

## 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 راه‌های 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. با وجود اصول تقریباً مشابه، روش‌های تزریق دارای تجهیزات و فرآیندهای اجرایی متفاوت هستند. هر یک از این روش‌ها 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 روش‌های بهسازی خاک‌های 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 مورد استفاده 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 از نظر توجیه فنی و اقتصادی پروژه‌های تزریق حائز اهمیت است.

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

### ۱- مقدمه

در خاک اطراف تونل و میزان تزریق بهینه هنوز به وضوح درک نشده است. ( Ghiasi and Farzan, 2019, Ghiasi and Kushki, 2020, Ghiasi et al, 2021, Rahimpour et al, 2023, Jafarzadeh Marandi et al, 2023) 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 سرویس دهی

پیشرفت‌های تکنولوژیکی اخیر به روش‌های موفق‌تری برای تثبیت اقصای 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 به صورت و به ناحیه بیش از حد برش که بین لوله بتنی و خاک است، تزریق می‌شود. پس از اینکه دوغاب فضاهای خالی خاک را پر کرد، در اثر فشار دوغاب، خاک تثبیت می‌شود. پس از پایان فرآیند رانندگی و هل دادن، تزریق دوغاب شیمیایی به خاک اطراف انجام می‌شود تا پایداری دائمی خاک اطراف تونل حفظ شود. با این حال، رفتار مواد تزریق شیمیایی

متصل می‌کنند و تقویت می‌کنند، این فرآیند را می‌توان تقریباً برای هر مشکل مهندسی که تزریق مقرون به صرفه‌ترین راه حل ارائه می‌دهد، اعمال کرد. انتخاب سیالات تزریق در هر مورد خاص به ویژگی‌های اساسی آن‌ها بستگی دارد که در زیر ذکر شده است. (اسکی و گلاسه، 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 پایین تری 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 مورد استفاده 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

آن، با توجه به الزامات پروژه افزایش یا کاهش می‌یابند. روش‌های بهسازی خاک در مقایسه با گزینه‌های دیگری مانند جایگزینی خاک ضعیف (عملیات خاکی) و طراحی مجدد براساس شرایط موجود از انعطاف پذیری بالاتر و هزینه پایین تری بهره می‌برند. به‌طور کلی، قدیمی‌ترین و متداول‌ترین کاربرد این روش‌ها در بهبود مشخصات خاک مورد استفاده برای فونداسیون سازه‌ها، 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 توسعه یافته و به جرئت می‌توان گفت که تزریق می‌تواند به عنوان تنها راه حل مناسب و اصولی برای فونداسیون‌های 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 می‌توانند مشکل ساز شوند. برای بهبود چنین شرایطی، تعدادی از تکنیک‌های تثبیت برای استفاده در دسترس هستند، از جمله 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 پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه بهسازی خاک‌های آبرفتی با استفاده از روش تزریق سیمان پرداخته شده است.

### مقدمه‌ای بر تزریق آبرفتی

از آنجایی که در حال حاضر دوغاب‌هایی در دسترس هستند که آبرفت‌های با ساختار متفاوت و در طیف وسیعی از دانه‌ها را

در استحکام خاک تیمار شده استفاده می شوند. در سال های اخیر تحقیقات زیادی روی گروه اول انجام شده است تا مخلوط هایی را پیدا کنند که زمان گیرش را می توان کنترل کرد. همه آن ها مبتنی هستند. روی مخلوط های سیلیکات سدیم با معرف هایی مانند دوغاب آهک، بی کربنات سودا، سولفات مس و نمک های مختلف آلومینوم. استحکام ژل کم است و افزایش محسوسی در استحکام زمین ایجاد نمی کند. اخیراً دوغ آب های سیلیکات ساخته شده اند که استحکام مواد تیمار شده را به شدت افزایش می دهند، به عنوان مثال، دوغاب مبتنی بر سیلیکات سدیم مخلوط شده با سیستمی از استرهای آلی که تکامل کنترل شده ای از یون های واکنش پذیر 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.

سائتی متر. می توان به دست آورد. ( Ghiasi and Dashtifamili, 2023, اسکی و گلاسب, ۱۹۶۲)

#### گروت های مبتنی بر پلیمرهای آلی

این نوع دوغاب ها شامل گروهی از مواد است که تک مولکول های آن ها، عموماً تحت تأثیر یک کاتالیزور، با هم متحد می شوند و مولکول های بزرگ تری را تشکیل می دهند که ممکن است اثر تبدیل یک ماده اولیه مایع به جامد را داشته باشد. این ویژگی نشان می دهد که پلیمرها ممکن است به عنوان دوغاب مورد استفاده قرار گیرند و در واقع چندین مورد در حال حاضر مورد استفاده قرار می گیرند و تعدادی دیگر در دست بررسی هستند. نمونه هایی از گروت های پلیمری آلی عبارت اند از: - ترکیبات غیراشباع، مانند آکریلات ها و مشتقات آن ها. فنل، زورسینول و اوره، در محلول آبی. این مواد امولسیون پلی استرها و اپوکسیدها هستند که با تزریق تجزیه می شوند. در نهایت، آلزینات، پلیمر طبیعی، می تواند به عنوان دوغاب استفاده شود. برخی از این مواد دارای ویسکوزیته نزدیک به آب هستند و در نتیجه می توانند به خاک های ریزدانه نفوذ کنند. مشاهده خواهد شد که با چنین طیف وسیعی از مواد که از نظر 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 می کند. ( Ghiasi

سیمان به آب معمولاً ۰-۴ است. چنین مخلوط هایی دارای قدرت گیرش حدود ۲۵ کیلوگرم بر مترمربع هستند. سائتی 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. در جاهایی که از خاک رس محلی با کیفیت پایین استفاده می شود، ممکن است با افزودن بتونیت، 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 ته نشین شدن آن ها جلوگیری می کند تا زمانی که پدیده ته نشینی رخ دهد، در حالی که البته، بسیاری از آب موجود توسط هیدراته شدن جذب می شود. (مایر، ۱۹۵۸)

#### دوغ آب های خاک رس تثبیت شده

در تهیه این دوغاب ها از مواد افزودنی برای بررسی لخته سازی و تقویت استحکام ژل استفاده می شود. همه رس ها را می توان با چنین عملیاتی بهبود بخشید و ظرفیت آن ها برای نفوذ به خاک همیشه بیشتر از مخلوط رس و سیمان است. بتونیت های با عیار بالا ممکن است در تزریق ماسه درشت تا متوسط استفاده شوند؛ اما از آنجایی که استحکام ژل آن ها برای افزایش قابل ملاحظه استحکام خاک کافی نیست، معمولاً فقط برای آب بندی و کاهش نفوذپذیری استفاده می شود. ( 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 پیش گرم 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, 2022, اسکی و گلاسب, ۱۹۶۲)

#### گروت بر پایه سیلیکات سدیم

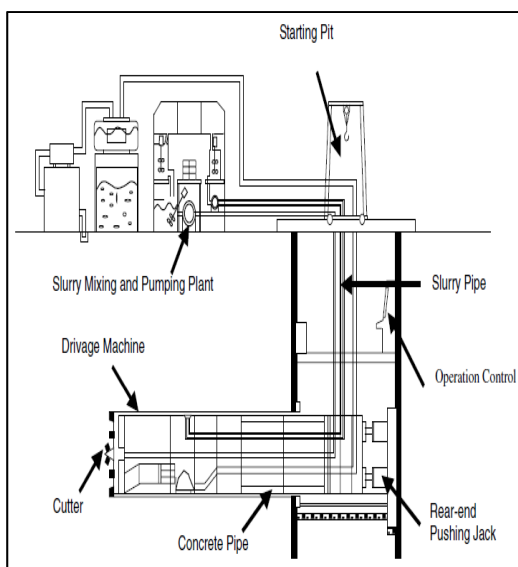
تنوع زیادی از این نوع دوغاب ها وجود دارد، برخی عمدتاً برای آب بندی خاک های شنی و برخی دیگر برای افزایش قابل توجهی

از مخلوط‌هایی از سیمان مقاوم در برابر سولفات و خاک رس با خاک رس تثبیت شده یا با سیلیکاژل تشکیل شده بودند. تزریق از طریق لوله‌های رانده انجام می‌شود، طول سینکته اغلب به ندرت بیش از چند متر بود. کارهای مشابه اغلب در ارتباط با تونل‌های شهری پاریس انجام می‌شود 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 به صورت 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 ۱) 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. با این حال، رفتار مواد تزریق شیمیایی در خاک اطراف تونل و میزان تزریق بهینه به وضوح درک نشده است. از این منظر،

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 می‌دهد، 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 مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما در حال حاضر تزریق یک سیال در این زمینه معرفی شده است و در هر سه خودروی بزرگ استفاده شده 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. (کیل، ۱۹۵۷؛ انون، ۱۹۵۷؛ اسکی و گلاسب ۱۹۶۲)

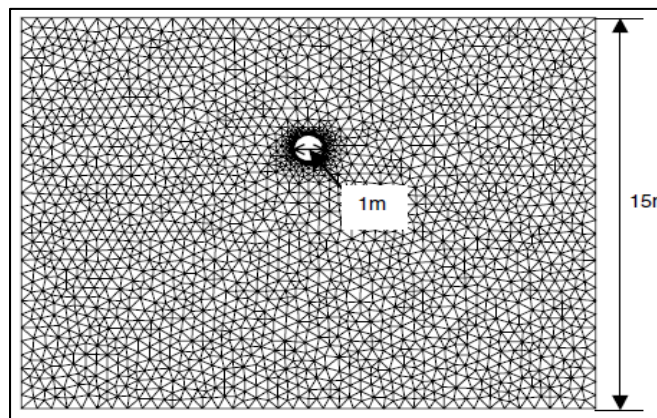
### تعمیرات سازه‌های زیرسطحی

پی‌های بتنی و بنایی روی خاک‌های آبرفتی ممکن است در معرض حمله سولفات‌های موجود در آب‌های زیرزمینی قرار گرفته و به شدت آسیب ببینند. در موارد دیگر، جریان آب زیرزمینی ممکن است ماسه ریز را از بین ببرد و در نتیجه حفره‌هایی ایجاد کند که یک سازه را به خطر می‌اندازد. این اتفاق در برخی از تونل‌های متروپولیتن راه‌آهن زیرزمینی پاریس رخ داده 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 ساخته شده‌اند که با آب حاوی سولفات کلسیم در محلول اشباع شده است. از بسترهای گچ زیر تپه به دست آمده 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 سنگ تراشی، شامل تزریق برای پر کردن و تحکیم زمین اطراف تونل بود. دوغ آب‌های مورد استفاده مطابق با طبیعت زمین بودند و

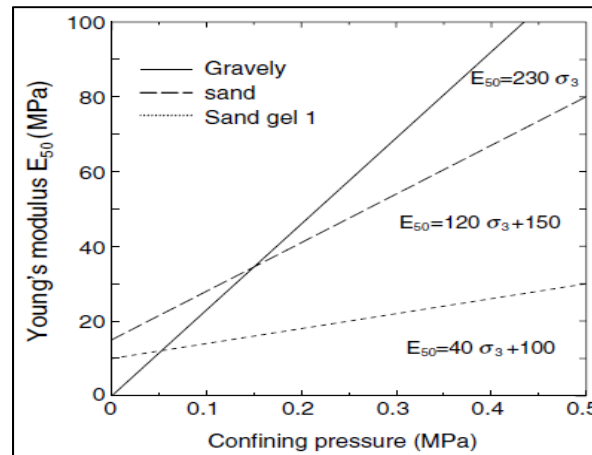
شیمیایی و ویژگی های خاک / منطقه دوغاب شده نیز مهم است. (شیمادا و همکاران، ۲۰۰۶)

این مقاله عملکرد و رفتار ملات و مواد تزریق شیمیایی در خاک اطراف و ناحیه برش اطراف لوله ها را در روش جک کشی 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 می دهد.

این مقاله عملکرد مواد تزریق شیمیایی را هنگامی که به خاک اطراف تونل تزریق می شود، با استفاده از تجزیه و تحلیل تراوش اویلری-لاگرانژی دوبعدی (شکل) مورد بحث قرار می دهد. علاوه بر این، اثربخشی تزریق دوغاب شیمیایی با استفاده از روش اجزای محدود غیرخطی ارزیابی شد. این بررسی نشان می دهد که چه زمانی محدوده ناحیه دوغاب شده طراحی شده 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

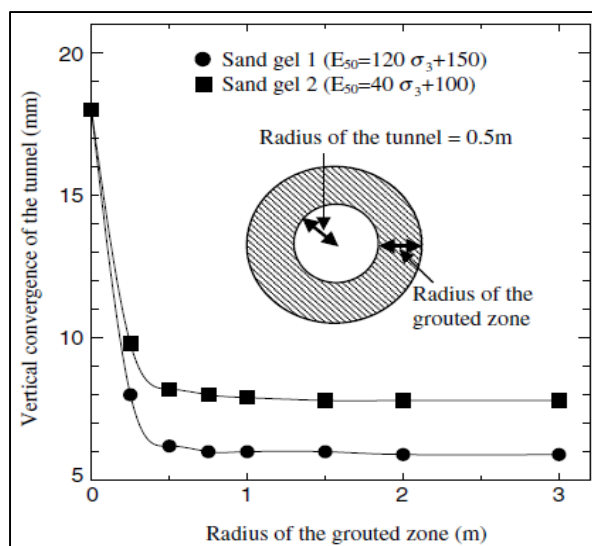


شکل ۲. مدل المان محدود دوبعدی (شیمادا و همکاران، ۲۰۰۶)



شکل ۳. رابطه بین فشار محدود و مدول یانگ E<sub>50</sub> (شیمادا و همکاران، ۲۰۰۶)

خواص مقاومتی خاک قبل از تزریق و پس از تزریق خاک - سیمان در این مقاله مورد بحث قرار گرفته است. با تکیه به این نکته که درصد تخلخل مفید می تواند نقش مؤثر در حجم تزریق مصرفی داشته باشد و در نتیجه عامل مهمی در تغییر مقاومت خاک های تزریق شده باشد، انتخاب نوع دانه بندی مصرف خاک های مسیر مورد مطالعه حائز اهمیت است. بدین منظور، انتخاب نمونه های آزمایشگاهی رسوبات آبرفتی مسیر براساس میانگینی از منحنی های دانه بندی گرفته شده از تونل های خط ۱ متروی تهران صورت گرفته است. همچنین نشان داده شده است که چگونه می توان مقاومت نهایی خاک های طبیعی را با بالا بردن در صد سیمان نسبت به وزن کل نمونه ها (با حفظ نقش آب) افزایش داد. دامنه تغییرات مقاومتی حاصل از نتایج آزمایش های انجام شده 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 داده شده است که می توان مقاومت رسوبات آبرفتی درشت دانه 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 از نظر توجیه فنی و اقتصادی پروژه های تزریق حائز اهمیت است (شکل ۴). (مجدی، ۱۳۸۳ و قارونی و بزرگ مهرنیا، ۱۳۸۸)



شکل ۴. رابطه بین شعاع ناحیه دوغاب شده و همگرایی عمودی تونل (شیمادا و همکاران، ۲۰۰۶)

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 بهبود یافته که علاوه بر سوراخ های تزریق در لوله بتنی دارای سوراخ های تخلیه است، یک سیستم تزریق ملات مؤثر است و می تواند مشکل سیستم تزریق ملات فعلی را حل کند. با این حال، به منظور ایجاد و بهره مندی از این سیستم تزریق ملات بهبود یافته، لازم است داده هایی از تجربیات شخصی و میدانی برای درک عملکرد رفتار تراوش/پراکنندگی ملات و دوغاب گل به دست آید. هنگامی که 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 پراکنندگی دوغاب شیمیایی و ویژگی های خاک منطقه دوغاب شده نیز مهم است. (شیمادا و همکاران، ۲۰۰۶)

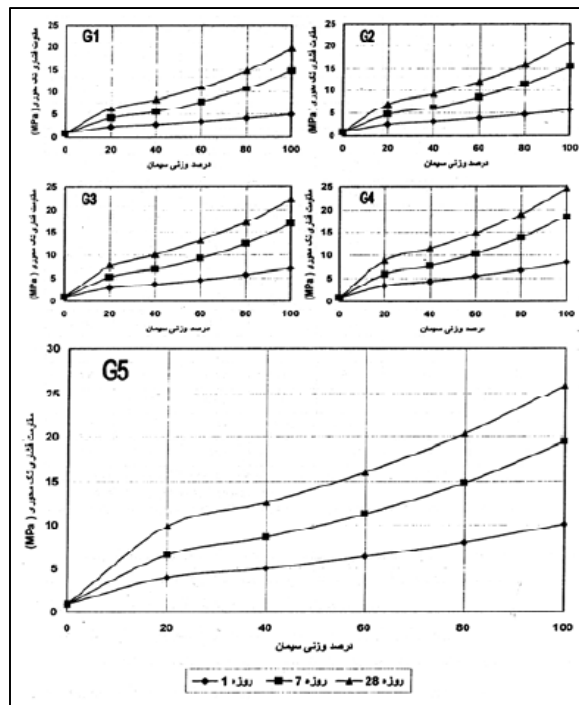
### ۳- تزریق در سازندهای آبرفتی به منظور پایدارسازی تونل های مترو و راه آهن

نتایج مطالعات آزمایشگاهی حاصل از تزریق سیمانی بر خواص مقاومتی رسوبات آبرفتی درشت دانه تهران و بررسی مقایسه ای

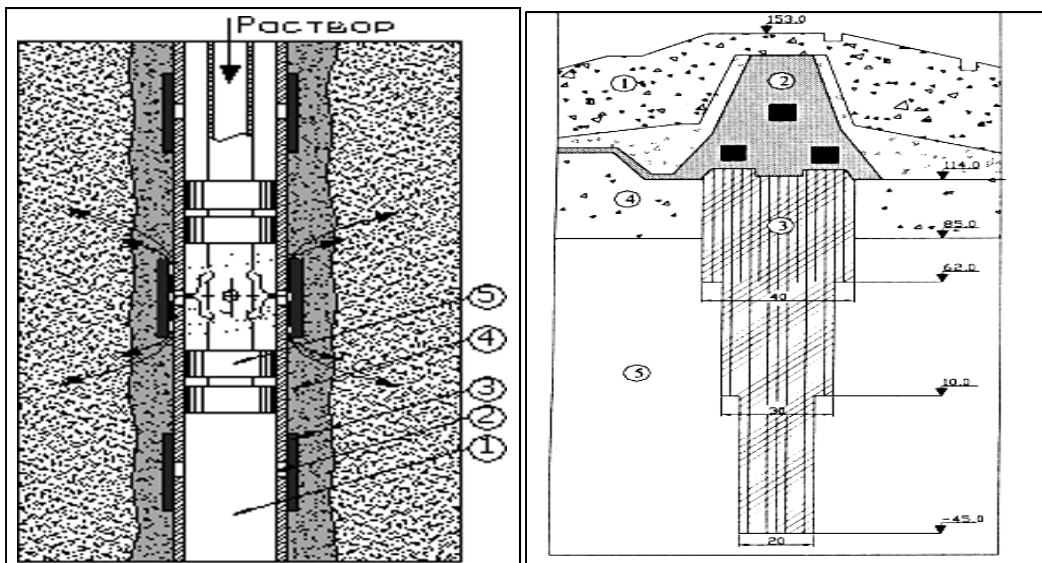
### ۳-۱- روش ژئوماس-ژئوکامپوزیت برای تثبیت خاک‌های

#### بستر

روش «ژئوماس-ژئوکامپوزیت» برای بهبود استحکام و خواص تغییرشکل خاک‌های مختلف هم از نظر طبیعی (ماسه، لوم شنی، لوم رسی، رس، لس و خاک‌های آبرفتی) و همچنین با منشاء تکنولوژیک (خاک پرکننده، خاک ریز و نهشته‌های کشت شده) توصیه می‌شود که بدون استثنا زیربنای انواع پی‌ها از جمله 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 سه طبقه در عمق تثبیت لایه‌های کنار شن و ماسه از لوم شنی تا ماسه درشت، از جمله رسوبات هیدرولیکی مصنوعی ناهمگن ماسه‌های "شالاسک" 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 تزریق شده از طریق سوراخ‌های ردیف‌های داخلی ساخته شدند (جدول ۱). (اوسیوف و فیلیمونف، ۲۰۰۲؛ موروز، ۲۰۰۵ و میلنیکف، ۱۹۸۵).



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



شکل ۶. گودال با ستون کاف (ایراگیموف، ۲۰۰۹)

جدول ۱. نتایج بررسی های زمین شناسی - مهندسی انجام شده در ۱۷ سوراخ بازرسی حفاری شده (ایبراگیموف ۲۰۰۹)

Hole No.	Sampling depth of probe, m	Density g/cm <sup>3</sup>	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

توسعه درز زغال سنگ 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 کرده اند (سوی و همکاران، ۲۰۰۰؛ ژیانگ و همکاران، ۲۰۰۵؛ گوئال 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 ویژگی های 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 فرانسون، 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. با این حال، از آنجایی که دوغاب سیمان یک ماده ذره ای است، معایبی مانند توانایی تزریق ضعیف (نفوذ در شکستگی های ریز و لایه های ماسه سیلتی دشوار است)، شکنندگی ماده جامد و

در بستر سد اسوان، یک پرده همگن وزنی فیلتراسیون در رسوبات آبرفتی ماسه ایجاد شد که از نظر اندازه ذرات و خواص فیلتراسیون بسیار ناهمگن است که نتایج آن را به صورت ذیل می توان بیان نمود (ایبراگیموف، ۲۰۰۹).

الف - به نظر ما برای تثبیت خاک های لاسدر بستر ساختمان ها و سازه ها نامناسب است، زیرا قابلیت نشست از نوع اسلامپ با این روش رفع نمی شود. خیس شدن با دوغ آب های تزریقی (آب-خاک و سوسپانسیون آب-سیمان) منجر به نشست های بیشتر از نوع اسلامپ می شود.

ب - از روش «ژئوماس-ژئوکامپوزیت» می توان برای تثبیت نشست های ساختمان ها بر روی خاک های شنی-رسی با پی گسترده استفاده کرد. تثبیت در درجه اول در نتیجه تشکیل لایه ای از خاک با ظرفیت باربری افزایش یافته در زیر پی حاصل می شود که با رگه های سیمانی تقویت می شود.

پ - تثبیت خاک که مطابق با تکنولوژی تزریق کاف انجام می شود، معایب روش «ژئوکامپوزیت ژئوماس» را از بین می برد.

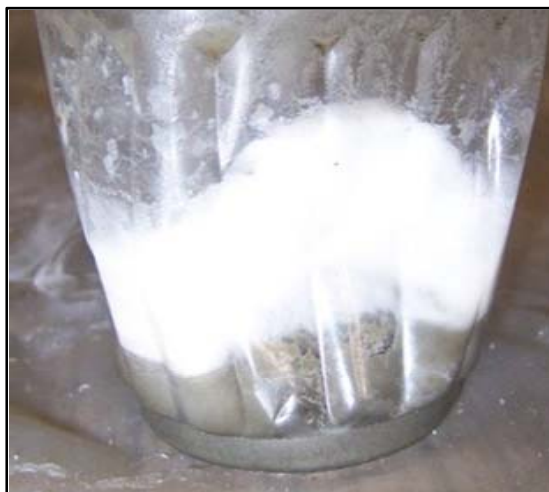
### ۲-۳- مواد تزریق کامپوزیت جدید: رزین اوره- فرمالدئید

#### اصلاح شده با سیمان

چین دارای پیچیده ترین شرایط معدنی هیدروژئولوژیکی در جهان است. با افزایش استخراج عمیق معدن در مناطق قدیمی تر شرقی و

شکل). گروت شیمیایی کاربرد ویژه‌ای دارد، اما کاربرد دوغاب سیمانی به دلیل گرانی و استحکام جامد کمتر محدود می‌شود. (دوان و همکاران، ۲۰۱۲)

شکل پذیری 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، به خوبی کار می‌کند.



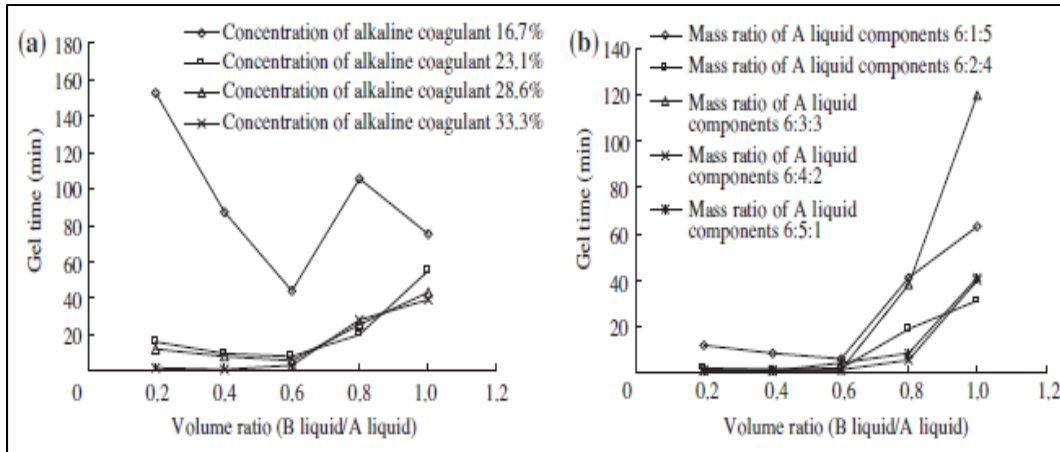
نسبت جرمی ۱۰:۵

نسبت جرمی ۱۰:۱,۵

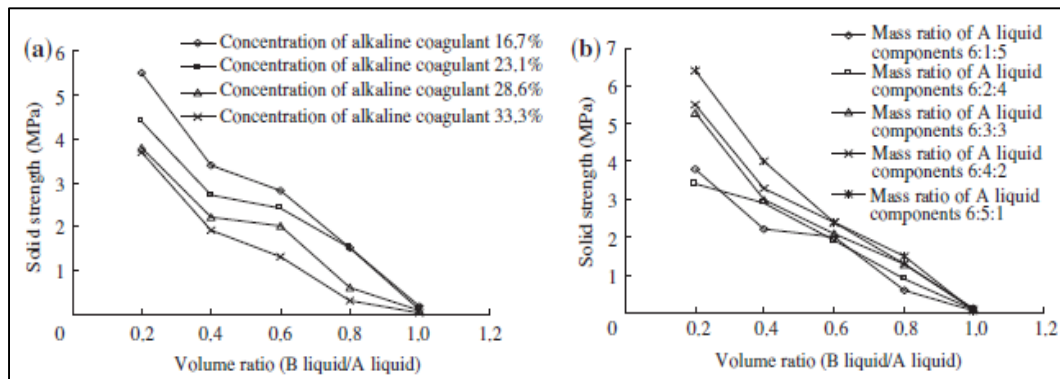
شکل ۷. تصویری از نتایج پس از اختلاط (دوان و همکاران، ۲۰۱۲)



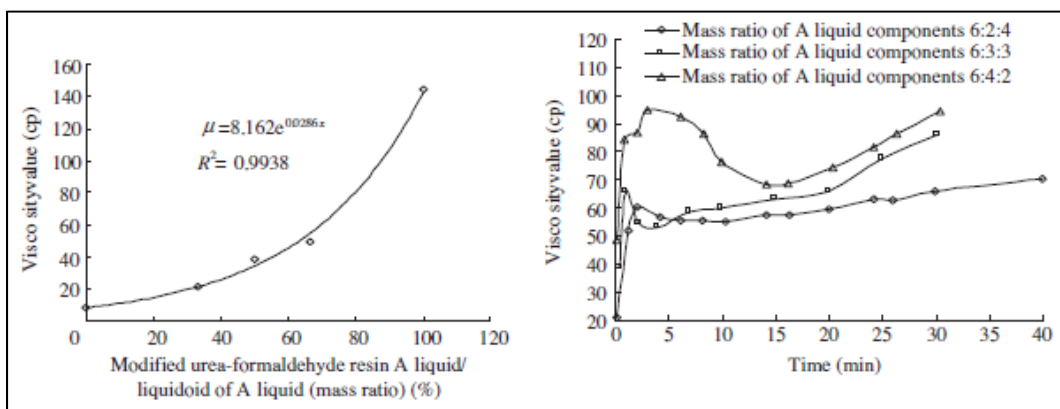
شکل ۸. تصویری از دوغاب پس از گیرش نهایی (دوان و همکاران، ۲۰۱۲)



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)

شد. جزء A از دوغاب رزین اوره فرمالدئید اصلاح شده، 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

نتایج حاصل از مواد تزریقی کامپوزیت جدید: رزین اوره- فرمالدئید اصلاح شده با سیمان.

الف - دوغاب رزین اوره فرمالدئید توسعه یافته توسط دانشگاه معدن و فناوری چین برای توسعه یک ماده تزریقی دوجزئی استفاده

### 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 ساخته شده‌اند. دو بنای مذهبی باستانی در منطقه دریای بالتیک از نظر تاریخی و میراثی بسیار مهم هستند (شکل و شکل) اما از نظر ژئوتکنیکی شکننده هستند. کلیسای جامع ویلنیوس در پایتخت لیتوانی و کلیسای جامع کونینگزبرگ در کالینینگراد، شهر بندری روسیه امروزی و مرکز منطقه‌ای بین لهستان و لیتوانی، بر روی خاک‌های آبرفتی ساخته شده‌اند 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 کونینگزبرگ 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 ۲/۴ مگاپاسکال پس از ۷ روز به ۴/۲ مگاپاسکال پس از ۳ ماه افزایش یافته است. ۱۲ تا ۱۹ برابر کمتر فرمالدئید در هوا از خاک تثبیت شده با رزین‌های اصلاح شده نسبت به خاک تثبیت شده با رزین‌های اصلاح نشده آزاد می‌شود. بوی تند و تحریک‌کننده فرمالدئید در بالای نمونه‌های تازه خرد شده خاک تثبیت شده با رزین اصلاح نشده درک شد و هوشمندی حاد چشم‌ها حس شد، درحالی‌که این پدیده‌ها در نمونه‌هایی از خاک‌های تثبیت شده با رزین اصلاح شده وجود نداشت.

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

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.

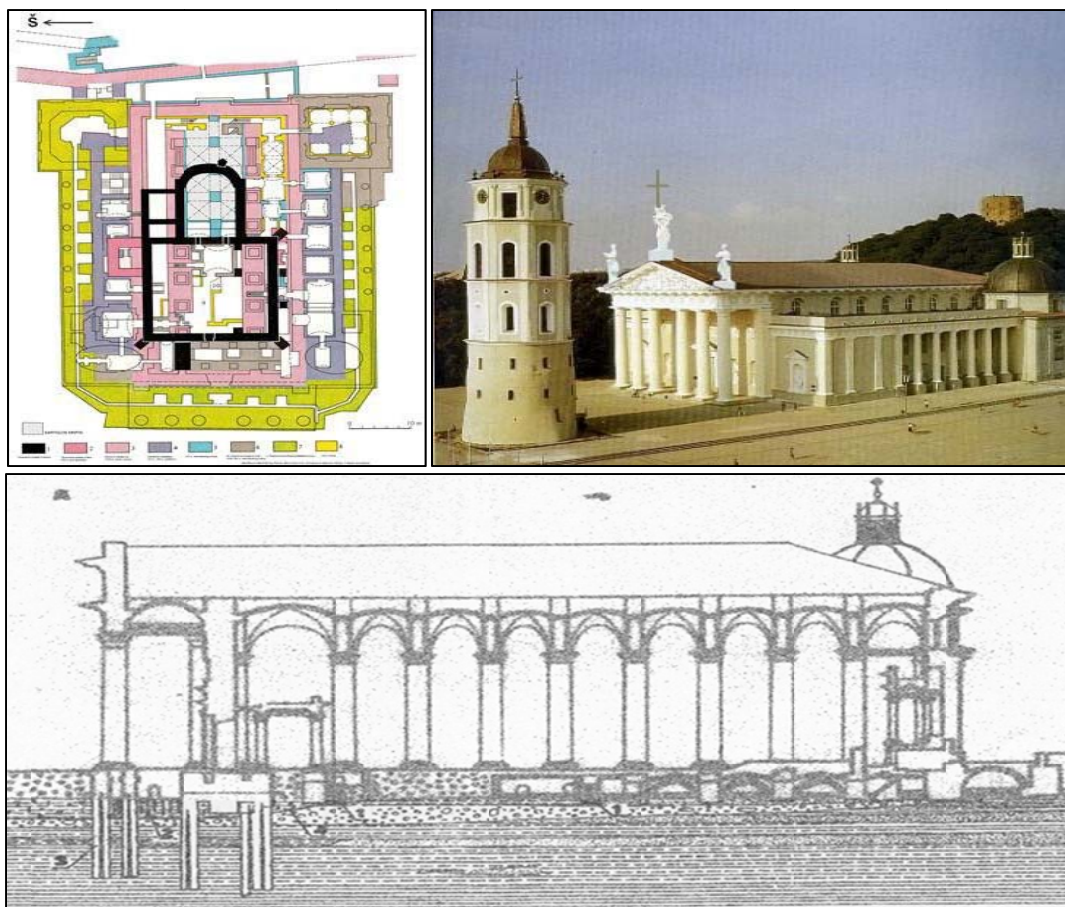
ب - پایداری مایع مواد تزریق کامپوزیتی جدید با نسبت‌های اصلاح شده رزین اوره فرمالدئید جزء A مایع، سیمان و آب در فرمولاسیون مرتبط است. آزمایش‌ها نشان داد که وقتی نسبت مایع رزین اوره فرمالدئید A از ۰,۵ بیشتر شود، زمان تثبیت جزء جدید A حداقل ۳ ساعت است. از این رو دوغاب جدید از ثبات حالت مایع خوبی برخوردار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

پ - آزمایش‌های متقاطع مخلوط نشان داد که با افزایش نسبت حجمی مایع A به B، زمان ژل ابتدا کوتاه‌تر و سپس افزایش می‌یابد. استحکام جامد با افزایش غلظت جزء B کاهش می‌یابد. 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 می‌گذارد و محتویات رزین بالاتر هزینه زیادی دارد.

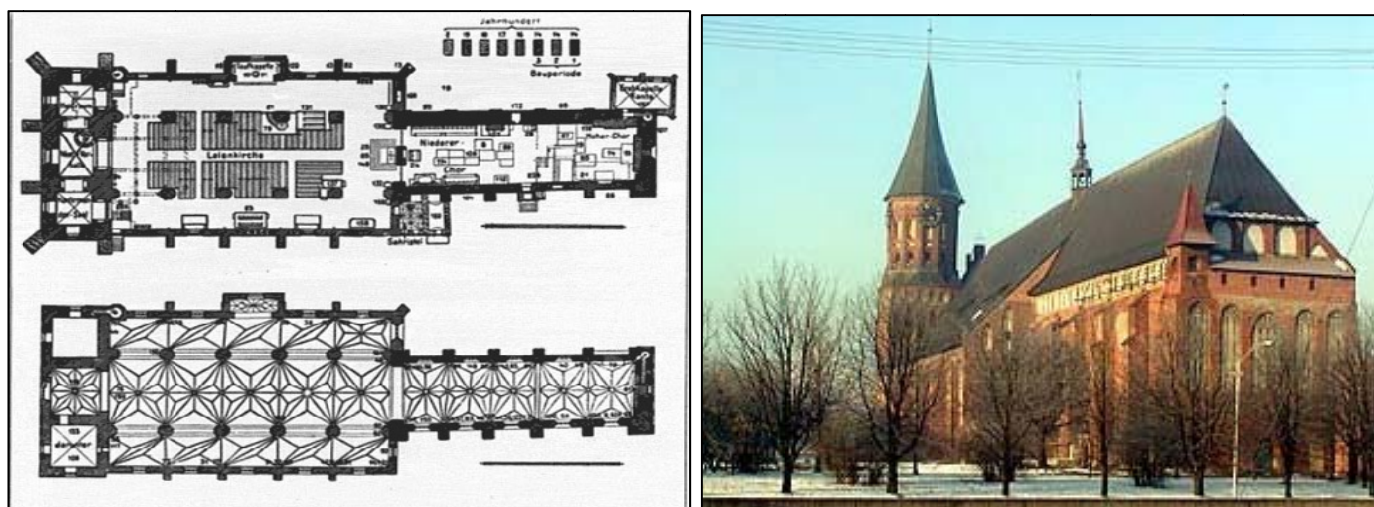
ت - استحکام جامد این دوغاب کامپوزیتی جدید در عرض ۷ روز به مقدار معینی می‌رسد. سرعت سخت شدن نسبتاً دیرتر کمتر می‌شود و سختی در نهایت تا روز ۲۸ تثبیت می‌شود. ویسکوزیته ماده تزریقی کامپوزیت جدید جزء A با محتوای رزین اوره فرمالدئید افزایش می‌یابد. تغییر ویسکوزیته به صورت تصاعدی است (رابطه ۱) و می‌تواند بر اساس موارد زیر باشد:

$$\mu = 8.162e^{0.0286x} \quad (1)$$

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.



شکل ۱۲. رفتار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت‌شده با درصدهای مختلف اوره فرمالدئید تزریق‌شده است. (مونستویلاس و همکاران، ۱۹۹۵؛ کیتکاو سکس، ۱۹۹۴ و بالتاس 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 تثبیت شده 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
7 days	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

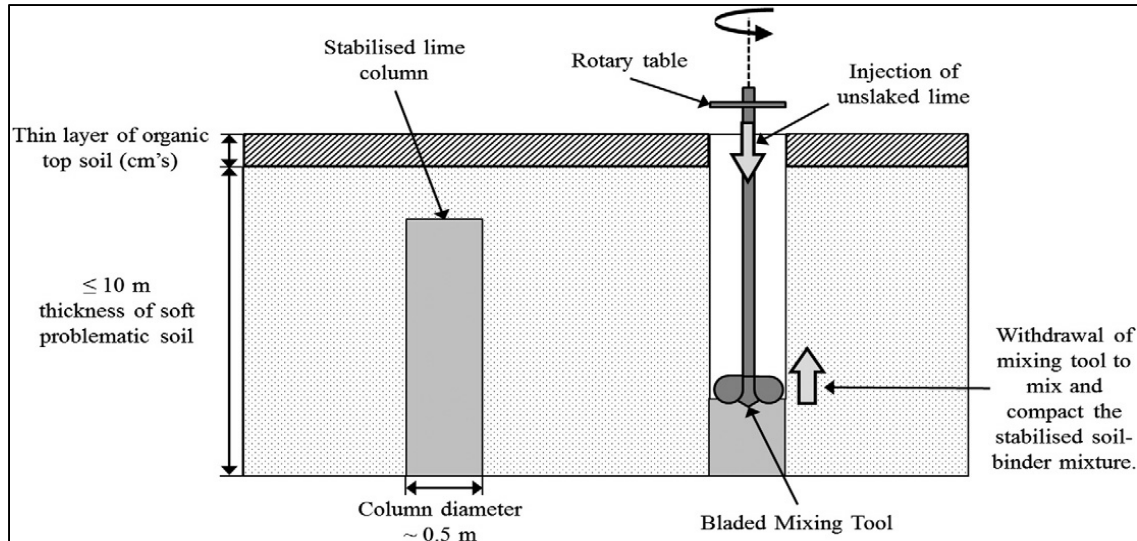
جدول ۳. مقاومت فشاری تک محوری نمونه های تثبیت شده در MPa (مکویشس، ۲۰۱۳)

Type of carbamide resin	Held for 7 days in moist-air medium	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

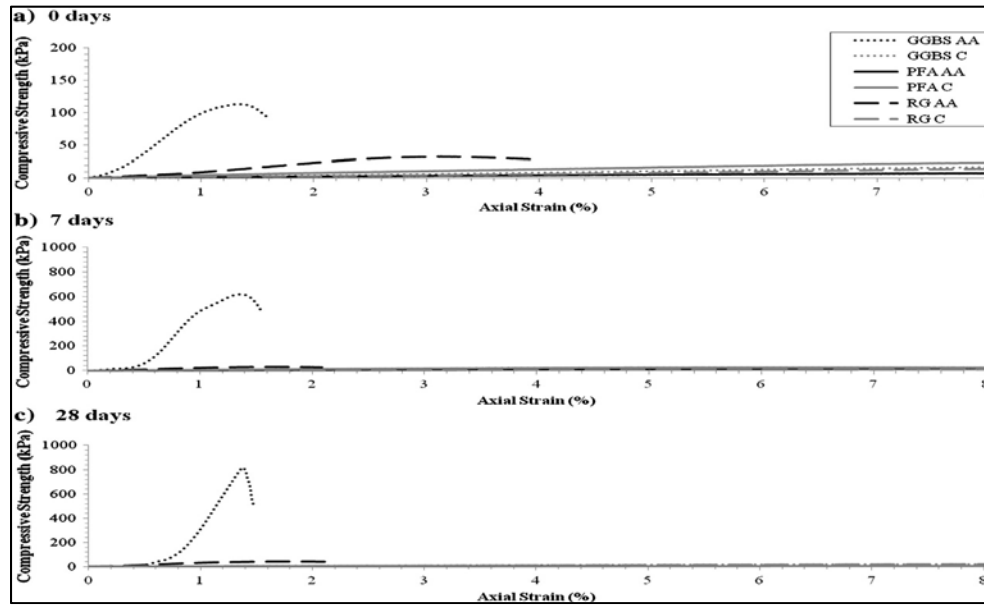
#### ۴- افزایش خواص مکانیکی و دوام خاک های آبرفتی نرم

(شکل). این مطالعه نشان می دهد که از محصولات جانبی آزمایش شده، خاک های تثبیت شده با سرباره کوره بلند فعال قلیایی منجر به بیشترین بهبود استحکام و دوام می شوند؛ با سایر مواد آزمایش شده بهبودهای کوچک تری را نشان می دهند. مشاهده شده است که افزودن فعال کننده های قلیایی اجازه می دهد تا واکنش های پوزولانیک رخ دهد که منجر به بهبود خواص مکانیکی شده است (شکل). در درجه اول قدرت که با گذشت زمان افزایش می یابد. 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)

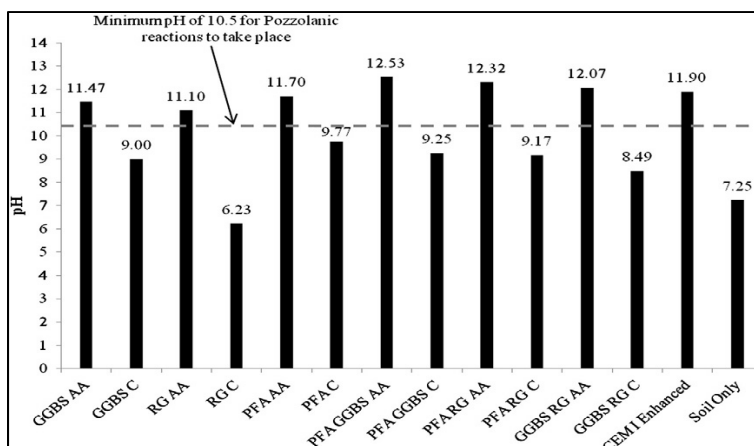
در بسیاری از کشورها، مناطق وسیعی از سطح زمین توسط خاک های نرم (مانند آبرفت و پیت) پوشیده شده است. به دلیل ظرفیت باربری نامطلوب، انقباض/متورم شدن، نشست و دوام، این می تواند مشکل ساز باشد. برای بهبود چنین شرایطی، تعدادی از تکنیک های تثبیت برای استفاده در دسترس هستند، از جمله تراکم/تحکیم، تثبیت مکانیکی و اختلاط خاک با چسب های سیمانی (هیوگس، ۲۰۱۲۰۱۱۳؛ شروود، ۱۹۹۳). آزمایش های ژئوتکنیکی و کانی شناسی برای تعیین عملکرد چسب ها در هنگام ادغام در خاک شن و ماسه سیلتی مصنوعی استفاده می شود. مقایسه هایی با استحکام و دوام خاک های تیمار نشده و تثبیت شده انجام شده است



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)



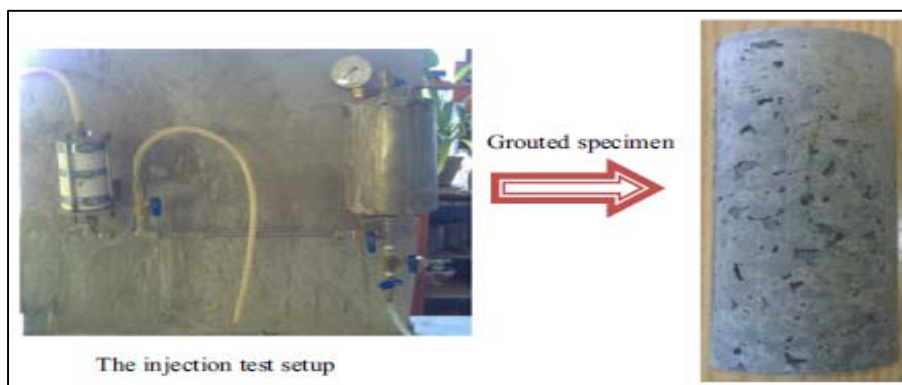
شکل ۱۷. نمودار میله‌ای که مقادیر متوسط PH به دست آمده توسط تمام نمونه‌های غیرفعال و فعال قلیایی در یک دوره ۲۸ روزه (سارگنت و همکاران، ۲۰۱۳)

بر بهبود ویژگی‌های 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 به دست آمده در این پژوهش، مشاهده شد که در نمونه‌های 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 تزریق شده با دوغاب مخلوط پس از ۲۸ روز عمل آوری ۱۵۰ درصد در مقایسه با موردی که دوغاب پایه سیمان تزریق شده 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 نمونه‌های پخت شده در ۲۸ روز نیز نشان می‌دهد که تزریق دوغاب پایه سیمان با ۲ و  $W/C = 1/5$  منجر به کاهش ۹۸ درصدی نفوذپذیری می‌شود. (فرامرزی و همکاران، ۲۰۱۶)

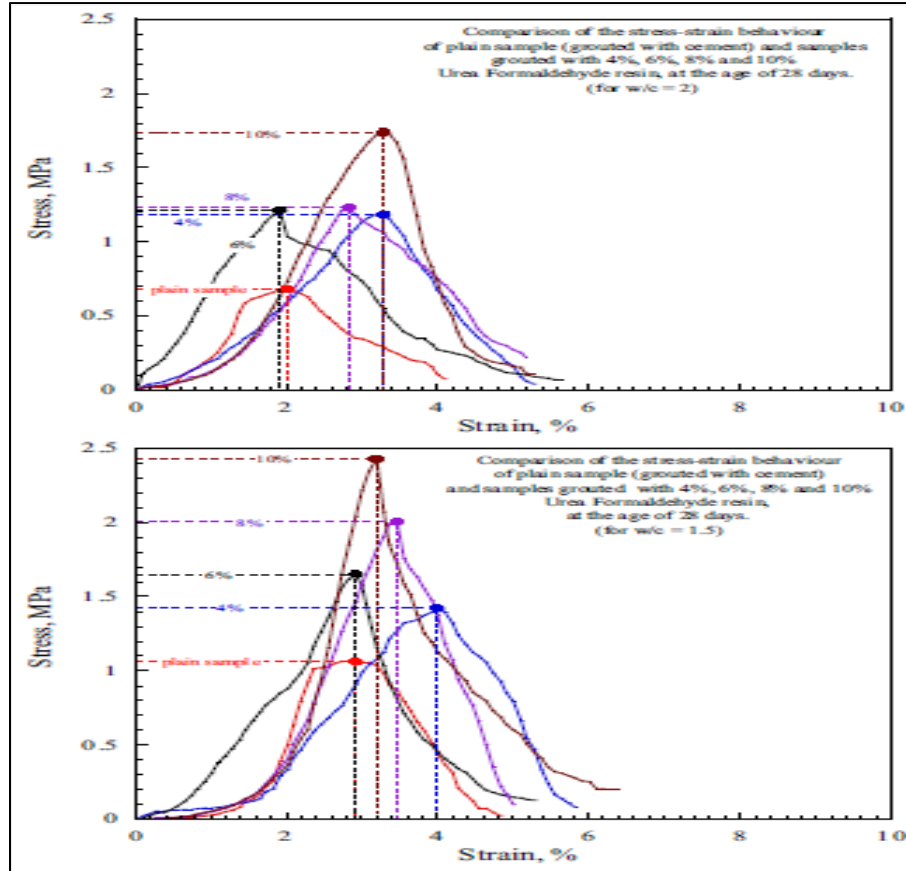
#### ۴-۱- تأثیر سیمان و تزریق شیمیایی بر بهبود خواص مکانیکی و هیدرولیکی سازندهای آبرفتی

یکی از رایج‌ترین روش‌های بهسازی زمین، نوعی تزریق است که در آن سیال تزریق شده به نام دوغاب از طریق گمانه وارد زمین می‌شود (شکل). این روشی است که شامل تزریق دوغاب به شکاف‌ها، ناپیوستگی‌ها، حفره‌ها و حفره‌های تشکیل خاک یا سنگ به منظور بهبود خواص آن‌ها، به ویژه برای کاهش نفوذپذیری و افزایش استحکام و مدول سازندها است. (آناگنوستوپولوس، ۲۰۰۵؛ شیمادا و همکاران، ۲۰۰۶)

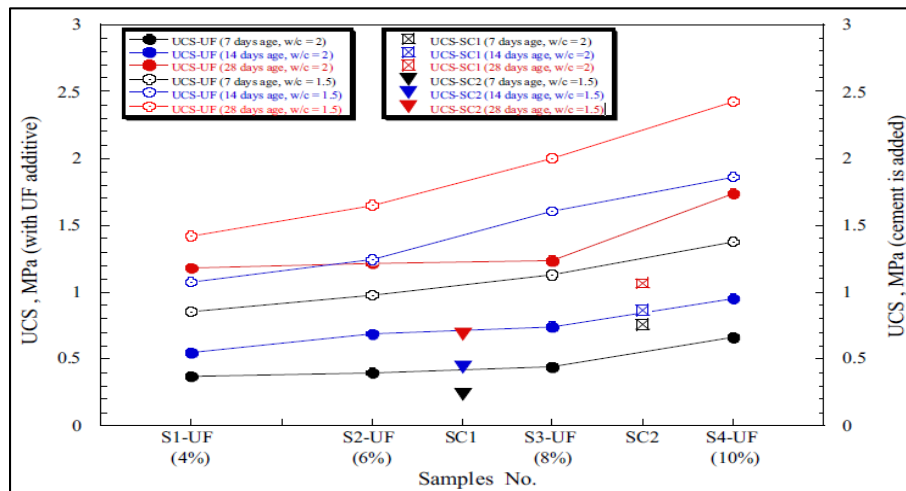
سازندهای آبرفتی در ایران اغلب در بسیاری از سایت‌های پروژه‌های مهندسی عمران (به ویژه پروژه‌های مترو) دیده می‌شوند که فاقد استحکام کافی برای تحمل بارگذاری در طول ساخت و ساز یا در طول عمر مفید هستند. برای بهبود استحکام و سختی آن سازندهای کم توان، تثبیت خاک با مواد سیمانی و شیمیایی انجام شده است. در این مطالعه مشاهده شد، که اثر تزریق دوغاب



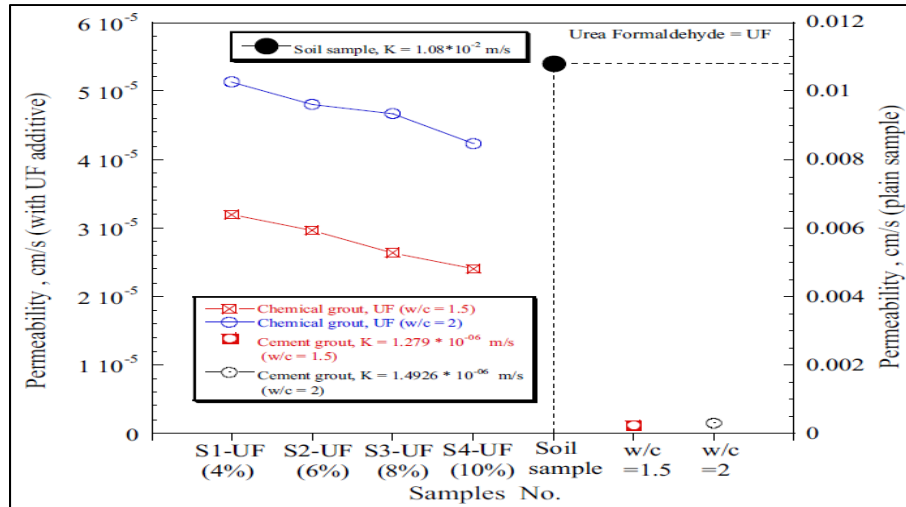
شکل ۱۸. تنظیمات تست تزریق (فرامرزی و همکاران، ۲۰۱۶)



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

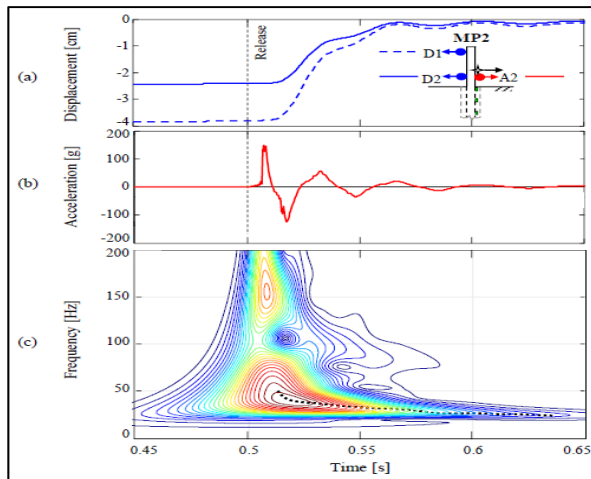


شکل ۲۰. مقاومت فشاری نامحدود نمونه‌های تزریق‌شده (فرامرزی و همکاران، ۲۰۱۶)



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

به سادگی دوغاب شد. آزمایش های دینامیکی شامل آزمایش های ارتعاش محیطی و آزمایش های بار ضربه ای 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، شتاب سنج ها و مبدل های جابه جایی در سر استفاده شدند. آزمایش انجام شده برای مطالعه رفتار دینامیکی سیستم های خاک-ریزش شکل در طیف وسیعی از سویه ها 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) جابه جایی ها و (ب) تاریخچه های زمانی شتاب ثبت شده در طول آزمایش ارتعاش آزاد (T2-F4) در MP2؛ (ج) S-تبدیل شتاب (کاپاتی و همکاران، ۲۰۱۸)

#### ۴-۲- بررسی تجربی در مقیاس کامل رفتار افقی دینامیکی ریزگردها در خاک های سیلتی آبرفتی

در ۵۰ سال گذشته پیشرفت های زیادی در زمینه تحقیقاتی برهمکنش دینامیکی خاک-شمع-سازه از نظر تئوری و تجربی حاصل شده است. با توجه به مدل سازی خاک، روش های موجود برای بررسی مشکل را می توان تقریباً به سه نوع اصلی طبقه بندی کرد: الف) راه حل های تحلیلی فرمول های پیوسته که در آن خاک به عنوان یک محیط کشسان در نظر گرفته می شود (باسو و همکاران، ۲۰۰۹). ب) روش های نوع وینکلر که اجازه می دهد 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 تفاوت های 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 به درستی کالیبره شوند؛ بنابراین آزمایش های تجربی برای افزایش قابلیت اطمینان آنها ضروری است. (کاپاتی و همکاران، ۲۰۱۸)

این کار یک برنامه آزمایشی گسترده از آزمایش های میدانی دینامیکی در مقیاس کامل را توصیف می کند که بر روی دو ریزشمع عمودی منفرد تعیبه شده در خاک های آبرفتی انجام شده است. یکی از دو ریزشمع با تزریق فشار بالا تکمیل شد و دیگری

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.

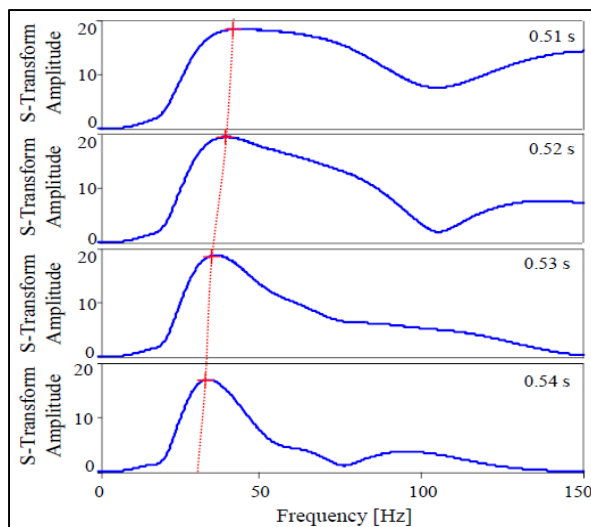
پ - در طول آزمایش‌های برگشت سریع، در محدوده کرنش‌های زیاد، چندین پدیده غیرخطی ظاهر شد، مانند ایجاد شکاف در سطح مشترک خاک-ریزشاخ، باز شدن ترک‌های شعاعی در خاک و تخریب کلی مواد. در ارتباط با این پدیده‌ها، تغییر قابل توجهی در سختی دینامیکی و نسبت میرایی برای هر دو سیستم خاک - میکروپیل رخ داد.

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

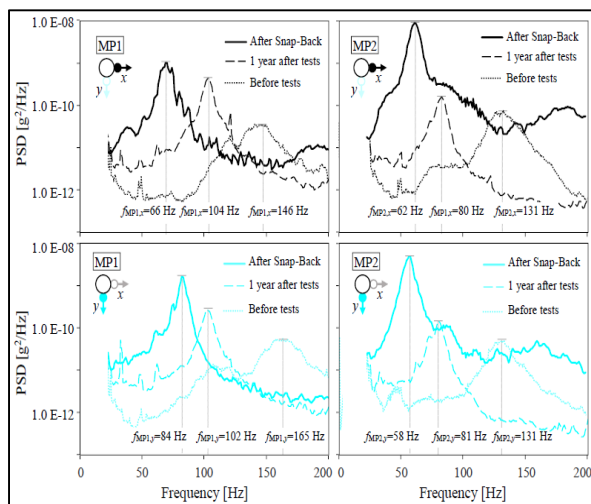
الف- آزمایش ارتعاش محیطی نشان داد که روشی همه‌کاره، سریع و مؤثر برای شناسایی ویژگی‌های دینامیکی سیستم‌های خاک-ریزپیل است. اجرای این تکنیک نیز بسیار ساده و تکرار آن آسان است. از این نظر، در رابطه با سرمایه‌گذاری زمان و منابع، می‌تواند یک راه بهینه برای نظارت بر سیستم‌های خاک-ریزپایه (مثلاً زمانی که از ریزشمع‌ها برای تثبیت خاک استفاده می‌شود) با بررسی تغییرات خواص دینامیکی با زمان و پس از رویدادهای خاص باشد. به‌عنوان مثال زلزله، بارندگی). با این حال، شایان‌ذکر است که تکنیک‌های پس پردازش داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های ارتعاش محیطی هم از نظر نظری و هم از نظر عملیاتی کاملاً خواستار هستند. تست بار ضربه را می‌توان برای همین منظور استفاده کرد. از یک 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 سیستم‌های خاک-ریزشکل را در میدان غیرخطی فراهم می‌کند و می‌تواند یک رویکرد خوب برای توصیف دینامیکی سیستم‌های خاک-ریزشکل باشد، نه تنها 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 به شدت بالا)، نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که ویژگی‌های بخش کم‌عمق تر رسوب تأثیر زیادی بر پاسخ دینامیکی سیستم و جنبه



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 می‌توان 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.

فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف و آزمایش‌های متفاوت با شیوه‌های نمونه‌سازی گوناگون است. از خاک ماسه‌ای یکنواخت و سیمان پرتلند با مقادیر ۴ درصد استفاده کرده‌اند. در نتیجه، تفاوت‌های موجود در مصالح، تهیه‌ی نمونه و نحوه‌ی آزمایش پژوهشگران مختلف، به سبب اختلاف در نتیجه‌گیری‌ها شده است.

سه فاکتور اصلی درصد سیمان، مدت زمان 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 مورد استفاده قرار گیرد.

تأثیر ناهمگن بودن خاک - سیمان بر توزیع غیریکنواخت تنش در داخل نمونه‌های تحت بارگذاری هم‌زمان موجب افزایش و کاهش تمرکز تنش در نقاط مختلف یک نمونه می‌گردد نقاط تحت افزایش تمرکز تنش، نقاط ضعف و در نتیجه نقاط شروع شکست است. ترک‌های طولی و عرضی کششی و پافشاری و نیز فرم‌های سطوح شکست حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های 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 تزریق شده است. در تمام گروه‌های پنج‌گانه، به‌طور متوسط نمونه‌های با کمتر از ۴۰ 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 ۴۰ سیمان دارای شکست ناگهانی و انفجاری است و فرم‌های شکست غالباً به‌تناسب افزایش درصد سیمان به‌صورت مخروطی و پا 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 از نظر توجیه فنی و اقتصادی پروژه‌های تزریق حائز اهمیت است.

## ۶- 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

پدیدار شناختی مرتبط با بارگذاری دینامیکی دارد. (تشکیل شکاف). با توجه به این ملاحظات، یک توصیف ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی تصفیه شده خاک پی نقش کلیدی را برای مدل‌سازی و طراحی اولیه آزمایش‌ها ایفا می‌کند (به‌عنوان مثال ابزار دقیق مورد استفاده، تعداد و موقعیت سنسورها، سطح نیرو/تغییر مکان). اعمال شود) و در نتیجه، برای موفقیت نهایی کمپین آزمایشی.

## ۵- نتیجه گیری

تأثیر سیمانی شدن بر زاویه‌ی اصطکاک خاک مورد بحث محققان بسیاری بوده است و درباره‌ی تأثیر افزایشی یا کاهش‌ی آن اتفاق نظری وجود ندارد. برخی تأثیر آن را کاهشده می‌دانند و معتقد هستند که ماده‌ی سیمانی‌کننده باعث کاهش اصطکاک بین ذرات خاک می‌شود. عده‌ای نیز این پدیده را بی‌تأثیر دانسته‌اند. این محققان معتقدند که سیمانی شدن، تنها سبب جابه‌جایی موازی پوش گسیختگی به سمت بالا می‌شود و تأثیر محسوسی بر زاویه اصطکاک نمی‌گذارد. بعضی نیز سیمانی شدن را عاملی در جهت افزایش مقدار و می‌دانند. سیمانی شدن سبب اتصال دانه‌های ریز خاک به یکدیگر و پدید آمدن دانه‌های بزرگ‌تر می‌شود. از آنجاکه دانه‌های بزرگ‌تر درهم‌رفتگی بیشتری پیدا می‌کنند، موجب افزایش زاویه اصطکاک می‌شوند. سیمانی شدن، سبب افزایش زاویه اصطکاک تا حدود ۵ درجه می‌شود ولی هیچ تأثیری بر روی زاویه اصطکاک باقیمانده ندارد.

بی‌ساختار شده مقدار و در محدوده‌ی فشارهای همه‌جانبه استفاده شده، تقریباً ثابت است ولی در نمونه‌های سیمانی شده، مقدار آن در فشارهای همه‌جانبه‌ی 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. شایان ذکر 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 می‌رسد مهم‌ترین عاملی که موجب شده است، محققان مختلف در تأثیر سیمانی شدن بر زاویه اصطکاک خاک درشت‌دانه اتفاق نظر نداشته باشند، استفاده از خاک‌هایی با جنس و شکل ذرات گوناگون، نوع و مقدار ماده سیمانی متفاوت، محدوده‌ی

- 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**
- آبرفتی، کنفرانس عمران، معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام، تبریز.
- قارونی نیک، مرتضی و بزرگمهر نیا، سعید، (۱۳۸۸). تزریق در سازندهای آبرفتی به منظور پایدارسازی تونل‌های مترو و راه آهن، دومین کنفرانس بین‌المللی پیشرفته‌ای اخیر در مهندسی راه آهن، تهران.
- بزرگمهرنیا، سعید (۱۳۸۸). تزریق در سازندهای آبرفتی به منظور پایدارسازی تونل‌ها. پایان‌نامه کارشناسی، دانشکده مهندسی راه آهن دانشگاه علم و صنعت ایران.
- مجیدی، 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

- 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 Naggari, 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 Engineering 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