

بررسی خصوصیات مهندسی خاک‌های شهر کرمان و عوامل مؤثر بر میزان رمبندگی آن‌ها

ایمان آقاملایی، غلامرضا لشکری‌پور*، محمد غفوری، ناصر حافظی مقدس؛

دانشگاه فردوسی مشهد، گروه زمین‌شناسی مهندسی

پذیرش ۹۶/۰۷/۰۲

تاریخ: دریافت ۹۶/۰۱/۱۶

چکیده

خاک‌های رمبند به‌طور گسترده‌ای در نواحی خشک و نیمه‌خشک در سراسر دنیا توزیع شده و حدود ۱۰٪ از مساحت کل خشکی‌های زمین را تشکیل می‌دهند. این خاک‌ها به‌طور معمول ساختار لانه زنبوری نیمه‌پایدار دارند که مستعد کاهش حجم زیاد یا ریش، به محض مرطوب شدن است. در این پژوهش برای تعیین خصوصیات مهندسی نهشته‌های شهر کرمان علاوه بر گردآوری اطلاعات ژئوتکنیکی موجود، از ۵۰ نقطه در سطح شهر نمونه‌گیری انجام شده است. پراکنش نقاط به‌گونه‌ای طراحی شده که پوشش قابل قبولی در سطح شهر داشته باشند. برای تعیین نوع کانی‌ها و همچنین بررسی ساختار خاک و نحوه آرایش دانه‌ها به ترتیب از روش XRD و تصاویر میکروسکوپ الکترونی استفاده شد. در بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌هایی که میزان رمبندگی زیادی نشان می‌دهند، ساختار باز و منافذ بین‌دانه‌ای دارند. در بخش‌های مرکزی شهر دانه‌های خاک عموماً دارای اتصال گوشه به گوشه است و در ساختار آن‌ها نظم مشخصی دیده نمی‌شود و آرایش ذرات تصادفی و بی‌نظم است و رمبندگی کمی نشان می‌دهند. علاوه بر نحوه آرایش دانه‌ها در برخی نمونه‌ها وجود مواد انحلال‌پذیر از جمله بلورهای ژیس و نمک نقش مهمی در میزان رمبندگی خاک ایفا می‌کنند. برای ارزیابی پتانسیل رمبندگی از معیارهای دنیسف، هولتز و هیلف، آیین‌نامه ساختمانی روسیه و آیین‌نامه ASTM که متداول‌ترند، استفاده شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده خاک‌های شهر کرمان عمدتاً در محدوده خاک‌های با رمبندگی متوسط قرار می‌گیرند.

واژه‌های کلیدی: خاک‌های رمبند، لس، تصاویر میکروسکوپ الکترونی، شهر کرمان

مقدمه

خاک‌های رمبنده از جمله خاک‌های مسئله‌دار هستند. این نشته‌ها عموماً دارای منشأ بادی یا لس هستند و حدود ۱۰٪ از مساحت کل خشکی‌های زمین را تشکیل می‌دهند. چندین کشور از جمله چین، روسیه، ایالات متحده، فرانسه، آلمان، نیوزلند و آرژانتین نواحی وسیعی از نشته‌های خاک‌های رمبنده را دارند [۱]-[۶]. این خاک‌ها معمولاً با ساختاری لانه زنبوری نیمه‌پایدار شکل گرفته‌اند و بسیار مستعد تغییرات ناگهانی کاهش حجم در اثر مرطوب شدن هستند [۷]، [۸]، [۹]. هر نوع خاک متراکم شده با مقدار رطوبتی کم‌تر از رطوبت بهینه در طبیعت تا حدی رمبنده است [۱۰]، [۱۱]، [۱۲].

رمبندگی و دیگر مسائل مرتبط مانند نشست‌های متفاوت، ترک‌های زمین و ریزش‌ها، باعث آسیب‌های جدی به زیر ساخت‌های اجرا شده روی این خاک‌ها شده‌اند [۱۳]، [۱۴]، [۱۵]. با افزایش توسعه شهرها در مناطق مختلف جهان احتمال ساخت و ساز بر این نوع خاک و در نتیجه دسترسی آب برای این خاک‌ها بیش‌تر می‌شود که نتیجه آن افزایش رطوبت و فروریزش این خاک‌ها را در پی دارد. بنابراین بررسی رفتار این نوع از خاک‌ها بسیار مهم است [۱۶].

طی شش دهه گذشته محققان زیادی بر مطالعه مکانیسم رمبش خاک‌های رمبنده در اثر مرطوب شدن تحقیق کرده‌اند. بحث‌ها روی این موضوع در سه دسته، روش‌های سنتی، بررسی ساختار خاک و روش‌های مبتنی بر مکانیک خاک خلاصه شده است. در میان روش‌های سنتی رمبندگی همیشه با توجه به یک عامل تنها تفسیر شده است. به‌عنوان مثال رمبندگی به کاهش کشش مویینه یا انحلال املاح انحلال‌پذیر نسبت داده شده است [۱۷]. علاوه بر این محققان زیادی تأثیر خصوصیات خاک مانند دانسیته، مقدار رس، حدود ات‌برگ و توزیع اندازه دانه‌ها روی رمبندگی خاک‌های لسی را بررسی کرده‌اند [۱۸]، [۱۹]، [۲۰]. و روابط تجربی زیادی در ارتباط با خاک‌های رمبنده ارائه شده است [۲۱]-[۲۵] این روابط تجربی تنها برای خاک‌های محلی که این روابط بر اساس خصوصیات آن‌ها توسعه یافته قابل تعمیم است. به‌عبارت دیگر روابط تجربی پیشنهاد شده دارای اعتبار جهانی برای استفاده در

مهندسی ژئوتکنیک نیستند [۲۶]. این موضوع به دلیل شکل‌های میکروساختاری خاک‌هاست که علیرغم داشتن خصوصیات فیزیکی مشابه رفتار مکانیکی متفاوتی ارائه می‌دهند. به عنوان مثال یک خاک رمبنده با تعدادی حفره بزرگ ممکن است همان نسبت پوکی یا دانسیته را داشته باشد که خاک رمبنده حفرات ریز بسیار زیاد دارد، ولی رفتارهای رمبندگی آنها به طور چشم‌گیری متفاوت است. ماهیت فروپاشی لس‌ها و خاک‌های دیگر با استفاده از اطلاعات میکروساختاری به خوبی توجیه شده است [۲۷]، [۲۸]، [۲۹]. ساختار خاک رمبنده را می‌توان بر اساس پژوهش‌های جامع روی میکروساختار خاک‌های رمبنده در قالب چهار عامل کلیدی و در عین حال مرتبط به هم شامل الگوی ذرات، تماس ذرات، فرم منافذ و پیوند یا اتصال مواد بررسی کرد. فرم منافذ و اتصال مواد به عنوان دو عامل که تأثیر بیش‌تری روی رفتار رمبندگی دارند پیشنهاد شده‌اند. محققان بسیاری در زمینه اتصال مواد و طبقه‌بندی منافذ خاک و اثر این عامل‌ها در رمبندگی تحقیق کرده‌اند [۲۷]، [۳۰]، [۳۱]، [۳۲]. و به طور گسترده‌ای پذیرفته شده است که میکروساختار نقش کلیدی در کنترل رفتار رمبندگی بازی می‌کند، با این حال فاقد یک توصیف‌گر کمی ساده برای برآورد تغییر شکل‌های رمبندگی است [۳۳]. این محدودیت در سال‌های اخیر با گسترش تکنیک‌های پردازش تصویر که تجزیه و تحلیل کمی ساختار خاک را تسهیل کرده‌اند تا حد زیادی کاهش یافته است [۳۴]. این برنامه‌های پردازش تصویر نتایج منطقی رضایت بخشی به‌ویژه برای خاک‌های درشت‌دانه ارائه می‌دهند. فو (۲۰۱۱) نشان داد که تشخیص دقیق دانه‌ها و اندازه منافذ از تصاویر دیجیتال با استفاده از برنامه‌هایی که در حال حاضر در دسترس است دشوار است [۳۵].

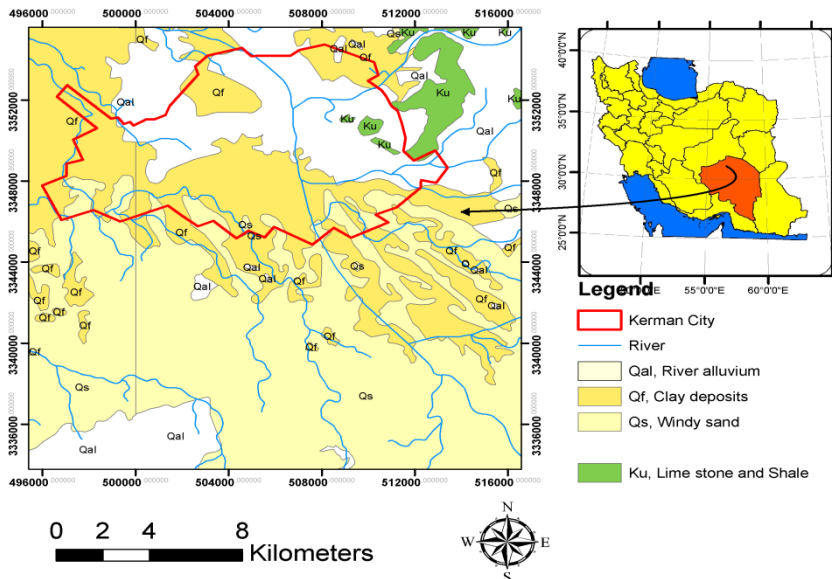
دسته سوم روش‌های مطالعاتی استفاده از مفاهیم مکانیک خاک برای شرح رفتار رمبندگی است. خاک‌های رمبنده به طور معمول غیراشباع هستند و قبل از رسیدن به شرایط کاملاً اشباع به طور چشم‌گیری فروپاشیده می‌شوند [۳۶]. به همین دلیل مفاهیم مکانیک خاک برای تفسیر رفتار رمبندگی خاک‌های غیراشباع گویاترند [۱۲]، [۳۷]، [۳۸]. رمبندگی به از دست رفتن مقاومت در ارتباط با کاهش مکش در نتیجه مرطوب شدن نسبت داده شده است [۳۹]. به همین دلیل رفتار فروپاشی (رمبندگی) به طور گسترده‌ای با استفاده از آزمایش‌های مکش

بررسی شده است [۴۰]. بر اساس آن مدل‌های متفاوت با توجه به متغیرهای حالت تنش مختلف (varying stress state variable) برای مدل‌سازی رفتار رمبندگی پیشنهاد شده است [۳۹]، [۴۰]. در طول ربع قرن گذشته، تعدادی از مدل‌های الاستوپلاستیک برای مدل‌سازی رفتار خاک‌های غیراشباع توسعه یافته است [۳۳]، [۴۱]. این مدل‌ها برای تفسیر رفتار تغییر حجم خاک‌های رمبند توسعه یافته یا اصلاح شده‌اند [۱۱]. در این مدل‌ها رمبندگی به‌عنوان بخشی از تغییر شکل در شرایطی که مسیر تنش از ناحیه الاستیک عبور می‌کند شرح داده شده است. در این پژوهش به ارزیابی پدیده رمبندگی و عوامل مؤثر بر آن در خاک‌های شهر کرمان پرداخته شده است.

زمین‌شناسی شهر کرمان

شهر کرمان با ارتفاع ۱۷۵۰ تا ۱۸۰۰ متر از سطح دریا در حاشیه شمالی دشت کرمان واقع شده است و بخشی از گستره آن را کفه‌های نمکی یا پلاهای سیلنتی-رسی می‌پوشانند. رسوبات نهشته شده در محدوده شهر کرمان عموماً ریزدانه است و متأثر از سرنوشت زمین‌شناسی و مدل رسوبی حوضه شهر کرمان هستند. این حوضه از دیدگاه تکتونیکی و ساختاری در زون ایران مرکزی جای دارد. از ویژگی‌های بسیار جالب این منطقه وجود توالی نسبتاً کاملی از سنگ‌های رسوبی است که محدوده سنی پروتروزوئیک فوقانی - کامبرین زیرین تا اواخر کواترنر را شامل می‌شوند (شکل ۱). بررسی این توالی‌های رسوبی و تغییرات جانبی آن‌ها نشان می‌دهد که محدوده بررسی شده در این دوران طولانی همواره در جنب و جوش تکتونیکی است و فازهای کوهزایی متعددی را در خود ثبت کرده است. دشت کرمان، یک چاله تکتونیکی از نوع گرابن فشاری است به‌گونه‌ای که تحت تأثیر حرکت گسل‌های معکوس موجود در مرزکوه و دشت و بالا رفتن کوهستان ایجاد شده است [۴۲]. با توجه به مدل حوضه رسوبی کرمان شکل‌گیری دشت رسوبی کرمان در اواخر کواترنر اتفاق افتاده است. فرآیند تشکیل آن چنان‌که ذکر شد ناشی از عملکرد توأمان فعالیت‌های دینامیکی و ایجاد ساختمان زمین‌شناسی جوان و پر انرژی همراه با دوره‌های پر باران بین یخچالی در

منطقه کرمان طی دوره کواترنری بوده است. دشت کرمان در طول پلیستوسن که اشکوب اصلی کواترنر است به صورت حوضه‌ای بسته کم‌ژرفا دریافت‌کننده همه جریان‌های سیلابی صادره از زمین‌های مرتفع حواشی دشت بوده است. در بعضی از مقاطع زمانی کوتاه مانند دوره یخچالی وورم^۱، تقریباً صدمتر رسوب در چاله رسوبی کرمان نهشته شده و تحت فشار سربار اعمال شده از طرف لایه‌های رویی فشرده و تحکیم شده‌اند. شواهد زمین‌ریخت‌شناسی نشان می‌دهند در برخی مقاطع زمانی، شرایط محیط‌های تبخیری و دریاچه‌ای فصلی نیز حاکم بوده است و ذرات ریزدانه وارد محیط کم ژرفای دریاچه‌ای شده و در آب معلق شده‌اند تا به تدریج رسوب کنند. حوضه بسته رسوبی این شهر به علت جنبش‌های پر اهمیت پلیستوسن زبرین، شرایط حوضه بسته را از دست داده و به آرامی به سوی شمال و شمال باختری و دره زرند- کرمان شیب بر داشته است و حجم چشم‌گیری از رسوبات انباشته شده در دوره‌های قبل را از دست داده است [۴۲].



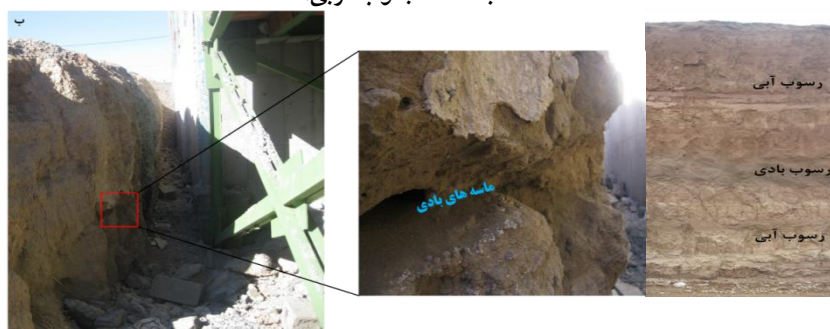
شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی محدوده شهر کرمان در این پژوهش

1. Würm glaciation

شواهد زمین‌شناختی نشان می‌دهد پس از خارج شدن دشت کرمان از شرایط حوضه بسته، پلایای دره کرمان-زرنند به تدریج در امتداد فرورفتگی بین دو رشته کوه ماهان - کوهبنان و باداموئیه - داوران به سوی شمال و شمال باختری تغییر مکان داده است. دشت کرمان از شروع هولوسن به بعد شاهد رسوب‌گذاری مهمی ناشی از فعالیت‌های سیلابی نبوده است و تنها عامل قابل اشاره فعالیت‌های بادی و رسوب‌گذاری بادی بوده است [۴۲]. بر اساس بازدیدهای انجام شده می‌توان اذعان داشت که در زمان‌های گذشته رسوبات بادی سطح وسیعی از شهر کرمان و اطراف آن را می‌پوشانده‌اند. مشاهد توالی رسوبات بادی و آبی در مجاور مسجد صاحب‌الزمان واقع در خیابان انتظار و همین‌طور در گودبرداری‌های انجام شده در بخش‌های مختلف شهر گواهی بر این موضوع است (شکل ۲ و ۳).



شکل ۲. توالی رسوبات بادی و آبی مجاور مسجد صاحب‌الزمان واقع در خیابان انتظار (دید به سمت جنوب‌غربی)



شکل ۳. توالی رسوبات بادی و آبی، الف) خیابان وصال (دید به سمت شرق)، ب) خیابان هلال احمر (دید به سمت شمال‌غربی)

مواد و روش‌ها

برای تعیین خصوصیات مهندسی نهشته‌های شهر کرمان و در راستای هدف این پژوهش ضمن گردآوری اطلاعات پیشین و با توجه به همگنی نسبی این خاک‌ها، پراکنش نقاط مربوط به اخذ نمونه و انجام آزمایش‌ها، به‌گونه‌ای طراحی شده که پوشش قابل قبولی در شهر کرمان داشته باشند برای این منظور در طول انجام این پژوهش تعداد ۵۰ نمونه دست نخورده از محل‌های جدید حفاری، تهیه شده و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن‌ها بررسی شد. برای تعیین نوع کانی‌ها و هم‌چنین بررسی ساختار خاک و نحوه آرایش دانه‌ها، تعداد ۱۲ نمونه انتخاب شده و به‌ترتیب از روش XRD و تصاویر میکروسکوپ الکترونی استفاده شده است.

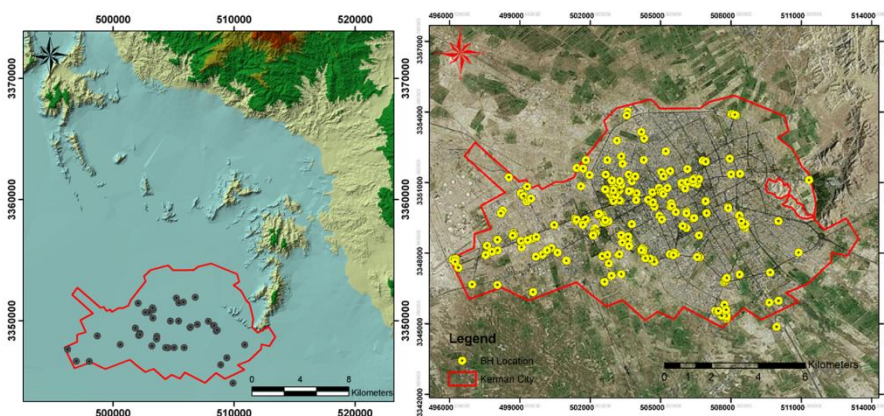
نتایج و بحث

خصوصیات مهندسی خاک‌های شهر کرمان

خصوصیات ژئوتکنیکی گردآوری شده از نهشته‌های دشت کرمان، شامل مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک هستند. این ویژگی‌ها از آزمایش‌های انجام شده در محل و یا آزمایش‌های آزمایشگاهی بر نمونه‌های دست‌خورده و دست‌نخورده، سطحی و تا عمق ۳۰ متری (تعداد کمی از گمانه‌ها تا عمق ۵۰ متری هم ادامه داشته‌اند) به‌دست آمده‌اند. نقشه پراکندگی گمانه‌های ژئوتکنیکی در سطح شهر و همین‌طور محل نمونه‌گیری‌ها در شکل ۴ و جدول ۱ نشان داده شده است. خصوصیات ژئوتکنیکی عمده نهشته‌های شهر در جدول ۲ نشان داده شده است. نسبت فراوانی کلاس‌های خاک بر اساس طبقه‌بندی متحد در شکل ۵ نشان داده شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده این رسوبات ریزدانه عموماً شامل دو گروه CL و CL-ML هستند. نتایج بررسی کانی‌شناسی خاک‌های شهر کرمان نشان می‌دهد که کانی‌های موجود در این نهشته‌ها عمدتاً شامل ایلیت، کلریت، اسمکتیت، هالوزیت، ایلیت-اسمکتیت، کلسیت، کوارتز و ژپس هستند. کانی‌های ایلیت، اسمکتیت و کلریت نسبت فراوانی تقریباً یک‌سان دارند و بخش عمده کانی‌های تشکیل دهنده رسوبات را همین کانی‌ها تشکیل می‌دهند (شکل ۶ الی ۹).

جدول ۱. موقعیت نقاط نمونه‌برداری شده

| شماره | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی | شماره | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی | شماره | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی |
|-------|---------------|---------------|-------|---------------|---------------|-------|---------------|---------------|
| ۱ | ۵۰۵۰۶۹ | ۳۳۴۷۷۸۱ | ۱۸ | ۵۰۴۹۱۵ | ۳۳۴۹۱۵۱ | ۳۵ | ۵۰۸۵۴۰ | ۳۳۴۹۱۴۲ |
| ۲ | ۵۰۸۶۱۵ | ۳۳۴۹۲۲۱ | ۱۹ | ۵۰۶۳۷۵ | ۳۳۴۹۴۵۲ | ۳۶ | ۴۹۸۷۰۳ | ۳۳۴۸۷۵۱ |
| ۳ | ۵۰۵۳۲۹ | ۳۳۵۱۸۷۴ | ۲۰ | ۴۹۶۲۵۰ | ۳۳۴۷۶۳۶ | ۳۷ | ۴۹۸۰۵۰ | ۳۳۴۶۶۵۰ |
| ۴ | ۵۰۸۳۳۱ | ۳۳۴۹۶۰۲ | ۲۱ | ۵۰۴۵۵۹ | ۳۳۴۷۷۵۹ | ۳۸ | ۵۰۰۶۰۷ | ۳۳۴۸۰۲۳ |
| ۵ | ۵۰۳۶۱۰ | ۳۳۴۸۴۸۷ | ۲۲ | ۵۰۶۹۴۷ | ۳۳۴۹۸۲۱ | ۳۹ | ۵۰۰۶۰۹ | ۳۳۴۸۰۲۴ |
| ۶ | ۵۰۹۳۰۳ | ۳۳۴۶۹۷۸ | ۲۳ | ۵۰۳۶۲۵ | ۳۳۴۸۷۰۶ | ۴۰ | ۵۰۵۴۲۵ | ۳۳۴۹۹۷۲ |
| ۷ | ۵۰۲۶۶۱ | ۳۳۵۱۳۳۱ | ۲۴ | ۵۰۶۷۹۶ | ۳۳۵۱۹۴۰ | ۴۱ | ۵۰۲۱۱۳ | ۳۳۴۸۸۰۰ |
| ۸ | ۵۱۰۸۸۳ | ۳۳۴۸۰۲۱ | ۲۵ | ۵۰۵۴۴۰ | ۳۳۵۱۴۷۲ | ۴۲ | ۵۰۲۹۸۱ | ۳۳۵۰۶۸۶ |
| ۹ | ۵۰۵۸۹۸ | ۳۳۴۷۷۴۳ | ۲۶ | ۵۰۴۱۰۳ | ۳۳۵۳۳۲۲ | ۴۳ | ۵۰۲۶۷۹ | ۳۳۵۰۷۰۰ |
| ۱۰ | ۵۰۸۶۱۳ | ۳۳۴۶۳۰۶ | ۲۷ | ۵۰۲۰۷۴ | ۳۳۵۱۴۴۱ | ۴۴ | ۵۰۳۳۰۲ | ۳۳۵۰۲۲۱ |
| ۱۱ | ۵۰۹۴۱۲ | ۳۳۴۶۹۴۸ | ۲۸ | ۵۰۳۲۶۶ | ۳۳۵۱۰۶۵ | ۴۵ | ۵۰۳۲۱۱ | ۳۳۴۷۹۳۰ |
| ۱۲ | ۵۰۸۹۰۹ | ۳۳۴۶۳۶۴ | ۲۹ | ۵۰۶۹۶۶ | ۳۳۴۹۷۰۰ | ۴۶ | ۵۰۲۲۳۷ | ۳۳۴۸۸۵۶ |
| ۱۳ | ۵۰۹۹۲۰ | ۳۳۴۴۸۵۰ | ۳۰ | ۵۰۳۳۳۳ | ۳۳۵۰۹۰۲ | ۴۷ | ۵۰۲۰۹۵ | ۳۳۴۹۴۷۵ |
| ۱۴ | ۵۰۵۸۷۸ | ۳۳۴۷۷۹۰ | ۳۱ | ۵۰۷۸۸۸ | ۳۳۴۹۹۶۶ | ۴۸ | ۵۰۶۴۰۹ | ۳۳۴۹۴۸۱ |
| ۱۵ | ۵۱۰۸۸۸ | ۳۳۴۸۰۱۲ | ۳۲ | ۵۰۴۲۱۶ | ۳۳۴۹۱۵۵ | ۴۹ | ۵۰۲۱۱۶ | ۳۳۴۸۹۲۸ |
| ۱۶ | ۵۰۸۳۶۴ | ۳۳۴۹۶۰۳ | ۳۳ | ۵۰۴۷۴۵ | ۳۳۴۹۹۷۶ | ۵۰ | ۵۰۱۸۵۰ | ۳۳۴۹۴۰۳ |
| ۱۷ | ۵۰۶۸۰۱ | ۳۳۵۱۹۳۲ | ۳۴ | ۵۰۵۸۱۱ | ۳۳۵۱۵۳۳ | | | |

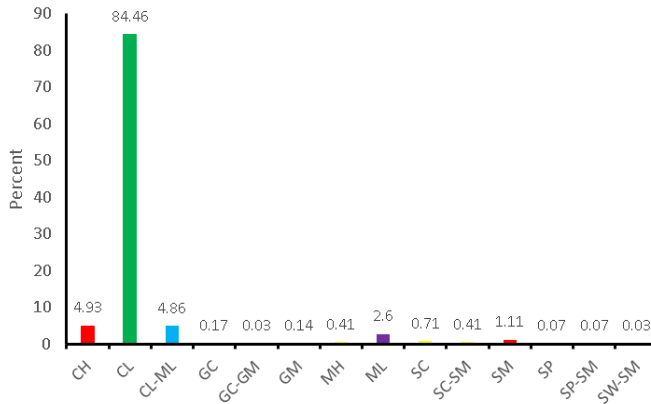


شکل ۴. الف) پراکندگی گمانه‌ها در سطح شهر، ب) موقعیت نقاط نمونه‌برداری جدید در این پژوهش

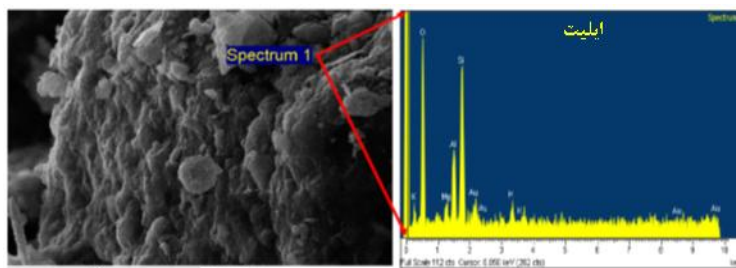
جدول ۲. پارامترهای آماری ویژگی‌های مهندسی خاک‌های شهر کرمان

| متغیر | تعداد | میانگین | میانه | مد | انحراف معیار | کم‌ترین | بیش‌ترین |
|----------------------------------|-------|---------|--------|--------|--------------|---------|----------|
| LL (%) | ۲۴۰۹ | ۳۵/۲۸۱ | ۳۴ | ۳۱ | ۷/۵۸۰ | ۱۵ | ۶۸ |
| PI (%) | ۲۳۸۳ | ۱۴/۶۶۳ | ۱۴ | ۱۲ | ۵/۹۱۴ | ۲ | ۴۰ |
| N(SPT) | ۲۰۶۹ | ۲۳/۱۲۸ | ۲۱ | ۱۹ | ۹/۱۳۰ | ۴ | ۶۲ |
| # 200 | ۱۹۷۴ | ۸۹/۱۸۸ | ۹۴ | ۹۹ | ۱۳/۴۳۵ | ۱۲ | ۱۰۰ |
| ω (%) | ۲۰۱۴ | ۲۰/۰۸ | ۲۰/۵ | ۲۴ | ۶/۳۶۳ | ۳ | ۳۹/۵ |
| γ_b (gr/cm ³) | ۷۱۱ | ۱/۸۳۹ | ۱/۸۵ | ۱/۹۱ | ۰/۱۳۶ | ۱/۳۳ | ۲/۳۴ |
| γ_d (gr/cm ³) | ۷۱۱ | ۱/۵۳۸ | ۱/۵۴ | ۱/۴۹ | ۰/۱۰۳ | ۱/۲۱ | ۱/۸۸ |
| Φ_D | ۳۶۰ | ۲۰/۸۶۴ | ۲۳/۲۰۰ | ۲۸/۰۰۰ | ۰/۸۰۷ | ۹/۰۰ | ۳۴/۰۰۰ |
| C_D | ۳۶۰ | ۰/۲۰۰ | ۰/۰۵۰ | ۰/۰۲۰ | ۰/۱۹۹ | ۰/۰۰۱ | ۰/۶۶۰ |
| $\Phi_{T \text{ axial}}$ (deg) | ۲۵۵ | ۴/۵ | ۳/۶ | ۲ | ۳/۲۹۱ | ۰ | ۱۶ |
| C_T (Kg/cm ²) | ۲۵۵ | ۰/۴۸۶ | ۰/۴۲ | ۰/۴۰ | ۰/۱۹۴ | ۰/۱۳ | ۰/۹۸ |
| C_C^* | ۴۶۰ | ۰/۱۹۱ | ۰/۱۸۹ | ۰/۱۴۹ | ۰/۰۷۹ | ۰ | ۰/۵۳۱ |
| C_S^{**} | ۴۶۰ | ۰/۰۲۳ | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۱۳ | ۰/۰۱۲ | ۰/۰۰۱ | ۰/۱۰۴ |

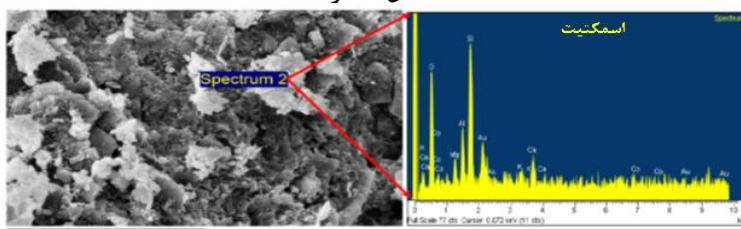
LL: حد روانی، PI: شاخص پلاستیسیته، N: عدد آزمایش نفوذ استاندارد، # 200: درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰، ω : درصد رطوبت، γ_d : دانسیته خشک، Φ_D و C_D : به ترتیب زاویه اصطکاک و چسبندگی حاصل از آزمایش برش مستقیم، Φ_T و C_T : به ترتیب زاویه اصطکاک و چسبندگی حاصل از آزمایش سه‌محوری تحکیم نیافته زهکشی نشده، CS و CC: به ترتیب نشانه فشردگی و نشانه تورم هستند.



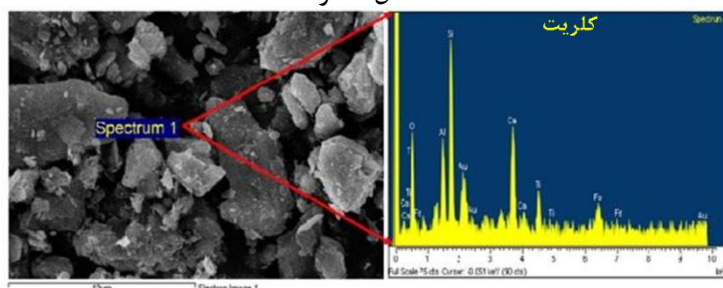
شکل ۵. نسبت فراوانی کلاس‌های خاک بر اساس طبقه‌بندی متحد



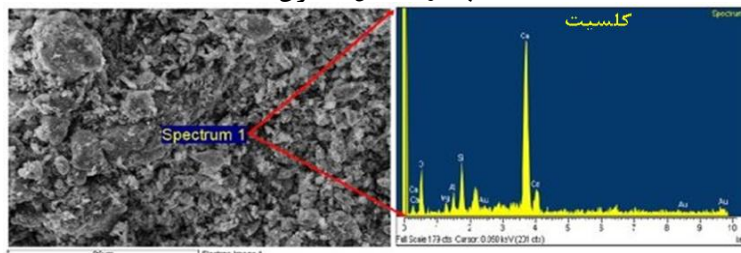
شکل ۶. فتومیکروگراف **SEM** و تجزیه نیمه کیفی EDX برای نمونه تهیه شده از بلوار آزدگان عمق ۶ متر



شکل ۷. فتومیکروگراف **SEM** و تجزیه نیمه کیفی EDX برای نمونه تهیه شده از بلوار جهاد عمق ۴ متر



شکل ۸. فتومیکروگراف **SEM** و تجزیه نیمه کیفی EDX برای نمونه تهیه شده از چهار راه بافدرت عمق ۸ متری



شکل ۹. فتومیکروگراف **SEM** و تجزیه نیمه کیفی EDX برای نمونه تهیه شده از خیابان حافظ عمق ۸ متر

همبستگی بین پارامترهای ژئوتکنیکی خاک

بررسی همبستگی بین پارامترهای مختلف سبب شناخت بهتر ویژگی‌های نهشته‌ها می‌شود و با برقراری روابط همبستگی قادر به پیش‌بینی برخی از ویژگی‌های خاک هستیم. محققان بسیاری روابط مختلف بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها را بررسی و ارائه کرده‌اند. در تحقیق حاضر با توجه به اطلاعات ژئوتکنیکی ثبت شده در محدوده شهر کرمان برخی از روابط بین پارامترهای مختلف بررسی و نتایج در جدول ۳ آورده شده است. بر اساس نتایج حاصل حد روانی (LL) با درصد رطوبت، شاخص خمیری و نشانه تورم رابطه معنی‌دار در سطح یک درصد دارد. عدد SPT با شاخص خمیری و حد روانی رابطه معناداری ندارد اما با زاویه اصطکاک داخلی رابطه معنادار در سطح یک درصد نشان می‌دهد. همین‌طور می‌توان اشاره کرد نشانه تورم با چسبندگی و شاخص خمیری دارای رابطه معنی‌دار است.

جدول ۳. بررسی رابطه بین متغیرها

| | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ |
|------------------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| LL ۱ | | | | | | | | |
| PI ۲ | ۰/۹۲۱* | | | | | | | |
| N ۳ | * | ۰/۰۱۳ | | | | | | |
| ω(%) | | ۰/۰۱۹ | ۰/۰۴۱ | | | | | |
| γ _d ۴ | | * | - | ۰/۰۲۶ | ۰/۱۴۱* | ۰/۰۷۷* | | |
| Φ ۵ | | | | ۰/۰۲۸* | ۰/۰۷۳ | -۰/۵۳۷ | -۰/۴۸۳ | |
| C ۶ | | | | ۰/۰۰۴ | ۰/۰۵۷ | ۰/۵۸۰* | ۰/۵۳۱* | |
| C _C ۷ | | | | | - | * | * | |
| C _S ۸ | | | | | ۰/۰۷۳ | ۰/۱۴۴ | ۰/۰۰۶ | ۰/۰۲۱ |
| | | | | | * | * | * | * |
| | | | | | ۰/۰۳۹۱ | ۰/۴۳۳* | ۰/۰۸۹ | ۰/۵۲۶* |
| | | | | | * | * | * | * |
| | | | | | ۰/۱۶۹ | ۰/۲۳۳ | ۰/۰۲۳ | ۰/۰۴۶ |
| | | | | | * | * | * | * |

LL: حد روانی، PI: شاخص پلاستیسیته، N: عدد آزمایش نفوذ استاندارد، ω: درصد رطوبت، γ_d: دانسیته خشک، Φ و C: به ترتیب زاویه اصطکاک و چسبندگی حاصل از آزمایش برش مستقیم، C_C و C_S به ترتیب نشانه فشردگی و نشانه تورم

هستند

ارزیابی شاخص رمبندگی

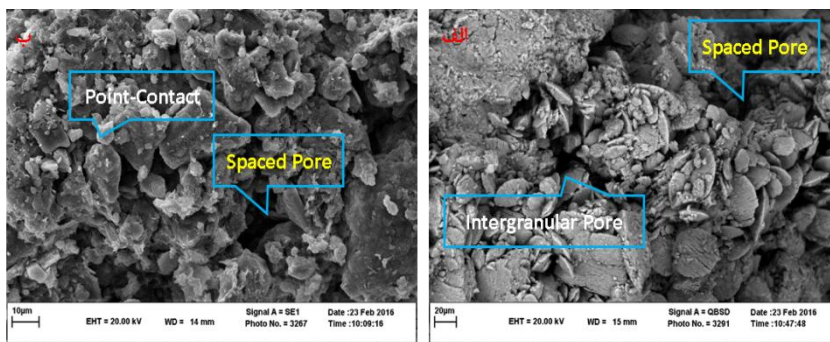
برای بررسی میزان رمبندگی خاک‌های شهر کرمان ضمن پژوهش‌های صحرایی و بررسی‌های میدانی (شکل ۱۰)، اطلاعات ژئوتکنیکی مربوط به خاک‌های شهر کرمان گردآوری شد. هم‌چنین از نقاط مختلف شهر نمونه‌های کاملاً دست‌نخورده اخذ شد و آزمایش‌های تعیین خواص فیزیکی، شاخص رمبندگی (جدول ۴) و پژوهش‌های ساختاری انجام شد. چنان‌که اشاره شد عوامل مختلفی بر رفتار رمبندگی مؤثرند که از جمله می‌توان به ساختار خاک اشاره کرد. نحوه آرایش دانه‌ها و پیوند میان دانه‌ها از فاکتورهای مهم در میزان رمبندگی است. در بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌هایی مربوط به منطقه هفت باغ (نمونه‌های ۲۱، ۱۷ و ۲۳) و شهرک مطهری (نمونه‌های ۳۵ الی ۳۸) شهرک پدر (نمونه‌های ۴۳ الی ۴۵) دارای ساختار باز و منافذ بین دانه‌ای هستند که میزان رمبندگی زیادی نشان دادند اما در عمده نمونه‌های گرفته شده از بخش‌های مرکزی شهر به‌عنوان مثال خیابان استقلال، میدان آزادی، خیابان بهمنیار، خیابان حافظ (نمونه‌های ۲۵ الی ۳۴) دانه‌های خاک عموماً دارای اتصال گوشه به گوشه بوده است و در ساختار آن‌ها نظم مشخصی دیده نمی‌شود و آرایش ذرات تصادفی و بی‌نظم است. وضعیت جهت‌یافتگی مشخص کم‌تر به چشم می‌خورد. علاوه بر ذرات خاک حفرات و فضاهای خالی خاک نیز توزیع تصادفی و بی‌نظم دارند و اندازه حفرها نیز کوچک است که تأییدی بر تراکم و فشردگی خاک است که میزان رمبندگی کم تا متوسطی را نیز نشان می‌دهند (شکل ۱۱ الی ۱۴).

در برخی نواحی (شهرک پدر، شهرک مطهری، هوانیروز و ...) (نمونه‌های ۲۱، ۱۳، ۱۵ و ۱۷)، در خاک‌های شهر کرمان، کریستال‌های نمک و گچ به‌وضوح دیده می‌شود. انتظار می‌رود با افزایش مقدار آب، این نمک‌ها انحلال پیدا کنند و می‌توان آثار آن را به‌صورت حفرات انحلالی مشاهده کرد (شکل ۱۵). انحلال کریستال‌های انحلال‌پذیر هم‌چنین می‌تواند باعث کاهش مقاومت ساختار خاک و نهایتاً منجر به فروپاشی خاک شود.

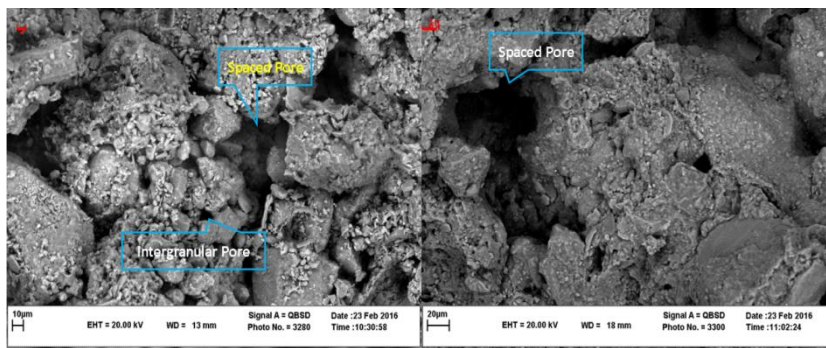
بلورهای کلسیت نیز در بعضی جاها به صورت سیمان کلسیتی در بین دانه‌ها، گاهی به صورت تک بلور و بعضی مواقع به شکل گرهک‌های آهکی در درون خاک‌های شهر کرمان دیده می‌شود.



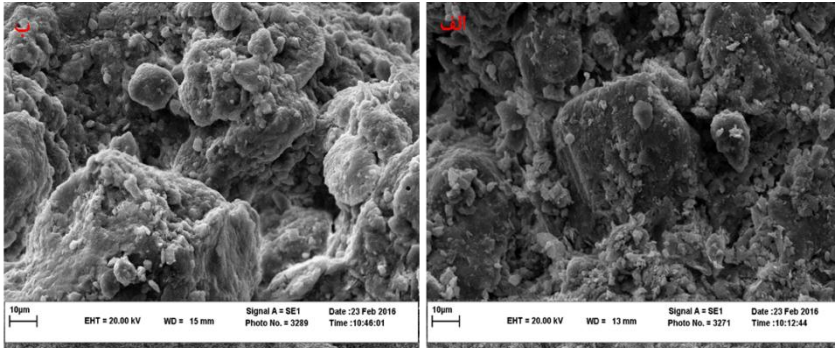
شکل ۱۰. فروریختن و ایجاد حفره در خاک



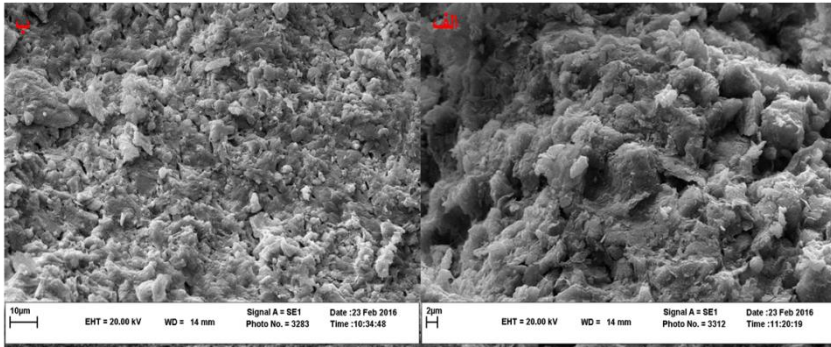
شکل ۱۱. فتومیکروگراف نمونه دست‌نخورده، الف) خیابان شهاب، ب) بلوار جهاد



شکل ۱۲. فتومیکروگراف نمونه دست‌نخورده، الف) خیابان باب الحوائج، ب) شهرک پدر



شکل ۱۳. فتومیکروگراف نمونه دست‌نخورده، الف) پل ابوذر، ب) میدان کوثر



شکل ۱۴. فتومیکروگراف نمونه دست‌نخورده، الف) خیابان حافظ، ب) بلوار آزادگان



شکل ۱۵. آثار حفرات ناشی از انحلال (نمونه ۲۱)

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌های اخذ شده

| شماره نمونه | کلاس و نام | e_0 | W (%) | γ_b (gr/cm ³) | γ_d (gr/cm ³) | معیار ASTM | آیین نامه ساختمانی روسیه [44] | معیار دنیسف (۱۹۶۴) [44] | معیار هولنز و هیلف (۱۹۶۱) [44] |
|-------------|------------|-------|-------|----------------------------------|----------------------------------|------------|-------------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| ۱ | CL | ۰/۷۶۱ | ۲۰/۴ | ۱/۶۴ | ۱/۳۶ | ۴/۲۰ | -۰/۰۵۹ | ۱/۱۳۶ | ۳۵/۳۶ |
| ۲ | CL | ۰/۸۲۹ | ۱۵/۹ | ۱/۷۵ | ۱/۵۱ | ۳/۹۹ | ۰/۰۳۲ | ۰/۹۲۹ | ۲۹/۸۶ |
| ۳ | CL - ML | ۰/۸۷۸ | ۱۴/۲ | ۱/۶۷ | ۱/۴۷ | ۴/۵۸ | ۰/۱۰۱ | ۰/۷۸۳ | ۳۱/۶۶ |
| ۴ | CL - ML | ۰/۷۵۹ | ۱۲/۵ | ۱/۷۴ | ۱/۵۵ | ۳/۷۰ | ۰/۰۷۶ | ۰/۸۲۴ | ۲۷/۷۵ |
| ۵ | CL | ۰/۸۴۹ | ۲۴/۲ | ۱/۷۲ | ۱/۳۹ | ۳/۸۹ | ۰/۰۵۰ | ۰/۸۹۱ | ۳۴/۹۲ |
| ۶ | CL | ۰/۸۴۵ | ۱۱ | ۱/۶۲ | ۱/۴۵ | ۴/۵۰ | -۰/۰۰۷ | ۱/۰۱۶ | ۳۱/۶۹ |
| ۷ | CL | ۰/۸۷ | ۱۶/۱ | ۱/۶۷ | ۱/۴۴ | ۵/۴۵ | -۰/۰۵۳ | ۱/۱۱۴ | ۳۲/۳۱ |
| ۸ | CL | ۰/۷۵۸ | ۲۲ | ۱/۸۸ | ۱/۵۴ | ۴/۳۲ | -۰/۱۲۲ | ۱/۲۸۴ | ۲۷/۹۴ |
| ۹ | CL | ۰/۷۹۶ | ۲۳ | ۱/۸۴ | ۱/۵ | ۴/۱۸ | -۰/۰۴۹ | ۱/۱۱۱ | ۲۹/۳۵ |
| ۱۰ | CL | ۰/۸۶۶ | ۱۱/۸ | ۱/۵۹ | ۱/۴۲ | ۳/۹۱ | ۰/۰۳۷ | ۰/۹۲۲ | ۳۲/۸۰ |
| ۱۱ | CL | ۰/۷۲۵ | ۱۰/۲ | ۱/۶۱ | ۱/۴۶ | ۴/۸۵ | ۰/۰۰۵ | ۰/۹۸۸ | ۲۹/۴۸ |
| ۱۲ | CL | ۱/۰۱۲ | ۱۳/۴ | ۱/۴۹ | ۱/۳۱ | ۶/۲۶ | ۰/۰۹۷ | ۰/۸۰۷ | ۳۸/۳۹ |
| ۱۳ | CL | ۰/۶۹۹ | ۱۱/۵ | ۱/۷۵ | ۱/۵۷ | ۴/۱۸ | ۰/۰۳۴ | ۰/۹۱۷ | ۲۶/۲۴ |
| ۱۴ | CL | ۰/۵۶۴ | ۸/۲ | ۱/۷۹ | ۱/۶۶ | ۴/۵۴ | -۰/۱۵۳ | ۱/۴۲۴ | ۲۱/۶۳ |
| ۱۵ | CL | ۰/۷۸۱ | ۱۶/۵ | ۱/۶۹ | ۱/۴۵ | ۴/۱۰ | ۰/۰۱۷ | ۰/۹۶۰ | ۳۰/۳۰ |
| ۱۶ | CL | ۰/۸۳۷ | ۱۲/۸ | ۱/۶ | ۱/۴۲ | ۵/۰۱ | ۰/۱۱۴ | ۰/۷۴۹ | ۳۲/۱۴ |
| ۱۷ | CL - ML | ۰/۸۶۴ | ۱۱/۹ | ۱/۵۳ | ۱/۳۷ | ۶/۲۸ | ۰/۰۸۲ | ۰/۸۲۳ | ۳۳/۶۲ |
| ۱۸ | CL | ۰/۹۳ | ۲۱/۷ | ۱/۶۵ | ۱/۳۶ | ۴/۲۰ | ۰/۰۴۷ | ۰/۹۰۲ | ۳۵/۳۶ |
| ۱۹ | CL | ۱/۰۲۹ | ۲۸/۵ | ۱/۷۵ | ۱/۳۶ | ۲/۰۲ | ۰/۰۱۸ | ۰/۹۶۵ | ۳۷/۲۷ |
| ۲۰ | CL | ۰/۷۴۱ | ۱۲/۵ | ۱/۷۱ | ۱/۵۲ | ۳/۳۳ | ۰/۰۴۷ | ۰/۸۹۱ | ۲۷/۹۱ |
| ۲۱ | CL - ML | ۱/۰۳۴ | ۶/۱ | ۱/۵۲ | ۱/۳۳ | ۱۱/۰۱ | ۰/۱۲۶ | ۰/۷۵۲ | ۳۵/۹۷ |
| ۲۲ | CL | ۰/۷۸۸ | ۹/۳ | ۱/۵۶ | ۱/۴۳ | ۱/۷۳ | ۰/۰۴۳ | ۰/۹۰۳ | ۳۰/۵۶ |
| ۲۳ | CL - ML | ۰/۵۱۷ | ۱۵/۵ | ۲/۰۴ | ۱/۷۷ | ۱/۷۱ | -۰/۱۱۹ | ۱/۳۴۸ | ۱۹/۱۸ |
| ۲۴ | CL | ۰/۸۵۹ | ۱۳ | ۱/۶۲ | ۱/۴۳ | ۵/۷۶ | -۰/۰۵۳ | ۱/۱۱۵ | ۳۲/۳۴ |
| ۲۵ | CL | ۰/۸۵۲ | ۲۳/۳ | ۱/۷۹ | ۱/۴۶ | ۱/۳۵ | -۰/۰۳۵ | ۱/۰۷۵ | ۳۱/۳۹ |
| ۲۶ | CL | ۰/۷۹۹ | ۱۹/۵ | ۱/۸ | ۱/۵۱ | ۰/۷۲ | ۰/۰۶۸ | ۰/۸۴۸ | ۲۹/۳۲ |
| ۲۷ | CL | ۰/۹۶۲ | ۱۷/۲ | ۱/۵۹ | ۱/۳۶ | ۳/۸۷ | ۰/۰۵۶ | ۰/۸۸۵ | ۳۵/۹۴ |
| ۲۸ | CL | ۰/۷۶۱ | ۱۵/۴ | ۱/۶۵ | ۱/۴۳ | ۱/۱۴ | ۰/۰۰۲ | ۰/۹۹۵ | ۳۰/۳۱ |

| شماره نمونه | کلاس خاک | e_0 | W (%) | γ_b (gr/cm ³) | γ_d (gr/cm ³) | معیار ASTM | آیین نامه ساختمانی روسیه [44] | معیار دنیسف (۱۹۶۴) [44] | معیار هولتز و هیلف (۱۹۶۱) [44] |
|-------------|----------|-------|-------|----------------------------------|----------------------------------|------------|-------------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| ۲۹ | CL | ۰/۵۹۰ | ۱۹/۲ | ۱/۹۳ | ۱/۶۲ | ۳/۵۲ | -۰/۳۲۳ | ۱/۶۰۰ | ۲۴/۶۵ |
| ۳۰ | CL | ۰/۷۶۳ | ۲۲/۹ | ۱/۸۲ | ۱/۴۸ | ۱/۳۰ | ۰/۰۱۲ | ۰/۹۷۳ | ۲۹/۸۶ |
| ۳۱ | CL | ۰/۴۹۹ | ۱۲/۳ | ۱/۹۱ | ۱/۷ | ۲/۹۴ | -۰/۱۶۲ | ۱/۴۸۸ | ۲۱/۱۰ |
| ۳۲ | CL | ۰/۶۹۳ | ۲۱/۶ | ۱/۸۳ | ۱/۵۱ | ۱/۵۹ | -۰/۰۲۴ | ۱/۰۶۰ | ۲۸/۱۰ |
| ۳۳ | CL | ۰/۶۹۸ | ۱۷/۷ | ۱/۷۴ | ۱/۴۷ | ۴/۰۶ | -۰/۰۲۵ | ۱/۰۶۱ | ۳۰/۲۲ |
| ۳۴ | CL | ۰/۶۹۱ | ۱۶/۱ | ۱/۷۲ | ۱/۴۹ | ۳/۳۱ | -۰/۰۲۸ | ۱/۰۶۹ | ۲۹/۲۱ |
| ۳۵ | CL-ML | ۰/۹۴ | ۷/۲ | ۱/۵۱ | ۱/۴۱ | ۷/۵۸ | ۰/۰۳۲ | ۰/۷۲۷ | ۳۴/۳۲ |
| ۳۶ | CL | ۰/۷۷۵ | ۱۶ | ۱/۷۲ | ۱/۴۸ | ۶/۳۱ | ۰/۰۶۶ | ۰/۸۴۸ | ۲۹/۵۴ |
| ۳۷ | CL | ۰/۷۲۱ | ۱۱/۳ | ۱/۶۵ | ۱/۴۸ | ۶/۶۸ | -۰/۱۴۴ | ۱/۳۴۴ | ۲۸/۳۵ |
| ۳۸ | CL | ۰/۸۲۶ | ۱۱/۳ | ۱/۶۱ | ۱/۵۱ | ۵/۰۴ | ۰/۰۷۶ | ۰/۸۳۲ | ۲۹/۸۶ |
| ۳۹ | CL | ۰/۷۱ | ۱۸/۹ | ۱/۷۸ | ۱/۵۸ | ۰/۲۹ | -۰/۱۳۵ | ۱/۳۲۶ | ۲۶/۱۲ |
| ۴۰ | CL | ۰/۸۲۳ | ۲۸/۷ | ۱/۹۱ | ۱/۴۹ | ۰/۳۳ | -۰/۰۳۹ | ۱/۰۸۷ | ۳۰/۲۱ |
| ۴۱ | CL | ۰/۹۸ | ۱۹ | ۱/۶۲ | ۱/۳۷ | ۱۰/۹۱ | ۰/۰۱۷ | ۰/۹۶۶ | ۳۶/۰۱ |
| ۴۲ | CL-ML | ۰/۹۳۷ | ۱۸ | ۱/۶۲ | ۱/۳۷ | ۰/۹۸ | ۰/۰۴۵ | ۰/۹۰۸ | ۳۵/۳۷ |
| ۴۳ | CL-ML | ۱/۰۰۳ | ۱۱/۹ | ۱/۴۹ | ۱/۳۳ | ۷/۳۴ | ۰/۱۱۴ | ۰/۷۷۲ | ۳۷/۷۲ |
| ۴۴ | CL-ML | ۰/۷۸۴ | ۹/۷ | ۱/۶۳ | ۱/۴۹ | ۱۰/۵۹ | ۰/۰۲۳ | ۰/۹۴۸ | ۲۹/۴۲ |
| ۴۵ | CL | ۰/۸۶۸ | ۱۱/۳ | ۱/۵۹ | ۱/۴۳ | ۱۰/۹۲ | ۰/۰۰۸ | ۰/۹۸۳ | ۳۲/۴۳ |
| ۴۶ | CL-ML | ۰/۸۳۸ | ۱۴/۶ | ۱/۶۷ | ۱/۴۵ | ۳/۵۴ | ۰/۰۷۸ | ۰/۸۲۸ | ۳۱/۵۱ |
| ۴۷ | CL | ۰/۸۸۹ | ۲۶/۴ | ۱/۸۲ | ۱/۴۴ | ۰/۱۶ | -۰/۰۲۰ | ۱/۰۴۲ | ۳۲/۷۳ |
| ۴۸ | CL | ۰/۸۰۸ | ۲۳/۸ | ۱/۸۴ | ۱/۴۹ | ۰/۲۲ | -۰/۱۰۳ | ۱/۲۳۰ | ۲۹/۹۰ |
| ۴۹ | CL | ۰/۷۳۷ | ۲۰/۹ | ۱/۹ | ۱/۵۷ | ۱/۳۲ | -۰/۱۵۹ | ۱/۳۷۴ | ۲۷/۱۴ |
| ۵۰ | CL | ۰/۶۲۴ | ۲۳/۲ | ۱/۸۷ | ۱/۶۵ | ۱/۷۹ | -۰/۱۶۱ | ۱/۴۱۹ | ۲۳/۳۵ |

e_0 : نسبت تخلخل اولیه، W: درصد رطوبت، γ_d : دانسیته خشک، γ_b : دانسیته مرطوب

بررسی پتانسیل رمبندگی خاک

طی دهه‌های اخیر معیارهای زیادی را محققان مختلف ارائه کرده‌اند. در این پژوهش از بین معیارهای بیان شده معیارهای دنیسف، هولتز و هیلف، آیین‌نامه روسیه و آیین‌نامه ASTM که متداول‌تر است روابط (۱) الی (۴)، [۴۴] برای ارزیابی پتانسیل رمبندگی خاک

بررسی شده انتخاب شده است. قابل ذکر است علاوه بر نتایج این پژوهش (جدول ۴) از داده‌های موجود در بانک اطلاعات اداره مکانیک خاک استان کرمان نیز در ارزیابی پتانسیل رمبندگی استفاده شده است (جدول ۵). بر اساس نتایج به دست آمده خاک‌های شهر کرمان بر اساس معیار آیین‌نامه ساختمانی روسیه عمدتاً رمبند هستند ($L > -0.1$)، بر اساس معیار دنیسوف (هرگاه e/e_L بزرگ‌تر از $1/5$ باشد خاک غیررمبند و در صورتی که بین $0/75$ تا $1/5$ باشد خاک مستعد رمبندگی و اگر بین $0/5$ تا $0/75$ باشد خاک شدیداً رمبند هستند) خاک‌های شهر کرمان در محدوده خاک‌های مستعد رمبندگی قرار می‌گیرند و بر اساس معیار ASTM در برخی مناطق شهر مانند شهرک مطهری، شهرک پدر و هفت‌باغ خاک‌ها عمدتاً حالت رمبندگی از خود نشان می‌دهند اما در بخش‌های مرکزی شهر مقدار عددی این معیار از $0/15$ تا 11 متغیر است که عمدتاً در محدوده خاک‌های با رمبندگی متوسط قرار می‌گیرند (شکل‌های ۱۶ الی ۱۹). در مقایسه نتایج معیارهای استفاده شده، در مناطقی از شهر که خاک رفتار رمبند دارد، نتایج نسبتاً مشابهی به لحاظ معرفی خاک رمبند دارند. شکل ۲۰ پتانسیل رمبندگی را در بخش‌های مختلف شهر نشان می‌دهد.

$$L = \frac{e_0 - e_L}{1 + e_0} \quad \text{معیار آیین‌نامه ساختمانی روسیه} \quad (1)$$

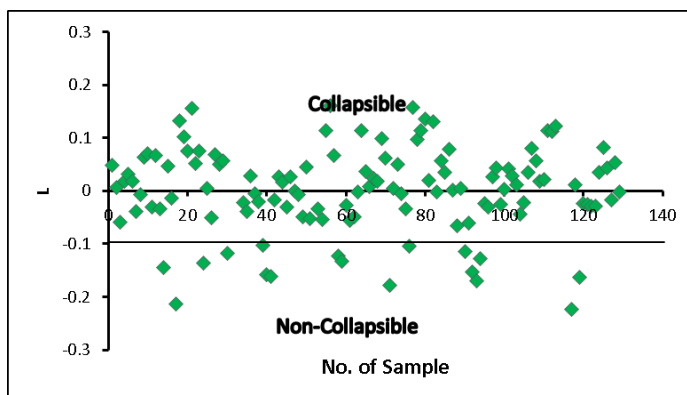
$$K = \frac{e}{e_L} \quad \text{معیار Denisov (1964) [44]} \quad (2)$$

$$W_{sat} = \left[\frac{G_s - \gamma_d}{G_s \times \gamma_d} \right] \times 100 \quad \text{معیار Holtz and Hilf (1961) [44]} \quad (3)$$

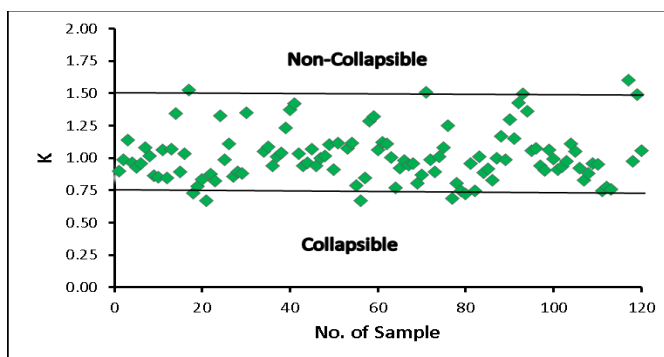
$$I_e = \frac{\Delta e \times 100}{1 + e_0} \quad \text{معیار آیین‌نامه (2002) ASTM} \quad (4)$$

جدول ۵. خلاصه نتایج پتانسیل رمبندگی

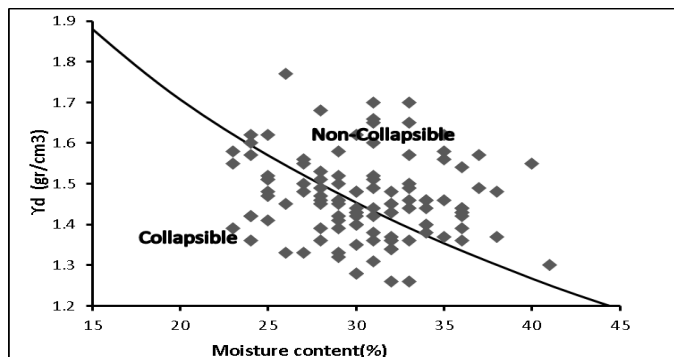
| معیار | تعداد | میانگین | حداقل | حداکثر |
|--------------------------|-------|---------|-------|--------|
| ASTM | ۱۳۲ | ۲/۶۱ | ۰/۱۵ | ۱۱/۰۲ |
| آیین نامه ساختمانی روسیه | ۱۳۲ | -۰/۰۰۶ | -۰/۲۲ | ۰/۱۶ |
| دنسیف | ۱۳۲ | ۱/۰۲۸ | ۰/۶۷ | ۱/۶۲ |
| هواتز و هیلف | ۱۳۲ | ۳۰/۶۷ | ۱۹/۱۸ | ۴۲/۱۰ |



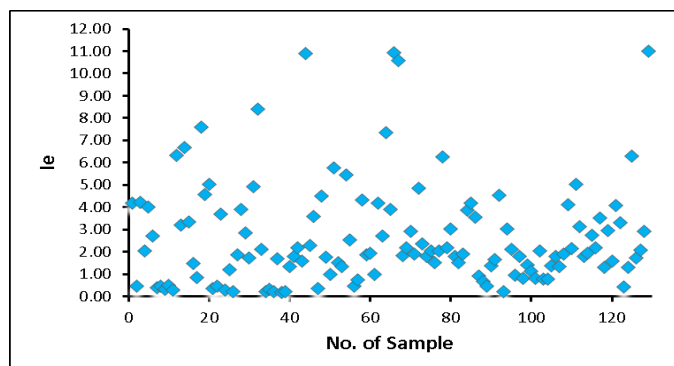
شکل ۱۶. پتانسیل رمبندگی بر اساس آیین‌نامه ساختمانی روسیه



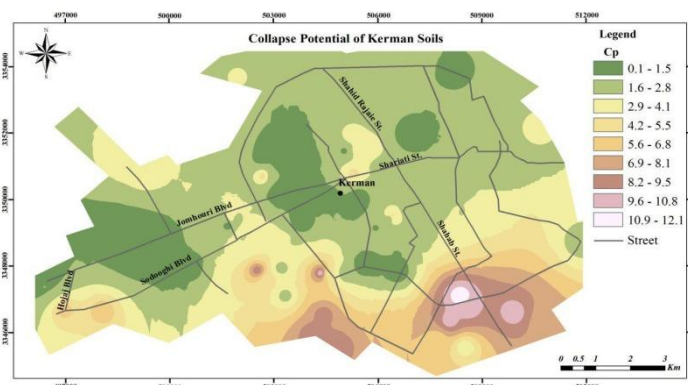
شکل ۱۷. پتانسیل رمبندگی بر اساس معیار سال (۱۹۶۴) Denisov



شکل ۱۸. پتانسیل رمبندگی بر اساس پیشنهاد (Holtz and Hilf ۱۹۶۱)



شکل ۱۹. تغییرات شاخص رمبندگی، I_e بر اساس معیار ASTM سال ۲۰۰۲



شکل ۲۰. پهنه‌بندی پتانسیل رمبندگی (C_p) خاک‌های ساختمانی شهر کرمان بر اساس معیار ASTM

(در این معیار مقادیر ۲ تا ۶ رمبندگی متوسط و ۶ تا ۱۰ رمبندگی زیاد را نشان می‌دهند)

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به‌دست آمده رسوبات ریزدانه شهر کرمان عمدتاً شامل دو گروه CL و CL-ML هستند. نتایج بررسی کانی‌شناسی نشان می‌دهد که کانی‌های موجود در این نهشته‌ها عمدتاً شامل ایلیت، کلریت، اسمکتیت، هالوزیت، ایلیت-اسمکتیت، کلسیت و کوارتز هستند. نتایج بررسی عکس‌های میکروسکپ الکترونی در مرکز شهر کرمان مؤید آرایش فشرده و تراکم ذرات خاک هستند. دانه‌های خاک عموماً دارای اتصال گوشه به گوشه است و در ساختار آن‌ها نظم مشخصی دیده نمی‌شود و آرایش ذرات تصادفی و بی‌نظم است. وضعیت جهت‌یافتگی مشخص کم‌تر به چشم می‌خورد. علاوه بر ذرات خاک حفرات و فضاهای خالی خاک نیز دارای توزیع تصادفی و بی‌نظم هستند و اندازه حفرها نیز کوچک بوده است که تأییدی بر تراکم و فشردگی خاک است. پیوند بین ذرات که بخشی از مقاومت خاک و حساسیت آن را ایجاد کرده است، به صورت سیمان کلسیتی است. نمونه‌های مربوط به منطقه هفت باغ و شهرک مطهری دارای ساختار و منافذ بین دانه‌ای هستند. با توجه به نتایج به‌دست آمده خاک‌های شهر کرمان بر اساس آیین‌نامه ساختمانی روسیه رهنده، بر اساس معیار دنیسف مستعد رهنده‌گی هستند. بر اساس معیار ASTM در بخش‌های مرکزی شهر خاک‌ها میزان رهنده‌گی کم تا متوسطی نشان می‌دهند. اما در برخی مناطق شهر مانند شهرک مطهری و هفت باغ خاک‌ها کاملاً حالت رهنده‌گی از خود نشان می‌دهند.

نتایج بررسی پتانسیل رهنده‌گی بر رویداده‌های گردآوری شده [۴۵]

| کلاس خاک | e_0 | w(%) | γ_b (gr/cm ³) | γ_d (gr/cm ³) | معیار AST M | آیین‌نامه ساختمانی روسیه | معیار دنیسف | معیار هولتز و هیلف |
|------------|-------|------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------|
| CL | 0.77 | 19.1 | 1.79 | 1.5 | 0.45 | 0.006 | 0.987 | 28.50 |
| CL | 0.781 | 14.7 | 1.79 | 1.55 | 2.70 | 0.019 | 0.958 | 28.42 |
| CL | 0.893 | 13.7 | 1.65 | 1.46 | 0.37 | -0.039 | 1.082 | 32.26 |
| CL - ML | 0.966 | 22.4 | 1.7 | 1.39 | 0.46 | -0.007 | 1.014 | 35.18 |
| CL - ML | 0.884 | 21.5 | 1.77 | 1.45 | 0.32 | 0.063 | 0.865 | 32.34 |
| CL | 0.883 | 19.8 | 1.77 | 1.48 | 0.48 | 0.070 | 0.850 | 31.61 |
| CL | 0.872 | 11 | 1.62 | 1.46 | 0.27 | -0.030 | 1.064 | 31.85 |
| CL | 1.003 | 17.5 | 1.53 | 1.3 | 3.20 | -0.033 | 1.067 | 38.61 |
| CL | 0.642 | 6 | 1.72 | 1.62 | 1.46 | -0.014 | 1.036 | 24.13 |

| کلاس خاک | e0 | w(%) | γ_b (gr/cm ³) | γ_d (gr/cm ³) | معیار AST M | آیین‌نامه ساختمانی روسیه | معیار دنیسف | معیار هولتز و هیلف |
|-------------|-------|----------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------|
| CL | 0.688 | 16.8 | 1.81 | 1.55 | 0.83 | -0.213 | 1.523 | 26.35 |
| CL - ML | 0.907 | 26.2 | 1.75 | 1.39 | 0.37 | 0.156 | 0.672 | 34.21 |
| CL | 0.708 | 19.8 | 1.9 | 1.58 | 0.47 | 0.051 | 0.877 | 26.25 |
| CL | 0.901 | 20.2 | 1.66 | 1.38 | 1.21 | 0.005 | 0.989 | 34.30 |
| CL | 0.853 | 27.2 | 1.81 | 1.42 | 0.22 | -0.051 | 1.110 | 32.40 |
| CL | 0.889 | 21.7 | 1.69 | 1.39 | 1.85 | 0.068 | 0.856 | 33.82 |
| CL | 0.942 | 10.8 | 1.53 | 1.38 | 2.83 | 0.057 | 0.882 | 35.14 |
| ML | 0.564 | 11.8 | 1.83 | 1.63 | 4.92 | -0.039 | 1.109 | 24.58 |
| CL | 0.943 | 17.2 | 1.58 | 1.35 | 8.39 | 0.040 | 0.917 | 35.91 |
| CL | 0.843 | 25.3 | 1.8 | 1.44 | 2.12 | -0.023 | 1.051 | 32.19 |
| CL | 0.826 | 24.3 | 1.84 | 1.48 | 0.22 | -0.023 | 1.050 | 30.67 |
| CL | 0.903 | 24 | 1.79 | 1.44 | 0.21 | 0.028 | 0.941 | 32.95 |
| CL | 0.89 | 24.5 | 1.74 | 1.4 | 1.69 | -0.005 | 1.011 | 33.65 |
| CL | 1.016 | 24.7 | 1.76 | 1.37 | 2.18 | -0.017 | 1.034 | 36.81 |
| ML | 0.848 | 21 | 1.74 | 1.44 | 1.57 | 0.026 | 0.942 | 31.91 |
| CL | 0.806 | 20 | 1.73 | 1.44 | 2.27 | -0.030 | 1.068 | 31.10 |
| CL | 0.816 | 16 | 1.69 | 1.46 | 3.58 | 0.027 | 0.939 | 30.66 |
| CL | 0.904 | 19 | 1.66 | 1.4 | 0.37 | 0.000 | 1.000 | 33.83 |
| CL | 0.882 | 20 | 1.73 | 1.44 | 1.75 | -0.050 | 1.106 | 32.53 |
| CL | 0.729 | 16.3 | 1.74 | 1.5 | 1.50 | -0.033 | 1.078 | 27.22 |
| CL | 1.126 | 25.6 | 1.59 | 1.26 | 2.54 | 0.113 | 0.787 | 42.11 |
| CL | 0.953 | 25.5 | 1.71 | 1.36 | 0.46 | 0.161 | 0.670 | 35.94 |
| CL | 0.705 | 19 | 1.85 | 1.56 | 1.88 | -0.133 | 1.321 | 26.51 |
| CL | 0.827 | 23 | 1.79 | 1.46 | 1.92 | -0.028 | 1.061 | 30.90 |
| CL | 0.852 | 28 | 1.83 | 1.43 | 0.97 | -0.055 | 1.120 | 32.19 |
| CL | 0.856 | 22 | 1.77 | 1.45 | 2.69 | -0.003 | 1.006 | 31.79 |
| CL | 0.744 | 13.5 | 1.66 | 1.46 | 1.83 | 0.019 | 0.956 | 29.12 |
| CL | 1.008 | 24.3 | 1.57 | 1.26 | 2.19 | 0.098 | 0.805 | 39.92 |
| CL | 0.88 | 19.7 | 1.62 | 1.35 | 2.93 | 0.062 | 0.868 | 34.81 |
| CL | 0.538 | 7.8 | 1.84 | 1.7 | 1.89 | -0.178 | 1.510 | 20.67 |
| CL | 0.858 | 6.8 | 1.52 | 1.42 | 2.37 | 0.051 | 0.891 | 32.47 |
| CL- ML | 0.73 | 7.2 | 1.64 | 1.53 | 1.79 | -0.005 | 1.013 | 27.50 |

| کلاس خاک | e0 | w(%) | γ_b (gr/cm3) | γ_d (gr/cm3) | معیار AST M | آیین نامه ساختمانی روسیه | معیار دنیسف | معیار هولتز و هیلف |
|-------------|-------|----------|------------------------|------------------------|-------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------|
| CL | 0.774 | 17.1 | 1.78 | 1.52 | 2.03 | -0.034 | 1.078 | 28.64 |
| CL | 0.709 | 17.3 | 1.85 | 1.57 | 1.52 | -0.105 | 1.253 | 26.55 |
| CL- ML | 1.015 | 19.5 | 1.59 | 1.33 | 2.03 | 0.158 | 0.687 | 37.87 |
| CL | 0.836 | 16.6 | 1.66 | 1.42 | 2.18 | 0.114 | 0.749 | 32.11 |
| CL | 0.979 | 24.7 | 1.66 | 1.33 | 3.03 | 0.136 | 0.725 | 37.17 |
| CL | 0.848 | 20 | 1.7 | 1.42 | 1.79 | 0.019 | 0.958 | 32.25 |
| CL | 1.052 | 25.4 | 1.6 | 1.28 | 1.51 | 0.131 | 0.744 | 39.81 |
| CL- ML | 0.629 | 16.4 | 1.89 | 1.62 | 1.90 | -0.003 | 1.007 | 23.85 |
| CL- ML | 0.624 | 16.6 | 1.86 | 1.6 | 0.92 | 0.001 | 0.996 | 23.89 |
| CL | 0.644 | 18.6 | 1.87 | 1.58 | 0.67 | -0.065 | 1.166 | 24.68 |
| CL | 0.691 | 22.1 | 1.83 | 1.5 | 0.47 | 0.005 | 0.989 | 27.14 |
| CL | 0.619 | 17.2 | 1.88 | 1.6 | 1.36 | -0.114 | 1.297 | 23.89 |
| CL | 0.687 | 16.4 | 1.76 | 1.51 | 1.66 | -0.061 | 1.151 | 27.01 |
| CL | 0.521 | 15 | 1.9 | 1.65 | 0.20 | -0.169 | 1.493 | 20.77 |
| CL | 0.554 | 20.4 | 1.95 | 1.62 | 3.02 | -0.128 | 1.359 | 21.89 |
| CL | 0.714 | 22.1 | 1.8 | 1.48 | 2.10 | -0.025 | 1.059 | 27.89 |
| CL | 0.687 | 23.6 | 1.88 | 1.52 | 0.95 | -0.031 | 1.076 | 26.57 |
| CL | 0.804 | 31.4 | 1.87 | 1.4 | 1.77 | 0.027 | 0.940 | 31.75 |
| CL | 0.866 | 27.2 | 1.73 | 1.36 | 0.80 | 0.044 | 0.906 | 34.00 |
| CL | 0.714 | 28.3 | 1.89 | 1.48 | 1.40 | -0.026 | 1.062 | 28.01 |
| CL | 0.886 | 23.5 | 1.65 | 1.34 | 0.80 | 0.042 | 0.910 | 34.94 |
| CL | 0.813 | 15.1 | 1.61 | 1.4 | 2.04 | 0.029 | 0.936 | 32.01 |
| CL | 0.784 | 22.9 | 1.75 | 1.43 | 0.78 | 0.012 | 0.973 | 30.61 |
| CL | 0.713 | 13.4 | 1.69 | 1.49 | 0.76 | -0.045 | 1.107 | 27.84 |
| CL | 0.764 | 12.2 | 1.6 | 1.43 | 1.36 | -0.023 | 1.053 | 30.15 |
| CL | 0.798 | 12.6 | 1.59 | 1.41 | 1.78 | 0.035 | 0.922 | 31.49 |
| CL | 0.856 | 23.4 | 1.68 | 1.36 | 1.35 | 0.080 | 0.827 | 33.97 |
| CL | 0.934 | 13.8 | 1.52 | 1.34 | 1.91 | 0.056 | 0.884 | 35.87 |
| CL | 0.764 | 20 | 1.76 | 1.47 | 2.15 | 0.021 | 0.951 | 29.48 |
| CL | 0.977 | 21.8 | 1.6 | 1.32 | 3.14 | 0.112 | 0.773 | 37.37 |
| CL | 1.029 | 21.1 | 1.55 | 1.28 | 1.77 | 0.122 | 0.759 | 39.69 |
| CL | 0.654 | 24 | 1.93 | 1.56 | 1.93 | -0.066 | 1.167 | 24.78 |

| کلاس خاک | e_0 | w(%) | γ_b (gr/cm ³) | γ_d (gr/cm ³) | معیار AST M | آیین‌نامه ساختمانی روسیه | معیار دنیسف | معیار هولتز و هیلف |
|----------|-------|------|----------------------------------|----------------------------------|-------------|--------------------------|-------------|--------------------|
| CL | 0.528 | 17.2 | 1.97 | 1.68 | 2.75 | -0.216 | 1.624 | 22.21 |
| CL | 0.518 | 18.8 | 2.02 | 1.7 | 2.17 | -0.162 | 1.475 | 20.87 |
| ML | 0.713 | 26 | 2 | 1.59 | 0.41 | 0.019 | 0.954 | 26.13 |
| CL | 0.826 | 26.9 | 1.89 | 1.49 | 1.31 | -0.129 | 1.284 | 30.35 |
| CL | 0.677 | 11.2 | 1.68 | 1.51 | 2.09 | -0.062 | 1.154 | 26.54 |
| CL | 0.812 | 17.8 | 1.67 | 1.42 | 2.92 | 0.038 | 0.914 | 31.36 |
| CL | 0.666 | 19.9 | 1.75 | 1.51 | 1.62 | -0.062 | 1.156 | 29.86 |
| CL | 0.562 | 23 | 1.79 | 1.46 | 1.66 | -0.202 | 1.562 | 30.90 |
| CL | 0.618 | 23.5 | 1.65 | 1.34 | 1.73 | -0.116 | 1.305 | 34.94 |

e_0 : نسبت تخلخل اولیه، W: درصد رطوبت، γ_d : دانسیته خشک، γ_b : دانسیته مرطوب

تقدیر و تشکر

نویسندگان این پژوهش از اداره مکانیک خاک استان کرمان برای در اختیار قرار دادن اطلاعات موجود و همچنین همکاری لازم در انجام آزمایش‌های مورد نیاز کمال تشکر و قدردانی را دارند.

منابع

1. Phien-wej N., Pientong T., Balasubramaniam A. S., "Collapse and strength characteristics of loess in Thailand", *Engineering Geology*, 32 (1-2) (1992) 59-72.
2. Rogers C. D. F., Dijkstra T. A., Smalley I.J., "Hydroconsolidation and subsidence of loess: studies from China, Russia, North America and Europe", *Engineering Geology*, 37 (2) (1994) 83-113.
3. Al-Rawas A. A., "State-of-the-art review of collapsible soils", *Science and Technology Review* (2000) 115-35.
4. Nouaouria M.S., Guenfoud M., Lafifi B., "Engineering properties of loess in Algeria", *Engineering Geology*, 99 (1-2) (2008) 85-90.

5. Ryashchenko T. G., Akulova V. V., Erbaeva M. A., "Loessial soils of Priangaria, Transbaikalia, Mongolia, and northwestern China", *Quaternary International*, 179 (1) (2008) 90-5.
6. Gaaver K. E., "Geotechnical properties of Egyptian collapsible soils", *Alexandria Engineering Journal*, 51 (3) (2012) 205-10.
7. Feda J., "Collapse of loess upon wetting", *Engineering Geology*, 25 (2-4) (1988) 263-9.
8. Houston S. L., Houston W. N., Spadola D. J., "Prediction of field collapse of soils due to wetting", *Journal of Geotechnical Engineering*, 114 (1) (1988) 40-58.
9. Lommler J. C., Bandini P., "Characterization of collapsible soils", In: *Proceedings of IFCEE 2015, San Antonio, Texas* (2015).
10. Fredlund D. G., Gan J. K. M., "The collapse mechanism of a soil subjected to one dimensional loading and wetting", In: *Genesis of Properties of Collapsible Soils. NATO ASI Series*, vol. 468. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, (1995) 173-205.
11. Kato S., Kawai K., "Deformation characteristics of a compacted clay in collapse under isotropic and triaxial stress state", *Soils and Foundations*, 40 (5) (2000) 75-90.
12. Pereira J. H. F., Fredlund D. G., "Volume change behavior of collapsible compacted gneiss soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126 (10) (2000) 907-16.
13. Derbyshire E., "Geological hazards in loess terrain, with particular reference to the loess regions of China", *Earth-Science Review*, 54 (1-3) (2001) 231-60.

14. Houston S. L., Houston W. N., Zapata C. E., Lawrence C., "Geotechnical engineering practice for collapsible soils", *Geotechnical and Geological Engineering*, 19 (3) (2001) 333-55.
15. Peng J. B., Sun P., Li X., "Ground fissure: the major geological and environmental problem in the development of Xi'an City, China", *Environmental Science and Technology*, 2 (2006) 469-74.
16. Sun P. P., Zhang M. S., Zhu L. F., "Typical case study of loess collapse and discussion on related problems. *Geological Bulletin of China*, 32 (6) (2013) 847-51.
17. Dudley J. H., "Review of collapsing soils", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, 97 (SM3) (1970) 925-47.
18. Zhang M. H., "Experimental study on wetting and drying deformation characteristics of collapsible loess soils. MS Thesis", Xi'an, China: Chang'an University (2002).
19. Fan H. R., Guo R., "Influencing factors of water-collapsible loess of Guanzhong area", *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 23 (2) (2003) 160-3.
20. Song Y. S., Wang X. G., "Research into the collapsibility of loess in Longdong District", *Soil Engineering and Foundation*, 18 (4) (2004) 37-40.
21. Clevenger W. A., "Experiences with loess as foundation material", *Transactions of the American Society of Civil Engineering*, 123 (1) (1958) 151-69.
22. Fedá J., "Mechanisms of collapse of soil structure", In: *Genesis of Properties of Collapsible Soils. NATO ASI Series*, vol. 468. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, (1995) 149-72.

23. Ayadat T., Hanna A., "Prediction of collapse behavior in soil", *Revue Europeenne de Genie Civil*, 11 (5) (2007) 603-19.
24. Zorlu K., Kasapoglu K. E., "Determination of geomechanical properties and collapse potential of a caliche by in situ and laboratory tests", *Environmental Geology*, 56 (2009)1449-59.
25. Noor S. T., Hanna A., Mashhour I., "Numerical modeling of piles in collapsible soil subjected to inundation", *International Journal of Geomechanics*, 13 (5) (2013) 514-26.
26. Yang Y. L., "Study on collapsible mechanism of loess soils", *Science in China: Series B*, 7 (1988) 756-66.
27. Derbyshire E., Mellors T. W., "Geological and geotechnical characteristics of some loess and loessic soils from China and Britain: a comparison", *Engineering Geology*, 25 (2-4) (1988) 135-75.
28. Delage P., Audiguier M., Cui Y. J., Howat M. D., "Microstructure of a compacted silt", *Canadian Geotechnical Journal*, 33 (1) (1996)150-8.
29. Romero E, Simms P. H., "Microstructure investigation in unsaturated soils: a review with special attention to contribution of mercury intrusion porosimetry and environmental scanning electron microscopy", *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, 26 (6) (2008) 705-27.
30. Osipov V. I., Sokolov V. N., "Factors and mechanism of loess collapsibility. In: Genesis of properties of collapsible soils", NATO ASI seriesvol. 468. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, (1995) 49-63.

31. Smalley I. J., Jefferson I. F., Dijkstra T. A., Derbyshire E., "Some major events in the development of the scientific study of loess", *Earth Science Review*, 54 (1-3) (2001) 5-18.
32. Lommler J. C., Bandini P., "Characterization of collapsible soils. In: *Proceedings of IFCEE 2015, San Antonio, Texas*, (2015).
33. Alonso E. E., Gens A., Lloret A., "The landslide of Cortes de Pallas, Spain", *Géotechnique*, 43 (4) (1993) 507-21.
34. Fang X. W., Shen C. N., Li C. H., Wang L., Liu H. J., "Quantitative analysis of microstructure characteristics of Pucheng loess in Shaanxi Province", *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34 (5) (2013) 1319-24.
35. Gu T. F., Wang J. D., Guo L., Wu D. L., Li K. C., "Study of Q3 loess microstructure changes based on image processing", *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30 (Suppl. 1) (2011) 3185-92.
36. El-Ehwany M., Houston S. L., "Settlement and moisture movement in collapsible soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, 116 (10) (1989) 1521-35.
37. Tadepalli R., Fredlund D. G., "The collapse behavior of a compacted soil during inundation. *Canadian Geotechnical Journal*, 28 (4) (1991) 477-88.
38. Habibagahi G., Mokheri M., "A hyperbolic model for volume change behavior of collapsible soils", *Canadian Geotechnical Journal*, 35 (2) (1998) 264-72.
39. Fredlund D. G., Gan J. K. M., "The collapse mechanism of a soil subjected to one dimensional loading and wetting", In: *Genesis of*

- Properties of Collapsible Soils", NATO ASI Series, vol. 468. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, (1995) 173-205.
40. Jotisankasa A., "Collapse behavior of a compacted silty clay", PhD Thesis. London, UK: University of London (2005).
41. Fredlund D. G., Morgenstern N. R., "Stress state variables for unsaturated soils", Journal of the Geotechnical Engineering Division, 103 (5) (1977) 447-66.
42. Wheeler S.J., Sharma R. J., Buisson M. S. R., "Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behavior in unsaturated soils", Géotechnique, 53 (1) (2003) 41-54.
43. Kadjar M. H., Nazemzadeh M., Azizan H., Rowshanravan J., "The history of Kerman basin during the Neogene and Quaternary", Geological Survey of Iran, Regional Center for S.E. Iran (Kerman) (1996) 74.
44. Ayadat T., Dahili M., "Assessment of Soil Collapse Prediction Methods", International Journal of Engineering, 25 (2) (2012)19-26.
۴۵. اداره کل آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان کرمان، آرشیو مطالعات ژئوتکنیک و مکانیک خاک پروژه‌های مختلف اجرا شده در محدوده شهر کرمان، سال‌های (۱۳۷۵ تا ۱۳۹۵).