تأثیر افزودن پامیس، پرلیت و میکروسیلیس بر ویژگی‌های مکانیکی خاک‌های گچی

جهانگیر عابدی کوپایی*، سمانه سلطانیان، مهدی قیصری[1]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۹/۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۲/۲۲

چکیده

عدم شناخت ویژگی‌ها و مسائل ژئوتکنیکی خاک بستر می‌تواند مشکلات عدیده‌ای در رابطه با بهره‌برداری و نگهداری شبکه‌های آبیاری و زهکشی را در پی داشته باشد. به‌طورکلی تمام خاک‌های نامتعارف از جمله خاک گچی می‌توانند مشکلاتی را در کانال‌های آبیاری ایجاد نمایند. پژوهش‌های کمی در مورد نحوه تثبیت این خاک‌ها در زیرسازی سازه‌های آبی و به ویژه کانال‌های آبیاری انجام شده است. دراین تحقیق در راستای تثبیت و اصلاح خاک مذکور مواد معدنی پرلیت و پامیس با درصدهای متفاوت (۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪)، میکروسیلیس با درصدهای متفاوت (۱٪، ۵٪ و ۱۰٪) با آن مخلوط گردیدند و ویژگی‌های مکانیکی خاک از جمله پارامترهای برشی، ظرفیت باربری، مشخصات تراکمی و حدود اتربرگ درنمونه‌های تهیه شده، بررسی شد. نتایج استخراج شده در قالب طرح کاملاً تصادفی مورد تجزیه وتحلیل آماری قرار گرفت و مقایسه میانگین‌های آنها در سطح آماری ۱ درصد ($P<0/01$) انجام پذیرفت. نتایج نشان داد میکروسیلیس بهترین تأثیر را روی پارامترهای برشی، باربری، تراکمی و حدود اتربرگ خاک گچی دارد و باعث بهبود این پارامترها در خاک گردید. پامیس نیز در خاک گچی خواص برشی، باربری، مشخصات تراکمی را بهبود داد. ولی پرلیت باعث تضعیف ویژگی‌های برشی، باربری ومشخصات تراکمی خاک گچی گردید.

واژه‌های کلیدی: خاک گچی، میکروسیلیس، پامیس، پرلیت

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکیkoupai@cc.iut.ac.ir

Archive of SID

www.SID.ir

مقدمه

پژوهش بیادگیو نشان می‌دهد که خاک‌های گچی در بیشتر کشورهای دارای اقلیم خشک و نیمه خشک با بارندگی سالیانه کمتر از ۴۰۰ میلی‌متر گسترش یافته‌اند و این درحالی است که حدود ۳۶ درصد از خشکی های سطح زمین را مناطق با آب وهوای خشک تشکیل می‌دهد (۱۲). این خاک‌ها مناطق وسیعی از قاره آسیا، از جمله ایران، سوریه، عراق، چین، ازبکستان و قزاقستان را به مقدار قابل ملاحظه اشغال نمودند. تنها درمنطقه اصفهان براساس مطالعات خاک‌شناسی و گزارش های ارزیابی، نزدیک به یک میلیون هکتار خاک گچی وجود دارد (۳). علیرغم وجود سطح وسیعی از اراضی گچی در ایران از جمله استان اصفهان، متأسفانه تحقیقات فنی و دقیق زیادی در زمینه مشخصات ژئوتکنیکی و مسائل و مشکلات ناشی از وجود گچ در رابطه با سازه‌های آبیاری در ایران صورت نگرفته است. بر اساس مجموع نتایج تحقیقات موجود، وجود گچ در خاک تا حدود ۳ درصد به هیچ وجه مخاطره انگیز نبوده وحتی در کانال های با ابعاد کوچک این مقدار تا چند درصد بیشتر (۵ تا ۷ درصد) هم قابل قبول است (۴). به‌طورکلی خاک‌های گچی بنا بر اهمیت رفتاری و مشخصات فنی خود ممکن است طی مراحل ساخت یا در حین بهره‌برداری از سازه‌های آبی به‌ویژه کانال‌های آبیاری مسائل و مشکلات عدیده‌ای را ایجاد نماید که ممکن است به‌صورت موضعی یا کلی به‌عنوان شکست یا تخریب سازه تلقی گردیده و موجب خسارات مالی فراوان گردد. در مراجع موجود موارد متعددی از تخریب کانال های آبیاری احداث شده در خاک‌های گچی ذکر گردیده که در زیر به برخی از آن موارد اشاره می گردد:

تخریب کانال سلهابیه درحوزه فرات سبب شد تا بعد از سال۱۹۲۷ در طول قریب به ۴۰ سال در برخورد با هر پروژه‌ای که در مناطق گچی واقع شده بود، یا اقدام به تعویض محل طرح گردید و یا این‌که از اجرای پروژه خودداری شد (۵). در ایران نیز، به‌علت مسائل به‌وجود آمده در پوشش بتنی کانال‌های بنا شده روی خاک‌های گچی (پروژه آبیاری و زهکشی نکو آباد و آبشار در اصفهان) بررسی ها وتحقیقات پراکنده‌ای به‌عمل آمده است. درهمین ارتباط، شرکت مهندسین مشاور سوگراه مأمور بررسی علل تخریب پوشش بتنی کانال‌های این واحد شد که نتایج آن را طی گزارشی درسال ۱۳۵۳منتشر ساخت (۱۰). مطالعات اراکیلیان (۱۱) خصوصیات فیزیکی وشیمیایی خاک‌های گچی را مورد بررسی قرار داد. مطالعات وی نشان داد که این خاک‌ها دارای وزن مخصوص کمتری نسبت به خاک‌های مشابه بوده و طی فرآیند آبشویی باعث بالا رفتن نسبت تخلخل و به تبع آن نشست می‌شود. درمورد تعیین درصد رطوبت این‌گونه خاک‌ها نیز نشان داد که اعمال درجه حرارت $105^{\circ}C$ که به‌عنوان معیار کارهای مکانیک خاک است، دراین گونه خاک‌ها باعث ایجاد خطای فاحش می‌شود (۱۱).

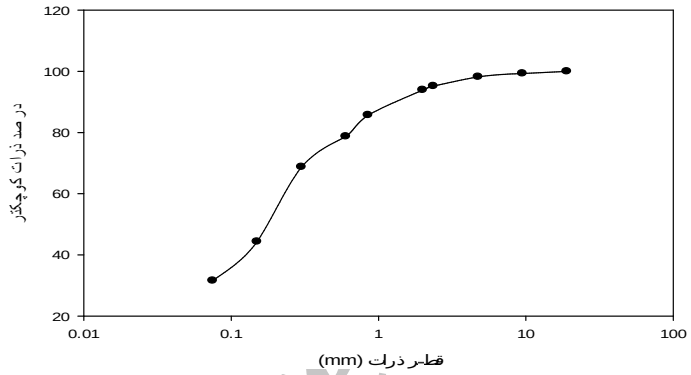
روزاکی وکوتاه (۱۴) تأثیر آبشویی بلندمدت بر پارامترهای مقاومت برشی یک خاک رسی گچی را بررسی کرده و نتیجه‌گیری نمودند که با افزایش مدت زمان آبشویی گچ، پارامترهای مقاومت برشی کاهش چشمگیری پیدا می کنند (۱۴). روزاکی و همکاران (۱۵) آزمایش باربری را روی خاک رسی که حاوی ۳۵٪ گچ بود انجام داده و نمونه‌ها را مدت زمان‌های مختلف آبشویی نمودند، آنها نتیجه‌گیری کردند که ظرفیت باربری نمونه‌ها کاهش یافته است (۱۵).

منصوری کیا وهمکاران (۹) اختلاط خاک‌های گچی با روغن سوخته و آهک سیمان و سولفات آلومینیوم (زاج) را مورد بررسی قرار دادند که به نتایج زیر دست یافتند: آهک تأثیر مهمی بر تغییر شاخص خمیرایی (PI) داشته ولی سایر مصالح تأثیر مهمی بر تعیین PI نداشته‌اند. در کل می‌توان نتیجه گرفت که افزودن حدود دو درصد آهک سبب بهبود مقاومت برشی خاک شده است. درحالی‌که برای همان بهبود توسط سیمان به حدود پنج درصد سیمان تیپ یک نیاز خواهیم داشت. نهایتاً افزودن ۱ تا ۳ درصد آهک همراه با افزودن حداکثر ۷ درصد روغن سوخته خودرو به خاک گچ دار سبب بهبود خواص آن جهت ساخت کانال‌های آبیاری شده است (۹). تعداد سازه‌هایی که به‌دلیل وجود گچ در خاک در سراسر دنیا تخریب شده و یا

www.SID.ir

جدول ۱. مشخصات خاک

مشخصات	مقدار	استاندارد
نوع خاک	A-2-4	(۱۶) AASHTO
طبقه‌بندی	SM	(۱۶) ASTM-D2487
جنس ذرات	ماسه لای دار	
D_{50} (قطرذره‌ای که ۵۰ درصد ذرات از آن کوچک‌ترند)	۰/۱۷ میلی‌متر	
حد روانی	٪۲۵/۶۷	(۱۶) ASTM D423-66
حدخمیری	٪۲۲/۸۱	(۱۶) ASTM D424-59



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک گچی

خسارت مالی و بعضاً جانی قابل توجهی را بار آوردند، بسیار می‌باشند. با توجه به وسعت وگسترش این اراضی در ایران و توسعه روز افزون جمعیت و لزوم ساخت ابنیه و تأسیسات آبی مختلف برروی این نوع خاک، تثبیت و تسلیح آن وجلوگیری از ایجاد خسارت بر سازه‌های آبی از جمله کانال‌های آبیاری به‌عنوان یکی از مسائل مهمی که در مقابل مهندسین طراح قرار داد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این تحقیق تلاش بر این است که با اختلاط مواد معدنی (میکروسیلیس، پامیس، پرلیت) با خاک گچی باعث بهبود خواص مکانیکی آن از جمله افزایش مقاومت برشی، ظرفیت باربری، مشخصات تراکمی و چسبندگی خاک شده تا بتوان در صورت ناگزیر بودن اجرای طرح‌های عمرانی به‌خصوص پروژه‌های آبیاری و زهکشی در اراضی گچی با تثبیت و تسلیح نمودن آن با مواد پیشنهادی این طرح خسارت وارده به سازه‌ها را به‌دلیل وجود گچ، حذف یا کاهش داد.

مواد و روش‌ها

تهیه نمونه‌ها

در این پژوهش از خاک گچی موجود در منطقه (اطراف سگزی، شمال شرقی اصفهان) استفاده شده است. منحنی دانه‌بندی آن (ASTM D422-87) (۱۶) در شکل (۱) ومشخصات خاک نیز در جدول شماره ۱ ارائه گردیده است. مشخصات تیمارها، همراه با نام‌گذاری آنها در جدول ۲ درج شده است. کلیه آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شد.

برای تعیین میزان گچ خاک از روش کاهش آب تبلور

www.SID.ir

جدول۲. مشخصات تیمارها، همراه با نام‌گذاری آنها

تیمارها	نام‌گذاری تیمارها	درصد وزنی مواد افزودنی
خاک گچی	G	–
خاک گچی+میکروسیلیس	GM_1	۱
	GM_2	۵
	GM_3	۱۰
خاک گچی+پامیس	GU_1	۵
	GU_2	۱۰
	GU_3	۱۵
خاک گچی+پرلیت	GE_1	۵
	GE_2	۱۰
	GE_3	۱۵

Gypsiferous (G), Micro Silica (M), Pumice (U), Perlite (E)

استفاده شد (۱۳). میزان گچ مورد تحقیق برابر۲۳٪ محاسبه گردید. خاک با مشخصات ذکر شده را با سه مواد افزودنی که عبارتند از میکروسیلیس، پامیس، پرلیت را با درصدهای مختلف (۱٪، ۵٪ و ۱۰٪) به‌طور جداگانه مخلوط کرده و آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم استاندارد، باربری کالیفرنیا (CBR) و برش مستقیم انجام شد و تأثیر افزودنی‌های ذکر شده مورد بررسی قرار گرفت.

میکروسیلیس

میکروسیلیس از محصولات فرعی کارخانه در تولیدهای آلیاژ فروسیلیسیم می‌باشد و در ایران به فراوانی تولید می‌شود. این ماده با داشتن بیش از ۹۰ درصد سیلیس با حالت غیرکریستالی و به‌شکل ذرات بی‌نهایت ریز شدیداً پوزولانی است و برای استفاده به‌عنوان یک ماده سیمانی در بتن بسیار مناسب است. میکروسیلیس عمدتاً، ذرات شیشه ای گرد مانند با سطح صاف می‌باشد که از نظر رنگ، بیشترین دامنه از سفید تا خاکستری تیره می‌باشد و سطح ویژه ذرات آن تقریباً kg/m^2 ۲۰۰۰۰ می‌باشد. در این تحقیق از اندازه ۱۵۰ میکرون آن استفاده شد.

پامیس

پامیس سنگ آتشفشانی غنی از سیلیس است که در اثر سرد شدن سریع لاوا در سطح زمین تشکیل می‌شود که به‌دلیل به سرعت سرد شدن و خروج گازها از آن موجب حفره‌دار شدن آن می‌شود این حفرات مدور یا بیضی هستند و ویسکوزیته بسیار کمی دارد که باعث شناور بودن آن در آب می‌شود. از خصوصیات پامیس دارا بودن خاصیت تبادل کاتیونی آن می‌باشد.

پرلیت

پرلیت ماده ای معدنی بر پایه شیشه از سنگ آتشفشانی (با ژنز ماگمائی) و با ترکیب ریولیتی است که در محیط آبی و با انجماد سریع ماگمای اسیدی (گدازه آتشفشان) به‌صورت آمورف (غیر کریستالی) تشکیل شده است و نزدیک به ۷۵ درصد آن اکسید سیلیسیم است. به‌دلیل وجود ۲ تا ۶ درصد آب ترکیبی در آن با حرارت دادن سریع (شوک حرارتی) در دمای ۸۷۰ –۱۱۰۰ $^{\circ}C$ افزایش حجم شدیدی معادل ۴ تا ۲۰ برابر بر اساس نوع و ترکیب شیمیائی و شرایط انبساط خواهد داشت و

www.SID.ir

ماده پفکی با دانسیته حدود kg/m^3 ۱۰۰-۵۰ ایجاد خواهد شد. پرلیت منبسط شده به‌دلیل دارا بودن ضریب هدایت حرارتی پائین و خاصیت جذب صوت نیز دارای کاربردهای ویژه ای می‌باشد پرلیت یک سیلیکات طبیعی می‌باشد لذا خنثی و دارای PH برابر با ۷ است.

آزمایشات انجام شده

حدود اتربرگ

دراین پژوهش آزمایش حد روانی طبق استاندارد ASTM D423-66 (۱۶) و آزمایش حد خمیری طبق استاندارد ASTM D424-59 (۱۶) روی نمونه‌ها صورت گرفت با این تفاوت که به‌جای خشک کردن نمونه‌ها در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در دمای ۶۰ درجه خشک کرد، چون دمای ۱۰۵ درجه باعث از دست رفتن آب بلورین ذرات گچ شده ودر تعیین رطوبت خاک خطا ایجاد می‌کند. به‌جای آن با استفاده از رابطه زیر به رطوبت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تبدیل گردیده است (۱۱).

$$W_{105}=1/007\ W_{60}+0/007 \quad [1]$$

W_{105}: رطوبت خاک که در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شده

W_{60}: رطوبت خاک که در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شده

تراکم استاندارد

آزمایش تراکم روی نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM D698-70 (۱۶) صورت گرفته تا بتوان تأثیر مواد افزودنی را روی رطوبت بهینه و حداکثر وزن واحد حجم خشک خاک معین کرد. به‌علاوه از آنجا که سایر آزمایش‌های ظرفیت باربری(CBR) و برش مستقیم نیازمند آماده‌سازی نمونه خاک با مقدار رطوبت بهینه و حداکثر وزن واحد حجم خاک می‌باشند، بنابراین انجام آزمایش تراکم ضروری است. قابل ذکر است که در تمام آزمایشات نمونه‌ها طبق آنچه در بالا ذکر گردیده در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردیده و باتوجه به فرمول ۱ به رطوبت دمای ۱۰۵ درجه تبدیل گردیده است.

ظرفیت باربری کالیفرنیا (CBR)

آزمایشCBR طبق استاندارد ASTM D1883-73 (۱۶) صورت گرفته است و تمامی نمونه‌ها در رطوبت بهینه آماده گردیده‌اند.

برش مستقیم

آزمایش برش مستقیم نیز طبق استانداردASTM D2080-72 (۱۶) انجام شده وسربارهای انتخاب شده برابر ۰/۵، ۱و ۱/۵ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع می‌باشد. تمامی نمونه‌ها در رطوبت بهینه آماده گردیده وآزمایش به حالت خشک روی آنها انجام گرفت.

نتایج و بحث

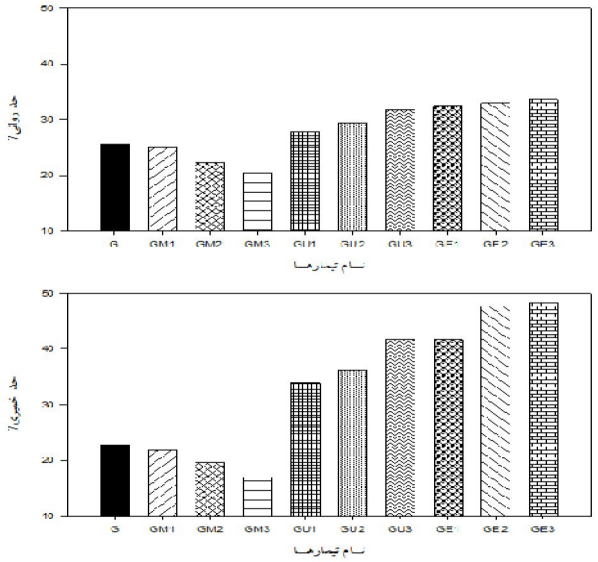
در این قسمت ابتدا نمودارهای مربوط به آزمایشات انجام شده ترسیم گردیده است و سپس اطلاعات موردنیاز را از آنها استخراج کرده و به تحلیل آماری، کمی وکیفی داده‌ها پرداخته شده است.

آزمایش حدوداتربرگ

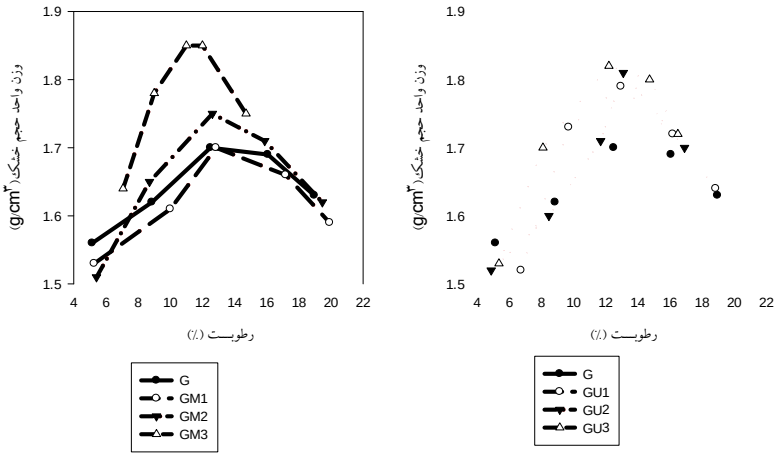
براساس نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام شده حد روانی خاک گچی مورد تحقیق۶۷ /۲۵٪ و حد خمیری آن۲۲/۸۱٪ در نتیجه شاخص خمیرایی (PI) آن در حدود ۲/۸۶ به‌دست آمده است. همان‌طورکه در نمودارهای ترسیم شده در شکل ۲ مشخص شده است، افزودنی‌های مورد تحقیق شامل پرلیت و پامیس به‌جز میکروسیلیس، باعث افزایش حد روانی وخمیری خاک گچی شده‌اند. اما میکروسیلیس باعث کاهش این دو پارامتر در خاک شد. تأثیر این مواد بر حدخمیری بیش از حد روانی خاک بوده است به‌طوری‌که باعث شده حد خمیری خاک بیش از حد روانی آن شده در نتیجه شاخص

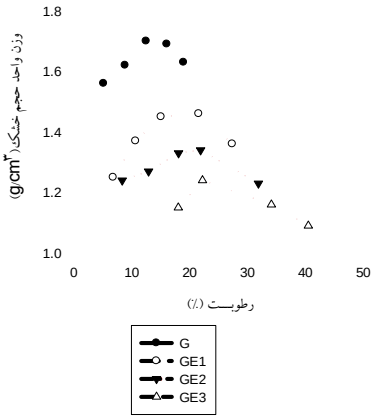
Archive of SID

www.SID.ir



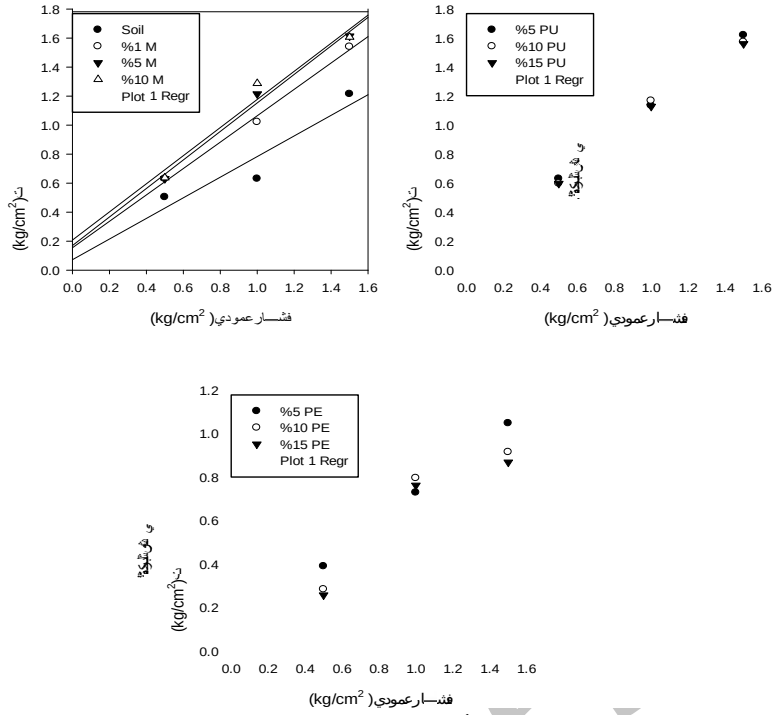
شکل۲. حد روانی وخمیری تیمارهای مختلف





شکل۳. تغییرات وزن واحد حجم خشک خاک تحت تأثیر درصد رطوبت در تیمارهای مختلف

www.SID.ir



شکل۴. روند تغیرات تنش برشی تحت تأثیر فشار عمودی در لحظه شکست در تیمارهای مختلف

خمیری خاک کمتر از صفر شود و به اصطلاح خاک فاقد شاخص خمیرایی شود.

آزمایش تراکم استاندارد

با انجام آزمایش تراکم پراکتور استاندارد برروی تیمارهای مختلف منحنی تراکم به ازای هریک از تیمارها ترسیم شده و با استفاده از این منحنی‌ها حداکثر وزن واحد حجم خشک و رطوبت بهینه به‌دست آمد. همان‌طورکه از نمودارهای ترسیم شده در شکل ۳ مشخص شده است. میکروسیلیس و پامیس باعث افزایش وزن واحد حجم خشک خاک شده‌اند و میکروسیلیس باعث کاهش رطوبت بهینه خاک ولی پامیس تأثیر مشخصی روی آن نداشته است. همان‌طورکه از نمودارها مشخص است پرلیت شدیداً باعث افزایش رطوبت بهینه وکاهش وزن واحد حجم خشک خاک گردیده است.

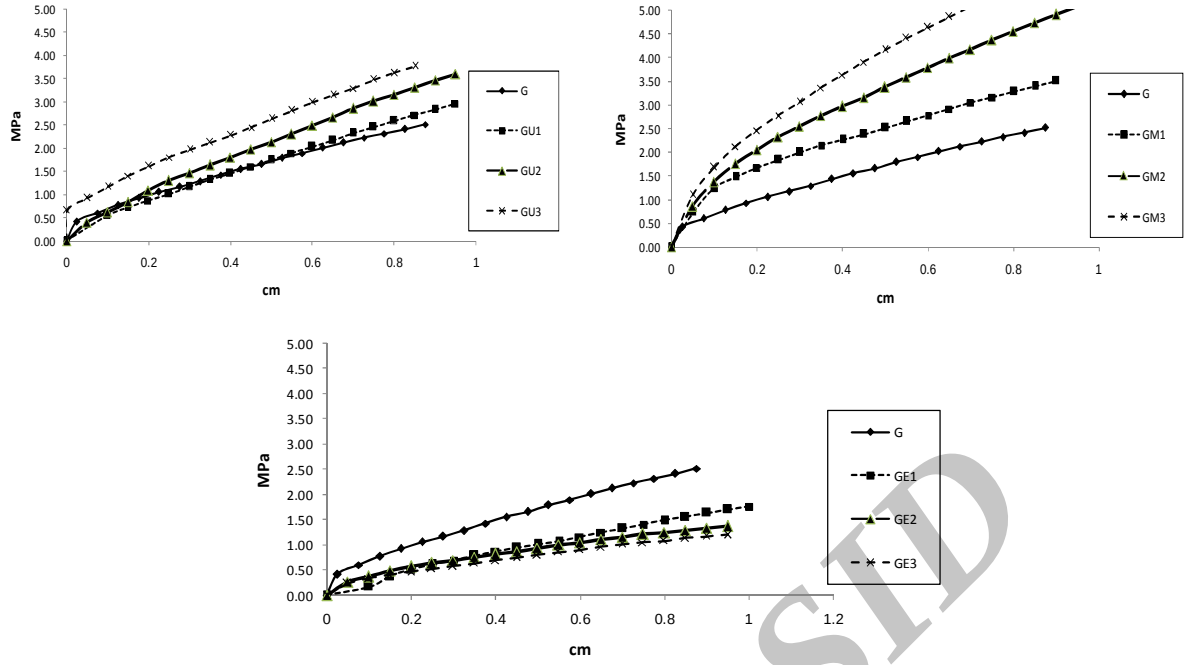
آزمایش برش مستقیم

با انجام آزمایش برش مستقیم تحت سه سر بار ذکر شده برای تمامی تیمارها نمودار تنش برشی در برابر تنش عمودی تهیه گردید تا به پارامترهای مقاومت برشی که شامل زاویه اصطکاک داخلی که از زاویه بین بهترین خط ترسیم شده از سه نقطه حاصل از سر بارهای وارده با امتداد افق و چسبندگی که از مقدار تنش برشی در محل تلاقی خط مذکور با محور عرض‌ها حاصل می‌شود دست پیدا کنیم. نمودارهای حاصل از آزمایش برش مستقیم در شکل شماره ۴ ترسیم گردیده است. با توجه به نمودارهای ترسیم شده ملاحظه می‌گردد که تنها نمودارهای مربوط به میکروسیلیس و پامیس دارای عرض از مبدأ هستند، که نشان دهنده این مطلب است که خاک دارای چسبندگی شده است. میکروسیلیس و پامیس نیز باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک شده‌اند. اما پرلیت تأثیر عکس داشته و زاویه اصطکاک داخلی خاک را کاهش داده است.

آزمایش ظرفیت باربری (CBR)

نتایج آزمایش نسبت باربری به‌صورت منحنی‌هایی ترسیم شده است که در آن مقدار نفوذ در محور افقی وتنش در محور قائم

www.SID.ir



شکل۵. روند تغییرات تنش به ازای افزایش نفوذ در تیمارهای مختلف در رطوبت بهینه

جدول۳. جدول تجزیه واریانس پارامترهای اندازه گیری شده

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات صفات اندازه گیری شده					
		C	ø	CBR	W	γ_d	LL	PL
تیمار	۹	۰/۰۱۳***	۹۸/۸۴۲***	۰/۰۳۴***	۶۳/۵۴۱***	۰/۱۴۳***	۶۴/۸۷۰***	۴۲۲/۷۱۵***
خطا	۲۰	۰/۰۰۰	۰/۵۷۸	۰/۰۰۰	۰/۳۳۷	۰/۰۰۱	۰/۸۷۰	۰/۸۸۰
CV		۲۲/۰۹	۱/۹۲	۱۱/۱۲	۳/۸۰	۲/۵۶	۳/۳۲	۲/۸۴

***معنی‌دار شدن در سطح ۰/۰۱ درصد می‌باشد

قراردارند. نسبت باربری ازمقدار تنش مورد نیاز برای نفوذ ۰/۱ اینچ نسبت به تنش لازم برای فرو کردن پیستون به همان اندازه در خاک استاندارد به‌دست می‌آید. همان‌طورکه از نمودارهای ترسیم شده در شکل شماره ۵ مشخص است در نفوذ های یکسان افزودن هر چه بیشتر درصد مواد میکروسیلیس و پامیس به خاک گچی باعث افزایش تنش در نمونه‌ها گردیده است. ولی افزودن هر چه بیشتر پرلیت باعث کاهش آن در نمونه‌ها گردیده است. در نتیجه میکروسیلیس و پامیس باعث افزایش ظرفیت باربری خاک شده است ولی پرلیت باعث کاهش آن شده است.

نتایج حاصل از آزمایشات واطلاعات استخراج شده از نمودارهای ترسیم شده در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار توسط نرم‌افزار SAS مورد تجزیه وتحلیل آماری قرار گرفت و مقایسه میانگین‌های آنها در سطح آماری ۱ درصد به‌وسیله آزمون دانکن انجام پذیرفت که نتایج آن در جدول شماره ۳ و ۴ ارائه گردیده است.

چسبندگی خاک(C)

همان‌طورکه در جدول شماره ۴ و نمودارهای ترسیم شده در شکل ۴ مشخص شد. بیشترین چسبندگی مربوط به تیمار GM_3

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۴. جدول مقایسه میانگین پارامترهای اندازه‌گیری شده در تیمارهای مختلف

تیمار	C	ø	CBR	W	γ_d	LL	PL
G	۰/۰۷^{c}	۳۵/۳۸^{c}	۰/۱۷^{e}	۱۲/۵۰^{b}	۱/۷۰^{c}	۲۵/۶۷^{d}	۲۲/۸۱^{e}
GM_1	۰/۱۵^{b}	۴۲/۲۸^{b}	۰/۲۷^{c}	۱۲/۸۵^{b}	۱/۷۰^{c}	۲۴/۹۹^{d}	۲۱/۸۶^{e}
GM_2	۰/۱۷^{b}	۴۴/۴۹^{a}	۰/۳۴^{b}	۱۲/۶۲^{b}	۱/۷۵^{bc}	۲۲/۳۶^{e}	۱۹/۶۴^{f}
GM_3	۰/۲۲^{a}	۴۴/۱۰^{a}	۰/۴۰^{a}	۱۱/۰۰^{c}	۱/۸۵^{a}	۲۰/۴۷^{f}	۱۶/۹۴^{g}
GU_1	۰/۱۳^{b}	۴۴/۶۸^{a}	۰/۱۷^{e}	۱۲/۹۵^{b}	۱/۷۹^{ab}	۲۷/۸۹^{c}	۳۳/۸۶^{d}
GU_2	۰/۱۳^{b}	۴۴/۲۹^{a}	۰/۲۱^{d}	۱۳/۱۰^{b}	۱/۸۱^{ab}	۲۹/۴۴^{c}	۳۶/۱۴^{c}
GU_3	۰/۱۳^{b}	۴۳/۹۰^{a}	۰/۲۴^{cd}	۱۲/۲۰^{b}	۱//۸۲^{ab}	۳۱/۷۲^{b}	۴۱/۶۰^{b}
GE_1	۰/۰۶^{c}	۳۳/۳۰^{d}	۰/۱۰^{f}	۲۱/۶۰^{a}	۱/۴۶^{d}	۳۲/۵۳^{ab}	۴۱/۵۹^{b}
GE_2	۰/۰۳^{cd}	۳۲/۲۳^{de}	۰/۰۹^{f}	۲۱/۹۰^{a}	۱/۳۴^{e}	۳۲/۹۴^{ab}	۴۷/۵۷^{a}
GE_3	۰/۰۱^{d}	۳۱/۴۱^{e}	۰/۰۸^{f}	۲۲/۲۲^{a}	۱/۲۴^{f}	۳۳/۵۷^{a}	۴۸/۲۷^{a}
LSD	۰/۰۴۲	۱/۲۹۵	۰/۰۳۹	۰/۹۸۸	۰/۰۷۱	۱/۵۹۲	۱/۵۹۷

میانگین‌هایی که در هر ردیف دارای حداقل یک حرف مشترک هستند در سطح احتمال ۱ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

بود که بیشترین درصد میکروسیلیس را دارا بود. چسبندگی در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس نسبت به خاک گچی تفاوت معنی‌داری پیدا کرد و سبب افزایش چسبندگی خاک شد به‌طوری‌که تیمار GM_3 باعث افزایش ۳/۱۴ برابری چسبندگی خاک گردید. پامیس نیز باعث افزایش معنی‌دار ۱/۸۵ برابری چسبندگی خاک شد، البته تغییرات در بین درصدهای متفاوت افزودن پامیس معنی‌دار نبوده است. پرلیت نیز تغییرات معنی‌داری در چسبندگی خاک ایجاد نکرد. باقرپور(۲) نیزگزارش کرده است که مقاومت برشی مخلوط‌های آهکی وسیمانی با افزودن میکروسیلیکا بالا می‌رود (۲).

زاویه اصطکاک داخلی خاک به درجه (ø)

همان‌طورکه در جدول شماره ۴ و نمودارهای ترسیم شده در شکل ۴ مشخص شد. زاویه اصطکاک داخلی با افزودن میکروسیلیس و پامیس افزایش معنی‌داری نسبت به خاک گچی پیدا کردکه این افزایش به‌ترتیب در حدود ۲۵و۲۶ درصد بود. ولی تفاوت معنی‌دار و محسوسی بین زاویه اصطکاک داخلی تیمارهای آنها وجود نداشت. پرلیت کاهش معنی‌داری در زاویه اصطکاک خاک ایجاد کرد که این کاهش در حدود ۱۱٪ می‌باشد. این نتایج با نتایجی که قبلاً توسط محققین مختلف ارائه شده تطابق دارد به‌طوری‌که مرادی (۸) گزارش کرده است که با افزایش میکروسیلیس، pH خاک افزایش یافته و سرعت واکنش پوزولانی زیاد می‌شود به‌همین‌دلیل سبب افزایش مقاومت خاک می‌گردد (۸).

ظرفیت باربری خاک به درصد (CBR)

همان‌طورکه در جدول شماره ۴ و نمودارهای ترسیم شده در شکل ۵ مشخص شد، بیشترین ظرفیت باربری مربوط به تیمار GM_3 بود که بالاترین درصد میکروسیلیس را دارا بود و ظرفیت باربری خاک گچی را ۲/۳۵ برابر کرد. افزایش درصد پامیس نیز ظرفیت باربری خاک را افزایش داد به‌صورتی که تیمار GU_3 ظرفیت باربری آن نسبت به تیمارG ۱/۴۱ برابر افزایش یافت.

Archive of SID

www.SID.ir

پرلیت باعث کاهش معنی‌دار ظرفیت باربری در خاک شد که این کاهش در تیمار GE_3 در حدود ۴۸ درصد بود. با مقایسه ظرفیت باربری های به‌دست آمده از تیمارهای مختلف با جداول موجود در استانداردهای طبقه‌بندی خاک جهت زیرسازی جاده‌ها (۱)، به این نتیجه می رسیم که خاک مورد تحقیق در محدوده خاک‌های متوسط قرار دارد که با افزودن پامیس ومیکروسیلیس ظرفیت باربری خاک را افزایش داده وآن را در محدوده خاک‌های خوب قرار می دهند. طباطبایی (۶) و مرادی(۸) نیز اظهار داشته‌اند که با افزایش میکروسیلیس، ظرفیت باربری خاک افزایش می‌یابد (۶ و۸).

رطوبت بهینه خاک (W)

رطوبت بهینه‌ها از نمودارهای شکل ۳ استخراج شد و تحلیل آماری روی آن صورت گرفت که نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که افزودن میکروسیلیس به خاک تفاوت معنی‌داری در رطوبت بهینه آن ایجاد نکرد به‌جز تیمار GM_3 که باعث کاهش ۱۲ درصدی آن گردید. افزودن پامیس نیز تفاوت معنی‌داری در رطوبت بهینه خاک ایجاد نکرد. ولی پرلیت باعث افزایش معنی‌دار رطوبت بهینه در خاک شد که این افزایش در تیمار GE_3 حدود ۷۷ درصد می‌باشد.

بیشترین وزن واحد حجم خشک ($¥_d$)

بیشترین وزن واحد حجم خشک از نمودارهای شکل ۳ استخراج شد وتحلیل آماری روی آن صورت گرفت. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که افزودن میکروسیلیس به خاک تفاوت معنی‌داری در بیشترین وزن واحد حجم خشک آن ایجاد نکرد به‌جز تیمارGM_3 که باعث افزایش ۸/۸ درصدی آن گردید. در تیمارهای حاوی پامیس نیز بیشترین وزن واحد حجم خشک مربوط به تیمار GU_3بود که نسبت به تیمارG، ۷ درصد افزایش داشت. پرلیت نیز باعث کاهش معنی‌دار بیشترین وزن واحد حجم خشک گردید که بیشترین کاهش مربوط به تیمار GE_3 بودکه برابر ۲۷ درصد می‌باشد.

حد روانی به درصد (LL)

حد روانی خاک با افزودن میکروسیلیس کاهش معنی‌داری پیدا کرد که بیشترین کاهش مربوط به تیمار GM_3 بود که مقدار آن برابر ۲۰ درصد می‌باشد. افزودن پامیس و پرلیت به خاک نیز باعث افزایش معنی‌داری در حد روانی آن شده‌اند که بیشترین مقدار آن مربوط به تیمارهای GU_3 و GE_3 بود که به‌ترتیب برابر ۲۳ و۳۰ درصد می‌باشد. مرادی(۱۳۹۱) نیز اظهار کرده است که با افزایش میکروسیلیس و آهک، حد روانی و نشانه خمیری خاک کاهش می‌یابد و موجب بهبود خصوصیات خمیری خاک می‌گردد. علت کاهش پلاستیسیته خاک پس از اختلاط با آهک و میکروسیلیس، تبادل کاتیون‌ها و درشت دانه شدن بافت آن می‌باشد(۸).

حد خمیرایی به درصد (PL)

حد خمیرایی خاک با افزودن میکروسیلیس کاهش معنی‌داری پیدا کرد که بیشترین کاهش مربوط به تیمار GM_3 بود که مقدار آن برابر ۲۵ درصد می‌باشد. افزودن پامیس و پرلیت به خاک نیز باعث افزایش معنی‌داری در حد روانی آن شده اند که بیشترین مقدار آن مربوط به تیمارهای GU_3 و GE_3 بود که به‌ترتیب برابر ۸۰ و۱۰۰ درصد می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به مطالب گفته شده تیمار GM_3 بهترین نتایج را به‌دست آورد، به‌طوری‌که باعث افزایش ۳/۱۴ برابری چسبنگی، ۲/۳۵ برابری ظرفیت باربری، ۲۵ درصدی زاویه اصطکاک داخلی و ۸/۸ درصدی بیشترین وزن واحد حجم خشک و کاهش ۱۲ درصدی رطوبت بهینه، ۲۰ درصدی حد روانی و ۲۵ درصدی حد خمیری خاک گچی گردید به‌طورکلی می‌توان گفت میکروسیلیس باعث بهبود خواص برشی، باربری ومشخصات تراکمی خاک گچی گردید.

تیمار GU_3 نیز نتایج خوبی به‌دست آورد به‌طوری‌که باعث افزایش ۸۵ درصدی چسبنگی، ۲۶ درصدی زاویه اصطکاک

www.SID.ir

داخلی، ۷ درصدی بیشترین وزن واحد حجم خشک، ۱/۴۱ برابری ظرفیت باربری، ۲۵ درصدی حد روانی و ۸۰ درصدی حد خمیری خاک گچی گردید و تغییرات معنی‌داری از لحاظ آماری و مکانیکی خاک برروی رطوبت بهینه آن نداشت. به‌طورکلی می‌توان گفت پامیس باعث بهبود خواص برشی، باربری خاک گچی گردید. درصورتی‌که پرلیت باعث تضعیف خواص مکانیکی خاک گچی از لحاظ خواص برشی، باربری ومشخصات تراکمی گردید.

منابع مورد استفاده

۱.ابن جلال، ر و م. شفاعی. ۱۳۷۷. اصول نظری وعملی مکانیک خاک. انتشارات دانشگاه شهید چمران. ۴۲۷-۴۳۳ .

۲. باقر پور، ا و ع. جانعلی زاده چوب بستی. ۱۳۸۱. بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه به‌وسیله افزودن میکروسیلیکا به همراه آهک یا سیمان، مجموعه مقالات سومین همایش بین المللی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران ۲۰۰- ۲۰۵.

۳. تومانیان، ن. ۱۳۷۴. منشا گچ وچگونگی تشکیل و تکامل خاک‌های گچی منطقه شمال‌غربی استان اصفهان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۴. رحیمی، ح. ۱۳۷۹. مسائل احداث کانال‌های آبیاری در خاک‌های نا متعارف (مشکل آفرین)، مقاله کارگاه فنی- آموزشی ساخت کانال‌های آبیاری محدودیت‌ها و راه حل‌ها ۱۲۸-۱۶۳.

۵. الرفاعی، ن. ۱۳۵۵. مسائل ایجاد شده در شبکه آبیاری و زمین‌های گچ دار حوزه رودخانه فرات در سوریه، کمیته ملی آبیاری و زهکشی. نشریه شماره ۱۶.

۶. طباطبایی، ه و س. آقایی آرایی. ۱۳۸۷. مقایسه اثر آهک زنده و شکفته بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک اصلاح شده، فصلنامه علوم زمین.

۷. محمودی، ش. ۱۳۷۴. خصوصیات ومدیریت خاکهای گچی. مجموعه مقالات چهارمین کنگره علوم خاک ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۸. مرادی، غ.، م. علیزاده و م. پاشایان. ۱۳۹۱. تأثیر میکروسیلیس بر مقاومت وتورم‌پذیری خاک مارن تثبیت شده با آهک، مجموعه مقالات نهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران.

۹. منصوری کیا، م.، ح. کیامنش و ب. شاهرخ. ۱۳۷۹. ساخت کانال‌های آبیاری در خاک‌های گچ‌دار محدودیت ها و راه حل‌ها، مقاله کارگاه فنی – آموزشی ساخت کانال‌های آبیاری محدودیت‌ها و راه‌حل‌ه. ۳۰۲ - ۳۲۰ .

۱۰. مهندسین مشاور سوگراه. ۱۳۵۳. استفاده از غشاءهای پلاستیکی نفوذ ناپذیر برای عایق بندی کانال‌های اصلی اصفهان واقع در اراضی گچدار، نشریه کمیته ملی آبیاری وزهکشی.

11. Arkelyan, E. A. 1986. Characteristics of the determination of the physical properties of gypsum soils. Soil Mech. and Found. Eng. 23 (1): 27-29.

12. Boyadgieve, T. G. and W. H.Verheye. 1996. Contribution to a utilitarian classification of gypsiferous soils, Geoderma 47: 321-338.

13. Nelson, R. E., L. C. Klameth and W. D. Nettleton. 1978. Determination of soil gypsum content and expressing properties of gypsiferous soils. Soil Sci. Soc. Amer. J. 42: 147-168.

14. Razouki, S. and S. Kuttah. 2007. Strength erosion of a fine-grained gypsiferous soil during soaking, The Arabian J. for Sci. and Eng. 32(1):147-152.

15. Razouki, S., S. Kuttah and A. D. Nashat. 2008. Using gypsiferous soil for embankments in hot desert areas, Thomas Telford J. Construction Materials 161(2): 63-71.

16. Standards Soil Mechanics Testing. 1984. Soil Mechanics Note. No.8

Archive of SID

www.SID.ir