

الحمد لله
الحمد لله



پردیس بین‌المللی خوارزمی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

بررسی آزمایشگاهی پارامترهای مقاومتی خاک واگرای تثبیت شده با خاکستر
لجن فاضلاب و آهک

نگارنده: محمد رضا اکبری

استاد راهنما :

دکتر سید مهدی حسینی

شهریور ۱۳۹۵

سپاسگزاری :

«من لم يشكر المخلوق لم يشكر الخالق»

از پدر و مادر عزیزم این دو معلم بزرگوارم که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت‌هایم گذشته‌اند و در تمام عرصه‌های زندگی یار و یآوری بی چشم‌داشت برای من بوده‌اند، تقدیر و تشکر می‌کنم.

بر خود لازم می‌دانم تا از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر سید مهدی حسینی که در کمال سعه‌صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده داشتند، تقدیر و تشکر نمایم.

از مدیران محترم شرکت مهندسین مشاور ساخت آزما جناب آقای دکتر جهانبخش تقدیر و تشکر می‌نمایم.

از جناب آقای مهندس عسکری، مدیریت محترم تصفیه‌خانه شهرستان بیرجند تقدیر و تشکر می‌کنم چرا که بدون حضور ایشان بخش‌های مربوط به تجزیه و تحلیل خاکستر لجن فاضلاب و بخش شیمی با دشواری همراه بود.

از جناب آقای مهندس شیر محمدی، ناظر سد رزه به خاطر حمایت برادرانه‌ی بنده حقیر در منطقه درمیان و سد رزه تقدیر و تشکر می‌کنم.

تقدیم به :

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار و ازخودگذشتگان به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است، به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌گراید و به پاس محبت های بی‌دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند این مجموعه را به:

پدر و مادر عزیزم

تقدیم می‌کنم .

چکیده:

در این تحقیق خاکستر لجن فاضلاب یک بار به تنهایی و بار دیگر همراه با آهک به یک نسبت ثابت ۴ به ۱ در هشت مقدار ($SL(2\%)$, $SL(4\%)$, $SL(8\%)$, $SL(16\%)$, $SSA(2\%)$, $SSA(4\%)$, $SSA(8\%)$, $SSA(16\%)$) و در شش زمان عمل‌آوری مختلف (۳،۷،۱۴،۲۸،۶۰ و ۹۰ روز) به‌عنوان تثبیت‌کننده به خاک واگرا اضافه گردید. به‌منظور درک تأثیر افزودنی‌ها آزمایشاتی نظیر تراکم با دو بار تکرار، پین هول و برش مستقیم هر کدام با سه بار تکرار بر روی نمونه‌ها انجام شد. این تحقیق نشان داد که با افزایش افزودنی، رطوبت بهینه افزایش و وزن مخصوص خشک کاهش می‌یابد همچنین نتایج نشان دادند که افزایش SSA به تنهایی تأثیری در غیر واگرا بودن خاک ندارد ولی چنانچه این ماده همراه با آهک مصرف شود واگرایی خاک با ۸٪ افزودنی و در زمان سه روزه از بین می‌رود این در حالی است که واگرایی خاک مذکور با ۷٪ آهک به تنهایی و در زمان سه روزه از بین می‌رود. نتایج آزمایشات برش مستقیم نیز نشان دادند که با افزایش SSA به خاک تا ۸٪ مقاومت برش مستقیم افزایش یافته و بعد از آن این مقاومت رو به کاهش است این درحالیست که با افزایش SL مقاومت همچنان رو به افزایش است.

زمان در مقاومت برشی نقش بسزایی داشته به طوری که با افزایش زمان مقاومت برشی نمونه خاک با افزودنی SSA و SL در هر حالت رو به رشد است.

کلیدواژه‌ها: خاک و آگرا، خاکستر لجن فاضلاب همراه با آهک، تثبیت خاک، مقاومت برش مستقیم

فهرست مطالب

فصل اول کلیات

مقدمه.....	۲
۱-۱ مقدمه.....	۳
۲-۱ بیان مسئله.....	۴
۳-۱ اهداف تحقیق.....	۵
۴-۱ فرضیات تحقیق.....	۶

فصل دوم بررسی ادبیات فنی

۱-۲ رس.....	۸
۱-۱-۲ سطح ویژم.....	۸
۲-۱-۲ چسبندگی.....	۱۰
۳-۱-۲ بار منفی رس.....	۱۱
۴-۱-۲ تبادل یونی در خاک.....	۱۲
۵-۱-۲ ظرفیت تبادل کاتیون کانی های رسی.....	۱۴
۶-۱-۲ اجتماع و پراکندگی ذرات رسی.....	۱۵
۷-۱-۲ کانیهای رس.....	۱۶
۸-۱-۲ جذب آب در رس ها.....	۱۷
۹-۱-۲ لایه دوگانه.....	۱۹
۲-۲ خاک رس واگرا.....	۲۱

۲۳	۱-۲-۲ مسائل ناشی از خاک های واگرا.....
۲۳	۲-۲-۲ تاریخچه.....
۲۶	۳-۲ نحوه آب شستگی در خاک های واگرا.....
۲۸	۱-۳-۲ آب شستگی های سطحی در خاک های واگرا.....
۳۰	۴-۲ منشأ خاک های واگرا.....
۳۲	۵-۲ موارد استفاده از خاک های واگرا.....
۳۲	۶-۲ عوامل مؤثر در پدیده واگرایی.....
۳۳	۱-۶-۲ نوع و غلظت نمک های محلول در آب منفذی.....
۳۴	۲-۶-۲ خصوصیات شیمیایی آب در تماس با سطح خاک.....
۳۴	۳-۶-۲ ترک خوردگی.....
۳۵	۷-۲ فرسایش و مسائل ناشی از آن.....
۳۷	۱-۷-۲ فرسایش داخلی و مکانیزم آن.....
۳۸	۸-۲ کانی های تشکیل دهنده خاک رس.....
۳۸	۹-۲ میزان تراکم، درصد رطوبت، درصد رس و حدود اتربرگ.....
۳۹	۱۰-۲ ملاحظات طراحی در مواجهه با خاک های واگرا.....
۳۹	۱-۱۰-۲ تثبیت و تسلیح خاک.....
۴۰	۱-۱۰-۲ الف تسلیح.....
۴۱	۱-۱۰-۲ ب تثبیت.....
۴۳	۲-۱۰-۲ استفاده از فیلترهای مناسب.....
۴۳	۳-۱۰-۲ جلوگیری از ترک خوردگی.....
۴۴	۱۱-۲ مواد معمول مورد استفاده برای تثبیت خاک.....
۴۴	۱-۱۱-۲ آهک.....
۴۵	۲-۱۱-۲ سولفات آلومینیوم.....

۳-۱۱-۲ افزودن ژئوپس (سنگ گچ آبدار) به آب مخزن سد..... ۴۵

۱۲-۲ پیشینه ی مطالعات انجام گرفته..... ۴۶

فصل سوم تئوری آزمایشات انجام گرفته

۱-۳ آزمایش های طبقه بندی خاک..... ۴۹

۱-۱-۳ آزمایش دانه بندی با الک..... ۴۹

۲-۱-۳ آزمایش هیدرومتری..... ۵۰

۳-۱-۳ آزمایش تعیین حدود اتربرگ..... ۵۱

۲-۳ آزمایش تراکم..... ۵۴

۳-۳ آزمایشات مربوط به تشخیص واگرایی خاک..... ۵۷

۱-۳-۳ شناسایی خاک های واگرا در بررسی های محلی..... ۵۷

۲-۳-۳ آزمایش های متداول در شناسایی خاک های واگرا..... ۵۹

۲-۳-۳-الف آزمایش پین هول..... ۶۱

۲-۳-۳-ب آزمایش های شیمیایی..... ۶۴

۲-۳-۳-ج آزمایش هیدرومتری دوگانه..... ۶۷

۲-۲-۳-د آزمایش کرامب..... ۶۹

۴-۳ آزمایش تعیین مقاومت برشی خاک های چسبند..... ۷۰

۱-۴-۳ وسایل آزمایش..... ۷۱

۲-۴-۳ شرح آزمایش..... ۷۱

۳-۴-۳ برش دادن نمونه..... ۷۳

۵-۴-۳ اشکالات آزمایش برش مستقیم..... ۷۴

۶-۴-۳ محاسن آزمایش برش مستقیم..... ۷۴

۷-۴-۳ موارد زیر در یک جدول درج و محاسبه می شود..... ۷۴

فصل چهارم آزمایشات و ارائه نتایج

۱-۴	موقعیت جغرافیایی منبع قرضه.....	۷۷
۲-۴	مواد مصرفی (خاکستر لجن فاضلاب).....	۸۰
۳-۴	مخلوط خاکستر لجن فاضلاب و آهک.....	۸۲
۴-۴	آزمایشات مربوط به طبقه‌بندی خاک.....	۸۴
۵-۴	آزمایشات مربوط به شناسایی خاک واگرا.....	۸۶
۱-۵-۴	آزمایش پین هول و کرامب.....	۸۶
۲-۵-۴	آزمایشات شیمیایی.....	۸۷
۳-۵-۴	هیدرومتری ساده و دوگانه.....	۸۹
۶-۴	نوع آزمایشات، تعداد تکرار آزمایشات برای هر نمونه، زمان عمل‌آوری.....	۹۰
۷-۴	آزمایش تراکم.....	۹۱
۸-۴	آزمایش واگرایی و تثبیت خاک.....	۹۳
۹-۴	آزمایش برش مستقیم.....	۱۰۱
۱-۵	نتیجه‌گیری.....	۱۱۴
۲-۵	پیشنهادهای.....	۱۱۶
	منابع و مراجع.....	۱۱۸
	Abstract.....	۱۲۱

فهرست شکل‌ها

- شکل (۲-۱): تغییرات سطح ویژه با قطر ذرات خاک..... ۹
- شکل (۲-۲): توزیع کاتیون‌ها در اطراف ذرات رس..... ۱۳
- شکل (۲-۳): تبادل یونی در خاک رس..... ۱۴
- شکل (۲-۴): (الف) ساختمان پراکنده، (ب) ساختمان مجتمع..... ۱۶
- شکل (۲-۵): ساختار کانی های رس (الف) کائولینیت، (ب) ایلیت و (ج) مونت موریلونیت..... ۱۷
- شکل (۲-۷): مولکول های دوقطبی آب و کاتیون‌ها در لایه مضاعف اطراف ذره رس..... ۱۹
- شکل (۲-۸): توزیع بار الکتریکی در اطراف ذره رسی - لایه دوگانه..... ۲۰
- شکل (۲-۹): آب جذب‌شده و آب لایه مضاعف در (الف) ذره مونت موریلونیت و (ب) ذره کائولینیت..... ۲۱
- شکل (۳-۱): شماتیک آزمایش دانه بندی با الک..... ۴۹
- شکل (۳-۲): شماتیک آزمایش هیدرومتری..... ۵۰
- شکل (۳-۳): شماتیک حدود اتربرگ..... ۵۲
- شکل (۳-۴): دستگاه کاساگرانده و نحوه انجام آزمایش تعیین حد روانی..... ۵۳
- شکل (۳-۵): نحوه انجام آزمایش تعیین حد خمیری..... ۵۴
- شکل (۳-۶): نمونه هایی از قالب و چکش تراکم..... ۵۶
- شکل (۳-۷): نمایی شماتیک از آزمایش تراکم..... ۵۷
- شکل (۳-۸): نمونه ای از آب شستگی در خاک منطقه..... ۵۹
- شکل (۳-۹): شمای دستگاه پین هول..... ۶۳
- شکل (۳-۱۰): نمای کلی دستگاه پین هول..... ۶۳
- شکل (۴-۱): موقعیت جغرافیایی خاک قرضه..... ۷۷
- شکل (۴-۲): نمای کلی از منطقه قرضه..... ۷۸
- شکل (۴-۳): خاک منطقه مورد مطالعه..... ۷۹
- شکل (۴-۴): نمایی از لجن موجود در تصفیه خانه شهرستان زنجان..... ۸۰

- شکل (۴-۵) نمایی محموله لجن فاضلاب بعد از خشک شدن در فضای آزاد..... ۸۱
- شکل (۴-۶) نمایی از کوره ذوب جهت سوزاندن لجن فاضلاب خشک شده..... ۸۱
- شکل (۴-۷) نمایی از خاکستر لجن فاضلاب حاصله از کوره..... ۸۲
- شکل (۴-۸) خاکستر لجن فاضلاب و آهک الک شده قبل از اختلاط..... ۸۳
- شکل (۴-۹) خاکستر لجن فاضلاب و آهک الک شده حین اختلاط..... ۸۳
- شکل (۴-۱۰) خاکستر لجن فاضلاب و آهک الک شده بعد از اختلاط..... ۸۴
- شکل (۴-۱۱) طبقه‌بندی خاک مورد مطالعه..... ۸۴
- شکل (۴-۱۲) طبقه‌بندی خاک مورد مطالعه در سیستم یونیفاید..... ۸۵
- شکل (۴-۱۳) قطر نمونه خاک واگرا (خاک مورد مطالعه) بعد از آزمایش پین هول..... ۸۶
- شکل (۴-۱۲) نمایی از طول استاندارد نمونه مورد مطالعه برای آزمایش پین هول..... ۸۷
- نمودار (۴-۳) تعیین واگرایی با استفاده نتایج آزمایش شیمی..... ۸۸
- نمودار (۴-۴) تغییرات رطوبت بهینه با تغییرات SL..... ۹۱
- نمودار (۴-۵) تغییرات رطوبت بهینه با تغییرات SSA..... ۹۲
- نمودار (۴-۶) تغییرات وزن مخصوص خشک با تغییرات SL..... ۹۳
- نمودار (۴-۷) تغییرات وزن مخصوص خشک با تغییرات SSA..... ۹۳
- شکل (۴-۱۳) قطر نمونه $SL(2\%)$ پس از اتمام آزمایش پین هول..... ۹۴
- شکل (۴-۱۴) قطر نمونه $SL(4\%)$ پس از اتمام آزمایش پین هول..... ۹۵
- شکل (۴-۱۵) قطر نمونه $SL(8\%)$ پس از اتمام آزمایش پین هول..... ۹۶
- شکل (۴-۱۶) قطر نمونه $SL(16\%)$ پس از اتمام آزمایش پین هول..... ۹۷
- شکل (۴-۱۷) قطر نمونه $SSA(2\%)$ پس از اتمام آزمایش پین هول..... ۹۸
- شکل (۴-۱۸) قطر نمونه $SSA(4\%)$ پس از اتمام آزمایش پین هول..... ۹۹
- شکل (۴-۱۹) قطر نمونه $SSA(8\%)$ پس از اتمام آزمایش پین هول..... ۱۰۰
- شکل (۴-۲۰) قطر نمونه $SSA(16\%)$ پس از اتمام آزمایش پین هول..... ۱۰۱

- نمودار (۸-۴) تغییرات مقاومت خاک با تغییرات میزان درصد SSA در زمانه‌ای عمل‌آوری مختلف ۱۰۳
- نمودار (۹-۴) تغییرات مقاومت خاک با تغییرات میزان درصد SL در زمانه‌های عمل‌آوری مختلف. ۱۰۴
- نمودار (۱۳-۴) مقایسه SSA(%4) با SL(%4) در زمانه‌ای عمل‌آوری مختلف..... ۱۱۰
- نمودار (۱۴-۴) مقایسه SSA(%8) با SL(%8) در زمانه‌ای عمل‌آوری مختلف..... ۱۱۱
- نمودار (۱۵-۴) مقایسه SSA(%2&4) با SL(%2&4) در زمانه‌های عمل‌آوری مختلف..... ۱۱۲
- نمودار (۱۶-۴) مقایسه SSA(%8&16) با SL(%8&16) در زمانه‌های عمل‌آوری مختلف..... ۱۱۳

فهرست جدول ها

جدول (۱-۲) چسبندگی در ذرات مختلف خاک.....	۱۱
جدول (۲-۲) عکس چگالی سطحی متوسط بارهای منفی روی سطوح برخی از کانی های رس.....	۱۱
جدول (۱-۴) نتایج حاصله از طبقه بندی خاک مورد مطالعه.....	۸۵
جدول (۲-۴) نتایج حاصل از آزمایش پین هول و کرامب.....	۸۶
جدول (۳-۴) نتایج آزمایشات شیمیایی.....	۸۸
جدول (۴-۴) نوع، تعداد تکرار آزمایشات برای هر نمونه، زمان عمل آوری.....	۹۱
جدول (۵-۴) آب خروجی حاصل از آزمایش پین هول برای نمونه SL(%2).....	۹۳
جدول (۶-۴) آب خروجی حاصل از آزمایش پین هول برای نمونه SL(%4).....	۹۴
جدول (۷-۴) آب خروجی حاصل از آزمایش پین هول برای نمونه SL(%8).....	۹۵
جدول (۸-۴) آب خروجی حاصل از آزمایش پین هول برای نمونه SL(%16).....	۹۶
جدول (۹-۴) آب خروجی حاصل از آزمایش پین هول برای نمونه SSA(%2).....	۹۷
جدول (۱۰-۴) آب خروجی حاصل از آزمایش پین هول برای نمونه SSA(%4).....	۹۸
جدول (۱۱-۴) آب خروجی حاصل از آزمایش پین هول برای نمونه SSA(%8).....	۹۹
جدول (۱۲-۴) آب خروجی حاصل از آزمایش پین هول برای نمونه SSA(%16).....	۱۰۰

فصل اول

کلیات

مقدمه:

سرزمین پهناور ایران در منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته و توزیع ناموزون جریان‌های سطحی، محدودیت‌های عمده‌ای را در امر استفاده بهینه از آب به وجود آورده است. قسمت اعظم این جریان‌ها قبل از اینکه مورد استفاده قرار گیرد از دسترس خارج شده و به‌سوی دریا سرازیر می‌گردند، لذا مهار سیلاب‌ها و آب‌های جاری از طریق احداث سد، از کارهای اساسی و زیر بنایی محسوب شده و برای نیل به خودکفایی اقتصادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در گذشته تصور می‌شد که خاک‌های رسی در مقابل فرسایش ناشی از آب بسیار مقاوم هستند، اما اکنون به روشنی مشخص شده است که برخی از گونه‌های رس در طبیعت وجود دارند که بسیار فرسایش پذیرند. این رس‌ها هنگامی که در معرض نشت متمرکز و یا جریان سطحی آب قرار می‌گیرند، به‌صورت کلوئیدی در آن حل شده و به‌سرعت شسته می‌شوند. تحقیق درباره علل اینگونه خرابی‌ها سبب پیشرفت‌های اساسی در طراحی سدهای خاکی شده است (نبیی، ۱۳۹۲).

بین ذرات خاک‌های رسی نیروهای دافعه و جاذبه وجود دارد. نیروهای جاذبه عمدتاً از نوع نیروهای واندروالسی هستند و نیروهای دافعه از وجود لایه دوگانه در اطراف ذرات رسی ناشی می‌شوند. در خاک‌های واگرا، بر اثر مجاورت با آب، نیروی جاذبه بین ذرات از بین می‌رود و در نتیجه ذرات کلوئیدی خاک به سهولت از یکدیگر دور شده با نیروی کمی که می‌تواند ناشی از حرکت بسیار آرام آب باشد، به حرکت در می‌آیند، در صورتی که در خاک‌های رسی غیر واگرا نحوه فرسایش به گونه‌ای دیگر است. در این خاک‌ها، بر اثر تماس خاک با آب، نیروی جاذبه بین ذرات از بین نمی‌رود و برای فرسایش و شسته شدن آنها لازم است سرعت جریان آب به قدر کافی زیاد باشد (نبیی، ۱۳۹۲).

در طراحی و اجرای سدهای خاکی، شناسایی، کاربرد و اصلاح خاک‌های واگرا از اهمیت خاصی برخوردار است. در مطالعات سازه‌های آبی، همواره منابع قرضه ریزدانه از نظر پتانسیل واگرایی بررسی می‌شوند. خاک‌های واگرا از جمله خاک‌های مشکل‌آفرینی هستند که استفاده از آنها تاکنون منجر به ایجاد خرابی‌های زیادی در سدهای خاکی و سایر خاکریزها شده است. در این‌گونه خاک‌ها با جریان

یافتن آب در ترک های خاک، ذرات رس در آب معلق گشته و فرسایش می یابند. یون سدیم قابل تعویض خاک، عامل اصلی ایجاد واگرایی در خاک های رسی محسوب می شود. شناسایی خاک های واگرا با روش های صحرایی و آزمایشگاهی صورت می گیرد. شناسایی کامل و دقیق خاک های واگرا بدون انجام آزمایش های آزمایشگاهی تقریباً غیرممکن است. لذا از آزمایش های ویژه ای برای شناسایی این خاک ها استفاده می شود؛ که متداول ترین این آزمایش ها عبارتند از: آزمایش پین هول، آزمایش شیمیایی، آزمایش هیدرومتری دوگانه و آزمایش کرامب. تخمین زده می شود که هر ساله در سراسر دنیا حدود ۱,۷ میلیون تن خاکستر لجن فاضلاب (Sewage Sludge Ash) تولید شود که اینک این روند تولید به مرور زمان رو به افزایش بوده و حذف این مواد ضروری می باشد. روش های مختلفی برای بازیافت و استفاده مفید از این مواد مورد بررسی قرار گرفته که شامل استفاده از خاکستر لجن فاضلاب به عنوان جایگزین رس در آجر پخته، کاشی، سنگ فرش و مواد خام و همچنین استفاده این مواد برای سنگدانه کارخانه جات می باشد (Donatello, 2013).

۱-۱ مقدمه

خواص مکانیکی اغلب خاک ها با افزایش رطوبت و اشباع شدن تغییر می کند. در برخی از خاک ها بر اثر افزایش رطوبت، پدیده های خاصی بروز می کند که بعضاً به خسارات عمده ای در طرح های عمرانی منجر می گردد. این خاک ها «خاکهای حساس در مقابل آب» نامیده می شوند و از مهمترین اقسام آنها می توان به خاک های متورم شونده و خاک های واگرا اشاره نمود. خاک های واگرا خاک های رسی هستند که در برخورد با آب به راحتی شسته می شوند. دلیل اصلی شسته شدن این خاک های رسی بر اثر پدیده واگرایی، افزایش نیروی دافعه بین ذرات خاک و غلبه بر نیروی جاذبه بین این ذرات می باشد. بر اساس مطالعات انجام گرفته، مهم ترین عاملی که بر پدیده واگرایی تأثیر می گذارد، غلظت یون سدیم در آب منفذی خاک و تک ظرفیتی بودن کاتیون مذکور می باشد. روش های گوناگونی

برای پایداری خاک های مسئله دار وجود دارد مانند افزودنی های شیمیایی، مسلح کردن خاک، جابجا کردن خاک، کنترل تراکم، کنترل رطوبت و... (کریمی، ۱۳۹۰).

در این تحقیق به این علت که خاک های واگرا پس از برخورد با آب، بر اثر جدا شدن ذرات خاک از یکدیگر، مقاومت برشی بسیار پایینی از خود نشان می دهند، به بررسی راه هایی برای افزایش مقاومت برشی خاک های رسی واگرا پرداخته شده است.

۱-۲ بیان مسئله

واگرایی، یک پدیده پیشرونده می باشد که از یک نقطه با تمرکز جریان آب شروع شده و به تدریج گسترش می یابد. نقطه شروع پدیده واگرایی می تواند ترک های حاصل از انقباض، نشست و یا ترک های حاصل از ریشه گیاهان باشد. این پدیده در طرح هایی نظیر سدهای خاکی و کانال های آبرسانی که تمرکز فشار آب در داخل خاک وجود دارد، دارای اهمیت ویژه ای می باشد و در خاکریزها، دیواره های کانالهای خاکی و سدهای خاکی مشکلاتی به وجود می آورد که غیرقابل جبران می باشد. (عسگری و سهرابی، ۱۳۷۹)

پدیده واگرایی پدیده ای فیزیکی - شیمیایی است و نباید با رگاب که پدیده ای کاملاً فیزیکی است و بر اثر شسته شدن ذرات سیلتی خاک رخ می دهد اشتباه شود. راه های غلبه بر مشکلات ناشی از خاک- های واگرا عبارتند از:

۱. دقت در انتخاب منابع قرضه، تعویض خاک واگرا با خاک غیر واگرا
 ۲. اصلاح و بهبود خواص خاک واگرا با استفاده از مواد و افزودنی های شیمیایی
 ۳. تسلیح خاک توسط الیاف مصنوعی مانند پلی پروپیلن و المان های مختلف تسلیح خاک
- (نبی، ۱۳۹۲).

روش‌های مختلفی جهت پایداری و بهبود مشخصات مقاومتی و مکانیکی خاک‌ها معرفی گشته که یکی از جدیدترین روش‌ها، روش استفاده از خاکستر لجن فاضلاب (SSA)^۱ می‌باشد. این روش بیشتر در کشورهای با وسعت کمتر و جمعیت بیشتر کاربرد دارد. دلیل این می‌باشد که در چنین کشورهایی تولید فضولات زیاد بوده و با استفاده منحصر در کشاورزی قادر به حذف این فضولات نمی‌باشند.

بکارگیری این روش جهت پایداری خاک‌های ریزدانه در پروژه‌های عمرانی بدون آگاهی از تأثیر آنها بر پارامترهای مختلف خاک عملاً با محدودیت‌های فراوانی همراه خواهد بود. در صورتی که، داشتن اطلاعات کافی در این زمینه‌ها می‌تواند طیف وسیع‌تری از موارد کاربرد این روش در پروژه‌های عمرانی از قبیل اصلاح خاک محل قرارگیری سازه‌های سنگین، تثبیت شیب‌ها و... را پیش روی متخصصان قرار داده و موجب تجاری‌سازی این مواد گردد، لذا بر آن شدیم تا تأثیر بکارگیری این مواد در افزایش قابلیت‌های خاک‌های ریزدانه را مورد مطالعه قرار دهیم.

در این آزمایشات برای افزایش کارایی خاک‌های واگرا، ابتدا مواد SSA به تنهایی و سپس SSA و آهک (نسبت SSA به آهک در تمامی آزمایشات ثابت می‌باشد) با درصدهای وزنی مختلف با خاک مذکور ترکیب شده و تأثیر هر کدام از درصدها در زمانه‌ای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس نتایج حاصل برای دو نوع نمونه تحت تأثیر این تغییرات با یکدیگر و با نمونه بدون افزودنی مقایسه می‌گردد و زمان و درصد وزنی بهینه برای دو نوع نمونه اعلام می‌گردد.

۱-۳ اهداف تحقیق

- ۱- ارائه روش بهینه در اصلاح خاک رسی واگرا.
- ۲- ارائه اطلاعاتی در مورد استفاده بهینه از لجن فاضلاب.
- ۳- ارائه درصد وزنی معقول جهت ترکیب SSA با خاک رسی واگرا جهت بالا بردن ویژگی‌های مقاومتی و تثبیت خاک مذکور.

۴- ارائه درصد وزنی معقول جهت ترکیب SSA به همراه آهک با خاک رسی واگرا جهت بالا بردن ویژگی‌های مقاومتی و تثبیت خاک مذکور.

۵- ارائه یک زمان بهینه عمل‌آوری جهت بیشترین تأثیر مثبت بر ویژگی‌های خاک واگرا در صورت استفاده از SSA.

۶- ارائه یک زمان بهینه عمل‌آوری جهت بیشترین تأثیر مثبت بر ویژگی‌های خاک واگرا در صورت استفاده از SSA به همراه آهک.

۱-۴ فرضیات تحقیق

۱. خاکستر لجن فاضلاب (SSA) به تنهایی و در کنار آهک برای تثبیت خاک‌های واگرا تأثیر مثبت دارد.

۲. خاکستر لجن فاضلاب به تنهایی و در کنار آهک بر ویژگی‌های مقاومتی خاک‌های ریزدانه واگرا تأثیر مثبت دارد.

۳. درصدهای وزنی مختلف خاکستر لجن فاضلاب در تثبیت خاک‌های ریزدانه واگرا تأثیرات متفاوتی خواهد داشت.

۴. درصدهای وزنی مختلف خاکستر لجن فاضلاب در کنار آهک در تثبیت خاک‌های ریزدانه واگرا تأثیرات متفاوتی دارد.

۵. زمان عمل‌آوری بر ویژگی‌های مقاومتی خاک‌های ریزدانه واگرا تأثیر دارد.

۶. برای عمل‌آوری جهت بیشترین تأثیر مثبت بر ویژگی‌های خاک واگرا در صورت استفاده از SSA به تنهایی زمان بهینه‌ای وجود دارد.

۷. برای عمل‌آوری جهت بیشترین تأثیر مثبت بر ویژگی‌های خاک واگرا در صورت استفاده از SSA به همراه آهک زمان بهینه‌ای وجود دارد.

فصل دوم

بررسی ادبیات فنی

۲-۱ رس

خاک بنا به اندازه غالب ذرات تشکیل دهنده آن به نام‌های شن، ماسه، لای یا رس طبقه‌بندی می‌گردد. رس‌ها معمولاً به ذرات کوچک‌تر از 0.002 میلی متر گفته می‌شود. با این حال در برخی موارد ذرات با اندازه 0.002 تا 0.005 میلی متر نیز به عنوان رس اطلاق می‌گردد. البته برای تشخیص بهتر و کامل‌تر این ذرات از ذرات غیر رسی، شرط دیگری برای رسی بودن خاک باید صادق باشد که اگر به خاک مقداری آب اضافه نماییم، حالت خمیری پیدا کند. به بیان دیگر خاک رس، خاکی است که چسبندگی و خواص خمیری ویژه‌ای دارد.

واژه رس در علم مکانیک خاک، در دو مورد، یکی توصیف اندازه ذرات خاک و دیگری توصیف انواع خاک، به کار برده می‌شود. در مورد اول کلمه رس بر آن دسته از ذرات خاک اطلاق می‌گردد که از 0.002 میلی‌متر کوچک‌ترند، اما در حالت دوم خاک رس خاکی است که چسبندگی و خواص خمیری ویژه‌ای دارد. با این نگرش تمام ذرات به اندازه رس الزاماً کانی رسی نیستند. مثلاً ذرات بسیار ریز گرد سنگ ممکن است به اندازه ذرات درشت رس باشند.

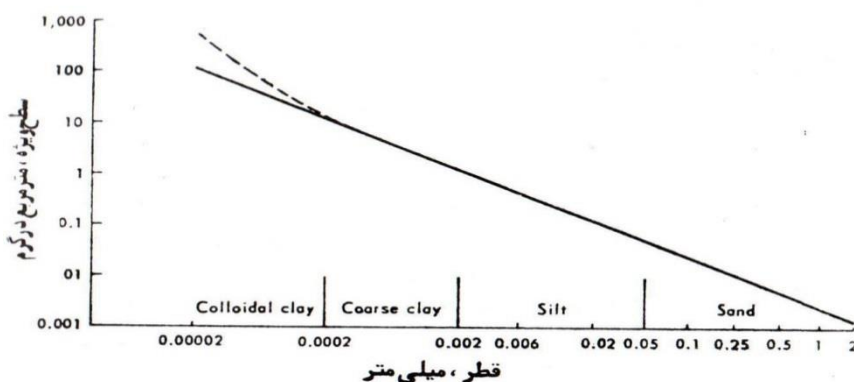
بالا بودن درصد ذرات کانی‌های رسی در یک خاک بر ویژگی‌های آن خاک اثر می‌گذارد. میزان این تأثیر به نسبت درصد وزنی این ذرات در خاک بستگی دارد. به طور کلی نقش ذرات رس به دلیل ساختمان بلوری خاص این ذرات، در رفتار عمومی خاک‌های رسی تعیین کننده است. خاصیت واگرایی رس (Dispersivity) نیز که موضوع این بررسی می‌باشد عمدتاً از خواص ذرات رس و واکنش آن‌ها نسبت به آب و یا ب عبارت دیگر از پدیده‌های فیزیکی - شیمیایی در سطح ذرات رسی ناشی می‌شود. لذا برای درک بهتر پدیده واگرایی خاک‌های رسی، در ادامه به طور مختصر ترکیب و ساختمان بلورهای کانی‌های رس یادآوری می‌شود.

۲-۱-۱ سطح ویژه

سطح ویژه به زبان ساده یعنی سطح در واحد وزن (m^2/gr). روابط موجود نشان‌دهنده این موضوع هستند که سطح ویژه یک توده مرکب از ذرات که به شکل پولک در نظر گرفته شده است، نسبت

مستقیم با مجموع شعاع و ضخامت و رابطه معکوس با حاصل ضرب این دو مؤلفه دارد. چون حاصل ضرب دو عدد مثبت سریع تر از مجموع این دو عدد افزایش می یابد، لذا سطح ویژه با کاهش اندازه ذرات، افزایش پیدا می کند (شکل ۲-۱).

اهمیت سطح ویژه را می توان به این شکل بیان نمود که به طور مثال برای این که خاکی را Silt یا Sand بنامیم، خاک بایستی محتوای ۸۰ درصد سیلت یا بیش از ۸۵ درصد ماسه باشد، در صورتی که وجود ۴۰ درصد خاک کافی است تا خاک در گروه Clay قرار گیرد (بای بوردی، ۱۳۸۲). در بیشتر محاسبات سطح ویژه، ذرات خاک به صورت کروی فرض می شوند. ولی در طبیعت انواع اشکال هندسی وجود دارد که در واقع مبین شدت هوا دیدگی و تأثیر فرآیند های خاک سازی نیز می باشد. بنابراین سطح ویژه علاوه بر اندازه ذرات، تابعی از شکل ذرات نیز خواهد بود. می دانیم که سطح کره در واحد حجم، کمترین بوده و اگر این کره به اشکال دیگر مانند پولک، صفحه یا میله در بیاید دارای سطح ویژه بیشتری خواهد بود. ذرات رس قابل انعطاف (مانند مونت مویلونیت) به طور کامل به یکدیگر می چسبند، به طوری که ۸۰ درصد سطح ویژه هر ذره در تماس با ذره مجاور است. ذرات رس غیر قابل انعطاف (مانند ایلیت) معمولاً ۲۰ درصد سطح ویژه هر ذره با ذره مجاور در تماس قرار می گیرد. در صورتی که در ذرات رس درشت (مانند کائولینیت) آرایش ذرات در کنار یکدیگر به گونه ای است که کمتر از ۱۰ درصد سطح ویژه هر ذره در تماس با ذره مجاور می باشد (برزگر، ۱۳۸۰).



شکل (۲-۱): تغییرات سطح ویژه با قطر ذرات خاک (بای بوردی، ۱۳۸۲)

هرچه اندازه ذرات یک کانی رسی کوچک‌تر باشد سطح ویژه آن بیشتر می‌شود. به همین دلیل سطح ویژه مونت موریلونیت از کائولینیت بیشتر است. سطح ویژه کائولینیت و ایلیت و مونت موریلونیت در حدود ۱۵ و ۹۰ و ۸۰۰ مترمربع بر گرم است. لایه‌های کائولینیت توسط پیوند هیدروژنی به یکدیگر متصل می‌شوند. بنابراین پیوند قوی بین این لایه‌ها برقرار بوده که تعادل شیمیایی بالاتری را به همراه خواهد داشت. لایه‌های ایلیت به کمک یون‌های پتاسیم به هم متصل‌اند. مونت موریلونیت ساختاری شبیه به ایلیت دارد، ولی به جای یون‌های پتاسیم، مقدار زیادی آب در فضای میان لایه‌ها جذب می‌شود (داس، ۲۰۰۲). بنابراین تا به اینجا مشخص گردید که وجود مونت موریلونیت جذب آب بیشتر را به همراه خواهد داشت (عسکری و فاخر، ۱۳۷۳).

۲-۱-۲ چسبندگی

در یک بلور رسی نیروی چسبندگی بین اتم‌های سازنده بلور رسی موجود است. منشأ نیروی چسبندگی، بار الکتریکی ذرات رسی و نیروهای واندروالس می‌باشد که این دو نیرو به توان سوم تا هفتم فاصله بین دو ذره نسبت معکوس دارد. بنابراین هر چه فاصله بین دو ذره رسی کمتر باشد، نیروی چسبندگی بیشتر خواهد گردید. نیروی چسبندگی در حالت خشک به بیشترین حد خود می‌رسد و در حالتیکه آب به خاک اضافه می‌گردد، به علت نفوذ آب در بین ذرات و افزایش فاصله بین ذرات نیروی چسبندگی کاهش می‌یابد. در جدول (۱-۲)، چسبندگی در نمونه‌های متراکم و اشباع ذرات مختلف خاک مشاهده می‌شود. همان‌طور که در این جدول مشخص است، ذرات درشت‌دانه دارای چسبندگی نیستند و ذرات رسی دارای بالاترین مقدار چسبندگی هستند. اگر اختلاف بین چسبندگی داخلی و خارجی قابل توجه باشد، خاکدانه‌ها را پایدار می‌نامیم و اگر هیچ واکنش شیمیایی و یا نیروهای فیزیکی نتواند در کاهش اندازه ذرات و متلاشی کردن آن‌ها موثر باشد، در این صورت با یک ذره اولیه که ساختمان تبلور ویژه‌ای دارد روبرو هستیم. این ذره اولیه (elementary particle) می‌تواند ذره رس، شن و یا سیلت باشد.

جدول (۱-۲) چسبندگی در ذرات مختلف خاک

USCS طبقه‌بندی	چسبندگی نمونه متراکم (KN/m^2)	چسبندگی نمونه اشباع (KN/m^2)
GW	-	-
GP	-	-
GM	-	-
GC	-	-
SW	-	-
SP	-	-
SM	50	20
SM-SC	50	14
SC	74	11
ML	67	9
ML-CL	65	22
CL	86	13
OL	-	-
MH	72	20
CH	103	11

۲-۱-۳ بار منفی رس:

در رس ذرات رس بار منفی خالص وجود دارد. این موضوع به دو دلیل جانشینی ایزو مورفی یا همگون و شکستن پیوستگی ساختار آن‌ها در لبه‌هاست. بار منفی بزرگ تر از سطوح ویژه بزرگ تر ناشی می‌گردد. هم چنین در لبه‌ها، ذرات با بار مثبت وجود دارد. در جدول (۲-۲)، میزان چگالی سطحی متوسط بارهای منفی روی سطوح برخی از کانی‌های رس بر حسب (بار الکترونیک/ $\text{\AA}^2$) آورده شده است. در واقع وجود بار منفی در ذرات رس علت اصلی بیشتر رفتارهای خاک رس به شکل مستقیم یا غیرمستقیم می‌باشد. از آن جمله می‌توان به جذب کاتیون، آب لایه دوگانه و...، نام برد که وجود آب خود بر خاصیت خمیری، واگرایی، تورم و... تأثیر می‌گذارد.

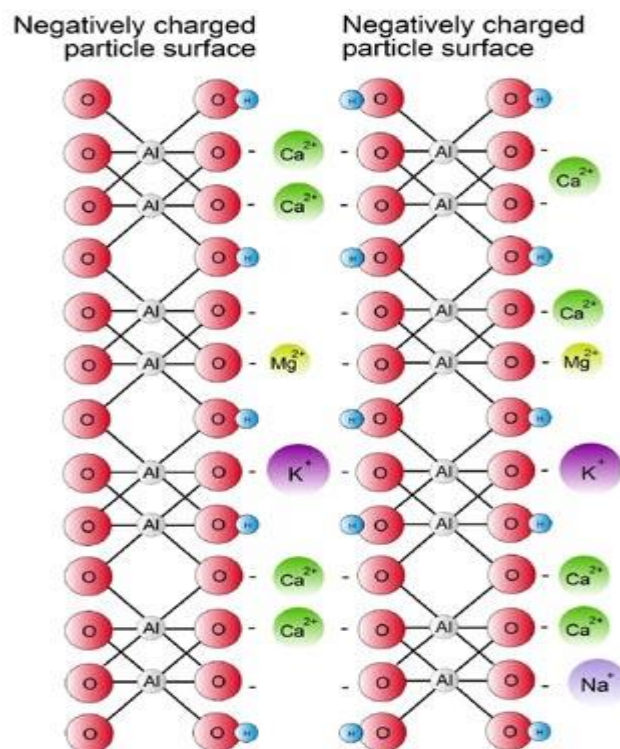
جدول (۲-۲) عکس چگالی سطحی متوسط بارهای منفی روی سطوح برخی از کانی‌های رس (داس، ۲۰۰۲)

کانی رس	عکس چگالی سطحی بار (بار الکترونیک/ $\text{\AA}^2$)
کائولینیت	۲۵
میکای رسی و کلوریت	۵۰
موننت موریلونیت	۱۰۰
ورمیکولیت	۷۵

۲-۱-۴ تبادل یونی در خاک

کاتیون های تبدالی، یون هایی با بار مثبت از محلول خاک هستند که جذب سطوح ذرات رسی می گردند تا بار منفی آن ها را خنثی کنند. وجه تسمیه تبدالی از این نظر است که یک کاتیون به سهولت با کاتیونی که ظرفیت مشابه دارد و یا با دو کاتیون که ظرفیت آن، نصف کاتیون جانشین شونده است، تبادل حاصل می کنند. به طور مثال اگر رسی سرشار از سدیم تبدالی را با محلول کلرو کلسیم، شستشو دهیم، هر یون کلسیم، جایگزین دو یون سدیم شده و سدیم با محلول خارج می شود (شکل ۲-۳). مقدار کل یون هایی که جذب سطحی رس می شوند، مبین ظرفیت تبادل کاتیونی یا بار منفی رس می باشد. کاتیون های کلسیم، منیزیم، پتاسیم و سدیم مهم ترین کاتیون های تبدالی هستند.

در خاک های اسیدی چون کاتیون های فوق آبشویی یافته اند، لذا هیدروژن و آلومینیم، یون های تبدالی را تشکیل می دهند. ظرفیت کاتیون، نقش عمده ای در جایگزینی و تبادل داشته و هر چه ظرفیت بزرگ تر باشد، توانایی جایگزینی آن بیشتر است. علاوه بر ظرفیت، نوع کانی رس نیز موثر است. به طور مثال، یون پتاسیم با سهولت بیشتری نسبت به سدیم می تواند در کانی های میکا، جایگزین کلسیم گردد، زیرا ساختمان تبلور این کانی ها به گونه ای است که جایگاه مناسبی برای پتاسیم فراهم می سازند.

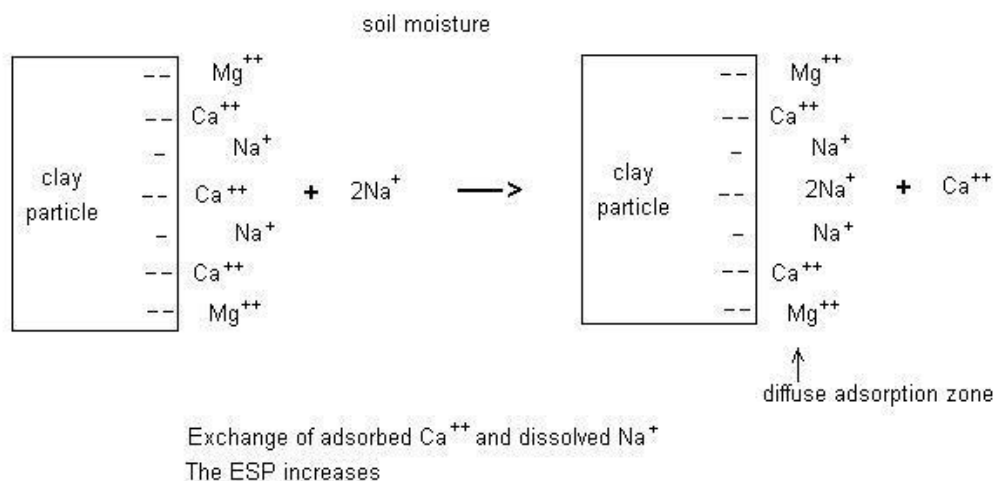


شکل (۲-۲) توزیع کاتیون‌ها در اطراف ذرات رس

گرچه توانایی تبادل یون‌ها علاوه بر ظرفیت آن، بستگی به نوع رس و کاتیون جانشین شونده دارد، ولی می‌توان آن‌ها را بر حسب افزایش قدرت تبدالی به صورت زیر نوشت (بای بوردی، ۱۳۸۲):



در اینجا لازم است توضیحی در مورد قانون اسکوفیلد که مربوط به یون‌های جذب سطحی شده در خاک می‌باشد، داده شود: اگر تغییرات یون‌های یک ظرفیتی در محلول خاک به نسبت واحد، دو ظرفیتی به نسبت مجذور و سه ظرفیتی به نسبت مکعب این تغییرات صورت گیرد، این تغییرات تعادل یون‌های جذب سطحی شده را به هم نمی‌زند. به عبارت دیگر، اگر نسبت یون‌های سدیم و کلسیم جذب سطحی شده در خاکی برابر باشد، اگر غلظت سدیم را در محلول خاک دو برابر کنیم، لازم است غلظت کلسیم را در محلول خاک چهار برابر افزایش دهیم تا نسبت مساوی سدیم و کلسیم جذب سطحی شده، حفظ گردد (بای بوردی، ۱۳۸۲).



شکل (۲-۳) تبادل یونی در خاک رس

۲-۱-۵ ظرفیت تبادل کاتیون کانی های رسی

وجود بار منفی در سطح ذرات رس که غالباً بر اثر جایگزین شدن اتم های سیلیسیوم (Si) و آلومینیم به وسیله اتم های با ظرفیت کمتر به وجود می آید، باعث جذب یون های مثبت می گردد. چون این کاتیون ها دارای پیوند های قوی نیستند، ممکن است یون های مثبت دیگر جایگزین آن ها شوند. به این پدیده تبادل کاتیونی گفته می شود. به طور مثال یون تک ظرفیتی سدیم (Na^{+}) می تواند به راحتی از یک محلول نمک (NaCl) کشیده شود و به سطح رس بچسبد، اما این پیوند، پیوند پایداری نیست و به محض قرارگیری رس در مجاورت محلول کلرات پتاسیم (KCl) یون سدیم توسط یون پتاسیم جایگزین می گردد. کاتیون های قابل تبادل در کانی های رس عمدتاً Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^{+} , NH_4^{+} , K^{+} , H^{+} می باشند.

تعریف ظرفیت تبادل کاتیون (CEC)، خاک معمولاً بر حسب میلی اکوی والان کاتیون های جذب سطحی شده در صد گرم خاک تعیین می گردد. مونت موریلونیت فعال ترین کانی رس در جذب و تبادل کاتیون می باشد. دلیل اول شبکه بزرگ بار های منفی است که توسط این کانی حمل می گردد و

دلیل دوم سطح ویژه بزرگ مونت موریلونیت نسبت به دیگر کانی‌هاست، چون بار منفی بزرگ‌تر از سطوح ویژه بزرگ تر ناشی می‌گردد.

۲-۱-۶ اجتماع و پراکندگی ذرات رسی

بین ذرات کانی‌های رس نیروهای جاذبه و دافعه وجود دارد. چنان که قبلاً ذکر شد لایه‌های دوگانه با بار یکسان یکدیگر را دفع می‌کنند و مقدار این نیروی دافعه به مشخصات لایه‌ها بستگی دارد. یکی از مهم‌ترین علل جذب میان ذره‌ای وجود نیروی واندروالس است. این نیرو تابع خصوصیات لایه دوگانه نیست. مقدار نیروی واندروالس با توان سوم و یا چهارم فاصله بین دو ذره موازی نسبت معکوس دارد. البته علاوه بر این نیرو، کانی‌های غیر رسی مانند اکسید آهن، اکسید آلومینیم، کربنات‌ها و ترکیبات آلی نیز مانند پلی ذرات رس را به یکدیگر پیوند می‌دهند، اما منشأ اصلی جاذبه میان ذرات رس نیروی واندروالس است.

وضعیت قرارگیری ذرات کانی‌های رس در خاک بستگی به برآیند نیروهای میان ذره‌ای دارد. مقدار نیروی دافعه با افزایش فاصله بین ذرات به صورت نمایی کاهش می‌یابد، در صورتی که مقدار نیروی جاذبه با توان سوم و یا چهارم فاصله میان ذرات نسبت معکوس دارد. در نتیجه اگر فاصله ذرات کم باشد یکدیگر را جذب و زمانی که فاصله آن‌ها زیاد باشد یکدیگر را دفع می‌کنند.

اگر برآیند نیروهای بین ذرات دافعه باشد شکل ساختمانی خاک از نوع پراکنده و اگر برآیند نیروها جاذبه باشد شکل ساختمانی از نوع مجتمع است (شکل ۲-۴). تراکم‌پذیری و حساسیت ساختمان مجتمع نسبت به دست خوردگی از ساختمان پراکنده بیشتر است. درجه تجمع ذرات یک رس در آب فاقد املاح کمتر از درجه تجمع ذرات همان خاک در آب حاوی املاح محلول می‌باشد، بنابراین تغییر طبیعت آب ممکن است منجر به تغییر ساختمان خاک شود.



ب



الف

شکل (۲-۴) (الف) ساختمان پراکنده. (ب) ساختمان مجتمع

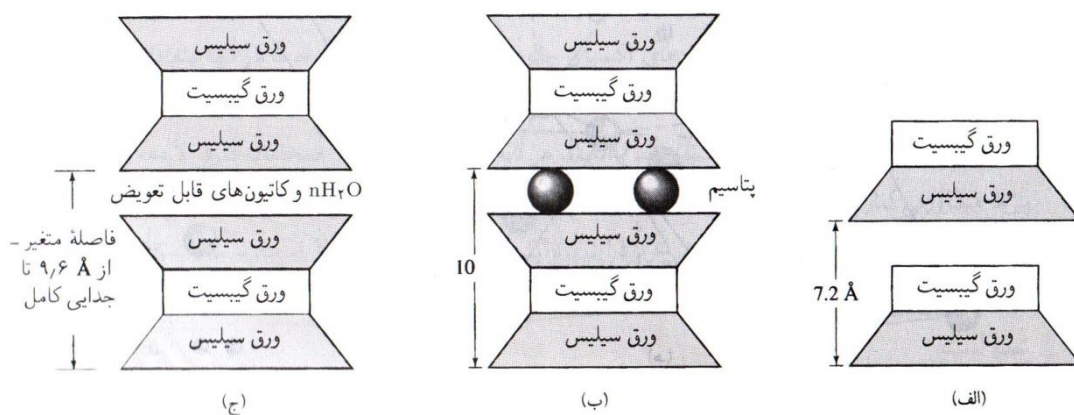
نیروهای واندروالس علاوه بر فاصله ذرات کانی های رس، تابع جرم آن‌ها نیز هستند. اگر ذرات خاک به قدر کافی کوچک باشند، این نیروها تحت الشعاع سایر نیروهای بین ذره‌ای قرار می‌گیرند. در این حالت در صورت تماس خاک رس با آب، بر اثر ضربات ناشی از برخورد مولکول های آب با ذرات کانی های رسی و در نتیجه فائق آمدن نیروهای دافعه بین ذرات بر نیروی واندروالسی، ذرات رس به راحتی در آب معلق می‌گردند. پدیده فوق خاصیت کلوئیدی نامیده می‌شود و به محلول حاصل، محلول کلوئیدی می‌گویند.

۲-۱-۷ کانی های رس

از سه کانی مهم رس، تنها وجود مونت موریلونیت بیشترین تأثیر را در ایجاد واگرایی در خاک رس دارد. علت آن ساختار این کانی می‌باشد. در ادامه به ویژگی های این سه کانی پرداخته و به ذکر علت تأثیر مونت موریلونیت بر واگرایی می‌پردازیم.

ذرات صفحه‌ای شکل کائولینیت عرضی در حدود ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ آنگستروم و ضخامتی در حدود ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ آنگستروم دارند. عرض ذرات ایلیت بین ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ آنگستروم و ضخامت آن‌ها در حدود ۵۰ تا ۵۰۰ آنگستروم است. عرض ذرات مونت موریلونیت نیز بین ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ آنگستروم بوده اما ضخامت آن‌ها کمتر و در حدود ۱۰ تا ۵۰ آنگستروم است. هرچه اندازه ذرات یک کانی رسی کوچک‌تر باشد سطح ویژه آن بیشتر می‌شود. به همین دلیل سطح ویژه مونت موریلونیت از کائولینیت بیشتر است. همان طور که قبلاً نیز اشاره گردید لایه‌های کائولینیت شامل لایه‌های تکراری سیلیس و

گیبسیت می‌باشد که این لایه‌ها توسط پیوند هیدروژنی کنار هم می‌مانند. لایه‌های ایلیت از ورق گیبسیت به دو ورق سیلیس تشکیل شده است که یکی در بالا و دیگری در پایین قرار دارد. لایه‌های ایلیت به کمک یون های پتاسیم به هم متصل‌اند. بار منفی لازم برای تعادل یون های پتاسیم از جایگزینی آلومینیم با برخی از سیلیکون های موجود در ورق های هشت‌وجهی ناشی می‌شود. مونت موریلونیت ساختاری مانند ایلیت دارد. در مونت موریلونیت، منیزیم و آهن به شکل ایزومورفی یا همگون جایگزین آلومینیم در ورق های هشت‌وجهی شده‌اند. در این جا مانند ایلیت یون های پتاسیم وجود ندارد و مقدار زیادی آب در فضای میان لایه‌ها جذب می‌شود. (شکل ۲-۵) (داس، ۲۰۰۲)



شکل (۲-۵) ساختار کانی های رس (الف) کائولینیت، (ب) ایلیت و (ج) مونت موریلونیت

۸-۱-۲ جذب آب در رس ها

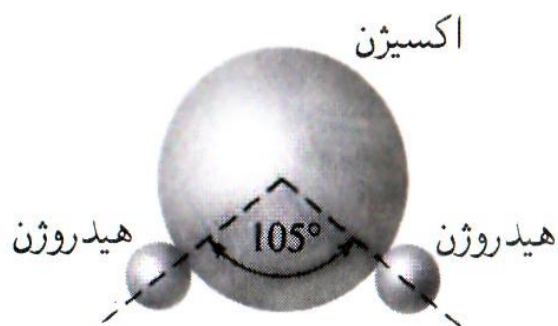
ذرات رس همان طور که اشاره شد دارای ذرات منفی در اطراف خود هستند، همچنین مولکول های آب به دلیل تقارن نداشتن اتم های هیدروژن نسبت به اتم اکسیژن مولکول‌هایی قطبی و دارای دو قطب مثبت و منفی هستند (شکل ۲-۶). عموماً ذرات رس در خاک با مولکول های آب احاطه شده‌اند و در واقع این مولکول‌ها بخشی از ساختمان رس را تشکیل می‌دهند. بدین لحاظ ویژگی‌ها و خواص کانی های رسی، بسته به ضخامت لایه آب محاط بر آن‌ها با یکدیگر متفاوت است.

آب در رس‌ها به دو دسته تقسیم می‌شود، در حالتی که اتم‌های هیدروژن موجود در مولکول‌های آب با اتم‌های اکسیژن روی سطح رس اشتراک پیدا کند، پیوند هیدروژنی قوی تشکیل می‌گردد که به آن آب جذب‌شده گفته می‌شود و این آب گرانش‌رتر از آب آزاد است.

آب دیگری نیز در اطراف ذرات رس وجود دارد که توسط کاتیون‌ها جذب می‌گردد. در رس بار منفی با کاتیون‌های قابل تعویض از جمله Mg^{2+} ، Ca^{2+} ، Na^{+} ، K^{+} متعادل می‌شود. زمانی که آب به رس اضافه می‌گردد، این کاتیون‌ها و چند آنیون در اطراف ذرات رس شناور می‌گردند. این لایه آب بانام لایه مضاعف یا دوگانه شناخته می‌شود.

در مونت موریلونیت نسبت به دیگر کانی‌ها آب لایه مضاعف ضخامت بیشتری دارد. سطح باردار منفی ذرات رس و کاتیون‌های موجود در لایه مضاعف، آب دو قطبی را جذب می‌کنند و کاتیون‌ها نیز به‌نوبه خود جذب ذرات خاک می‌گردند. آب اطراف ذرات رس به خاک رس خاصیت خمیری می‌دهد. بالاترین LL و PL‌ها مربوط به خاک رس حاوی کانی مونت موریلونیت می‌باشد (داس، ۲۰۰۲).

مولکول‌های آب از انتهای مثبت جذب سطوح منفی ذرات رس می‌شوند (شکل ۲-۷). از طرفی به دلیل وجود پیوند هیدروژنی میان مولکول‌های آب، این مولکول‌ها زنجیروار به یکدیگر متصل‌اند و هر جا بار ذرات منفی است از انتهای مثبت و هر جا بار مثبت است از انتهای منفی به سطوح ذرات رسی می‌چسبند. کاتیون‌های تبادلی نیز به‌نوبه خود مقداری آب در اطراف خوددارند. مقدار آب موجود در اطراف این کاتیون‌ها بستگی به شعاع و ظرفیت آن‌ها دارد و لذا ضخامت لایه آب در اطراف سطوح ذرات رسی به نوع کاتیون‌های موجود نیز وابسته است.



خصوصیت دوقطبی آب

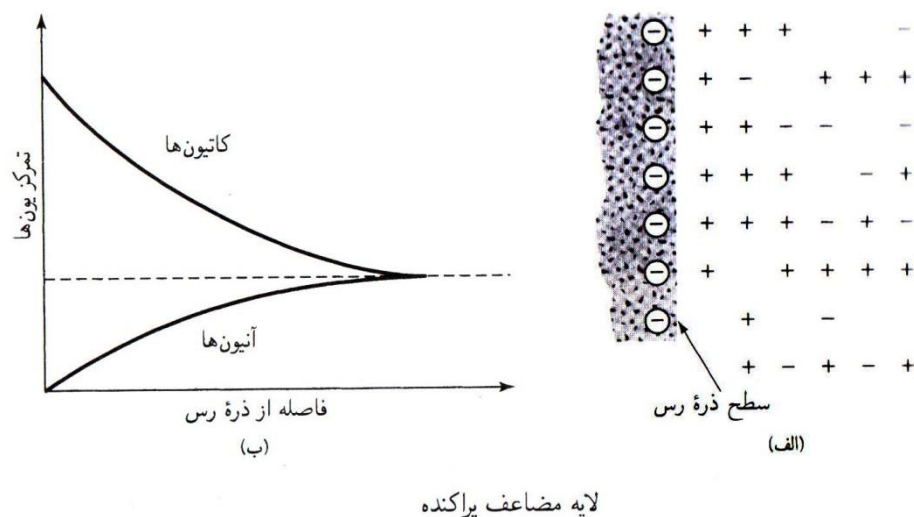
شکل (۲-۶) مولکول دوقطبی آب



شکل (۲-۷) مولکول های دوقطبی آب و کاتیون ها در لایه مضاعف اطراف ذره رس

۲-۱-۹ لایه دوگانه

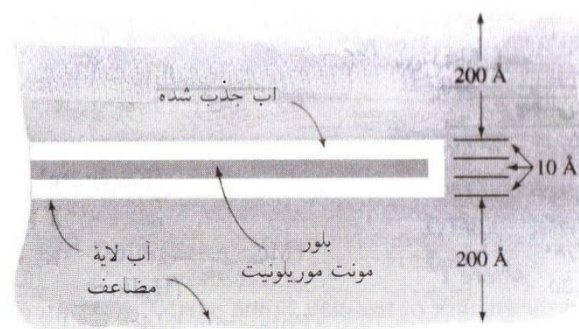
اگر خاک رسی به تدریج خشک شود کاتیون ها به شدت جذب سطح ذرات آنیون های رسی می شوند و مازاد کاتیون ها به صورت املاح رسوب می کنند. چنانچه خاک مزبور مجدداً در آب قرار داده شود، املاح ته نشین شده در آب حل می شوند و کاتیون های جذب شده تحت اثر دو نیروی مخالف، یعنی نیروی اسمزی از یک سو و جاذبه الکتریکی ذره رس از سوی دیگر، توزیع ویژه ای در اطراف ذره رس می یابند (شکل ۲-۸).



شکل (۲-۸) توزیع بار الکتریکی در اطراف ذره رسی - لایه دوگانه

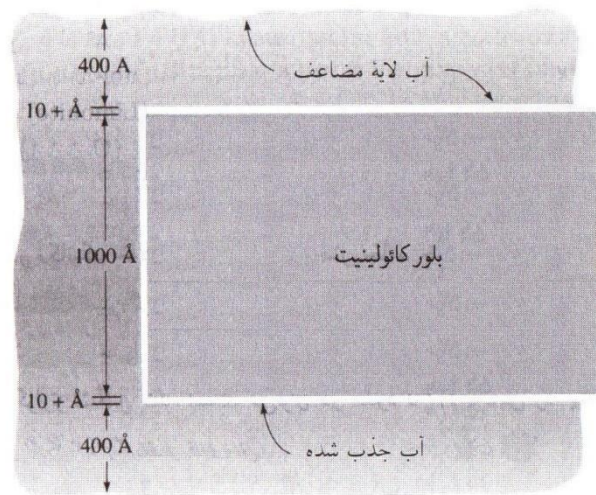
نحوه قرار گرفتن و توزیع کاتیون‌ها در اطراف ذرات رسی شبیه به توزیع مولکول‌های هوا در جو زمین است. نیروهای ثقلی از یک سو و توانایی دور شدن مولکول‌های هوا از سطح زمین از سویی دیگر موقعیت هر مولکول را در جو زمین مشخص می‌کنند. بدین‌جهت در اطراف پوسته زمین، فراوانی مولکول‌های هوا زیاد است و با افزایش ارتفاع از فراوانی آن‌ها کاسته می‌شود. آنیون‌ها برخلاف کاتیون‌ها، به علت این که دارای بار منفی هستند، از سطوح منفی ذرات رس رانده می‌شوند. بدین لحاظ فراوانی آنیون‌ها در نزدیکی سطوح رس به کمترین مقدار خود می‌رسد و هرچه از این سطوح دورتر شویم فراوانی آن‌ها بیشتر می‌شود. این پدیده را گاهی جذب منفی (Negative Adsorption) نیز می‌نامند.

سطح ذره رسی با بار منفی و توزیع کاتیون‌ها در اطراف آن به لایه دوگانه موسوم است. منشأ خصوصیات خمیری خاک‌های رسی، وجود لایه دوگانه در اطراف ذرات کانی‌های آن‌هاست. در شکل (۲-۹)، ضخامت لایه دوگانه در کانی‌های کائولینیت و مونت موریلونیت مشاهده می‌شود.



نمونه ذره مونت موریلونیت، $1000 \text{ \AA}$ در $10 \text{ \AA}$.

(الف)



نمونه ذره کائولینیت، $10000 \text{ \AA}$ در $1000 \text{ \AA}$.

(ب)

(ترسیم شکل بر اساس Lambe, ۱۹۵۸)

شکل (۲-۹) آب جذب شده و آب لایه مضاعف در (الف) ذره مونت موریلونیت و (ب) ذره کائولینیت

۲-۲ خاک رس واگرا

به خاکی اطلاق می‌گردد که حالت فیزیکی - شیمیایی دانه‌های آن به گونه‌ای است که در تماس با آب نسبتاً خالص، ذرات منفرد رس، پراکنده و از یکدیگر جدا می‌گردد. در این حالت، خاک رس به شدت فرسایش پذیر می‌شود، به‌صورتی که حتی تحت تأثیر تنش‌های بسیار کوچک، در جریان آب با گرا دیان هیدرولیکی کم روان می‌گردد.

لذا خاک های رسی واگرا به خاک‌هایی اطلاق می‌شود که در آنها ذرات خاک رس در مجاورت آب چسبندگی خود را از دست می‌دهند و به سرعت شسته می‌شوند، حتی اگر سرعت جریان آب کم باشد به سهولت شسته شده و فرسایش می‌یابند.

باید در نظر داشت که کیفیت «واگرایی» باکیفیت «مایع گرایی» خاک های موسوم به «رس سریع» که بر اثر لرزش به حالت مایع در می‌آیند، متفاوت می‌باشد. همچنین برخی از خاک های غیر چسبنده مانند لای ها یا ماسه‌های بسیار ریزدانه نیز قابلیت فرسایش بسیار زیادی دارند، لیکن روند فرسایش این خاک‌ها در اثر جریان آب صرفاً مکانیکی بوده و ارتباطی به پدیده واگرایی که مختص رس های ریزدانه است، ندارد.

وجود خاصیت واگرایی در یک خاک رس وابسته به متغیرهای مختلفی از جمله کانی‌شناسی و ترکیبات شیمیایی ذرات رس، املاح محلول در آب حفره‌ای و املاح محلول در آب جاری از میان خاک است. رس های واگرا حتی در مقایسه با خاک های لای و ماسه ریزدانه، از فرسایش‌پذیری بیشتری در مقابل جریان آب برخوردارند (عسگری و فاخر، ۱۳۷۳).

خاصیت واگرایی باعث می‌شود که با برخورد این نوع خاک با آب، ذرات آن شروع به جدا شدن از یکدیگر نمایند و خواص مکانیکی خاک دگرگون گردد. این خاصیت تنها به دلیل ریز بودن ذرات خاک رس به وجود نمی‌آید. به بیان دیگر پدیده واگرایی تنها یک پدیده فیزیکی نیست و به واکنش های شیمیایی بین کانی های رس، کاتیون‌ها و آب و عوامل دیگر شیمیایی نیز بستگی دارد.

بین ذرات خاک های رسی نیروهای دافعه و جاذبه وجود دارد. نیروهای جاذبه عمدتاً از نوع نیروهای واندروالسی هستند و نیروهای دافعه از وجود لایه دوگانه در اطراف ذرات کانی های رسی ناشی می‌شوند. دلیل اصلی شسته شدن رس‌ها بر اثر پدیده واگرایی، افزایش نیروی دافعه بین ذرات خاک و غلبه بر نیروی جاذبه بین این ذرات می‌باشد. بر اساس مطالعات انجام‌گرفته، مهم‌ترین عاملی که بر پدیده واگرایی تأثیر می‌گذارد، غلظت یون سدیم در آب منفذی خاک و تک ظرفیتی بودن کاتیون

مذکور می‌باشد. عموماً، ذرات رس در خاک با مولکول های آب احاطه شده‌اند و در واقع این مولکول‌ها بخشی از ساختمان رس را تشکیل می‌دهند. بدین لحاظ، ویژگی‌ها و خواص کانی‌های رسی، بسته به ضخامت لایه آب محاط بر آن‌ها، با یکدیگر متفاوت است. در قسمت‌های آینده، ویژگی‌های خاک‌های واگرا و مسائل مربوط به آن‌ها به تفصیل بررسی خواهد شد.

۲-۲-۱ مسائل ناشی از خاک‌های واگرا

وجود مقدار و نوع املاح موجود در خاک یکی از مسائل مهمی است که همواره باید در انتخاب منابع قرضه خاک‌های ریزدانه در نظر گرفته شود. تجربیات گذشته نشان داده است که عدم توجه به این مسئله در اجرای سازه‌های آبی، مشکلات فراوانی را به وجود آورده و بعضاً به خرابی این سازه‌ها منجر شده است. از مهم‌ترین پدیده‌هایی که در این ارتباط می‌توان به آن‌ها اشاره نمود یکی پدیده واگرایی در این نوع خاک‌ها و دیگری مسئله شسته شدن املاح و تغییر بافت و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک می‌باشند.

مسئله آب شستگی در خاک‌های واگرا از جمله مسائلی است که در دو دهه اخیر توجه بسیاری از محققان و مهندسان را به خود جلب کرده است و در نتیجه تحقیقاتی که در همین دو دهه در این زمینه انجام شده نقش پدیده واگرایی در آب شستگی بسیاری از خاکریزها، سدهای خاکی و دیواره‌های کانال‌های خاکی معلوم گردیده است. شناخت پدیده واگرایی، علت اصلی بسیاری از آب شستگی‌ها را که تا پیش از این مبهم مانده بود روشن ساخته است. (کریمی، ۱۳۹۰)

۲-۲-۲ تاریخچه

مسئله خاک‌های واگرا قبل از آن که برای مهندسان راه و ساختمان مطرح گردد، سال‌ها برای دانشمندانی که خاک را از دیدگاه کشاورزی می‌نگریسته‌اند مطرح بوده است. از دیرباز در آن دسته از زمین‌های زراعی که قشر رویی خاک، رس واگرا بوده است، زمین بر اثر شسته شدن خاک و در نتیجه

ایجاد خلل و فرج و حفره‌های بزرگ، به شدت آسیب می‌دیده و زراعت در آن غیرممکن می‌گشته است.

بیشتر خاک‌های واگرایی که در آغاز در علوم کشاورزی مورد مطالعه قرار گرفتند، رنگ تیره‌ای داشته‌اند، لذا خاک‌های مذکور به خاک‌های قلیای سیاه یا قلیا معروف شده‌اند. نام دیگر این خاک‌ها سولونتر (Solonetz) است (الیاس آذر، ۱۳۶۹).

نخستین بار در سال ۱۹۳۰، میدلتون (Middleton) پدیده واگرایی را یکی از عوامل مؤثر در فرسایش خاک‌های ریزدانه معرفی کرده و بالا بودن درصد املاح سدیم را در خاک‌های واگرا یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های آن‌ها دانسته است. در سال‌های ۱۹۳۵ تا ۱۹۳۸، ولک (Volk) نیز واگرایی خاک‌ها را دلیل اصلی بسیاری از خرابی‌هایی دانست که در سدهای خاکی کوچک و بندها و خاک‌ریزهای طراحی‌شده در سازمان حفاظت خاک آمریکا SCS مشاهده شده بود. این سدها عموماً پس از اولین آبگیری خراب شده بودند.

با توجه به نتایج بررسی‌های انجام‌شده تا آن زمان چنین به نظر می‌آمد که برای شروع آب شستگی در خاک‌های واگرا، باید شرایط زیر موجود باشد:

الف) وجود ترک‌ها یا منافذ بزرگ در خاک.

ب) وجود رس‌های ریزدانه به مقدار کافی برای این که امکان گسترش ترک‌ها و ایجاد آبروها در توده خاک فراهم شود.

علاوه بر این از مدل نمودن بسیاری از خرابی‌های ناشی از رگاب در آزمایشگاه معلوم گردیده بود که در صورت وجود ترک‌های بسیار ریز در خاک و جریان بسیار آرام آب در آن‌ها نیز، خاک‌های واگرا شسته می‌شوند. بر اساس این نتایج، جریانی با گرادیان ۰/۱ برای حل و خارج شدن ذرات رس‌های واگرا از سوراخی افقی به قطر ۲/۵ میلی‌متر کافی بود و سرعت لازم برای این آب شستگی را در حدود

۷/۵ سانتیمتر بر ثانیه تخمین زده بودند. نتایج آزمایش پین هول که بعدها ابداع گردید نتایج این بررسی های اولیه را تأیید نمود.

در خلال سال های ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ تحقیقاتی که اغلب در استرالیا و بر روی علل تخریب سدهای خاکی کوتاه انجام گرفت به شناخت بهتر رس هایی که به سهولت شسته می شدند (Eroible Clays) منجر گردید (Sherard, Ryker & Decker, ۱۹۷۲). تجارب مهندسان و پژوهشگران استرالیایی به طور عمده از مطالعه علل تخریب سدهای خاکی کوتاه به دست آمده است، لیکن نتایج به دست آمده کلی بوده و بسیار شایان توجه است.

در سال ۱۹۶۵ وود و ایتکیسان (Wood and Aitchison) پدیده رگاب را در سدهای خاکی کوتاه با در نظر گرفتن اثر نوع خاک، نسبت جذب سدیم (SAR)، میزان املاح آب موجود در خاک و انجام دادن آزمایش هایی بر روی نمونه هایی از خاک های سدهای تخریب شده بر اثر این پدیده مورد بررسی قرار دارند. آن ها در بررسی های خود به این نتیجه رسیدند که سدهای خاکی مورد مطالعه از رس واگرا ساخته شده و ضمن جریان آب در خلل و فرج فراوان آن ها، ذرات خاک در آب حل گردیده و شسته شده اند. این دو محقق توصیه کرده اند که بهتر است این گونه خاک ها در سمت مرطوب رطوبت بهینه متراکم شوند.

در سال ۱۹۶۹، اینگل و ایتکیسان (Ingle and Aitchison) نتایج بررسی های خود را در زمینه نحوه تأثیر شیمی آب و خاک در پدیده واگرایی و همچنین تأثیر درزها و ترک ها در آب شستگی های داخلی عرضه کردند و با توجه به این نتایج، حدود سدیم تبدلی را در خاک های واگرا و غیر واگرا تعیین نمودند (Ingles & Aitchison, ۱۹۶۹).

در خلال سال های ۷۲ - ۱۹۷۱، شرارد و چند تن از محققان دیگر، تحقیقات انجام شده تا آن زمان را با دامنه گسترده تری در امریکا ادامه دادند (Sherard, Ryker & Decker, ۱۹۶۲) و اثر پدیده رگاب را در سه گروه اصلی از سازه های خاکی ساخته شده از خاک رس، بررسی نمودند.

در سال ۱۹۷۵، آرولاناندن (Arulanandan) دستگاهی را جهت ارزیابی پدیده واگرایی و آب شستگی های سطحی ناشی از آن در خاک های رسی طراحی و عرضه کرد. وی به کمک این دستگاه که استوانه چرخان نام گرفت تنش برشی لازم را برای جدا شدن ذرات خاک از سطح آن بر اثر جریان آب اندازه گیری کرد و نشان داد که با افزایش نسبت جذب سدیم (SAR) و یا با کاهش میزان املاح در آب منفذی موجود در خلل و فرج خاک از میزان تنش برشی لازم برای شروع آب شستگی کاسته می شود.

پس از آرولاناندن، شرارد نیز در سال ۱۹۷۶ آزمایش دیگری را به منظور اندازه گیری مستقیم میزان فرسایش پذیری خاک های ریزدانه ابداع نمود (Sherard, Dunningan & Decker, ۱۹۷۷). از آزمایش مذکور که به نام آزمایش پین هول معروف گردیده، تاکنون در بسیاری از پروژه ها استفاده شده است و در حال حاضر این آزمایش معتبرترین و درعین حال متداول ترین آزمایش مورد استفاده در طراحی و ساخت سازه های هیدرولیکی و به ویژه سدهای خاکی به شمار می رود.

پس از ابداع دستگاه پین هول، غالب پژوهشگران به بررسی بیشتر نتایج حاصل از روش های موجود شناسایی خاک های واگرا و به ویژه مطالعه روش های جلوگیری از شسته شدن آن ها پرداخته اند که مهم ترین آن ها مطالعاتی است که در دهه اخیر در زمینه فیلتر مناسب برای خاک های واگرا صورت گرفته است.

۲-۳ نحوه آب شستگی در خاک های واگرا

عمده ترین مسئله در خاک های واگرا، مسئله آب شستگی های داخلی و مشکلات ناشی از آن است که به ویژه در سازه های آبی مطرح است. این پدیده در بسیاری از سدهای خاکی، خاکریزها، بستر کانال ها و سازه های آبی دیگری که بر روی این خاک ها ساخته شده اند دیده شده است. شسته شدن خاک های واگرا با جریان یافتن آب در درزها و ترک های خاک آغاز می شود. معمولاً سرعت آب در این ترک ها زیاد نیست. آب جاری در رس های واگرا تدریجاً گل آلود می گردد و بر سرعت فرسایش خاک

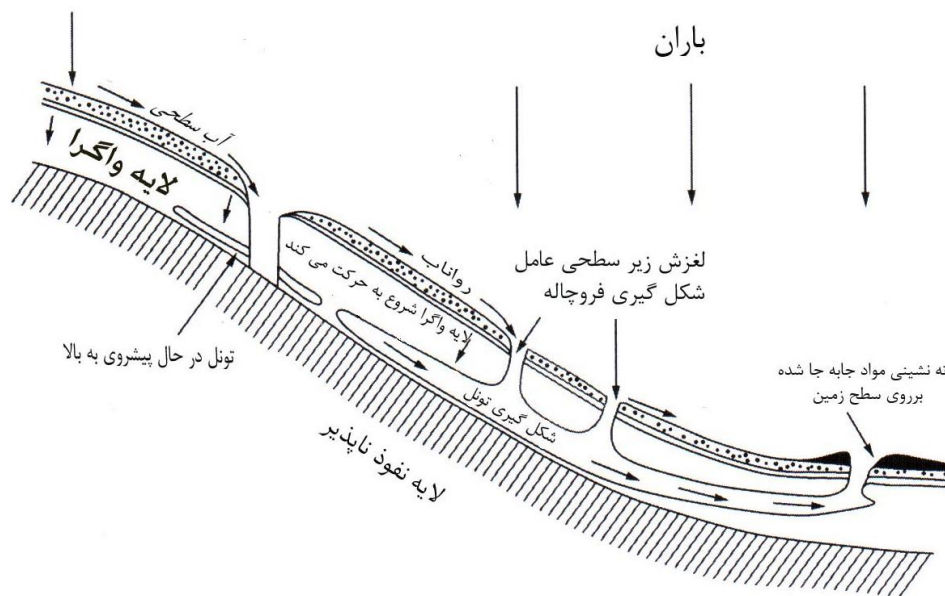
نیز به تدریج افزوده می‌شود، اما در رس‌های غیر واگرا چنین نیست. در این رس‌ها یا جریان آب، بدون آن که بر سرعت آن افزوده شود، ادامه می‌یابد و یا بر اثر تورم خاک و نرم شدن دیواره‌های ترک‌ها، مجرای آب بسته می‌شود. این تفاوت از آن جا ناشی می‌شود که در خاک‌های غیر واگرا، برای جدا شدن ذرات خاک از یکدیگر لازم است که انرژی فرسایشی جریان آب بر نیروی جاذبه بین ذرات فائق آید و اگر سرعت جریان از حدی کمتر باشد، خاک‌های مذکور فرسایش نمی‌یابند؛ اما در خاک‌های واگرا چنین حدی برای سرعت وجود ندارد و پیوند ذرات خاک، حتی در آب ساکن نیز از بین می‌رود و محلولی کلوئیدی تشکیل می‌شود.

به طور کلی آب شستگی با فرسایش ذرات رس واگرا در پایین‌دست سازه خاکی یا در محل اتصال سازه به منطقه‌ای با نفوذپذیری بالا آغاز می‌شود و فرآیند فرسایش در داخل یا زیر سازه به سمت نواحی با بار آبی بیشتر در بالادست پیشروی می‌کند و سرانجام مسیر فرسایش یافته به صورت یک تونل یا مجرا به منبع آب متصل می‌شود. در این مرحله، در صورت وجود آب کافی در منبع، آب با شدتی بسیار بیشتر از گذشته و به صورت متمرکز جریان می‌یابد و روند فرسایش با چنان سرعتی ادامه می‌یابد که ممکن است در مدت کوتاهی به تخریب سازه منجر شود. این پدیده عیناً در خاک‌های غیر چسبنده بسیار ریز مانند سیلت‌ها و ماسه‌های خیلی نرم مشاهده می‌شود، اما در این خاک‌ها علت آب شستگی مکانیکی است، درحالی‌که در خاک‌های رسی واگرا پدیده‌ای فیزیکی – شیمیایی می‌باشد.

در سدهای خاکی و خاکریزهای در تماس با آب، آب شستگی با تمرکز جریان آب در ترک‌ها یا درزهای موجود در توده پایین‌دست (که ممکن است به دلیل نشست سازه و یا انقباض خاک ایجاد شده باشد) آغاز می‌شود و بر اثر پیشروی این فرآیند به سمت بالادست، حفره جدیدی برای خروج سریع تر آب به وجود می‌آید و این امر توأم با افزایش سرعت فرسایش خاک، نهایتاً به تخریب سازه منجر می‌شود. در سازه‌های آبی دیگر مانند کانال‌های انتقال آب، آب شستگی و فرسایش خاک در زیرپوشش یا از روی خاکریز بدنه کانال و یا از محل سازه‌های زهکش سیستم آغاز و در نهایت،

گسترش آب شستگی، ضمن ایجاد خسارات فراوان، به تخریب پوشش کانال منجر می‌گردد. مورد اخیر در چندین پروژه آبرسانی در ایران، سوریه، عراق و شوروی مشاهده شده است. همچنین قرار گرفتن خاک های واگرا بر روی قشرهای نفوذپذیری چون لایه های شن و ماسه و نفوذ آب باران از راه ترک های حاصل از خشک شدن سطح زمین یا حفره های باقیمانده بر جای ریشه های پوسیده گیاهان و یا حفره های ایجادشده توسط حیوانات، به شسته شدن سریع خاک در این منافذ و ایجاد تونل ها و حفره های بزرگ (Sink Holes) منجر می شده است.

علاوه بر موارد مذکور جریان یافتن آب باران بر روی سطح خاکریزهای ساخته شده از خاک های واگرا سبب فرسایش سطحی خاک می شود و بر اثر نفوذ آب باران، از طریق ترک های ناشی از خشک شدن خاک، و در نتیجه فرسایش داخلی توده خاک، تونل ها و حفرات بزرگی در بدنه خاکریز به وجود می آید (شکل ۲-۱۰).



شکل ۲-۱۰ آب شستگی های سطحی در خاکریز (Waters and 1984) (soil and water management)

آب شستگی های سطحی در خاک های واگرا نیز از جمله مسائلی است که هنوز عوامل مؤثر در آن به خوبی شناخته نشده است. اگرچه در اکثر موارد خاک های واگرای موجود در سطح خاکبرداری ها و

خاک‌ریزی‌ها بر اثر ریزش باران شسته شدند مواردی نیز بوده است که باوجود واگرا بودن خاک آب شستگی مشاهده نشده است.

تحقیقات گذشته حاکی از آن بود که اگر میزان املاح محلول در آب منفذی از ۱۵ میلی‌اکی‌والان گرم در لیتر بیشتر باشد، آب شستگی سطحی به وقوع نمی‌پیوندد. این معیار نسبتاً درست بوده است، بااین‌حال، اخیراً در برخی از مناطق باوجود بالا بودن میزان املاح محلول در آب منفذی، آب شستگی‌های سطحی مشاهده شده است (Sherard, Dunningan & Decker, ۱۹۷۷).

ایجاد پوشش گیاهی بر روی سطوح خارجی آن دسته از سازه‌های خاکی که از خاک‌های واگرا ساخته شده‌اند، روش مناسبی برای تثبیت این نوع خاک‌ها نمی‌باشد. زیرا در خاک‌های واگرا عبور آب از ترک‌های حاصل از خشک شدن و انقباض خاک باعث فرسایش خاک می‌شود و تا زمانی که ترکی برای ورود آب وجود داشته باشد وجود پوشش گیاهی تأثیری در این نوع فرسایش نخواهد داشت. به‌علاوه کاهش رطوبت خاک بر اثر مصرف آن به‌وسیله ریشه گیاهان، امکان گسترش ترک‌های ناشی از انقباض خاک را افزایش می‌دهد.

در دانشگاه کلرادوی آمریکا ارتباط بین آب شستگی‌های سطحی و پدیده واگرایی را در خاک‌های رسی غیراشباع – از جنس مونت‌موریلونیت – مورد مطالعه قرار داده شده است (Sheikh, Ruff, Charlie & Aht, ۱۹۸۸).

یکی از موارد درخور توجه در این مطالعات بیشتر بودن سرعت آب شستگی سطحی در برخی از رس‌های غیر واگرای مورد آزمایش در این بررسی‌ها بوده است. پژوهشگران مذکور این مسئله را ناشی از پدیده جدایی ذرات خاک (Slaking) دانسته‌اند. توضیح این که در صورت زیاد بودن سرعت نفوذ آب در خاک ممکن است فرصت کافی برای خروج هوای موجود در منافذ خاک وجود نداشته باشد. این امر منجر به متراکم شدن و بالا رفتن فشار هوای مذکور می‌گردد و در نتیجه ذرات خاک بر اثر این افزایش فشار از یکدیگر جدا می‌شوند این پدیده که عمدتاً در خاک‌های ریزدانه غیراشباع مشاهده

می‌شود، به پدیده جدا شدن ذرات خاک (Slaking) موسوم است. ذرات مونت موریلونیت های حاوی کلسیم بر اثر این پدیده سریعاً از هم جدا می‌شوند. این ذرات کوچک تر به آسانی با جریان آب شسته می‌شوند. در مونت موریلونیت های حاوی سدیم این پدیده مشاهده نمی‌شود. ذکر این نکته نیز لازم است که در خاک های اشباع این پدیده مشاهده نشده است و این مطالعات بر روی مونت موریلونیت های غیراشباع انجام شده است.

شرارد نیز مطالعاتی در زمینه آب شستگی های سطحی انجام داده است. از نظر وی علاوه بر میزان املاح محلول در آب منفذی سرعت تورم خاک و بسته شدن ترک‌ها، سرعت جدا شدن ذرات رس از سطح خاک و سرعت و مدت ریزش باران نیز در میزان آب شستگی های سطحی مؤثرند. در ماه‌های گرم سال، خشک شدن خاک های رسی به انقباض و ایجاد ترک‌هایی در سطح این گونه خاک‌ها منجر می‌شود. یک بارندگی ناگهانی و شدید ممکن است باعث شسته شدن ذرات خاک از طریق همین ترک‌ها شود، اما در یک بارندگی آرام و مداوم، قبل از آن که ذرات خاک شسته شوند میزان رطوبت خاک به حدی می‌رسد که ترک‌ها بسته می‌شوند (Sherard, Dunningan & Decker, ۱۹۷۷).

۲-۴ منشأ خاک های واگرا

خاک های واگرا تا به امروز اغلب در آبرفت های رسی دشت های سیلابی و رسوبات دریاچه‌ای ولسی مشاهده شده‌اند. همچنین در بعضی از مناطق، مشاهده شده است که املاح محلول در آب منفذی سنگ های رسی و شیل های تشکیل شده در زیر دریاها همانند املاح محلول در رس های واگرا هستند و خاک های حاصل از هوازدگی آنها نیز واگرا بوده است جز در چند مورد معدود تاکنون خاک های ریزدانه بر جا مانده از هوازدگی سنگ های آذرین و دگرگونی و همچنین سنگ های آهکی واگرا نبوده‌اند.

بر اساس نتایج اولیه تصور می‌شد که محل تشکیل خاک های واگرا، مناطق خشک و نیمه‌خشک است و این گونه رس‌ها دارای آب منفذی قلیایی (PH بزرگ‌تر از ۸/۵) می‌باشند. در سال های اخیر خاک

های واگرا در بسیاری از مناطق مرطوب مانند استرالیا، مکزیک، ویتنام، تایلند، هندوستان، برزیل، ونزوئلا و مناطق جنوبی ایالات متحده مشاهده شده‌اند و در مواردی نیز دارای آب منفذی اسیدی بوده‌اند. از نظر رنگ تاکنون خاک های واگرا به رنگ های قرمز، قهوه‌ای، خاکستری روشن، زرد و ترکیبی از این رنگ‌ها دیده شده‌اند. (رحیمی، ۱۳۶۸)

در خاک های واگرا، میزان رطوبت حد انقباض، بسیار کمتر از رطوبت اشباع است، لذا کاهش رطوبت در این خاک‌ها به کاهش حجم و ایجاد ترک های فراوان در سطح خاک منجر می‌شود. همچنین در خاک های مذکور، درصد سدیم تبادلی (ESP) از ۱۵ درصد و PH در اکثر مواقع از ۸/۵ بیشتر است. (Decker & Dunnigan, ۱۹۷۷).

چنان که قبلاً گفته شد یکی از مهم‌ترین ویژگی های خاک های واگرا وجود املاح سدیم در آنها می‌باشد. ۷۵٪ از سنگ های سطح زمین از نوع رسوبی و ۸۰٪ این سنگ‌ها از رسوبات دریایی هستند. میزان املاح این رسوبات به طور متوسط در حدود ۵ تا ۸ درصد است. هوازدگی و فرسایش این سنگ‌ها منجر به انتقال نمک‌ها و از جمله املاح سدیم به خاک می‌گردد. همچنین ممکن است که املاح مذکور در آب حل شده با جریان آب از محلی به محل دیگر منتقل شوند و سپس در شرایطی خاص مجدداً بر سطح خاک رسوب نمایند.

در مناطق گرم و خشک یا گرم و نیمه‌خشک شدت تبخیر منجر به جمع شدن املاح در سطح خاک می‌شود. نفوذناپذیر بودن لایه‌های زیرین خاک نیز به جمع گشتن املاح در سطح خاک کمک می‌نماید.

منشأ دیگر املاح در خاک آب های شور هستند. همچنین تراز سطح سفره آب زیرزمینی یکی از عوامل مؤثر در تجمع املاح در خاک‌هاست. اگر آب زیرزمینی حاوی املاح و سطح سفره آب به سطح زمین نزدیک باشد، صعود آب در خاک بر اثر پدیده مویینگی و تبخیر سطحی به انتقال املاح آب به لایه‌های سطحی خاک و تجمع آنها در این سطح منجر می‌شود. در دشت‌ها و زمین‌هایی که پستی و

بلندی های کم ارتفاع و کوچک متناوباً به شکل امواج وجود دارند قسمت های برآمده سریع تر خشک می شوند و در نتیجه غلظت املاح در این نقاط بیشتر است (الیاس آذر، ۱۳۶۹).

۲-۵ موارد استفاده از خاک های واگرا

استفاده از خاک های واگرا عمدتاً مشکلاتی را به وجود می آورد، لیکن در مواردی نیز کاربرد آنها مفید بوده است. استفاده از خاک واگرا در ساخت مخازن و کانال ها یکی از روش های جلوگیری از نشت آب از این سازه ها می باشد. این روش در برخی از پروژه ها به کار برده شده است و حتی در مواردی که خاک واگرا در منطقه موجود نبوده، به کمک افزودنی های شیمیایی خاک های موجود را واگرا نموده اند. برای نمونه در یک کانال خاکی به طول $3/2$ کیلومتر که در سال ۱۹۳۰ زیر نظر سازمان SCS ساخته شد (Decker & Dunnigan, ۱۹۷۷)، آب ورودی به دلیل نشت از خلل و فرج و ترک های موجود در کف و کناره ها به انتهای دیگر کانال نمی رسید. برای رفع این مشکل، پس از خاک برداری مجدد کف و کناره های کانال، ابتدا لایه ای از شن و ماسه تمیز به ضخامت ۳۰ تا ۹۰ سانتیمتر ریخته و بر روی آن ۲۰ تا ۳۰ سانتیمتر خاک رس واگرا (با درصد واگرایی بیش از ۴۰٪) قرار داده شده است. سپس یک لایه شنی به ضخامت ۸ تا ۱۰ سانتیمتر بر روی ۲ لایه قبل اجرا گردید. پس از مدتی خلل و فرج شن و ماسه زیرین مسدود و کانال آب بندی شد.

اگر خاک واگرا در دسترس نباشد، می توان خاک موجود را با استفاده از افزودنی های شیمیایی واگرا ساخت. از جمله این افزودنی ها می توان کلرید سدیم، پلی فسفات سدیم و بی کربنات سدیم را که تاکنون سازمان حفاظت خاک در صدها پروژه مورد استفاده قرار داده است نام برد.

۲-۶ عوامل مؤثر در پدیده واگرایی

مهم ترین عوامل مؤثر در بررسی واگرایی خاک های رسی و همچنین به برخی از عوامل مهمی که نحوه تأثیر آنها در این پدیده هنوز به درستی مشخص نشده در زیر اشاره خواهد شد.

۲-۶-۱ نوع و غلظت نمک های محلول در آب منفذی

با توجه به نتایج حاصل از بررسی سد های تخریب شده بر اثر آب شستگی و نتایج آزمایش های انجام یافته، معلوم گردیده که مهم ترین عامل مؤثر بر پدیده واگرایی، غلظت یون سدیم در آب منفذی خاک است.

علت اصلی این مسئله، یک ظرفیتی بودن کاتیون های سدیم است. خاک های حاوی املاح کلسیم، منیزیم و آلومینیوم، به دلیل بیشتر بودن ظرفیت این عناصر، واگرا نیستند. کاتیون های پتاسیم نیز یک ظرفیتی اند، اما به دلیل کوچک بودن، در فضای میان اتم های تشکیل دهنده کانی های رسی وارد شده در آن محبوس می شوند. لذا کاتیون های مذکور تبادل پذیر نیستند. کاتیون هایی چون سدیم و لیتیم، به دلیل بزرگ بودن، نمی توانند در این فضا وارد شوند. سزیم، روبیدیم و گاه آمونیم نیز مانند پتاسیم در فضای میان اتم ها محبوس می شوند و لذا میزان این یون ها معمولاً در حدی نیست که سبب واگرایی خاک شود.

به دلیل یک ظرفیتی بودن یون سدیم تعداد یون هایی که برای برقراری تعادل الکتروستاتیکی جذب ذرات رس می شوند دو برابر یون های دو ظرفیتی است و در نتیجه پتانسیل اسمزی در خاک های حاوی املاح سدیم بیشتر می باشد. خاصیت اسمز، یکی از دلایل جدایی ذرات خاک از یکدیگر است. به عنوان مثال، حالتی را در نظر می گیریم که بر اثر ترک خوردن هسته رسی یک سد خاکی آب مخزن در داخل ترک ها جاری شود، در این صورت اگر غلظت یون های موجود در آب منفذی خاک از غلظت آن در آب مجاور خاک بیشتر باشد آب در تماس با خاک به درون آن نفوذ می کند. بر اثر این خاصیت که آن را اسمز می گویند خاک متورم می گردد. با ورود آب و در نتیجه ایجاد فاصله میان ذرات خاک، از نیروی جاذبه بین ذرات کاسته می شود و در نهایت، ذرات خاک از یکدیگر جدا می شوند.

بدین ترتیب میزان تأثیر خاصیت اسمز با غلظت و به عبارت دیگر، با تعداد یون های موجود در خاک نسبت مستقیم دارد و با توجه به آنچه در مورد فراوانی یون های سدیم در خاک حاوی املاح این

عنصر به منظور برقراری تعادل الکتروستاتیکی گفته شد، نتیجه می‌شود که شدت خاصیت اسمز در این خاک‌ها بیشتر است. علاوه بر این مسئله نیروی جاذبه الکتریکی میان یون‌های سدیم و سطح ذرات رس از یون‌های دو ظرفیتی کمتر و در نتیجه ضخامت لایه دوگانه بیشتر است. بنا به دلایل فوق، ضخامت لایه یون‌های احاطه‌کننده ذرات رس در خاک‌های حاوی املاح سدیم بیشتر است و در این شرایط مقدار نیروی جاذبه واندروالسی بین ذرات کمتر بوده چه بسا به صفر نیز برسد.

پس وجود سدیم در خاک‌ها منجر به افزایش پتانسیل اسمزی و کاهش نیروهای جاذبه واندروالسی بین ذرات و در نتیجه واگرایی خاک‌های رس می‌شود (فاخر و عسکری، ۱۳۷۳). البته باید یادآوری کرد که برای این که خاکی واگرا باشد باید غلظت املاح محلول در آب منفذی آن از حدی بیشتر باشد. نتایج آزمایش‌های شرارد و نمودار حاصل از این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که اکثر خاک‌هایی که در آن‌ها غلظت املاح محلول در آب منفذی از یک میلی‌اکی والان گرم در لیتر کمتر است، واگرا نیستند (فاخر و عسکری، ۱۳۷۳).

۲-۶-۲ خصوصیات شیمیایی آب در تماس با سطح خاک

با توجه به مطالب گفته‌شده در قبل معلوم گردید که با کاهش میزان املاح محلول در آب در تماس با سطح خاک، احتمال آب شستگی افزایش می‌یابد. در این بررسی‌ها، مقدار کل املاح محلول در آب دریاچه‌ها بیشتر سدهای تخریب‌شده از ۵ میلی‌اکی والان گرم در لیتر کمتر بوده است.

باید توجه داشت که نوع املاح آب نیز در واگرایی خاک و فرسایش آن موثر است. وجود کاتیون‌های کلسیم در آب خطر فرسایش ناشی از رگاب را کاهش می‌دهد و بالعکس وجود کاتیون‌های سدیم بر این خطر می‌افزاید البته هرچه میزان املاح آب کمتر باشد تأثیر نوع املاح نیز کمتر می‌شود. (فاخر و عسکری، ۱۳۷۳).

۲-۶-۳ ترک خوردگی

شسته شدن خاک‌های واگرا مستلزم شرایطی است که یکی از آن‌ها، وجود ترک‌ها یا منافذ بزرگ در خاک است. به طور کلی ترک‌هایی که در خاکریزها و سدهای خاکی به وجود می‌آیند عبارتند از:

۱ - ترک های انقباضی: در صورت توقف عملیات ساختمانی خاکریزهای رسی به مدت چند روز در ایام گرم و خشک سال و عدم حفاظت از سطح آن، خشک شدن و انقباض خاک باعث ایجاد و گسترش ترک های انقباضی در این خاکریزها می شود. در شروع مجدد عملیات ساختمانی، معمولاً سطح خاک را مرطوب می نمایند و شخم می زنند. با این همه، معمولاً به عمق این گونه ترک ها توجه نمی شود. عمق این ترک ها ممکن است از آنچه تصور می شود بسیار بیشتر باشد.

۲- ترک های ناشی از نشست نامساوی: این ترک ها عمدتاً به دلیل تفاوت ارتفاع خاکریزی در قسمت های مختلف یک خاکریز به وجود می آیند.

۳- ترک های ناشی از عمل قوسی: این ترک ها که بر اثر نشست نامساوی پوسته و هسته رسی در سدها به وجود می آیند در درون خاکریزند و دیده نمی شوند (بیشتر در هسته مرکزی سدهای خاکی). علامت مشخصه این ترک ها نشن آب در پایین دست است.

۴- برخی از ترک ها به سبب بیشتر شدن فشار آب منفذی از مقدار کمترین تنش اصلی به وجود می آیند. این نوع ترک ها به ترک های هیدرولیکی (Hydraulic Fracturing) موسوم اند. نشست نامساوی پی و یا خشک شدن خاک و در نتیجه ایجاد و گسترش ترک های انقباضی در بدنه خاکریز، ممکن است منجر به ایجاد چنین شرایطی گردد (حائری، ۱۳۶۳).

شرارد در بررسی علل خرابی تعدادی از سدهای خاکی ساخته شده از رس های واگرا، به این نتیجه رسیده است که به احتمال بسیار زیاد، شروع خرابی ها به دلیل ایجاد ترک های هیدرولیکی بوده است. به نظر شرارد ایجاد چنین ترک هایی در سدهای تخریب شده موجب شسته شدن خاک های واگرای مورد استفاده در ساختمان این سدها شده است.

۷-۲ فرسایش و مسائل ناشی از آن

یکی از مشکلاتی که بشر از آغاز زراعت بر روی زمین با آن مواجه بوده، فرسایش سریع خاک ها می باشد. فرسایش خاک هنوز هم در آمریکا و بسیاری از مناطق حاره ای و نیمه خشک دنیا از معضلات

به شمار می رود و در کشورهایی که آب و هوای معتدل دارند - از جمله انگلستان، بلژیک و آلمان - به عنوان یکی از مسایل خطرناک تلقی می شود. این مشکل در ایران که بخش وسیع آن را کویرها در بر گرفته اند و خاک از پوشش مناسبی برخوردار نیست بسیار بارز و چشمگیر است. اثر فرسایش تنها به مناطقی که خاک سطحی آن توسط باد و آب از بین رفته و سنگ مادر یا خاک زیر در معرض دید قرار گرفته و سطح زمین توسط آب بریدگی ها چاک چاک شده است مربوط نمی شود، بلکه مناطق پایین باد و کف دره ها را که در آن سطح زمین پوشیده از نهشته های شن و ماسه بوده و کانال ها و نهلهایی که از رسوب پر شده اند را نیز در بر می گیرد .

فرسایش عبارت است از پدیده ای که در آن مواد خاکی توسط عواملی از قبیل آب، باد و نیروی ثقل انتقال می یابند. فرسایش آبی در دوران های زمین شناسی، دگرگونی های شگرفی در پوسته زمین پدیدار ساخته و به ایجاد بیابان های خشک و هم چنین اراضی مزروعی حاصلخیز منجر شده است. در گذشته ای نه چندان دور، آن چه را فرسایش طبیعی از خاک می ربود، عوامل خاک سازی مجدداً ایجاد می نمود و در نتیجه بین ایجاد شدن و از بین رفتن خاک تعادل برقرار بود. دخالت بشر در چند قرن اخیر این تعادل را به هم زده و با جایگزینی پوشش طبیعی خاک با کشت هایی که خاک را برهنه می سازد فرسایش خاک شدت یافته است. (بای بوردی، ۱۳۸۲)

شدت فرسایش در زمان ها و مکان های مختلف متغیر است. رسوباتی که در اثر یک واقعه آب و هوایی معین ایجاد می شود به شرایط توپوگرافی، نوع خاک و نحوه استفاده از زمین بستگی دارد و این امر موجب تغییرات موضعی فرسایش می شود. از آنجایی که آب و هوا مرکب از مجموعه وقایعی با شدت های مختلف است در نتیجه مهم ترین عامل در تغییرات زمانی کوتاه مدت فرسایش را می توان آب و هوا به شمار آورد. در هر حال خصوصیات اقلیمی، بخصوص مقدار بارندگی، شدت بارندگی و سرعت باد در جاهای مختلف متغیر است. از این گذشته تغییرات زمانی درازمدت نیز ممکن است در فرسایش اتفاق افتد. بنابراین، نقش متقابل تغییرات زمانی و مکانی فرسایش تا حد زیادی پیچیده است .

۲-۷-۱ فرسایش داخلی و مکانیزم آن

فرسایش در خاک های مختلف مکانیزم متفاوتی نیز دارد و طبقه بندی های مختلفی اعم از فرسایش آبی یا بادی، طبیعی یا مصنوعی و ...، صورت گرفته است، ولی به طور کلی می توان گفت فرسایش بر اثر جدا شدن ذرات خاک از یکدیگر شکل می پذیرد. حال این جدا شدن ذرات یا به شکل فیزیکی و با نیروی آب انجام می پذیرد و یا بر اثر واکنش شیمیایی که بین ذرات خاک و آب انجام می گیرد. در هر صورت فرسایش خاک گاهاً باعث خرابی های فاجعه آمیز می گردد که به منظور حفظ جان مردم و مسائل اقتصادی و مهندسی باید از وقوع آن، جلوگیری به عمل بیاید.

فرسایش داخلی به ترکیب خاک و مشخصات واگرایی خاک مربوط می گردد. واگرایی خاک به عنوان یک عامل اساسی در مسائل مربوط به خاک مانند پدیده پایپینگ در سد های خاکی، کاهش ظرفیت باربری در زیرساخت راه و پایداری شیب شیروانی ها مطرح می گردد. از موارد مکانیزم بحرانی فرسایش داخلی، حضور ترک های کششی در کانال های روباز آب را می توان نام برد.

البته میزان فرسایش داخلی خاک بستگی بسیار زیادی به چسبندگی واقعی خاک نیز دارد. چسبندگی واقعی در خاک به مقاومت برشی خاک در تنش موثر صفر گفته می شود. اگر نیروهای داخلی ذرات خاک جاذبه باشد، چسبندگی واقعی مثبت و اگر این نیروها دافعه باشند چسبندگی واقعی منفی خواهد بود. میزان چسبندگی به خصوصیات فیزیکی - شیمیایی ذرات خاک، آب منفذی و آب آزاد بستگی دارد.

فرسایش فیزیکی بیشتر در باران های سنگین مناطق حاره ای اتفاق می افتد. ابتدا ترک در صفحه ضعیف حادث می شود که موجب نفوذ آب باران و ریزش یا لغزش نهایی حاصل از فرسایش می گردد. در خاک های واگرا جدا شدن ذرات به دلیل کلوئیدی شدن انجام می پذیرد. یعنی آب بدون اینکه سرعت و نیروی کافی داشته باشد می تواند ذرات را از هم جدا نماید، حال اگر سرعت آب نیز به حد کافی باشد می تواند باعث حمل ذرات خاک گردد و پدیده فرسایش اتفاق بیفتد.

انواع فرسایش به فرسایش بادی و آبی تقسیم می‌گردد که خود نیز وابسته به عواملی مختلف همچون بافت خاک، نیروی باد و دیگر عوامل می‌باشد. بررسی های زیادی در مورد فرسایش خاک در مناطق و شرایط مختلف انجام گرفته است که موضوع بحث در این تحقیق نیستند.

۲-۸ کانی های تشکیل دهنده خاک رس

به نظر می‌رسد که وجود کانی های مونت موریلونیت در رس ها و قرارگیری یون های سدیم در میان لایه های میانی آن ها، یکی از علل اصلی بروز پدیده واگرایی باشد. تعدادی از پژوهشگران استرالیایی به این نتیجه رسیده اند که احتمالاً همه خاک های واگرا حاوی درصد بسیار زیادی کانی مونت موریلونیت هستند (1972, Sherard & et al.).

کائولینیت یکی دیگر از کانی های اصلی تشکیل دهنده خاک های رس است. ساختمان این کانی کاملاً از ساختمان مونت موریلونیت متفاوت است. از به هم پیوستن ذرات این کانی، صفحاتی به وجود می‌آیند که ضخامت آن ها بسیار بیشتر از صفحات کانی مونت موریلونیت است و به همین دلیل در کائولینیت، نسبت ضخامت صفحات به سطح از مونت موریلونیت بیشتر است. همچنین به هم پیوستگی صفحات سیلیس – آلومین در کائولینیت به دلیل وجود پیوند هیدروژنی نسبتاً محکم، بسیار بیشتر است (عسکری و فاخر، ۱۳۷۳). بنابراین ملاحظه می‌شود که میزان سدیم لازم برای جدا شدن ذرات کائولینیت و واگرا شدن آن بسیار بیشتر از مونت موریلونیت است.

۲-۹ میزان تراکم، درصد رطوبت، درصد رس و حدود اتربرگ

میزان تراکم، درصد رطوبت و درصد رس، از عواملی هستند که چگونگی تأثیر آن ها بر میزان واگرایی خاک ها به خوبی روشن نمی‌باشد. در برخی موارد کاهش رطوبت و دیگر موارد ذکر شده، باعث کاهش میزان واگرایی خاک گردیده و بالعکس مواردی نیز بوده است که بر اثر کاهش این پارامترها، بر میزان واگرایی خاک افزوده شده است.

۲-۱۰ ملاحظات طراحی در مواجهه با خاک های واگرا

با توجه به نتایج حاصل از مطالعه رفتار خاک های واگرا و پدیده آب شستگی در آن ها لازم است در طرح و اجرای آن دسته از سازه های خاکی که با خاک های واگرا ساخته می شوند و یا با آن ها در تماس می باشند ضوابط ویژه ای در نظر گرفته شود. بررسی رفتار بسیاری از سدهای خاکی ساخته شده در چند سال اخیر نشان می دهد که تعداد خرابی ها و مشکلات ناشی از پدیده رگاب در سدهایی که در ساخت آن ها ضمن استفاده از خاک های واگرا چنین ضوابطی رعایت شده، بسیار اندک بوده است. شناخت پدیده واگرایی و شناسایی خاک های واگرا باعث شده که در انتخاب منابع قرضه خاک های ریزدانه ضوابط بیشتر و دقیق تری در نظر گرفته شود. اگر دو منبع قرضه در یک منطقه موجود باشد که یکی دارای خاک واگرا و دیگری دارای خاک غیر واگرا باشد، مسلماً منبع قرضه ای انتخاب می شود که خاک آن واگرا نباشد. بدیهی است که در این صورت می توان حتی در طرح فیلتر نیز وسواس کمتری به خرج داد.

پس به طور کلی اولین راه حلی که در مواجهه با خاک های واگرا بررسی می گردد، عدم استفاده از آن هاست؛ اما اگر استفاده از خاک های واگرا ضرورت داشته باشد، باید برای مقابله با پدیده آب شستگی در آن ها چاره ای اندیشید.

۲-۱۰-۱ تثبیت و تسلیح خاک

بهبود خصوصیات خاک به طور معمول به دو روش صورت می پذیرد: تثبیت خاک با افزودن مواد شیمیایی به خاک و در مواردی، افزودن این مواد به آب مخزن سد و تسلیح با الیاف. در این بخش، تأثیر افزودن آهک سولفات آلومینیوم به خاک و افزودن ژئوپس به آب مخزن و چگونگی تقویت خصوصیات مکانیکی خاک توسط الیاف مورد بررسی قرار می گیرد.

۲-۱۰-۱ الف تسلیح

به طور کلی تقویت خاک های ضعیف و نامناسب جهت به کارگیری در شیروانی ها، پی ها و ...، برای ایجاد پیکربندی خاک با ویژگی های مهندسی دلخواه، تثبیت و تسلیح خاک نامیده می شود. تسلیح خاک به منظور بهبود رفتار خاک و به طور خاص افزایش مقاومت در برابر گسیختگی، به صورت فیزیکی می باشد. مفاهیم و مقدمات خاک های مسلح توسط وایدل در سال ۱۹۶۹ پایه گذاری گردید. وایدل به بیان این نظریه پرداخت که وجود مواد تسلیح کننده باعث افزایش مقاومت برشی می گردد. (2007, Akbulut & et al.)

به طور کلی عناصر موجود برای تسلیح خاک به شکل صفحات مشبک، لایه های تنیده، تسمه های نواری و رشته های طناب مانند در محل ها و جهات مشخص و یا به صورت الیاف در بین لایه های خاک قرار می گیرند. تسلیح خاک یا به صورت استفاده مستقیم از الیاف به صورت تصادفی در ماتریسی همانند خاک و یا با استفاده از الیاف با آرایش یافتگی مشخص، همچون ژئوسنتیتک ها صورت می گیرد. خاک مسلح ماده مخلوطی از ترکیب و بهینه سازی خواص تک تک مواد تشکیل دهنده آن است (اخوت و همکاران، ۱۳۸۹). هدف اول در تسلیح خاک بهبود پایداری یا افزایش ظرفیت باربری، کاهش نشست و تغییر شکل جانبی می باشد. میزان الیاف (مصنوعی و طبیعی) در تسلیح خاک، باعث افزایش درصد رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص خشک می گردد. افزایش رطوبت بهینه به دلیل ظرفیت بالای جذب آب توسط الیاف می باشد، همچنین وزن مخصوص پایین الیاف باعث کاهش وزن مخصوص ترکیب خاک و الیاف نسبت به خاک بدون الیاف می گردد. قابل ذکر است که الیافی با اندازه برابر و یا کوچک تر از اندازه دانه های خاک تاثیری در بهبود خواص خاک ندارد.

تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی با استفاده از ضایعات لاستیک ماشین، پلی پروپیلن و پلی اتیلن به صورت خطی نیست و چون مواد تسلیح کننده هم به صورت افقی و هم به صورت عمودی در سطوح برش در داخل خاک قرار می گیرند. همچنین ضایعات لاستیک، پلی پروپیلن، پلی اتیلن، ضریب میرایی و مدول برشی را افزایش می دهند. در ضمن این الیاف از ضایعات مواد می باشد و به

همین دلیل استفاده از آن‌ها به‌منظور تسلیح خاک نیز مقرون به صرفه است. بنابراین برای بهبود پارامترهای مقاومت برشی و دینامیکی استفاده از این مواد بهینه و اقتصادی می‌باشد (2007, Akbulut & et al.).

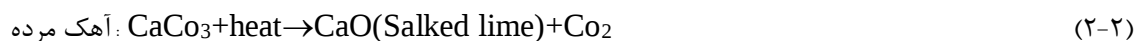
۲-۱۰-۱ ب تثبیت

روشی است به‌منظور بهبود کیفیت مصالح به‌کار می‌رود. برای تثبیت خاک از مواد تثبیت‌کننده نظیر سیمان، آهک، قیر، کلو کلسیم یا سدیم استفاده می‌شود. افزایش مقاومت خاک تثبیت‌شده با آهک به علت ترکیب دوغاب آهک با کانی‌های رسی و تشکیل سیلیکات و آلومینات کلسیم است که سبب چسباندن دانه‌های خاک و سنگ به یکدیگر می‌گردد (واکنش پوزولانی) (طباطبایی، ۱۳۸۸).

افزودن آهک به خاک‌های ریزدانه موجب شروع چندین واکنش می‌گردد. واکنش تبادل یون‌های مثبت و واکنش تجمع - تراکم آنی بوده و به‌مجرد تماس آهک با خاک‌های ریزدانه شروع می‌شود که سبب بهبود خواص خمیری و مقاومت خاک می‌گردد. واکنش دیگری که در برخی از خاک‌ها پس از افزودن آهک به وجود می‌آید واکنش پوزولانی است. واکنش پوزولانی به واکنشی اطلاق می‌گردد که بین آهک و آب و مواد سیلیس دار و آلومین دار خاک انجام می‌پذیرد. واکنش پوزولانی سبب به وجود آمدن مواد سمندی می‌شود که باعث افزایش مقاومت و دوام خاک تثبیت‌شده با آهک می‌گردد. افزایش پوزولانی تابع زمان است و بنابراین افزایش مقاومت خاک به‌کندی صورت می‌پذیرد. خاک‌ها را می‌توان از نظر میزان واکنش با آهک به دو گروه تقسیم کرد: خاک‌های با واکنش و خاک‌های بدون واکنش با آهک. خاک‌های با واکنش، خاک‌هایی هستند که پس از تثبیت با آهک و عمل آمدن به مدت ۲۸ روز در گرمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد بیش از ۳/۵ کیلوگرم بر سانتی مترمربع افزایش مقاومت (فشاری محدود نشده) از خود نشان می‌دهند. خاک‌هایی که پس از عمل‌آوری با آهک مقدار مقاومت کمتری از خود نشان دهند خاک‌های بدون واکنش با آهک هستند (طباطبایی، ۱۳۸۸).

خاک تثبیت شده با آهک دارای حداکثر وزن مخصوص خشک کمتر و درصد رطوبت بهینه بیشتری از خاک تثبیت نشده است. هر اندازه میزان آهک مصرفی برای تثبیت خاک بیشتر باشد، مقدار این اختلاف نیز بیشتر خواهد بود. ضمناً هر اندازه باگذشت زمان مواد سمنی بیشتری در خاک تثبیت شده تشکیل شود، حداکثر وزن مخصوص مصالح کمتر و درصد رطوبت بهینه آن بیشتر خواهد بود (طباطبایی، ۱۳۸۸).

آهک در بیان عمومی به کلسیمی که شامل مواد ارگانیک است گفته می شود که البته غالب این مواد ارگانیک، کربنات ها، اکسیدها و هیدروکسیدها می باشند. همچنین به ماده معدنی CaO (آهک طبیعی) که خیلی به ندرت اتفاق می افتد نیز آهک اطلاق می گردد. در صنعت به صورت سیمان، بتن، سنگ آهک و یا ماده خام شیمیایی مورد استفاده قرار می گیرد. مواد معدنی و سنگ هایی که از آن ها آهک تهیه می گردد، معمولاً سنگ آهک یا گچ می باشد که دارای ترکیب اولیه ای از کربنات کلسیم است. البته این مواد باید از محل بریده شده، پودر شوند و تغییرات شیمیایی روی آن ها انجام گیرد تا قابل استفاده گردند. آهک به طور کلی به دو نوع تقسیم می گردد: آهک مرده و آهک زنده:



آهک مرده (آهک شکفته یا آبدیده) ماده سوزآوری است که بعد از اضافه کردن آب به آن تبدیل به ماده ای به نام آهک زنده می شود که خاصیت قلیایی قوی دارد، ولی خاصیت سوزآوری آن کمتر است. تا کنون کارهای زیادی نظیر تراکم، زه کشی، تحکیم، ستون های سنگی، شمع و فرآیند های شیمیایی نظیر تثبیت و یا عناصر مسلح کننده به منظور بهسازی خاک مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از این روش ها، اضافه کردن آهک می باشد. (مختاری و همکاران، ۱۳۸۸). بسته به شرایط و زمان عمل آوری، با توجه به کانی های رسی و آهک واکنش های متعددی از قبیل تبادل کاتیونی، واکنش پوزولانی و کربناسیون انجام می پذیرد. این واکنش ها به خصوص واکنش پوزولانی باعث تغییر در بافت کریستالی خاک رس و ترکیب شیمیایی کانی ها شده و در نتیجه تغییرات قابل توجهی در خواص

فیزیکی و رفتار مکانیکی خاک ایجاد می‌کند. افزودن آهک به خاک، باعث افزایش رطوبت بهینه و کاهش دانسیته خشک حداکثر می‌گردد. همچنین وجود آهک در خاک باعث افزایش قابل توجهی در میزان CBR می‌گردد. (مختاری و همکاران، ۱۳۸۸)

۲-۱۰-۲ استفاده از فیلترهای مناسب

دانه‌بندی فیلترهای مورد استفاده در پایین دست خاک های واگرا از مسائلی است که نظر محققان بسیاری را به سوی خود جلب نموده است. یکی از آزمایش‌هایی که بدین منظور از آن استفاده شده آزمایش فیلتر است. با استفاده از نتایج این آزمایش عملکرد فیلتر طراحی شده ارزیابی می‌گردد. آزمایش فیلتر را می‌توان بر روی هرگونه خاک و فیلتری از جمله خاک های واگرا و فیلترهای مورد استفاده برای آن‌ها انجام داد. در این آزمایش نظیر آزمایش پین هول آب با گذشتن از درون سوراخی که در وسط نمونه‌ای از خاک ایجاد گردیده است وارد فیلتر ماسه‌ای می‌شود.

از نظر شرارد در صورت استفاده از فیلتری حاوی حداقل درصد کوچکی ماسه ریزدانه (کوچک تر از الک شماره ۴۰) احتمال وقوع آب شستگی های داخلی در خاک های واگرا بسیار کم می‌شود. به‌هرحال در صورت پیش‌بینی استفاده از خاک های واگرا در سدهای خاکی مهم لازم است آزمایش فیلتر بر روی خاک واگرای مورد استفاده و فیلتر طراحی شده انجام شود.

تجربیات به‌دست آمده از مطالعه رفتار سدهای ساخته‌شده نیز این نتیجه‌گیری را در مورد عملکرد فیلترهای ماسه‌ای در متوقف کردن نشت آب تأیید نموده است. به همین دلیل نیز یکی از بهترین روش های پیشنهادشده جهت افزایش ایمنی سدهایی که از خاک های واگرا ساخته شده‌اند، استفاده از پوشش ماسه‌ای به‌عنوان فیلتر بر روی شیب پایین دست سد است. برای محافظت از این فیلتر می‌توان آن را با یک خاکریز وزنی پوشاند.

۲-۱۰-۳ جلوگیری از ترک خوردگی

وجود ترک‌ها و منافذ بزرگ، یکی از مهم‌ترین علل وقوع آب شستگی در خاک های واگراست و جلوگیری از ایجاد ترک در خاکریزهای ساخته‌شده با این‌گونه خاک‌ها یکی از مسائل مهم است. به‌طور

نظری چنین نتیجه گرفته می‌شود که بهتر است در ترازهای پایین تر سد، خاک را با انرژی بیشتر و در ترازهای بالاتر با انرژی کمتر و رطوبتی بیش از رطوبت بهینه متراکم کرد. در این صورت خاک قسمت های بالای سد انعطاف پذیر می‌گردد و امکان ایجاد ترک در آن بر اثر نشست های نامتساوی کمتر است و در قسمت های پایین نیز که تنش ها بیشترند مقاومت خاک بیشتر و نشست آن کمتر است (عسکری و فاخر، ۱۳۷۳).

۲-۱۱ مواد معمول مورد استفاده برای تثبیت خاک

۲-۱۱-۱ آهک

چنان چه خاک رس به شدت واگرایی را با مقدار کمی آب آهک (هیدروکسید کلسیم) مخلوط کنیم خواص آن کاملاً دگرگون می‌شود. به طور کلی بر اثر افزودن آب آهک دامنه خمیری خاک کاهش و حد انقباض آن افزایش می‌یابد.

هنگامی که هیدروکسید کلسیم به خاک رسی افزوده می‌شود، یون های OH^- ، یون های H^+ موجود در ذرات رس را جذب می‌کنند و موجب افزایش بار منفی ذرات رس می‌گردند. در نتیجه کاتیون های Ca^{++} به سهولت جذب ذرات رس می‌شود و پدیده جایگزینی کلسیم به جای سدیم به وقوع می‌پیوندد. در مجموع ایجاد لایه‌ای خاک تثبیت شده با آهک در سطح خاکریزهای ساخته شده از رس های واگرا به دلایل زیر سودمند خواهد بود:

- ذرات رس، ساختمانی مجتمع می‌یابند و در نتیجه تمایل آن‌ها به جدا شدن از توده خاک و احتمال شسته شدن آن‌ها بر اثر جریان آب بسیار کمتر می‌شود.

- خشک شدن لایه سطحی در برابر آفتاب، باعث انقباض و ایجاد ترک در خاک نمی‌شود و در نتیجه مقدار آبی که از این لایه به لایه‌های زیرین نفوذ می‌کند، بسیار کمتر است.

- به دلیل عدم وجود ترک های ناشی از خشک شدن خاک در لایه سطحی لایه‌های زیرین نیز در مقابل خشک شدن محافظت می‌شوند و مانند آن می‌ماند که سطح خاکریز با لایه ضخیمی از ماسه

مرطوب پوشانده شده باشد. بدین ترتیب درصد رطوبت خاک های رس و اگرای زیرین ثابت مانده تمایلی به ایجاد ترک های ناشی از انقباض در آنها به وجود نمی آید.

- کاسته شدن وزن مخصوص و پتانسیل تورم و افزایش مقاومت برشی و نفوذپذیری خاک. (عسکری و فاخر، ۱۳۷۳).

۲-۱۱-۲ سولفات آلومینیوم

سولفات آلومینیوم یکی دیگر از موادی است که برای تثبیت خاک های واگرا از آن استفاده شده است. قابلیت حل شدن سولفات آلومینیوم در آب بسیار بیشتر از آهک است و به همین دلیل نیز مخلوط کردن آن با خاکی که اصلاح آن مورد نظر می باشد، نسبت به آهک هزینه کمتری دارد. همچنین ضرر سولفات آلومینیوم در تماس با دست، نسبت به آهک کمتر است. با این همه استفاده از این ماده معایبی نیز دارد که عمده ترین آنها عبارتند از:

- قیمت آن بسیار گران تر از آهک است.

- به شدت اسیدی است ($PH = 3/4$) و استفاده از آن، رویش گیاهان را مشکل می سازد.

اضافه کردن حدود ۰/۵ تا ۲ درصد سولفات آلومینیوم به خاک، علاوه بر افزایش مقاومت در برابر آب شستگی باعث افزایش نفوذپذیری و مقاومت برشی و کاهش پتانسیل تورم نیز می شود. لیکن وزن مخصوص خاک تغییر محسوسی نمی کند (عسکری و فاخر، ۱۳۷۳).

۲-۱۱-۳ افزودن ژئوپس (سنگ گچ آبدار) به آب مخزن سد

اگر خاک منطقه ای واگرا باشد علاوه بر مشکلات ناشی از آب شستگی بر اثر حل شدن ذرات رس در آب کیفیت آب مخزن نیز نامناسب می گردد. در این گونه موارد یکی از راه حل های ممکن بهبود کیفیت آب یا افزودن مواد مضاعف به آن است.

افزودن ژئوپس به آب مخزن در پروژه فوق بسیار سودمند بوده است لیکن باید توجه داشت که معمولاً افزودن غلظت کاتیون های موجود در آب روشی گران و غیر متداول است.

۲-۱۲ پیشینه ی مطالعات انجام گرفته

Deng-Fong Lin و Li Chen، رفتار تثبیتی خاک بستر نرم به وسیله خاکستر لجن فاضلاب و سیمان را مورد مطالعه قرار دادند. آنها در این مطالعه، خاکستر لجن فاضلاب سوزانده (ISSA) را با سیمان به یک نسبت ثابت از ۴ به ۱، برای استفاده به عنوان تثبیت کننده به منظور بهبود خاک بستر، نرم، دارای چسبندگی مخلوط کردند. آنها پس از انجام آزمایشات PH، حد اتربرگ، تراکم، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)، مقاومت فشاری تک محوری و سه محوری نشان دادند که مقاومت فشاری تک محوری نمونه های آزمایشی با افزودن ترکیب ISSA / سیمان، تقریباً حدود ۳ تا ۷ بار بهتر از خاک دست نخورده می باشد؛ علاوه بر این، رفتار تورم نیز به طور موثر به اندازه ۱۰ تا ۶۰٪ برای آن دسته از نمونه ها کاهش یافته و در برخی از نمونه ها، مخلوط ISSA / سیمان، مقدار CBR را به بیش از ۳۰ بار بیشتر از خاک دست نخورده افزایش داد.

Deng-Fong Lin و همکارانش در مطالعه ای تلاش کردند تا برای بهبود مشخصات و مقاومت خاک از SSA و آهک هیدراته برای پایدار کردن خاک چسبنده استفاده کنند. آزمایشات آنها نشان داد که مقاومت فشاری تک محوری نمونه های اصلاح شده تا ۳ الی ۷ برابر بهتر از نمونه های عادی بودند و همچنین رفتار تورمی آنها کاهش چشمگیری داشت. آنها اعلام کردند که نتایج آزمایش فشاری سه محوری نمایانگر این است که پارامتر مقاومت برشی C، با افزایش مقدار افزودنی از ۳۰ الی ۵۰-۷۰ کیلو پاسکال افزایش میابد. در کل آهک هیدراته و SSA می تواند مشخصات خاک چسبنده را بهبود بخشد. بعلاوه این افزودنی می تواند ۹۵ درصد سی بی آر، مقاومت برشی سه محوری، مقاومت فشاری تک محوری و پارامتر مقاومت برشی، C خاک را بهبود بخشد. آنها اشاره کردند که خاکستر لجن فاضلاب - آهک هیدراته شده بیشتر می تواند به بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک بستر نرم چسبناک کمک نماید.

تای و گواه سیمان را با خاکستر سوزانده شده لجن فاضلاب در ساخت بتن جایگزین کردند، در نتیجه، کارآمدی و مقاومت فشاری بتن حاصل گردید.

نتایج به دست آمده توسط یاکوئی و همکارانش نشان داد که سیلیس و کلسیت در تبلور (کریستالیزاسیون) خشک لجن فاضلاب با استفاده از تجزیه و تحلیل DRX مشاهده گردیده شدند؛ بنابراین، علاوه بر این، خاکستر لجن فاضلاب برای ساروج کردن می تواند فرآیندهای هیدراتاسیون سیمان را کند نماید.

لین و همکارانش ۰ تا ۴۵٪ از خاکستر لجن فاضلاب سوزانده شده را به عنوان جایگزینی برای خاک رس در تولید کاشی لعابی استفاده کردند. آنها دریافتند که خاکستر لجن سوزانده شده برای تولید کاشی لعابی مناسب است. اگر چه به دست آوردن جذب کمتر آب و مقاومت خمشی مورد توجه قرار داشت، کاشی های لعابی خاکستر لجن قابلیت تطابق با استاندارد CNS را برای کاشی کف سفالی به دست آورد. علاوه بر این، لین و همکارانش نانو SiO_2 را به عنوان افزودنی برای بهبود خواص کاشی خاکستر لجن مورد استفاده قرار دادند. آنها نشان دادند که قدرت خمش کاشی خاکستر لجن با افزایش مقدار نانو SiO_2 افزایش می یابد. با این حال، کاهش مقاومت در خمش نیز متوجه و مرتبط با افزایش میزان نانو SiO_2 افزوده شده در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد و یا بالاتر بود.

به منظور استفاده وسیع تر از لجن برای برنامه های کاربردی مختلف، تای و گواه نیز خواص فیزیکی و شیمیایی پس مانده های خاکستر را مورد آزمایش قرار داده و برنامه های کاربردی ممکن را در مناطق ژئوتکنیکی مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه آنها بر روی مخلوط خاکستر ذغال سنگ و خاکستر بلند شده و ترکیب متعاقب آنها با خاک، ویژگی های حاصل از این رفتار بر خاک ثابت بودند. آنها همچنین اشاره کردند که خصوصیات خاک مانند مقاومت برشی تا حد زیادی بهبود یافته بود.

فصل سوم

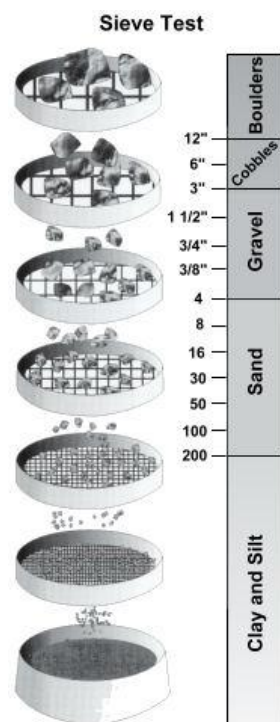
تئوری آزمایشات انجام گرفته

۳-۱ آزمایش‌های طبقه‌بندی خاک

به‌منظور طبقه‌بندی خاک‌ها، اقدام به انجام آزمایش‌های مورد نیاز شامل آزمایش دانه‌بندی با الک، آزمایش هیدرومتری، آزمایش تعیین حدود اتربرگ شده است که روش و استاندارد انجام این آزمایش‌ها به‌صورت زیر می‌باشد.

۳-۱-۱ آزمایش دانه بندی با الک

برای تعیین نحوه توزیع اندازه دانه‌های خاک معمولاً از آزمایش دانه‌بندی به کمک الک استفاده می‌گردد. در این تحقیق این آزمایش بر روی نمونه بر اساس استاندارد ASTM D422 انجام‌شده است. در این روش ابتدا الک‌ها با اندازه‌های مختلف بر روی هم قرار داده‌شده و پس از الک کردن نمونه خاک بر روی آن‌ها، وزن خاک مانده در روی هر الک تعیین‌شده و نمودار ابعاد دانه‌ها در مقابل درصد مانده یا رد شده رسم می‌گردد.

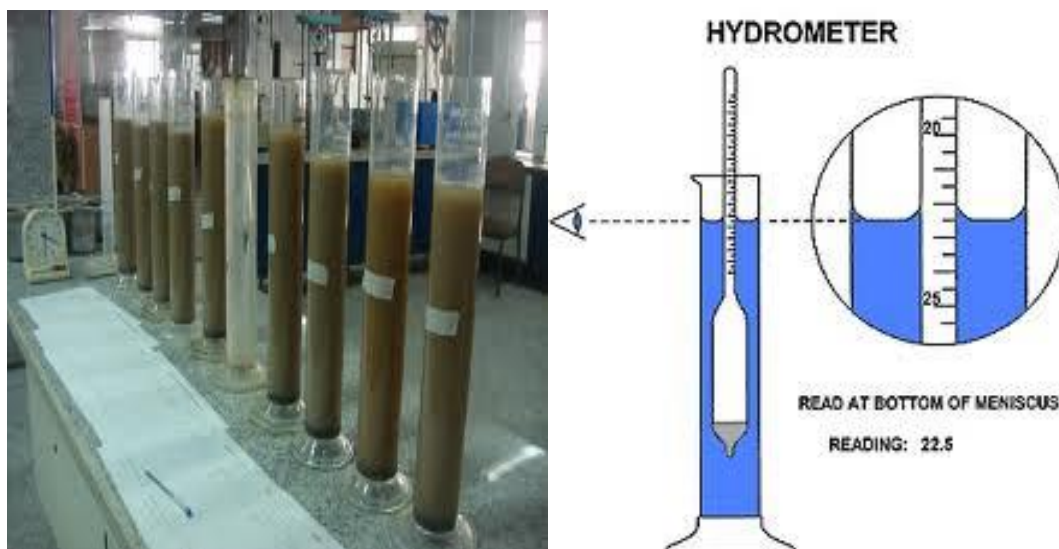


شکل (۳-۱) شماتیک آزمایش دانه بندی با الک

۳-۱-۲ آزمایش هیدرومتری

برای دانه‌های کوچک‌تر از 0.075 میلی‌متر، دانه‌بندی به کمک الک قابل انجام نمی‌باشد، لذا برای این بخش از خاک، به‌منظور تعیین اندازه دانه‌ها، از آزمایش هیدرومتری استفاده می‌گردد. این روش بر اساس اصل ته‌نشینی دانه‌های خاک می‌باشد. وقتی ذرات خاک در آب پراکنده شدند، با سرعت‌های متفاوتی که بستگی به وزن و شکل و اندازه ذرات دارد در آب رسوب خواهند کرد.

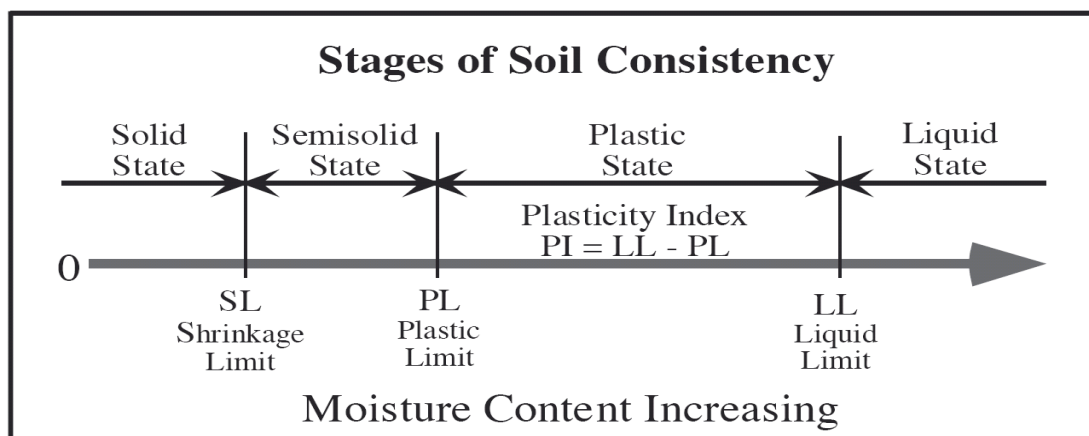
جهت انجام آزمایش هیدرومتری معمولاً از یک استوانه ته‌نشینی استفاده می‌شود و پس از مخلوط کردن نمونه خاک با محلول آب و ماده جداساز، با ثابت قرار دادن استوانه ته‌نشینی به خاک اجازه داده می‌شود تا ته‌نشین گردد. در مدت‌زمان ته‌نشینی برای بازه‌های مختلف زمانی با استفاده از غلظت‌سنج، چگالی مخلوط همگن آب و خاک در مجاورت حباب غلظت‌سنج اندازه‌گیری می‌شود. با فرض کروی بودن دانه‌های خاک و با استفاده از قانون استوک ابعاد دانه‌های خاک تعیین می‌گردد. در شکل ذیل، نمونه‌ای از وسایل مورد استفاده برای آزمایش هیدرومتری نمایش داده شده است.



شکل (۳-۲) شماتیک آزمایش هیدرومتری

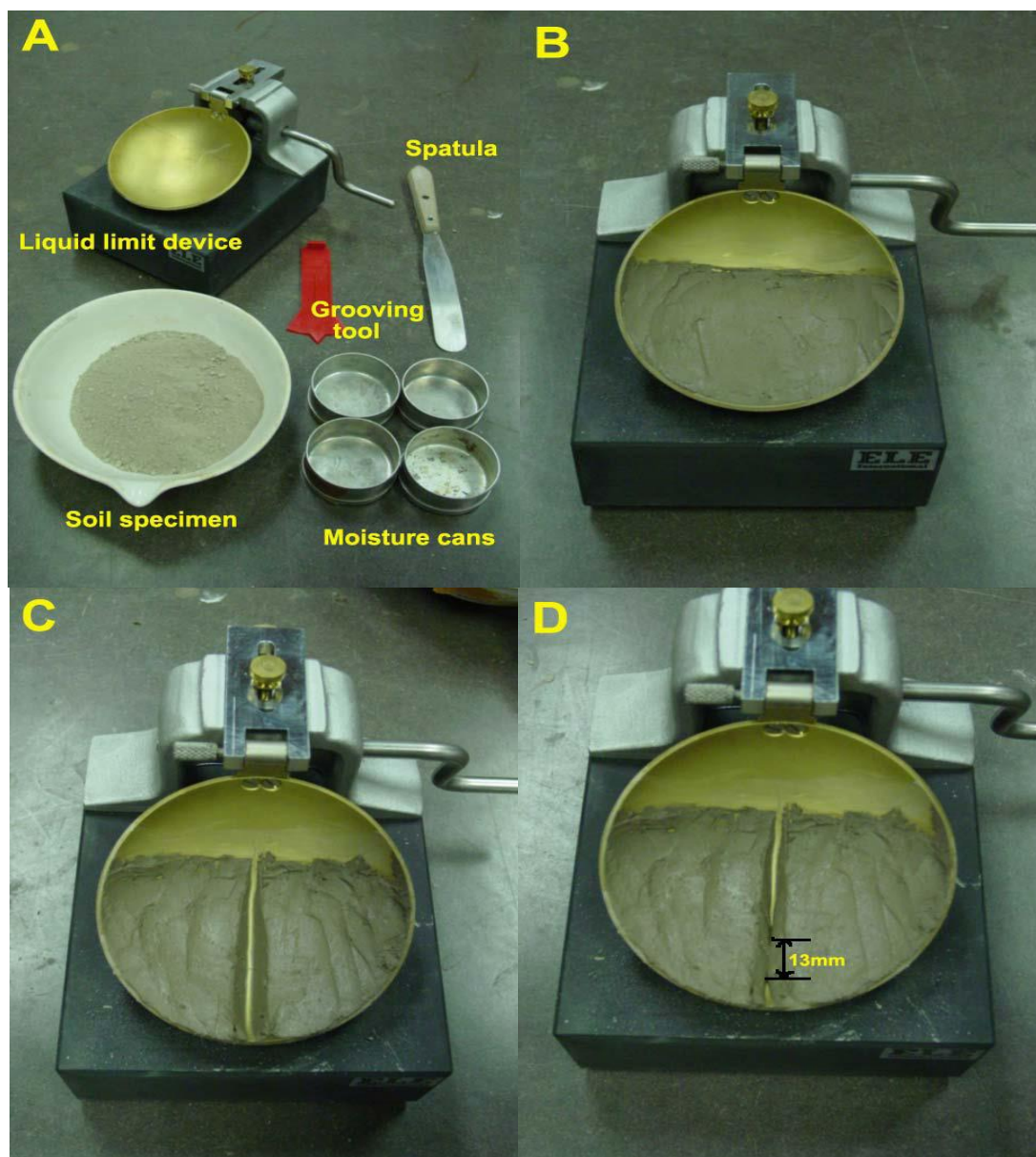
۳-۱-۳ آزمایش تعیین حدود اتربرگ

وقتی کانی‌های رسی در خاک‌های ریزدانه وجود داشته باشد خاک می‌تواند باوجود مقداری رطوبت بدون خرد شدن به‌صورت خمیری در آید. این حالت چسبندگی ناشی از آب جذب‌شده در پیرامون ذرات رس است. در ابتدای دهه ۱۹۹۰ یک دانشمند سوئدی به نام اتربرگ، روشی را برای توصیف حساسیت خاک‌های ریزدانه در ارتباط با تغییر درصد رطوبت آنها ابداع کرد. در درصد رطوبت بسیار کم خاک شبیه به یک جسم سفت (جامد) رفتار می‌کند. وقتی درصد رطوبت بسیار زیاد است خاک و آب شبیه یک مایع به حرکت در می‌آیند؛ بنابراین بر اساس یک اصل قراردادی بسته به درصد رطوبت، طبیعت و رفتار خاک می‌تواند به چهار حالت مهم تقسیم شود که شامل حالت های سفت (جامد) و نیمه سفت (نیمه جامد) و خمیر (پلاستیک) و مایع (روان) می‌باشد. درصد رطوبتی که در آن درصد رطوبت حالت سفت به نیمه سفت تبدیل می‌شود را حد انقباض (SL) می‌نامند. درصد رطوبتی که در آن نقطه، خاک از حالت نیمه سفت به حالت خمیر درمی‌آید را حد خمیری (PL) می‌گویند و به درصد رطوبتی که از حالت خمیری به حالت مایع یا روان تبدیل می‌شود حد مایع یا روانی (LL) اطلاق می‌شود. این حالت‌ها به‌صورت شماتیک در شکل ذیل نشان داده شده است. برای توضیح فیزیکی حالت‌های یک خاک درشت‌دانه از نحوه توزیع دانه‌های خاک استفاده می‌شود ولی این معیارها برای خاک‌های ریزدانه کافی نیست. برای رس‌ها و سیلت‌ها دسته‌بندی معمول حاصل از ویژگی‌های مهندسی مربوط به تغییر شرایط رطوبتی می‌باشد. به طور مرسوم این خصوصیات با میزان سفتی توضیح داده می‌شود. حال روش تجربی اتربرگ بیشتر برای خاک‌های چسبنده کاربرد دارد. وقتی که خاکی چسبنده با مقدار زیادی آب مخلوط می‌شود به یک حالت روانی یا مایع گونه درمی‌آید و مانند یک سیال غلیظ جریان می‌یابد. زمانی که این سیال غلیظ به تدریج خشک شود و رطوبت خود را از دست دهد به یک حالت خمیری یا پلاستیک می‌رسد. با کاهش بیشتر رطوبت خاک به یک حالت نیمه جامد و بعد به حالت کاملاً جامد می‌رسد.



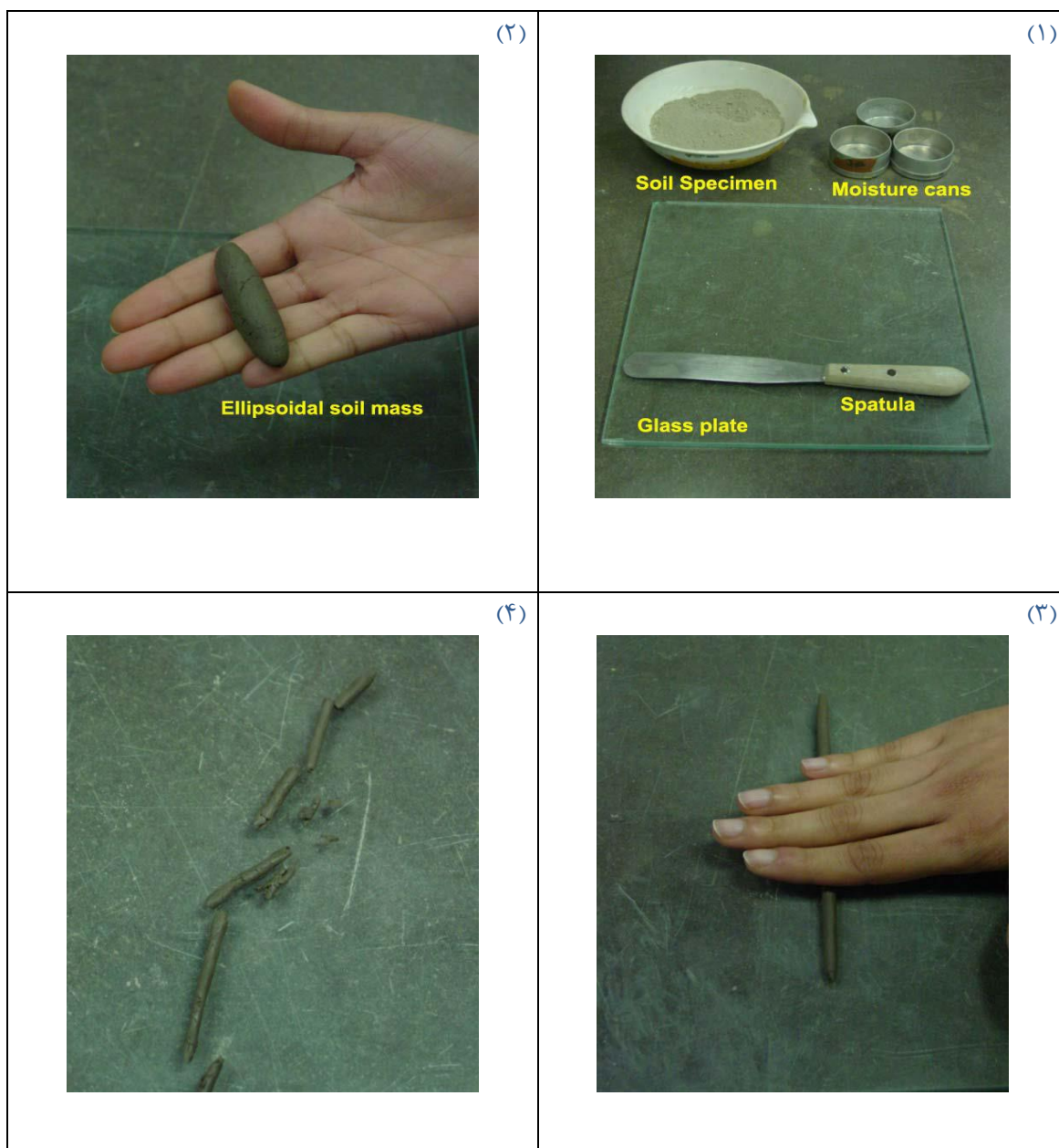
شکل (۳-۳) شماتیک حدود اتربرگ

در این تحقیق آزمایش تعیین حدود اتربرگ طبق استاندارد ASTM D4318 انجام شده است. خلاصه‌ای از نحوه انجام آزمایش، طبق این استاندارد بدین شرح می‌باشد که ابتدا مقداری خاک را از الک شماره ۴۰ (قطر آن ۰/۴۲۵) عبور داده و از آن به مقدار ۳۰۰ تا ۵۰۰ گرم جدا کرده و به مدت ۱۶ ساعت در مجاورت آب قرار داده تا کاملاً رطوبت جذب کند. سپس خاک مرطوب را روی شیشه ریخته و با کاردک عمل خمیرگیری را انجام می‌دهیم تا کاملاً همگن شود. برای آزمایش تعیین حد روانی از دستگاه کاساگرانده استفاده می‌شود. پس از پر کردن کاسه دستگاه کاساگرانده با شیار زن یک شیار روی خاک مرطوب ایجاد می‌کنیم. حد روانی رطوبتی از خاک است که در آن رطوبت، با ۲۵ ضربه دستگاه کاساگرانده، شیار ایجادشده به هم برسد. دستگاه کاساگرانده و نحوه انجام آزمایش در شکل ذیل نشان داده شده است.



شکل (۳-۴) دستگاه کاساگرانده و نحوه انجام آزمایش تعیین حد روانی

جهت به دست آوردن حد خمیری، ابتدا خاک مرطوب را با دست و روی شیشه به صورت فتیله‌هایی به قطر ۳ میلی‌متر درمی‌آوریم، رطوبتی که در آن رطوبت بر روی فتیله‌های ۳ میلی‌متری ترک‌هایی ایجاد گردد، حد خمیری می‌باشد. در شکل (۳-۵)، نحوه انجام آزمایش نشان داده شده است.



شکل (۳-۵) نحوه انجام آزمایش تعیین حد خمیری

۳-۲ آزمایش تراکم

به منظور تعیین تراکم نمونه‌ها جهت انجام آزمایش پین هول و برش مستقیم ابتدا آزمایش‌های تراکم به روش استاندارد بر روی نمونه‌های منتخب طبق استاندارد ASTM D698، می‌شود. این آزمایش به منظور تعیین ارتباط بین درصد رطوبت و وزن مخصوص خشک خاک‌ها، پس از به کار بردن میزان

معینی انرژی کوبشی، حد رطوبت بهینه و ماکزیمم وزن مخصوص خشک خاک را با استفاده از نمودار، نتیجه می‌دهد.

اضافه کردن مقداری آب به خاک خشک باعث می‌شود ذرات راحت تر روی یکدیگر بغلتند و نفوذ تراکم راحت‌تر انجام گیرد در مقابل اگر مقدار این آب از حد معینی بیشتر گردد نیروی (انرژی) واردشده به خاک را گرفته و باعث می‌شود تراکم به خوبی انجام نگیرد؛ بنابراین مقدار بهینه‌ای از رطوبت وجود دارد که خاک در این رطوبت به بهترین شکل متراکم می‌گردد و به بیشترین وزن مخصوص خود می‌رسد. هدف از انجام این آزمایش پیدا کردن این مقدار بهینه آب است.

در مورد تراکم غیر چسبنده (مانند شن و ماسه) می‌توان گفت که این خاک‌ها معمولاً از ذرات درشت‌دانه و نسبتاً کروی شکل تشکیل می‌شوند و درجه ترکم آنها بستگی به طرز قرار گرفتن ذرات در کنار یکدیگر دارد. از آنجایی که ذرات تقریباً غیرقابل تغییر شکل و تراکم ناپذیر هستند استفاده از ارتعاش و لرزه بهترین وسیله جهت متراکم کردن این گونه خاک‌ها می‌باشد.

در خاک‌های ریزدانه چسبنده (مانند سیلت و رس) به علت ساختمان ویژه ذرات ریزدانه چسبنده، تراکم آنها به وسیله ارتعاش مقدور نیست و بار یا فشار استاتیک بهترین وسیله برای تراکم این گونه خاک‌هاست. برای نشان دادن تراکم‌پذیری این گونه خاک‌ها تحت فشار می‌توان مقداری آب به توده‌ای از خاک میکا افزود و آن را در یک لیوان قرارداد.

چنانچه با یک استوانه فلزی مقداری فشار روی سطح خاک در لیوان وارد آید مشاهده خواهد شد که سطح خاک نشست قابل‌ملاحظه‌ای نموده است یعنی تحت تأثیر فشار استاتیک متراکم شده است. با انرژی های مختلف می‌توان تراکم های مختلف داشته باشیم. از طرفی برای تراکم کردن خاک می‌توان رطوبت را نیز زیاد کرد؛ و برای این که پروژه‌ای از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد باید مقدار رطوبت به حد ایتیمم باشد. در هنگام ساخت و اجرای بزرگراه‌ها و فرودگاه‌ها و سازه‌های دیگر متراکم کردن خاک یک امر ضروری جهت بهبود مقاومت خاک می‌باشد.

در سال ۱۹۳۳، آقای پراکتور چهارمقاله در مورد تراکم نمودن خاک منتشر نمود و در دومین مقاله‌اش به تراکم پراکتور استاندارد پرداخت. البته در روش ابداعی پراکتور در آن سال به جای سقوط چکش از ارتفاع ۱۲ اینچی، از ضربات محکم چکش استفاده می‌شد. این آزمایش به سه روش انجام می‌پذیرد که استفاده از قالب‌هایی با اندازه‌های مختلف علیرغم یکسان بودن انرژی در واحد حجم، منجر به حصول جواب‌هایی با اختلاف جزئی می‌گردد. ضمناً، آزمایش‌های تراکم به جز در مورد اندازه قالب و انرژی تراکم به کار گرفته‌شده در بقیه موارد همگی شبیه به هم هستند. شکل زیر نمونه‌هایی از قالب و چکش تراکم را نمایش می‌دهد.



شکل (۳-۶) نمونه‌هایی از قالب و چکش تراکم

در آزمایش پراکتور استاندارد خاک در قالب به حجم ۹۴۴ سانتی‌متر مکعب (1.30 ft^3) تراکم می‌گردد. خاک با مقادیر مختلف آب (در هر مرحله حدود ۲ درصد وزن خشک نمونه در حال تراکم، آب اضافه می‌کنیم) مخلوط شده سپس در سه لایه مساوی تراکم می‌شود. تراکم هر لایه با ۲۵ ضربه انجام می‌گیرد. وزن چکش ۲٫۵ کیلوگرم بوده و از فاصله ۳۰٫۵ میلی‌متری فرود می‌آید. در این شرایط

انرژی معادل 600 KN.m/m^3 ایجاد می‌گردد. حداکثر وزن مخصوص خشک زمانی برای یک رطوبت مشخص، حاصل می‌شود که هیچ هوایی در فضای خالی وجود نداشته باشد. (حالت حفره‌های هوای صفر).



شکل (۳-۷) نمایی شماتیک از آزمایش تراکم

۳-۳ آزمایشات مربوط به تشخیص واگرایی خاک

از زمان شناخته شدن پدیده واگرایی تا به امروز، کوشش‌های فراوانی در زمینه ابداع روش‌هایی جهت تشخیص خاک‌های واگرا به عمل آمده است. شناسایی خاک‌های واگرا شامل مراحل زیر است:

الف - شناخت کلی خاک‌های واگرا در بررسی‌های مقدماتی صحرایی

ب - شناسایی خاک‌های واگرا در آزمایشگاه.

۳-۳-۱ شناسایی خاک‌های واگرا در بررسی‌های محلی

این مرحله از شناسایی در بازدیدهای مقدماتی از محل و در ضمن بررسی‌های اولیه زمین‌شناسی در سطح منطقه صورت می‌پذیرد. در پروژه‌های سدسازی، به‌ویژه در انتخاب منابع قرضه برای سدهای خاکی، بررسی زمین از جهت وجود خاک‌های واگرا باید بخشی از بررسی‌های کلی را تشکیل دهد.

در جاهایی که سطح زمین شیب نسبتاً تندی دارد، شناسایی خاک های واگرا آسان تر است. در این مناطق، بر اثر بارندگی ها و فرسایش سریع، بریدگی های بسیار عمیق و مشخصی در سطح زمین به وجود می آید که مشخصه اصلی این گونه خاک هاست. از سوی دیگر در مناطق مسطح و کم شیب، تشخیص خاک های واگرا به سادگی میسر نیست. در این مناطق بر اثر بارندگی، ذرات رس های واگرا شسته می شوند و لایه ای از ماسه لای دار یا لای ماسه ای در سطح زمین باقی می ماند که لایه های عمیق تر را محافظت می کند، در نتیجه مشخصه بارز خاک های واگرا را که فرسایش و بریدگی های عمیق است، نمی توان در سطح زمین مشاهده نمود. بدین ترتیب عدم وجود علائم آب شستگی و فرسایش در سطح زمین، به معنای عدم وجود خاک های واگرا در منطقه نیست (عسکری و فاخر، ۱۳۷۳).

به دلیل آن که تمایل کانی های رسی به جذب کاتیون های دو ظرفیتی کلسیم و منیزیم بیشتر از کاتیون یک ظرفیتی سدیم است، رس های سدیم دار واگرا از دیگر انواع رس ها در طبیعت کمیاب تر می باشند، لیکن این بدان معنی نیست که رس های واگرا در طبیعت کمیاب اند، بلکه برعکس این رس ها به فراوانی در نقاط مختلف زمین یافت می شوند. (عسکری و فاخر، ۱۳۷۳)

معمولاً در مناطق دربردارنده خاک های واگرا آثار آب شستگی از قبیل کانال های تنگ و عمیق طبیعی (Erosion Gullies)، خلل و فرج و حفره های بزرگ با دیواره های عمودی (Sink Holes)، جویبار، تونل و آب شستگی های کوزه ای شکل دیده می شود (عسکری و فاخر، ۱۳۷۳) (شکل ۳-۸).



شکل (۳-۸) نمونه ای از آب شستگی در خاک منطقه

آثار سطحی را در صورت وجود می‌توان در بستر جریان آب های سطحی و آب باران، در شیب های طبیعی و شیب های حاصل از خاک‌برداری یا خاک‌ریزی مشاهده کرد. دیواره عمودی حفره‌ها و کانال های حاصل از آب شستگی، از نزدیک بسیار شبیه دیواره غارها و حفره‌هایی است که بر اثر حل شدن سنگ های آهکی در آب به وجود می‌آیند. یکی از مشخصات بارز کانال های ناشی از آب شستگی در خاک های واگرا، مسیر پر پیچ و خم آنها است که مانند مآندرهای به وجود آمده در بستر رودخانه‌ها می‌باشد. معمولاً زاویه خمش مسیر این کانال‌ها حدود ۹۰ درجه است. (عسکری و فاخر، ۱۳۷۳)

اینگلز (Ingles) و وود (Wood)، دو تن از پژوهشگران استرالیایی، جهت شناسایی مقدماتی خاک های رس واگرا از روش نسبتاً سودمندی استفاده می‌کردند. آنها با هواپیمای سبکی در منطقه مورد نظر پرواز و حدود مناطقی را که آب های جاری در آنها کدر بودند، مشخص می‌کردند. این مناطق از نظر آب شستگی در خاک های واگرا، مشکوک در نظر گرفته می‌شدند (عسکری و فاخر، ۱۳۷۳).

۳-۲-۳ آزمایش های متداول در شناسایی خاک های واگرا

شناسایی کامل و دقیق خاک های واگرا در محل و بدون به انجام رساندن آزمایش های آزمایشگاهی مخصوص عملاً مشکل و تقریباً غیرممکن است. به همین دلیل بسیاری از محققان تلاش نموده اند تا آزمایش های مختلفی را به این منظور عرضه نمایند و در این میان، فعالیت های سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) از همه چشم گیر تر است.

خاک های واگرا به کمک آزمایش هایی نظیر دانه بندی و حدود اتربرگ که به طور معمول در آزمایشگاه های مکانیک خاک برای طبقه بندی خاک ها از آن ها استفاده می شود، تشخیص داده نمی شوند، لذا بدین منظور از آزمایش های ویژه ای استفاده می گردد. متداول ترین آزمایش های شناسایی خاک های واگرا عبارتند از:

۱- آزمایش پین هول

۲- آزمایش تعیین درصد نمک های محلول در آب منفذی (آزمایش های شیمیایی)

۳- آزمایش هیدرومتری دوگانه

۴- آزمایش کرامب

آزمایش های هیدرومتری دوگانه و کرامب، آزمایش های نسبتاً ساده ای هستند که به کمک آن ها پتانسیل واگرایی در نمونه های مورد آزمایش تخمین زده می شود. معمولاً در صورتی که در این دو آزمایش، نمونه واگرا تشخیص داده شود، خاک واگراست، اما عکس این مطلب صادق نیست. یعنی واگرا نبودن نمونه مورد مطالعه در این دو آزمایش دلیلی بر واگرا نبودن خاک نخواهد بود. آزمایش های شیمیایی نیز آزمایش های متداولی هستند که کارشناسان خاک در رشته های کشاورزی به خوبی با آن ها آشنا می باشند، لیکن در حال حاضر مهندسان راه و ساختمان آشنایی کمتری با آن ها دارند. در آزمایش پین هول، جریان متمرکز آب در ترک های درون خاک مدل می گردد و در حال حاضر این آزمایش بهترین روش شناسایی خاک های واگراست. در بیشتر موارد، نتایج حاصل از روش های

مختلف یکسان است اما موارد استثنایی نیز وجود دارد و به همین دلیل بهتر است هر چهار آزمایش مذکور را که نسبتاً ساده و کم هزینه هستند بر روی خاک مورد نظر انجام داد.

شایان ذکر است که برای تشخیص خاک های واگرا در یک منطقه، باید آزمایش های واگرایی بر روی تعداد نمونه های نسبتاً زیادی انجام شود، زیرا در بسیاری از مناطق، این خاک ها به صورت موضعی و در ناحیه ای کوچک مشاهده می شوند و ممکن است که درصد کمی از خاک منطقه مورد بررسی را تشکیل دهند (عسکری و فاخر، ۱۳۷۳).

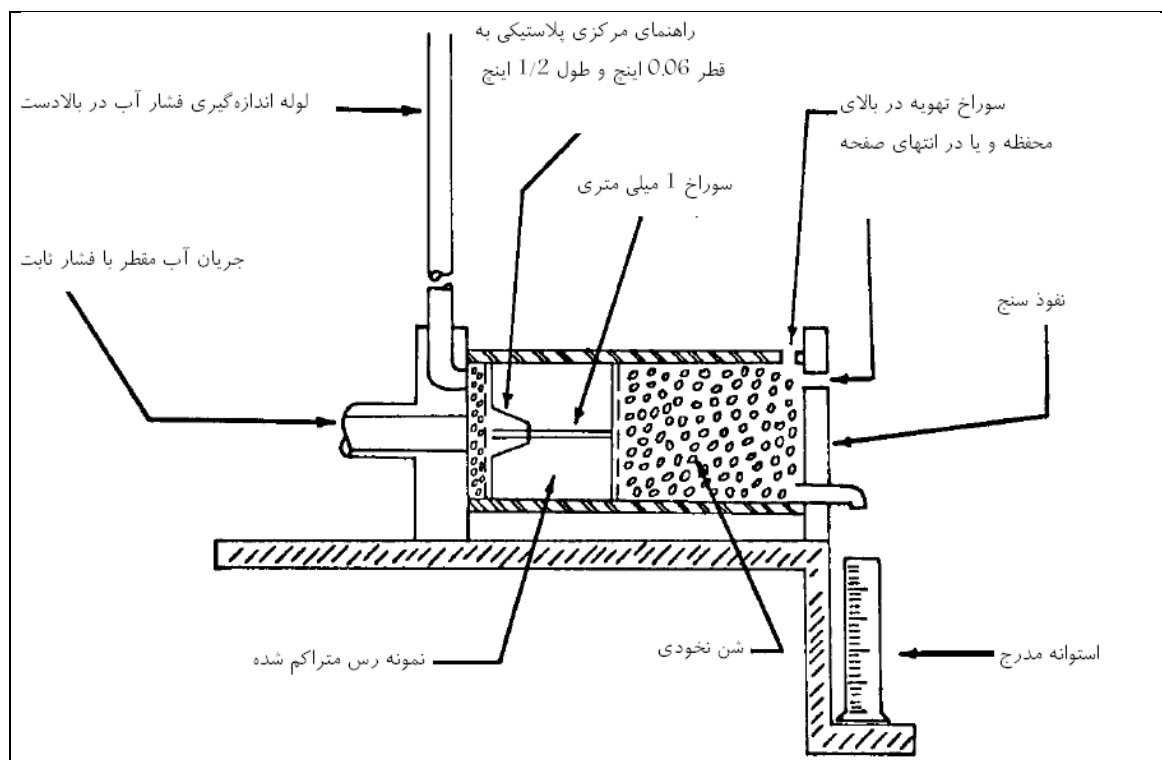
همچنین لازم است که رطوبت طبیعی نمونه ها در تمامی مراحل نمونه گیری، حمل و نگهداری تا زمان انجام یافتن آزمایش حفظ شود. چنان که خواهیم دید، خشک شدن نمونه در هوا ممکن است باعث تغییر نتایج آزمایش شود.

۳-۲-الف آزمایش پین هول

آزمایش پین هول را شرارد و همکارانش در سال ۱۹۷۳ ابداع و نتایج حاصل از آن را طی مقاله ای در سال ۱۹۷۶ ارائه کردند. در این آزمایش که به آزمایش شرارد نیز معروف است میزان واگرایی خاک های ریزدانه مستقیماً با عبور دادن آب از داخل سوراخی که در نمونه خاک ایجاد می گردد اندازه گیری می شود. آبی که از داخل نمونه های خاک های واگرا خارج می شود کدر و دارای ذرات کلوئیدی است، اما در نمونه های غیر واگرا، آب مذکور زلال و شفاف است.

انگیزه اصلی ابداع آزمایش پین هول، مدل کردن جریان متمرکز آب در سدهای رسی و مطالعه آن در آزمایشگاه بوده است. مقایسه نتایج آزمایش های مختلفی که تاکنون برای شناسایی خاک های واگرا عرضه شده با آب شستگی های مشاهده شده در طبیعت نشان داده است که نتایج آزمایش پین هول در اکثر موارد با مشاهدات مذکور هماهنگ بوده است. به همین دلیل در حال حاضر آزمایش پین هول مطمئن ترین روش موجود برای ارزیابی پتانسیل واگرایی در خاک ها به شمار می رود.

در شکل (۳-۱۰)، نمای کلی دستگاه پین هول مشاهده می‌گردد. در این آزمایش، نمونه خاک در استوانه‌ای به قطر دلخواه بر روی ماسه درشت‌دانه و توری سیمی که قبلاً در سلول آزمایش قرار داده شده‌اند متراکم می‌گردد. ارتفاع نمونه مورد آزمایش باید ۳۸ میلی‌متر باشد. به کمک سوزنی به قطر یک میلی‌متر که از هادی سوزن عبور داده می‌شود، سوراخی در امتداد محور طولی نمونه ایجاد می‌گردد. سپس دستگاه در وضعیتی قرار داده می‌شود که این سوراخ افقی باشد (شکل ۳-۹). در این مرحله، آب مقطر را به ترتیب تحت بارهای آبی ۵۰، ۱۸۰، ۳۸۰ و ۱۰۲۰ میلی‌متر و در مدت‌زمانی معین از سوراخ نمونه عبور می‌دهند و مقدار آب و رنگ آن را پس از خروج نمونه مورد بررسی قرار می‌دهند. همچنین در پایان آزمایش نمونه خاک را از داخل استوانه درآورده نحوه آب شستگی و قطر نهایی سوراخ را ثبت می‌کنند. به طور کلی می‌توان چنین گفت که اگر نمونه خاک تحت بار آبی ۵۰ میلی‌متر به آسانی شسته شود و محلولی کلونیدی از آن خارج گردد، خاک واگراست. در صورتی که نمونه تحت بار آبی ۵۰ تا ۱۸۰ میلی‌متر به آهستگی شسته شود و آب خارج شده گل آلود باشد، خاک به طور متوسط واگراست و در نهایت اگر نمونه مورد آزمایش تحت بار آبی ۳۸۰ و ۱۰۲۰ میلی‌متر شسته نشده و آب خارج شده از آن زلال باشد، خاک غیر واگراست.



شکل (۳-۹) شمای دستگاه پین هول



شکل (۳-۱۰) نمای کلی دستگاه پین هول

هرچه میزان املاح آب در تماس با خاک های رس (آبی که به طور متمرکز در داخل توده رس جریان می یابد) کمتر باشد، تمایل این خاک ها به حل شدن در آب و تشکیل محلول کلوئیدی بیشتر می گردد.

تغییرات میزان املاح آبی که در خاک جریان دارد ممکن است تأثیر زیادی در نتایج آزمایش داشته باشد. به همین دلیل در آزمایش پین هول از آب مقطر استفاده می شود. متأسفانه برخی از آزمایش کنندگان بدین امر توجه ندارند و از آب شرب به جای آب مقطر استفاده می کنند. البته در صورت لزوم، می توان آزمایش را با آب موجود در محل نیز انجام داد و نتایج آن را با نتایج به دست آمده از آزمایش های انجام شده با آب مقطر مقایسه کرد، لیکن نتایج آزمایش با آب شرب را به ویژه در پروژه های با اهمیت نمی توان چندان دقیق قلمداد نمود.

نتایج آزمایش پین هول بر روی رس هایی که در آن ها میزان سدیم زیاد بوده، نشان داده است که این گونه رس ها در این آزمایش به سرعت شسته می شوند. بالعکس رس های با سدیم کم در مقابل شسته شدن و فرسایش مقاوم بوده اند. در مواردی معدود رس هایی که در آن ها میزان سدیم بسیار کم بوده در این آزمایش به سرعت شسته شده اند. دلیل این مسئله به خوبی مشخص نشده است. البته نتایج آزمایش های دیگر بر روی برخی از این رس ها نشان داده است که آن ها واگرا نبوده اند.

در خاک های واگرا یا غیر واگرا، معمولاً نتایج آزمایش های متعدد پین هول بر روی نمونه ای خاص، یکسان است اما در خاک های به طور متوسط واگرا نتایج این آزمایش ها ممکن است کمی باهم متفاوت باشند.

بهتر است که درصد رطوبت نمونه از زمان نمونه گیری تا هنگامی که مورد آزمایش قرار می گیرد حفظ شود و وضعیت رطوبت و چگالی خاک در زمان آزمایش، مطابق با شرایطی باشد که در عمل از خاک استفاده خواهد شد.

۳-۳-۲-ب آزمایش های شیمیایی

بررسی علل خرابی های ناشی از آب شستگی در خاک های رسی نشان داده است که بین خواص شیمیایی خاک های رس و وقوع پدیده رگاب در آن ها ارتباط بسیار نزدیکی برقرار است. آزمایش های شیمیایی مورد استفاده در این پژوهش ها، در رشته های وابسته به کشاورزی بسیار معمول و متداول اند و کارشناسان خاک به خوبی با آن ها آشنا هستند، لیکن در حال حاضر، اکثر مهندسان راه و ساختمان با این آزمایش ها چندان آشنایی ندارند. آزمایش های شیمیایی به دو بخش اصلی تقسیم می شوند:

گروه اول، آزمایش هایی هستند که بر روی آب منفذی خاک انجام می شوند. در این آزمایش ها نمونه ای از خاک رس با رطوبت طبیعی تهیه شده میزان رطوبت آن با افزودن آب مقطر به حد روانی رسانده می شود. خمیر حاصل چند ساعت به حال خود رها می شود تا بین نمک های موجود در آب منفذی و کاتیون های موجود در خاک تعادل برقرار شود. سپس به منظور انجام دادن آزمایش های شیمیایی لازم، مقدار بسیار کمی (در حدود ۱۰ تا ۲۵ سانتیمتر مکعب) از آب منفذی خمیر به دست آمده را از آن جدا می سازند این عمل معمولاً با ایجاد خلاء و استفاده از یک صافی انجام می شود.

آب منفذی خارج شده از نمونه به شیره اشباع یا عصاره اشباع موسوم است. سپس میزان مهم ترین کاتیون های فلزی (کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم) در آن بر حسب میلی اکوی والان در لیتر تعیین می گردد. یکی از کمیت های مهمی که از نتایج این آزمایش ها به دست می آید نسبت جذب سدیم (SAR) است. این کمیت از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca+Mg}{2}}} \quad (1-3)$$

در رابطه فوق منظور از Na و Ca و Mg به ترتیب غلظت نمک های سدیم ، کلسیم و منیزیم در شیره اشباع بر حسب میلی اکوی والان در لیتر است . باید ذکر کرد که مجموع چهار کاتیون سدیم ، پتاسیم ، منیزیم و کلسیم یک نمونه خاک را اصطلاحاً (Total Dissolved Salts) TDS می نامند.

در آزمایش نوع دوم ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC) را بر حسب میلی اکی والان در ۱۰۰ گرم خاک خشک اندازه می گیرند. با استفاده از نتایج آزمایش های مذکور، "درصد سدیم تبدلی (ESP)" خاک از رابطه زیر به دست می آید:

$$ESP = \frac{\overline{Na}}{CEC} \quad (2-3)$$

Na در رابطه فوق معرف مقدار سدیم تبدلی است و بر حسب میلی اکی والان در ۱۰۰ گرم خاک خشک می باشد. بر اساس تحقیقات انجام شده، در خاک های واگرایی که TDS آنها بین ۰/۵ تا ۳ میلی اکی والان در لیتر باشد، $SAR > 2$ و $ESP > 10$ است.

SAR و ESP دو معیار مهم هستند و به کمک آنها می توان در مورد مقدار نسبی سدیم در خاک قضاوت کرد. این دو کمیت به طور نظری به یکدیگر مربوط هستند و نشان داده شده است که در بیشتر خاک ها، همبستگی نسبتاً خوبی بین آنها برقرار است. بر همین اساس به عقیده پژوهشگران استرالیایی برای شناسایی خاک های واگرا، تعیین نسبت جذب سدیم (SAR) کافی است و درصد سدیم تبدلی را می توان از روی رابطه همبستگی بین دو کمیت تخمین زد.

شرارد نیز در قسمتی از مطالعات خود، نمونه های خاک سدهایی را که بر اثر آب شستگی های داخلی با سطحی تخریب شده و یا به شدت آسیب دیده بودند مورد آزمایش شیمیایی قرار داده است. در این آزمایش ها درصد سدیم که از رابطه زیر به دست می آید، تعیین گردید:

$$\text{درصد سدیم (P.S)} = \frac{Na}{Ca+Mg+Na+K} \times 100 \quad (3-3)$$

واحد کمیت ها در رابطه فوق میلی اکی والان در لیتر شیره اشباع است. درصد سدیم با نسبت جذب سدیم در ارتباط است و بیش از آن کاربرد دارد، زیرا ضمن ساده تر بودن، مستقیماً میزان سدیم را در شیره اشباع مشخص می کند.

۳-۲-۳ ج آزمایش هیدرومتری دوگانه

این آزمایش را ولک (Volk) در سال ۱۹۳۷ عرضه کرده و به نام آزمایش SCS نیز شهرت دارد .
آزمایش مذکور اولین آزمایشی است که به منظور شناسایی خاک های واگرا به کاربرده شده و از زمان
آغاز استفاده از این آزمایش تاکنون در بسیاری از پروژه ها به کار گرفته شده است.

در این آزمایش ابتدا دانه بندی خاک به روش استاندارد آزمایش هیدرومتری یعنی با استفاده از هم زن
مکانیکی و ماده شیمیایی پراکنده ساز ، تعیین می گردد و سپس روی نمونه دیگری از همان خاک ،
آزمایش هیدرومتری دیگری بدون استفاده از هم زن مکانیکی و ماده شیمیایی پراکنده ساز انجام
می شود. درصد ذرات کوچک تر از 0.075 میلی متر در هر دو آزمایش تعیین و سپس " درصد واگرایی
(Percent Dispersion) " که برابر است با نسبت درصد ذرات کوچک تر از 0.075 میلی متر در
آزمایش دوم به درصد همین ذرات در آزمایش اول ، محاسبه می گردد

روش هیدرومتری ، روشی متداول در تعیین دانه بندی خاک های ریزدانه است و آزمایش هیدرومتری
دوگانه را به راحتی می توان در هر یک از آزمایش های مکانیک خاک انجام داد .

نتایج بررسی های انجام شده حاکی از آن بوده که احتمال فرسایش و آب شستگی رس های با درصد
واگرایی بیش از ۴۰ بسیار زیاد است .

حد مذکور به نوع خاک نیز وابسته است . دکر (Decker) پیشنهاد نموده است که در رس های غیر
آلی ، حد فوق در حدود ۴۰ درصد و در سیلت های با خاصیت خمیری کم ، ماسه های رس دار (SC)
و ماسه های لای دار (SM) در حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد در نظر گرفته شود.

شرارد نیز معیارهای زیر را جهت تعیین پتانسیل واگرایی خاک ها با کمک نتایج آزمایش هیدرومتری
دوگانه ، پیشنهاد کرده است.

۱ - چنان چه درصد واگرایی در اکثر آزمایش های انجام شده بر روی ده نمونه ، از ۴۰ تا ۵۰ درصد بیشتر باشد ، خاک به شدت واگراست و احتمالاً نیازی به انجام یافتن آزمایش های شیمیایی نیز نخواهد بود .

۲ - اگر نتایج بیشتر آزمایش ها در محدوده بین ۲۰ تا ۴۰ درصد قرار گیرد و در یک یا دو نمونه درصد واگرایی بیش از ۵۰ درصد باشد ، خاک مورد مطالعه به طور متوسط واگراست .

۳ - معمولاً درصد واگرایی رس های عادی در حدود ۱۰ تا ۴۰ درصد است ، اما در برخی از رس های به شدت واگرا باوجود وقوع فرسایش و آب شستگی های داخلی ، درصد واگرایی کمتر از ۴۰ درصد بوده است . لذا در چنین مواردی لازم است که آزمایش های شیمیایی نیز بر روی شیره اشباع انجام شود.

۴ - درصد واگرایی رس های به شدت مقاوم در مقابل شسته شدن ، معمولاً بین ۰ تا ۱۵ درصد است . اگر نتایج همه آزمایش ها در این محدوده قرار گیرد ، به احتمال قریب به یقین ، خاک غیر واگراست . باوجود این انجام دادن چند آزمایش شیمیایی بر روی شیره اشباع جهت حصول اطمینان لازم است .

باید توجه داشت که توصیه های شرارد را در مواردی که میزان املاح محلول در آب مخزن سد از ۵ میلی اکسی والان در لیتر کمتر باشد ، می توان به کار گرفت . بدون شک ، چنان که نتایج مطالعات محققان استرالیایی نشان داده است ، هرچه میزان املاح محلول در آب مخزن سد بیشتر باشد احتمال وقوع پدیده رگاب کمتر می گردد.

یکی از نکات مهمی که لازم است در آزمایش هیدرومتری دوگانه بدان توجه شود، تأثیر احتمالی کم شدن رطوبت نمونه در نتایج آزمایش است. نتایج بررسی های انجام شده در این زمینه حاکی از آن بوده که در برخی موارد پس از نمونه گیری از خاک در محل، رطوبت آن ها بر اثر قرار گرفتن در معرض

هوا کاهش یافته و به همراه آن از درصد واگرایی خاک در آزمایش هیدرومتری دوگانه کاسته شده است.

۳-۲-۲-د آزمایش کرامب

آزمایش کرامب نخستین بار در سال ۱۹۶۷ در استرالیا مورد استفاده قرار گرفته و به آزمایش امرسون نیز معروف است. در این آزمایش بسیار ساده که می توان آن را به راحتی در محل نیز انجام داد. ابتدا تکه کوچکی از خاک (به قطر ۶ تا ۹ میلی متر) در داخل ظرفی حاوی ۱۵۰ سانتیمتر مکعب آب مقطر انداخته می شود. پس از ۵ تا ۱۰ دقیقه میزان جدا شدن ذرات رس از نمونه و تشکیل محلول کلوئیدی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته و واکنش ذرات خاک در مقابل آب، به یکی از صور زیر بیان می شود:

۱ - بدون واکنش: در این حالت ذرات خاک از یکدیگر جدا و در ته ظرف ته نشین می شود، اما رنگ آب تغییر نمی کند و محلول کلوئیدی تشکیل نمی شود.

۲ - واکنش خفیف: رنگ آب در مجاورت سطح خاک کمی تغییر می کند.

۳ - واکنش متوسط: تغییر رنگ کم آب را در تمامی ظرف می توان به راحتی تشخیص داد. این تغییر رنگ، معمولاً در مجاورت سطح خاک محسوس تر است.

۴ - واکنش شدید: رنگ آب به دلیل تشکیل محلول کلوئیدی و تا فاصله زیادی از سطح خاک کاملاً تغییر می کند و گاهی تمام آب درون ظرف کدر می شود.

در اغلب خاک ها چگونگی آب مورد استفاده و دست خوردگی نمونه مورد مطالعه تأثیر چندانی در نتایج آزمایش ندارد، اما در مواردی محدود قرار گرفتن نمونه ها در معرض هوا و در نتیجه خشک شدن آن ها باعث تغییر نتایج آزمایش شده است.

از آزمایش کرامب برای تخمین تقریبی و سریع درصد واگرایی در آزمایش هیدرومتری دوگانه نیز استفاده شده است. بدین منظور ابتدا بر روی تعدادی از نمونه‌ها که درصد واگرایی آن‌ها با استفاده از آزمایش هیدرومتری دوگانه تعیین شده است، آزمایش کرامب نیز انجام می‌یابد و سپس با انجام دادن این آزمایش ساده بر روی سایر نمونه‌ها و مقایسه رنگ آب در آن‌ها با نمونه‌هایی که قبلاً بر روی آن‌ها آزمایش شده است، درصد واگرایی تخمین زده می‌شود. از روش فوق در تایلند جهت تخمین سریع درصد واگرایی خاک در محل استفاده شده و نتایج حاصل از کاربرد آن از نظر اقتصادی بسیار سودمند بوده است..

تجربه نشان می‌دهد که بعضی از خاک‌های واگرا در این آزمایش از خود واکنشی نشان نمی‌دهند. از جمله درحالی‌که مونت موریلونیت‌های واگرا غالباً به وسیله این آزمایش تشخیص داده می‌شوند، در مواردی مشاهده شده است که رس‌هایی از نوع کائولینیت که در آزمایش پین هول واگرا بوده‌اند، در آزمایش کرامب از خود واکنشی نشان نداده‌اند.

در مجموع اگر خاکی در آزمایش کرامب از خود واکنش نشان دهد به احتمال زیاد واگراست، اما عدم واکنش در این آزمایش به معنای غیر واگرا بودن خاک نخواهد بود. (Sherard, 1979)

۳-۴ آزمایش تعیین مقاومت برشی خاک‌های چسبنده

یکی از قدیمی‌ترین آزمایش‌های تعیین مقاومت برشی خاک‌های تحکیم شده چسبنده، آزمایش برش مستقیم است در این آزمایش تنش‌های وارد بر سطحی که در آن گسیختگی رخ می‌دهد در سراسر آزمایش مستقیماً کنترل می‌شود. دستگاه برش مستقیم اساساً مرکب از یک قوطی که در جهت افقی به دو قسمت تقسیم شده است قسمت پایین به طور ثابت به پایه دستگاه اتصال یافته و بدون حرکت است در حالیکه قسمت بالایی آزاد است و می‌تواند در هر دو جهت افقی و قائم حرکت کند که مقدار حرکت را می‌توان بوسیله گیج اندازه‌گیری نمود. مقاومت برشی توده خاک، مقاومت داخلی واحد سطح آن خاک است که می‌تواند برای مقابله با گسیختگی یا لغزش در امتداد هر صفحه داخلی بروز

دهد. برای تحلیل مسائل پایداری خاک نظیر ظرفیت فشاری، پایداری شیروانیها و فشار جانبی بر روی سازه های حائل خاک، لازم است طبیعت مقاومت برشی بخوبی شناخته شود. آزمایش برش مستقیم یک نمونه از آزمایشهای تعیین مقاومت برشی خاک می باشد این آزمایش روی نمونه تحکیم شده زهکشی شده انجام می شود و هدف از آن تعیین c و T در خاکها می باشد .

در خاکهای ماسه ای متراکم نمودار صعود می کند بعد به یک نقطه (peak) می رسد که بعد از این نقطه خاک نرم می شود و نزول می کند هر چه ماسه متراکم تر باشد شیب نمودار بیشتر می شود چون سختی آن بیشتر می شود پس خاک ماسه ای متراکم تمایل به اتساع (dilation) دارد. اتساع یعنی افزایش حجم ناشی از تنش برشی. خاک متراکم وقتی تحت برش قرار می گیرد ابتدا یک مقدار متراکم می شود اما بعد دانه ها شروع به راندن یکدیگر می کنند (مثل شخصی که میخواهد از جمعیتی عبور کند پس باید به اطراف فشار بیاورد) پس تمایل به افزایش حجم پیدا می کند و اصطکاک کمتر می شود و با افت مقاومت برشی مواجه هستیم و خاصیت نرم شوندگی از خود نشان می دهد. بنابراین خاک ماسه ای متراکم تمایل به اتساع دارد. در خاکهای ماسه ای شل وقتی تحت برش قرار می گیرد متراکم می شود و کاهش حجم می دهد.

۳-۴-۱ وسایل آزمایش

۱- جعبه برش به همراه سنگ متخلخل و صفحه سربار ۲- دستگاه برش مستقیم که شامل دستگاههای بارگذاری برشی به وسیله موتور ، بارگذاری قائم به وسیله وزنه و شامل گنج های عمودی ، افقی و نیروسنج است ۳- نمونه با داشتن وزن مخصوص ۴- ترازو ۵- کرنومتر ۶- کولیس ۷- تراز ۸- الک ۴ .

۳-۴-۲ شرح آزمایش

آزمایش جعبه برش به دو طریق می تواند انجام شود:

۱. با کنترل تنش: با مساوی بودن نیروی برشی، تغییر شکل را در مراحل مختلف اندازه می گیرند.

۲. با کنترل تغییر شکل: تغییر شکل‌ها را اعمال می‌کنند و نیروی برشی نظیر هرکدام را بدست می‌آورند .

برای نمونه‌گیری ابتدا خاک را داخل جعبه برش می‌کوبیم اگر بخواهیم نمونه‌گیری را به صورت طبیعی تهیه کنیم یا باید خاک را از محل گرفته و به اندازه جعبه برش در آورده داخل آن می‌گذاریم. یا خاک را در جعبه برش به تراکم طبیعی برسانیم. پیچ‌های جعبه برش را بسته و سنگ متخلخل را داخل آن قرار داده و ابعاد آنرا توسط کولیس اندازه می‌گیرند تا حجم جعبه برش بدست‌آید از ارتفاع حدود ۲ میلی‌متری متراکم می‌کنند و حجم جعبه را به دست می‌آورده و با داشتن وزن مخصوص خاک، وزن خاک مورد نیاز برای پرکردن جعبه برش را محاسبه می‌کنند.

با ترازو خاک مورد نیاز راجدا کرده و به صورت لایه لایه درون جعبه برش ریخته و متراکم می‌کنیم. این کار را توسط ورق فولادی و ضربه زدن با چکش انجام می‌دهیم باید گوشه‌های جعبه برش دقت پر شود تا گوشه‌ها خالی نباشد پس از تراکم و ایجاد نمونه ارتفاع آن از لبه جعبه برش را اندازه می‌گیرند اگر برابر ۲ میلی‌متر نشد در مراحل بعدی آزمایش را اصلاح می‌کنند نمونه به روی دستگاه برش برده می‌شود دستگاه شامل یک جایگاه بار گذاری قائم است که دارای بازو می‌باشد و هر ۱ کیلو گرم وزنه ۱۰ کیلو گرم بار به نمونه وارد می‌کند و یک موتور بارگذاری برشی که سرعت‌های قابل تنظیم دارد. جعبه برش را در مکان خود قرار داده و سپس بازوی دستگاه را تراز می‌کنند محور اندازه‌گیری تغییر مکان عمودی را مماس بر بازو کرده و مفصل بالایش را در جایگاه سربار صفحه برش قرار می‌دهند. بعد از آن گیج‌ها را روی صفر تنظیم می‌نمایند و دو پیچ جعبه برش را باز کرده و دو پیچ دیگر را حدود یک یا دو دور باز می‌کنند تا نمونه به راحتی برش بخورد. بار را با تنظیم موتور روی سرعت مشخص وارد می‌کنند و در همین لحظه پیچ ترازکننده بازوی بار عمودی را نیز باز می‌کنند و هر ۳۰ ثانیه گیج‌ها را قرائت می‌کنند زمانی آزمایش خاتمه می‌یابد که نمونه به اندازه ۲۰٪ ضلع جعبه برش

تغییر مکان دهد یا نیرو سنج ثابت بماند یا به عقب برگردد. پس از اتمام آزمایش جعبه برش را برداشته و با زدن کلید بازگشت به همان مدت زمانی آزمایش دستگاه را به حالت اول بر می گردانند.

۳-۴-۳ برش دادن نمونه

برای اندازه گیری جابجایی افقی در طی برشی از یک گیج عقربه ای استفاده می شود. قدم اول در برش دادن نمونه قرائت کردن مقدار اولیه عقربه گیج های تغییر شکل افقی و عمودی است. این مقادیر روی برگه یادداشت می شوند. درست قبل از آغاز برش، باید پین های قالب را درآورد. فراموش کردن این کار باعث آسیب شدید دستگاه می شود. عرض جعبه ها به پیچ هایی مجهز هستند که یک فضای خالی بین قسمت های بالایی و پایینی قالب ایجاد می کند. فاصله خالی بین دو نیمه قالب در این جعبه های برش باید حدود 0.025 in باشد. برای اعمال نیروی برشی به نیمه بالایی قالب دو روش وجود دارد:

روش کرنش کنترل شده: در این حالت نیروی برشی به نحوی اعمال می شود که نرخ جابه جایی کنترل شود. این امکان با استفاده از یک موتور الکتریکی و جعبه دنده مهیا می شود. نیروی برشی توسط بار سنج یا حلقه بار نشان داده می شود، این وسایل باید قادر باشند که نیروی برشی را با دقت ۱٪ مقاومت برشی اندازه گیری کنند. مرحله برش تا رسیدن به جابه جایی معادل ۱۰ تا ۲۰ درصد قطر اولیه نمونه ادامه می یابد. بنابراین برای نمونه ای با قطر 2.5 in ، نمونه باید تا جابجایی افقی حداقل 0.25 in ادامه یابد.

روش تنش کنترل شده: در این حالت نیروی برشی به صورت افزایشی اعمال می شود. یک کابل به نیمه بالایی جعبه برش متصل شده است. این کابل از طریق یک چرخ به آویز متصل شده است و بار به این آویز وارد می شود. با اضافه کردن وزنه به آویز نیروی برشی افزایش می یابد. با افزایش یافتن تغییر شکل افقی نمونه، باید وزنه های سبک تری به آویز اضافه نمود. وقتی که به مقاومت برشی نمونه رسید، نمونه سریعاً به نیم تقسیم می شود.

در میان دو روش بالا روش کرنش کنترل شده متداول تر است. در طول برش نمونه خاک، داده‌های در قسمت مربوطه ثبت می‌شوند. این داده‌ها شامل قرائت‌های گیج‌های عقربه ای افقی و قائم و قرائت‌های حلقه بار، بارسنج یا وزنه‌ها که برای محاسبه تنش برشی استفاده می‌شوند. سرعت آزمایش باید به قدری کم باشد که فشار منفذی در نمونه ایجاد نشود. یعنی اگر نمونه تمایل به اتساع نشان داد، باید زمان کافی برای ورود آب به نمونه وجود داشته باشد. بالعکس اگر نمونه تمایل به تراکم نشان داد، باید زمان کافی برای خروج آب به نمونه وجود داشته باشد.

۳-۴-۵ اشکالات آزمایش برش مستقیم

- غیر قابل کنترل بودن شرایط زهکشی نمونه می‌باشد یعنی فقط می‌توان تنش کل را اندازه گرفت.
- توزیع تنش برشی برروی صفحه گسیختگی یکنواخت نیست و گسیختگی از طرف کناره‌ها به طرف مرکز بوجود می‌آید .
- سطح زیر برش و بارهای قائم ثابت باقی نمی‌ماند .
- دراین آزمایش اجازه داده نمی‌شود که خاک در امتداد ضعیف‌ترین صفحه گسیخته شود و گسیختگی اجباراً در صفحه جدایی دو نیمه فوقانی و تحتانی جعبه برش رخ می‌دهد .

۳-۴-۶ محاسن آزمایش برش مستقیم

- ساده بودن آزمایش و سهولت آماده نمودن آن می‌باشد.
- ساده‌ترین و اقتصادی‌ترین آزمایش برای خاک‌های ماسه‌ای خشک و اشباع است.

۳-۴-۷ موارد زیر در یک جدول درج و محاسبه می‌شود

- مقدار بار
- قرائت نیروی برشی از روی گیج
- نیروی برشی kg

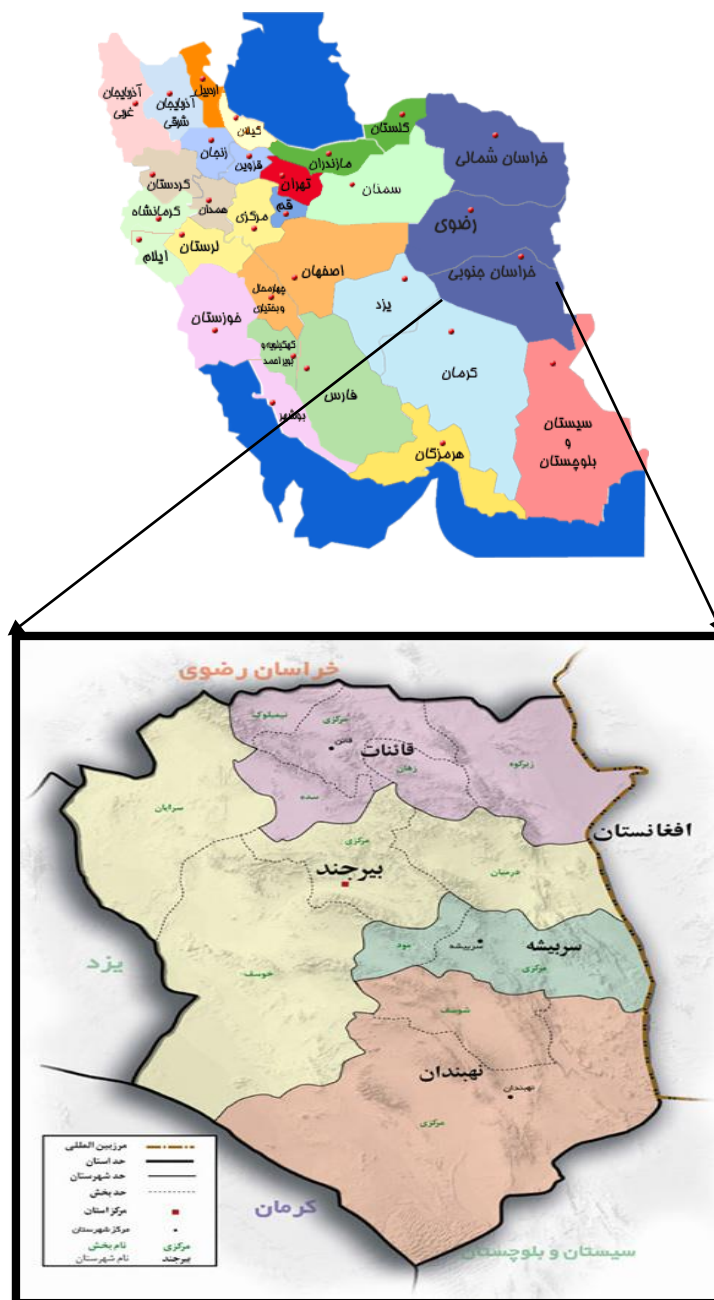
- قرائت تغییر مکان افقی از روی گیج
- تغییر مکان افقی
- قرائت تغییر مکان قائم از روی گیج
- تغییر مکان قائم
- نیروی برشی بیشینه از روی نمودار
- مقدار $\sigma \left(\frac{Kg^2}{cm} \right)$
- مقدار $T \left(\frac{Kg^2}{cm} \right)$

فصل چهارم

آزمایشات و ارائه نتایج

۴-۱ موقعیت جغرافیایی منبع قرضه

سد رزه در استان خراسان جنوبی، در فاصله ۱۳۵ کیلومتری بیرجند، جاده‌ی بیرجند - قائن واقع شده است. این سد در روستای رزه از توابع شهرستان درمیان قرار دارد. منطقه مورد نظر دارای مختصات UTM (X=796307, Y=3718497) می‌باشد (شکل ۴-۱). در شکل های (۴-۲) و (۴-۳) نمای کلی از منطقه و خاک مورد مطالعه دیده می‌شود.



شکل (۴-۱) موقعیت جغرافیایی خاک قرصه



شکل (۴-۲) نمای کلی از منطقه قرضه



شکل (۳-۴) خاک منطقه مورد مطالعه

۴-۲ مواد مصرفی (خاکستر لجن فاضلاب)

لجن فاضلاب از تصفیه‌خانه شهرستان بیرجند واقع در ۵ کیلومتری این شهر جمع‌آوری شده (شکل ۴-۴) و در فضای باز به مدت یک ماه جهت خشک شدن کامل پهن شد در این مرحله وزن نمونه بیش از ۸۰ درصد افت پیدا کرد. لجن خشک حاصله جهت سوزاندن به کارگاه ریختگری انتقال یافت و در کوره ذوب در دمای بالای ۸۰۰ درجه به مدت ۵ الی ۱۰ دقیقه سوخت. در این مرحله وزن نمونه خشک بیش از ۴۰ درصد کاهش یافت.

اشکال (۴-۵)، (۴-۶)، (۴-۷) فرایند تهیه خاکستر لجن فاضلاب درحالت خشک، در حال سوختن و بعد از سوختن را نشان می‌دهند.

مواد حاصله خورد شده و از الک #۲۰۰ گذرانده شدند.



شکل (۴-۴) نمایی از لجن موجود در تصفیه‌خانه شهرستان زنجان



شکل (۴-۵) نمایی محموله لجن فاضلاب بعد از خشک شدن در فضای آزاد



شکل (۴-۶) نمایی از کوره ذوب جهت سوزاندن لجن فاضلاب خشک شده



شکل (۴-۷) نمایی از خاکستر لجن فاضلاب حاصله از کوره

۴-۳ مخلوط خاکستر لجن فاضلاب و آهک

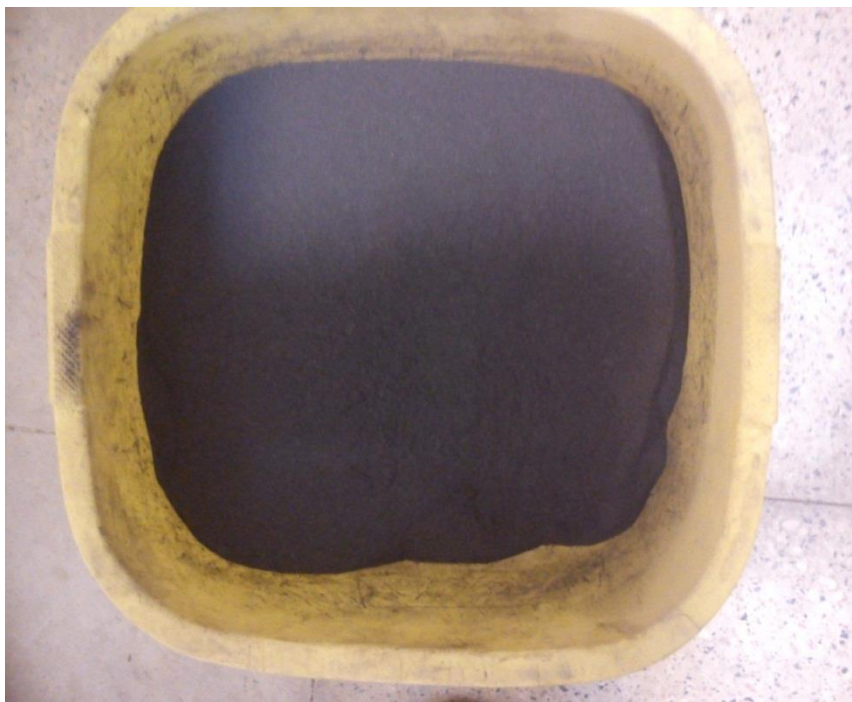
خاکستر لجن فاضلاب و آهک هر دو از یک الک عبور داده شده و به نسبت ثابت ۴ به ۱ (به ازای ۴ خاکستر لجن فاضلاب، ۱ آهک) باهم مخلوط شده‌اند. شکل های (۴-۸)، (۴-۹) و (۴-۱۰) به ترتیب مخلوط خاکستر لجن فاضلاب و آهک شده قبل، حین و بعد از اختلاط را نشان می‌دهند.



شکل (۴-۸) خاکستر لجن فاضلاب و آهک الک شده قبل از اختلاط



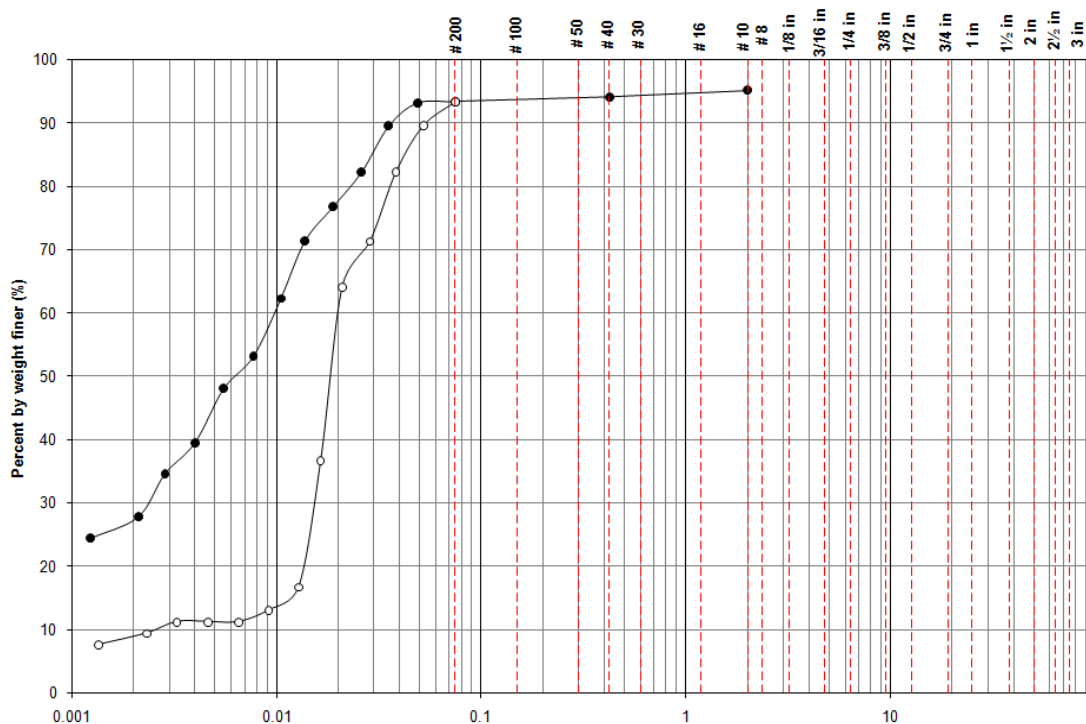
شکل (۴-۹) خاکستر لجن فاضلاب و آهک الک شده حین اختلاط



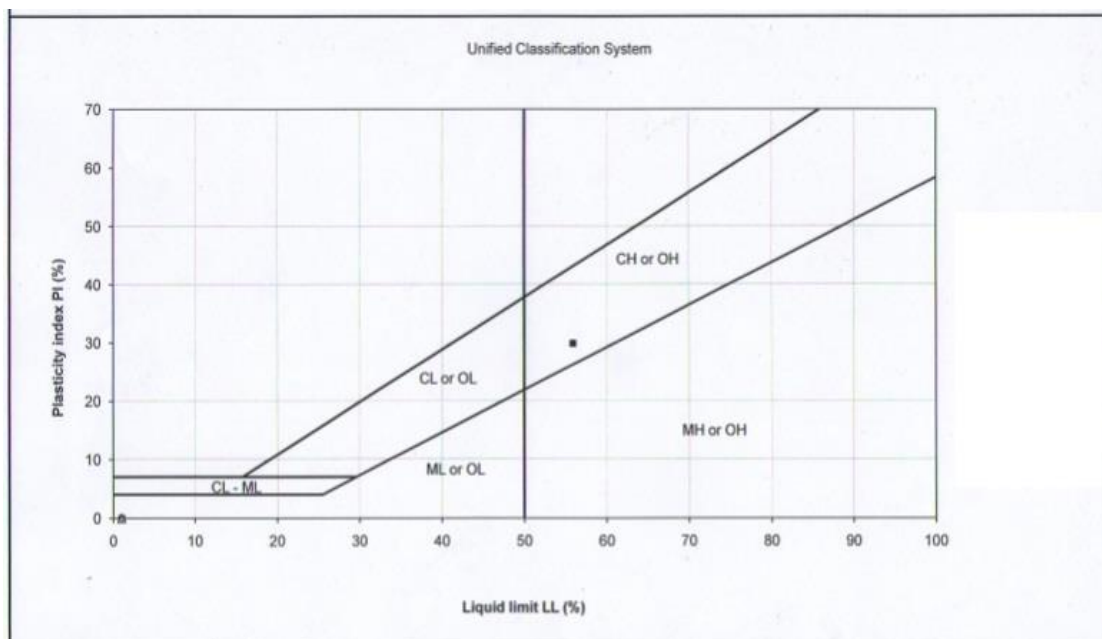
شکل (۴-۱۰) خاکستر لجن فاضلاب و آهک الک شده بعد از اختلاط

۴-۴ آزمایشات مربوط به طبقه‌بندی خاک

مطابق آزمایشات صورت گرفته طبق تئوری های فصل چهارم نتایج آزمایشات از قبیل دانه‌بندی (آزمایش الک و هیدرومتری) و طبقه‌بندی (سیستم یونیفاید و آشتو) به صورت زیر ارائه می‌گردد.



شکل (۴-۱۱) طبقه‌بندی خاک مورد مطالعه



شکل (۴-۱۲) طبقه‌بندی خاک مورد مطالعه در سیستم یونیفاید

جدول (۴-۱) نتایج حاصله از طبقه‌بندی خاک مورد مطالعه

$D_{30}(\text{mm})$	0.002
$D_{60}(\text{mm})$	0.010
Pas.0.005(S)	45.05
Pas.0.005(D)	11.28
Liquid Limit	55.92
Plastic Limit	26.02
Plastic Index	30
Gs	2.72
UNIFIED CI.	CH
AASHTO CI.	A-7-6

۴-۵ آزمایشات مربوط به شناسایی خاک واگرا

۴-۵-۱ آزمایش پین هول و کرامب

بر روی خاک انتخاب شده ۳ بار آزمایش پین هول و یک بار آزمایش کرامب انجام گردید که این آزمایشات واگرایی خاک مورد نظر را تأیید کردند و نتایج آن به‌قرار زیر اعلام گردید:

جدول (۴-۲) نتایج حاصل از آزمایش پین هول و کرامب

میزان شفافیت	خیلی تیره
نتیجه کرامب	واکنش نسبتاً شدید
قطر سوراخ	بیش از پنج برابر



شکل (۴-۱۳) قطر نمونه خاک واگرا (خاک مورد مطالعه) بعد از آزمایش پین هول



شکل (۴-۱۲) نمایی از طول استاندارد نمونه مورد مطالعه برای آزمایش پین هول

۴-۵-۲ آزمایشات شیمیایی

به منظور انجام دادن آزمایشات شیمیایی لازم، مقدار بسیار کمی (در حدود ۱۰ تا ۲۵ سانتی متر مکعب) از آب منفذی خمیر به دست آمده را از آن جدا می سازند، این عمل معمولاً با ایجاد خلاء و استفاده از یک صافی انجام می گیرد.

در این بخش از آزمایشات با استفاده از غلظت تعدادی از کاتیون ها در خاک و نمودارهای مربوطه به شناسایی خاک پرداخته شده است. یکی از مهم ترین کمیت ها که از نتایج این آزمایشات به دست می آید، نسبت جذب سدیم (SAR) است.

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca+Mg}{2}}} \quad (۴-۱)$$

$$\text{درصد سدیم} = \frac{Na}{Ca + Mg + Na + K} \quad (۴-۲)$$

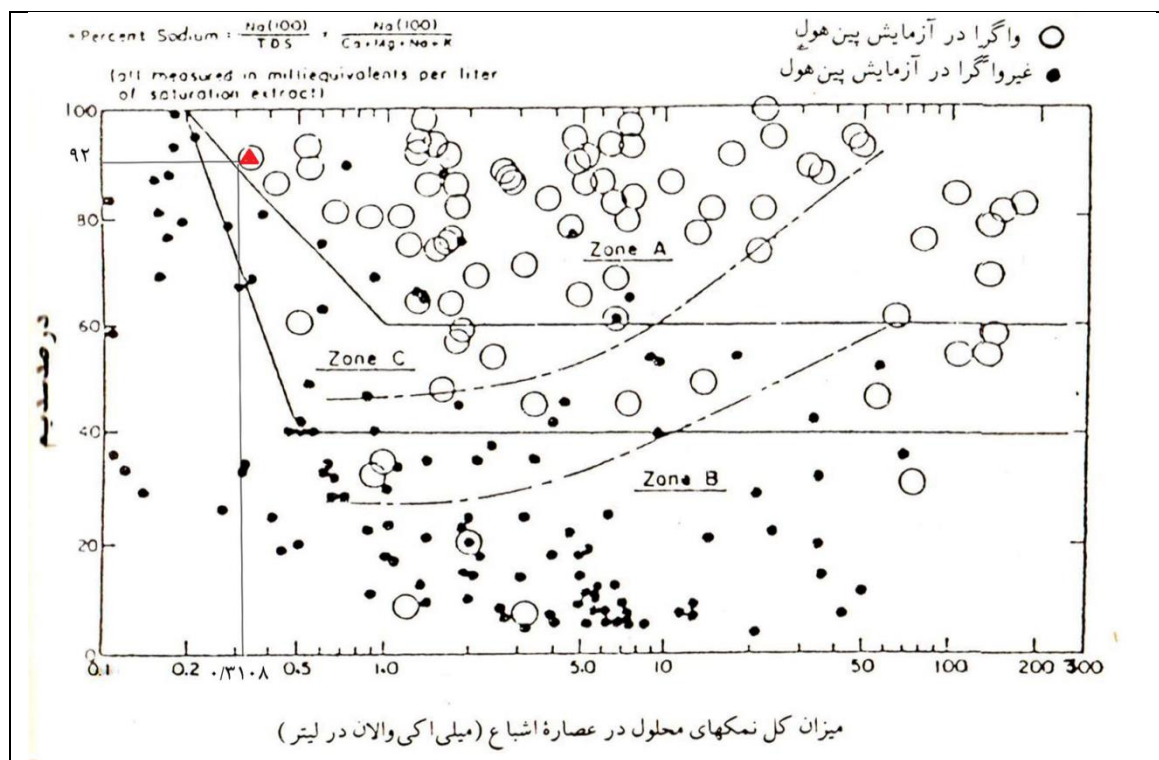
در رابطه فوق، منظور از Na، Ca و Mg به ترتیب نمک های سدیم، کلسیم و منیزیم در شیره اشباع بر حسب میلی اکی والان در لیتر است. دانشمندان استرالیایی بر این عقیده اند که برای شناسایی خاک- های واگرا، تعیین نسبت جذب سدیم (SAR) کافی است و درصد سدیم تبادلی را می توان از روی رابطه همبستگی بین دو کمیت تخمین زد.

در محاسبات انجام گرفته توسط روابط (۱-۴) و (۲-۴)، درصد سدیم، ۹۲ درصد و میزان کل نمک های محلول در عصاره اشباع، ۰/۳۱۰۸ (میلی اکی والان در لیتر) است که با توجه به نمودار (۳-۴)، در منطقه واگرایی قرار گرفته است (با علامت مثلث).

جدول (۳-۴)، نشان دهنده نتایج آزمایشات شیمیایی است. در این جدول غلظت کاتیون ها، به شکل میلی اکی والان در لیتر و میلی گرم در لیتر تعیین شده است. همچنین همان طور که در جدول زیر نیز مشاهده می گردد، خاک با PH برابر ۷/۵۳، یک خاک نسبتاً قلیایی می باشد.

جدول (۳-۴) نتایج آزمایشات شیمیایی

غلظت به	PH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
---	۷/۵۳	---	---	---	---
mg/l	---	۵۰۰	۱۷۰/۸۰	۲۸۷۴	۱۴/۲
me/l	---	۰/۰۰۵	۰/۰۱۷	۰/۲۸۷۴	۰/۰۰۱۴



۳-۵-۴ هیدرومتری ساده و دوگانه

در این بخش، ابتدا دانه‌بندی خاک به روش استاندارد آزمایش هیدرومتری، یعنی با استفاده از هم زن مکانیکی و ماده شیمیایی پراکنده ساز، تعیین می‌گردد و سپس روی نمونه دیگری از همان خاک، آزمایش هیدرومتری دیگری بدون استفاده از هم زن مکانیکی و ماده شیمیایی پراکنده ساز انجام می‌شود. درصد ذرات کوچک‌تر از 0.005 میلی‌متر در هر دو آزمایش تعیین و سپس درصد واگرایی که برابر است با نسبت درصد ذرات کوچک‌تر از 0.005 میلی‌متر آزمایش دوم (آزمایش هیدرومتری مضاعف) به درصد همین ذرات در آزمایش اول، محاسبه می‌گردد.

با توجه به جدول (۴-۱) و محاسبه میزان واگرایی، عدد به دست آمده برای واگرایی ۲۵ درصد می‌باشد که بنا به آزمایشات انجام گرفته توسط شرارد، این خاک به طور متوسط واگراست (عسکری و فاخر، ۱۳۷۳).

$$\frac{\text{Pas.0.005(D)}}{\text{Pas.0.005(S)}} * 100 = \frac{11.28}{45.05} * 100 = 25 \text{ (\%)}$$

۴-۶ نوع آزمایشات، تعداد تکرار آزمایشات برای هر نمونه، زمان عمل آوری و مجموع آزمایشات مورد مطالعه

در این تحقیق سعی شده است خاکستر لجن فاضلاب (که در این تحقیق با مخفف این عبارت (SSA) نام خواهیم برد) یک بار به تنهایی و بار دیگر با آهک ($\frac{SSA}{Lime} = \frac{4}{1}$) (که در این تحقیق با (SL) نام خواهیم برد) را با نسبت های 0%، 2%، 4%، 8%، 16% به خاک اضافه شود.

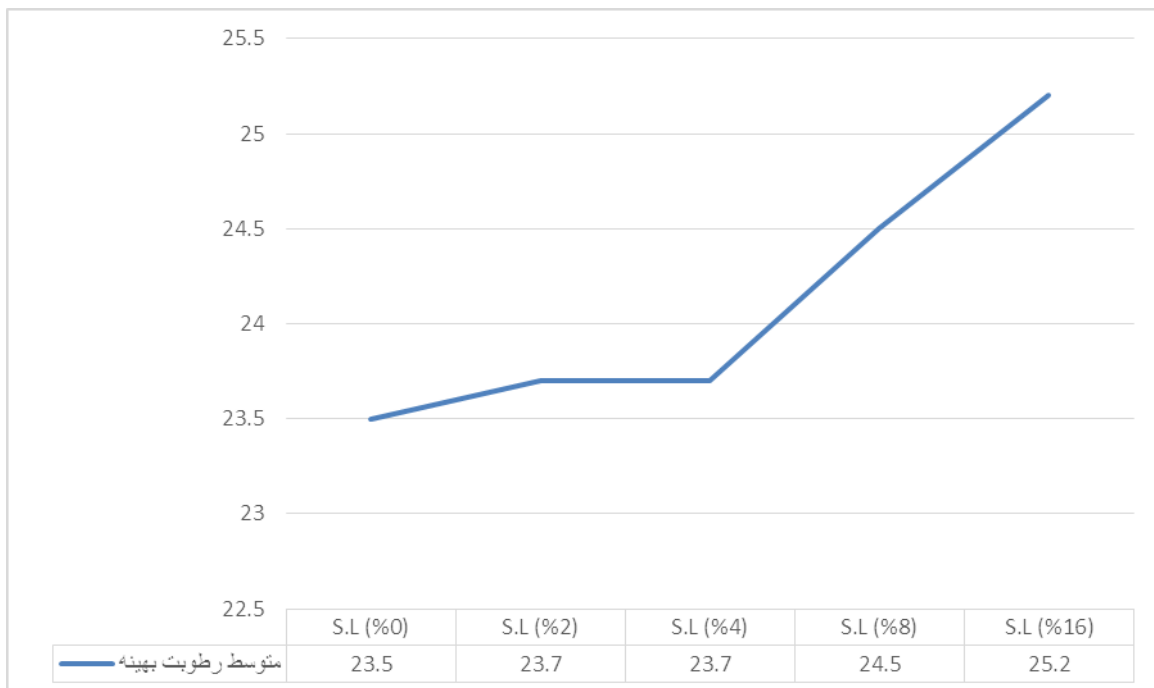
جدول (۴-۴) نوع آزمایشات، تعداد تکرار آزمایشات برای هر نمونه، زمان عمل آوری و مجموع آزمایشات مورد مطالعه را به صورت کمی نشان می دهد.

جدول (۴-۴) نوع، تعداد تکرار آزمایشات برای هر نمونه، زمان عمل آوری و مجموع آزمایشات مورد مطالعه به صورت کمی

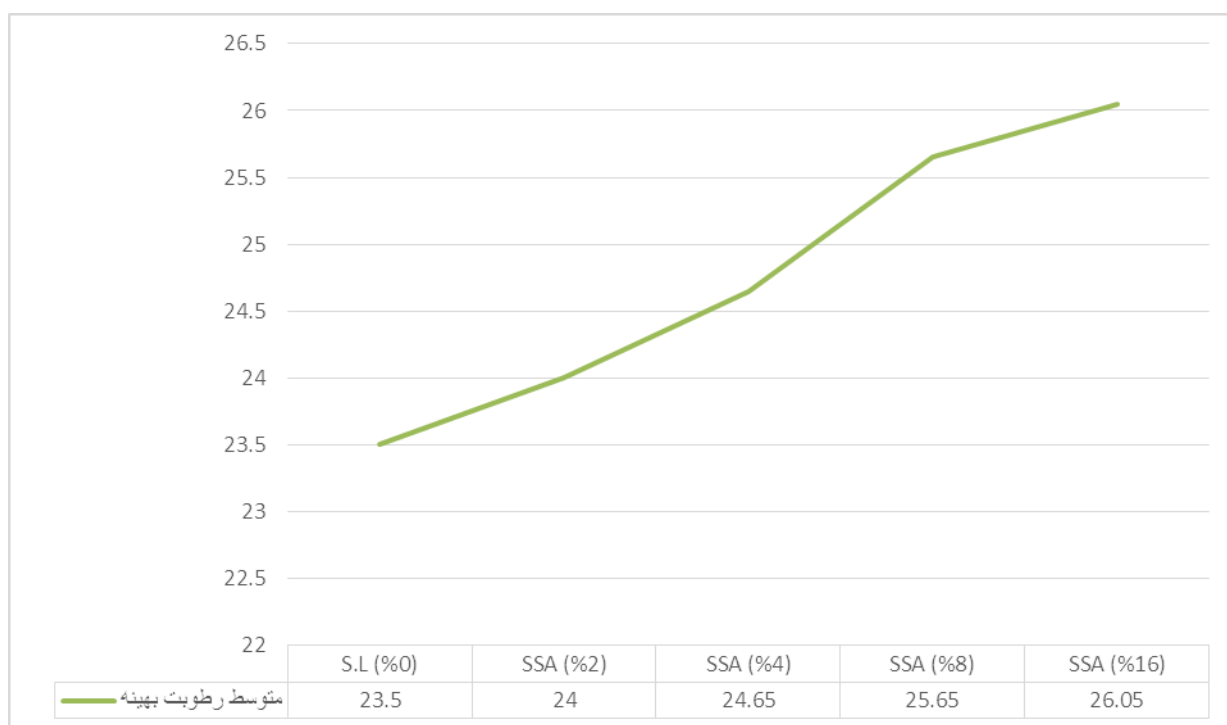
نوع آزمایش	درصدهای مورد آزمایش	زمان های عمل آوری	تعداد تکرار	مجموع آزمایشات
تراکم	SSA(%(2.4.8.16)) - 0% SL(%(2.4.8.16))	یک روزه	۲ بار	۹*۲=۱۸
پین هول	SSA(%(2.4.8.16)) - 0% SL(%(2.4.8.16))	۳.۷، ۱۴، ۲۸، ۶۰ و ۹۰	۳ بار	۳*۹*۶=۱۶۲
برش مستقیم	SSA(%(2.4.8.16)) - 0% SL(%(2.4.8.16))	۳.۷، ۱۴، ۲۸، ۶۰ و ۹۰	۳ بار	۳*۹*۶=۱۶۲

۷-۴ آزمایش تراکم

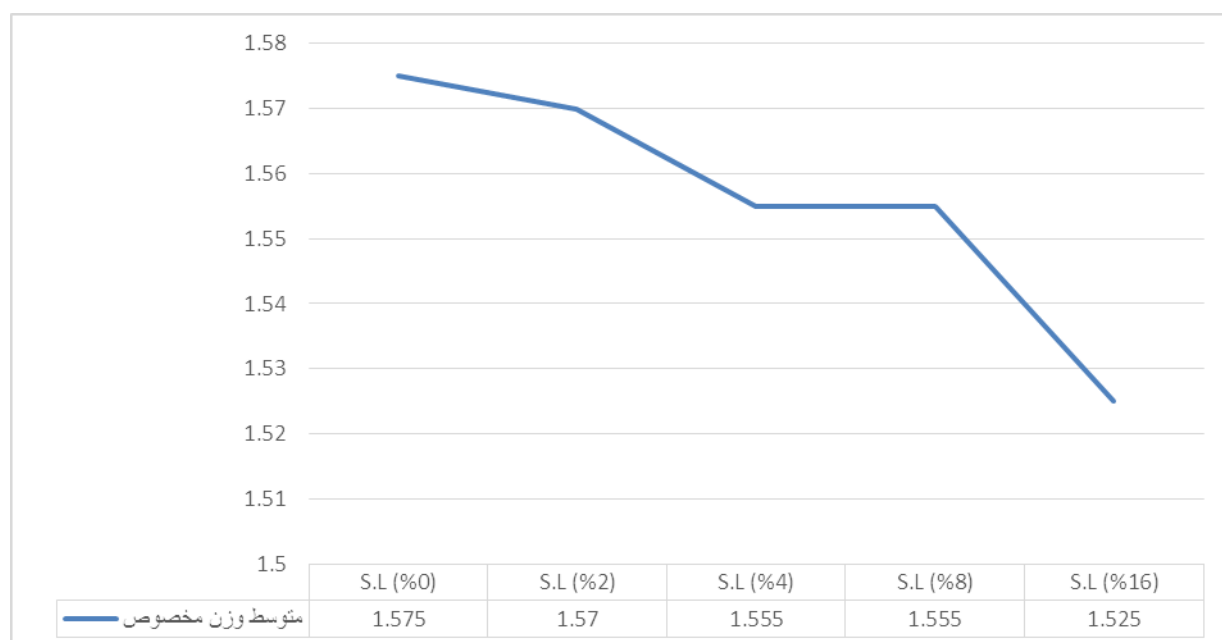
همان طور که در نمودارهای (۴-۴)، (۵-۴)، (۶-۴)، (۷-۴) مشخص است با افزایش درصد افزودنی رطوبت بهینه افزایش یافته و وزن مخصوص خشک کاهش یافته است.



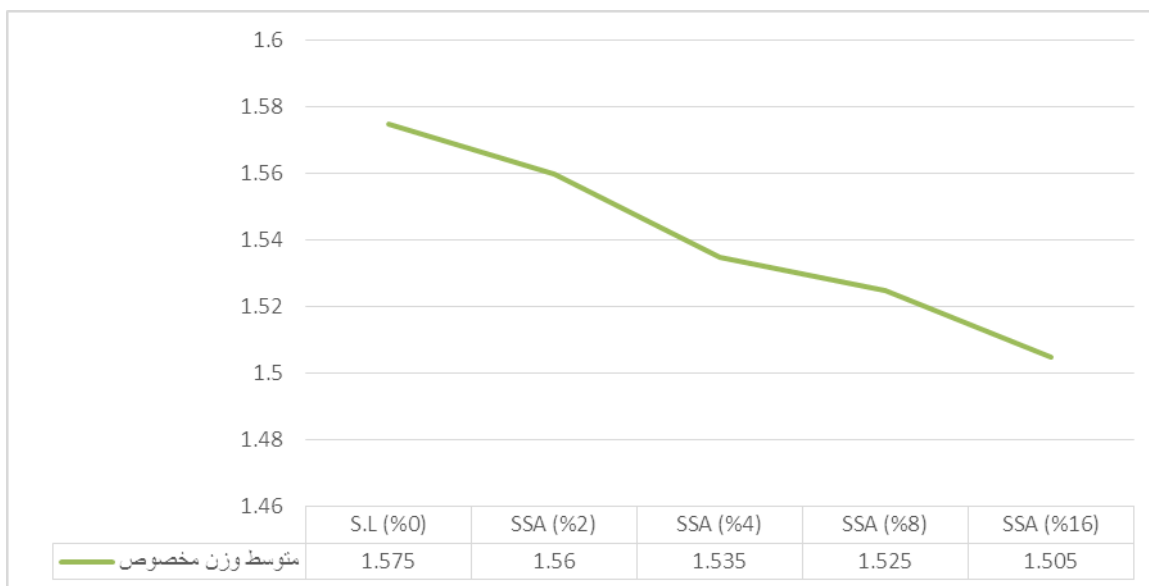
نمودار (۴-۴) تغییرات رطوبت بهینه با تغییرات **SL**



نمودار (۴-۵) تغییرات رطوبت بهینه با تغییرات SSA



نمودار (۴-۶) تغییرات وزن مخصوص خشک با تغییرات SL



نمودار (۴-۷) تغییرات وزن مخصوص خشک با تغییرات SSA

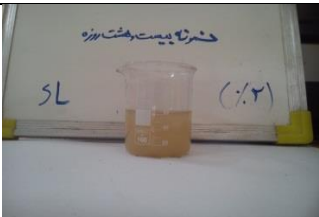
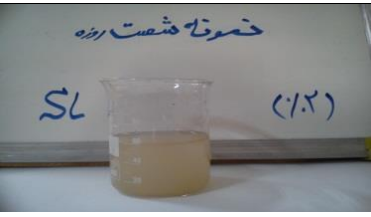
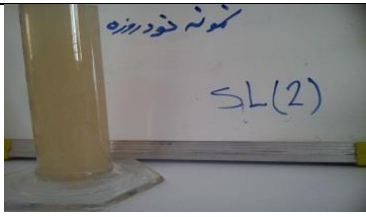
(واحد وزن مخصوص $\frac{gr}{cm^3}$ می باشد).

۴-۸ آزمایش واگرایی و تثبیت خاک

نتایج آزمایشات پین هول نشان می دهد که SSA به تنهایی در تثبیت خاک های واگرا زیاد موثر نیست به طوری که خاکستر لجن فاضلاب به تنهایی نتوانست خاک واگرا را به خاک با واگرایی متوسط تبدیل کند، اما مخلوط خاکستر لجن فاضلاب با آهک توانست خاک واگرا را در زمان عمل آوری ۳ روزه و در ۸٪ به خاک غیر واگرا تبدیل کند. شکل نمونه ها در زمانه های مختلف در جداول و اشکال زیر نمایش داده شده است:

جدول (۴-۵) آب خروجی حاصل از آزمایش پین هول برای نمونه SL(2%) در زمانه های مختلف

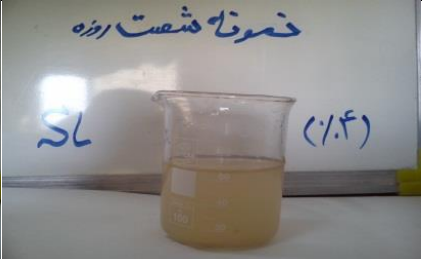
سه روزه	هفت روزه	چهارده روزه
		

بیست و هشت روزه	شصت روزه	نود روزه
		



شکل (۴-۱۳) قطر نمونه SL(2%) پس از اتمام آزمایش پین هول

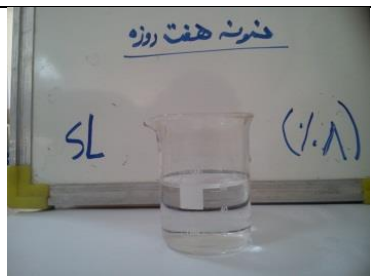
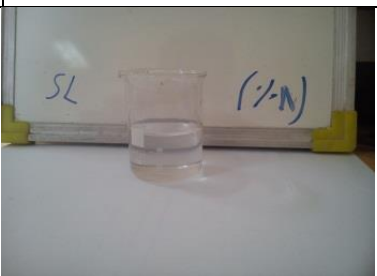
جدول (۴-۶) آب خروجی حاصل از آزمایش پین هول برای نمونه SL(4%) در زمانه‌ای مختلف

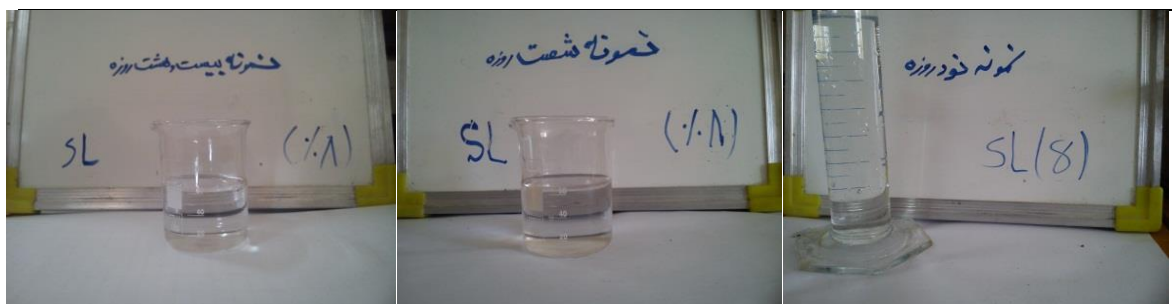
سه روزه	هفت روزه	چهارده روزه
		
بیست و هشت روزه	شصت روزه	نود روزه
		



شکل (۴-۱۴) قطر نمونه SL(4%) پس از اتمام آزمایش پین هول

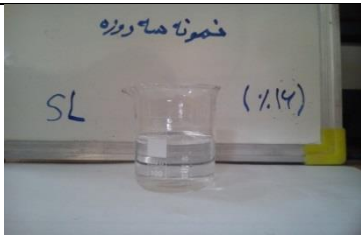
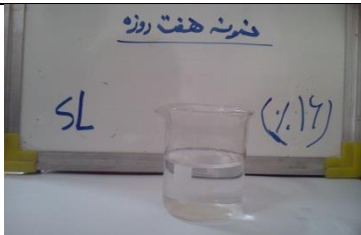
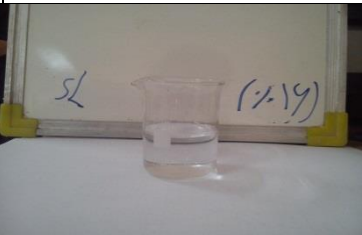
جدول (۴-۷) آب خروجی حاصل از آزمایش پین هول برای نمونه SL(8%) در زمانه‌ای مختلف

سه روزه	هفت روزه	چهارده روزه
		
بیست و هشت روزه	شصت روزه	نود روزه



شکل (۴-۱۵) قطر نمونه **SL(8%)** پس از اتمام آزمایش پین هول

جدول (۴-۸) آب خروجی حاصل از آزمایش پین هول برای نمونه **SL(16%)** در زمانه‌ای مختلف

سه روزه	هفت روزه	چهارده روزه
		
بیست و هشت روزه	شصت روزه	نود روزه



شکل (۴-۱۶) قطر نمونه **SL(16%)** پس از اتمام آزمایش پین هول

جدول (۴-۹) آب خروجی حاصل از آزمایش پین هول برای نمونه $SSA(2\%)$ در زمانه‌ای مختلف

سه روزه	هفت روزه	چهارده روزه
بیست و هشت روزه	شصت روزه	نود روزه



شکل (۴-۱۷) قطر نمونه SSA(2%) پس از اتمام آزمایش پین هول

جدول (۴-۱۰) آب خروجی حاصل از آزمایش پین هول برای نمونه SSA(4%) در زمانه‌ای مختلف

سه روزه	هفت روزه	چهارده روزه
بیست و هشت روزه	شصت روزه	نود روزه



شکل (۴-۱۸) قطر نمونه SSA(4%) پس از اتمام آزمایش پین هول

جدول (۴-۱۱) آب خروجی حاصل از آزمایش پین هول برای نمونه SSA(8%) در زمانه‌ای مختلف

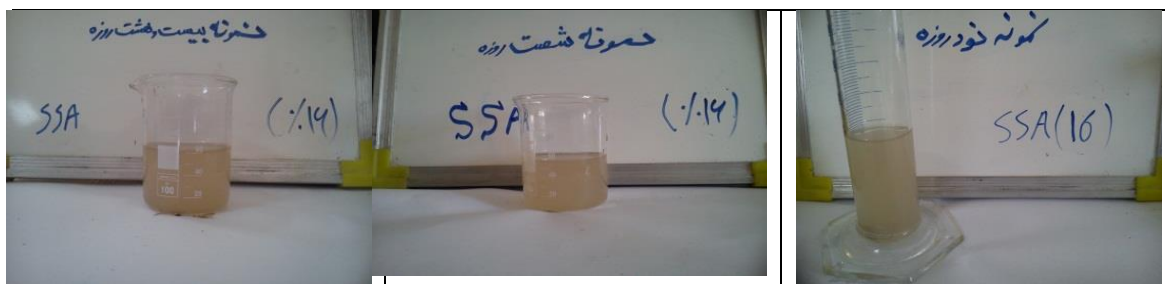
سه روزه	هفت روزه	چهارده روزه
بیست و هشت روزه	شصت روزه	نود روزه



شکل (۴-۱۹) قطر نمونه **SSA(8%)** پس از اتمام آزمایش پین هول

جدول (۴-۱۲) آب خروجی حاصل از آزمایش پین هول برای نمونه SSA(16%) در زمانه‌ای مختلف

سه روزه	هفت روزه	چهارده روزه
		
بیست و هشت روزه	شصت روزه	نود روزه



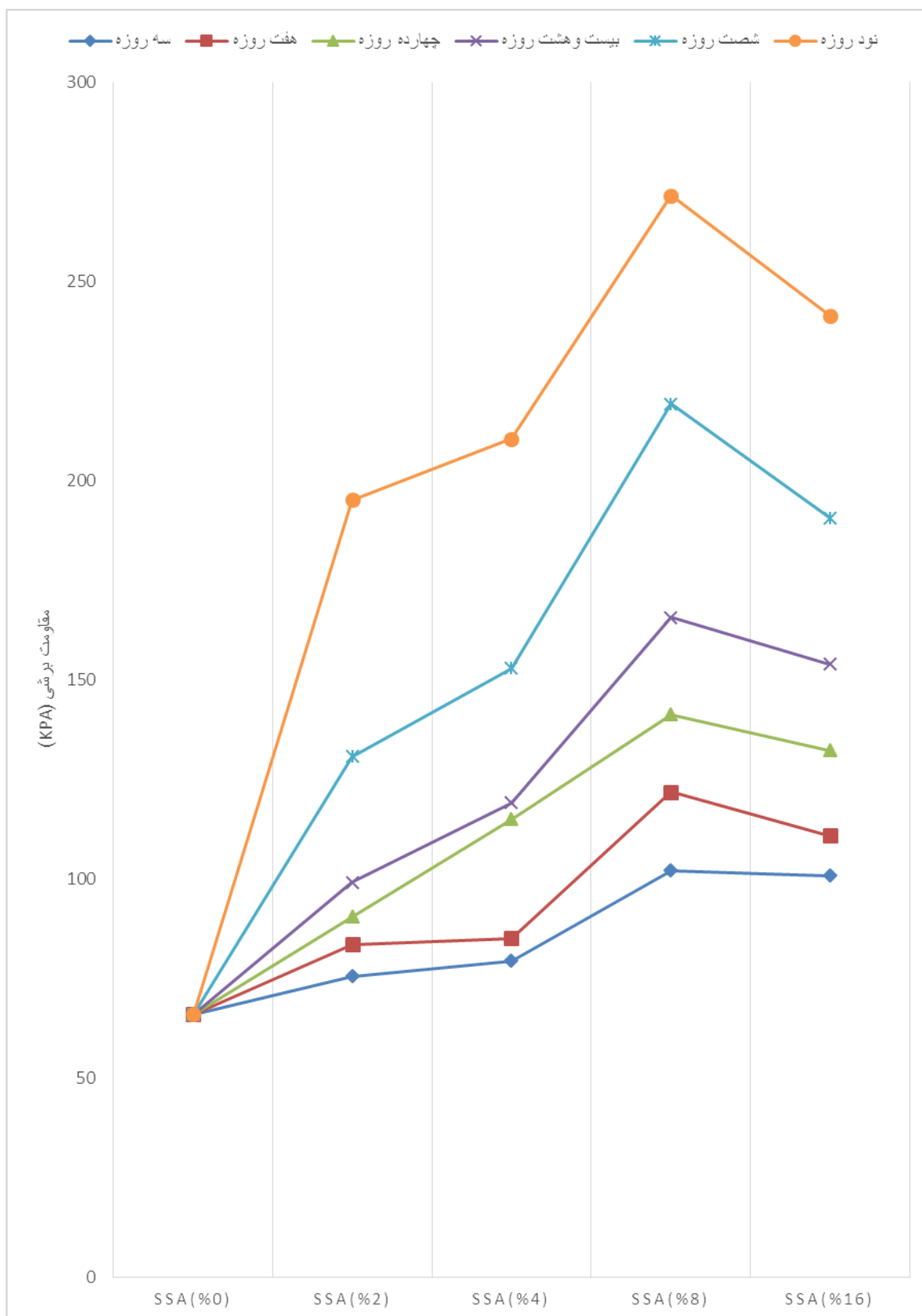
شکل (۴-۲۰) قطر نمونه SSA(16%) پس از اتمام آزمایش پین هول

۹-۴ آزمایش برش مستقیم

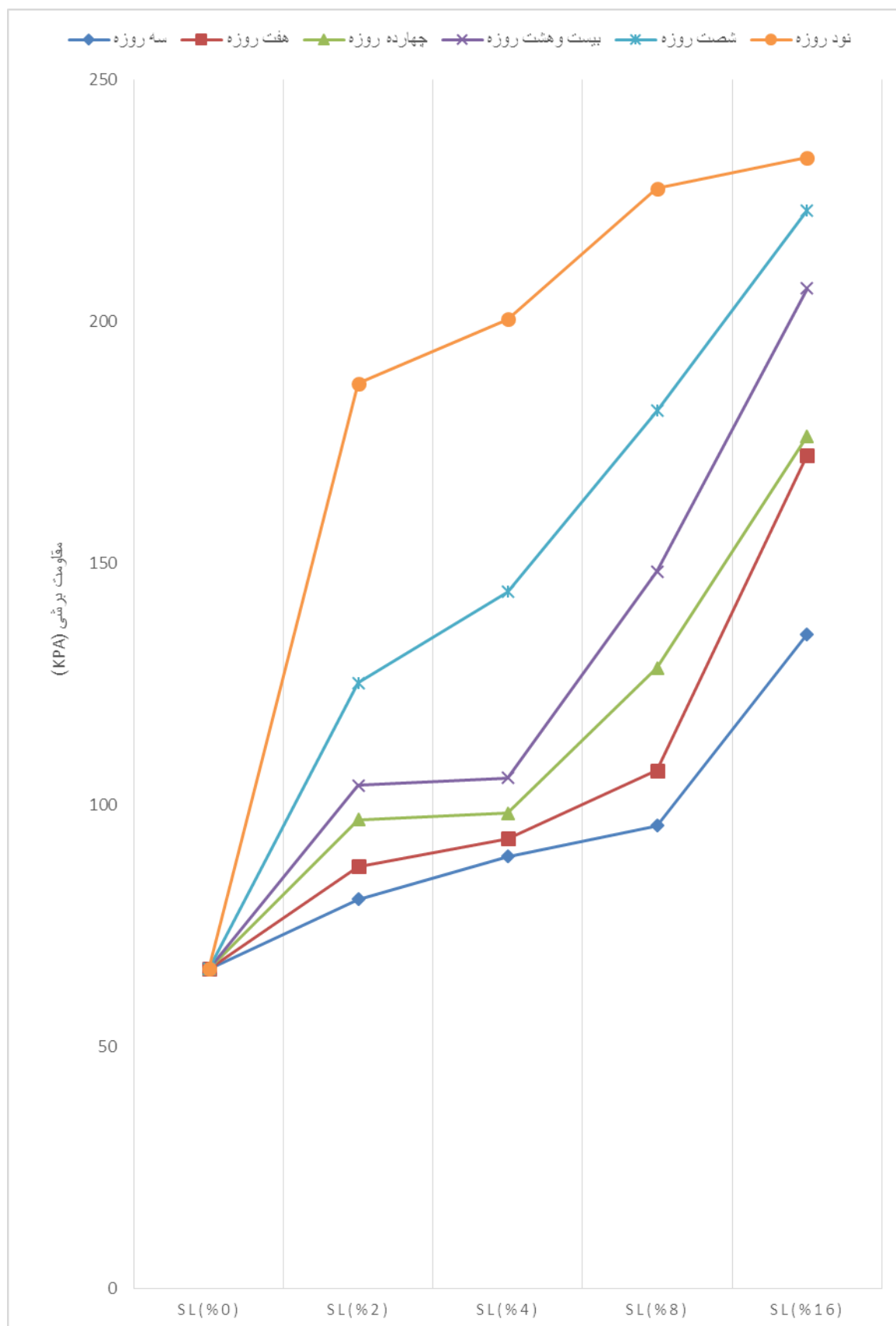
نمونه‌های مورد آزمایش در قالب ۱۰*۱۰ و تحت تنش قائم ۳۰۰ کیلو پاسکال و در زمان‌های عمل‌آوری ۳، ۷، ۱۴، ۲۸، ۶۰، ۹۰ تحت آزمایش قرار گرفت که میانگین ۳ تکرار به عنوان جواب نهایی انتخاب شده و مورد بحث و نتیجه‌گیری قرار گرفته است.

نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که با افزودن مقدار SSA تا ۸٪ مقاومت برشی در زمان‌های مختلف عمل‌آوری، افزایش می‌یابد. در صورتی که مقدار SSA از ۸٪ تجاوز نماید، مقاومت در زمان‌های مختلف عمل‌آوری کاهش خواهد یافت. (نمودار ۴-۸)

همچنین نمودار (۹-۴) نشان می‌دهد که با افزایش مقدار SL (خاکستر لجن فاضلاب همراه با آهک)، مقاومت برشی در زمان‌های عمل‌آوری مختلف افزایش می‌یابد.

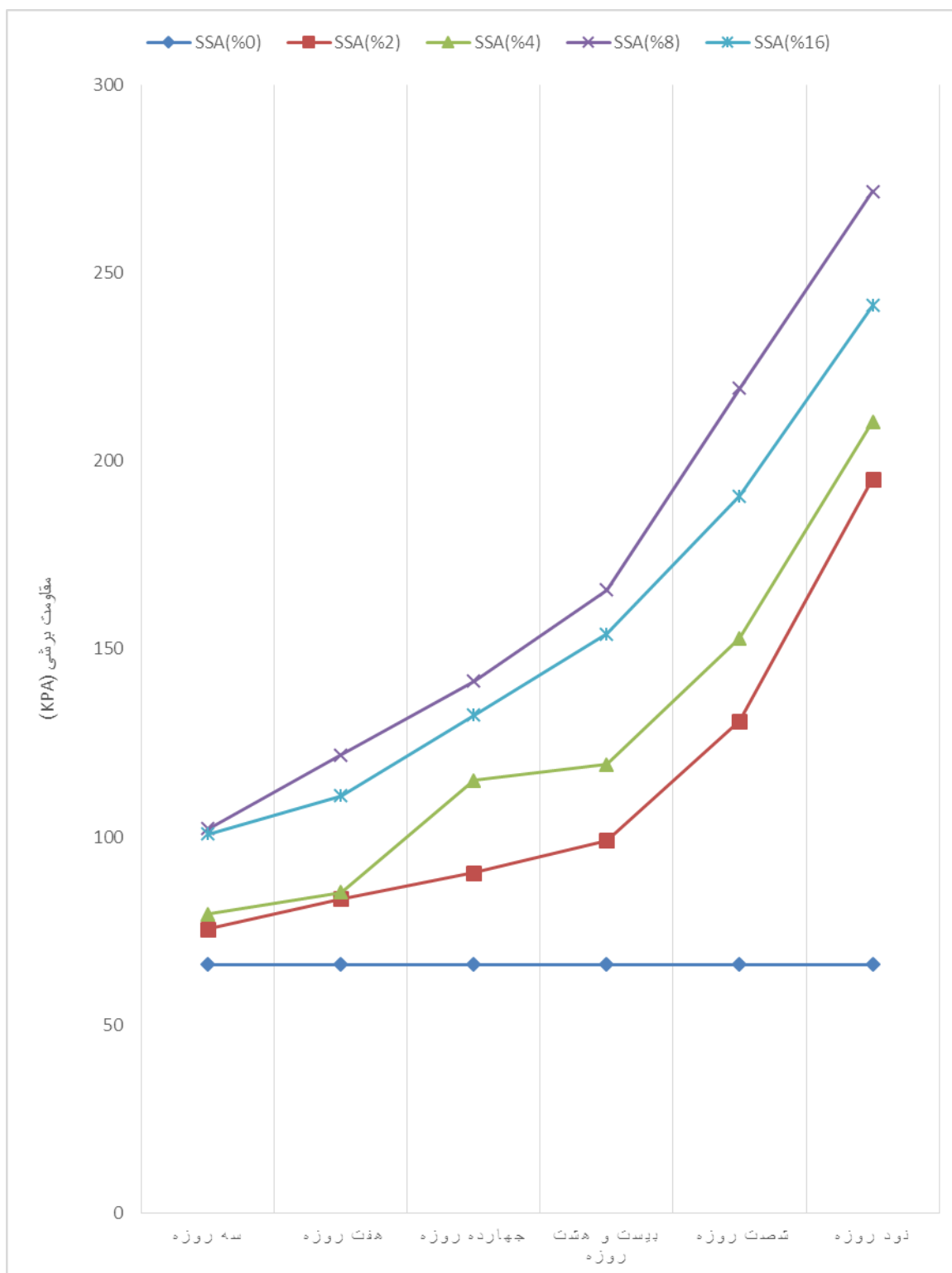


نمودار (۸-۴) تغییرات مقاومت خاک با تغییرات میزان درصد SSA در زمانه‌ای عمل‌آوری مختلف



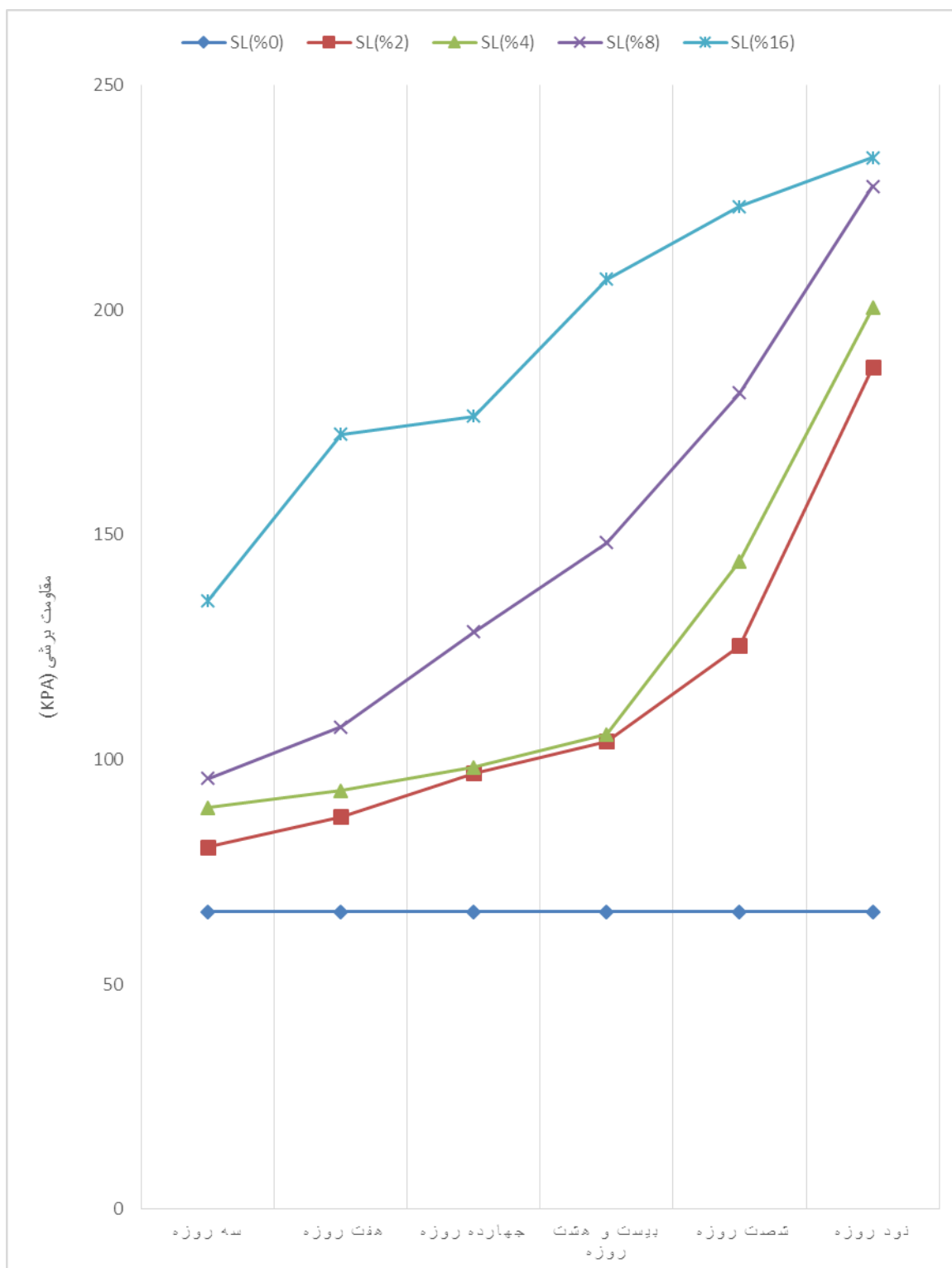
نمودار (۹-۴) تغییرات مقاومت خاک با تغییرات میزان درصد SL در زمانه‌های عمل‌آوری مختلف

نمودار (۴-۱۰) بیانگر افزایش مقاومت برشی هر یک از درصد های چهارگانه ($SSA(2\%)$ ، $SSA(4\%)$ ، $SSA(8\%)$ و $SSA(16\%)$) با گذشت زمان می باشد.



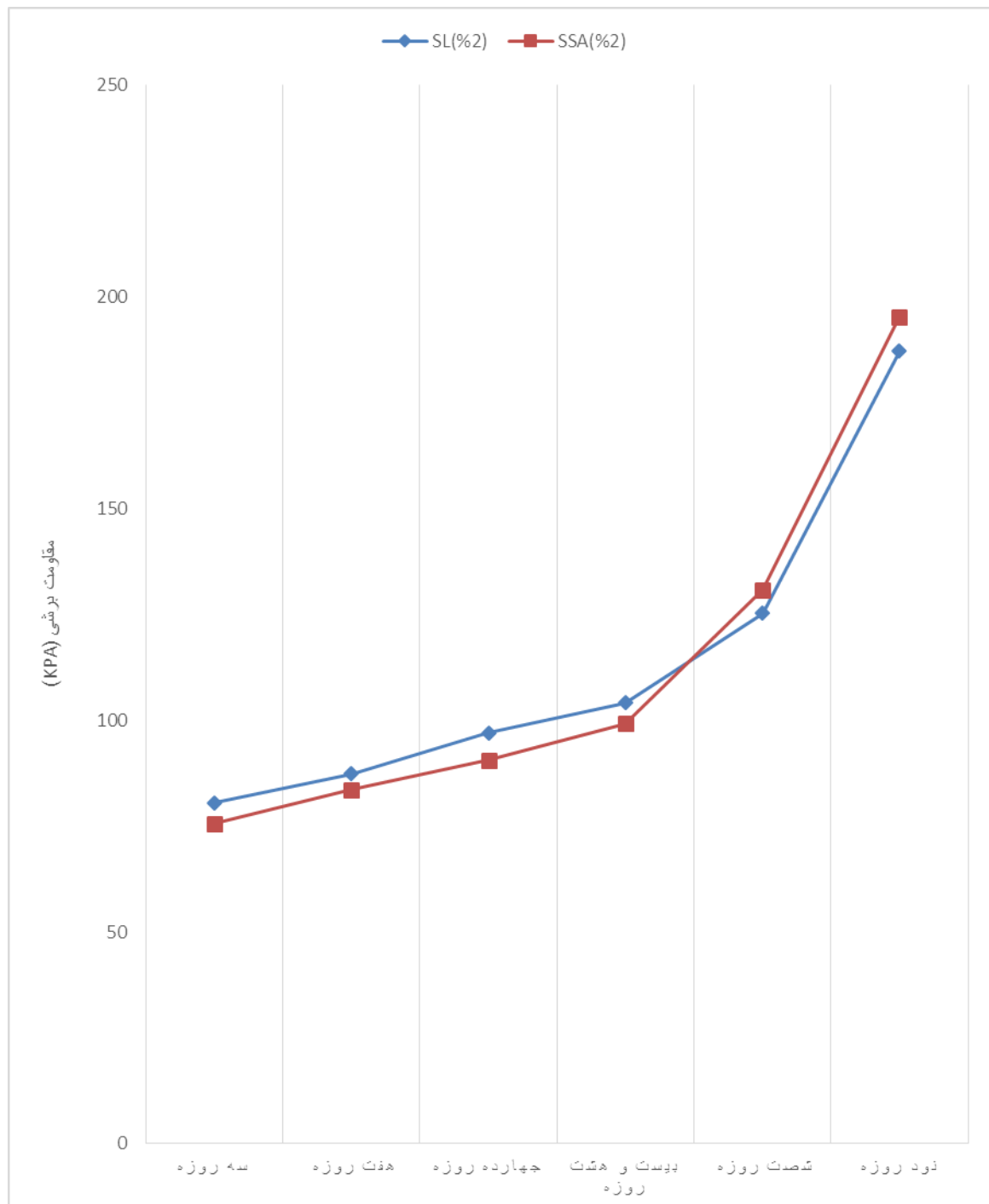
نمودار (۴-۱۰) تغییرات مقاومت خاک با تغییرات زمان عمل‌آوری در درصد‌های مختلف SSA

نمودار (۴-۱۱) بیانگر افزایش مقاومت برشی هر یک از درصد‌های چهارگانه $SL(2\%)$ ، $SL(4\%)$ ، $SL(8\%)$ و $SL(16\%)$ با گذشت زمان می‌باشد.



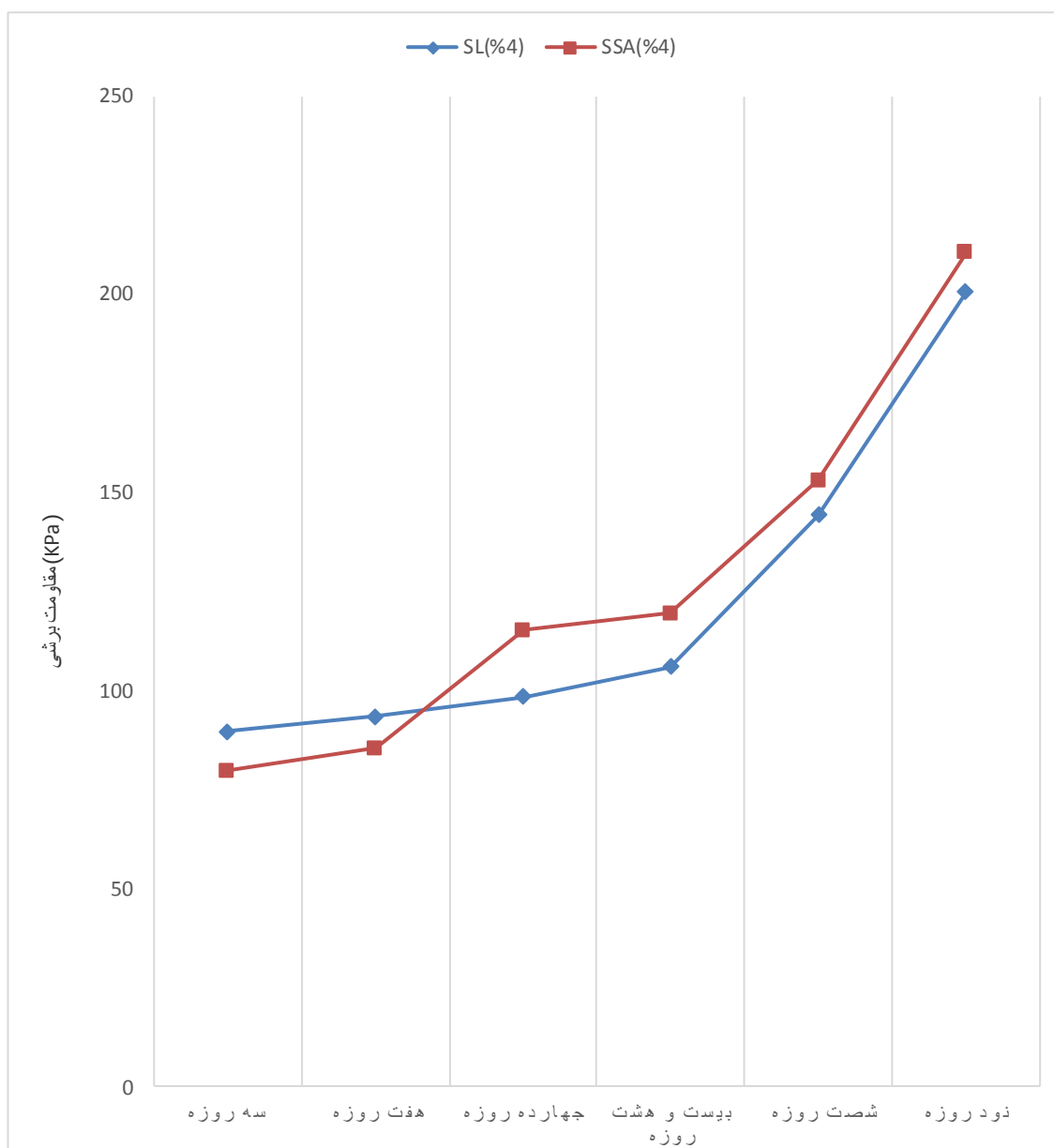
نمودار (۴-۱۱) تغییرات مقاومت خاک با تغییرات زمان عمل‌آوری در درصدهای مختلف SL

نمودار (۴-۱۲) مقایسه‌ای بین خاک با افزودنی $SSA(2\%)$ و خاک با افزودنی $SL(2\%)$ انجام داده و به این نتیجه می‌رسد که در مدت عمل‌آوری کم مقاومت برشی توسط خاک با افزودنی $SL(2\%)$ بیشتر از مقاومت برشی توسط خاک $SSA(2\%)$ بوده و این رفتار با مرور زمان تغییر یافته و در زمان ۶۰ روزه نتیجه برعکس خواهد شد و مقاومت برشی توسط خاک با افزودنی $SSA(2\%)$ بیشتر از $SL(2\%)$ خواهد شد.

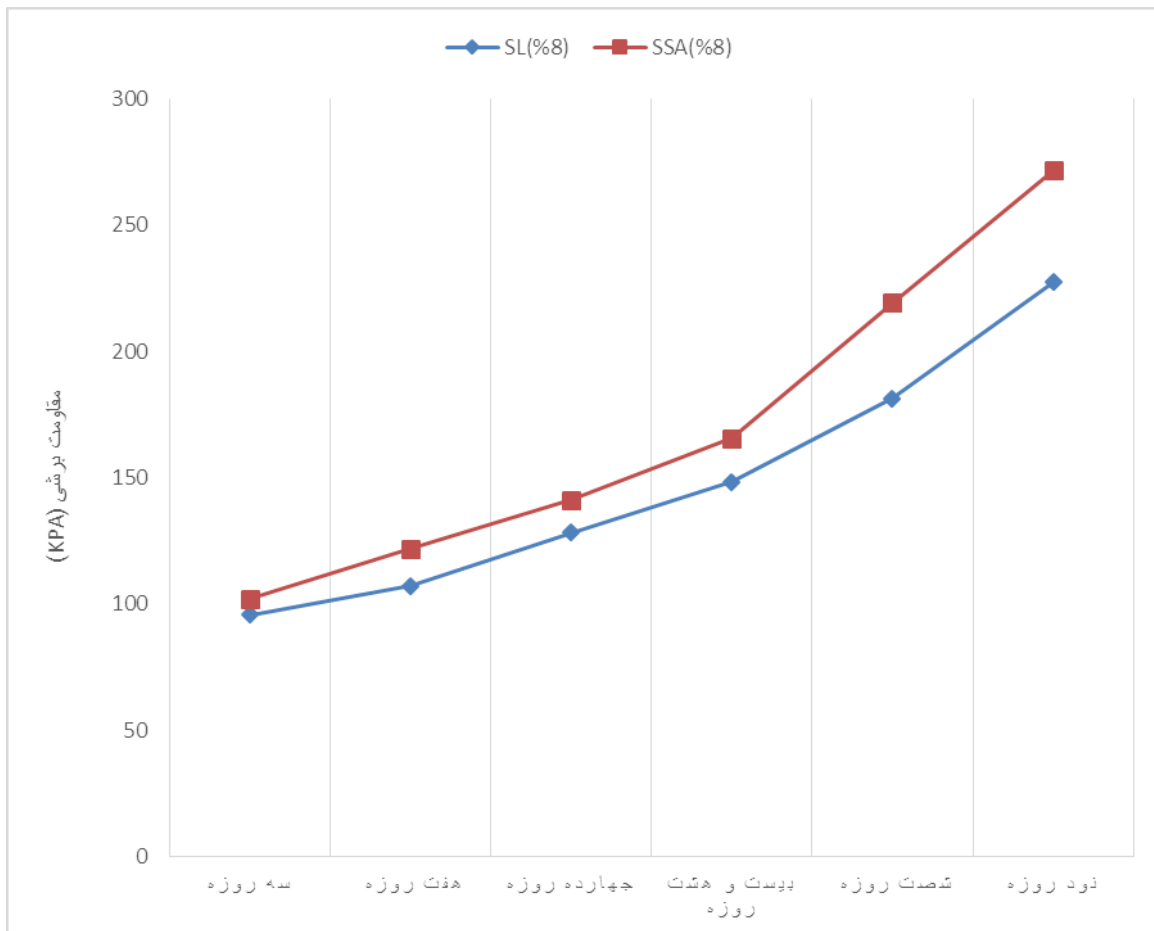


نمودار (۱۲-۴) مقایسه SSA(%2) با SL(%2) در زمانه‌ای عمل‌آوری مختلف

نمودار (۱۳-۴) مقایسه‌ای بین خاک با افزودنی SSA(%4) و خاک با افزودنی SL(%4) و نمودار (۴-۴) (۱۴) مقایسه‌ای بین خاک با افزودنی SSA(%8) و خاک با افزودنی SL(%8) انجام داده و ضمن تأیید نمودار (۱۲-۴) نتیجه می‌گیرند که با افزایش افزودنی، افزایش مقاومت برشی با افزودنی SSA نسبت به افزودنی SL در زمان پائین تری به وقوع می‌پیوندد به گونه‌ای که با افزایش افزودنی از ۲٪ به ۴٪ زمان افزایش مقاومت برشی با افزودنی SSA نسبت به افزودنی SL از ۶۰ روز به ۱۴ روز کاهش می‌یابد. این روند به گونه‌ای است که افزایش افزودنی تا ۸٪ باعث افزایش مقاومت برشی با افزودنی SSA نسبت به افزودنی SL در تمامی زمانه‌ای عمل‌آوری می‌شود.



نمودار (۴-۱۳) مقایسه SSA(4%) با SL(4%) در زمانه‌ای عمل‌آوری مختلف

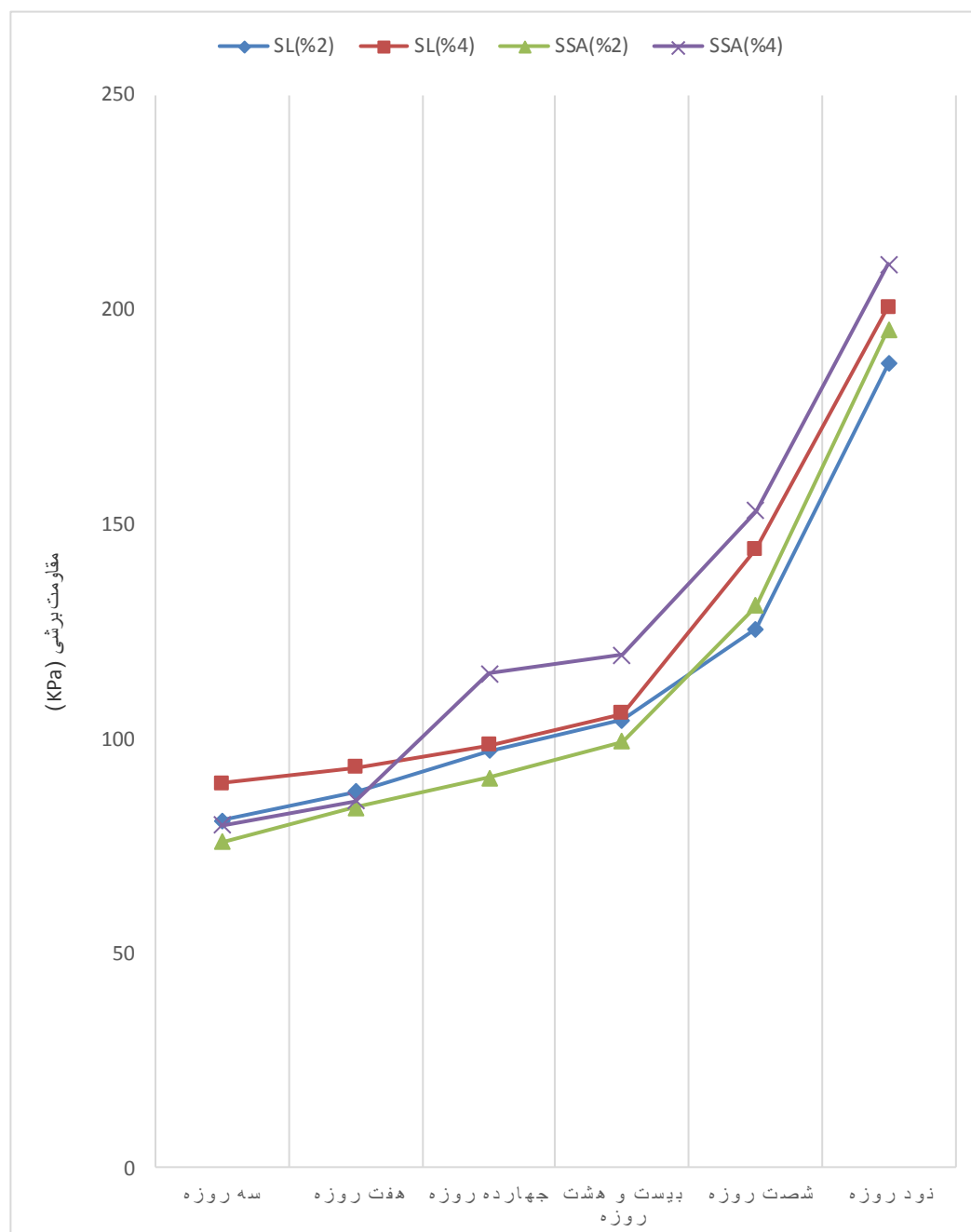


نمودار (۴-۱۴) مقایسه $SSA(8\%)$ با $SL(8\%)$ در زمانه‌ای عمل‌آوری مختلف

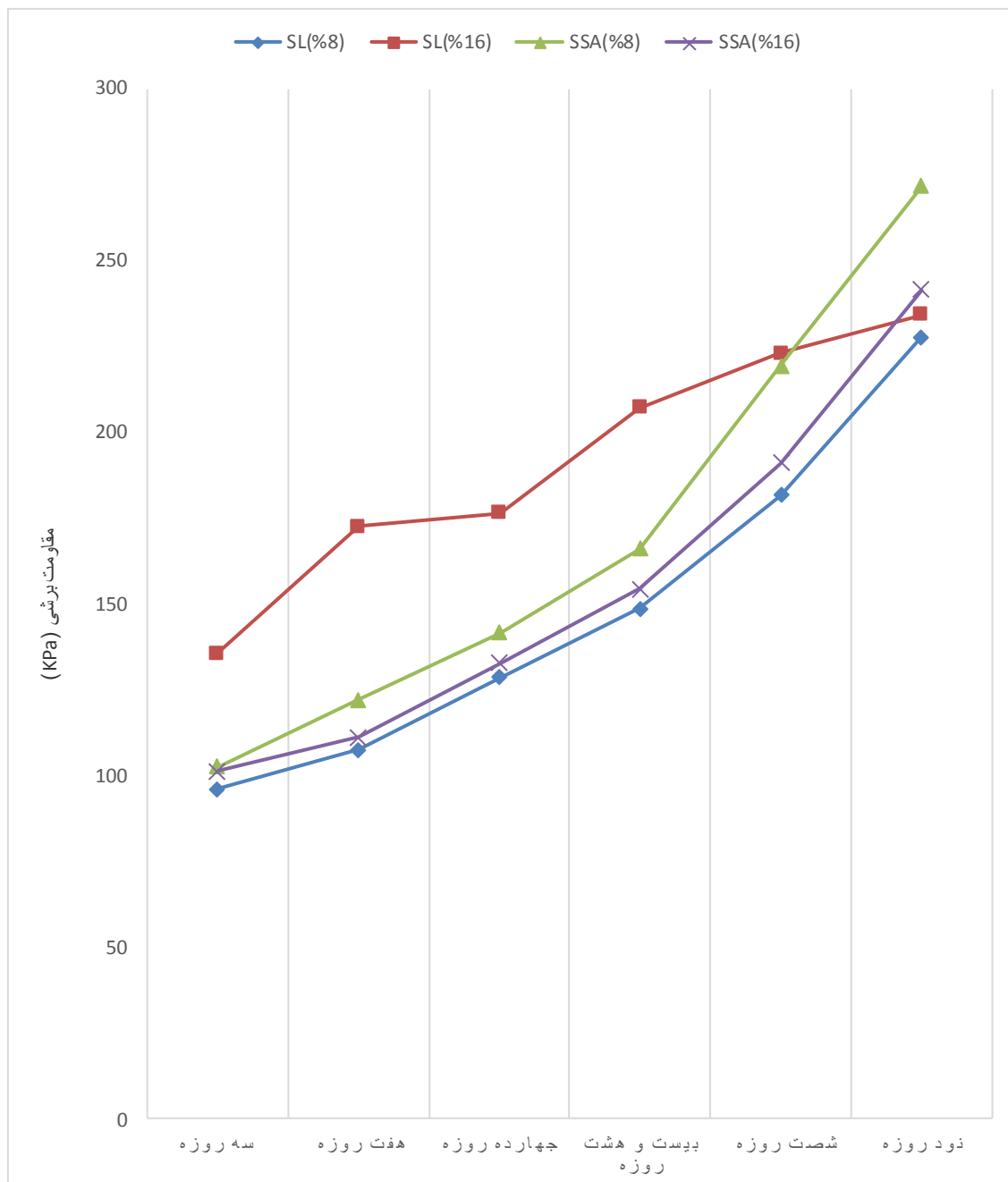
نمودار (۴-۱۵) مقایسه‌ای بین خاک با افزودنی‌های $SSA(2\&4\%)$ و خاک با افزودنی‌های $SL(2\&4\%)$ انجام داده و نتیجه می‌گیرد که در زمان عمل‌آوری پائین مقاومت برشی خاک با افزودنی $SSA(2\&4\%)$ از خاک با افزودنی $SL(2\%)$ پائین‌تر بوده ولی باگذشت زمان روند طوری تغییر می‌کند که مقاومت برشی خاک با افزودنی $SSA(4\%)$ از خاک با افزودنی $SL(2\%)$ و $SL(4\%)$ در زمان ۱۴ روزه بیشتر می‌شود.

نمودار (۴-۱۶) مقایسه‌ای بین خاک با افزودنی‌های $SSA(8\&16\%)$ و خاک با افزودنی‌های $SL(8\&16\%)$ انجام داده و نتیجه می‌گیرد که مقاومت برشی خاک بین چهار درصد مختلف افزودنی $SSA(8\%)$ ، $SSA(16\%)$ ، $SL(8\%)$ و $SL(16\%)$ به گونه‌ای می‌باشد که در تمامی زمانه‌ای عمل‌آوری مقاومت برشی خاک با افزودنی $SL(8\%)$ کمترین مقدار و با افزودنی $SL(16\%)$ تا زمان عمل‌آوری ۶۰

روز بیشترین مقدار را دارند ولی در زمان عمل‌آوری ۹۰ روزه مقاومت برشی خاک با افزودنی SL(16%) و SSA(8%) از مقاومت برشی خاک با افزودنی SL(16%) بیشتر می‌شود.



نمودار (۴-۱۵) مقایسه $SL(2\&4)$ با $SSA(2\&4)$ در زمان‌های عمل‌آوری مختلف



نمودار (۴-۱۶) مقایسه $SL(8\&16\%)$ با $SSA(8\&16\%)$ در زمان‌های عمل‌آوری مختلف

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ نتیجه‌گیری

بر اساس آزمایشات انجام‌شده در فصل پنجم نتایج زیر حاصل گردید:

- ۱- با افزودن خاکستر لجن فاضلاب به خاک، رطوبت بهینه افزایش یافته و از مقدار $23,5\%$ (خاک بدون افزودنی) تا $26,05\%$ (خاک با افزودنی 16% SSA) می‌رسد.

۲- با افزودن خاکستر لجن فاضلاب به خاک وزن مخصوص خشک کاهش یافته و از مقدار $1,575 \frac{gr}{cm^3}$ (خاک بدون افزودنی) تا $1,505 \frac{gr}{cm^3}$ (خاک با افزودنی (SSA(16%) می‌رسد.

۳- با افزودن خاکستر لجن فاضلاب و آهک به خاک، رطوبت بهینه افزایش یافته و از مقدار $23,5\%$ (خاک بدون افزودنی) تا $25,2\%$ (خاک با افزودنی (SL(16%) می‌رسد.

۴- با افزودن خاکستر لجن فاضلاب و آهک به خاک وزن مخصوص خشک کاهش یافته و از مقدار $1,575 \frac{gr}{cm^3}$ (خاک بدون افزودنی) تا $1,525 \frac{gr}{cm^3}$ (خاک با افزودنی (SSA(16%) می‌رسد.

۵- افزودن SSA (به تنهایی) تأثیری در واگرایی خاک ندارد و نمی‌تواند خاک واگرا را به غیر واگرا تبدیل کند.

۶- افزودن SSA همراه با آهک به میزان 8% خاصیت واگرایی خاک را در مدت عمل‌آوری سه روزه از بین برده و خاک واگرا را به خاک غیر واگرا تبدیل می‌کند.

نتیجه فوق بیانگر کاهش حجم آهک مصرفی بوده و نشان می‌دهد که ترکیب SSA با آهک در بهبود خاصیت واگرایی بهتر از آهک (به تنهایی) و SSA (به تنهایی) عمل می‌کند.

۷- با افزایش میزان افزودنی خاکستر لجن فاضلاب تا میزان بهینه 8% مقاومت برشی افزایش یافته و از آن به بعد با کاهش مقاومت مواجه خواهیم بود.

۸- با افزایش زمان عمل‌آوری مقاومت خاک با افزودنی خاکستر لجن فاضلاب افزایش می‌یابد.

۹- با افزایش میزان افزودنی خاکستر لجن فاضلاب و آهک مقاومت برشی افزایش می‌یابد.

۱۰- با افزایش زمان عمل‌آوری مقاومت خاک با افزودنی خاکستر لجن فاضلاب و آهک افزایش می‌یابد.

۱۱- خاک با افزودنی SSA در زمان عمل‌آوری کوتاه مقاومت کمتری نسبت به خاک با افزودنی SL دارد و باگذشت زمان و افزایش درصد افزودنی این روند تغییر پیدا کرده به‌طوری که شاهد سه نتیجه جالب زیر گشتیم:

الف: مقاومت خاک با افزودنی $SSA(4\%)$ در زمان سه روزه نسبت به مقاومت خاک با افزودنی $SL(2\&4\%)$ کمتر می‌باشد ولی با افزایش زمان عمل‌آوری این روند تغییر یافته به گونه‌ای که در زمان چهارده روزه بیشتر از $SL(2\%)$ و $SL(4\%)$ می‌شود.

ب: خاک با افزودنی $SSA(8\%)$ در هر زمانی مقاومت کمتری نسبت به مقاومت خاک با افزودنی $SL(8\%)$ دارد.

ج: در تمامی درصدها با افزایش زمان عمل‌آوری مقاومت خاک با افزودنی SSA نسبت به مقاومت خاک با افزودنی SL بیشتر می‌شود.

۵-۲ پیشنهادها

۱- انجام آزمایش مشابه با درصدهای وزنی مختلف: در این مطالعه بر روی ۸ درصد مختلف از افزودنی (۴ درصد مختلف از SSA به تنهایی و ۴ درصد مختلف از SSA با آهک) آزمایش صورت گرفت که می‌توان این درصدها را به درصدهای مختلف تعمیم داده، در مورد بهینه بودن ۸ و یا درصد های مجاور نظیر ۷ تا ۴ یا ۹ تا ۱۵ تصمیم‌گیری نمود. (برای افزودنی SSA به تنهایی)

۲- انجام آزمایش مشابه در زمانه‌ای عمل‌آوری مختلف: این مطالعه در ۶ زمان عمل‌آوری مختلف (۳ روزه، ۷ روزه، ۱۴ روزه، ۲۸ روزه، ۶۰ روزه و ۹۰ روزه) انجام گرفته که می‌توان آزمایش مشابهی را در زمان عمل‌آوری بالا تر مانند ۶ ماهه، ۹ ماهه و حتی ۱ ساله نیز انجام داده، روند تغییرات را مورد ارزیابی قرارداد.

۳- انجام آزمایش مشابه بر روی خاک های مختلف: این مطالعه بر روی خاک با مشکل واگرایی انجام شده که می‌توان این آزمایش را بر روی خاک های مسئله‌دار دیگری نظیر خاک متورم شونده انجام داده و نتایج را مورد ارزیابی قرارداد.

۴- انجام آزمایش مشابه با افزودنی های مختلف: در این مطالعه یک‌بار از افزودنی SSA به تنهایی و بار دیگر از افزودنی SSA به همراه آهک استفاده شده است که می‌توان به جای آهک از مواد دیگری نظیر سیمان، میکروسیلیس و... استفاده نموده و با این مطالعه مقایسه کرد و در نتیجه موثرترین مواد را انتخاب نمود.

۵- انجام آزمایش مشابه با نسبت های مختلف SSA به آهک یا هر افزودنی دیگر: در این مطالعه SSA و آهک به نسبت ثابت ۴ به ۱ (به ازای هر آهک، ۴ SSA) باهم ترکیب شده اند که می توان این نسبت را از ۴ به ۱ به نسبت های ۱ به ۱، ۲ به ۱، ۳ به ۱، ۱ به ۲، ۱ به ۳، ۱ به ۴ و ... تعمیم داده و نتایج را مورد بحث و بررسی قرارداد.

۶- انجام سایر آزمایشات: در این مطالعه بر روی آزمایشات پین هول و برش مستقیم کار شده درحالی که می توان بر روی سایر آزمایشات نظیر سه محوری، تک محوری، CBR، تورم (بیشتر برای خاک های متورم شونده)، تحکیم و ... مطالعه مشابهی را انجام داده و نتایج را مورد بحث و بررسی قرارداد.

منابع و مراجع:

۱. اخوت، نشاط و همکاران، (۱۳۸۹)، «اصلاح رفتار مقاومتی خاک با استفاده از الیاف طبیعی»، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
۲. اسلامی، ابوالفضل و سخاوتیان، آرش، (۱۳۹۲)، «مهندسی ژئوتکنیک؛ مبانی، کاوش‌ها و تفسیرها»، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران)، ۸۶۱ صفحه.
۳. افتخاریان، لیلا و همکاران، (۱۳۸۰)، «آزمایشگاه مکانیک خاک»، نشر کتاب دانشگاهی، چاپ دوم.
۴. الیاس آذر، خسرو، (۱۳۶۹)، «خاک‌شناسی»، انتشارات بخش فرهنگی جهاد دانشگاهی دانشگاه ارومیه.
۵. بای بوردی، محمد، (۱۳۶۳)، «فیزیک خاک»، تهران، موسسه چاپ و انتشار دانشگاه تهران، چاپ هفتم (تابستان ۱۳۸۲)، ۵۲۳ صفحه.
۶. برزگر، عبدالرحمن، (۱۳۸۰)، «فیزیک خاک پیشرفته»، تهران، انتشارات دانشگاه شهید چمران، چاپ اول، ۳۱۷ صفحه.
۷. حائری، محسن، (۱۳۶۳)، «اصول طرح سدهای خاکی»، گروه مهندسين عمران و صنايع.
۸. حیدریان، هومن، ۲۶ شهریور، (۱۳۸۷)، «روش‌های استاندارد آزمون‌های آزمایشگاه مکانیک خاک بر اساس استاندارد ASTM 2000»، ناشر: آوند اندیشه، جلد اول.
۹. داس، برانجا ام. ترجمه: اطمیابی، اردشیر، پاییز (۱۳۷۲)، «اصول مهندسی ژئوتکنیک»، تهران، نشر کتاب دانشگاهی، ویرایش پنجم، ۶۵۶ صفحه.
۱۰. رحیمی، حسن، (۱۳۶۸)، «مسائل سازه‌های آبی در خاک‌های شور و گچی»، اولین مجمع فنی ژئوتکنیک در سد سازی و منابع آب.
۱۱. طباطبایی، امیرمحمد، (۱۳۶۴)، «روسازی راه»، تهران، نشر کتاب دانشگاهی، چاپ شانزدهم (۱۳۸۸)، ۵۶۵ صفحه.

۱۲. عسگری، ف و سهرابی بیدار، ع، (۱۳۷۹)، «پهنه‌بندی زمین‌شناسی مهندسی استان لرستان» > مطالعه موردی پهنه‌بندی خاک های واگرا»، پژوهشنامه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، شماره سوم، صفحه ۱۷ الی ۲۴.

۱۳. عسگری، فرج اله و فاخر، علی، (۱۳۷۳)، «تورم و واگرایی خاک‌ها از دید مهندس ژئوتکنیک»، تهران، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران، ۲۴۵ صفحه.

۱۴. کریمی، سیامک، (۱۳۹۰)، «بررسی پارامترهای مقاومت برشی خاک های رسی واگرای تثبیت‌شده با آهک و تسلیح شده با الیاف مصنوعی»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی زنجان.

۱۵. مختاری، مریم، پور حسینی، رضا، عبدلی، نادر، (۱۳۸۸)، «تأثیر الیاف بر رفتار مکانیکی خاک تثبیت‌شده با آهک»، هشتمین کنگره بین‌المللی عمران.

۱۶. نبی، مهرداد، (۱۳۹۲)، «بررسی پارامتر های تحکیمی خاک رس واگرا، تثبیت‌شده با آهک و تسلیح شده با الیاف پلی‌پروپیلن»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی زنجان.

[17]. Akbulut, Suat, Arasan, Seracettin, kalkan, Ekram, 13 February 2007, "Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers", Elsevier, Applied Clay Science 38 (2007), 23-32.

[18]. ASTM D4647-87, Standard Test Method for "Identification and classifications of Dispersive Clay Soils by Pinhole Test".

[19]. A. Yague, S. Valls, E. Vazquez, "Use of cement portland mortar of stabilized dry sewage sludge in construction applications", Waste Manage. Environ. (2002) 527-536.

[20]. Decker R.S. and Dunnigan L.P. "Development and Use of the Soil Conservation Service Dispersion Test", ASTM STP 623, 1977, PP. 34-109.

[21]. D.F. Lin, H.L. Luo, Y.N. Sheen, "Glazed Tiles Manufactured From Incinerated Sewage Sludge Ash and Clay", J. Air Waste Manage. Assoc. 55(2)(2005) 163-172.

[22]. D.F. Lin, H.L. Luo, S.W. Zhang, "Effects of nano-SiO₂ on tiles manufactured with clay and incinerated sewage sludge ash", J. Mater. Civil Eng, ASCE 19(10)(2007) 801-808.

[23]. D.F. Lin, K.L. Lin, M.J. Hung, H.L. Luo, "Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil", J. Hazard. Mater. 145(1-2)(2007) 58-64 doi:10.1016/j.jhazmat.2006.10.087.

[24]. J.H. Tay, A.T.C. Goh, "Clay-blended sludge as lightweight aggregate concrete material", J. Environ. Eng. 117(6)(1991) 834-844.

- [25].J.H.Tay,A.T.C.Goh,"Engineering properties of incinerator residue",J.Environ.Eng.117(2)(1991)224-235.
- [26].L.Chen, D.F. Lin," Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement" J. Hazardous. Materials.162 (2009) 321–327.
- [27]. Shane, Donatello, Christopher R. Cheeseman, " Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (ISSA) ", review. Waste Management 33 (2013) 2328–2340.
- [28]. Sherard J.L. Dunnigan L.P. and Decker R.S."Identification and Nature of Dispersive Soils", J.Geotech.Eng.Div. ASCE, VOL. 102, NO. GT4, 1976, PP. 287-301.
- [29]. Sherard, J. L."Sink Holes in Dams of Coarse Broadly Graded Soils",Trans. Of 13th International Congress on Large Dams, Delhi, India,Vol.2, pp. 25-36, 1979.
- [30].Test Method Nev." Method Of Test For Maximum Density And Relative Compaction Of Soils Using The Harvard Miniature Compaction Device"T101G September 15, 2009.

Abstract

In this research the sewage sludge ash once separately and once with lime with the constant ration of 4 to 1 in eight values (SSA(%2) ,SSA(%4) ,SSA(%8) ,SSA(%16) , SL(%2) ,SL(%4) ,SL(%8) , SL(%16)) and in six different processing times (60, 28, 14, 7, 3 and 90 days) was added to the soil as stabilizer. In order to understand the impact of additives, experiments such as congestion with two repetition times, pinhole and direct cut each with three repetition times were conducted on the samples. This research has shown that with increase of additive, the optimum humidity increases and the dry density decreases. Also findings show that increase of SAA has no effect in the non-divergence of the soil but if this material is used alongside the lime, the divergence of the soil with 8% additive and in three days period vanishes. Whereas the divergence of the mentioned soil with 7% lime disappears solely in three days period.

The findings of straight cut also show that with addition of SAA up to 8% the straight cut resistance increases and after that the resistance decreases whereas with the increase of SL the resistance is still increasing.

Time has a great role in the cut resistance so that with increase of the time the cut resistance of soil sample with addition of SSA and SL in each state increases.

Keywords: Divergent soil, Sewage sludge ash with lime, Soil stabilization, Straight cut resistance.



Kharazmi International Campus

M.Sc. Thesis in Geotechnical Engineering

Investigation of Laboratory tests for strength Parameters of Stabilized
dispersive soil by sewage sludge ash (SSA) and lime

By: Mohammad Reza Akbari

Supervisor:

Dr. Seyed Mahdi Hosseini

September 2016