

Field Verification of Prefabricated Concrete Beams of 3-Span Railway Bridge Behavior and Short Term Performance using Load Testing Method

Saeed Zolghadri^{1*}, Mohammad Maghsodi²

1-CEO, Arike Gostar Kara co (Kara Co.). Iran.

szolghadri@agkaraco.ir

2-Assistant Professor, Faculty of Engineering, University of Jiroft, Iran. maghsodi_mohammad@ujiroft.ac.ir

Received: 28 July 2023 Revised: 19 November 2023 Accepted: 20 February 2024

Research paper

Abstract

All structures during their operational period are inevitably affected by certain destructive natural and unnatural factors. Since many significant structures built several decades ago are still in use, continuous monitoring of the performance of important structures to ensure their proper functioning, timely identification of damage, analysis of damaged structures, and, if necessary, rehabilitation, strengthening, or repair of damaged and vulnerable elements to enhance the useful life of the structure is of high importance. Structural health monitoring broadly refers to a procedure for obtaining accurate information about the condition and performance of a structure, which can be evaluated over short or long-term periods. These methods are classified into dynamic and static identification methods based on the data used. The objective of these methods is to compare the parameters of the analytical or numerical model with the measured field data and assess their conformity with each other. In this research, the details of monitoring the performance and behavior of precast concrete beams as a three-span bridge structure at kilometer 90 of the Arak-Kermanshah railway are described using a loading test method. The results indicate satisfactory performance of the structure under study, causing normal stress equal to 11 and 9 percent of the ultimate strength of concrete in the main beams and a maximum measured deflection of 4.4 millimeters, equivalent to 17.5 percent of the allowable deflection in static and dynamic loading tests. Moreover, the stresses and displacements monitored in the structural elements under static loading show good agreement with the results obtained from numerical modeling.

Keywords: Structural health monitoring system, load testing, strain gauge, impact factor (IM), prefabricated concrete girder, load testing,

*Corresponding Author: Saeed Zolghadri

zolghadri, S., Maghsoudi, M. Field Verification of the prefabricated concrete beams of 3-span railway bridge behavior and short term performance using load testing method. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2023; 8(2): 1-15. <http://doi.org/10.30478/jcsm.2024.409030.1339>

2538-5828/ © 2024 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

ارزیابی رفتار و عملکرد کوتاه مدت تیرهای پیش ساخته بتنی پل ۳ دهانه راه آهن تحت آزمایش بارگذاری استاتیکی و دینامیکی

سعید ذوالقدری^{۱*}، محمد مقصودی^۲

۱- مدیرعامل شرکت صنایع بتنی اریکه گستر کارا

۲- استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه جیرفت

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mahsodi_mohammad@ujiroft.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۲۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۰۱

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

تمامی سازه‌ها طی دوره بهره‌برداری خود قطعاً تحت تاثیر برخی از عوامل مخرب طبیعی و یا غیرطبیعی قرار می‌گیرند. از آنجا که بسیاری از سازه‌ها با اهمیت که چند دهه‌ی پیش ساخته شده‌اند هنوز در حال استفاده‌اند بررسی مستمر عملکرد سازه‌های مهم در راستای حصول اطمینان از عملکرد مناسب سازه و نیز شناسایی به‌موقع خسارت تحلیل سازه‌ی آسیب دیده و عنداللزوم بهسازی مقاوم‌سازی و یا ترمیم نقاط آسیب دیده و ایمن‌سازی آن برای افزایش طول عمر مفید سازه امری بسیار مهم تلقی می‌گردد. پایش سلامت سازه‌ها در مفهوم کلی رویه‌ای جهت تامین اطلاعات دقیق در مورد شرایط و وضعیت موجود سازه و کارایی آن می‌باشد که می‌تواند در بازه زمانی کوتاه و یا طولانی مدت مورد بررسی قرار گیرد. این روش‌ها با توجه به داده‌های مورد استفاده به روش‌های شناسایی دینامیکی و استاتیکی طبقه بندی می‌شوند. هدف از این روش‌ها مقایسه پارامترهای مدل تحلیلی یا عددی با داده‌های اندازه‌گیری شده و میزان مطابقت آن‌ها با یکدیگر می‌باشد. در تحقیق حاضر جزییات پایش عملکرد و رفتار تیرهای پیش ساخته بتنی به‌عنوان سازه‌ی پل سه دهانه در کیلومتر ۹۰ راه آهن اراک- کرمانشاه به روش آزمایش بارگذاری تشریح نتایج با مدل‌های اولیه طراحی پل قیاس گردیده است. نتایج بیانگر عملکرد مناسب سازه مورد بررسی با ایجاد تنش نرمالی برابر با ۱۱ و ۹ درصد تنش نهایی بتن در شاه‌تیرها و مقدار حداکثر خیز پایش شده ۴/۴ میلی‌متر برابر با ۱۷/۵ درصد خیز مجاز در تست بارگذاری استاتیکی و دینامیکی می‌باشد. همچنین تنش‌ها و تغییر مکان‌های پایش شده در المان‌های سازه‌ای تحت بارگذاری استاتیکی از تطابق مناسبی با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی دارد.

کلمات کلیدی: سیستم پایش سلامت سازه آزمایش بارگذاری کرنش سنج ضریب ضربه تیرپل بتنی پیش ساخته

پایش سلامت سازه طریقه‌ای در جهت تامین اطلاعات دقیق و به لحظه مرتبط با شرایط و کارایی سازه می‌باشد که متشکل است از برداشت اطلاعات به صورت دوره‌ای یا پیوسته که برای کوتاه مدت و یا بلند مدت صورت می‌پذیرد. اطلاعات جمع‌آوری شده از پایش که معمولاً برای برنامه‌ریزی و طراحی نگهداری استفاده می‌شوند ایمنی و قابلیت اطمینان را افزایش و عدم قطعیت‌ها را کاهش می‌دهد. سازه‌ها در مدت زمان طولانی تحت تاثیر عوامل مخرب قرار می‌گیرند. این عوامل به شکل‌های طبیعی و غیرطبیعی بر سازه اثر می‌گذارد. عوامل طبیعی از قبیل زلزله باد و غیره و عوامل غیرطبیعی شامل انفجار ضربه و سایر موارد تاثیر مخربی بر بروی سازه دارند. این اثرات مخرب گاهی بر روی سطح خارجی سازه ظاهر می‌شوند که ترمیم و بازسازی آن به وسیله بازرسی چشمی ممکن می‌باشد ولی گاهی این اثرات مخرب درون سازه رخ می‌دهد یا بنا به شرایط هندسی سازه قابل مشاهده به وسیله بازرسی چشمی نمی‌باشند. بنابراین در چنین حالاتی تشخیص محل خسارت و همچنین شدت آسیب وارد شده به سازه امری دشوار است و نیاز به انجام مطالعات و آزمایش دارد. بسیاری از سازه‌ها از جمله سدها پل‌ها راه‌آهن و ساختمان‌های مهم به‌عنوان زیر ساخت‌های عمرانی کشورها در صورتی که به صورت مستمر مورد پایش قرار گرفته و به‌موقع خسارت و آسیب‌های وارده به آن‌ها تشخیص داده شده و مورد تحلیل قرار گرفته و جهت مقاوم‌سازی و ایمن‌سازی آن اقدام گردد قادر خواهند بود برای مدت طولانی به صورت مستمر مورد بهره‌برداری قرار گیرند.

سنجش عملکرد سازه‌ها از طریق تحلیل پاسخ‌های دریافت شده از انواع سنسورها انجام می‌پذیرد و به‌طورکلی قابل تفکیک به دسته‌های زیر می‌باشند:

۱. مکانیکی: کرنش، تغییر شکل، جابجایی، بازشدگی ترک‌ها، بار، تنش

۲. فیزیکی: دما، رطوبت، فشار آب منفذی

۳. شیمیایی: نفوذ کلراید، نفوذ سولفات، نفوذ کربنات‌ها، زنگ‌زدگی

ابزار تشخیص فیزیکی در پایش سلامت سازه مجموعه کامل و یکپارچه‌ای از تجهیزات دریافتی و سیستم‌های امدادی شامل قسمت‌های زیر می‌باشد سیستم‌های حسگر (سنسورها) سیستم جمع‌آوری و انتقال اطلاعات (دیتالاگر) سیم ارتباطات سیستم مدل‌سازی و تحلیل نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی سازه‌ها که در دو گروه عمده استاتیکی و دینامیکی طبقه بندی می‌شود. در آزمایش‌های استاتیکی در نقاطی از سازه بارهای استاتیکی وارد و تغییر مکان‌ها در نقاط دیگری از سازه ثبت می‌شوند. اجرای آزمایش‌های استاتیکی ساده و براحتی قابل تکرار می‌باشد و به تجهیزات ویژه‌ای نیاز ندارد. اما اندازه‌گیری تغییر مکان‌های استاتیکی در بسیاری از سازه‌ها مشکل می‌باشد و مهمتر اینکه برای دستیابی به پاسخ‌ها و جواب‌های قابل قبول و دقیق از عملیات پایش ضروریست 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 عمده‌ای روبرو خواهد شد. با توجه به این موارد بسیاری از محققین استفاده از کرنش‌های اندازه‌گیری شده در المان‌ها را برای تعیین خرابی در آزمایش‌های استاتیکی پیشنهاد کرده‌اند.

در صورتی که از آزمایش‌های 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 می‌شود. با اندازه‌گیری ارتعاشات سازه می‌توان فرکانس‌ها یا شکل مودها را به‌عنوان اطلاعات اولیه استخراج نمود. اجرای آزمایش‌های دینامیکی به تجهیزات ویژه‌ای برای ایجاد ارتعاش و وارد کردن بارهای دینامیکی و اندازه‌گیری ارتعاش نیاز خواهند داشت. اطلاعات استخراج شده از آزمایش‌های دینامیکی به نقاط اثر بارهای دینامیکی حساسیت چندان ندارند ولی به تغییرات در پارامترهای المان‌های سازه حساست بیشتری را از خود نشان می‌دهند. اطلاعاتی که از

این آزمایش‌ها برای انجام پایش قابل استخراج است عبارتند از فرکانس‌ها شکل مودها ارتعاشات نقطی از سازه و میرایی [۱]. بررسی تاریخیچه تحقیق نشان می‌دهد که در دنیا بیشترین استفاده از سیستم پایش سلامت سازه‌ها مربوطه به پروژه‌های صنایع نفت گاز و پتروشیمی صنعت حمل و نقل زمینی (بزرگراه‌ها و پل‌ها) و صنایع سدسازی می‌باشند و در این صنایع تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام گرفته است. اگرچه در صنعت مهندسی ساختمان (SHM) Structural Health Monitoring 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 سازه‌ها و زیرساخت هوشمند (ISHMII) بسیاری از پل‌ها و سازه‌ها در کشورهای اروپائی به حسگر 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 ابنیه‌های قدیمی و متروکه به‌عنوان نماد فرهنگی آن‌ها محسوب می‌شود را در وضعیت مطلوبی نگهداری کنند و این موجب پایش سلامت سازه این ابنیه‌ها گردید و سبب بسط و توسعه این سیستم‌ها گردیده است. ISHMII مرجع کاملی را برای پل‌هایی که در سرتاسر اروپا پایش می‌شوند راه‌اندازی نموده است. در ایالت متحده آمریکا بسیاری از دانشگاه‌ها از طریق تحقیقات درگیر پایش سلامت سازه‌ی پل‌ها و ابنیه مسکونی شده‌اند. گروه تفحص خانه‌های قدیمی آمریکا (HABS) و ثبت تاریخی مهندسی (HEAR) اطلاعات قابل ملاحظه‌ای را راجع به موضوع مورد تحقیق فراهم آورده‌اند و از پایگاه اطلاع‌رسانی بسیار خوبی برخوردارند [۷]. شناسنامه گزارشی زیرساخت‌ها که توسط انجمن مهندسان سازه آمریکا ASCE در سال ۱۹۹۷ تهیه گردید یک از اقدامات بسیار ارزشمند در این زمینه بوده است.

آزمایش بارگذاری پل‌ها در ایران در حال حاضر مطابق دستورالعمل نشریه شماره ۱۳۹ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور انجام می‌شود. سیستم پیشرفته پایش سلامت سازه برای تعدادی از پل‌های مهم نظیر پل ورسک واقع در روستای ورسک عباس‌آباد در ۴۵ کیلومتری جنوب شهر زیراب و ۸۵ کیلومتری شهر قائمشهر در محور فیروزکوه و در مسیر راه‌آهن شمال راه‌اندازی شده است. این پل دو کوه عظیم و سخت‌گذر عباس‌آباد را به یکدیگر اتصال می‌دهد که در سال‌های اخیر مقاوم‌سازی گردیده است و مجهز به سامانه GPS به صورت ترکیب با نرم افزار پردازش‌گر پیشرفته می‌باشد که پایش مستمر پل را در تغییرات مختلف آب و هوایی و با دقت بسیار زیاد عملی ساخته و این تغییرات را با دقت میلی‌متری نشان می‌دهد. بین سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۸۹ با ارزیابی ۱۱۵۰ پل که در ایران ارزیابی شد ضعف سازه‌ای و فرتوت شدن کاهش عملکردی از ۲۸/۵ درصد به ۲۷/۱ درصد را نشان داد و بهبود عملکرد پل‌ها مستلزم هزینه کرد طی دوره‌ای بلند مدت برای رفع تمامی نقاط ضعف پل‌ها می‌باشد.

۲- معرفی پل کیلومتر ۹۰ راه‌آهن اراک - کرمانشاه

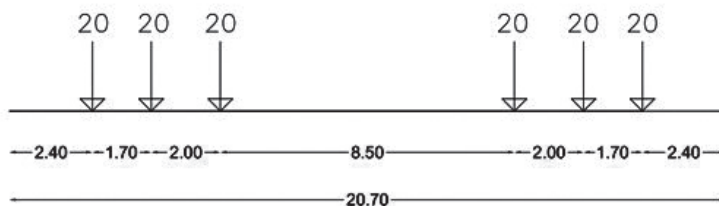
پل احداث شده در کیلومتر ۹۰+۴۴۱ قطعه چهارم محور ریلی اراک - کرمانشاه دارای سه دهانه به طول حدوداً ۲۰ متر بوده و تابلیه پل از ۴ تیرپل بتنی پیش ساخته که با یک دال بتنی درجا ریز یکپارچه گردیده تشکیل شده است (شکل ۱). ابعاد اندازه و مشخصات فنی مقاطع پل طبق نقشه‌های ارائه شده می‌باشد.



شکل ۱: تصاویر پل کیلومتر ۹۰ راه آهن اراک - کرمانشاه

۳- آزمایش بارگذاری پل تحت حالت‌های مختلف بارگذاری پل

آزمایش بارگذاری پل به‌عنوان پیش فرض اولیه جهت فراهم شدن امکان تحویل قطعی قطعه چهارم پروژه راه آهن اراک - کرمانشاه مطابق دستورالعمل فصل هفتم آئین نامه بارگذاری پل‌های راه آهن برنامه‌ریزی گردید. بازدید از پل امکان سنجی و برآورد محدودیت‌های دسترسی و انسداد محور ماشین‌رو و پرتدد کمربندی اراک - ملایر انطباق نقشه‌های چون ساخت پل با پل موجود جمع‌آوری داده‌های منطقه‌ای و انتخاب منابع مورد نظر جهت تامین ملزومات انجام کار و تهیه طرح نهایی آزمایش بارگذاری پل تدارک مصالح مورد نیاز و آماده‌سازی گچ‌ها و کابل‌های رابط مراحل اداری و اخذ مجوز مسدودی خط و اجاره لوکوموتیو و واگن مورد نیاز از اداره کل راه آهن اراک صورت پذیرفت و عملیات نقشه برداری ابزاربندی نصب تجهیزات پایش پل و انجام آزمایش بارگذاری پل و پردازش اطلاعات حاصل از آزمایش بارگذاری پل‌ها و تهیه گزارش‌های مربوطه به صورت مستر انجام و تکمیل گردید. برای آزمایش بارگذاری از لوکوموتیو مدل GM با وزن حدود ۱۲۶/۶ تن و واگن شن کش که وزن آن براساس برگ توزین ایستگاه ملایر ۵۸/۳ تن بود استفاده گردید (شکل ۲).



شکل ۲: لوکوموتیو مورد استفاده در آزمایش بارگذاری پل‌ها و توزیع بار تقریبی لوکوموتیو و فاصله محورهای بارگذاری آن از یکدیگر

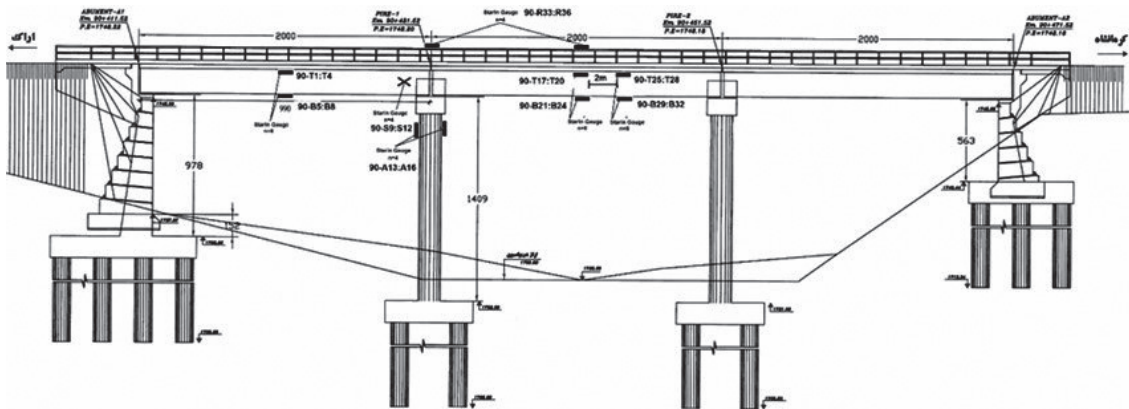
براساس پروپوزال‌های مصوب و جهت بررسی شرایط خدمت‌پذیری شاه‌تیرها و پل سه حالت بارگذاری در شرایط بهره‌برداری این پل پایش و مورد ارزیابی قرار گرفت. داده‌های جمع‌آوری شده برای سه حالت عبور قطار با سرعت‌های ۳۰ و ۶۰ کیلومتر در ساعت از سمت ایستگاه اراک به سمت ایستگاه کرمانشاه و توقف قطار بر روی پل و اعمال بار به صورت استاتیکی در نقاط بحرانی پل و هر یک از حالت‌های بارگذاری در دو نوبت صورت پذیرفت.

۴- تجهیزات و ابزار دقیق مورد استفاده جهت آزمایش بارگذاری پل

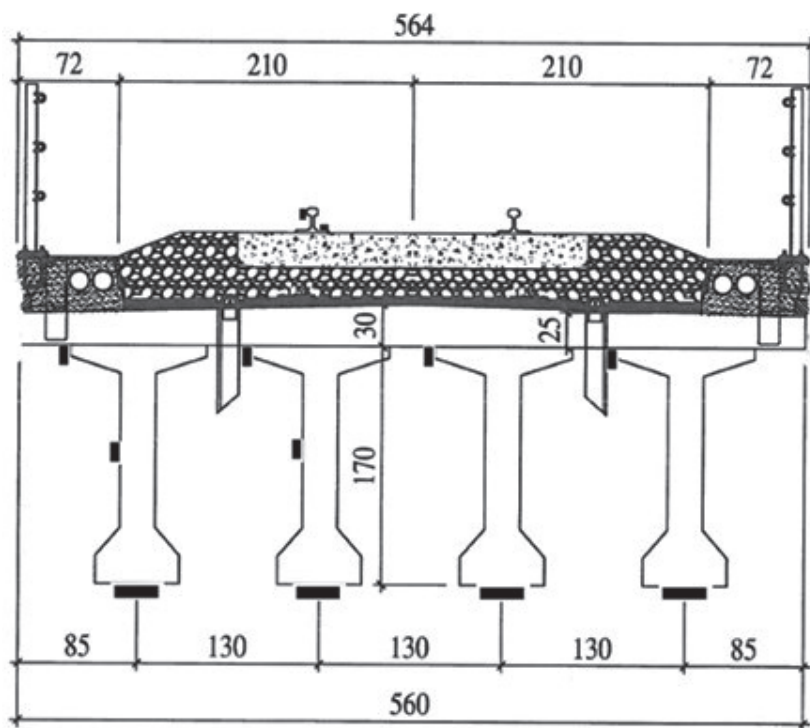
کرنش‌سنج‌ها مبدل‌هایی هستند که اعمال فشار یا کشش روی آن‌ها موجب تغییر مقاومت الکتریکی‌شان می‌گردد و از فلزات نیمه هادی ساخته شده‌اند. در صورتی که نیرو به طرف داخل جسم اعمال شود تنش فشاری موجود سبب کوتاه‌تر شدن جسم می‌گردد و تنش کششی سبب افزایش طول جسم خواهد گردید. با تغییر ابعاد فیزیکی مقاومت الکتریکی نیز تغییر می‌نماید و ارقام ثبت شده موید این تغییر می‌باشند. لازم به توضیح است که تغییر مقاومت الکتریکی در جهت طولی بسیار بیشتر از این تغییرات در جهت عرضی می‌باشد. کلیه ابزار دقیق (کرنش‌سنج و ترمینال‌های اتصال) مورد استفاده جهت انجام پایش پل حاضر از محصولات شرکت TML ژاپن تهیه شده است. سایر تجهیزات و ادوات فنی و مواد مصرفی نیز از میان تولید داخلی دارای تاییدیه‌های لازم انتخاب گردیده‌اند. (جدول ۱). با توجه به اینکه پل مورد نظر بر روی رودخانه احداث گردیده بود که برای تردد جرثقیل بستر نامناسبی بوده و همچنین ارتفاع تراز زیر عرشه از تراز بستر در حدود ۱۶ متر بوده که دسترسی را از بستر رودخانه با دشواری بسیار روبه‌رو نموده بود و عملاً اجرای پایه‌های موقت (داربست) جهت جاگذاری و استفاده از خیز سنج الکترونیکی امکان پذیر نبوده لذا از کرنش‌سنج‌های الکترونیکی به‌عنوان تنها گزینه قابل قبول از لحاظ فنی استفاده و همان‌گونه که در ادامه آورده خواهد شد خروجی کرنش‌ها با استفاده از روش‌های تئوریک به خیز تبدیل گردید. بر روی هر شاه‌تیر در دهانه ابتدایی و دهانه میانی ۴ کرنش‌سنج نصب شد و ابزارها از سمت کوله A۱ به سمت کوله A۲ از ۱ تا ۴ به صورت افزایشی شماره گذاری گردید. همچنین تعدادی کرنش‌سنج بر روی پایه‌های پل و روی ریل‌ها نیز نصب گردید. داده‌های مورد نظر با استفاده از مجموعاً ۳۶ عدد کرنش‌سنج که در نقاط بحرانی که در شکل‌های شماره ۵ و ۴ و ۳ به صورت شماتیک نشان داده شده است بر روی المان‌های مختلف پل نصب گردید برداشت شد. با استفاده از دستگاه نگاشت اطلاعات کرنش‌های مقاطع مختلف ثبت و سپس برای تبدیل نتایج کرنش به تنش و ممان با استفاده از روش‌های تحلیلی مقادیر کرنش مقطع به تنش‌های نرمال مقطع و سپس به ممان مقطع تبدیل گردید.

جدول ۱: مشخصات مکانیکی و تعداد ابزارهای دقیق مورد استفاده در پایش

ردیف	نوع حسگر	مدل TML	تعداد	توضیحات
۱	Strain Gauge	FLA-10	۳۶	کرنش‌سنج ۱۲۰ اهمی برای پایش المان‌های فولاد
۲	Data Logger	-	۱	پرادازش‌گر داده‌ها
۳	چسب	CN	۲	-
۴	سیم	۴۲۶۴ (متر)		روکش دار



شکل ۳: نقاط بحرانی انتخاب شده جهت نصب کرنش سنج‌ها و پایش شاه تیرها



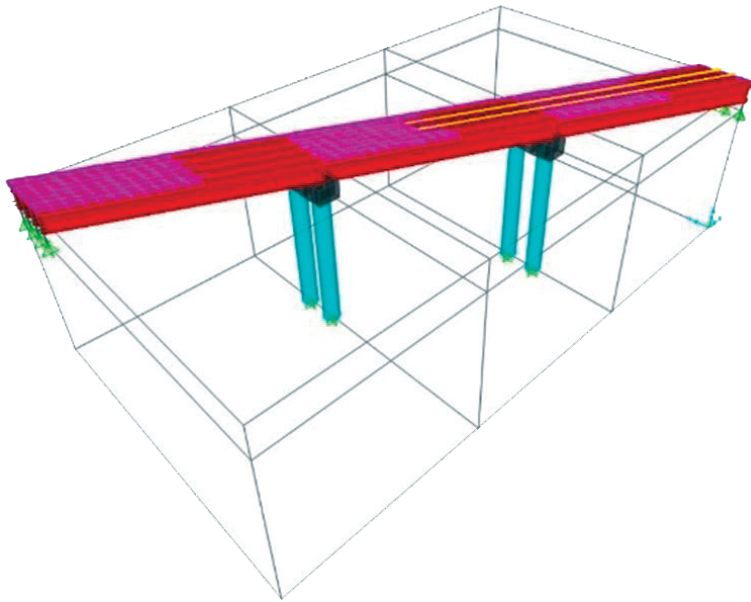
شکل ۴: محل نصب کرنش سنج‌ها



شکل ۵: آماده سازی و نصب کرنش سنج ها و ابزاربندی پل

۵- مقایسه نتایج مدل سازی نرم افزار SAP و نتایج پایش در بارگذاری استاتیکی

جهت بارگذاری سربارهای زنده عرشه پل به صورت ۳ بعدی در نرم افزار SAP مدل سازی شده (شکل ۶) و بارگذاری لازم بر روی آن انجام گرفته است. بارگذاری انجام گرفته در هر قسمت به نحوی انجام شد که هیچ یک از تلاش‌های خمشی و برشی از تلاش‌های بار زنده طراحی شده مطابق بند ۷-۲ نشریه شماره ۱۳۹ بیشتر نگردد.



شکل ۶: تصاویر مدل سازی عرشه در نرم افزار SAP

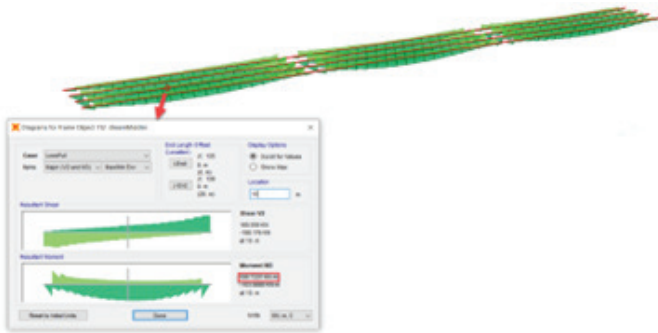
از بین بارگذاری انجام شده با توجه به قابلیت های نرم افزار SAP نتایج بارگذاری استاتیکی در مدل سازی قابل مقایسه با نتایج پایش تشخیص داده شد و نتایج حاصل از آن در زیر با نتایج مدل سازی مقایسه گردیده است. قطار تست در نقاط بحرانی دهانه (شکل ۳) برای حصول بدترین حالت بارگذاری استاتیکی توقف نمود و اطلاعات مربوطه توسط سنسورها قرائت گردید. در مدل نرم افزار SAP نیز بار لوکوموتیو و واگن و فواصل محورها به صورت یک بار Vehicle (بار وسیله نقلیه) تعریف شده و از روی پل عبور داده شده است و خط تاثیر خمش ترسیم و مقادیر لنگر خمشی در شاه تیرها در شکل های ۷ و ۶ نشان داده شده است. همچنین در شکل های ۸ و ۹ نیز با استفاده از روابط مقاومت مصالح و با فرض رفتار خطی مصالح شاه تیرها (در ادامه با توجه به تنش های نرمال کششی و فشاری پایش شده صحت رفتار خطی مصالح شاه تیرها تایید می گردد) تنش های نرمال پایش شده بر حسب زمان به لنگر خمشی مقطع تبدیل شده و منحنی تغییرات لنگر خمشی شاه تیرهای میانی و کناری بر حسب زمان در بحرانی ترین نقطه پل برای بارگذاری استاتیکی ارائه شده است و حداکثر مقدار لنگر خمشی پایش شده تعیین شده است (شکل های ۸ و ۹).



دهانه اول

دهانه دوم

شکل ۶: خروجی حداکثر لنگر خمشی شاه تیر کناری در نرم افزار SAP در بارگذاری استاتیکی

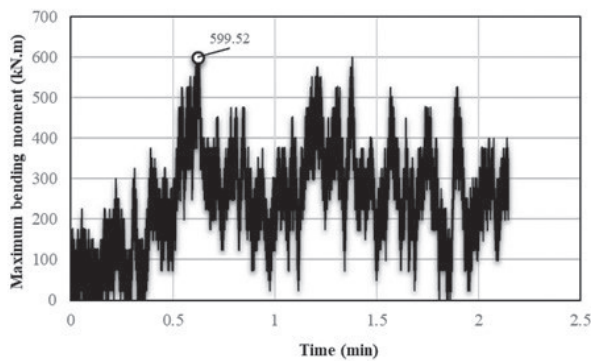


دهانه اول

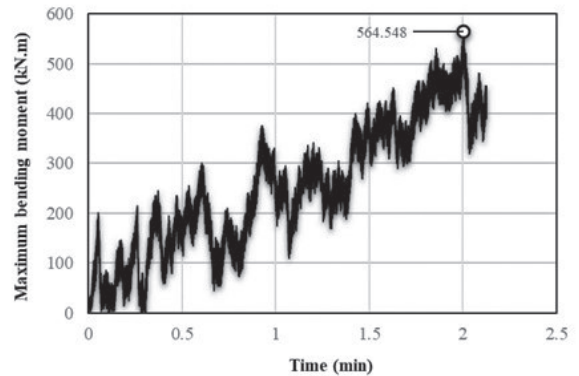


دهانه دوم

شکل ۷: خروجی حداکثر لنگر خمشی شاه تیر میانی در نرم افزار SAP در بارگذاری استاتیکی

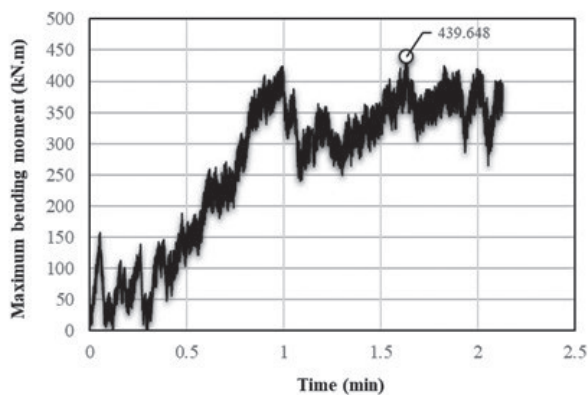


دهانه دوم

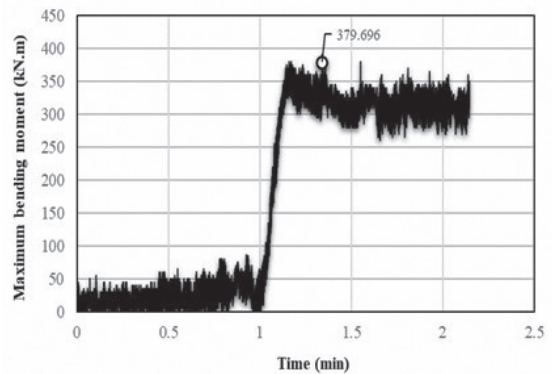


دهانه اول

شکل ۸: خروجی پایش برای تغییرات حداکثر لنگر خمشی شاه تیر میانی بر حسب زمان در بارگذاری استاتیکی



دهانه دوم



دهانه اول

شکل ۹: منحنی پایش برای تغییرات حداکثر لنگر خمشی شاه تیر کناری بر حسب زمان در بارگذاری استاتیکی

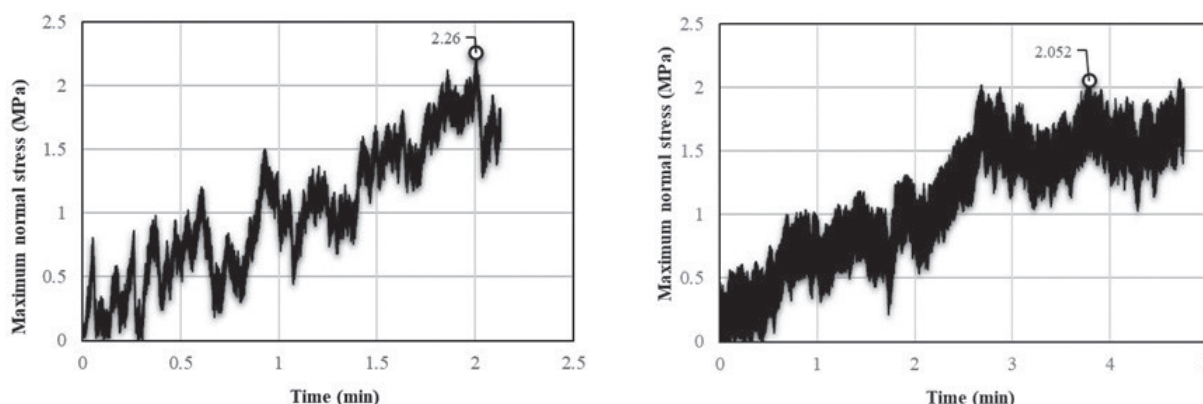
جدول ۲: مقایسه حداکثر لنگر خمشی شاه‌تیر میانی و کناری پل در مدل SAP و پایش برای بارگذاری استاتیکی

	پایش	مدل SAP
حداکثر لنگر خمشی شاه‌تیر میانی پل (kN.m)	دهانه اول	506.72
	دهانه دوم	548.52
حداکثر لنگر خمشی شاه‌تیر کناری پل (kN.m)	دهانه اول	374.90
	دهانه دوم	421.76
سهم لنگر خمشی هر شاه‌تیر کناری پل از کل لنگر خمشی ناشی از بار (درصد)	دهانه اول	21.26
	دهانه دوم	21.73
سهم لنگر خمشی هر شاه‌تیر میانی پل از کل لنگر خمشی ناشی از بار (درصد)	دهانه اول	28.74
	دهانه دوم	28.27
اختلاف نتایج پایش و مدل عددی برای شاه‌تیر کناری پل (درصد)	دهانه اول	10.24
	دهانه دوم	8.51
اختلاف نتایج مدل عددی و پایش برای شاه‌تیر میانی پل (درصد)	دهانه اول	1.26
	دهانه دوم	4.07

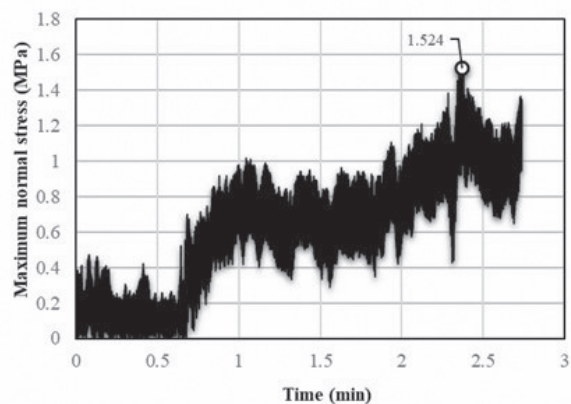
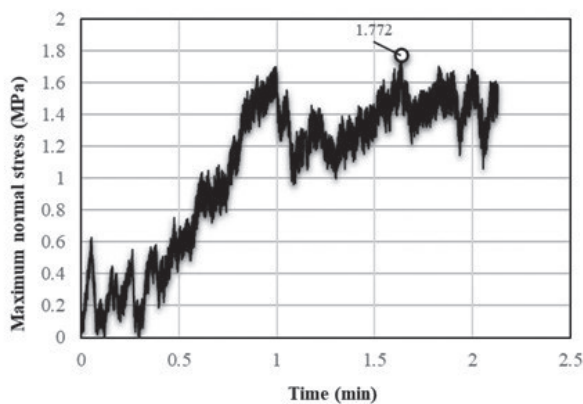
همان طور که نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد خروجی نتایج مدل‌سازی عددی و پایش از تطابق مناسبی برخوردار می‌باشد که حاکی از صحت پایش پل نیز دارد.

۶- تغییرات تنش نرمال در شاه‌تیرهای پایش شده تحت انواع بارگذاری قطار

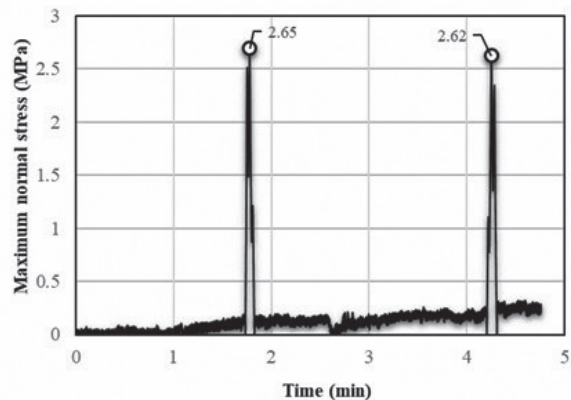
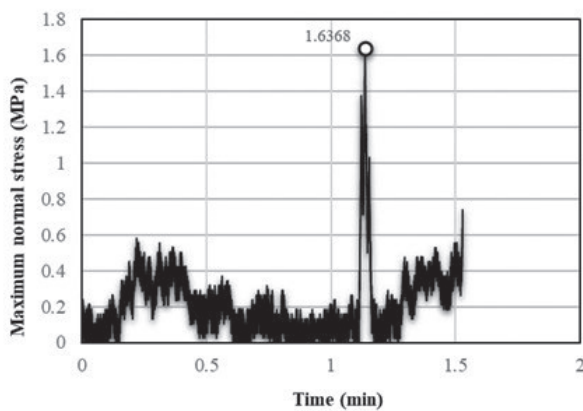
با توجه به اینکه تعدادی از تست‌های بارگذاری قطار دینامیکی و تعدادی نیز به صورت استاتیکی مورد بررسی قرار گرفت بنابراین در شکل‌های ۱۰ الی ۱۵ منحنی تغییرات تنش نرمال شاه‌تیرهای کناری و میانی در نقاط بحرانی پایش شده برای دو گروه بارگذاری دینامیکی و استاتیکی آورده شده است.



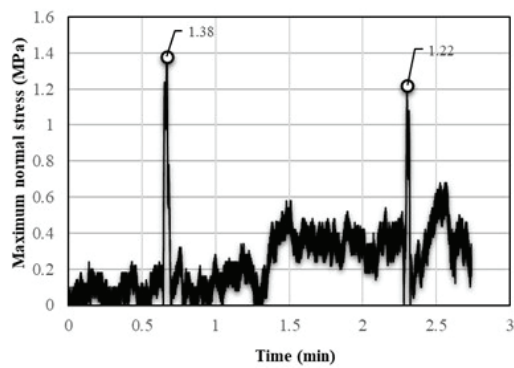
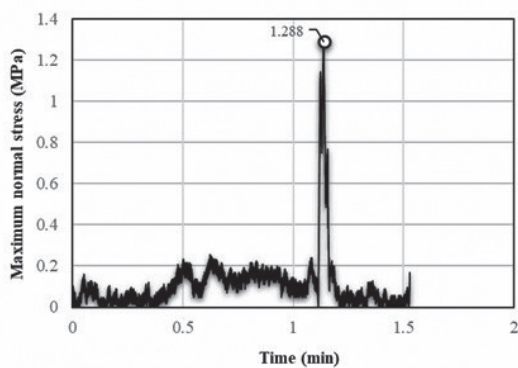
شکل ۱۰: منحنی تغییرات تنش نرمال شاه‌تیر میانی بر حسب زمان در پایش با بارگذاری استاتیکی



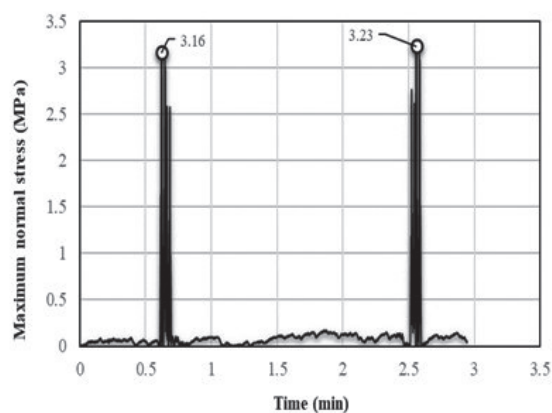
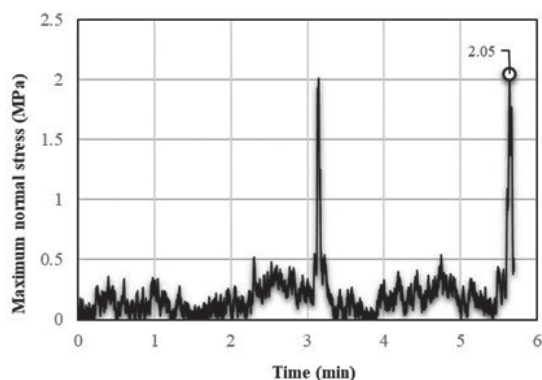
شکل ۱۱: منحنی تغییرات تنش نرمال شاه تیر کناری بر حسب زمان در پایش با بارگذاری استاتیکی



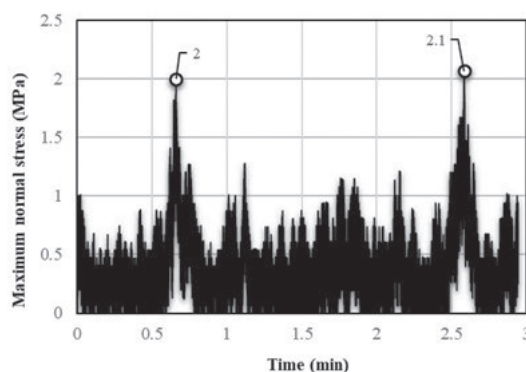
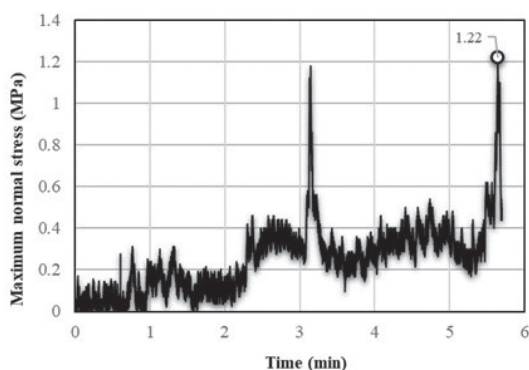
شکل ۱۲: منحنی تغییرات تنش نرمال شاه تیر میانی بر حسب زمان در پایش با بارگذاری دینامیکی با سرعت عبور ۶۰ کیلومتر بر ساعت



شکل ۱۳: منحنی تغییرات تنش نرمال شاه تیر کناری بر حسب زمان در پایش با بارگذاری دینامیکی با سرعت عبور ۶۰ کیلومتر بر ساعت



شکل ۱۴: منحنی تغییرات تنش نرمال شاه تیر میانی بر حسب زمان در پایش با بارگذاری دینامیکی با سرعت عبور ۳۰ کیلومتر بر ساعت



شکل ۱۵: منحنی تغییرات تنش نرمال شاه تیر کناری بر حسب زمان در پایش با بارگذاری دینامیکی با سرعت عبور ۳۰ کیلومتر بر ساعت

همان طور که در منحنی‌های فوق نشان داده شده است مشاهده می‌گردد بیشترین تنش نرمال تولید شده در نقاط بحرانی پایش شده مربوط است به شاه تیرهای میانی و کناری در تست بارگذاری استاتیکی و دینامیکی با سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت می‌باشد که در این بارگذاری ها ۳/۲۳ مگاپاسکال تنش نرمال در شاه تیر میانی و ۲/۶۵ مگاپاسکال تنش نرمال در شاه تیر کناری تولید شده است که این مقادیر با توجه به استفاده از بتن C۳۰ با تنش نهایی برابر با ۳۰ مگاپاسکال به ترتیب برابراند با ۱۱ و ۹ درصد تنش نهایی بتن در شاه تیرها می‌باشد که این فاصله حدوداً ۹۰ درصدی تا تنش نهایی بتن شاه تیرها نشان از قابل قبول بودن طرح پل بر اساس نتایج خروجی پایش برای پارامتر تنش در بحرانی ترین بارگذاری دارد. یادآور می‌گردد تنش‌های ایجاد شده در شاه تیرها در سایر حالات بارگذاری کمتر بوده و نتیجتاً طراحی پل برای تمام حالات بارگذاری اشاره شده در گزارش مزبور در پارامتر تنش نرمال قابل قبول می‌باشد. همچنین با دقت به بعضی از نمودارهای بارگذاری دینامیکی مشاهده می‌شود دو نقطه اوج تشکیل شده است که نشان‌دهنده تکرار تست با سرعت مربوطه با فاصله زمانی کوتاه می‌باشد این در حالیست که در تست بارگذاری استاتیکی با افزایش تنش و ثبات بار بر روی پل تنش در یک بازه زمانی در شاه تیرها ثابت مانده و با خروج قطار از روی پل مجدداً شاهد کاهش تنش‌ها در شاه تیرها می‌باشیم.

۷- محاسبات خیز:

۷-۱ محاسبات خیز پایش شده در آزمایش بارگذاری قطار

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. بررسی‌ها نشان می‌دهد که محاسبات خیز به کمک آئین نامه انگلستان از دقت و مقدار بیشتری نسبت به آئین نامه آمریکا برخوردار است. بنابراین در این گزارش با توجه به برداشت کرنش‌های 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 می‌توان انحناء را در ایستگاه‌های 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 تست بارگذاری استاتیکی که پیش‌تر بحرانی‌ترین تست‌های بارگذاری با توجه به نتایج پایش معرفی گردید ارائه می‌گردد. همچنین یادآور می‌شود که حداکثر خیز در وسط هر دهانه در دو شاه‌تیر میانی و کناری با توجه به محاسبات زیر ارائه می‌گردد. برای محاسبه خیز ایجاد شده در شاه‌تیرها از انحنای وسط دهانه تیر در رابطه (۱) استفاده گردید:

$$\Delta = kL^2\phi \quad (1)$$

در حالیکه ضریبی ثابت است و مقدار آن به شکل نمودار ممان تیر بستگی داشته و با توجه با بارگذاری قطار تست از رابطه (۲) بدست می‌آید:

$$k = 0.1042 \left(1 - \frac{1}{10} \left(\frac{M_{left} + M_{right}}{M_{middle}} \right) \right) \quad (2)$$

$$k = 0.1042 \left(1 - 0.1 \left(\frac{M_{left} + M_{right}}{M_{middle}} \right) \right)$$

برای پل مورد نظر با شرایط تکیه‌گاهی موجود در دهانه اول داریم: $M_{right} = 0.125wL^2$ و $M_{left} = 0$ و $M_{middle} = 0.07wL^2$ در دهانه دوم نیز خواهیم داشت:

$M_{middle} = 0.07wL^2$ و $M_{left} = 0.125wL^2$ ، $M_{right} = 0.125wL^2$ و طول دهانه شاه‌تیر ۲۰ متر و همچنین انحنای شاه‌تیر در مقطع وسط دهانه می‌باشد و از رابطه (۳) قابل تعیین است:

$$\phi = \frac{\epsilon_{sb}}{x} \quad (3)$$

که ϵ_{sb} کرنش افقی فولاد در بال پایین (که در ایستگاه‌های مختلف برای حالت‌های مختلف بارگذاری قرائت گردید) و x تار خنثی مقطع شاه‌تیر می‌باشد که با فرض رفتار خطی و الاستیک فولاد بر مرکز سطح شاه‌تیر منطبق خواهد بود. مرکز سطح مقطع شاه‌تیر با توجه به تقارن مقطع I- شکل ۱/۷۰ متری برابر خواهد بود با نصف ارتفاع تیر:

$$\bar{y} = \frac{1700}{2} = 850mm$$

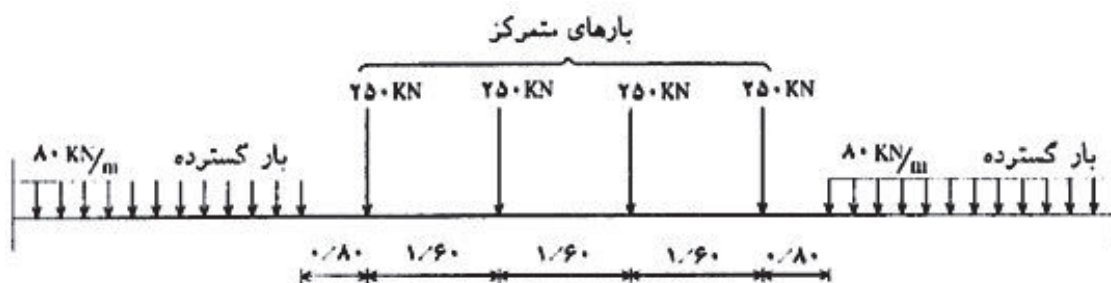
بنابراین با جایگزین کردن مقادیر فوق و کرنش حداکثر پایش شده در بال پایین شاه‌تیر می‌توان انحنای مقطع در وسط دهانه و به دنبال آن حداکثر خیز شاه‌تیر در وسط دهانه را تعیین نمود. جدول ۳ مقادیر حداکثر خیز شاه‌تیرهای میانی و کناری را در وسط دهانه نشان می‌دهد.

جدول ۳: حداکثر خیز شاه‌تیرهای میانی و کناری در وسط دهانه به‌دست آمده از پایش پل

تست بارگذاری	نام شاه‌تیر	حداکثر کرنش بال پایین شاه‌تیر در وسط دهانه ($\times 10^{-6}$)	انحناء شاه‌تیر در وسط دهانه	حداکثر خیز شاه‌تیر در وسط دهانه	
بارگذاری استاتیکی	دهانه اول	شاه‌تیر میانی	11	$29/1 \times 10^{-8}$	40/4
		شاه‌تیر کناری	9	$05/1 \times 10^{-8}$	60/3
	دهانه دوم	شاه‌تیر میانی	10	$17/1 \times 10^{-8}$	31/3
		شاه‌تیر کناری	8	$94/0 \times 10^{-8}$	51/2

۲-۷ مقایسه خروجی خیز شاه‌تیرها در مدل نرم افزار SAP تحت آزمایش بارگذاری انجام شده و بارگذاری استاندارد آیین نامه

مطابق بند ۱-۳ نشریه ۱۳۹ بارگذاری استاندارد مطابق شکل ۱۶ تعریف می‌گردد.



شکل ۱۶: بارگذاری استاندارد قطار براساس نشریه ۱۳۹

همچنین مطابق نشریه برای حصول نامساعدترین شرایط بارگذاری تمامی خطوط باید تحت ۷۵ درصد بارگذاری استاندارد مورد بررسی قرار گیرند. بنابراین با توجه به توضیحات فوق در مدل نرم افزار SAP دو نوع بارگذاری تعریف گردید که یکی براساس بارگذاری تست آزمایش بارگذاری و دیگری نیز براساس ۷۵ درصد بارگذاری استاندارد نشریه ۱۳۹ و خروجی خیز پایش شده و نتایج مدل عددی در دهانه‌های مختلف در جدول ۳ با هم مقایسه گردیده است.

جدول ۴: مقایسه خروجی خیز شاه‌تیرها در مدل نرم افزار SAP با خیز پایش شده شاه‌تیرها در آزمایش بارگذاری قطار

نام تست بارگذاری	نام شاه‌تیر		حداکثر خیز شاه‌تیر در وسط دهانه (میلی متر)
	بارگذاری تست قطار پایش شده	دهانه اول	شاه‌تیر میانی
شاه‌تیر کناری			۳/۶۰
دهانه دوم		شاه‌تیر میانی	۳/۳۱
		شاه‌تیر کناری	۲/۵۱
۷۵ درصد بارگذاری استاندارد در مدل SAP	دهانه اول	شاه‌تیر میانی	۵/۸۸
		شاه‌تیر کناری	۴/۷۵
	دهانه دوم	شاه‌تیر میانی	۵/۶۹
		شاه‌تیر کناری	۴/۶۸
بارگذاری تست قطار در مدل SAP	دهانه اول	شاه‌تیر میانی	۳/۲۲
		شاه‌تیر کناری	۲/۶۴
	دهانه دوم	شاه‌تیر میانی	۳/۷۴
		شاه‌تیر کناری	۳/۱۰

با بررسی جدول ۳ مشاهده می‌گردد که نتایج خروجی مدل نرم افزاری در مقایسه با خروجی نتایج خیز شاه‌تیرهای پایش شده از دقت بسیار مناسبی برخوردار است و این نشان‌دهنده صحت مدل عددی برای انجام بررسی‌ها بیشتر را دارد. همچنین با مراجعه به بند ۷-۷ آیین نامه بارگذاری پل‌ها (نشریه ۱۳۹) در قسمت مربوط به پل‌های راه‌آهن تبصره ۷-۲ برای پل‌های بتنی تک دهانه یا پیوسته حداکثر تغییرشکل ناشی از بارهای بهره‌بردار $L/1000$ به علاوه ۵ میلیمتر محدود می‌گردد. برای دهانه ۲۰۰۰۰ میلی متری پل مورد نظر مقدار ۲۵ میلیمتر را نتیجه میدهد. مشاهده می‌گردد مقادیر خیز پایش شده حداکثر ۴/۴ میلیمتر بوده که ۱۷/۵ درصد خیز مجاز بوده و حکایت از قابل قبول بودن طرح پل بر اساس نتایج خروجی پایش برای پارامتر خیز دارد.

۸- محاسبه ضریب ضربه دینامیکی:

ضریب ضربه دینامیکی براساس آیین نامه بارگذاری پل‌ها (نشریه ۱۳۹) به صورت یک ضریب تشدید تعریف می‌گردد که برای تمامی اعضای پل‌ها لحاظ می‌گردد و از روابط (۴) بدست می‌آید:

$$\delta_1 = \frac{0.96}{\sqrt{L'-0.2}} + 0.88 \quad \delta_2 = \frac{1.44}{\sqrt{L'-0.2}} + 0.82 \quad \delta_1 = \frac{2.16}{\sqrt{L'-0.2}} + 0.73 \quad (4)$$

نشریه ۱۳۹ دو نوع ضریب ضربه دینامیکی برای تلاش‌های برشی و لنگرهای خمشی با توجه به دهانه پل و شرایط نگهداری خط تعریف می‌کند. برای استخراج ضرایب ضربه پیشنهادی آیین نامه اگر شرایط نگهداری خط با معیارهای دقیق و طول دهانه ۲۰ متر در نظر گرفته شود ضریب ضربه دینامیکی در برش $\delta_1 = 1.10$ و ضریب ضربه دینامیکی در خمش $\delta_2 = 1.16$ خواهد بود. همچنین با تقسیم لنگرهای خمشی و نیروی برشی پایش شده در آزمایش بارگذاری دینامیکی به همین مقادیر در آزمایش بارگذاری استاتیکی

ضریب ضربه دینامیکی در برش $\delta_2 = 1.08$ و ضریب ضربه دینامیکی در خمش $\delta_2 = 1.15$ خواهد بود. این به این معناست که ضرایب ضربه پیشنهادی آیین نامه با مقادیر پایش شده در این پل تطابق دارد.

۹- نتیجه گیری:

۱- نتایج حاصل از پایش تنش‌ها و تغییر مکان‌های واقعی در المان‌های سازه‌ای تحت بارگذاری استاتیکی از تطابق مناسبی با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی برخوردار می‌باشد.

۲- بیشترین تنش نرمال تولید شده در نقاط بحرانی پایش شده مربوط است به شاه تیرهای میانی و کناری در تست بارگذاری استاتیکی و دینامیکی با سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت می‌باشد که در این بارگذاری ها $3/23$ مگاپاسکال تنش نرمال در شاه تیر میانی و $2/65$ مگاپاسکال تنش نرمال در شاه تیر کناری تولید شده است که این مقادیر با توجه به استفاده از بتن $C30$ با تنش نهایی برابر با 30 مگاپاسکال به ترتیب برابراند با 11 و 9 درصد تنش نهایی بتن در شاه تیرها می‌باشد که این فاصله حدوداً 90 درصدی تا تنش نهایی بتن شاه تیرها نشان از قابل قبول بودن طرح پل بر اساس نتایج خروجی پایش برای پارامتر تنش در بحرانی ترین بارگذاری دارد.

۳- نشریه 139 حداکثر تغییر شکل ناشی از بارهای بهره برداری را به $L/1000$ به علاوه 5 میلیمتر محدود می‌گردد. برای دهانه 20000 میلی متری پل مورد نظر مقدار 25 میلیمتر را نتیجه می‌دهد. مقدار حداکثر خیز پایش شده $4/4$ میلیمتر بوده که $17/5$ درصد خیز مجاز بوده و حکایت از قابل قبول بودن طرح پل بر اساس نتایج خروجی پایش برای پارامتر خیز دارد.

۴- مقایسه نتایج مدل عددی و پایش حاکی از آن است که پل در وضعیت موجود به لحاظ طراحی و اجرا در وضعیت کاملاً قابل قبول می‌باشد.

۵- ضرایب ضربه پیشنهادی آیین نامه با مقادیر پایش شده در این پل از تطابق خوبی برخوردار است.

۶- در راستای جلوگیری از هدر رفت منابع و حرکت در مسیر توسعه پایدار لازم است با تدوین دستورالعمل‌های لازم نسبت به پایش مستمر پل‌ها و گردآوری اطلاعات لازم و کافی جهت گام نهادن در مسیر اصلاح برخی روابط محافظه کارانه در آیین نامه‌های طراحی اقدام گردد.

۱۰- سپاسگزاری

بدین وسیله از دفتر فنی و بررسی طرح‌های راه آهن بنادر و فرودگاه‌های شرکت ساخت و توسعه زیربناهای حمل و نقل کشور، مهندسین مشاور پاسیلو، شرکت راهسازی و عمران ایران و شرکت صنایع بتنی اریکه گستر کارا جهت همکاری و کوشش‌های موثری که طی مدت اجرای عملیات و تهیه گزارشی که این مقاله بخشی از نتایج آن است مبذول داشتند، قدردانی فراوان به عمل می‌آید.

۱۱- منابع

- [1] AASHTO (2017). *LRFD Bridge Design Specifications*. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [2] AASHTO-MBE (2018). *The Manual for Bridge Evaluation (MBE)*, 3rd Edn. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [3] Wenzel, H., *health monitoring of bridges*. TG305. Vol. 5, 2009, India, Wiley.
- [4] Torres, V., Zolghadri, N., Maguire, M., Barr, P., and Halling, M. (2019). *Experimental and analytical investigation*

of live-load distribution factors for double tee bridges. *J. Perform. Construct. Facil.* 33:04018107. doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001259

[5] Catbas, F. N., Grimmelman, K. A., Ciloglu, S. K., Burgos-Gil, I., and Coll-Borgo, M. (2006). Static and dynamic testing of a concrete T-beam bridge before and after carbon fiber-reinforced polymer retrofit. *Transport. Res. Rec.* 1976, 76–87. doi: 10.1177/0361198106197600109

[6] CSI (2019). *SAP2000: Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures*.

[7] Malakooti, A., *The use of sensors in the knowledge of structural health monitoring*, *The first national conference on architecture, civil engineering and urban environment*, Hamedan, Iran, 2014

[8] Khairuddin A., Sharbatdar, M.K., Ghazimoradi, M., *Health monitoring is an unavoidable necessity to ensure the performance of construction structures*, *The 7th National Congress of Civil Engineering*, Zahedan, Iran, 2013

[9] Hajela, P. and Soeiro, F.J., “Recent Developments In Damage Detection Based on System Identification Method” , *Dept. Of Aerospace Engineering and Mechanics University Of Florida*, Gainesville, Florida 32611, USA.

[10] Tawadrous, R., Morcous, G., and Maguire, M. (2019). Performance evaluation of a new precast concrete bridge deck system. *J. Bridge Eng.* 24:04019051. doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001422