فصلنامه علمی جاده، سال بیست و سوم، دوره اول، شماره ۱۱۸، بهار ۱۴۰۳

بهسازی خاک‌های آبرفتی با استفاده از روش تزریق سیمان

مقاله علمی – پژوهشی

واحد قیاسی *، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ایران
ستار اسکندری، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: v. ghiasi@malayeru.ac

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۰– پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵
صفحه ۲۳۲-۲۰۹

چکیده

بهسازی خاک به روش تزریق دوغاب سیمان یکی از روش‌های اصلاح خواص محل اجرای پروژه‌های عمرانی یا سازه‌های موجود است. برای بهبود چنین شرایطی، تعدادی از تکنیک‌های تثبیت برای استفاده در دسترس هستند، از جمله راه های تثبیت خاک تراکم، تحکیم، تثبیت مکانیکی و تزریق سیمان به خاک است. تزریق، اغلب با پر کردن حفره‌ها و شکستگی‌های درون زمین توسط دوغاب یا ملات سیمانی انجام می‌شود. باوجود اصول تقریباً مشابه، روش‌های تزریق دارای تجهیزات و فرآیندهای اجرایی متفاوت هستند. هر یک ازاین‌روش‌ها از ویژگی‌های و مزیت‌های مختص به خود بهره می‌برند به دلیل ظرفیت باربری نامطلوب، انقباض، متورم شدن، نشست و دوام می‌توان از یکی روش‌های مذکور استفاده شود. در این پژوهش مروری بر روش های بهساری خاک های آبرفتی با استفاده از روش تزریق سیمان پرداخته شده است. پس از بررسی نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان دریافت سه فاکتور اصلی درصد سیمان، مدت‌زمان گیرش (سن نمونه) و درصد خاک‌های درشت‌دانه نقش بسیار مؤثر و کنترل‌کننده در مقاومت نمونه‌های خاک - سیمان داشته است، اما تأثیر سه عامل مذکور در افزایش مقاومتی یکسان نیست نتایج حاصل از چنین آزمایش‌ها می‌تواند پایه‌ای برای کنترل کیفی تزریق‌های سیمانی در محیط‌های متخلخل، به‌ویژه در رسوبات آبرفتی درشت‌دانه و نیز سنگ‌های درزه‌دار و خردشده مورداستفاده قرار گیرد. مقاومت رسوبات آبرفتی درشت‌دانه با پتانسیل ریزش را می‌توان، در زمان حفر تونل و یا پس از آن، با افزودن حداقل مقدار درصد سیمان تزریقی به مقاومت مطلوب و یا به مقاومت طراحی رساند که ازنظر توجیه فنی و اقتصادی پروژه‌های تزریق حائز اهمیت است.

واژه‌های کلیدی: بهسازی خاک، خاک آبرفتی، تزریق، دوغاب سیمان

۱-مقدمه

پیشرفت‌های تکنولوژیکی اخیر به روش های موفقی برای تثبیت اقشار ناپایدار منجر شده است. این کار با حذف آب از حفاری‌ها با استفاده از دوغاب گل در اطراف لوله‌ها انجام می‌شود. در طی فرآیندهای هل دادن، دوغاب گل به‌صورت و به ناحیه بیش‌ازحد برش که بین لوله بتنی و خاک است، تزریق می‌شود. پس‌ازاینکه دوغاب فضاهای خالی خاک را پر کرد، در اثر فشار دوغاب، خاک تثبیت می‌شود. پس از پایان فرآیند راندن و هل دادن، تزریق دوغاب شیمیایی به خاک اطراف انجام می شود تا پایداری دائمی خاک اطراف تونل حفظ شود. بااین‌حال، رفتار مواد تزریق شیمیایی در خاک اطراف تونل و میزان تزریق بهینه هنوز به‌وضوح درک نشده است. (Ghiasi and Farzan, 2019, Ghiasi and Kushki, 2020, Ghiasi *et al*, 2021, Rahimpour *et al*, 2023,Jafarzadeh Marandi et al, 2023) شیمادا و همکاران، ۲۰۰۶) بهسازی خاک یا به‌طور دقیق‌تر بهسازی زمین فرآیندی است که به منظور اصلاح خواص خاک و سنگ در پروژه‌های عمرانی انجام می‌شود. طی این فرآیند، پارامترهای ژئومکانیکی زمین نظیر ظرفیت باربری، نفوذپذیری، تراکم پذیری و دیگر پارامترهای مؤثر بر عملکرد سازه در طول عمر سرویس‌دهی

آن، با توجه به الزامات پروژه افزایش یا کاهش می یابند. روش های بهسازی خاک در مقایسه با گزینه‌های دیگری مانند جایگزینی خاک ضعیف (عملیات خاکی) و طراحی مجدد براساس شرایط موجود از انعطاف‌پذیری بالاتر و هزینه پایین‌تری بهره می‌برند. به‌طورکلی، قدیمی‌ترین و متداول‌ترین کاربرد این روش‌ها در بهبود مشخصات خاک مورداستفاده برای فونداسیون سازه ها، بستر راه و مصالح ساختمانی است. در این پژوهش ضمن بیان تکنیک کلی تزریق، مراحل و شرایط کامل یک پروژه تزریق را از ابتدا تا مرحله عمل بازگو کرده، بعلاوه سعی خواهد شد تا امکانات و فن‌های تزریق در رسوبات آبرفتی را که در مقایسه با تزریق در سنگ که یک تکنیک بهسازی شناخته شده‌ای است شرح داده شود که در دو دهه اخیر به‌طور چشمگیری توسعه‌یافته و به‌جرئت می‌توان گفت که تزریق می تواند به عنوان تنها راه‌حل مناسب و اصولی برای فندانسیون‌های غیرمعمول باشد. (Ghiasi and Najafi, 2022, Ghiasi et al., 2023, Ghiasi and Mostafaeifar, 2023, Ghiasi and Molaei, 2023, Ghiasi and Nazhdghorbani,2022,هوانگ و ونگ، ۲۰۱۵؛ بهارالدین و همکاران، ۲۰۱۳)

در بسیاری از کشورها، مناطق وسیعی از سطح زمین توسط خاک‌های نرم (مانند آبرفت و پیت) پوشیده شده است. به دلیل ظرفیت باربری نامطلوب، انقباض، متورم شدن، نشست و دوام، این موارد می توانند مشکل ساز شوند. برای بهبود چنین شرایطی، تعدادی از تکنیک‌های تثبیت برای استفاده در دسترس هستند، ازجمله تراکم، تحکیم، تثبیت مکانیکی و تزریق سیمان به خاک است. در این پژوهش نظر بر آن است تا به بررسی مروری پیرامون مطالعات و روش‌های بهسازی خاک‌های آبرفتی با استفاده از روس تزریق سیمان پرداخته شود.

۲- پیشینه تحقیق

در این بخش به مرور و بررسی پژوهش های صورت گرفته در زمینه بهسازی خاک‌های آبرفتی با استفاده از روش تزریق سیمان پرداخته شده است.

مقدمه‌ای بر تزریق آبرفتی

ازآنجایی‌که در حال حاضر دوغاب‌هایی در دسترس هستند که آبرفت‌های با ساختار متفاوت و در طیف وسیعی از دانه‌ها را متصل می‌کنند و تقویت می‌کنند، این فرآیند را می‌توان تقریباً برای هر مشکل مهندسی که تزریق مقرون به‌صرفه‌ترین راه‌حل ارائه می دهد، اعمال کرد. انتخاب سیالات تزریق در هر مورد خاص به ویژگی های اساسی آن‌ها بستگی دارد که در زیر ذکرشده است. (اسکی و گلاسب، ۱۹۶۲ و حائری و همکاران، ۱۳۸۱ و ۱۳۸۳)

پایداری

دوغاب باید در فرآیند اختلاط و تزریق پایدار بماند، یعنی اگر سوسپانسیون است نباید رسوب زودرس داشته باشد و اگر مایع است، گیرش زودرس نداشته باشد.

اندازه ذرات

در یک سوسپانسیون، اندازه ذرات حد پایین‌تری را برای اندازه دانه خاک تعیین می‌کند که بتواند به آن نفوذ کند.

ویسکوزیته

ویسکوزیته اندازه‌گیری درجه نفوذ گروت در خاک‌های مشابه است. سایر خواص جریان (ضمیمه U) و زمان ژل شدن، حداکثر مقدار شعاع تزریق را تعیین می‌کند.

استحکام

این استحکام در هنگام گیرش است (مقاومت ژل) که اهمیت آن به تقویت یا آب‌بندی خاک بستگی دارد. در هر صورت باید آن‌قدر بالا باشد که در برابر هرگونه تمایل به خزش مقاومت کند.

ماندگاری

دوغاب پس از گیرش باید در برابر حمله شیمیایی و فرسایش آب‌های زیرزمینی مقاومت کند.

انواع دوغاب برای درمان رسوبات آبرفتی

موارد زیر انواع اصلی دوغ آب‌های مورداستفاده در حال حاضر برای درمان رسوبات آبرفتی است.

دوغ آب‌های رسی-سیمانی

از این نوع در درمان آبرفت‌های درشت استفاده می‌شود. آن‌ها با افزودن سیمان پرتلند به دوغاب رسی ساخته می‌شوند که نسبت

سیمان به آب معمولاً ۰-٤ است. چنین مخلوط هایی دارای قدرت گیرش حدود ۲۵ کیلوگرم بر مربع هستند. سانتی متر و خواص آن ها، در یک محدوده نسبتاً گسترده، مستقل از نسبت خاک رس در مخلوط است. مقدار خاک رس اضافه شده به کیفیت آن، یعنی به اندازه ذرات و حد مایع آن بستگی دارد. درجاهایی که از خاک رس محلی با کیفیت پایین استفاده می شود، ممکن است با افزودن بنتونیت، سیلیکات سدیم یا دیگر معرف ها، آن را بهبود بخشد. چنین دوغاب در هنگام تزریق پایدار است، زیرا ذرات سیمان با وجود خاک رس از ته‌نشین شدن آن‌ها جلوگیری می‌کند تا زمانی که پدیده ته‌نشینی رخ دهد، درحالی‌که البته، بسیاری از آب موجود توسط هیدراته شدن جذب می‌شود. (مایر، ۱۹۵۸)

دوغ آب‌های خاک رس تثبیت‌شده

در تهیه این دوغاب‌ها از مواد افزودنی برای بررسی لخته سازی و تقویت استحکام ژل استفاده می‌شود. همه رس‌ها را می‌توان با چنین عملیاتی بهبود بخشید و ظرفیت آن‌ها برای نفوذ به خاک همیشه بیشتر از مخلوط رس و سیمان است. بنتونیت‌های با عیار بالا ممکن است در تزریق ماسه درشت تا متوسط استفاده شوند؛ اما ازآنجایی‌که استحکام ژل آن‌ها برای افزایش قابل ملاحظه استحکام خاک کافی نیست، معمولاً فقط برای آب بندی و کاهش نفوذپذیری استفاده می‌شود. (Ghiasi and Tavagho, 2022, Ghiasi and Kamalabadi, 2022,مایر، ۱۹۵۸)

دوغاب قیری

دوغاب قیری دو نوع هستند. اولی شامل دوغاب قیر است که بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ درجه سانتی گراد گرم شده است. استفاده از چنین دوغاب بسیار دشوار است و ممکن است شامل پیش‌گرم کردن خاک مورد درمان باشد. روش دوم استفاده از دوغاب امولسیون قیر است. تجزیه امولسیون در خاک را می توان با افزودن یک استر آلی یا با استفاده از یک رزین مصنوعی به دست آورد. (Jamshidi et al, 2022اسکی و گلاسب، ۱۹۶۲)

گروت بر پایه سیلیکات سدیم

تنوع زیادی از این نوع دوغاب ها وجود دارد، برخی عمدتاً برای آب‌بندی خاک‌های شنی و برخی دیگر برای افزایش قابل‌توجهی در استحکام خاک تیمار شده استفاده می شوند. در سال های اخیر تحقیقات زیادی روی گروه اول انجام‌شده است تا مخلوط هایی را پیدا کنند که زمان گیرش را می توان کنترل کرد. همه آن‌ها مبتنی هستند. روی مخلوط های سیلیکات سدیم با معرف هایی مانند دوغاب آهک، بی‌کربنات سودا، سولفات مس و نمک‌های مختلف آلومینیوم. استحکام ژل کم است و افزایش محسوسی در استحکام زمین ایجاد نمی‌کند. اخیراً دوغ آب‌های سیلیکات ساخته‌شده‌اند که استحکام مواد تیمار شده را به‌شدت افزایش می‌دهند، به‌عنوان‌مثال، دوغاب مبتنی بر سیلیکات سدیم مخلوط شده با سیستمی از استرهای آلی که تکامل کنترل‌شده‌ای از یون‌های واکنش‌پذیر را به وجود می آورد. این در زمان مناسب منجر به رسوب ژل سیلیکا می شود. استحکام زمین به این روش به غلظت سیلیکات سدیم در دوغاب و استحکام حدود ۲۰ کیلوگرم بر مترمربع بستگی دارد. سانتی‌متر. می‌توان به دست آورد. (Ghiasi and Dashtifamili,2023,اسکی و گلاسب، ۱۹۶۲)

گروت‌های مبتنی بر پلیمرهای آلی

این نوع دوغاب‌ها شامل گروهی از مواد است که تک مولکول های آن‌ها، عموماً تحت تأثیر یک کاتالیزور، با هم متحد می‌شوند و مولکول‌های بزرگ‌تری را تشکیل می‌دهند که ممکن است اثر تبدیل یک ماده اولیه مایع به جامد را داشته باشد. این ویژگی نشان می دهد که پلیمرها ممکن است به‌عنوان دوغاب مورداستفاده قرار گیرند و درواقع چندین مورد در حال حاضر مورداستفاده قرار می‌گیرند و تعدادی دیگر در دست بررسی هستند. نمونه‌هایی از گروت‌های پلیمری آلی عبارت‌اند از: – ترکیبات غیراشباع، مانند آکریلات‌ها و مشتقات آن‌ها. فنل، رزورسینول و اوره، در محلول آبی. این مواد امولسیون پلی استرها و اپوکسیدها هستند که با تزریق تجزیه می شوند. درنهایت، آلژینات، پلیمر طبیعی، می‌تواند به‌عنوان دوغاب استفاده شود. برخی از این مواد دارای ویسکوزیته نزدیک به آب هستند و درنتیجه می‌توانند به خاک‌های ریزدانه نفوذ کنند. مشاهده خواهد شد که با چنین طیف وسیعی از مواد که ازنظر هزینه و مناسب بودن برای انواع مختلف خاک بسیار متفاوت است، یک آزمایشگاه بخش اساسی هر سازمانی است که با گروتیوگ مرتبط است، زیرا هر پروژه بزرگ مشکلات خاص خود را ایجاد می‌کند. (Ghiasi

and Sharififar,2023,Ghiasi and Zakavi, 2023, اسکی و گلاسب، ۱۹۶۲)

استفاده از تزریق آبرفتی در تونل

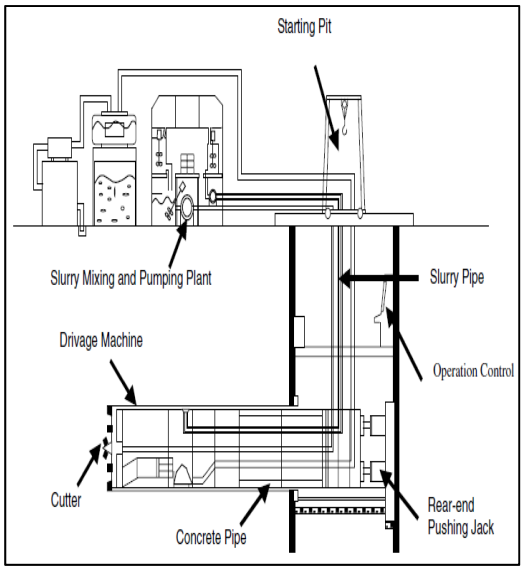
کاربرد تزریق آبرفتی احتمالاً با ارزش‌ترین کمک به عمل تونل زنی زمین نرم و اختراع سپر Greathead است. علاوه بر حمایت از زمین، اتلاف هوای فشرده را تا حد زیادی کاهش می دهد، خطر ضربه را به حداقل می‌رساند و جایگزین پاکت‌های رسی می‌شود که اگرچه مؤثر است، اما به استخراج کنندگان بسیار ماهر نیاز دارد که یافتن آن‌ها دشوار است. در بریتانیای کبیر، فرآیندهای Joosten و Guttman در ۲۵ سال گذشته در ساخت راه‌آهن‌های زیرزمینی به‌طور منظم مورداستفاده قرارگرفته‌اند، اما در حال حاضر تزریق یک سیال در این زمینه معرفی شده است و در هر سه خودروی بزرگ استفاده‌شده است. تونل‌هایی که از زمان جنگ در حال ساخت هستند. این‌ها تونل دارتفورد-پرفلیت در زیر رودخانه تیمز، تونل کلاید در غرب گلاسکو و تونل جدید بلک وال نیز در زیر رودخانه تیمز هستند. (کِل، ۱۹۵۷؛ انون، ۱۹۵۷؛ اسکی و گلاسب ۱۹۶۲)

تعمیرات سازه‌های زیرسطحی

پی‌های بتنی و بنایی روی خاک‌های آبرفتی ممکن است در معرض حمله سولفات‌های موجود در آب‌های زیرزمینی قرارگرفته و به شدت آسیب ببینند. در موارد دیگر، جریان آب زیرزمینی ممکن است ماسه ریز را از بین ببرد و درنتیجه حفره‌هایی ایجاد کند که یک سازه را به خطر می‌اندازد. این اتفاق در برخی از تونل‌های متروپولیتن راه‌آهن زیرزمینی پاریس رخ‌داده است. برای مثال، در پای تپه مون‌مارتر که بین سال‌های ۱۹۲۵ و ۱۹۳۰ ساخته شد، بین ایستگاه‌های استراسبورگ سنت دنیس و سنت مارتین، تونل‌ها در شن‌های شنی دره سن ساخته‌شده‌اند که با آب حاوی سولفات کلسیم در محلول اشباع‌شده است. از بسترهای گچ زیر تپه به‌دست‌آمده است. در زیر تونل‌ها، درست بالای یک بستر نفوذناپذیر، بستری از ماسه نسبتاً ریز وجود دارد که در طول زمان بخشی از آن شسته شده است. کارهای اصلاحی، علاوه بر تعمیر سنگ‌تراشی، شامل تزریق برای پر کردن و تحکیم زمین اطراف تونل بود. دوغ آب‌های مورداستفاده مطابق با طبیعت زمین بودند و از مخلوط‌هایی از سیمان مقاوم در برابر سولفات و خاک رس با خاک رس تثبیت‌شده یا با سیلیکاژل تشکیل‌شده بودند. تزریق از طریق لوله‌های رانده انجام می‌شود، طول سینکته اغلب به‌ندرت بیش از چند متر بود. کارهای مشابه اغلب در ارتباط با تونل های شهری پاریس انجام می شود و کار در شب و زمانی که قطارها در حال حرکت نیستند انجام می‌شود.

عملکرد تزریق ملات و دوغاب شیمیایی به خاک اطراف با استفاده از روش لوله جک دوغابی

پیپ جکینگ تکنیکی برای نصب خطوط لوله زیرزمینی از طریق سوراخ ایجادشده توسط یک ماشین درایو نوع سپر است که به‌صورت هیدرولیکی از یک گودال شروع استفاده می‌شود. این فناوری بیش از ۵۰ سال پیش در ایالات متحده توسعه یافت. از آن زمان، مزایای این روش توسط تمام جهان شناخته شده است. فناوری Pipejacking (شکل) در کاربردهای مختلفی مانند خطوط لوله نفت و گاز، نصب کابل برق و مخابرات استفاده شده است. (شیمادا و همکاران، ۲۰۰۶)

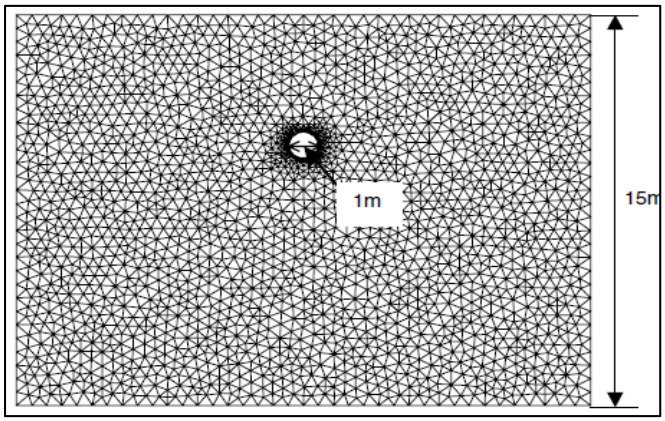


شکل ۱. طرح سیستم لوله جک دوغاب (شیمادا و همکاران، ۲۰۰۶)

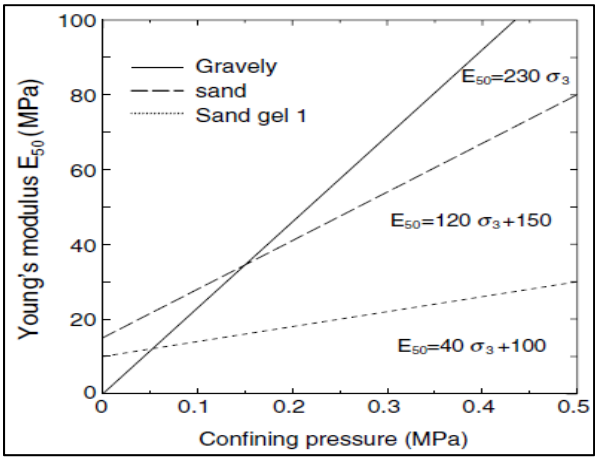
هدف از تزریق دوغاب شیمیایی حفظ پایداری دائمی خاک اطراف است. بااین‌حال، رفتار مواد تزریق شیمیایی در خاک اطراف تونل و میزان تزریق بهینه به‌وضوح درک نشده است. از این منظر،

این مقاله عملکرد مواد تزریق شیمیایی را هنگامی که به خاک اطراف تونل تزریق می‌شود، با استفاده از تجزیه‌وتحلیل تراوش اویلری-لاگرانژی دوبعدی (شکل) موردبحث قرار می‌دهد. علاوه بر این، اثربخشی تزریق دوغاب شیمیایی با استفاده از روش اجزای محدود غیرخطی ارزیابی شد. این بررسی نشان می‌دهد که چه زمانی محدوده ناحیه دوغاب‌شده طراحی‌شده است. لازم است که رابطه بین مدول یانگ ناحیه خاک/گروت و تنش محصورکننده در نظر گرفته شود تا سیستم تزریق دوغاب شیمیایی مؤثر، اقتصادی و ایمن ایجاد شود. درک عملکرد تراوش / رفتار پراکندگی دوغاب شیمیایی و ویژگی‌های خاک / منطقه دوغاب‌شده نیز مهم است. (شیمادا و همکاران، ۲۰۰۶)

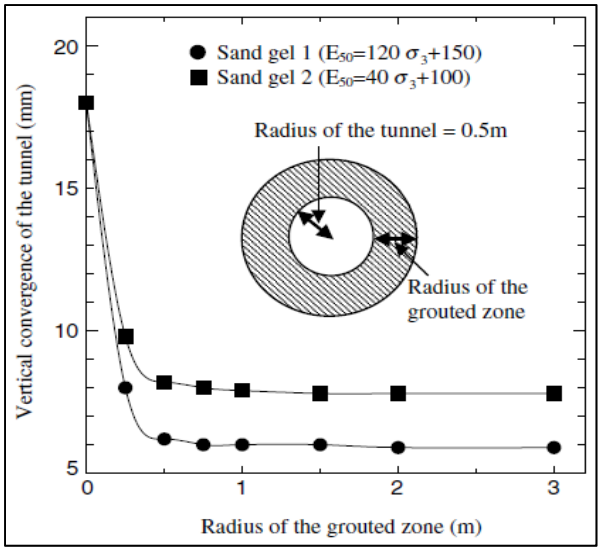
این مقاله عملکرد و رفتار ملات و مواد تزریق شیمیایی در خاک اطراف و ناحیه برش اطراف لوله‌ها را در روش جک‌کشی لوله دوغابی با استفاده از آنالیز تراوش دوبعدی اویلرین-لاگرانژ و آنالیز مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. در بخش اول، تحقیقات ما مشکلات سیستم تزریق ملات فعلی، کارایی سیستم تزریق ملات بهبودیافته و هر موضوعی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. مدل المان محدود دوبعدی (شیمادا و همکاران، ۲۰۰۶)



شکل ۳. رابطه بین فشار محدود و مدول یانگ E50 (شیمادا و همکاران، ۲۰۰۶)

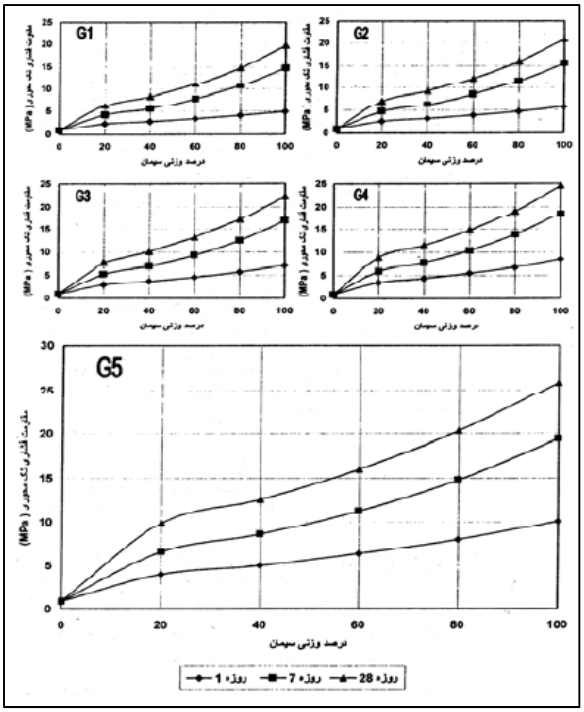


شکل ٤. رابطه بین شعاع ناحیه دوغاب‌شده و همگرایی عمودی تونل (شیمادا و همکاران، ۲۰۰٦)

علاوه بر این، پیش بینی می شود که تغییرات در سطح و شکستگی لوله به دلیل فشار بسیار زیاد اطراف لوله ناشی از فشار تزریق ملات رخ دهد. سیستم تزریق ملات بهبودیافته که علاوه بر سوراخ‌های تزریق در لوله بتنی دارای سوراخ‌های تخلیه است، یک سیستم تزریق ملات مؤثر است و می‌تواند مشکل سیستم تزریق ملات فعلی را حل کند. بااین‌حال، به‌منظور ایجاد و بهره‌مندی از این سیستم تزریق ملات بهبودیافته، لازم است داده‌هایی از تجربیات شخصی و میدانی برای درک عملکرد رفتار تراوش/پراکندگی ملات و دوغاب گل به دست آید. هنگامی‌که محدوده ناحیه دوغاب شده طراحی شده است. لازم است که رابطه بین مدول یانگ منطقه خاک،گروت و تنش محصور در نظر گرفته شود. برای استقرار سیستم تزریق دوغاب شیمیایی مؤثر، اقتصادی و ایمن، لازم است داده ها را از تجربه و میدانی به دست آوریم. درک عملکرد تراوش، رفتار پراکندگی دوغاب شیمیایی و ویژگی های خاک منطقه دوغاب شده نیز مهم است. (شیمادا و همکاران، ۲۰۰٦)

۳-تزریق در سازندهای آبرفتی به‌منظور پایدارسازی تونل‌های مترو و راه‌آهن

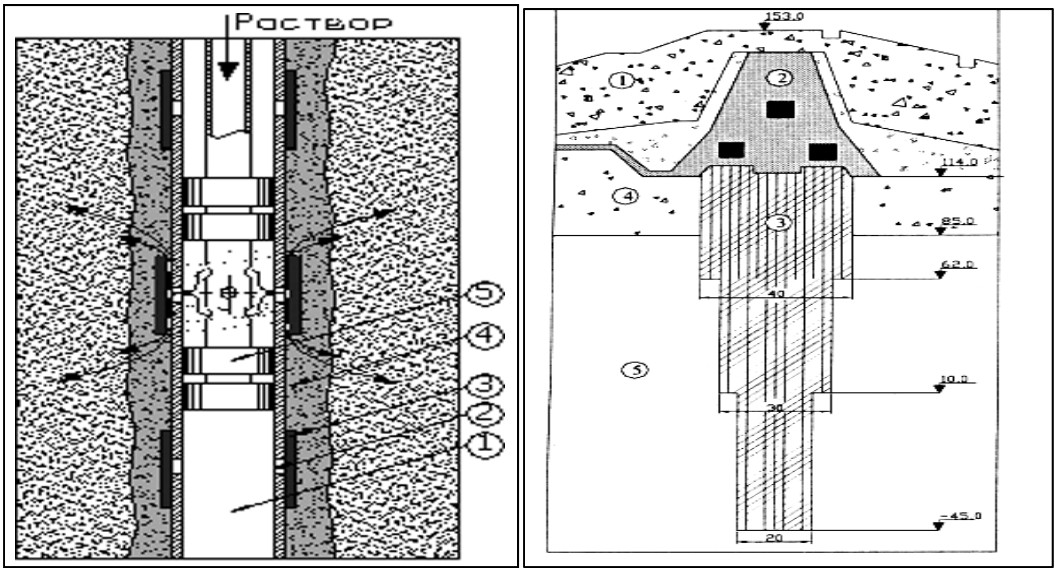
نتایج مطالعات آزمایشگاهی حاصل از تزریق سیمانی بر خواص مقاومتی رسوبات آبرفتی درشت‌دانه تهران و بررسی مقایسه‌ای خواص مقاومتی خاک قبل از تزریق و پس از تزریق خاک – سیمان در این مقاله موردبحث قرارگرفته است. با تکیه به این نکته که درصد تخلخل مفید می‌تواند نقش مؤثر در حجم تزریق مصرفی داشته باشد و درنتیجه عامل مهمی در تغییر مقاومت خاک‌های تزریق‌شده باشد، انتخاب نوع دانه‌بندی مصرف خاک‌های مسیر مورد مطالعه حائز اهمیت است. بدین‌منظور، انتخاب نمونه های آزمایشگاهی رسوبات آبرفتی مسیر براساس میانگینی از منحنی‌های دانه‌بندی گرفته‌شده از تونل‌های خط ۱ متروی تهران صورت گرفته است. همچنین نشان داده شده است که چگونه می‌توان مقاومت نهایی خاک‌های طبیعی را با بالا بردن در صد سیمان نسبت به وزن کل نمونه‌ها (با حفظ نقش آب) افزایش داد. دامنه تغییرات مقاومتی حاصل از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بیانگر خواص مقاومتی رسوبات آبرفتی، تابعی است از پارامترهای مختلف که مؤثرترین آن ها در صد سیمان، ابعاد ذرات خاکی و درصد آب در نسبت های وزنی و یا حجمی مواد سازنده تزریق است. در این مقاله نشان داده‌شده است که می‌توان مقاومت رسوبات آبرفتی درشت‌دانه با پتانسیل ریزش را در زمان حفر تونل و یا پس از آن با افزودن حداقل مقدار درصد سیمان تزریقی، به مقاومت مطلوب و با مقاومت طراحی رساند که ازنظر توجیه فنی و اقتصادی پروژه‌های تزریق حائز اهمیت است (شکل). (مجدی، ۱۳۸۳ و قارونی و بزرگ‌مهرنیا، ۱۳۸۸)



شکل ۵. تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری نسبت به افزایش درصد سیمان نمونه‌های استوانه‌ای گروه‌های پنج‌گانه خاک-سیمان (قارونی و بزرگ‌مهرنیا، ۱۳۸۸)

۳-۱-روش ژئوماس-ژئوکامپوزیت برای تثبیت خاک‌های بستر

روش «ژئوماس-ژئوکامپوزیت» برای بهبود استحکام و خواص تغییرشکل خاک‌های مختلف هم ازنظر طبیعی (ماسه، لوم شنی، لوم رسی، رس، لس و خاک‌های آبرفتی) و همچنین با منشاء تکنولوژیک (خاک پرکننده، خاک‌ریز و نهشته‌های کشت‌شده) توصیه می‌شود که بدون استثنا زیربنای انواع پی‌ها ازجمله پی‌های نواری، گسترده و شمعی و همچنین پایه‌های ساختمان‌ها و سازه‌های شکست‌خورده و تازه‌ساخته هستند (اوسیوف و فیلیمونف، ۲۰۰۲؛ موروز، ۲۰۰۵ و میلنیکف، ۱۹۸۵). به دلیل ناهمسانگردی طبیعی خاک‌های آبرفتی آرام و تغییر در بار فیلتراسیون عمیق، یک پرده تلسکوپی شکل در سه‌طبقه در عمق سد اجرا شد (شکل). در طبقه اول، ۱۵ ردیف سوراخ تزریق برای تثبیت لایه های کنار شن و ماسه از لوم شنی تا ماسه درشت، ازجمله رسوبات هیدرولیکی مصنوعی ناهمگن ماسه‌های "شلالسک" وجود دارد. هفت ردیف سوراخ در طبقه دوم و سه الی پنج ردیف در طبقه سوم وجود دارد. در هر طبقه، ردیف‌های خارجی در امتداد محیط پرده عمدتاً به عنوان موانعی برای محدود کردن گسترش دوغ آب‌های تزریق‌شده از طریق سوراخ‌های ردیف‌های داخلی ساخته شدند (جدول ۱). (اوسیوف و فیلیمونف، ۲۰۰۲؛ موروز، ۲۰۰۵ و میلنیکف، ۱۹۸۵).



شکل ٦. گودال با ستون کاف (ایراگیموف، ۲۰۰۹)

جدول ۱. نتایج بررسی‌های زمین‌شناسی- مهندسی انجام‌شده در ۱۷ سوراخ بازرسی حفاری‌شده (ایبراگیموف ۲۰۰۹)

Hole No.	Sampling depth of probe, m	Density g/cm^3	Moisture content	Flow index	Normalized E_n, MPa		
					minimal	maximal	average
3	3-6.5	□	□	□	10.5	35.0	21.0
4	3-8.7	1.89-1.94	0.16-0.17	0.34-0.41	7.0	17.5	9.5
7	3-9.5	1.91-1.93	0.16-0.167	0.31-0.36	7.0	14.0	10.5
8	2.5-5.7	1.93-1.98	0.16-0.164	0.39-0.38	10.5	35.0	19.2
9	2.0-5.4	1.88-1.96	0.2-0.206	0.65-0.68	7.0	10.5	8.7
11	1.5-8.0	1.87-1.93	0.19-0.20	0.41-0.32	7.0	10.5	8.7
13	3-8.2	1.86-1.90	0.181-0.2	0.71-0.8	7.0	7.0	7.0
14	2.5-8.7	1.94-1.97	0.15-0.20	0.31-0.7	3.5	35.0	13.3
16	2-9.0	1.94-2.01	0.18-0.19	0.74-0.84	7.0	35.0	20.4
17	2.5-7.5	1.88-1.90	0.16-0.20	0.39-0.66	7.0	7.0	7.0

در بستر سد اسوان، یک پرده همگن وزنی فیلتراسیون در رسوبات آبرفتی ماسه ایجاد شد که ازنظر اندازه ذرات و خواص فیلتراسیون بسیار ناهمگن است که نتایج آن را به‌صورت ذیل می‌توان بیان نمود (ایبراگیموف، ۲۰۰۹).

الف – به نظر ما برای تثبیت خاک‌های لسدر بستر ساختمان‌ها و سازه‌ها نامناسب است، زیرا قابلیت نشست از نوع اسلامپ با این روش رفع نمی‌شود. خیس شدن با دوغ آب‌های تزریقی (آب–خاک و سوسپانسیون آب–سیمان) منجر به نشست‌های بیشتر از نوع اسلامپ می‌شود.

ب – از روش «ژئوماس–ژئوکامپوزیت» می‌توان برای تثبیت نشست‌های ساختمان‌ها بر روی خاک‌های شنی- رسی با پی گسترده استفاده کرد. تثبیت در درجه اول درنتیجه تشکیل لایه‌ای از خاک با ظرفیت باربری افزایش یافته در زیر پی حاصل می‌شود که با رگه‌های سیمانی تقویت می‌شود.

پ – تثبیت خاک که مطابق با تکنولوژی تزریق کاف انجام می‌شود، معایب روش «ژئوکامپوزیت ژئوماس» را از بین می‌برد.

۳-۲-مواد تزریق کامپوزیت جدید: رزین اوره- فرمالدئید اصلاح‌شده با سیمان

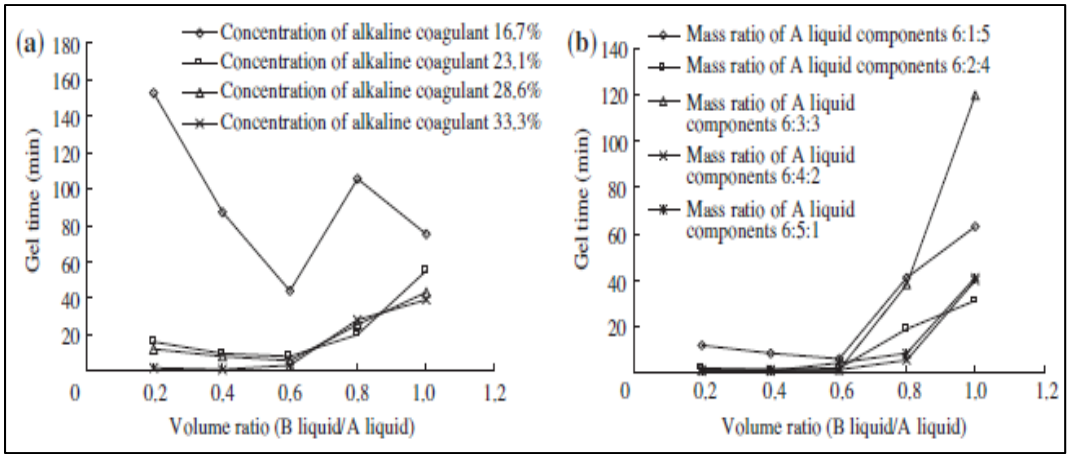
چین دارای پیچیده‌ترین شرایط معدنی هیدروژئولوژیکی در جهان است. با افزایش استخراج عمیق معدن در مناطق قدیمی تر شرقی و توسعه درز زغال‌سنگ ژوراسیک غربی، مشکلات مدیریت بلایای آب افزایش می یابد. تخلخل ریزشکستگی که در حین استخراج عمیق و ساخت شفت با آن مواجه می شود، زمانی که با عواملی مانند تنش بالا، فشار بالا و دمای زمین گرمایی بالا مواجه می شود، مشکل ساز می شود (گائو و همکاران، ۲۰۰۱؛ هو ۲۰۰۵). مهندسی معدن ایمن و کارآمد نیاز به مسدود کردن آب با تقویت کف و تزریق چاه دارد. پرسنل فنی و کارشناسان در حوزه های مرتبط با معدن همواره این حوزه ها را به عنوان موضوعات مهم تحقیقاتی درک کرده‌اند (سوی و همکاران، ۲۰۰۰؛ ژیانگ و همکاران، ۲۰۰۵؛ گوثال و استیل؛ ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰؛ کوا و همکاران، ۲۰۰۹؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۱ و یانگ و همکاران، ۲۰۰۱). در حال حاضر بسیاری از دستاوردها براساس تئوری و عمل تزریق سنگ شکستگی و مطالعه مواد و ویژگی‌های تزریق، توجه بیشتری را به خود جلب کرده است. در سرتاسر جهان، تحقیق در مورد مواد تزریقی جدید و اصلاح مواد تزریقی موجود یک مسئله اصلی است (سونگ و گوا، ۲۰۰۰؛ فونگهانگ و فراناسون، ۲۰۰۶a, b؛ فونگهانگ و گوستافسون؛ ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰؛ کوا و فنگ، ۲۰۰۹؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۱ و یائو، ۲۰۰۱). دوغاب سیمان (شکل و شکل) به دلیل ارزان بودن، منابع آماده و استحکام بالا کاربرد وسیعی دارد. بااین‌حال، ازآنجایی‌که دوغاب سیمان یک ماده ذره‌ای است، معایبی مانند توانایی تزریق ضعیف (نفوذ در شکستگی های ریز و لایه‌های ماسه سیلتی دشوار است)، شکنندگی ماده جامد و

شکل‌پذیری ضعیف، کاربرد عملی دوغاب سیمان را محدود می‌کند. دوغاب شیمیایی به دلیل توانایی تزریق خوب، زمان ژل قابل تنظیم و انعطاف‌پذیری آن پس از انجماد، به‌خوبی کار می‌کند شکل). گروت شیمیایی کاربرد ویژه‌ای دارد، اما کاربرد دوغاب سیمانی به دلیل گرانی و استحکام جامد کمتر محدود می‌شود. (دوان و همکاران، ۲۰۱۲)

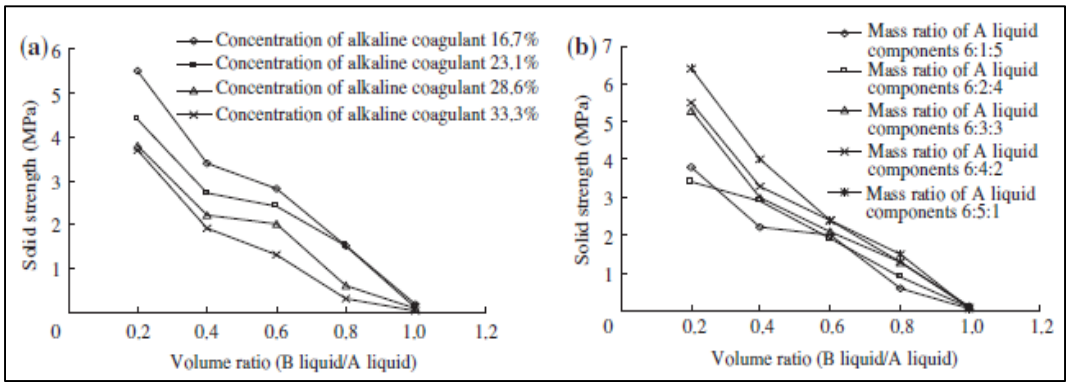
نسبت جرمی ۱۰:۱٫۵ نسبت جرمی ۱۰:۵

شکل ۷. تصویری از نتایج پس از اختلاط (دوان و همکاران، ۲۰۱۲)

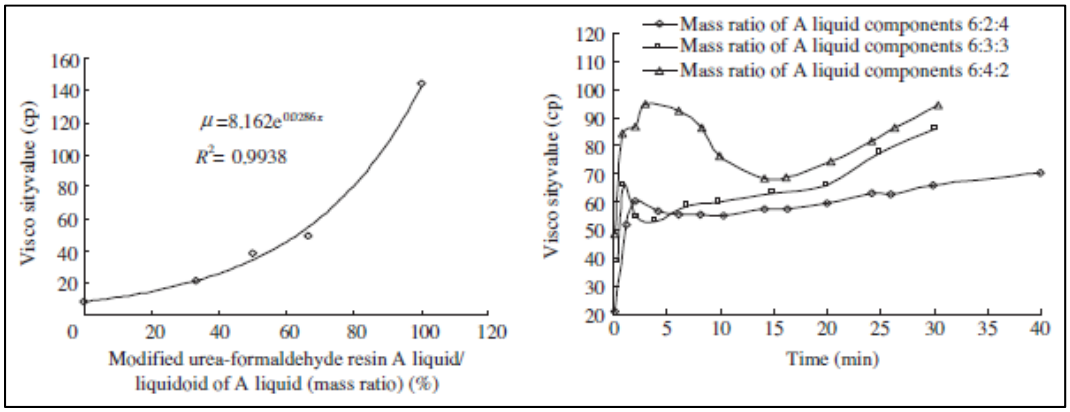
شکل ۸. تصویری از دوغاب پس از گیرش نهایی (دوان و همکاران، ۲۰۱۲)



شکل ۹. مقایسه زمان گیرش دوغاب‌ها (دوان و همکاران، ۲۰۱۲)



شکل ۱۰. مقایسه مقاومت دوغاب‌ها (دوان و همکاران، ۲۰۱۲)



شکل ۱۱. منحنی‌های ویسکوزیته (الف) ویسکوزیته در مقابل غلظت جزء رزین A، (ب) ویسکوزیته در برابر زمان (دوان و همکاران، ۲۰۱۲)

نتایج حاصل از مواد تزریق کامپوزیت جدید: رزین اوره- فرمالدئید اصلاح‌شده با سیمان.

الف - دوغاب رزین اوره فرمالدئید توسعه‌یافته توسط دانشگاه معدن و فناوری چین برای توسعه یک ماده تزریق دوجزئی استفاده شد. جزء A از دوغاب رزین اوره فرمالدئید اصلاح‌شده، سیمان پرتلند و آب تشکیل شده است. جزء B یک منعقد کننده قلیایی است. آزمایش متعامد چهار عامل در سه سطح نشان می‌دهد که زمان ژل برای سطوح بالاتر آب و رزین اوره فرمالدئید افزایش

می‌یابد. زمان ژل با سطوح بالاتر منعقد کننده قلیایی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، مشخص شد که فرمول A2B2C3D1 یا A3B1C3D2 برای دوغاب میعانات کوتاه بهینه است. فرمول A3B2C1D3 دارای بالاترین استحکام بوده و بهترین انتخاب برای تقویت تک تزریق مایع است.

ب – پایداری مایع مواد تزریق کامپوزیتی جدید با نسبت‌های اصلاح شده رزین اوره فرمالدئید جزء A مایع، سیمان و آب در فرمولاسیون مرتبط است. آزمایش‌ها نشان داد که وقتی نسبت مایع رزین اوره فرمالدئید A از ۰,۵ بیشتر شود، زمان تثبیت جزء جدید A حداقل ۳ ساعت است. ازاین رو دوغاب جدید از ثبات حالت مایع خوبی برخوردار است.

پ– آزمایش های متقاطع مخلوط نشان داد که با افزایش نسبت حجمی مایع A به B، زمان ژل ابتدا کوتاه‌تر و سپس افزایش می یابد. استحکام جامد با افزایش غلظت جزء B کاهش می یابد. افزایش غلظت جزء رزین A به نفع استحکام جامد بالاتر است. نسبت حجمی بهینه A به B برای مواد تزریق کامپوزیت جدید در صورت استفاده برای اتصال آب در محل، از ۵:۱ تا ۵:۲ است. نسبت رزین اوره فرمالدئید اصلاح شده A بین ۳/۱ و ۳/۲ است. محتویات کمتر رزین بر استحکام جامد تأثیر منفی می گذارد و محتویات رزین بالاتر هزینه زیادی دارد.

ت – استحکام جامد این دوغاب کامپوزیتی جدید در عرض ۷ روز به مقدار معینی می رسد. سرعت سخت شدن نسبتاً دیرتر کمتر می شود و سختی درنهایت تا روز ۲۸ تثبیت می شود. ویسکوزیته ماده تزریقی کامپوزیت جدید جزء A با محتوای رزین اوره فرمالدئید افزایش می‌یابد. تغییر ویسکوزیته به‌صورت تصاعدی است (رابطه ۱) و می‌تواند براساس موارد زیر باشد:

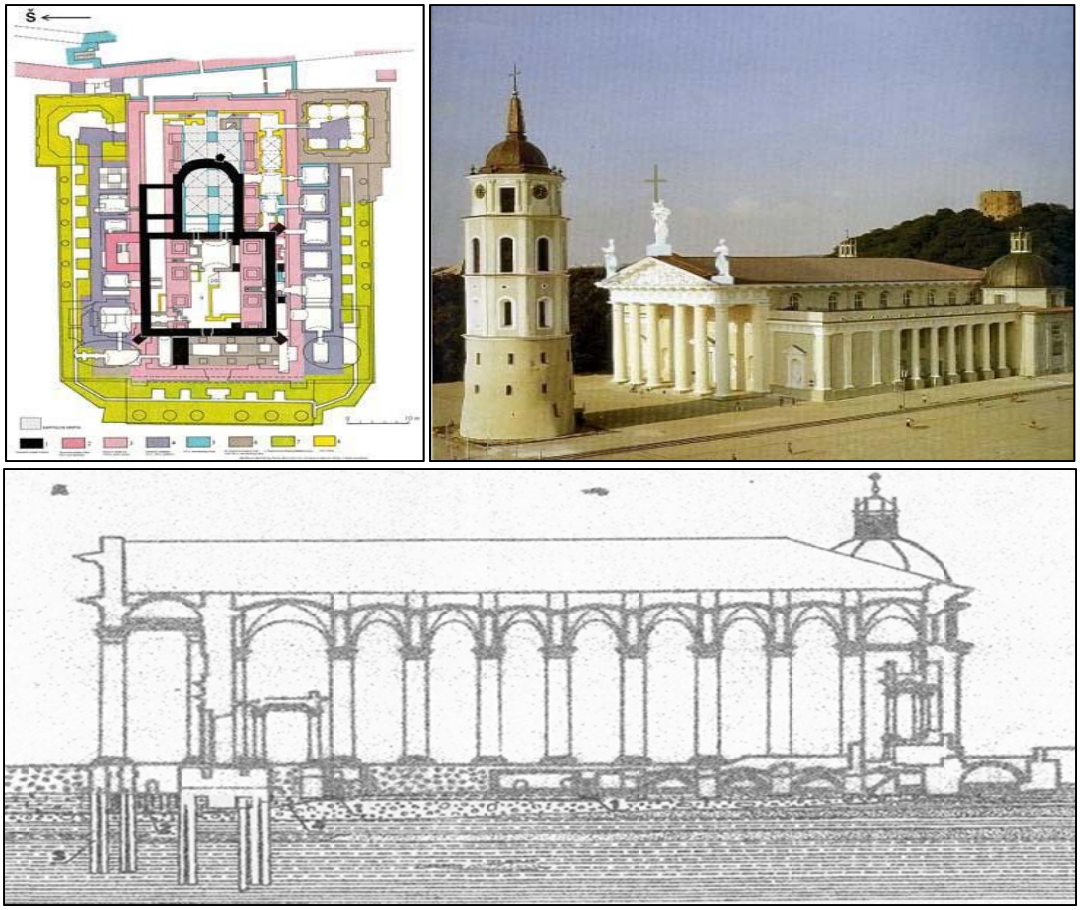
$$\mu = 8.162e^{0.0286x} \qquad (۱)$$

مواد تزریق کامپوزیت جدید جریان سیال پلاستیکی را نشان می‌دهد. ویسکوزیته بلافاصله پس از اختلاط افزایش می‌یابد. مقادیر بیشتر رزین اوره فرمالدئید ویسکوزیته بهتری را به جزء کامپوزیت جدید دوغاب A می‌دهد.

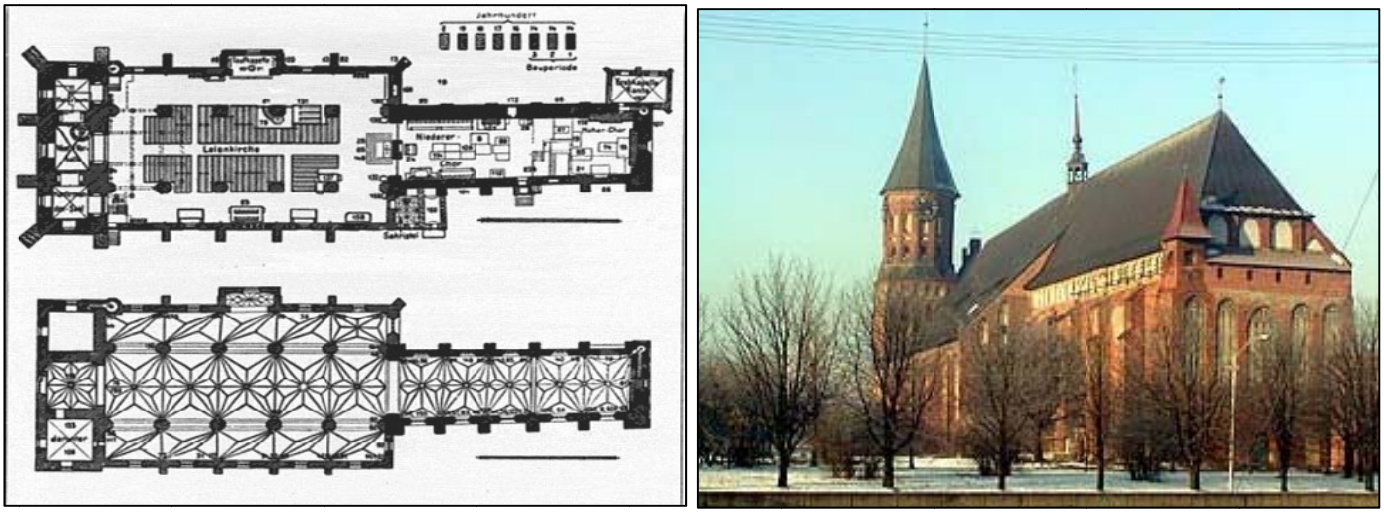
۳-۳-امکان تثبیت خاک و پی دو کلیسای باستانی بر روی خاک‌های آبرفتی منطقه بالتیک با تزریق دوغاب

بسیاری از ساختمان‌های باستانی در منطقه دریای بالتیک بر روی خاک‌های نرم و ضعیف ساخته‌شده‌اند. دو بنای مذهبی باستانی در منطقه دریای بالتیک ازنظر تاریخی و میراثی بسیار مهم هستند (شکل و شکل) اما از نظر ژئوتکنیکی شکننده هستند. کلیسای جامع ویلنیوس در پایتخت لیتوانی و کلیسای جامع کونیگزبرگ در کالینینگراد، شهر بندری روسیه امروزی و مرکز منطقه‌ای بین لهستان و لیتوانی، بر روی خاک‌های آبرفتی ساخته‌شده‌اند و در قرن‌های متمادی دچار سکونت‌گاه‌های بزرگ و ترک‌های زیادی در سازه‌های خود شده‌اند. یکی از روش‌های تثبیت محوطه این کلیساها، تزریق دوغاب است. نتایج حاکی از آن است که تثبیت خاک شنی زیر کلیسای جامع ویلنیوس با تزریق امکان‌پذیر است. تثبیت زمین پیاز و سفالی کلیسای جامع کونیگزبرگ با تزریق امکان‌پذیر نیست. افزودن اجزای فعال به رزین‌های کاربامید باعث افزایش چگالی و pH (سطح قلیایی) محلول و کاهش ویسکوزیته شد. استحکام تک‌محوری ماسه‌های تثبیت‌شده با رزین‌های پلیمری وابسته به زمان است و از ۲/٤ مگاپاسکال پس از ۷ روز به ٤/۲ مگاپاسکال پس از ۳ ماه افزایش‌یافته است. ۱۲ تا ۱۹ برابر کمتر فرمالدئید در هوا از خاک تثبیت شده با رزین‌های اصلاح‌شده نسبت به خاک تثبیت‌شده با رزین‌های اصلاح‌نشده آزاد می‌شود. بوی تند و تحریک‌کننده فرمالدئید در بالای نمونه‌های تازه خردشده خاک تثبیت‌شده با رزین اصلاح‌نشده درک شد و هوشمندی حاد چشم‌ها حس شد، درحالی‌که این پدیده‌ها در نمونه‌هایی از خاک‌های تثبیت‌شده با رزین اصلاح‌شده وجود نداشت.

جدول ۲ و جدول ۳). (مکویشس، ۲۰۱۳ و استراگیس و مکویشس، ۲۰۰۵).



شکل ۱۲. رفتار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت‌شده با درصدهای مختلف اوره فرمالدئید تزریق‌شده است.
(مونستویلاس و همکاران، ۱۹۹۵؛ کیتکاوسکس، ۱۹۹۴ و بالتناس و همکاران، ۲۰۰۲)



شکل ۱۳. رفتار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت‌شده با درصدهای مختلف اوره فرمالدئید تزریق‌شده است. (فورماناویکوس، ۱۹۹۵ و مکویشس، ۲۰۱۳)

جدول ۲. آزادسازی فرمالدئید آزاد از خاک تثبیت‌شده در محیط هوا برحسب درصد به جرم رزین (مکویشس، ۲۰۱۳)

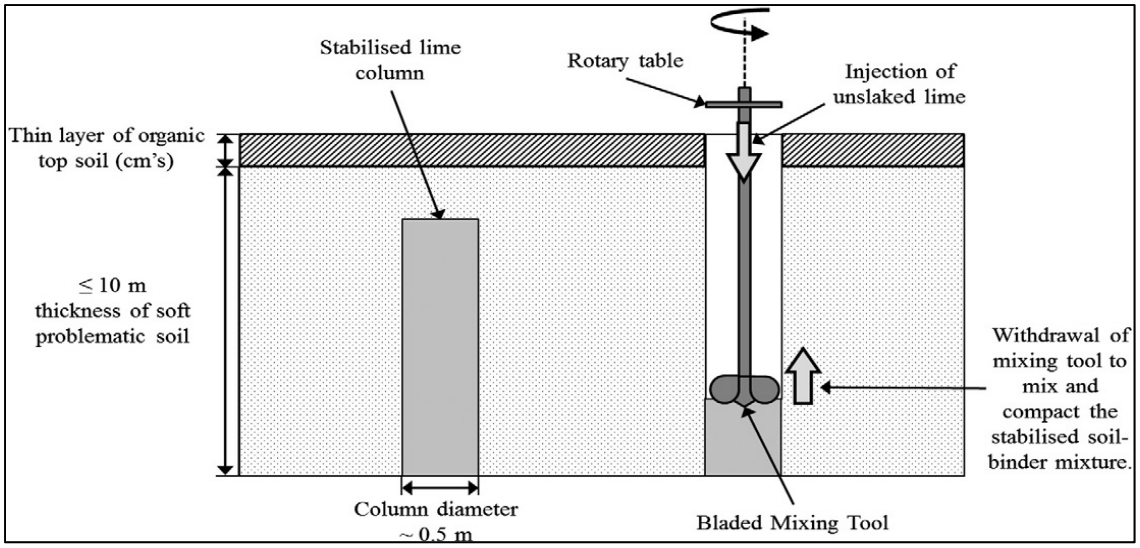
Time-span of investigation	Modified "20"	Modified "15"	Unmodified
1 day	0.002	0.004	0.05
7days	0.01	0.03	0.29
14 days	0.02	0.05	0.55
28 days	0.04	0.08	0.92
2 months	0.05	0.12	1.31
6 months	0.08	0.18	1.97
12 months	0.09	0.20	2.19

جدول ۳. مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های تثبیت‌شده در MPa (مکویشس، ۲۰۱۳)

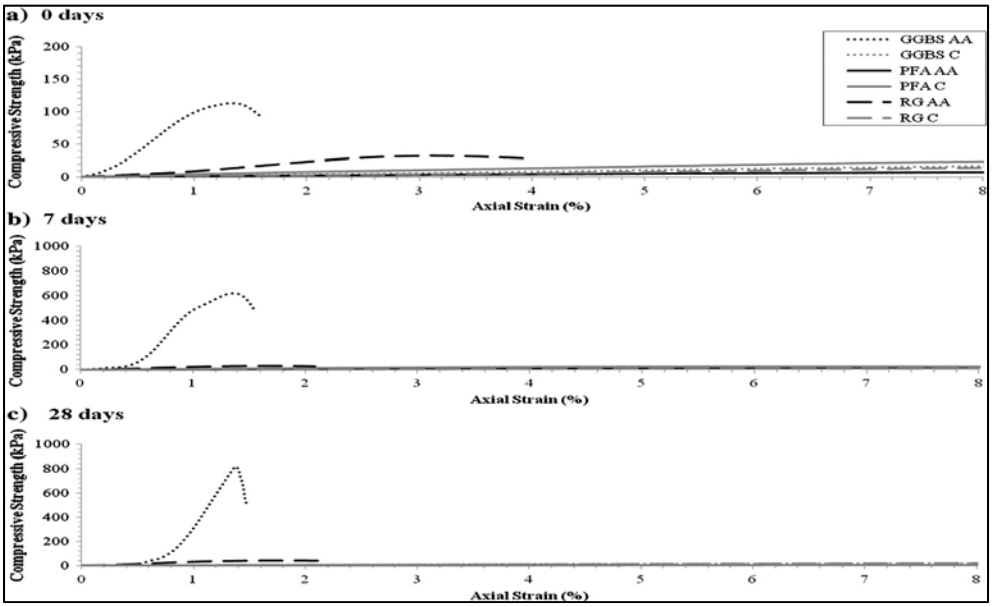
Type of carbamide resin	Held for 7 days in moist-air m edium	Held for 28 days in moist-air medium
Unmodified	5.4	6.6
Modified "15	3.0	4.2
Modified "20"	2.4	3.1

٤- افزایش خواص مکانیکی و دوام خاک‌های آبرفتی نرم

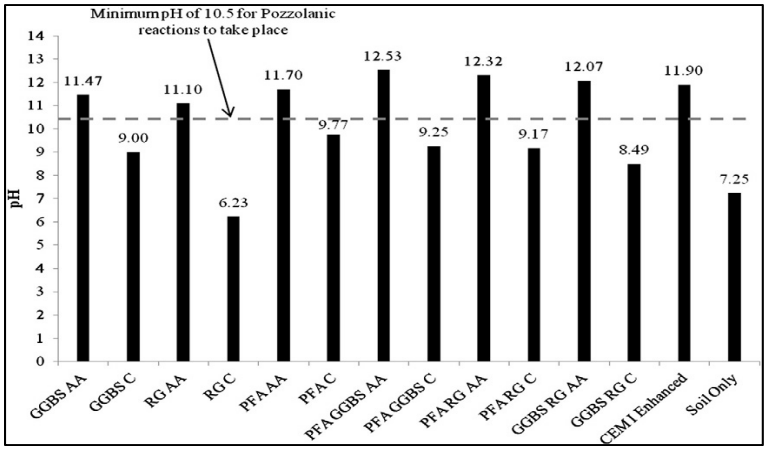
در بسیاری از کشورها، مناطق وسیعی از سطح زمین توسط خاک‌های نرم (مانند آبرفت و پیت) پوشیده شده است. به دلیل ظرفیت باربری نامطلوب، انقباض/متورم شدن، نشست و دوام، این می‌تواند مشکل‌ساز باشد. برای بهبود چنین شرایطی، تعدادی از تکنیک‌های تثبیت برای استفاده در دسترس هستند، ازجمله تراکم/ تحکیم، تثبیت مکانیکی و اختلاط خاک با چسب‌های سیمانی (هیوگس، ۲۰۱۲۰۱۱۳؛ شروود، ۱۹۹۳). آزمایش‌های ژئوتکنیکی و کانی‌شناسی برای تعیین عملکرد چسب‌ها در هنگام ادغام در خاک شن و ماسه سیلتی مصنوعی استفاده می‌شود. مقایسه‌هایی با استحکام و دوام خاک‌های تیمار نشده و تثبیت‌شده انجام‌شده است (شکل). این مطالعه نشان می‌دهد که از محصولات جانبی آزمایش‌شده، خاک‌های تثبیت‌شده با سرباره کوره بلند فعال قلیایی منجر به بیشترین بهبود استحکام و دوام می شوند؛ با سایر مواد آزمایش‌شده بهبودهای کوچک‌تری را نشان می‌دهند. مشاهده‌شده است که افزودن فعال کننده های قلیایی اجازه می‌دهد تا واکنش‌های پوزولانیک رخ دهد که منجر به بهبود خواص مکانیکی شده است (شکل). در درجه اول قدرت که با گذشت زمان افزایش می‌یابد. دوام خاک با افزودن محصولات جانبی بهبود یافته، اگرچه فعال سازی قلیایی باعث افزایش بیشتر قابل توجهی در دوام نشده است (شکل). (سارگنت و همکاران ۲۰۱۳)



شکل ۱۵. گودال با ستون کاف (سارگنت و همکاران، ۲۰۱۳)



شکل ۱۶. نمودار تنش-کرنش از آزمایش UCS برای مخلوط بیندر منفرد IBP پس از دوره‌های: الف) ۰ روز، ب) ۷ روز و ج) ۲۸ روز. (سارگنت و همکاران، ۲۰۱۳)

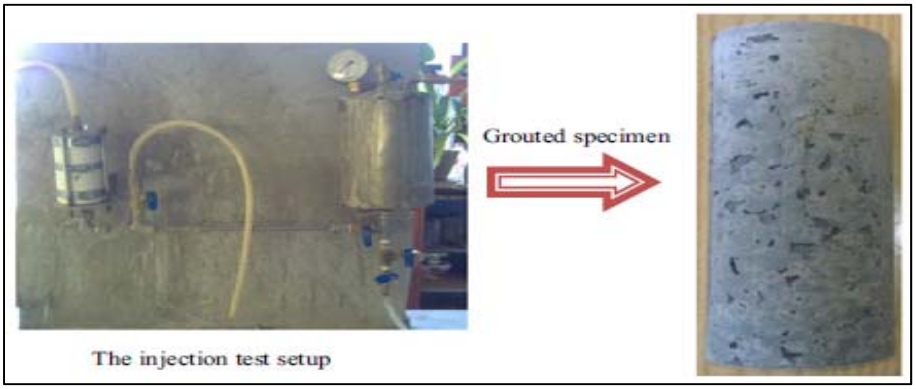


شکل ۱۷. نمودار میله‌ای که مقادیر متوسط PH به‌دست‌آمده توسط تمام نمونه‌های غیرفعال و فعال قلیایی در یک دوره ۲۸ روزه (سارگنت و همکاران،۲۰۱۳)

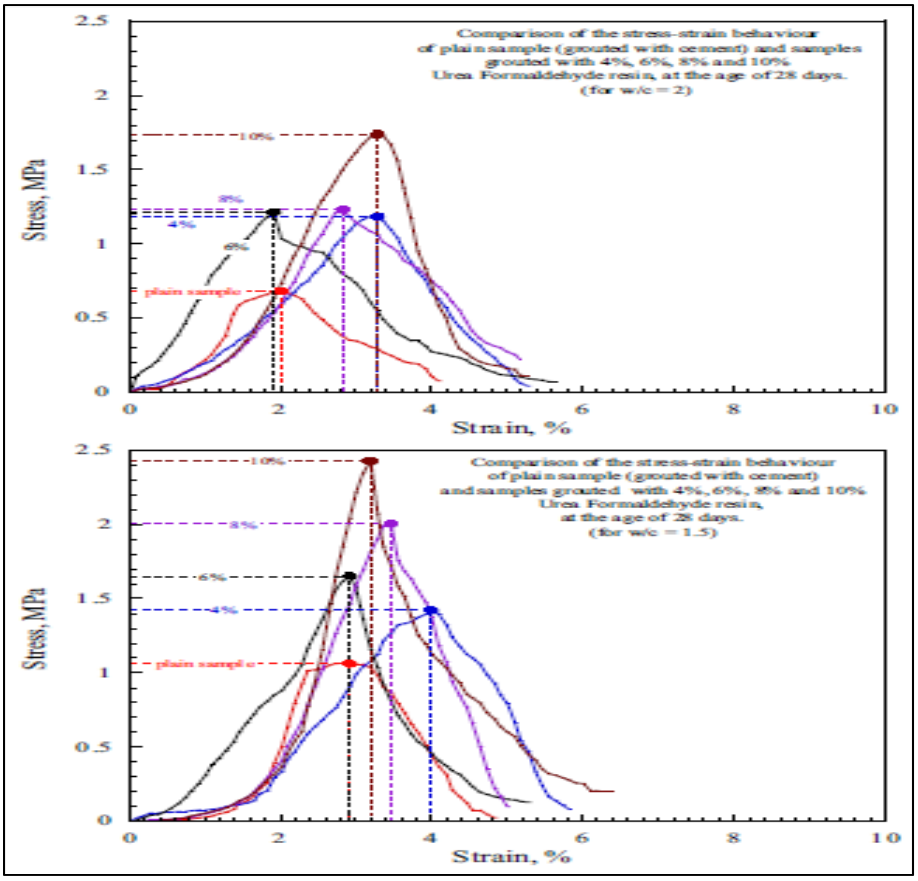
٤-١-تأثیر سیمان و تزریق شیمیایی بر بهبود خواص مکانیکی و هیدرولیکی سازندهای آبرفتی

یکی از رایج‌ترین روش‌های بهسازی زمین، نوعی تزریق است که در آن سیال تزریق شده به نام دوغاب از طریق گمانه وارد زمین می شود (شکل). این روشی است که شامل تزریق دوغاب به شکاف‌ها، ناپیوستگی‌ها، حفره‌ها و حفره‌های تشکیل خاک یا سنگ به‌منظور بهبود خواص آن ها، به ویژه برای کاهش نفوذپذیری و افزایش استحکام و مدول سازندها است. (آناگنوستوپولوس، ۲۰۰۵؛ شیمادا و همکاران، ۲۰۰٦)

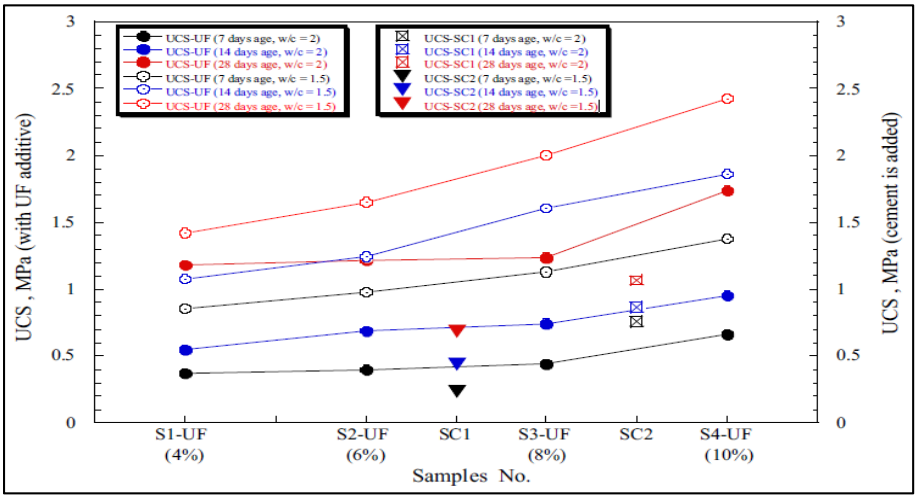
سازندهای آبرفتی در ایران اغلب در بسیاری از سایت های پروژه‌های مهندسی عمران (به‌ویژه پروژه‌های مترو) دیده می‌شوند که فاقد استحکام کافی برای تحمل بارگذاری در طول ساخت‌وساز یا در طول عمر مفید هستند. برای بهبود استحکام و سختی آن سازندهای کم توان، تثبیت خاک با مواد سیمانی و شیمیایی انجام‌شده است. در این مطالعه مشاهده شد، که اثر تزریق دوغاب بر بهبود ویژگی های مقاومتی و خواص هیدرولیکی سازند آبرفتی در سنین مختلف پخت با کمک نتایج تجربی مشخص شد. در پایان پس از ۲۸ روز عمل آوری، مقاومت فشاری نامحدود بر روی نمونه‌ها انجام شد. براساس نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش، مشاهده شد که در نمونه های تزریق شده توسط دوغاب مخلوط با w/c 2، بیشترین میزان مقاومت فشاری زمانی حاصل شد که دوغاب حاوی ۱۰ درصد رزین اوره فرمالدئید بود. استحکام نمونه تزریق‌شده با دوغاب مخلوط پس از ۲۸ روز عمل‌آوری ۱۵۰ درصد در مقایسه با موردی که دوغاب پایه سیمان تزریق‌شده بود، افزایش یافت (شکل ۱۵ الی شکل). همچنین، افزایش رزین اوره فرمالدئید در دوغاب مخلوط منجر به افزایش کرنش شکست، مدول الاستیسیته و مدول سکونت شد. نتایج آزمایش نفوذپذیری بر روی نمونه های پخت شده در ۲۸ روز نیز نشان می‌دهد که تزریق دوغاب پایه سیمان با ۲ و ۱/۵ = w/c منجر به کاهش ۹۸ درصدی نفوذپذیری می‌شود. (فرامرزی و همکاران، ۲۰۱٦)



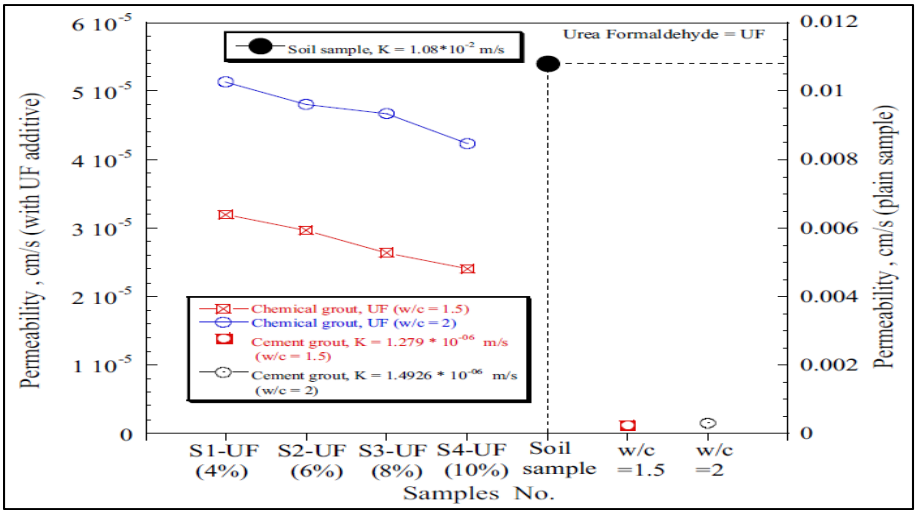
شکل ۱۸. تنظیمات تست تزریق (فرامرزی و همکاران، ۲۰۱٦)



شکل ۱۹. رفتار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت‌شده با درصدهای مختلف اوره فرمالدئید تزریق‌شده است. (فرامرزی و همکاران، ۲۰۱۶)



شکل ۲۰. مقاومت فشاری نامحدود نمونه‌های تزریق‌شده (فرامرزی و همکاران، ۲۰۱۶)

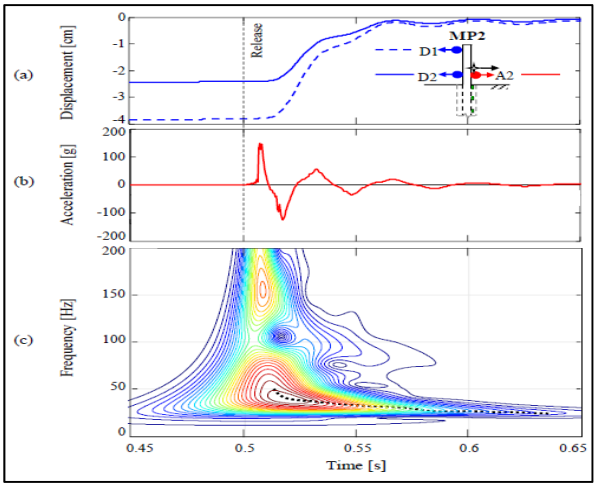


شکل ۲۱. کاهش نفوذپذیری با محتوای سیمان و فرمالدئید اوره (فرامرزی و همکاران، ۲۰۱۶)

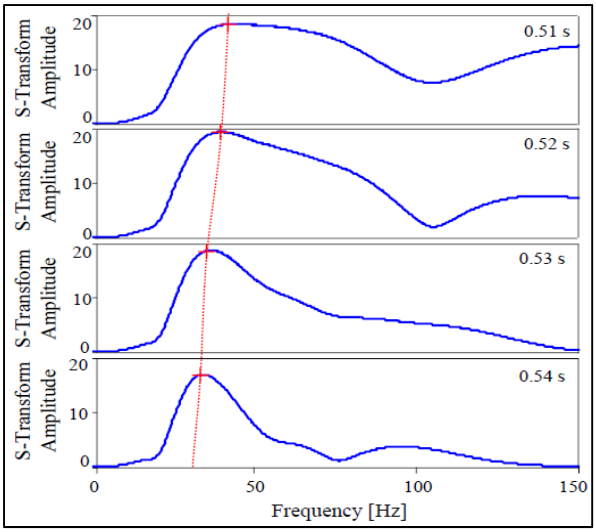
٤-۲-بررسی تجربی در مقیاس کامل رفتار افقی دینامیکی ریزگردها در خاک‌های سیلتی آبرفتی

در ۵۰ سال گذشته پیشرفت های زیادی در زمینه تحقیقاتی برهمکنش دینامیکی خاک-شمع-سازه ازنظر تئوری و تجربی حاصل شده است. با توجه به مدل‌سازی خاک، روش‌های موجود برای بررسی مشکل را می‌توان تقریباً به سه نوع اصلی طبقه‌بندی کرد: الف) راه‌حل های تحلیلی فرمول‌های پیوسته که در آن خاک به عنوان یک محیط کشسان در نظر گرفته می شود (باسو و همکاران، ۲۰۰۹). ب) روش‌های نوع وینکلر که اجازه می‌دهد تا تعاملات خطی و غیرخطی (منحنی های py) خاک-شمع و شمع به شمع با اجتناب از مدل سازی مستقیم خاک (با بهره گیری از هر دو رویکرد تحلیلی یا عددی) ضبط شود (تومباری و همکاران، ۲۰۱۷ و دزی و همکاران، ۲۰۱۶) و ج) روش های المان محدود، عنصر مرزی یا تفاوت‌های محدود، موجود در هر دو فرکانس (لاتینی و زانیا، ۲۰۱۷) و حوزه زمانی که قادر به محاسبه رفتار غیرخطی خاک هستند. همه این رویکردها نیاز به اعتبارسنجی مناسب دارند و براساس پارامترهایی هستند که باید به‌درستی کالیبره شوند؛ بنابراین آزمایش‌های تجربی برای افزایش قابلیت اطمینان آن‌ها ضروری است. (کاپاتی و همکاران، ۲۰۱۸)

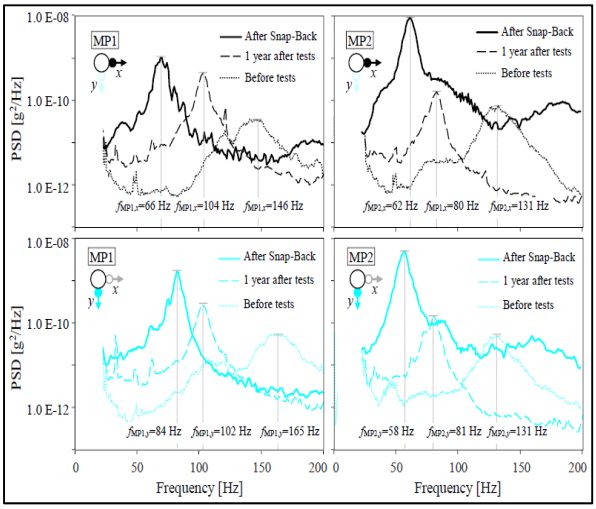
این کار یک برنامه آزمایشی گسترده از آزمایش‌های میدانی دینامیکی در مقیاس کامل را توصیف می کند که بر روی دو ریزشمع عمودی منفرد تعبیه‌شده در خاک‌های آبرفتی انجام‌شده است. یکی از دو ریزشمع با تزریق فشار بالا تکمیل شد و دیگری به‌سادگی دوغاب شد. آزمایش‌های دینامیکی شامل آزمایش‌های ارتعاش محیطی و آزمایش های بار ضربه‌ای برای بررسی رفتار دینامیکی در محدوده کرنش بسیار کوچک و کوچک و آزمایش های برگشت سریع برای بررسی محدوده کرنش کوچک تا متوسط بود. هر دو ریزشمع با کرنش سنج در امتداد شفت، شتاب‌سنج‌ها و مبدل‌های جابه‌جایی در سر استفاده شدند. آزمایش انجام شده برای مطالعه رفتار دینامیکی سیستم های خاک-ریزشکل در طیف وسیعی از سویه‌ها که رفتارهای متفاوت دو سیستم، با و بدون تزریق و در امتداد دو جهت را برجسته می کند، مؤثر بود (شکل و شکل). (کاپاتی و همکاران، ۲۰۱۸)



شکل ۲۲. (الف) جابه‌جایی‌ها و (ب) تاریخچه‌های زمانی شتاب ثبت‌شده در طول آزمایش ارتعاش آزاد (T2–F4) در MP2؛ (ج) S-تبدیل شتاب (کاپاتی و همکاران، ۲۰۱۸)



شکل ۲۳. تغییر با زمان طیف محلی برای تست F4-T2 در MP2 (کاپاتی و همکاران، ۲۰۱۸)



شکل ۲۴. بررسی ویژگی‌های دینامیکی از طریق تست‌های ارتعاش محیطی قبل از آزمایش، بعد از آزمایش‌های ارتعاش رایگان و ۱ سال پس از پایان برنامه آزمایشی روی MP1 و MP2 (در امتداد محورهای x و y) (کاپاتی و همکاران، ۲۰۱۸)

مشاهدات اصلی را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

الف – از آزمایش‌های ارتعاشات محیطی، در محدوده کرنش بسیار کوچک، فرکانس‌های اساسی و نسبت‌های میرایی مربوطه سیستم‌های خاک – میکروپیل برآورد شد. مشخص شد که فرکانس اساسی ریزشمع با تزریق حدود ۲۵ درصد بیشتر از ریزشمع بدون تزریق است. هر دو پدیده قبلی را می توان نه تنها به تأثیرات تزریق بر روی خود ریزشمع (از طریق افزایش سطح مقطع) بلکه به متراکم شدن خاک اطراف بخش تزریق‌شده ریزشمع نسبت داد.

ب – آزمایش‌های بار ضربه‌ای بر روی دو ریزشمع ابزار، در محدوده کرنش کوچک تا متوسط، اطلاعات دقیق‌تری را در مورد رفتار دینامیکی سیستم‌ها به لطف کرنش‌سنج‌های واقع در امتداد شفت ریزشمع‌ها ارائه کرد. جداشدگی جزئی در دوغاب لوله و در سطح مشترک خاک – میکروپیل نیز شناسایی شد.

پ – در طول آزمایش‌های برگشت سریع، در محدوده کرنش‌های زیاد، چندین پدیده غیرخطی ظاهر شد، مانند ایجاد شکاف در سطح مشترک خاک–ریزشاخ، باز شدن ترک های شعاعی در خاک و تخریب کلی مواد. در ارتباط با این پدیده ها، تغییر قابل توجهی در سختی دینامیکی و نسبت میرایی برای هر دو سیستم خاک – میکروپیل رخ داد.

با توجه به نتایج کمپین آزمایشی ارائه شده، می توان نتایج زیر را گرفت:

الف– آزمایش ارتعاش محیطی نشان داد که روشی همه کاره، سریع و مؤثر برای شناسایی ویژگی های دینامیکی سیستم‌های خاک–ریزپیل است. اجرای این تکنیک نیز بسیار ساده و تکرار آن آسان است. از این نظر، در رابطه با سرمایه‌گذاری زمان و منابع، می تواند یک راه بهینه برای نظارت بر سیستم‌های خاک–ریزپایه (مثلاً زمانی که از ریزشمع ها برای تثبیت خاک استفاده می شود) با بررسی تغییرات خواص دینامیکی با زمان و پس از رویدادهای خاص باشد. به‌عنوان‌مثال زلزله، بارندگی). بااین‌حال، شایان‌ذکر است که تکنیک‌های پس پردازش داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های ارتعاش محیطی هم ازنظر نظری و هم ازنظر عملیاتی کاملاً خواستار هستند. تست بار ضربه را می‌توان برای همین منظور استفاده کرد. ازیک طرف نیاز به اعمال ضربه دارد، اما از طرف دیگر انجام سریع‌تر و ارسال فرآیند آسان‌تر است.

ب – انجام آزمایش ارتعاش رایگان نسبتاً ساده است، اگرچه برای اعمال نیروی خارجی و اطمینان از آزاد شدن ناگهانی به نصب یک دستگاه بسیار بزرگ و گران قیمت نیاز دارد. این آزمایش امکان بررسی رفتار دینامیکی سیستم های خاک–ریزشکل را در میدان غیرخطی فراهم می کند و می تواند یک رویکرد خوب برای توصیف دینامیکی سیستم‌های خاک–ریزشکل باشد، نه‌تنها در مواردی که نباید از اندرکنش لرزه‌ای خاک و سازه غافل شد، بلکه همچنین هنگامی که بارگذاری باد و موج وجود دارد (ریزپایه‌ها اغلب برای پایه‌های ترکیبی برج‌های بادی و سازه‌های فراساحلی استفاده می‌شوند).

پ – تحت بارگذاری با ماهیت اینرسی (با شدت نسبتاً محدود به‌شدت بالا)، نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که ویژگی‌های بخش کم‌عمق تر رسوب تأثیر زیادی بر پاسخ دینامیکی سیستم و جنبه

پدیدار شناختی مرتبط با بارگذاری دینامیکی دارد. (تشکیل شکاف). با توجه به این ملاحظات، یک توصیف ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی تصفیه‌شده خاک پی نقش کلیدی را برای مدل‌سازی و طراحی اولیه آزمایش‌ها ایفا می‌کند (به‌عنوان‌مثال ابزار دقیق مورداستفاده، تعداد و موقعیت سنسورها، سطح نیرو/تغییرمکان). اعمال شود) و درنتیجه، برای موفقیت نهایی کمپین آزمایشی.

۵-نتیجه‌گیری

تأثیر سیمانی شدن بر زاویه‌ی اصطکاک خاک موردبحث محققان بسیاری بوده است و درباره‌ی تأثیر افزایشی یا کاهشی آن اتفاق‌نظری وجود ندارد. برخی تأثیر آن را کاهنده می‌دانند و معتقد هستند که ماده‌ی سیمانی کننده باعث کاهش اصطکاک بین ذرات خاک می‌شود. عده‌ای نیز این پدیده را بی‌تأثیر دانسته‌اند. این محققان معتقدند که سیمانی شدن، تنها سبب جابه جایی موازی پوش گسیختگی به سمت بالا می‌شود و تأثیر محسوسی بر زاویه اصطکاک نمی گذارد. بعضی نیز سیمانی شدن را عاملی در جهت افزایش مقدار و می‌دانند. سیمانی شدن سبب اتصال دانه های ریز خاک به یکدیگر و پدید آمدن دانه‌های بزرگ‌تر می‌شود. ازآنجاکه دانه‌های بزرگ‌تر درهم‌رفتگی بیشتری پیدا می‌کنند، موجب افزایش زاویه اصطکاک می‌شوند. سیمانی شدن، سبب افزایش زاویه‌ی اصطکاک تا حدود ۵ درجه می شود ولی هیچ تأثیری بر روی زاویه اصطکاک باقیمانده ندارد.

بی ساختار شده مقدار و در محدوده‌ی فشارهای همه‌جانبه استفاده‌شده، تقریباً ثابت است ولی در نمونه‌های سیمانی شده، مقدار آن در فشارهای همه جانبه ی پایین، زیاد و در فشارهای همه‌جانبه‌ی بالا، کمتر است.

زاویه‌ی اصطکاک محاسبه شده، براساس مقاومت در لحظه حداکثر انقباض نمونه‌های سیمانی شده نیز با افزایش سیمانی شدن قدری افزایش نشان می‌دهد. مقایسه‌ی زوایای اصطکاک مختلف بیانگر آن است که به‌طور متوسط در هر سری از نمونه‌های سیمانی شده، مقدار و بزرگ‌تر از ۸ است. شایان‌ذکر است که همواره پوش مربوط به نقاط حداکثر انقباض زیر پوش مقاومت اوج قرار می‌گیرد. به‌بیان‌دیگر مقاومت برشی در این شرایط، کمتر از مقاومت برشی اوج است.

به نظر می رسد مهم ترین عاملی که موجب شده است، محققان مختلف در تأثیر سیمانی شدن بر زاویه اصطکاک خاک درشت‌دانه اتفاق‌نظر نداشته باشند، استفاده از خاک‌هایی با جنس و شکل ذرات گوناگون، نوع و مقدار ماده سیمانی متفاوت، محدوده‌ی فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف و آزمایش‌های متفاوت با شیوه‌های نمونه‌سازی گوناگون است. از خاک ماسه‌ای یکنواخت و سیمان پرتلند با مقادیر و ٤ درصد استفاده کرده‌اند. درنتیجه، تفاوت‌های موجود در مصالح، تهیه‌ی نمونه و نحوه‌ی آزمایش پژوهشگران مختلف، به سبب اختلاف در نتیجه‌گیری‌ها شده است.

سه فاکتور اصلی درصد سیمان، مدت‌زمان گیرش (سن نمونه) و درصد خاک‌های درشت‌دانه نقش بسیار مؤثر و کنترل‌کننده در مقاومت نمونه های خاک – سیمان داشته است، اما تأثیر سه عامل مذکور در افزایش مقاومتی یکسان نیست نتایج حاصل از چنین آزمایش‌ها می‌تواند پایه‌ای برای کنترل کیفی تزریق‌های سیمانی در محیط‌های متخلخل، به‌ویژه در رسوبات آبرفتی درشت‌دانه و نیز سنگ‌های درزه‌دار و خردشده مورداستفاده قرار گیرد.

تأثیر ناهمگن بودن خاک – سیمان بر توزیع غیریکنواخت تنش در داخل نمونه های تحت بارگذاری هم‌زمان موجب افزایش و کاهش تمرکز تنش در نقاط مختلف یک نمونه می‌گردد نقاط تحت افزایش تمرکز تنش، نقاط ضعف و درنتیجه نقاط شروع شکست است. ترک های طولی و عرضی کششی و پافشاری و نیز فرم های سطوح شکست حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه های خاک – سیمان مبین تأثیر درصد سیمان و نوع دانه بندی خاک بر چگونگی روند گسترش گسیختگی در نمونه‌ها و تا حدی نیز مبین نحوه ایجاد و گسترش ترک‌ها و شکاف در ناحیه تزریق‌شده است. در تمام گروه‌های پنج‌گانه، به‌طور متوسط نمونه‌های با کمتر از ٤٠ سیمان دارای شکست تدریجی و کرنش زیاد در مقایسه با ظرفیت باربری اندک است و فرم‌های شکست غالباً به‌صورت برشی است. خاک‌های با بیشتر از ٤٠ سیمان دارای شکست ناگهانی و انفجاری است و فرم های شکست غالباً به‌تناسب افزایش درصد سیمان به‌صورت مخروطی و یا محوری طولی است. مقاومت رسوبات آبرفتی درشت‌دانه با پتانسیل ریزش را می‌توان، در زمان حفر تونل و یا پس از آن، با افزودن حداقل مقدار درصد سیمان تزریقی به مقاومت مطلوب و یا به مقاومت طراحی رساند که ازنظر توجیه فنی و اقتصادی پروژه‌های تزریق حائز اهمیت است.

٦- مراجع

-عفتی، پیمان و روحانی، احسان (۱۳۹۷). بررسی میزان تأثیرگذاری شرایط مختلف شمع بر کاهش نشست فونداسیون و تحلیل میزان کارایی شمع‌ها در بهبود این شرایط در خاک‌های

آبرفتی، *کنفرانس عمران، معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام*، تبریز.

–قارونی نیک، مرتضی و بزرگمهر نیا، سعید،(۱۳۸۸). تزریق در سازندهای آبرفتی به‌منظور پایدارسازی تونل‌های مترو و راه‌آهن، *دومین کنفرانس بین‌المللی پیشرفته‌ای اخیر در مهندسی راه‌آهن*، تهران.

–بزرگمهرنیا، سعید (۱۳۸۸). تزریق در سازندهای آبرفتی به‌منظور پایدارسازی تونل‌ها. *پایان‌نامه کارشناسی*، دانشکده مهندسی راه‌آهن دانشگاه علم و صنعت ایران.

–مجدی، عباس (۱۳۸۳). راهنمای بررسی طرح تزریق در تونل‌ها سازه‌های زیرزمینی. *شرکت متروی تهران.*

–حائری، سید محسن، سید شهاب‌الدین یثربی، علی ارومیه‌ای و ابراهیم اصغری (۱۳۸۳). تأثیر سیمانی شدن بر مقاومت برشی آبرفت‌های درشت‌دانه تهران. *امیرکبیر*، ۱۵(ج–۵۹)، ۵۷–۴۳.

–حائری، سید محسن، سید شهاب‌الدین یثربی، علی ارومیه‌ای و ابراهیم اصغری (۱۳۸۱). ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی آبرفت‌های درشت‌دانه و سیمانی شده تهران، *فصلنامه علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی کشور*، جلد ۱۱، شماره ۴۷، ۱۴–۲.

-Anagnostopoulos, C. A. (2005). Laboratory study of an injected granular soil with polymer grouts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(6), 525-533.

-Baharuddin, I. N. Z., Omar, R. C., & Devarajan, Y. (2013). Improvement of engineering properties of liquefied soil using Bio-VegeGrout. In IOP conference series: earth and environmental science, Vol. 16, No. 1, 012104. *IOP Publishing.*

-Baltenas, A., Paknys, R., Venclova, T., 2002. Vilnius. R. Paknio leidykla, *Vilnius,* 116-117.

-Basu, D., Salgado, R., & Prezzi, M. (2009). A continuum-based model for analysis of laterally loaded piles in layered soils. *Geotechnique*, 59(2), 127-140.

-Cao, C. M., & Feng, Z. Q. (2009). Development and application of low viscosity urea-formaldehyde resin grouting material. *Mei T'an Hsueh Pao Journal of China Coal Society,* 34.

-Cao, S., Li, G., Yao, Q., & Wang, F. (2009). Prediction of quantity of water inrush from coal seam floor and its reinforcement technique by grouting. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,* 28(2), 312-318.

-Capatti, M. C., Dezi, F., Carbonari, S., & Gara, F. (2018). Full-scale experimental assessment of the dynamic horizontal behavior of micropiles in alluvial silty soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* 113, 58-74.

Dezi, F., Carbonari, S., & Morici, M. (2016). A numerical model for the dynamic analysis of inclined pile groups. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics,* 45(1), 45-68.

-Duan, H., Jiang, Z., Zhu, S., Yao, P., & Sun, Q. (2012). New composite grouting materials: Modified urea–formaldehyde resin with cement. *International Journal of Mining Science and Technology,* 22(2), 195-200.

-Duan, H., Jiang, Z., Zhu, S., Yao, P., & Sun, Q. (2012). New composite grouting materials: Modified urea–formaldehyde resin with cement. *International Journal of Mining Science and Technology*, 22(2), 195-200.

-Faramarzi, L., Rasti, A., & Abtahi, S. M. (2016). An experimental study of the effect of cement and chemical grouting on the improvement of the mechanical and hydraulic properties of alluvial formations. *Construction and Building Materials*, 126, 32-43.

-Funehag, J., & Fransson, Å. (2006). Sealing narrow fractures with a Newtonian fluid: model prediction for grouting verified by field study. *Tunnelling and underground space technology*, 21(5), 492-498.

-Funehag, J., & Gustafson, G. (2008). Design of grouting with silica sol in hard rock–New methods for calculation of penetration length, Part I. *Tunnelling and underground space technology,* 23(1), 1-8.

-Funehag, J., & Gustafson, G. (2008). Design of grouting with silica sol in hard rock–New design criteria tested in the field, Part II. *Tunnelling and underground space technology,* 23(1), 9-17.

-Ghiasi, V., & Farzan, A. (2019). Numerical study of the effects of bed resistance and groundwater conditions on the behavior of geosynthetic reinforced soil walls. *Arabian Journal of Geosciences*, *12*(23), 729.
doi.org/10.1007/s12517-019-4947-2

-Ghiasi, V., & Koushki, M. (2020). Numerical and artificial neural network analyses of ground surface settlement of tunnel in saturated soil. *SN Applied Sciences*, *2*(5), 939.
doi.org/10.1007/s42452-020-2742-z

-Ghiasi, V., Ghasemi, S. A. R., & Yousefi, M. (2021). Landslide susceptibility mapping through continuous fuzzification and geometric average multi-criteria decision-making approaches. *Natural Hazards*, *107*(1), 795-808.
doi.org/10.1007/s11069-021-04606-y

-Ghiasi, V., & Zakavi, I. (2023). Geosynthetics of Stone Columns- A Review. *Road*, *31*(117), 143-170. **doi: 10.22034/road.2022.333550.2033**

-Ghiasi, V., Pauzi, N,I, M.., Karimi, S., and Yousefi, M.(2023),Landslide risk zoning using support vector machine algorithm, *Geomechanics and Engineering*, 34(3), 267-284.
doi: 10.12989/gae.2023.34.3.267

-Ge, L. T., Ye, G. J., & Gao, H. L. (2001). Coal hydrogeology in China.

-Gothäll, R., & Stille, H. (2009). Fracture dilation during grouting. Tunnelling and underground space technology, 24(2), 126-135.

-Gothäll, R., & Stille, H. (2010). Fracture–fracture interaction during grouting. Tunnelling and Underground Space Technology, 25(3), 199-204.

-Hu WY. (2005). The theory and methods of coal mine water disasters controlling. Beijing, *China Coal Industry Publishing House.*

-Huang, Y., & Wen, Z. (2015). Recent developments of soil improvement methods for seismic liquefaction mitigation. *Natural Hazards*, 76(3), 1927-1938.

Hughes, P. N., Glendinning, S., Manning, D. A., & White, M. L. (2011). Use of red gypsum in soil mixing engineering applications. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering,* 164(3), 223-234.

-Ibragimov, M. N. (2009). Experience with injection methods for stabilization of bed soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 46(1), 17-23.

-Ischy, E., & Glossop, R. (1962). An Introduction to alluvial grouting. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers,* 21(3), 449-474.

Ischy, E., & Glossop, R. (1962). AN Introduction To Alluvial Grouting. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers,* 21(3), 449-474.

-Jamshidi, S., Ghiasi, V., Ghanbari, A., & Zanganeh, A. (2022). Evaluation of Burnt Oil and Asphalt Chips on Some Properties of Hot Asphalt Mix. *Road*, *30*(113), 143-156.
doi: 10.22034/road.2022.341569.2047

-Jiang, Z. Q., Wu, S. L., Li, D. L., Yang, C. X., & Jia, S. L. (2005). Chemical pre-grouting treatment applied to water leakage control of fissured surrounding rocks in inclined mine shaft of Zhaozhuang mine. *Coal science and Technology,* 2, 26-28.

-Kell, J. (1957). Pre-treatment of Gravel for Compressed Air Tunnelling Under the River Thames at Dartford. *Institution of Civil Engineers.*

-Ghiasi, V., & Najafi, F. (2022). Investigation of liquefiable soils improvement methods. *Road*, *30*(110), 41-56.
doi: 10.22034/road.2023.112863

-Ghafari, M., Nahazanan, H., Yusoff, Z. M., & Ghiasi, V. (2021). Effect of soil cohesion and friction angles on reverse faults. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, *20*, 329-334. **doi.org/10.1007/s11803-021-2023-x**

-Ghiasi, V., Haghtalab Joraghani, M., & Rashno, S. (2023). An Overview of Chemical Soil Stabilization Methods. *Road*, *31*(116), 151-166.
doi: 10.22034/road.2022.312705.1988

-Ghiasi, V., & Molaei Tari, P. (2022). Geotechnical design of landfills and solutions for their construction in different soils. *Road*.
doi: 10.22034/road.2022.324326.2020

--Ghiasi, V., & nazhdghorbani, A. (2022). An overview of the use of fly ash for soil stabilization. *Road*.
doi: 10.22034/road.2022.333556.2034

-Ghiasi, V., & molaei tari, P. (2023). Investigating the potential application of biochar on soil water retention properties (swrc) with different textures in geotechnical engineering structures. *Road*.
doi: 10.22034/road.2023.353589.2073

-Ghiasi, V., & Sharifi far, F. (2023). Bearing capacity of strip foundation on granular soil reinforced with geogrid. *Road*.
doi: 10.22034/road.2023.360048.2083

-Ghiasi, V., & Tavagho Hamedani, H. (2022). A review of soil improvement with waste and recycled materials and its impact on soil parameters. *Road*.
doi: 10.22034/road.2022.324228.2019

--Ghiasi, V., & madah, S. (2022). Investigation of increasing shear strength of dispersive clays using additives. *Road*.
doi: 10.22034/road.2022.324512.2023

-Ghiasi, V., & Mostafaeifar, A. (2023). Assessment of the effects of geosynthetics on geotechnical soils behavior. *Road*, *31*(115), 67-80.
doi: 10.22034/road.2022.323429.2015

-Ghiasi, V., & kamalabadi Farahani, M. (2022). Feasibility study of soil pollution removal using the electrokinetic method. Road.
doi: 10.22034/road.2022.323983.2018

--Ghiasi, V., & Dashti famili, S. (2023). A Review of the Factors That Cause Sinkholes and the Effect of Soil Type on Its Formation. *Road*, *31*(114), 15-32. **doi: 10.22034/road.2022.323699.2017**

Shimada, H., Matsui, K., & Inoue, M. (1998), Fundamental experiment for stability of mud slurry in using pipe-jacking. In Proc. of 9th Conference on Trenchless Technology, 37-44.

-Shimada, H., Sasaoka, T., Khazaei, S., Yoshida, Y., & Matsui, K. (2006). Performance of mortar and chemical grout injection into surrounding soil when slurry pipe-jacking method is used. *Geotechnical & Geological Engineering,* 24(1), 57-77.

-Song, Y. B., & Gao, Q. C. (2006). Mechanism of grouting for waterproof using organic material with high water content. *Journal of Mining & Safety Engineering,* 3, 320-323.

-Stragys, V., Mackevicius, R., (2005). Foundations of ancient buildings having architectural value and their strengthening in Lithuania". Proceedings of the 13th World Lithuanian Symposium on the Arts and Sciences, Vilnius, *Lithuania,* 78-79.

-Tombari, A., El Naggar, M. H., & Dezi, F. (2017). Impact of ground motion duration and soil non-linearity on the seismic performance of single piles. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* 100, 72-87.

-Wanghua, S., Yongtao, L., Guantian, L., & Guoqing, W. (2000). Seepage prevention grouting in coalmine shaftwall and mechanism analysis. *Chinese Journal OF Geotechnical Engineerin-Cngineering Edition*, 22(2), 214-217.

-Yang, M. J., Chen, M. X., & He, Y. N. (2001). Simulating experiment for grouting seepage in rockmass. *Journal of Experimental Mechanics*, 16(1), 105-112.

-Yao, P. (2007). Study on engineering performance and simulation experiment of cement-based composite grouting material. Xuzhou: *China University of Mining & Technology.*

-Zhang, G. L., Zhan, K. Y., & SUI, W. H. (2011). Experimental investigation of the impact of flow velocity on grout propagation during chemical grouting into a fracture with flowing water. *Journal of China Coal Society,* 36(3), 403-406.

-Kitkauskas, N. (1994). Vilniaus arkikatedros požemiai. *Kultūra.*

-Kuleev, M. T., Kutuzov, B. N., Neporozhnii, V. P., & Popov, A. V. (1970). Anti-seepage curtain in the Aswan Dam. Energiya, *Moscow.*

-Latini, C., & Zania, V. (2017). Dynamic lateral response of suction caissons. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* 100, 59-71.

-Mackevicius, R. (2013). Possibility for stabilization of grounds and foundations of two valuable ancient cathedrals on weak soils in Baltic Sea region with grouting. *Procedia Engineering,* 57, 730-738.

-Mayer, A. (1958). Cement and Clay Grouting of Foundations: French Grouting Practice. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 84(1), 1550-1.

-Mel'nikov, B. N. (1985). Geotechnical masses as a new form of beds for engineering structures. *Inzh.* Geol, (2), 11-21.

-Monstvilas, K., ISrumpis, G., & NSikauskas, N. (1995). Foundations of Vilnius cathedral and of the Grand Dukes' Palace and the investigations of their ground. In Baltic Geotechnics' 95. *Baltic Geotechnical Conference,* 5-9.

-Moroz, V. V. (2005). Geocomposite-an effective means of strengthening weak soils. Novye Tekhnol., *Tekhnika, Mater,* (3), 25-27.

-Osipov, V. I., & Filimonov, S. D. (2002). Hardening and Reinforcement of Weak Soils by the "Geocomposite" Method. *Soil Mechanics and Foundation Engineering,* 39(5), 171-179.

-Rahimpour, H., Ghiasi, V., Fahmi, A., & Marabi, Y. (2023). Geopolymer vs ordinary portland cement: review of the 3-d printing of concrete. *Applied Engineering and Technology*, *2*(2), 133-152.

doi:10.31763/aet.v2i2.1010

-Sargent, P., Hughes, P. N., Rouainia, M., & White, M. L. (2013). The use of alkali activated waste binders in enhancing the mechanical properties and durability of soft alluvial soils. *Engineering geology,* 152(1), 96-108.

-Sherwood, P.T., 1993. Soil Stabilisation with Cement and Lime - State of the Art Review. Transport Research Laboratory, Department of Transport. *HMSO Publications,* 0-11-551171-7.

Improvement of Alluvial Soils Using Cement Injection Method

Vahed Ghiasi, Department of Engineering, Faculty of Civil and Architecture Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.

Satar Eskandari, M.Sc.,Student, Department of Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.

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

Received: June 2023- Accepted: February 2024

ABSTRACT

Injection soil improvement is one of the methods of modifying the properties of the site of construction projects or existing structures. Several stabilization techniques are available to improve such conditions, including compaction, consolidation, mechanical stabilization, and cement injection into the soil. The injection is often done by filling cavities and fractures with grout or cement mortar. Despite almost the same principles, injection methods have different equipment and procedures. These methods have their characteristics and advantages due to insufficient bearing capacity, shrinkage swelling, settling, and durability. This study intended to review the studies and methods of improving alluvial soils using the cement injection method. After reviewing the results of this study, we can get three main factors: percentage of cement, setting time (sample age), and percentage of coarse soils have a very effective and controlling role in the strength of soil-cement samples, but the effect of these three factors is not the same in increasing strength. The results of such experiments can be used as a basis for quality control of cement injections in porous media, especially in coarse-grained alluvial sediments and jointed and crushed rocks. The resistance of coarse-grained alluvial sediments with the potential for spillage can be increased, during or after tunnel excavation, by adding a minimum percentage of injected cement to the desired strength or design strength, which is essential from the technical and economic justification of injection projects.

Keywords: Soil Improvement, Alluvial Soil, Injection, Cement Slurry