

ارزیابی عددی عملکرد ریل مضاعف در سختی ناحیه انتقال تونل کوهین

مقاله علمی - پژوهشی

مهدی معظمی گودرزی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده راه آهن، دانشگاه علم و صنعت تهران، ایران

*مسعود فتحعلی (نویسنده مسئول)، استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

بابک بالازاده، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.fathali@bhrc.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۱۵ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵

صفحه ۲۵۶-۲۴۱

چکیده

در محل تلاقی بستر خاکی با ابنیه فنی شاهد تغییر در سختی خط آهن می باشیم. این بخش از خط آهن که تاثیر زیادی بر روی نیروی های دینامیکی وارده بر خط و اندر کنش خط و ناوگان دارد، در ادبیات فنی به عنوان ناحیه انتقال سختی نام گذاری شده است. در این ناحیه اندرکنش روسازی راه آهن در تعامل با بخش های خاکی و بستر بتنی ابنیه فنی تحت بار دینامیکی وارده از ناوگان عبوری ریلی متفاوت می باشد. در طراحی خط آهن باید تمهیداتی برای تغییر تدریجی این سختی در نظر گرفته شود تا عملکرد مطلوب خط را برای سیر ایمن ناوگان فراهم نماید. یکی از این تمهیدات که در بخش روسازی قابل اجرا می باشد، استفاده از دو ریل اضافی با طول مشخص در بین دو ریل اصلی خط با هدف کنترل نشست های نامتقارن در این ناحیه می باشد. در این مقاله عملکرد ریل مضاعف نصب شده در روسازی خط آهن در ورودی تونل کوهین واقع در محور راه آهن قزوین-رشت از طریق مدلسازی عددی ارزیابی شده است. نتایج تحلیل ها نشان داد که استفاده از ریل مضاعف با طول ۱۸ متر، باعث کاهش نشست ۱۶ درصدی در قسمت بالاستی خط می شود. راهکار دیگر برای کم کردن نشست تفاضلی قائم بین دو بخش از خط، کاهش سختی روسازی خط در بخش بتنی می باشد. این راهکار با استفاده از لایه ارتجاعی مانند فرش یا پد ارتجاعی در زیر ریل یا در زیر خط بتنی عملی می شود. وجود این فرش باعث کاهش سختی خط در بخش بتنی و افزایش نشست خط می باشد. موضوعی که سختی روسازی در دو بخش بتنی و بالاستی را تا سطح بالایی نزدیک می کند.

واژه های کلیدی: سختی، ناحیه انتقال، ریل مضاعف، نشست خط، روسازی خط

۱-مقدمه

به عنوان نمونه عامل رطوبت تاثیرات عملکردی مهمی بر روی لایه های بالاست و زیر بالاست می گذارد و باعث تغییر در خواص ارتجاعی لایه های خط می گردد (Wang, H, 2017). در هر صورت برای یکنواخت کردن رفتار یک مسیر ریلی در تعامل با ناوگان عبوری، آیین نامه ها و استانداردهای ریلی مصالح منتخب با مشخصات تعیین شده را در خاکریز و خاکبرداری و روسازی خط آهن تعیین می نمایند (ضابطه ۲۷۹، ۱۳۸۳) و (ضابطه ۳۰۱، ۱۴۰۱). این امر باعث ایجاد یک بستر خاکی یکنواخت در تمام طول مسیر ریلی در بخش خاکی می گردد. از سوی دیگر بخشهایی از مسیر ریلی از ابنیه فنی عبور

دو وظیفه اصلی یک مسیر ریلی ایجاد بستری ایمن به منظور عبور ناوگان ریلی و همزمان فراهم کردن راحتی سیر برای مسافری می باشد. با توجه به ظهور قطارهای پرسرعت و همچنین ایجاد قطارهای سنگین در بسیاری از راه آهن های دنیا اهمیت عملکرد مطلوب خط آهن در فراهم نمودن بستری یکنواخت در بخشهای مختلف مسیر بیشتر شده است. یک مسیر ریلی از مناطق مختلف جغرافیایی و پهنه های گوناگون زمین شناسی عبور می کند. نوع خاک، وضعیت فرسایش زمین، شرایط اقلیمی و پوشش گیاهی در طول مسیر ریلی باعث تنوع در بستر خط می گردد. حتی در صورت استفاده از مصالح استاندارد و یک دست شرایط مذکور بر عملکرد خط تاثیر گذار

می‌کند. گاهی در این ابنیه فنی نوع روسازی خط‌آهن نیز از بالاستی به بتنی تغییر می‌کند. این تغییرات باعث تغییرات در سختی خط‌آهن شده و در نهایت باعث ایجاد نشست نا همسان در دو بخش بالاستی و بتنی می‌گردد.

به مرور زمان این نشست‌ها در یک چرخه معیوب با عبور قطارهای بیشتر باعث افزایش ضربه‌های وارده بر خط شده و نهایتاً باعث رشد قابل ملاحظه نشست تفاضلی می‌گردد. نرخ رشد این نشست تفاضلی وابسته به مشخصات دینامیکی قطار از جمله جرم و سرعت حرکت در ترکیب با مشخصات سیستم تعلیق آن خواهد بود. مکانیزم رشد نشست تفاضلی به این صورت است که تفاوت سختی باعث افزایش بارگذاری دینامیکی بر خط خواهد شد. در نتیجه افزایش بارگذاری دینامیکی، نشست تفاضلی روی خواهد داد. این نشست تفاضلی باعث فعال شدن ارتعاشات اضافی که خود منجر به افزایش بار دینامیکی بیشتر در حین عبور از این ناحیه می‌گردد. به این ترتیب نشست تفاضلی بیشتر شده و این چرخه ادامه پیدا خواهد کرد. از آنجاییکه نشست تفاضلی ممکن است باعث تشدید خرابی خط گردد لازم است تا حد ممکن کنترل گردد. این کنترل در محدوده تغییر سختی و در ناحیه‌ای موسوم به ناحیه انتقال انجام می‌شود. در منابع فنی راهکارهای گوناگونی برای ناحیه انتقال ارائه شده است. برخی از این راهکارها مربوط به افزایش سختی در زیرسازی و برخی دیگر مربوط به افزایش در سختی در بخش روسازی مسیر در بخش بالاستی می‌باشد.

تمام راهکارهای ارائه شده تغییر تدریجی سختی تا رسیدن به ناحیه‌ای با سختی زیادتر را مد نظر داشته‌اند. اتحادیه بین‌المللی راه آهن‌ها طرح‌هایی جهت کاهش شدت تغییر سختی در بستر راه آهن و در محدوده ناحیه انتقال ارائه شده که در راه آهن‌های مختلف اجرا شده است (UIC719,2008). در مجموع طرح‌های ارائه شده در فیش مذکور با رویکرد اعمال این تغییر تدریجی در بستر و زیر سازی راه آهن طراحی شده است. طرح‌های ارائه شده در این کد عموماً شامل اجرای پیش دال در سازه پل‌ها و استفاده از مصالح منتخب سنگی می‌باشد و دارای محدودیت‌هایی

می‌باشند چرا که به نظر می‌رسد این طرح‌ها برای ناحیه انتقال پل‌ها و بیشتر برای خطوط بالاستی می‌باشد.

در متون فنی دیگر نیز برخی راه کارهای مربوط به ناحیه انتقال سختی در بخش روسازی ارائه شده است. این روش‌ها شامل تغییر در فواصل تراورسها در ناحیه انتقال سختی، افزایش طول

۲- گام‌های انجام پژوهش

تراورس‌ها و استفاده از ریل مضاعف می‌باشد. انتخاب نوع ناحیه انتقال برای یک منطقه تغییر سختی به عوامل گوناگونی بستگی دارد که موضوع این مطالعه نمی‌باشد ولی در هر صورت هر کدام از این راهکارهای کنترلی در کاهش هزینه‌های نگهداری خط و عملکرد مطلوب تر خط نقش موثری دارند. موضوع نگهداری ناحیه انتقال نیز یک موضوع مغفول در مطالعات ریلی می‌باشد که با گسترش استفاده از این نواحی در خطوط راه آهن اهمیت آن پدیدار می‌شود. (Bizjaka,2016). هم در بارهای محوری بالا و هم در سرعت‌های بالا موضوع نشست خط در نواحی تغییر سختی حائز اهمیت می‌باشد. علاوه بر خطوط با سرعت معمولی در خطوط پرسرعت نیز استفاده از ناحیه انتقال موضوعی ضروری و موثر در عملکرد خط می‌باشد. مطالعاتی در خصوص تاثیر مثبت استفاده از راهکارهای افزایش سختی در زیرسازی مسیر مثل تثبیت مصالح دانه‌ای با سیمان در قبل از ابنیه فنی (Paixaõ,2015) و (Hu,P,2018) یا راهکارهایی در روسازی مثل بررسی عملکرد ریل مضاعف در خطوط آهن پرسرعت انجام شده است (Esmacili,2017). جلوگیری از خرابی‌های خط در نواحی انتقال با کنترل نشست در این مناطق مقدور می‌باشد. این کنترل‌ها هم می‌تواند بوسیله نصب تغییر مکان سنجها بر روی اجزای خط انجام شود و هم از طریق دوربین‌های ثبت تغییر مکان در محل‌های مشخص بر روی ریل و تراورس (Wang,H,2017) و (Wang,H,2018).

در این مطالعه تاثیر روش استفاده از ریل مضاعف در کاهش نشست تفاضلی بین دو بخش با روسازی بتنی و بالاستی با استفاده از روش شبیه سازی عددی در خط آهن معمولی بررسی شده است. به این منظور مشخصات خط آهن در محدوده ورودی تونل کوهین در راه آهن قزوین-رشت گرد آوری شده و در نرم افزاری مدل‌سازی شده است. تونل کوهین دارای روسازی بتنی از نوع طرح ره‌دا ۲۰۰۰ می‌باشد. همچنین خط آهن در قبل از تونل از نوع روسازی بالاستی با تراورس بتنی می‌باشد.

لایه زیر بالاست در این خط اجرا نشده است. در مطالعه انجام شده ۶۰ متر از خط مدل‌سازی شده است. در ناحیه انتقال سختی این طول از ریل مضاعف با طول ۱۸ متر استفاده شده است.

با توجه به مطالعات انجام شده این طول، مقدار مناسب و موثری می‌باشد. (Zakeri,2016).

کلیات روند انجام این مطالعه بر اساس فلوگرام ارائه شده در شکل (۱) می‌باشد. توضیحات و جزئیات مربوط به هر گام در بخش‌های مربوطه ارائه شده است.

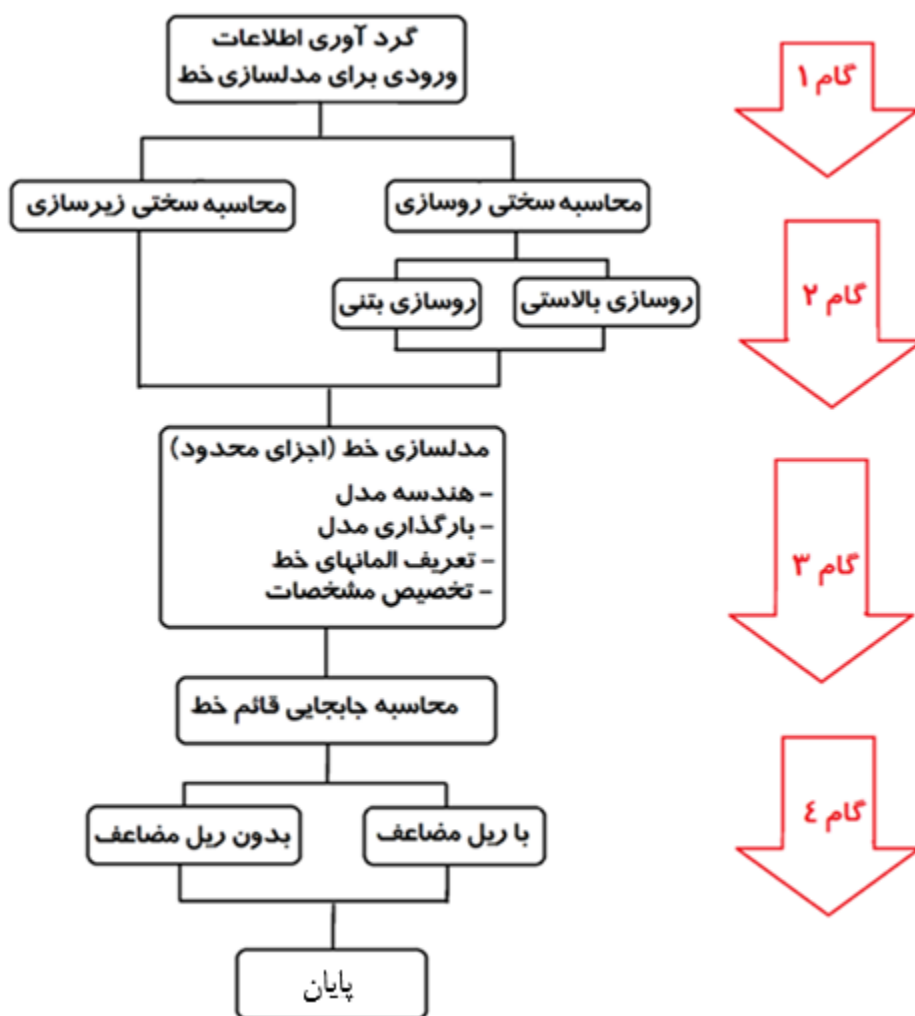
انجام این پژوهش شامل سه مرحله اصلی زیر می‌باشد:

- گردآوری اطلاعات

- انجام محاسبات مربوط به مدل‌سازی خط

- تحلیل نتایج

برخی داده‌های مربوط به مرحله گردآوری اطلاعات از طریق برخی از داده‌ها از آزمایشات میدانی به دست آمده است و برخی داده‌های نظری مورد نیاز از مشخصات فنی مربوط مصالح مورد استفاده در خط بدست آمده است.



شکل ۱. گام‌های انجام پژوهش

۱-۲- گام شماره (۱) گرد آوری اطلاعات

اطلاعات اولیه مورد نیاز برای مدلسازی خط در بخش ناحیه انتقال به ۲ گروه تقسیم می شود. گروه اول مربوط مشخصات فنی بستر روسازی در بخش روسازی بالاستی و بتنی می باشد. بستر مسیر در بخش روسازی بالاستی از نوع بستر خاکی می باشد که طبق مشخصات ارائه شده در ضابطه ۲۷۹ سازمان برنامه و بودجه کشور اجرا شده است. مشخصات خط در بخش داخل تونل طبق مشخصات کفبندی و بتن اجرا شده برای اجرای روسازی بتنی در تونل کوهین می باشد. گروه دوم اطلاعات مربوط به مشخصات روسازی بتنی اجرا شده در تونل کوهین و روسازی بالاستی در ورودی تونل می باشد.

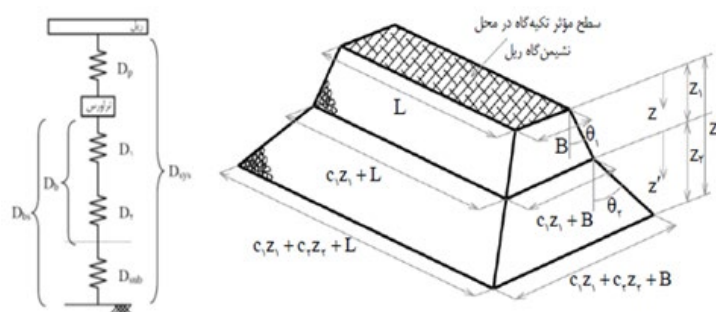
روسازی خط در داخل تونل از نوع روسازی بتنی درجا ریز و از نوع رهدا ۲۰۰۰ می باشد. همچنین روسازی بالاستی در قبل از ورودی تونل شامل تراورس بتنی از نوع B70 و لایه مصالح سنگی بالاست به ضخامت ۳۰ سانتیمتر می باشد. ادوات اتصال ریل به تراورس پابند وسلو با فنر w14 می باشد. در روسازی بالاستی پد پلاستیکی به ضخامت ۱ سانتیمتر بین تراورس و ریل قرار گرفته است. لایه زیر بالاست در این بخش خط اجرا نشده است.

۲-۲- گام شماره (۲) محاسبه سختی خط در بخش روسازی و زیرسازی

در این بخش مدل تهیه شده برای تحلیل ناحیه انتقال تونل کوهین واقع در محور راه آهن قزوین- رشت پرداخته شده و نتایج حاصل از بررسی ارائه می گردد. تحلیل دینامیکی خط در اثر بار

متحرک توسط مدل نرم افزاری توسعه داده شده دو بعدی بر مبنای روش اجزا محدود انجام می گیرد. تغییر سختی در ناحیه انتقال در اثر دو عامل ایجاد می گردد. عامل اول مربوط به نوع روسازی انجام گرفته در داخل و خارج تونل بوده و عامل دوم مربوط به بستر قرارگیری روسازی می باشد. ابتدا سختی مربوط به روسازی خط در قسمت های بالاستی و بتنی بر اساس مشخصات بالاست، بتن و پد زیر ریل و فنر محاسبه می شود. سپس مشخصات بستر روسازی بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایشات انجام گرفته در محل در مدل اعمال می گردد.

سختی روسازی با توجه به مشخصات مصالح روسازی و از طریق روش نظری محاسبه شده است. اساس کار از این قرار است که هر کدام از اجزای روسازی با یک فنر معادل می شود و در انتها سختی معادل از طریق سختی فنر معادل محاسبه می شود. در شکل (۱) مدل این سامانه نمایش داده شده است. (میر محمد صادقی، ۱۳۸۷) به علت سختی بسیار بالای تراورس نسبت به سایر اجزای روسازی می توان آن را به عنوان یک جسم صلب در نظر گرفت. مطابق پارامترهای نشان داده شده در شکل شماره ۲ سختی در لایه های بالاست از روابط زیر محاسبه می گردد. را می توان از طریق روابط زیر محاسبه نمود. پارامترهای موجود در این رابطه را بر اساس شکل ۲ تعریف می گردد. سختی برای لایه اول بالاست و لایه دوم بالاست و سختی کل لایه بالاست و سختی کل به ترتیب از رابطه های ۱ و ۲ و ۳ و ۴ محاسبه می شوند. (Doyle, 1980)



شکل ۱. معادل سازی خط با فنر

(۱)

$$D_1 = \frac{c_1(L-B)E_b}{\ln \frac{L(c_1z_1+B)}{B(c_1z_1+L)}}$$

$$D_2 = \frac{c_2(L-B)E_b}{\ln \frac{(c_1z_1+L)(c_1z_1+c_2z_2+B)}{(c_1z_1+B)(c_1z_1+c_2z_2+L)}}$$

(۲)

$$\frac{1}{D_b} = \frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2}$$

(۳)

$$\frac{1}{D_{sys}} = \frac{1}{D_b/2} + \frac{1}{D_p} + \frac{1}{D_{sub}/2}$$

(۴)

برابر ۲۵۰ مگاپاسکال برای بالاست و مقطع خط مطابق شکل ۲۰ و همچنین مقدار سختی لایه ارتجاعی زیر ریل ۱۵۰ کیلونیوتن بر میلیمتر می‌توان سختی خط در قسمت بالاستی را برای هر تراورس از رابطه ۵ محاسبه نمود.

$$\frac{1}{D_b} = \frac{1}{334} + \frac{1}{536} \quad D_b = 204 \text{ kn/mm}$$

رابطه (۷) خواهد بود. برای خط در بخش بتنی با توجه به سختی زیاد بتن اسلب، سختی کل خط از روابط (۸) و (۹) محاسبه شده است.

$$\frac{1}{D_{BT}} = \frac{1}{D_{pad}} + \frac{1}{D_b} = \frac{1}{150} + \frac{1}{204/2}$$

(۶)

$$D_{BT} = 60 \text{ kN/mm}$$

(۷)

$$\frac{1}{D_{ST}} = \frac{1}{D_{pad}} + \frac{1}{D_{concrete}}$$

(۸)

$$D_{ST} = D_{pad} = 150 \text{ kN/mm}$$

(۹)

در رابطه ۴ سختی‌های پد زیر ریل D_p و سختی بستر D_{sub} می‌باشد. در محاسبه سختی کل می‌بایست نیمی از سختی لایه‌های بالاست و بستر به همراه سختی پد محاسبه گردد. مدول بستر ریل (u) با تقسیم سختی کل سیستم بر فاصله تراورس‌ها به دست می‌آید. با فرض مقدار ضریب الاستیسه (E)

(۵)

با توجه به اینکه تنها نیمی از خط مدلسازی می‌گردد، سختی لایه بالاست در محاسبه سختی خط مطابق رابطه (۶) نصف در نظر گرفته می‌شود. هم چنین سختی کل خط در بخش بالاستی مطابق

با اعمال فشار تدریجی بر آن، به ازای مقدار فشاری وارده ثبت گردید. در نهایت نیز ضریب عکس العمل بستر و نسبت تنش بر جابجایی محاسبه گردید. در شکل شماره (۳) جزئیات مربوط به آزمایش بارگذاری صفحه در ورودی تونل کوهین ارائه شده است.



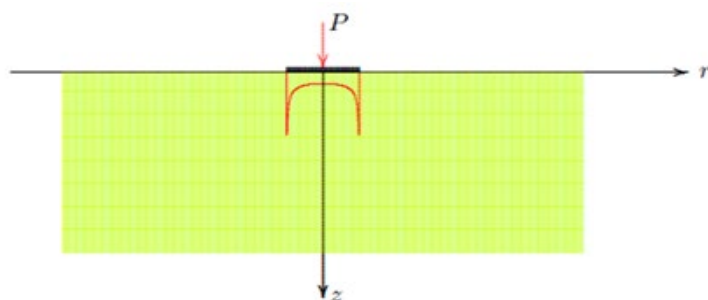
به منظور تعیین مشخصات الاستیک مورد نیاز بستر مسیر از جمله ضریب ارتجاعی و ضریب عکس العمل بستر آزمایش بارگذاری صفحه PLT در نقطه ورودی تونل (کیلومتر ۲۹+۹۷۸ محور راه آهن قزوین-رشت از مبدا سیاه چشمه) انجام گردید. در این آزمایش میزان فرو رفتن صفحه صلب فولادی روی خاک و



شکل ۲. آزمایش بارگذاری صفحه در ورودی تونل کوهین

معادل سختی فنر در نظر گرفت. شکل (۴) بار وارده P بر روی صفحه صلب با شعاع a که بر روی نیم فضای ارتجاعی قرار گرفته است را نشان می‌دهد.

تعریف واحد این پارامتر در سیستم SI برابر $N/m^2/m$ می‌باشد. به خاطر سادگی مفهوم و سهولت کاربرد در نرم افزارهای تجاری، خاک زیر پی توسط فنر مدل می‌گردد که در سطح بستر گسترده شده‌اند. ضریب عکس العمل را می‌توان



شکل ۳. شماتیک آزمایش بارگذاری صفحه

دهنده رابطه مستقیم بین ضریب عکس العمل بستر و ضریب ارتجاعی خاک می‌باشد. دقت در این رابطه مشخص می‌سازد که ضریب عکس العمل بستر بر خلاف ضریب ارتجاعی مشخصه خاک نبوده و وابسته به ابعاد محل بارگذاری شده نیز می‌باشد.

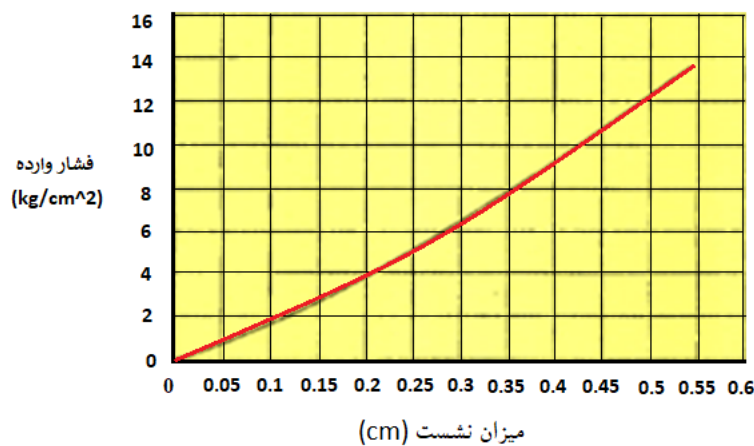
برای محاسبه توزیع تنش و جابجایی ایجاد شده در این حالت از رابطه تیموشنکو استفاده گردید. مقدار نشست برای سطح زیر صفحه بر اساس رابطه تیموشنکو مطابق رابطه های ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ می‌باشد. با استفاده از این رابطه‌ها می‌توان مقدار پارامتر معادل ضریب عکس العمل بستر را به دست آورد. این روابط نشان

$$u_{z=0} = \frac{\pi}{2}(1 - \nu^2) \frac{pa}{E} \quad (10)$$

$$\frac{p}{u_{z=0}} = \frac{2E}{\pi a(1 - \nu^2)} \quad (11)$$

$$P = p\pi a^2 \quad (12)$$

از کاربردهای آزمایش بارگذاری صفحه تعیین ضریب ارتجاعی خاک (E) می‌باشد. بر اساس گزارش آزمایش بارگذاری صفحه انجام شده در ورودی تونل کوهین و طبق شکل (۵)، مقدار ضریب عکس‌العمل بستر برابر ۱۹,۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب اعلام گردیده است که ضریب ارتجاعی خاک مطابق رابطه بالا برابر ۶۲ مگاپاسکال خواهد بود.



شکل ۴. نتایج آزمایش بارگذاری صفحه تورودی ونل کوهین

افزایی دارای بخش‌های تعریف گره‌ها و المان‌ها، محاسبه ماتریس سختی، جرم و میرایی مجموعه و حل معادله تعادل در حوزه زمان و همچنین پردازش نهایی خروجی محاسبات می‌باشد. با محاسبه ماتریس‌های سختی k میرایی c و جرم m سیستم نهایتاً معادله دیفرانسیل تعادل کل مجموعه مطابق رابطه ۱۳ تشکیل می‌گردد.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = f_{ext}$$

ماتریس میرایی C برای محیط خاکی از روش رابلی محاسبه می‌گردد که ترکیب خطی از ماتریس سختی و جرم می‌باشد. در شکل ۶ محیط برنامه نویسی برای محاسبه معادله تعادل با خروجی جابجایی، سرعت، شتاب نمایش داده شده است.

۳-۲- گام شماره (۳) مدل‌سازی خط

برای مدل‌سازی خط از روش اجزاء محدود استفاده شده است. (Hughes, T, R, 2003). نرم افزار توسعه داده شده در محیط نرم افزار MATLAB قابلیت مدل‌سازی دو بعدی و دینامیکی حرکت بار متحرک مشابه مساله حرکت قطار با لحاظ نمودن اثرات اندرکنشی خط و بستر خاکی را دارا می‌باشد. برنامه نرم

(۱۳)

که در این معادله f_{ext} نیروهای خارجی وارد می‌باشد. حل معادله فوق در حوزه زمان و با انتگرال گیری به روش نیومارک انجام شده و مقادیر جابجایی، سرعت و شتاب را نتیجه می‌دهد.

```
function [U,UD,UDD]=timeHHT2(M,K,C,Ts,P,T)

alfa=-1/2;
beta=(1-alfa)^2/4;
ghama=(1-2*alfa)/2;

n=floor(T/Ts);
en=size(K,1);

K=sparse(K);C=sparse(C);M=sparse(M);
U=zeros(en,n);UD=zeros(en,n);UDD=zeros(en,n);

A=sparse(M+(1+alfa)*(C*Ts*ghama+K*Ts^2*beta));

for i=2:n % estimation in t=(i-1)*Ts

    B=alfa*(C*UD(:,i-1)+K*U(:,i-1))-(1+alfa)*(C*(UD(:,i-1)+Ts*(1-ghama)*UDD(:,i-1))+K*(U(:,i-1)+Ts^2*(1/2-beta)*UDD(:,i-1)+Ts*UD(:,i-1))));

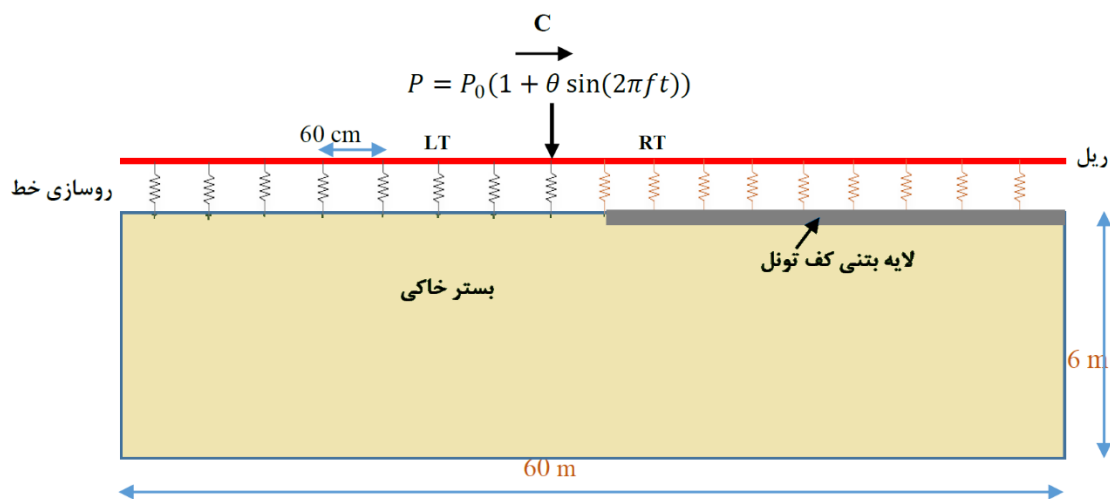
    UDD(:,i)=A\sparse(B+P(:,i));
    UD(:,i)=UD(:,i-1)+Ts*((1-ghama)*UDD(:,i-1)+ghama*UDD(:,i));
    U(:,i)=U(:,i-1)+Ts*UD(:,i-1)+Ts^2*((1-2*beta)*UDD(:,i-1)+2*beta*UDD(:,i))/2;

end
```

شکل ۵. برنامه مربوط به حل معادله تعادل در حالتی کنترلی دوم

اندرکنش خط- قطار، اثر سیستم تعلیق قطار به صورت تابع سینوسی در بار متحرک آورده شده است. نمودار بارگذاری برای فرکانس $f = 10 \text{ Hz}$ و $\theta = 0.1$ در شکل (۹) رسم گردیده است. همچنین مشخصات ریل و بستر در مدلسازی انجام شده مطابق مقادیر مندرج در جدول شماره (۱) در نظر گرفته شده است.

برای مدلسازی ناحیه‌ای به ابعاد ۶۰ متر در ۶ متر مطابق شکل (۷) در نظر گرفته شده است. طول هر یک از بخش‌های بالاستی و بتنی برابر ۳۰ می‌باشد. اتصال ریل و بستر با استفاده از المان فنر خطی در فواصل ۶۰ سانتیمتری (برابر فاصله تراورس‌ها) برقرار شده است. ضریب فنر برای ناحیه بتنی و بالاستی محاسبه شده است. بار P دارای دامنه متغیر بوده و P_0 بار یک چرخ قطار و برابر ۱۲۵ کیلونیوتن می‌باشد که با در نظر گرفتن مساله



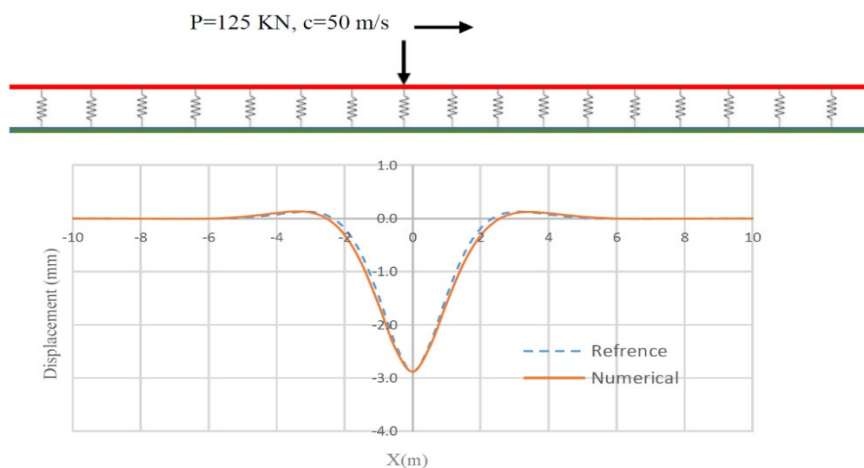
شکل ۶. جزییات مدلسازی خط

جدول ۱. مشخصات ریل و بستر

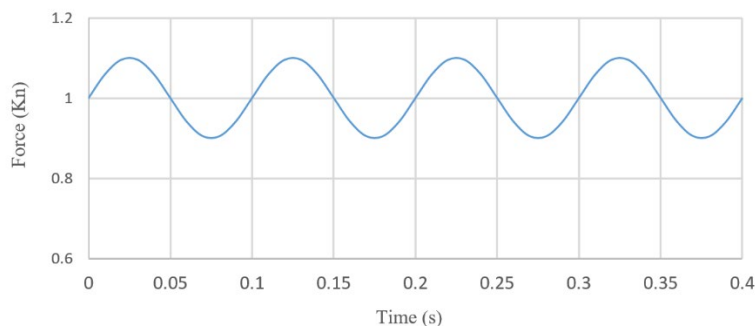
193 MPa/m	k_s	ضریب عکس العمل بستر
7800 kg/m ³	ρ	جرم واحد حجم ریل
77 cm ²	a	مساحت مقطع ریل
6.4 MN.m ²	EI	سختی خمشی ریل

برای گسسته سازی محیط خاک در این مدل، از المان‌های چهار گرهی استفاده شده است. کوچکترین بعد المان‌های مورد استفاده برابر ۳۰ سانتی متر و بزرگترین بعد آن یک متر می‌باشد. به منظور اعمال شرایط مرزی مناسب در مرزهای مدل از روش مرز جاذب انرژی استفاده شده است. با انجام دو کنترل، نتایج مدل توسعه یافته مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج به دست آمده از طریق حل تحلیلی مقایسه شد.

کنترل اول: بار نقطه ای متحرک در تیر بر روی بستر ارتجاعی بار متحرک P با سرعت c بر روی تیر بر روی بستر ارتجاعی با ضریب عکس العمل 193 MPa/m و مشخصات ریل مطابق مندرجات جدول (۱) می‌باشد. شکل (۸) نشان دهنده تطابق نتایج به دست آمده از مدل عددی با حل تحلیلی مساله می‌باشد و جابجایی قائم سطح ریل در اثر حرکت بار را نشان می‌دهد. به علت سرعت پایین حرکت بار نسبت به سرعت بحرانی و در نتیجه ضریب دینامیکی پایین، تغییر چندانی در شکل جابجایی به وجود آمده در سطح نسبت به حالت استاتیکی ایجاد نمی‌گردد. سرعت بحرانی برای این مساله برابر ۶۱۸ متر بر ثانیه و ضریب دینامیکی برابر ۱.۰۰۰۱ خواهد بود.



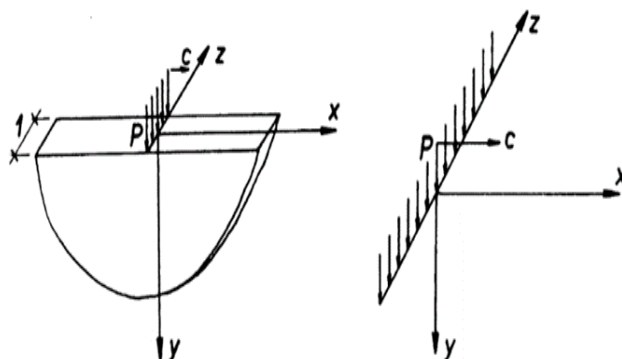
شکل ۷. مقایسه حل عددی با نتایج تحلیل مساله



شکل ۸. نمودار بار متحرک

سرعت c در جهت محور x مطابق شکل (۱۰) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کنترل دوم: بار خطی متحرک در نیم فضای ارتجاعی در این کنترل، مساله حرکت بار خطی در نیم فضای ارتجاعی با



شکل ۹. حرکت بار خطی در نیم فضای ارتجاعی

مدل‌سازی انجام شده مطابق مندرجات جدول شماره (۲) می‌باشد.

برای حالتی که سرعت حرکت کمتر از سرعت بحرانی اول (سرعت موج برشی) باشد، تنش‌های ایجاد شده مطابق روابط (۱۴) و (۱۵) خواهد بود. همچنین مشخصات محیط خاک در

$$\sigma_y = -\frac{P}{\pi} \left[C_1(2 - \alpha_2^2) \frac{a_1 y}{r_1^2} - 2C_1 a_2 \frac{a_2 y}{r_2^2} \right] \quad (14)$$

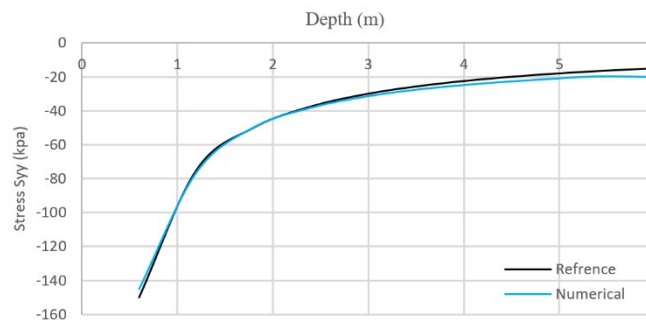
$$r_i^2 = x^2 + a_i^2 y^2 \quad i = 1, 2 \quad (15)$$

جدول ۲. مشخصات محیط خاک در نرم افزار

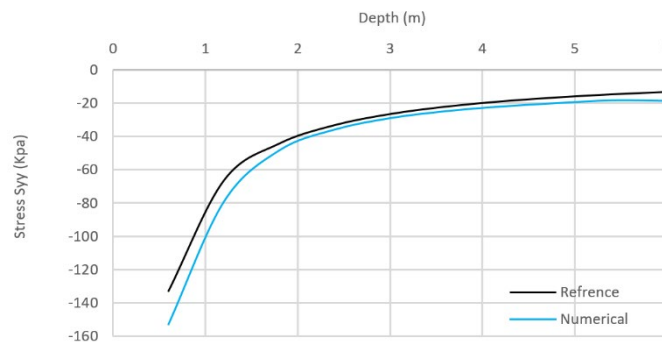
80 MPa	E	ضریب الاستیسته محیط
2000 Kg/m ³	ρ	جرم واحد حجم
0.3	γ	ضریب پواسون

دو حالت مشاهده می‌شود نتایج به دست آمده از مدل‌سازی تطابق قابل قبولی با حل تحلیلی دارا می‌باشد.

شکل (۱۱) و (۱۲) تنش قائم در عمق‌های مختلف به دست آمده از مدل عددی و حل تحلیلی به ترتیب در حالت دینامیکی و استاتیکی را نشان می‌دهند. با بررسی نمودارهای ارائه شده در



شکل ۱۱. تنش قائم ایجاد شده در زیر بار متحرک در حالت دینامیکی

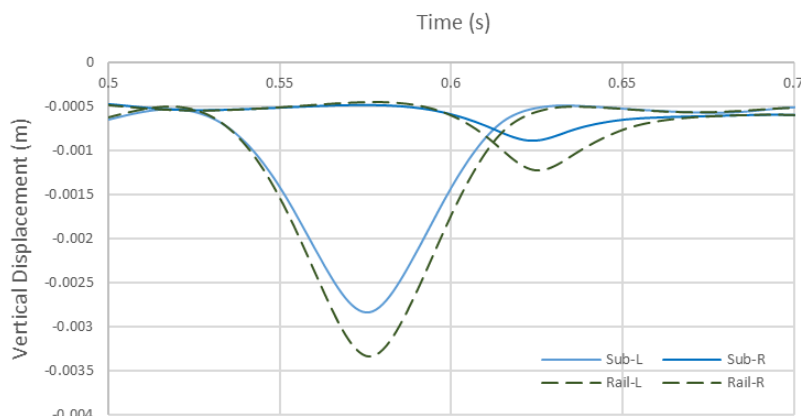


شکل ۱۲. تنش قائم ایجاد شده در زیر بار متحرک در حالت استاتیکی

۲-۴-گام شماره ۴- محاسبه جابجایی قائم خط در حالت وجود و عدم وجود ریل مضاعف

سیستم روسازی استفاده شده (دال خط) و بستر بتنی کف تونل. سختی سیستم روسازی (دال خط) به صورت سختی فنر در مدل اعمال گردیده است. مشخصات لایه بتنی کف تونل نیز که منجر به تغییر مشخصات الاستیسیته محیط می‌گردد لحاظ گردیده است. شکل (۱۳) جابجایی سطح ریل و بستر را در فاصله ۱،۲ متری از طرفین فصل مشترک ناحیه بالاستی و بتنی در اثر حرکت بار چرخ قطار با سرعت ۵۰ متربر ثانیه از سمت چپ به راست را نشان می‌دهد. منحنی‌های سمت چپ نشست در محل تراورس LT و منحنی‌های سمت راست نشست در محل تراورس RT می‌باشد. تفاوت جابجایی قائم ریل به دلیل تفاوت سختی خط در بخش بالاستی و بتنی در این نمودار مشخص می‌باشد به گونه‌ای که نشست سطح ریل در قسمت بالاستی حدود ۲،۸ برابر بیشتر از نشست قسمت بتنی می‌باشد. برای نشست بستر این میزان ۳،۱ برابر می‌باشد.

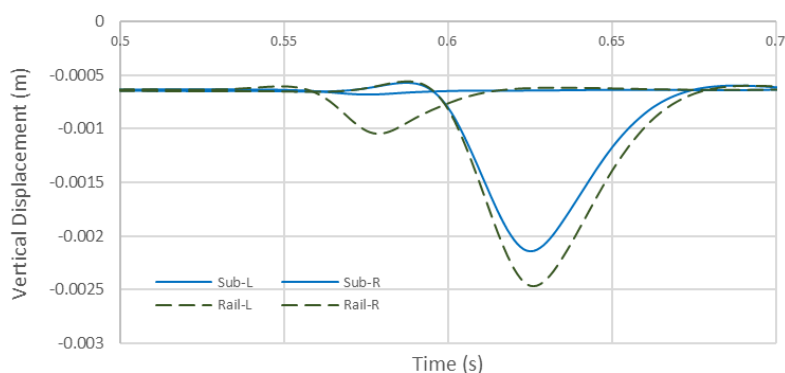
در این بخش به ارائه نتایج مدل‌سازی پرداخته شده است. نتایج به دست آمده از تحلیل این مدل دینامیکی شامل جابجایی، سرعت، شتاب و نیرو و تنش در نقاط مختلف محیط خاکی و ریل می‌باشد. در حالت‌های مختلف جابجایی قائم (نشست) سطح ریل و یا بستر در محل نقاط LT و RT (شکل ۷) به هنگام عبور بار مشخص می‌گردد. بر اساس تعریف انجام شده از سختی خط جابجایی به دست آمده رابطه مستقیمی با سختی در دو بخش خواهد داشت که از این طریق می‌توان عملکرد روش ارائه شده برای کاهش اختلاف سختی را سنجید. نسبت نشست ماکزیمم سطح ریل و بستر در بخش بالاستی و بتنی می‌تواند به عنوان مشخصه قابلیت کاهش سختی برای روش ارائه شده عنوان گردد. تغییر سختی خط باعث ایجاد نشست تفاضلی بین دو ناحیه با سختی متفاوت می‌گردد. دو دلیل عمده در تغییر سختی خط در تونل کوهین عبارت است از سختی بیشتر



شکل ۱۰. نشست سطح ریل و بستر در ناحیه انتقال حرکت از بالاستی به بتنی

در صورت حرکت بار از سمت سختی بیشتر به سختی کمتر و به عبارتی از روسازی بتنی به روسازی بالاستی نشست‌های سطح ریل و بستر به صورت زیر خواهد بود. نتایج این موضوع در شکل (۱۴) نمایش داده شده است.

در صورت حرکت بار از سمت سختی بیشتر به سختی کمتر و به عبارتی از روسازی بتنی به روسازی بالاستی نشست‌های سطح ریل و بستر به صورت زیر خواهد بود. نتایج این موضوع در شکل (۱۴) نمایش داده شده است.



شکل ۱۱. نشست سطح ریل و بستر در ناحیه انتقال حرکت از بتنی به بالاستی

با دقت در نمودارها می‌توان نتیجه‌گیری نمود که نشست‌های ایجاد شده در این حالت کمتر از حالت قبلی بوده به طوری که نسبت ماکزیمم نشست ریل در بخش بالاستی ۲,۳ برابر نشست بتنی می‌باشد. این نتیجه‌گیری در تطابق با تحقیقات پیشین می‌باشد. با توجه به شکل شماره (۱۵) دلیل این موضوع را می‌توان توضیح داد. شکل تنش‌های قائم در محیط خاک را در اثر عبور بار چرخ قطار از سمت راست به چپ را در زمان‌های ۰,۲۵ و ۰,۳۵ و ۰,۴۵ ثانیه نشان می‌دهد. با دقت در شکل تنش قائم در ناحیه زیر بار بیشترین مقدار خود را دارا می‌باشد. با حرکت بار به سمت راست، امواج ایجاد شده که منجر به تولید پالس تنشی در فواصل پنج متری از محل قرارگیری بار می‌گردد که خود نشان دهنده افزایش جابجایی‌ها در پشت سر حرکت بار می‌باشد.

با دقت در نمودارها می‌توان نتیجه‌گیری نمود که نشست‌های ایجاد شده در این حالت کمتر از حالت قبلی بوده به طوری که نسبت ماکزیمم نشست ریل در بخش بالاستی ۲,۳ برابر نشست بتنی می‌باشد. این نتیجه‌گیری در تطابق با تحقیقات پیشین می‌باشد. با توجه به شکل شماره (۱۵) دلیل این موضوع را می‌توان توضیح داد. شکل تنش‌های قائم در محیط خاک را در اثر عبور بار چرخ قطار از سمت راست به چپ را در زمان‌های ۰,۲۵ و ۰,۳۵ و ۰,۴۵ ثانیه نشان می‌دهد. با دقت در شکل تنش قائم در ناحیه زیر بار بیشترین مقدار خود را دارا می‌باشد. با حرکت بار به سمت راست، امواج ایجاد شده که منجر به تولید پالس تنشی در فواصل پنج متری از محل قرارگیری بار می‌گردد که خود نشان دهنده افزایش جابجایی‌ها در پشت سر حرکت بار می‌باشد.

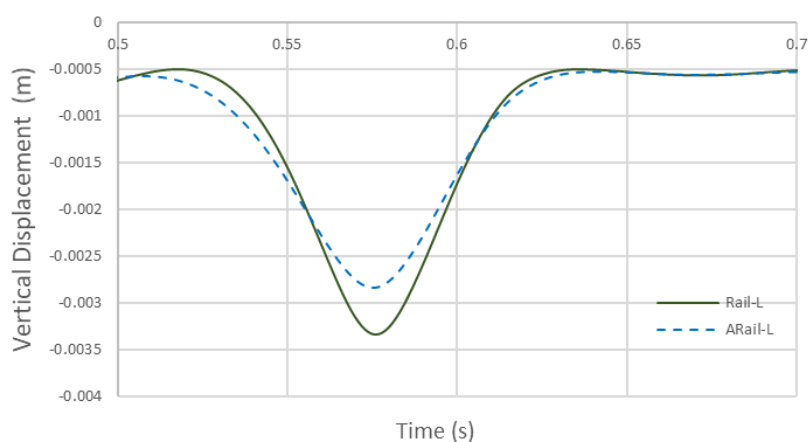


شکل ۱۵. تنش قائم بستر در زمان های مختلف با حرکت بار به سمت راست

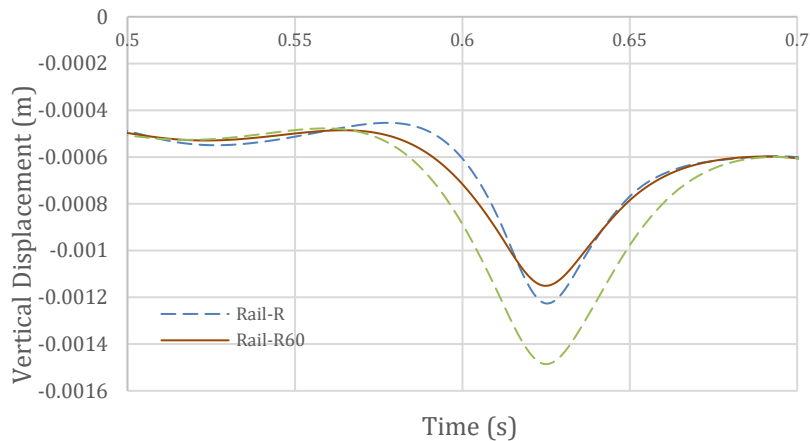
۳- تفسیر نتایج

مانند فرش یا پد ارتجاعی در زیر ریل در زیر خط بتنی عملی می شود. وجود این فرش باعث کاهش سختی خط در بخش بتنی و افزایش نشست خط می باشد. با در نظر گرفتن سختی موثر فرش ارتجاعی برابر ۱۰۰ کیلونیوتن بر میلیتر (مدول الاستیسیته ۷,۵ مگاپاسکال)، سختی خط در بخش بتنی برابر ۶۰ کیلونیوتن بر میلیتر می گردد. در این حالت سختی روسازی در دو بخش بتنی و بالاستی برابر می گردد. نتیجه به دست آمده از تحلیل خط در این حالت در نمودار شکل (۱۷) نشان داده شده است. در این نمودار استفاده از فرش ارتجاعی باعث افزایش ۲۵ درصدی نشست سطح ریل در بخش بتنی می گردد.

با بکارگیری ریل مضاعف و افزودن دو ریل با مشخصات مشابه ریل اصلی که منجر به افزایش دو برابری سختی خمشی ریل می گردد می توان نشست تفاضلی مابین دو بخش را کاهش داد. مقدار کاهش اختلاف نشست وابسته به طول ریل نصب شده در بخش بتنی و بالاستی می باشد. بر اساس نمودار شکل (۱۶) استفاده از ریل مضاعف با طول ۱۸ متر، باعث کاهش نشست ۱۶ درصدی در قسمت بالاستی خط می گردد. با احتساب این میزان نشست، نسبت نشست در بخش بالاستی به نشست در بخش بتنی ۲,۳ خواهد بود. راهکار دیگر برای کم کردن نشست تفاضلی قائم بین دو بخش از خط کاهش سختی روسازی خط در بخش بتنی می باشد. این راهکار با استفاده از لایه الاستیک



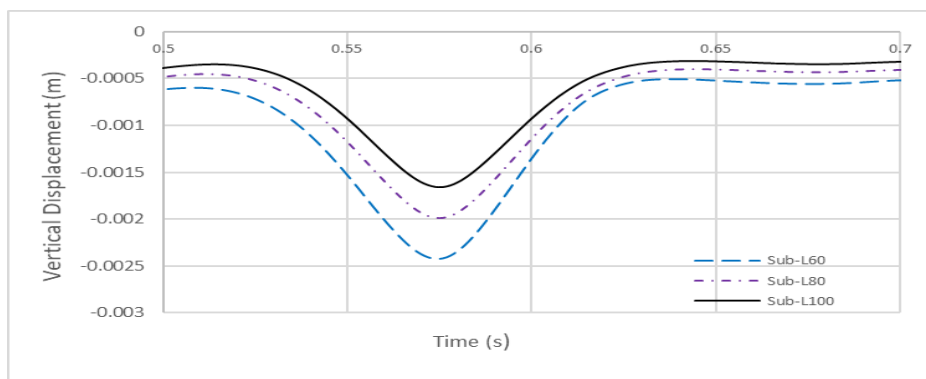
شکل ۱۲. نشست سطح ریل در صورت استفاده از ریل مضاعف



شکل ۱۳. تاثیر فرش ارتجاعی در نشست خط در بخش بتنی

می‌باشد. در نمودار شکل (۱۸) نشست بستر برای سه ضریب ارتجاعی متفاوت (۶۰، ۸۰، ۱۰۰ مگاپاسکال) رسم گردیده است. نمودارهای بیانگر این مطلب هستند که با افزایش مقدار ضریب ارتجاعی بستر، مقدار نشست کاهش چشمگیری می‌یابد. از این رو آماده سازی مناسب بستر در ناحیه انتقال در کاهش نشست تفاضلی خط تاثیرگذار خواهد بود.

با توجه به شکل (۱۳) ماکزیمم نشست ایجاد شده در سطح ریل و در فاصله دو تراورس از فصل مشترک ناحیه بالاستی و بتنی هنگام عبور بار برابر ۳،۳ میلیمتر است که این مقدار مجموع نشست بستر و نشست خط می‌باشد. سهم بستر از نشست کل ۲،۵ میلیمتر و سهم روسازی خط ۰،۸ میلیمتر می‌باشد که نشان دهنده سهم عمده نشست بستر (۷۵ درصد) در نشست کل خط



شکل ۱۴- نشست بستر با مشخصات مختلف

روشهای اشاره شده در دسته دوم و مرتبط در تغییر سختی روسازی از جمله روش ریل مضاعف استفاده می‌شود. بر اساس نتایج این پژوهش استفاده از ریل مضاعف در ناحیه انتقال سختی منجر به کاهش حدود ۱۶ درصدی اختلاف نشست می‌گردد. روش ریل مضاعف به همراه استفاده از لایه ارتجاعی در بخش اسلب به طور همزمان منجر به کاهش ۲۸ درصدی اختلاف نشست می‌گردد. در مطالعه‌ای مشابه برای کلاس سرعتی موضوع پژوهش حاضر بسته به سختی لایه ارتجاعی مورد استفاده تغییر مکان ریل در بخش سخت تر در ناحیه انتقال سختی دارای ریل مضاعف ۲۸ درصد افزایش یافته است. (Heydari, 2017)

طرح‌های کاربردی برای اجرا در ناحیه انتقال سختی در خطوط آهن را می‌توان به دو دسته تقسیم نمود. دسته اول شامل روش‌ها مرتبط با تغییر سختی در زیرسازی خط آهن هستند. مانند روش تقویت بستر و روش پیش دال و روش ستون سنگی. دسته دوم شامل روش‌های مرتبط با تغییر در روسازی خط آهن هستند. مانند روش ریل مضاعف یا تغییر در فاصله و ابعاد تراورس ها. با توجه تحلیل انجام گرفته در این مطالعه، می‌توان نتیجه گرفت که تاثیر روش‌های دسته اول در حل مساله تغییرات سختی خط بیشتر می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان ماهیت جسم خاکریز و ابنیه فنی در راه آهن دانست. در مواردی که امکان بکارگیری روش‌های کنترل تغییر سختی در زیر سازی فراهم نمی‌باشد از

۴- جمع‌بندی

روش‌های گروه دوم، به‌ویژه ریل مضاعف، گزینه‌ای مؤثر و قابل اجرا خواهد بود. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از ریل مضاعف در ناحیه انتقال سختی، منجر به کاهش حدود ۱۶ درصدی اختلاف نشست می‌شود. همچنین استفاده هم‌زمان از ریل مضاعف و لایه ارتجاعی در بخش بتنی، موجب کاهش حدود ۲۸ درصدی اختلاف نشست می‌گردد. این نتایج نشان می‌دهد که ترکیب روش‌های اصلاح روسازی می‌تواند در بهبود عملکرد ناحیه انتقال بسیار مؤثر باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از ریل مضاعف، به‌ویژه در ترکیب با لایه‌های ارتجاعی مناسب، راهکاری عملی برای کاهش نشست تفاضلی و بهبود رفتار دینامیکی خط در ناحیه انتقال محسوب می‌شود.

راهکارهای اجرایی برای کاهش اثرات تغییر سختی در ناحیه انتقال خطوط آهن را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد. دسته اول شامل روش‌های مرتبط با اصلاح و تغییر سختی در زیرسازی خط آهن مانند تقویت بستر، اجرای پیش‌دال و استفاده از ستون سنگی است. دسته دوم شامل روش‌های مرتبط با تغییر در روسازی خط آهن مانند استفاده از ریل مضاعف یا تغییر در فاصله و ابعاد تراورس‌ها است. بر اساس تحلیل انجام‌شده در این تحقیق، روش‌های گروه اول، یعنی اصلاح زیرسازی، در کنترل و کاهش مشکل تغییر سختی خط، اثرگذاری بیشتری دارند. دلیل این موضوع را می‌توان در ماهیت مصالح خاکی و ابنیه فنی در راه آهن جست‌وجو کرد. با این حال، در مواردی که امکان اجرای اصلاحات در زیرسازی وجود نداشته باشد، استفاده از

۵- مراجع

-Zakeri, J. H. Heydari-Noghabi (2016). Field study using additional rails and an approach slab as a transition zone from slab track to the ballasted track. *Journal Rail and Rapid Transit*, (0) 1-9, IMechE 2017

-Bizjaka, K.F (2016). Life-cycle assessment and repair of the railway transition zones of an existing bridge using geocomposite materials.

-Paixão, A (2015). Design and construction of backfills for railway track transition zones, *Rail and Rapid Transit*, Vol. 229(1) 58-70

-Wang, H (2017). Experimental analysis of railway track settlement in transition zones, *Journal Rail and Rapid Transit*, (0) 1-9, IMechE 2017.

-Wang, H (2017). Analysis of the Dynamic Wheel Loads in Railway Transition Zones Considering the Moisture Condition of the Ballast and Subballast, *Appl. Sci.* 2017, 7, 1208; doi:10.3390/app7121208

-Wang, H (2018). Methodology for the comprehensive analysis of railway transition zones, 2018 Elsevier Ltd. Computers and Geotechnics 99 (2018) 64-79.

-Hu, P. (2018). Dynamic responses of high-speed railway transition zone with various subgrade fillings, Elsevier Ltd, *Computers and Geotechnics* 108 (2019) 17-26.

-UIC 719 R, (2008). Earthworks and track bed for railway lines, 3rd Edition, February 2008.

-میر محمد صادقی، سید جواد (۱۳۸۷). اصول و مبانی تحلیل و طراحی خطوط بالاستی راه آهن.

-سازمان برنامه و بودجه کشور (۱۴۰۱). ضابطه ۳۰۱، مشخصات فنی عمومی روسازی راه آهن.

-سازمان برنامه و بودجه کشور (۱۳۸۳). ضابطه ۲۷۹، مشخصات فنی عمومی زیرسازی راه آهن.

-حیدری نوقابی، حمیدرضا، اسماعیلی، مرتضی و ذاکری، جبار علی (۱۴۰۳). بررسی عملکرد استفاده از ناحیه انتقال چند بخشی در خطوط ریلی به روش عددی. *پژوهشنامه حمل و نقل*، ۲۱(۱)، ۲۱۱-۲۲۰.

-Doyle, N.F (1980). Railway Track Design: "A review of current practice" Occasional paper No. 35. Bureau of Transport economics, Commonwealth of Australia, Canberra.

-H. Heydari-Noghabi (2017). Investigating the Influence of Auxiliary Rails on Dynamic Behavior of Railway Transition Zone by a 3D Train-Track Interaction Model.

-Esmacili, M, (2017). Numerical investigation of railway transition zones stiffened with auxiliary rails. *Transport Journal*, Vol.173, Issue 5.

Numerical Evaluation of the Performance of Double Rails in the Stiffness Transition Zone of the Kuhin Tunnel

Mehdi Moazemi, M.Sc., Grad., Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Masoud Fathali, Assistant Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

Babak Balazadeh, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran.

E-mail: m.fathali@bhrc.ac.ir

Received: March 2026- Accepted: August 2026

ABSTRACT

At the interface between the earthwork subgrade and engineering structures, a change in railway track stiffness is typically observed. This section of the railway, which significantly affects the dynamic forces acting on the track and the interaction between the track and rolling stock, is referred to in technical literature as the track stiffness transition zone. In this zone, the interaction of the railway superstructure with the embankment section and the concrete foundation of engineering structures behaves differently under the dynamic loads imposed by passing trains. In railway design, appropriate measures should be considered to ensure a gradual change in stiffness in this area in order to maintain proper track performance and ensure the safe operation of trains. One such measure that can be implemented in the track superstructure is the installation of double rails with a specified length between the two main rails, aimed at controlling differential settlements in this zone. In this study, the performance of double rails installed in the railway superstructure at the entrance of Kouhin Tunnel on the Qazvin–Rasht railway line was evaluated through numerical modelling. The results of the analyses showed that using additional rails with a length of 18 meters reduces settlement in the ballasted section of the track by 16 percent. Another approach to reduce the vertical differential settlement between the two sections of the track is to decrease the stiffness of the track structure in the concrete section. This can be achieved by using an elastic layer, such as elastic mat or pad, either beneath the rail or beneath the concrete track slab. The presence of such a mat reduces the stiffness of the track in the concrete section and increases track settlement, which helps bring the stiffness of the ballasted and concrete sections closer to each other.

Keywords: Stiffness, Transition Zone, Double Rail, Track Settlement, Superstructure