

بررسی عملکرد میراگر جرمی تنظیم‌شونده غیرفعال در کاهش ارتعاشات عرشه‌ی پل‌ها تحت عبور بار ترافیکی

الیاس بیات^۱، فرهاد دانشجو^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه سازه، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد، گروه سازه، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

danesh_fa@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۵/۳/۱۹]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۴/۹/۲۵]

چکیده- یکی از راه حل‌های اصلی و عمده برای کاهش میزان ارتعاشات قائم در پل‌ها استفاده از سیستم‌های کنترل است. سیستم‌های کنترل در حالت کلی به سه دسته غیرفعال، فعال و نیمه‌فعال تقسیم‌بندی می‌شوند. در این مطالعه، کاهش ارتعاشات قائم پل‌ها با استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده (Tuned Mass Damper) از دسته سیستم‌های کنترل غیرفعال بررسی شده است. از پارامترهای موثر بر عملکرد TMD ها در کاهش ارتعاشات قائم عرشه پل تحت بارگذاری‌های ترافیکی می‌توان به مشخصات دینامیکی TMD، محل نصب TMD و سرعت وسایل نقلیه عبوری اشاره کرد. در بخش اول از این مطالعه، ابتدا با ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترهای گفته شده، تاثیر جرم TMD بر عملکرد آن بررسی می‌شود، سپس در مراحل بعد تاثیر درصد میرایی و فرکانس تنظیمی آن، در کاهش ارتعاشات مقاطع مختلف پل و همچنین عملکرد TMD در محل‌های مختلف استقرار آن بررسی می‌شود. در بخش دوم، با تغییر سرعت وسایل نقلیه عبوری، عملکرد TMD در کاهش ارتعاشات قائم عرشه پل بررسی می‌شود.

نتایج نشان می‌دهند که جرم TMD در مقایسه با درصد میرایی آن، تاثیر بیشتری در کاهش ارتعاشات قائم دارد. همچنین TMD به فرکانس تنظیمی خود بسیار حساس می‌باشد، به گونه‌ای که با کمی انحراف از فرکانس تنظیمی خود، عملکرد آن کاهش می‌یابد. تاثیر TMD در سرعت‌های خاص و محل‌های قرارگیری خاصی مثبت و قابل توجه است و مهم‌ترین تاثیر آن، کاهش پاسخ سازه در مرحله ارتعاشات آزاد عرشه پل است. برای پل مورد نظر تحت بارگذاری ترافیکی مورد استفاده، بیشینه کاهش پاسخ دینامیکی عرشه پل همراه با TMD برای دامنه شتاب اجباری و آزاد عرشه پل، به ترتیب به میزان ۲۴٪ و ۵۹٪ و برای بیشینه کاهش و بیشینه جابه‌جایی عرشه پل ۱۳٪ به دست می‌آید، که این نتایج مربوط به زمانی است که در عرشه پل پدیده تشدید رخ می‌دهد.

واژگان کلیدی: میراگر جرمی تنظیم‌شونده، پل، ارتعاشات قائم، محل استقرار میراگر، مشخصات بارگذاری ترافیکی

۱- مقدمه

یکی از روش‌های کاهش ارتعاشات قائم عرشه پل، استفاده از سیستم‌های کنترل است. سیستم‌های کنترل می‌توانند با کاهش ارتعاشات قائم در پل، عمر بهره‌برداری، ایمنی و قابلیت استفاده از پل را افزایش دهند.

سیستم‌های کنترل ارتعاشات به طور کلی به سه دسته غیرفعال، فعال و نیمه‌فعال تقسیم‌بندی می‌شوند، که در این مطالعه از میراگر جرمی تنظیم‌شونده غیرفعال برای کاهش ارتعاشات قائم

عرشه پل تحت عبور بار ترافیکی، استفاده شده است. در این مطالعه با مدل‌سازی پل، وسیله نقلیه و TMD در نرم‌افزار CSI Bridge، عملکرد TMD با تغییر مشخصات دینامیکی (جرم، فرکانس طبیعی و درصد میرایی)، محل قرارگیری TMD در پل و همچنین بارهای ترافیکی با سرعت‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد، تا مشخص شود پارامترهای گفته شده به چه میزان در عملکرد TMD برای کاهش ارتعاشات قائم پل تاثیرگذار است.

۲- مروری بر تاریخچه پژوهشها

کتان و همکارانش، عملکرد TMD را روی یک پل پیاده‌رو که در معرض ارتعاشات قائم و جانبی بود، بررسی کردند. در این مطالعه رفتار دینامیکی پل هم به صورت تئوری و هم تحت آزمایش‌های میدانی، قبل و بعد از نصب TMD بررسی شد. آن‌ها در مطالعات تئوری از ۶ عدد TMD قائم و افقی استفاده کردند و پارامترهایی که مورد بحث قرار گرفت شامل انتخاب مودهای ارتعاشی که باید کنترل شوند، تاثیر خطاهای تنظیم مشخصات TMD ها بر عملکرد آن‌ها در کاهش ارتعاشات پل و مقایسه عملکرد TMD منفرد با حالت TMD چندگانه بود. نتایج نشان داد که تاثیر TMD ها در عمل کمتر از آن چیزی است که در تئوری به دست می‌آید که دلایل این موضوع را، وجود اصطکاک بین اعضای TMD و همچنین تقسیم جرم TMD به چند واحد جرم که در تئوری باید یکسان باشد اما در واقعیت متفاوت رفتار می‌کند، مرتبط دانستند [۲،۱].

لو و همکارانش، به بهینه‌سازی سیستم‌های TMD برای کاهش و کنترل هم‌زمان ارتعاشات قائم در چند مقطع از پل، تحت عبور بار قطار پرداختند. در آن مطالعه، تابع هدف براساس استراتژی طراحی کنترل مقاوم انتخاب شده است و همچنین روی پلهایی که از نظر استاتیکی نامعین است و تحت عبور قطار با سرعت بالا قرار دارند، انجام شده است. آن‌ها در آن مطالعه، یک پل دو دهانه را (با طول دهانه‌های یکسان)، با استفاده از ۴ عدد TMD، تحت عبور بار قطار بررسی کردند. نتایج نشان داد که بیشینه مقدار کاهش پاسخ دینامیکی قائم به دست آمده با استفاده از روش پیشنهاد شده، به میزان ۴۰،۴۵٪ بوده، در حالی که با سیستم‌های معادل با پارامترهای تعیین شده به وسیله‌ی روش دن‌هارتوگ، به میزان ۳۸،۲٪ بوده است. پس به این نتیجه رسیدند که این بهبود به خاطر در نظر گرفتن مشخصات میرایی سازه اصلی حاصل شده است [۳].

دومانسچی و همکاران، عملکرد سیستم‌های کنترل TMD را برای کاهش ارتعاشات دینامیکی ناشی از بادهای قوی، در یک پل معلق دو دهانه، با طول دهانه اصلی ۹۴۰ متر، همراه با عرشه فولادی را بررسی کردند. در آن مطالعه، از یک سیستم TMD با دو درجه آزادی در مدل کامل سه‌بعدی پل و در وسط دهانه

اصلی با اتصال به عرشه استفاده شده است. نتایج مربوط به استفاده از یک سیستم TMD در وسط دهانه اصلی نشان داد که این سیستم می‌تواند بیشینه جابه‌جایی قائم و ممان خمشی عرشه پل، در وسط دهانه اصلی را به ترتیب به میزان ۱۹٪ و ۱۷٪ و همچنین بیشینه نیروی برشی و ممان خمشی برج‌های پل را به ترتیب به میزان ۹،۵٪ و ۱۱٪ کاهش دهد [۴].

۳- روش بهینه‌سازی TMD

روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی TMD ها در سازه‌ها وجود دارند که در این پژوهش برای بهینه‌سازی پارامترهای TMD از روش دن‌هارتوگ استفاده شده است. زیرا در این روش مبنای معادلات به دست آمده بیشتر تئوری‌های دینامیک سازه است در حالی که در بعضی دیگر از روش‌های بهینه‌سازی، نتایج و فرمول‌های تجربی نقش تعیین‌کننده‌ای در به دست آوردن پارامترهای بهینه‌سازی دارند و از آنجایی که این نتایج تجربی، نتایج حاصل از پژوهش‌ها و مدل‌سازی سازه‌های ساختمانی و مدل‌های ساختمانی است، امکان آن می‌رود که پارامترهای به دست آمده از آن‌ها نتایج مطلوبی را برای مدل‌های پل به همراه نداشته باشد. همچنین در این روش از بارگذاری هارمونیکی استفاده شده است، که عبور بار متحرک از روی پل شباهت زیادی به اعمال نیم‌پریود از بار هارمونیکی معادلی را به پل دارد و به دلیل اینکه روابط دن‌هارتوگ نیز برای چنین بارگذاری به دست آمده‌اند، استفاده از آن‌ها می‌تواند پارامترهای بهینه‌تری را به دست آورد. تاثیر TMD در کاهش پاسخ سازه‌ای را می‌توان با بسط فرمول‌های دن‌هارتوگ در مورد سیستم‌های تک‌درجه آزادی نامیرا که تحت تحریک یک نیروی سینوسی با فرکانس ω قرار دارد، به دست آورد [۶،۵].

با توجه به شکل (۱)، c_2, k_2, m_2 به ترتیب جرم و سختی و میرایی TMD و k_1, m_1 به ترتیب جرم و سختی سازه اصلی است که TMD به آن متصل می‌شود. براساس روش دن‌هارتوگ پارامترهای بهینه TMD به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\alpha_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (۱)$$

$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} \quad (۲)$$

نتایج مرجع [۸] استفاده شده است. در نرم افزار مدل وسیله نقلیه به صورت نیروی متحرک روی پل در نظر گرفته می شود که در این روش پاسخ دینامیکی پل قابل محاسبه است ولی اندرکنش بین پل و وسیله نقلیه در نظر گرفته نمی شود.

۴-۱- موقعیت و مشخصات مدل پل

در این پژوهش برای انجام مطالعات پارامتری از پل قلعه مرغی تهران استفاده شده است. این پل دارای ۲۲۵ متر طول و دارای ۷ دهانه $(30+30)+(30+45+30)+(30+30)$ متری است که سه دهانه پیوسته وسط با درز انبساط از دهانه های مجاور جدا شده است و همچنین پل در قوس افقی به شعاع ۱۴۰ متری قرار گرفته است شکل (۲). سیستم عرشه ای این پل از تیرورق جعبه ای و بتن درجا تشکیل شده است. مشخصات مقطع شاه تیرها مطابق شکل (۳) است و شاه تیرها از فولاد ST37 ساخته شده اند. همچنین ضخامت دال بتنی عرشه ۲۵ سانتی متر با مقاومت مشخصه ۳۰ مگاپاسکال است. عرشه پل را چهار تیر ورق مرکب جعبه ای خمیده به عمق ۱/۸ متر و به فاصله ۴/۴ متری تشکیل می دهد. همچنین عرض این پل چهار خطه راه، ۱۸ متر است $(1/5+3/7+3/9+3/9+3/5+1/5)$. هر تیر در تکیه گاه ها روی نئوپرن های دایروی قرار گرفته است. نئوپرن های استفاده شده در پل قلعه مرغی از نوع نئوپرن های دایروی شرکت مگانو گومبا است، که در زیر هر شاه تیر از دو نئوپرن دایروی شکل استفاده شده است. در تکیه گاه اول و چهارم در زیر هر شاه تیر از نئوپرن $2\Phi 450 \times 114 \text{ mm}$ و در تکیه گاه دوم و سوم از نئوپرن $2\Phi 550 \times 54 \text{ mm}$ استفاده شده است [۷].

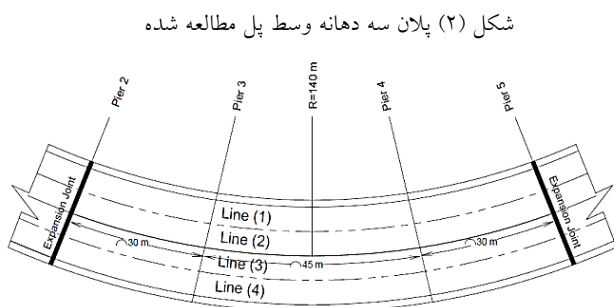


Fig. 2. Plan of three middle spans of the studied bridge

$$\alpha = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (3)$$

نسبت فرکانس TMD به فرکانس سازه

$$\mu = \frac{m_2}{m_1} \quad (4)$$

نسبت جرم TMD به جرم سازه

نسبت جرم TMD به جرم سازه (μ) باید به درستی انتخاب شود، زیرا مقادیر کوچک این نسبت باعث افزایش دامنه ارتعاشات TMD می شود و مقادیر بزرگ آن محدودیت اجرایی و اقتصادی دارد. با توجه به روابط (۱ الی ۴)، سختی و میرایی TMD را می توان از روابط زیر استخراج کرد:

$$k_2 = \omega_2^2 m_2 \quad (5)$$

$$c_2 = 2 m_2 \omega_2 \xi_{opt} \quad (6)$$

شکل (۱) سازه تک درجه آزادی نامیرا همراه با TMD تحت تحریک سینوسی [۶]

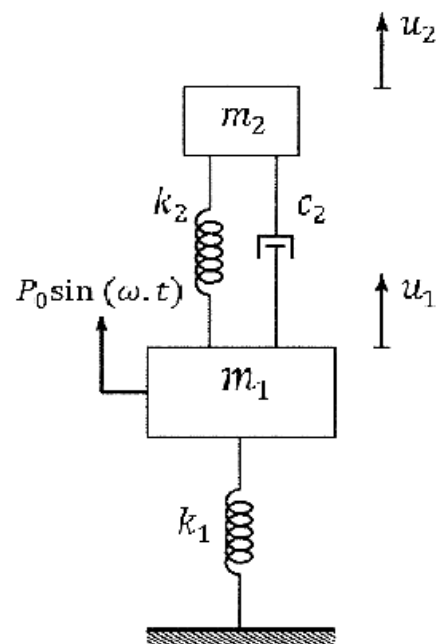


Fig. 1. Undamped single degrees of freedom system with TMD subjected to sinusoidal excitation[6]

۴- چگونگی مدل سازی در نرم افزار و مشخصات مدل پل

برای مدل سازی پل، وسیله نقلیه و TMD از نرم افزار مناسب و

شکل (۴) مدل سازی پل در نرم افزار و چگونگی نامگذاری مقاطع و

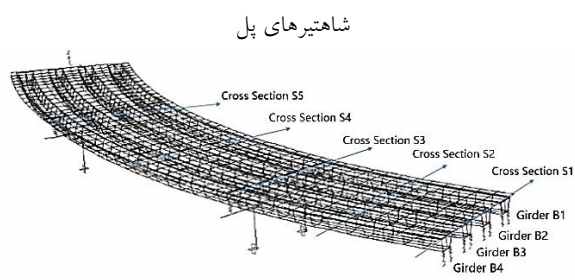


Fig. 4. Bridge modeling and naming of bridge sections and girders

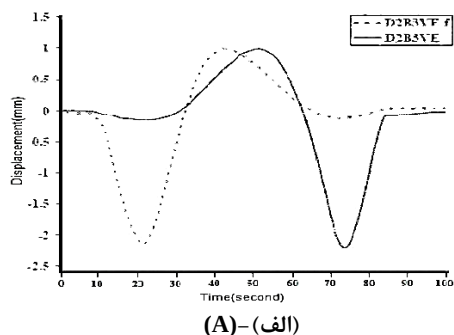
۴-۴- درستی آزمایشی مدل با آزمایش های میدانی

در برنامه آزمایش میدانی، بارگذاری های استاتیکی و دینامیکی به وسیله کامیون های ۲۸ تنی با چندین حالت بارگذاری انجام شده است. این کامیون ها دارای سه محور است که فاصله محور یک (جلو) با محور دو $3/2$ متر و فاصله محور دو با محور سه $1/38$ متر است. همچنین بار محورهای یک، دو و سه به ترتیب برابر با $5/6$ ، $11/2$ و $11/2$ تن است.

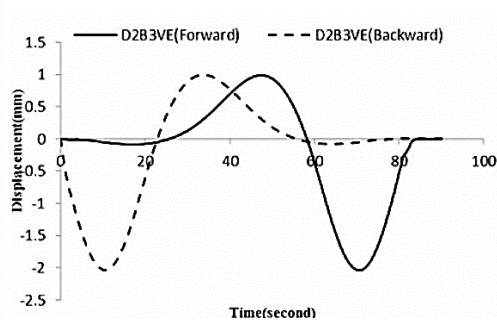
شکل (۵) نمودار تغییر مکان قائم خارجی تیر سوم در مقطع دوم در

آزمایش میدانی خط تاثیر (الف) نتایج حاصل از آزمایش میدانی [۷]

(ب) نتایج حاصل از مدل



(A) - (الف)



(B) - (ب)

Fig. 5. External vertical displacement of the third beam in the second section (influence line) (A) The results of the field test [7] (B) The results of the model

شکل (۳) مقطع شاه تیرهای پل مورد مطالعه

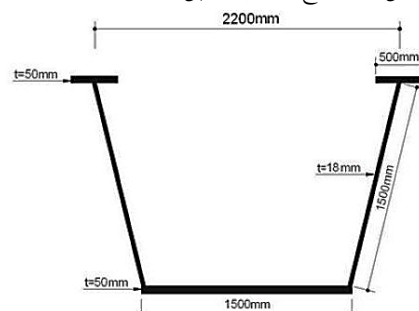


Fig. 3. Section of girders in the studied bridge

۴-۲- چگونگی مدل سازی پل و TMD در نرم افزار

در مدل ایجاد شده در نرم افزار، برای دال بتن آرمه و شاه تیرهای فلزی جعبه ای از المان پوسته استفاده شده و بال فوقانی شاه تیر به اندازه فاصله بین مرکز بال فوقانی تا مرکز دال بتن آرمه پایین آورده شده است. برای مدل سازی TMD از المان های پیوند خطی فنر و میراگر استفاده شده است و برای TMD از یک جرم استفاده شده است که به وسیله المان های فنر و میراگر به سازه پل وصل می شود و برای جلوگیری از حرکت های افقی و چرخشی TMD، با استفاده از قیدهایی، درجات آزادی غیر از جهت قائم، به محل نصب TMD مقید شده، به گونه ای که TMD فقط در جهت قائم می تواند حرکت کند. همچنین برای مدل سازی نشوین در نرم افزار از المان rubber isolater با مشخصات خطی المان استفاده شده است. نمایی از مدل سازی پل در شکل (۴) نشان داده شده است.

۴-۳- مشخصات و آرایش تجهیزات اندازه گیری آزمایش های

میدانی

اداره کل خط و سازه های فنی راه آهن ایران و سازمان مهندسی و عمران شهر تهران، آزمایش های بارگذاری میدانی روی پل قلعه مرغی را با هدف بررسی علل ارتعاشات ناخواسته، تشخیص مشکلات پل و پیرو شکایت ساکنان اطراف پل از لرزش واحدهای مسکونی در حین عبور وسایل نقلیه، انجام داده اند که در آزمایش ها رفتارسنجی، از ۱۰۲ حسگر استفاده شده است. در این آزمایش ها، شتاب به وجود آمده در ۳۴ نقطه، تغییر مکان ها در ۳۹ نقطه و کرنش ها در ۲۹ نقطه ثبت شد. حسگرها به طور کلی در ۵ مقطع عرضی پل نصب شده اند (شکل ۴) [۷].

شکل (۷)، مد اول و چهارم بدست آمده از آنالیز مودال حاصل از مدل را نشان می‌دهد. همچنین مدهای ۱ الی ۴ حاصل از مدل، به‌ترتیب دارای فرکانس‌های ۲/۵۳، ۳/۴۵، ۴/۱۵ و ۴/۴ هرتز می‌باشند. شکل موده‌های سازه، بیانگر ارتعاشات قائم زیاد عرشه پل در فرکانس‌های ۲/۵۳ و ۴/۴ هرتز است، که با فرکانس ۲/۶ و ۴/۳ هرتز بدست آمده از شتاب‌سنج‌ها نزدیکی قابل قبولی دارد.

۵- مطالعه پارامتری مشخصه‌های دینامیکی TMD بر عملکرد آن

در این مطالعه عملکرد TMD با تغییر مشخصات دینامیکی TMD (جرم، فرکانس طبیعی و درصد میرایی)، محل قرارگیری آن در پل و همچنین عملکرد آن در سرعت‌های مختلف وسیله نقلیه بررسی می‌شود.

شکل‌بندی وسیله نقلیه مورد استفاده در این مطالعه، مانند بار نوع اول آیین‌نامه بارگذاری پل ایران است. همچنین با توجه به این‌که مدل پل استفاده شده در این مطالعه، یک پل با چهار خط عبور است، و همچنین با توجه به بند مربوط به چگونگی استقرار بار عادی روی عرشه‌ی پل، از ضریب کاهش ۰/۷۵ به مناسبت همزمانی بارها، برای کاهش بار کامیون ۴۰ تنی استفاده شده است. با توجه به آیین‌نامه بارگذاری پل ایران و شرایط بارگذاری‌های معمول روی پل‌ها از بارگذاری‌های ترافیکی زیر برای استفاده در تحلیل‌ها، استفاده شده است. توجه شود که در تمام این بارگذاری‌ها، کامیون‌ها با سرعت غالب ۵۰ کیلومتر بر ساعت حرکت می‌کنند.

بارگذاری ترافیکی T1: دو کامیون ۳۰ تنی به‌طور موازی از خط عبور ۳ و ۴ عبور می‌کنند.

بارگذاری ترافیکی T2: چهار کامیون ۳۰ تنی به‌طور موازی از خط عبور ۱ الی ۴ عبور می‌کنند.

بارگذاری ترافیکی T3: دو کامیون ۳۰ تنی از خط عبور ۱ و ۲ در جهت رفت و دو کامیون ۳۰ تنی از خط عبور ۳ و ۴ در جهت برگشت، به‌طور هم‌زمان عبور می‌کنند.

بارگذاری ترافیکی T4: چهار کامیون ۳۰ تنی به‌صورت دو به دو و پشت سرهم از خط عبور ۱ و ۲ در جهت رفت و از خط

در آزمایش میدانی خط تاثیر انجام شده روی پل مورد نظر، با عبور یک کامیون ۲۸ تنی به‌صورت رفت و برگشت از خط عبوری ۴، با سرعت ۵ کیلومتر بر ساعت انجام شده است. به‌طور نمونه در شکل (۵) نتایج حاصل از آزمایش‌های میدانی یاد شده با نتایج حاصل از مدل، برای تیر شماره ۳ در مقطع ۲ مقایسه شده است، که بیشینه خطای حاصل از مدل در این قسمت ۶/۸٪ است.

شکل (۶) تبدیل فوریه شتاب‌های قائم ثبت شده در مقطع اول

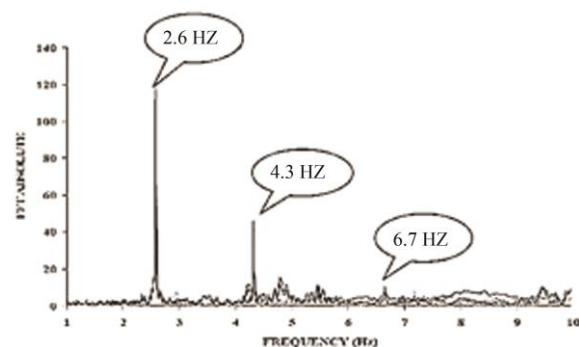


Fig. 6. Fourier transform of installed vertical acceleration in the registered in the first section

شکل (۷) شکل مدی مد اول و چهارم مدل

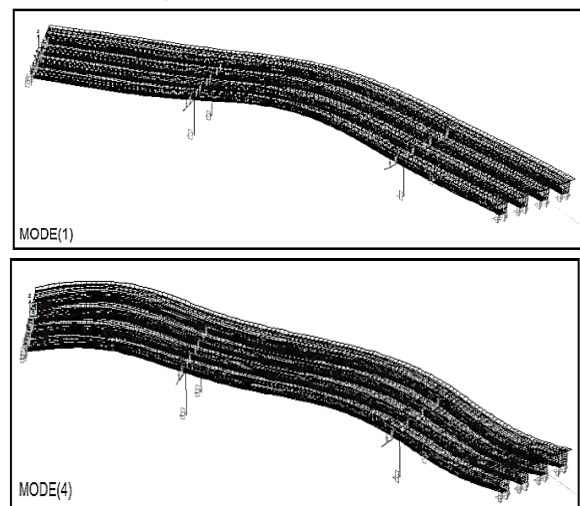


Fig. 7. The first and fourth mode shapes of model

در شکل (۶) اندازه تبدیل فوریه شتاب‌سنج‌های قائم نصب شده در مقطع اول در آزمایش میدانی آورده شده است. در فرکانس‌های ۲/۶، ۴/۳ و ۶/۷ هرتز کل عرشه‌ی پل و حتی تکیه‌گاه‌ها ارتعاش می‌کنند و فرکانس مود اول، دوم و سوم غالب ارتعاشی پل در جهت قائم می‌باشند. همچنین در

عبور ۳ و ۴ در جهت برگشت عبور می‌کنند.

برای بررسی چگونگی عملکرد میراگر در طول زمان پاسخ، باید معیاری غیر از بیشینه پاسخ مورد مطالعه قرار گیرد. برای این منظور از معیار جذر میانگین مربعات یا RMS (Root Mean Square)، پاسخ سازه در طول مدت تحلیل مورد بررسی قرار می‌گیرد. رابطه (۷) چگونگی محاسبه جذر میانگین مربعات را نشان می‌دهد.

$$Y_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} y_i^2}{n}} \quad (7)$$

با توجه به این که هدف از این مطالعه کاهش ارتعاشات قائم عرشه‌ی پل است، از نمودارهای مربوط به شتاب بررسی شده است و نتایج مربوط به RMS شتاب تیرهای ۱ و ۴، مربوط به مقاطع S2 و S4 بررسی شده است و به طور نمونه منظور از S2B4T1، تیر B4 در مقطع عرضی S2 تحت بارگذاری ترافیکی T1 است.

در این قسمت از مطالعه، در هر مرحله TMD با فرکانس مد اول و چهارم (۲/۵۳ و ۴/۴ هرتز)، که مد خمشی می‌باشند تنظیم شده و با توجه به شکل مدی عرشه‌ی پل در این فرکانس‌ها، در مکانی از عرشه‌ی پل که بیشترین جابه‌جایی قائم را دارد (به ترتیب در وسط دهانه ۴۵ متری و ۳۰ متری)، قرار داده شده است. ابتدا با استفاده از روش دین هارتوگ نسبت میرایی و نسبت فرکانس تنظیمی بهینه TMD را برای هر نسبت جرمی محاسبه کرده و سپس میزان کاهش ارتعاشات قائم مقاطع را در نسبت‌های جرمی مختلف بررسی می‌شود. نتایج مربوط به این تحلیل در شکل‌های (۸ و ۹) آورده شده است.

با توجه به نتایج، RMS شتاب قائم در مقاطع S2 و S4 برای تمامی بارگذاری‌های ترافیکی انجام شده روی مدل در نسبت‌های جرمی ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ به طور میانگین، به شرح زیر کاهش می‌یابد.

هنگامی که TMD در مقطع S4 نصب شده است:

کاهش در مقطع S2 به ترتیب به میزان ۶/۷٪، ۱۳/۲٪، ۱۶/۴٪ و ۱۸٪

کاهش در مقطع S4 به ترتیب به میزان ۸/۸۵٪، ۱۷/۸۵٪، ۲۰/۳٪

و ۲۳/۶٪

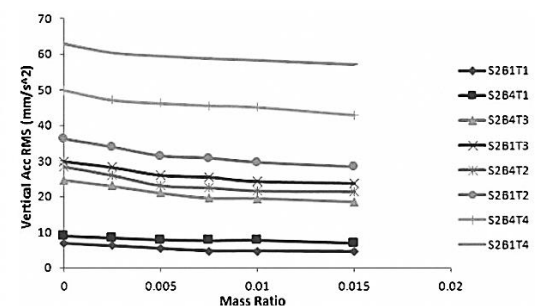
هنگامی که TMD در مقطع S2 نصب شده است:

کاهش در مقطع S2 به ترتیب به میزان ۱۴/۱٪، ۳۰/۴٪، ۳۳/۶٪ و ۳۹/۸٪

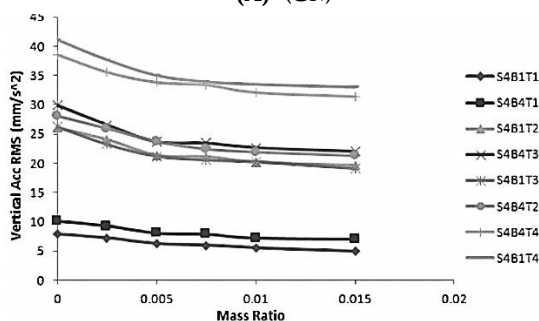
کاهش در مقطع S4 به ترتیب به میزان ۲/۳۵٪، ۵٪، ۶/۶۵٪ و ۸/۶۲٪

مشاهده می‌شود که با افزایش جرم TMD، شتاب قائم عرشه‌ی پل در تمامی مقاطع کاهش می‌یابد، اما از رشد این کاهش از نسبت جرمی ۰/۵ به بعد کاسته می‌شود که دلیل آن می‌تواند اضافه شدن وزن TMD به عنوان بار استاتیکی به عرشه‌ی پل باشد. پس یکی از مناسب‌ترین عملکرد میراگر در نسبت جرمی ۰/۵ است. همچنین مشاهده می‌شود که بیشترین عملکرد TMD مربوط به همان مقطعی است که TMD در آن نصب شده است و TMD نصب شده در وسط دهانه‌های ۳۰ متری در کاهش شتاب قائم عرشه‌ی پل در مقاطع S1 و S3، نسبت به زمانی که TMD در وسط دهانه ۴۵ متری نصب شده بود، عملکرد بهتری نشان می‌دهد.

شکل (۸) تغییرات RMS شتاب قائم در مقاطع (الف) ۲ و (ب) ۴ همراه با TMD در مقطع ۴ با نسبت جرمی متغیر



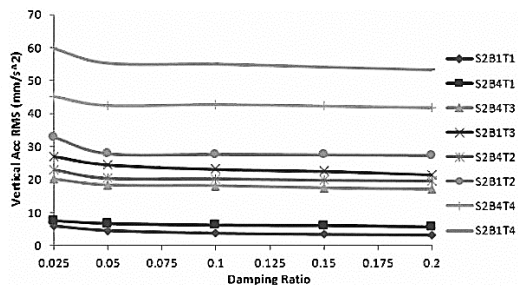
(الف) - (A)



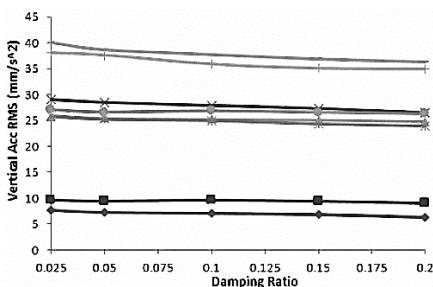
(ب) - (B)

Fig. 8. Variations of vertical acceleration RMS in section (A) 2 and (B) 4 along with TMD in section 4 with variable mass ratio

شکل (۱۱) تغییرات RMS شتاب قائم در مقاطع (الف) ۲ و (ب) ۴ همراه با TMD در مقطع ۲ با نسبت میرایی متغیر



(الف) - (A)



(ب) - (B)

Fig. 11. Variations of vertical acceleration RMS in section (A) 2 and (B) 4 along with TMD in section 2 with variable damping ratio

در ادامه با احتساب نسبت جرمی محاسبه شده در مرحله قبل و با ثابت نگه داشتن نسبت جرمی و فرکانس تنظیمی TMD، تاثیر نسبت میرایی میراگر را در کاهش شتاب قائم عرشه‌ی پل در مقاطع S2 و S4 بررسی می‌شود.

با توجه به شکل‌های (۱۰ و ۱۱)، تغییرات RMS شتاب قائم عرشه پل در مقاطع S2 و S4، به طور میانگین برای تمامی بارگذاری‌های ترافیکی انجام شده روی مدل در نسبت‌های میرایی ۰/۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ در مقایسه با حالتی که نسبت میرایی ۲/۵٪ باشد، به شرح زیر است:

هنگامی که TMD در مقطع S4 نصب شده است:

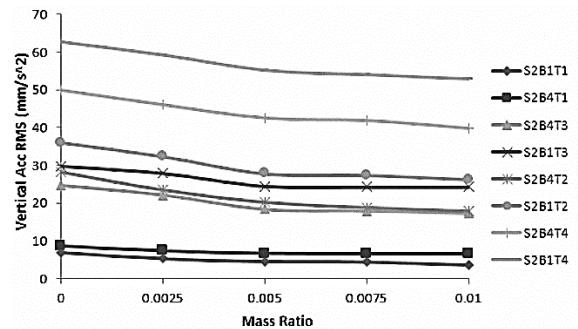
کاهش در مقطع S2 به ترتیب به میزان ۷/۷۵٪، ۱۰/۲٪، ۱۱/۹٪ و ۱۴/۱٪

کاهش در مقطع S4 به ترتیب به میزان ۱۰/۳٪، ۱۲/۰۵٪، ۱۴/۳٪ و ۱۵/۸۵٪

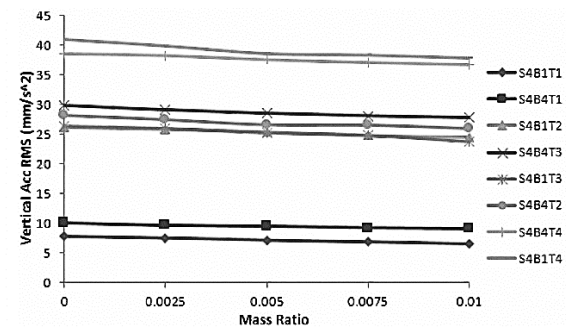
هنگامی که TMD در مقطع S2 نصب شده است:

کاهش در مقطع S2 به ترتیب به میزان ۱۱/۷٪، ۱۵/۱٪، ۱۷/۴٪ و ۱۹/۷۵٪

شکل (۹) تغییرات RMS شتاب قائم در مقاطع (الف) ۲ و (ب) ۴ همراه با TMD در مقطع ۲ با نسبت جرمی متغیر



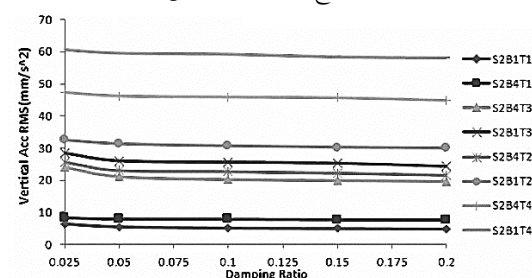
(الف) - (A)



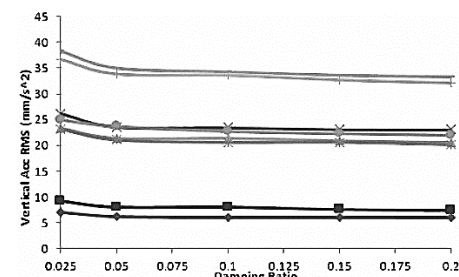
(ب) - (B)

Fig. 9. Variations of vertical acceleration RMS in section (A) 2 and (B) 4 along with TMD in section 2 with variable mass ratio

شکل (۱۰) تغییرات RMS شتاب قائم در مقاطع (الف) ۲ و (ب) ۴ همراه با TMD در مقطع ۴ با نسبت میرایی متغیر



(الف) - (A)



(ب) - (B)

Fig. 10. Variations of vertical acceleration RMS in section (A) 2 and (B) 4 along with TMD in section 4 with variable damping ratio

میانگین برای تمامی بارگذاری‌های ترافیکی انجام شده روی مدل برای مقاطع S2 و S4 در نسبت‌های فرکانسی مختلف، نسبت به زمانی که نسبت فرکانس تنظیمی برابر با یک باشد، به صورت زیر است:

درصد کاهش عملکرد در مقطع S4 برای نسبت‌های فرکانسی ۰/۹، ۰/۹۵، ۱/۰۵ و ۱/۱ به ترتیب به میزان ۰/۲۶/۴، ۰/۸/۱۵، ۰/۷/۱۹/۷۵ و ۰/۱۹/۷۵٪

درصد کاهش عملکرد در مقطع S2 برای نسبت‌های فرکانسی ۰/۹، ۰/۹۵، ۱/۰۵ و ۱/۱ به ترتیب به میزان ۰/۶/۱۶، ۰/۴/۸۵، ۰/۶/۷ و ۰/۱۵/۵٪

با توجه به نتایج به دست آمده، با انحراف از نسبت فرکانس تنظیمی در همان مقطعی که TMD نصب شده است، افت عملکرد شدیدتری رخ داده است. همچنین مشاهده می‌شود، هنگامی که TMD در وسط دهانه‌های ۳۰ متری نصب می‌شود، در مقایسه با حالتی که TMD در وسط دهانه ۴۵ متری نصب می‌شود، با انحراف فرکانس تنظیمی TMD، افت عملکرد آن به میزان کمتری است.

برای بررسی اثر سرعت وسیله نقلیه بر عملکرد TMD از کامیون استاندارد آیین‌نامه بارگذاری پل ایران استفاده شده است. در این بررسی پل تحت عبور قطار کامیون‌ها با فاصله مرکز به مرکز ۱۸ متر و با سرعت‌های مختلف قرار گرفته است. آرایش بارگذاری‌های ترافیکی استفاده شده در این مطالعه در شکل (۱۳) نشان داده شده است و همچنین در این مطالعه سرعت بارهای ترافیکی از سرعت ۱۰، ۲۰، ... و ۱۴۰ کیلومتر بر ساعت تغییر می‌کند.

شکل (۱۳) بارگذاری‌های ترافیکی مورد استفاده در بررسی سرعت وسایل نقلیه

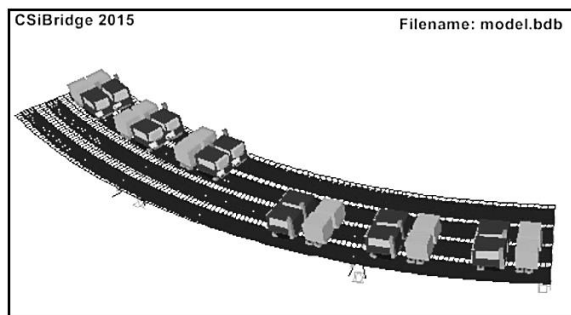
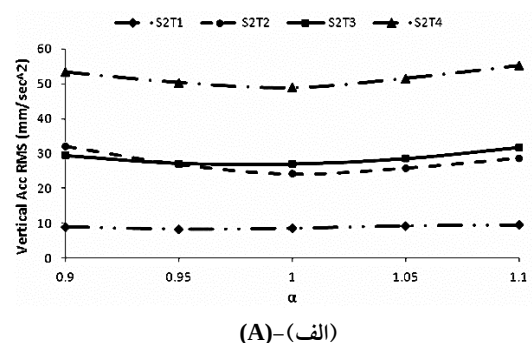


Fig. 13. Traffic loads used to study the speed of vehicles

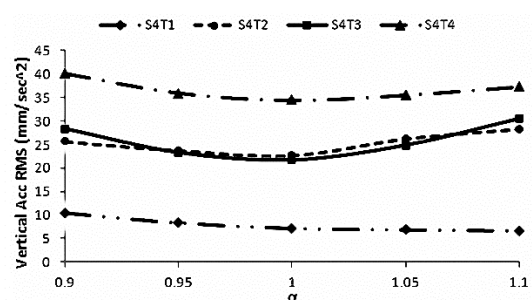
کاهش در مقطع S4 به ترتیب به میزان ۰/۲/۴، ۰/۴، ۰/۵/۵ و ۰/۸٪ با توجه به نتایج به دست آمده از نمودارها، می‌توان نتیجه گرفت که نسبت میرایی در مقایسه با نسبت جرمی تاثیر کمتری در عملکرد TMD دارد و همچنین میزان درصد کاهش پاسخ دینامیکی عرشه پل با افزایش نسبت میرایی کاهش می‌یابد، پس می‌توان نتیجه گرفت که در این مدل مناسب‌ترین عملکرد میراگر در نسبت میرایی ۰/۵٪ است.

در انتها با در نظر گرفتن نسبت میرایی و نسبت جرمی بهینه میراگر، نسبت فرکانس TMD به فرکانس سازه را (α) از ۰/۹ تا ۱/۱ تغییر داده و در این حالت نتایج مربوط به تغییر RMS شتاب قائم عرشه‌ی پل در مقاطع S2 و S4 در (شکل ۱۲) آورده شده است.

شکل (۱۲) تغییرات RMS شتاب قائم در مقاطع (الف) ۲ و (ب) ۴ همراه با TMD در همان مقاطع با فرکانس تنظیمی متغیر



(الف)–(A)



(ب)–(B)

Fig. 12. Variations of vertical acceleration RMS in section (A) 2 and (B) 4 along with TMD in the same section with variable tuned frequency

با توجه به شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که به طور کلی با انحراف فرکانس تن هظیمی از مقدار تنظیم‌شده براساس معیار دن‌هارتوگ، عملکرد آن در بارگذاری‌های ترافیکی مختلف کاهش می‌یابد. این مقدار کاهش در عملکرد TMD به طور

عرشه پل دچار تشدید شده است و مشاهده می‌شود که TMD در این سرعت‌ها عملکرد بهتری از خود نشان داده است. نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب قائم عرشه‌ی پل در مقطع عرضی S4 همراه (وبدون) TMD در همین مقطع، در سرعت‌های گفته شده در شکل‌های (۱۵ و ۱۶) آورده شده است.

شکل (۱۶) نمودار تاریخچه زمانی شتاب قائم مقطع S4 به‌هنگام عبور وسایل نقلیه با سرعت ۱۳۰ کیلومتر بر ساعت

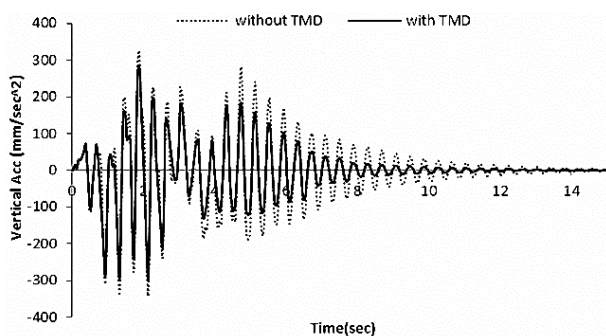


Fig. 16. Vertical acceleration time history diagram in section S4 when traffic load is passing with speed of 130 (km/hr)

با توجه به شکل‌های (۱۵ و ۱۶) مشاهده می‌شود که TMD دامنه شتاب در مقطع عرضی S4 را در سرعت‌های ۷۰ و ۱۳۰ کیلومتر بر ساعت، در حالت ارتعاشات اجباری به ترتیب به میزان ۲۴٪ و ۱۱٪ و در حالت ارتعاشات آزاد به ترتیب به میزان ۵۹٪ و ۴۳٪ کاهش داده است. با توجه به نتایج می‌توان نتیجه گرفت که TMD علاوه بر اینکه به طور کلی در سرعت‌هایی که باعث پدیده تشدید در عرشه پل می‌شود خوب عمل می‌کند بلکه در سرعت‌های پایین‌تر ایجاد پدیده تشدید، بهتر عمل کرده است. همچنین مشاهده می‌شود TMD در کاهش دامنه شتاب ارتعاشات آزاد عملکرد خیلی بهتری داشته است.

در ادامه، با قرار دادن TMD با مشخصات $\mu = 0.5\%$ و $\xi = 5\%$ (که با فرکانس مد چهارم تنظیم شده است) در وسط دهانه‌های کناری پل، دوباره همان تحلیل‌های انجام شده در مرحله قبل روی مدل پل انجام می‌شود. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها براساس معیار RMS شتاب قائم عرشه پل برای مقطع عرضی S2 در شکل (۱۷) آورده شده است.

در این بررسی، ابتدا پل بدون TMD تحت بارگذاری ترافیکی مورد نظر، در سرعت‌های مختلف تحلیل می‌شود، سپس با قرار دادن TMD با مشخصات دینامیکی $\mu = 0.5\%$ و $\xi = 5\%$ (که با فرکانس مد اول تنظیم شده است) در وسط دهانه میانی پل، دوباره همان تحلیل‌ها بر روی مدل پل انجام می‌شود. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها براساس معیار RMS شتاب قائم عرشه پل برای مقطع عرضی S4 در شکل (۱۴) آورده شده است. همچنین لازم به گفته است برای انجام این تحلیل‌ها، از تحلیل تاریخچه زمانی خطی مودال استفاده شده است.

شکل (۱۴) نمودار تغییرات RMS شتاب قائم مقطع عرضی S4 با تغییرات سرعت بار ترافیکی (با و بدون TMD)

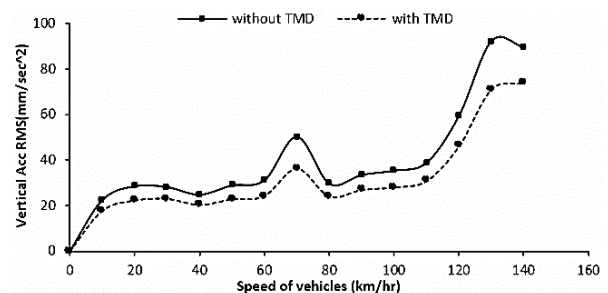


Fig. 14. Variations of vertical acceleration RMS in section S4 versus Variations of traffic load speed (with/without TMD)

شکل (۱۵) نمودار تاریخچه زمانی شتاب قائم مقطع S4 به‌هنگام عبور بار ترافیکی با سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت

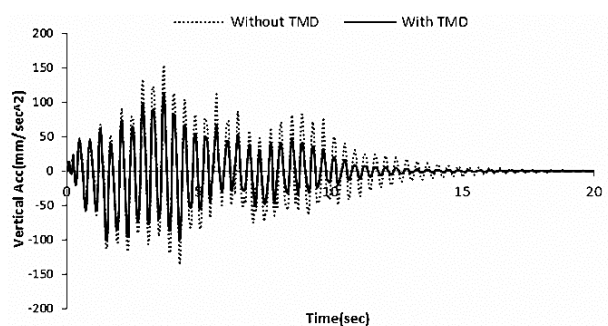


Fig. 15. Vertical acceleration time history diagram in section S4 when traffic load is passing with speed of 70 (km/hr)

با توجه به شکل (۱۴) مشاهده می‌شود که دامنه شتاب عرشه پل در مقطع مورد نظر در سرعت‌های ۷۰ و ۱۳۰ کیلومتر بر ساعت افزایش چشمگیری پیدا می‌کند و در این سرعت‌ها

شده به میزان ۱۳٪ کاهش داده است، که حداکثر کاهش بیشینه جابجایی قائم عرشه پل به کمک TMD تحت بارگذاری ترافیکی مورد نظر در سرعت‌های مختلف برای مدل پل مورد نظر است.

شکل (۱۹) نمودار تاریخچه زمانی جابجایی قائم مقطع S2 به هنگام عبور وسایل نقلیه با سرعت ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت

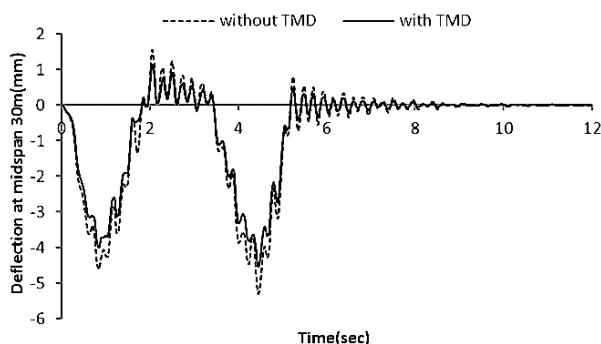


Fig. 19. Vertical displacement time history diagram in section S2 when traffic load is passing with speed of 120 (km/hr)

۶- نتیجه‌گیری

TMD در کاهش ارتعاشات مقطعی که در آن مقطع نصب شده است بیشترین عملکرد را دارد، پس با دورتر شدن از محل نصب TMD کارایی آن کمتر می‌شود. این امر به دلیل این است که TMD به محتوای فرکانسی نیروی تحریک خارجی حساس است، پس زمانی که TMD در مقطع چهار نصب شده است، به هنگام عبور بار ترافیکی از روی پل، فرکانس غالب ارتعاش در مقطع دوم برابر با $\frac{4}{4}$ هرتز است که با مد چهارم سازه تلافی دارد و چون TMD با مد اول تنظیم شده است، دامنه پاسخ در مد اول را کاهش می‌دهد. همچنین هنگامی که TMD در وسط دهانه‌های اول و آخر قرار می‌گیرد، فرکانس غالب ارتعاش در مقطع چهارم برابر با $\frac{2}{53}$ هرتز است، که با مد اول سازه تلافی دارد و چون TMD با مد چهارم تنظیم شده است دامنه پاسخ در مد چهارم را کاهش می‌دهد.

نسبت جرمی و نسبت میرایی TMD، تا یک اندازه معینی باعث افزایش عملکرد TMD می‌شوند و بعد از آن تاثیر کمتری در افزایش عملکرد آن دارند. همچنین با توجه به نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که تاثیر نسبت جرمی در عملکرد TMD بیشتر از

شکل (۱۷) نمودار تغییرات RMS شتاب قائم مقطع عرضی S2 با تغییرات سرعت بار ترافیکی (با و بدون TMD)

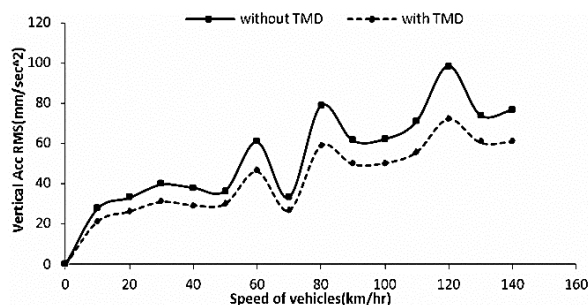


Fig. 17. Variations of vertical acceleration RMS in section S2 versus Variations of traffic load speed (with/without TMD)

با توجه به شکل (۱۷) مشاهده می‌شود که دامنه شتاب عرشه پل در مقطع مورد نظر در سرعت‌های ۸۰، ۶۰ و ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت افزایش چشمگیری پیدا می‌کند و همچنین TMD در این سرعت‌ها عملکرد بهتری از خود نشان داده است. برای نمونه بررسی عملکرد TMD، نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب قائم و جابجایی قائم عرشه پل در مقطع عرضی S2 در شکل‌های (۱۸ و ۱۹) آورده شده است.

شکل (۱۸) نمودار تاریخچه زمانی شتاب قائم مقطع S2 به هنگام عبور بار ترافیکی با سرعت ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت

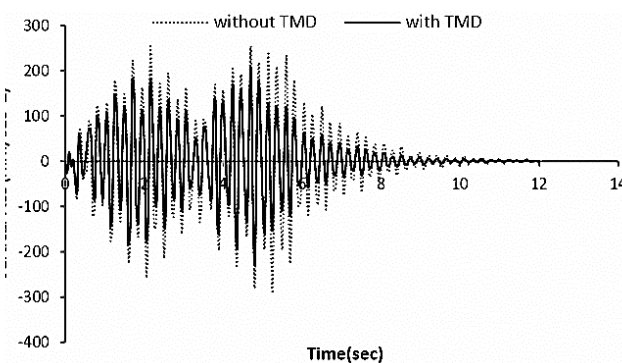


Fig. 18. Vertical acceleration time history diagram in section S2 when traffic load is passing with speed of 120 (km/hr)

با توجه به شکل (۱۸) مشاهده می‌شود که TMD، دامنه شتاب در مقطع عرضی S2 را در سرعت بار ترافیکی ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت، در حالت ارتعاشات اجباری و آزاد به ترتیب به میزان ۲۰/۱۵٪ و ۴۷/۵٪ کاهش داده است و همچنین با توجه به (شکل ۱۹) مشاهده می‌شود که TMD، بیشینه جابه جایی قائم عرشه پل را در مقطع پل و سرعت بار ترافیکی گفته

References

۷- مراجع

- [1] Caetano, Elsa, et al. "Studies for controlling human-induced vibration of the Pedro e Inês footbridge, Portugal. Part 1: Assessment of dynamic behaviour." *Engineering Structures* 32.4 (2010): 1069-1081.
- [2] Caetano, Elsa, et al. "Studies for controlling human-induced vibration of the Pedro e Inês footbridge, Portugal. Part 2: Implementation of tuned mass dampers." *Engineering Structures* 32.4 (2010): 1082-1091.
- [3] Luu, M., V. Zabel, and C. Könke. "An optimization method of multi-resonant response of high-speed train bridges using TMDs." *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 53, pp. 13-23, (2012)
- [4] Domaneschi, M., L. Martinelli, and E. Po. "Control of wind buffeting vibrations in a suspension bridge by TMD: Hybridization and robustness issues." *Computers & Structures* 155 (2015): 3-17.
- [5] JP Den Hartog. *Mechanical vibrations*. Courier Corporation, 1985.
- [۶] زهرایی، مهدی. ۱۳۸۹. کنترل غیرفعال ارتعاشات. چاپ اول، موسسه انتشارات دانشگاه تهران
- [۷] اداره کل خط و سازه‌های فنی راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران، (۱۳۸۶). گزارش نتایج آزمایش ارتعاش‌سنجی پل قلعه مرغی، سازمان مهندسی و عمران شهرتهران.
- [۸] «توسعه روش طیف ظرفیت و تعیین تغییر مکان هدف و مدنظر گرفتن نقطه کنترل در پل های دارای انحناء در پلان». علی گل افشاور، فرهاد دانشجو، مجله علمی پژوهشی عمران مدرس، دوره چهاردهم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۳، صفحه ۱۸۷ تا ۱۲۸.

نسبت میرایی آن است.

TMD به فرکانس تنظیمی خود بسیار حساس است و با کمی انحراف از فرکانس تنظیمی خود عملکرد آن کاهش می‌یابد که با توجه به نمودارها نسبت بهینه فرکانس برای همه بارگذاری‌ها تقریباً برابر با یک است.

در این مدل به‌طور میانگین، مناسب‌ترین عملکرد TMD در نسبت‌های جرمی، نسبت‌های میرایی و نسبت فرکانس تنظیمی مختلف، مربوط به حالت $\mu = 0.5\%$ و $\xi = 5\%$ و $\alpha = 1$ می‌باشد که باعث کاهش ارتعاشات قائم به میزان $17/85\%$ در وسط دهانه میانی و $30/4\%$ در وسط دهانه‌های کناری می‌شود و این میزان کاهش نشان می‌دهد که TMD در وسط دهانه‌های ۳۰ متری عملکرد بهتری از خود نشان داده است.

در بررسی اثر سرعت بارهای ترافیکی بر عملکرد TMD، نتایج نشان می‌دهد که در برخی سرعت‌ها، عرشه پل دچار تشدید می‌شود و TMD در این شرایط عملکرد بهتری از خود نشان داده است. بیشینه کاهش دامنه شتاب قائم ارتعاشات اجباری و آزاد و حداکثر کاهش بیشینه جابه‌جایی قائم عرشه پل برای مدل پل مورد نظر تحت بارگذاری ترافیکی استفاده شده، به ترتیب به میزان $24/2\%$ ، $59/0\%$ و $13/0\%$ است، که مربوط به زمانی است که عرشه پل دچار تشدید شده است.

Performance Evaluation of Passive Tuned Mass Dampers For Reduction of Bridges Traffic Vibrations

Bayat E.¹, Daneshjoo F.^{2 *}

1- M.Sc. Student., Structural Eng. Dept., Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modarres University

2- Prof., Structural Eng. Dept., Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modarres University

danesh_fa@modares.ac.ir

Abstract:

In today's world, bridges play important roles in transportation. Due to their structural geometry, bridges have wide and thin decks usually. Thus, they are prone to vibrate in vertical direction. Vertical vibrations of bridges' deck, resulting from the passage of vehicles, affect the security and serviceability of these structures. Using control systems is one of the main strategies to reduce the vertical vibrations in bridges. In general, control systems can be classified into three categories: passive, active and semi active control systems. In this study, the reduction in the vertical vibrations of bridges is investigated considering the passive tuned mass dampers (TMD) control systems. Passive TMDs contain a relatively small mass (compared to mass of the bridge), a spring and a damper which are installed and operated in order to reduce the intensity of the dynamic response. The performance of these components principally depends on the amount of the dissipated energy during the deck vibrating motion which is caused by oscillating motion of damper's mass. Thus, the frequency of TMD is proportional to the frequency of the dominant structural vibration modes of the bridge (usually the first mode). Therefore, when this frequency is excited, the vibration of TMD initiates in the opposite direction of the bridge's vibration, and the energy is dissipated by the inertia force which is imposed by the damper. The inertia force in the passive TMD is the main cause of energy dissipation in the deck. Dynamic characteristics of TMD (including mass, damping ratio and frequency settings), location of the installed TMD, speed of the passing vehicles, are among effective parameters affecting the performance of TMD in reducing vertical vibrations of deck under traffic loads.

In the first part of this study, the effect of mass is investigated on performance of the TMD, while other parameters are kept constant. Participation of damping ratio, frequency settings and different locations for the installation of tuned mass damper for decreasing the vibrations of different sections of bridges is also evaluated. In the second part, the performance of TMD is surveyed in different speeds of vehicles.

Results show that the mass of TMD is more effective parameter in reducing imposed vertical vibration in comparison with the damping ratio. Also, it is found that TMD is very sensitive to its regulatory frequency, i.e., with a little deviation from that frequency, the expected performance is weakened. TMD shows positive and considerable performance in certain vehicle speeds and for specific placement locations. Furthermore, the results reveal that the most important role of TMD is in the reduction of the vibration response of the bridges' deck, where the free vibration occurs. In that case, maximum reductions of 24% and 59% are reported in the dynamic acceleration response of the bridge deck for the forced and free acceleration amplitudes, respectively. A maximum reduction of 13% is also obtained in the maximum displacement of the bridge deck. The results are mainly related to the occurrence of resonance in the bridge deck.

Keywords: Tuned mass damper, Bridge, Vertical vibrations, Traffic loading characteristics