

ارزیابی مقاومت جانبی دینامیک تراورس بتنی با استفاده از دستگاه بارگذاری آونگی

مرتضی اسماعیلی*، دانشیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
سعید مجیدی‌پرست، کارشناس ارشد مهندسی خطوط راه‌آهن، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه
علم و صنعت ایران، تهران
سیداحمد سیدحسینی، کارشناس خط و سازه‌های ریلی، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و
صنعت ایران، تهران

E-mail: M_esmaeili@iust.ac.ir

دریافت: ۹۵/۰۴/۰۲ - پذیرش: ۹۵/۰۸/۰۱

چکیده

مقاومت جانبی تراورس یکی از پارامترهای کلیدی تضمین‌کننده مقاومت جانبی خط و هندسه آن در صفحه افقی می‌باشد. متداول‌ترین روش تعیین مقاومت جانبی تراورس تک، آزمایش استاتیک STPT است. مهمترین نقطه ضعف آزمایش یاد شده، ارزیابی استاتیک مقاومت جانبی است. در صورتی که در عمل، بار اعمالی از جانب چرخ، یک بار دینامیک است. برای رفع این نقیصه، در تحقیق حاضر، از آزمایش بارگذاری پاندولی برای اعمال بار دینامیک بر تراورس بتنی استفاده شده است. برای جلوگیری از خرد شدن تراورس بتنی در حین آزمایش ضربه، یک پد الاستومتریکی در وجه جانبی تراورس نصب شده است. نتایج آزمایش‌های صورت گرفته برای جرم‌های مختلف و زوایای رهاسازی متنوع در قالب نمودارهای طراحی متناظر با بارگذاری واقعی چرخ ارائه شده است. همچنین، نتایج این آزمایش با نتایج تعدادی آزمایش STPT در شرایط مشابه مقایسه گردیده است. نتایج این مقایسه بیانگر آن است که بر خلاف وجود مقاومت جانبی ثابت به‌دست آمده برابر ۶/۵ کیلونیوتن در آزمایش STPT، نیروی نظیر جابجایی ۲ میلی‌متر در آزمایش پاندولی از حدود ۲ تا ۳۱ کیلونیوتن متغیر است. بنابراین، نسبت مقاومت جانبی دینامیک به مقاومت جانبی استاتیک در محدوده‌ی ۰/۳ تا ۴/۹ قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: بارگذاری جانبی دینامیک خط، آزمایش بارگذاری پاندولی، مقاومت جانبی دینامیک تراورس، نیروهای دینامیک در خط

۱. مقدمه

خط آهن، ایمنی خط آهن، به واسطه‌ی وقوع کمانش و افزایش احتمال خروج از خط قطار، به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد. مقاومت جانبی خط ریلی به واسطه عملکرد خمشی ریل، عملکرد پیشگی اتصالات ریل به

اهمیت تعیین مقاومت جانبی خط آهن بر هیچ یک از کاربران و مهندسين شاغل در صنعت حمل و نقل ریلی پوشیده نیست. در صورت عدم کفایت مقاومت جانبی

نیروی وارده توسط چکش و نیروی انتقال یافته به تراورس در این آزمایش حائز اهمیت است، اقدام به نصب شتابسنج روی چکش و در سه نقطه مختلف تراورس شده است. جابجایی انتهای تراورس نیز با استفاده از LVDT ثبت گردیده است. از آنجا که احتمال شکست تراورس بتنی ناشی از ضربه چکش قابل پیش-بینی بوده است، لذا از یک پد الاستومر برای جلوگیری از این موضوع در محل برخورد ضربه با تراورس نصب شده است.

مقاومت‌های جانبی دینامیک به دست آمده با این روش با نتایج به دست آمده از آزمایش استاتیک STPT مقایسه گردیده است. همچنین، مقاومت جانبی دینامیک انواع تراورس‌ها (چوبی، فلزی و بتنی) با دستگاه بارگذاری آونگی، در سمینار کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی راه‌آهن، توسط مجیدی‌پرست (۱۳۹۳) ارائه شده است. لازم به یادآوری است که نوآوری روش ارائه شده در پژوهش حاضر، برخلاف اکثر روش‌های پیشین، اندازه‌گیری مقاومت جانبی خط ریلی به صورت دینامیک و تحت بار ضربه‌ای است. از آنجا که ماهیت نیروهای جانبی وارده بر خط عمدتاً به صورت دینامیک می‌باشد، لذا رویکرد پیشنهادی این مقاله در جهت ارزیابی مقاومت جانبی تطابق مناسب‌تری با شرایط واقعی خط ریلی دارد.

۲. پیشینه تحقیقات

در بخش تعیین مقاومت جانبی خط بالاستی، فعالیت‌های متنوعی توسط محققین انجام گرفته است. مکانیزم ایجاد مقاومت جانبی در قوس‌ها بدین گونه است که ابتدا سهم زیادی از نیروی جانبی از طریق لبه چرخ قطار به ریل بیرونی وارد می‌شود. سختی جانبی ریل این نیرو را به سیستم اتصالات و آن‌ها نیز به وسیله سختی جانبی و دورانی نیروی جانبی را به تراورس‌ها منتقل می‌کنند. بعد از آن، تراورس به علت وزن خود و

تراورس و مقاومت بالاست در کف، بدنه و شانه تراورس، تضمین کننده حفظ هندسه خط در صفحه افق است. قرار گرفتن قطار در مسیرهای مختلف خط (خط مستقیم، قوس، پل‌ها و...)، شرایط محیطی متفاوت مسیر (شرایط دمایی مختلف، عوامل محیطی مثل باد و ...) مشخصات هندسی متفاوت مقطع (میزان بربلندی، ضخامت بالاست، عرض شانه و...) و همچنین شرایط بهره برداری از آلات ناقله ریلی (نحوه شتاب‌گیری و ترمزگیری) مجموعه‌ای پیچیده از نیروهای جانبی را به وجود خواهد آورد که لزوم تعیین مقادیر آن‌ها را بسیار ضروری خواهد کرد. لذا، با بررسی کارهای تحقیقاتی صورت گرفته می‌توان تلاش‌های محققین در این حوزه را در دو بخش مذکور یعنی تعیین نیروهای جانبی وارد بر خط و تعیین مقاومت جانبی خط تقسیم‌بندی نمود.

عمده روش‌های پیشنهادی در خصوص مقاومت جانبی خط ریلی دارای ماهیت استاتیک می‌باشند. در صورتی که نیروهای جانبی وارده به خط عمدتاً به صورت دینامیک است. از این رو، با توجه به کاستی و خلأ یاد شده در تحقیقات موجود در خصوص روش‌های تعیین مقاومت جانبی خط و تراورس نیاز به یک آزمون آزمایشگاهی با ماهیت دینامیک احساس می‌شود. در جهت رفع نقیصه موجود، برای اندازه‌گیری مقاومت جانبی دینامیک تراورس، آزمایشی تحت عنوان "آزمایش پاندولی" با ایده‌گیری از روش شمع‌کوبی، در دانشکده مهندسی راه‌آهن دانشگاه علم و صنعت طراحی و ساخته شد (اسماعیلی و همکاران، ۲۰۱۶). تئوری حاکم بر دستگاه همان تئوری آونگ بوده که در طراحی اولیه دستگاه مورد استفاده قرار گرفته است. به بیان دیگر، عنصر اصلی این دستگاه که آزمایش‌های مختلف با آن انجام می‌گیرد، چکش متصل به آونگ آن می‌باشد. با ساخت دستگاه، در محیط آزمایشگاه آزمایش‌های متعددی به ازای وزنه‌ها و زوایای رهاسازی مختلف چکش روی تراورس بتنی انجام شده است. از آنجا که

عمده آزمایش‌های انجام شده در خصوص مقاومت جانبی تراورس با استفاده از روش STPT انجام گرفته است. راه‌آهن فرانسه^۱ یکی از اولین مطالعات انجام شده روی مقاومت جانبی تراورس‌های چوبی را در سال ۱۹۶۷ انجام داد که خروجی آن فرمولی برای مقدار بار جانبی بحرانی بود (هانت، ۱۹۸۶). همچنین، مؤسسه ERRI در سال ۱۹۹۲ آزمایش‌های متعددی در این زمینه روی تراورس‌های بتنی انجام داد. لازم به ذکر است که مقدار جابجایی تراورس در این آزمایش‌ها در حدود ۵ میلی‌متر است. نتایج به دست آمده در قالب نمودارهای نیرو بر حسب جابجایی برای سه حالت خط قوی (بعد از عبور ترافیک)، متوسط (فقط زیرکوبی شده- بدون رلوژ) و ضعیف (بعد از زیرکوبی/رلوژ) می‌باشد (ERRI DT 360-361, ۱۹۹۷). راه‌آهن اسپانیا در سال ۱۹۹۵ چندین آزمایش میدانی STPT برای به دست آوردن مقادیر پارامترهای مختلف خط، در خطوط کماتش یافته انجام داد. آزمایش‌ها روی تراورس‌های بتنی در سه قوس کماتش یافته در دمای حدود ۶۰ درجه سلسیوس صورت گرفت. هدف از انجام این آزمایش‌ها معتبرسازی مدل اجزای محدود برای مسئله کماتش جانبی خط بود (گالگو و گومز-ری، ۱۹۹۵). راه‌آهن ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۹۸ حدود ۱۲۵ آزمایش STPT روی تراورس بتنی در شرایط قبل از زیرکوبی، بعد از زیرکوبی/قبل از پایدارسازی، بعد از پایدارسازی و بعد از عبور ترافیک انجام داد. به طور متوسط، بعد از هر ۱۰ آزمایش، میانگین و دامنه تغییرات و انحراف معیار برای بررسی نیاز به آزمایش‌های اضافی محاسبه می‌شد. نتایج آزمایش‌های آنها در قالب نمودارهای نیرو-تغییرشکل بعد از شرایط بهره برداری مذکور خط به دست آمد (ساسمن و کیش، ۱۹۹۸). ذاکری و همکاران (۲۰۱۰) با انجام چندین آزمایش STPT در شرایط میدانی و آزمایشگاهی، به بررسی

همچنین اندرکنش با بالاست در سه ناحیه کف، آخوری و شانه سهم قابل توجهی در تأمین مقاومت جانبی خط را دارد. مقدار مقاومت جانبی خط به پارامترهای نوع تراورس (بتنی، چوبی، فلزی)، وزن تراورس، ابعاد و فاصله بین تراورس‌ها، ترکیب دانه‌بندی بستر بالاست، مقدار مصالح بستر بالاست در بین و انتهای تراورس‌ها (شانه بستر بالاست) و تراکم بستر بالاست بستگی دارد (پلاسر و تورر، ۲۰۰۷).

تعیین سهم بار جانبی اعمالی از طرف چرخ به تراورس‌های مختلف از مباحث چالش برانگیز در حوزه‌ی مهندسی خطوط می‌باشد. زیرا این سهم تابع پارامترهای مختلفی از جمله فاصله بین تراورس‌ها، شرایط خط، بالاست، طریقه قرارگیری محورهای بوژی، سرعت و بار محوری ناوگان و نحوه اتصالات ریل به تراورس می‌باشد. در پژوهشی که توسط لوپن (۲۰۰۸) انجام گرفت، درصد نیروی جانبی رسیده به تراورس‌های قرار گرفته زیر چرخ قطار، برحسب سختی‌های مختلف خط ارزیابی گردیده است. اما آرما (۲۰۰۶) توزیع نیروی جانبی بین تراورس‌ها را همانند توزیع نیروی قائم بین آنها در نظر گرفت. البته چنین توزیعی برای نیروی جانبی از این جهت که طبیعت واقعی بار را در نظر نمی‌گیرد غیرمحافظة‌کارانه به نظر می‌رسد.

متداول‌ترین روش اندازه‌گیری مقاومت جانبی روش STPT می‌باشد که یک تراورس تک در بالاست را در برابر جابجایی جانبی بسیج می‌کند و رفتار نیرو در برابر جابجایی آن را اندازه‌گیری می‌کند (کیش، ۲۰۱۱). مطابق با متون فنی شرکت پلاسر و تورر (۲۰۰۷)، اغلب اوقات، مقدار نیروی متناظر با جابجایی تا مقدار ۲ میلی‌متر به عنوان مقاومت جانبی تراورس منفرد یاد می‌شود. علت انتخاب این مقدار این است که عملاً از ۲ میلی‌متر به بعد معمولاً سختی جانبی تراورس تک تقریباً ثابت می‌شود.

^۱- Prud'homme

روش استفاده برای تعیین ویژگی‌های مصالح در نرخ-های کرنش بالا می‌باشد. لازم به ذکر است که به منظور توسعه دستگاه بارگذاری پاندولی در تحقیق حاضر و تعیین جرم‌ها و زوایای رهاسازی مناسب، یک مدل اجزای محدود مبتنی بر جرم- فنر- میراگر توسط نرم-افزار Working model 2D توسعه داده شده و رفتار دینامیک کل سیستم مورد مطالعه قرار گرفته است. برای دسترسی به جزئیات، تحلیل دینامیک و طراحی دستگاه، به اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۶) و سید حسینی (۱۳۹۲) مراجعه شود.

۳-۱. آزمایش ضربه روی تراورس

هدف، استفاده از توسعه دستگاه بارگذاری پاندولی، اعمال بار جانبی ضربه‌ای به تراورس و نزدیک کردن شرایط آن به وضعیت واقعی بارگذاری در خط ریلی بوده است. برای این منظور، با نصب شتاب‌سنج‌هایی روی تراورس، مقادیر شتاب پس از ضربه ثبت و با نصب LVDT در انتهای تراورس، جابجایی جانبی آن نیز اندازه‌گیری شده است. در عین حال، با اتصال یک شتاب‌سنج به چکش ضربه زننده، امکان اندازه‌گیری نیروی برخورد فراهم گردیده است. با این سیستم آزمایشگاهی، آزمایش‌های متعددی روی تراورس بتنی B70 مدفون در بالاست دولومیتی با دانه‌بندی مطابق شماره ۳ (آرما، ۲۰۰۶) انجام شده و به موازات آن آزمایش استاتیک STPT نیز در شرایط مشابه صورت گرفته است.

برای آماده سازی مقطع، ابتدا بالاست شانه یک طرف مقطع بالاستی برداشته می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که تا آنجایی که ممکن است سعی شود بالاست ناحیه کف و آخوری به صورت کامل باقی بمانند. بعد از آن نوبت به حمل دستگاه به کنار مقطع بالاستی می‌رسد. دستگاه باید طوری در کنار تراورس قرار گیرد که چکش بر سطح جانبی آن مماس باشد.

مقاومت جانبی خط با استفاده از تراورس‌های مختلف در خط پرداختند. همچنین، آن‌ها در سال ۲۰۱۲ آزمایش‌هایی میدانی با استفاده از تراورس‌های بتنی معمولی و اصطکاکی در قوسی با شعاع ۲۵۰ متر انجام داده و تأثیر استفاده از تراورس‌های اصطکاکی را بررسی نموده‌اند. ذاکری و همکاران (۲۰۱۴) و لوپین (۲۰۱۴) با استفاده از روش پردازش تصویری و محاسبات تعادل محدود، اثر ابعاد هندسی بالاست شانه بر مقاومت جانبی استاتیک تراورس را با استفاده از روش STPT مورد بررسی قرار دادند و اثر بالاست شانه‌ی تراورس مجاور را نیز بر تراورس مورد آزمایش اندازه‌گیری کردند. در یک بررسی تجربی دیگر، کویک و همکاران (۲۰۱۴) آزمایش‌های متعددی را روی تراورس‌های بتنی، با ابعاد یک پنجم تراورس واقعی، برای تعیین اثر شکل تراورس و فاصله بین تراورس‌ها بر مقاومت جانبی استاتیک انجام دادند. آن‌ها همچنین یک روش عددی برای تعیین مقاومت جانبی تراورس ارائه کردند. ذاکری و همکاران (۲۰۱۴)، یک مدل اجزای محدود برای تعیین مقاومت جانبی تراورس اصطکاکی ارائه کردند. در این مدل، میزان افزایش مقاومت جانبی تراورس اصطکاکی در قیاس با تراورس معمولی، ۶۳-۷۰ درصد ارزیابی شده است. پس از روش ارائه شده توسط شرکت پلاس و تورر (۲۰۰۷)، تاکنون روش جدیدی در تعیین مقاومت جانبی خط و تراورس توسعه داده نشده است.

۳. ساخت دستگاه بارگذاری پاندولی و آزمون‌های آزمایشگاهی

ایده اصلی و کلیدی ساخت دستگاه پاندولی برای اندازه‌گیری مقاومت جانبی دینامیک تراورس از آزمایش میله دوتکه هاپکینسون برگرفته شده است (هاپکینسون، ۱۹۱۴). آزمایش میله دوتکه هاپکینسون متداول‌ترین

مخصوص، چکش بالا می‌آید و بعد از رسیدن به موقعیت دلخواه، با رهاسازی چکش، ضربه اعمال می‌گردد.

سپس، با توجه به برنامه آزمایش، برای رسیدن به جرم مورد نظر، داخل چکش، با وزنه‌های دایره‌ای شکل فلزی (پولک) پر می‌شود. برای رسیدن به زاویه دلخواه، با استفاده از سیستم چرخ دنده، به وسیله آچار

۳-۲. اجزای دستگاه بارگذاری پاندولی

در شکل ۱، اجزای دستگاه بارگذاری پاندولی نشان داده شده است.



- ۱- قرقره فلزی
- ۲- قاب فلزی
- ۳- کابل
- ۴- چرخ‌های متحرک
- ۵- چرخ‌های ثابت
- ۶- صفحه فلزی برای وزنه‌های تعادل
- ۷- سیستم winch
- ۸- آچار
- ۹- میله‌ی مرکزی چکش
- ۱۰- چکش فولادی
- ۱۱- سیستم اتصال چکش و کابل
- ۱۲- اتصال میله آونگ و چکش
- ۱۳- میله آونگ
- ۱۴- حفره‌های تنظیم ارتفاع
- ۱۵- مهره ۶ ضلعی
- ۱۶- میله‌ی ضربه‌گیر
- ۱۷- بلبرینگ
- ۱۸- سیستم درجه‌بندی

شکل ۱. اجزای دستگاه بارگذاری پاندولی

۳-۳. برنامه آزمون‌های آزمایشگاهی

هندس و مشخصات خط تست آزمایشگاهی مورد استفاده در آزمایش‌های دینامیک و استاتیک در شکل ۲ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، خط مذکور متشکل از سه تراورس بتنی B70 با فاصله مرکز تا مرکز ۶۰ سانتی‌متر می‌باشد که به طور کامل در بالاست مدفون گردیده است. ضخامت مقطع بالاستی از

سطح زمین تا کف تراورس‌ها برابر ۵۰ سانتی‌متر، عرض شانه بالاستی ۵۰ سانتی‌متر و شیب شانه ۱:۱٫۵ بوده است. از آنجا که هدف آزمایش، بارگذاری جانبی دینامیک و استاتیک تراورس تک می‌باشد، ارتباط میان تراورس‌ها و ریل قطع شده و تراورس میانی مورد آزمایش قرار گرفته است.



شکل ۲. ابعاد هندسی مقطع بالاستی آزمایش

پس از ضربه ثبت و از ضرب آن در جرم تراورس، که در این آزمایش برابر ۳۲۰ کیلوگرم بوده است، مقدار نیروی جانبی دینامیک بر حسب زمان استخراج گردیده است. از طرف دیگر، با نصب LVDT در انتهای تراورس، جابجایی جانبی تراورس پس از ضربه بر حسب زمان ثبت شده است. با توجه به آن که امکان خردشدگی تراورس بتنی در اثر ضربه چکش فلزی وجود داشته، یک پد الاستومر Sylomer SR18 (شرکت گتسنر، ۲۰۱۲) در محل برخورد چکش با تراورس روی وجه جانبی تراورس نصب شده است. این موضوع قطعاً بر نیروی دینامیک چکش و مقدار منتقل شده آن

از آنجا که هدف از انجام آزمایش بارگذاری پاندولی، استخراج الگوی رفتار تراورس تحت بارگذاری ضربه‌ای متناسب با ضربه ناشی از عبور چرخ بوده است، لذا با توجه به توانمندی‌های دستگاه ساخته شده، با احتساب وزن چکش، محدوده وزنی بین ۳۰ الی ۱۱۰ کیلوگرم و زوایای رهاسازی بین ۳۰ الی ۹۰ درجه در شرایط آزمایشگاهی مدنظر قرار داده شده است. از آنجا که متناظر با آزمایش مقاومت جانبی استاتیک، هدف تعیین تغییرات نیروی جانبی بر حسب جابجایی خواهد بود، لذا با نصب سه شتاب‌سنج در مرکز و طرفین تراورس، مطابق شکل ۳، شتاب تراورس

فراهم گردیده است. جدول ۱ مشخصات ابزار دقیق و همچنین دستگاه دیتالاگر که همگی ساخت شرکت Tokyo Sokki Kenkyujo می‌باشند و برای ثبت این اطلاعات استفاده شده‌اند را نشان می‌دهد.

به تراورس تأثیرگذار خواهد بود. لذا، به منظور تعیین نیروی دقیق ضربه توسط چکش، یک شتاب‌سنج نیز روی چکش نصب و با ثبت مقادیر شتاب و ضرب آن در وزن چکش امکان اندازه‌گیری نیروی ضربه‌ای نیز

جدول ۱. مشخصات ابزار دقیق و دستگاه دیتالاگر استفاده شده در آزمایش‌ها

تعداد کانال	سرعت داده- برداری	دامنه پاسخ فرکانسی (هرتز)	ضریب واسنجی $\times 10^{-6}$	ظرفیت	نوع	ابزار دقیق
۸	10 KHz	-	-	-	TMR-7200	دستگاه دیتالاگر
-	-	0 - 520	0.452 (m/s ²)	(m/s ²)500	ARH-500A	شتاب‌سنج تراورس
-	-	0 - 520	0.439 (m/s ²)	(m/s ²)500	ARH-500A	شتاب‌سنج تراورس
-	-	0 - 520	0.448 (m/s ²)	(m/s ²)500	ARH-500A	شتاب‌سنج تراورس
-	-	0 - 2100	(m/s ²)1.77	2000 (m/s ²)	ARE-2000A	شتاب‌سنج چکش
-	-	-	0.005 (mm)	(mm)50	CDP-50	جابجایی سنج تراورس



شکل ۳. محل نصب سه شتاب‌سنج و LVDT تراورس آزمایش

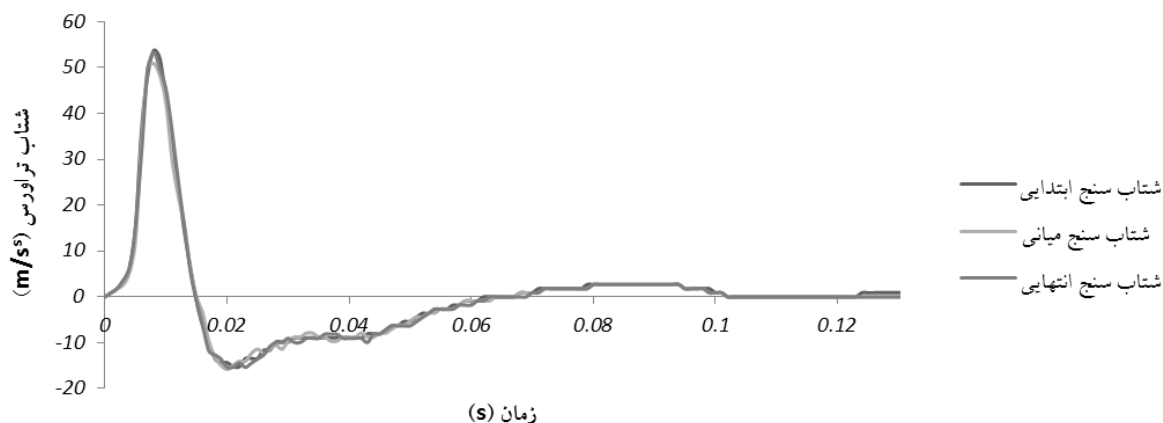


شکل ۴. دستگاه دیتالاگر TMR-7200 متصل به کامپیوتر قابل حمل

۳-۴. تفسیر نتایج و بحث

نتایج به دست آمده از آزمایش‌های دینامیک مقاومت جانبی تراورس به سه فرم نیرو- زمان، جابجایی- زمان و نیرو- جابجایی قابل ارائه می‌باشد. لازم به ذکر است که سه شتاب ثبت شده در ابتدا، انتها و میانه تراورس بر حسب زمان به علت صلبیت تراورس، اختلاف ناچیزی با یکدیگر داشته و لذا از میانگین آن‌ها در محاسبه شتاب تراورس و به تبع آن نیروی دینامیک تراورس استفاده شده است. در شکل ۵، یک نمونه از مقادیر شتاب‌سنج‌های مختلف تراورس نشان داده شده است

برای سهولت کار، در نام‌گذاری حالات مختلف بارگذاری، حروف اول نوع تراورس را مشخص می‌کنند (=CS) تراورس بتنی، =SS تراورس فلزی، =WS تراورس چوبی). سپس، وزن چکش (که بین ۳۰ تا ۱۱۰ کیلوگرم متغیر است) و زاویه رهاسازی (از صفر تا ۹۰ درجه) ذکر می‌شود. به عنوان مثال، حالت بارگذاری CS7045 مربوط به بارگذاری تراورس بتنی با چکش ۷۰ کیلوگرمی، با زاویه رهاسازی ۴۵ درجه، می‌باشد.



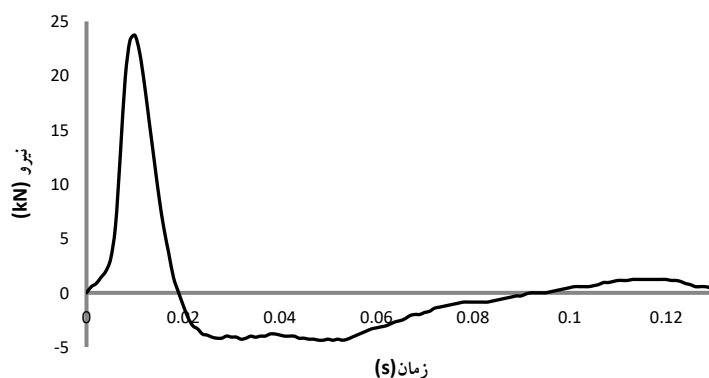
شکل ۵. تاریخچه زمانی شتاب‌های تراورس بتنی در ضربه CS3090

۱-۴-۳. نمودارهای نیرو- زمان، جابجایی- زمان و

نیرو- جابجایی

پس از برخورد چکش با سطح جانبی تراورس (الاستومر)، موج فشاری تولید می‌گردد که شروع به حرکت به سمت انتهای تراورس می‌کند. پس از رسیدن این موج به انتهای تراورس، بخش عمده‌ای از آن به بالاست شانه انتقال می‌یابد و قسمتی از آن به صورت موج کششی از انتهای تراورس بازتاب می‌گردد. در شکل ۶ تاریخچه زمانی نیروی وارده به تراورس بتنی برای جرم ۹۰ کیلوگرم و زاویه رهاسازی ۴۵ درجه چکش نشان داده شده است.

در این بخش، نتایج به دست آمده در سه قسمت مورد بررسی قرار گرفته است. اول آن که فرم نتایج خروجی آزمایش به صورت موردی بررسی شده و مفهوم مقاومت جانبی دینامیک نشان داده شده است. در قسمت دوم، گراف‌ها و مقادیر طراحی مقاومت جانبی دینامیک رسم و معادله‌ای استخراج شده است. در انتها، با انجام آزمایش مقاومت جانبی استاتیک، مقایسه‌ای میان مقاومت جانبی دینامیک و استاتیک صورت گرفته است.



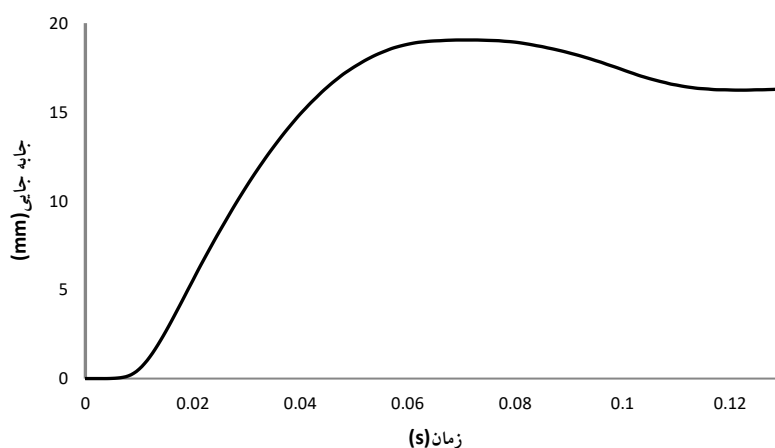
شکل ۶. تاریخچه زمانی نیروی وارده به تراورس بتنی (CS9045)

رسیده (حدود ۲۵ کیلونیوتن) و در زمانی حدود ۰/۰۲ ثانیه به انتهای تراورس رسیده و مقدار نیرو به صفر می‌-

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، موج فشاری تولید شده در زمان ۰/۰۱ به حداکثر مقدار خود

می‌کند و قسمت‌هایی از آن انتقال و بازتاب می‌یابد. این حرکت پی در پی موج‌های فشاری و کششی باعث نوسان تراورس در جهت جانبی می‌گردد. از آنجا که آزمایش حاضر با آزمایش مقاومت جانبی استاتیک مقایسه خواهد شد، لذا تنها فاز فشاری نیروی اعمالی برای تعیین مقاومت جانبی مدنظر قرار داده می‌شود. در شکل ۷، نمودار جابجایی- زمان برای همین آزمایش نشان داده شده است.

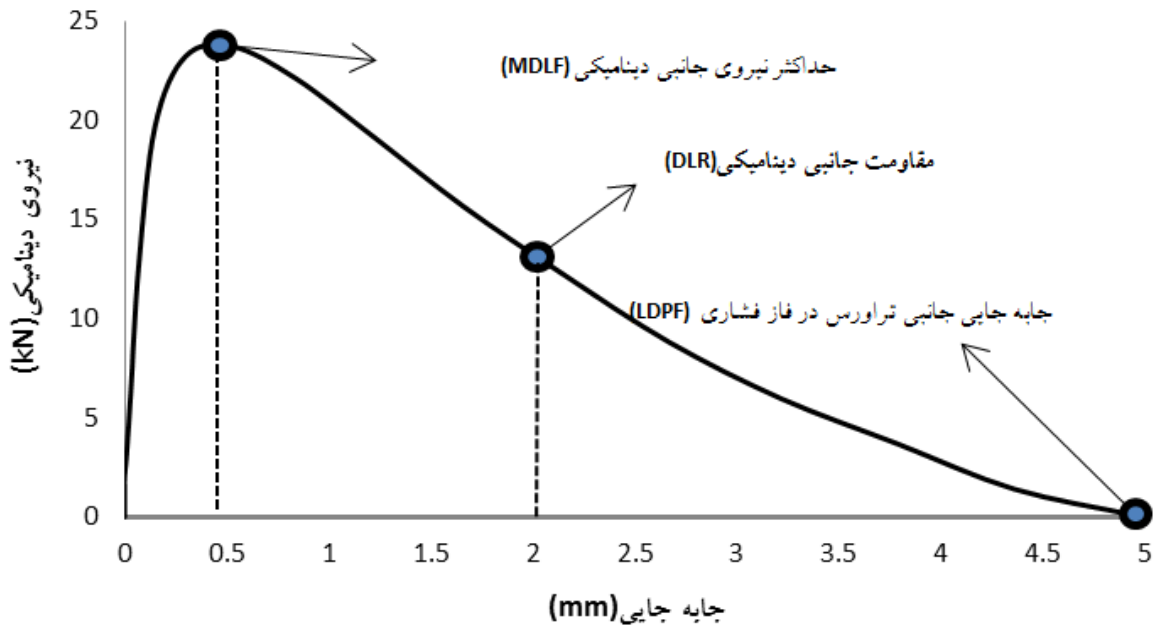
رسد. واضح است که این موج فشاری باعث جابجایی جانبی تراورس در جهت ضربه اعمالی می‌گردد. پس از برخورد موج فشاری به انتهای تراورس، قسمت عمده- ای (حدود ۸۰٪) به بالاست شانه انتقال می‌یابد. اما بخشی از آن (حدود ۲۰٪) به صورت موج کششی بازتاب می‌گردد و مطابق نمودار شکل ۶ مقدار این موج کششی به حدود ۵ کیلونیوتن می‌رسد که باعث حرکت تراورس در خلاف جهت ضربه اعمالی می‌گردد. این موج کششی دوباره به انتهای دیگر تراورس برخورد



شکل ۷. نمودار جابجایی- زمان در آزمایش CS9045

رسیده است. روند کاهش جابجایی پس از آن به عدد ۱۶ میلی‌متر تا پایان زمان تأثیر بارگذاری ضربه‌ای ادامه یافته است. نمودار نیرو- جابجایی تراورس در فاز فشاری در آزمایش یاد شده همانند نمودار شکل ۸ خواهد بود.

مطابق شکل ۷، در زمانی حدود ۰/۰۱ ثانیه که نیروی وارده به تراورس به حداکثر مقدار خود رسیده است، جابجایی قابل توجهی در تراورس اتفاق نیفتاده است. بعد از آن، نمودار به صورت خطی تا ۰/۰۴ ثانیه افزایش و پس از آن به صورت غیر خطی تا مدت زمان ۰/۰۷ ثانیه به حداکثر جابجایی خود (برابر ۱۹ میلی‌متر)



شکل ۸ نمودار نیرو-جابجایی آزمایش CS9045

بدیهی است در مقام مقایسه با آزمایش مقاومت جانبی استاتیک، نیروی نظیر جابجایی دو میلی متر به عنوان مقاومت جانبی دینامیک تراورس در نظر گرفته می شود. این مقدار با مقادیر نیروی حداکثر جانبی ایجاد شده در تراورس متفاوت خواهد بود. به طور مثال، در شکل ۸، نیروی حداکثر برابر ۲۴ کیلونیوتن بوده، در حالی که نیروی نظیر جابجایی دو میلی متر برابر ۱۳ کیلونیوتن به دست آمده است. در جدول ۲، مقادیر حداکثر نیروی جانبی دینامیک^۱ (MDLF) و جابجایی متناظر با آن، نیروی نظیر جابجایی دو میلی متر^۲ (DLR) و همچنین جابجایی جانبی تراورس در فاز فشاری^۳ (LDPF) به ازای وزنه‌ها و زوایای رهاسازی مختلف به دست آمده از آزمایش‌ها، ارائه گردیده است.

^۱- Maximum Dynamic Lateral Force

^۲- Dynamic Lateral Resistance

^۳- Lateral Displacement Due to Pressure Force

جدول ۲. مقادیر MDLF، DLR و LDPF

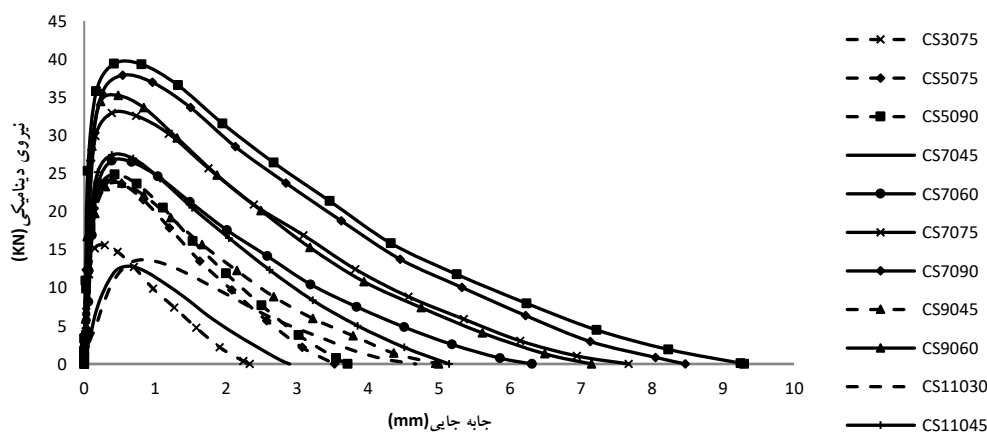
m θ	30			50			70			90			110		
	MDLF	DLR	LDPF	MDLF	DLR	LDPF	MDLF	DLR	LDPF	MDLF	DLR	LDPF	MDLF	DLR	LDPF
30	1.7	*	0.7	4	*	1.9	5.5	1.2	2.5	8	4.5	3.55	14	9.2	4.7
45	3	*	0.95	9	2.2	2.5	13	4.8	2.9	24	13.3	5	28	17	5.2
60	8.5	*	1.55	14.5	2.9	2.5	27	17.6	6.3	35	23.8	7.1	40	31.4	9.3
75	15.5	0.7	2.2	24	10.4	3.5	33	23.8	7.7	-	-	-	-	-	-
90	17	1.7	2.3	25	12	3.7	38	29.5	8.5	-	-	-	-	-	-

مقادیر MDLF و DLR بر حسب کیلونیوتن و LDPF بر حسب میلی‌متر می‌باشند.
 مقادیر جرم بر حسب کیلوگرم و زوایا بر حسب درجه می‌باشند.
 * در این آزمایش‌ها، یا جابجایی دو میلی‌متر اصلاً رخ نداده و یا در فاز کششی نیرو قرار داشته است.
 - به علت جابجایی جانبی زیاد در آزمایش‌های آخر و کافی بودن دامنه حداکثر نیروی جانبی دینامیک (MDLF) از انجام این آزمایش‌ها خودداری گردیده است.

نمودار آزمایش‌های منتخب را به منظور استفاده برای مقاصد طراحی نشان می‌دهد. مقدار نیروی حداکثر به دست آمده از هر آزمایش می‌تواند متناظر با نیروی دینامیک اعمالی از طرف محور بر دو ریل در خط بالاستی در نظر گرفته شود. این در حالی است که نیروی نظیر جابجایی دو میلی‌متر همان مقاومت جانبی دینامیک بسیج شده در تراورس است.

۳-۴-۲. گراف‌ها و مقادیر طراحی مقاومت جانبی دینامیک

با بررسی نتایج آزمایش‌های انجام شده، آزمایش‌هایی که در آن‌ها جابجایی دو میلی‌متر رخ داده است، به منظور استخراج مقاومت جانبی دینامیک تراورس مد نظر قرار داده شده و در قالب یک نمودار واحد ارائه گردیده است. شکل ۷



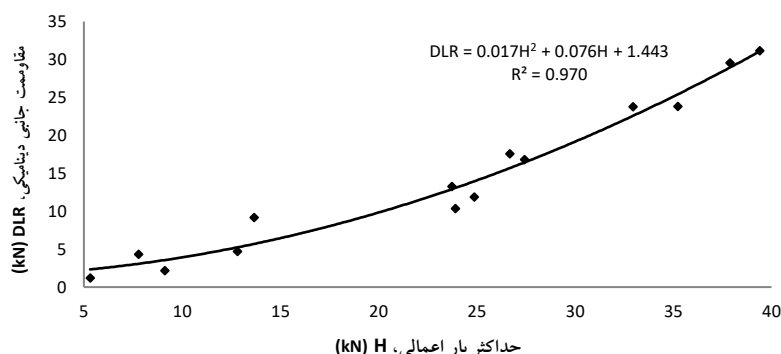
شکل ۹. نمودارهای طراحی مقاومت جانبی دینامیک بر اساس آزمایش‌های انجام گرفته

دینامیک و نیروی جانبی دینامیک اعمالی به تراورس از جانب محور به فرم زیر به دست خواهد آمد:

$$DLR = 0.017H^2 + 0.076H + 1.443 \quad (1)$$

که DLR مقاومت جانبی دینامیک (kN) و H نیروی جانبی دینامیک اعمالی به تراورس از جانب محور (kN) است.

اگر مقادیر نیروی حداکثر و نیروی نظیر جابجایی دو میلی‌متر را در نمودارهای شکل ۹ استخراج کنیم، نمودار دیگری به فرم نشان داده شده در شکل ۱۰ قابل ترسیم خواهد بود. با توجه به مقادیر ارائه شده در شکل ۱۰، یک رابطه رگرسیون درجه دوم میان مقاومت جانبی



شکل ۱۰. نمودار مقادیر طراحی مقاومت جانبی دینامیک بر حسب نیروی جانبی دینامیک اعمالی به تراورس

استفاده قرار گرفته است. مطابق شکل ۱۱ دو قطعه ریل با استفاده از پابند پاندرول به تراورس‌های کناری آزمایش متصل شده است. سپس جک هیدرولیکی و LVDT دستگاه دیتالاگر مدل KS625N هر کدام به یک ریل تکیه داده شده و با استفاده از سیم‌های مخصوص خود به دستگاه دیتالاگر متصل شده‌اند. با روشن نمودن دستگاه، عملیات پمپاژ روغن و فشار هیدرولیکی جک توسط دستگاه صورت می‌گیرد و تراورس در خلاف جهت اعمال نیروی جک شروع به جابجا شدن می‌کند. واضح است که تراورس مورد آزمایش هیچ گونه اتصالی به ریل ندارد.

نکته اساسی در متغیر بودن مقاومت جانبی تراورس بر حسب بار جانبی ناشی از محور آن است که بارهای مختلف محور می‌تواند مشخصات دینامیک جانبی متفاوتی را در جهت عرضی در خط ایجاد کند و لذا ملاحظه می‌شود که عدد مقاومت جانبی در شرایط دینامیک مقدار ثابتی نیست.

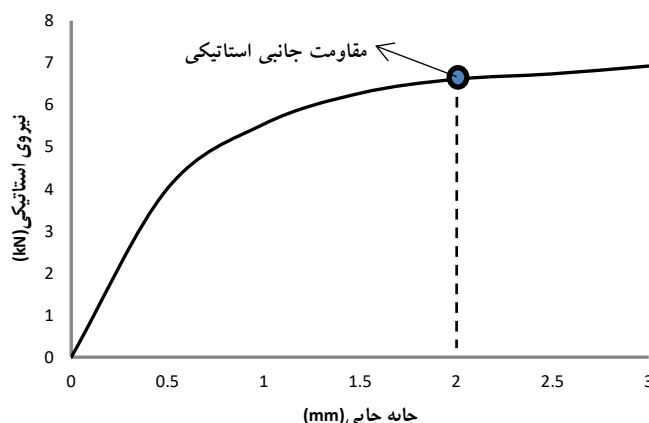
۳-۴-۳. مقایسه نتایج آزمایش‌های دینامیک و استاتیک

برای رسیدن به این هدف چندین آزمایش استاتیک در همان مقطع بالاستی و با شرایط مشابه صورت گرفت که میانگین نتایج ۸ آزمایش STPT برای مقایسه با نتایج آزمایش‌های دینامیک مورد



شکل ۱۱. ابزاربندی تراورس جهت انجام آزمایش استاتیک STPT

شکل ۱۲ تغییرات نیروی استاتیک اعمالی افزایش یابنده را برحسب جابجایی جانبی نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. نمودار نیرو-جابجایی آزمایش استاتیک STPT

تا ۹۰ درجه برای اعمال بار ضربه‌ای روی تراورس فراهم گردیده است. با استخراج نیروی دینامیک تراورس و جابه جایی آن با استفاده از ابزاربندی صورت گرفته، نیروی نظیر جابه جایی دو میلی‌متر، به عنوان مقاومت جانبی دینامیک تراورس بتنی B70 پیشنهاد شده است. با تفسیر نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مختلف دینامیک و مقایسه آن با نتایج آزمایش بارگذاری استاتیک معمول STPT عمده نتایج زیر در تحقیق حاضر به دست آمده است:

۱. فرم نمودار تاریخچه زمانی نیرو دارای دو فاز فشاری و کششی بوده، اما برای مقایسه مقادیر مقاومت جانبی دینامیک با استاتیک تنها فاز فشاری در نظر گرفته شده است. حداکثر نیروی جانبی دینامیک و زمان رسیدن به آن به ترتیب در محدوده ۲ الی ۴۰ کیلونیوتن و ۰/۰۰۶ الی ۰/۰۱۶ ثانیه قرار دارد.
۲. تغییر مکان حداکثر تراورس در فاز فشاری و مدت زمان لازم برای رسیدن به آن (مدت زمان برخورد) به ترتیب در محدوده ۰/۷ تا ۹/۳ میلی‌متر و ۰/۰۱۴ الی ۰/۰۲۷ ثانیه می‌باشد.

چندین آزمایش STPT روی مقطع بتنی ساخته شده انجام شد که تفاوت چندانی با یکدیگر نداشتند و میانگین مقاومت جانبی استاتیک برای ۲ میلی‌متر جابجایی، ۶،۵ کیلونیوتن به دست آمد. همانگونه که از جدول ۲ مشخص است، مقادیر مقاومت جانبی دینامیک محدوده‌ای از ۲ تا ۳۲ کیلونیوتن را شامل می‌شود. بدین صورت، نسبت مقاومت جانبی دینامیک به استاتیک محدوده‌ای از ۰/۳ تا ۴/۹ به دست می‌آید.

۴. نتیجه‌گیری

مرور ادبیات فنی مبین آن است که عمده آزمایش‌های اندازه‌گیری مقاومت جانبی خط به صورت استاتیک انجام می‌شود و این در شرایطی است که بار عبوری قطار یک بار دینامیک است و لذا پژوهش حاضر به اندازه‌گیری دینامیک مقاومت جانبی تراورس با استفاده از یک دستگاه ابداعی در آزمایشگاه روسازی دانشکده مهندسی راه‌آهن اختصاص داده شده است. با استفاده از دستگاه بارگذاری پاندولی، امکان رهاسازی وزنه‌های ۳۰ تا ۱۱۰ کیلوگرمی در محدوده زوایای ۳۰

۳. نیروی جانبی نظیر جابجایی دو میلیمتر، به عنوان مقاومت جانبی دینامیک، رابطه‌ای درجه دوم با حداکثر نیروی جانبی وارده از جانب محور داشته و مقادیر نیروی متناظر با جابجایی دو میلی‌متر در آزمایش استاتیک برابر ۶/۵ کیلونیوتن و در آزمایش‌های دینامیک بین ۲ الی ۳۱ کیلونیوتن قرار دارد.
۴. نسبت مقاومت جانبی دینامیک به استاتیک محدوده- ای از ۰/۳ تا ۴/۹ را دارا می‌باشد.

۵. مراجع

- سیدحسینی، س. ا. ۱۳۹۲. "اندازه‌گیری آزمایشگاهی مقاومت جانبی دینامیک تراورس بتنی". پایان‌نامه کارشناسی، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- مجیدی پرست، س. (۱۳۹۳) "اندازه‌گیری آزمایشگاهی مقاومت جانبی دینامیک تراورس‌های مختلف"، سمینار کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت راه‌آهن
- AREMA. 2006. "Manual for Railway Engineering". Vol. 1, Track.
- ERRI DT 360: Reinicke, Herrmann and Parmentier. 1997. ERRI D202 424/WG 3 Lateral Resistance Tests Report 50548, Deutsche Bahn, Germany.
- ERRI DT 361: Hunt, G. A. and Yu, Z. M. 1997. "Measurement of Lateral Resistance Characteristics for Ballasted Track". BR Research Report RR-TCE-81.
- Esmaeili, M., S. Hosseini, S. A. and Sharavi, M. 2016. "Experimental assessment of dynamic lateral resistance of railway concrete sleeper". Soil Dyn. Earthq. Eng., 82: 40-54.
- Gallego, J. and Gomez-Rey, D. 1995. "A Finite Element Solution for the Lateral Track Buckling Problem". Department of Railways System Technology, TIFSA-RENFE Group.
- Getzner Company. 2012. "Sylomer SR18". Copyright by Getzner Material GmbH103, Germany.
- Hunt, G. A. 1986. "Dynamic analysis of railway vehicle/track interaction forces". PHD theses, Loughborough University, England.
- Hopkinson, B.F.R.S. 1914. "A method of measuring the pressure produced in the detonation of explosives or by the impact of bullets". Phil. ٦
Trans. Roy. Soc. London, 213: 437-456.
- Kish, A. 2011. "On the Fundamentals of Track Lateral Resistance". AREMA Annual Conference, September 18-21, Minneapolis, MN.
- Koike, Y., Nakamura, T., Hayano, K. and Momoya, Y. 2014. "Numerical method for evaluating the lateral resistance of sleepers in ballasted tracks". J. Jap. Geotech. Soc.: Soils Found. 54(3): 502-514.
- Le Pen, L. 2008. "Track behaviour: The importance of the tie to ballast interface". PhD Thesis, University of Southampton, UK.
- Le Pen, L., Bhandari, A. R. and Powrie, W. 2014. "Sleeper end resistance of ballasted railway tracks". ASCE, J. Geotech. Geoenviron. Eng. 140(5): 04014004.
- Plasser and Theurer Publications. 2007. "The Lateral Resistance of the Track". Technical Report.
- Sussmann, T., Kish, A. and Trosino, M. 1998. "Investigation of the Influence of Track Maintenance on the Lateral Resistance of Concrete Tie Track". U.S. DOT/Volpe Center, Amtrak.
- Zakeri, J. A., Mirfattahi, B. and Fakhari, M. 2010. "Field and Laboratory Investigation on the Lateral Resistance of Sleepers by Employing STPT Test". Proceedings of the First International Conference on Road and Rail Infrastructure (CETRA 2010), 17-18 May, Croatia.
- Zakeri, J. A., Mirfattahi B. and Fakhari, M. 2012. "Lateral resistance of railway track with frictional ties". Proc. Inst. Civil Eng.- Transport J., 165: 151-155.
- Zakeri, J. A., Esmaeili, M., Kasraei, A. and Bakhtiary, A. 2014. "A numerical investigation on the lateral resistance of frictional sleepers in ballasted railway tracks". Proc. Inst. Mech. Eng., Part F: J. Rail and Rapid Transit, doi: 10.1177/0954409714543507.

ارزیابی مقاومت جانبی دینامیک تراورس بتنی با استفاده از دستگاه بارگذاری آونگی