



University Of Qom



Investigation of Performance Improvement of Friction Piles with Two-Component Polymer Using Direct Shear Test

Meysam Bayat¹ 

1. Corresponding author, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
E-mail: bayat.m@pci.iaun.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 14 Jun 2024
Revised 31 Jul 2024
Accepted 13 Dec 2024
Published 13 Dec 2024

Keywords:

Pile,
Interface,
Sand,
Direct Shear Test,
Polymer.

ABSTRACT

Mobilized shear strength in the interaction between various materials such as sand and steel plays a crucial role in geotechnical applications, particularly in the design and performance of friction piles. This study presents an innovative approach through polymer injection to enhance the mobilized shear strength between the pile and soil. To investigate this idea, a series of direct shear tests were conducted under three values of vertical stresses on both smooth and rough surfaces. Parameters such as the amount of inject-ed polymer, curing time, and the roughness of the steel surface were examined. The test results indicate that polymer injection significantly increases the mobilized shear strength at the sand-steel interface, even after a short period of about one-hour post-injection. An increase in the amount of injected polymer from 0% to 20% resulted in a nonlinear increase in shear strength. The test results show a remarkable increase in shear strength on smooth surfaces after injection compared to rough surfaces. Additionally, with more time, the mobilized shear strength also increased. Microscopic images of the injected area in the sand demonstrate the bonds formed between the grains by the polymer, which ultimately improves the injected soil.

Cite this article: Bayat M. Investigation of Performance Improvement of Friction Piles with Two-Component Polymer Using Direct Shear Test. Civil Infrastructure Researches. 2024; 10(2): 201-215. <https://doi.org/10.22091/cer.2024.10872.1558>



بررسی بهبود عملکرد شمع‌های اصطکاکی با پلیمر دو جزئی با آزمایش برش مستقیم

میثم بیات^۱

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران. رایانامه: bayat.m@pci.iaun.ac.ir

چکیده

مقاومت برشی بسیج شده در اندرکنش بین مصالح مختلف همچون ماسه و فولاد، نقش مهمی در کاربردهای ژئوتکنیکی به‌خصوص در طراحی و عملکرد شمع‌های اصطکاکی دارد. در این مطالعه، یک رویکرد نوین از طریق تزریق پلیمر جهت بهبود مقاومت برشی بسیج شده بین شمع و خاک ارائه شده است. برای بررسی این ایده، مجموعه‌ای از آزمایش‌های برش مستقیم تحت سه تنش عمودی بر روی دو سطح صاف و زبر فولادی انجام شده است. پارامترهایی همچون مقدار پلیمر تزریق شده، زمان عمل‌آوری و زبری سطح فولاد بررسی شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که تزریق پلیمر باعث افزایش مهمی در مقاومت برشی بسیج شده در سطح مشترک ماسه و فولاد حتی با گذشت زمان کوتاهی در حدود یک ساعت بعد از تزریق شده است. افزایش مقدار پلیمر تزریق شده از مقدار صفر تا ۲۰ درصد باعث افزایش غیرخطی مقاومت برشی شده است. مقدار افزایش چسبندگی به دلیل تزریق پلیمر بیشتر از افزایش زاویه اصطکاک بوده است که به دلیل وجود لایه چسبنده ایجاد شده بعد از تزریق پلیمر در مرز مشترک ماسه و فولاد بوده است. نتایج آزمایش‌ها افزایش چشمگیر مقاومت برشی در سطح صاف بعد از تزریق را نسبت به سطح زبر نشان می‌دهد. از طرف دیگر، نتایج آزمایش‌ها در زمان‌های متفاوت عمل‌آوری نشان می‌دهد که با گذشت بیشتر زمان، مقدار مقاومت برشی بسیج شده نیز افزایش یافته است. عکس‌های میکروسکوپی از ناحیه تزریق شده در ماسه، نشان‌دهنده پیوند ایجاد شده بین دانه‌ها به وسیله پلیمر است که در نهایت موجب بهسازی خاک محل تزریق شده است.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۲۳

کلیدواژه‌ها:

شمع،
اندرکنش،
ماسه،
آزمایش برش مستقیم،
پلیمر.

استناد: بیات میثم. بررسی بهبود عملکرد شمع‌های اصطکاکی با پلیمر دو جزئی با آزمایش برش مستقیم. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی،

۱۴۰۳؛ ۱۰(۲): ۲۰۱-۲۱۵. <https://doi.org/10.22091/cer.2024.10872.1558>

۱- مقدمه

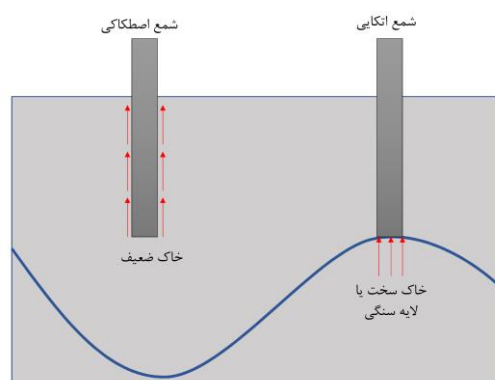
شمع‌ها یکی از عناصر کلیدی در مهندسی عمران برای انتقال بارهای سازه به لایه‌های پایدارتر زمین می‌باشند. در مواقعی که خاک سطحی، ضعیف و ناتوان از تحمل بارهای سنگین است، از شمع‌ها استفاده می‌شود. شمع‌های اتکایی بار سازه را از طریق نوک شمع به لایه‌های سخت‌تر و مقاوم‌تر زمین منتقل می‌کنند [۵] و [۶]. در مقابل، شمع‌های اصطکاکی بار را از طریق مقاومت اصطکاکی بین سطح جانبی شمع و خاک اطراف به زمین منتقل می‌کنند [۷ و ۸]. این نوع شمع‌ها برای خاک‌های ضعیف و ناپایدار بسیار مناسب بوده و به بهبود پایداری سازه‌ها در چنین شرایطی کمک می‌کنند.

عملکرد شمع‌های اصطکاکی تحت تأثیر چندین عامل کلیدی قرار دارد. یکی از مهم‌ترین عوامل، نوع و ویژگی‌های خاک اطراف شمع است [۹-۱۱]. خاک‌های با قابلیت چسبندگی بالا و تراکم مناسب، اصطکاک بیشتری را فراهم می‌کنند و در نتیجه، ظرفیت باربری شمع افزایش می‌یابد. طول و قطر شمع نیز از عوامل مهم دیگر می‌باشند؛ شمع‌های بلندتر و با سطح جانبی بیشتر، سطح تماس بیشتری با خاک دارند و به همین دلیل، نیروی اصطکاک بیشتری در پیرامون آنها ایجاد می‌شود. جنس و سطح شمع نیز بر عملکرد آن تأثیرگذار است [۱۲ و ۱۳]. شمع‌ها با سطح ناصاف یا دارای پوشش‌های خاص می‌توانند اصطکاک بیشتری ایجاد کنند. همچنین، روش نصب شمع نیز بر عملکرد آن مؤثر است؛ شمع‌هایی که به روش‌های کوبشی یا حفاری نصب می‌شوند، ممکن است باعث تغییر در ویژگی‌های خاک از جمله تراکم آنها شوند که این تغییرات می‌تواند بر ظرفیت باربری نهایی شمع تأثیر بگذارد. به علاوه، شرایط محیطی مانند سطح آب زیرزمینی و فشارهای جانبی خاک نیز می‌توانند عملکرد شمع‌های اصطکاکی را تحت تأثیر قرار دهند.

تحقیق‌های قبلی منجر به پیشرفت‌های قابل توجهی در درک و مهندسی رابطه‌های خاک-سازه شده است که به نوبه خود طراحی پی و مهندسی ژئوتکنیک را متحول کرده است [۱۴-۱۹]. این پیشرفت‌ها به طور قابل

خاک‌های ضعیف در پروژه‌های عمرانی مشکلاتی اساسی ایجاد می‌کنند، زیرا نمی‌توانند بارهای سنگین سازه‌ها را به خوبی تحمل کنند و ممکن است منجر به نشست، جابه‌جایی و ناپایداری سازه‌ها شوند [۱-۴]. این خاک‌ها معمولاً دارای تراکم کم، قابلیت چسبندگی پایین و ظرفیت باربری ضعیف می‌باشند. برای مقابله با این مشکلات، مهندسان از تکنیک‌های مختلفی استفاده می‌کنند.

یکی از راه‌حل‌های متداول، استفاده از شمع‌ها برای انتقال بار سازه به لایه‌های مقاوم‌تر و عمیق‌تر زمین است. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، عملکرد شمع‌ها عمدتاً بر دو صورت اتکایی^۱ و اصطکاکی^۲ است. شمع‌های اتکایی و اصطکاکی می‌توانند به طور مؤثری این وظیفه را انجام دهند. به علاوه، بهسازی خاک نیز یکی از راه‌حل‌های دیگر است که شامل روش‌هایی مانند تثبیت شیمیایی خاک با افزودن مواد پایدارکننده، تراکم دینامیکی و استفاده از ژئوسنتتیک‌ها است. این روش‌ها می‌توانند ظرفیت باربری خاک را بهبود بخشیده و پایداری سازه‌ها را تضمین کنند. در مواردی نیز، تکنیک‌های نوآورانه مانند استفاده از پلیمرها برای تقویت شمع‌ها به کار می‌روند تا عملکرد و دوام آنها در خاک‌های ضعیف افزایش یابد.



شکل ۱- عملکرد شمع اتکایی و اصطکاکی

^۱- End-bearing piles

^۲- Friction piles

فولاد انجام دادند. یافته‌های آنها نشان داد که تغییر شکل عمودی حداکثر مشاهده شده در آزمایش‌های اندرکنش کمتر از مقدار متناظر در آزمایش مربوط به ماسه خالص است. علاوه بر این، مقاومت برشی بسیج شده در سطح ماده در زمان آزمایش‌های اندرکنشی، کمتر از مقدار متناظر در آزمایش برش مستقیم بر روی ماسه خالص است [۳۴]. کو^۷ و همکاران نشان دادند که زبری سطح صفحه فولادی به طور قابل توجهی بر رفتار برشی تأثیر می‌گذارد، به طوری که زبری بالاتر منجر به افزایش مقاومت برشی پیک می‌شود [۳۵]. اوسوگی و کیشیدا^۸، مجموعه‌ای از آزمایش‌های آزمایشگاهی را برای تحلیل رفتار اصطکاک بین فولاد و ماسه‌ها با استفاده از دستگاه برش ساده انجام دادند. یافته‌های آنها نشان داد که d_{50} ماسه در محدوده مورد بررسی، تأثیر کوچکی بر روی نتایج دارد [۳۶].

در حالی که ادبیات به درک رابط خاک-سازه تأکید دارد، قابل ذکر است که تعامل خاص رابط در زمان افزودن مواد دیگر همچنان یک حوزه کمتر بررسی شده در مهندسی ژئوتکنیک باقی مانده است. این شکاف نیاز به تحقیقات بیشتر را برای بررسی جامع تأثیر رابط خاک-سازه در تکنیک‌های تزریق یا افزودن مواد برجسته می‌کند.

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، تنش خاک در نزدیکی شمع در طول فرایند حفاری از بین می‌رود و در نتیجه باعث کاهش مقاومت شفت می‌شود [۲۶ و ۳۷]. استفاده از روش پس‌تزریق^۹ یک روش مؤثر برای مقابله با چالش‌های مذکور و همزمان افزایش ظرفیت باربری شمع‌های حفاری شده در محل است [۳۸ و ۳۹]. روش پس‌تزریق نقش محوری در افزایش چسبندگی بین خاک‌های اطراف و مواد تزریقی دارد و بدین ترتیب

توجهی ایمنی و پایداری پروژه‌های زیرساختی را بهبود بخشیده‌اند. در ساخت پی، مانند شمع‌ها و انکرها، تعامل بین عناصر سازه‌ای و خاک اطراف از اهمیت بسزایی برخوردار است [۲۰ و ۲۱]. به ویژه زمانی که تحت بارهای چرخه‌ای ناشی از باد و امواج اقیانوس قرار می‌گیرند، شمع‌ها به شکست احتمالی ظرفیت باربری حساس می‌باشند. این شکست‌ها معمولاً با لغزش در مرز شمع-خاک آغاز می‌شوند که اغلب ناشی از کاهش مقاومت بسیج شده در این مرز است [۲۲].

روش‌های متعددی از جمله آزمایش‌های میدانی، آزمایش‌های آزمایشگاهی، مدل‌های نظری و تحلیل‌های عددی در مطالعه‌های قبلی برای ارزیابی رفتار اندرکنش خاک-سازه به کار گرفته شده‌اند، به ویژه در مورد مواد سازه‌ای مانند سطوح فولادی و بتنی [۱۷، ۲۳-۲۸]. آزمایش برش مستقیم به‌طور گسترده‌ای برای بررسی رفتار برشی اندرکنش خاک-مصالح دیگر همچون فولاد، بتن و ژئوتکستایل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. عوامل مختلفی از جمله زبری سطح، تراکم خاک، مقدار رطوبت، شکل ذرات، خواص و زبری مواد و همچنین نوع بارگذاری نقش مهمی در تعیین رفتار برشی رابط بین خاک‌ها و مواد سازه‌ای ایفا می‌کنند [۹، ۱۷، ۲۹، ۳۰]. سامنتا^۳ و همکاران و هان^۴ و همکاران در تحقیق خود با استفاده از آزمایش‌های برش مستقیم نشان دادند که عواملی همچون زبری سطح، اندازه ذرات ماسه و تراکم نسبی بر رفتار برشی در اندرکنش ماسه و سطوح فولادی یا بتنی تأثیر مهمی دارند [۳۱ و ۳۲]. دی‌جونگ و وستگیت^۵ نشان دادند که ماسه‌های متراکم‌تر تمایل به نشان دادن مقاومت بالاتری در اندرکنش دارد [۳۳]. سو^۶ و همکاران با استفاده از آزمایش‌های برش مستقیم، اثرات زبری نسبی و اندازه متوسط ذرات بر رفتار برشی در اندرکنش ماسه-

⁷- Kou

⁸- Uesugi and Kishida

⁹- Post-grouting

³- Samanta

⁴- Han

⁵- DeJong and Westgate

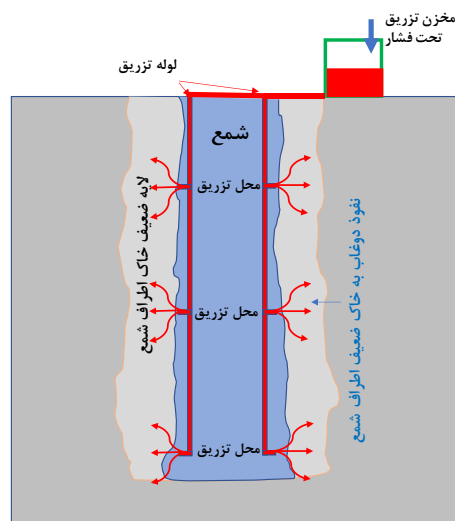
⁶- Su

منفی صنعت ساخت و ساز بر محیط زیست را کاهش دهد.

در سال‌های اخیر، مواد و فناوری‌های نوین به عنوان روش‌های جایگزین برای روش‌های سنتی تثبیت خاک ظاهر شده‌اند. یکی از تکنیک‌های مؤثر برای بهبود خواص مکانیکی خاک‌ها، تثبیت خاک با استفاده از پلیمرها است [۴۴-۴۹]. پلیمر پلی‌ارتان یک پلیمر چندمنظوره است که به خاطر ویژگی‌های قابل توجهی مانند واکنش سریع، خواص چسبندگی قوی، انعطاف‌پذیری، دوام، ترکیب سبک، مقاومت شیمیایی، قابلیت تزریق و گسترش و مقاومت در برابر شرایط محیطی متنوع شناخته شده است [۵۰-۵۵]. در مهندسی عمران، استفاده از پلی‌ارتان به‌عنوان یک راه‌حل نوآورانه و مؤثر برای تثبیت خاک، بهسازی پی و بازسازی زیرساخت‌ها، کمک به بهبود روش‌های ساخت و ساز و توسعه پایدار برجسته شده است [۵۶-۵۸]. تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که پلی‌ارتان، صرف‌نظر از ویژگی‌های فیزیکی-مکانیکی و سطح آب زیرزمینی در شرایط ژئوتکنیکی پیچیده می‌تواند به‌طور مؤثر انواع مختلف خاک را تثبیت کند. به‌طور قابل توجهی، پلی‌ارتان به‌عنوان یک تثبیت‌کننده خاک به دلیل خواص شیمیایی پایدار و دوره‌های عمل‌آوری کوتاه‌تر در مقایسه با عوامل تثبیت‌کننده سنتی مانند سیمان و آهک محبوبیت یافته است [۵۹ و ۶۰].

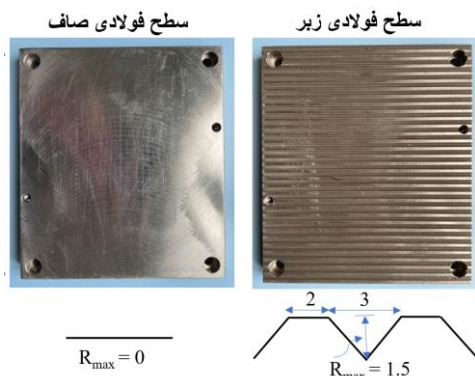
نوآوری این مطالعه در رویکرد پیشگامانه آن به کاربرد تزریق پلی‌ارتان به عنوان جایگزینی برای تزریق دوغاب سیمان معمولی در زمینه شمع‌های پس‌تزریق شده نهفته است. تلاش‌های تحقیقاتی قبلی بر استفاده از دوغاب سیمان به عنوان ماده تزریقی متمرکز بوده است، با کمترین یا هیچ‌گونه بررسی از مزایای احتمالی که تزریق پلی‌ارتان می‌تواند در کاربردهای ژئوتکنیکی ارائه دهد. پلی‌ارتان به خاک اطراف شمع نفوذ کرده، مقاومت برشی در رابط شمع-خاک را افزایش می‌دهد و به دلیل خاصیت انبساطی خود باعث تراکم خاک سست مجاور شمع می‌شود. یکی از مهم‌ترین مشارکت‌های این مطالعه، بهبود

اصطکاک سطحی بهتری بین این اجزا ایجاد می‌کند. تزریق دوغاب تحت فشار ابتدا در اطراف دوغاب سخت شده شمع عمل می‌کند و از فرار آن جلوگیری می‌کند و سپس به دلیل فشار تزریق، دوغاب تزریقی باعث شکست پوشش بتنی در شمع می‌شود و به لایه‌های خاک مجاور، به ویژه در مناطق نرم‌تر نفوذ کرده و باعث پیوند با خاک‌های متراکم‌تر دورتر از سطح شمع می‌شود. برای تسهیل شکست بتن، یک بازه زمانی حداکثری از پیش تعیین شده معمولاً بین فاز اولیه بتن‌ریزی و عملیات پس‌تزریق بعدی اعمال می‌شود تا از توسعه استحکام بیش از حد در بتن اولیه جلوگیری شود. استفاده از روش پس‌تزریق با استفاده از دوغاب سیمانی در بسیاری از پروژه‌های مهندسی اخیر استفاده شده است که برخی از نتایج به‌دست آمده بر روی آنها در ادبیات فنی انتشار یافته است [۴۰-۴۳].



شکل ۲- روش پس‌تزریق جهت بهبود عملکرد شمع‌ها

در پروژه‌های مهندسی عمران، به‌طور سنتی دوغاب سیمان به عنوان ماده اصلی تزریق مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، بررسی و پذیرش جایگزین‌های نوآورانه سیمان همچنان محدود بوده است. بررسی این جایگزین‌ها نه تنها با توجه به افزایش تمرکز جهانی بر راه‌حل‌های دوست‌دار محیط زیست همخوانی دارد، بلکه می‌تواند به ارتقا روش‌های ساخت و ساز پایدار و مسئولانه از نظر محیط زیستی کمک کند و بدین ترتیب تأثیرات



شکل ۴- صفحات فولادی مورد استفاده

ماده اصلی دیگر که در این تحقیق مورد استفاده واقع شده است، پلی‌ارتان دو جزئی است که در شکل ۵ نشان داده شده است. از این ماده جهت تزریق در مرز مشترک ماسه و صفحات فولادی جهت افزایش مقاومت برشی بسیج شده در این مرز استفاده شده است. حدود یک تا دو دقیقه بعد از مخلوط شدن این دو فاز، یک واکنش شیمیایی اتفاق می‌افتد و در نهایت، باعث سخت شدن ماده می‌شود.



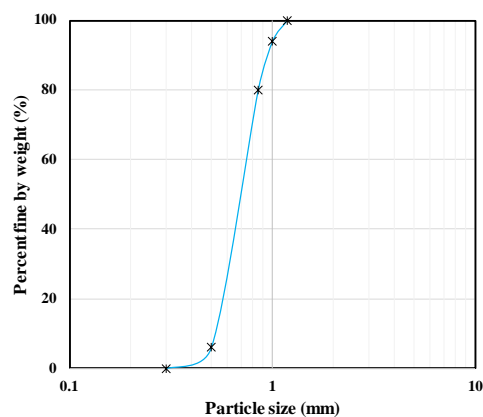
شکل ۵- پلی‌ارتان دو جزئی

در این تحقیق از آزمایش برش مستقیم جهت بررسی مقاومت برشی بسیج شده در اندرکنش ماسه-صفحات فولادی استفاده شده است. جزئیات این دستگاه در شکل ۶ نشان داده شده است. قبل از انجام آزمایش‌ها، این دستگاه کمی اصلاح شده است. به عبارت دیگر، تغییراتی در دستگاه داده شده است تا امکان تزریق پلیمر وجود داشته باشد. از جمله این تغییرات، اضافه شدن مخزن، اتصال مخزن به پمپ فشار هوا، ایجاد دو سوراخ در

اندرکنش ماسه- فولاد با تزریق پلی‌ارتان است که تاکنون بررسی نشده است.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق از ماسه ریزدانه سیلیسی ریزدانه دانه‌بندی یکنواخت استفاده شده است. این ماسه به دلیل گردگوشه بودن و ریزدانه بودن موجب اصطکاک زیادی بین ماسه و فولاد نمی‌شود و در پروژه‌های واقعی می‌تواند موجب بروز مشکلاتی در زمان استفاده از شمع شود. منحنی دانه‌بندی این خاک در شکل ۳ و مشخصات ژئوتکنیکی آن در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی ماسه مورد استفاده

جدول ۱- مشخصات ژئوتکنیکی ماسه

ویژگی	مقدار
G_s (-)	۲/۶۵
e_{max} (-)	۰/۸۱
e_{min} (-)	۰/۵۹
D_{10} (mm)	۰/۵۱
D_{30} (mm)	۰/۶۰
D_{50} (mm)	۰/۷۰
D_{60} (mm)	۰/۷۲
C_u (-)	۱/۴۱
C_c (-)	۰/۹۸

برای بررسی رفتار اندرکنش ماسه و فولاد، از دو سطح فولادی (زبر و صاف) استفاده شده است. شکل و مشخصات این صفحات فولادی در شکل ۴ نشان داده شده است.

تنش برشی - جابه‌جایی افقی و در نهایت، پارامترهای مقاومت برشی استخراج شده است.

قابل ذکر است که در کلیه آزمایش‌ها، بعد از تزریق، پلیمر یک ناحیه سخت نیم‌دایره‌ای شکل در اطراف سوراخ‌های محل تزریق ایجاد کرده است که نمونه‌ای از آن در شکل ۷ نشان داده شده است.

قابل ذکر است با توجه به چسبندگی ایجاد شده روی سطح فلز و ایجاد لایه‌ای از ماسه روی سطح فولادی، بعد از هر آزمایش سطوح فلزی با استفاده از برس‌های سیمی، کامل تمیز شده است و برای آزمایش بعدی مورد استفاده قرار گرفته است.



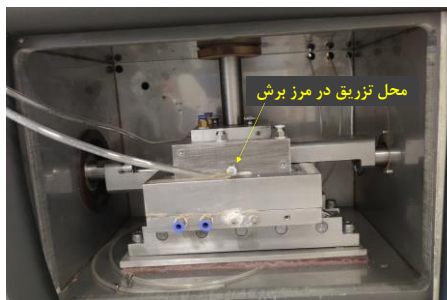
شکل ۷- تصویر نمونه تزریق شده بعد از سخت شدن پلیمر

۳- بحث و بررسی نتایج

در این قسمت از مقاله، نتایج آزمایش‌های برش مستقیم و تحلیل آنها ارائه شده است. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق عبارت است از درصد پلیمر تزریق‌شده، زبری سطح فولاد (دو سطح صاف و زبر) و زمان عمل‌آوری.

در شکل ۸، نمودار تنش برشی در مقابل جابه‌جایی افقی برای سه مقدار تنش نرمال ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال ارائه شده است. این آزمایش‌ها برای بررسی اندرکنش ماسه و سطح صاف فولادی برای درصد‌های مختلف پلیمر تزریق‌شده انجام شده است. آزمایش‌های مشابهی نیز برای بررسی اندرکنش ماسه و سطح زبر نیز انجام گردیده است که نتایج آن در شکل ۹ ارائه شده است. قابل ذکر است زمان عمل‌آوری در تمامی این آزمایش‌ها برابر با یک ساعت بوده است. در واقع، هدف

قالب دستگاه جهت تزریق و کنترل فشار تزریق با استفاده از یک رگراتور بوده است.

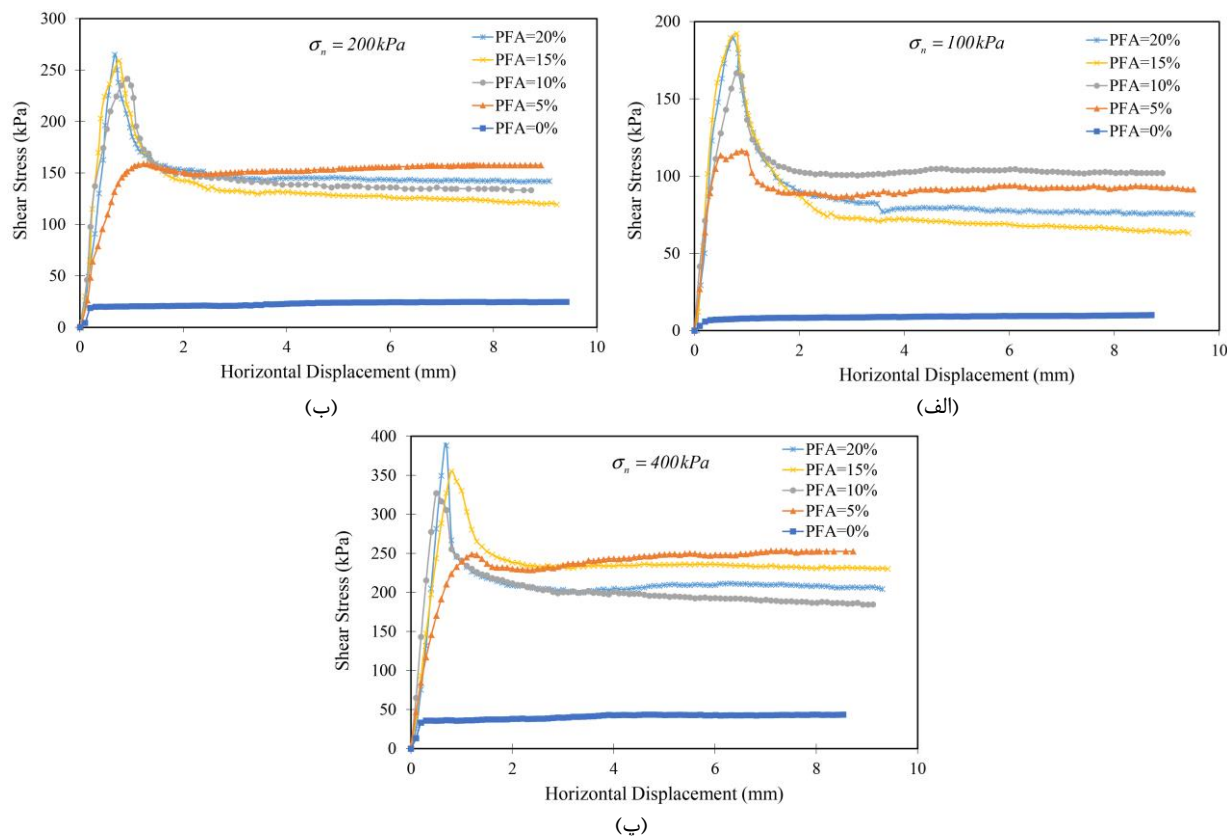


شکل ۶- دستگاه برش اصلاح شده برای انجام آزمایش‌ها

روش آماده‌سازی نمونه‌ها بدین صورت بوده است که در ابتدا صفحه فولادی در قسمت پایین قالب قرار داده شده و بعد از آن ماسه با تراکم موردنظر به صورت ریزش خشک با کیفی درون قسمت بالایی قالب ریخته شده است. در تمامی آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، دانسیته نسبی ماسه ۳۰٪ در نظر گرفته شده است تا نمایانگر شرایط سست ماسه اطراف شمع باشد. بعد از انتقال قالب به درون دستگاه، تنش عمودی مورد نظر اعمال گردیده است. بعد از این مرحله، مقدار مورد نظر پلیمر به درون نمونه تزریق شده است. برای این کار، ابتدا دو جز پلیمر به صورت جداگانه تزریق شده و ترکیب شدن دو جز در نمونه ماسه اتفاق افتاده است. برای تزریق پلیمر، ابتدا پلیمر درون تانکر مخصوص ریخته شده و سپس با اعمال فشار ۷۵ کیلوپاسکالی، تزریق انجام شده است. بعد از تزریق، زمان عمل‌آوری شروع شده است و نمونه تا زمان عمل‌آوری بدون تغییر باقی می‌ماند. بعد از اتمام زمان عمل‌آوری، نمونه به صورت کرنش کنترل با سرعت ۰/۱ میلیمتر بر دقیقه برش داده شده است. تمامی آزمایش‌ها تحت سه مقدار تنش عمودی انجام گردیده است (۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال). بعد از انجام آزمایش‌ها، نمودار

طولانی است که هدف اصلی این تحقیق معرفی پلیمر پلی‌ارتان برای تزریق جهت بهبود اندرکنش شمع و ماسه در زمان کوتاه است.

اصلی از این آزمایش‌ها بررسی رفتار کوتاه‌مدت بعد از تزریق پلیمر بوده است، زیرا در برخی موارد، زمان، پارامتر مهمی در پروژه محسوب می‌شود. یکی از معایب دوغاب‌های سنتی تزریق مثل دوغاب سیمان، زمان گیرش

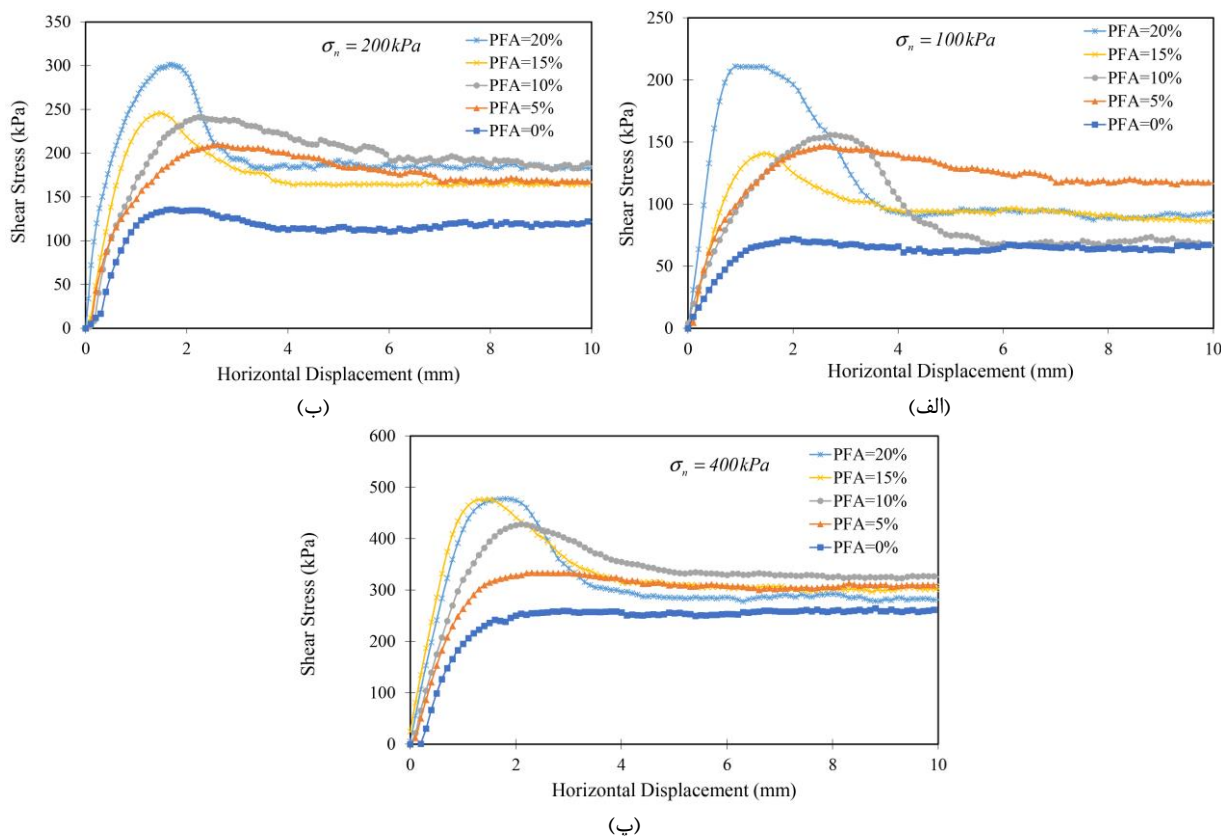


شکل ۸- نمودارهای تنش برشی - جابه‌جایی افقی برای اندرکنش سطح صاف و ماسه در تنش‌های (الف) ۱۰۰، (ب) ۲۰۰ و (پ) ۴۰۰ کیلوپاسکال

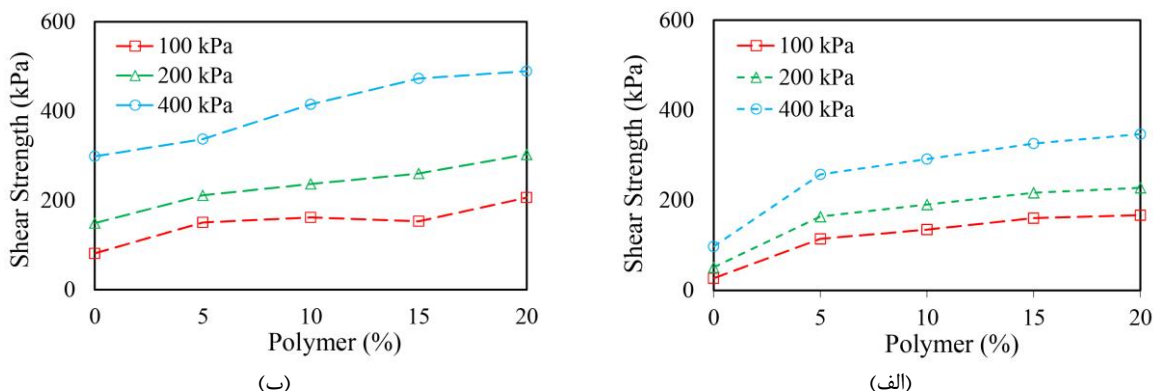
دست رفتن چسبندگی ایجاد شده در سطح صاف نسبت به سطح زبر نیاز به کرنش کمتری دارد. در واقع، در نمودارهای مربوط به حالت تزریق، مقاومت تا نقطه اوج افزایش یافته و بعد از آن روند کاهشی پیدا کرده است. با این حال، مقاومت در نقطه اوج و حالت بحرانی (مربوط به انتهای نمودار) بیشتر از حالت بدون تزریق است که نشان‌دهنده عملکرد مناسب تزریق پلیمر در بهبود اندرکنش ماسه و سطح فولاد حتی در زمان کوتاه بعد از تزریق یعنی یک ساعت است. برای مقایسه دقیق‌تر اثر مقدار پلیمر و زبری سطح بر روی نتایج، تغییرات مقاومت برشی بسیج شده در سطح در مقابل مقدار پلیمر تزریق شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

همانطور که نتایج نشان می‌دهد، تزریق پلیمر باعث افزایش مقاومت برشی حداکثر در اندرکنش ماسه و سطح فولادی شده است و فرم نمودار نسبت به حالت بدون تزریق، تغییر کرده است و دارای نقطه اوج است. ایجاد نقطه اوج در حالت صفحه فولاد صاف نشان‌دهنده از دست‌رفتن آنی چسبندگی ایجاد شده در سطح برش به دلیل تزریق پلیمر است. در صورتی که این رفتار در حالت صفحه زبر با شدت نشان داده شده در صفحه صاف به وجود نیامده است.

از طرف دیگر، نتایج نشان می‌دهد که نقطه پیک در سطح صاف نسبت به نقطه پیک در سطح زبر در سطح کرنش کوچک‌تری اتفاق می‌افتد. این نشان می‌دهد از



شکل ۹- نمودارهای تنش برشی- جابه‌جایی افقی برای اندرکنش سطح زبر و ماسه در تنش‌های (الف) ۱۰۰، (ب) ۲۰۰ و (پ) ۴۰۰ کیلوپاسکال



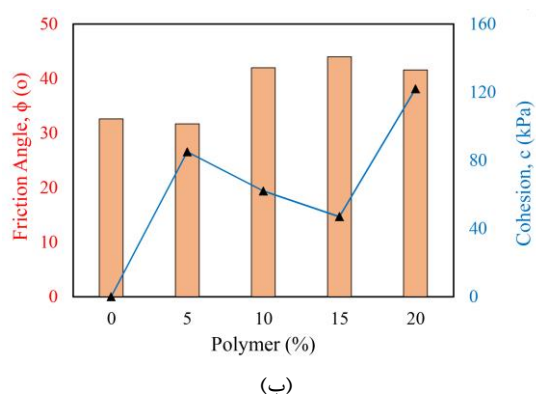
شکل ۱۰- تغییرات مقاومت برشی بسیج شده در اندرکنش سطح فولاد و ماسه، (الف) سطح صاف و (ب) سطح زبر

برشی تقریباً افزایش غیرخطی با افزایش مقدار پلیمر دارد. افزایش مقاومت خاک به دلیل اضافه شدن پلیمر به خاک در برخی از تحقیق‌های گذشته نیز اعلام شده است که هم‌خوانی خوبی با نتایج این تحقیق دارد [۵۰، ۵۹، ۶۱، ۶۲].

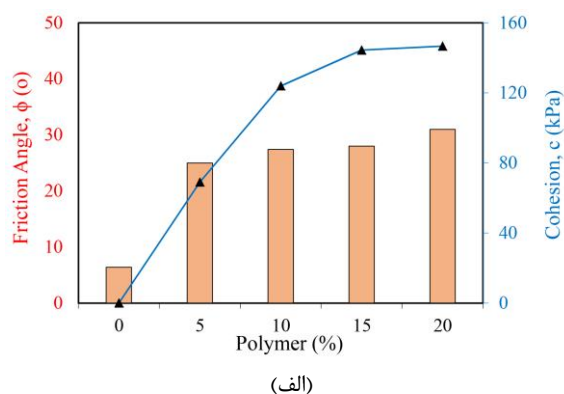
برای بررسی دقیق‌تر نتایج، تغییرات پارامترهای مقاومت برشی در مقابل درصد پلیمر تزریق شده در شکل ۱۱ نشان داده شده است. تغییرات چسبندگی با خط و

تغییرات مقاومت به ازای تغییرات مقدار پلیمر تزریق شده تابعی از سطح تنش نرمال و زبری سطح فولاد است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد افزایش تنش عمودی و مقدار پلیمر باعث افزایش مقاومت برشی شده است. از طرف دیگر، مقایسه نتایج به دست آمده برای هر دو سطح نشان می‌دهد که در یک مقدار تنش عمودی و پلیمر یکسان، مقدار مقاومت برشی برای حالت سطح زبر بیشتر از سطح صاف است. در هر دو سطح، مقدار تنش

درصد تأثیر مهمی بر روی آن نداشته است. برای سطح زبر نیز، تغییرات نامنظم زاویه اصطکاک با مقدار پلیمر تزریق شده مشاهده می‌شود. مقدار حداکثر زاویه اصطکاک در مقدار پلیمر تزریق شده ۲۰ درصد و ۱۵ درصد برای سطح صاف و زبر به دست آمده است. به طور کلی، تزریق پلیمر در هر دو سطح باعث بهبود پارامترهای مقاومت برشی شده است. تغییرات مقدار چسبندگی نسبت به زاویه اصطکاک به ازای تزریق پلیمر نسبت به حالت بدون تزریق (مقدار پلیمر صفر درصد) بیشتر است.

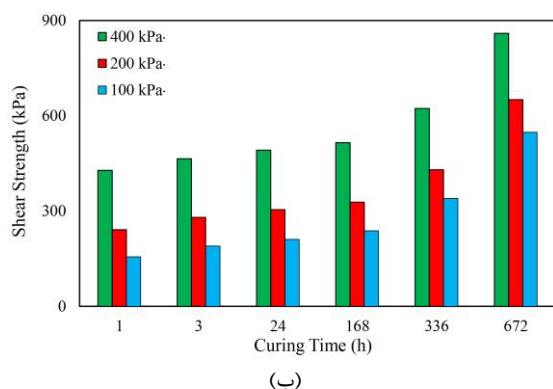


تغییرات زاویه اصطکاک با ستون‌ها قابل مشاهده است. همانطور که در نتایج مشخص است، مقدار چسبندگی برای سطح صاف به صورت غیرخطی با افزایش مقدار پلیمر از صفر تا ۲۰ درصد، افزایش یافته است. در صورتی که برای سطح زبر، مقدار چسبندگی با افزایش پلیمر از صفر تا ۵ درصد، افزایش یافته است و بعد از آن با افزایش بیشتر تا ۱۵ درصد، کاهش یافته است. تغییرات زاویه اصطکاک نشان می‌دهد تزریق پلیمر باعث افزایش آن در سطح صاف شده است ولی تغییر مقدار پلیمر از ۵ تا ۲۰



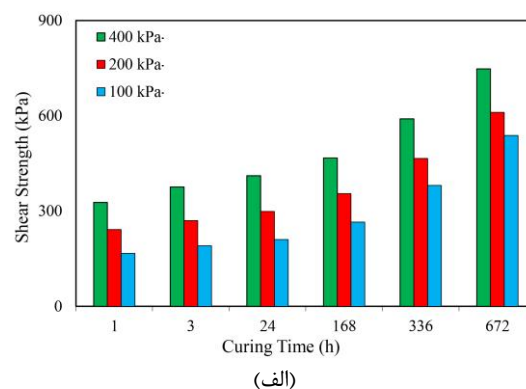
شکل ۱۱- تغییرات پارامترهای مقاومت برشی بسیج شده در اندک‌نش سطح فولاد و ماسه، (الف) سطح صاف و (ب) سطح زبر

مقدار پلیمر تزریق شده ثابت و برابر با ۱۰ درصد است. زمان‌های عمل‌آوری یک، سه و ۲۴ ساعت و ۱۴، ۷ و ۲۸ روز در نظر گرفته شده است، به طوری که اثر تزریق پلیمر در هر دو حالت کوتاه‌مدت و بلندمدت بررسی شود. نتایج به دست آمده برای هر دو سطح صاف و زبر در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



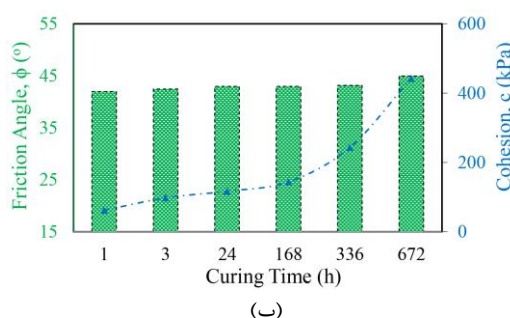
مقایسه رفتار سطح صاف و زبر در شکل ۱۱ نشان می‌دهد در شرایط یکسان، زاویه اصطکاک همواره در سطح زبر، بزرگ‌تر از حالت به وجود آمده در صفحه زبر است ولی مقدار چسبندگی بعد از تزریق معمولاً در حالت صفحه صاف بزرگ‌تر از صفحه زبر است.

در مرحله بعد از آزمایش‌ها، تأثیر زمان عمل‌آوری بر روی نتایج بررسی شده است. در این گروه از آزمایش‌ها

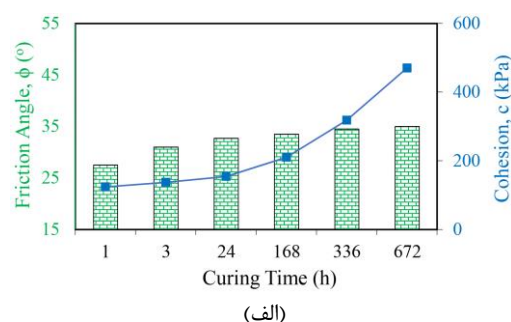


شکل ۱۲- تغییرات مقاومت برشی بسیج شده در اندک‌نش سطح فولاد و ماسه در برابر زمان‌های عمل‌آوری مختلف، (الف) سطح صاف و (ب) سطح زبر

تغییرات پارامترهای مقاومت برشی در مقابل زمان عمل‌آوری در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که در اینجا مشاهده می‌شود، افزایش زمان عمل‌آوری تأثیر مهمتری بر روی چسبندگی نسبت به زاویه اصطکاک دارد. در واقع با گذشت زمان، چسبندگی پلیمر با سطح فولادی بیشتر شده است. افزایش مقاومت فشاری و برشی خاک یا مقاومت اندرکنش خاک و سایر مصالح در زمان افزودن افزودنی‌های سنتی همچون سیمان و آهک و یا افزودنی‌های جدید در مطالعه‌های گذشته نیز گزارش شده است [۶۳-۶۶].



همانطور که در اینجا مشاهده می‌شود، افزایش زمان عمل‌آوری از یک ساعت تا ۲۸ روز باعث افزایش غیرخطی مقاومت برشی بسیج شده در سطح مشترک ماسه و فولاد برای هر دو سطح صاف و زبر شده است. مقایسه دو سطح نشان می‌دهد که سطح زبر، همواره مقاومت برشی بالاتری نسبت به سطح صاف به ازای یک مقدار تنش عمودی و زمان عمل‌آوری یکسان دارد. در واقع در سطح به واسطه زبری موجود در سطح درگیری دانه‌های ماسه بهسازی‌شده با پلیمر با سطح بیشتر است و این افزایش درگیری باعث افزایش مقاومت برشی بسیج شده است.



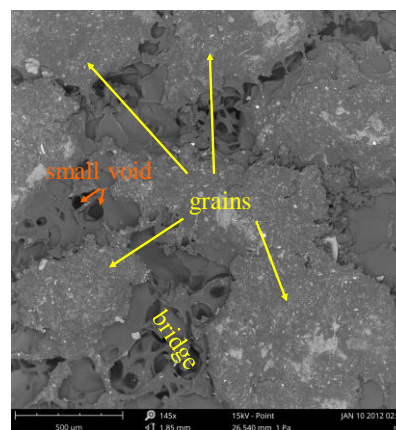
شکل ۱۳- تغییرات پارامترهای مقاومت برشی بسیج شده در اندکنش سطح فولاد و ماسه در برابر زمان‌های عمل‌آوری مختلف، (الف) سطح صاف و (ب) سطح زبر

از طرف دیگر، پلیمر باعث ایجاد پل‌های چسبنده بین دانه‌ها شده است که در نهایت باعث افزایش چسبندگی بین توده ماسه می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه یک رویکرد نوآورانه را با بررسی تزریق پلی‌ارتان برای افزایش مقاومت برشی در اندرکنش ماسه-فولاد ارائه می‌دهد که می‌تواند جایگزین روش‌های سنتی مثل دوغاب سیمان شود. استفاده از پلی‌ارتان مزیت واکنش سریع را فراهم می‌کند که آن را به‌ویژه در پروژه‌های حساس به زمان ارزشمند می‌سازد. در این تحقیق، بررسی سیستماتیک در مورد تأثیر پارامترهای مهم مختلف، از جمله محتوای پلی‌ارتان (در محدوده صفر تا ۲۰ درصد)، زمان عمل‌آوری پس از تزریق (در محدوده یک ساعت تا ۲۸ روز) و زبری سطح (شامل سطح صاف و سطح زبر) انجام شده است. این بررسی شامل یک سری

برای بررسی تأثیر تزریق پلیمر بر روی ساختار خاک، عکس میکروسکوپی از نمونه حاوی ۱۰ درصد پلیمر تهیه شده است. همانطور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، تزریق پلیمر باعث کاهش فضاهای خالی بین دانه‌ها شده و در نهایت، باعث تبدیل فضاهای خالی بزرگ بین دانه‌ها به فضاهای کوچک شده است.



شکل ۱۴- عکس میکروسکوپی از ناحیه تزریق شده ماسه با ۱۰٪ پلیمر

نسبت به تغییرات مقدار پلی‌ارتان در سطوح صاف حساس‌تر از سطوح زبر بوده است.

۴- تأثیر زمان پخت بر مقاومت برشی در اندرکنش به‌طور کلی، افزایش مقاومت برشی با طولانی‌تر شدن زمان عمل‌آوری را نشان می‌دهد. نتایج به‌دست آمده برای سنین مختلف عمل‌آوری نشان می‌دهد که افزایش مقاومت برشی پس از هفت روز قابل‌توجه‌تر بوده است. علاوه بر این، مطالعه نشان داد که افزایش مقاومت برشی با طولانی‌تر شدن زمان عمل‌آوری در سطوح تنش‌های عمودی پایین‌تر بیشتر مشهود بوده که نشان‌دهنده عملکرد برتر تزریق برای عمق‌های کم در کاربردهای مهندسی است.

۵- تحلیل میکروسکوپی الکترونی ماسه‌های تزریق‌شده با پلی‌ارتان، تشکیل یک ساختار شبکه‌ای سه‌بعدی را نشان داد که پیش‌بینی می‌شود خواص مکانیکی ماسه را به‌طور قابل‌توجهی بهبود داده است. تزریق پلی‌ارتان، باعث چسبیدن و اتصال پلی‌ارتان به ذرات ماسه شده است و اتصالات اولیه را تشکیل داده و فضاهای خالی را کاهش دادند. پلی‌ارتان با تراکم کم و خاصیت انبساطی، فواصل بین ذرات خاک را پر کرده، چسبندگی را افزایش داده و جابه‌جایی ذرات را کاهش می‌دهد. این مکانیزم پرکنندگی باعث افزایش چسبندگی و نواحی تماس بین ذرات خاک و سطوح شده و اصطکاک بسیج‌شده را افزایش می‌دهد.

برای ادامه این کار پژوهشی، اثر درجه حرارت، درصد رطوبت و همچنین بررسی رفتار اندرکنشی تحت بارهای رفت‌وبرگشتی پیشنهاد می‌شود. همچنین مقایسه رفتار اندکنشی ماسه‌های متفاوت از جمله ماسه سیلیسی و کربناته با مصالح مختلف همچون فولاد، بتن و ژئوسنتتیک‌ها تحت شرایط یکسان می‌تواند جذاب باشد.

آزمایش‌های برش مستقیم برای بررسی اندرکنش ماسه و سطح فولادی است. با استفاده از نتایج آزمایش‌ها، نتایج زیر قابل استخراج است:

۱- محتوای پلی‌ارتان تأثیر قابل‌توجهی بر تغییرات تنش برشی به‌ویژه بر تنش برشی اوج نسبت به تنش برشی بحرانی دارد. تأثیر محتوای پلی‌ارتان با توجه به زبری سطح متغیر بود و تأثیر بیشتری بر سطوح صاف‌تر نسبت به سطوح زبر دارد. این موضوع نشان می‌دهد که تزریق پلی‌ارتان به‌ویژه برای خاک‌های اطراف شمع‌های حفاری شده در شرایط سست مناسب است.

۲- این مطالعه نشان داد که تزریق پلی‌ارتان تأثیر مهمی بر مقاومت برشی دارد، به‌ویژه در سطوح صاف و این اثر در سطوح تنش پایین‌تر حتی بیشتر مشهود است. نتایج آزمایش‌ها برای اندرکنش سطح صاف و ماسه، نشان‌دهنده افزایش ۸ تا ۱۶ برابری مقاومت برشی بسیج‌شده بسته به سطح تنش عمودی اعمال شده، در سطح مشترک ماسه و فولاد نسبت به حالت بدون تزریق بعد از گذشت زمان یک ساعته از تزریق دارد. این یافته‌ها بر اثربخشی استثنایی تزریق پلی‌ارتان در افزایش مقاومت برشی، به‌ویژه در مواجهه با سطوح صاف، تأکید می‌کنند.

۳- پارامترهای مقاومت برشی، C و ϕ ، با تغییر مقدار پلی‌ارتان، تغییرات قابل‌توجهی نشان می‌دهد. ماهیت این تأثیر، عمدتاً به زبری سطح بستگی دارد. در سطوح صاف، هر دو پارامتر C و ϕ به‌طور غیرخطی با افزایش محتوای پلی‌ارتان از صفر تا ۲۰ درصد افزایش یافته است. با این حال، برای سطوح زبر، این روند کمتر منظم بود. تزریق پلی‌ارتان در سطوح زبر عمدتاً منجر به افزایش مقادیر چسبندگی شده است، در حالی که تأثیر نسبتاً کمی بر ϕ داشته است. زاویه اصطکاک

References

- [1] Heidarli E, Ouria A. Laboratory Study of the Effect of Cement Stabilization of the Interface of Reinforcement and Sand on the Interface Shear Strength. *Civil Infrastructure Researches* 2023; 9: 77-89. doi: 10.22091/cer.2022.8359.1415 [In Persian]
- [2] Bayat M, Khosravian Homami A, Mousivand M. Shear strength and wind erosion potential of biologically improved sand. *Geomicrobiology Journal*. 2021 Jul 1; 38(7): 631-638. doi: 10.1080/01490451.2021.1917733
- [3] Salehi M, Bayat M, Saadat M, Nasri M. Experimental study on mechanical properties of cement-stabilized soil blended with crushed stone waste. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2021 Jun; 25(6): 1974-1984. doi: 10.1007/s12205-021-0953-5
- [4] Rezaei-Hosseinabadi MJ, Bayat M, Nadi B, Rahimi A. Sustainable utilisation of steel slag as granular column for ground improvement in geotechnical projects. *Case Studies in Construction Materials*. 2022 Dec 1; 17: e01333. doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01333
- [5] Mohammad Alinejad R, Bayat M, Nadi B, Pakbaz MS. Response of pile group adjacent to a slope crest under static axial loading. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021 Dec; 14: 1-12. doi: 10.1007/s12517-021-09123-7
- [6] Alinejad RM, Bayat M, Nadi B, Pakbaz MS. Experimental Study of Axially Loaded Pile Group Near a Sloping Ground. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2023 Mar 28; 67(2): 382-391. doi: 10.3311/PPci.18334
- [7] Song C, Hong S, Ding Z, Qiu J. The influences of vertical load on lateral dynamic responses of end-bearing friction pile. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2024 Feb 1; 177: 108387. doi: 10.1016/j.soildyn.2023.108387
- [8] Oetomo J, Sulaiman A, Fadhillah RA, Astuti ED. Effect of Permanent Load in Gresik Alluvium on Friction Pile Embedment Depth. *Indonesian Geotechnical Journal*. 2023 Dec 30; 2(3): 147-158. doi: 10.56144/igi.v2i3.54
- [9] Janipour AK, Mousivand M, Bayat M. Study of interface shear strength between sand and concrete. *Arabian Journal of Geosciences*. 2022 Jan; 15(2): 172. doi: 10.1007/s12517-021-09394-0
- [10] Liu X, Wang L, El Naggar MH, Wu W, Liu H, Li L, Wang K, Mei G, Xiao L. Dynamic analysis of layered soil-pile interaction based on the nearly continuous model. *Ocean Engineering*. 2023 Jul 1; 279: 114457. doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114457
- [11] Yan J, Kong L, Xiong C, Xu G. Damage analysis of shear mechanical behavior of pile-structural soil interface considering shear rate effect. *Acta Geotechnica*. 2023 Oct; 18(10): 5369-5383. doi: 10.1007/s11440-023-01912-6
- [12] Liu KF, Feng WQ, Cai YH, Xu H, Wu PC. Physical model study of pile type effect on long-term settlement of geosynthetic-reinforced pile-supported embankment under traffic loading. *Transportation Geotechnics*. 2023 Jan 1; 38: 100923. doi: 10.1016/j.trgeo.2022.100923
- [13] Zarrabi M, Eslami A. Behavior of piles under different installation effects by physical modeling. *International Journal of Geomechanics*. 2016 Oct 1; 16(5): 04016014. doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000643
- [14] Aghamolaei M, Saeedi Azizkandi A, Abolhasanpoor A, Hashemi S. Influence of soil-pile interface characteristics on the seismic response of single pile foundations: shaking table testing and numerical simulation. *Acta Geotechnica*. 2024 Jan; 19(1): 417-436. doi: 10.1007/s11440-023-01955-9
- [15] De Gennaro V, Pande GN, Lerat P. Stability problems in soil-structure interfaces: Experimental observations and numerical study. *International Journal of Geomechanics*. 2002 Apr; 2(2): 175-203. doi: 10.1061/(ASCE)1532-3641(2002)2:2(175)
- [16] Hu L, Pu J. Testing and modeling of soil-structure interface. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 2004 Aug; 130(8): 851-860. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:8(851)
- [17] Noroozi AG, Ajalloeian R, Bayat M. Effect of FTC on the interface between soil materials and asphalt concrete using a direct shear test. *Case Studies in Construction Materials*. 2022 Dec 1; 17: e01632. doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01632
- [18] Noroozi AG, Ajalloeian R, Bayat M. Experimental study of the role of interface element in earth dams with asphalt concrete core-Case study: Mijran dam. *Case Studies in Construction Materials*. 2022 Jun 1; 16: e01004. doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01004
- [19] Ghaffari J, Fazeli S. Experimental Investigation of Stress Relaxation Behavior in Sand and Sand-Geotextile Interface. *Civil Infrastructure Researches*. 2024 May 21; 10(1): 187-198. doi: 10.22091/cer.2024.9284.1507 [In Persian]
- [20] Peng SY, Ng CW, Zheng G. The dilatant behaviour of sand-pile interface subjected to loading and stress relief. *Acta Geotechnica*. 2014 Jun; 9(3): 425-37. doi: 10.1007/s11440-013-0216-9

- [21] Yue H, Zhuang P, Zhang H, Song X. Failure and deformation mechanisms of vertical plate anchors subjected to lateral loading in sand. *International Journal of Geomechanics*. 2020 Nov 1; 20(11): 04020210. doi: **10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001859**
- [22] Randolph MF. Science and empiricism in pile foundation design. *Géotechnique*. 2003 Dec; 53(10): 847-875. doi: **10.1680/geot.2003.53.10.847**
- [23] Saberi M, Annan CD, Konrad JM, Lashkari A. A critical state two-surface plasticity model for gravelly soil-structure interfaces under monotonic and cyclic loading. *Computers and Geotechnics*. 2016 Dec 1; 80: 71-82. doi: **10.1016/j.compgeo.2016.06.011**
- [24] Maghsoodi S, Cuisinier O, Masroufi F. Thermal effects on mechanical behaviour of soil-structure interface. *Canadian geotechnical journal*. 2020; 57(1): 32-47. doi: **10.1139/cgj-2018-0583**
- [25] De Gennaro V, Pande GN, Lerat P. Stability problems in soil-structure interfaces: Experimental observations and numerical study. *International Journal of Geomechanics*. 2002 Apr; 2(2): 175-203. doi: **10.1061/(ASCE)1532-3641(2002)2:2(175)**
- [26] Cao S, Wang Q, Ma J, Xiao Z, Li C, Yang Y, Wang J. Experimental Investigation of Vertical Bearing Characteristics of Composite Post-grouting Piles in Sandy Soil. *International Journal of Civil Engineering*. 2024 Feb; 22(2): 303-315. doi: **10.1007/s40999-023-00899-1**
- [27] Li H, Meng Z, Shen S. Effects of interface morphology on the shear mechanical properties of sand-concrete interfaces. *Materials*. 2023 Sep 8; 16(18): 6122. doi: **10.3390/ma16186122**
- [28] Feng X, Zhang Y, Yuan X, Zhang P. An experimental study on frictional properties of concrete pipe-soil interface. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2022 May 1; 13(2): 04022004. doi: **10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000638**
- [29] Zheng J, He H, Alimohammadi H. Three-dimensional Wadell roundness for particle angularity characterization of granular soils. *Acta Geotechnica*. 2021 Jan; 16:133-49. doi: **10.1007/s11440-020-01004-9**
- [30] Isaev ON, Sharafutdinov RF. Soil Shear Strength at the Structure Interface. *Soil Mechanics & Foundation Engineering*. 2020 May 1; 57(2): 139-147. doi: **10.1007/s11204-020-09649-0**
- [31] Samanta M, Punetha P, Sharma M. Influence of surface texture on sand-steel interface strength response. *Géotechnique Letters*. 2018 Mar; 8(1): 40-48. doi: **10.1680/jgele.17.00135**
- [32] Han F, Ganju E, Salgado R, Prezzi M. Effects of interface roughness, particle geometry, and gradation on the sand-steel interface friction angle. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2018 Dec 1; 144(12): 04018096. doi: **10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001990**
- [33] DeJong JT, Westgate ZJ. Role of initial state, material properties, and confinement condition on local and global soil-structure interface behavior. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2009 Nov; 135(11): 1646-1660. doi: **10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:11(1646)**
- [34] Su LJ, Zhou WH, Chen WB, Jie X. Effects of relative roughness and mean particle size on the shear strength of sand-steel interface. *Measurement*. 2018 Jul 1; 122: 339-346. doi: **10.1016/j.measurement.2018.03.003**
- [35] Kou HL, Diao WZ, Zhang WC, Zheng JB, Ni P, Bo-An JA, Wu C. Experimental study of interface shearing between calcareous sand and steel plate considering surface roughness and particle size. *Applied Ocean Research*. 2021 Feb 1; 107: 102490. doi: **10.1016/j.apor.2020.102490**
- [36] Uesugi M, Kishida H. Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel. *Soils and foundations*. 1986 Dec 1; 26(4): 139-149. doi: **10.3208/sandf1972.26.4_139**
- [37] Youn H, Tonon F. Numerical analysis on post-grouted drilled shafts: A case study at the Brazo River Bridge, TX. *Computers and Geotechnics*. 2010 Jun 1; 37(4): 456-465. doi: **10.1016/j.compgeo.2010.01.005**
- [38] Tan Y, Lu Y, Peng F, Liao S. Post-Grouting of Long Bored Piles in Clay. *InGrouting 2017*. 2017; 338-347. doi: **10.1061/9780784480786.033**
- [39] Zheng AR. Post-grouting bored pile technology. *InIOP conference series: earth and environmental science* 2017 Apr 1; 61(1): 012057. doi: **10.1088/1755-1315/61/1/012057**
- [40] Tsuji M, Kobayashi S, Mikake S, Sato T, Matsui H. Post-grouting experiences for reducing groundwater inflow at 500 m depth of the Mizunami Underground Research Laboratory, Japan. *Procedia engineering*. 2017 Jan 1; 191: 543-550. doi: **10.1016/j.proeng.2017.05.216**
- [41] Dai G, Gong W, Zhao X, Zhou X. Static testing of pile-base post-grouting piles of the Suramadu bridge. *Geotechnical Testing Journal*. 2011 Jan 1; 34(1): 34-49. doi: **10.1520/GTJ102926**
- [42] Thiyyakkandi S, McVay M, Bloomquist D, Lai P. Experimental study, numerical modeling of and axial prediction approach to base grouted drilled shafts in cohesionless soils. *Acta Geotechnica*. 2014 Jun; 9: 439-454. doi: **10.1007/s11440-013-0246-3**
- [43] Li Y, Cheng L, Lei W, Su Y, Huang T, Zhu Y, Mei C, He X. Microstructures and mechanical property of post-fire grouting sleeve connections considering concrete cover. *Construction and Building Materials*. 2023 Nov 3; 403: 132578. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2023.132578**

- [44] Soltani-Jigheh H, Bagheri M, Amani-Ghadim AR. Use of hydrophilic polymeric stabilizer to improve strength and durability of fine-grained soils. *Cold Regions Science and Technology*. 2019 Jan 1; 157: 187-195. doi: [10.1016/j.coldregions.2018.10.011](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.10.011)
- [45] Ghasemi M, Bayat M, Ghasemi M. Experimental study on mechanical behavior of Sand improved by polyurethane foam. *Experimental Techniques*. 2023 Dec; 47(6): 1201-1211. doi: [10.1007/s40799-023-00633-5](https://doi.org/10.1007/s40799-023-00633-5)
- [46] Huang J, Kogbara RB, Hariharan N, Masad EA, Little DN. A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization. *Construction and Building Materials*. 2021 Oct 25; 305: 124685. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2021.124685](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124685)
- [47] Suhailuddin SH, Aprajith K, Sanjay B, Shabeeruddin SH, Begum SS. Development and characterization of flame retardant property in flexible polyurethane foam. *Materials Today: Proceedings*. 2022 Jan 1; 59: 819-826. doi: [10.1016/j.matpr.2022.01.115](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.115)
- [48] Li P, Shi M, Xia Y, Xue B, Zhang C, Chen J, Wang J, Pan Y, Wang C, Han B. Study on bonding performance and load transfer model between polyurethane anchor bolts and silty soil. *Construction and Building Materials*. 2023 Jun 27; 384: 131335. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2023.131335](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131335)
- [49] Shahidi S, Bayat M, Zareei SA. Enhancing Mechanical Behavior of Silica and Calcareous Sand through Polyurethane Foam, Nanomaterial, and Fiber. *Indian Geotechnical Journal*. 2024 May 9:1-20. doi: [10.1007/s40098-024-00971-0](https://doi.org/10.1007/s40098-024-00971-0)
- [50] Xiao Y, Stuedlein AW, Chen Q, Liu H, Liu P. Stress-strain-strength response and ductility of gravels improved by polyurethane foam adhesive. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2018 Feb 1; 144(2): 04017108. doi: [10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001812](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001812)
- [51] Al-Atroush ME, Sebaey TA. Stabilization of expansive soil using hydrophobic polyurethane foam: A review. *Transportation Geotechnics*. 2021 Mar 1; 27: 100494. doi: [10.1016/j.trgeo.2020.100494](https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100494)
- [52] Tan P, Wang F, Guo C, Liu J, Lei Q, Liu Z. Performance evaluation and stabilization mechanism of red clay treated with polyurethane. *Chemosphere*. 2023 Nov 1; 340: 139864. doi: [10.1016/j.chemosphere.2023.139864](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139864)
- [53] Hao S, Yu Y, Song J, Liu J, Song Z, Che W, Huang T, Chen Z, Sun S. Study on direct shear strength properties of sand mixed with polyurethane prepolymer and sisal fiber. *Environmental Earth Sciences*. 2023 Oct; 82(19): 436. doi: [10.1007/s12665-023-11121-9](https://doi.org/10.1007/s12665-023-11121-9)
- [54] Zang Y, Gong W, Liu B, Chen H. Effects of different segments in polyurethane on the performance of sand stabilization. *Journal of Applied Polymer Science*. 2019 Apr 20; 136(16): 47267. doi: [10.1002/app.47267](https://doi.org/10.1002/app.47267)
- [55] Liu J, Chen Z, Kanungo DP, Song Z, Bai Y, Wang Y, Li D, Qian W. Topsoil reinforcement of sandy slope for preventing erosion using water-based polyurethane soil stabilizer. *Engineering geology*. 2019 Mar 26; 252: 125-135. doi: [10.1016/j.enggeo.2019.03.003](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.03.003)
- [56] Newman TG. Construction geological logging of the Thames Tideway Tunnel beneath central London: unearthing the ground truth. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 2022 Aug 8; 55(3): qjehg2021-154. doi: [10.1144/qjehg2021-154](https://doi.org/10.1144/qjehg2021-154)
- [57] Ma Q, Chen JF, Xiao HL, Pan YT, Song ZN. Effect of polyurethane foam adhesive on the static mechanical properties of municipal solid waste incineration bottom ash (IBA). *Construction and Building Materials*. 2022 Mar 28; 325: 126460. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2022.126460](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126460)
- [58] Yu XY, Yao XW, Zhu JH, Li GY. Coupling reinforcement of uranium tailings via Klebsiella-induced calcium carbonate precipitation and waterborne polyurethane. *Construction and Building Materials*. 2023 Oct 12; 400: 132641. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2023.132641](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132641)
- [59] Tao G, Yuan J, Chen Q, Peng W, Yu R, Basack S. Chemical stabilization of calcareous sand by polyurethane foam adhesive. *Construction and Building Materials*. 2021 Aug 9; 295: 123609. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2021.123609](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123609)
- [60] Bai Y, Liu J, Cui Y, Shi X, Song Z, Qi C. Mechanical behavior of polymer stabilized sand under different temperatures. *Construction and Building Materials*. 2021 Jul 5; 290: 123237. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2021.123237](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123237)
- [61] Chen Q, Yu R, Li Y, Tao G, Nimbalkar S. Cyclic stress-strain characteristics of calcareous sand improved by polyurethane foam adhesive. *Transportation Geotechnics*. 2021 Nov 1; 31: 100640. doi: [10.1016/j.trgeo.2021.100640](https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100640)
- [62] Chen Q, Yu R, Tao G, Zhang J, Nimbalkar S. Shear behavior of polyurethane foam adhesive improved calcareous sand under large-scale triaxial test. *Marine Georesources & Geotechnology*. 2021 Dec 2; 39(12): 1449-1458. doi: [10.1080/1064119X.2020.1849473](https://doi.org/10.1080/1064119X.2020.1849473)
- [63] Sidek N, Mohamed K, Mohd Jais IB, Abu Bakar IA. Polyurethane foams in soil stabilization: A compressibility effect. In *InCIEC 2015: Proceedings of the International Civil and Infrastructure Engineering Conference*. 2016; 369-377. doi: [10.1007/978-981-10-0155-0_33](https://doi.org/10.1007/978-981-10-0155-0_33)

- [64] Wang C, Diao Y, Guo C, Wu H, Guan H, Qin L, Chu X, Du X. Experimental study on the mechanical behaviour of silty soil stabilized with polyurethane. *Construction and Building Materials*. 2024 Feb 16; 416: 135251. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2024.135251**
- [65] Asgari MR, Baghebanzadeh Dezfuli A, Bayat M. Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with cement/lime. *Arabian Journal of Geosciences*. 2015 Mar; 8: 1439-1452. doi: **10.1007/s12517-013-1173-1**
- [66] Bayat MR, Asgari MR, Mousivand M. Effects of cement and lime treatment on geotechnical properties of a low plasticity clay. In *International conference on civil engineering architecture & urban sustainable development*. 2013.