



www.testmag.ir



دکتر کمال الدین فرزانه
گروه مهندسی فرزانه
خرداد ۱۳۹۴

تحلیل ارتعاشی و کنترل
بارگذاری میدانی بر روی پل

ورسک

مقدمه:

پل ورسک از بزرگترین پل‌های راه‌آهن سراسری ایران است که در ارتفاعات روستای ورسک در شهرستان سوادکوه در استان مازندران قرار دارد. این پل که از شاهکارهای مهندسی به حساب می‌آید در سال ۱۳۱۵ بازگشایی شد. پل ورسک که راه‌آهن سراسری تهران - شمال را به هم متصل می‌کند در ارتفاع ۱۱۰ متری از ته دره با دهانه‌ی ۶۶ متری و با وسایل ابتدایی ساخته شد. پل ورسک در شمار مهم‌ترین آثار فنی مهندسی راه‌آهن شمال ایران محسوب می‌شود که در مهرماه ۱۳۵۶ با شماره ۱۵۳۴ ثبت آثار ملی شده است. ورسک از جمله پل‌های استراتژیک ایران است که توسط مهندسان آلمانی و اتریشی با تضمین ۷۰ ساله احداث شد.

با توجه به شرایط منطقه‌ای و ترافیک بالای عبوری از این پل، حفظ، مراقبت و ارتقای ایمنی این سازه بعد از بیش از ۸۰ سال از زمان تأسیس آن بسیار با اهمیت می‌باشد. به همین منظور؛ دانشکده‌ی مهندسی راه‌آهن دانشگاه علم و صنعت متصدی انجام تحقیقات جامعی بر روی شاخص‌های مختلف این پل گردیده است. به این منظور یک گروه ۲۵ نفره از متخصصان در زمینه‌های مختلف به سرپرستی دکتر عطایی و با همکاری دکتر کمال‌الدین فرزانه، مهندس مصطفی کریمی، مهندس محمد خادم ثامنی و جمعی از مهندسين و کارشناسان دیگر به محل اعزام و مطالعات و آزمایش‌های کاملی را بر روی پل انجام دادند.

تاریخچه پل ورسک:

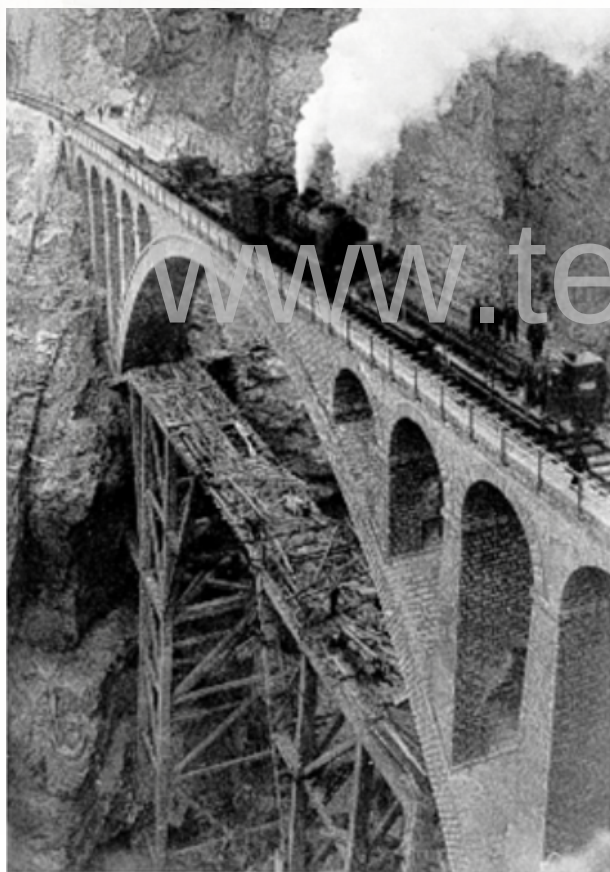
طول راه‌آهن شمال ۳۸۲ کیلومتر بعلاوه ۲۱ کیلومتر خط انشعابی بندر امیرآباد و همچنین مجموعاً ۹۱ کیلومتر خطوط فرعی شامل ۴۳/۵ کیلومتر تجاری و ۴۷/۵ کیلومتر خط مانوری می‌باشد. راه‌آهن شمال قریب به ۱۵۰۰ دستگاه پل و آبرو بطول تقریبی ۶۸۵۰ متر به عنوان بزرگترین شاخه انتقالی راه‌آهن شمال محسوب می‌گردد. نام ورسک از قریه ورسک گرفته شده است که در مجاورت محل ساخت پل قرار داشته و در آن زمان در حدود ۲۰ خانوار در آن ساکن بوده‌اند. پس از چند سال از احداث پل ساکنان این روستا به ورسک امروزی که آن زمان به عباس‌آباد معروف بود، آمدند و امروز این روستا به نام ورسک عباس‌آباد معروف شده است.



پل ورسک

کوه‌های البرز، بهترین مهندسان اروپا را به ایران فراخواند. هنگامی که آنها نقشه‌ی هوایی رشته کوه‌های البرز را تهیه کردند، ساکسیلد دریافت که در منطقه ورسک مشکلی وجود دارد. راه‌آهن باید از روستای عباس‌آباد (که بعدها به ورسک تغییر نام داد) عبور می‌کرد. ترن پس از عبور از روستای ورسک باید با طی مسافت ده کیلومتر و نیز ۶۰۰ متر صعود، از کوهستان عبور و به سمت تونل گدوک حرکت می‌کرد. اما از آنجا که صعود چنین شیب تندی برای ترن میسر نبود، مهندسان کامپساکس، مسیر را به صورت سه پله روی دامنه کوه طراحی کردند. مسیری که امروز به سه خط طلا معروف است. اما مشکل به همین جا ختم نمی‌شد. وجود دره‌ی ورسک، مهندسان کامپساکس را مجبور کرد تا پلی با دهانه‌ی بزرگ را روی آن در نظر بگیرند. ساکسیلد برای این چالش یکی از بهترین مهندسان پل‌ساز سوئیسی را در تیم خود داشت. هانس ناتر که در سوابق درخشان خود احداث پل و ایستگاه راه‌آهن برن سوئیس را داشت؛ ماموریت یافت تا پلی را با مصالح ساختمانی، در ارتفاع ۱۱۰ متری از کف دره‌ی ورسک با دهانه ۶۰ متر طراحی کند. هانس ناتر کار محاسبات پل ورسک را به پایان برد و نقشه‌ی آن را تهیه کرد. در این اثنا مهندسان کامپساکس که به چشم خود طغیان رود ورسک را دیده بودند تصمیم گرفتند با احداث تونلی در زیر رودخانه ورسک، ترن را از طغیان محافظت کنند و سپس با چرخش در مسیر و صعود به میزان صد متر، ترن روی پل راه‌آهن ورسک قرار گیرد.

پس از پایان کار هانس ناتر، نوبت به آغاز عملیات احداث آن بود. برای



«عبور نخستین قطار از پل ورسک»

ساخت پل ابتدا دو ستون مرتفع و سپس یک داربست بتونی احداث شد. ساخت پل از اواسط آبان ۱۳۱۳ آغاز و بالاخره در پنجم اردیبهشت ۱۳۱۵ به طور رسمی افتتاح شد. هزینه‌ی احداث پل ورسک دو میلیون و ۶۰۰ هزار ریال اعلام شد. پل راه‌آهن ورسک از دیدگاه مهندسان کامپساکس یک شاهکار مهندسی بود. ساکسیلد که کتاب خاطرات خود را در سال ۱۳۵۰ با نام «خاطرات یک مهندس دانمارکی» چاپ کرد، برای طرح جلد کتابش از نمای پل ورسک استفاده کرد.

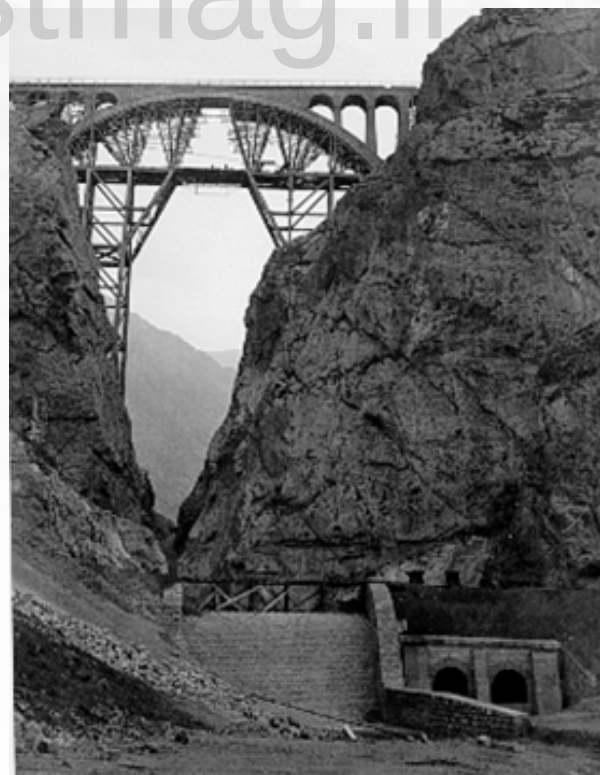
در زمان حکومت رضاشاه و در اول اردیبهشت سال ۱۳۱۲ یورگن ساکسیلد به عنوان مدیرعامل شرکت دانمارکی کامپساکس (Kampsax) قرارداد نظارت بر احداث راه‌آهن شمال - جنوب ایران را همراه با شرکت ایتالیایی (پیزاگالی) به عنوان مجری طرح امضا کرد. یورگن ساکسیلد در این قرارداد تعهد داد تا احداث ۹۰۰ کیلومتر خط راه‌آهن را در مدت شش ماه به پایان برساند و برای ساخت هر متر راه‌آهن، معادل پنج دلار طلا (حدود ۱,۵ گرم طلای خالص) دریافت کند. او برای تعیین مناسب‌ترین مسیر عبور راه‌آهن از میان رشته

لادیس لوس فون رابسویچ (L. Von Robcevidc) معروف به مهندس ورسک (۱۸۹۳-۱۹۷۵) اهل اتریش و ناظر بر عملیات احداث پل ورسک که به همراه خانواده‌اش درخانه‌ای واقع در دره‌ی ورسک و نزدیک به پل اقامت



وادیسلاوس فون رابسویچ طراح پل ورسک»

داشت و بعدها تحصیلات تکمیلی خود را تا مقطع دکترای مکانیک سنگ ادامه داد. او مسئولیت احداث تونل‌های مسیر راه‌آهن را نیز بر عهده داشته است. رابسویچ از بنیان‌گذاران روش تونل‌زنی جدید اتریشی (NATM) بود. همچنین سرپرستی مهندسان محاسب و طراح پل برعهده‌ی هانس اتو ناتر (Hans Otto Nater) مهندس سوئیس بوده است که در طراحی و احداث پل و ایستگاه راه‌آهن برن سوئیس نقش داشت. هانس ناتر (۱۸۵۶-۱۹۵۴) نابغه ریاضی و پل‌سازی، فارغ‌التحصیل دانشگاه پلی‌تکنیک زوریخ (سوئیس) بود که طراحی و انجام محاسبات پل‌های راه‌آهن سراسری ایران و نیز پل ورسک توسط گروهی از مهندسان تحت نظارت او انجام شد.



جمع‌آوری مطالعات انجام شده

پل قوسی، پلی است با تکیه‌گاه‌های انتهایی در هر طرف، که شکلی نیم دایره مانند دارد. پلی که از رشته‌ای از قوس‌ها تشکیل شده باشد، پل دره‌ای نامیده

می‌شود. پل قوسی ابتدا توسط یونانی‌ها و از سنگ ساخته شد. بعدها، مردم باستان از ملات در پل‌های قوسی خود استفاده کردند. با توجه به اصول مقاومت مصالح، شعاع قوس و ابعاد این پل‌ها را طوری انتخاب می‌کنند که بارهای قائم وارده تبدیل به یک نیروی فشاری در امتداد قوس شود. بنابراین در مناطقی با کیفیت خاک مناسب، می‌توان دهانه‌های بزرگ (تا حدود ۵۰۰ متر) را با پل‌های قوسی طی نمود.

ارزیابی پل بصورت محاسبه ظرفیت باربری یک پل به منظور مشخص کردن عملکرد پل از نظر ایمنی و سرویس دهی تحت بارها و سرعت‌ها در محدوده ترافیک معمول فعلی تا نیازهای بهره‌برداری صورت می‌پذیرد. ارزیابی می‌تواند به دو صورت کیفی و کمی باشد. در پل‌های قوسی ظرفیت باربری برای طاق قوسی به صورت کمی اندازه‌گیری و تکیه‌گاه‌ها و پایه‌ها معمولاً به صورت کیفی ارزیابی می‌شوند. ارزیابی پل‌های قوسی به این خاطر ضروری است که پل‌های قوسی در طول زمان فرسوده می‌شوند و بنابراین ظرفیت باربری آن‌ها کاهش می‌یابد. به منظور تأمین ایمنی راه‌آهن بسیار ضروری است که ظرفیت باربری کافی مورد نیاز برای حمل و نقل فعلی بدون افزایش سرعت خرابی تأمین و از قابل استفاده بودن پل اطمینان حاصل شود. بارگذاری بر روی پل‌ها ممکن است در طول زمان تغییر کند. به طور نمونه بار محوری، تعداد محورها و سرعت وسایل نقلیه ممکن است افزایش پیدا کند و زمانی که حرکت قطار جدید می‌خواهد آغاز شود لازم است که از ظرفیت کافی پل‌ها و مسیر بدون کاهش حاشیه امنیت اطمینان حاصل کرد. ارزیابی باید این اطمینان را به ما بدهد که سازه توانایی تحمل بارهای وارده را به نحوی ایمن دارد و خواهد داشت، به عبارتی دیگر باید مشخص کند که در کجا و چرا کاهش ظرفیت باربری داریم. پیشنهاد راهکار جهت اقدامات مفید به عنوان بخشی از ارزیابی تلقی می‌شود.

مدلسازی پل ورسک

از آنجایی که پل ورسک از سازه‌ی بتنی تشکیل شده است و تمامی قوس‌ها به همراه قوس اصلی (دهانه ۶۶ متری) در ارتباط با هم وظیفه‌ی باربری سازه را انجام می‌دهند، لذا رفتار این سازه، رفتاری پیچیده است. بنابراین جهت مدلسازی این سازه می‌بایست حالات مختلف آن را با نرم‌افزارهای اجزای محدود در نظر گرفت تا به بهترین حالت برای استفاده از خروجی نرم‌افزار دست یافت.

به منظور مدلسازی این پل از نرم‌افزار SAP2000 V14.2.4 استفاده شده و سازه به سه روش مدل می‌گردد. این سه روش عبارتند از:

۱. مدلسازی پل با اجزای FRAME
۲. مدلسازی پل با اجزای SHELL
۳. مدلسازی پل با اجزای SOLID

شایان ذکر است که در نگاه اول با توجه به نوع سازه به نظر می‌رسد که مدلسازی پل با اجزای SHELL و SOLID از قرابت بیشتری با واقعیت پل برخوردار باشد. بنابراین به منظور بررسی همه‌ی حالات مورد نظر، سازه‌ی پل با هر سه روش فوق مدلسازی گردید. با توجه به نقشه‌های سازه‌ای پل ورسک، در تمامی حالات مدلسازی از مصالح زیر استفاده شده است:

مدلسازی قوس اصلی و قوسهای فرعی: با استفاده از مشخصات مصالح بتنی با مقاومت ۲۰۰ مگاپاسکال

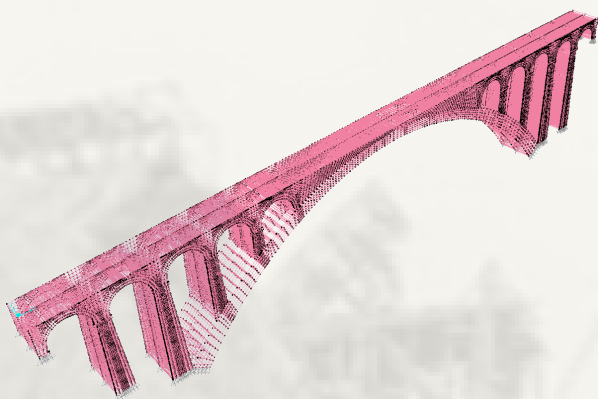
مدلسازی مصالح پرکننده: با استفاده از مشخصات مصالح بتنی با مقاومت ۱۵۰ مگا پاسکال

از آنجایی که میزان سلامت بلوک‌های بتنی دارای قوس مشخص نمی‌باشد، لذا مدول الاستیسیته بلوک بتنی قوس نیز در حد مدول الاستیسیته بتن پرکننده در نظر گرفته شده است.

مدلسازی با اجزای FRAME

در این روش از مدلسازی تمامی قسمت‌های پل با استفاده از اجزای

در این مدل سازی از ۱۵۲۹۰ عدد اجزای SOLID و ۲۸۱۶۶ عدد گره استفاده شده است.



مدل سه بعدی سازه با اجزای SOLID

اندازه گیری میدانی پل ورسک

اندازه گیری های میدانی پل ورسک توسط یک گروه ۲۵ نفره از متخصصان ریلی به سرپرستی دکتر عطایی و همکاری دکتر کمال الدین فرزانه، مهندس خادم ثامنی، مهندس کریمی و دیگر متخصصان ریلی کشور در مدت ۵ روز بر روی پل ورسک صورت پذیرفت.

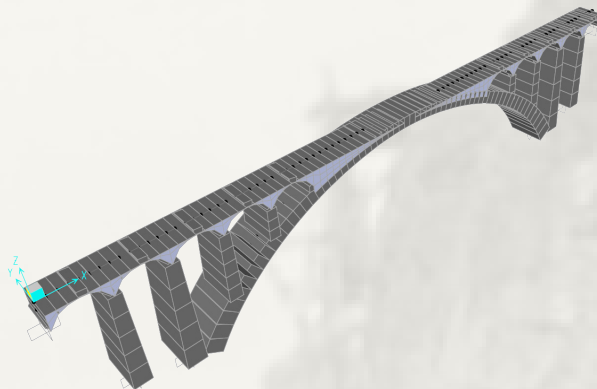


سنسورهای مختلفی از جمله DCDT برای اندازه گیری جابجایی قائم میانه دهانه اصلی و نقاط دیگر پل، کرنش سنج جهت تشخیص میزان بار وارده از طریق واگن به پل و همچنین خط کش LVDT برای اندازه گیری جابجایی قائم خط در محل تراورس ها بر روی پل نصب شده و اندازه گیری ها با عبور یک قطار متشکل از دو لکوموتیو و دو واگن باری صورت گرفته است. در ادامه نتیجه برخی از اندازه گیری های انجام شده در میانه دهانه اصلی پل (جابجایی قائم دهانه، جابجایی قائم تراورس و کرنش سنج نصب شده در میانه پل) نشان داده شده است.

جهت اندازه گیری مقادیر تنش، کرنش، تغییر مکان و شتاب در نقاط مختلف پل کلاً تعداد ۴۵ عدد سنسور بر روی پل نصب شد. سنسورهای کرنش Strain Gage بر روی ریل ها نصب گردید. این سنسورها در حین عبور قطار مقدار تنش به وجود آمده بر روی ریل را اندازه گیری می کنند. ارتعاش میانه ی پل، دهانه ۱/۴ و دهانه ۳/۴ با نصب سنسورهای شتاب اندازه گیری می شود. در دهانه ی میانی سنسور شتاب در سه جهت قائم عرضی و طولی نصب شده است.

بارهای جانبی همانند نیروی باد ایجاد ارتعاش عرضی می کنند. در ضمن این پل بدلیل وجود قوس در مسیر سیر قطار دارای نیروی جانب مرکز سنگینی است که در تنش های عرضی نمایان می گردد.

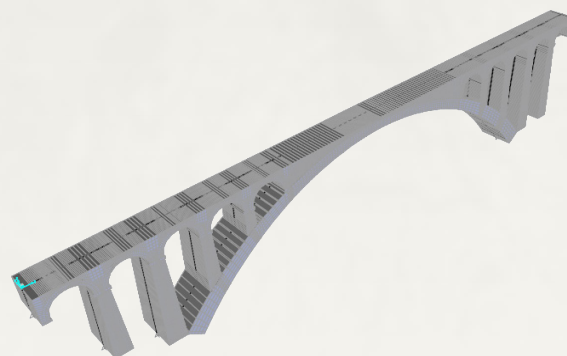
FRAME استفاده شده و برای مدل سازی مصالح پرکننده ی روی آن از اجزای SHELL استفاده شده است. به منظور تبیین مدل موجود با واقعیت پل، تمامی مقاطع پل با تغییر ضخامت های عرضی و ارتفاعی مربوط به خود تعریف شده اند که این تغییرات در نمای سه بعدی کامل پل در شکل زیر نشان داده شده است. در این مدل سازی از ۲۷۸ عدد اجزای FRAME، ۳۱۳ عدد اجزای SHELL و ۴۷۰ عدد گره استفاده شده است.



مدل سه بعدی سازه با اجزای FRAME

مدل سازی با اجزای SHELL

در روش دوم از اجزای SHELL جهت مدل سازی کل سازه استفاده می شود. از نقاط قوت این حالت نسبت به حالت اول، مدل سازی کل سازه (قوس اصلی و مصالح پرکننده) با استفاده از اجزای SHELL بوده و از آنجایی که اتصال بین اجزای FRAME و SHELL حذف شده است؛ دقت مدل بالاتر خواهد بود. به طور کلی امروزه در مدل سازی های پیشرفته سعی بر آن است تا از به کار بردن اجزای FRAME و SHELL به صورت همزمان خودداری گردد. چراکه دقت مدل سازی را کاهش می دهد. این امر بدان دلیل است که از ۲ نوع اجزا با سختی متفاوت در سازه استفاده شده است که همین مسئله در سازه های بزرگی مانند پل ورسک می تواند نتایج مدل سازی را با مشکل روبرو نماید.



مدل سه بعدی سازه با اجزای SHELL

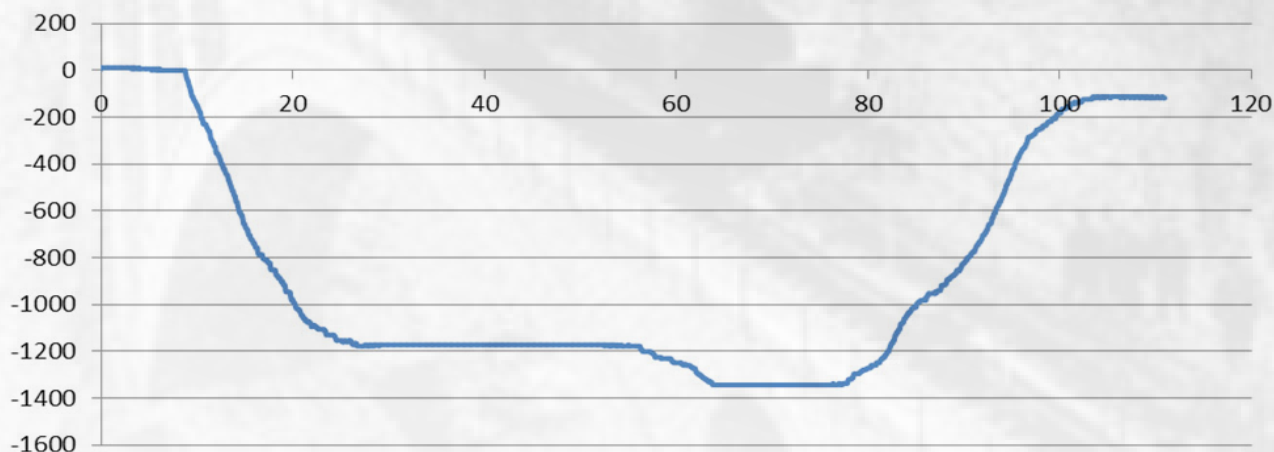
مدل سازی با اجزای SOLID

از آنجا که عموماً مدل سازی یک سازه ی عظیم با دو روش کاملاً متفاوت، یعنی مدل سازی با اجزای FRAME یا SHELL تفاوت هایی با هم خواهد داشت، لذا تنها با استفاده از یک مدل سه بعدی کامل با اجزای SOLID می توان بهترین مدل را شناسایی و از نتایج آن استفاده نمود. به همین دلیل در روش سوم از اجزای SOLID جهت مدل سازی پل استفاده می شود. از نکات مهم استفاده از این اجزا، مدل سازی کامل پل با در نظر گرفتن تمامی ابعاد پل در سه جهت می باشد که درصد خطا در مدل سازی را به شدت کاهش می دهد. در شکل زیر مدل سه بعدی پل در این حالت نشان داده شده است.

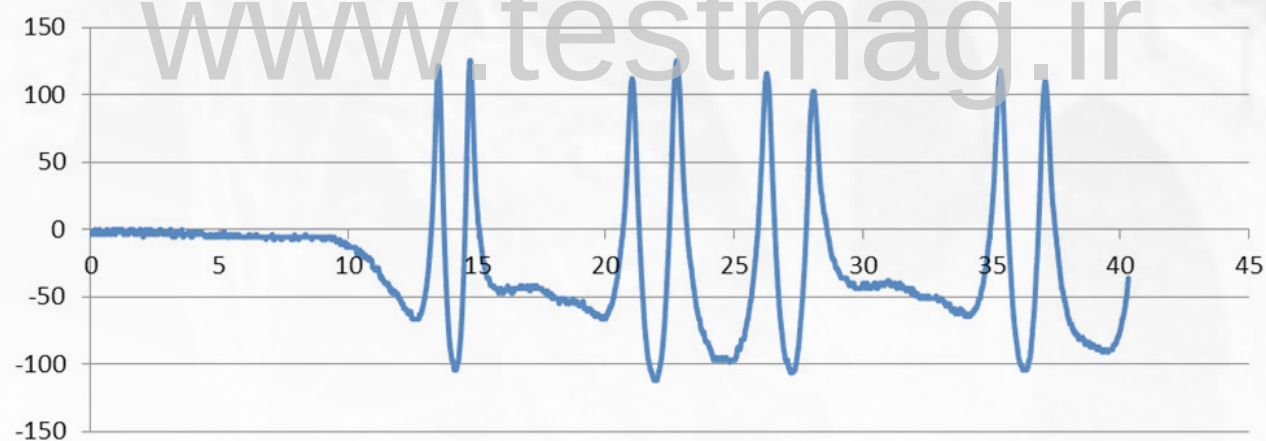


فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی پل از تحلیل اسپکتروم این سنسورها بدست می‌آید.
نصب سنسورهای تغییر مکان با تکنولوژی DCDT بر روی میانه و دهانه‌ی ۴/۳ و ۴/۱ میزان خیز این نقطه در حین حرکت قطار و پس از آن یعنی در اثر بارگذاری دینامیک و استاتیک را اندازه‌گیری می‌کنند.

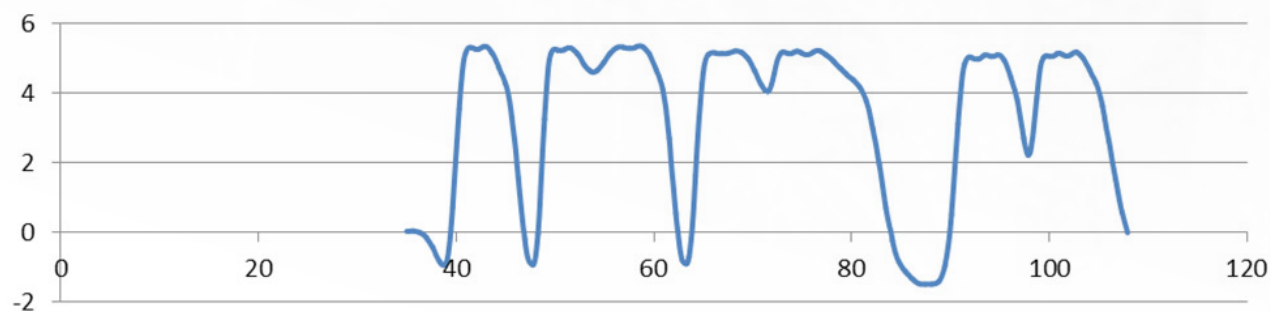
نتایج این تحلیل برای مقایسه و یکسان‌سازی با مدل FEM کامپیوتری بسیار مهم است.



نمودار جابجایی قائم میانه دهانه اصلی پل و رسک بر حسب زمان (واحد میکرومتر)



کرنش اندازه‌گیری شده ریل بر اثر عبور قطار بر حسب زمان (Micro Strain)



نمودار جابجایی قائم تراورس میانه پل بر حسب زمان (میلی‌متر)