکاملی الگوریتم تصمیم‌گیری می‌گردد. در صورت عدم ارضای شرط توقف،

1 Probability Cycle Recombination
2 Possibility Mutation

۴- بررسی اثر میراگرهای جرمی روی میزان بیشینه و نرم تغییر مکان و انرژی جذب شده

برای اینکه اثر بیشینه شتاب رکوردهای زلزله، بر کارایی سیستم کنترل پیشنهادی در این مطالعه سنجیده شود، آنالیز IDA برای بیشینه شتاب‌های 0.1g تا 1.0g با گام 0.1g انجام شده است. این آنالیزها برای چهار زلزله معرفی شده انجام گرفته است و مقادیر بیشینه و نرم (RMS) جابه‌جایی بلندترین پایه پل برای حالت کنترل شده و کنترل نشده در شکل‌های (۱۳ تا ۲۰) نشان داده شده است.

مقادیر RMS با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$RMS(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}}$$

در رابطه بالا x_i پاسخ مورد نظر و n تعداد آن است.

شکل (۱۳) بیشینه تغییر مکان افقی بلندترین پایه پل تحت زلزله السترو

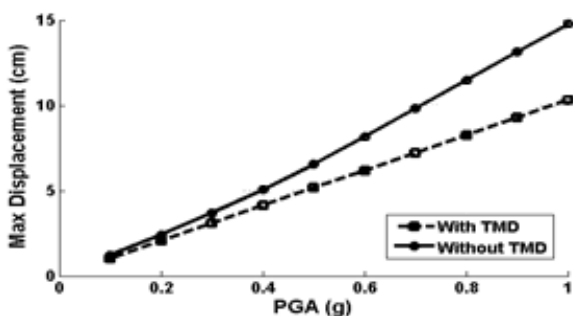


Fig. 13. The maximum horizontal displacement of the tallest pier subjected to El Centro earthquake

شکل (۱۴) بیشینه تغییر مکان افقی بلندترین پایه پل تحت زلزله کرن‌کانتی

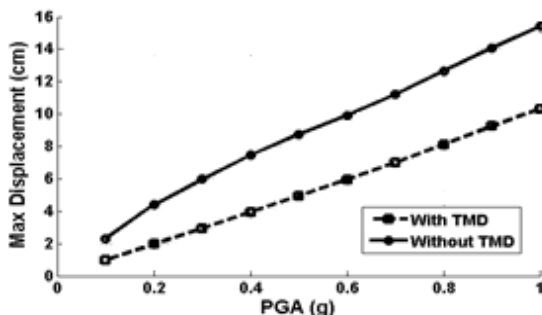


Fig. 14. The maximum horizontal displacement of the tallest pier subjected to Kern-County earthquake

به خوبی توانسته است مقادیر بهینه را با سرعت همگرایی بالایی پیدا کند.

برای کنترل غیرفعال سازه پل از نسبت جرمی ۴ درصد استفاده می‌شود و مقادیر بهینه فرکانس و میرایی میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده بر اساس این نسبت جرمی انتخاب می‌شوند.

شکل (۱۲) نمودار همگرایی پارامترهای میراگرهای جرمی

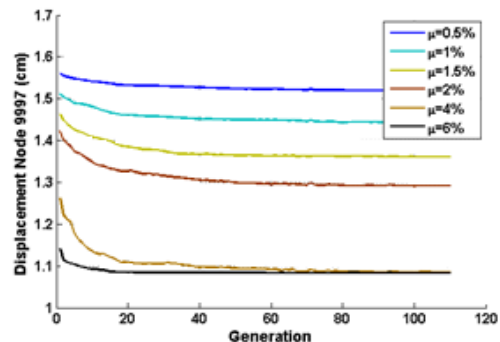


Fig.

12. Convergence of the parameters of the mass dampers

با توجه به این‌که مقادیر بهینه میرایی و فرکانس میراگرهای جرمی تحت زلزله السترو بهینه شده است، در نتیجه این مقادیر ممکن است برای زلزله‌های دیگر متفاوت باشد و اختلاف نتایج برای زلزله‌های مختلف ناشی از مقادیر بهینه مختلف برای هر زلزله است. برای تعیین پارامترهای بهینه فرکانس و میرایی، تغییر مکان افقی نقطه فوقانی بلندترین پایه پل (Node 9997) به عنوان تابع هدف مورد بررسی قرار گرفته است. مقادیر بهینه پارامترهای مذکور در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول (۳) مقادیر بهینه شده فرکانس و میرایی میراگرها

No.	Mass (kg)	ω_a (rad/sec)	ξ_d (%)
TMD 1	12132	14.1745	8.73
TMD 2	12132	12.5961	11.35
TMD 3	12132	12.9941	6.91
TMD 4	12132	12.7333	1.45
TMD 5	12132	12.9941	26.13
TMD 6	12132	12.5549	7.14
TMD 7	12132	12.5	28.52
TMD 8	12132	15.1078	29.20
TMD 9	12132	12.7471	22.49
TMD 10	12132	13.29	1
TMD 11	12132	12.7471	2.7

Table 3. Optimum values of frequency and damping ratio for the mass dampers

شکل (۱۹) RMS تغییر مکان افقی بلندترین پایه پل تحت زلزله کوبه

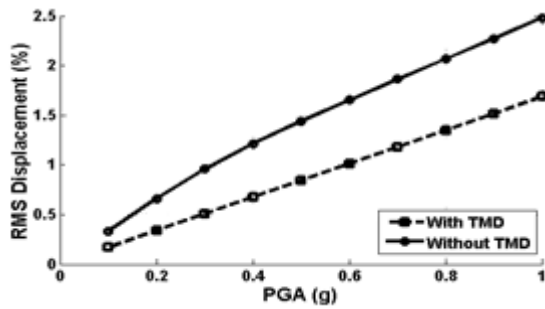


Fig. 19. RMS of the maximum horizontal displacement of the tallest pier subjected to Kobe earthquake

شکل (۱۵) بیشینه تغییر مکان افقی بلندترین پایه پل تحت زلزله کوبه

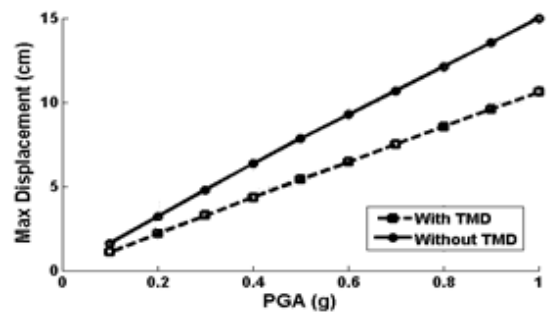


Fig. 15. The maximum horizontal displacement of the tallest pier subjected to Kobe earthquake

شکل (۲۰) RMS تغییر مکان افقی بلندترین پایه پل تحت زلزله نرثریج

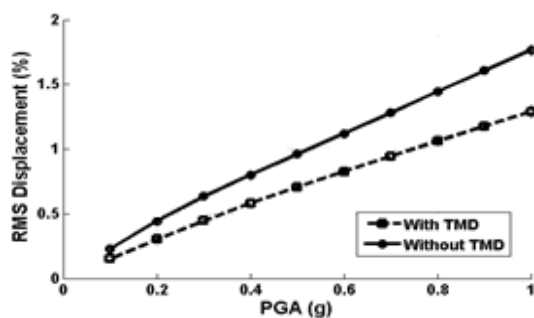


Fig. 20. RMS of the maximum horizontal displacement of the tallest pier subjected to Northridge earthquake

شکل (۱۶) بیشینه تغییر مکان افقی بلندترین پایه پل تحت زلزله نرثریج

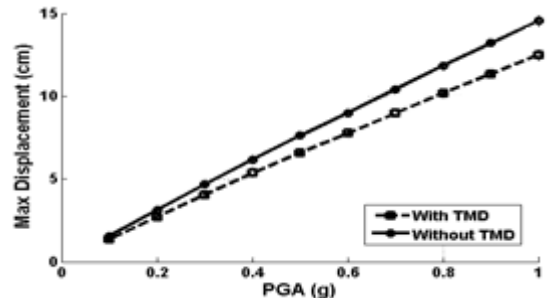


Fig. 16. The maximum horizontal displacement of the tallest pier subjected to Northridge earthquake

با بررسی نمودارهای ارائه شده در شکل‌های (۱۳ تا ۲۰) می‌توان به عملکرد مناسب میراگرهای جرمی مورد استفاده پی برد؛ همچنین میزان کاهش پاسخ‌های سازه برای بیشینه شتاب‌های مختلف و زلزله‌های اعمال شده نشان‌دهنده وابستگی کمتر میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده چندگانه به زلزله‌های اعمالی است. مقادیر فرکانس تعیین شده برای این میراگرها در بازه ۱۲/۵ تا ۱۵/۱ رادیان بر ثانیه قرار دارد که نشان‌دهنده فعال شدن این میراگرها و عملکرد مناسب آن‌ها برای زلزله‌های مختلف است. با وجود این‌که مقادیر بهینه برای پارامترهای میراگرها با اعمال زلزله السترو انجام گرفته است، اما میزان کاهش پاسخ سازه نشان از وابستگی کمتر تنظیم مناسب میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده چندگانه به زلزله‌های ورودی است.

با توجه به این‌که عرشه پل به صورت صلب و الاستیک می‌باشد، انرژی ورودی زلزله به وسیله‌ی غیرخطی شدن پایه‌ها جذب و مستهلک می‌شود. مقادیر این انرژی جذب‌شده به

شکل (۱۷) RMS تغییر مکان افقی بلندترین پایه پل تحت زلزله السترو

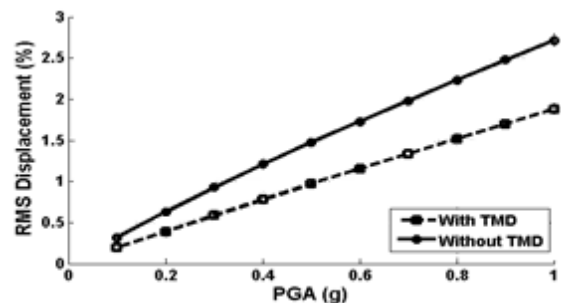


Fig. 17. RMS of the maximum horizontal displacement of the tallest pier subjected to El Centro earthquake

شکل (۱۸) RMS تغییر مکان افقی بلندترین پایه پل تحت زلزله کرن‌کانتی

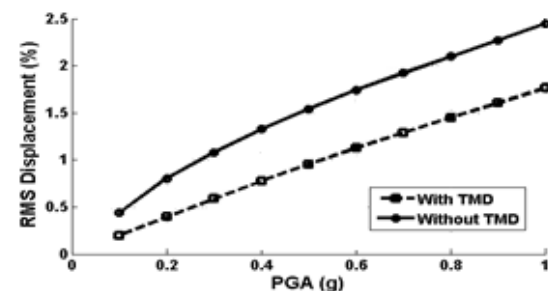


Fig. 18. RMS of the maximum horizontal displacement of the tallest pier subjected to Kern-County earthquake

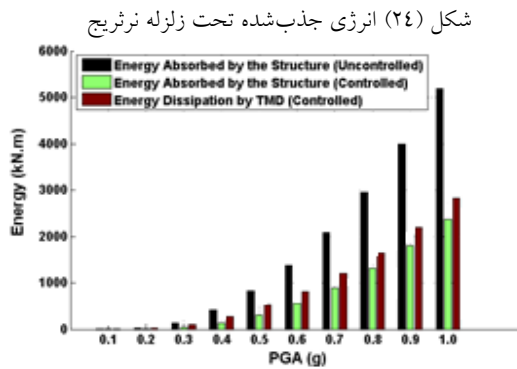


Fig. 24. The energy absorbed during Northridge earthquake

با توجه به نمودارهای میله‌ای رسم شده برای انرژی مستهلک شده به وسیله میراگرها، ملاحظه می‌شود که برای بیشینه شتاب‌های مختلف زلزله‌های اعمال شده به سازه، سهم مستهلک نمودن انرژی برای میراگرهای جرمی استفاده شده، بیشتر از انرژی مستهلک شده به وسیله خود سازه است.

۵- نتیجه گیری

در مطالعه انجام گرفته رفتار لرزه‌ای پیل فلزی کالج و کنترل ارتعاشات نامطلوب آن تحت اثر زلزله‌هایی با بیشینه شتاب مختلف بررسی شده و میزان اثربخشی میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه در کاهش پاسخ سازه در برابر زلزله‌های مخرب مورد مطالعه قرار گرفته است. برای یافتن پارامترهای بهینه میراگرها از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. پارامترهای میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه با نسبت‌های جرمی ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۴ و ۶ درصد برای زلزله السترو با هدف به حداقل رساندن تغییر مکان افقی بلندترین پایه پیل به دست آمده است و نسبت جرمی ۴ درصد برای کنترل ارتعاشات پیل فلزی کالج انتخاب شده است.

برای بررسی انرژی جذب شده به وسیله میراگرها می‌توان گفت، تحت اثر زلزله‌هایی با بیشینه شتاب کمتر، به دلیل خطی بودن رفتار سازه، انرژی ورودی به سازه تقریباً به طور کامل به وسیله میراگرهای جرمی مستهلک شده است و برای بیشینه شتاب‌های زیاد با توجه به این که سازه پیل رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهد، مقداری انرژی به وسیله پایه‌ها جذب و مستهلک می‌شود.

وسیله سازه پیل و میراگرهای جرمی برای حالت‌های با وجود میراگرهای جرمی و بدون میراگرهای جرمی برای زلزله‌های گفته شده در شکل‌های (۲۱ تا ۲۴) نشان داده شده است.

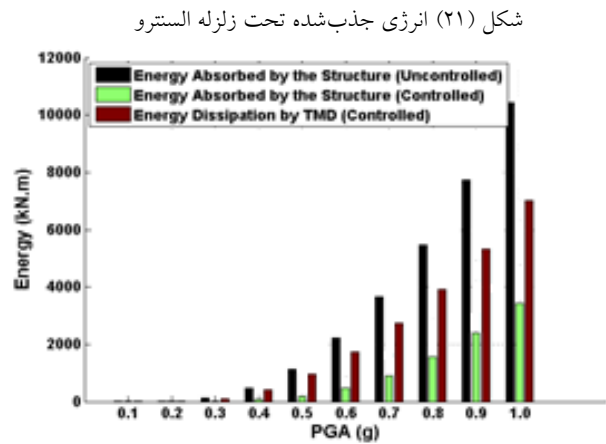


Fig. 21. The energy absorbed during El Centro earthquake

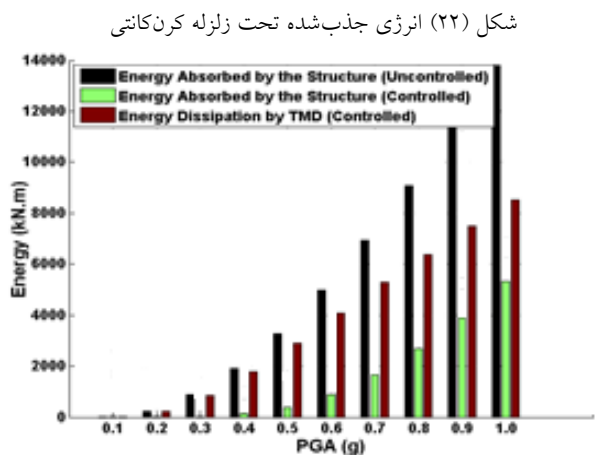


Fig. 22. The energy absorbed during Kern-County earthquake

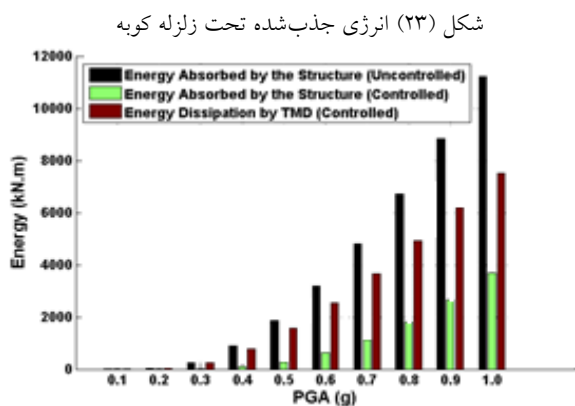


Fig. 23. The energy absorbed during Kobe earthquake

- [4] Kareem, A., & Kline, S. (1995). Performance of multiple mass dampers under random loading. *Journal of structural engineering*, 121(2), 348-361.
- [5] Yamaguchi, H., & Harnpornchai, N. (1993). Fundamental characteristics of multiple tuned mass dampers for suppressing harmonically forced oscillations. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 22(1), 51-62.
- [6] Abe, M., & Fujino, Y. (1994). Dynamic characterization of multiple tuned mass dampers and some design formulas. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 23(8), 813-835.
- [7] Jangid, R. S. (1999). Optimum multiple tuned mass dampers for base-excited undamped system. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 28(9), 1041-1049.
- [8] Chen, G., & Wu, J. (2001). Optimal placement of multiple tune mass dampers for seismic structures. *Journal of structural engineering*, 127(9), 1054-1062.
- [9] Zuo, L., & Nayfeh, S. A. (2005). Optimization of the individual stiffness and damping parameters in multiple-tuned-mass-damper systems. *Journal of vibration and acoustics*, 127(1), 77-83.
- [10] Jefferson, M. F., Pendleton, N., Lucas, S. B., & Horan, M. A. (1997). Comparison of a genetic algorithm neural network with logistic regression for predicting outcome after surgery for patients with nonsmall cell lung carcinoma. *Cancer*, 79(7), 1338-1342.
- [11] Michalewicz, Z. (1996). *Genetic algorithms + data Structures = evolution programs* (pp.1-10). Springer, Berlin Heidelberg.
- [12] Hadi, M. N. & Arfiadi, Y. Optimum design of absorber for MDOF structures. *Journal of structural engineering*, 1998. 124(11), 1272-1280.
- [13] Mohebbi, M., & Joghataie, A. (2012). Designing optimal tuned mass dampers for nonlinear frames by distributed genetic algorithms. *The structural design of tall and special buildings*, 21(1), 57-76.
- [14] Ansari, P. Experimental and analytical studies on traffic induced vibrations of steel bridges and feasibility study of applying tuned mass dampers, M.Sc Thesis, K.N.Toosi University of Technology, November, 2010 (In Persian).

میراگر جرمی تنظیم‌شده با مستهلک نمودن انرژی ورودی زلزله از جذب انرژی به وسیله پایه‌های پل جلوگیری کرده و باعث می‌شود که رفتار غیرخطی در پایه‌های پل در بیشینه شتاب‌های بالاتر رخ دهد و این می‌تواند ظرفیت سازه پل را برای مقابله با زلزله‌های قوی‌تر بالا ببرد.

استفاده از الگوریتم ژنتیک برای تعیین مقادیر مناسب میرایی و فرکانس میراگرهای جرمی تنظیم‌شده روشی موفق می‌باشد که دقت و سرعت همگرایی بالایی دارد.

مقادیر بهینه فرکانس میراگرهای جرمی در محدوده ۱۲/۵ تا ۱۵/۱ رادیان بر ثانیه قرار دارند و این باعث شده است تا عملکرد میراگرها برای سایر زلزله‌های اعمال شده مناسب باشد. میزان کاهش بیشینه و RMS تغییر مکان افقی بالای بلندترین پایه پل به وسیله میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده برای زلزله‌های السترو، کرن کانتی، کوبه و نثریج به ترتیب برابر ۲۴/۹ و ۳۴/۳، ۴۳/۵ و ۳۸/۷، ۳۰/۶ و ۴۰/۴ و ۱۳/۶ و ۲۸/۱ درصد است.

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب قدردانی خود را از شرکت محترم مهندسی مشاور طازند به خاطر در اختیار قرار دادن نقشه‌های سازه‌های پل کالج ابراز میدارند. همچنین آنان از راهنمایی‌های ارزشمند جناب آقای دکتر شهرام وهدانی، عضو محترم هیات علمی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران، تشکر مینمایند.

References

۷- مراجع

- [1] Frahm, H., *Device for damped vibrations of bodies*. 1909, US Patent No. 989958.
- [2] Wirsching, P. H., & Yao, J. T. (1973). Safety design concepts for seismic structures. *Computers & structures*, 3(4), 809-826.
- [3] Mashkat Razavi, H., *Intelligent algorithms in structural control with tuned mass dampers considering soil-structure interaction*, PhD Dissertation, University of Mashhad, December, 2014 (In Persian).

Seismic Vibration Control of College Bridge Using Genetic Algorithm and Multiple Tuned Mass Dampers

A. Bathaei¹, M. Ramezani², A.K. Ghorbani-Tanha^{3*}

1- M.Sc., Earthquake Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- M.Sc., Earthquake Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

3- Assist. Prof., School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

ghtanha@ut.ac.ir

Abstract:

One of the challenging tasks for civil engineers is to mitigate the vibration of structures due to dynamic loads in order to prevent possible damages and human and economic losses. By reducing the external disturbance on a system, response of the system can be reduced. However, this may not be possible in all cases. On the other side, modification of a system to prevent occurrence of resonance may require significant redesigning. Furthermore, this would be difficult to be applied on existing structures. Therefore, using vibration control devices was introduced as a reliable and simple method. These devices are simply attached to existing systems to reduce the vibration of the structure without altering the original system drastically. Passive tuned mass damper (TMD) -introduced more than a century ago- is undoubtedly a simple, inexpensive and reliable mean to suppress unfavorable vibrations of structures. However, very narrow band of suppression frequency, ineffective reduction of non-stationary vibration, and sensitivity problem due to detuning are inherent limitations of the passive TMDs. These dampers are usually tuned to the first natural frequency of the structures. TMD parameters are constant during the life cycle of the structure, therefore it is important to adjust them properly to achieve a favorable performance. Optimal values for TMD parameters in structures with non-linear behavior are determined by non-linear dynamic analysis. There are many analytical and empirical relations to identify these parameters through simplified modeling. In this paper, Genetic Algorithm (GA) is employed to find optimum TMD parameters for vibration control of the College Bridge in Tehran. With the length of 372 m, this steel bridge has 14 spans. The bridge is modeled in OpenSees environment. Verification of the finite element model is performed by comparing the results of the dynamic analysis under four earthquake records by those of alternative model created in SAP2000. In order to mitigate vibration of this bridge, 11 TMDs are considered to be installed on the bridge. The aim of the GA approach is to minimize the displacement of tallest pier of the bridge in order to decrease the maximum displacement of the structure subjected to earthquake excitations. Based on the analyses conducted for near-field and far-field earthquakes, it was concluded that employing GA will considerably reduce the convergence rate of achieving optimum TMD parameters. To evaluate the performance of the control system during severe earthquakes, Incremental Dynamic Analysis (IDA) is conducted for the maximum Peak Ground Acceleration (PGA) of 0.1g to 1.0g. The longitudinal root mean square and maximum displacement of the tallest pier in uncontrolled and controlled cases are obtained and compared. The results show that for low PGA values, TMDs absorb and dissipate a large portion of the input energy, and the piers remain elastic in this case. However, for higher values of PGA, piers also dissipate a portion of input energy by entering nonlinear region. The percentage of response reduction for different earthquakes are not the same because each earthquake has its own frequency content. Numerical analyses for the mass ratio of 4% for TMDs show that the reduction percentage of longitudinal and RMS displacement of the largest pier with tuned mass damper are 24.9 and 34.3, 43.5 and 38.7, 30.6 and 40.4, and 13.6 and 28.1 for El-Centro, Kern-County, Kobe and Northridge earthquakes, respectively.

Keywords: College Bridge; Multiple Tuned mass dampers; Genetic Algorithm; Incremental Dynamic Analysis