

## تخمین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک رس با پلاستیسیته کم بر اساس عدد *SPT* و بررسی تاثیر آهک بر مقاومت فشاری خاک رس

پرهام باباخانی<sup>۱</sup>، ابراهیم رحیمی<sup>۲</sup>، هورمان غروی<sup>۳</sup>، محمدرضا مطهری<sup>۴</sup> و احمد رستگاریانیا<sup>۵\*</sup>

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان

۳- گروه مهندسی عمران، واحد فنی و مهندسی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۴- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک

۵- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

نویسنده مسئول: \*ahmad.rastegarnia@mail.um.ac.ir

نوع مقاله: پژوهشی

پذیرش: ۹۹/۴/۱۲

دریافت: ۹۸/۱۲/۱۸

### چکیده

در این تحقیق رابطه چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی با عدد نفوذ استاندارد در ۱۲۰ گمانه در حوضه رسوبی کرمان در جنوب ایران بررسی شد. با توجه به اینکه خاک این حوضه به طور عمده از نوع *CL* می‌باشد تأثیر آهک هیدراته بر روی مقاومت فشاری و خصوصیات تراکمی این نوع خاک نیز بررسی شد. نتایج نشان داد که ارتباط چسبندگی با عدد نفوذ استاندارد بیش‌تر از ارتباط زاویه اصطکاک داخلی با عدد نفوذ استاندارد می‌باشد که نشان می‌دهد تأثیر چسبندگی بر خصوصیات مقاومت برشی خاک‌های ریزدانه بیش‌تر از تأثیر زاویه اصطکاک داخلی بر مقاومت اینگونه خاک‌ها می‌باشد. براساس نتایج شبکه عصبی مصنوعی (*ANN*)، ضریب همبستگی زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی با *SPT-N<sub>60</sub>* به ترتیب ۰/۸۴ و ۰/۹۰ می‌باشد. با مقایسه  $R^2$  و *RMSE* دو روش، شبکه عصبی مصنوعی دقت بالاتری نسبت به رگرسیون ساده برای پیش‌بینی پارامترهای مقاومت برشی نشان داد. مشخص شد که، *SPT* می‌تواند برای تخمین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی رس‌ها بخصوص در مرحله مقدماتی شناسایی ساختگاه پروژه‌ها با دقت قابل قبول مورد استفاده قرار گیرد. جهت بررسی تأثیر آهک بر ویژگی مقاومتی و تراکمی خاک رس، تعدادی نمونه با افزودن مقادیر مختلفی از آهک تهیه شد. تغییرات ساختار خاک در حین دوره عمل‌آوری با استفاده از آزمایش میکروسکوپ *SEM* بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار آهک وزن واحد حجم خشک حداکثر کاهش و رطوبت بهینه افزایش یافته است. هم‌چنین افزایش آهک به طور قابل‌ملاحظه‌ای موجب افزایش مقاومت فشاری خاک با رطوبت بهینه گردید و این افزایش مقاومت به طور معنی‌دار متأثر از زمان عمل‌آوری و مقادیر آهک هیدراته می‌باشد. به طوری که حداکثر مقاومت فشاری به ازای ۷ درصد آهک بدست آمد.

**واژه‌های کلیدی:** خصوصیات ژئوتکنیکی، تخمین پارامترهای مقاومت برشی، حوضه رسوبی کرمان، افزودنی آهک، تثبیت رس

### ۱- پیشگفتار

می‌شود. از جمله معروف‌ترین آزمون برجا جهت تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی خاک آزمایش *SPT* می‌باشد. گرچه در اصل آزمایش *SPT* برای تعیین خصوصیات خاک‌های درشت‌دانه ارائه شده است، اما به مرور زمان از آن جهت برآورد خواص مهندسی خاک‌های ریزدانه از قبیل مقاومت فشار زهکشی نشده (*qu*) و ضریب تراکم‌پذیری حجمی، مقاومت برشی زهکشی نشده (*Su*) و دیگر پارامترهای ژئوتکنیکی مانند چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی استفاده می‌شود (مجتبی و همکاران، ۲۰۱۷ و سیوریکایا و همکاران، ۲۰۱۳). محققین مختلف رابطه عدد نفوذ استاندارد را با زاویه اصطکاک داخلی و

تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی با استفاده از آزمون‌های صحرائی مانند آزمایش نفوذ استاندارد (*SPT*) در اکثر پروژه‌های عمرانی به دلیل در دسترس نبودن تجهیزات، محدودیت‌های مالی و زمانی و به هم‌خوردگی ناشی از نمونه‌برداری یک اولویت می‌باشد (مخبری و خادمی، ۲۰۱۷؛ سیوریکایا و طغرل ۲۰۰۶؛ مطهری‌تباری و شوش‌پشا، ۲۰۱۸؛ نساجی و کلانتری، ۲۰۱۱ و یاقوتی لیقوان و حاج علیلو بناب، ۲۰۱۸). از طرفی تثبیت خاک باعث بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی خاک موجود در محل ساختگاه پروژه‌ها و دسترسی به مشخصات مورد نیاز

بررسی‌ها نشان داده است که حداکثر افزایش مقاومت فشاری خاک رس در اثر افزودن ۸ درصد آهک ایجاد می‌شود (هاریشانی و همکاران، ۲۰۱۱؛ چن، ۲۰۱۲ و الشیناوی، ۲۰۱۷). بررسی دیگری نشان داد که حداکثر افزایش در مقاومت فشاری محصور نشده و حد روانی خاک به ترتیب بعد از افزودن ۸ و ۴ درصد آهک ایجاد می‌شود (مدرس و نوسودی، ۲۰۱۵). تحقیقات دیگر حداکثر تغییر در شاخص خمیری را به ازای ۱۰ درصد آهک گزارش کردند (اکاگو و یاکوبو، ۲۰۰۰ و باقرپور و چوبستی، ۲۰۰۳). افزودن آهک به خاک رس منجر به رخداد واکنش پوزولانی و در نتیجه کاهش کانی‌های رسی در نمونه‌های تثبیت شده می‌گردد. کلسیت به عنوان مواد سخت کننده خاک شناخته می‌شود که منجر به افزایش مقاومت خاک می‌شود (احمد، ۲۰۱۵ و هاشمی و همکاران، ۲۰۱۹).

هدف اصلی این مقاله ارائه روابطی جهت تخمین پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بر اساس *SPT* و بررسی عملکرد آهک در بهبود ویژگی تراکمی و مقاومت فشاری خاک رس حوضه رسوبی کرمان می‌باشد. به منظور ارائه روابط جهت تخمین پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی از نتایج آزمایش برش مستقیم و آزمایش نفوذ استاندارد (*SPT*) که از ۱۲۰ گمانه از حوضه رسوبی کرمان در دسترس می‌باشند، استفاده شد.

جهت تاثیر آهک بر خاک رس، بر روی نمونه‌های رسی آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص، مقاومت فشاری محصور نشده، دانه‌بندی، حدود آتربرگ، تراکم، *XRD*، *SEM* و *XRF* انجام شد. به خاک رس درصدهای مختلف آهک هیدراته اضافه و نمونه‌های با درصد مشخص از آهک تهیه شدند. سپس برای تاثیر زمان عمل‌آوری آهک بر مقاومت فشاری، نمونه مخلوط در زمان‌های ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفت. هم‌چنین تاثیر افزودنی آهک بر ویژگی تراکمی خاک رس مشخص شد.

## ۲- منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه حوضه رسوبی کرمان در جنوب ایران با مختصات جغرافیایی  $X:506524$  و  $Y:3351027$  می‌باشد. شکل ۱ مقطع زمین‌شناسی این حوضه را نشان می‌دهد. حوضه رسوبی کرمان، یک چاله تکنونیک از نوع گرابن کششی است به گونه‌ای که تحت تاثیر حرکت

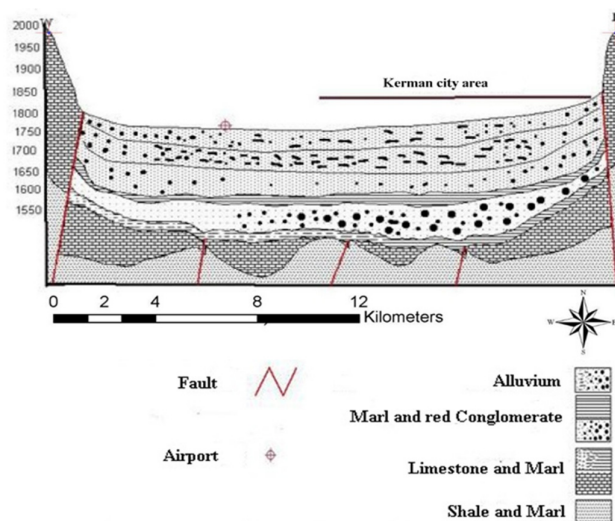
چسبندگی بررسی کردند (فون و کولهاوی، ۱۹۹۹؛ سیوریکایا و طغرل، ۲۰۰۶؛ سالاری و همکاران، ۲۰۱۵). قنبری و همکاران (۱۳۹۰) رابطه زاویه اصطکاک داخلی خاک با *SPT* را برای هر یک از لایه‌های رسوبات آبرفتی کرج بررسی کردند. ایشان بیان کردند که مقایسه روابط حاصل از رسوبات آبرفتی کرج با نتایج پژوهشگران دیگر نشان می‌دهد که رابطه ارائه شده توسط میرهوف (۱۹۵۶) و هاتاناکا و اوشیدا (۱۹۹۶) مقدار بالاتری برای زاویه اصطکاک داخلی رسوبات آبرفتی کرج ارائه می‌کند (قنبری و همکاران، ۱۳۹۰). قبادی و همکاران (۱۳۹۱) بیان کردند که آهک بهینه برای بهسازی خاک‌های ریزدانه موجود در ساختگاه سد اکباتان برابر با ۷ درصد در دوره عمل‌آوری ۴۵ روزه می‌باشد. در تحقیقی دیگر تاثیر آهک بر خاک‌های رسی بررسی و مشخص شد که میزان آهک بهینه برای دستیابی به مقاومت فشاری حداکثر در بهسازی خاک رس با پلاستیسیت کم (*CL*) حدود ۸ درصد وزنی خاک می‌باشد (ادبسی و همکاران، ۲۰۱۶).

طی سال‌های اخیر، چندین افزودنی به عنوان عامل پایدار کننده خاک مورد استفاده قرار گرفته است. اثرات برخی از پایدارکننده‌ها شامل گونه‌های مختلف سیمان، آهک، مواد ضایعاتی، افزودنی‌های پوزولانی، بنتونیت، فیبر و قیرها بررسی شده است (بیرانوند و همکاران، ۲۰۱۹؛ فوزی و همکاران، ۲۰۱۳؛ فروتن و همکاران، ۲۰۱۸؛ اویلامی و آن روی، ۲۰۱۶؛ مطهری و کیانی وفا، ۲۰۲۰؛ عباسی دذفولی و شکیبیا، ۲۰۲۰؛ عباسی دذفولی و همکاران، ۲۰۱۹؛ نگهدار و همکاران، ۱۳۹۳؛ ۲۰۲۰ و چاندرساکاران، ۲۰۱۸). استفاده از این روش در پروژه‌های بزرگ و با اهمیت از جمله پروژه‌های راهسازی به خصوص در مواردی که جایگزینی خاک‌های نامناسب در برگیرنده حجم بالایی از عملیات خاکی باشد؛ می‌تواند از نظر اقتصادی مورد توجه قرار گیرد. محققین مختلف تاثیر آهک بر خاک‌های رسی را بررسی کردند (اسپرهام و همکاران، ۲۰۲۰؛ سکو و همکاران، ۲۰۱۱؛ اسماعیلی، ۲۰۱۳ و طاهری و همکاران، ۲۰۱۸). تثبیت خاک‌های رسی با استفاده از پایدارکننده‌های متداول مانند سیمان و آهک باعث افزایش مقاومت و بهبود دوام آن در برابر رطوبت و شرایط ذوب و انجماد می‌گردد (لو و همکاران، ۲۰۱۴ و شیبی و کامی، ۲۰۱۴).

کرتاسه‌اند که در اطراف شهر در حاشیه شرقی شامل سه ارتفاع کوچک جدا از هم‌اند که بر روی دو تا از آن‌ها قلعه اردشیر و قلعه‌دختر که هسته‌های اولیه شهر کرمان می‌باشند، بنا شده‌اند. سنگ‌های پالئوژن در بر گیرنده واحدهای سنگ‌های آندزیتی- توفی و سازند کنگلومرای کرمان (کنگلومرای قاعده‌ای) می‌باشند. سنگ‌های نئوژن (کنگلومرای جوان نئوژن- کواترنر) را می‌توان به عنوان قدیمی‌ترین مجموعه رسوبی کواترنر قلمداد نمود که گستره وسیعی از ناحیه شمال شرقی کرمان را می‌پوشانند. این رسوبی‌های آواری بیش‌تر به صورت برش، کنگلومرا، مارن، ماسه‌سنگ و لایه‌های نازک گچ‌سنگ دیده می‌شوند (شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان کرمان، ۱۳۶۴).

گسل‌های عادی موجود در مرز کوه با دشت و بالا رفتن کوهستان ایجاد شده است. با توجه به مدل حوضه رسوبی کرمان شکل‌گیری دشت رسوبی کرمان در اواخر کواترنر اتفاق افتاده است. بخشی از گستره دشت را کفه‌های نمکی یا پلایای سیلتی رسی می‌پوشاند (شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان کرمان، ۱۳۶۴).

واحدهای زمین‌شناسی حوضه شامل سنگ‌های کامبرین و پرمین (سری دزو)، سنگ‌های پرمین و تریاس (سنگ‌های کربناتی سازندهای جمال و شتری)، سنگ‌های ژوراسیک (مجموعه‌ای از سنگ‌های آواری بصورت ماسه‌سنگ و شیل شامل سازندهای نایبند، شمشک و بادامو) می‌باشند. گسترده‌ترین سنگ‌های حوضه آبریز، سنگ‌های شیلی، ماسه‌سنگی و آهکی



شکل ۱. مقطع زمین‌شناسی حوضه رسوبی شهر کرمان (شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان کرمان، ۱۳۶۴)

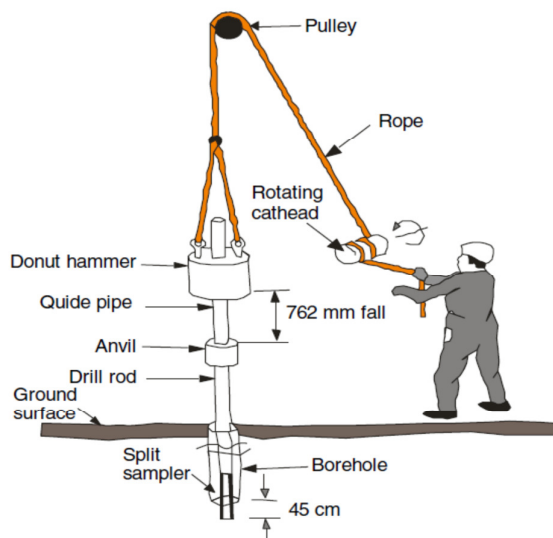
به طور عمده از نوع *CL* (رس با پلاستیسیته کم) می‌باشد (ASTM 2011). تاثیر افزودنی آهک بر این نوع خاک مورد بررسی قرار گرفت. روش تحقیق جهت بررسی تاثیر آهک بر ویژگی تراکمی و مقاومتی خاک رس شامل تهیه نمونه‌های خاک، انجام آزمایش‌های شناسایی (تعیین خصوصیات فیزیکی، مقاومتی، SEM و آزمایش XRF) خاک مورد مطالعه، تهیه نمونه‌ها با درصد مختلف آهک و انجام آزمایش‌های تراکم و مقاومت فشاری محصور نشده است. آزمایش حدود آتربرگ با استفاده از استاندارد ASTM D4318 انجام شد (ASTM 2010a). وزن مخصوص خاک رس بر اساس استاندارد ASTM D854 تعیین شد (ASTM 2010b)، (جدول ۵). رطوبت بهینه و

### ۳- مواد و روش‌ها

به منظور انجام آزمایش *SPT* فرو بردن یک نمونه‌گیر دو کفه‌ای استاندارد با استفاده از سقوط ضربات مکرر چکش ۶۳/۵ کیلوگرمی از ارتفاع ۷۶۰ میلی‌متر انجام می‌شود. نمونه‌گیر قاشقی شکاف‌دار در پایین‌ترین عمق گمانه قرار می‌گیرد، و به اندازه ۴۵۰ میلی‌متر در خاک رانده می‌شود. مقاومت نفوذ برابر تعداد ضربات مورد نیاز برای راندن قاشق شکاف‌دار برای ۳۰۰ میلی‌متر انتهایی می‌باشد (ASTM 2008). شکل ۲ شماتیک آزمایش *SPT* را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه بر اساس بررسی‌های ژئوتکنیک خاک حوضه رسوبی کرمان بر اساس طبقه‌بندی یونیفاید و مطابق با استاندارد ASTM D2487

کیسه نایلونی ریخته شده و درب آن تا زمان ساخت نمونه‌ها بسته نگه داشته شد تا رطوبت آن از بین نرود. نسبت‌های آهک در مخلوط به صورت نسبت وزن خشک آن‌ها به وزن خشک خاک تعریف شد. در آزمایش تراکم ۸ سطح آهک هیدراته در نظر گرفته شد. بنابراین ۸ نوع مخلوط تهیه گردید. نمونه‌های مورد نیاز برای بررسی تاثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری محصور نشده نیز در ۵ سطح مختلف از آهک تهیه شد.

حداکثر چگالی خشک خاک در آزمایش تراکم بر اساس استاندارد *ASTM D1557* تعیین شد (*ASTM 2012*). همچنین مقاومت محصور نشده نمونه‌ها بر اساس استاندارد *ASTM D2166* (*ASTM 2006*) تعیین شد. برای ساخت نمونه‌های حاوی ترکیب آهک هیدراته و خاک ابتدا آهک هیدراته با خاک مخلوط و سپس آب به تدریج به اندازه رطوبت بهینه به دست آمده از آزمایش تراکم به نمونه‌ها اضافه گردید. سپس مصالح مخلوط در



شکل ۲. شماتیک دیاگرام آزمایش *SPT* (هتیاراچی و براون، ۲۰۰۹)

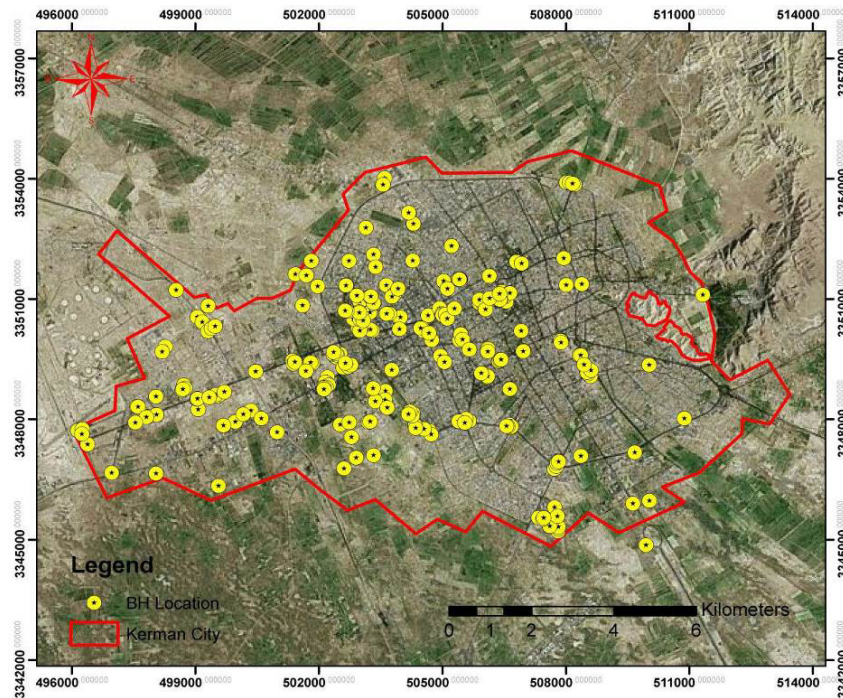
کرمان را نشان می‌دهد. نتایج کلیه آزمون‌های آزمایشگاهی انجام شده بر روی خاک حاصل از گمانه‌ها و همچنین نتایج آزمایش *SPT* در جدول ۱ آمده است. مشاهده می‌شود که متوسط چسبندگی حاصل از آزمایش سه‌محوری تقریباً  $2/5$  برابر مقدار آن در آزمایش برش مستقیم می‌باشد. اختلاف چسبندگی در دو آزمایش به دلیل تاثیر فشار همه‌جانه می‌باشد. فشار همه‌جانه در آزمایش سه‌محوری باعث افزایش پارامترهای مقاومت برشی می‌شود (کمالی‌اصل و همکاران، ۲۰۱۹). متوسط زاویه اصطکاک داخلی در آزمایش‌های برش مستقیم و سه‌محوری (تحکیم یافته زهکشی شده  $(CD)$ ) به ترتیب  $20/9$  و  $4/5$  می‌باشد. مقادیر ضریب تحکیم و شاخص تورم نیز به ترتیب برابر با  $0/19$  و  $0/23$  می‌باشند (جدول ۱). بررسی نتایج حاصل از گمانه‌های حفاری شده نشان می‌دهد که براساس طبقه‌بندی یونیفاید خاک غالباً از نوع *CL* می‌باشد (جدول ۲).

#### ۴- نتایج و بحث

در این پژوهش خصوصیات ژئوتکنیکی حوضه رسوبی کرمان با استفاده از نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و برجا بررسی شد و روابطی جهت تعیین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بر اساس عدد نفوذ ارائه شد. با توجه به اینکه خاک این حوضه عمدتاً ( $77/1$  درصد) از نوع *CL* می‌باشد، تاثیر آهک هیدراته بر روی این نوع خاک نیز بررسی شد. منحنی دانه‌بندی این نوع خاک در شکل ۱۷ ارائه شده است.

#### ۴-۱- مطالعات ژئوتکنیکی و پتروگرافی رسوبات

آزمایش‌های آزمایشگاهی نظیر دانه‌بندی، دانسیته، حدود آتربرگ، برش مستقیم، آزمایش سه‌محوری و تحکیم بر روی خاک حاصل از گمانه‌ها و آزمایش نفوذ استاندارد بر طبق استاندارد *ASTM D1586* (*ASTM 2008*) و در بیش از ۱۰۰ گمانه در حوضه رسوبی کرمان انجام شده است. شکل ۳ موقعیت گمانه‌های حفاری شده در حوضه رسوبی



شکل ۱. موقعیت گمانه‌های حفاری شده در حوضه رسوبی کرمان

جدول ۱. توصیف شاخص‌های مرکزی و پراکندگی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک حوضه کرمان

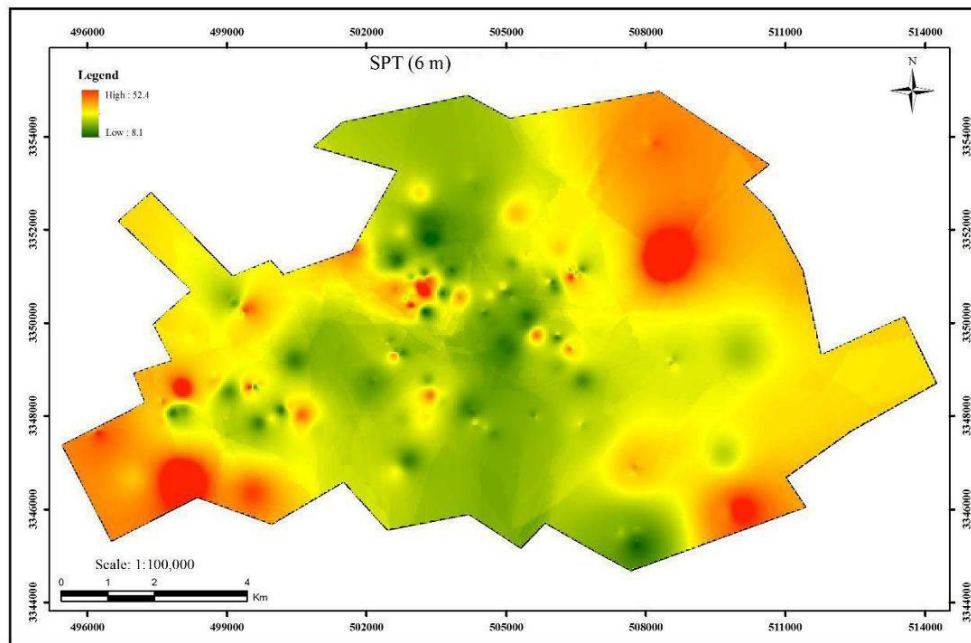
پارامتر	توضیح هر پارامتر	میانگین	میانه	مد	انحراف استاندارد	حداقل	حداکثر
$LL$ (%)	حد روانی	۳۸٫۳	۳۴	۳۱	۷/۵۸	۱۵	۶۸
$PI$ (%)	شاخص خمیری	۱۴٫۷	۱۴	۱۲	۵/۹۱	۲	۴۰
$N(SPT)$	عدد نفوذ استاندارد	۲۳٫۱۳	۲۱	۱۹	۹/۱۳	۴	۶۲
Passing Mesh 200	درصد عبوری از الک ۲۰۰	۸۹٫۲	۹۴	۹۹	۱۳/۴۳	۱۲	۱۰
$\omega$ (%)	رطوبت بهینه	۲۰٫۱	۲۰/۵۰	۲۴	۶/۳۶	۳	۳۹/۵۰
$\gamma_b$	چگالی ظاهری	۱٫۸۴	۱/۸۵	۱/۹۱	-۱/۳۶	۱/۳۳	۲/۳۴
$\gamma_d$	چگالی خشک	۱٫۵۴	۱/۵۴	۱/۴۹	-۱/۰۳	۱/۲۱	۱/۸۸
$\Phi_D$	زاویه اصطکاک داخلی در آزمایش برش مستقیم	۲۰/۸۶	۲۳/۲۰	۲۸	-۱/۸۰۷	۰/۰۰	۳۴
$C_D$	چسبندگی در آزمایش برش مستقیم	۰/۲۰	۰/۰۵	۰/۰۲	-۱/۹۹	۰/۰۰	۰/۶۶
$\Phi_T$	زاویه اصطکاک داخلی در آزمایش سه محوری	۴/۵۰	۳/۶۰	۲	۳/۲۹۱	۰/۰۰	۱۶
$C_T$	چسبندگی در آزمایش سه محوری	۰/۴۸	۰/۴۲	۰/۴۰	-۱/۹۴	۰/۱۳	۰/۹۸
$C_C$	ضریب تراکم در آزمایش تحکیم	۰/۱۹	۰/۱۸۹	۰/۱۴۹	-۰/۷۹	۰/۰۰	۰/۵۳
$C_S$	ضریب تحکیم در آزمایش تحکیم	۰/۰۲۳	۰/۰۲۲	۰/۰۱۳	-۰/۱۲	-۰/۰۱	۰/۱۰۴

خاک و عمق زیاد سطح ایستابی می‌توان گفت که رخداد روانگرایی پایین است. تصاویری از وضعیت عدد نفوذ استاندارد در اعماق ۶، ۱۰ و ۱۶ متری در اشکال ۴ تا ۶ ارائه شده است. هم‌چنین بررسی نتایج آزمایش  $XRD$  بر روی نمونه‌ها نشان می‌دهد که کانی رسی در این حوضه غالباً از نوع ایلیت می‌باشد (شکل ۷). شکل ۸ نیز تصویر میکروسکوپی از کانی ایلیت را نشان می‌دهد.

با توجه به دانه‌بندی رسوبات، بافت خاک (بافت ریزدانه)، عمق زیاد آب (بیش از ۱۵ متر) و وضعیت تراکم رسوبات (میانگین عدد نفوذ استاندارد برابر با ۲۳)، احتمال رخداد روانگرایی در این رسوبات پایین است. بنابراین حوضه رسوبی شهر کرمان عمدتاً از رسوبات ریزدانه رسی و سیلتی پوشیده شده و این بافت تا اعماق ادامه دارد. هم‌چنین زلزله‌خیز بودن منطقه نیز یکی از عوامل مهم موثر در روانگرایی است. در مجموع با توجه به شرایط ریزدانه بودن

جدول ۲. توزیع فراوانی و درصد فراوانی در طبقه‌بندی یونیفاید (USCS)

USCS	فراوانی	درصد فراوانی	درصد فراوانی معتبر
CH	۱۴۶	۴/۵	۴/۹
CL	۲۵۰۰	۷۷/۱	۸۴/۵
CL-ML	۱۴۴	۴/۴	۴/۹
GC	۵	۰/۲	۰/۲
GC-GM	۱	۰/۰	۰/۰
GM	۴	۰/۱	۰/۱
MH	۱۲	۰/۴	۰/۴
ML	۷۷	۲/۴	۲/۶
SC	۲۱	۰/۶	۰/۷
SC-SM	۱۲	۰/۴	۰/۴
SM	۳۳	۱/۰	۱/۱
SP	۲	۰/۱	۰/۱
SP-SM	۲	۰/۱	۰/۱
SW-SM	۱	۰/۰	۰/۰
Total	۲۹۶۰	۹۱/۳	۱۰۰



شکل ۲. تصویری از وضعیت عدد نفوذ استاندارد در عمق ۶

چسبندگی با عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده براساس نتایج آزمایش برش مستقیم نشان داده شده است. بر اساس شکل ۹، رابطه عدد نفوذ استاندارد با زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی مطابق زیر می‌باشد:

$$\varphi = 0.83N_{60} + 1.24 \quad (1)$$

$$C = 0.010N_{60} - 0.004 \quad (2)$$

در این روابط  $N_{60}$  عدد نفوذ اصلاح شده،  $\varphi$  زاویه اصطکاک داخلی بر حسب درجه و  $C$  چسبندگی خاک بر حسب

#### ۴-۲- رابطه میان زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی

##### با $SPT$ به کمک رگرسیون ساده

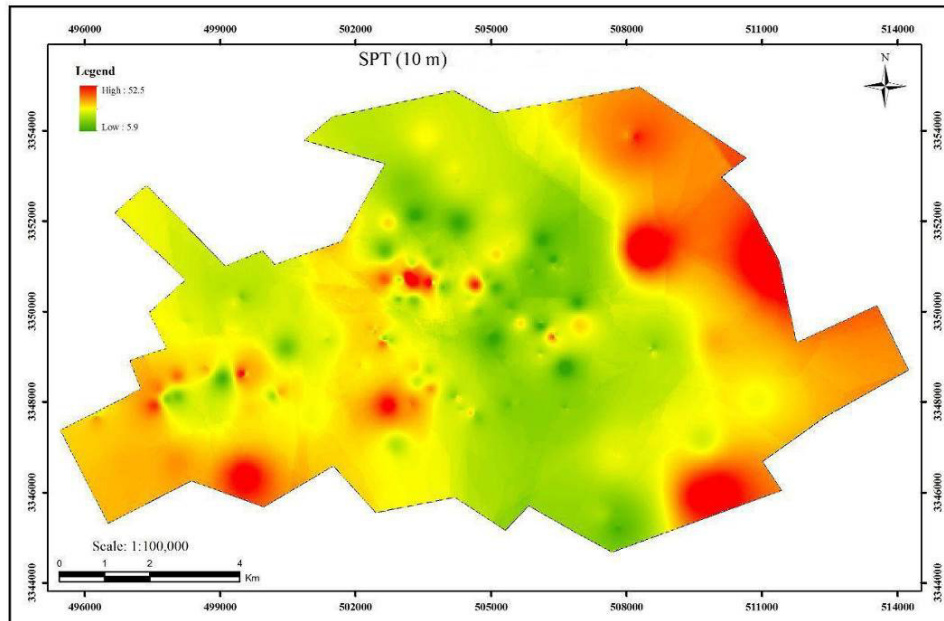
به منظور ارائه روابطی برای محاسبه زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک رس با پلاستیسیته کم ( $CL$ ) در حوضه آبرفتی کرمان، از نتایج آزمون‌های برش مستقیم و نفوذ استاندارد استفاده شد. بررسی‌های صورت گرفته بر روی ۱۹۴ داده نشان می‌دهد که ارتباط مستقیمی میان زاویه اصطکاک داخلی خاک و چسبندگی با عدد نفوذ استاندارد وجود دارد. در شکل ۹ ارتباط میان زاویه اصطکاک داخلی و

سطح معنی‌داری، ضریب تعیین، خطای مجذور میانگین مربعات ( $RMSE$ ) و آماره دوربین واتسون برای ارزیابی روابط استفاده شدند.  $RMSE$  و ضریب تعیین بطور گسترده توسط محققین مختلف برای ارزیابی روابط تجربی استفاده شده است (انصاری و هاشمی، ۲۰۱۷؛ مقدم و همکاران، ۲۰۱۸؛ شاهرخ‌آبادی و همکاران، ۲۰۱۹؛ قیداری و همکاران، ۲۰۲۰؛ کاشانی و همکاران، ۲۰۱۹).

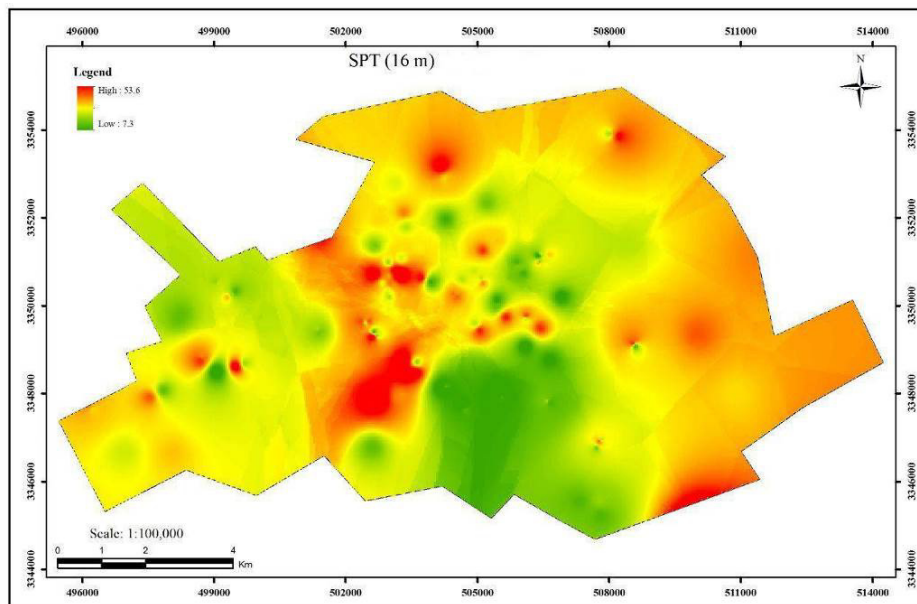
$Kg/Cm^2$  می‌باشد. مقدار  $N_{60}$  در این روابط با استفاده از رابطه ۳ اصلاح شد (ربرتسون و فیر، ۱۹۹۶):

$$N_{60} = N_{SPT} * C_E * C_B * C_S * C_R \quad (3)$$

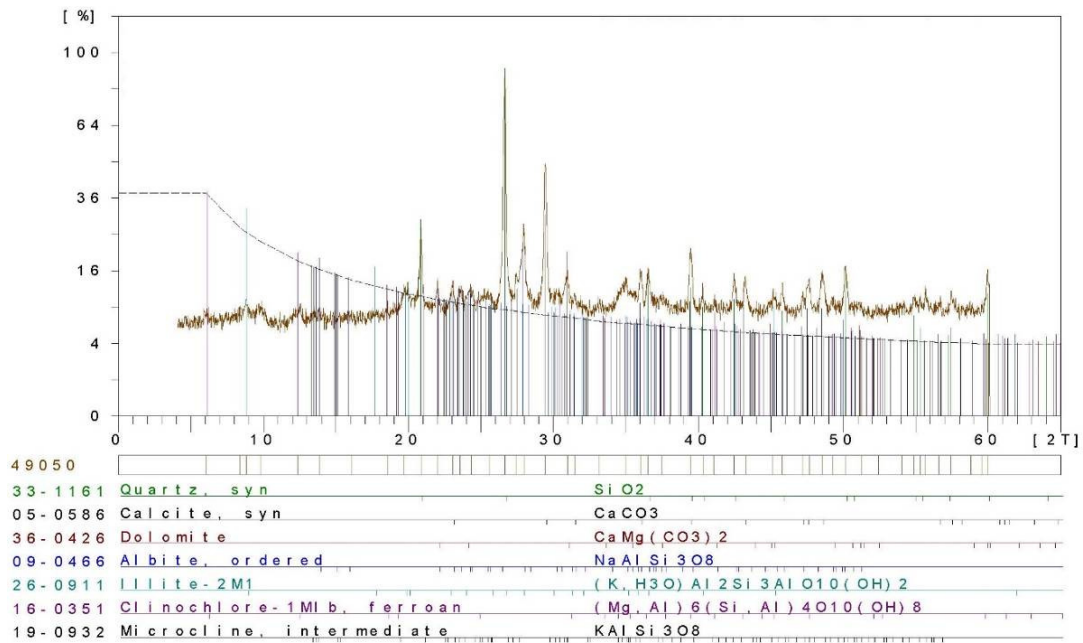
در رابطه ۳،  $C_B$  عدد اصلاحی برای قطر گمانه،  $C_E$  عدد اصلاحی برای انرژی چکش،  $C_S$  عدد اصلاحی برای شرایط نمونه‌گیر و  $C_R$  عدد اصلاحی برای طول میله حفاری می‌باشند. انواع رابطه زاویه اصطکاک و چسبندگی بر اساس  $N_{60}$  در جدول ۳ ارائه شده است. معیارهای آماری از جمله



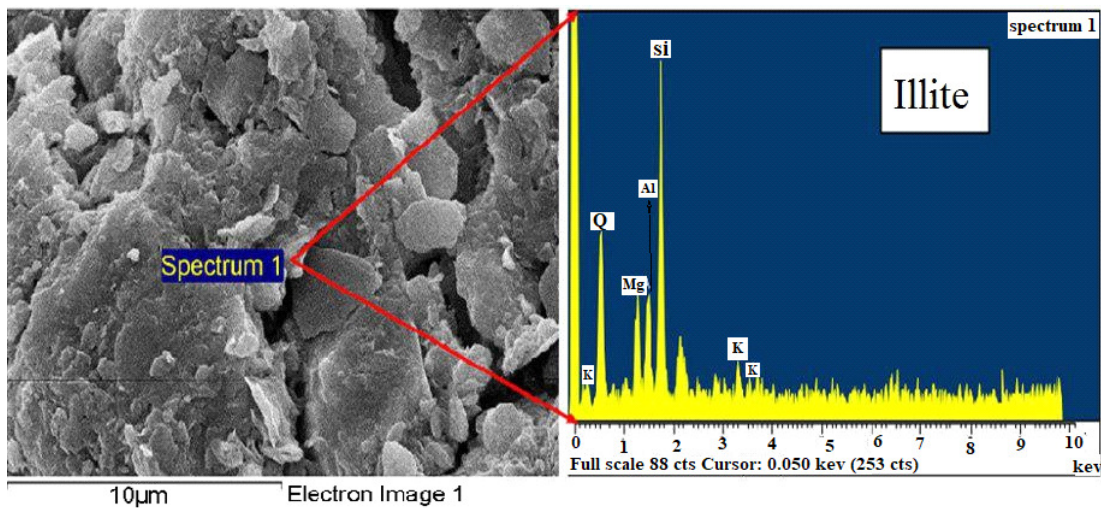
شکل ۳. تصویری از وضعیت عدد نفوذ استاندارد در عمق ۱۰



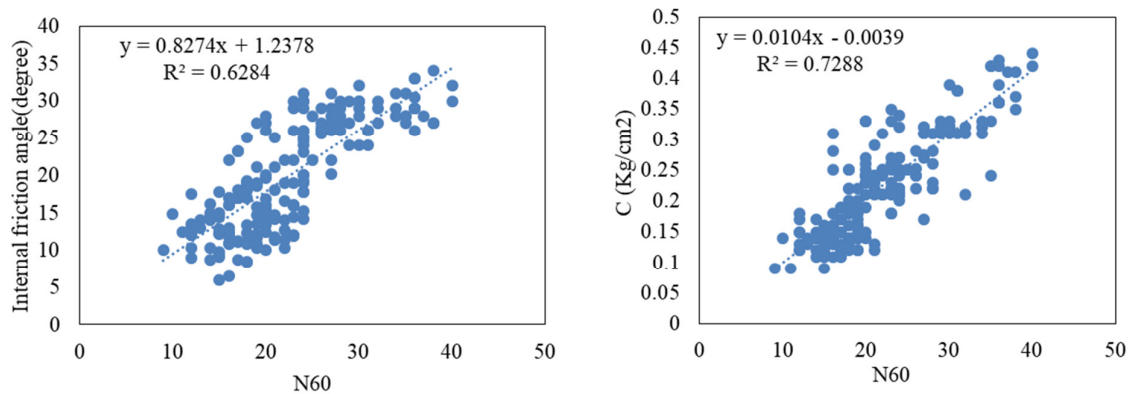
شکل ۴. تصویری از وضعیت عدد نفوذ استاندارد در عمق ۱۶ متری



شکل ۵. نمونه‌ای از نتایج آزمایش XRD کانی‌های رسی



شکل ۶. تصویر SEM کانی ایلیت



شکل ۹. ارتباط میان چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی با عدد نفوذ استاندارد



چسبندگی بر اساس عدد نفوذ استاندارد دارای دقت بیشتری نسبت به تخمین زاویه اصطکاک داخلی بر اساس این پارامتر می‌باشد. برخی از روابطه مربوط به بررسی‌های پیشین برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی با استفاده از چسبندگی و زاویه اصطکاک در جدول ۴ ارائه شده است. در این تحقیق مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی با استفاده از این روابط (موجود در جدول ۴) محاسبه شد و با مقادیر اندازه‌گیری شده تحقیق حاضر مقایسه شد. نتایج این بررسی در شکل ۱۱ آمده است. مقایسه نتایج حاصل از روابط ۱ و ۲ با روابط دیگر محققین نشان می‌دهد که رابطه ارائه شده توسط محمود (۲۰۱۳) بهترین سازگاری را با مقادیر تحقیق حاضر دارد. مشاهده می‌شود که بهترین رابطه مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین‌زده شده از نوع خطی و دارای سازگاری تقریباً متوسطی می‌باشد (شکل ۱۱). بهترین انطباق (بر اساس شکل ۱۱) و بالاترین دقت (بر اساس شکل ۱۰) مربوط به چسبندگی اندازه‌گیری شده و تخمین‌زده شده می‌باشد که نشان می‌دهد در خاک‌های ریزدانه همبستگی عدد نفوذ با چسبندگی بیش‌تر از رابطه آن با زاویه اصطکاک داخلی می‌باشد. این به این معنی می‌باشد که خصوصیات مقاومتی خاک ریزدانه بیش‌تر توسط چسبندگی آن‌ها کنترل می‌شود.

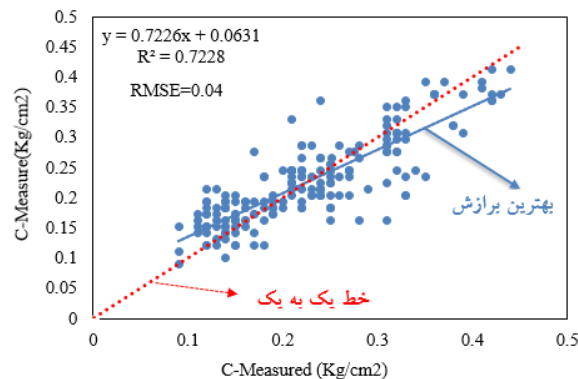
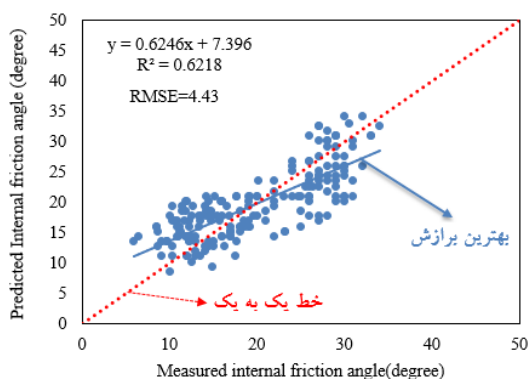
مقدار سطح معنی‌داری ( $P$ -value) حاصل از ANOVA (آزمون آنالیز واریانس) نشانگر مناسب بودن برازش بین متغیرهای مستقل و وابسته می‌باشد. اگر مقدار سطح معنی‌داری کمتر از ۵ درصد باشد نشانگر این است که الگو مناسب و برازنده داده می‌باشد.

یکی دیگر از مفروضات رگرسیون، مستقل بودن خطاها از یکدیگر است (خطاها همان تفاوت بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط معادله رگرسیون هستند). در صورتی که خطاها با یکدیگر همبستگی داشته باشند، امکان استفاده از رگرسیون وجود ندارد. به منظور بررسی استقلال خطاها از یکدیگر از آزمونی به نام آزمون دوربین واتسون ( $Durbin-Watson$ ) استفاده می‌شود. مقدار این آماره باید بین ۱/۵ تا ۲ باشد. در اینجا مقدار این آماره نشان می‌دهد که استقلال خطاها از یکدیگر وجود دارد و امکان استفاده از رابطه خطی وجود دارد (جدول ۳).

میزان  $RMSE$  و ضریب تعیین مربوط به رابطه چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی اندازه‌گیری شده و تخمین‌زده شده در شکل ۱۰ آمده است. مشاهده می‌شود که خطای مربوط به مقادیر چسبندگی مشاهداتی و اندازه‌گیری شده بسیار کم (کمتر از ۰/۰۵) می‌باشد. به این معنی که امکان تخمین

جدول ۳. آماره دوربین واتسون، سطح معنی‌داری و ضریب تعیین مربوط به انواع روابط چسبندگی و زاویه اصطکاک بر اساس  $N_{60}$

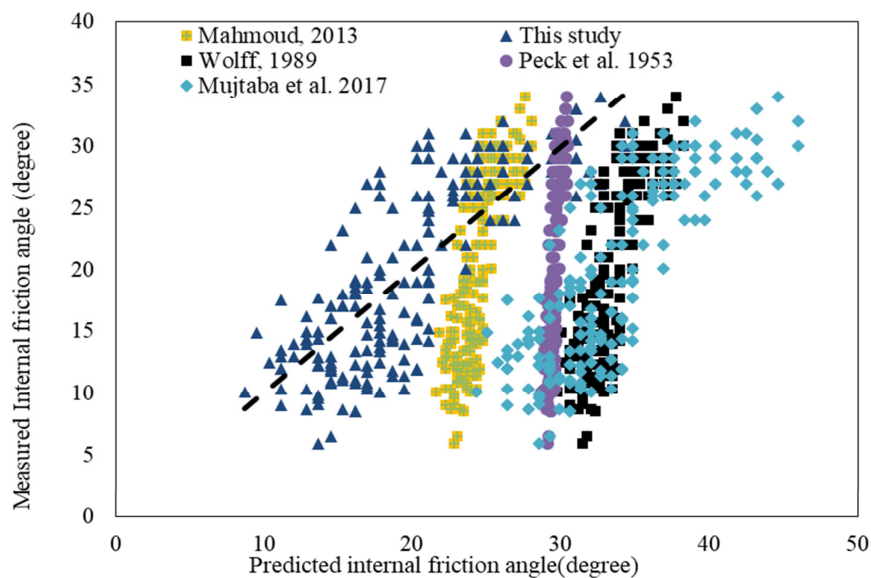
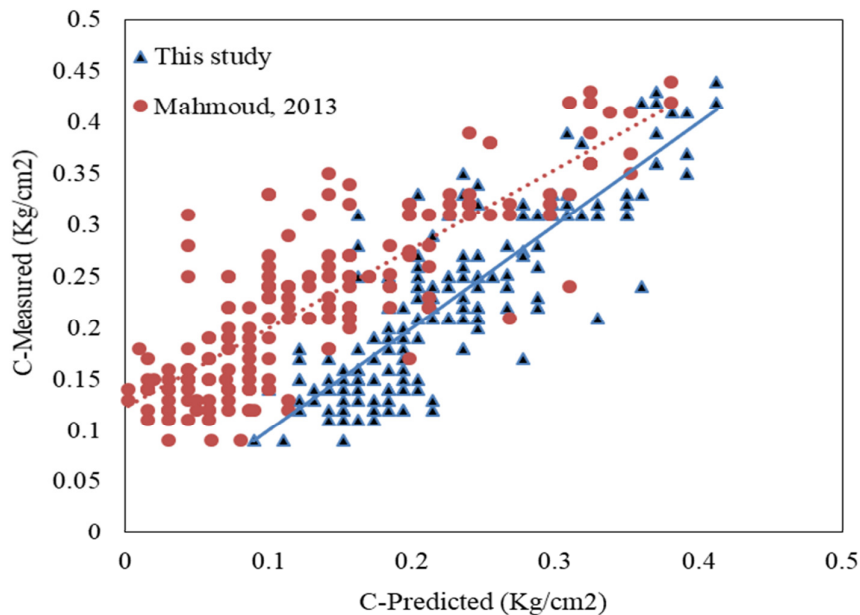
انواع رابطه زاویه اصطکاک بر اساس $N_{60}$	$R^2$	$P$ -value	$Durbin-Watson$	انواع رابطه چسبندگی بر اساس $N_{60}$	$R^2$	$P$ -value	$Durbin-Watson$
خطی	0.622	0.00	1.52	خطی	0.722	0.00	1.63
لگاریتمی	0.605	0.00		لگاریتمی	0.693	0.00	
چند جمله ای درجه دو	0.625	0.00		چند جمله ای درجه دو	0.723	0.00	
توانی	0.559	0.00		توانی	0.69	0.00	
تابع نمایی	0.562	0.00		تابع نمایی	0.681	0.00	



شکل ۷. ارتباط مقادیر تخمین‌زده شده توسط رگرسیون ساده با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه

جدول ۴. روابطه مربوط به بررسی های پیشین برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی با استفاده از چسبندگی و زاویه اصطکاک

روابط ارائه شده	مراجع	نوع خاک
$\varphi = 27.1 + 0.3N_F - 0.00054N_F^2$	ولف (۱۹۸۹)	خاک‌های ماسه ای
$\varphi = 0.70N_{60} + 18$	مجتبی و همکاران (۲۰۱۷)	
$\varphi = \sqrt{0.3N_F} + 27$	پک و همکاران (۱۹۵۳)	خاک‌های رس سیلتی با ماسه
$C = 0.014 N_{60} - 0.18$	محمود (۲۰۱۳)	
$\varphi = 0.209 N_{60} + 19.68$	محمود (۲۰۱۳)	



شکل ۱۱. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده با روابط حاصل از تحقیق حاضر و تحقیقات پیشین

عصبی جلوگیری می‌کند. مجموعه آزمایش در طول آموزش شبکه استفاده نشده و برای آزمایش شبکه در پیش‌بینی داده‌های جدید محفوظ می‌ماند (ساقی و همکاران ۲۰۱۹؛ سیفی ۲۰۱۷). عملکرد مدل آموزش دیده باید با استفاده از یک گروه مستقل از داده‌های آزمایش تأیید شود (جلیلی و همکاران ۲۰۱۵؛ قدمی و ابراهیمیان ۲۰۱۵؛ سیل و کارتام ۱۹۹۴؛ مایر و دندی ۲۰۰۰). در شکل ۱۲ روند تغییرات خطای مجذور میانگین ( $MSE$ ) در مدل بهینه با ۱۵ لایه پنهان برای هر مورد ارائه شده است. کمترین مقدار  $MSE$  در دوره‌های دوم و یازدهم به ترتیب برای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به دست آمد. مدل‌های ارائه شده با استفاده از  $R^2$  و  $RMSE$  ارزیابی شدند. نتایج حاصل از همبستگی بین خروجی و ورودی برای موارد آموزش، آزمایش و کل داده‌های مدل  $ANN$  بهینه در شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، رابطه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده برای چسبندگی خاک بیش‌تر از زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌باشد. شبکه عصبی برای برآورد این دو متغیر دقت بالاتری نسبت به رگرسیون ساده نشان دادند. دقت بالای روش  $ANN$  برای پیش‌بینی خواص ژئوتکنیکی نیز توسط محققان دیگر تأیید شده است (قربانی و همکاران ۲۰۱۲؛ رستگاریا و همکاران، ۲۰۱۸؛ عبدی و قاسمی‌دهنوی، ۲۰۱۹).

۴-۳- بهسازی خاک رس با استفاده از آهک هیدراته خاک‌های رسی با پلاستیسیته کم معمولاً دارای مقاومت و ظرفیت باربری اندکی هستند. یکی از راه‌های مقابله با مشکلات مربوط به این نوع خاک‌ها، تثبیت آن‌ها با آهک است. بهبود خصوصیات خاک در وضعیت درجا با استفاده از مواد افزودنی که به پایدار کردن یا تثبیت خاک معروف است، بیش‌تر برای خاک‌های ریزدانه مدنظر قرار می‌گیرد و اصولاً عملیات تراکم برای آن‌ها مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. در ترک‌خوردگی سدها علاوه بر تأثیر نیروها، نوع، رطوبت و دانسیته خاک متراکم شده و حتی کانی‌های تشکیل‌دهنده خاک می‌توانند نقش به‌سزایی داشته باشد. به هر حال خاک‌های خشک با پلاستیسیته کمتر احتمال ترک‌خوردگی بیش‌تری دارند. از آنجا که مقاومت کششی خاک ناچیز است، کرنش‌های کششی کم می‌تواند موجب ترک‌خوردگی شود (لطف‌الهی قره شیران

۴-۳- رابطه میان زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی

با  $SPT$  با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

شبکه عصبی مصنوعی بطور گسترده توسط محقق مختلف در مهندسی ژئوتکنیک استفاده شده است (ساقی و همکاران، ۲۰۱۹؛ شمس‌آشتیانی و امیری، ۲۰۱۸؛ عبدی و قاسمی‌دهنوی، ۱۳۹۸؛ راجیش کومار و همکاران، ۲۰۱۳؛ رضوی و همکاران، ۱۳۸۹؛ رحیمی و همکاران، ۲۰۱۹ و رستگاریا و همکاران، ۲۰۱۸).

در تحقیق حاضر، پانزده لایه پنهان در شبکه عصبی مصنوعی بهینه حاصل شد که برای ساختن مدل پس‌انتشار برای هر مورد (زاویه اصطکاک داخلی یا چسبندگی) استفاده شد. بهترین شبکه در نظر گرفته شده شامل پانزده لایه پنهان با یک ورودی (یعنی  $SPT-N60$ ) و یک خروجی (زاویه اصطکاک داخلی یا چسبندگی) است. شبکه چند لایه مورد استفاده در این مطالعه از نوع پس‌انتشار با الگوریتم آموزش لوبز-مارکورت<sup>۱</sup> انتخاب شد. برای جلوگیری از اثرات منفی مقادیر بسیار بزرگ یا بسیار کوچک متغیرهای ورودی بر وزن شبکه، ابتدا تمام داده‌های ورودی با استفاده از معادله ۴ نرمال‌سازی شدند، به طوری که بین -۱ تا ۱ قرار می‌گیرند،

$$X_i = 2 \left( \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \right) - 1 \quad (4)$$

دقت متغیرهای تخمین زده شده با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی بهینه با محاسبه شاخص‌های  $R^2$  و  $RMSE$  که به شرح زیر محاسبه می‌شود، ارزیابی می‌شود.

$$RMSE = \frac{1}{s^2 n} \sum_{i=1}^n (y - y')^2 \quad (5)$$

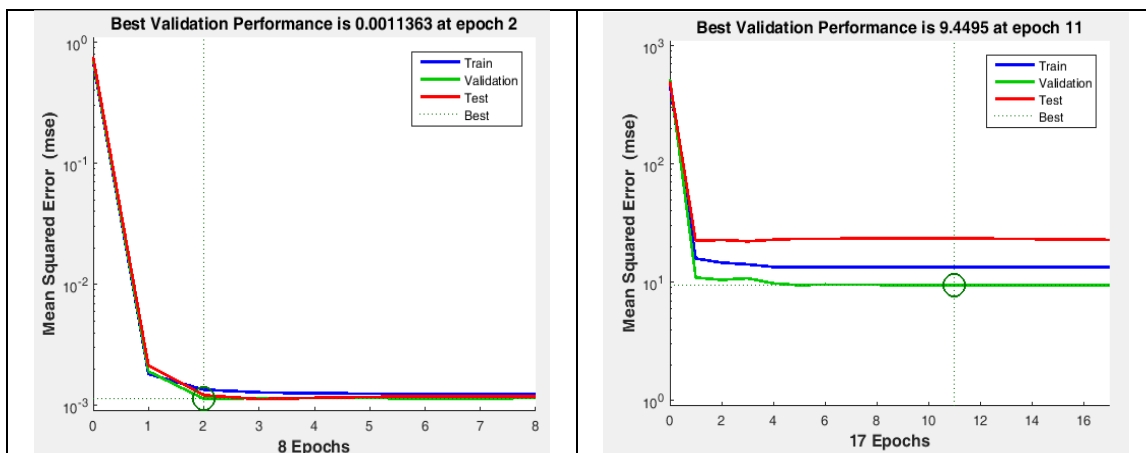
که در رابطه ۵،  $y$  متغیرهای اندازه‌گیری شده،  $y'$  مقدار برآورد شده توسط معادله مدل،  $n$  تعداد کل داده‌ها و  $s^2$  واریانس نمونه می‌باشد.

کل داده‌ها به عنوان ورودی به شبکه به سه مجموعه شامل داده‌های آموزش، آزمایش و صحت‌سنجی تقسیم می‌شوند. از مجموعه آموزشی برای آموزش الگوریتم و بدست آوردن مقادیر دقیق وزن‌ها برای نتایج مطلوب استفاده شد. از مجموعه اعتبارسنجی برای اطمینان از عدم وابستگی زیاد شبکه به مجموعه داده‌های آموزش استفاده شد که از فرایند بیش‌برازش<sup>۲</sup> توسط شبکه

<sup>1</sup> Levenberg-Marquardt  
<sup>2</sup> overfitting

داخلی هسته ایجاد شد، نشان داد که خاک رس با پلاستیسیته کم منجر به تخریب سد مذکور شده است.

و همکاران، ۲۰۱۵؛ فروتن و همکاران، ۲۰۱۴؛ مقدم، ۲۰۱۹. ماهان‌تان (۲۰۰۰) با بررسی پتانسیل ترک‌خوردگی سد تتون (*Teton*) که در اثر ناپایداری

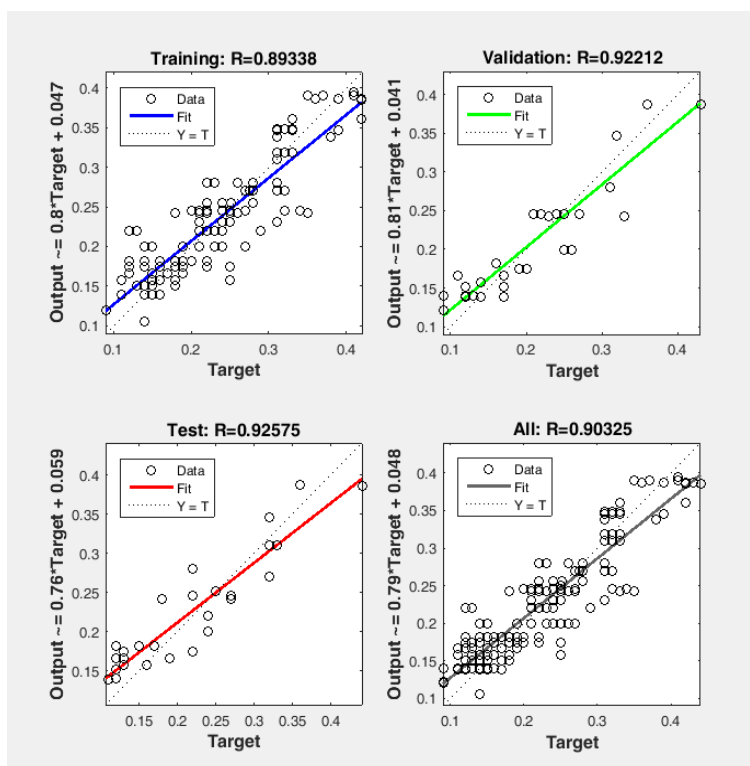


شکل ۱۲. کمترین مقدار *MSE* در مدل؛ چسبندگی خاک (سمت چپ) و زاویه اصطکاک داخلی خاک (سمت راست)

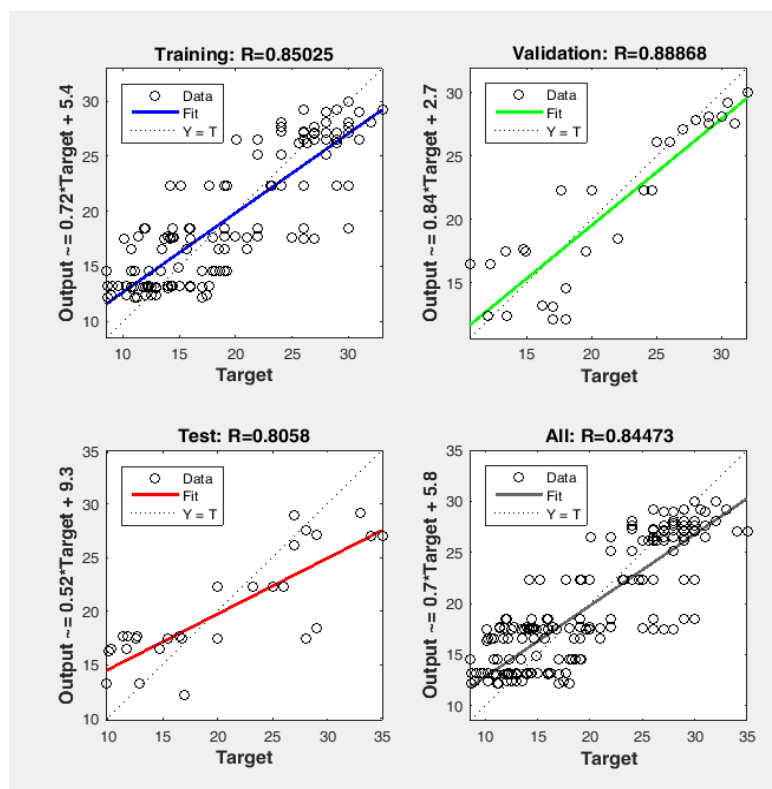
Results			
	Samples	MSE	R
Training:	135	1.35412e-3	8.93384e-1
Validation:	29	1.13627e-3	9.22120e-1
Testing:	29	1.21713e-3	9.25752e-1
<b>Total</b>		<b>1.30080e-3</b>	<b>9.03247e-1</b>

Results			
	Samples	MSE	R
Training:	135	13.85127e-0	8.65174e-1
Validation:	29	12.34152e-0	8.13101e-1
Testing:	29	16.02796e-0	8.11088e-1
<b>Total</b>		<b>14.36351e-0</b>	<b>8.44731e-1</b>

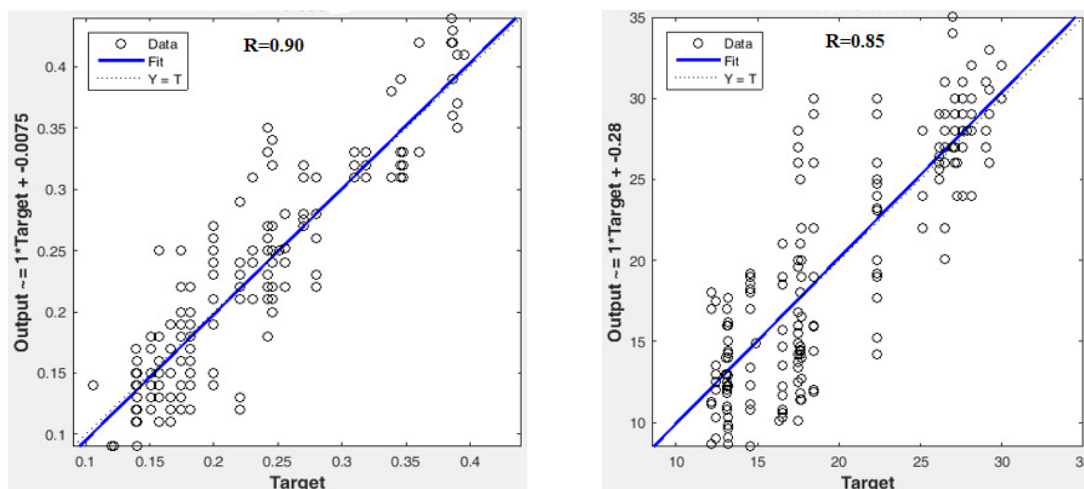
شکل ۱۳. نتایج حاصل از خطای *MSE* برای چسبندگی (سمت چپ) و زاویه اصطکاک داخلی (سمت راست)



شکل ۱۴. تخمین چسبندگی خاک با استفاده از شبکه عصبی



شکل ۱۵. تخمین زاویه اصطکاک داخلی با استفاده از شبکه عصبی



شکل ۱۶. رابطه بین چسبندگی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و تخمین‌زده شده توسط *ANN* (سمت چپ) و زاویه اصطکاک داخلی (سمت راست)

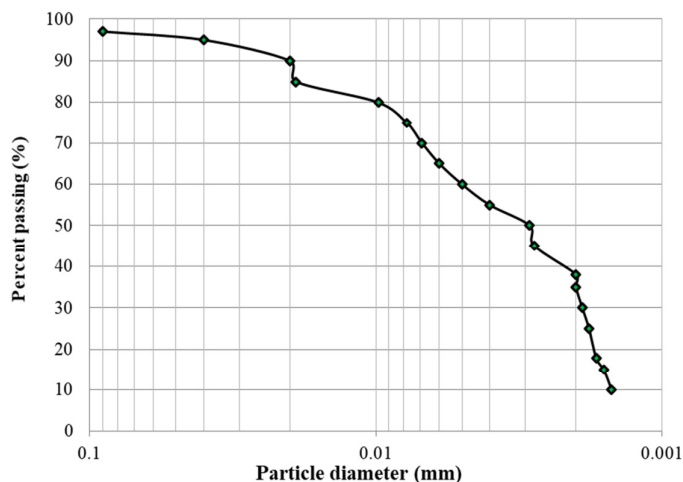
استاندارد *ASTM D-422* در شکل ۱۷ نشان داده شده است. نتایج آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده، حدود آتربرگ و نوع خاک بر اساس طبقه‌بندی یونیفاید، در جدول ۵ ارائه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، رطوبت بهینه و حداکثر چگالی خشک خاک مورد مطالعه به ترتیب ۲۰ درصد و ۱/۷۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب

در تحقیق حاضر، در مطالعات تکمیلی تاثیر درصدهای مختلف آهک هیدراته بر مقاومت فشاری محصور نشده و مشخصات تراکمی خاک رس با پلاستیسیته پایین (خاک غالب حوضه رسوبی کرمان) بررسی شد. نتایج این بررسی‌ها در زیر تشریح شده است. منحنی دانه‌بندی خاک رس مورد مطالعه به روش هیدرومتری با استفاده از

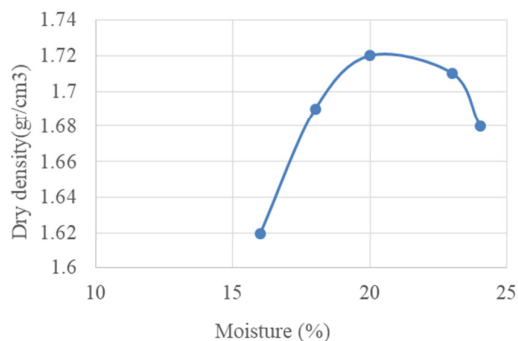
ترکیبات پوزولانی ( $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ) همراه با اکسید کلسیم در خاک نقش مهمی در تشکیل سیمان‌شدگی اجزا در ترکیب با تثبیت‌کننده‌های آزمایش شده ایفا می‌کند. کاتیون‌ها و آنیون‌های عصاره خاک مورد آزمایش در جدول ۷ آمده است. مشاهده می‌شود که یون غالب خاک بی‌کربنات و کلر می‌باشد.

تعیین شد (شکل ۱۸). علاوه بر این وزن مخصوص خاک رس بر اساس استاندارد *ASTM D854* برابر با ۲/۶۹ بود (*ASTM, 2014*) (جدول ۵).

نتایج *XRF* نمونه‌های رس و آهک در جدول ۶ آمده است. مطابق جدول ۶ ترکیب شیمیایی رس مورد مطالعه شامل  $CaO$  و  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  می‌باشد. وجود



شکل ۱۷. منحنی دانه‌بندی خاک رس



شکل ۱۸. منحنی تراکم خاک رس

جدول ۵. ویژگی‌های خاک رس

پارامتر	<i>LL</i> (%)	<i>PL</i> (%)	<i>PI</i> (%)	درصد حد انقباض ( <i>SL</i> )	مقاومت فشاری محصور نشده ( <i>kPa</i> )	درصد رطوبت بهینه	چگالی خشک حداکثر ( <i>gr/cm3</i> )	<i>Gs</i>
مقادیر	۴۵	۲۵	۲۰	۱۹	۳۵۲	۲۰	۱/۷۲	۲/۶۹

جدول ۶. نتایج تجزیه شیمیایی نمونه آهک و رس

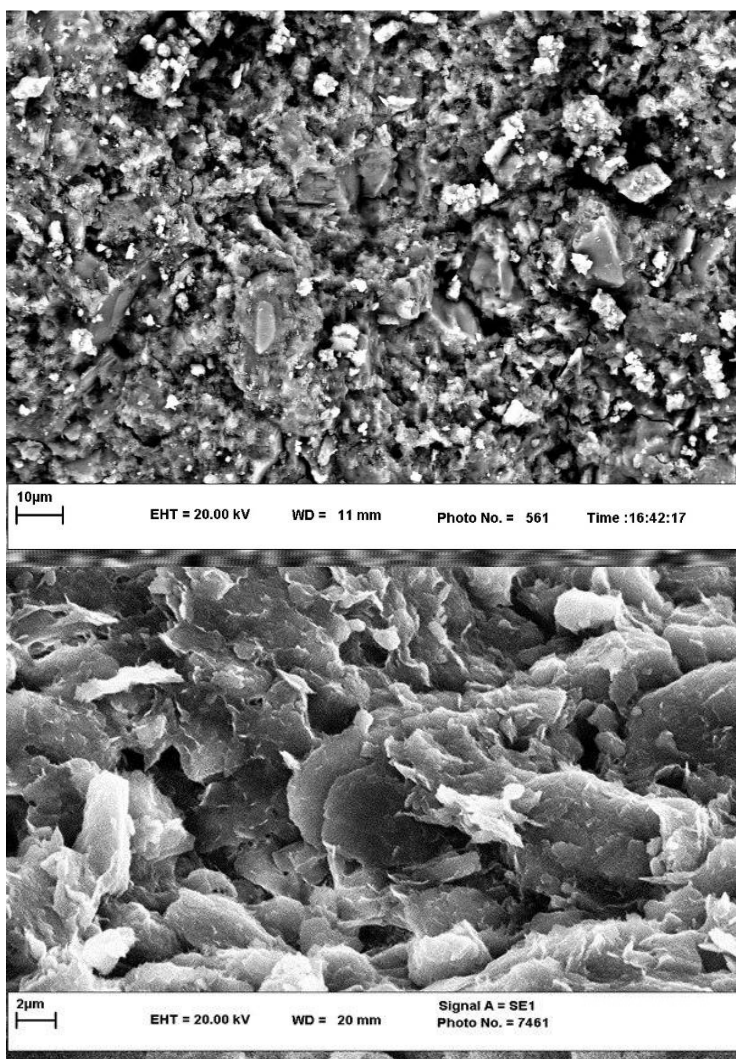
نمونه	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$CaO$	$Na_2O$	$K_2O$	$MgO$	$TiO_2$	$SO_3$	$P_2O_5$
آهک	۲/۵۵	۰/۶۵	۰/۴۳	۶۲	۰/۰۵	۰/۲۴	۴	۰/۰۹	۰/۶	۰/۰۲
رس	۶۸	۱۰	۷/۵	۴/۳۴	۰/۵	۲/۴	۶/۱۶	۰/۹	۰/۰۱	۰/۲

جدول ۷. نتایج تجزیه شیمیایی خاک مورد بررسی

ترکیب	$SO_4^{2-}$	$CO_3^{2-}$	$HCO_3^-$	$Cl^-$	$Mg^{2+}$	$Ca^{2+}$	$Na^+$	$K^+$
غلظت (meq/L)	۸	۲	۱۰	۱۱	۶	۴	۶/۱۶	۰/۹۳

همدیگر می‌شود. در نتیجه تخلخل نمونه‌ها کاهش می‌یابد و باعث افزایش مقاومت آن‌ها می‌گردد (شکل‌های ۸ و ۱۹).

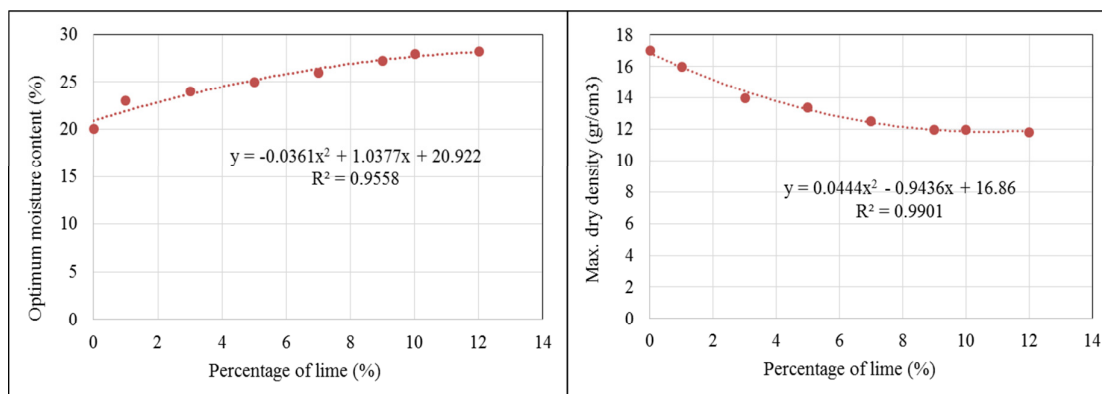
با مقایسه تصاویر میکروسکوپ الکترونی، مشاهده می‌شود که اضافه شدن آهک به خاک رس موجب اتصال دانه‌ها به



شکل ۱۹. تصویر SEM آهک با بزرگنمایی ۱۰۰ (بالا) و رس تثبیت شده با آهک در زمان عمل آوری ۲۸ روزه با بزرگنمایی ۱۰۰۰ (پایین).

رطوبت بهینه و چگالی خشک حداکثر هر کدام از نمونه‌های مخلوط مختلف خاک رس و آهک با استفاده از آزمایش پرکتور اصلاح شده بر اساس استاندارد *ASTM D 1557* انجام شد (*ASTM D698-12e2 2012*). تاثیر درصد آهک بر رطوبت بهینه و چگالی خشک نمونه‌ها در شکل ۲۰ آمده است. همان‌طوری که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار آهک هیدراته، درصد رطوبت بهینه افزایش و وزن واحد حجم خشک حداکثر کاهش می‌یابد. کاهش در حداکثر چگالی تا ۱۰ درصد آهک هیدراته ادامه دارد و بعد از آن (بعد از ۱۰ درصد) این روند تقریباً ثابت می‌ماند. علاوه بر این بیش‌ترین مقدار افزایش در

رطوبت بهینه (برابر با ۲۸ درصد) در ۱۰ درصد آهک که با خاک رس مخلوط شده حاصل شده است. هنگامی که آهک به خاک افزوده می‌شود، واکنش آنی تبادل کاتیونی رخ می‌دهد و ذرات خاک رس با یکدیگر لخته می‌شوند. این فرایند منجر به تشکیل حفره‌های هوا در میان ذرات شده و سبب ایجاد یک محیط متخلخل با کمترین وزن واحد حجم خشک بهینه می‌شود. علاوه بر این آب بیش‌تری نیز برای پر کردن حفرات لازم است؛ به صورتی که رطوبت بهینه افزایش می‌یابد. اثرهای ذکر شده برای خاک ترکیب شده با آهک در شکل ۲۰ نشان داده شده است.



شکل ۲۰. تأثیر مقدار آهک بر درصد رطوبت بهینه و چگالی خشک حداکثر

صورت مجاورت با هیدروکسید کلسیم در معرض رطوبت اتفاق می‌افتد و خواص چسبندگی و سیمانی شدن را ایجاد می‌کند. وقتی آهک به خاک رس اضافه می‌شود، واکنش‌های متعددی در آن ایجاد می‌شود (باقرزاده خلخالی و همکاران، ۲۰۱۹؛ هوبن و گویلا، ۱۹۹۴ و سخاوتی و جعفر کاظمی، ۲۰۱۹) که عبارتند از:

**واکنش تبادل کاتیون‌ها:** تقریباً تمامی خاک‌های ریزدانه وقتی با آهک و آب مخلوط می‌شوند طی مدت زمان کوتاهی واکنش تبادل کاتیونی را نشان می‌دهند. در این واکنش، کاتیون‌های قابل تبادل خاک رس (کاتیون‌های تک‌ظرفیتی) با کاتیون‌های آهک جایگزین می‌شوند.

**واکنش پوزولانی:** این واکنش باعث افزایش چشمگیر مقاومت در ترکیبات خاک رس و آهک می‌شود و تابع زمان می‌باشد. نسبت  $Ca/Si$  یک فاکتور مهمی در ویژگی مقاومتی در ترکیب پوزولان-آهک می‌باشد. مقدار بالاتر نسبت آهک به پوزولان منجر به تولید نسبت بالای  $CSH$  که محصول اصلی واکنش پوزولانی با نسبت بالای کلسیم به سیلیس است، می‌شود. بر طبق گزارشات پیشینه پژوهش توانایی تولید پیوند در  $CSH$  با افزایش نسبت کلسیم به سیلیس کاهش می‌یابد (آیدین و بارادان، ۲۰۱۲؛ ابراهیمی فرد و جباری، ۲۰۱۷ و شیرمحمدی و حسین خانشان، ۲۰۱۸).

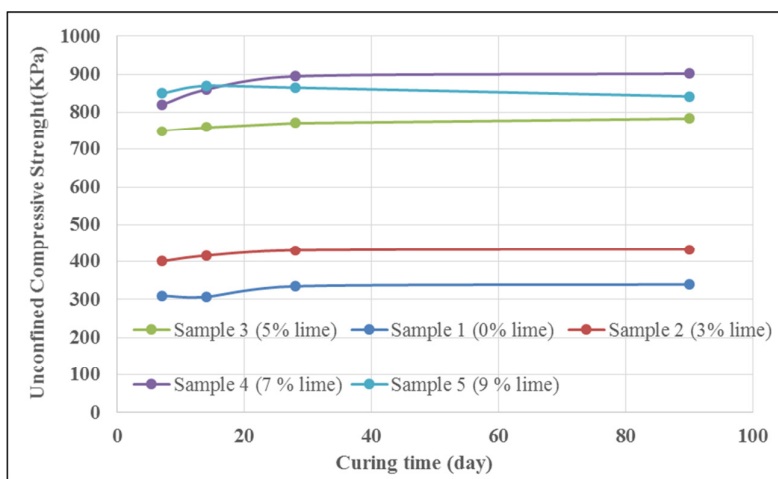
**واکنش کربناسیون:** در این واکنش آهک با گاز کربنیک هوا ترکیب شده و باعث می‌شود که آهک به حالت غیرفعال سنگ‌آهک باز گردد. با توجه به زمان انجام واکنش‌های شیمیایی فوق‌الذکر در زمان‌های ۲۸، ۱۴ و ۶۰ روز و دراز مدت خواص مکانیکی بهبود یافته‌ای می‌توان از مخلوط‌های رسی آهک‌دار انتظار داشت.

آزمایش مقاومت فشاری بر روی ۵ نمونه بعد از زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزه با رطوبت بهینه (نمونه‌های استفاده شده برای تعیین مقاومت فشاری محصور نشده با رطوبت بهینه متراکم شدند) براساس استاندارد  $ASTM$  انجام شد ( $ASTM, 2007$ ). پس از فرایند تراکم نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در قالب نگهداشته شدند. پس از خروج نمونه‌ها از مولد بهبود نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه ادامه داشت و پس از مدت ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز از زمان عمل‌آوری نمونه‌ها، آزمایش بر روی نمونه‌ها انجام شد. در حین فرایند بهبود، نمونه‌ها با پوشش پلاستیکی به منظور جلوگیری از افت سریع رطوبت پوشیده شدند.

تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها با درصدهای مختلف آهک و زمان عمل‌آوری مختلف در شکل ۲۱ ارائه شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار آهک و زمان عمل‌آوری نمونه‌ها، مقاومت فشار محصور نشده افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که درصد آهک بهینه حدود ۷ درصد می‌باشد. همچنین حداکثر مقاومت فشاری محصور نشده در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه بدست آمد و بعد از آن تغییر در مقاومت فشاری ثابت شده است. نتایج مشابهی نیز توسط سایر محققین بدست آمده است. چن در مورد میزان آهک مورد نیاز برای تثبیت خاک‌های رسی به این نتیجه رسید که محدوده آهک مورد نیاز برای تثبیت خاک‌های رسی بین ۲ تا ۸ درصد می‌باشد (چن، ۲۰۱۲). الشیناوی (۲۰۱۷) نیز بیان کرد که مقدار آهک بهینه جهت بهسازی ماسه رسی حدود ۸ درصد می‌باشد.

دلیل افزایش در مقاومت فشاری را می‌توان افزایش واکنش‌های پوزولانی قلمداد کرد. فعل و انفعالات پوزولانی بین اجزای سیلیسی یا سیلیسی آلومیناتی یک پوزولان در





شکل ۲۱. تأثیر زمان عمل‌آوری بر روی مقاومت فشاری نمونه‌ها

### نتیجه‌گیری

تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی خاک و ارائه روابط کاربردی جهت تخمین این ویژگی‌ها بر اساس نتایج آزمون‌های شاخص از جمله *SPT* باعث کاهش هزینه‌های شناسایی ساختگاه سازه‌ها می‌گردد. از طرفی تثبیت خاک یکی از روش‌های مرسوم در بهبود خواص مهندسی خاک‌های مورد استفاده در پروژه‌های عمرانی می‌باشد. خاک‌های رسی تقریباً دارای پراکندگی زیادی در نقاط مختلف جهان و ایران می‌باشند که این امر می‌تواند مشکلات زیادی در بستر پروژه‌های عمرانی ایجاد کند. در این پژوهش خواص ژئوتکنیکی حوضه رسوبی شهر کرمان تعیین و روابطی جهت تخمین پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بر اساس عدد نفوذ استاندارد (*SPT*) ارائه شد. با توجه به اینکه خاک غالب حوضه رسوبی کرمان از نوع رس با پلاستیسیته کم (*CL*) می‌باشد تأثیر افزودنی آهک هیدراته در بهبود ویژگی تراکم و مقاومت فشاری خاک‌رس این حوضه بررسی شد. با توجه به بافت خاک، عمق زیاد آب و عدد نفوذ استاندارد متوسط، خطرات روانگرایی در این حوضه وجود ندارد. متوسط زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در آزمایش برش مستقیم به ترتیب  $20/9$  و  $0/2$  می‌باشد.

تخمین زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک‌رس با پلاستیسیته پایین (*CL*) به روش رگرسیون ساده و بر اساس آماره‌های آماری از جمله *RMSE*، ضریب تعیین، سطح معنی‌داری و آماره دوربین واتسون نشان می‌دهد که ارتباط قابل قبولی میان زاویه اصطکاک داخلی خاک و چسبندگی با عدد نفوذ استاندارد وجود دارد. در

خاک‌های ریزدانه همبستگی عدد نفوذ با چسبندگی بیش‌تر از رابطه آن با زاویه اصطکاک داخلی می‌باشد، که نشان می‌دهد خصوصیات مقاومتی خاک ریزدانه بیش‌تر توسط چسبندگی آن‌ها کنترل می‌شود.

بر اساس نتایج شبکه عصبی مصنوعی، ضریب همبستگی  $\phi$  و  $c$  با  $SPT-N_{60}$  به ترتیب  $0/84$  و  $0/90$  می‌باشد. با مقایسه  $R^2$  و *RMSE* دو روش، شبکه عصبی مصنوعی دقت بالاتری نسبت به رگرسیون ساده برای پیش‌بینی پارامترهای مقاومت برشی نشان داد.

نتایج آنالیز *SEM* نشانگر تغییرات اساسی در ساختار خاک بعد از افزودن آهک می‌باشد. ساختار اولیه خاک متخلخل و دانه‌ای بود که بعد از بهسازی با ترکیب آهک به ساختار یکپارچه تبدیل شده است.

نتایج حاصل از آزمایش‌های تراکم استاندارد نشان داد که افزودن آهک به خاک رس سبب افزایش رطوبت بهینه و کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه می‌گردد. با انجام آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده با رطوبت بهینه مشخص شد که پس از ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری، بیش‌ترین مقدار مقاومت فشاری محصور نشده، به ازای ۷ درصد آهک به دست آمد. هم‌چنین حداکثر مقاومت فشاری محصور نشده در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه بدست آمده و بعد از آن، تغییر در مقاومت فشاری ثابت می‌ماند.

### قدردانی

بدینوسیله نویسندگان این مقاله از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان کرمان به جهت ارائه داده‌های مورد نیاز تحقیق حاضر سپاسگزاری می‌نمایند.

## منابع

- sampling of soils. *Annual book of ASTM D1586 standards*.
- ASTM (2010a) *Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils*. In: *The American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States*. D4318.
- ASTM (2010b) *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. *Astm D854 1-7*. doi: 10.1520/D0854-10.2.
- ASTM (2012) *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort*. D1557.
- ASTM D (2006) *Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil*. ASTM standard D2166.
- ASTM D (2011) 2487 (2006) *Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)*. *Book of Standards 4*.
- ASTM D698-12e2 (2012) *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>))*. ASTM International.
- Aydin, S. and Baradan, B (2012) *Mechanical and microstructural properties of heat cured alkali-activated slag mortars*. *Materials & Design*, 35: 374-383.
- Bagherpour, I. and Choobbasti, A. J (2003) *Stabilization of fine-grained soils by adding microsilica and lime or microsilica and cement*. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 8: 1-10.
- Bagherzadeh Khalkhali, A., Safarzadeh, I. and Rahimi Manbar, H (2019) *Investigating the Effect of Nanoclay Additives on the Geotechnical Properties of Clay and Silt Soil*. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 3(2): 63-74.
- Beiranvand, P., Omidinasab, F. and Moradpour, A (2019) *Investigate Effect of the Parameters Compressive on Behavior of Concrete Filled Tubular Columns under Fire*. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 3(3): 131-142.
- Chandrasekaran, V (2018) *Experimental Investigation of Partial Substitution of Cement with Eggshell Ash in M20 Grade Concrete*. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 2(1): 66-74.
- Chen, FH (2012) *Foundations on expansive soils*. Elsevier.
- Ebrahimi Fard, H. and Jabbari, M. M (2017) *The Effect of Magnesium Oxide Nano Particles on the Mechanical and Practical Properties of Self-Compacting Concrete*. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 1(2): 77-87.
- El-Shinawi, A (2017) *Instability improvement of the subgrade soils by lime addition at Borg El-Arab, Alexandria, Egypt*. *Journal of*
- رضوی، ش.، گشتاسی گوهرریزی، ک.، آهنگری، ک.، غفوری‌پور، ا (۱۳۸۹) تخمین چگالی خاک‌ها به کمک شبکه عصبی مصنوعی، نشریه یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۴، شماره ۷، ص ۲۹-۳۵.
- شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان کرمان (۱۳۶۴) *مطالعات دشت کرمان*.
- عبدی، ی.، قاسمی‌دهنوی، آ (۱۳۹۸) پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیک ماسه‌سنگ‌ها با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و آنالیز رگرسیون چندمتغیره. نشریه یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۳، شماره ۲۶، ص ۴۵-۵۴.
- قبادی، م. ح.، بابازاده، ر.، عبدی، ی (۱۳۹۱) بهسازی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی خاک‌های ریزدانه منطقه سد اکباتان همدان با استفاده از آهک، نشریه یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۶، شماره ۱۲، ص ۸-۱.
- قنبری، ع.، زرنگ‌زاده، س. ص.، رضایی، ف.، شیخ‌زکریایی، س. ج (۱۳۹۰) مطالعه ویژگی‌های ژئوتکنیکی رسوبات آبرفتی کرج، فصلنامه علمی- پژوهشی علوم‌زمین، شماره ۸۱.
- نگهدار، ع.، عسکری‌لاسکی، ب.، لطف‌الهی، س (۱۳۹۳) بررسی آزمایشگاهی تاثیر سدیم کلرید (NaCl) بر مقاومت CBR و پارامترهای تراکمی خاک طبیعی و خاک تثبیت شده با سیمان، پژوهش‌های تجربی در مهندسی عمران. دوره ۱، ص ۷۳-۷۹.
- Abbasi, Dezfouli, A. and Orak, M (2019) *Effect of Using Different Fibers on Slab on Grades*. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 3(2): 86-94.
- Abbasi, Dezfouli, A. and Shakiba, A (2020) *Experimental Investigation on the Effect of Nano Carbon Tube on Concrete Strength*. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 4(1). Doi:10.22034/JCEMA.2020.215337.1013
- Adebisi, N. O., Ariyo, S. O. and Sotikare, PB (2016) *Electrical resistivity and geotechnical assessment of subgrade soils in southwestern part of Nigeria*. *Journal of African Earth Sciences*, 119: 256-263.
- Ahmed, A (2015) *Compressive strength and microstructure of soft clay soil stabilized with recycled bassanite*. *Applied Clay Science* 104: 27-35.
- Ansari, Y. and Hashemi, A (2017) *Neural Network Approach in Assessment of Fiber Concrete Impact strength*. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 1(3): 88-97.
- ASTM (2008) *Standard test method for standard penetration test (SPT) and split barrel*

- Examination of Soil Arching (Doctoral dissertation, University of Mohaghegh Ardabili).*
- Lu, S. G., Sun, F. F. and Zong, Y. T (2014) Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol). *Catena*, 114: 37–44.
- Mahmoud, M. A. A. N (2013) Reliability of using standard penetration test (SPT) in predicting properties of silty clay with sand soil. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 3: 545–556.
- Meyerhof, G. G (1956) Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 82: 1–19.
- Modarres, A. and Nosoudy Y. M (2015) Clay stabilization using coal waste and lime - Technical and environmental impacts. *Applied Clay Science*, 117: 281–288.
- Moghadam, A (2019) A signal-processing-based approach for damage detection of steel structures, Doctoral dissertation, Sharif University of Technology.
- Moghadam, A., E Estekanchi, H. and Yekrangnia, M (2018) Evaluation of PR steel frame connection with torsional plate and its optimal placement. *Scientia Iranica*, 25(3): 1025–1038.
- Mokhberi, M. and Khademi, H (2017) The Use of Stone Columns to Reduce the Settlement of Swelling Soil Using Numerical Modeling. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 1(2): 45-60.
- Motahari, M. and Kiani Vafa, H (2020) Studying Performance of PVDs on Consolidation Behavior of soft Clayey Soils Using EFM, Mahshahr Oil Storages, *Journal of civil Engineering and Materials Application*, Doi: 10.22034/JCEMA.2020.205130.1008.
- Motaharitari, S. and Shooshpasha, I (2018) Evaluation of coarse-grained mechanical properties using small direct shear test. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 1-13. Doi. org/10. 1080/19386362. 2018.1505310
- Muhunthan, B (2000) Schofield, *Liquifaction and Dam Failures*, GeoDenver, Denver, Colorado.
- Mujtaba, H., Farooq, K., Sivakugan, N. and Das B. M (2017) Evaluation of relative density and friction angle based on SPT-N values. *KSCE Journal of Civil Engineering* 22: 572–585.
- Nassaji, F. and Kalantari, B (2011) SPT capability to estimate undrained shear strength of fine-grained soils of Tehran, Iran. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 16 1229–1238.
- Okagbue, C. O and Yakubu, J. A (2000) Limestone ash waste as a substitute for lime in soil improvement for engineering construction. *Bulletin of engineering Geology and the African Earth Sciences* 130: 195–201.
- Esparham, A., Moradikhrou, A. B. and Avanaki, M. J (2020) effect of Various Alkaline Activator Solutions on Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, *Journal of civil Engineering and Materials Application*, Doi: 10.22034/JCEMA.2020.224071.1018.
- Fauzi, A., Rahman, W. M. N. W.A. and Jauhari, Z (2013) Utilization waste material as stabilizer on kuantan clayey soil stabilization. *Procedia engineering*, 53: 42–47.
- Foroutan, M., Hassan, M. M., Desrosiers, N., and Rupnow, T (2018) Evaluation of the reuse and recycling of drill cuttings in concrete applications. *Construction and Building Materials*, 164: 400-409.
- Foroutan, M., Kassim, A. B., Amiri, S. T. and Molkaraei, P (2014) Coupling Effect of Suction Variation on Riverbank Stability. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE)*, 19: 4427-4438.
- Harichane, K, Ghrici, M., Kenai, S. and Grine, K (2011) Use of natural pozzolana and lime for stabilization of cohesive soils. *Geotechnical and geological engineering*, 29: 759–769.
- Hashemi, M., Vahidi, M. and Kaviani, A (2019) Effect of thermal stabilization of soil, bentonite, calcium carbonate and fibers on behavior properties of clay soil. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 3(1): 53-62.
- Hatanaka, M. and Uchida, A (1996) Empirical correlation between penetration resistance and internal friction angle of sandy soils. *Soils and foundations*, 36: 1–9
- Hettiarachchi, H. and Brown, T (2009) Use of SPT Blow Counts to Estimate Shear Strength Properties of Soils: Energy Balance Approach. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135:830–834.
- Houben, H. and Guillaud, H (1994) *Earth construction: a comprehensive guide*. Intermediate Technology Publications.
- Ismail, H. A. H (2013) Cement kiln dust chemical stabilization of expansive soil exposed at El-Kawther Quarter, Sohag Region, Egypt. *International Journal of Geosciences*, 4: 1416–1424.
- Kamali-Asl, A., Kc, B., Foroutan, M., Ghazanfari, E., Cladouhos, T. T. and Stevens, M (2019) Stress-strain response and seismic signature analysis of phyllite reservoir rocks from Blue Mountain geothermal field. *Geothermics*, 77: 204-223.
- Kashani, H., Movahedi, A. and Morshedi, M. A (2019) an agent-based simulation model to evaluate the response to seismic retrofit promotion policies. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 33: 181-195.
- Lotfollahi Qareshiran, S., Ouria, A. and Baher Talari, T (2015) Experimental and Numerical

- profiles in unsaturated soils under transient flow. *Engineering Geology*, 260, 105218.
- Shamsashitany, R. and Ameri, M (2018) Road Accidents Prediction with Multilayer Perceptron MLP modelling Case Study: Roads of Qazvin, Zanjan and Hamadan. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 2(4): 181-192.
- Shibi, T. and Kamei, T (2014) Effect of freeze-thaw cycles on the strength and physical properties of cement-stabilised soil containing recycled bassanite and coal ash. *Cold Regions Science and Technology*, 106: 36–45.
- Shirmohammadi, H. and Hoseiny Khanshan, H (2018) Effect of Mineral pitch and Zycosil Nano-Material on Mechanical Properties and Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 2 (2): 97-102.
- Sivrikaya, O. and Tougrol, E (2006) Determination of undrained strength of fine-grained soils by means of SPT and its application in Turkey. *Engineering geology*, 86: 52–69.
- Sivrikaya, O., Kayadelen, C. and Cecen, E (2013) Prediction of the compaction parameters for coarse-grained soils with fines content by MLR and GEP. *Acta Geotechnica Slovenica*, 10: 29–41.
- Taheri, M., Zamani, S. and Ramazani, A (2018) Design and Optimization of Mechanical Properties of Reduced-Graphene Oxide-Loaded Cement." *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 159-164.
- Wolff, T. F (1989) Pile capacity prediction using parameter functions. In: *Predicted and Observed Axial Behavior of Piles: Results of a Pile Prediction Symposium*. pp 96–106.
- Yaghouti Lighvan, A. and Hajjalilu Bonab, M (2018) Investigation into Effect of Liquefaction on Behavior of Retaining Wall. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 2(4): 201-215.
- Environment*, 58: 107–113.
- Oyelami, C. A and Van Rooy, J. L (2016) A review of the use of lateritic soils in the construction development of sustainable housing in Africa: A geological perspective. *Journal of African Earth Sciences*, 119: 226–237.
- Peck, R. B., Hanson, W. E. and Thornburn, T. H (1953) *Foundation Engineering* (Vol. 10). New York: Wiley.
- Phoon, K. K. and Kulhawy, F. H (1999) Evaluation of geotechnical property variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 36: 625–639
- Qeidari, H. S., Salehi, M., Shayan, H., Kahnoot, S. R. H. and Sadeghloo, T (2020) Analysis of the factors affecting probable failure of local entrepreneurs. *International Journal of Law and Management*. 62(1): 93-115.
- Rajesh-Kumar, B., Vardhan, H., Govindaraj, M. and Vijay, G. S (2013) Regression analysis and ANN models to predict rock properties from sound levels produced during drilling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 58: 61–72.
- Rastegarnia, A., Teshnizi, E. S., Hosseini, S., Shamsi, H. and Etamadifar, M (2018) Estimation of punch strength index and static properties of sedimentary rocks using neural networks in south west of Iran. *Measurement*, 128: 464-478.
- Robertson, P. K. and Fear, C. E (1996) Soil liquefaction and its evaluation based on SPT and CPT. In: *Proc. NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance*.
- Saghi, H., Behdani, M., Saghi, R., Ghaffari, A. R. and Hirdaris, S., 2019. Application of Gene Expression Programming Model to Present a New Model for Bond Strength of Fiber Reinforced Polymer and Concrete *Journal of civil Engineering and Materials Application* 3(1): 15-29.
- Salari, P., Lashkaripour, GH. R. and Ghafoori, M (2015) Presentation of Empirical Equations for Estimating Internal Friction Angle of GW and GC Soils in Mashhad , Iran Using Standard Penetration and Direct Shear Tests and Comparison with Previous Equations. *Open Journal of Geology*, 2015: 231–238
- Seco, A., Ramirez, F., Miqueleiz and L., Garcia, B (2011) Stabilization of expansive soils for use in construction. *Applied Clay Science*, 51: 348–352.
- Sekhavati, P. and Jafarkazemi, M (2019) Investigating durability behavior and compressive strength of lightweight concrete containing the nano silica and nano lime additives in the acid environment. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 3(2): 103-117.
- Shahrokhbadi, S., Vahedifard, F., Ghazanfari, E., and Foroutan, M (2019) Earth pressure

## ***Determining of cohesion and internal friction angle of low-plasticity clays (CL) soils using SPT number and investigating the effect of lime on compressive strength of clay soil***

***P. Babakhani<sup>1</sup>, E. Rahimi<sup>2</sup>, H. Gharavi<sup>3</sup>, M. R. Motahari<sup>4</sup> and A. Rastegarnia<sup>5\*</sup>***

*1- Dept., of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Tehran*

*2- Dept., of Geology, Faculty of Sciences, Damghan University, Damghan*

*3- School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran*

*4- Dept., of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak*

*5- Dept., of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad*

*\* ahmad.rastegarnia@mail.um.ac.ir*

***Received: 2020/3/8 Accepted: 2020/7/2***

### ***Abstract***

*In this study, geotechnical properties and the relationship between cohesion (C) and internal friction angle ( $\phi$ ) with SPT number is investigated in 120 boreholes in sedimentary basins of Kerman. Also, the effect of hydrated lime on petrography and mechanical properties of CL soil was investigated. The correlation between C and SPT ( $R_2 = 0.72$ ) is stronger than that of  $\phi$  and SPT ( $R_2 = 0.62$ ) which shows the effect of C on the shear strength of fine-grained soils is higher than the effect of friction angle on the strength of these soils. Based on the results of the ANN model the correlation coefficients of  $\phi$  and c with SPT are 0.84 and 0.90, respectively. Based on the  $R_2$  and RMSE, ANN showed higher accuracy than simple regression for prediction of  $\phi$  and c parameters. It is proved that, the SPT could be used for estimating cohesion and friction angle of clays (CL) especially at the preliminary stage of projects with acceptable accuracy. To study the effect of lime on strength and compaction properties of clay soil, a set of samples were prepared by adding different contents of lime. Next, the standard Proctor test and uniaxial compressive strength test at the optimum moisture content were performed. SEM analysis showed substantial changes in the soil structure after the addition of additives. Also, an increase in the hydrated lime content results in a decrease in their maximum dry unit weight and increase in the optimum moisture content. Furthermore, it was found that an increase in hydrated lime content results in the increase of compressive strength and optimum moisture content. The maximum compressive strength is achieved at 7% hydrated lime.*

***Keywords:*** *Standard penetration test, geotechnical properties, Kerman sedimentary basin, lime additive, clay stabilization*