



## شناسایی آزمایشگاهی ترک طولی تراورس بتنی پیش تنیده با استفاده از تست مودال تجربی

مرتضی اسماعیلی<sup>۱\*</sup>، بابک شیری<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> ایران، تهران، خیابان نارمک، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی راه آهن - گروه خط و سازه های ریلی، استاد تمام

<sup>۲</sup> دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی راه آهن - گروه خط و سازه های ریلی، دانشجوی دکتری

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [babakshiri91@gmail.com](mailto:babakshiri91@gmail.com), [m\\_esmaeili@iust.ac.ir](mailto:m_esmaeili@iust.ac.ir)

### چکیده

خطوط بالاستی راه آهن یکی از سیستم های حمل و نقل ریلی قابل توجه مسافر و بار در کشور محسوب می شوند. تراورس های بتنی پیش تنیده به عنوان یکی از اجزای اصلی خطوط بالاستی، نقش حیاتی در ایمنی و پایداری این خطوط ایفا می کنند. از سوی دیگر، در طول بهره برداری خطوط، عملکرد تراورس ها تحت تأثیر انواع مختلف آسیب ها قرار می گیرد. ترک خوردگی ناشی از عوامل محیطی یا شیمیایی و تشدید آن توسط بارهای دینامیکی وارده به عنوان یکی از مهم ترین نوع خرابی های تراورس ها در ادبیات فنی و گزارش های صنعتی اشاره شده است. از این رو، ترک های طولی یکی از مهم ترین آسیب هایی هستند که به دلیل خوردگی تاندون داخل تراورس بتنی ظاهر می شوند. با این حال، مطالعات اندکی در زمینه شناسایی این نوع ترک خوردگی انجام شده است و مطالعه کاربردی که بتواند اطلاعات اضافی برای بازرسان یا مهندسان جهت کمی سازی وضعیت سلامت تراورس ارائه دهد، مورد نیاز است. بنابراین، مقاله حاضر به بررسی آزمایشگاهی در زمینه شناسایی آسیب طولی تراورس بتنی ناشی از خوردگی تاندون با استفاده از تغییرات ویژگی های ارتعاشی اندازه گیری شده نمونه ها در تست مودال تجربی تمرکز دارد. از این رو، نمونه های آزمایشگاهی تراورس بتنی B-70 در حالت های سالم و آسیب دیده با ترک های طولی تحت شرایط مختلف بررسی شده است به طوری که شناسایی آسیب به صورت موقعیت ترک خوردگی در مقطع مرکزی تار بالا و پایین و همچنین، در دو وجه جانبی تراورس با طول ۱۲۰ سانتی متر انجام گردیده است. نتایج تحلیل داده های تست مودال نشان دادند که در همه نمونه ها شکل مودی و فرکانس طبیعی مود اول ارتعاشی قادر به شناسایی ترک های طولی تراورس بتنی نیستند. از سوی دیگر، تغییرات مشخصه های مودهای پنجم به بالای تراورس های ترک خورده نیز تفاوت اندکی با حالت سالم آن دارند و می توان در شناسایی این نوع آسیب تراورس بتنی از آن ها صرف نظر نمود. همچنین، نتایج مشخص کردند فرکانس های طبیعی مودهای دوم تا چهارم (مود اول تا سوم خمشی) در ترک خوردگی طولی تراورس تا ۳۰ درصد کاهش می یابد. علاوه بر این، تراورس با ترک خوردگی طولی تار بالا و پایین در هر دو وجه جانبی نسبت به نمونه با شرایط مشابه و ترک طولی در تار پایین در حدود ۵۵ درصد تأثیر بیشتری بر کاهش مشخصه های دینامیکی دارد که می تواند در ارزیابی شدت ترک خوردگی طولی تراورس بتنی مفید واقع شود.

**کلمات کلیدی:** تراورس بتنی پیش تنیده؛ شناسایی آسیب؛ ترک خوردگی طولی تراورس؛ تست مودال تجربی.

خطوط بالاستی راه‌آهن، شبکه‌های اصلی حمل و نقل ریلی در بسیاری از کشورهای سراسر جهان را تشکیل می‌دهند. این خطوط، مسافران، بارهای حجیم و سنگین را بین شهرها، معادن، مزارع و بنادر حمل می‌کنند. ایمنی و کارایی کامل این خطوط به همکاری پیچیده و یکپارچه تمام اجزای مسیر در پاسخ به شرایط مختلف فیزیکی - مکانیکی - شیمیایی محیط و همچنین، بارهای تکراری دینامیکی که توسط قطار اعمال می‌شود بستگی دارد. تراورس‌ها به عنوان مرز قسمت رو سازه ریلی بین سنگ‌دانه‌های لایه بالاست و ریلی فولادی، بارهای وارده از ناوگان ریلی را از سمت ریل‌ها دریافت و آن را به محیط متخلل و گسسته بالاست، مرز ارتباط با بخش زیر سازه، منتقل می‌کنند. از این رو، تراورس‌ها به عنوان مرز جدا کننده زیرسازه و روسازه، یکی از مهمترین اجزاء خط در تحمل بارهای دینامیکی و ضربه‌ای وارده و توزیع آن‌ها به لایه‌های زیرین را برعهده دارند. بنابراین، در سیستم بالاستی، تراورس‌های بتنی پیش‌تنیده اتصالات و ریل‌ها را در موقعیت خود در برابر نیروهای مختلف نگه داشته و نقش حیاتی در ایمنی و پایداری خطوط ریلی ایفا می‌کنند. از سوی دیگر، به دلیل نیروهای دینامیکی تحمیل‌شده توسط چرخ‌های قطار، بارهای تصادفی و شرایط محیطی قرار گرفته، انواع مختلفی از آسیب‌ها در تراورس‌های بتنی ظاهر می‌شوند که بر عملکرد آن تأثیر گذاشته و منجر به شکست کلی می‌گردد. در ادبیات فنی، شایع‌ترین علل شکست تراورس‌های بتنی به گروه‌های مختلف با دلایل فیزیکی - شیمیایی تقسیم‌بندی شده است که شامل تخریب نشیمن‌گاه ریل، ترک خوردگی مرکز تراورس، آسیب ناشی از بارگذاری با ضربه شدید، تشکیل دیر هنگام اترینگایت، واکنش قلیایی سنگ‌دانه‌ها، حمله اسیدی، خوردگی میلگرد و یخ زدگی می‌باشد [1]. این شکست‌ها به صورت آسیب‌های مقطعی و طولی در تراورس ظاهر می‌شوند. بنابراین، براساس دسته‌بندی تراورس‌های بتنی آسیب‌دیده، یکی از شرایطی که می‌تواند کارایی تراورس را تحت تأثیر قرار دهد آسیب‌های ناشی از شرایط فیزیکی و شیمیایی غالب یک منطقه با اقلیم خاص نفوذ یون کلرید و حمله اسیدی است [2,3] که نه تنها منجر به خوردگی میلگردهای مدفون در تراورس بتنی در بلندمدت می‌شود بلکه الگوهای ترکیبی ترک خوردگی در آن ایجاد کرده و مطابق شکل (۱) به مرور موجب خرابی و انهدام تراورس بتنی پیش‌تنیده نیز می‌گردد [4,5]. بر این اساس، به دلیل میکرو ترک‌های اولیه تراورس بتنی، تاندون‌های فولادی دچار خوردگی شده و تنش‌هایی را در اطراف بتن ایجاد می‌کنند با پیشرفت خوردگی و افزایش سطح آن، مقدار تنش افزایش یافته و ترک طولی در تراورس ایجاد می‌شود. به همین دلیل این نوع ترک‌ها در امتداد میلگردها در موقعیت‌های تار پایینی و/یا بالایی تراورس ظاهر می‌شوند. زمانی که تعداد زیادی از تراورس‌ها در یک محدوده مشخص خط آهن دچار ترک خوردگی طولی شوند، عملکرد سطح تراورس تحت تأثیر قرار خواهد گرفت و عواقب آن ممکن است بسیار جدی باشد. برای کنترل و پیشگیری از این پدیده روش‌های مختلفی برای تقویت مصالح تراورس مانند استفاده از میلگردهای تقویتی [6]، بهبود عملکرد بتن با الیاف فولادی و/یا بتن تقویت‌شده با الیاف مصنوعی [7]، همچنین، افزایش مقاومت فشاری بتن برای استفاده از بتن با کارایی بالا [8] پیشنهاد شده است. اگرچه این روش‌های جدید برای جلوگیری از خوردگی میلگردها و افزایش عملکرد تراورس بتنی پیش‌تنیده موثر بوده است اما نتوانسته‌اند آسیب‌های مربوط به ترک خوردگی تراورس‌ها را کاملاً حذف کنند. از سوی دیگر، در دهه‌های اخیر استفاده از تراورس بتنی پیش‌تنیده با توجه به مزیت‌های زیاد همچون تأمین پایداری جانبی بیشتر برای خط ریلی، امکان استفاده از بالاست با دانه‌بندی ریزتر به دلیل سختی نسبتاً زیاد بتن و اشتعال‌ناپذیری در خطوط بالاستی ریلی سراسر دنیا رواج بسیاری یافته است و بیش از ۸۰ درصد تراورس‌های استفاده شده در خطوط ریلی از نوع تراورس‌های بتنی می‌باشد. این گستردگی استفاده از تراورس‌های بتنی سبب می‌شود اهمیت شناسایی آسیب این تراورس‌ها در شرایط مختلف قرارگیری سیستم خطوط بالاستی طی چرخه عمر آنها آشکار گردد.



شکل ۱. ترک طولی تراورس بتنی پیش‌تنیده در اثر خوردگی تاندون [5].

از این رو، برای ارزیابی وضعیت سلامت خطوط بالاستی و تراورس‌های بتنی روش‌های مختلفی همچون تست‌های غیرمخرب استفاده می‌شوند و در بسیاری از کشورها نیز، شناسایی شدت آسیب تراورس بتنی به بازرسی بصری و آزمون‌های مخرب وابسته است [9]. با این حال، این ارزیابی‌ها هزینه‌بر و زمان‌بر بوده و شناسایی آسیب‌هایی که در قسمت زیرین یا ناپیدای تراورس قرار دارند نیز دشوار است. از این رو، تعداد زیادی از روش‌های پایش خط راه آهن برای شناسایی، مکان‌یابی و کمیت‌سنجی شدت آسیب‌های سازه‌ای توسعه یافته‌اند تا آسیب‌ها و ترک‌های تراورس‌های بتنی را پایش کنند [10]. برای این منظور، پاسخ ویژگی‌های مختلف ارتعاشی مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج مطالعات نشان داد فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مودی دقیق‌تر و راحت‌تر از سایر پارامترهای مودال قابل شناسایی بوده و ویژگی‌های مودال دینامیکی استخراج شده می‌توانند برای شناسایی آسیب سازه‌ای سیستم خط بالاستی مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین، با توجه به مقبولیت پارامترهای تغییرات فرکانس طبیعی و شکل مودی، تکنیک‌ها و شاخص‌های پیشرفته شناسایی آسیب بسیاری از تست‌های دینامیکی براساس آن‌ها توسعه داده شدند [11,12]. از این رو، ژانگ و همکاران [13] تکنیک جدید شناسایی آسیب مبتنی بر استخراج فرکانس‌های طبیعی به جای انحنای شکل مودی پیشنهاد کردند. علاوه بر این، وانگ و همکاران [10] به طور تحلیلی و آزمایشگاهی تغییر فرکانس ناشی از جرم کمکی را در شناسایی آسیب ریل مطالعه نمودند. آن‌ها اثر پابندهای آسیب دیده یا مفقودی را بر فرکانس‌های طبیعی بررسی کردند. از سوی دیگر، از ادبیات فنی موجود می‌توان مشاهده نمود که مطالعات زیادی برای ارزیابی آسیب سازه‌های ترک‌خورده توسعه یافته است. چینکا و همکاران [14] از منحنی شکل مودی و فرکانس طبیعی در ارزیابی ترک‌ها استفاده کردند. در پژوهش دیگری با استفاده از فرکانس‌های طبیعی اندازه‌گیری شده تجربی، سینها و همکاران [15] مدلی برای تخمین عمق ترک خوردگی چندگانه و موقعیت آن‌ها روی تیرهای آسیب‌دیده ارائه دادند. مطابق پژوهش یانگ و اوایدیجی [16]، روش تشخیص آسیب مبتنی بر منحنی فرکانس مودال را می‌توان در تئوری و کاربردهای عملی با استفاده از همبستگی بین تغییر پارامترهای مودال تجربی و کاهش سختی موضعی به کار برد. علاوه بر این، کارهای زیادی روی تحلیل دامنه زمان-فرکانس به منظور بهبود شناسایی مشخصه‌های دینامیک انجام شده است، زیرا روش‌های اشاره شده به شدت با کیفیت پارامترهای مودال شناسایی شده مرتبط است که از توابع پاسخ فرکانس (FRFs) به دست می‌آیند.

از سوی دیگر، با آسیب‌خوردن شدید تراورس هزینه‌های بالا بر تعمیر و نگهداری خطوط راه‌آهن تحمیل می‌گردد. بنابراین، می‌توان دریافت شناسایی به موقع آسیب در تراورس بتنی از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. با این وجود، اگرچه برخی تحقیقات درباره رفتار تراورس بتنی با ترک مقطعی انجام شده است، ولی یکی از مسائل کمتر مورد توجه قرار گرفته تأثیر شدت ترک‌خوردگی طولی به دلیل نفوذ یون کلرید و موقعیت آن در تراورس بتنی بر پاسخ مودال دینامیکی تراورس است. خروجی این پارامتر، ظرفیت باربری تراورس بتنی تحت بار قطار را منعکس کرده و بینشی درباره عمر سرویس‌دهی باقی‌مانده و ظرفیت عضو از دیدگاه نگهداری خطوط راه‌آهن ارائه می‌دهد. از این رو، در مطالعه حاضر به منظور شناسایی ترک‌خوردگی طولی تراورس بتنی ناشی از خوردگی تاندون از تست مودال تجربی برای تعیین وضعیت تراورس بتنی به عنوان هدف اصلی پژوهش حاضر استفاده می‌گردد و امکان‌سنجی شناسایی موقعیت و شدت ترک خوردگی طولی تراورس بتنی با استفاده از ویژگی‌های ارتعاشی اندازه‌گیری شده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- متدولوژی انجام پژوهش

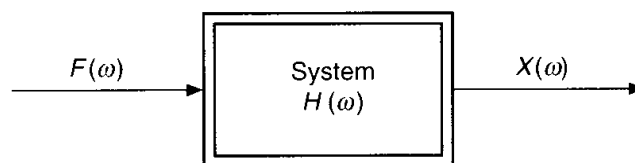
اساس پژوهش حاضر بر مبنای تحقیق محمدزاده و وهابی [۱۷] بر روی خرابی تراورس‌های بتنی پیش‌تنیده در معرض خوردگی میلگرد فولادی می‌باشد. این محققین نشان دادند که خوردگی تراورس بتنی به دلیل نفوذ یون کلرید و محیط اسیدی در مقطع میانی زودتر و در مدت ۵/۵ سال از شروع بهره‌برداری اتفاق می‌افتد و پس از رسیدن غلظت یون کلر در اطراف تاندون فولادی به مقدار معینی و زایل شدن لایه محافظ اطراف تاندون، ترک طولی آغاز می‌شود و سطح مقطع آن کاهش قابل توجهی می‌یابد. از این رو، مطالعه حاضر بر ترک‌خوردگی طولی تراورس بتنی در میانه مقطع و پیش‌روندگی در موقعیت‌های مختلف مقطع تراورس در امتداد تاندون تمرکز دارد و رفتار دینامیکی این عضو سازه‌ای خط بالاستی در سیستم بالاست-تراورس مورد بررسی قرار می‌گیرد. از سوی دیگر، با توجه به اینکه هدف مطالعه بررسی تأثیر تغییرات بالاست بر پارامترهای مودال در امتداد تراورس نیست به منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی تراورس بر

روی بالاست، تراورس بتنی بر روی لایه مصالح پلی اورتان به صورت تماس کامل به صورت سختی یکسان لایه بالاست قرار می‌گیرد تا با اعمال رفتار الاستیک (به عنوان یک تکیه‌گاه جایگزین) بتوان از انتشار ارتعاشات زیاد زمین بتنی با سختی بالا به تراورس جلوگیری نمود که در شکل (۳-ب) نیز قابل مشاهده است. همچنین، با توجه به اینکه برای موفقیت در تشخیص آسیب تراورس مبتنی بر تست مودال تجربی، دو عامل کلیدی؛ (۱) تحلیل رفتار دینامیکی سیستم تراورس-بلاست براساس حداکثر احتمال موقعیت آسیب‌خوردگی تراورس، (۲) کاهش خطای تست مودال با استفاده از صحت‌سنجی ابزارها قبل از تست و کاهش عدم قطعیت‌های سیستم و استفاده از میانگین و همبستگی داده‌های اندازه‌گیری‌شده ارتعاشات تراورس در محل، باید مورد توجه قرار گیرد. بنابراین، مزیت دیگر استفاده از لایه پلی اورتان را می‌توان در کاهش عدم قطعیت سختی بالاست و کاهش خطاهای احتمالی اندازه‌گیری تست مودال در سیستم بالاست-تراورس برای شناسایی آسیب تراورس بتنی برشمرد.

بنابراین، با توجه به اینکه هدف مطالعه ارزیابی شدت و موقعیت ترک‌خوردگی مقطع تراورس بتنی ناشی از خوردگی تاندون در اثر نفوذ اسید یا یون‌های کلرید است در این راستا، از معیار مبتنی بر تابع پاسخ فرکانسی<sup>۱</sup> با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده تست مودال در فرآیند شناسایی آسیب‌خوردگی تراورس استفاده شده است. تست مودال روشی تجربی برای بدست آوردن مدل مودال یک سیستم ارتعاشی خطی نامتغیر با زمان بوده و مبنای تئوری این روش براساس رابطه بین پاسخ ارتعاشی در یک نقطه از سازه با تحریک در همان نقطه و یا نقطه‌ای دیگر بصورت تابعی از فرکانس تحریک بصورت یک تابع ریاضی مختلط می‌باشد [۱۸]. از سوی دیگر، تابع پاسخ فرکانسی به عنوان نمایش ریاضی بین ورودی و خروجی یک سیستم که از تبدیل فوریه مشتق شده است با داشتن معادله کلی حرکت، پاسخ جابجایی در حوزه فرکانس با استفاده از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$X(\omega) = (-\omega^2 M + j\omega C + K)^{-1} F(\omega) = H_d(\omega) F(\omega) \quad (1)$$

که در آن  $H_d(\omega)$  نشان‌دهنده ماتریس جابجایی تابع پاسخ فرکانسی و  $\sqrt{-1} = j$  می‌باشد. استفاده از توابع پاسخ فرکانسی نیاز به نصب تعداد کمتری سنسور دارند و اندازه‌گیری‌های مربوطه به طور موثری تشخیص موضعی را انجام می‌دهند [۱۹]. همچنین، در میان ویژگی‌های دینامیکی مختلف سازه، به دست آوردن پاسخ فرکانسی نسبتاً ساده‌تر است. از سوی دیگر، در شرایط اندازه‌گیری ایده‌آل مطابق شکل (۲) که در آن هیچ نویز یا خطایی وجود ندارد، FRF بصورت نسبت دو تبدیل فوریه مطابق رابطه (۲) به دست می‌آید که در آن تبدیل مربوط به پاسخ  $x(t)$  به شکل  $X(\omega)$  و تبدیل مربوط به نیروی ورودی  $f(t)$  به صورت  $F(\omega)$  نشان داده شده است.



شکل ۲. سیستمی با یک ورودی و خروجی [۱۸].

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \quad (2)$$

در حالت کلی، تکنیک‌های مبتنی بر فرکانس بر این واقعیت استوار هستند که وقتی سازه دچار هر نوع آسیبی گردد منجر به تغییر در فرکانس‌های طبیعی و مشخصه‌های مودال سازه می‌گردد.

<sup>۱</sup>Frequency Response Functions (FRFs)

## ۳- تست‌های آزمایشگاهی

در تحقیق حاضر، مطالعه تراورس‌های بتنی پیش‌تنیده تمام مقیاس از نوع B-70 با شدت و موقعیت ترک‌های مختلف در آزمایشگاه دانشکده مهندسی راه‌آهن دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شده است. این نوع تراورس‌های بتنی پیش‌تنیده که پرمصرف‌ترین تراورس‌های مورد استفاده در خطوط راه‌آهن ایران نیز می‌باشند دارای وزنی در حدود ۲۸۰ کیلوگرم بوده و از خط تولید تراورس مستقر در کرج تهیه شده است. مشخصات هندسی تراورس‌های بتنی پیش‌تنیده مطابق مشخصات فنی روسازی راه‌آهن (نشریه ۳۰۱) در جدول (۱) مشاهده می‌گردد [20]. از سوی دیگر، تست مودال تجربی مورد استفاده جهت شناسایی ترک طولی تراورس بتنی شامل سه مرحله آماده‌سازی برای انجام تست، اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی و استخراج پارامترهای مودال می‌باشد. آماده‌سازی تست (مطابق شکل ۳) شامل انتخاب نوع تحریک، نقاط تحریک، سخت‌افزارها و نرم‌افزارهای اندازه‌گیری نیرو و پاسخ، تعیین هندسه مدل که در آن نقاط اندازه‌گیری مشخص شده است و تعیین عواملی که باعث ایجاد نویز در اندازه‌گیری می‌شوند، بوده است. سپس در گام دوم انجام تست، مجموعه‌ای از داده‌ها اندازه‌گیری شده و ذخیره شدند تا در مراحل بعد به منظور مشخص کردن *FRF* و تعیین پارامترهای دینامیکی نمونه مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین، در مطالعه حاضر، تحلیل مودال تجربی با تحریک ضربه چکش برای ارزیابی تراورس‌های بتنی در شرایط سالم و آسیب دیده با اندازه‌گیری داده‌های مودال جهت استخراج مشخصه‌های دینامیکی استفاده گردید. در آزمایشگاه برای ایجاد ترک خوردگی در تراورس‌ها از برش‌دهنده بتن استفاده شد. مکان‌های تحریک در هر ۱۵ سانتی‌متر در امتداد سطح بالای تراورس‌ها قرار گرفته و تحریک ضربه‌ای متحرک در نقاط مورد نظر تراورس‌ها اجرا شد. ذکر این نکته ضروری است که بهترین مکان برای نصب شتاب‌سنج‌ها در مرکز مقطع و انتهای تراورس می‌باشد. به همین دلیل، شتاب‌سنج‌ها در موقعیت‌های ثابت در سه بخش، یعنی دو انتها و وسط دهانه تراورس‌ها قرار گرفتند. شکل (۳) تجهیزات مورد نیاز برای انجام تست و موقعیت داده‌برداری و ابزاربندی آزمایشگاهی تست مودال تجربی را بر روی سطح تراورس سالم نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات هندسی تراورس‌ها بتنی پیش‌تنیده [20].

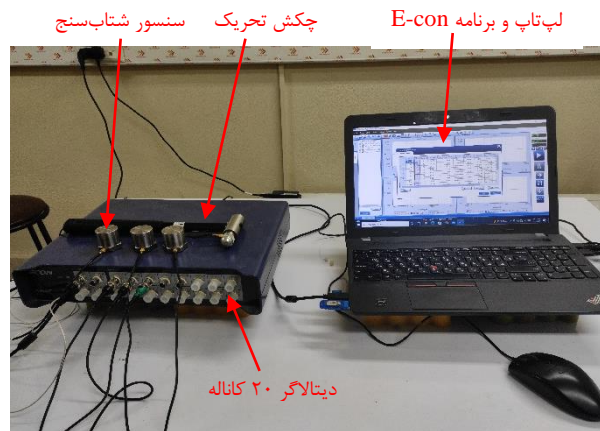
ویژگی	ابعاد تراورس بتنی پیش‌تنیده (سانتی‌متر)
طول کل تراورس	۲۴۰-۲۶۰
عرض کف تراورس	۲۴-۲۹
عرض رویه تراورس	۲۲-۲۵
ارتفاع تراورس	۱۵-۲۲
شیب نشیمن‌گاه ریل	۱:۲۰

موقعیت‌های مختلف خوردگی تاندون در مطالعه حاضر به عنوان آسیب تراورس تعریف شده است که منجر به ترک طولی در امتداد تراورس بتنی می‌شود. از این رو، مطابق جدول (۲) یک نمونه تراورس سالم و چهار نمونه آسیب‌دیده در نظر گرفته شده است. ترک خوردگی تراورس بتنی به صورت برش طولی به اندازه ۱۲۰ سانتی‌متر (حدود نصف طول تراورس) در موقعیت‌های بالا و پایین، در یک یا هر دو وجه جانبی تراورس شبیه‌سازی گردید. به عنوان مثال، در جدول (۲) نمونه ترک‌خورده ۱ نشان‌دهنده آسیب تراورس در موقعیت تار پایین و در یک طرف تراورس در امتداد میلگردهای پایینی در محتمل‌ترین حالت ممکن مقطع (موقعیت میانی) بررسی شده است در حالی که آسیب در هر دو تار پایین و بالا و وجه بالا و پایین در مقطع میانی ناشی از خوردگی تاندون‌ها در نمونه ترک‌خورده ۴ شبیه‌سازی شده است. حسگرهای شتاب‌سنج و چکش تحریک با وزن ۳ کیلوگرم در مطالعه استفاده شده است. تمام حسگرها برای اندازه‌گیری ارتعاش عمودی سیستم روی سطح بالای تراورس بتنی قرار گرفتند. پاسخ‌های ارتعاشی اندازه‌گیری شده از سنسورها از طریق کابل‌های اتصال به دیتالاگر ۲۰ کاناله منتقل شد و با استفاده از چکش ضربه برای برانگیختن ارتعاشات در تراورس، پاسخ‌های دینامیکی در دامنه زمان با استفاده از سیستم دیتالاگر به دست آمد. سپس، پردازش داده‌ها و توابع پاسخ فرکانسی ضبط شده توسط برنامه *N-*

Modal انجام شد و مقادیر فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مودی تراورس سالم و آسیب‌دیده به دست آمد. در مطالعه حاضر به منظور افزایش دقت و صحت داده‌برداری و نتایج حاصله تمام مراحل سه بار انجام و میانگین آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.



(ب) ابزاربندی آزمایشگاهی و انجام تست بر روی تراورس سالم



(الف) تجهیزات استفاده شده در تست مودال تجربی

شکل ۳. ابزاربندی و تجهیزات مورد استفاده در تست مودال تجربی برای شناسایی آسیب تراورس بتنی در آزمایشگاه تحقیقاتی پایش وضعیت سازه‌های ریلی دانشگاه علم و صنعت.

جدول ۲. نمونه تراورس‌های بتنی سالم و آسیب‌دیده در موقعیت‌های مختلف

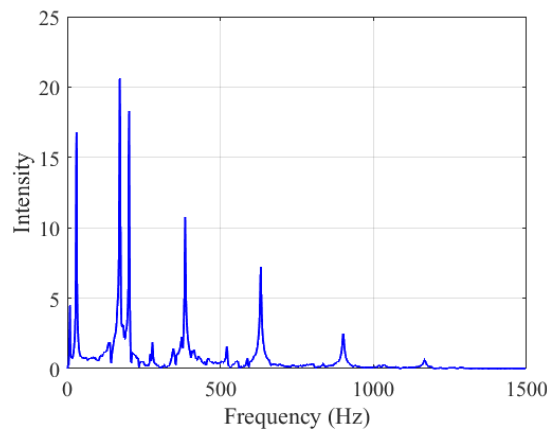
نمونه تراورس بتنی					موقعیت ترک خوردگی
ترک‌خورده ۴	ترک‌خورده ۳	ترک‌خورده ۲	ترک‌خورده ۱	سالم	
*	*	*	*	-	تار پایین
*	*			-	تار بالا
	*		*	-	یک وجه جانبی
*		*		-	هر دو وجه جانبی

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

تراورس‌های سالم و آسیب‌دیده تحت ضربه چکش قرار گرفتند و پس از برخورد به نقاطی که روی تراورس‌ها مشخص شده‌اند، پاسخ دینامیکی توسط سنسورهای شتاب‌سنج و دیتالاگر دریافت و به برنامه Econ-Modal Data Acquisition منتقل گردید. سپس، در این برنامه داده‌های پاسخ حوزه زمانی اندازه‌گیری شده با استفاده از تبدیل فوری سریع (FFT) به دامنه فرکانسی تبدیل شدند. به عنوان مثال، در شکل (۴) پاسخ فرکانسی تبدیل شده توسط برنامه Econ برای نمونه تراورس بتنی ترک‌خورده ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود برخی از پیک‌ها در تبدیل فوری سریع ظاهر می‌شوند که نشان دهنده فرکانس‌هایی با دامنه ارتعاش زیاد بوده و محدوده مقادیر ممکن فرکانس‌های طبیعی تراورس‌های بتنی را در شرایط سالم و آسیب دیده نشان می‌دهند. همچنین، پیک‌های به دست آمده به عنوان نتایج اولیه فرکانس‌های طبیعی برای شناسایی مودال در برنامه N-Modal با استفاده از تابع پاسخ فرکانسی مورد

<sup>1</sup> Fast Fourier Transform (FFT)

بهره‌برداری قرار گرفته و با استفاده از این برنامه پارامترهای دینامیکی تست مودال اندازه‌گیری شده مانند فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی استخراج گردیده است.



شکل ۴. نتایج تحلیل تست مودال تجربی برای نمونه تراورس ترک‌خورده طولی ۲.

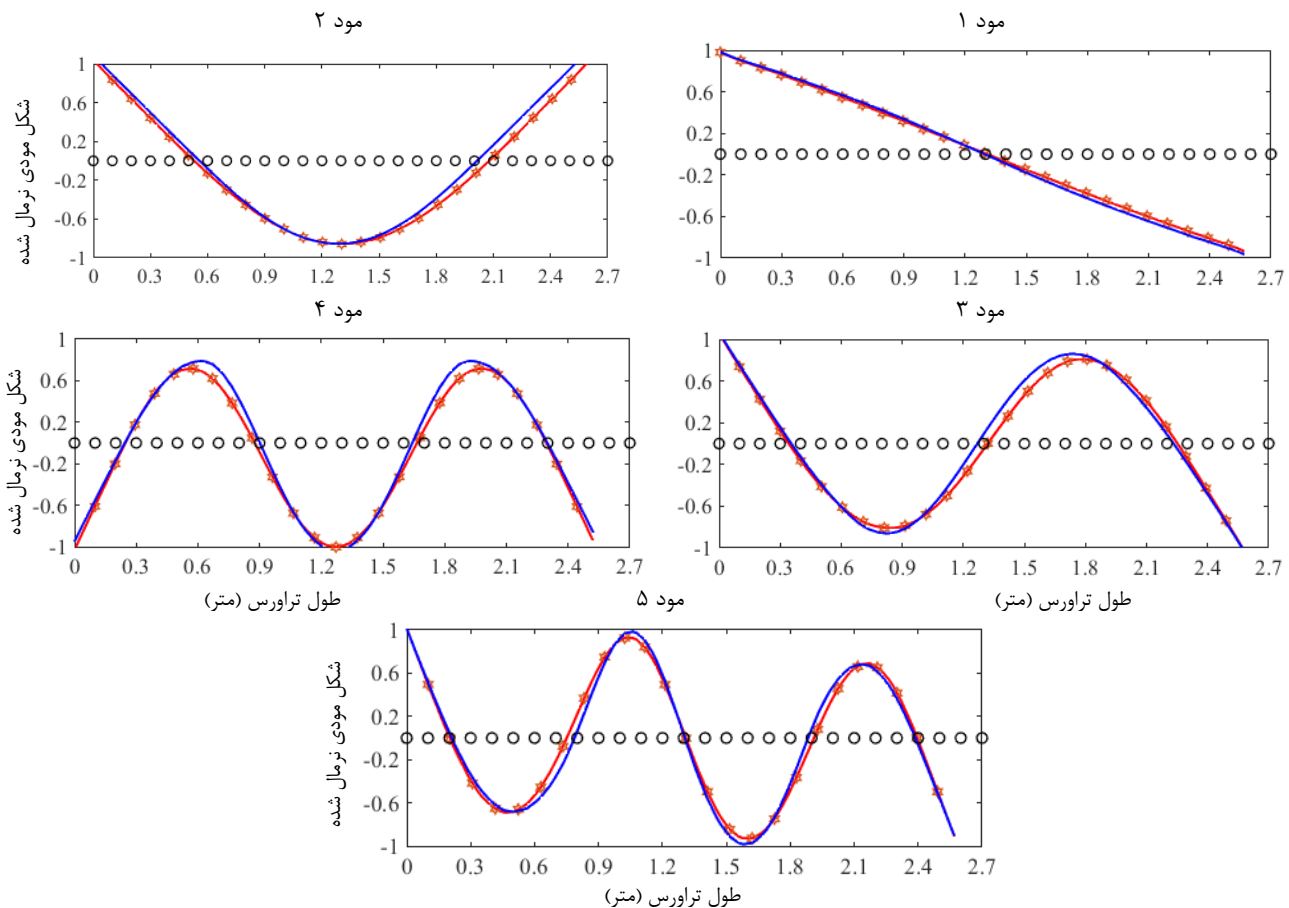
در جدول ۳ فرکانس‌های طبیعی شناسایی شده برای نمونه‌های سالم و ترک‌خورده طولی در پنج مود اول آورده شده است. همچنین، در شکل (۵) شکل‌های مودی استخراج شده از تحلیل داده‌های تست مودال تجربی در آزمایشگاه برای نمونه تراورس سالم و نمونه ۲ ترک‌خورده آورده شده است به طوری که شکل مودی اول نشان‌دهنده مود صلب چرخشی و شکل مودهای دوم تا پنجم شامل چهار مود اولی خمشی نمونه‌ها هستند. در این شکل‌ها، دایره‌های توخالی نشان‌دهنده نمونه بدون تغییر شکل است در حالی که خط ممتد آبی رنگ و خط قرمز علامت‌دار به ترتیب، شکل مودی نمونه تراورس‌های سالم و آسیب‌دیده را نشان می‌دهند.

جدول ۳. فرکانس‌های طبیعی به دست آمده از تست مودال تجربی برای نمونه تراورس‌های بتنی سالم و ترک‌خورده طولی.

نمونه تراورس بتنی	مود ۱	مود ۲	مود ۳	مود ۴	مود ۵
سالم	۹۸/۱۳	۱۸۷/۵۱	۳۹۷/۶۹	۶۸۷/۴۲	۱۰۷۵/۸۲
ترک‌خورده ۱ (%) اختلاف	۹۹/۷۲ ۱/۵۹	۱۷۱/۹۶ -۸/۵۱	۳۷۲/۳۸ -۶/۳۷	۶۶۸/۰۴ -۲/۸۲	۱۰۳۴/۳۰ -۳/۹۵
ترک‌خورده ۲ (%) اختلاف	۹۸/۶۷ ۰/۵۵	۱۵۰/۱۲ -۲۰/۱۳	۳۳۹/۸۲ -۱۴/۵۵	۶۱۷/۰۰ -۱۰/۲۴	۹۴۵/۰۴ -۱۲/۲۴
ترک‌خورده ۳ (%) اختلاف	۹۹/۲۳ ۱/۱۲	۱۶۱/۰۶ -۱۴/۱۱	۳۵۵/۷۷ -۱۰/۵۴	۶۴۴/۸۵ -۶/۱۹	۱۰۰۵/۱۰ -۶/۵۶
ترک‌خورده ۴ (%) اختلاف	۹۹/۴۹ ۱/۳۹	۱۴۵/۲۲ -۲۹/۶۹	۳۱۲/۵۲ -۲۴/۱۷	۶۰۳/۹۲ -۱۳/۹۸	۹۴۰/۲۷ -۱۲/۶۰

نتایج تحلیل داده‌های تست مودال تجربی به دست آمده برای فرکانس‌های طبیعی در جدول ۳ نشان می‌دهد که در حالت کلی تراورس آسیب‌دیده، منجر به کاهش فرکانس‌های طبیعی در هر چهار مود خمشی نسبت به تراورس سالم می‌شود در حالی که تأثیر اندکی بر کاهش فرکانس در مود صلب چرخشی (حداکثر مقدار کاهش ۱/۶ درصد) دارد. همچنین، ترک‌خوردگی طولی تراورس بتنی تأثیر قابل توجهی بر مشخصه دینامیکی مودهای دوم تا چهارم (مخصوصاً مود دوم و سوم) می‌گذارد. به طوری که حداکثر درصد کاهش فرکانس طبیعی نمونه‌های آسیب‌دیده نسبت به نمونه سالم در مود دوم اتفاق می‌افتد و برای نمونه تراورس با ترک طولی ۱۲۰ سانتی‌متر در هر دو تار و دو وجه جانبی (نمونه آسیب‌دیده ۴) حدود ۳۰ درصد و برای مود سوم نیز تقریباً ۲۴ درصد کاهش یافته است که

نشان‌دهنده حساسیت این دو مود برای ترک خوردگی طولی تراورس بتنی نسبت به سایر مودهای خمشی شبیه‌سازی شده است. همچنین، مقایسه نتایج نمونه‌های آسیب‌دیده نشان‌دهنده حداقل کاهش فرکانس طبیعی در نمونه ترک‌خورده ۱ (ترک خوردگی فقط در تار پایین و یک وجه تراورس) نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد به طوری که حداکثر کاهش فرکانس اندازه‌گیری‌شده در حدود ۹ درصد با نمونه سالم اختلاف دارد. نکته قابل توجه دیگر در نتایج به دست آمده از تست مودال را می‌توان در اثرگذاری ترک خوردگی طولی تراورس در دو تار پایینی (نمونه ۲) نسبت به ترک خوردگی تارهای بالا و پایین در یک سمت جانبی (نمونه ۳) مشاهده نمود. در نمونه ۲ کاهش فرکانس‌های طبیعی در مودهای خمشی تا حدود ۴۰ درصد بیشتر از نمونه ۳ است در حالی که افزایش (هر چند ناچیز) مود صلب چرخشی نمونه ۳ تقریباً دو برابر نمونه ۲ با ترک خوردگی طولی در دو وجه تار پایینی اتفاق می‌افتد و علت آن را می‌توان در تقارن در امتداد طول تراورس آسیب‌دیده نمونه ۲ دانست در حالی که برای نمونه ۳ آسیب‌دیدگی باعث خروج از مرکزیت آن شده و بر تعادل مود صلب چرخشی دینامیکی نمونه تأثیر بیشتری می‌گذارد. همچنین در شرایط یکسان، ترک خوردگی طولی در هر دو تار پایین و بالا و دو وجه نسبت به نمونه با ترک طولی در تار پایین و هر دو وجه تراورس، کاهش فرکانس طبیعی برای مود دوم و سوم به ترتیب، ۴۵ درصد و ۷۰ درصد نشان می‌دهند که می‌تواند در تشخیص شدت آسیب تراورس بتنی پیش‌تنیده مؤثر باشد.



شکل ۵. شکل‌های مودی استخراج شده از تحلیل داده‌های تست مودال تجربی برای نمونه تراورس بتنی ترک‌خورده ۴.

از سوی دیگر، با مقایسه تغییر شکل‌های مودی استخراج شده از داده‌های تست مودال اندازه‌گیری شده برای نمونه تراورس‌های بتنی سالم و آسیب‌دیده ۴ در شرایط مختلف می‌توان دریافت شکل مودی اول نمونه‌های ترک‌خورده طولی نسبت به نمونه سالم تفاوت اندکی نشان می‌دهند در حالی که شکل مودی دوم تا پنجم تراورس‌های آسیب‌دیده با شدت و موقعیت‌های مختلف نسبت به نمونه سالم قابل توجه است. همچنین، با افزایش شدت ترک خوردگی مقطعی تراورس بتنی شکل مودی به دست آمده می‌تواند به صورت موضعی، موقعیت آسیب تراورس بتنی را نشان دهد. از سوی دیگر، نتایج نشان می‌دهد که مطالعه سه مود اول خمشی تراورس بتنی برای تشخیص



آسیب و ترک‌خوردگی تراورس ضروری هستند. علاوه بر این، ضمن تأیید اینکه تغییرات در مشخصه‌های مودال تراورس بتنی حاوی اطلاعاتی در مورد وضعیت سلامت تراورس است، برخی از تغییرات درجه مود در پارامترهای مودال (فرکانس طبیعی و شکل مودی) نمونه‌های ترک‌خورده طولی نسبت به تراورس سالم به اندازه کافی محسوس هستند تا به طور قابل قبولی میزان آسیب و موقعیت آن را در تراورس بتنی شناسایی کنند.

## مراجع

- [1] W. Ferdous, A. Manalo, Failures of mainline railway sleepers and suggested remedies - Review of current practice, *Engineering Failure Analysis*. 44 (2014) 17–35.
- [2] J.A. Zakeri, M. Esmaeili, M. Fathali, Evaluation of humped slab track performance in desert railways, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 225 (2011) 566–573.
- [3] N.Ö. Bezgin, Climate effects on the shoulder width measurements of prestressed concrete high speed railway sleepers of ballasted tracks, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 75 (2015) 201–209.
- [4] اسماعیلی، مرتضی، گزارش تحقیقاتی "مطالعه و بررسی تراورس های بتنی و طراحی و ساخت نمونه آزمایشی مدل بهینه برای مناطق ماسه گیر با نگاه جلوگیری از خوردگی و شکست،" تهران، ۱۳۹۹.
- [5] اسماعیلی، مرتضی، ص. کاویانی، ت. محسن، توسعه مدل پیش بینی آغاز خوردگی تراورس های بتنی، مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل. (۱۳۹۸) ۳۱–۵۶.
- [6] A.A. Ramezani-pour, M. Esmaeili, S.A. Ghahari, M.H. Najafi, Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers, *Construction and Building Materials*. 44 (2013) 411–418.
- [7] C. Camille, O. Mirza, B. Kirkland, T. Clarke, Structural behaviour of prestressed concrete sleepers reinforced with high-performance macro synthetic fibres, *Engineering Failure Analysis*. 141 (2022).
- [8] Y. Bae, S. Pyo, Ultra high performance concrete (UHPC) sleeper: Structural design and performance, *Engineering Structures*. 210 (2020).
- [9] M.P. Papaelias, C. Roberts, C.L. Davis, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit A review on non-destructive evaluation of rails: state-of-the-art and future development*, (2008).
- [10] L. Wang, Y. Zhang, S.T. Lie, Detection of damaged supports under railway track based on frequency shift, *Journal of Sound and Vibration*. (2016).
- [11] P. Academy, F.F. Machinery, *VIBRATION ANALYSIS OF A CRACKED BEAM*, 36 (1990) 245–250.
- [12] C.P. Ratcliffe, Damage detection using a modified laplacian operator on mode shape data, *Journal of Sound and Vibration*. 204 (1997) 505–517.
- [13] S. Zhong, S.O. Oyadiji, K. Ding, Response-only method for damage detection of beam-like structures using high accuracy frequencies with auxiliary mass spatial probing, *Journal of Sound and Vibration*. 311 (2008) 1075–1099.
- [14] S. Chinka, SSB; Putti, B. Adavi, Modal testing and evaluation of cracks on cantilever beam using mode shape curvatures and natural frequencies, *Structures*. 32 (2021) 1386–1397.
- [15] J.K. Sinha, M.I. Friswell, S. Edwards, Simplified models for the location of cracks in beam structures using measured vibration data, *Journal of Sound and Vibration*. 251 (2002) 13–38.
- [16] C. Yang, S.O. Oyadiji, Damage detection using modal frequency curve and squared residual wavelet coefficients-based damage indicator, *Mechanical Systems and Signal Processing*. 83 (2017) 385–405.
- [17] S. Mohammadzadeh, E. Vahabi, Time-dependent reliability analysis of B70 pre-stressed concrete sleeper subject to deterioration, *Engineering Failure Analysis*. 18 (2011) 421–432.
- [18] J. He, Z.-F. Fu, *Modal analysis*, Butterworth-Heinemann, 2001.
- [19] X. Fang, H. Luo, J. Tang, Structural damage detection using neural network with learning rate improvement, *Computers and Structures*. 83 (2005) 2150–2161.
- [20] سازمان برنامه و بودجه، مشخصات فنی و عمومی روسازی راه آهن (نشریه ۳۰۱)، تهران، ۱۳۸۴.