

ارزیابی تأثیر شرایط غیراشباع بر مشخصات مکانیکی خاک‌های تثبیت شده با آهک هیدراته

رضا جهانشاهی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات

تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

مجتبی قاسمی*، استادیار، دانشکده عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و

فناوری پیشرفته کرمان

وحید توفیق، استادیار دانشکده عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری

پیشرفته کرمان

Email: m.ghasemi@kgut.ac.ir

دریافت: ۹۵/۰۹/۱۷ - پذیرش: ۹۶/۰۳/۰۸

چکیده

تغییرات رطوبت سطحی و زیرسطحی یکی از عوامل مؤثر بر ارزیابی عملکرد رفتاری خاک‌ها متأثر از عوامل مخاطره‌آمیزی همچون فرسایش، تورم، انقباض، نشست نامتقارن، ذوب و یخ‌زدگی‌های متوالی، پدیده روانگرایی، رانش ساختگاه و انتشار آلودگی زیست‌محیطی می‌باشد. در این پژوهش آزمایشگاهی، عملکرد دو نمونه خاک رسی و ماسه‌ای طی تثبیت با مقادیر ۳، ۵ و ۷ درصد آهک هیدراته افزوده شده، بررسی شده و مقاومت اکتسابی نمونه‌های حاصل شده تحت آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، منطبق بر انرژی پراکتور استاندارد در شرایط اشباع، غیراشباع و خشک برآورد شده است. روش تماس فیلتر کاغذی، با توجه به اندازه‌گیری تعادل رطوبتی، جهت برآورد مشخصه ذاتی مکش خاک طی شرایط وجود و عدم وجود افزودنی آهک در حالت غیراشباع، به عنوان راه‌حل محاسبه مکش انتخاب شده است. میزان نفوذپذیری متأثر از تثبیت خاک طی دوره عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه نیز یکی دیگر از پارامترهای مورد سنجش این مطالعه می‌باشد. نتایج آزمون‌ها طی یک سیکل هیستریسیس خشک‌شدگی بیانگر آن است که مکش ماتریک نمونه‌های رسی در حدود ۱۱ برابر نمونه‌های ماسه‌ای بوده و تغییرات آهک نیز موجب تشدید نگهداشت آب منفذی و برآورد مکش شده است. نمونه‌های تثبیت شده رسی به‌طور متوسط ۸۷٪ و نمونه‌های ماسه‌ای حدود ۸۳٪ مقاومت فشاری تک‌محوری خود را هنگام حضور آب، به علت ناپایدار شدن چسب آهکی، از دست داده‌اند. علی‌رغم انتظار، عواملی همچون ناهمگنی ایجاد طی تثبیت در بافت خاکدانه، تشکیل چسب ضعیف آهکی و تغییر وضعیت شرایط دانه‌بندی از ریزدانه به درشت‌دانه هنگام افزودن آهک، در اغلب اوقات منتج به افزایش نفوذپذیری در دوره زمانی گیرش ۷ و ۲۸ روزه شده است.

واژه‌های کلیدی: خاک غیراشباع، منحنی مشخصه آب و خاک، روش فیلتر کاغذی، تثبیت با آهک هیدراته، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

۱. مقدمه

می‌باشد. بنابراین، هدف اصلی مطالعات فنی انجام گرفته، یافتن نسبت مناسبی از شن، ماسه و خاک رس تثبیت شده جهت حصول یک مخلوط بهینه با هدایت هیدرولیکی مد نظر می‌باشد. از آنجایی که سازه‌های خاکی معمولاً چه در تراز زیرزمینی و یا روی سطح زمین به شدت تحت تأثیر عوامل محیطی می‌باشند، متخصصین امر تأکید دارند تا وضعیت عملکردی هیدرولیکی سازه خاکی تحت شرایط غیراشباع ارزیابی شده و رفتار آن در طراحی‌ها لحاظ گردد. عملکرد هیدرولیکی خاک غیراشباع را می‌توان با بیان فنی منحنی مشخصه آب خاک و یا رابطه بین هدایت هیدرولیکی تحت شرایط غیراشباع و مکش خاک تعیین نمود.

به صورت خلاصه، اهداف پژوهش آزمایشگاهی حاضر با توجه به مطالب ذکر شده به قرار زیر می‌باشد:

۱) تعیین شاخصه‌های مهندسی و مکانیکی دو گروه خاک پایه ماسه و رسی (مخلوط با نسبت تعیین شده) طی تثبیت شیمیایی با آهک هیدراته در بازه زمانی گیرش ۲۸ روزه با توجه به استانداردهای موجود، ۲) برآورد تأثیر تغییرات دانه‌بندی، نوع خاک و ماده افزوده بر مکش ماتریک^۱ و تعیین منحنی مشخصه خاک و آب نمونه‌های تثبیت شده و نشده با استفاده از روش فیلتر کاغذی و ۳) بررسی روند تغییرات پارامتر نفوذپذیری طی دوره عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه با توجه به تغییر در درصد آهک افزوده در شرایط اشباع.

تأثیرپذیری مشخصات مهندسی و مکانیکی خاک‌ها، شامل نفوذپذیری، شاخص‌های تورمی و انقباضی، ضریب چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و همچنین تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از استفاده از مخلوط خاک- آهک به صورت گسترده دستمایه پژوهش‌های کوچک و بزرگ محققین بوده است (سیسونی و روسو، ۲۰۱۲؛ دژ و حسین، ۲۰۱۱؛ کاواک و بیگال، ۲۰۱۲؛ ییلدیز و

خاک یکی از مصالح در دسترس و پُر مصرف در صنعت ساخت و ساز به شمار می‌رود. وجود ضعف مقاومتی به انضمام پاسخ رفتاری نامناسب و متعاقباً وقوع مخاطرات جدی حاصل از آن (همانند تورم/ انقباض شدید، آب- شستگی، روانگری) در حضور عوامل طبیعی و اجباری موجب شده تا در طول دهه‌های اخیر، رفتارشناسی این مصالح به صورت مؤثر و مدون در برنامه پژوهشی و مطالعاتی بسیاری از محققین قرار گیرد. عوامل اقتصادی و محدودیت‌های زمانی، مکانی و تجهیزاتی موجب گشته تا شیوه‌های متعددی جهت بهسازی و بهبود خواص مهندسی این منبع تجدیدنپذیر ارائه گردد. بر همین اساس، تثبیت با افزودنی‌های شیمیایی یکی از رایج‌ترین روش‌های بهسازی خاک می‌باشد. در سنجش‌های علمی و عملی، دو هدف اصلی بهبود خدمت‌پذیری و افزایش مقاومت توده خاک تحت تأثیر، جزء فاکتورهای مؤثر بر کیفیت شیوه بهسازی به روش شیمیایی می‌باشد (ال شریف و همکاران، ۲۰۱۳؛ کاواک و بیگال، ۲۰۱۲). تأثیر تثبیت‌کننده‌های آهک، سیمان، خاکستر بادی و مواد پایه نفتی (امولسیون‌های قیری) به صورت گسترده بر خاک‌های مسئله‌دار (تورمی، واگرا، رمبنده، ماسه‌ای ناپایدار و ...) مورد مطالعه قرار گرفته است.

همچنین، از آنجایی که مخلوط شن، ماسه و رس یکی از رایج‌ترین مصالح مورد استفاده در ساخت و بهسازی بستر ابنیه، راه و جزء اصلی تشکیل‌دهنده مصالح آب‌بند و فیلتر در سیستم‌های پوشش محل‌های دفن زباله و یا آستر سازه‌های هیدرولیکی، از جمله سدهای خاکی می‌باشد، لذا عملکرد رفتاری آن در قیاس با مصالح صرفاً شن و ماسه‌ای (درشت‌دانه) و یا رسی (ریزدانه) بیشتر نیازمند پژوهش می‌باشد. یکی از اصلی‌ترین معیارهای تعیین‌کننده مناسب بودن کیفیت بستر ایجاد شده، کارایی و میزان هدایت هیدرولیکی مصالح مورد استفاده با توجه به میزان تراکم آن

¹ - Matric suction

خواهد بود. مکش محاسباتی معطوف به میزان فشار منفی درونی و تغییرات رطوبتی بافت متخلخل توده خاک می‌باشد. عواملی همچون نوع کانی‌های خاک، شکل و اندازه ذرات بافت خاکدانه، تنش‌های اعمالی و دوره‌های تر و خشک شدن از پارامترهای اساسی این مشخصه ذاتی بوده که به‌طور مستقیم بر تعیین و تحلیل منحنی مشخصه خاک و آب اثرگذار خواهد بود (کمبل، ۱۹۸۸؛ لو و لیکوس، ۲۰۰۴).

شرط برآورد مکش خاک به‌صورت غیرمستقیم، در نظر گرفتن شرایط تعادل رطوبتی خاک به جای مکش می‌باشد. این شرایط تعادل رطوبتی را می‌توان با ابزارهایی همچون بخارسنج هوا، رطوبت‌سنج ترانزیستوری، رطوبت‌سنج آینه‌ای و فیلتر کاغذی (کاغذ صافی) تعیین نمود. در این بین، فیلتر کاغذی یکی از روش‌های مستند، با نتایج قابل قبول در عمده مقالات علمی و دارای استاندارد مربوط به خود می‌باشد. از ویژگی‌های این روش می‌توان به سهولت و ارزان بودن آزمایش اشاره داشت (بولت و لئونگ، ۲۰۰۸). همچنین، سهولت این شیوه محاسباتی منجر به درک ناکافی و استفاده نادرست از آن شده است. بنابراین، لحاظ پارامترهایی همچون زمان تعادل رطوبتی و روابط متفاوت واسنجی کاغذ بر مقادیر محاسباتی مکش مؤثر خواهد بود (لئونگ و همکاران، ۲۰۰۲). تا کنون تغییرات مقدار مکش انواع خاک مانند شن، ماسه، لای و رس توسط این شیوه اندازه‌گیری شده است. اندازه‌گیری مکش ماتریک در مقادیر مکش کم با لحاظ محدودیت‌ها و مشکلات بالقوه در برآورد مکش، آسان‌تر از محاسبه مکش کل بوده و مورد اقبال بیشتری در مطالعات واقع شده است (هوستون و همکاران، ۱۹۹۴).

۲. پدیده مکش خاک

۲-۱. تعریف کلی مکش

به غیر از اثرات اینرسی، عوامل دما و گرانش نیز جزء مکانیزم‌های اساسی و مؤثر بر کاهش پتانسیل آب منفذی خاک می‌باشند. این مکانیزم‌های فیزیکی و شیمیایی منجر به رخداد مکش کل در توده خاک خواهند شد. اثرات جذب کوتاه دامنه، اثرات مویبندی و

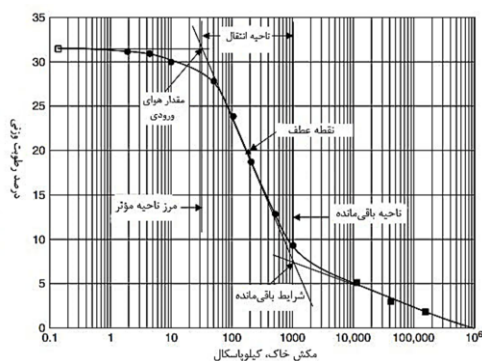
سوگانچی، ۲۰۱۲؛ قبادی و همکاران، ۲۰۱۴؛ مدرس و محمدی نوسودی، ۲۰۱۵). بهبود خدمت‌پذیری با توجه به کاهش بودن روند تغییرشکل توده تثبیت شده و همچنین شاخص پلاستیسیته خاک (PI) حاصل می‌گردد. تغییرات شیمیایی پدید آمده در توده خاک از جمله تبادل کاتیونی، لخته‌سازی و کلوخه شدن، واکنش هیدراتاسیون و واکنش پوزلانی نیز منجر به افزایش مقاومت خواهد شد (دش و حسین، ۲۰۱۱؛ یلدیز و سوگانچی، ۲۰۱۲).

افزودن آهک در بازه صفر تا ۷ درصد تغییرات قابل ملاحظه‌ای در ساختار خاک رس و مشخصات مکانیکی آن پدید می‌آورد. همچنین، افزودن آهک سبب کاهش چشمگیر پتانسیل تورمی و تغییر در شاخص فشردگی خاک‌های رسی می‌شود (نالبانتوغلو و تونس، ۲۰۱۱). مقاومت فشاری تک‌محوری رس کائولینیت تثبیت شده با آهک در بازه ۴ الی ۱۲ درصد، پس از گذشت ۱۰ سال می‌تواند ۲۱ برابر گردد (کاواک و بیکال، ۲۰۱۲). استفاده از آهک به عنوان تثبیت‌کننده عمدتاً در خاک‌های رسی با ریزدانه بیشتر از ۲۵٪ در جهت بهبود مشخصات خاک، بخصوص کاهش دامنه خمیری و افزایش مقاومت، توصیه شده است (انجمن علمی تحقیقاتی ساخت و ساز، ۱۹۸۸).

تحقیقات نشان داده است که وجود آب درون بافت ذرات خاک از عوامل حاکم و مؤثر بر طراحی سازه‌های مرتبط با خاک خواهد بود. ضریب هدایت هیدرولیکی خاک یکی از عوامل مؤثر بر پایداری آن می‌باشد (الشریف و همکاران، ۲۰۱۳). نتایج تحقیقات تراشی و همکاران (۱۹۸۰) نشان‌دهنده کاهش نفوذپذیری خاک تثبیتی با آهک بوده، اما در مقابل، نالبانتوغلو و تونس (۲۰۱۱) افزایش این پارامتر را گزارش داده‌اند. نوع و کیفیت آهک افزوده، شیوه طرح اختلاط (به‌صورت خشک و یا مرطوب)، نحوه تراکم و شرایط محیطی حاکم بر تثبیت را می‌توان جزء عوامل مؤثر بر ضریب مذکور دانست (الشریف و همکاران، ۲۰۱۳؛ پارسون و میلبرون، ۲۰۰۳).

رفتار خاک طی اندرکنش سه فاز جامد، مایع و گاز با توجه به رابطه بین تنش و مکش خاک قابل بیان

مواد آلی موجود، ساختار معدنی مواد و نحوه اندرکنش مابین فاز جامد، مایع و گاز از جمله موارد مؤثر بر این منحنی می‌باشند (ویلیامز و اسمیت، ۱۹۹۱). شناخت رفتار کلی این منحنی و ارتباط تنگاتنگ آن با خصوصیات فیزیکی خاک از پارامترهای اساسی جهت حل مسائل فنی دانش مکانیک خاک غیراشباع خواهد بود. در شکل ۱، نمونه‌ای از منحنی مشخصه خاک و آب قابل مشاهده می‌باشد (فردلانند و همکاران، ۲۰۱۲).



شکل ۱. منحنی مشخصه خاک و آب (فردلانند و

همکاران، ۲۰۱۲)

اثرات اسمزی، سه بخش کلی از این مکانیزم‌های فیزیکی و شیمیایی خواهند بود. بنابراین، مکش موجود در خاک را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم‌بندی نمود. در بخش نخست مکش ناشی شده از پدیده جذب کوتاه دامنه و نیروی موینگی موجود در خاک به صورت مکش ماتریک تعریف شده و مکش وابسته به میزان املاح و نمک موجود در خاک را مکش اسمزی^۱ نامگذاری کرده‌اند. از جمع جبری مکش ماتریک و مکش اسمزی مقدار عددی مکش کل حاصل می‌گردد. همچنین، می‌توان از مقدار عددی مکش اسمزی به خاطر وابستگی به میزان انحلال املاح موجود در خاک، با توجه به ناچیز بودن آن، چشم‌پوشی نمود. بدین صورت، در اکثر مطالعات انجام شده، از مکش ماتریک به عنوان مکش تأثیرگذار در روابط مکانیک خاک غیراشباع استفاده شده است. رابطه (۱) نشان‌دهنده موارد مذکور می‌باشد (باخمن و وندر پلوگ، ۲۰۰۲؛ فردلانند و همکاران، ۲۰۱۲).

$$\psi_t = \psi_m + \psi_o \quad (1)$$

ψ_t = مقدار مکش کل

ψ_m = مقدار مکش ماتریک

ψ_o = مقدار مکش اسمزی

۲-۲. رژیم‌های مکشی و منحنی مشخصه خاک و آب

نوع و ساختار فیزیکی خاک به شدت بر نحوه و مکانیزم جابجایی از منطقه با مکش کم به منطقه با مکش زیاد تأثیر گذاشته و مقدار آن با توجه به فرایند موینگی کنترل خواهد شد. منحنی مشخصه خاک و آب نشان‌دهنده رابطه اساسی بین مکش و مقدار رطوبت خاک می‌باشد. در این منحنی، رابطه بین آب موجود در خاک (به صورت وزنی، حجمی یا درصد رطوبت) با پتانسیل مکش خاک بررسی خواهد شد. مشخصات ذاتی مصالح شامل توزیع اندازه منافذ و ذرات، چگالی خاک، مقدار

۳. مواد و روش‌ها

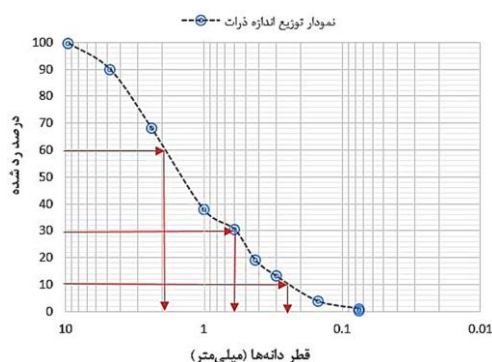
برنامه آزمایش شامل محاسبه مکش ماتریک خاک و برآورد مقاومت فشاری تک‌محوری خاک تثبیت شده با آهک بوده است. مقادیر حاصل شده از مکش به جهت حصول منحنی مشخصه آب و خاک تثبیت شده با آهک می‌باشد. همچنین، دیگر مشخصات خاک، از جمله وزن مخصوص، حد روانی، حد خمیری و pH خاک تثبیت شده نیز محاسبه شده است.

۳-۱. مصالح خاکی

برای انجام آزمایش، دو نمونه خاک رسی و ماسه‌ای به صورت مینا انتخاب شده است. خاک مینای رسی از جاده اتوبان هفت باغ علوی، حد فاصل دو شهر کرمان و ماهان در استان کرمان و از عمق ۱/۵ متری سطح زمین برداشت شده است. رنگ طبیعی حالت خشک آن متمایل به قهوه‌ای کمرنگ بوده و براساس آزمایش‌های

¹ - Osmotic suction

مشخصات اولیه خاک‌های پایه استفاده شده ارائه شده است.



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی خاک ماسه‌ای

انجام شده رس مینا دارای حد روانی $33/7$ ، حد خمیری $16/1$ و شاخص خمیری برابر با $17/6$ می‌باشد. این خاک در طبقه رس با دامنه خمیری کم (CL) قرار گرفته است. خاک ماسه‌ای نیز به صورت شسته شده از محل کارگاه ساختمانی واقع در محل دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان گردآوری شده و به جهت اطمینان از عدم وجود رس و مواد آلی، مصالح ماسه‌ای مجدداً شسته شده و به مدت ۴۸ ساعت درون آون با دمای 110 درجه سلسیوس جهت خشک شدن قرار گرفته است. شکل ۲ نشان‌دهنده منحنی دانه‌بندی خاک ماسه‌ای براساس روش دانه‌بندی با الک مطابق استاندارد ASTM D6913 می‌باشد. در جدول ۱

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیک خاک‌های مینا

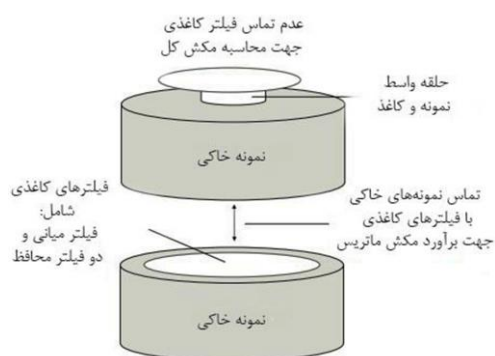
سیستم طبقه بندی خاک		مشخصات اولیه خاک پایه						
متحد	آشتو	pH	نشانه خمیری	حد خمیری	حد روانی	جرم مخصوص Gs	درصد رطوبت بهینه OMC	نوع خاک
SP	A-1-b	$7/33$	-	-	-	$2/68$	-	خاک ماسه
CL	A-7-6	$7/61$	$17/6$	$16/1$	$33/7$	$2/72$	$14/8$	خاک رس

آهک هیدراته (آهک شکفته خشک) پژوهش حاضر به صورت پودر الک شده (رد شده از الک شماره ۴۰ و در قالب کیسه‌های بسته‌بندی شده در کارخانه) بوده که با مقادیر وزنی صفر، ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی جهت تثبیت خاک استفاده شده است. آهک مصرفی پیش از اختلاط خاک-آهک به مدت ۲۴ ساعت درون آون با دمای 110 درجه سلسیوس جهت خشک شدن قرار گرفته است. در رابطه (۲)، واکنش تولید آهک هیدراته مشخص شده است (شروود، ۱۹۹۳). لازم به ذکر است که فرایند گیرش و هیدراتاسیون آهک تابع

۳-۲. افزودنی تثبیت‌کننده

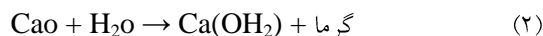
حصول یک تثبیت مطلوب، نیازمند یک برنامه آزمایشی مدون روی خاک هدف به جهت تعیین نسبت مناسب اختلاط خاک و آهک می‌باشد (فراتالوچی و همکاران، ۲۰۰۹). لحاظ تأثیر عوامل محیطی همچون رطوبت، شرایط دمایی، وجود املاح شیمیایی (حمله سولفاتی)، اثرات متوالی ذوب-یخ‌زدگی و همچنین تقدم و تأخر حین ساخت از جمله پارترهای تأثیرگذار بر طرح اختلاط می‌باشند (پارسون و میلبرن، ۲۰۰۳).

فیزیکی کاغذ و نمونه) مکش کل برآورد خواهد شد. محاسبات انجام شده با توجه به نحوه ارتباط کاغذ با نمونه و نوع مصالح خاکی مصرفی، نیازمند تعادل رطوبتی طی مدت زمان ۵ الی ۲۰ روز می‌باشد (لئونگ و همکاران، ۲۰۰۲؛ رندی رینواتر و همکاران، ۲۰۱۲؛ سواربریک، ۱۹۹۵). شکل ۳ نحوه انجام آزمایش فیلتر کاغذی را نشان می‌دهد.



شکل ۳. نحوه قرارگیری کاغذ جهت برآورد مکش ماتریس و کل (لو و لیکوس، ۲۰۰۴)

پارامترهای دما و زمان شروع گیرش خواهد بود. مطالعات نشان داده است که عامل حرارت، تأثیر قابل توجهی در فعالیت خاک و آهک داشته است (گیلوت، ۱۹۸۷).



۳-۳. فیلتر کاغذی

روش فیلتر کاغذی با وجود سهولت و مقرون به صرفه بودن آن، نیازمند مهارت، سرعت و دقت تکنسین آزمایشگاه می‌باشد (لئونگ و همکاران، ۲۰۰۲؛ اولیویرا و فرناندو، ۲۰۰۶). با لحاظ شرایط مذکور در استاندارد ASTM D5298 مکش خاک را می‌توان به واسطه میزان آب جذب شده توسط کاغذ در دو حالت کل و ماتریک به صورت غیرمستقیم محاسبه نمود. طی اتصال مستقیم کاغذ و نمونه با تعادل رطوبتی (جریان مایع) مکش ماتریک و در تعادل رطوبتی با بخار آب (عدم ارتباط

جدول ۲. رده‌های مختلف خاکی تهیه شده

γ_{dmax} (gr/cm^3)	%Wopt	pH	PI	LL	PL	درصد آهک	درصد رس	درصد ماسه	نام خاک	دسته‌بندی خاک
۲/۱۸	۶/۵	۷/۴۹	۴/۰۹	۱۶/۳۷	۱۲/۲۸	۰	۲۰	۸۰	SA	S 80-20
۲/۱۶	۸	۱۰/۹۲	۳/۹۲	۱۷/۴۳	۱۳/۵۱	۳	۲۰	۸۰	SB	
۲/۱	۹	۱۱/۰۷	۳/۳۸	۱۸/۲۶	۱۴/۸۸	۵	۲۰	۸۰	SC	
۲/۰۶	۱۰/۵	۱۱/۱۴	۲/۹۳	۱۸/۳۷	۱۵/۴۴	۷	۲۰	۸۰	SD	
۱/۹۶	۱۳/۵	۷/۵۸	۸/۸۱	۲۳/۶۶	۱۴/۸۵	۰	۸۰	۲۰	SE	S 20-80
۱/۷۹	۱۵	۱۱/۱۴	۷/۰۴	۲۴/۴۷	۱۷/۴۳	۳	۸۰	۲۰	SF	
۱/۶۷	۱۷/۵	۱۱/۲۶	۶/۳۵	۲۶/۹۱	۲۰/۵۶	۵	۸۰	۲۰	SG	
۱/۵۹	۱۷/۵	۱۱/۳۲	۵/۲۸	۲۷/۳۳	۲۲/۰۵	۷	۸۰	۲۰	SH	

حاصل جهت آغاز فعالیت پوزولانی برابر ۱۲/۴ می باشد (کاواک و بیکال، ۲۰۱۲).

برای انجام آزمایش و افزایش دقت آن، نخست ماسه شسته شده توسط آسیاب گلوله‌ای جهت برآورد شاخص مذکور، به‌طور کامل پودر شده و جهت برآورد این معیار از روش A استاندارد ASTM-D4972 استفاده شده است. بدین جهت ۱۰ گرم نمونه خاکی تهیه و درون ۱۰ میلی‌لیتر آب ریخته شده است. سپس برای حصول یک مخلوط معلق، مصالح تهیه شده به مدت ۱ ساعت روی همزن قرار گرفته و جهت ایجاد چرخش گردابی از مگنت استفاده شده است. طی این مدت اجازه داده شد تا عدد pH به‌طور کامل ثابت شده و سپس مقدار آن برداشت شده است. شکل ۴ نشان دهنده روند انجام کار به انضمام تجهیزات مورد استفاده می‌باشد.

۳-۶. مقاومت فشاری تک‌محوری

جهت سنجش مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های مدنظر، نخست دو رده خاک مبنای ذکر شده در جدول ۱ با درصد‌های مختلف آهک مورد نظر به‌صورت اختلاط دستی و با آب شرب مخلوط شده و در رطوبت بهینه مربوط به هر رده خاکی به شکل نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۵×۱۰ سانتی‌متر طبق استاندارد ASTM D698 و منطبق بر شرایط پراکتور استاندارد ساخته شده است. جهت انطباق شرایط تراکمی قالب ۵×۱۰ سانتی‌متری با قالب استاندارد، وزن مخصوص خشک مدنظر قرار گرفته و بر اساس آن تعداد ۳ لایه، ۳ ضربه با ارتفاع سقوط ۳۰ سانتی‌متری چکش ۴/۵ کیلوگرمی لحاظ شده است. همچنین، قبل از انجام فرایند تراکم، سطح درونی قالب‌ها با کمی روغن چرب شده تا هنگام خروج نمونه توسط جک، آسیبی به ساختار نمونه وارد نشود. تمامی نمونه‌ها به مدت ۱۰ روز درون عایق پلاستیکی جهت تکمیل فرایند گیرش در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه در دمای ۲۳ درجه

فیلتر کاغذی مورد استفاده در این مطالعه از نوع واتمن شماره ۴۲ با قطر ۵/۵ سانتی‌متر و ساخت کمپانی بریتانیایی GE Healthcare Life Sciences انتخاب شده است.

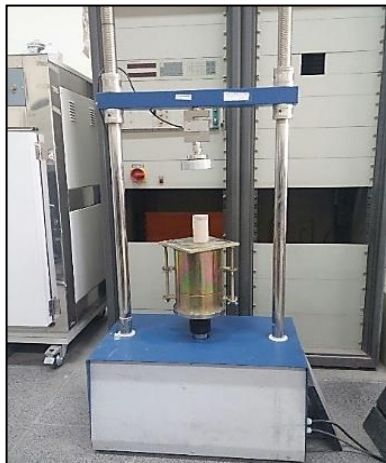
۳-۴. تهیه رده‌های خاکی، آزمایش‌های حدود اتربرگ و تعیین درصد رطوبت بهینه

به جهت تهیه یک خاک مصنوعی، دو خاک مینا (ماسه و رسی) با نسبت‌های ترکیبی ۸۰ و ۲۰ درصد با یکدیگر ترکیب شده‌اند. آزمایش‌های حدود اتربرگ (حد خمیری و شاخص خمیری) مطابق استاندارد ASTM D4318 انجام شده است. از آنجایی که محاسبه حد روانی در خاک‌های ماسه‌ای با توجه به استاندارد ASTM D4318 کمی با دشواری همراه می‌باشد، لذا شیوه محاسباتی حد روانی استاندارد (BS1377:2(1990) مرجع کار قرار گرفته است. کاربرد این روش عمدتاً در کشورهای اروپایی و همچنین آسیای شرقی رایج بوده و به جهت سادگی و انطباق مطلوب با روش محاسباتی حد روانی موجود در استاندارد ASTM D4318 از محبوبیت قابل توجهی برخوردار می‌باشد (ورث و وود، ۱۹۷۸). جهت تعیین وزن مخصوص خشک حداکثر و همچنین رطوبت بهینه معادل آن، از شیوه پراکتور استاندارد، مطابق ASTM D698 استفاده شده و تست‌های مربوطه به این آزمایش در قالب ۴ اینچی پراکتور انجام شده است. جدول ۲ نشان دهنده رده‌های خاکی تهیه شده و نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده می‌باشد.

۳-۵. آزمایش pH

یکی از روش‌های تعیین مقدار بهینه آهک مصرفی آزمایش pH خواهد بود. حداقل مقدار pH مخلوط

ارزیابی تأثیر شرایط غیراشباع بر مشخصات مکانیکی خاک‌های تثبیت شده با آهک هیدراته



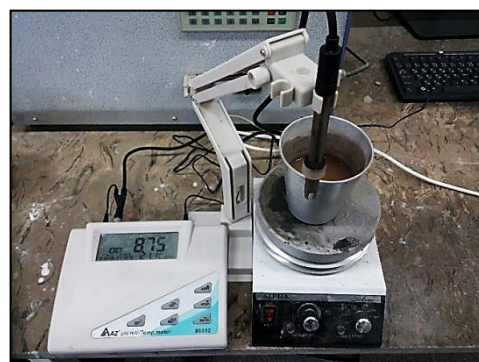
شکل ۵. جک بارگذاری آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و دیتا لاگر جهت برداشت نتایج



شکل ۶. نمونه‌های ساخته شده در ابعاد ۱۰×۵ سانتی‌متری و نمونه‌های غرقاب شده

سلسیوس قرار گرفته‌اند. حداکثر مقاومت تک‌محوری نمونه‌های ساخته شده با توجه به استاندارد ASTM D2166 و با نرخ بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه اندازه‌گیری شده است. دستگاه مورد استفاده ساخت شرکت فنی مهندسی آزمون مینا و با ظرفیت بارگذاری ۱۰ تن می‌باشد. در شکل ۵ جک بارگذاری و روند کار جهت شکست نمونه‌ها نشان داده شده است.

جهت شکست نمونه‌ها در حالت غیراشباع، نخست وزن نمونه‌های خشک اندازه‌گیری شده و سپس به مدت ۲۴ ساعت درون ظرف حاوی آب طبق شکل ۶ قرار گرفته تا حالت اشباع به‌طور کامل برقرار گردد. پس از اشباع‌سازی، مقرر گردید تا تعدادی از نمونه‌ها رطوبت خود را در دمای ۲۳ درجه سلسیوس از دست داده و در رطوبت مدنظر شکسته شوند. این امر پس از توزین‌های متوالی هر نمونه حاصل شده است. به‌طور کلی، نمونه‌ها در حالت خشک کامل (عدم تماس با آب)، اشباع کامل و غیراشباع (رطوبت هدف) تحت آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری قرار گرفتند.



شکل ۴. آزمایش pH

۳-۷. آزمایش نفوذپذیری

جهت برآورد ضریب نفوذپذیری، نخست نمونه‌های هدف درون قالب ۴ اینچی و با لحاظ تراکم استاندارد پراکتور ساخته شده است. سپس با توجه به شکل ۷، روش بار افتان مطابق استاندارد ASTM D5084 پس از تکمیل فرایند گیرش نمونه‌ها در بازه زمانی ۷ و ۲۸ روزه انجام شده است. رابطه (۳) نشان‌دهنده نحوه برآورد ضریب نفوذپذیری رده‌های خاکی مذکور می‌باشد.

$$k = \frac{a * L}{A * \Delta t} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (3)$$

a سطح مقطع بورت (سانتی‌متر مربع)

L طول نمونه در استوانه نفوذپذیری (سانتی‌متر)

A سطح مقطع نمونه (سانتی‌متر مربع)

Δt بازه زمانی انجام آزمایش (ثانیه)

h_1 بار آبی یا ارتفاع آب روی نمونه قبل از شروع آزمایش (سانتی‌متر)

h_2 بار آبی یا ارتفاع آب روی نمونه در پایان آزمایش (سانتی‌متر)

۳-۸. آزمایش مکش

جهت برآورد مکش ماتریک خاک، ۸ رده خاکی مذکور در ابعاد ۵/۵×۵/۵ سانتی‌متر ساخته شده و درون ظرفی از آب جهت اشباع سازی قرار گرفتند. پس از اشباع سازی، به نمونه‌ها اجازه داده شد که رطوبت خود را تا نزدیک رطوبت هدف در دمای محیط از دست بدهند. سپس نمونه‌ها از وسط به دو قسمت تقسیم شده ۳ لایه کاغذ با قطر ۵/۵ سانتی‌متر بین دو قطعه نمونه قرار داده شد. پس از بستن شکاف بین قطعات با نوار عایق، نمونه‌های حاصل درون لیوان شیشه‌ای قرار گرفته و درب لیوان‌ها به جهت جلوگیری از تبخیر آب با درپوش عایق گردیده و برای ایجاد تعادل رطوبتی و حرارتی، تمامی نمونه‌ها درون جعبه یونولیتی قرار داده شده است. مطالعات سواربریک (۱۹۹۵) نشان‌دهنده متغیر بودن زمان لازم جهت تعادل رطوبتی و حرارتی فیلتر کاغذی با توجه به نوع خاک بین ۲ روز تا چند هفته می‌باشد. بنابراین، پس از گذشت ۱۵ روز از جای گرفتن کاغذ، مقدار رطوبت جذب شده کاغذ توسط ترازویی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم تعیین گردید. روند فعالیت‌های مذکور در شکل ۸ آورده شده است.



شکل ۸. ترازوی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم و دیگر تجهیزات برآورد مکش خاک به همراه بخشی از نمونه‌های آماده شده

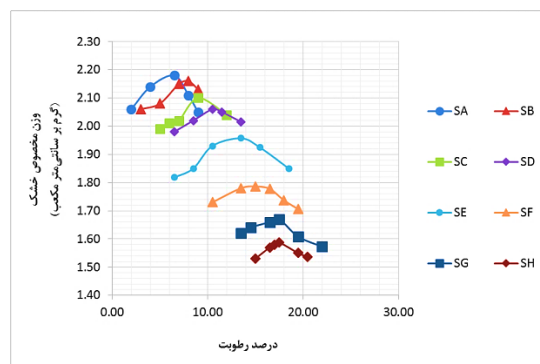


شکل ۷. آزمایش نفوذپذیری منطبق بر روش بار افتان

۴. نتایج و بحث

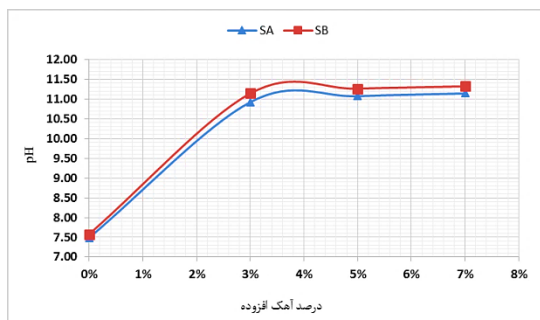
۴-۱. نتایج آزمایش‌های اولیه (رطوبت بهینه، وزن مخصوص، حدود اتربرگ و pH)

با توجه به شکل ۹، مشاهده می‌شود که افزایش پله‌ای آهک افزوده و ریزدانه‌تر شدن بافت خاک، سبب افزایش رطوبت بهینه نمونه‌ها نسبت به حالت اولیه (۶۱/۵ درصد برای نمونه‌های پایه ماسه و ۲۹/۶ درصد برای نمونه‌های پایه رسی) و کاهش وزن مخصوص نمونه‌ها نسبت به حالت اولیه (۵/۵ درصد برای نمونه‌های پایه ماسه و ۱۸/۸ درصد برای نمونه‌های پایه رسی) شده است. در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزایش آهک، شاخص خمیری خاک کاهش و در نتیجه کارایی آن افزایش می‌یابد.

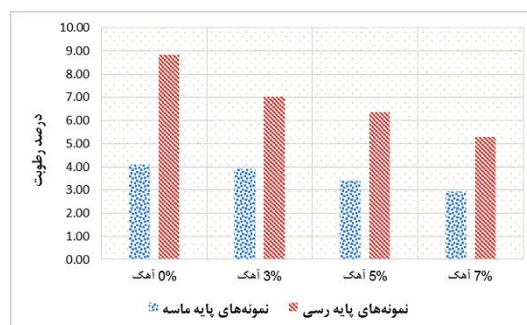


شکل ۹. روند تغییرات رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک

آهک می‌باشد. با توجه به شکل ۱۱، مقدار pH خاک‌های طبیعی مبنای برابر ۷/۵ بوده و مقدار pH حداکثری ۱۱/۳۲ برای آهک افزوده ۷٪ حاصل شده است. از نتایج این شکل قابل برداشت است که افزودن بازه آهکی مدنظر به نمونه‌ها جهت فعال شدن فعالیت پوزلانی یعنی مقدار حداقل ۱۲/۴ برآورد نشده است (سیسونی و روسو، ۲۰۱۲؛ فراتالوچی و همکاران، ۲۰۰۹؛ کاواک و بیگال، ۲۰۱۲). در نتیجه، قابل ذکر است که خاک‌های مبنای SA و SE از واکنش‌پذیری با آهک آنچنان مناسب نبوده و یا مقدار آهک افزوده بیشتری را لازم دارند. لازم به ذکر است که افزایش درصد آهک بیش از حد توصیه شده، با توجه به شکل ۱۲ الزاماً منتج به افزایش مقاومت نهایی نخواهد شد. برآیند نتایج نشان‌دهنده تفاوت اندک و نامحسوس تغییرات pH در خاک‌های رسی و ماسه پودر شده با یکدیگر در درصدهای مختلف آهک افزوده بوده است.



شکل ۱۱. نمودار pH حاصل از افزودن آهک به صورت پله‌ای به دو خاک ماسه‌ای و رسی



شکل ۱۰. تغییرات PI طی تثبیت خاک

۴-۲. مقاومت فشاری تک‌محوری

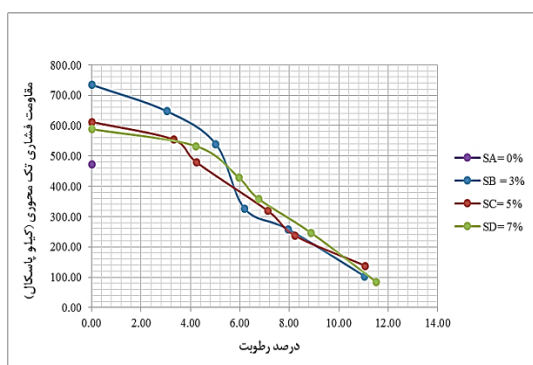
۴-۲-۱. مقاومت فشاری تک‌محوری خاک تثبیت شده (عدم حضور رطوبت)

با توجه به پیشنهاد استاندارد ASTM D4609 حصول یک روند افزایشی معین در مقاومت اکتسابی می‌تواند

شاخص pH نشان دهنده میزان فعالیت بین خاک و

کاهش چشمگیری پدیدار شده است. از طرفی، مقدار آب جذب شده دو رده خاکی متفاوت می‌باشد. در نمونه‌های پایه ماسه‌ای، میزان رطوبت جذب شده بین صفر تا ۱۱/۵۲ درصد و برای نمونه‌های پایه رسی بین صفر تا ۱۸/۹۵ درصد متغیر بوده است. بنابراین، برآیند کار به‌درستی نشان دهنده پتانسیل بیشتر جذب آب توسط خاک‌های پایه رسی می‌باشد.

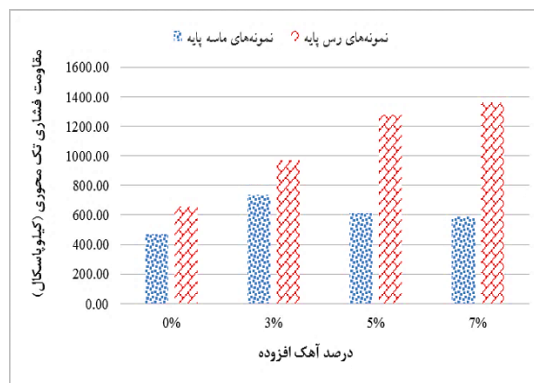
حداکثر مقاومت نمونه‌های پایه ماسه‌ای، ۷۳۴/۵۱ کیلوپاسکال بوده که در حضور آب (تقریباً به‌صورت اشباع) این مقدار به ۱۰۳/۴ کیلوپاسکال کاهش پیدا کرده است. در نمونه‌های پایه رسی نیز همین روند قابل پیش‌بینی خواهد بود. بدین صورت که حداکثر مقاومت ثبت شده این گروه از نمونه‌ها برابر ۱۳۵۹/۷۵ کیلوپاسکال بوده و در حضور آب (تقریباً به‌صورت اشباع) این مقدار به ۱۵۷/۳۷ کیلوپاسکال کاهش پیدا کرده است. این کاهش مقاومت‌های شدید نشان‌دهنده ضعف در چسبندگی آهک می‌باشد. به همین علت، استفاده از این افزودنی در حضور آب، نیازمند تأمل جدی می‌باشد. نمونه‌های خاکی تثبیت نشده (SA, SE)، در حضور آب دچار گسیختگی ساختاری بعد از ۱۰ ساعت شده (طی بازه زمانی اشباع سازی ۲۴ ساعته) و هیچگونه مقاومتی برای آن‌ها ثبت نشده است.



شکل ۱۳. نتایج مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های ماسه پایه (۸۰٪ ماسه، ۲۰٪ رس) با درصد متغیر آهک در حضور آب

نشان‌دهنده یک تثبیت مطلوب باشد. در مطالعات شروود (۱۹۹۸) مقدار افزایش مقاومت اولیه ۲۰۰ کیلوپاسکالی با افزودن آهک و در استاندارد ASTM D4609 مقدار این افزایش به‌صورت ۳۴۵ کیلوپاسکالی گزارش شده است.

شکل ۱۲ نشان می‌دهد که روند افزایش مقاومت اولیه در نمونه‌های پایه ماسه‌ای ۲۶۳ کیلوپاسکال بوده و با توجه به مراجع ذکر شده افزودنی آهک چندان مناسب نبوده و یا به بیان دیگر آهک واکنش مطلوبی با اینگونه خاک‌ها نداشته است و طی افزایش درصد آهک کاهش مقاومت نیز مشاهده شده است. در نمونه‌های پایه رسی، روند افزایش مقاومت اولیه برابر ۳۱۱/۱۱ کیلوپاسکال می‌باشد. از اینرو می‌توان عملکرد افزودنی آهکی در نمونه‌های پایه رسی در قیاس با خاک پایه ماسه را مطلوب‌تر دانست.



شکل ۱۲. نمودار تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری خاک ماسه و رس پایه طی گیرش ۲۸ روزه با توجه به درصد تغییرات آهک در حالت عدم حضور آب (نمونه‌های خشک)

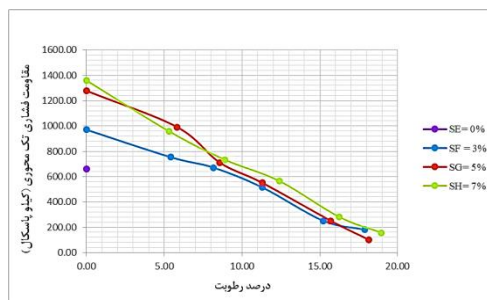
۲-۲-۴. مقاومت فشاری تک‌محوری خاک تثبیت شده (در حضور رطوبت)

با توجه به شکل‌های ۱۳ و ۱۴ می‌توان مشاهده کرد که در دو رده خاک پایه ماسه و رسی تثبیت شده با آهک (SA-SH)، در مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها

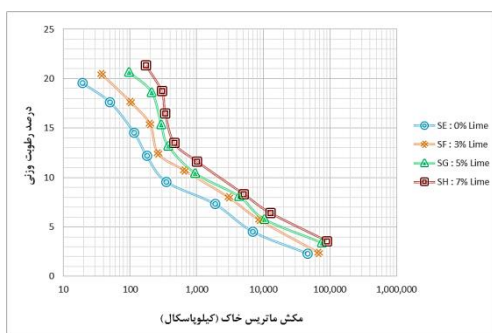
ارزیابی تأثیر شرایط غیراشباع بر مشخصات مکانیکی خاک‌های تثبیت شده با آهک هیدراته



شکل ۱۵. منحنی مشخصه خاک و آب نمونه‌های ماسه پایه منطبق بر سیکل نخست خشک‌شدگی



شکل ۱۴. نتایج مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های رس پایه (۲۰ درصد ماسه، ۸۰ درصد رس) با درصد متغیر آهک در حضور آب



شکل ۱۶. منحنی مشخصه خاک و آب نمونه‌های رس پایه منطبق بر سیکل نخست خشک‌شدگی

۴-۴. نتایج حاصل شده از آزمایش نفوذپذیری به طور کلی، وقوع چهار فرایند زیر طی افزودن آهک به خاک با توجه به گذشت زمان مورد انتظار می‌باشد:

تبادل کاتیونی^۱

لخته سازی و توده شدن^۲

واکنش هیدراتاسیون^۳

واکنش پوزلانی^۴

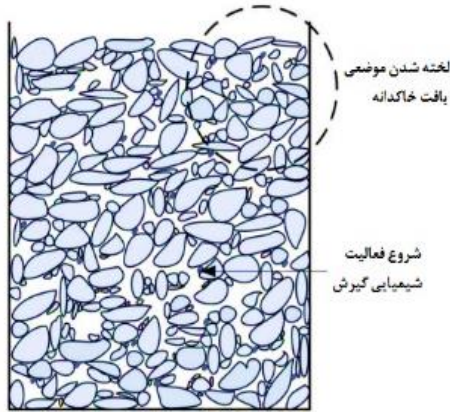
سه مرحله نخست یعنی تبادل کاتیونی، لخته سازی و واکنش هیدراتاسیون جزء دوره گیرش کوتاه مدت یا همان ۷ روزه برآورد شده و واکنش پوزلانی پس از گذشت ۲۸ روز به عنوان بخش طولانی مدت فرایند

۴-۳. منحنی مشخصه خاک تثبیت شده با آهک

منحنی مشخصه خاک‌های تثبیت شده در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. با توجه به نتایج، تغییرات رطوبت جذبی نمونه‌های پایه ماسه‌ای بین ۲/۷۷ تا ۱۳/۶۲ درصد (در درصدهای متفاوت آهک افزوده) می‌باشد. این بازه رطوبتی برای نمونه‌های رسی بین ۲/۳۲ تا ۲۱/۳۷ درصد است. بازه مکش ماتریک ثبت شده برای خاک‌های ماسه‌ای بین ۲۱/۴۷ کیلوپاسکال تا ۸۲۹۴/۶۷ کیلوپاسکال بوده و برای خاک‌های رسی این بازه بین ۱۹/۱۵ کیلوپاسکال تا ۸۹۱۳۶/۶۲ کیلوپاسکال می‌باشد. این مشاهدات گواه پتانسیل مکش بسیار بیشتر رس در قیاس با ماسه و یا نسبت تقریباً ۱۱ برابری بوده است.

از آنجایی که ساختار خاک رس ذاتاً ریزدانه می‌باشد، پس هنگام افزودن آهک تغییرات مکش قابل ملاحظه‌ای در آن‌ها مشاهده نمی‌شود و نمودارهای مربوطه با فواصل کمتری از یکدیگر جابجا خواهند شد. اما در خاک ماسه‌ای به هنگام تثبیت با آهک به سبب افزایش ریزدانه خاک و تشکیل لوله‌های موئین بیشتر، مکش محاسبه شده این خاک‌ها تغییرات قابل ملاحظه‌ای از خود نشان داده و فواصل این نمودارها از یکدیگر در قیاس با خاک رس بیشتر می‌باشد.

1- Cation exchange
2- Flocculation and agglomeration
3- Cementitious hydration
4- Pozzolanic reaction



شکل ۱۹. تغییر توده بافت خاک طی فعالیت‌های شیمیایی گیرش آهک

۵. نتیجه‌گیری

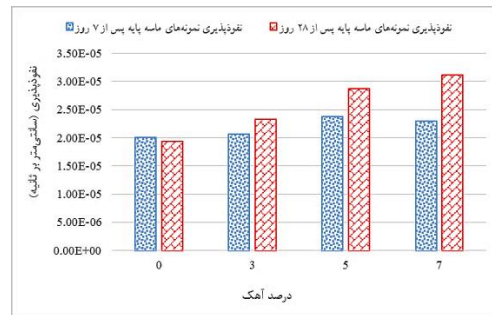
در پژوهش آزمایشگاهی حاضر، تأثیر درصد‌های مختلف آهک هیدراته بر منحنی مشخصه خاک و آب دو رده کلی خاک پایه ماسه و رسی به همراه روند تغییرات کارایی بهبود یافته، مقاومت فشاری تک‌محوری به جهت تعیین درصد آهک بهینه و نیز تغییرات نفوذپذیری طی تثبیت روی دو خاک مذکور مورد بررسی قرار گرفته است.

تخمین تأثیر مخرب رطوبت بر بهسازی شیمیایی با آهک نیز به عنوان یکی از پارامترهای اساسی مدنظر بوده است. نتایج کلی حاصل شده به قرار زیر می‌باشد:

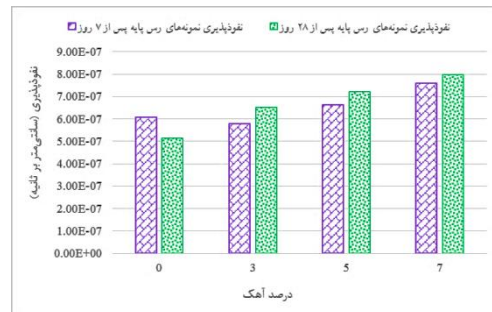
کاهش شاخص شاخص پلاستیسته خاک یکی از اهداف کلی تثبیت شیمیایی می‌باشد. افزودن آهک به خاک‌ها (پایه ماسه و پایه رسی) در مطالعه اخیر موجب کاهش شاخص مذکور شده است. حداقل تغییرات حاصل شده در PI خاک‌های پایه ماسه برابر با ۴/۱۴ درصد و در خاک‌های پایه رسی برابر با ۲۰/۱۴ درصد بوده و این نشانه عملکرد بهتر آهک در خاک‌های رسی می‌باشد.

۱- بهبود و افزایش باربری خاک مسئله‌دار، هدف ثانویه عمده مطالعات علمی و عملی می‌باشد. با وجود پاسخ مطلوب‌تر خاک تثبیت شده در قیاس با خاک

گیرش محسوب می‌گردد. همانگونه که در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ مشاهده می‌شود، نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده تغییر در ضریب نفوذپذیری برای زمان‌های گیرش ۷ و ۲۸ روزه بوده است. این تغییرات عمدتاً به صورت افزایشی بوده که طبق جدول ۳ به مرور و با گذشت زمان و با تکمیل شدن فرایند نهایی واکنش‌های شیمیایی (فعالیت پوزلانی آهک) خصوصیات ریزساختاری دگرگون شده است. منشأ این تغییرات ریزساختاری^۱ را می‌توان در افزایش اندازه منافذ بین دانه‌ها جستجو کرد. بنابراین، تغییر ماهیت بافت ذرات خاک به سمت درشت‌دانه شدن و همچنین ناهمگنی در توده خاک اصلی‌ترین دلیل افزایش هدایت هیدرولیکی می‌باشد (نالبانتوغلو و تونسیر، ۲۰۱۱). شکل ۱۹ لخته شدن موضعی و تغییرات حاصل از چهار فرایند گیرش را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷. تغییرات نفوذپذیری نمونه‌های ماسه پایه، پای، ۷ و ۲۸ روز



شکل ۱۸. تغییرات نفوذپذیری نمونه‌های رسی پایه در بازه گیرش ۷ و ۲۸ روزه

¹ - microstructure changes

۶- ریزدانه بودن خاک نمونه‌های پایه رسی در قیاس با نمونه‌های پایه ماسه‌ای موجب شده تا لوله‌های مویین بیشتری تشکیل شده و نمودارهای حاصل از مکش این نمونه‌ها بالاتر از نمونه‌های پایه ماسه‌ای قرار گرفته گیرد. می‌توان نتیجه گرفت که قابلیت مکش و نگهداشت خاک رس بیشتر از خاک ماسه می‌باشد. تغییرات مقدار آهک نیز تأثیر و سهم خود را در جابجا کردن نمودارها نشان داده است.

۷- برآورد شرایط تنش، تغییرشکل و نحوه جریان در حل مسائل تحلیلی می‌بایست همزمان با یکدیگر باشد. این نمودارها در تحلیل‌های عددی جهت برآورد مقاومت بستر تثبیت شده و تقریب نشست‌های وابسته به حالت غیراشباع بسیار کاربردی خواهند بود.

۸- یکی از پارامترهای اساسی و مؤثر بر رفتارشناسی خاک تثبیت شده در مواجهه با آب، میزان نفوذپذیری توده تثبیتی هدف با توجه به موقعیت منافذ، بافت خاک، میزان همگن بودن و تنش‌های اعمالی خواهد بود. علی‌رغم انتظار افزودن آهک در اغلب اوقات باعث افزایش نفوذپذیری در دوره زمانی گیرش ۷ و ۲۸ روزه شده است. علت آن را می‌توان ناهمگنی ایجاد شده در بافت ذرات خاک، تشکیل پیوند ضعیف آهکی و تغییر وضعیت شرایط دانه‌بندی از ریزدانه به درشت‌دانه دانست.

۹- با توجه به نتایج و ضعف عملکرد مقاومتی افزودنی آهک در حضور آب، پیشنهاد می‌گردد تا استفاده از این ماده به اقلیم‌های گرم و خشک، مکان‌های آب‌بند شده، تراز آب زیرزمینی پایین در محل اجرای تثبیت و یا مناطق مطمئن از عدم وقوع سیلاب معطوف گردد.

تثبیت نشده، نمونه‌های پایه ماسه‌ای به دلیل کاهش مقاومت در مقدار ۰/۵٪ آهک افزوده و عدم حصول pH توصیه شده حداقلی جهت شروع فرایند پوزولانی به عنوان رده خاکی نامناسب این شیوه تثبیت تعیین شده است.

۲- نمونه‌های پایه رسی در قیاس با نمونه‌های پایه ماسه‌ای واکنش مطلوب‌تری با لحاظ مقاومت اکتسابی اولیه از خود نشان دادند. شایان ذکر می‌باشد که واکنش‌های تثبیت آهکی به پارامترهایی همچون دما و زمان گیرش وابسته خواهد بود.

۳- مقاومت خاک‌های تثبیت شده هنگام حضور آب به‌صورت چشمگیری تنزل پیدا کرده است. کاهش مقاومت ثبت شده در نمونه‌های رسی به‌طور متوسط ۸۷٪ و در نمونه‌های ماسه‌ای حدود ۸۳٪ می‌باشد.

۴- نتایج نمودارهای شکست نمونه‌های پایه رسی در مقایسه با نتایج نمونه‌های پایه ماسه‌ای از تغییرات کمتری برخوردار بوده است. این تغییرات حاصل از نحوه عملکرد ضعیف آهک در ایجاد پیوند با ذرات ماسه بوده و موجب شکستی ناگهانی شده است. تقعر و تحذب نمودارها ناشی از قفل‌شدگی دانه‌های ماسه و آزاد شدن ناگهانی انرژی درونی این توده می‌باشد.

۵- از طرفی، با توجه به ریزدانه بودن رس، تغییرات زیادی در نمودارهای مکش این نوع خاک مشاهده نشده است و نمودارها به‌صورت فشرده‌تر بوده‌اند. از طرف دیگر، نمونه‌های ماسه‌ای به علت درشت‌دانه بودن در قیاس با خاک رس تثبیت شده، دارای نمودارهای گسسته‌تری از یکدیگر می‌باشند. افزودن آهک به این خاک‌ها موجب شده تا این نمودارها به مرور فشرده‌تر گردند.

جدول ۳. میزان تغییر نفوذپذیری نمونه‌های ماسه پایه و رس پایه به تفکیک، طی دوره زمانی ۲۱ روز

درصد تغییر نفوذپذیری نمونه‌های رس پایه پس از طی بازه ۲۱ روزه	درصد تغییر نفوذپذیری نمونه‌های ماسه پایه پس از طی بازه ۲۱ روزه	درصد آهک افزوده
-۱۵/۴۶	-۳/۹۸	۰
۱۲/۸۲	۱۳/۱۰	۳
۸/۹۱	۲۰/۵۸	۵
۴/۸۷	۳۵/۸۰	۷

۶- مراجع

- Bachmann, J. and van der Ploeg, R. R. 2002. "A review on recent developments in soil water retention theory: Interfacial tension and temperature effects". *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 165(4): 468-478.
- Bulut, R. and Leong, E. C. 2008. "Indirect measurement of suction". *Geotech. Geolog. Eng.*, 26: 633-644.
- Campbell, G. S. 1988. "Soil water potential measurement: An overview". *Irrig. Sci.*, 9(4): 265-273.
- Cecconi, M. and Russo, G. 2012. "Geotechnical properties of lime stabilized pyroclastic Soils". *Elec. J. Geotech. Eng.*, 17: 2581-2597.
- Charman, J. H. 1988. "Laterite in Road Pavements". Construction Industry Research and Information Association, London, UK.
- Dash, S. K. and Hussain, M. 2011. "Lime stabilization of soils: Reappraisal". *J. Mater. Civ. Eng.*, 24(6): 707-714.
- Elsharief, A., Elhassan, A. A. M. and Mohamed, A. E. M. 2013. "Lime stabilization of tropical soils from Sudan for road construction". *Int. J. Geomate*, 4(2): 533-538.
- Fralalocchi, E., Bellezza, I., Di Sante, M. and Pasqualini, E. 2009. "Mix-design, construction and controls of lime stabilized embankments". Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, IOS Press, Rotterdam, The Netherlands.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H. and Fredlund, M. D. 2012. "Soil Mechanics for Unsaturated Soils". John Wiley and Sons, N. Y.
- Ghobadi, M., Abdilor, Y. and Babazadeh, R. 2014. "Stabilization of clay soils using lime and effect of pH variations on shear strength parameters". *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 73: 611-619.
- Gillott, J. E. 1987. "Clay in Engineering Geology". Elsevier.
- Houston, S., Houston, W. and Wagner, A. 1994. "Laboratory filter paper suction measurements". ASTM International, West Conshocken.
- Kavak, A. and Baykal, G. 2012. "Long-term behavior of lime-stabilized kaolinite clay". *Environ. Earth Sci.*, 66: 1943-1955.
- Leong, E. C., Rahardjo, H. and He, L. 2002. "Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements". ASTM International, West Conshocken.
- Lu, N. and Likos, W. J. 2004. "Unsaturated Soil Mechanics". John Wiley and Sons, N. Y.
- Modarres, A. and Mohammadi Nosoudy, Y. M. 2015. "Clay stabilization using coal waste and lime- Technical and environmental impacts". *Appl. Clay Sci.*, 116-117: 281-288.
- Nalbantoglu, Z. and Tuncer, E. R. 2001. "Compressibility and hydraulic conductivity of a chemically treated expansive clay". *Can. Geotech. J.*, 38(1): 154-160.
- Oliveira, O. M. and Fernando, F. A. M. 2006. "Evaluation of filter paper calibration". ASCE, Fourth International Conference on Unsaturated Soils.
- Parsons, R. and Milburn, J. 2003. "Engineering behavior of stabilized soils". Transportation Research Record: J. Transport. Res. Board, 1837: 20-29.

- Randy Rainwater, N., McDowell, L. A. and Drumm, E. C. 2012. "Measurement of total soil suction using filter paper: Investigation of common filter papers, alternative media, and corresponding confidence". *Geotech. Test. J.*, 35(2): 295-304.
- Sherwood, P. 1993. "Soil Stabilization with Cement and Lime". Her Majesty Stationary Office, London.
- Swarbrick, G. 1995. "Measurement of soil suction using the filter paper method". *Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils*.
- Terashi, M., Tanaka, H., Niidome, Y. and Sakanoi, H. 1980. "Permeability of treated soils". *Proceedings of the 15th Japan Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hiroshima*, pp. 773-776.
- Williams, P. J. and Smith, M. W. 1991. "The Frozen Earth: Fundamentals of Geocryology". Cambridge University Press, Cambridge, pp. 306.
- Wroth, C. P. and Wood, D. M. 1978. "The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils". *Can. Geotech. J.*, 15(2): 137-145.
- Yildiz, M. and Soğancı, A. S. 2012. "Effect of freezing and thawing on strength and permeability of lime-stabilized clays". *Sci. Iran.*, 19(4): 1013-1017.