بررسی اثر ژئوسنتتیک‌ها بر افزایش مدول خط آهن بر اساس نتایج بارگذاری میدانی و مقایسه آن با نتایج تحلیل عددی

مرتضی اسماعیلی (نویسنده مسئول)، استادیار دانشکده مهندسی راه‌آهن دانشگاه علم و صنعت ایران
مسعود نصرآزادانی، استادیار دانشکده مهندسی راه‌آهن دانشگاه علم و صنعت ایران
اصغر سعادت راد، کارشناسی ارشد خط و سازه ریلی دانشکده مهندسی راه‌آهن دانشگاه علم و صنعت ایران
Email: m_esmaeili@iust.ac.ir

چکیده

مزیت‌های غیرقابل انکار حمل‌ونقل ریلی در مقایسه با سایر گزینه‌های حمل‌ونقل ، توسعه روزافزون خطوط ریلی جدید و همچنین بازسازی و بهسازی مسیرهای قدیمی در سراسر دنیا را به دنبال داشته است. یکی از مشکلات اجرا و بازسازی خطوط متکی بر بسترهای سست، عدم تأمین باربری لازم و ایجاد نشست قابل ملاحظه در خط می‌باشد. جهت حل عملی این مسأله در خطوط ریلی راه‌حل‌های متنوعی جهت بهسازی بستر به صورت مکانیکی و شیمیایی پیشنهاد گردیده است. یکی از روش‌های نوین مسلح‌سازی بستر خط ریلی به منظور افزایش ظرفیت باربری، استفاده از مصالح مصنوعی یا ژئوسنتتیک‌ها می‌باشد. از آنجاکه بخش عمده‌ای از مزایای استفاده از چنین روشی جهت بهسازی بستر به‌طور قطع اثر خود را در سختی خط ریلی منعکس خواهد نمود، لذا در تحقیق حاضر بحث سختی سنجی خطوط ریلی با بستر مسلح شده با ژئوتکستایل و ژئوگرید مد نظر قرار گرفته است. برای این منظور بخشی از خط راه‌آهن در دست احداث اهواز-خرمشهر که بر بستر ریزدانه رسی-سیلتی قرارگرفته است انتخاب و در چهار مقطع مختلف خط با بستر مسلح شده با ژئوتکستایل، ژئوگرید، ترکیب ژئوتکستایل و ژئوگرید و بستر طبیعی تحت آزمایش بارگذاری ناشی از واگن حمل بالاست در دو حالت پر و خالی قرار گرفته است. بر مبنای نتایج اندازه‌گیری تغییر مکان روی ریل و با به‌کارگیری روش تالبوت، سختی خط در مقاطع چهارگانه محاسبه و با یکدیگر مقایسه گردیده است. در ادامه با انجام مدلسازی عددی به روش اجزای محدود و به کمک نرم‌افزار Plaxis۳D کالیبراسیون مدل عددی با نتایج بارگذاری میدانی صورت گرفته است. در پایان نیز با استفاده از مدل عددی کالیبره شده تحلیل حساسیت روی پارامتر سختی محوری EA مصالح ژئوگرید صورت گرفته شده و نقش آن بر میزان سختی خط مطالعه شده است. نتیجه مطالعات صورت گرفته افزایش سی و یک درصدی سختی قائم خط را در شرایط استفاده از ژئوگرید با بیشترین سختی محوری را نشان می‌دهد .

واژه‌های کلیدی: مسلح‌سازی، ژئوگرید، ژئوتکستایل، بستر خط آهن، مدول خط آهن

۱. مقدمه

امروزه دامنه وسیع کاربرد حمل‌ونقل ریلی در دنیا اعم از نقل و انتقال بار و مسافر این سیستم را به عنوان روشی ایمن و اقتصادی در مقایسه با سایر روش‌های حمل‌ونقل مطرح نموده است. از این رو است که در کشور ایران نیز در سال‌های اخیر توجه خاصی به این مقوله معطوف شده و حجم بالایی از سرمایه‌گذاری‌های داخلی و خارجی به سمت راه‌اندازی خطوط جدید گسیل شده است. از طرف دیگر اجرای خطوط ریلی جدید به عنوان یک پروژه عمرانی با چالش‌های متنوعی روبه‌روست. این چالش‌ها به‌طور عمده در ساخت دو جزء اساسی خط ریلی یعنی زیرسازی و روسازی نمود می‌یابد. البته ابنیه فنی راه‌آهن اعم از پل‌ها، تونل‌ها و سازه‌های حائل نیز در جای خود دارای اهمیت و جایگاه ویژه‌ای از نظر فنی و اقتصادی می‌باشند. لیکن از نظر اجرایی وزن عمده عملیات اجرا، بهسازی و بازسازی خطوط ریلی به اجرای زیرسازی اختصاص می‌یابد چراکه روسازی عمدتاً دارای سیستم پیش‌ساخته بوده و بازرسی، عیب‌یابی و اصلاح آن نسبت به زیرسازی آسان‌تر و کم‌هزینه‌تر می‌باشد. از طرف دیگر خرابی زیرسازی، عملاً خرابی و ناکارآمدی روسازی را نتیجه می‌دهد. که این موضوع به‌طور عمده ناشی از تغییر مکان‌های دائمی بستر خط ریلی است. این نوع تغییر مکان‌ها به‌طور عمده در بسترهای ریزدانه رسی- سیلتی تحت اثر بار تکراری راه‌آهن رخ می‌دهد. وقوع این تغییر مکان‌ها در شرایط پیش‌رونده می‌تواند به خرابی‌هایی از نوع لغزش بستر بینجامد. به‌طورکلی در چنین مواردی عیوب بستر را می‌توان در عدم تأمین الزامات باربری و کنترل نشست خط ریلی جستجو نمود. از جمله راهکارهایی که به‌طور معمول برای غلبه بر این مشکلات ارائه می‌شود، استفاده از محصولات ژئوسنتتیک روی بستر سست می‌باشد. این گزینه معمولا در مقایسه فنی- اقتصادی با گزینه‌هایی همچون جاگذاری مصالح بستر تا عمق مشخصی با مصالح مرغوب، تراکم، تثبیت شیمیایی و ... مورد بررسی و انتخاب قرار می‌گیرد. در عین حال استفاده از ژئوتکستایل در خط به عنوان جایگزینی برای زیربالاست و در بعضی موارد به عنوان فیلتر نیز مد نظر بوده است. این در حالی است که ژئوگرید با مقاومت کششی قابل توجه و مقدار ناچیزی مقاومت خمشی معمولا برای افزایش باربری بستر به کار گرفته می‌شود. در بعضی مواقع برای استفاده از هر دو خصوصیت به‌طور همزمان از ترکیب ژئوگرید[1] و ژئوتکستایل[2] به صورت ژئوکامپوزیت[3] استفاده می‌شود.

استفاده از ژئوسنتتیک‌ها در خطوط راه‌آهن به دهه هفتاد برمی‌گردد. این موضوع بیانگر تجربه تقریبا ۴۰ سالهٔ استفاده از ژئوسنتتیک‌ها در راه‌آهن دنیا به منظور استفاده از مزایای فنی - اقتصادی این محصول می‌باشد. در ابتدای به‌کارگیری این محصول تقریباً فقط از ژئوتکستایل نبافته[4] در ساخت راه‌آهن استفاده میشد. این لایه نبافته به عنوان یک المان مسطح بین سطح تمام شده زمین و سطح روسازی (زیر بالاست، بالاست و...) مورد استفاده قرار گرفته و دو وظیفه زهکشی و جداسازی را انجام می‌داد. در این بازه زمانی ضرورت ساخت ژئوسنتتیکی که بتواند در کرنش‌های کم‌تنشهای کششی بالایی را همچون آرماتور در بتن مسلح تحمل نماید، به وجود آمد. با ابداع ژئوسنتتیک‌های با مقاومت بالا فصل جدیدی از کاربرد این محصولات در خطوط راه‌آهن گشوده شد. با مطالعه ادبیات فنی کاربرد ژئوسنتتیک‌ها در خطوط ریلی می‌توان از پروژه‌های متعددی نام برد. از آن جمله استفاده از ژئوتکستایل بافته[5] در بهسازی خط آهن سنت پترزبورگ-مسکو در روسیه می‌باشد که بازرسی‌های پنج‌ساله این خط ریلی نشان داد که این مصالح علاوه بر کار جداسازی و فیلتراسیون می‌توانند برای مسلح‌سازی بستر نیز مورد استفاده قرار گیرند [۱]. پروژه دیگر بهسازی خط آهن فولینگو- ترونتولا ایتالیا توسط دولایه ژئوکامپوزیتی متشکل از ژئوگرید و ژئوتکستایل به منظور جداسازی و مسلح‌سازی با استفاده از مصالح دانه‌ای بین این دو لایه بود که کاهش چشمگیر کرنش‌های بستر را در پی داشت [۲]. در پروژه دیگری بهسازی خط آهن سلژه- اسلونی توسط یک لایه از ژئوکامپوزیت متشکل از ژئوگرید و ژئوتکستایل صورت گرفت که طی آن نتایج مناسبی از تأثیر این مصالح بر کاهش کرنش‌های بستر حاصل گردید [۲]. در پروژه دیگری بهسازی بستر خط آهن بخارست-کنستانتا رومانی توسط

یـک لایه ژئوگرید به همـراه یک لایه ژئوتکسـتایل و همچنین اجرای مصالح دانه‌ای مناسب روی آن صورت گرفت که افزایش مدول بستر را در حد ۶۰ درصد در پی داشت [۳].

در پروژه‌های یاد شـده هدف از به کارگیـری ژئوکامپوزیت‌ها افزایش ظرفیت باربری بستر سست بوده است ولیکن به تأثیر این مصالح بر افزایش سـختی قائم خطوط مورد نظر اشـاره‌ای نشده اسـت. لذا در تحقیق حاضر در قالب یک پروژه عملی و با انجام بارگذاری میدانی تلاش در تعیین تأثیر این مصالح بر سختی خط بوده است. با نگاهی به ادبیات فنی موجود درخصوص روش‌های تعیین سـختی قائم خطوط ریلی به راحتـی می‌توان دریافت که روش‌های ارائه شده به‌طورکلی به سه دسته نظری، نظری-تجربی و تجربی تقسیم‌بندی می‌گردند. در روش‌های نظری قبل از اینکه خط ساخته شود می‌توان با توجه به مشخصات مصالح زیرسازی و روسـازی خط ریلی سختی و یا مدول خط را محاسبه نمود و حتی در صورت نیاز به سـختی‌های مختلـف می‌توان این میزان را با تعویض مصالح به دسـت آورد. در دسته دوم که روش‌های نظری-تجربی می‌باشند، می‌توان سختی یا مدول خطوط موجود را بـا توجه به تئوری‌های مختلـف و عمدتاً در حالت بارگذاری استاتیکی تعیین نمود که این روش‌ها جزء روش‌های اولیه تعیین سـختی و مدول خط به شمار می‌روند. در دسته سوم که موسوم به روش‌های تجربی می‌باشـند میزان مدول و یا سختی خط و در کنار آن پارامترهای هندسـی خط آهن موجود توسط ماشین‌های مجهز به سیسـتم‌های اندازه‌گیـری در حالت حرکت اندازه‌گیری میشـوند که عمدتاً این روش برای مشـخص‌نمودن خرابی‌های خط و اجـرای زمان‌بندی تعمیر و نگهداری مورد اسـتفاده قرار می‌گیرد.

اولیـن روش نظـری بـرای اندازه‌گیری سـختی و مدول خط آهن روش مدل هرمی می‌باشـد. این روش که توسـط پراس[۶] و همکاران وی در سال ۱۹۷۴ ارائه گردید، قادر است مقدار سختی خط را بدون نیاز به اندازه‌گیری خصوصیات میدانی و تغییرمکان ریل، محاسـبه نموده و سـپس به کمک یک رابطه سـاده، مدول بسـتر ریل را به دسـت آورد. روش‌های نظری-تجربی که برای اندازه‌گیری سختی و مدول خط در حالت استاتیکی مورد استفاده قـرار می‌گیرند عبارتند از روش بارگذاری تک‌محوره که اولین بار توسط آقایان تیموشنکو[۷] و لانگر[۸] در سال ۱۹۳۲ ارائه گردید و در پی آن توسط اسنمن[۹] در سال ۱۹۸۱ و هی[۱۰] در سال ۱۹۸۲ تکمیل گردیـد [۴]. پس از آن نیز توسـط گروه تالبوت ماشـینی جهت اندازه‌گیری سختی به این روش ساخته شد. روش دیگر پیشنهادی روش کر می‌باشـد که در سـال ۱۹۶۳ ارائه گردیـد. روش دیگر مدل تیر بر روی بستر ارتجاعی (وینکلر[۱۱]) می‌باشد[۵]. یکی دیگر از این روش‌ها، روش محاسـبه حوضه تغییرشکلی ریل می‌باشد، این روش که ابتدا در سـال ۱۹۱۸ و توسط کمیته ویژه تحقیق در مـورد تنش‌های ریل از انجمن مهندسـین راه‌آهـن آمریکا[۱۲] و به سرپرسـتی آقای تالبوت ارائه شد و سـپس در سال ۱۹۳۴ توسط وسیوتینسکی[۱۳] توسعه یافت، بر اساس این فرض استوار است که می‌توان با اسـتفاده از تعادل نیروها در راستای قائم، رابطه محاسبه مدول بستر ریل را به صورت نسبت مجموع تمامی بارهای چرخ وارد بر خط به مسـاحت محصور در بین منحنی تغییرشـکل ریل قبل و پس از بارگذاری به دسـت آورد [۵]. روش ثابت ارتجاعی نیز مشابه روشی اسـت که در تئوری ارتعاشات برای تعیین ثابت ارتجاعـی به کار می‌رود. روش دیگر، روش زیمرمان[۱۴] می‌باشـد که در سـال ۱۹۵۲ ارائه گردید که این روش نیز بر اسـاس فرض اولیه وینکلر در خطوط با تراورس‌های طولی توسـعه داده شـده اسـت. همچنین روش آرما[۱۵] و کلارک[۱۶] به سال ۱۹۷۶ که در این روش تغییـر مکان‌های پیوسـته تکیه‌گاهی را می‌تـوان با تعدادی تغییـر مکان‌های پله‌ای (غیرپیوسـته) که در محـدوده فاصله بین دو تراورس ثابت فرض می‌شـود، تقریـب زد. در بخش دیگری از روش‌های ارزیابی سـختی می‌توان به روش‌های تجربی اشاره نمود. اسـاس اندازه‌گیری سختی در این روش‌ها ثبت تغییر مکان ریل از طریق اندازه‌گیری پیوسـته با استفاده از ابزاری نصب شده روی واگـن متحرک می‌باشـد. در این روش واگـن اعمال بار با سـرعت مشـخصی بر روی خط آهن حرکت نموده و ضمن این حرکت به اندازه‌گیری مستقیم مدول بستر ریل و سختی خط آهن و یا به‌طور غیر مستقیم از طریق ثبت تغییر مکان‌ها امکان محاسبه

سختی خط آهن و مدول بستر ریل را فراهم می‌آورد. امروزه ماشین‌های متعددی برای این منظور ساخته شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله ابزار پیشنهادی مبتنی بر روش اندازه‌گیری فوق می‌توان به روش آکادمی علوم راه‌آهن چین و روش مرکز مطالعات فناوری حمل‌ونقل آمریکا اشاره نمود [۵].

۲. متدولوژی تحقیق

همان‌گونه که در مقدمه مطرح شد هدف از تحقیق حاضر بررسی اثر استفاده از ژئوسنتتیک‌ها بر سختی قائم خط می‌باشد. برای این منظور خط راه‌آهن اهواز–خرمشهر به عنوان خط مورد مطالعه در نظر گرفته شده و سختی قائم آن در چهار مقطع متشکل از بستر طبیعی، بستر مسلح شده با ژئوتکستایل، بستر مسلح شده با ژئوگرید، بستر مسلح شده با ترکیب ژئوتکستایل و ژئوگرید مورد مطالعه قرار گرفته است. برای اندازه‌گیری سختی خط از بارگذاری به وسیله واگن حمل بالاست چهارمحوری با وزن پر ٦٤ تن و وزن خالی ٢٤ تن استفاده شده است. اندازه‌گیری سختی در حالت استاتیکی از طریق اندازه‌گیری تغییر مکان‌ها روی تراورس‌ها انجام شده است. این اندازه‌گیری‌ها عملاً تغییر مکان‌های غیرخطی ناشی از بستر را نیز در برگرفته است. برای اندازه‌گیری تغییر مکان‌های ناشی از بارگذاری از کرنش سنج‌های مکانیکی با دقت یک صدم میلی‌متر که بر روی یک قاب خرپایی ثابت نگه داشته شده‌اند استفاده گردیده است. با توجه به محدودیت در تعداد کرنش‌سنج‌ها اندازه‌گیری‌ها تنها در محل هفت تراورس، شامل تراورس بارگذاری شده و سه تروارس قبل و بعد آن صورت گرفته است. با استفاده از تغییر مکان‌های ثبت شده حوضچه تغییر مکان زیر چرخ‌های محور عقب یا جلو تشکیل و مساحت این حوضچه مطابق روش تالبوت ملاک محاسبه سختی قائم قرار گرفته است. در ادامه با کالیبراسیون مدل عددی سه بعدی اجزای محدود ساخته شده با نرم‌افزار Plaxis٣D با نتایج اندازه‌گیری میدانی، روی اثر سختی محوری ژئوگرید(EA) بر سختی خط حساسیت‌سنجی صورت گرفته‌است.

۳. معرفی پروژه اهواز–خرمشهر

خط آهن اهواز–خرمشهر اولین بار در سال ۱۳۲۰ ساخته شده است. طول این خط ۱۲۱ کیلومتر بوده و دارای ایستگاه‌های متعددی می‌باشد که مهم‌ترین آنها ایستگاه حمید و حسینیه می‌باشند که در حال حاضر مورد بهره‌برداری قرار نمی‌گیرند. این خط تا به حال به دلیل خرابی‌های مختلف خصوصاً هنگام جنگ تحمیلی به دفعات بازسازی گردیده است. سال ۱۳۸۷ بلاک سوم این خط یعنی بین ایستگاه حسینیه و خرمشهر به طول ٤٠ کیلومتر مورد بازسازی قرار گرفت. این بلاک در طولی معادل ۲۰ کیلومتر در مجاورت دریاچه ماهیگیری قرار دارد که وجود این دریاچه یکی از دلایل تخریب این قسمت از خط می‌باشد. در بهسازی این بلاک خاکریزی به ارتفاع یک و نیم متر و عرض ۱۰ متر اجرا شده است تا امکان دوخطه‌نمودن آن در آینده فراهم گردد [٦]. ریل استفاده شده در این مسیر از نوع U٣٣ و تراورس مصرفی از نوع B٥٨ می‌باشد. برای ساخت خاکریز، خاک موجود با شن و ماسه مخلوط شده و مجدداً کوبیده شده است که البته در قسمت‌هایی نیز میزان خاک رس بیشتر از حد معمول بوده و در بعضی قسمت‌ها نیز شن و ماسه به خوبی با خاک رس موجود مخلوط نگردیده است. منطقه انتخاب شده برای انجام آزمایشات میدانی تحقیق حاضر کیلومتر ٦٥٠+٩٢٢ تا ٧٥٠+٩٢٢ از تهران می‌باشد [۷].

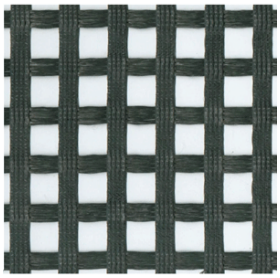
۳–۱ مشخصات ژئوتکنیکی منطقه مورد مطالعه

با توجه به بافت عمومی آبرفت دشت خوزستان، بستر خط ریلی در منطقه مورد مطالعه، ریزدانه و عمدتاً متشکل از رس و سیلت با نفوذپذیری کم می‌باشد. خصوصیات ژئوتکنیکی بستر خط ریلی در منطقه مورد مطالعه نیز با توجه به اطلاعات گمانه‌های موجود در اطراف پروژه که مشخصات یکسانی با خاک محل پروژه داشته‌اند، به دست آمده است. با توجه به قضاوت مهندسی صورت گرفته بر مبنای اطلاعات موجود مشخصات بستر مورد مطالعه تا عمق ۱۰/۵ متر در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است سطح آب زیرزمینی نیز در عمق ۲ متری از

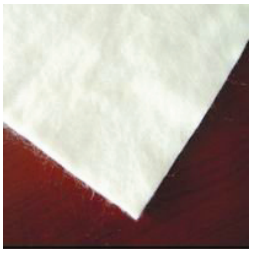
سطح بستر قرار گرفته است. به منظور دستیابی به مشخصات ژئوتکنیکی خاکریز راه‌آهن مورد بحث، اقدام به انجام نمونه‌گیری مونولیتی گردیده و با انتقال نمونه دست نخورده به آزمایشگاه دانشکده مهندسی راه‌آهن، آزمایشات متعدد از جمله آزمایش برش مستقیم، آزمایش تک‌محوری، آزمایش تعیین حدود اتربرگ و آزمایش تعیین درصد رطوبت بهینه تراکم روی نمونه‌های خاک صورت گرفته و خلاصه نتایج به‌دست آمده در جدول ۲ ارائه گردیده است [۸].

۳-۲ مشخصات مصالح ژئوسنتتیک مورد استفاده در مطالعه حاضر

همان‌گونه که قبلا بیان گردید برای مسلح‌سازی بستر خط ۵۰ متر ژئوگرید پلی‌استری (TGS-۵۰-۵۰)، شکل ۱ و ۵۰ متر ژئوتکستایل نبافته مطابق شکل ۲ با مشخصات فنی ارائه شده در جداول ۳ و ٤ تهیه گردید. سپس این مصالح روی بستر به‌گونه‌ای پهن شد که همپوشانی در طول ۲۵ متر فراهم گردید. بدین صورت امکان بررسی شرایط بستر در سه حالت مسلح شده با ژئوگرید، مسلح شده با ژئوکامپوزیت (یک لایه ژئوگرید و یک لایه ژئوتکستایل) و مسلح شده با ژئوتکستایل فراهم گردید. کار نصب این مصالح، هنگام بازسازی خط به روش دستی صورت گرفت. بدین ترتیب که قبل از قرار دادن کوپلاژها در جای خود، این مصالح بر روی بستر پهن گردیده، کوپلاژها روی آنها قرار گرفتند. پس از آن عملیات بالاستریزی و سپس زیرکوبی صورت گرفته و خط آماده بهره‌برداری گردید. در قسمت همپوشانی شده، ژئوتکستایل بر روی ژئوگرید قرار گرفت. شکل ۳ روند نصب ژئوتکستایل روی ژئوگرید قبل از نصب کوپلاژ را نشان می‌دهد [۹].



شکل ۱. ژئوگرید TGS-۵۰-۵۰



شکل ۲. ژئوتکستایل نبافته

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیکی گمانه ایجاد شده

ضخامت (m)	جنس خاک	چگالی توده خاک (kN/m^3)	درصد رطوبت	حد خمیری	حد روانی	شاخص خمیری	عدد SPT
۰-۱/۵	Lean Clay	۱/۸۲	۱۷/۵	۳۳	۲۳	۱۰	۱۳
۱/۵-۳	Lean Clay	۱/۸۹	۱٦/۸	۳۵	۲۲	۱۳	۱۹
۳-٤/۵	Lean Clay	۱/۸۳	۱۷/۳	۲۸	۲۰	۸	۳۰
٤/۵-٦	Lean Clay	۱/۸۷	۱۹/۷	۲۷	۱۸	۹	۱۹
٦-۷/۵	Lean Clay	۱/۹۳	۱۸/٤	۲۵	۱٦	۹	۲۳
۷/۵-۹	Lean Clay	۱/۸۵	۱۷/۲	۳۰	۲۲	۸	۳٤
۹-۱۰/۵	Lean Clay	۱/۹۱	۱۵/٦	٤۲	۲٤	۱۸	۳۷

جدول ۲. مشخصات ژئوتکنیکی خاکریز

نام لایه	ضخامت لایه (m)	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب پوآسون	وزن مخصوص خشک(kN/m^3)	درصد رطوبت
خاکریز	۱/۵	۵۰	۳۵	۲۰	۰/۳۵	۱۷/۸	۱۹

جدول ۳. مشخصات ژئوگرید مورد استفاده

نام تجاری	TGS-۵۰-۵۰
مقاومت کششی(kN/m)	۵۰
اندازه مش (cm)	۲/۵*۲/۵
افزایش طول هنگام گسیختگی	۱۰ درصد

شکل۳. روند نصب ژئوتکستایل و ژئوگرید

جدول ٤. مشخصات ژئوتکستایل مورد استفاده

نام	ژئوتکستایل ۸۰ گرمی
نوع پلیمر	PET
وزن واحد(gr/m^2)	۸۰۰
ضخامت(mm)	٤/۵
آزمایش کشش چنگک(N)	۲۹۱۰
افزایش طول آزمایش کشش چنگک	بیشتر از ۵۰ درصد
مقاومت کششی پهن(kN/m)	۳۷
اندازه روزنه‌های مشهود(mm)	۰/۰۹
نفوذپذیری(cm/sec)	۰/۲۰

٤. اندازه‌گیری میدانی سختی خط

٤-۱ معرفی ابزار اندازه‌گیری میدانی

متاسفانه به دلیل نبود هیچ یک از تجهیزات و ماشین‌آلات مکانیزه اندازه‌گیری سختی که در مقدمه به برخی از آنها اشاره شد، در پروژه حاضر میزان تغییر مکان‌ها به شیوه‌ای ابداعی اندازه‌گیری شده و طی آن از تغییرمکان سنج‌های مکانیکی با دقت ۰/۰۱ mm استفاده گردیده است. در عمل در محل هر تراورس و پای ریل این تغییرمکان‌سنج‌ها نصب و بوسیله آن تغییر مکان پاشنه ریل اندازه‌گیری گردیده است. برای اندازه‌گیری دقیق سختی خط باید تغییر مکان کلیه تراورس‌هایی که تحت تأثیر بار قرار می‌گرفتند اندازه‌گیری میشد ولی به دلیل سختی کار و نبود امکانات کافی تغییر مکان فقط در زیر هفت تراورس، به صورت سه تراورس قبل و بعد تروارس تحت بار اندازه گرفته شد و بقیه تغییر مکان‌ها به روش متقارن سازی تخمین زده شد. این تغییرمکان‌سنج‌ها به ترتیب از سومین تراورس از بر اولین چرخ نصب گردیدند که محل نصب ابزار اندازه‌گیری در ادامه نشان داده خواهد شد. برای اطمینان از عدم تأثیر تکیه‌گاه پایه نگهدارنده این تغییرمکان‌سنج‌ها از بارگذاری صورت گرفته روی خط، پایه مذکور بصورت طره‌ای و با فاصله مناسبی از بر خط قرار داده شده است. با توجه به امکانات اجرایی تکیه‌گاه در فاصله سه متری از لبه ریل قرار گرفت تا ضمن امکان‌پذیری انجام کار، خطای اندازه‌گیری نیز به حداقل مقدار ممکن برسد. برای اینکه وسیله ساخته شده صلبیت کافی داشته و تحت تأثیر نیروی باد تغییرمکان‌سنج‌ها دچار خطا نشوند از سیستم خرپا برای ساخت پایه نگهدارنده کرنش‌سنج‌ها استفاده شد که تصویر این خرپا در شکل ٤ نشان داده شده است. در یک سر این خرپا تغییر مکان‌سنج‌ها، در وسط تکیه‌گاه و در انتها قلاب نگهدارنده قرار دارد [۹].

به دلیل طره‌ای بودن خرپا و به منظور تثبیت آن در محل، در انتهای آن وزنه‌ای نصب گردیده و مجموعه ثابت گردید. برای این منظور نیز وسیله‌ای با ارتفاع متغیر ساخته شد که یک سر آن به خرپا متصل گردید و سر دیگر آن به شکل قلاب بزرگ مربعی ساخته شده و از داخل آن یک تکه ریل به طول تقریبی

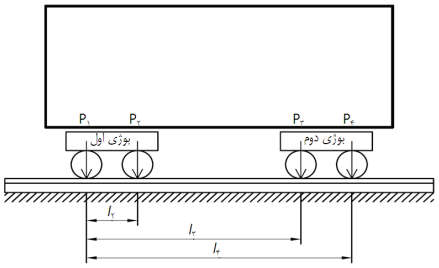
شکل٤. خرپای ساخته شده برای نصب تغییرمکان‌سنج‌ها در پای ریل

یک متر عبور داده شـد. در ایـن مجموعه یک تکه ریل به عنوان وزنه متعادل کننده عمـل نموده و پایداری را تأمین نمود. اتصال این دو سر به شکل کشویی و متحرک در نظر گرفته شد تا امکان نصب و تثبیت سـریع خرپا در محل وجود داشته باشد. جزئیات این مجموعه در شکل ۵ نشان داده شده است.

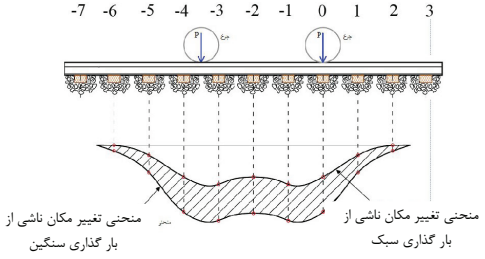
شکل۵. قلاب نگهدارنده خرپا

٤-٢ انجام بارگذاری و ثبت نتایج

به‌طور معمول یکی از مهم‌تریـن نکاتی که در روند اندازه‌گیری مـدول خط تحت اثر بار می‌بایسـت به آن توجه شـود رفتار غیر خطی بالاسـت زیر تراورس‌هایی است که در آنها نیاز به زیرکوبی وجـود دارد. برای خطی که به تازگی سـاخته می‌شـود در مرحله اول بعـد از بالاسـت‌ریزی و قراردادن کوپلاژهـا نیاز به زیرکوبی و پس از آن پایدارسـازی و اصلاح تراز هندسـی خط می‌باشـد. لـذا در روند اندازه‌گیری میدانی در تحقیق حاضر برای شناسـایی تراورس‌هایی که دارای لقی می‌باشند ابتدا بار قطار عبور داده شده و محل‌های لازم جهت زیرکوبی اولیه تعیین گردید. پس از اصلاح لقی‌هـای موجود، عبور بار قطار موجب گردید که بخش عمده‌ای از تغییر شـکل‌های برگشـت ناپذیر از بالاسـت رخ داده و امکان اندازه‌گیـری نشسـت آن تحت اثر بار قطار به وجـود آید. بعد از مشخص شـدن محل‌های مناسـب جهت انجام بارگذاری و ثبت تغییر مکان‌ها، وسیله ساخته شده جهت اندازه‌گیری تغییر مکان‌ها در محل مناسـب نصب شده و تغییرمکان‌سـنج‌ها نیز بر روی آن ثابت گردید. بعد از تثبیت مجموعه، عدد تغییرمکان‌سنج‌ها قرائت شـده و سـپس چرخ واگن مربوطه روی محل مورد نظر در خط قرار گرفتـه و بارگذاری صورت گرفـت. حاصل اختلاف قرائت اولیـه و قرائت بعد از بارگـذاری با واگن در این حالت تغییر مکان ناشی از بارگذاری را مشخص می‌نمود. از آنجا که در روند محاسبه مدول خط، بارگذاری در دو حالت واگن پر و خالی صورت گرفته است، لذا تغییر مکان نظیر دو حالت یاد شده در روند انجام آزمایش در چهار مقطع مختلف بسـتر خط ثبت گردیـد. برای این منظور از واگـن حمل بالاسـت پر به وزن ٦٤ تن و واگن حمل بالاسـت خالی به وزن ٢٤ تن اسـتفاده شده اسـت. لازم به ذکر است که بار محـوری بـرای حالت اول ١٦ تن و برای حالـت دوم ٦ تن تعیین گردیده اسـت. فاصله محورهای بـوژی از یکدیگر ۲ متر و فاصله آکس به آکس بوژی‌ها از یکدیگر ۱۰/۵ متر می‌باشـد. لازم به ذکر اسـت به دلیل متقارن بودن واگن حمل بالاست و مساوی بودن بار چرخ‌هـا در دو حالـت پر و خالی، بارگـذاری و اندازه‌گیری تغییر مکان‌ها فقط در محل بوژی دوم صورت گرفته است. شکل ٦ واگن حمل بالاسـت، بوژی‌ها و چرخ‌ها را نشان می‌دهد. به منظور ایجاد سـهولت در پردازش قرائت‌ها، عدد تراورسی که در زیر چرخ اول قرار گرفته اسـت برابر صفر و در ادامه سـه تراورس سمت راست به ترتیب یک، دو، سـه و سه تراورس سمت چپ منفی یک، منفی دو و منفی سـه نامگذاری گردیده‌اند. این شماره‌گذاری در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ٦. واگن حمل بالاست، بوژی‌ها و چرخ‌های آن



شکل۷. شماره تراورس‌ها و محل قرارگیری چرخ‌های بوژی دوم

به دلیل محدودیت تعداد تغییرمکان‌سنج‌ها و عدم امکان اندازه‌گیری تغییر مکان همه تراورس‌ها برای ترسیم کامل منحنی، تغییرمکان تراورس‌های شماره ٤- تا ٧- از قرینه سازی و به کمک تغییر مکان‌های سمت راست مشخص گردید تا بتوان از روش گروه کاری تالبوت میزان مدول خط آهن را محاسبه نمود. نکته دیگر اینکه به دلیل عدم امکان برداشت نتایج درست در زیر ریل، نصب تغییرمکان‌سنج‌ها در فاصله ١٠ سانتی‌متری از پای ریل صورت گرفت که باید این تغییر مکان‌ها با افزایش مقادیری به تغییر مکان‌های زیر ریل تبدیل میشد. برای به دست آوردن مقادیر اصلاح از مدل کامپیوتری که در بخش بعد تشریح می‌گردد بهره گرفته شده و تغییرمکان‌ها به ترتیب از کمترین تا بیشترین مقدار از ٠/٠١ تا ٠/٠٧ میلی‌متر افزایش یافتند. بدین ترتیب تغییر مکان‌های برداشت شده اصلاح گردیده و برای محاسبه مدول خط از این مقادیر استفاده گردید.

٤-٣ پردازش نتایج به‌دست آمده و تعیین مدول خط به روش تالبوت

پس از ثبت تغییر مکان‌ها در محل پروژه، در ادامه برای محاسبه مدول خط از روش تالبوت [٥] استفاده گردیده است. مطابق روش تالبوت ملاک در تعیین مدول خط مقایسه میان تغییر مکان‌ها در دو حالت بارگذاری شده سنگین و سبک خواهد بود. رابطه تالبوت در محاسبه مدول خط آهن به صورت رابطه ١ است:

$$k = \frac{\Sigma(Ph - Pl)}{a\Sigma_{i=1}^{m}(Yhi - Yli)} \quad (١)$$

که در آن:

Ph: بار چرخ وسیله نقلیه ریلی در حالت پر بر حسب کیلوگرم نیرو

Pl: بار چرخ وسیله نقلیه ریلی در حالت خالی بر حسب کیلوگرم نیرو

a: فاصله مرکز به مرکز تراورس‌ها بر حسب سانتی‌متر

Yhi: تغییرمکان تراورس i اُم در اثر اعمال بار ترافیک سنگین (cm)

Yli: تغییرمکان تراورس i اُم در اثر اعمال بار ترافیک سبک (cm)

k: مدول خط آهن بر حسب کیلوگرم نیرو بر سانتی‌متر مربع

این رابطه معروف به رابطه اصلاح شده گروه کاری تالبوت می‌باشد که البته اگر در این رابطه بارگذاری سبک را برابر صفر قرار دهیم تبدیل به روش گروه تالبوت می‌شود [٢]. میزان مدول خط آهن محاسبه شده به روش تالبوت ممکن است با خطاهای ناشی از لقی زیر تراوس‌ها همراه باشد که این مشکل در روش اصلاح شده وجود ندارد زیرا در بارگذاری سبک لقی‌ها گرفته شده و در بارگذاری سنگین مدول واقعی خط آهن محاسبه می‌گردد تنها ایرادی که در محاسبه سختی به روش اصلاح شده گروه تالبوت وجود دارد این است که به دلیل رفتار غیر خطی راه‌آهن میزان سختی به دست آمده عدد بزرگی است که به حالت سخت شونده خط در بارگذاری‌های سنگین مرتبط می‌گردد. مقادیر تغییر مکان‌ها برای حالت‌های مختلف مسلح‌سازی در بارگذاری سنگین در جدول ٥ و برای بارگذاری سبک در جدول ٦ آورده شده است.

جدول ٥. مقادیر تغییر مکان‌ها (mm) در محل تروارس‌ها در حالت‌های مختلف مسلح‌سازی در بارگذاری سنگین ١٦ تن

شماره تراورس	٣	٢	١	٠	-١	-٢	-٣	-٤	-٥	-٦	-٧
محل بدون مسلح‌سازی	٠/٠١	٠/٣٣	٠/٦٢	١/١٥	١/٥٢	١/٥٠	١/٢٩	١/١٥	٠/٦٣	٠/٣٣	٠/٠١
مسلح‌سازی شده توسط ژئوگرید	٠/٥٣	٠/٧٣	٠/٨٩	١/٢	١/٩٨	١/٥٥	١/٤٣	١/٢	٠/٨٩	٠/٧٣	٠/٥٣
مسلح‌سازی شده توسط ژئوکامپوزیت	٠/٠١	٠/٥١	٠/٧٠	٠/٨٣	٠/٣٩	٠/٢٦	٠/٥٩	٠/٨٣	٠/٧٠	٠/٥١	٠/٠١
مسلح‌سازی شده توسط ژئوتکستایل	٠/٠١	٠/٧٤	١/٠٥	١/٥٩	٢/٠٣	١/٧٢	٠/٧٦	١/٥٩	١/٠٥	٠/٧٤	٠/٠١

جدول٦. مقادیر تغییر مکان‌ها (mm) در محل تروارس‌ها در حالت‌های مختلف مسلح‌سازی در بارگذاری سبک ٦ تن

شماره تراورس	٣	٢	١	٠	-١	-٢	-٣	-٤	-٥	-٦	-٧
محل بدون مسلح‌سازی	٠/٠١	٠/٢٦	٠/٣٣	٠/٧٨	٠/٢٧	٠/٧١	٠/٩٠	٠/٧٨	٠/٣٣	٠/٢٦	٠/٠١
مسلح‌سازی‌شده توسط ژئوگرید	٠/٤٠	٠/٦٣	٠/٦٠	٠/٨٥	١/٤٦	١/٢٨	١/٠٥	٠/٨٥	٠/٦٠	٠/٦٣	٠/٤٠
مسلح‌سازی‌شده توسط ژئوکامپوزیت	٠/٠١	٠/٢٣	٠/١٨	٠/٤٠	٠/٣٥	٠/٢١	٠/٣٧	٠/٤٠	٠/١٨	٠/٢٣	٠/٠١
مسلح‌سازی‌شده توسط ژئوتکستایل	٠/٠١	٠/٤٦	٠/٦٠	٠/٥٦	١/٤٠	٠/٥١	٠/١٣	٠/٥٦	٠/٦٠	٠/٤٦	٠/٠١

با توجه به مقادیر تغییـــر مکان‌های هریک از تراورس‌ها و مقدار بار اعمال شده، مقادیر سختی خط در حالت‌های مختلف محاسبه گردیده و در جدول ۷ آورده شده است.

نتایج به‌دست آمده حاصل از آزمایش برای چهار نقطه به روش گروه تالبوت و روش اصلاح شـــده گروه تالبوت در بالا ارائه شده است. با مقایسه مدول خط به‌دست آمده برای هر نقطه، همان‌طورکه ملاحظه می‌گردد مدول خط به‌دســـت آمده در روش گـــروه تالبوت برای بار محوری ۱۶ تن بیشتر از مقدار محاسبه شده برای بارگذاری محوری ۶ تن می‌باشد که این به دلیل رفتار سخت شونده زیرسازی خط آهن می‌باشد. مقدار مدول محاسبه شده به روش اصلاح شده گروه تالبوت نیز به دلیل اینکه فقط مدول سخت شده خط آهن را نتیجه می‌دهد از دو مقدار قبلی بزرگ‌تر است. در مقایسه مدول این چهار نقطه نسبت به یکدیگر نیز ملاحظه می‌گردد که مدول خط به‌دست آمده برای محل مسلح‌سازی شده با ژئوکامپوزیت بیشترین مقدار را دارد که این ناشی از تأثیر این مصالح در افزایش مدول خط می‌باشد. علت اینکه مدول خط برای مقطع بدون مسلح‌سازی از مقطع مسلح‌سازی شده با ژئوتکستایل بیشـــتر به‌دســـت آمده را می‌توان به عدم یکنواختی مصالح خاکریز و افزایش میزان ریزدانه‌ها در محل مسلح‌سازی شده مرتبط دانست.

۵. کالیبراسیون مدل عددی اجزای محدود با استفاده از نتایج اندازه‌گیری میدانی

در این بخش هدف آن اســـت که بـــا انجام یک تحلیل عددی به روش اجزامحدود، مدلی ارائه شـــود که نتایج آن تطابق مناســـبی با مقادیر به دســـت آمده از اندازه‌گیری میدانی داشـــته باشد. با توجه به ماهیت ســـه بعدی مسأله مورد بحث برای این منظور از نرم‌افزار Plaxis۳D اســـتفاده شده اســـت. قابلیت این برنامه کامپیوتری در حل مسائل سه‌بعدی غیر خطی در حوزه ژئومکانیک از این نرم‌افزار ابزاری سودمند جهت حل مسائل مربوط به ژئوتکنیک خطوط ریلی را فراهم آورده اســـت [۱۰]. با توجه به قابلیت ابزار یاد شـــده و با استفاده از شرایط تقارن حاکم بر مسأله، نیمی از خط ریلی به صورت ســـه‌بعدی مدلسازی شده است. لازم به ذکر است که این مدلسازی در حالت بدون وجود مسلح کننده و در روند انجام کالیبراسیون دو محور اساسی دنبال شده است. مورد اول آنکه با انجام سعی و خطا تلاش شده تا تغییر مکان مدل عددی با تغییر مکان به دست آمده از محل یکســـان باشد و دیگری آنکه میزان سختی خط به دست آمده از روش تالبوت بر اساس خروجی‌های تغییر مکان مدل و همچنین تغییر مکان‌های برداشـــت شده از محل یکسان گردد. در ادامه روند مدلسازی عددی و نحوه کالیبراسیون نتایج تشریح می‌گردد.

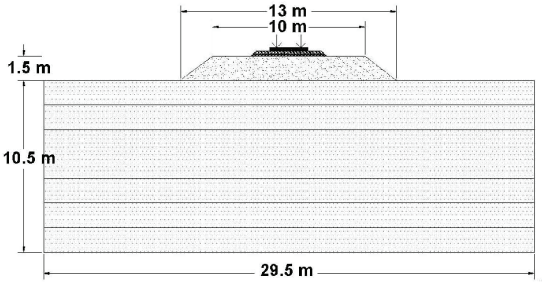
۵-۱ هندسه مدل و نوع المان‌های مورد استفاده جهت تحلیل

با توجه به مشـــخصات اجزای خط و ابعاد خاکریز اجراء شـــده در محل در این بخش ابعاد و هندســـه مدل ســـاخت شـــده در نرم‌افزار Plaxis۳D مورد بررســـی قرار می‌گیرد [۶]. در روند مدلســـازی به دلیل ناچیزبودن سختی از مدل نمودن پد صرفنظر شده ولیکن سختی خمشی ریل U۳۳ با مدول الاستیســـته فولاد ($۲۱۰۰۰۰۰ kg/cm^۲$) با ضریب پوآســـون ۰/۲ و تراورس‌های بتنی B۵۸ به صورت المان‌های مکعبی به ابعاد ۲۴۰×۳۰×۳۰ با مدول الاستیسیته بتن ($۲۱۰۰۰۰ kg/cm^۲$) با ضریب پوآسون ۰/۳ در نظر گرفته شده‌اند که در ساخت مدل به شکل

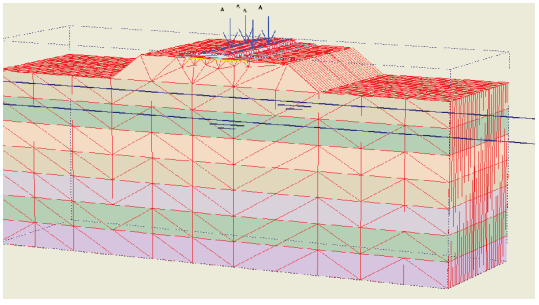
جدول ۷. مدول خط آهن‌های اندازه‌گیری شده در خط به روش‌های مختلف

ناحیه مورد نظر	مدول خط اندازه‌گیری شده با بارگذاری سبک ۶ تن	مدول خط اندازه‌گیری شده با بارگذاری سنگین ۱۶ تن	مدول خط اندازه‌گیری شده به روش اصلاح شده تالبوت با بارگذاری سبک ۶ و سنگین ۱۶ تن
بدون مسلح سازی	۲۱۵	۳۰۷	۴۳۰
مسلح‌سازی با ژئوگرید	۱۱۴	۲۲۸	۵۱۸
مسلح‌سازی با ژئوکامپوزیت	۳۹۰	۴۹۹	۵۹۹
مسلح‌سازی با ژئوتکستایل	۱۸۹	۲۳۶	۲۰۸

الاستیک در نظر گرفته شده و پارامترهای هریک اعمال گردیده است. ضخامت بالاست مورد استفاده در پروژه ۳۰ سانتی‌متر بوده و مشخصات هندسی خاکریز در منطقه طرح نیز عینا در ساخت مدل مد نظر قرار گرفته است. طولی از خط که در بارگذاری توسط این واگن‌ها تحت تأثیر قرار می‌گرفت در حدود ۱۷/۶۰ متر بود که به دلیل متقارن بودن واگن بارگذاری جهت سهولت در امر مدلسازی نیمی از آن مدل گردیده است یعنی طول مدل ساخته شده برابر با ۸/۸ متر می‌باشد. در روند مدلسازی عددی لازم است ابعاد در جهت عرض و عمق به‌گونه‌ای انتخاب شود که تنش ناشی از بارها به فاصله مناسبی از مرزهای افقی و قائم مدل میرا شده باشند. برای این منظور عرض مدل و ارتفاع آن بعد از انجام چندین بار سعی و خطا عددی به ترتیب برابر ۱۲ و ۲۹/۵ در نظر گرفته شده است. هندسه مدل در مقطع عرضی در شکل ۸ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که المان‌های مورد استفاده در این تحلیل عددی منشوری مثلثی چندگرهی بوده است. در عین حال با توجه به تغییر هندسه خط در طول منطقه مورد مطالعه در این قسمت ابعاد ارائه شده متوسط ابعاد موجود در نظر گرفته شده است. شکل۹ شرایط المان‌بندی و هندسه نهایی مدل را به صورت سه‌بعدی نشان می‌دهد.



شکل ۸. مشخصات هندسی مقطع مدل



شکل ۹. المان‌بندی مدل سه بعدی اجزامحدود

۵-۲ بارگذاری و شرایط مرزی مدل

بعد از ایجاد هندسه مدل با اعمال شرایط مرزی استاندارد نرم افزار، تغییر مکان‌های کف و دو طرف مدل محدود گشته و برای اینکه میزان تغییر مکان تنها تحت اثر بار واگن بر خط مشاهده شود از تغییر مکان‌های دیگر به‌طور مثال تغییر مکان ناشی از وزن صرفنظر گردیده و مقادیر آنها پس از تحلیل اولیه برابر صفر قرار داده شده است. برای اعمال بار ناشی از واگن مطابق چیدمان چرخ‌ها، بار چرخ به شکل بار نقطه‌ای و در طول یک سانتی‌متر به مقدار ۸۰۰۰ kN/m نظیر حالت بارگذاری سنگین و ۳۰۰۰ kN/m برای حالت بارگذاری سبک اعمال گردید تا در نهایت بار نقطه‌ای ۸ تن برای بارگذاری سنگین و ۳ تن برای بارگذاری سبک بر مدل اعمال گردد. همان‌گونه که قبلا نیز ذکر گردید بارگذاری سنگین توسط واگن حمل بالاست به وزن ٦٤ تن و بارگذاری سنگین توسط واگن حمل بالاست خالی به وزن ٢٤ تن صورت گرفته و واگن‌های حمل بالاست دارای دو بوژی دو محوره می‌باشند.

۵-۳ پارامترهای ژئومکانیکی خاک بستر و روسازی و مدل‌های رفتاری

همان‌طورکه در بخش قبل عنوان شد، پارامترهای ژئوتکنیکی بستر بر اساس نتایج آزمایشات میدانی و آزمایشگاهی در مکان‌هایی در مجاورت محل پروژه اخذ گردیده است. به منظور انجام کالیبراسیون با توجه به تعیین‌کننده بودن دو پارامتر E مدول یانگ و C چسبندگی بستر ابتدا با توجه به تغییرات SPT در عمق تمامی این مقادیر نسبت به SPT لایه اول بی بعد شده و سپس مقدار اولیه برای E لایه اول انتخاب و برای سایر لایه‌ها نسبت عدد SPT در E لایه اول ضرب گردید. این مقدار به عنوان E سعی اول در تمامی لایه‌ها انتخاب شده و عیناً همین روند برای پارامتر چسبندگی نیز دنبال گردید. در ادامه با این مقادیر میزان نشست در خط محاسبه و با مقدار اندازه‌گیری شده مقایسه گردید. چنانچه همخوانی میان نتایج وجود نداشت، E و C لایه اول و به تبع آن سایر لایه‌ها تغییر داده شده است تا همخوانی مورد نظر تأمین گردده و در نهایت سختی اندازه‌گیری شده به

سختی به‌دست آمده از تحلیل عددی نزدیک گردد. جدول ۸ بهترین مقادیر به‌دست آمده از روند سعی و خطا را نشان می‌دهد [۱۱]. لازم به ذکر است که مدل رفتاری تراورس در تحلیل عددی الاستیک خطی و برای سایر مصالح الاستوپلاستیک با معیار مورکلمب منظور شده است.

۵-٤ نتایج کالیبراسیون و میزان نشست در زیر تراورس‌ها در محل پروژه و مدل

همان‌گونه که بیان گردید بعد از ساخت مدل و اعمال پارامترهای مشخص و قطعی مربوط به اجزای روسازی و اعمال پارامترهای نامشخص و حدودی برای زیرسازی و تغییر در مقادیر این پارامترها باید نشست‌های زیر هریک از تراورس‌ها در مدل به اندازه‌ای می‌رسید که میزان مدول خط محاسبه شده به روش تالبوت در حالت واقعی بدون مسلح‌سازی و در مدل ساخته شده بدون مسلح‌سازی با یکدیگر برابر می‌گردیدند. این مقدار برابر با ۳۰۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد. این مقادیر برای هر دو حالت یاد شده در جدول ۹ آورده شده است.

۵-۵ تحلیل حساسیت بر روی سختی ژئوگرید و اثر آن بر سختی خط

در این قسمت از مقاله پس از کالیبره شدن مدل عددی برای حالت بدون مسلح‌سازی، این بار مدل همانند حالت مسلح‌سازی شده در محل مسلح گردیده و با افزایش میزان سختی کششی ژئوگرید هدف آن است که میزان تأثیر سختی کششی ژئوگرید بر مدول خط مطالعه شود. با توجه به آنکه از نظر عملی در ساخت و تولید ژئوگرید مقدار سختی محوری یا فاکتور EA به عدد مشخصی محدود می‌گردد، ولیکن با دید تئوریک و با استفاده از نرم‌افزار این پارامتر تغییر داده شده و اثر آن بر تغییر شکل‌ها و در نتیجه میزان مدول خط به روش تالبوت مطالعه شده است. برای این منظور در مدل ساخته شده در شرایط وجود ژئوگرید سختی کششی (EA) در محدوده ۵۰ kN/m تا ۱۰۰۰۰۰ kN/m تغییر داده شده و سختی خط برای هریک از حالت‌ها به روش تالبوت محاسبه گردیده است. لازم به ذکر است که در این قسمت برای بارگذاری مدل فقط بار محوری ۱٦ تن اعمال شده و مدول خط بر اساس آن

جدول ۸. مشخصات ژئوتکنیکی مصالح بستر پس از انجام کالیبراسیون

شماره لایه	ضخامت لایه (m)	عدد SPT	نسبت عدد SPT به SPT لایه اول	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب پوآسون	وزن مخصوص خشک(kN/m^3)	درصد رطوبت
۱	۱/۵	۱۳	۱	۵۰	۱۵	۱۰۰	۰/۳۵	۱۷/۸	۱۷/۵
۲	۱/۵	۱۹	۱/٤٦	٦۵	۱۵	۱٤٦/۲	۰/۳۵	۱۷/۸	۱٦/۸
۳	۱/۵	۳۰	۲/۳۱	۸۵	۱۵	۲۳۰/۸	۰/۳۵	۱۷/۸	۱۷/۳
٤	۱/۵	۱۹	۱/٤٦	٦۵	۱۵	۱٤٦/۲	۰/۳۵	۱۷/۸	۱۹/۷
۵	۱/۵	۲۳	۱/۷۷	۷۰	۱۵	۱۷٦/۹	۰/۳۵	۱۷/۸	۱۸/٤
٦	۱/۵	۳٤	۲/٦۲	۹۰	۱۵	۲٦۱/۵	۰/۳۵	۱۷/۸	۱۷/۲
۷	۱/۵	۳۷	۲/۸۵	۱۰۰	۱۵	۲۸٤/٦	۰/۳۵	۱۷/۸	۱۵/٦

جدول ۹. مقادیر تغییر مکان‌ها (mm) در محل تروارس‌ها در حالت بدون مسلح‌سازی در محل و در مدل ساخته شده

شماره تراورس / سختی محوری ژئوگرید	۳	۲	۱	۰	-۱	-۲	-۳	-٤	-۵	-٦	-۷
بدون مسلح‌سازی در محل	۰/۰۱	۰/۳۳	۰/٦۲	۱/۱۵	۱/۵۲	۱/۵۰	۱/۲۹	۱/۱۵	۰/٦۳	۰/۳۳	۰/۰۱
بدون مسلح‌سازی در مدل (EA=۰)	۰/۰۱٦	۰/۳٦٦	۰/۹۲۷	۱/٤۵٤	۱/۳۱۵	۱/۲٦۲	۱/٤۸۹	۱/۱۷٦	۰/۵٤٤	۰/۱۲۱	۰/۰۸۱

اندازه‌گیری شده است. میزان تغییر مکان هریک از تراورس‌ها در مسلح‌سازی با سختی کششی (EA)های مختلف از مدل به دست آمده و در جدول ۱۰ نشان داده شده است. که بر اساس این تغییر مکان‌ها مدول خط در حالت‌های مختلف مسلح‌سازی به روش تالبوت محاسبه گردیده و در جدول ۱۱ آورده شده است. همان‌طورکه ملاحظه می‌گردد میزان مدول محاسبه شده از مدل در حالت سختی کششی صفر (EA=۰) دقیقا برابر با مدول خط به دست آمده از محل واقعی پروژه در حالت مسلح‌سازی نشده می‌باشد که مقدار آن برابر با ۳۰۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد. مقدار مقاومت کششی مصالح مسلح‌سازی در محل پروژه برابر با ۵۰ کیلونیوتن بر متر در کرنش ۱۰ درصد می‌باشد در نتیجه سختی کششی (۵۰kN/m=EA) می‌باشد که مدول خط به‌دست آمده از این مسلح‌سازی توسط مدل ساخته توسط نرم‌افزار برابر با ۳۱۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع گردیده است.

همان‌طورکه از جدول ۱۱ ملاحظه می‌گردد با افزایش سختی کششی (EA) مصالح مسلح‌سازی در مدل میزان مدول خط افزایش پیدا کرده و در سختی کششی برابر با ۱۰۰۰۰۰۰ کیلونیوتن بر متر (۱۰۰۰۰۰۰kN/m=EA) میزان مدول خط به ۴۰۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش می‌یابد که افزایش ۳۱ درصدی مدول خط را در پی دارد.

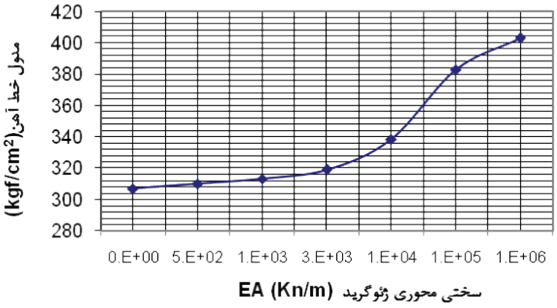
در شکل ۱۰ میزان افزایش مدول خط با افزایش سختی کششی (EA) مصالح مسلح‌سازی ترسیم گردیده است. با توجه به این نمودار ملاحظه می‌گردد که بیشترین شیب برای حالتی که سختی کششی(EA) مصالح مسلح‌سازی از ۱۰۰۰۰ کیلونیوتن بر متر به ۱۰۰۰۰۰ کیلونیوتن بر متر افزایش یابد. همچنین ملاحظه می‌گردد با عبور سختی کششی (EA) از مرز ۱۰۰۰۰۰ کیلونیوتن بر متر باز شیب ملایم گشته و تأثیر افزایش سختی کششی مصالح مسلح‌سازی در افزایش مدول خط کمتر می‌گردد [۹].

جدول ۱۰. مقادیر تغییر مکان‌ها (mm) در محل تروارس‌ها در حالت‌های مختلف مسلح‌سازی در بارگذاری سنگین ۱۶ تن به‌دست آمده از مدل

شماره تراورس / سختی محوری ژئوگرید	۳	۲	۱	۰	-۱	-۲	-۳	-۴	-۵	-۶	-۷
بدون مسلح سازی (EA=۰)	۰/۰۱۶	۰/۳۶۶	۰/۹۲۷	۱/۴۵۴	۱/۳۱۵	۱/۲۶۲	۱/۴۸۹	۱/۱۷۶	۰/۵۴۴	۰/۱۲۱	۰/۰۸۱
مسلح‌سازی شده (EA=۵۰kN/m)	۰/۰۱۶	۰/۳۶۳	۰/۹۱۹	۱/۴۴۳	۱/۳۰۴	۱/۲۵۱	۱/۴۷۶	۱/۱۶۴	۰/۵۳۸	۰/۱۲	۰/۰۸
مسلح‌سازی شده (EA=۱۰۰kN/m)	۰/۰۱۶	۰/۳۶	۰/۹۱۲	۱/۴۳۴	۱/۲۹۵	۱/۲۴۲	۱/۴۶۵	۱/۱۵۳	۰/۵۳۳	۰/۱۱۹	۰/۰۷۹
مسلح‌سازی شده (EA=۱۰۰۰kN/m)	۰/۰۱۹	۰/۳۵۳	۰/۸۹۵	۱/۴۱۱	۱/۲۷۱	۱/۲۱۹	۱/۴۳۷	۱/۱۲۹	۰/۵۲	۰/۱۱۷	۰/۰۷۷
مسلح‌سازی شده (EA=۱۰۰۰۰kN/m)	۰/۰۱۶	۰/۳۳۲	۰/۸۴۵	۱/۳۴۳	۱/۲۰۵	۱/۱۵۹	۱/۳۶۴	۱/۰۶۴	۰/۴۸۹	۰/۱۱۵	۰/۰۶۹
مسلح‌سازی شده (EA=۱۰۰۰۰۰kN/m)	۰/۰۱۴	۰/۲۷۵	۰/۷۳۶	۱/۱۹۶	۱/۰۵۸	۱/۰۲۳	۱/۲۱۳	۱/۹۳۴	۰/۴۱۳	۰/۱۰۳	۰/۰۴۰
مسلح‌سازی شده (EA=۱۰۰۰۰۰۰kN/m)	۰/۰۱۶	۰/۲۵۲	۰/۷۰۶	۱/۱۳۸	۰/۹۸۴	۰/۹۵۲	۱/۱۴۶	۰/۸۸۴	۰/۳۷۴	۰/۰۷۶	۰/۰۳۶

جدول ۱۱. میزان مدول خط آهن برای حالت مسلح‌سازی نشده و مسلح شده با EAهای مختلف

مدول کششی ژئوگرید EA(kN/m)	۱۰۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰	۵۰	۰
مدول خط آهن (kg/cm^2)	۴۰۳	۳۸۳	۳۳۸	۳۱۹	۳۱۳	۳۱۰	۳۰۷



شکل ۱۰. نمودار تغییر مدول خط آهن بر حسب مدول کششی ژئوگرید

٦. نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر اثر به‌کارگیری مصالح ژئوسنتتیک‌ها بر سختی قائم خط ریلی در قالب انجام بارگذاری میدانی بررسی و تحلیل نتایج بصورت تحلیلی و عددی برای خط مورد مطالعه انجام شده است. برای این منظور خط تست مورد نظر در طولی برابر ۱۰۰ متر در شرایط متنوعی اعم از بستر مسلح شده با ژئوتکستایل، ژئوگرید و ترکیب ژئوتکستایل و ژئوگرید وبستر طبیعی مورد بارگذاری قرار گرفته و نتایج مربوط به تغییر مکان خط ثبت گردیده است. برای بار گذاری از واگن حمل بالاست در دو حالت پر و خالی استفاده شده و ثبت تغییر مکان از طریق شابلون اندازه‌گیری صورت گرفته است. و سپس با به‌کارگیری روش تالبوت سختی قائم خط در شرایط مختلف محاسبه شده است. عمده نتایج بدست آمده از تحقیق بصورت زیر قابل تبیین می‌باشد:

• محاسبه سختی قائم خط از طریق اندازه‌گیری میدانی تغییر مکان قائم خط، بیانگر اثر مناسب ژئوتکستایل ژئوگرید بر سختی خط با افزایش حداکثری در حدود ٤٠ درصد در مقایسه با سایر حالات تقویت بستر می‌باشد.

• در صورت انتخاب مناسب پارامترهای خط و بستر و همچنین مصالح ژئوسنتتیک، نتایج بدست آمده از مدل عددی اجزامحدود سه‌بعدی در شرایط غیر خطی همخوانی مناسبی را با نتایج اندازه‌گیری میدانی نشان می‌دهد و از این رو، ابزار مناسبی جهت تحلیل بار- تغییر مکان فراهم می‌سازد.

• با تغییر سختی در محوری ژئوگرید(EA) در مدل عددی کالیبره شده حداکثر میزان افزایش در سختی قائم در بهترین حالت تئوریک برابر ۳۱ درصد می‌باشد.

• با تغییر سختی در محوری ژئوگرید(EA) در مدل عددی کالیبره شده حداکثر میزان افزایش بار محور نهایی قابل تحمل توسط خط حدود ۳۱ درصد می‌باشد.

۷. پانویس‌ها

1- Geogrid
2- Geotextile
3- Geocomposite
4- Nonwoven Geotextile
5- Woven Geotextile
6- Praouse
7- Timoshenko
8- Langer
9- Esenmann
10- Hay
11- Winkler
12- AREA
13- Wasiutynski
14- Zimmermann
15- Arma
16- Clarke

۸. مراجع

[1] E.S. ASHPIZ, University of Transport Engineer, Moscow, Russia, R. Diederich & C. Koslowski, DuPont de Nemours, Luxembourg "The use of Spunbounded Geotextile in Railway track Renewal St. Petersburg-Moscow".

[2] Filippo Montanelli, Sales Director-Geosynthetic Division, TENAX Spa, Vigano(Lecco) – Italy, Pier Giorgio Recalcati, Civil Engineer, Technical Manager, Geosynthetic Division, TENAX Spa "Geogrid Reinforced Railways Embankments: Design Concepts and Experimental Test Results" , Vigano(Lecco) – Italy

[3] Jorg Klompmaker, BBG Geokunstoffe,Espelkamp-Fiestel, Bodgan Tronac, "Rehabilitation of Railway Lines with Geogrid Reinforcement",NAUE Romania S.R.L.

٤- علیرضا زجاجی (۱۳۸۷)، "بررسی تحلیلی و محاسبه سختی قائم خط آهن"، پایان‌نامه کارشناسی، استاد راهنما: دکتر جبارعلی ذاکری، استاد مشـــاور: دکتر مرتضی اسماعیلی، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

[5] Arnold D. Kerr(2003) "Fundamentals Of Railway Track Engineering",

٦- نشریه شماره ۲۸۸، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی،"آیین نامه طرح هندسی راه‌آهن"، معاونت امور فنی، ۱۳۸۳

۷- نشریه شماره ۳۰۱، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی،"مشخصات فنی عمومی‌روسازی راه‌آهن"، معاونت امور فنی، ۱۳۸٤

۸- نشریه شماره ۲۷۹، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی،"مشخصات فنی عمومی زیرسازی راه‌آهن"، معاونت امور فنی، ۱۳۸۳

۹- اصغر سعادتی راد (۱۳۸۸)، "بررسی روش‌های تقویت بستر خاکریز راه‌آهن با اســـتفاده از ژئوسنتتیک‌ها- مطالعه موردی خط آهن اهواز-خرمشـــهر"، پایان‌نامه کارشناســـی ارشد، استاد راهنما: دکتر مســـعود نصر آزادانی، استاد مشاور: دکتر مرتضی اسماعیلی، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

[10] "Plaxis 3D Tunnel Reference Manual", version 1, April 2001, Plaxis B.V. P.O. Box 572, 2600 AN DELFT, Netherlands.

[11]Ernest T. Selige and John M. Waters(1994) "Track Geotechnology and Substructure Management", Thomas Telford Services Ltd,1 Heron Quay, London.