



بررسی و اصلاح زیرسازی خطوط راه آهن موجود جهت ارتقاء سرعت و تردد قطارهای سریع السیر

محمودرضا کی منش^۱، حسین کاکاخانی^۲، سحر خسروآبادی^۳

۱- استادیار مهندسی عمران دانشگاه پیام نور، تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران _ راه و ترابری، دانشگاه پیام نور، تهران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران _ راه و ترابری، دانشگاه پیام نور، تهران

kakakhani@yahoo.com

خلاصه

با ظهور خطوط سریع السیر به عنوان کاراترین روش حمل مسافر در مسیرهای بین شهری، تحوّل عظیم در حمل و نقل ریلی بوجود آمده است. با وجود بهبود قابل ملاحظه ای که این خطوط در سیستم حمل و نقل پدید آورده اند، وجود بارهای دینامیکی و ضربات شدید وارده بر خط در سرعت های بالا نگرانی هایی در مورد کفایت روشهای طراحی سنتی در طرح این خطوط به وجود آمده است.

با توجه به هزینه های بالای ساخت خطوط راه آهن سریع السیر، برخی از کشورها در جهت ارتقاء خطوط موجود و افزایش کیفیت و بهبود شرایط بهره برداری آنها به نتایج خوبی دست یافته اند که می تواند الگوی سایر کشورها باشد. ارائه ی یک روش مناسب جهت تعیین نشست و تغییر شکل در خطوط راه آهن در اثر عبور قطارهای سریع السیر با در نظر گرفتن مفاهیم اولیه ی بارگذاری خطوط و اصول ارتعاشات و دینامیک خاک از الزامات این تحقیق می باشد. القای ارتعاش در خطوط به وسیله ی حرکت قطارهای سریع السیر از مسائل پیچیده دینامیکی می باشد. انواع گوناگونی از ارتعاشات در اثر عبور قطار از ناهمواری چرخها یا ریلها و پستی و بلندی تراورسها حاصل می گردد. این ارتعاشات به سازه خط ارسال می گردند. پس از عبور ارتعاشات از لایه های مختلف، امواج حاصله موجب ایجاد ناراحتی برای ساکنین همجوار خطوط راه آهن و همچنین باعث نشست های احتمالی مجموعه ی خط در بخش هایی که دارای بستر ضعیف می باشند خواهد شد. در این مقاله در ابتدا مسئله ارتعاش خاک بوسیله ی روشهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته و سپس سعی شده مشخصات ارتعاشات فونداسیونها که همان زیرسازی خطوط راه آهن می باشد با مدنظر قرار دادن تاثیر سختی و میرایی خاک در انتقال و میرا نمودن ارتعاشات بررسی و به وسیله ی یک روش عددی نرم افزاری میزان تغییر مکان خاکریز محاسبه و ارزیابی گردد.

کلمات کلیدی: زیرسازی خطوط راه آهن، سرعت بحرانی، پدیده تشدید، تغییر مکان خط، میرایی

۱. مقدمه

حرکت قطارهای سریع السیر روی خط آهن بسته به سرعت و فاصله محورهای قطار باعث اعمال بارگذاری تناوبی در مدت زمان عبور قطار می گردد. این بارگذاری دارای دو مشخصه طول موج و فرکانس است. تفاوت بارگذاری استاتیک (بار مرده) ناشی از روسازی با بارگذاری دینامیک (بار زنده) ناشی از عبور قطارهای سریع السیر روی بستر راه آهن در این است که بستر تحت بارگذاری استاتیک با گذشت زمان به تحکیم و ثبات بیشتری می رسد، در حالیکه در اثر بارگذاری دینامیکی بر اثر گذشت زمان، بستر ثبات خود را از دست داده و دچار وضعیت بدتری می گردد.

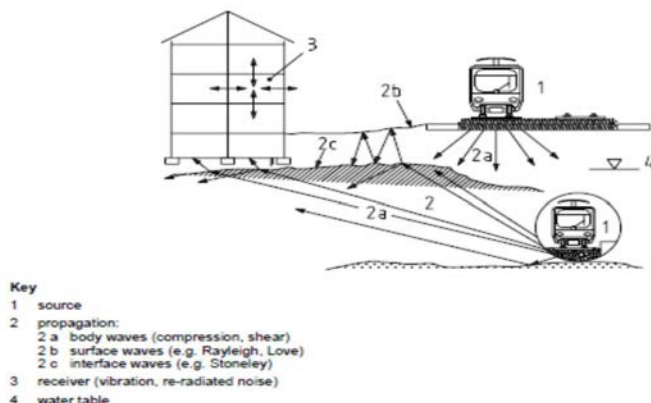
۲. فازهای اصلی انتقال ارتعاشات

چهار فاز اصلی برای انتقال ارتعاش از حرکت قطار بر راه آهن به خاکریز و سازه های مجاور به صورت زیر تعریف می شود (شکل شماره ۱):
الف- تولید: تحریک به واسطه تکرار منظم عمل حرکت بارهای چرخ بر روی ریلها و ضربه ناشی از چرخش چرخها بر روی ریلهای دارای سطوح ناهموار.

ب- ارسال: انتشار امواج در خاکریزها، بستر و خاکهای مجاور.

ج-وصول: رسیدن ارتعاشات به ساختمانهای مجاور.

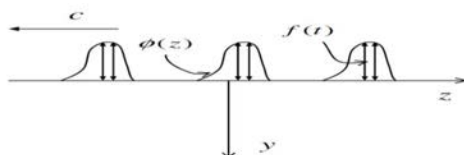
د-برخورد: کاهش ارتعاشات در اثر برخورد با موانعی مانند شمعها، ترنچها، پدهای ایزوله و....



شکل ۱- فازهای انتقال ارتعاشات [۲]

۳. تابع بار عمومی یک قطار متحرک

در خصوص ارتعاشات ناشی از قطار بر روی خاکها، بارها به خط و خاکهای زیر آن از طریق نقاط ارتباطی موجود بین چرخها و ریلها منتقل می شوند. بسته به طبیعت بارها، آنها به دو قسمت به صورت ترسیم شده در شکل (2) تقسیم می شوند. اولین قسمت به توزیع بارهای محوری عبوری یک نقطه ثابت به صورت $\Phi(Z-Ct)$ مربوط می شود، جاییکه C سرعت بار متحرک و $\Phi(Z)$ تابع توزیع بار هر محور می باشد. این بخش که تحریک فرکانس عبوری چرخها را باعث می شود منبع اصلی برای اجراء وابسته سرعت قطار در طیف ارتعاشی فرکانس کوتاه ۱ می باشد (کری لاو ۱۹۹۵). [۲]



شکل 2- تابع توزیع بار $\Phi(Z)$ و نیروی برهم کنش بین چرخ و ریل $f(t)$

دومین بخش به وسیله برهم کنش بین چرخها و ریلها تولید می شود که به وسیله $f(t)$ نمایش داده می شود، با چرخها حرکت می کند و از جهت حرکت Z مستقل است. یک عبارت عمومی برای بار متحرک $P(x,z,t)$ که در طول محور Z حرکت می کند به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} P_x &= \delta(x)\Phi_x(z-ct)f_x(t) \\ P_y &= \delta(x)\Phi_y(z-ct)f_y(t) \\ P_z &= \delta(x)\Phi_z(z-ct)f_z(t) \end{aligned} \quad (1)$$

به طوری که زیر نویسههای Z, Y, X جهت اعمال بارها را مشخص می کنند هر دو تابع $\Phi(Z)$ و $f(t)$ در بخش های بعدی محاسبه خواهند شد.

به وسیله به کارگیری تبدیل فوریه ۲ در معادله (1) با متحرک به صورت زیر بیان می شود:

$$\begin{aligned} \hat{P}_x &= \frac{1}{2\pi} \tilde{\Phi}_x(k_z) \tilde{f}_x(\omega + k_z c) \\ \hat{P}_y &= \frac{1}{2\pi} \tilde{\Phi}_y(k_z) \tilde{f}_y(\omega + k_z c) \\ \hat{P}_z &= \frac{1}{2\pi} \tilde{\Phi}_z(k_z) \tilde{f}_z(\omega + k_z c) \end{aligned} \quad (2)$$

1-Low Frequency Vibration Spectra

2-Fourier transformation



که $\Phi(k_z)$ و $\tilde{f}(\omega)$ به ترتیب تبدیلات فوریه یک بعدی $\Phi(Z)$ و $f(t)$ راجع به متغیرهای t و Z هستند. در این بخش نشانه های $\tilde{\omega}$ و \tilde{t} به ترتیب برای نشان دادن یک تبدیل فوریه سه گانه و یک بعدی استفاده می شوند. [۲]

۴. حداکثر مقادیر نشست قابل تحمل

• نشست کل

بروز نشست در بستر خاکریز از دو جنبه حائز اهمیت است. اول آنکه در صورت ادامه روند نشست بستر پس از اتمام عملیات ساختمان، روسازی نیز به تبعیت از زیر سازی نشست پیدا کرده و در نهایت تغییر شکل های حاصله از حد قابل تحمل برای حرکت ایمن و آسوده قطار بر روی ریل تجاوز می کند و ثانیاً با ادامه نشست قابل ملاحظه بستر و با توجه به اینکه نشست خاکریز همواره با تغییر شکل های افقی بستر و بازشدگی و انبساط بخش های خاکریز همراه است، این مسئله به کاهش تراک خاک کوبیده شده خاکریز و افت کیفیت در بخش های تحتانی آن منجر می شود.

لذا مقادیر نشست پسماند ۱ خاکریز بر روی بستر پس از اتمام عملیات ساخت آن، بسته به نوع روسازی و سرعت طرح، به شرح زیر محدود می گردند:

- در سیستم روسازی بالاستی در سرعت های طرح ۱۶۰ و ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت، نشست پسماند به ترتیب به مقادیر ۲۰ و ۱۵ سانتی متر محدود می گردد.
- در سیستم روسازی بدون بالاست، در سرعت های طرح ۱۶۰ و ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت، نشست پسماند به ترتیب به مقادیر ۶ تا ۳ سانتی متر محدود می گردد.

• نشست نسبی

صرف نظر از محدودیت مقادیر مطلق نشست در خاکریزها، آنچه از اهمیت ویژه ای برخوردار است، احتراز از اعمال شتابهای غیر قابل تحمل به قطار سریع السیر است که از طریق کنترل مقادیر نشست نسبی در طول خط قابل بررسی و مطالعه است.

مقادیر نشست نسبی در طول خط بسته به سرعت طرح و نوع روسازی (بالاستی یا بدون بالاست) به مقادیر زیر محدود می گردد:

در روسازی بالاستی با سرعت طرح ۱۶۰ و ۲۵۰ کیلومتر در ساعت، نشست نسبی در طول ۱۰ متر از خط نباید به ترتیب از ۲۰ و ۱۰ میلیمتر تجاوز نماید. در سرعت های طرح بالا (در حدود ۲۵۰ کیلومتر در ساعت)، به طور استثنایی در محل خاکریز منتهی شونده به محل پله ۲، مقدار نشست خاکریز در فاصله ۳۰ متری از کوله پل می تواند به حد ۲۰ میلیمتر از تراز عرشه پل برسد. در حالت عمومی در خطوط با روسازی بالاستی مقادیر نشست نسبی باید به حد آسایش به شرح زیر محدود شوند:

$$f < 0.625 \frac{L^2}{V_{tr}^2} \quad (3)$$

که در آن:

L : فاصله بین دو نقطه که نشست نسبی بین آنها مد نظر است، بر حسب متر

V_{tr} : سرعت حرکت قطار بر حسب متر بر ثانیه

f : نشست حد آسایش مسافر

در روسازی بدون بالاست در سرعت های طرح ۱۶۰ و ۲۵۰ کیلومتر در ساعت، نشست نسبی به ترتیب به مقادیر ۶ و ۳ میلیمتر محدود می گردد که البته دلیل آن حساسیت شدید اینگونه روسازی به نشست است. [۱]

۵. مفهوم سرعت حدی^۳

در خطوط آهن مخصوص سرعت های معمولی (کمتر از حد ۱۳۰ تا حداکثر ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت)، بار وارده از سوی محورهای قطار به صورت یکی پس از دیگری بر تراورسها و سپس جسم خاکریز منتقل می گردد و روند اعمال فشار به خاکریز با حرکت خود قطار به صورت پیش رونده،

1- Residual Settlement

2- Approach Embankments

3-Critical Speed

حرکت کرده و امواج حاصل از حرکت قطار در ضخامت روسازی و بخشی از بستر آن مستهلک می گردند. در حالی که در خطوط آهن مخصوص قطارهای سریع السیر امواج حاصل از حرکت قطار با فرکانس بیشتر و قوی تر در حجم خاکریز نفوذ می کنند. از آنجا که سرعت سیر امواج در خاکها گاه تا حدود ۱۵۰ کیلومتر بر ساعت کاهش می یابد، لذا با افزایش سرعت حرکت قطار از حدی به بعد (تقریباً در حدود سرعت انتشار امواج در خاک بستر) نوعی تشدید دینامیکی^۱ در جسم خاکریز و بستر آن ایجاد می گردد که در پی آن خاک از خود رفتار غیر خطی بروز داده و تغییر شکل های پیش رونده ای در بدنه خاکریز و روسازی خط متکی بر آن رخ می دهد.

از جمله اثرات تشدید دینامیکی در بدنه خاکریز، بروز خستگی در ریل، نشست پیش رونده، تغییر شکل لایه بالاست و تغییر باربری خط است که می تواند عواقب ناگواری را برای قطار باعث گردد. مقدار سرعتی که با تجاوز از آن، تشدید دینامیکی در زیر سازی ایجاد می گردد، به عنوان سرعت حدی خط^۲ نامیده می شود. [۱] و [۱۹]

۶. مدلسازی توسط روش تفاضل محدود

در روش تفاضل محدود هر مشتق در دسته معادلات به طور مستقیم به وسیله عبارت جبری بر حسب متغیرهای فیزیکی (یعنی تنش یا تغییر مکان) در نقاط گسسته فضا جایگذاری می شود که مقدار این متغیرها در المانها مشخص نیست. در مقابل در روش اجزاء محدود مقادیر فیزیکی (تنش، جابجایی) در هر المان بر اساس یک مدل پیش بینی شده تغییر می کند که به وسیله توابع مشخصی این عوامل کنترل می شوند. شیوه حل مسئله بر مبنای سازگاری این عوامل بر اساس حداقل کردن انرژی یا خطا است. هر دو روش منجر به حل یک سری معادلات جبری می شود. حتی اگر این معادلات به روش های کاملاً متفاوت حل شوند در بیشتر موارد نتایج برای هر دو روش یکسان خواهد بود.

در روش تفاضل محدود توده مدل شده به تعدادی جزء دو بعدی تقسیم می شود که در نقاط گرهی ارتباط داخلی دارند، معادلات حرکت در هر گره به روش گذر زمانی حل می شود که بدین ترتیب رفتار سیستم را می توان به صورت گذر زمانی بررسی کرد.

در این پژوهش از نرم افزار FLAC که مبتنی بر روش عددی برای حل معادلات اساسی به روش تفاضل محدود می باشد استفاده شده است.

[۹] و [۱۸]

۷. ضوابط طراحی دینامیکی خاکریزها

بر اساس تحقیقات انجام شده، حد سرعتی معادل ۶۰ درصد سرعت حدی، تغییر شکلها قابل برگشت بوده و این حد را می توان سرعت حد پایین برای شرایط خاص تحلیل انجام شده دانست. در این خصوص، لازم است که خاکریز و روسازی (بصورت توأم) برای سرعتی طرح گردند که بیشتر از ۶۰٪ سرعت حدی آنها نباشد. به عبارت دیگر مجموعه خاکریز و روسازی آن از لحاظ دینامیکی باید برای حدود ۱/۷ برابر سرعت طرح، طراحی گردند.

تغییر شکل پذیری سطح ریل (که تابع سختی بستر آن است)، تأثیر قابل توجهی بر مسائل تعمیر و نگهداری و آسایش مسافین دارد. تغییر شکل پذیری در این بخش، با نشست نسبی یا انحرافهای خط متفاوت است. حرکت بر روی ریلهای فلزی متکی بر بستر صلب باعث تشدید ارتعاشات و لرزشها در روسازی (بلاست یا دال بتنی) و ایجاد خستگی در آنها می گردد. از طرف دیگر، تغییر شکل پذیری زیاد نیز در خود ریل نوعی فرسودگی و خستگی به دنبال دارد. از این رو مقدار تغییر شکل ارتجاعی ریل اثر قرارگیری چرخ با نیروی ۲۰۰ کیلو نیوتن به مقادیر زیر محدود می گردد:

- سرعت کمتر از ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت: نشست ارتجاعی بین ۱/۰ تا ۲/۲ میلیمتر

- سرعت بین ۱۶۰ تا ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت (قطار سریع السیر): نشست ارتجاعی بین ۱/۵ تا ۲/۰ میلیمتر. [۱] و [۲۰]

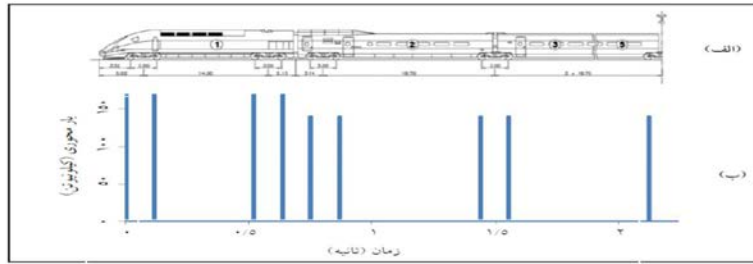
۸. مشخصات بارگذاری ناشی از حرکت قطار

در شرایط واقعی، بار قطار از طریق سطح تماس چرخ و ریل بر خط اعمال می گردد. در این راستا استفاده از تئوری هرتز امکان تعریف بارگذاری به صورت سطوح گسسته را در محل هر چرخ فراهم می آورد. با توجه به عدم همگرایی حل مدل تحلیلی در شرایط استفاده از بار ضربه ای تولید شده، معمولاً از شکل هارمونیک بار که توسط تبدیل فوریه قابل استخراج می باشد، استفاده می گردد. این مسئله باعث می شود که امکان انتخاب گام های زمانی بسیار کوچک و بالا بردن دقت حل و یا گام های انتخاب گام های زمانی بزرگ و کاهش زمان حل فراهم گردد. مهمترین گام در تعریف بارگذاری هارمونیک، تعیین فرکانس مناسب بار است. به عبارت دیگر صحت بارگذاری توسط فرکانس آن که نشان دهنده سرعت بارگذاری

^۱ - Dynamic Amplification

^۲ - Critical Speed

است کنترل می شود. معمولاً برای تعیین فرکانس غالب از تبدیل سریع فوری استفاده می گردد. تبدیل سریع فوری یک روند محاسباتی مناسب و مؤثر برای روش تبدیل انفصالی فوری است.
با استفاده از تبدیل فوری می توان حل مسئله با بارگذاری غیر تناوبی را از حوزه زمان به حوزه فرکانس منتقل نمود. در نتیجه با در نظر گرفتن فرکانس های غالب، بارگذاری ساده شده و مسئله نیز ساده تر حل می شود.
بارگذاری حاصل از عبور قطار، پیچیده و دارای فرکانس های متعددی است شکل (۳) نمایی از قطار سریع السیر تالیس ۱ و فاصله بین محورهای آن را نشان می دهد. همچنین جدول (۱) مشخصات قطار تالیس را نمایش می دهد.



شکل ۳-الف- نمایی از قطار سریع السیر Thalys، ب- بارگذاری ضربه ای معادل قطار

جدول ۱- مشخصات قطار Thalys

واگن داخلی	واگن خارجی	لکوموتیو	واگن / محور
۱۸/۷۰	۲۱/۸۴	۲۲/۱۵	طول واگن Lt(m)
۱۸/۷۰	۱۸/۷۰	۱۴	فاصله بین بوژیها Lb(m)
۳	۳	۳	فاصله بین محورها La (m)
۱۷۰۰۰	۱۴۵۰۰	۱۷۰۰۰	بار محوری Mt (kg)

بنابراین با توجه به نوع قطار عبوری و سرعت قطار ۲۵۰ km/h فرکانس عبور بوژی واگن ها برابر ۳/۷۲ هرتز و فرکانس عبور محورها برابر ۲۳/۱۵ هرتز می باشد.

فرکانس عبور بوژی و محور در نتایج اندازه گیری های میدانی نیز به دست آمده است ۲ فرکانس عبور بوژی و فرکانس عبور محورها را به عنوان فرکانس های اصلی سیستم، در اندازه گیری های میدانی انجام شده به دست آورده اند. بنابراین برای توسعه و حل معادلات حاکم بر سیستم از رابطه هارمونیک ایده آل زیر استفاده می شود.

$$F = P(1 - \cos 2\pi ft) \quad (۴)$$

در رابطه (۴)، P بار محوری f فرکانس اعمال بار (معادل فرکانس عبور بوژی) و t زمان می باشد. در این تحقیق بار محوری هر چرخ برابر ۸۵۰۰۰ N فرکانس برابر ۳/۷۲ Hz (فرکانس عبور بوژی) در نظر گرفته شده است.

۹. مشخصات مکانیکی خاک بستر و روسازی خط ریلی

مشخصات فنی خاک بسترو لایه های روسازی در نظر گرفته شده در این تحقیق بر اساس جدولهای (۲) و (۳) می باشد.

1-Thalys

¹- Galvin and Dominguez and Degrande

جدول ۲- مشخصات مکانیکی خاک بستر خط ریلی [۱۰]

نوع خاک یا مصالح						واحد	مشخصات خاک
Sand	R	S3	S2	S1	S0		
1700	2100	1800	1700	1650	1600	Kg/m ³	چگالی (d)
1.08e ⁷	1.67e ⁹	6.67e ⁷	2.08e ⁷	1.11e ⁷	4.63e ⁶	N/m ² (pa)	مدول حجمی (k)
9.29e ⁶	1.88e ⁹	5.71e ⁷	1.79e ⁷	7.69e ⁶	3.68e ⁶	N/m ²	مدول برشی (G)
31	20	30	30	20	10	0 درجه	زاویه اصطکاک (f)
1000	150000	10000	12000	36000	10000	N/m ²	چسبندگی (C)
1	1	3	3	1	1	0 درجه	زاویه اتساع (di)

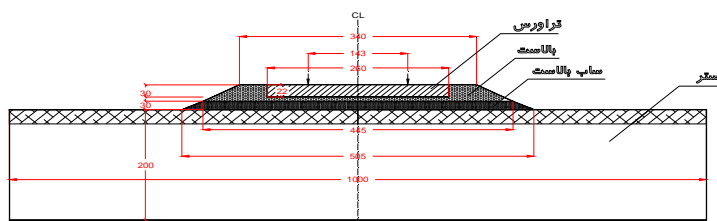
جدول ۳- مشخصات مکانیکی لایه های روسازی [۱۰]

نوع لایه		واحد	مشخصات
بالاست	زیر بالاست		
۲۰۹۲	۲۰۰۰	Kg/m ³	چگالی (d)
۱e ^۷	۱/۲۵e ^۷	N/m ² (pa)	مدول حجمی (k)
۸/۵۷e ^۷	۱/۰۷e ^۷	N/m ²	مدول برشی (G)
۳۱	۲۹	۰ درجه	زاویه اصطکاک (f)
۱۰۰۰	۱۰۰۰	N/m ²	چسبندگی (C)
۲	۱	۰ درجه	زاویه اتساع (d)

ضمناً مشخصات مکانیکی تراورس نیز به شرح زیر است :

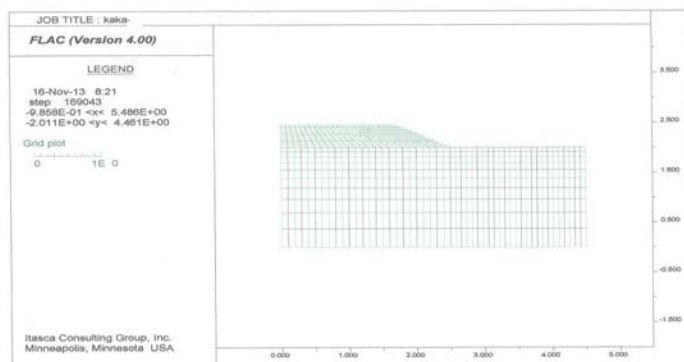
- چگالی (d): ۲۴۸۰ Kg/m³
- مدول برشی (G): ۱۰ N/m² ۱/۰۲e
- مدول بالک (k): ۱۰ N/m² ۱/۲۲e

مقطع عرضی در نظر گرفته شده به صورت شکل (۴) می باشد که به دلیل وجود تقارن و سرعت در انجام محاسبات نیمی از مقطع در تحلیل در نظر گرفته شده است.

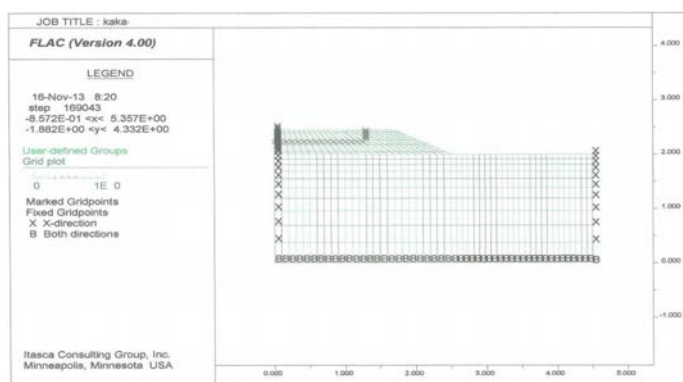


شکل ۴- مقطع عرضی خط ریلی [۴] و [۵]

پس از وارد نمودن اطلاعات هندسی مقطع در نرم افزار FLAC شبکه مش بندی به صورت شکل های (۵) و (۶) خواهد بود.



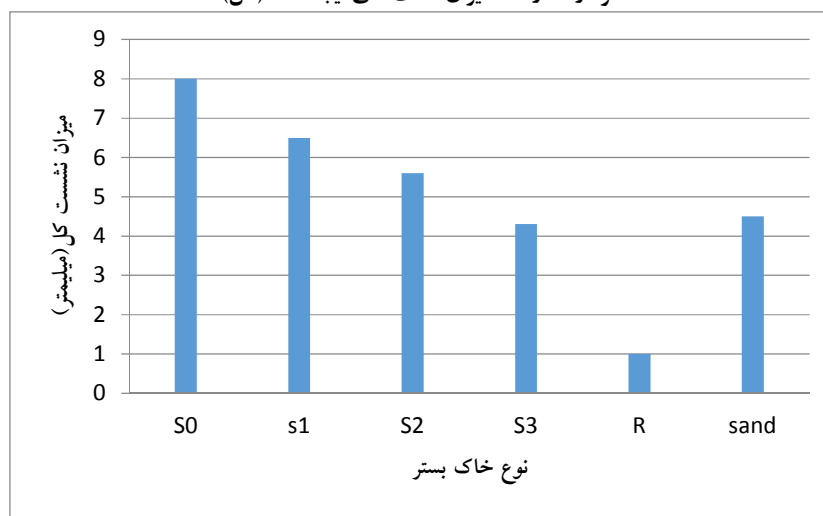
شکل ۵- مش بندی مدل



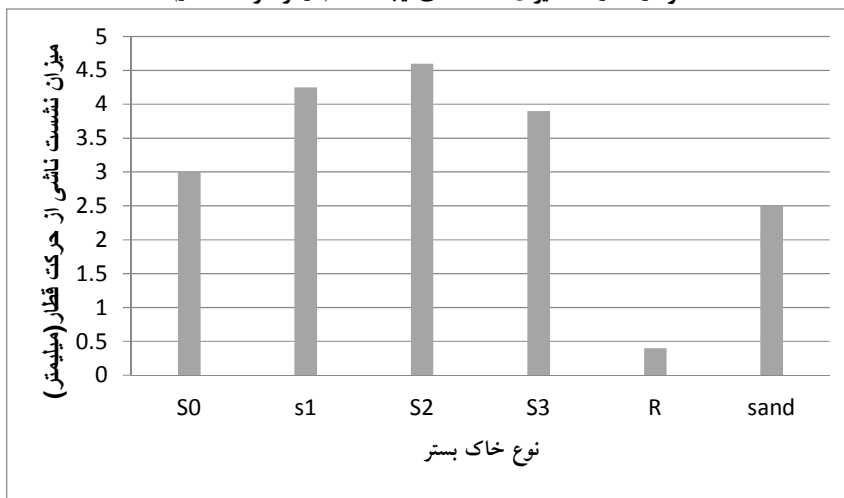
شکل ۶- تعیین مرزهای مدل

با توجه به انواع خاک بسترهای در نظر گرفته شده نتایج حاصل از تحلیل درخصوص میزان نشست های ایجاد شده به صورت نمودارهای شماره (۱) و (۲) می باشد.

نمودار شماره ۱- میزان نشست های ایجاد شده (کل)



نمودار شماره ۲- میزان نشست های ایجاد شده (دراثر حرکت قطار)

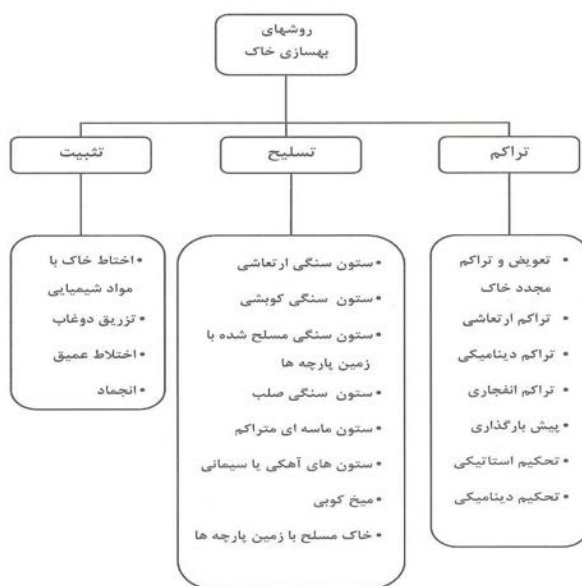


با توجه به ضوابط دینامیکی خاکریزها مطابق با بند ۳-۲-۴-۶-۴ نشریه ۳۹۴ که نشست حداکثر را به ۱/۵ تا ۲ میلیمتر جهت حرکت قطار با سرعت ۲۵۰ km/hr محدود نموده است، و با عنایت به توضیحات مندرج در فوق کلیه خطوط با مشخصات خاک بستر بررسی شده به استثنای خط راه آهن با بستر R نیاز به اصلاح و تقویت خواهند داشت.

۱۰. روش های اصلاح و تقویت بستر خطوط راه آهن

روش های اصلاح و بهسازی خاک را می توان از دیدگاه های مختلف طبقه بندی کرد. با توجه به فلسفه روش های بهسازی خاک، این روش ها به سه گروه کلی زیر تقسیم می شوند (شکل ۷).

- ۱- تراکم: این روش معمولاً اقتصادی ترین امکان تراکم ساختن ذرات برای هر دو خاک های چسبنده و غیر چسبنده است.
- ۲- تسلیح: در این روش با ساخت و قرار دادن اجزای تقویتی درون توده خاک، شرایط خاک از لحاظ مهندسی بهبود می یابد. در این روش اگر تسلیح با استفاده از ستونهای سنگی، ماسه ای، سیمانی، یا آهکی انجام شود نتیجه این عمل آوری گاهی زمین مرکب نیز نامیده می شود. اما اگر برای تسلیح از زمین پارچه ها استفاده گردد، این وسیله در وهله نخست کار تسلیح را انجام می دهد، اما گاهی در حالت های سودمند دیگری نیز به کار می رود.
- ۳- تثبیت: این روش شامل افزودن مواد خارجی به منظور چسباندن ذرات خاک می باشد که در نتیجه مقاومت خاک افزایش یافته و تراکم پذیری و نفوذ پذیری آن کاهش می یابد. برای تزریق یک سیال گرانیو جهت کاهش نسبت تخلخل یا پر کردن ترک های سنگ مورد استفاده قرار می گیرد. متداول ترین سیال گرانیو مخلوطی است از آب و سیمان یا آب و آهک و مواد افزودنی مانند ماسه ریز، رس بنتونیت و نرمه خاکستر است. گاهی اوقات از قیر و مواد شیمیایی معینی نیز استفاده می شود. [۱۱] و [۱۶]



شکل ۷- تقسیم بندی انواع روشهای بهسازی خاک [۱۱]

۱۱. نتیجه گیری

در بررسی انجام شده خط ریلی با بستر نوع S0 دارای میزان نشست حدود ۸ میلیمتر، خط ریلی با بستر نوع S1 دارای میزان نشست حدود ۶/۵ میلیمتر، خط ریلی با بستر نوع S2، دارای میزان نشست ۵/۶ میلیمتر، خط ریلی با بستر نوع S3، دارای میزان نشست ۴/۳ میلیمتر، خط ریلی با بستر نوع R دارای میزان نشست ۱ میلیمتر و خط ریلی با بستر نوع sand دارای میزان نشست ۴/۵ میلیمتر می باشد. در پایان به روش های گوناگون اصلاح و بهسازی بستر خطوط ریلی پرداخته شد. مناسبترین روش جهت اصلاح و بهسازی خط، روش تثبیت خط توسط تزریق دوغاب به لایه خاک بستر پیشنهاد می گردد.

۱۲. مراجع

- ۱- معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری (۱۳۸۶)، "دستورالعمل طراحی و نظارت بر روسازی راه آهن سریع السیر" نشریه شماره ۳۹۴.
- 2-Y.B.yang & H.H Hung (2009) 'Wave propagation for train-induced vibration' A finite/ infinite element approach.
- ۳- امین صدر آبادی، حسین، (۱۳۸۹) " راه آهن سریع السیر" انجمن حمل و نقل ریلی ایران.
- ۴- ا.پروفلیدیس، ترجمه محسن حسنقلیان و حسین قهرمانی، (۱۳۸۰) "مهندسی راه آهن"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.
- ۵- معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، (۱۳۸۳) "آئین نامه طرح هندسی راه آهن"، نشریه شماره ۲۸۸.
- 6-Design of new lines for speeds of 300-350 km/hr state of the art, version dated 25 october 2001,UIC
- 7- Michael Thomson Hendry, (2007) "Train-induced dynamic Response of railway trach and embankments on soft peaty foundations", A Thesis submitted to the college of graduate studies and research in partial fulfillment of the degree of master of science in the department of civil engineering,university of Saskatchewan,Saskatoon, Canada.
- ۸- میرمحمدصادقی، سپیدجواد، (۱۳۸۷) "آنالیز و طراحی روسازی بالاستی راه آهن" انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.
- ۹- ضمیران، سیاوش، (۱۳۹۲) "مدلسازی و تحلیل سازه های خاکی و سنگی در نرم افزار FLAC".
- ۱۰- اسدی درباغی، مرتضی، پایان نامه کارشناسی ارشد، (۱۳۸۸) " بررسی روشهای استفاده از ژئوسنتتیک در ارتقای کیفیت لایه های روسازی راه آهن"، دانشکده فنی دانشگاه تهران.
- ۱۱- قضاوی، محمود. نظری افشار، جواد، (۱۳۸۸) " طراحی و روشهای اجرای ستونهای سنگی".
- ۱۲- معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، (۱۳۸۳) "مشخصات فنی عمومی زیرسازی راه آهن"، نشریه شماره ۲۷۹.
- ۱۳- ایسولده، کوئن راد، ترجمه محمدزاده، سعید و ذاکری سردرودی، جبار علی، (۱۳۸۸) " خطوط ریلی پیشرفته (راه آهن و مترو) جلد اول و دوم، انجمن حمل و نقل ریلی ایران.
- ۱۴- جازیار، محمدحسن و قناد، زینب، (۱۳۸۶) "مبانی دینامیک خاک بانگرش ویژه به مهندسی زلزله"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.



- 15-Bowles, J.E. (1996); "Foundation analysis and design", Fifth edition John Wiley and sons, USA.
- ۱۶- معاونت امور مهندسی و فناوری وزارت نفت، "راهنمای انجام مطالعات و طراحی ژئوتکنیکی صنعت نفت در منطقه ویژه اقتصادی پتروشیمی ماهشهر".
- 17- Cernica J. N., (1995); "Geotechnica; engineering foundation design" John Wiley and sons.
- 18- "Fish in Flac", Flac. Fast lagrangian Analysis of continua, I TASCAs Consulting Eng. Minnesota.
- 19- Kenny, J.T (1954); "Steady – state vibrations of Beams on elastic Foundation for Moving Load". Journal of Applied Mechanics.
- 20-Krylov, V. (1995); "Generation of ground Vibration by Superfast trains" Applied Acoustics.
- 21-Paolucci, R., and Spinelli, D. 2006. "Ground Motion by train passage" Journal of Engineering Mechanics.
- 22- Lamb, H. (1904); "On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid", phil. Trans. Roy. Soc. London, ser. A, CCIII.
- 23- "Training in high speed Systems" February 2007, RAI-UIC, Theran, Iran.
- 24- "6th word congress on High speed Rail proceeding", Mar, 2008, Amsterdam.
- 25- SySTRA, NOV. 2008, "General Training about Railway operation". Tehran, Iran.
- 26- [Http://WWW.uic.org/gv,2009](http://WWW.uic.org/gv,2009).
- 27- [Http://WWW.uic.org/2009-2010](http://WWW.uic.org/2009-2010).
- 28-Fryba,L. (1972). "Vibration of Solids and Structures under Moving Load", Noordhoff. International publishing, Groningen, the Nether lands.