توسعه روش پایدارسازی زیرسازی خطوط سنگین راه آهن با استفاده از زهکش های قائم پیش ساخته

جواد میرمحمد صادقی (مسئول مکاتبات)، استاد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم وصنعت ایران، تهران، ایران

امیرعباس حضرتی، دستیار تحقیقاتی، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

آراز هاشمی نژاد، دستیار تحقیقاتی، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: Javad_Sadeghi@iust.ac.ir

دریافت:۱۳۹۲/۱۰/۰۳ پذیرش:۱۳۹۳/۰۵/۱۳

چکیده:

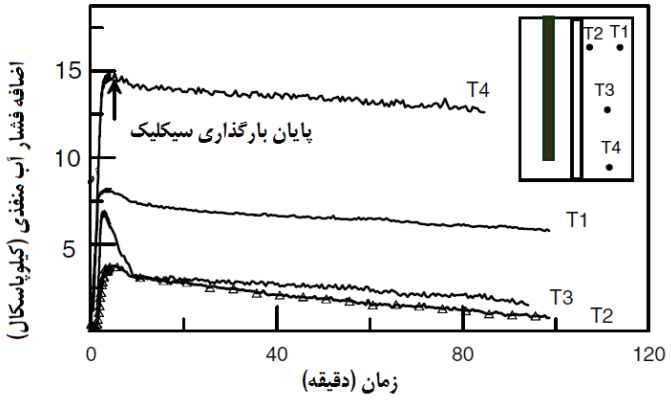
پایدارسازی خط یکی از موضوع های اساسی در ساخت خطوط و بهره برداری از آن در ماه های ابتدایی راه اندازی خط بشمار می‌آید. در مناطقی که دارای خاک با ماهیت ریزدانه بوده وآب زیرزمینی در سطح بالایی قرار دارد، به علت وجود فشار آب منفذی، زمان تحکیم طولانی است. افزایش تنش های حاصل از خطوط سنگین راه آهن بر لایه های بستر در طول زمان باعث نشست های موضعی و کلی شده و پایداری خط در زمان مطلوب حاصل نمی‌شود. این تغییر شکلها به علت ماهیت افزایشی باعث کاهش ایمنی و پایداری خط آهن شده ونتیجتا نگهداری خط در شرایط مطلوب را با چالش مواجه می کنند. طولانی شدن زمان پایدار سازی خط باعث عدم اطمینان از پایداری خط و نتیجتا عدم امکان استفاده از حداکثر ظرفیت خط خواهد شد. در این مقاله تلاش شده تا با ارائه یک الگوی مناسب از زهکش های قائم پیش ساخته جهت نصب در بستر خطوط سنگین راه آهن، مدت زمان لازم برای دستیابی به درجه تحکیم مناسب به حداقل ممکن خود کاهش یابد. در این تحقیق پس از تحلیل روسازی و زیرسازی بستر خط آهن سنگین به کمک تئوری اجزاء محدود، پارامترهای مدت زمان تحکیم کامل بستر، درجه تحکیم بستر و نشست نهایی بسترطبیعی به دست آمده و سپس مدت زمان تحکیم برای بستر به همراه زهکش های قائم پیش ساخته مشخص شده است. با استفاده از نتایج حاصل در این تحقیق، تعداد و فاصله زهکش های پیش ساخته در واحد طول تعیین شده است. همچنین با استفاده از تحلیل حساسیت برروی بستر خط آهن تحکیم یافته با زهکشهای دارای طول های متفاوت، طول بهینه هر زهکش مشخص شده و سرانجام یک مدل که شامل تعداد، فاصله و طول زهکش ها است، جهت نصب در واحد طول بستر خط راه آهن سنگین پیشنهاد شده است.

واژه‌های کلیدی: خطوط سنگین راه آهن، زهکش های قائم پیش ساخته، تحکیم بسترخط آهن، درجه تحکیم، مدل اجزاء محدود

۱. مقدمه

درنواحی که دارای خاک های ریزدانه هستند، حجم زیادی از رس های پلاستیک می‌توانند فشارآب منفذی اضافی را تحت اثر بارهای استاتیک و دینامیک، در خود نگهدارند. فشارآب منفذی اضافی، ظرفیت باربری زهکشی نشده خاک را به طور موثری کاهش می دهد که این امر منجر به کاهش ایمنی و پایداری خط آهن می‌شود. درخطوط سنگین راه آهن این مسئله بحرانی تر است. امروزه در سراسر جهان روشهای متعددی جهت بهسازی بسترخطوط مورد استفاده قرار می‌گیرند، ازجمله تعویض کردن خاک بستر با مصالح مرغوب، استفاده از ژئوسنتتیک ها، استفاده از زهکش های سطحی و استفاده از ستون های سیمانی. اما یکی از جدیدترین و موثرترین روش ها دراین زمینه استفاده از زهکش‌های عمقی است. زهکش های قائم پیش ساخته نوع جدیدی از زهکش های عمقی محسوب می شوند. اولین نوع زهکشهای پیش ساخته در سال ۱۹۳٤توسط پورتز در کالیفرنیا بکارگرفته شدند که از جنس مقوایی بودند و درسال ۱۹٥٤ انواع پلیمری زهکش های پیش ساخته به بازار عرضه شدند .[Aris et al. 1985] زهکش های امروزی از مواد پلیمری تهیه می شوند [Ghandeharioon et al. 2009].

در سالهای اخیر تلاشهای متعددی برای بررسی استفاده از این نوع زهکش ها در بهسازی زمین‌های دارای خاک های ریزدانه صورت گرفته است. از آن جمله می‌توان به آزمایش‌های متعددی که توسط ایندراراتنا وهمکارانش در سال ۲۰۰٦ در دانشگاه ولوونگونگ در جهت استفاده از این زهکشها در پی راه‌آهن صورت گرفته است، اشاره نمود [Shahin and Indrarat-na, 2006]. یکی از این آزمایشها به بررسی تاثیر استفاده از زهکش‌ها در کاهش اضافه فشارآب منفذی می پردازد. دراین آزمایش از یک نمونه خاک رس با وزن واحد۱۷ تا ۱۷/۵۰ کیلونیوتن بر متر مکعب، ضریب نفوذپذیری برابر ۰/٦ تا ۰/۷ و مقاومت برشی زهکشی نشده کمتر از ۸ کیلو پاسکال تحت بارگذاری با فرکانس ۵ تا ۱۰ هرتز، استفاده شد. برای انجام آزمایش، نمونه‌ای از این خاک تحت آزمایش سه محوری تناوبی با ابعاد واقعی قرار داده شد. بار اعمالی از نوع تناوبی بوده و حسگرهای اندازه‌گیری کننده فشار آب منفذی در بخش پایینی نمونه و در قسمت حاوی خاک خشک فشرده شده سلول سه محوری نصب شدند. موقعیت نصب این حسگرها به شماره های T_1، T_2، T_3 و T_4 در شکل (۱) نشان داده شده است. پس از انجام آزمایش نشان داده شد که مقدار اضافه فشارآب منفذی در نواحی کنار زهکش (حسگر T_3) به طورنسبتاً مشخصی کمتر از نواحی کناری سلول خاک (حسگر T_4) است. همچنین در نواحی منتهی به نقاط خارجی سلول خاک (حسگرهای T_1 و T_3) اضافه فشارآب منفذی باسرعت کمتری نسبت به نواحی داخلی(حسگرهای T_2 و T_3) زایل می‌شود. ایندراراتنا وهمکارانش نتیجه گرفتند که زهکش های پیش ساخته تاثیر زیادی در کاهش فشار منفذی دارند [Sha-



شکل ۱. حذف اضافه فشار آب منفذی در نواحی مختلف اطراف زهکش های قائم پیش ساخته [Indraratna et al. 2006,2009]

[hin and Indraratna, 2006,2009][Ni,2012].

فرآیند تحکیم در خاک های ریزدانه اغلب اوقات، زمان زیادی را نیاز دارد، مخصوصاً زمانی که تحکیم به صورت عمقی بوده و خاک دارای مقادیر قابل ملاحظه ای از رس باشد. ایندراراتنا وهمکارانش در مطالعات تکمیلی خود مشخص کردند که زهکش های پیش ساخته کوتاه در بسترهای رسی نرم، نه تنها زمان تحکیم را کوتاه می‌کنند بلکه می‌توانند تغییر مکان جانبی خط را نیز تا ۲۵ درصد کاهش دهند . [Shahin and Indraratna, 2006] علی رغم تحقیقات ارزشمند انجام شده، نتایج آنها در قالب عملی در نیامده و هیچ گونه مدلی جهت استفاده از نتایج تحقیقات صورت گرفته، ارائه نشده است. برای استفاده کاربردی از این زهکش ها در بستر خطوط آهن، پارامترهایی مانند طول، تعداد، فاصله و نوع زهکش مورد نیاز هستند که در تحقیقات قبلی بررسی نشده‌اند. به بیان دیگر نتایج تحقیقات انجام شده بر روی زهکشها به ارائه یک الگوی کاربردی از زهکشها جهت بهسازی بستر خطوط منتهی نمی‌شود. مروری بر ادبیات موجود نشان می دهد که کاربردی کردن تحقیقات انجام شده نیازمند مطالعات بیشتری برروی شیوه بکارگیری این زهکش ها است. در این راستا، تحقیق ارائه شده در این مقاله تلاش دارد تا مدلی عملی جهت استفاده از زهکش‌های پیش ساخته ارائه کند. برای جوابگویی به نیاز فوق، در این تحقیق ابتدا مقطعی از خط آهن دوخطه به همراه بستر آن به صورت دوبعدی و در حالت کرنش صفحه ای مدل سازی شده و سپس با استفاده از تحلیل حساسیت و مقایسه روند تغییرات پارامترهای تحکیم خاک، یک الگوی بهینه از زهکش‌ها جهت نصب در مقطع عرضی راه آهن دوخطه سنگین که برروی بستری از خاک ریزدانه قرار دارد، ارائه شده است. به کمک نتایج این تحقیق می توان در مناطقی که خاک بستر ریزدانه بوده و همچنین آب زیرزمینی در سطح بالایی قرار دارد، مدت زمان دست یابی به حداکثر نشست را کاهش داده و نشست های رخداد را یکنواخت کرد.

۲. مدل سازی

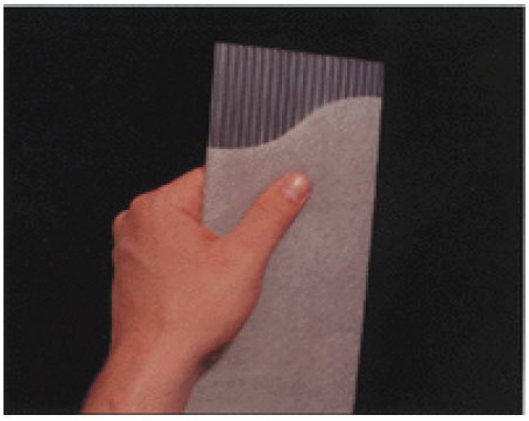
پارامترهای سختی بستر و ضخامت بالاست، فاکتورهای موثر بر روی کارآیی خط هستند و به تبع آن استفاده از روشهای مناسب برای افزایش سختی بستر به عنوان امری ضروری برای خطوطی است که بر روی خاک های با ماهیت نرم شوندگی ساخته می شوند . [Shahin and Indraratna, 2006] در این تحقیق برای نیل به این هدف، ابتدا یک مدل از بستر خط آهن براساس شرایط و ضوابط آیین نامه های موجود راه آهن شامل آئین نامه AREMA و استاندارد UIC ساخته شد. پارامترهای استفاده شده در مدل سازی عبارتند از: بارطراحی، ابعاد مدل بستر، مشخصات طراحی، مراحل محاسباتی و شرایط سرحدی. جهت تعیین هندسه مدل ابتدا بااستفاده از تحلیل حساسیت، حداقل ابعاد لازم مدل بستر راه آهن تعیین شد. برای این منظور با تحلیل مدل های با عمق و عرض متفاوت، عمق و عرض مدل که افزایش بیش از حد آنها تاثیری در نتایج تحلیل ندارد مشخص شد. ابعاد بهینه مدل به دست آمده از تحلیل ها برابر۲۰ متر عمق و ۳۰ متر عرض است. نوع مصالح مورد استفاده در مدل سازی بستر مطابق توصیه‌های UIC است. براساس استاندارد UIC بسترهای راه آهن به پنج گروه S_0، S_1، S_2، S_3 و R طبقه بندی می شوند [UIC,2006]. پارامترهای مورد استفاده در مدل سازی خاک در جدول (۱) درج شده اند.

در شکل (۲) نمایی از مقطع زهکش قائم پیش ساخته مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است. این نوع زهکش از دوبخش هسته و فیلتر تشکیل شده که بخش فلیتر دارای مقطع مستطیلی بوده و در اطراف بخش هسته قرار دارد. وظیفه بخش فیلتر جداسازی جریان آب از مصالح خاکی اطراف خود وانتقال آن به داخل زهکش است. بخش هسته نیز وظیفه انتقال آب موجود در داخل زهکش به سطح را دارد.

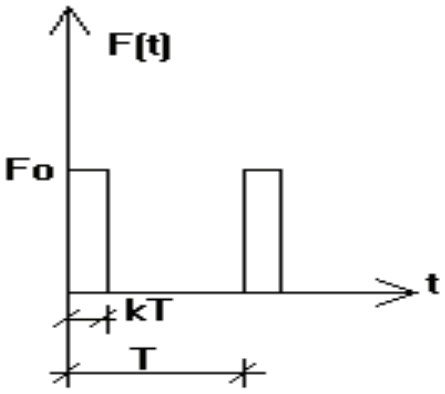
بارگذاری به صورت بار عبوری ناوگان مطابق شکل (۳) در نظر گرفته شده است. در این شکل F_0 بار محوری ناوگان، kT زمان عبور قطار از خط و T زمان تناوبی عبور قطارهاست. برای تعیین بار طراحی اعمالی بر اساس آمار متوسط تناژ عبور بار سالانه (MGT) و نوع واگن های سنگین ایران مقادیرk , F , T به

جدول ۱. مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل سازی بستر راه آهن

	S_0	S_1	S_2	S_3	R	بالاست	زیر بالاست
نوع مدلسازی	موهرکلمب	موهرکلمب	موهرکلمب	موهرکلمب	موهرکلمب	موهرکلمب	موهرکلمب
شرایط	زهکشی شده	زهکشی شده	زهکشی شده	زهکشی شده	زهکشی شده	زهکشی شده	زهکشی شده
$\gamma unsat\ (kN/m^3)$	۱۰	۱۵	۱۶	۱۷	۲۳	۱۸	۱۷
$\gamma sat\ (kN/m^3)$	۱۱/۵۰	۱۸	۲۰	۲۰	۲٤	۲۱	۲۲
$K_x(m/s)$	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰٤	۰/۰۰۱۵	۰/۰٤٤	۱/۰	۱/۰	۰/۵۰
$Ky\ (m/s)$	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰٤	۰/۰۰۱۵	۰/۰٤٤	۱/۰	۱/۰	۰/۵۰
$E(MPa)$	۳۵۰	۱۵۰۰	۲۵۰۰	٤۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰	۱۳۰۰۰۰	۲۰۰۰۰۰
ν	۰/۳۵۰	۰/٤۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۳۰
$c\ (kPa)$	۵/۰	۱۵/۰	۱۰/۰	۱/۰	۱۵۰۰	۱/۰	۰/۱
φ	۲۰	۱۰	۲۰	۳۰	۲۰	٤۵	۳۵
ψ	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰	۳
ضریب انبساط	۱/۵	۱/۳	۱/۲	۱	۱/۲	–	–



شکل ۲. نمای مقطع عرضی زهکش قائم پیش ساخته



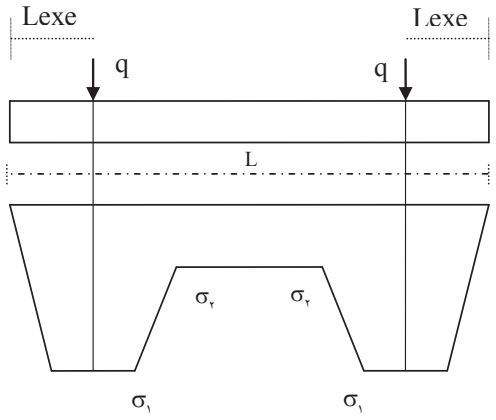
شکل ۳. مدل بارگذاری بر روی بالاست

ترتیب برابر ۰/۰۰۳۳ و ۱۶ تن و ۲/۵ ساعت منظور شد. برای تعیین بار محوری ناوگان، بار قائم چرخ به صورت تابعی از بار استاتیکی در نظرگرفته شده و در این راستا ضریب ضربه طبق رابطه انجمن راه آهن آمریکا اتخاذ شد [AREMA,2006 Sad-eghi and Barati,2010].

به منظور تعیین تنش ایجاد شده در زیر تراورس‌ها از الگوی تنش که در محل، اندازه گیری شده است، استفاده شد(شکل (٤)). طبق این الگو، تنش اعمالی در بستر به صورت دو مقدار تنش σ_1 و σ_2 بوده که با در نظر گرفتن مفروضات زیر به دست آمده اند. ریل از نوع UIC 60 بوده و نوع تراورس۷۰ B است (طول برابر ۲۶۰۰ میلیمتر، عرض برابر۲۵۰ میلیمترو ارتفاع برابر۲۰۰ میلیمتر). سرعت طرح برابر ٦۰ کیلومتر برساعت و حداکثر بار محوری با توجه به خطوط سنگین راه آهن و قطارهای موجود در ایران ۲۵ تن در نظرگرفته شده است. خط آهن مذکور از نوع بالاستی بوده و عرض خط مطابق با عرض خط آهن استاندارد برابر ۱٤۳۵ میلیمتر در نظر گرفته شده است [Sadeghi,2008]. فاصله تراورس ها برابر۵۰۰ میلیمتر بوده و قطر چرخ برابر با ۱۰۰۰ میلیمتر است. سطح بستر به صورت افقی و بدون شیب در نظرگرفته شده است. مقدار تنشهای اعمالی بر روی زیرسازه که توسط الگوی تنش توزیعی به دست آمده است عبارتند از: σ_1 برابر با ۱٥٤/٤۰ کیلونیوتن بر متر مربع و σ_2 برابر با ۳۸/٦۰ کیلو نیوتن بر مترمربع. از آنجایی که خطوط سنگین راه آهن دارای بارمحوری زیاد و سرعت کم هستند درنتیجه تنش زیادی برروی لایه های بالاست، زیربالاست و بستر اعمال می‌شود. بنابراین لایه بستر نقش بسزایی در پایداری سیستم خط آهن برعهده می‌گیرد. ابعاد لایه های موجود در روسازه خط عبارتند از: لایه بالاست به ضخامت ٤۰ سانتی متر(شیب ۱/۵۰ : ۱) و لایه زیربالاست به ضخامت ۱۵ سانتی متر(شیب ۱/۵۰ : ۱). بخش بستر خط آهن عبارتند از: لایه شکل دهی به ضخامت ۱ متر، بستر راه آهن که تا عمق ۱٦ متری ادامه دارد، لایه ای از خاک رس که در عمق ۱٦ متری قرارگرفته و ٤ متر ضخامت دارد. سطح آب زیرزمینی در عمق ٤ متری سطح زمین است. شکل (۵) نمایی از هندسه مدل را نشان می دهد.

در این تحقیق مشخصات مدلسازی در سه دسته طبقه بندی می‌شوند که عبارتند از: نوع مدل، پارامترهای رفتار مصالح و ضریب نفوذ پذیری. براساس ویژگی های مصالح خط آهن بالاستی و درنظرگرفتن بعضی پارامترها، مدل موهر- کلمب برای مدل سازی مصالح برگزیده شده است. برای تعیین نوع بسترها از رده بندی کیفی و برای تحلیل بسترخط آهن از روش ساخت مرحله ای استفاده شد. لازمه استفاده از روش ساخت مرحله ای، تعیین فازهای محاسباتی است. فازهای مورد استفاده از این قرار هستند : خاکبرداری در محل احداث لایه شکل دهی، احداث لایه شکل دهی و متراکم کردن این لایه، مدت زمان وقفه که ناشی از عملیات روادارای و همسطح کردن لایه شکل دهی است، نصب کردن زهکش های قائم پیش ساخته در بستر، احداث لایه‌های بالاست و زیربالاست، مدت زمان وقفه که شامل مراحل ریل گذاری، روادارای و نصب ابنیه فنی است، اعمال بار قطار و تحکیم با فشار منفذی کمینه. نوع المان اجزاء محدود در این تحلیل، المان مثلث پانزده گرهی بوده و درجه مش نیز از نوع ریز است. در این تحقیق به دلیل اینکه سیستم خط آهن و بستر دارای شرایط کرنش صفحه ای هستند، از حالت دو بعدی نرم استفاده می‌شود. برای ایجاد شرایط مرزی در مدل ساخته شده از شرایط گیرداری استاندارد استفاده شده است. برای شبیه سازی هرچه بیشتر شرایط محیطی در مدل، در مرزهای دو طرف مدل از حالت مرز بسته شده استفاده شد. همچنین مرز پایین مدل به دلیل وجود لایه رس، باز نگه داشته شده و فشارهای آب منفذی اضافی می‌توانند در لایه رس حذف شوند.

فرآیند ایجاد تنش اولیه برپایه روش K_0 است که مقدارپیش فرض K_0 نیز برابر با مقدار تابع $1-\sin\varphi$ است. زمان پایان تحلیل تحکیم براساس معیار فشارحفره ای کمینه تعیین می‌شود. هنگامی که فشار حفره ای اضافی مطلق (P_s) کمتر از مقدار فشار حفره ای کمینه باشد، محاسبات متوقف می‌شود. مقدار فشار حفره ای کمینه در این تحلیل برابر با یک کیلونیوتن بر متر مربع در نظر گرفته شده است. مقدار درجه تحکیم بستر خط آهن براساس



شکل ٤. الگو توزیع تنش در لایه خاک زیر تراورس [Sadeghi,2008]

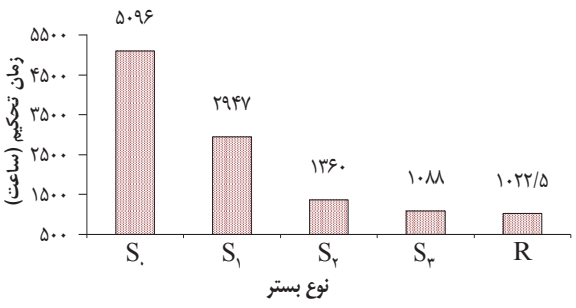
رابطه (۱) تعیین می‌شود، به طوریکه مقدار فشار حفره ای اضافی حداکثر برابر (P_m) است.

$$P_s = P_m * X \qquad (۱)$$

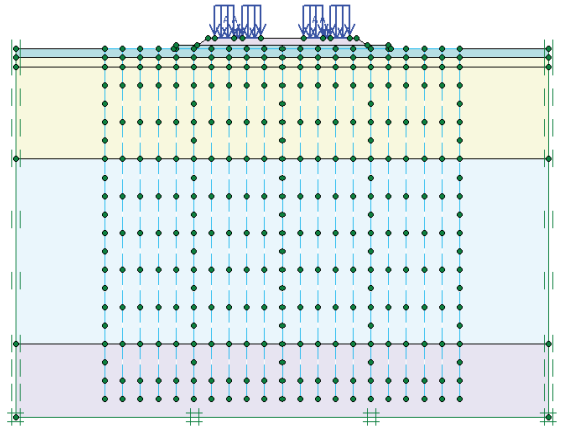
که در آن X ، مقدار درجه تحکیم برحسب درصد است .

۳. تحلیل بستر خط آهن سنگین در حالت های مختلف

برای بررسی تاثیر زهکش های قائم پیش ساخته برروی تحکیم بسترهای خطوط سنگین از سه پارامتر اصلی استفاده شد که عبارتند از : زمان تحکیم کامل بستر، درجه تحکیم نهایی بستر و نشست نهایی بستر. در ابتدا باید محدوده کاربرد بسترهای پیشنهادی UIC که برابر(S_0، S_1، S_2، S_3 و R) هستند مشخص می‌شد. به این منظور یک سری تحلیل حساسیت بر روی پنج بستر مزبور صورت گرفت و نتایج حاصل از این تحلیل ها در قالب سه نمودار مدت زمان تحکیم (شکل (٦))، درجه تحکیم(شکل ۷) و نشست نهایی بستر(شکل۸) تنظیم شد. براساس شکل(۸) مشخص



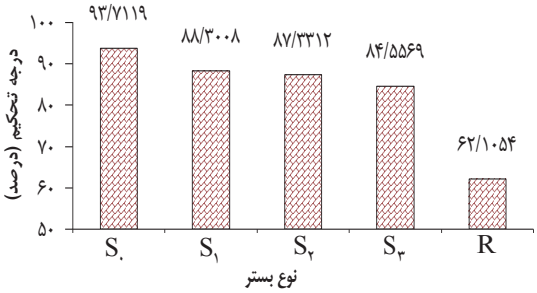
شکل ٦. نمودارمدت زمان لازم برای تحکیم بسترهای پیشنهادی $UIC_{٧١٤}$



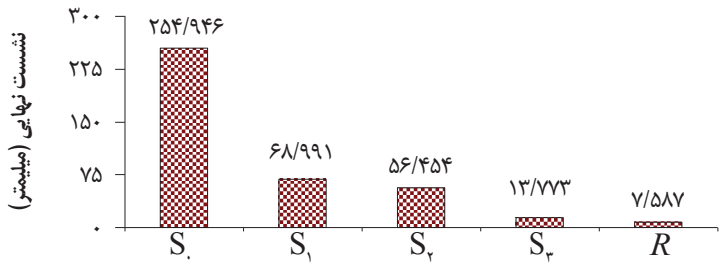
شکل۵. نمایی از بستر مدل سازی شده

می‌شود که امکان وقوع تحکیم در بستر در شرایط متداول وجود ندارد. زیرا در این نوع بستر پدیده نشست در طول زمان ادامه دارد و برای بهسازی آن باید از روشهای دیگری چون جایگزینی خاک بستر استفاده کرد. در مورد بسترهای S_3 و R (بستر سنگی) نیز همانطورکه در شکل(۸) مشاهده می‌شود، مقدار نشست نهایی این بسترها در حالت بدون استفاده از زهکش های قائم پیش ساخته در محدوده قابل قبول است و در صورت استفاده از زهکش در این بسترها فقط هزینه های سیستم خط بستر افزایش می‌یابد.

بنابراین در این مورد مشاهده می‌شود که به دلیل ساختار مناسب این بسترها نیازی به استفاده از زهکش در بهسازی آنها احساس نمی‌شود. در مورد بستر S_2 نیز با بررسی شکل(٦) مشاهده می‌شود که مدت زمان لازم برای تحکیم این نوع بستر بسیار نزدیک به بستر S_3 است و براساس شکل(۸) مشاهده می‌شود که مقدار نشست نهایی این بستر در حالت بدون استفاده از زهکش، بسیار بیشتر از بوده و در نتیجه در بهسازی این نوع بستر باید شرایط



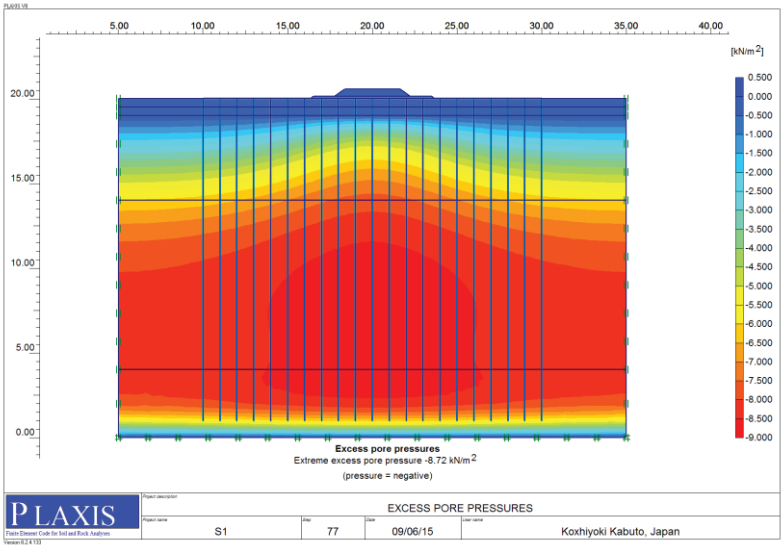
شکل ۷. نمودار مقداردرجه تحکیم بسترهای پیشنهادی $UIC_{٧١٤}$



شکل ۸. نمودارمقدار نشست نهایی به وجود آمده در بسترهای پیشنهادی UIC_{714}

اقتصادی پروژه و حجم عملیات بخش هایی از پروژه که این نوع خاک در آنها وجود دارد در نظر گرفته و سپس اقدام نمود. در شرایط عادی، بهسازی این نوع بستر با استفاده از زهکش‌های قائم پیش ساخته به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست. بنابراین بستر S_1 واجد تمام شرایط برای بهسازی به وسیله زهکش‌های قائم تشخیص داده می‌شود. براساس نتایج حاصل، بستر ضعیف S_1 قابلیت بهسازی بوسیله زهکش‌های قائم پیش ساخته را دارد. شکل (۹) نمایی از مدل بستر ضعیف S_1 را در حالت طبیعی و بدون استفاده از زهکش نشان می دهد. خطوط عمودی موجود در مقطع عرضی بستر راه آهن فقط مربوط به محل قرار گیری زهکش ها هستند و بر روی نتایج تاثیری ندارند.

مناطق قرمز رنگ در شکل (۹) نواحی هستند که اضافه فشار آب منفذی در آن ها وجود دارد و مناطق آبی رنگ قسمت‌هایی هستند که اضافه فشار آب منفذی در آنها از بین رفته و پدیده تحکیم به طور کامل انجام شده است. باتوجه به شکل (۹) مشاهده می‌شود که قسمت های واقع در مرکز مقطع عرضی خط آهن مناطقی هستند که فشار آب منفذی در آنها تا مدت زمان طولانی تری وجود دارد و زهکش ها در این قسمت ها می توانند مورد استفاده قرار گیرند. جهت تعیین تعداد و فاصله بهینه زهکش های پیش ساخته در بستر ضعیف S_1، بستر مذکور در پنج مرحله تحلیل شد. مرحله اول، زهکش ها با فاصله یک متر از یکدیگر در بستر نصب و بستر تحلیل شد. این کار تا پنج مرحله ادامه پیدا کرده و در مرحله پنجم، فاصله زهکش‌ها برابر پنج متر است. نتایج حاصل ازاین تحلیل ها در زیر بحث شده است.

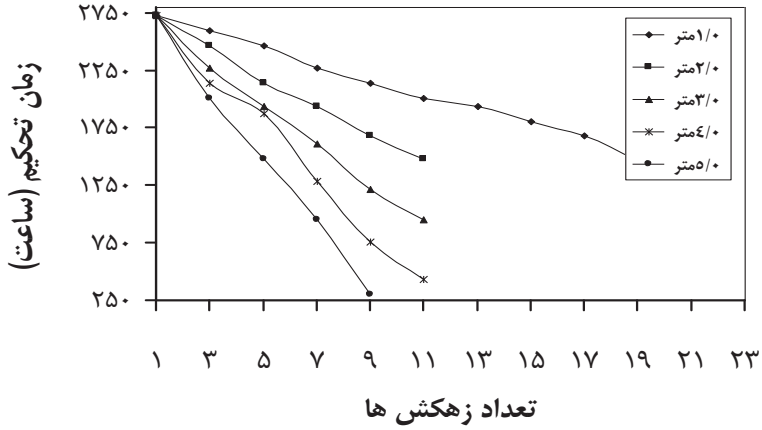


شکل۹. بستر S_1 تحکیم یافته درحالت بدون استفاده از زهکش های قائم پیش ساخته

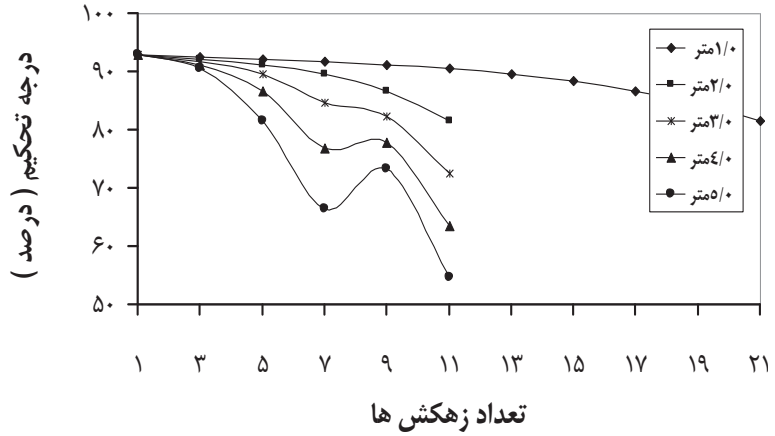
٤. تحلیل نتایج حاصل از مدل سازی بستر ضعیف

با توجه به شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود که حالت استفاده از ۵ عدد زهکش با فاصله نصب ۵ متر از همدیگر بهترین گزینه جهت بهسازی بستر ضعیف S_1 از لحاظ پارامتر مدت زمان لازم برای تحکیم کامل بستر است. به طوری که مدت زمان تحکیم از ٢٤٦٧ ساعت در حالت نصب با فاصله یک متر را به ١٤٨٢ ساعت در حالت نصب با فاصله ۵ متر کاهش می دهد. استفاده از حالت ۹ عدد زهکش از لحاظ اجرایی مناسب نیست. زیرا مقطع عرضی سیستم خط آهن بسیار کمتر از عرض موثر زهکش ها در این حالت است. باتوجه به شکل (۱۱) مشاهده می‌شود که از لحاظ پارامتر درجه تحکیم بستر، از میان گزینه های مناسب یکم الی پنجم، گزینه چهارم مناسب تر است. یعنی نصب هفت عدد زهکش با فاصله نصب یک متر از یکدیگر بهترین گزینه است. با توجه به شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که براساس پارامتر نشست نهایی بستر، مقدار نشست نهایی بستر با افزایش تعداد زهکش ها بیشتر می‌شود. اما افزایش تعداد زهکش ها باعث افزایش هزینه پروژه نیز می‌شود. بنابراین حالت استفاده از پنج عدد زهکش با فاصله نصب ۵ متر از یکدیگر بهترین گزینه از لحاظ اجرایی و اقتصادی است. با جمع بندی نتایج حاصل از سه پارامتر مدت زمان تحکیم بستر، درجه تحکیم بستر و نشست نهایی بستر مشخص می‌شود که بهترین حالت بکارگیری زهکش های قائم پیش ساخته برای تحکیم بستر ضعیف خطوط سنگین راه آهن، استفاده از پنج عدد زهکش قائم پیش ساخته با فاصله نصب پنج متر از یکدیگر است.

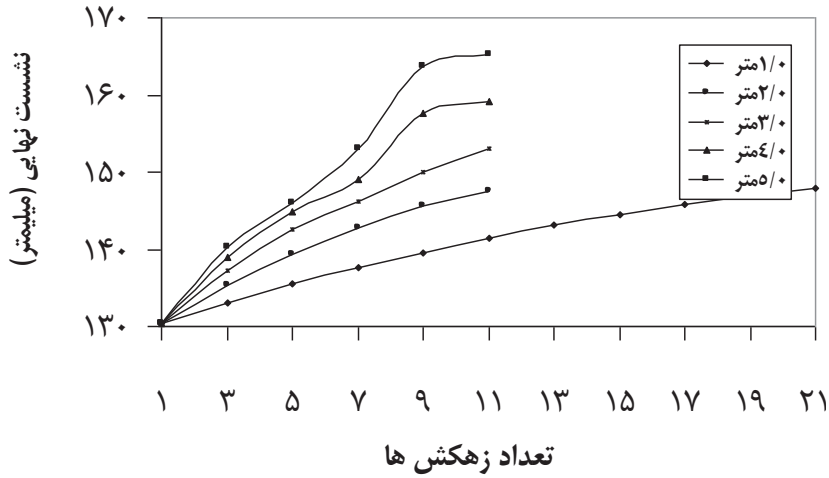
جهت تعیین طول بهینه هریک از این پنج زهکش نصب شده در بستر یک سری تحلیل حساسیت انجام گرفت. برای انجام این



شکل۱۰. بستر S_1 تحکیم یافته درحالت بدون استفاده از زهکش های قائم پیش ساخته



شکل ۱۱. نمودار مدت زمان لازم برای ایجاد تحکیم کامل در بستر S_1 در حالت استفاده از زهکش های قائم پیش ساخته با فاصله نصب ۱ الی ۵ متراز یکدیگر

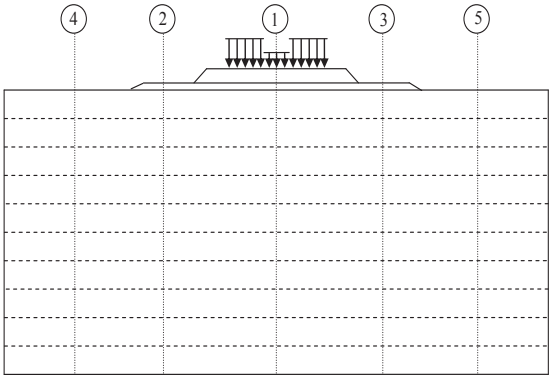


شکل۱۲. نمودار نشست نهایی بستر S_1 در حالت استفاده از زهکش های قائم پیش ساخته با فاصله ی نصب ۱ الی ۵ متر از یکدیگر

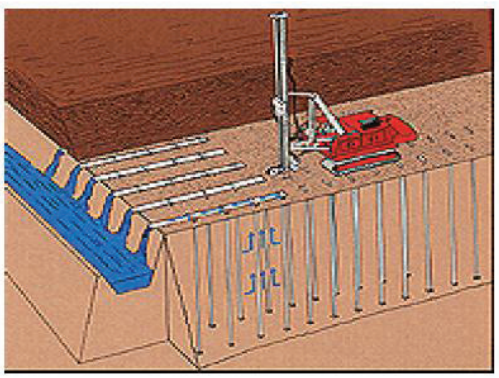
تحلیل حساسیت ابتدا می بایست نحوه قرارگیری زهکش ها در مقطع عرضی بستر خط آهن مشخص می شد. برای این منظور مطابق شکل(۱۳) زهکش ها در بستر نصب شدند به طوری که زهکش واقع در وسط مقطع عرضی بستر دارای شماره یک بوده و دو زهکش بعدی دارای شماره های ۲و۳ هستند و زهکش های کناری دارای شماره های ٤و۵ هستند. شکل (١٤) مدل گرافیکی مرحله نصب زهکش را نمایش می دهد. همانطور که در شکل (١٤) مشاهده می‌شود، این زهکش ها درقالب پلان مربعی نصب می شوند. پلان شکل(۱۳)، نمایی از مقطع عرضی خط آهن را نشان می دهد. زهکش ها به صورت عمودی درعمق بستر نصب می شوند.

در جدول شماره (۳)، در ردیف طول زهکش ها سه عدد درج شده است. عدد بالایی مربوط به طول زهکش های شماره ٤و۵ بوده، عدد وسطی مربوط به طول زهکش های ۲و۳ و عدد پایینی مربوط به طول زهکش شماره یک است. این نوع دسته بندی طول زهکش ها براساس نتایج تحلیل های صورت گرفته در مدل های آزمایشی انجام شده است. پس از انجام ١٤ مرتبه تحلیل بر روی بستر ضعیف بهمراه زهکش های قائم پیش ساخته با طول های ارائه شده در جدول (۳)، نتایج در قالب سه پارامتر ارائه شده در تحلیل های قبلی دسته بندی شده و به صورت نمودارهایی در اشکال (۱۵)، (١٦)و(۱۷) نشان داده شده اند.

در هر مرحله، طول زهکش ها یک متر کاهش داده می‌شود تا طول بهینه زهکش ها مشخص شود. با توجه به نمودار (۱۵) مشاهده می‌شود که از لحاظ پارامتر زمان تحکیم، حالت های شماره ۷ الی۹ مناسب هستند. زمان تحکیم در این حالت ها برابر ۱۸۷٦ ساعت است. از لحاظ پارامتر درجه تحکیم بستر(شکل١٦) حالت



شکل۱۳. پلان نصب زهکش ها در بستر خط آهن



شکل ١٤. پلان نصب زهکش ها در بستر خط آهن

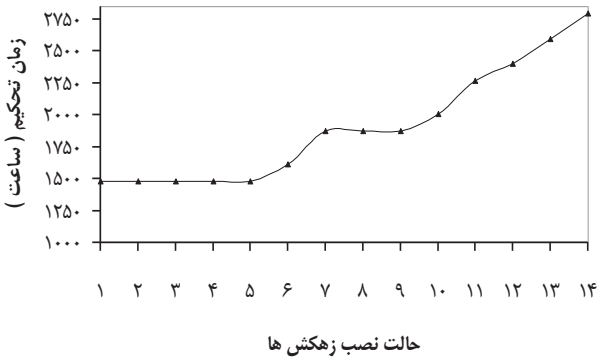
جدول۳. طول زهکش های شماره های ۱ ، ۲ ، ۳ ، ٤ و ٥ نصب شده در بستر S_1 در قالب چهارده حالت مختلف (متر)

حالت	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱٤
زهکش شماره٤و٥	۱۹	۱۸	۱۷	۱٦	۱٥	۱٤	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	٦
زهکش شماره۲و۳	۱۹	۱۹	۱۸	۱۷	۱٦	۱٥	۱٤	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷
زهکش شماره۱	۱۹	۱۹	۱۹	۱۸	۱۷	۱٦	۱٥	۱٤	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸

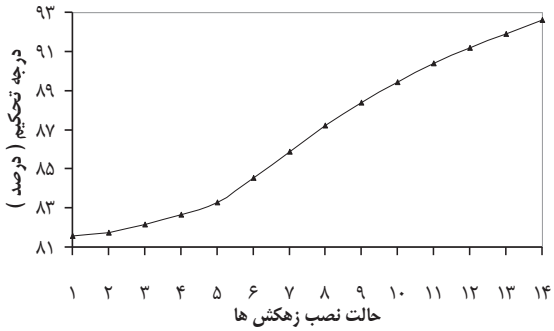
شماره ۸ مناسب تشخیص داده می‌شود. زیرا درجه تحکیم نسبت به حالت های قبل افزایش بیشتری دارد. از لحاظ پارامتر نشست نهایی بستر(نمودار۱۷)، حالت های ۷ الی۹ مناسب هستند، زیرا دارای مقدار نشست کمتری هستند. با جمع بندی این سه پارامتر تحکیم، گزینه شماره ۹ یعنی نصب زهکش های پیش ساخته با طول های (۱۳-۱۲-۱۱) مناسب تشخیص داده می‌شود. در شکل شماره(۱۸) نمایی از مدل بستر تحکیم یافته توسط ۵ عدد زهکش قائم پیش ساخته با فاصله نصب ۵ متر از یکدیگر در حالت (۱۳-۱۲-۱۱) نشان داده شده است. درشکل (۱۹) نمای گرافیکی از مقطع عرضی بستر خط آهن در حالت نهایی (پیشنهادی) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص شده است مجموعه زهکش ها همانند پلان عرضی بستر (شکل۱۳) در فواصل ۵ متر از یکدیگر در طول بستر خط آهن نصب می شوند.

۵. نتیجه گیری

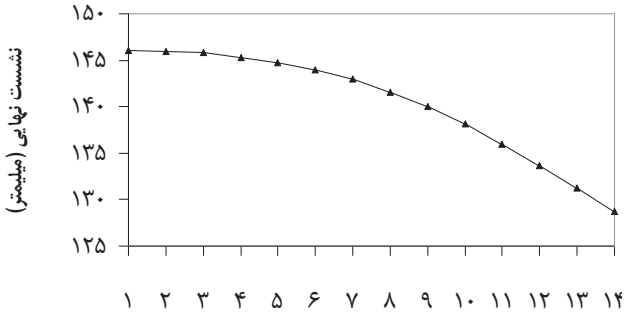
استفاده از زهکش های قائم پیش ساخته در عمق بستر راه آهن موجب کاهش مدت زمان دست یابی به حداکثر تحکیم می‌شود که در نتیجه آن مدت زمان تعمیر ونگهداری خط آهن به حداقل ممکن خود کاهش می یابد و از این طریق مقدار هزینه ای که صرف تهیه زهکش ها شده است برگشت داده می‌شود. از طرف



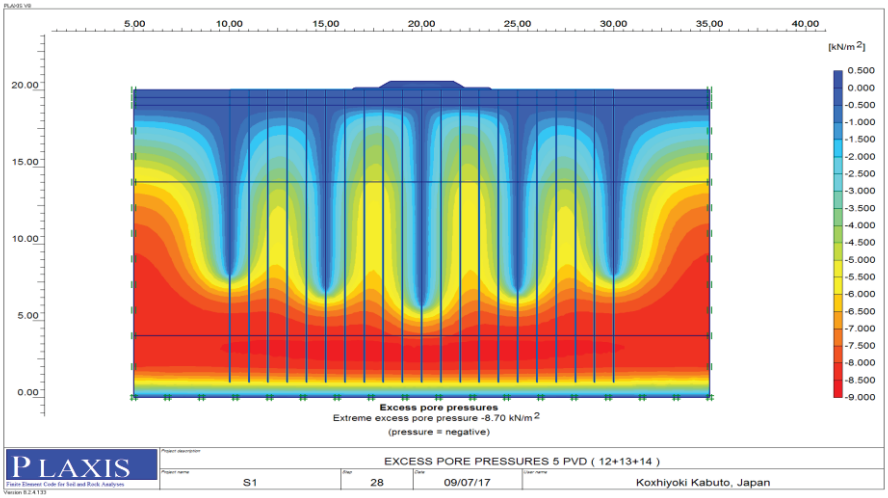
شکل ۱۵. نمودار زمان تحکیم بستر S_1 (استفاده از زهکش)



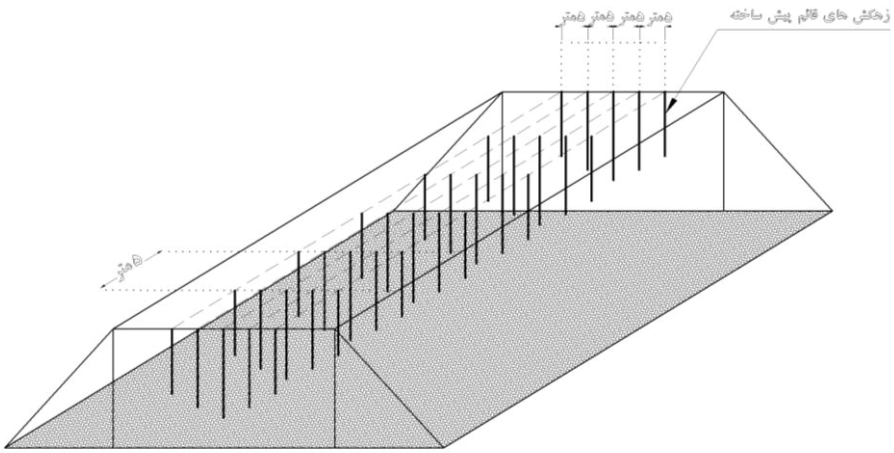
شکل ۱٦. نمودار درجه تحکیم بستر S_1 (استفاده از زهکش)



شکل ۱۷. نمودار نشست نهایی بستر S_1 (استفاده از زهکش)



شکل۱۸. نمایی از بستر تحکیم یافته توسط زهکش های قائم پیش ساخته در حالت (۱۳-۱۲-۱۱)



شکل۱۹. نمای بستر تحکیم یافته توسط زهکش های قائم پیش ساخته در حالت نهایی (پیشنهادی)

دیگر پایداری خط در مدت زمان طولانی‌تری تضمین شده و امکان استفاده بیشتر از این سیستم خط فراهم می‌شود. مزیت اصلی این زهکش ها در سیستم خطوط آهن جدید الحداث است. از آنجایی که یک فاصله زمانی میان مرحله احداث خط آهن و مرحله بهره برداری کامل از خط وجود دارد، این زهکشها می‌توانند با افزایش دادن سرعت فرآیند تحکیم، علاوه بر تامین ایمنی و پایداری خط، زمان تثبیت بستر را نیزکاهش دهند که این عمل باعث کاهش هزینه های جاری خط می‌شود. در یک دهه اخیر تحقیقات زیادی در زمینه این زهکشها صورت گرفته است. این تحقیقات اگر چه ارزش استفاده از این زهکشها را آشکار می کنند، ولی تنها به بررسی چند پارامتر خاص پرداخته و نتایج حاصل دارای محدودیت هایی ازجمله عدم روشن سازی استفاده بهینه از این زهکشها در اجرا است. بررسی و تکمیل تحقیقات در راستای کاربردی کردن این زهکشها و ایجاد یک الگوی مناسب نصب زهکش در بستر خط آهن در این تحقیق انجام شده است تا از این رهگذر، نتایج تحقیقات موجود قابلیت اجرایی پیدا کنند. دراین مقاله با ساخت یک مدل بهینه از بستر راه، بسترهای مختلف خطوط آهن (مطابق با ضوابط) از لحاظ پارامترهای تحکیمی مورد بررسی قرار گرفت. بستر ضعیف تنها بستر مناسب جهت بهسازی بوسیله زهکش های قائم پیش ساخته تشخیص داده شد. با انجام تحلیل حساسیت بر روی مدل ساخته شده، ابعاد، تعداد و طول زهکش های قائم پیش ساخته لازم جهت نصب در بستر

ضعیف معین شد. براساس الگوی به دست آمده، برای بهسازی بستر ضعیف خط آهن سنگین باید از پنج عدد زهکش قائم پیش ساخته با فاصله نصب پنج متر از یکدیگر در مقطع عرضی خط آهن استفاده شود. زهکش نصب شده در مرکز خط آهن سیزده متر طول داشته و دو زهکش مجاور که در فاصله پنج متری نصب شده دوازده متر طول دارند. دو زهکش کناری بسترکه از مرکز خط آهن ۱۰ متر فاصله دارند دارای طولی برابر یازده متر هستند. در این تحقیق نشان داده شد که بااستفاده از الگوی پیشنهادی نصب زهکش ها، فرآیند تحکیم بستر تسریع شده و سریعتر خاتمه می پذیرد. به این صورت با افزایش دادن سرعت فرآیند تحکیم، علاوه بر تامین ایمنی و پایداری خط، زمان تثبیت بسترکاهش می یابد. از این طریق آماده سازی خط جهت بهره برداری کامل، تسریع می‌شود. با عنایت به امکان تولید ماده اولیه این زهکش ها (از پسماند محصولات صنایع پتروشیمی) در داخل کشور از یک سو و از سوی دیگر مزایای قابل ملاحظه استفاده ازاین تکنیک در تقویت مقاومت و پایداری بستر راه آهن، درنواحی یی که دارای خاک های ریزدانه رسی هستند، استفاده از الگوی پیشنهادی جهت احداث خطوط سنگین ریلی دارای توجیه فنی و اقتصادی است.

٦. مراجع

- American Railway Engineering and Maintenace of Way (AREMA) (2006) "Manual For Railway Engineering" , Vol. 4, Chap.16, Part 10.

- Bo, M. W. (2004) "Discharge capacity of prefabricated vertical drain and their field measurements" Geotextiles and Geomembranes, Vol 22, Number 1, pp. 37-48

- Chu, J., Bo, M.W. and Choa, V. (2004) "Practical considerations for using vertical drains in soil improvement projects", Geotextiles and Geomembranes Pub.Service, Vol 22, Number 1, pp. 101-117

- Ghandeharioon, A., Indraratna, B. and Rujikiatkamjorn, C. (2009) "Analysis of soil disturbance associated with mandrel-driven prefabricated vertical drains using an elliptical cavity expansion theory", International Journal of Geomechanics, Vol 10. No .2 , pp.53-64.

- Holtz, R. D. (1987) "Preloading with prefabricated vertical strip drains", Geotextiles and Geomembranes, Vol 6, Issues 1-3, pp. 109-131.

- Indraratna, B. (2008) “Recent advances in the use of prefabricated vertical drains in soft soils”, Faculty of Engineering, 418 pages.

- Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., Ewers, B. and Adams, M. (2009) “Class A prediction of the behavior of soft estuarine soil foundation stabilized by short vertical drains beneath a rail track. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 136(5), pp.686-696.

- Indraratna, B., Sathananthan, I. , Rujikiatkamjorn, C. and Balasubramaniam, A. S. (2005) "Analytical and numerical modeling of soft soil stabilized by prefabricated vertical drains incorporating vacuum preloading" , International Journal of Geomechanics, Vol 5, No.2, ASCE.

- Indraratna, B. , Shahin, M. A. and Rujikiatkamjorn, C. (2006) "Stabilization of rail tracks and underlying soft soil formations", Indian Geotechnical Conference, India, pp. 41-50.

- Indraratna, B., Attya, A. and Rujikiatkamjorn, C. (2009) ”Experimental investigation on effectiveness of a vertical drain under cyclic loads”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135(6), pp.835-839.

- International Union of Railways (2006) "UIC Leaflet" UIC No. 13-0345, France.

- Lo, S. R., Mak, J., Gnanendran, C. T., Zhang, R. and Manivannan, G. (2008) "Long-term performance of a wide embankment on soft clay improved with prefabricated vertical drains", Canadian Geotechnical Journal, Vol 45, Number 8, pp. 1073-1091(19).

-Lorenzo, G. A., Bergado, D. T., Bunthai, W., Hormdee D. and Phothiraksanon, P. (2004) "Innovations and performances of PVD and dual function geosyn-

thetic applications", Geotextiles and Geomembranes, Vol 22, Number 1, pp. 75-99(25).

- Ni, J. (2012) "Application of geosynthetic vertical drains under cyclic loads in stabilizing tracks" , Ph.D. dissertation, University of Wollongong.

- Sadeghi, J. (2008) "Fundamentals of analysis and design of railway ballasted track", IUST Publication, Tehran.

- Sadeghi, J. and Barati, P. (2010) "Improvement of conventional methods in railway analysis and design", Canadian Journal of Civil Engineering, 37(5), pp.675-683.

- Shahin, M. A. and Indraratna, B. (2006) "Parametric study on the resilient response of ballasted railway track substructure using numerical modelling", ASCE. Geocongress 2006, Atlanta, Proceedings.

- Stamatopoulos, Aris, C. and Kotzias, Panaghiotis, C. (1985) "Soil improvement by preloading", Wiley, John and Sons Pub.Service.