

ارائه ابتکارات در سیستم ترکیبی شمع و تیر بتنی درجا با دال پیش ساخته بتنی جهت احداث زیرگذر در خطوط ریلی در حال بهره برداری با کمترین مدت زمان مسدودی

مقاله علمی - پژوهشی

مرتضی پناهی، دانشجوی دکترا، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد نجف آباد، ایران
*جبارعلی ذاکری سردرودی (نویسنده مسئول)، استاد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران
مهدی فضیلتی، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
امیر امینی، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد نجف آباد، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: zakeri@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۱۵ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۳۰

صفحه ۵۲۶-۵۰۵

چکیده

تقاطع‌های همسطح جاده و راه آهن از مهم‌ترین نقاط بروز سوانح و اختلال در بهره‌برداری شبکه حمل و نقل محسوب می‌شوند و تبدیل آن‌ها به تقاطع‌های غیرهمسطح، به‌ویژه به‌صورت زیرگذر، راهکاری مؤثر برای ارتقای ایمنی و کارایی شبکه است. با این حال، اجرای زیرگذر در زیر خطوط ریلی در حال بهره‌برداری با محدودیت‌های ناشی از لزوم حداقل‌سازی زمان مسدودی خط، چالش‌های ژئوتکنیکی و محدودیت‌های اجرایی مواجه است. هدف این پژوهش، انتخاب روش بهینه و تبیین ابتکارات اجرایی مؤثر برای احداث زیرگذر در چنین شرایطی است. بدین منظور، شش روش اجرایی (شامل زیرگذر بتنی درجا، زیرگذر جعبه‌ای بتنی پیش‌ساخته، مقطع قوسی فولادی پیش‌ساخته، شمع‌های بتنی درجا با عرشه فولادی پیش‌ساخته و شمع‌های بتنی درجا با عرشه بتنی پیش‌ساخته یکپارچه) با استفاده از تحلیل SWOT ارزیابی کمی و تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر روش سلسله مراتبی مقایسه شدند و روش ترکیبی شمع و تیر بتنی درجا با دال پیش‌ساخته بتنی با امتیاز ۳/۹۰ (از ۵ امتیاز) بعنوان روش برتر ارائه و معرفی شد. بنابراین در ادامه نوآوری‌های اصلی این روش از جمله اجرای حفاری خندقی کنترل‌شده، به‌کارگیری دیوار بلوکی مسلح به‌عنوان گارد بالاست برای تثبیت موقت بستر خط و امکان تخریب سریع آن در زمان برداشت خط و استفاده از پیش‌دال‌های بتنی به‌منظور پایدارسازی خاک و آماده‌سازی بستر نصب عرشه تبیین شدند. نتایج نشان می‌دهد به‌کارگیری ابتکارات اجرایی یادشده موجب انتقال بخش عمده عملیات اجرایی به قبل از مسدودی خط و فراهم شدن امکان نصب سریع عرشه پیش‌ساخته می‌شود؛ به‌گونه‌ای که اجرای زیرگذر دهانه ۱۲ متری با مسدودی کمتر از شش ساعت و بدون نیاز به مسیر انحرافی امکان‌پذیر شده است. بر این اساس، سیستم ترکیبی شمع و تیر بتنی درجا با دال بتنی پیش‌ساخته می‌تواند به‌عنوان روشی کارآمد در طراحی و اجرای زیرگذرهای ریلی در خطوط در حال بهره‌برداری، به‌ویژه در دهانه‌های حدود ۱۰ تا ۱۲ متر، مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: زیرگذر ریلی، شمع و تیر درجا، دال بتنی پیش‌ساخته، ابتکارات اجرایی، خط در حال بهره‌برداری

۱- مقدمه

حمل و نقل جاده‌ای و ریلی، این تقاطع‌ها به یکی از گلوگاه‌های مهم ترافیکی تبدیل شده‌اند و نقش قابل توجهی در افزایش زمان سفر، بروز سوانح و کاهش کارایی شبکه ایفا می‌کنند. در این میان،

تقاطع‌های همسطح جاده و راه آهن از نقاط بحرانی شبکه حمل و نقل محسوب می‌شوند که هم‌زمان می‌توانند موجب کاهش ایمنی، افت ظرفیت عبور و اختلال در بهره‌برداری شوند. با افزایش تقاضای

سپس، متناسب با نتایج این ارزیابی، سیستم ترکیبی شمع و تیر بتنی درجا با دال بتنی پیش‌ساخته به‌عنوان گزینه منتخب معرفی و ابتکارات اجرایی آن تشریح می‌شود. نوآوری این پژوهش در تلفیق فرایند ارزیابی و انتخاب روش اجرایی با ارائه تمهیدات عملیاتی روش منتخب است؛ به‌گونه‌ای که بخش عمده فعالیت‌های زمان‌بر به خارج از بازه مسدودی خط منتقل شده و ضمن کاهش مدت مداخله در بهره‌برداری، امکان اجرای ایمن‌تر و کنترل‌پذیرتر زیرگذر در مجاورت خط فعال فراهم شود. بدین ترتیب، پژوهش حاضر افزون بر ارائه چارچوبی برای مقایسه روش‌های اجرایی، مجموعه‌ای از راهکارهای قابل استفاده در طراحی و اجرای پروژه‌های مشابه را عرضه می‌کند.

۲- پیشینه پژوهش

پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه اجرای سازه‌های زیرزمینی در مجاورت و یا در زیر خطوط ریلی در حال بهره‌برداری، عمدتاً بر کنترل تغییرشکل زمین، محدودسازی نشست خط، کاهش ریسک‌های بهره‌برداری و تأمین ایمنی حین اجرا متمرکز بوده‌اند. در سال‌های اخیر، توسعه مدل‌های عددی، مطالعات آزمایشگاهی و پایش‌های میدانی برای تحلیل رفتار بستر خط در زمان حفاری یا عبور سازه‌های زیرزمینی، سهم قابل توجهی از ادبیات این حوزه را به خود اختصاص داده است. در این راستا، برخی پژوهش‌ها با بهره‌گیری از مدل‌سازی عددی و آزمایش‌های سانتریفیوژ نشان داده‌اند که زاویه تقاطع سازه زیرزمینی با محور خط، ویژگی‌های ژئوتکنیکی زمین و توالی مراحل اجرا، تأثیر مستقیمی بر شکل ناوه نشست و میزان تغییرشکل‌های منتقل‌شده به روسازی خط دارد (Lin et al., 2024).

همچنین، مطالعاتی که به بررسی عبور تونل‌های جدید از زیر خطوط ریلی عملیاتی پرداخته‌اند، بر لزوم شناخت دقیق الگوی توزیع تغییرشکل‌ها و کنترل آن‌ها پیش از رسیدن به محدوده‌های بحرانی بهره‌برداری تأکید داشته‌اند (Fei et al., 2024). افزون بر این، استفاده از تمهیدات تقویتی نظیر تزریق، شمع‌کوبی، بهسازی موضعی بستر و ترکیب هم‌زمان چند راهکار ژئوتکنیکی، در شماری از تحقیقات به‌عنوان ابزاری مؤثر برای کاهش نشست و افزایش پایداری حین اجرا معرفی شده است (Li et al., 2021).

احداث تقاطع‌های غیرهمسطح، به‌ویژه زیرگذرها، از راهکارهای مؤثر برای جداسازی جریان‌های ترافیکی، ارتقای ایمنی و بهبود عملکرد شبکه به‌شمار می‌رود. با وجود مزایای عملکردی زیرگذرها، اجرای این سازه‌ها در زیر خطوط ریلی در حال بهره‌برداری با محدودیت‌ها و ملاحظات ویژه‌ای همراه است. در چنین شرایطی، حفظ پایداری بستر خط، کنترل نشست و تغییرشکل، تأمین ایمنی عبور قطارها و کاهش اختلال در بهره‌برداری، از مهم‌ترین الزامات اجرایی پروژه محسوب می‌شود. افزون بر این، مسدودی خط برای انجام عملیات ساخت می‌تواند پیامدهای اقتصادی و بهره‌برداری قابل توجهی به همراه داشته باشد. از این رو، انتخاب روش اجرایی مناسب در این‌گونه پروژه‌ها باید فراتر از ملاحظات صرفاً سازه‌ای و بر پایه ارزیابی هم‌زمان معیارهای فنی، اجرایی و اقتصادی انجام گیرد. اهمیت این موضوع در زیرگذرهای با دهانه متوسط تا بزرگ و در خطوط پرتردد، به‌ویژه خطوط یک‌خطه، دوچندان است؛ زیرا در این شرایط، میزان وابستگی عملیات به بازه مسدودی خط، نقش تعیین‌کننده‌ای در امکان‌پذیری اجرا و کارایی نهایی روش ساخت دارد. بنابراین، پیش از تشریح راهکارهای اجرایی، لازم است گزینه‌های مختلف ساخت از منظر مدت مسدودی، هزینه، ریسک اجرایی، سرعت اجرا و سهولت پیاده‌سازی ارزیابی و گزینه مناسب انتخاب شود. در پروژه احداث زیرگذر با دهانه ۱۲ متر در محور ریلی تهران-اصفهان، با توجه به محدودیت‌های اجرایی و بهره‌برداری، سیستم ترکیبی شمع و تیر بتنی درجا همراه با دال بتنی پیش‌ساخته به‌عنوان یکی از گزینه‌های قابل طرح مورد توجه قرار گرفت. با این حال، کارآمدی این سیستم زمانی قابل اتکا است که برتری آن نسبت به سایر گزینه‌های اجرایی به‌صورت مستند و بر مبنای معیارهای مشخص ارزیابی شود و سپس نحوه تحقق این برتری در مرحله اجرا تبیین گردد. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف شناسایی و انتخاب روش مناسب برای احداث زیرگذرهای کم‌عمق با دهانه متوسط در زیر خطوط ریلی در حال بهره‌برداری انجام شده است. بدین منظور، ابتدا گزینه‌های اجرایی متداول با بهره‌گیری از تحلیل کیفی نقاط قوت، نقاط ضعف، فرصت‌ها و تهدیدها، ارزیابی کمی شاخص‌های زمان و هزینه و تحلیل چندمعیاره مبتنی بر معیارهای هزینه ساخت، مدت مسدودی خط، ریسک اجرایی، سرعت اجرا و سهولت اجرا مقایسه می‌شوند تا انتخاب روش برتر صورت گیرد.

زمان اشغال خط و بازه اجرایی بحرانی را به طور معناداری کاهش دهد. برخی مطالعات، کاهش محسوس زمان کل اجرا و حتی کاهش نزدیک به نصف برنامه زمان بندی ساخت را در نتیجه استفاده از سامانه های پیش ساخته گزارش کرده اند (Rafie, 2026). با این حال، شماری دیگر از پژوهش ها تصریح کرده اند که موفقیت این رویکرد وابسته به انطباق دقیق سیستم سازه ای با شرایط ژئوتکنیکی، نحوه باربری در مراحل مختلف ساخت، توالی مناسب اجرا و امکان پذیری حمل و نصب قطعات است؛ از این رو، استفاده از پیش ساختگی به تنهایی مزیت قطعی ایجاد نمی کند، بلکه زمانی اثربخش خواهد بود که در قالب یک سیستم اجرایی منسجم، هماهنگ و متناسب با قیود پروژه تعریف شود (Athanasopoulou, 2019; Pyrgidis, 2021). دیگر، در پروژه های حساس ریلی، مزیت اصلی صرفاً در پیش ساخته بودن اجزا خلاصه نمی شود، بلکه در نحوه تلفیق اجزای درجا و پیش ساخته به گونه ای است که عملیات زمان بر از دوره مسدودی خط منفک شده و فعالیت های بحرانی به حداقل ممکن کاهش یابد. از سوی دیگر، در بخش قابل توجهی از ادبیات، مسئله مدیریت زمان مسدودی و پیامدهای بهره برداری ناشی از انسداد خط، به عنوان یکی از متغیرهای تعیین کننده در تصمیم گیری پروژه های ریلی مطرح شده است. برخی مطالعات داخلی با رویکردهای آماری و برنامه ریزی عملیاتی، بر تعیین زمان بهینه مسدودی و کاهش تعارض میان عملیات اجرایی و برنامه حرکت قطارها تمرکز داشته اند (کفایتی و همکاران، ۱۳۸۸). پژوهش های جدیدتر نیز نشان داده اند که برنامه ریزی هم زمان تعمیرات، بهره برداری و تخصیص بازه های انسداد می تواند تأثیر معناداری بر کاهش تأخیر، افزایش قابلیت اطمینان شبکه و مدیریت هزینه های غیرمستقیم پروژه داشته باشد (Bababeik et al., 2021; Shakibaei et al., 2020). است که ارزش واقعی زمان انسداد صرفاً به مدت آن محدود نمی شود، بلکه تابعی از پیامدهای بهره برداری، اختلال در برنامه حرکت، هزینه های تأخیر و محدودیت های ظرفیتی شبکه است. بر این اساس، ممکن است روشی که از منظر هزینه مستقیم ساخت اقتصادی تر به نظر می رسد، در ارزیابی کلان و با لحاظ هزینه های ناشی از انسداد، گزینه بهینه تلقی نشود. این ملاحظه در پروژه های

ازسوی دیگر، نتایج برخی مطالعات میدانی و پایش محور نیز نشان می دهد که در پروژه های عبور از زیر خطوط فعال، صرف نظر از نوع روش اجرایی، استقرار یک نظام دقیق پایش ژئودتیک و کنترل مستمر رفتار خط و زمین، از ارکان اساسی حفظ ایمنی بهره برداری به شمار می رود (Frolov et al., 2017; Fu et al., 2022; Ivanov et al., 2017; Lunardi et al., 2020; van Bracht, n.d.; Wu et al., 2024; فرزانه و حمیدرضا، ۲۰۲۵). محمد و نقی، (۲۰۱۹). در کنار این دسته از مطالعات، بخش مهمی از ادبیات موضوع به بررسی روش های اجرایی مختلف برای احداث زیرگذر یا سازه های عبوری در مجاورت شریان های حمل و نقل اختصاص یافته است. در این میان، روش هایی نظیر حفاری باز، پوش و جک، باکس جکینگ، راندن سازه های پیش ساخته، روش های تونلی و نیز سامانه های ترکیبی متشکل از اجزای درجا و پیش ساخته، هر یک متناسب با شرایط پروژه، محدودیت های اجرایی و حساسیت های بهره برداری مورد توجه قرار گرفته اند. برخی مرورهای فنی نشان داده اند که در پروژه های شهری و ریلی، انتخاب روش اجرا دیگر صرفاً تابع ملاحظات سازه ای نیست، بلکه باید هم زمان در پرتو قیود زمانی، ترافیکی، ایمنی و اقتصادی ارزیابی شود. در واقع، در بسیاری از پروژه های عبور از زیر مسیرهای فعال، چالش اصلی نه صرفاً ایجاد دهانه عبوری، بلکه امکان انجام عملیات با حداقل اختلال در سرویس، حداقل ریسک نشست و بیشترین قابلیت کنترل اجرایی است؛ موضوعی که در مطالعات کاربردی مرتبط با عبور از زیر خطوط ریلی نیز مورد تأکید قرار گرفته است (Rafie, 2026; Cao, 2018). در همین چارچوب، برخی پژوهشگران نشان داده اند که انتقال بخشی از فعالیت ها از محل پروژه به کارگاه های پیش ساخت و سپس نصب سریع اجزا در دوره های محدود انسداد، می تواند نقش بسزایی در کاهش زمان مداخله در خط و ارتقای قابلیت برنامه ریزی اجرا ایفا کند (Lyons, 2012; Yang, 2023). در امتداد این رویکرد، بهره گیری از فناوری های ساخت سریع و سامانه های مبتنی بر اجزای پیش ساخته در سال های اخیر بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات مرتبط با ساخت شتاب یافته پل و رویکردهای مشابه نشان می دهند که پیش ساختگی، در صورت طراحی صحیح اتصالات، برنامه ریزی دقیق حمل و نصب، و هماهنگی کامل با محدودیت های کارگاهی، می تواند مدت

مورد بررسی قرار داده‌اند. از این رو، جای خالی پژوهشی که بتواند در قالب یک چارچوب منسجم، گزینه‌های متداول اجرای زیرگذر را بر پایه معیارهایی نظیر هزینه ساخت، مدت زمان اجرا، مدت مسدودی خط، ریسک اجرایی، سرعت اجرا و سهولت اجرا مقایسه کرده و سپس با انتخاب گزینه برتر، ابتکارات اجرایی آن را به‌عنوان راهکاری عملی برای پروژه‌های مشابه ارائه دهد، به‌وضوح محسوس است. نوآوری مقاله حاضر در پاسخ به این خلأ تعریف می‌شود؛ بدین معنا که در این پژوهش، ابتدا با بهره‌گیری از ارزیابی‌های کیفی، کمی و چندمعیاره، برتری سیستم ترکیبی شمع و تیر بتنی درجا با دال بتنی پیش‌ساخته نسبت به سایر گزینه‌های متداول بررسی و مستند می‌شود و سپس ابتکارات اجرایی این سیستم به‌عنوان راهکاری برای کاهش وابستگی عملیات به دوره مسدودی خط، افزایش امکان‌پذیری اجرا در مجاورت خط فعال و بهبود هم‌زمان ملاحظات فنی و بهره‌برداری تبیین می‌گردد.

۳- بررسی روش‌های اجرایی و انتخاب روش برتر

۳-۱- روش زیرگذر بتنی درجا

در این روش، کل سازه زیرگذر شامل دیوارهای جانبی، تیرها و دال سقف به‌صورت بتن مسلح درجا اجرا می‌شود. فرآیند اجرایی معمولاً شامل برداشت کامل خط ریلی، انجام گودبرداری در محل تقاطع، اجرای قالب‌بندی و آرماتوربندی، بتن‌ریزی اجزای سازه و در نهایت بازسازی زیرسازی و روسازی خط است. این روش به دلیل انعطاف‌پذیری بالا در طراحی و امکان تطبیق با شرایط مختلف ژئوتکنیکی، در بسیاری از پروژه‌های عمرانی مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، اجرای آن در خطوط ریلی در حال بهره‌برداری با چالش‌های جدی مواجه است. مهم‌ترین محدودیت این روش نیاز به مسدودی کامل خط برای مدت نسبتاً طولانی است؛ زیرا بخش عمده عملیات سازه‌ای در محل تقاطع و در زیر خط انجام می‌شود. علاوه بر این، گودبرداری عمیق در زیر مسیر خط می‌تواند موجب ناپایداری جداره‌ها و افزایش احتمال نشست خط شود. در شرایطی که خط ریلی دارای ترافیک بالا باشد، این موضوع می‌تواند محدودیت جدی در استفاده از این روش ایجاد کند (Chen et al., 2023; Keefer et al., 2001; Mohsenian & Di-Sarno, 2024).

زیرگذر ریلی که عموماً در محیط‌های فعال و با محدودیت شدید دسترسی اجرا می‌شوند، از اهمیت دوچندان برخوردار است. در ادبیات داخلی نیز، هرچند مطالعات ارزشمندی در زمینه عبور تونل یا سازه از مجاورت زیرساخت‌های فعال، تمهیدات کنترل نشست، روش‌های اجرایی خاص و ملاحظات ایمنی انجام شده است، اما بخش عمده این پژوهش‌ها یا بر پروژه‌های تونلی عمیق و شرایط ویژه ژئوتکنیکی متمرکز بوده‌اند، یا صرفاً یکی از ابعاد مسئله، نظیر کنترل تغییرشکل، مدیریت ریسک یا برنامه‌ریزی انسداد را به‌صورت مستقل بررسی کرده‌اند. برای مثال، برخی مطالعات اجرایی در پروژه‌های مترو، بر شناسایی تمهیدات پیشگیرانه و کاهش مخاطرات ناشی از نزدیک‌شدن جبهه حفاری به سازه‌ها و تأسیسات موجود تأکید داشته‌اند (معینی و همکاران، ۱۳۹۸؛ پناهی و همکاران، ۱۴۰۵؛ یزدانی و همکاران، ۱۴۰۲)، حال آن‌که در برخی دیگر، تمرکز اصلی بر رفتار خاک و سازه یا راهکارهای فنی موضعی بوده است. با وجود ارزش علمی و اجرایی این پژوهش‌ها، در اغلب آن‌ها مقایسه‌ای میان گزینه‌های مختلف اجرای زیرگذر از فنی، اجرایی، اقتصادی و بهره‌برداری مشاهده نمی‌شود. به‌ویژه در ارتباط با زیرگذرهای کم‌عمق با دهانه متوسط در زیر خطوط ریلی در حال بهره‌برداری (Feng et al., 2025; Lei et al., 2020; Xie et al., 2024; Xu et al., 2026; Zhang et al., 2016)، هنوز چارچوبی منسجم که بتواند ابتدا روش‌های اجرایی مختلف را بر مبنای معیارهای چندگانه مقایسه و روش بهینه را انتخاب کند و سپس ابتکارات اجرایی همان روش منتخب را برای کاهش وابستگی عملیات به بازه انسداد تبیین نماید، کمتر در ادبیات گزارش شده است. بر این اساس، جمع‌بندی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه مطالعات موجود هر یک بخشی از مسئله را پوشش داده‌اند، خلأ اصلی همچنان در نبود یک رویکرد یکپارچه برای ارزیابی تطبیقی روش‌های اجرایی زیرگذر ریلی و تبیین ابتکارات اجرایی روش برتر در شرایط واقعی بهره‌برداری است. بخش عمده پژوهش‌های پیشین یا بر تونل‌زنی و سازه‌های عمیق متمرکز بوده‌اند، یا تحلیل‌های فنی و ژئوتکنیکی را بدون پیوند مستقیم با تصمیم‌گیری اجرایی دنبال کرده‌اند، و یا موضوع زمان انسداد را مستقل از انتخاب سیستم سازه‌ای و روش ساخت

۳-۲- زیرگذر جعبه‌ای بتنی پیش‌ساخته

یکی از روش‌های متداول در پروژه‌های زیرگذر ریلی استفاده از باکس‌های بتنی پیش‌ساخته است. در این روش، سازه جعبه‌ای در کارخانه یا در کارگاه مجاور پروژه ساخته شده و سپس در زمان مسدودی خط، در محل زیرگذر نصب می‌شود. این روش به‌ویژه برای دهانه‌های کوچک تا متوسط کاربرد گسترده‌ای دارد و در بسیاری از پروژه‌های زیرساختی مورد استفاده قرار گرفته است. مزیت اصلی این روش کاهش زمان عملیات بتن‌ریزی در محل پروژه و افزایش کیفیت ساخت به دلیل تولید کارخانه‌ای است. با این حال، استفاده از باکس‌های بتنی پیش‌ساخته با محدودیت‌هایی همراه است. مهم‌ترین محدودیت این روش وزن بسیار زیاد قطعات پیش‌ساخته در دهانه‌های بزرگ است که نصب آن‌ها را نیازمند استفاده از جرثقیل‌های فوق سنگین می‌کند. علاوه بر این، حمل و نقل قطعات بزرگ بتنی به محل پروژه نیز می‌تواند با محدودیت‌های لجستیکی همراه باشد. در پروژه‌هایی با دهانه بزرگ‌تر از حدود ۸ تا ۱۰ متر، این روش از نظر اجرایی با چالش‌های قابل توجهی مواجه می‌شود (Cheng et al., 2021; Mamaqani et al., 2020; L. Wang et al., 2023; Z. Wang et al., 2019).

۳-۳- زیرگذر قوسی فولادی پیش‌ساخته

در این روش از سازه‌های فولادی قوسی پیش‌ساخته، معمولاً از ورق‌های فولادی، برای ایجاد دهانه زیرگذر استفاده می‌شود. این سیستم به‌صورت سازه مرکب خاک - فولاد عمل کرده و پس از نصب سازه فولادی، خاکریز اطراف آن متراکم می‌شود تا عملکرد سازه‌ای سیستم تأمین گردد. مزیت اصلی این روش سرعت نسبتاً بالای نصب و کاهش عملیات بتن‌ریزی در محل پروژه است. با این حال، این سیستم در محیط‌های شهری یا در پروژه‌هایی با الزامات معماری خاص ممکن است محدودیت‌هایی داشته باشد. علاوه بر این، سازه‌های فولادی در محیط‌های مرطوب یا خورنده نیازمند تمهیدات ویژه برای محافظت در برابر خوردگی هستند. همچنین عملکرد سازه به میزان زیادی به کیفیت تراکم خاک اطراف وابسته است که کنترل آن در شرایط اجرایی دشوار می‌تواند چالش‌برانگیز باشد (Huang et al., 2025).

۳-۴- زیرگذر با شمع‌های درجا و عرشه فولادی

پیش‌ساخته

در این روش، ابتدا شمع‌های بتنی درجا در دو طرف مسیر خط اجرا می‌شوند. سپس یک عرشه فولادی پیش‌ساخته بر روی شمع‌ها نصب شده و نقش سازه‌ای عبور خط ریلی را بر عهده می‌گیرد. این سیستم امکان انتقال بخش قابل توجهی از عملیات اجرایی به قبل از دوره مسدودی خط را فراهم می‌کند. مطالعات مرتبط با ساخت سریع پل‌ها و تقاطع‌های غیرهمسطح نشان داده‌اند که استفاده از اجزای پیش‌ساخته می‌تواند نقش مؤثری در کاهش زمان انسداد مسیرهای حمل‌ونقل داشته باشد. با این حال، در این روش وزن بالای عرشه فولادی و حساسیت اتصالات آن از جمله چالش‌های اجرایی محسوب می‌شود. علاوه بر این، هزینه بالای فولاد مصرفی و نیاز به تجهیزات نصب سنگین می‌تواند از محدودیت‌های اقتصادی این روش باشد (پناهی و همکاران، ۱۴۰۵).

۳-۵- زیرگذر با شمع‌های درجا و عرشه بتنی یکپارچه

پیش‌ساخته

در این روش، شمع‌های بتنی درجا در طرفین مسیر اجرا شده و سپس یک عرشه بتنی پیش‌ساخته شامل سیستم تیر و دال یکپارچه بر روی آن‌ها نصب می‌شود. این سیستم نسبت به عرشه فولادی دارای سختی خمشی بالاتر بوده و می‌تواند عملکرد مناسبی در انتقال بارهای دینامیکی قطار داشته باشد. با وجود مزایای سازه‌ای، این روش نیز با محدودیت‌هایی مواجه است. مهم‌ترین چالش آن وزن بسیار زیاد عرشه بتنی پیش‌ساخته است که فرآیند حمل و نصب را دشوار می‌کند. علاوه بر این، عملیات نصب عرشه و تنظیم تراز آن معمولاً نیازمند زمان قابل توجهی در دوره مسدودی خط است. در برخی پروژه‌ها گزارش شده است که زمان انسداد مورد نیاز برای نصب عرشه بتنی می‌تواند به بیش از ۱۰ ساعت برسد (پناهی و همکاران، ۱۴۰۵).

۳-۶- سیستم ترکیبی شمع و تیر درجا با دال بتنی

پیش ساخته

در پاسخ به محدودیت‌های روش‌های پیشین، در این پژوهش یک سیستم ترکیبی شامل شمع‌های بتنی درجا، تیرهای درجا و دال‌های بتنی پیش ساخته پیشنهاد شده است. در این سیستم تلاش شده است تا با تفکیک اجزای سازه‌ای و انتقال حداکثری عملیات اجرایی به قبل از دوره مسدودی، زمان مداخله در خط ریلی به حداقل برسد. ویژگی کلیدی این روش استفاده از چند ابتکار اجرایی است که شامل حفاری خندقی در محدوده اجرای تیرها، استفاده از دیوار بلوکی مسلح به عنوان گارد بالاست برای تثبیت بستر خط و اجرای پیش دال بتنی به منظور پایداری خاک در مرحله ساخت می‌شود. این تمهیدات امکان انجام بخش عمده عملیات سازه‌ای در خارج از محدوده زمانی مسدودی را فراهم می‌کند. در این سیستم، شمع‌های بتنی ابتدا در طرفین خط اجرا شده و سپس تیرهای بتنی درجا بر روی آن‌ها شکل می‌گیرند. پس از آماده‌سازی بستر و تثبیت خاک، دال‌های بتنی پیش ساخته در زمان کوتاهی نصب می‌شوند و بلافاصله امکان بازسازی روسازی خط فراهم می‌گردد. این رویکرد موجب کاهش قابل توجه زمان مسدودی خط در مقایسه با روش‌های متداول می‌شود. این روش با رویکردهای ساخت شتاب یافته در زیرساخت‌های حمل و نقل همخوانی دارد که هدف آن‌ها انتقال عملیات پیچیده به مراحل پیش ساخت و کاهش زمان مداخله در مسیرهای فعال است. با این حال، تفاوت اصلی روش حاضر در توسعه مجموعه‌ای از ابتکارات اجرایی متناسب با شرایط خطوط ریلی و دهانه‌های متوسط است که در مطالعات پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

۳-۷- ارزیابی کیفی و کمی روش‌های اجرایی و انتخاب

روش برتر

پس از معرفی گزینه‌های اجرایی قابل استفاده برای احداث زیرگذر در زیر خطوط ریلی در حال بهره‌برداری، انتخاب روش برتر بر پایه یک فرایند ارزیابی دو مرحله‌ای شامل تحلیل کیفی و ارزیابی کمی انجام شد تا پیش از ورود به تشریح ابتکارات اجرایی، برتری روش منتخب به صورت مستند اثبات شود. در گام نخست، تحلیل SWOT برای شش روش اجرایی انجام شد و نتایج آن در جدول

۱ ارائه شده است. مطابق این جدول، روش بتن درجا از نظر انعطاف پذیری طراحی و عدم نیاز به حمل قطعات سنگین مزیت دارد، اما زمان‌بر بودن، تأثیرپذیری از شرایط جوی و نیاز به مسیر انحرافی، قابلیت کاربرد آن را در خطوط فعال محدود می‌کند. در روش باکس پیش ساخته بتنی، سرعت اجرای بالا و کیفیت کنترل شده از نقاط قوت اصلی است، ولی نیاز به تجهیزات سنگین و محدودیت حمل قطعات، دامنه کاربرد آن را کاهش می‌دهد. روش قوسی فلزی پیش ساخته نیز به دلیل سرعت اجرای زیاد، سبکی و مقاومت در برابر ارتعاشات، برای پروژه‌های دارای محدودیت زمانی مناسب است، اما هزینه بالا، حساسیت به کیفیت فونداسیون و نیز نوسان قیمت فلزات و وابستگی احتمالی به واردات، تهدیدهای مهم آن به شمار می‌آید. در روش شمع بتنی با دال فولادی یکپارچه پیش ساخته، دوام و استحکام بالا و زمان اجرای کم مشاهده می‌شود، اما هزینه زیاد، نیاز به پوشش ضدزنگ و خطر خوردگی فولاد، نقاط ضعف و تهدیدهای اصلی این گزینه هستند. روش شمع بتنی با دال بتنی یکپارچه پیش ساخته نیز از نظر دوام و نیاز کم به نگهداری وضعیت مناسبی دارد، ولی وزن زیاد قطعات، دشواری حمل و نصب و انعطاف پذیری پایین، اجرای آن را با محدودیت مواجه می‌سازد. در مقابل، روش شمع بتنی، تیر درجا و دال پیش ساخته، بر اساس جدول ۱، تنها روشی است که به صورت هم زمان از «ترکیب مزایای سیستم‌های پیش ساخته و درجا» و «انعطاف بالا در طراحی» برخوردار است؛ هرچند اجرای پیچیده‌تر، نیاز به هماهنگی بیشتر و احتمال عدم تطابق اجرا یا بروز خطای انسانی، از جمله محدودیت‌های آن محسوب می‌شود. با این حال، مقایسه مجموعه نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدها نشان می‌دهد که این روش از منظر سازگاری با محدودیت‌های اجرایی پروژه‌های ریلی فعال، نسبت متعادل تری میان قابلیت اجرا، انعطاف طراحی و کاهش وابستگی عملیات بحرانی به بازه انسداد خط ایجاد می‌کند.

در گام دوم، ارزیابی کمی هزینه و زمان با استفاده از داده‌های جدول ۲ انجام شد. این محاسبات برای یک زیرگذر با دهانه ۱۲ متر و بر مبنای فهرست بهای راه و باند سال ۱۴۰۳ انجام شده است. همچنین، مدت مسدودی مجاز خط بر اساس ضوابط راه آهن جمهوری اسلامی ایران ۴ ساعت در نظر گرفته شده و خسارت هر ساعت مسدودی نیز معادل ۴۹۰،۰۰۰،۲۳۳ ریال منظور شده

بررسی شده از سقف مسدودی برنامه‌ای مجاز ۴ ساعت بیشتر هستند، اما تنها روش شمع بتنی، تیر درجا و دال پیش‌ساخته به این حد نزدیک شده و فاصله آن با محدودیت بهره‌برداری به مراتب کمتر از سایر گزینه‌هاست؛ همین ویژگی، ظرفیت این روش را برای توسعه ابتکارات اجرایی با هدف رساندن عملیات بحرانی به بازه مجاز، برجسته می‌سازد.

برای پرهیز از اتکا به یک یا دو شاخص منفرد، در ادامه ارزیابی چندمعیاره روش‌ها نیز انجام شد. در این بخش، از تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره با رویکرد وزن‌دهی ساده استفاده شد و وزن معیارها با بهره‌گیری از روش سلسله مراتبی و بر اساس نظر ۱۵ نفر از خبرگان صنعت راه‌آهن شامل مدیران پروژه، مچریان و اساتید دانشگاهی تعیین گردید. بررسی پرسش‌نامه‌های مقایسه زوجی نشان داد که نرخ ناسازگاری (CR) کمتر از ۰٫۱ است؛ از این رو، وزن‌های استخراج‌شده از اعتبار لازم برخوردارند. معیارهای اصلی شامل هزینه ساخت، مدت مسدودی، ریسک اجرایی، سرعت اجرا و سهولت اجرا بودند که به ترتیب وزن‌های ۳۰، ۲۵، ۲۰، ۱۵ و ۱۰ درصد به آن‌ها اختصاص یافت. این توزیع وزن نشان می‌دهد که در تصمیم‌گیری برای اجرای زیرگذر در خطوط در حال بهره‌برداری، دو معیار هزینه ساخت و مدت مسدودی، در مجموع ۵۵ درصد وزن کل را به خود اختصاص داده‌اند؛ بنابراین هر روشی که در این دو شاخص عملکرد ضعیفی داشته باشد، حتی با وجود برخی مزایای فنی، شانس کمتری برای انتخاب نهایی خواهد داشت. نتایج این ارزیابی در جدول ۳ ارائه شده و نمایش میله‌ای امتیاز نهایی روش‌ها نیز در شکل ۱ آمده است. بر اساس جدول ۳، روش بتن درجا با امتیاز نهایی ۱٫۹۰ کمترین رتبه را کسب کرده است؛ زیرا در معیار هزینه ساخت امتیاز ۱ و در سرعت اجرا نیز امتیاز ۱ دریافت کرده و تنها در سهولت اجرا و ریسک اجرایی در سطح متوسط باقی مانده است. روش باکس پیش‌ساخته بتنی با امتیاز نهایی ۲٫۹۵ اگرچه در سهولت اجرا امتیاز ۴ و در سرعت اجرا امتیاز ۳ دارد، اما در مدت مسدودی فقط امتیاز ۲ گرفته است. روش قوس فلزی نیز با وجود امتیاز ۴ در سرعت اجرا و ۴ در سهولت اجرا، به دلیل امتیاز ۲ در هزینه ساخت و ۲ در مدت مسدودی، امتیاز نهایی ۲٫۸۵ را کسب کرده است. روش شمع بتنی، تیر و دال پیش‌ساخته بتنی با امتیاز ۲٫۸۰، به رغم سرعت اجرای مناسب‌تر، به علت امتیاز ۲ در ریسک اجرایی

است. بر این اساس، علاوه بر برآورد هزینه مستقیم ساخت، اثر اقتصادی مدت انسداد خط نیز در ارزیابی روش‌ها لحاظ شده است. داده‌های جدول ۲ نشان می‌دهد که روش قوس فلزی با هزینه ساخت ۷۷۲٫۹۹۸٫۸۵۰٫۰۰۰ ریال، پرهزینه‌ترین گزینه است و با ۸۰ ساعت مسدودی، بیشترین خسارت ناشی از انسداد را نیز معادل ۸۹۸٫۶۷۹٫۲۰۰٫۰۰۰ ریال ایجاد می‌کند؛ به گونه‌ای که نسبت خسارت مسدودی به هزینه ساخت در این روش به ۱۱۶ درصد می‌رسد که از کل هزینه ساخت نیز بیشتر است. این نسبت به خوبی نشان می‌دهد که در پروژه‌های ریلی فعال، اتکای صرف به هزینه اولیه ساخت می‌تواند به تصمیم‌گیری نادرست منجر شود. در مقابل، روش شمع بتنی، تیر درجا و دال پیش‌ساخته با هزینه ساخت ۱۸۸٫۸۹۱٫۱۶۰٫۶۸۸ ریال، کمترین هزینه ساخت را در میان شش گزینه داراست و در عین حال، با مدت مسدودی کمتر از ۶ ساعت، کمترین خسارت انسداد را نیز به میزان ۶۷٫۴۰۰٫۹۴۰٫۰۰۰ ریال ایجاد می‌کند؛ به طوری که نسبت خسارت مسدودی به هزینه ساخت در این روش فقط ۳۶ درصد است که پایین‌ترین مقدار در میان همه گزینه‌هاست. روش بتن درجا با وجود آنکه از نظر هزینه ساخت (۳۶۹٫۲۴۸٫۰۱۹٫۷۴۲ ریال) از روش قوسی فلزی ارزان‌تر است، به دلیل ۱۵ ساعت مسدودی، خسارتی معادل ۱۶۸٫۵۰۲٫۳۵۰٫۰۰۰ ریال ایجاد می‌کند و نسبت خسارت به هزینه ساخت آن ۴۶ درصد است. روش باکس پیش‌ساخته بتنی با هزینه ساخت ۳۱۹٫۱۵۵٫۳۲۰٫۶۳۴ ریال و ۱۸ ساعت مسدودی، خسارتی برابر ۲۰۲٫۲۰۲٫۸۲۰٫۰۰۰ ریال دارد و نسبت خسارت به هزینه ساخت آن به ۶۳ درصد می‌رسد. روش شمع بتنی، تیر و دال پیش‌ساخته بتنی نیز با هزینه ساخت ۲۷۹٫۵۷۷٫۳۳۶٫۰۵۶ ریال و ۱۴ ساعت مسدودی، خسارتی برابر ۱۵۷٫۲۶۸٫۸۶۰٫۰۰۰ ریال ایجاد می‌کند و نسبت خسارت آن ۵۶ درصد است. روش شمع بتنی با دال بتنی پیش‌ساخته از نظر هزینه ساخت (۲۴۸٫۳۳۳٫۴۱۴٫۰۲۶ ریال) و مدت مسدودی (۱۱ ساعت) عملکرد بهتری نسبت به اغلب گزینه‌ها دارد، اما همچنان از سقف مجاز ۴ ساعت فراتر است و نسبت خسارت آن ۴۹ درصد باقی می‌ماند.

بنابراین، جدول ۲ به روشنی نشان می‌دهد که روش شمع بتنی، تیر درجا و دال پیش‌ساخته نه تنها کم‌هزینه‌ترین گزینه است، بلکه از نظر کاهش تبعات اقتصادی انسداد خط نیز مناسب‌ترین روش محسوب می‌شود. نکته مهم دیگر آن است که همه روش‌های

در بسیاری از روش‌های رایج، ابتدا خط مسدود شده، سپس بخش قابل توجهی از عملیات خاکبرداری، نصب سازه اصلی، اجرای روسازی مجدد و آزادسازی خط در همان بازه محدود انسداد انجام می‌شود. این توالی باعث می‌شود عملیات حجیم، پرریسک و زمان‌بر، مستقیماً به دوره مسدودی وابسته شود. در روش پیشنهادی، این منطق تغییر داده شده است. به جای آنکه سازه اصلی زیرگذر در دوره مسدودی ساخته یا نصب شود، بخش عمده عملیات شامل حفاری شمع‌ها، آرماتوربندی و بتن‌ریزی شمع‌ها، اجرای سرستون‌ها، اجرای شاه‌تیرهای طولی بتنی درجا و ساخت دال‌های پیش‌ساخته، قبل از مسدودی خط و در شرایط بهره‌برداری عادی انجام می‌شود. بنابراین، بازه مسدودی به مجموعه‌ای از عملیات کوتاه، از پیش برنامه‌ریزی شده و قابل کنترل شامل برداشت موقت خط، خاکبرداری محدود، تخریب دیوار حفاظتی، نصب دال‌های پیش‌ساخته، بازگرداندن خط و تنظیم روسازی محدود می‌شود.

این منطق اجرایی با رویکردهای ساخت شتاب‌یافته در زیرساخت‌های حمل‌ونقل همخوانی دارد؛ با این تفاوت که در این پروژه، شتاب‌بخشی صرفاً از طریق پیش‌ساختگی کامل سازه حاصل نشده، بلکه از طریق ترکیب هدفمند اعضای درجا و پیش‌ساخته و جابه‌جایی گلوگاه‌های اجرایی از داخل بازه مسدودی به قبل و بعد از آن تحقق یافته است. در واقع، نوآوری اصلی روش پیشنهادی در این است که سازه باربر خط پیش از آغاز خاکبرداری اصلی زیرگذر آماده می‌شود و پس از نصب دال‌ها، خط روی مجموعه‌ای متشکل از شمع‌ها، تیرهای طولی و دال‌های پیش‌ساخته قرار می‌گیرد. بدین ترتیب، خاکبرداری اصلی زیرگذر در مرحله بعد و در حالی انجام می‌شود که خط دیگر مستقیماً بر توده خاک ناپایدار متکی نیست.

مطابق برنامه زمان‌بندی پروژه، مدت کل اجرای عملیات اصلی حدود ۸۰ روز پیش‌بینی شد (پناهی و همکاران، ۱۴۰۵). در مقابل، مدت مسدودی مورد نیاز برای نصب عرشه و بازگرداندن خط به بهره‌برداری، حداکثر ۶ ساعت هدف‌گذاری شد. در اجرای واقعی پروژه نیز عملیات بحرانی در دو نوبت کوتاه مدیریت شد و خط در زمان برنامه‌ریزی شده به بهره‌برداری بازگشت. این موضوع نشان می‌دهد که کاهش زمان مسدودی در روش پیشنهادی، نتیجه مستقیم چند ابتکار اجرایی هم‌زمان است، نه صرفاً استفاده از دال پیش‌ساخته.

و ۲ در سهولت اجرا، رتبه بالاتری به دست نیآورده است. روش شمع بتنی با دال بتنی پیش‌ساخته با امتیاز نهایی ۳/۲۰ در جایگاه دوم قرار گرفته و مزیت اصلی آن، کسب امتیاز ۴ در هزینه ساخت و ۴ در مدت مسدودی است، هرچند در ریسک اجرایی و سهولت اجرا هر دو امتیاز ۲ دارد.

بیشترین امتیاز نهایی، مطابق جدول ۳ و شکل ۱، به روش شمع بتنی، تیر درجا و دال پیش‌ساخته اختصاص یافته است که امتیاز ۳/۹۰ از ۵ را کسب کرده است. این روش در دو معیار با بیشترین وزن، یعنی هزینه ساخت و مدت مسدودی، امتیاز کامل ۵ دریافت کرده است؛ موضوعی که با داده‌های جدول ۲ نیز سازگار است، زیرا این روش دارای کمترین هزینه ساخت و کمترین خسارت ناشی از انسداد خط است. افزون بر این، در معیار ریسک اجرایی نیز امتیاز ۴ گرفته که از اکثر گزینه‌ها بهتر است، هرچند در معیارهای سرعت اجرا و سهولت اجرا امتیاز آن ۳ و در حد متوسط ارزیابی شده است. همین الگوی امتیازدهی نشان می‌دهد که برتری این روش ناشی از غلبه در معیارهای کم‌اهمیت نیست، بلکه حاصل عملکرد مناسب در شاخص‌های اصلی و وزن‌دار تصمیم‌گیری است. به بیان دقیق‌تر، این روش نه ساده‌ترین گزینه اجرایی است و نه لزوماً سریع‌ترین گزینه از نظر کل مدت پروژه، اما به دلیل عملکرد ممتاز در دو معیار راهبردی «هزینه ساخت» و «مدت مسدودی» و نیز عملکرد خوب در «ریسک اجرایی»، بالاترین امتیاز نهایی را به دست آورده است.

۴- تشریح روش سیستم ترکیبی شمع و تیر بتنی درجا با دال عرشه بتنی پیش‌ساخته

۴-۱- منطق توسعه روش پیشنهادی و چارچوب کلی اجرا
سیستم ترکیبی شمع و تیر بتنی درجا با دال عرشه بتنی پیش‌ساخته، که در این مقاله به‌عنوان روش پیشنهادی بررسی می‌شود، در پروژه احداث زیرگذر تقاطع کاشان در محور ریلی تهران - اصفهان به‌کار گرفته شده است. منطق اصلی این روش بر پایه بازآرایی توالی کلاسیک اجرای زیرگذر در خطوط ریلی فعال است.

۴-۲- مرحله جانمایی، حفاری و اجرای شمع‌ها در شرایط خط گرم

۴-۲-۱- جانمایی شمع‌ها و محدودیت‌های فضایی مجاور خط نخستین مرحله اجرایی روش پیشنهادی، جانمایی دقیق شمع‌ها بر اساس نقشه‌های اجرایی و مختصات پنج‌مارک پروژه بود. این مرحله توسط تیم نقشه‌برداری انجام شد و محل هر شمع روی زمین علامت‌گذاری گردید (شکل ۲ الف و ب). در پروژه موردی، مجموعاً شش شمع بتنی درجا برای تحمل تیرهای طولی و انتقال بار عرشه طراحی شد. شمع‌های شماره مقطع عرضی در فاصله حدود ۶ متری از خط گرم راه‌آهن قرار داشتند و از نظر دسترسی ماشین‌آلات، شرایط نسبتاً مناسب‌تری داشتند. در مقابل، شمع‌های شماره مقطع طولی در مجاورت مستقیم خط راه‌آهن واقع شده

بودند و اجرای آن‌ها با محدودیت‌های شدید حریم بهره‌برداری، ایمنی عبور قطارها و مانور ماشین‌آلات همراه بود (شکل ۲-ج). این وضعیت سبب شد که اجرای شمع‌ها در دو گروه اجرایی متفاوت مدیریت شود. در شمع‌های دورتر از خط، امکان استفاده محدودتر از ماشین‌آلات وجود داشت؛ اما در شمع‌های مجاور خط، هرگونه استفاده از ماشین حفاری سنگین می‌توانست با ریسک برخورد، لرزش، کاهش پایداری زیرسازی و ایجاد سانحه برای قطارهای عبوری همراه باشد. از این رو، برای شمع‌های نزدیک خط، استفاده از دستگاه حفاری مکانیزه کنار گذاشته شد و حفاری به صورت دستی و کنترل‌شده برنامه‌ریزی گردید. این تصمیم، اگرچه باعث افزایش مدت حفاری شد، اما ریسک بهره‌برداری را به‌طور قابل توجهی کاهش داد.

جدول ۱. تحلیل SWOT برای روش‌های مختلف اجرای زیرگذر

روش اجرا	نقاط قوت	نقاط ضعف	فرصت‌ها	تهدیدها
بتن درجا	انعطاف‌پذیری در طراحی، عدم نیاز به حمل قطعات سنگین	زمان‌بر، تأثیرپذیر از شرایط جوی، نیاز به مسیر انحرافی	مناسب مناطق دوردست یا بدون تجهیزات سنگین	تأخیر ناشی از شرایط جوی و ضعف در کیفیت اجرا
باکس پیش‌ساخته بتنی	سرعت اجرا بالا، کیفیت کنترل‌شده	نیاز به تجهیزات سنگین	صنعتی‌سازی پروژه‌ها	محدودیت در حمل قطعات
قوسی فلزی پیش‌ساخته	اجرای سریع، سبک، مقاوم در برابر ارتعاشات	هزینه بالا، حساسیت به فونداسیون	مناسب پروژه‌های با محدودیت زمانی	نوسان قیمت فلزات، نیاز به واردات
شمع بتنی دال فولادی یکپارچه پیش‌ساخته	دوام و استحکام بالا، زمان اجرای کم	هزینه زیاد، نیاز به ضدزنگ	مناسب خاک‌های ضعیف و پرتراфик	خوردگی فولاد، بازرسی مداوم
روش شمع بتنی دال بتنی یکپارچه پیش‌ساخته	دوام زیاد، نگهداری کم	حمل دشوار، وزن بالا	پروژه‌هایی با اولویت دوام	حمل و نصب دشوار، انعطاف پایین
روش شمع بتنی تیر درجا و دال پیش‌ساخته	ترکیب مزایای پیش‌ساخته و درجا	اجرای پیچیده، نیاز به هماهنگی	انعطاف بالا در طراحی	عدم تطابق اجزاء، خطای انسانی



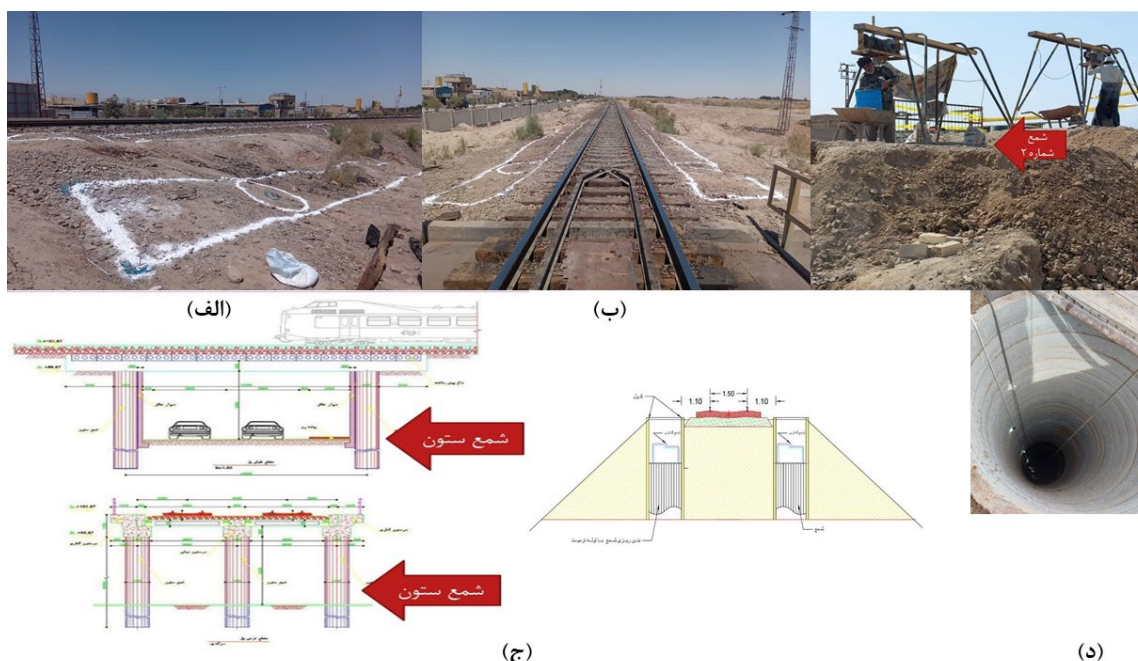
شکل ۱. امتیاز نهایی وزن مربوط به روش‌ها بر اساس سلسله مراتبی

جدول ۲. ارزیابی کمی هزینه روش‌های ساخت زیرگذر در خطوط ریلی در حال بهره برداری

روش اجرا	برآورد هزینه ساخت (ریال)	مدت پروژه (روز)	مدت مسدودی (ساعت)	خسارت در مدت مسدودی (ریال)	نسبت خسارت مسدودی به هزینه ساخت (درصد)
بتن درجا	۳۶۹,۲۴۸,۰۱۹,۷۴۲	۱۱۰	۱۵	۱۶۸,۵۰۲,۳۵۰,۰۰۰	۴۶
روش باکس پیشساخته بتنی	۳۱۹,۱۵۵,۳۲۰,۶۳۴	۶۰	۱۸	۲۰۲,۲۰۲,۸۲۰,۰۰۰	۶۳
روش قوس فلزی	۷۷۲,۹۹۸,۸۵۰,۰۰۰	۹۰	۸۰	۸۹۸,۶۷۹,۲۰۰,۰۰۰	۱۱۶
شمع بتنی، تیر و دال پیشساخته بتنی	۲۷۹,۵۷۷,۳۳۶,۰۵۶	۹۰	۱۴	۱۵۷,۲۶۸,۸۶۰,۰۰۰	۵۶
شمع بتنی، دال بتنی پیش ساخته	۲۴۸,۳۳۳,۴۱۴,۰۲۶	۹۰	۱۱	۱۲۳,۵۶۸,۳۹۰,۰۰۰	۴۹
شمع بتنی، تیر درجا و دال پیش ساخته	۱۸۸,۸۹۱,۱۶۰,۶۸۸	۸۰	کمتر از ۶ ساعت	۶۷,۴۰۰,۹۴۰,۰۰۰	۳۶

جدول ۳. تحلیل چندمعیاره (مقیاس امتیازدهی (۱ تا ۵): ۱ = بسیار ضعیف، ۲ = ضعیف، ۳ = متوسط، ۴ = خوب، ۵ = عالی)

روش ساخت	هزینه ساخت	مدت مسدودی	ریسک اجرایی	سرعت اجرا	سهولت اجرا	امتیاز
بتن درجا	۱	۳	۳	۱	۳	۱/۹۰
روش باکس پیشساخته بتنی	۳	۲	۳	۳	۴	۲/۹۵
روش قوس فلزی	۲	۲	۳	۴	۴	۲/۸۵
شمع بتنی، تیر و دال پیشساخته بتنی	۳	۳	۲	۴	۲	۲/۸۰
شمع بتنی، دال بتنی پیش ساخته	۴	۴	۲	۳	۲	۳/۲۰
شمع بتنی، تیر درجا و دال پیش ساخته	۵	۵	۴	۳	۳	۳/۹۰



شکل ۲. الف و ب) جانمایی محل شمع ج) محل شمعها در سازه و د) حفاری دستی و کول گذاری شمع

۲-۲-۴- حفاری دستی شمعها و کنترل ریزش جداره چاه

حفاری شمعها با استفاده از نیروی انسانی و تجهیزاتی مانند دستگاه بالابر، پیکور و ابزارهای دستی انجام شد. هر جبهه حفاری توسط سه نفر نیروی اجرایی مدیریت می شد. عمق شمعها حدود ۲۰ تا ۲۲ متر و قطر نهایی آنها حدود ۱/۰۵ متر بود. به دلیل سختی بالای زمین، عملیات حفاری هر چاه حدود ۲۵ روز زمان برد. همچنین در حین عملیات، مته های پیکور به طور مکرر دچار آسیب و شکستگی می شدند که نشان دهنده سختی قابل توجه لایه های زمین در محل پروژه بود. یکی از ریسک های اصلی در این مرحله، احتمال ریزش جداره چاه ها، به ویژه در شمع های مجاور خط، بود. برای کنترل این ریسک، همزمان با پیشروی حفاری، عملیات کول گذاری انجام شد. قطر مورد نیاز کول ها حدود ۱/۲۰ متر بود؛ اما به دلیل نبود کول آماده با این ابعاد در بازار محلی، تیم پروژه اقدام به طراحی و ساخت قالب ویژه کول کرد. سپس کول های مورد نیاز بر اساس قالب طراحی شده تهیه و در چاه ها نصب شدند (شکل ۲-د). این اقدام، نمونه ای از سازگاری اجرایی روش با محدودیت های واقعی پروژه است؛ زیرا بدون کول گذاری مناسب، ریزش جداره چاه می توانست علاوه بر خسارت اجرایی، پایداری خط مجاور را نیز تهدید کند. در مجموع، با به کارگیری دو اکیپ

حفاری، حفاری شش حلقه شمع در بازه حدود ۸۰ روز تکمیل شد. اگرچه این زمان نسبت به حفاری مکانیزه طولانی تر است، اما باید توجه داشت که کل این عملیات در خارج از بازه مسدودی و همزمان با بهره برداری عادی خط انجام شد؛ بنابراین زمان حفاری تأثیری مستقیم بر مدت انسداد خط نداشت.

۲-۲-۴- آرماتوربندی، گچ بافی و نصب قفسه شمعها

پس از تکمیل حفاری هر شمع، عملیات آرماتوربندی و گچ بافی آغاز شد. قفسه های آرماتور شمع با استفاده از میلگردهای ۳۲، ۲۵، ۱۴ و ۱۲ ساخته شدند. طول هر شمع حدود ۲۰ متر و قطر آن حدود ۱/۰۵ متر بود. برای هر شمع حدود ۴/۸ تن میلگرد مصرف شد و مجموع فولاد مصرفی در شش شمع حدود ۲۸/۸ تن بود. پس از تکمیل قفسه آرماتور، عملیات جاگذاری آن در چاه انجام شد. در این مرحله، کنترل تراز و موقعیت قفسه توسط تیم نقشه برداری انجام گرفت تا قفسه آرماتور در موقعیت صحیح نسبت به محور سازه قرار گیرد (شکل ۳). این کنترل از آن جهت اهمیت داشت که هرگونه انحراف در موقعیت شمعها می توانست

در مراحل بعد، به عدم تطابق محل نشیمن تیرهای طولی و دال‌های پیش‌ساخته منجر شود.

۴-۳- حفاری خندقی و اجرای دیوار بلوکی مسلح به عنوان گارد بالاست

۴-۳-۱- ضرورت اجرای گارد بالاست در مجاورت تراورس‌ها پس از اجرای شمع‌ها، برای اجرای سرستون‌ها و تیرهای طولی لازم بود در محدوده مجاور خط خاکبرداری انجام شود. این خاکبرداری در برخی نقاط دقیقاً مماس با انتهای تراورس‌های راه‌آهن قرار می‌گرفت. در صورت انجام خاکبرداری مستقیم و پیوسته، احتمال ریزش بالاست و زیرسازی خط وجود داشت و این موضوع می‌توانست منجر به کاهش پایداری خط، ایجاد نشست موضعی و حتی خطر خروج قطار از خط شود (محل قرارگیری گارد در شکل ۴-الف نشان داده شده است). برای کنترل این ریسک، احداث یک دیوار حفاظتی موقت در امتداد خط در دستور کار قرار گرفت. این دیوار، در عملکرد اجرایی خود، نقش گارد بالاست را بر عهده داشت؛ یعنی از ریزش مصالح زیرسازی و بالاست به داخل محدوده حفاری جلوگیری می‌کرد و امکان ادامه عملیات خاکبرداری و اجرای تیرهای طولی را بدون انسداد طولانی خط فراهم می‌ساخت.

۴-۳-۲- روش اجرای مرحله‌ای دیوار بلوکی مسلح

اجرای دیوار حفاظتی به صورت مرحله‌ای و در قالب حفاری خندقی انجام شد. در هر مرحله، خندقی به ارتفاع حدود ۲ متر، طول ۲ تا ۳ متر و ضخامت تقریبی ۴۵ سانتی‌متر حفر می‌شد. محدود کردن طول خندق به ۲ تا ۳ متر به این دلیل بود که توده خاک و مصالح زیرسازی خط در طول زیادی بدون تکیه‌گاه باقی نماند. بلافاصله پس از حفاری هر قطعه، ابتدا و انتهای خندق با سپر تقویت می‌شد و سپس دیوار بلوکی داخل خندق اجرا می‌گردید. برای ساخت دیوار از بلوک‌هایی با ضخامت ۴۰ سانتی‌متر استفاده شد. به منظور افزایش مقاومت دیوار در برابر فشار جانبی خاک و بار ناشی از عبور قطار، میلگردهای نمره ۳۲ به صورت افقی و عمودی در داخل بلوک‌ها قرار داده شد. همچنین در انتهای هر قطعه دیوار، یک تیرآهن قائم به طول حدود ۳ متر داخل زمین کوبیده شد تا پایداری انتهایی دیوار افزایش یابد. در مجموع، حدود ۲۰ متر دیوار حفاظتی با ارتفاع حداقل ۲ متر در طرفین خط اجرا شد. به دلیل تردد زیاد قطارها، سرعت و توالی اجرای دیوار اهمیت زیادی داشت. بر همین اساس، برنامه اجرا



شکل ۳. اجرا و بتن ریزی شمع‌ها

۴-۲-۴- بتن‌ریزی شمع‌ها با میکسر، دستگاه شوت و لوله ترمی بتن‌ریزی شمع‌ها یکی از حساس‌ترین بخش‌های مرحله نخست بود. حجم بتن‌ریزی هر شمع حدود ۲۵ مترمکعب بود و با توجه به عمق ۲۰ تا ۲۲ متری چاه‌ها، استفاده از لوله ترمی برای جلوگیری از جداشدگی بتن و اطمینان از پیوستگی بتن‌ریزی ضروری بود. برای شمع‌های مقطع عرضی، به دلیل وجود فضای کافی، بتن‌ریزی با استفاده از میکسر انجام شد. اما در شمع‌های مقطع طولی که در مجاورت خط قرار داشتند، فضای کافی برای استقرار و مانور میکسر وجود نداشت؛ بنابراین بتن از طریق دستگاه شوت به محل هدایت شد. سپس بتن‌ریزی در داخل چاه به کمک لوله‌های ترمی انجام گرفت. لوله‌های ترمی مورد استفاده از قطعات ۳ متری تشکیل می‌شدند که با بست به یکدیگر متصل می‌گردیدند و در مجموع طولی حدود ۱۸ تا ۲۰ متر ایجاد می‌کردند. در حین بتن‌ریزی، با بالا آمدن سطح بتن، طول لوله ترمی متناسب با تراز بتن کاهش داده می‌شد. از آنجا که تجهیزات ترمی آماده متناسب با شرایط پروژه در دسترس نبود، طراحی و ساخت لوله‌های ترمی و قیف موردنیاز توسط مدیریت و پرسنل پروژه در کارگاه انجام شد و برای این منظور از لوله‌های پی وی سی مقاوم استفاده گردید. این اقدام، علاوه بر کاهش وابستگی به تجهیزات خاص، امکان اجرای بتن‌ریزی عمیق در فضای محدود مجاور خط را فراهم کرد.

علاوه بر فشار خاک، اثر بار قطار نیز در محاسبات لحاظ شد. در این پروژه، بار محوری قطار برابر ۲۵ تن فرض گردید. با توجه به اینکه بار چرخ یا محور قطار در عمق زیرسازی به صورت مخروطی در توده خاک توزیع می شود، تنش قائم ناشی از بار قطار در عمق ۲ متری بر اساس سطح گسترش بار به صورت $\frac{25}{\pi \times 4} = 1/99 \text{ t/m}^2$ محاسبه شد. با فرض $\phi = 30^\circ$ و زاویه گسترش تنش در خاک و ضریب فشار جانبی، بخشی از تنش قائم به فشار جانبی وارد بر دیوار تبدیل گردید.

در محاسبات پروژه، ضریب تبدیل بار قائم به بار جانبی حدود $K = 1 - \sin(30^\circ) = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \approx 0.5$ در نظر گرفته شد که در آن σ_h فشار جانبی وارد بر دیوار و σ_v تنش قائم ناشی از خاک و بار قطار است. با توجه به ماهیت مثالی توزیع فشار جانبی در ارتفاع دیوار، ممان خمشی حداکثر در پای دیوار یا در نزدیکی نقطه تکیه گاهی اصلی آن ایجاد می شود. کنترل خمشی دیوار بر اساس رابطه (۲) انجام شد.

$$\sigma = \frac{My}{I} = \frac{(\frac{3/8}{2} + \frac{1/99}{2}) \times 2}{2 \times 3} = 2/895 \text{ t.m} \quad (2)$$

که در آن M ممان خمشی، y فاصله تار کناری تا محور خشی و I ممان اینرسی مقطع دیوار است. با در نظر گرفتن ضخامت مؤثر دیوار ۳۰ سانتیمتر (با مقاومت فشاری مجاز 150 kg/m^2) و عرض واحد، تنش های فشاری و کششی ناشی از فشار جانبی کنترل شدند. بنابراین تنش مماسی ناشی از وزن دیوار در عمق ۲ متر (σ_w) و تنش کششی ناشی از بار جانبی وارده (σ) و تنش فشاری ناشی از بار جانبی (σ_c) از روابط ۳ و ۴ به دست می آید.

$$\sigma_w = \frac{1 \times 2 \times 0.3 \times 2}{0.3 \times 1} = 4 \text{ t/m}^2 \quad (3)$$

به گونه ای تنظیم شد که در هر روز بیش از ۲ تا ۳ متر حفاری باز باقی نماند و عملیات بلوک چینی و تقویت دیوار بلافاصله پس از حفاری انجام شود. این توالی مرحله ای، یکی از عناصر کلیدی کاهش ریسک در روش پیشنهادی بود؛ زیرا هم امکان اجرای کار در خط در حال بهره برداری را فراهم کرد و هم از بازماندن ترانشه طولانی در کنار خط جلوگیری نمود. توالی اجرای گارد بالاست در شکل ۴-ب قابل مشاهده است.

۴-۳-۳- پایداری کافی و تخریب پذیری سریع

دیوار بلوکی مسلح در این پروژه صرفاً یک دیوار نگهدارنده معمولی نبود. این دیوار باید دو شرط متعارض را هم زمان تأمین می کرد. از یک طرف، باید در مدت بهره برداری خط و هنگام اجرای سرستون ها و تیرهای طولی، پایداری کافی در برابر فشار خاک و اثر بار قطار داشته باشد؛ از طرف دیگر، در زمان مسدودی خط و هنگام نصب دال های پیش ساخته، باید در کوتاه ترین زمان ممکن تخریب شود تا عملیات نصب عرشه به تأخیر نیفتد. به همین دلیل، استفاده از دیوار بتنی دائمی یا سیستم های سنگین نگهداری گود می توانست زمان تخریب را افزایش دهد و هدف کاهش مسدودی را نقض کند. انتخاب دیوار بلوکی مسلح، از این نظر یک راهکار اجرایی هدفمند بود؛ زیرا علاوه بر تأمین مقاومت لازم، با تجهیزات معمول کارگاهی و در زمان کوتاه قابل تخریب و جمع آوری بود. بنابراین، نوآوری دیوار گارد بالاست نه فقط در عملکرد مقاومتی آن، بلکه در تناسب هم زمان آن با دو نیاز پایداری و سرعت تخریب است.

۴-۴- کنترل فنی دیوار گارد بالاست از نظر فشار و کشش

برای اطمینان از عملکرد دیوار حفاظتی، اثر فشار خاک و بار عبوری قطار بر دیوار بررسی شد. با فرض وزن مخصوص خاک برابر $\gamma = 1/9 \text{ t/m}^3$ و ارتفاع مؤثر $h = 2 \text{ m}$ ، تنش قائم ناشی از وزن خاک در عمق ۲ متر از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$\sigma_v = \gamma h = 3/8 \text{ t/m}^2 \quad (1)$$

$$\sigma_{t,c} = \frac{MC}{I} = \frac{1/93 \times 0/15}{\frac{1 \times 0/3^3}{12}} \quad (۴)$$

$$= 128/67 \text{ t/m}^2$$

$$(\sigma_t)_{all} = 0/1 \times 150 > (12/87 - 0/4) \quad (۵)$$

$$= 12/47 \text{ kg/cm}^2$$

$$(\sigma_c)_{all} = 0/6 \times 150 > (12/87 + 0/4) \quad (۶)$$

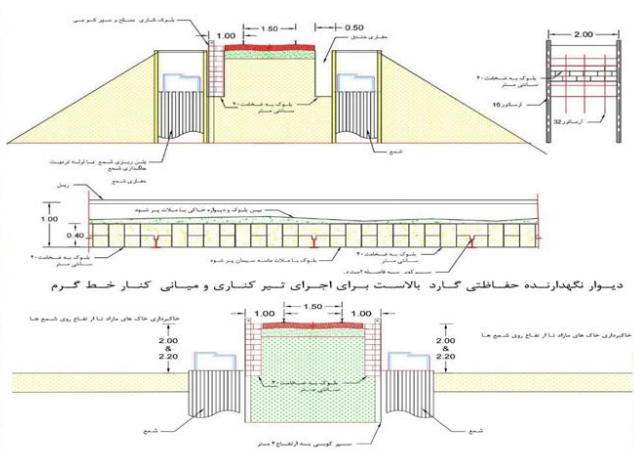
$$= 13/27 \text{ kg/cm}^2$$

بر این اساس، دیوار بلوکی مسلح از نظر فشار در محدوده مجاز قرار گرفت. همچنین با توجه به مسلح‌سازی انجام‌شده، کنترل کششی نیز قابل قبول ارزیابی شد. نتیجه این بررسی آن بود که دیوار پیشنهادی می‌توانست در دوره اجرای تیرهای طولی، پایداری کافی برای نگهداری زیرسازی خط فراهم کند و در عین حال، به دلیل ماهیت بلوکی، در زمان نصب دال‌ها به سرعت تخریب شود.

بر اساس رابطه ۵ تنش کششی ایجادشده در دیوار بلوکی غیرمسلح می‌تواند از ظرفیت کششی مجاز مصالح بیشتر شود؛ ازاین‌رو، مسلح‌سازی دیوار با میلگردهای افقی و قائم ضروری بود. وجود میلگردهای نمره ۳۲ در دو راستا باعث شد دیوار در برابر ترک‌خوردگی کششی ناشی از فشار جانبی خاک و بار قطار مقاوم شود. از نظر فشاری نیز مقدار تنش نهایی با مقاومت فشاری مجاز مصالح مقایسه شد. در محاسبات پروژه، مقاومت فشاری مجاز دیوار به‌صورت رابطه (۶) در نظر گرفته شد.



(ب)



(الف)

شکل ۴: الف) نمای محل قرارگیری گارد بالاست (ب) اجرای گارد بالاست در محل پروژه

۴-۵- اجرای سرستون‌ها و تیرهای طولی بتنی درجا

بود؛ بنابراین امکان اجرای عملیات در مجاورت خط در حال بهره‌برداری و بدون انسداد طولانی فراهم گردید. پس از آماده‌سازی محل، آرماتوربندی، قالب‌بندی و بتن‌ریزی سرستون‌های میانی و کناری انجام شد. این سرستون‌ها نقش انتقال بار تیرهای طولی به

پس از تکمیل دیوار حفاظتی، خاکبرداری موضعی برای اجرای سرستون‌های میانی و کناری آغاز شد (شکل ۵). حجم خاکبرداری این بخش حدود ۱۲۰ تا ۲۰۰ مترمکعب بود. این خاکبرداری در محدوده‌ای انجام شد که پیش‌تر با دیوار بلوکی مسلح پایدار شده

این ابعاد به گونه‌ای انتخاب شد که هر قطعه از نظر وزن، قابلیت جابه‌جایی و نصب با جرثقیل کارگاهی را داشته باشد و نیاز به تجهیزات فوق‌سنگین ایجاد نکند. در ساخت این دال‌ها، مجموعاً حدود ۱۷/۷ تن میلگرد و ۶۱ مترمکعب بتن مصرف شد. تولید دال‌ها در خارج از حریم خط، چند مزیت مهم ایجاد کرد. نخست آنکه کنترل کیفیت آرماتوربندی، قالب‌بندی و بتن‌ریزی در محیط کارگاهی ساده‌تر و دقیق‌تر انجام شد. دوم آنکه زمان گیرش و عمل‌آوری بتن هیچ‌گونه تأثیری بر زمان مسدودی خط نداشت. سوم آنکه با تقسیم عرشه به قطعات یک‌متری، ریسک حمل، بارگیری، جانمایی و نصب قطعات کاهش یافت. این موضوع در مقایسه با روش‌هایی که از عرشه فولادی یا بتنی یکپارچه استفاده می‌کنند اهمیت زیادی دارد. در آن روش‌ها وزن زیاد قطعه اصلی، نیاز به جرثقیل سنگین، حساسیت زیاد در جانمایی و خطر عدم تطابق قطعات، ریسک عملیات نصب را افزایش می‌دهد. اما در روش پیشنهادی، عرشه به قطعات کوچک‌تر تقسیم شده و نصب هر قطعه در زمان کوتاه‌تری انجام می‌شود.



شکل ۶. اجرای دال پیش ساخته در کارگاه

۴-۷- ابتکار پیش‌دال و نقش آن در پایداری خاک حین خاکبرداری زیرگذر

یکی از جنبه‌های مهم روش پیشنهادی، استفاده از بخش‌های امتدادی دال در راستای خط به عنوان پیش‌دال است. در این سیستم، دهانه اصلی زیرگذر ۱۲ متر در نظر گرفته شده و دال‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که در امتداد خط، علاوه بر پوشش دهانه اصلی، در طرفین نیز امتداد داشته باشند. این امتداد، نقش کنسولی یا پیش‌دال را ایفا می‌کند. عملکرد پیش‌دال‌ها به‌ویژه در مرحله پس از بازگشایی خط اهمیت دارد. پس از نصب دال‌ها و بازگرداندن خط به بهره‌برداری، عملیات خاکبرداری اصلی زیرگذر در زیر عرشه

شمع‌ها را بر عهده داشتند. در ادامه، شاه‌تیرهای طولی بتنی درجا بر روی سرستون‌ها اجرا شدند. این تیرها به صورت موازی با امتداد ریل و در دو طرف مسیر قرار گرفتند. از نظر هندسی، تیرهای طولی در فاصله حدود ۳۰ سانتی‌متری از پشت تراورس‌ها و در عمقی حدود ۲ متر پایین‌تر از روی ریل اجرا شدند. این موقعیت به گونه‌ای انتخاب شد که از یک سو، تداخل مستقیم با روسازی موجود خط ایجاد نشود و از سوی دیگر، پس از نصب دال‌های پیش‌ساخته، امکان انتقال بار خط به شمع‌ها فراهم گردد. اهمیت این مرحله در آن است که عملیات قالب‌بندی، آرماتوربندی، بتن‌ریزی و گیرش تیرهای اصلی، همگی قبل از مسدودی خط انجام شد. در روش‌های متعارف، بخش قابل توجهی از این عملیات یا اجرای قاب اصلی سازه در دوره انسداد انجام می‌شود؛ اما در روش پیشنهادی، تیرهای حمال پیش از انسداد آماده شدند. این موضوع موجب شد که در بازه مسدودی، هیچ عملیات سنگین بتن‌ریزی سازه‌ای وابسته به گیرش بتن وجود نداشته باشد و زمان انسداد به‌طور محسوسی کاهش یابد.



شکل ۵. اجرای سرستون در محل پروژه

۴-۶- ساخت دال‌های پیش‌ساخته و آماده‌سازی برای نصب سریع

هم‌زمان با اجرای شمع‌ها، سرستون‌ها و تیرهای طولی، قطعات دال عرشه در کارگاه ساخته شدند (شکل ۶). هدف از پیش‌ساختگی دال‌ها، افزایش سرعت نصب در بازه مسدودی و کاهش وابستگی عملیات به بتن‌ریزی در محل بود. در پروژه موردی، تعداد ۱۸ عدد دال پیش‌ساخته با طول ۶ متر و عرض ۱ متر طراحی و ساخته شد.

طراحی سازه‌ای نبوده، بلکه ناشی از برنامه‌ریزی دقیق لجستیکی و حذف فعالیت‌های غیرضروری از پنجره انسداد بوده است.

۴-۹- عملیات مسدودی خط و نصب دال‌های پیش ساخته

مرحله مسدودی خط، حساس‌ترین بخش پروژه بود. در این مرحله، خط راه‌آهن در دو نوبت چهار ساعته، مجموعاً ۸ ساعت مسدود شد. با توجه به تردد قطارهای باری و مسافری، لازم بود تمام عملیات در بازه زمانی محدود انجام شود و خط بدون تأخیر به بهره‌برداری بازگردد. پس از شروع مسدودی، ابتدا برشکاری خط در ابتدا و انتهای محدوده پروژه انجام شد. در هر مرحله، بخشی از خط به طول حدود ۱۰ متر و در مجموع حدود ۲۰ متر آماده برداشت شد. سپس کوپلاژ خط با جرثقیل برداشته و در محل تعیین شده کنار گذاشته شد. پس از آن، بالاست موجود با لودر جمع‌آوری گردید و خاکبرداری لایه‌ای خاکریز خط تا عمق موردنیاز، حدود یک متر، انجام شد. در ادامه، دیوار حفاظتی بلوکی که پیش‌تر نقش گارد بالاست را ایفا کرده بود، تخریب شد. اهمیت تخریب سریع این دیوار در همین مرحله مشخص می‌شود؛ زیرا اگر دیوار از نوع سنگین یا دائمی انتخاب می‌شد، تخریب آن بخش زیادی از زمان انسداد را مصرف می‌کرد. پس از تخریب دیوار و جمع‌آوری نخاله‌ها و سپرها، دال‌های پیش‌ساخته با جرثقیل روی تیرهای طولی نصب شدند. پس از نصب دال‌ها، محل اتصال تیر و دال بتن‌ریزی شد و عملیات ایزولاسیون تابلیه پل انجام گرفت. سپس سطح دال‌ها با بالاست پوشانده شد تا امکان قرارگیری مجدد خط فراهم شود. در ادامه، کوپلاژ در موقعیت اولیه قرار گرفت، ریل‌ها سوراخ‌کاری و اتصالات بسته شد، سپس چند مرحله بالاست‌ریزی، زیرکوبی، رلواژ و تسطیح بالاست با رگلاتور انجام گردید. توالی کامل عملیات برداشت و نصب مجدد خط شامل مراحل؛ برشکاری ریل، برداشتن کوپلاژ با جرثقیل و انتقال آن به محل دیو، جمع‌آوری بالاست با لودر، خاکبرداری خاکریز خط تا عمق حدود یک متر، تخریب دیوار حفاظتی مجاور خط و جمع‌آوری نخاله و سپرها، نصب دال‌های پیش‌ساخته، بتن‌ریزی محل اتصال تیر و دال، بالاست‌ریزی اولیه، قراردادن مجدد کوپلاژ در محل خود، سوراخ‌کاری ریل، بستن اتصالات، بالاست‌ریزی تکمیلی، زیرکوبی رلواژ اول و تسطیح بالاست با رگلاتور، بالاست‌ریزی مجدد، زیرکوبی رلواژ دوم و تسطیح بالاست،

آغاز می‌شود. در این زمان، خط ریلی دیگر مستقیماً بر خاک زیرسازی تکیه ندارد؛ بلکه بار آن از طریق دال‌ها، تیرهای طولی و شمع‌ها منتقل می‌شود. بخش‌های پیش‌دال نیز به کنترل ریزش خاک پشت شمع‌ها و کاهش تغییرشکل جانبی توده خاک کمک می‌کنند. به بیان دیگر، در روش پیشنهادی، دال عرشه صرفاً عضو عبور بار قائم نیست، بلکه در مرحله ساخت، بخشی از نقش پایدارسازی خاک را نیز بر عهده دارد. این عملکرد دوجهی موجب می‌شود خاکبرداری زیرگذر پس از آزادسازی خط با ایمنی بیشتری انجام شود. چنین ترکیبی از عملکرد عرشه و پایدارسازی خاک در روش‌های کلاسیک باکس پیش‌ساخته یا سازه قوسی فولادی کمتر دیده می‌شود.

۴-۸- آماده‌سازی پیش از مسدودی خط

یکی از دلایل موفقیت روش پیشنهادی، انتقال بخش قابل توجهی از فعالیت‌های مقدماتی به قبل از شروع مسدودی بود. پیش از انسداد خط، محل برش ریل‌ها با تأیید ناظر راه‌آهن تعیین شد. عملیات سوراخ‌کاری موردنیاز، آماده‌سازی اتصالات، انتقال قطعات پیش‌ساخته به محل پروژه و تعیین موقعیت استقرار ماشین‌آلات سنگین انجام گرفت. همچنین مسیر حرکت ماشین‌آلات، شامل جرثقیل، بیل مکانیکی، لودر و کمپرسی، پیش از شروع عملیات مشخص شد. محل دیو، بالاست، محل دیو، نخاله‌های خاکبرداری، فضای مانور ماشین‌آلات و موقعیت استقرار تجهیزات رزرو نیز از قبل تعیین گردید. حتی یک دستگاه بیل مکانیکی اضافه همراه با راننده و یک راننده لودر و مکانیک ماشین‌آلات سنگین به‌عنوان پشتیبان پیش‌بینی شد تا در صورت بروز نقص فنی، عملیات متوقف نشود. مصالح و تجهیزات موردنیاز نیز پیش از انسداد آماده شد. این مصالح شامل سه واگن بالاست، اتصالات R60، پیچ و مهره‌های مربوطه، صفحات برش، مته‌های ریل‌سوراخ‌کن و مصالح جوشکاری ترمیت بود. ماشین‌آلات ریلی شامل دیزل واگن شن‌کش، زیرکوب و رگلاتور نیز برای عملیات بعد از نصب خط در نظر گرفته شد. همچنین تجهیزات دستی شامل موتور ریل‌بر، موتور پیچ‌بند، دیلم خطی، انبر ریل‌گیر، انبر تراورس‌گیر، هوابرش و کپسول هوا پیش‌بینی گردید. این سطح از آماده‌سازی نشان می‌دهد که کاهش زمان مسدودی، صرفاً نتیجه

می‌شود، کاهش داد. همچنین عملیات تکمیلی روی خط شامل بالاست‌ریزی‌های تکمیلی، زیرکوبی و تنظیم نهایی تراز ریل در بازه‌های کوتاه و برنامه‌ریزی شده انجام شد تا پایداری بلندمدت خط تضمین شود.



شکل ۷. سلسله عملیات‌های مربوط به نصب خط پس از اجرای عرشه

۴-۱۲- ریسک‌های اصلی و نحوه کنترل آن‌ها در روش

پیشنهادی

در پژوهش حاضر، مجموعه‌ای از ریسک‌های اجرایی شناسایی شد که بخشی از آن‌ها مربوط به عملیات در مجاورت خط در حال بهره‌برداری و بخشی مربوط به نصب قطعات پیش‌ساخته در بازه محدود انسداد بود. مهم‌ترین ریسک‌ها شامل آسیب دیدن قطعات در هنگام بارگیری، نقص فنی جرثقیل‌های ریلی، ریزش شمع‌ها در حین حفاری، ریزش زیرسازی خط هنگام حفاری خندقی، خروج قطار از خط در اثر ناپایداری مجاور شمع‌ها، عدم تطابق جانمایی دقیق دال‌های پیش‌ساخته، عدم اجرای نصب در زمان مسدودی و عدم رعایت تقلیل سرعت توسط لوکوموتیوران بود.

روش پیشنهادی برای هر یک از این ریسک‌ها پاسخ اجرایی مشخصی ارائه کرد. ریسک ریزش شمع‌ها با حفاری مرحله‌ای، کول‌گذاری و کنترل مداوم وضعیت جداره چاه کاهش یافت. ریسک ریزش زیرسازی خط با اجرای دیوار بلوکی مسلح به‌عنوان گارد بالاست کنترل شد. ریسک عدم تطابق جانمایی دال‌ها با کنترل نقشه‌برداری محل شمع‌ها، سرستون‌ها و تیرهای طولی کاهش یافت. ریسک نقص فنی ماشین‌آلات با پیش‌بینی تجهیزات و راننده پشتیبان مدیریت شد. ریسک تأخیر در نصب نیز با انتقال

بالاست‌ریزی نهایی و زیرکوبی و تسطیح تکمیلی در صورت نیاز بود. بخشی از این سلسله عملیات در شکل ۷ نشان داده شده است. بخش اصلی عملیات بحرانی حدود ۱۹۵ دقیقه، معادل ۳ ساعت و ۲۵ دقیقه، زمان برد. این مقدار نشان می‌دهد که با آماده‌سازی قبلی و کاهش عملیات داخل مسدودی، امکان اجرای مرحله نصب در زمانی بسیار کمتر از روش‌های متعارف فراهم شده است.

۴-۱۰- نیروی انسانی و ماشین‌آلات در مرحله نصب

برای اجرای مرحله مسدودی، ترکیب مشخصی از نیروی انسانی و ماشین‌آلات به‌کار گرفته شد. ماشین‌آلات سنگین شامل جرثقیل، لودر، بیل مکانیکی، کامیون و تریلی بود. ماشین‌آلات خاص ریلی شامل دیزل واگن شن‌کش، زیرکوب و رگلاتور در عملیات بازگرداندن و تنظیم خط استفاده شدند. نیروی انسانی کلیدی شامل برشکار، موتورسوار خطی، راننده لودر، راننده بیل مکانیکی، مکانیک و دو نفر قلاب‌انداز بود. همچنین تجهیزات احتیاطی شامل هواپرش، کپسول هوا، انبرهای حمل ریل و تراورس و تجهیزات برش و پیچ‌بندی آماده‌سازی شد. این ترکیب نیروی انسانی و تجهیزات نشان می‌دهد که عملیات نصب دال‌ها، اگرچه از نظر زمانی کوتاه بود، اما نیازمند هماهنگی دقیق چند گروه اجرایی، ریلی و ایمنی بود.

۴-۱۱- تکمیل عملیات پس از آزادسازی خط

پس از نصب دال‌ها و بازگشایی خط، مرحله سوم پروژه آغاز شد. در این مرحله، عملیات تکمیلی زیرگذر در خارج از بازه مسدودی و هم‌زمان با بهره‌برداری عادی قطارها انجام شد. مهم‌ترین فعالیت‌های این مرحله شامل خاکبرداری اصلی زیر عرشه، اجرای دیوارهای جانبی و نما در جلوی شمع‌ها، تکمیل دیوارهای حائل، اجرای عایق‌کاری و آب‌بندی، خاکریزی و تراکم طرفین زیرگذر، ساخت رمپ‌های دسترسی و اجرای روسازی مسیر عبوری بود. مزیت اصلی روش پیشنهادی در این مرحله آشکار می‌شود. پس از نصب دال‌ها، خط ریلی روی سیستم سازه‌ای شامل دال، تیرهای طولی و شمع‌ها قرار گرفته بود؛ بنابراین خاکبرداری زیرگذر بدون آنکه خط مستقیماً روی خاک در حال برداشت متکی باشد، انجام شد. این وضعیت ریسک نشست و ناپایداری خط را نسبت به روش‌هایی که خاکبرداری اصلی پیش از استقرار سازه باربر انجام

فعالیت‌های مقدماتی به روزهای قبل از انسداد و آماده‌سازی کامل مصالح، تجهیزات و مسیر حرکت ماشین‌آلات کاهش پیدا کرد. بنابراین، کاهش ریسک در روش پیشنهادی، یک نتیجه جانبی نبود؛ بلکه بخشی از منطق طراحی و برنامه‌ریزی روش محسوب می‌شد.

۴-۱۳- نوآوری‌های اجرایی روش پیشنهادی

بر اساس تشریح مراحل فوق، نوآوری روش پیشنهادی را می‌توان در چند محور اصلی جمع‌بندی کرد؛ نخست، عملیات حجیم و زمان‌بر شامل حفاری و بتن‌ریزی شمع‌ها، اجرای سرستون‌ها، شاه‌تیرهای طولی و ساخت دال‌ها، پیش از مسدودی خط انجام شد. این موضوع موجب حذف عملیات سنگین سازه‌ای از پنجره انسداد شد. دوم، حفاری خندقی مرحله‌ای و دیوار بلوکی مسلح به‌عنوان گارد بالاست، امکان اجرای تیرهای طولی در مجاورت خط فعال را فراهم کرد. این دیوار به‌گونه‌ای طراحی شد که هم در برابر فشار خاک و بار قطار پاسخگو باشد و هم در زمان نصب دال‌ها با سرعت تخریب شود. سوم، عرشه به دال‌های پیش‌ساخته سبک‌تر تقسیم شد تا حمل، بارگیری، جانمایی و نصب آن‌ها با ریسک کمتر و در زمان کوتاه‌تری انجام گیرد. این راهکار وابستگی پروژه به قطعات فوق‌سنگین و جرتقلیل‌های خاص را کاهش داد. چهارم، پیش‌دال‌ها علاوه بر ایفای نقش عرشه، در مرحله خاکبرداری زیرگذر به پایداری خاک پشت شمع‌ها کمک کردند و ریسک ریزش و نشست را کاهش دادند. پنجم، توالی کلاسیک اجرای زیرگذر معکوس شد. به جای آنکه ابتدا خاکبرداری اصلی زیر خط انجام شود و سپس سازه نصب گردد، ابتدا سازه باربر خط ساخته و نصب شد و سپس خاکبرداری زیرگذر در مرحله بعد انجام گرفت. در نتیجه، روش پیشنهادی توانست سه هدف اصلی را به‌صورت هم‌زمان تأمین کند؛ اجرای زیرگذر دهانه ۱۲ متری، حفظ بهره‌برداری خط ریلی در بیشتر زمان پروژه و کاهش بازه مسدودی به حداقل ممکن (پناهی و همکاران، ۱۴۰۵).

۵- نتیجه‌گیری

تبدیل تقاطع‌های همسطح به غیرهمسطح در خطوط ریلی فعال، همواره با چالش موازنه میان ایمنی، هزینه، ریسک اجرایی و زمان

مسدودی خط روبه‌رو است. بر این اساس، پژوهش حاضر ابتدا با رویکردی تطبیقی، عملکرد شش روش متداول احداث زیرگذر در شرایط بهره‌برداری را شامل روش بتن درجا، باکس بتنی پیش‌ساخته، قوسی فولادی پیش‌ساخته، شمع و عرشه فولادی، شمع و عرشه بتنی یکپارچه، و سیستم ترکیبی شمع بتنی، تیر بتنی درجا و دال عرشه بتنی پیش‌ساخته ارزیابی کرد. نتایج ارزیابی کیفی و کمی نشان داد که سیستم ترکیبی شمع و تیر بتنی درجا با دال عرشه بتنی پیش‌ساخته، به دلیل ایجاد توازن مناسب‌تر میان هزینه ساخت، قابلیت اجرایی و به‌ویژه کاهش مدت مسدودی خط، گزینه بهینه‌تری نسبت به سایر روش‌های مورد بررسی است. سپس، با تکیه بر تجربه اجرایی احداث یک زیرگذر با دهانه ۱۲ متر در محور تهران-اصفهان، ابتکارات اجرایی توسعه‌یافته برای این روش منتخب تشریح و تحلیل شد تا نشان داده شود چگونه می‌توان با بهینه‌سازی توالی ساخت و انتقال بخش عمده عملیات به خارج از بازه انسداد، کارایی اجرایی این سیستم را در شرایط واقعی بهره‌برداری ارتقا داد. جمع‌بندی نتایج به شرح زیر است:

-برخلاف روش‌های سنتی که ساخت سازه را در بازه مسدودی خط تعریف می‌کنند، نوآوری روش پیشنهادی در بازآرایی منطق ساخت نهفته است. در این روش، بخش عمده عملیات زمان‌بر (شامل حفاری، بتن‌ریزی شمع‌ها، اجرای تیرهای طولی و ساخت عرشه) به خارج از دوره مسدودی منتقل شده و بازه بحرانی انسداد صرفاً به عملیات نهایی نصب دال‌ها و بازسازی روسازی تقلیل یافته است.

-روش پیشنهادی با کاهش زمان مسدودی، کارایی به‌مراتب بالاتری نسبت به روش‌هایی همچون باکس بتنی پیش‌ساخته یا مقاطع قوسی فولادی دارد. این روش بدون نیاز به مسیر انحرافی، امکان تداوم بهره‌برداری از خط را در پروژه‌های دهانه متوسط فراهم می‌سازد.

-این روش با تقسیم عملکرد سازه‌ای میان اجزای درجا (شمع‌ها و تیرها) و اجزای پیش‌ساخته (دال‌ها)، دامنه ریسک‌های عملیاتی را محدود می‌کند. نقش دیوار بلوکی مسلح (گارد بالاست) در پایداری سازه‌ای خاک پشت شمع‌ها، ابتکاری است که با جلوگیری از نشست‌های ناگهانی، ایمنی خط فعال را در حین اجرای زیرگذر تضمین می‌نماید.

موفقیت این روش در گرو انطباق دقیق طراحی با شرایط محلی است.

-به منظور ارتقای پشتوانه تحلیلی این روش، پیشنهاد می‌شود مطالعات تکمیلی در سه حوزه انجام پذیرد؛ نخست، تحلیل عددی رفتار سیستم ترکیبی شمع-تیر- دال برای ارزیابی دقیق‌تر توزیع نیروها؛ دوم، پایش میدانی عملکرد بلندمدت سازه و نشست خط؛ و سوم، انجام تحلیل‌های مقایسه‌ای اقتصادی (هزینه چرخه عمر) میان این روش و گزینه‌های جایگزین در سناریوهای مختلف بهره‌برداری.

-برخلاف روش‌های متکی بر باکس یا پل‌سازی با قطعات سنگین، روش سیستم ترکیبی شمع و تیر بتنی درجا با دال عرشه بتنی پیش‌ساخته با کاهش مقیاس قطعات پیش‌ساخته و استفاده از ماشین‌آلات متعارف کارگاهی وابستگی پروژه به تجهیزات فوق‌سنگین و پیچیدگی‌های لجستیکی را حذف کرده و از این منظر، گزینه‌ای بهینه محسوب می‌شود.

-یافته‌های این پژوهش نشان داد که علیرغم کارایی بالای روش پیشنهادی در دهانه‌های ۱۰ تا ۱۲ متر، تعمیم آن به دهانه‌های بسیار بزرگتر یا شرایط ژئوتکنیکی بحرانی (خاک‌های مسعد روانگرایی)، نیازمند بازنگری در طراحی شمع‌ها و ابعاد دال‌ها است. بنابراین،

۶- مراجع

Time. *International Journal of Rail Transportation* 10 (5): 562-80.

-Van Bracht, H. (2015). Rail underpasses: A technological and economic feasibility study on standardization of underpasses [Master's thesis, Delft University of Technology].

-Chen, Jinnan, Chengshun Xu, Hesham M El Naggar, and Xiuli Du. (2023). Comparative Study on Seismic Performance of Prefabricated and Cast-in-Place Underground Structures under Different Site Conditions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 171:107998.

-Cheng, Chihao, Shaoming Liao, Lisheng Chen, and Junzuo He. (2021). Jacking Precision Control of Pipe Roof and Large Box Culvert below Urban Expressway-a Case Study of a Large Underpass in Shanghai. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 703:12050. IOP Publishing.

-Cao, C., Shi, C., Lei, M., Peng, L., & Bai, R. (2018). Deformation characteristics and countermeasures of shallow and large-span tunnel under-crossing the existing highway in soft soil: a case study. *KSCSE Journal of Civil Engineering*, 22(8), 3170-3181.

-Feng, Jiajun, Panpan Guo, Penghui Xue, Siyao Liu, Gan Wang, and Yixian Wang. (2025). Ground Surface Settlements and Deformation Behavior of In-Service High-Speed Railway Tunnel Induced by Obliquely Undercrossed TBM Tunnelling. *Simulation Modelling Practice*

- پناهی، مرتضی، ذاکری سردودی، جبارعلی، فضیلتی، مهدی و امینی، امیر (۱۴۰۵). ارزیابی فنی و اقتصادی روش‌های ساخت زیرگذرها در خطوط ریلی در حال بهره‌برداری با رویکردی مبتنی بر کاهش مدت مسدودی. *مهندسی سازه و ساخت*.

doi: 10.22065/jsce.2026.578548.3934

محمدی کیان، فرزانه، احدی، حمیدرضا (۱۴۰۴). ارزیابی میزان ریسک در گذرگاه‌های همسطح ریل و جاده با استفاده از مدل آکدام. *مهندسی حمل و نقل*. ۴۹۱۵-۴۹۳۴.

-کرم نیای فر، محمد و دهقان، علی نقی (۱۳۹۷). بررسی اثر سیستم پیش‌نگهداری (فورپولینگ) بر کنترل نشست سطح زمین ناشی از حفاری تونل‌های کم عمق شهری تحت بارگذاری ترافیک ریلی. *مهندسی تونل و فضا‌های زیرزمینی*، ۲۷(۲)، ۸۵-۶۳.

doi: 10.22044/tuse.2019.7345.1345

-بزدانی، قاضی مغربی، افشار کاظمی. (۱۴۰۳) بهینه‌سازی و کاهش مسدودی خطوط ریلی با استفاده از شبکه‌های عصبی سه لایه پرسپترون. *مهندسی سازه و ساخت* ۱۰ (۶)، ۲۰۶-۱۸۶.

-Athanasopoulou, A., Bezuijen, A., Bogusz, W., Bournas, D., Brandtner, M., Breunese, A., & Subrin, D. (2019). Standardisation needs for the design of underground structures. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Bababeik, Mostafa, Mohammad Farjadamin, Navid Khademi, and Amir-Hossein Fani. (2022). Simultaneous Schedule of Trains and Track Maintenance According to Stochastic Blockage

Space Technology, 119, 104211.

-Li, Y., Zhou, G., Tang, C. A., Wang, S., Wang, K., & Wang, T. (2021). Influence of undercrossing tunnel excavation on the settlement of a metro station in Dalian. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 80(6), 4673.

-Lunardi, P, G Cassani, A Bellocchio, M Gatti, and F Pennino. (2020). An Innovative Approach in Tunnel Planning and Construction through 30 Years of Experience. In *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture and Art*, CRC Press. 2546–56.

-Lyons, C., Holt, M., Ager, M., Ciavarella, C., & Muscat, D. (2012). Cardinia Road Railway Station–Pedestrian Underpass Jacking. In *ANZ 12 Geomechanics Conference Proceedings..*

-Mamaqani, Babak, Mohammad Najafi, and Vinayak Kaushal. (2020). Developing a Risk Assessment Model for Trenchless Technology: Box Jacking Technique. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* 11 (4): 4020035.

-Mohsenian, Vahid, and Luigi Di-Sarno. (2024). Estimation of Effective Damping Ratio for Cast-in-Place Tunnel-Form System and Evaluation of Its Role in Performance Point Prediction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 187:108989.

-Rafie, K., & Kramer, G. (2026). Tunnelling under operating highways and railways: Lessons learned from previous tunnel crossing projects. In *Connecting Communities Through Underground Infrastructure*, CRC Press, 3501-3514.

-Shakibayifar, Masoud, Abdorreza Sheikholeslami, Francesco Corman, and Erfan Hassannayebi. (2020). An Integrated Rescheduling Model for Minimizing Train Delays in the Case of Line Blockage. *Operational Research* 20 (1): 59–87.

-Pyrgidis, C. N. (2021). Railway transportation systems: design, construction and operation. *CRC Press*.

-Wang, Lei, Xiangsheng Chen, Dong Su, Shuya Liu, Xian Liu, Shouchao Jiang, Hao Gao, and Wensheng Yang. (2023). Mechanical Performance of a Prefabricated Subway Station Structure Constructed by Twin Closely-Spaced Rectangular Pipe-Jacking Boxes. *Tunnelling and Underground Space Technology* 135:105062.

and Theory, 103224.

-Fei, R., Peng, L., Zhang, C., Zhang, J., & Zhang, P. (2024). Experimental and numerical studies of a shield twin tunnel undercrossing the existing high-speed railway tunnel. *Geotechnical and Geological Engineering*, 42(3), 1871-1886.

-Frolov, Y. S., A. N. Konkov, and E. S. Svintsov. (2017). Appraisal of Highway Tunnels Construction on the Active Railroad Tunnel Operational Reliability in the City of Sochi. *Procedia Engineering* 189: 811–17. doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.126.

-Fu, Jinyang, Ningning Zhao, Yong Qu, Junsheng Yang, and Shuying Wang (2022). Effects of Twin Tunnel Undercrossing Excavation on the Operational High Speed Railway Tunnel with Ballastless Track. *Tunnelling and Underground Space Technology* 124:104470.

-Huang, Ziyi, Hao Huang, Huajun Liao, Diandong Sun, and Wei Wang. (2025). Analysis on Stress State of Arch Complex Joints of Long-Span Underpass Composite Bridge. In *Civil Engineering and Smart Structure Technology: Proceedings of the 1st International Symposium (CESST 2024)*, Xiamen, China, 21-23 November 2024, 40–50. SAGE Publications 1 Oliver's Yard, 55 City Road, London, EC1Y 1SP.

-Ivanov, Tatiana V., Vladimir N. Kavkazskiy, and Mikhail I. Shidakov. 2017. Geomechanical Tasks Solving in Modelling of Temporary Support Parameters in Sochi Tunnels. *Procedia Engineering* 189: 227–31. doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.036.

-Keefer, Jim, John Passey, Herbert Kleeman, Judy Congdon, Randy Henderson, Keith Lytton, and Mike Motil. (2001). Garrett Railroad Underpass Project: Panel Discussion.

-Lei, Mingfeng, Dayong Lin, Qiyu Huang, Chenghua Shi, and Linchong Huang. (2020). Research on the Construction Risk Control Technology of Shield Tunnel underneath an Operational Railway in Sand Pebble Formation: A Case Study.” *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 24 (10): 1558–72.

-Lin, X. T., Chen, R. P., Wu, H. N., Meng, F. Y., Su, D., & Han, K. (2022). Calculation of earth pressure distribution on the deep circular tunnel considering stress-transfer mechanisms in different zones. *Tunnelling and Underground*

-Xu, Qiang, Yongquan Zhu, Shengxiang Lei, Zhichun Liu, and Wei Zhao. (2026). Underpassing Underpinning Method with Active–Passive Disturbance Control: A Case Study of High-Risk Metro Station Construction in Shallow Urban Strata. *Arabian Journal for Science and Engineering* 51 (4): 5419–37.

-Yang, X., Li, J. Q., Liu, W., Wang, K. C., Hatt, J., & Schwennesen, J. (2023). Selection of at-grade highway-rail crossings for grade separation. *International Journal of Rail Transportation*, 11(2), 227-247.

-Zhang, Dingwen, Bo Liu, and Yujun Qin. (2016). Construction of a Large-Section Long Pedestrian Underpass Using Pipe Jacking in Muddy Silty Clay: A Case Study. *Tunnelling and Underground Space Technology* 60:151–64.

-Wang, Zhichao, Zhao Hu, Jinxing Lai, Hao Wang, Ke Wang, and Wenbo Zan. (2019). Settlement Characteristics of Jacked Box Tunneling underneath a Highway Embankment.” *Journal of Performance of Constructed Facilities* 33 (2): 4019005.

-Wu, Beiyu, Xing-Tao Lin, Dong Su, Kaihang Han, and Xiangsheng Chen. (2024). Settlement Transfer Mechanism of CFG Piles for Strengthening High-Speed Railway Subgrades Induced by Twin Shield Tunnelling Undercrossing. *Tunnelling and Underground Space Technology* 145:105577.

-Xie, Can, Yuhang Qu, Haiyan Lu, and Shuguang Song. (2024). Study on Deformation of New Tunnels Overcrossing Existing Tunnels underneath Operating Railways. *Buildings* 14 (8): 2420.

