

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

گروه مکانیک خاک و پی

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی رفتار خاک های لس فروریزی با استفاده از دستگاه تحکیم در حالت اشباع

و غیر اشباع توسط افزودن مقادیر مختلف مواد نانو

سید صادق حسینی

استاد راهنما :

دکتر سید مهدی حسینی

بهمن ۱۳۹۴



دانشکده مهندسی عمران

گروه مکانیک خاک و پی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سید صادق حسینی به شماره دانشجویی ۹۲۱۶۴۷۴

تحت عنوان: بررسی رفتار خاک های لس فروریزی با استفاده از دستگاه تحکیم در

حالت اشباع و غیر اشباع توسط افزودن مقادیر مختلف مواد نانو

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد

ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

ماحصل آموخته هایم را تقدیم می کنم به آنان که مهر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی ام است

به استوارترین تکیه گاهم، دستان پر مهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان سبز مادرم

به همراهان همیشگی ام، خواهرانم

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بکوشم قطره ای از دریای بی کران مهربانیتان را

سپاس نتوانم بگویم، امروز هستی ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما

بوسه بر دستان پرمهرتان

شکر شایان نثار ایزد منان که توفیق را رفیق راهم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم. از استاد فاضل و اندیشمند جناب آقای دکتر سید مهدی حسینی به عنوان استاد راهنما که همواره نگارنده را مورد لطف و محبت خود قرار داده و با رهنمایی های خویش، روشن گر مسیر بنده بوده اند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

نهال را "باران" باید، تا سیرابش کند از آب حیات و "آفتاب" باید تا بتاباند نیرو را و محکم کند شاخه های تازه روییده را؛

بسی شایسته است از اساتید فرهیخته و فرزانه ام جناب آقای دکتر رضا نادری و جناب آقای دکتر امیر بذرافشان مقدم، آموزگاران که برایم مسیر علم را روشن نمودند و زحمت بازخوانی و داوری پایان نامه را تقبل فرمودند، تقدیر و تشکر نمایم. همچنین سزاوار است از جناب آقای دکتر احمد احمدی، جناب آقای جبرئیل نوکنده و جناب آقای مهندس سید جمال کلانتری که همگی در روند آزمایش ها، کمال مساعدت و همکاری را داشتند، تقدیر و تشکر نمایم.

از دوست عزیزم جناب آقای مهندس صابر نوکنده که بنده را در تمامی مراحل پایان نامه و آزمایشگاه همراهی نمودند و موجب دلگرمی بودند، از صمیم قلب تشکر میکنم و از جناب آقای مهندس آرش محمد حسینی که همواره راهگشای مشکلات بنده بودند، قدردانی می نمایم.

تعهد نامه

اینجانب سید صادق حسینی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده "پایان نامه بررسی رفتار خاک های لس فروریزی با استفاده از دستگاه تحکیم در حالت اشباع و غیر اشباع توسط افزودن مقادیر مختلف مواد نانو" تحت راهنمایی جناب آقای دکتر سید مهدی حسینی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

خاک‌هایی در طبیعت وجود دارند که در مقابل افزایش رطوبت حساس می‌باشند. این خاک‌ها ممکن است در اثر مرطوب شدن در حضور یا عدم حضور بار، دچار افزایش یا کاهش در حجم و ساختار شوند که خاک‌های مسأله‌دار نامیده می‌شوند. خاک‌های متورم‌شونده و فروریزی^۱، خاک‌های مسأله‌داری هستند که خاک‌های فروریزی موجب تخریب در سازه‌ها می‌شوند و خاک لس^۲ معمول-ترین خاک فروریزی می‌باشد. محققان مختلفی این موضوع را بررسی و راه حل‌هایی را ارائه کرده‌اند که یکی از راه‌های جلوگیری از فروریزش، تثبیت و بهسازی خاک‌ها می‌باشد.

در این پژوهش، خاک لس کلاله بررسی و پتانسیل فروریزش آن محاسبه می‌شود و سپس توسط مواد مختلف از جمله: سیمان، خاکستر بادی، نانو آهک، نانو بوکسیت، نانو سیلیکا، بنتونیت و کائولینیت در درصدهای مختلف تثبیت شده و پتانسیل فروریزش در آن‌ها محاسبه و سپس با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که سیمان، نانو آهک و نانو سیلیکا بیشترین تأثیر را در کاهش پتانسیل فروریزش داشته و سایر مواد تأثیر به‌سزایی در جلوگیری از فروریزش نداشته‌اند.

به منظور ارزیابی رفتار فروریزی، چندین آزمایش کاغذ فیلتر^۳ و ادمتر با قابلیت کنترل مکش به صورت مکش ساختاری متغیر و بار ثابت در حالت غیر اشباع برای خاک‌های بازسازی شده صورت گرفته و مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که نانو آهک در شرایط غیر اشباع، پتانسیل فروریزی خاک را کاهش می‌دهد.

کلمات کلیدی: خاک‌های فروریزی، تثبیت، لس کلاله، سیمان، خاکستر بادی، نانو آهک، نانو بوکسیت، نانو سیلیکا، بنتونیت، کائولینیت، کاغذ فیلتر، غیر اشباع

¹ Collapsible

² Loess

³ Filter Paper

مقالات مستخرج از پایان نامه:

حسینی س. ص.، نوکنده ص.، حسینی س. م.، (۱۳۹۴)، " بررسی آزمایشگاهی تاثیر تورم و چسبندگی در نشست خاک های فروریزی با انجام آزمایش تحکیم و محاسبه پارامتر فروریزی"،
دومین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، قم

فهرست مطالب

۱- فصل اول : کلیات..... ۱

۱-۱- مقدمه..... ۲

۱-۲- ضرورت و اهداف انجام تحقیق..... ۴

۱-۳- روش تحقیق..... ۴

۱-۴- ساختار پایان نامه..... ۵

۲- فصل دوم : خاک‌های فروریزی و مروری بر تحقیقات گذشته..... ۷

۲-۱- مقدمه..... ۸

۲-۲- خاک‌های فروریزی..... ۸

۲-۲-۱- مروری بر تعاریف خاک‌های فروریزی..... ۸

۲-۲-۲- نحوه پیدایش لس‌ها..... ۹

۲-۲-۳- پراکندگی خاک لس..... ۱۱

۲-۳-۱- پراکندگی خاک لس در جهان..... ۱۱

۲-۳-۲- پراکندگی لس در ایران..... ۱۲

۲-۴- ویژگی‌های عمومی و مشخصات لس‌ها..... ۱۳

۲-۳- عوامل مؤثر بر میزان فروریزش خاک..... ۲۱

۲-۳-۱- میزان رطوبت اولیه..... ۲۱

۲-۳-۲- تأثیر نوع خاک..... ۲۱

۲-۳-۳- تراکم نسبی..... ۲۲

۲۳	۴-۳-۲- تأثیر تنش موجود در هنگام اشباع کردن خاک
۲۳	۵-۳-۲- اثر باندهای سیمانی بین ذرات
۲۴	۶-۳-۲- اثر سیکل‌های ترش‌دگی
۲۵	۴-۲- روش‌های شناسایی خاک‌های فروریزشی
۲۷	۱-۴-۲- روش‌های صحرایی
۲۸	۲-۴-۲- آزمایش بارگذاری صفحه
۲۸	۳-۴-۲- آزمایش‌های تحکیم یگانه و دوگانه
۳۰	۴-۴-۲- روش‌های آزمایشگاهی کیفی
۳۳	۵-۲- شیمی خاک و تبادل کاتیونی
۳۳	۱-۵-۲- لایه مضاعف الکتریکی
۳۴	۱-۱-۵-۲- لایه مضاعف هلموتز
۳۴	۲-۱-۵-۲- تئوری لایه مضاعف گوی - چاپمن
۳۵	۳-۱-۵-۲- تئوری لایه مضاعف اشترن
۳۶	۴-۱-۵-۲- اثر ظرفیت کاتیون بر ضخامت لایه مضاعف پخش شده
۳۶	۵-۱-۵-۲- اثر غلظت الکترولیت بر ضخامت لایه مضاعف پخش شده
۳۷	۲-۵-۲- ویژگی‌های واکنش‌های تبادل کاتیونی
۳۸	۶-۲- بهسازی لس‌ها
۳۸	۱-۶-۲- تراکم لس
۳۸	۱-۱-۶-۲- تراکم سطحی با استفاده از غلطک
۳۸	۲-۱-۶-۲- تراکم به وسیله کوبش
۳۹	۳-۱-۶-۲- تراکم به وسیله شمع‌های هرمی کوتاه
۳۹	۲-۶-۲- بهسازی دانه‌بندی خاک

۳۹	 زهکشی لس ۳-۶-۲
۳۹	 زهکش‌های سطحی ۱-۳-۶-۲
۴۰	 زهکش‌های افقی ۲-۳-۶-۲
۴۰	 زهکش‌های قائم ۳-۳-۶-۲
۴۱	 زهکش‌های برقی قائم ۴-۳-۶-۲
۴۲	 تثبیت لس ۴-۶-۲
۴۲	 تثبیت‌کننده‌های دانه‌ای ۱-۴-۶-۲
۴۲	 تثبیت‌کننده‌های شیمیایی ۲-۴-۶-۲
۴۲	 سیمان پرتلند ۱-۲-۴-۶-۲
۴۳	 آهک ۲-۲-۴-۶-۲
۴۴	 قیر طبیعی ۳-۲-۴-۶-۲
۴۵	 رزین ۴-۲-۴-۶-۲
۴۵	 پسماند نیروگاه ۵-۲-۴-۶-۲
۴۶	 نمک‌ها و سایر مصالح ۶-۲-۴-۶-۲
۴۸	 سایر روش‌های مورد استفاده برای بهسازی خاک‌های لس ۵-۶-۲
۴۹	 خاک‌های غیر اشباع ۷-۲
۴۹	 مفهوم مکش ۱-۷-۲
۵۱	 روش‌های اندازه‌گیری مکش ساختاری و مکش کل خاک ۲-۷-۲
۵۲	 رفتار فروریزشی خاک‌ها با تغییرات مکش ساختاری ۳-۷-۲
۵۷	 فصل سوم: شناسایی خاک و روند انجام آزمایش‌ها
۵۸	 مقدمه ۱-۳

۵۸	۲-۳- انتخاب موقعیت و محل اخذ نمونه خاک فروریزی.....
۶۱	۳-۳- نمونه‌گیری.....
۶۱	۱-۳-۳- نمونه‌گیری دست‌نخورده در محل.....
۶۴	۲-۳-۳- نمونه‌گیری دست‌نخورده در آزمایشگاه.....
۶۴	۴-۳- آزمایشات شناسایی اولیه خاک.....
۶۴	۱-۴-۳- درصد رطوبت طبیعی خاک.....
۶۵	۲-۴-۳- چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک (G_s):.....
۶۶	۳-۴-۳- حد خمیری (PL)، حد روانی (LL) و PH خاک.....
۶۷	۴-۴-۳- دانه‌بندی هیدرومتری.....
۶۸	۵-۴-۳- تعیین وزن مخصوص خشک خاک.....
۶۹	۶-۴-۳- نتایج آزمایش XRD.....
۷۰	۷-۴-۳- نتایج آزمایش XRF.....
۷۱	۵-۳- ارزیابی پتانسیل فروریزی خاک منطقه مورد مطالعه توسط آزمایش تحکیم یگانه..
۷۳	۶-۳- مشخصات مصالح.....
۷۳	۱-۶-۳- نانو آهک.....
۷۴	۲-۶-۳- بنتونیت.....
۷۵	۳-۶-۳- کائولینیت.....
۷۶	۴-۶-۳- نانو بوکسیت.....
۷۶	۵-۶-۳- نانو سیلیکا.....
۷۷	۶-۶-۳- سیمان.....
۷۸	۷-۶-۳- خاکستر بادی.....

- ۷۸-۷-۳- تعیین منحنی مشخصه آب - خاک.....
- ۸۰-۱-۷-۳- روش کاغذ فیلتر.....
- ۸۲-۲-۷-۳- آزمایش ادومتر با قابلیت کنترل مکش.....
- ۸۴-۱-۲-۷-۳- اجزا محفظه ادومتر غیر اشباع.....
- ۸۶-۲-۲-۷-۳- اشباع سازی دیسک سرامیکی.....
- ۸۷-۳-۲-۷-۳- روند انجام آزمایش ادومتر غیر اشباع.....
- ۸۷-۸-۳- نتیجه گیری.....

۴- فصل چهارم.....

- ۹۰-۱-۴- کلیات.....
- ۹۳-۲-۴- نتایج آزمایش های فروریزش استاندارد و بحث در مورد آنها.....
- ۹۳-۱-۲-۴- خاک دست نخورده.....
- ۹۴-۲-۲-۴- خاک بازسازی شده و تثبیت نشده.....
- ۹۶-۳-۲-۴- خاک بازسازی شده و تثبیت شده.....
- ۹۷-۱-۳-۲-۴- خاکستر بادی.....
- ۹۹-۲-۳-۲-۴- بنتونیت.....
- ۱۰۱-۳-۳-۲-۴- نانو بوکسیت.....
- ۱۰۳-۴-۳-۲-۴- کائولینیت.....
- ۱۰۵-۵-۳-۲-۴- سیمان.....
- ۱۰۷-۶-۳-۲-۴- نانو آهک.....
- ۱۰۹-۷-۳-۲-۴- نانو سیلیکا.....

۳-۴- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌های فروریزش استاندارد..... ۱۱۰

۱-۳-۴- اثر دست‌خوردگی در پتانسیل فروریزش خاک ۱۱۰

۲-۳-۴- تاثیر میزان ماده افزودنی در فروریزش خاک ۱۱۱

۳-۳-۴- مقایسه نوع ماده افزودنی در میزان فروریزش ۱۱۳

۴-۴- نتایج آزمایش کاغذ فیلتر..... ۱۱۷

۵-۴- نتایج آزمایش ادمتر با قابلیت کنترل مکش..... ۱۱۸

۵- فصل پنجم : خلاصه نتایج آزمایش‌ها و پیشنهادها..... ۱۲۳

۱-۵- مقدمه..... ۱۲۴

۲-۵- خلاصه نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی..... ۱۲۴

۳-۵- پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده..... ۱۲۵

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ نحوه تشکیل خاک‌های لسی..... ۱۰
- شکل ۲-۲ پراکندگی خاک لس در جهان ۱۱
- شکل ۳-۲ ریز ساختار کلی خاک‌های لسی..... ۱۵
- شکل ۴-۲ ساختار لانه زنبوری خاک لس الف: پیش از غرقاب شدن ب: پس از غرقاب شدن..... ۱۵
- شکل ۵-۲ منحنی دانه‌بندی خاک‌های لسی..... ۱۶
- شکل ۶-۲ انواع مختلف نیروهای بین دانه‌ای در ساختارهای فروریزی..... ۱۹
- شکل ۷-۲ فرایند فروریزش خاک ماسه‌ای با پیوندهای رسی در اثر افزایش رطوبت ۱۹
- شکل ۸-۲ اثر تغییرات درصد رس بر میزان فروریزش..... ۲۲
- شکل ۹-۲ رابطه پتانسیل فروریزش با تراکم نسبی..... ۲۲
- شکل ۱۰-۲ بررسی اثر میزان مواد سیمانی‌کننده (کربنات کلسیم) بر فروریزش خاک ماسه‌ای با استفاده از اودومتر..... ۲۴
- شکل ۱۱-۲ اثر اعمال سیکل‌های ترشدگی بر میزان فروریزش..... ۲۵
- شکل ۱۲-۲ روند فروریزش در آزمایش تحکیم یگانه..... ۳۰
- شکل ۱۳-۲ روند فروریزش در آزمایش تحکیم مضاعف..... ۳۰
- شکل ۱۴-۲ توزیع کاتیون‌ها نزدیک سطح ذره باردار بر اساس تئوری هلموتز..... ۳۴
- شکل ۱۵-۲ توزیع کاتیون‌ها و آنیون‌ها در اطراف ذره باردار براساس تئوری اشترن..... ۳۶
- شکل ۱۶-۲ نحوه عملکرد زهکش قائم..... ۴۱
- شکل ۱۷-۲ پر شدن فضای خالی بین ذرات خاک توسط سولفور..... ۴۷
- شکل ۱۸-۲ نمودار آزاد پوسته قابل انقباض..... ۵۰
- شکل ۱۹-۲ روش انتقال محوری..... ۵۲
- شکل ۲۰-۲ نسبت فروریزش نسبی به فروریزش کل با تغییرات مکش ماتریسی..... ۵۳
- شکل ۲۱-۲ فروریزش در خاک تحت کاهش مکش ساختاری به دور از شرایط اشباع..... ۵۴

- شکل ۲-۲۲ نمودار نسبت تخلخل - مکش ماتریسی - تنش خالص قائم (a) ساختار پایدار (b) ساختار ناپایدار..... ۵۵
- شکل ۳-۱ تصاویر ماهواره‌ای مناطق بازدید شده جهت نمونه‌گیری (الف): هزار پیچ گرگان (ب): بالاجاده گرگان (ج): حومه کلاله..... ۵۹
- شکل ۳-۲ فروریزش خاک‌های منطقه نمونه‌گیری..... ۶۰
- شکل ۳-۳ مشخص کردن محل‌های کندن زمین جهت نمونه‌گیری..... ۶۱
- شکل ۳-۴ تعیین عمق خاک نباتی و رسیدن به تراز نمونه‌گیری..... ۶۲
- شکل ۳-۵ مراحل نمونه‌گیری دست‌نخورده..... ۶۳
- شکل ۳-۶ عایق کردن نمونه‌ها جهت حفظ رطوبت..... ۶۳
- شکل ۳-۷ نمودار درصد رطوبت بر حسب تعداد ضربات..... ۶۷
- شکل ۳-۸ منحنی دانه‌بندی خاک..... ۶۸
- شکل ۳-۹ نمودار خط A..... ۶۸
- شکل ۳-۱۰ نمودار رفتار فروریزشی خاک دست‌نخورده..... ۷۲
- شکل ۳-۱۱ آزمایش میکروسکوپ الکترونی..... ۷۷
- شکل ۳-۱۲ سطح مقطع دانه سیمان..... ۷۸
- شکل ۳-۱۳ نمونه منحنی مشخصه آب - خاک..... ۷۹
- شکل ۳-۱۴ نحوه قرار گرفتن فیلتر کاغذی در روش تماسی..... ۸۱
- شکل ۳-۱۵ نحوه قرار گرفتن فیلتر کاغذی در روش غیر تماسی..... ۸۲
- شکل ۳-۱۶ محفظه دستگاه تحکیم غیر اشباع..... ۸۴
- شکل ۳-۱۷ پایه کف محافظ و دیسک سرامیکی..... ۸۵
- شکل ۴-۱ نمودار رفتار فروریزشی خاک دست‌نخورده و تثبیت نشده..... ۹۳
- شکل ۴-۲ نمودار رفتار فروریزشی خاک بازسازی شده..... ۹۵
- شکل ۴-۳ نمودار رفتار فروریزشی خاک بازسازی شده و تثبیت شده با خاکستر بادی..... ۹۷
- شکل ۴-۴ نمودار رفتار فروریزشی خاک بازسازی شده و تثبیت شده با بنتونیت..... ۹۹

- شکل ۴-۵ نمودار رفتار فروریزی خاک بازسازی شده و تثبیت شده با نانو بوکسیت..... ۱۰۱
- شکل ۴-۶ نمودار رفتار فروریزی خاک بازسازی شده و تثبیت شده با کائولینیت..... ۱۰۳
- شکل ۴-۷ نمودار رفتار فروریزی خاک بازسازی شده و تثبیت شده با سیمان..... ۱۰۵
- شکل ۴-۸ نمودار رفتار فروریزی خاک بازسازی شده و تثبیت شده با نانو آهک..... ۱۰۷
- شکل ۴-۹ نمودار رفتار فروریزی خاک بازسازی شده و تثبیت شده با نانو سیلیکا..... ۱۰۹
- شکل ۴-۱۰ نمودار مقایسه رفتار فروریزی خاک تثبیت نشده در حالت دست‌نخورده و بازسازی شده
..... ۱۱۱
- شکل ۴-۱۱ نمودار مقایسه رفتار فروریزی خاک بازسازی شده و تثبیت شده به ازای ۲٪ ماده
افزودنی..... ۱۱۳
- شکل ۴-۱۲ نمودار مقایسه رفتار فروریزی خاک بازسازی شده و تثبیت شده به ازای ۴٪ ماده
افزودنی..... ۱۱۴
- شکل ۴-۱۳ نمودار مقایسه رفتار فروریزی خاک بازسازی شده و تثبیت شده به ازای ۶٪ ماده
افزودنی..... ۱۱۵
- شکل ۴-۱۴ نمودار مقایسه معیار فروریزش بر حسب مقادیر مختلف مواد افزودنی..... ۱۱۶
- شکل ۴-۱۵ منحنی مشخصه آب - خاک بر اساس درجه اشباع با استفاده از روش کاغذ فیلتر..... ۱۱۷
- شکل ۴-۱۶ منحنی مشخصه آب - خاک بر اساس رطوبت حجمی با استفاده از روش کاغذ فیلتر..... ۱۱۸
- شکل ۴-۱۷ تغییرات تخلخل بر حسب زمان در آزمایش ادمتر غیر اشباع..... ۱۱۹
- شکل ۴-۱۸ منحنی مشخصه آب - خاک در روش ادمتر و کاغذ فیلتر..... ۱۲۱

فهرست جدول‌ها و رابطه‌ها

جدول ۱-۲	سطح پوشیده از لس در برخی از کشورهای جهان	۱۲
جدول ۲-۲	معیار فروریزش خاک بر اساس معیارهای کیفی آزمایشگاهی	۲۶
جدول ۳-۲	معیار فروریزش خاک بر اساس معیارهای کمی آزمایشگاهی	۲۶
جدول ۴-۲	جدول مقادیر درجه بحرانی اشباع در خاک‌های مختلف	۳۲
جدول ۵-۲	اثر ظرفیت و غلظت بر ضخامت لایه مضاعف پخش شده	۳۷
جدول ۱-۳	درصد رطوبت طبیعی خاک	۶۵
جدول ۲-۳	چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک	۶۶
جدول ۳-۳	تعداد ضربات بر اساس درصد رطوبت در آزمایش حد روانی	۶۶
جدول ۴-۳	نتایج آزمایش دانسیته خشک خاک طبیعی	۶۹
جدول ۵-۳	ترتیب فراوانی کانی‌های موجود در خاک با توجه به آزمایش XRD	۷۰
جدول ۶-۳	نتایج درصد وزنی اکسید عناصر در خاک با توجه به آزمایش XRF	۷۱
جدول ۷-۳	نتایج آزمایش فروریزش نمونه‌های دست نخورده	۷۳
جدول ۸-۳	مشخصات عمومی آهک	۷۴
جدول ۹-۳	مشخصات کائولینیت SZWMK1	۷۵
جدول ۱۰-۳	مشخصات نانو سیلیس	۷۶
جدول ۱۱-۳	روند کلی انجام آزمایش‌های غیر اشباع	۸۳
جدول ۱-۴	خلاصه آزمایش‌های فروریزش استاندارد	۹۱
جدول ۲-۴	خلاصه آزمایش‌های فروریزش غیر اشباع	۹۲
جدول ۳-۴	نتایج آزمایش فروریزش نمونه‌های دست نخورده و تثبیت نشده	۹۴
جدول ۴-۴	نتایج آزمایش فروریزش نمونه‌های بازسازی شده	۹۶

جدول ۴-۵	نتایج آزمایش فروریزش نمونه‌های بازسازی شده و تثبیت شده با خاکستر بادی.	۹۸
جدول ۴-۶	نتایج آزمایش فروریزش نمونه‌های بازسازی شده و تثبیت شده با بنتونیت	۱۰۰
جدول ۴-۷	نتایج آزمایش فروریزش نمونه‌های بازسازی شده و تثبیت شده با نانو بوکسیت.	۱۰۲
جدول ۴-۸	نتایج آزمایش فروریزش نمونه‌های بازسازی شده و تثبیت شده با کائولینیت	۱۰۴
جدول ۴-۹	نتایج آزمایش فروریزش نمونه‌های بازسازی شده و تثبیت شده با سیمان	۱۰۶
جدول ۴-۱۰	نتایج آزمایش فروریزش نمونه‌های بازسازی شده و تثبیت شده با نانو آهک	۱۰۸
جدول ۴-۱۱	نتایج آزمایش فروریزش نمونه‌های بازسازی شده و تثبیت شده با نانو سیلیکا.	۱۱۰
جدول ۴-۱۲	بررسی اثر دست‌خوردگی در رفتار فروریزشی خاک	۱۱۱
جدول ۴-۱۳	خلاصه نتایج معیار فروریزشی خاک توسط افروندنی‌های ۲٪	۱۱۴
جدول ۴-۱۴	خلاصه نتایج معیار فروریزشی خاک توسط افروندنی‌های ۴٪	۱۱۵
جدول ۴-۱۵	خلاصه نتایج معیار فروریزشی خاک توسط افروندنی‌های ۶٪	۱۱۶
جدول ۴-۱۶	پتانسیل فروریزش در آزمایش ادمتر با قابلیت کنترل مکش	۱۲۰
رابطه ۲-۱	معیار فروریزش در آزمایش تحکیم یگانه	۲۹
رابطه ۲-۲	معیار فروریزش در آزمایش تحکیم مضاعف	۲۹
رابطه ۲-۳	مکش ساختاری	۵۰
رابطه ۳-۱	درصد رطوبت طبیعی خاک	۶۴
رابطه ۳-۲	چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک	۶۵
رابطه ۳-۳	دامنه خمیری خاک	۶۷
رابطه ۳-۴	درصد رطوبت حجمی خاک	۷۹
رابطه ۴-۱	پتانسیل فروریزش خاک در آزمایش ادمتر غیر اشباع	۱۲۰

۱- فصل اول : کلیات

۱-۱- مقدمه

ساختار خاک‌ها متشکل از دانه‌های جامد و حفره‌های به هم پیوسته می‌باشد. حفره‌ها دربرگیرنده آب و هوا هستند. رفتار مکانیکی خاک‌ها، متأثر از ساختار آن‌ها می‌باشد؛ لذا شناسایی خاک، ملزم به شناخت ساختار و اجزای آن است که نباید نادیده گرفته شوند.

بسیاری از تئوری‌ها، قوانین و روابطی که تا کنون در مکانیک خاک مقدماتی پایه‌ریزی شده است، با فرض اشباع بودن خاک و نادیده گرفتن حفره‌های هوا و اثرات مکش^۱ می‌باشد؛ در حالی که ساختار حفره‌ها و مقادیر آب و هوای موجود در خاک که تعیین کننده درصد رطوبت می‌باشند، تأثیر به‌سزایی در تغییر پارامترهای مقاومتی و حجم خاک دارد.

افزایش درصد رطوبت و درجه اشباع، موجب تغییر در رفتار مکانیکی اغلب خاک‌ها می‌شود. در برخی موارد افزایش درصد رطوبت، مشکلاتی را به همراه می‌آورد که همراه با خسارت در پروژه‌های عمرانی می‌باشد. این نوع خاک‌ها را، مسأله دار و یا حساس در مقابل آب می‌نامند که از جمله آن‌ها می‌توان به خاک‌های متورم شونده، فروریزی و واگرا اشاره نمود (Adnan et al. 1992). در این پژوهش به بررسی خاک‌های فروریزی^۲ خواهیم پرداخت و رفتار مکانیکی این دسته از خاک‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

وجود خاک‌های فروریزی در پنج قاره جهان تا کنون گزارش شده است (Lutengger et al. 1988). لذا به دلیل طیف گسترده این خاک‌ها، شناخت و بررسی رفتار مکانیکی آن‌ها در پروژه‌های عمرانی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. خاک‌های فروریزی بخش وسیعی از مناطق ایران از جمله نواحی مرکزی، شرقی و شمالی را در بر می‌گیرد.

پروژه‌هایی از قبیل سد سیوند، راه‌آهن تهران-مشهد، طرح زهکشی خدا آفرین، جاده یزد-

¹ Suction

² Collapsible Soils

اردکان، جاده هشتگرد-طالقان، شهرهایی مانند کرمان، گرگان، گنبد، کلالة و... روی این خاک‌ها احداث شده‌اند. این خاک‌ها در درصد رطوبت‌های پایین و به تبع آن در درجه اشباع‌های پایین، به دلیل پیوندهای بین دانه‌ای و مکش ساختاری، مقاومت خوبی از خود نشان می‌دهند ولی در صورت افزایش رطوبت، این پیوندها سست می‌شوند و موجب کاهش حجم آنی و سریع خاک و در نهایت فروریزش آن می‌شود. لازم به ذکر است که پیوندهای دانه‌ای در خاک لس، به دلیل وجود باندهای نمکی، کلسیتی و یا پل‌های رسی می‌باشد. دانشمندان مختلفی، جهت مشخص کردن میزان فروریزی بودن خاک، معیارهای مختلفی را ارائه نموده‌اند که در ذیل به چندین مورد از آن‌ها اشاره می‌شود.

کلونگر اولین معیار فروریزش خاک را بر پایه وزن مخصوص خشک ارائه نمود (Clevenger, 1956).

گیبس و بارا معیار خود را بر اساس وزن مخصوص خشک و حد روانی خاک ارائه نمودند (Gibbs and Bara, 1962).

جنینگز و نایت آزمایش ادومتری مضاعف را جهت ارزیابی رفتار خاک در برابر اشباع شدن و بارگذاری در تنش‌های مختلف ارائه نمودند (Jennings and Knight, 1975) که مدت‌ها بعد توسط هاستن و همکاران اصلاح گردید (Houston et al., 1988).

از اواخر دهه هشتاد، محققان به بررسی خاک‌های فروریزی به کمک مدل‌های ریاضی و روش‌های عددی نمودند که تمرکز آن‌ها روی مدل کردن خاک و نحوه توزیع حفرات و خلل و فرج بوده است. در گذشته توصیه به عدم ساخت سازه‌ها بر روی خاک‌های فروریزی بوده است؛ لیکن امروزه می‌توان با روش‌های مختلفی به اصلاح و تثبیت¹ آن‌ها پرداخت و ساخت سازه‌ها را بر روی این خاک‌ها انجام داد. قابل ذکر است که این مطلب متناسب با درجه اهمیت سازه می‌باشد. از جمله روش‌های

¹ Stabilization

اصلاح و تثبیت این خاک‌ها می‌توان به اشباع کردن قبل از ساخت سازه، تراکم دینامیکی، تزریق و تثبیت آن‌ها و کنترل آب‌های سطحی اشاره نمود.

۱-۲- ضرورت و اهداف انجام تحقیق

به طور تقریبی می‌توان بیان کرد که خاک‌های فروریزی در اکثر نقاط ایران وجود دارد و پراکنده شده است. با توجه به مشکلات و خساراتی که ساخت سازه بر روی این خاک‌ها به همراه دارد، بررسی رفتار این خاک‌ها و مکانیسم فروریزش آن‌ها و پیدا کردن روشی برای اصلاح و تثبیت آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

از جمله عوامل کنترل فروریزش، می‌توان به تقویت پیوندهای رسی و افزایش حجم خاک اشاره نمود. تقویت پیوندهای رسی می‌تواند توسط موادی که قابلیت ایجاد خاصیت چسبندگی دارند، صورت پذیرد. افزایش حجم خاک نیز می‌تواند توسط کانی‌های رسی از جمله بنتونیت که دارای خاصیت چسبندگی نیز می‌باشد، صورت پذیرد. در این پژوهش از خاکستر بادی، سیمان، نانو بوکسیت، نانو سیلیکا، نانو آهک، بنتونیت و کائولینیت به عنوان ماده افزودنی استفاده شده است. در این تحقیق بررسی و اصلاح خاک‌های فروریزی با مواد مختلف توسط آزمایش فروریزش استاندارد صورت گرفته است و در نهایت توسط نانو آهک، آزمایش ادمتر با قابلیت کنترل مکش در شرایط غیر اشباع انجام شده است. در حقیقت می‌توان گفت هدف کلی این پژوهش، تثبیت خاک فروریزی با مواد مختلف، ساخت دستگاه تحکیم غیراشباع و راه اندازی آن و انجام آزمایش برای حالت غیر اشباع با تثبیت خاک می‌باشد.

۱-۳- روش تحقیق

در این تحقیق پس از انجام آزمایش‌های اولیه شناسایی خاک طبیعی و اثبات فروریزی بودن خاک با انجام آزمایش فروریزش، به بررسی تأثیر ۷ ماده با درصد‌های مختلف در خاک بازسازی شده

پرداخته شده است. پس از بررسی فروریزش خاک و تثبیت آن، آزمایش‌های غیر اشباع جهت بررسی رفتار فروریزی خاک در درصدهای مختلف رطوبت انجام شده است و رفتار خاک غیر اشباع توسط چند آزمایش غیر اشباع بررسی شده است. در این پژوهش، آزمایش‌های تحکیم غیر اشباع و کاغذ فیلتر در خاک غیر اشباع انجام شده است.

۴-۱- ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه حاضر در پنج فصل ارائه خواهد شد.

فصل اول شامل مقدمه و کلیاتی در مورد موضوع و اهداف تحقیق بوده است و در فصل دوم به مطالعات مختلف صورت گرفته بر روی رفتار تغییر حجمی خاک‌های غیر اشباع، تاریخچه خاک‌های فروریزی، تحقیقات انجام شده در مورد فروریزش، مطالعه روش‌ها و معیارهای شناسایی این نوع خاک‌ها، عوامل تاثیر گذار در فروریزش و مواد و روش‌های بهسازی این خاک‌ها، پرداخته شده است.

در فصل سوم نتایج آزمایش‌های اولیه شناسایی عمومی خاک از جمله چگالی دانه‌های جامد خاک، درصد رطوبت طبیعی، دانه بندی به روش تر و هیدرومتری، تراکم خاک، حدود اتربرگ، PH خاک و همچنین آزمایش‌های شناسایی عناصر و کانی‌های خاک از جمله XRD و XRF آمده است. در این فصل همچنین موقعیت جغرافیایی محل نمونه‌گیری و نحوه نمونه‌گیری دست‌نخورده در محل به تفصیل بیان شده است.

در فصل چهارم نتایج آزمایش‌های فروریزش استاندارد، ادومتر با قابلیت کنترل مکش در شرایط غیر اشباع، کاغذ فیلتر و تجزیه و تحلیل و ترسیم نمودارها و مقایسه در مورد آن‌ها آمده است.

در نهایت در فصل پنجم، جمع‌بندی نتایج تحقیق و پیشنهادات برای تحقیقات آینده، ارائه شده است.

۲- فصل دوم : خاک‌های فروریزی و مروری بر

تحقیقات گذشته

۲-۱- مقدمه

یکی از مسائل مهم، انجام ساخت و ساز ایمن بر روی مصالح خاکی به عنوان بستر می‌باشد. با توجه به این که خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها متفاوت می‌باشد، انجام بررسی‌های ژئوتکنیکی به منظور شناسائی خاک زیر سطحی ضروری است. از جمله خاک‌های مسأله‌دار در مهندسی ژئوتکنیک، خاک‌های فروریزی بوده که در این فصل ابتدا مروری بر تعاریف و رفتار کلی خاک‌های فروریزی داشته و در ادامه تحقیقات مرتبط به بررسی رفتار مکانیکی این نوع خاک‌ها و روش‌های تثبیت آن‌ها پرداخته می‌شود.

۲-۲- خاک‌های فروریزی

در مهندسی ژئوتکنیک، بخشی از مصالح خاکی که دارای رفتار ویژه‌ای بوده و ساخت و ساز روی آن‌ها مشکلاتی به همراه دارد، خاک‌های مسأله‌دار نام دارند. در این میان خاک‌های فروریزی به عنوان بخش مهمی از خاک‌های مسأله‌دار، حائز اهمیت ویژه‌ای می‌باشند که خاک لس بخش اعظم خاک‌های فروریزی را در بر می‌گیرد. لس، شناخته شده‌ترین نوع خاک فروریزی می‌باشد که حدوداً ۱۰ درصد از کل سطح خشکی کره زمین را پوشانده است (El-Howayek et al. 2011). لذا تحقیق حاضر به‌طور خاص به مطالعه بهسازی و تثبیت این خاک‌ها می‌پردازد.

۲-۲-۱- مروری بر تعاریف خاک‌های فروریزی

خاک‌های فروریزی آن دسته از خاک‌هایی هستند که در حالت عادی خشک، پایدار و قوی می‌باشند ولی در اثر تماس با رطوبت به سرعت تحکیم می‌یابند و نشست‌های بزرگ و غیرقابل پیش‌بینی را ایجاد می‌کنند. به همین دلیل این خاک‌ها را فروریزی، رمبنده یا ناپایدار می‌نامند (Swan, C.C. 2005).

Feda لس را نهشته‌های بادی تعریف نمود که دارای پتانسیل فروریزش بالایی هستند. رنگ لس معمولاً زرد نخودی است. در درصد رطوبت‌های پایین شیب ترانشه‌های لسی گاه تا ۱۳ درجه پایدار می‌ماند ولی به محض افزایش رطوبت این مقدار به طرز قابل توجهی کاهش می‌یابد (Feda, 1988).

بر اساس نظر Evstatiev، لس‌ها خاک‌های بادرفتی هستند که قسمت عمده آن‌ها را سیلت تشکیل می‌دهد، از نظر کانی‌شناسی عموماً شامل کوارتز به همراه مقادیر متغیری از میکا، فلدسپارها، کربنات‌ها و رس تشکیل شده‌اند (Evstatiev, 1988).

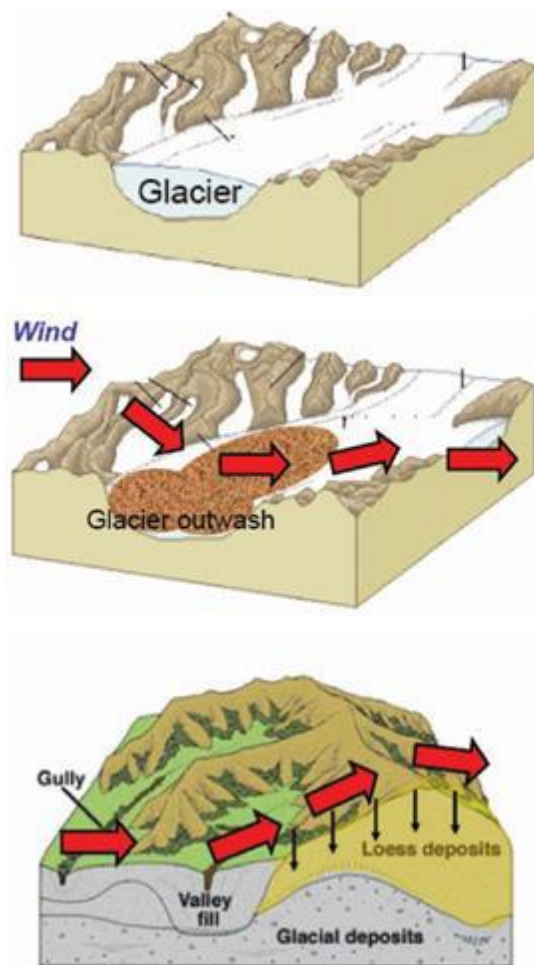
لس شناخته شده‌ترین نوع خاک فروریزی می‌باشد که حدوداً ۱۰ درصد از کل سطح خشکی کره زمین را پوشانده است (El-Howayek et al. 2011).

در ایران و نواحی اطراف آن رسوبات ضخیمی از مصالح لای دار وجود دارند که با عنوان لس توصیف می‌شوند (کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، ۱۳۷۸).

۲-۲-۲ نحوه پیدایش لس‌ها

سال‌های بسیاری است که نحوه پیدایش لس‌ها، نظر محققان را به خود جلب کرده است. امروزه توافق عمومی بر آن است که لس‌ها توسط باد انتقال یافته و انباشته شده‌اند و رسوبات از منشأ یخچالی رودخانه‌ای هستند. پودر سنگ ریز شده که لس از آن تشکیل یافته، توسط اندرکنش چندین فرایند زمین شناسی تولید شده است. لیکن اساساً از سایش ناشی از حرکت‌های یخچال‌های بزرگ کوهستانی ایجاد شده‌اند. همچنین موادی که با رودخانه‌ها به خارج حمل شده، به مرور در طول دشت های سیلابی رودخانه‌ها به صورت سیلت در آمده و سپس مجدداً توسط باد انتقال یافته و انباشته شده‌اند (USBR, 1985). همان‌طور که ذکر گردید، لس‌ها خاک‌های با منبع بادرفتی هستند که مقدار جابجایی آن‌ها وابسته به سرعت باد و اندازه‌ی ذرات و ... می‌باشد. شکل ۱-۲ نشان‌دهنده روند تشکیل

خاک‌های لسی می‌باشد.



شکل ۱-۲ نحوه تشکیل خاک‌های لسی (محمد حسینی ۱۳۹۳)

برای گسترش رسوبات لسی باید شرایط معینی فراهم شده باشد. این شرایط عبارتند از:

(USBR 1985)

الف: منبعی مختلط از لای و رس به میزان کافی برای ایجاد رسوبات معین

ب: وجود بادهای قوی با وزش غالب از یک جهت

ج: محلی مناسب برای رسوب‌گذاری

د: شرایط خشک یا نیمه خشک که به دنبال انتشار سیلت از یخچال‌ها پس از رسوب‌گذاری

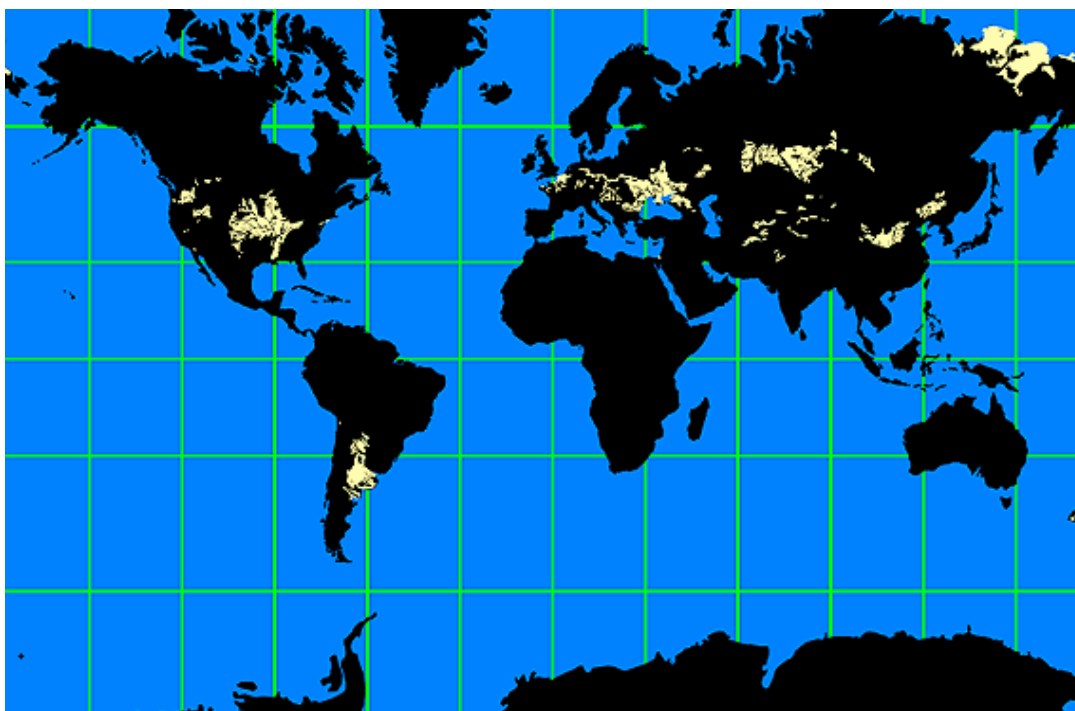
برقرار باشد.

۳-۲-۲- پراکندگی خاک لس

به منظور شناسایی و اقدامات لازم در جهت کاهش خرابی‌ها و اثرات ناشی از این خاک‌ها، لازم است اطلاعاتی راجع به محل‌های وجود این نوع خاک‌ها، مشخصات زمین‌شناسی این مناطق و همچنین زمین ریخت‌شناسی این مناطق جمع‌آوری گردد (Al-Obaidi et al. 2013).

۳-۲-۱- پراکندگی خاک لس در جهان

این خاک‌ها مناطق وسیعی از جهان سطحی معادل ۱۰ درصد توده‌های قاره‌ای را در بر گرفته‌اند. این مناطق شامل نهشته‌های پیوسته‌ای از شمال چین تا جنوب شرقی اروپا و مناطق پراکنده‌ای از آمریکای شمالی و جنوبی و نیوزیلند است (Jefferson et al. 2008). شکل ۲-۲ پراکندگی خاک لس را در برخی از کشورها نشان می‌دهد (El Howayek et al. 2011).



شکل ۲-۲ پراکندگی خاک لس در جهان (El Howayek et al. 2011)

جدول ۱-۲ مساحت پوشیده از خاک لس را در برخی از کشورها نشان می‌دهد.

جدول ۱-۲ سطح پوشیده از لس در برخی از کشورهای جهان (محمد حسینی ۱۳۹۳)

نام کشور	درصد مساحت پوشیده از لس به کل مساحت کشور
اوکراین	۶۵
آرژانتین	۳۹/۸
آمریکا	۴۶
چین	۶/۶
روسیه	۲۰
رومانی	۱۱/۵
لهستان	۶
نیوزیلند	۱۰
بلغارستان	۱۳

۲-۲-۳-۲ - پراکندگی لس در ایران

۱- لس در نواحی کویری ایران

این منطقه، شامل نواحی مرکزی و جنوب غرب ایران می‌باشد و حد نهایی جنوب غربی دشت کویر را تشکیل می‌دهد. کویر نمک به فاصله تقریباً ۱۵۰ کیلومتر از جنوب کاشان در شمال غرب امتداد دارد و از نائین در مرکز و یزد در جنوب شرق عبور می‌کند. دشت کویر توسط کوه‌های البرز در شمال و کوه‌های زاگرس واقع در جنوب و غرب احاطه می‌گردد (کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، ۱۳۷۸).

۲- لس در نواحی شمالی ایران

۳۸۸ هزار هکتار از کل ناحیه ۱/۵ میلیون هکتاری در دشت گرگان با مصالح لس پوشانیده شده است (کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، ۱۳۷۸). این رسوبات به سه ناحیه تقسیم می‌شوند:

- مصالح لس بر روی ناحیه کوهستانی گرگان جنوبی که مساحتی تقریباً برابر با ۱۳۸ هزار هکتار دارد؛

- مصالح لس که به صورت پلکانی رسوب‌گذاری شده‌اند و ۱۵۴ هزار هکتار تحت پوشش آن‌ها قرار دارد؛

- خاک‌های لسی در مرز ایران و ترکمنستان که تقریباً ۷۴ هزار هکتار را پوشانیده‌اند (کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، ۱۳۷۸).

۲-۲-۴ ویژگی‌های عمومی و مشخصات لس‌ها

اکثر خاک‌های فروریزی که بطور طبیعی وجود دارند، از نوع ماسه و لای بادرستی یا لس هستند. مشخصات این خاک‌ها به هنگام رسوب‌گذاری، تخلخل زیاد و دانستیه کم است (حائری و همکاران، ۱۳۹۱).

طبق نظریه رزنیك، مصالح خاکی غیر اشباعی که وزن مخصوص خشک آن‌ها کمتر از KN/m^3 ۱۶ می‌باشد، قابلیت فروریزش دارند (Reznic, 1993). البته فروریزش لزوماً در مورد خاک‌ها با وزن مخصوص کم اتفاق نمی‌افتد، بلکه شرایط رسوب‌گذاری در هنگام تشکیل خاک می‌بایست ساختاری باز بین ذرات آن ایجاد کرده باشد. این خاک‌ها در شرایط عادی ساختار خود را هنگام اعمال بار حفظ می‌کنند، اما یک نقطه بحرانی در مقدار تنش کل وارده بر آن‌ها وجود دارد که از آن نقطه به بعد، با افزایش درصد رطوبت و یا به عبارتی افزایش درجه اشباع، مقاومت ساختاری خاک در اثر اعمال بار به

یکباره از بین رفته و خاک تغییر شکل زیادی را تجربه می‌کند. این مسأله نباید با تحکیم اولیه یا ثانویه در خاک اشتباه گردد.

لاریونو در سال ۱۹۶۵ ساختار خاک‌های فروریزی را مورد مطالعه قرار داد. او نتیجه‌گیری کرد که خاک‌های فروریزی اساساً از ذرات حجیم (سیلت و ماسه و شن ریز) تشکیل شده‌اند که در میان توده‌های ذرات ریز پراکنده، با یا بدون تماس با هم به صورت مستغرق می‌باشند. همچنین سه نوع سیستم حفره‌ای توسط لاریونو تشخیص داده شد که در ادامه به آن‌ها می‌پردازیم (محمد حسینی ۱۳۹۳).

۱- حفره‌های فرا میکروسکوپی بین ذرات ریز

اندازه این حفرات در محدوده‌ی 3×10^{-6} تا 2×10^{-3} میلی‌متر می‌باشد و $2/5$ تا 10 درصد حجم تمام حفرات را تشکیل می‌دهد و همواره از آب به شدت جذب سطحی شده پر می‌باشد. با این مشخصات می‌توان نتیجه گرفت که این نوع حفرات نقش بسیار کوچکی در تغییر شکل خاک ایفا می‌کنند.

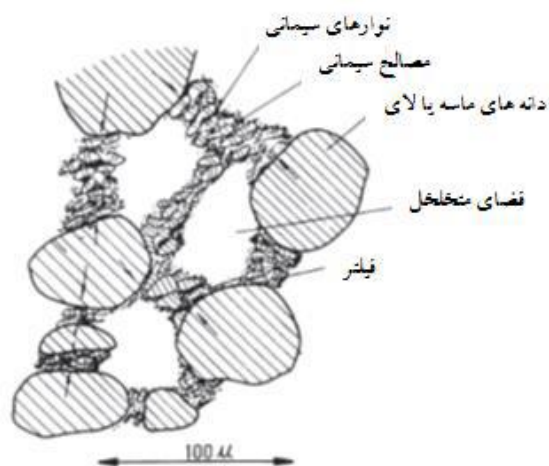
۲- حفرات بین ذره‌ای

اندازه این حفرات بین 2×10^{-5} تا 5×10^{-1} میلی‌متر می‌باشد و 13 تا 36 درصد حجم کل حفرات را تشکیل می‌دهد. این نوع از حفرات نقش اصلی را در فروریزش خاک دارند.

۳- حفرات ماکروسکوپی

این حفرات از کانال‌های کوچکی تشکیل شده‌اند که دیواره‌های آن معمولاً کلسیتی است. وجود این حفرات، سبب افزایش نفوذپذیری خاک می‌شود.

شکل ۲-۳ ریز ساختار خاک لسی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳ ریز ساختار کلی خاک‌های لسی (Derbyshire, E. 1994)

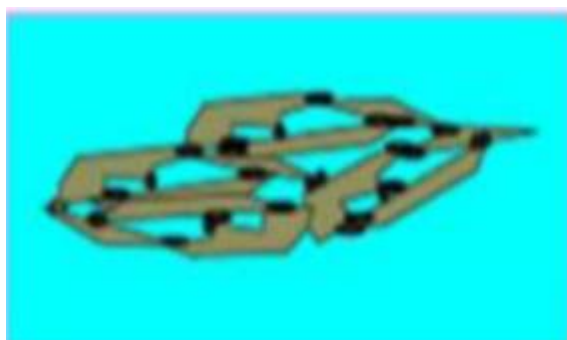
نهشته‌های لسی دارای دو ویژگی اصلی می‌باشند:

۱- این نهشته‌ها، سیمانی سست هستند؛

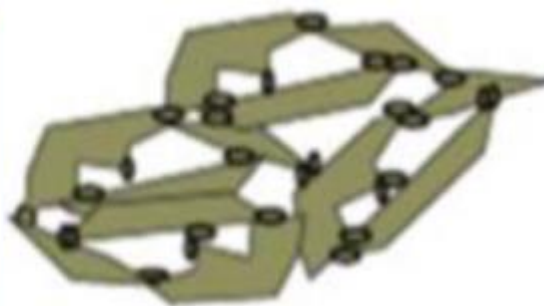
۲- آن‌ها دارای درصد رطوبت ناچیزی می‌باشند؛

این خاک‌های سست از ذرات در اندازه‌ی لای تشکیل شده‌اند که به وسیله‌ی پیوندهای سست

سیمانی مانند لانه‌ی زنبور مطابق شکل ۲-۴ به هم متصل شده‌اند.



(ب)



(الف)

شکل ۲-۴ ساختار لانه زنبوری خاک لس الف: پیش از غرقاب شدن ب: پس از غرقاب شدن (Swan, C.C. 2005)

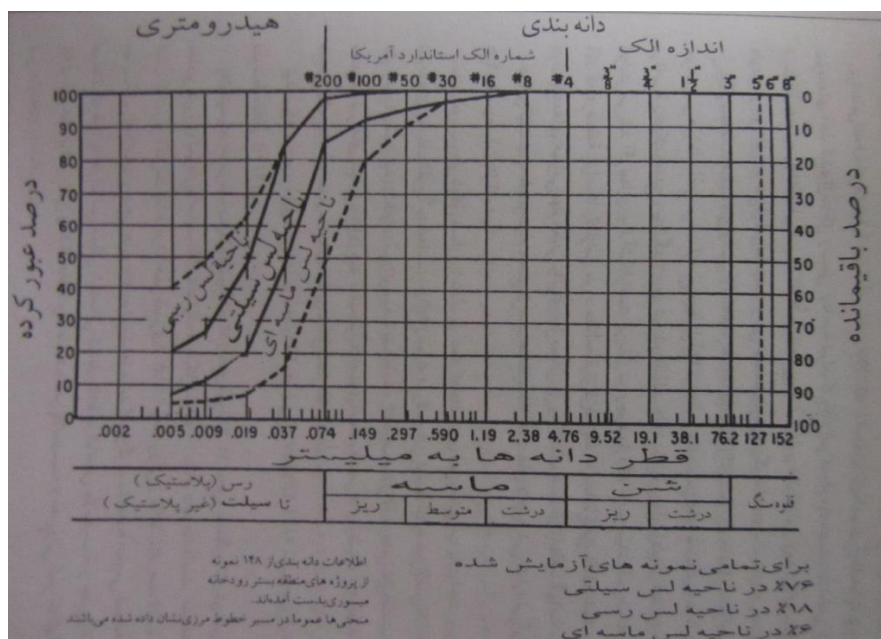
2005)

این ساختار سست به وسیله‌ی مقدار ناچیزی آب محلول در ترکیبات سیمانی مانند رس‌های

معدنی و کلسیم کربنات به هم متصل شده است. با ورود آب به این ساختار مواد سیمانی در آب حل

می‌شود و پیوندهای سست از بین می‌رود؛ به این ترتیب خاک تحت ساختار فشرده‌تر نسبت به حالت اولیه قرار می‌گیرد (Swan, C.C. 2005).

از آن جایی که نهشته‌های لسی از جمله نهشته‌های سست هستند، رنگ آن‌ها نیز مشابه نهشته‌های سست از زرد تا قهوه‌ای متغیر می‌باشد (Zia And Fox, 2000). این نهشته‌ها همچنین دارای دانه‌بندی یکنواختی هستند که در شکل ۵-۲ نشان داده شده‌اند.



شکل ۵-۲ منحنی دانه‌بندی خاک‌های لسی (کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، ۱۳۷۸)

از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های عمومی خاک لس می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (Smalley, 1971):

1971)

- ۱- ساختار متخلخل و مشابه؛
- ۲- وجود ۱۵ تا ۱۸ درصد کربنات در آن؛
- ۳- وجود ذرات کوارتز تا ۷۰٪، آهن تا ۲٪ و کربن‌های آلی کمتر از ۲٪؛
- ۴- منحنی S شکل توزیع دانه‌ها، که قسمت مرکزی و فراوان آن سیلت ($20-50 \mu m$) است و همچنین به مقدار کمی ماسه (۱-۲٪) و رس (۱۵-۱۸٪) دارد.

پیوندهای رسی، پیوندهای شیمیایی و تنش مؤئینگی سه مکانیزم اصلی نگه‌دارنده حالت کم ثبات لس می‌باشند (Barden et al. 1973). این پیوندها هستند که خاک را با ساختار باز نگه می‌دارند و باعث می‌شوند خاک مستعد نشست باشد. امروزه مهندسان ژئوتکنیک، خاک‌های غیراشباع را دارای چهار فاز هوا، آب، اسکلت خاک و پوسته‌ی قابل انقباض می‌دانند. در شرایط ایده‌آل با اعمال تنش، دو فاز آب و هوا جاری می‌شوند و دو فاز اسکلت خاک و پوسته‌ی قابل انقباض به شرایط پایدار می‌رسند. فروریزش لس به واسطه درصد رطوبت و مقدار تنش وارده بر خاک کنترل می‌شود. در خاک‌های با درصد رطوبت کم‌تر، فشار بحرانی (فشاری که در آن فروریزش ساختار لس شروع می‌شود و خاک از حالت با قابلیت فشردگی کم به حالت با قابلیت فشردگی زیاد تبدیل می‌شود) مقدار بزرگتری دارد. فروریزش ایجاد شده به وسیله افزایش رطوبت در تنش اعمال شده، همواره منجر به تخلخل نهایی یکسانی صرف نظر از درصد رطوبت اولیه می‌شود. این بیان‌گر رابطه یکتایی بین نسبت تخلخل و تنش وارده پس از مرطوب شدن است.

چهار شرط اساسی که برای فروریزش خاک مورد نیاز است (Murthy, 2007):

- ۱- ساختار متخلخل غیراشباع و به‌طور نسبی ناپایدار؛
- ۲- وجود فشار خالص کافی که منجر به ناپایداری ساختار خاک شود؛
- ۳- وجود عامل سیمان‌شدگی که باعث پایداری خاک در حالت غیراشباع باشد؛
- ۴- مقدار آب اضافی تا سیمان‌شدگی بین ذرات کاهش یابد و اتصال دانه‌ها از بین برود؛

مشخصات کلی خاک‌های فروریزشی به طور خاص عبارتند از (Futai and Admeida 2002):

- ۱- نسبت تخلخل بالا (بیش از ۴۰ درصد)؛
- ۲- درجه اشباع پایین (کمتر از ۰/۶)؛
- ۳- مقدار لای و ماسه ریز بالا (بیش‌تر از ۰/۳۰)؛
- ۴- از بین رفتن پیوند بین ذرات در اثر اشباع شدن؛

طبق نظریه باردن ، گاون و کولینز خاک‌های فروریزی به دوصورت در طبیعت یافت می‌شوند (Barden et al. 1969).

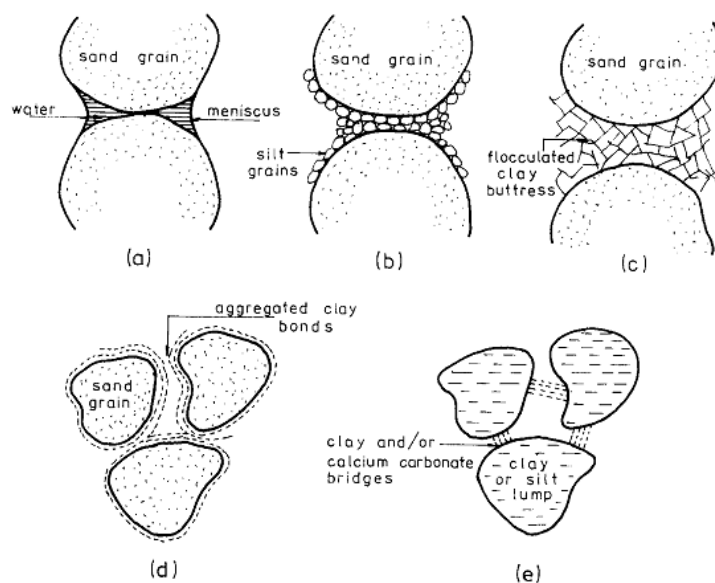
۱- خاک‌های ماسه‌ای و لای‌دار که توسط پیوندهای رسی به یکدیگر چسبیده‌اند و ساختمان متخلخلی را به وجود آورده‌اند. در صورتی که خاک اشباع گردد، دانه‌های ماسه در اثر خمیری شدن رس بر روی یکدیگر می‌لغزند و خاک کاهش حجم پیدا خواهد نمود.

۲- خاک‌های نیمه اشباعی که در حالت طبیعی دارای فشار منفی بوده و در اثر نیروی مکش به یکدیگر چسبیده‌اند، در حالت طبیعی به صورت موقت پایدار می‌باشند؛ در این خاک‌ها بر اثر افزایش رطوبت، نیروی مکشی کاهش یافته و پیوند بین دانه‌های خاک از بین رفته و موجب فروپاشی اسکلت خاک و کاهش حجم می‌شود.

ساختار خاک در حالت نیمه اشباع به علت کشش سطحی آب (نیروی مؤئینه) و در حالت خشک به علت پیوند بین دانه‌ها و به وسیله کانی‌های رسی یا عوامل سیمانی‌کننده مانند کربنات کلسیم یا اکسید آهن، پایدار می‌باشد. این خاک‌ها بیشتر از نوع بادرفت (مانند خاک لس و ماسه بادی همراه با لای و مقدار کمی رس) می‌باشند که دارای تخلخل بالا و وزن مخصوص کم هستند.

در اثر مرطوب شدن، پیوند بین ذرات خاک از بین می‌رود و خاک مقاومت خود را از دست داده و در تنش ثابت موجود، دچار فروریزش ساختاری می‌شود. شکل ۲-۶ انواع مختلف نیروهای بین دانه-ای در خاک فروریزی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل زیر مشاهده می‌شود، نیروی نگه‌دارنده ذرات از یک پیوند بین دانه‌ای (پیوند رسی و یا سیلتی) و یا از مکش ساختاری ناشی از کشش سطحی در خاک‌های غیراشباع به وجود می‌آید.

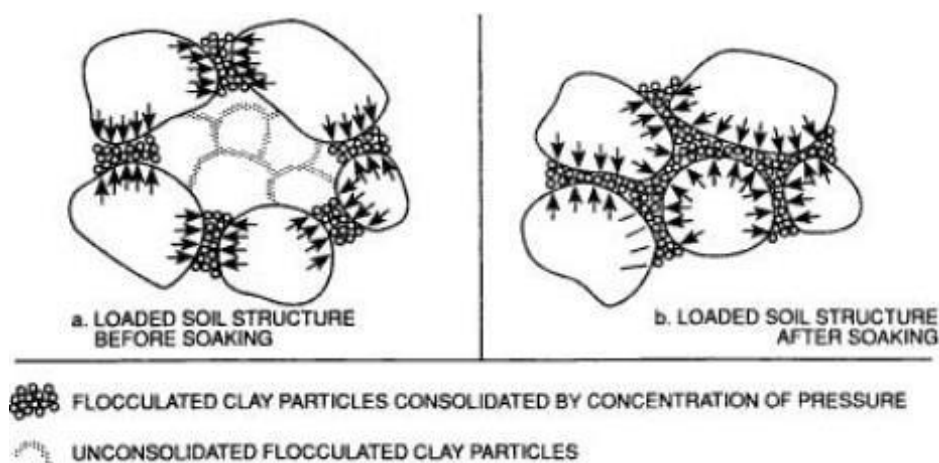
نمک‌ها، رس و لای ترکیب مؤثری را به عنوان عامل سیمانی‌کننده در خاک‌های فروریزی ایفا می‌کنند. پیوندهای ساختاری که در اثر وجود نمک‌ها ایجاد می‌شوند، می‌توانند پل‌های سیمانی را در بین ذرات خاک ایجاد کنند.



شکل ۶-۲ انواع مختلف نیروهای بین دانه‌ای در ساختارهای فروریزی (Elkady, 2002)

همان‌طور که در شکل ۶-۲ نشان داده شده است، عامل نگه‌دارنده ذرات خاک، یا وجود باندهای سیمانی (مانند پیوندهای رسی یا نمکی) و یا وجود مکش ساختاری ناشی از کشش سطحی در خاک-های غیر اشباع می‌باشد.

شکل ۷-۲ فرایند فروریزش و تغییر ساختار در خاک ماسه‌ای را که بین ذرات آن پیوند رسی وجود دارد، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در اثر جذب رطوبت، فروریزش صورت گرفته و حجم خاک کاهش پیدا کرده و ذرات آن در موقعیت جدیدی قرار گرفته‌اند.



شکل ۷-۲ فرایند فروریزش خاک ماسه‌ای با پیوندهای رسی در اثر افزایش رطوبت (Rogers, 1995)

به طور کلی روند فروریزش در خاک‌های فروریزی مانند خاک لس به سه فاز تقسیم می‌شود (Klukanova and Sajgalik 1994).

فاز اول شامل تخریب ساختار میکروسکوپی اولیه در اثر افزایش رطوبت یا تنش خارجی می‌باشد. در این فاز توده‌های متراکم از هم باز شده، غشاها، اتصالات و پل‌های رسی شکسته و قسمت بیشتری از کربنات‌ها حل می‌شوند که باعث حرکت اکسیدهای آهن و منگنز می‌شوند.

در فاز دوم ساختار ریز خاک از هم پاشیده و می‌شکند. ذرات رس توسط آب در خاک جابه‌جا شده، حجم کربنات‌ها کاهش می‌یابد و بقیه المان‌ها فشرده می‌شوند. در این فاز حجم کل لس کاهش می‌یابد.

فاز سوم شامل تشکیل ریز ساختارهای جدید بعد از کامل شدن نشست می‌شود. در این فاز، ذرات رس جمع شده و در بعضی نواحی بافت چسبنده تشکیل می‌دهند. همچنین اندازه حفره‌ها تغییر کرده و به طور کلی تخلخل کاهش می‌یابد.

مکانیزم شکست در خاک‌های فروریزی، با استفاده از اصول تنش مؤثر در خاک‌های غیراشباع نیز بررسی شده است. تعریف‌های متعددی برای معادله تنش مؤثر برای خاک‌های غیراشباع وجود دارد. در خاک‌های غیر اشباع دو پارامتر مجزا از تنش مؤثر وجود دارد که عبارتند از $(\sigma - ua)$ و $(ua - uw)$. این دو پارامتر، نشان دهنده تنش‌های بین دانه‌ای به وجود آمده توسط مکانیزم‌های مختلف است. پارامتر $(\sigma - ua)$ سبب ایجاد تنش بین دانه‌ها و ایجاد ناپایداری در محل اتصال ذرات شده، در حالی که مکش $(ua - uw)$ یک عامل پایداری در محل تماس بین ذرات می‌باشد که در اثر مرطوب شدن و افزایش درجه اشباع به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (El-Ehwany, 1989).

۳-۲- عوامل مؤثر بر میزان فروریزش خاک

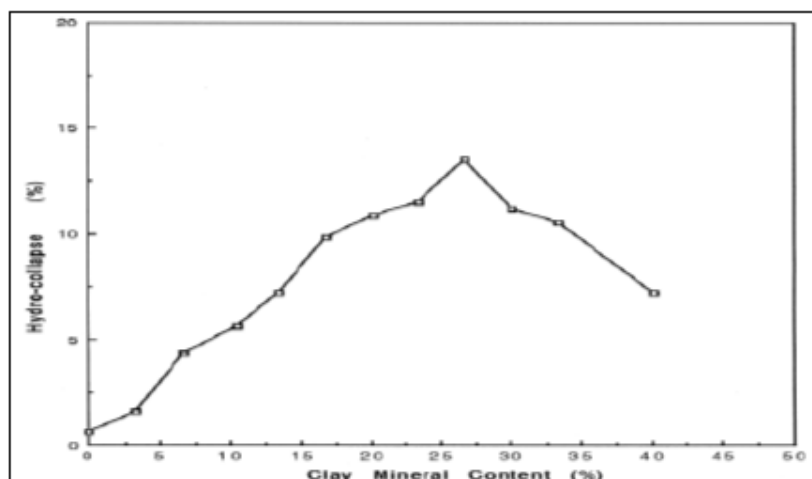
عوامل متعددی بر میزان فروریزش خاک‌ها تأثیر دارند که از جمله این عوامل می‌توان به رطوبت اولیه، نوع خاک، تراکم، اثرات باندهای سیمانی، اثر سیکل‌های ترش‌دگی و تأثیر دست‌خوردگی نمونه اشاره کرد که در ادامه به طور مختصر در مورد هر کدام توضیح داده خواهد شد (محمد حسینی ۱۳۹۳).

۳-۲-۱- میزان رطوبت اولیه

رطوبت اولیه خاک یکی از عواملی است که بر پتانسیل فروریزش خاک تأثیر به‌سزایی دارد. هرچه رطوبت اولیه خاک کم‌تر باشد، خاک در حالت ناپایدارتری بوده و میزان فروریزش خاک بیش‌تر است. در درجه اشباع پایین، مقدار فروریزش متناسب با تنش اعمالی تغییر می‌کند ولی با افزایش درجه اشباع، مقدار فروریزش ناچیز و مستقل از تنش وارده به خاک می‌باشد (Basma, 1992).

۳-۲-۲- تأثیر نوع خاک

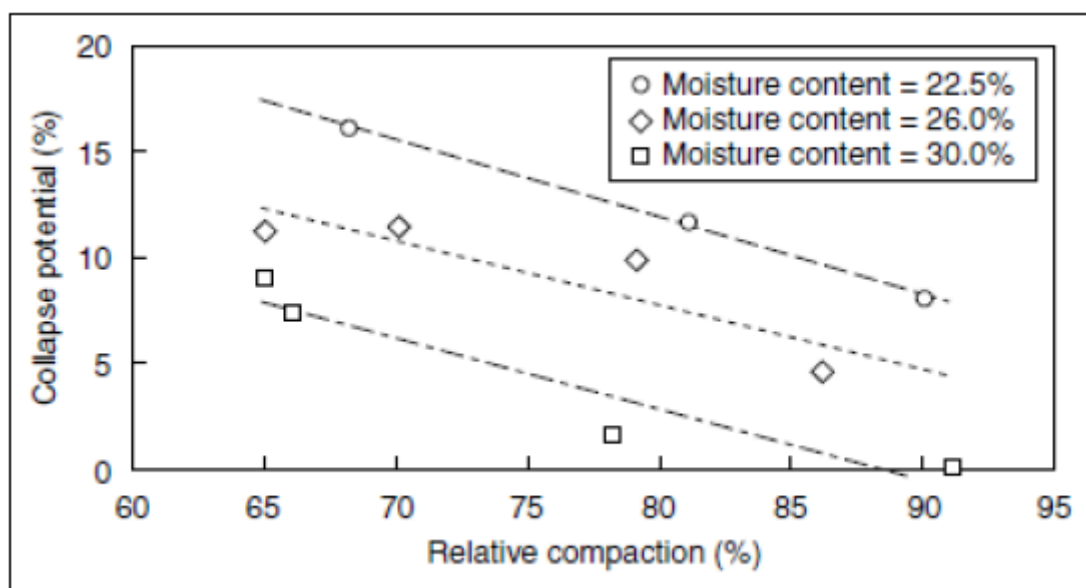
(Assallay et al., 1998) اثر رس را بر پتانسیل فروریزش خاک لس بررسی کردند. شکل ۲-۸ نشان‌دهنده تأثیر میزان رس بر پتانسیل فروریزش خاک لس است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش رس تا مقدار مشخصی (۲۵٪)، پتانسیل فروریزش افزایش یافته و بعد از آن پتانسیل فروریزش کاهش می‌یابد.



شکل ۲-۸ اثر تغییرات درصد رس بر میزان فروریزش (Assallay et al., 1998)

۲-۳-۳- تراکم نسبی

شکل ۲-۹ نتایج آزمایش بر روی خاک ماسه لای دار را نشان می دهد که همان گونه که مشاهده می شود، برای درصد رطوبت اولیه مشخص میزان فروریزش با افزایش وزن مخصوص خشک، کاهش می یابد. همچنین مشاهده می شود که در یک چگالی خشک مشخص با افزایش رطوبت اولیه خاک، میزان پتانسیل فروریزش کاهش می یابد (Ng et al., 1998).



شکل ۲-۹ رابطه پتانسیل فروریزش با تراکم نسبی (Ng et al., 1998)

۲-۳-۴- تأثیر تنش موجود در هنگام اشباع کردن خاک

وضعیت تنش در خاک نیز از عوامل تأثیر گذار بر میزان فروریزش است. به طوری که خاک‌های ماسه‌ای با افزایش میزان تنش، فروریزش بیش‌تری خواهند داشت ولی در خاک‌های رسی در فشارهای میانی بین ۲۰۰ الی ۴۰۰ کیلو پاسکال فروریزش بیش‌تر از سایر فشارها خواهد بود (Adnan and Basma, 1992).

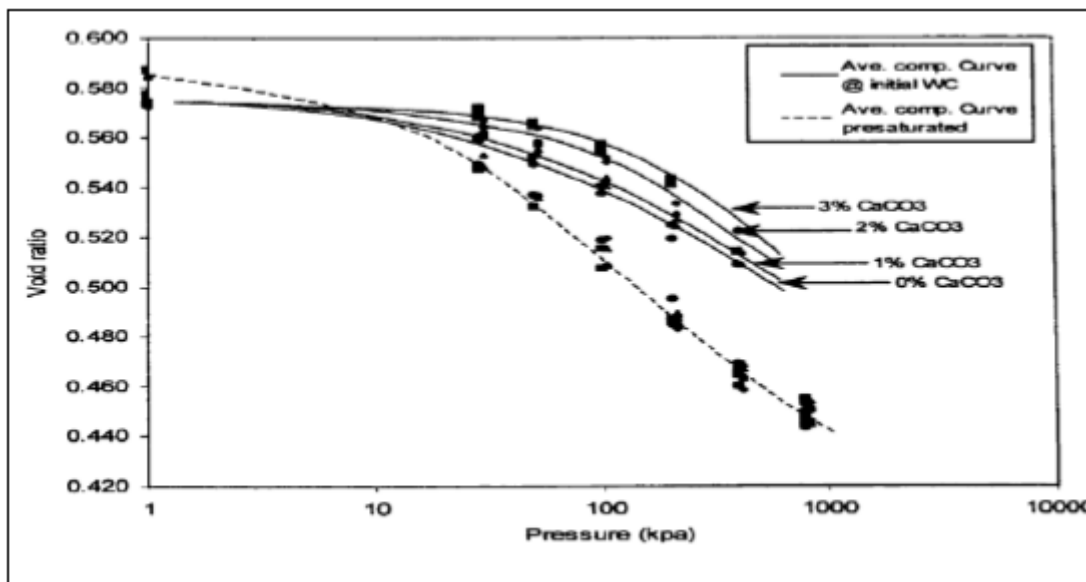
همچنین طی تحقیقات دیگری که بر روی خاک‌های فروریزی لس‌گران انجام شد، نشان داد که میزان فروریزش در طی آزمایش‌ها در مسیر ترشوندگی وابسته به میزان جذب آب نمونه و میزان تنش خالص اعمالی دارد. در تنش خالص بیش‌تر، فروریزش به مقدار قابل توجهی بیش‌تر می‌باشد و نمونه با جذب مقادیر اندک آب، از همان ابتدای پروسه ترشوندگی، فروریزش قابل ملاحظه‌ای می‌کند (قاضی زاده ۱۳۹۲).

۲-۳-۵- اثر باندهای سیمانی بین ذرات

همان‌گونه که می‌دانیم، عامل تشکیل ساختار باز بین دانه‌ای در خاک‌های فروریزی، وجود یک پیوند سست میان ذره‌ای است که در صورت جذب رطوبت سست می‌شود و با اعمال تنش سربار، ساختار خاک به طور ناگهانی فرو می‌ریزد. خاک‌های فروریزی معمولاً میزان قابل توجهی پیوند سیمانی بین ذرات خود دارند. این پیوندها معمولاً یا به صورت پیوند سیمانی شکننده و کریستالی و یا پیوند سیمانی ناشی از فشار حفرهای منفی بالا (مکش)، خود را نشان می‌دهند. که هر چه میزان لای یا رس بیش‌تر باشد، پیوندهای سیمانی ناشی از مکش بیش‌تر می‌شود (El-Ehwany, 1989).

(Alkandari, 2000) رفتار فروریزی ماسه‌های غیر اشباع سیمانی شده در درصدهای مختلف کلسیم کربنات (۱٪، ۲٪، ۳٪) و فشار سربار در لحظه ترشدگی ۱۰۴/۶، ۲۱۰/۷، ۴۲۹/۹ کیلو پاسکال را بررسی نمود. شکل ۲-۱۰ بخشی از نتایج این تحقیقات را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌-

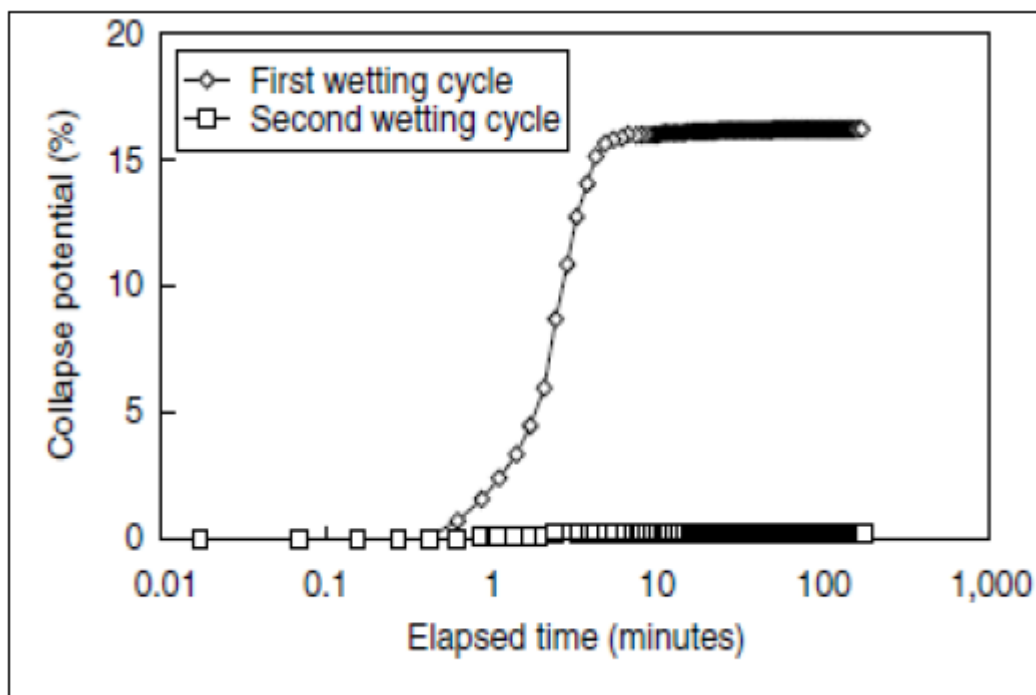
شود، با افزایش کربنات کلسیم میزان فروریزش کاهش یافته است. این کاهش فروریزش به سبب افزایش باندهای سیمانی بین ذرات ماسه می‌باشد.



شکل ۲-۱۰ بررسی اثر میزان مواد سیمانی‌کننده (کربنات کلسیم) بر فروریزش خاک ماسه‌ای با استفاده از ادومتر (Alkandari, 2000)

۲-۳-۶- اثر سیکل‌های ترشدگی

با انجام یک سری آزمایش روی نمونه‌هایی از ماسه لای‌دار، برای یک میزان تنش ثابت، اثر سیکل‌های ترشدگی بر میزان کرنش ناشی از فروریزش بررسی شده است و مشخص گردید که میزان کرنش ناشی از فروریزش در سیکل‌های بعدی ترشدگی بسیار کمتر از سیکل اول است و در سیکل دوم تنها ۳٪ مقدار ایجاد شده در سیکل اول می‌باشد. شکل ۲-۱۱ نتایج آزمایش‌ها را در سیکل اول و سیکل دوم ترشدگی نشان می‌دهد (Chiu et al. 1998).



شکل ۱۱-۲ اثر اعمال سیکل‌های ترشدگی بر میزان فروریزش (Chiu et al., 1998)

۲-۴- روش‌های شناسایی خاک‌های فروریزشی

روش‌های مختلفی در متون فنی به منظور شناسایی وجود پتانسیل فروریزش در خاک‌ها پیشنهاد شده است. در خصوص روش‌های آزمایشگاهی، این معیارها به دو دسته معیارهای کیفی مبتنی بر ویژگی‌های وزنی حجمی (Elkady, 2002) و معیارهای کمی مبتنی بر انجام آزمایش‌های ادمتر تقسیم می‌گردند (Alkandari, 2000). در جدول ۲-۲ می‌توان جمع‌بندی روش‌های دسته اول و در جدول ۳-۲ دسته دوم را مشاهده کرد.

جدول ۲-۲ معیار فروریزش خاک بر اساس معیارهای کیفی آزمایشگاهی (Elkady, 2002)

محقق	معیار فروریزش
Priklonski (1952)	$K_0 = (w_0 - LL) / PI$ که در آن w_0 درصد رطوبت در حالت طبیعی خاک و LL حد روانی - خاک می باشد. $K_0 < 0$ درجه فروریزش شدید $K_0 > 0.5$ خاک غیر فروریزشی $K_0 > 1.0$ خاک متورم شونده
Clevenger (1958)	$\gamma_{dry} < 1.28 \text{ gr/cm}^3$ خاک فروریزشی $\gamma_{dry} > 1.44 \text{ gr/cm}^3$ خاک غیر فروریزشی
Feda (1964)	$K_1 = (w_0/s_0) - (LL/PI)$ ، این رابطه برای خاک غیر اشباع استفاده می شود که در آن w_0 درصد رطوبت در حالت طبیعی خاک، s_0 درجه اشباع در حالت طبیعی خاک، LL حد روانی خاک و PI دامنه خمیری خاک می باشد. اگر $K_1 > 0.85$ باشد، خاک مورد نظر فروریزشی می باشد
Feda (1966)	اگر $n_0 > 40\%$ یعنی تخلخل طبیعی خاک از ۴۰٪ بیشتر باشد، خاک فروریزشی می باشد.

جدول ۳-۲ معیار فروریزش خاک بر اساس معیارهای کمی آزمایشگاهی (Alkandari, 2000)

محقق	معیار فروریزش
Sultan (1969)	$C_p = \Delta H / H_0$ که در آن ΔH اختلاف بین ارتفاع اولیه نمونه (ماقبل اشباع سازی) و ارتفاع نهایی نمونه (بعد از اشباع سازی) در آزمایش ادومتر می باشد. $C_p > 6\%$ درجه فروریزش شدید
Jennings and Knight (1975)	$C_p = \Delta H / H_0$ که در آن ΔH اختلاف بین ارتفاع اولیه نمونه (ماقبل اشباع سازی) و ارتفاع نهایی نمونه (بعد از اشباع سازی) در آزمایش ادومتر می باشد. $0 < C_p < 1\%$ غیر فروریزشی $1 < C_p < 5\%$ درجه فروریزش کم $5 < C_p < 10\%$ درجه فروریزش متوسط $10 < C_p < 20\%$ درجه فروریزش شدید $C_p > 20\%$ درجه فروریزش بسیار شدید
Sabbagh (1982)	$C_p = \Delta H / H_0$ که در آن ΔH اختلاف بین ارتفاع نمونه (ماقبل اشباع سازی) و ارتفاع نهایی نمونه (بعد از اشباع سازی) در آزمایش ادومتر می باشد. $0 < C_p < 2\%$ غیر فروریزشی $2 < C_p < 5\%$ درجه فروریزش متوسط $C_p > 5\%$ درجه فروریزش شدید

همچنین در متون فنی روش های متعددی جهت شناسایی خاک های فروریزشی چه در محل و

چه در آزمایشگاه ذکر شده است. روش های آزمایشگاهی نیز به نوبه خود به دو دسته روش های کیفی و

روش‌های کمی تقسیم می‌شوند. بر اساس نظر (Alkandary, 2000) ، روش‌های شناسایی صحرایی می‌توانند جهت تخمین زدن روش سریعی ارائه نمایند. بر اساس نظر (El-Ehwany, 1989) ، مزیت عمده روش‌های صحرایی نسبت به روش‌های آزمایشگاهی، حذف شدن خطاهای ناشی از دست-خوردگی خاک در تعیین میزان فروریزش می‌باشد. عاملی که بنا بر نظر (Houston et al. 1988) مقدار فروریزش را کمتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد. برخی از معیارهای ارائه شده به شرح زیر می‌باشند.

۲-۴-۱- روش‌های صحرایی

Clevenger استفاده از آزمایش نفوذ استاندارد را برای پیش‌بینی احتمال فروریزش توصیه نمود (Clevenger, 1956). در هر حال بنا به عقیده El-Ehwany استفاده از این آزمایش به تنهایی برای پیش‌بینی احتمال فروریزش صحیح نمی‌باشد (El-Ehwany, 1989).

Shvets و همکاران استفاده از آزمایش پرسیومتری را توصیه کردند که در آن خصوصیات تغییر شکل‌پذیری خاک در جهت افقی مشخص می‌شود. سپس وی پارامتر ناهمگنی خاک، K_a را معرفی نمود تا مقدار تغییر شکل افقی پرسیومتر را به تغییر شکل آزمایش صفحه فشاری ارتباط دهد. مقدار پارامتر K_a قبل از پروسه ترشوندگی، بین ۰/۵۵ تا ۱/۹ با متوسط ۱/۱۱ تغییر می‌کند. پس از پروسه ترشوندگی این مقدار به ۰/۶۵ تا ۱/۳ با متوسط ۰/۹۸ کاهش می‌یابد (Shvets et. al. 1981).

Krutuv و همکاران از آزمایش صفحه باربر برای مشخص نمودن فشاری که موجب کرنش فروریزشی ۰/۵ درصد می‌شود، استفاده کرد. وی این مقدار فشار را، فشار اولیه نامید. روش وی بر این مبنا است که سطح فونداسیون نباید بیش از فشار اولیه بارگذاری شود (Krutuv and Tarasova, 1964).

Jennings و Knight روشی را ارائه کردند که در آن یک نمونه خاکی به دو قسمت تقریباً

مساوی تقسیم می‌گردد. سپس نمونه اول مرطوب شده و ورز داده می‌شود تا تبدیل به یک جسم تقریباً کروی شکل شود. حال اگر حجم نمونه جدید از نمونه دوم کم‌تر باشد، خاک پتانسیل فروریزش دارد (Jennings and Knight, 1975).

Reznic به کمک آزمایش بارگذاری صفحه، نشست خاک را در اثر افزایش رطوبت بررسی نموده

است. همچنین برای بررسی پتانسیل فروریزشی خاک به کمک دستگاه تحکیم از دو روش تحکیم یگانه و روش تحکیم دوگانه می‌توان استفاده کرد (Reznic, 1993).

اگرچه برخی روش‌های برجا را بر روش‌های آزمایشگاهی ترجیح می‌دهند، این روش دارای پیچیدگی‌های فراوانی می‌باشد و تأثیر بسیاری از پارامترها همچون میزان ترشوندگی و حالت تنش در آن مشخص نمی‌باشد.

۲-۴-۲- آزمایش بارگذاری صفحه

به منظور نشان دادن نشست و ظرفیت باربری شالوده‌های گسترده بر روی لس، یک سری آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای در یک لس با دانسیته کم توسط USBR در نزدیکی سد Ashton در Nebraska انجام گرفت. آزمایش‌های صحرایی عبارت بودند از بارگذاری صفحه‌های مربعی در سه اندازه ۳۰، ۹۰ و ۱۵۰ سانتی‌متر. در گودالی به مساحتی معادل با اندازه صفحه قرار داده شده به طوری که اثر کامل سربار وجود داشت (USBR, 1985).

۲-۴-۳- آزمایش‌های تحکیم یگانه و دوگانه

در آزمایش تحکیم یگانه، یک نمونه خاک با درصد رطوبت طبیعی تحت اثر اعمال بار قرار می‌گیرد و در یک مرحله مشخص از بارگذاری در مقدار بار ثابت، اشباع شده و تغییر شکل ایجاد شده در

اثر اشباع شدن در مقدار بار ثابت، به عنوان معیار تشخیص وجود قابلیت فروریزش مورد بررسی قرار می‌گیرد. رابطه ۱-۲ معیار فروریزش بودن خاک را با استفاده از تحکیم یگانه نشان می‌دهد:

رابطه ۱-۲ :

$$i_e = \frac{\Delta e_c}{1 + e_i}$$

Δe_c : تغییرات در نشانه خلأ در اثر افزایش رطوبت

e_i : نشانه خلأ خاک قبل از اشباع کردن

در روش تحکیم دوگانه که اولین بار توسط Jennings and Knight ارائه شده است، دو نمونه خاک در نظر گرفته می‌شود که یکی در حالت اشباع و دیگری در رطوبت طبیعی بارگذاری می‌گردد. پس از رسم منحنی‌ها بر روی یک دستگاه مختصات مشترک، پتانسیل فروریزش مطابق رابطه ۲-۲ تعریف می‌شود (Jennings and Knight 1975):

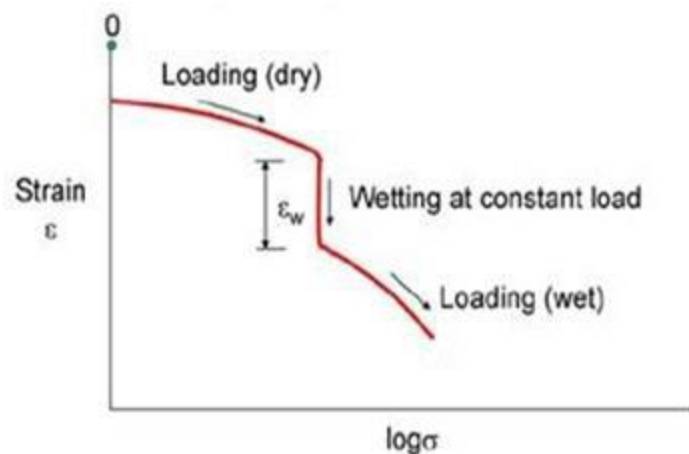
رابطه ۲-۲ :

$$i_c = \frac{\Delta e_c}{1 + e_i}$$

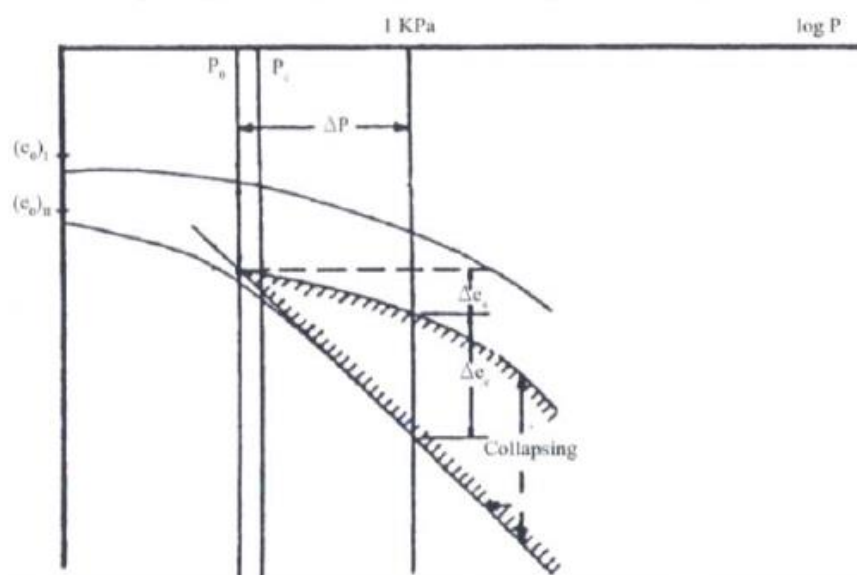
Δe_c : میزان اختلاف در نشانه خلأ در حالت اشباع و نیمه اشباع

e_i : نشانه خلأ در منحنی مربوط به رطوبت طبیعی

در شکل ۱۲-۲ روند فروریزش در آزمایش تحکیم یگانه و در شکل ۱۳-۲ روند فروریزش در آزمایش تحکیم مضاعف نشان داده شده است.



شکل ۱۲-۲ روند فروریزش در آزمایش تحکیم یگانه (محمد حسینی ۱۳۹۳)



شکل ۱۳-۲ روند فروریزش در آزمایش تحکیم مضاعف (محمد حسینی ۱۳۹۳)

۲-۴-۴- روش‌های آزمایشگاهی کیفی

روش‌های کیفی بر اساس خواص اندیس خاک، پتانسیل فروریزش را مشخص می‌نمایند. این روش‌ها یک ایراد اساسی دارند چرا که نمی‌توانند به ازای یک مقدار مشخص تر شوندگی، مقدار نشست فروریزشی در خاک را اندازه‌گیری کنند. همچنین در این روش‌ها، فاکتورهای تأثیرگذار مهمی

همچون بار اعمال شده، رطوبت طبیعی خاک، میزان تراکم خاک، پروفیل رطوبت خاک، توزیع تنش در ناحیه‌ی تر شونده، ناهمگنی در بافت خاک و غیره لحاظ نمی‌گردند. علی‌رغم ضعف‌های موجود، توانایی این روش‌ها در تعیین سریع و تقریبی امکان وجود قابلیت فروریزی در یک خاک را نمی‌توان نادیده گرفت. در زیر به چند مورد از این روش‌ها اشاره می‌کنیم.

Clevenger استفاده از چگالی خشک طبیعی را برای پیش‌بینی خاصیت فروریزی خاک پیشنهاد داد. وی توصیه نمود که در صورتی که وزن مخصوص خشک خاک کمتر از $12/6$ کیلو نیوتون بر متر مکعب باشد، خاک احتمالاً پتانسیل فروریزش دارد (Clevenger, 1956).

Denisov توصیه نمود که در صورتی که نسبت تخلخل طبیعی خاک e_0 بزرگ‌تر از نسبت تخلخل خاک در حد روانی e_1 باشد، پدیده‌ی فروریزش در اثر ترشدگی اتفاق می‌افتد. او حاصل تقسیم e_1 بر e_0 را پارامتر k نامید. به این اساس اگر k بین $0/5$ تا $0/75$ باشد، خاک به شدت فروریزی دسته‌بندی می‌شود. به ازای مقادیر بزرگ‌تر از یک برای k ، خاک غیر فروریزی در نظر گرفته می‌شود (Denisov, 1951).

معیار Feda توصیه می‌کند که خاک‌های لسی و دانه‌ای که تخلخل طبیعی آن‌ها از $0/4$ بیش‌تر باشند، مستعد فروریزش هستند (Feda, 1988).

Jennings و Knight مفهوم درجه اشباع بحرانی را مطرح کردند که کمتر از آن، فروریزش در خاک رخ نمی‌دهد، برای مثال در خاک‌های ماسه‌ای لای‌دار، درجه اشباع بحرانی در حدود 50 الی 60 درصد می‌باشند. در جدول $2-4$ درجه بحرانی اشباع برای خاک‌های مختلف مشاهده می‌شود (Jennings and Knight, 1975).

جدول ۴-۲ جدول مقادیر درجه بحرانی اشباع در خاک‌های مختلف (Jennings and Knight, 1975)

Soil Type	Critical degree of saturation
Transported clayey sand, 35% finer than 0.075mm.	46-51%
Transported silty sand, 40% finer than 0.075mm.	61%
Fine gravels	6-10%
Fine silty sands	50-60%
Clayey silts	90-95%
Berea red sands, 25% finer than 0.075mm.	69%
Residual granite, 15% finer than 0.075mm.	52%
Transported sand, 10% finer than 0.075mm.	21%

بنا بر عقیده‌ی El-Ehwany، استفاده از روش‌های آزمایشگاهی کیفی، دارای خطای ذاتی فراوانی می‌باشد و معیارهای گفته شده حتی جهت پیش‌بینی قابلیت یا عدم قابلیت فروریزش در خاک، بسته به مکان و شرایط خاک‌ها متفاوت می‌باشد. لذا استفاده از روش‌های آزمایشگاهی کمی و روش‌های برجا، دقیق‌تر می‌باشند (El-Ehwany, 1989).

۲-۵- شیمی خاک و تبادل کاتیونی

یکی از مهم‌ترین خصوصیت شیمیایی خاک‌ها توانایی آن‌ها در جذب و تبادل یون‌های با بار مثبت در سطح کلویدهای خاک است. تبادل یونی مستلزم برهم کنش‌های الکترواستاتیک بین یک یون با بار مخالف موجود در سطح ذره باردار با بار مخالف که ذره باردار را احاطه کرده است، می‌باشد. ظرفیت خاک برای تبادل کاتیون‌ها یکی از تفاوت‌های اساسی ذرات خاک با ترکیبات دیگری است که به عنوان محیط رشد ریشه مورد استفاده قرار می‌گیرد. خصوصیات کلویدهای رس نظیر پراکندگی و فولکوله شدن تحت تأثیر توزیع کاتیون‌ها در اطراف رس‌ها می‌باشد. در ادامه جنبه‌های مختلف تبادل کاتیونی بحث خواهد شد (Bohn, et. al. 2001).

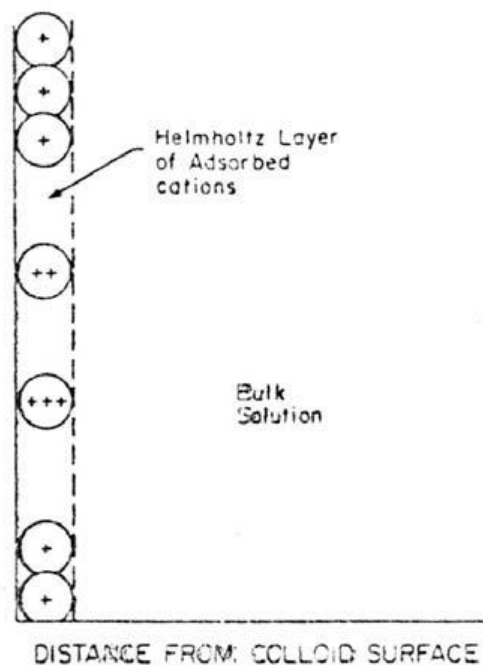
۲-۵-۱- لایه مضاعف الکتریکی

به دلیل وجود بارهای منفی، ذرات رس می‌توانند کاتیون‌ها را جذب کنند. یون‌های با بار مثبت به طور یکنواخت در تمام محیط توزیع نشده‌اند. این یون‌ها در سطح یا نزدیکی سطح رس نگهداری می‌شوند و بعضی از این یون‌ها به آسانی با یون‌های دیگر تعویض می‌شوند. به دلیل اصل خنثی بودن الکتریکی، بار منفی ذرات رس معادل یون‌های با بار مثبت می‌باشد که بار منفی سطح رس و یون‌های مثبت اطراف آن لایه مضاعف الکتریکی نامیده می‌شود (McBride, 1994). اولین لایه، لایه مضاعف شامل بارهای منفی سطح رس می‌باشد که فرض می‌کنیم بار منفی به صورت یکنواخت در تمام سطح رس توزیع شده است. دومین لایه، لایه محلول در تماس با سطح رس می‌باشد. یون‌های مثبت در این ناحیه به سطح رس جذب می‌شوند. اما در همان زمان یون‌ها از سطح ذره به طرف فاز محلول انتشار می‌یابند. این دو فرایند در تعادل خواهند بود و در نتیجه توزیع یون‌ها در اطراف ذرات رس شبیه توزیع مولکول‌های گاز در اتمسفر زمین می‌باشد. به عبارت دیگر غلظت کاتیون‌ها در نزدیکی سطح ذره زیاد و هرچه به طرف محلول اطراف کلویید می‌رویم غلظت کاتیون کم می‌شود (McBride,).

(1994). در ارتباط با لایه مضاعف الکتریکی تئوری‌هایی ارائه شده است که در ادامه ارائه شده‌اند.

۲-۵-۱-۱ - لایه مضاعف هلموتز

این تئوری از اولین نظریه‌ها در مورد لایه مضاعف الکتریکی می‌باشد. در این تئوری بار منفی کلویید در سطح ذره توزیع شده است و کل بارهای مخالف در دومین لایه در صفحه‌ای موازی با سطح با فاصله X متمرکز شده است (Bohn, et. al. 2001). در این تئوری غلظت کاتیون‌ها در سطح ذره ماکزیمم و با افزایش فاصله از سطح ذره، غلظت به طور خطی کاهش می‌یابد.



شکل ۲-۱۴ توزیع کاتیون‌ها نزدیک سطح ذره باردار بر اساس تئوری هلموتز (Bohn, et. al. 2001)

۲-۵-۱-۲ - تئوری لایه مضاعف گوی - چاپمن

این تئوری به وسیله گوی در ۱۹۱۰ و چاپمن در ۱۹۱۳ ارائه شد. در این تئوری فرض شده است که بار منفی به طور یکنواخت در سطح ذره توزیع شده است. ولی یون‌های با بار مخالف در اطراف آن شبیه مولکول‌های گازی در اطراف زمین توزیع شده‌اند. این تئوری همچنین تئوری لایه

مضاعف پخش شده نامیده می‌شود (McBride, 1994). در این تئوری غلظت کاتیون‌ها با افزایش فاصله از سطح به طور نمایی کاهش می‌یابد و می‌توان با توجه به معادله بولتزمن غلظت در هر فاصله از سطح را محاسبه کرد که با توجه به این معادله بیش‌ترین غلظت کاتیون‌ها و کم‌ترین غلظت آنیون‌ها در نزدیکی سطح ذره می‌باشد.

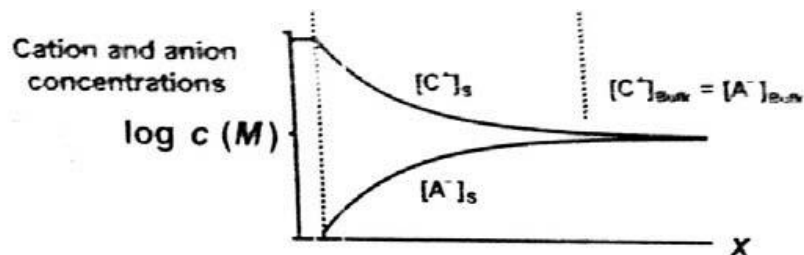
۲-۵-۱-۳- تئوری لایه مضاعف اشترن

در تئوری ارائه شده به وسیله گوی و چاپمن بار منفی به طور یکنواخت در سطح ذره توزیع شده است. در تئوری گوی و چاپمن یون‌های مثبت را به صورت بارهای نقطه‌ای در نظر می‌گیرند و بنابراین فضایی اشغال نمی‌کنند. این تئوری سپس به وسیله اشترن تغییر داده شد. به عبارت دیگر اشترن با در نظر گرفتن اندازه برای یون‌ها تئوری لایه مضاعف پخش شده را تصحیح کرد. در تئوری اشترن اولین لایه مضاعف الکتریکی شبیه به تئوری‌های قبلی است (McBride, 1994). هر چند دومین لایه به دو بخش تقسیم می‌شود:

۱. یک لایه نزدیک تر به سطح کلویید

۲. لایه پخش شده

در اولین لایه کاتیون‌ها با نیروی قوی جذب شده و لایه اشترن نامیده می‌شود. در این تئوری تغییرات غلظت کاتیون ترکیبی از لایه دوگانه گوی - چاپمن و لایه دو گانه هلموتز می‌باشد. کاهش در غلظت به دو بخش تقسیم می‌شود. در لایه اشترن غلظت با افزایش فاصله از سطح به طور خطی کاهش می‌یابد. در لایه پخشیده غلظت با افزایش فاصله از سطح به طور نمایی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۵-۲ توزیع کاتیون‌ها و آنیون‌ها در اطراف ذره باردار براساس تئوری اشترن (Essington, 2004)

۲-۵-۱-۴- اثر ظرفیت کاتیون بر ضخامت لایه مضاعف پخش شده

ضخامت لایه مضاعف پخش شده تحت تأثیر ظرفیت کاتیون‌های تبادلی می‌باشد. در یک غلظت مشابه، ضخامت لایه مضاعف پخش شده در مورد کاتیون‌های یک ظرفیتی بیش‌تر از کاتیون‌های دوظرفیتی است. این امر به دلیل تمایل کاتیون‌ها به انتشار از سطح کلویید است که به ترتیب زیر می‌باشد (Bohn, et. al. 2001):

کاتیون‌های سه ظرفیتی > کاتیون‌های دوظرفیتی > کاتیون‌های تک ظرفیتی

۲-۵-۱-۵- اثر غلظت الکترولیت بر ضخامت لایه مضاعف پخش شده

ضخامت لایه مضاعف پخش شده بستگی به غلظت الکترولیت دارد. غلظت بالا باعث کاهش ضخامت لایه مضاعف پخش شده می‌شود. با افزایش غلظت الکترولیت مقدار کاتیون افزایش می‌یابد. این امر باعث کاهش شیب غلظت در حد فاصل مایع، بین سطح کلویید و فاز مایع احاطه کننده آن می‌شود (Bohn, et. al. 2001). بنابراین تمایل کاتیون برای انتشار از سطح کلویید کاهش می‌یابد که سبب کاهش ضخامت لایه دوگانه می‌شود.

جدول ۲-۵ اثر ظرفیت و غلظت بر ضخامت لایه مضاعف پخش شده (Bohn, et. al. 2001)

ضخامت لایه دو گانه (آنگستروم)		
کاتیون‌های دوظرفیتی	کاتیون‌های یک ظرفیتی	غلظت
۵۰۰	۱۰۰۰	10^{-6}
۵۰	۱۰۰	10^{-3}
۵	۱۰	10^{-1}

۲-۵-۲- ویژگی‌های واکنش‌های تبادل کاتیونی

تبادل یونی معمولاً سریع، تحت کنترل پخش، برگشت‌پذیر و دارای استوکیومتری بوده و سطح تبادل‌کننده در اغلب موارد نسبت به یک یون قدری بیش از سایر یون‌ها انتخاب‌گری نشان می‌دهد (اوستان ۱۳۸۳). تبادل موقعی برگشت‌پذیر است که دمای مربوط به واکنش‌ها رفت و برگشت بر هم منطبق باشند. البته گاهی برگشت ناپذیری تبادل یا پسماند نیز مشاهده می‌شود. استوکیومتری بدان معنی است که همه یون‌هایی که سطح کلوییدی را ترک می‌کنند، به وسیله مقدار هم ارزی (برحسب بار یون) از دیگر یون‌ها جایگزین می‌شود. علت این امر برقراری شرط خنثی بودن بار الکتریکی است. وقتی یک یون از سطحی مبادله می‌شود، در تبادل‌کننده کمبود بار مخالف به وجود می‌آید که به وسیله یون‌های با بار مخالف موجود در ابر یونی پخشیده که تبادل‌گر را احاطه کرده است، جبران شود (اوستان ۱۳۸۳). بنابراین مقدار کل یون‌های با بار مخالف بر حسب اکی والان ثابت باقی می‌ماند. برای مثال به منظور حفظ استوکیومتری، دو یون K^+ برای جایگزینی یک یون Ca^{2+} لازم است.

از آنجایی که در تبادل یونی نیروهای الکترواستاتیک دخالت دارند می‌توان برای تبیین انتخاب‌گری یا ترجیح تبادل‌گر یونی برای یک یون نسبت به سایر یون‌ها از قانون کولن استفاده کرد. ولی به طور خلاصه می‌توان گفت که برای گروه معینی از عناصر جدول تناوبی که ظرفیت برابر دارند، یون‌هایی ترجیح داده می‌شوند که دارای شعاع آب‌پوشی کوچک‌تری هستند، زیرا در محیط خاک یون‌ها آب‌پوشی می‌شوند.

۲-۶- بهسازی لس‌ها

روش‌های مختلف و فراوانی جهت بهسازی لس‌ها موجود است. در طبقه‌بندی که استاتیو در سال ۱۹۸۶ انجام داد، روش‌های بهسازی لس‌ها را به چند گروه تقسیم کرد که این طبقه‌بندی تمامی این روش‌ها را در خود پوشش می‌داد. به دلیل فراوانی این روش‌ها، به صورت اجمالی به تشریح تعدادی از این روش‌ها که امروزه بیش‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌پردازیم.

۲-۶-۱- تراکم لس

در این روش با افزایش چگالی و وزن مخصوص لس، پتانسیل فروریزی آن کاهش می‌یابد. برخی از این روش‌ها علاوه بر کاهش فروریزش، نفوذپذیری خاک را کاهش و ظرفیت باربری آن را افزایش می‌دهند.

۲-۶-۱-۱- تراکم سطحی با استفاده از غلطک

این روش، بهترین و گسترده‌ترین روش به کار برده شده در عملیات عمرانی می‌باشد که حجم عظیمی از لس متراکم شده برای استفاده در جاده‌ها، سدهای خاکی، ترانشه‌ها و ... به کار می‌رود. عملیات تراکم معمولاً در رطوبت بهینه خاک انجام می‌شود، اما برای تسهیل در تراکم در شرایطی می‌توان از قسمت تر منحنی تراکم استفاده کرد.

۲-۶-۱-۲- تراکم به وسیله کوبش

در این روش با اعمال انرژی دینامیکی که وزنه به خاک وارد می‌کند، سبب تراکم و بهسازی خاک می‌گردد. در قدیم وزنه‌های ۲ و ۳ تنی استفاده می‌کردند اما اکنون به ۵۰ تن نیز رسیده‌اند. همچنین بهترین نتایج در درجه‌های اشباع ۰/۳۵ تا ۰/۶ به وجود آمده است. این روش برای اولین بار در دهه سی میلادی (۱۹۳۰) در شوروی انجام شد.

۲-۶-۱-۳- تراکم به وسیله شمع‌های هرمی کوتاه

این روش در سال ۱۹۶۵ در شوروی سابق استفاده شده است. در این روش شمع‌های بتنی به طول ۳ تا ۴ متر توسط کوبش وارد خاک می‌گردند. مقطع این شمع‌ها در بالا به شکل مربع یا دایره به ضلع و یا قطر ۶۰ تا ۷۰ سانتی‌متر و در پایین به ضلع و یا قطر ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. مقاطع دایروی (شمع‌های هرمی شکل) نسبت به مقاطع مربعی (شمع‌های منشوری) در بهسازی لس‌ها مؤثرتر می‌باشند. روش‌های دیگر بهسازی به روش تراکم شامل تراکم به وسیله شمع‌های درجای خاکی، تراکم به وسیله تزریق سیمان و تراکم به وسیله تزریق سوسپانسیون‌های رس می‌باشد که این روش‌ها به طور کلی به عنوان روش‌های تراکمی محسوب نمی‌شوند، اما استفاده از تزریق در خاک‌های لسی به علت فروریزی که این خاک تحت اثر فشار تزریق و آب انجام می‌دهد، موجب متراکم شدن و کاهش حجم در این گونه خاک‌ها می‌شود.

۲-۶-۲- بهسازی دانه‌بندی خاک

در این روش با توجه به مصالح اطراف محل مورد نظر، یک ترکیب دانه‌بندی بهینه انتخاب شده و با خاک لس مورد نظر ترکیب می‌شود. این روش بیش‌تر در عملیات راه‌سازی کاربرد دارد. استفاده از این روش به ویژه در مناطقی که ضخامت لایه‌های خاک لس در آن زیاد است، انجام این عملیات راه حلی به صرفه و اجرایی نیست.

۲-۶-۳- زهکشی لس

از جمله روش‌های زهکشی لس می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۲-۶-۳-۱- زهکش‌های سطحی

روش‌های بسیاری جهت حذف آب‌های سطحی حین اجرای پروژه وجود دارند که اهمیت

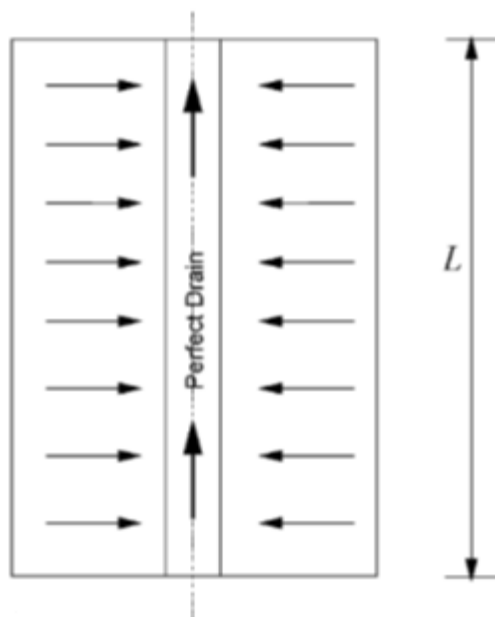
هریک از آن‌ها امری روشن است (Evstatiev, D. 1988).

۲-۶-۳-۲ زهکش‌های افقی

زهکش‌های افقی پیش ساخته نیز جایگزین مناسبی برای پی‌های ماسه‌ای هستند (Yong Jeon, H. 2004). نتایج تحلیل ظرفیت زهکشی نشان می‌دهد که ظرفیت ایجاد شده توسط زهکش‌های افقی پیش ساخته بیش‌تر از ماسه حتی در حالت وجود سربار است. در اثر وجود سربار، مقطع عرضی زهکش کاهش می‌یابد؛ این امر منجر به کاهش ظرفیت تخلیه می‌گردد، بنابراین در ملاحظات طراحی می‌بایست کاهش مقاومت فشاری در اثر کاهش مقطع عرضی لحاظ شود. نتایج به دست آمده از از ابزارهای کنترل نشان می‌دهد که تحکیم عادی بدون ایجاد ناپایداری در خاک‌ریز صورت می‌گیرد و فشار آب به سرعت مستهلک می‌شود که بیان‌گر ظرفیت تخلیه مناسب زهکش‌های افقی پیش ساخته است.

۲-۶-۳-۳ زهکش‌های قائم

نتایج پژوهش‌های انجام شده نشان داده است که زهکش‌های قائم وقوع زهکشی در راستای افق را به دلیل ایجاد مسیر کوتاه‌تر، در زمان کم‌تری فراهم می‌کنند (Chu et al., 2004). کاهش زمان تحکیم به‌طور معمول با کاهش فاصله زهکش‌ها حاصل می‌شود. البته محدودیت عملکرد معکوس در ناحیه‌ی دست‌خورده نیز وجود دارد. موفقیت در طراحی زهکش‌های قائم پیش ساخته، نه تنها به محاسبات طراحی بلکه به کنترل کیفیت زهکش‌ها، نحوه انتخاب پارامترهای خاک و روش‌های نصب بستگی دارد. شکل ۲-۱۶ نحوه عملکرد زهکش‌های قائم را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۶ نحوه عملکرد زهکش قائم (Chu et al., 2004)

۲-۳-۴- زهکش‌های برقی قائم

با توجه به تحقیقات انجام شده، زهکش‌های برقی قائم حرکت آب به سمت زهکش‌ها را سریع‌تر می‌نماید. آب منفذی به وسیله یون‌های مثبت ایجاد شده خارج می‌گردد و به این ترتیب خاک تحکیم می‌یابد. با بررسی تأثیر زهکش‌های برقی قائم بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی خاک، نتایج نشان داد که افزایش زمان بهسازی و ولتاژ، منجر به افزایش ضریب نفوذپذیری می‌گردد. با این روش، حد روانی و حد خمیری افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش مقاومت برشی خاک، شاخص روانی آن کاهش پیدا می‌کند (Estabragh et al., 2014).

با بررسی‌های انجام شده روی بهسازی رس لای‌دار به وسیله ی تزریق کلسیم کلراید و سدیم سیلیکات، به روش زهکش قائم برقی، نتایج نشان داد که حضور میدان الکتریکی موجب انتقال بهتر یون Ca^{2+} موجود در کلسیم کلراید و SiO_2^{3-} موجود در سدیم سیلیکات در خاک رس می‌گردد. همچنین مقاومت برشی خاک با این روش افزایش می‌یابد (Chien et al., 2011).

۲-۶-۴- تثبیت لس

در پی پژوهش‌های محققان برای تثبیت خاک، آن‌ها به روش‌هایی اقتصادی و عملی دست یافتند که در ادامه به آن‌ها می‌پردازیم (Winterkorn and Pamukcu, 1991).

۲-۶-۴-۱- تثبیت‌کننده‌های دانه‌ای

ترکیبی از مصالح درشت‌دانه و مصالحی جهت پرکردن فضای خالی بین ذرات است. از مصالح رسی، سیمانی و بتن می‌توان به عنوان مصالح پرکننده استفاده نمود.

۲-۶-۴-۲- تثبیت‌کننده‌های شیمیایی

نقش اصلی تثبیت خاک در این روش برعهده‌ی واکنش شیمیایی ذرات است و واکنش فیزیکی- شیمیایی مصالح نقش چندانی در بهبود خواص خاک ایفا نمی‌کند. از واکنش‌های شیمیایی متداول می‌توان به هیدراته‌شدن، انتقال یون، واکنش پوزولانی (سیمانی شدن)، مجتمع‌سازی، ته-نشینی، پلیمر شدن، اکسید شدن و کربناتی شدن اشاره نمود. همچنین استفاده از تثبیت‌کننده‌های زیستی یا کاشت گیاهان جهت پایداری شیب، جزء این دسته از روش‌های تثبیت قرار می‌گیرد. از جمله تثبیت‌کننده‌های شیمیایی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

۲-۶-۴-۲-۱- سیمان پرتلند

پژوهش‌هایی که توسط تعدادی از محققان در تثبیت خاک با سیمان صورت پذیرفت، نشان داد که این ماده بسیار مناسب می‌باشد. به عنوان مثال (Jefferson et al., 2008)، با بررسی مشخصات ترکیب خاک و سیمان، پی بردند که این ترکیب، یک لایه خاک پرمقاومت زیر پی ایجاد می‌کند. این لایه به همان میزان که با هدف جلوگیری از نفوذ آب احداث می‌شود، به منظور افزایش ظرفیت باربری نیز به کار می‌رود. لایه ساخته شده توسط آن‌ها دارای ضخامت ۱/۵ تا ۵ متر بود. آن‌ها از خاک حفاری شده برای ایجاد این لایه استفاده نمودند. مقدار سیمان افزوده شده برابر ۳٪، ۴٪ و ۶٪ در نظر گرفته

شده بود و نفوذپذیری آن کمتر از ۹-۱۰ متر بر ثانیه بود. برای کنترل کیفیت روند ساخت در محل، میزان سیمان مصرفی، کیفیت ترکیب و میزان رطوبت بهینه باتوجه به وزن مخصوص خشک، به دست آوردن ضریب تغییر مکان ترکیب و اندازه گیری نشست با استفاده از ابزارهای دقیق نقشه برداری لازم می باشد.

۲-۶-۴-۲- آهک

آهک می تواند به شکل های مختلف از جمله آهک هیدراته (Ca(OH)_2)، آهک سریع (CaO)، آهک- خاکستر بادی و آهک- سنگ گچ باشد (Winterkorn and Pamukcu 1991). آهک هیدراته و آهک سریع فرآورده ی جانبی به دست آمده از سوزاندن سنگ آهک می باشند. این ماده ازجمله قدیمی ترین مصالح ساختمانی است و تاریخچه ی استفاده از آن به بیش از ۲۰۰۰ سال پیش بازمی- گردد. دلیل استفاده ی گسترده از این ماده، صرفه ی اقتصادی و همچنین کاربری و فناوری تولید آسان آن می باشد. پژوهش های بسیاری جهت بررسی تأثیر این ماده در بهبود خواص خاک انجام شده است. بررسی ها نشان داد، سازوکار این ماده، افزایش غلظت الکترولیت در مایعات منفذی است. بر اثر افزایش غلظت این مایعات، امکان جا به جایی ذرات کاهش می یابد. همچنین واکنش های انجام شده منجر به کاهش ضخامت لایه ی آب دوگانه می گردد. با توجه به تحقیقات انجام شده توسط محققان (Sujit Kumar and Monowar, 2012)، روی تغییرات حد روانی، حد خمیری، تورم، مقاومت و ریزساختارهای خاک تثبیت شده با آهک، نتایج نشان داد که آهک به طور کلی منجر به بهبود خواص خاک می گردد. همچنین آن ها دریافتند که در خاک هایی که دارای سیلیکا هستند، درصد بهینه ای جهت ترکیب آهک وجود دارد که فراتر از آن درصد، مقاومت خاک کاهش می یابد؛ زیرا سیلیکای موجود در خاک در اثر تماس با آهک و آب، ژل سیلیکا تولید می کند. این ژل حجم زیادی از آب را در خود نگه می دارد. به این ترتیب منجر به افزایش ویژگی خمیری خاک و تورم آن می شود. برای تمامی خاک های مطالعه شده، کاهش در شاخص خمیری مشاهده شد؛ زیرا با افزودن آهک، حد روانی کاهش

و حد خمیری افزایش می‌یابد. بررسی بر روی خاک‌های تورم‌زا نشان داد، شاخص خمیری آنها تا ۵۰٪ کاهش می‌یابد. تغییر شاخص خمیری منجر به تغییر نوع خاک می‌گردد. به گونه‌ای که خاک از دانه-بندی رس به لای تبدیل می‌شود.

گروهی دیگری از محققان (Cuisinier et al., 2014)، تأثیر تغییرات رطوبت بر ترکیب خاک لس تورم‌زا و آهک را بررسی نمودند. نمونه‌های بررسی شده دارای ۲ تا ۵ درصد آهک بودند و همچنین نمونه‌ها به مدت ۲۸ تا ۱۸۰ روز عمل‌آوری شدند. نتایج نشان داد، وجود ۲ درصد آهک مانع از تورم می‌گردد. اما در صورتی که خاک دارای دو درصد آهک، به‌طور دوره‌ای در معرض رطوبت قرار گیرد، سپس رطوبت آن حذف شود، در آن تنجش‌های بازگشت ناپذیری ایجاد می‌گردد. اما نمونه‌های دارای پنج درصد آهک با اعمال رطوبت و حذف آن نیز دچار تغییر شکل نمی‌شوند.

همچنین نتایج بررسی‌های انجام شده (Celauro et al., 2012) روی روش‌های مخلوط خاک و آهک نشان داد که عملکرد مکانیکی مخلوط، همچنین تراکم آن در محل نیاز به توجه ویژه‌ای دارد. لازم به بیان است عملکرد مخلوط، با افزایش وزن مخصوص آن، افزایش می‌یابد و بنابراین در صورتی که طراح برای درصد تراکم مقادیر زیادی را در نظر گرفته باشد، باید به این نکته توجه شود که به دست آوردن این مقدار در محل دشوار است و همچنین این امکان وجود دارد که عملکرد مکانیکی مخلوط در واقعیت تفاوت چشم‌گیری با محاسبات داشته باشد. نکته‌ی دیگر در اجرای مخلوط خاک و آهک، درصد رطوبت مخلوط است؛ زیرا این متغیر نه تنها عملکرد مکانیکی مخلوط را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه در روند واکنش پوزولانی آهک نیز تأثیر می‌گذارد.

۲-۶-۴-۳- قیر طبیعی

از قیر طبیعی برای ترکیب با ماسه استفاده می‌گردد. با استفاده از قیر، ذرات خاک نفوذناپذیر می‌شوند (Winterkorn and Pamukcu, 1991).

رزین جهت نفوذ ناپذیری خاک‌های دانه‌ای و چسبنده استفاده می‌شود (Winterkorn and Pamukcu 1991). نتایج پژوهش نشان داد که با افزودن رزین اکریلیت به خاک لس، می‌توان فروریزش را بیش از ۶۰٪ کاهش داد. این ترکیبات ذرات خاک را در بر می‌گیرند و مانع از رسیدن رطوبت به آن‌ها می‌شوند. همچنین بررسی بر روی نمونه‌های خشک نشان داد ترکیبات اکریلیت چسبندگی را افزایش و زاویه اصطکاک داخلی را کاهش می‌دهند. تأثیر این مواد بر چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک، منجر به ایجاد مقاومت برشی حداکثر در تمام تنش‌های قائم می‌گردد (Fattah et al., 2013).

در این روش خاک‌های چسبنده را به وسیله‌ی پسماندهای پوزولانی تثبیت می‌نمایند. نتایج ناشی از بررسی گرد کوره سیمان (Parsons and Kneebone, 2004)، نشان داد که این ماده منجر به کاهش تورم و ویژگی خمیری خاک و همچنین افزایش مقاومت آن می‌گردد. بر اساس این بررسی‌ها، میزان ۱/۵ تا ۷ درصد گردکوره سیمان مناسب می‌باشد. با افزایش درصد این ماده مقاومت نیز افزایش می‌یابد. غرقاب کردن موجب افزایش چشم‌گیری در مقاومت می‌شود. نمونه‌های تثبیت‌شده با گرد کوره سیمان، در برابر مرطوب و خشک شدن عملکردی مشابه نمونه‌های بهسازی شده با آهک، خاکستر بادی و سیمان دارند. اما در برابر ذوب و انجماد، دوام نمونه‌های تثبیت شده با آهک، خاکستر بادی و سیمان بیش‌تر است. همچنین تحقیقات دیگری نیز صورت گرفت (Sariosseiri and Muhunthan, 2008) که سیمان و گرد کوره‌ی سیمان را به مقدار ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ درصد وزن خشک خاک با آن ترکیب نمودند. بررسی‌ها نشان داد این مواد منجر به افزایش درصد رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی خاک می‌گردد. در نمونه‌های دارای بیش از ۶٪ سیمان، وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان بیش از وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی نمونه‌های تثبیت‌شده با گردکوره‌ی سیمان است. اگرچه با افزودن سیمان و گردکوره‌ی

سیمان رفتار خاک شکننده تر می گردد، این مواد تأثیر به سزایی بر افزایش مقاومت خاک و ضریب کشسانی آن دارند. سطح مخصوص ذرات این ماده زیاد است، به همین دلیل مانع از جذب آب توسط خاک می گردند. همچنین بررسی ها نشان داد در درصدهای افزودنی کم، شاخص خمیری خاک افزایش می یابد ولی با افزایش درصد افزودنی این شاخص کم می شود.

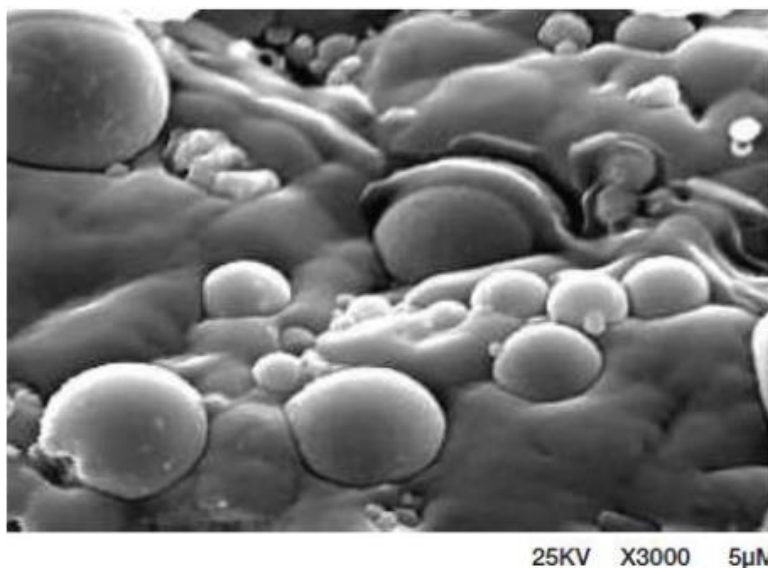
۲-۶-۴-۶-۲- نمک ها و سایر مصالح

نمک ها (کلرایدها)، اسیدها (فسفریک اسید)، مصالح ترموپلاستیک (آسفالت، پلی اتیلن)، سدیم و کلسیم سیلیکات، کلسیم آلومینات، گوگرد، سولفات، پتاسیم، اکسید آهن، خاکسترپوزولانی از زغال سنگ نارس و ضایعات کشاورزی، چوب، فیبر، ضایعات کاغذ، خمیر کاغذ، سلولز و زباله را می توان برای تثبیت خاک استفاده نمود.

تحقیقاتی توسط محققان انجام شد که با ترکیب ۸۰٪ ماسه و ۲۰٪ کائولین، شرایط رمبندگی را در نمونه های بازسازی شده بررسی نمودند (Abbeche et al., 2010). آن ها رفتار خاک های رمبند را پس از ترکیب با آمونیوم سولفات و پتاسیم کلراید با غلظت های ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ مول بر لیتر بررسی کردند. نتایج نشان داد که ترکیب نمک های معدنی با خاک رمبند تأثیر به سزایی در کاهش فروریزش این خاک ها دارد. همچنین نمونه هایی که با انرژی تراکم بیش تری بازسازی شدند، دارای استعداد رمبندگی کم تری بودند. لازم به بیان است، برای استفاده از این ترکیبات در صورتی که عمق لایه ی خاک رمبند کم تر از چهار متر باشد، ابتدا خاک محل حفاری می شود، سپس با محلول نمک مورد نظر ترکیب می گردد و در انتها با میزان تراکم مشخصی به محل حفاری بازگردانده می شود. اما در صورتی که لایه ی خاک عمیق باشد، محلول به آن تزریق می گردد.

بررسی تأثیر افزودن خاکستر بادی با میزان کلسیم بالا بر خاک های رسی (Kolias et al., 2005)، نشان داد عملکرد این افزودنی تحت تأثیر درصد مصرف شده از این ماده، نوع خاک و مدت زمان عمل آوری نمونه ها می باشد. نمونه های دارای ۵ تا ۲۰ درصد وزن خاک خشک خاکستر بادی،

دارای وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی بیش‌تر و درصد رطوبت بهینه‌ی کم‌تری نسبت به نمونه‌های تثبیت‌نشده بود. بررسی‌ها نشان داد، با افزودن دو تا چهار درصد سیمان، نمونه‌ها زودتر سخت می‌شوند و مقاومت بیش‌تری پیدا می‌کنند. البته میزان این تغییرات تحت تأثیر نوع خاک نیز می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت، افزودن خاکستر بادی به خاک، مقاومت، ضریب کشسانی و ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد. همچنین تثبیت خاک لس با خاکستر بادی و سولفور نیز صورت پذیرفت (Onsy Mohamed and El Gamal, 2012). نمونه‌های مورد آزمایش در هوا، آب و محلول نمکی عمل‌آوری شدند. دمای عمل‌آوری از دمای محیط تا ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و مدت عمل‌آوری آن‌ها از ۲۸ روز تا یک سال در نظر گرفته‌شد. بررسی‌ها نشان داد، مقاومت این نمونه‌ها سه برابر نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان پرتلند می‌باشد. نفوذپذیری این نمونه‌ها بین متغیر بود. این ویژگی امکان استفاده از این ترکیب را جهت تثبیت در مناطق خشک فراهم می‌کند. این پژوهشگران دریافته‌اند که این ترکیب در مدت زمان کم‌تر از یک روز مقاومت زیادی به دست می‌آورد و همچنین توانایی مقابله با شرایط سخت محیطی مانند اسیدی و قلیایی شدن خاک را دارد. شکل ۲-۱۷ نمایی از پر شدن فضای خالی بین ذرات خاک توسط سولفور را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۷ پر شدن فضای خالی بین ذرات خاک توسط سولفور (Onsy Mohamed and El Gamal, 2012)

گروهی از محققان (Zia and Fox, 2000)، لس‌های ترکیب شده با خاکستر بادی را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که افزودن خاکستر بادی نوع C به خاک لسی، موجب کاهش شاخص خمیری و افزایش چسبندگی بین ذرات می‌گردد. این ماده با پر کردن فضای خالی بین ذرات لس و جذب رطوبت، استعداد خاک در تورم و انقباض را کاهش می‌دهد و مخلوط پایداری ایجاد می‌کند. نتیجه‌ی پژوهش‌های آن‌ها نشان داد، نهشته‌هایی که تا ۹٪ خاکستر بادی در آن‌ها موجود است، دارای وزن مخصوص خشک بیشینه و درصد رطوبت بهینه‌ی بیش‌تری هستند، اما برای درصدهای بالاتر از خاکستر بادی، وزن مخصوص خشک بیشینه کاهش می‌یابد.

بررسی‌های انجام شده (Buhler and Cerato, 2007) با مقایسه خاک‌های متورم‌شونده‌ی اصلاح شده با دو ماده آهک و خاکستر بادی نوع C نشان داد، هر دو مصالح آهک و خاکستر بادی از نشست و تورم خاک جلوگیری می‌کنند، اما در درصد وزنی برابر تأثیر آهک بیش‌تر است. به گونه‌ای که افزودن پنج درصد آهک، انقباض خطی را چهار تا هفت درصد کاهش می‌دهد و در حالی که افزودن پنج درصد خاکستر بادی نوع C یک تا دو درصد از این ویژگی می‌کاهد. همچنین در درصدهای کم، نرخ کاهش انقباض بیش‌تر است. نکته‌ی قابل توجه دیگر این است که وزن مخصوص دانه‌های آهک ۵/۴ برابر کم‌تر از خاکستر بادی نوع C می‌باشد؛ بنابراین در درصد وزنی برابر حجم آهک افزوده شده در مقایسه با حجم خاکستر بادی خیلی بیش‌تر است. این امر موجب کاهش کارایی مخلوط خاک و آهک نسبت به مخلوط خاک و خاکستر بادی می‌شود. در نتیجه اگر چه در صورت استفاده از میزان مشخصی از هردو ماده تأثیر آهک بیش‌تر است، ولی در پروژه‌های بزرگ استفاده از خاکستر بادی مقرون به صرفه‌تر می‌باشد.

۲-۶-۵- سایر روش‌های مورد استفاده برای بهسازی خاک‌های لس

روش‌های دیگری که برای بهسازی خاک‌ها وجود دارند عبارتند از: مسلح کردن خاک، استفاده از ژئوممبرین‌ها، اصلاح شیب‌ها و در نهایت جایگزینی خاک که هزینه زیادی را به همراه دارد.

۷-۲- خاک‌های غیر اشباع^۱

از آنجایی که بخشی از این تحقیق شامل بررسی و ارزیابی پتانسیل فروریزی در شرایط غیر اشباع می‌باشد، لذا در ادامه مختصری در مورد پارامترها و تئوری مربوط به خاک‌های غیر اشباع پرداخته شده است.

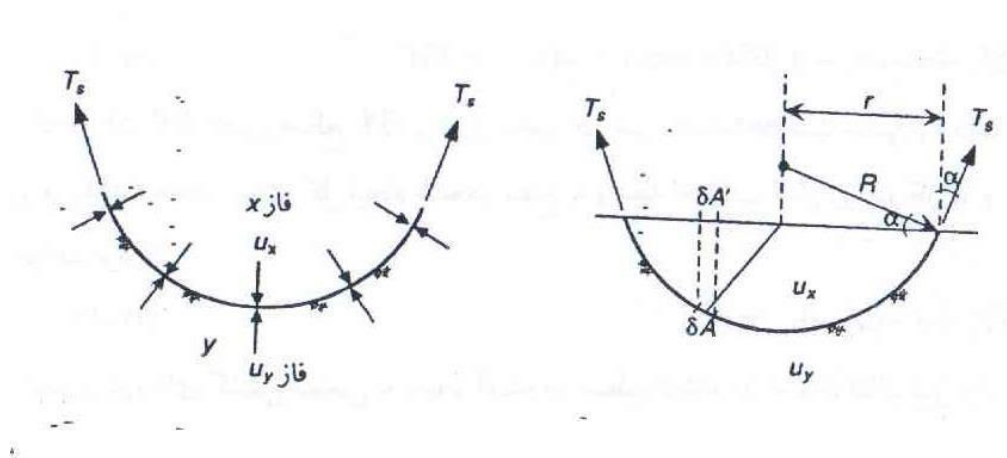
۷-۲-۱- مفهوم مکش^۲

مکش در خاک‌های غیر اشباع را می‌توان به پتانسیل خاک برای جذب آب نسبت داد که پارامتر اصلی کنترل‌کننده رژیم جریان و فاکتور اصلی در بررسی رفتار مکانیکی این خاک‌ها می‌باشد. خاک غیراشباع محیطی سه فازی شامل آب، هوا و دانه‌های جامد خاک می‌باشد؛ البته سطح تماس بین آب و هوا (پوسته قابل انقباض) نیز بر روی مشخصات مکانیکی محیط‌های غیراشباع تأثیر می‌گذارد و در نتیجه می‌توان آن را به عنوان یک فاز مستقل در نظر گرفت (Fredlund and Morgenstern, 1977). از جمله ویژگی‌های پوسته قابل انقباض، تحمل نیروهای کششی وارد بر خاک است که اصطلاحاً کشش سطحی نام دارد. تحت بارهای وارده، دو فاز آب و هوا جریان یافته و دو فاز اسکلت خاک و پوسته قابل انقباض (سطح تماس بین آب و هوا)، به تعادل می‌رسند. برای آن‌که پوسته قابل انقباض در حال تعادل باشد، نیروی کشش سطحی در تمامی سطح تداخل آب و هوا به وجود می‌آید که آن را با T_s نشان می‌دهند. این نیرو بر سطح تماس (پوسته قابل انقباض) مماس می‌باشد. کشش سطحی باعث می‌شود تا پوسته قابل انقباض همچون یک غشای الاستیک رفتار نماید. در صورتی که یک غشای الاستیک دو بعدی در دو وجه خود تحت اثر فشارهای مختلفی قرار گرفته باشد، برای آن‌که در وضعیت تعادل قرار بگیرد باید سطح آن نیز به سمت فشار بیشتر باشد. این عمل موجب به وجود آمدن نیروهای کششی در غشا خواهد شد. شکل ۲-۱۸ نمودار آزاد پوسته قابل

¹ Unsaturated soils

² suction

انقباض را نشان می‌دهد (Mitchell, 1976).



شکل ۱۸-۲ نمودار آزاد پوسته قابل انقباض (Mitchell, 1976).

معمولاً پارامترهای مکانیکی و رفتاری خاک‌های غیر اشباع بر اساس مکش ساختاری تعیین می‌شود. در مکانیک خاک‌های غیر اشباع به اختلاف فشار هوا و فشار آب اصطلاحاً مکش بافتی یا مکش ساختاری گفته و آن را با حرف اختصاری s نشان می‌دهند که طبق رابطه ۲-۳ با کشش سطحی در ارتباط است.

رابطه ۲-۳:

$$s = (u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R}$$

U_a : فشار هوا در بالای انحنا

U_w : فشار آب در زیر انحنا

T_s : نیروی کشش سطحی

R : شعاع انحنا پوسته قابل انقباض

مکش ساختاری حاصل دو پدیده فیزیکی موئینگی و جذب سطحی می‌باشد. پدیده موئینگی به

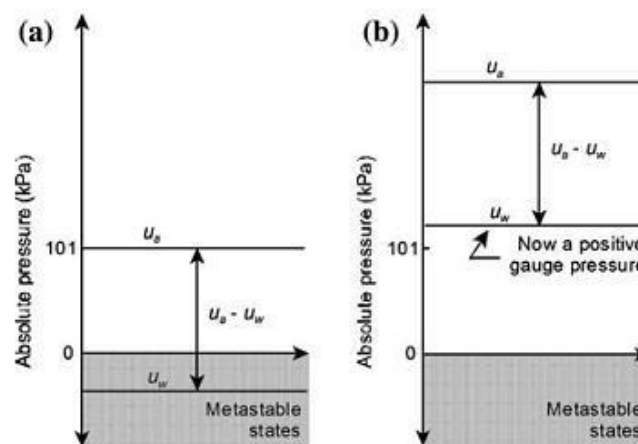
طور مستقیم مرتبط با کشش سطحی آب می‌باشد. در یک لوله موئینه، نیروی موئینگی (متناظر با مقدار مکش) با انحنای تقعر آب متناسب است و کاهش شعاع لوله باعث افزایش انحنا و همچنین افزایش ارتفاع سطح آب در لوله موئینه می‌گردد.

۲-۷-۲ روش‌های اندازه‌گیری مکش ساختاری و مکش کل خاک

مکش کل خاک را می‌توان با اندازه‌گیری میزان رطوبت نسبی درون خاک به دو صورت مستقیم و غیر مستقیم اندازه گرفت. در روش مستقیم مقدار فشار بخار آب درون خاک به وسیله دستگاه بخارسنج هوا اندازه‌گیری شده و با داشتن مقدار فشار بخار آب درون خاک و فشار اشباع بخار آب مقدار رطوبت نسبی محاسبه می‌شود. در روش غیر مستقیم به وسیله فیلتر کاغذی بین خاک و فیلتر، تعادل برقرار نموده و از روی مقدار رطوبت نسبی جذب شده توسط فیلتر کاغذی، مقدار مکش کل درون خاک که برابر با مکش فیلتر می‌باشد، اندازه‌گیری می‌شود (Nam Soonkie et al., 2011).

روش‌های متعددی نیز برای اندازه‌گیری مکش بافتی خاک و تعیین منحنی مشخصه آب-خاک وجود دارد. این منحنی ممکن است به صورت مستقیم یا غیر مستقیم در آزمایشگاه تعیین شود. در روش مستقیم فشار آب حفره‌ای با اعمال فشار هوای مشخص، اندازه‌گیری شده و لذا مکش (ua-uw) در درصد رطوبت مورد نظر تعیین می‌گردد. از میان روش‌های مستقیم، فشار صفحه‌ای (pressure plate) و تensiومتر (tensiometer) و فشار غشایی (pressure membrane) از جمله مهم‌ترین و معمول‌ترین این روش‌ها می‌باشند. در روش غیر مستقیم با بررسی شاخص‌های نشان‌دهنده میزان رطوبت خاک و یا خواص فیزیکی که نسبت به تغییرات میزان رطوبت حساس هستند، نسبت به اندازه‌گیری درصد رطوبت خاک در مکش متناظر اقدام می‌شود. از میان روش‌های مورد استفاده در این بخش می‌توان به روش فیلتر کاغذی (filter paper) و سنسورهای اتلاف حرارتی (heat dissipation sensor) نام برد (جوهری و همکاران ۱۳۹۰). در روش‌های مستقیم با استفاده از یک دیسک سرامیکی که اجازه عبور هوا را از درون خود نمی‌دهد، مکش ماتریسی اندازه‌گیری می‌شود.

این دیسک سرامیکی دارای حفرات هم‌اندازه بوده و همچون یک غشا بین دو فاز هوا و آب قرار می‌گیرد و عمدتاً از مصالح سرامیکی از جنس کائولینیت ساخته می‌شود (Jotisankasa, 2005). در خاک‌های غیراشباع فشار آب منفی است و اندازه‌گیری مستقیم آن می‌تواند منجر به پدیده کاویتاسیون در سیستم اندازه‌گیری شود. برای رفع این مسأله به شرط ثابت ماندن میزان مکش و درصد رطوبت، مقدار فشار هوا و فشار آب را به یک میزان افزایش می‌دهند تا فشار آب مثبت شود. این روش که به روش انتقال محوری معروف است، برای اولین بار توسط اسکافیلد در سال ۱۹۳۵ و هیلف (Hilf, 1956) ارائه و توسعه یافت و اولین کاربرد آن توسط بیشاپ گزارش شد (Bishop and Donald, 1961).



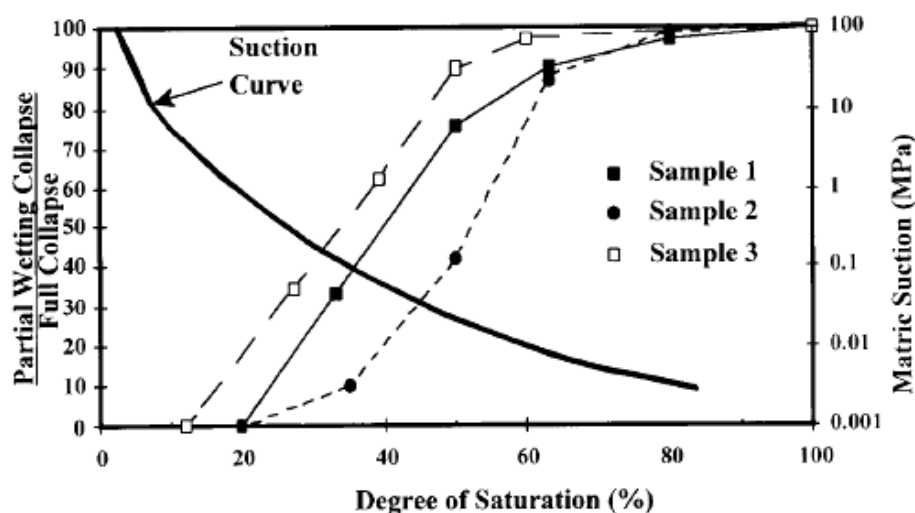
شکل ۲-۱۹ روش انتقال محوری

۲-۷-۳ رفتار فروریزی خاک‌ها با تغییرات مکش ساختاری

آنچه که اهمیت دارد این است که شواهد آزمایشگاهی و مشاهدات محلی متعددی حاکی از این مسئله است که فروریزش در خاک می‌تواند تحت تغییر درصد رطوبت یا به طور مناسب‌تر تغییرات مکش در شرایط دور از شرایط اشباع و مکش صفر اتفاق افتد. شواهد آزمایشگاهی، نشان داده است که فروریزش می‌تواند در اثر افزایش تدریجی درصد رطوبت یا کاهش تدریجی مکش خاک رخ دهد (Rodrigues & Vilar, 2011).

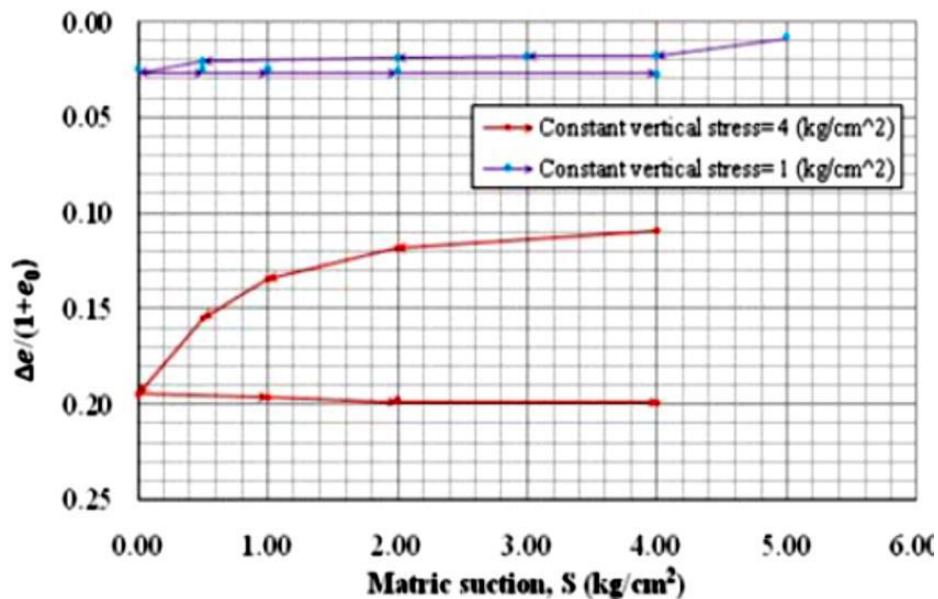
در طبیعت نیز خاک فروریزی ممکن است به طور نسبی در معرض آب قرار گیرد و کاملاً اشباع نشود. در واقع خاک در این حالت مرطوب شده و در اثر افزایش رطوبت دچار فروریزش نسبی می‌شود. پس از این فروریزش نسبی، خاک هنوز در وضعیت غیراشباع قرار دارد. در واقع با تغییر رطوبت خاک میزان مکش ماتریسی در آن تغییر می‌کند. وقتی خاک مرطوب می‌شود مکش ماتریسی کاهش می‌یابد ولی مانند رسیدن به وضعیت اشباع، مکش ماتریسی به صفر نمی‌رسد. بنابراین برای بررسی رفتار خاک‌های فروریزی باید تغییرات مکش ماتریسی در حین مرطوب‌سازی بررسی شود.

در طبیعت خاک‌های غیراشباع زمانی به طور کامل اشباع می‌شوند که سطح آب زیرزمینی بالا بیاید. هنگامی که چنین شرایطی پیش‌بینی می‌شود، جهت پیش‌بینی میزان فروریزش باید از آزمایشاتی که خاک در آن به طور کامل اشباع می‌شود، استفاده کرد. در مقابل، زمانی که آب از بالا وارد خاک می‌شود و شرایط طوری است که خاک در آب غوطه‌ور نمی‌شود، خاک فروریزی به طور نسبی مرطوب شده و خاک نیز به طور نسبی فروریزش می‌کند. در شکل ۲-۲۰ اثرات مرطوب‌سازی نسبی بر کرنش واقعی فروریزش در خاک سیلتی نشان داده شده است. جهت پیش‌بینی واقعی و دقیق میزان فروریزش باید تخمین خوبی از میزان رطوبتی که به خاک می‌رسد در دست باشد، که این قسمت مشکل‌ترین بخش در پیش‌بینی میزان فروریزش نسبی در خاک می‌باشد.



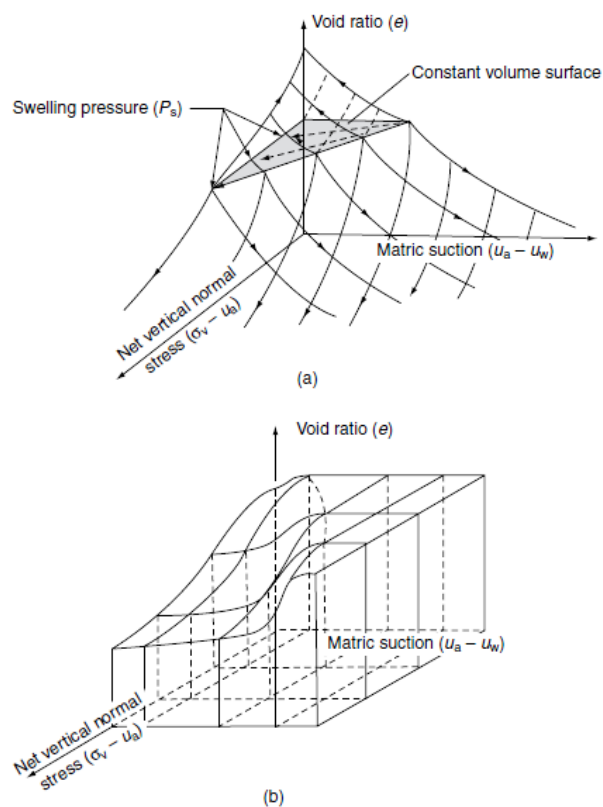
شکل ۲-۲۰ نسبت فروریزش نسبی به فروریزش کل با تغییرات مکش ماتریسی (Houstoun et al., 2001)

حائری و همکاران نیز، با انجام آزمایشات ادمتر با قابلیت کنترل مکش ساختاری بر روی نمونه‌های دست‌نخورده خاک فروریزی تحت تنش خالص ثابت، همان‌گونه که در شکل ۲-۲۱ نشان داده شده است، مشاهده نمودند که با کاهش مکش ساختاری و به دور از حالت اشباع یا مکش ساختاری صفر نیز در نمونه‌ها کاهش حجم و فروریزش رخ می‌دهد (Haeri et al., 2012).



شکل ۲-۲۱ فروریزش در خاک تحت کاهش مکش ساختاری به دور از شرایط اشباع (Haeri et al., 2012)

شکل ۲-۲۲ گراف سه بعدی را از خاک‌های غیراشباع با ساختار پایدار و ناپایدار در فضای سه بعدی نسبت تخلخل - مکش ماتریسی - تنش خالص قائم، نمایش می‌دهد. با توجه به این گراف‌ها، در خاک با ساختار پایدار، هنگامی که تحت بار قائم ثابت، مکش ماتریسی با افزایش رطوبت کاهش پیدا می‌کند، تخلخل خاک افزایش می‌یابد. در عین حال در خاک غیراشباع با ساختار ناپایدار (فروریزی)، با کاهش مکش ماتریسی در اثر افزودن آب، نسبت تخلخل با نرخ بالایی کاهش پیدا می‌کند (Fredlund, 1996).



شکل ۲-۲۲ نمودار نسبت تخلخل - مکش ماتریسی - تنش خالص قائم (a) ساختار پایدار (b)

ساختار ناپایدار (Fredlund, 1996).

بر اساس موارد فوق، نتیجه گرفته می‌شود که فروریزش در یک خاک فروریزی می‌تواند با جذب رطوبت کمتر از شرایط اشباع نیز رخ دهد؛ بنابراین بایستی آزمایشاتی با کنترل مکش ماتریسی انجام شود و میزان فروریزش با تغییر تدریجی مکش ماتریسی خاک به دست آید.

۳- فصل سوم: شناسایی خاک و روند انجام آزمایش-

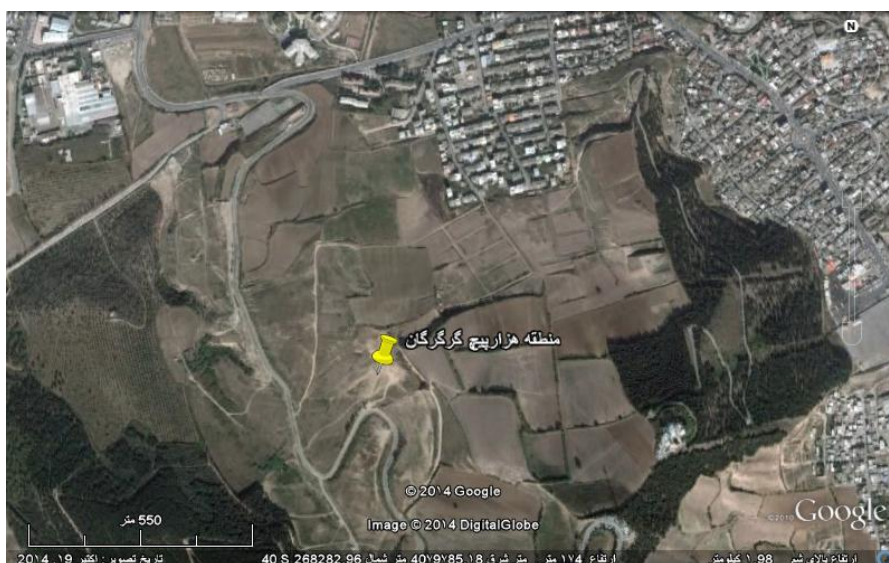
ها

۳-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا چگونگی انتخاب منطقه دارای پتانسیل فروریزی و نحوه اخذ نمونه‌ها آمده است و سپس به بررسی و شناسایی خواص و ویژگی‌های خاک مورد استفاده شده در تحقیق (لس کلالة) پرداخته می‌شود. بدین منظور آزمایشات اولیه شناسایی روی این خاک صورت گرفته است که در ادامه بحث آمده است. همچنین آزمایش‌های تحکیم فروریزش، تحکیم غیر اشباع و کاغذ صافی نیز انجام شده که در این فصل شرح داده شده است.

۳-۲- انتخاب موقعیت و محل اخذ نمونه خاک فروریزی

با مطالعه و تحقیقات انجام شده در استان گلستان، در نهایت سه منطقه جهت بازدید انتخاب شدند که بیشترین خاک لس در آن‌ها موجود بوده است. این سه منطقه عبارتند از: تپه هزار پیچ گرگان، منطقه بالا جاده گرگان و دشت لس شهرستان کلالة که موقعیت جغرافیایی این سه منطقه در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. در نهایت خاک لس شهرستان کلالة به علت دست‌خوردگی کمتر عوامل انسانی و موقعیت جغرافیایی (دشت یکنواخت)، جهت نمونه‌گیری انتخاب شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱-۳ تصاویر ماهواره‌ای مناطق بازدید شده جهت نمونه‌گیری (الف): هزار پیچ گرگان (ب): بالاجاده گرگان

(ج): حومه کلاله

تصاویری از منطقه نمونه‌گیری و فروریزش خاک‌های این منطقه در شکل ۲-۳ نشان داده شده

است



شکل ۲-۳ فروریزش خاک‌های منطقه نمونه‌گیری

۳-۳- نمونه‌گیری

۳-۳-۱- نمونه‌گیری دست‌نخورده در محل

نمونه‌گیری در محل توسط ده جعبه $30 \times 30 \times 30$ سانتی‌متر صورت گرفت. تمامی نمونه‌گیری‌ها روی یک سطح هموار و در مجاورت هم صورت گرفته است. روش انجام کار به این صورت است که برای هر جعبه مساحتی به ابعاد 1×1 متر مطابق شکل ۳-۳ مشخص شده است.



شکل ۳-۳ مشخص کردن محل‌های کندن زمین جهت نمونه‌گیری

سپس حفاری زمین و خارج کردن کامل خاک تا عمقی که نشانه‌ای از خاک نباتی و ریشه گیاهان نباشد انجام شده است؛ ماکزیمم عمق خاک نباتی در منطقه حدود ۸۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد که در جهت اطمینان از عدم وجود ریشه گیاهان، کندن تمامی گودال‌ها تا عمق ۱ متری ادامه یافت و نمونه‌ها از عمق ۱ متری سطح زمین گرفته شده‌اند. عمق خاک نباتی در شکل ۳-۴ با نخ مشخص شده است.



شکل ۳-۴ تعیین عمق خاک نباتی و رسیدن به تراز نمونه‌گیری

پس از آن، جعبه‌ها را به صورت وارونه در مرکز گودال قرار داده و به اندازه ۱۰ سانتی‌متر از هر لبه جعبه فاصله گرفته و کندن زمین اطراف جعبه تا عمق ۴۰ سانتی‌متری صورت گرفته تا جعبه در نهایت روی یک مکعب خاک به ابعاد ۴۰*۵۰*۵۰ سانتی‌متر قرار گیرد. سپس خاک اطراف آن به آرامی و به کمک وسایل برنده جدا شده و همزمان نیز با اعمال فشار کمی روی جعبه، به پایین فشار داده می‌شود. پس از این‌که جعبه به اندازه ۳۰ سانتی‌متر داخل خاک فرورفت، خاک قسمت پایین جعبه با اره جدا و جعبه خارج خواهد شد. شکل ۳-۵ مراحل کار را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۵ مراحل نمونه‌گیری دست‌نخورده

پس از خارج نمودن نمونه‌ها، برای حفظ رطوبت طبیعی خاک، روی نمونه‌ها به وسیله پارچه تنظیف و موم و پارافین به صورت کامل اندود شده و کل جعبه در داخل پلاستیک محصور شده تا از هر گونه تغییرات درصد رطوبت جلوگیری شود. شکل ۳-۶ ایزوله کردن نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶ عایق کردن نمونه‌ها جهت حفظ رطوبت

پس از عایق کردن، نمونه‌ها توسط پلاستیک‌های ضربه‌گیر با احتیاط و وسیله مناسب که کم‌ترین لرزش را داشته باشد، به آزمایشگاه خاک دانشگاه شاهرود منتقل شد.

۳-۳-۲- نمونه‌گیری دست‌نخورده در آزمایشگاه

جهت نمونه‌گیری دست‌نخورده در آزمایشگاه، روش‌های مختلفی انجام شد و در نهایت بهترین روش ممکن شناسایی و استفاده شد.

روش کار به این صورت است که در ابتدا رینگ نمونه‌گیر در جهت لبه تیز آن، بر روی سطح هموار خاک دست‌نخورده قرار داده شد. پس از آن به فاصله حدوداً ۱ سانتی‌متر از محیط اطراف رینگ، شروع به برداشتن خاک اطراف آن توسط تیغ برداشته شد که در نهایت رینگ بر روی تپه‌ای استوانه‌ای بزرگ‌تر از محیط خود قرار گرفت. سپس مرطوب کردن تیغ به طور مداوم (جهت عدم شکستن خاک) و برداشتن خاک اطراف رینگ و اعمال فشار بر روی رینگ، موجب فرو رفتن رینگ درون خاک می‌شود. در نهایت خاک قسمت تحتانی رینگ برش خورده و هموار شده است.

۳-۴- آزمایشات شناسایی اولیه خاک

۳-۴-۱- درصد رطوبت طبیعی خاک

برای محاسبه درصد رطوبت طبیعی خاک ($\omega\%$) از رابطه ۳-۱ استفاده می‌شود.

رابطه ۳-۱ :

$$\omega\% = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

W_w : وزن آب موجود در خاک

W_s : وزن دانه های جامد خاک (خاک خشک)

بدین منظور، این آزمایش بر روی سه نمونه خاک صورت گرفت و در نهایت میانگین آن‌ها به

عنوان درصد رطوبت طبیعی خاک در نظر گرفته شد.

جدول ۱-۳ درصد رطوبت طبیعی خاک

شماره آزمایش	$\omega\%$
۱	۵/۴۱
۲	۵/۴۷
۳	۵/۸۴
میانگین	۵/۵۷

۳-۴-۲- چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک (G_s):

این آزمایش مطابق استاندارد ASTM D 854 صورت گرفته است. برای محاسبه چگالی دانه-های جامد خاک، از رابطه ۲-۳ استفاده می‌شود.

رابطه ۲-۳ :

$$G_s = K * \frac{M_s}{M_s + M_{pw} - M_{pws}}$$

M_s : جرم خاک

M_{pw} : جرم خاک و آب

$M_s + M_{pw} - M_{pws}$: جرم خاک و آب و پیکنومتر

K: ضریب تصحیح دمای آب

این آزمایش بر روی سه نمونه خاک صورت پذیرفت و در نهایت میانگین آن‌ها به عنوان چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه دمای آب برابر

۲۴/۵ اندازه گیری شده است، ضریب $K: 0/99897$ در نظر گرفته شده است.

جدول ۲-۳ چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک

شماره آزمایش	G_s
۱	۲/۶۵۷
۲	۲/۶۸۹
۳	۲/۶۵۹
میانگین	۲/۶۶۸

۳-۴-۳ - حد خمیری (PL)، حد روانی (LL) و PH خاک

آزمایش‌های حد روانی و حد خمیری مطابق با استانداردهای ASTM D 4318 و ASTM D

427 صورت گرفته است. با انجام آزمایش فتیله، حد خمیری خاک برابر ۲۱ حاصل شده است. با توجه

به داده‌های خروجی برای حد روانی و جام کاساگرانده نتایج زیر حاصل شده است:

جدول ۳-۳ تعداد ضربات بر اساس درصد رطوبت در آزمایش حد روانی

شماره آزمایش	تعداد ضربه	درصد رطوبت
۱	۱۸	۳۰/۳۱
۲	۲۷	۲۸/۹۲
۳	۳۴	۲۷/۵۷



شکل ۷-۳ نمودار درصد رطوبت بر حسب تعداد ضربات

با توجه به شکل ۷-۳، مقدار درصد رطوبت به ازای ۲۵ ضربه برابر ۲۹ می‌باشد که بیان‌گر حد روانی است. دامنه خمیری مطابق رابطه ۳-۳، برابر ۸ محاسبه شده است.

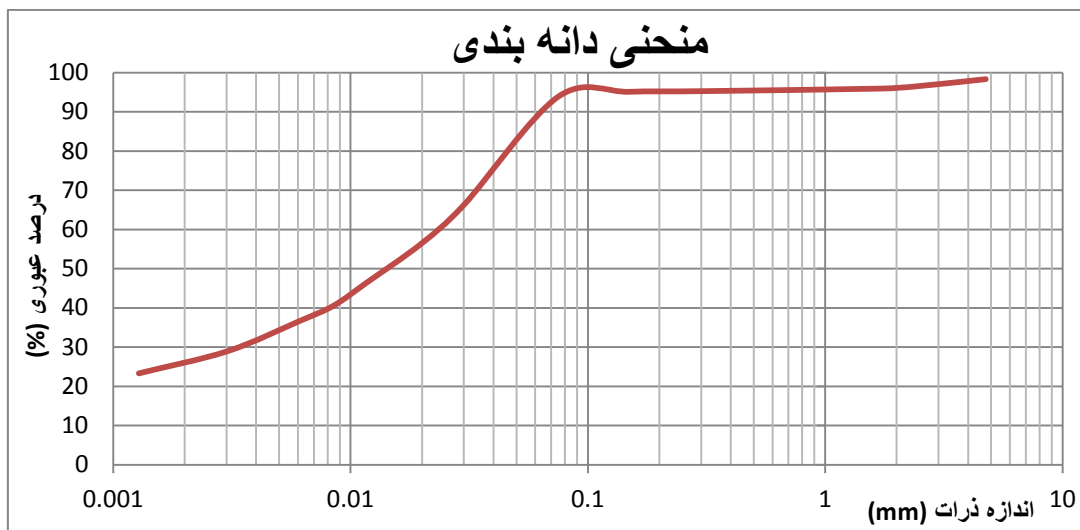
رابطه ۳-۳ :

$$PI = LL - PL$$

آزمایش PH نیز بر روی خاک انجام گرفت و نتیجه آزمایش انجام شده بیان‌گر PH برابر ۷/۶ برای خاک مورد مطالعه می‌باشد.

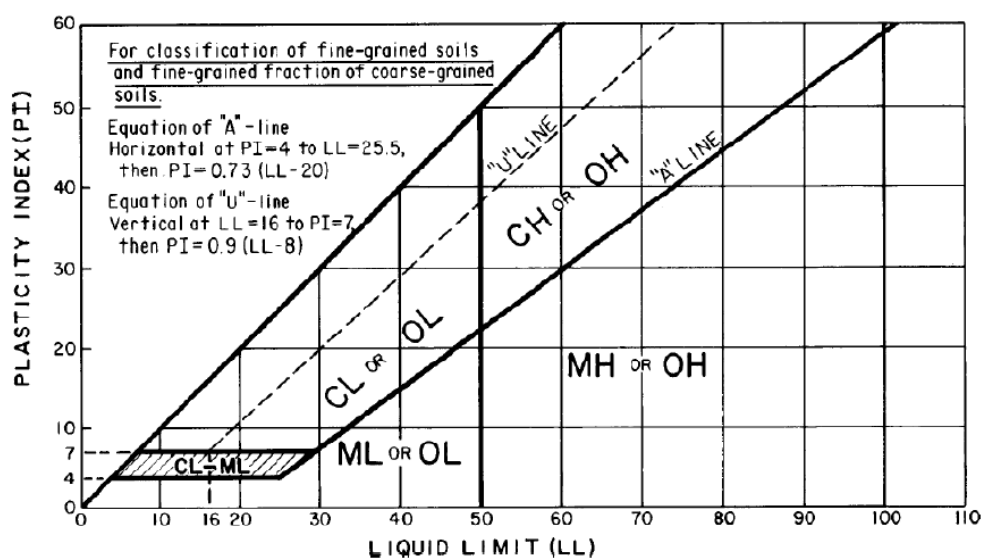
۳-۴-۴ - دانه‌بندی هیدرومتری

آزمایش دانه‌بندی طبق استاندارد ASTM D 422-63 بر روی خاک مورد نظر انجام شده است. برای مشخص کردن اندازه ذرات، ابتدا دانه بندی به روش تر صورت گرفت تا مقادیر خاک مانده روی الک‌های بزرگ‌تر از الک ۲۰۰ مشخص شوند. سپس برای خاک‌های عبوری از الک ۲۰۰، آزمایش هیدرومتری انجام داده و مجموع نتایج آزمایش دانه‌بندی تر و هیدرومتری در شکل ۸-۳ آمده است.



شکل ۳-۸ منحنی دانه‌بندی خاک

مطابق نمودار فوق، حدود ۹۸٪ خاک از الک نمره ۴ و ۹۴٪ از الک نمره ۲۰۰ عبور کرده و با توجه به شکل ۳-۹ و خصوصیات خاک، خاک مورد آزمایش رس با خاصیت خمیری پایین (CL) می‌باشد.



شکل ۳-۹ نمودار خط A

۳-۴-۵- تعیین وزن مخصوص خشک خاک

برای محاسبه وزن مخصوص خشک خاک دست نخورده، از پارافین استفاده شده است. برای انجام آزمایش، ابتدا خاک دست‌نخورده خشک شده را وزن کرده و نمونه توسط پارافین ذوب شده به

صورت کامل احاطه کرده و وزن و حجم نمونه‌ی احاطه شده اندازه‌گیری شده است. با مشخص بودن وزن و دانسیته پارافین، حجم پارافین محاسبه شده و از حجم کل نمونه احاطه شده کم می‌شود. در نتیجه حجم خاک خشک به دست می‌آید. با معلوم بودن وزن و حجم خاک خشک، دانسیته خشک خاک محاسبه می‌شود. این آزمایش‌ها بر روی پنج نمونه انجام گرفته که میانگین آن‌ها به عنوان وزن مخصوص خشک خاک در نظر گرفته می‌شود. جدول ۳-۴ نتایج حاصل از این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۴ نتایج آزمایش دانسیته خشک خاک طبیعی

شماره نمونه	دانسیته خشک طبیعی (g/cm^3)
۱	۱/۴۲
۲	۱/۴۵
۳	۱/۳۸
۴	۱/۳۹
۵	۱/۴۶
میانگین	۱/۴۲

۳-۴-۶ نتایج آزمایش XRD

در این آزمایش نمونه توسط دستگاه آنالیز پراش اشعه X (XRD) مدل D8 Advance-Bruker برای شناسایی فازهای کریستالی معدنی، مورد بررسی قرار گرفت. برای آنالیز و تعیین دقیق فازها از

گام بسیار کوتاه با مدت زمان طولانی حدود ۵۰ دقیقه برای هر نمونه استفاده شد. زاویه اسکن دستگاه (2θ) برای تعیین پیک‌های پراشی برای اندازه ۴ تا ۷۰ درجه تنظیم شده است. بر اساس طیف پراش، نتایج در بخش زیر برای نمونه ارائه می‌گردد. با مراجعه به طیف ملاحظه می‌شود که درصد فراوانی کانی‌های نمونه، به ترتیب جدول ۳-۵ است.

جدول ۳-۵ ترتیب فراوانی کانی‌های موجود در خاک با توجه به آزمایش XRD

ترتیب	نماد شیمیایی	نام
۱	SiO ₂	Quartz
۲	CaCO ₃	Calcite
۳	NaAlSi ₃ O ₈	Albite
۴	(Mg,Fe,Al) ₆ (Si,Cr) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	Clinochlore
۵	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	Muscovite

۳-۴-۷- نتایج آزمایش XRF

هدف از انجام این آزمایش تعیین درصد وزنی اکسید عناصر در نمونه خاک می‌باشد. مدل دستگاه استفاده شده در این آزمایش Bruker Axs-S4 Explorer می‌باشد و نتایج حاصل از آن در جدول ۳-۶ ارائه شده است.

جدول ۳-۶ نتایج درصد وزنی اکسید عناصر در خاک با توجه به آزمایش XRF

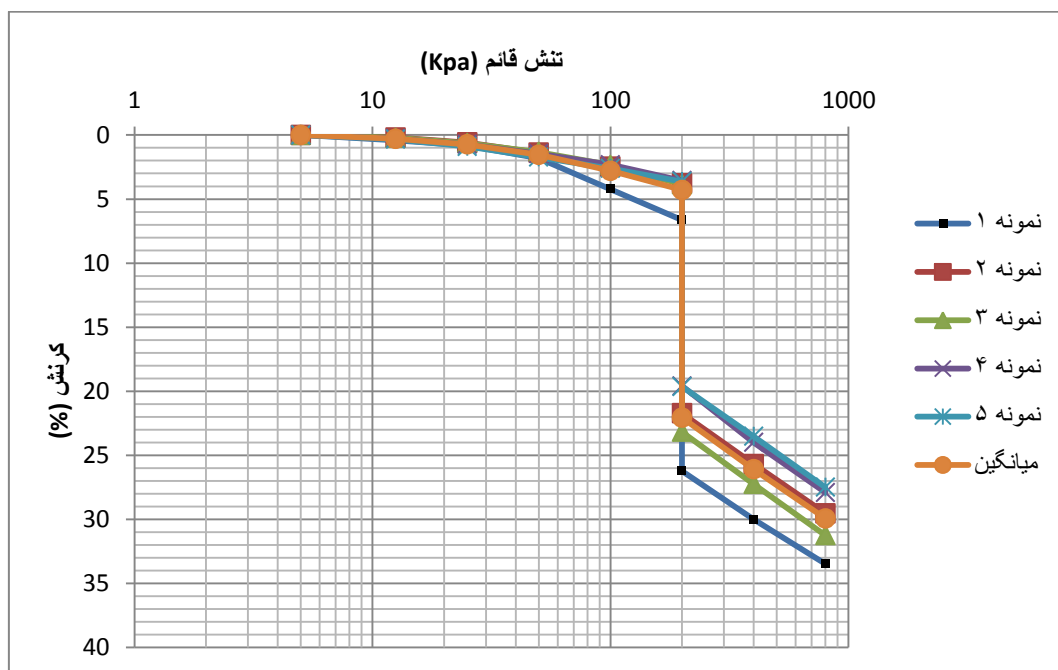
ترتیب	اکسید عناصر	درصد وزنی
۱	SiO ₂	۴۵/۹۰۲
۲	CaO	۱۷/۳۸۲
۳	Al ₂ O ₃	۱۱/۹۷۰
۴	Fe ₂ O ₃	۴/۷۹۸
۵	K ₂ O	۲/۲۲۷
۶	Na ₂ O	۰/۸۰۱
۷	TiO ₂	۰/۶۴۰
۸	P ₂ O ₅	۰/۱۲۵
۹	MnO	۰/۰۸۳
۱۰	SrO	۰/۰۴۵

۳-۵- ارزیابی پتانسیل فروریزی خاک منطقه مورد مطالعه

توسط آزمایش تحکیم یگانه

آزمایش فروریزش مطابق استاندارد ASTM D 5333 انجام شده است. نحوه انجام آزمایش بدین گونه است که پس از قرار دادن نمونه در دستگاه و تراز کردن دستگاه، باید در ابتدا تنش ۵ کیلو پاسکال را به نمونه وارد نمود تا تغییر شکل اولیه صورت گیرد و سنگ متخلخل به طور کامل بر روی آن قرار گیرد. سپس تنش‌های ۱۲/۵، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ کیلو پاسکال را به فواصل زمانی ۱ ساعت به نمونه اعمال می‌کنیم و مقدار نشست آن را به ازای هر تنش اندازه‌گیری می‌کنیم. پس از قرائت مربوط به تنش ۲۰۰ کیلو پاسکال، مرحله اشباع سازی با همان تنش ۲۰۰ کیلو پاسکال صورت می‌-

گیرد و به مدت ۲۴ ساعت اجازه نشست به خاک تحت تنش ذکر شده داده می‌شود و مقدار نشست آن اندازه‌گیری می‌شود. سپس تنش‌های ۴۰۰ و ۸۰۰ کیلو پاسکال نیز با فواصل زمانی ۲۴ ساعت به نمونه اشباع وارد می‌شوند و نشست آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود. در پایان آزمایش نمونه از دستگاه خارج شده و پس از اندازه‌گیری وزن آن، به منظور محاسبه درصد طوبت داخل گرمکن قرار داده می‌شود. نتایج آزمایش در شکل ۳-۱۰ و جدول ۳-۷ ارائه شده که بیانگر این است که خاک منطقه مورد مطالعه در رده خاک‌های فروریزی شدید قرار می‌گیرد.



شکل ۳-۱۰ نمودار رفتار فروریزی خاک دست‌نخورده

در شکل فوق، تفاوت اندکی بین نمودارهای مختلف مشاهده می‌شود که بیانگر تفاوت در پراکندگی حفره‌های خاک می‌باشد؛ البته این تفاوت مقدار کمی بوده و می‌توان گفت فروریزش تمامی نمونه‌ها نزدیک به هم می‌باشد. در نمونه شماره ۱ که تفاوت ظاهری در نمودار فروریزش معلوم می‌شود، می‌توان گفت که فروریزش آن تفاوت چندانی با سایر نمونه‌ها ندارد و فقط مقادیر کرنش‌های آن کمی بیش‌تر است.

جدول ۷-۳ نتایج آزمایش فروریزش نمونه‌های دست نخورده

شرایط نمونه	نسبت تخلخل اولیه	نسبت تخلخل نهایی	رطوبت اولیه (%)	رطوبت نهایی (%)	دانسیته خشک خاک (g/cm^3)	معیار فروریزش (%)	درجه فروریزش
دست نخورده	۱/۰۵	۰/۳۷	۳/۷۲	۱۸/۸۷	۱/۳	۱۹/۵۸	شدید
دست نخورده	۰/۸۹	۰/۳۳	۳/۷۹	۱۸/۷۴	۱/۴۱	۱۷/۹۴	شدید
دست نخورده	۰/۷۷	۰/۲۱	۲/۵۵	۱۶/۹۲	۱/۵۱	۱۹/۳۳	شدید
دست نخورده	۰/۷۴	۰/۲۶	۳/۱۴	۱۶/۲۹	۱/۵۳	۱۶/۰۴	شدید
دست نخورده	۰/۷۸	۰/۲۹	۲/۸۷	۱۶/۹۸	۱/۵۰	۱۶/۰۱	شدید

۳-۶- مشخصات مصالح

۳-۶-۱- نانو آهک

آهک به طور زنده و به صورت پودر در تثبیت خاک استفاده می‌شود. آهک مورد استفاده متعلق به کوره آهک پزی قدس شاهرود می‌باشد که در آزمایشگاه دانشکده معدن دانشگاه صنعتی شاهرود به نانو تبدیل شده است. ترکیب شیمیایی عمومی آهک در جدول ۸-۳ ارائه شده است.

جدول ۳-۸ مشخصات عمومی آهک

ترکیب شیمیایی	مقدار %
Na ₂ O	>۰/۱
MgO	۰/۵۳
SiO ₂	۱/۲
Al ₂ O ₃	۰/۶۹
SO ₃	۰/۱
K ₂ O	>۰/۱
CaO	۷۱/۱
TiO ₂	>۰/۱
MnO ₂	>۰/۱
Fe ₂ O ₃	۰/۱۲
کاهش وزن در اثر حرارت	۲۵/۸۶
G _s	۲/۳

۳-۶-۲- بنتونیت

بنتونیت ماده‌ای است معدنی از دسته رس‌ها یا شبه رس‌ها و از کانی‌های متورم شونده تشکیل شده است، که عموماً حاوی مونتموریلونیت و به مقدار کم بیدلیت هستند. به همین دلیل، منظور از بنتونیت، رسی است که ۸۵-۹۰ درصد کانی مونتموریلونیت داشته باشد. بنتونیت یک فیلوسیلیکات آلومینیوم‌دار با فرمول $(\text{Na,Ca})_{0.33}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ که عمدتاً از مونت موریلونیت یا کانی‌های گروه اسمکتیت تشکیل شده است و عمدتاً بر دو نوع است:

• بنتونیت های متورم Swelling bentonite یا بنتونیت های سدیم دار

• بنتونیت های غیرمتورم Non-swelling bentonite یا بنتونیت های کلسیم دار

در این پژوهش از بنتونیت سدیم دار صنایع خاک چینی ایران استفاده شده است.

۳-۶-۳ کائولینیت

کائولینیت از جمله کانی‌های رسی است که جهت تثبیت خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. در

این پژوهش از کائولینیت SZWMK1 صنایع خاک چینی ایران استفاده شده که در جدول ۹-۳

مشخصات آن آمده است.

جدول ۹-۳ مشخصات کائولینیت SZWMK1

Products/محصولات		SZWMK1
% آنالیز شیمیایی Chemical Analysis %	L.O.I	9±1
	SiO ₂	63±1
	Al ₂ O ₃	24±1
	Fe ₂ O ₃	0.55±0.1
	TiO ₂	0.04±0.01
	CaO	1.2±0.2
	MgO	0.55±0.06
	Na ₂ O	0.4±0.1
	K ₂ O	0.3±0.1
	SO ₄	-
% آنالیز مینرالی Mineralogical Analysis %	Kaolinite / کائولینیت	64±2
	Quartz / کوارتز	27±2
	Calcite / کلسیت	2.1±0.5
	Total Feldspar / فلدسپار	-
	Others / سایر	6±1
% توزیع دانه بندی Particle Size Distribution %	>150 μ	0.00
	>40 μ	0-0.5
	<20 μ	99
	<2 μ	47±3

۳-۶-۴- نانو بوکسیت

بوکسیت عمده ترین منبع تولید آلومینیوم محسوب می‌شود که حاوی اکسیدها و هیدرو اکسیدهای آلومینیوم و آهن و مقداری سیلیس است و از نظر زمین شناسی بوکسیت ماده رسوبی غنی از آلومینیوم است. مجموع هیدروکسیدها و اکسیدهای آلومینیوم، آهن و تیتانیوم موجود در آن بیش از ۵۰ درصد بوده که در این میان هیدرواکسیدهای آلومینیوم بیشترین مقدار را تشکیل می‌دهند.

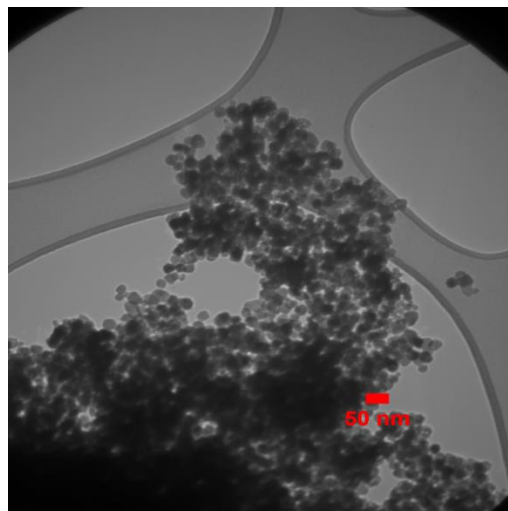
بوکسیت نرم یا شیلی به علت پایین بودن درصد Al_2O_3 در رده لاتریت ها بوده و اصطلاحاً به نام بوکسیت شیلی نام گذاری شده و به رنگ قرمز روشن است. این بوکسیت دارای ارزش معدنی برای تولید آلومینا نیست و Al_2O_3 آن بین ۲۰ تا ۴۰ درصد و SiO_2 آن بین ۱۵ تا ۳۵ و حتی بیش از ۳۵ درصد تغییر می کند. بوکسیت استفاده شده در این پروژه از نوع بوکسیت شیلی است که از معدن بوکسیت جاجرم تهیه شده و در آزمایشگاه دانشکده معدن دانشگاه صنعتی شاهرود به نانو تبدیل شده است.

۳-۶-۵- نانو سیلیکا

نانوسیلیس استفاده شده در این پژوهش از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانی که مورد تایید ستاد نانو می‌باشد، تهیه شده است و آزمایش‌های SEM & TEM بر روی آن انجام شده است. مشخصات این ماده، در جدول ۳-۱۰ و شکل ۳-۱۱ آمده است.

جدول ۳-۱۰ مشخصات نانو سیلیس

Size	SiO ₂	Ti	Ca	Na	Fe
20-30 nm	>99%	<120 ppm	<70 ppm	<50 ppm	<20 ppm



شکل ۱۱-۳ آزمایش میکروسکوپ الکترونی

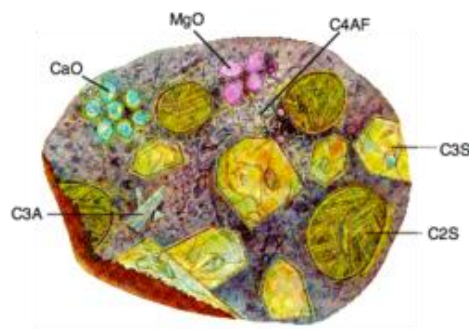
با کاهش اندازه ذرات نانوسیلیس، سطح ویژه آن کاهش یافته و موجب افزایش سطح چسبندگی با ذرات خاک می‌شود و پیوندهای بین دانه‌ای ذرات خاک را تقویت می‌کند که در نتیجه با کاهش نشست و فروریزش خاک همراه می‌باشد.

۳-۶-۶- سیمان

سیمان استفاده شده در این پژوهش، سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه سیمان شاهرود می‌باشد. فازهای اصلی تشکیل دهنده سیمان عبارتند از:

- تری‌کلسیم سیلیکات (آلیت) C_3S ۲۰-۷۵ درصد
- دی‌کلسیم سیلیکات (بلیت) C_2S ۱۵-۴۶ درصد
- تری‌کلسیم آلومینات C_3A ۴-۱۳ درصد
- تتراکلسیم آلومینوفریت C_4AF ۸-۱۲ درصد است.

شکل ۳-۱۲ سطح مقطع دانه سیمان را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۲ سطح مقطع دانه سیمان

۳-۶-۷- خاکستر بادی

خاکستر بادی ماده‌ای است که از سوختن زغال‌سنگ حاصل می‌گردد و توسط فیلترهای مخصوص، به صورت غبار جمع‌آوری می‌شود. حدود ۸۵ درصد ذرات این ماده از اکسیدهای سیلیسیم، آلومینیم، آهن، کلسیم و منیزیم تشکیل می‌شود. خاکستر بادی مورد استفاده در این پژوهش، خاکستر بادی وارداتی تهیه شده از شرکت نامیکاران در بسته‌های ۲۵ کیلوگرمی و با چگالی نسبی ۲/۲ می‌باشد.

۳-۷- تعیین منحنی مشخصه آب - خاک^۱

منحنی مشخصه آب - خاک از جمله مفاهیم اساسی در مکانیک خاک‌های غیر اشباع می‌باشد. این منحنی رابطه بین درصد رطوبت و میزان مکش ماتریسی در خاک را مشخص می‌کند (Haerial et al. 2012). مقدار رطوبت خاک با پارامترهای گوناگونی مانند درجه اشباع (S_r)، درصد رطوبت وزنی (ω) و یا درصد رطوبت حجمی (θ) قابل بیان است که به صورت

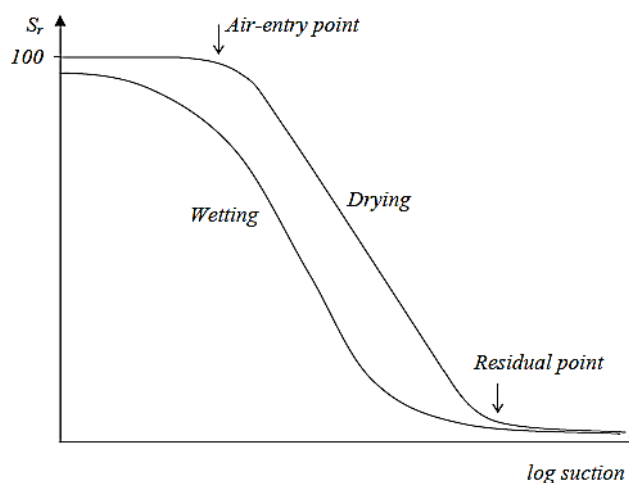
رابطه ۳-۴ با هم مرتبط می‌شوند:

¹ SWCC

رابطه ۳-۴ :

$$\theta = \frac{S_r * e}{1 + e} = \frac{\omega * G_s}{1 + e}$$

درصد رطوبت حجمی آب در واقع نماینده حجم آبی است که درون حفره‌های خاک قرار دارد؛ به عبارتی درصد رطوبت حجمی آب، نسبت حجم آب به حجم کل خاک می‌باشد (Leong and Rahardjo, 1997). با توجه به این که منحنی مشخصه آب - خاک به عنوان مبنایی جهت به دست آوردن پارامترهای خاک غیراشباع استفاده می‌شود، بدست آوردن مشخصات دقیق منحنی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد (Thudi, 2006). منحنی مشخصه آب خاک نموداری است که محور عمودی آن، درصد حجمی آب در خاک و محور افقی آن، میزان مکش ساختاری در خاک است که با مقیاس لگاریتمی ترسیم می‌شود. شکل ۳-۱۳ نمونه‌ای از منحنی مشخصه آب خاک را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۳ نمونه منحنی مشخصه آب - خاک

در مکش ماتریسی صفر، درجه اشباع خاک برابر ۱۰۰٪ می‌باشد (Fredlund and Xing, 1994). همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمودار شامل دو منحنی خشک شدگی^۱ و منحنی ترشدگی^۲ بوده و طی فرایندهای خشک شدگی و ترشدگی در هر مکش ماتریسی معین، میزان حجم آب و درجه اشباع

^۱ Drying

^۲ Wetting

متفاوت می‌باشد (Fredlund and Rahardjo, 1993).

نسبت تغییرات مکش ماتریسی به تغییرات حجم آب در واقع پتانسیل نگهداشت آب است. مکشی که در آن هوا وارد بزرگترین حفره خاک می‌شود، نقطه ورود هوا^۱ نام دارد و قبل از آن نمونه اشباع می‌باشد. بعد از این مرحله با افزایش مکش ساختاری، به تدریج درجه اشباع خاک کاهش یافته و خاک خشک می‌شود و در نهایت منحنی به نقطه پسماند^۲ می‌رسد و سطح منحنی افقی می‌شود که به حجم آب در ابتدای این مرحله حجم آب پسماند می‌گویند. بعد از نقطه پسماند، درجه اشباع با افزایش مکش ماتریسی به کندی کاهش می‌یابد. در ادامه روش‌های تعیین منحنی SWCC در این پژوهش آمده است.

۳-۷-۱- روش کاغذ فیلتر^۳

استاندارد مورد استفاده در این آزمایش ASTM D 5298-03 می‌باشد که توسط کاغذ صافی Wattman 42 انجام گرفته است. از این آزمایش برای محاسبه‌ی مکش خاک استفاده می‌شود. نکته‌ی اساسی مطرح شده، عدم قابلیت روش کاغذ صافی در نظر گرفتن تأثیر تنش خالص اعمالی بر شکل منحنی SWCC است. با در نظر نگرفتن تأثیر این عامل، روش کاغذ صافی نمی‌تواند تأثیر بروز فروریزش بر شکل منحنی SWCC و همچنین تأثیر افزودن تثبیت‌کننده به خاک را به درستی نشان دهد. بنابراین منحنی به دست آمده از روش کاغذ صافی، صرفاً یک تخمین ابتدایی بوده و بیش‌تر جهت دادن یک دید اولیه و کلی پیرامون رفتار خاک می‌باشد. به خصوص در مورد خاک‌های فروریزی استفاده از این روش برای به دست آوردن منحنی SWCC پیشنهاد نمی‌گردد (حائری و همکاران ۱۳۹۲).

این آزمایش می‌تواند به دو صورت تماسی و غیر تماسی صورت گیرد. در روش تماسی، کاغذ

¹ Air-entry point

² Residual point

³ Filter paper

فیلتر در تماس مستقیم بین دو نمونه مرطوب خاک قرار دارد و فقط از دو کاغذ صافی به عنوان محافظ در دو طرف کاغذ صافی اصلی استفاده می‌شود و در نهایت درصد رطوبت کاغذ صافی میانی (اصلی) پس از به تعادل رسیدن، به عنوان درصد رطوبت اندازه‌گیری می‌شود. در روش غیر تماسی، کاغذ صافی بدون محافظ و با فاصله از نمونه خاک قرار دارد و پس از به تعادل رسیدن، درصد رطوبت آن اندازه‌گیری می‌شود. در این پژوهش از درصد رطوبت‌های ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۱، ۲۴، ۲۷ و ۳۰ استفاده شده است. برای هر درصد رطوبت، مقدار مکش مطابق استاندارد و با استفاده از کاغذ صافی Wattman 42 محاسبه شده است و در نهایت با داشتن درصدهای مختلف رطوبت و مقادیر متناظر مکش برای آن‌ها، منحنی SWCC ترسیم شده است.

در این پژوهش، از هر دو روش تماسی و غیر تماسی برای خاک بازسازی شده در انجام این آزمایش استفاده شده است. نحوه انجام آزمایش به این صورت است که ابتدا نمونه را ساخته و سپس کاغذ محافظ را روی نمونه قرار می‌دهیم و روی آن کاغذ اصلی را قرار داده و سپس محافظ دیگری روی آن به صورتی قرار می‌دهیم که کاغذ اصلی، میان دو محافظ قرار گیرد. سپس نمونه دیگر را روی کاغذ صافی‌ها قرار می‌دهیم و بدین ترتیب آزمایش مطابق شکل ۳-۱۴ به روش تماسی صورت گرفته است.



شکل ۳-۱۴ نحوه قرار گرفتن فیلتر کاغذی در روش تماسی

در روش غیر تماسی، یک کاغذ صافی دیگر مطابق شکل ۳-۱۵ با فاصله و در بالای نمونه خاک قرار داده شده و پس از رسیدن به تعادل، رطوبت آن اندازه گیری می شود.



شکل ۳-۱۵ نحوه قرار گرفتن فیلتر کاغذی در روش غیر تماسی

در پایان کل مجموعه درون محفظه ای ایزوله قرار می گیرد تا تبادل هوا و رطوبت با محیط پیرامون خود نداشته باشد و خاک و کاغذ صافی به تعادل برسند.

قابل ذکر است که قبل از شروع آزمایش، تمامی کاغذ صافی ها به صورت کاملاً خشک و بدون درصد رطوبت بوده اند. در نهایت پس از به تعادل رسیدن کاغذ صافی و نمونه، منحنی SWCC برای خاک مورد نظر ترسیم می گردد که نتایج آن در فصل بعد آمده است.

۳-۷-۲- آزمایش ادومتر با قابلیت کنترل مکش

برای بررسی فروریزش خاک در مکش های مختلف و تعیین منحنی SWCC، آزمایش های ادومتر با کنترل مکش را انجام داده ایم. آزمایش ها روی نمونه های بازسازی شده و روی دو نمونه خاک صورت گرفته است. نمونه اول فاقد افزودنی و نمونه دوم خاک تثبیت شده با نانو آهک بوده است. هر دو نمونه، تحت آزمایش بار قائم ثابت - مکش ساختاری متغیر قرار گرفته اند. در این تحقیق از تنش قائم ثابت ۲۰۰ کیلو پاسکال و مکش ساختاری در جهت کاهشی استفاده شده است. مکش های ساختاری از مکش ۱۵۰ کیلو پاسکال شروع شده است و پس از به تعادل رسیدن هر مکش، مکش های

۱۰۰ و ۵۰ کیلو پاسکال اعمال شده‌اند. در طی آزمایش‌ها میزان تغییرات حجم آب داخل نمونه خاک و میزان جابه‌جایی قائم اندازه‌گیری شده است. جدول ۳-۱۱ روند انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۱۱ روند کلی انجام آزمایش‌های غیر اشباع

نمونه	آزمایش	بار قائم ثابت خالص (Kpa)	ماده افزودنی	پارامترهای اندازه‌گیری شده	مکش‌های اعمال شده (Kpa)
بازسازی شده	بار ثابت - مکش متغیر	۲۰۰	-	تغییر شکل قائم و تغییرات آب داخل بورت	۱۵۰ ۱۰۰ ۵۰
بازسازی شده	بار ثابت - مکش متغیر	۲۰۰	نانو آهک	تغییر شکل قائم و تغییرات آب داخل بورت	۱۵۰ ۱۰۰ ۵۰

این آزمایش‌ها بر اساس روش ارائه شده توسط Fredlund and Rahardjo (1996) انجام شده-
اند. در واقع این آزمایش‌ها با کنترل فشار هوا و فشار آب (مکش ساختاری)، رفتار تغییر حجمی و
تغییرات رطوبتی خاک را بررسی می‌کنند. برای این کار نیاز به دستگاه ادومتر با قابلیت کنترل مکش
است. این دستگاه‌ها بر پایه روش انتقال محوری طراحی و ساخته شده‌اند. در ادامه به تفصیل، دستگاه
ساخته شده شرح داده می‌شود. دستگاه‌های موجود در آزمایشگاه، دارای رینگ‌های ۵ سانتی‌متری
می‌باشند. ورودی‌های دستگاه، آب و هوا می‌باشند. به دلیل حساسیت موجود در آزمایش، آب ورودی
به سیستم باید کاملاً فاقد هوا باشد؛ در این راستا آب ورودی به درون منبع آب انتقال داده می‌شود و

سپس توسط پمپ وکیوم، هوای درون آن به صورت کامل خارج می‌شود و از این آب جهت ورود به سیستم استفاده می‌شود. هوای مورد نیاز سیستم، توسط پمپ باد موجود در آزمایشگاه که تا ۸۰۰ کیلو پاسکال قادر به اعمال فشار می‌باشد، تامین می‌شود. لازم به ذکر است که قبل از ورود هوا به داخل سیستم از رطوبت‌گیر استفاده کرده‌ایم تا از ورود آب و بخار آب ناخواسته به داخل سیستم جلوگیری شود. در طول آزمایش‌ها جهت کنترل کلیه فشارها، از ۴ عدد رگلاتور استفاده شده است.

محفظه دستگاه تحکیم غیر اشباع که خاک درون آن قرار می‌گیرد، در شکل ۳-۱۶ نشان داده شده است و شامل قسمت‌های مختلفی است که در ادامه آمده است.



شکل ۳-۱۶ محفظه دستگاه تحکیم غیر اشباع

۳-۷-۲-۱- اجزا محفظه ادمتر غیر اشباع

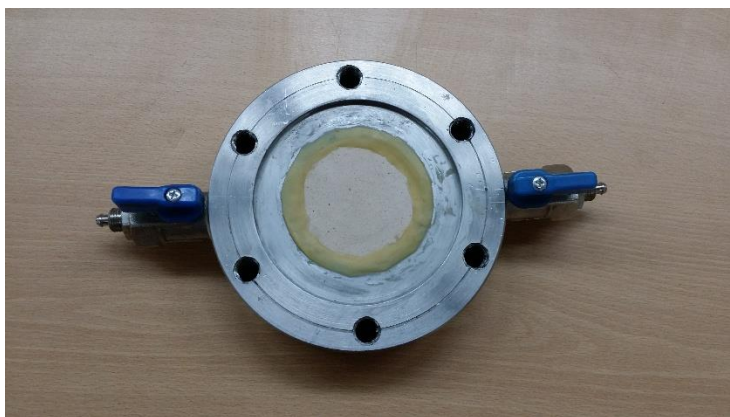
۱- پایه کف محفظه

شامل محل قرارگیری دیسک سرامیکی و همچنین محفظه‌ای برای عبور آب از زیر نمونه می‌باشد. در دو طرف پایه کف، شیرهای ورودی و خروجی آب می‌باشد. آب از طریق شیر ورودی وارد محفظه زیر نمونه که به صورت مسیر مارپیچ است شده و ضمن شست و شوی فشاری از شیر خروجی

خارج می‌شود.

۲- دیسک سرامیکی

این دیسک مانند یک غشا بین فاز آب و هوا عمل می‌کند؛ به طوری که در زیر دیسک سرامیکی اعمال فشار آب و در بالای آن اعمال فشار هوا وجود دارد. نمونه خاک روی این دیسک قرار می‌گیرد و خاصیت این دیسک در این است که اجازه عبور هوا را تا مکش خاصی نمی‌دهد. این دیسک متخلخل از حفره‌های هم‌اندازه تشکیل شده‌اند و عمدتاً از مصالحی با جنس کائولینیت ساخته شده‌اند. به ماکزیمم مکشی که دیسک سرامیکی متخلخل، اجازه عبور هوا را از داخل خود نمی‌دهد، عدد عبوری هوا برای دیسک مورد نظر گویند. شکل ۳-۱۷ نحوه قرارگیری دیسک سرامیکی را روی پایه کف محفظه نشان می‌دهد. عدد عبوری هوا برای دیسک‌های استفاده شده در آزمایش، برابر ۲۵۰ کیلوپاسکال می‌باشد.



شکل ۳-۱۷ پایه کف محافظ و دیسک سرامیکی

۳- رینگ نمونه‌گیر

رینگ‌ها به قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۲ سانتی‌متر می‌باشند که خاک در داخل آن قرار می‌گیرد.

۴- مخروط ناقص فلزی

جهت اعمال فشار هوا و تنش قائم، از این مخروط استفاده می‌شود. این مخروط شامل سه

سوراخ برای اعمال فشار هوا روی نمونه می‌باشد که در نهایت به سه سطح دایروی (برای اعمال فشار یکنواخت) متصل می‌شوند.

۵- استوانه فلزی

این استوانه برای نگه داشتن فشار هوا و قرارگیری درپوش فلزی روی آن استفاده می‌شود و روی پایه کف قرار می‌گیرد.

۶- درپوش فلزی

بر روی استوانه فلزی قرار می‌گیرد و توسط پیچ‌های موجود به پایه کف متصل می‌شود. این درپوش شامل شیر ورودی هوا و سوراخی برای عبور شفت (جهت اعمال نیروی قائم) می‌باشد.

۷- شفت اعمال فشار قائم

این شفت از وسط درپوش فلزی عبور کرده و وظیفه آن اعمال تنش قائم به نمونه خاک می‌باشد.

۳-۲-۲-۷-۳ اشباع سازی دیسک سرامیکی

در طول آزمایش باید همواره دیسک سرامیکی اشباع باشد. اشباع نبودن دیسک حتی برای یک لحظه به منزله شکست آزمایش و نتایج نادرست می‌باشد. برای اشباع کردن دیسک، راه‌های متفاوتی وجود دارد. در این پژوهش ابتدا محفظه استوانه‌ای تا حدود نصف حجم خود اشباع شده و دیسک به مدت ۲۴ ساعت تحت فشارهای آب و هوای برابر بوده است به طوریکه فشار آب از پایین سرامیک و فشار هوا از بالای سرامیک اعمال شده است. بعد از گذشت ۲۴ ساعت از اعمال فشار برابر، فشار هوای بالای سرامیک افزایش داده و نرخ تغییرات آب خروجی از پایین سرامیک اندازه‌گیری می‌شود. ثابت ماندن نرخ تغییرات آب خروجی از سرامیک، نشان‌دهنده‌ی اشباع بودن کامل سرامیک می‌باشد.

باشد. لازم به ذکر است که در طول اشباع سازی، چندین بار شست و شوی با فشار از زیر دیسک انجام شده است تا هوای حل شده در آب و همچنین هوای محبوس شده از زیر سرامیک خارج شود.

۳-۷-۲-۳- روند انجام آزمایش ادمتر غیر اشباع

در این پژوهش، آزمایش‌ها به صورت تنش قائم ثابت - مکش متغیر انجام شده است. روند انجام کار به این صورت است که در ابتدا دیسک سرامیکی مطابق روشی که پیش‌تر اشاره شد، اشباع می‌شود و پس از اشباع سازی در مدت زمان بسیار کم (حدود ۳۰ ثانیه)، نمونه خاک روی دیسک قرار می‌گیرد و محفظه دستگاه بسته می‌شود. سپس زیر سرامیک اشباع سازی شده تا شیارهای موجود در پایه کف پر از آب شود و پس از آن مکش به خاک اعمال می‌گردد و از آن لحظه به بعد به طور مداوم قرائت‌ها صورت می‌گیرد. پس از به تعادل رسیدن مکش، تنش قائم ثابت اعمال و تغییر مکان قائم مداوم قرائت می‌شود. پس از به تعادل رسیدن مکش و تنش قائم، مکش کمتری اعمال شده تا نمونه خاک مسیر ترشوندگی را طی کند. مطابق استاندارد ASTM D 6836 برای نمونه های تحت مکش ساختاری کمتر از ۵۰۰ کیلو پاسکال، نمونه زمانی به تعادل می‌رسد که برای حداقل ۲۴ ساعت، جذب و دفع آب نداشته باشد. حالت تعادل زمانی تعریف می‌شود که میزان جذب و دفع آب، کمتر از ۰/۱ سی‌سی و تغییر مکان قائم، کمتر از ۰/۰۱ میلی‌متر در هر ۲۴ ساعت باشد. در نهایت پس از انجام آزمایش، نمونه خارج شده و درصد رطوبت آن اندازه‌گیری می‌شود.

۳-۸- نتیجه‌گیری

در این فصل آزمایش‌های اولیه و شناسایی خاک به صورت کامل بیان شد و سپس به معرفی دستگاه‌های مورد استفاده، اجزای آن‌ها، نحوه انجام آزمایش و متغیرهای مورد نظر پرداخته شد. در فصل آینده به بررسی نتایج آزمایش‌ها، تفسیر و تحلیل آن‌ها می‌پردازیم.

۴- فصل چهارم

نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل
آنها

۴-۱- کلیات

آزمایش‌ها در دو دسته آزمایش‌های فروریزی استاندارد و آزمایش‌های ادومتر با کنترل مکش در شرایط غیر اشباع صورت گرفته‌اند.

آزمایش‌های فروریزش استاندارد در دو گروه دست‌نخورده و بازسازی شده صورت گرفته‌اند. آزمایش‌های دست‌نخورده، فاقد تثبیت می‌باشند و فقط برای محاسبه درجه فروریزش طبیعی خاک صورت گرفته‌اند که نتایج آن در فصل ۳ ذکر شده است؛ در حالی که آزمایش‌های بازسازی شده در دو گروه تثبیت شده و تثبیت نشده انجام شده‌اند. آزمایش‌های تثبیت خاک توسط ۷ ماده مختلف صورت گرفته است که هر ماده شامل ۳ درصد مختلف می‌باشد. لازم به توضیح است که نمونه‌های تثبیت شده پس از ساخت، به مدت ۴ روز در محیط بسته که فاقد هرگونه ارتباط با محیط بیرون بوده، نگهداری شده‌اند تا واکنش‌های لازم صورت گیرد و رطوبت در کل خاک به صورت یکنواخت پراکنده شود. پیش از بررسی نتایج آزمایش‌های فروریزش استاندارد، توجه به چند نکته ضروری می‌باشد که در زیر به بیان آن‌ها می‌پردازیم:

- آزمایش‌ها برای هر ماده افزودنی، در ۳ درصد مختلف ۲، ۴ و ۶ درصد انجام شده است.
- به منظور صحت و تکرارپذیری نتایج، هر آزمایش حداقل ۲ بار تکرار شده است.
- برخی نتایج آزمایش‌ها به دلیل پراکندگی ناشی از خطای آزمایشگاهی و... حذف شده‌اند.
- در تمامی آزمایش‌های فروریزش استاندارد، از کاغذ صافی Whatman شماره ۵ در بالا و پایین نمونه خاک استفاده شده است.
- تمامی آزمایش‌های فروریزش مطابق ASTM D 5333 انجام شده‌اند.

شرایط و تعداد آزمایش‌های انجام شده به طور خلاصه در جدول ۱-۴ آمده است.

جدول ۱-۴ خلاصه آزمایش‌های فروریزش استاندارد

آزمایش	شرایط آزمایش	درصدهای افزودنی	تعداد آزمایش به ازای هر درصد
فروریزش استاندارد	دست‌نخورده	۰	۵
فروریزش استاندارد	بازسازی شده	۰	۵
فروریزش استاندارد	بازسازی شده سیمان	۶، ۴، ۲	۲
فروریزش استاندارد	بازسازی شده بنتونیت	۶، ۴، ۲	۲
فروریزش استاندارد	بازسازی شده خاکستر بادی	۶، ۴، ۲	۲
فروریزش استاندارد	بازسازی شده کائولینیت	۶، ۴، ۲	۲
فروریزش استاندارد	بازسازی شده نانو بوکسیت	۶، ۴، ۲	۲
فروریزش استاندارد	بازسازی شده نانو آهک	۶، ۴، ۲	۲
فروریزش استاندارد	بازسازی شده نانو سیلیکا	۴، ۲	۲
تعداد کل آزمایش‌ها پس از حذف خطاها			۵۰

آزمایش‌های غیر اشباع در حالت بازسازی شده صورت گرفته اند و در مجموع ۲ تست غیر اشباع صورت گرفته است. تست اول تثبیت نشده و تست دوم تثبیت شده، صورت گرفته است. این آزمایش‌ها به صورت تنش قائم ثابت و مکش متغیر انجام شده‌اند. ذکر چندین نکته در این آزمایش‌ها ضروری می‌باشد که در ذیل بیان شده است:

- این آزمایش‌ها به دلیل مدت زمان مورد نیاز بالا که حدود ۱ ماه برای هر تست می‌باشد و با توجه به تعداد دستگاه‌های موجود در اختیار در این پژوهش، فقط ۲ تست انجام شده است.

- سرامیک متخلخل موجود، دارای عدد عبوری هوا ۲۵۰ کیلو پاسکال می‌باشد و لذا تمامی مکش‌های اعمال شده به خاک در طول آزمایش کم‌تر از این مقدار بوده‌اند.

مشخصات آزمایش‌ها در شرایط غیر اشباع در جدول ۴-۲ آمده است.

جدول ۴-۲ خلاصه آزمایش‌های فروریزش غیر اشباع

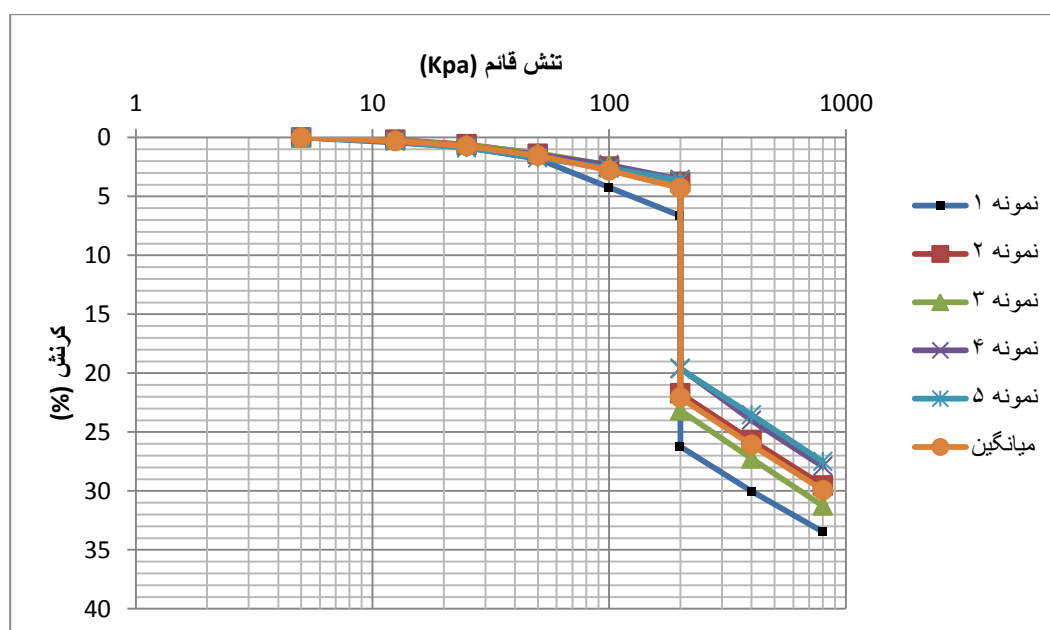
آزمایش	شرایط آزمایش	درصد ماده افزودنی	تعداد آزمایش به ازای هر درصد
ادومتر با قابلیت کنترل مکش	بازسازی شده بدون افزودنی	۰	۱
ادومتر با قابلیت کنترل مکش	بازسازی شده نانو آهک	۲	۱
تعداد کل آزمایش‌ها			۲

۲-۴- نتایج آزمایش‌های فروریزش استاندارد و بحث در مورد

آنها

۱-۲-۴- خاک دست‌نخورده

نتایج آزمایش‌های فروریزشی بر روی خاک دست‌نخورده جهت اثبات فروریزشی بودن خاک منطقه در فصل ۳ ذکر گردید. به این منظور، در مجموع ۵ آزمایش انجام شده است که خلاصه نتایج آن در شکل ۱-۴ و جدول ۳-۴ جهت یادآوری و مقایسه با نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های بازسازی شده آمده است.



شکل ۱-۴ نمودار رفتار فروریزشی خاک دست‌نخورده و تثبیت‌نشده

جدول ۳-۴ نتایج آزمایش فروریزش نمونه‌های دست نخورده و تثبیت نشده

شرایط نمونه	نسبت تخلخل اولیه	نسبت تخلخل نهایی	رطوبت اولیه (%)	رطوبت نهایی (%)	دانسیته خاک ($\frac{g}{cm^3}$)	معیار فروریزش (%)	درجه فروریزش
دست نخورده	۱/۰۵	۰/۳۷	۳/۷۲	۱۸/۸۷	۱/۳	۱۹/۵۸	شدید
دست نخورده	۰/۸۹	۰/۳۳	۳/۷۹	۱۸/۷۴	۱/۴۱	۱۷/۹۴	شدید
دست نخورده	۰/۷۷	۰/۲۱	۲/۵۵	۱۶/۹۲	۱/۵۱	۱۹/۳۳	شدید
دست نخورده	۰/۷۴	۰/۲۶	۳/۱۴	۱۶/۲۹	۱/۵۳	۱۶/۰۴	شدید
دست نخورده	۰/۷۸	۰/۲۹	۲/۸۷	۱۶/۹۸	۱/۵۰	۱۶/۰۱	شدید

در ادامه بررسی نتایج آزمایش‌های فروریزش انجام شده بر روی نمونه‌های بازسازی شده و تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از آزمایش‌ها آمده است.

۴-۲-۲- خاک بازسازی شده و تثبیت نشده

در ادامه تحقیق جهت بررسی اثر افزودنی‌های مختلف بر روی پتانسیل فروریزش، از خاک بازسازی شده با دانسیته و رطوبت طبیعی استفاده شده است. دلایل استفاده از خاک بازسازی شده به طور خلاصه در ادامه آمده است:

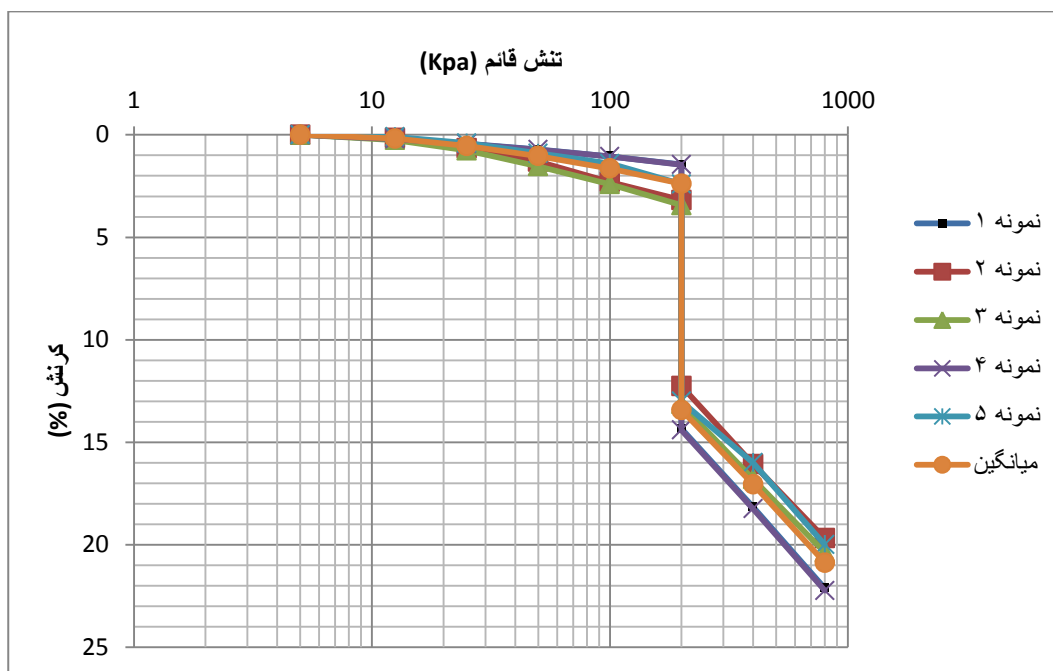
- تفاوت در تخلخل و دانسیته خاک طبیعی در نمونه‌های خاک دست‌نخورده؛ به دلیل

تفاوت در پراکندگی حفرات و ساختار خاک طبیعی

- دشوار بودن اخذ نمونه دست‌نخورده با توجه به پایین بودن رطوبت طبیعی خاک

- عدم امکان تثبیت خاک دست‌نخورده با روش‌های معمول

ابتدا به منظور کنترل اثر بازسازی و تغییر ساختار خاک بر روی پتانسیل فروریزش، تعداد ۵ آزمایش بر روی نمونه‌های بازسازی شده با شرایط طبیعی صورت پذیرفت. نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۲-۴ و جدول ۴-۴ آمده است.



شکل ۲-۴ نمودار رفتار فروریزشی خاک بازسازی شده

با توجه به نتایج آزمایش شکل فوق که بر روی نمونه‌های مختلف صورت گرفته است، مشاهده

می‌شود که تمامی نمونه‌ها به طور نسبی دارای فروریزش یکسان می‌باشند و تفاوت چشم‌گیری در

نمونه‌های مختلف مشاهده نمی‌شود.

جدول ۴-۴ نتایج آزمایش فروریزش نمونه‌های بازسازی شده

شرایط نمونه	نسبت تخلخل اولیه	نسبت تخلخل نهایی	رطوبت اولیه (%)	رطوبت نهایی (%)	دانسیته خشک خاک (g/cm^3)	معیار فروریزش (%)	درجه فروریزش
بازسازی شده	۰/۹۲	۰/۵	۵/۵	۱۹/۰۸	۱/۴۲	۱۲/۸۹	شدید
بازسازی شده	۰/۸۹	۰/۵۲	۵/۵	۱۸/۴۹	۱/۴۲	۹/۰۸	متوسط
بازسازی شده	۰/۸۹	۰/۵۱	۵/۵	۱۷/۶۵	۱/۴۲	۹/۷۱	متوسط
بازسازی شده	۰/۸۸	۰/۴۶	۵/۵	۱۹/۰۸	۱/۴۲	۱۲/۹۵	شدید
بازسازی شده	۰/۸۹	۰/۵۰	۵/۵	۱۸/۶۴	۱/۴۲	۹/۹۳	متوسط

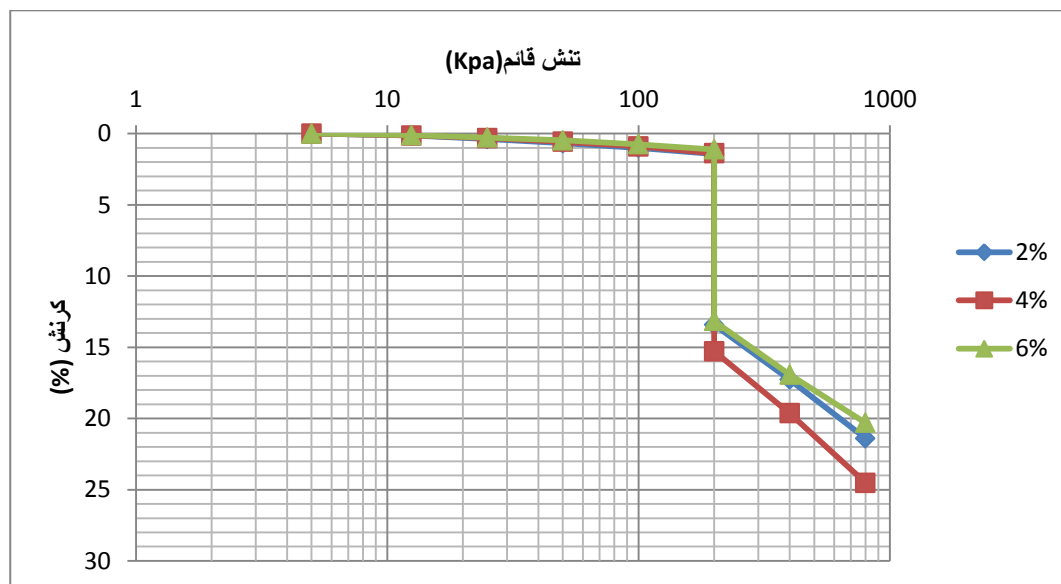
خلاصه نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد، متوسط پتانسیل فروریزش نمونه‌های بازسازی شده ۱۰/۹۱ درصد می‌باشد که نسبت به نمونه‌های دست‌نخورده در اثر بازسازی و تغییر ساختار خاک، ۶/۸۷ درصد کاهش پتانسیل فروریزشی مشاهده شده است.

۴-۲-۳- خاک بازسازی شده و تثبیت شده

تثبیت خاک بازسازی شده توسط ۷ ماده مختلف صورت گرفته است و هر ماده به میزان ۲، ۴ و ۶ درصد نسبت وزنی خاک، مورد آزمایش قرار گرفته‌اند و لازم به ذکر است که هر آزمایش حداقل ۲ مرتبه تکرار شده است. همچنین قابل ذکر است که نانو سیلیس در این پژوهش با مقادیرهای ۲ و ۴ درصد، مورد آزمایش قرار گرفته است. در ادامه نمودارهای فروریزش حاصل از افزودنی‌های مختلف بررسی شده است.

۱-۳-۲-۴ - خاکستر بادی

رفتار فروریزی خاک تثبیت شده با مقادیر مختلف خاکستری در شکل ۳-۴ نشان داده شده است.



شکل ۳-۴ نمودار رفتار فروریزی خاک بازسازی شده و تثبیت شده با خاکستر بادی

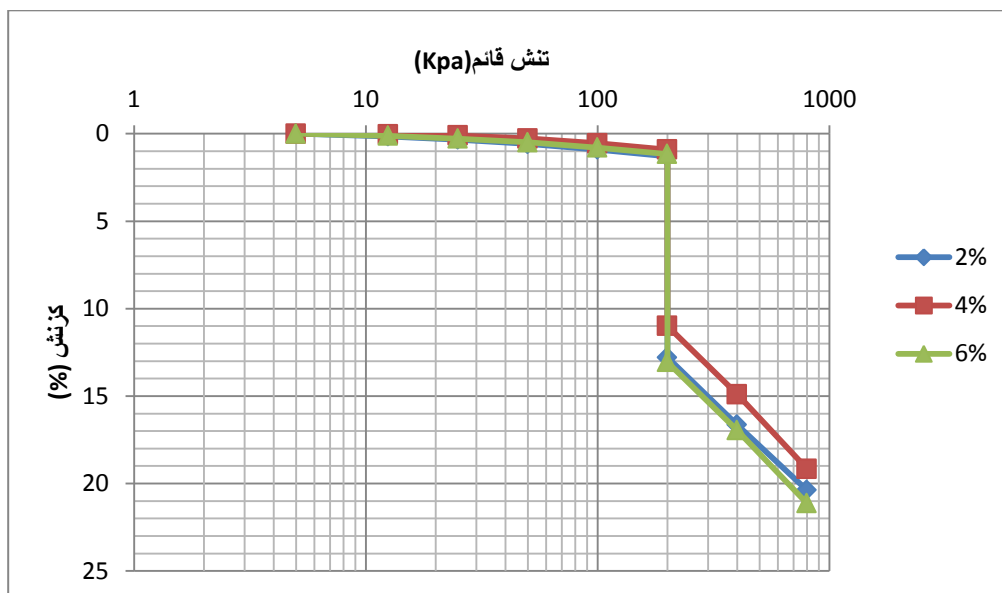
با توجه به نمودار فوق مشاهده می‌شود که مقادیر نشست (کرنش) و رفتار خاک در هر سه مقدار، قبل از فروریزش حدوداً یکسان بوده است؛ ولی کرنش نمونه ۴ درصد پس از فروریزش، مقدار بیش‌تری نسبت به نمونه‌های ۲ و ۶ درصد داشته است و کرنش نهایی تحت تنش ۸۰۰ کیلوپاسکال، در نمونه‌های ۲ و ۶ درصد تقریباً برابر بوده و در نمونه ۴ درصد مقدار بیش‌تری داشته است. جدول ۵-۴ نتایج حاصل از این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۵ نتایج آزمایش فروریزش نمونه‌های بازسازی شده و تثبیت شده با خاکستر بادی

درصد ماده افزودنی	شرایط نمونه	نسبت تخلخل اولیه	نسبت تخلخل نهایی	رطوبت اولیه (%)	رطوبت نهایی (%)	دانسیته خشک خاک g/cm^3	میانگین معیار فروریزش (%)	درجه فروریزش
۲٪	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۵۱	۵/۵	۱۹/۳۷	۱/۴۲	۱۱/۹۹	شدید
	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۵۰	۵/۵	۱۸/۵۳	۱/۴۲		
۴٪	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۴۵	۵/۵	۱۸/۶۳	۱/۴۲	۱۳/۹۱	شدید
	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۴۶	۵/۵	۱۹/۰۸	۱/۴۲		
۶٪	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۵۳	۵/۵	۱۹/۱۸	۱/۴۲	۱۲/۰۵	شدید
	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۵۲	۵/۵	۱۹/۳۸	۱/۴۲		

۲-۳-۲-۴ - بنتونیت

رفتار فروریزی خاک تثبیت شده به ازای مقادیر مختلف بنتونیت در شکل ۴-۴ آمده است.



شکل ۴-۴ نمودار رفتار فروریزی خاک بازسازی شده و تثبیت شده با بنتونیت

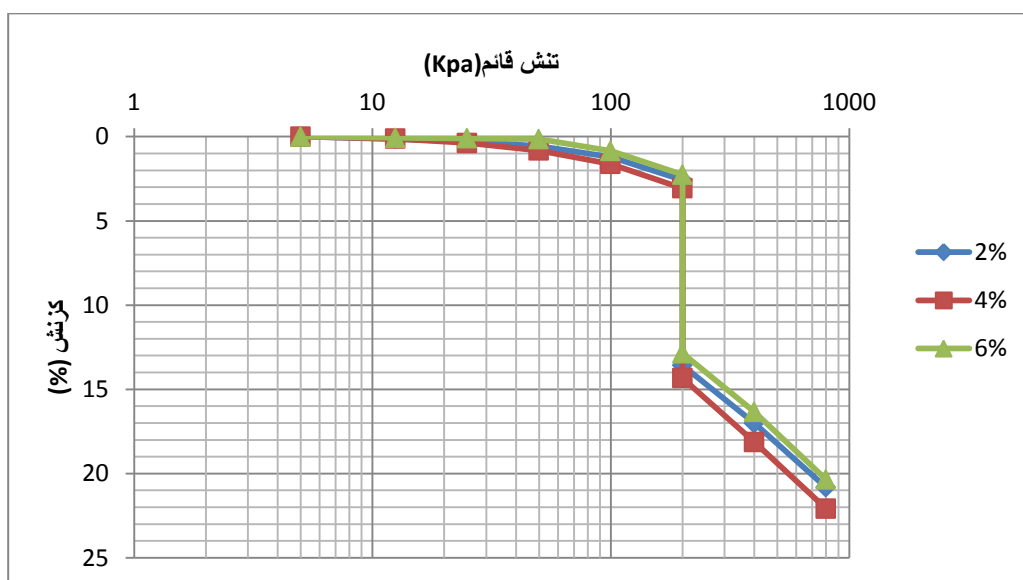
با توجه به نمودار فوق مشاهده می‌شود که مقادیر کرنش و رفتار خاک در هر سه نمونه، قبل از فروریزش حدوداً یکسان بوده است؛ ولی کرنش نمونه ۴ درصد پس از فروریزش، مقدار کمتری نسبت به نمونه‌های ۲ و ۶ درصد داشته است و کرنش نهایی تحت تنش ۸۰۰ کیلوپاسکال، در نمونه‌های ۲ و ۶ درصد تقریباً برابر بوده و در نمونه ۴ درصد مقدار کمتری داشته است. جدول ۴-۶ نتایج حاصل از این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۶ نتایج آزمایش فروریزش نمونه‌های بازسازی شده و تثبیت شده با بنتونیت

درصد ماده افزودنی	شرایط نمونه	نسبت تخلخل اولیه	نسبت تخلخل نهایی	رطوبت اولیه (%)	رطوبت نهایی (%)	دانسیته خشک خاک g/cm^3	میانگین معیار فروریزش (%)	درجه فروریزش
%۲	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۵۳	۵/۵	۱۹/۹۰	۱/۴۲	۱۱/۵۰	شدید
	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۵۱	۵/۵	۱۸/۳۳	۱/۴۲		
%۴	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۵۵	۵/۵	۲۰/۴۶	۱/۴۲	۱۰/۰۸	شدید
	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۵۲	۵/۵	۱۹/۸۱	۱/۴۲		
%۶	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۵۱	۵/۵	۲۰/۸۱	۱/۴۲	۱۱/۹۰	شدید
	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۵۴	۵/۵	۲۰/۲۶	۱/۴۲		

۳-۳-۲-۴ - نانو بوکسیت

رفتار فروریزی خاک تثبیت شده به ازای مقادیر مختلف نانو بوکسیت در شکل ۵-۴ آمده است.



شکل ۵-۴ نمودار رفتار فروریزی خاک بازسازی شده و تثبیت شده با نانو بوکسیت

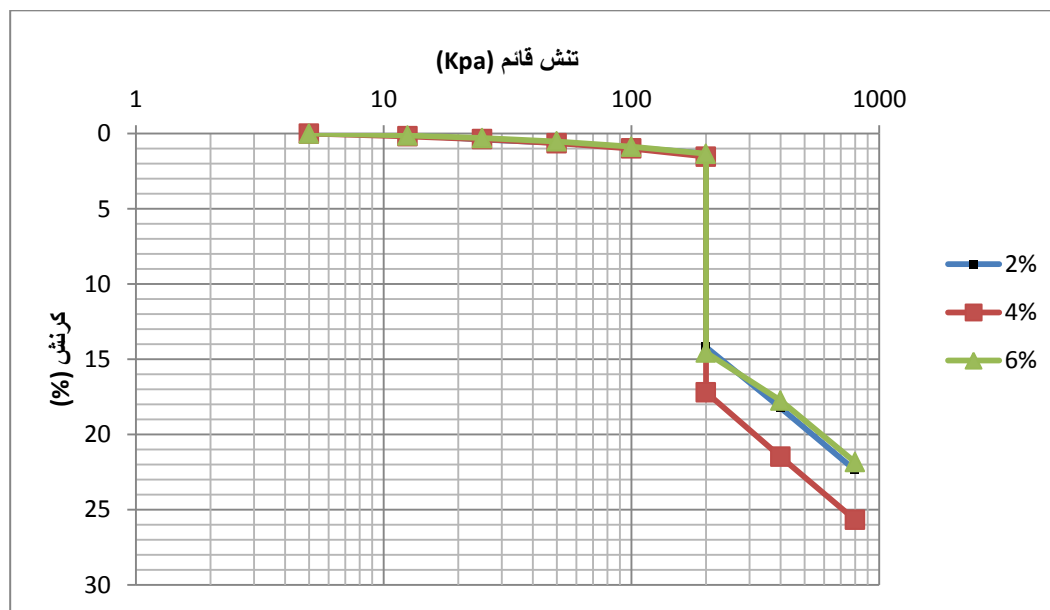
با توجه به نمودار فوق مشاهده می‌شود که مقادیر کرنش در نمونه‌ها اندکی متفاوت می‌باشد. به طور کلی می‌توان مشاهده کرد که کرنش خاک قبل و بعد از فروریزش و تحت تنش ۸۰۰ کیلوپاسکال، به ترتیب به ازای ۶ و ۲ درصد، مقدار کمتری نسبت به ۴ درصد داشته است. جدول ۷-۴ نتایج حاصل از این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۷-۴ نتایج آزمایش فروریزش نمونه‌های بازسازی شده و تثبیت شده با نانو بوکسیت

درصد ماده افزودنی	شرایط نمونه	نسبت تخلخل اولیه	نسبت تخلخل نهایی	رطوبت اولیه (%)	رطوبت نهایی (%)	دانسیته خشک خاک g/cm^3	میانگین معیار فروریزش (%)	درجه فروریزش
۲٪	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۵۲	۵/۵	۱۸/۵۰	۱/۴۲	۱۰/۹۹	شدید
	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۵۱	۵/۵	۱۸/۳۴	۱/۴۲		
۴٪	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۵۰	۵/۵	۱۸/۱۰	۱/۴۲	۱۱/۲۸	شدید
	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۴۹	۵/۵	۱۸/۰۵	۱/۴۲		
۶٪	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۵۳	۵/۵	۱۸/۲۷	۱/۴۲	۱۰/۶۱	شدید
	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۵۲	۵/۵	۱۸/۲۲	۱/۴۲		

۴-۲-۳-۴ - کائولینیت

رفتار فروریزی خاک تثبیت شده به ازای درصدهای مختلف کائولینیت در شکل ۶-۴ آمده است.



شکل ۶-۴ نمودار رفتار فروریزی خاک بازسازی شده و تثبیت شده با کائولینیت

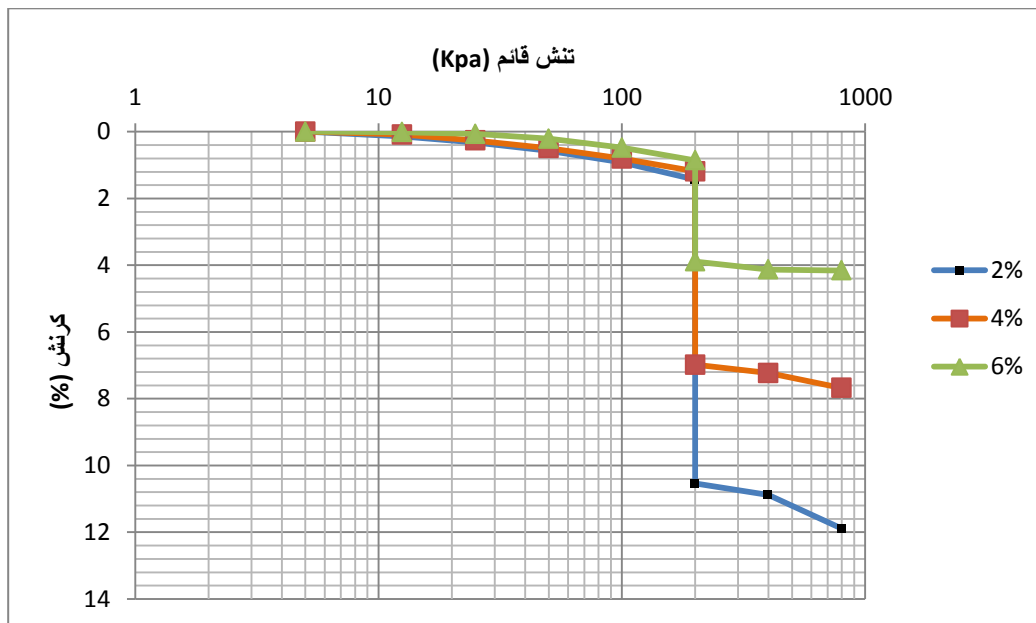
نتایج رفتار خاک مطابق شکل ۶-۴ نشان می‌دهد که مقادیر کرنش در هر سه نمونه، قبل از فروریزش تقریباً یکسان بوده است؛ ولی پس از فروریزش کرنش نمونه ۴ درصد، مقدار بیش‌تری نسبت به نمونه‌های ۲ و ۶ درصد داشته است و کرنش نهایی تحت تنش ۸۰۰ کیلوپاسکال، در نمونه‌های ۲ و ۶ درصد تقریباً برابر بوده و در نمونه ۴ درصد مقدار بیش‌تری را داشته است. جدول ۸-۴ نتایج حاصل از این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۸-۴ نتایج آزمایش فروریزش نمونه‌های بازسازی شده و تثبیت شده با کائولینیت

درصد ماده افزودنی	شرایط نمونه	نسبت تخلخل اولیه	نسبت تخلخل نهایی	رطوبت اولیه (%)	رطوبت نهایی (%)	دانسیته خشک خاک g/cm^3	میانگین معیار فروریزش (%)	درجه فروریزش
%۲	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۴۹	۵/۵	۱۸/۳۶	۱/۴۲	۱۲/۸۹	شدید
	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۴۷	۵/۵	۱۹/۱۰	۱/۴۲		
%۴	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۴۳	۵/۵	۱۸/۴۷	۱/۴۲	۱۵/۶۷	شدید
	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۴۸	۵/۵	۱۸/۳۲	۱/۴۲		
%۶	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۵۰	۵/۵	۱۸/۴۱	۱/۴۲	۱۳/۲۲	شدید
	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۴۹	۵/۵	۱۹/۲۰	۱/۴۲		

سیمان ۴-۲-۳-۵

رفتار فروریزی خاک به ازای مقادیر مختلف سیمان در شکل ۷-۴ آمده است.



شکل ۷-۴ نمودار رفتار فروریزی خاک بازسازی شده و تثبیت شده با سیمان

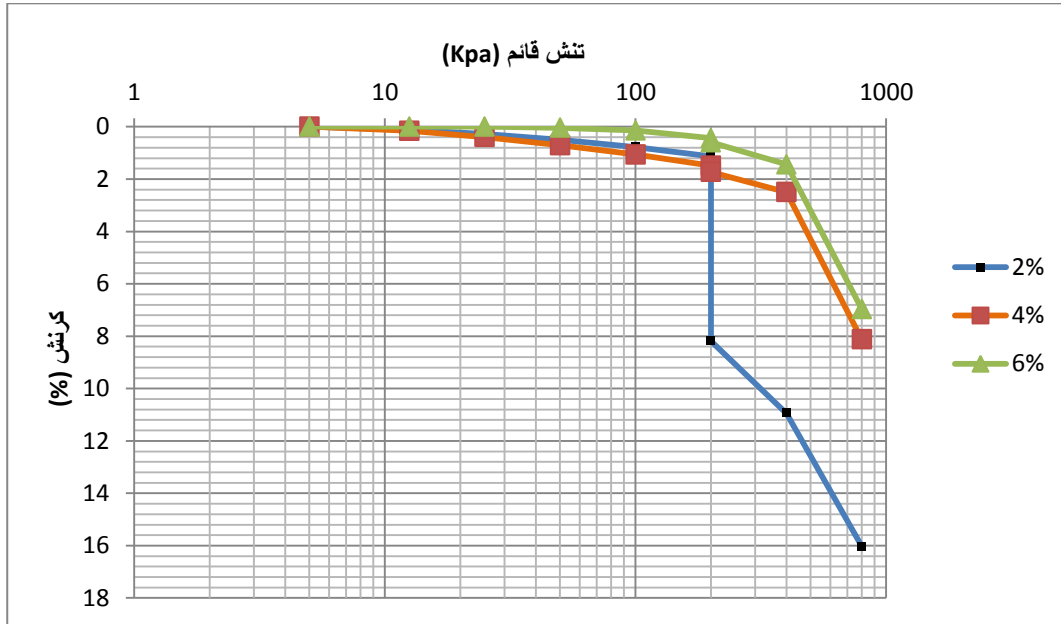
نمودار فوق نشان می‌دهد که کرنش نمونه‌های ۶ و ۴ درصد به ترتیب مقدار کمتری نسبت به نمونه ۲ درصد داشته‌اند. پس از فروریزش همان‌طور که مشاهده می‌شود، تفاوت چشم‌گیری در کرنش‌ها رخ داده است؛ به گونه‌ای که نمونه‌های ۶، ۴ و ۲ درصد به ترتیب کمترین کرنش‌ها را داشته‌اند و این تفاوت به طور چشم‌گیری قابل ملاحظه است.

جدول ۹-۴ نتایج آزمایش فروریزش نمونه‌های بازسازی شده و تثبیت شده با سیمان

درصد ماده افزودنی	شرایط نمونه	نسبت تخلخل اولیه	نسبت تخلخل نهایی	رطوبت اولیه (%)	رطوبت نهایی (%)	دانسیته خشک خاک g/cm^3	میانگین معیار فروریزش (%)	درجه فروریزش
%۲	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۶۹	۵/۵	۲۳/۵۰	۱/۴۲	۹/۱۰	متوسط
	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۶۸	۵/۵	۲۳/۱۰	۱/۴۲		
%۴	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۷۷	۵/۵	۲۵/۶۲	۱/۴۲	۵/۷۹	متوسط
	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۷۲	۵/۵	۲۴/۹۰	۱/۴۲		
%۶	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۸۴	۵/۵	۲۷/۲۹	۱/۴۲	۳/۰۳	کم
	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۸۳	۵/۵	۲۶/۸۷	۱/۴۲		

۴-۲-۳-۶- نانو آهک

رفتار فروریزی خاک به ازای مقادیر مختلف نانو آهک در شکل ۴-۸ آمده است.



شکل ۴-۸ نمودار رفتار فروریزی خاک بازسازی شده و تثبیت شده با نانو آهک

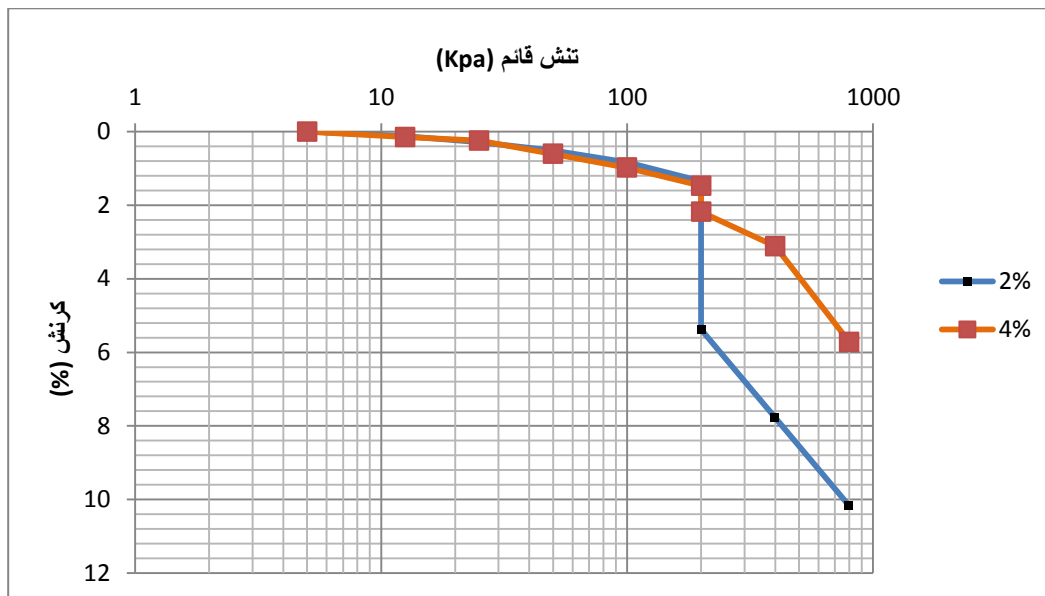
با توجه به نمودار فوق مشاهده می‌شود که کرنش نمونه‌های ۶ و ۴ درصد قبل و بعد از فروریزش، برای هر نمونه تقریباً مقدار یکسانی است که نشان‌دهنده عدم بروز نشست ناگهانی در این نمونه‌ها می‌باشد. همچنین نمونه ۲ درصد، دچار فروریزش بسیار بیشتری نسبت به نمونه‌های ۴ و ۶ درصد شده است که فروریزش آن در شکل ۴-۸ قابل ملاحظه است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها در جدول ۴-۱۰ آمده است.

جدول ۴-۱۰ نتایج آزمایش فروریزش نمونه‌های بازسازی شده و تثبیت شده با نانو آهک

درصد ماده افزودنی	شرایط نمونه	نسبت تخلخل اولیه	نسبت تخلخل نهایی	رطوبت اولیه (%)	رطوبت نهایی (%)	دانسیته خشک خاک g/cm^3	میانگین معیار فروریزش (%)	درجه فروریزش
%۲	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۶۱	۵/۵	۲۳/۴۰	۱/۴۲	۷/۰۵	متوسط
	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۶۳	۵/۵	۲۳/۱۷	۱/۴۲		
%۴	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۷۶	۵/۵	۲۶/۵۱	۱/۴۲	۰/۲۴	غیر فروریزشی
	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۷۵	۵/۵	۲۶/۲۰	۱/۴۲		
%۶	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۷۹	۵/۵	۲۷/۲۴	۱/۴۲	۰/۱۶	غیر فروریزشی
	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۸۰	۵/۵	۲۷/۱۰	۱/۴۲		

۴-۲-۳-۷ - نانو سیلیکا

رفتار فروریزی خاک به ازای ۲ و ۴ درصد نانو سیلیکا در شکل ۴-۹ آمده است.



شکل ۴-۹ نمودار رفتار فروریزی خاک بازسازی شده و تثبیت شده با نانو سیلیکا

با توجه به نمودار فوق مشاهده می‌شود که کرنش و رفتار نمونه‌های ۲ و ۴ درصد قبل از فروریزش، تقریباً مقدار یکسانی است و پس از فروریزش و تحت تنش ۸۰۰ کیلوپاسکال، نمونه ۴ درصد کرنش بسیار کم‌تری نسبت به نمونه ۲ درصد را داشته است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها در جدول ۴-۱۱ آمده است.

جدول ۴-۱۱ نتایج آزمایش فروریزش نمونه‌های بازسازی شده و تثبیت شده با نانو سیلیکا

درصد ماده افزودنی	شرایط نمونه	نسبت تخلخل اولیه	نسبت تخلخل نهایی	رطوبت اولیه (%)	رطوبت نهایی (%)	دانسیته خشک خاک g/cm^3	میانگین معیار فروریزش (%)	درجه فروریزش
%۲	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۶۱	۵/۵	۲۳/۴۰	۱/۴۲	۴/۰۴	کم
	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۶۳	۵/۵	۲۳/۱۷	۱/۴۲		
%۴	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۷۶	۵/۵	۲۶/۵۱	۱/۴۲	۰/۷۱	غیر فروریزی
	بازسازی و تثبیت شده	۰/۹۲	۰/۷۵	۵/۵	۲۶/۲۰	۱/۴۲		

پس از ارائه نتایج، در ادامه تجزیه و تحلیل نتایج نمودارها و جدول‌های فوق آمده است.

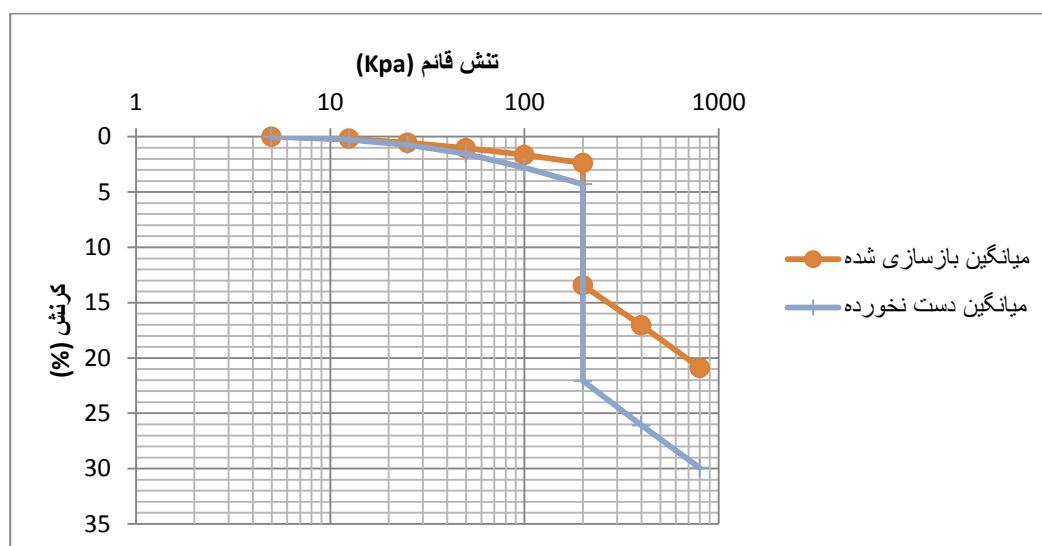
۴-۳- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌های فروریزش استاندارد

۴-۳-۱- اثر دست‌خوردگی در پتانسیل فروریزش خاک

تمامی آزمایش‌های تثبیت خاک فروریزی در این پژوهش، بر روی نمونه‌های بازسازی شده صورت گرفته است؛ لذا لازم است که اثر دست‌خوردگی و بازسازی کردن نمونه‌ها با وزن مخصوص اولیه و طبیعی خاک بررسی شود. مقایسه میانگین نتایج آزمایش‌های فروریزی خاک بازسازی شده و دست‌نخورده به صورت خلاصه در جدول ۴-۱۲ و مقایسه رفتار فروریزی در حین آزمایش در شکل ۴-۱۰ آمده است.

جدول ۴-۱۲ بررسی اثر دست‌خوردگی در رفتار فروریزی خاک

شرایط نمونه	میانگین معیار فروریزش	میانگین درجه فروریزش
دست نخورده	۱۷/۷۸	شدید
بازسازی شده	۱۰/۹۱	شدید



شکل ۴-۱۰ نمودار مقایسه رفتار فروریزی خاک تثبیت‌نشده در حالت دست‌نخورده و بازسازی شده

با توجه به نتایج فوق، دست‌خوردگی خاک موجب کاهش چشم‌گیر در میزان فروریزش خواهد شد. بر طبق جدول فوق میانگین معیار فروریزش از ۱۷/۷۸ به ۱۰/۹۱ کاهش یافته است؛ علت این کاهش را می‌توان از بین رفتن حفره‌های فرامیکروسکوپی و تغییر ساختار خاک که نقش بسیار مؤثری در فروریزش را ایفا می‌کند، نسبت داد. در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت که بازسازی خاک، موجب از بین رفتن حفرات فرامیکروسکوپی و در نتیجه کاهش پتانسیل فروریزش خاک می‌شود.

۴-۳-۲ تاثیر میزان ماده افزودنی در فروریزش خاک

با توجه به نتایج آزمایش فروریزش در نمونه‌های تثبیت‌شده با خاکستر بادی در درصدهای مختلف آن، می‌توان نتیجه گرفت که خاکستر بادی در کاهش فروریزش خاک تحت شرایط آزمایش-

های انجام شده در این پژوهش تأثیری نداشته است. همچنین قابل ذکر است که عناصر تشکیل دهنده و درصد آن‌ها در خاکستر بادی می‌تواند متفاوت باشد و به همین دلیل، این امکان وجود دارد که انواع دیگر خاکستر بادی در کاهش فروریزش خاک نقش مؤثری داشته باشند.

نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده توسط بنتونیت، نشان‌دهنده عدم کاهش خاصیت فروریزی خاک توسط بنتونیت می‌باشد. همانطور که می‌دانیم بنتونیت دارای جذب آب، تورم و چسبندگی زیادی می‌باشد. عدم کارایی بنتونیت در فروریزش خاک در این پژوهش را می‌توان به درصد رطوبت پایین نمونه‌های بازسازی شده نسبت داد؛ لذا لازم است بنتونیت را با درصد رطوبت‌های بالا استفاده کرد تا جذب آب آن، موجب تورم و چسبندگی نمونه خاک گردد.

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌ها، نانو بوکسیت و کائولینیت نیز در کاهش فروریزش خاک ناتوان بوده اند و درصدهای مختلف آن‌ها تأثیری در پایدار نگه داشتن ساختار خاک نداشته اند.

سیمان در شرایط آزمایش‌های انجام شده و درصد رطوبت پایین نمونه‌ها، با خاصیت چسبندگی بسیار بالای خود توانسته است که کاهش چشم‌گیری در رفتار فروریزی خاک ایجاد نماید. همانطور که نتایج نشان می‌دهد با افزایش مقادیر سیمان، معیار فروریزی خاک کاهش می‌یابد؛ طوری که معیار فروریزش خاک در مقادیر ۲، ۴ و ۶ درصد به ترتیب برابر ۹/۱۰، ۵/۷۹ و ۳/۰۳ می‌باشد و سیمان ۶ درصد قادر بوده است که درجه فروریزش شدید خاک تثبیت‌نشده را به درجه فروریزی کم تبدیل نماید.

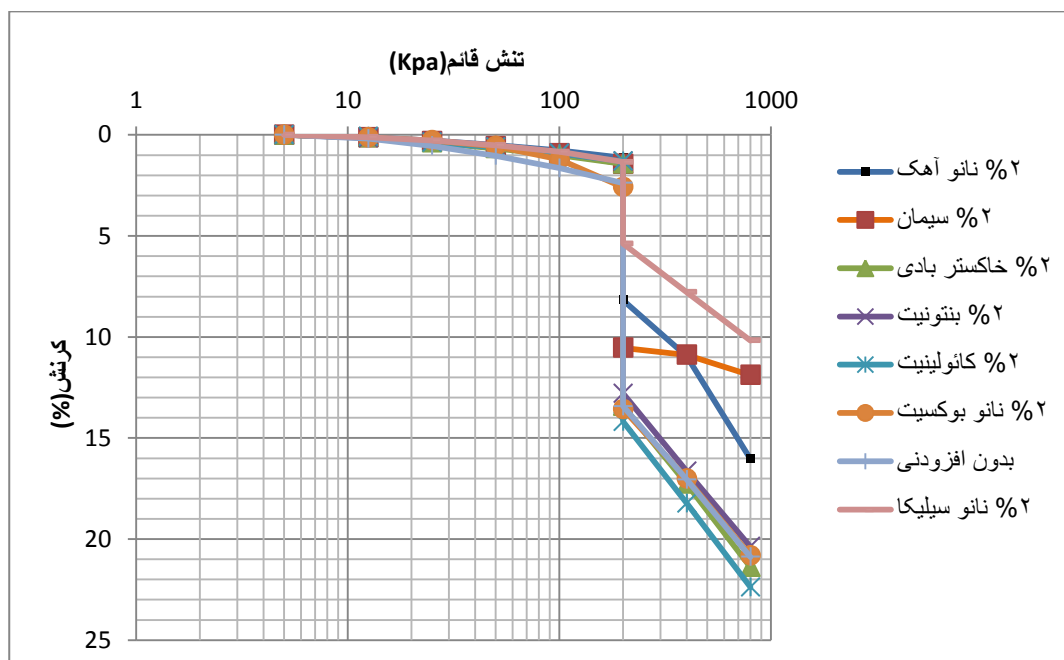
با توجه به نتایج آزمایش‌ها، نانو آهک نیز موجب کاهش بسیار چشم‌گیر رفتار فروریزش خاک شده است؛ به طوری که با افزایش میزان نانو آهک، فروریزش خاک کاهش بیش‌تری پیدا کرده است و معیار فروریزی خاک به ازای ۲، ۴ و ۶ درصد به ترتیب برابر ۷/۰۵، ۰/۲۴ و ۰/۱۶ اندازه‌گیری شده است. مشاهده می‌شود که نانو آهک بسیار مؤثرتر از سیمان در کاهش فروریزش خاک بوده است و مقادیر ۲ و ۴ درصد نانو آهک، خاک فروریزی شدید را به خاک غیر فروریزی تبدیل کرده و

همچنین معیار فروریزش خاک به ازای ۶ درصد، تفاوت چندانی با ۴ درصد نداشته است که در نتیجه می‌توان گفت نیازی به استفاده نانو آهک بیش از ۴ درصد وجود نداشته است.

نانو سیلیکا نیز با مقادیر ۲ و ۴ درصد مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که نانو سیلیکا تأثیر به سزایی در رفتار فروریزی خاک داشته و آن را کاهش داده است. معیار فروریزی خاک به ازای ۲ و ۴ درصد به ترتیب برابر ۰/۴ و ۰/۷۱ اندازه‌گیری شده است و به ازای ۴ درصد نانو سیلیکا به خاک غیر فروریزی دست یافته‌ایم.

۳-۳-۴- مقایسه نوع ماده افزودنی در میزان فروریزش

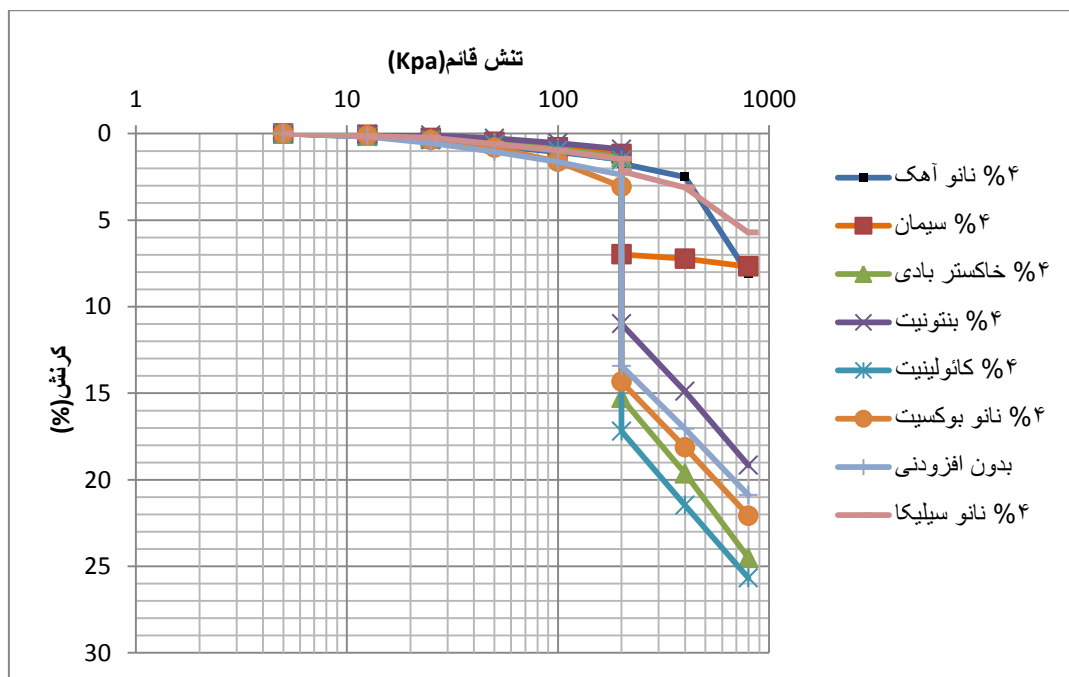
تأثیر نوع ماده افزودنی و مقادیر آن‌ها بر رفتار تغییر شکل و فروریزش خاک در آزمایش فروریزش، در شکل ۴-۱۱ تا ۴-۱۳ و میانگین معیار فروریزی در درصدهای مختلف افزودنی در جدول ۴-۱۳ تا ۴-۱۵ در ادامه آمده است.



شکل ۴-۱۱ نمودار مقایسه رفتار فروریزی خاک بازسازی شده و تثبیت شده به ازای ۲٪ ماده افزودنی

جدول ۴-۱۳ خلاصه نتایج معیار فروریزی خاک توسط افزودنی‌های ۲٪

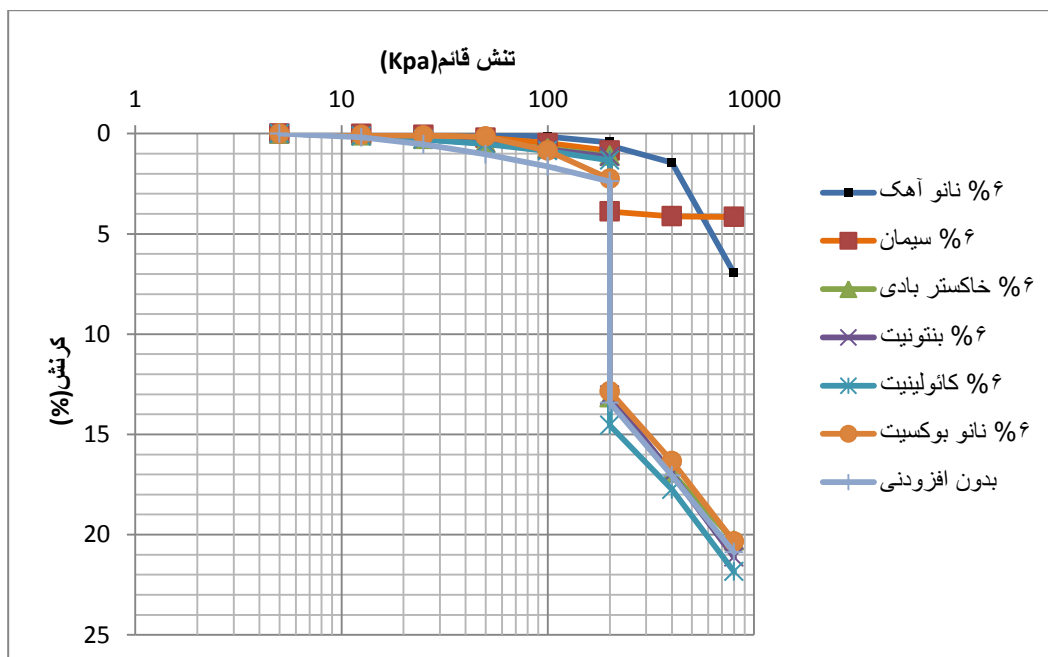
درصد ماده افزودنی	ماده افزودنی	معیار فروریزش	درجه فروریزش
۲	خاکستر بادی	۱۱/۹۹	شدید
	بنتونیت	۱۱/۵۰	شدید
	نانو بوکسیت	۱۰/۹۹	شدید
	کائولینیت	۱۲/۸۹	شدید
	سیمان	۹/۱۰	متوسط
	نانو آهک	۷/۰۵	متوسط
	نانو سیلیکا	۴/۰۴	کم



شکل ۴-۱۲ نمودار مقایسه رفتار فروریزی خاک بازسازی شده و تثبیت شده به ازای ۴٪ ماده افزودنی

جدول ۴-۱۴ خلاصه نتایج معیار فروریزی خاک توسط افزودنی های ۴٪

درصد ماده افزودنی	ماده افزودنی	معیار فروریزش	درجه فروریزش
۴	خاکستر بادی	۱۳/۹۱	شدید
	بنتونیت	۱۰/۰۸	شدید
	نانو بوکسیت	۱۱/۲۸	شدید
	کائولینیت	۱۵/۶۷	شدید
	سیمان	۵/۷۹	متوسط
	نانو آهک	۰/۲۴	غیر فروریزی
	نانو سیلیکا	۰/۷۱	غیر فروریزی

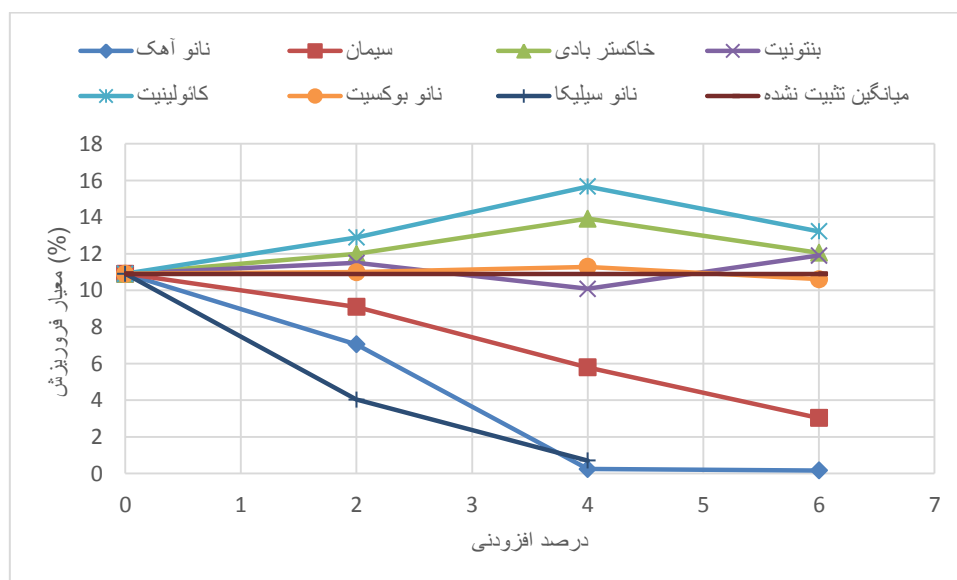


شکل ۴-۱۳ نمودار مقایسه رفتار فروریزی خاک بازسازی شده و تثبیت شده به ازای ۶٪ ماده افزودنی

جدول ۴-۱۵ خلاصه نتایج معیار فروریزی خاک توسط افزودنی‌های ۶٪

درصد ماده افزودنی	ماده افزودنی	معیار فروریزش	درجه فروریزش
۶	خاکستر بادی	۱۲/۰۵	شدید
	بنتونیت	۱۱/۹۰	شدید
	نانو بوکسیت	۱۰/۶۱	شدید
	کائولینیت	۱۳/۲۲	شدید
	سیمان	۳/۰۳	کم
	نانو آهک	۰/۱۶	غیر فروریزی

جهت مقایسه بهتر اثر درصدهای مختلف افزودنی‌ها بر پتانسیل فروریزش خاک بازسازی شده، نتایج به دست آمده به صورت شماتیک در شکل ۴-۱۴ مقایسه شده است.



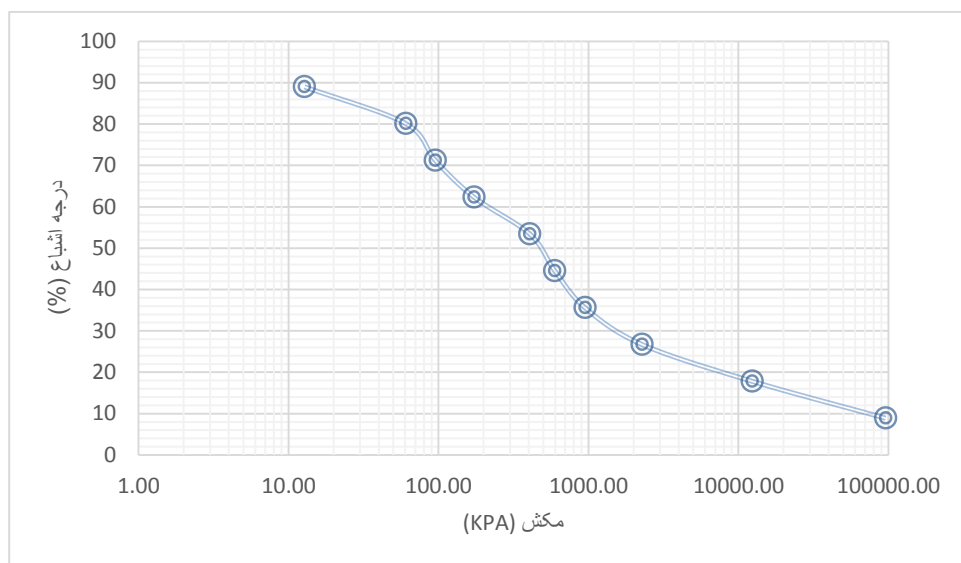
شکل ۴-۱۴ نمودار مقایسه معیار فروریزش بر حسب مقادیر مختلف مواد افزودنی

با توجه به نتایج حاصل می‌توان نتیجه‌گیری کرد که به ازای ۲، ۴ و ۶ درصد ماده افزودنی، به ترتیب نانو سیلیکا، نانو آهک و سیمان بیشترین تأثیر را در کاهش فروریزش خاک داشته‌اند؛ به طوری

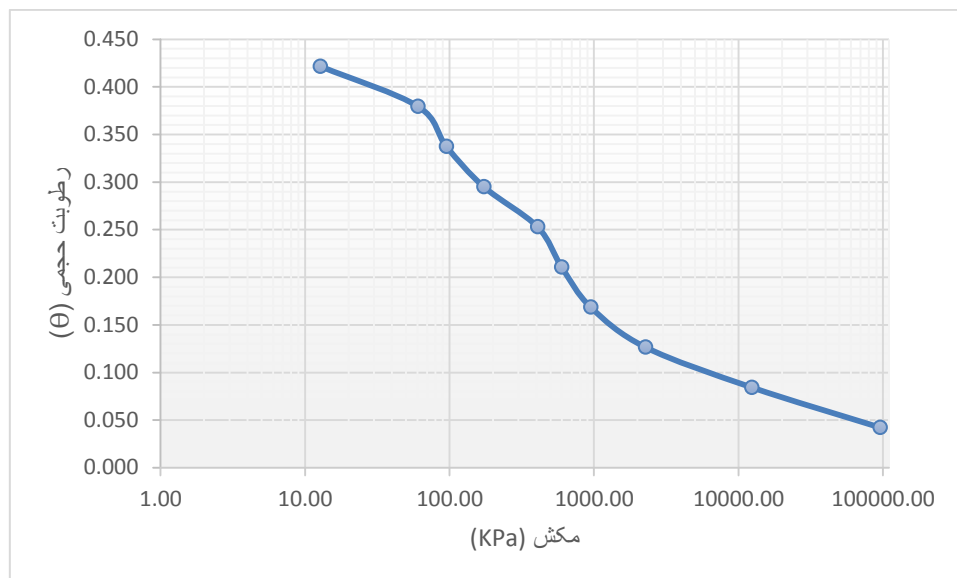
که به ازای ۰.۲٪، نانو سیلیس و به ازای ۰.۴٪ و ۰.۶٪، نانو آهک بیش‌ترین تأثیر را در کاهش فروریزش خاک داشته است.

۴-۴- نتایج آزمایش کاغذ فیلتر

به منظور تعیین نمودار مشخصه آب - خاک برای خاک بازسازی شده و تثبیت نشده، آزمایش کاغذ صافی در درصدهای مختلف اشباع صورت پذیرفت که شرح این آزمایش در فصل سوم به طور کامل آورده شده است. همان‌طور که در فصل ۳ ذکر شد، نمونه‌ها با درصد رطوبت‌های ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۱، ۲۴، ۲۷ و ۳۰ مورد آزمایش قرار گرفتند و متناسب با هر میزان رطوبت، مقدار مکش متناظر آن با توجه به استاندارد مشخص شده است و نتایج آن‌ها، در ادامه و به عنوان منحنی مشخصه خاک فروریزی ترسیم شده است.



شکل ۴-۱۵ منحنی مشخصه آب - خاک بر اساس درجه اشباع با استفاده از روش کاغذ فیلتر

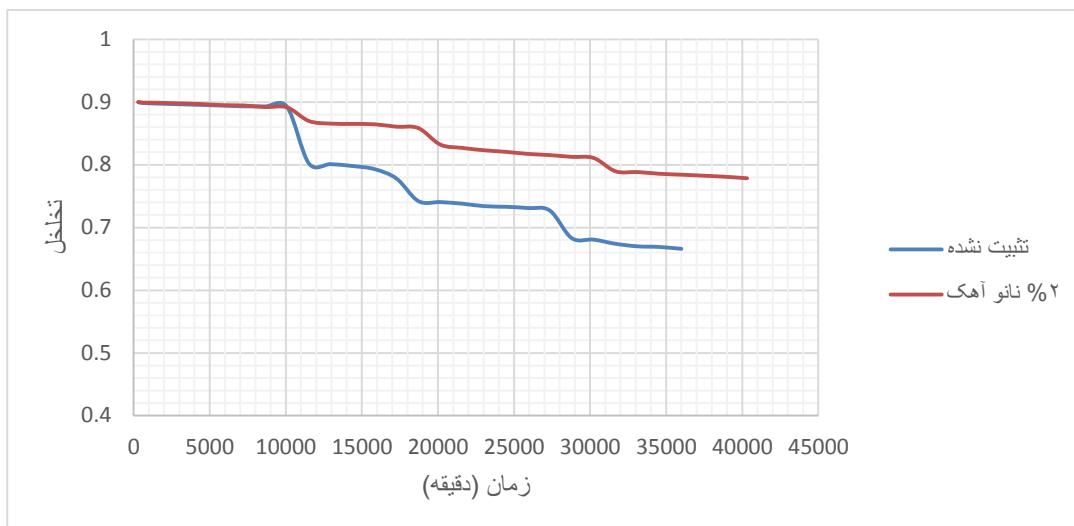


شکل ۴-۱۶ منحنی مشخصه آب - خاک بر اساس رطوبت حجمی با استفاده از روش کاغذ فیلتر

نتایج فوق نشان می‌دهد که با کاهش رطوبت، میزان مکش خاک افزایش می‌یابد و نرخ تغییرات رطوبت در مکش‌های کم‌تر از حدود ۱۰۰۰ کیلوپاسکال، بیش‌تر می‌باشد و نتایج فوق دید کلی بسیار مناسبی در مورد رفتار خاک غیر اشباع در اختیار قرار می‌دهد.

۴-۵- نتایج آزمایش ادمتر با قابلیت کنترل مکش

آزمایش ادمتر با قابلیت کنترل مکش، برای نمونه بازسازی شده‌ی تثبیت نشده و بازسازی شده با ۲ درصد نانو آهک انجام شده و آزمایش‌ها از مسیر ترشوندگی صورت گرفته‌اند. پس از به تعادل رسیدن در هر مرحله آزمایش مکش کاهش یافته و در نتیجه همراه با جذب آب، تخلخل خاک کاهش می‌یابد. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، آزمایش‌ها تحت مکش‌های ۱۵۰، ۱۰۰ و ۵۰ کیلوپاسکال و تنش قائم خالص ۲۰۰ کیلوپاسکال انجام شده‌اند. در ادامه نتایج حاصل از این آزمایش‌ها آمده است.



شکل ۴-۱۷ تغییرات تخلخل بر حسب زمان در آزمایش ادمتر غیر اشباع

همان طور که در شکل ۴-۱۷ مشاهده می شود، نمونه ها در ابتدا تحت مکش ۱۵۰ کیلوپاسکال قرار گرفته اند و پس از به تعادل رسیدن در این مکش، تنش قائم خالص ۲۰۰ کیلوپاسکال به آن ها اعمال شده است که با کاهش تخلخل زیادی در گام اول همراه بوده اند و پس از به تعادل رسیدن در هر مرحله، مکش کاهش یافته است که کاهش مکش همراه با کاهش ناگهانی تخلخل در نمودار بوده است. همچنین مشاهده می شود که نمونه تثبیت نشده، با کاهش تخلخل بیشتری نسبت به نمونه تثبیت شده با نانو آهک همراه بوده است که این اختلاف در هنگام اعمال تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال به وضوح رخ داده است.

در آزمایش های ادمتر با قابلیت کنترل مکش ساختاری، پتانسیل فروریزش بر اساس روش ادمتر مضاعف به دست می آید که برابر با اختلاف بین منحنی تحکیم برای مکش ساختاری مشخص با نمونه اشباع شده (مکش ساختاری صفر) می باشد و طبق نظریه (Jennings and Knight (1975 از رابطه ۴-۱ محاسبه می شود.

رابطه ۴-۱ :

$$C_p(\%) = \frac{(e_{in} - e_{iw}) * 100}{1 + e_{in}}$$

e_{in} : نسبت تخلخل در نمونه با مکش ساختاری مشخص در هر تنش مؤثر

e_{iw} : نسبت تخلخل در نمونه با مکش ساختاری صفر (اشباع) در هر تنش مؤثر

مقادیر پتانسیل فروریزی بر اساس رابطه ۴-۱ در آمده است:

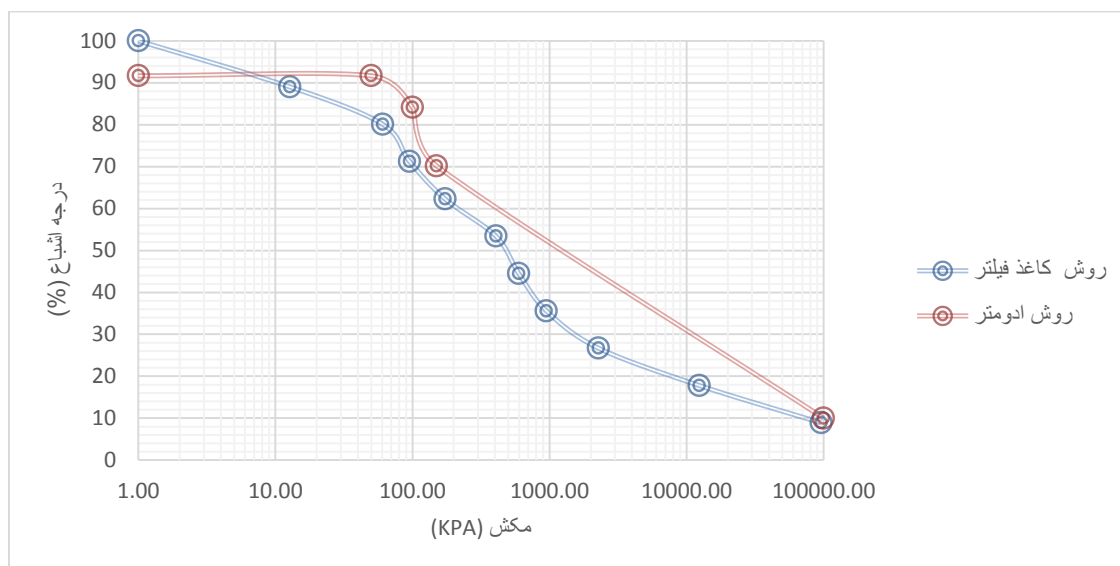
جدول ۴-۱۶ پتانسیل فروریز در آزمایش ادمتر با قابلیت کنترل مکش

مکش (Kpa)	تثبیت نشده		نانو آهک ۲٪	
	e	C_p (%)	e	C_p (%)
۱۵۰	۰/۷۸	۶/۱۷	۰/۸۶	۵/۹۱
۱۰۰	۰/۷۳	۳/۴۷	۰/۷۸	۱/۶۸
۵۰	۰/۶۷	۰	۰/۷۵	۰

همان‌طور که مشخص است با تثبیت خاک، مقادیر پتانسیل فروریز کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد. علت کاهش مقادیر پتانسیل فروریز در نمونه‌های تثبیت شده این است که با افزودن نانو آهک، باندهای سیمانی بین دانه‌ها تقویت شده و نمونه حالت پایدارتری به خود می‌گیرد و در نتیجه تغییر حجم کم‌تری در اثر اشباع شدن از خود نشان می‌دهد که باعث کاهش پتانسیل فروریز خاک می‌گردد. همچنین مشاهده می‌شود که با کاهش مکش ساختاری در خاک، پتانسیل فروریز کاهش یافته است. علت آن است که در خاک لس هنگامی که مکش ساختاری کم می‌شود و یا به عبارتی درصد رطوبت نمونه افزایش می‌یابد، پیوندهای بین ذرات لای سست‌تر شده و خاک تحت تنش‌های اعمالی دچار تغییر شکل بیش‌تری می‌شود و خود را به شرایط پایدارتر نزدیک می‌کند؛ در نتیجه در

مکش‌های ساختاری کمتر، فضای لازم برای فروریزش ساختار خاک و جابجایی ذرات کاهش می‌یابد.

در شکل ۴-۱۸ منحنی مشخصه آب - خاک در آزمایش ادومتر با قابلیت کنترل مکش ترسیم و با نتایج حاصل از آزمایش کاغذ فیلتر مقایسه شده است.



شکل ۴-۱۸ منحنی مشخصه آب - خاک در روش ادومتر و کاغذ فیلتر

همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین نرخ جذب آب، حدود مکش ۱۵۰ کیلوپاسکال می‌باشد و نمونه بیشترین رطوبت را در این محدوده جذب کرده است؛ البته تفاوت نتایج میان دو روش مشاهده می‌شود که می‌تواند به دلیل اختلاف در روند ترشدگی باشد. روند پروسه ترشدگی بر اساس روش انتقال محوری و کاغذ صافی به کلی متفاوت می‌باشد. در روش انتقال محوری، نمونه تحت تنش خالص میانگین اعمال شده جذب آب می‌کند که در این فرایند، میزان تغییرات حجمی به شدت به میزان تنش خالص میانگین اعمالی بستگی دارد؛ حال آنکه در روش کاغذ صافی تأثیر پارامتر تنش خالص میانگین وجود ندارد و نمونه‌ها در پروسه تر شدگی به خودی خود آب جذب نمی‌کنند بلکه با توجه به تخلخل ثابت و وزن مخصوص خشک یکسان، در رطوبت‌های مختلف ساخته می‌شوند.

۵- فصل پنجم : خلاصه نتایج آزمایش‌ها و پیشنهاد-

ها

۵-۱- مقدمه

در این پژوهش به طور کلی آزمایش‌ها در دو دسته فروریزش استاندارد و شرایط غیر اشباع با کنترل مکش صورت گرفته و آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های بازسازی شده انجام شده است. در این فصل، نتایج کلی و پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده ارائه شده است. نتایج کلی این آزمایش‌ها در ادامه بیان شده است.

۵-۲- خلاصه نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی

- بازسازی خاک موجب کاهش چشم‌گیر پتانسیل فروریزش خاک دست‌نخورده می‌شود.
- افزودن سیمان، نانو آهک و نانو سیلیس موجب کاهش به‌سزایی در پتانسیل فروریزش می‌شوند به طوری که با افزایش مقدار آن‌ها، پتانسیل فروریزش کاهش بیش‌تری می‌یابد.
- بنتونیت، کائولینیت، خاکستر بادی و نانو بوکسیت در رطوبت‌های پایین خاک قادر به کاهش پتانسیل فروریزش خاک نمی‌باشند.
- به ازای ۲٪ ماده افزودنی، نانو سیلیکا و به ازای ۴٪ و ۶٪، نانو آهک بیش‌ترین نقش را در کاهش پتانسیل فروریزش خاک داشته‌اند.
- با توجه به این که مقدار ۴٪ نانو آهک و نانو سیلیکا، موجب غیر فروریزی شدن خاک می‌شود، لذا مقادیر بیش‌تر آن‌ها در تثبیت خاک، اقتصادی نمی‌باشد.
- در آزمایش کاغذ فیلتر با افزایش میزان رطوبت خاک، مکش بافتی خاک کاهش می‌یابد و در مکش‌های کم‌تر از ۱۰۰۰ کیلوپاسکال، نرخ این کاهش بیش‌تر است.
- در آزمایش با قابلیت کنترل مکش با گذشت زمان و کاهش مکش، تخلخل خاک در نمونه‌های تثبیت شده و تثبیت نشده کاهش می‌یابد و افزودن نانو آهک موجب شده

است که تخلخل خاک، کاهش کمتری پیدا کند.

- با توجه به آزمایش ادمتر با قابلیت کنترل مکش با کاهش مکش خاک، پتانسیل فروریزش کاهش پیدا می کند و افزودن نانو آهک موجب کم تر شدن فروریزش می شود.
- در مقایسه روش کاغذ فیلتر و ادمتر با قابلیت کنترل مکش مشاهده می شود که استفاده از روش کاغذ فیلتر برای تعیین منحنی مشخصه آب - خاک، به دلیل عدم در نظر گرفتن بار اعمالی و تغییراتی که در حجم حفرات رخ می دهد، توصیه نمی شود و فقط برای به دست آوردن دید کلی برای خاک فروریزی مناسب است.

۵-۳- پیشنهادها برای پژوهش های آینده

موضوعات زیر برای پژوهش های بعدی توصیه می شود.

- تثبیت خاک دست نخورده توسط روش های مختلف از جمله الکتروکینتیک و سایر روش ها و انجام آزمایش های فروریزش استاندارد و غیر اشباع بر روی نمونه های دست نخورده.
- استفاده از موجودات زنده مانند باکتری و قارچ و سایر افزودنی ها و نمک های محلول در آب و بررسی تاثیر آنها جهت تثبیت و کاهش فروریزش خاک.
- بررسی تاثیر میزان رطوبت اولیه در هنگام بازسازی نمونه ها و تاثیر آن بر روی فروریزش خاک.
- بررسی دما و مدت عمل آوری نمونه های تثبیت شده.
- مطالعه ی فروریزش خاک در تنش های مختلف و مقایسه ی آنها.
- استفاده از سرامیک متخلخل با عدد عبوری هوای بالاتر و بررسی رفتار خاک غیر اشباع در شرایط مکش های بالاتر.
- انجام آزمایشات بار متغیر بر روی نمونه های غیر اشباع

- Abbeche, K., Bahloul, O., Ayadat, T., And Bahloul, A. (2010). "Treatment of Collapsible Soils by Salt Using Double Consolidation Method." Proceeding of Experimental and Applied Modeling of Unsaturated Soils, ASCE, GSP No.202,pp.69-78.
- Adnan, A., Basma, A. and Tuncer, E. R. (1992), "Evolution and Control of Collapsible Soils", Journal of Geotechnical Eng, ASCE, Vol. 118, No 10, PP: 1491-1504.
- Alkandari, F. A., (2000), " Collapse of Cemented Carbonate Sand", Ph.D. thesis, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, USA.
- Al-Obaidi, Q.A.J., Saad Farhan, I., and Schanz, T. (2013). "Evaluation of Collapse Potential Investigated from Different Collapsible Soils." Journal of Multiphysical Testing of Soils and Shales, Springer Series in Geomechanics and Geoengineering 2013, pp.117-122.
- Assallay, A.M., Jeffeson, I., Rogers, C.D.F., Smalley, I.J., (1998). "Fragipan formation in loess soils": development of the Bryant hydroconsolidation model. Geoderma. 83, pp: 1-16.
- Barden, L., Madedor, A.O., Sides, G.R., (1969). "Volume change calculations of unsaturated clay". J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE, 95,PP: 33–51.
- Barden, L., McGown, A., Collins, K., (1973), "The collapse mechanisms in partly saturated soils", Engineering Geology, Vol. 7, PP: 49-60.
- Basma, A.A., Tuncer, E.R., (1992). "Evaluation and control of collapsible soils". Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 118, No. 10.
- Bishop A.W., Donald I.B., (1961) "The experimental study of party saturated soil in the triaxial apparatus". Proc. 5th Conf. On Soil Mechanics and Found Eng.1, PP. 13-21.
- Bohn, H.L., B.L. Mcneal, and G.A.Oconner. (2001). Soil chemistry. John Wiley and Sons, New York.

Buhler, R.L., And Cerato, A.B. (2007). "Stabilization of Oklahoma Expansive Soils Using Lime and Class C Fly Ash." Proceeding of Problematic Soils and Rocks and In Situ Characterization,ASCE,GSP No.162,pp.1-10.

Celauro,B., Bevilacqua,A., Bosco, D.L. and Celauro,C. (2012). "Design Procedures for Soil-Lime Stabilization for Road and Railway Embankments." Journal of Social and Behavioral Sciences,Vol.53,pp.755-764.

Chien,S.C., Ou,C.Y. and Wang,Y.H. (2011). "Soil improvement using electroosmosis with the injection of chemical solutions: laboratory tests." Journal of the Chinese Institute of Engineers,Taylor and Francis,Vol.34,No.7,pp.863-875.

Chiu, C.F., NG, C.W.W., Shen, C.K., (1998). "Collapse behaviour of loosely compacted virgin and non-virgin fills in Hongkong". Proc. 2nd . Int. Conf. Unsaturated soils. Vol. 1, pp: 25-30.

Chu, J., Bo, M.W., and Choa, V. (2004). "Practical Considerations for Using Vertical Drains in Soil Improvement Projects." Journal of Geotextiles and Geomembranes, Vol.22,No.1,pp.101–117.

Clevenger, W. A., (1956), "Experiences with loess as foundation material," Journal of the soil mechanic and foundation division, ASCE, Vol. 96, No. 3. 925-947.

Cuisinier,O., Stoltz,G. and Masrouri,F. (2014). "Long Term Behavior of Lime-Treated Clayey Soil exposed to Successive Drying and Wetting." Proceeding of Geo-Congress 2014 Technical Papers,ASCE, GSP No.234,pp.4146-4155.

Denisov, N.Y., "The Engineering Properties of Loess and Loess Loams", Gosstroizdat, Moscow, USSR 1951.

Derbyshire,E. (1994). "Genesis and Properties of Collapsible Soils." NATO ASI Series,pp.1-10.

El Howayek, A., Huang, P., Santaga, M., (2011), "Identifcation and behavior of collapsible soils", Joint transportation research program technical report series.

El-Ehwany, M. H., (1989), "Collapse Settlement Prediction: A Field and Laboratory Study", Ph.D. Thesis, Arizona State University, USA.

- Elkady, T.Y., (2002). "Static and dynamic behaviour of collapsible soils". p.H.D. Thesis, Arizona State University, USA.
- Essington, M.E. (2004). Soil and water chemistry. CRC Press, New York.
- Estabragh, A.R., Naseh, M. and Javadi, A.A. (2014). "Improvement of Clay Soil by Electro-Osmosis Technique." Journal of Applied Clay Science, vol.95, pp.32-36.
- Evstatiev, D. (1988). "Loess Improvement Methods." Journal of Engineering Geology, Vol.25, pp.341-366.
- Fattah, M.Y., Al-Ani, M.M. and Al-Lamy, M.T.A. (2013). "Treatment of collapse of gypseous soils by grouting." Journal of Ground Improvement, Institution of Civil Engineers, Vol.166, pp.32-43.
- Feda, J., (1988), "Collapse of loess upon wetting". Engineering Geology, 25: 263-269. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam Printed in the Netherlands.
- Fredlund, D.G., Morgenstern, N., (1977). "Constitutive relations for volume change in unsaturated soils". Canadian Geotechnical Journal, 13: PP: 261-276.
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H., (1993), "Soil mechanics for unsaturated soils". John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Fredlund, D.G., Xing, A., (1994). "Equations for the soil-water characteristic curve". Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, pp: 521-532.
- Futai, M. M. and Admeida, M. (2002), "Collapsible soil: a Theoretical and Experimental Study", EJGE Paper 0218.
- Gibbs, H.J., Bara, J.P., (1962). "Predicting surface subsidence from basic soil test. ASTM. spec. tech. pub., 322, PP: 321-246.
- Haeri, S. M., Garakani, A. A., (2012), "The variation of total volume change, Water volume change, yielding net confining stress and shear strength of undisturbed unsaturated loess under isotropic compression", Springer, Unsaturated Soil: research and applications, PP. 293-300.

Hilf, J. W., (1956), " An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils", Ph. D. Thesis, Technical Memorandum, No. 654, United State Department of the Interior Bureau of Reclamation, Design and Construction Division, Denver, Colorado, USA.

Houston, S., Houston, W., Spadola, D., (1988). "Prediction of field collapse of soils due to wetting". Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE., Vol. 1, pp: 40-58.

Jefferson, I., Evstatiev, D., And Karastanev, D., (2008). "The Treatment of Collapsible Loess Soils Using Cement Materials." Proceeding of Geosustainability and Geohazard Mitigation, ASCE, GSP No.178,pp.662-669.

Jennings, J. E., Knight, K., (1975), "A guide to construction or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure",6th Regional Conference for Africa On Soil Mechanics & Foundation Engineering, Durban, South Africa, september, PP: 99-105.

Jotisankasa, A., (2005), "Collapse Behaviour of a Compacted Silty Clay", Ph.D. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London.

Klukanova, A., Sajgalik, J., (1994), "Changes in loess fabric caused by collapse", Quaternary International, 24, 35-39.

Kolias, S., Kasselouri-Rigopoulou,V. and Karahalios, A. (2005). "Stabilisation of Clayey Soils With High Calcium Fly Ash And Cement."Journal of Cement & Concrete Composites,Vol.27,pp.301-313.

Krutuv, V.I., Tarasova, I. V., (1964), "A method for determining the magnitude of the initial pressure for slumping soils."Translation from the soviet journal of soil mechanic and foundation engineering, Jan-Feb, 1, 7-9.

Leong, E . C ., and R ahardjo, H . (1997). "Review of soil-water characteristic curve equations." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental E ngineering, Vol. 12,pp. 1106 -1117

Lutenegger, A., Hallberg, G., (1988) , "Stability of loess", Engineering Geology, Vol. 25, PP. 247-261.

McBride, M.B. (1994). Environmental chemistry of soils. Oxford Univ. Press, New York.

Mitchell, J.K., (1976), "Fundamentals of soils behavior". John Wiley & Sons, New York, N.Y., 222-252.

Murthy, V.N.S. (2007). "Advanced Foundation Engineering." 1st ed, New delhi,CBS,pp.555-564.

Nam Soonkie, Gutierrez Marte, Diplas Panayiotis, Petrie John. (2011) "Determination of the shear strength of unsaturated soils using them multistage direct shear test".pp 2-3

Ng, C. W. W., Chiu, C. F., Shen, C. K., (1998), "Effects of Wetting History on the Volumetric Deformation of Unsaturated Loose Fills", Proc. 13th South East Asian Geotrch. Conf., Taipei, Taiwan, 141-146.

Onsy Mohamed, A.M., And El Gamal, M.M. (2012). "Treatment of Collapsible Soils Using Sulfur Cement." International Journal of Geotechnical Engineering, J.Ross Publishing, Vol.6,pp.65-77.

Parsons, R.L. and Kneebone, E.R. (2004). "Use of Cement Kiln Dust for The Stablization of Soils." Proceeding of Geotechnical Engineering for Transportation Projects, ASCE, GSP No.126, pp.1124-1131.

Reznic, Y. M. (1993), "Plate Load Test on Collapsible Soils", J. Geotech Eng. (ASCE), 119(3) PP: 608-615.

Rodrigues, R. A., Vilar, O. M., (2011), "Experimental Study of the Collapsible Behavior of a Tropical Unsaturated Soil", Unsaturated Soils, Alonso & Gens (Eds), 353-357.

Rogers, C. D. F., (1995), "Types and Distribution of Collapsible Soils: In Genesis and Properties of Collapsible Soils", 1-17, E. Derbyshire et al. (Eds), Kluwer academic publishers.

Sariosseiri, F. and Muhunthan, B. (2008). "Geotechnical Properties of Palouse Loess Modified With Cement Kiln Dust and Portland Cement" Proceeding of Characterization Monitoring And Modeling of Geosystems, ASCE, GSP No.179, pp.92-99.

Shvets, V. B. et. al., (1981), "Collapsible Soils by the pressure meter method", Soviet Journal of soil mechanic and foundation engineering, Nov.-Dec.,6,13-16.

Smalley, I.J., (1971) . "In situ theories of loess formation and the significance of the calcim carbonate content of loess". Earth Science Review, 7, PP: 67-86.

Sujit Kumar,D. and Monowar,H. (2012). "Lime Stabilization of Soils: Reappraisal." Journal of Materials in Civil Engineering,Vol.24,No.6,pp.707-714.

Swan, C.C. (2005). "Foundations on Weak and Compressible Soils." Journal of Foundation Engineering, The University of Iowa., pp.53-139.

Thudi, H.R.,(2006) "Assessment of soil-water retention properties of lime and cemented treated clays", Thesis of Master of Science, University of Texas at Arlington.

USBR, (1985). "PetrographHic and Engineering Properties of Loess", MonographH No.28,

Winterkorn, H.F. and Pamukcu, S. (1991). "Soil Stabilization and Grouting." Springer US, Foundation Engineering Handbook, pp.317-378.

Yong Jeon, H. (2004). "Assesment of Geosynthetic Performances For Improvement of Soft Foundation Soils in Coastal Areas." Proceeding of Geotechnical Engineering for Transportation Projects, ASCE. GSP No:126, pp.590-599.

Zia, N., And Fox, P.J. (2000). "Engineering Properties of Loess-Fly ash Mixtures for Roadbase Construction." Journal of The Transportation Research Record 1714, No.886, pp.49-56.

اوستان، ش. (۱۳۸۳)، شیمی خاک با نگرش زیست محیطی (ترجمه)، انتشارات دانشگاه تبریز،
صفحه ۴۳۵.

جوهری، ع. فرخ نژاد، س. جوکار، ع. (۱۳۹۰)، "پیش بینی منحنی مشخصه آب_خاک با استفاده از
روش آماری"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

حائری، س. م. اکبری گرکانی، ا. روح پرور، ح. (۱۳۹۱)، "بررسی بهسازی بستر کانال های انتقال آب

قرار گرفته بر روی خاک‌های فروریزی با افزایش آهک با انجام آزمایش ادومتر و مدلسازی عددی مطالعه موردی خاک لس گرگان " سومین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی شبکه‌های آبیاری و زهکشی، کرج، ایران.

حائری، س. م. قاضی‌زاده، ش. ذبیحی، ن. گرگانی، ا. (۱۳۹۲)، "تحلیل و مقایسه منحنی نگهداشت آب – خاک با استفاده از روش کاغذ صافی و انتقال محوری برای نمونه‌های دست‌نخورده، بازسازی شده و تثبیت شده با آهک"، اولین کنگره ملی مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی.

قاضی زاده، ش.، (۱۳۹۲)، پایان‌نامه ارشد: "بررسی رفتار هیدرومکانیکی و برشی خاک‌های فروریزی با استفاده از دستگاه سه محوری با قابلیت اعمال و کنترل مکش ساختاری مطالعه موردی: لس گرگان"، دانشگاه صنعتی شریف،

کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، (۱۳۷۸)، "خواص ژئوتکنیکی خاکهای فروریزی و اهمیت آن از نظر پی سدها"، شماره ۲۴

محمد حسینی، آ.، (۱۳۹۳)، پایان‌نامه ارشد: "بهسازی و تثبیت خاک های فروریزی دست نخورده با استفاده از روش الکتروکینتیک به وسیله نانو سیلیکا و آهک مطالعه موردی: لس گرگان"، دانشگاه صنعتی شریف،

There are soils in nature that are sensitive by increasing moisture. These soils may increase or decrease in volume change and structure with or without load application in wetting that are defined as problematic soils. Expansive and collapsible soils are two types of problematic soils that the collapse of soils is destructive and causes damage in all structures and Loess soil is the most common of collapsible soils. Various researchers consider this topic and offer the solutions. One of the solutions for prevention of collapse is stabilization and improvement of soils.

In this experimental study, consider the Kalale loess soil and calculate the collapse potential for it, and then stabilize it with various materials such as cement, fly ash, nanolime, nanobauxite, nanosilica, bentonite and kaolinite in different percentages and calculate the collapse potential for all of the stabilized soil with different values and compare together. Test results show that cement, nanolime and nanosilica have the most influence for reduction of collapse potential and other materials couldn't have the great role on prevention of collapse.

In order to assess the collapsible behavior, several filter paper and Oedometer tests under constant vertical stress and varying matric suction in Unsaturated case for remolded soils were performed and compared. Results show that nanolime decreases the collapsible potential in unsaturated case.

Keywords: Collapsible Soils, Stabilize, Kalale loess, Cement, Fly ash, Nanolime, Nano bauxite, Nanosilica, Bentonite, Kaolinite, Filter paper, Unsaturated.



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

**assessment of behavior of collapsible loess soils with oedometer in
saturation and unsaturation with nano materials**

Seyed Sadegh Hosseini

Supervisor:

Dr. S.M. Hosseini

January 2016