

ارزیابی پتانسیل رمبندگی خاک ماسه‌ای لای دار تثبیت شده با میکروسیلیس، بنتونیت و خاکستر پسته برنج

عبدالحسین حداد^۱ و سید حسین دستی گردی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: رمبنده، بنتونیت، میکروسیلیس، خاکستر پسته برنج، پتانسیل رمبندگی، تثبیت.</p>	<p>خاک‌های رمبنده، در حالت طبیعی نهشته‌هایی سست و دارای ساختار متخلخل بوده و بیشتر در مناطق خشک و بیابانی یافت می‌شوند. ذرات این خاک‌ها در حالت غیر اشباع توسط کشش مویینگی و در حالت خشک توسط عوامل سیمانتاسیون نظیر پیوندهای رسی و سیلتی و یا توسط مواد چسبنده مانند کربنات کلسیم به یکدیگر متصل گشته که این عامل سیمانتاسیون مقاومت ظاهری بالایی را در این خاک‌ها ایجاد می‌نماید. این در حالیست که با افزایش رطوبت، ساختار خاک فرو می‌ریزد. شهر سمنان به واسطه قرارگیری در منطقه خشک و رمبنده بودن خاک در بخش‌هایی از آن، در معرض خطرات ناشی از این پدیده قرار دارد. از این رو مطالعات بیشتر در زمینه شناخت و روش‌های مقابله با این پدیده از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق، اثر میکروسیلیس، بنتونیت و خاکستر پسته برنج بر روی تغییر حجم خاک مورد مطالعه بررسی شد. بر اساس نتایج آزمایش‌ها افزودن میکروسیلیس تا حدود ۴ درصد وزنی خاک، باعث کاهش رمبندگی شده و افزودن بیش از این مقدار تاثیری در کاهش رمبندگی ندارد. در حالت افزودن چند ماده تثبیت کننده بصورت ترکیبی شامل ۳ درصد میکروسیلیس ثابت و درصدهای متغیر بنتونیت و خاکستر پسته برنج، پتانسیل رمبندگی به طور پیوسته و چشمگیر روند کاهشی داشته است.</p>

۱- مقدمه

تغییرات ایجاد شده در خواص آنها پس از مرطوب شدن آنها است، چرا که پس از مرطوب شدن، ساختار این خاک‌ها به شرایط ناپایدار میل می‌کند. خاک‌های فروریزی یا رمبنده^۱ در این گروه از خاک‌ها قرار می‌گیرند. این خاک‌ها در حالت طبیعی نهشته‌هایی سست و دارای ساختار باز بوده که بیشتر در مناطق خشک و نیمه بیابانی یافت می‌شوند. نقاط تماس ذرات در این خاک‌ها توسط مواد چسبنده به یکدیگر متصل گشته که این عامل سیمانتاسیون، مقاومت ظاهری بالایی را در این نوع خاک ایجاد می‌نماید. ولی به دلیل از بین رفتن عوامل چسبندگی در هنگام مرطوب شدن، ساختار خاک دچار

خاک‌ها از مهم‌ترین مصالح موجود در طبیعت می‌باشند که از دیرباز بوسیله انسان در کارهای مهندسی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به طور کلی همه ساخت و سازها در درون، روی و یا به وسیله خاک انجام می‌شود اما همه خاک‌ها شرایط مناسب جهت ساخت و ساز را ندارند. از جمله این موارد می‌توان به خاک‌های حساس به رطوبت اشاره کرد. موضوع مهم و مورد توجه در مورد این خاک‌ها،

* پست الکترونیک نویسنده مسئول:

sh.dastigerdi@students.semnan.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

¹ Collapsible soil

آزمایش‌ها به تنهایی نمی‌تواند رمبندگی را یک خاک را برای ما مشخص کند. از اینرو لازم است تلفیقی از آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی برای تشخیص این خاک‌ها بکار گرفته شود. از جمله روش‌های بهسازی این خاک‌ها در جهت مقابله با خسارات ناشی از پدیده رمبندگی می‌توان به روش‌های برداشت و تعویض لایه خاک رمبندگی در مناطقی که ضخامت این لایه محدود است، همچنین پیش مرطوب کردن و کنترل رطوبت خاک، متراکم کردن خاک از طریق روش‌های تراکم دینامیکی، ارتعاش و یا شمع‌های تراکمی و در نهایت تغییر ساختار خاک از طریق تزریق و یا تثبیت شیمیایی اشاره نمود.

همانطور که بیان شد کشور ایران بخصوص استان‌های مرکزی آن در منطقه گرم و خشک واقع شده است. اقلیم نسبتاً گرم و خشک یکی از عوامل مؤثر بر پدیده رمبندگی می‌باشد. حرکت بادهای شدید در بخش کویر مرکزی و رانده شدن نهشته‌های بادی به سمت حاشیه کویر موجب شده بخش وسیعی از اراضی در مناطق شهری استان‌های مرکزی از پتانسیل رمبندگی برخوردار باشند. استان سمنان یکی از این استان‌ها می‌باشد. شهر سمنان به عنوان مرکز این استان و برخی دیگر از شهرهای این استان، در منطقه خشک و در حاشیه کویر واقع شده‌اند. همچنین بر اساس نقشه‌های زمین شناسی پهنه وسیعی از این استان را رسوبات کواترن پوشانده است. که مستعد پدیده رمبندگی می‌باشد.

بر اساس گزارش‌های آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان سمنان، مسئله رمبندگی در نقاط مختلف این استان گزارش شده است. با توجه به اینکه در این استان، پروژه‌های عمرانی متعددی در حال بررسی و مطالعه می‌باشد، لذا شناخت مناطقی که از نظر خاک بستر دارای ویژگی‌های خاک رمبندگی می‌باشند اهمیت پیدا می‌کند. بدیهی است سرمایه‌گذاری و احداث سازه‌ها بر روی چنین خاک‌هایی، منجر به مشکلاتی خواهد شد که در آینده بخش‌های دولتی و عمومی را به خودش درگیر می‌کند و برطرف کردن خسارت ناشی از این مشکلات، حجم زیادی از منابع عمرانی را می‌تواند به خودش اختصاص دهد. لذا با توجه به مطالعات ناچیز انجام گرفته، مطالعات بیشتر در زمینه شناسایی و بهسازی این خاک‌ها لازم و ضروری می‌باشد.

ناپایداری شده و فرو می‌ریزد. رمبندگی ممکن است تنها در اثر مرطوب شدن یا مرطوب شدن توأم با بارگذاری رخ دهد. منشأ خاک‌های رمبندگی می‌تواند خاک‌های انتقالی^۱ بویژه خاک‌های بادرفتی^۲، خاک‌های برج^۳ یا خاکریزهایی که به خوبی متراکم نشده‌اند^۴، باشد.

مشکلات ناشی از خاک‌های رمبندگی بطور جدی پس از جنگ جهانی دوم شناخته شد. برای اولین بار جنینگز، علت فروریزش ساختمان‌ها در آفریقای جنوبی را در سال ۱۹۵۵ مربوط به تغییر آرایش ذرات خاک زیرین ساختمان‌ها نسبت به هم عنوان نمود. [۱] در سال ۱۹۵۶، پدیده رمبندگی در خاک‌های لس آمریکای شمالی توسط کلونجر گزارش شد. [۲] در سال ۱۹۵۷ جنینگز و نایت، ماسه‌های بادرفتی آفریقای جنوبی را توصیف نمودند. [۳] در سال‌های اخیر، بروز این پدیده در خاک‌های مختلف در نقاط زیادی از جهان گزارش شده است و با توجه به حجم زیاد خسارات گزارش شده ناشی از رمبندگی خاک به سازه‌ها، لزوم توجه بیشتر به این موضوع هر روز آشکارتر می‌گردد.

با توجه به قرارگیری کشور ایران در منطقه گرم و خشک و اشغال سطح وسیعی از آن توسط خاک‌های سطحی که منشأ بادرفتی دارند لزوم شناسایی و مطالعه روش‌های بهسازی خاک به منظور مقابله با این خطر بالقوه از اهمیت بسزایی برخوردار است. [۴]

محققین مختلف معیارها و آزمایش‌های مختلفی جهت شناسایی این خاک‌ها ارائه نموده‌اند و نیز تحقیقاتی در مورد روش‌ها و نحوه بهسازی این خاک‌ها انجام داده‌اند. معیارهای ارائه شده در ابتدا به صورت کیفی و بر اساس خصوصیات فیزیکی خاک، رمبندگی بودن خاک را بررسی می‌نمود. سپس آبلف [۵]، جنینگز و نایت [۶] و موسسه ASTM [۷] روش‌هایی برای ارزیابی پتانسیل رمبندگی خاک با استفاده از دستگاه تحکیم ارائه نمودند. از جمله روش‌های شناسایی این خاک‌ها در محل، می‌توان به آزمایش‌های بارگذاری صفحه، آزمایش نفوذ مخروط (CPT)، آزمایش‌های نفوذ استاندارد (SPT) و آزمایش‌های ژئوفیزیکی اشاره نمود. البته هیچ یک از

¹ Transported soils

² Aeolian soil

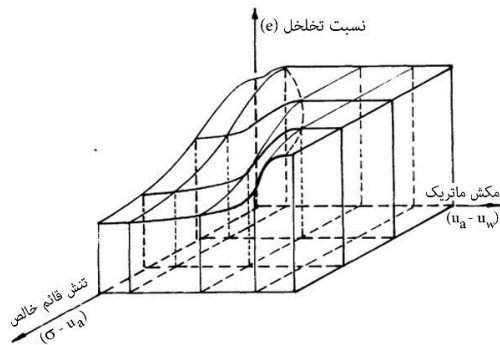
³ Residual soils

⁴ Uncompacted fills

بر اساس شرط پیوستگی بین روابط ساختاری خاک، آب و هوای موجود در خاک رابطه ۳ برقرار می‌باشد:

$$\frac{dv_v}{v_0} = \frac{dv_w}{v_0} + \frac{dv_a}{v_0} \quad (3)$$

شکل ۱، رویه حالت خاک متناظر با متغیرهای بیان شده و نسبت تخلخل را نشان می‌دهد.



شکل ۱. رویه حالت خاک رمنده متناظر با متغیرهای مکش ماتریک، تنش قائم خالص و نسبت تخلخل [۸]

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، ساختار خاک رمنده با افزایش رطوبت (کاهش مکش ماتریک) و افزایش تنش قائم خالص، ناپایدار شده و فرو می‌ریزد. در سال‌های اخیر، محققین مختلف اثر مواد و سیال‌های مختلف را بر رفتار مکانیکی خاک‌های رمنده بررسی نمودند.

حداد و خدایان در سال ۲۰۰۲، اثر سیال‌های مختلف از قبیل آب آشامیدنی، فاضلاب و آب اسیدی را بر پتانسیل رمنده‌گی خاک لسی سمنان بررسی نمودند. آنها نتیجه گرفتند که سیال‌های مختلف می‌توانند باعث رمنده‌گی خاک گردند و حتی در بعضی موارد، نمونه‌های اشباع شده با آب آشامیدنی در حالت پایدار باقی می‌مانند. در حالیکه نمونه‌های اشباع شده با دیگر سیال‌ها دچار رمنده‌گی می‌شوند. [۹]

از جمله موادی که جهت تقویت سیمان‌تاسیون بین ذرات خاک رمنده در مقابل عوامل تغییر رطوبت و تنش استفاده شده است می‌توان به سیلیکات سدیم، کلرید کلسیم و آمونیاک اشاره نمود [۱۰]. اما به دلیل گران بودن استفاده از آنها اقتصادی نمی‌باشد. آهک و سیمان از دیگر مواد متداول جهت تثبیت می‌باشند. البته استفاده از آهک جهت تثبیت خاک‌های در معرض سولفات، باعث کاهش مقاومت خاک می‌گردد.

انتخاب روش مقابله با پدیده رمنده‌گی به عوامل مختلفی نظیر عمق لایه خاک رمنده، زمان بهسازی، عوامل تغییر میزان تنش و رطوبت خاک بستگی دارد. تزریق و تثبیت نمودن خاک‌ها به کمک مواد شیمیایی جهت بهبود ساختار خاک از جمله روش‌هایی بوده است که از دیرباز برای مقابله با این پدیده مورد استفاده قرار گرفته است. در روش تزریق با افزودن مواد شیمیایی به خاک، سیمان‌تاسیون بین ذرات خاک تقویت شده و ساختار خاک در مقابل تغییر رطوبت و تغییر تنش پایدارتر می‌گردد. نکته حائز اهمیت در روش تزریق، ماده افزودنی می‌باشد. به طوری که نوع خاک و شرایط محیطی در انتخاب این مواد تأثیرگذار می‌باشند.

۲- مروری بر تحقیقات گذشته

اساساً رفتار مکانیکی خاک (تغییر حجم و مقاومت برشی)، توسط عبارت‌های حالت تنش در آن خاک قابل توصیف می‌باشد و حالت تنش نیز شامل ترکیبات معینی از متغیرها، موسوم به متغیرهای حالت تنش می‌باشد. این متغیرها مستقل از خواص فیزیکی خاک بوده و تعداد آنها جهت توصیف حالت تنش در خاک، عمدتاً وابسته به تعداد فازهای تشکیل دهنده خاک می‌باشد.

جهت بررسی اعتبار و صحت متغیرهای حالت تنش در خاک‌های غیر اشباع به لحاظ تجربی و آزمایشگاهی، کارهایی در این زمینه صورت پذیرفته است که از جمله می‌توان به مطالعه انجام شده توسط فردلند و مورگنسترن [۸] اشاره نمود. آنها بر اساس دو متغیر حالت تنش، تنش قائم خالص $(\sigma_y - u_a)$ و مکش ماتریک $(u_a - u_w)$ ، رابطه ۱ را برای بیان تغییر حجم خاک و رابطه ۲ را برای بیان تغییر حجم آب موجود در خاک بیان نمودند:

$$\frac{dv_v}{v_0} = m_{1k}^s d(\sigma_y - u_a) + m_2^s d(u_a - u_w) \quad (1)$$

$$\frac{dv_w}{v_0} = m_{1k}^w d(\sigma_y - u_a) + m_2^w d(u_a - u_w) \quad (2)$$

در روابط فوق m_{1k}^s و m_2^s ضرایب تغییر حجم خاک، m_{1k}^w و m_2^w ضرایب تغییر حجم آب موجود در خاک با توجه به تغییر تنش قائم خالص و تغییر مکش ماتریک می‌باشند. همچنین رابطه‌ای مشابه با روابط ۱ و ۲ برای بیان تغییر حجم هوای موجود در خاک غیراشباع نیز ارائه شده است. [۸]

در یک رطوبت ثابت، وزن مخصوص خاک را افزایش می‌دهد. [۱۶]

در پژوهش حاضر ۳ ماده در دسترس در منطقه شامل میکروسیلیس، بنتونیت و خاکستر پوسته برنج بعنوان مصالح تثبیت کننده انتخاب شدند و سپس تأثیر این مواد بر رفتار تغییر شکل پذیری خاک ماسه‌ای رمبند مورد بررسی قرار گرفت.

۳- مواد و روش‌شناسی تحقیق

۳-۱ منطقه مورد مطالعه

استان سمنان با مساحتی برابر ۹۸ هزار و ۵۱۵ کیلومتر مربع، حدود ۵/۸ درصد از وسعت کل کشور ایران را به خود اختصاص داده است که از این لحاظ در سطح کشور، دارای رتبه ششم است. این استان بین مدارهای ۳۴ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۵۷ درجه و ۵۸ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است. شکل ۲، نقشه پراکندگی خاک‌ها در استان سمنان را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، پهنه وسیعی از این استان را خاک‌های بیابانی و شور تشکیل می‌دهند.

از لحاظ زمین‌شناسی، نهشته‌های اطراف سمنان جوان‌تر از ائوسن بوده و نهشته‌های قدیمی‌تر در این منطقه کمتر به چشم می‌خورد. این نهشته‌ها که به نهشته‌های دشت سمنان معروف است، اغلب آبرفتی و متعلق به عهد حاضر (کواترنری) می‌باشند.

از دیدگاه نبوی [۱۷]، رسوبات آبرفتی کواترنر در اطراف شهر سمنان به دو گروه، رسوبات آبرفتی کهن و آبرفت-های جوان تقسیم می‌شوند. گروه رسوبات آبرفتی کهن را آبرفت‌هایی با نشانه یخرفت محلی در دشت‌های بلند شمال شرقی سنگسر، بازمانده‌های آبرفت قدیم، نهشته‌های آبرفتی دشت چلیم در شمال افتر و نهشته‌های آبرفتی دشت درجزین در شمال سمنان و پیرامون درجزین تشکیل داده‌اند. گروه رسوبات آبرفتی جوان متشکل از پهنه‌های رسی و با گستردگی فراوان، در شرق، جنوب شرق و جنوب سمنان و نهشته‌های دشت سمنان در پیرامون سمنان به چشم می‌خورند.

در سال ۱۳۸۷ برای بهسازی خاک رمبند در محدوده نزدیک به راه آهن سمنان-تهران از روش تزریق آهک استفاده گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که با توجه به سیمان‌تاسیون رسی موجود بین ذرات خاک، تزریق آهک منجر به کاهش قابل ملاحظه پتانسیل رمبندگی خاک در شرایط اشباع و افزایش ظرفیت باربری خاک گردید [۱۱].

در سال ۲۰۱۰ برای تثبیت خاک لسی در شهر چائویانگ چین از سیمان استفاده شد. بر اساس نتایج این تحقیق، با افزودن سیمان به خاک، مقاومت تک محوری خاک افزایش یافته است. [۱۲]

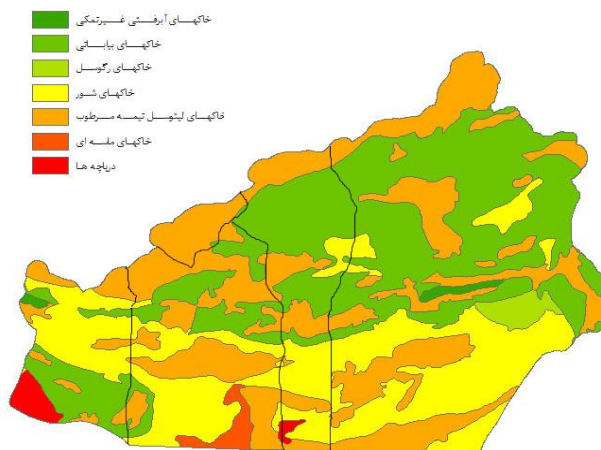
علاوه بر مواد ذکر شده، مواد معدنی نظیر بنتونیت، ضایعات کشاورزی نظیر خاکستر پوسته برنج و محصولات فرعی صنایع نظیر میکروسیلیس جهت تثبیت خاک بکار می‌روند. بر اساس جستجوی صورت گرفته در متون فنی، تاکنون مطالعات محدودی جهت بررسی تأثیر این مواد جهت تثبیت خاک رمبند صورت گرفته است. در ادامه نتایج چند تحقیق در مورد تثبیت خاک بوسیله مواد ذکر شده آورده شده است.

در سال ۲۰۰۸ در کشور نیجریه و در شهر مینا اثر خاکستر پوسته برنج بر پارامترهای مقاومتی خاک ریزدانه مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج این تحقیق، این ماده باعث کاهش وزن مخصوص حداکثر، افزایش درصد رطوبت بهینه، افزایش مقاومت تک محوری و CBR خاک می‌گردد [۱۳].

در مطالعه دیگری در سال ۲۰۱۰ سیمان پرتلند به همراه خاکستر پوسته برنج برای تثبیت خاک لس استفاده گردید. این مطالعه در کشور تایلند و بر روی لس منطقه خن کائن انجام گرفت. بر اساس نتایج این تحقیق، استفاده از ۶۰ درصد سیمان پرتلند به همراه ۴۰ درصد خاکستر پوسته برنج یک نسبت مؤثر برای تثبیت خاک-های لسی پیشنهاد گردید. [۱۴]

در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۱ اثر ترکیب میکروسیلیس و آهک بر روی خاک بستر راه آهن جندق - گرمسار بررسی گردید. بر اساس نتایج این تحقیق، ترکیب میکروسیلیس و آهک باعث افزایش مقاومت CBR و کاهش تورم خاک می‌شود. [۱۵]

در سال ۱۳۹۱ اثر بنتونیت بر تراکم‌پذیری خاک رسی رمبند بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که بنتونیت باعث افزایش شاخص تراکم می‌گردد و همچنین



شکل ۲. نقشه پراکندگی خاکها در استان سمنان [۱۸]

جدول ۱. مشخصات لایه خاک ربنده واقع در چند نقطه از استان سمنان [۱۹]

ردیف	محل	عمق لایه خاک ربنده	نوع خاک	وزن مخصوص خشک حداکثر KN/m ³	درصد رطوبت %	پتانسیل ربنده %
۱	دیباچ	۱/۵ متر	لای ماسه دار (ML)	۱۵	۹/۱	۹/۰۳
۲	میامی	۲-۴ متر	لای ماسه دار (ML)	۱۵/۴	۴	۱۰/۹۹
۳	سمنان	۱ متر	لای ماسه دار (ML)	۱۴/۷	۳/۱	۶/۵۲
۴	سمنان	۶ متر	لای ماسه دار (ML)	۱۵/۱	۵/۹	۴/۸۷

این خاک، بر اساس طبقه بندی یونیفاید بصورت ماسه خوب دانه بندی شده به همراه سیلت (SW-SM) طبقه بندی می گردد. نتایج آزمایش های اولیه و آزمایش های شیمیایی بر روی این خاک در جدول ۲ و جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج این آزمایش ها، نمونه خاک مورد مطالعه به لحاظ خصوصیات دانه بندی (ماسه لای دار با درصد رس کم و فاقد خاصیت خمیری) و داشتن نسبت تخلخل بالا دارای خصوصیات عمومی خاک ربنده می- باشد و با خاک های ردیف ۳ و ۴ جدول ۱ تطابق زیادی دارد.

همانطور که بیان شد استان سمنان یکی از استان های مستعد پدیده ربنده می باشد. جدول ۱ مشخصات چند لایه خاک ربنده در استان سمنان می باشد که از گزارش های مطالعات محلی توسط آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استخراج شده است. [۱۹]

۳-۲ مشخصات خاک مورد استفاده

خاک مورد استفاده در این پژوهش از محوطه دانشکده نفت در حال ساخت دانشگاه سمنان تهیه گردید که منحنی دانه بندی آن در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲. خواص فیزیکی خاک مورد مطالعه [۲۰]

چگالی ویژه خاک (G _s)	رطوبت اولیه خاک (%)	وزن مخصوص خشک خاک (g/cm ³)	درجه اشباع (%)	وزن مخصوص خشک حداکثر (g/cm ³)	درصد رطوبت بهینه
۲/۶۴	۳	۱/۴۲	۱۱/۶	۱/۹۷	۱۲/۸۵

جدول ۳. خواص شیمیایی خاک مورد مطالعه [۲۰]

pH	گچ (%)	کلرید (%)	SO ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)
۷/۶۸	۲/۸۶	۰/۰۱	۱/۶۸	۳/۴۵	۸/۱۵	۴۸/۴۶

جدول ۴. خصوصیات میکروسیلیس مصرفی [۲۱]

مقدار	خاصیت
خاکستری، کروی	رنگ و شکل
۲/۲	چگالی ویژه
۰/۲-۰/۳	اندازه ذرات (μ)
۳/۵-۴	وزن مخصوص در حالت بسته بندی شده (KN/m^3)
۲-۳	وزن مخصوص در حالت فله (KN/m^3)

جدول ۵. ترکیبات شیمیایی میکروسیلیس [۲۲]

نمونه دوم داخلی	نمونه اول داخلی	حدود مقادیر در مراجع	ترکیب شیمیایی
۸۵	۹۵	۷۵-۹۸	SiO_2
۰/۴	۱/۷	۰/۰۳-۵/۷۸	Al_2O_3
۰/۴	۲	۰/۰۶-۴/۵۴	Fe_2O_3
۱/۵	۲/۳	۰/۰۱-۰/۸۳	CaO
۰/۱	۰/۹	۰/۳۶-۰/۵۲	MgO
-	-	۰/۱۷-۰/۲۳	Na_2O
-	-	۱/۱۵-۲/۰۲	K_2O
۲	۱/۲	۰/۳۱-۲/۷۵	افت سرخ شدن
۰/۸۷	۰/۴۵	-	SO_2
۰/۰۸	-	-	CL

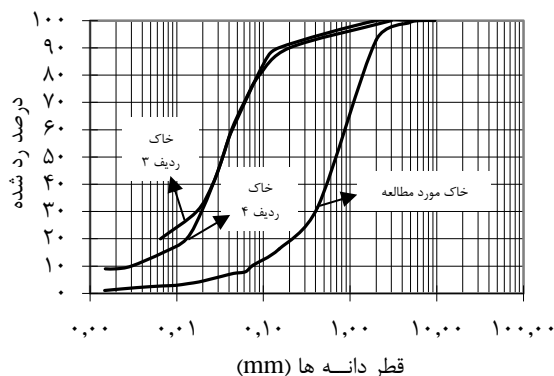
۲-۳-۳ بنتونیت

بنتونیت ماده‌ای است معدنی از دسته رس‌ها یا شبه رس‌ها و از کانی‌های متورم شونده تشکیل شده است، که عموماً حاوی مونتموریلونیت و به مقدار کم بیدلایت هستند [۲۳]. به همین دلیل، منظور از بنتونیت، رسی است که ۸۵-۹۰ درصد کانی مونتموریلونیت داشته باشد.

بنتونیت‌ها میزان نفوذپذیری آب در خاک و یا سازه‌های بتنی را کاهش داده و یا از آن کاملاً جلوگیری می‌کنند. بدین صورت که، ذرات بنتونیت به داخل خلل و فرج خاک نفوذ کرده و در اثر تورم، منافذ موجود را می‌پوشانند. از آنجا که این ذرات در آب نامحلول می‌باشند و مخلوط خاک و بنتونیت قشری خمیر مانند، محکم و انعطاف پذیر تشکیل می‌دهند، تا زمانی که در لایه‌ها و یا سطوح آغشته با بنتونیت تغییرات فیزیکی داده نشود، پایدار می‌ماند و در مقابل کاهش حجم ناگهانی مقابله می‌نماید.

استان سمنان دارای ذخایر غنی بنتونیت نظیر کانسارهای بنتونیتی رشم، سوسن وار، معلمان و کنار جاده سر کویر

شکل ۳ منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه را به همراه دو نوع خاک ردیف ۳ و ۴ جدول ۱ نشان می‌دهد.



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه [۲۰]

۳-۳-۳ مواد استفاده شده در تحقیق

۱-۳-۳ میکروسیلیس

میکروسیلیس، ماده‌ای در بین مواد مضاف سیمانی می‌باشد که به عنوان یک پوزولان معرفی می‌گردد. این ماده یکی از محصولات جنبی صنعت آلیاژ فروسیلیسیم و فلز سیلیسیم می‌باشد و در هنگام تولید آلیاژ فروسیلیسیم و فلز سیلیسیم، از کوره قوس الکتریکی توسط جمع کننده‌های دوده بازیافت می‌شود.

این ماده، باعث کاهش آلومینیم محلول در خاک شده، که موجب کنترل سولفات‌ها و تورم می‌شود. در ضمن اضافه کردن این ماده باعث افزایش pH و کلسیم شده و واکنش پوزولانی را سرعت می‌بخشد، در نتیجه باعث تقویت سیمان‌تاسیون بین ذرات خاک شده و مقاومت خاک را افزایش می‌دهد.

با توجه به ویژگی‌ها و خواص ارائه شده برای میکروسیلیس، همچنین وجود کارخانه فروسیلیس ایران در نزدیکی شهر سمنان، این ماده به عنوان یک ماده افزودنی در دسترس برای تثبیت خاک انتخاب گردید. خصوصیات میکروسیلیس مصرفی در جدول ۴ آورده شده است.

نتایج تجزیه شیمیایی انجام یافته روی نمونه میکروسیلیس کارخانه فروسیلیس ایران و همچنین ترکیبات شیمیایی میکروسیلیس مستخرج از منابع خارجی در جدول ۵ نشان داده شده است.

۰/۴۱	Al ₂ O ₃
۰/۲۱	Fe ₂ O ₃
۰/۴۱	CaO
۰/۴۵	MgO
۰/۰۸	Na ₂ O
۲/۳۱	K ₂ O

۳-۳-۴ روش شناسی تحقیق

در این تحقیق از روش آزمایشگاهی جهت بررسی تأثیر افزودن مواد مختلف بر تغییر شکل خاک رمبنده استفاده شده است. در این روش، ابتدا از محل مورد مطالعه نمونه-گیری شده و پس از حمل نمونه به آزمایشگاه، آزمایش‌های مختلف جهت شناسایی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و به ویژه آزمایش تعیین پتانسیل رمبندگی به وسیله دستگاه تحکیم روی نمونه‌ها انجام شد. تعداد تکرار آزمایش، برای آزمایش‌های مقدماتی و پتانسیل رمبندگی روی نمونه خاک طبیعی ۳ مرتبه و برای نمونه‌های تثبیت شده بسته به درصد‌های وزنی مختلف ماده افزودنی متغیر بوده است. این آزمایش‌ها به همراه استاندارد روش انجام آزمایش در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۸. استانداردهای مورد استفاده در آزمایش‌های آزمایشگاهی

نام آزمایش	استاندارد مربوطه
دانه بندی	ASTM D421
هیدرومتری	ASTM D422
تعیین حدود اتربرگ	ASTM D4318
تعیین درصد رطوبت	ASTM D2216
تعیین چگالی ویژه	ASTM D854
تراکم	ASTM D698
آزمایش‌های شیمیایی	ASTM C25
تعیین پتانسیل رمبندگی	ASTM D5333

۳-۳-۵ روش نمونه گیری

برای انجام آزمایش‌های اولیه و شیمیایی و همچنین بررسی پتانسیل رمبندگی خاک محل، نمونه‌های دست خورده و دست نخورده از محل تهیه گردید. جهت نمونه گیری از خاک به صورت دست نخورده، پس از خاکبرداری تا سطح مورد نظر، بلوکی از خاک برداشته شده و برای جلوگیری از تبخیر رطوبت خاک، بلوک توسط فویل

می‌باشد. با توجه به این ذخایر غنی و خصوصیات بنتونیت، این ماده برای تثبیت خاک انتخاب گردید. بنتونیت مورد استفاده از کارخانه نگین پودر سمنان تهیه شده است. با توجه به اطلاعات گرفته شده از این کارخانه، بنتونیت مصرفی دارای خصوصیات زیر می‌باشد.

جدول ۶. مشخصات بنتونیت مصرفی [۲۴]

ترکیب (٪)	مقدار
SiO ₂	۶۵/۵۳
Al ₂ O ₃	۱۰/۴۴
Fe ₂ O ₃	۱/۲۴
CaO	۳/۲۳
MgO	۱/۵۷
Na ₂ O	۳/۵۱
K ₂ O	۱/۳۱
SO ₃	۱/۹۵
دیگر ترکیبات	۹/۷۵

۳-۳-۳ خاکستر پوسته برنج

در نواحی شمالی ایران، سالیانه به مقدار زیادی پوسته برنج تولید می‌شود. از آنجایی که پوسته برنج برای خوراک دام مناسب نبوده و خارج کردن آن از محیط زیست همواره با مشکلاتی روبروست. بنابراین استفاده از خاکستر آن در بهسازی خاک، یکی از گزینه‌های مناسب، جهت رفع این مشکلات می‌باشد. جدول ۷ تجزیه شیمیایی خاکستر پوسته برنج را نشان می‌دهد. بر اساس این جدول بیش از ۹۲ درصد وزنی خاکستر پوسته برنج را سیلیس تشکیل می‌دهد، از این رو می‌توان این ماده را جزء پوزولان‌های مصنوعی به حساب آورد. استفاده از خاکستر پوسته برنج موجب تقویت سیمان‌تاسیون بین ذرات خاک شده و علاوه بر افزایش مقاومت خاک، موجب کاهش نشست خاک می‌گردد.

پوسته برنج مصرفی در این پژوهش، از شمال کشور تهیه و سپس در دمای بیش از ۴۵۰ درجه سانتیگراد سوزانده شد. خاکستر به دست آمده دارای رنگ خاکستری روشن و برای استفاده جهت تثبیت، آن را از الک نمره ۴۰ عبور داده و سپس مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۷. تجزیه شیمیایی خاکستر پوسته برنج [۲۵]

عناصر متشکل	درصد وزنی
SiO ₂	۹۲/۱۵

$$I_e = \left[\frac{\Delta e}{1 + e_0} \right] \times 100 \quad (۴)$$

که در آن، Δe تغییرات نسبت تخلخل ناشی از اشباع کردن نمونه و e_0 نسبت تخلخل اولیه می‌باشد. جدول ۹ رده‌بندی خطر ناشی از رمبندگی خاک‌ها را بر اساس شاخص رمبندگی به‌دست آمده از رابطه ۴، نشان می‌دهد.

جدول ۹. رده‌بندی خطر ناشی از رمبندگی خاک‌ها برحسب

$[\Delta]I_e$	
شاخص رمبندگی (I_e)	درجه رمبندگی
صفر	بدون مشکل
۰,۱-۲	اندک
۲,۱-۶	متوسط
۶,۱-۱۰	نسبتاً شدید
>۱۰	شدید

۴- نتایج و بحث

۴-۱- نتایج آزمایش تعیین حدود اتربرگ

نتایج این آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های تثبیت شده در جدول ۱۰ ارائه شده است. با توجه به این نتایج، افزودن خاکستر پوسته برنج به خاک ماسه‌ای لای‌دار بر روی حدود اتربرگ آن، تأثیری نداشته است. در حالت افزودن میکروسیلیس به خاک، افزایش میکروسیلیس بیش از ۲ درصد، باعث کاهش حد روانی خاک شده و در حالت ترکیبی شامل ۳٪ میکروسیلیس و درصدهای متغیر بنتونیت، افزایش بنتونیت حدود اتربرگ خاک را افزایش داده است. بطوری‌که خاک مورد مطالعه که در حالت تثبیت نشده فاقد شاخص خمیری بود، با افزایش ۷ درصد بنتونیت، شاخص خمیری آن به مقدار ۷ درصد افزایش یافته است.

۴-۲- آزمایش تعیین پتانسیل رمبندگی

شکل ۴، نتایج آزمایش پتانسیل رمبندگی روی نمونه خاک طبیعی مورد مطالعه بدون افزودن مواد شیمیایی را نشان می‌دهد.

آلومینیوم و پارچه‌ای پوشانده شده و بوسیله مایع پارافین عایق بندی گردید. سپس در داخل کیسه نایلونی قرار داده و به آزمایشگاه حمل گردید.

۳-۳-۶ روش بازسازی نمونه

برای اضافه کردن مواد تثبیت کننده به خاک موردنظر، بایستی نمونه‌ها در آزمایشگاه با شرایط محل بازسازی گردند. بازسازی نمونه‌ها بر اساس بخش ۷ از استاندارد BS 1377 انجام گرفت [۲۶]. جهت تهیه نمونه‌های بازسازی شده، خاک مورد آزمایش به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه قرار داده شد تا کاملاً خشک شود. مقدار وزن لازم خاک جهت ساخت نمونه با توجه به مشخص بودن حجم رینگ آزمایش تحکیم و با در نظر گرفتن چگالی خشک مدنظر تعیین شد. سپس با داشتن وزن لازم برای هر نمونه و متناسب با درصد ماده تثبیت کننده مورد نظر، ماده تثبیت کننده به خاک اضافه گردید. در مرحله بعد رطوبتی معادل با درصد رطوبت طبیعی خاک، به نمونه اضافه شده و مخلوط به خوبی ورز داده شد تا نمونه همگن حاصل شود. نمونه حاصل در دو مرحله درون رینگ تحکیم ریخته شده و تا حد لازم متراکم گردید.

۳-۳-۷ روش تعیین پتانسیل رمبندگی

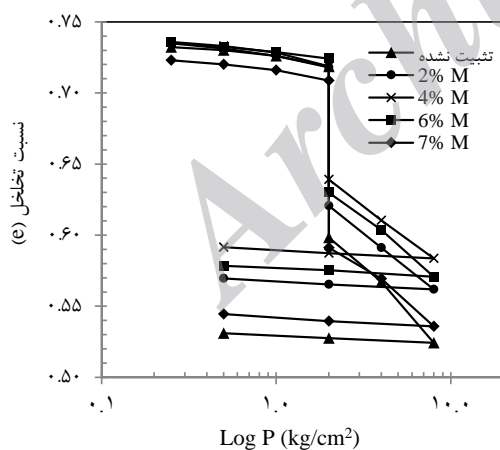
برای تعیین پتانسیل رمبندگی در این پژوهش از روش استاندارد شده ASTM D5333 استفاده شده است [۵]. در این روش، نمونه خاک پس از آماده‌سازی در دستگاه تحکیم قرار گرفته و سپس تحت فشار اولیه ۵ کیلو پاسکال قرار می‌گیرد پس از ۵ دقیقه از اعمال فشار اولیه، نمونه در گام های یک ساعته تحت اثر فشارهای بیشتر معادل ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ KPa قرار می‌گیرد. اشباع سازی نمونه پس از گذشت ۱ ساعت از اعمال فشار قائم KPa ۲۰۰ انجام می‌شود. نمونه در حال غرقاب در فشار مورد نظر، ۲۴ ساعت باقی می‌ماند و سپس بارگذاری با گام های ۲۴ ساعته ادامه می‌یابد. تغییر شکل‌ها در مراحل بارگذاری قرائت شده و یادداشت می‌گردد. شاخص رمبندگی (I_e) مقدار نسبی رمبندگی خاک در فشار ۲۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد و از رابطه ۴ به دست می‌آید:

جدول ۱۰. نتایج آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ روی نمونه‌های تثبیت شده [۲۰]

ماده افزودنی	درصد وزنی	حد خمیری (%)	حد روانی (%)	شاخص خمیری (%)
میکروسیلیس	۲	-	-	-
	۴	-	۲۴	-
	۶	-	۲۰	-
	۷	-	۱۹	-
ترکیب میکروسیلیس-بنتونیت (نسبت میکروسیلیس ثابت و برابر ۳ درصد)	۳-۳	۱۸	۲۰	۲
	۵-۳	۲۰	۲۳	۳
	۷-۳	۲۱	۲۸	۷
خاکستر پوسته برنج	۵.۷، ۳	-	-	-

نمودارهای تغییرات نسبت تخلخل بر حسب تنش سربرار قائم و نمودار تغییرات نشست نمونه‌های تثبیت شده با میکروسیلیس، بترتیب در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است.

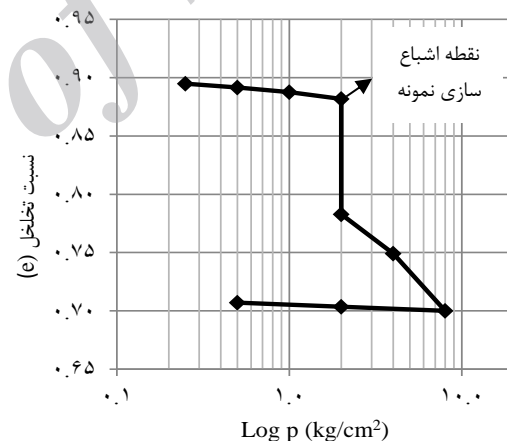
همانطور که از شکل ۵ مشاهده می‌شود با افزودن میکروسیلیس تا ۴ درصد وزن خاک، پتانسیل رمبندگی کاهش یافته و با افزودن میکروسیلیس بیش از ۴ درصد، پتانسیل رمبندگی افزایش یافته است. بطوریکه پتانسیل رمبندگی از ۶/۹۴ درصد در حالت تثبیت نشده به ۴/۶۱ درصد در حضور ۴ درصد میکروسیلیس کاهش یافته و در حضور ۶٪ و ۷٪ میکروسیلیس بترتیب به مقادیر ۵/۴۱ و ۶/۷۴ افزایش یافته است.



M: میکروسیلیس

شکل ۵. نمودار تغییرات نسبت تخلخل بر حسب تنش سربرار قائم برای نمونه‌های تثبیت شده با میکروسیلیس

همانطور که ملاحظه می‌شود نتایج آزمایش تحکیم روی این نمونه تغییرات شدید نسبت تخلخل پس از اشباع نمودن نمونه خاک را نشان می‌دهد. به طوری که مقدار پتانسیل رمبندگی خاک بر اساس رابطه ۴، ۵/۱۶ درصد می‌باشد و این مقدار بر اساس جدول ۹، نشان‌دهنده خاک با پتانسیل رمبندگی متوسط می‌باشد.



شکل ۴. منحنی تحکیم نمونه مورد مطالعه

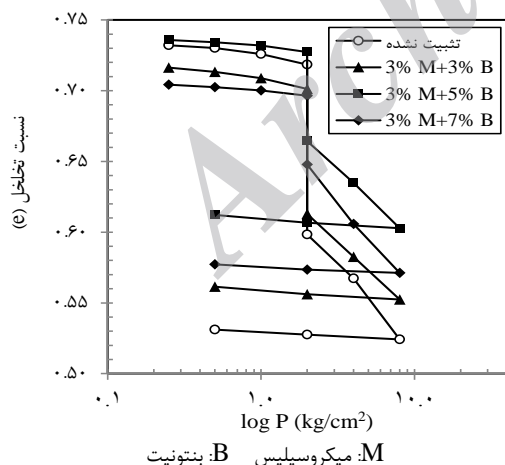
۴-۲-۱ نمونه‌های تثبیت شده با میکروسیلیس

نتایج آزمایش‌های تحکیم بر روی نمونه‌های تثبیت شده با میکروسیلیس در جدول ۱۱ آمده است. این نتایج نشان می‌دهند، نمونه‌های تثبیت شده، دارای نسبت تخلخل تقریباً برابر با ۰/۷۴ می‌باشند، شیب منحنی تحکیم قبل از اشباع کردن، در ابتدا با افزودن ۲ درصد میکروسیلیس افزایش و سپس با افزایش میکروسیلیس تا ۶ درصد وزنی خاک، کاهش یافته است و برای مقدار بیشتر از ۶ درصد مجدداً افزایش داشته است.

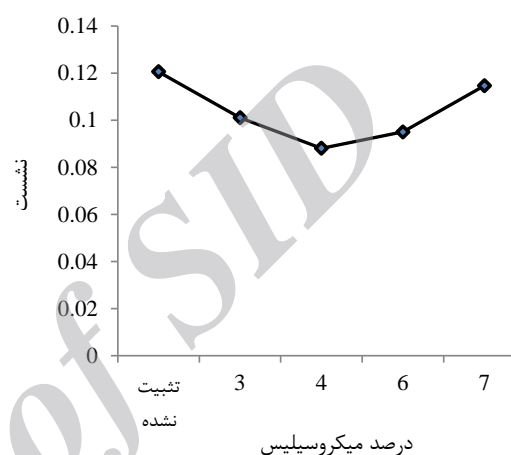
جدول ۱۱. نتایج آزمایش‌های تعیین پتانسیل رمبندگی روی نمونه‌های تثبیت شده با میکروسیلیس [۲۰]

پتانسیل رمبندگی (%)	تغییرات نسبت تخلخل در مرحله اشباع کردن	شیب منحنی باربرداری	شیب منحنی پس از اشباع کردن	شیب منحنی قبل از اشباع کردن	نسبت تخلخل نهایی (e _f)	نسبت تخلخل اولیه (e ₀)	درصد وزنی میکروسیلیس
۶/۹۲	۰/۱۲	۰/۰۰۰۸	۰/۰۱۲	۰/۰۰۷۴	۰/۵۲۴	۰/۷۳۳	تثبیت نشده
۵/۵۷	۰/۰۹۷	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۹۵	۰/۰۱۱	۰/۵۶۵	۰/۷۴۱	۲٪
۴/۶۱	۰/۰۸	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۹	۰/۰۰۹	۰/۵۸۴	۰/۷۳۷	۴٪
۵/۴۱	۰/۰۹۴	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۹۶	۰/۰۰۶	۰/۵۷۱	۰/۷۳۶	۶٪
۶/۷۴	۰/۱۱۷	۰/۰۰۱	۰/۰۰۹	۰/۰۱۱	۰/۵۳۶	۰/۷۳۵	۷٪

تثبیت شده با میکروسیلیس و بنتونیت در جدول ۱۲ آمده است. این نتایج نشان می‌دهند، نمونه‌ها دارای نسبت تخلخل تقریباً برابر با ۰/۷ می‌باشند، شیب منحنی تحکیم قبل از اشباع کردن، در ابتدا با افزودن ۳ درصد بنتونیت به ترکیب خاک و ۳ درصد میکروسیلیس، افزایش و سپس با افزایش درصد بنتونیت، شیب آن نسبت به نمونه تثبیت نشده، کاهش یافته است. شیب منحنی پس از اشباع کردن برای نمونه‌های تثبیت شده نسبت به نمونه تثبیت نشده کاهش داشته است و شیب منحنی باربرداری برای نمونه‌های تثبیت شده با ۳ و ۵ درصد بنتونیت، کمتر از مقدار نمونه تثبیت نشده و برای ۷ درصد بنتونیت این مقدار افزایش یافته است. نمودارهای تغییرات نسبت تخلخل بر حسب تنش سربار قائم و نمودار تغییرات نشست برای نمونه‌های تثبیت شده با میکروسیلیس و بنتونیت، بترتیب در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است.



شکل ۷. نمودار تغییرات نسبت تخلخل بر حسب تنش سربار قائم برای نمونه‌های تثبیت شده با ۳٪ میکروسیلیس و درصد‌های متغیر بنتونیت



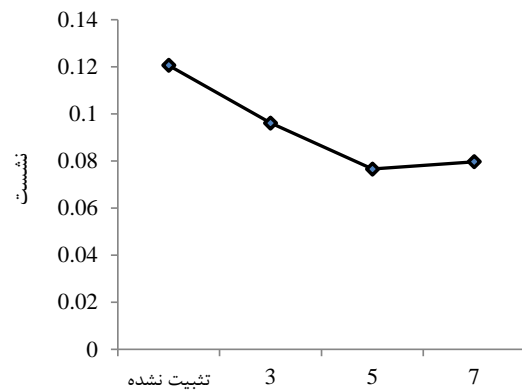
شکل ۶. نمودار تغییرات نشست برای نمونه‌های تثبیت شده با میکروسیلیس

همانطور که از شکل ۶ مشاهده می‌شود با افزودن میکروسیلیس تا ۴ درصد وزن خاک، مقدار نشست کاهش یافته و با افزودن میکروسیلیس بیش از ۴ درصد، مقدار نشست افزایش یافته است. بطوریکه مقدار نشست از ۰/۱۲ ارتفاع نمونه، در حالت تثبیت نشده به ۰/۰۸ ارتفاع نمونه، در حضور ۴ درصد میکروسیلیس کاهش یافته و در حضور ۶٪ و ۷٪ میکروسیلیس بترتیب به مقادیر ۰/۰۹ و ۰/۱۱ ارتفاع نمونه افزایش یافته است.

۲-۲-۴ نمونه‌های تثبیت شده با میکروسیلیس و بنتونیت

با توجه به نتایج آزمایش‌های تحکیم بر روی نمونه‌های تثبیت شده با میکروسیلیس و ملاحظات اقتصادی، ۳٪ میکروسیلیس با درصد‌های مختلف بنتونیت به نمونه‌ها اضافه گردید. نتایج آزمایش‌های تحکیم بر روی نمونه‌های

کاهش یافته است. بطوریکه مقدار نشست از ۰/۱۲ ارتفاع نمونه، در حالت تثبیت نشده به ۰/۰۷۹ ارتفاع نمونه، در حضور ۳ درصد میکروسیلیس و ۷ درصد بنتونیت کاهش یافته است.



شکل ۸. نمودار تغییرات نشست نمونه‌های تثبیت شده با ۳٪ میکروسیلیس و خاک

همانطور که از شکل ۷ مشاهده می‌شود با افزودن ۳ درصد میکروسیلیس و با افزایش درصد بنتونیت به خاک، پتانسیل رمبندگی کاهش یافته است. بطوریکه پتانسیل رمبندگی از ۶/۹۲ درصد در حالت تثبیت نشده به ۲/۸۱ در حضور ۳ درصد میکروسیلیس و ۷ درصد بنتونیت کاهش یافته است.

شکل ۸ نشان می‌دهد با افزودن ۳ درصد میکروسیلیس و با افزایش درصد بنتونیت به خاک، مقدار نشست نمونه

شکل ۸ نشان می‌دهد با افزودن ۳ درصد میکروسیلیس و با افزایش درصد بنتونیت به خاک، مقدار نشست نمونه

۳-۲-۴ نمونه‌های تثبیت شده با خاکستر پوسته برنج

نتایج آزمایش‌های تحکیم بر روی نمونه‌های تثبیت شده با خاکستر پوسته برنج در جدول ۱۳ آمده است. این نتایج نشان می‌دهند، نمونه‌ها دارای نسبت تخلخل تقریباً برابر با ۰/۷ می‌باشند، شیب منحنی تحکیم قبل از اشباع کردن با افزایش درصد خاکستر پوسته برنج تا ۰/۷، نسبت به نمونه تثبیت نشده افزایش داشته ولی با اضافه کردن مقدار ۰/۷ خاکستر پوسته برنج به خاک، این مقدار کاهش پیدا کرده است. شیب منحنی پس از اشباع کردن برای نمونه‌های تثبیت شده با درصد‌های ۳، ۵ و ۷ درصد خاکستر پوسته برنج، کمتر یا مساوی شیب نمونه تثبیت نشده می باشد و شیب منحنی باربرداری با افزایش خاکستر پوسته برنج کاهش یافته است.

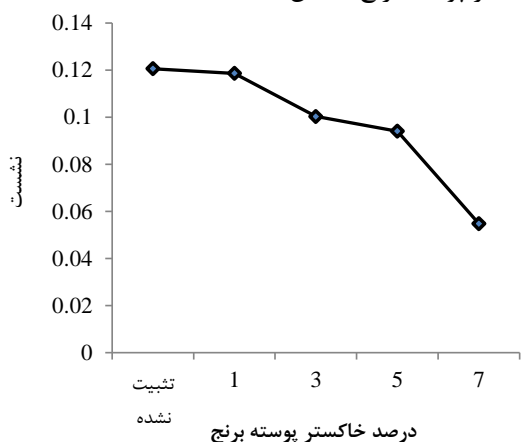
جدول ۱۲. نتایج آزمایش‌های تعیین پتانسیل رمبندگی روی نمونه‌های تثبیت شده با میکروسیلیس و بنتونیت [۲۰]

درصد وزنی بنتونیت	نسبت تخلخل اولیه (e ₀)	نسبت تخلخل نهایی (e _f)	شیب منحنی قبل از اشباع کردن	شیب منحنی پس از اشباع کردن	شیب منحنی باربرداری	تغییرات نسبت تخلخل در مرحله اشباع کردن	پتانسیل رمبندگی (%)
تثبیت نشده	۰/۷۳۳	۰/۵۲۴	۰/۰۰۷۴	۰/۰۱۲	۰/۰۰۰۸	۰/۱۲	۶/۹۲
۳٪	۰/۷۱۷	۰/۵۵۲	۰/۰۰۸	۰/۰۰۹	۰/۰۰۱	۰/۰۸۸	۵/۱۲
۵٪	۰/۷۳۶	۰/۶۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۱	۰/۰۰۱۱	۰/۰۶۳	۳/۶۳
۷٪	۰/۷۰۷	۰/۵۷۱	۰/۰۰۵۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۰۷	۰/۰۴۸	۲/۸۱

جدول ۱۳. نتایج آزمایش‌های تعیین پتانسیل رمبندگی روی نمونه‌های تثبیت شده با خاکستر پوسته برنج [۲۰]

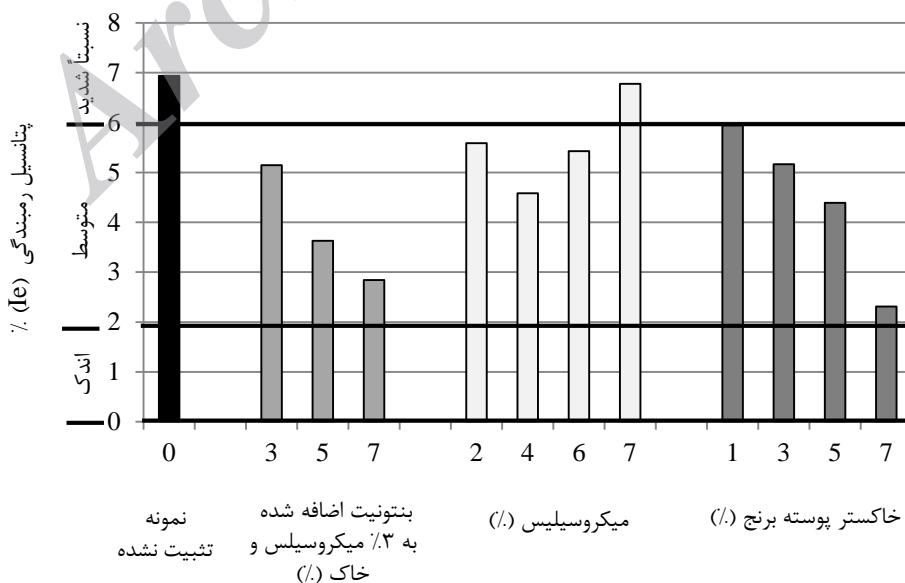
درصد وزنی بنتونیت	نسبت تخلخل اولیه (e ₀)	نسبت تخلخل نهایی (e _f)	شیب منحنی قبل از اشباع کردن	شیب منحنی پس از اشباع کردن	شیب منحنی باربرداری	تغییرات نسبت تخلخل در مرحله اشباع کردن	پتانسیل رمبندگی (%)
تثبیت نشده	۰/۷۳۳	۰/۵۲۴	۰/۰۰۷۴	۰/۰۱۲	۰/۰۰۰۸	۰/۱۲	۶/۹۲
۱٪	۰/۷۳۶	۰/۵۳	۰/۰۱۱	۰/۰۱۳	۰/۰۰۰۹	۰/۱	۵/۷۶
۳٪	۰/۷۳۴	۰/۵۶	۰/۰۰۸۲	۰/۰۱۱	۰/۰۰۱۳	۰/۰۹	۵/۱۹
۵٪	۰/۷۳۳	۰/۵۷	۰/۰۰۷۵	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲۱	۰/۰۷۶	۴/۳۸
۷٪	۰/۷۳۵	۰/۶۴	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۷۳	۰/۰۰۱	۰/۰۴	۲/۳

بطوریکه مقدار نشست از ۰/۱۲ ارتفاع نمونه، در حالت تثبیت نشده به ۰/۰۵۴ ارتفاع نمونه، در حضور ۷ درصد خاکستر پوسته برنج کاهش یافته است.



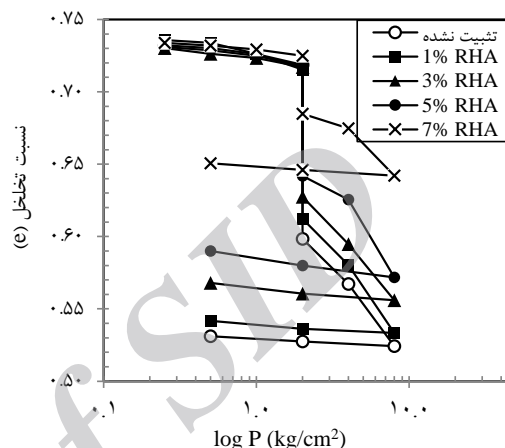
شکل ۱۰. نمودار تغییرات نشست نمونه‌های تثبیت شده با خاکستر پوسته برنج
۴-۲-۴ تحلیل نتایج

شکل ۱۱ تغییرات پتانسیل رمبندگی را برای نمونه‌های تثبیت شده نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، پتانسیل رمبندگی خاک با افزودن بنتونیت و خاکستر پوسته برنج به خاک روند کاهشی داشته است در حالی که با افزودن میکروسیلیس تا ۴ درصد، پتانسیل رمبندگی روند کاهشی و پس از آن روند افزایشی داشته است.



شکل ۱۱. مقایسه تغییرات پتانسیل رمبندگی نمونه‌های تثبیت شده

نمودار تغییرات نسبت تخلخل بر حسب تنش سربار قائم برای نمونه‌های تثبیت شده با خاکستر پوسته برنج، در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود با افزایش درصد خاکستر پوسته برنج، پتانسیل رمبندگی کاهش یافته است. بطوریکه پتانسیل رمبندگی از ۶/۹۲ درصد در حالت تثبیت نشده به ۲/۳ در حضور ۷ درصد خاکستر پوسته برنج کاهش یافته است.



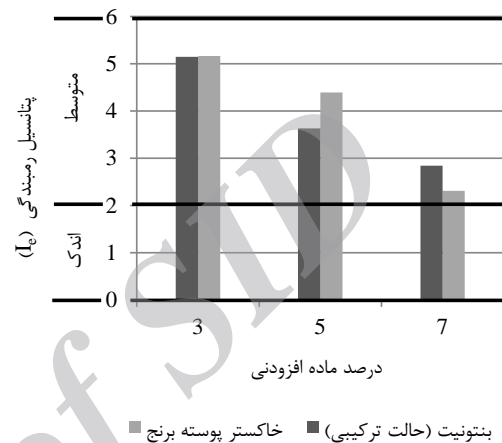
خاکستر پوسته برنج RHA

شکل ۹. نمودار تغییرات نسبت تخلخل بر حسب تنش سربار قائم برای نمونه‌های تثبیت شده با خاکستر پوسته برنج

شکل ۱۰، نمودار تغییرات نشست برای نمونه‌های تثبیت شده با خاکستر پوسته برنج را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود با افزایش درصد خاکستر پوسته برنج، مقدار نشست نمونه کاهش یافته است.

- نتایج آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ بر روی نمونه‌های تثبیت شده با خاکستر پوسته برنج نشان می‌دهند که افزودن خاکستر پوسته برنج بر روی حدود اتربرگ خاک ماسه‌ای لای‌دار مورد مطالعه، تأثیری نداشته است.
- نتایج آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ بر روی نمونه‌های تثبیت شده با میکروسیلیس نشان می‌دهند که افزودن میکروسیلیس بیش از ۲ درصد، باعث کاهش حد روانی خاک شده و تأثیری روی حد خمیری خاک ماسه‌ای لای‌دار مورد مطالعه نداشته است.
- نتایج آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ بر روی نمونه‌های تثبیت شده با میکروسیلیس و بنتونیت نشان می‌دهند که با افزایش درصد بنتونیت به ترکیب خاک و ۳٪ میکروسیلیس، حدود اتربرگ افزایش می‌یابد. به طوری که خاک مورد مطالعه که در حالت تثبیت نشده فاقد شاخص خمیری بود، با افزایش ۷ درصد بنتونیت، شاخص خمیری آن به مقدار ۷ درصد افزایش یافته است.
- نتایج آزمایش‌های رهمبندگی بر روی نمونه‌های تثبیت شده با میکروسیلیس نشان می‌دهند که با افزودن میکروسیلیس تا ۴ درصد وزن خاک، پتانسیل رهمبندگی کاهش یافته و با افزودن میکروسیلیس بیش از ۴ درصد، پتانسیل رهمبندگی افزایش یافته است. به طوری که پتانسیل رهمبندگی در حضور ۴ درصد میکروسیلیس ۳۴٪ کاهش و در حضور ۶٪ و ۷٪ میکروسیلیس به ترتیب ۱۵٪ و ۳۲٪ افزایش یافته است.
- نتایج آزمایش‌های رهمبندگی بر روی نمونه‌های تثبیت شده با میکروسیلیس و بنتونیت نشان می‌دهند که با افزودن ۳ درصد میکروسیلیس و با افزایش درصد بنتونیت به خاک، پتانسیل رهمبندگی کاهش یافته است. به طوری که پتانسیل رهمبندگی در حضور ۳ درصد میکروسیلیس و ۷ درصد بنتونیت ۶۰٪ کاهش یافته است.

شکل ۱۲ تغییرات پتانسیل رهمبندگی را برای نمونه‌های تثبیت شده با بنتونیت-میکروسیلیس و خاکستر پوسته برنج در درصدهای مشابه نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، بنتونیت در ترکیب با ۳٪ میکروسیلیس در درصدهای کمتر از ۷٪، نسبت به خاکستر پوسته برنج، پتانسیل رهمبندگی کمتری و برای مقدار ۷٪، خاکستر پوسته برنج، پتانسیل رهمبندگی کمتری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. مقایسه تغییرات پتانسیل رهمبندگی نمونه‌های تثبیت شده با خاکستر پوسته برنج و حالت ترکیبی میکروسیلیس-بنتونیت

با مقایسه نتایج به دست آمده، خاکستر پوسته برنج با توجه به اینکه جزء ضایعات کشاورزی بی مصرف بوده و از لحاظ اقتصادی هم نسبت به گزینه‌های دیگر، به صرفه تر می‌باشد، گزینه بهتری برای تثبیت می‌باشد. همچنین با توجه به ذخایر غنی بنتونیت در منطقه، خصوصیات و کاربرد فراوان این ماده در مهندسی عمران می‌توان آن را به عنوان یک ماده افزودنی مناسب برای تثبیت خاک رهمبند استفاده نمود.

۵- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر تأثیر افزودن مواد تثبیت کننده بر پتانسیل رهمبندگی خاک ماسه ای لای دار مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ۳ ماده میکروسیلیس، بنتونیت و خاکستر پوسته برنج به عنوان مواد در دسترس در منطقه انتخاب گردیدند. نتایج به دست آمده از این تحقیق بدین شرح می باشد:

پوسته برنج، پتانسیل رمبندگی کمتری و برای مقدار ۰.۷٪، خاکستر پوسته برنج، پتانسیل رمبندگی کمتری را نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از خاکستر پوسته برنج در خاک مورد مطالعه از نظر تاثیر مناسب آن در کاهش پتانسیل رمبندگی قابل توجه است. همچنین از دیدگاه اقتصادی و زیست محیطی نیز چون این ماده از ضایعات کشاورزی ارزان قیمت تامین می‌گردد نسبت به دیگر گزینه‌های مطرح شده مناسبتر است.

- نتایج آزمایش‌های رمبندگی بر روی نمونه‌های تثبیت شده با خاکستر پوسته برنج نشان می‌دهند که با افزایش درصد خاکستر پوسته برنج، پتانسیل رمبندگی کاهش یافته است. به طوری- که پتانسیل رمبندگی در حضور ۷ درصد خاکستر پوسته برنج ۶۷٪ کاهش یافته است.
- مقایسه تغییرات پتانسیل رمبندگی نمونه‌های تثبیت شده با بنتونیت-میکروسیلیس و خاکستر پوسته برنج در درصدهای مشابه نشان می‌دهد که بنتونیت در ترکیب با ۳٪ میکروسیلیس در درصدهای کمتر از ۰.۷٪، نسبت به خاکستر

فهرست علائم اختصاری

e_0	نسبت تخلخل اولیه	u_w	فشار آب حفره‌ای
I_c	پتانسیل رمبندگی	V_a	حجم هوا
m_{1k}^s	ضریب تغییر حجم خاک با توجه به تغییر تنش قائم خالص	V_v	حجم کل
m_{1k}^w	ضریب تغییر حجم آب موجود در خاک با توجه به تغییر تنش قائم خالص	V_w	حجم آب
m_2^s	ضریب تغییر حجم خاک با توجه به تغییر مکش ماتریک	V_0	حجم کل اولیه
m_2^w	ضریب تغییر حجم آب موجود در خاک با توجه به تغییر مکش ماتریک	Δe	تغییر در نسبت تخلخل ناشی از اشباع کردن نمونه
u_a	فشار هوای حفره‌ای	σ_y	تنش کل

تقدیر و تشکر

اطلاعات و همچنین از همکاری آقای مهندس دوست محمدی مسئول آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه سمنان تشکر و قدردانی می‌نمائیم.

در پایان از آزمایشگاه مکانیک خاک و سازمان جهاد کشاورزی استان سمنان بخاطر در اختیار قرار دادن

۶- مراجع

- [1] Jennings, J. E. B. (1965). "The theory and practice of construction on partly saturated soils as applied to south African conditions", Proceedings. of international conference on engineering effects of moisture change in soils, Texas, pp. 345-363.
 - [2] Clevenger, W. A. (1956). "Experiences with loess as a foundation material", Journal of the soil mechanics and foundations division, ASCE, Vol. 82.
 - [3] Alfi, A.A. (1984). "Mechanical and electron optical properties of a stabilized collapsible soil in tucson, arizona", Doctoral dissertation, department of civil engineering, the university of Arizona.
- [۴] کریمی، ع. (۱۳۸۹). پراکنش رسوبات لسی در ایران، دومین همایش ملی فرسایش بادی و طوفان‌های گرد و غبار، یزد.

- [5] Abelev, Y.M., (1948) "Fundamentals of design and constructinn on macroporous Soils", Stroivoenmorizdat, Moscow.
- [6] Jennings, J. E., & Knight, K., (1975). "A Guide to construction or withmaterials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure," 6th Regional Conference for Africa On Soil Menchanics & Foundation Engineering, Durban, South Africa, pp. 99-105.
- [7] ASTM, (2002). "ASTM D5333: Standard test method for measurement of collapse potential of soils", Annual book ofASTM standards, vol. 04, ASTM international, West Conshohocken, pp. 1197-1199.
- [8] Fredlund, D.G. and Gan, K.M. (1994) "The collapse mechanism of a soil subjected to one-dimensional loading and wetting", NATO ASI series, Kluwer academic publishers, Vol. 468, pp. 173-205.
- [9] Haddad, A., Khodaian, S. (2002),"Collapse potential of Semnan soils", Third Iranian international conference on geotechnical engineering and soil mechanics, Tehran.
- [10] Al-rawas, A.A. (2000). "State-of-the-art review of collapsible soils", Science and technology, Special review, pp. 115-135.
- [۱۱] محمد عزیزاده رفیع، ب. (۱۳۸۷)، اصلاح خاک‌های رمبنده به روش تزریق (مطالعه موردی راه آهن سمنان - تهران)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی قزوین.
- [12] Bo, S., Changming, W., Don, G., and Tan, G. (2010). "Experimental study on improving collapsible loess with cement", Global geology, 13(2), pp.79-84.
- [13] Alhassan, M. (2008). "Potentials of rice husk ash for soil stabilization", Assumption university journal of technology, 11(4), pp. 246-250.
- [14] Huangjing, S. and Gasaluck, W.(2010). "The stabilization of loess by chemical additives for road base", EJGE, 15, pp. 1651-1668.
- [15] Karimi, M., Ghorbani, A., Daghigh, Y., Alhosseini, S. K., and Rabbani, P. (2011). "Stabilization of silty sand soils with lime and microsilica admixture in presence of sulfates", 14th Pan-american conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Toronto, Canada.
- [۱۶] ابراز، ع.، نوری م.ر. و مرید سادات، م. (۱۳۹۱)، تأثیر افزودن بنتونیت بر تراکم‌پذیری خاک مسئله‌دار، سومین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی شبکه‌های آبیاری و زهکشی، کرج، صفحات ۲۱۳-۲۱۷.
- [۱۷] نبوی، م. ح. (۱۳۶۶)، نقشه شناسی سمنان به مقیاس ۱:۱۰۰/۰۰۰، سازمان زمین شناسی کشور.
- [۱۸] سازمان جهاد کشاورزی استان سمنان، نقشه خاک‌شناسی استان سمنان. ۱۳۹۰.
- [۱۹] آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان سمنان، گزارشات ژئوتکنیکی از سال ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۱.
- [۲۰] دستی گردی، س. ح.، (۱۳۹۱). تأثیر افزودن مواد شیمیایی (معدنی) بر تغییر شکل پذیری خاک‌های رمبنده سمنان. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
- [۲۱] کارخانه فروسیلیس ایران، گزارش مشخصات فنی میکروسیلیس، ۱۳۹۱.
- [۲۲] زمانی، م. ع. (۱۳۸۰)، "کاربرد میکروسیلیس در بتن با استفاده از مصالح محلی سمنان"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
- [۲۳] حجازی، م. و قربانی م. (۱۳۷۳)، زمین شناسی ایران (بنتونیت - ژئولیت)، سازمان زمین شناسی کشور، تهران.
- [۲۴] شرکت نگین پودر سمنان، گزارش مشخصات فنی بنتونیت، ۱۳۹۱.
- [۲۵] رضانیانپور، ع. ا.، جعفرپور، ف.، ماجدی اردکانی، م. ح. (۱۳۷۴)، بررسی تحقیقات انجام شده بر روی مصارف پوسته برنج و خاکستر آن در صنعت ساختمان، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، انتشارات مرکز، تهران.
- [26] BSI, (1990) "BS 1377: Methods of test for Soils for civil engineering purposes - Part 1: General requirements and sample preparation".