بهینه‌سازی فرآیند تزریق در تونل‌های دوقلوی پونه

مقاله علمی – پژوهشی

واحد قیاسی*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران
شهاب کریمی، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: V.ghiasi@malayeru.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۵– پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۸
صفحه ۳۲-۱۵

چکیده

تزریق روشی است که توسط آن ماده تزریق به خلل و فرج، درزه و شکاف و یا حفره‌های تشکیلات سنگی و خاکی تزریق شده و موجب بهبود مشخصات تشکیلات فوق می‌گردد، به طوری که در اثر آن نفوذپذیری لایه‌ها کم، مقاومت لایه‌ها زیاد و تغییر شکل پذیری آنها کم می‌شود. تونل‌های دوقلوی پونه در محور آزادراهی اراک – خرم آباد به دلیل قرار گرفتن در زیر سطح آب زیرمینی و یا بر اثر انفجارهایی که به منظور حفاری تونل‌ها انجام شده، سست گردیده است که در نتیجه با مشکلات نفوذ آب به درون جسم تونل مواجه شده است. در این مقاله بهینه‌سازی فرآیند تزریق در پروژه تونل‌های دوقلوی پونه مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پروژه با استفاده از روش‌های تزریق تماسی و تحکیمی در چال‌های تزریق و بهینه‌کردن طرح اختلاط دوغاب، مانع از نفوذ آب به درون تونل شده به طوری که قسمت‌هایی از بدنه و سقف تونل آب بند شده است.

واژه‌های کلیدی: تزریق تحکیمی، تزریق تماسی، طرح اختلاط دوغاب، فشار تزریق

۱- مقدمه

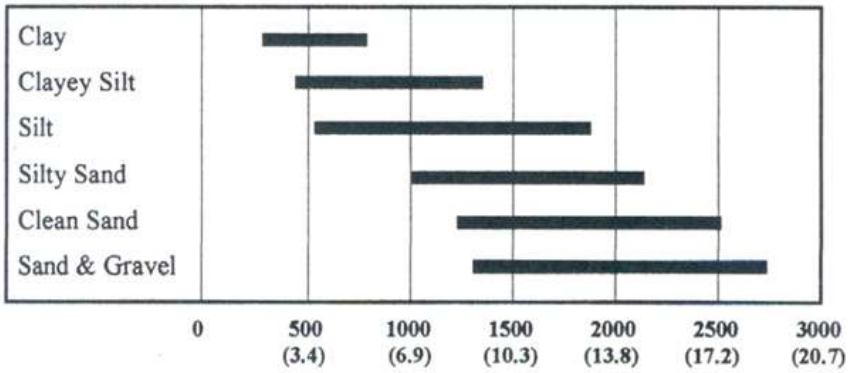
تزریق روشی است که به وسیله آن دوغاب به خلل و فرج، درزه یا شکاف یا حفرات موجود در تشکیلات سنگی یا خاکی نفوذ کرده و موجب بهبود مشخصات فیزیکی و مکانیکی تشکیلات مذکور می‌شود به نحوی که در اثر آن نفوذپذیری و تغییر شکل لایه‌ها کم و مقاومت آن بالا می‌رود. تزریق در واقع پر کردن درزه‌ها و منفذهای زمین منطقه‌ای با مواد سیالی که دوغاب نامیده می‌شود، است. تکنولوژی تزریق به عنوان یک راه حل مهندسی، یک تکنیک کهن در بهسازی زمین است که در حدود دو قرن قدمت دارد(Ghiasi and Mozafari, , 2018; Ghiasi et al., 2012; Ghiasi and Koushki, 2020; Ghiasi et al., 2010; Ghiasi et al., 2011; Ghiasi et al., 2021; Ghiasi and Omar, 2011;).

از نقطه نظر تاریخی، تزریق در زمین برای اولین بار توسط یک مهندس فرانسوی بنام چارلز برینی مورد استفاده قرار گرفته است. در سال ۱۸۲۰ میلادی این مهندس از یک سوسپانسیون آب و سیمان پوزولانی جهت پر نمودن حفرات به وجود آمده در پی یک آب بند که در اثر نشست پی حادث شده بود و نیز برای آب‌بندی و پایدارسازی همزمان نهشته‌های آبرفتی در زیر پی استفاده نمود. در حدود سال‌های ۱۹۰۰ تا ۱۹۲۰ با پیشرفت تجهیزات تزریق و تکنیک‌های مربوط به این فن، پمپ‌های تزریق ساخته شد. در سال ۱۹۲۶ میلادی مواد تزریق شیمیایی توسط یک دانمارکی به نام یوستن کشف شد که به واسطه آن گام بلندی در زمینه مهندسی تزریق در آلمان برداشته شد. بعد از جنگ جهانی دوم، مواد تزریق شیمیایی با ویسکوزیته بسیار کم

توسعه چشمگیری پیدا کردند، به نحوی که امکان آماده‌سازی و اختلاط آنها در سطح و تزریق آنی در زیر سطح فراهم شد (معروف،۱۳۹۲). عمل تزریق شامل دو بخش است، اطلاعات و دانش کافی در مورد دوغاب‌ها و دیگری تکنیک‌های تزریق دوغاب در خاک یا سنگ. تزریق را می‌توان از دیدگاه‌های متفاوت نیز دسته بندی کرد. از دیدگاه مصالح نیازمند تزریق، این روش‌ها به سه دسته تزریق در خاک، تزریق در سنگ و تزریق در سازه تقسیم بندی می‌شوند؛ از دیدگاه مکان تزریق، این روش‌ها به دو دسته تزریق در سطح زمین و تزریق در سازه‌های زیر زمینی تقسیم می‌شوند(مسعودی، ۱۳۸۸). روش‌های تزریق در خاک شامل تزریق نفوذی یا آب بند، تزریق تحکیمی (جابجایی)، تزریق تراکمی (جایگزینی)، تزریق جت، تزریق شکست هیدرولیکی، تزریق تماسی یا تعادلی می‌باشد. روشهای تزریق در سنگ شامل تزریق نفوذی (اسلاری)، تزریق تحکیمی (جابجایی)، تزریق شکست هیدرولیکی و تزریق تماسی یا تعادلی می‌باشد (Ghiasi et al 2014; Ghiasi et al., 2011; Ghiasi and Valirasti, 2021;). در تزریق نفوذی، دوغاب در داخل خاک به گونه‌ای که دانه بندی و ساختار خاک تغییر نکند، انتشار می‌یابد اگرخاک همگن و همگرا باشد و در یک نقطه تزریق گردد، ناحیه تزریق کروی شکل خواهد بود. در تزریق نفوذی، ملات تزریق به داخل فضاهای خالی و حفرات خاک تزریق می گردد. ازاین تکنیک، برای کنترل جریان آب به داخل تونل و یا بهبود ساختار خاک، استفاده می شود. این نوع تزریق، قدیمی ترین نوع روش‌های تزریق بوده و جزء متداول ترین نوع تزریق‌های به کار رفته، نیز به شمار می آید. یک مخلوط سیمانی تزریق، از سیمان، بنتونیت، و آب تشکیل می یابد. هنگامی که عملیات تزریق در شن یا شن ماسه‌ای درشت دانه، انجام می‌گیرد، عموماً برای کاهش هزینه تأمین مصالح، از فیلرهایی نظیر خاکستر آتشفشانی و ماسه دانه ریز، استفاده می‌شود. سیمان پورتلند تیپ ۱و تیپ ۲ بیشترین استفاده را درملات‌های تزریق دارا می باشند. سیمان پورتلند زودگیر تیپ ۳ و سیمان فوق العاده دانه ریز، برای تزریق خاک‌های دانه ریز مورد استفاده قرار می‌گیرند. همان طور که اشاره خواهد شد گستره زیادی از دوغاب‌های تزریق در این روش مورد استفاده قرار می‌گیرند (مجدی، ۱۳۸۷). این تزریق مانند تزریق نفوذی در سنگ و سازه که ترک‌ها، درزه‌ها و به طور کلی عیوب سنگ و سازه و مصالح بنایی را پر می کند حفرات خاک‌ها و سنگدانه‌ها و جاهای خالی لایه‌های خاک را پر می‌کند. هدف این نوع تزریق پرکردن فضای حفرات بدون هیچگونه جابه-جایی در ساختار و تغییری در پیکر بندی حفره‌ها یا حجم است. همچنین هدف از این نوع تزریق بالا بردن مقاومت اولیه، جلوگیری از جریان آب یا ترکیبی از این دو است که مکانیسم عمل آن جاذبه بین ذرات و سیمانتاسیون خاک است. تزریق نفوذی تنها نوع تزریق است که استفاده آن در همه انواع لایه‌ها وجود دارد. این روش احتمالا قدیمیترین تکنیک تزریق است که اولین برنامه کاربردی ثبت شده آن به اوایل ۱۸۰۰ برمی‌گردد (مسعودی، ۱۳۸۸). تزریق پرفشار یا جت گروتینگ یکی از شیوه‌های پایدارسازی و بهسازی خاک به صورت درجا می‌باشد. پایه اصلی تزریق جت، جت برشی با سرعت بالا است. در این تزریق دوغاب از طریق یک نازل به همراه آب و هوا با فشار اولیه ۳۰۰ تا ۶۰۰ بار به خاک اطراف وارد می‌گردد و به طور کامل خاک را تغییر می‌دهد و باعث تخریب ساختار خاک موجود می‌شود و ترکیبی از خاک و دوغاب را به وجود میآورد. طی این فرآیند، بخشی از ذرات خاک و دوغاب از درون گمانه حفاری بیرون آمده و بخش دیگر بصورت درجا با دوغاب مخلوط می‌شود. در نتیجه این فرآیند، توده‌ای از خاک اصلاح شده بوجود می‌آید که به آن، اصطلاحاً توده خاک – سیمان اطلاق می‌شود. ستون خاک- سیمان ایجاد شده از طریق روش تزریق با فشار در داخل خاک، دارای مقاومت بالا، تغییر شکل‌پذیری اندک و نفوذپذیری بسیار پایین هستند و باعث تقویت خصوصیات خاک محل می‌شوند. به عبارت دیگر عملیات تزریق با فشار افزایش و تقویت خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک ساختگاه از جمله مقاومت فشاری، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی تا چندین برابر ارتقاء می‌یابد(Ghiasi et al., 2021; Ghiasi et al., 2011; , مجدی، ۱۳۸۷). از مزایای این روش می‌توان به افزایش ظرفیت باربری و توان خاک در حالت اشباع، نفوذناپذیر نمودن ساختگاه ترک‌ها در برابر نفوذ آب و جلوگیری از وقوع پدیده آب شستگی، تثبیت و تراکم لایه‌های سست موجود در عمق ساختگاه مورد مطالعه و ترمیم و پر نمودن تمامی خلل و فرج موجود در درون ساختگاه اشاره کرد.

هنگامی که بهبود زمین مورد نیاز است، این روش ممکن است به جای تزریق در زمین‌های بسیار ریزدانه استفاده شود(AASHTO, 1997). در شکل ۱ مقاومت انواع خاک‌هایی که با این روش تزریق شده‌اند مرور شده است.

لازم به ذکر است که اگر از این نوع تزریق برای مقاصد تونل سازی استفاده شود هم می‌توان از داخل تونل به این کار مبادرت کرد و هم می‌توان از خارج تونل این کار را انجام داد (AASHTO T26, 1997).



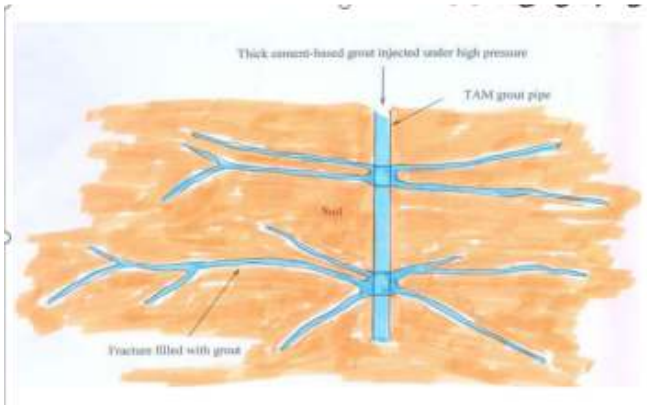
شکل ۱. مقاومت بدست آمده بر حسب پوند بر اینچ مربع و مگاپاسکال
در انواع خاک تزریق شده با روش جت(AASHTO T26, 1997))

در روش تزریق شکست هیدرولیکی، دوغاب با فشار بالا توسط پمپ درون درز و ترک‌ها نفوذ کرده و باعث کاهش تعداد شکافها و بهسازی خاک می‌شود. اصول این روش ایجاد درز و ترک در خاک با حفظ پایداری خاک است (Aksoy, 2007). جهت کاهش نشست زمین ناشی از حفر تونل، می‌توان از تزریق شیمیایی استفاده کرد. این روش در صورتی که سطح آب زیرزمینی بالا باشد می‌تواند روش مؤثری بوده و نشست ناشی از زهکشی آب را نیز کاهش دهد(ASTM C150 / C150M-21, 2021) . یکی از روش‌های مؤثر جهت کاهش میزان نشست در اثر حفاری های زیرزمینی، تزریق جبرانی یا متعادل است. اصول اولیه این روش تزریق دوغاب به ناحیهای بین تونل و لایه‌های زیرین سازه می‌باشد تا نشست زمین و تنشهای ایجاد شده در اثر حفاری را کاهش دهد. به عنوان یک نتیجه با این تزریق می‌توان برآمدگی زمین و سطح زمین را جابجا و نشست‌های قبلی و قدیمی را جبران نمود. در به کار بردن این روش، برای جبران نشست حاصل از حفر تونل به دلیل فشار اعمالی بالا و وارد آمدن بار زیاد به پوشش تونل باید احتیاط نمود. محدودیت عمده این روش در تحرک بالا و ویسکوزیته پایین دوغاب است که می‌تواند باعث مشکلاتی در کنترل محل دوغاب شود.

استفاده از گروت با زمان گیرش بالا تا حدی می‌تواند به حل این مشکل کمک کند(ASTM C33 / C33M-18, 2018) در ابتدا کاربرد تزریق عمدتاً به پر کردن فضاهای خالی، توقف نشت آب و تحکیم زمین محدود بوده است؛ ولی امروزه کاربرد آن برای اهدافی همچون کاهش نشست زمین در نتیجه حفر تونل و فضاهای زیرزمینی و تقویت زمین به گونه‌ای که بتوان آن را به صورت یک ساختار نگهدارنده در حل مسائل ژئوتکنیکی به کار برد، توسعه یافته است,(ASTM D1067-16, 2016) .

همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، سیال مورد تزریق که تحت عنوان کلی دوغاب معرفی می‌شود، از منبع آماده‌سازی و با طی مسیری تحت عنوان خط جریان دوغاب، وارد گمانه می‌شود و با عبور از آن به محیطی درون زمین تحت عنوان مقطع تزریق، نفوذ می‌کند و قسمت مورد تزریق قرارگرفته، مستحکم می‌شود و مقاومت آن افزایش می‌یابد ,(ASTM D1067-16, 2016). تزریقات پرده آب‌بند به منظور کاهش نفوذپذیری توده سنگ واقع در

تکیه‌گاه‌ها و پی سازه‌های آبی به ویژه سدها برای کنترل تراوش آب و کاهش نشت آب مخزن به کار گرفته می‌شود. در این نوع تزریقات با حفر یک، دو یا چند ردیف گمانه در راستای محور سد و تزریق آنها، یک پرده یکپارچه آب‌بند احداث می‌شود. پرده‌های تزریق، برای سازه‌های زیرزمینی و با اهداف هیدرولیکی نظیر انتقال و ذخیره آب و همچنین برای سازه‌هایی همچون مخازن زیرزمینی که محصولات گاز طبیعی و نفت را ذخیره می‌کنند، مورد استفاده قرار می‌گیرند، در این مورد می‌توان از تونل‌ها و شفت‌های تحت فشار، مخازن و ایستگاه‌های پمپاژ، به عنوان مثال‌هایی از این نوع سازه‌ها نام برد(ASTM D1881-17, 2017)



شکل۲. نفوذ دوغاب در شکستگی‌های سنگ(ASTM D1067-16, 2016).

تزریق تحکیمی عبارت است از حفر چال‌هایی در سنگ با یک الگوی منظم در زیر و اطراف سازه‌ها برای کاهش نفوذپذیری و بهبود کیفیت سنگ و در صورت لزوم، حفاری و تزریق گمانه‌هایی با عمق، زوایا و موقعیت‌های متفاوت برای ترمیم یکایک پدیده‌های زمین‌شناسی موضعی خاص که ضمن پیشرفت کار چالزنی و تزریق، ممکن است مشاهده شوند. در صورت وجود درزه و شکاف و یا سایر ناپیوستگی‌های زمین شناسی در توده سنگ دربرگیرنده سازه و از همه مهم‌تر، قرار گرفتن توده سنگ تحت شرایط هیدروستاتیک و هیدرودینامیک می‌بایست در توده سنگ تزریقات تحکیمی انجام شود. در تزریق تحکیمی ضخامت بیشتری از منطقه سنگی نسبت به تزریق تماسی مورد توجه می‌باشد. این منطقه در زیر شالوده سازه‌های بتنی بزرگ یا اطراف پوشش تونل و یا گودبرداری‌های وسیع زیرزمینی واقع می‌شود. یکی از مهمترین اهداف تزریق تحکیمی در پی سازه‌های عظیم از قبیل سدهای بتنی و تونل‌ها، افزایش خصوصیات مکانیکی توده سنگ است. تزریق سیمان روشی است که به وسیله آن مخلوطی از آب و سیمان و یا تلفیقی از چند ماده مختلف با فشار مناسب به داخل خلل و فرج و درزه و شکاف و یا شکاف و یا حفره‌های تشکیلات سنگی و خاکی رانده می‌شود تا موجب بهبود مشخصات فیزیکی و مکانیکی آنها شود. در حقیقت این عمل باعث کاهش نفوذپذیری و افزایش سرعت انتشار امواج لرزه‌ای، مدول تغییرشکل پذیری، مقاومت و ظرفیت باربری محیط می‌شود (ASTM D1881-17, 2017) تزریق تماسی عبارت است از تزریق در محدوده بین سنگ و بتن. یعنی تزریق کردن در چال‌های کوتاهی که برای محدوده محل تماس سنگ و بتن انجام می‌شود و یا تزریق در لوله‌های از پیش کار گذاشته شده و نیز تزریق قطعات مدفون. پس از انجام عملیات لاینینگ ممکن است در سقف تونل فضای خالی ایجاد شود. همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، مقدار تقریبی این افت، حدود یک صدم قطر حفاری می‌باشد. عملیات انجام شده جهت پر کردن فضای خالی ایجاد شده پشت پوشش به وسیله دوغاب که ناشی از افت حجم بتن یا شکستگی، ریزش و لغزش است را عملیات تزریق تماسی گویند. در تزریق تماسی تنها درزه‌هایی از سنگ مدنظر هستند که در ضخامتی بین ۰/۵ تا ۱ متر از آن قرار دارند. محدوده عرض درزه و شکاف‌هایی که در تزریق تماسی مورد تزریق واقع می‌شوند، در حدود چند دهم میلی

متر تا ۱۰ سانتی متر و یا بیش‌تر می‌باشد؛ از این رو می‌توان از سوسپانسیون‌های غلیظ سیمان نیز استفاده نمود.

به طور کلی می‌توان گفت اهداف تزریق تماسی شامل: پر شدن فضاهای خالی موجود بین پوشش بتنی و زمین و تأمین ناتراوایی و کمک به آب‌بندی سیستم نگهداری در زمین‌های آب دار، تحکیم و تثبیت پوشش بتنی، اعمال همگن بارسنگ روی پوشش بتنی و به حداقل رسیدن اعمال بار متمرکز در اثر همگرایی زمین، تبدیل کردن قطعات پوشش تونل و محیط پیرامونی آن به یک مجموعه واحد، جلوگیری از نشست زمین به ویژه در مناطق با روباره کم و سنگ ضعیف. (ASTM D1881-17, 2017) روش‌های متداول و در دسترس به منظور بررسی میزان بهبود ویژگیهای مکانیکی در اثر تزریق دوغاب شامل آزمایش‌های ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی برجاست. در سال‌های اخیر نیز برای ارزیابی میزان بهبود خصوصیات مکانیکی توده سنگ به سبب تزریق دوغاب از روش‌های ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی استفاده شده است. کیکوچی و همکاران (ASTM D1888, 1989). با آزمایش‌های ژئوفیزیکی نظیر اندازه‌گیری دامنه امواج الکترومغناطیس و سرعت امواج الاستیک و آزمایش‌های ژئوتکنیکی نظیر آزمایش دیلاتومتری بهبود کیفیت توده سنگ در اثر تزریق را بررسی کردند و نشان دادند که در نتیجه تزریق دوغاب سرعت انتشار امواج الاستیک و مدول تغییر شکل‌پذیری توده سنگ افزایش و تغییرات در دامنه امواج الکترومغناطیس کاهش یافته است (ASTM D1888, 1989).

در مجموع اهداف اصلی تزریق در تونل سازی شامل: جلوگیری از جریان و حرکت آب از طریق مسیرهای عبور آب و منافذ سنگ‌ها و یا خاک‌ها به درون حفریات ایجاد شده (کاهش نفوذپذیری)، افزایش مقاومت نهایی زمین به نحوی که زمین‌های رونده مانع عملیات احداث تونل نشوند، افزایش ایمنی در عملیات تونلسازی و کاهش نشست سطح زمین و تکمیل تکنیک‌های سنتی سازه‌های سطحی در مناطق شهری(ASTM D1881-17, 2017).

مزایای اقتصادی تزریق باعث طرفداری و توجه شایان به این تکنیک در مقایسه با سایر تکنیک‌ها شده است، به ویژه وقتی که مشکلات تکنیکی خاصی وجود داشته باشد؛ برخی از مشکلات تکنیکی شامل موارد زیر می‌باشد:

– چنانچه لازم است فونداسیون طرحی پایین‌تر از سطح آب‌های زیرزمینی، خاکبرداری شود؛ فونداسیون عمیق، برای اجرای عملیات ساختمانی به زمان زیادی نیاز دارد؛

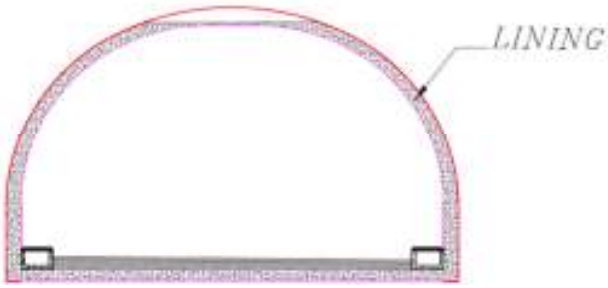
– وقتی اجرای یک پی مناسب خیلی مشکل باشد، این مورد معمولا در کارهای داخل شهر، در تونل‌های انتقال، مجاری فاضلاب، راه های زیر زمینی مترو و . . . پیش می‌آید؛

– وقتی ابعاد هندسی محل فونداسیون خیلی پیچیده باشد و شرایط مرزی و تشکیلات مختلفی از لحاظ جنس و از نظر زمین شناسی وجود داشته باشد؛

– وقتی، وجود سازه‌هایی در مجاور فونداسیون جدید، اجازه و امکان خاکبرداری در عمق‌های خیلی پایین را ندهد.

اما در اغلب حالات در مقایسه با سایر تکنیک‌ها، تزریق یک راه حل کند می‌باشد. همچنین ممکن است مخارج هنگفتی را در بر داشته باشد، زیرا که برای دستیابی به نتایجی با کیفیت بهتر، نیاز به استفاده از دوغاب‌های مخصوص و اکیپ مجهز و متخصص می‌باشد.

در این پژوهش فرآیند تزریق تماسی و تحکیمی در تونل‌های دوقلو پونه در پروژه آزادراه اراک – خرم آباد با توجه به پارامترهایی از قبیل میزان آب، سیمان، مواد افزودنی، طرح اختلاط دوغاب و دیگر عوامل بهینه شده است.



شکل۳. پرنشدن شماتیک فضای سقف در اثر افت حجم پس از انجام لاینینگ

جدول ۱. مختصات ورودی و خروجی تونل دوقلوی پونه

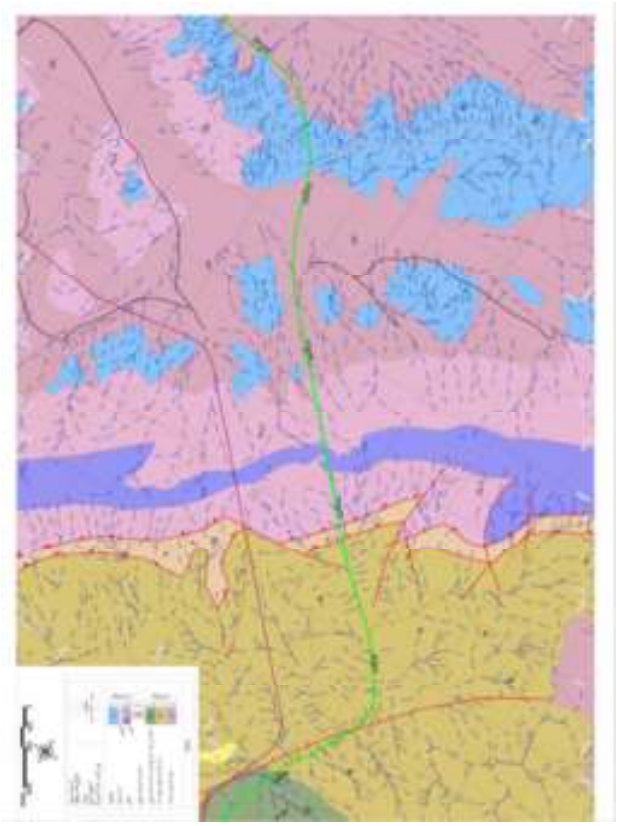
تونل‌ها	ورودی		خروجی	
	x	Y	x	y
راست	۲۸٦٤٦۱	۳۷۳۰٦۱۸	۲٤٤۱٦۷	۳۷۲۸٥۳٦
چپ	۲۸٦٤۸۷	۳۷۳۰٥۸٦	۲٤٤۱۸۱	۳۷۲۸٥۲۳

۲- مشخصات پروژه

در مسیر آزاد راه اراک–خرم‌آباد که در حال احداث است تونل‌های دوقلوی پونه اجرا می‌گردد که دارای طول مجموع حدودی ٦۱٦۰ متر هستند. مختصات ورودی و خروجی تونل‌های سمت راست و چپ (از کیلومتراژ کمتر به بیشتر) در سیستم UTM در جدول) ارایه شده است. تونل مذکور دارای آزیموت حدود ۲۳۰ درجه، سطح مقطع ۱۲۸ متر مربع و به طول تقریبی حدوداً ۳۱۰۰ متر است. با توجه به بزرگی سطح مقطع این تونل‌ها، برای حفاری آن‌ها روش پیشانی و پله (Heading and Benching) در نظر گرفته شده است. این روش برای تونل‌های بزرگ مقطع و در زمین‌های با شرایط دشوار زمین‌شناسی قابل استفاده است. در این روش ابتدا قسمت پیشانی (هد) در یک یا چند مرحله (متناسب با جنس و شرایط ژئومکانیکی توده سنگ) حفاری می‌گردد و سیستم نگهداری موقت آن نصب می‌شود. سپس حفاری و تحکیم پله (بنچ) با فاصله مناسب از سینه کار (مطابق شرایط زمین شناسی و اجرایی) در حداقل ۳ مرحله انجام می‌شود.

۳- زمین شناسی مسیر تونل

گستره پروژه حفاری تونل‌های دوقلوی پونه در تقسیم‌بندی ساختاری – رسوبی ایران زمین در ناحیه زاگرس گسل خورده (زاگرس مرتفع) قرار دارد. حد شمالی ناحیه مذکور با زون سنندج – سیرجان به وسیله گسل امتداد لغز دورود و حد جنوبی آن توسط زاگرس چین خورده محدود می‌گردد. زاگرس خرد شده در جنوب غرب بروجرد و شمال شرق خرم‌آباد، در راستای شمال غربی- جنوب شرقی و هم‌سو با زاگرس چین خورده از یک سری ارتفاعات بلند و دیواره‌ساز تشکیل شده است. این زون که به صورت نوار باریکی دیده می‌شود، دارای عرض‌های متغیری است. در بروجرد عرض این واحد از ۱۵ تا ۳۵ کیلومتر متغیر است. مرز شمالی و شرقی زاگرس خرد شده بسیار مشخص است، چرا که گسل‌های راست گرد زاگرس و میناب آن را از واحدهای دیگر مجزا می‌نماید. در بروجرد مرز این واحد با زون دگرگون به وسیله دشت آبرفتی پوشیده شده است و از معرض دید پنهان می‌شود. زاگرس خرد شده که قسمتی از پلیت عربی می‌باشد، در این منطقه هر چه از جنوب غربی به طرف شمال شرقی نزدیک‌تر می‌شویم بر شدت دگریختی افزوده می‌شود و در محل برخورد آن قسمت از پلیت عربی (زاگرس خرد شده) با بخش سنندج- سیرجان (زون دگرگونه) در لبه زاگرس، واحدهای سنگی به شدت تکتونیزه است و با شیب به سمت شمال شرقی بر روی یکدیگر لغزیده‌اند. یک واحد برجای و دو واحد نابرجای در زاگرس خردشده این ناحیه واقع شده است به نحوی که سفره رورانده و نابرجای چغلوندی که نام واحد چغلوندی بر آن گذارده شده است و ارتفاعات جنوب غربی و سفره رورانده گرین در منتهی الیه شمال غربی منطقه، برونزد دارد. از رخدادهای زمین‌ساختی، رخداد کالدونین تا آخر فاز آلپی در این ناحیه دیده می‌شود. گسل‌های موجود عمدتاً در راستای شمال غربی- جنوب شرقی با حرکت راستا لغز هستند. ضمن این که گسل‌های فشاری نیز دیده می‌شود که احتمالاً دارای زمانی قدیمی‌تر از گسل‌های راستا لغز است. اصلی‌ترین گسل موجود در منطقه گسل رورانده زاگرس با راستای شمال غربی- جنوب شرقی است که محل برخورد دو بخش زاگرس و سنندج- سیرجان بوده است که در این جا توسط رسوبات آبرفتی جوان پوشیده شده و از دید پنهان است. شکل٤ پلان زمین‌شناسی موقعیت احداث تونل‌ها را نمایش می‌دهد.



شکل ٤. پلان زمین‌شناسی موقعیت احداث تونل‌ها

تونل دوقلوی پونه شامل ۹ زون است که به ترتیب زیر از جبهه شمالی به سمت جبهه جنوبی (از مسیر بروجرد به خرم آباد) شامل نواحی زیر می‌شود.

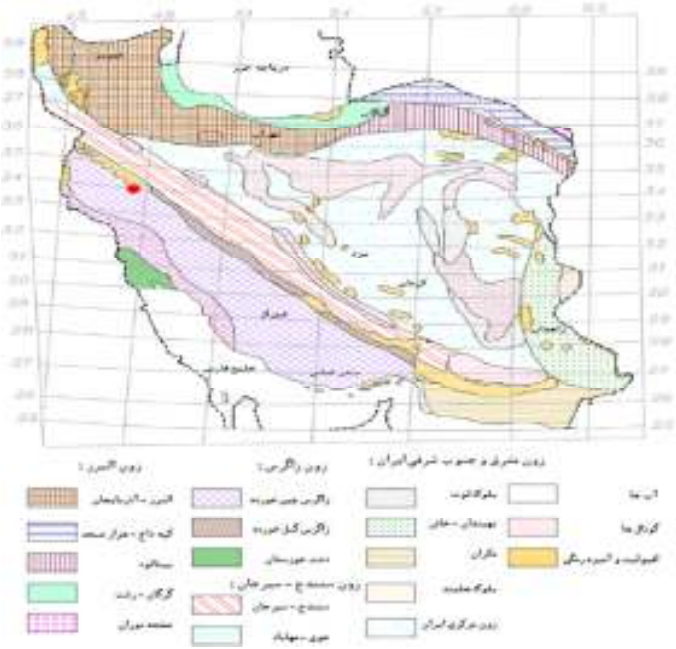
زون ۱: این واحد شامل سنگ آهک مارنی، مارن و مارن آهکی همراه با رگه و رگچه کلسیت با میان لایه‌هایی از مارن سبز، مارن سنگ و مارن آهکی است که درجبهه شمالی (بخش ورودی) تونل در زیر نهشته‌های آبرفتی قرار گرفته است. گذر تونل‌های راست و چپ به ترتیب با طول ۱۱۹۰ و ۱۱۹۳ متر از رسوبات سنگی این واحد هستند.

زون ۲: این واحد شامل شیل آهکی به رنگ قرمز است که به صورت رخنمون‌هایی با ریخت تپه ماهوری در بخش ورودی تونل قابل رویت است. واحد شیل آهکی همانند واحد قبل با رگه و رگچه کلسیت همراه است که هوازده و کم مقاومت است. این واحد در تونل‌های راست و چپ به ترتیب ۱۳۳ و ۱۳۱ متر را شامل می‌شود. زون ۳: این واحد شامل سنگ آهک مارنی، مارن و مارن آهکی همراه با رگه و رگچه‌های کلسیت است و در زیر رسوبات کوهرفتی مدفون شده است. این واحد در تونل‌های راست و چپ به ترتیب ٤۹۹ و ۵۱۹ متر را شامل می‌شود. زون ٤: سنگ آهک توده ای رازن بخش ستیغ‌ساز کوه پونه را ایجاد نموده است که در بین دو گسل رورانده سفره چغلوندی بالا آمده است. این واحد دارای مقاومت بیشتری نسبت به دیگر واحدهای تشکیل‌دهنده کوه پونه است. عملاً این زون مطابق برداشت‌های زمین شناسی در تونل دیده نشده است. زون ۵: این واحد شامل سنگ آهک‌های مارنی آجری رنگی است که بر روی آهک‌های توده‌ای رازن قرار گرفته است. سنگ آهک مارنی آجری رنگ تقریباً بخش مرتفع کوه پونه را می‌سازد و به نظر می‌رسد قرارگیری این واحد در بین دو واحد سنگ آهکی نسبتاً مقاوم سبب پایداری آن در مقابل فرسایش شده است. این واحد در تونل‌های راست و چپ به ترتیب ۳۱۳ و ۳۱۱ متر را شامل می‌شود. زون ٦: شامل سنگ آهک شیری رنگ که به نظر مقاوم‌تر از واحد قبلی است و در بعضی از نقاط زیر واحد کوهرفتی کم‌ضخامتی، پوشیده شده است. این واحد در تونل‌های راست و چپ به ترتیب ۱۰۹ و ٦۲ متر را شامل می‌شود. زون ۷: این واحد شامل سنگ آهک مارنی و سنگ آهک مارنی متورق است. این واحد در تونل‌های

راست و چپ به ترتیب ۴۷۹ و ۴۹۷ متر از طول تونل را شامل می‌شود. زون ۸: این واحد شامل واحدهای ولکانیکی به سن ژوراسیک است که به شدت دچار هوازدگی و دگرگونی شده است. جنس این واحد آندزیت پورفیریک خاکستری تیره تا سیاه با ساختمان بالشی و گهگاه با آلتراسیون قرمز رنگ است که در بخش انتهایی تونل دوقلوی پونه قرار دارد. این واحد در تونل سمت راست و چپ به ترتیب ۸۴ و ۷۵ متر از بخش انتهای آن‌ها را شامل می‌شود. زون ۹: این زون متشکل از جنس آبرفتی و GC است. نقشه تقسیم‌بندی زون‌های ایران به همراه محل تقریبی تونل پونه در محدوده زون زاگرس چین خورده در شکل۵ نمایش داده شده است. به طور کلی مسیر تونل‌های مذکور متشکل از سنگ های آهکی، مارنی، آهک مارنی، ولکانیک و شیل به همراه گسل خوردگی‌های محلی بوده و تونل بصورت موضعی آبدار است. دهانه تونل در قسمت شمالی از جنس مارن و در قسمت جنوبی از جنس GC است. متراژهای ابتدایی تشخیص سطوح لایه‌بندی امکان‌پذیر نیست اما با حرکت به سمت خروجی سطوح لایه‌بندی پدیدار می‌شوند. به گونه‌ای که عموماً شیب لایه‌ها ۴۵ درجه و جهت شیب ۲۲۰ است.

صفحات لایه‌بندی عمدتاً در زون ۱ تا ۷ حاوی پرشدگی‌های سیلت تا ماسه و رس هستند. به طور کلی این لایه‌ها به علت وجود دسته درزه‌های متعدد به صورت بلوکی درآمده‌اند یا به شکل ورقه‌ای می‌باشند. برای شناسایی نوع و جنس سنگ میزبان مسیر، اقدام به حفر ۷ گمانه در مرحله اکتشافی در طول مسیر تونل گردید. در دهانه جنوبی تونل پس از ناحیه آبرفتی، عمدتاً سنگ‌ها از جنس ولکانیک در ابتدا و آهک مارنی در بقیه مسیر(تا نیمه تونل) است که به طور کلی می‌توان گفت کیفیت سنگ میزبان این قسمت در گستره سنگ‌های خوب تا متوسط است به طوری که شاخص RQD این سنگ‌ها از ۵۰-۷۰ برآورد شده است ولی در دهانه شمالی تونل پونه تا نیمه تونل(انتهای زون ۳) عمدتاً سنگ میزبان از نوع آهک مارنی، مارن و مارن آهکی و شیلی می‌باشد؛ با این تفاوت مهم که کیفیت سنگ‌ها در این قسمت ضعیف تا بسیار ضعیف قلمداد می‌شود به طوری که شاخص RQD دارای رقوم اندک ۲۰-۴۰ درصد است.

با نگاه اجمالی می‌توان به این نتیجه رسید که روند حفاری، انفجار و نگهداری در دهانه شمالی تونل پونه تا مرکز آن با مسائل عدیده‌ای همراه خواهد بود و با نگاه ویژه به نقشه‌ها و لوگ‌های گمانه‌زنی می‌توان اوج این کاهش کیفیت سنگ را در ۱۲۲۰ متر تا متراژ ۱۳۷۰ از دهانه ورودی تونل در نظر گرفت جایی که شاخص‌های کیفی سنگ آن RQD=0-25، RMR=28 و GSI=30 است. بنابراین از دهانه ورودی تا کیلومتراژ ۹۸۰+۱۰۰ کیفیت توده سنگ نامناسب و این محدوده نیازمند نصب لتیس مناسب است.



شکل ۵. نقشه تقسیم بندی زون‌های ساختاری - رسوبی ایران

٤- سطح آب زیرزمینی

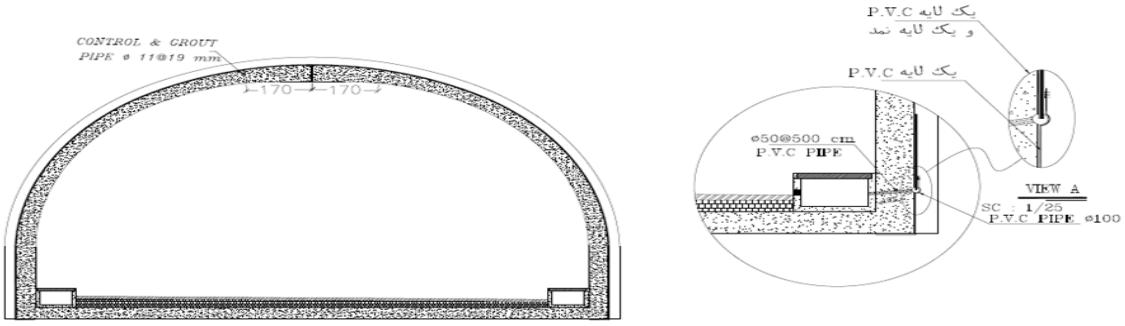
مطالعات صحرایی بر اساس اطلاعات حاصل از گمانه‌های ماشینی BH:TU07 الی BH:TU01 انجام شده است. اطلاعات مربوط به گمانه‌های حفر شده شامل عمق و مختصات گمانه‌ها در جدول ۲ آمده است. بر اساس اندازه گیری‌های انجام شده در گمانه‌های نیمه ورودی و خروجی تونل پونه سطح آب ایستابی در گمانه BH:TUO2 در عمق ۲٦ متری، در گمانه BH:TUO3 در عمق ۱۵۰ متری، در گمانه BH:TUO4 در عمق ۳/۵ متری، در گمانه BH:TU05 در عمق۱۰ متری، در گمانه BH:TUO6 در عمق ۲۷ متری و در گمانه BH:TU07 در عمق ۵ متری مشاهده شده است که موید این مطلب است که تونل در تمامی طول خود زیر سطح آب زیر زمینی حفاری شده است که تأثیر مهمی در نوع و نحوه تزریقات خواهد داشت.

جدول ۲. مشخصات گمانه‌های اکتشافی

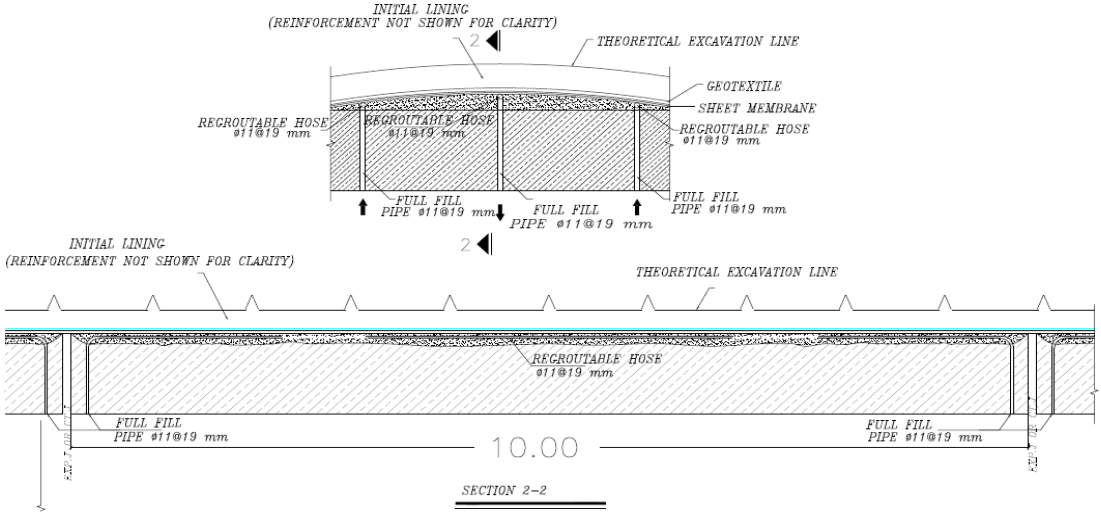
شماره گمانه	مختصات		عمق حفاری شده (متر)
	Y	X	
BH:TU01	3728508	284363	47
BH:TU02	3728647	284355	65
BH:TU03	3728908	284720	190
BH:TU04	3730476	286340	30
BH:TU05	3730139	285984	110
BH:TU06	3729746	285639	250
BH:TU07	3730597	286464	30

٤- طراحی نقشه‌های تزریقات تحکیمی و تماسی

جهت تزریقات تحکیمی و تماسی تونل‌های دوقلوی پونه محدوده کورد تزریق به دو قسمت تقسیم شده است. قسمت اول مناطقی هستند که در آنها عایق رطوبتی (ژئوتکستایل و ژئوممبرین) نصب نگردیده است. در هر پارت بتن ریزی ۱۰ متری ۳ ردیف لوله PVC یا PE (پلی اتیلن) که هر ردیف شامل ۳ لوله می‌باشد به گونه‌ای که یک لوله در آکس و دو لوله دیگر در همان راستا به فاصله ۱,۷ متری در طرفین آکس نصب می‌گردد و رینگ‌های کناری با فاصله داری حدوداً ۱,۵ متری از لبه پارت و رینگ سوم در میانه پارت جانمائی می‌گردد (زون آبرفتی- ولکانیکی). در مناطقی که عایق نصب گردیده است، در هر پارت عایق ۱۰ متری شیلنگ‌های تزریق در سقف با فاصله ۱,۷۰ متر از یکدیگر در ابتدا و انتهای پارت بر روی عایق نصب می‌شوند. شیلنگ‌های تزریق به طول ۱۲ متر هستند که در هر پارت عایق ۱۰ متری حداقل یک متر در ابتدای پارت و یک متر در انتهای پارت از سقف آویزان هستند

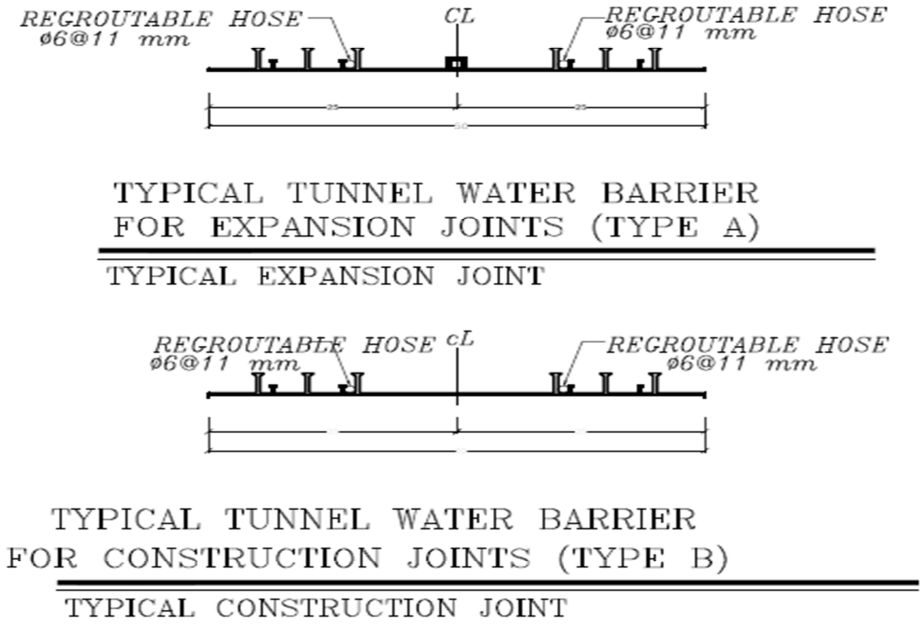


شکل ٦. آرایش لوله‌های تزریق در قسمت‌های دارای عایق



شکل ۷. آرایش لوله‌های تزریق سقف

لوله‌های تزریق تماسی مورد استفاده در سقف تونل از جنس لوله‌هایی از نوع PVC و PE، می‌باشند. فشار تزریق لوله‌ها بین ٤ الی ۷ بار و قطر داخلی لوله‌های تزریق تماسی ۱۱ میلی‌متر و قطر خارجی آن‌ها ۱۹ میلی‌متر است. در شکل‌های ٦ و ۷ آرایش لوله‌های تزریق در قسمت‌های دارای عایق نشان داده شده است. بر روی هرکدام از واتراستاپ‌ها که در ابتدا و انتهای هر پارت ۱۰ متری عایق نصب می‌شوند، دو شیلنگ تزریق واتراستاپ نصب می‌شوند. مشخصات فنی شیلنگ‌های تزریق واتراستاپ در قسمت‌هایی که عایق نصب شده است، به این صورت است که فشار تزریق لوله بین ۲ الی ۵ بار، قطر داخلی و قطر خارجی آن به ترتیب ٦ و ۱۱ میلی‌متر و از جنس PVC می‌باشد. در شکل ۸ آرایش شیلنگ‌های تزریق واتراستاپ نشان داده شده است.



شکل ۸. آرایش شیلنگ‌های تزریق واتراستاپ

۵- مصالح مورد استفاده در تزریق

در عملیات تزریق، مواد و مصالح مختلفی استفاده می‌شود که نوع و مشخصات آنها به اهداف تزریق و ویژگی‌های خاک یا سنگ تحت تزریق بستگی دارد. این مواد شامل سیمان و آب همراه با مواد افزودنی، مخلوط‌های شیمیایی، ملات پلاستیک، رزین‌ها و فوم‌های مصنوعی و غیره هستند. مخلوط سیمان و آب به صورت غلیظ و رقیق در سنگ‌های درزه و شکاف‌دار در مقیاس کوچک تزریق می‌شود. محلول‌های شیمیایی در محیط‌هایی که به دلایلی امکان استفاده از مخلوط‌های سیمان وجود ندارد مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای پر کردن و بستن شکاف‌ها و حفره‌های بزرگ، از ملات‌های ماسه‌دار استفاده می‌شود. همچنین برای افزایش میزان نفوذپذیری مواد تزریقی می‌توان از رزین‌ها استفاده کرد. سیمان: ماده اصلی مخلوط دوغاب تزریق سیمان است که در انواع مختلف و خواص متفاوت وجود دارد. سیمان معمولی عموماً از اکسید کلسیم ($CaCO3$)، اکسید سولفور($SO3$)، اکسید منیزیم(MgO)، اکسید آهن ($Fe2O3$)، اکسید آلومینیوم($Al2O3$) و اکسید سیلیسیوم ($SiO2$) تشکیل شده است. مشخصات فیزیکی سیمان که در آزمایشگاه تعیین شده است و در انتخاب نوع سیمان مصرفی اهمیت زیادی دارد شامل ریزدانگی یا درصد دانه‌های بزرگتر از ۰،۰۹ میلی متر، جرم حجمی بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب، زمان گیرش و نیز مقاومت ۳، ۷ و ۲۸ روزه می‌باشد. سیمان باید در مقابل واکنش‌های مواد شیمیایی زیرزمینی مقاوم بوده و از نوع پرتلند تیپ ۲ باشد و با مشخصات انجمن آزمایش‌های مصالح آمریکا شماره(ASTM-C150) مطابقت داشته باشد. بیش از ۲ ٪ از سیمان نباید برروی الک شماره ۲۰۰ باقی بماند و سیمان باید عاری از هرگونه کلوخ باشد. ضریب ریزدانگی (که به عدد بلین معروف است) برای تزریق آب‌بندی و سایر تزریقات نباید حدوداً از ۲۸۰۰ سانتیمتر مربع بر گرم کمتر باشد. دمای سیمان مورد استفاده در ساخت دوغاب در هیچ زمانی نباید از ٤٥ درجه سانتیگراد بیشتر باشد.

آب: آب مورد استفاده برای دوغاب باید زلال، شفاف و عاری از هر گونه فضولات، روغن، اسید، مواد قلیایی، نمک‌های محلول، لای، مواد آلی، گچ، سولفورها و دیگر ناخالصی‌ها باشد. آب مصرفی باید فاقد رنگ، بو و مزه خاصی بوده و دمای آن هنگام اختلاط باید بین ۵ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد باشد. ویژگی‌های شیمیایی آب باید منطبق بر استاندارد شماره D-1193 و از نوع III یا IV باشد. علاوه بر این می‌توان ویژگی‌های آب را با استاندارد AASHTO-T26 و(ASTM D512-12, 2021) نیز کنترل نمود. PH آب در محدوده ۵ تا ۸ بوده و غلظت ناخالصی‌ها یا املاح موجود در آن مطابق حدود استانداردهای زیر تعیین شده است. استانداردهای مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از سولفات‌ها ASTM D514، کلریدها ASTM D512، قلیائی‌ها ASTM D1067، مواد محلول ASTM D1881، ذرات جامد معلق (ASTM D514, 1996; ASTM International, 2012; James, C. Ni. and Wen-Chieh, Ch., 2009; -Kikuchi ET AL., 1997; Kolymbas., 2005; Leca, and New., 2007; Nonveiller., 1989)ASTM D1888. ماسه: از ماسه به عنوان یک پرکننده برای کاهش مصرف سیمان، پایداری و گرانروی مخلوط دوغاب در تزریق درزه و شکاف‌های بزرگ مورد استفاده می‌گیرد. توزیع دانه‌بندی و حداکثرابعاد دانه‌ها با توجه به اندازه شکاف‌ها، پمپ تزریق، لوله و اتصالات و دیگر تجهیزات تزریق انتخاب می‌شود. ماسه مورد نیاز عملیات باید خشک و از ناخالصی‌های آلی، کلوخه‌های رس یا مواد خارجی غیر قابل قبول عاری باشد و با مشخصات شن و ماسه بتن مندرج در ASTM-C33 (Pellegrino, 1999) منطبق باشد. به طور کلی دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در تزریق باید منطبق بر جدول (۳) باشد نسبت اختلاط ماسه با سیمان می‌تواند تا ۲ برابر وزن سیمان افزایش یابد (عموماً ۱۰ درصد وزن سیمان). استفاده از ماسه در تزریقات تحکیمی در مناطقی با درزه‌های باز و خورند بالا مورد استفاده قرارمی‌گیرد. مواد افزودنی: جهت افزایش روانی و همچنین پایداری دوغاب مورد استفاده در تزریق لازم است از مواد روان‌کننده‌ای که به همین منظور در دسترس می‌باشد، استفاده شود.

در این راستا بنتونیت و روان کننده‌های مناسب مانند سیکامنت، رئوبیلد، ملکریت، ویسکوکریت، روان‌کننده‌های بر پایه نفتالین و افزودنی‌های زودگیر، دیرگیر، کاهنده آب یا حباب ساز نیز در صورت قابل دسترس بودن، شرایط اجرایی می‌توانند مطابق طرح مورد استفاده قرار گیرند. مواد

روان‌کننده باید دور از انجماد و تابش شدید آفتاب نگهداری شوند. همچنین در صورت برخورد با ناحیه‌های کارستی و زون‌های خرد شده از زودگیرها و ماسه نیز استفاده خواهد شد. برخی از مواد افزودنی سرعت ژله‌شدگی مخلوط دوغاب تزریق را افزایش داده و پایداری دوغاب تزریق شده را در درزه و شکاف‌هایی که ممکن است دارای آب باشند، بهبود می‌بخشند. البته این به این معنی نیست که زمان رسیدن به مقاومت نهایی دوغاب سیمان کاهش می‌یابد، بلکه تنها سرعت ژله شدگی در مراحل اولیه تزریق افزایش می‌یابد. در حال حاضر استفاده از مواد افزودنی در تونل‌های دوقلوی پونه در دستور کار قرار ندارد. طرح اختلاط دوغاب: انتخاب طرح اختلاط مناسب به مشخصات توده سنگ منطقه و اهداف تعیین شده در عملیات تزریق بستگی دارد. برای کاهش نفوذپذیری و تغییر شکل توده سنگ‌های درزه‌دار، مناسب‌ترین طرح اختلاط، استفاده از دوغاب سیمان با نسبت‌های مختلف آب به سیمان است. برای تزریق درزه و شکاف‌های عریض، استفاده از دوغاب سیمان همراه با پرکننده‌هایی نظیر ماسه با نسبت‌های وزنی معین توصیه می‌گردد. مهم‌ترین عامل در انتخاب طرح اختلاط مناسب، تعیین نسبت وزنی آب به سیمان (W/C) است. هرچه این نسبت بزرگ‌تر انتخاب شود، میزان نفوذپذیری دوغاب تزریقی افزایش یافته و در عوض مقاومت و پایداری دوغاب کاهش می‌یابد و برعکس. به عنوان یک قانون کلی در شروع عملیات تزریق نباید مخلوط دوغاب رقیق‌تر از۳W/۱C (سه نسبت آب به یک نسبت سیمان) انتخاب شود. در اکثر موارد مخلوط‌های دوغاب با غلظت۲W/۱C یا غلیظ‌تر با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است.

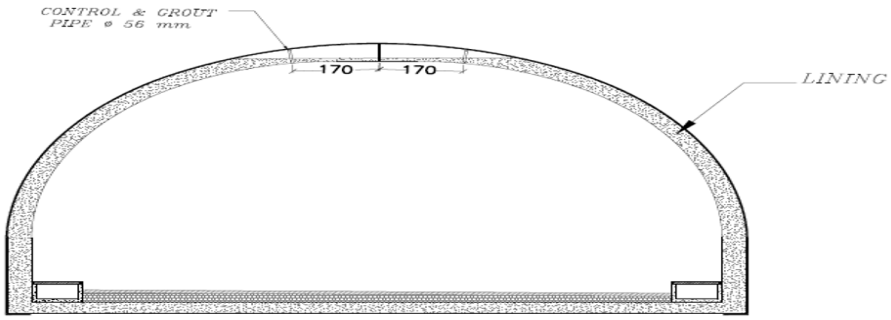
جدول ۳. دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در تزریق

درصد وزنی مصالح عبور کرده (٪)	سایز سرند (میکرون)
۱۰۰	۲۳۶۰
۹۵-۱۰۰	۱۱۸۰
۶۰-۸۵	۶۰۰
۳۰-۵۰	۳۰۰
۱۰-۳۰	۱۵۰
۰-۵	۷۵

مشخصات تزریق

حفاری گمانه‌های تزریق در مناطق فاقد عایق: مطابق با مشخصات فنی روش حفاری و با توجه به نوع زمین و شرایط زمین‌شناسی قطر مورد نیاز چال انتخاب می‌شود. برای حفاری چال‌های تزریق بسته به شرایط از دو روش دورانی‌ضربه‌ای و دورانی استفاده خواهد شد و قطر حفاری ۵۱-۵۶ میلیمتر خواهد بود. با اتمام عملیات حفاری، چال با آب شستشو می‌شود تا خرده‌سنگ‌های حفاری از درون چال به بیرون منتقل شوند. اتمام شستشوی چال، با خارج شدن آب تمیز (شفاف و زلال) همراه خواهد بود. آرایش چال‌های تزریق: در مناطق بدون لتیس آرایش چال‌های تزریق به این صورت است که در هر پارت بتن ریزی ۱۰ متری ۳ ردیف لوله PVC یا PE که هر ردیف شامل ۳ لوله می‌باشد به گونه‌ای که یک لوله در آکس و دو لوله دیگر در همان راستا به فاصله ۱,۷ متری در طرفین آکس نصب می‌گردد و رینگ‌های کناری با فاصله داری حدوداً ۱,۵ متری از لبه پارت و رینگ سوم در میانه پارت جانمائی می‌گردد. برای بازکردن لوله‌های جانمایی شده در لاینینگ از دستگاه جامبودریل می‌شود. طول چال‌های تزریق در این مناطق به اندازه ضخامت بتن بعلاوه ۰,۵ متر در سنگ به منظور تزریق بهینه و کاهش میزان بلدینگ دوغاب و پرشدن مناسب مقطع در نظر گرفته شده است. آرایش چال‌های تزریق در مناطق دارای لتیس بدین صورت است که در هر پارت بتن ریزی ۱۰ متری سه ردیف چال حفاری می‌شود به گونه‌ای که یک لوله در آکس و دو لوله دیگر در همان راستا به فاصله ۱,۷ متری در طرفین آکس نصب می‌شود. رینگ‌های کناری با فاصله داری حدوداً ۱,۵ متر از لبه پارت و رینگ سوم در میانه پارت جانمایی می‌گردد و حفاری توسط جامبودریل انجام خواهد شد. طول چال‌های تزریق در این مناطق حداقل ۰,۷۵ متر (به گونه‌ای که حفاری از لاینینگ عبور کرده و منطقه بین لتیس و لاینینگ را شامل شود) می‌باشد. در شکل (۹) آرایش چال‌های تزریق تماسی نشان داده شده است. طرح اختلاط دوغاب سیمان و آب به نسبت ۱:۱ فشار چال‌های تزریق تماسی بایستی ۷-۲ بار باشد. یعنی تا رسیدن به فشار مذکور، تزریق در گمانه ادامه دارد. ابتدا چال‌های

کناری تزریق و سپس چال سقف تزریق گردد. زمان خاتمه تزریق در صورتی می‌باشد که مقدار تزریق از ۱۰ لیتر در ۱۰ دقیقه در فشار فوق‌الذکر کمتر گردد. حفاری و نصب شیرهای تزریق: در صورت قرارگیری موقعیت هر یک از گمانه‌ها در محل سازه‌های بتنی در مناطق فاقد عایق (داخل گالری‌ها، تونل‌ها و غیره) پیش از انجام بتن‌ریزی به منظور اجتناب از حفاری در بتن و جلوگیری از قطع شبکه آرماتور باید لوله‌هایی با مسدود کننده‌های موقت تعبیه گردد. لوله‌های مذکور که در داخل پوشش بتنی قرار می‌گیرند معمولاً از جنس فولاد ضد زنگ یا لوله‌های PVC یا PE تا قطر ۳ اینچ می‌باشند و در تونل پونه از لوله‌های PVC و PE با قطر ۵۶ تا ۶۳ میلی‌متر استفاده خواهد شد. لوله‌های مذکور باید به گونه‌ای نصب شوند که دوغاب به راحتی از آن عبور نموده و فضاهای خالی مابین سطوح سنگی و پوشش بتنی را پر نماید. دهانه لوله‌ها باید بوسیله سرپوش یا وسیله حفاظتی دیگر پوشیده شود تا یافتن گمانه‌ها بعد از بازکردن قالب‌ها به آسانی صورت پذیرد. همچنین حفاری چال‌ها بوسیله دستگاه حفاری و به روش دورانی و یا دورانی- ضربه‌ای انجام می‌شود و طول حفاری ۵۰ سانتی‌متر در سنگ ادامه می‌یابد. قطر حفاری چال‌ها ۵۱-۵۶ میلیمتر خواهد بود. پس از حفاری چال‌ها به منظور تزریق از مسدودکننده مکانیکی در تزریقات تحکیمی یا مسدود کننده گچ و سیمان در تزریقات تماسی به منظور اتصال به لوله تزریق استفاده می‌شود. در مناطق عایق دار شیلنگ‌های تزریق تماسی و واتراستاپ توسط کوپلینگ به لوله‌های تزریق پمپ متصل می‌شود.



شکل ۹. آرایش چال‌های تزریق تماسی

٤- دستگاه‌ها و تجهیزات حفاری و تزریق

تجهیزات حفاری: تجهیزات حفاری عبارتند از: قطعات و متعلقات دستگاه حفاری شامل سرمته، بغل تراش، راد حفاری، پایدارکننده، واحد تأمین نیروی محرک و غیره که با توجه به نوع حفاری و اهداف تعیین شده عملیات حفاری انتخاب می شوند. برای حفاری گمانه‌های تزریق، می‌بایست از دستگاه‌های حفاری دورانی یا دورانی- ضربه‌ای استفاده نمود که خارج نمودن ذرات حفاری شده از چال به کمک آب باشد. با توجه به نحوه خروج ذرات حفاری از چال‌ها (به کمک آب)، این ذرات به دیواره گمانه نچسبیده و درزه‌های سنگ در دیواره چال مسدود نخواهند شد و عمل تزریق به خوبی انجام می‌گیرد. با توجه به قطر ۵۱-۵۶ میلیمتری چال‌های تزریق، دستگاه انتخابی باید توانایی حفر این قطر چال را داشته باشد. همچنین امکان حفاری در شیب‌های مختلف به کمک این دستگاه وجود داشته باشد. دستگاه انتخابی می‌بایست سبک باشد تا امکان تخریب بتن کف تونل کم شده و انتقال آن به راحتی از یک برم به برم دیگر صورت گیرد. نمونه‌ای از دستگاه حفاری دورانی برای عملیات تزریق در شکل(۱۰) نشان داده شده است.

تجهیزات تزریق: برای تزریق گمانه‌های حفاری شده، از پمپ‌های تزریق و نیز تجهیزات عملیات تزریق شامل پکر (مکانیکی یا گچ و سیمان) در مناطق فاقد عایق، فشارشکن، لوله‌ها و شیلنگ‌های تزریق و غیره استفاده می‌شود. پکرها با ابعاد مختلف به منظور آب‌بند کردن قطعه مورد تزریق در گمانه‌های حفاری شده مورد استفاده قرار می‌گیرند شکل (۱۱). عموماً در تزریقات تماسی و تحکیمی به دلیل سرعت بالا از گچ و سیمان به عنوان مسدود کننده تا فشار ۱۰ بار استفاده شده و در تونل به دلیل سهولت و سرعت بالا حتی‌المقدور از این روش استفاده می‌گردد.

شکل ۱۰. دستگاه حفاری مدادی

شکل ۱۱. پکر مورد استفاده در پروژه

پمپ تزریق مورد استفاده از پمپ‌های شرکت اطلس کوپکو و مدل ZBE100 و ITP است. این پمپ تزریق دارای یک پیستون دو طرفه است که هم در حالت رفت و هم در حالت برگشت، دوغاب را با فشار تزریق می‌کند، رفت و برگشت پیستون به وسیله چشم الکتریکی و هیدرولیک انجام می‌گردد. دبی پمپ در یک رفت و برگشت پیستون بین ۱/۸ تا ۲ لیتر می‌باشد. این نوع پمپ‌ها، قادر به تزریق تا فشار حداکثر ۱۰۰ بار و دانه‌هایی تا بزرگی ۵ میلی‌متر می‌باشند. قدرت نوسان پمپ تزریق حدوداً نباید از۲ بار بیشتر باشد. بدین منظور نصب مانومتر بر روی پمپ ضروری است، لازم به ذکر است فاصله استقرار پمپ تزریق تا گمانه حداکثر ۵۰ متر است. برای انجام بهینه عملیات تزریق، ضروری است مواد اولیه مخلوط دوغاب شامل سیمان، آب، روان‌کننده یا زودگیر و سایر مواد افزودنی به صورت صحیح و با ترتیب معین مخلوط شوند و در نهایت مخلوط دوغاب همگن شده به پمپ تزریق انتقال یابد برای این منظور از ایستگاه اولیه دوغاب سازی (بچینگ) که مجهز به میکسرها، همزن‌ها همانند تجهیزات توزین، سیلوی ارتباطی، تجهیزات انتقال دوغاب و سایر تجهیزات اختلاط دوغاب هستند، استفاده می‌شود اما به دلیل طول زیاد تونل‌ها (هر کدام حدود ۳۱۰۰ متر) امکان استفاده از سانترال و یونیت به جهت گرفتگی لوله‌های انتقال دوغاب وجود ندارد و ساخت دوغاب به صورت دستی یا توسط بچینگ انجام شده و با تراک میکسر به محل تزریق رسانده می‌شود. در شکل (۱۲) ماشین آلات و تجهیزات مورد استفاده در عملیات تزریق نشان داده شده است.

شکل ۱۲. ماشین آلات و تجهیزات مورد استفاده در عملیات تزریق

تزریق

پس از برپاداری دستگاه تزریق، با اتصال لوله شیلنگ تزریق به لوله‌های نصب شده تزریق آغاز می‌شود. تزریق با دبی پایین شروع شده و فشار آن با توجه به میزان خورند کنترل می‌شود. در هر زمان بایستی از بروز فشارهای بالا در مقدار خورند بالا اجتناب کرد چرا که انرژی بالای وارد شده به توده سنگ در این شرایط منجر به پدیده شکست هیدرولیکی خواهد شد. در کلیه مراحل تزریق و تحت هیچ شرایطی نباید فشار پمپ را به طور ناگهانی افزایش داد، بلکه افزایش فشار تزریق همواره تدریجی خواهد بود. در این حالت اگر تزریق ادامه یابد بایستی زمانی که یکی از شرایط و معیارهای خاتمه تزریق حاصل شود، تزریق خاتمه یابد. در زمان انجام تزریق باید به نکات زیر توجه شود: هیچگونه عملیات تزریق بلافاصله بعد از بتن ریزی صورت نمی‌گیرد مگرآنکه حداقل مدت ۲۸ روز از زمان بتن‌ریزی گذشته باشد. دمای بهینه دوغاب ساخته شده با هر طرح اختلاطی بین ۲۵ تا ۳۰ درجه سا نتی‌گراد می‌باشد. استفاده از دوغاب‌های ساخته شده با دمای کمتر از ۲۵ درجه تا دمای ۵ درجه سانتی‌گراد نیز مجاز خواهد بود. تحت هیچ شرایطی نباید فشار پمپ تزریق به طور ناگهانی افزایش داده شود، بلکه افزایش فشار تزریق همواره تدریجی خواهد بود.

۵- نتیجه‌گیری

یکی از عواملی که به منظور کنترل کیفیت تزریقات تماسی و تحکیمی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، میزان خورند در توالی گمانه‌های تزریق شده است. کاهش میزان خورند از گمانه‌های اولیه تا گمانه‌های ثانویه نشان دهنده موفقیت آمیز بودن عملیات تزریق است (بیانگر پرشدن کامل فضاهای خالی بین بتن و سنگ و نیز خلل و فرج سنگ در تزریق گمانه های اولیه است). دمای بهینه دوغاب ساخته شده با هر طرح اختلاطی بین ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. طرح اختلاط مخلوط‌های دوغاب با غلظتW/۱C۲ یا غلیظ‌تر با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است. برای حفاری چال‌های تزریق بسته به شرایط از دو روش دورانی‌ضربه‌ای و دورانی استفاده خواهد شد و قطر حفاری ۵۱-۵۶ میلی‌متر خواهد بود. طرح اختلاط دوغاب سیمان و آب به نسبت ۱:۱ فشار چال‌های تزریق تماسی بایستی ۷-۲ بار باشد. یعنی تا رسیدن به فشار مذکور، تزریق در گمانه ادامه دارد. ابتدا چال‌های کناری تزریق و سپس چال سقف تزریق گردد. زمان خاتمه تزریق در صورتی می‌باشد که مقدار تزریق از ۱۰ لیتر در ۱۰ دقیقه در فشار فوق‌الذکر کمتر گردد. مجموعه‌ای از عوامل فوق باعث افزایش راندمان و آب‌بندی نسبتاً موفق تونل شده است.

٦- مراجع

-معروف، م. ع.، (۱۳۹۲)،"کاهش نشست زمین ناشی از حفاری تونل در زمین‌های نرم با تزریق، (مطالعه موردی: ساختمان گردشگری مشهد)"، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان.

-مسعودی، م.، (۱۳۸۸)، "ارزیابی، تحلیل و مدلسازی فرآیند تزریق دوغاب سیمانی در ارتباط با ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی ژئوتکنیکی پی‌های سنگی در سدها"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

-مجدی ع.، (۱۳۸۷)، "مبانی کاربرد تزریق در سنگ‌های درزه‌دار در تونل‌ها"، وزارت راه و شهرسازی، پژوهشکده حمل و نقل.

-AASHTO- T26 , (1997), "Standard Method of Test for Quality of Water to Be Used in Concrete".

-Aksoy, C. O., (2007), "Chemical injection application at tunnel service shaft to prevent ground settlement induced by groundwater drainage: A case study, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences", Vol. 45, pp. 376–383.

-ASTM C150 / C150M-21, (2021), "Standard Specification for Portland Cement", ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

-ASTM C33 / C33M-18, (2018), "Standard Specification for Concrete Aggregates", ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

-ASTM D1067-16, (2016), "Standard Test Methods for Acidity or Alkalinity of Water", ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

-ASTM D1881-17, (2017), "Standard Test Method for Foaming Tendencies of Engine Coolants in Glassware", ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

-ASTM D1888, (1989), "Methods of Test for Particulate and Dissolved Matter in Water".

-ASTM D512-12, (2021), "Standard Test Methods for Chloride Ion in Water".

-ASTM D514, (1996), "Test Method for Hydroxide Ion in Water".

-ASTM International, (2012), "West Conshohocken", PA., www.astm.org.

-James, C. Ni. and Wen-Chieh, Ch., (2009), "Grout Efficiency of Lifting Structure in Soft Clay", International Conference on Challenges and Recent Advance in Transportation Geotechnics, China.

-Kikuchi K., Igari T., Mito Y., Utsuki S., (1997), "In situ experimental studies on improvement of rock masses by grouting treatment", Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. Vol. 34, pp.134-138.

-Kolymbas, D., (2005), "Tunneling and Tunnel Mechanics, A Rational Approach to Tunneling", Springer, Berlin, pp. 159-170.

-Leca, E. and New, B., (2007), "Settlements induced by tunneling in soft ground", Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 22, pp. 119–149.

-Nonveiller, E., (1989), "Grouting in Theory and Practice", Elsevier Pub.

-Pellegrino, G., (1999), "Soil Improvement Technologies for Tunneling: Selected Case Histories, Geotechnical Seminar State-of-the-Art Technology in Earth and Rock Tunneling", New York, NY.

-Vahed Ghiasi, Vahid Mozafari, Seismic response of buried pipes to microtunnelling method under earthquake loads, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 113, 2018, pp.193-201, ISSN 0267-7261.
https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.05.020

-Ghiasi, V., Ghiasi, S., & Prasad, A., (2012), "Evaluation of tunnels under squeezing rock condition", Journal of Engineering, Design and Technology.
DOI: 10.1108/17260531211241167.

-Ghiasi, V., Koushki, M., (2020), "Numerical and artificial neural network analyses of ground surface settlement of tunnel in saturated soil", SN Appl. Sci. 2, 939.
https://doi.org/10.1007/s42452-020-2742-z

-Ghiasi, V., Ghiasi, S., Omar, H., Ebrahimi, B., & Ghiasi, M. (2010, March), "A review of metro tunnel safety parameters and role of risk management, Tehran Metro", In Fourth International Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt is Main, Germany, pp. 511-515.

-Vahed, G., Husaini, O., Jamal, R., Zainuddin, B. M. Y., Samad, G., Bujang, K. H., & Ratnasamy, M., (2011), "Geotechnical and geological studies of NWCT tunnel in Iran focusing on the stabilization analysis and design of support: A case study", Scientific

-Ghiasi, V., & Valirasti, S., (2021), "A review of stress distribution in circular tunnels", Road, 29(107), pp.113-134. Doi: 10.22034/road.2021.211545.1879.

-Ghiasi, V., Koushki, M., (2021), "Numerical investigation of ground surface settlement due to circular tunneling influenced by variations of geometric characteristics of tunnel and mechanical properties of saturated soil and its prediction in the artificial neural network", Journal of Modeling in Engineering, 19(64), pp.27-39.
Doi: 10.22075/jme.2019.18022.1735

-Ghiasi Vahed, Omar Husaini, Kazemian Sina, Ghiasi Samad, Muni Ratnasamy, Baharv Moharam, Ghavamoddin Hosaini Seyed, Souri Morteza, Prasad Arun, b Md Yusoff Zainuddin, Safaei MehrdadScientific Research and Essays Vol. 6(9), pp. 1940-1956.
http://www.academicjournals.org/SRE.
DOI: 10.5897/SRE10.749 ISSN 1992-2248 2011 Academic Journals.

Research and Essays, 6(1), pp.79-97. DOI: 10.5897/SRE10.704.

-Ghiasi, V., Smaeili, K., Arzjani, D., (2021), "Pile- Tunnel Interaction in Subway Tunnels under Seismic Loads", Journal of Civil and Environmental Engineering, 51.3(104), pp.149-157.
Doi: 10.22034/jcee.2020.9813.

-Ghiasi, V., & Omar, H., (2011), "Analysis of shotcrete lining of underground tunnels", Pertanika Journal of Science & Technology, 19(2), pp.249-257.
ISSN: 0128-7680.

-Ghiasi, V., Omar, H., Huat, B. B. K., Muniandi, R., & Zainuddin, B., (2011), "Risk management overview of tunnels using numerical modeling", Journal of Engineering, Design and Technology, 9(1), 110-124. Emerald Group Publishing Limited 1726-0531.
DOI 10.1108/17260531111121495.

-Ghiasi, V., Jalalvand, A., & Saeidijam, S. (2014), "Diaphragm Wall-Tunnel Interaction in Saturated Soil", The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 19.

-Ghiasi, Vahed et al., Non-Destructive Tests for Evaluation of a Concrete Tunnel Structures", EACEF - International Conference of Civil Engineering, [S.l.], v. 1, p. 272-278, aug. 2011. Available at: <http://proceeding.eacef.com/ojs/index.php/EACEF/article/view/194>. Date accessed: 04 Oct. 2022.

Optimization of the Injection Process in the Twin Tunnels of Pooneh

Vahed Ghiasi, Assistant Professor, Department of Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.

Shahab Karimi, M.Sc., Student, Geotechnical Engineering, Faculty of Civil and Architectural Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.

E-mail: v.ghiasi@malayeru.ac.ir

Received: July 2022- Accepted: November 2022

ABSTRACT

Injection is a method by which the injection material is injected into pores, joints and cracks or cavities of rock and soil formations and improves the characteristics of the formations, so the permeability of the layers is low, resistance layers increase and their ductility decreases. Pooneh twin tunnels in the Arak-Khorramabad freeway have been weakened due to being under the groundwater level or due to explosions to dig the tunnels, which resulted in problems of water penetration into the body of the tunnel. In this paper, the optimization of the injection process in the Pooneh twin tunnel project has been studied. In this project, by using contact and consolidation injection methods in the injection holes and optimizing the slurry mixing plan, water penetration into the tunnel is prevented so that parts of the body and crown of the tunnel are sealed.

Keywords: Consolidation Injection, Contact Injection, Slurry Mixing, Injection Pressure