

بررسی آزمایشگاهی شناسایی آسیب اتصال‌های پل‌های خرپایی با استفاده از پاسخ‌های ارتعاشی تحت بار متحرک

عابد کردی (دانشجوی دکتری)

موسی محمودی صاحبی* (استاد)

دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۴۰۲ (۳۹ شماره ۳، صص. ۷۱-۸۱، پژوهشی)

پاسخ‌های ارتعاشی سازه‌ها، از قبیل تغییرمکان، همواره در اثر آسیب‌های موضعی دچار تغییر می‌شوند و با مقایسه‌ی آنها در سازه‌های سالم و آسیب‌دیده تحت بارگذاری‌های مختلف می‌توان نشانگری مناسب جهت شناسایی محل آسیب معرفی کرد. در پژوهش حاضر، با بررسی پاسخ‌های تغییرمکان ارتعاشی ناشی از بار متحرک و تغییرات آنها و همچنین مقایسه‌ی شکل الگوی تغییرات پاسخ‌های ارتعاشی با شکل دیاگرام خط تأثیر اعضاء خرپا در پل‌های خرپایی اقدام به شناسایی آسیب در اعضا و اتصال‌ها شده است. برای هدف مذکور، یک مدل آزمایشگاهی از یک پل خرپایی مسطح، با اتصال‌های پیچی ساخته و طی ۱۸ سناریوی آسیب مختلف، نتایج برداشت و بررسی شده است. این نتایج نشان می‌دهند که اگر آسیب در اتصال‌های پل رخ دهد، نمودار اختلاف پاسخ‌های تغییرمکان دو حالت سالم و آسیب‌دیده و دیاگرام خط تأثیر عضوی که اتصال‌های آن آسیب دیده است، از نظر شکل منطبق خواهند بود و می‌تواند شاخصی برای شناسایی آسیب باشد.

واژگان کلیدی: شناسایی آسیب، پاسخ تغییرمکان، خط تأثیر، پل خرپایی، اتصال‌ها.

۱. مقدمه

سازه‌ها همواره ممکن است در حین بهره‌داری به دلایل مختلف، نظیر: زلزله، خستگی ناشی از بارگذاری و باربرداری، بارگذاری بیش از حد مجاز، بارهای تناوبی، بار باد و دلایل دیگر دچار آسیب شوند.^[۱] رخداد چنین خسارت‌ها و نواقصی در سازه باعث تغییر مشخصات و رفتار سازه می‌شود. همچنین گذشت زمان و شرایط محیطی نیز سبب فرسایش و زوال مصالح سازه‌ها و در نتیجه تغییر مشخصات آنها می‌شود. امروزه علاقه به افزایش توانایی در نظارت و شناسایی آسیب در مراحل اولیه‌ی آسیب در سازه‌های مختلف، از جمله: پل‌ها، زیرساخت‌ها و سازه‌های فضایی و مکانیکی بسیار فراگیر شده است.^[۲] موارد مذکور سبب شده است تا شناسایی خصوصیات سیستم، تشخیص آسیب موجود در آن (شدت، نوع، زمان و محل آسیب) و شناسایی سلامت سازه به یکی از مسائل مهم در علوم مهندسی، از جمله مهندسی عمران بدل شود. در میان سازه‌ها، پل‌ها همواره تحت بار متحرک ناشی از حرکت وسایل نقلیه هستند و به همین دلیل پتانسیل آسیب بالایی دارند. در نتیجه، پژوهشگران

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۹/۹، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۱/۱۷، پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۲۶

استناد به این مقاله:

کردی، عابد و محمودی صاحبی، موسی، ۱۴۰۲. بررسی آزمایشگاهی شناسایی آسیب اتصال‌های پل‌های خرپایی با استفاده از پاسخ‌های ارتعاشی تحت بار متحرک. مهندسی عمران

شریف، ۳۹(۳)، صص. ۷۱-۸۱. DOI:10.24200./J30.2023.61428.3173

را با چند مثال از سازه‌های خرابایی بررسی کردند.^[۸] سیورادانه^۳ (۲۰۱۵)، نیز یک روش ساده برای تشخیص محل آسیب در پل ریلی با اندازه‌گیری مقادیر پارامترهای مدل ارائه کرده است.^[۹] لی و هاپو^۴ (۲۰۱۶)، امکان انجام و همین اثرگذاری یک حسگر جدید اندازه‌گیرنده تغییر مکان نسبی در شناسایی آسیب اتصال‌های پل‌های خرابایی را بررسی کرده‌اند.^[۱۰] کیم و همکاران (۲۰۱۶)، یک الگوریتم عددی با استفاده از یک تحلیل اجزاء محدود ارتعاش آزاد ارائه و شناسایی محل و مقادیر چند آسیب را در سازه‌های خرابایی بررسی کرده‌اند.^[۱۱] چانگ و کیم^۵ (۲۰۱۶)، یک آزمایش میدانی بر روی یک پل با تکیه‌گاه‌های ساده‌ی خرابایی با ۴ سناریوی آسیب به انجام رساندند و فرایند شناسایی آسیب را با استفاده از نتایج پارامترهای مودال و پارامترهای ارتعاشی ارائه کردند.^[۱۲] مرادی‌پور و همکاران (۲۰۱۷)، بر روی کاربرد روش انرژی کرنشی مودی برای شناسایی آسیب‌های شبیه‌سازی شده بر روی یک پل شاخص و معیار تمرکز کردند.^[۱۳] کومار و بیسواس^۶ (۲۰۱۳)، یک الگوریتم شناسایی و موقعیت‌یاب آسیب برای پل‌های خرابایی فولادی تحت بار و شرایط محیطی متغیر با استفاده از رویکرد داده‌محور پیشنهاد کرده‌اند.^[۱۴] مصطفی و همکاران (۲۰۱۷)، یک ساختار تحلیلی برای پایش سلامت مبتنی بر ارتعاش سازه‌ی از طریق معرفی یک برآورد میرایی بر پایه‌ی انرژی پیشنهاد کردند و فرایند شناسایی آسیب را با ارزیابی نسبت‌های میرایی مودال از المان‌های سازه‌ی مختلفی با استفاده از نسبت‌های میرایی مودال که به صورت آزمایشگاهی به دست آمده‌اند و همچنین انرژی‌های پتانسیل و کرنشی مودال به دست آمده از یک مدل اجزاء محدود به‌روز شده به انجام رساندند.^[۱۵] آنو^۷ و همکاران (۲۰۱۹)، برای شناسایی آسیب در سازه‌های خرابایی از سیگنال‌های ارتعاشی به دست آمده از حسگرهای نصب شده در پل استفاده و یک مدل رگرسیون به سیگنال‌های زمانی اعمال کردند تا مشخصات سلامت سازه را استخراج کنند و در نهایت، یک روش یادگیری ماشین به ضرایب رگرسیون اعمال کردند تا بتوانند سازه‌ها را به دو حالت آسیب‌دیده و سالم طبقه‌بندی کنند.^[۱۶] موسوی و همکاران (۲۰۲۰)، عملکرد تبدیل هیلبرت - هوانگ را بر اساس تجزیه‌ی مودی کامل با استفاده از روش نویز تطابقی و شبکه‌ی عصبی مصنوعی به عنوان روشی برای شناسایی آسیب معرفی کردند.^[۱۷] برناردینی^۹ و همکاران (۲۰۲۱)، قابلیت ابزارهای نوین را برای پایش آسیب غیرمستقیم سازه‌های ریل راه‌آهن با معرفی یک مرحله‌ی دقیق‌تر از مدل‌سازی آسیب برای دست‌یابی به مدلی با شباهت بیشتر به واقعیت بررسی کرده‌اند.^[۱۸] علاوه بر پل‌ها، به اتصال‌های دیگر سازه‌های زیرساختی، از قبیل: برج‌ها و ساختمان‌های بلندمرتبه و خرپاهای بزرگ نیز همواره در سال‌های اخیر توجه شده است، که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره شده است. جی^۱ و همکاران (۲۰۲۱)، با استفاده از یک روش جدید و پاسخ ناشی از بار باد، اقدام به شناسایی محل پیچ‌های لق شده در یک برج بلندمرتبه کردند و حالت نرمال شده‌ی واریانس ریشه‌ی پاسخ کرنش عمودی ناشی از باد را به عنوان شاخص شل بودن پیچ معرفی کردند.^[۱۹] قتادی و کورهللی^{۱۱} (۲۰۲۲)، با بهره‌گیری از چند روش بهینه‌یابی که اخیراً معرفی شده‌اند، اقدام به برآورد آسیب در سازه‌های با مقیاس بزرگ کردند و نتایج روش‌های مذکور را با چند روش شناخته شده که در گذشته بسیار به آنها توجه شده است، مقایسه کردند و طی دو مدل عددی که شامل مدل‌سازی خرابایی صفحه‌ی با ۵۳ عضو و یک قاب ۳ طبقه با مقیاس واقعی بود، نتایج آماری مقایسه‌ی انجام شده را ارائه کردند.^[۲۰] همچنین قتادی و همکاران (۲۰۲۲)، روش‌ها و نتایج ۵۰ پژوهش انجام شده در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ در حوزه‌ی شناسایی آسیب با استفاده از الگوریتم بهینه‌یابی (PSO) بررسی و چندین موضوع را برجسته کردند و همچنین روش‌هایی که عمدتاً از روش بهینه‌یابی PSO بهره‌برده‌اند را از نظر زمان محاسبات و دقت بررسی کردند.^[۲۱] کربالی و ملک جعفریان (۲۰۲۲)، با رویکردی

جدید اقدام به معرفی مفهوم نسبت‌های شکل انحرافی ناشی از پاسخ‌های اندازه‌گیری شده از دو محور پشت سر هم وسیله‌ی نقلیه روی پل کردند و با بررسی نسبت‌های مذکور که نسبت‌های بدون بُعد بودند، توانستند تغییرات رفتاری پل را تشخیص دهند و از این مفهوم به عنوان شاخصی برای شناسایی آسیب استفاده کنند.^[۲۲] مصطفی و همکاران (۲۰۲۲)، نیز در یک مطالعه‌ی تحلیلی نشان دادند که می‌توان با استفاده از بسامد لحظه‌ی پل راه‌آهن و بهره‌گیری از نوعی تبدیل موجک، شاخصی برای شناسایی آسیب معرفی کرد، در حالی که بین بسامد ناشی از بار متحرک و بسامد ناشی از آسیب تمایز قائل شد.^[۲۳] در پژوهش حاضر، یک راهبرد جدید برای شناسایی آسیب در اتصال‌های پل‌های خرابایی با استفاده از پاسخ تغییر مکان قائم ارتعاشی پل تحت بار متحرک و همچنین دیاگرام‌های خط تأثیر اعضا معرفی شده است. لازم به ذکر است که پاسخ فقط یک نقطه‌ی دلخواه از تیر برای انجام شناسایی آسیب لازم است.

۲. روش پژوهش

۲.۱.۲. ملاحظات مقدماتی

در پژوهش حاضر برای شناسایی آسیب در اتصال‌های پل‌های خرابایی، داشتن دیاگرام‌های خط تأثیر اعضا ضروری بوده است. در ادامه‌ی پژوهش، نوشتارهایی که از میحث خط تأثیر برای پیشبرد مطالعاتشان در حوزه‌ی مطالعات در مورد پل‌های خرابایی بهره‌برده‌اند، بررسی شده‌اند. خط تأثیر، یک تابع پاسخ است که دامنه‌ی تغییرات یک پاسخ سازه‌ی (به طور مثال نیروی محوری، برشی، گشتاور خمشی، تغییر شکل و غیره) را در یک نقطه‌ی مشخص در سیستم سازه‌ی ناشی از اعمال یک الگوی بار استاتیکی قرار گرفته در هر نقطه روی سازه نشان می‌دهد. به یک خط تأثیر زمانی که بار اعمال شده فقط محدود به بار واحد باشد، خط تأثیر واحد گفته می‌شود.^[۲۴] زاتورن و نکاتی^{۱۲} (۲۰۱۱)، اطلاعات حسی و تصویری را برای استخراج خط تأثیر واحد به عنوان یک شاخص آسیب برای نظارت بر رفتار پل تحت شرایط بارگذاری با استفاده از روش‌های تصویری رایانه تحلیل کرده‌اند.^[۲۶] استیماک^{۱۳} و همکاران (۲۰۰۶)، یک روش شناسایی آسیب سازه‌ی از طریق تحلیل خطوط تأثیر تغییر مکان و صفحه‌های تأثیر بر مبنای اختلاف در انحنای خطوط و صفحه‌های تأثیر تغییر مکان در دو حالت سالم و آسیب‌دیده پیشنهاد کرده‌اند.^[۲۷] وانگ و همکاران (۲۰۱۲)، خطوط تأثیر نیروی برشی و لنگر خمشی تیر در حالت‌های سالم و آسیب‌دیده را آنالیز کردند و نشان دادند که خط تأثیر نیروی برشی، غیرحساس به آسیب در تیر و لنگر خمشی در تکیه‌گاه وسط تیر، بسیار حساس به آسیب است.^[۲۸] ژو^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۴)، به یک رویکرد نوین شناسایی محل آسیب از طریق ترکیب مقادیر خط تأثیر تنش به دست آمده از چند نقطه با استفاده از روش فیوژن دست یافتند.^[۲۹] استیماک^{۱۵} و همکاران (۲۰۰۶)، تأثیر فاصله‌ی نمونه در خط تأثیر انحراف را بر اساس روش تشخیص آسیب در تیرها بررسی کردند و برای نشان دادن کاربرد روش اخیر حتی زمانی که تعداد کمی از نقاط نمونه‌برداری استفاده می‌شود، یک تحلیل عددی انجام دادند.^[۳۰] چن و همکاران (۲۰۱۵)، یک روش منظم‌سازی برای شناسایی خط تأثیر تنش بر اساس اطلاعات وسایل نقلیه و تاریخچه‌ی زمانی تنش مرتبط، که هنگام عبور وسایل نقلیه از روی پل اندازه‌گیری می‌شود، معرفی کرده است.^[۳۱] زینالی و استوری (۲۰۱۷)، یک روش تشخیص نقص ارائه کردند که انحنای خطوط تأثیر تغییر شکل استاتیکی دارای نویز را برای پیش‌بینی مکان و شدت آسیب ساختاری ارزیابی می‌کند.^[۳۲] یونکای^{۱۶} و همکاران (۲۰۲۱)، از تغییرات خطوط تأثیر تنش و تغییر شکل قبل و بعد از آسیب پل، یک شاخص برای

• مقایسه‌ی نمودار و دیاگرام‌های دو مرحله‌ی قبل از نظر شکل و تطبیق نمودار و خط تأثیر مشابه جهت شناسایی عضو آسیب‌دیده.

پس از مقایسه‌ی نمودارها و دیاگرام‌ها، در صورتی که نمودار خط تأثیر عضوی با نمودار اختلاف پاسخ‌ها منطبق باشد، به این معنی است که اتصال و یا اتصال‌ها مربوط به عضو مورد نظر آسیب‌دیده بوده و آسیب مذکور موجب اختلال در عملکرد این عضو محوری شده است.

۲.۲. مشخصات نمونه‌ی آزمایشگاهی

در پژوهش حاضر، مبنای راهبرد استفاده شده، مقایسه‌ی دیاگرام‌های خط تأثیر اعضا و نمودار به دست آمده از رابطه‌ی اختلاف پاسخ‌های تغییرمکان رابطه‌ی ۱ بوده است. برای بررسی میزان کارایی روش پیشنهادی، یک پل خرابایی با اتصال‌های پیچی که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، ساخته و بررسی شده است. به دلیل صفحه‌یی بودن پل خرابایی اشاره شده و جلوگیری از حرکت خارج از صفحه، تمام اعضاء افقی ردیف بالای خرپا توسط قطعاتی از جنس فوم از هر دو طرف به دو تکیه‌گاه پیوسته، که در شکل ۱ به رنگ قرمز هستند، تکیه داده شده‌اند.

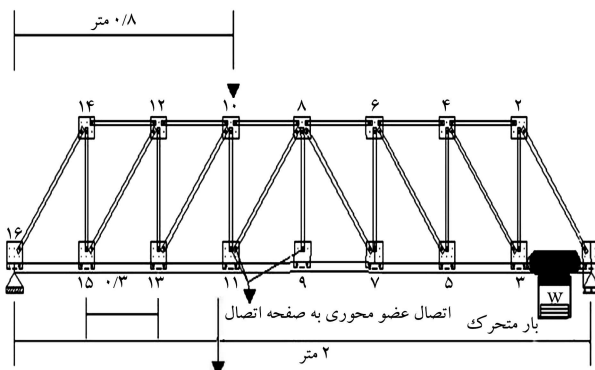
محل قرارگیری حسگر تغییرمکان‌سنج، ابعاد اعضاء پل و همچنین نوع عملکرد تکیه‌گاه‌ها در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

پل خرابایی پژوهش حاضر با طول دهانه‌ی ۲ متر از ورق گالوانیزه با ضخامت ۰/۰۰۱ متر ساخته شده است. مشخصات ورق‌های تشکیل‌دهنده‌ی پل مذکور و همچنین مشخصات هندسی آن در جدول ۱ ارائه شده است.

برای اندازه‌گیری مقادیر پاسخ تغییرمکان قائم یک نقطه در پل خرابایی تحت



شکل ۱. نمونه‌ی پل خرابایی ساخته شده در آزمایشگاه.



شکل ۲. شماتیک پل خرابایی ساخته شده.

ارزیابی آسیب و همچنین محل اولیه‌ی آسیب در پل و اثربخشی شناسایی آسیب استفاده کرده‌اند. ژانگ و همکاران (۲۰۲۱)، خط تأثیر تغییر مکان و مشتقات اول و دوم انحنای تیر پیوسته و اختلاف بین خط تأثیر تغییرمکان و مشتقات اول و دوم تصویر را در زمانی که آسیب در چند نقطه رخ می‌دهد، برآزش داده‌اند. [۳۳] عظیم و گول ۱۷ (۲۰۲۱)، یک چارچوب تشخیص آسیب جدید برای شناسایی آسیب در سطح المان، برای پل‌های خرابایی راه‌آهن ارائه کرده‌اند، که تحلیل پاسخ‌های شتاب و کرنش را ترکیب می‌کند. [۳۵]

چنگ ۱۸ و همکاران (۲۰۲۲)، با یک رویکرد نوین اقدام به معرفی یک روش برای شناسایی آسیب پل‌های پیوسته‌ی تیری کردند، که در آن از خطوط تأثیر عکس‌العمل تکیه‌گاه‌ها به عنوان شاخص شناسایی آسیب استفاده کردند. ابتدا ارتباط بین آسیب‌های موضعی در تیر و شاخص آسیب مذکور را تعیین کردند و در ادامه، حساسیت آن را با تئوری دمپستر- شفر بررسی کردند و نشان دادند اگر از خطوط تأثیر بیشتری استفاده شود، حساسیت روش ذکر شده در برابر نویز کاهش پیدا می‌کند. [۳۶] کُردی و محمودی (۲۰۲۲)، یک روش جدید برای شناسایی اعضاء آسیب‌دیده در پل‌های خرابایی تحت بار متحرک با استفاده از پاسخ تاریخی‌ی زمانی و دیاگرام‌های خط تأثیر اعضا ارائه کردند و دو عدد پل خرابایی تحت بار متحرک در یک نرم‌افزار المان محدود مدل‌سازی کردند و کارایی روش اخیر را در دو مدل مذکور بررسی کردند. [۳۷] ایشان با برداشت پاسخ تغییرمکان نقطه‌ی میانی تیر پایین خرابای تحت بار متحرک، از طریق رابطه‌ی ۱ اقدام به محاسبه‌ی اختلاف پاسخ‌های تغییرمکان در حالت‌های سالم و آسیب‌دیده کردند:

$$DD = V_i - V_d \quad (1)$$

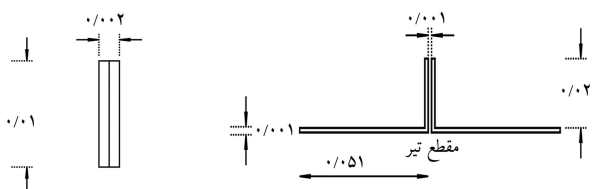
که در آن V_i و V_d به ترتیب نشان‌دهنده‌ی مقادیر تغییرمکان قائم نقطه‌ی وسط خرپا در حالت‌های سالم و آسیب‌دیده هستند. نهایتاً، عضو آسیب‌دیده با ترسیم دیاگرام خط تأثیر اعضاء پل خرابایی و مقایسه و انطباق شکلی نموداری رابطه‌ی ۱ و دیاگرام‌های اعضا تشخیص داده می‌شود. روش ذکر شده‌ی اخیر با دو مثال عددی راستی‌آزمایی شده است. [۳۷]

در پژوهش حاضر، روش استفاده شده برای انجام شناسایی آسیب، مشابه روش کُردی و محمودی، [۳۷] بوده است، با این تفاوت که پژوهش اخیر، [۳۷] یک پژوهش عددی بوده و اعضاء پل خرابایی به عنوان المان‌های آسیب‌دیده در نظر گرفته شده‌اند؛ اما پژوهش حاضر کاملاً آزمایشگاهی بوده و آسیب در اتصال‌های پیچی خرپا ایجاد شده و اعضایی که اتصال‌های آنها دچار آسیب شده است، شناسایی شده‌اند. مراحل شناسایی آسیب در پژوهش حاضر به این ترتیب بوده است:

- ساخت پل خرابایی با اتصال‌های پیچی در آزمایشگاه؛
- شبیه‌سازی آسیب در اتصال‌های پیچی با حذف پیچ و یا شل کردن مهره‌ی مربوط به پیچ مورد نظر؛
- برداشت پاسخ‌های تغییرمکان یک نقطه از خرابای سالم و آسیب‌دیده تحت بار متحرک توسط حسگر تغییرمکان‌سنج؛
- فیلتر کردن نویزهای موجود در پاسخ‌های تغییرمکان با استفاده از محاسبه‌گر میانگین متحرک ساده؛
- محاسبه‌ی مقادیر رابطه‌ی ۱ برای دو حالت سالم و آسیب‌دیده و ترسیم نمودار مقادیر به دست آمده؛
- محاسبه و ترسیم دیاگرام‌های خط تأثیر اعضاء خرپا؛

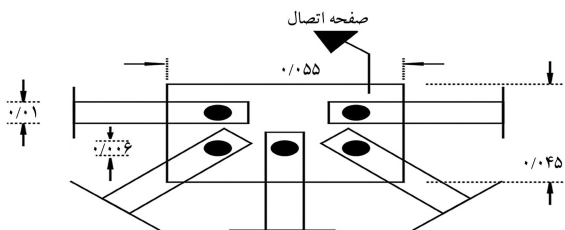
جدول ۱. مشخصات مواد و هندسه‌ی پل خرابایی.

مشخصات مواد و هندسه‌ی پل خرابایی	
مشخصات مهندسی	مشخصات مواد
طول ۲ متر	چگالی 7800 kg/m^3 کیلوگرم بر مترمکعب
ارتفاع $32/0$ متر	مدول کشسانی 210 GPa گیگاپاسکال

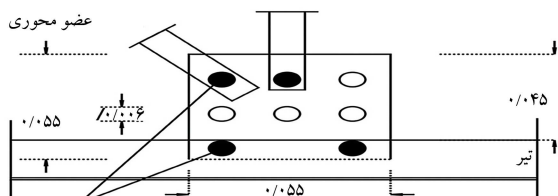


مقطع اعضای محوری (الف) تیر پیوسته پایین؛ (ب) اعضای با رفتار محوری.

شکل ۵. مشخصات مقاطع تشکیل دهنده‌ی پل خرابایی.

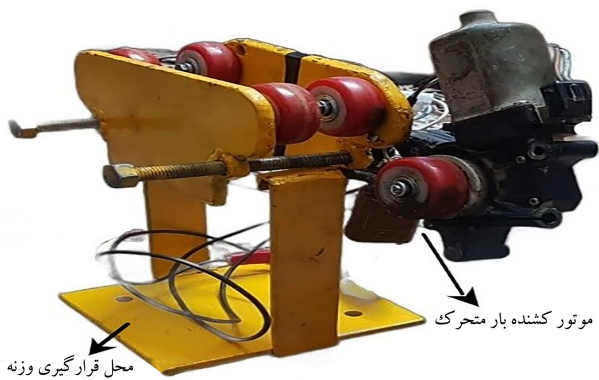


(الف) گره ۷؛



(ب) گره ۸. پیچ‌ها به قطر ۵ میلی‌متر

شکل ۶. جزئیات هندسی اتصال‌های پل خرابایی.



شکل ۷. دستگاه شبیه‌ساز بار متحرک.

۳.۲. مشخصات بار متحرک طراحی شده

در پژوهش حاضر با توجه به این‌که پل از نوع خرابایی و مسطح بوده و محدودیت حرکت وجود داشته است، برخلاف پل‌های تیری، امکان عبور بار متحرک از بالای تیر پایین پل وجود نداشت. به همین دلیل، یک وسیله‌ی قابل حرکت ۵ چرخ به گونه‌ی که بتواند از پایین تیر پل خرابایی عبور کند و در عین حال نیروی بار متحرک را انتقال دهد، به گونه‌ی طراحی شد که ۴ چرخ آن بر روی دو لبه‌ی بالایی تیر قرار گرفت و به آن آویزان شد و یک چرخ دیگر توسط موتور الکتریکی قابل کنترل از راه دور در جلوی آن قرار گرفت، که با شروع چرخش، نیروی لازم برای به حرکت درآوردن را فراهم می‌کرد (شکل ۷).



شکل ۳. حسگر تغییر مکان سنج خطی. [۳۸]



شکل ۴. دیتالاگر ۱۶ کاناله‌ی AL۸.

بار متحرک، یک حسگر تغییر مکان سنج در فاصله‌ی $76/0$ متری از تکیه‌گاه سمت چپ قرار داده شده است (شکل ۳).

درگاه‌های خروجی حسگر تغییر مکان سنج خطی از طریق کابل‌هایی به یک دیتالاگر با قابلیت ذخیره‌ی مقادیر ۱۶ کانال با سرعت نمونه‌برداری ۸ نمونه در هر ثانیه متصل شده‌اند، که تصویر درگاه‌های خروجی و ورودی دیتالاگر مذکور در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

عضو پایین پل خرابایی از یک تیر پیوسته تشکیل شده است، که از سمت راست توسط یک تکیه‌گاه غلظتی و از سمت چپ توسط یک تکیه‌گاه مفصلی مهار شده است. به جز تیر پیوسته‌ی پایین خرابا، تمامی اعضا دیگر با توجه به اتصال پیچی به ورق‌های اتصال، رفتار محوری دارند. لازم به ذکر است که شروع حرکت بار متحرک از تکیه‌گاه سمت راست بوده است. فاصله‌ی دو تکیه‌گاه، دو متر و طول خالص حرکت بار متحرک، $1/9$ متر بوده است. اعضا با رفتار محوری، که شامل اعضا افقی ردیف بالا، قطری و قائم بودند، به ترتیب به طول $255/0$ ، $236/0$ و $24/0$ متر بودند. تمام اعضا ذکر شده از اتصال دو ورق با طول اشاره شده، عرض $1/0$ متر و ضخامت $1/0$ متر ساخته شده‌اند. اما تیر پیوسته‌ی پایین پل از دو مقطع ال شکل دابل شده ساخته شده است. مشخصات هندسی اعضا پل خرابایی در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

مشخصات هندسی اتصال‌های اعضا به صفحه‌های اتصال و همچنین مشخصات اتصال صفحه‌های اتصال به تیر پایین پل در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

جدول ۲. سناریوهای آسیب شدید در اتصال‌ها و سناریوهای دو آسیب هم‌زمان.

سناریوی آسیب	اتصال آسیب دیده	عضو مرتبط با اتصال	نوع عضو	وزن بار متحرک (kg)
سناریوی ۱	۷	عضو ۷-۸	قطری	۶/۲
سناریوی ۲	۱۳	عضو ۱۰-۱۳	قطری	۱۳/۸
سناریوی ۳	۷	عضو ۶-۷	قائم	۱۳/۸
سناریوی ۴	۱۳	عضو ۱۲-۱۳	قائم	۶/۲
سناریوی ۵	۱۴	عضو ۱۲-۱۴	افقی	۶/۲
سناریوی ۶	۴	عضو ۴-۶	افقی	۶/۲
سناریوی ۷	۷ و ۱۳	عضو ۱۰-۱۳ و ۶-۷	قطری و قائم	۱۳/۸
سناریوی ۸	۶ و ۱۳	عضو ۱۲-۱۳ و ۶-۷	قطری و قائم	۱۳/۸

از هر دو سر توسط پیچ و مهره به صفحه‌های اتصال وصل شده است. به همین جهت برای شبیه‌سازی آسیب شدید در اتصال‌ها، پیچ و مهره به کلی از اتصال جدا و برای شبیه‌سازی آسیب کم، مهره‌ی پیچ مورد نظر شل شده است. هر برداشت در آزمایش، با فشردن دکمه‌ی ریموت کنترل دستگاه بار متحرک و استخراج مقادیر پاسخ نقطه‌ی قرارگیری حسگر تغییر مکان سنج آغاز می‌شود. در طی یک برداشت، بار متحرک مسافت ۱/۹ متری را طی می‌کند و باعث ایجاد ارتعاش قائم در پل می‌شود و این ارتعاش توسط حسگر تغییر مکان سنج خطی برداشت و توسط دیتالاگر در یک فایل اکسل ذخیره می‌شود. در بخش حاضر، دو گروه سناریوی آسیب در نظر گرفته شده است، که در سناریوهای گروه یک، آسیب فقط در اتصال مربوط به یک عضو و در سناریوهای گروه دوم، آسیب در اتصال‌های دو عضو شبیه‌سازی شده‌اند. در مرحله‌ی کنونی تلاش شده است که اعضاء متنوعی، شامل: اعضاء افقی، قائم و قطری تحت بررسی قرار گیرند تا کارایی روش پیشنهادی برای تشخیص آسیب به شکل عمیق‌تری بررسی شود. با توجه به شماره‌گذاری تمامی گره‌های اتصال اعضاء، هر عضو از طریق گره‌های دو سر آن عضو و همچنین صفحه‌های اتصال نیز با شماره‌ی گره، نام‌گذاری شده‌اند. در جدول ۲، نتایج ۸ سناریوی مختلف مربوط به آسیب شدید ارائه شده است.

مطابق جدول ۲، در سناریوهای اخیر، پیچ کاملاً از اتصال عضو به صفحه حذف شده است تا آسیب شدید مدل‌سازی شود. سناریوهای هفتم و هشتم نیز مربوط به آسیب هم‌زمان در دو اتصال است. با توجه به این‌که هر عضو با عملکرد محوری، توسط یک پیچ در هر سر عضو به صفحه‌ی اتصال متصل شده و در صورت آسیب در هر یک از اتصال‌های مذکور، عملکرد عضو متناظر تحت تأثیر قرار گرفته است، لذا در جدول اخیر، علاوه بر اتصال عضو آسیب‌دیده، به عضو مرتبط با اتصال آسیب‌دیده نیز اشاره شده است. در ادامه، در جدول ۳، نتایج ۶ سناریوی دیگر، که در آنها فقط پیچ‌های اتصال مورد نظر شل شده‌اند تا آسیب با شدت کمی شبیه‌سازی شود، ارائه شده است.

در ادامه‌ی پژوهش حاضر، نتایج نمودارهای به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده که همان مقادیر معادله‌ی ۱ هستند، با دیاگرام‌های خط تأثیر مقایسه شده‌اند، تا کارایی روش ارائه شده در تشخیص اتصال‌های آسیب‌دیده تأیید شود. لازم به ذکر است که نمودارهای مربوط به هر سناریو به صورت سری سه‌گانه ارائه شده است، که نمودار اول مربوط به مقادیر معادله‌ی ۱ بدون اعمال فیلتر؛ نمودار دوم با اعمال فیلتر و نمودار سوم مربوط به دیاگرام خط تأثیر عضو تأثیر

در پژوهش حاضر بار متحرک با دو وزن مختلف بر سازه وارد شده است. اولین آزمایش‌ها با وزن خود دستگاه کشنده، که ۶/۲ کیلوگرم بود، انجام شده و پس از آن با اضافه کردن وزنه در بخش پایین دستگاه، وزن بار متحرک تا ۱۳/۸ کیلوگرم افزایش یافته است. سرعت حرکت بار متحرک نیز با توجه به دو وزن مختلف بار متحرک از ۰/۲۲ تا ۰/۲۵ متر بر ثانیه متغیر بوده است. لازم به ذکر است که وزن پل خرابایی، ۴/۱۵۲ کیلوگرم و طول مسیر حرکت بار متحرک برابر با ۱/۹ متر بوده است. با توجه به این‌که در هر ثانیه ۵۰۰ داده برداشت می‌شود، حین عبور بار متحرک که حدوداً ۸ تا ۸/۶ ثانیه به طول می‌انجامد، ۴۰۰۰ تا ۴۳۰۰ داده با توجه به وزن بار متحرک در حافظه‌ی دیتالاگر ذخیره شده است. پس از انتقال داده‌ها به نرم‌افزار اکسل، فیلتر میانگین متحرک ساده با ۱۰۰۰ داده به نمودارهای اختلاف پاسخ‌ها اعمال شد تا شرایط لازم جهت مقایسه‌ی آنها با نمودارهای خط تأثیر مهیا شود.

۴.۲. دیاگرام‌های خط تأثیر اعضاء

در پژوهش حاضر برای شناسایی آسیب در اتصال‌ها، دیاگرام خط تأثیر نیروی محوری اعضاء تعیین و سپس نمودارهای اختلاف پاسخ‌های تغییر مکان پل در دو حالت سالم و آسیب‌دیده با دیاگرام‌های خط تأثیر اعضاء از نظر شکل مقایسه شده‌اند. عضوی که دیاگرام خط تأثیر آن از نظر شکل با نمودار اختلاف پاسخ‌های تغییر مکان یکسان باشد، در یکی از اتصال‌هایش، دچار آسیب می‌شود. لازم به ذکر است که دیاگرام‌های خط تأثیر اعضاء با شبیه‌سازی پل خرابایی در نرم‌افزار اجزاء محدود و اعمال بار واحد به نقاط مشخص شده بر روی تیر پایین خرابا تعیین شده است. نقاط مشخص شده روی تیر پایین پل، علاوه بر گره‌های اتصال، شامل نقاط میانی دو گره مجاور نیز می‌شود. در نتیجه به ۱۷ نقطه‌ی مشخص روی تیر، بار واحد اعمال و مقادیر نیروی محوری هر عضو ثبت شده است، تا دیاگرام خط تأثیر نیروی محوری اعضاء تعیین شود. در دیاگرام خطوط تأثیر نیروی محوری اعضاء، محور افقی، نشان‌دهنده‌ی موقعیت بار واحد و محور قائم، نشان‌دهنده‌ی مقدار نیروی محوری هر عضو با واحد نیوتن است.

۵.۲. سناریوهای آسیب و پاسخ‌های تغییر مکان ثبت شده توسط

دیتالاگر

در مدل آزمایشگاهی حاضر، هر عضو دارای عملکرد محوری در پل ذکر شده،

جدول ۳. سناریوهای آسیب با شدت کم در اتصال‌ها.

سناریوی آسیب	اتصال آسیب دیده	عضو مرتبط با اتصال	نوع عضو	وزن بار متحرک (kg)
سناریو ۹	۱۳	عضو ۱۲-۱۳	قائم	۶/۲
سناریو ۱۰	۱۴	عضو ۱۲-۱۴	افقی	۶/۲
سناریو ۱۱	۷	عضو ۶-۷	قائم	۱۳/۸
سناریو ۱۲	۷	عضو ۷-۸	قطری	۶/۲
سناریو ۱۳	۱۳	عضو ۱۰-۱۳	قطری	۱۳/۸
سناریو ۱۴	۴	عضو ۴-۶	افقی	۶/۲

می‌توان به دو بخش استاتیک و دینامیک تفکیک کرد، که این کار با اعمال فیلتر میانگین متحرک ساده، که اعمال آن به پاسخ، بخش استاتیک پاسخ را نتیجه می‌دهد، انجام پذیر است. در پژوهش حاضر، با توجه به لزوم مقایسه‌ی پاسخ با نمودار خط تأثیر و اطلاع از ماهیت استاتیکی نمودار خط تأثیر، اعمال فیلتر میانگین الزامی است. به همین دلیل همان‌طور که در شکل‌های ۸ تا ۱۰ مشاهده می‌شود، فیلتر مورد نظر به تمامی نمودارهای اول هر بخش (نمودارهای با عنوان بدون فیلتر) اعمال شده و نمودارهای دوم هر بخش به دست آمده است. نمودارهای دوم هر بخش، که همان نمودارهای فیلتر شده هستند، از نظر تنظیمات عددی محور قائم به گونه‌ی در نظر گرفته شده‌اند تا شباهت شکلی آنها با نمودارهای خط تأثیر به شکل واضح‌تر قابل مشاهده باشد. نتایج طی سه گروه با رنگ‌های مختلف ارائه شده است، که نتایج سناریوهای ۱ تا ۶، که با رنگ آبی ارائه شده‌اند، مربوط به حالت آسیب با شدت زیاد است. نتایج سناریوهای ۷ و ۸، که با رنگ سبز ارائه شده‌اند، مربوط به حالت آسیب در اتصال دو عضو به صورت هم‌زمان با شدت زیاد است. و نمودارهای با رنگ نارنجی مربوط به سناریوهای ۹ تا ۱۴ و مربوط به حالت آسیب در اتصال یک عضو و با شدت کم هستند. در مجموع برای ۱۴ سناریوی آسیب مختلف، نتایج ارائه شده است. با بررسی نمودارهای حالت آسیب شدید می‌توان مشاهده کرد در نتایج مربوط به سناریوهای ۲ و ۵، محل پیک‌های نمودارها تفاوت بیشتری در مقایسه با ۴ سناریوی دیگر دارد، که نشان‌دهنده‌ی کیفیت کمتر نتایج در سناریوهای اخیر است. همچنین مسئله‌ی اخیر برای حالت آسیب با شدت کم برای سناریوهای ۱۰ و ۱۳ به شکل مشابهی تکرار شده است. در سناریوهای ۷ و ۸، که در اتصال دو عضو به صورت هم‌زمان، آسیب شدید مشاهده شده است، در نمودارها از نظر شکلی، انطباق بیشتری ملاحظه شده است. به طور کلی می‌توان گفت که از منظر کیفیت نتایج، تفاوتی بین حالت‌های با شدت زیاد و کم مشاهده نشده است.

۵. نتیجه‌گیری

روش پیشنهادی در پژوهش حاضر، برای شناسایی آسیب در پل‌های خرپایی معرفی شده است. در هر بار آزمایش، پل خرپایی تحت بار متحرک قرار گرفته و پاسخ تغییرمکان قائم یک نقطه از تیر در دو حالت آسیب‌دیده و سالم برداشت شده است. اختلاف مقادیر تغییرمکان به دست آمده از دو حالت سالم و آسیب‌دیده به شکل نمودار رسم شده است. دیاگرام‌های خط تأثیر اعضاء پل خرپایی نیز با مدل‌سازی پل در نرم‌افزار اجزاء محدود تعیین و در نهایت با مقایسه‌ی نمودار اختلاف پاسخ‌های

پذیرفته از آسیب اتصال است. همان‌طور که در جدول‌های اخیر مشاهده می‌شود، در پژوهش حاضر تلاش شده است که نتایج انواع مختلف عضو، از قبیل: عضوهای افقی، عمودی و مورب بررسی شوند تا نتایج با قدرت‌ترو با قابلیت اتکای بیشتری باشند.

۳. نتایج برداشت‌های آزمایشگاهی و مقایسه‌ی نمودارها و دیاگرام‌ها

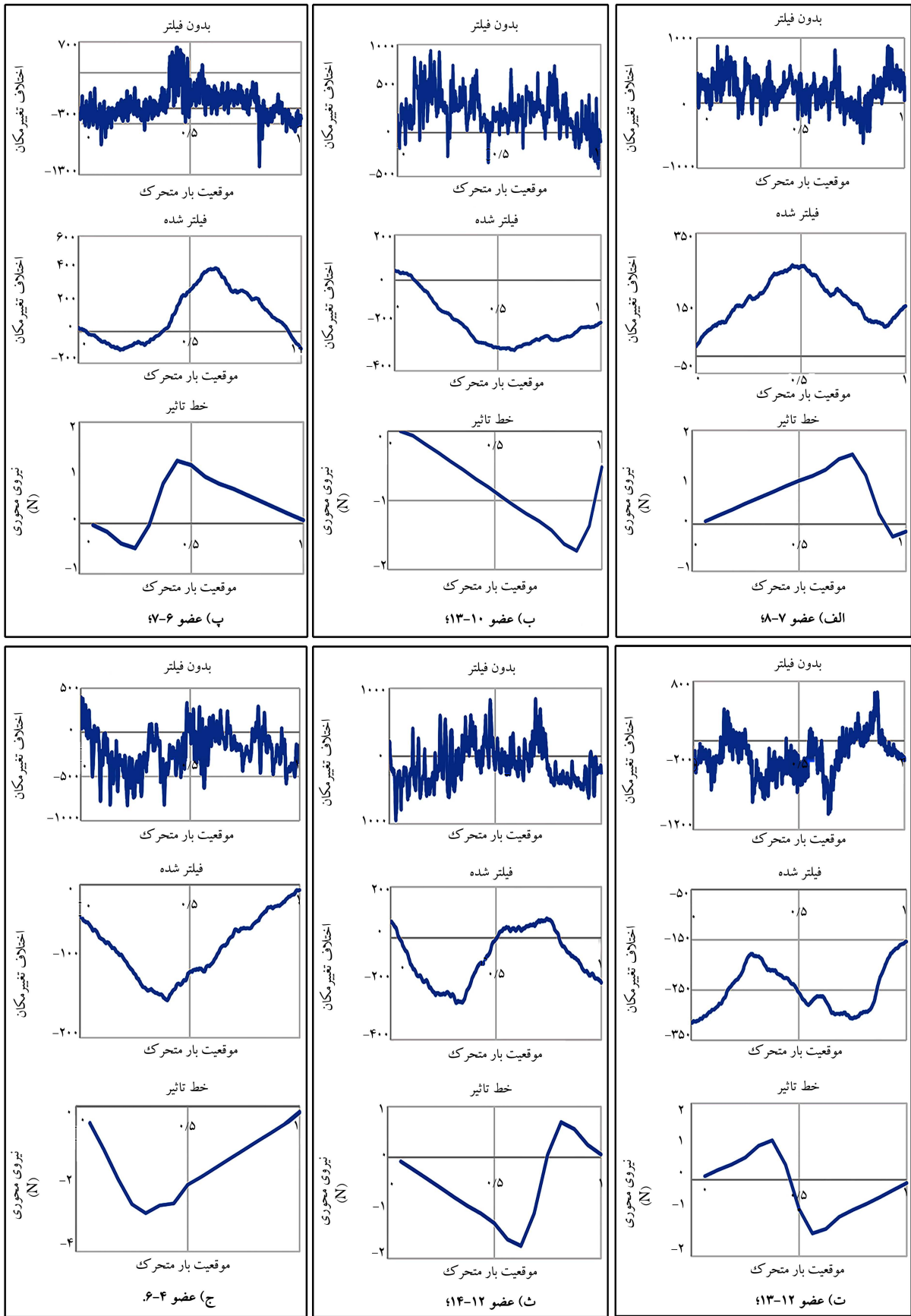
لازم به ذکر است که در نمودارهای اختلاف تغییرمکان شکل‌های ۸ تا ۱۰، محور قائم نشان‌دهنده‌ی مقادیر رابطه‌ی ۱ بر حسب صدم میلی‌متر است و محور افقی، محل بار متحرک را نشان می‌دهد. در ادامه، نتایج سناریوهای هفتم و هشتم مربوط به جدول ۲، که مربوط به حالت‌های دو آسیب شدید هم‌زمان است، ارائه شده است (شکل ۹).

در ادامه‌ی بخش حاضر، نتایج مربوط به جدول ۲، که سناریوهای آسیب با شدت کم هستند ارائه شده‌اند، شکل ۱۰، که منظور از شدت کم، همان شل کردن مهره‌ی یک پیچ بوده و برخلاف مرحله‌ی قبل، پیچ همچنان در جای خود قرار گرفته و عملکرد آن کاملاً قطع نشده است.

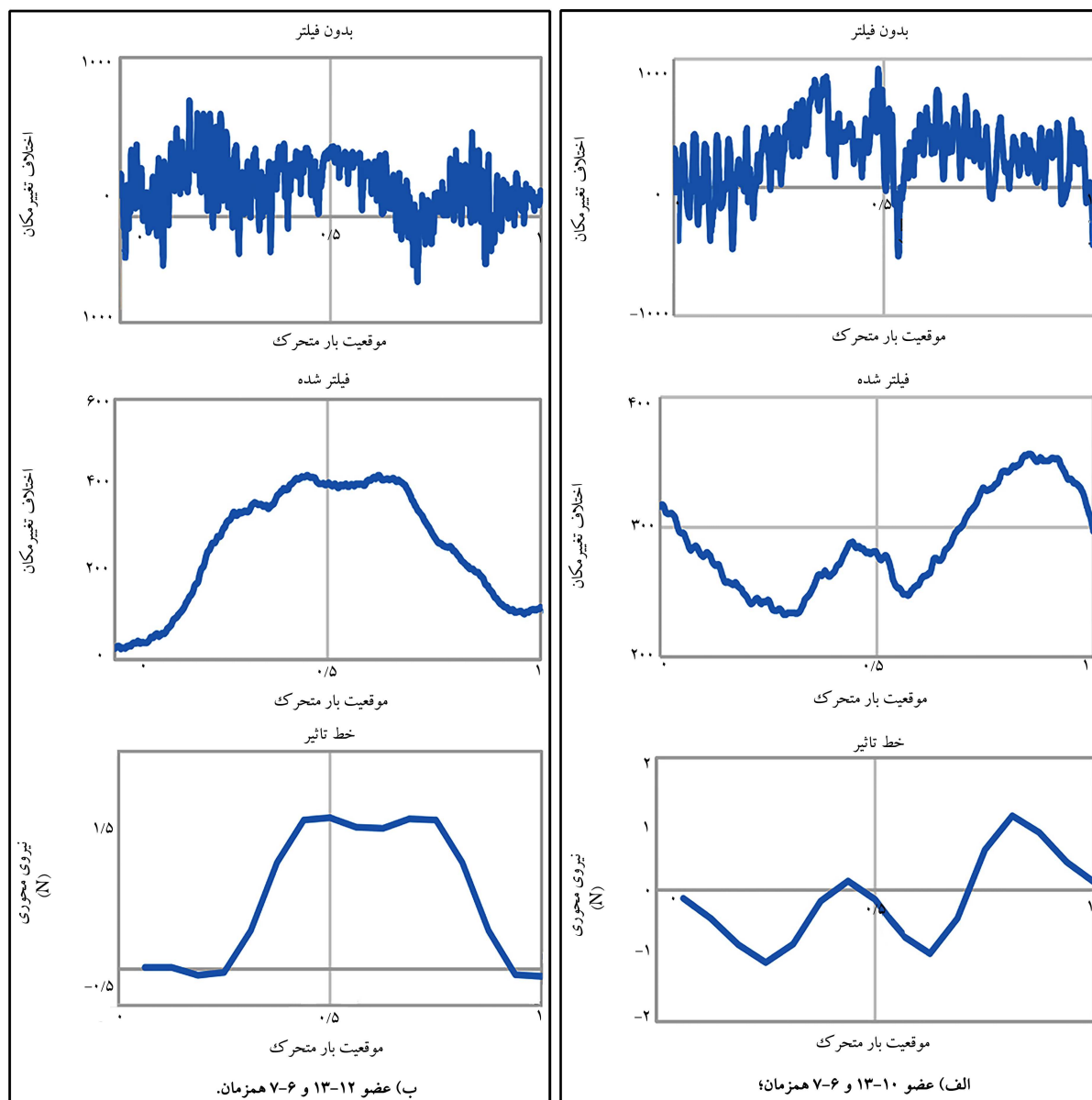
همان‌طور که در بخش‌های قبل نیز اشاره شده است، برای تشخیص و شناسایی اتصال آسیب‌دیده، باید نمودار اختلاف پاسخ‌های دینامیکی یک نقطه از پل خرپایی در دو حالت سالم و آسیب‌دیده با نمودار خط تأثیر عضوهای خرپا مقایسه شود. در صورت انطباق نمودار با دیاگرام خط تأثیر عضو، اتصال مربوط به عضو مورد نظر، همان اتصال آسیب‌دیده است.

۴. بحث در مورد نتایج

همان‌طور که در بخش‌های پیشین اشاره شده است، روش کار در نوشتار حاضر به این صورت بوده است که نمودار اختلاف پاسخ‌های تغییرمکان در دو حالت سالم و آسیب‌دیده پس از اعمال فیلتر میانگین متحرک ساده، که توسط نرم‌افزار اکسل بر روی خروجی‌های به دست آمده از دیتالاگر اعمال شده است، با نمودار خط تأثیر عضو آسیب‌دیده مقایسه شده است تا میزان قدرت روش پیشنهادی در شناسایی آسیب اعضا بررسی شود. همان‌طور که در نوشتار گونزالز و هستر^{۱۹} (۲۰۱۳)،^{۱۳} اشاره شده است، در تحلیل پل‌های تحت بار متحرک، پاسخ پل به بار متحرک را



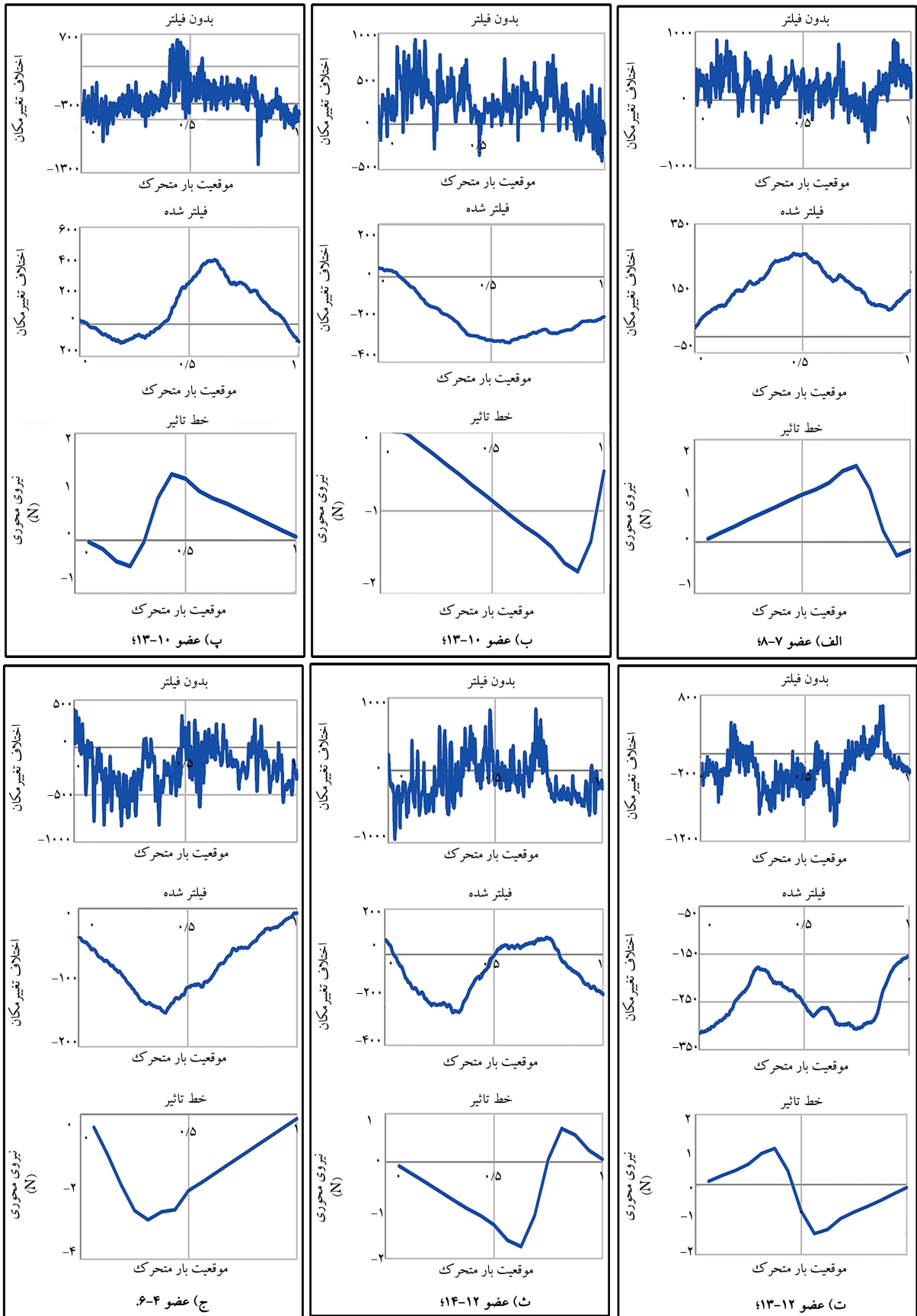
شکل ۸. انطباق نمودارهای اختلاف پاسخ تغییر مکان با دیاگرام‌های خط تأثیر اعضا برای سناریوهای با آسیب شدید.



شکل ۹. انطباق نمودارهای اختلاف پاسخ تغییر مکان با دیاگرام های خط تاثیر اعضا برای سناریوهای با دو آسیب شدید هم‌زمان.

روش مورد نظر برای شناسایی آسیب استفاده کرد. لازم به ذکر است که با توجه به نزدیکی آزمایشگاه به محل عبور خودروهای متعدد و همچنین ارتعاش موجود در دستگاه بار متحرک، نویزهای زیادی در پاسخ‌های تغییر مکان عضو مشاهده می‌شود، که با استفاده از محاسبه‌گر میانگین متحرک ساده تا حد زیادی کاهش داده شده است، اما همواره اثر منفی این نویزها در فرایند انطباق شکلی نمودارها و دیاگرام‌ها کاملاً مشهود است. انتظار می‌رود در صورتی که از حسگر تغییر مکان‌سنج با دقت اندازه‌گیری بهتر در شرایط آزمایش با نویز کمتر استفاده شود، انطباق نمودارها و دیاگرام‌ها بهبود یابد. علاوه بر وجود نویز، با توجه به این‌که برای شناسایی آسیب در هر عضو، نیاز به انجام دو آزمایش با شرایطی کاملاً یکسان است و مهیا کردن چنین شرایطی با توجه به تغییر دائمی شرایط محیطی و شرایط اندرکنش بار متحرک و پل کمی دست‌نیافتنی به نظر می‌رسد، وجود خطا در نتایج نهایی امری ناگزیر است.

تغییر مکان و دیاگرام‌های خط تاثیر، آن عضوی که دیاگرام خط تاثیرش با نمودار پاسخ‌های تغییر مکان از نظر شکل انطباق داشته باشد، به عنوان عضوی که دست کم یکی از اتصال‌های آن دچار آسیب شده در نظر گرفته شده است. بررسی نمودارها و دیاگرام‌های به دست آمده نشان می‌دهد در زمانی که اتصال پیچی مربوط به عضو آسیب می‌بیند، پاسخ تغییر مکان پل نسبت به حالت بدون آسیب دچار تغییر می‌شود و نمودار تغییرات ایجاد شده، از نظر شکل شبیه به دیاگرام خط تاثیر آن عضو است. در نتیجه می‌توان تشخیص داد که اتصال‌های کدام عضو دچار آسیب شده است. بررسی نمودارها نشان می‌دهد که این نتیجه برای هر دو حالت آسیب شدید و آسیب با شدت کم برقرار است. لازم به ذکر است حتی در حالتی که دو اتصال به صورت هم‌زمان دچار آسیب شوند نیز می‌توان با روش پیشنهادی، عضوایی که اتصال‌های آنها دچار آسیب شده است، شناسایی کرد. در حالتی که فقط مهره‌ی اتصال شل می‌شود (آسیب با شدت کم ایجاد می‌شود) نیز می‌توان از



شکل ۱۰. انطباق نمودارهای اختلاف پاسخ تغییر مکان با دیاگرام خط تأثیر اعضا برای سناریوهای آسیب با شدت کم.

پانوشتها

1. Brunell & Kim
2. Lee
3. Siriwardane
4. Li & Hao
5. Chang & Kim
6. Kumar & Biswas
7. Unno
8. Hilbert
9. Bernardini
10. Ji
11. Kourehli
12. Zaurin & Necati
13. Štimac
14. Zhu
15. Štimac
16. Yunkai
17. Azim & Gül
18. Cheng
19. González & Hester

منابع (References)

1. Fallahian, S., Joghataie, A. and Kazemi, M.T., 2018. Structural damage detection using time domain responses and teaching-learning-based optimization (TLBO) algorithm. *Scientia Iranica*, 25(6), pp.3088-3100. DOI:10.24200/sci.2017.4238.
2. Rezvani, K., NMM, M. and Sabour, M.H., 2018. A comparison of some methods for structural damage detection. *Scientia Iranica*, 25(3), pp.1312-1322. DOI:10.24200/sci.2017.4494.
3. Chatterjee, P.K., Datta, T.K. and Surana, C.S., 1994. Vibration of continuous bridges under moving vehicles. *Journal of Sound and Vibration*, 169(5), pp.619-632. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1994.1037>.
4. Lee, H.P., 1996. The dynamic response of a Timoshenko beam subjected to a moving mass. *Journal of Sound and Vibration*, 198(2), pp. 249-256. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1996.0567>.
5. Khadri, Y., Tekili, S., Daya, El M. and et al., 2009. Analysis of the dynamic response of bridges under moving loads. *International Review of Mechanical Engineering*, 3(1), pp.91-99.
6. Brunell, G. and Kim, Y.J., 2013. Effect of local damage on the behavior of a laboratory-scale steel truss bridge. *Engineering Structures*, 48, pp.281-291. DOI:10.1016/j.engstruct.2012.09.017.
7. Kim, C.W., Kitauchi, S. and Sugiura, K., 2013. Damage detection of a steel truss bridge through on-site moving vehicle experiments. In *SMAR-2nd International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures*, Istanbul, Turkey.
8. Lee, E.T., Eun, H.C. and Kim, T., 2011. Damage detection of truss structure based on the variation in axial stress and strain energy predicted from incomplete measurements. *Journal of Vibro Engineering*, 13(2), pp.173-185.
9. Siriwardane, S.C., 2015. Vibration measurement-based simple technique for damage detection of truss bridges. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, 4, pp.50-58. DOI:10.1016/j.csefa.2015.08.001.
10. Li, J. and Hao, H., 2016. Health monitoring of joint conditions in steel truss bridges with relative displacement sensors. *Measurement*, 88, pp.360-371. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.12.009>.
11. Kim, Y.W., Kim, N.I. and Lee, J., 2016. Damage identification of truss structures based on force method and free vibration analysis. *Advances in Structural Engineering*, 19(1), pp.3-13. DOI:10.1177/1369433215618300.
12. Chang, K.C. and Kim, C.W., 2016. Modal-parameter identification and vibration-based damage detection of a damaged steel truss bridge. *Engineering Structures*, 122, pp.156-173. DOI:10.1016/j.engstruct.2016.04.057.
13. Moradipour, P., Chan, T.H. and Gallage, C., 2017. Benchmark studies for bridge health monitoring using an improved modal strain energy method. *Procedia Engineering*, 188, pp.194-200. DOI:10.1016/j.proeng.2017.04.474.
14. Kumar, K., Biswas, P.K. and Dhang, N., 2019. Damage diagnosis of steel truss bridges under varying environmental and loading conditions. *Int. J. Acoust. Vibr*, 24(1), pp.56-67. DOI:10.20855/ijav.2019.24.11255.
15. Mustafa, S., Matsumoto, Y. and Yamaguchi, H., 2018. Vibration-based health monitoring of an existing truss bridge using energy-based damping evaluation. *Journal of Bridge Engineering*, 23(1), p.04017114. DOI:10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001159.
16. Unno, K., Mikami, A. and Shimizu, M., 2019. Damage detection of truss structures by applying machine learning algorithms. *GEOMATE Journal*, 16(54), pp.62-67. DOI:10.21660/2019.54.4840.
17. Mousavi, A.A., Zhang, C., Masri, S.F. and et al., 2020. Structural damage localization and quantification based on a CEEMDAN hilbert transform neural network approach. *A Model Steel Truss Bridge Case study: Sensors*, 20(5), p.1271. <https://doi.org/10.3390/s20051271>.
18. Bernardini, L., Carnevale, M. and Collina, A., 2021. Damage identification in warren truss bridges by two different time-frequency algorithms. *Applied Sciences*, 11(22), p.10605. DOI:10.3390/app112210605.
19. Ji, B., Xiong, Q., Xing, P. and et al., 2021. Bolt loosening localization at flange joints using wind-induced response for high-rise tower. *International Journal of Steel Structures*, 21(5), pp.1790-1803. DOI:10.1007/s13296-021-00535-5.
20. Ghannadi, P. and Kourehli, S.S., 2022. Efficiency of the slime mold algorithm for damage detection of large-scale structures. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 31(14), p.1967. DOI:10.1002/tal.1967.
21. Ghannadi, P., Kourehli, S.S. and Mirjalili, S., 2022. The application of PSO in structural damage detection: An analysis of the previously released publications (2005-2020). *Frattura ed Integrità Strutturale*, 16(62), pp.460-489. DOI:10.3221/IGF-ESIS.62.32.
22. Corbally, R. and Malekjafarian, A., 2022. Bridge damage detection using operating deflection shape ratios obtained from a passing vehicle. *Journal of Sound and Vibration*, 537, p.117225. DOI:10.1016/j.jsv.2022.117225.

23. Mostafa, N., Maio, D.D., Loendersloot, R. and et al., 2022. Railway bridge damage detection based on extraction of instantaneous frequency by Wavelet Synchrosqueezed Transform. *Advances In Bridge Engineering*, 12(3), p.27. DOI:10.1186/s43251-022-00063-0.
24. Hajizeinalibiouki, Y., 2018. Flexural Rigidity Estimation Using Noisy Static Influence Lines. *Civil and Environmental Engineering Theses and Dissertations*, 1.
25. Zeinali, Y. and Story, B.A., 2017. Framework for flexural rigidity estimation in Euler-Bernoulli beams using deformation influence lines. *Infrastructures*, 2(4), p.23. DOI:10.3390/infrastructures2040023.
26. Zaurin, R. and Necati Catbas, F., 2011. Structural health monitoring using video stream, influence lines, and statistical analysis. *Structural Health Monitoring*, 10(3), pp.309-332. DOI:10.1177/1475921710373290.
27. Štimac, I., Mihanović, A. and Kožar, I., 2006. Damage detection from analysis of displacement influence lines. *In International Conference on Bridges*, Dubrovnik, pp.1001-1008.
28. Zhang, R.F., Zhang, X.M. and Qi, C.X., 2012. Application of the influence line on the bridge testing. *In Advanced Materials Research., Trans. Tech. Publications Ltd., 594*, pp.1586-1589. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.594-597.1586.
29. Zhu, S., Chen, Z., Cai, Q. and et al., 2014. Locate damage in long-span bridges based on stress influence lines and information fusion technique. *Advances in Structural Engineering*, 17(8), pp.1089-1102. DOI:10.1260/1369-4332.17.8.1089.
30. Štimac, I., Mihanović, A. and Kožar, I., 2006. Damage detection from analysis of displacement influence lines. *In International Conference on Bridges*, Dubrovnik, pp.1001-1008.
31. Y. L., Li, Q. and Cai, Q.L., 2015. Damage detection in long suspension bridges using stress influence lines. *Journal of Bridge Engineering*, 20(3), p.05014013. DOI:10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000681.
32. Zeinali, Y. and Story, B.A., 2017. Framework for flexural rigidity estimation in Euler-Bernoulli beams using deformation influence lines. *Infrastructures*, 2(4), p.23. DOI:10.3390/infrastructures2040023.
33. Yunkai, Z., Qingli, X., Guohua, L. and et al., 2021. Damage identification of multi-span bridge structure based on the recognition of influence line. *In E3S Web of Conferences*, 233, p.03002 EDP Sciences. DOI:10.1051/e3sconf/202123303002.
34. Zhang, Y., Xie, Q., Li, G. and et al., 2021. Multi-damage identification of multi-span bridges based on influence lines. *Coatings*, 11(8), p.905. DOI:10.3390/coatings11080905.
35. Azim, M.R. and Gül, M., 2021. Development of a novel damage detection framework for truss railway bridges using operational acceleration and strain response. *Vibration*, 4(2), pp.422-443. DOI:10.3390/vibration4020028.
36. Cheng, Q., Ruan, X., Wang, Y. and et al., 2022. Serious damage localization of continuous girder bridge by support reaction influence lines. *Buildings*, 12(2), p.182. <https://doi.org/10.3390/buildings12020182>.
37. Kordi, A. and Mahmoudi, M., 2022. Damage detection in truss bridges under moving load using time history response and members influence line diagrams. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 55(1), pp.183-194. 10.22059./DOI:CEIJ.2021.314109.1723
38. <https://www.opkon.com.tr/Content/media/file-ce927f18.pdf>.
39. González, A. and Hester, D., 2013. An investigation into the acceleration response of a damaged beam-type structure to a moving force. *Journal of Sound and Vibration*, 332(13), pp.3201-3217. DOI:10.1016/j.jsv.2013.01.024.