اساس ـــ

بررسی تاثیر الیاف کربن، نانورس و آهک بر رفتار خاک های رسی گچدار

مریم حق بین haghbin@iiau.ac.ir

خسرو ادهمی kingkhosrow2001@yahoo.com

دانشگاه ازاد اسلامی، واحد اسلامشهر، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، اسلامشهر، ایران . دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اسلامشهر، اسلامشهر، ایران.

چکیده

امروزه تاثیر مواد الیافی و نانو بر بهسازی خاک‌ها مورد توجه قرار گرفته است. برای این منظور در این پژوهش تاثیر الیاف کربن، نانورس و آهک به صورت جداگانه و همچنین مخلوط (با نسبت مساوی)، بر رفتار خاک های رسی گچدار مورد بررسی قرار گرفته است. جهت شناسایی دقیق اثر مواد افزودنی بر خاک مورد نظر، آزمایش‌های متناسب با اهداف تحقیق، شامل آزمایش‌های آتربرگ، تراکم، برش مستقیم و تحکیم انجام شد. مقدار الیاف کربن، نانو رس و آهک اضافه شده به خاک ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد است که در زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه بررسی شده است. طبق نتایج حاصل از تحقیق، درصد بهینه ماده افزودنی آهک، الیاف و مخلوط الیاف، آهک و نانورس برای رسیدن به بیشترین مقاومت برشی ۶ درصد و ماده نانو ۴ درصد می‌باشد. همچنین مدت زمان عمل آوری تاثیر قابل توجه بر رفتار خاک های بهسازی شده با این مواد افزودنی دارد. نتایج نشان می دهد که برای کاهش نشست تحکیمی در خاک، آهک و الیاف کربن تاثیر قابل توجه دارند و جهت افزایش مقاومت برشی خاک استفاده از مخلوط آهک، الیاف کربن و نانو رس بیشترین تاثیر را دارد. همچنین تثبیت کننده نانو رس، با توجه به افزایش شاخص خمیری، باعث کاهش نفوذپذیری شده و بیشتر در زمینه اب بند کردن کاربرد دارد.

واژه‌های کلیدی: الیاف کربن، نانو رس، آهک، رس گچدار، بهسازی

Investigating the effect of carbon fiber, nanoclay and lime on the behavior of gypsum clay soils

Maryam Haghbin* ,Khosro Adhami

ABSTRACT

Today, the effect of fiber and nano materials has been considered on soil improvement. For this purpose, the effect of carbon fiber, nanoclay and lime have been investigated separately and also mixed (with equal ratio) on the behavior of gypsum clay soils in this study. In order to accurate identification of additives effects on the soil, suitable tests were performed such as atberberg, density, direct shear and consolidation test. Fiber, nanoclay and lime with mixed percentages of 2, 4, 6, 8 were added to the soil at the treatment duration of 7 and 28 days old. According to the results of the research, the optimum percentage of lime, fiber and mixture of fiber, lime and nonoclay were 6% and nono clay was 4%. Also, the duration of treatment had significant effect on the behavior of improved soils with these additives. The results indicate that adding lime and carbon fiber to the native soil decreased consolidation settlement and to increase the shear strength of the soi, mixture of lime, carbon fiber and nanoclay has maximum effect. Also, Nano-clay due to the increase in the plasticity index, reduces the penetration and is more applicable for dike.

KEYWORDS: Carbon fiber, Nonoclay, Lime, Gypsum clay, Improvement

تاریخ دریافت : ۱۳۹۷/۱۲/۱۳ تاریخ آخرین اصلاحات : ۱۴۰۰/۱۱/۲۷ تاریخ پذیرش : ۱۴۰۱/۰۱/۲۰

۱- مقدمه

استفاده از زمین هایی با شرایط ژئوتکنیکی نامناسب، با گسترش روز افزون ساخت وساز و توسعه زیرساخت های جامعه بشری اجتناب‌ناپذیر است. برای به کارگیری زمین هایی با این ویژگی ها، باید به بهسازی و بهینه کردن ویژگی های مهندسی آن‌ها مبادرت ورزید. بهبود مقاومت و ویژگی های مهندسی خاک، از روش‌های گوناگون مانند فرایندهای مکانیکی، افزودن مواد شیمیایی و یا مسلح کردن خاک امکان پذیر می‌شود.

در بسیاری از نقاط جهان خواص مکانیکی خاک های رسی برای مقاصد عمرانی مناسب نمی باشد. با توجه به اهمیت بهسازی خاک‌های ریزدانه، امروزه با تاثیر پذیری از مکانیسم های موجود در طبیعت و با مطالعه و ترکیب علم ژئوتکنیک و ژئوشیمی سعی بر آن شده است که راهکاری مناسب جهت بهبود مقاومت برشی این نوع خاک ها ارائه شود. ضیایی موید و همکاران در سال ۱۳۸۹ تاثیر تثبیت خاک رس با آهک و پلیمر و تسلیح با الیاف پلیمری بر رفتار تغییر حجمی خاک‌های رسی را بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که افزودن آهک، پلیمر و الیاف پلیمری به خاک موجب کاهش حد روانی خاک می‌شود ولی میزان این کاهش در آهک و پلیمر در مقایسه با الیاف پلیمری بیشتر است[1]. روحبخشان و همکاران در سال ۱۳۹۵ به بررسی تثبیت خاک رس با آهک و پودر ضایعات سنگی پرداختند[2]. از جمله نتایج به دست آمده این بود که افزودن ضایعات سنگی و آهک باعث افزایش حد خمیری و کاهش حد روانی می شود و رطوبت بهینه را افزایش می دهد. مقدار اهک بهینه به دست آمده ۷ درصد و پودر ضایعات سنگی بهینه ۶ درصد وزنی به دست آمده است. بیش از سی سال است که محققان مطالعاتی را در باره کاربرد خاکستر پوسته برنج به عنوان یک ماده تثبیت کننده در بهبود خاک انجام دادند [3] که برخی از این تحقیق ها نشان می دهند که خاکستر پوسته برنج یک ماده امید بخش برای تثبیت خاک رس با آهک یا سیمان بوده است [4-6]. دمیرل [7] اثرهای استفاده از ضایعات گرد و غبار سنگ مرمر را به عنوان ماسه ریزدانه بر روی خواص مکانیکی بتن مورد مطالعه قرار داد. مشاهده شد که افزودن ضایعات گرد و غبار سنگ مرمر به عنوان جایگزین مصالح ریزدانه تاثیرهای بسزایی را در مقاومت فشاری آن ها دارد. ساکر و همکاران در سال ۲۰۰۸ به بررسی تاثیر آهک بر رس نرم حاوی مواد آلی پرداختند[8]. نتایج نشان داد که مقدار بهینه آهک برای تثبیت خاک رس نرم حاوی ۱۴ درصد مواد آلی، مقدار ۷ درصد است. یونس و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی تاثیر اهک بر رفتار مقاومتی خاک رس پرداختند [9] و نتیجه گرفتند که با افزایش اهک رفتار مقاومتی خاک رس بهبود پیدا می کند و بین ۷ تا ۲۸ روز افزایش مقاومت قابل توجه است.

یکی از انواع خاک‌های متورم شونده خاک‌های ریزدانه سولفاته (گچی) است که در بسیاری از مناطق شهری به دلیل مشکلاتی که برای ساختمان ها ایجاد کرده اند مسئله ساز هستند و مطالعه آنها ضروری می باشد. خاک های ریزدانه دارای خاصیت تغییر حجم شدید بوده و در طبیعت با تراکم و وزن مخصوص بسیار پایین (مانند $1/2 gr/cm^3$) تا تراکم بالا ($1/8 gr/cm^3$) موجود هستند. عمل تراکم که یکی از روش های بهسازی خاک های سست است. اما در مورد خاک های متورم شونده نه تنها کارساز نیست بلکه زیانبار نیز هست. زیرا اینگونه خاک ها بر اثر افزایش تراکم به محض اشباع شدن نسبی، به شدت متورم می شوند[10]. در طول دهه های اخیر ساختمان های ساخته شده در منطقه تهران مواجه با نشست یا تورم خاک شده اند. این دو پدیده متناقض که علت اصلی آن کاملا آشکار نبوده، موجب وارد آمدن خساراتی به ساختمان ها می شد. لذا با توجه به خسارات جبران ناپذیری که خاکهای متورم شونده روی سازه ها داشته اند، بررسی رفتار اینگونه خاک ها از اهمیت ویژه ای در این منطقه برخوردار است .

با توجه به اهمیت بررسی های ژئوتکنیک زیست محیطی و تأثیر شیرابه ها در طراحی مدفن بهداشتی زباله ها، پژوهش های جامعی در این زمینه انجام شده است. نتایج پژوهش ها نشان داده است که با افزودن نانورس به خاک در اثر نفوذ شیرابه ها به خاک زیرین، مقادیر فلزات سنگین جذب خاک شده و به عبارت دیگر تأثیر افزودن نانورس، ضمن کاهش نفوذپذیری مخلوط، موجب کاهش غلظت فلزات سنگین و جذب آلاینده ها و بهبود عملکرد زیست محیطی می شود .، هم چنین افزودن نانورس موجب کاهش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک نیز شده است[11, 12]. با توجه به اهمیت به سازی خاک های مسئله دار و لزوم تقویت آن ها و ارزیابی رفتار آن ها ناشی از تثبیت و اصلاح خواص خاک، تأثیر افزودن نانومواد مختلف از قبیل نانوسیلیس، نانوآلومینیوم، نانورس و نانومس بر خواص ژئوتکنیکی خاک ها بررسی شده است .نتایج حاصل از این پژوهش ها حاکی از تأثیر بسیار مهم نانوذرات بر رفتار رمبندگی خاک ها بوده است [13].بهاری و شاه نظری[14] با انجام آزمایش های ژئوتکنیکی مختلف دریافتند که در اثر افزودن نانورس به نمونهٔ خاک آزمایش شده از بستر کانال بند انحرافی گنج افروز، پایداری و استحکام خاک بیش تر شده و مشکلات ناشی از فرسایش بستر و هم چنین حمل مصالح قرضه برای زیرسازی کانال وجود نخواهد داشت.

تحقیقات نشان داده است که از جمله روشهای موثر بهسازی خاک رس استفاده از آهک برای تثبیت خاک می باشد که بدلیل ویژگیهای بدست آمده ناشی از این نوع مصالح مانند ارزانی قیمت مصالح، در دسترس بودن و عدم رشد گیاهان هرز بین مهندسان بسیار محبوب

است. اما در شرایطی که خاک حاوی سولفاتهای قابل حل باشد مثل خاکهای گچدار اشباع، استفاده از آهک نه تنها موثر واقع نخواهد شد بلکه به علت واکنشهای شیمیایی که بین رس، آهک و یون سولفات انجام می‌گیرد کانی های ثانویه ای از قبیل اترینگایت و تاماسایت ایجاد گشته که این کانی ها با توجه به قابلیت جذب آب بالا و تورم شدید مشکل زا بوده و باعث کاهش مقاومت می گردند[20]. به همین دلیل، در این تحقیق به ارائه روش های علمی و آزمایشگاهی جهت بهسازی خاک های رسی (گچدار) پرداخته خواهد شد و اثر هریک از مصالح مانند الیاف کربن، نانورس، اهک و مخلوط این افزودنی ها (با نسبت مساوی) بر رفتار این نوع خاک ها مورد مطالعه قرار می گیرد. آزمایشهایی انجام شده در این تحقیق حدود آتربرگ، تراکم، برش مستقیم و تحکیم می باشد. با مقایسه میزان تغییرات ایجاد شده با افزودن درصدهای مختلف این مصالح در خاک، بهینه‌ترین مقدار این مصالح با توجه به موارد ذکر شده، به دست آورده می‌شود و با مقایسه تاثیرات این افزودنی ها در درصدهای مختلف در سنین ۲۸ روزه طی آزمایشات مربوطه، بهترین طرح اختلاط برای تثبیت خاک های رسی انتخاب خواهد گردید.

۲- مشخصات تثبیت کننده ها و مصالح به کار رفته

۲-۱- نانورس

نانورس ها مواد منحصر به فردی هستند که به عنوان مواد افزودنی برای ساخت نانوکامپوزیت ها و بهبود قابل توجه خواص مواد پلیمری به کار می روند. نانورس‌ها سطح ویژه‌ای در حدود ۷۵۰ مترمربع بر گرم دارند. غالباً برای اصلاح خواص مکانیکی مواد پلیمری، آنها را با پرکننده‌ها تقویت می‌کنند. خالص بودن و ظرفیت تبادل کاتیونی، دو خصوصیت مهم برای موفقیت نانورس‌ها به‌عنوان عامل استحکام در پلیمرها به شمار می‌رود. خالص بودن رس، خصوصیات مکانیکی پلیمر را افزایش می‌دهد که این به افزایش تبادل کاتیونی رس در ترکیب شدن رس با پلیمر کمک می‌کند. نانورس‌ها (Nanoclay) کانی‌هایی هستند که حداقل یکی از ابعاد آنها در حد نانومتر باشد. این مواد به‌دلیل ارزانی و در دسترس بودن، توجه زیادی در زمینه فناوری نانو به خود جلب کرده‌اند، همچنین اندازه کوچک این مواد آنها را قادر ساخته تا بتوانند با مواد دیگر که در این زمینه وجود دارند، رقابت کنند. نانو رس مورد استفاده در تحقیق، از نمایندگی شرکت هندوستانی خریداری شد که مشخصات آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱) مشخصات نانو رس مورد استفاده

پایه	مونتوموریلونیت
اصلاح کننده آلی	MT2EOH
درصد رطوبت	کمتر از ۲ درصد
وزن مخصوص (kg/m3)	۲۲۷
آزمایش xRD	D001=1.85m
قطر ذرات (mm)	۶ میکرومتر

۲-۲- الیاف کربن

الیاف کربن (Carbon Wrap) یکی از پرکاربرد ترین الیاف در صنعت مقاوم سازی و کامپوزیت است (شکل ۱). این الیاف بیشترین مقدار ضریب ارتجاعی را نسبت به الیاف شیشه و کولار دارد. ضریب انبساط گرمایی خطی این نوع الیاف در دماهای بالا و پایین بسیار کم می باشد که این مساله باعث پایداری ابعادی الیاف کربن در دماهای متفاوت می‌گردد. در بین مزایای مختلف الیاف کربن، برجسته ترین آنها مقاومت کششی فوق العاده نسبت به وزن آن است (کربن تقریبا یک سوم فولاد وزن و ۵ الی ۱۰ برابر آن مقاومت دارد). علاوه بر آن الیاف کربن مقاومت خوبی در برابر خستگی دارد. دوام و عمر طولانی در برابر مواد شیمیایی و نفوذ ناپذیری در برابر اشعه x از بارزترین خصوصیات الیاف کربن به شمار می‌رود. همچنین الیاف کربن رسانایی الکتریکی بسیار خوبی دارد و قابلیت بافت و تولید پارچه، ساخت کامپوزیت‌های سبک و مستحکم CFRP و پایداری در برابر حرارت، آن را از سایر مواد مهندسی متمایز می‌سازد. فیبر کربن عنصری با دانسیته ۲/۲۷ gr/cm^3 است و اشکال بلوری مختلفی دارد. رشته الیاف کربن که از فیبرهای کربن تشکیل می‌گردد، به مراتب نازکتر از موی انسان در قطر بین ۶ تا ۱۰ میکرومتری می‌باشد. علیرغم حجم بالای استفاده از آنها، قیمت الیاف کربن هنوز نسبتاً بالا است. این مسئله باعث محدودیت فروش کامپوزیت CFRP می‌گردد. در سال های اخیر بیش از یک میلیون متر مربع ژئوتکستایل برای مسلح کردن خاک مورد استفاده قرار گرفته است. با این وجود، در ارتباط با ژئوتکستایل مشکلات متعدد مهمی مانند خزش، مقاومت و مدول الاستیسیته ی پایین و حساسیت نسبت به محیط تهاجمی وجود دارد. الیاف کربن تقویت شده ی پلیمری (CFRP) بیش از دو دهه ی پیش در رشته ی مهندسی سازه معرفی شده است و همچنین می تواند در مهندسی ژئوتکنیک مورد استفاده قرار گیرد . الیاف کربن دارای تمام مزایای مرتبط با ژئوتکستایل است و همچنین هیچ خزشی ندارد و دارای مقاومت بالاتر و مدول بالاتر است و در محیط های تهاجمی قابل اطمینان می باشد. نانوالیاف کربن بکار رفته در این پروژه به طول ۶ میکرومتر می باشد و از شرکت سیگما آلدریچ آلمان خریداری شده است و مشخصات آن طبق جدول ۲ می باشد.

جدول ۲) مشخصات نانوالیاف کربنی استفاده شده

پودر	فرم
100 nm × 20-200 μm	D × L
آهن آزاد	ناخالصی
محتوای آهن<100 ppm	محتوای آهن
130 nm	قطر متوسط
gr/cm۰/ ۰۷۵	اندازه منفذ
24 m^2/g	سطح
3652-3697 °C	MP
1/9 g/mL at 25 °C	تراکم
0.5-3.5 lb/cu.ft	تراکم فله

شکل ۱) تصویر الیاف کربن

۲-۳- آهک

یکی از مهمترین موادی که خاک را با استفاده از آن تثبیت میکنند، آهک است. استفاده از آهک در تثبیت خا کها به عنوان روشی اقتصادیاست که به صورت گسترده مورد استفاده قرار میگیرد. اضافه کردن آهک به خاک رس سبب به وجود آمدن واکنشهایی که منجر به بهبود در خواص اولیه خاک می شوند، میگردد .آهکهایی که معمولاً برای پایدار کردن خا کهای ریزدانه مورداستفاده قرار میگیرند، عبارتند از :هیدروکسید کلسیم یا آهک شکفته ، آهک زودگیر و یا آهک زنده که در بین آ نها، آهک زنده از پرکاربردترین نوع آهک برای تثبیت در اروپا است [15] . از طرفی دیگر، آهک زنده اثر بهتری را در مقایسه با آهک هیدراته دارد. اما خطر آن برای محیط زیست و انسانها زیاد است. واکنشهای آهک زنده با آب، با تولید گاز دی اکسید کربن و گرما همراه بوده که برای سلامتی انسان زیان آور است. بنابراین، کار کردن با آهک هیدراته ایمن تر است. آهک استفاده شده در این تحقیق آهک شکفته صنعتی البرز با چگالی Gs=2/3 و رطوبت طبیعی ۰/۲ درصد بوده که می توان آنرا خشک فرض نمود. در ساخت نمونه های حاوی آهک، تأخیر زمانی بین اختلاط آهک وخاک تا زمان تراکم یک ساعت در نظر گرفته شده است.

۲-۴- خاک رس گچ دار

خاک رس دارای طیف گسترده ای از ترکیبات کانی شناسی بوده که از ابعاد و انواع مختلفی از کانی های رسی تشکیل شده است. مهمترین آنها شامل کائولینیت، ایلیت و مونتموریلونیت است. در این تحقیق خاک رس مصرفی از نوع کانی رس کائولینیت و مربوط به استان خراسان می باشد و بر اساس سیستم طبقه بندی متحد خاک رس از نوع CL است. با توجه به اینکه گچ موجود در نمونه‌های مورد آزمایش طبیعی است، اندازه‌گیری چگالی گچ به عنوان یک ماده ممکن نبوده و با توجه به اینکه اکثرسولفات‌های موجود از نوع گچی می‌باشد نه اندریتی، چگالی ویژه کاهش می‌یابد. اگرچه تغییرات چگالی ویژه با افزایش میزان گچ تا حدود ۲۰ درصد، بسیار اندک می باشد. همچنین نشانه خمیری و وزن مخصوص خشک خاک موردآزمایش با افزایش مقدار گچ کاهش می‌یابد که بیانگر تاثیر پذیری خاصیت خمیری خاک از میزان گچ است. بنظر می‌رسد علت این موضوع، درصدی از ذرات گچ با چگالی ۲/۲۰ است که بجای ذرات خاک با چگالی ۲/۷۲ قرار گرفته‌اند. بنابراین وزن مخصوص خشک مخلوط کاهش می‌یابد. همچنین چون گچ جهت هیدراسیون به آب نیاز دارد، وجود آب بیشتر در اثر بارش‌های سالانه و جایگزینی آن با ذرات خاک باعث کاهش وزن مخصوص خشک خواهد شد. باتوجه به اینکه در طول حفاری به آب زیر زمینی بر خورد نشده است، از بالا بودن عددSPT می‌توان نتیجه گرفت که واکنش‌های هیدراسیون گچ و آب به مرور زمان باعث سفت شدن مخلوط خاک، و در نتیجه باعث خشک و متراکم شدن خاک منطقه شده است. به بیان دیگر وجود مقاومت‌های بالای این نوع خاک در حالت خشک، در صورت عدم بهسازی، طرح را به اشتباه انداخته ودر نهایت منجر به شکست وخرابی سازه می گردد. نتایج آزمایش‌های محققین نشان داده است که این قبیل خاکها، قبل از آبشویی معمولاً نسبت به خاک‌های مشابه، مقاومت‌های بالاتری را نشان می‌دهد. اما بعد از آبشویی خاک، کاهش پارامترهای مقاومتی خاک از جمله φ (زاویه اصطکاک داخلی) و c (چسبندگی) گزارش شده است. مشخصات خاک مورد استفاده در این آزمایش در جدول۳ نشان داده شده است.

جدول ۳) مشخصات خاک مورد آزمایش

چسبندگی kg/cm2	زاویه اصطکاک درجه	سولفات%	گچ٪	PH	وزن مخصوص خشک(gr/cm³)	وزن مخصوص طبیعی(gr/cm3)	شاخص خمیری (٪)	حد روانی (٪)	طبقه‌بندی یونیفاید
۰/۳۶	28	۱۵/۸	۱۲/۸	۷/۵۶	۷۶/۱	۸۳/۱	20	36	CL

۳-روش تحقیق

آزمایش هایی که در این تحقیق برای بررسی تاثیر تثبیت کننده‌ها بر رفتار خاک رس انجام شد، شامل حدود آتربرگ، تراکم، برش مستقیم و تحکیم می باشد. همانطور که قبلا اشاره شد، تثبیت کننده ها عبارتند از آهک، نانورس، الیاف کربن و همچنین مخلوط آنها. هدف از آزمایش حدود آتربرگ، تعیین حد روانی، حد خمیری و دامنه خمیری خاک است. حـدود اتربـرگ از شـاخص‌هـای مهم شناسایی و توصیف خاک می‌باشد. براساس نتایج این آزمایش و آزمایش دانه‌بندی، طبقه‌بندی خاک (روش متحده) صورت می‌گیرد. به‌منظور تعیین مقادیر حدود اتربرگ خاک با مخلـوط ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد آهک، در زمان های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه، آزمایش مطابق استانداردASTM D4318، بر روی نمونـه‌هـای بـا درصدهای متفاوت آهک انجام گردید[20]. درادامه این تحقیق، به منظور بررسی تاثیر نانورس بر خاک ساختگاه مورد مطالعه ، ابتدا محلول نانو تهیه و به خاک مورد آزمایش اضافه گردید. در تهیه محلول نانو، ابتدا مقدار2CC ماده نانو پلیمر پلی وینیل استات را در 1000cc آب مخلوط کرده و محلول ۲٪ نانو تهیه گردید. سپس این محلول با مقادیر ۲، ۴ و ۶ درصد نانو، متناسب با رطوبت بهینه حاصل از آزمایش تراکم خاک طبیعی ، به نمونه مورد آزمایش اضافه گردید. در ادامه خاک مخلوط شده با نانو ر ا به مدت ۲۴ ساعت در کیسه پلاستیکی جهت عمل آوری قرار داده، سپس نمونه ها از کیسه خارج کرده و متناسب با زمان های عمل آوری ۷و ۲۸ روز در مخزن رطوبت قرار داده شدند. جهت شناسایی دقیق خاک با مخلوط نانو، آزمایش های متناسب با اهداف تحقیق شامل آزمایش های شاخص و مکانیکی انجام گردید. همچنین به منظور تعیین مقادیر حدود اتربرگ خاک با مخلوط ۲، ۴ و ۶ درصد نانورس، آزمایش مطابق استاندارد ASTM D4318 انجام گردید[20]. به همین ترتیب برای تعیین تاثیر الیاف کربن و مخلوط تثبیت کننده ها، مقادیر ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد به خاک رس اضافه گردید. برای بررسی اثر افزودن توام آهک، الیاف و نانو در آزمایش از درصدهای مساوی هر سه افزودنی به مقدار 1/3آهک، 1/3الیاف و1/3 نانو استفاده شده است.

جهت بررسی تاثیر آهک بر وزن مخصوص خشک حداکثر خاک، بر روی نمونه‌های خاک طبیعی و مخلوط شـده با ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد آهک تعـداد ۵ آزمـایش تـراکم اسـتاندارد مطـابق بـا استاندارد ASTM D698 انجام شد[22]. همچنین برای بررسی تاثیر نانو رس، ۳ آزمایش با درصد های ۲، ۴ و ۶ درصدو برای بررسی تاثیر الیاف کربن، ۴ آزمایش با درصد های ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد و برای بررسی تاثیر مخلوط الیاف کربن، نانو رس و آهک، ۴ آزمایش با درصدهای ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد انجام شده است.

جهت تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک منطقه مـورد مطالعـه، آزمـایش بـرش مـستقیم مطـابق اسـتاندارد ASTM D3080برروی نمونه های دستخورده، باقالب ۱۰×۱۰ cm انجام پذیرفت[23]. ازآنجا کـه مقـادیر تـنش قائم برای هر آزمایش باید متناسب با فشار سربار باشد این آزمایش بـا سـه تـنش قـائم متفاوت ۰/۵ ، ۱ و ۲ kg/cm^2 برروی نمونه های خـاک طبیعـی ومخلـوط شده با مقادیر ۲، ۴ ،۶و ۸ درصدآهک و ۲، ۴ و ۶ درصد نانو رس و ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد الیاف کربن و ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد مخلوط آهک، نانورس و الیاف کربن، بـرای روزهـای عمـل آوری۷ و ۲۸ روزه، انجام گردید (شکل ۲، ۳ و ۴). نحوه‌ی کار در این آزمایش بدین صورت است که نمونه درون جعبه‌ای به شکل مربع یا حلقه قرار می‌گیرد. جعبه‌ها از دو نیمه‌ی ثابت پایینی و نیمه متحرک بالایی تشکیل شده‌اند و دو نیمه‌ی جعبه به وسیله‌ی دو پیچ به هم متصل می‌شوند. نمونه در داخل جعبه و در بین دو صفحه سنگ متخلخل از بالا و پایین محصور شده است، به طوری که نمی‌تواند تحت تأثیر تنش چرخشی واقع شود. سپس باید نمونه را بارگذاری نمود. در این مطالعه، بارگذاری نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM D 3080 – 90 با سرعت اعمال تغییر مکان برابر ۱ میلی متر بر دقیقه برای تمام نمونه‌ها، صورت پذیرفته است [۲۳]. برای انتخاب سرعت آزمایش چند پیش آزمایش بر روی چند نمونه با مشخصات ثابت و با سرعت‌های مختلف انجام شد که با توجه به نحوه گسیختگی نمونه‌ها و با در نظر گرفتن زمان موجود سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد. براساس نتایج به دست آمـده میزان چسبندگی برای خاک طبیعیkg/cm^2 ۰/۳۶ وزاویه اصطکاک داخلی ۲۸ درجه مـی باشـد.

شکل ۲) نحوه اختلاط و آماده سازی

شکل ۳) نحوه خارج کردن قالب با استفاده از جک هیدرولیکی، نحوه قالب‌گیری با استفاده از جک هیدرولیکی، نحوه پر کردن قالب برش

شکل ۴) نمونه هایی از نحوه شکست نمونه پس از انجام آزمایش مقاومت برش مستقیم

هدف از آزمایش تحکیم بدست آوردن تراکم پذیری و میزان نشست در خاک ها با درصد تثبیت کننده های مختلف می باشد. این آزمایش طبق استانداردASTM D2435 انجام شده است.[24] در این تحقیق از نمونه هایی به قطر ۷۵ میلیمتر و ارتفاع ۲۰ میلیمتر استفاده شده است (شکل ۵).

۴-نتایج و مباحث

در این بخش نتایج آزمایش های انجام شده در این تحقیق که شامل حدود آتربرگ، تراکم، برش مستقیم و تحکیم می باشد، بر خاک های تثبیت شده با درصد های مختلف آهک، نانو، الیاف کربن و مخلوط آنها در زمان های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه بررسی می شود.

۴-۱- نتایج آزمایش تعیین حدود اتربرگ

مطابق جدول ۴، تنها خاک‌های با مخلوط ۲ درصد آهک و با عمل‌آوری ۲۸ روزه دارای دامنه خمیـری می‌باشند. براساس نتایج به‌دست آمده، افزودن اهک به میزان ۲ درصد به خاک طبیعی، باعث کـاهش دامنـه خمیری در عمل‌آوری‌های ۲۸ روزه می‌گردد. دیگر مقادیر اختلاط، و با زمان‌های عمل‌آوری موردنظر، باعث از بین رفتن دامنه خمیری خاک می‌گردد. علت اصلی کاهش حد روانی در نمونه های تثبیت شده با آهک را می توان واکنش تبادل یونی ناشی از ترکیب خاک با اهک دانست. این واکنش ها باعث کاهش خصوصیات خمیری خاک می شوند که در نهایت افزایش کارایی خاک را نتیجه می دهند.

جدول ۴) مقادیر حدود اتربرگ خاک با درصدهای مختلف آهک در عمل‌آوری۷ و ۲۸ روزه

درصد آهک	زمان‌های عمل‌آوری (روز) ۷			۲۸		
	حد روانی	حد خمیری	دامنه خمیری	حد روانی	حد خمیری	دامنه خمیری
۲			NP	۳۴	۲۵	۹
۴			NP		NP	
۶			NP		NP	
۸			NP		NP	

شکل ۵) دستگاه آزمایش تحکیم مورد استفاده

جدول ۵ مقادیر حدود اتربرگ خاک با درصدهای ۲ الی ۶ درصد نانو با زمان های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه را نشان می دهد. مطابق جدول ۵، افزودن ماده نانورس به خاک، باعث افزایش دامنه خمیری می گردد. بر اساس نتایج به دست آمده در زمان عمل آوری ۲۸ روزه، دامنه خمیری خاک بیشترین افزایش را دارد. بیشترین دامنه خمیری مربوط به خاک با مخلوط ۲ درصد نانورس و عمل

آوری ۲۸ روزه و به مقدار ۳۰ می باشد .کمترین میزان دامنه خمیری مربوط به خاک با مخلوط ۶ درصد نانو و عمل آوری ۲۸ روزه و به مقدار ۲۱ می باشد، که تقریبا معادل دامنه خمیری خاک طبیعی است. با افزایش خصوصیات خمیری خاک های آزمایش شده در اثر افزودن نانورس، تحمل خاک در برابر تغییر شکل های بزرگ به دلیل تغییر رطوبت ازدیاد یافته و در نتیجه خطر ترک خوردگی کاهش و این عامل منجر به کاهش ضریب نفوذپذیری می شود که این تغییر رفتار در پوشش کانال های آببند نقش بسیار مهمی دارد[16]. در این ارتباط علت افزایش شاخص خمیری نمونه ها را می توان به تمایل نمونه ها به افزایش حجم

جدول ۵) مقادیر حدود اتربرگ خاک با درصدهای مختلف نانورس در عمل‌آوری۷ و ۲۸ روزه

درصد نانورس	زمان‌های عمل‌آوری (روز)					
	۷			۲۸		
	حد روانی	حد خمیری	دامنه خمیری	حد روانی	حد خمیری	دامنه خمیری
۲			NP	۴۶	۱۶	۳۰
۴			NP	۴۶	۱۸	۲۸
۶			NP	۳۸	۱۷	۲۱

آب بیش تر در اثر افزودن نانورس و ازدیاد بار الکتریکی ناشی از فعل و انفعالات شیمیایی و تأثیر آن بر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک اشاره کرد .هم چنین می توان گفت که علت افزایش حد روانی و حد خمیری وجود رطوبت در انباشتگی های نانومواد بوده است که این رطوبت در گرم خانه حذف شده و سطح ویژه بسیار بزرگ آن ها باعث ایجاد فعل و انفعالات بین ذره ای گسترده تری در خاک می شود [17, 18].

با توجه به اینکه اختلاط آهک که باعث بهبود وضعیت نشست میشود، در دراز مدت به علت واکنشهای شیمیایی که بین رس، آهک ویون سولفات انجام می گیرد، تورم خاک را افزایش میدهد، لذا وجود آهک در کنار خاک گچی نیز مشکلات خاص خود را به همراه دارد. به نظر می رسد یکی از راه حلهای مناسب برای کم کردن مشکلات خاک گچی اضافه کردن الیاف به خاک گچی است. با این کار درصد گچ در حجم خاک پایین میآید و مقدار تورم و نشست کاهش پیدا میکند[20]. براین اساس نسبتهای مختلف الیاف کربن به خاک اولیه اضافه گردید. به‌منظور تعیین مقادیر حدود اتربرگ خاک با مخلـوط ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد الیاف کربن، آزمایش مطابق استاندارد ASTM D4318، بر روی نمونـه‌هـای بـا درصدهای متفاوت **الیاف** کربن انجام گردید[21] (جدول ۶).

جدول ۶) مقادیر حدود اتربرگ خاک با درصدهای مختلف الیاف کربن و عمل‌آوری۷ و ۲۸ روزه

درصد الیاف کربن	زمان‌های عمل‌آوری (روز)					
	7			۲۸		
	حد روانی	حد خمیری	دامنه خمیری	حد روانی	حد خمیری	دامنه خمیری
۲			NP	۳۷	۲۲	۱۵
۴			NP			NP
۶			NP			NP
۸			NP			NP

مطابق جدول ۶، تنها خاک‌های با مخلوط ۲ درصد الیاف کربن و با عمل‌آوری ۲۸ روزه دارای دامنه خمیـری می‌باشند. براساس نتایج به‌دست آمده، افزودن **الیاف کربن** به میزان ۲ درصد به خاک طبیعی، باعث کـاهش دامنــه خمیری در عمل‌آوری‌های ۲۸ روزه می‌گردد. در دیگر مقادیر اختلاط و در زمان‌های عمل‌آوری مورد نظر، دامنه خمیری خاک از بین می رود. بیشترین میزان دامنه خمیری مربوط به خاک با مخلوط ۲ درصد آهک و عمل‌آوری ۲۸ روزه، با مقدار ۱۵ می‌باشد. دلیل این نتیجه مقاومت و مدول الاستیسیته بالای الیاف کربن می باشد. همانطور که در نتایج دیده می شود، رفتار خمیری خاک تثبیت شده با آهک مشابه رفتار خاک تثبیت شده با الیاف کربن می باشد.

یکی از راه حلهای مناسب برای کم کردن مشکلات خاک گچی اضافه کردن توام چند ماده مقاوم کننده است . در این قسمت تاثیر توام آهک، الیاف و نانو با درصدهای یکسان در خاک مورد بررسی قرار گرفته است. به‌منظور تعیین مقادیر حدود اتربرگ خاک با مخلـوط ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد آهک، الیاف و نانو ، تعداد ۸ آزمایش، مطابق استانداردASTM D4318، بر روی نمونـه‌هـای بـا درصدهای متفاوت آهک، الیاف و نانو انجام گردید (جدول ۷). برای بررسی اثر افزودن توام آهک، الیاف و نانو در آزمایش از درصدهای مساوی هر سه آفزودنی به مقدار 1/3آهک، 1/3الیاف و1/3 نانو استفاده شده است.

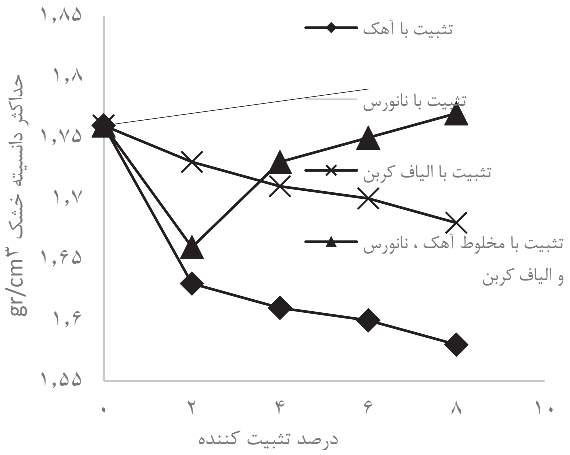
جدول ۷) مقادیر حدود اتربرگ خاک با درصدهای مختلف آهک، الیاف و نانو و عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه

آهک، الیاف و نانو	زمان‌های عمل‌آوری (روز)					
	۷			۲۸		
	حد روانی	حد خمیری	دامنه خمیری	حد روانی	حد خمیری	دامنه خمیری
۲	۴۸	۲۰	۲۸	۳۷	۲۱	۱۶
۴	۴۶	۱۷	۲۹	۴۵	۲۱	۲۴
۶	۴۶	۱۸	۲۸	۴۶	۲۹	۱۷
۸	۴۷	۲۰	۲۷	۴۷	۲۵	۲۲

مطابق جدول ۷، با افزایش درصد تثبیت کننده ها به خاک تا مقدار ۴ درصد، دامنه خمیری مخصوصا در عمل آوری ۲۸ روزه افزایش می یابدو با افزایش درصد تثبیت کننده ها به ۶ درصد، کاهش دامنه خمیری و با افزایش به ۸ درصد افزایش دامنه خمیری مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه دامنه خمیری خاک طبیعی ۲۰ بود، می‌توان گفت که ۲ درصد تثبیت کننده دامنه خمیری را نسبت به خاک طبیعی تا حدی کاهش می دهد ولی افزایش بیشتر از ۲ درصد روند ثابتی در تغییرات دامنه خمیری را نشان نمی دهد و به طور کلی دامنه خمیری نزدیک به خاک طبیعی می باشد. علت این نتیجه مربوط به تاثیر متفاوت نانو رس بر خاک در مقابل تاثیر الیاف کربن و آهک است. زیرا همانطور که در نتایج دیده شد نانو رس دامنه خمیری را افزایش داده و الیاف کربن و آهک دامنه خمیری را کاهش می دهد.

۴-۲-نتایج آزمایش تراکم

بر اساس نتایج به دست آمده از شکل ۶ مربوط به مخلوط خاک با آهک، میزان دانسیته خشک حداکثر نسبت به خاک طبیعی، کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. روند کاهش با افزایش درصد آهک از ۲ تا ۸ درصد از ۱/۶۳ gr/cm^3 تا ۱/۵۸ gr/cm^3 می‌باشد. براساس نتایج به دست آمده میزان رطوبت بهینه با افزایش درصد آهک نسبت به خاک طبیعی افزایش می یابد (شکل ۷). علت کاهش دانسیته به دلیل بالاتر بودن چگالی دانه های خاک نسبت به دانه های اهک و همچنین کلسیمی شدن رس می باشد. افزایش رطوبت بهینه نیز به علت انجام هیدراتاسیون و واکنش های پوزولانی میان خاک و آهک و همچنین آب دوست بودن آهک بوده، چنانکه با افزایش میزان آهک، رطوبت بهینه نیز افزایش می یابد.



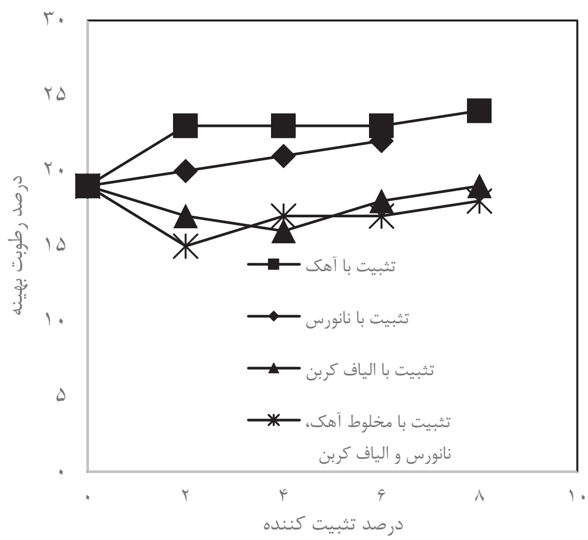
شکل ۶) تاثیر درصد تثبیت کننده بر حداکثر دانسیته خشک در عمل آوری ۲۸ روزه

با توجه به نتایج به دست آمده با افزودن مقادیر مختلف نانورس به خاک های آزمایش شده، وزن مخصوص خشک ماکزیمم و درصد رطوبت بهینه نمونه ها افزایش یافته است که علت افزایش وزن مخصوص خشک نمونه ها را میتوان به جایگزینی ذرات ریز نانو با دانسیته بیشتر تر با خاک مرتبط دانست .هم چنین به دلیل تمایل نمونه ها به جذب آب بیش تر ناشی از افزایش سطح ویژه خاک در اثر افزودن نانورس، درصد رطوبت بهینه نمونه هازیاد شده است.

بر اساس نتایج به دست آمده، در مخلوط خاک با الیاف کربن، میزان دانسیته خشک حداکثر نسبت به خاک طبیعی، با افزایش درصد الیاف کربن، کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. همچنین میزان رطوبت بهینه، ابتدا با افزایش درصد الیاف کربن تا میزان ۴ درصد نسبت به خاک طبیعی کاهش و سپس با افزودن بیشتر از ۴ درصد الیاف کربن ،افزایش می‌یابد. کاهش دانسیته به دلیل بالاتر بودن چگالی دانه های خاک نسبت به الیاف کربن می باشد.

بر اساس نتایج به دست آمده در مخلوط خاک، آهک، نانو رس و الیاف کربن، حداکثر دانسیته خشک در افزایش ۲ درصد، ابتدا نسبت به خاک طبیعی کاهش و با افزایش بیشتر درصد تثبیت کننده، افزایش می یابد. به بیان دیگر، تاثیر نانو رس در بین تثبیت کننده ها، باعث افزایش حداکثر دانسیته خشک در درصدهای بالاتر از ۲ می‌شود. اما باید ذکر شود که در نهایت مقدار حداکثر دانسیته خشک تقریبا برابر خاک طبیعی می شود. زیرا آهک و الیاف کربن حداکثر دانسیته خشک را کاهش و نانو رس افزایش می دهد. نتایج حاکی از آن است که با افزودن هرسه ماده، قدرت جذب آب مخلوط خاک مورد آزمایش و درصد رطوبت بهینه نسبت به خاک طبیعی ابتدا کاهش و با افزایش بیشتر از ۲ درصد افزایش می‌یابد. به طور کلی

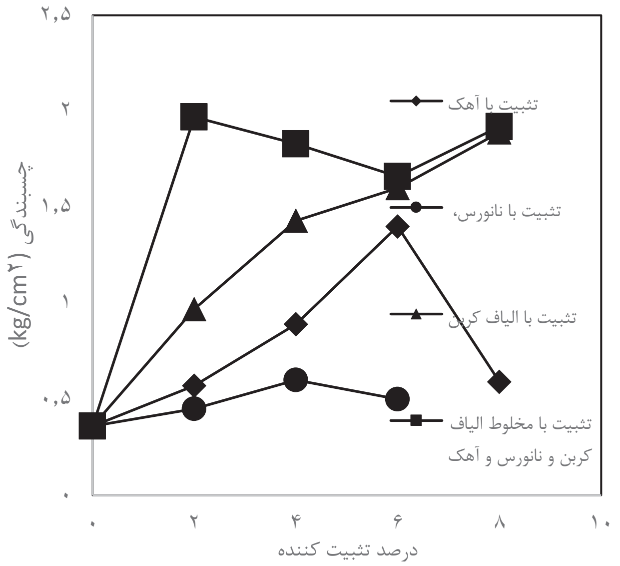
می‌توان گفت که آهک و نانورس درصد رطوبت بهینه را نسبت به خاک طبیعی افزایش می دهد و الیاف کربن درصد رطوبت بهینه را نسبت به خاک طبیعی کاهش می دهد. نتایج نشان می دهد که با افزایش مخلوط الیاف کربن، نانو رس، آهک، درصد رطوبت بهینه نسبت به خاک طبیعی کاهش داشته و رفتار خاک مشابه شرایطی است که الیاف کربن به خاک اضافه شده است.



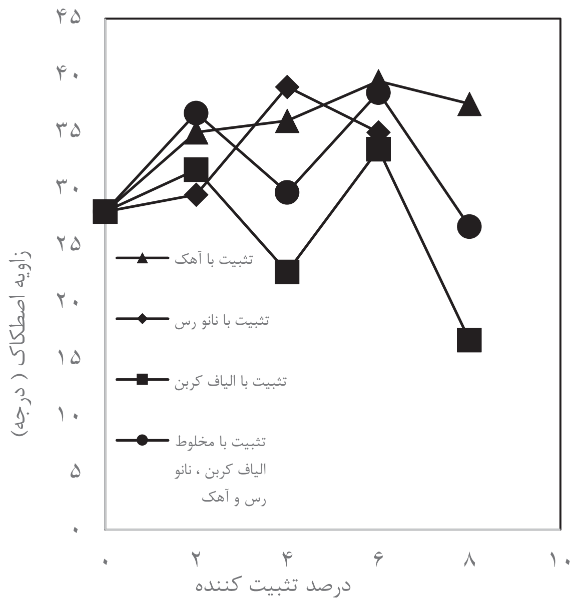
شکل۷) تاثیر درصد تثبیت کننده بر درصد رطوبت بهینه در زمان عمل آوری ۲۸ روز

۴-۳ - نتایج آزمایش برش مستقیم

بر اساس نتایج به دست آمده افزودن ماده آهک تا ۶ درصد باعث افزایش پارامترهای مقاومتی خاک می گردد و در مقادیر بیشتر کاهش مقاومت برشی مشاهده می شود. همچنین افزودن آهک به مقدار ۶ درصد، بهترین مقدار جهت تثبیت خاک می‌باشد. در این مقدار بهینه زاویه اصطکاک ۴۱ درصد نسبت به خاک طبیعی افزایش می یابد و جسبندگی ۳٫۹ برابر می شود (شکل ۸ و ۹). علت این پدیده را باید در مکانیسم واکنش آهک با ذرات خاک بررسی کرد. خاک ترکیب شده با آهک با شروع سیمانتاسیون می‌تواند تثبیت شود و مقدار مقاومت و سختی به طور محسوسی زیاد می‌گردد. مقاومت کوتاه مدت خاک تثبیت شده با آهک ناشی از واکنش‌های تبادل کاتیونی و مقاومت بلند مدت ناشی از واکنش‌های پوزولانیک می‌باشند. با افزودن آهک به خاک تا حد درصد بهینه، حداکثر تغییر در کانی‌های خاک رس به دلیل واکنش‌های ذکر شده اتفاق میفتد و درگیری مکانیکی بین ذرات خاک منجر به افزایش زاویه اصطکاک می‌شود که همین تغییرات ساختاری عاملی در افزایش مقاومت برشی است ولی درصورتیکه این مقدار از درصد بهینه عبور کند منجر به ایجاد تخلخل در خاک می‌شود و دیگر تراکم به خوبی صورت نمی‌پذیرد و مقاومت برشی کاهش می‌یابد.



شکل ۸) تاثیر درصد تثبیت کننده بر چسبندگی خاک در زمان عمل آوری ۲۸ روزه



شکل ۹) تاثیر درصد تثبیت کننده بر زاویه اصطکاک خاک در زمان عمل اوری ۲۸ روزه

بر اساس نتایج به دست آمده افزودن ماده نانورس باعث افزایش قابل توجه در چسبندگی خاک نمیگردد. اما افزایش زاویه اصطکاک قابل توجه می باشد. دلیل افزایش زاویه اصطکاک ناشی از افزودن ذرات نانورس را می توان به اندرکنش و پیوند بین دانه ها ناشی از حضور ذرات نانو در بافت خاک مرتبط دانست که این مطلب پیش

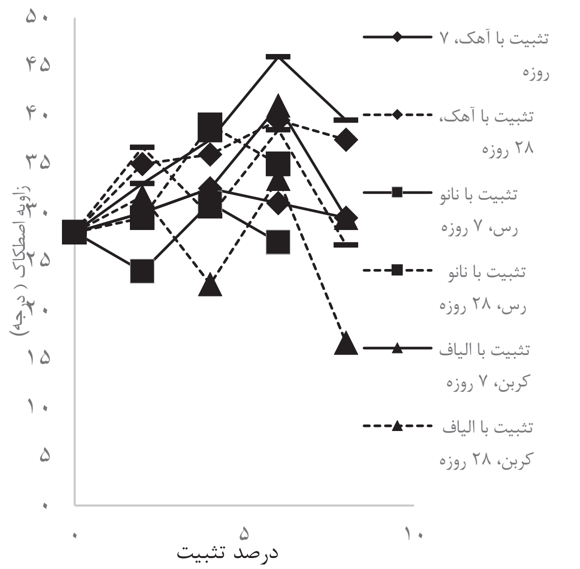
تر در نتایج تحقیقات گذشته نیز اشاره شده است[19] . همچنین با توجه به نتایج، میزان چسبندگی در عمل آوری های ۲۸ روزه تقریبا یکنواخت می باشد و میزان زاویه اصطکاک داخلی در زمان عمل آوری ۲۸ روزه افزایش می یابد. درصد افزایش میزان زاویه اصطکاک داخلی خاک در درصد بهینه ۴ نسبت به خاک طبیعی ، برای عمل آوری ۲۸ روزه ۳۹ درصد می باشد. لازم به ذکر است، مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک ابتدا تا مخلوط ۴ درصد، روند صعودی و سپس با افزایش نانو روند نزولی به خود می گیرد. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش های آزمایشگاهی، افزودن نانورس به مقدار ۴ درصد، بهترین مقدار جهت تثبیت خاک می باشد.

همانطور که در شکل ۸ دیده می شود، با افزایش درصد الیاف کربن، چسبندگی خاک نسبت به خاک طبیعی افزایش می یابد و تقریبا ۵ برابر می شود. همچنین نتایج نشان می دهد که با افزایش درصد الیاف کربن، روند تغییرات زاویه اصطکاک ثابت نیست و در ۶ درصد ماکزیمم می شود و ۱۹ درصدنسبت به خاک طبیعی افزایش می یابد. این نتیجه می تواند به دلیل نحوه توزیع الیاف کربن در خاک و خطاهایی که در آزمایش برش مستقیم پیش می آید باشد.

در انتها تاثیر مخلوط الیاف کربن، نانورس و آهک بر زاویه اصطکاک و چسبندگی خاک بررسی می شود. همانطور که در شکل ۸ و۹ دیده می شود، ماکزیمم چسبندگی در ۲ درصد تثبیت کننده به دست می آید و نتایج مربوط به بهینه درصد تثبیت کننده با شرایطی که یکی از این تثبیت کننده ها استفاده شود متفاوت است. مقدار چسبندگی دراین شرایط ۵٫۵ برابر می شود. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می شود، تغییرات زاویه اصطکاک ثابت نیست و مشابه شرایطی است که الیاف کربن به خاک طبیعی اضافه شده است. میزان افزایش زاویه اصطکاک نسبت به خاک طبیعی در بهینه ترین حالت که در درصد تثبیت کننده ۶ می باشد ۳۷ درصد است. به طور کلی بیشترین افزایش مقاومت برشی در استفاده از مخلوط آهک، الیاف کربن و نانو رس دیده می شود، که عمده تاثیر را از آهک می‌گیرد.

۴-۳-۱-تاثیر زمان عمل آوری بر زاویه اصطکاک خاک در درصدهای تثبیت کننده مختلف

در این بخش تاثیر زمان عمل آوری بر زاویه اصطکاک خاک در درصدهای مختلف تثبیت کننده بررسی می شود. نتایج در شکل ۱۰نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش درصد آهک و نانو رس، زاویه اصطکاک در زمان عمل آوری ۲۸ روزه بیشتر از زمان عمل آوری ۷ روزه می شود. اما با افزایش درصد الیاف کربن و مخلوط الیاف کربن، آهک و نانو رس، زاویه اصطکاک در زمان عمل آوری ۷ روزه بیشتر از ۲۸ روزه می شود. درصد افزایش از ۷ روز به ۲۸ روز برای شرایطی که آهک اضافه شده است در شرایط بهینه۲۱ درصد است. در مورد نانو رس درصد افزایش از ۷ روز به ۲۸ روز، در شرایط بهینه ۲۵ درصد است. همچنین در مورد الیاف کربن درصد کاهش از ۷ روز به ۲۸ روز در شرایط بهینه، ۲۲ درصد است و در مورد ترکیب الیاف کربن، آهک و نانو رس این درصد کاهش برابر ۱۹ درصد است. نتایج نشان می دهد که درصد افزایش و کاهش در زمان عمل آوری ۷ روز به ۲۸ روز در تثبیت کننده های مختلف تقریبا مشابه و حدود ۲۰ درصد می باشد.



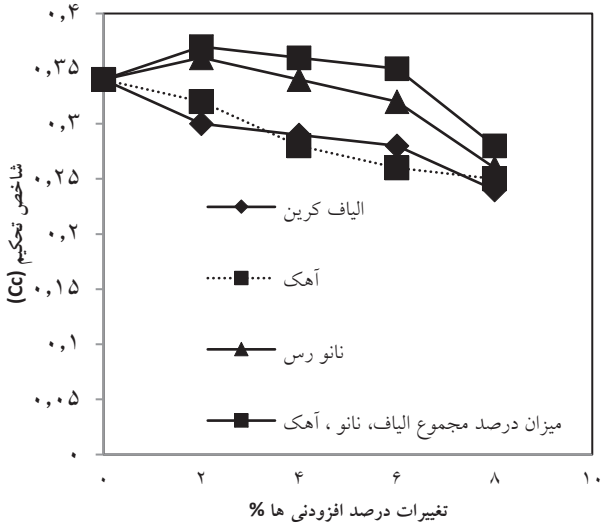
شکل ۱۰) تاثیر زمان عمل آوری بر زاویه اصطکاک خاک در درصد تثبیت کننده های مختلف

۴-۴-نتایج آزمایش تحکیم

همانطور که نتایج نشان می دهد، با افزایش درصد آهک شاخص تحکیم کاهش می یابد. به طوریکه در مقدار آهک ۸ درصد، نسبت به خاک طبیعی ۲۷ درصد کاهش مشاهده می شود. (شکل 11). این کاهش به علت گیرش آهک با خاک و مقاومت نمونه در برابر نشست می باشد. در مورد تاثیر افزایش نانو رس، نتایج نشان می دهد که در میزان ۲ درصد، تغییرات ناچیز است و روند افزایشی دارد و با افزایش بیشتر مقدار نانو رس، کاهش شاخص تحکیم مشاهده می شود. به طوریکه در ۸ درصد نانو رس، ۲۵ درصد کاهش شاخص تحکیم نسبت به خاک طبیعی مشاهده می شود. پس نتیجه قابل توجه، عدم تاثیر نانو رس بر قابلیت نشست پذیری تا مقدار ۲ درصد می باشد. علت را می توان در تغییرات دامنه خمیری نمونه در درصدهای مختلف نانو رس مطابق جدول ۵ به دست آورد. همانطور که در جدول دیده می شود در نمونه خاک با ۲ درصد نانورس دامنه خمیری نسبت به خاک طبیعی ۵۰ درصد افزایش پیدا کرده و همین باعث افزایش تغییر شکل

پذیری نمونه خاک می شود و با افزایش بیشتر مقدار نانو رس دامنه خمیری روندی کاهشی پیدا کرده است.

در مورد تاثیر الیاف کربن بر شاخص تحکیم و تراکم پذیری خاک، نتایج نشان می دهد که با افزایش درصد الیاف کربن کاهش شاخص تحکیم و تراکم پذیری نمونه مشاهده می شود. دلیل این رفتار افزایش مقاومت و مدول سختی الیاف کربن می باشد که باعث کاهش تخلخل و افزایش مقاومت خاک در برابر نشست می شود. همانطور که در شکل ۱۱ دیده می شود تاثیر مخلوط آهک، نانو رس و الیاف کربن هم بر خاک طبیعی بررسی شده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش درصد مخلوط مورد نظرتا ۲ درصد، شاخص تحکیم نسبت به خاک طبیعی افزایش می یابد و با افزایش درصد این مخلوط تا ۶ درصد با شیب کم، کاهش شاخص تحکیم مشاهده می شود، اما هنوز مقدار آن بیشتر از خاک طبیعی می باشد. با افزایش مقدار این مخلوط تا ۸ درصد، کاهش شاخص تحکیم با شیب بیشتر مشاهده می شود و ۱۸ درصد کاهش نسبت به خاک طبیعی دیده می شود. علت این رفتار تاثیر غالب نانورس بر رفتار این خاک در درصدهای پایین تر می باشد. نتایج نشان می دهد که کمترین میزان شاخص تحکیم مربوط به خاک با ۸ درصد الیاف کربن می باشد. دلیل آن هم افزایش سختی و مقاومت و کاهش تخلخل نمونه خاک به واسطه وجود الیاف کربن است.



شکل ۱۱) تغییرات شاخص تحکیم با تغییرات میزان درصد الیاف کربن، آهک و نانورس

۵-نتیجه گیری

در این تحقیق به ارائه روش های علمی و آزمایشگاهی جهت بهسازی خاک های رسی گچدار پرداخته شده است و اثر هریک از مصالح مانند الیاف کربن، نانورس و اهک و مخلوط این افزودنی ها (با نسبت مساوی) بر رفتار این نوع خاک ها مورد مطالعه قرار گرفته است. آزمایشهایی انجام شده در این تحقیق حدود آتربرگ، تراکم، برش مستقیم و تحکیم می باشد. نتایج به دست آمده از این تحقیق عبارتند از:

-افزودن آهک و همچنین الیاف کربن باعث تغییر رفتار رس به حالت غیر خمیری می‌گردد. در حالیکه افزودن نانو به خاک باعث تغییر رفتار رس به سمت افزایش دامنه خمیری می‌گردد. در شرایطی که مخلوط الیاف کربن و آهک و نانو رس به خاک طبیعی اضافه شود، تاثیر نانو رس باعث افزایش دامنه خمیری می شود.

-افزودن آهک و الیاف کربن به خاک طبیعی باعث کاهش حداکثر دانسیته خشک و افزایش طوبت بهینه نسبت به خاک طبیعی می شود. با افزودن نانو رس به خاک رس گچدار، دانسینه خشک حداکثر و رطوبت بهینه افزایش می یابد. با اضافه کردن مخلوط الیاف کربن، آهک و نانورس به خاک طبیعی تا میزان افزودنی ۲ درصد، کاهش حداکثر دانسیته خشک و درصد رطوبت بهینه مشاهده می شود و در مقدار بیشتر از ۲ درصد افزایش حداکثر دانسیته خشک و رطوبت بهینه مشاهده می شود. به این ترتیب تاثیر نانو رس بر مخلوط این سه افزودنی بیشتر است

- بیشترین چسبندگی در اضافه کردن مخلوط این ۳ افزوددنی به خاک اتفاق می افتد و روند تغییرات چسبندگی در درصدهای مختلف الیاف کربن به خاک تقریبا مشابه با مخلوط ۳ افزودنی می باشد . همچنین کمترین افزایش چسبندگی در اضافه کردن نانو رس به خاک دیده می شود که تقریبا مشابه با خاک طبیعی می باشد. در مورد تاثیر تثبیت کننده ها بر زاویه اصطکاک خاک نتایج نشان می دهد که در ۳ حالت استفاده از نانو رس، آهک و مخلوط ۳ افزودنی ماکزیمم زاویه اصطکاک تقریبا مشابه است ولی درصد بهینه مقادیر تثبیت کننده ها متفاوت است. در مورد الیاف کربن افزایش زاویه اصطکاک خیلی ناچیز است و در بعضی درصدها کاهش دیده می شود. می توان گفت که ماکزیمم افزایش پارامترهای مقاومت برشی در مورد مخلوط آهک، الیاف کربن و نانو رس اتفاق می افتد، که بیشترین تاثیر را از آهک می گیرد.

- در مورد تاثیر تثبیت کننده ها بر نشست تحکیمی نتایج نشان می دهد، در شرایط اضافه کردن آهک و الیاف کربن به خاک، کاهش شاخص تحکیمی دیده می شود و روند تغییرات مشابه می باشد. اما در مورد اضافه کردن نانو رس و همچنین مخلوط این ۳ افزودنی افزایش نشست تحکیمی دیده می شود. این نتیجه می تواند مربوط شود به تاثیری که این افزودنی ها بر رفتار خمیری خاک می گذارند. به طور کلی می توان گفت که برای کاهش نشست تحکیمی در خاک، آهک و الیاف کربن تاثیر قابل توجه دارند و جهت افزایش مقاومت

برشی خاک استفاده از مخلوط آهک، الیاف کربن و نانو رس بیشترین تاثیر را دارد. همچنین تثبیت کننده نانو رس، با توجه به افزایش شاخص خمیری، باعث کاهش نفوذپذیری شده و بیشتر در زمینه اب بند کردن کاربرد دارد.

۶-منابع

[۱] ضیایی موید، رضا و هراتیان، مهرداد. (۱۳۸۹)" تاثیر تثبیت با آهک و پلیمر و تسلیح با الیاف پلیمری بر رفتار تغییر حجمی خاک های رسی شور" نشریه زمین شناسی مهندسی، جلد چهارم، شماره ۱، ص ۸۲۷-۸۵۲.

[۲] روحبخشان، آرمین و کلانتری، بهزاد. (۱۳۹۵)" تثبیت خاک رس با آهک و پودر ضایعات سنگی" نشریه علمی پژوهشی امیر کبیر- مهندسی عمران و محیط زیست، دوره ۴۸، شماره ۴، ص ۴۲۹-۴۳۸.

[3] Lazaro, R. C. and Moh, Z. C.; "Stabilization of Deltaic Clays with Lime-rice Husk Ash Admixtures," *2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering, Singapore*, pp. 215–223, 1970.

[4]Rahman, M. A.; "Effect of Cement-rice Husk Ash Mixtures on Geotechnical Properties of Lateritic Soils," *Soils and Foundations*, Vol. 27, No. 2, pp. 61–65, 1987.

[5] Ali, F. H.; Adnan, A. and Choy, C. K.; "Use of Rice Husk Ash to Enhance Lime Treatment of Soil," *Canadian Geotech Journal*, Vol. 29, No. 5, pp. 843–852, 1992.

[6] Muntohar, A. S.; "Influence of Plastic Waste Fibers on the Strength of Lime-rice Husk Ash Stabilized Clay Soil," *Civil Engineering Dimension*, Vol. 11, No. 1, pp. 32–40, 2009

[7] Demirel, B.; "*The Effect of the Using Waste Marble Dust as Fine Sand on the Mechanical Properties of the Concrete*," International Journal of the Physical Sciences, Vol. 5, No. 9, pp. 1372–1380, 2010.

[8] Sakr, M., Shahin, M and Metwally, Y., 2009.," *Utilization of Lime for Stabilizing Soft Clay Soil of High Organic Content*", Geotechnical and Geological Engineering, 27, 105.

[9] Yunis, N., Marto, A.,Pakir, F.,Kasran, K., Azri, M. and Abdolah, N. 2015" *Performance of Lime-Treated Marine Clay on Strength and Compressibility Chracteristics.*" International Journal of Geomate, 8, 2, pp. 1232-1238.

[10] Nelson, D.J., and Miller, J.D., "*Expansive Soils: Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*", John Wiley and Sons, New York, (1992).

[11] Kananizadeh N., Ebadi T., Khoshniat S. A., Mousavirizi S. E., "The positive effects of nanoclay on the hydraulic conductivity of compacted Kahrizak clay permeated with landfill leachate", Clean–Soil, Air, Water Vol.39 (7) (2011) 605-611.

[12] اوحدی و.، چوبچیان ا.،" رفتار ژئوتکنیک زیست محیطی مونتموریلونیت اصلاح شده با کاتیون در جذب آلاینده سرب"، مجلهٔ علمی پژوهشی عمران تربیت مدرس، دورهٔ دهم، شمارهٔ دوم (1389).

[13] Iranpour B., Haddad A., "*The influence on nanomaterials on collapsible soil treatment*", Engineering Geology Vol. 205(2016) 40-53.

[14]بهاری م.، شاهنظری ع.،" بررسی آزمایشگاهی تثبیت بستر خاکی ریزدانه با استفاده از نانورس"، مجلهٔ علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی -علوم آب و خاک، سال نوزدهم، شمارهٔ هفتاد و دوم (۱۳۹۴).

[15] Bell, F. G.; "*Stabilization and Treatment of Clay Soils with Lime-some Applications*,"*Ground Engineering*, Vol. 21, No. 2, pp. 22–30, 1988.

[16] فخری ز.، پورحسینی اردکانی ر.، عبادی ت.،" بهبود خواص هیدرولیکی خاک رس کائولینیت با افزودن نانورس"، مجلهٔ علمی پژوهشی عمران و محیط زیست امیرکبیر، دورهٔ چهل و هفتم، شمارهٔ سوم (۱۳۹۴).

[17] Lan T., Kaviratna P. D., "*Mechanism of clay tactiod exfoliation in epoxy-clay nanocomposites*", Chem. Master (1995) 2144-2150.

[18] Mitchel J. K., Soga K., "*Fundamental of Soil Behavior*", John Wiley and Sons, Third Edition, (2005).

[19]Khalid N., Mukri M., Kamarudin F., "*Effect of nanoclay in soft soil stabilization*", Springer Science Business Media Singapore (2015) 905-914.

[20] قالیباف ح، بزاز ج و باقرپورا، "بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی خاکهای گچی شمال شرق مشهد وراهکارهای بهسازی آن"، چهارمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران،۱۳۸۹، تهران، ایران

[21]ASTM D4318 - Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, 2010.

[22]ASTM D698 - Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, 2011.

[23]ASTM D3080 / D3080M - Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, 2011.

[24]ASTM D2435 / D2435M -Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading