بررسی میدانی تغییرات سختی جانبی خط آهن در قوس به روش خطی و غیر خطی با استفاده از تراورسهای معمولی و اصطکاکی

جبارعلی ذاکری(مسئول مکاتبات)، دانشیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم وصنعت ایران، تهران، ایران
بهروز میرفتاحی، کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم وصنعت ایران، تهران، ایران
zakeri@iust.ac.ir

دریافت: ۹۱/۰۳/۰۲ پذیرش: ۹۱/۱۱/۲۵

چکیده

یکی از مهم ترین پارامترهایی که می بایست در طول مدت بهره برداری از خط آهن مد نظر قرار گیرد، پایداری جانبی آن است. در طول عمر خط آهن، نیروهای جانبی مختلفی بر آن اعمال می شوند. این نیروها عمود بر محور اصلی خط بوده و ناشی از مولفه جانبی نیروی اصطکاک بین چرخ و ریل، نیروی جانبی وارده از لبه چرخ به ریل و کمانش ریل ناشی از تغییرات نیروی محوری ریل از جمله تغییر دمای ریل است.

هنگام اعمال نیروی جانبی، عوامل مختلفی از جمله ریل، تراورس، بالاست و ادوات اتصال تا حد ممکن از تغییر شکل جانبی خط جلوگیری می کنند. یکی از راههای جلوگیری از تغییر شکل ناخواسته جانبی خط و همچنین کاهش هزینه های هنگفت تعمیر و نگهداری، افزایش سختی جانبی خط است.

در این مطالعه میدانی، ضمن معرفی تراورس بتنی اصطکاکی، با بکارگیری تراورسهای بتنی اصطکاکی و استفاده از روش جابجایی جانبی پانل خط، به بررسی تغییرات سختی جانبی خط آهن با تراورسهای معمولی و اصطکاکی در قوس با شعاع ۲۵۰ متر پرداخته می شود.

نتایج حاصل از بررسیهای میدانی نشان داد که سختی جانبی خط در هنگام بکارگیری تراورسهای بتنی اصطکاکی، حداقل ۷۹/۱ برابر سختی جانبی خط در هنگام بکارگیری تراورسهای بتنی معمولی است. بنابراین با توجه به نتایج آزمایشهای میدانی، می توان به منظور افزایش سختی جانبی خط و در نتیجه کاهش تغییر شکل جانبی آن، از تراورسهای اصطکاکی به جای تراورسهای معمولی استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: خط آهن، مقاومت جانبی، تراورس بتنی اصطکاکی، آزمایش میدانی

۱. مقدمه

در بسیاری از خطوط قدیمی راه آهن، به دلیل عدم امکان تأمین مقاومت جانبی خط آهن، امکان جوشکاری درز ریل در قوس های تند (با شعاع کمتر از ٤٠٠ متر) وجود ندارد و به همین دلیل هزینه زیادی برای عملیات تعمیر و نگهداری صرف می شود و به واسطه آن زمان، انرژی، نیروی انسانی، ادوات و تجهیزات اتلاف می گردد.

در محل درزهای قوسهای خط آهن، خرابی ادوات، لهیدگی تاج و کناره ریل، شکستگی تراورس، خرابی بالاست و ... به وضوح اتفاق می افتد. همچنین در آن قوسها، جابجایی جانبی یکی از زمان برترین و پر هزینه ترین خرابیهای هندسی است که در طول عملیات نگهداری خطوط اتفاق می افتد.

به طور کلی، روشهای مختلفی برای افزایش سختی جانبی خطوط وجود دارند. از جمله می توان به تغییر نوع تراورس، تغییر فاصله بین تراورسها، استفاده از فنآوریهای جدید شامل مهارهای تراورس و XiTRACK[1] اشاره کرد [Mirfattahi, 2009].

عوامل مختلفی چون ضریب اصطکاک میان تراورس و بالاست، لایه بالاست در طرفین دو سر تراورس، فاصله بین تراورسها، سختی خط و اندازه بربلندی در تامین مقاومت جانبی در خطوط بالاستی موثرند که یکی از موثرترین عوامل، ضریب اصطکاک میان تراورس و بالاست است.

مقاومت ایجاد شده بین تراورس و بالاست برای تأمین مقاومت جانبی از ۳ بخش مقاومت اصطکاکی در زیر تراورس، مقاومت اصطکاکی در اطراف تراورس و مقاومت اصطکاکی در انتهای تراورس با بالاست شانه ها تشکیل شده است.

مؤلفه مقاومت اصطکاکی در زیر تراورس، از ایجاد نیروی اصطکاک بین دانه های بالاست که بر روی سطح نسبتا یکنواخت تراورس بتنی می لغزند به وجود می آید. بررسیهای میدانی نشان داده است که در خطوط با بار محوری ۲۰ تن، با توجه به نوع بالاست و هندسه دانه های تشکیل دهنده آن، ضریب اصطکاک میان دانه های بالاست بین ۰/۵ – ۰/٤٥ تغییر می کند. [Selig, 1994]

همچنین تحقیقات نشان داده است که با بکار بردن تراورسهای بتنی اصطکاکی به جای تراورسهای بتنی معمولی، این ضریب به محدوده ۱/۱ – ۰/۸٦ افزایش می یابد. [Zakeri and Mirfatahi, 2012]

از آنجا که وجود نیروی اصطکاک بین بالاست و کف تراورس و افزایش و یا کاهش آن تأثیر بسزایی درمیزان جابجایی جانبی و در نتیجه سختی جانبی خط دارد، بنابراین، در این مطالعه میدانی با بکارگیری تراورسهای اصطکاکی در قوسها، که استفاده از آنها سبب افزایش اصطکاک بین کف تراورس و بالاست می شود، به بررسی تغییر میزان سختی جانبی خط در قوسها با تراورسهای عادی و اصطکاکی پرداخته می شود.

در این مقاله نتایج آزمایشهای انجام شده بر روی خط واقعی، هم با تراورسهای استاندارد و هم تراورسهای بتنی اصطکاکی [Zakeri, 2010] و [Nordal and Lohren, 2003] در قوس با شعاع ۲۵۰ متر ارایه و تأثیر استفاده از تراورس اصطکاکی تشریح شده است.

۲. روشهای بررسی تغییرات سختی جانبی خط آهن

از ابتدای آغاز به کار صنعت ریلی، مهندسین خطوط به دنبال روش مطلوبی برای اندازه گیری واکنش ساختار خط در برابر بارهای وارده بوده اند [Zarembski and Choros, 1979]. توانایی مشخص کردن ظرفیت خطوط برای طراحی و عملیات نگهداری خطوط بسیار مهم و ضروری است [Profillidis, 2006]. در واقع، سختی کلی جانبی خط، برابر با مجموع سختی اجزای مختلف خط است. سختی جانبی خط تحت تأثیر عوامل متعددی همچون دانه بندی بالاست، کیفیت مصالح بالاست، میزان تراکم بالاست، مقدار بالاست در میان و انتهای تراورسها، نوع، وزن، ابعاد و فاصله میان تراورسها، نوع ریل و پابندها و همچنین میزان نبروی جانبی وارده قرار دارد [Berggren, 2009].

سختی جانبی خط (K) می تواند به صور مختلفی تعریف شود. یکی از ساده ترین تعاریف، نسبت نیروی جانبی وارده به خط (F) و جابجایی جانبی خط (Z) (معادله ۱) است. [Hosseingh

[lian and Froumentin, 2009

$$K=\frac{F}{Z} \quad (1)$$

بررسی تغییرات سختی جانبی خط آهن با روش های زیر صورت می پذیرد که در مرجع [Mirfattahi, 2009] آمده است.

۱- روش تحلیل خطی

۲- روش تحلیل غیر خطی

در این روشها با توجه به نمودارهای نیروی جانبی- جابجایی جانبی برای آزمایش با تراورسهای معمولی و اصطکاکی در محل اعمال نیرو، مقادیر سختی در نیروهای اعمالی مشخص بررسی می شود.

۲-۱ روش تحلیل خطی

در این روش، به کمک نمودار نیروی جانبی- جابجایی جانبی و با توجه به معادله ۱، در نیروهای اعمالی مشخص، شیب خط گذرنده از مبدا و نیروی اعمالی مشخص سختی نامیده می شود. به این ترتیب در نیروهای مشخص به مقایسه میان تغییر سختی خط در اثر تغییر نوع تراورس پرداخته می شود.

۲-۲ روش تحلیل غیر خطی

در این روش، مقدار سختی خط در هر نقطه برابر است با شیب منحنی نمودار نیروی جانبی- جابجایی جانبی در همان نقطه. به این ترتیب به مقایسه تغییر مقدار سختی خط در هر نقطه، در اثر تغییر نوع تراورس پرداخته می شود.

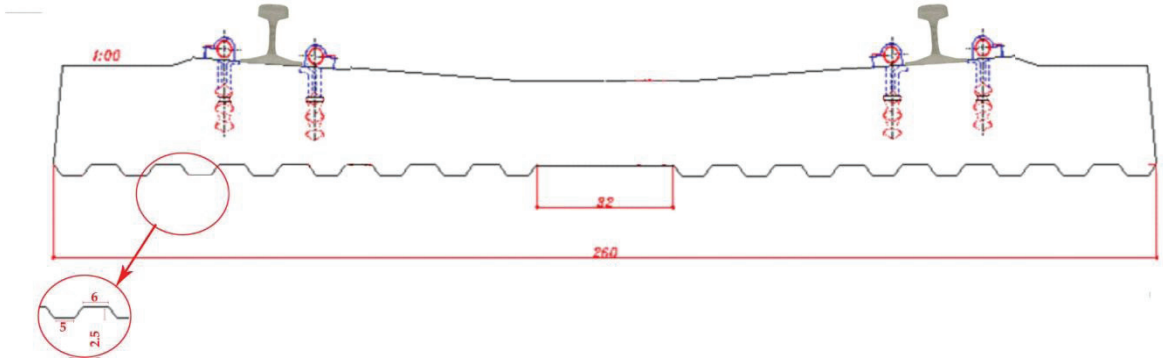
۲-۳ تراورس بتنی اصطکاکی

تمام قسمتهای تراورس بتنی اصطکاکی که توسط مؤلف اول طراحی شده است ، به استثنای بخش زیرین، همانند تراورس B۷۰ است. در قسمت تحتانی تراورس زائده هایی ذوزنقه ای شکل با قائده بزرگ ۱۰ سانتیمتر وقائده کوچک ٦ سانتیمتر و ارتفاع ۲/۵ سانتیمتر ایجاد شده است تا باعث افزایش اصطکاک بین دانه های بالاست و کف تراورس شود. در نتیجه، درگیری دانه های بالاست با کف تراورس افزایش یافته و سبب افزایش سختی جانبی خط می شود. نکته قابل توجه این است که با بکارگیری این نوع تراورس، کلیه عملیات تعمیر و نگهداری به آسانی انجام می پذیرد. [Zakeri, 2010]

۳. آزمایشهای میدانی تعیین و بررسی تغییرات سختی جانبی خط آهن

روش کلی کار به این صورت است که ابتدا در قوس مورد نظر آزمایشهای سنجش سختی جانبی خط با تراورسهای معمولی صورت گرفت و سپس با تعویض کوپلاژهای خط و استفاده از تراورس اصطکاکی همان آزمایشها تکرار شد. مشخصات و خصوصیات قوس انتخابی به شرح زیر است:

طول قوس: ۱٤٥ متر، شعاع قوس:۲٥۰ متر، دور: ۱۲۰ میلی متر، نوع ریل: ٦۰ UIC، نوع تراورس: تیپ وسلو B۷۰، فاصله تراورس ها: ٦۰ سانتی متر، نوع پابند: وسلو، اندازه شانه بالاست: ٤۰ سانتی متر، شیب شیروانی: ۲ به ۳، وضعیت تراورس ها: مغروق در بالاست، وضعیت بالاست: خوب، وضعیت بستر:



شکل ۱. تراورس بتنی اصطکاکی (ابعاد به سانتیمتر است)

شکل ۲. بخش زیرین تراورس بتنی اصطکاکی

خاکریز به ارتفاع تقریبی ٤/٥٤ متر در انجام آزمایش سعی شد شرایط یکسان و تقریبا مساوی بر آزمایشها حاکم باشد. برای یکسان سازی شرایط حاکم بر آزمایش می بایست هم شرایط آب و هوایی و هم شرایط فیزیکی خط در هر دو حالت همسان باشند. به منظور یکسان سازی شرایط آب و هوایی می بایست هر دو آزمایش (با تراورسهای معمولی و اصطکاکی) در شرایط جوی تقریباً یکسانی صورت پذیرد و به منظور یکسان سازی شرایط فیزیکی خط، می بایست در هر دو آزمایش اولا از زیرکوب استفاده و سپس با استفاده از پایدار ساز دینامیکی، خط پایدار گردد. همچنین منظور کردن شرایط یکسان در مشخصات خط شامل اندازه شانه، شیب شیروانی، میزان بالاست آخوری و ارتفاع بالاست از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

در انجام این مطالعه میدانی از آزمایش جابجایی جانبی خط در قوس به کمک جک هیدرولیکی استفاده شده است.

در ابتدا لازم است که سنسورهای سنجش تغییر مکان جانبی (LVDT[۲]) به خوبی بر روی پایه نصب و از برخورد نوک آن به انتهای تراورس اطمینان حاصل شود. در مرحله بعد، جک هیدرولیکی می بایست در محل خود نصب گردد. به این منظور همان طور که در شکل (۳) مشاهده می شود، برای استقرار جک هیدرولیکی حد فاصل تکیه گاه و خط (ریل داخلی) از حائل استفاده شده است.

همچنین عمود بودن نوک جک به جان ریل (محل اعمال نیرو) از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

حال با این تفاسیر، شرایط برای انجام آزمایش کاملا مهیا است. در لحظه t=۰ شروع به اعمال نیروی جانبی به بیرون جان ریل داخلی کرده و در همان لحظه زمان نیز ثبت می شود. سپس، از یک طرف توسط جک هیدرولیکی به جان ریل داخلی نیروی جانبی وارد شده و سپس نیرو بر حسب زمان ثبت و از طرف

شکل ۳. نحوه استقرار جک در محل اعمال نیرو

دیگر (جان ریل خارجی)، LVDT داده های تغییر مکان را به پردازشگر انتقال داده و بنابراین تغییر مکان بر حسب زمان به دست می آید.

در فاز دوم این مطالعه میدانی، کوپلاژهای تهیه شده با تراورسهای اصطکاکی می بایست به محل قوس مورد نظر انتقال داده شوند. پس از نصب و بکارگیری این کوپلاژها، آزمایشهای مربوطه انجام گرفته و سپس داده های به دست آمده از این آزمایشها با هم مقایسه می شوند. [Mirfattahi, 2009]

در ادامه به منظور مطالعه میزان تأثیر تراورسهای اصطکاکی در تغییر سختی جانبی خط در قوس مورد نظر، به بررسی و تفسیر و مقایسه نتایج آزمایشهای میدانی صورت گرفته در فازهای اول (آزمایش با تراورسهای معمولی) و دوم (آزمایش با تراورسهای اصطکاکی) پرداخته می شود.

۵. نتایج آزمایشها

با توجه به نمودارهای نیروی جانبی- جابجایی جانبی برای آزمایش با تراورسهای معمولی و اصطکاکی در محل امتداد نیرو و به علت ماهیت غیر خطی خط در برابر اعمال نیرو، مقادیر سختی در نیروهای اعمالی مشخص بررسی می شود.

۵-۱ تحلیل خطی

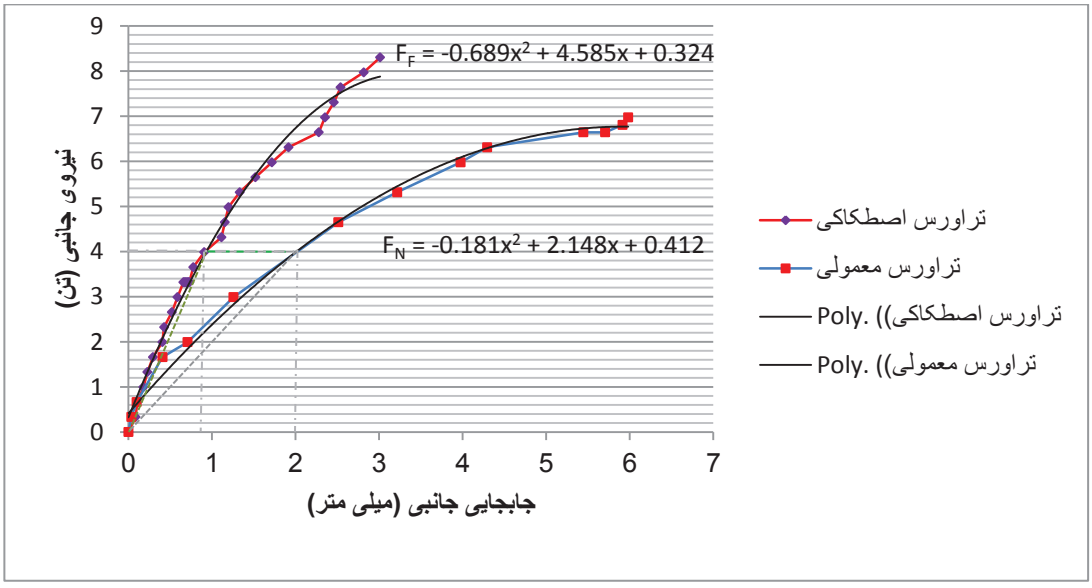
در این روش تحلیل، در نیروهای جانبی مشخص به بررسی و مقایسه میان سختی جانبی خط با بکارگیری تراورسهای اصطکاکی و معمولی پرداخته می شود. (نیروی جانبی = F_L، جابجایی جانبی تراورس معمولی= X_N، جابجایی جانبی تراورس اصطکاکی= X_F، سختی جانبی خط با تراورس اصطکاکی=K_F ، سختی جانبی خط با تراورس معمولی= K_N)

به طور مثال، همان گونه که در شکل (٤) دیده می شود، در صورتی که مقدار نیروی جانبی برابر ٤ تن باشد، در آن صورت X_F و X_N (به ترتیب تغییر مکان جانبی خط با تراورس اصطکاکی و معمولی) برابر ۰/۸۹ و ۲ بوده و در نتیجه خواهیم داشت:

$$K_F=٤/٤٩,\ K_N=٢ \Longrightarrow K_F/\ K_N=٢/٢٥ \qquad (٢)$$

در جدول ۱، این محاسبات برای نیروهای جانبی مختلف انجام و محاسبه شده است.

با توجه به محاسبات انجام شده در روش تحلیل خطی، نسبت سختی جانبی خط با تراورسهای اصطکاکی به سختی خط با تراورسهای معمولی، در محدوده های بارگذاری ۱ تا ٦ تن متغیر بوده و از ۱/۷۹ تا ۲/٤٦ تغییر می کند. با عنایت به اینکه ملاک عمل در کنترل مقاومت جانبی ۲ میلیمتر است، بنابراین می توان



شکل ٤. نمایش سختی خط، تحلیل خطی در نیروی جانبی ٤ تن

جدول ۱. محاسبه نسبت سختی جانبی خط با بکارگیری تراورس های اصطکاکی و معمولی، روش تحلیل خطی

F_L	X_F	X_N	K_F	K_N	K_F/K_N
۱	۰/۱٤	۰/۲۵	۷/۱٤	٤	۱/۷۹
۲	۰/۳٦	۰/۷۳	۵/۵٦	۲/۷٤	۲/۰۳
۳	۰/٦٤	۱/۳٦	٤/٦۹	۲/۲۱	۲/۱۳
٤	۰/۸۹	۲	٤/٤۹	۲	۲/۲۵
۵	۱/۲۳	۲/۸۲	٤/۰۷	۱/۷۷	۲/۲۹
٦	۱/۵۵	۳/۸۲	۳/۸۷	۱/۵۷	۲/٤٦

چنین بیان کرد که سختی جانبی خط با تراورس اصطکاکی ۲/۲ برابر بیشتر از سختی جانبی خط با تراورس معمولی است.

۲-۵ تحلیل غیرخطی

در این روش تحلیل، به کمک شیب منحنی نمودار نیروی جانبی- جابجایی جانبی در نقاط مشخص به بررسی و مقایسه میان سختی جانبی خط با بکارگیری تراورس های اصطکاکی و معمولی پرداخته می شود.

معادلات شیب منحنی های برازش برای تراورس های اصطکاکی و معمولی پس از مشتق گرفتن از معادله منحنی برازش نیروهای جانبی به دست می آید.

$$K_F = -۱/۳۷۸\ X + ٤/۵۸۵ \quad (۳)$$

$$K_N = -۰/۳٦۲\ X + ۲/۱٤۸ \quad (٤)$$

حال به محاسبه و سپس مقایسه میان سختی خط (شیب منحنی برازش) در نیروهای اعمالی مشخص پرداخته می شود.

به طور مثال، همان گونه که در شکل (۵) دیده می شود، در صورتی که مقدار نیروی جانبی برابر ٤ تن باشد، در آن صورت X_F و X_N (به ترتیب تغییر مکان جانبی خط با تراورس اصطکاکی و عادی) برابر ۰/۸۹ و ۲ بوده و در نتیجه خواهیم داشت:

$$K_F = ۳/۳٦,\ K_N = ۱/٤۲ \Longrightarrow K_F/K_N = ۲/۳۷ \quad (۵)$$

در جدول ۲ این محاسبات برای نیروهای جانبی مختلف انجام و محاسبه شده است.

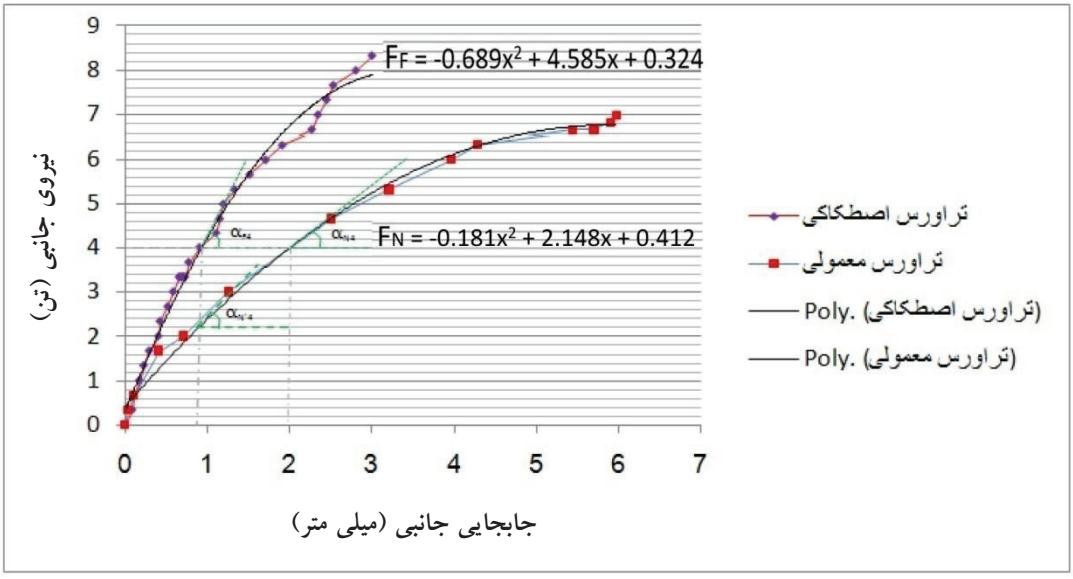
با توجه به توضیحات و محاسبات انجام شده مشخص می شود که در روش تحلیل غیرخطی، میزان سختی جانبی خط با بکارگیری تراورسهای اصطکاکی حداقل ۲/۱۳ برابر بیشتر از میزان سختی جانبی خط در هنگام بکارگیری تراورسهای اصطکاکی است..

در شکل (٦)، نسبت سختیها با روشهای تحلیل خطی و غیرخطی در محدوده بار جانبی بین ۱ تا ٦ تن با هم مقایسه شده اند. [Mirfattahi, 2009]

این شکل نشان می دهد که تغییر سختی در محدوده فوق تقریبا خطی است و با افزایش نیروی جانبی، سختی خط نیز افزایش می یابد. در حالت غیر خطی تا حدود ٤ تن تقریبا سختی ثابت است و پس از آن سختی افزایش می یابد.

٦. جمع بندی و نتیجه گیری

در بسیاری از خطوط قدیمی راه آهن، به دلیل عدم امکان جوشکاری درز ریل در قوسهای با شعاع کمتر از ٤۰۰ متر، هزینه زیادی برای انجام عملیات تعمیر و نگهداری صرف می شود.



شکل ۵. نمایش سختی خط به صورت خط مماس بر منحنی در نیروی جانبی ٤ تن

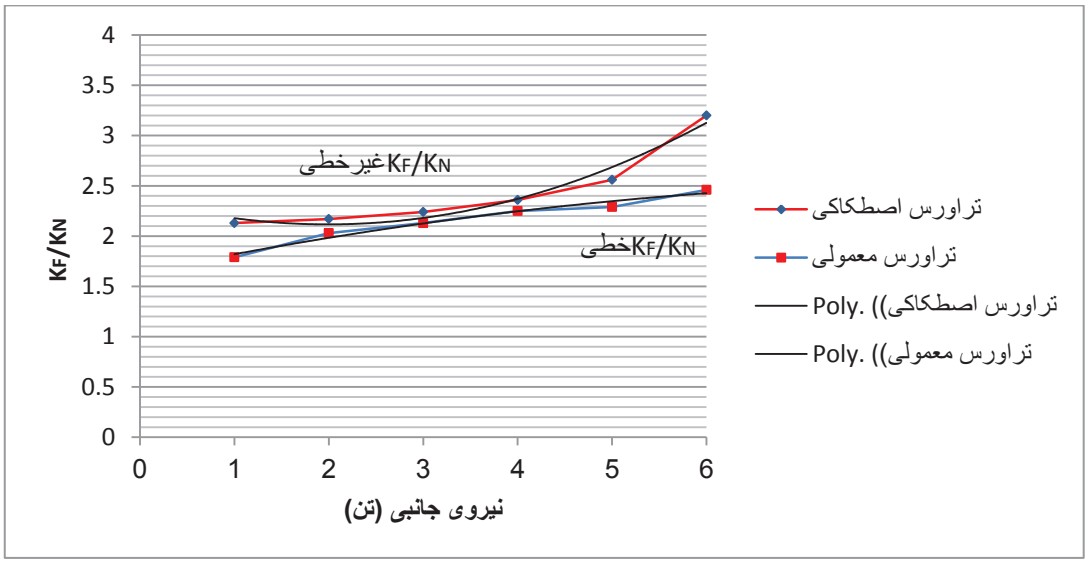
جدول ۲. محاسبه نسبت سختی جانبی خط با بکارگیری تراورس های اصطکاکی و معمولی، تحلیل غیر خطی

F_L	X_F	X_N	K_F	K_N	K_F / K_N
۱	۰/۱٤	۰/۲۵	٤/۳۹	۲/۰٦	۲/۱۳
۲	۰/۳٦	۰/۷۳	٤/۰۹	۱/۸۸	۲/۱۸
۳	۰/٦٤	۱/۳٦	۳/۷۰	۱/٦٦	۲/۲۳
٤	۰/۸۹	۲	۳/۳٦	۱/٤۲	۲/۳۷
۵	۱/۲۳	۲/۸۲	۲/۸۹	۱/۱۳	۲/۵٦
٦	۱/۵۵	۳/۸۲	۲/٤۵	۰/۷۷	۳/۲۰

همچنین در محل درزها، خرابی ادوات، لهیدگی تاج و کناره ریل، شکستگی تراورس، خرابی بالاست و جابجایی جانبی خط به وضوح اتفاق می افتد.

به علت اینکه وجود نیروهای اصطکاک بین بالاست و کف تراورس، و افزایش و یا کاهش آن تأثیر بسزایی در تغییر سختی جانبی دارد، بنابراین در این مطالعه میدانی با بکارگیری تراورسهای اصطکاکی در قوس با شعاع ۲۵۰ متر و مقایسه آن با تراورس معمولی به بررسی تغییر سختی جانبی پرداخته می شود.

روش کلی کار در این مطالعه میدانی به این صورت است که ابتدا در قوس مورد نظر با شعاع ۲۵۰ متر، آزمایشهای سنجش سختی جانبی با تراورسهای معمولی صورت گرفت و سپس با تعویض کوپلاژهای موجود در قوس و استفاده از تراورس اصطکاکی، همان آزمایشها تکرار شد. در انجام آزمایش سعی شد شرایط یکسان و تقریباً مساوی بر آزمایش حاکم باشد. به طور مثال در هر مرحله از آزمایش (هم با تراورسهای عادی و هم با تراورسهای اصطکاکی) قبل از شروع، ابتدا قوس مورد نظر زیرکوبی و سپس



شکل ٦. مقایسه میان نسبت سختی ها با روش های تحلیل خطی و غیرخطی

با کمک پایدارساز دینامیکی اقدام به پایدارسازی شد. همچنین به منظور ایجاد شرایط یکسان، میزان بالاست شانه و آخوری نیز مد نظر قرار گرفت.

در روش مقایسه سختی جانبی خط به کمک تحلیل خطی مشخص شد میزان سختی جانبی خط با بکارگیری تراورسهای اصطکاکی حداقل مقدار ۱/۷۹ برابر بیشتر از میزان سختی جانبی خط در هنگام بکارگیری تراورس های معمولی بوده و به کمک تحلیل غیر خطی مشخص شد که میزان سختی جانبی خط با بکارگیری تراورسهای اصطکاکی حداقل مقدار ۲/۱۳ برابر بیشتر از میزان سختی جانبی خط در هنگام بکارگیری تراورسهای عادی است . بنابراین با توجه به نتایج آزمایشهای میدانی، می توان گفت که به دلیل افزایش سختی جانبی خط و در نتیجه کاهش تغییر شکل جانبی خط، در قوسها علی الخصوص قوسهای تند استفاده از تراورسهای اصطکاکی مؤثر بوده و کارآیی خوبی از خود نشان داده است.

۷. پی نوشتها

۱- فنآوری XiTRACK به برای کمک به خطوط با بالاست در افزایش بار محوری، افزایش سرعت و کاهش عملیات نگهداری بکار می‌رود. استفاده از این فنآوری، یک روش تقویت و پایدارسازی خط راه آهن با استفاده از فناوری پیشرفته بر پایه پلیمر است. رفتار پلیمری آن در جذب انرژی وارده به بالاست یا سایر ساختارهای دانه ای خط سبب کارآیی مناسب تر خط شده است.

۲- تجهیزاتی برای اندازه گیری تغییر مکان جانبی خط است که دقت در این تجهیزات بسیار زیاد بوده و با اتصال آن به پردازشگر می توان اطلاعات تغییر مکان را در هر لحظه از زمان آزمایش به دست آورد.

۸. مراجع

- میرفتاحی، بهروز (۱۳۸۷) "راهکارهای افزایش مقاومت جانبی خط در خطوط CWR"، سمینار کارشناسی ارشد مهندسی ایمنی در راه آهن، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران.

- میرفتاحی، بهروز (۱۳۸۸) "مطالعه میدانی مقاومت جانبی خط آهن با استفاده از تراورسهای اصطکاکی"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ایمنی در راه آهن، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران.

- Berggren, E. (2009) "Railway track stiffness", Doc-

toral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm.

- Hosseingholian, M., Froumentin, M. and Levacher, D. (2009) "Continuous method to measure track stiffness", IDOSI publication.

- Nordal, S. R. and Lohren, A. H. (2003) "Concrete friction sleeper for increased lateral track resistance", International Conference on Railway Engineering, London, UK.

- Profillidis, V.A. (2006) "Railway management and engineering" 3rd Edition, Ashgate.

- Selig, E. T. and Waters, J. M. (1994) "Track geotechnology and substructure management", Thomas Relford, London.

- Zakeri, J. A. (2010) "Frictional concrete sleeper and its influence on the lateral resistance of track", Research Report, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

- Zakeri, J. A., Mirfattahi, B. and Fakhari, M. (2010) "Lateral resistance of railway track with frictional sleepers", Journal of Transport, ICE, Uk, Vol. 165, Issue TR2, pp.151-155.

- Zarembski, A. M. and Choros, J. (1979) "On the measurement and calculation of vertical track modulus", Bulletin, 675, Volume 81.