تخمین مدول بستر ریل براساس مشخصات اجزای روسازی بالاستی

جبارعلی ذاکری؛ استادیار دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران[1]
محمد خورده‌بینان؛ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران[2]
مسعود پلاسی؛ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران[3]
سعید محمدزاده؛ استادیار دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران[4]
Email: Zakeri@iust.ac.ir

چکیده

مدول بستر ریل یکی از پارامترهای مهم در طراحی بهینه خط است که با توجه به اجزای تشکیل‌دهنده خط بالاستی تعیین می‌شود. شناخت رفتار بستر خط راه‌آهن تحت شرایط مختلف و بر روی زیرسازی با مشخصات پیچیده امری لازم و مفید است. مشخصات فنی و هندسی زیرسازی خط می‌تواند بر مدول بستر ریل نقش بسزایی را ایفا کند. مروری بر تحقیقات اخیر در راه‌آهن‌های کشورهای مختلف دلالت بر اهمیت شرایط سیستم حائل ریل برنتایج تحلیل ریل دارد. در این تحقیق اهمیت تأثیر تغییر مشخصات اجزای زیرسازی ریل بر تعیین مدول بستر ریل به‌عنوان یکی از پارامترها در تحلیل و طراحی سیستم راه‌آهن در دو قسمت تحلیل عددی و تست میدانی مورد بررسی قرار می‌گیرد، برای این مهم ابتدا خطوط بالاستی راه‌آهن در محدوده مشخصات هندسی و فنی مدل‌سازی می‌گردد سپس برای کنترل صحت مدل‌سازی به کمک تست میدانی انجام شده قبلی مدل کالیبره می‌شود و براساس طبقه‌بندی اجزای سیستم خطوط مختلف، مدل به روش المان محدود تحلیل می‌گردد، در پایان نمودارها و جدول‌هایی برحسب ضخامت لایه بالاست و نوع بستر جهت تعیین و کنترل مقدار مدول بستر ریل و نیز تخمین نشست ریل برای انواع شرایط خطوط راه‌آهن ارایه می‌شود که با توجه به آن در طی سیکل عملیات زیرکوبی و پایدارسازی در دوره بهره‌داری، رفتار خط در محدوده رفتار تیر بر روی بستر الاستیک حفظ و از زوال خط جلوگیری می‌گردد و همچنین ضمن بهره‌برداری بهینه، ایمنی و عمر خط افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: مدول بستر ریل، بستر، بالاست، خط راه‌آهن، خیز ریل

۱. مقدمه

خطوط بالاستی راه‌آهن از ریل، پابند، تراورس، بالاست و بستر تشکیل شده است. عملکرد سیستم خط تحت تأثیر این اجزا می‌باشد به‌طوری‌که با شناخت رفتار پارامترهای تشکیل‌دهنده خطوط می‌توان با ایجاد تغییرات در هریک از اجزا به عملکرد مطلوب‌تری از خط دست یافت، ریل‌ها وظیفه هدایت چرخ‌ها را به عهده دارند و نیروهای قائم، جانبی و طولی را به تراورس‌ها و پابندها انتقال می‌دهند، پابندها و پدها با خواص میراکنندگی خود ریل را بر روی تراورس محکم می‌کنند و نقش مهمی در ثبات عملکرد خط ایفا می‌کنند، تراورس‌ها که در بین ریل و بالاست قرار می‌گیرند با توزیع تنش‌های وارده از ریل بر سطح مطمئنی از لایه بالاست، پایداری روسازی را تأمین می‌کنند و در نهایت لایه بالاست که در پایداری (طولی و جانبی و ...) خط نقش اساسی را برعهده دارد، بر بستری با خواص غیریکنواخت قرار می‌گیرد و تنش‌های اعمالی را با شدتی کمتر بر روی سطحی وسیع‌تر از بستر توزیع می‌کند.

مهم‌ترین عامل در تحلیل یک خط آهن، تخمین سختی خط و تعیین مدول بستر ریل می‌باشد. سختی خط ضریب تناسب بین تغییرمکان قائم ریل و فشار تماسی قائم بین پاشنه و بستر ریل است [۱ ، ۲] و مدول بستر ریل به صورت نیروی تکیه‌گاهی وارد بر واحد طول ریل به‌ازای تغییرمکان واحد ریل در راستای قائم تعریف می‌شود. مدول بستر ریل از اهمیت زیادی برخوردار است و با سطح عملکرد، میزان ایمنی خط آهن و حجم عملیات تعمیر و نگهداری رابطه‌ای مستقیم دارد درصورتی‌که مقدار مدول بستر ریل کم و یا تغییرات آن در طول محدود و مشخصی از خط آهن بیش از اندازه زیاد باشد، تأثیرات نامطلوبی به همراه خواهد داشت. نتایج مطالعات نشان می‌دهد چنانچه مقدار مدول بستر ریل کمتر از میزان لازم باشد باعث نشست خط راه‌آهن می‌گردد و اگر تغییرات مدول بستر ریل زیاد باشد نیروهای دینامیکی وارد بر خط افزایش یافته و در نتیجه عمر اجزای سیستم خط کاهش می‌یابد، که در هر دو حالت افزایش سیکل انجام عملیات تعمیر و نگهداری خط را به همراه دارد. سطح کیفی راحتی و آسایش سرنشینان که از روی مقدار شتاب قائم مشخص می‌شود، یکی دیگر از مواردی است که به‌شدت به مقدار مدول بستر ریل بستگی دارد [۳ ، ٤].

مطالعه تحقیقات صورت گرفته براساس روش‌های مختلف تئوری و تجربی توسط Hay در سال ۱۹۵۳، Birmann و Luber در سال‌های ۱۹٦۱ تا ۱۹٦٦ در کشور آلمان، Prause و همکاران در سال ۱۹۷٤، Ahlf در سال ۱۹۷۵ و شرکت راه‌آهن غرب استرالیا (Westrail) در سال ۱۹۷٦ نشان می‌دهد که همه این پژوهش‌ها در مورد تعیین مدول بستر ریل محدود و موردی بوده است و نقش ضخامت‌های مختلف لایه بالاست و شرایط مختلف طبقه‌بندی شده خطوط به‌صورت کلی در نظر گرفته شده است [۵]. شناسایی رفتار ریل و مدول بستر آن تحت فاکتورهای مختلف خطوط راه‌آهن ایران جهت کنترل بهره‌برداری خط، امری است که در این تحقیق برای اشکال مختلف ممکن سیستم‌های یک‌خطه ریلی مورد توجه قرار می‌گیرد.

تعیین مدول بستر ریل با توجه به متغیربودن اجزای خط و اندرکنش آنها و همچنین ماهیت دینامیکی‌بودن نیروها امری دشوار و پیچیده بوده و نیاز به مطالعه گسترده دارد، لذا تدوین یک روش تخمین مدول بستر ریل که دربرگیرنده کلیه عوامل موثر در آن باشد را ضروری می‌کند [٦].

در این مقاله مدلسازی عددی برای تحلیل سیستم خط آهن ارایه گردید و سپس مدل بهینه خط به کمک نرم‌افزار به روش اجزا محدود به عنوان روشی کارآمد در تحلیل مکانیکی تک‌تک اجزا سیستم راه‌آهن، طراحی می‌شود و با استفاده از نتایج تست میدانی صورت گرفته توسط دکتر محمدزاده [٦]، مدول بستر ریل واقعی، کالیبره می‌گردد، در مرحله بعد مدل تحت ضخامت‌های مختلف لایه بالاست، انواع بستر، سرعت عبوری و بار محوری مورد تحلیل قرار می‌گیرد سپس نتایج حاصل از آنالیز برنامه نرم‌افزاری Ansys جهت تعیین مدول بستر ریل بررسی می‌شود. در پایان نمودارهایی برحسب ضخامت لایه بالاست و نوع بستر جهت تعیین مقادیر مدول بستر ریل و کنترل نشست آن برای انواع خطوط راه‌آهن ارایه می‌گردد که با استفاده از آن عمر و ایمنی خط افزایش می‌یابد.

۲. تحلیل روسازی خط راه‌آهن

در قسمت اول مدلی برای تحلیل سازه خط ارایه می‌گردد و سپس با استفاده از نتایج آزمایش‌های قبلی انجام شده توسط دکتر محمدزاده سیستم خط راه‌آهن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد [٦] و در قسمت دوم با استفاده از فرآیند آزمون و خطا، مدلی که بیشترین انطباق را با داده‌های تست میدانی داشته باشد براساس روش المان محدود به‌دست می‌آید، در ادامه مدلسازی و تحلیل به کمک نرم‌افزار برای انواع شرایط سیستم خط، آنالیز حساسیت صورت می‌گیرد. سپس با ترسیم نمودارها و تنظیم جداول مناسب نتیجه‌گیری روشن و قابل استنادی در مورد نحوه و میزان تأثیر پارامترهای مختلف بر مدول بستر ریل ارایه می‌گردد.

الف- برای تحلیل تئوری خط راه‌آهن به کمک نرم‌افزارهای «Catia" و "Ansys"، ابتدا از روش آزمون و خطا ابعاد اولیهٔ مدل تغییر داده شد تا مدلی که کمترین اختلاف نتایج را با سیستم روسازی خط در مطالعه میدانی داشته باشد انتخاب گردد سپس دقت مدل با نتایج تست میدانی و نیز خصوصیات هندسی اجزا خط کنترل شد. فرضیات ساختار مدل خط با توجه به راستای تحقیق عبارتند از:

(۱) ضخامت لایه زیربالاست ثابت برابر ۱۰ سانتی‌متر

(۲) تراورس بتنی پیش‌تنیده تک بلوکی B۷۰ با ابعاد معادل طول ۲٦۰ cm، عرض ۲٤ cm و ارتفاع ۱۵ cm

(۳) فاصله تراورس‌ها ٦۰ سانتی‌متر

(٤) مقاومت فشاری تراورس برابر ٦۰۰ kg/cm^2

(۵) نوع ریل UIC٦۰ به عنوان مقطع ریل رایج در ایران، در مدلسازی استفاده گردید که خصوصیات این نوع ریل در جدول ۱ آورده شده است.

مدول ارتجاعی ریل فولادی برابر ۲/۰۳×۱۰۵ MPa و ضریب پوآسون آن برابر ۰/۳ می‌باشد که در محاسبات لحاظ شده است.

بر اساس بررسی منابع مختلف علمی، مشخصات فنی اجزای مختلف سیستم بالاستی خطوط ریلی که در مدلسازی به‌عنوان

جدول ۱. مشخصات مقطع ریل UIC٦۰

شکل هندسی	وزن واحد طول (m/kg)	مساحت سطح مقطع (mm^2)	ارتفاع کل (mm)	عرض پاشنه (mm)	عرض کلاهک (mm)	ممان اینرسی حول محور افقی(cm^4)
پاشنه‌دار	٦۰/۳٤	۷٦۸٦	۱۷۲	۱۵۰	۷۲	۳۰۵۵

جدول ۲. مشخصات مکانیکی اجزای مختلف خط بالاستی

مصالح	ارتجاعی مدول kg/cm^2	ضریب پوآسون	چسبندگی kg/cm^2	زاویه اصطکاک
ضعیف کیفیت با بستر (S_1)	۱۲۵	۰/٤	۰/۱۵	۱۰
بستر با کیفیت متوسط (S_2)	۲۵۰	۰/۳	۰/۱	۲۰
خوب کیفیت با بستر (S_3)	۸۰۰	۰/۳	۰	۳۰
بالاست	۱۳۰۰	۰/۲	۰	٤۵
زیربالاست شنی	۲۰۰۰	۰/۳	۰	۳۵

پارامترهـای اساسـی مورد اسـتفاده قرار گرفتـه مطابق جدول ۲ طبقه‌بندی شده است [۸،۹].

ب- نتایج تست میدانی انجام شده در خط چهار راه‌آهن ایستگاه بهـرام (بین ایسـتگاه‌های ری و ورامین در مسـیر راه‌آهن تهران- مشهد) [٦] که بر روی بستر از نوع خاک ماسه‌ای با کیفیت خوب برای کنترل محاسـبات مورد اسـتفاده قرار گرفته اسـت. سیستم خـط با بار محوری ۲۰ تن و سـرعت‌های عبوری ۳/٤ km/h و ٦/۸۸ km/h در دوحالـت قبل و بعد از زیرکوبی و پایدارسـازی ریلی انجام گردید. در این مرحله نتایج مدلی که کمترین اختلاف را با حالت تسـت میدانی داشـت به‌عنوان مدل اصلی در تحلیل عـددی انتخاب شـد، خصوصیات مقطع خط مـورد آزمایش در سـایت برای مدلسـازی تئوری در جدول ۳ ارایه شـده است [۳ و ٦].

در شکل ۲ مدلی که کمترین اختلاف منطقی در خروجی داده‌ها را با حالت واقعی داشـت نشان داده شده است. تعیین طول خط در مدل با توجه به روش اجزا محدود می‌باشـد که نشان می‌دهد

الف- ماشین زیرکوب۰۹-۳x-۴۸

ب- ماشین پایدارساز دینامیکی

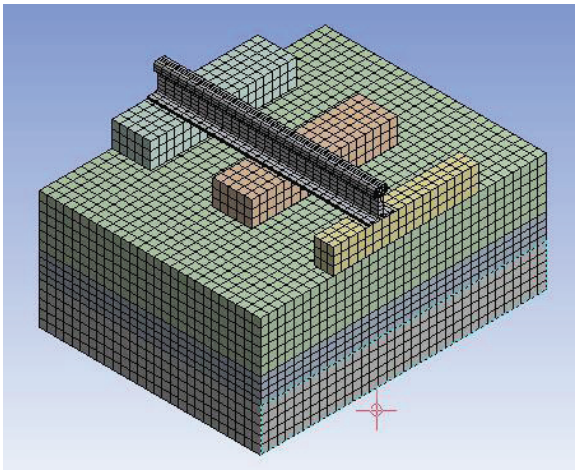
شکل ۱. ماشین زیرکوب و ماشین پایدارساز دینامیکی

خط بارگذاری گردید [۷].

بر اسـاس گزارش ارایه شـده [٦]، آزمایش‌ها در دو مرحله و با نصب شش عدد نیروسنج و شش عدد سنسور تغییر مکان‌سنج در سـه تراورس خط جهت ثبت مقادیر نیروی وارده بر بستر ریل و میزان نشست انجام گردیده است. در مرحله نخست با عبور دیزل ٦ محوره و واگن ٤ محوره پاسـخ خط ثبت شـده سپس عملیات زیرکوبی و پایدارسازی در سیستم روسازی راه‌آهن صورت گرفته است و با بارگذاری دوباره خط با عبور دیزل و واگن، پاسخ خط اندازه‌گیری شـده اسـت. در شکل ۱ ماشـین زیرکوب و ماشین پایدار ساز دینامیکی نشان داده شده است.

همان‌طورکه در بالا اشـاره شـد پس از مدلسازی در ادامه برای حصـول اطمینان از صحت نتایج به‌دسـت آمده در روش عددی، کالیبره‌کردن مدل در جهت انطباق با حالت تسـت میدانی خطوط

اگـر بار چرخ مسـتقیماً روی یک تراورس قـرار بگیرد تراورس مذکـور ٤۰ درصد بـار را تحمل می‌نمایـد و اولین تراورس‌های مجـاور هریک ۲۳ درصـد بار و دومین تراورس‌هـای مجاور آن



شکل ۲. مدل سیستم روسازی خط راه‌آهن

جدول ۳. مقادیر پارامترهای سیستم خط با توجه به مطالعه میدانی در مدلسازی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
تراورس اینرسی ممان (cm^4)	۲۴۲۰۰	بستر ارتجاعی مدول (kg/cm^2)	۱۲۴۰
ریل اینرسی ممان (cm^4)	۳۹۵۰	زیربالاست ارتجاعی مدول (kg/cm^2)	۱۲۶۰
بالاست ضخامت (cm)	۳۸	بالاست ارتجاعی مدول (kg/cm^2)	۲۴۹۰
زیربالاست ضخامت (cm)	۱۵/۲	تراورس ارتجاعی مدول (kg/cm^2)	۲/۱۰^{۵}×۰۷
بارچرخ (Ton)	۱۴/۲	ریل ارتجاعی مدول (kg/cm^2)	۲/۱۰^{۶}×۰۷
تراورس طول (cm)	۲۵۹	بستر پوآسون ضریب	۰/۴
تراورس عرض (mm)	۲۲۹	ضریب پوآسون لایه بالاست	۰/۴
فاصله بین تراورس‌ها (cm)	۶۱	ضریب پوآسون تراورس	۰/۳
ریل مساحت (cm^2)	۸۶/۵	ضریب پوآسون ریل	۰/۲۵
زیربالاست لایه پوآسون ضریب	۰/۳		

هریک ۷ درصد بار را تحمل خواهند نمود. بدین ترتیب اثر روی تروارس‌های سوم به بعد قابل صرفنظر خواهد بود. پس در هر بار چرخ ۵ تراورس با تقارن کامل در امتداد ریل تأثیر خواهند داشت. با توجه به شـرایط طرح مدل اثر همپوشانی بارهای مجاور تحت ضریب اطمینان خوب در مدلسـازی صرفنظر می‌گردد. شـرایط مـرزی مدل با توجه به اینکه مـدل در دو امتداد ریل و تراورس دارای تقارن کامل است لذا اصل تقارن در جهات ذکر شده مدنظر قرار گرفته است، در دو جهت دیگر مدل یکی در جهت شانه خط کاملا آزاد و در امتداد ریل صفحه مدل فاقد هرگونه جابه‌جایی در راستای عمود بر صفحه می‌باشد. درجات آزادی در صفحه تحتانی نیز معادل صفر در نظر گرفته شده است.

نتایج حاصل از کالیبره‌کردن مدل نهایی در جدول ۴ نشان می‌دهد

جدول ۴. مقایسه نتایج مدلسازی تئوری و مطالعه میدانی [۶]

مدل	سطح بستر		کرنش سطح بالاست
	(تغییر مکان mm)	تنش (kPa)	
حالت تئوری	۰/۸۹	۷۱	۰/۰۰۱۴۴
حالت میدانی	۰/۸۵	۷۰	۰/۰۰۱۵۵
درصد اختلاف (درصد)	۴/۷	۱/۴	۶

که اختلاف ۱ تا ٦ درصدی با اندازه‌گیری‌های تست میدانی وجود دارد که این میزان تفاوت به علت شـرایط محیطی می‌تواند توجیه گردد.

بارمحـوری و بـار ترافیکی که بر روی ریـل حرکت می‌کنند از جمله عوامل بحرانی در ایجاد خستگی خط و بستر هستند. در این مقاله طبقه‌بندی بار محوری و سـرعت سـیر ناوگان مورد استفاده در خطـوط راه‌آهن به ترتیب ١٦ و ١٨ تن برای خطوط مسـافری با سـرعت حداکثر ١٦٠ کیلومتر بر ساعت و بار محوری ٢٠ و ٢٥ تن برای خطوط باری با سـرعت حداکثر ١٠٠ کیلومتر بر ساعت می باشد.

ماهیت نیروهای وارد بر خطوط راه‌آهن اساسـاً دینامیکی است. امـا پیش‌بینی دقیق نیروهـای دینامیکی وارد بـر خطوط راه‌آهن دشـوار است. از سوی دیگر ایجاد سهولت هرچه بیشتر در فرآیند تحلیل و طراحی خطوط راه‌آهن امری ضروری اسـت، از این رو معمـولاً برای مقاصد طراحی نیروی قائم اسـتاتیکی وارد از چرخ وسـایل نقلیه ریلی در ضریبی موسـوم به ضریب ضربه دینامیکی ضرب شـده و نیروی شـبه اسـتاتیکی مورد اسـتفاده در طراحی خطوط راه‌آهن به دسـت می‌آید. [١٠و١١] با اعمال ضریب ضربه دینامیکی در بارهای اسـتاتیکی اثرات عواملی که در ساده‌سازی‌ها لحاظ نگردیده اسـت منظور می‌شود از این عوامل به ویژگی‌های هندسـی خـط، کیفیت، سـختی و اجـزای تشـکیل‌دهنده خط، مشـخصات وسیله نقلیه ریلی (نوع چرخ‌ها، بزرگی بار و سرعت) و در نهایت میزان افزایش و کاهش شـتاب می‌توان اشـاره نمود، جهت محاسـبه ضریب ضربه دینامیکی روابط مختلفی از سـوی مؤسسـات و اشخاص گوناگون ارایه شده است که در این تحقیق با توجه به شـرایط حاکم بر روسازی (شامل سرعت عبوری و بار محـوری) و فرض حالت بحرانی برای هرکدام از خطوط مختلف ضریب بـار به‌صورت جداگانه بـه روش AREMA که در زیر آمده محاسبه می‌شود. [١٢]

$$f = 1 + 5/21\frac{V}{D} \qquad (١)$$

در آن V: سرعت (km/h) و D: قطر چرخ (بر حسب mm) می‌باشـد، قطر چرخ در این تحقیق ٩٢٠ mm فرض شده است. با توجه به شـرایط واگن‌های ایران و همچنین با انتخاب ضریب ضربه مناسب **f** که در هرکدام از بارهای محوری جداگانه ضرب می‌شـود بار محوری وارده برای هر چـرخ (P) بر خطوط ریلی محاسـبه می‌گردد. در این تحقیق بارگذاری به روش تدریجی و با پیش‌بارگذاری ١٧/٥ درصد صورت می‌گیرد.

٣. تحلیل مدول خط راه‌آهن

تحلیل نتایج نشـان می‌دهد کـه تحت بار محوری ٢٠ تن مدول بسـتر ریل بعد از زیرکوبی و پایدارسـازی خط نسبت به قبل از زیرکوبـی بیش از ٣ برابرافزایش پیدا کرده اسـت. بنا به تحقیقات صـورت گرفتـه در خطوط راه‌آهن ایران با ایجـاد زوال در خط، پارامترهای مکانیکی ناهمگون و سـختی خـط کاهش می‌یابد و رفتار خط از رفتار تیر بر روی بستر الاستیک دور می‌شود همچنین نشست می‌تواند ٣ الی ٦ برابر افزایش یابد که با انجام زیرکوبی و پایدارسازی، خط رفتار یکنواختی از خود نشان می‌دهد و سختی آن افزایش می‌یابد [٤].

٣-١ تحلیل نتایج روش المان محدود

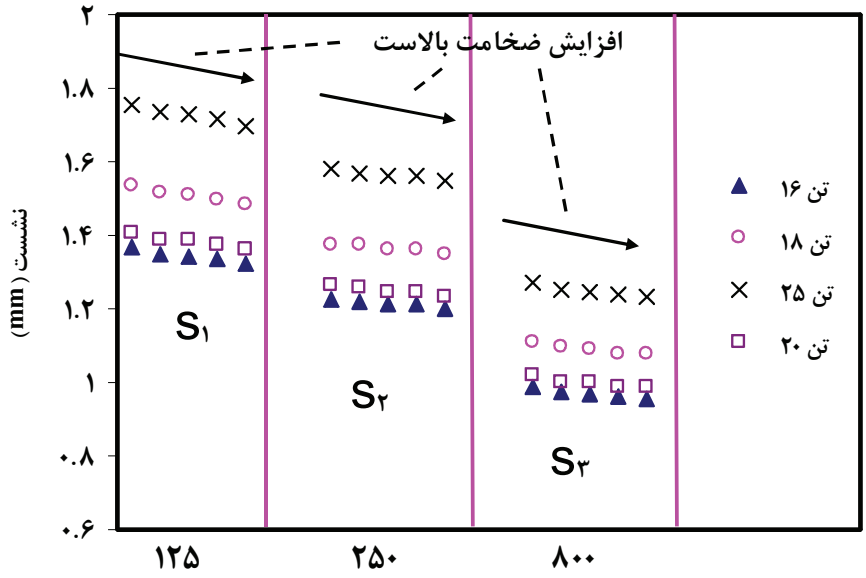
با تحلیل مدل، نتایج تغییر شـکل ریل در راستای قائم (نشست) به صورت تابعی از شـرایط بسـتر و ضخامت لایه بالاست تحت یک بار بارگذاری در نمودار شکل ٣ ترسیم شده است، هریک از این نقاط برای یک مقطع ممکن خاص و به تفکیک، متناسـب با شرایط بار محوری عبوری به دست آمده است.

بررسـی شـکل ٣ برای انواع پارامترهای مورد اسـتفاده در این تحلیل نشان میدهد که:

رابطهای مستقیم و ثابت بین نشست ریل در راستای قائم و رشد سرعت عبوری و بار محوری وسایل نقلیه ریلی وجود دارد.

کاهش تغییرشکل ریل در راستای قائم (نشست) به صورت تابعی از افزایش ضخامت لایه بالاست در شکل مشاهده می‌شود.

افزایش کیفیت بستر تأثیر مستقیم بر کاهش خیز ریل دارد.



شکل ۳. نشست ریل برحسب وضعیت خط

جدول ۵. اثر تغییر کاربری خط بر افزایش حداکثر نشست ریل برای بسترهای مختلف

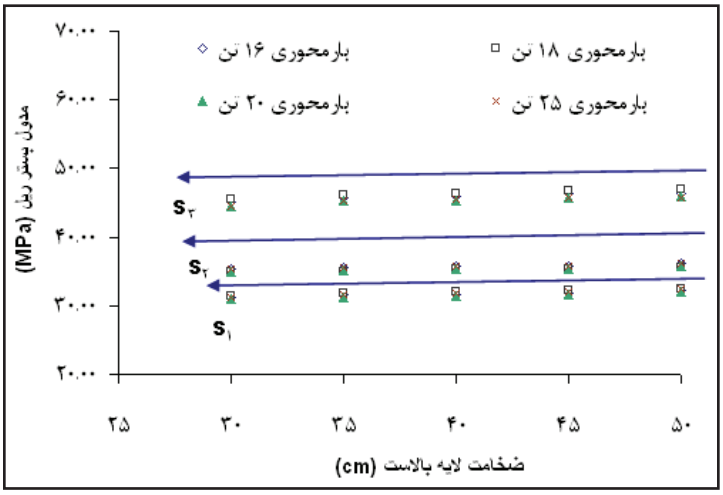
مشخصات ناوگان عبوری خط		درصدافزایش نشست		
سرعت (km/h)	بار محوری (Ton))	بستر نوع یک	بستر نوع دو	بستر نوع سه
سیستم خط مسافری با بار محوری حداکثر ۱۶ تن				
۱۶۰	۱۶	۰	۰	۰
۱۶۰	۱۸	۱۲/۴۶	۱۲/۴۶	۱۲/۳۹
۱۰۰	۲۰	۳/۰۷	۳/۰۸	۲/۹۹
۱۰۰	۲۵	۲۸/۷۷	۲۸/۸۷	۲۸/۶
سیستم خط مسافری با بار محوری حداکثر ۱۸ تن				
۱۶۰	۱۸	۰	۰	۰
۱۰۰	۲۰	-۸/۳۵	-۸/۳۴	-۸/۳۸
۱۰۰	۲۵	۱۴/۵۱	۱۴/۵۹	۱۴/۴۲
سیستم خط باری با بار محوری حداکثر ۲۰ تن				
۱۰۰	۲۰	۰	۰	۰
۱۰۰	۲۵	۲۴/۹۴	۲۵/۰۲	۲۴/۸۹

اثر تغییر شرایط بهره‌برداری خط (بارگذاری) در هریک از چهار خط طبقه‌بندی شده بر روی نشست ریل به‌صورت درصد در جدول ۵ نشان داده شده است.

با توجه به مقادیر مندرج در جدول ۵ می‌توان استنباط نمود که:

افزایش سرعت عبوری و بار محوری موجب تغییر ۳ تا ۲۸ درصدی در میزان نشست ریل می‌گردد.

اثر افزایش بار محوری و سرعت عبوری بر درصد تغییر نشست ریل، در انواع بسترها و ضخامت‌های مختلف لایه بالاست با توجه



شکل ٤. مدول بستر ریل برحسب ضخامت لایه بالاست و شرایط بارگذاری

به درصد خطای تحلیل یکسان است.

مقادیر مدول بستر ریل برحسب ضخامت لایه بالاست، کیفیت بستر و تحت شرایط بارگذاری مختلف در شکل ٤ ارایه گردیده است.

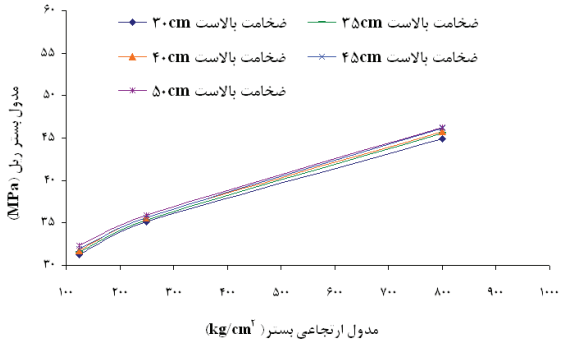
نتایج تحلیل مدول بستر ریل نشان می‌دهد که نوع خطوط باری و مسافری در تعیین این پارامتر مهم طراحی نقش نداشته و در شرایط ثابت با ضخامت لایه بالاست رابطه‌ای مستقیم دارد. با توجه به این اصل که در طول مسیر خط راه‌آهن نوع بستر در حال تغییر است، تأثیر تغییر نوع بستر با کیفیت سه‌گانه 1S، 2S و 3S بر مدول بستر ریل به‌صورت درصد افزایشی در جدول ٦ بیان شده است [۱۳].

جدول ٦. تأثیر تغییر نوع بستر بر مقدار مدول بستر ریل

نوع تغییر بستر	درصد افزایش مدول بستر ریل
بستر یک به بستر دو	۱۱/۸۱
بستر دو به بستر سه	۲۸/۸٦
بستر یک به بستر سه	٤٤/۱

جدول ٦ نشان می‌دهد که هر نوع ارتقا کیفیت بستر می‌تواند مدول بستر ریل را بین ۱۱ تا ٤٥ درصد افزایش دهد. نقش تغییر ضخامت لایه بالاست در خطوط راه‌آهن بر میزان مدول بستر ریل در جدول ۷ مشاهده می‌گردد.

در شرایط عمومی خطوط ریلی ایران برای تعیین مدول بستر ریل برحسب ضخامت لایه بالاست و مدول ارتجاعی بستر منحنی‌هایی در شکل ۵ ارایه شده است. در جهت حفظ عملکرد مناسب خط راه‌آهن در زیر بار ترافیک با توجه به تحلیل تست میدانی خط



شکل ۵. تعیین مدول بستر ریل برحسب مدول ارتجاعی بستر و ضخامت لایه بالاست

جدول ۷. درصد افزایش مدول بستر ریل با تغییر ضخامت لایه بالاست

میزان افزایش ضخامت لایه بالاست	۵ سانتی‌متر	۱۰ سانتی‌متر	۱۵ سانتی‌متر	۲۰ سانتی‌متر
میانگین درصد افزایش مدول بستر ریل	۰/۹۳	۱/۷۲	۲/٦	۳/۷۷

راه‌آهن تهران- مشهد [۷]، مقدار مدول بستر ریل می تواند تا ۷۰ درصد در بازه زیرکوبی و پایدارسازی مجدد خط کاهش یابد.

۳-۲ تحلیل نتایج تست میدانی

تحلیل نتایج حاصل از تست میدانی ارایه شده توسط دکتر محمدزاده [٦ و ۷] در شـرایط بستر ماسه‌ای تحکیم یافته (کیفیت خوب) برای سیستم خط چهار راه‌آهن ایستگاه بهرام در جدول ۸ ارایه شده است.

و زوال خط کاهش پیدا می‌کند. در جدول ۹ اثر مقدار مدول بستر ریل بر میزان نشست حداکثری ریل تحلیل شده است.

از مقادیر مندرج در جدول ۹ می‌توان اسـتنباط نمود که افزایش مدول بستر ریل (با تغییر شرایط بستر) موجب کاهش قابل ملاحظه ۱۰ الی ۳۸ درصدی میزان نشست ریل می‌گردد. با در نظر گرفتن افزایش ترافیک و دوره زمانی زیرکوبی و پایدارسـازی، نشسـت خط ۳ تا ٦ برابر رشد غیر یکنواخت پیدا می‌کند که این مسئله در

جدول ۸. مدول بستر ریل در تست میدانی

مشخصات سیستم خط	مدول بستر ریل (MPa)		
	تراورس یک	تراورس دو	تراورس سه
قبل از زیرکوبی خط	۱۷/۲٦	۲۳/۹٦٤	۳۵/۰٦
بعد از زیرکوبی و پایدارسازی خط	۵۷/۲٤	۵۳/٦۲	۵٤/۷۸

جدول ۹. تأثیر تغییر مقدار مدول بستر ریل بر حداکثر نشست ریل

مدول خط	درصد افزایش مدول خط	حداکثر نشست ریل (mm)				درصد کاهش نشست ریل			
		سرعت ۱٦۰ کیلومتر بر ساعت		سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت		سرعت ۱٦۰ کیلومتر بر ساعت		سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت	
		حداکثربار محوری عبوری (تن)				حداکثربار محوری عبوری (تن)			
		۱٦	۱۸	۲۰	۲۵	۱٦	۱۸	۲۰	۲۵
۳۲	۰	۱/۳۷	۱/۵٤	۱/٤۱	۱/۷٦	۰	۰	۰	۰
۳٦	۱۲/۵	۱/۲۳	۱/۳۸	۱/۲٦	۱/۵۸	۱۰/۲٦	۱۰/۲۹	۱۰/۱٦	۱۰/۰۷
٤٦	٤۳/۷۵	۰/۹۹	۱/۱۱	۱/۰۲	۱/۲۷	۲۷/٦۹	۲۷/٦۹	۲۷/۷۲	۲۷/۷۲

میزان میانگین مدول بستر ریل از نتایج تحلیل عددی تحت یک سیکل بارگذاری و شرایط بستر با کیفیت سه‌گانه (۱S، ۲S و ۳S) برای بسـتر نوع یک ۳۲ MPa، بستر نوع دو ۳٦ MPa و بستر نوع سـه ٤٦ MPa پیشنهاد می‌گردد که با در نظر گرفتن شرایط ترافیک میدانی، بازه تعمیر و مرمت خط (زیرکوبی و پایدارسازی) حالت تست میدانی مرجع [۷] به‌خوبی نشان داده شده است.

٤. نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر تأثیر مشخصات اجزا روسازی بالاستی راه‌آهن بر مقادیر نشسـت و مدول بسـتر ریل مورد مطالعه و بررسی قرار

گرفت، در این راســتا سعی شد تا شرایط ایجاد شده در ساخت و بهره‌برداری روســازی خط که باعث تغییر در مقادیر فوق می‌شود در تحلیل لحاظ گردد لذا تأثیر اجزای خط بر میزان مدول بستر ریل در دو حالت تحلیل عددی و تست میدانی (با استفاده از داده‌های موجــود [٦]) مطالعــه شــد، در مرحله تحلیل عــددی به کمک نرم‌افزار Ansys، مدل کالیبره روسازی خط تحت بارگذاری برای شــرایط مختلف هندســی و فنی خط تحلیل شد و مقادیر نشست حداکثــری و مدول بســتر ریل خط تعیین گردیــد، تحلیل داده‌ها براساس طبقه‌بندی خطوط نشان داد که (۱) به‌طور کلی با افزایش مقدار مدول بســتر ریل یا کاهش ســرعت عبوری و بار محوری وسایل نقلیه ریلی، نشســت ریل کاهش می‌یابد. (۲) میزان مدول بستر ریل با ارتقای کیفیت نوع بستر بین ۱۱ تا ٤٥ درصد افزایش پیدا می‌کند. (۳) تغییرات ضخامت لایه بالاست به‌صورت افزایشی بین ۰/۹۳ تا ۳/۷۷ درصد مدول بستر ریل را می‌تواند ارتقا بخشد، به‌طورکلی می‌توان گفت با افزایش کیفیت خاک بستر و ضخامت بالاســت، مدول بســتر افزایش می‌یابد. در شــرایط تست میدانی تحلیل نتایج نشــان داد که تحت بــار محوری ۲۰ تن میزان مدول بستر ریل بعد از زیرکوبی و پایدارسازی نسبت به قبل از زیرکوبی خط، ۳۳۷ درصد افزایش می‌یابد و با زیرکوبی و پایدارسازی خط تغییرات و نوســان‌های مقدار نشســت ریــل در طول خط کاهش می‌یابد. با توجه به منحنی‌های ارایه شــده برحسب ضخامت لایه بالاست و مدول ارتجاعی بستر می‌توان میزان مدول بستر ریل را با در نظر گرفتن شرایط تعمیر و نگهداری خط تعیین و ارزیابی کرد و ایمنــی، طول عمر و زوال خــط را حفظ رفتار خط در محدوده رفتار تیر بر روی بستر الاستیک کنترل نمود.

۵. مراجع

۱– سعید محمدزاده، جبارعلی ذاکری (۱۳۸۸).خطوط پیشرفته ریلی. انتشارات انجمن مهندسی حمل‌ونقل ریلی ایران، تهران، ایران.

2- Boresi, Arthur P., Schmidt, Richard J., (2003), «Advanced Mechanics of Materials», 6th Edition. John Wiley & Sons, New York, NY: Chap. 5, 10.

3- Selig E. T., Waters J. M, (1994), «Track geotechnology and substructure management», University of Massachusetts, USA.,1994.

٤– ذاکری جبار علی، درودی یاشــار. محمدزاده سعید (١٣٨٦) "بررسی میدانی توزیع تنش تماسی در سطح زیرین تراورس B٧٠" نشریه دانشکده فنی دانشگاه تبریز، جلد ٣٣ شماره ٢ ص ٤٤–٣٦.

٥– مقدس‌نــژاد، فریــدون، (١٣٨٣)، پــروژه تحقیقاتــی «تعیین ضخامت بالاســت بــرای خطوط ریلــی ایران»، مرکــز تحقیقات راه‌آهن، تهران، ایران.

٦– محمدزاده، ســعید؛ عطایی ، شروان (١٣٨٦) « وضعیت سنجی میدانــی خط راه‌آهن با آزمایــش بارگذاری « مجموعه مقالات اولین کنفرانس بین المللی بازرسی فنی و آزمون غیر مخرب، تهران، ایران.

۷– محمدزاده، سعید (۱۳۸۵)، «بررسی زوال در خطوط راه‌آهن»، مرکز تحقیقات راه‌آهن، تهران، ایران.

۸– میرمحمدصادقــی، جــواد، خورده بینان، محمد وریــا، (۱۳۸۸)، «بررسی نقش مشخصات سیستم حائل ریل در تحلیل روسازی راه‌آهن»، فصلنامه مهندسی حمل ونقل، شماره ۱، پاییز ۱۳۸۸، ص. ۷۹–۸۸.

9- Zakeri, J. A. and Xia H., (2008), "Sensitivity Analysis of Track Parameters on Train- Track Dynamic Interaction», Journal of Mechanical Science and Technology, V22-NO. 7, PP 1299-1304.

10- Selig, E. T., Li, D., (1994), "Track Modulus: Its meaning and Factors Influencing It," Transportation Research Record 1470, pp. 47-54. USA.

11- Kaewunruen, S., Remennikov, A.M., (2007), «Field trials for dynamic characteristics of railway track and its components using impact excitation technique», NDT & E International, Vol.40, pp 510-519.

12- Manual for Railway Track Engineering, (2006), Vol.1, Chapter 1, part 2, «Roadway and Ballast-ballast», American Railway Engineering and maintenance of way Association.

13- UIC CODE, 719 R, (1994), «Earthworks and trackbed construction for railway lines», International Union of Railways, 2nd Edition.