

ارزیابی پتانسیل واگرایی خاک رس واگرایی تثبیت شده با پوزولان

امیرحسین وکیلی^۱، سید محمد علی زمردیان^۲، امیر وکیلی^۳، مهرداد آرام^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران گرایش خاک و پی دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان و عضو باشگاه پژوهشگران جوان

۲- عضو هیات علمی دانشگاه شیراز

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران گرایش خاک و پی دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان و عضو باشگاه پژوهشگران جوان

۴- کارشناس عمران و عضو انجمن بتن آمریکا

amir_fars58@yahoo.com

خلاصه

یکی از مهمترین مشکلاتی که در اجرای سدهای خاکی بوجود می آید برخورد با خاک های واگرا در محل ساختگاه، پی سدهای خاکی و منابع قرضه ریز دانه رسی می باشد. لذا پیش از آغاز به ساخت، انجام مطالعات ژئوتکنیکی جهت شناسایی این گونه خاک ها ضروری است. زیرا استفاده از آنها باعث ایجاد خرابی های زیادی در سدهای خاکی، کانال های آبرسانی و سایر خاکریزها شده است. به منظور غلبه بر مشکل واگرایی می توان از ترمیم شیمیایی استفاده نمود. در این مقاله نتایج افزودن پوزولان طبیعی به نمونه خاک واگرا ارائه گردیده و پتانسیل واگرایی با در نظر گرفتن دو متغیر زمان عمل آوری و درصد وزنی پوزولان کنترل گردیده است. نتایج نشان می دهند که افزودن پوزولان و زمان عمل آوری همراه با کاهش پتانسیل واگرایی خاک، سبب افزایش غلظت املاح و کاتیون های خاک، کاهش درصد سدیم موجود در آب منفذی و کاهش PH می گردند. کلمات کلیدی: تثبیت و بهسازی خاک واگرا، پوزولان، آزمایش های شیمیایی، پین هول.

مقدمه

خواص مکانیکی اغلب خاکها با افزایش رطوبت و اشباع شدن تغییر می کند. در برخی از خاک ها بر اثر افزایش رطوبت، پدیده های خاصی بروز می کند که بعضاً به خسارات عمده ای در طرح های عمرانی منجر می گردد. این خاکها « خاک های حساس در مقابل آب » نامیده می شوند و از مهمترین اقسام آنها می توان به خاکهای متورم شونده^۱، خاکهای واگرا^۲ و خاکهای رمننده^۳ اشاره نمود [۱].

خاک های واگرا، خاک های رسی هستند که در آبهای با غلظت پایین نمک به راحتی شسته می شوند. این رس ها معمولاً دارای مقادیر بالایی یون سدیم در کاتیون های جذبی خود می باشند. واگرایی، یک پدیده پیشرونده می باشد که از یک نقطه با تمرکز جریان آب شروع شده و به تدریج گسترش می یابد. نقطه شروع پدیده واگرایی می تواند ترک های حاصل از انقباض، نشست نامساوی و یا ترک های هیدرولیکی باشد. پدیده واگرایی و اهمیت شناخت آن در طرح هایی نظیر سد های خاکی و کانال های آبرسانی که تمرکز فشار آب در داخل خاک وجود دارد، دارای اهمیت بسیار زیادی می باشد. خاک های واگرا در انواع مختلف اقلیم ها و در مناطق مختلف جهان نظیر استرالیا، برزیل، ایران و ایالات متحده آمریکا به وفور وجود دارد. خاک های واگرا را با آزمایش های معمول مکانیک خاک نظیر دانه بندی، حدود اتربرگ و ... نمی توان شناخت و معمولاً جهت شناسایی این گونه خاک ها توصیه به انجام همزمان ۴ دسته آزمایش می شود که عبارتند از آزمایش پین هول، کرامب، هیدرومتری دوگانه و آزمایش های شیمیایی.

پدیده واگرایی دارای ماهیت فیزیکی - شیمیایی است که عمدتاً از نوع کانی های خاک و خصوصیات شیمیایی آب منفذی خاک متاثر می گردد. بر اساس تاثیر آب منفذی بر روی رفتار واگرایی خاک، می توان گفت که هر گاه یک خاک واگرا در معرض آب قرار گیرد، ذرات رس ممکن است از هم جدا گردیده و به صورت معلق درآیند. به همین دلیل شکل گیری پدیده واگرایی می تواند باعث شکل گیری پدیده پاپینگ در سدهای خاکی [۸] و [۹]، فرسودگی و تخریب جاده ها و کانال های آبرسانی و تخریب پی سازه ها گردد [۱۰]. در گذشته توصیه اکید بر عدم استفاده از این نوع خاک ها بود اما امروزه با توجه به گسترش

۱) Expansive Soil
۲) Dispersive Soil
۳) Collapsible Soil

ارزیابی پتانسیل واگرایی خاک رس واگرایی تثبیت شده با پوزولان

روز افزون ساخت پروژه های خاکی- بویژه سدهای خاکی- و برخورد با این گونه خاک ها در محل ساخت سد و یا در محل قرضه و اقتصادی نبودن جایگزینی منابع قرضه ریزدانه واگرا با منابع قرضه غیر واگرا می توان بر اهمیت و ضرورت اصلاح خاک های واگرا تاکید نمود.

در تحقیق حاضر از پوزولان طبیعی جهت تثبیت خاک واگرا استفاده شده است. پوزولان های طبیعی یا مصنوعی موادی هستند که به سهولت و با هزینه ناچیز و بدون هرگونه کار اضافی جهت آماده سازی آنها، می توانند به کار برده شوند، ضمن آنکه اغلب موادی که به نام پوزولان های مصنوعی شناخته می شوند، مواد زائد حاصل از فرآیند تولید در کارخانه های صنعتی می باشند و موادی هستند که معمولاً دور ریخته می شوند [۲]. مطابق استاندارد ASTM-C618، پوزولان به ماده سیلیسی یا سیلیسی آلومیناتی که به خودی خود ارزش چسبندگی ندارد، اطلاق می شود. اما به شکل ذرات بسیار ریز و در مجاورت رطوبت در درجه حرارت های معمولی با هیدروکسید سدیم واکنش شیمیایی داشته و ترکیباتی را بوجود می آورد که خاصیت سیمانی و چسبندگی دارد، بنابراین پوزولان یک ماده طبیعی یا مصنوعی است که حاوی سیلیس فعال است. لازم به ذکر است که همانگونه که خاک های مناطق مختلف دارای خصوصیات رفتاری متفاوتی هستند، پوزولان های طبیعی نواحی مختلف نیز به دلیل تفاوت در خصوصیات و ترکیب های شیمیایی دارای ویژگی های متفاوتی می باشند. به نحوی که رفتار یک نمونه خاک در مواجهه با پوزولان های طبیعی نواحی مختلف می تواند کاملاً متفاوت باشد. در مقاله حاضر تاثیر افزودن درصد های مختلف پوزولان در زمان عمل آوری متفاوت بر خاک واگرا مورد ارزیابی قرار گرفته است. جهت بررسی پتانسیل واگرایی از آزمایش هیدرومتری دوگانه و آزمایش پین هول و آزمایش های شیمیایی استفاده گردیده است. آزمایش هیدرومتری دوگانه جهت یک ارزیابی اولیه مورد استفاده قرار گرفت و آزمایش پین هول به دلیل دقت در مدل کردن شرایط نشت متمرکز مطابق با آنچه در واقعیت اتفاق می افتد، مورد استفاده قرار گرفت. توجه کمتر به مکانیزم های شیمیایی اتفاق افتاده در سیر تثبیت شیمیایی در مقالات و تحقیق های مرتبط مهمترین دلیل انجام آزمایش های شیمیایی می باشد. بویژه آنکه در خاک های واگرا، رفتار خاک به واسطه وجود کانی های فعال رسی نظیر مونت موریلونیت ها و وجود کاتیون های سدیم تحت تاثیر شاخصه های شیمیایی نظیر PH، PS و EC قرار می گیرد.

تهیه مصالح و روش ها:

خاک رس مورد استفاده در این تحقیق از قرضه های وسیع و گسترده خاک های واگرایی منطقه آذربایجان و در منطقه ای به نام بوردوزی که در کیلومتر ۱۵ جاده تبریز به سمت اهر و در نزدیکی بخشی به نام خواجه واقع شده است، تهیه شد. جدول ۱ مشخصات واگرایی خاک رس مورد استفاده را نشان می دهد.

جدول ۱ مشخصات واگرایی خاک رس مورد استفاده

طبقه بندی بر اساس آزمایش پین هول	طبقه بندی در آزمایش هیدرومتری دوگانه	درصد واگرایی در آزمایش هیدرومتری دوگانه
D_2 واگرا	کاملاً واگرا	۵۶/۱

برای آن که تحقیق دارای جامعیت بیشتر باشد و نتایج آن برای خاک های مناطق دیگر نیز به طور نسبی قابل استفاده باشد، با اضافه نمودن یک درصد وزن خشک خاک، پودر هگزا متا فسفات سدیم که یک ماده پراکنش گرا می باشد، درصد واگرایی خاک مورد استفاده را مقداری افزایش داده و برای ادامه تحقیقات از این خاک استفاده شد. جداول ۲ و ۳ مشخصات واگرایی خاک رس واگراتر شده را نشان می دهند.

جدول ۲ مشخصات واگرایی خاک واگراتر شده

طبقه بندی در آزمایش پین هول	طبقه بندی در آزمایش هیدرومتری دوگانه	درصد واگرایی در آزمایش هیدرومتری دوگانه
D_1 کاملاً واگرا	کاملاً واگرا	۷۵/۸ %

جدول ۳ مشخصات شیمیایی خاک واگراتر شده

PH	Na ⁺	K ⁺ (meq/lit)	Ca ²⁺ (meq/lit)	Ng ²⁺ (meq/lit)	EC (ms/cm)	TDS (meq/lit)	SAR	PS%
۸/۵	۱۷۹/۱۶	۱۶/۸۹	۲۱/۲۵	۱۳/۱۵	۲۰/۹	۲۳۰/۴۵	۴۳/۲	۷۷/۸۲

کاملاً مشخص است که بر اساس نتایج به دست آمده و با توجه به معیارهای مختلف ارزیابی پتانسیل واگرایی، خاک مورد استفاده در طبقه خاک های کاملاً واگرا و شدیداً فرسایش پذیر قرار می گیرد.

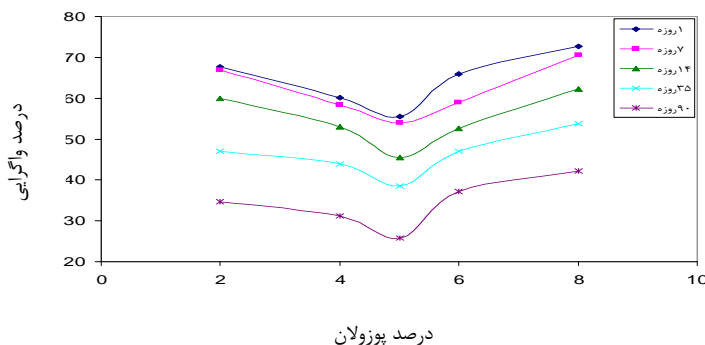
ارزیابی پتانسیل واگرایی خاک رس واگرایی تثبیت شده با پوزولان

پوزولان مورد استفاده از نوع پوزولان طبیعی مصرفی کارخانه سیمان استهبان می باشد که از منطقه سیرجان که در حدود ۱۸۰ کیلومتری استهبان واقع شده است، تهیه می گردد. جهت ساخت و عمل آوری نمونه ها، ابتدا آزمایش تراکم بر روی خاک طبیعی انجام پذیرفت. در جهت فرآیند تثبیت، تمامی نمونه ها با رطوبت بهینه ساخته و عمل آوری گردیدند. درصد های اختلاط شامل ۲، ۴، ۵، ۶ و ۸ درصد وزن خشک خاک و زمان های عمل آوری شامل زمان های ۱ روزه، ۷ روزه، ۱۴ روزه، ۳۵ روزه و ۹۰ روزه می شد. ضمن آنکه تمامی آزمایش ها مطابق با استاندارد ASTM انجام پذیرفت.

نتایج و تجزیه و تحلیل:

بررسی پتانسیل واگرایی:

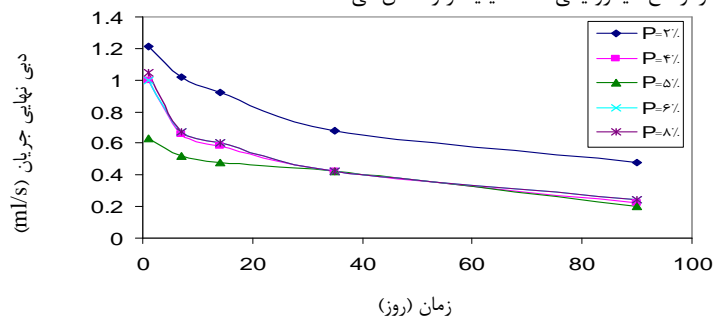
جهت بررسی اولیه تغییرات پتانسیل واگرایی از آزمایش هیدرومتری دوگانه استفاده گردید. شکل ۱ تغییرات درصد واگرایی نمونه های تثبیت شده با درصد های مختلف پوزولان را در زمان های عمل آوری متفاوت نشان می دهد.



شکل ۱ تغییرات درصد واگرایی نمونه های تثبیت شده با درصد های مختلف پوزولان برای زمان های عمل آوری متفاوت

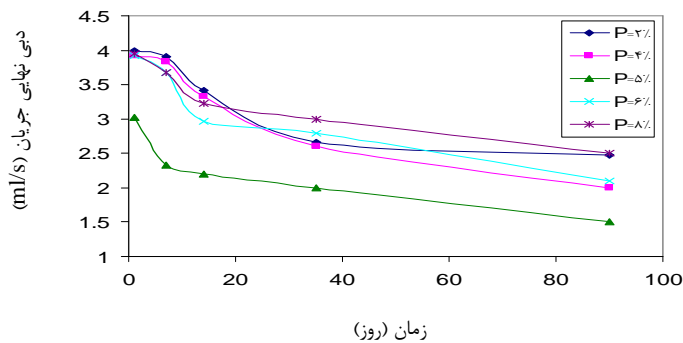
با افزودن پوزولان از ۲ به ۵ درصد از میزان واگرایی نمونه ها کاسته می شود در حالی که برای افزایش پوزولان از ۵ به ۸ درصد مقداری برگشت در میزان واگرایی مشاهده می گردد. با افزایش زمان عمل آوری نیز از میزان واگرایی نمونه ها کاسته می شود. مطابق مطالعات شرارد و همکاران [۳] نمونه هایی که در آزمایش هیدرومتری دوگانه دارای درصد واگرایی بیش از ۴۰ باشند شدیداً فرسایش پذیر هستند و در صورت آنکه دارای درصد واگرایی کمتر از ۱۵ درصد باشند در رده خاک های مقاوم به فرسایش پذیری طبقه بندی می شوند، ضمن آنکه نمونه هایی که دارای درصد واگرایی بین ۱۵ تا ۴۰ درصد هستند متوسط و اگر می باشند. کاملاً مشخص است که نمونه تثبیت شده با ۵ درصد پوزولان و در زمان عمل آوری ۹۰ روزه کمترین مقدار واگرایی نسبت به سایر نمونه های تثبیت شده را دارا است. درصد واگرایی نمونه ۹۰ روزه مذکور ۲۵/۷۹ درصد به دست آورده شده است که با این تفاسیر خاک را در رده خاک های نیمه واگرا قرار می دهد. لذا می توان چنین استدلال نمود که پوزولان مصرفی هر چند باعث کاهش پتانسیل واگرایی می شود اما برای خاک های با درصد های واگرایی زیاد نمی تواند خاک را به نمونه ای کاملاً غیر واگرا تبدیل نماید.

برای دسترسی به یک دید جامع و واقع بینانه تر بر روی تمامی نمونه های ساخته شده و در تمامی زمان های عمل آوری آزمایش پین هول که مطابق با تحقیقات پیشین [۱] به دلیل مدل کردن شرایط نشن متمرکز از دقیق ترین و متداول ترین آزمایش های تشخیص پتانسیل واگرایی است، استفاده گردید. جهت ارزیابی نمونه ها از روش C ذکر شده در استاندارد ASTM استفاده شد. شکل های ۲ و ۳ تغییرات دبی نهایی نمونه های تثبیت شده با پوزولان در ارتفاع هیدرولیکی ۵۰ میلیمتر و در ارتفاع هیدرولیکی ۳۸۰ میلیمتر را نشان می دهند.



شکل ۲ تغییرات دبی نهایی جریان در زمان های عمل آوری متفاوت برای نمونه های تثبیت شده با درصد های مختلف پوزولان در شرایط (H=۵۰mm)

ارزیابی پتانسیل واگرایی خاک رس واگرایی تثبیت شده با پوزولان

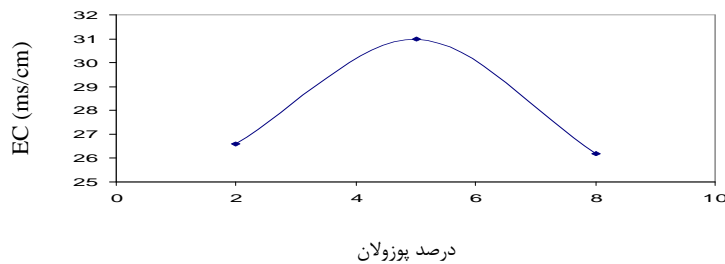


شکل ۳ تغییرات دبی نهایی جریان در زمان عمل آوری متفاوت برای نمونه های تثبیت شده با درصد های مختلف پوزولان شرایط (H=۳۸۰mm)

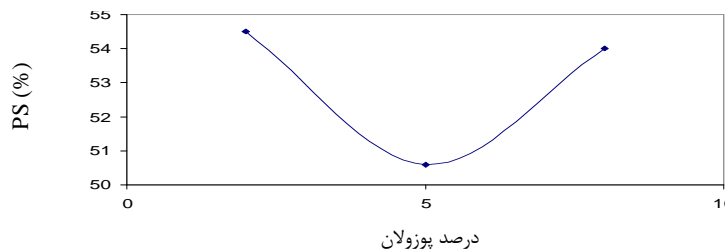
نتایج آزمایش پین هول نشان می دهند که با افزایش زمان عمل آوری از میزان دبی خروجی نمونه ها کاسته می شود. نتیجه مهم این واقعیت کاهش فرسایش سوراخ ایجاد شده در نمونه ها و در نتیجه کاهش پتانسیل واگرایی می باشد.

فرآیند تثبیت با پوزولان یک فرآیند زمان بر است. چنانچه گراف ها نشان می دهند، فرآیند اصلاح خاک با پوزولان حتی تا ۹۰ روز پس از اصلاح ادامه پیدا می کند. در آزمایش پین هول نیز کمترین واگرایی در تمامی زمان های عمل آوری مربوط به نمونه تثبیت شده با ۵ درصد پوزولان می باشد. در جهت تکمیل نتایج و تحلیل نوع برهمکنش اتفاق افتاده بر روی نمونه تثبیت شده با ۵ درصد پوزولان در زمان های عمل آوری متفاوت آزمایش های شیمیایی انجام گرفت. ضمن آنکه جهت مقایسه، در یک زمان عمل آوری خاص (زمان ۳۵ روزه) اثر تغییرات درصد پوزولان بر پتانسیل واگرایی بررسی گردید. در آزمایش های شیمیایی به صورت خاص تغییرات ۳ پارامتر EC, PS, PH بررسی شدند. هدایت الکتریکی خاک است و موید غلظت املاح و کاتیون های خاک می باشد. مطابق تحقیقات پیشین [۴] هر چه غلظت املاح و کاتیون های خاک بیشتر باشد احتمال وقوع پدیده واگرایی کمتر است.

PS درصد سدیم موجود در خاک است و پارامتری است که رابطه مستقیم با مقدار کاتیون سدیم دارد و به طور مستقیم از آن در تعیین پتانسیل واگرایی مطابق معیار شرارد [۳] استفاده می کنند. مطابق روابط موجود هر چه درصد سدیم خاکی بیشتر باشد استعداد واگرایی آن خاک نیز بیشتر است. شکل ۴ تغییرات هدایت الکتریکی و شکل ۵ تغییرات درصد سدیم نمونه های ۳۵ روزه تثبیت شده با درصد های مختلف پوزولان را نشان می دهند. در هماهنگی با نتایج آزمایش های فیزیکی تشخیص پتانسیل واگرایی، مشخص است که در ۵ درصد پوزولان خاک مورد مطالعه دارای بیشترین هدایت الکتریکی و کمترین درصد سدیم می باشد و این نکته موید کمتر بودن پتانسیل واگرایی در این درصد اختلاط است. علت کمتر بودن پتانسیل واگرایی در درصد اختلاط ۵ پوزولان را می توان به کاهش ضخامت لایه دوگانه ارتباط داد.



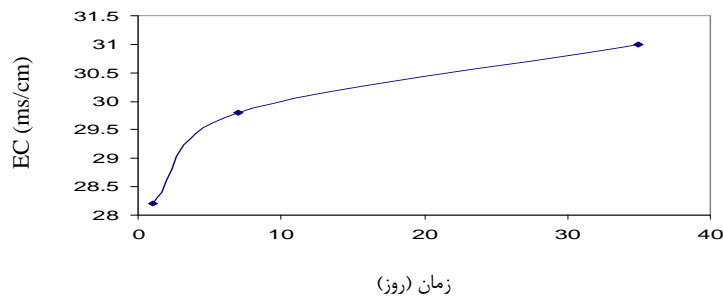
شکل ۴ تغییرات هدایت الکتریکی نمونه های ۳۵ روزه تثبیت شده با درصد های مختلف پوزولان



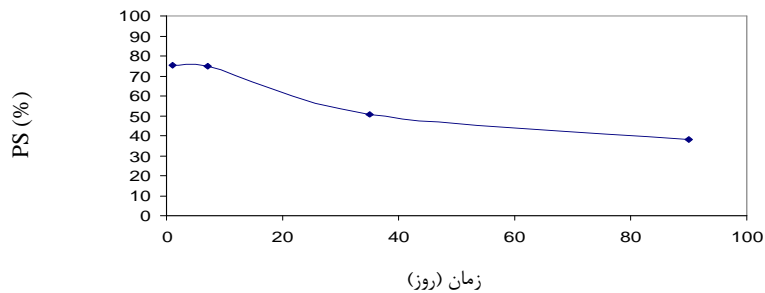
شکل ۵ تغییرات درصد سدیم نمونه های ۳۵ روزه تثبیت شده با درصد های مختلف پوزولان

ارزیابی پتانسیل واگرایی خاک رس واگرایی تثبیت شده با پوزولان

این مساله می تواند حکایت از انجام واکنش های تبادل یونی داشته باشد. در واکنش تبادل یونی کاتیون های دو یا سه ظرفیتی موجود در پوزولان نظیر Ca^{2+} Al^{3+} جایگزین کاتیون سدیم (Na^+) که تک ظرفیتی بوده و خاص خاک های واگرا نیز می باشد، می گردد. در اثر جایگزینی یاد شده ساختار خاک دچار تغییر می شود و در اثر تغییرساخت خاک از حالت پراکنده به حالت مجتمع (لخته ای)، نیروی دافعه بین ذرات کاهش پیدا نموده و در نهایت با افزایش نیروهای جاذبه از پتانسیل واگرایی نمونه ها کاسته می شود. شکل های ۶ و ۷ به بررسی عامل زمان عمل آوری در انجام تغییرات شیمیایی در روند تثبیت با پوزولان می پردازند. با افزایش زمان عمل آوری از میزان PS نمونه ها کاسته و بر میزان EC آنها افزوده می شود. به عبارت مناسب تر اشکال نشان می دهند که واکنش تبادل یونی در بستر زمان انجام می پذیرند.



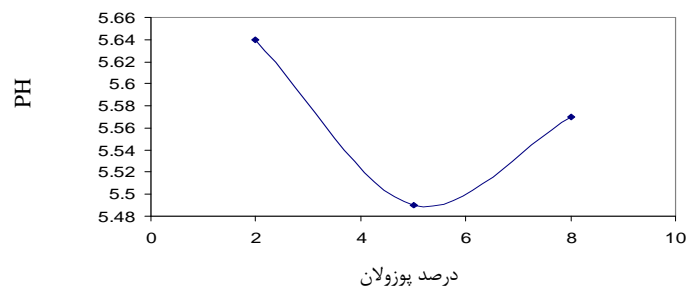
شکل ۶ تغییرات هدایت الکتریکی نمونه تثبیت شده با ۵ درصد پوزولان در زمان های عمل آوری متفاوت



شکل ۷ تغییرات درصد سدیم نمونه تثبیت شده با ۵ درصد پوزولان در زمان های عمل آوری متفاوت

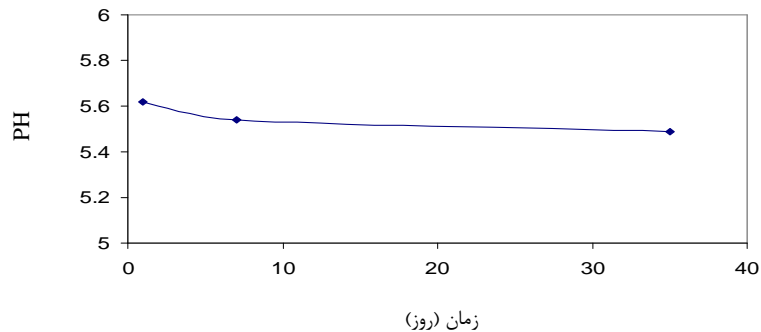
فرآیند جایگزینی حتی تا ۹۰ روز پس از اصلاح کاملا ادامه می یابد که این نکته را می توان از شیب منحنی تغییرات درصد سدیم نیز استنباط نمود. از لحاظ آزمایش های شیمیایی فقط نمونه تثبیت شده با ۵ درصد پوزولان در زمان عمل آوری ۹۰ روزه کاملا غیر واگرا تشخیص داده می شود. هر چند طبق آزمایش های فیزیکی نمونه مذکور در رده خاک های متوسط واگرا قرار گرفت. در مجموع در مساله اصلاح خاک با پوزولان حداقل زمان اصلاح در درصد بهینه اختلاط ۹۰ روز می باشد.

شکل های ۸ و ۹ به بررسی تغییرات PH خاک می پردازند.



شکل ۸ تغییرات PH نمونه های ۲۵ روزه تثبیت شده با درصد های مختلف پوزولان

ارزیابی پتانسیل واگرایی خاک رس واگرایی تثبیت شده با پوزولان



شکل ۹ تغییرات PH نمونه تثبیت شده با ۵ درصد پوزولان برای زمان های عمل آوری متفاوت

مشخص است که با افزایش زمان عمل آوری از میزان PH نمونه ها کاسته می شود. ضمن آنکه نمونه تثبیت شده با ۵ درصد پوزولان دارای PH کمتری است. ضمن آنکه PH تمامی نمونه های تثبیت شده از PH نمونه طبیعی کمتر است. در این رابطه با مساله دوگانه ای روبرو هستیم. نخست آنکه در فرآیند تثبیت شیمیایی جهت انجام فعل و انفعالات لازم و تسریع در انجام واکنش های یونی و پوزولانی می باید PH نمونه ها از یک حدی کمتر نشود. در برخی از متون علمی [۵] این محدوده را ۱۲/۴ در نظر می گیرند. پس از این دیدگاه می توان اثر بخشی کمتر پوزولان و طولانی بودن زمان اصلاح را به کاهش قابل ملاحظه PH نمونه ها ارتباط داد. دیدگاه دوم که مربوط به خاک های واگرا می باشد؛ بیان می دارد که استعداد واگرایی خاک در PH های کم، کمتر می باشد. زیرا در PH های کم عموماً ساختار از نوع لخته ای می باشد. از این دیدگاه می توان چنین نظر داد که فرآیند کاهش PH نمونه ها در بستر زمان و افزودن پوزولان تایید کننده انجام واکنش های تبادل یونی و تغییر ساخت خاک از حالت پراکنده به حالت لخته ای می باشد.

جمع بندی و نتیجه گیری:

در یک جمع بندی کلی می توان ضمن اشاره به اهمیت خاکهای واگرا از لحاظ گستره وسیع آنها، به این نکته نیز اشاره نمود که همواره باید به سوی روشی حرکت نمود که بتواند به بهترین و اقتصادی ترین نحو خاکهای واگرا را تثبیت و قابل استفاده نماید. لذا همواره باید یک جمع بندی اقتصادی به اقتضای هر پروژه و منطقه بین روش های اصلاحی انجام گیرد. با توجه به شرایط ذکر شده می توان بیان نمود که:

۱- در اثر اختلاط پوزولان با خاک رس، واکنش تبادل یونی بین یون های کلسیم و آلومینیوم و کاتیون های خاک رس صورت می گیرد و یون کلسیم و آلومینیوم جایگزین یون سدیم که دارای ظرفیت کمتری است می شود که این عمل سبب تجمع یون های کلسیم و آلومینیوم در اطراف ذرات رس می گردد. با زیاد شدن غلظت الکترونی اطراف ذرات رس، نیروی جاذبه الکتریکی در دانه ها ایجاد شده که سبب لخته شدن ذرات و ایجاد دانه های بزرگ تر می گردد و این عمل باعث تغییر ساخت خاک، کاهش پلاستیسیته خاک و کاهش مشکل واگرایی می گردد.

۲- واکنش پوزولانی به مرور زمان انجام می شود و به عوامل مؤثری نظیر نوع و شکل و نحوه پراکندگی کانی های رسی موجود در خاک بستگی دارد. لذا شرط لازم برای انجام واکنش های پوزولانی، وجود کانی های رسی فعال در خاک است. واکنش پوزولانی تا زمانی که کلسیم و آلومینیوم کافی در مواد تثبیت کننده وجود داشته باشد و خاک تثبیت شونده نیز سیلیکات و آلومینات قابل حل کافی دارا باشد، ادامه می یابد.

۳- اضافه نمودن پوزولان به خاک واگرا، علاوه بر کاهش پتانسیل واگرایی خاک، سبب ایجاد فعل و انفعالات شیمیایی در خاک گردیده که بر رفتار های فیزیکی و شیمیایی خاک تاثیر می گذارد که از آن جمله می توان به افزایش EC خاک، کاهش PS و کاهش PH اشاره نمود. لذا بررسی های مختلف فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی خاک در حالت اصلاح با مواد مضاف و کنترل این موارد امری ضروری می باشد.

مراجع

[۱] عسگری، فرج اله و فاخر، علی، (۱۳۷۳). "تورم و واگرایی خاکها از دید مهندس ژئوتکنیک". تهران: انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران، ۲۴۵ صفحه.

[۲] رضانیپور، علی اکبر، پرهیزکار، طیبه و طاهری، افشین، (۱۳۷۶). "مواد افزودنی و پوزولانی و کاربرد آن در بتن". تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه شماره ۲۴۱.

ارزیابی پتانسیل واگرایی خاک رس واگرایی تثبیت شده با پوزولان

- [۳] Sherard, J. L., Dunnigan, L. P. and Decker, R. S. (۱۹۷۶), "Identification and Nature of Dispersive Soils", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. ۱۰۲, PP: ۲۸۷-۳۰۱.
- [۴] Fell, R., Gregor, J. P. and Stapledon, D. (۱۹۹۲), "Geotechnical Engineering of Embankment Dams", Rotterdam.
- [۵] طباطبایی، امیر محمد، (۱۳۷۹). "روسازی راه"، تهران: انتشارات مرکز نشر دانشگاهی، ۵۵۶ صفحه.
- [۶] Punmia, C. B. (۲۰۰۵), "Soil Mechanics and Foundations", Laxmi Publications LTD. ۱۶TD Edition, ۹۱۶ PP.
- [۷] بیات، آرش، (۱۳۸۶). "بررسی تاثیر تثبیت کننده های سیمانی بر خصوصیات مهندسی خاک های ریزدانه"، مجموعه مقالات سومین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز.
- [۸] Sherard, J. L., Decker, R. S. and Ryker, N. L. (۱۹۷۲), "Piping in Earth Dams of Dispersive Clay", Proc of Specility Conf on Performance of Earth and Earth Supported Structures, ASCE, Vol. ۱ PP: ۵۸۴-۶۲۶.
- [۹] Ingles, O. G. (۱۹۸۵), "Piping in Earth Dams of Dispersive Clay", ASCE, Speciality Con, on the Performance of Earth and Earth Supported Stracthures, Vol. ۳ PP: ۱۱۱-۱۱۷.
- [۱۰] Ouhadi, V. R. and Goodarzi, A. R. (۲۰۰۶), "Assessment of the Stability of a Dispersive Soil Treated by Alum", [Online] < <http://www.elsevier.com/locate>. > Engineering Geology, PP: ۹۱-۱۰۱.