

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

جهانگیر عابدی کوپایی*، سمانه سلطانیان، مهدی قیصری^۱

(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. به‌طور کلی 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. در این 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 اتزبرگ در نمونه‌های تهیه شده، بررسی شد. نتایج استخراج شده در قالب طرح کاملاً تصادفی مورد تجزیه و تحلیل 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 اتزبرگ 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 و مشخصات تراکمی خاک گچی گردید.

واژه‌های کلیدی: خاک گچی، میکروسیلیس، پامیس، پرلیت

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

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی koupai@cc.iut.ac.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 خشکی‌های سطح زمین را مناطق با آب و هوای 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 در منطقه اصفهان براساس مطالعات خاک‌شناسی و گزارش‌های 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 مخاطره‌انگیز نبوده و حتی در کانال‌های با ابعاد کوچک این مقدار تا چند درصد بیشتر (۵ تا ۷ درصد) هم قابل قبول است (۴). به‌طور کلی 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 کانال‌های آبیاری احداث شده در خاک‌های گچی ذکر گردیده که در زیر به برخی از آن موارد اشاره می‌گردد:

تخریب کانال سلهاییه درحوزه فرات سبب شد تا بعد از سال ۱۹۲۷ 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) بررسی‌ها و تحقیقات پراکنده‌ای به‌عمل آمده است. در همین ارتباط، شرکت مهندسی مشاور سوگراه مأمور بررسی علل تخریب پوشش بتنی کانال‌های این واحد شد که نتایج آن را طی گزارشی در سال ۱۳۵۳ منتشر ساخت (۱۰).

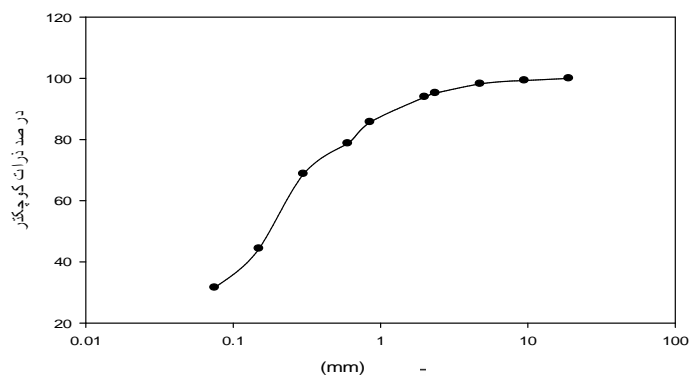
مطالعات اراکلیان (۱۱) خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های گچی را مورد بررسی قرار داد. مطالعات وی نشان داد که این خاک‌ها دارای وزن مخصوص کمتری نسبت به خاک‌های مشابه بوده و طی فرآیند آبشویی باعث بالا رفتن نسبت تخلخل و به تبع آن نشست می‌شود. درمورد تعیین درصد رطوبت این‌گونه خاک‌ها نیز نشان داد که اعمال درجه حرارت 105°C که به‌عنوان معیار کارهای مکانیک خاک است، در این‌گونه خاک‌ها باعث ایجاد خطای فاحش می‌شود (۱۱).

روزاکی و کوتاه (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 می‌کنند (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 و همکاران (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 خمیریایی (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

جدول ۱. مشخصات خاک

استاندارد	مقدار	مشخصات
AASHTO (۱۶)	A-2-4	نوع خاک
ASTM-D2487 (۱۶)	SM	طبقه‌بندی
	ماسه لای دار ۰/۱۷ میلی‌متر	جنس ذرات D ₅₀ (قطر ذره‌ای که ۵۰ درصد ذرات از آن کوچک‌ترند)
ASTM D423-66 (۱۶)	%۲۵/۶۷	حد روانی
ASTM D424-59 (۱۶)	%۲۲/۸۱	حد خمیری



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک گچی

طرح خسارت وارده به سازه‌ها را به دلیل 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) و مشخصات 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

خسارت مالی و بعضاً جانی قابل توجهی را بار آوردند، بسیار می‌باشند. با توجه به وسعت و گسترش این اراضی در ایران و توسعه روز افزون جمعیت و لزوم ساخت ابنیه و تأسیسات آبی مختلف بر روی این نوع خاک، تثبیت و تسلیح آن و جلوگیری 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

جدول ۲. مشخصات تیمارها، همراه با نام‌گذاری آنها

تیمارها	نام‌گذاری تیمارها	درصد وزنی مواد افزودنی
خاک گچی	G	-
خاک گچی+میکروسیلیس	GM _۱	۱
	GM _۲	۵
	GM _۳	۱۰
خاک گچی+پامیس	GU _۱	۵
	GU _۲	۱۰
	GU _۳	۱۵
خاک گچی+پرلیت	GE _۱	۵
	GE _۲	۱۰
	GE _۳	۱۵

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

پامیس

پامیس سنگ آتشفشانی غنی از سیلیس است که در اثر سرد شدن سریع لاوا در سطح زمین تشکیل می‌شود که به دلیل 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 انجام سریع ماگمای اسیدی (گدازه آتشفشان) به صورت آمورف (غیر کریستالی) تشکیل شده است و نزدیک به ۷۵ درصد آن اکسید سیلیسیم است. به دلیل وجود ۲ تا ۶ درصد آب ترکیبی در آن با حرارت دادن سریع (شوک حرارتی) در دمای ۱۱۰۰-۸۷۰ °C افزایش حجم شدیدی معادل ۴ تا ۲۰ برابر بر اساس نوع و ترکیب شیمیائی و شرایط انبساط خواهد داشت و

استفاده شد (۱۳). میزان گچ مورد تحقیق برابر ۲۳٪ 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٪) به طور جداگانه مخلوط کرده و آزمایش‌های حدود اتبرگ، 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 به شکل ذرات بی‌نهایت ریز شدیداً پوزولانی است و برای استفاده به عنوان 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 20000 kg/m^2 می‌باشد. در این تحقیق از اندازه ۱۵۰ میکرون آن استفاده شد.

درجه سانتی‌گراد خشک گردیده و باتوجه به فرمول ۱ به رطوبت دمای ۱۰۵ درجه تبدیل گردیده است.

ظرفیت باربری کالیفرنیا (CBR)

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

برش مستقیم

آزمایش برش مستقیم نیز طبق استاندارد ASTM D2080-72 (۱۶) انجام شده و سربارهای انتخاب شده برابر ۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد. تمامی نمونه‌ها در رطوبت بهینه آماده گردیده و آزمایش 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 و کیفی داده‌ها پرداخته شده است.

آزمایش حدوداتریبگ

براساس نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام شده حد روانی خاک گچی مورد تحقیق ۶۷/۲۵٪ و حد خمیری آن ۸۱/۲۲٪ در نتیجه شاخص خمیری (PI) آن در حدود ۱۴/۸۶ به‌دست آمده است. همان‌طورکه در نمودارهای ترسیم شده در شکل ۲ مشخص شده است، افزودنی‌های مورد تحقیق شامل پرلیت و پامیس به‌جز میکروسلیس، باعث افزایش حد روانی و خمیری خاک گچی شده‌اند. اما میکروسلیس 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

ماده پفکی با دانسیته حدود $100-50 \text{ kg/m}^3$ ایجاد خواهد شد. پرلیت منبسط شده به‌دلیل دارا بودن ضریب هدایت حرارتی پائین و خاصیت جذب صوت نیز دارای کاربردهای ویژه‌ای می‌باشد پرلیت یک سیلیکات طبیعی می‌باشد لذا ختشی و دارای PH برابر با ۷ است.

آزمایشات انجام شده

حدود اتریبگ

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 و در تعیین رطوبت خاک خطا ایجاد می‌کند. به‌جای آن با استفاده از رابطه زیر به رطوبت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تبدیل گردیده است (۱۱).

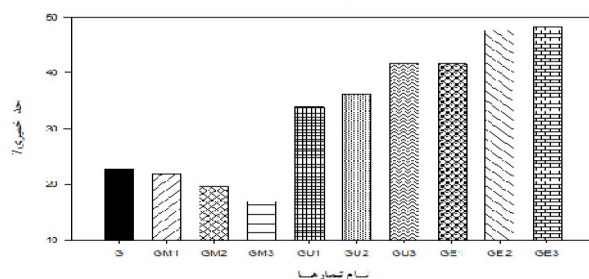
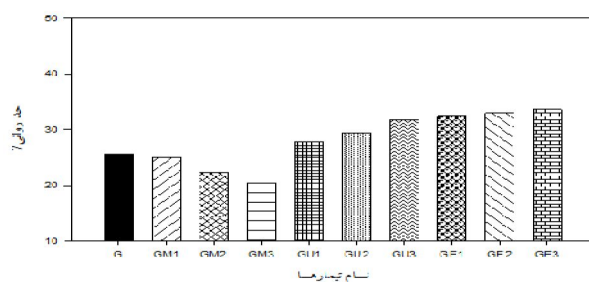
$$W_{105} = 1/0.07 W_{60} + 0/0.07 \quad [1]$$

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

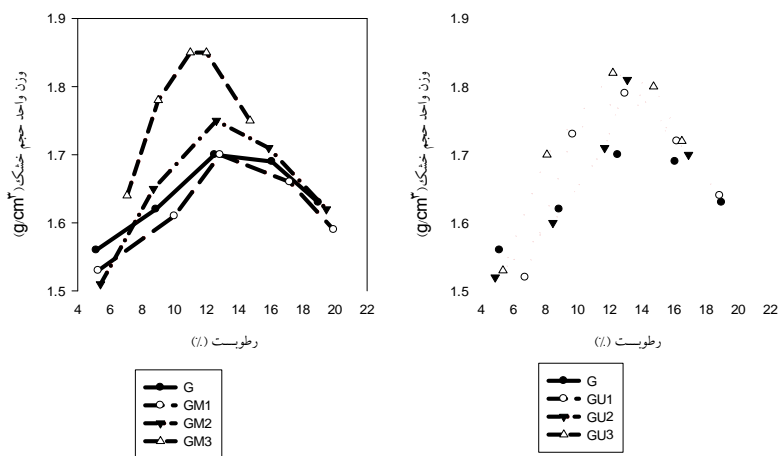
W_{60} : رطوبت خاک که در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شده

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

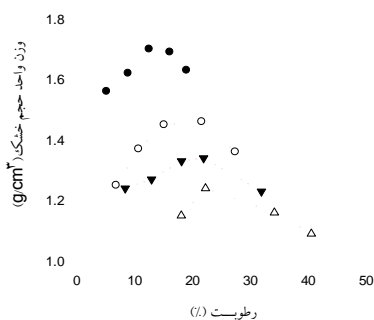


شکل ۲. حد روانی و خمیری تیمارهای مختلف



رطوبت (%)

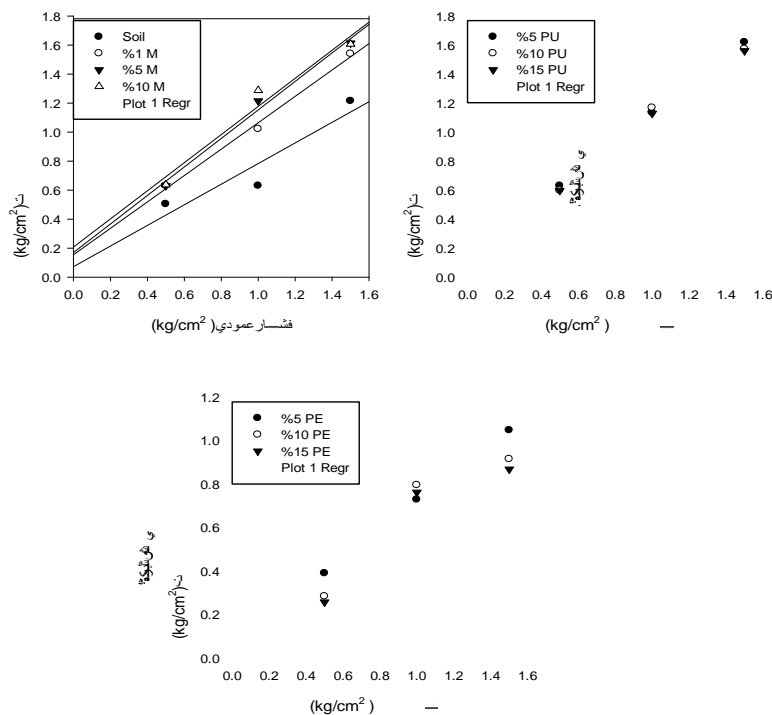
رطوبت (%)



رطوبت (%)



شکل ۳. تغییرات وزن واحد حجم خشک خاک تحت تأثیر درصد رطوبت در تیمارهای مختلف



شکل ۴. روند تغییرات تنش برشی تحت تأثیر فشار عمودی در لحظه شکست در تیمارهای مختلف

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 عرض ها حاصل می شود دست پیدا کنیم. نمودارهای حاصل از آزمایش برش مستقیم در شکل شماره ۴ ترسیم گردیده است. با توجه به نمودارهای ترسیم شده ملاحظه می گردد که تنها نمودارهای مربوط به میکروسلیس و پامیس دارای عرض از مبدأ هستند، که نشان دهنده این مطلب است که خاک دارای چسبندگی شده است. میکروسلیس و پامیس نیز باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک شده اند. اما پرلیت تأثیر عکس داشته و زاویه اصطکاک داخلی خاک را کاهش داده است.

آزمایش ظرفیت باربری (CBR)

نتایج آزمایش نسبت باربری به صورت منحنی هایی ترسیم شده است که در آن مقدار نفوذ در محور افقی و تنش در محور قائم

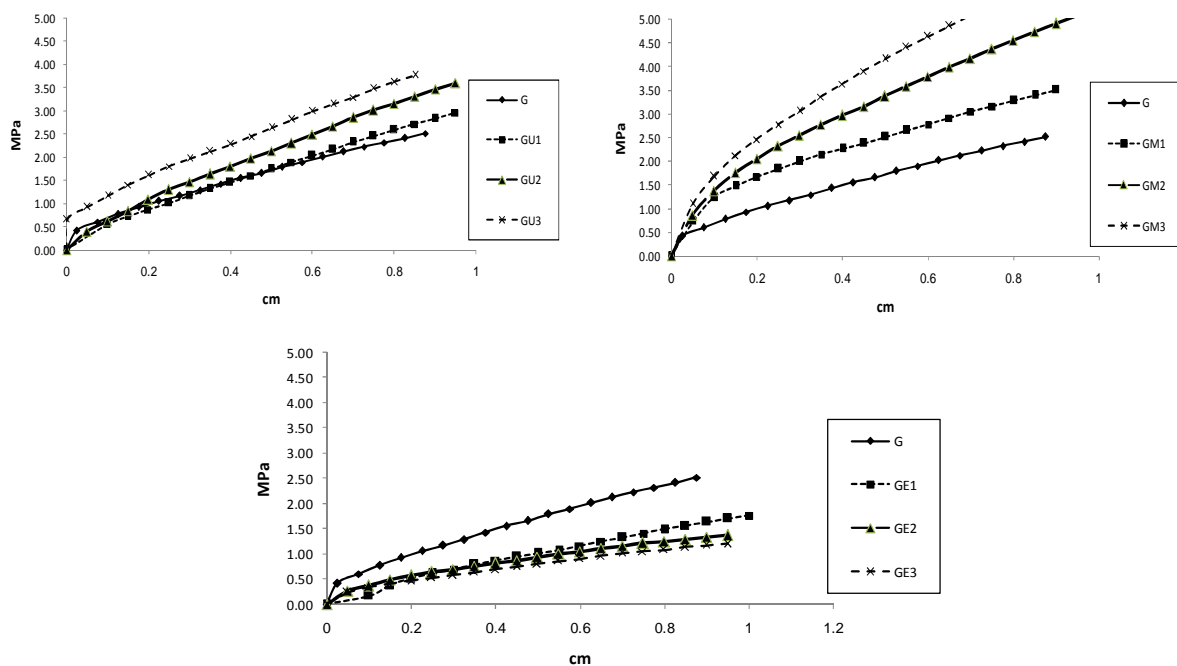
خمیری خاک کمتر از صفر شود و به اصطلاح خاک فاقد شاخص خمیری شود.

آزمایش تراکم استاندارد

با انجام آزمایش تراکم پراکتور استاندارد بر روی تیمارهای مختلف منحنی تراکم به ازای هریک از تیمارها ترسیم شده و با استفاده از این منحنی ها حداکثر وزن واحد حجم خشک و رطوبت بهینه به دست آمد. همان طور که از نمودارهای ترسیم شده در شکل ۳ مشخص شده است. میکروسلیس و پامیس باعث افزایش وزن واحد حجم خشک خاک شده اند و میکروسلیس باعث کاهش رطوبت بهینه خاک ولی پامیس تأثیر مشخصی روی آن نداشته است. همان طور که از نمودارها مشخص است پرلیت شدیداً باعث افزایش رطوبت بهینه و کاهش وزن واحد حجم خشک خاک گردیده است.

آزمایش برش مستقیم

با انجام آزمایش برش مستقیم تحت سه سر بار ذکر شده برای



شکل ۵. روند تغییرات تنش به ازای افزایش نفوذ در تیمارهای مختلف در رطوبت بهینه

جدول ۳. جدول تجزیه واریانس پارامترهای اندازه گیری شده

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

*** معنی دار شدن در سطح ۰/۰۱ درصد می باشد

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

چسبندگی خاک (C)

همان‌طور که در جدول شماره ۴ و نمودارهای ترسیم شده در شکل ۴ مشخص شد. بیشترین چسبندگی مربوط به تیمار GM_۳

قرار دارند. نسبت باربری از مقدار تنش مورد نیاز برای نفوذ ۰/۱ اینچ نسبت به تنش لازم برای فرو کردن پیستون به همان اندازه در خاک استاندارد به دست می‌آید. همان‌طور که 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.

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

تیمار	C	ϕ	CBR	W	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 _۱	۰/۱۵ ^b	۴۲/۲۸ ^b	۰/۲۷ ^c	۱۲/۸۵ ^b	۱/۷۰ ^c	۲۴/۹۹ ^d	۲۱/۸۶ ^e
GM _۲	۰/۱۷ ^b	۴۴/۴۹ ^a	۰/۳۴ ^b	۱۲/۶۲ ^b	۱/۷۵ ^{bc}	۲۲/۳۶ ^e	۱۹/۶۴ ^f
GM _۳	۰/۲۲ ^a	۴۴/۱۰ ^a	۰/۴۰ ^a	۱۱/۰۰ ^c	۱/۸۵ ^a	۲۰/۴۷ ^f	۱۶/۹۴ ^g
GU _۱	۰/۱۳ ^b	۴۴/۶۸ ^a	۰/۱۷ ^e	۱۲/۹۵ ^b	۱/۷۹ ^{ab}	۲۷/۸۹ ^c	۳۳/۸۶ ^d
GU _۲	۰/۱۳ ^b	۴۴/۲۹ ^a	۰/۲۱ ^d	۱۳/۱۰ ^b	۱/۸۱ ^{ab}	۲۹/۴۴ ^c	۳۶/۱۴ ^c
GU _۳	۰/۱۳ ^b	۴۳/۹۰ ^a	۰/۲۴ ^{cd}	۱۲/۲۰ ^b	۱/۸۲ ^{ab}	۳۱/۷۲ ^b	۴۱/۶۰ ^b
GE _۱	۰/۰۶ ^c	۳۳/۳۰ ^d	۰/۱۰ ^f	۲۱/۶۰ ^a	۱/۴۶ ^d	۳۲/۵۳ ^{ab}	۴۱/۵۹ ^b
GE _۲	۰/۰۳ ^{cd}	۳۲/۲۳ ^{de}	۰/۰۹ ^f	۲۱/۹۰ ^a	۱/۳۴ ^e	۳۲/۹۴ ^{ab}	۴۷/۵۷ ^a
GE _۳	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.

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 به‌همین دلیل 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_۳ 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_۳ ظرفیت باربری آن نسبت به تیمار G ۱/۴۱ برابر افزایش یافت.

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_۳ 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) نیز گزارش کرده است که مقاومت برشی مخلوط‌های آهکی و سیمانی با افزودن میکروسیلیکا بالا می‌رود (۲).

زاویه اصطکاک داخلی خاک به درجه (ϕ)

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 کرد که این افزایش به ترتیب در حدود ۲۵ و ۲۶ درصد بود.

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 به ترتیب برابر ۲۳ و ۳۰ 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 خمیری به درصد (PL)

حد خمیری 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 شده‌اند که بیشترین مقدار آن مربوط به تیمارهای GU_3 و GE_3 بود که به ترتیب برابر ۸۰ و ۱۰۰ درصد می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به مطالب گفته شده تیمار GM_3 بهترین نتایج را به دست آورد، به طوری که باعث افزایش ۳/۱۴ برابری چسبندگی، 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 به طور کلی می‌توان گفت میکروسیلیس باعث بهبود خواص برشی، باربری و مشخصات تراکمی خاک گچی گردید.

تیمار GU_3 نیز نتایج خوبی به دست آورد به طوری که باعث افزایش ۸۵ درصدی چسبندگی، ۲۶ درصدی زاویه اصطکاک

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

رطوبت بهینه خاک (W)

رطوبت بهینه‌ها از نمودارهای شکل ۳ استخراج شد و تحلیل آماری روی آن صورت گرفت که نتایج به دست آمده حاکی از آن است که افزودن میکروسیلیس به خاک تفاوت معنی‌داری در رطوبت بهینه آن ایجاد نکرد به جز 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 (X_d)

بیشترین وزن واحد حجم خشک از نمودارهای شکل ۳ استخراج شد و تحلیل آماری روی آن صورت گرفت. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که افزودن میکروسیلیس به خاک تفاوت معنی‌داری در بیشترین وزن واحد حجم خشک آن ایجاد نکرد به جز تیمار GM_3 که باعث افزایش ۸/۸ درصدی آن گردید. در تیمارهای حاوی پامیس نیز بیشترین وزن واحد حجم خشک مربوط به تیمار GU_3 بود که نسبت به تیمار G ، ۷ درصد افزایش داشت. پرلیت نیز باعث کاهش معنی‌دار بیشترین وزن واحد حجم خشک گردید که بیشترین کاهش مربوط به تیمار GE_3 بود که برابر ۲۷ درصد می‌باشد.

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 آماري و مکانیکی خاک بر روی رطوبت بهینه آن نداشت. به‌طور کلی می‌توان گفت پامیس باعث بهبود خواص برشی،

باربری خاک گچی گردید. در صورتی که پرلیت باعث تضعیف خواص مکانیکی خاک گچی از لحاظ خواص برشی، باربری و مشخصات تراکمی گردید.

منابع مورد استفاده

۱. ابن جلال، ر و م. شفاعی. ۱۳۷۷. اصول نظری و عملی مکانیک خاک. انتشارات دانشگاه شهید چمران. ۴۲۷-۴۳۳.
۲. باقر پور، ا و ع. جانعلی زاده چوب بستنی. ۱۳۸۱. بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه به وسیله افزودن میکروسلیکا به همراه آهک یا سیمان، مجموعه مقالات سومین همایش بین المللی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران ۲۰۰-۲۰۵.
۳. تومانیان، ن. ۱۳۷۴. منشا گچ و چگونگی تشکیل و تکامل خاک‌های گچی منطقه شمال غربی استان اصفهان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
۴. رحیمی، ح. ۱۳۷۹. مسائل احداث کانال‌های آبیاری در خاک‌های نامتعارف (مشکل آفرین)، مقاله کارگاه فنی- آموزشی ساخت کانال‌های آبیاری محدودیت‌ها و راه حل‌ها ۱۶۳-۱۲۸.
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 آرای. ۱۳۸۷. مقایسه اثر آهک زنده و شکفته بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک اصلاح شده، فصلنامه علوم زمین.
۷. محمودی، ش. ۱۳۷۴. خصوصیات و مدیریت خاک‌های گچی. مجموعه مقالات چهارمین کنگره علوم خاک ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان.
۸. مرادی، غ، م. عزیززاده و م. پاشایان. ۱۳۹۱. تأثیر میکروسلیس بر مقاومت و تورم‌پذیری 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 محدودیت‌ها و راه حل‌ها، مقاله کارگاه فنی - آموزشی ساخت کانال‌های آبیاری محدودیت‌ها و راه حل‌ها. ۳۰۲ - ۳۲۰.
۱۰. مهندسین مشاور سوگرا. ۱۳۵۳. استفاده از غشاهای پلاستیکی نفوذ ناپذیر برای عایق بندی کانال‌های اصلی اصفهان واقع در اراضی گچ‌دار، نشریه کمیته ملی آبیاری و زهکشی.

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*