

پایش عملکرد (آزمایش بارگذاری) پل بزرگ صدرا واقع در تقاطع غیر همسطح راه آهن شیراز-اصفهان با بزرگراه خلیج فارس

سعید ذوالقدری^۱، علی اکبر مقصودی^۲، امین رضا در تاج نژاد^۳، محمد مقصودی^۴، ادریس مهدیانی^۵

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران- معاون اجرایی و مدیر پروژه آزمایش بارگذاری پل صدرا شرکت اریکه گستران سام

۲- استاد فقید گروه مهندسی عمران دانشگاه شهید باهنر کرمان- مدیر فنی پروژه آزمایش بارگذاری پل صدرا شرکت اریکه گستران سام

۳- کارشناس ارشد مهندسی عمران- کارشناس ارشد پروژه آزمایش بارگذاری پل صدرا شرکت اریکه گستران سام

۴- دکتری مهندسی عمران- کارشناس ارشد پروژه آزمایش بارگذاری پل صدرا شرکت اریکه گستران سام

۵- کارشناس ارشد مدیریت ساخت- معاون فنی موسسه امید پارس کارفرمای پروژه آزمایش بارگذاری پل صدرا

info@agsamco.ir

چکیده

پس از دستیابی مهندسان به تکنولوژی های پیشرفته جهت ساخت سازه های مهم که عمدتاً هزینه های زیادی برای ساختشان مصرف می گردد، اهمیت بررسی کارایی و عملکرد سازه ها بیش از پیش گردید. همچنین از آنجاکه بسیاری از سازه هایی که چند دهه پیش ساخته شده اند هنوز در حال استفاده اند ولی گاهی رو به خراب شدن هستند حصول اطمینان از عملکرد بی نقص سازه هایی با اهمیت بالا مانند سازه های تاریخی و یا ساختمان های حیاتی و پل های ارتباطی خطوط ریلی اصلی یا بزرگراه ها و جاده های مواصلاتی با اهمیت ضروری می باشد. پایش سلامت سازه ها در مفهوم کلی رویه ای جهت تامین اطلاعات دقیق در مورد شرایط و وضعیت موجود سازه و کارایی آن می باشد که می تواند در بازه زمانی کوتاه و یا طولانی مدت مورد بررسی قرار گیرد. این روش ها با توجه به داده های مورد استفاده، به روش های شناسایی دینامیکی و استاتیکی طبقه بندی می شوند. هدف از این روش ها مقایسه پارامترهای مدل تحلیلی یا عددی با داده های اندازه گیری شده و میزان مطابقت آن ها با یکدیگر می باشد. با چنین رویکردی امروزه شاهد پایش مستمر سازه های با اهمیت در کشورهای پیشرفته جهان می باشیم لیکن در ایران این بررسی ها در ابتدای راه می باشد. در مقاله حاضر پس از بیان مبانی پایش عملکرد سازه ها، جزئیات پایش عملکرد سازه ای پل بزرگ صدرا واقع در تقاطع غیر همسطح راه آهن شیراز-اصفهان با بزرگراه خلیج فارس از طریق آزمایش بارگذاری تشریح و نتایج حاصله به تفصیل بیان گردیده است.

کلمات کلیدی: سیستم پایش سلامت سازه SHM، زیرساخت، سیستم های هوشمند، عملکرد

۱. مقدمه

پایش سلامت سازه، طریقه ای در جهت تامین اطلاعات دقیق و به لحظه مرتبط با شرایط سازه و کارایی سازه می باشد که متشکل است از ضبط پارامترهایی به صورت دوره ای، پیوسته و یا دوره ای پیوسته که در کوتاه مدت و یا بلند مدت می باشد. این اطلاعات جمع آوری شده از پایش که معمولاً برای برنامه ریزی و طراحی نگهداری استفاده می شوند، ایمنی و قابلیت اطمینان را افزایش و عدم قطعیت ها را کاهش می دهد [۱]. سازه ها در مدت زمان طولانی تحت تاثیر عوامل مخرب قرار می گیرند. این عوامل به شکل های طبیعی و غیر طبیعی بر سازه اثر می گذارد. عوامل طبیعی از قبیل زلزله، باد و ... و عوامل غیر طبیعی شامل انفجار، ضربه و ... تاثیر مخربی بر بروی سازه دارند. این اثرات مخرب گاهی بر روی سطح خارجی سازه ظاهر می شوند که ترمیم و بازسازی آن به وسیله بازرسی چشمی ممکن می باشد ولی گاهی این اثرات مخرب درون سازه رخ می دهد یا بنا به شرایط هندسی سازه قابل مشاهده به وسیله بازرسی چشمی نمی باشند. بنابراین در چنین حالاتی تشخیص محل خسارت و همچنین شدت آسیب وارد شده به سازه امری دشوار است نیاز به انجام مطالعات و

آزمایش دارد بسیاری از سازه های موجود، که در چند دهه پیش ساخته شده اند، هنوز در حال استفاده ولی رو به خراب شدن هستند. به عنوان مثال، زیر ساخت های عمرانی در اکثر کشورها از جمله پل ها، راه آهن و ساختمان ها اشاره کرد که از لحاظ سازه ای دچار خسارت شده و نیاز به تعمیر و بازسازی دارند. [۱] بنابراین شناسایی به موقع خسارت، تحلیل سازه ی آسیب دیده و پایش سلامت سازه آسیب دیده جهت مقاوم سازی و ایمن سازی آن برای افزایش طول عمر مفید سازه امری بسیار مهم تلقی می گردد. فرض پایه و اساسی در روش شناسایی خسارت در سازه بر این اصل استوار است که خسارت وارد شده به سازه باعث تغییر در خصوصیات فیزیکی مصالح از جمله مدول الاستیسیته آن می شود و همچنین ممکن است سبب تغییر هندسه سازه گردد که منجر به تغییر در برخی از ویژگی های سازه از جمله ممان اینرسی آن می گردد این خسارت ممکن است ناشی از وجود ترک، پیچ و مهره ی شل، جوش منقطع، خوردگی، خستگی و ... ایجاد شود. لذا تغییر در خصوصیات فیزیکی و هندسی سازه منجر به تغییر رفتار دینامیکی سازه می گردد، به عبارت دیگر، پارامترهای حاصل از روش شناسایی دینامیکی از قبیل پارامترهای مودال قبل و بعد از خسارت در سازه متفاوت می باشند. [۵] با توجه به تحقیقات صورت گرفته، پارامترهای مودال از جمله فرکانس طبیعی سازه، اشکال مودی سازه و همچنین پارامترهای مستخرج از آن ها از قبیل نرمی مودال و ... توسط پژوهشگران جهت شناسایی خسارت در سازه ها بسیار با اهمیت می باشند و با توجه به اینکه بخش عظیمی از زیر ساخت ها در مدت زمان طولانی و بنا به علل مختلف دچار خسارت شده اند، لذا پایش سلامت سازه ها امری بسیار مهم و ضروری تلقی می گردد.

۲- مبانی پایش سلامت سازه

۲-۱- مقدمات پایش سلامت سازه

سنجش عملکرد سازه ها از طریق تحلیل پاسخ های دریافت شده از انواع سنسورها انجام می پذیرد و بطور کلی قابل تفکیک به دسته های زیر می باشند:

- مکانیکی: کرنش، تغییر شکل، جابجایی، بازشدگی ترک ها، بار، تنش
- فیزیکی: دما، رطوبت، فشار آب منفذی
- شیمیایی: نفوذ کلراید، نفوذ سولفات، نفوذ کربنات ها، زنگ زدگی

ابزار تشخیص فیزیکی در پایش سلامت سازه مجموعه کامل و یکپارچه ای از تجهیزات دریافتی و سیستم های امدادی شامل قسمت های زیر می باشد

سیستم های حس (سنسورها)

سیستم جمع آوری اطلاعات

سیستم پردازش اطلاعات

سیستم ارتباطات

سیستم تعیین آسیب و مدلینگ

آزمایشات انجام گرفته بر روی سازه ها می تواند در دو گروه عمده استاتیکی و دینامیکی طبقه بندی شود. در آزمایشات استاتیکی در نقاطی از سازه بارهای استاتیکی وارد و تغییر مکان ها در نقاط دیگری از سازه ثبت می شوند. اجرای آزمایشات استاتیکی ساده و براحتی قابل تکرار می باشد و به تجهیزات ویژه ای نیاز ندارد. اما اندازه گیری تغییر مکان های استاتیکی در بسیاری از سازه ها مشکل می باشد و مهمتر اینکه برای دستیابی به پاسخ ها به جواب های قابل قبول و دقیق از عملیات پایش ضروری هست که بارهای استاتیکی در نقاط خاصی از سازه وارد شوند. در این روش اگر قسمتی از سازه به صورت صلب عمل نماید امکان تشخیص خرابی در سازه با مشکلات عمده ای روبرو خواهد شد. با توجه به این موارد بسیاری از محققین استفاده از کرنش های اندازه گیری شده در المان ها را برای تعیین خرابی در آزمایشات استاتیکی پیشنهاد کرده اند.

در صورتی که از آزمایشات دینامیکی برای استخراج اطلاعات اولیه از سازه استفاده شود با وارد کردن بارهای دینامیکی در نقاطی از سازه و یا ایجاد ارتعاشات محیطی، ارتعاشاتی در سازه ایجاد می شود. با اندازه گیری ارتعاشات سازه می توان فرکانس ها یا شکل مودها را به عنوان اطلاعات اولیه استخراج نمود. اجرای آزمایشهای دینامیکی به تجهیزات ویژه ای برای ایجاد ارتعاش و وارد کردن بارهای دینامیکی و اندازه گیری ارتعاش نیاز خواهند داشت.

اطلاعات استخراج شده از آزمایشات دینامیکی به نقاط اثر بارهای دینامیکی حساسیت چندان ندارند. اطلاعات استخراج شده از آزمایشات دینامیکی به تغییرات در پارامترهای المان‌های سازه حساست بیشتری را از خود نشان می‌دهند. اطلاعاتی که از این آزمایشات برای انجام عمل پایش قابل استخراج است عبارتند از فرکانس‌ها، شکل مودها و ارتعاشات نقاطی از سازه و میرایی. [۱۲]

۲-۲- اهداف و منافع حاصل از پایش عملکرد سازه‌ها

هدف از SHM (structural health monitoring system) پایش رفتار درجای یک سازه به صورت دقیق و به میزان کافی جهت کسب اطلاع از کارایی سازه تحت بارهای مختلف سرویس می‌باشد. این موضوع به جهت نمایان ساختن و تشخیص آسیب و تعیین سلامتی و یا شرایط سازه می‌باشد. سیستم SHM باید قابلیت تامین کردن اطلاعات قابل استناد را برای حفظ و افزایش ضریب ایمنی، تضمین کیفیت از طریق ارزیابی کیفیت سازه در طول ساخت، عملیات نگهداری، و تعمیر و حذف هزینه‌های پنهان خسارات، آشکار کردن منابع پنهان از طریق کشف کارایی بهتر سازه نسبت به طراحی اولیه را دارا باشد. جنبه اقتصادی رویه پایش سلامت سازه نیز همچنین بسیار منطقی می‌باشد و مانند خرید یک بیمه نامه برای سلامت سازه می‌باشد. هزینه انجام پایش مستمر سلامت سازه برای یک دوره ده ساله بین ۲ تا ۵ درصد کل هزینه احداث سازه می‌باشد. مهم ترین بحث در مورد شناسایی خسارت در سازه استفاده از روش های غیر مخرب می‌باشد.

۲-۳- کام‌های پایش سلامت سازه و روش‌های شناسایی خسارت و پایش سلامت سازه

پیرامون مراحل پایش سلامت سازه، محققین در بررسی در پیشینه موضوع به فصل مشترکی رسیده اند که نتایج به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- تعیین سازه‌های نیازمند پایش عملکرد
 - ۲- جمع‌آوری اطلاعات اولیه، تشخیص وجود خسارت در سازه، تعیین موقعیت هندسی نقاط آسیب پذیر یا خسارت دیده، ارزیابی شدت خسارت
 - ۳- طراحی سیستم پایش سلامت سازه
 - ۴- نصب و کالیبره کردن سنسورها
 - ۵- جمع‌آوری، تحلیل و مدیریت اطلاعات و پیش بینی طول عمر باقی مانده
- به طور کلی روش‌های شناسایی و ارزیابی خسارت در سازه به دو دسته تقسیم می‌گردد: یکی روش‌های شناسایی استاتیکی و دیگری روش‌های شناسایی دینامیکی می‌باشد.

۳- وضعیت پایش سلامت سازه‌ای در جهان

بررسی تاریخچه تحقیق نشان می‌دهد که در دنیا بیشترین استفاده از سیستم پایش سلامت سازه‌ها مربوطه به پروژه‌های صنایع نفت و گاز و پتروشیمی، صنعت حمل و نقل زمینی (بزرگراه‌ها و پل‌ها) و صنایع سده‌سازی می‌باشند و در این صنایع تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام گرفته است. اگرچه در صنعت مهندسی ساختمان SHM واژه نسبتاً جدیدی به شمار می‌رود لیکن استفاده از ابزار دقیق جهت ارزیابی سلامت سازه‌ها به خصوص پل‌ها و سدها دارای سابقه نسبتاً طولانی مدتی می‌باشد.

بر اساس گزارش‌های انجمن بین‌المللی پایش سلامت سازه‌ای و زیرساخت‌ها (ISHMII) بسیاری از پل‌ها و سازه‌ها در کشورهای اروپایی به سبک مجهز هستند و وقوع هر خسارتی مستمراً پایش می‌گردد. مقدم بر این‌ها، فرهنگ اروپا از ریشه‌هایی در تاریخ برخوردار است، که آن‌ها را واداشته تا این‌به

های قدیمی و متروکه به عنوان نماد فرهنگی آن ها محسوب می شود را در وضعیت مطلوبی نگهداری کنند و این موجب پایش سلامت سازه ای یا SHM این ابنیه ها گردید و سبب بسط و توسعه این سیستم ها گردیده است. ISHMII مرجع کاملی را برای پل هائی که در سرتاسر اروپا پایش می شوند راه اندازی نموده است. در ایالت متحده امریکا بسیاری از دانشگاه ها از طریق تحقیقات در گیر پایش سلامت سازه ای و پل ها و ابنیه مسکونی شده اند. گروه تفحص خانه های قدیمی آمریکا (HABS) و ثبت تاریخی مهندسی (HEAR) اطلاعات قابل ملاحظه ای را راجع به موضوع مورد تحقیق فراهم آورده اند و از پایگاه اطلاع رسانی بسیار خوبی برخوردار هستند [۷]. شناسنامه گزارشی زیرساخت ها که توسط انجمن مهندسان سازه آمریکا ASCE در سال ۱۹۹۷ تهیه گردید یک از اقدامات بسیار ارزشمند در این زمینه بوده است.

براساس گزارش مراجع دولتی هندوستان تا سال ۱۹۹۸ تعداد سدهای غیر ایمن ۳۳ درصد یعنی ۳۵۰۰ افزایش یافته است. سدهائی که تحت نظر حکومت فدرال قرار دارد از شرایط خوبی برخوردار بوده، در صورتیکه به دلیل دریافت نسبتا کم هزینه مرمت، تعداد آن هائی که ایمن نمی باشند در حال افزایش است. تا ۱۲ سال آینده ۱۰/۱ بیلیون دلار لازم است تا سدهائی که در حالت بحرانی بوده و تحت نظارت حکومت فدرال نیستند مشخص و مقاوم سازی گردند و سدهائی که خطر مستقیمی را متوجه انسان ها می نمایند برچیده شوند.

۴- وضعیت پایش سلامت سازه ای در ایران

سدها در ایران از اهمیت ملی زیادی برخوردارند. گزارشی راجع به روش های ایمن سازی سد مبین این نکته مهم است که از جنبه ابزار دقیق که بخش حیاتی پایش محسوب می گردد با خلاء پیوستگی بین مسئولین زمان طراحی و اجرا از یک طرف و مسئولین بهره برداری و نگهداری از طرف دیگر وجود دارد. قرائت های اولیه ابزار دقیق نهاده شده در سد به ندرت قابل دسترس است، عدم دسترسی به چنین اطلاعاتی تجزیه تحلیل های بعدی را با مشکل روبرو می سازد. پل ها جزء سازه های مهم در خطوط ارتباطی زمینی محسوب می شوند و برنامه بازرسی مستمر و نگهداری در آن ها از اهمیت بالایی برخوردار است. آزمایشات بارگذاری به روش استاتیکی و دینامیکی و... در پل های جدیدالاحداث بر طبق استانداردها و آیین نامه های مربوطه الزامی گردیده است و عموما اجرا می شود. پایش موقتی و دائم برای بررسی هرگونه آسیب و خسارت به خصوص خسارات احتمالی ناشی از وقایع طبیعی نظیر زمین لرزه، رانش زمین، طوفان، سیل و نظایر آن مفید است. راه بسیار موثر به جهت کشف خسارات و بروز رسانی پل ها استفاده از تحلیل مدل است که صرفا قادر به آشکارسازی تغییرات کلان ناشی از نشست پی، گسیختگی در باربری یا لطمات مشابه نظیر افت تنش در کابل اصلی یا گسست اجزاء عرشه می باشند. در این روش نیازی به حسگرهایی با دقت بالا نمی باشد لیکن بهینه سازی تعداد و موقعیت حسگرها ضروریست. سیستم پیشرفته پایش سلامت سازه ای برای تعدادی از پل های مهم نظیر پل ورسک واقع در روستای ورسک عباس آباد در ۴۵ کیلومتری جنوب شهر زیراب و ۸۵ کیلومتری شهر قائمشهر در محور فیروزکوه و در مسیر راه آهن شمال راه اندازی شده است. این پل دو کوه عظیم و سخت گذر عباس آباد را به یکدیگر اتصال می دهد در سال های اخیر مقاوم سازی گردیده و مجهز به سامانه GPS به صورت ترکیب با نرم افزار پردازش گر پیشرفته ای می باشد که پایش مستمر پل را در تغییرات مختلف آب و هوایی و با دقت بسیار زیاد عملی ساخته و این تغییرات را با دقت میلی متر نشان می دهد.

بین سالهای ۱۳۸۶ تا ۱۳۸۹ با ارزیابی ۱۱۵۰ پل که در ایران ارزیابی شد، ضعف سازه ای و فرتوت شدن عملکردی از ۲۸/۵ درصد به ۲۷/۱ درصد کاهش نشان داد. به هر حال، ادامه این کاهش مستلزم هزینه کرد طی دوره ای بلند مدت برای رفع تمامی نقاط ضعف پل می باشد. آزمایش بارگذاری پلها در ایران در حال حاضر مطابق دستورالعمل فصل هفتم نشریه شماره ۱۳۹ سازمان مدیریت تحت عنوان آیین نامه بارگذاری پل های راه آهن انجام می شود.

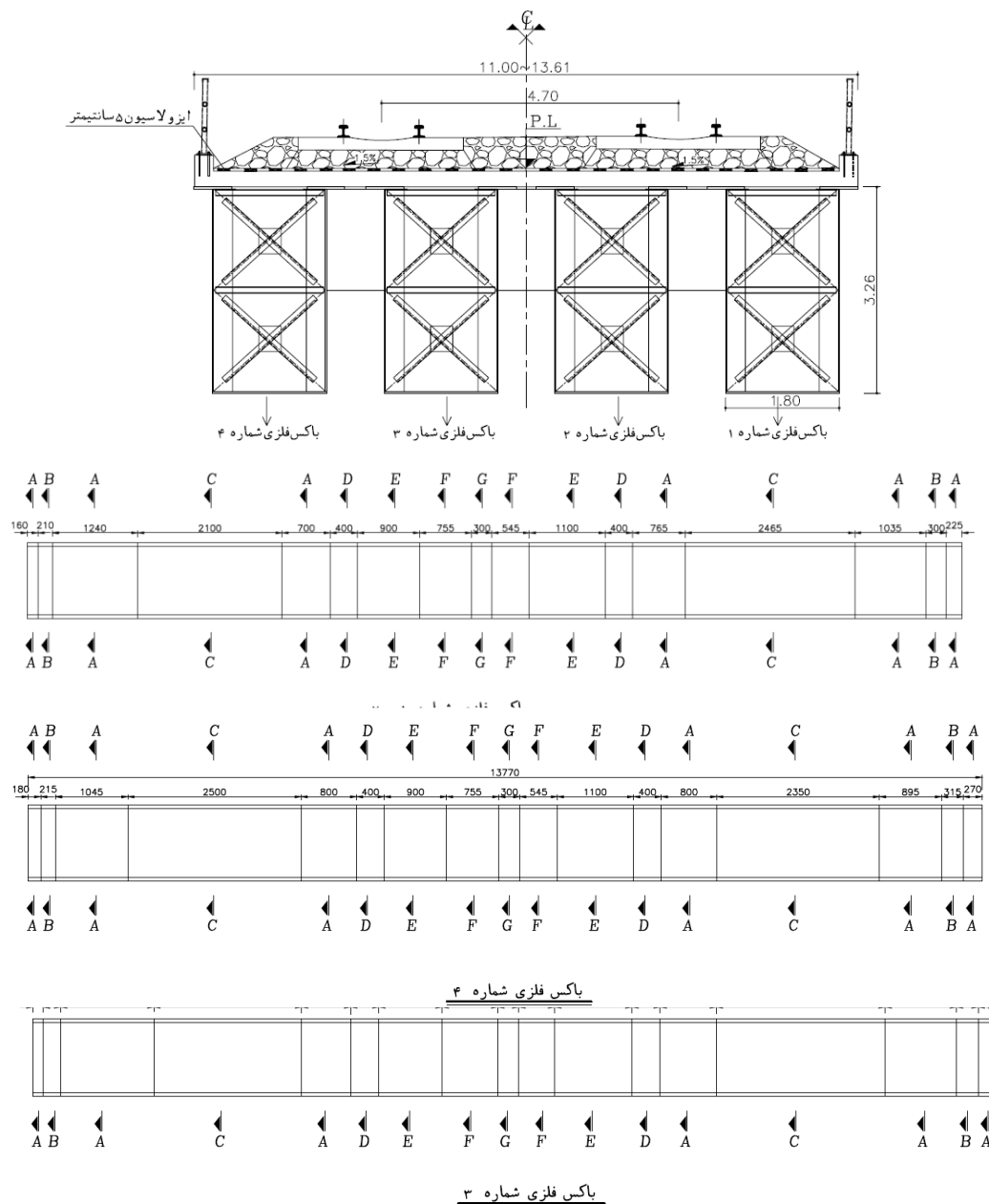
۵- معرفی پل بزرگ صدرا

۵-۱- کلیات

پل تقاطع صدرا در کیلومتر ۷۱+۱۱۰ راه آهن اصفهان-شیراز به صورت روگذر از روی بزرگراه خلیج به عنوان مواصلاتی اصلی شهر شیراز به شهر جدید صدرا عبور می کند. پل شامل دو دهانه هر یک به طول حدود ۶۸ متر می باشد. عرض کل تابلیه متغیر بین ۱۱ تا ۱۳/۶ متر شامل دو خط راه آهن به صورت رفت و برگشت می باشد. پل دارای زاویه بیه حدود ۷۳ درجه می باشد.

۵-۲- سیستم سازه ای عرشه

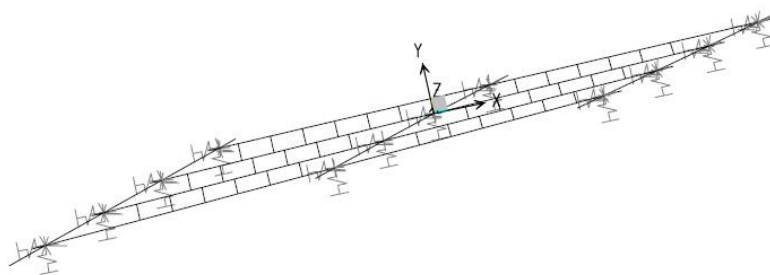
سیستم سازه ای پل در تابلیه از نوع تیوروق جعبه ای مرکب به تعداد ۴ عدد در هر دهانه می باشد که به صورت سراسری و پیوسته بر روی تکیه گاهایی دارای نوبن در محل کوله ها و پایه میانی مستقر گردیده اند. پایه وسط شامل ۴ ستون کتابی شکل بوده که از بالا به سرستون و از پائین به پی عمیق (سرشمع و شمع) منتهی می گردند. کوله ها از نوع بسته می باشند که بر روی پی عمیق قرار گرفته اند.



شکل ۱: مقطع پل صدرا

۶- محاسبات بارگذاری پل بزرگ صدرا

الف : جهت بارگذاری سربارهای زنده ، عرشه پل به صورت ۳ بعدی مدل سازی شده و بارگذاری لازم بر روی آن انجام گرفته است.
ب : بارگذاری انجام گرفته در هر قسمت به نحوی انجام می شود که هیچ یک از تلاش های خمشی و برشی از تلاش های بار زنده طراحی مربوط مطابق بند ۷-۲ نشریه شماره ۱۳۹۹ بیشتر نگردد. دفترچه محاسبات توسط مشاور پروژه تهیه شده و محاسبات آن براساس نتایج حاصل از آزمایش بارگذاری کنترل گردیده است.



شکل ۲: تصویر سه بعدی عرشه در مدل سازی سه بعدی عرشه پل صدرا

جدول ۱: خلاصه نتایج لنگر خمشی بار زنده در مدل های دو بعدی و سه بعدی

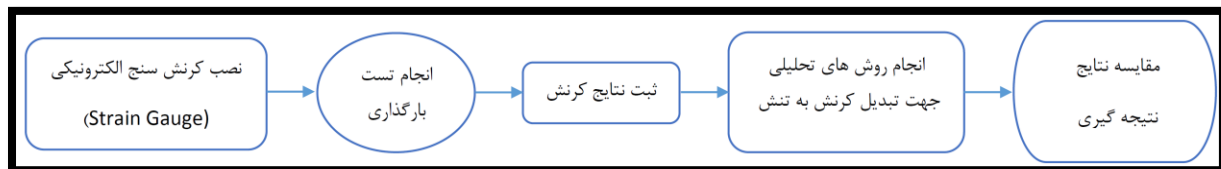
لنگر خمشی منفی ماکزیمم (در محل پایه میانی)	لنگر خمشی مثبت ماکزیمم (دهانه اول)	لنگر خمشی مثبت ماکزیمم (دهانه دوم)	لنگر خمشی بر اثر بار زنده Ton.m
۱۷۱۷.۴۴	۸۴۵.۲	۱۱۹۷.۹۲	فایل سه بعدی
۲۵۸۱.۸۷	۱۸۵۱.۰۶	۱۹۵۲	فایل دو بعدی

۷- برنامه ریزی و اجرای آزمایش بارگذاری پل بزرگ صدرا

آزمایش بارگذاری پل صدرا به عنوان پیش فرض اولیه جهت فراهم شدن امکان تحویل موقت پروژه راه آهن اصفهان- شیراز مطابق دستورالعمل فصل هفتم آئین نامه بارگذاری پل های راه آهن برنامه ریزی گردید. در مورخ ۱۳۹۶/۰۲/۲۸ جهت امکان سنجی و برآورد محدودیت های دسترسی و انسداد و ... تهیه طراح اولیه آزمایش از پل صدرا بازدید به عمل آمد. سپس انطباق نقشه های چون ساخت پل با پل موجود کنترل گردید و طرح اولیه آزمایش براساس مفروضات ارائه شده و نتایج حاصل از بازدید محلی تهیه شد.

در مورخ ۱۳۹۶/۰۶/۲۵ مجوز تجهیز کارگاه از شهرداری صدرا اخذ گردید و تجهیز کارگاه از مورخ ۱۳۹۶/۰۶/۲۵ لغایت ۱۳۹۶/۰۶/۲۷ به صورت کامل انجام گرفت. اخذ مجوز انسداد مسیر از پلیس راهور استان فارس از مورخ ۱۳۹۶/۰۶/۲۲ لغایت ۱۳۹۶/۰۷/۰۲ به طول انجامید و سرانجام مجوز انسداد صرفاً برای ۴ روز کاری از مورخ ۱۳۹۶/۰۷/۰۲ لغایت ۱۳۹۶/۰۷/۰۵ صادر گردید. مجوز تاکید می نماید ساعت کار از ۸ تا ۱۸ بوده و صرفاً انسداد یک محور از هر مسیر در هر بازه زمانی امکان پذیر است. با توجه به محدودیت های مجوز کار کارشناسان گروه جهت نصب تجهیزات و ابزار دقیق و کابل کشی های مربوطه با دشواری زیادی همراه گردید لیکن کار با تلاش شایسته تمام اعضای گروه در مدت زمان تعیین شده به پایان رسید و آزمایش نهایی بر مبنای برنامه از پیش

تعیین شده راس ساعت ۷ صبح مورخ ۱۳۹۶/۰۷/۰۶ آغاز و با همکاری شایسته گروه اعزامی راه آهن در ساعت ۹:۳۰ و در کمتر از ۲:۳۰ به پایان رسید در حالیکه برای آزمایش ۵.۵ ساعت مجوز مسدودی صادر شده بود. برای آزمایش بارگذاری از لوکوموتیو مدل GM با وزن حدود ۱۲۰ تن و دو واگن شن کش که وزن تقریبی هر یک حدود ۸۰ تن بود استفاده گردید.



شکل ۳: مراحل انجام پایش شاه تیرهای پل صدرا

۷-۱- حالت های بارگذاری پل بزرگ صدرا

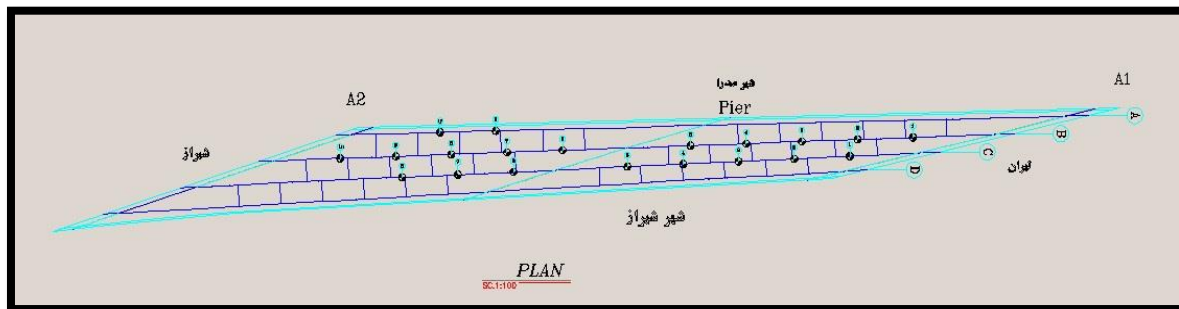
با هماهنگی مشاور طرح و اداره کل راه آهن ناحیه فارس ۶ حالت بارگذاری برای این پل در نظر گرفته شده است. قرائت های انجام شده برای حالات ۶ گانه زیر و در دو نوبت صورت پذیرفته است.

- ۱- عبور قطار با سرعت ۶۰ کیلومتر در ساعت از سمت ایستگاه شیراز به سمت ایستگاه مرودشت (بارگذاری دینامیکی)
- ۲- عبور قطار با سرعت ۳۰ کیلومتر در ساعت از سمت ایستگاه مرودشت به سمت ایستگاه شیراز (بارگذاری دینامیکی)
- ۳- توقف قطار بر روی پل در فواصل ۱۰ متری از سمت ایستگاه مرودشت به سمت ایستگاه شیراز (بارگذاری استاتیکی)
- ۴- توقف قطار بر روی پل در فواصل ۳۰ متری از سمت ایستگاه مرودشت به سمت ایستگاه شیراز (بارگذاری استاتیکی)
- ۵- ترمز قطار در حال حرکت با سرعت ۶۰ کیلومتر در ساعت از سمت ایستگاه شیراز به سمت ایستگاه مرودشت و توقف بر روی پل (بارگذاری دینامیکی)
- ۶- ترمز قطار در حال حرکت با سرعت ۶۰ کیلومتر در ساعت از سمت ایستگاه شیراز به سمت ایستگاه مرودشت بر روی پل و توقف بعد از پل (بارگذاری دینامیکی)

۷-۲- تجهیزات و ابزار دقیق مورد استفاده جهت آزمایش بارگذاری پل صدرا

کلید تجهیزات و ادوات فنی و نیز لوازم مصرفی و ابزار دقیق مورد استفاده جهت انجام پروژه پایش از محصولات شرکت TML ژاپن می باشد که از طریق نماینده فنی و فروش آن شرکت در ایران خریداری گردید (جدول ۲).

با توجه به حجم ترافیک عبوری جاده شیراز به شهر جدید صدرا و عدم امکان انسداد پیش از یک خط از هر مسیر بنا به دستور پلیس راهور عملاً امکان استفاده از پایه موقت (داربست) وجود نداشته لذا استفاده از خیز سنج های الکترونیکی برای تمام مقاطع امکان پذیر نبود و از کرنش های الکترونیکی به عنوان تنها گزینه پیش رو استفاده گردید و بر روی هر شاه تیر ۱۰ کرنش سنج نصب شد و ابزارها از سمت کوله A1 به سمت کوله A2 از ۱ تا ۱۰ به صورت افزایشی شماره گذاری گردید. ابزار بندی شاه تیرهای پل صدرا به صورت شماتیک در شکل شماره ۴ شان داده شده است. با استفاده از دستگاه نگاشت اطلاعات، کرنش های مقاطع مختلف ثبت و سپس برای تبدیل نتایج کرنش به تنش و ممان با استفاده از روش های تحلیلی مقادیر کرنش مقطع به ممان مقطع تبدیل می گردد.



شکل ۴: تصویر شماتیک ابزار بندی عرشه پل صدرا

جدول ۲: مشخصات مکانیکی و تعداد ابزارهای دقیق مورد استفاده در پایش پل بزرگ

ردیف	نوع حسگر	مدل TML	تعداد	توضیحات
۱	Strain Gauge	FLA-10	۲۴	کرنش سنج ۱۲۰ اهمی برای پایش المانهای فولاد
۲	Data Logger	-		پردازشگر داده‌ها
۳	Switching box system	-		دارای ۵۰ کانال
۴	چسب	CN	۲	-
۵	سیم		۲۱۳۰	-

کرنش سنج‌ها مبدل‌هایی هستند که اعمال فشار یا کشش روی آن‌ها موجب تغییر مقاومت الکتریکی‌شان می‌گردد و از فلزات نیمه هادی ساخته شده‌اند. در صورتی که نیرو به طرف داخل جسم اعمال شود تنش فشاری موجود سبب کوتاه تر شدن جسم می‌گردد و تنش کششی سبب افزایش طول جسم خواهد گردید. با تغییر ابعاد فیزیکی مقاومت الکتریکی نیز تغییر می‌نماید و ارقام ثبت شده موبد این تغییر می‌باشند. لازم به توضیح است که تغییر مقاومت الکتریکی در جهت طولی بسیار بیشتر از این تغییرات در جهت عرضی می‌باشد. [۱۱]

۷-۳- تشریح و تحلیل نتایج حاصل از آزمایش بار گذاری پل

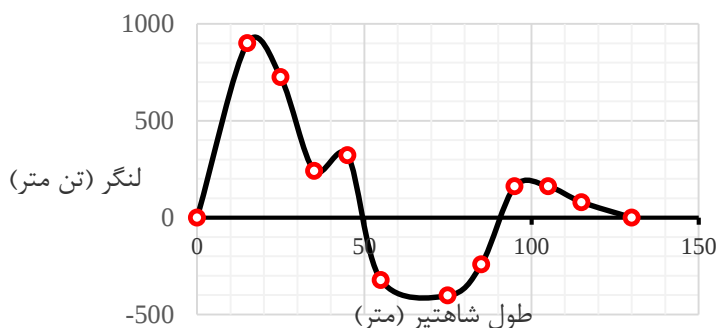
از بین دو بارگذاری استاتیکی انجام شده بارگذاری با توقف در فواصل ایستگاهی ۱۰ متری بحرانی تر تشخیص داده شد که نتایج حاصل از آن در زیر با نتایج مدل‌سازی مقایسه گردیده است. قطار آزمایش هر ۱۰ متر از سمت کوله A2 توقف کرده و اطلاعات دریافتی از سنسورها ثبت گردید. قطار ابتدا از سمت کوله A2 حرکت و توقف قطار برای فواصل ۱۰ متر به ۱۰ متر برای حصول بدترین حالت بارگذاری استاتیکی انجام شده است. با توجه به بررسی داده‌ها بحرانی ترین حالت برای محاسبه بیشینه لنگر استفاده شده که در جداول مربوطه آورده شده است.

جدول ۳: مقادیر بیشینه کرنش و ممان بدست آمده از نتایج پایش شاه تیرهای B و C در بارگذاری استاتیکی با توقف هر ۱۰ متر

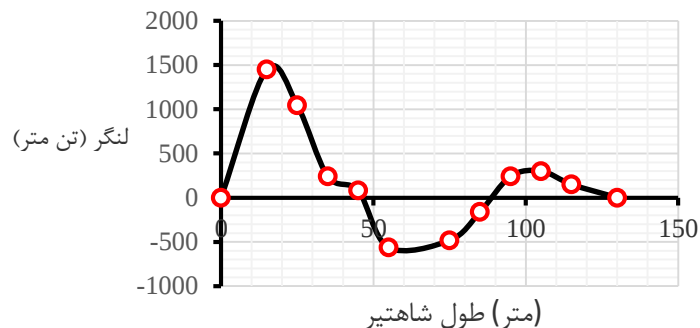
moment	location	moment	برجسب کرنش سنج	strain	شماره کرنش سنج
۰	۱۳۰	۰	C1	۰	۱
۱۵۰	۱۱۵	۱۶۱.۰۳۰۵۹۵۸	C2	۲	۲
۳۰۰	۱۰۵	۲۴۱.۵۴۵۸۹۳۷	C3	۳	۳

۴	۵	C4	۴۰۲.۵۷۶۴۸۹۵	۹۵	۲۴۱.۵۴۵۸۹۴
۵	۴	C5	۳۲۲.۰۶۱۱۹۱۶	۸۵	-۱۶۱.۰۳۰۶
۶	۴	C6	۳۲۲.۰۶۱۱۹۱۶	۷۵	-۴۸۳.۰۹۱۷۹
۷	۳	C7	۲۴۱.۵۴۵۸۹۳۷	۵۵	-۵۶۳.۶۰۷۰۹
۸	۹	C8	۷۲۴.۶۳۷۶۸۱۲	۴۵	۸۰
۹	۰	B1	۰	۳۵	۲۴۱
۱۰	۰	B2	۰	۲۵	۱۰۴۶.۶۹۸۸۷
۱۱	۳	B3	۲۴۱.۵۴۵۸۹۳۷	۱۵	۱۴۴۹.۲۷۵۳۶
۱۲	۲	B4	۱۶۱.۰۳۰۵۹۵۸	۰	۰
۱۳	۶	B5	۴۸۳.۰۹۱۷۸۷۴		
۱۴	۷	B6	۵۶۳.۶۰۷۰۸۵۳		
۱۵	۳	B7	۲۴۱.۵۴۵۸۹۳۷		
۱۶	۱	B8	۸۰.۵۱۵۲۹۷۹۱		
۱۷	۱۳	B9	۱۰۴۶.۶۹۸۸۷۳		
۱۸	۱۸	B10	۱۴۴۹.۲۷۵۳۶۲		

لنگر مثبت دهانه اول با استفاده از پردازش داده‌های دیتالاگر در جدول شماره ۴ مشخص شده است. همچنین منحنی لنگر خمشی شاهتیر B در شکل ۵ و منحنی لنگر خمشی شاهتیر C در شکل ۵ نشان داده شده است.

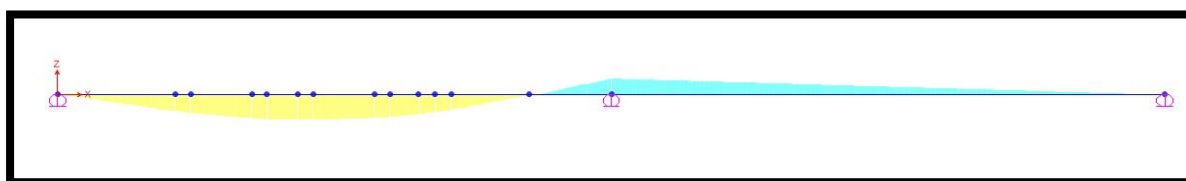


شکل ۶: منحنی لنگر خمشی شاه تیر C



شکل ۵: منحنی لنگر خمشی شاه تیر B

برای صحت سنجی مدل محاسباتی، مدل بارگذاری قطار آزمایش بر روی مدل سه بعدی سازه ای طرح اولیه قرار داده شد و نتایج با نتایج حاصل از آزمایش بارگذاری سازه مقایسه گردید. مقایسه لنگر محاسباتی طراحی پل با نتایج به دست آمده از پایش پل و مدل بارگذاری در جدول زیر آورده شده است. بر اساس محاسبات انجام شده بیشترین لنگر مثبت در شاهتیر شماره B اتفاق افتاده و مقدار آن از روی مدل سه بعدی برابر ۵۸۴ تن متر می‌باشد. بحرانی ترین حالت بارگذاری استاتیکی را بر روی مدل دو بعدی شاهتیر B قرار داده و نتایج حاصل از لنگرهای تیر میانی در شکل ۷ آورده شده است.



شکل ۷: بحرانی ترین حالت بارگذاری استاتیکی در مدل دو بعدی شاه تیر B

همانطور که در منحنی های شکل ۸ نشان داده شده است، مشاهده می گردد، بیشترین تنش تولید شده در بین تمامی ایستگاه های پایش شده، مربوط است به ایستگاه B10. برای آزمایش بارگذاری استاتیکی با فواصل توقف ۱۰ متر، که حدوداً ۰/۱ تنش تسلیم در آن تنش ایجاد شده است.

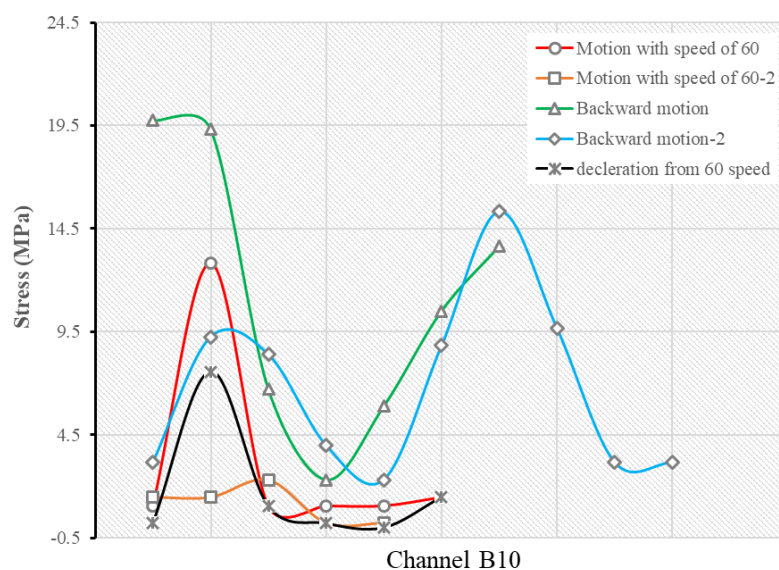
جدول ۷: مقایسه نتیجه لنگر بدست آمده از مدل سازه های انجام شده با نتایج به دست آمده از پایش پل

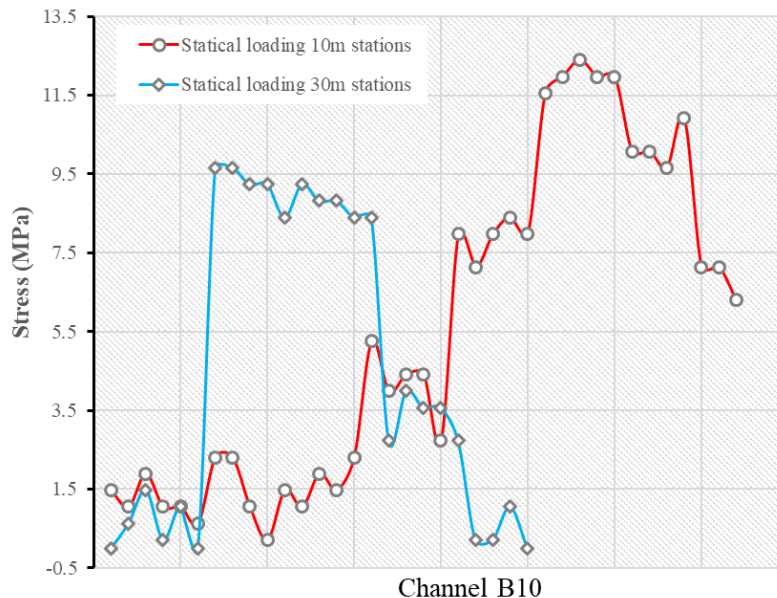
موضوع	محاسبات سازه سه بعدی	محاسبات سازه دو بعدی	درصد اختلاف
مقدار لنگر دهانه از سمت ایستگاه شیراز توسط طراح	۱۱۹۷	۱۹۵۲	۳۹ درصد

موضوع	محاسبات سازه سه بعدی	محاسبات سازه دو بعدی	درصد
مقدار لنگر دهانه از سمت ایستگاه شیراز از بارگذاری بر روی مدل پل	۸۴۵	۱۵۲۷	۴۵ درصد

موضوع	مدل سه بعدی	مدل دو بعدی	بارگذاری قطار آزمایش
مقدار لنگر (تن متر) بارگذاری	۸۴۵	۱۵۲۷	۱۴۴۹
مقدار لنگر طراحی	۱۱۹۷	۱۹۵۲	-

موضوع	بیشترین لنگر محاسباتی	لنگر به دست آمده از بارگذاری	اختلاف به درصد
لنگر (تن متر)	۱۹۵۲	۱۴۴۹	۷۴ درصد





شکل ۷: ماکزیمم تنش های ایجاد شده

۷-۴- محاسبات خیز:

در روش پیشنهادی آئین نامه انگلستان برای تخمین خیز از روش لنگر- انحناء بهره جسته شده است، این در حالی است که در روش پیشنهادی آئین نامه آمریکا از روش تعیین ممان اینرسی برای تعیین خیز استفاده شده است. بررسی ها نشان می دهد که محاسبات خیز بکمک آئین نامه انگلستان از دقت و مقدار بیشتری نسبت به آئین نامه آمریکا برخوردار است. بنابراین در این گزارش با توجه به برداشت کرنش های افقی بال پایین شاهتیرها در نقاط مختلف و مشخص بودن عمق تار خنثی که با فرض رفتار خطی و الاستیک فولاد بر مرکز سطح شاهتیر منطبق خواهد بود، می توان انحناء را در ایستگاه های بحرانی بدست آورد و با استفاده از رابطه پیشنهادی آئین نامه انگلستان که در زیر آورده شده است به حداکثر خیز شاهتیر رسید در وسط دهانه رسید.

محاسبات خیز حداکثر برای دو حالت آزمایش بارگذاری استاتیکی با فواصل توقف ۱۰ متر و ۳۰ متر که پیش تر بحرانی ترین آزمایش های بارگذاری با توجه به نتایج پایش معرفی شدند ارائه می گردد. همچنین یادآور می شود که حداکثر خیز در وسط هر دهانه در دو شاهتیر B و C (ایستگاههای B4 و C4 (وسط دهانه اول) و B8 و C8 (وسط دهانه دوم) با توجه به محاسبات زیر ارائه می گردد:

جدول ۸: حداکثر خیز شاهتیرهای B و C را در وسط دهانه اول و دوم به دست آمده از پایش پل

نوع آزمایش بارگذاری	نام شاهتیر	حداکثر کرنش بال پایین شاهتیر در وسط دهانه اول ($\times 10^{-6}$)	حداکثر کرنش بال پایین شاهتیر در وسط دهانه دوم ($\times 10^{-6}$)	انحناء شاهتیر در وسط دهانه اول	انحناء شاهتیر در وسط دهانه دوم	حداکثر خیز شاهتیر در وسط دهانه اول (mm)	حداکثر خیز شاهتیر در وسط دهانه دوم (mm)
بارگذاری استاتیکی با فواصل توقف ۱۰ متر	شاهتیر B	۲۵	۳۸	$1/67 \times 10^{-7}$	$2/54 \times 10^{-7}$	۶/۶۰	۹/۹۰
	شاهتیر C	۲۱	۲۹	$1/40 \times 10^{-7}$	$1/94 \times 10^{-7}$	۵/۵۰	۷/۶۷
	شاهتیر B	۲۲	۴۰	$1/47 \times 10^{-7}$	$2/7 \times 10^{-7}$	۵/۵۷	۱۰/۰۶

بارگذاری استاتیکی با فواصل توقف ۳۰ متر	شاهتیر C	۲۳	۲۸	$1/53 \times 10^{-7}$	$1/87 \times 10^{-7}$	۶/۰۰	۷/۳۵
---	----------	----	----	-----------------------	-----------------------	------	------

اگر خیز مجاز شاهتیر را $L/500$ در نظر بگیریم که برای دهانه ۶۸ متر مقدار ۱۳۶ میلیمتر را نتیجه می دهد. همچنین بیشینه خیز محاسبه شده برای لنگر نظیر بارگذاری در شاهتیر B برابر با $18/5$ میلیمتر می باشد.

۸- نتیجه گیری

- ۱- با اجرای همگانی سیستم های پایش سلامت سازه ها که روشی در جهت دستیابی به توسعه پایدار است می توان از صرفه های اقتصادی فراوان آن بهره مند شد. با گردآوری اطلاعات و پایش و تحلیل آن ها می توان درخصوص طراحی های انجام شده و در مرتبه ای بالاتر درخصوص آیین نامه های طراحی اظهار نظر نموده و زمینه لازم درخصوص تجدید نظرهای مورد نیاز را فراهم نمود.
- ۲- به طور کلی با توجه به نتایج به دست آمده از بارگذاری استاندارد و و پایش بارگذاری قطار آزمایش و تحلیل خروجی های کرنش و تبدیل آنها به تنش های نرمال و ممان در شاه تیرهای بحرانی (شاه تیر B و C)، پل در وضعیت موجود به لحاظ طراحی و اجرا از حاشیه ایمنی زیادی برخوردار بوده است.
- ۳- بیشترین تنش تولید شده در بین تمامی ایستگاه های پایش شده، مربوط است به ایستگاه B10 برای آزمایش بارگذاری استاتیکی با فواصل توقف ۱۰ متر، که حدوداً $1/0$ تنش تسلیم در آن تنش ایجاد شده که این فاصله ۹۰ درصدی حداکثر تنش در بحرانی ترین شاه تیر، تا تنش تسلیم، نشان از قابل قبول بودن طرح پل بر اساس نتایج خروجی پایش برای پارامتر کرنش و تنش دارد.
- ۴- مقادیر خیز پایش شده حداکثر در دهانه دوم $0.6/10$ میلیمتر بوده که ۷ درصد خیز مجاز بوده و حکایت از قابل قبول بودن طرح پل بر اساس نتایج خروجی پایش برای پارامتر خیز دارد.
- ۵- فاصله بسیار زیاد تنش های مجاز با تنش های واقعی در سازه پل و نیز اختلاف نسبتاً زیاد خیز مجاز با خیز اندازه گیری شده را می توان به ضرایب اطمینان نسبتاً بالای اعمال شده در طراحی نسبت داد.

۹- منابع

- ۱- گلابچی، م.، ضرورت بهره گیری از فناوری های نوین ساختمانی، ساخت و ساز در پایتخت. ۱۳۸۵: پردیس دانشکده فنی دانشگاه تهران. p. 16
- ۲- قاضی مرادی، م.، امکان سنجی بکارگیری یک متدولوژی به منظور ماکزیمم سازی قابلیت اطمینان و موفقیت پیمان های طرح و ساخت، پنجمین کنفرانس بین المللی مدیریت ساخت، ۱۳۸۸: تهران. p. 13
- ۳- Wenzel, h., health monitoring of bridge. TG³⁰⁵.w⁴⁶. Vol. ۵-۰۳۱۷۳-۴۷۰-۰۰- ۹۷۸. ۲۰۰۹, India: Wiley.
- ۴- Wu, X., J. Ghaboussi, and J.H. Garrett Jr, Use of neural networks in detection of structural damage. Computers & Structures, ۱۹۹۲. ۴۲(۴): p. ۹۵۶- ۶۴۹
- ۶- حلاج، ش. بررسی وضعیت طراح های عمرانی و ارائه معیارهای اولویت بندی به عنوان راهکار اصلی، م.پ. ها ۱۳۸۹، مجلس شورای اسلامی: تهران.
- ۷- Guidelines for Structural Health Monitoring, ISIS Canada.

- ۸- Report card for America's Infrastructure. ۲۰۰۵, American Society of Structural Engineers.
- ۹- میلاد جهانگیری کاربرد تکنیک بهینه سازی تک هدفه به منظور پایش سلامت در سازه ها ششمین کنفرانس بین المللی زلزله و سازه ۲۲ و ۲۳ مهرماه ۱۳۹۴، جهاد دانشگاهی استان کرمان
- ۱۰- دکتر علی خیرالدین پایش سلامت ضرورتی اجتناب ناپذیر جهت تضمین عملکرد سازه های عمرانی هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، زاهدان
- ۱۱- امیر ملکوتی و رامین آرزو، کاربرد حسگرها در دانش پایش سلامت سازه، اولین همایش ملی معماری، عمران و محیط زیست شهری، همدان، خرداد ۱۳۹۳
- ۱۲- P.Hajela and F.J.Soeiro, "Recent Developments In Damage Detection Based on System Identification Methoda", Dept.Of Aerospace Engineering, Mechanics and University Of Florida, Gainesville, Florida ۳۲۶۱۱, USA.