

بررسی آزمایشگاهی تثبیت و تسلیح ماسه با استفاده از الیاف و اپوکسی رزین

مسعود محمدی، دانشجوی کارشناسی ارشد رشته خاک و پی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

وحید توفیق*، استادیار، دانشکده عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

E-mail: vahiddavis@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۱۳ - پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۲۵

چکیده

تقویت خاک‌های ضعیف و نامناسب جهت به‌کارگیری در عملیات عمرانی برای ایجاد خاکی با ویژگی‌های مهندسی دلخواه، تثبیت و تسلیح نامیده می‌شود. تثبیت خاک برای اهداف مختلفی به‌کار می‌رود که از آن جمله می‌توان به جلوگیری از فرسایش سطوح برای فعالیت‌های ساخت و ساز، بهبود شرایط خاک بسترهای ضعیف، کنترل شن‌های روان، بهسازی لایه‌های اساس و بازیافت راه‌های قدیمی اشاره کرد. امروزه، به دلیل ضعف‌هایی مانند مقاومت کم و زمان طولانی برای گیرش که خاک‌های تثبیت شده با انواع تثبیت‌کننده‌های رایج، از قبیل آهک و سیمان، دارند، گرایش برای یافتن مصالح جدید که این نواقص را رفع کنند افزایش یافته است. در این تحقیق، از خاک ماسه‌ای، یک ماده پتروشیمی به نام اپوکسی رزین به‌عنوان تثبیت‌کننده و همچنین از الیاف به‌عنوان تسلیح‌کننده خاک استفاده شده است تا تأثیر آنها بر پارامترهای مقاومتی خاک ارزیابی شود. رفتار نمونه‌های خاک تثبیت شده در این تحقیق در فشار و برش بررسی شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مقاومت‌های فشاری و کششی خاک تثبیت شده با اپوکسی رزین افزایش چشمگیری دارد. در حالی که خاک ماسه‌ای مورد استفاده، مقاومت‌های فشاری و کششی بسیار ضعیفی دارد. با افزودن الیاف به نمونه‌ها، مقاومت فشاری خاک افزایش نمی‌یابد؛ اما باعث افزایش قابل توجهی در مقاومت کششی نمونه‌ها می‌شود. همچنین، نمونه‌های دارای الیاف، تغییر شکل بیشتری از خود نشان می‌دهند؛ یعنی تحت بارگذاری، انرژی بیشتری جذب می‌کنند تا به مرحله گسیختگی برسند.

واژه‌های کلیدی: خاک ماسه‌ای، الیاف پلیمری، اپوکسی رزین، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری.

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، با توسعه شهرها و صنعت و نیز با توجه به بهینه‌سازی و هزینه‌های سازه‌های عمرانی، نیاز به احداث شالوده‌ها و یا راه‌ها روی بسترهای مرغوب و یا نامرغوب زمین شدیداً احساس می‌شده است. از این رو، مهندسی علم ژئوتکنیک همواره سعی بر اصلاح و

خاک طبیعی موجود در محل پروژه‌های عمرانی اغلب از نظر مهندسی ژئوتکنیک برای استفاده مناسب نمی‌باشد. علت آن، مشخصات فنی نامطلوب خاک است که برای عملیات مختلف عمرانی نامرغوب محسوب می‌شود.

والدرون (۱۹۷۷) به این نتیجه رسید که مقاومت برشی خاک آلی رسی مسلح به ریشه‌ی گیاه یونجه تا ۲۷٪ افزایش می‌یابد و همچنین خاک مسلح به ریشه‌ی دیگر گیاهان، ۱۲ تا ۳۲ درصد افزایش می‌یابد.

دین و فریتنگ (۱۹۸۶) طی انجام آزمایش‌های تک‌محوری، تأثیر الیاف مصنوعی با توزیع تصادفی را بر رفتار ماسه رس‌دار مطالعه نمودند و نتیجه گرفتند که افزودن الیاف به این خاک، منحنی تنش- کرنش این ماسه را در جهت افزایش مقاومت و کاهش سختی تغییر می‌دهد.

ناتاراجا و مک‌منیس (۱۹۹۷) رفتار خاک رس مسلح شده با الیاف مصنوعی را با انجام آزمایش‌های تراکم و برش مستقیم، تک‌محوری و CBR بررسی کردند، و افزایش مقاومت برشی و فشاری تک‌محوری و افزایش CBR را گزارش دادند.

وَنگ و همکاران (۲۰۰۰) طی انجام آزمایش‌های تراکم، تک‌محوری و سه‌محوری، تأثیر افزودن بعضی الیاف پلیمری را بر تراکم، مقاومت و شکل‌پذیری ماسه رس‌دار بررسی کرده و نتیجه گرفتند که با افزایش درصد وزنی الیاف مورد استفاده، رطوبت بهینه خاک افزایش و وزن مخصوص ماکزیمم آن کاهش می‌یابد. همچنین، مقاومت ماکزیمم و مقاومت باقیمانده خاک را افزایش داده و سختی را کاهش می‌دهد.

قیاسیان و پورا‌براهیم (۲۰۰۳) بهبود مشخصات مقاومتی ماسه با استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها رفتار تنش- کرنش، مقاومت نهایی و شکل‌پذیری ماسه ریزدانه مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن برحسب درصد وزنی و نسبت ابعاد را بررسی کردند. تعدادی آزمایش سه‌محوری تحکیم یافته زهکشی شده، آزمایش تک‌محوری و CBR انجام شد. نتایج تحقیق نشان داد که افزودن عناصر تسلیح، شکل‌پذیری و مقاومت نهایی نمونه‌ها را افزایش، ولی ضریب کشسانی حداکثر را کاهش می‌دهد.

یا بهبود مشخصات خاک موجود برای رسیدن به مشخصات خاک مطلوب‌تر در محل پروژه‌ها دارند.

از راهکارهای پیشنهاد شده برای افزایش مقاومت می‌توان به فرایندهای مکانیکی نظیر تراکم، زهکشی به- وسیله چاه‌های ماسه‌ای، تحکیم و فرایندهای شیمیایی نظیر اصلاح و تثبیت یا استفاده از عناصر مسلح‌کننده اشاره نمود. همچنین، مطالعات انجام شده بیانگر آن است که هر یک از این روش‌ها وجه ویژه‌ای از مشخصه‌های خاک را بهبود می‌بخشند (داس، ۲۰۰۶).

کاربرد الیاف در مسلح‌سازی خاک سابقه‌ی طولانی دارد و به استفاده از کاه در مخلوط کاه‌گل در عایق‌بندی رطوبتی ساختمان‌ها و ابنیه در ایران برمی‌گردد. همچنین، کاربرد الیاف در دیوار چین در ۲۰۰۰ سال قبل مؤید این مطلب است که دانش مهندسی‌نساچی از قدیم‌الایام در کنار مهندسی‌ن عمران، یاریگر ایشان در ارتقای عمر مفید سازه‌های گوناگون بوده است. استفاده از مواد تثبیت‌کننده نیز به استفاده از ملات ساروج در ساخت بنای آبنبارها، پل‌ها، بندها و دیگر سازه‌های آبی در ایران برمی‌گردد که از آهک به همراه خاکستر در تثبیت و ضد آب نمودن خاک استفاده می‌نمودند.

تسلیح خاک با الیاف از یک طرف شامل استفاده مستقیم از الیاف به صورت تصادفی در ماتریسی همانند خاک است و از طرف دیگر شامل استفاده از الیاف با آرایش یافتگی مشخص، همچون خانواده‌ی ژئوستتیک-ها است. تسلیح خاک با الیاف بهبود قابل توجهی در مقاومت، ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و تغییرات حجم ماتریس خاک را به همراه دارد. همچنین، مطالعات نشان می‌دهد که خصوصیات تنش- کرنش و مقاومت خاک-های تسلیح شده با توزیع تصادفی الیاف تابعی از میزان الیاف، نسبت طول به عرض الیاف، سطح اصطکاک الیاف در امتداد خاک و خصوصیات مقاومتی الیاف است.

عمل‌آوری، مقاومت فشاری و پارامترهای مقاومت برشی را بهبود می‌بخشد.

آناگنوستوپولس (۲۰۰۶) تحقیق خود را در زمینه تزریق رزین آکرلیک در ماسه انجام داد و مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن را بررسی نمود. نتایج وی نشان می‌دهد که افزودن رزین آکرلیک به گروت سیمانی، باعث افزایش نفوذپذیری و انتشار گروت به خاک می‌شود. همچنین، مقادیر کم رزین آکرلیک، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته را افزایش و تخلخل را کاهش می‌دهد و مقادیر بیشتر از آن فقط در صورت وجود ساختار خاک-سیمان متراکم مفید خواهد بود.

تنگ و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی مقاومت و رفتار مکانیکی خاک رس مسلح شده با الیاف کوتاه پلی پروپیلن و تثبیت شده با سیمان پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزایش الیاف به خاک سیمانی شده و سیمانی نشده، باعث افزایش مقاومت فشاری محدود نشده، مقاومت برشی و کرنش برشی و کاهش سختی می‌شود. همچنین، خاک سیمانی شده دارای شکل‌پذیری بیشتری نسبت به خاک سیمانی نشده است.

مدهوی لاتا و مورتی (۲۰۰۷) با بررسی ماسه سیلتی مسلح شده با الیاف به این نتیجه رسیدند که افزودن الیاف باعث بهبود منحنی تنش-کرنش و پارامترهای برشی خاک می‌شود که این افزایش رابطه مستقیم با درصد وزنی الیاف موجود در خاک دارد و با افزایش درصد الیاف از درصد بهینه به بعد تنش برشی کاهش می‌یابد.

مطالعات مرنندی و همکاران (۲۰۰۸) روی نمونه‌های ماسه سیلتی تثبیت شده با الیاف خرما نشان داد که مقاومت کششی بارزترین خصوصیت الیاف است که منجر به افزایش مقاومت کششی مخلوط‌های خاکی می‌شود. همچنین، افزودن الیاف به طور قابل توجهی مقدار CBR، مقاومت فشاری و مقاومت باقیمانده ماسه را افزایش می‌دهد. با افزایش الیاف و طول آنها،

آناگنوستوپولس و حاجی‌سپرو (۲۰۰۴) روی تثبیت دو نوع خاک ماسه‌ای رودخانه‌ای تحقیق کردند. آن‌ها برای تثبیت از اپوکسی رزین و ترکیب آن با سدیم سیلیکات استفاده کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که با افزودن اپوکسی رزین و سدیم سیلیکات به خاک باعث افزایش مقاومت فشاری آن می‌شود. این افزایش مقاومت تابع مقدار رزین و سدیم سیلیکات است. بدین صورت که مقاومت دو نمونه با درصد رزین مساوی، تابع مقدار سدیم سیلیکات است و در صورت کاهش رزین، مقدار کاهش یافته با بالا بردن مقدار سدیم سیلیکات جبران می‌شود. آنها همچنین دریافتند که نتیجه تثبیت با اپوکسی رزین و یا ترکیب آن با سدیم سیلیکات، مستقیماً به اندازه ذرات خاک بستگی دارد. هرچه اندازه ذرات خاک کوچک‌تر باشد، بهبود مشخصات فیزیکی و مکانیکی مخلوط بیشتر خواهد بود. افزودن اپوکسی رزین به خاک، علاوه بر افزایش مقاومت، باعث کاهش نفوذپذیری نیز می‌گردد.

باشا و همکاران (۲۰۰۵) با افزودن سیمان و خاکستر پوسته برنج و همچنین ترکیب آن‌ها به خاک رسوبی، تأثیر درصد این مواد بر مقاومت فشاری نمونه‌ها را بررسی کردند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان می‌دهد که با افزودن ۱۰٪ سیمان و ۱۰٪ خاکستر پوسته برنج به خاک، مقاومت به ترتیب به ۰/۳ و ۰/۱۵ مگاپاسکال می‌رسد. همچنین، با افزودن ۱۰٪ ترکیب آن‌ها با نسبت سیمان به خاکستر پوسته برنج ۴ به ۱، مقاومت فشاری نمونه به ۰/۷ مگاپاسکال می‌رسد.

کای و همکاران (۲۰۰۶) به بررسی اثر الیاف و آهک بر خواص مهندسی خاک رسی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزودن آهک و الیاف تا حد مشخصی منجر به افزایش مقاومت برشی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌گردد و نیز موجب کاهش خزش و تورم خاک می‌شود. همچنین، افزایش مدت

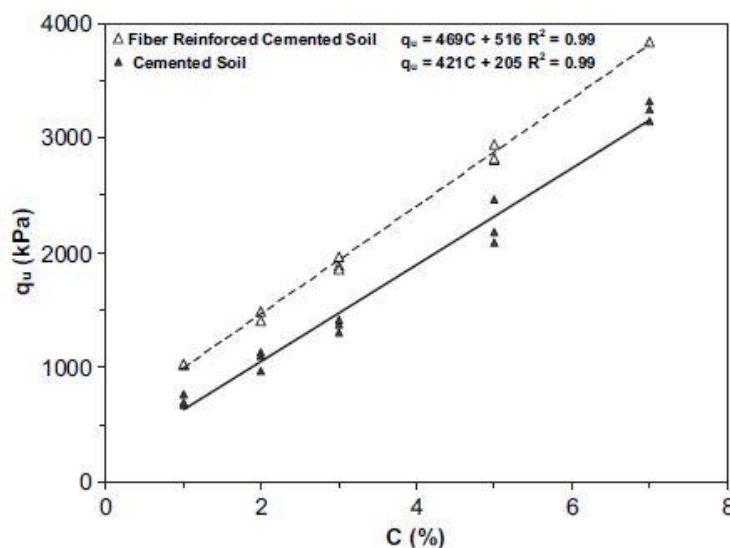
۱۰۰ ساعت تقریباً ثابت می‌شود. در حالی که مقاومت نمونه ماسه‌ای تنها پس از گذشت ۳۰ ساعت تقریباً ثابت می‌شود.

کنسولی و همکاران (۲۰۱۰) با بررسی آزمایشگاهی مقاومت ماسه سیلتی تثبیت شده با سیمان و الیاف که به طور تصادفی و یکنواخت با هم ترکیب شده‌اند، دریافتند که افزودن الیاف به نمونه‌های تثبیت شده با سیمان باعث افزایش مقاومت فشاری محصور نشده خاک شده است. نمودار حاصل از این تحقیق در شکل ۱ آورده شده است تا در پایان بحث حاضر، امکان مقایسه نتایج وجود داشته باشد. در این نمودار، محور افقی، درصد سیمان مصرفی و محور عمودی، مقاومت فشاری تک‌محوری محصور نشده نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه می‌باشد. نمودار خطی تحتانی مربوط به خاک تثبیت شده با سیمان بوده و به صورت خطی با افزایش درصد وزنی سیمان مصرفی از ۱٪ تا ۷٪ افزایش می‌یابد.

شکل‌پذیری نمونه‌ها افزایش می‌یابد و باعث کاهش نشست ناگهانی می‌شود.

پارک (۲۰۰۹) در تحقیق خود، با استفاده از تست فشاری محدود نشده، به بررسی اثر توزیع الیاف در ماسه تثبیت شده با سیمان پرداخت و به این نتیجه رسید که با افزایش تعداد لایه‌های الیاف، مقاومت نیز افزایش می‌یابد.

نائینی و قربانعلی زاده (۲۰۱۰) در زمینه تثبیت خاک ماسه رسی تحقیقاتی انجام دادند. به این صورت که تأثیر درصد سیلت موجود در خاک را بر مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با پلیمر در زمان‌های مختلف بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان‌دهنده تأثیر منفی سیلت بر مقاومت خاک است. به عبارتی، هر چه سیلت در خاک کمتر باشد با افزایش چسبندگی، مقاومت فشاری تک‌محوری آن بیشتر خواهد بود. همچنین، دریافتند که با افزودن سیلت بیشتر به خاک، مقاومت نهایی پس از گذشت زمان بیشتری به دست می‌آید. برای مثال، مقاومت نمونه ماسه‌ای با ۱۰٪ سیلت، پس از



شکل ۱. نمودار خطی مقاومت فشاری - درصد وزنی سیمان (کنسولی و همکاران، ۲۰۱۰)

افزودن اپوکسی رزین به خاک، مقاومت فشاری و کششی افزایش و تخلخل و نفوذپذیری کاهش می‌یابد. همچنین، در آزمایش سه‌محوری، با افزودن اپوکسی

آناگنوستوپولس و همکاران (۲۰۱۱) در زمینه تثبیت ماسه ریزدانه توسط اپوکسی رزین محلول در آب تحقیق کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با

نشان می‌دهد که افزودن اپوکسی رزین به خاک باعث افزایش چشمگیر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک می‌شود و همچنین افزودن سیمان نتیجه‌ای مشابه دارد، ولی با شدت کمتر و در زمان بیشتر. برای مثال، در نمونه با نسبت اپوکسی رزین به آب ۱ و در سن ۲۸ روز، مقاومت فشاری برابر با ۱/۴ مگاپاسکال است. در حالی که با افزودن ۲۰٪ سیمان به خاک، این مقدار به ۲/۲ مگاپاسکال می‌رسد.

تحقیق حاضر مرتبط با بررسی عملی پارامترهای مقاومتی ماسه تثبیت شده با استفاده از اپوکسی رزین و سپس تسلیح نمونه‌ها با افزودن الیاف شیشه بریده شده^۱ و الیاف کربن بریده شده^۲ به نمونه خاک و رزین است. به نحوی که پس از ترکیب کردن مصالح، مخلوطی همگن از خاک و رزین با توزیع تصادفی الیاف خواهیم داشت.

جهت دستیابی به اهداف این تحقیق، سه نوع نمونه فاقد الیاف، دارای الیاف شیشه و دارای الیاف کربن با درصدهای مختلف رزین و در سنین مختلف ۳، ۷ و ۲۸ روزه ساخته شده است. پس از آماده سازی نمونه‌ها، مقاومت فشاری محدود نشده و مقاومت کششی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه مقاومت فشاری تک‌محوری به دست آمده و با یکدیگر مقایسه شده است.

۲. مصالح و روش‌ها

۲-۱. الیاف شیشه

یکی از مصالح مصرفی مورد استفاده در این تحقیق، الیاف شیشه بریده شده با طول ۱۲ میلی‌متر و ساخت شرکتی از کشور چین به نام China National Building Materials است که مطابق شکل ۲-الف دارای ظاهری سفید رنگ و رشته رشته می‌باشد.

رزین به خاک، کاهش نسبت آب به اپوکسی رزین و گذشت زمان، مقدار مقاومت و سختی نیز افزایش می‌یابد. برای مثال، برای نمونه با نسبت اپوکسی رزین به آب برابر ۱، مقاومت فشاری در سن ۷ روز برابر با ۰/۴ مگاپاسکال است. در حالی که در سن ۲۸ روز به ۱/۵ مگاپاسکال می‌رسد. آن‌ها همچنین مدل رگرسیون غیرخطی را برای پیش‌بینی مقادیر آزمایش‌ها به دست آوردند که با مقایسه با مقادیر واقعی، دقت قابل قبولی را ارائه می‌کند.

آناگنوستوپولس و پاپالیانگاس (۲۰۱۲) در زمینه تثبیت خاک ماسه‌ای توسط اپوکسی رزین تحقیق خود را تکمیل کرده و آزمایش‌های خود را روی نمونه‌های ۹۰ روزه نیز انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که افزودن اپوکسی رزین به خاک ماسه‌ای باعث افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری آن می‌شود که تابعی از نسبت اپوکسی رزین به آب و زمان است. به این صورت که با گذشت زمان تا ۹۰ روز، مقاومت نیز افزایش می‌یابد.

آتش (۲۰۱۳) تحقیقات خود را در زمینه تثبیت سیمانی خاک‌های ماسه‌ای انجام داد و تأثیر درصدهای مختلف سیمان بر مقاومت این خاک بررسی نمود. نتایج وی نشان می‌دهد که با افزودن ۲۰ و ۳۰ درصد سیمان به ماسه، مقاومت پس از ۷ روز به ترتیب برابر با ۵ و ۸/۵ مگاپاسکال است.

آناگنوستوپولس (۲۰۱۵) تحقیق خود را در زمینه بررسی مشخصات خاک رس سیلتی تثبیت شده با اپوکسی رزین و سیمان انجام داد. وی با تغییر مقدار اپوکسی رزین به آب و سیمان، نمونه‌ها را در سنین مختلف تحت آزمایش قرار داد. بدین صورت که با ثابت نگه داشتن مقدار سیمان، نسبت اپوکسی رزین به آب را تغییر داد و همچنین با تغییر هر دو پارامتر، یعنی مقدار سیمان و نسبت اپوکسی رزین به آب، آزمایش فشاری تک‌محوری را روی نمونه‌ها انجام داد. نتایج وی

1- Chopped glass fibers
2- Chopped carbon fibers



شکل ۲. الف) تصویر الیاف شیشه (سمت راست) و ب) تصویر الیاف کربن (سمت چپ)

می‌توان به استحکام کششی خوب و عایق مطلوب الکتریسیته اشاره کرد. سایر مشخصات فنی این محصول در جدول ۱ (ارائه شده توسط شرکت سازنده) نمایش داده شده است.

این الیاف شیشه از نوع E-Glass یا همان شیشه‌ی کلسیم-آلومینا است که به دلیل داشتن قیمت مناسب برای مصارف عمومی بوده و متداول‌ترین نوع الیاف شیشه است که در صنعت به‌کار می‌رود. از مزایای آن

جدول ۱. مشخصات فنی الیاف شیشه

Calcium-Alomina	نوع الیاف
۲۱۰۰	مقاومت کششی (Mpa)
۷۱	مدول الاستیسیته (Gpa)
۱۲۰۰	چگالی (kg/m^3)
0.016 ± 0.01	ضخامت الیاف (mm)
12 ± 2	طول الیاف (mm)

Fibers America می‌باشد که جزو الیاف کربن با مدول متوسط است. نمونه‌ای از این الیاف در شکل ۲-ب و مشخصات فنی آن در جدول ۲ (ارائه شده توسط شرکت سازنده) آورده شده است.

۲-۲. الیاف کربن

یکی دیگر از مصالح مصرفی مورد استفاده در این تحقیق، الیاف کربن بریده شده با طول ۱۲ میلی‌متر و ساخت یک شرکت آمریکایی به نام Toray Carbon

جدول ۲. مشخصات مکانیکی الیاف کربن

T300-3k HS	نوع الیاف
۳۵۳۰	مقاومت کششی (Mpa)
۲۳۰	مدول الاستیسیته (Gpa)
۱۶۰۰	چگالی (kg/m^3)
0.28 ± 0.01	ضخامت الیاف (mm)
12 ± 2	طول الیاف (mm)

۲-۳. اپوکسی رزین

های حرارتی را نیز تحمل می‌کند و در آن ترک و شکستگی به وجود نمی‌آید. این محصول، به دلیل داشتن مقاومت شیمیایی خوب در محیط‌های شیمیایی نیز کاربرد دارد. در شکل ۳، دو جزء تشکیل دهنده این اپوکسی رزین قابل مشاهده است و در جداول ۳ و ۴ (ارائه شده توسط شرکت سازنده) مشخصات فیزیکی، ظاهری و مکانیکی ارائه شده است.

رزین مورد استفاده در این تحقیق از نوع RL440 با هاردنر HY440 است که بر پایه اپوکسی بیسفنول A و هاردنر بتن پلیمری آمینی تولید می‌شود. در ساختار این رزین اپوکسی از نوع رقیق کننده واکنش‌گرا استفاده گردیده است که علاوه بر افزایش خصوصیات عایق الکتریکی محصول، باعث ارتقای خصوصیات مکانیکی و ضربه‌پذیری آن نیز گردیده است. این محصول شوک-

جدول ۳. مشخصات فیزیکی و مکانیکی اپوکسی رزین

رنگ ظاهری	زرد شفاف
نسبت ترکیب وزنی رزین به هاردنر	۲: ۱
حداکثر زمان ترکیب اجزا	۵ دقیقه
زمان خشک شدن در دمای اتاق	۳۶۰ دقیقه
وزن مخصوص (gr/cm^3)	۱/۱۰
مقاومت فشاری (kgf/cm^2)	۷۵۱
مقاومت خمشی (kgf/cm^2)	۶۵۲
استحکام کششی (kgf/cm^2)	۵۰۳
سختی	۸۰
مقاومت ضربه‌ای (kJ/m^2)	۶/۳۹۸
چسبندگی (kJ/cm^2)	۸۵

۲-۴. خاک

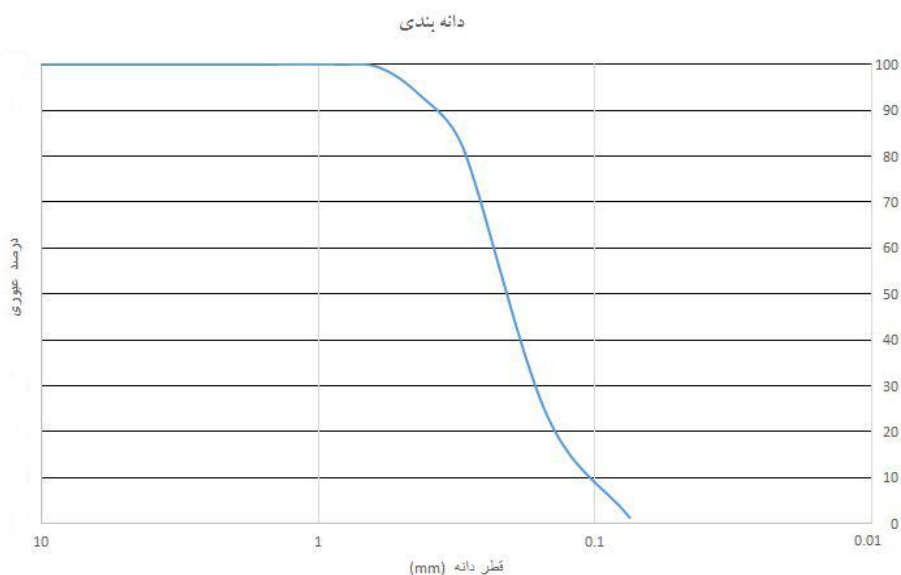
برخوردارند، این خاک جهت انجام تحقیقات انتخاب شده است. از مشکلات این خاک می‌توان به قابلیت تراکم کم، مقاومت باربری کم و مقاومت برشی صفر اشاره کرد که در پروژه‌های عمرانی مشکلات فنی و مهندسی زیادی از قبیل ریزش یا ترک خوردگی ساختمان‌ها، نشست ناهمگون ساختمان، روان‌گرایی خاک در هنگام وقوع زلزله، بالا آمدن سطح آب زیرزمینی و تورم ساختگاه را به همراه خواهد داشت. پس از انجام آزمایش‌های مقدماتی و شناسایی خاک مطابق آیین‌نامه‌های مربوطه، مشخصات مکانیکی

خاک مورد استفاده در این تحقیق از نوع ماسه لای‌دار (ماسه بادی) است که دانه‌بندی یکنواختی دارد. این خاک از منطقه هفت باغ کرمان (جاده کرمان- ماهان) که در موقعیت جغرافیایی 34.78°N $4' 30^{\circ}$ و $14' 57^{\circ} \text{E}$ قرار دارد برداشت شده و به آزمایشگاه منتقل شده است. خاک مذکور از لحاظ ظرفیت باربری جزو خاک‌های ضعیف و مسئله‌دار محسوب می‌شود و از آنجا که در محل برداشت خاک، ساخت و ساز وسیعی در حال انجام است و همچنین با توجه به اینکه اکثر نقاط کویری در جنوب شرق ایران از خاک مشابه

ماسه مورد استفاده در جدول ۴ و نمودار دانه‌بندی این خاک در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۴. مشخصات مکانیکی خاک مورد استفاده

وزن مخصوص خشک حداکثر	(ASTM D698-10)	$1.7 \text{ (gr/cm}^3\text{)}$
درصد رطوبت بهینه	(ASTM D698-10)	۱۴
ضریب یکنواختی (Cu)	(ASTM D422-63)	۲
ضریب دانه‌بندی (Cc)	(ASTM D422-63)	۰/۹۲
اندازه مؤثر ذرات (d_{10})	(ASTM D422-63)	۰/۱۴ میلی‌متر
نام خاک	(ASTM D2487-11)	ماسه لای‌دار بد دانه‌بندی شده



شکل ۳. نمودار دانه بندی خاک مورد استفاده

همزن ترکیب شده است تا یک مخلوط یکنواخت و همگن به دست آید. سپس ترکیب حاصل در سه لایه درون قالب ریخته و هر لایه با ۴ ضربه مطابق انرژی تراکم استاندارد (محاسبه شده از رابطه ۱) کوبیده شده است. نمونه‌ها برای مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نگاه‌داشته شده و سپس توسط جک از قالب بیرون آورده شده‌اند.

۳. نحوه ساخت نمونه و انجام آزمایش‌ها

۳-۱. ساخت نمونه

فرایند آماده‌سازی نمونه‌ها که طبق استاندارد ASTM C 938-80 انجام شده به این شرح است: مؤلفه A و مؤلفه B رزین با نسبت ۱ به ۲ با یکدیگر به مدت ۳ دقیقه توسط یک همزن مخلوط شده است. ترکیب حاصل با درصد وزنی مشخص شده الیاف و با مقدار معینی ماسه (متناسب با حجم قالب) برای مدت ۳ دقیقه توسط

$$\frac{(\text{تعداد ضربه})(\text{تعداد لایه})(\text{ارتفاع سقوط (m)})\left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)(\text{وزن چکش (kg)})}{\text{حجم قالب (m}^3\text{)}} = \left(\frac{\text{KN.m}}{\text{m}^3}\right) \text{ انرژی تراکم} \quad (1)$$

سریع برای تعیین مقاومت زهکشی نشده خاک‌های چسبنده است. دستگاه تک‌محوری مورد استفاده در این آزمایش، که تصویر آن در شکل ۴ آورده شده، به صورت تمام اتوماتیک است. به این صورت که پس از تهیه نمونه مورد نظر و قرار دادن آن در مرکز صفحه بارگذاری دستگاه، کاربر باید پس از انجام یک سری تنظیمات در نرم‌افزار کامپیوتری متصل به دستگاه تک‌محوری، آزمایش را آغاز کند. آزمایش تا مرحله گسیختگی نمونه تحت بار محوری ادامه می‌یابد و همزمان با انجام آزمایش منحنی تنش- کرنش ترسیم می‌گردد.

پس از تهیه نمونه‌ها و نگهداری آنها تا سنین تعیین شده (۳، ۷ و ۲۸ روزه) در دمای اتاق، نمونه‌ها آماده آزمایش می‌باشند و فقط هنگام قرار دادن نمونه زیر دستگاه باید دقت داشت که بالا و پایین نمونه صاف و هموار باشد تا بار به طور یکنواخت بر سطح نمونه وارد شود.

برای محاسبه تعداد ضربات تراکم در هر لایه با استفاده از رابطه ۱ و از آنجا که مقدار انرژی تراکم استاندارد برابر ۵۹۲/۷، تعداد لایه برابر ۳، ارتفاع سقوط چکش ۰/۳ متر، وزن چکش ۳/۲۹ کیلوگرم و حجم قالب استوانه‌ای به قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی-متر برابر ۰/۰۰۰۱۹۶ متر مکعب می‌باشد، تعداد ضربات مورد نیاز در هر لایه عدد ۴ به دست خواهد آمد.

لازم به ذکر است که به منظور جلوگیری از دست‌خوردگی نمونه‌ها توسط جک حین خروج نمونه از قالب، قبل از ساخت نمونه، داخل قالب روغن کاری شده تا اصطکاک بین نمونه و جداره داخلی قالب هنگام خروج نمونه به حداقل برسد و نمونه به راحتی و بدون دست‌خوردگی از قالب خارج شود.

۲-۳. آزمایش تک‌محوری محصور نشده

آزمایش تک‌محوری محصور نشده که مطابق استاندارد ASTM D2166 انجام می‌شود، یک روش



شکل ۴. تصویر دستگاه آزمایش فشاری تک‌محوری

بنابراین، درصد وزنی ۰/۲ به عنوان درصد مشارکت الیاف در طرح‌های اختلاط انتخاب شد.

۳-۳. تعیین مقاومت کششی

برای به دست آوردن مقاومت کششی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه تک‌محوری می‌توان مطابق آیین‌نامه ASTM-C496-11 عمل کرد. در این آیین‌نامه که مربوط به مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای می‌باشد، نمونه‌ی آماده شده، به صورت افقی (مطابق شکل ۵) در زیر دستگاه تک‌محوری قرار داده می‌شود. به طوری که خط تقارن نمونه بر خط تقارن صفحه بارگذاری دستگاه منطبق باشد. سپس، اعمال نیرو توسط دستگاه آغاز می‌شود تا زمانی که نمونه ترک خورده و گسیخته شود. بیشترین نیروی فشاری که به نمونه اعمال شده به عنوان نیروی P در رابطه ۲ (فرمول ذکر شده در استاندارد) قرار داده می‌شود تا مقاومت کششی نمونه حاصل شود.

$$T = \frac{2P}{\pi ld} \quad (2)$$

که T مقاومت کششی (MPa)، P حداکثر نیروی فشاری اعمال شده توسط دستگاه (N)، l طول نمونه (mm) و d قطر نمونه (mm) است.

لازم به ذکر است که در مرحله آماده‌سازی نمونه‌های دارای الیاف و اختلاط مصالح، ترتیب اختلاط مصالح شامل خاک، رزین و الیاف به سه روش مختلف انجام شده است و پس از انجام آزمایش روی نمونه‌ها و به دست آوردن مقاومت‌های فشاری تک‌محوری، در هر سه مورد نتایج یکسان به دست آمده است:

- ۱- آماده کردن اپوکسی رزین، اختلاط آن با خاک، اضافه کردن الیاف و اختلاط مصالح
- ۲- آماده کردن اپوکسی رزین، اختلاط آن با الیاف، اضافه کردن خاک و اختلاط مصالح
- ۳- آماده کردن اپوکسی رزین، اضافه کردن همزمان خاک و الیاف و اختلاط مصالح

همچنین، جهت به دست آوردن درصد بهینه الیاف، نمونه‌هایی با طرح‌های اختلاط با ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ درصد وزنی از الیاف شیشه و کربن ساخته شده‌اند. پس از انجام آزمایش با دستگاه تک‌محوری روی نمونه‌ها با سنین یکسان، مشاهده شد که الیاف با درصد وزنی ۰/۲ بیشترین مقاومت را از خود نشان می‌دهند.



شکل ۵. نحوه قرارگیری نمونه جهت انجام آزمایش کشش

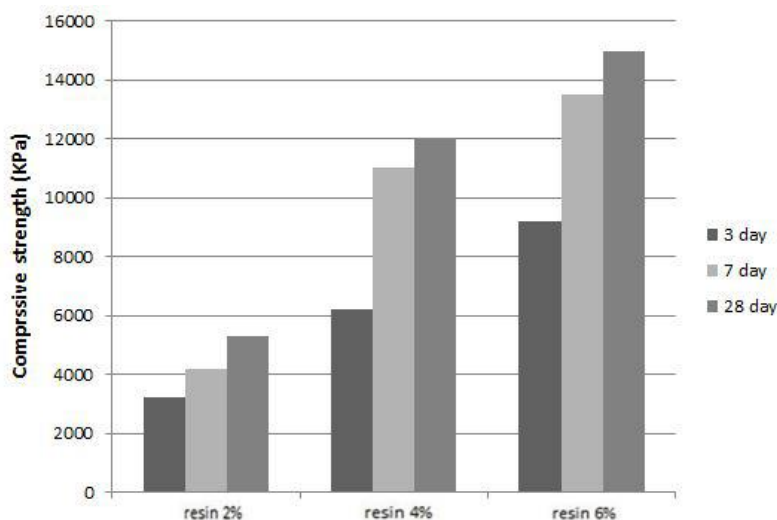
۴. نتایج و بحث

۴-۱. نتایج آزمایش تک محوری برای به دست

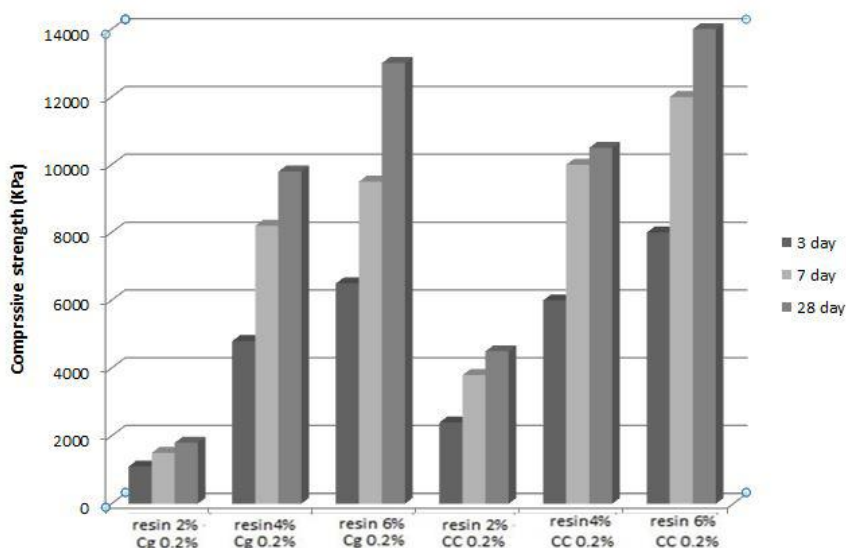
آوردن مقاومت فشاری

برای به دست آوردن مقاومت فشاری تک محوری، آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده مطابق استاندارد

روی نمونه‌های مسلح و غیرمسلح ساخته شده، که تا سن معینی در دمای اتاق نگهداری شده‌اند، انجام شد. میانگین مقاومت‌های فشاری تک محوری مربوط به نمونه‌های مختلف که با ۳ بار تکرار انجام شده، پس از معادل‌گیری در شکل‌های ۶ و ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۶. نمودار میله‌ای مقاومت فشاری نمونه‌های دارای درصد‌های مختلف رزین و در سنین ۳ تا ۲۸ روزه



شکل ۷. نمودار میله‌ای مقاومت فشاری نمونه‌های دارای درصد‌های مختلف رزین و الیاف

یافته و با بالا رفتن سن نمونه‌ها از ۷ روز به ۲۸ روز، مقاومت فشاری نمونه‌ها حدود ۱۸٪ افزایش داشته است، که دلیل آن گیرش زودهنگام اپوکسی رزین است.

با کمی دقت در شکل ۶ می‌توان دریافت که با بالا رفتن سن نمونه‌ها از ۳ روز به ۷ روز، به طور میانگین، مقاومت فشاری نمونه‌ها حدود ۵۰٪ افزایش

فشاری تک‌محوری، در حین انجام آزمایش و پس از آن، نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است، هنگام رسیدن نمونه‌ها به مقاومت نهایی و شکست، نمونه‌های فاقد الیاف کاملاً از هم گسیخته شده‌اند. در حالی که نمونه‌های دارای الیاف پس از شکست از هم نمی‌پاشند و الیاف باعث جلوگیری از گسیختگی سریع و نابهنگام نمونه‌ها می‌شود.

همانگونه که از تصاویر پیداست، نمونه‌های فاقد الیاف دارای مود گسیختگی خوب و قابل قبولی بوده و اصطلاحاً نمونه در برش گسیخته شده است، که نشان دهنده صحت نمونه‌سازی و همگن بودن نمونه‌های ساخته شده می‌باشد. با افزودن الیاف، که مانند پل‌هایی کوچک میان قسمت‌های نمونه مانع از پیشرفت ریز ترک‌ها و تبدیل آنها به ترک‌های بزرگتر و گسیختگی نابهنگام نمونه می‌شوند، نمونه از لحاظ مقاومت برشی تقویت می‌شود. بارگذاری نمونه توسط دستگاه تک‌محوری تا جایی ادامه می‌یابد که کرنش نمونه از مقدار مجاز بیشتر شده، نمونه لهیده می‌شود و تنها ترک‌های سطحی در قسمت‌های بیرونی نمونه دیده می‌شود.

همچنین، در سن یکسان، با افزایش مقدار رزین از ۲٪ به ۴٪، مقاومت فشاری نمونه‌ها دو برابر شده، اما با افزایش مقدار رزین از ۴٪ به ۶٪ باعث افزایش ۲۰ درصدی در مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است.

با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از آزمایش‌ها، مقاومت فشاری تک‌محوری، نمودار میله‌ای موجود در شکل ۷ مربوط به مقاومت فشاری نمونه‌های دارای درصد‌های رزین، الیاف و سنین مختلف جهت مقایسه هر چه بهتر رفتار و پاسخ نمونه‌ها تحت بارگذاری فشاری تک‌محوری ترسیم شده است.

همچنین، با مقایسه نمودارهای موجود در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که اضافه کردن الیاف به خاک باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها نشده است که می‌تواند دلایل مختلفی داشته باشد. اما نمونه‌های دارای الیاف شیشه دارای مقاومت کمتری نسبت به نمونه‌های دارای الیاف کربن می‌باشند که دلیل آن داشتن مقاومت کششی بیشتر الیاف کربن نسبت به الیاف شیشه است.

در شکل ۸، تصویر نمونه‌های تست شده تسلیح شده و تسلیح نشده، جهت به‌دست آوردن مقاومت



شکل ۸ الف) نمونه‌های تست شده دارای الیاف (تصاویر پایینی) و ب) نمونه‌های تست شده فاقد الیاف (تصاویر بالایی)

۲-۴. نتایج آزمایش تک‌محوری جهت به‌دست

آوردن مقاومت کششی

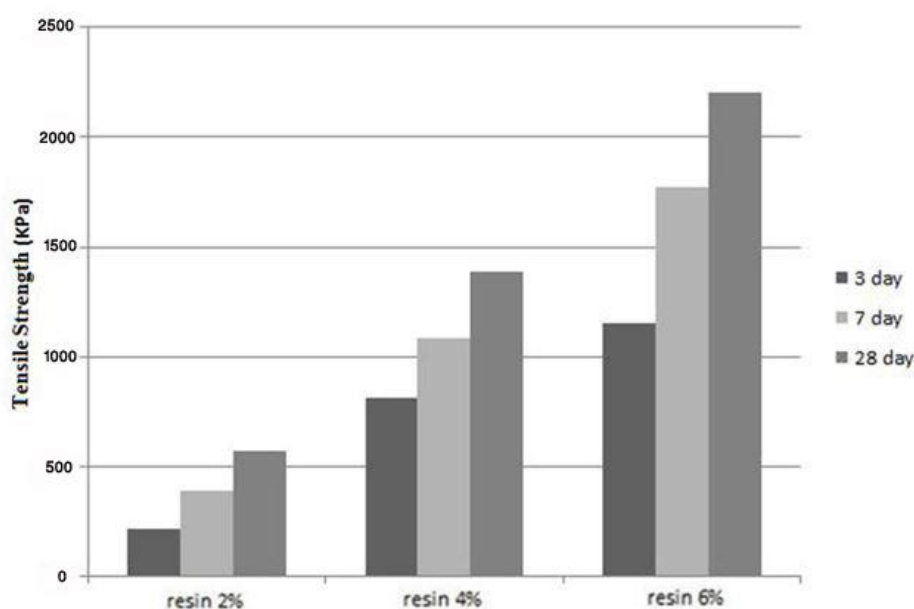
نتایج مقاومت کششی ماسه تثبیت شده با رزین و الیاف، در شکل‌های ۹ و ۱۰ ترسیم شده است. در این نمودارها محور عمودی نمایشگر مقاومت کششی برحسب مگاپاسکال، محور افقی نمایشگر درصد رزین و الیاف به‌کار رفته در هر نمونه و رنگ‌های مندرج در کنار نمودارها نشانگر سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌ها می‌باشد. همچنین، CC نشان دهنده الیاف کربن بریده شده و Cg نشان دهنده الیاف شیشه بریده شده می‌باشد.

با کمی دقت در این نمودار می‌توان دریافت که با بالا رفتن سن نمونه‌ها از ۳ روز به ۷ روز، به طور میانگین مقاومت کششی نمونه‌ها حدود ۴۰٪ افزایش یافته و با بالا رفتن سن نمونه‌ها از ۷ روز به ۲۸ روز،

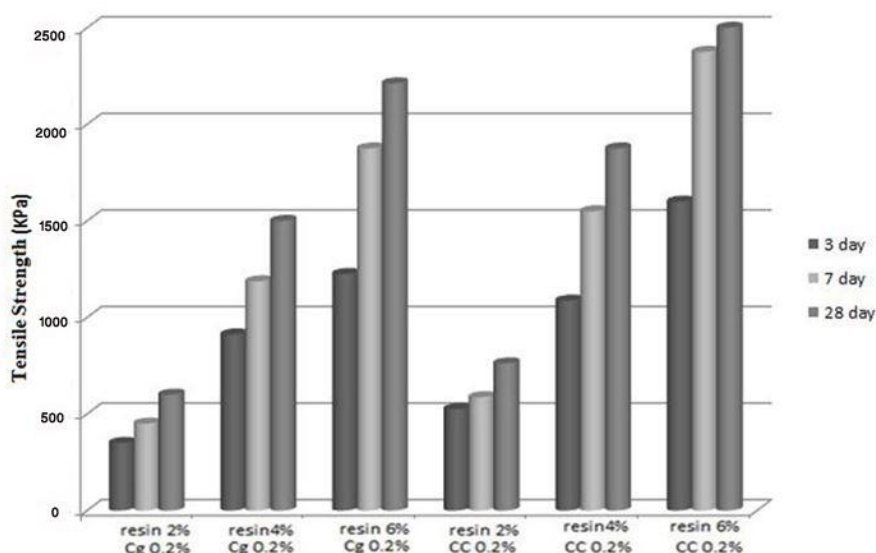
مقاومت کششی نمونه‌ها حدود ۲۰٪ افزایش داشته است، که دلیل آن گیرش زود هنگام اپوکسی رزین است.

همچنین، در سن یکسان، با افزایش مقدار رزین از ۲٪ به ۴٪، مقاومت کششی نمونه‌ها ۲۵۰٪ افزایش یافته، اما با افزایش مقدار رزین از ۴٪ به ۶٪ باعث افزایش ۵۰٪ مقاومت برشی نمونه‌ها شده است.

با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از آزمایش‌های مقاومت کششی، نمودار میله‌ای موجود در شکل ۱۰ مربوط به مقاومت کششی نمونه‌های دارای درصد‌های رزین، الیاف و سنین مختلف جهت مقایسه هر چه بهتر رفتار و پاسخ نمونه‌ها در کشش ترسیم شده است.



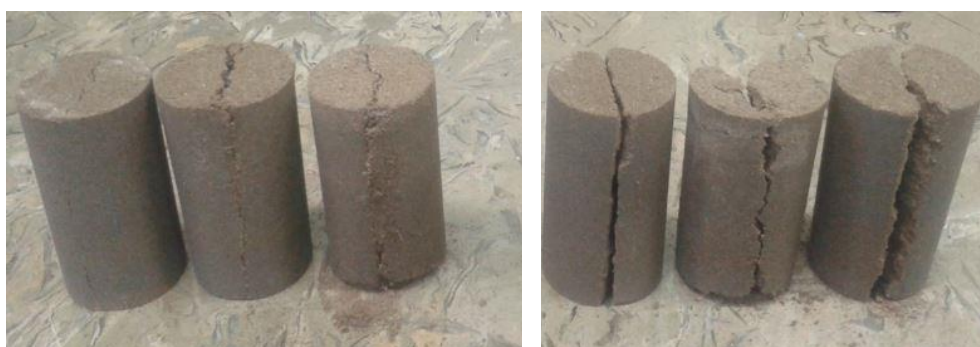
شکل ۹. نمودار میله‌ای مقاومت کششی نمونه‌های دارای درصد‌های مختلف رزین و در سنین ۳ تا ۲۸ روزه



شکل ۱۰. نمودار میله‌ای مقاومت کششی نمونه‌های دارای درصد‌های مختلف رزین و الیاف در سنین ۳ تا ۲۸ روزه

نمونه‌ها داریم، که دلیل آن داشتن مقاومت کششی بیشتر الیاف کربن نسبت به الیاف شیشه است. در شکل ۱۱ نیز تصویر نمونه‌های تست شده با دستگاه تک‌محوری جهت به‌دست آوردن مقاومت کششی، در حین انجام آزمایش، نشان داده شده است.

با مقایسه نمونه‌های دارای الیاف و فاقد الیاف مشاهده می‌شود که با اضافه کردن الیاف کربن به مصالح، به طور متوسط افزایش ۴۰ درصدی در مقاومت کششی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف مشاهده می‌شود. در حالی که با اضافه کردن الیاف شیشه، به طور متوسط افزایش ۱۰ درصدی در مقاومت کششی



شکل ۱۱. الف) نمونه‌های تست شده دارای الیاف (تصویر سمت چپ) و ب) نمونه‌های تست شده فاقد الیاف (تصویر سمت راست)

هم گسیخته شده‌اند. در حالی که نمونه‌های دارای الیاف، پس از شکست از هم نمی‌پاشند و الیاف باعث جلوگیری از گسیختگی سریع و نابهنگام نمونه‌ها می‌شود.

در این شکل، سه نمونه سمت راست فاقد الیاف و سه نمونه سمت چپ مسلح به الیاف می‌باشند. همانگونه که مشخص است، هنگام رسیدن نمونه‌ها به مقاومت نهایی و شکست، نمونه‌های فاقد الیاف کاملاً از

۵. نتیجه گیری

۳- استفاده از الیاف شیشه و کربن در کنار اپوکسی رزین باعث افزایش مقاومت فشاری نمی‌شود. در واقع، نقش الیاف، افزایش مقاومت کششی و جلوگیری از پیشرفت ریزترک‌ها و گسیختگی آنی و زود هنگام نمونه‌ها است و کاهش مقاومت فشاری در حضور الیاف با توجه به مطالعات گذشتگان امری معمول بوده و دلیل آن جذب شدن مقداری از اپوکسی رزین مصرفی توسط خود الیاف، به علت بالا بودن سطح ویژه الیاف، و ایجاد تخلخل در نمونه‌ها است.

۴- استفاده از الیاف شیشه و کربن در کنار اپوکسی رزین، باعث افزایش مقاومت کششی نمونه‌ها و جلوگیری از پیشرفت ریزترک‌ها و گسیختگی آنی و زود هنگام آن‌ها می‌شود.

۵- نمونه‌های دارای الیاف کربن، مقاومت کششی بیشتری (تقریباً ۳۰٪) نسبت به نمونه‌های دارای الیاف شیشه از خود نشان دادند، که دلیل آن، داشتن مقاومت کششی بالاتر الیاف کربن نسبت به الیاف شیشه است.

۶- با مقایسه نتایج این تحقیق و تحقیقات انجام شده توسط محققین بخش عمران دانشگاه فدرال ریوگرند برزیل روی ماسه سیلتی تثبیت شده با استفاده از سیمان، درمی‌یابیم که مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با اپوکسی رزین در سن یکسان چندین برابر بیشتر از نمونه‌های تثبیت شده با سیمان است. برای مثال، مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با ۲٪ اپوکسی رزین در سن ۲۸ روزه، دو برابر مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با ۶٪ سیمان در سن ۲۸ روزه است، که امکان دارد این موضوع بتواند توجیه اقتصادی نیز داشته باشد.

هدف این تحقیق بررسی پارامترهای مقاومتی خاک ماسه‌ای تثبیت شده با الیاف و اپوکسی رزین با استفاده از دستگاه آزمایش فشاری تک‌محوری بود. از این آزمایش، پارامترهایی از قبیل مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی، کاربرد الیاف کربن و الیاف شیشه قابل نتیجه‌گیری است. آزمایش‌ها در سه درصد مختلف رزین، در سه سن متفاوت و با درصد بهینه‌ای از الیاف شیشه و الیاف کربن انجام شده است که پس از بررسی نتایج و مقایسه آنها با یکدیگر، نتایج زیر حاصل شد:

۱- با افزایش سن نمونه‌ها از ۳ روز به ۷ روز، به طور میانگین افزایش حدوداً ۴۵ درصدی و با افزایش سن از ۷ روز به ۲۸ روز، به طور میانگین افزایش حدوداً ۱۹ درصدی در مقاومت‌های فشاری و کششی نمونه‌ها داریم. اما پیش‌بینی می‌شود که با افزایش سن به بیشتر از ۲۸ روز، افزایش قابل محسوسی در مقاومت‌های ذکر شده نخواهیم داشت، زیرا به طور متوسط نمونه‌ها در سن ۷ روزه به ۸۰٪ مقاومت ۲۸ روزه خود رسیده‌اند.

۲- از آنجا که سرعت گیرش اپوکسی رزین بالاست، نمونه‌های تثبیت شده با رزین در سن یکسان، مقاومت بالاتری نسبت به سیمان و آهک دارند. یعنی زمان گیرش نمونه تثبیت شده با اپوکسی رزین نسبت به سیمان یا آهک بسیار کمتر است. در نتیجه، در شرایطی که در پروژه، زمان عامل مهمی باشد، نسبت به دیگر انواع تثبیت‌کننده، بسیار مفید خواهد بود.

۶. منابع

- Anagnostopoulos, C. 2006. "Physical and mechanical properties of injected sand with latex-superplasticized grouts". *Geotech. Test. J.*, 29(6). DOI: 10.1520/GTJ100307
- Anagnostopoulos, C. 2015. "Strength properties of an epoxy resin and cement-stabilized silty clay soil". *Appl. Clay Sci.*, 114: 517-529.
- Anagnostopoulos, C. and Hadjispyrou, S. 2004. "Laboratory study of an epoxy resin grouted sand". *Ground Improvement*, 8: 39-45.

- Anagnostopoulos, C. and Papaliangas, T. 2012. "Experimental investigation of epoxy resin and sand mixes". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 138: 841-849.
- Anagnostopoulos, C. A., Papaliangas, T., Manolopoulou, S. and Dimopoulos, T. 2011. "Physical and mechanical properties of chemically grouted sand". *Tunnel. Underground Space Technol.*, 26(6): 718-724.
- Anagnostopoulos, C., Kandiliotis, P., Lola, M. and Karavatos, V. 2014. "Improving properties of sand using epoxy resin and electrokinetics". *Geotech. Geol. Eng.*, 32: 859-872.
- ASTM C496-11. "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens". ASTM International, West Conshohocken, PA, Vol. 04.08.
- ASTM C938-80. "Standard Practice for Proportioning Grout Mixtures for Preplaced-Aggregate Concrete". ASTM International, West Conshohocken, PA, Vol. 04.02.
- ASTM D2166 / D2166M-13. "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil". ASTM International, West Conshohocken, PA, Vol. 04.08.
- ASTM D422-63-e2. "Standard Test Method for Particle Size Analysis of Soils". ASTM International, West Conshohocken, PA, Vol. 04.08.
- ASTM D698-12e2. "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort". ASTM International, West Conshohocken, PA, Vol. 04.08.
- Ates, A. 2013. "The effect of polymer-cement stabilization on the unconfined compressive strength of liquefiable soils". *Int. J. Polym. Sci.*, DOI: 10.1155/2013/356214.
- Basha, E. A., Hashim, R., Mahmud, H. B. and Muntohar, A. S. 2005. "Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement". *Constr. Build. Mater.*, 19(6): 448-453.
- Cai, Y., Shi, B., Ng, C. W. W. and Tang, C. S. 2006. "Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil". *J. Eng. Geol.*, 87: 230-240.
- Consoli, N. C., Arcari Bassani, M. A. and Festugato, L. 2010. "Effect of fiber-reinforcement on the strength of cemented soils". *Geotext. Geomembranes*, 28(4): 344-351.
- Das, B. M. 2006. "Principles of Geotechnical Engineering". California State University, Sacramento, 5th edition.
- Dean, R. and Freitag, F. 1986. "Soil randomly reinforced with fibers". *J. Geotech. Eng.*, 112: 820-826.
- Ghiassian, H. and Poorebrahim, G. R. 2003. "Improvement of Strength Parameters of Sand Reinforced with Polymeric Fibers". Dept. of Civil Eng., Iran Univ. of Sci. and Technol., Tehran, Iran.
- Madhavi Latha, G. and Murthy, V. S. 2007. "Effects of reinforcement form on the behavior of geosynthetic reinforced sand". *Geotext. Geomembranes*, 25: 23-32.
- Marandi, S. M., 2008. "Strength and ductility of randomly distributed palm fibers reinforced silty-sand soils". *Am. J. Appl. Sci.*, 5(3): 209-220.
- Naeini, S. A. and Ghorbanalizadeh, M. 2010. "Effect of wet and dry conditions on strength of silty sand soils stabilized with epoxy resin polymer". *J. Appl. Sci.*, 10(22). DOI: 10.3923/jas.2010.2839.2846.
- Nataraj, M. S. and McManis, K. L. 1997. "Strength and deformation properties of soils reinforced with fibrillated fibers". *Geosynth. Int.*, 4(1): 65-79.
- Park, S. S. 2009. "Effect of fiber reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fiber-reinforced cemented sand". *Geotext. Geomembranes*, 27(2): 162-166.
- Tang, C., Shi, B. and Chen, W. 2007. "Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil". *J. Geotext. Geomembranes*, 25: 194-202.
- Waldron, L. J. 1977. "The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil". *Soil Sci. Soc. Am.*, 41(5): 843-849.
- Wang, Y., Frost, J. D. and Murray, J. J. 200. "Utilization of Recycled Fiber for Soil Stabilization". Proc. of The Fiber Society Meeting, Guimaraes, Portugal, pp. 59-62.