نشریه علوم آب و خاک
سال بیست و ششم / شماره سوم / پاییز ۱۴۰۱/مقاله علمی-پژوهشی: صفحات ۱۴۳ تا ۱۵۷

تأثیر دوره عمل‌آوری و درصد اختلاط مواد افزودنی بتنی در بالابردن ظرفیت باربری و مقاومت برشی خاک‌های سیلت ماسه‌ای

حدیث دقیق[۱]، سید حبیب موسوی جهرمی[۲*]، امیر خسروجردی[۱] و حسین حسن‌پور درویشی[۳]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۲/۱۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۱۴)

چکیده

وجود خاک سیلت ماسه‌ای در زمان فونداسیون‌های سازه‌های بتنی و سازه‌های هیدرولیکی و آبیاری همواره باعث به‌وجود آمدن چالش‌هایی شده است. بالابردن پایداری و ظرفیت باربری این خاک سست، با استفاده از اضافه کردن مواد دیگر همواره مورد بحث و تحقیق بوده است. تحقیق حاضر، اثر دوره عمل‌آوری و درصدهای مختلف مواد افزودنی گوناگون روی مقاومت خاک‌های سیلت ماسه‌ای را مورد بحث و بررسی قرار می دهد. از این‌رو، مواد افزودنی مختلفی با درصد اختلاط ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی در دوره‌های عمل‌آوری ۳، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روز به خاک اضافه شد. به‌منظور بررسی تأثیر هر یک از این مواد افزودنی بر پارامترهای مقاومتی خاک سیلت ماسه‌ای، تست‌های آزمایشگاهی نظیر مقاومت فشاری تک محوری (U.C.S) و ظرفیت باربری کالیفرنیا (C.B.R) انجام شد. در مجموع، ۲۹۹ آزمایش در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران انجام گرفت. نتایج نشان داد،که اضافه کردن افزودنی‌های بتن به‌مراتب تأثیر بیشتری را بر بالابردن مقاومت فشاری و ظرفیت باربری در خاک سیلت ماسه‌دار دارد. همچنین، مقاومت فشاری و ظرفیت باربری به‌مرور زمان برای افزودنی‌های سیمان افزایش پیدا کرده و در روز ۲۱ این درصد نرخ ثابت به‌خود می‌گیرند. درحالی که مواد افزودنی کانفیکس و بنتونیت تأثیر معناداری بر افزایش ظرفیت باربری ندارند. در ادامه تغییرات درصد اختلاط مواد نشان داد، افزایش میزان اختلاط مواد سیمانی باعث افزایش مقاومت فشاری و ظرفیت باربری برای مواد بتنی می‌شود. درحالی که مواد کانفیکس و بنتونیت همچنان تأثیر کمی را دارا هستند. بیشترین ظرفیت باربری و مقاومت فشاری به‌ازای سیمان پوزولانی به‌وجود می‌آمد. این مقادیر نشان داد به‌ازای افزودن ۵ درصد سیمان پوزولانی و ۷ درصد سیمان پرتلند با ۲۸ روز عمل‌آوری، بیشترین عدد CBR و مقاومت UCS به‌ترتیب به‌مقدار ۱۷۶/۲۶ و ۱۷/۵۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به‌وجود خواهد آمد. همچنین الگوی گسیختگی مورد بررسی قرار داده شد. این مقایسه‌ها نشان داد با افزایش دوره عمل‌آوری، رفتار نمونه‌ها از نیمه ترد به ترد و به‌سمت سخت شدن تغییر می‌کند.

واژه‌های کلیدی: درصد اختلاط، دوره عمل‌آوری، مقاومت فشاری، ظرفیت باربری، آزمایش UCS، آزمایش CBR

۱. گروه مهندسی سیستم‌های کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲. گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۳. گروه عمران- مهندسی و مدیریت منابع آب، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: h-mousavi@srbiau.ac.ir

مقدمه

یکی از مقدماتی‌ترین و مهم‌ترین اصول در اجرای طرح‌های عمرانی، داشتن زمینی مقاوم برای احداث بناست که با توجه به رشد روز افزون جمعیت دنیا در سال‌های اخیر و ضرورت احداث تأسیسات مختلف در پروژه‌های آبخیزداری و سدسازی، بهسازی خاک برای احداث این‌گونه بناها الزامی است. خاک قرار گرفته در پی این سازه‌ها باید پایدار باشد. خاک‌های ماسه‌ای و سیلتی به‌خاطر ساختار ذاتی خود در برابر مقاومت فشاری، از خود مقاومت کمی را نشان می دهند. از این‌رو بهبود این نوع خاک‌ها با استفاده از مواد افزودنی می‌تواند راهکاری برای مهندسان و طراحان این سازه‌ها معرفی شود. در این زمینه مطالعات زیادی با اهداف مختلف انجام شده است که می‌توان به این موارد اشاره کرد، (۸، ۱۳ و ۱۸).

کاردوسو و همکاران (۱۲)، به بررسی تأثیر اختلاط بتن در درصد اختلاط‌های مختلف در خاک‌های ماسه‌ای پرداختند. در این تحقیق، از آزمایش مقاومت کششی استوانه استفاده شد. همچنین مقاومت فشاری و مقاومت برشی نمونه‌ها به‌ازای درصد مختلف آب اضافه شده به مخلوط بتن و ماسه، مورد بحث و بررسی قرار داده شد. در این پژوهش از زاویهٔ شکست نمونه در حال آزمایش به‌عنوان معیار مقایسه استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد، درصد آب استفاده شده در دوره عمل‌آوری مخلوط ماسه و بتن تأثیر مستقیم بر مقدار مقاومت برشی و مقاومت فشاری نمونه‌ها دارد. همچنین به‌ازای درصدی از آب مخلوط شده، تأثیر این پارامتر بر زاویه شکست نمونه‌های در حال تست به‌صورت زیادی تقلیل پیدا خواهد کرد.

کانسویل و همکاران (۸) در سال ۲۰۱۰، به بررسی تأثیر اختلاط سیمان پرتلند با درصد اختلاط بالای ده درصد پرداختند. در این تحقیق، آزمایش UCS برای بررسی میزان افزایش مقاومت فشاری استفاده شد. به‌ازای افزایش میزان نرخ آب درون سیمان ۰/۶، ۱/۲ و ۱/۸، میزان مقاومت فشاری در روزهای سوم، هفتم، چهاردهم و بیست و هشتم، مورد بررسی قرار داده شد. در این تحقیق رفتار مکانیکی خاک به‌عنوان پارامتری برای تعیین رفتار خاکدانه‌ها استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد به‌ازای افزایش مقدار درصد سیمان پرتلند، مقاومت فشاری افزایش پیدا خواهد کرد. این نکته حائز اهمیت بود. نرخ افزایش مقاومت فشاری با افزایش میزان سیمان و درصد آب درون بتن درنهایت به تعادلی خواهد رسید. به این معنا که به‌ازای درصدی از سیمان و ماسه، مقاومت فشاری مقادیر نزدیکی برآورد می‌شود.

کانسول و همکاران (۹) به بررسی پارامترهای مرتب با مقاومت بتن در بهسازی خاک ماسه‌ای پرداختند. در این پژوهش پارامترهایی از درصد آب محبوس شده در خاک، درصد تخلخل و درصد محتوای سیمان، مورد بررسی قرار داده شد. آزمایش‌ها نشان داد به‌ازای افزایش درصد محتوای سیمان در مخلوط خاک ماسه‌ای، نرخ افزایش مقاومت فشاری با نرخ خطی افزایش پیدا خواهد کرد. دامنه مخلوط سیمان در بازه ۳ تا ۹ درصد درنظر گرفته شد. همچنین نتایج تخلخل خاکدانه‌های مورد آزمایش نشان داد، با افزایش میزان تخلخل در خاکدانه ماسه‌ای همراه با سیلت، مقاومت فشاری به‌صورت تابع نمایی کاهش پیدا خواهد کرد و درنهایت در مقداری ثابت می‌شود.

نتایج این تحقیق نشان داد، افزایش آب محبوس در مخلوط خاکدانه با سیمان، باعث کاهش محسوس در مقاومت فشاری می‌شود. درصد آب محبوس در خاکدانه در رنج ۱۷ تا ۲۳ درصد قرار داشت. مقایسه‌های مقادیر مقاومت فشاری حاصل از آزمایش UCS نشان داد، با افزایش نرخ تخلخل بر درصد سیمان (پارامتر تعریف شده) درنهایت با افزایش این پارامتر از مقدار تقریبی ۲۰، مقاومت فشاری خاکدانه‌ها در رنجی ناچیز متغیرخواهند بود و مقاومت فشاری خاکدانه سیلت ماسه مخلوط شده با سیمان برابر با ۷۰۰ کیلوپاسکال خواهد بود. درنهایت با استفاده از قضیهٔ پی- باکینگهام، رابطه‌ای برای برآورد مقاومت فشاری ارائه شد.

کانسول و همکاران (۱۰)، به بررسی تأثیر دوره عمل‌آوری خاک ماسه‌ای مخلوط شده با سیلت پرداختند. در این پژوهش

از آزمایش UCS برای برآورد مقاومت فشاری استفاده شد. در ازای مقادیر مختلف درصد سیمان مخلوط شده، مقادیر مقاومت فشاری خاک در طول زمان ۲، ۷ و ۲۸ روز اندازه‌گیری شد. نتایج این تحقیق نشان داد با گذر زمان و افزایش دوره عمل‌آوری خاک‌های مورد آزمایش، مقاومت فشاری تا ۵۸ درصد افزایش پیدا خواهد کرد. درحالی که با افزایش دوره عمل‌آوری، میزان تخلخل خاکدانه‌ها مستقل از دوره عمل‌آوری است. افزایش دوره عمل‌آوری تأثیری بر میزان تخلخل خاکدانه ها نداشته و با افزایش میزان تخلخل، میزان مقاومت به‌صورت معناداری کاهش پیدا خواهد کرد. درنهایت با درنظر گرفتن پارامترهای مکانیکی خاک از جمله درصد تخلخل، میزان مقاومت فشاری و درصد سیمان مخلوط شده، دوره عمل‌آوری به‌عنوان پارامتر وابسته به این روابط (با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی) تعریف شد.

در سال ۲۰۱۲، کانسول و همکاران (۱۱) به بررسی تأثیر درصد هوای خلأ در مخلوط ماسه و سیمان با درصد اختلاط سیمان بین ۱ تا ۱۰ درصد پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد به‌ازای افزایش هوای محبوس شده در مخلوط ماسه و سیمان، میزان مقاومت فشاری کاهش پیدا خواهد کرد. با تخلیهٔ این هوا می‌توان مقاومت فشاری و برشی خاک را تا میزان قابل قبولی افزایش داد. از آزمایش برش تک محوری و برش مستقیم سیلندر (ITS) استفاده شد.

همچنین در اضافه کردن مواد افزودنی به خاکدانه تحقیقاتی وجود دارد که در زیر به آنها اشاره شده است.

زولکیفلی و همکاران (۱۹)، در بررسی اثر خاکستر آتشفشان بر خصوصیات مهندسی خاک نشان دادند که این ماده افزودنی باعث کاهش حد روانی و شاخص خمیری و باعث افزایش عدد CBR و مقاومت فشاری تک‌محوری می‌شود. همچنین آنها به این نتیجه رسیدند که مخلوط آهک و خاکستر آتشفشانی در پایداری خاک‌های سیلتی و ماسه‌ای بسیار مؤثر است.

پو پالا و موسودا (۱۶)، بیان داشتند که اضافه کردن الیاف پارچه‌ای می‌تواند تأثیر مستقیم بر افزایش مقاومت فشاری خاکدانه‌های ماسه‌ای همراه با سیلت داشته باشد. آنها بیان داشتند در پایدارسازی خاک، استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به علت کم‌هزینه بودن آن، بسیار متداول است. این مصالح مقاومت بالایی در مواجه با تخریبات شیمیایی و بیولوژیکی دارند و سبب فروشویی خاک نمی‌شوند. همچنین افزایش غلظت الیاف و طول آنها سبب افزایش درصد رطوبت بهینه و کاهش جزئی حداکثر وزن مخصوص خشک می‌شود. همچنین فوریزین و همکاران (۱۴) بیان داشتند، افزودن الیاف به خاک سبب افزایش کرنش‌گسیختگی شده و رفتار نمونه به‌سمت رفتار نرم می‌رود. آناگوستوپولو و همکاران (۲)، به بررسی تأثیر مواد افزودنی بر مقاومت خاک ماسه‌ای پرداختند. آنها با درنظر گرفتن خاک مورد آزمایش تحت یک بارگذاری مشخص نتیجه گرفتند که حداکثر بارگذاری در خاک‌های تثبیت نشده خیلی بیشتر از خاک‌های تثبیت شده است و حداقل میزان نشست در خاک‌های تثبیت شده با الیاف پلی پروپیلن به‌صورت چشمگیری کاهش پیدا خواهد کرد. همچنین با این رویکرد تحقیقات دیگر انجام پذیرفت (۱۴).

یکی از مشکلات و خلأهای تحقیقاتی موجود در زمینه خاک‌های مسئله‌دار، وجود خاک‌های سیلت ماسه‌ای در محل پروژه است که می‌توانند کاربری طرح را تحت تأثیر قرار دهند و یا منجر به تخریب آن شوند. نوآوری مطالعه حاضر بر ارزیابی عملکرد مواد افزودنی بتنی در شرایط مختلف عمل‌آوری بر روی پارامترهای مقاومت خاک سیلت ماسه‌ای متمرکز شده است. بیشتر مطالعات انجام شده تاکنون، در راستای به‌کارگیری یک ماده افزودنی به‌صورت واحد و یا در ترکیب با سایر افزودنی‌ها صورت گرفته و مطالعات بسیار کمی به بررسی عملکرد چندین نوع ماده افزودنی در زمان‌های مختلف عمل‌آوری، بر بهسازی خاک‌ها به‌خصوص خاک‌های سیلت ماسه‌ای پرداخته است. همچنین برخی از مواد افزودنی مورد استفاده در این مطالعه مانند سیمان پوزولانی ویژه، ترمیم کننده بتن Confix PR50 و ترکیب سیمان پرتلند با الیاف پلی‌پروپیلن به‌عنوان افزودنی برای تثبیت خاک، در پژوهش‌های گذشته

کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برخی از افزودنی‌های مورد استفاده در این تحقیق مانند سیمان پوزولانی ویژه در مقادیر حجم‌های زیاد، اقتصادی بوده و به‌راحتی در دسترس است. از اهداف اصلی این تحقیق، بررسی تأثیردوره عمل‌آوری (۳، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روز) و درصدهای مختلف افزودنی (۳، ۵ و ۷ درصد) بر روی پارامترهای مقاومتی خاک‌های سیلت ماسه‌ای و بهسازی این نوع خاک‌ها است.

مواد و روش‌ها

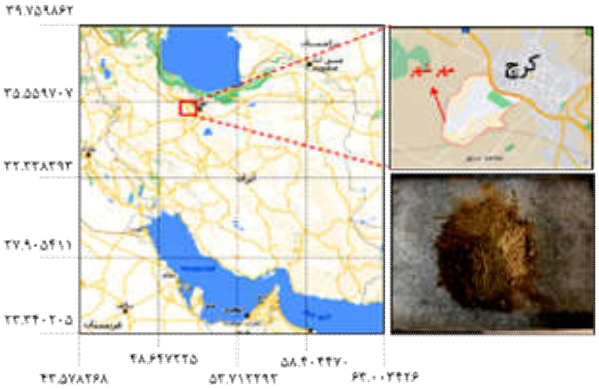
آزمایش‌های مکانیک خاک: برای دستیابی به پارامترهای خاک مورد مطالعه، آزمایش‌هایی نظیر تراکم، دانه‌بندی، هیدرومتری و درنهایت آزمایش‌هایی همچون ظرفیت باربری کالیفرنیا و مقاومت فشاری تک‌محوری به‌صورت ۳ آزمایش بر روی چهار نمونه خاک انجام شد. لازم به توضیح است، کلیه آزمایش‌ها در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران انجام شده است. به‌طور کلی، ۲۹۹ آزمایش به‌منظور بررسی تأثیر مواد افزودنی بتن در شرایط مختلف عمل‌آوری بر پارامترهای مقاومتی خاک‌های سیلت ماسه‌ای انجام شده است.

دانه‌بندی نمونه خاک: خاک سیلت ماسه‌ای مورد استفاده در این پژوهش از منطقه مهرشهر کرج، واقع در استان البرز تهیه شده است. دانه‌بندی خاک مورد مطالعه طبق استاندارد ASTM D422-63 انجام شده است (۱۵). شکل ۱، موقعیت منطقه مورد مطالعه و نمونه خاک را نشان می‌دهد.

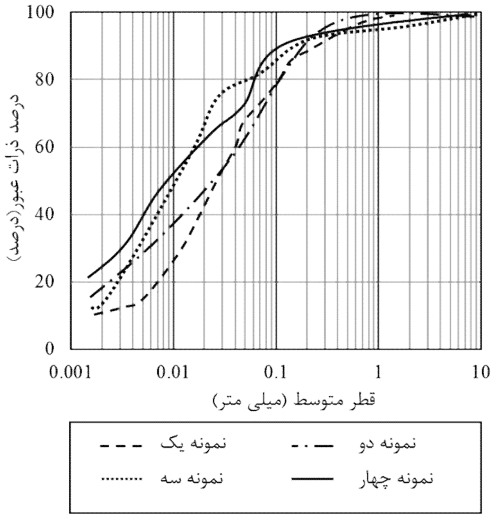
در مجموع چهار آزمایش به روش‌تر (شستشوی خاک بر روی الک نمره ۲۰۰)، بر روی نمونه‌های مختلف خاک انجام شده است تا بازه‌ای که دانه‌های خاک به لحاظ اندازه در آن قرار گرفته‌اند، با دقت مشخص شود. برای تعیین دانه‌بندی بخش ریزدانه خاک از آزمایش هیدرومتری استفاده شده است. این آزمایش بر طبق استاندارد ASTM D422-63 انجام شده است. با توجه به آزمایش‌های دانه‌بندی مکانیکی و هیدرومتری انجام شده، مشخص شد که خاک مورد مطالعه از نوع سیلت ماسه‌دار (ML) است. شکل ۲، منحنی‌دانه‌بندی چهار نمونه آزمایش شده را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، آزمایش‌ها بر روی مخلوط این خاک‌ها انجام پذیرفت.

خصوصیت‌های فیزیکی نمونه خاک: آزمایش‌های مورد نیاز برای دستیابی به پارامترهای فیزیکی خاک مورد نظر صورت گرفت. برای تعیین حد روانی و خمیری نمونه خاک، آزمایشی بر طبق استاندارد (ASTM D4318-87) انجام گرفت. در مجموع بر روی چهار نمونه خاک مورد مطالعه، چهار آزمایش حد روانی و حد خمیری انجام شده است و درنهایت با میانگین‌گیری از کلیه نتایج، حدود اتربرگ خاک مورد مطالعه تعیین شد. همچنین، به‌منظور تعیین درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک ماکزیمم، چهار آزمایش تراکم اصلاح شده از نوع A طبق استاندارد (ASTM D1557-02) انجام گرفت. لازم به ذکر است، خاک مربوطه نسبت به افزایش رطوبت حساس بوده به‌طوری که با رساندن درصد رطوبت به حدود ۱۵ درصد، عملاً تراکم خاک به راحتی امکان‌پذیر نبود. با توجه به آنکه خاک مورد نظر به شکل کلوخه‌ای و به‌شدت متخلخل بوده است، وزن مخصوص ظاهری آن با استفاده از قانون شناوری ارشمیدس تعیین شد. درنهایت با توجه به وزن اولیه نمونه و تغییر حجم آن، وزن مخصوص عددی حدود ۱/۳ با ۱/۴ به‌دست آمد. همچنین چگالی ویژه ذرات جامد خاک بر اساس استاندارد (ASTM D854-02) تعیین شده است که مقدار آن برابر ۲/۵۵ است. خصوصیات فیزیکی و ژئوتکنیکی نمونه‌های خاک سیلت ماسه‌ای در جدول ۱، ذکر شده است.

مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها: همان‌طور که در شکل (۳-الف) مشخص است، نمونه‌های آزمایشگاهی برای انجام تست های UCS وCBR، ابتدا در سیلندرهایی از پیش تعیین شده آماده‌سازی شدند. به‌ازای آزمایش‌های مختلف، مواد افزودنی با درصد ۳، ۵ و ۷ با نمونه‌ها مخلوط شد. در جدول ۲، مشخصات مواد اضافه شده به نمونه‌های آزمایشگاهی مشخص شده است. با توجه به اینکه افزودنی‌های گالنا و پلی یورتان هزینه گزاف نسبت به سایر افزودنی‌ها دارند، به‌همین دلیل



شکل ۱. محل گرفتن نمونه خاک مورد مطالعه و نمونه خاک



شکل ۲. منحنی‌های دانه‌بندی چهار آزمایش انجام شده

(الف) (ب) (ج)

شکل ۳. تجهیزات آزمایشگاهی: الف) آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی، ب) آزمایش ظرفیت باربری، ج) آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و ژئوتکنیکی نمونه‌های خاک سیلت ماسه‌ای

پارامترها	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	میانگین
چگالی ویژه ذرات جامد خاک، Gs	۲/۵۰	۲/۶۳	۲/۴۱	۲/۶۶	۲/۵۵
شن	۳/۸	۸	۰	۰	۲/۵
ماسه	۱۸/۷	۱۹/۰	۴۰/۰	۳۴/۰	۱۴/۸
سیلت و رس	۷۸/۵	۷۳/۰	۶۰/۰	۶۶/۰	۷۳/۵
حد روانی ٪	۲۰/۷۰	۲۱/۵۰	۲۰/۳۰	۲۱/۲۰	۲۰/۹۲
حد خمیری ٪	۱۶/۹۰	۱۷/۵۰	۱۷/۶۰	۱۷/۷۰	۱۷/۴۲
شاخص خمیری	۳/۸۰	۴/۴۰	۲/۷۰	۳/۵۰	۳/۶۰
درصد رطوبت بهینه ٪	۱۴/۰۲	۱۴/۴۹	۱۳/۰۶	۱۳/۸۳	۱۳/۸۵
ماکزیم وزن مخصوص خشک (g/cm^3) (kg/m^3)	۱۸۶۵	۱۸۵۹	۱۹۱۰	۱۸۶۲	۱۸۷۱
رطوبت (درصد)	۹/۵۲	۶/۷۳	۱۱/۰۶	۱۳/۵۸	۱۰/۲۲
عدد CBR	۲۲/۴۰	۱۳/۹۰	۳۲/۱۰	۱۶/۹۰	۲۱/۳۲
Q_u (kg/cm^2)	۰/۹۲	۰/۹۶	۰/۸۳	۰/۷۵	۰/۸۶
C_u (kg/cm^2)	۰/۴۶	۰/۵۰	۰/۴۱	۰/۳۷	۰/۴۳

جدول ۲. خصوصیت‌ها و ویژگی‌های افزودنی‌های مورد استفاده

نوع افزودنی	مشخصه	آزمایش‌های انجام شده
سیمان پرتلند (نوع II)	پودر کلینکر به همراه مقدار مناسب گچ یا سولفات کلسیم کریستالی خام. این سیمان، یک سیمان هیدرولیکی است که در شرایط محیطی متوسط استفاده می‌شود.	CBR-UCS
سیمان پوزولان	این سیمان حاوی ۱۵–۴۰ درصد پوزولان است. باعث گرمازدایی کم در هنگام بتن‌ریزی‌های فله‌ای می‌شود. مقاومت کششی بیشتر و کاهش عرض و عمق ترک را ایجاد می‌کند.	CBR-UCS
ترمیم کننده Confix PR50	ملات تکی بر پایه الیاف پلیمری سیمانی و اصلاح شده استفاده شده در سطوح بتنی آسیب دیده به عنوان بهبود بتن و در هسته سدهای خاکی برای کنترل نشست‌ها و ترک‌های احتمالی، این ماده چسبندگی و انعطاف‌پذیری عالی را بدون جمع‌شدگی و ترک خوردگی ایجاد می‌کند. از مقاومت بسیار خوبی در برابر انجماد / ذوب، سطح نرم و کارآیی راحت، انعطاف‌پذیری، نفوذپذیری کم و جلوگیری از نفوذ دی اکسید کربن برخوردار است.	CBR-UCS
مخلوط سیمان پرتلند و الیاف پلی‌پروپیلن	الیاف پلی‌پروپیلن ۱ درصد (با وزنی). از آنها برای تقویت و بازوی بتن و مخلوط‌های سیمانی و گچی استفاده می‌شود. این ترکیب مقاومت خمشی، کششی و برشی بتن و مقاومت آن در برابر ضربه، سایش و خوردگی (کاهش ترک) را افزایش می‌دهد.	CBR-UCS
مخلوط ترمیم کننده Confix PR50 و بتونیت	۲۵ درصد بتونیت به‌عنوان خاکستر آتشفشانی مبتنی برخاک رس (بیشتر مونت‌موریلونیت) و سایر مواد معدنی (وزنی). این ماده با داشتن حجم چندین برابر در تماس با آب که تبدیل به مایعات ژلاتینی و چسبناک می‌شود، دارای خاصیت کلوئیدی قوی است. از خواص مفید آن نرمی، انعطاف پذیری، چسبندگی، جذب و توانایی به‌نسبت خوبی در مخلوط کردن با آب است.	CBR-UCS

ادامه جدول ۲

نوع افزودنی	مشخصه	آزمایش‌های انجام شده
Emaco S45	یک پودر بر پایه سیمان است که در تقویت بتن و ترمیم سطوح بتونی آسیب دیده استفاده می‌شود.	CBR-UCS
Galena	یک ماده معدنی طبیعی به فرم سرب II، سولفید PbS. در بتن برای حفاظت در برابر اشعه استفاده می‌شود.	UCS
Polyurthane	یک پلیمر گرمازایی است که از پیوندهای یورتان تشکیل شده است. این الاستومر (PU) پلی‌یورتان پرمصرف دارای ویژگی‌هایی از جمله مقاومت مکانیکی و سایشی بالا، انعطاف پذیری دمای پایین، .مقاومت در برابر جذب آب، روغن‌ها و حلال‌ها، قابلیت تراش و قابلیت انعطاف‌پذیری بالا است.	UCS

استفاده از این افزودنی‌ها در حجم‌های زیاد مقرون به‌صرفه نبوده و لذا آزمایش CBR روی آنها انجام نگرفته است و فقط برای آشنایی با نحوه عملکرد این افزودنی‌ها در مقاومت اندازه گیری شده نمونه تثبیت شده، آزمایش UCS روی آنها انجام شد.

ظرفیت باربری کالیفرنیا C.B.R: از آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا به‌منظور سنجش مقاومت خاک بستر و کلیه لایه‌های روسازی از قبیل زیر اساس و اساس و تعیین ضخامت این لایه ها استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر از این آزمایش جهت مقایسه ظرفیت باربری خاک سیلت ماسه‌دار مورد مطالعه، استفاده شده است. این آزمایش، طبق استاندارد ASTM D1883-99 بر روی نمونه اصلی انجام شده است (شکل ۳- ب). در مجموع ۱۲ آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا به‌عبارتی سه تست برای هر یک از چهار نمونه موجود انجام شده است که نتایج مربوط به آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

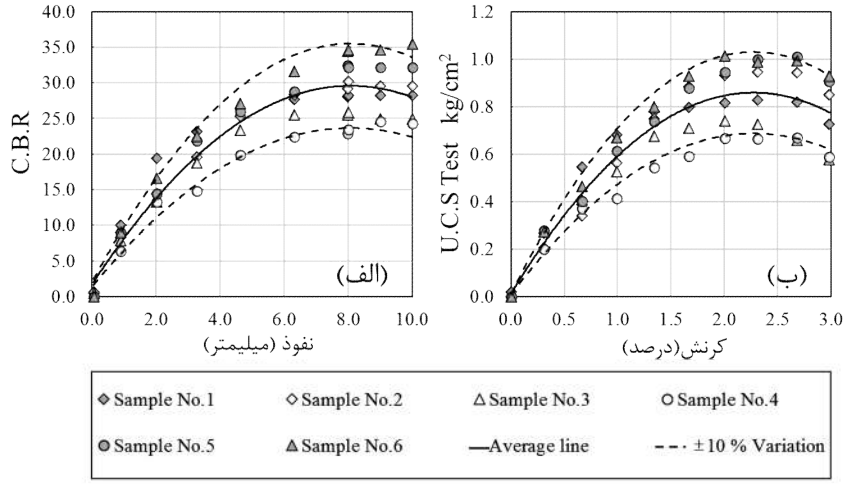
مقاومت فشاری تک‌محوری U.C.S: هدف از انجام این آزمایش، اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک‌محوری خاک‌های چسبنده است که کلیه آزمایش‌ها به‌روش کنترل کرنش انجام شده است. در مجموع ۴ آزمایش روی سه نمونه مختلف خاک به‌روش کنترل کرنش انجام شده است. لازم به ذکر است نمونه های ساخته شده دارای قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر هستند (شکل ۳- ج). این آزمایش، طبق استاندارد ASTM D2166-66 انجام شد. خصوصیات مقاومتی خاک طبیعی مورد مطالعه در جدول ۱ عنوان شده است.

نتایج و بحث

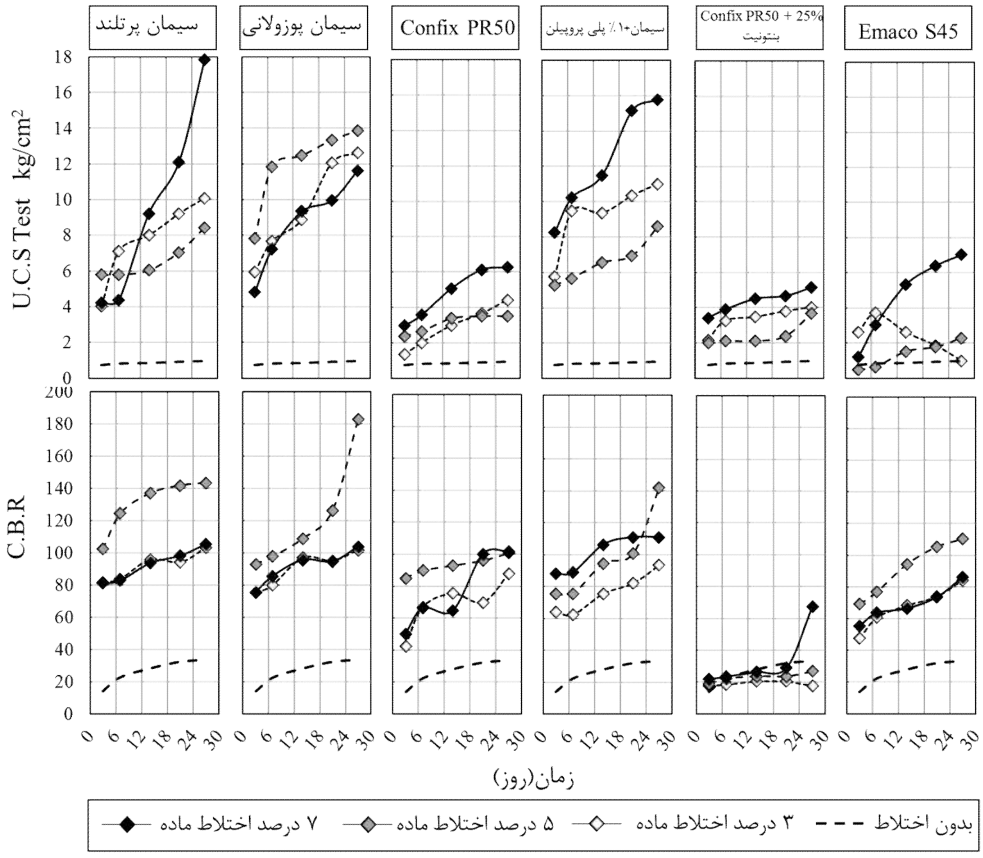
تعیین میزان خطای آزمایش‌های UCS و CBR: در شکل ۴، آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و ظرفیت باربری برای یک نمونه در یک روز عمل‌آوری انجام شد. درنهایت مقادیر مقاومت فشاری و عدد CBR برای آزمایش‌ها ترسیم شد. این کار با هدف تعیین میزان خطای آزمایش‌های ظرفیت باربری و مقاومت فشاری صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که مقادیر خطای به‌دست آمده برای آزمایش‌های یاد شده کمتر از ده درصد برآورد می‌شود. از این‌رو، استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی می‌تواند خطای قابل قبولی را برای بررسی دیگر پارامترها داشته باشد.

آزمایش‌های مقاومت تک‌محوری UCS و ظرفیت باربری کالیفرنیا CBR: شکل ۵، نتیجه آزمایش‌های UCS و CBR به ازای درصدهای ۳، ۵ و ۷ درصد از مواد افزودنی مختلف در روزهای عمل‌آوری ۳، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روز را نشان می‌دهد. به‌طور کلی مواد افزودنی باعث افزایش مقاومت اندازه‌گیری شده در تمامی نمونه‌ها می‌شود. طبق نتایج حاصل شده، سیمان پرتلند و سیمان پوزولان ویژه بیشترین مقاومت در زمان‌های مختلف عمل‌آوری را نشان می‌دهند. این نکته در هر دو آزمون CBR و UCS قابل مشاهده است.

طبق نتایج CBR، ترکیب ترمیم کننده بتن Confix PR50 به



شکل ۴. خطای آزمایش‌های برآورد مقاومت فشاری و ظرفیت باربری: الف) آزمایش ظرفیت باربری و ب) آزمایش مقاومت فشاری



شکل ۵. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و ظرفیت باربری به‌ازای درصد اختلاط مختلف مواد

اضافه بنتونیت در عمل‌آوری سه روزه با کاهش در میزان ظرفیت باربری همراه است که با افزایش در مقدار Confix PR50، ظرفیت باربری اندازه‌گیری شده افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشهود است با افزایش دوره عمل‌آوری، ظرفیت باربری افزایش می‌یابد و تمامی افزودنی‌ها در عمل‌آوری ۲۸ روزه، بیشترین مقاومت را نشان داده‌اند.

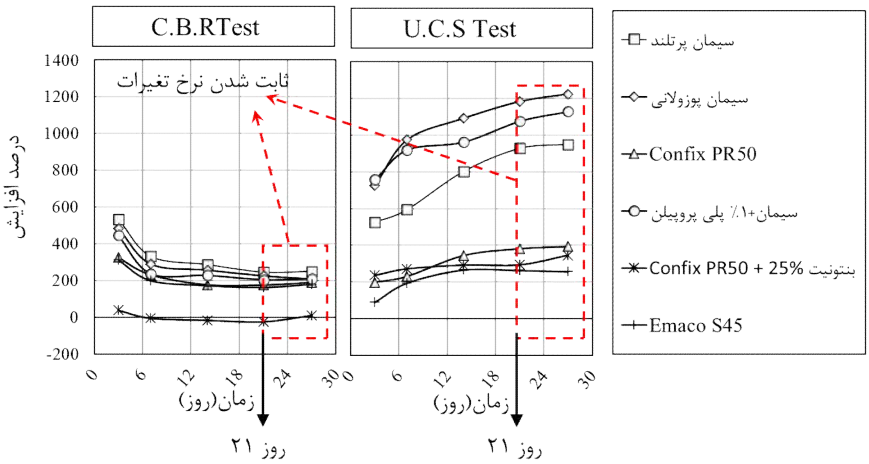
طبق نتایج این آزمون، بیشترین نرخ رشد مربوط به افزودنی درصد از سیمان پوزولان در آزمون CBR با ۲۸ روز دوره عمل‌آوری است. در واقع سیمان پوزولانی در حضور آب تبدیل به ماده‌ای چسباننده شده و دانه‌های خاک را به‌هم پیوند می‌دهد و باعث تشکیل دانه‌بندی جدید می‌شود که درنهایت مقاومت بیشتری را از خود نشان می‌دهد. نتایج اضافه کردن مواد بنتونیت به مخلوط Confix PR50 و ماسه‌ی سیلتی نشان داد، این مخلوط تأثیر معناداری بر میزان مقاومت فشاری و ظرفیت باربری ندارد. می‌توان نتیجه گرفت مواد بنتونیت به‌نحوی تأثیر مواد Confix PR50 تا ۵۲ درصد در روز ۲۸ کاهش می‌دهند.

طبق آزمایش‌های انجام شده، مقادیر نرخ رشد برای نمونه‌های تثبیت شده با افزودنی‌های مختلف در درصدهای اختلاط ۳، ۵ و ۷ درصد نسبت به خاک طبیعی به‌طور جداگانه محاسبه شد. مقادیر نرخ رشد در نمونه‌های تحت آزمایش ظرفیت باربری کالیفرنیا با میزان ۵ درصد افزودنی، دارای بیشترین میزان نرخ رشد نسبت به نمونه‌های تثبیت شده با سایر افزودنی‌ها و همچنین درصدهای اختلاط مختلف، بوده است. کمترین میزان نرخ رشد مربوط به نمونه تثبیت شده با Confix PR50 به‌همراه بنتونیت و بیشترین میزان آن مربوط به نمونه خاک تثبیت شده با سیمان پوزولانی به مقدار ۷/۲۲ است. همچنین در شکل ۶، میزان درصد افزایش مقادیر مقامت فشاری و ظرفیت باربری در مقابل دوره عمل‌آوری ترسیم شده است. نکته حائز اهمیت این است که با گذرکردن از روز بیست و یکم، نرخ درصد افزایش ظرفیت باربری و مقاومت فشاری تقریباً ثابت خواهد شد. این بدین معناست که با گذر کردن از روز بیست و یکم فرم افزایش مقاومت فشاری و ظرفیت‌باربری به‌صورت خطی تغییر خواهد کرد.

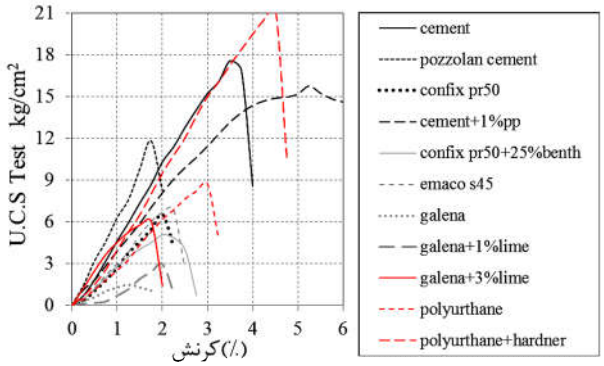
منحنی تنش- کرنش بر اساس مقاومت فشاری تک‌محوری UCS: شکل ۷، نشان‌دهنده میزان تغییرات مقاومت فشاری تک محوری به‌ازای کرنش در روز ۲۸ است. همان‌طور که مشخص است، نمونه‌های پلی‌یورتان به‌همراه سخت شونده، سیمان پرتلند، سیمان به‌همراه پلی پروپیلن و سیمان پوزولانی ویژه به ترتیب، دارای بیشترین سهم UCS (از ۱۱/۷۹ تا ۱۷/۵۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) و گالنا (۱/۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) کمترین میزان این سهم را داراست. رفتار مقاومتی برای تمامی نمونه‌ها در روز ۲۸ام، به‌غیر از نمونه سیمان به‌همراه ۱ درصد پلی پروپیلن که نیمه ترد است، به‌صورت رفتاری ترد بوده است و گسیختگی برای بیشتر نمونه‌ها در محدوده کرنش ۱/۵۰ تا ۲/۵۰ درصد اتفاق افتاده است. در نمونه‌های با میزان مقاومت بیشتر، کرنش گسیختگی با افزایش همراه بوده است.

در مقایسه افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به سیمان مشاهده می شود که افزایش این الیاف‌ها سبب کاهش میزان مقاومت نمونه تا ۹ درصد و افزایش کرنش گسیختگی در حدود ۲/۵۰ درصد شده است و رفتار نمونه از حالت ترد به نیمه ترد تغییر کرده است. با توجه به مزایای این نوع الیاف‌ها به جهت افزایش مقاومت خاک، جلوگیری از ایجاد ترک و با توجه به نتایج حاصل شده می‌توان فهمید که ترکیب این نوع الیاف‌ها با افزودنی سیمان برای هر نوع خاکی لزوماً سبب کارایی بهتر نمی شود. با وجود دارا بودن خاصیت کششی و به‌تبع افزایش مقاومت، استفاده از درصدهای بالای الیاف پلی‌پروپیلن با مشکلاتی همراه است. درواقع درصد بالای الیاف به‌طور یکنواختی با خاک مخلوط نشده و باعث بروز مشکلاتی برای نمونه می‌شود. همچنین استفاده از آهک و الیاف پلی‌پروپیلن برای بهسازی، باید با درنظر گرفتن شرایط اقتصادی صورت گیرد که این امر با درصد پایین الیاف محقق می‌شود. در بررسی اثر آهک روی افزودنی گالنا می‌توان مشاهده کرد که افزایش درصد اختلاط آهک به این افزودنی، مقاومت UCS را افزایش داده است و رفتار نمونه از حالت نیمه‌ترد به ترد تغییر پیدا کرده است. این امر را می‌توان به تبادل یونی و تشکیل پیوندهای قوی سیمانی به‌دلیل وجود آهک نسبت داد. این مقدار تنش در سطوح کرنش بالاتر اتفاق افتاده است. اما با افزایش بنتونیت به افزودنی Confix PR50، رفتار نمونه از حالت ترد به نیمه ترد تغییر کرده، کرنش گسیختگی افزایش و مقاومت U.C.S به میزان ۱۵ درصد کاهش پیدا کرده است.

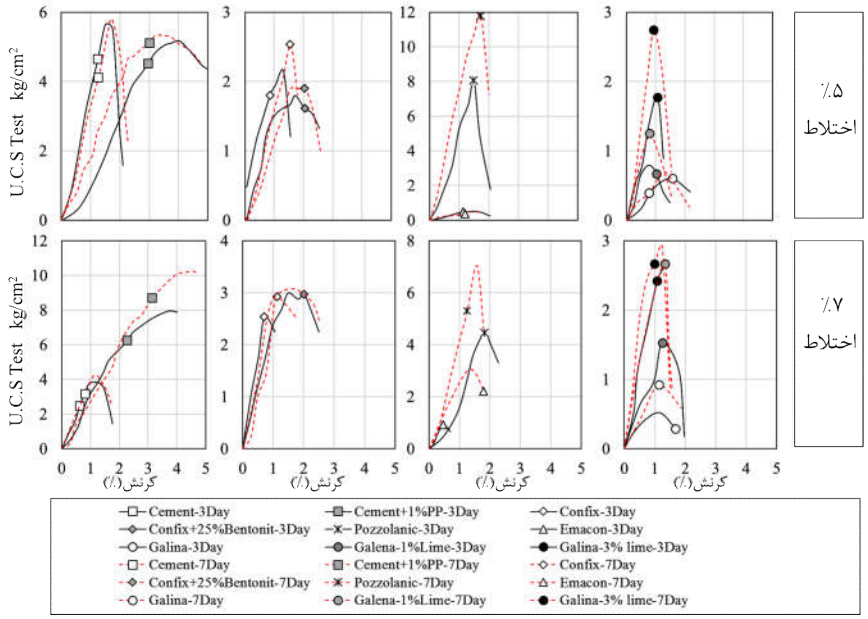
همچنین در شکل ۸، منحنی‌های تنش- کرنش برای



شکل ۶. میزان درصد افزایش مقادیر مقامت فشاری و ظرفیت باربری در مقابل دوره عمل‌آوری



شکل ۷. میزان تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری به‌ازای کرنش در روز ۲۸ (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۸. رفتار تنش- کرنش نمونه‌های عمل‌آوری شده به‌میزان ۵ و ۷ درصد در روزهای ۳ و۷ ام

درصدهای اختلاط ۵ و ۷ درصد در زمان‌های عمل‌آوری ۳ و ۷ روزه نشان داده شده است. منحنی تنش- کرنش نشان می دهد که الگوی گسیختگی نمونه‌های عمل‌آوری شده با درصد اختلاط مساوی از افزودنی‌های گوناگون با افزایش دوره عمل‌آوری، از حالت نیمه‌ترد به ترد تغییر می‌کند. به‌عبارتی دیگر تنش در ابتدا به‌صورت تقریباً خطی افزایش پیدا کرده است و با رسیدن به نقطه اوج به‌صورت ناگهانی با شیب به نسبت زیادی کاهش پیدا می‌کند که این مسئله به‌علت رفتار ترد است. این موضوع در مطالعات ربانی و همکاران (۷)، با استفاده از سرباره نیز، قابل مشاهده است که نشان‌دهنده صحت نتایج به‌دست آمده در این تحقیق است.

با افزایش دوره عمل‌آوری و به‌تبع آن افزایش رطوبت، مقاومت نمونه‌ها به‌علت وجود زمان بیشتر برای انجام واکنش‌های سیمان پوزولانی افزایش می‌یابد که این به‌معنای پر شدن فضاهای خالی و اتصال و چسبندگی بیشتر ذرات به یکدیگر است. با مقایسه نمونه‌های تثبیت شده با ۵ و ۷ درصد ماده افزودنی و نمودارهای مربوط به آنها در شکل ۸، می‌توان دریافت که افزایش میزان افزودنی‌ها سبب افزایش مقاومت می‌شود.

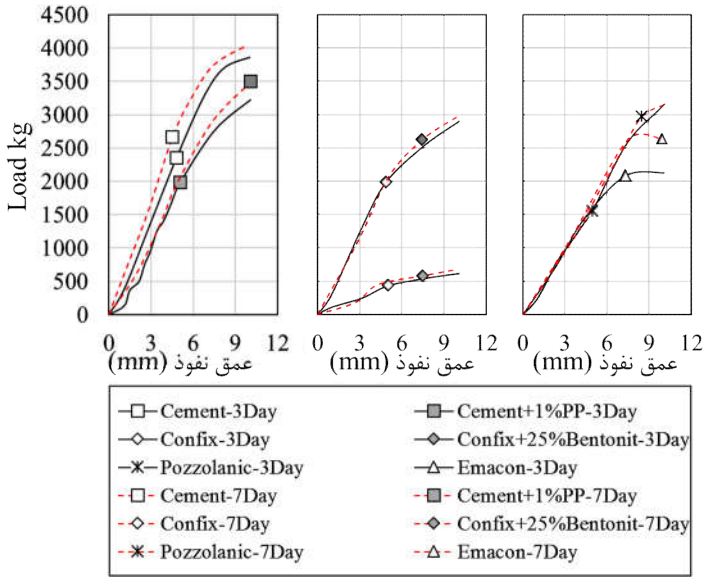
طبق نتایج، میزان حداکثر UCS به‌ازای افزودنی‌های مختلف با زمان‌های عمل‌آوری یکسان، در بازه‌های مختلف کرنش اتفاق افتاده است. به‌عبارتی این مقدار حداکثر در بعضی موارد در کرنش‌های کم و در کرنش‌های بالا دیده شده است که در حالت کلی از قانون خاصی تبعیت نمی‌کند.

نتایج آزمایش ظرفیت باربری: نتایج آزمایش‌های CBR صورت گرفته به‌منظور تعیین مقاومت برشی نمونه‌ها با افزودنی های مختلف، در شکل ۹ آورده شده است. نمودار بار در برابر نفوذ را در مدت دوره عمل‌آوری ۳ و ۷ روزه برای درصد اختلاط ۵ درصد نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج پیداست، با افزایش مدت دوره عمل‌آوری در عمق نفوذهای یکسان، میزان بار وارده افزایش پیدا کرده است و سیمان پرتلند دارای بیشترین میزان تحمل بار و ترمیم کننده بتن Confix PR50 به همراه بنتونیت، دارای کمترین مقدار این عدد در عمق نفوذهای یکسان است. با افزایش دوره عمل‌آوری تا روز ۲۸ مشخص شد که سیمان پوزولانی ویژه دارای بیشترین عدد CBR به میزان ۱۷۶/۲۶ است.

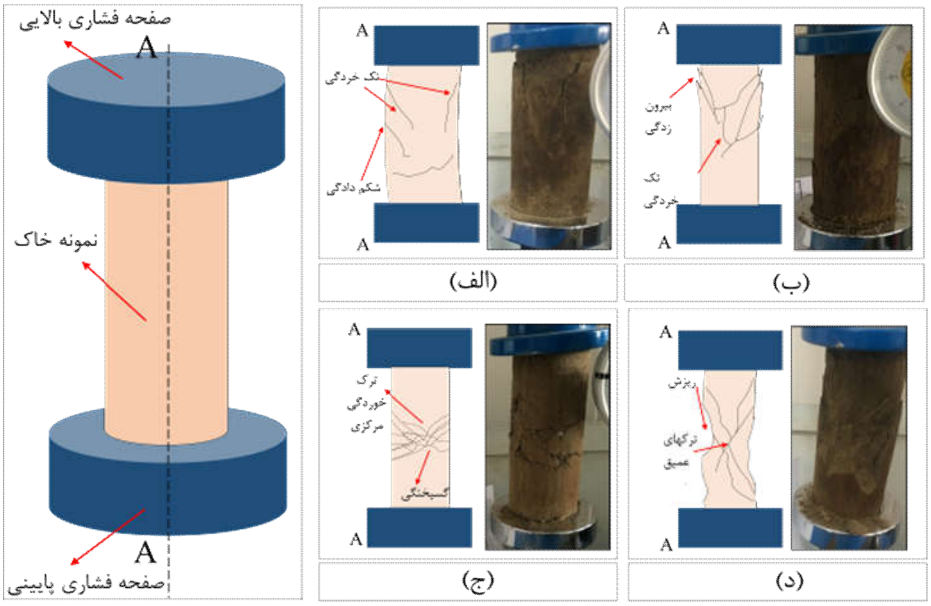
در مقایسه اثر بنتونیت به‌همراه ترمیم کننده بتن Confix PR50 مشخص شد که افزودن بنتونیت به این ماده افزودنی سبب کاهش چشمگیر ۸۰ درصد میزان مقاومت نمونه نسبت به حالت افزودن Confix PR50 به تنهایی شده است.

الگوی گسیختگی: شکل ۱۰، الگوی گسیختگی نمونه‌های مختلف تثبیت شده با ۳ درصد افزودنی به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری را تحت آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری نمایش می‌دهد. تغییر رفتار این نمونه‌ها طی ۲۸ روز و در مقایسه با روز سوم عمل‌آوری نشان داده شده است. نمونه‌های تحت این آزمایش رفتارهای متفاوتی از خود نشان دادند. شکل ۱۰، مدل های گسیختگی ایجاد شده در نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در برخی از نمونه‌ها همانند شکل ۱۰- الف، پس از اعمال تنش و رسیدن به حالت گسیختگی، شکم‌دادگی در نمونه دیده می‌شود. در برخی از نقاط نمونه، شاهد ریزش نمونه هستیم. این نمونه‌ها دارای شکست‌های افقی و برشی متعدد و ترک‌های عمیق‌تر بوده‌اند. نمونه‌های تثبیت شده با افزودنی‌های Emaco S45، و Confix Pr50 با ارائه رفتاری از نرم به نیمه‌ترد، دارای این الگوی گسیختگی هستند. در نمونه‌های با الگوی گسیختگی شکل ۱۰-ب، مشاهده می‌شود که نمونه در قسمت‌های انتهایی دچار شکستگی و درنهایت ریزش نمونه و یا بخشی از آن شده است. در این نمونه‌ها شاهد شکستگی‌های برشی هستیم و خط گسیختگی قابل رویت است. رفتار این نمونه‌ها از حالت نیمه ترد به ترد تغییر حالت داده است. نمونه‌های تثبیت شده با افزودنی‌های سیمان‌پوزولانی، سیمان‌پرتلند، گالنا به‌همراه ۱ و ۳ درصد آهک، ترکیب Confix Pr50 و بنتونیت از این الگوی گسیختگی تبعیت می‌کنند.

همان‌طور که در شکل ۱۰- ج مشخص است، در قسمت‌های بالایی نمونه شاهد ترک‌های کمی هستیم. در این نمونه‌ها خط گسیختگی مشاهده می‌شود و شکم‌دادگی کمی در



شکل ۹. نتایج آزمایش باربری (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۰. الگوهای گسیختگی: الف) نرم به نیمه ترد، ب) نیمه ترد به ترد، ج) نیمه ترد و د) نرم

نمونه‌ها قابل مشاهده است و گسیختگی در قسمت مرکزی نمونه اتفاق افتاده است. نمونه‌های تثبیت شده با سیمان پرتلند به همراه ۱ درصد پلی‌پروپیلن، پلی‌یورتان و ترکیب پلی‌یورتان به‌همراه سخت شونده، با ارائه رفتاری نیمه‌ترد دارای این ویژگی هستند. در الگوی گسیختگی شکل ۱۰- د، صفحه گسیختگی به‌خوبی قابل مشاهده است. صفحات گسیختگی از اطراف به‌سمت قسمت میانی نمونه ادامه پیدا کرده‌اند. در این نمونه همچنین در قسمت انتهایی ترک‌های قائم در اطراف نمونه وجود دارد. این نمونه‌ها در روز ۲۸ عمل‌آوری دارای رفتار نرم بوده و از مقاومت کمتری برخوردار هستند. نمونه‌های تثبیت شده با افزودنی گالنا، این نوع الگوی گسیختگی را از خود نشان دادند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق خصوصیت‌های مقاومتی خاک سیلت ماسه‌ای که یکی از انواع خاک‌های مسئله‌دار است، مورد بررسی قرار گرفت. به‌همین منظور، افزودنی‌های گوناگون با درصدهای اختلاط مختلف به نمونه خاک اضافه شد تا تأثیر هریک از آنها در خاک مورد مطالعه مشخص شود. مخلوط خاک و افزودنی‌ها تحت آزمایش‌های ظرفیت باربری کالیفرنیا، مقاومت فشاری تک‌محوری قرارگرفت و نتایج هرکدام به تفصیل آورده شده است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش مقدار افزودنی‌ها، مقاومت نمونه خاک افزایش می‌یابد. همچنین افزایش دوره عمل‌آوری نمونه‌ها نیز باعث افزایش مقاومت می‌شود. طبق نتایج ارائه شده، تأثیر افزودنی‌ها در افزایش مقاومت خاک یکسان نیست، برخی از افزودنی‌ها با افزایش چشمگیر، اما برخی دیگر با افزایش جزئی در مقاومت خاک همراه هستند. در واقع افزایش در مقدار افزودنی‌ها به‌دلیل افزایش واکنش‌های بین خاک و مواد افزودنی، باعث افزایش مقاومت می‌شود. همچنین دوره عمل‌آوری نیز باعث می‌شود که واکنش‌ها به‌صورت کامل اتفاق افتاده و تثبیت انجام شود و درنهایت نمونه از استحکام بالایی برخوردار باشد.

یکی از نتایج نو این تحقیق این مورد است، که رفتار و الگوی گسیخت خاک در زمان قرار گرفتن روی بار محوری مورد ارزیابی قرار داده شد و تأثیر مواد افزودنی بر خاک و تغییرات این مواد بر رفتار خاک مورد تحلیل قرار داده شد. این مقایسه‌ها نشان داد، با افزایش دوره عمل‌آوری برای مواد سیمانی، رفتار نمونه‌ها از نیمه‌ترد به ترد و به‌سمت سخت شدن تغییر می‌کند.

نتایج حاصل نشان داد که افزودن ۵ سیمان پوزولانی و ۷ سیمان پرتلند با ۲۸ روز عمل‌آوری به‌ترتیب دارای بیشترین عدد CBR و بیشترین مقاومت UCS به‌میزان ۱۷۶/۲۶ و ۱۷/۵۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع هستند. درنهایت مقادیر مقاومت و ظرفیت باربری کالیفرنیا در نمونه‌های تثبیت شده با افزودنی‌های بتنی نسبت به نمونه طبیعی خاک، به‌ترتیب ۲۰/۴۴ و ۸/۲۶ برابر شده‌اند.

نمونه‌های تثبیت شده، الگوهای گسیختگی مختلفی را از خود نشان دادند. این الگوها در افزودنی‌های مختلف، متفاوت بوده و رفتار آنها به‌صورت نرم به ترد، نیمه ترد به ترد، نیمه نرم به ترد و ترد به نرم دسته‌بندی شد و مشاهده شد که با افزایش دوره عمل‌آوری، رفتار نمونه‌ها از نیمه ترد به ترد و به‌سمت سخت شدن تغییر می‌کند.

طبق نتایج، بیشترین عدد CBR در بازه‌های مختلف کرنش اتفاق افتاده است و با افزایش دوره عمل‌آوری در درصدهای مساوی از افزودنی‌ها، رفتار نمونه‌ها از حالت نیمه‌ترد به ترد تغییر کرده است. درنهایت، تحلیل‌های صورت گرفته نشان داد که افزودنی‌های مختلف بتن، پارامترهای مقاومت خاک سیلت ماسه ای مانند مقاومت فشاری تک‌محوری و نسبت ظرفیت باربری کالیفرنیا را بهبود می‌بخشند و استفاده از مواد افزودنی برای ترمیم و بهسازی خاک‌های سیلت ماسه‌ای مسئله‌دار توصیه می‌شود. با این حال، هنگام انتخاب نوع خاصی از مواد افزودنی برای تثبیت خاک‌های سیلت ماسه‌ای، عواملی مانند هزینه، مزایا، کارایی و قابلیت دسترسی باید درنظر گرفته شود.

منابع مورد استفاده

1. Afrin, H. 2017. A review on different types soil stabilization techniques. *International Journal of Transportation Engineering and Technology* 3(2): 19-24.
2. Anagnostopoulos, C. A., D. Tzetzis and K. Berketis. 2014. Shear strength behaviour of polypropylene fibre reinforced cohesive soils. *Geomechanics and Geoengineering* 9(3): 241-251.
3. ASTM (American Society for Testing and Materials). 2002. Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM D 4318-87, West Conshohocken, PA: ASTM.
4. ASTM (American Society for Testing and Materials). 2002. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil. D1557-02, West Conshohocken, PA: ASTM.

5. ASTM (American Society for Testing and Materials). 2002. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, D854–02, West Conshohocken, PA: ASTM.
6. ASTM (American Society for Testing and Materials). 2002. Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils, D1883-99, West Conshohocken, PA: ASTM.
7. ASTM (American Society for Testing and Materials). 2002. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, D2166-66, West Conshohocken, PA: ASTM.
8. Consoli, N. C., R. C. Cruz, M. F. Floss and L. Festugato. 2010. Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 136(5): 759-763.
9. Consoli, N. C., D. A. Rosa, R. C. Cruz and A. Dalla Rosa. 2011a. Water content, porosity and cement content as parameters controlling strength of artificially cemented silty soil. *Engineering Geology* 122(3-4): 328-333.
10. Consoli, N. C., R. C. Cruz and M. F. Floss. 2011b. Variables controlling strength of artificially cemented sand: influence of curing time. *Journal of Materials in Civil Engineering* 23(5): 692-696.
11. Consoli, N. C., R. C. Cruz, A. V. Da Fonseca and M. R. Coop. 2012. Influence of cement-voids ratio on stress-dilatancy behavior of artificially cemented sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 138(1): 100-109.
12. Daghigh, Y. and A. Tolooiyan. 2011. Environmental impacts of coastal dykes on coastal soil salinity. *Journal of Watershed Engineering and Management*, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Tehran, (In Farsi).
13. Davies, J. and L. M. Fendukly. 1994. Behaviour of soil-cement specimens in unconfined dynamic compression. *Journal of Materials Science* 29(12): 3255-3260.
14. Firoozi, A. A., M. R. Taha, A. A. Firoozi and T. A. Khan. 2015. Effect of ultrasonic treatment on clay microfabric evaluation by atomic force microscopy. *Measurement* 66: 244-252.
15. Megargle, R. 1990. ASTM (American Society for Testing and Materials) standards for medical computing. *Computers in Healthcare* 11(2): 25-26.
16. Puppala, A. J. and C. Musenda. 2000. Effects of fiber reinforcement on strength and volume change in expansive soils. *Transportation Research Record* 1736(1): 134-140.
17. Rabbani, P., A. Tolooiyan, H. Lajevardi, A. Daghigh and M. Fallah. 2019. The effect of depth of cutter soil mixing on the compressive behavior of soft clay treated by Alkali-Acticated slag. *KSCE Journal of Civil Engineering* 23: 4237-4249.
18. Xuan, D. X., L. J. M. Houben, A. A. A. Molenaar and Z. H. Shui. 2012. Mechanical properties of cement-treated aggregate material–a review. *Materials & Design* 33: 496-502.
19. Zulkifley, M. T. M., T. F. Ng, J. K. Raj, R. Hashim, A. F. A. Bakar, S. Paramanthan and M. A. Ashraf. 2014. A review of the stabilization of tropical lowland peats. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 73(3): 733-746.

Journal of Water and Soil Science
Vol. 26, No. 3, Fall 2022, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Effect of Curing Time and Percentage of Concrete Additives on Increasing the Compressive Strength and Shear Strength of Silty Sand Soils

H. Daghigh[1], S. H. Mousavi Jahromi[2*], A. Khosrojerdi[1] and H. Hassanpour Darvishi[3]

(Received: May 3-2021 ; Accepted: December 5-2021)

Abstract

The existence of silty sand in the infrastructure under concrete constructions, hydraulic structures, and irrigation systems has always caused challenges. Improving this kind of soil is always a challenging approach to increase compressive strength and shear stress. There is a conception that adding some extra material such as concrete can increase the stability of this soil against contributed forces. The present study investigated the effects of curing time (3, 7, 14, 21, and 28 days) and different percentages of various additives (3%, 5%, and 7%) on the strength of the silty sand soils. A series of laboratory tests were carried out to measure the Uniaxial Compressive Strength (UCS) and California Bearing Ratio (CBR) by evaluating the effect of additives on the strength parameters of silty sand soil. In total, 299 experimental tests have been conducted in the soil mechanics laboratory of SRBIAU. Results indicated that adding additives such as concrete to silty sand soil improved significantly the compressive strength and shear strength. The comparisons among the experimental test illustrate that due to increasing the curing time, the aforementioned parameters were increased significantly; however, Confix and Bentonite aggregates did not have a marginal effect on the compressive strength and shear strength. Also, after the 21st day of the curing time, the rate of increment of the UCS and CBR reached slightly and then attained a constant value. Also, after this duration, the curing time is an independent factor in the variation of the UCS and CBR tests. Furthermore, the addition of 5% Pozzolana cement and 7% Portland cement with 28 days of curing had the highest CBR number and UCS resistance of 176.26 and 17.58 kg/cm^2, respectively. Also, the sketch of the different failure patterns was shown during the curing time. Finally, by increasing the curing time, the behavior of specimens from semi-brittle to brittle made them harder.

Keywords: Percentage of the additive, Curing time, Compressive strength, Shear strength, UCS test, CBR test

1. Department of Water Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
3. Department of Water Engineering, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
*: Corresponding author, Email: h-mousavi@srbiau.ac.ir