

# آزمایش بارگذاري استاتيكي و ديناميكي پل‌ها مطالعه موردی پل قلعه مرغي تهران

فریدون رضائی<sup>۱\*</sup>؛ سید مسعود نصر آزادانی<sup>۲</sup>؛ سیامک رزاقی<sup>۳</sup>

## چکیده

به منظور بررسی عملکرد پل‌ها و سلامت‌سنجی آن‌ها از مدل‌سازی عددی، آزمایش‌های بارگذاری میدانی و یا ترکیبی از هر دو روش استفاده می‌شود. با توجه به اعمال فرضیات و ساده‌سازی عوامل پیچیده حاکم بر رفتار واقعی پل‌ها، روش‌های مبتنی بر آزمایش‌های میدانی می‌توانند عملکرد واقعی سازه پل‌ها را با کمترین مقادیر خطا و تقریب آشکار نمایند. در این مقاله نتایج آزمایش بارگذاری پل قلعه مرغي به منظور رفتارسنجی، عیب‌یابی و بررسی دلایل لرزش ساختمان‌های اطراف ارائه شده است. در مطالعات عددی، مدل سازه در نرم‌افزارهای تحلیلی ساخته و تحت بارگذاری‌های آیین‌نامه‌ای قرار گرفت. در ادامه رفتارسنجی پل با نصب بیش از یکصد حسگر و انجام آزمایش‌های استاتیکی و دینامیکی اجرا گردید. نتایج بیانگر لرزش شدید پل و ارتعاش پیچشی آن در مود اول به جای ارتعاش خمشی می‌باشد که موجب ایجاد ارتعاشات ناخواسته در پل و ساختمان‌های اطراف شده است. از طرفی به دلیل نزدیکی فرکانس ارتعاشی پل با ساختمان‌های اطراف شاید پدیده تشدید رخ دهد. در انتها راهکارهایی برای کاهش ارتعاش پل و جلوگیری از ایجاد تشدید احتمالی در ساختمان‌های اطراف ارائه شده است.

## کلمات کلیدی

پل، آزمایش بارگذاری، ارتعاش، تغییر مکان، کرنش، شتاب، تشدید.

## *Dynamic & Static Load Testing of Bridges, Case Study of Qale Morqi Bridge in Tehran*

F. Rezaie; M. Nasr Azadani; S. Razaghi

### ABSTRACT

Bridge performance and health monitoring can be obtained from numerical models, site load test or combination of both. Load test approach illustrates bridge behavior with minimum inaccuracy without taking into account the assumptions and simplified approaches of structure analysis. In this research, the structure of Qale Morqi bridge was investigated in order to identify the bridge performance and defects that cause vibration to be induced into surrounding buildings. Numerical models of bridge were made and bridge model was loaded according to bridge Design codes. Bridge was instrumented with more than a hundred sensors, and then loading was implemented in static and dynamic steps. It was observed that the bridge vibrates intensively and instead of bending pattern, the first mode shape was torsional. Due to proximity of bridge first mode with peripheral building first mode, resonance is probable. In conclusion, some strategies for decreasing bridge vibration or preventing resonance in peripheral building are presented.

### KEYWORDS

Bridge, load testing, vibration, displacement, strain, acceleration, resonance.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۶/۱۲/۲۰

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۹/۳/۱۰

<sup>۱\*</sup> نویسنده مسئول و دکترای مهندسی عمران - سازه، عضو هیأت علمی دانشگاه بوعلی سینا، Email: frezaie@basu.ac.ir

<sup>۲</sup> دکترای مهندسی عمران - راه و ترابری، عضو هیأت علمی دانشگاه علم و صنعت ایران، Email: nasrazadani@iust.ac.ir

<sup>۳</sup> کارشناس ارشد مهندسی عمران - سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تبریز، Email: siamak.razaghi@gmail.com



گردیده و پاسخ سازه با ۸۸ حسگر کرنش‌سنج، تغییرمکان‌سنج و شتاب‌سنج اندازه‌گیری شده است. نمای پل یادشده تحت بارگذاری در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱): آزمایش بارگذاری پل تله زنگ

پل خرپایی نکا در ناحیه‌ی راه‌آهن شمال و در ۳۰۰ متری ایستگاه نکا واقع است. خرپای پل به دهانه‌ی ۳۶ متر و شامل ۱۲ چشمه‌ی ۳ متری به ارتفاع ۳/۳ متر و عرض ۵/۵ متر است که عبور یک خط راه‌آهن را از روی رود نکا ممکن می‌سازد. در این آزمایش، ۸۹ حسگر به خدمت گرفته شد. در این آزمایش‌ها، شتاب در ۲۷ نقطه، تغییرمکان در ۲۰ نقطه و کرنش‌ها در ۴۲ نقطه ثبت گردید [۱۱]. آزمایش با عبور دیزل ۱۲۰ تنی و یا دیزل به همراه دو واگن مخزن‌دار ۸۰ تنی با سرعت‌های ۵ الی ۵۵ کیلومتر بر ساعت انجام شد.

پل اکبرآباد دارای ۵ دهانه‌ی ۶ متری بوده و در کیلومتر ۲۴ راه آهن قدیم تهران قم واقع شده است. سازه‌ی پل از نوع قوسی بتنی غیرمسلح می‌باشد و بیش از ۶۰ سال از زمان ساخت آن گذشته است. نمایی از پل در شکل ۲ نشان داده شده است. برای دستیابی به یک داوری واقع‌بینانه از مقاومت موجود پل، آزمایش‌های دینامیکی و استاتیکی بر روی پل انجام گردید [۱۲]. در آزمایش استاتیکی، پل به میزان ۵۰۰ تن تحت اثر بار گسترده واقع شد. بارگذاری مزبور در طول ۵ متر و در وسط دهانه‌ی میانی اعمال گردید و تغییرمکان‌های دهانه‌ی میانی پل، توسط ۹ تغییرمکان‌سنج اندازه‌گیری شد. در آزمایش دینامیکی، دیزل شش محوره‌ی ۱۲۰ تنی با سرعت‌های اسمی ۱۰ الی ۹۰ کیلومتر بر ساعت، از روی پل عبور کرده و پاسخ تغییرمکانی و شتاب پل اندازه‌گیری شد.



شکل (۲): آزمایش بارگذاری پل اکبرآباد

بیشتر آزمایش بارگذاری پل‌ها برای رفتارسنجی و یا سلامت‌سنجی سازه‌ها، تشخیص خرابی‌ها، بررسی ظرفیت بار قابل تحمل و همچنین کالیبره کردن مدل‌های عددی بکار می‌رود [۱]. آزمایش بارگذاری پل بویژه تحت اثر بار ناشی از وسائط نقلیه، روشی اقتصادی و قابل اعتماد برای سلامت‌سنجی پل‌ها می‌باشد [۲]. تجزیه و تحلیل اطلاعات بدست‌آمده از حسگرها بر اساس مبانی آمار و احتمالات، می‌تواند اطلاعات مفیدی در خصوص رفتار پل‌ها ارائه دهند [۳].

پل‌های با شاه‌تیرهای فولادی و عرشه بتنی از عملکرد مناسبی در تحمل بارهای وارده برخوردار بوده و همچنین دارای هزینه ساخت و نگهداری مناسبی می‌باشند و به این دلیل در روسازه بسیاری از پل‌های شهری و جاده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۴]. با این حال موارد فراوانی در خصوص لرزش‌های ناخواسته پل‌ها با سیستم عرشه یادشده تحت عبور بار سرویس گزارش شده است [۵]. یانگ و یوو برای رفع نقص لرزش پل‌های با شاه‌تیر فولادی و عرشه بتنی تحقیقاتی را انجام داده‌اند و راهکارهایی برای از بین بردن نقص عملکردی، شامل اصلاح درزهای انبساط و تکیه‌گاه‌های الاستومری ارائه نمودند [۶] و [۷]. محققین دیگری نیز برای بررسی درستی مطالعات تحلیلی و همچنین به منظور به‌هنگام‌سازی مدل‌های عددی، اقدام به انجام آزمایش‌های میدانی نموده‌اند [۸]. در حال حاضر با توجه به گستردگی مهندسی پل، آزمایش بارگذاری پل‌ها با اهداف مختلفی توسط محققین انجام می‌شود [۹].

## ۲- تاریخچه آزمایش پل در ایران

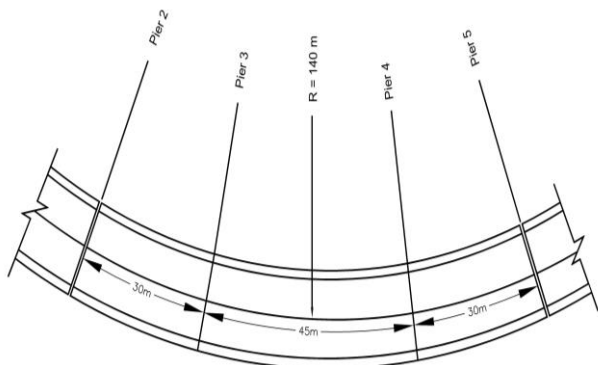
در کشور ایران سابقه چندانی پیرامون انجام آزمایش بارگذاری پل‌ها وجود ندارد. در این باره می‌توان به انجام آزمایش بارگذاری پل تله‌زنگ، پل نکا و پل اکبرآباد اشاره نمود. پل تله‌زنگ در کیلومتر ۵۸۷ مسیر راه آهن لرستان، بین دورود و اندیمشک واقع شده است. دهانه‌ی اصلی پل از شش تیرورق فلزی پست‌نیده به طول ۷۲ متر و ارتفاع ۲/۵ متر تشکیل شده‌است که با دو پایه‌ی مورب، دهانه‌ی ۷۲ متری به دو دهانه‌ی ۱۵ و یک دهانه‌ی ۴۲ متری کاهش داده شده‌است. آزمایش بارگذاری به منظور بررسی دلایل لرزش جانبی عرشه ناشی از عبور قطار، که باعث احساس ناامنی و ایجاد محدودیت در سرعت بهره‌برداری می‌گردید، انجام شد [۱۰]. بارگذاری با لکوموتیو چهار محوره ۸۰ تنی به همراه سه واگن باری انجام گشته است. پل در بحرانی‌ترین حالت بارگذاری، به میزان ۳۰۷ تن بارگذاری

### ۳- آزمایش بارگذاری پل قلعه مرغی

پیچش دینامیکی بود. در این آزمایش‌ها تغییرشکل‌ها، کرنش‌ها و شتاب‌ها در مقاطع مورد نظر اندازه‌گیری شد. در مجموع ۱۰۲ حسگر استفاده شد. شتاب در ۳۴ نقطه، تغییرمکان‌ها در ۳۹ نقطه و کرنش‌ها در ۲۹ نقطه ثبت گردید. تجهیزات اندازه‌گیری در ۵ مقطع عرشه نصب شد که سه مقطع در روی پایه‌ها و ۲ مقطع در وسط دهانه‌های سوم و چهارم پل انتخاب شد.

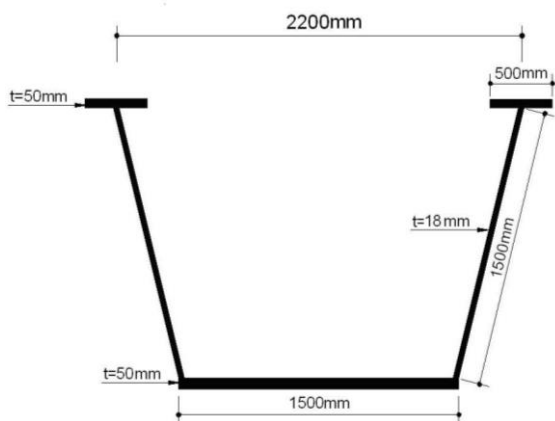
### ۴- مشخصات پل مورد مطالعه

پل قلعه مرغی ۲۲۵ متر طول و در طول خود به ۷ دهانه (۳۰+۳۰)+(۳۰+۴۵+۳۰)+(۳۰+۳۰) متری تقسیم شده است. سه دهانه پیوسته وسط با درز انبساط از دهانه‌های مجاور جدا گردیده اند. شعاع قوس افقی که پل در آن قرار دارد ۱۴۰ متر و فاصله مرکز به مرکز شاه‌تیرهای جعبه‌ای ۴/۴ متر و فاصله مرکز شاه‌تیر کناری تا لبه عرشه ۲/۳ متر است (شکل ۳).



شکل (۳): سه دهانه وسط پل مورد مطالعه

مشخصات مقطع شاه‌تیرها مطابق شکل ۴ و تا فاصله ۶ متری از تکیه‌گاه‌های پیوسته مطابق شکل ۵ می‌باشد. شاه‌تیرها از فولاد ST37 ساخته شده است.



شکل (۴): مقطع شاه‌تیرها در وسط دهانه

هر شاه‌تیر در تکیه‌گاه روی ۲ نئوپرن دایروی نشسته است.

آزمایش بارگذاری پل قلعه مرغی با هدف بررسی علل ارتعاشات ناخواسته، تشخیص مشکلات پل و پیرو شکایت اهالی از لرزش واحدهای مسکونی در حین عبور وسایل نقلیه با همکاری سازمان مهندسی و عمران شهر تهران و اداره کل خط و ابنیه راه آهن انجام شد. پل در انتهای خیابان قلعه مرغی تهران در سال ۱۳۷۴ ساخته شده است و امکان عبور وسائط نقلیه را از روی خطوط راه آهن جنوب کشور فراهم می‌کند.

عملیات رفتار سنجی پل بطور مشروح در چهار مرحله برنامه ریزی گردید که عبارتند از:

مرحله اول: بازرسی‌های چشمی

مرحله دوم: مطالعات تئوریک و مدلسازی

مرحله سوم: آزمایش میدانی پل

مرحله چهارم: تحلیل نتایج

مرحله اول شامل بازدیدهای میدانی و برداشت اطلاعات به

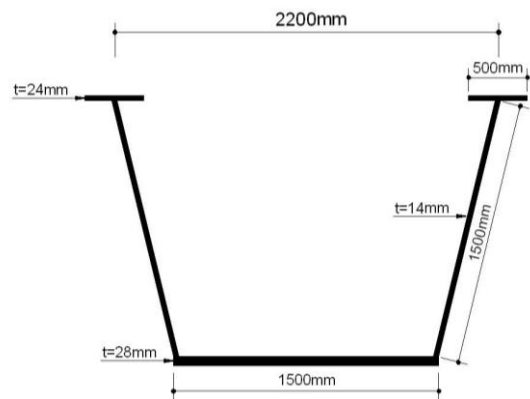
صورت چشمی بود. بازرسی چشمی به منظور بررسی اولیه پل و تشخیص خرابی‌های احتمالی و نیز شناخت ظاهری سازه انجام شد. طی این مرحله برخلاف وجود برخی خرابی‌های جزئی در سازه از قبیل قرارنگرفتن نئوپرن‌ها در جایگاه مناسب خود، وجود فاصله بین مقیدکننده‌های عرضی و شاه‌تیرهای طولی، شوره‌زدگی جزئی بتن زیر دال، خوردگی جزئی اجزاء فولادی، پکیدگی بتن در قسمت سرستون، خوردگی سطحی بتن، ترک طولی و عرضی بتن، وضعیت سازه مناسب ارزیابی شد.

مرحله دوم شامل مدلسازی سه بعدی پل توسط نرم‌افزار ANSYS، همچنین شبیه‌سازی رفتار آن، یافتن معایب سازه‌ای و طراحی آزمایش میدانی و به‌هنگام‌سازی مدل با نتایج آزمایش‌های استاتیکی و دینامیکی می‌باشد.

برای انجام مرحله سوم و انجام آزمایش میدانی، اقدام به آماده نمودن پرسنل، تهیه وسایل اندازه‌گیری، نصب داربست و کلیه ابزار اندازه‌گیری و سایر سازوکار لازم گردید. این اقدامات دارای ابعاد گسترده‌ای بود. باتلاش گسترده جمع‌زایی از همکاران و با اقدامات فراوان تعدادی از نهادهای دست‌اندرکار، سرانجام مقدمات لازم آماده و امکان آزمایش میدانی فراهم گردید. مقدمات آزمایش، نصب کرنش‌سنج و شتاب‌سنج و حسگرهای تغییرمکان‌سنج در طول دو هفته انجام گردید.

در برنامه آزمایش میدانی، بارگذاری استاتیکی و دینامیکی به وسیله ۶ کامیون ۲۸ تنی و یک کمرشکن ۵۰ تنی و با چندین حالت بارگذاری انجام شد. برنامه بارگذاری شامل آزمایش‌های خط‌تأثیر، آزمایش هارمونیک، آزمایش خمشی استاتیکی، آزمایش پیچشی استاتیکی، آزمایش خمشی دینامیکی و آزمایش

ضخامت دال بتنی عرشه ۲۵۰ میلی‌متر با مقاومت مشخصه ۳۰ مگاپاسکال می‌باشد.



شکل (۵): مقطع شاه‌تیرها در نزدیکی تکیه گاه پیوسته

## ۵- مطالعات عددی

در آزمایش بارگذاری پل قلعه‌مرغی از مدل‌سازی در دو نرم‌افزار با ویژگی‌های مخصوص برای پیشبرد اهداف مطالعات استفاده گردید. مدل ساده اولیه برای برآورد تقریبی از ظرفیت نهایی پل و مدل دقیق ثانویه که با رعایت تمامی جزئیات سازه‌ای به منظور بررسی رفتار واقعی سازه پل ساخته شدند. به منظور افزایش دقت مدل اصلی و بهنگام‌سازی آن با توجه به نتایج آزمایش بارگذاری فرآیند کالیبراسیون روی مدل انجام شد.

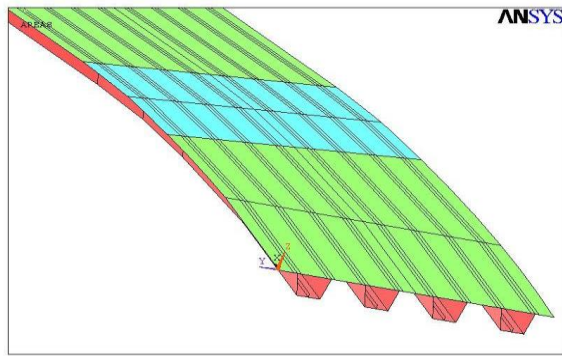
### ۵-۱- مدل‌سازی عددی

مدل عددی اول با جزئیات و دقت کمتر ولی با کارایی و سرعت بالا قبل از انجام آزمایش بارگذاری توسط نرم‌افزار SAP2000 ساخته شد. شاه‌تیرها توسط المان Frame و دال بتنی سراسری با المان Area ساخته و سپس مدل با بارگذاری‌های مختلف و مطابق با اصول آیین‌نامه بارگذاری پل‌های ایران، بارگذاری و تلاش‌های داخلی و تغییرمکان‌های اعضاء مشخص گردید.

پس از کنترل مقاطع از نظر حداکثر لنگر و برش قابل تحمل برای هر یک از اعضاء، تعداد و آرایش کامیون‌ها با توجه به امکانات موجود برای بارگذاری پل تعیین گردید. نوع و دامنه عملکرد کرنش‌سنج‌ها و تغییرمکان‌سنج‌ها با استفاده از مقادیر کرنش‌ها و تغییرمکان‌ها در مقاطع بحرانی انتخاب شد. همچنین خطوط تأثیر متغیرهای مختلف از جمله لنگر، برش و تغییرمکان برای کنترل عملکرد صحیح سازه‌ای پل ترسیم شد.

مدل دوم با استفاده از نرم‌افزار ANSYS ساخته شد. تمامی جزئیات سازه‌ای در ساخت این مدل سه‌بعدی گنجانده شد تا بتواند پس از انجام کالیبراسیون، عملکردی واقعی از رفتار پل

را ارائه نماید (شکل ۶).

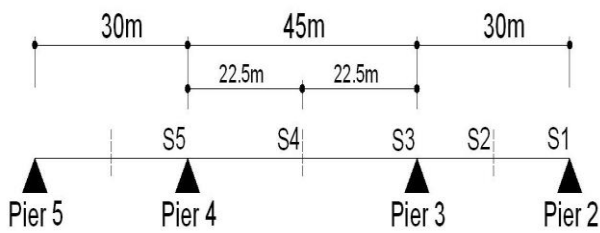


شکل (۶): شمایی از مدل عددی پل قلعه‌مرغی در نرم‌افزار ANSYS

جان، بال و سخت‌کننده‌های شاه‌تیرهای تشکیل‌دهنده عرشه با المان پوسته Shell 63 مدل‌سازی گردید. این المان خمشی غشایی بوده و دارای چهار گره و ۶ درجه آزادی شامل ۳ درجه آزادی انتقالی و ۳ درجه آزادی دورانی در هر گره می‌باشد. شاه‌تیرها بصورت یکپارچه مدل‌سازی شد، بدین ترتیب که وصله‌های اجرایی جداگانه مدل‌سازی نگردید. تیرهای عرضی و سخت‌کننده‌های قطری داخلی شاه‌تیرها با المان تیر Beam4 مدل‌سازی گردید. این المان دوگره‌ای بوده و دارای ۶ درجه آزادی انتقالی و دورانی می‌باشد. عرشه پل در روی تمامی تکیه‌گاه‌ها روی سرستون‌ها دارای تیر عرضی می‌باشد. در زیر هر شاه‌تیر در تکیه‌گاه‌های ساده و پیوسته دو نئوپرن دایروی قرار دارد. این نئوپرن‌ها با المان تماسی Contact52 مدل‌سازی شد. این المان از نوع دو نقطه‌ای بوده و دارای سختی افقی و قائم با ۳ درجه آزادی در هر گره می‌باشد. در این المان در صورتی که نیروی افقی وارد بر المان از حد مشخصی که قابل تعریف می‌باشد، فراتر رود و یا نیروی نرمال وارد بر المان صفر شود، سختی المان از بین رفته و در غیر این صورت مشابه یک فنر الاستیک عمل می‌کند.

عرشه بتنی پل با استفاده از المان مکعبی Solid65 مدل‌سازی گردید. این المان حجمی ۳ بعدی دارای ۸ گره و ۳ درجه آزادی انتقالی در هر گره می‌باشد که به دلیل خواص غیرخطی، از آن در مدل‌سازی سازه‌های بتنی با امکان ترک‌خوردگی استفاده می‌شود [۱۳]. بدلیل قوس قابل توجه پل و سازوکارهای پیچیده و غیر قابل پیش‌بینی در میزان و چگونگی توزیع تلاش‌های داخلی در بتن عرشه و همچنین با توجه به امکان ترک‌خوردگی در بتن عرشه، انجام تحلیل غیر خطی اجتناب ناپذیر می‌باشد [۱۴].

با استفاده از این المان ایجاد مدل واقعی از سازه پل با امکان ترک‌خوردگی عرشه تحت لنگرهای خمشی منفی و منظور نمودن تأثیر کاهش سختی عرشه در مقطع معادل دال بتنی و



شکل (۷): مقاطع نصب حسگرها

## ۲-۶- برنامه بارگذاري

برنامه بارگذاري، شامل آزمایش‌های خط‌تأثیر، هارمونیک، خمشی استاتیکی، پیچشی استاتیکی، خمشی دینامیکی و پیچش دینامیکی بودند. در طول آزمایش در مجموع از ۶ کامیون ۲۸ تنی استفاده شد. کامیون‌ها ابتدا بارگیری و سپس هر سه محور آن‌ها باسکول گردید. وزن محور جلو ۴/۳ تن و وزن هر یک از محورهای عقب کامیون‌ها ۱۱/۳۵ تن و فاصله محور جلو تا وسط و وسط تا عقب به ترتیب ۴ و ۱/۴ متر تعیین شد.

در آزمایش خط‌تأثیر یک کامیون با سرعت ثابت ۵ کیلومتر بر ساعت در طول پل به صورت رفت و برگشت در خطوط ۱ الی ۴ مسیر پل عبور داده شد و اطلاعات متغیرهای تغییرمکان، کرنش و شتاب برداشت گردید. آزمایش هارمونیک با عبور ۶ کامیون پشت سر هم با فاصله ۱۵ متری از خط ۴ با سرعت ۲۰ کیلومتر در ساعت انجام شد (شکل ۸). با این بارگذاري رفتار پل تحت اثر بار هارمونیک با پریود ۲/۸ ثانیه مورد سنجش قرار گرفت. آزمایش خمشی استاتیکی با قرارگیری محور دوم کامیون‌ها روی خطوط ۱ تا ۴ با دو بار تکرار در وسط دهانه سوم، چهارم و پنجم و ربع دهانه چهارم انجام شد. در این آزمایش پل به میزان ۱۱۱ تن بارگذاري گردید. آزمایش پیچشی استاتیکی با قرارگیری کامیون‌ها بصورت پشت به پشت، بر روی خطوط ۳ و ۴ در وسط دهانه سوم و چهارم و پنجم پل انجام شد. در آزمایش خمشی دینامیکی، کامیون‌ها روی خطوط ۱ تا ۴ در یک امتداد و با سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت، از روی پل عبور کردند. این آزمایش بصورت رفت و برگشت تکرار شد. در آزمایش پیچشی دینامیکی کامیون‌ها با سرعت ۲۰ کیلومتر در ساعت از خطوط شماره ۳ و ۴ عبور کردند.

شاه‌تیر فولادی امکان‌پذیر گردید و نتایج بارگذاري پل و همچنین آنالیز مودال بر اساس مقطع ترک‌خورده استخراج شد.

## ۲-۵- کالیبراسیون مدل عددی

پس از آزمایش میدانی و جمع‌آوری داده‌ها و فیلتراسیون آن‌ها، مدل سه‌بعدی اجزاء محدود با رعایت تمامی جزئیات سازه‌ای ساخته شد و بارگذاري مدل مطابق با آزمایش‌های استاتیکی و دینامیکی انجام شد. کالیبراسیون با تعدیل مشخصات مصالح و یا تغییر شرایط تکیه‌گاهی مدل بر اساس مقایسه نتایج عددی با داده‌های متناظر بدست آمده از آزمایش بارگذاري، به منظور انطباق هر چه بهتر مدل با رفتار واقعی سازه پل، انجام گردید. پارامترهای سختی خمشی تکیه‌گاه‌ها، چگونگی اتصال المان‌های عرضی به شاه‌تیرها و سختی خمشی دال بتنی بیشترین تأثیر را در کالیبراسیون مدل دارا می‌باشند. در پایان تغییر در مقادیر این پارامترها منجر به انطباق مقادیر تغییرمکان‌ها و فرکانس‌های ارتعاشی مدل و پل واقعی گردید.

## ۶- مطالعات تجربی، آزمایش بارگذاري

در این آزمایش از ۱۰۲ حسگر برای اندازه‌گیری شتاب در ۳۴ تغییرمکان در ۳۹ و کرنش در ۲۹ نقطه استفاده شد. حسگرها در سه مقطع روی پایه‌ها و دو مقطع در وسط دهانه‌های سوم و چهارم پل نصب شد. مقاطع نصب حسگرها در شکل ۷ مشخص شده است. حسگرها به ترمینال‌هایی متصل شدند که ۹۸ کانال استاتیک و ۴۸ کانال دینامیک را پشتیبانی می‌نمودند.

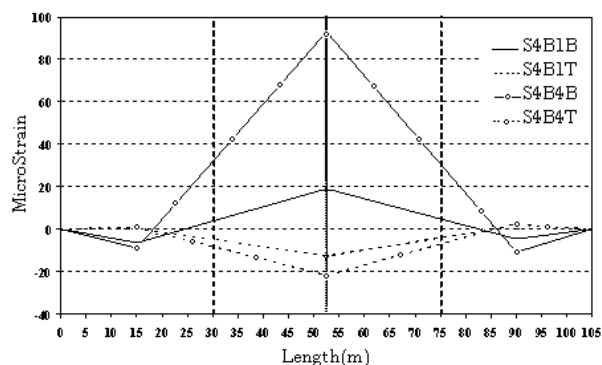
### ۶-۱- نام‌گذاری حسگرها

- فرمت نام گذاری حسگرها ترکیبی از ۵ یا ۶ کاراکتر است:
- ۱- حسگر شامل A شتاب‌سنج، S کرنش‌سنج و D تغییرمکان‌سنج
  - ۲- موقعیت مقطع که با شماره ۱ تا ۵ در شکل ۷ مشخص شده است.
  - ۳- نشانگر شاه‌تیر طولی B
  - ۴- شماره شاه‌تیر طولی که از داخل به خارج قوس شماره گذاری شده اند.
  - ۵- موقعیت حسگر، B تحتانی و T فوقانی برای کرنش‌سنج‌ها، V قائم و L جانبی برای شتاب و تغییرمکان‌سنج‌ها
  - ۶- موقعیت حسگر شتاب و تغییرمکان‌سنج نسبت به خارج قوس E و یا داخل قوس I

حاصل نمود و نتیجه گیری کرد که مشکل ارتعاش پل ناشی از کمبود ظرفیت و یا سختی کم اعضاء نمی باشد. بنابراین شاید مشخصات و ویژگی‌های دینامیکی سازه پل سبب ایجاد ارتعاش در پل و انتقال آن به ساختمان‌های اطراف می‌گردد.

## ۷-۲- نتایج کرنش سنج‌ها

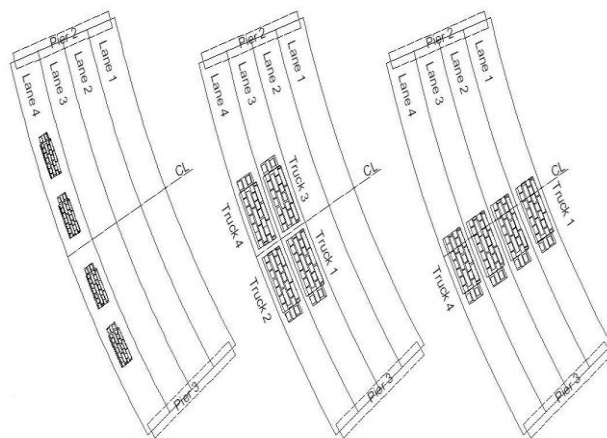
در جداول ۱ الی ۳ داده‌های برداشت شده از کرنش‌سنج‌ها در وسط دهانه سوم (دهانه ۳۰ متری) که همان مقطع شماره ۲ در آزمایش می‌باشد، در تکیه گاه اول دهانه چهارم (دهانه ۴۵ متری) یا مقطع شماره ۳ و همچنین در وسط دهانه چهارم (مقطع شماره ۴)، ارائه شده است. نتایج کرنش‌سنج‌ها نشان می‌دهد که حداکثر قدر مطلق کرنش‌های القایی در شاه‌تیرها به حد یکصد میکرواسترین محدود می‌شود (شکل ۱۰). با قبول خطی بودن رابطه بین تنش و کرنش، حداکثر تنش القایی تحت آزمایش‌های خمشی و پیچشی استاتیکی به ۱۰ مگاپاسکال محدود می‌گردد. دیده نشدن کرنش‌های غیر معمول بیانگر سختی زیاد المان‌های پل و اندازه بودن ظرفیت تحت بارهای بهره‌برداری می‌باشد. در این آزمایش سلامت‌سنجی، سلامت سازه‌ای پل تحت بارهای استاتیکی نیز دیده شد.



شکل (۱۰): کرنش بال فوقانی و تحتانی شاه‌تیرهای یک و چهار در مقطع چهارم (وسط دهانه ۴۵ متری) در موقعیت‌های ۴۱/۱۵، ۲۵/۵۲/۵، ۶۱/۷۵ و ۹۰ متری پل در آزمایش پیچش استاتیکی

## ۷-۳- نتایج تغییر مکان‌سنج‌ها

در وسط دهانه سوم (دهانه ۳۰ متری) که همان مقطع شماره ۲ در آزمایش می‌باشد، ۱۲ عدد تغییر مکان‌سنج نصب شده است. داده‌های برداشت شده در جدول ۴ ارائه شده است. در وسط دهانه چهارم (دهانه ۴۵ متری) یا مقطع شماره ۴ در آزمایش، ۶ عدد تغییر مکان‌سنج نصب شده است و داده‌های برداشت شده در جدول ۵ گزارش شده است. این آزمایش نیز با توجه به نبودن تغییر مکان‌های غیر متعارف بیانگر سلامت رفتار سازه تحت بارهای بهره‌برداری می‌باشد. نمونه‌ای از اندازه‌گیری انجام شده در شکل ۱۱ آورده شده است.



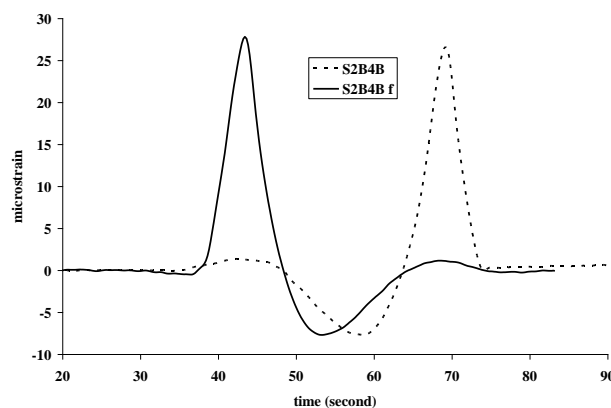
شکل (۸): خطوط مسیر سواره‌رو و نحوه‌ی چیدمان کامیون‌ها در آزمایش خمشی، پیچشی و هارمونیک

## ۷-۴- نتایج آزمایش‌های بارگذاری استاتیکی

در این بخش نتایج مربوط به آزمایش‌های خط‌تأثیر و بارگذاری استاتیکی بعد از انجام فیلتراسیون ارائه می‌شود. ابتدا اطلاعات مربوط به آزمایش‌های خط‌تأثیر و سپس اطلاعات مربوط به کرنش‌سنج‌ها و تغییر مکان‌سنج‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

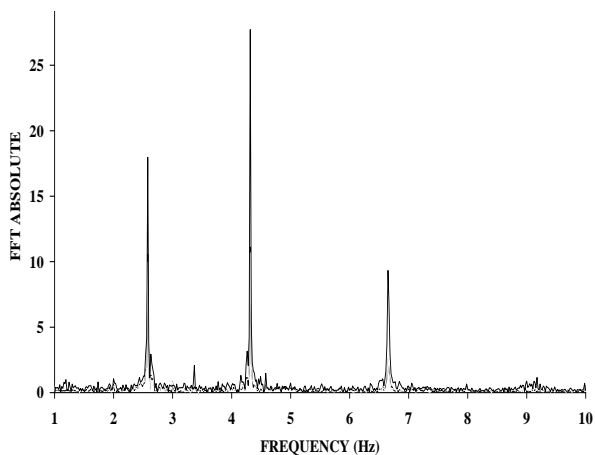
## ۷-۴-۱- نتایج آزمایش‌های خط‌تأثیر

نتایج متغیرهای تغییر مکان و کرنش طی ۸ مرحله بارگذاری رفت و برگشتی در چهار مسیر عبوری پل برداشت گردید. در شکل ۹ خط تأثیر کرنش بال تحتانی شاه‌تیر چهارم در وسط دهانه ۳۰ متری در دو حالت رفت و برگشت نشان داده شده است.



شکل (۹): خط تأثیر کرنش بال تحتانی در وسط دهانه ۳۰ متری شاه‌تیر چهارم در دو حالت رفت و برگشت (f) در خط چهارم

با رسم نمودارهای خطوط تأثیر حاصل از عبور کامیون و مقایسه آن با خطوط تأثیر تحلیلی بدست آمده از مدل عددی برای پل بدون کاستی و همچنین دیده‌نشدن تغییر شکل‌های غیرمعمول می‌توان از عملکرد صحیح و ایمن سازه اطمینان



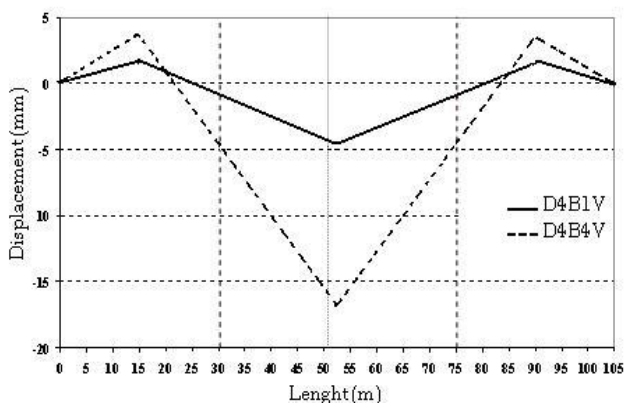
شکل (۱۲): اندازه تبدیل فوریه شتابسنج نصب شده روی زمین

### ۹- جمع بندی نتایج و نتیجه گیری

آزمایش بارگذاری پل‌ها و استفاده از ابزار دقیق، راهکاری اقتصادی و مطمئن برای ارزیابی سازه‌ها می‌باشد. نتایج این آزمایش‌ها حاکی از آن دارد که فاصله قابل توجهی بین نتایج آزمایش بارگذاری که رفتار واقعی سازه را نشان می‌دهد با نتایج حاصل از مطالعات عددی وجود دارد. از اینرو تهیه مدل‌های المان محدود با مش بندی اندازه و با جزئیات حداکثری و همچنین توجه ویژه به به‌هنگام‌سازی و کالیبراسیون مدل‌های عددی امری مهم می‌باشد. از نتایج آزمایش‌های بارگذاری پل‌ها می‌توان برای از بین بردن کمبود آن‌ها بویژه تحت بار بهره‌برداری استفاده نمود.

در پیوند با نتایج آزمایش‌های بارگذاری استاتیکی دیده می‌شود که حداکثر قدر مطلق کرنش‌های القایی در شاه‌تیرها به حد یکصد میکرواسترین محدود می‌شود که با فرض خطی بودن رابطه بین تنش و کرنش مطابق قانون هوک، حداکثر تنش القایی تحت آزمایش‌های خمشی و پیچشی استاتیکی به ۱۰ مگاپاسکال محدود می‌گردد. لذا با توجه به سطح پایین تنش‌ها و کرنش‌های ایجاد شده در مقاطع بحرانی و دیده نشدن تغییرشکل‌های غیرمعمول می‌توان از عملکرد صحیح و ایمن سازه اطمینان حاصل نمود و نتیجه‌گیری کرد که مشکل ارتعاش پل ناشی از کمبود ظرفیت و یا سختی کم اعضاء نبوده و مشخصات و ویژگی‌های دینامیکی سازه پل سبب ایجاد ارتعاش در پل و انتقال آن به ساختمان‌های اطراف می‌گردد.

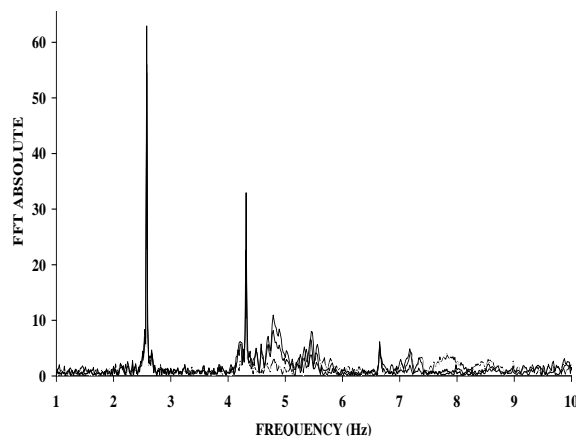
با تفسیر نتایج بارگذاری دینامیکی مشخص گردید پل در فرکانس ۲/۶ هرتز بطور شدید ارتعاش می‌کند و بر خلاف انتظار پل در مود اول به جای حالت خمشی به صورت پیچشی ارتعاش می‌کند که همین امر باعث ایجاد ارتعاشات ناخواسته در پل و ساختمان‌های اطراف شده است (شکل ۱۴). از طرفی به



شکل (۱۱): تغییر مکان قائم داخلی و خارجی تیرهای یک و چهار در مقطع چهارم (وسط دهانه ۴۵ متری) در موقعیت های ۰.۱۵، ۴۱/۲۵، ۵۲/۵، ۶۱/۷۵ و ۹۰ متری پل در آزمایش پیچش استاتیکی

### ۸- نتایج آزمایش های بار گذاري دینامیکی

نتایج مربوط به حسگرهای شتابسنج در آزمایش دینامیکی پل بعد از انجام فیلتراسیون در این بخش ارائه می‌شود. در مجموع ۴۴ عدد شتابسنج بر روی پل در نقاط مختلف نصب شده است. به عنوان نمونه اندازه‌ی تبدیل فوریه شتابسنج آزمایش عبور کامیون ۲۸ تنی با سرعت اسمی ۵۰ کیلومتر بر ساعت از خط چهارم در شکل ۱۲ و اندازه تبدیل فوریه ارتعاشات زمین در جهت بیشینه در شکل ۱۳ نشان داده شده‌اند.



شکل (۱۲): اندازه تبدیل فوریه شتابسنج‌های قائم نصب شده در مقطع سوم S3 (تکیه گاه پیوسته)

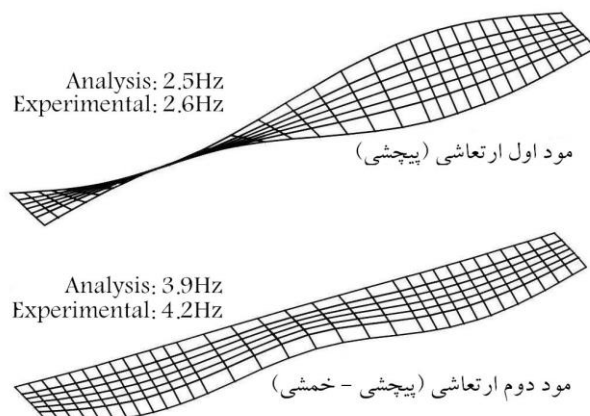
همان‌طور که دیده می‌شود فرکانس مود اول، دوم و سوم غالب ارتعاشی پل به ترتیب ۲/۶، ۴/۲ و ۶/۷ هرتز می‌باشد. مطابق شکل ۱۳ شدت ارتعاش سازه در مودهای اول و دوم قابل توجه و در مود دوم حداکثر می‌باشد.

فرکانس اصلی پل را به مقداری فراتر از  $2/6$  هرتز افزایش داد که به این ترتیب فاصله فرکانس پل و ساختمان‌های اطراف افزایش یافته و احتمال ایجاد پدیده تشدید به حداقل می‌رسد. در راهکاری دیگر استفاده از سیستم‌های جاذب ارتعاش می‌تواند باعث افزایش میرایی و پیرو آن کاهش ارتعاشات شود. همچنین می‌توان بین پل و ساختمان‌های قدیمی و حساس اطراف، سازه‌های واسطی به منظور ایفای نقش فیلتر و جاذب ارتعاشات القایی ژئوتکنیکی ایجاد نمود. البته در صورت اجرای ترکیبی از روش‌های یادشده، عملیات از بین بردن کاستی‌ها و بهبود عملکرد پل از کارایی بسیار مناسب‌تری برخوردار خواهد بود.

### ۱- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله وظیفه‌ی خود می‌دانند که از سازمان مهندسی و عمران شهر تهران، اداره کل خط و ابنیه راه آهن و همچنین آقایان دکتر سعید محمد زاده، دکتر شروان عطائی، مهندس سعید نائبی و مهندس سید امیر سیاسی، به خاطر همکاری‌های ارزنده‌شان تشکر نمایند.

دلیل نزدیکی فرکانس غالب ارتعاشی پل با ساختمان‌های اطراف که دارای فرکانس طبیعی نزدیک به  $2/5$  هرتز می‌باشند، شاید پدیده تشدید رخ دهد.



شکل (۱۴): مود اول و دوم ارتعاشی پل

در مورد پل مورد مطالعه می‌توان با کاهش سرعت و یا هموارسازی روسازی، بویژه در محل درزهای انبساط، انرژی ارتعاشی ورودی به پل را به حداقل رساند. میزان کارایی این راهکار زیاد نمی‌باشد زیرا تأثیر چندانی در بهبود مشخصات دینامیکی پل ندارد. از طرفی با افزایش سختی پل می‌توان

جدول (۱): مقادیر کرنش در وسط دهانه سوم (مقطع شماره ۲) بر حسب میکرواسترین

آزمایش پیچش استاتیکی			آزمایش خمش استاتیکی					نوع و مرحله آزمایش
مرحله ۸ SL34R03	مرحله ۷ SL34R07	مرحله ۶ SL34R11	مرحله ۵ SLAF11	مرحله ۴ SLAF08	مرحله ۳ SLAF07	مرحله ۲ SLAF06	مرحله ۱ SLAF03	نام حسگر
۱۵/۳۳	-۱۴/۵۶	۴/۴۴	۳/۸۵۵	-۱۱/۳۵	-۲۰/۶۰۵	-۲۰/۳۰۵	۵۰/۱۳	S2B1B
-۱۰	۷/۱	۰/۶۱	-۱/۹۲۵	۳/۶۷	۶/۱	۷/۴۸۵	-۳۱/۰۹	S2B1TE
۲۶/۴۵	-۱۹/۴۱	۳/۷	۲/۵۷	-۱۱/۶۸۵	-۲۱/۲۸	-۱۹/۶۰۵	۵۵/۷۳	S2B2B
-۲۰/۹۵	۸/۵۵	-۰/۵۲	-۰/۹	۳/۹۵۵	۷/۹۲۵	۷/۳۵	-۲۰/۹۶	S2B2TE
۷۵/۷	-۲۷/۴۲	-۰/۲۷	۶/۳۵	-۹/۰۲	-۲۱/۶۱	-۲۱/۵۰۵	۶۲/۶۹۵	S2B3B
-۳۲/۹۴	۵/۰۱	-۲/۳۵	-۳/۸۰۵	۰/۷۷۵	۴/۸	۵/۰۹۵	-۲۰/۸۱	S2B3TE
۶۶/۳۱	-۲۵/۸	۴/۳۹	۲/۸۱	-۱۰/۶۷	-۱۹/۴۱۵	-۱۸/۹۲۵	۴۶/۱۴۵	S2B4B
-۳۵/۷۵	۱۳/۱۷	-۰/۹۹	-۱/۶۹	۵/۸۸	۱۰/۶۴	۱۰/۱۸	-۲۶/۵۸	S2B4TI

جدول (۲): مقادیر کرنش در تکیه گاه اول دهانه چهارم (مقطع شماره ۳) بر حسب میکرواسترین

آزمایش پیچش استاتیکی			آزمایش خمش استاتیکی					نوع و مرحله آزمایش
مرحله ۸ SL34R03	مرحله ۷ SL34R07	مرحله ۶ SL34R11	مرحله ۵ SLAF11	مرحله ۴ SLAF08	مرحله ۳ SLAF07	مرحله ۲ SLAF06	مرحله ۱ SLAF03	نام حسگر
۳/۵۶	-۱۲/۳۸	۵/۷۷	۶/۲۸۵	-۱۴/۰۸۵	-۲۸/۸۶۵	-۲۶/۶۰۵	-۱۱/۹۶	S3B1B
۰/۵۱	۲/۸۹	-۱/۴۲	-۲/۶۴	۳/۳۲	۷/۵۵۵	۷/۴۹	۵/۴۳۵	S3B1TE
-۱۰/۲۲	-۲۸/۸۸	۴/۸۹	۵/۵۱	-۱۸/۳۹	-۳۵/۰۶	-۲۳/۹۴	-۲۰/۹۲	S3B2B
۵/۶۷	۹/۱۸	-۲/۷۷	-۲/۱	۴/۷۸	۹/۵۱	۹/۷۹	۵/۰۲۵	S3B2TE
-۳۷/۳۷	-۴۴/۳۴	۶/۹۱	۶/۳۸	-۱۶/۹۱	-۳۲/۶۶۵	-۳۲/۷۳۵	-۲۰/۷۸	S3B3B
۱۲/۹۷	۱۹/۳۱	-۱/۹۶	-۱/۲۲۵	۷/۲۶۵	۱۳/۲۶۵	۱۲/۷۹	۶/۶۵	S3B3TE
-۳۰/۱۷	-۵۲/۵۱	۹/۱۴	۴/۵۹۵	-۱۸/۸۳	-۳۴/۷۶	-۳۲/۰۳۵	-۱۵/۸۷۵	S3B4B
۷/۰۲	۹/۶۷	-۲/۱۸	-۱/۸۱	۳/۳۶۵	۷/۶۶	۶/۸۴	۴/۴۳	S3B4TI



جدول (۳): مقادیر کرنش در وسط دهانه چهارم (مقطع شماره ۴) بر حسب میکرواسترین

آزمایش پیش استاتیکی			آزمایش خمش استاتیکی					نوع و مرحله آزمایش
مرحله ۸ SL34R03	مرحله ۷ SL34R07	مرحله ۶ SL34R11	مرحله ۵ SLAF11	مرحله ۴ SLAF08	مرحله ۳ SLAF07	مرحله ۲ SLAF06	مرحله ۱ SLAF03	
-۶/۵۴	۱۸/۹۷	-۴/۷۶	-۷/۲۱	۱۸/۷۰۵	۴۹/۲	۲۰/۵۳	-۷/۷۰۵	S4B1B
۰/۰۶	-۱۲/۸	۱/۶۲	۰/۷	-۹/۷	-۱۹/۶۲۵	-۶/۶۲	۲/۳۴۵	S4B1TE
-۹/۰۳	۹۳/۰۱	-۱۰/۹۵	-۱۱/۰۲	۲۶/۲۷۵	۶۳/۸۱	۲۸/۰۳	-۹/۴۴	S4B4B
۰/۸۵	-۲۱/۹۱	۲/۶۸	۰/۸۷	-۹/۱۵	-۱۵/۸۷	-۶/۵	۱/۶۹۵	S4B4TI
-۱/۴۵	-۱۰/۸۳	۳/۰۹	۰/۳۵۵	-۶/۹۴	-۸/۴۷	-۴/۲۶۵	۱/۵۸	S4B4TE

جدول (۴): مقادیر تغییر مکان در وسط دهانه سوم (مقطع شماره ۲) بر حسب میلیمتر

آزمایش پیش استاتیکی			آزمایش خمش استاتیکی					نوع و مرحله آزمایش
مرحله ۸ SL34R03	مرحله ۷ SL34R07	مرحله ۶ SL34R11	مرحله ۵ SLAF11	مرحله ۴ SLAF08	مرحله ۳ SLAF07	مرحله ۲ SLAF06	مرحله ۱ SLAF03	
-۱/۱۹	۱/۶۶	-۰/۲۹	-۰/۲۹	۱/۲۳	۲/۲	۲/۱۲	-۴/۱۲	D2B1VI
-۱/۶۱	۱/۷۳	-۰/۳۸	-۰/۳۲۵	۱/۲۶۵	۲/۲۸	۲/۱۶	-۲/۸۲	D2B1VE
-۰/۰۳	۰/۲۶	۰/۰۳	-۰/۰۱۵	۰/۳۱	۰/۴۳	۰/۴	۱/۳۳۵	D2B1LE
-۳/۲۱	۲/۳۲	-۰/۴۲	-۰/۴۰۵	۱/۳۵۵	۲/۴۹	۲/۳۵	-۵/۵۷۵	D2B2VI
-۵/۶۸	۴/۷	-۰/۴۴	-۰/۴۹	۳/۷۸۵	۵/۲۶	۴/۵۴	-۷/۴۵	D2B2VE
۰/۰۵	۰/۳۶	-۰/۰۲	-۰/۰۲	۰/۳۱۵	۰/۴۱۵	۰/۳۷۵	۰/۰۶۵	D2B2LE
-۷/۹۵	۳/۲۸	-۰/۵۶	-۰/۴۲	۱/۵۵	۲/۸۵	۲/۷۲۵	-۶/۱۴	D2B3VI
-۸/۶۱	۳/۴۵	-۰/۵۸	-۰/۴۳	۱/۵۶	۲/۸۶۵	۲/۷۳۵	-۶/۱۱	D2B3VE
-۱/۵۵	۰/۸	-۰/۰۶	-۰/۰۶	۰/۵۰۵	۰/۷۸	۰/۷۱	-۱/۲۱	D2B3LE
-۰/۶۷	۰/۵۲	-۰/۰۹	-۰/۰۵	۰/۱۷۵	۰/۳۹	۰/۳۸۵	-۰/۶	D2B4LI
-۸/۸۴	۳/۹۹	-۰/۶۶	-۰/۵	۱/۶۳	۳/۰۶۵	۲/۹۲۵	-۵/۸۰۵	D2B4VI
-۸/۰۳	۴/۱۲	-۰/۶	-۰/۳۹	۱/۷۵۵	۳/۱۱۵	۲/۹۸۵	-۵/۱۹	D2B4VE

جدول (۵): مقادیر تغییر مکان در وسط دهانه چهارم (مقطع شماره ۴) بر حسب میلیمتر

آزمایش پیش استاتیکی			آزمایش خمش استاتیکی					نوع و مرحله آزمایش
مرحله ۸ SL34R03	مرحله ۷ SL34R07	مرحله ۶ SL34R11	مرحله ۵ SLAF11	مرحله ۴ SLAF08	مرحله ۳ SLAF07	مرحله ۲ SLAF06	مرحله ۱ SLAF03	
۱/۵۶	-۴/۴۸	۱/۴۹	۲/۰۱۵	-۵/۴۷	-۸/۶۹	-۵/۵۵۵	۲/۲۲	D4B1VI
۱/۶۵	-۵/۰۷	۱/۵۹	۲/۰۱	-۵/۸۳۵	-۹/۳۴۵	-۵/۸۹۵	۲/۲۲۵	D4B1VE
۰/۰۵	-۰/۷	۰/۱۲	۰/۲۸	-۰/۹۷	-۱/۴۸	-۰/۹۵۵	۰/۳۱	D4B1LE
۰/۸۶	-۲/۷	۰/۷۵	۰/۵۷	-۰/۹۶	-۱/۶۵۵	-۱/۰۸۵	۰/۶۵۵	D4B4LI
۳/۶۳	-۱۶/۸۶	۳/۵۸	۲/۶۷	-۷/۱۸۵	-۱۱/۷۲	-۷/۴۲	۲/۹۲	D4B4VI
۳/۸۷	-۱۶/۸۳	۳/۸۴	۲/۷۹۵	-۷/۱۱۵	-۱۱/۵۳۵	-۷/۳۵۵	۳/۰۲۵	D4B4VE

## ۱۱- مراجع

Ataei; Aghakouchak; Marefat; Mohammadzadeh; "Sensor Fusion of a Railway Bridge Load Test using Neural Networks", Expert Systems with Applications 29, 678-683, 2005.

Montens M, Vallery C, Park H. Advantages of twin I beams composite solutions for highway and railway bridges. Steel Structures Int J 2003; 3(1): 65-72.

[۱] Scott D. Schiff; Joseph J. Piccirilli; Christopher M.; "Load Testing for Assessment and Rating of Highway Bridges", 2006.

[۲] Peeters, B.; "System identification and damage detection in civil engineering", PhD Thesis, Katholieke University of Leuven, Belgium, 2000.

- Mohammadzadeh, S. ; "Load Testing of the Neka Bridge", Technical report, Railway Faculty of Engineering, Science and Technology University, Tehran, Iran, 2004.
- معرفت، م. ص. " مطالعه مشکلات پل تله زنگ و راه حل های آن " مرکز تحقیقات راه آهن، گروه خط و ابنیه، ۱۳۸۰.
- Marefat; Ghahremani; Ataei; "Load Test of a Plain Concrete Arch Railway Bridge of 20-m Span" Construction and Building Materials 18, 661-667, 2004.
- ANSYS Release 9.0; Documentation - ANSYS Elements Reference, 2004.
- AASHTO; Guide Specifications for Horizontally Curved Steel Girder Highway Bridges with Design Examples for I-Girder & Box-Girder Bridges, 2005.
- [۱۰] Kavatani M, Kobayashi Y, Kawaki H. Influence of elastomeric bearings on traffic-induced vibration of highway bridges. TRR National Research Council 2000; 2(1696): 76-82. [۵]
- [۱۱] Yang YB, Lin CL, Yau JD, Chang DW. Mechanism of resonance and cancellation for train-induced vibrations on bridges with elastic bearings. J Sound Vibr 2004; 269: 345-360. [۶]
- [۱۲] Yau JD, Wu YS, Yang YB. Impact response of bridges with elastic bearings to moving loads. J Sound Vibr 2001; 248(1): 9-30. [۷]
- [۱۳] Green MF, Cebon D. Dynamic response of highway bridges to heavy vehicle loads: Theory and experimental validation. J Sound Vibr 1994; 170(1): 51-78. [۸]
- [۱۴] Zhu XQ, Law SS. Dynamic load on continuous multi-lane bridge deck from moving vehicles. J Sound Vibr 2002; 251(4):697-716. [۹]