

تأثیر شرایط زمین‌شناسی و خصوصیات ژئوتکنیکی نهشته‌ها در ایجاد گسیختگی زمین در شرق سمنان

Original Article

محمدحسین طاهری نیا (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی زمین‌شناسی، دانشگاه خوارزمی

شهرزاد شریفی (دکتری)

دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

سید محمود فاطمی عقدا* (دانشیار)

دانشکده‌ی زمین‌شناسی، دانشگاه خوارزمی

الهه خشتکار (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی زمین‌شناسی، دانشگاه شهید بهشتی

در پژوهش حاضر، جهت روشن شدن علت اصلی ایجاد و گسترش ترک‌ها در منطقه‌ی شرق شهر سمنان، به بررسی عوامل مختلف تأثیرگذار در گسیختگی زمین، شامل: خصوصیات ژئوتکنیکی نهشته‌ها و شرایط زمین‌شناسی حاکم بر منطقه در کنار بررسی الگوی گسترش سطحی و عمقی ترک‌ها پرداخته شده است. براساس نتایج حاصل از مطالعات انجام شده، گسترش ترک‌ها در منطقه تحت تأثیر عوامل درونی (ذاتی) حاکم بر منطقه رخ داده و در واقع ترک‌های موجود، نمونه‌ی از ترک‌های انقباضی ایجاد شده در کفه‌های رسی ولی با ابعاد بسیار بزرگ بوده است. ترک‌های مذکور در عمق زمین شکل گرفته و در نهایت با توسعه‌ی آنها در اثر فرسایش زیرسطحی در سطح زمین رخمون پیدا کرده‌اند. شرایط ویژه‌ی زمین‌شناسی موجود در منطقه، شامل: کانی‌شناسی، توپوگرافی و هیدرولوژی منطقه در کنار وضعیت اقلیمی منطقه از عوامل کلیدی در ایجاد ترک‌های گلی عظیم بوده است. همچنین پتانسیل رمبندگی و واگرایی نهشته‌های سطحی، نقش مهمی در توسعه‌ی ترک‌های گلی عظیم در منطقه داشته است.

واژگان کلیدی: ترک‌های گلی، گسیختگی زمین، رمبندگی خاک، پتانسیل واگرایی، کفی رسی.

۱. مقدمه

منطقه نشان داده است که هیچیک از دلایل ذکر شده نمی‌تواند توضیح کامل و قابل قبولی برای الگوی توسعه‌ی ترک‌ها در منطقه ارائه دهد. بررسی صحرایی ترک‌ها مشخص ساخت که اغلب شکستگی‌های ذکر شده محدود به عمق متوسط ۴ تا ۶ متری هستند و الگوی گسترش پلیگونی دارند. بررسی جابه‌جایی در لبه‌ی شکاف‌های موجود در منطقه، نشان‌دهنده‌ی عدم رخداد جابه‌جایی برشی در سطح شکاف است. همچنین با توجه به عبور مسیر راه‌آهن از منطقه به‌عنوان یک سازه‌ی خطی رخداد، هرگونه جابه‌جایی (برشی و کششی) در سطح زمین باعث ایجاد شکستگی و انحراف ریل‌ها می‌شود که رخداد این اتفاق نیز با وجود گسترش شدید ترک‌ها در منطقه تاکنون مشاهده نشده است.

در سال ۲۰۰۷^[۵] در بررسی شکستگی‌هایی با الگوی مشابه در منطقه‌ی رستاق در دشت یزد - اردکان، عامل درونی زمین و پتانسیل بالای رمبندگی و واگرایی خاک منطقه به‌عنوان یکی از دلایل محتمل جهت ایجاد این‌گونه شکستگی‌ها در

در محدوده‌ی واقع در شرق سمنان و به ویژه در کیلومترهای ۲۳۲ تا ۲۳۸ راه‌آهن تهران - مشهد (بلوک سمنان - میاندره) براساس مشاهده‌های میدانی و گزارش‌های متعدد، ترک‌های گسترده‌ی در سطح زمین مشاهده شده است.^[۱-۲] با توجه به خطر بالقوه‌ی ترک‌های ذکر شده برای سازه‌های موجود در منطقه، مطالعات گسترده‌ی جهت شناسایی عوامل احتمالی ایجاد آنها انجام شده است. براساس نظر بسیاری از کارشناسان، ترک‌های موردنظر در اثر فرورانش زمین در نتیجه‌ی برداشت بی‌رویه‌ی آب‌های زیرزمینی ایجاد شده‌اند.^[۱] همچنین بسیاری از کارشناسان ژئوتکنیکی، پتانسیل بالای رمبندگی خاک را علت اصلی ایجاد و گسترش ترک‌های مذکور در منطقه ذکر کرده‌اند.^[۲،۳] مطالعه‌ی گزارش‌های موجود و همچنین بررسی صحرایی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۰/۶/۱۳۹۵، اصلاحیه ۱۱/۲/۱۳۹۵، پذیرش ۲۷/۳/۱۳۹۶.

DOI:10.24200/J30.2018.1434.1811

محدوده‌ی مطالعاتی باشد. رسوب‌های مخروط افکنه‌ی منطقه‌ی ذکر شده توسط رودخانه‌هایی که از کوهستان سرزیر شده‌اند، حمل و به جا گذاشته شده‌اند. با حرکت از رأس به طرف قاعده‌ی مخروط و طی مسافتی در حدود ۱۰ کیلومتر، رسوب‌ها دانه‌ریزتری شوند و همچنین جورشدگی بهتری دارند. رسوب‌های بخش‌های قاعده‌ی بیشتر از جنس سیلت و رس هستند.

۳. بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی نهشته‌های منطقه

جهت بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی نهشته‌ها در محدوده‌ی تمرکز ترک‌ها از اطلاعات حاصل از ۹ چاهک دستی حفر شده تا عمق ۸ متر در امتداد راه‌آهن و یک چاهک دستی با عمق ۱۰ متر در محدوده‌ی جنوبی خط استفاده شد. این تذکر لازم است که ۹ چاهک با عمق ۸ متر و در امتداد شمال راه‌آهن در فاز اول مطالعات و چاهک مشخص شده با نام new در شکل ۱ و با عمق ۱۰ متر در فاز دوم مطالعات در جنوبی راه‌آهن و در محدوده‌ی بایر حفر شده‌اند.

به منظور شناخت پارامترهای مختلف خاک منطقه‌ی مورد مطالعه، آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی مختلفی انجام پذیرفت که از آن جمله می‌توان به دانه‌بندی خاک، آزمایش‌های تحکیم، تحکیم مضاعف، بین هول و نفوذپذیری با بارافتان و ثابت اشاره کرد. در بخش حاضر، فقط نتایج دانه‌بندی خاک و تحکیم و در بخش‌های بعدی به فراخور نتایج، سایر آزمایش‌ها ارائه شده است.

با استفاده از سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS) و با توجه به دانه‌بندی و حد روانی و نشانه‌ی خمیری نمونه‌های به دست آمده از چاهک‌های حفر شده، به طور کلی نهشته‌های موجود در محدوده‌ی مورد مطالعه تا عمق ۸ متر را می‌توان در ۵ گروه طبقه‌بندی کرد. بر این اساس نهشته‌های موجود در پهنه‌ی رسی جز در گمانه‌ی شماره‌ی ۲ که در محدوده‌ی آبراه اصلی حفر شده است، عمدتاً شامل نهشته‌های ریزدانه است و در گروه نهشته‌های رسی و سیلتی قرار می‌گیرد. نوع خاک در گمانه‌ی شماره‌ی ۲ در گروه خاک‌های سیلتی و ماسه‌ی قرار می‌گیرد. همچنین رسوب‌های رودخانه‌ی و طغیانی براساس سیستم طبقه‌بندی متحد در گروه‌های SC و ML قرار می‌گیرند. به طور کلی نهشته‌های این بخش از مسیر نسبت به نهشته‌های کفه‌ی رسی درشت‌دانه‌تر هستند. با استفاده از نرم‌افزار Rockworks و داده‌های حاصل از ۹ چاهک دستی حفر شده در محدوده‌ی مطالعاتی، مدل سه بعدی گسترش نهشته‌های مختلف تهیه شد (از اطلاعات چاهک new به دلیل فاصله‌ی نسبتاً زیاد چاهک new تا ۹ چاهک اولیه در مدلسازی‌های انجام شده توسط نرم‌افزار Rockworks استفاده نشده است). براساس مدل سه بعدی گسترش نهشته‌ها در محدوده‌ی مورد مطالعه، لایه‌ی سطحی شامل نهشته‌های گروه CL است که در زیر آن در محدوده‌ی

منطقه‌ی مذکور معرفی شده است. رخداد ترک‌ها مشابه با الگوی پلیگونی در بسیاری از ایالت‌های آمریکا که اقلیم بیابانی داشتند، مانند اورگان، نوادا، کالیفرنیا، آریزونا و نیومکزیکو گزارش شده است.^[۶] در واقع می‌توان این نوع ترک‌های پلیگونی بزرگ را به عنوان یکی از لندفرم‌های شاخص مناطق خشک و نیمه خشک که در برخی از نهشته‌های آبرفتی به ویژه پلایاها مشاهده می‌شوند، معرفی کرد.^[۷]

بررسی علل مختلف تشکیل ترک‌های پلیگونی بزرگ، نشان‌دهنده‌ی رخداد مکانیسمی مشابه با پدیده‌ی انقباض خاک‌های غنی از رس و به ویژه کانی مونت‌موریلونیت در اثر از دست دادن رطوبت و ایجاد ترک‌های گلی در سطح آنهاست.^[۶-۱۰] و در واقع ترک‌های با ساختار مشابه ترک گلی و یا ترک‌های بزرگ خاکی، اما با مقیاس بسیار بزرگ‌تر هستند. مونت‌موریلونیت خالص غنی از سدیم با اضافه شدن آب ممکن است تا ۱۰ برابر حجم اولیه منبسط شود. براساس مطالعات آزمایشگاهی و همچنین مشاهده‌های میدانی، ترک‌های گلی می‌توانند اندازه‌های مختلفی از حدود چند سانتیمتر تا چند ۱۰۰ متر داشته باشند. یک ترک گلی عظیم می‌تواند تا ۱ متر عرض و تا ۳۰۰ متر طول داشته باشد.^[۱۱] آزمایش‌های انجام شده جهت بررسی عوامل مؤثر در توسعه‌ی ترک‌های گلی، نشان‌دهنده‌ی وجود ارتباط مستقیم میان ابعاد ترک و ضخامت لایه‌ی رسی خشک شده است.^[۱۲] ترک‌های گلی عظیم می‌توانند در عمق ۱۵ متری خاک شده تشکیل شوند و نهایتاً با فروپاشی سقف حفره در سطح زمین رخنمون یابند. رخنمون سطحی ترک‌های عظیم مدفون ذکر شده به صورت یک مجموعه‌ی خطی از فرچاله‌های فروریزی است.^[۸]

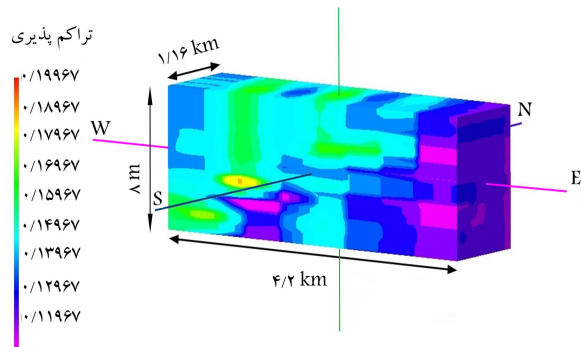
در سال ۱۹۶۸،^[۶] ترک‌های پلیگونی شکل ایجاد شده در ۴۵ پلایای مختلف در ایالت‌های مختلف آمریکا بررسی شد و براساس نتایج به دست آمده، توسعه‌ی ترک‌های گلی عظیم غالباً در مناطقی با رسوب‌های ریزدانه و سطح سخت (لایه‌ی سطحی خاک که به واسطه‌ی تجمع رسوب‌های تبخیری به صورت پوسته‌ی سخت در سطح زمین ایجاد می‌شود) است. تحقیقات انجام شده در سال ۲۰۱۰،^[۱۳] بر روی ترک‌های ایجاد شده در حوضه‌ی (پلایای) برودول^۱ در ایالت کالیفرنیا نشان داد که ترک‌های مشاهده شده در منطقه‌ی اشاره شده در واقع ترک‌های (انقباضی) گلی غول‌پیکر هستند که براساس سن‌سنجی ایزوتوپی کربن ۱۴ موجود در واریزه‌های چوبی مواد پرکننده‌ی ترک‌های مذکور، سن آنها به بیش از صدها سال و حتی شاید به چند هزار سال برسد. همچنین براساس شواهد رسوب‌شناسی، رخداد چنین ترک‌های گلی در رسوب‌های قدیمی نیز به ثبت رسیده است.^[۱۱] با توجه به ملاحظات عنوان شده، در بسیاری از موارد ترک‌های گلی عظیم ناشی از یک عامل طبیعی در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به الگوی پلیگونی، توسعه‌ی ترک‌های موجود در منطقه‌ی شرق سمنان و همچنین وضعیت زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی و هیدرولوژی حاکم بر منطقه در مطالعات انجام شده، پدیده‌ی انقباض خاک‌های رسی به علت از دست دادن رطوبت به عنوان عامل اصلی گسترش ترک در منطقه بررسی دقیق شده است.

۲. وضعیت زمین‌شناسی محدوده‌ی مورد مطالعه

براساس چهارگوش زمین‌شناسی سمنان، بخشی از محدوده‌ی مورد مطالعه بر روی یک پهنه‌ی رسی و بخش اصلی آن بر روی مخروط افکنه‌ی جوان شامل آبرفت رودخانه‌ی و دشت سیلابی قرار دارد.^[۱۱،۱۲] براساس گسترش سازنده‌های زمین‌شناسی در اطراف محدوده‌ی مورد مطالعه و همچنین مسیر جریان‌های سطحی در منطقه به نظر می‌رسد سازند کرج به سن ائوسن و متشکل از توف، شیل و سنگ‌های آذرینی که ارتفاعات شرقی سمنان را تشکیل می‌دهند، منشأ بیشتر نهشته‌های موجود در



شکل ۱. موقعیت چاهک‌های دستی حفر شده در محدوده‌ی مورد مطالعه.



شکل ۴. مدل سه بُعدی ضریب تحکیم پذیری نهشته‌های سطحی تا عمق ۸ متر در محدوده مورد مطالعه.



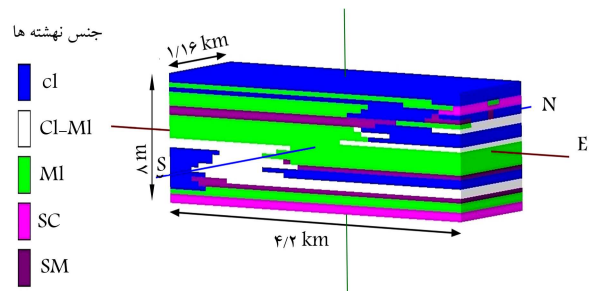
شکل ۵. تصویر ماهواره‌ای از ترک‌های گلی عظیم در محدوده مورد مطالعه.

نمونه‌ی به‌دست آمده از اعماق مختلف گمانه‌های حفر شده در محدوده‌ی مطالعاتی براساس استاندارد ASTM D2435، انجام پذیرفت. [۱۶] بارگذاری نمونه‌ها تا فشار ۸ کیلوگرم بر سانتیمترمربع و همچنین باربرداری در انتها تا فشار ۱ کیلوگرم بر سانتیمترمربع در ۱ مرحله انجام شده است. مدل سه‌بعدی تراکم‌پذیری نهشته‌های موجود در محدوده‌ی مطالعاتی در شکل ۴ ارائه شده است که مطابق آن کمینه‌ی مقدار ضریب تراکم‌پذیری در قسمت شرقی دشت که بیشتر تمرکز شکستگی‌ها در آنجا قرار دارد، مشاهده می‌شود. از این رو نمی‌توان ترک‌های ایجاد شده در سطح زمین را ناشی از تراکم رسوب‌های سُست سطحی دانست.

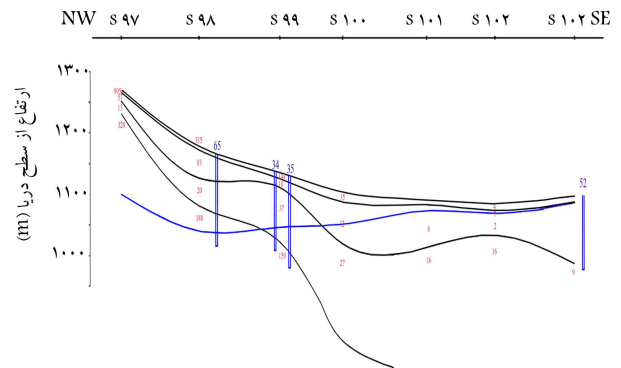
۴. بررسی الگوی شکاف‌ها و ترک‌ها در محدوده مورد نظر

جهت شناسایی علت ایجاد شکستگی‌ها در منطقه، الگوی شکستگی‌ها و روند توسعه‌ی آنها در محدوده‌ی مورد مطالعه با استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای و همچنین بازدیدهای صحرایی بررسی شد. با توجه به عکس‌های هوایی موجود، مناطقی که ترک‌ها گسترش بیشتری داشتند، شناسایی و نسبت به برداشت دقیق اطلاعات از وضعیت آنها در بازدیدهای صحرایی اقدام شد. عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای بیشترین تمرکز شکستگی‌ها را در منطقه‌ی شمال شرقی روستای اعلا در زمین‌های بایر نشان می‌دهند (شکل ۵).

بررسی دقیق نحوه‌ی گسترش ترک‌ها در سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، نشان‌دهنده‌ی الگوی گسترش ترک‌ها به شکل پلیگون‌هایی (بسته یا باز)



شکل ۲. مدل سه بُعدی گسترش لایه‌های مختلف نهشته‌های سطحی در محدوده مورد مطالعه (حداصل کیلومتر ۲۳۲/۵ الی ۲۳۶/۵).



شکل ۳. پروفیل ژئوالکتریکی شرق شهر سمنان در محدوده‌ی گسترش ترک‌ها

پهنه‌ی رسی، لایه‌ی از نهشته‌های گروه ML قرار دارد که با حرکت به سمت شرق (رسوب‌های رودخانه و طغیانی) نهشته‌های گروه SC جایگزین آنها می‌شود. لایه‌ی سوم در محدوده‌ی پهنه‌ی رسی شامل نهشته‌های گروه SM است که ضخامت بسیار کمی دارد و با حرکت به سمت شرق از ضخامت آن کاسته و نهشته‌های گروه CL جایگزین آن می‌شود. لایه‌ی چهارم موجود در منطقه، شامل نهشته‌های گروه ML است که ضخامت قابل توجهی دارد و بیشترین ضخامت آن در محدوده‌ی گمانه ۴ (در پهنه‌ی رسی) است. جزئیات کامل چگونگی گسترش نهشته‌ها در اعماق مختلف محدوده‌ی مورد مطالعه در شکل ۲ ارائه شده است.

به منظور تعیین عمق سنگ بستر، سطح آب زیرزمینی و وضعیت لایه‌های خاک در اعماق بیشتر علاوه بر اطلاعات حاصل از گمانه‌های حفاری شده از داده‌های ژئوالکتریکی نیز استفاده شد. در شکل ۳، پروفیل مقاومت الکتریکی لایه‌های مختلف زمین در منطقه‌ی مورد مطالعه نشان داده شده است. براساس نتایج حاصل از مطالعات انجام شده، لایه‌ی با مقاومت الکتریکی ۴ تا ۳۱۵ اهم‌متر وجود دارد که بیانگر رسوب‌ها و نهشته‌های سطحی منطقه است و ضخامتی حدود ۲ تا ۷ متر دارد. لایه‌ی دوم با مقاومت ۸ تا ۸۳ اهم‌متر بیانگر رسوب‌های درشت، متوسط تا ریزدانه است. از ابتدای پروفیل به سمت انتهای آن، اندازه‌ی رسوب‌ها از درشت به ریز تغییر می‌یابد. ضمناً رسوب‌های مذکور در ابتدای پروفیل خشک و در انتها مرطوب می‌شوند. لایه‌ی سوم با مقاومت ۹ تا ۳۷ اهم‌متر، بیانگر رسوب‌های متوسط تا ریزدانه و مرطوب است. در قسمت تحتانی، سونداژ ۱۰۰ تا انتهای پروفیل مربوط به سازند قرمز بالایی است. لایه‌ی آخر نیز با مقاومت ۱۵۹ تا ۳۰۰ اهم‌متر از ابتدای پروفیل تا سونداژ ۱۰۰ ردیابی شده است، که بیانگر سنگ‌های آتشفشانی ریولیت‌دار ناحیه‌ی مذکور است.

به منظور تعیین پارامترهای تحکیم و نشست مصالح، آزمایش تحکیم بر روی ۳۵

صورتی که سطح آب زیرزمینی در عمق بیش از ۱۵ الی ۳۰ متر از سطح زمین قرار داشته باشد، افت سطح آب تأثیری در گسترش ترک‌های گلی مذکور نخواهد داشت.^[۱۷] برخی از ترک‌های عظیم در مناطق کشاورزی که در آنجا سطح آب‌های زیرزمینی به دلیل پمپاژ کاهش یافته است، ایجاد شده‌اند؛ در حالی که در بسیاری از موارد وجود چنین ترک‌هایی در پلایاهای دورافتاده که در آنجا هیچ‌گونه پمپاژ آب‌های زیرزمینی صورت نگرفته است، گزارش شده است. علاوه بر این، در دهه‌ی گذشته، قبل از گسترش استفاده از آب‌های زیرزمینی و افت گسترده‌ی سطح آب، وجود ترک‌هایی عظیم در مکان‌های مختلفی ثبت شده است.^[۱۸] این تذکر لازم است که در محدوده‌ی گسترش ترک‌ها در منطقه‌ی مورد مطالعه، سطح آب زیرزمینی در سال ۱۳۷۲ براساس اطلاعات حاصل از پیرومتر شمال اعلا در عمق ۴۱ متری از سطح زمین قرار داشته است.

ترک‌های گلی عظیم ایجاد شده در عمق زمین می‌توانند مسیرهای بسیار مناسبی جهت رخداد پاپیننگ یا فرسایش تونلی در منطقه ایجاد کنند. در فرسایش تونلی، لایه‌های زیرین خاک به وسیله‌ی جریان‌های زیرسطحی آب شروع به فرسایش می‌کند و تونل‌های متعددی در لایه‌ی زیرین خاک تشکیل می‌شود و توسعه می‌یابد که نهایتاً با ریزش سقف تونل در سطح زمین به صورت گال‌هایی رخنمون می‌یابند. عوامل مختلفی در توسعه‌ی فرسایش تونلی تأثیر دارند، که از آن جمله می‌توان به هیدرولوژی منطقه، توپوگرافی زمین، کانی‌شناسی خاک و کاربری اراضی اشاره کرد. فرسایش تونلی در انواع مختلف خاک‌ها شامل خاک‌های لسی و ماسه‌یی و به‌ویژه در خاک‌های واگرا و رمبنده توسعه می‌یابد.^[۱۸] در شکل ۸، نمونه‌هایی از آثار فرسایش تونلی در منطقه‌ی مورد مطالعه ارائه شده است.

در زمین‌شناسی مهندسی، خاک رمبنده، خاکی ناپایدار با ساختار نسیست، متخلخل و در حالت طبیعی غیراشباع است. خاک‌های رمبنده در حالت خشک، مقاومت بالایی دارند اما در اثر اشباع شدن، ساختار آن‌ها فرو می‌ریزد و دچار رمبندگی می‌شوند.^[۱۹] رمبندگی خاک می‌تواند مشکلاتی برای پی‌سازه‌های مسکونی، پل‌ها، جاده‌ها، کانال‌های آبیاری و سایر ابنیه‌ی فنی به وجود آورد. میزان رمبندگی خاک تا حدودی وابسته به تخلخل ذاتی است. خصوصیات اصلی خاک‌های رمبنده، تخلخل بالا (بیشتر از ۴۰٪)، اشباع‌شدگی پایین (کمتر از ۶۰٪)، درصد سیلت بالا (بیشتر از ۳۰٪ و گاهی تا ۹۰٪) و نرم شدن سریع در آب است.^[۲۰]

واگرایی پدیده‌یی است که طی آن خاک در اثر تماس با آب به صورت شناور در آن درمی‌آید و توسط نیروی حاصل از جریان آب از محیط خارج می‌شود. در گذشته چنین تصور می‌شد که تمام خاک‌های رسی در مقابل فرسایش ناشی از جریان آب مقاوم هستند، اما اکنون مشخص شده است که رس‌هایی در طبیعت

در سطح زمین است که بی‌شبهت به ترک‌های گلی نیستند، ولی ابعاد بسیار بزرگ‌تری دارند (شکل ۵). یکی دیگر از شواهد موجود در منطقه‌ی مورد مطالعه، فروچاله‌های فروریزشی با ابعاد مختلف است، که غالباً در امتداد یک خط قرار دارند و در عمق توسط تونلی (شکافی) به یکدیگر متصل هستند. در شکل ۶، نمونه‌یی از فروچاله‌های فروریزشی با آرایش خطی در محدوده‌ی مورد مطالعه ارائه شده است.

ترک‌های گلی معمولاً بعد از رخداد یک بارندگی شدید که باعث تولید رواناب قابل توجهی می‌شود، در سطح خاک رخنمون می‌یابند. بارندگی باعث اشباع شدن سطح بالایی خاک و رسوب‌ها و کاهش چسبندگی و مقاومت لایه‌های رسی و نهایتاً فروریختن لایه‌های سطحی در داخل حفره‌ی ایجادشده به‌وسیله‌ی ترک گلی می‌شود. معمولاً ترک‌های گلی عظیم در یک منطقه به‌صورت شبکه‌یی در عمق معینی از خاک ایجاد می‌شود.

ترک‌های عظیم ذکرشده در بخش انتهایی یک مخروط افکنه، جایی که شیب زمین به شدت کاهش می‌یابد و جریان آب از وضعیت کانالی و متمرکز به جریان صفحه‌یی تبدیل می‌شود، تشکیل می‌شوند. جریان صفحه‌یی آب نسبت به جریان‌های کانالی به علت سرعت حرکت کمتر و همچنین گستردگی بیشتر بر روی سطح، باعث اشباع کامل خاک تا عمق بیشتری می‌شود. همچنین جریان صفحه‌یی با توجه به پوشش بخش وسیعی از منطقه، احتمال نفوذ جریان آب به داخل ترک‌های ایجادشده و توسعه‌ی آن را بیشتر می‌کند.^[۱۹] در شکل ۷، موقعیت ترک‌های ثبت شده نسبت به مخروط افکنه‌ی موجود در منطقه‌ی مورد مطالعه مشاهده می‌شود.

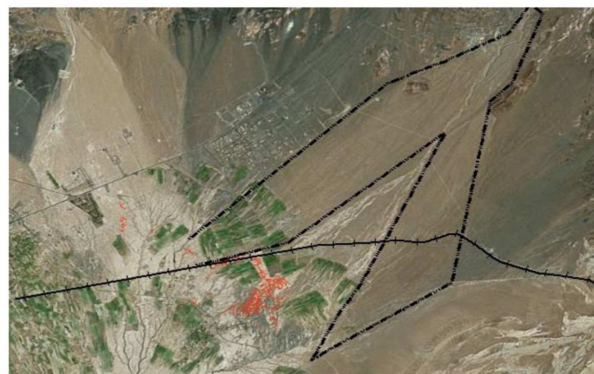
برخی پژوهشگران، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در اثر پمپاژ آب از چاه‌ها را به عنوان یک عملکرد ماشه‌یی در رخداد ترک‌های عظیم، به ویژه در مناطقی که سطح آب زیرزمینی نزدیک سطح زمین قرار دارد، پیشنهاد کرده‌اند. ولی در



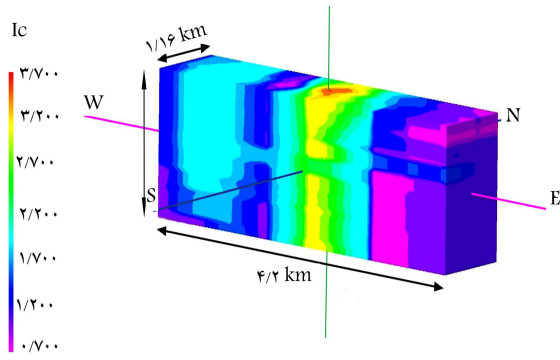
شکل ۶. نمایی از فروچاله‌های خطی در سطح زمین که نشان‌دهنده‌ی وجود یک ترک گلی در لایه‌های زیرین است.



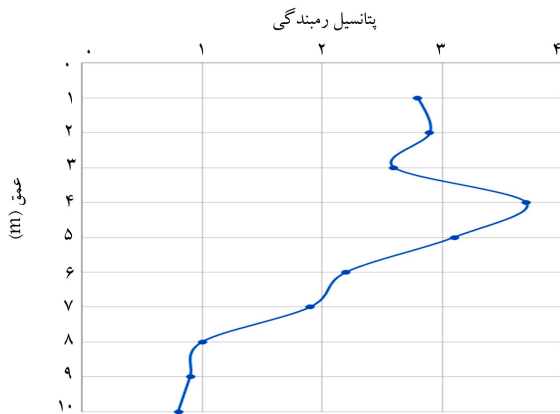
شکل ۸. نمونه‌هایی از فرسایش تونلی مشاهده شده در منطقه.



شکل ۷. موقعیت ترک‌های مشاهده شده در قسمت انتهایی مخروط افکنه.



شکل ۹. مدل سه بُعدی تغییرات شاخص رمبندگی معیار فدا (Ic) در محدوده مورد مطالعه.



شکل ۱۰. تغییرات پتانسیل رمبندگی خاک نسبت به عمق در چاهک دستی حفارده در شرق منطقه‌ی مورد مطالعه.

گمانه‌های ۸ و ۹ بوده است که براساس نتایج آزمایش تحکیم مضاعف (در گمانه‌ی ۹) و معیار فدا، پتانسیل رمبندگی داشتند. با توجه به تمرکز شدید، ترک‌های بخش شرقی منطقه‌ی مورد مطالعه و جهت تکمیل اطلاعات مورد نیاز علاوه بر چاهک دستی حفارده در منطقه، نسبت به حفاری یک چاهک دستی دیگر به عمق ۱۰ متر و تهیه‌ی نمونه‌ی دست نخورده از محل تمرکز شکستگی‌ها اقدام شد. براساس نتایج انجام تحکیم مضاعف بر روی نمونه‌های به‌دست آمده از منطقه‌ی مذکور، بیشینه‌ی پتانسیل رمبندگی خاک در عمق ۴ متری و برابر با ۳/۷ است (لايه CL-ML). در شکل ۱۰، روند تغییرات پتانسیل رمبندگی در اعماق مختلف نشان داده شده است. نتایج واگرایی خاک در گمانه‌های حفارده در محدوده‌ی مورد مطالعه با استفاده از آزمایش سوراخ سوزنی، نشان‌دهنده‌ی مقاومت خاک در برابر واگرایی در تمامی نمونه‌های به‌دست آمده از چاهک دستی جدید به جز لایه‌ی قرارگرفته در عمق ۵ تا ۶ متر است که مقاومت پایینی در برابر واگرایی دارد. علاوه بر آزمایش انجام شده در سایر چاهک‌های دستی، از آزمایش پاش اشعه‌ی ایکس (XRD) جهت تعیین وضعیت کانی‌شناسی نمونه‌های رسی به‌دست آمده از چاهک جدید حفارده در شرق منطقه استفاده شده است که براساس نتایج حاصل بیش از ۴۳/۸٪ کانی‌های رسی به‌دست آمده در گروه مونت‌موریلونیت قرار دارند.

۲.۴. بررسی نفوذپذیری

تغییرات ضریب نفوذپذیری خاک، تأثیر به‌سزایی در تمرکز جریان در یک افق خاص

جدول ۱. نتایج آزمایش ارزیابی واگرایی (سوراخ سوزنی).

گمانه	رده‌ی خاک	عمق (متر)	رده‌بندی	مقاومت در برابر واگرایی
TP۱	CL	۰-۲	ND۲	زیاد
TP۲	ML	۴-۶	ND۲	زیاد
TP۳	CL-ML	۴-۶	ND۳	متوسط
TP۴	CL	۰-۲	ND۲	زیاد
TP۵	ML	۲-۴	ND۲	زیاد
TP۶	CL-ML	۴-۶	ND۳	متوسط
TP۷	CL	۶-۸	ND۲	زیاد
TP۸	CL	۰-۲	ND۲	زیاد
TP۹	CL	۴-۶	ND۳	متوسط

جدول ۲. نتایج آزمایش استاندارد اندازه‌گیری پتانسیل رمبندگی.

شماره‌ی گمانه	عمق (متر)	جنس خاک	پتانسیل رمبندگی
TP۱	۸	CL-ML	۱/۲
TP۳	۶	CL-ML	۰/۶
TP۶	۶	CL-ML	۱/۸
TP۹	۵	CL	۴/۸

وجود دارند که با جریان آب به شدت شسته می‌شوند. براساس مطالعات انجام شده، پدیده‌ی واگرایی می‌تواند ماهیت فیزیکی و شیمیایی (خاک رس) و یا ماهیت فیزیکی (ماسه‌ی ریز و سیلت درشت غیرچسبیده) داشته باشد. فرسایش ذرات رسی، در اثر پدیده‌ی واگرایی ناشی از فزونی نیروهای دفعه بین ذرات بر نیروی جاذبه آن‌هاست و انتقال ذرات در ماسه‌های ریزدانه در اثر عدم چسبندگی و ریز بودن آنها صورت می‌گیرد.^[۲۱]

۱.۴. بررسی پتانسیل واگرایی و رمبندگی خاک

با توجه به حساسیت بالای خاک‌های واگرا و رمبند نسبت به فرسایش تونلی، آزمایش‌های تعیین پتانسیل واگرایی و رمبندگی خاک بر روی نمونه‌های به‌دست آمده از محدوده‌ی مورد مطالعه انجام شد. نتایج واگرایی خاک در گمانه‌های حفارده در محدوده‌ی مورد مطالعه با استفاده از روش سوراخ سوزنی^۲ بر طبق استاندارد ASTM D۴۶۴۷^[۲۲] و با روش C در جدول ۱ ارائه شده است. بر طبق نتایج ارائه شده در جدول ۱ در عمق ۴-۶ متری از گمانه‌های ۳، ۶ و ۹، خاک پتانسیل واگرایی دارد. برای تعیین پتانسیل رمبندگی خاک از آزمایش تحکیم مضاعف طبق استاندارد ASTM D۵۳۳۳^[۲۳] بر روی نمونه‌های به‌دست آمده از اعماق مختلف خاک انجام شد که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به تعداد کم آزمایش‌های تحکیم مضاعف جهت ارزیابی دقیق‌تر پتانسیل رمبندگی، خاک محدوده‌ی مورد مطالعه از معیار تعیین پتانسیل رمبندگی خاک ارائه شده توسط فدا نیز استفاده شد (شکل ۹).^[۲۴] که براساس آن، اگر مقدار Ic کمتر از ۱ باشد، خاک موردنظر پتانسیل رمبندگی دارد. در شکل ۹، مدل سه بُعدی تغییرات مقدار Ic در معیار فدا در منطقه‌ی مورد مطالعه ارائه شده است که براساس آن نهشته‌های بخش شرقی محدوده (ناحیه‌ی تمرکز شکستگی‌ها)، پتانسیل رمبندگی دارند (Ic < ۱).

با توجه به موقعیت گمانه‌های حفارده، بیشترین تمرکز شکستگی‌ها در محدوده‌ی

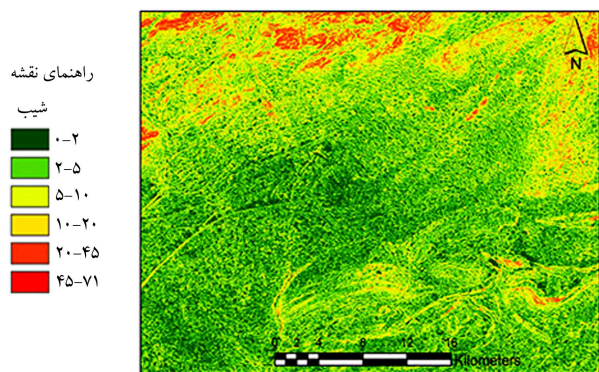
۳.۴. بررسی وضعیت توپوگرافی منطقه

همانگونه که اشاره شد، بیشترین تمرکز ترک‌های گلی عظیم در انتهای مخروط افکنه‌ها، جایی که شیب زمین به شدت کاهش می‌یابد و تقریباً برابر با صفر می‌شود، گزارش شده است. بر این اساس با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی منطقه در نرم‌افزار ArcGIS، وضعیت شیب منطقه تعیین شد. نقشه‌ی شیب برای منطقه‌ی مورد مطالعه مطابق شکل ۱۳ در ۶ گروه ۰-۲، ۲-۵، ۵-۱۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۴۵ و بیش‌تر از ۴۵ درجه تهیه شد. همانگونه که در شکل ۱۳ مشخص است، گسترش شکستگی‌ها در محدوده‌ی با شیب ۰-۲ درجه، مشاهده شده است.

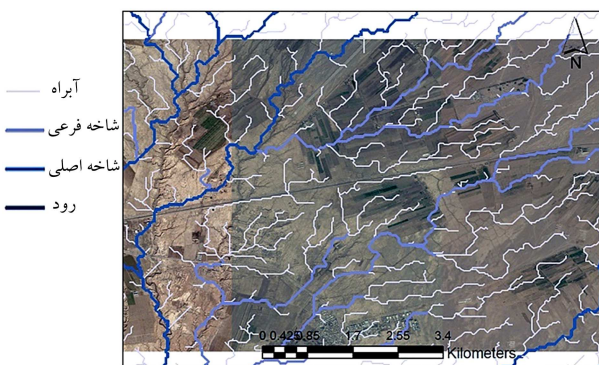
۴.۴. بررسی وضعیت جریان سطحی رواناب‌ها در منطقه

با توجه به اهمیت چگونگی توزیع رواناب‌ها در منطقه بر روی گسترش ترک‌های عظیم و همچنین فرایند واگرایی و رمبندگی خاک، توزیع رواناب‌ها در سطح محدوده‌ی مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و لایه‌ی ارتفاعی رقومی منطقه تعیین شد (شکل ۱۴).

بررسی مسیر آبراهه‌ها نشان می‌دهد که با توجه به شیب بسیار کم زمین، کل منطقه تحت پوشش آبراهه‌هایی با جهت‌گیری‌های مختلف است. همچنین مسیر راه‌آهن، تأثیر مهمی در جهت‌گیری آبراهه‌ها در محدوده‌ی نزدیک به مسیر راه‌آهن داشته است و بسیاری از آبراهه‌ها به موازات راه‌آهن قرار گرفته‌اند. بررسی ترک‌های گلی عظیم در آریزونا آمریکا مشخص ساخت که سازه‌های خطی (مانند راه‌آهن و جاده‌ها) نقش مهمی در توسعه و گسترش ترک‌های گلی دارند که علت آن را می‌توان تجمع رواناب‌های سطحی در امتداد سازه‌های مذکور دانست.^[۱۱]



شکل ۱۳. زاویه‌ی شیب منطقه و محدوده‌ی گسترش ترک‌ها.



شکل ۱۴. مسیرهای احتمالی جریان با توجه به توپوگرافی محدوده‌ی مورد مطالعه.

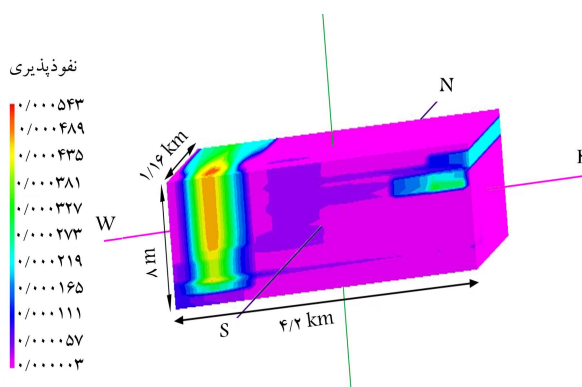
خاک و گسترش فرسایش تونلی در آن دارد. وجود لایه با نفوذپذیری پایین، باعث ایجاد جریان افقی در خاک می‌شود. معمولاً بیشترین گسترش فرسایش تونلی در جریان افقی از خاک با نفوذپذیری بالا که روی لایه‌ی با نفوذپذیری پایین‌تر قرار گرفته است، رخ می‌دهد.^[۲۵] در جدول ۳، افق‌های مختلف خاک شناسایی شده در گمانه‌ی شماره‌ی ۹ و نفوذپذیری آنها ارائه شده است.

همچنین در شکل ۱۱، مدل سه بُعدی نفوذپذیری محدوده‌ی مورد مطالعه ارائه شده است که براساس آن در شرق محدوده‌ی مطالعاتی، اختلاف فاحشی میان نفوذپذیری لایه‌های مختلف وجود دارد.

با توجه به نتایج نفوذپذیری ارائه شده در جدول ۳ و مدل سه بُعدی نفوذپذیری منطقه، اختلاف قابل توجهی میان نفوذپذیری لایه‌های دوم (SC) و سوم (CL) وجود دارد که این امر باعث ایجاد جریان افقی آب در لایه‌ی دوم می‌شود. در شکل ۱۲، نمایی از فرایند فرسایش لایه‌ی زیرین خاک و چگونگی ایجاد ترک در سطح زمین نشان داده شده است.

جدول ۳. تغییرات نفوذپذیری نهشته‌های سطحی در اعماق مختلف.

عمق (متر)	نوع خاک	نفوذپذیری (cm/s)
۰-۲	CL	$5,8 \times 10^{-7}$
۲-۴	SC	$4,3 \times 10^{-4}$
۴-۶	CL	$5,8 \times 10^{-7}$
۶-۸	CL-ML	$6,8 \times 10^{-6}$



شکل ۱۱. مدل سه بُعدی ضریب نفوذپذیری محدوده‌ی مورد مطالعه.



شکل ۱۲. وجود یک لایه با تراوی و پتانسیل فرسایش بالا در زیر لایه‌ی رسی سطحی.

۵.۴. بارندگی

یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار در توسعه‌ی ترک‌های عظیم، رژیم بارندگی و رخداد خشکسالی در منطقه است. براساس مطالعات انجام شده بر روی گسترش ترک‌ها در آریزونا در بازه‌های زمانی مختلف مشخص شد که گسترش ترک‌ها با دوره‌های خشکسالی در منطقه مطابقت دارد.^[۱۱] از سوی دیگر، رخنمون ترک‌های تشکیل شده در اعماق زمین در سطح زمین در طول بارندگی‌ها در منطقه گزارش شده است. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که الگوی بارندگی لازم جهت تشکیل و رخنمون سطحی ترک‌ها شامل رخداد دوره‌ی خشکسالی و ترسالی و تغییر چشمگیر میزان بارندگی در سال‌های مختلف در یک منطقه است. براساس اطلاعات به دست آمده از سازمان هواشناسی استان سمنان، میانگین بارندگی سالانه در شهر سمنان حدود ۱۴۰ میلی‌متر است. رژیم بارش در منطقه‌ی مذکور، مدیترانه‌یی است؛ بدین معنی که فصل بارندگی منطبق بر نیمه‌ی سرد سال و فصل خشک منطبق بر تابستان است. نکته‌ی بسیار مهم در مورد الگوی بارندگی‌های منطقه، تغییرات فاحش بارندگی از سالی به سال دیگر است که در برخی موارد تا ۵ برابر تغییر می‌کند. این امر می‌تواند در منطقه باعث ایجاد ترک‌هایی در طول دوره‌ی خشکسالی و گسترش آنها به سطح در طول دوره‌ی ترسالی شود. با توجه به آمار موجود، کمترین بارندگی سالانه برابر ۶۰/۵ میلی‌متر بوده است، که در سال آبی ۱۳۵۱ اتفاق افتاده و پر باران‌ترین سال آبی، ۱۳۵۰ بوده است که میزان بارندگی به ۲۷۶/۱ میلی‌متر رسیده است.

۵. نتیجه‌گیری

براساس مطالعات و بررسی‌های انجام پذیرفته می‌توان چنین استنباط کرد که گسترش ترک‌ها در محدوده‌ی شرق سمنان ناشی از عامل درونی و خصوصیات نهشته‌های سطحی موجود در منطقه است. در واقع، ترک‌های موجود، نمونه‌یی بسیار عظیم از ترک‌های گلی (ترک‌های انقباضی) ایجاد شده در خاک‌های رسی به علت اشباع و خشک شدن خاک است. بررسی الگوی گسترش و همچنین هندسه‌ی ترک‌ها، نشان‌دهنده‌ی تفاوت آشکار ترک‌های مذکور با ترک‌های ایجاد شده در اثر برداشت آب و فرونشست زمین است. براساس نقشه‌ی زمین‌شناسی دشت سمنان، محدوده‌ی

اصلی توسعه‌ی ترک‌ها بر روی مخروط‌افکنه‌ی جوان قرار دارد. نهشته‌های منطقه‌ی مذکور، عمدتاً شامل کانی‌های رسی فراوان است که براساس نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه و مسیر جریان منشأ آنها، غالباً توف، شیل و سنگ‌های آذرین سازند کرج به سن ائوسن است.

براساس مدل سه بُعدی تهیه شده از منطقه‌ی مورد مطالعه، عمق گسترش ترک‌ها محدود به لایه‌ی ذکر شده است، که روی آن با لایه‌یی از جنس SM-SC با نفوذپذیری بالا (در عمق تقریبی ۲ تا ۴ متری از سطح زمین) قرار دارد. در واقع، ترک‌های کششی ایجاد شده در عمق ۴ تا ۶ متری توسط فرسایش زیرسطحی و تمرکز جریان آب در مرز لایه با نفوذپذیری بالا و پایین توسعه یافته و نهایتاً با ریزش سقف حفره (لایه‌ی بالایی) در سطح زمین آشکار شده‌اند. بررسی تأثیر رمبندگی خاک بر توسعه ترک‌ها در منطقه مشخص ساخت که تمرکز ترک‌ها در بخش شرقی منطقه که با توجه به مدل سه بُعدی، ضریب رمبندگی با پتانسیل رمبندگی بالاتری دارد، بوده است. علاوه بر خصوصیات نهشته‌های موجود در منطقه‌ی توپوگرافی سطحی منطقه‌ی مورد مطالعه که شامل محدوده‌ی هموار و بدون شیب لازم جهت زهکشی رواناب‌ها بوده است، نیز نقش به‌سزایی در گسترش ترک‌های موجود ایفا کرده است. همچنین تغییر مسیر جریان‌ها به واسطه‌ی ایجاد سازه‌های خطی، مانند راه‌آهن باعث تمرکز گسترش ترک‌ها شده است. شرایط آب‌وهوایی و ویژه‌ی حاکم بر منطقه (سال‌های بسیار خشک و سال‌های پر بارش)، نیز یکی دیگر از عوامل توسعه‌ی ترک‌ها در منطقه است. روند توسعه‌ی ترک‌ها و شکستگی موجود در منطقه در صورت عدم کنترل مناسب آنها، با توجه به اینکه رخنمون یک شکستگی در سطح زمین مسیر مناسبی را جهت حرکت رواناب‌ها و ایجاد فرسایش زیرسطحی فراهم می‌کند، با سرعت بیشتری ادامه می‌یابد و در نهایت، منجر به ایجاد گال‌های متعددی در سطح زمین می‌شود. از این رو کنترل رواناب‌های سطحی و ایجاد مسیرهای متمرکز زهکشی و همچنین تسطیح زمین جهت پوشش رخنمون سطحی ترک‌های مذکور می‌تواند نقش بسیار مهمی در جلوگیری از توسعه‌ی آنها داشته باشد. راهکار دیگر پیشنهادی جهت کنترل ترک‌ها، انجام عملیات تزریق دوغاب در محدوده‌ی سازه‌ها و زیرساخت‌های موجود در منطقه است. تزریق دوغاب علاوه بر کاهش پتانسیل واگرایی و رمبندگی و افزایش شاخص‌های کیفی خاک با پر کردن درزه‌های زیرسطحی باعث انسداد مسیر جریان آب و کنترل فرایند فرسایش زیرسطحی می‌شود.

پانویس‌ها

1. Broadwell Basin
2. pin hole

منابع (References)

1. Bazan, A., Hosseyni, Kh. and Mousavi, S.F. "Study of land subsidence due to water table drop, Case studies: The main plains of Semnan province", National Conference of Water Crisis in Iran and The Middle East, Shiraz, 5 p. (2015).
2. Eskani, G.H. and Jadidi, S. "Investigate of land subsidence in the Semnan plain", *Mining and Geosciences Journal*, **5**(60), pp. 25-28 (2011).
3. Rafie, B.M.A. "Stabilization of collapsible soil using grouting technology-case study semnan-damghan railway", MSc. Thesis, Civil Engineering Faculty, Imam Khomeini International University, 128 p. (2009).
4. Rafie, B., Ziaie Moayed, R. and Esmaeli, M. "Evaluation of soil collapsibility potential: A case study of Semnan", *Railway station Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **13**(1), pp. 1-7 (2008).
5. Komak panah, A. "Geotechnical investigation on the land failure of Yazd_Ardakan road network", *Journal of Transportation Reserch*, **4**(2), pp. 181-196 (2007).

6. Neal, J.T.; Langer, A.M. and Kerr, P.F. "Giant desiccation polygons of Great Basin playas", *Geological Society of America Bulletin*, **79**(1), pp. 69-90 (1968).
7. Goudie, A.S. "Arid and semi-arid geomorphology", Cambridge University Press (2013).
8. Lang, W.B. "Gigantic drying cracks in Animas valley", *New Mexico, Science*, **98**(2557), pp. 583-584 (1943).
9. Fife, D.L. "Giant desiccation polygons and playa features", D.L. Fife and A.R. Brown (eds.), *Geology and Mineral Wealth of the California Desert*, Anaheim, California, South Coast Geological Society, pp. 414-429 (1980).
10. Lister, L.A. and Screst, C.D. "Giant desiccation cracks and differential surface subsidence, red lake playa, Mohave county, Arizona", *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, **XXII**(3), pp. 299-314 (1985).
11. Harris, R.C. "Giant desiccation cracks in Arizona", Arizona Geological Survey, Open-File Report, 99 p. (2004).
12. Rodriguez, R., Sanchez, M., Ledesma, A. and et al. "Experimental and numerical analysis of desiccation of a mining waste", *Canadian Geotechnical Journal*, **44**(6), pp. 644-658 (2007).
13. Johnson, W.J., Johnson, M.G. and Zullo, E.G. "Characterization of unusual ground fissuring in a dry lakebed-broadwell basin, San Bernardino county, California", *Conference GeoFlorida: Advances in Analysis, Modeling and Design*, West Palm Beach, Florida (Feb. 20-24, 2010).
14. Samadian, M. and et al. "Geological map of Semnan, scale 1: 250,000", Geological Survey of Iran (1975).
15. Nabavi, M.H. "Geological Map of Semnan Sheet, 1: 100,000", Geological Survey of Iran (1987).
16. ASTM D2435/ D2435M-11, "Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading", ASTM International, West Conshohocken, PA (www.astm.org) (2011).
17. Lund, W.R., DuRoss, C.B., Kirby, S.M. and et al. "The origin and extent of earth fissures in Escalante Valley, Southern Escalante desert, Iron county", Utah Geological Survey, Utah, 115 (2005).
18. Valentin, C., Poesen, J. and Li, Y. "Gully erosion: Impacts, factors and control", *Catena*, **63**(1), pp. 132-153 (2005).
19. Hafezi Moghadas, N., Nikudelm, M.R. and Bahrami, K. "Assessment of collapsibility of loess soil at Qrnabh areas in the north of Kalaleh, Golestan province", *Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, **4**(1&2), pp. 39-46 (2011).
20. Ziaie Moayed, R. and Kamalzare, M. "Improving physical characteristics of collapsible soil (Case Study: Tehran-Semnan railroad)", *Journal of Engineering Geology*, **9**(2), pp. 2869-2890 (2015).
21. Rahimi, H., Davarzani, H. and Abbasi, N. "Physical dispersivity phenomenon and its evaluation criteria in cohesionless soils", *Iranian J. Agric. Sci.*, **35**(3), pp. 541-550 (2004).
22. ASTM Standard D4647-06, "Standard test method for identification and classification of dispersive clay soils by the pinhole test", ASTM International, West Conshohocken, PA., (www.astm.org)(2006).
23. ASTM D 5333-02., *Standard Test Method for Measurement of Collapse Potential of Soils*, Annual Book of ASTM Standards, 04, ASTM International, pp. 1197-1199 (www.astm.org) (2002).
24. Feda, J. "Structural stability of subsident loess soil from Praha-Dejvice", *Engineering Geology*, **1**(3), pp. 201-219 (1966).
25. Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G. and et al. "Gully erosion and environmental change: importance and research needs", *CATENA*, **50**(2-4), pp. 91-133 (2003).