[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]

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 زمین شناسی مهندسی

تاریخ: دریافت ۹۶/۰۱/۱۶ پذیرش ۹۶/۰۷/۰۲

چکیده

خاک‌های رمبنده 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 رمبش، 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 نحوهٔ آریش دانه‌ها به‌ترتیب 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 نحوهٔ آرایش دانه‌ها در برخی نمونه‌ها وجود مواد انحلال‌پذیر از جمله بلورهای ژیپس و نمک نقش مهمی در میزان رمبندگی خاک ایفا می‌کنند. برای ارزیابی پتانسیل رمبندگی از معیارهای دنیسف، هولتز و هیلف، آیین‌نامهٔ ساختمانی روسیه و آیین‌نامه ASTM که متداول‌ترند، استفاده شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده خاک‌های شهر کرمان عمدتاً در محدودهٔ خاک‌های با رمبندگی متوسط قرار می‌گیرند.

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

*نویسنده مسئول lashkaripour@um.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]

مقدمه

خاک‌های رمبنده از جمله خاک‌های مسئله‌دار هستند. این نشهته‌ها 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 نهشته‌های خاک‌های رمبنده را دارند [۱]-[٦] .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]، [١٤]، [۱۵]. با افزایش توسعهٔ 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 [١٦].

طی شش دههٔ گذشته محققان زیادی بر مطالعهٔ 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 اتربرگ و توزیع اندازهٔ 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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]

مهندسی ژئوتکنیک نیستند [۲٦]. این موضوع به‌دلیل شکل‌های میکروساختاری خاک‌هاست که علیرغم داشتن خصوصیات فیزیکی مشابه رفتار مکانیکی متفاوتی ارائه می‌دهند. به‌عنوان 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 به‌طور چشم‌گیری متفاوت است. ماهیت فروپاشی لس‌ها و خاک‌های دیگر با استفاده از اطلاعات میکروساختاری به‌خوبی 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 به‌هم شامل الگوی ذرات، تماس ذرات، فرم منافذ و پیوند یا اتصال مواد بررسی کرد. فرم منافذ و اتصال مواد به‌عنوان دو عامل که تأثیر بیش‌تری روی رفتار رمبندگی دارند پیشنهاد شده‌اند. محققان بسیاری در زمینهٔ اتصال مواد و طبقه‌بندی منافذ خاک و اثر این عامل‌ها در رمبندگی تحقیق کرده‌اند [۲۷]، [۳۰]، [۳۱]، [۳۲]. و به‌طور 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 [۳٤]. این برنامه‌های پردازش تصویر نتایج منطقی رضایت بخشی به‌ویژه برای خاک‌های درشت‌دانه ارائه می‌دهند. فو (۲۰۱۱) نشان داد که تشخیص دقیق دانه‌ها و اندازهٔ منافذ از تصاویر دیجیتال با استفاده از برنامه‌هایی که درحال حاضر در دسترس است دشوار است [۳۵].

دسته سوم روش‌های مطالعاتی استفاده از مفاهیم مکانیک خاک برای شرح رفتار رمیندگی است. خاک‌های رمبنده به‌طور معمول غیراشباع هستند و قبل از رسیدن به شرایط کاملاً اشباع به‌طور چشم‌گیری فروپاشیده می‌شوند [۳٦]. به‌همین دلیل مفاهیم مکانیک خاک برای تفسیر رفتار رمبندگی خاک‌های غیراشباع گویاترند [۱۲]، [۳۷]، [۳۸]. رمیندگی به از دست رفتن مقاومت در ارتباط با کاهش مکش در نتیجه مرطوب شدن نسبت داده شده است [۳۹]. به‌همین دلیل رفتار فروپاشی (رمبندگی) به‌طور گسترده‌ای با استفاده از آزمایش‌های مکش

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]

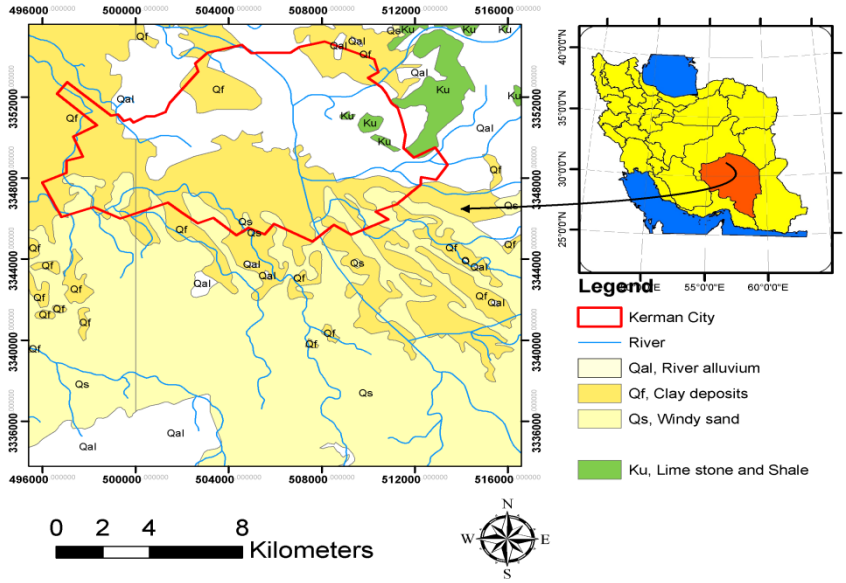
بررسی شده است [٤٠]. بر اساس آن مدل‌های متفاوت با توجه به متغییرهای حالت تنش مختلف (varying stress state variable) برای مدل‌سازی رفتار رمبندگی پیشنهاد شده است [۳۹]، [٤٠]. در طول ربع قرن گذشته، تعدادی از مدل‌های الاستوپلاستیک برای مدل‌سازی رفتار خاک‌های غیراشباع توسعه یافته است [۳۳]، [٤١]. این مدل‌ها برای تفسیر رفتار تغییر حجم خاک‌های رمبنده توسعه یافته یا اصلاح شده‌اند [۱۱]. در این مدل‌ها رمبندگی به‌عنوان بخشی از تغییرشکل در شرایطی که مسیر تنش از ناحیهٔ 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 حاشیهٔ شمالی دشت کرمان واقع شده است و بخشی از گسترهٔ آن را کفه‌های نمکی یا پلایای سیلتی-رسی می‌پوشانند. رسوبات نهشته شده در محدودهٔ شهر کرمان عموماً ریزدانه است و متأثر ازسرنوشت زمین‌شناسی و مدل رسوبی حوضهٔ 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 محدودهٔ سنی پروتروزوئیک فوقانی- کامبرین زیرین تا اواخر کواترنر را شامل می‌شوند (شکل ۱). بررسی این توالی‌های رسوبی و تغییرات جانبی آن‌ها نشان می‌دهد که محدودهٔ 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 [٤٢]. با توجه به مدل حوضهٔ 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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]

منطقهٔ کرمان طی دوره کواترنری بوده است. دشت کرمان در طول پلیستوسن که اشکوب اصلی کواترنر است به‌صورت حوضه‌ای بسته کم‌ژرفا دریافت‌کننده همهٔ جریان‌های سیلابی صادره از زمین‌های مرتفع حواشی دشت بوده است. در بعضی از مقاطع زمانی کوتاه مانند دورهٔ یخچالی وورم[1]، 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 به‌تدریج رسوب کنند. حوضهٔ بسته رسوبی این شهر به‌علت جنبش‌های پر اهمیت پلیستوسن زبرین، شرایط حوضهٔ بسته را از دست داده و به آرامی به‌سوی شمال و شمال باختری و درهٔ زرند- کرمان شیب بر داشته است و حجم چشم‌گیری از رسوبات انباشته شده در دوره‌های قبل را از دست داده است [۴۲].

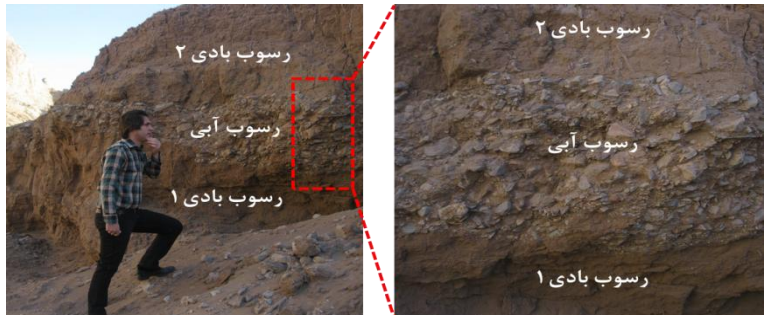


شکل ۱. نقشهٔ زمین‌شناسی محدودهٔ شهر کرمان در این پژوهش

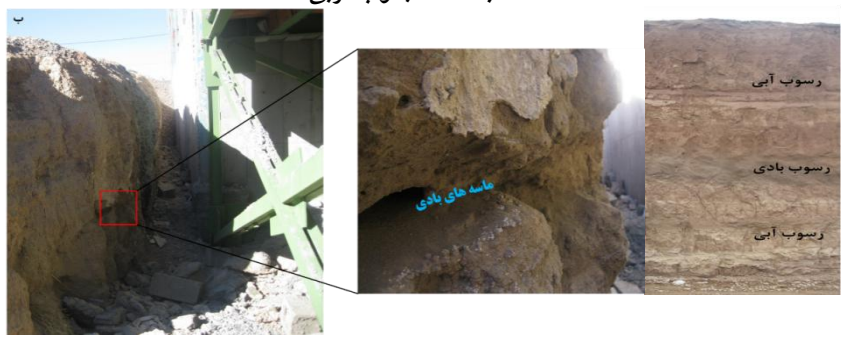
1. Würm glaciation

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]

شواهد زمین‌شناختی نشان می‌دهد پس از خارج شدن دشت کرمان از شرایط حوضهٔ بسته، پلایای درهٔ کرمان–زرند به‌تدریج درامتداد فرورفتگی بین دو رشته کوه ماهان ـ کوهبنان و باداموئیه ـ داوران به‌سوی شمال و شمال باختری تغییر مکان داده است. دشت کرمان از شروع هولوسن به‌بعد شاهد رسوب‌گذاری مهمی ناشی از فعالیت‌های سیلابی نبوده است و تنها عامل قابل اشاره فعالیت‌های بادی و رسوب‌گذاری بادی بوده است [٤٢]. بر اساس بازدیدهای انام 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 (شکل۲ و ۳).



شکل۲. توالی رسوبات بادی و آبی مجاور مسجد صاحب‌الزمان واقع درخیابان انتظار (دید به‌سمت جنوب‌غربی)



شکل۳. توالی رسوبات بادی و آبی، الف) خیابان وصال(دید به‌سمت شرق)، ب) خیابان هلال احمر(دید به‌سمت شمال‌غربی)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]

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 انحام 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 نحوهٔ آریش دانه‌ها، تعداد ۱۲ نمونه انتخاب شده و به‌ترتیب از روش XRD و تصاویر میکروسکوپ الکترونی استفاده شده است.

نتایج و بحث

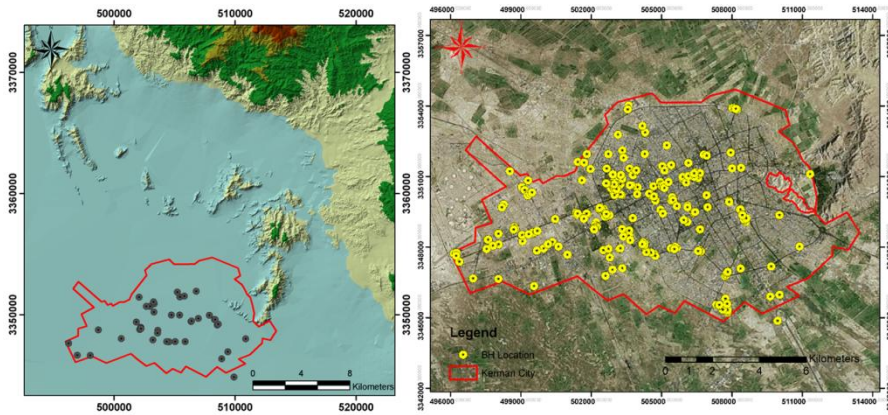
خصوصیات مهندسی خاک‌های شهر کرمان

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 دست نخورده، سطحی و تا عمق ۳۰ متری (تعداد کمی از گمانه‌ها تا عمق ۵۰ متری هم ادامه داشته‌اند) به‌دست آمده‌اند. نقشهٔ پراکندگی گمانه‌های ژئوتکنیکی در سطح شهر و همین‌طور محل نمونه‌گیری‌ها در شکل ٤ 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 ژیپس هستند. کانی‌های ایلیت، اسمکتیت و کلریت نسبت فراوانی تقریباً یک‌سان دارند و بخش عمدهٔ کانی‌های تشکیل دهنده رسوبات را همین کانی‌ها تشکیل می‌دهند (شکل٦ الی ۹).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]

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	۵۰۵۲۲۹	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	۳۳۴۶۲۰۶	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			



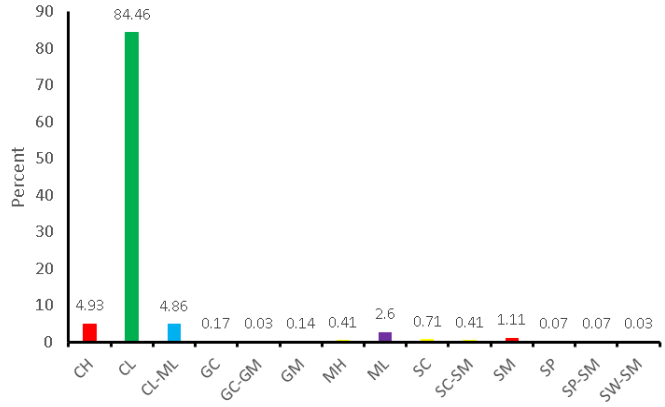
شکل ٤. الف) پراکندگی گمانه‌ها در سطح شهر، ب) موقعیت نقاط نمونه‌برداری جدید در این پژوهش

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]

جدول۲. پارامترهای آماری ویژگی‌های مهندسی خاک‌های شهر کرمان

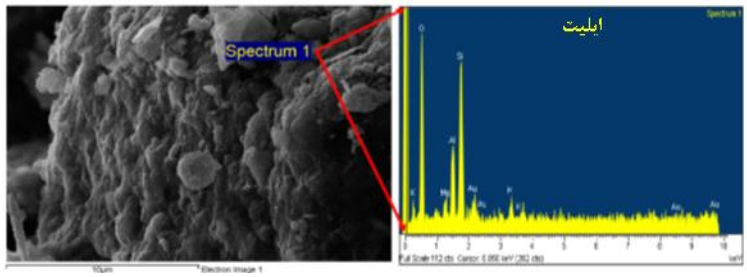
متغیر	تعداد	میانگین	میانه	مد	انحراف معیار	کم‌ترین	بیش‌ترین
LL (%)	۲٤۰۹	۳۵/۲۸۱	۳٤	۳۱	۷/۵۸۰	۱۵	٦۸
PI (%)	۲۳۸۳	۱٤/٦٦۳	۱٤	۱۲	۵/۹۱٤	۲	٤۰
N(SPT)	۲۰٦۹	۲۳/۱۲۸	۲۱	۱۹	۹/۱۳۰	٤	٦۲
# 200	۱۹۷٤	۸۹/۱۸۸	۹٤	۹۹	۱۳/٤۳۵	۱۲	۱۰۰
ω (%)	۲۰۱٤	۲۰/۰۸	۲۰/۵	۲٤	٦/۳٦۳	۳	۳۹/۵
γ_b (gr/cm^3)	۷۱۱	۱/۸۳۹	۱/۸۵	۱/۹۱	۰/۱۳٦	۱/۳۳	۲/۳٤
γ_d (gr/cm^3)	۷۱۱	۱/۵۳۸	۱/۵٤	۱/٤۹	۰/۱۰۳	۱/۲۱	۱/۸۸
Φ_D	۳٦۰	۲۰/۸٦٤	۲۳/۲۰۰	۲۸/۰۰۰	۰/۸۰۷	۹/۰۰	۳٤/۰۰۰
C_D	۳٦۰	۰/۲۰۰	۰/۰۵۰	۰/۰۲۰	۰/۱۹۹	۰/۰۰۱	۰/٦٦۰
$\Phi_{T\ riaxial}$(deg)	۲۵۵	٤/۵	۳/٦	۲	۳/۲۹۱	۰	۱٦
C_T (Kg/cm^2)	۲۵۵	۰/٤۸٦	۰/٤۲	۰/٤۰	۰/۱۹٤	۰/۱۳	۰/۹۸
C_C^*	٤٦۰	۰/۱۹۱	۰/۱۸۹	۰/۱٤۹	۰/۰۷۹	۰	۰/۵۳۱
C_S^{**}	٤٦۰	۰/۰۲۳	۰/۰۲۲	۰/۰۱۳	۰/۰۱۲	۰/۰۰۱	۰/۱۰٤

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

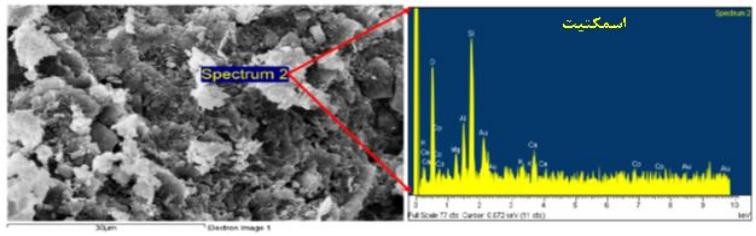


شکل۵. نسبت فراوانی کلاس‌های خاک بر اساس طبقه‌بندی متحد

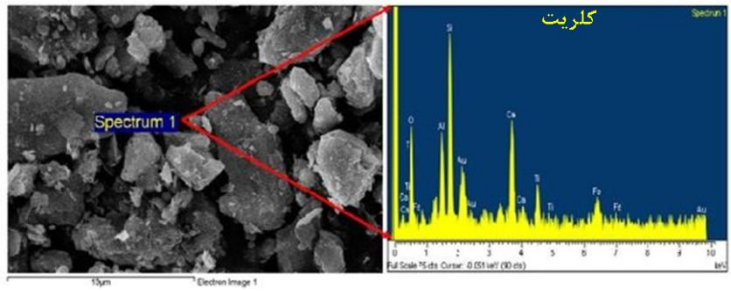
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]



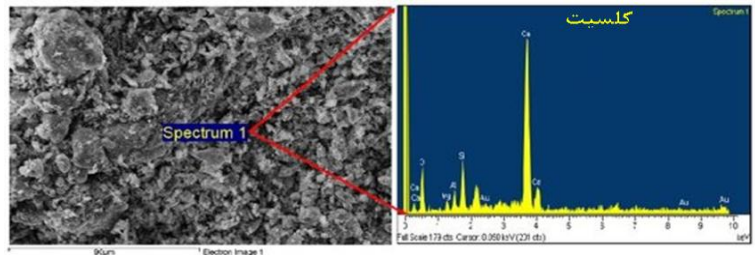
شکل٦. فتومیکروگراف <u>SEM</u> و تجزیهٔ نیمه‌کیفیEDX برای نمونهٔ تهیه شده از بلوار آزدگان عمق ٦ متر



شکل۷. فتومیکروگراف SEM و تجزیهٔ نیمه‌کیفی EDX برای نمونهٔ تهیه شده از بلوار جهاد عمق ٤ متر



شکل۸. فتومیکروگراف SEM و تجزیهٔ نیمه‌کیفیEDX برای نمونهٔ تهیه شده از چهار راه بافدرت عمق ۸ متری



شکل۹. فتومیکروگراف SEM و تجزیهٔ نیمه‌کیفی EDX برای نمونهٔ تهیه شده از خیابان حافظ عمق ۸ متر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]

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 محدودهٔ 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 نشانهٔ تورم رابطه معنی‌دار در سطح یک درصد دارد. عدد SPT با شاخص خمیری و حد روانی رابطهٔ معناداری ندارد اما با زاویهٔ اصطکاک داخلی رابطهٔ معنادار در سطح یک درصد نشان می‌دهد. همین‌طور می‌توان اشاره کرد نشانهٔ تورم با چسپندگی و شاخص خمیری دارای رابطهٔ معنی‌دار است.

جدول۳. بررسی رابطه بین متغیرها

	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۱. LL	۱							
۲. PI	۰/۹۲۱**	۱						
۳. N	۰/۰۱۳	۰/۰۱۹	۱					
ω(%)	۰/۳۲۲**	۰/۲۲۲**	۰/۰۴۱-	۱				
۴. γ_d	۰/۰۷۷*	۰/۱۴۱*	۰/۰۲۶	-۰/۰۸*	۱			
۵. Φ	-۰/۴۸۳**	-۰/۵۳۷**	۰/۰۷۳	۰/۰۰۴	-۰/۳۰۱**	۱		
۶. C	۰/۵۳۱**	۰/۵۸۰**	۰/۰۵۷-	۰۵۰	۰/۳۶۳**	-۰/۸۹**	۱	
۷. C_C	۰/۱۲۱	۰/۱۲۳	۰/۰۸۲	۰/۰۷۳-	-۰/۳۹۱**	۰/۱۴۴	۰/۰۰۶	۱
۸. C_S	۰/۳۷۴**	۰/۳۷۴**	۰/۰۴۶	۰/۰۲۳	۰/۱۶۹	۰/۴۵۱**	۰/۳۱۵**	۰/۵۲۶**

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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]

ارزیابی شاخص رمبندگی

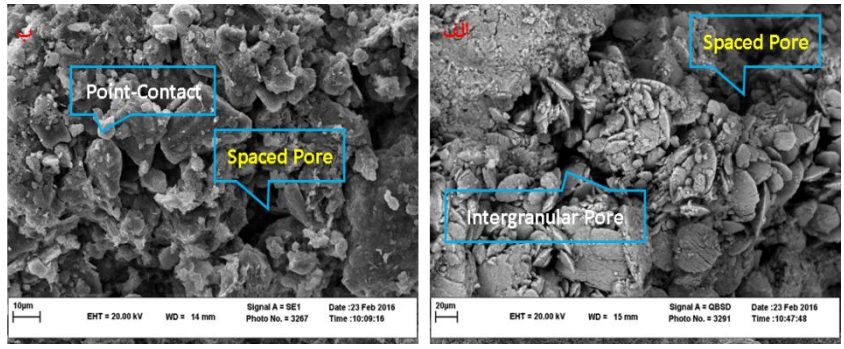
برای بررسی میزان رمبندگی خاک‌های شهر کرمان ضمن پژوهش‌های صحرایی و بررسی‌های میدانی (شکل۱۰)، اطلاعات ژئوتکنیکی مربوط به خاک‌های شهر کرمان گردآوری شد. هم‌چنین از نقاط مختلف شهر نمونه‌های کاملاً دست‌نخورده اخذ شد و آزمایش‌های تعیین خواص فیزیکی، شاخص رمبندگی (جدول ٤) و پژوهش‌های ساختاری انجام شد. چنان‌که اشاره شد عوامل مختلفی بر رفتار رمبندگی مؤثرند که از جمله می‌توان به ساختار خاک اشاره کرد. نحوهٔ 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 ٤۳ الی ٤٥) 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 ۳٤) 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 بی نظم دارند و اندازهٔ حفرها نیز کوچک است که تأییدی بر تراکم و فشردگی خاک است که میزان رمبندگی کم تا متوسطی را نیز نشان می‌دهند (شکل۱۱ الی ١٤).

در برخی نواحی(شهرک پدر، شهرک مطهری، هوانیروز و ...)(نمونه‌های ۲۱، ۱۳ ،۱۵و 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 (شکل۱۵). انحلال کریستال‌های انحلال‌پذیر هم‌چنین می‌تواند باعث کاهش مقاومت ساختار خاک و نهایتاً منجر به فروپاشی خاک شود.

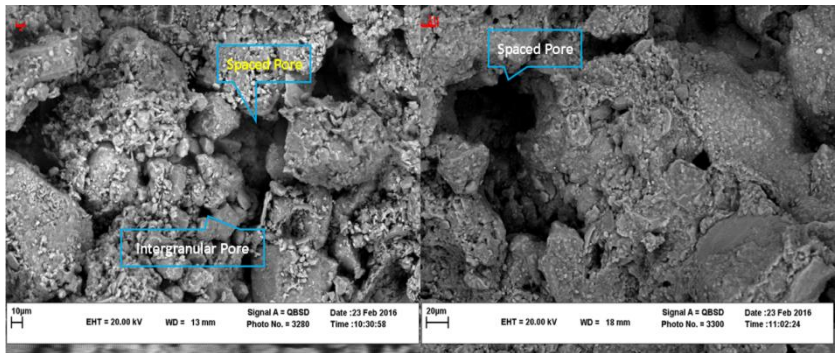
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]

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

شکل ۱۰. فروریختن و ایجاد حفره در خاک

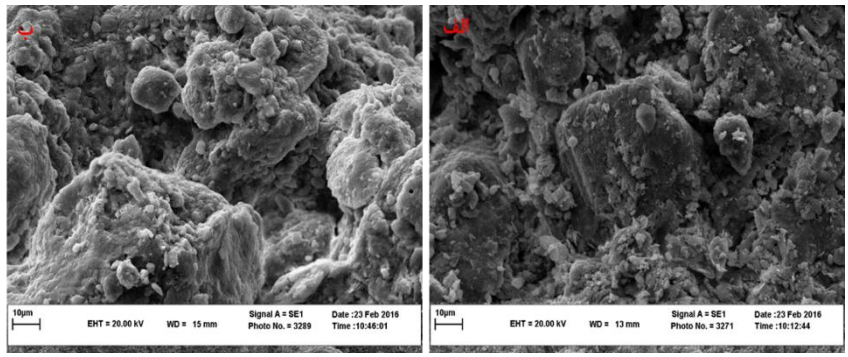


شکل ۱۱. فتومیکروگراف نمونه دست‌نخورده، الف) خیابان شهاب، ب) بلوار جهاد

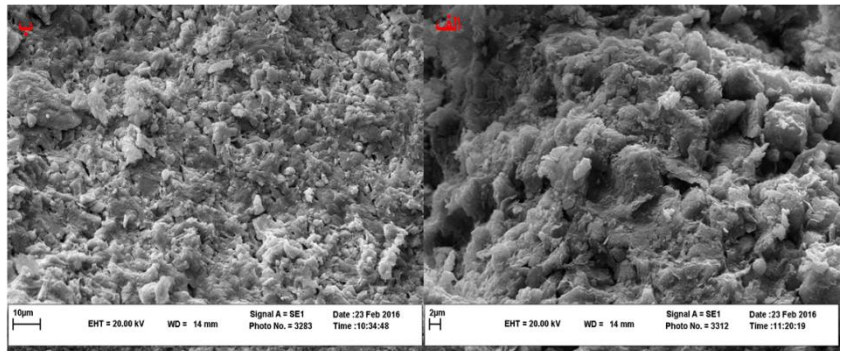


شکل ۱۲. فتومیکروگراف نمونه دست‌نخورده، الف) خیابان باب الحوائج، ب) شهرک پدر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]



شکل۱۳. فتومیکروگراف نمونه دست‌نخورده، الف) پل ابوذر، ب) میدان کوثر



شکل۱٤. فتومیکروگراف نمونه دست‌نخورده، الف) خیابان حافظ، ب) بلوار آزادگان

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

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1] [DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4] [Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

جدول٤. نتایج آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌های اخذ شده

شمارهٔ نمونه	کلاس خاک	e_0	W (%)	γb (gr/cm^3)	γd (gr/cm^3)	معیار ASTM	آیین نامهٔ ساختمانی روسیه [44]	معیار دنیسف (۱۹٦٤) [44]	معیار هولتز و هیلف (۱۹٦۱) [44]
۱	CL	۰/۷٦۱	۲۰/٤	۱/٦٤	۱/۳٦	٤/۲۰	-۰/۰۵۹	۱/۱۳٦	۳۵/۳٦
۲	CL	۰/۸۲۹	۱۵/۹	۱/۷۵	۱/۵۱	۳/۹۹	۰/۰۳۲	۰/۹۲۹	۲۹/۸٦
۳	CL - ML	۰/۸۷۸	۱٤/۲	۱/٦۷	۱/٤۷	٤/۵۸	۰/۱۰۱	۰/۷۸۳	۳۱/٦٦
٤	CL - ML	۰/۷۵۹	۱۲/۵	۱/۷٤	۱/۵۵	۳/۷۰	۰/۰۷٦	۰/۸۲٤	۲۷/۷۵
۵	CL	۰/۸٤۹	۲٤/۲	۱/۷۲	۱/۳۹	۳/۸۹	۰/۰۵۰	۰/۸۹۱	۳٤/۹۲
٦	CL	۰/۸٤۵	۱۱	۱/٦۲	۱/٤۵	٤/۵۰	-۰/۰۰۷	۱/۰۱٦	۳۱/٦۹
۷	CL	۰/۸۷	۱٦/۱	۱/٦۷	۱/٤٤	۵/٤۵	-۰/۰۵۳	۱/۱۱٤	۳۲/۳۱
۸	CL	۰/۷۵۸	۲۲	۱/۸۸	۱/۵٤	٤/۳۲	-۰/۱۲۲	۱/۲۸٤	۲۷/۹٤
۹	CL	۰/۷۹٦	۲۳	۱/۸٤	۱/۵	٤/۱۸	-۰/۰٤۹	۱/۱۱۱	۲۹/۳۵
۱۰	CL	۰/۸٦٦	۱۱/۸	۱/۵۹	۱/٤۲	۳/۹۱	۰/۰۳۷	۰/۹۲۲	۳۲/۸۰
۱۱	CL	۰/۷۲۵	۱۰/۲	۱/٦۱	۱/٤٦	٤/۸۵	۰/۰۰۵	۰/۹۸۸	۲۹/٤۸
۱۲	CL	۱/۰۱۲	۱۳/٤	۱/٤۹	۱/۳۱	٦/۲٦	۰/۰۹۷	۰/۸۰۷	۳۸/۳۹
۱۳	CL	۰/٦۹۹	۱۱/۵	۱/۷۵	۱/۵۷	٤/۱۸	۰/۰۳٤	۰/۹۱۷	۲٦/۲٤
۱٤	CL	۰/۵٦٤	۸/۲	۱/۷۹	۱/٦٦	٤/۵٤	-۰/۱۵۳	۱/٤۲٤	۲۱/٦۳
۱۵	CL	۰/۷۸۱	۱٦/۵	۱/٦۹	۱/٤۵	٤/۱۰	۰/۰۱۷	۰/۹٦۰	۳۰/۳۰
۱٦	CL	۰/۸۳۷	۱۲/۸	۱/٦	۱/٤۲	۵/۰۱	۰/۱۱٤	۰/۷٤۹	۳۲/۱٤
۱۷	CL - ML	۰/۸٦٤	۱۱/۹	۱/۵۳	۱/۳۷	٦/۲۸	۰/۰۸۲	۰/۸۲۳	۳۳/٦۲
۱۸	CL	۰/۹۳	۲۱/۷	۱/٦۵	۱/۳٦	٤/۲۰	۰/۰٤۷	۰/۹۰۲	۳۵/۳٦
۱۹	CL	۱/۰۲۹	۲۸/۵	۱/۷۵	۱/۳٦	۲/۰۲	۰/۰۱۸	۰/۹٦۵	۳۷/۲۷
۲۰	CL	۰/۷٤۱	۱۲/۵	۱/۷۱	۱/۵۲	۳/۳۳	۰/۰٤۷	۰/۸۹۱	۲۷/۹۱
۲۱	CL - ML	۱/۰۳٤	٦/۱	۱/۵۲	۱/۳۳	۱۱/۰۱	۰/۱۲٦	۰/۷۵۲	۳۵/۹۷
۲۲	CL	۰/۷۸۸	۹/۳	۱/۵٦	۱/٤۳	۱/۷۳	۰/۰٤۳	۰/۹۰۳	۳۰/۵٦
۲۳	CL - ML	۰/۵۱۷	۱۵/۵	۲/۰٤	۱/۷۷	۱/۷۱	-۰/۱۱۹	۱/۳٤۸	۱۹/۱۸
۲٤	CL	۰/۸۵۹	۱۳	۱/٦۲	۱/٤۳	۵/۷٦	-۰/۰۵۳	۱/۱۱۵	۳۲/۳٤
۲۵	CL	۰/۸۵۲	۲۳/۳	۱/۷۹	۱/٤٦	۱/۳۵	-۰/۰۳۵	۱/۰۷۵	۳۱/۳۹
۲٦	CL	۰/۷۹۹	۱۹/۵	۱/۸	۱/۵۱	۰/۷۲	۰/۰٦۸	۰/۸٤۸	۲۹/۳۲
۲۷	CL	۰/۹٦۲	۱۷/۲	۱/۵۹	۱/۳٦	۳/۸۷	۰/۰۵٦	۰/۸۸۵	۳۵/۹٤
۲۸	CL	۰/۷٦۱	۱۵/٤	۱/٦۵	۱/٤۳	۱/۱٤	۰/۰۰۲	۰/۹۹۵	۳۰/۳۱

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]

شمارهٔ نمونه	کلاس خاک	e_0	W (%)	γ_b (gr/cm^3)	γ_d (gr/cm^3)	معیار ASTM	آیین نامهٔ ساختمانی روسیه [44]	معیار دنیسف (۱۹٦٤) [44]	معیار هولتز و هیلف (۱۹٦۱) [44]
۲۹	CL	۰/۵۹۰	۱۹/۲	۱/۹۳	۱/٦۲	۳/۵۲	-۰/۳۲۳	۱/٦۰۰	۲٤/٦۵
۳۰	CL	۰/۷٦۳	۲۲/۹	۱/۸۲	۱/٤۸	۱/۳۰	۰/۰۱۲	۰/۹۷۳	۲۹/۸٦
۳۱	CL	۰/٤۹۹	۱۲/۳	۱/۹۱	۱/۷	۲/۹٤	-۰/۱٦۲	۱/٤۸۸	۲۱/۱۰
۳۲	CL	۰/٦۹۳	۲۱/٦	۱/۸۳	۱/۵۱	۱/۵۹	-۰/۰۲٤	۱/۰٦۰	۲۸/۱۰
۳۳	CL	۰/٦۹۸	۱۷/۷	۱/۷٤	۱/٤۷	٤/۰٦	-۰/۰۲۵	۱/۰٦۱	۳۰/۲۲
۳٤	CL	۰/٦۹۱	۱٦/۱	۱/۷۲	۱/٤۹	۳/۳۱	-۰/۰۲۸	۱/۰٦۹	۲۹/۲۱
۳۵	CL - ML	۰/۹٤	۷/۲	۱/۵۱	۱/٤۱	۷/۵۸	۰/۰۳۲	۰/۷۲۷	۳٤/۳۲
۳٦	CL	۰/۷۷۵	۱٦	۱/۷۲	۱/٤۸	٦/۳۱	۰/۰٦٦	۰/۸٤۸	۲۹/۵٤
۳۷	CL	۰/۷۲۱	۱۱/۳	۱/٦۵	۱/٤۸	٦/٦۸	-۰/۱٤٤	۱/۳٤٤	۲۸/۳۵
۳۸	CL	۰/۸۲٦	۱۱/۳	۱/٦۱	۱/۵۱	۵/۰٤	۰/۰۷٦	۰/۸۳۲	۲۹/۸٦
۳۹	CL	۰/۷۱	۱۸/۹	۱/۷۸	۱/۵۸	۰/۲۹	-۰/۱۳۵	۱/۳۲٦	۲٦/۱۲
٤۰	CL	۰/۸۲۳	۲۸/۷	۱/۹۱	۱/٤۹	۰/۳۳	-۰/۰۳۹	۱/۰۸۷	۳۰/۲۱
٤۱	CL	۰/۹۸	۱۹	۱/٦۲	۱/۳۷	۱۰/۹۱	۰/۰۱۷	۰/۹٦٦	۳٦/۰۱
٤۲	CL-ML	۰/۹۳۷	۱۸	۱/٦۲	۱/۳۷	۰/۹۸	۰/۰٤۵	۰/۹۰۸	۳۵/۳۷
٤۳	CL-ML	۱/۰۰۳	۱۱/۹	۱/٤۹	۱/۳۳	۷/۳٤	۰/۱۱٤	۰/۷۷۲	۳۷/۷۲
٤٤	CL-ML	۰/۷۸٤	۹/۷	۱/٦۳	۱/٤۹	۱۰/۵۹	۰/۰۲۳	۰/۹٤۸	۲۹/٤۲
٤۵	CL	۰/۸٦۸	۱۱/۳	۱/۵۹	۱/٤۳	۱۰/۹۲	۰/۰۰۸	۰/۹۸۳	۳۲/٤۳
٤٦	CL-ML	۰/۸۳۸	۱٤/٦	۱/٦۷	۱/٤۵	۳/۵٤	۰/۰۷۸	۰/۸۲۸	۳۱/۵۱
٤۷	CL	۰/۸۸۹	۲٦/٤	۱/۸۲	۱/٤٤	۰/۱٦	-۰/۰۲۰	۱/۰٤۲	۳۲/۷۳
٤۸	CL	۰/۸۰۸	۲۳/۸	۱/۸٤	۱/٤۹	۰/۲۲	-۰/۱۰۳	۱/۲۳۰	۲۹/۹۰
٤۹	CL	۰/۷۳۷	۲۰/۹	۱/۹	۱/۵۷	۱/۳۲	-۰/۱۵۹	۱/۳۷٤	۲۷/۱٤
۵۰	CL	۰/٦۲٤	۲۳/۲	۱/۸۷	۱/٦۵	۱/۷۹	-۰/۱٦۱	۱/٤۱۹	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 محقیقان مختلف ارائه کرده‌اند. در این پژوهش از بین معیارهای بیان شده معیارهای دنیسف، هولتز و هیلف، آیین‌نامهٔ روسیه و آیین‌نامهٔ ASTM که متداول‌تر است روابط (۱الی٤)، [٤٤] برای ارزیابی پتانسیل رمبندگی خاک

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]

بررسی شده انتخاب شده است. قابل ذکر است علاوه بر نتایج این پژوهش (جدول ٤) از داده‌های موجود در بانک اطلاعات اداره مکانیک خاک استان کرمان نیز در ارزیابی پتانسیل رمبندگی استفاده شده است (جدول ۵). بر اساس نتایج به‌دست آمده خاک‌های شهر کرمان بر اساس معیار آیین‌نامهٔ ساختمانی روسیه عمدتاً رمبنده هستند (L>-0.1)، بر اساس معیار دنیسف (هرگاه e/eL بزرگ‌تر از ۱/۵ باشد خاک غیررمبنده و در صورتی که بین ۰/۷۵ تا ۱/۵ باشد خاک مستعد رمبندگی و اگر بین ۰/۵ تا ۰/۷۵ باشد خاک شدیداً رمبنده هستند) خاک‌های شهر کرمان در محدودهٔ 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 ۰/۱۵ تا ۱۱ متغیر است که عمدتاً در محدودهٔ خاک‌های با رمبندگی متوسط قرار می‌گیرند (شکل‌های ١٦ الی ١٩). در مقایسه نتایج معیارهای استفاده شده، در مناطقی از شهر که خاک رفتار رمبنده دارد، نتایج نسبتاً مشابهی به لحاظ معرفی خاک رمبنده دارند. شکل ۲۰ پتانسیل رمبندگی را در بخش‌های مختلف شهر نشان می‌دهد.

$$L = \frac{e_0 - e_L}{1+e_0}$$ معیار آیین‌نامهٔ ساختمانی روسیه (۱)

$$K = \frac{e}{e_L}$$ معیار Denisov(۱۹٦٤) [44] (۲)

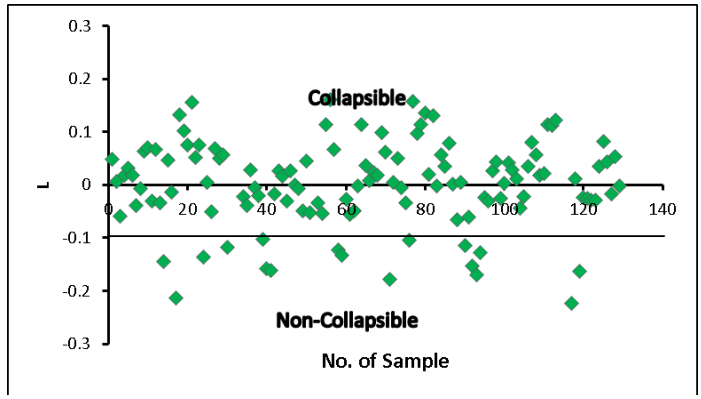
$$W_{sat} = \left[\frac{G_S - \gamma_d}{G_S \times \gamma_d}\right] \times 100$$ معیار Holtz and Hilf (۱۹٦۱) [44] (۳)

$$I_e = \frac{\Delta e \times 100}{1+e_0}$$ معیار آیین‌نامهٔ ASTM (۲۰۰۲) (٤)

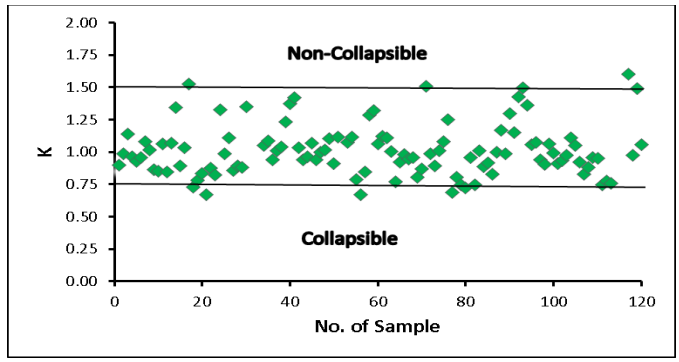
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]

جدول۵. خلاصه نتایج پتانسیل رمبندگی

معیار	تعداد	میانگین	حداقل	حداکثر
ASTM	۱۳۲	۲/٦۱	۰/۱۵	۱۱/۰۲
ایین نامه ساختمانی روسیه	۱۳۲	−۰/۰۰٦	−۰/۲۲	۰/۱٦
دنسیف	۱۳۲	۱/۰۲۸	۰/٦۷	۱/٦۲
هواتز و هیلف	۱۳۲	۳۰/٦۷	۱۹/۱۸	٤۲/۱۰

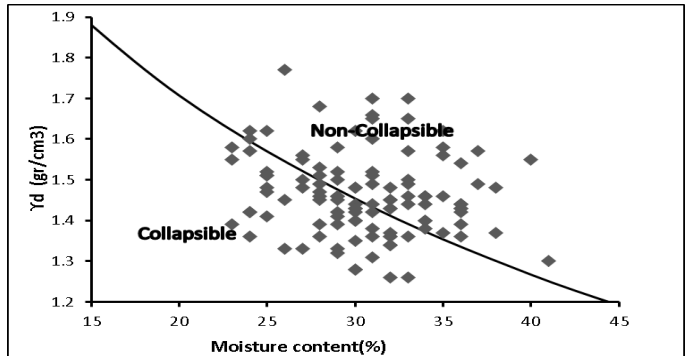


شکل۱٦. پتانسیل رمبندگی بر اساس آیین‌نامهٔ ساختمانی روسیه

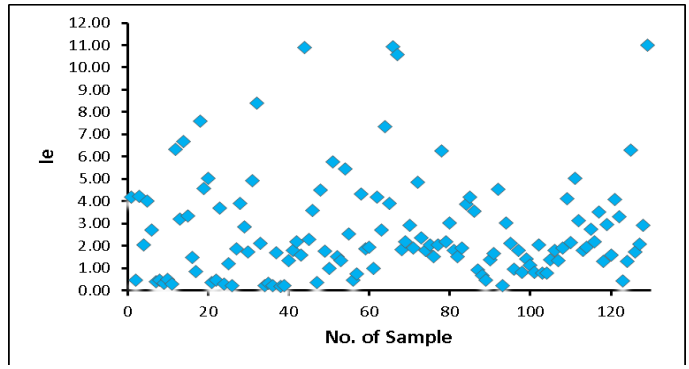


شکل۱۷. پتانسیل رمبندگی بر اساس معیار سال (۱۹٦٤)Denisov

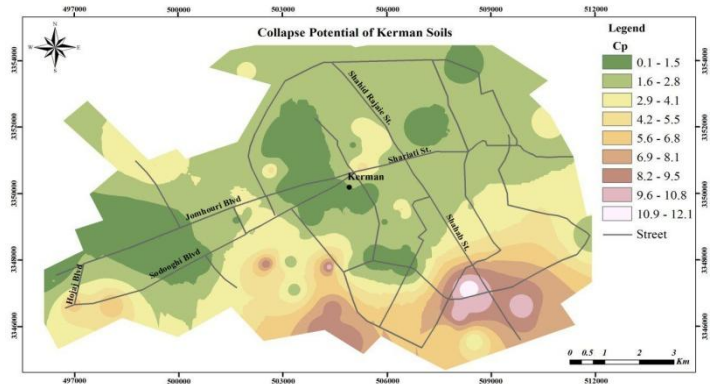
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]



شکل ۱۸. پتانسیل رمبندگی بر اساس پیشنهاد Holtz and Hilf (۱۹٦۱)



شکل۱۹. تغییرات شاخص رمبندگی، Ie بر اساس معیار ASTMسال۲۰۰۲



شکل ۲۰. پهنه‌بندی پتانسیل رمبندگی(Cp) خاک‌های ساختگاه شهر کرمان بر اساس معیار ASTM

(در این معیار مقادیر ۲تا ٦ رمبندگی متوسط و ٦ تا ۱۰ رمبندگی زیاد را نشان می‌دهند)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]

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 متراکم 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 به‌چشم می‌خورد. علاوه بر ذرات خاک حفرات و فضاهای خالی خاک نیز دارای توزیع تصادفی و بی‌نظم هستند و اندازهٔ 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، به‌صورت سیمان کلسیتی است. نمونه‌های مربوط به منطقهٔ هفت باغ و شهرک مطهری دارای ساختار و منافذ بین دانه‌ای هستند. با توجه به نتایج به‌دست آمده خاک‌های شهر کرمان بر اساس آیین‌نامهٔ ساختمانی روسیه رمبنده، بر اساس معیار دنیسف مستعد رمبندگی هستند. بر اساس معیار ASTM در بخش‌های مرکزی شهر خاک‌ها میزان رمبندگی کم تا متوسطی نشان می‌دهند. اما در برخی مناطق شهر مانند شهرک مطهری و هفت باغ خاک‌ها کاملاً حالت رمبندگی از خود نشان می‌دهند.

نتایج بررسی پتانسیل رمبندگی بر رویداده‌های گردآوری شده [٤٥]

کلاس خاک	e0	w(%)	ϒb (gr/cm3)	ϒd (gr/cm3)	معیار ASTM	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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]

کلاس خاک	e0	w(%)	ϒb (gr/cm3)	ϒd (gr/cm3)	معیار ASTM	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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]

کلاس خاک	e0	w(%)	ϒb (gr/cm3)	ϒd (gr/cm3)	معیار ASTM	آیین‌نامه 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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

کلاس خاک	e0	w(%)	ϒb (gr/cm3)	ϒd (gr/cm3)	معیار ASTM	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، ϒd: دانسیته خشک، ϒb: 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.

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]

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.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]

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. Feda 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.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]

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.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]

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., Mokhberi 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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.3.4]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.1]

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 محدودهٔ شهر کرمان، سال‌های(۱۳۷۵ تا ۱۳۹۵).