



## محاسبه پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شونده و بررسی عملکرد آن بر روی پل یکپارچه چهار دهانه

سیده فاطمه لبافی<sup>۱</sup>، احمد شوشتری<sup>۱\*</sup>، احسان محتشمی<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۵

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۳/۰۷

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۵/۲۵

### کلمات کلیدی:

میراگر جرمی تنظیم شونده

پل یکپارچه

پارامترهای میراگر

بهینه‌سازی

الگوریتم ازدحام ذرات

**خلاصه:** در این مقاله عملکرد سیستم کنترل میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD) در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای یک پل یکپارچه چهار دهانه مورد بررسی قرار می‌گیرد. دو روش تحلیلی کلاسیک و یک روش بهینه‌سازی برای محاسبه پارامترهای این میراگر به کار گرفته می‌شود و تاثیر آن بر پاسخ لرزه‌ای پل بررسی می‌شود. در روش بهینه‌سازی، سه تابع هدف کمینه کردن بیشینه جابه‌جایی و بیشینه شتاب گره میانی عرشه و نیز بیشینه برش پایه مورد استفاده قرار می‌گیرد. میراگر با پارامترهای محاسبه شده بر روی پل قرار گرفته و پل تحت چند زلزله بزرگ در جهت عرضی قرار می‌گیرد. بهینه‌سازی در برنامه MATLAB و تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه در نرم‌افزار OpenSees برنامه‌نویسی شده است. هدف از انجام این پژوهش مقایسه روش‌های مختلف در به دست آوردن پارامترهای میراگر و معرفی روشی است که میراگر با استفاده از آن روش عملکرد بهتری بر روی پل داشته باشد. نتایج عددی نشان می‌دهد استفاده از TMD در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای پل موثر بوده و انتخاب روش محاسبه این پارامترها بر عملکرد آن تاثیرگذار است. استفاده از روش بهینه‌سازی به دلیل تعیین پارامترهای میراگر با توجه به مشخصات زلزله سبب کاهش بیشتر پاسخ‌های نیرویی و حرکتی پل می‌شود. همچنین انتخاب تابع هدف نیز در مقدار کاهش پاسخ‌ها موثر است و بیشترین مقدار کاهش پاسخ، مربوط به پاسخ متناظر با تابع هدف می‌باشد. برای پل مورد بررسی مقادیر بیشینه کاهش پاسخ جابه‌جایی و شتاب گره میانی عرشه برابر ۲۲/۴ و ۱۷/۷ درصد و برای برش پایه ۴/۳ درصد می‌باشد. بنابراین تابع هدف جابه‌جایی بهترین تابع هدف معرفی می‌گردد.

داد. در بین این سیستم‌ها، استفاده از سیستم‌های کنترلی غیرفعال سازه به دلیل کارایی و راحتی اجرای آن و همچنین هزینه‌های اجرایی کمتر، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD)<sup>۱</sup> یکی از سیستم‌های غیرفعال کنترل لرزه‌ای سازه‌ها می‌باشد که برای اولین بار توسط فراهام<sup>۲</sup> در سال ۱۹۰۹ برای کاهش دوران جانبی و نوسان حرکت کشتی مورد استفاده قرار گرفت [۱]. بعدها دن‌هارتوگ<sup>۳</sup> [۲]، اوهنو<sup>۴</sup> و همکاران [۳]، سونگ<sup>۵</sup> و دارگوش<sup>۶</sup> [۴]، واربرتون<sup>۷</sup> [۵]، اسلادک<sup>۸</sup> و کلینگنر<sup>۹</sup> [۶]، لی<sup>۱۰</sup> و

### ۱- مقدمه

پل‌ها یکی از سازه‌های مهمی هستند که شکست آن‌ها سبب اختلال در سیستم حمل و نقل می‌گردد. در سرتاسر دنیا پل‌های زیادی وجود دارند که در اثر وقوع زلزله به مرحله شکست رسیده که گاه موجب بروز مشکلات جدی در امداد رسانی به هنگام وقوع سوانحی همچون زلزله و سیل می‌گردد. از این رو، در سال‌های اخیر پژوهشگران توجه ویژه‌ای به سیستم‌های کنترل کننده‌ای نموده‌اند که سبب کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها و همچنین جلوگیری از آسیب جدی زلزله بر پل‌ها گردند. در بسیاری از کشورهایی که خطر لرزه‌خیزی بالایی دارند، برنامه‌های کنترل کننده‌ای برای سازه‌ها در جهت بهبود عملکرد لرزه‌ای آن‌ها انجام شده است. یکی از این برنامه‌های کنترلی، استفاده از سیستم‌های کنترل سازه است. این سیستم‌ها شامل سیستم‌های فعال، غیرفعال، نیمه فعال و ترکیبی می‌باشند که با به کار بستن آن‌ها بر روی سازه، می‌توان پاسخ‌های سازه از جمله جابه‌جایی و شتاب آن را کاهش

- 1 Tuned Mass Damper
- 2 Frahm
- 3 Den Hartog
- 4 Ohno
- 5 Soong
- 6 Dargush
- 7 Warburton
- 8 Sladek
- 9 Klingner
- 10 Lee

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ashosht@um.ac.ir

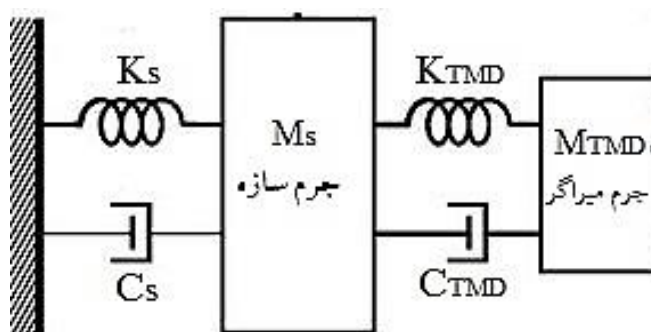


شی در سال ۲۰۱۹ ابتدا رابطه بین دامنه شتاب دینامیکی و پارامترهای مهم MTMD (فرکانس‌ها، میرایی TMD، نسبت فرکانس مرکزی، نسبت جرم و تعداد TMD) را بیان کرده و سپس بر اساس مطالعات پارامتری فرمول‌های نسبت بهینه میرایی و عرض باند فرکانس را برای پل‌های آدم رو پیشنهاد کردند [۱۴]. فریرا<sup>۱۱</sup> و سیموئز<sup>۱۰</sup> در سال ۲۰۱۹ به طراحی بهینه یک پل کابلی پیاده‌رو با به کارگیری میراگرهای جرمی فعال و غیرفعال پرداختند [۱۵]. بین<sup>۱۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۹ یک نوع جدید TMD به نام  $pTMD^3$  از ترکیب TMD و یک لایه ویسکوالاستیک محدود کننده برای ائتلاف انرژی ارائه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که تعداد میراگر و نسبت جرم‌های آن در کاهش ارتعاشات همراه باد، ترافیک و پل هر دو قابل توجه هستند. با این حال سختی در کاهش ارتعاشات موثر نیست [۱۶]. بطهایی و همکاران در سال ۱۳۹۵ به بهینه‌سازی میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه با استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور کنترل ارتعاشات پل پرداختند. آن‌ها برای این منظور پل مورد نظر را در نرم‌افزار OpenS-ees مدل‌سازی کرده و تغییر مکان طولی بلندترین پایه را به عنوان تابع هدف در نظر گرفتند. در این پژوهش نسبت جرمی بهینه میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه نیز برابر ۴ درصد جرم سازه پل در نظر گرفته شد [۱۷]. بیات و دانشجو در سال ۱۳۹۵ به بررسی تاثیر جرم، درصد میرایی، فرکانس تنظیمی و محل TMD در کاهش ارتعاشات مقاطع مختلف پل پرداختند. همچنین با تغییر سرعت وسایل نقلیه عبوری، عملکرد TMD در کاهش ارتعاشات قائم پل را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد جرم TMD در مقایسه با درصد میرایی آن تاثیر بیشتری در کاهش ارتعاشات قائم دارد. همچنین TMD به فرکانس تنظیمی خود بسیار حساس می‌باشد و مهم‌ترین تاثیر TMD بر کاهش پاسخ سازه در مرحله ارتعاشات پل می‌باشد [۱۸]. اخلاق پسند و همکاران در سال ۱۳۹۹ مطالعه‌ای در مورد مقایسه اثر میراگر جرمی تنظیم شونده منفرد و چندگانه انجام دادند. در این پژوهش به بررسی و مقایسه عملکرد میراگر جرمی منفرد واقع در محل بیشینه جابه‌جایی مودی و میراگرهای جرمی چندگانه توزیع شده بر اساس تحلیل مودال، پرداخته شد. نتایج تحلیل‌های صورت گرفته نشان داد که کنترل سازه در حالت خطی توسط میراگرهای جرمی چندگانه تنظیم شده بر اساس مودهای اول-دوم رفتار مناسب‌تری نسبت استفاده از میراگرهای

همکاران [۷] و بکره<sup>۱</sup> و جنگید<sup>۲</sup> [۸] نمودارهای طراحی را جهت بهینه‌سازی پارامترهای سیستم TMD برای نسبت‌های جرمی مشخص و میرایی سیستم‌های مختلف اولیه دسته‌بندی کرده و ارائه دادند. پورزینلی و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی عملکرد سیستم TMD و پارامترهای آن شامل جرم، سختی و میرایی با استفاده از بهینه‌سازی چند هدفه با الگوریتم ژنتیک پرداختند. بدین منظور سه تابع هدف ماکزیمم جابه‌جایی، ماکزیمم سرعت و ماکزیمم شتاب هر طبقه به طور همزمان مینیمم می‌شوند که برای این منظور از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند [۹]. میگوئل<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۶ یک کاربرد جدید از طراحی بهینه TMD و MTMD<sup>۴</sup> بیان کردند. در این مقاله پارامترهای TMD به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شدند و بهینه‌سازی برای طراحی‌هایی که کمتر به عدم اطمینان پارامترهای سیستم و پارامترهای تحریک حساس هستند، انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از MTMD ها در مقایسه با TMD تک، می‌تواند جابه‌جایی‌ها را افزایش داده و واریانس حداکثر جا به جایی عمودی گره مرکزی پل زیاد می‌شود [۱۰]. شی<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۸ کاربرد الگوریتم شای ماهی را در طراحی بهینه TMD در یک پل عابر پیاده مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد TMD اثر خوبی در کنترل ارتعاشات ناشی از حرکت انسان‌ها در فرکانس‌های مختلف دارد [۱۱]. چن<sup>۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۸ تاثیر فرکانس‌های تقویت شده در عملکرد دینامیکی یک پل ریلی تحت زلزله را بررسی کردند. در این مطالعه روش طراحی پل ریلی با TMD معرفی شد و روشی برای طراحی این نوع پل‌ها ارائه نمودند [۱۲]. شی<sup>۷</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۹ مطالعه آزمایشگاهی و تحلیل روی سیستم غیرفعال TMD را مورد بررسی قرار دادند. با توجه به اینکه TMD ها عموماً برای کنترل لرزش ناشی از حرکت پیاده‌ها رو پل‌های پیاده رو مورد استفاده قرار می‌گیرد و اینکه TMD ها نسبت به تغییر فرکانس بسیار حساس هستند، با تغییر آن اثر بخشی آن‌ها کاهش پیدا می‌کند در نتیجه TMD های سنتی قابلیت تنظیم و بازگشت به حالت اولیه خود را ندارند. با توجه به این مشکل در این پژوهش یک نوع جدید TMD به نام APVM-TMD<sup>۸</sup> ارائه شد [۱۳]. وانگ<sup>۹</sup> و

- 1 Bakre
- 2 Jangid
- 3 Miguel
- 4 Multiple Tuned Mass Dampers
- 5 Shi
- 6 Chen
- 7 Shi
- 8 Adaptive Passive Variable Mass Tuned Mass Damper
- 9 Wang

- 10 Ferreira
- 11 Simões
- 12 Yin
- 13 Pounding Tuned Mass Dampers



شکل ۱. طرح شماتیک TMD

Fig. 1. Schematic diagram of the TMD

محاسبه پارامترهای میراگر استفاده شده است. این روش‌ها در این مقاله در قالب روش‌های کلاسیک و روش‌های بهینه‌سازی معرفی شده و سپس کارایی و توانایی آن مورد قیاس قرار گرفته است. همچنین اثر انتخاب تابع هدف در روش بهینه‌سازی برای کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای پل بررسی شده است. بنابراین نوآوری مقاله حاضر، مقایسه و معرفی روش‌های مختلف برای محاسبه پارامترهای میراگر و اثر این روش‌ها بر عملکرد TMD بوده و همچنین معرفی تابع هدف مناسب‌تر از بین پرکاربردترین توابع هدفی است که در پژوهش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

## ۲- روش‌های کلاسیک برای محاسبه پارامترهای TMD

یک TMD معمولی شامل یک جرم  $m$  است که نسبت به سازه حرکت می‌کند و به وسیله یک فنر با سختی  $k$  و یک میراگر لزج با میرایی  $c$  به سازه اصلی متصل می‌شود. طرح شماتیکی از TMD در شکل ۱ نشان داده شده است.

مشخصات یک TMD به وسیله جرم تنظیم شونده و نسبت‌های میرایی آن تعریف می‌شود. نسبت تنظیم شونده  $\alpha$ ، نسبت جرمی  $\mu$  و نسبت میرایی  $\xi$  به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\alpha = \frac{\omega_{TMD}}{\omega_s}, \quad \mu = \frac{M_{TMD}}{M_s}, \quad \xi = \frac{C_{TMD}}{2M_{TMD}\omega_{TMD}} \quad (1)$$

منفرد تنظیم شده، بر اساس مود اول می‌باشد. اما در مدل غیرخطی سازه، عملکرد میراگرهای جرمی منفرد و چندگانه ضمن کنترل پاسخ‌های سازه، اندکی کاهش یافته است [۱۹]. در جدیدترین پژوهش‌ها، سهیلی و همکاران اثرات TMD را بر پاسخ یک سازه شامل سه نوع خاک و تحت ۱۶ زمین لرزه دور گسل بررسی نمودند. روش بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها برای به دست آوردن بهترین تنظیمات برای مقادیر TMD استفاده شده و هدف کاهش حداکثر دررفت سازه با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه بود. در این پژوهش اثرات TMD بر پاسخ جابه‌جایی و شتاب سازه و همچنین تأثیر آن بر دررفت مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که طراحی بهینه منجر به کاهش قابل توجهی در دررفت سازه شده که سود استفاده از دستگاه TMD را افزایش داد [۲۰].

در این مقاله اثر میراگر TMD بر کاهش پاسخ‌های یک پل یکپارچه چهار دهانه که تحت چندین زلزله بزرگ دنیا قرار گرفته است، مورد بررسی قرار می‌گیرد و روش‌های محاسبه پارامترهای میراگر و تأثیر آن بر عملکرد میراگر با یکدیگر مقایسه می‌گردد. به طور کلی پژوهش‌های انجام شده در زمینه استفاده از TMD را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم‌بندی کرد: دسته اول مقالاتی که برای محاسبه پارامترهای میراگر، از روابط و معادلات بهینه ارائه شده در پژوهش‌های گذشته استفاده نموده‌اند و دسته دوم مقالاتی که از روش‌های بهینه‌سازی برای محاسبه پارامترهای میراگر بهره جسته‌اند. در پژوهش حاضر برای محاسبه پارامترهای میراگر، هم روابط ارائه شده در پژوهش‌های پیشین و هم روش بهینه‌سازی به طور همزمان برای

$$\alpha_{opt} = \frac{1}{1+\mu}, \quad \xi_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \quad (3)$$

با توجه به رابطه (۳) مقادیر جرم، میرایی و سختی بهینه میراگر به صورت زیر بیان می‌شود که در این روابط  $f_s$  نشان دهنده فرکانس سازه اصلی می‌باشد و بقیه پارامترها پیش از این تعریف شده است:

$$C_{opt} = 4\pi\xi_{opt}\alpha_{opt}f_sM_{TMD} \quad (4)$$

$$M_{TMD} = \mu M_s, \quad K_{opt} = 4\pi^2\alpha_{opt}^2f_s^2M_{TMD},$$

## ۲-۲- روش سادک و همکاران

بر اساس روابط کلاسیک ارائه شده توسط دن هارتوگ، سادک و همکاران در سال ۱۹۹۷ با استفاده از روش برازش منحنی، روابط زیر را برای سازه تک درجه آزادی با در نظر گرفتن اثر میرایی ارائه دادند [۲۲]:

$$\alpha_{opt} = \frac{1}{1+\mu} \left[ 1 - \beta \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \right], \quad \xi_{opt} = \frac{\beta}{1+\mu} + \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \quad (5)$$

که در این دو رابطه  $\beta$  نسبت میرایی سازه می‌باشد. همچنین در ادامه سادک و همکاران مقادیر بهینه TMD را برای سازه چند درجه آزادی دارای میرایی که به نحو مناسبی پاسخ‌های سازه تحت زلزله را کاهش می‌دهد، به صورت زیر ارائه دادند. لازم به توضیح است که در این روابط،  $\phi$  تغییر شکل مود اول سازه به ازای مکانی که TMD در آن قرار دارد، می‌باشد.

$$\alpha_{opt} = \frac{1}{1+\mu\phi} \left[ 1 - \beta \sqrt{\frac{\mu\phi}{1+\mu\phi}} \right], \quad \xi_{opt} = \phi \left[ \frac{\beta}{1+\mu} + \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \right] \quad (6)$$

بدین ترتیب پس از محاسبه مقادیر  $\alpha_{opt}$  و  $\xi_{opt}$  که در روابط ۶ بیان شد، می‌توان مقدار جرم، میرایی و سختی TMD را با استفاده از روابط ۴ محاسبه نمود.

به منظور کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها، مطالعات مختلفی بر روی بهینه‌سازی پارامترهای TMD ( $\alpha$  و  $\xi$ ) برای نسبت داده شده  $i$  صورت پذیرفته است. با در نظر گرفتن جرم TMD برابر با درصدی از جرم کلی سازه و روابط دینامیک سازه‌ها می‌توان میرایی و سختی TMD را با استفاده از روابط زیر محاسبه نمود.

$$M_{TMD} = \mu M_s, \quad K_{TMD} = M_{TMD} \omega_{TMD}^2, \quad (7)$$

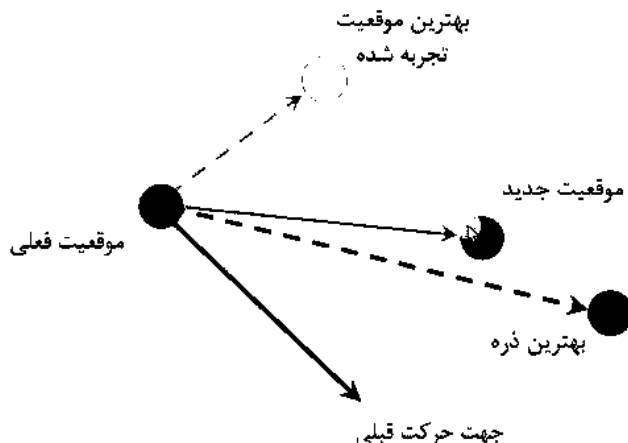
$$C_{TMD} = 2\xi M_{TMD} \omega_{TMD}$$

در روابط فوق،  $\omega_{TMD}$ ،  $M_{TMD}$ ،  $K_{TMD}$  و  $C_{TMD}$  به ترتیب فرکانس، جرم، سختی و میرایی مربوط به میراگر و  $M_s$  و  $\omega_s$  جرم و فرکانس سازه اصلی می‌باشد.

مطالعات زیادی در مورد پارامترهای بهینه TMD انجام شده است. یکی از مهم‌ترین و پایه‌ترین روش‌ها، روش پیشنهادی دن هارتوگ می‌باشد که برای به دست آوردن پارامترهای TMD در یک سازه تک درجه آزادی ارائه شده است. پس از آن پژوهش‌های دیگری روابط دن هارتوگ را برای سازه‌های چند درجه آزادی ارتقا دادند که یکی از آن‌ها روش پیشنهادی سادک و همکاران می‌باشد. در ادامه به توضیح مختصر این دو روش پرداخته می‌شود.

## ۲-۱- روش دن هارتوگ

یکی از اصلی‌ترین و پایه‌ترین روش‌ها برای محاسبه پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شونده، روش دن هارتوگ می‌باشد. دن هارتوگ برای حالت ساده سیستم سازه‌ای نامیرا ( $C=0$ ) و وقتی که تحت تاثیر یک تحریک سینوسی با فرکانس  $\omega$  باشد، بسط پایه‌ای ارائه داد که با دنبال نمودن آن می‌توان یکی از مزیت‌های TMD در کاهش پاسخ لرزه‌ای را به دست آورد. در این روند، اثر دینامیکی یک TMD در مقایسه با تغییر مکان استاتیکی حاصل از حداکثر نیروی اعمالی استاتیکی به سازه اندازه گرفته می‌شود. بدین ترتیب دو پارامتر  $\alpha$  و  $\xi$  که به ترتیب، نسبت فرکانس TMD به فرکانس سازه و نسبت میرایی میراگر در حالت بهینه برای به دست آوردن پارامترهای TMD است، با استفاده از روش دن هارتوگ به صورت زیر معرفی می‌شود [۲۱].



شکل ۲. بردارهای تعیین کننده جهت مسیر حرکت ذره‌ها در الگوریتم PSO

Fig. 2. Vectors that determine the direction of particles movement in PSO algorithm

به خود، جابه‌جا می‌شوند. جابه‌جایی گروه ذرات با توجه به بهترین موقعیتی که هر ذره تجربه کرده و بهترین وضعیتی که کل گروه بدان دست یافته است، صورت می‌پذیرد و ذرات تلاش می‌نمایند در بهترین موقعیت واقع در همسایگی خود قرار گیرند. بدین ترتیب هر ذره بر سایر ذره‌ها اثر می‌گذارد و کل گروه به سمت نقاط بهینه پیشروی می‌نماید. اولین مقدار بهترین موقعیتی است که آن ذره تاکنون داشته است  $pbest$  و دومین مقدار، بهترین موقعیتی است که تا به حال توسط کل ذره‌های اجتماع به دست آمده است و بهترین  $pbest$  در کل گروه  $gbest$  می‌باشد. این فرایند تا زمانی که نتیجه مطلوب حاصل گردد (یعنی سرعت پرندگان به سمت صفر میل نماید) و یا این که به حداکثر تعداد تکرار در نظر گرفته شده برای الگوریتم PSO برسیم، تکرار می‌گردد. با توجه به مقادیر  $pbest$  و  $gbest$ ، هر پرنده از روابط زیر برای تعیین موقعیت بعدی استفاده می‌نماید.

$$v_{i,j}(t+1) = wv_{i,j}(t) + c_1r_{1,j}(t)(pbest_{i,j}(t) - x_{i,j}(t)) + c_2r_{2,j}(t)(gbest_{i,j}(t) - x_{i,j}(t)) \quad (7)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (8)$$

همانطور که در مقدمه بیان شد، علاوه بر روش‌های کلاسیک، برای محاسبه پارامترهای میراگر می‌توان از روش‌های بهینه‌سازی نیز استفاده نمود. در ادامه ضمن معرفی روش بهینه‌سازی PSOPC که یکی از روش‌های پرکاربرد بهینه‌سازی، از آن برای محاسبه پارامترهای میراگر استفاده شده و با دو روش کلاسیک اشاره شده در بخش پیش مقایسه می‌گردد.

### ۳- استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSOPC برای محاسبه پارامترهای TMD

همانطور که اشاره شد، یکی دیگر از روش‌هایی که برای محاسبه پارامترهای میراگر می‌توان استفاده نمود، روش بهینه‌سازی است. در این پژوهش از الگوریتم بهینه‌سازی  $PSOPC^1$  که الگوریتم ارتقا یافته‌ای از الگوریتم  $PSO^2$  می‌باشد، استفاده شده است. الگوریتم بهینه‌سازی PSO، از جمله ساده‌ترین، پرکاربردترین الگوریتم‌هایی است که از دقت همگرایی خوبی برخوردار است و به وفور در مسائل بهینه‌سازی استفاده می‌گردد. از جمله مزایای این الگوریتم می‌توان به سرعت همگرایی بالا، انعطاف‌پذیری در برابر حل مشکل بهینه محلی و همچنین راحتی پیاده‌سازی و اجرا اشاره کرد. این الگوریتم شیوه‌ای آماری و مبتنی بر جمعیت بوده که از هوش موجود در حرکت گروهی پرندگان و ماهی‌ها، الهام گرفته شده است. در این روش، هر یک از کاندیداهای پاسخ مسئله، ذره‌ای دارای موقعیت و سرعت انگاشته می‌شود. این ذرات بدون کنترل مرکزی، در فضای جستجو با سرعت مختص

1 Passive Congregation based PSO

2 Particle Swarm Optimization

جدول ۱. تعریف مسئله بهینه‌سازی

Table 1. Definition of the optimization problem

Find : $M_{TMD}, K_{TMD}, C_{TMD}$
Minimize :
$f(M_{TMD}, K_{TMD}, C_{TMD}) = \max( x_{mid} )$
$f(M_{TMD}, K_{TMD}, C_{TMD}) = \max( \ddot{x}_{mid} )$
$f(M_{TMD}, K_{TMD}, C_{TMD}) = \max( Base\ shear )$
Subject to :
$M_{TMD, min} \leq M_{TMD} \leq M_{TMD, max}$
$K_{TMD, min} \leq K_{TMD} \leq K_{TMD, max}$
$C_{TMD, min} \leq C_{TMD} \leq C_{TMD, max}$

جرم  $M_{TMD, max}$  و  $M_{TMD, min}$  مقدار برش پایه پل؛  $K_{TMD, max}$  و  $K_{TMD, min}$  سختی حداقل و حداکثر،  $C_{TMD, max}$  و  $C_{TMD, min}$  میرایی حداقل و حداکثر در مسئله بهینه‌سازی می‌باشد.

در این مقاله برای استفاده از الگوریتم PSOPC، مقدار جمعیت N و حداکثر تعداد تکرار  $I_{max}$  به ترتیب ۳۰ و ۱۵۰ انتخاب شده است. قابل ذکر است مقادیر انتخاب شده به صورتی است که هم دقت و هم سرعت همگرایی برای مسئله حفظ گردد.

۴- مدل‌سازی پل یکپارچه مجهز به TMD و مشخصات تحلیل

پل مورد بررسی در این پژوهش یک پل یکپارچه چهار دهانه با طول ۱۸۰ متر می‌باشد. طراحی اولیه این پل بر اساس آیین‌نامه طراحی پل AASHTO به روش LRFD می‌باشد [۲۵]. پل یکپارچه، پلی است که در طول آن درز انبساطی وجود ندارد و همچنین اتصال عرشه به پایه‌ها و کوله‌ها صلب باشد. جزئیات سازه‌ای این پل در شکل ۳ نشان داده شده است. در پل مورد نظر، عرشه به صورت مقطع جدار نازک سلولی می‌باشد. روسازه آن به صورت یک تیر پیوسته چند دهانه و زیر سازه به صورت قاب خمشی با پایه‌های دو ستونی دایره‌ای بر زمین تکیه دارد. برای مدل‌سازی این پل از محیط برنامه‌نویسی OpenSees استفاده شده است. این پل در پژوهش‌های گذشته نیز مورد استفاده قرار گرفته است [۲۱ و ۲۰]. بتن مورد استفاده در این پل به صورت درجا با مقاومت فشاری ۳۵ مگاپاسکال و

ثابت‌های  $c_1$  و  $c_2$  در روابط بالا پارامترهای یادگیری (میزان تأثیر) را برای  $gbest$  و  $pbest$  تعیین می‌کنند و معمولاً برابر با ۲ انتخاب می‌شوند و  $r_1$  و  $r_2$  اعدادی تصادفی در محدوده [۰ و ۱] هستند.  $x_{i,j}(t)$  موقعیت کنونی،  $v_{i,j}(t)$  سرعت حرکت ذره‌ها در آن مرحله می‌باشد. W پارامتری است که لختی حرکت ذرات را کنترل می‌نماید و از رابطه (۹) محاسبه می‌گردد.

$$\omega = \omega_{max} - \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{I_{max}} I \quad (9)$$

که در این رابطه  $I_{max}$  حداکثر تعداد تکرار و  $\omega_{max}$  و  $\omega_{min}$  بیشترین و کمترین مقدار  $\omega$  می‌باشند. PSO مبتنی بر جمعیت منفعل (PSOPC) که توسط او و همکاران [۲۳] پیشنهاد شده است، در مقایسه با الگوریتم PSO دقت بهتر و سرعت همگرایی بیشتری دارد. در PSOPC سرعت هر ذره به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

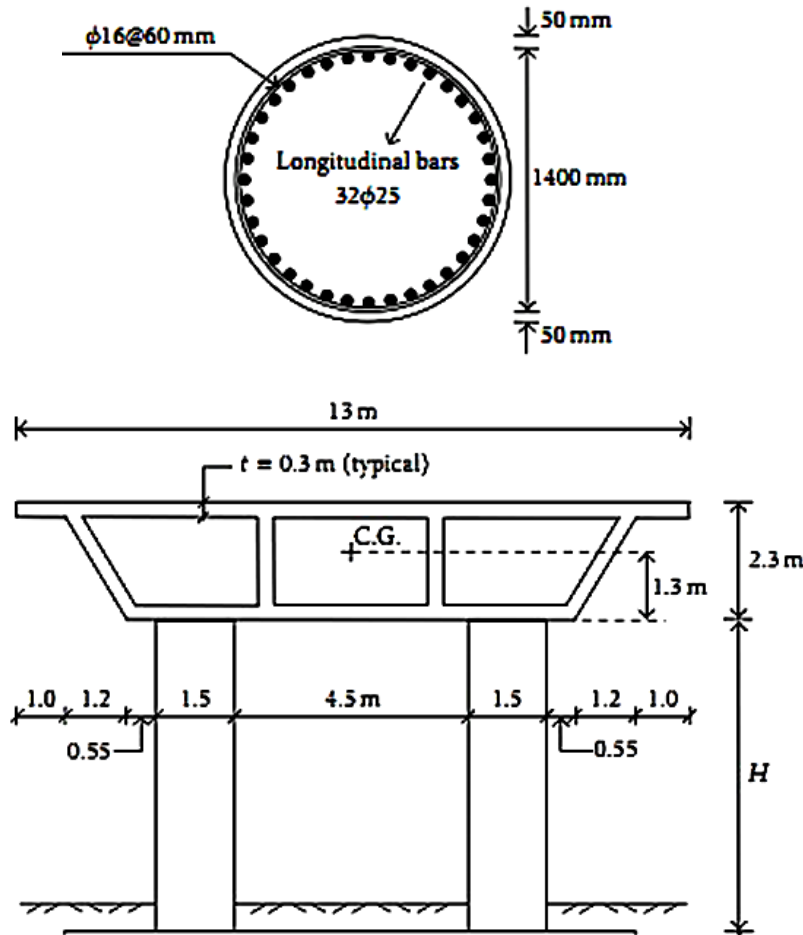
$$v_{i,j}(t+1) = wv_{i,j}(t) + c_1r_{1,j}(t)(pbest_{i,j}(t) - x_{i,j}(t)) + c_2r_{2,j}(t)(gbest_{i,j}(t) - x_{i,j}(t)) + c_3r_{3,j}(t)(R_i(t) - x_{i,j}(t)) \quad (10)$$

که  $R_i$  ذره‌ای است که به طور تصادفی از گروه انتخاب شده است.  $c_3$  ضریب جماعت منفعل است و  $r_3$  یک عدد تصادفی یکنواخت در محدوده [۰ و ۱] می‌باشد. در این پژوهش به جهت افزایش سرعت همگرایی از الگوریتم PSO بهبود یافته یا PSOPC استفاده شده است [۲۴].

برای محاسبه پارامترهای TMD با استفاده از روش بهینه‌سازی PSOPC، سه تابع هدف حداقل نمودن بیشینه جابه‌جایی و شتاب گره میانی عرشه و بیشینه برش پایه به صورت مجزا در نظر گرفته شده است (۳ بهینه‌سازی تک هدفه). بر این اساس مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر تعریف می‌گردد:

در روابط جدول ۱،  $M_{TMD}, K_{TMD}, C_{TMD}$  به ترتیب جرم، سختی و میرایی TMD؛  $x_{mid}$  و  $\dot{x}_{mid}$  جابه‌جایی و شتاب گره میانی عرشه؛



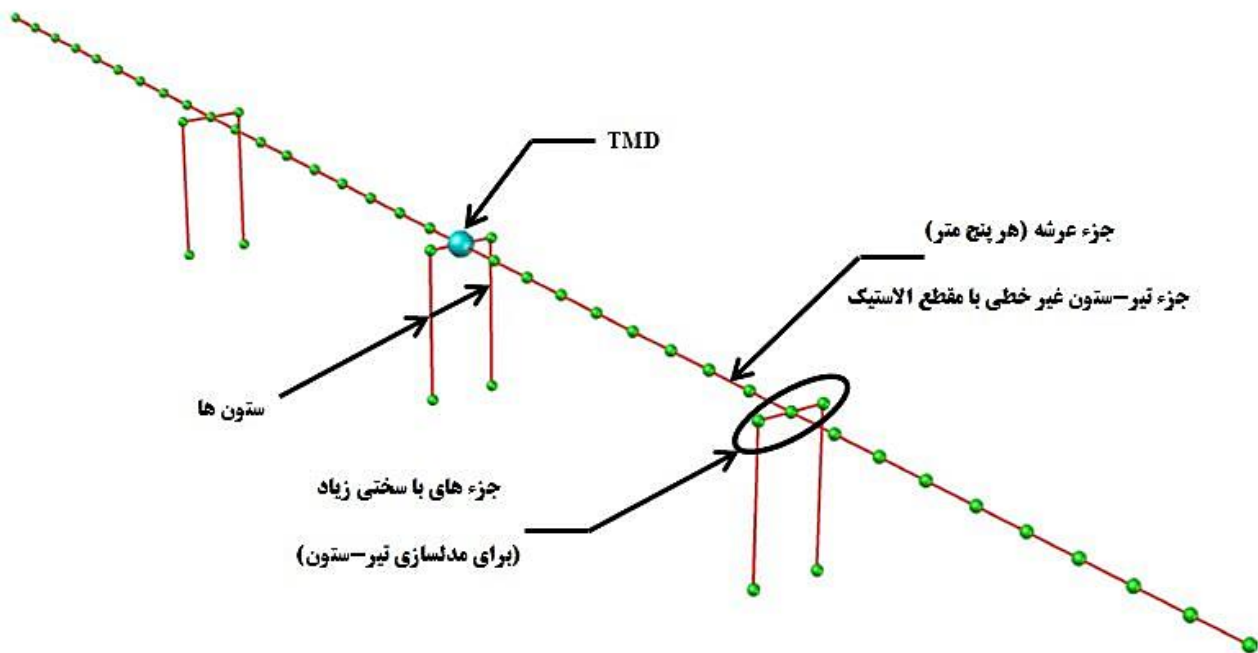


شکل ۳. جزئیات مقطع عرشه و پایه‌ها [۲۰ و ۲۱]

Fig. 3. Details of the deck section and piers

بتن محصور شده برای هسته، بتن محصور نشده برای بتن پوششی و فولاد برای میلگردها می‌باشد، الگوسازی گردیده است. همانطور که بیان شد یک TMD شامل جرم، میرایی و سختی می‌باشد. برای مدل‌سازی سیستم TMD، یک گره اضافی در عرشه پل و در محل قرارگیری TMD تعریف گردیده و جرم میراگر به آن اختصاص داده می‌شود. سپس این گره به گره متناظر آن در عرشه به وسیله المان با طول صفر (zeroLength) متصل می‌گردد. چرخش و جابه‌جایی این جرم با چرخش و جابه‌جایی گره عرشه برابر بوده و سختی سیستم میراگر به المان با طول صفر اختصاص داده می‌شود. همچنین میرایی این سیستم با مواد ویسکوز تعریف می‌گردد. همچنین میرایی این سیستم با مواد ویسکوز تعریف می‌گردد [۲۴]. نمای شماتیک پل به همراه میراگر بر روی آن در شکل ۴ نشان داده شده است.

مدول یانگ ۲۸ گیگاپاسکال می‌باشد. مدول الاستیسیته میلگردهای فولادی برابر ۲۰۰ گیگاپاسکال و تنش تسلیم آن‌ها ۴۵۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. جرم کلی پل شامل روسازه، سرستون و نصف جرم پایه‌ها برابر ۵۰۱۰۰ کیلو نیوتن می‌باشد که جرم هر المان بین دو گره ابتدایی و انتهایی تقسیم می‌شود. اولویت اول در تحلیل پل، الاستیک ماندن روسازه و منتقل شدن تغییر شکل‌های غیرالاستیک به پایه‌هاست، بنابراین در مدل‌سازی، عرشه پل با جزء‌های تیر-ستون غیرخطی به طول ۵ متر با استفاده از جزء nonlinearBeamColumn در نرم‌افزار Opensees مدل‌سازی شده است. با توجه به اینکه در طراحی پل‌ها ترجیح داده می‌شود روسازه الاستیک باقی بماند، بیشتر تغییر شکل‌های غیرالاستیک به پایه‌های پل که نرم‌تر می‌باشند، منتقل می‌شود. از این رو، پایه‌های پل به صورت عضوهای تیر ستون غیرالاستیک در نظر گرفته شده و با استفاده از جزء nonlin-earBeamColumn در نرم‌افزار با مقطع فایبری که شامل سه مصالح



شکل ۴. نمای شماتیک پل یکپارچه به همراه میراگر نصب شده بر روی آن

Fig. 4. Schematic diagram of the integral bridge with TMD

توصیف زلزله مناسب تر می باشد [۲۷]. بنابراین انتخاب رکوردهای زلزله با مقدهارهای متنوع PGV/PGA در برگیرنده دامنه وسیعی از نیاز لرزه‌ای خواهد بود.

بدین ترتیب با معرفی روش‌های محاسبه پارامترهای میراگر و همچنین زلزله‌های مورد استفاده برای تحلیل لرزه‌ای پل، می‌توان تحلیل پل را آغاز نمود. مطابق با نمودار جریان در شکل ۵، فرآیند تحلیل بر اساس آنچه بیان شد قابل مشاهده می‌باشد. لازم است که ابتدا پارامترهای میراگر با استفاده از سه روش معرفی شده محاسبه گردد. سپس ضمن مقایسه این پارامترها در هر روش، سیستم میراگر به ازای هر کدام از آن‌ها بر روی پل قرار داده شده و پل تحت اثر رکوردهای جدول ۲ در نرم‌افزار OpenSees تحلیل دینامیکی غیرخطی می‌گردد. مقادیر بیشینه جابه‌جایی گره میانی عرشه، بیشینه شتاب گره میانی عرشه و بیشینه برش پایه پل در حالت پل با میراگر و بدون میراگر مقایسه می‌شود. با استفاده از این مقادیر می‌توان بهترین روش برای محاسبه پارامترهای میراگر را انتخاب نمود.

برای تحلیل لرزه‌ای پل و بررسی عملکرد سیستم TMD بر روی آن هفت زلزله از میان زلزله‌های بزرگ دنیا انتخاب شده است. مشخصات این زمین لرزه‌ها در جدول زیر ارائه شده است. در این پژوهش به منظور بررسی عملکرد سیستم TMD بر روی پل یکپارچه در زلزله طرح، شتاب‌نگاشت‌ها با استفاده از طیف آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران ابتدا مقیاس شده و سپس این زلزله‌ها به  $g/4$  که ملاکی از زلزله‌های شدید می‌باشد، همپایه شده است [۲۵]. همچنین به دلیل حساس‌تر بودن پل به تحریک زلزله در راستای عرضی نسبت به راستاهای طولی و قائم، زلزله‌ها در جهت عرضی پل بر آن اعمال می‌شوند [۲۶].

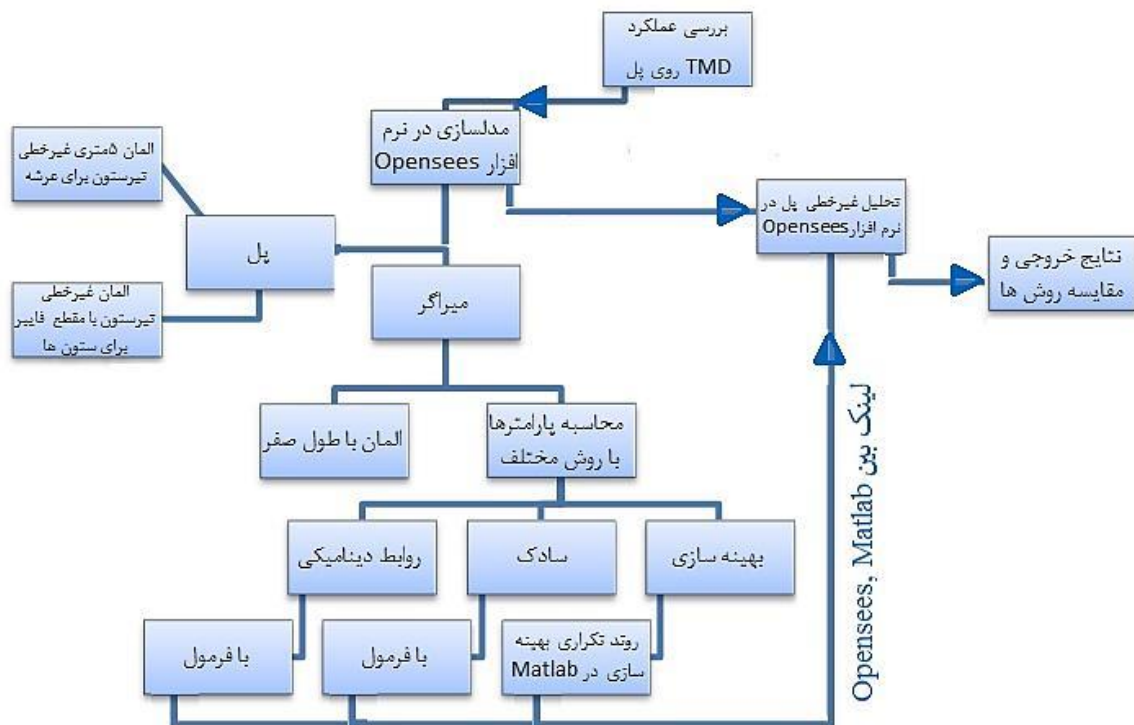
رکوردهای انتخاب شده برای زلزله ورودی از پایگاه داده‌های PEER و برای زلزله‌های با بزرگی بین  $6/4$  و  $7/4$  و نیز میانگین فاصله از مرکز زلزله  $11/9$  کیلومتر انتخاب شده‌اند. این رکوردها به گونه‌ای گزینش شده‌اند که بازه وسیعی از پارامترهای تاثیرگذار در محتوای فرکانسی زلزله را پوشش دهند. برای این منظور از نسبت PGV/PGA استفاده شده که به عنوان معیاری کمی از محتوای فرکانسی و انرژی زلزله به شمار می‌رود و برای



جدول ۲. مشخصات زلزله‌های وارد بر پل

Table 2. Characteristics of earthquakes applied on the bridge

زلزله	سال	ایستگاه - مولفه زلزله	PGA(g)	PGV(cm/s)	PGV/PGA(ms)
Iwate,Japan	۲۰۰۸	IWT010—NS	۰/۲۲۳	۲۱/۹	۱۰۰
Kobe,Japan	۱۹۹۵	Nishi-Akashi—NS	۰/۵۰۳	۳۶/۹	۷۵
LomaPrieta,USA	۱۹۸۹	13- BRAN—NS	۰/۵۰۱	۴۴/۰	۹۰
Northridge,USA	۱۹۹۴	24087—NS	۰/۳۴۴	۴۷/۷	۱۴۱
Shizuoka,Japan	۲۰۰۹	SZO014—NS	۰/۳۱۴	۱۸/۹	۶۱
Shizuoka,Japan	۲۰۱۱	SZO011—NS	۰/۵۱۱	۳۵/۲	۷۰
Tabas,Iran	۱۹۷۹	9101-Tabas—NS	۰/۸۵۲	۱۱۸/۹	۱۴۲



شکل ۵. نمودار جریان روند انجام تحلیل

Fig. 5. Flowchart of the analysis procedure

## ۵- تحلیل عددی و نتایج

### ۵-۱- بهینه‌سازی پارامترهای TMD

به جهت بررسی عملکرد سیستم TMD بر روی پل ابتدا لازم است که مناسب‌ترین محل قرارگیری TMD بر روی پل مشخص گردد. معمولاً TMD در محلی قرار می‌گیرد که بیشترین جابه‌جایی دینامیکی را داشته باشد [۲۸]. با توجه به اینکه بیشترین جابه‌جایی و شتاب در عرشه پل در میانه پل وجود دارد، بهتر است که میراگر در آن محل قرار داده شود. بنابراین محل قرارگیری TMD بر روی پل برای تمامی تحلیل‌ها گره میانی عرشه انتخاب گردید. بعد از مشخص شدن محل قرارگیری TMD لازم است که پارامترهای آن شامل جرم، میرایی و سختی محاسبه شده و در تحلیل مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به پژوهش‌های گذشته، مقدار جرم TMD می‌تواند بین ۱ تا ۱۰ درصد جرم کل سازه باشد که هر چه مقدار جرم بیشتر باشد عملکرد TMD بهتر خواهد بود [۲۹]. در این پژوهش، با توجه به وزن زیاد پل، حداکثر وزن TMD به ۵ درصد وزن پل محدود شده است تا اجرایی بودن آن در واقعیت امکان‌پذیر باشد. سایر پارامترها با سه روش مختلف شامل روابط دینامیک سازه‌ها (رابطه (۴))، سادک و همکاران (رابطه‌های (۶) و (۸)) و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSOPC (جدول ۱) محاسبه می‌گردد. لازم به ذکر است که در روش PSOPC، مقادیر سختی به بازه ۴۱۱۱ و ۱۱۵۷۶۷ (kN/m) و همچنین مقادیر میرایی به بازه ۹/۱۹ و ۱۰۰۰ (kN.s/m) محدود شده است. این کران‌ها در روش PSOPC با استفاده از رابطه‌های (۱۱) محاسبه شده است. بر این اساس مقادیر جرم، سختی و میرایی به دست آمده برای TMD در روش‌های مختلف در جدول ۳ آورده شده است. شکل‌های ۶ تا ۸ نیز توزیع این مقادیر را در سه روش ذکر شده به ازای زلزله‌های بیان شده در جدول ۲ نشان می‌دهد.

$$K_{TMD} = M_{TMD} \omega^2, \quad C_{TMD} = 2\xi M_{TMD} \omega \quad (11)$$

قابل ذکر است که در روش‌های کلاسیک (روابط دینامیکی - سادک و همکاران) روابط برای محاسبه جرم، میرایی و سختی به زلزله وابسته نبوده و برای همه زلزله‌ها به صورت یکسان محاسبه می‌شود و مستقل از زلزله می‌باشد. در مقابل، در روش بهینه‌سازی مقادیر پارامترهای میراگر با توجه به هر رکورد با استفاده از روند بهینه‌سازی محاسبه می‌شود و مقادیر پارامترها در روش بهینه‌سازی در توابع هدف مختلف متغیر است. بنابراین انتخاب تابع هدف در مقادیر این پارامترها تاثیرگذار خواهد بود. نمودارهای ۶ و ۷ و ۸ به

ترتیب توزیع مقادیر جرم، سختی و میرایی به دست آمده در جدول ۳، در روش‌های کلاسیک و بهینه‌سازی نسبت به یکدیگر نشان می‌دهند.

مطابق با شکل ۶، همان‌گونه که پیش‌تر نیز بیان شد، در روش‌های کلاسیک مقدار جرم، ثابت و برابر ۵ درصد جرم کل سازه در نظر گرفته شده و مقدار آن برای زلزله‌های مختلف ثابت می‌باشد اما در روش بهینه‌سازی به دلیل محدود کردن جرم به مقدار ۵ درصد جرم کل سازه، تمامی جرم‌های به دست آمده در این روش کمتر از این مقدار به دست آمده است.

شکل ۷ توزیع سختی را در روش‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، عموماً در روش بهینه‌سازی سختی بیشتر از روش‌های کلاسیک محاسبه و پیشنهاد شده است.

با توجه به شکل ۸، مقادیر میرایی در روش‌های کلاسیک نسبت به روش بهینه‌سازی بیشتر در نظر گرفته شده است. همانطور که در هر سه شکل ۶، ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، انتخاب تابع هدف در مقادیر پارامترها مهم است. این امر نشان می‌دهد که باید در انتخاب تابع هدف در بهینه‌سازی دقت نمود زیرا مقدار پارامترهای TMD به طور مستقیم در کنترل پاسخ لرزه‌ای پل تاثیر می‌گذارد و تابع‌های هدف مختلف، مقادیر متفاوتی را به تحلیل‌گر پیشنهاد می‌دهند. در این شکل‌ها مقدار سختی و میرایی در روش سادک از روش معادلات دینامیک کمتر به دست آمده است که به دلیل استفاده از ضریب  $\alpha$  و  $\xi$  در روش سادک و همکاران می‌باشد که مقدار هر دو کمتر از ۱ است.

### ۵-۲- نتایج تحلیل پل در حالت با میراگر و بدون میراگر

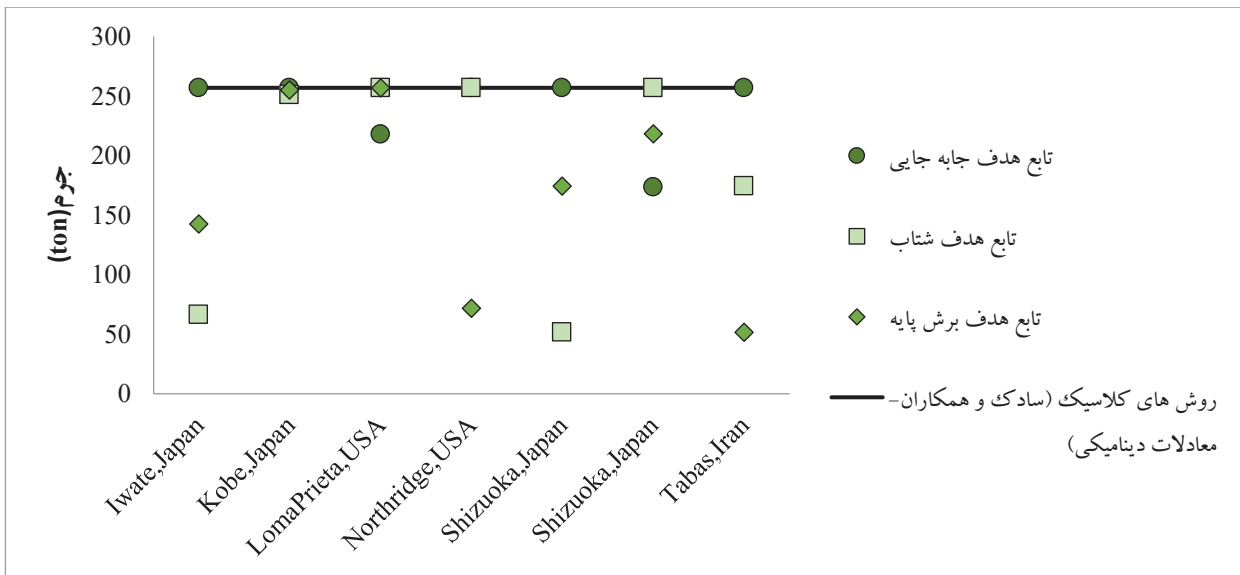
با توجه به نتایج پارامترهای بهینه به دست آمده در بند قبل، تحلیل پل بدون میراگر و با میراگر برای ۷ رکورد زلزله انجام شده و نتایج تحلیل به صورت مقایسه جابه‌جایی و شتاب گره میانه عرشه و همچنین برش پایه پل در روش‌های مختلف به صورت زیر در جدول ۴ و برای ۷ رکورد زلزله انتخابی ارائه می‌شود.

قابل ذکر است که در روش بهینه‌سازی، ابتدا بهینه‌سازی تحت سه تابع هدف مختلف برای هر زلزله به صورت جداگانه انجام پذیرفته است. سپس با استفاده از مقادیر به دست آمده برای پارامترهای TMD، پاسخ تحلیل غیرخطی پل مجهز به TMD با حالت بدون TMD مقایسه شده است. نتایج بیان شده در جدول ۴ که به ترتیب برای مقدار جابه‌جایی گره میانه عرشه، شتاب گره میانی عرشه و برش پایه در حالت بدون میراگر و حالت با میراگر در روش‌های مختلف است، در شکل‌های زیر نیز نشان داده می‌شود. از این شکل‌ها به راحتی برای مقایسه روش‌های مختلف می‌توان استفاده نمود.

جدول ۳. جرم، سختی و میرایی به دست آمده میراگر در روش‌های مختلف

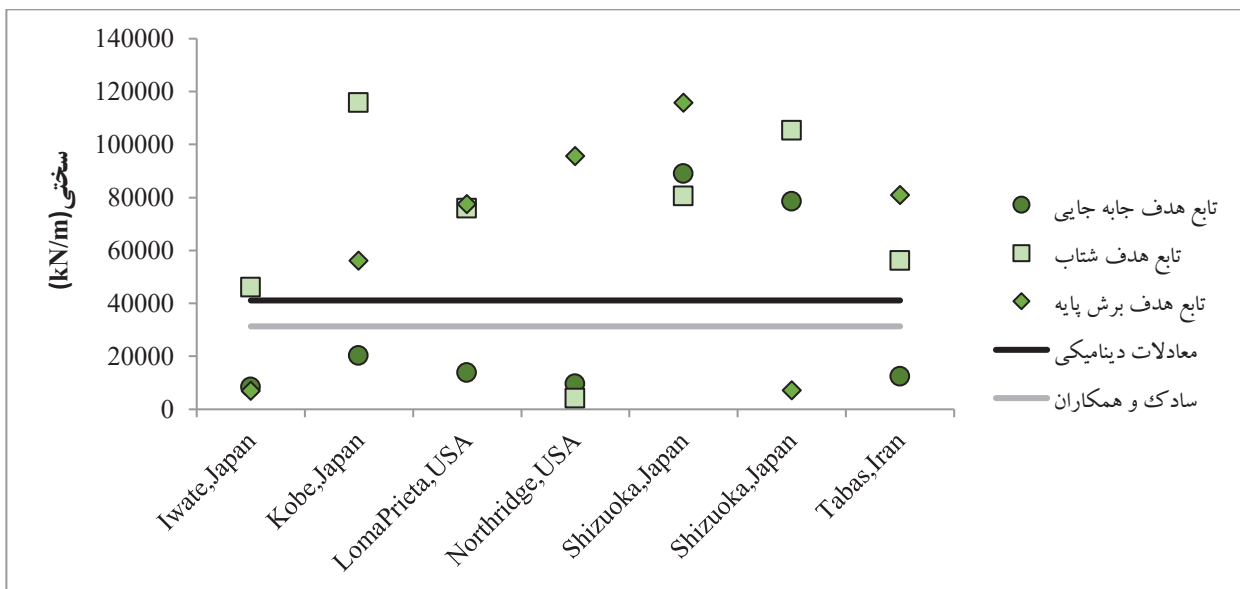
Table 3. The mass, stiffness and damping of TMD in different methods

زلزله	پارامترها (جرم، سختی، میرایی)	روش کلاسیک			روش بهینه‌سازی	
		معادلات دینامیکی	سادک و همکاران	تابع هدف جابه‌جایی	تابع هدف شتاب	تابع هدف برش پایه
<b>Iwate, Japan</b>	m (ton)	۲۵۶/۹	۲۵۶/۹	۲۵۶/۷	۶۶/۲	۱۴۲/۳
	k (kN/m)	۴۱۱۱۷	۳۱۳۳۶	۸۴۳۶	۴۶۰۸۸	۶۹۵۱
	c (kN.s/m)	۴۵۹/۶	۳۵۰/۷	۱۶۱/۳	۳۲۷/۲	۱۰/۴
<b>Kobe, Japan</b>	m (ton)	۲۵۶/۹	۲۵۶/۹	۲۵۶/۹	۲۵۱/۰	۲۵۱/۱
	k (kN/m)	۴۱۱۱۷	۳۱۳۳۶	۲۰۲۵۱	۱۱۵۷۶۱	۵۶۱۴۷
	c (kN.s/m)	۴۵۹/۶	۳۵۰/۷	۱۸۱/۸	۱۱۰/۳	۱۰۹/۲
<b>LomaPrieta, USA</b>	m (ton)	۲۵۶/۹	۲۵۶/۹	۲۱۷/۸	۲۵۶/۹	۲۵۶/۹
	k (kN/m)	۴۱۱۱۷	۳۱۳۳۶	۱۳۷۴۴	۷۵۸۶۲	۷۷۴۷۱
	c (kN.s/m)	۴۵۹/۶	۳۵۰/۷	۲۰/۲	۱۹۰/۷	۹/۲
<b>Northridge, USA</b>	m (ton)	۲۵۶/۹	۲۵۶/۹	۲۵۶/۹	۲۵۶/۷	۷۱/۵
	k (kN/m)	۴۱۱۱۷	۳۱۳۳۶	۹۶۵۰	۴۱۱۲	۹۵۵۸۰
	c (kN.s/m)	۴۵۹/۶	۳۵۰/۷	۹/۲	۸۲۵/۴	۲۴۵/۸
<b>Shizuoka, Japan</b>	m (ton)	۲۵۶/۹	۲۵۶/۹	۲۵۶/۹	۵۱/۶	۱۴۷/۱
	k (kN/m)	۴۱۱۱۷	۳۱۳۳۶	۸۸۹۱۰	۸۰۴۶۲	۱۱۵۷۶۷
	c (kN.s/m)	۴۵۹/۶	۳۵۰/۷	۳۷۴/۸	۵۰۰/۵	۹/۲
<b>Shizuoka, Japan</b>	m (ton)	۲۵۶/۹	۲۵۶/۹	۱۷۳/۷	۲۵۶/۹	۲۱۸/۲
	k (kN/m)	۴۱۱۱۷	۳۱۳۳۶	۷۸۴۳۸	۱۰۵۲۴۵	۷۲۲۳
	c (kN.s/m)	۴۵۹/۶	۳۵۰/۷	۹/۲	۱۹۹/۷	۲۲۸/۵
<b>Tabas, Iran</b>	m (ton)	۲۵۶/۹	۲۵۶/۹	۲۵۶/۹	۱۷۴/۱	۵۱/۴
	k (kN/m)	۴۱۱۱۷	۳۱۳۳۶	۱۲۴۴۹	۵۶۲۰۰	۸۰۹۰۳
	c (kN.s/m)	۴۵۹/۶	۳۵۰/۷	۳۱۶/۵	۵۳۷/۳	۹/۲



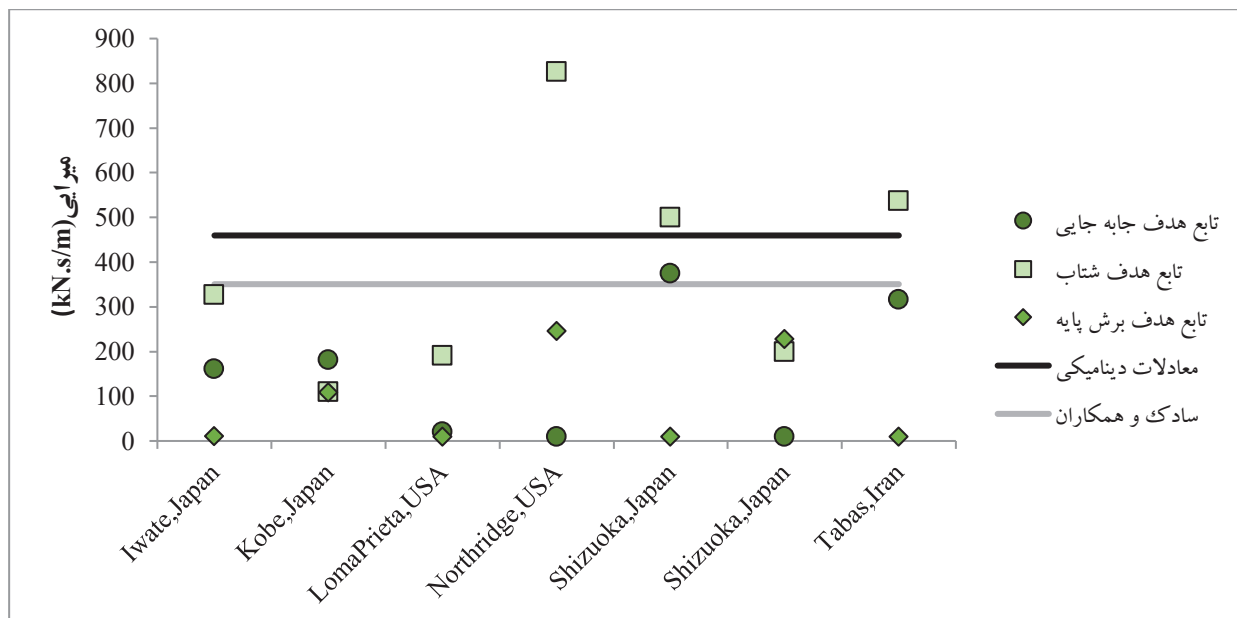
شکل ۶. مقادیر جرم TMD در روش‌های کلاسیک و بهینه‌سازی در زلزله‌های مختلف

Fig. 6. Mass values of TMD in classic and optimization methods in different earthquakes



شکل ۷. مقادیر سختی TMD در روش‌های کلاسیک و بهینه‌سازی در زلزله‌های مختلف

Fig. 7. Stiffness values of TMD in classic and optimization methods in different earthquakes



شکل ۸. مقادیر میرایی TMD در روش کلاسیک و بهینه‌سازی در زلزله‌های مختلف

Fig. 8. Damping values of TMD in classic and optimization methods in different earthquakes

برش پایه پل ندارد و نتایج در روش‌های کلاسیک و بهینه‌سازی مشابه است. نمودار نشان می‌دهد که انتخاب تابع هدف نیز تاثیری بر مقدار کاهش برش پایه نداشته و به طور کلی میراگر اثری بر برش پایه پل ندارد.

برای مقایسه بهتر نتایج، میانگین درصد کاهش جابه‌جایی و شتاب گره میانی عرشه و برش پایه پل برای ۷ زلزله مذکور در روش‌های کلاسیک و روش بهینه‌سازی در جدول ذیل بیان شده است. این جدول به طور کلی خلاصه‌ای از نتایج تحلیل‌های انجام شده را نشان می‌دهد. همانطور که پیش از این نشان داده شد و در جدول زیر نیز آمده است، میراگر جرمی تنظیم شونده اثری بر کاهش برش پایه پل نداشته و بیشترین مقدار تاثیر آن بر کاهش شتاب گره میانی عرشه می‌باشد. قابل ذکر است که بیشترین مقدار کاهش پاسخ در روش‌های بهینه‌سازی و تابع هدف متناظر با پاسخ مورد نظر اتفاق افتاده است.

با توجه به شکل ۹، بیشترین مقدار کاهش جابه‌جایی نسبت به حالت بدون میراگر در همه زلزله‌ها مربوط به روش بهینه‌سازی با تابع هدف متناظر با پاسخ جابه‌جایی می‌باشد. علاوه بر آن، در برخی از زلزله‌ها در حالت کنترل شده با میراگر نسبت به حالت کنترل نشده، مقدار جابه‌جایی افزایش یافته، که این موارد در استفاده از روش‌های کلاسیک رخ داده است.

شکل ۱۰ نشان دهنده مقدار شتاب در گره میانی عرشه در حالت بدون میراگر و با میراگر می‌باشد. این شکل نشان می‌دهد که شتاب در همه روش‌ها مقدار آن نسبت به حالت بدون میراگر کمتر می‌باشد. بنابراین استفاده از میراگر در هر صورت سبب کاهش شتاب گره میانی عرشه می‌گردد.

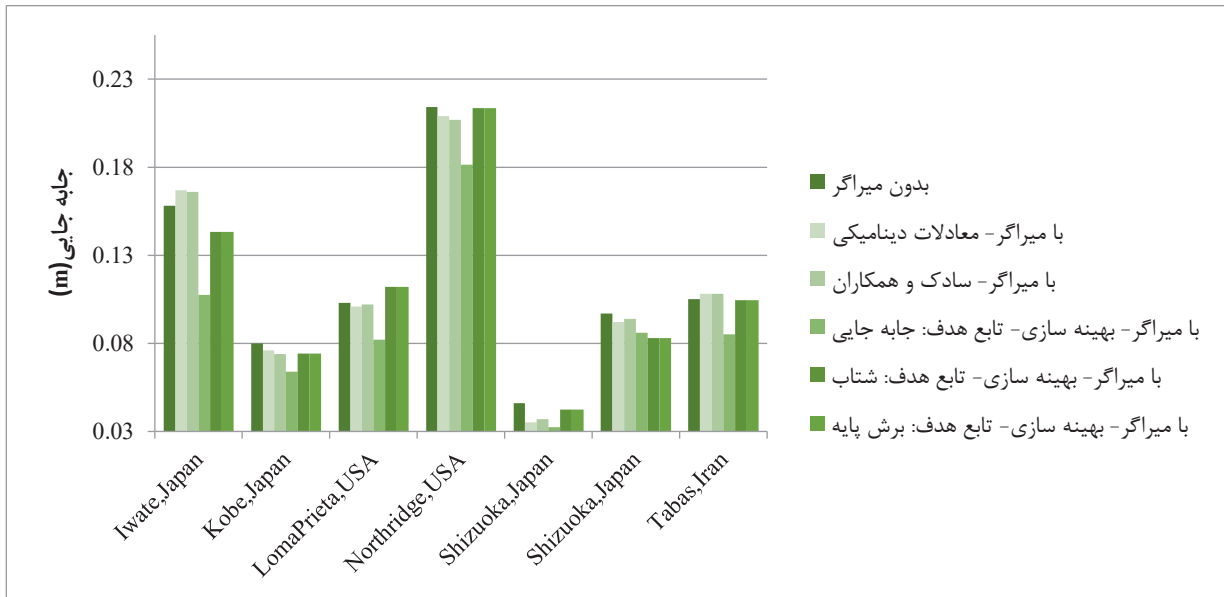
به طور کلی شکل ۱۱ که نمودار برش پایه پل را نشان می‌دهد، میراگر در زلزله‌های مختلف اثر قابل ملاحظه‌ای در کاهش برش پایه پل ندارد. با توجه به شکل، در کلیه روش‌ها میراگر کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقدار

جدول ۴. بیشینه پاسخ جابه‌جایی، شتاب و برش پایه برای پل کنترل شده و کنترل نشده در روش‌های مختلف

Table 4. Maximum displacement, acceleration and base shear for controlled and uncontrolled bridge in different methods

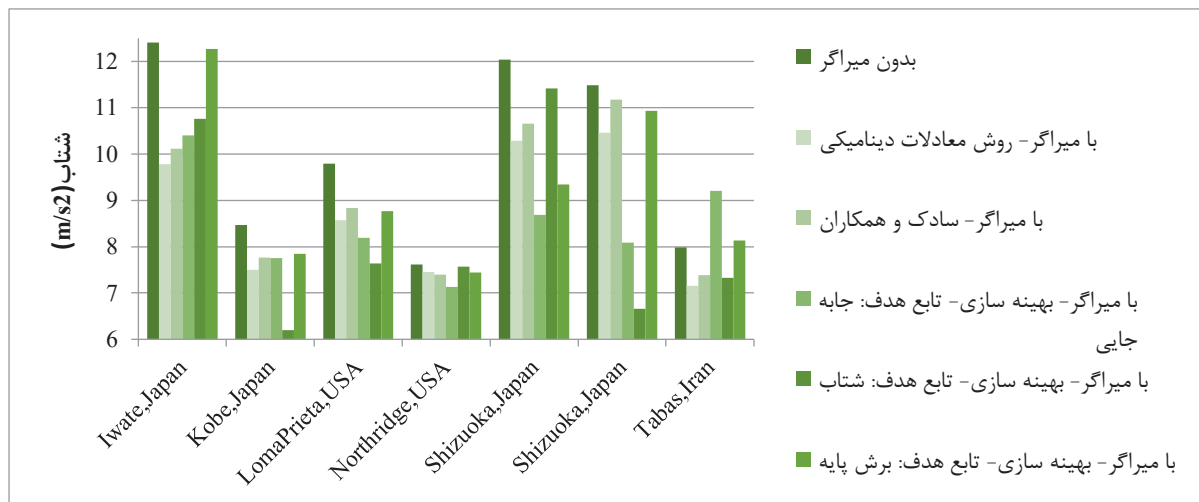
زلزله	روش	حداکثر تغییر مکان (m)			حداکثر شتاب (m/s <sup>2</sup> )			حداکثر برش پایه (kN)		
		بدون میراگر	با میراگر	درصد کاهش	بدون میراگر	با میراگر	درصد کاهش	بدون میراگر	با میراگر	درصد کاهش
Iwate	معادلات دینامیکی	۰/۱۵۳	۰/۱۶۲	-۵/۹	۱۱/۹	۹/۲۸	۲۲	۷۵۸۹	۷۵۴۲	۰/۶
	سادک و همکاران	۰/۱۵۳	۰/۱۶۱	-۵/۲	۱۱/۹	۹/۶۱	۱۹/۲	۷۵۸۹	۷۵۴۲	۰/۶
	تابع هدف جابه‌جایی	۰/۱۵۳	۰/۱۰۳	۳۲/۹	۱۱/۹	۹/۹	۱۶/۸	۷۵۸۹	۷۴۱۱	۲/۳
	تابع هدف شتاب	۰/۱۵۳	۰/۱۵۵	-۱/۳	۱۱/۹	۱۰/۲۶	۱۳/۸	۷۵۸۹	۷۵۷۰	۰/۲
	تابع هدف برش	۰/۱۵۳	۰/۱۳۸	۹/۶	۱۱/۹	۱۱/۷۷	۱/۱	۷۵۸۹	۷۳۱۵	۳/۶
Kobe	معادلات دینامیکی	۰/۰۷۵	۰/۰۷۱	۵/۳	۷/۹۷	۷	۱۲/۲	۷۲۲۷	۷۲۲۰	۰/۱
	سادک و همکاران	۰/۰۷۵	۰/۰۶۹	۸	۷/۹۷	۷/۲۶	۸/۹	۷۲۲۷	۷۲۱۰	۰/۲
	تابع هدف جابه‌جایی	۰/۰۷۵	۰/۰۵۹	۲۱/۶	۷/۹۷	۷/۲۶	۸/۹	۷۲۲۷	۶۸۵۶	۵/۱
	تابع هدف شتاب	۰/۰۷۵	۰/۰۷۸	-۴/۵	۷/۹۷	۵/۷	۲۸/۵	۷۲۲۷	۷۳۰۷	-۱/۱
	تابع هدف برش	۰/۰۷۵	۰/۰۶۹	۷/۶	۷/۹۷	۷/۳۵	۷/۸	۷۲۲۷	۷۰۵۵	۲/۴
Loma Prieta	معادلات دینامیکی	۰/۰۹۸	۰/۰۹۶	۲	۹/۲۹	۸/۰۷	۱۳/۱	۷۶۲۰	۷۴۹۵	۱/۶
	سادک و همکاران	۰/۰۹۸	۰/۰۹۷	۱	۹/۲۹	۸/۳۴	۱۰/۲	۷۶۲۰	۷۴۸۲	۱/۸
	تابع هدف جابه‌جایی	۰/۰۹۸	۰/۰۷۷	۲۱/۳	۹/۲۹	۷/۶۹	۱۷/۲	۷۶۲۰	۷۲۳۱	۵/۱
	تابع هدف شتاب	۰/۰۹۸	۰/۱۰۲	-۳/۷	۹/۲۹	۷/۱۴	۲۳/۱	۷۶۲۰	۷۴۴۸	۲/۳
	تابع هدف برش	۰/۰۹۸	۰/۱۰۷	-۹/۲	۹/۲۹	۸/۲۷	۱۱	۷۶۲۰	۷۳۸۳	۳/۱
North ridge	معادلات دینامیکی	۰/۲۰۹	۰/۲۰۴	۲/۴	۷/۱۲	۶/۹۵	۲/۴	۷۶۳۷	۷۶۴۹	-۰/۲
	سادک و همکاران	۰/۲۰۹	۰/۲۰۲	۳/۳	۷/۱۲	۶/۹۰	۳/۱	۷۶۳۷	۷۶۴۶	-۰/۱
	تابع هدف جابه‌جایی	۰/۲۰۹	۰/۱۷۷	۱۵/۶	۷/۱۲	۶/۶۳	۶/۸	۷۶۳۷	۷۶۷۴	-۰/۵
	تابع هدف شتاب	۰/۲۰۹	۰/۱۹۵	۶/۶	۷/۱۲	۷/۰۷	۰/۷	۷۶۳۷	۷۶۷۸	-۰/۷
	تابع هدف برش	۰/۲۰۹	۰/۲۰۹	۰/۲	۷/۱۲	۶/۹۴	۲/۵	۷۶۳۷	۷۶۳۰	۰/۱
Shizuoka 2009	معادلات دینامیکی	۰/۰۴۱	۰/۰۳۰	۲۶/۸	۱۱/۵۳	۹/۷۹	۱۵/۱	۵۵۹۹	۵۱۱۳	۸/۷
	سادک و همکاران	۰/۰۴۱	۰/۰۳۲	۲۲	۱۱/۵۳	۱۰/۱۶	۱۱/۹	۵۵۹۹	۵۳۹۹	۳/۶
	تابع هدف جابه‌جایی	۰/۰۴۱	۰/۰۲۷	۳۳/۴	۱۱/۵۳	۸/۱۸	۲۹/۱	۵۵۹۹	۵۳۶۹	۴/۱
	تابع هدف شتاب	۰/۰۴۱	۰/۰۳۹	۳/۹	۱۱/۵۳	۱۰/۹۱	۵/۴	۵۵۹۹	۵۵۱۶	۱/۵
	تابع هدف برش	۰/۰۴۱	۰/۰۳۷	۸/۸	۱۱/۵۳	۸/۸۴	۲۳/۴	۵۵۹۹	۴۶۵۳	۱۶/۹
Shizuoka 2011	معادلات دینامیکی	۰/۰۹۲	۰/۰۸۷	۵/۴	۱۰/۹۹	۹/۹۶	۹/۴	۷۳۵۶	۷۳۷۹	-۰/۳
	سادک و همکاران	۰/۰۹۲	۰/۰۸۹	۳/۳	۱۰/۹۹	۱۰/۶۸	۲/۸	۷۳۵۶	۷۴۱۴	-۰/۸
	تابع هدف جابه‌جایی	۰/۰۹۲	۰/۰۸۱	۱۱/۸	۱۰/۹۹	۷/۵۹	۳۰/۹	۷۳۵۶	۷۳۷۵	-۰/۳
	تابع هدف شتاب	۰/۰۹۲	۰/۰۸۸	۴/۵	۱۰/۹۹	۶/۱۶	۴۳/۹	۷۳۵۶	۷۳۲۵	۰/۴
	تابع هدف برش	۰/۰۹۲	۰/۰۷۸	۱۵/۳	۱۰/۹۹	۱۰/۴۴	۵	۷۳۵۶	۷۰۵۶	۴/۱
Tabas	معادلات دینامیکی	۰/۱	۰/۱۰۳	-۳	۷/۴۸	۶/۶۶	۱۱	۷۳۷۵	۷۴۸۷	-۱/۵
	سادک و همکاران	۰/۱	۰/۱۰۳	-۳	۷/۴۸	۶/۸۹	۷/۹	۷۳۷۵	۷۴۷۲	-۱/۳
	تابع هدف جابه‌جایی	۰/۱	۰/۰۸	۱۹/۸	۷/۴۸	۸/۷۱	-۱۶/۴	۷۳۷۵	۷۳۰۳	۱
	تابع هدف شتاب	۰/۱	۰/۰۹۹	۱/۴	۷/۴۸	۶/۸۳	۸/۷	۷۳۷۵	۷۴۶۴	-۱/۲
	تابع هدف برش	۰/۱	۰/۰۹۹	۰/۶	۷/۴۸	۷/۶۳	-۲/۱	۷۳۷۵	۷۳۹۳	-۰/۲





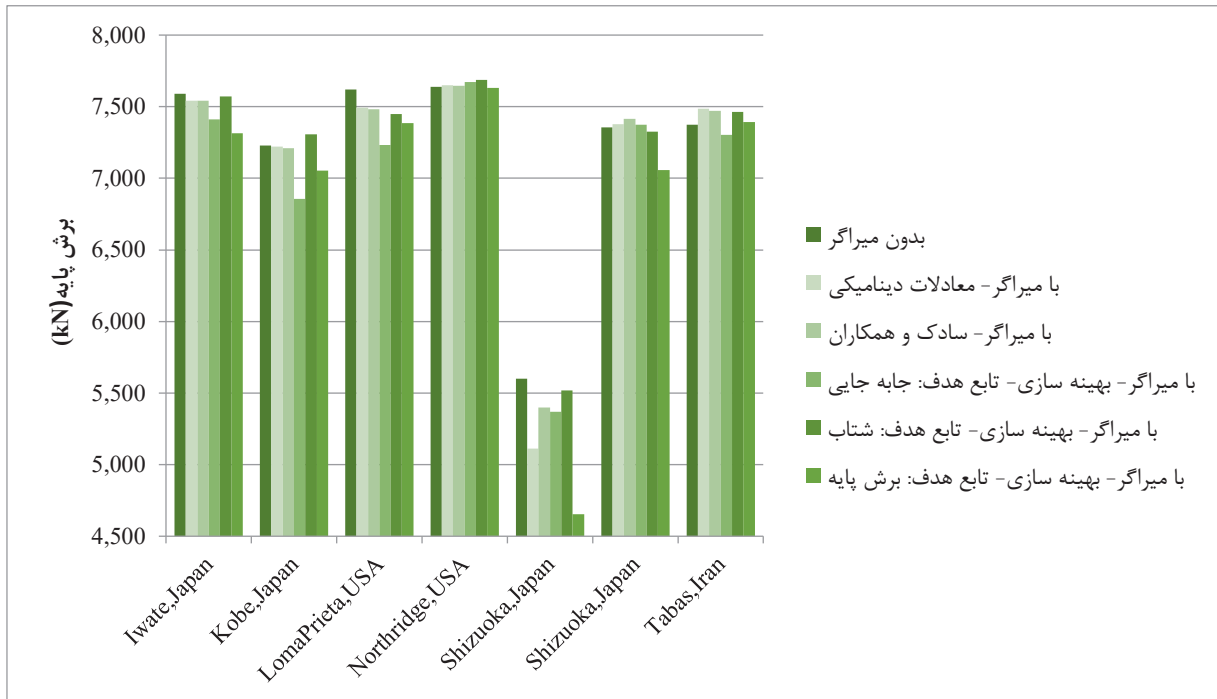
شکل ۹. نمودار جابه‌جایی گره میانی عرشه در حالت با و بدون TMD در ۷ زلزله با استفاده از روش‌های کلاسیک و بهینه‌سازی

Fig. 9. Displacement of the deck midpoint in controlled and uncontrolled bridge under the 7 earthquakes, in classic and optimization methods



شکل ۱۰. نمودار شتاب گره میانی عرشه در حالت با و بدون TMD در ۷ زلزله با استفاده از روش‌های کلاسیک و بهینه‌سازی

Fig.10. Acceleration of the deck midpoint in controlled and uncontrolled bridge under the 7 earthquakes, in classic and optimization methods



شکل ۱۱. نمودار برش پایه پل در حالت با و بدون TMD در ۷ زلزله با استفاده از روش‌های کلاسیک و بهینه‌سازی

Fig. 11. Base shear of the controlled and uncontrolled bridge under the 7 earthquakes, in classic and optimization methods

## ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش عملکرد میراگر TMD بر روی یک پل یکپارچه چهار دهانه مورد بررسی قرار گرفت. روش‌های مختلفی برای به دست آوردن پارامترهای TMD وجود دارد که در این مطالعه از روش‌های کلاسیک که شامل روابط دینامیک سازه‌ها و روش سادک و همکاران می‌باشد و همچنین روش الگوریتم بهینه‌سازی PSOPC استفاده شد و پارامترهای میراگر با استفاده از این روش‌ها به دست آمد. برای تحلیل، هفت رکورد زلزله از میان بزرگ‌ترین زلزله‌های دنیا انتخاب شده و به  $0.4g$  همپایه شدند و در جهت عرضی پل بر روی آن اعمال گردیدند. سپس پل مورد نظر در حالت کنترل شده با TMD و حالت کنترل نشده تحت این زلزله‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. در این پژوهش از نرم‌افزار OpenSees برای مدل‌سازی پل و از نرم‌افزار Matlab برای برنامه‌نویسی روش بهینه‌سازی استفاده شده است. در استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی، سه تابع هدف کمینه کردن بیشینه جابه‌جایی و بیشینه شتاب گره میانی عرشه و بیشینه برش پایه پل در نظر گرفته شده است. علاوه بر مقایسه پاسخ‌های لرزه‌ای پل در روش‌های

کلاسیک و بهینه‌سازی برای محاسبه پارامترهای TMD، مقایسه‌ای بین سه تابع هدف الگوریتم بهینه‌سازی، صورت گرفته است. نتایج کلی تحلیل به صورت زیر بیان می‌شود:

- با توجه به پاسخ‌های عددی، به طور کلی استفاده از میراگر TMD در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای پل موثر می‌باشد. این کاهش‌ها تا ۲۳ درصد دیده شد که بیشترین مقدار کاهش مربوط به جابه‌جایی گره میانی عرشه پل در روش بهینه‌سازی می‌باشد.
- در روش‌های کلاسیک، بیشترین مقدار کاهش پاسخ، در مقدار شتاب رخ می‌دهد. بنابراین میراگری که بر اساس روش کلاسیک طراحی می‌شود، برای کاهش مقدار شتاب گره میانی عرشه عملکرد بهتری دارد. این مسئله با هدف آیین‌نامه‌ها که وظیفه اصلی میراگرها را کاهش شتاب ناشی از تحریک‌های دینامیکی می‌دانند، هم‌خوانی دارد.
- در بین سه روش بیان شده برای محاسبه پارامترهای میراگر (دو روش کلاسیک و یک روش بهینه‌سازی)، استفاده از روش بهینه‌سازی پارامترهای مناسب‌تری برای میراگر، به جهت کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای پل

## منابع

- [1] H. Frahm, Device for damping vibration bodies, US Patent No. 989/959, 1911.
- [2] J.P. Den Hartog, Mechanical vibrations, McGraw-Hill, 1956.
- [3] S. Ohno, Optimum tuning of the dynamic damper to control response of structures to earthquake ground motion, Proc. 6WCEE, 1977, (1977).
- [4] G.F.D. T. T. Soong Passive energy dissipation systems in structural engineering, John Wiley & Sons Chichester, 1997.
- [5] G. Warburton, Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 10(3) (1982) 381-401.
- [6] J.R. Sladek, R.E. Klingner, Effect of tuned-mass dampers on seismic response, Journal of Structural Engineering, 109(8) (1983) 2004-2009.
- [7] C.-L. Lee, Y.-T. Chen, L.-L. Chung, Y.-P. Wang, Optimal design theories and applications of tuned mass dampers, Engineering structures, 28(1) (2006) 43-53.
- [8] S. Bakre, R. Jangid, Optimum parameters of tuned mass damper for damped main system, Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures, 14(3) (2007) 448-470.
- [9] S. Pourzeynali, S. Salimi, H.E. Kalesar, Robust multi-objective optimization design of TMD control device to reduce tall building responses against earthquake excitations using genetic algorithms, Scientia Iranica, 20(2) (2013) 207-221.
- [10] L.F. Miguel, R.H. Lopez, A.J. Torii, L.F. Miguel, A.T. Beck, Robust design optimization of TMDs in vehicle-bridge coupled vibration problems, Engineering Structures, 126 (2016) 703-711.

محاسبه می‌نماید. بیشترین مقادیر کاهش در روش‌های کلاسیک برای جابه‌جایی، شتاب و برش پایه به ترتیب در حدود  $۴/۷$ ،  $۱۲/۲$  و  $۱/۳$  درصد است که این مقادیر در روش‌های بهینه‌سازی، به ترتیب، برابر با  $۲۲/۴$ ،  $۱۷/۷$  و  $۴/۳$  درصد می‌باشد. روش استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSOPC به دلیل محاسبه پارامترها متناسب با هر زلزله در مقایسه با دو روش کلاسیک که یک مقدار ثابت برای جرم، میرایی و سختی برای همه زلزله‌ها در نظر می‌گیرند، مناسب‌تر بوده و بنابراین عملکرد بهتری برای TMD به همراه خواهد داشت.

• در روش استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSOPC چنانچه تابع هدف هر کدام از سه مقدار جابه‌جایی و شتاب میانی عرشه و برش پایه انتخاب گردد، در تحلیل پل بیشترین مقدار کاهش مربوط به پارامتر متناظر با تابع هدف می‌باشد. همچنین در این روش اگر تابع هدف، کمینه کردن جابه‌جایی گره میانی عرشه انتخاب گردد، TMD هر سه مقدار جابه‌جایی و شتاب میانی عرشه و برش پایه را در پل نسبت به دو تابع هدف دیگر به خوبی کاهش می‌دهد. این نتیجه نشان می‌دهد که بهینه‌سازی تک هدفه در شکل کنونی خود قادر نیست پاسخ‌های مختلف سازه‌ای را به طور قابل توجهی بهبود دهد و فقط بر روی کمیت تابع هدف کارکرد چشمگیر دارد.

## پیشنهادات برای پژوهش‌های آینده

در این پژوهش هنگامی که پارامترهای TMD به روش‌های سنتی و کلاسیک محاسبه می‌شود، میانگین درصد کاهش در پاسخ‌های لرزه‌ای پل برای زلزله‌های مقیاس شده به  $۰/۴$  g بررسی شد که ممکن است در شدت‌های دیگر نتایج متفاوتی داشته باشد. بنابراین عملکرد میراگر در شدت‌های دیگر نیازمند بررسی بیشتر می‌باشد. در این مورد نیاز به بررسی بیشتر برای زلزله‌های با شدت‌های مختلف وجود دارد تا اثر شدت برای دو روش کلاسیک بیان شده مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج برای شدت‌های دیگر نیز بررسی شود. همچنین همانطور که در نتایج بیان شد، در روش بهینه‌سازی انتخاب تابع هدف بر مقادیر پارامترهای میراگر تاثیر می‌گذارد. تعیین تابع هدفی که به طور همزمان مقادیر جابه‌جایی، شتاب و برش پایه پل را کاهش دهد و یا به صورت بهینه‌سازی چند هدفه به کار برده شود، نیازمند بررسی بیشتری می‌باشد. همچنین در این پژوهش نتایج برای یک میراگر بررسی شده است که این نتایج برای TMD چندگانه قابل بررسی خواهد بود.

- [20] S. Soheili, H. Zoka, M. Abachizadeh, Tuned mass dampers for the drift reduction of structures with soil effects using ant colony optimization, *Advances in Structural Engineering*, 24(4) (2021) 771-783.
- [21] T.T. Soong, G.F. Dargush, *Passive energy dissipation systems in structural engineering*, Wiley, 1997.
- [22] F. Sadek, B. Mohraz, A.W. Taylor, R.M. Chung, A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26(6) (1997) 617-636.
- [23] S. He, Q. Wu, J. Wen, J. Saunders, R. Paton, A particle swarm optimizer with passive congregation, *Biosystems*, 78(1) (2004) 135-147.
- [24] M.R. Shayesteh Bilondi, H. Yazdani, M. Khatibinia, Seismic energy dissipation-based optimum design of tuned mass dampers, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 58(6) (2018) 2517-2531.
- [25] E. Mohtashami, A. Shooshtari, A multimode adaptive pushover procedure for seismic assessment of integral bridges, *Advances in Civil Engineering*, 2013 (2013).
- [26] T. Isaković, M. Fischinger, Higher modes in simplified inelastic seismic analysis of single column bent viaducts, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 35(1) (2006) 95-114.
- [27] A.S. Elnashai, L. Di Sarno, *Fundamentals of earthquake engineering: from source to fragility*, John Wiley & Sons, 2015.
- [28] Z. Li, D. Li, Y. Lu, C. Tang, Analysis on vibration control of a large-span pedestrian suspension bridge based on a multiple tuned mass damper system, *Noise & Vibration Worldwide*, 50(2) (2019) 56-63.
- [29] R. Kamgar, M. Khatibinia, Optimization criteria for design of tuned mass dampers including soil-structure interaction effect, *Iran University of Science & Technology*, 9(2) (2019) 213-232.
- [11] W. Shi, L. Wang, Z. Lu, Q. Zhang, Application of an artificial fish swarm algorithm in an optimum tuned mass damper design for a pedestrian bridge, *Applied Sciences*, 8(2) (2018) 175.
- [12] Z. Chen, H. Fang, Z. Han, S. Sun, Influence of bridge-based designed TMD on running trains, *Journal of Vibration and Control*, 25(1) (2019) 182-193.
- [13] W. Shi, L. Wang, Z. Lu, H. Wang, Experimental and numerical study on adaptive-passive variable mass tuned mass damper, *Journal of Sound and Vibration*, 452 (2019) 97-111.
- [14] C. Wang, W. Shi, Optimal design and application of a multiple tuned mass damper system for an in-service footbridge, *Sustainability*, 11(10) (2019) 2801.
- [15] F. Ferreira, L. Simões, Optimum design of a controlled cable-stayed footbridge subject to a running event using semiactive and passive mass dampers, *Journal of performance of constructed facilities*, 33(3) (2019) 04019025.
- [16] X. Yin, G. Song, Y. Liu, Vibration suppression of wind/traffic/bridge coupled system using multiple pounding tuned mass dampers (MPTMD), *Sensors*, 19(5) (2019) 1133.
- [17] A. Bathaei, M. Ramezani, A.K. Ghorbani-Tanha, Vibration control of the College Bridge using tuned mass dampers, *Modares Civil Engineering journal*, 16(20) (2017) 21-32. (in persian).
- [18] F. Baiat, E. Daneshjoo, Performance Evaluation of Passive Tuned Mass Dampers For Reduction of Bridges Traffic Vibrations, *Modares Civil Engineering journal*, 16(4) (2016) 23-34. (in persian).
- [19] A. akhlagh pasand, a. fatollah pour, S.M. Zahrai, Comparing performance of TMD and MTMD vertically distributed in height for multi-modal seismic control of tall buildings, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(10) (2020) 2563-2582. (in persian).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*S. F. Labbafi, A. Shoostari, E. Mohtashami, Determination of Tuned Mass Damper Parameters and its performance in a Four-Span Integral Bridge, Amirkabir J. Civil Eng., 54(11) (2023) 4307-4326.*

**DOI:** [10.22060/ceej.2022.20692.7509](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.20692.7509)



