



بررسی عددی و آزمایشگاهی میزان بهینه بهسازی خاک رس فیروزبهرام با آهک و سیمان و تأثیر آن در کاهش نشست پذیری خاک بستر تصفیه‌خانه فاضلاب غرب تهران

مسعود ذبیحی سامانی^{۱*}، سید مصطفی دریاباری^۱، سید ابوالفضل دریاباری^۲، سید علیرضا میرحبیبی^۱

^۱ گروه مهندسی عمران، واحد پرند، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۰۱

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۶/۰۵

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۷/۰۴

کلمات کلیدی:

آهک

سیمان

اصلاح خاک رس

تثبیت خاک

نشست پی‌های گسترده

خلاصه: با توجه به اهمیت کنترل نشست در پی‌های گسترده به ویژه در خاک‌هایی که مقاومت لازم را نداشته، جهت احداث سازه بر روی این گونه خاک‌ها، روش‌های گوناگونی برای کاهش نشست وجود دارد. از جمله این روش‌ها، اصلاح خاک با استفاده از موادی مشابه آهک و سیمان است. در این پژوهش، از افزودنی‌های آهک و سیمان جهت تثبیت خاک رس به منظور کاهش نشست در پی‌های گسترده، در بهبود پارامترهای مقاومتی استفاده شده است. آهک و سیمان با خاک رس ترکیب و تأثیر استفاده از این دو ماده افزودنی در تثبیت خاک ریزدانه رسی (CL) در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های خاک در حالت طبیعی و نیز در حالت ترکیب با درصدهای مختلف آهک و سیمان معادل ۳٪، ۶٪ و ۸٪ وزن خشک خاک برای آزمون‌های آزمایشگاهی شامل آزمایش حدود آتربرگ، آزمایش دانه‌بندی، آزمایش تراکم استاندارد، آزمایش مقاومت فشاری و آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا و همچنین آزمایش‌های سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده (CU) و برش مستقیم، مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج بدست آمده کاهش در پلاستیسیته و وزن واحد حجم بیشینه خاک و افزایش رطوبت بهینه، مقاومت فشاری و همچنین نسبت باربری کالیفرنیا رس با افزودن این دو ماده را نشان می‌دهد. میزان چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی که از آزمایش‌های سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده (CU) و برش مستقیم بدست آمده است، با افزایش درصد سیمان و آهک افزایش می‌یابند. به منظور صحت‌سنجی تحقیقات انجام شده آزمایش بارگذاری صفحه در محل نیز انجام شده است. پس از بررسی‌های آزمایشگاهی، اثرات استفاده از خاک اصلاح شده با اعماق بهسازی ۱m، ۲m، ۴m، ۶m، ۸m و ۱۰m به کمک نرم‌افزار Plaxis۲D بصورت عددی نیز ارزیابی شد. نتایج نشان‌دهنده این امر است که با افزایش عمق بهسازی، میزان نشست کاهش یافته که این میزان در مقایسه با نشست بدست آمده از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای در حالت طبیعی دارای اختلاف زیادی می‌باشد. اما اختلاف نتایج بدست آمده از نرم‌افزار و آزمایش بارگذاری پس از بهسازی ناچیز می‌باشد.

۱- مقدمه

با موارد افزودنی اشاره کرد. تثبیت خاک با آهک و سیمان به طور گسترده‌ای در مهندسی عمران در پروژه‌های مختلف جهت تقویت خاک زیر شالوده‌ها، بستر راه‌ها و خاکریزها به کار گرفته شده است. این روش‌ها علاوه بر مقاومت روی سایر مشخصه‌های خاک نیز تأثیر می‌گذارد. انتخاب نوع ماده تثبیت کننده به عوامل زیادی از قبیل جنس خاک، شرایط جوی منطقه، میزان آمد و شد، هدف از انجام تثبیت خاک و هزینه عملیات بستگی دارد. با توجه به این موارد،

اغلب خاک رس طبیعی در برابر بارهای وارده از مقاومت لازم برخوردار نمی‌باشد، که این امر یکی از عوامل ایجاد نشست‌های غیر قابل قبول در شالوده‌های گسترده می‌باشد. لذا بایستی با استفاده از روش‌های اصلاح خاک، مقاومت لازم جهت جلوگیری از نشست‌های بیش از حد ایجاد شود، که از جمله این روش‌ها می‌توان به تثبیت

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mzabihi@iust.ac.ir



۱ و ۷ روزه و همچنین تغییرات شاخص خمیری را با اضافه کردن آهک مورد بررسی قرار دادند [۵]. آسما موحمد^۶ و همکاران در سال ۲۰۱۳ مطالعاتی در رابطه با تأثیر تثبیت به وسیله آهک در مقاومت و ریزساختار رس انجام دادند. در این پژوهش آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم، مقاومت فشاری محصور نشده و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)^۷ بر روی خاک رس کائولین مخلوط شده با ۵٪ آهک هیدراته انجام شد سپس دو متغیر مؤثر بر میزان مقاومت مورد بررسی قرار گرفت که این متغیرها شامل زمان عمل‌آوری و درصد رطوبت بودند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که زمان عمل‌آوری باعث افزایش مقاومت فشاری محصور نشده می‌شود. همچنین تجزیه و تحلیل SEM، حضور محصولات سیمانی را در خاک رس کائولین ناشی از واکنش آهک به خاک رس نشان داد [۶]. جابر شهیری^۸ و همکاران در سال ۲۰۱۷ به تثبیت خاک با سیمان و سرباره مس پرداختند. در این تحقیق آزمایش مقاومت فشاری تک محوری بر روی خاک رس تثبیت شده با سیمان و خاک تثبیت شده با سیمان و سرباره مس با درصد‌های مختلف و زمان‌های عمل‌آوری متفاوت انجام گرفت که نتایج آزمون‌ها نشان داد که گنجاندن سرباره مس تأثیر معناداری بر مقاومت فشاری محصور نشده دارد [۷]. آنیل پاندی^۹ و همکاران در سال ۲۰۱۷ بر روی تثبیت خاک به وسیله سیمان تحقیقی را انجام دادند که این کار تحقیقاتی عمدتاً بر تثبیت خاک با استفاده از سیمان برای بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی مانند پلاستیسیته، تراکم و مقاومت فشاری محصور نشده خاک مورد مطالعه انجام شد. در این کار مشخص شد که با افزایش مقدار سیمان اضافه شده به خاک، از چگالی خشک خاک کاسته می‌شود و رطوبت بهینه افزایش می‌یابد. همچنین با افزودن سیمان به خاک مقاومت فشاری محصور نشده افزایش یافته و در دوره عمل‌آوری بیشتر نیز این میزان بالاتر مشاهده گردید [۸]. سای هارشیتا^{۱۰} در سال ۲۰۱۸ تحقیقی به منظور تعیین وزن مخصوص، حدود اتربرگ، مقاومت برشی، رفتار تراکمی و ظرفیت باربری خاک با استفاده از پودر آهک را انجام داد. در این مطالعه، بین ۰ تا ۱۰٪ پودر آهک به خاک رسی مورد مطالعه اضافه شد. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که افزایش بهینه خواص خاک با ۸٪ پودر

انجام آزمایش‌ها و بررسی‌های دقیق خاک منطقه مورد نظر ضروری می‌باشد. از جمله مواد تثبیت کننده که در خاک‌های رسی تأثیر مطلوبی دارد، سیمان و آهک می‌باشد. زمانی که آهک به خاک مرطوب اضافه می‌شود دو دسته واکنش رخ می‌دهد: (۱) واکنش کوتاه‌مدت و (۲) واکنش بلندمدت. واکنش‌های کوتاه‌مدت شامل تبادل کاتیونی، لخته شدن^۱ و کربناسیون و واکنش‌های بلندمدت شامل، واکنش‌های پوزولانی و مقاومتی است. تبادل کاتیونی بین یون کلسیم آهک و کاتیون‌های مختلف جمع شده در سطح خاک اتفاق می‌افتد و در نتیجه آن ذرات رس به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند که این روند را لخته شدن می‌نامند. دسته دوم واکنش‌ها یعنی واکنش‌های بلندمدت (پوزولانی)، موجب بالا رفتن مقاومت خاک‌های رسی می‌شوند [۱]. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد، رفتار مقاومتی خاک‌ها به طور عمده پس از تثبیت با آهک بهبود می‌یابد. اگر چه استفاده از آهک خواص مهندسی خاک را بهبود می‌بخشد، لکن سبب ایجاد تغییرات نامطلوب در برخی مشخصه‌های آن نیز می‌گردد که از آن جمله می‌توان به کاهش شکل‌پذیری و افزایش سختی و رفتار شکننده خاک تثبیت شده با آهک اشاره کرد [۲]. سیمان نیز که از دیگر افزودنی مورد استفاده جهت تثبیت خاک می‌باشد دارای مواد پوزولانی بوده و در کنار آب تبدیل به ماده چسباننده‌ای شده و دانه‌های خاک را به همدیگر پیوند می‌دهد. در خاک‌های تثبیت شده با سیمان مقاومت با گذر زمان افزایش می‌یابد. در روزهای اول، افزایش مقاومت با سرعت بیشتری انجام می‌پذیرد؛ ولی با گذشت زمان از سرعت افزایش مقاومت کاسته می‌شود [۳]. تاکنون مطالعات بسیاری در رابطه با تثبیت خاک‌ها با استفاده از آهک و سیمان انجام شده است. امر علی الراواس^۲ و هیلال السرمی^۳ در سال ۲۰۰۵، خاک تورمی شهر الخود (شهر شمالی عمان) را با استفاده از آهک تثبیت کردند. نتایج نشان داد که با افزودن ۶٪ آهک، درصد تورم و فشار تورم، به صفر کاهش می‌یابد [۴]. وحید اوهادی و ان یانگ^۴، در سال ۲۰۰۶، تأثیر افزودن آهک را بر روی خاک مارنی نمونه‌برداری شده از قسمت شمالی خلیج فارس بررسی کردند. آن‌ها تأثیر افزودن آهک را بر تغییرات مقادیر سی بی ار (CBR)^۵ در حالت خشک و تر و در زمان

6 Asma Muhmed
7 Scanning Electron Microscope
8 Jaber Shahiri
9 Anil Pandey
10 Sai Harshita

1 Flocculate
2 Amer Ali Al-Rawas
3 Hilal Al-Sarmi
4 Raymond N. Yong
5 California Bearing Ratio

می‌شود که اثر آهک، در شرایط عمل‌آوری مرطوب بیش از سیمان بوده، و در شرایط عمل‌آوری تر، اثر سیمان در افزایش مقاومت بیش از آهک است. نتایج همچنین نشان می‌دهند که نسبت مقاومت فشاری مرطوب به خاک‌های تر تثبیت شده به نوع خاک، مقدار و نوع ماده افزودنی بستگی دارد [۱۳]. در این تحقیق علاوه بر بررسی و مقایسه تأثیر بهسازی خاک به وسیله آهک و سیمان، بر روی پارامترهای مقاومتی به میزان نشست پس از بهسازی خاک در اعماق مختلف به وسیله آزمایش بارگذاری صفحه‌ای و نرم‌افزار Plaxis2D خواهیم پرداخت. با توجه به مقادیر مجاز اولیه برای نشست یکنواخت موجود در مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان، میزان نشست مجاز در پی‌های گسترده بر روی خاک‌های رسی ۶/۵cm تا ۱۰cm می‌باشد. بنابر اطلاع نویسندگان تاکنون پروژه‌ای به این ابعاد بزرگ بصورت آزمایشگاهی برای افزودن خاک رس و آهک تا رسیدن به نشست مورد نظر آیین‌نامه صورت نگرفته است. در این پژوهش به جهت وجود اتصالات حساس در تانک لجن فعال میزان نشست مجاز پی گسترده مورد نظر کمتر از ۳cm در نظر گرفته می‌شود تا بدین ترتیب اتصالات دچار اشکال نشود. با توجه به راهکارهای متفاوت موجود جهت حصول نشست کمتر از ۳cm و همچنین مهندسی ارزش صورت گرفته قبل از اجرای طرح، حداکثر میزان ماده افزودنی به منظور تثبیت خاک و کاهش نشست‌پذیری، ۸٪ وزن خشک خاک در نظر گرفته شده است که تا حدودی نتایج مطالعات قبلی را نیز تأیید می‌کند.

۲- مواد و روش‌ها

برنامه آزمایشگاهی در این تحقیق، شامل مراحل زیر است:

- (الف) آزمون‌های آزمایشگاهی اولیه شامل دانه‌بندی، حدود آتربرگ و آزمایش‌های تراکم استاندارد
- (ب) آزمون‌های آزمایش فشاری محدود نشده، آزمایش برش مستقیم، آزمایش مقاومت فشاری تک محوری و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) در مقادیر مختلف آهک و سیمان
- (ج) آزمون بارگذاری صفحه‌ای در محل احداث پروژه

۲-۱- مشخصات و جانمایی پروژه

این تحقیق به منظور بررسی خاک مسأله دار رسی تصفیه‌خانه فاضلاب غرب تهران می‌باشد که در زمینی به مساحت ۴۵ هکتار در

آهک در خاک امکان پذیر می‌باشد [۹]. رینو ژوزه^۱ و راجامانه^۲ در سال ۲۰۱۸ مطالعاتی با هدف مقایسه تثبیت خاک با آهک و سیمان انجام دادند. این مطالعه بر روی تغییرات مقاومت برشی خاک‌های رسی با پلاستیسیته بالا و پایین (CL, CH) مخلوط شده با آهک و سیمان انجام گرفته شده است. در این مطالعه مقاومت فشاری محصور نشده برای تمام نمونه‌های آماده شده با آهک و سیمان با دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روزه تعیین شده است که از نتایج آزمون (UCS) مشاهده گردید که مقدار مقاومت فشاری محصور نشده (UCS) با افزایش دوره عمل‌آوری و افزایش درصد آهک و سیمان اضافه شده افزایش می‌یابد. همچنین بهبود پارامترهای مقاومتی خاک و سختی باعث افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست می‌شود [۱۰]. ایکا پوجی هستوتی^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۹ از مخلوط ۱٪ تا ۱۰٪ سیمان، گچ و سنگ آهک بر روی خاک رس با استفاده از عمل‌آوری ۱۴ روز انجام گرفت. مطابق با این پژوهش میزان مقاومت فشاری تک محوری محصور نشده در خاک طبیعی برابر با $1/4 \text{ Kg/cm}^2$ تعیین گردید. آنان پس از تثبیت با مخلوط‌های مختلف سیمان، گچ و سنگ آهک حداکثر مقاومت فشاری محصور نشده در مخلوط ۱۰٪ سیمان $3/681 \text{ Kg/cm}^2$ اندازه‌گیری کردند. به طور مشابه، مقاومت فشاری محصور نشده در تثبیت خاک با مخلوط ۱۰٪ سنگ آهک و گچ به ترتیب $3/307 \text{ Kg/cm}^2$ و $2/975 \text{ Kg/cm}^2$ بدست آمده است [۱۱]. در پژوهشی که توسط یولیان فیرمانا آریفین^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۹ ترکیبات مختلف مخلوط خاک و سیمان و خاک و سیمان- خاکستر پوست درخت نخل (PKSA)^۵ در محدوده ۲٪-۱۰٪ وزن خاک تهیه شده است. در این تحقیق آزمایش‌های تراکم، مقاومت فشاری تک محوری و همچنین CBR بر روی ترکیبات مختلف بررسی گردید. نتایج نشان می‌دهد که مقدار بهینه PKSA ۲٪ در مخلوط خاک با ۱۰٪ سیمان می‌باشد [۱۲]. نصرتی و همکاران در سال (۱۳۹۴) اثر دو نوع تثبیت کننده مختلف بر مقاومت فشاری خاک رس با دامنه خمیری بالا مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد در خاک رس با دامنه خمیری بالا بیشترین کاهش دامنه خمیری مربوط به آهک است. برای خاک رس با دامنه خمیری بالا، نشان داده

1 Rinu Jose
2 N P Rajamane
3 Ika Puji Hastuty
4 Yulian Firmana Arifin
5 Palm Kernel Shell Ash Admixture

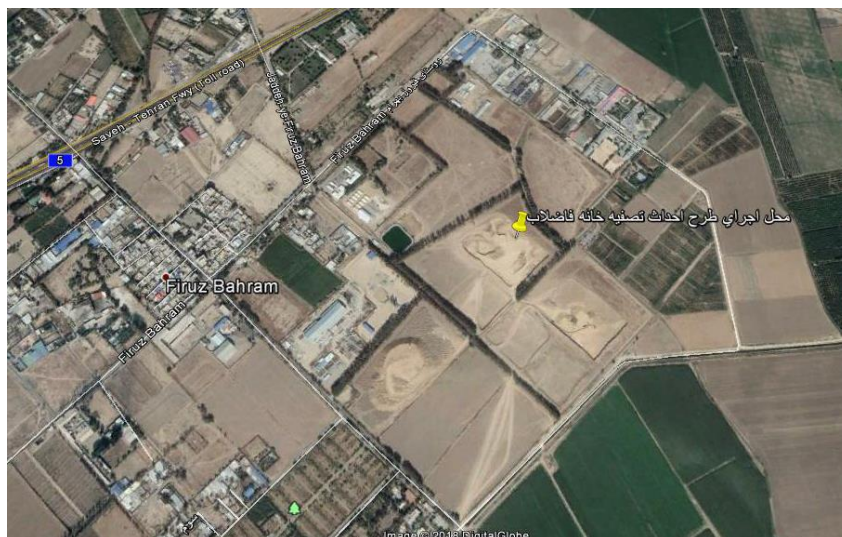
جدول ۱. آزمایشات و استانداردهای به کار گرفته شده بر روی نمونه‌های اخذ شده از محل پروژه

Table 1. Tests and standards applied to samples taken from the site

تعداد نمونه‌های مورد آزمایش	استاندارد	نوع آزمایش
۱۴	ASTM D4318	حدود اتربرگ
۷	ASTM D1557	تراکم استاندارد
۷	ASTM D2166	مقاومت فشاری تک محوری محصور نشده
۷	AASHTO T193	نسبت باربری کالیفرنیا
۷	ASTM D3080	برش مستقیم ۱۰*۱۰
۷	ASTM D4767	سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده (CU)
۲	ASTM D1194	بارگذاری صفحه‌ای

جدول ۲. مختصات جغرافیایی محل اجرای پروژه
Table 2. Geographical coordinates of the site

عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	منطقه مورد مطالعه
۳۵.۳۹۷۶۱	۵۱.۱۹۹۷۹	فیروز بهرام



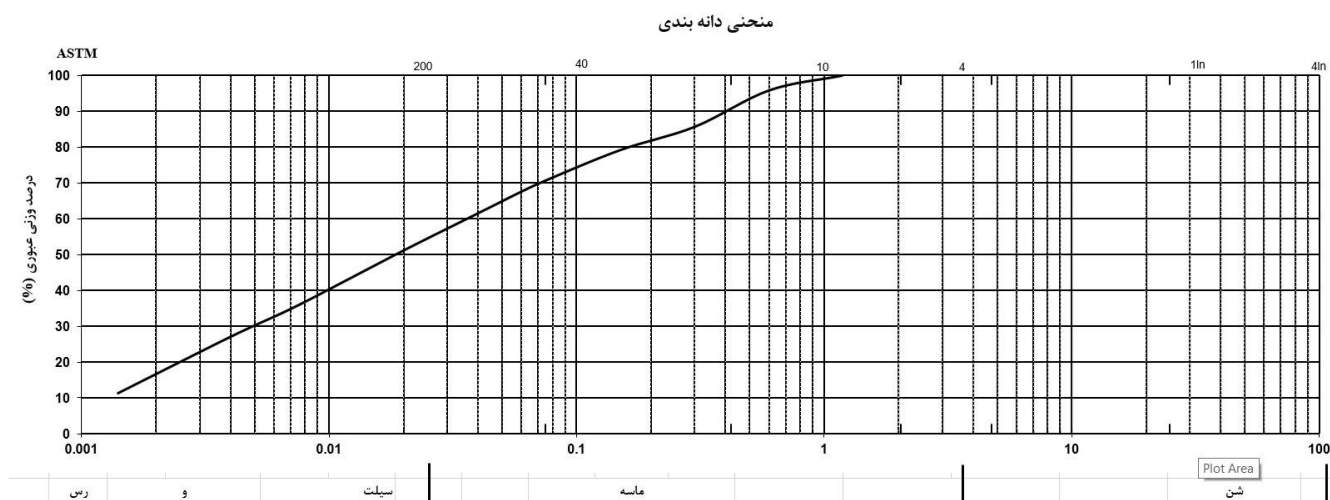
شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محل اجرای طرح
Fig. 1. Geographical location of the project

۵m واقع شده است.

۲-۲- مصالح مصرفی

سه نوع از مصالح گوناگون در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است که عبارتند از: خاک رس کائولینیت، آهک و سیمان. همچنین برای آزمایش‌های این پژوهش، ترکیبها با علامت (Clay) که بیانگر خاک رس مصرفی، (Lime) بیانگر آهک موجود در ترکیب

منطقه فیروزبهرام در جنوب بزرگراه آزادگان و در شرق آزادراه تهران ساوه واقع شده است که با جمعیت زیر پوشش دو میلیون و ۱۰۰ هزار نفر امکان تصفیه فاضلاب مناطق غرب و جنوب غربی تهران را فراهم می‌کند. واحدهای تصفیه‌خانه غرب تهران شامل سیستم تصفیه کامل بیولوژیکی به روش لجن فعال با قابلیت حذف ازت و فسفر همراه با تأسیسات فرآوری لجن خواهد بود. سازه تانک لجن فعال بر روی پی گسترده با عرض ۲۰m و نسبت طول به عرض ۲ و با عمق مدفون



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی خاک در عمق ۵ تا ۵/۴ متر
 Fig. ۲. Soil grading diagram at a depth of 4.5 to 5.0 meters

جدول ۳. مشخصات فنی خاک طبیعی سایت تانک لجن فعال شرقی
 Table 3. Technical specifications of natural soil of Eastern activated sludge tank site

عمق	درصد رطوبت	LL	P.L	P.I	دی یونیفاید	مدول الاستیسته	γ_{dMax}	W_{OPT}	γ_{dry}	ϕ (Degree)	C (Kg/cm ²)	آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده	آزمایش برش مستقیم ۱۰*۱۰
m	%	%	%	%	-	(Kg/cm ²)	(gr/cm ³)	%	(gr/cm ³)	(Degree)	(Kg/cm ²)		
-	ASTM D۲۲۱۶	ASTM D۴۳۱۸	ASTM D۴۲۲	ASTM D۲۱۶۶	ASTM D۱۵۵۷	ASTM D۱۵۵۷	ASTM D۱۵۵۶	ASTM D۴۷۶۷	ASTM D۲۰۸۰				
لجن فعال شرقی	۱۰/۸	۲۱/۰	۱۱/۰	۱۰/۰	CL	۱۲۵	۱/۷۳	۱۶/۲	۱/۶۵	۲۲	۰/۳۵	۲۳/۲	۰/۲۴

حد روانی و حد خمیری خاک اندازه گیری شد. شکل ۲ دانه‌بندی خاک مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. بیش از ۷۰٪ دانه‌های خاک ریزتر از ۰/۰۷۵ mm بوده و حدود ۳۰٪ آن نیز از ماسه تشکیل شده است. حد روانی و حد خمیری خاک نیز به ترتیب، ۲۱٪ و ۱۱٪ تعیین شدند که بر این اساس دامنه خمیری خاک ۱۰٪ محاسبه می‌شود. در طبقه‌بندی یونیفاید، خاک از نوع CL تعیین می‌شود. با توجه به مشخصات فنی نامطلوب ارائه شده در جدول ۳ که مربوط به خاک طبیعی می‌باشد، روش اصلاح یا بهبود خاک به وسیله افزودن

و (Cement) بیانگر سیمان موجود در ترکیب است.

۲-۲-۱- خاک رس

خاک رس مورد استفاده در این تحقیق از منطقه فیروزبهرام در جنوب بزرگراه آزادگان و در شرق آزادراه تهران ساوه تهیه شد. به علت قرارگیری فونداسیون مخزن در عمق ۵m، خاک نمونه‌گیری شده از عمق ۵m تا ۵/۴m برداشت و مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا دانه‌بندی خاک تهیه شده در عمق ۵ تا ۵/۴ متری انجام شده و سپس

جدول ۴. مشخصات شیمیایی آهک مورد استفاده بهسازی

Table 4. Chemical properties of lime used for soil improvement

آنالیز شیمیایی آهک	
نتایج	(%)
۱/۹۴	SiO ₂
۰/۶۸	Al ₂ O ₃
۰/۳۲	Fe ₂ O ₃
۰/۰۵	Alkali (K ₂ O,Na ₂ O)
۸۲/۳	CaO
-	TiO ₂
۰/۵۴	MgO
۱۴/۱۷	سایر موارد

جدول ۵. مشخصات فیزیکی سیمان مورد استفاده جهت بهسازی خاک

Table 5. Physical properties of cement used for soil improvement

نتایج آزمایش‌ها برای مشخصات فیزیکی سیمان		
نتایج	شرایط	آنالیز فیزیکی
۱۰۰±۳۰۰۰	-	سطح مخصوص
۱۰±۱۲۰	اولیه	زمان گیرش (min)
۱۰±۲۳۰	نهایی	انبساط اتوکلاو (%)
۰/۰۱±۰/۰۹	-	مقاومت فشاری (kg/cm ²)
۱۰±۲۸۰	۳ روز	
۲۰±۳۹۰	۷ روز	
۳۰±۵۲۰	۲۸ روز	



شکل ۳. نمونه‌های خاک ترکیب شده در کیسه‌های پلاستیکی در مدت عمل‌آوری

Fig. 3. Soil samples mixed in plastic bags during curing

با استفاده از نتایج به دست آمده، دامنه خمیری نمونه‌ها محاسبه شد.

شکل ۴ تغییرات دامنه خمیری خاک را برحسب مقادیر مختلف مواد

سیمان و آهک به خاک منطقه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۲-۲- آهک

در این تحقیق، آهک زنده به عنوان عامل تثبیت‌کننده مورد استفاده قرار گرفته بوده و عامل شیمیایی اصلی آهک مورد استفاده اکسید کلسیم (CaO) است که مشخصات شیمیایی آن مطابق جدول ۴ می‌باشد.

۲-۲-۳- سیمان

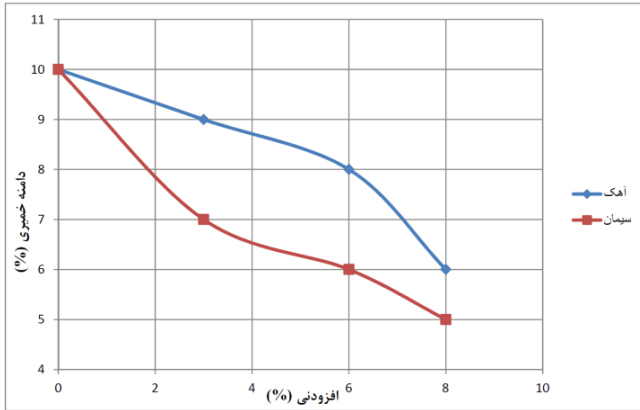
در این پروژه به منظور بهبود رفتار خاک از سیمان تیپ ۲ استفاده گردید که مشخصات شیمیایی و فیزیکی آن در جدول ۵ ارائه گردیده است.

۲-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها و فرآیند آزمایشگاهی

ابتدا خاک رس با مقادیر از پیش تعیین شده آهک و سیمان به صورت خشک و کامل ترکیب شد و دوباره مقدار آب مورد نظر برای هر نمونه به خاک اضافه گردید سپس نمونه‌ها با دست ترکیب شدند تا به صورت همگن درآیند. بعد از آن، نمونه‌های مخلوط شده با سیمان به مدت ۷ روز و نمونه‌های مخلوط شده با آهک به مدت ۲۸ روز در دمای ۲۳°C عمل‌آوری شدند. برای جلوگیری از کربناته شدن آهک و سیمان و همچنین جلوگیری از کاهش رطوبت نمونه‌ها، عمل‌آوردن نمونه‌ها در پوشش‌های پلاستیکی انجام گردید [۱۴]. مقادیر آهک و سیمان برای انجام آزمایش‌های صورت گرفته معادل با ۳٪، ۶٪ و ۸٪ وزنی نسبت به خاک خشک هستند. در عملیات اجرایی نیز جهت پاشیدن سیمان و آهک بر روی خاک خشک از دستگاه مکانیکی استفاده و عمل اختلاط خاک نیز به وسیله گریدر تا زمانی که خاک تغییر رنگ دهد، ادامه دارد. همچنین جهت جلوگیری از کاهش رطوبت پس از انجام عملیات تثبیت کیسه‌های پلاستیکی بر روی هر لایه تا مدت زمان عمل‌آوری که به ترتیب برای سیمان ۷ و برای آهک ۲۸ روز می‌باشد، قرار داده می‌شود.

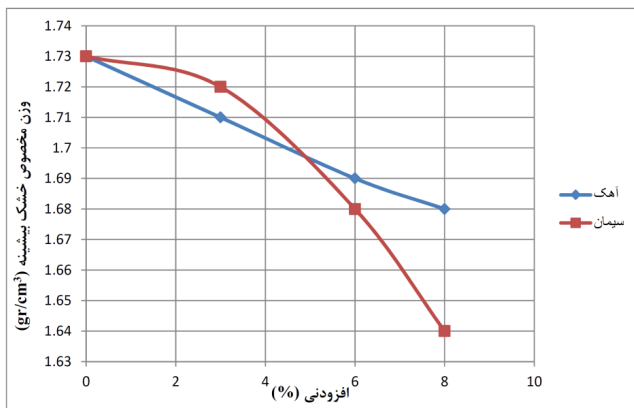
۲-۳-۱- مقایسه حدود اتربرگ با درصدهای مختلف آهک و سیمان

بر روی نمونه‌های خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف از مواد تثبیت‌کننده، آزمایش‌های تعیین حد روانی و حد خمیری انجام شد.



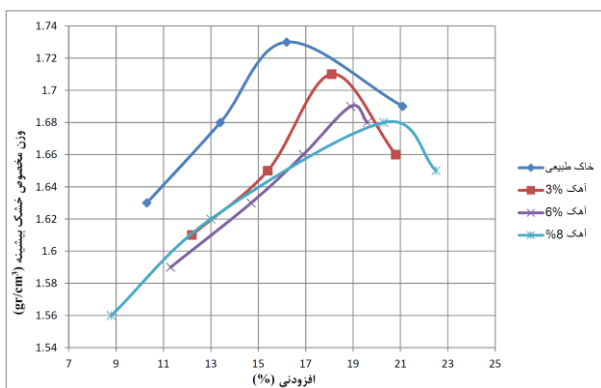
شکل ۴. منحنی تغییرات دامنه خمیری برای خاک ترکیب شده با درصد‌های مختلف آهک و سیمان

Fig. 4. Plasticity index diagram for soil mixed with different percentages of lime and cement



شکل ۵. تغییرات وزن واحد حجم خشک بیشینه با تغییر درصد آهک و سیمان

Fig. 5. Maximum dry density diagram for soil mixed with different percentages of lime and cement



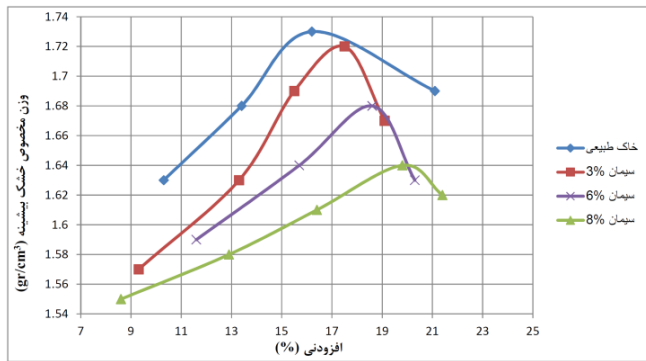
شکل ۶. تغییرات وزن واحد حجم خشک بیشینه و درصد رطوبت بهینه با تغییر درصد آهک

Fig. 6. Maximum dry density versus optimal moisture content for different percentages of lime

افزودنی آهک، سیمان نشان می‌دهند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در محدوده مقادیر استفاده شده، اثر سیمان در کاهش دامنه خمیری بیشتر از آهک است. همچنین نتایج نشان‌دهنده این است که نرخ کاهش در مقدار دامنه خمیری برای سیمان و آهک تقریباً مشابه است. با توجه به عملیات‌های مختلف موجود در سایت و لزوم استفاده از سیمان و همچنین به دلیل دسترسی راحت‌تر و مسافت حمل کمتر و همچنین لزوم استفاده از سیمان در مراحل مختلف ساخت پروژه در صورت مشابه بودن رفتار این دو ماده افزودنی در پارامترهای مقاومتی، ترجیح بر استفاده از سیمان می‌باشد. میزان کاهش دامنه خمیری نسبت به خاک طبیعی پس از افزودن ۸٪ سیمان ۵٪ و بعد از اضافه کردن ۸٪ آهک ۴٪ می‌باشد. علت کاهش مشخصات پلاستیسیته خاک در اثر افزودن آهک و سیمان، ترد و شکننده شدن خاک است که به موجب آن، قابلیت اجرایی آن بهبود می‌یابد. نتایج نشان داده شده در این شکل‌ها همچنین بیانگر این است که با افزایش بیشتر آهک و سیمان، دامنه خمیری کاهش بیشتری خواهد داشت.

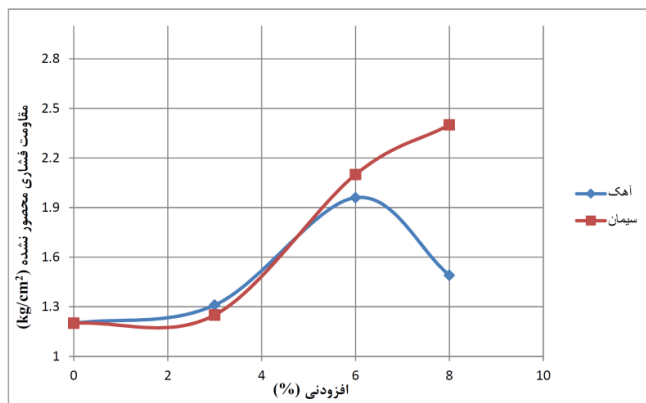
۲-۳-۲- مقایسه چگالی حداکثر خشک و میزان رطوبت بهینه با درصد‌های مختلف آهک و سیمان

بر روی نمونه‌های خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک و سیمان آزمایش‌های تراکم انجام شده و مقادیر رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک آزمایشگاهی در هر حالت تعیین شد تا برای ساختن نمونه‌ها برای ادامه آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گیرند. نتایج این آزمایش‌ها در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است که در آن‌ها درصد رطوبت بهینه تراکم و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌های ترکیب شده با آهک و سیمان منجر به تغییراتی در مقدار چگالی خشک بیشینه می‌شود و با افزودن مقدار آهک و سیمان، چگالی خشک بیشینه کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است، هنگامی که آهک به خاک افزوده می‌شود، واکنش آبی تبادل کاتیونی رخ می‌دهد و ذرات خاک رس با یکدیگر لخته می‌شوند. این فرآیند منجر به تشکیل حفره‌های هوا در میان ذرات شده و سبب ایجاد یک محیط متخلخل با کمترین وزن واحد حجم خشک بیشینه می‌شود. آب بیشتری نیز برای پر کردن حفرات لازم است؛ به صورتی که رطوبت بهینه افزایش می‌یابد. به لحاظ تئوری افزودن سیمان به خاک‌های مرطوب عموماً باعث تجمع و



شکل ۷. تغییرات وزن واحد حجم خشک بهینه و درصد رطوبت بهینه با تغییر درصد سیمان

Fig. 7. Maximum dry density versus optimal moisture content for different percentages of cement



شکل ۸. تغییرات مقاومت فشاری خاک نسبت به درصدهای متفاوت سیمان و آهک

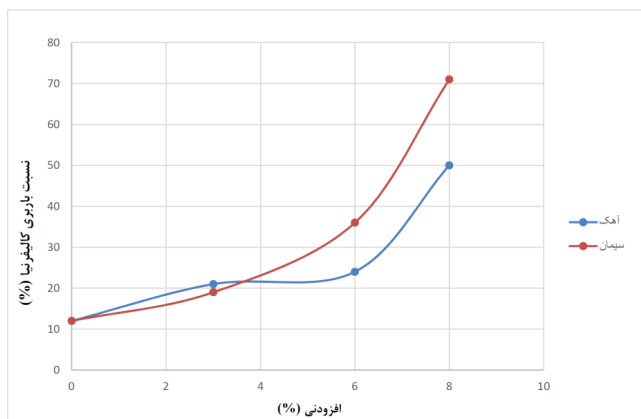
Fig. 8. Uniaxial compressive strength diagram for soil mixed with different percentages of lime and cement

۲۸ روز افزایش محسوسی داشته است. این افزایش ناشی از وجود واکنش‌های انجام شده بین آهک و خاک رس و چسبیدن ذرات به یکدیگر و گیرش آهک بوده است. از طرفی افزودن ۸٪ آهک باعث افزایش کمی در مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود که این امر به علت اشباع شدن فضای خالی خاک از آهک می‌باشد، که در نتیجه، وجود آهک بیشتر، در روند افزایشی مقاومت فشاری کارساز نمی‌باشد. حداکثر مقاومت فشاری محصور نشده در مخلوط ۸٪ سیمان Kg/cm^2 برابر ۲/۴ اندازه‌گیری که در مقایسه با حالت طبیعی خاک افزایش ۲ برابری داشته است. به طور مشابه، مقاومت فشاری محصور نشده در تثبیت خاک با مخلوط ۶٪ آهک Kg/cm^2 ۱/۹۶ بدست آمده است که افزایش ۱/۶۳ برابری داشته است.

گلوله شدن خاک می‌شود. این عمل که به دلیل هیدراسیون سیمان صورت می‌گیرد باعث افزایش درصد رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص خاک تثبیت شده با سیمان نسبت به خاک اولیه می‌شود، لیکن بیشتر بودن چگالی سیمان نسبت به خاک طبیعی کاهش وزن مخصوص خاک تثبیت شده با سیمان را جبران می‌کند. روند نتایج حاصله، مطابق یافته‌های سایر محققان می‌باشد که نشان می‌دهد که با افزایش مقدار آهک و سیمان، مقدار رطوبت بهینه افزایش و حداکثر وزن مخصوص خشک کاهش می‌یابد. بیش‌ترین میزان کاهش وزن مخصوص مربوط به افزودن ۸٪ سیمان به خاک طبیعی می‌باشد که منجر به افزایش ۳/۶٪ رطوبت بهینه و کاهش ۵/۲٪ وزن مخصوص می‌شود.

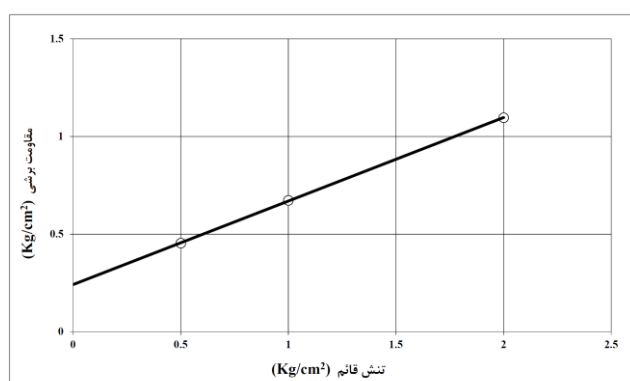
۲-۳-۳- مقایسه مقاومت فشاری محدود نشده با درصدهای مختلف آهک و سیمان

آزمایش مقاومت تک محوری یکی از آزمایش‌هایی است که به طور گسترده در عملیات تثبیت به عنوان شاخصی برای ارزیابی میزان بهبود خاک‌های تثبیت شده بکار می‌رود. به همین منظور آزمایش مقاومت فشاری تک محوری بر روی نمونه‌های خاک تثبیت شده با درصدهای وزنی مختلف آهک و سیمان انجام گرفت. نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۵۰ mm و ارتفاع ۱۰۰ mm تهیه و به مدت زمان لازم عمل‌آوری شده و سپس تحت بار با سرعت بارگذاری ۱ mm/min قرار گرفته و تغییرات مقدار بار (یعنی قرائت‌های عقربه مدرج متصل به حلقه) و همچنین کرنش عمودی به وسیله گیج نصب شده با دقت ۰/۰۱ mm در قسمت فک پایینی دستگاه فشاری تک محوری اندازه‌گیری و ثبت شد. با ترسیم تغییرات تنش بر حسب کرنش مقدار حداکثر تنش به عنوان مقاومت تک محوری هر ترکیب در نظر گرفته شده است. شکل ۷ تغییرات مقاومت تک محوری خاک‌های تثبیت شده را با درصدهای مختلف آهک و سیمان نشان می‌دهند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود هر دو افزودنی باعث افزایش مقاومت تک محوری می‌شوند، اما تأثیر سیمان در افزودن مقاومت بیشتر از افزودنی آهک می‌باشد. تأثیر کمتر آهک بر روی افزایش مقاومت این خاک به ترکیبات شیمیایی خاک مورد استفاده ارتباط داده می‌شود. مطابق نمودار ۸ ارائه شده مشاهده می‌شود که تا مرحله افزایش ۶٪ آهک، مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از مدت



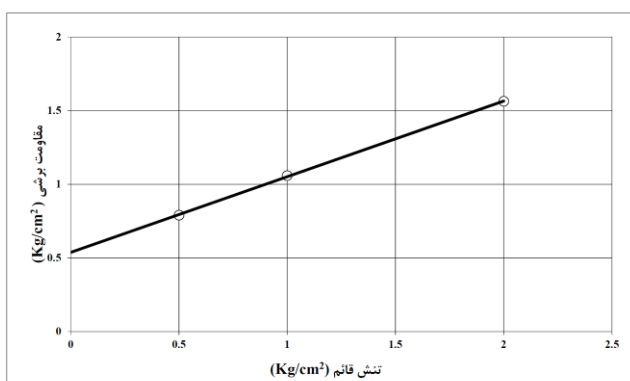
شکل ۹. نمودار تغییرات نسبت باربری کالیفرنیا نسبت به درصدهای متفاوت سیمان و آهک

Fig. 9. California bearing ratio diagram for soil mixed with different percentages of lime and cement



شکل ۱۰. نمودار تغییرات تنش عمودی نسبت به تنش برشی در حالت طبیعی خاک

Fig. 10. Normal stress versus shear stress in natural soil



شکل ۱۱. نمودار تغییرات تنش عمودی نسبت به تنش برشی با افزودن ۸٪ سیمان به خاک طبیعی

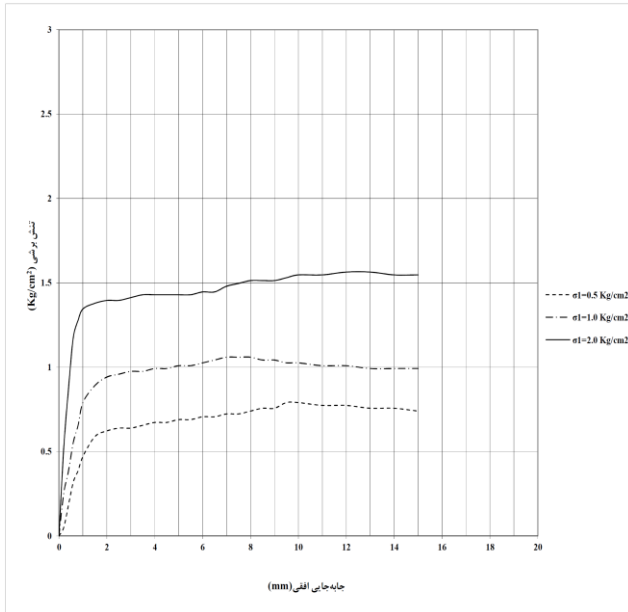
Fig. 11. Normal stress versus shear stress by adding 8% cement to natural soil

۲-۳-۴- مقایسه نسبت باربری کالیفرنیا با درصدهای مختلف آهک و سیمان

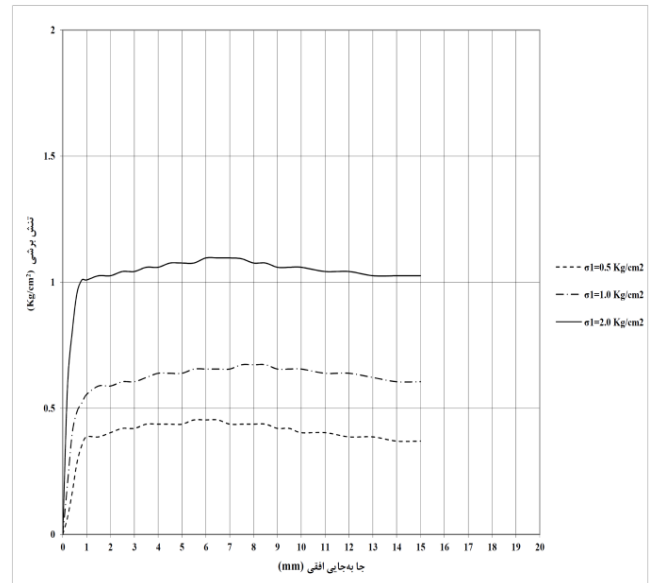
آزمایش‌های نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)، در حالت خشک بر روی نمونه‌های خاک تثبیت شده با مواد افزودنی، انجام شدند. آزمایش بر روی نمونه‌هایی انجام گرفت که با درصد رطوبت بهینه در قالب‌های تهیه نمونه آزمایش متراکم شده بودند. شکل ۹ نتایج نسبت باربری کالیفرنیا را برای نمونه‌های تثبیت شده با آهک و سیمان، در حالت خشک نشان می‌دهند. مقایسه نتایج ارائه شده در این شکل‌ها نشان می‌دهد که بیشترین نسبت باربری کالیفرنیا خشک با استفاده از ماده افزودنی سیمان قابل حصول است و آهک کمتر از سیمان تأثیر را در افزایش نسبت باربری کالیفرنیا داشته است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن ۸٪ سیمان به خاک طبیعی موجب افزایش ۵/۹۱ برابری نسبت باربری کالیفرنیا نسبت به حالت طبیعی می‌شود. این افزایش در درصد مشابه با افزودن آهک به میزان ۴/۱۶ برابر می‌باشد.

۲-۳-۵- مقایسه چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در آزمایش برش مستقیم با درصدهای مختلف آهک و سیمان

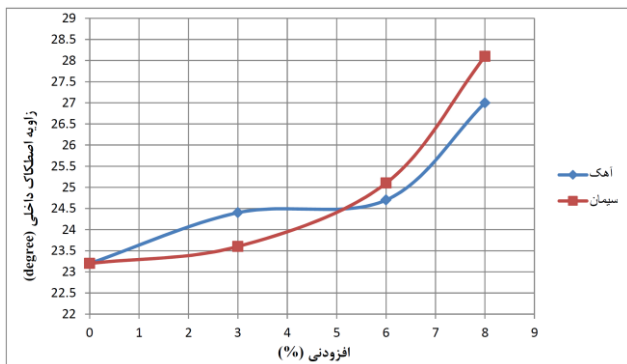
آزمایش برش مستقیم یکی از آزمایشات مهم در مهندسی ژئوتکنیک به منظور تعیین پارامترهای مقاومتی خاک در شرایط تحکیم یافته زهکشی شده می‌باشد. جهت تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک منطقه مورد مطالعه، آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های مغزه‌گیری شده از آزمایش تراکم استاندارد با قالب ۱۰*۱۰ انجام پذیرفت. شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب نتایج چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی حاصل از آزمایش برش مستقیم را برای نمونه‌های تثبیت شده با آهک و سیمان نشان می‌دهند. بررسی نتایج آزمایش برش مستقیم نشان می‌دهد با مخلوط هر دو ماده افزودنی، پارامترهای مقاومت برشی خاک افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج نشان‌دهنده این است که افزودن سیمان بیش از ۳٪ وزن خشک خاک تأثیر بیشتری در افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک، نسبت به آهک دارا می‌باشد. به طوری که بیشترین تأثیر سیمان مربوط به مخلوط خاک با ۸ درصد سیمان می‌باشد که چسبندگی را نسبت به حالت طبیعی خاک ۲/۲۵ برابر و زاویه اصطکاک داخلی آن را به میزان ۲۱٪ درصد افزایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود میزان تنش گسیختگی در هر سه مرحله‌ی آزمایش



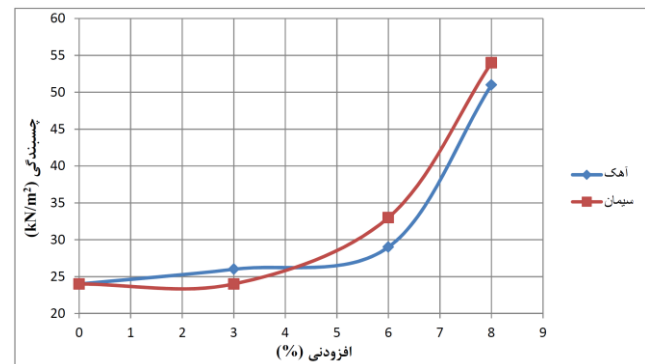
شکل ۱۳. نمودار جابه‌جایی افقی نسبت به تنش برشی با افزودن ۸٪ سیمان به خاک طبیعی
Fig. 13. Horizontal displacement versus shear stress by adding 8% cement to natural soil



شکل ۱۲. نمودار جابه‌جایی افقی نسبت به تنش برشی در حالت طبیعی خاک
Fig. 12. Horizontal displacement versus shear stress in natural soil



شکل ۱۵. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی با درصدهای متفاوت آهک و سیمان در آزمایش برش مستقیم
Fig. 15. Internal friction angle diagram for soil mixed with different percentages of lime and cement in direct shear test



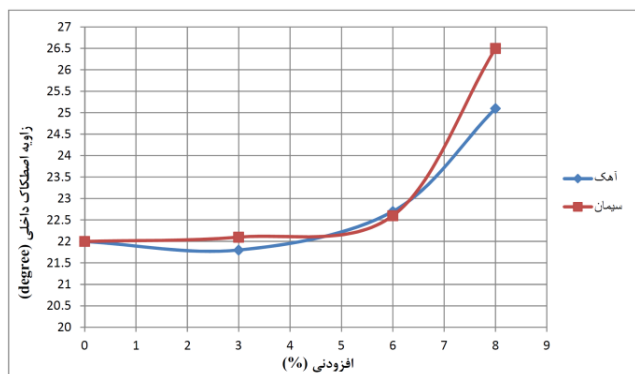
شکل ۱۴. تغییرات چسبندگی با درصدهای متفاوت آهک و سیمان در آزمایش برش مستقیم
Fig. 14. Cohesion diagram for soil mixed with different percentages of lime and cement in direct shear test

و قابل‌اعتمادتری برای تعیین مقاومت برشی خاک‌ها می‌باشد. دلیل آن این است که در آزمایش برش مستقیم خاک به اجبار از محل درز بین دو قسمت جعبه گسیخته می‌شود؛ ولی در آزمایش سه محوری خاک از محل ضعیف‌ترین صفحه خود گسیخته می‌شود. آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده (CU) بر روی نمونه‌های دست نخورده انجام گرفت. نتایج به دست آمده از این آزمایش بیانگر این مسأله است که افزودن ماده آهک و سیمان باعث افزایش پارامترهای مقاومتی خاک می‌گردد. روند تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک

مقاومت برشی بعد از اضافه کردن ۸٪ سیمان افزایش یافته است که میزان این افزایش در مرحله سوم آزمایش پس از اضافه کردن ۸٪ سیمان در حدود ۵۱٪ نسب به حالت طبیعی خاک می‌باشد.

۲-۳-۶- مقایسه چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده (CU) با درصدهای مختلف آهک و سیمان

هدف این آزمایش نیز تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک است. آزمایش سه محوری نسبت به آزمایش‌های دیگر روش پیچیده‌تر



شکل ۱۷. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی با درصد‌های متفاوت آهک و سیمان در آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده

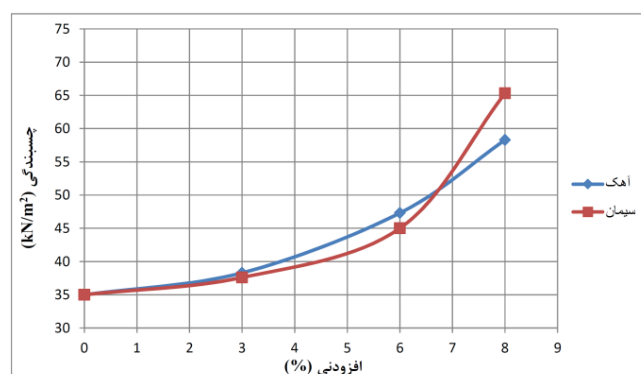
Fig. 17. Internal friction angle diagram for soil mixed with different percentages of lime and cement in Consolidated Undrained Triaxial (CU) test

در جدول ۷ و خروجی نرم‌افزار آن نیز در شکل‌های ۱۸ تا ۲۱ آورده شده است.

با توجه به این که میزان اختلاف نشست‌پذیری پی‌های گسترده مدل شده با مدل‌سازی صورت گرفته در مقاله سونیل پوسادکار [۱۵] به عرض‌های ۱۰m، ۱۵m، ۲۰m و ۳۰m کمتر از ۳/۵٪ می‌باشد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نتایج مدل‌سازی با دقت خوبی نسبت به نتایج قبلی تطابق دارد.

۵-۲- تحلیل میزان نشست پی گسترده با استفاده از نرم‌افزار Plaxis2D دوبعدی

از دلایل استفاده این نرم‌افزار در پژوهش مورد نظر می‌توان به ورودی‌های گرافیکی ساده برنامه که مدل‌های پیچیده‌ای از روش اجزاء محدود را آنالیز و خروجی‌های آن نتایج دقیق و با جزئیات زیادی را ارائه می‌کند، اشاره کرد. همچنین از نقاط ضعف این نرم‌افزار می‌توان به عدم بهره‌مندی از ابزارهای لازم جهت مدل‌سازی، عدم بهره‌مندی از حل‌گره‌هایی با قابلیت حل مسائل متنوع و در نهایت عدم بهره‌مندی از محیط‌های کدنویسی مناسب برای تولید توابع و رفتارهای مد نظر جهت کدنویسی اشاره نمود. مدل رفتاری سخت‌شونده در پروژه‌هایی که باربرداری یا بارگذاری به میزان زیاد انجام می‌گردد، مانند ساخت خاک‌ریزها، حفاری تونل‌ها و گودبرداری‌ها توصیه می‌شود. همچنین مدل خاک سخت‌شونده، یک مدل پیشرفته برای شبیه‌سازی رفتار انواع مختلف خاک‌های سخت و نرم است. با توجه به توضیحات صورت



شکل ۱۶. تغییرات چسبندگی با درصد‌های متفاوت آهک و سیمان در آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده

Fig. 16. Cohesion diagram for soil mixed with different percentages of lime and cement in Consolidated Undrained Triaxial (CU) test

داخلی خاک با درصد‌های مختلف آهک و سیمان در اشکال ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است. این نتایج نشان‌دهنده این است ماده افزودنی سیمان تأثیر بیشتری در افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک، نسبت به آهک داشته است. بیشترین میزان چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مربوط به خاک مخلوط شده با ۸ درصد سیمان می‌باشد. میزان چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی پس از اضافه کردن ۸٪ درصد سیمان به ترتیب ۸۶/۵٪ و ۲۰/۴٪ و پس از افزودن ۸٪ آهک چسبندگی ۶۶/۶٪ و زاویه اصطکاک داخلی ۱۴/۱٪ افزایش می‌یابد.

۴-۲- اعتبار سنجی مدل‌سازی

در این قسمت اعتبار نتایج حاصل از مدل‌سازی پی گسترده که جهت تعیین نشست خاک مورد استفاده قرار گرفته است، با عرض‌های ۱۰m، ۱۵m، ۲۰m و ۳۰m با نتایج متناظر بدست آمده از مقاله دکتر سونیل پوسادکار^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۳ با عنوان " رفتار پی گسترده با پایه عمودی با استفاده از نرم‌افزار Plaxis2D " [۱۵] مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است. برای این منظور نمودار نشست مدل موجود در این پژوهش با مدل مقاله مذکور نسبت به عرض‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است. در جدول ۶ فرضیات مدل‌سازی مقاله سونیل پوسادکار [۱۵] تشریح گردیده است. همچنین میزان نشست‌پذیری پی‌های گسترده مدل شده با عرض‌های متفاوت

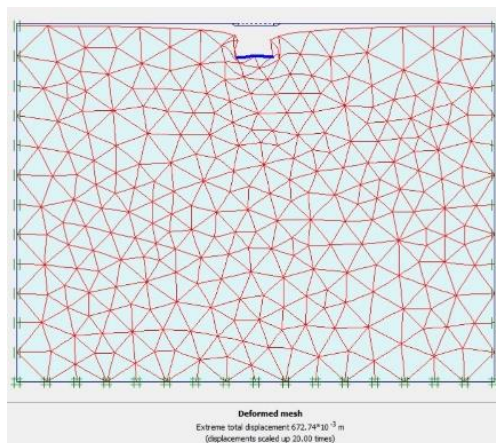
جدول ۶. فرضیات مدل سازی مقاله سونیل پوسادکار [۱۵]
Table 6. Modeling Assumptions of Sunil Posadkar [15]

پارامتر	مقدار/نوع	پارامتر	مقدار/نوع
نوع خاک	ماسه	چسبندگی (kN/m^2)	۰/۱
مدل رفتاری خاک	خاک سخت شونده	زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)	۳۲
E_{50} مدول یانگ (kN/m^2)	۴۰۰۰۰	زاویه اتساع	۲
وزن مخصوص خشک (kN/m^3)	۱۷	ضریب کاهش میان صفحه‌ای (R_{int})	۰/۶۷
توان (m)	۰/۵		

جدول ۷. مقایسه نتایج نشست پی گسترده مدل شده با مقاله سونیل پوسادکار [۱۵]

Table 7. Comparison of the results of the mat foundation settlement with that of the article by Sunil Posadkar [15]

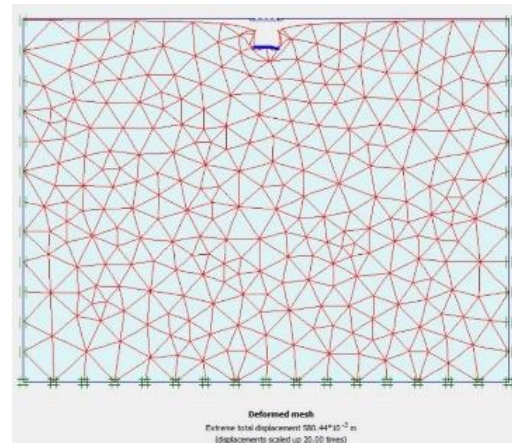
عرض پی (m)			
۳۰	۲۰	۱۵	۱۰
۹۵۷	۸۰۱	۶۷۲	۵۸۰
نشست شبیه سازی شده برای بار ۱۰۰۰ کیلونیوتون بر مترمربع (mm)			
۹۶۹	۸۱۹	۶۸۳	۵۶۰
نشست مقاله دکتر سونیل اس. پوس ادکار [۱۵] برای بار ۱۰۰۰ کیلونیوتون بر مترمربع (mm)			



شکل ۱۹. میزان نشست پذیری پی گسترده مدل شده به عرض ۱۵ متر با مشخصات داده شده در مقاله مورد مقایسه

Fig. 19. Settlement of modeled mat foundation with a width of 15m with the properties given in the article used for verification

پرداخته می شود تا علاوه بر بدست آوردن درصد مناسب آهک و سیمان بهینه ترین عمق اصلاح خاک نیز برای نشست کمتر از ۳cm حاصل شود. در این پژوهش به دلیل پایین بودن سطح آب زیرزمینی از تحلیل پلاستیک جهت تعیین نشست پی گسترده مورد نظر استفاده گردید که این تحلیل در سه مرحله شرایط اولیه، خاک برداری خاک برجا و سپس جایگزینی خاک بعد از اختلاط خاک طبیعی با ۳، ۶ و ۸ درصد آهک و سیمان با پارامترهای مقاومتی تقویت شده با عمق های بهسازی ۱m، ۲m، ۴m، ۶m، ۸m و ۱۰m صورت پذیرفت.

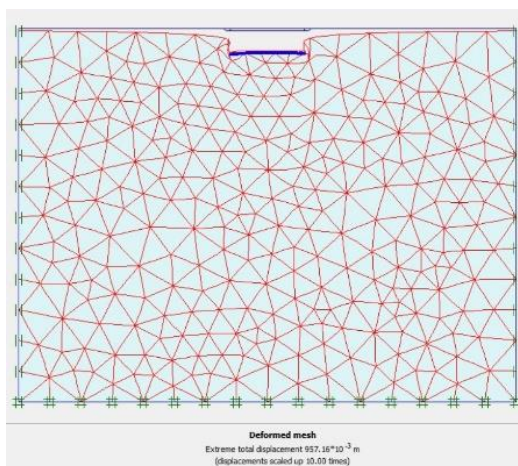


شکل ۱۸. میزان نشست پذیری پی گسترده مدل شده به عرض ۱۰ متر با مشخصات داده شده در مقاله مورد مقایسه

Fig. 18. Settlement of modeled mat foundation with a width of 10m with the properties given in the article used for verification

گرفته، در این پژوهش به دلیل بارگذاری، خاک برداری و خاک ریزی متعدد از مدل رفتاری سخت شونده جهت مدل سازی رفتار خاک استفاده گردید.

پس از انجام آزمایشات آزمایشگاهی بر روی خاک طبیعی و خاک با درصدهای متفاوت آهک و سیمان و مقایسه پارامترهای مقاومتی مورد نظر، از نرم افزار Plaxis2D دوبعدی به منظور اندازه گیری میزان نشست در زیر پی گسترده به عرض ۲۰m و بار گسترده وارده ۱ Kg/cm² با اعماق بهسازی ۱m، ۲m، ۴m، ۶m، ۸m و ۱۰m



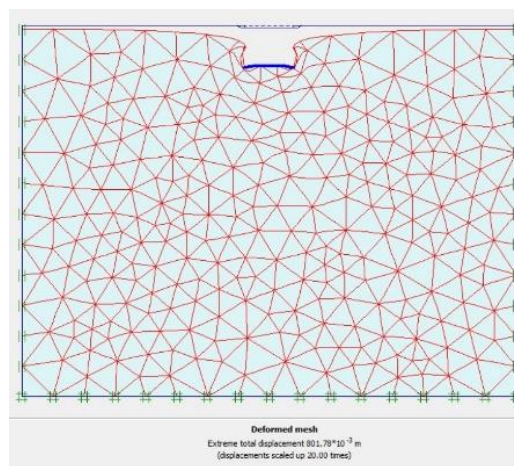
شکل ۲۱. میزان نشست پذیری پی گسترده مدل شده به عرض ۳۰ m با مشخصات داده شده در مقاله مورد مقایسه

Fig. 21. Settlement of modeled mat foundation with a width of 30m with the properties given in the article used for verification

افزایش عمق بهسازی، نسبت به بهسازی خاک با آهک سریع تر می باشد. با اضافه کردن ۸٪ سیمان در صورت بهسازی خاک زیر پی به میزان ۱۰ m، میزان کاهش نشست پذیری زیر پی ۵/۴۷cm می باشد و برای رسیدن به نشست کمتر از ۳cm لازم است بهسازی خاک با اختلاط ۸٪ سیمان و با عمق بهسازی ۱۰m انجام پذیرد.

۲-۶- آزمایش بارگذاری صفحه ای در محل و بدست آوردن میزان نشست پی گسترده در شرایط واقعی

آزمایش بارگذاری صفحه روشی برای تخمین میزان نشست بستر، ناشی از ساخت سازه و یا تعیین ظرفیت باربری نهایی بستر ساخته شده است. واضح است که ایده آل ترین حالت برای تعیین نشست بستر ناشی از بار واقعی سازه حالتی است که بار معادل سازه بر سطحی به اندازه شالوده واقعی اعمال شود و میزان نشست اندازه گیری شود، با توجه به هزینه و مشکلات تأمین چنین شرایطی، آزمایش بارگذاری صفحه (PLT) با اعمال بار طراحی پیشنهادی بر صفحه ای با ابعاد کوچک انجام می شود و برای دستیابی به میزان نشست و ظرفیت باربری پی با ابعاد واقعی، از ضرایب تبدیل استفاده می شود. آزمایش بارگذاری، عبارت است از: قراردادن یک صفحه صلب (اغلب فولادی) روی خاک و اعمال فشار بر آن، همراه با اندازه گیری میزان فرورفتن صفحه در خاک، به ازای مقدار فشاری که وارد می شود [۱۶]. در این پروژه آزمایش بارگذاری صفحه ای بر روی صفحه ای به قطر ۳۰cm

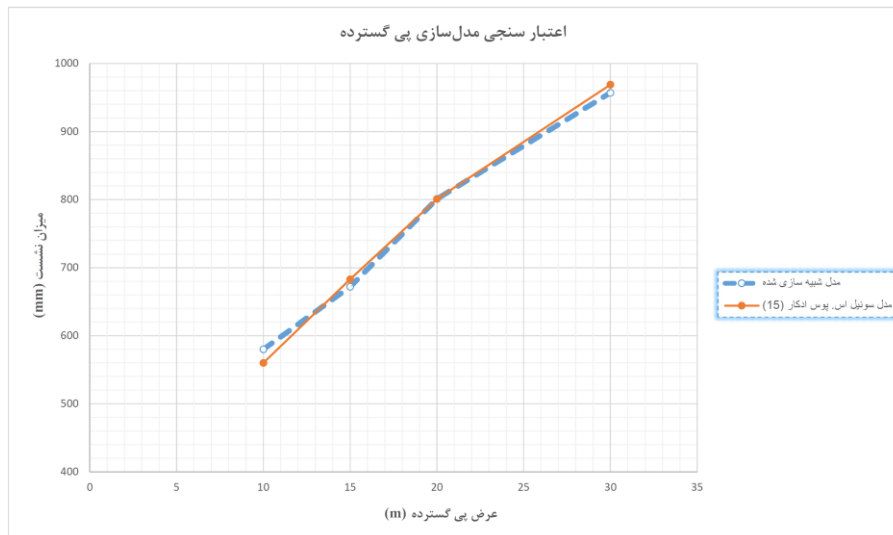


شکل ۲۰- میزان نشست پذیری پی گسترده مدل شده به عرض ۲۰ m با مشخصات داده شده در مقاله مورد مقایسه

Fig. 20. Settlement of modeled mat foundation with a width of 20m with the properties given in the article used for verification

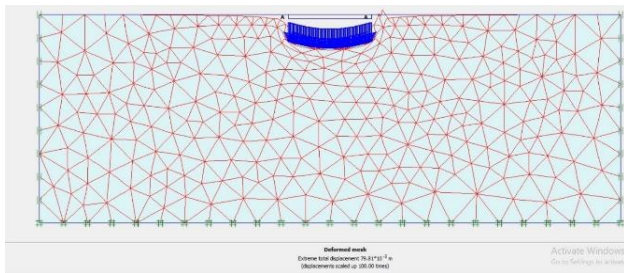
مشخصات خاک استفاده شده، مطابق جدول ۸ می باشد. لازم به ذکر است که پارامترهای ورودی نرم افزار Plaxis2D از قبیل چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی از نتایج آزمون سه محوری زهکشی نشده گرفته شده است. اشکال ۲۳ تا ۲۴ میزان نشست پی گسترده مورد نظر را در نرم افزار Plaxis2D نشان می دهد.

با توجه به شکل ۲۳ میزان نشست پذیری پی گسترده مورد نظر بر روی خاک طبیعی ۸/۲۱ سانتی متر می باشد که این میزان به وسیله بهبود پارامترهای مقاومتی خاک با اضافه کردن آهک به خاک طبیعی کاهش یافته است. این روند نزولی نشست پذیری در خاک با اختلاط ۸٪ آهک بیشتر از اختلاط خاک با ۳٪ و ۶٪ آهک می باشد. همچنین با توجه به اشکال ۲۵ و ۲۶ می توان چنین نتیجه گرفت که یکی از عوامل مهم در کاهش میزان نشست پی های گسترده، عمق بهسازی خاک می باشد. همان طور که در اشکال یاد شده ملاحظه است با افزایش عمق بهسازی خاک، نشست پذیری خاک به طور خطی کاهش یافته است. با توجه به شکل ۲۶ می توان چنین نتیجه گرفت که بهسازی خاک با سیمان نیز رفتاری مشابه به بهسازی خاک با آهک دارد؛ به طوری که با افزایش درصد سیمان به خاک، میزان نشست پذیری کاهش یافته که این مقدار در اختلاط خاک با ۸٪ سیمان به کمترین میزان خود می رسد. همچنین همانند بهسازی با آهک با افزایش عمق بهسازی خاک، میزان نشست پذیری کاهش یافته؛ با این تفاوت که این کاهش نشست پذیری پی گسترده با



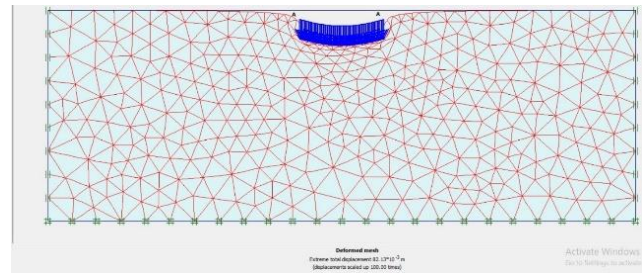
شکل ۲۲. نمودار مقایسه مقدار نشست پی گسترده مدل شده با مقاله استفاده شده

Fig. 22. Comparison between settlements of modeled mat foundation with that of the article used for verification



شکل ۲۴. مدل نشست کلی پی سازه تانک لجن فعال با اختلاط ۳٪ آهک و عمق بهسازی یک متر

Fig. 24. Settlement of modeled activated sludge tank structure foundation with 3% lime mixed and 1m improvement depth



شکل ۲۳. مدل نشست کلی پی سازه تانک لجن فعال بر روی خاک طبیعی بدون بهسازی بستر

Fig. 23. Settlement of modeled activated sludge tank structure foundation on natural soil without subgrade improvement

کوچک تقسیم شود تا بتوان تمام عملیات تثبیت خاک با سیمان از جمله کوبیدن و تراکم نهایی خاک را قبل از گیرش سیمان به پایان رساند. این طول در ساختگاه محل پروژه جهت انجام آزمایش بارگذاری صفحه‌ای ۳۰۰ m بوده و عملیات تثبیت خاک با سیمان به منظور انجام این آزمایش در هوای آفتابی با درجه حرارت C° ۲۹ درجه سانتیگراد انجام گرفت. آماده کردن خاک برای تثبیت با سیمان به وسیله شیار دادن و شخم زدن خاک با استفاده از شانه گریدر به ضخامت و عمق مندرج در نقشه‌های اجرایی و همچنین خرد و نرم کردن کلوخه‌های خاک انجام گردید. پس از خرد و نرم کردن خاک کلیه مواد گیاهی و دانه‌های سنگی بزرگتر از ۷۵mm جمع‌آوری و از خاک خارج شد؛ بطوری‌که خاک آماده شده عاری از

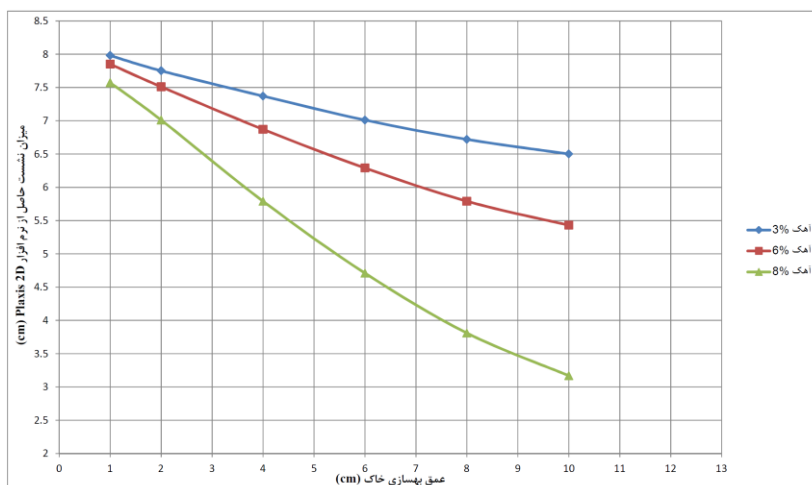
بر روی خاک طبیعی و همچنین پس از عملیات تراکم و ایجاد لایه ایزوله به ارتفاع ده متر با درصد اختلاط ۸٪ سیمان به منظور اطمینان از میزان نشست بدست آمده از نرم‌افزار پلکسیس در محل سایت تانک لجن فعال صورت گرفته است که نتایج آن در شکل‌های ۲۷ و ۲۸ و همچنین جدول ۹ آورده شده است. لازم به ذکر است که مدول عکس‌العمل بستر بدست آمده بر اساس رابطه (۱) که توسط وسیک^۱ ارائه شده، محاسبه گردیده است [۱۷]. مراحل اجرایی عملیات تثبیت خاک با سیمان شامل آماده کردن خاک، پخش سیمان، اختلاط و آب‌پاشی، کوبیدن و تسطیح و عمل آوردن مخلوط می‌شود. سیمان یک ماده زودگیر است و به همین دلیل باید طول راه به قطعات

1 Vesic

جدول ۸. پارامترهای مختلف بدست آمده خاک از آزمایشات آزمایشگاهی برای ورودی نرم افزار Plaxis2D
Table 8. Soil parameters obtained from laboratory tests used as Plaxis2D software input

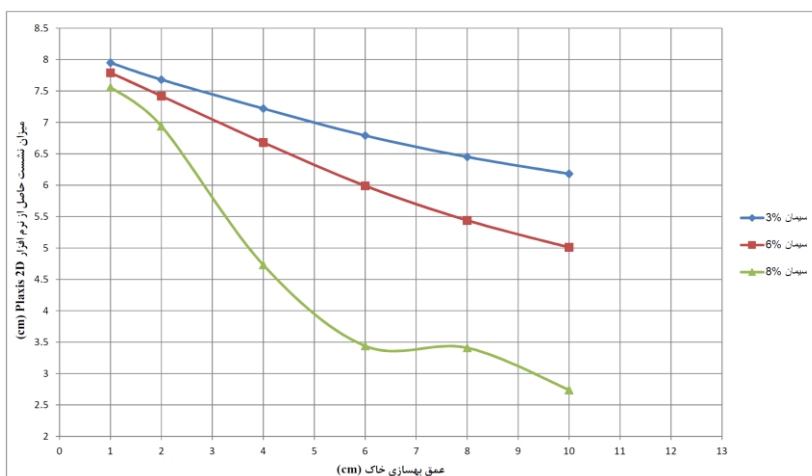
مشخصات							استانداردها	واحد	پارامتر
CL+۷/۸	CL+۷/۶	CL+۷/۳	آهک ۷/۸	آهک ۷/۶	آهک ۷/۳	CL	ASTM D۴۲۲ ASTM D۴۳۱۸	-	نوع خاک
سیمان	سیمان	سیمان	سیمان	سیمان	سیمان	سیمان	-	-	مدل مورد استفاده
HS-Small	HS-Small	HS-Small	HS-Small	HS-Small	HS-Small	HS-Small	-	-	وزن مخصوص خشک
۱۵/۸	۱۶/۰	۱۶/۴	۱۵/۹	۱۶/۱	۱۶/۳	۱۶/۵	ASTM D۱۵۵۶	(kN/m ³)	E_{50}^{ref}
۵۷۵۰۰	۲۳۵۰۰	۱۸۵۰۰	۴۲۵۰۰	۲۰۸۰۰	۱۷۲۰۰	۱۲۵۰۰	ASTM D۲۱۶۶	(kN/m ²)	E_{oed}^{ref}
۵۷۵۰۰	۲۳۵۰۰	۱۸۵۰۰	۴۲۵۰۰	۲۰۸۰۰	۱۷۲۰۰	۱۲۵۰۰	ASTM D۲۱۶۶	(kN/m ²)	E_{ur}^{ref}
۱۷۲۵۰۰	۷۰۵۰۰	۵۵۵۰۰	۱۲۷۵۰۰	۶۲۴۰۰	۵۱۶۰۰	۳۷۵۰۰	ASTM D۲۱۶۶	(kN/m ²)	توان
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-	(m)	R_{inter}
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-	-	چسبندگی (C)
۶۵/۳	۴۵	۳۷/۶	۵۸/۳	۴۷/۳	۳۸/۳	۳۵	ASTM D۴۷۶۷	(kN/m ²)	زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)
۲۶/۵	۲۲/۶	۲۲/۱	۲۵/۱	۲۲/۷	۲۱/۸	۲۲	ASTM D۴۷۶۷	درجه	$\gamma_{0.7}$
$1.0^{-4} \times 1/5$	$1.0^{-4} \times 1/5$	$1.0^{-4} \times 1/5$	$1.0^{-4} \times 1/5$	$1.0^{-4} \times 1/5$	$1.0^{-4} \times 1/5$	$1.0^{-4} \times 1/5$	-	-	G_{0ref}
$1.0^{-10} \times 3/58$	$1.0^{-10} \times 1/46$	$1.0^{-10} \times 1/15$	$1.0^{-10} \times 2/66$	$1.0^{-10} \times 1/30$	$1.0^{-10} \times 1/107$	$1.0^{-10} \times 8$	-	(kN/m ²)	

جدول ۸: پارامترهای مختلف بدست آمده خاک از آزمایشات آزمایشگاهی برای ورودی نرم افزار Plaxis2D



شکل ۲۵. میزان نشست پذیری پی گسترده با درصدهای مختلف اختلاط آهک با خاک طبیعی در عمق‌های مختلف بهسازی

Fig. 25. Settlement with different percentages of mixing lime with natural soil at different improvement depths



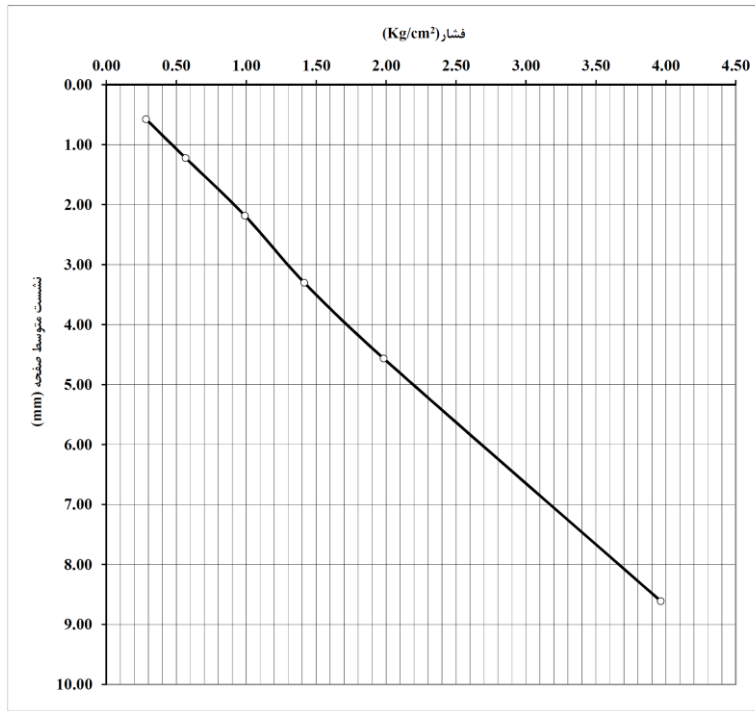
شکل ۲۶. میزان نشست پذیری پی گسترده با درصدهای مختلف اختلاط سیمان با خاک طبیعی در عمق‌های مختلف بهسازی

Fig. 26. Settlement with different percentages of mixing cement with natural soil at different improvement depths

جدول ۹. نتایج میزان نشست پذیری پی گسترده با استفاده از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای

Table 9. Settlement of mat foundation using plate load test

شرایط آزمایش	پارامتر	استاندارد ها	نتایج حاصل از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای	$\Delta H = \Delta q / K_s$ (cm)
خاک طبیعی	مدول الاستیسیته (kN/m^2)	ASTM D1194	۹۷۰۰	۱۴/۳۰
	مدول عکس‌العمل بستر (kN/m^3)	ASTM D1194	۶۹۹	
عمق بهسازی ۱۰ متر و درصد اختلاط ۸٪ سیمان	مدول الاستیسیته (kN/m^2)	ASTM D1194	۴۱۲۰۰	۲/۹۷
	مدول عکس‌العمل بستر (kN/m^3)	ASTM D1194	۳۳۵۷	



شکل ۲۷. منحنی نشست - بار آزمایش بارگذاری صفحه‌ای در سایت تانک لجن فعال بر روی خاک طبیعی

Fig. 27. Settlement versus load of plate load test at the site of activated sludge tank on natural soil

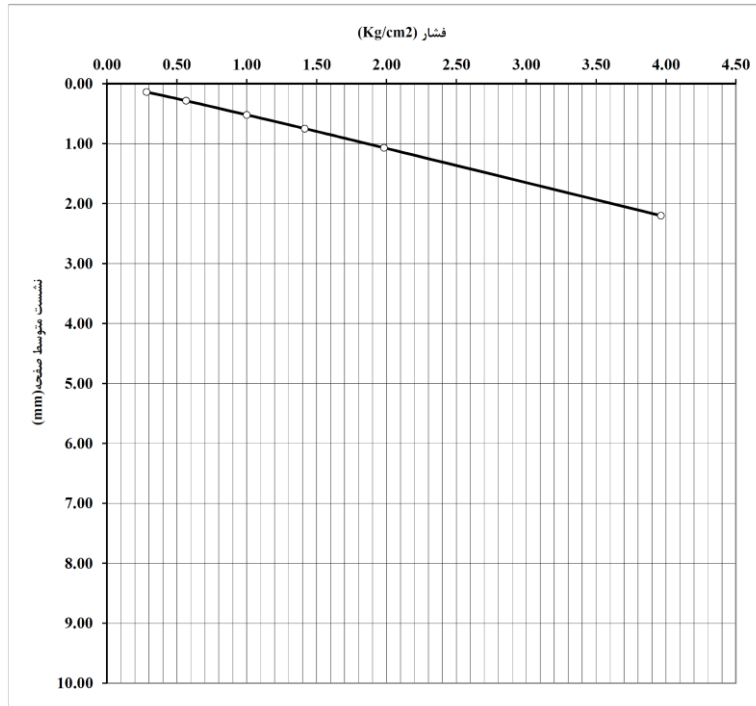
گرفته شد و مطابق با دستورالعمل تثبیت لایه‌های خاک‌ریز و روسازی راه‌ها (نشریه شماره ۲۶۸) انجام گردید. و در انتهای این عملیات جهت جلوگیری از خشک شدن سطح لایه تثبیت شده از پوشش‌های پلاستیکی استفاده گردید.

$$K_s = \frac{0.65E_s}{B(1-\nu^2)} \sqrt[12]{\frac{E_s B^4}{EI}} \quad (1)$$

که در این جا :

E_s و E و ν = به ترتیب مدول الاستیسیته خاک و شالوده برحسب واحدهای سازگار و نسبت پواسون خاک
 B و I = عرض شالوده و گشتاور لختی آن بر اساس مقطع عرضی

هرگونه مواد زائد خارجی برای پخش سیمان گردید. همچنین بدلیل کربناته شدن مصالحی که در معرض هوا قرار داشتند، حدود ۰/۵ cm از سطح لایه تثبیت شده خاک با سیمان با استفاده از تیغه گریدر تراشیده شد. پخش سیمان بر روی خاک آماده شده با استفاده از پخش‌کننده‌های مکانیکی انجام گرفت و اختلاط آن نیز با استفاده از تیغه گریدر انجام گردید. این عمل آن‌قدر ادامه پیدا کرد تا رنگ مخلوط یکنواخت شد. عملیات تراکم خاک با سیمان بلافاصله پس از افزودن آب به مخلوط خاک و سیمان شروع و عملیات تراکم برای لایه های روسازی بعد از آنکه آب به مخلوط خاک و سیمان اضافه شد، در مدت حداکثر ۳ ساعت به پایان رسید. لازم به ذکر است که حداکثر ضخامت متراکم شده در لایه های زیرسازی ۲۰ cm در نظر



شکل ۲۸. منحنی نشست - بار آزمایش بارگذاری صفحه‌ای در سایت تانک لجن فعال با عمق بهسازی ۱۰ متر و درصد اختلاط ۸٪ سیمان

Fig. 28. Settlement-load diagram of plate load test at the site of activated sludge tank with improvement depth of 10m and mixing percentage of %8 cement



شکل ۳۰. نمایی از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای انجام گرفته در محل سایت

Fig. 30. Plate load test performed at the site



شکل ۲۹. نمایی از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای انجام گرفته در محل سایت

Fig. 29. Plate load test performed at the site

پیدا کرده است که با توجه به ابعاد آزمایش قابل قبول می‌باشد. این اختلاف را می‌توان ناشی از تفاوت در عمق تأثیر آزمایش بارگذاری صفحه نتیجه‌گیری نمود و صرفاً می‌توان نتایج آنرا برای صحت‌سنجی مطالعات و مدل‌سازی در محدوده عمق تأثیر آزمایش بارگذاری صفحه استفاده نمود و برای اعماق نهایی نمی‌توان از نتایجش برای مقایسه با

بر حسب واحدهای سازگار نتیجه بدست آمده از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای در خاک طبیعی با نتایج حاصل از مدل‌سازی به وسیله نرم‌افزار Plaxis2D اختلافی ۶/۰۹cm داشته؛ اما این میزان اختلاف پس از عملیات بهسازی خاک با ۸٪ سیمان و با عمق بهسازی ۱۰m، به میزان ۰/۲۳ cm کاهش

در شکل ۸ نشان می‌دهند که افزودن آهک تا ۶٪ وزن خشک خاک، موجب افزایش مقدار مقاومت فشاری می‌شود؛ در حالی که این مقدار با اضافه کردن ۸٪ آهک به خاک طبیعی کاهش پیدا می‌کند. مقدار مقاومت فشاری با افزودن سیمان تا ۸٪ و نیز با توجه به شکل ۹ مقدار نسبت باربری کالیفرنیا با افزایش سیمان و آهک تا همین مقدار روندی افزایشی داشته است. میزان چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی حاصل از آزمایش‌های سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده (CU) و برش مستقیم که در شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ آورده شده نشانگر این امر است که با افزایش درصد سیمان و آهک دو پارامتر مقاومتی یاد شده افزایش می‌یابند. با توجه به راهکارهای متفاوت موجود جهت حصول نشست کمتر از ۳cm و همچنین مهندسی ارزش صورت گرفته قبل از اجرای طرح، حداکثر میزان ماده افزودنی به منظور تثبیت خاک، ۸٪ وزن خشک خاک در نظر گرفته شده است. بنابراین این امکان وجود دارد که رفتار خاک با اضافه کردن میزان افزودنی بیش از ۸٪ وزن خشک خاک تغییر کرده و پارامترهای حاصل شده از آزمایشات آزمایشگاهی کاهش پیدا کند. اشکال ۲۵ و ۲۶ که نتایج حاصله از مدل‌سازی پی گسترده مورد نظر پس از بهسازی خاک با اعماق مختلف به وسیله آهک و سیمان در نرم‌افزار Plaxis2D می‌باشد، بیانگر این مسأله است که با افزایش درصد آهک و سیمان و همچنین عمق بهسازی خاک میزان نشست‌پذیری کاهش می‌یابد. همان‌طور که از این نمودارها پیداست بیشترین میزان کاهش نشست‌پذیری مربوط به بهسازی خاک با ۸٪ آهک و ۸٪ سیمان می‌باشد. شیب نمودار نشست پی گسترده پس از بهسازی خاک تا عمق ۱۰m با ۸٪ درصد سیمان بیشتر از مخلوط خاک با ۸٪ آهک بوده و این امر نشان‌دهنده عملکرد بهتر سیمان در کاهش نشست‌پذیری نسبت به آهک ۸٪ می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج موجود در جدول ۹ میزان نشست بدست آمده از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای در حالت طبیعی در مقایسه با نشست حاصل از مدل‌سازی در نرم‌افزار Plaxis2D دارای اختلاف قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به مطالعه صورت گرفته توسط ایکا پوجی هستوتی و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۱۱] که نشان‌دهنده تأثیر بهتر افزودنی سیمان نسبت به دو افزودنی گچ و سنگ آهک بر روی مقاومت فشاری محصور نشده می‌باشد، در این تحقیق نیز عملکرد بهتر سیمان بر روی مقاومت فشاری محصور نشده و سایر پارامترهای مقاومتی قابل مشاهده است. همچنین در مقایسه



شکل ۳۱. نمایی از عملیات تراکم برای لایه‌های روسازی در محل سایت
Fig. 31. Compaction performed on improved soil layers at the site

نتایج عددی و تجربی استفاده کرد.

۳- نتایج و بحث

در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر آهک و سیمان بر روی خاک مسأله‌دار رسی منطقه فیروز بهرام، ابتدا مقدار مشخصی از خاک واقع در محل ساختگاه مورد مطالعه نمونه‌برداری و آزمایش گردید. جهت شناسایی دقیق اثر مواد افزودنی بر روی خاک مورد نظر، آزمایش‌های آزمایشگاهی متناسب با اهداف تحقیق شامل آزمایش‌های شاخص و مکانیکی بر روی خاک با درصدهای مخلوط ۳٪، ۶٪ و ۸٪ آهک و ۳٪، ۶٪ و ۸٪ سیمان انجام گردید. بر اساس شکل‌های ۴ و ۵ با مخلوط کردن آهک و سیمان به خاک، میزان چگالی خشک حداکثر و دامنه خمیری نسبت به خاک طبیعی، تغییرات می‌یابد. میزان تغییر بستگی به نوع ماده افزودنی دارد. بطوری‌که ماده آهک و سیمان تا میزان ۸٪ وزن خشک خاک باعث کاهش چگالی خشک حداکثر و دامنه خمیری خاک می‌گردد. همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۷ قابل ملاحظه می‌باشد با افزایش درصد اختلاط سیمان و آهک به خاک طبیعی، درصد رطوبت بهینه افزایش یافته که دلیل این امر به لحاظ تئوری برای آهک لخته‌شدگی دانه‌ها و بالا رفتن حد خمیری و برای سیمان تجمع و گلوله شدن خاک که به دلیل هیدراسیون سیمان صورت می‌گیرد، می‌باشد [۱۸]. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری

زهکشی نشده (CU) نشان می‌دهد با افزودن هر دو ماده، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک افزایش می‌یابد که تأثیر سیمان در افزایش این دو پارامتر مقاومتی بیشتر از آهک می‌باشد.

۷- افزودن آهک و سیمان باعث کاهش نشست‌پذیری شده که سیمان کاهش بیشتری را در نشست‌پذیری خاک نسبت به آهک، باعث می‌شود.

۸- با افزایش درصد آهک و سیمان و همچنین عمق بهسازی خاک میزان نشست‌پذیری خاک کاهش می‌یابد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

B	عرض پی گسترده، m
C	چسبندگی خاک، kN/m^2
E_s	مدول الاستیسیته خاک، kN/m^2
I	گشتاور لختی آن بر اساس مقطع عرضی بر حسب واحدهای سازگار، m^4
K_s	مدول عکس‌العمل بستر، kN/m^3

علائم یونانی

v_s	ضریب پواسون
Φ	زاویه اصطکاک داخلی خاک

مراجع

- [1] Ali Eskandari, Maryam Hodhodi, "Investigation of the stabilizing effect of clay with lime "First National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2014, in Persian
- [2] Nima golchinfar, "Effect of freezing and thawing cycles on compressive strength of lime-stabilized clay soils reinforced with polypropylene fibers "Master of Geotechnical Thesis, 2012, in Persian
- [3] Amir Mohammad Tabatabae, Road pavement, Thirteenth Edition, University Publication Center, 2008-2007, in Persian
- [4] Al-Rawas. A. A, Goseen. M, Expansive Soils –Recent Advances in characterization and treatment –2006
- [5] N. Yong, Reymond and R. Ouhadi, Vahid, "Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils", Applied Clay Science 2007

با مطالعه صورت گرفته توسط رینو ژوزه و راجامانه در سال ۲۰۱۸ [۱۰] روند کاهش نشست‌پذیری خاک ریزدانه رسی بر اثر اضافه کردن سیمان و آهک و بهبود پارامترهای مقاومتی، در نتایج آزمایشگاهی این تحقیق نیز نشان داده شده است. هر چند مقدار نشست خاک رس با درصد مشخص سیمان و آهک، احتمالاً به دلایل کانی‌شناسی در دو تحقیق متفاوت می‌باشد. همچنین می‌توان چنین نتیجه گرفت که افزودن سیمان و آهک موجب کاهش نشست‌پذیری خاک ریزدانه رسی موجود در زیر پی می‌شود. در مجموع مطابق با نتایج حاصل از پژوهش‌های ارائه شده در بخش ۱ و همچنین نتایج بدست آمده از تحقیق پیش رو نتیجه می‌شود که افزودن آهک و سیمان به خاک موجب افزایش رطوبت بهینه و کاهش چگالی خشک خاک و همچنین بهبود پارامترهای مقاومتی نظیر مقاومت فشاری محصور نشده، نسبت باربری کالیفرنیا و مقاومت برشی خاک می‌شود که این امر کاهش نشست‌پذیری خاک زیر پی را به همراه دارد.

۴- نتیجه‌گیری

آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ، تراکم، نسبت باربری کالیفرنیا، مقاومت تک محوری، برش مستقیم و آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده (CU) بر روی یک نوع خاک رس تثبیت شده با مقادیر مختلف آهک و سیمان انجام گرفته است. در محدوده مقادیر بکار رفته از مواد افزودنی و نوع خاک مورد استفاده در این تحقیق، خلاصه نتایج این تحقیق به شرح زیر است:

- ۱- سیمان کاهش بیشتری را در دامنه خمیری خاک نسبت به آهک، باعث می‌شود.
- ۲- درصد رطوبت بهینه خاک با افزایش آهک و سیمان با درجات مختلف افزایش می‌یابد.
- ۳- حداکثر وزن مخصوص خشک خاک تثبیت شده با افزایش آهک و سیمان کاهش می‌یابد.
- ۴- هر دو ماده تثبیت‌کننده باعث افزایش نسبت باربری کالیفرنیا و خاک می‌شوند. تأثیر سیمان در افزایش این نسبت بیشتر از آهک است.
- ۵- تمام مواد افزودنی باعث افزایش مقاومت تک محوری خاک می‌گردند، اما بیشترین تأثیر مربوط به سیمان است.
- ۶- نتایج آزمایشات برش مستقیم و سه محوری تحکیم یافته

- of Soft Soil with Cement and Palm Kernel Shell Ash Admixture "MATEC Web of Conferences 2019) 0 ,280)
- [13] Nosrati, "Comparison of the effect of lime and cement type 2 on the compressive strength of clay soils with high plasticity index in different conditions" Second international conference on geotechnical and urban seismic engineering, 2015, in Persian
- [14] Instructions embankment stabilization and pavement of roads, Journal 268, Publications Management and Planning Organization, in Persian
- [15] Dr. Sunil S. Pusadkar, Ms. Tejas Bhatkar "Behaviour of Raft Foundation with Vertical Skirt Using Plaxis 2d" International Journal of Engineering Research and Development Volume 7, Issue 6 (June 2013)
- [16] Ministry of Power, Journal 231, Plate loading test on soil and soft rock, in Persian
- [17] Wael N. Abd Elsamee "An Experimental Study on the Effect of Foundation Depth, Size and Shape on Subgrade Reaction of Cohesionless Soil" Published Online October 2013
- [18] Amini, Laboratory review Comparison of the stabilizing effect of lime, cement and product made with nano technology (CBR+) in clay soil with high plasticity index, 2014, in Persian
- [6] Asma Muhmed, DariuszWanatowski "Effect of Lime Stabilisation on the Strength and Microstructure of Clay" IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering Volume 6, Issue 3, May. - Jun. 2013
- [7] Jaber Shahiri, Mojtaba Ghasemi " Utilization of Soil Stabilization with Cement and Copper Slag as Subgrade Materials in Road Embankment Construction" International Journal of Transportation Engineering Volume 5, No.1, Summer 2017
- [8] Anil Pandey, Prof. Ahsan Rabbani, "Soil Stabilisation Using Cement" International Journal of Civil Engineering and Technology, Volume 8, Issue 6, June 2017
- [9] Sai Harshita M M, " Soil Stabilisation using Lime " International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology Volume 6, Issue I, January 2018
- [10] Rinu Jose, N P Rajamane "Influence of lime and cement in strength characteristics of soil" International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 9, Issue 1, January2018-
- [11] Ika Puji Hastuty, Roesyanto "Comparison of the Use of Cement, Gypsum, and Limestone on the Improvement of Clay by Using Unconfined Compression Test "Journal of Civil Engineering FORUM, Vol.
- [12] Yulian Firmana Arifin, and Gazali Rahman "Stabilization

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Zabihi Samani, M. Daryabari, A. Daryabari, A.R. Mirhabibi, Numerical and Experimental Investigation of Optimal Soil Improvement with Lime and Cement and Its Impact on Reduction of Settlement in West Tehran Wastewater Treatment Plant, Amirkabir J. Civil Eng., 53(7) (2021) 2937-2956.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17574.6607](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17574.6607)

