

بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی خاک‌های لسی شمال کلاله در استان گلستان با نگرش ویژه بر رمبندگی و فرسایش‌پذیری

کاظم بهرامی^(*)، محمدرضا نیکودل^۲ و ناصر حافظی مقدس^۳

۱- کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۹۰/۶/۹

تاریخ پذیرش: ۹۲/۸/۷

چکیده

لس‌ها نوع خاصی از خاک‌های سیلتی با ساختار متخلخل و چسبندگی ضعیف بوده و در ادوار مختلف کواترنری ته‌نشست شده‌اند. این خاک‌ها از نظر زمین‌شناسی مهندسی جزو خاک‌های مسئله‌دار بوده و می‌توان مهمترین خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی آن‌ها را رmembندگی و فرسایش‌پذیری عنوان کرد. خاک‌های لسی، پوشش اصلی منطقه شمال کلاله در استان گلستان را تشکیل می‌دهند. این خاک‌ها در سطحی معادل ۴۲۰۰ کیلومتر مربع گسترش یافته‌اند. در این تحقیق به منظور بررسی و شناخت خاک‌های لسی، نمونه‌هایی به صورت دست نخورده تهیه و به آزمایشگاه منتقل گردید و حدود اتربرگ، دانه‌بندی، درصد آهک، چگالی مخصوص دانه‌ها، میزان تحکیم، پارامترهای مقاومت برشی و همچنین قابلیت واگرایی و رmembندگی این خاک‌ها تعیین شد. قابلیت رmembندگی این خاک‌ها با استفاده از نتایج آزمایش تحکیم مضاعف به دست آمد. این خاک‌ها بر مبنای استاندارد یونیفاید (Unified) جزو خاک‌های با خاصیت خمیری پایین بوده و در گروه CL و ML می‌باشند. بر مبنای طبقه‌بندی کلونجر (Clevenger) نیز جزو لس‌های رسی و لس‌های سیلتی می‌باشند. میزان کرنات کلسیم این خاک‌ها از ۱۲/۰ تا ۲۲/۳ درصد می‌باشد و پارامترهای مقاومت برشی پایینی را در حالت اشباع از خود نشان می‌دهند. نتایج آزمایش تحکیم مضاعف نشان می‌دهد که این خاک‌ها مستعد رmembندگی می‌باشند. آزمایش‌های واگرایی انجام شده بر روی این خاک‌ها نیز نشان می‌دهد که پدیده واگرایی ناشی از حضور سدیم در فرسایش این خاک‌ها نقشی ندارد و فرسایش‌پذیری بالای این خاک‌ها اساساً یک پدیده مکانیکی است که ناشی از بافت و دانه‌بندی خاص لس‌ها می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: لس، فرسایش‌پذیری، رmembندگی، کلاله

مقدمه

از رس تا ماسه دانه‌ریز می‌باشد (جعفری اردکانی و همکاران، ۱۳۸۸). خاک‌های لسی در بسیاری از کشورهای جهان به ویژه کشورهای نیم‌کره شمالی و در عرض‌های ۳۰ تا ۵۵ درجه گسترش زیادی یافته‌اند. برای مثال در چین لس‌ها در مساحتی بالغ بر ۶۳۰۰۰۰۰ کیلومتر مربع گسترده شده‌اند. (Khalifa et al.,

نهشته‌ها یا خاک‌های لسی از نظر زمین‌شناسی مهندسی در زمره خاک‌های مسئله‌دار قرار می‌گیرند. این نهشته‌ها عموماً یکنواخت، بدون چینه‌بندی، متخلخل، شکننده، کمی چسبنده (عموماً با ضخامت کمتر از ۳۰ متر)، شامل غالباً سیلت با مقدار کمتری

* نویسنده مرتبط Bahrami.kazem@gmail.com

کلاله، مینو دشت و نواحی شمال گرگان به‌صورت متناوب با نهشته‌های آبرفتی مشاهده شده است - و در نواحی گرگان تا حدود ۵۰ متر گزارش شده است (دفتر مطالعات پایه منابع ایران، ۱۳۸۷). از نظر ساختارهای زمین‌شناسی، گسل‌های منطقه عموماً روندی شمال شرقی - جنوب غربی داشته و در محدوده ۴۵ N تا ۹۰ N قرار دارد. از نظر اقلیم، آب و هوای نیمه خشک تا معتدل دارد و میزان بارندگی سالانه آن حدود ۲۰۰ میلی‌متر است. از اشکال فرسایشی که به وفور در این مناطق دیده می‌شود می‌توان فرسایش خندقی و تونلی را نام برد. شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و موقعیت نمونه‌های برداشت شده را نشان می‌دهد.

روش تحقیق

روش‌های مورد استفاده در این تحقیق با توجه به نوع و ماهیت آن، مبتنی بر به‌کارگیری روش‌های دفتری، میدانی و آزمایشگاهی به صورت زیر بوده است.

ابتدا با استفاده از نقشه زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای، نقشه گسترش رسوبات لسی در منطقه مورد مطالعه تهیه شد و سپس طی مطالعات صحرایی، ۱۴ نمونه خاک به‌صورت دست نخورده به‌دست آمد. برای به حداقل رساندن اثر فرایندهای هوازدگی و دخالت‌های انسان، نمونه‌ها از محل ترانسه‌هایی که به تازگی حفر شده بودند، برداشت شد. این نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و آزمایش‌های دانه‌بندی تر، هیدرومتری، حدود اتربرگ، برش مستقیم، XRD، کلسیمتری، تحکیم، تحکیم مضاعف، کرام، هیدرومتری دوگانه و پین هول بر روی آن‌ها انجام شد. سپس نتایج این آزمایش‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

خصوصیات پایه و شاخص خاک‌های لسی محدوده مطالعاتی دانه‌بندی

به منظور تعیین دقیق توزیع اندازه دانه‌های خاک، دو آزمایش دانه‌بندی تر و هیدرومتری بر روی ۱۱ نمونه انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که ذرات ماسه از ۲ تا ۸ درصد، ذرات سیلت از ۴۷ تا ۷۴ درصد و ذرات رس نیز از ۲۴ تا ۵۰ درصد متغیر می‌باشد. جدول ۱ نتایج این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

خواص خمیری لس‌ها در نمونه‌های مورد مطالعه

خاصیت خمیری خاک‌ها وابسته به میزان رس و نوع کانی‌های رسی می‌باشد. به‌منظور تعیین حدود اتربرگ نمونه‌های مورد آزمایش، از روش کاساگراند برای تعیین حد روانی خاک و از روش فیتله کردن خاک برای تعیین حد خمیری خاک استفاده شده است. جدول ۲ نتایج آزمایش‌های انجام شده برای تعیین خصوصیات خمیری لس‌های منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

تخمین زده می‌شود که خاک‌های لسی و شبه لس‌ها حدود ۱۰ درصد از سطح خشکی‌های زمین را می‌پوشانند (Pecci, 1990).

Pecci (1990) ده معیار را برای شناسایی خاک‌های لسی ذکر می‌کند:

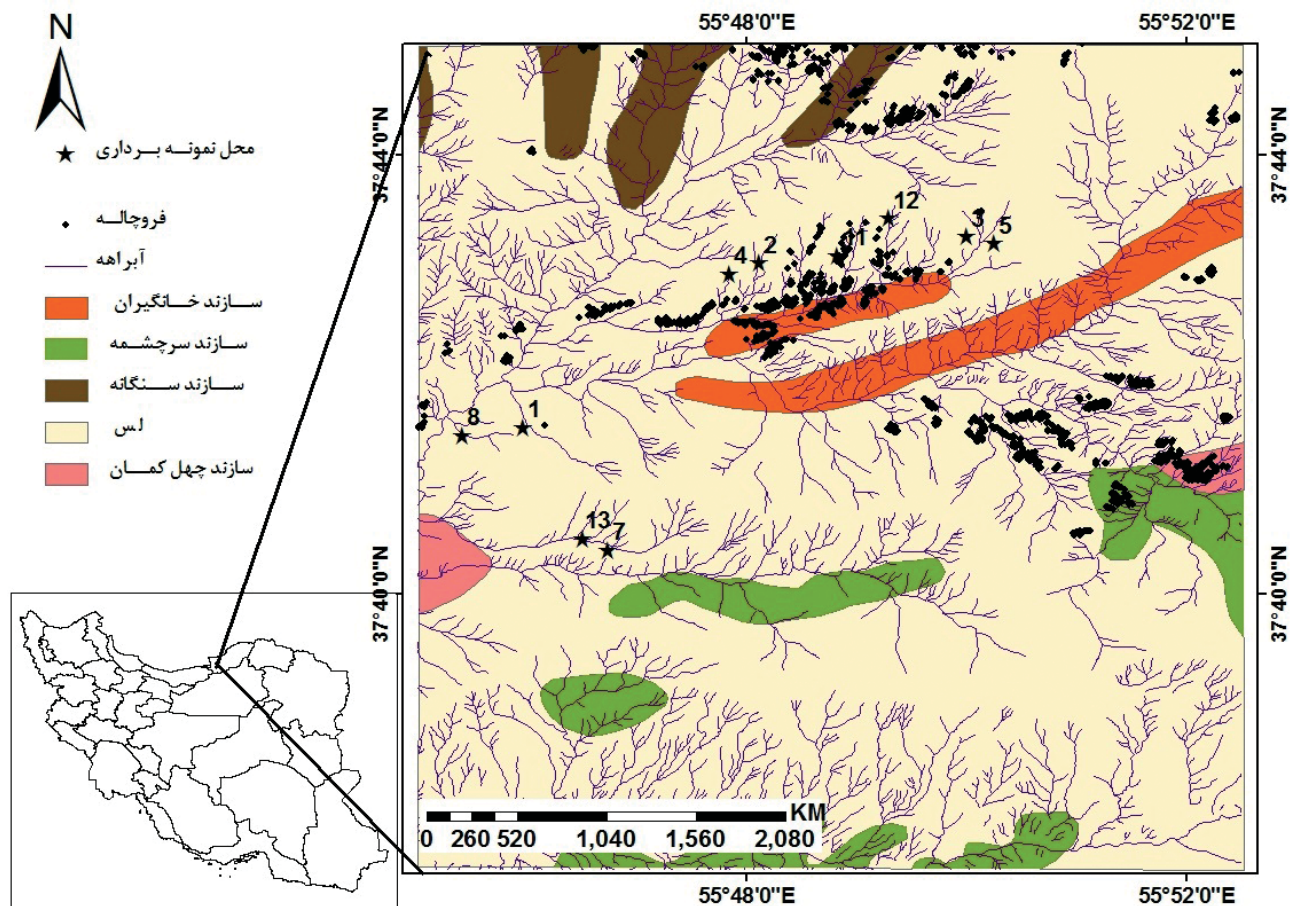
نهشته‌ای شل با درصد ذرات سیلتی بالا، فاقد لایه‌بندی، متخلخل، نفوذپذیر، تشکیل دهنده دیواره‌های قائم پایدار، فرسایش‌پذیری آسان در مقابل آب، کوارتز به عنوان کانی اصلی تشکیل دهنده (۸۰-۴۰)، فلدسپار به عنوان کانی فرعی، به دلیل ذرات پراکنده لیمونیت دارای رنگ زرد نخودی، درصد رس متغیر و کربنات‌ها از ۱ تا ۲۰ درصد.

لس‌ها به علت دارا بودن ریز ساختارهای خاص، تراکم‌پذیری بسیار پایینی را در حالت خشک از خود نشان می‌دهند (Miao, 2001). اما وقتی این خاک‌ها، از آب اشباع شوند به شدت دچار کاهش مقاومت شده و ممکن است ساختار آن‌ها فروریخته و دچار رمبش شوند (Rogers et al., 1994; Feda, 1996). شفییعی (۱۳۸۱) نشان داد که ویژگی‌های لس‌ها نسبت به اخذ رطوبت متغیر می‌باشد و این خاک‌ها عمدتاً خاک‌های غیر آلی با خاصیت خمیری پایین می‌باشند. دانه‌بندی خاص خاک‌های لسی و قابلیت رمبندگی آن‌ها وقتی که تحت بار قرار گرفته و مرطوب می‌شوند، از ویژگی‌های مهم لس‌ها می‌باشد (Nouaouria et al., 2008).

در قسمت وسیعی از مرز ایران و ترکمنستان در استان گلستان، سازندی به‌صورت تپه ماهور دیده می‌شود که جنس آن از لس می‌باشد. این تپه‌ها حاصل نهشته‌های بادی متعلق به دوره کواترنری است که در سطحی معادل ۴۲۰۰ کیلومتر مربع پراکنده شده‌اند (جعفری اردکانی و همکاران، ۱۳۸۸). لس‌های استان گلستان از گرد و غبار حمل شده به وسیله بادهای پلیستوسن از رسوبات سطحی صحراها، دره‌های آبرفتی، دشت‌ها و یا رسوبات یخچالی و پیش از گسترش پوشش گیاهی منشاء گرفته‌اند (پاشایی، ۱۳۷۶). این خاک‌ها در شرایط آب و هوای سرد و خشک حاصل شده‌اند (خواجه، ۱۳۸۱) و جهت بادهای غالب در تشکیل این رسوبات از سمت شمال غرب به سمت جنوب شرق بوده است (خواجه و همکاران ۱۳۸۳).

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در شمال شهرستان کلاله، استان گلستان و در موقعیت جغرافیایی ۵۵° ۴۵' تا ۵۳° ۵۵' طول شرقی و ۳۷° ۳۷' تا ۴۵° ۳۷' عرض شمالی واقع شده است. این منطقه بخشی از زون گرگان - رشت است و از نظر چینه‌شناسی شامل سازندهای آهکی چهل کمان، شیلی خانگیران، شیل و سیلتی آب دراز، شیلی سنگانه، مارنی سرچشمه، آهکی تیرگان، ماسه‌سنگی زرد، آهکی مزدوران و رسوبات کواترنری می‌باشد. رسوبات کواترنری عموماً لسی بوده و بیش از ۷۰ درصد پوشش منطقه را به خود اختصاص می‌دهد. ستبرای لس‌ها بسیار متغیر بوده - در بعضی از چاه‌های اکتشافی در نواحی گنبد کاووس،



شکل ۱. زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و موقعیت نمونه‌های برداشت شده

جدول ۱. نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی تر و هیدرومتری.

شماره نمونه	درصد سیلت	درصد رس	درصد ماسه
۱	۷۰	۲۸	۲
۲	۷۲	۲۶	۲
۳	۷۳	۲۵	۲
۴	۵۲	۴۴	۴
۵	۶۲	۳۰	۸
۶	۷۴	۲۴	۲
۷	۶۸	۲۸	۴
۹	۴۷	۵۰	۳
۱۰	۷۰	۲۶	۴
۱۱	۶۸	۲۶	۶

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های انجام شده به منظور تعیین حدود اتربرگ.

شماره نمونه	حد خمیری	حد روانی	شماره نمونه	حد خمیری	حد روانی
۱	۱۶/۲	۳۲/۷	۹	۲۶/۸	۴۱/۷
۲	۱۹/۸	۳۵/۵	۱۰	۱۷/۷	۳۱/۷
۳	۲۰	۳۰/۸	۱۱	۲۰/۸	۲۷/۳
۴	۱۹/۳	۴۰/۸	۱۲	۱۹/۵	۳۱/۵
۵	۱۹/۳	۳۵/۱	۱۳	۲۱/۱	۳۳/۷
۶	۱۸/۸	۲۹/۲	۱۴	۱۸	۳۲/۵
۷	۱۸/۵	۳۴/			

اصطکاک داخلی (ϕ) آن می‌باشد. خاک‌های لسی با افزایش درصد رطوبت، کاهش شدیدی را در پارامترهای مقاومت برشی، از خود نشان می‌دهند (Bell, 2002). آزمایش برش مستقیم به صورت اشباع شده و زهکشی شده بر روی ۱۱ نمونه لسی که به صورت دست نخورده تهیه شده بودند، انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

میزان کربنات کلسیم موجود در نمونه‌های مورد آزمایش

برخی از ویژگی‌های لس‌ها از جمله بافت، تخلخل و رمبندگی، متأثر از حضور کربنات کلسیم می‌باشد. برای تعیین میزان کربنات کلسیم خاک از آزمایش کلسیمتری به روش برنارد استفاده شد. جدول ۳ نتایج این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

طبقه‌بندی خاک

نوع خاک‌های لسی را می‌توان بر اساس طبقه‌بندی کلونجر و استاندارد یونیفاید مشخص کرد. نمونه‌های لسی برداشت شده از منطقه مورد مطالعه بر مبنای طبقه‌بندی یونیفاید (Unified) جزو خاک‌های رسی با خاصیت خمیری پایین می‌باشند و در گروه CL و ML قرار می‌گیرند. کلونجر بر مبنای منحنی دانه‌بندی، لس‌ها را به سه دسته لس رسی، لس سیلتی و لس ماسه‌ای تقسیم‌بندی کرد (Clevenger, 1958). منحنی دانه‌بندی نمونه‌های مورد آزمایش نشان می‌دهد که این لس‌ها بر مبنای طبقه‌بندی کلونجر در گروه لس رسی و لس سیلتی قرار می‌گیرند. در شکل‌های ۳ و ۴ طبقه‌بندی لس‌ها بر مبنای استاندارد یونیفاید و کلونجر نشان داده شده است.

آزمایش تعیین نوع کانی‌ها (XRD)

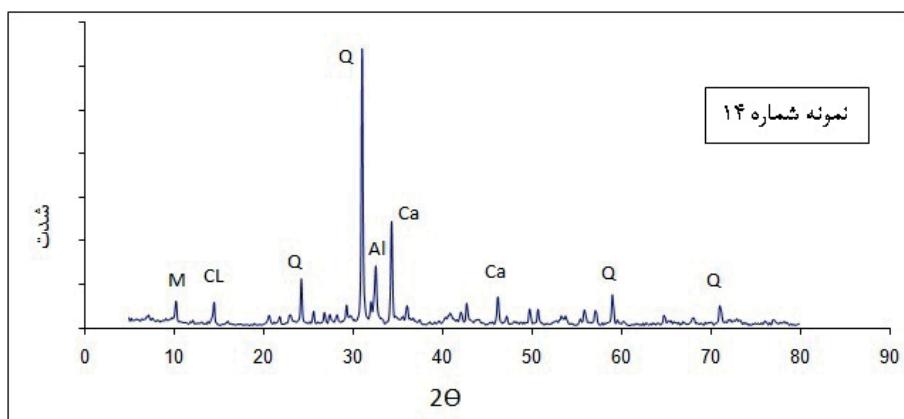
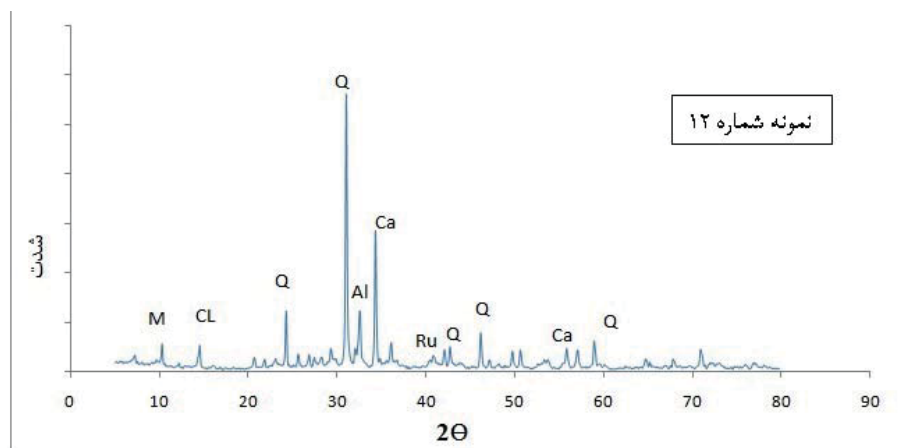
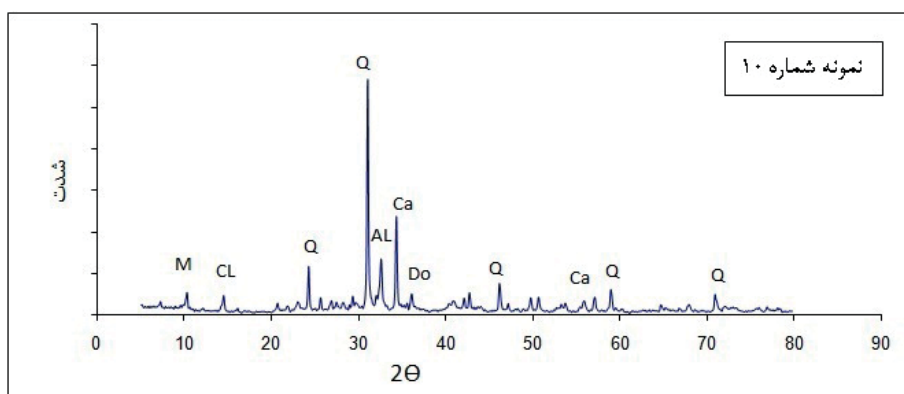
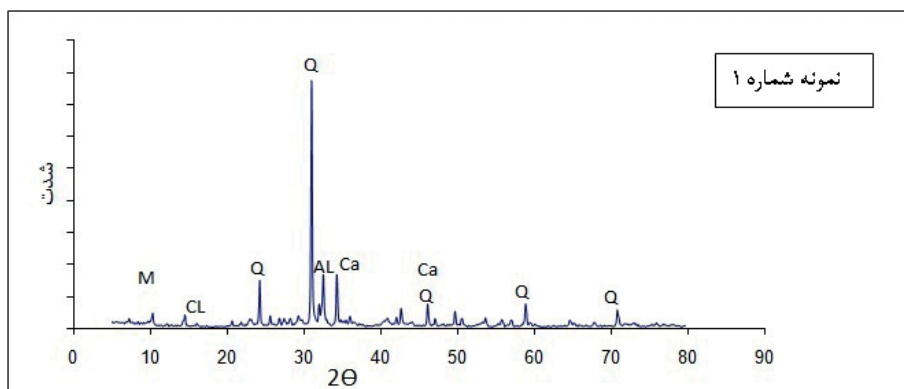
با استفاده از آزمایش XRD نوع کانی‌ها و شدت حضور هر کانی در خاک را می‌توان به دست آورد، نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.

پارامترهای مقاومت برشی خاک

تحقیقات انجام شده توسط Clevenger (1958) نشان می‌دهد که لس‌ها از مقاومت برشی بالایی در درصد رطوبت طبیعی برخوردارند، به طوری که مشاهده شده است که لس‌های با وزن واحد حجم پایین به صورت دیواره‌های قائم به ارتفاع ۱۵ تا ۲۴ متر بدون تکیه‌گاه پایدار باقی مانده‌اند (شفیعی، ۱۳۸۱). دو پارامتر اساسی مقاومت برشی خاک شامل چسبندگی (C) و زاویه

جدول ۳. نتایج آزمایش کلسیمتری

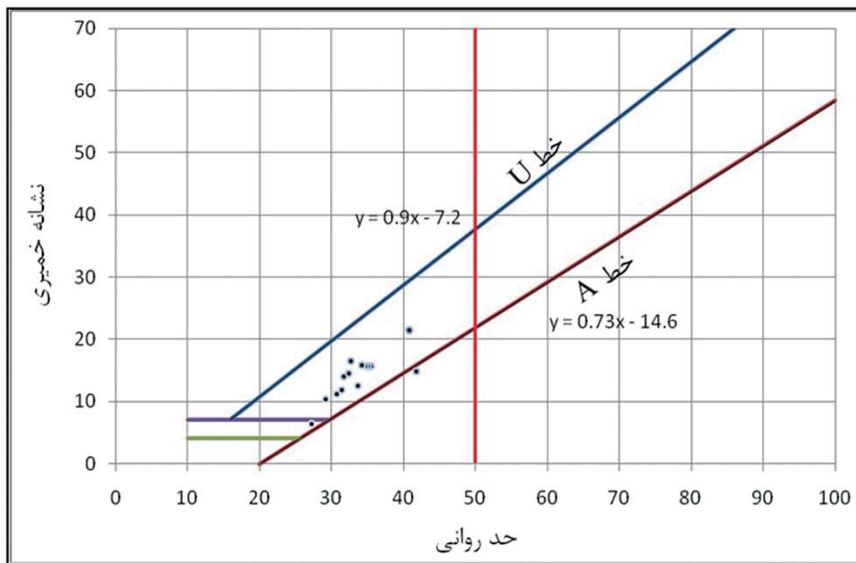
شماره نمونه	درصد کربنات کلسیم	شماره نمونه	درصد کربنات کلسیم
۱	۱۲/۰	۸	۲۲/۳
۲	۱۴/۶	۹	۱۸/۸
۳	۱۴/۴	۱۰	۱۶/۴
۴	۱۴/۸	۱۱	۱۵/۳
۵	۱۸/۶	۱۲	۲۰/۴
۶	۱۵/۴	۱۳	۱۳/۲
۷	۱۳/۲	۱۴	۱۸/۱



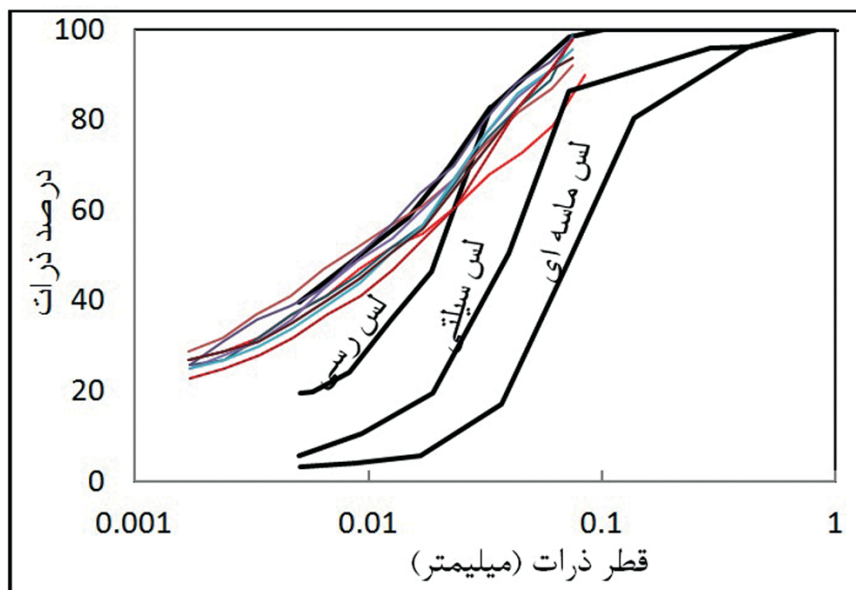
شکل ۲. نتایج آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD) بر روی نمونه‌های شماره ۱، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ (M=مسکویت، CL=کلریت، Q=کوارتز، AL=آلبیت، Do=دولومیت، Ca=کلسیت، Ru=روتیل).

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های برش مستقیم.

شماره نمونه	چسبندگی (C) kg/cm ²	زاویه اصطکاک داخلی (Φ) درجه	شماره نمونه	چسبندگی (C) kg/cm ²	زاویه اصطکاک داخلی (Φ) درجه
۱	۰/۰۰	۲۰/۶۵	۷	۰/۱۱	۱۵/۱
۲	۰/۰۰	۲۲/۵	۱۱	۰/۰۰	۲۳/۶
۳	۰/۰۰	۱۷/۱	۱۲	۰/۰۰	۱۶/۷
۴	۰/۰۶	۱۸/۲	۱۳	۰/۱۹	۲۵/۱
۵	۰/۰۰	۲۴/۴	۱۴	۰/۰۰	۲۰/۰
۶	۰/۰۰	۱۹/۹			



شکل ۳. طبقه بندی لس‌ها بر مبنای استاندارد یونیفاید (Unified).



شکل ۴. تعیین نوع لس‌ها بر مبنای طبقه‌بندی کلونجر (Clevenger).

رمبندگی

رمبندگی خاک‌های لسی در آزمایشگاه موثر باشد (شفیعی، ۱۳۸۱; Grabowska-Olzewska, 1988; Yuan and Wang, 2009).

از دهه چهارم قرن بیستم میلادی تاکنون، خاک‌های رمنده توسط بسیاری از محققین مورد مطالعه قرار گرفته و معیارهای مختلفی برای رمنندگی خاک‌ها ارائه شده است. امروزه آزمایش تحکیم مضاعف، که توسط (Jenningz and Knight 1975) ارائه شده است، عمومی‌ترین آزمایش برای تعیین رمنندگی خاک‌ها می‌باشد. آزمایش تحکیم مضاعف به این صورت است که دو آزمایش تحکیم بر روی دو نمونه یکسان انجام می‌شود. یکی از این آزمایش‌ها بر روی نمونه‌ای با رطوبت طبیعی انجام شده و دیگری در شرایط اشباع می‌باشد. آن‌ها متعاقباً این آزمایش را اصلاح کردند. آزمایش اصلاح شده تحکیم مضاعف شامل بارگذاری بر روی نمونه، تا یک مقدار مشخصی از تنش است که در این لحظه بدون افزایش تنش، نمونه را از آب اشباع کرده و تغییر حجم نمونه اندازه‌گیری می‌شود. کاهش حجم خاک بعد از اشباع شدن را می‌توان به عنوان ضریب رمنندگی بیان نمود (Baecher and Christian, 2003; Bell, 2002; Jenningz and Knight).

$$C_p = \frac{\Delta e_c}{1 + e_c} = \frac{\Delta H_c}{H_0} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن CP ضریب رمنندگی، HCA تغییر ارتفاع نمونه بعد از اشباع شدن کامل نمونه ۰ و H ارتفاع نمونه در حالت رطوبت طبیعی است. جدول ۵ شدت مشکل خاک‌ها را بر اساس میزان رمنندگی آن‌ها نشان می‌دهد.

برای ارزیابی قابلیت رمنندگی خاک‌های لسی شمال کلاله به روش جنینگز و نایت ابتدا نمونه‌های دست نخورده به گونه‌ای برش داده شد که فضای داخل قالب دستگاه تحکیم را پر کند سپس آزمایش تحکیم مضاعف برای هر نمونه از خاک در بارهای ۴۰۸، ۲۰۴ و ۱۰۲ (KN/m²) انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۵ ارائه شده است.

واگرایی و فرسایش پذیری لس‌ها

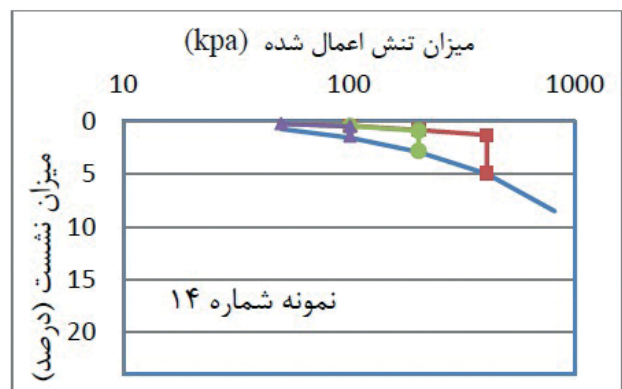
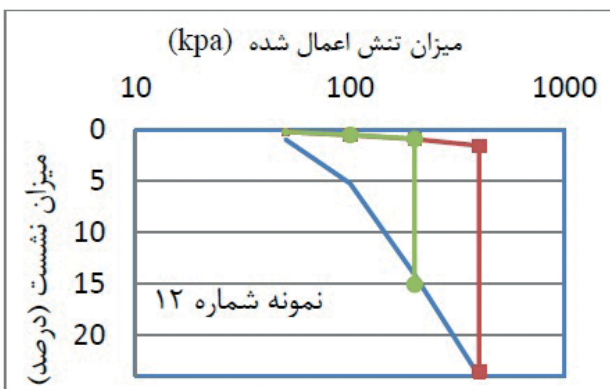
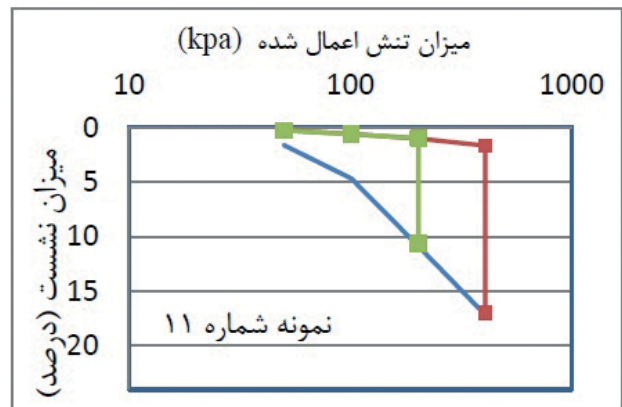
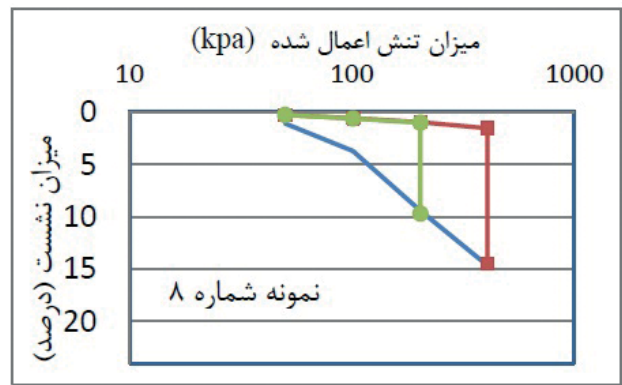
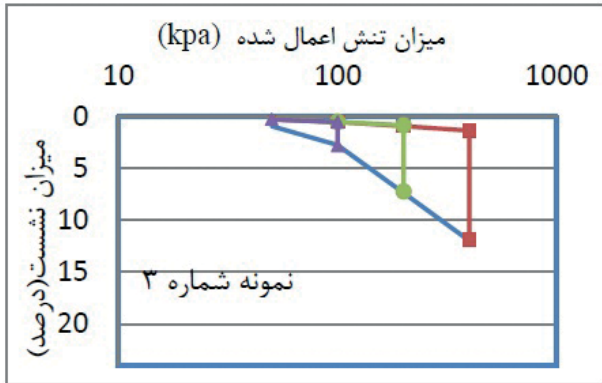
لس‌ها یکی از مهم‌ترین واحدهای رسوبی - بادرفتی قلمداد می‌شوند و به لحاظ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، قابلیت رسوب‌زایی و فرسایش‌پذیری زیادی دارند. میزان رسوب‌دهی

جدول ۵. ارزیابی شدت مشکل خاک بر اساس میزان رمنندگی آن (Nouaouria et al., 2008)

شدت مشکل	ضریب رمنندگی
بدون مشکل	۰ - ۱
مشکل متوسط	۱ - ۵
شدید	۵ - ۱۰
خیلی شدید	۱۰ - ۲۰
فوق‌العاده شدید	۲۰ <

از دیدگاه زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، خاک‌های رمنده در گروه خاک‌های مسئله‌دار قرار می‌گیرند. خاک‌های رمنده خاک‌های سست و سیمانی شده، با درصد رطوبت پایین می‌باشند که مستعد نشست زیاد و ناگهانی در اثر افزایش رطوبت و اشباع شدن می‌باشند. این نشست می‌تواند بدون افزایش تنش قائم و یا در اثر افزایش کمی در تنش قائم صورت گیرد (Mansour et al., 2008; Ali, 2011; Day, 2001). لس‌ها مهم‌ترین گروه خاک‌های رمنده می‌باشند. این خاک‌ها به علت ریز ساختارهای خاص، تراکم‌پذیری بسیار پایینی را در حالت خشک از خود نشان می‌دهند (Miao, 2001). اما وقتی این خاک‌ها از آب اشباع شوند به شدت دچار کاهش مقاومت شده و ممکن است ساختار آن‌ها فروریخته و دچار رمبش شوند (جعفری اردکانی و همکاران، ۱۳۸۸; Rogers et al., 1994; Feda, 1996). خاک‌های رمنده، متخلخل و حاوی کربنات هستند، در تماس با آب دچار افزایش رطوبت می‌شوند و به دلیل شسته شدن سیمان کربناته، ساختمان آن‌ها به هم می‌ریزد، حجم آن‌ها کاهش یافته و دچار رمنندگی می‌شوند (قبادی، ۱۳۸۵).

در حالت خشک، سیمان‌شدگی طبیعی بین دانه‌ها و همچنین چسبندگی ذرات سیلت و ماسه، به علت پوششی از کانی‌های رسی عامل اصلی پیوستگی بین دانه‌ای است. اما به هر حال اشباع شدن این خاک‌ها باعث تخریب سیمان بین دانه‌ای و رها شدن کانی‌های رسی از ذرات سیلت می‌شود که خود عاملی برای ریزش ساختار خاک حتی بدون اعمال بار می‌باشد. در خاک‌های نیمه اشباع نیز پایداری خاک به علت کشش موئینه بوده و با اشباع شدن خاک، این پدیده از بین می‌رود (Hormdee and Thailand, 2008; Khalifa et al., 2010; Rafie et al., 2008). میزان رمنندگی خاک تا حدودی وابسته به تخلخل ذاتی است. خصوصیات اصلی خاک‌های رمنده، تخلخل بالا (بیشتر از ۴۰ درصد)، اشباع‌شدگی پایین (کمتر از ۶۰ درصد)، درصد سیلت بالا (بیشتر از ۳۰ درصد و گاهی تا ۹۰ درصد) و نرم‌شدن سریع در آب است (Rafie et al., 2008). با این وجود عوامل زیادی از جمله دانسیته نسبی لس، درجه اشباع‌شدگی اولیه، میزان تنش پیش‌تحکیمی، تنش جانبی، عمق لس، میزان و نوع سیمان‌شدگی، دست‌خوردگی، سن، هوازدگی، میزان و نوع کانی رسی می‌تواند در ارزیابی میزان



شکل ۵. نتایج آزمایش‌های تحکیم مضاعف و تحکیم که بر نمونه‌های دست نخورده انجام شده است (تحکیم) —، تحکیم مضاعف با بار ۴۰۸ kpa —، آزمایش تحکیم مضاعف با بار ۱۰۲ kpa —، تحکیم مضاعف با بار ۲۰۴ kpa —، (درصد) —.

بنابراین با توجه به شواهد صحرایی و آگرایی، آزمایش‌های کرامب، پین هول و هیدرومتری دوگانه به منظور ارزیابی قابلیت و آگرایی این خاک‌ها بر روی نمونه‌هایی که به صورت دست نخورده تهیه شده بودند، انجام شد.

آزمایش کرامب (Crumb)

در این آزمایش کلوخه کوچکی از خاک به قطر ۶ الی ۹ میلی‌متر را در داخل ظرفی محتوای ۱۵۰ سانتی‌متر مکعب آب مقطر قرار می‌دهند. بعد از مدت زمانی در حدود ۵ الی ۱۰ دقیقه در صورت واگرا بودن خاک، جدائی ذرات رس از کلوخه خاک باعث تولید یک محلول کلوئیدی در اطراف نمونه خاک می‌شود. بر اساس شدت کلوئیدی بودن محلول حاصل، می‌توان میزان و آگرایی خاک را به دست آورد. نتایج این آزمایش در جدول ۷ ارائه شده است. میزان و آگرایی خاک بر اساس شدت کلوئیدی بودن محلول حاصل به صورت زیر تقسیم‌بندی می‌گردد (Ghazinoor, 1990).

- ۱- واگرایی شدید: در این حالت رنگ آب به علت وجود محلول کلوئیدی کامل تغییر می‌کند و گاهی کدر می‌شود.
- ۲- واگرایی متوسط: رنگ آب در تمامی ظرف به میزان کمی تغییر می‌کند و در نزدیکی نمونه تغییر محسوس‌تر است.
- ۳- واگرایی خفیف: رنگ آب در مجاورت سطح خاک کمی تغییر می‌کند.
- ۴- غیر واگرا: هیچ‌گونه محلول کلوئیدی تشکیل نمی‌شود. ولی ذرات خاک از هم جدا شده، در ته ظرف ته‌نشین می‌شوند.

آزمایش هیدرومتری دوگانه

این آزمایش یکی از روش‌های معمول در ارزیابی قابلیت و آگرایی خاک‌های ریزدانه و رسی می‌باشد. روش انجام این آزمایش طبق استاندارد ASTM D ۴۲۲۱-۸۳a بوده است. در استاندارد ASTM از درصد ذرات ریزتر از الک ۱۰ استفاده

برآورد شده برای خاک‌های لسی شمال کلاله بر اساس مدل EPM، ۵/۵۷ تن در هکتار در سال است که نشان‌دهنده فرسایش‌پذیری بسیار بالای این خاک‌ها می‌باشد (جعفری اردکانی و همکاران، ۱۳۸۸). یکی از عوامل مهم که می‌تواند باعث فرسایش‌پذیری خاک‌های ریزدانه شود، و آگرایی است. و آگرایی یا فرسایش کلوئیدی، یک فرایند فیزیکی- شیمیایی است که غالباً در خاک‌های ریز دانه حاوی ذرات رسی رخ می‌دهد (Fernando, Sherard et al., 1976; 2010). عامل ایجاد و آگرایی فزونی نیروی دافعه بین کانی‌های رسی نسبت به نیروی جاذبه بین آن‌ها می‌باشد زمانی که نیروی دافعه بین ذرات از نیروی جاذبه بیشتر باشد، وجود آب به راحتی و سهولت می‌تواند ذرات خاک را از یکدیگر جدا کرده و جابجا کند (Yildiz et al., 1999). مهم‌ترین عامل ایجاد نیروی دافعه بین ذرات حضور کاتیون سدیم در بین کانی‌های رسی می‌باشد. البته نوع کانی رسی، شرایط آب منفذی و نوع آنیون‌های موجود در خاک نیز در پدیده و آگرایی موثر می‌باشند (گودرزی و اوحدی، ۱۳۹۰; Baik and Lee, 2010). شناسایی خاک‌های واگرا در دو مرحله به شرح زیر انجام می‌شود.

- ۱- شناسایی خاک‌های واگرا در بررسی‌های محلی
- ۲- شناسایی خاک‌های واگرا با روش‌های آزمایشگاهی

مرحله اول شناسایی خاک‌های واگرا شامل بازدیدهای مقدماتی از محل و بررسی‌های اولیه زمین‌شناسی می‌باشد. در جاهائی که سطح زمین شیب نسبتاً تندی دارد شناسایی خاک‌های واگرا آسان‌تر است. در این مناطق، بر اثر بارندگی‌ها و فرسایش سریع بریدگی‌های عمیق و مشخصی در سطح زمین ایجاد می‌شود که اصلی‌ترین مشخصه صحرایی این خاک‌ها می‌باشد. طی بازدیدهای صحرایی که از منطقه مورد مطالعه صورت گرفت، نمونه‌هایی از این عوارض مورفولوژیکی در منطقه مشاهده شد. شکل ۶ نمونه‌ای از این بریدگی‌ها را نشان می‌دهد.



ب



الف

شکل ۶. وجود بریدگی‌های عمیق و مشخص در روی دامنه‌های لسی که از شواهد و آگرایی خاک‌ها می‌باشد (موقعیت عکس (الف) "۴۸' ۴۵° ۵۵ طول شرقی و "۳۹' ۴۵° ۳۷ عرض شمالی. موقعیت عکس (ب) "۳۰' ۹° ۵۵ طول شرقی "۲۰' ۲۹° ۳۷ عرض شمالی).

جدول ۶. نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه

شماره نمونه	درصد ذرات ریزتر از ۵ میکرون بدون اضافه کردن ماده پراکنده‌ساز	درصد ذرات ریزتر از ۵ میکرون با اضافه کردن ماده پراکنده‌ساز	نتیجه آزمایش
۱	صفر	۳۹/۷۴	غیر واگرا
۲	صفر	۳۷/۶۸	غیر واگرا
۳	صفر	۳۷/۱۲	غیر واگرا
۴	صفر	۵۹/۴۵	غیر واگرا
۵	صفر	۴۲/۴۳	غیر واگرا
۶	صفر	۳۲/۶۴	غیر واگرا
۷	صفر	۳۷/۶۸	غیر واگرا
۹	صفر	۷۵/۱۵	غیر واگرا
۱۰	صفر	۳۴/۳۷	غیر واگرا
۱۱	صفر	۳۵/۷۷	غیر واگرا

اما در نمونه‌های غیر واگرا، آب مذکور، زلال و شفاف است. مقایسه نتایج آزمایش‌های مختلفی که تاکنون برای شناسایی خاک‌های واگرا عرضه شد، با آب شستگی‌های مشاهده شده در طبیعت، نشان داده است که نتایج آزمایش پین‌هول در اکثر موارد با مشاهدات مذکور هماهنگ بوده است. شرح دقیق این آزمایش در استاندارد ASTM ۴۶۴۷-۸۷ آمده است. این آزمایش به سه روش انجام می‌شود: روش A، روش B و روش C. در روش A که مبنای انجام آزمایش در این تحقیق نیز بوده، خاک‌ها از نظر واگرایی به ۶ رده تقسیم می‌شوند:

D_1 و D_2 : واگرا.

ND_3 و ND_4 : کمی تا اندازه‌ای واگرا.

ND_1 و ND_2 : غیر واگرا.

نتایج آزمایش پین‌هول، این خاک‌ها را کمی واگرا و در بعضی

می‌شود ولی در اینجا چون درصد ذرات ریزتر از ۰/۰۰۵ میلی‌متر مد نظر است و همچنین درصد ذرات مانده بر روی الک ۲۰۰ در همه نمونه‌ها کمتر از ۸ درصد است، از الک ۲۰۰ استفاده شده است. نتایج این آزمایش در جدول ۶ ارائه شده است.

آزمایش پین هول (Pinhole)

آزمایش پین هول را معتبرترین آزمایش برای تعیین واگرایی خاک می‌دانند. این آزمایش را (Sherard et al., 1972) ابداع کردند و نتایج حاصل از آن را طی مقاله در سال ۱۹۷۶ ارائه دادند. در این آزمایش با ایجاد یک جریان آب از داخل سوارخی که در وسط نمونه ایجاد شده میزان واگرایی خاک‌های ریز دانه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. آبی که از داخل نمونه خاک‌های واگرا خارج می‌شود کدر و دارای ذرات معلق کلوئیدی است،

جدول ۷. نتایج آزمایش کرامب (Crumb).

شماره نمونه	نتایج آزمایش کرامب	شماره نمونه	نتایج آزمایش کرامب
۱	غیر واگرا	۸	غیر واگرا
۲	غیر واگرا	۹	غیر واگرا
۳	غیر واگرا	۱۰	غیر واگرا
۴	غیر واگرا	۱۱	غیر واگرا
۵	غیر واگرا	۱۲	غیر واگرا
۶	غیر واگرا	۱۳	غیر واگرا
۷	غیر واگرا	۱۴	غیر واگرا

۳- جدا شدن ذرات انبوه شده خاک به درون جریان آب به علت آزاد شدن تنش‌های موئینگی در خاک‌های غیر اشباع. این ذرات به سرعت در درون آب وارد شده، ته‌نشین می‌شوند. بنابراین از سه مکانیسمی که باعث فرسایش خاک در آزمایش پین‌هول می‌شوند دو مکانیسم آن ناشی از عواملی غیر از حضور سدیم در خاک می‌باشد. همان‌طور که در بالا ذکر گردید مشخصه خاک‌های واگرای سدیم‌دار بیشتر رنگ تیره آب خارج شده و میزان آب خارج شده از دستگاه پین‌هول می‌باشد. از مشخصات دو مکانیسم فرسایش دیگر، ته‌نشست سریع ذرات وارد شده به درون ظرف جمع‌آوری آب و میزان آب خارج شده از دستگاه پین‌هول می‌باشد. بنابراین قسمت‌های پایینی ظرف جمع‌آوری آب، رنگ کاملاً تیره‌ای را از خود نشان می‌دهد در حالی که قسمت‌های بالای ظرف، رنگ روشن‌تری دارد. این وضعیت در طی آزمایش‌های انجام شده به وضوح مشاهده شد. همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود، تفاوت رنگ در قسمت‌های بالایی و پایینی ظرف جمع‌آوری آب در آزمایش پین‌هول کاملاً مشخص است. همچنین می‌توان تیرگی ته‌نشست لایه‌ای از ذرات را در ته ظرف مشاهده کرد. بنابراین نتایج به‌دست آمده در آزمایش پین‌هول ناشی از واگرایی فیزیکی شیمیایی نبوده و یک پدیده کاملاً مکانیکی است.

با توجه به نرخ رسوب‌دهی به‌دست آمده برای خاک‌های لسی بر اساس مدل EPM و نتایج آزمایش پین‌هول، خاک‌های لسی

نمونه‌ها نیز غیر واگرا نشان می‌دهد. جدول ۸ نتایج آزمایش‌های پین‌هول را نشان می‌دهد.

نتایج آزمایش‌های کرامب و هیدرومتری دوگانه که اساساً بر پایه واگرایی شیمیایی (واگرایی ناشی از حضور سدیم) خاک می‌باشد این خاک‌ها را کاملاً غیر واگرا نشان می‌دهد در حالی که آزمایش پین‌هول که نتایج آن هم بر پایه واگرایی شیمیایی و هم واگرایی مکانیکی است بعضی از نمونه‌های آزمایش شده را کمی تا اندازه‌ای واگرا نشان می‌دهد. در تجزیه و تحلیل تفاوت بین نتایج آزمایش‌های هیدرومتری دوگانه و کرامب با آزمایش پین‌هول می‌توان از نحوه فرسایش خاک در آزمایش پین‌هول استفاده کرد.

به طور کلی سه مکانیسم مختلف برای فرسایش در آزمایش پین‌هول وجود دارد (رحیمی، ۱۳۸۱):

۱- فرسایش عادی: تنش‌های برشی ناشی از جریان آب باعث فرسایش ذرات خاک اطراف سوراخ می‌شود. این فرسایش بیشتر زمانی اتفاق می‌افتد که خاک مورد آزمایش رس لای‌دار و یا خاک‌های لای‌دار باشد. این نوع فرسایش به وسیله غلظت زیاد ذراتی که به سرعت در ظرف اندازه‌گیری آب خروجی ته‌نشین می‌شوند، مشخص می‌شود.

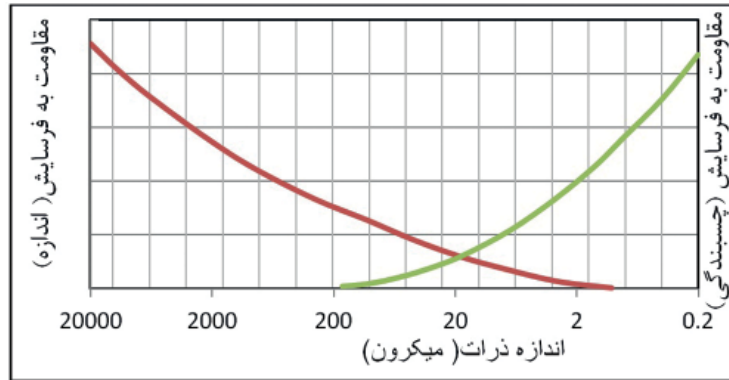
۲- فرسایش ناشی از نیروی دافعه کاتیون‌های سدیم در آب منفذی که همان پدیده واگرایی است. مهم‌ترین مشخصه فرسایش رس‌های واگرا در آزمایش پین‌هول رنگ کلوتیدی آب است.

جدول ۸. نتایج آزمایش پین‌هول انجام شده بر روی نمونه‌های دست نخورده.

شماره نمونه	رده خاک	شدت واگرایی
۶	ND3	کمی تا اندازه‌ای واگرا
۷	ND3	کمی تا اندازه‌ای واگرا
۹	ND2	غیر واگرا
۱۲	ND2	غیر واگرا
۱۳	ND3	کمی تا اندازه‌ای واگرا



شکل ۷. تفاوت رنگ آب جمع شده در ظرف جمع‌آوری آب و همچنین ته‌نشست لایه‌ای از رسوبات در ته ظرف در آزمایش پین‌هول (Pinhole).



شکل ۸. طرح کلی نقش اندازه ذرات و چسبندگی آن‌ها از نظر مقاومت خاک در برابر فرسایش آبی (رفاهی، ۱۳۸۸)

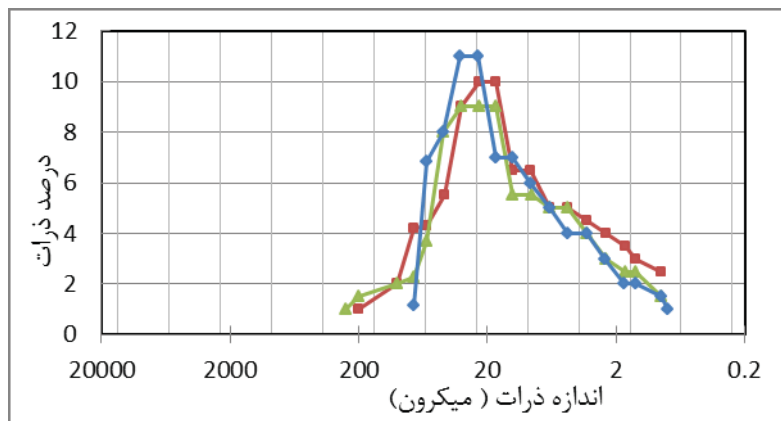
مقاومت آن‌ها به دلایل متفاوتی است (رفاهی، ۱۳۸۸). مواد شنی به این دلیل در برابر فرسایش مقاوم هستند که ذرات آن‌ها از نظر انتقال خیلی درشت است و به راحتی منتقل نمی‌شوند، همچنین به دلیل این‌که سبب افزایش نفوذپذیری خاک می‌گردند، آبدوی و در نتیجه قابلیت فرسایش کاهش می‌یابد. مقاومت خاک‌های رسی در برابر فرسایش به علت چسبندگی کانی‌های رسی است که باعث می‌شود ذرات رس قابلیت جداشدگی بسیار پایینی را از خود نشان دهند. البته در مواردی که رس در اثر حرارت شکافته می‌شود و یا در مواردی که مواد آلی آن کم است، از مقاومت آن در برابر عوامل فرسایش کاسته می‌شود.

نقش اندازه ذره و چسبندگی آن از نظر مقاومت در برابر فرسایش آبی به‌طور قیاسی در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۸ ملاحظه می‌شود ذراتی در اندازه (۴-۲۰۰) در محدوده‌ای قرار می‌گیرند که مقاومت در برابر فرسایش، هم از نظر اندازه و هم از نظر چسبندگی نسبتاً کم است و کم‌ترین مقاومت در برابر فرسایش را از خود نشان می‌دهند. شکل ۹ درصد هر رده از ذرات خاک در نمونه‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این نمودار دیده می‌شود بیشترین درصد ذرات در اندازه‌ای بین ۱۰ تا ۶۰ میکرون قرار دارد و این اندازه کم‌ترین مقاومت را در برابر فرسایش از خود نشان می‌دهد.

بنابراین با توجه به نتایج آزمایش‌های پین‌هول، هیدرومتری دوگانه، کرامب و آزمایش دانه‌بندی خاک، فرسایش‌پذیری بالای

از فرسایش‌پذیری بسیار بالایی برخوردارند. در توجیه این امر می‌توان از تأثیر دانه‌بندی و بافت خاک بر روی فرسایش‌پذیری خاک استفاده کرد. به عقیده بسیاری از دانشمندان بین مقدار سیلت خاک و فرسایش‌پذیری آن ارتباط نزدیکی وجود دارد. هر چه مقدار سیلت خاک بیشتر باشد فرسایش‌پذیری آن افزایش می‌یابد، زیرا سیلت فاقد چسبندگی است. البته باید در نظر داشت که خاک‌های سیلتي معمولاً خوب دانه‌بندی می‌شوند، ولی در اثر مرطوب شدن، خاک‌دانه‌ها به سهولت شکسته و ذرات سیلت جدا و منتقل می‌شود (رفاهی، ۱۳۸۸). خاک‌هایی که دارای ۴۰ تا ۶۰ درصد سیلت می‌باشند، فرسایش‌پذیرترین نوع خاک‌ها به شمار می‌روند (Richter and Negendank, 1977). ارتباط بین درصد سیلت خاک و میزان فرسایش‌پذیری تحت تأثیر درصد مواد آلی و درصد رس خاک می‌باشد. بین دو خاک با میزان سیلت برابر ولی مواد آلی و رس متفاوت خاکی که میزان مواد آلی و رس بیشتری دارد، کمتر فرسایش‌پذیر است (رفاهی، ۱۳۸۸).

قابلیت جدا شدن ذرات و قابلیت انتقال آن‌ها از پارامترهای موثر در فرسایش‌پذیری خاک بوده و در خاک‌های مختلف متفاوت است. معمولاً هر چه اندازه ذره درشت‌تر باشد قابلیت جدا شدن آن بیشتر است، برای نمونه ذرات شن آسان‌تر از ذرات ریز رس جدا می‌شوند ولی قابلیت انتقال آن‌ها کمتر از ذرات رس می‌باشد. هر چه اندازه ریزتر باشد قابلیت انتقال آن‌ها بیشتر است. بنابراین ذرات رسی آسان‌تر از ذرات شن انتقال می‌یابند در واقع معمولاً مواد شنی و رسی در برابر فرسایش آبی نسبتاً مقاوم هستند ولی



شکل ۹. نمونه‌ای از نتایج آزمایش دانه‌بندی خاک‌های لسی که به‌صورت درصد واقعی هر رده خاک ارائه شده است.

فرسایش شیمیایی که به علت بودن درصد ذرات سیلت می‌باشد که در برابر فرسایش آبی پایین‌ترین مقاومت را دارند و به علت حضور سدیم در نهشته‌های لسی نیست که نحوه تجمع سدیم در این خاک‌ها خود یک سوال اساسی است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق ابتدا خصوصیات شاخص و پایه‌ای خاک‌های لسی شمال کلاله تعیین و سپس به بررسی پدیده رمنبندی و فرسایش‌پذیری این خاک‌ها و عوامل موثر بر آن پرداخته شد. به‌طور کلی می‌توان نتایج زیر را از این تحقیق برداشت نمود:

۱- خاک‌های لسی شمال کلاله جزو لس‌های رسی می‌باشد و در طبقه‌بندی یونیفاید در گروه CL و ML قرار می‌گیرند. ترکیب دانه‌بندی آن‌ها به طور متوسط شامل ۶۲ درصد سیلت، ۳۴ رس و ۴ درصد ماسه می‌باشد.

۲- بر مبنای طبقه‌بندی کلونجر برای خاک‌های لسی این خاک‌ها در گروه لس رسی و لس سیلتی قرار می‌گیرند.

۳- درصد کربنات کلسیم موجود در این خاک‌ها از ۱۲ تا ۲۲ درصد متغیر است.

۴- از نظر خصوصیات خمیری، لس‌های این منطقه جزو خاک‌های با خاصیت خمیری کم می‌باشند. حد خمیری این خاک‌ها از ۱۶/۲ تا ۲۶/۸ درصد و حد روانی این خاک‌ها از ۲۷/۳ تا ۴۱/۷ درصد متغیر می‌باشد.

۵- لس‌ها در حالت خشک از مقاومت بالایی برخوردارند ولی در حالت اشباع مقاومت بسیار کمی دارند. میزان چسبندگی به‌دست آمده برای اکثر نمونه‌ها نزدیک به صفر می‌باشد. زاویه اصطکاک داخلی نیز از ۱۵ تا ۲۵ درجه متغیر است. به نظر می‌رسد کاهش چسبندگی خاک به علت از بین رفتن نیروی موئینگی ناشی از اشباع شدن باشد و کاهش زاویه اصطکاک داخلی به علت به وجود آمدن شرایط لغزنده برای کانی‌های رسی که بین دانه‌های سیلت قرار گرفته‌اند، باشد.

۶- معیار مورد استفاده جهت ارزیابی رمنبندی در این تحقیق نشان می‌دهد که خاک‌های لسی شمال کلاله مستعد پدیده رمنبندی می‌باشد و در صورت بارگذاری و اشباع شدن ممکن است دچار رمنبندی شوند.

۷- نتایج آزمایش‌های هیدرومتری دوگانه و کرامب این خاک‌ها را غیر واگرا نشان می‌دهند، در حالی‌که نتایج آزمایش پین‌هول برای اغلب نمونه‌ها این خاک‌ها را کمی تا اندازه‌ای واگرا نشان می‌دهد. آزمایش‌های کرامب و هیدرومتری دوگانه بیشتر واگرایی شیمیایی را نشان می‌دهند در حالی‌که نتایج آزمایش پین‌هول بر پایه هر دو فرسایش مکانیکی و شیمیایی استوار می‌باشد. هر چند آزمایش‌های شیمیایی تعیین سدیم در لس‌ها انجام نشده لیکن با توجه به مشاهدات ثبت شده در طی آزمایش پین‌هول، از جمله ته‌نشست سریع رسوبات و تفاوت رنگ قسمت‌های بالا و پایین ظرف جمع‌آوری آب به نظر می‌رسد که عامل اصلی فرسایش رسوبات در آزمایش پین‌هول فرسایش مکانیکی می‌باشد و نه

منابع

- پاشایی، ع.، ۱۳۷۶. بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و چگونگی خاستگاه رسوب‌های لسی در منطقه گرگان و دشت. ۲۳-۲۴.

- جعفری اردکانی، ع.، بیات، ر.، پیروان، ح.ر.، شریعت جعفری، م. و چرخایی، ا.ح.، ۱۳۸۸. بررسی وضعیت فرسایش و رسوب در نهشته‌های لسی استان گلستان. ششمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۱۷۳-۱۱۶۱.

- خواجه، م.، ۱۳۸۱. بررسی رسوب‌شناسی، محیط رسوبی و رسوب‌زایی نهشته‌های کواترنر حوضه گرگانرود. رساله دکتری زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات.

- خواجه، م.، غیومیان، ج. و فیض‌نیا، س.، ۱۳۸۳. بررسی تغییرات جانبی اندازه ذرات و کانی‌شناسی به منظور تعیین بادهای غالب در تشکیل رسوبات لس استان گلستان. نشریه بیابان، ۹، ۳۰۶-۲۹۳.

- دفتر مطالعات پایه منابع آب ایران، ۱۳۸۷. گزارش بهنگام‌سازی (تلفیق مطالعات منابع آب حوزه آبریز رودخانه‌های قره‌سو- گرگان رود).

- رحیمی، ا.، ۱۳۸۱. بررسی علل فرسایش خاک در دشت سیستان از دیدگاه زمین‌شناسی مهندسی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

- رفاهی، ح.، ۱۳۸۸. فرسایش آبی و کنترل آن. انتشارات دانشگاه تهران، چاپ ششم. ۵۶۸.

- شفیع‌ی، ع.، ۱۳۸۱. مطالعه ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های رمنبده در ایران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا.

- قبادی، م.ح.، ۱۳۸۵. مبانی زمین‌شناسی مهندسی (ویژه دانشجویان زمین‌شناسی)، دانشگاه بوعلی سینا.

- گودرزی، ا.ر. و اوحدی و.ر.، ۱۳۹۰. تأثیر نوع آنیون بر قابلیت واگرایی و خصوصیات مهندسی رس مونت‌موریونیت. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

- Ali, M.M., 2011. Identifying and analyzing problematic soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29, 343-350.

- American Society for Testing Materials, 1999, *Annual Book of ASTM Standard*, 04. 08.

- Baecher, G.B. and Christian, J.T., 2003. *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. John Wiley and Sons, London and New York. 618.

- Baik, M.H. and Lee, S.Y., 2010. Colloidal stability of bentonite clay considering surface charge properties as a function of PH and Ionic strength, *Industrial and Engineering Chemistry*, 16, 837-841.
- Bell, F.G., 2002. *Engineering Properties of Soils and Rocks*. 3rd ed Oxford, U.K. Butter Worth-Heinemann, 496.
- Clevenger, W.A., 1958. Experiences with loess as a foundation material. *Transactions American Society for Civil Engineers*, 123, 51-80.
- Day, R.W., 2001. *Soil Testing Manual*. Mac Graw Hill, 618.
- Derbyshire, E., Meng, X.M., Wang, J.T., Zhou, Z.Q., and Li, B.X., 1995. Collapse loess on the loess Plateau of China. Genesis and properties of collapsible soils. Kluwer Academic publishers. 267- 293.
- Fedá, J., 1996. Structural stability of subsident loess soils from Praha-Dejvice. *Engineering Geology*, 39, 201-219.
- Fernando, J., 2010. Effect of water quality on the dispersive characteristics of soils found in the Morwell area, Victoria, Australia. *Geotechnical and Geological Engineering*, 28, 835-850.
- Ghazinoor, A., 1990. Piping failure in earth dams, caused by dispersive clay. *Proceedings of the first international seminar on soil mechanics and foundation of Iran*, 328- 335.
- Grabowska- Olzewska, B., 1988. Engineering geological problems of loess in Poland. *Engineering Geology*, 25, 177- 199.
- Hormdeh, D. and Thailand, k.k., 2008. Investigation on collapse potential of loess soil. *Proceeding of the Eighteenth International Offshore and polar Engineering Conference Vancouver, BC, Canada*.
- Jennings, J.E. and Kinght, 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 and foundation engineering, Durban, South Africa, September, 99 -105.
- Khalifa, B., Salah, L.M. and Farid, M., 2010. Prediction of collapsible soils by cone penetrometer and ultrasonic tests. *Studia geotechnical et mechanica*, 32, 3-21.
- Miao, T., 2001. Present status of collapse deformation mechanism of loess. *Engineering and research on collapsible loess*, Luo yusheng, wang Guolie, ed. China Architecture press, Beijing, 73- 82.
- Mansour, Z., Chik. Z., and Taha, M.R., 2008. On soil collapse potential evaluation. *international conference on construction and building technology*, 3, 21- 32.
- Nouaouria, M.S., Guenfoud, M. and Lafifi, B., 2008. Engineering properties of loess in Algeria. *Engineering Geology*, 99, 85-90.
- Pecci, M., 1990. Loess is not just accumulation of airborne dust. *Quaternary International*, 7/8, 1- 21.
- Rafie, B.M.A., Ziaie Moayed. R., and Esmaeli. M., 2008. Evaluation of soil collapsibility potential: A, case study of Semnan Railway Station. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 13, bund.G.
- Reznik, Y.M., 2000. Engineering approach to interpretation of oedometer tests performed on collapsible soils. *Engineering geology* , 57, 205- 213.
- Richter, G. and Negendank, J.F.W., 1977. Soil erosion processes and their measurement in the german area of the moselle river. *Earth surface processes*, 2, 261- 278.
- Rogers, C.D.F., Dijkstra, T.A. and Smalley, I.J., 1994. Hydroconsolidation and subsidence of loess: studies from China, Russia, North America and Europe. *Engineering Geology*, 37, 83-113.
- Sherard, J.L., Dunnigan, L.P. and Decker, R.S., 1976. Identification and nature of dispersive soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 102, 4, 287-301.
- Sherard. J.L., Ryker. N.L., and Decker. R.S., 1972. Piping in Earth dam of dispersive clay. *Proceeding of specialty conference on performance of earth and earth supported structures*, 1 , 1, 584- 626.
- Yildiz, N., Sarikaya, Y. and Calimli, A., 1999. The Effect of the electrolyte concentration and pH on the rheological properties of the original and the Na₂CO₃ - Activated Kütahya bentonite. *Applied Clay Sciences*, 14, 319-327.
- Yuan, Z.X. and Wang, L.M., 2009. Collapsibility and seismic settlement of loess. *Engineering Geology*, 105, 119 – 123.