



Semnan University



Research Article

Field Study of Vertical Stiffness of Ballasted Railway Track by Using the Beam on the Elastic Foundation Method

Ehsan Norouzi ^a, Jabbar Ali Zakeri ^b, Aliakbar Abbasi ^a, Seyed Ali Mosayebi ^c*

^a MSc., School of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, I. R. Iran.

^b Professor, School of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, I. R. Iran.

^c Assistant Professor, School of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, - I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2025-01-04

Revised: 2025-02-07

Accepted: 2025-02-08

Keywords:

Ballasted railway track;
Mechanized maintenance;
Vertical stiffness;
Elastic foundation.

ABSTRACT

The present study analyzes and measures the vertical stiffness of ballasted railway track based on the beam on the elastic foundation method by focusing on the effects of dynamic stabilizer machine. Investigating the effects of this machine on the vertical stiffness of ballasted tracks can help the railway engineers in track maintenance planning and cost reduction. One of the methods for maintaining ballasted railway tracks is using the mechanized track maintenance trains to adjust longitudinal leveling, track alignment, and stabilize the railway. While the tamping machine has advantages for quickly correcting the track geometry, it also has disadvantages such as a reduction in the lateral resistance and stiffness. These disadvantages result from the penetration of tamping tines into the ballast layer, and lack of coherence in the ballast grading. The dynamic stabilizer machine, based on available technical literature, can reduce some of the deficiencies caused by the tamping machine. To examine these effects, a field experiment was conducted in Line No. 1 at Karaj Railway Station. Results of the tests performed in three steps including before tamping, after tamping, and after using the stabilizer machine indicate that, due to the absence of tamping for five years, the vertical stiffness was at its maximum level before tamping. After employing the tamping machine, the vertical stiffness decreased by approximately 69%, mainly due to the penetration of tamping tines into the ballast layer, which reduced the compaction and the contact surface between ballast particles. Following the passage of the dynamic stabilizer machine and application of horizontal vibrations and static vertical loads, which enhanced the compaction and proper interlocking of ballast particles, the vertical stiffness increased by approximately 47% compared to the step after tamping operation.

* Corresponding author

E-mail address: mosayebi@iust.ac.ir

How to cite this article: Norouzi, E. , Zakeri, J. A. , Abbasi, A. and Mosayebi, S. A. (2025). Field study the vertical stiffness of ballasted railway track by using the beam on the elastic foundation method. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 10(4), 35-50. <https://doi.org/10.22075/jtie.2025.36434.1711>

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



Semnan University

مجله زیر ساخت های حمل و نقل

وبسایت نشریه: <https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en>

شاپا: 2821-0549



مقاله پژوهشی

مطالعه میدانی سختی قائم خط آهن بالاستی بر اساس روش تیر روی بستر ارتجاعی

احسان نوروزی^۱، جبارعلی ذاکری^۲، علی اکبر عباسی^۱، سید علی مسیبی^{۳*}

^۱ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

^۲ استاد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

چکیده

مطالعه حاضر به تحلیل و اندازه‌گیری سختی قائم خط آهن بالاستی بر اساس روش تیر روی بستر ارتجاعی با تمرکز بر تأثیر ماشین پایدارساز دینامیک پرداخته است. بررسی اثر این ماشین بر سختی قائم خطوط بالاستی می‌تواند به مهندسان راه آهن در برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری و کاهش هزینه‌های آن کمک کند. یکی از روش‌های نگهداری خطوط ریلی بالاستی، استفاده از قطار تعمیر و نگهداری مکانیزه خطوط (MDZ) برای تنظیم تراز طولی، پلان مسیر و تثبیت خط ریلی است. در حالی که ماشین زیرکوب دارای مزایایی برای اصلاح سریع هندسه‌ی خط است، معایبی نیز به همراه دارد که به کاهش مقاومت و سختی منجر می‌شود. این معایب ناشی از نفوذ کلنگ‌های زیرکوب به لایه‌ی بالاست و بر هم زدن هم‌بندی دانه‌های بالاست است. ماشین پایدارساز دینامیک، بر اساس مطالعات و متون فنی، می‌تواند بخشی از معایب ایجادشده توسط ماشین زیرکوب را بهبود بخشد. برای بررسی این تأثیرات، آزمایشی میدانی در خط شماره یک ایستگاه راه آهن کرج انجام شد. نتایج آزمایش‌های انجام شده در سه مرحله، شامل قبل از زیرکوبی، بعد از زیرکوبی و پس از استفاده از ماشین پایدارساز نشان می‌دهد که به دلیل عدم زیرکوبی خط به مدت ۵ سال، در مرحله‌ی قبل از زیرکوبی، سختی قائم در بیشترین مقدار خود قرار دارد. بعد از استفاده از ماشین زیرکوب، به علت نفوذ کلنگ‌های آن به لایه‌ی بالاست و کاهش تراکم و سطح تماس بین دانه‌های بالاست، سختی قائم خط حدود ۶۹ درصد کاهش یافته است. با عبور ماشین پایدارساز دینامیک و اعمال ارتعاشات افقی و بار قائم استاتیک، که منجر به افزایش تراکم و هم‌بندی مناسب دانه‌های لایه بالاست می‌شود، سختی قائم خط حدود ۴۷ درصد نسبت به مرحله‌ی بعد از زیرکوبی افزایش یافته است.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰

واژگان کلیدی:

روسازی بالاستی،

نگهداری مکانیزه،

سختی قائم خط،

بستر ارتجاعی.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mosayebi@iust.ac.ir

استناد به این مقاله: نوروزی، احسان، ذاکری، جبارعلی، عباسی، علی اکبر و مسیبی، سید علی. (۱۴۰۳). مطالعه میدانی سختی قائم خط آهن بالاستی

بر اساس روش تیر بر روی بستر ارتجاعی. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱۰ (۴)، ۳۵-۵۰.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2025.36434.1711>

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

۱. مقدمه

کمانش و نیروی گریز از مرکز در قوس‌ها هستند. مقاومت جانبی خط از طریق سه ناحیه تأمین می‌شود: اصطکاک کف تراورس و بالاست، اصطکاک اطراف تراورس و بالاست (ناحیه آخوری) و بالاست انتهایی تراورس (شانه). برای حفظ کیفیت مسیر، تأمین ایمنی و بهره‌برداری مناسب از خطوط ریلی، انواع مختلفی از عملیات نگهداری و تعمیرات مکانیزه خطوط در دستور کار قرار دارد (گو و همکاران، ۲۰۲۱). یکی از ماشین‌آلات نگهداری مکانیزه خطوط بالاستی، ماشین پایدارساز دینامیک است. پایدارسازی خط توسط ماشین پایدارساز دینامیک، بلافاصله پس از عملیات زیرکوبی انجام می‌شود و خط را در شرایط کنترل‌شده‌ای مستقر می‌کند. تثبیت خط با این ماشین، تراکم لایه بالاست و هم‌بندی برشی دانه‌های بالاست را افزایش داده و به این ترتیب می‌تواند موجب افزایش مقاومت جانبی و سختی قائم خط پس از زیرکوبی شود (شیائو و همکاران، ۲۰۲۳). نگهداری و تعمیر خطوط بالاستی و ارزیابی وضعیت خط برای نگهداری پیش‌بینانه، امری ضروری است. هدف از انجام مطالعه حاضر بررسی تغییر وضعیت سختی قائم خط با روش تیر بر روی بستر ارتجاعی در زمان استفاده از ماشین‌آلات مکانیزه خطوط و همچنین بررسی وضعیت و کارایی این ماشین‌آلات جهت بهبودی خط می‌باشد.

۲. مروری بر ادبیات فنی

با توسعه روزافزون شبکه خطوط ریلی، افزایش سرعت قطارها، بار محوری و حجم ترافیک عبوری، هزینه‌های نگهداری و تعمیرات خطوط ریلی بالاستی به‌طور متناسب افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، در روش‌های نگهداری و تعمیرات غیرمکانیزه (دستی)، تأمین نیروی انسانی لازم برای انجام عملیات مرتبط، به‌طور مستقیم هزینه‌ها را افزایش می‌دهد. افزون بر این، ضرورت انجام عملیات نگهداری و تعمیرات با دقت، کیفیت بالا و

راه‌آهن نقش کلیدی در توسعه جامعه مدرن، به‌ویژه در دهه‌های اخیر، ایفا کرده است. خدمات اصلی راه‌آهن شامل جابجایی کالا و مسافر است. از این‌رو، سیاست‌های اقتصادی راه‌آهن به گونه‌ای طراحی شده است که علاوه بر برآورده کردن نیازهای مشتریان، به افزایش سودآوری نیز توجه ویژه‌ای داشته باشد. برای تحقق این هدف، همواره در تلاش است تا سرعت و ظرفیت باربری خطوط را افزایش دهد. به‌منظور تضمین کیفیت خدمات، عملیات تعمیر و نگهداری خطوط ضروری است. این فرآیند شامل مجموعه‌ای از فعالیت‌هاست که با هدف حفظ ویژگی‌های خطوط ریلی و بازگرداندن تغییرات ایجادشده، انجام می‌شود (ویل و همکاران، ۲۰۱۲). تجربیات نشان داده‌اند که نگهداری نامناسب خطوط راه‌آهن می‌تواند به تبعات اجتماعی و اقتصادی منفی منجر شود. حفظ و ترمیم به‌موقع و مناسب خطوط ریلی می‌تواند به حفاظت از سرمایه‌های ملی و زیرساختی کمک کرده و بودجه بیشتری برای احداث خطوط جدید فراهم آورد. یکی از شاخص‌های معتبر برای ارزیابی کیفیت خط آهن، سختی قائم خط است. سختی قائم خط به رابطه بین نیروی اعمال‌شده و جابه‌جایی خطوط اطلاق می‌شود و معمولاً به‌صورت نسبت بار وارده به ریل بر جابه‌جایی آن اندازه‌گیری می‌شود. این پارامتر می‌تواند به‌صورت ایستایی یا پیوسته اندازه‌گیری گردد. تغییرات در سختی قائم و مقادیر افراطی آن، چه به سمت زیاد و چه به سمت کم، می‌تواند بر روند خرابی مسیر تأثیرگذار باشد و به تبع آن، هزینه‌های نگهداری و تعمیر را تحت تأثیر قرار دهد (کای و شو، ۲۰۱۰). یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر عملکرد خطوط بالاستی، مقاومت جانبی خط است. مقاومت جانبی خطوط ریلی به مقاومت در برابر نیروهای جانبی واردشده به موازات محور تراورس‌ها یا عمود بر محور اصلی ریل اشاره دارد که این نیروها عمدتاً ناشی از نیروهای تماس چرخ و ریل، نیروهای ناشی از

از قطار تعمیر و نگهداری مکانیزه خطوط (MDZ) است. این روش برای نخستین بار در سال ۱۹۶۵ توسط راه آهن فدرال اتریش و با همکاری نزدیک شرکت پلاسر و تئورر معرفی شد. هدف اصلی این روش، افزایش کارایی و بهره‌وری ماشین‌آلات از طریق به‌کارگیری گروهی از ماشین‌ها به‌طور متوالی بود. استفاده از قطارهای تعمیراتی به مدیران خطوط این امکان را می‌دهد که از مجموعه‌ای از ماشین‌آلات برای نگهداری و تعمیر خطوط بهره‌برداري کنند. این روش به‌طور قابل توجهی موجب افزایش سرعت و کارایی عملیات شده و زمان مسدودی خطوط آهن را به حداقل می‌رساند (سلیگ، ۱۹۹۴).

۳-۱. ماشین زیرکوب^۲

لایه بالاست در معرض بارهای دینامیک و تکراری ناشی از وسایل نقلیه قرار دارد که موجب تخریب ذرات بالاست، شامل شکستگی و ساییدگی می‌شود. این تخریب می‌تواند منجر به معایب زیر بالاست، آلودگی بالاست و تغییر شکل پلاستیک بستر شود. خرابی لایه بالاست، هندسه مسیر را تغییر می‌دهد و به تبع آن، منجر به مشکلاتی نظیر سیر نامطلوب، تشدید تعامل چرخ و ریل، و در بدترین حالت، بروز مسائل ایمنی مانند خارج شدن از ریل می‌شود. برای تراز و اصلاح هندسی مسیر، از ماشین‌های زیرکوب استفاده می‌شود. زیرکوبی خط با این ماشین‌ها، مهم‌ترین عملیات برای پر کردن شکاف‌های بالاست و یکنواخت کردن لایه بالاست است. عدم انجام عملیات زیرکوبی می‌تواند به افزایش کرنش‌های تجمعی قائم لایه‌ها با افزایش ترافیک عبوری منجر شود. عملیات زیرکوبی معمولاً با استفاده از ماشین‌های زیرکوب و کلنگ‌های ارتعاشی انجام می‌شود که به ارتقاء کیفیت و دوام لایه بالاست کمک می‌کنند (گو و همکاران، ۲۰۲۱).

سرعت بیشتر به‌منظور کاهش زمان مسدودی‌ها، مدیران نگهداری و تعمیرات خطوط ریلی را به استفاده از ماشین‌آلات و مکانیزه کردن این عملیات سوق می‌دهد. استفاده از ماشین‌آلات مکانیزه در عملیات نگهداری بر پارامترهای کلیدی پایداری خطوط ریلی بالاستی، نظیر مقاومت جانبی و سختی قائم، تأثیرگذار است. آگاهی از تأثیرات این ماشین‌آلات بر فاکتورهای پایداری خطوط می‌تواند به مهندسان خط کمک کند تا وضعیت خط را پس از انجام عملیات نگهداری ارزیابی کرده و برنامه‌ریزی‌های لازم برای اقدامات پس از نگهداری را به‌طور مؤثر انجام دهند (وانگ و همکاران، ۲۰۱۶).

سختی قائم خط یکی از پارامترهای کلیدی در مهندسی خطوط راه‌آهن است که به‌ویژه در طراحی و نگهداری خطوط ریلی بالاستی اهمیت ویژه‌ای دارد. این پارامتر به رابطه بین نیروی اعمال‌شده و جابه‌جایی خط اشاره دارد. اصطلاح سختی کلی یا جامع زمانی به‌کار می‌رود که تمامی اجزای سازه‌ای خط در نظر گرفته شده باشد و معمولاً به‌صورت نسبت بار وارده به ریل بر جابه‌جایی ریل اندازه‌گیری می‌شود. سختی کلی خط تحت تأثیر دو پارامتر اصلی قرار دارد: فرکانس بار اعمال‌شده و محل مورد نظر در طول خط. تغییرات در سختی خط و مقادیر افراطی آن (چه زیاد و چه کم) می‌تواند بر روند خرابی مسیر تأثیرگذار باشند. سختی کلی خط قابلیت اندازه‌گیری به‌صورت استاتیک و دینامیک را داراست (سلیگ و لی، ۱۹۹۴).

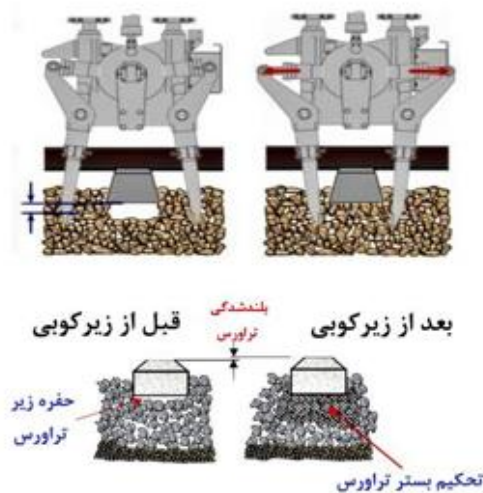
۳. استفاده از ماشین‌آلات نگهداری خط

یکی از روش‌های پیشرفته و پرطرفدار در نگهداری مکانیزه خطوط ریلی که به‌ویژه در کشورهای توسعه‌یافته در صنعت حمل‌ونقل ریلی به‌کار گرفته می‌شود، استفاده

²- Tamping Machine

مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل، سال دهم، پیاپی چهارم، زمستان ۱۴۰۳

¹- Plasser & Theurer



شکل ۱. وضعیت لایه بالاست قبل و بعد از عملیات زیرکوبی (سلیگ، ۱۹۹۴)

۲-۳. ماشین خط آرا^۱

تقریباً طی انجام تمامی عملیات نگهداری و تعمیر خطوط اعم از زیرکوبی، سرند بالاست و ... جهت تنظیم هندسه مسیر، به اضافه کردن بالاست جدید به خط نیاز پیدا می‌شود. از طرف دیگر، جهت حصول به وضعیت هندسی صحیح خط آهن، دستیابی به وضعیت مناسب و استاندارد پروفیل بستر بالاست ضروری است.

متأسفانه هنگام انتقال بالاست به محل سایت عملیاتی و تخلیه آن، امکان توزیع یکنواخت و مناسب در هر نقطه از خط وجود ندارد. در نتیجه، در بعضی از قسمت‌های خط، بالاست اضافه شده ناکافی و در بعضی قسمت‌ها بیشتر از مقدار نیاز است. روش‌های دستی پخش و آرایش لایه بالاست تنها می‌توانند در محدوده کوچکی اثربخش باشند و تراز نمودن یکنواخت بستر بالاست در کل طول خطوط تنها در صورت استفاده از ماشین‌آلات خط آرا انجام پذیر می‌باشد (ذاکری سردودی و رضازاده زواردهی، ۱۳۹۴).

۳-۳. ماشین پایدارساز دینامیک خط^۲

این دستگاه به‌عنوان مکمل ماشین‌های زیرکوب و سرند بالاست مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از عملیات زیرکوبی و سرند بالاست، چیدمان دانه‌های بالاست به هم ریخته و پس از عبور قطار از روی خط، نشست‌های اولیه نامنظمی در خط ایجاد می‌گردد که موجب توسعه خرابی‌های هندسی و کاهش کیفیت عملیات تعمیر و نگهداری خطوط ریلی می‌شود. لذا، به‌منظور جلوگیری از نشست نامنظم خط ضروری است پس از انجام عملیات زیرکوبی یا سرند بالاست تمامی نقاط خط به‌صورت کنترل‌شده و به میزان معینی فشرده گردند. بنابراین، به جهت افزایش دقت عملیات تعمیر و نگهداری با ماشین‌آلات زیرکوب و سرند بالاست اصلاح و تثبیت مناسب هندسه خط و تثبیت ادوات روسازی از ماشین پایدارساز استفاده می‌شود (اسولد، ۲۰۰۱).

عمل استقرار بالاست را می‌توان نوعی تراکم دینامیک دانست. شکل ۲، نمایی از واحد پایدارساز و نحوه اعمال نیروهای قائم و افقی را نشان می‌دهد. این ماشین شامل دو واحد پایدارساز می‌باشد که زیرقالب اصلی ماشین حرکت می‌کنند. هر واحد دارای دو عدد دیسک غلتکی

¹ - Regulation Machine

² - Dynamic Track Stabilizer

هر واحد پایدارساز توسط دو سیلندر هیدرولیکی که زیربندنه ماشین قرار دارند به چهار عدد چرخ کوچک که روی ریل حرکت می‌کنند، منتقل می‌کند (سلیگ، ۱۹۹۴).

لبه‌دار می‌باشد که به قسمت خارجی ریل متصل شده و با تاج ریل در تماس است و کوپلاژ خط را در جهت افقی به لرزش درمی‌آورد، بار قائم اعمالی به خط برای



شکل ۲. ماشین پایدارساز خط

است. برای محاسبه سختی از رابطه (۱) استفاده شده است.

$$K = \frac{P_{35} - P_{7.5}}{S_{35} - S_{7.5}} \quad (1)$$

که در آن، K سختی خط ($\frac{kN}{mm}$) و P_{35} و $P_{7.5}$ به ترتیب بار قائم ۳۵ و ۷/۵ کیلونیوتن و S_{35} و $S_{7.5}$ نشست‌های متناظر با بارهای قائم ۳۵ و ۷/۵ کیلونیوتن می‌باشد. با توجه به نتایج، پس از تثبیت خط، جابه‌جایی قائم تراورس کاهش پیدا کرده و سختی آن افزایش پیدا می‌کند. بعد از عبور ماشین پایدارساز، سختی از $\frac{kN}{mm}$ $\frac{24}{3}$ به $\frac{kN}{mm}$ $\frac{66}{1}$ رسیده که افزایش $\frac{kN}{mm}$ $\frac{41}{8}$ سختی را نشان می‌دهد که معادل افزایش ۱۷۲ درصدی سختی خط می‌باشد. در حین انجام تثبیت خط، روند سختی دینامیک خط افزایشی می‌باشد و بیشترین سختی

۴. مروری بر مطالعات انجام شده

در تحقیقی که توسط گرب و ماری (۱۹۹۷) انجام شده، هدف، بررسی اثر ماشین پایدارساز بر مشخصات قوس‌های مسیر می‌باشد. خط انتخاب شده یکی از خطوط ریلی صادرات زغال‌سنگ سنگین در آفریقای جنوبی می‌باشد. در این خط، ۸ قوس انتخاب شدند که چهار قوس آن در خط بین Piet Retief و Vryheid و چهار قوس در خط بین Vryheid و Ulundi قرار داشتند. نتیجه به دست آمده حاکی از میزان حداکثر نشست ۱۲ میلی‌متر بود. همچنین، در این تحقیق، نتایج نشان می‌دهد که استفاده از تثبیت‌کننده باعث ایجاد بالاست یکتواخت-تری می‌شود. در تحقیق هونگ و همکاران (۲۰۲۳)، اثر ماشین پایدارساز بر سختی قائم به صورت میدانی بررسی شد. در بخش میدانی، از ماشین زیرکوب DWL-48 و برای پایدارساز از ماشین WD-320 استفاده شده

دینامیک ثبت شده بعد از تثبیت خط با پایدارساز می باشد که مقدار آن $\frac{kN}{mm}$ ۹۱/۵ است که نشان می دهد عبور ماشین پایدارساز از روی خط بعد از زیرکوبی باعث بهبود سختی خط می شود. در تحقیق دیگری که توسط شیائو و همکاران (۲۰۲۳) انجام شد، هدف، بررسی اثر ماشین پایدارساز در خطوط جدید احداث شده می باشد. در این آزمایش که به صورت میدانی انجام شد، خطی در نزدیکی ایستگاه Fengtai در Beijing انتخاب شد، که دارای مشخصات ریل CHN60N و پابند Type-I و تراورس بتنی Type-II می باشد. در این آزمایش، ماشین زیرکوب و پایدارساز DWL-48 به یکدیگر متصل هستند. برای محاسبه سختی قائم از روابط (۲) و (۳) استفاده شد که در آنها K_1 سختی خط در حین بارگذاری تراورس ($\frac{kN}{mm}$)، P35 و P7.5 به ترتیب بار قائم ۳۵ و ۷/۵ کیلونیوتن، S35 و S7.5 نشست های متناظر با بارهای قائم ۳۵ و ۷/۵ کیلونیوتن هنگام بارگذاری، K_2 سختی خط در حین باربرداری از تراورس ($\frac{kN}{mm}$)، P35 و P7.5 به ترتیب بار قائم ۳۵ و ۷/۵ کیلونیوتن و S35 و S7.5 نشست های متناظر با بارهای قائم ۳۵ و ۷/۵ کیلونیوتن هنگام باربرداری می باشد.

مقدار سختی خط قبل از زیرکوبی $\frac{kN}{mm}$ ۴/۹ می باشد که بعد از زیرکوبی به مقدار $\frac{kN}{mm}$ ۵۳/۹ می رسد که دلیل آن تراکم زیر تراورس ها می باشد و به دلیل اینکه خط جدید احداث بوده و تراکم اولیه آن کم بوده با زیرکوبی تراکم آن افزایش یافته و سختی خط نیز افزایش پیدا کرده است. پس از عبور ماشین پایدارساز، سختی به

$\frac{kN}{mm}$ ۸۲/۹ رسیده است که مقادیر سختی بعد از عملیات های نگهداری (زیرکوبی و پایدارساز) در حالت بارگذاری به ترتیب $\frac{kN}{mm}$ ۱۰ و $\frac{kN}{mm}$ ۱۵/۹ برابر مقدار سختی قبل از زیرکوبی می باشد. در مرحله باربرداری، سختی خط قبل از زیرکوبی $\frac{kN}{mm}$ ۱۶/۱ بوده که بعد از زیرکوبی به $\frac{kN}{mm}$ ۱۹۰/۹ رسیده است. بعد از عبور ماشین پایدارساز، مقدار سختی به $\frac{kN}{mm}$ ۱۵۶/۶ رسیده است. مقادیر سختی بعد از عملیات نگهداری (زیرکوبی و پایدارساز) در حالت باربرداری به ترتیب $\frac{kN}{mm}$ ۱۰ و $\frac{kN}{mm}$ ۱۵/۹ برابر مقدار سختی قبل از زیرکوبی می باشد. وانگ و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که عملیات تثبیت دینامیک می تواند به طور مؤثری عملکرد مکانیکی بستر بالاست را با استفاده از تثبیت کننده بهبود بخشد. برای بهبود اثر تثبیت، یک مدل شبیه سازی دینامیک جفت انعطاف پذیر صلب از سیستم بستر تثبیت کننده- بالاست با توجه به ساختار واقعی تثبیت کننده ایجاد شد و تأثیر پارامترهای عملیاتی مختلف تثبیت کننده بر عملیات تثبیت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتیجه زیرکوبی نشان دهنده افزایش سختی خط به میزان ۱۷۱/۱۸ درصد است، که نشان دهنده بهبود قابل توجهی در استحکام و پایداری زیرساخت های ریلی می باشد.

۵. طرح مسئله و روش تحقیق

روش تحقیق در این مقاله به صورت میدانی می باشد. بدین صورت که با هماهنگی های انجام شده با اداره کل خط و ابنیه راه آهن جمهوری اسلامی ایران، خط شماره یک ایستگاه کرج جهت انجام این آزمایش انتخاب گردید که با توجه به اطلاعات موجود اداره خط ناحیه کرج، خط شماره یک ایستگاه کرج ۵ سال زیرکوبی نشده است.

مقدار سختی خط قبل از زیرکوبی $\frac{kN}{mm}$ ۴/۹ می باشد که بعد از زیرکوبی به مقدار $\frac{kN}{mm}$ ۵۳/۹ می رسد که دلیل آن تراکم زیر تراورس ها می باشد و به دلیل اینکه خط جدید احداث بوده و تراکم اولیه آن کم بوده با زیرکوبی تراکم آن افزایش یافته و سختی خط نیز افزایش پیدا کرده است. پس از عبور ماشین پایدارساز، سختی به

$$K_1 = \frac{P_{35} - P_{7.5}}{S_{35} - S_{7.5}} \quad (2)$$

$$K_2 = \frac{P_{35} - P_{7.5}}{S_{35} - S_{7.5}} \quad (3)$$

روش تحقیق در این مقاله به صورت میدانی می باشد. بدین صورت که با هماهنگی های انجام شده با اداره کل خط و ابنیه راه آهن جمهوری اسلامی ایران، خط شماره یک ایستگاه کرج جهت انجام این آزمایش انتخاب گردید که با توجه به اطلاعات موجود اداره خط ناحیه کرج، خط شماره یک ایستگاه کرج ۵ سال زیرکوبی نشده است.

قائم خط بعد از عملیات زیرکوبی از روی تراورس‌های مشخص شده ثبت گردید. در مرحله آخر، برای بررسی اثر ماشین پایدارساز، ماشین پایدارساز دینامیکی طول معینی از خط (همان طولی از خط که ماشین زیرکوب، زیرکوبی کرده بود) را پس از عملیات زیرکوبی تثبیت کرد و داده‌های مورد نیاز ثبت گردید. پس از انجام تمام آزمایش‌ها در سه مرحله قبل از زیرکوبی، بعد از زیرکوبی، بعد از پایدارساز، داده‌ها تحلیل گردید و نتایج آن ارزیابی شد.

پس از انتخاب خط، برای انجام آزمایش‌ها تراورس‌هایی جهت اندازه‌گیری سختی قائم خط انتخاب گردید. سپس، برای پی بردن به اثرات ماشین‌آلات نگهداری بر سختی قائم خط و پی بردن از وضعیت خط قبل از کار کردن ماشین‌آلات، این فاکتور قبل از عبور ماشین زیرکوب روی تراورس‌های مشخص شده اندازه‌گیری و ثبت گردید. در مرحله بعد، برای بررسی اثر ماشین زیرکوب، زیرکوب طول معینی از خط (۷۵ متر از خط یک ایستگاه کرج) را زیرکوبی کرد و داده‌های مورد نیاز برای سختی



شکل ۳. موقعیت ایستگاه کرج



(ب)



(الف)

شکل ۴. الف) تصویر لکوموتیو و واگن تخت لبه کوتاه مورد استفاده در تست ب-نصب ادوات محاسبه جابجایی قائم روی خط

معادله تیر روی بستر ارتجاعی به صورت زیر بیان می شود (میرمحمدصادقی، ۱۳۹۹):

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + kw(x) = P \quad (4)$$

که E مدول یانگ ($\frac{N}{mm^2}$)، I ممان اینرسی ریل (mm^4)، w جابه‌جایی قائم ریل (mm)، k مدول خط ($\frac{N}{mm^2}$) و P : بار چرخ (N) است. حل این معادله به صورت زیر است:

$$w(x) = \frac{P\beta}{2k} e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$$

در این روش، جابه‌جایی حداکثر قائم تراورس در زیر بار چرخ را به دست آورده و با توجه به رابطه (۵) سختی خط محاسبه می‌شود:

$$k = \frac{1}{4} \sqrt[3]{\frac{P^4}{EIw_m^4}} \quad (5)$$

برای محاسبه و به دست آوردن سختی قائم خط، ۴ تراورس پشت سر هم انتخاب گردید تا جابه‌جایی آن‌ها در سه مرحله قبل از زیرکوبی، بعد از زیرکوبی و بعد از پایدارساز اندازه‌گیری شود و با به دست آوردن جابه‌جایی تراورس‌ها در هر مرحله، با توجه به رابطه (۵) سختی خط بر حسب kN/mm در هر مرحله محاسبه می‌شود.

۶. محاسبه سختی قائم خط براساس تجهیزات

دقیق VDT L - روش تیر بر بستر ارتجاعی

در این سری از آزمایش‌ها از تجهیزات LVDT برای بررسی و سنجش تغییرمکان قائم خط استفاده گردیده است. همانطور که در ادامه شرح داده خواهد شد، این سری از تست‌ها در چند نقطه مختلف صورت می‌گیرد. داده‌ها و اطلاعات حاصل از این آزمایش‌ها علاوه بر اینکه میزان نشست قائم خط را به صورت تاریخچه زمانی در زیر بار عبوری نشان می‌دهند، می‌توانند برای محاسبه مدول بستر ریل نیز مورد استفاده قرار گیرند. با توجه به مقاله کومارا و هایانو (۲۰۱۶) مقدار بهینه برای مدول خط $34 MPa$ و $69 MPa$ می‌باشد. برای محاسبه سختی قائم، روش‌های میدانی متعددی وجود دارد. به عنوان مثال، در تحقیق باربیر و همکاران (۲۰۲۱) از روش محاسبه مساحت تغییرمکان حوضچه با بار سنگین و سبک با یک عدد LVDT به روش دینامیک استفاده شده است. در مقاله مودولوس (۱۹۹۴) از روش محاسبه مساحت حوضچه تغییرمکان بار سنگین و سبک به روش دینامیک و استاتیک با استفاده از ۶ عدد LVDT و در مقاله عباسی و همکاران (۲۰۲۴) از روش محاسبه مساحت تغییرمکان حوضچه با بار سنگین و سبک به روش دینامیک با ۴ عدد LVDT، برای به دست آوردن مدول خط استفاده شده است. اما در این مقاله از جابه‌جایی یک تراورس به صورت دینامیک استفاده شده است و با توجه به رابطه تیر روی بستر ارتجاعی سختی قائم خط محاسبه گردید.



شکل ۵. چهار تراورس مشخص شده برای اندازه‌گیری سختی قائم خط آهن بالاستی

۷. تحلیل نتایج سختی قائم

۱-۷. قبل از زیرکوبی

با توجه به بررسی‌های انجام شده، خط شماره یک ایستگاه کرج، یک خط قدیمی می‌باشد که حدوداً ۵ سال زیرکوبی نشده است. از این رو، انتظار می‌رود خط نشست خود را در طول این مدت با عبور قطارهای مسافری و باری انجام داده باشد و دارای پایداری بالایی در راستای

قائم باشد. پس انتظار می‌رود در مرحله قبل از زیرکوبی، خط دارای جابه‌جایی‌های کمی در راستای قائم و سختی زیاد باشد. با توجه به ابزاربندی ۴ تراورس پشت سر هم و تحلیل نتایج جابه‌جایی تراورس‌ها در راستای قائم، بعد از برداشت داده‌ها، جابه‌جایی‌سنج‌های (LVDT) تراورس اول و چهارم دارای نویز و خطای بسیاری در این مرحله بوده و به‌اجبار، این دو تراورس از تحلیل‌ها حذف شدند.



(ب)

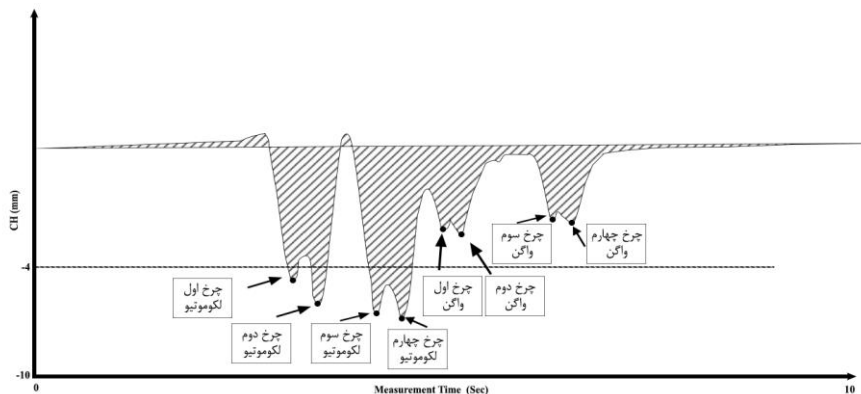


(الف)

شکل ۶. وسایل سنجش خط: الف) LVDT و ب) دیتالاگر

بودن بار محوری لوکوموتیو نسبت به واگن بیشتر می‌باشد. مقدار حداکثر جابه‌جایی تراورس‌های دوم و سوم در راستای قائم در مرحله قبل از زیرکوبی هنگام عبور چرخ‌های قطار بارگذاری از روی تراورس‌های دوم و سوم در جدول ۱ آورده شده است.

شکل ۷، نمونه عبور قطار بارگذاری (یک عدد لوکوموتیو چهار محوره و یک عدد واگن لبه کوتاه) از تراورس سوم در مرحله قبل از زیرکوبی را نشان می‌دهد. با توجه به عبور قطار با سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت، جابه‌جایی برای ۴ چرخ لوکوموتیو نسبت به واگن، به دلیل زیاد



شکل ۷. عبور قطار بارگذاری از روی تراورس سوم قبل از زیرکوبی

جدول ۱. نتایج جابه‌جایی قائم برای تراورس‌های دوم و سوم قبل از زیرکوبی

نوع بار	شماره چرخ	جابه‌جایی قائم تراورس دوم (mm)	جابه‌جایی قائم تراورس سوم (mm)
بار سنگین	چرخ اول	۰٫۳	۰٫۴۴
	چرخ دوم	۰٫۳۳۶	۰٫۵۲
	چرخ سوم	۰٫۳۷۲	۰٫۵۴۸
	چرخ چهارم	۰٫۳۷۲	۰٫۵۷۶
بار سبک	چرخ اول	۰٫۲۰۴	۰٫۲۹۲
	چرخ دوم	۰٫۲۰۸	۰٫۳۰۸
	چرخ سوم	۰٫۱۸۴	۰٫۲۶۸
	چرخ چهارم	۰٫۱۹۲	۰٫۲۹۲

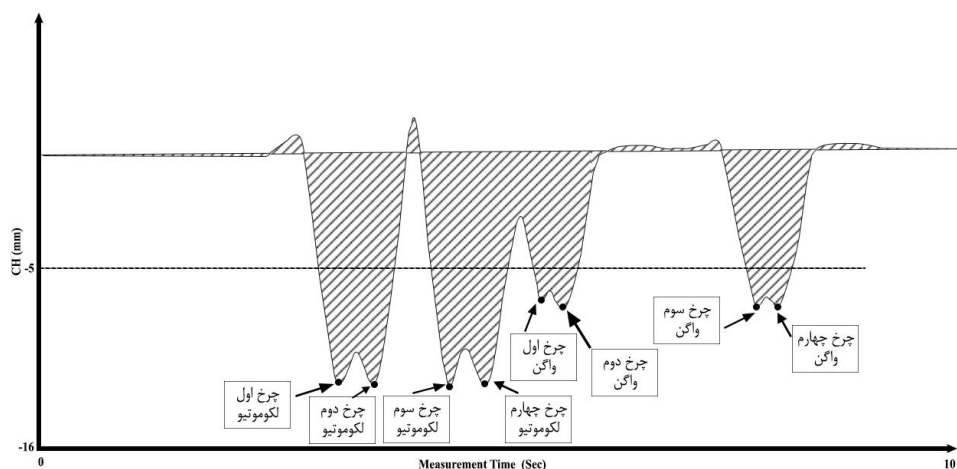
۷-۲. بعد از زیرکوبی

پس از عبور ماشین زیرکوب از محل مشخص شده برای اندازه‌گیری جابه‌جایی تراورس‌ها، قطار بارگذاری از محل تراورس‌ها عبور کرده و جابه‌جایی تراورس‌های دوم و سوم برداشت شد. به دلیل نفوذ کلنگ‌ها به لایه بالاست و برهم زدن وضعیت دانه‌های بالاست نسبت به یکدیگر و کاهش

برای محاسبه سختی از رابطه (۵) استفاده شده است. برای محاسبه سختی از بار قائم برای لوکوموتیو (۹ تن) و برای واگن (۳ تن)، ممان اینرسی ریل ($30.55 \times 10^6 \text{ mm}^4$)، مدول یانگ ریل (210000^6 N/mm^2) و حداکثر جابه‌جایی تراورس‌ها با توجه به نتایج به دست آمده در جدول ۱ استفاده شده است.

جدول ۲ آورده شده است. در شکل‌های ۹ و ۱۰، میزان کاهش سختی در مرحله بعد از زیرکوبی نسبت به قبل از زیرکوبی آورده شده است. با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰ بازه کاهش سختی برای تراورس دوم بین ۶۷٫۷ تا ۷۸٫۱ درصد و برای تراورس سوم بین ۵۷ تا ۷۱٫۸ درصد می‌باشد. این موضوع نیز در مقالات شی و همکاران (۲۰۲۲) و گائو و همکاران (۲۰۲۳) اشاره شده است.

تراکم بالاست نسبت به قبل از زیرکوبی، جابه‌جایی‌های به‌دست آمده برای تراورس‌های دوم و سوم نسبت به مرحله قبل از زیرکوبی افزایش پیدا کرده است. به دلیل رابطه معکوس بین جابه‌جایی و سختی خط، با افزایش جابه‌جایی‌ها در این مرحله، سختی‌های به‌دست‌آمده برای تراورس‌های دوم و سوم کاهش پیدا کرده است. نتایج سختی برای تراورس‌های دوم و سوم در مرحله بعد از زیرکوبی و میزان کاهش آن نسبت به قبل از زیرکوبی در

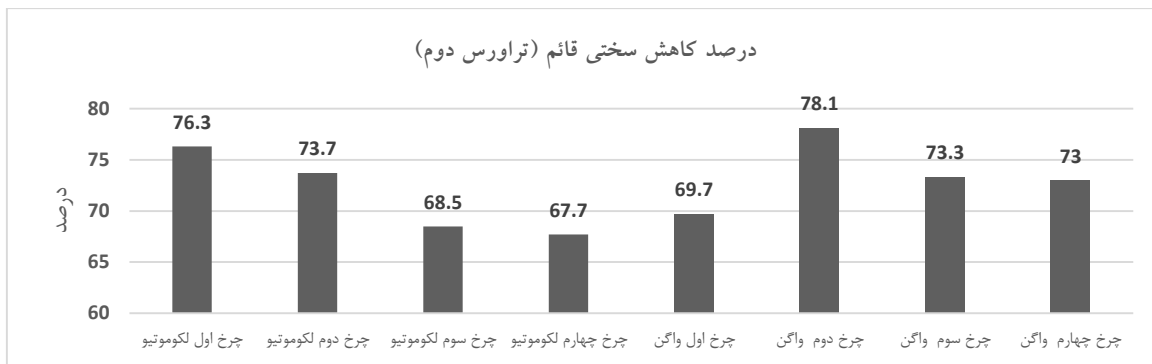


شکل ۸. عبور قطار بارگذاری از روی تراورس سوم بعد از زیرکوبی

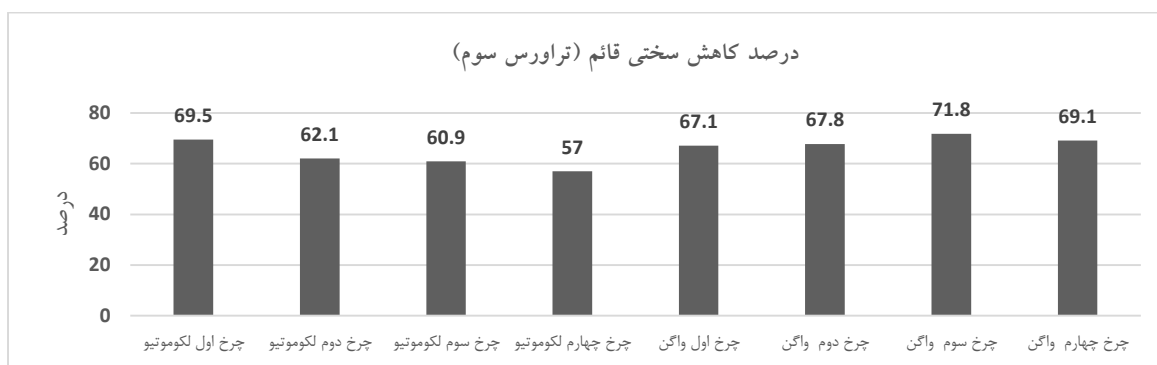
جدول ۲. نتایج سختی برای تراورس‌های دوم و سوم و تغییرات سختی بعد از زیرکوبی

میزان کاهش	بعد از زیرکوبی		قبل از زیرکوبی		شماره چرخ	نوع بار
	میزان کاهش تراورس سوم (درصد)	مقدار سختی زیر تراورس سوم (kN/mm)	مقدار سختی زیر تراورس دوم (kN/mm)	مقدار سختی زیر تراورس سوم (kN/mm)		
۶۹٫۰۵	۷۶٫۳	۴۸٫۲	۶۲٫۳	۱۵۸٫۱	۲۶۳٫۴	چرخ اول
۶۲٫۱	۷۳٫۷	۴۸	۵۹٫۰۵	۱۲۶٫۰۵	۲۲۶٫۴	چرخ دوم
۶۰٫۹	۶۸٫۰۵	۴۶٫۱	۶۲٫۳	۱۱۸	۱۹۷٫۷	چرخ سوم
۵۷	۶۷٫۷	۴۷٫۰۵	۶۳٫۹	۱۱۰٫۴	۱۹۷٫۷	چرخ چهارم
۶۷٫۱	۶۹٫۷	۲۰٫۸	۳۰٫۸	۶۳٫۱	۱۰۱٫۸	چرخ اول
۶۷٫۸	۷۸٫۱	۱۸٫۹	۲۱٫۷	۵۸٫۸	۹۹٫۲	چرخ دوم
۷۱٫۸	۷۳٫۳	۲۰	۳۱٫۱	۷۰٫۸	۱۱۶٫۸	چرخ سوم
۶۹٫۱	۷۳	۱۹٫۰۵	۲۹٫۸	۶۳٫۱	۱۱۰٫۴	چرخ چهارم

جدول ۲. نتایج سختی برای تراورس‌های دوم و سوم و تغییرات سختی بعد از زیرکوبی



شکل ۹. تغییرات سختی بعد از زیرکوبی برای تراورس دوم

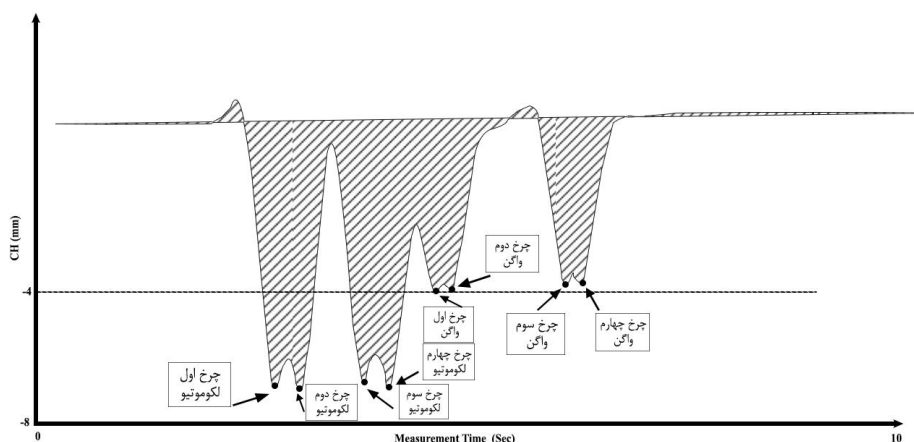


شکل ۱۰. تغییرات سختی بعد از زیرکوبی برای تراورس سوم

۳-۷. بعد از پایدارسازی

شکل ۱۱، عبور قطار بارگذاری (یک عدد لکوموتیو ۴ محوره و یک عدد واگن لبه‌کوتاه) از تراورس دوم در مرحله بعد از پایدارسازی را نشان می‌دهد.

پس از عبور ماشین پایدارساز دینامیک از محل مشخص شده برای اندازه‌گیری جابه‌جایی تراورس‌ها، قطار بارگذاری از محل تراورس‌ها عبور کرده و جابه‌جایی تراورس‌های دوم و سوم برداشت شد.



شکل ۱۱. عبور قطار بارگذاری از روی تراورس دوم بعد از پایدارسازی

به همین دلیل، مقادیر جابه‌جایی تراورس‌ها در مرحله بعد از پایدارسازی نسبت به حالت بعد از زیرکوبی کمتر و نسبت به مرحله قبل از زیرکوبی بیشتر می‌باشد. این موضع نیز در مقالات یان و یانگ (۲۰۲۱) و هونگ و همکاران (۲۰۲۳) اشاره شده است.

به دلیل بارهای قائم و ارتعاش در راستای افقی کوپلاژ خط توسط ماشین پایدارساز، خلل و فرج به وجود آمده در لایه‌ی بالاست به دلیل زیرکوبی تا حدی از بین رفته و لایه‌ی بالاست نسبت به مرحله بعد از زیرکوبی متراکم‌تر می‌شود. اما به تراکم مرحله قبل از زیرکوبی نمی‌رسد.

جدول ۳. نتایج سختی برای تراورس دوم و سوم و تغییرات سختی بعد از پایدارسازی

میزان افزایش		بعد از پایدارسازی		بعد از زیرکوبی		شماره چرخ	نوع بار
میزان افزایش تراورس سوم (درصد)	میزان افزایش تراورس دوم (درصد)	مقدار سختی زیر تراورس سوم (kN/mm)	مقدار سختی زیر تراورس دوم (kN/mm)	مقدار سختی زیر تراورس سوم (kN/mm)	مقدار سختی زیر تراورس دوم (kN/mm)		
۳۷	۴۵	۶۵,۹	۹۰,۵۸	۴۸,۲	۶۲,۳	چرخ اول	بار سنگین (لوکوموتیو)
۳۳	۵۴	۶۴	۹۲,۰۵	۴۸	۵۹,۹	چرخ دوم	
۴۷	۴۹	۶۷,۵۹	۹۲,۸	۴۶	۶۲,۳	چرخ سوم	
۳۴	۴۴	۶۳,۴۹	۹۲,۰۵	۴۷,۵	۶۳,۹	چرخ چهارم	
۴۲	۳۱	۲۹,۵۴	۴۰,۴	۲۰,۸	۳۰,۸	چرخ اول	بار سبک (واگن)
۵۵	۸۱	۲۹,۲۴	۳۹,۳۷	۱۸,۹	۲۱,۷	چرخ دوم	
۵۱	۳۹	۳۰	۴۳,۲	۲۰	۳۱,۱	چرخ سوم	
۶۱	۴۵	۳۱,۴۷	۴۳,۲	۱۹,۵	۲۹,۸	چرخ چهارم	

۸. نتیجه‌گیری

شود. این مسائل به افزایش هزینه‌های تعمیر، کاهش سرعت قطار، ناراحتی مسافران و فرسایش بیشتر خطوط راه‌آهن منجر می‌شود. پس از عملیات تثبیت مسیر، سختی قائم خط افزایش حدود ۴۷ درصدی را نشان می‌دهد. این به دلیل فشار عمودی و ارتعاشات افقی ماشین تثبیت‌کننده است که موجب افزایش چگالی بالاست و بهبود تماس بین دانه‌های بالاست و بستر می‌شود. همچنین، فضای خالی ایجاد شده در لایه بالاست بهبود یافته و کیفیت بستر تقویت شده است. استفاده از ماشین‌های تثبیت‌کننده دینامیک پس از زیرکوبی منجر به افزایش فاصله زمانی نگهداری، بهبود راحتی سفر و کاهش خطر خروج از ریل می‌شود.

پارامتر سختی قائم خط آهن بالاستی نقش اساسی در ایمنی و راحتی مسیرهای راه‌آهن دارد. در عملیات نگهداری با استفاده از ماشین‌آلات خاص، این پارامتر می‌تواند تغییر کند. در این زمینه، در ایستگاه راه‌آهن کرج، تأثیر ماشین‌های تثبیت‌کننده مسیر و زیرکوب بر تغییرات سختی قائم خط آهن بالاستی از طریق آزمایش‌های میدانی مورد بررسی قرار گرفت. در خطوط راه‌آهن قدیمی، پس از انجام عملیات زیرکوبی، سختی قائم خط کاهش حدود ۶۹ درصدی را نشان می‌دهد. این کاهش به دلیل نفوذ تیغه‌های ماشین کوبنده به بستر بالاست و کاهش تراکم لایه بالاست است. عملیات زیرکوبی می‌تواند به کاهش ظرفیت بستر بالاست، نشست غیر یکنواخت و ناهنجاری‌های هندسی منجر

۹. مراجع

- Abbasi, A., Zakeri, J. A., Norouzi, E. and Mosayebi, S. A. 2024. "Field investigation on the effect of the tamping machine and dynamic track stabilizer on changing the rail support modulus". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: J. Rail Rapid Transit, 09544097241255718.
- Barbir, O., Adam, D., Kopf, F., Pistor, J., Antony, B. and Auer, F. 2021. "In-situ ballast condition assessment by tamping machine integrated measurement system". IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.
- Cai, C. and Xu, P. 2010. "Dynamic analysis of key design parameters for ballastless track of high-speed railway". J. Southwest Jiaotong University, 45(4): 493-497.
- Esveld, C. 2001. "Modern Railway Track". MRT-Productions, a subsidiary of Esveld Consulting Services BV.
- Gao, L., Shi, S., Zhong, Y., Xu, M. and Xiao, Y. 2023. "Real-time evaluation of mechanical qualities of ballast bed in railway tamping maintenance". Int. J. Mech. Sci., 248: 108192.
- Gräbe, H. and Maree, J. S. 1997. "Use of a dynamic track stabiliser to improve track maintenance and optimisation of track tamping". In Proceedings of the 6th International Heavy Haul Association Conference, Cape Town, South Africa.
- Guo, Y., Markine, V. and Jing, G. 2021. "Review of ballast track tamping: Mechanism, challenges and solutions". Constr. Build. Mater., 300: 123940.
- Hong, X., Wang, X., Zhang, Z., Nadakatti, M. M., Jin, J. and Chi, Y. 2023. "Dynamic stability model and analysis of mechanical properties for railway operations". Comput. Particle Mech., 10(5): 1205-1219.
- Kumara, J. J. and Hayano, K. 2016. "Deformation characteristics of fresh and fouled ballasts subjected to tamping maintenance". Soils Found., 56(4): 652-663.
- Selig, E. 1994. "Track Geotechnology and Substructure Management". Thomas Telford.
- Selig, E. and Li, D. 1994. "Track modulus: Its meaning and factors influencing it". Transport. Res. Record, 1470: 47-54.
- Shi, S., Gao, L., Cai, X., Xiao, Y. and Xu, M. 2022. "Mechanical characteristics of ballasted track under different tamping depths in railway maintenance". Transport. Geotech., 35: 100799.
- Vale, C., Ribeiro, I. M. and Caçada, R. 2012. "Integer programming to optimize tamping in railway tracks as preventive maintenance". J. Transport. Eng., 138(1): 123-131.
- Wang, P., Wang, L., Chen, R., Xu, J., Xu, J. and Gao, M. 2016. "Overview and outlook on railway track stiffness measurement". J. Modern Transport., 24: 89-102.
- Wang, J., Wang, L., Huang, H., Chen, T., Jiang, W., Zhao, Z., Qin, J. and Jia, T. 2023. "Stabilization effect of dynamic stabilizer with different operation parameters". Adv. Mech. Eng., 15(2): 16878132231157166.
- Xiao, H., Zhang, Z., Zhu, Y., Gan, T. and Wang, H. 2023. "Experimental analysis of ballast bed state in newly constructed railways after tamping and stabilizing operation". Constr. Build. Mater., 362: 129772.
- Yan, B. and Yang, J. 2021. "Modeling and parameter optimization of dynamic characteristic variables of ballast bed during operation for dynamic track stabilizer". Complexity, 2021(1); 5519566.

* Corresponding author.

E-mail address: mosayebi@iust.ac.ir

How to cite this article: Norouzi, E., Zakeri, J. A., Abbasi, A. and Mosayebi, S. A. 2025. "Field study of vertical stiffness of ballasted railway track by using the beam on the elastic foundation method". **J. Transport. Infrastruct. Eng., 10(4): 35-50.**

© 2024 The Author(s). Journal of Transportation Infrastructure Engineering Published by Semnan University Press. This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mosayebi@iust.ac.ir

استناد به این مقاله:

نوروزی، ا.، ذاکری، ج.ع.، عباسی، ع. و مسیبی، س.ع. ۱۴۰۳. "مطالعه میدانی سختی قائم خط آهن بالاستی بر اساس روش تیر روی بستر ارتجاعی". مجله مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۱۰(۴): 35-50

© 2024 The Author(s). Journal of Transportation Infrastructure Engineering Published by Semnan University Press. This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)