بررسی تاثیر تناوب ذوب و یخ بر عمر مفید خاک های ماسه بادی تثبیت شده

جلیل عمادی
عضو هیئت علمی گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد اردستان

محسن صالحی
کارشناس ارشد عمران-راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

گستردگی رسوبات ماسه بادی که در بسیاری از نقاط دنیا یافت می‌شوند، دلیل قرار گرفتن آن در ردیف مهمترین نوع رسوبات از نظر نحوه تثبیت است. یکی از روشهای تثبیت در این نوع بسترها استفاده از قابلیت سیمانی شدن پوزولان طبیعی در مجاورت آهک می‌باشد. این نوع خاکها دارای مقاومت باربری پایینی در هر دو حالت رطوبت طبیعی و اشباع می‌باشند. در این تحقیق یک مطالعه آزمایشگاهی روی دو نوع خاک ماسه بادی انجام شده و نتایج به صورت نمودارهای روند کاهش مقاومت در طول سیکل‌های مختلف ذوب و یخ آمده است. با توجه به این نمودارها، دوام مقاومت ایجاد شده در برابر اثرات نیروهای ناشی از یخزدگی نمونه‌ها، بررسی می-شود. بنابراین با استفاده از نتایج این تحقیق می‌توان، عمر مفید گیرش سیمانی ایجاد شده در این نوع خاک‌ها را بطور تقریبی برای تعداد سیکل مشخص تخمین زد.

کلید واژه ها:

تثبیت، پوزولان طبیعی، خاک ماسه بادی

۱- مقدمه

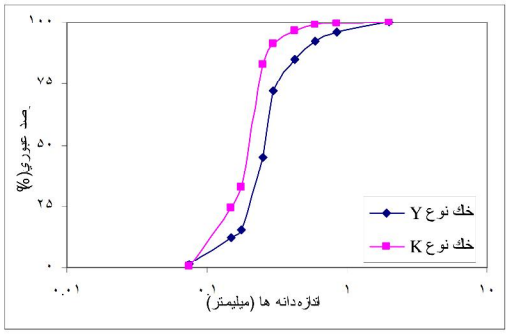
در این تحقیق از ترکیب پوزولان وآهک برای تثبیت این نوع خاک-ها(رسوبات ماسه بادی) استفاده شده‌است. آهک از جمله متداولترین مواد افزودنی برای تثبیت خاکهای سست است که تجربیات زیادی از استفاده آن در نقاط مختلف دنیا وجود دارد. پوزولان نیز یک ماده افزودنی ارزان قیمت می‌باشد که منبع غنی سیلیس و آلومین بوده و در پروژه‌های مختلفی مورداستفاده قرار گرفته است. برای تثبیت این خاکها معمولاً از روشهای بیولوژیکی یا فیزیکی (مالچ پاشی نفتی یا کاشت درختچه) استفاده می‌گردد. به همین خاطر منابع قابل توجهی در زمینه کارهای مشابه انجام شده در این تحقیق وجود ندارد. هدف از انجام این تحقیق بررسی میزان پایداری مقاومت ایجاد شده در این نوع خاکها در اثر استفاده از پودر پوزولان و آهک بعد از تجربه شرایط نامطلوب جوی در بستر مورد نظر می‌باشد. درصورت بکارگیری مواد افزودنی در تثبیت این خاکها، بر اثر خاصیت سیمانی پوزولان مصرفی مقاومت مناسبی ایجاد می‌شود که با انجام این تحقیق، میزان پایداری ترکیبات پوزولانی ایجاد شده در برابر شرایط نامساعد جوی، از لحاظ چگونگی روند کاهش مقاومت و همچنین مقدار مقاومت نهایی باقیمانده، مشخص می‌گردد.

هزینه‌های تعمیر و نگهداری در پروژه‌های راهسازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این هزینه‌ها در طول عمر مفید راه اتفاق می‌افتد که شرایط بستر تثبیت شده از نظر مقدار مقاومت در طول زمان، احتمال فرسودگی زودرس و اثرات آن بر روسازی مسیر، تاثیر بسزایی در هزینه‌های یاد شده دارد. بنابراین در صورت استفاده از این روش جهت تثبیت بسترهای مورد نظر، وجود معیاری برای تخمین مقدار نهایی مقاومت بستر پس از تجربه شرایط نامساعد جوی، جهت تعیین ضخامت روسازی مورد نیاز و همچنین برآورد هزینه‌های تعمیر و نگهداری مسیر در طول عمر مفید بهره‌برداری از آن، بسیار موثر می-باشد که با انجام این تحقیق می‌توان به بررسی معیار یاد شده، پرداخت.

۲- معرفی مصالح مصرفی

در این تحقیق دو نوع ماسه بادی استفاده شده است. لازم به ذکر است دلیل کاربرد این نوع مصالح، عدم وجود راهکار مناسب تثبیت جهت ایجاد مقاومت باربری در این بسترها می‌باشد که بتوان در آن به انجام عملیات عمرانی مبادرت ورزید. همچنان که در بند ۱ این تحقیق نیز اشاره شد روشهای کنونی تثبیت این خاکها تنها در جهت جلوگیری از حرکت و روان شدن و نه ایجاد مقاومت باربری در آن می‌باشد و در صورت کاربرد، قابلیت انجام پروژه‌های عمرانی در آن وجود ندارد. بنابراین تحقیق پیش رو می‌تواند باب تازه‌ای برای ایجاد امکان فعالیتهای عمرانی در این بسترها که از لحاظ گستره جغرافیایی شامل سطح وسیعی از مناطق مرکزی ایران می‌شود را ایجاد نماید.

محل جغرافیایی تهیه خاکها از مناطق کویر مرکزی ایران در محدوده شهرهای کاشان و یزد بوده است. برای شناخت بیشتر نحوه دانه‌بندی این خاکها، آزمایش دانه بندی انجام شده و نتایج آن در نمودار شکل ۱ مشخص است [۱] . با توجه به نمودار یاد شده ذرات ریزدانه (رس و لای با بعد کوچکتر از ۰/۰۷۵ میلیمتر) در نمونه‌های آزمایشی بسیار کم است. بنابراین این گونه مصالح به علت عدم وجود خاصیت خمیری، نیازی به انجام آزمایشات تعیین حدوداتربرگ ندارند. همچنین با دقت در محدوده دانه‌بندی ارائه شده در نمودار شکل ۱، اکثریت بعد دانه‌های مصالح آزمایشی بین ۰/۱ تا ۱ میلیمتر می‌باشند که شامل دامنه تغییرات ۰/۹ میلیمتر می‌شود. این محدوده کوچک دانه‌بندی، اشاره به یکنواختی بسیار بالای مصالح آزمایشی دارد و دلیل این امر را می‌توان در جابجایی این ذرات توسط باد دانست. بطوریکه قدرت وزش باد و حمل دانه‌های خاک محدود بوده و تنها بازه‌ای کوچک از مصالح را که توانایی حمل آنها را دارد جابجا می‌نماید.



شکل ۱- نتایج آزمایش دانه‌بندی روی نمونه‌های آزمایشی

پوزولان مصرفی در این تحقیق از نوع تراس بوده که بهمراه آهک ئیدراته، قبل از مصرف پودر شدند. اشکال ۲ و ۳ تصاویر نمونه پوزولان و آهک مصرفی بعد از پودر شدن و قبل از مصرف را نشان می‌دهد.

شکل ۲- پودر پوزولان تراس مصرفی.

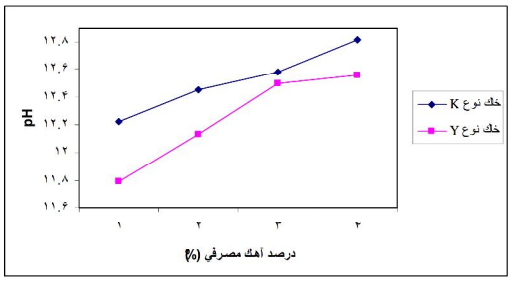
شکل ۳- پودر آهک ئیدراته مصرفی.

۳- آزمایشها و نتایج آنها

۳-۱- آزمایش تعیین PH

این آزمایش جهت تعیین میزان بهینه آهک انجام شد. واکنش‌های پوزولانی در PH حدود ۱۲/۵ صورت می‌گیرند، بنابراین درصد آهک لازم جهت رساندن PH خاک به ۱۲/۵ با انجام این آزمایش مشخص می‌شود. این روش بخصوص در تثبیت خاک‌های رسی به وسیله آهک مورد توجه است و به وسیله این آزمایش درصد آهک مصرفی جهت تثبیت این خاک‌ها را مشخص می‌کنند.

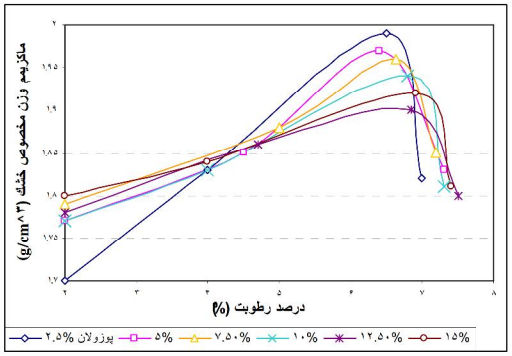
PH اولیه نمونه‌های خاک برای نوع K برابر ۸/۴ و برای نوع Y برابر ۷/۹ بود. همچنین PH نمونه‌ها با درصد مختلف آهک اندازه گیری شده و نتایج آن در شکل ۱ مشخص می‌باشد [۲]. با مشاهده نمودار مربوط، برای هر دو نوع خاک از۳٪وزنی پودرآهک ئیدراته (عبوری از الک ۱۰۰) در تمامی آزمایشهای بعدی استفاده خواهد شد.



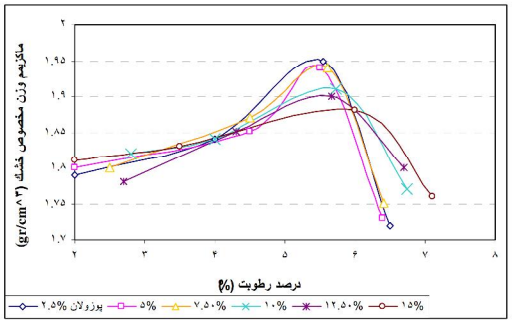
شکل ٤- نتایج آزمایش PH
(خاکهای نوع K و Y).

۳-۲- آزمایش تراکم

این آزمایش برای تعیین میزان رطوبت بهینه جهت دستیابی به حداکثر وزن مخصوص خشک خاک با توجه به درصد آهک بهینه (تعیین شده در بند ۳-۱) برای درصدهای مختلف پوزولان به روش پروکتور اصلاح شده انجام شده و نتایج این آزمایشها به ازای $d_{\max}$ بر حسب gr/cm^3 در برابر درصد رطوبت (وزنی) در شکلهای ۵ و ۶ برای خاکهای آزمایشی به طور جداگانه نشان داده شده است [۳]. با توجه به نمودارهای ذکر شده، رطوبت بهینه برای خاک نوع Y بین ۶٪ تا ۷٪ و برای خاک نوع K بین ۵٪ تا ۶٪ مشاهده می‌شود.



شکل ۵- نتایج آزمایش تراکم روی خاک نوع Y

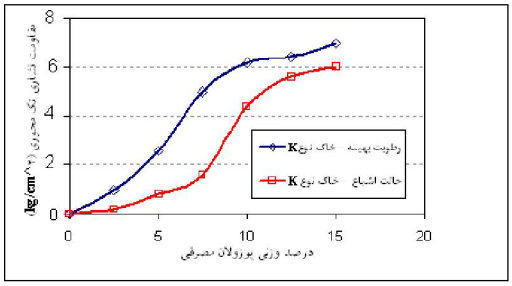


شکل ٦- نتایج آزمایش تراکم روی خاک نوع K

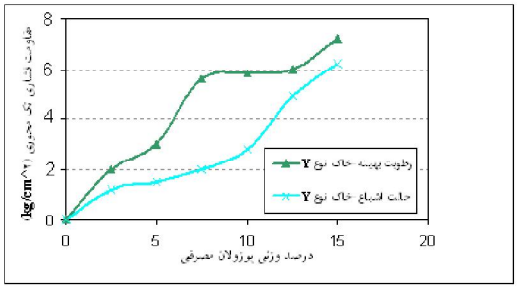
۳-۳- آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (قبل از انجام سیکلهای ذوب و یخ)

این آزمایش با هدف تعیین حداکثر مقاومت اولیه ایجاد شده در این بسترها در صورت استفاده از این روش روی نمونه‌هایی به قطر ۵ و طول ۱۰ سانتی متر (نسبت ارتفاع به قطر برابر با ۲) با درصدهای آهک و رطوبت بهینه و درصدهای مختلف پوزولان انجام شد. تحقیقات مشابه صورت گرفته در استفاده از پوزولان تراس روی بسترهای رسی، زمان مناسب عمل آوری جهت ایجاد حداکثر مقاومت اولیه را بین ۴۵ تا ۶۰ روز نشان میدهد [۴،۵و۶]. بنابراین نمونه‌های آزمایشی با دو ماه عمل‌آوری تحت آزمایش مقاومت فشاری تک محوری قرار گرفتند تا مقدار نهایی مقاومت ایجاد شده مشخص گردد. درنهایت نتایج بدست آمده به صورت نمودارهای مقاومت فشاری تک محوری (بر حسب Kg/cm^2) در برابر درصد پوزولان مصرفی در شکلهای ۷ و ۸ آمده است. هر شکل شامل شرایط رطوبتی انجام آزمایش (اشباع و عمل آوری شده با رطوبت بهینه) و نوع خاک مصرفی می‌باشد. لازم به ذکر است قبل از انجام آزمایش در شرایط

اشباع، نمونه‌ها به مدت ۴ روز در زیر آب در دمای آزمایشگاه نگهداری شدند[۷].



شکل ۷- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری خاک نوع K (۶۰ روزه و قبل از انجام سیکلهای ذوب و یخ)



شکل ۸- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری خاک نوع Y (۶۰ روزه و قبل از انجام سیکلهای ذوب و یخ)

٤- سیکل‌های ذوب و یخ

این آزمایشها روی نمونه‌های استوانه‌ای، ساخته شده همانند شرایط آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (نسبت ارتفاع به قطر برابر با ۲، با ارتفاع ۱۰ و قطر۵ سانتی‌متر) انجام شده است. شرایط رطوبتی ساخت نمونه‌ها و میزان آهک مصرفی، همانند شرایط ساخت نمونه-های آزمایش مقاومت فشاری تک محوری بوده است. درصد پوزولان مصرفی ۲/۵٪ ، ۵٪، ۷/۵٪، ۱۰٪، ۱۲/۵٪ و ۱۵٪ وزنی خاک‌های آزمایشی بوده است . نمونه‌ها ۶۰ روز در دمای بین ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتیگراد عمل‌آوری و سپس در دو حالت رطوبت بهینه و اشباع (در آب به مدت ۴ روز) تحت سیکل های متناوب ذوب و یخ قرار گرفتند.

برای ایجاد سیکلهای ذوب و یخ از یک دستگاه فریزر با قابلیت سیستم کنترل دمابه صورت دلخواه، استفاده شد،بنابراین با رسیدن دمای نمونه‌ها به مقدار حداقل تعیین شده، آنهاراز فریزر خارج کرده و در دمای محیط آزمایشگاه به مقدار دمای ماکزیمم تعیین شده برای سیکلهای ذوب یخ می‌رسیدند. همچنین برای کنترل دمای نمونه‌ها هنگام خارج شدن از فریزر از یک عدد ترمومتر دستی ساده استفاده گردید. البته لازم به ذکر است به علت تغییر شرایط رطوبتی نمونه‌ها هنگام خارج کردن و برگرداندن آنها به داخل فریزر، مقاومت نهایی حاصل شده دارای درصدی خطا بوده که با مقدار واقعی اندکی متفاوت خواهد بود که برای کم کردن این مقدار خطا، تمامی نمونه‌ها هنگاه خارج شدن از فریزر داخل یک لایه پلاستیک پیچیده می‌شدند.

دمای حداقل و حداکثر سیکلهای ذوب یخ برای نمونه‌ها و همچنین تعداد سیکلهای مورد نظر با استفاده ازجدول شماره۱ تعیین شد.

با توجه به جدول ۱، در این مناطق در دیماه کمترین درجه حرارت هوا با محدوده تغییرات دمایی ۱۰ درجه سانتیگراد (از ۵- تا ۵+) وجود دارد. نمونه‌های تثبیتی در صورت استفاده در محل بطور متوسط هر ساله حدود ۳۰ سیکل ذوب و یخ را تجربه می‌کنند، بنابراین تعداد ۲۰ و ۵۰ و ۸۰ سیکل متناوب جداگانه برای نمونه‌ها با دمای حداقل ۵- و حداکثر ۵+ درجه سانتیگراد، انتخاب شدند تا آزمایشات مورد نظر، محدوده‌های تعداد تکرار ذوب و یخ کم، متوسط و زیاد را تحت پوشش قرار دهند.

جدول ۱- اطلاعات وضع جوی ایستگاه‌های سینوپتیک موجود در مناطق کویری محدوده مرکزی کشور (از سال تاسیس تا دی‌ماه ۱۳۸۳)[۸].

حداقل درجه حرارت هوا در دی‌ماه	متوسط درجه حرارت هوا در دی‌ماه	حداکثر بارندگی در یک روز (میلی‌متر)	معدل تعداد روزهای یخبندان
-٤/٤	٥/٧	٤٨	٣٠

٥- آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (بعد از انجام سیکلهای ذوب و یخ)

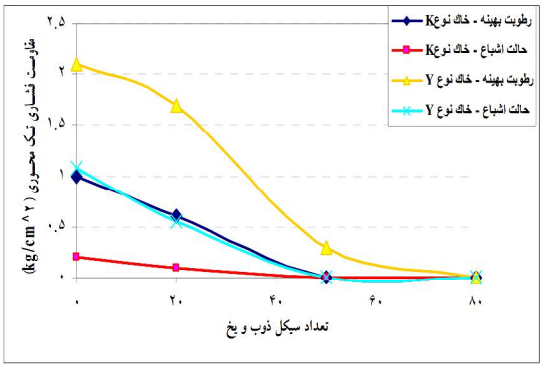
بعد از انجام سیکلهای ذوب و یخ نمونه‌ها تحت آزمایش مقاومت فشاری تک محوری قرار گرفتند تا نرخ کاهش مقاومت به ازای تغییر درصد پوزولان مصرفی در برابر تعداد سیکل تجربه شده توسط نمونه-ها مشخص گردد.

شکلهای ۹ تا ۱۴، نتایج این آزمایشها را روی خاکهای مورد نظر با توجه به شرایط ذکر شده نشان می‌دهد.

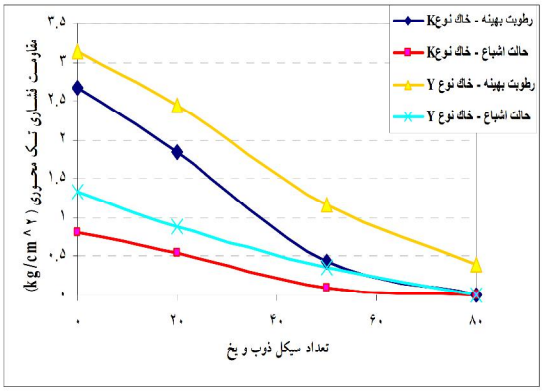
با توجه به نمودارهای حاصل از نتایج آزمایشها، با افزایش درصد پوزولان مصرفی، روند کاهش مقاومت فشاری تک محوری نمونه ها در اثر سیکل های متناوب ذوب و یخ کندتر شده است. بطوری که در شکل ۹ که نتایج آزمایش روی نمونه‌های با ۲/۵٪ پوزولان را نشان می‌دهد، پس از حدود ۵۰ سیکل مقاومت نمونه‌ها به صفر رسیده است. در حالی که با افزایش درصد پوزولان مصرفی به ۵٪ و بیشتر، حداقل مقاومت باقیمانده در اثر تمامی ۸۰ سیکل انجام شده افزایش یافته و به روند نسبتاً ثابتی رسیده است.

نکته قابل توجه در این مرحله از آزمایشها، تعیین حداقل درصد پوزولان مصرفی از لحاظ دوام مخلوط به سیکل های متناوب ذوب و

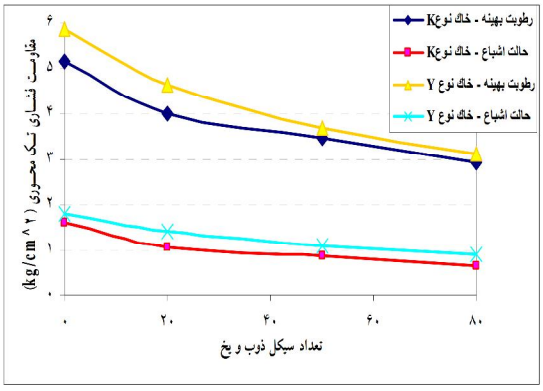
یخ می‌باشد که در مرحله بعدی تعیین می‌شود. درصورت تعیین درصد پوزولان یاد شده برای این بسترها، می‌توان شرایطی را ایجاد نمود که ضمن کاهش هزینه‌های مصرفی با بهینه شدن روند تثبیت، مقاومتی ایجاد نمود که ضمن پایداری مناسب در برابر شرایط نامساعد جوی، از نظر فنی نیز جوابگوی نیازهای مقاومتی این بسترها باشد.



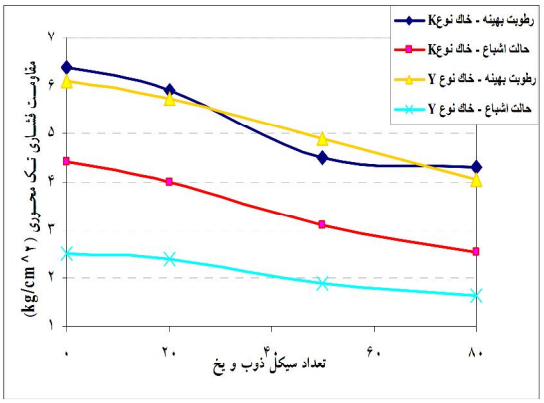
شکل۹- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (با۶۰روزعمل آوری و۲/۵٪ پوزولان)



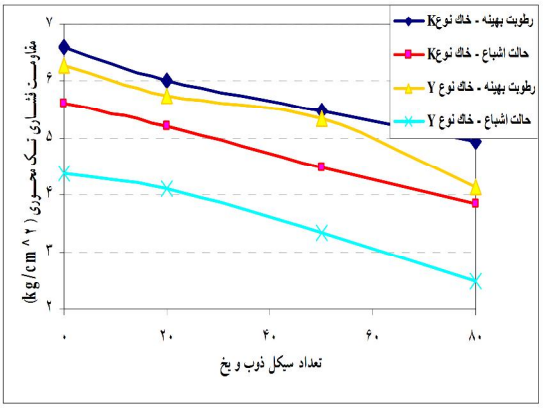
شکل۱۰- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (با۶۰روز عمل آوری و ۵٪ پوزولان)



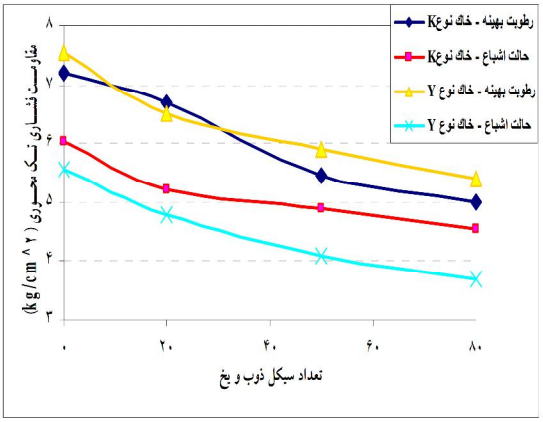
شکل۱۱-نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (با۶۰روزعمل آوری و۷/۵٪ پوزولان)



شکل۱۲-نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (با۶۰روز عمل آوری و۱۰٪ پوزولان)



شکل۱۳-نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (با۶۰روزعمل آوری و۱۲/۵٪ پوزولان)



شکل ۱۴- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (با۶۰ روز عمل آوری و ۱۵٪ پوزولان)

٦- تعیین درصد پوزولان مناسب تثبیت

با توجه به نمودارهای مقاومت فشاری تک محوری (شکلهای ۷ و ۸)، از لحاظ ایجاد مقاومت اولیه مناسب در خاکهای مورد نظر، مقدار ۵٪ پوزولان می‌تواند باعث ایجاد مقاومت‌های نسبتا مناسبی در خاکهای مورد نظر به خصوص در حالت رطوبت بهینه شود. اما با توجه به نتایج آزمایشات مقاومت فشاری تک محوری بعد از انجام سیکل‌های ذوب و یخ (ارائه شده در بند ۴ این تحقیق)، نمونه‌های با۲/۵و۵ درصد پوزولان در اثر تجربه ۴۰ سیکل ذوب و یخ و بیشتر از آن، دچار افت شدید مقاومت شده و تقریبا به مقاومت صفر رسیده‌اند. در حالی که نمونه‌های با ۷/۵٪ پوزولان، در ابتدا مقاومت نسبتاً مناسبی ایجاد کرده و پس از طی تمامی سیکل‌های ذوب و یخ، مقاومت خود را در حد مطلوبی حفظ کرده‌اند. این مطلب با درنظر گرفتن شرایط رطوبتی نمونه‌ها در محل و میزان بارندگی پایین مناطق یاد شده که در اکثر مواقع بسترهای آزمایشی را در حالتی غیر از اشباع قرار می‌دهد نیز قابل تایید است. چون مقدار کاهش مقاومت نمونه‌ها در حالت رطوبت بهینه از اشباع کمتر می‌باشد و مقاومت نهایی در حد مطلوبی حفظ شده است (شکلهای ۱۱ تا ۱۴).

بنابراین در حالت رطوبت بهینه، نمونه‌های آزمایشی با ۷/۵٪ پوزولان بعد از تجربه کردن حدود ۸۰ سیکل ذوب و یخ، مقدار مقاومتی حدود ۳ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع دارند (شکل ۱۱). نسبت عدد مقاومت نهایی در این حالت به اعداد مقاومت اولیه که حدود ۵ و ۶ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع برای خاکهای آزمایشی می‌باشند، حدود ۵۵٪ بوده و نشانه دوام خوب مقاومتهای ایجاد شده نسبت به تحمل شرایط نامطلوب جوی در طول زمان می‌باشد.

درنهایت با درنظرگرفتن هزینه‌های اجرایی، مقدارمقاومت ایجاد شده در ابتدای عمل تثبیت و دوام مقاومت موجود پس از آزمایشات ذوب و یخ، درصد پوزولان ۷/۵٪ می‌تواند گزینه پیشنهادی مناسبی برای تثبت این نوع خاکها باشد که شرایط مطلوبی از جهت انجام پروژه‌های راهسازی و ساخت ابنیه فنی دراین گونه محیطها فراهم می‌کند.

لازم به ذکر است تعدادی از نمونه‌های ساخته شده با ۲/۵ و ۵ درصد پوزولان قبل از رسیدن به مرحله آزمایش مقاومت فشاری تک محوری و در حین انجام سیکل‌های متناوب ذوب و یخ، ترک خورده و از بین رفتند. شکلهای ۱۵ و ۱۶، بعضی از نمونه های ترک خورده و پکیده شده را نشان می دهد.

شکل ۱۵- نمونه ترک خورده حین انجام سیکلهای ذوب و یخ (با ۵٪ پوزولان).

شکل ۱۵- نمونه پکیده شده حین انجام سیکلهای ذوب و یخ (با ۲/۵٪ پوزولان).

۷- نتیجه گیری

با توجه به نتایج آزمایشات و همچنین بحث‌های مطرح شده در بخش های مختلف می‌توان نتایج این تحقیق رابصورت زیرجمع بندی کرد.

۱- درصد پوزولان مصرفی نقش موثری در تثبیت این نوع بسترها دارد. به طوری که ایجاد جهش مقاومت در این نوع خاکها (شکل گیری روند افزایش مقاومت مناسب) از پوزولان مصرفی ۵٪ به بعدشروع می‌شود(شکلهای ۷ و ۸).

۲- تعیین درصد پوزولان مناسب برای تثبیت این نوع خاکها با در نظر گرفتن نتایج آزمایشات مقاومت و دوام، انجام شده در بندهای ۴ و ۵ این تحقیق، برای پوزولان تراس مصرفی ۷/۵٪ وزنی خاک، پیشنهاد می شود.

۳- با توجه به ایجاد مقاومت و دوام مناسب در این نوع خاکها بااستفاده ازموادافزودنی مورد نظرمی‌توان به اهداف زیر دست یافت:

– کاهش قابل توجه مصرف مصالح اساس و زیر اساس در ساخت روسازی راه.

– کاهش هزینه‌های ساخت مسیر با توجه به ارزان بودن و در دسترس بودن پوزولان تراس و افزایش مقاومت بستر با مصرف این ماده افزودنی و درنهایت بهینه شدن مصرف مصالح روسازی.

منابع و مراجع

۱. ASTM D 421,(1993) Standard Practice for Dry Preparation of Soil Sample for Particle – Size Analysis and Determination of Soil Contants. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, Vol. 4.08.

۲. ASTM D 4972,(1993) Standard Test Method for pH of Soils. American Society for Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, Vol. 4.08.

۳. ASTM D 1557,(1993) Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft^3 [27,000 kN-m/m3)]. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, Vol. 4.08, pages 227-234.

۴- عمادی، ج.، بررسی دوام و نحوه تغییر مقاومت بسترهای ماسه‌ای تثبیت شده با پوزولانهای مختلف، پروژه پژوهشی، دانشگاه آزاد اسلامی- واحد اردستان، ۱۳۸۵

۵. ASTM D 2166,(1993) Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, Vol. 4.08.

۶. Tensar, Subgrade Improvement: Construction Over Soft Soils , Tensar Earth Tecnologies Inc., WWW.TENSARCORP.com ,2000.

۷. Tensar, Technical Note BR10: Chemical and Mecanical Stabilization of Subgrades and Flexible Pavement Sections, Tensar Earth Tecnologies Inc., WWW.TENSARCORP.com, July 1998.

Study Of Freezing And Thawing Cycles Influence On Durability Of Stablized Eolian Sand Sediment

Jalil Emadi
Islamic Azad University,Ardastan Branch

Mohsen Salehi
Ms In Road And Transportation Engineering

Abstract:

With considerable dispersion in many areas of the world, sand sediments are among the most important sediments in deserted environments. A stabilization method for this type of beds is making use of the setting property of natural pozzolana in the vicinity of lime. These soils have little strength, both in natural humidity as well as in full saturation conditions. Their dispersion in many areas of the world is another important point about them which adds to the significance of this study. In this study an experimental investigation has been carried out on two types of soils (taken from two different beds), and the results have been presented in strength gain diagrams, in different curing periods , and the changes that occurred when different percentages of pozzolanas were used are shown. Referring to these diagrams and results of durability tests with different freeze-thaw cycles, a percentage of pozzolana has been recommended that, from durability point of view in this type of beds, that makes it possible to construct the required routes on these beds.

Keywords:

Stabilization, durability, freeze-thaw cycles