

## ارزیابی نقش رسوبات رسی نئوژن در وقوع زمین لغزش‌ها، جنوب استان اردبیل، شمال غرب ایران

رضا طلائی\*<sup>۱</sup> و آرش محمدعلیزاده<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران و <sup>۲</sup> دانش‌آموخته کارشناس ارشد مهندسی عمران، ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد واحد مرند، اردبیل، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۲۰

### چکیده

مناطق جنوبی استان اردبیل دارای سنگ‌های رسوبی رس‌دار است و در دامنه‌های آن هر ساله به‌علت وقوع زمین لغزش‌های جدید و یا فعالیت دوباره زمین لغزش‌های قدیمی خسارت‌های مالی زیادی وارد می‌شود. در منطقه مورد مطالعه، لایه‌های رسوبی رس‌دار مربوط به سازند قرمز فوقانی بوده و به سن نئوژن هستند. کانی‌های رسی می‌توانند به‌علت داشتن خصوصیت تورمی، عامل اصلی وقوع زمین لغزش‌ها باشند. این پژوهش برای آزمون فرضیه تأثیر خاک‌های رس‌دار تورم‌پذیر در ناپایداری دامنه انجام گرفت. از مساحت ۱۶۴۵۰۰ هکتاری منطقه در ۱۱/۹۱ درصد از آن زمین لغزش اتفاق افتاده است. ۳۲/۸ درصد از لایه‌های رسوبی رس‌دار درگیر زمین لغزش هستند. کمینه درصد ذرات ماسه، سیلت و رس در خاک‌های رس‌دار منطقه به ترتیب برابر صفر، ۲۳/۴ و هشت بوده، بیشینه آن‌ها نیز برابر ۳۹/۹، ۷۲ و ۵۴/۵ می‌باشد. کمینه حد روانی نمونه‌ها ۳۶/۷ درصد و بیشینه آن ۶۷/۶۶ می‌باشد. حد خمیری نیز بین ۱۹ تا ۳۳/۱۳ درصد تغییر می‌کند. خاک‌های منطقه دارای pH بالای هشت هستند. ظرفیت تبادل کاتیونی بالای ۳۰/۴۱ میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم خاک که تا ۷۶/۵۲ نیز می‌رسد، از خصوصیات اصلی خاک‌های منطقه است. درجه تورم‌پذیری خاک‌های دامنه‌های لغزشی با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و بر اساس روش‌های مختلف در چهار گروه تورمی با پتانسیل کم، متوسط، بالا و خیلی بالا طبقه‌بندی شدند. دست‌کم ۸۰ درصد از نمونه‌های خاک منطقه دارای پتانسیل تورمی متوسط و بالا بوده، ۸۷/۲ درصد از آن‌ها در پهنه‌های با خطر زمین لغزش بالا و بسیار بالا قرار می‌گیرند. خاک‌های رسی تورم‌پذیر یکی از عوامل اصلی وقوع زمین لغزش‌های منطقه هستند.

**واژه‌های کلیدی:** پتانسیل تورمی، حد خمیری، خسارت، سنگ‌های رسوبی، نئوژن

### مقدمه

زمین لغزش‌ها می‌دانند (Kojima و همکاران، ۲۰۰۰). تعداد ۵۷۰۲۸ نفر از سال ۱۹۰۳ تا ۲۰۰۷ در اثر وقوع زمین لغزش در نقاط مختلف دنیا کشته شده‌اند (OFDA/CRED، ۲۰۰۷). میزان خسارت وارده در این مدت بیش از پنج میلیارد دلار تخمین زده می‌شود

زمین لغزش‌ها یکی از مهمترین خطرات طبیعی برای جان و دارائی مردم هستند (Raghuvanshi و همکاران، ۲۰۱۴). محققان حدود یک چهارم از خسارت‌های طبیعی وارده در دنیا را مربوط به

(۲۰۱۷). تغییر در میزان رطوبت خاک‌های رس‌دار به انقباض و انبساط شدید منجر شده و با وجود شرایط محیطی دیگر مانند شیب دامنه‌ها ناپایدار می‌شوند (Manish, ۲۰۱۶). در این مورد، مطالعاتی انجام گرفته که می‌توان به نتایج برخی از آن‌ها اشاره کرد. خاک‌های رسی تورم‌پذیر در بیشتر نقاط جهان و در ایران گسترش قابل توجهی دارند (Majidi و همکاران، ۲۰۱۷) و یکی از عوامل موثر ناپایداری دامنه در این مناطق هستند (Yalcin, ۲۰۰۷). برخی از خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های دارای کانی‌های رسی از جمله حد خمیری و روانی و درصد ذرات رسی بالا از علل اصلی وقوع زمین‌لغزش معرفی شده‌اند (Meisina, ۲۰۰۶). خاک‌های دارای کانی‌های رسی خصوصاً کانی رسی مونت‌موریلونیت در زمان بارندگی به علت جذب آب سریعاً مقاومت خود را از دست می‌دهند و در دامنه‌های شیب‌دار باعث گسیخته شدن لایه‌های خاک می‌شوند (Azañón و همکاران، ۲۰۱۰). ویژگی‌های سازندهای رسوبی از جمله دارا بودن مقدار قابل توجهی از کانی‌های رسی و همچنین، وقوع و یا فعالیت زمین‌لغزش‌های گسترده در گذشته و در سال‌های اخیر در منطقه مورد مطالعه، می‌تواند به دلیل وجود خاک‌های مشکل آفرین به ویژه خاصیت تورم‌پذیری آن‌ها باشد (Baynes, ۲۰۰۸). مقایسه درصد فراوانی زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده در واحدهای سنگی و خاکی مختلف در منطقه نشان می‌دهد (Talaie و همکاران، ۲۰۰۴)، بیشترین تعداد و مساحت لغزش‌های اتفاق افتاده در دامنه‌های با لایه-های رسوبی رس‌دار مربوط به سازند قرمز فوقانی به سن زمین‌شناسی نئوژن رخ داده است.

فرضیه اصلی در این پژوهش این است که نهشته‌های رسوبی رس‌دار موجود در منطقه مورد مطالعه به دلیل داشتن ویژگی تورمی<sup>۵</sup> یکی از علل اصلی تشکیل و توسعه زمین‌لغزش‌ها هستند. با وجود این‌که خاک‌های تورم‌پذیر یکی از عوامل اصلی در وقوع زمین‌لغزش‌ها در منطقه شناخته شده ولی مطالعه چندانی در این زمینه صورت نگرفته است. به این دلیل این پژوهش برای شناخت و ارزیابی

(Castellanos Abella, ۲۰۰۸). خسارت مستقیم ۴۹۰۰ مورد زمین‌لغزش در کشور تا سال ۲۰۰۷ بالغ بر ۱۲۶۸۹۳ میلیارد ریال برآورد شده است (Mohammady و همکاران، ۲۰۱۲). مناطق جنوبی استان اردبیل در غرب رشته کوه البرز و در شمال غرب ایران هر سال شاهد وقوع زمین‌لغزش‌های جدید و یا فعالیت دوباره برخی از زمین‌لغزش‌های قدیمی است (Talaie, ۲۰۱۴). در مناطق لغزش‌خیز جنوب استان اردبیل، زمین‌لغزش‌ها نه تنها باعث تخریب سازه‌ها، راه‌های ارتباطی، اراضی زراعی و باغی می‌شوند، بلکه خسارت‌های زیادی را بر منابع طبیعی وارد آورده و ضمن تولید حجم زیادی از رسوبات از کیفیت منابع آب سطحی نیز می‌کاهد. یکی از عواملی که در بیشتر مواقع باعث ناپایداری دامنه‌ها می‌شود، حضور رس‌های تورم‌پذیر در ترکیب مواد سازنده دامنه‌ها است (Mugagga و همکاران، ۲۰۱۲). هر چند، در نقاط مختلف دنیا محققین در خصوص تعیین نقش و مکانیسم وقوع زمین‌لغزش‌ها در دامنه‌های دارای خاک‌های تورم‌پذیر تلاش زیادی کرده‌اند (Schulz و همکاران، ۲۰۱۸) اما با وجود لغزش‌خیز بودن نقاط کوهستانی ایران، مطالعه چندانی در این زمینه صورت نگرفته است.

در برخی از خاک‌ها با افزایش رطوبت، رفتارهای تورم‌پذیری، واگرایی و رمبندگی بروز می‌کند (Baynes, ۲۰۰۸) که این خاک‌ها تحت عنوان "خاک‌های حساس در مقابل آب" و یا "خاک‌های مشکل آفرین"<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند. خاک‌های متورم شونده به علت داشتن کانی‌های رسی مانند ایلیت و مونت‌موریلونیت دارای سه ویژگی مهم ترک خوردگی و شکاف<sup>۲</sup>، تراکم بالا<sup>۳</sup> و انقباض و انبساط<sup>۴</sup> شدید هستند (Jie و همکاران، ۲۰۱۷). با افزایش مقدار آب در این خاک‌ها فاصله بین ورقه‌های کانی‌های رسی بیشتر می‌شود (Azañón و همکاران، ۲۰۱۰) و در نتیجه با انقباض و انبساط شدید خاک‌های تورم‌پذیر در چرخه مرطوب و خشک‌شدگی متوالی، زمین‌لغزش‌ها به وقوع می‌پیوندند (Jie و همکاران،

<sup>1</sup> Problem soils

<sup>2</sup> Cracking and fissures

<sup>3</sup> Over-consolidation

<sup>4</sup> Swelling and shrinkage

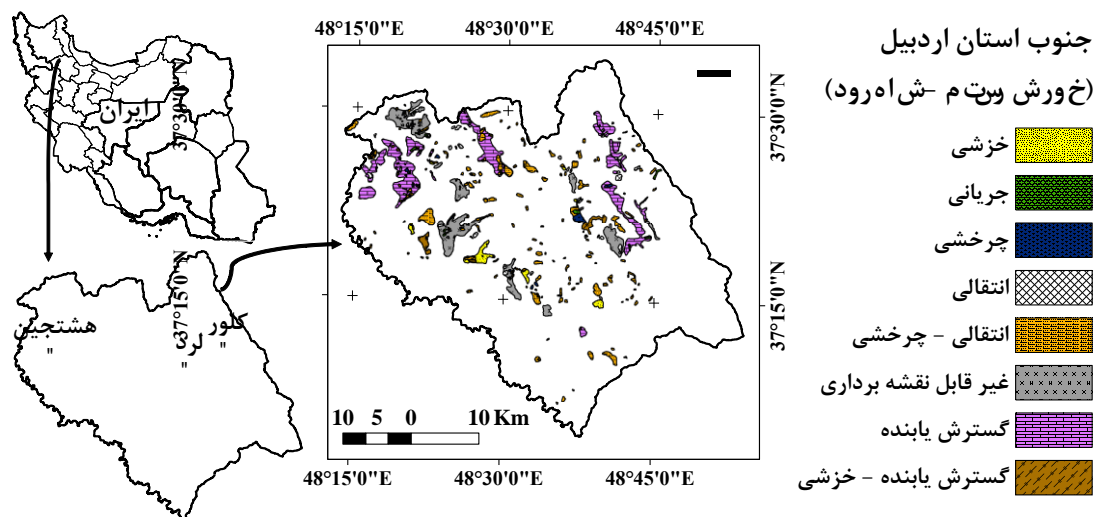
<sup>5</sup> Expansive

کوه‌های آق‌داغ در بخش مرکزی منطقه حدود ۳۳۲۴ متر و پست‌ترین نقطه در حاشیه قزل‌اوزن در غرب ۸۵۰ متر ارتفاع دارند. محدوده مورد مطالعه، قسمت اعظم بخش خورش رستم و شاهرود (امام‌رود) شهرستان خلخال را در بر می‌گیرد (شکل ۱). در این منطقه، لایه‌های رسوبی قرمز رنگ شامل سنگ‌های کنگلومرا، ماسه‌سنگ، سیلتستون، گلسنگ و مارن هستند که به نام رسوبات نئوژن شناخته می‌شوند. در بیشتر لایه‌های رسوبی مربوط به نئوژن این منطقه رس و گچ وجود دارد و در بخش‌های سطحی که زمین‌لغزش‌ها نیز در آن بخش به وقوع می‌پیوندند، نسبتاً نرم می‌باشند. به همین دلیل برای سنگ‌های رسوبی نرم و خاک‌های روی آن‌ها از اصطلاح خاک استفاده شده است.

ویژگی‌های رسوبات رس‌دار و نقش آن‌ها در ناپایداری دامنه‌ها در منطقه انجام گرفت. با داشتن اطلاعات دقیق از خصوصیات ژئوتکنیکی مصالح سازنده دامنه‌ها می‌توان ارزیابی حساسیت دامنه‌ها به زمین‌لغزش را با دقت بالا انجام داد.

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد پژوهش:** منطقه مورد مطالعه، به مساحت ۱۶۴۵۰۰ هکتار در بخش جنوبی استان اردبیل قرار دارد. این ناحیه بین طول‌های جغرافیایی ۴۸° ۱۳' ۵۴" و ۴۸° ۵۴' ۲۳" شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۷° ۴۵' ۰۴" و ۳۷° ۳۴' ۵۹" شمالی واقع شده است. این منطقه قسمتی از شمال غرب رشته کوه البرز است و بلندترین نقطه در



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و گسترش انواع ناپایداری‌های دامنه‌ای (Talaei, ۲۰۱۴).

هوایی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ و ۱:۵۰۰۰۰ (سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح و سازمان نقشه برداری کشور) شناسایی شد. سپس، طی بررسی‌های میدانی ضمن اصلاح محدوده زمین‌لغزش‌ها برای آن‌ها شناسنامه اطلاعاتی تکمیل شد (شکل ۱).

تهیه نقشه ترکیب سنگی: با استفاده از اطلاعات نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ هشتجین (Faridi و Anvari, ۲۰۰۰)، ماسوله (Davies و همکاران, ۱۹۷۲) و نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ بندر انزلی (Davies و همکاران, ۱۹۷۵) و انجام پیمایش‌های صحرائی نقشه زمین‌شناسی منطقه به مقیاس

**روش پژوهش:** در این پژوهش، ویژگی‌های تورم‌پذیری رسوبات و خاک‌های رس‌دار در ارتباط با وقوع زمین‌لغزش‌های گسترده در مناطق جنوبی استان اردبیل مورد مطالعه قرار گرفت. این پژوهش در سه بخش انجام گرفته است.

**شناسایی زمین‌لغزش‌ها:** جمع‌آوری داده‌ها و تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها در فاصله سال‌های ۱۳۷۴ تا ۱۳۹۳ انجام گرفت. برای تهیه نقشه ویژگی‌های زمین‌لغزش<sup>۱</sup> ابتدا موقعیت آن‌ها بر اساس عکس‌های

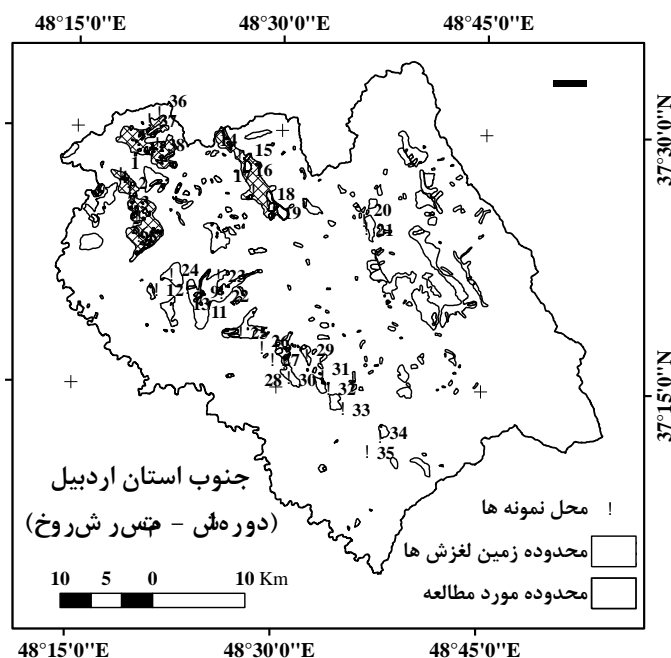
<sup>۱</sup> Landslide inventory map

شد. برای آزمون معنی‌دار بودن اختلاف بین فراوانی-های مشاهده شده از وقوع لغزش‌ها بر اساس ترکیب سنگ‌ها و خاک‌ها با فراوانی‌های پیش‌بینی شده، از مقادیر شاخص محاسبه شده تحت عنوان مربع کای ( $X^2$ ) استفاده شده است.

**نمونه‌برداری:** بعد از تعیین محدوده رسوبات رس‌دار، نمونه‌برداری از مصالح سطحی منطقه در مناطق لغزشی انجام گرفت. در این پژوهش، ۳۸ نمونه سطحی و زیرسطحی تا عمق ۱۰ متری و به‌صورت دست‌خورده و نخورده از توده‌های اصلی زمین‌لغزش‌ها تهیه شد (شکل ۲).

۱:۲۰۰۰۰ تهیه شد. در تعیین محدوده رسوبات نئوژن و ترکیب سنگ‌های رسوبی و خاک‌های روی آن‌ها علاوه بر نقشه‌ها و گزارشات زمین‌شناسی از نتایج پژوهش‌های پیشین در خصوص شناخت ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و کانی‌شناسی آن‌ها نیز استفاده شده است (Talaei و همکاران، ۲۰۱۳). نقشه ترکیب سنگی منطقه نیز از نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۰۰۰۰ استخراج شد.

**ارزیابی نقش ترکیب سنگی در وقوع زمین‌لغزش:** نقش ترکیبات مختلف سنگی و خاکی در وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش آمار غیر پارامتری تحلیل



شکل ۲- موقعیت محل نمونه‌برداری از زمین‌لغزش‌ها در دامنه‌های با سازندهای رسوبی رس‌دار در جنوب استان اردبیل (خورش رستم-شاهرود)

اندازه‌گیری شد و در پنج نمونه نیز آزمایش تحکیم انجام گرفت (ASTM D5333) (ASTM، ۲۰۰۰b).  
**ارزیابی تورم‌پذیری خاک‌های مناطق لغزشی:** برای شناسایی و ارزیابی پتانسیل تورمی خاک‌ها از روش‌های مستقیم و غیرمستقیم استفاده می‌شود. پتانسیل تورمی خاک با استفاده از یک معیار (Yukselen-Aksoy و Kaya، ۲۰۱۰) و یا چند معیار (Yilmaz، ۲۰۰۶) تعیین می‌شود. مهمترین معیارهای انتخاب شده برای ارزیابی پتانسیل تورم‌پذیری

**مطالعات آزمایشگاهی:** دانه‌بندی (ASTM D422)، حد روانی<sup>۱</sup>، حد خمیری<sup>۲</sup> (ASTM، ۱۹۹۲)، چگالی خاک، (ASTM D4318) (ASTM، ۲۰۰۰a)، مقدار pH و غلظت عناصری همچون سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم در نمونه‌های خاک تعیین شد. در این مطالعه، در ۱۳ نمونه ویژگی‌های شیمیایی خاک‌ها

<sup>۱</sup> Liquid Limit (LL)

<sup>۲</sup> Plastic Limit (PL)

آن‌ها در نقشه‌های توپوگرافی ترسیم شد. در ۲۵۵ مورد (۵۹ درصد) از لغزش‌ها شواهدی از وقوع جابه‌جایی در سال‌های گذشته مشاهده می‌شود. این زمین‌لغزش‌ها در ۵۰ تا ۱۰۰ سال گذشته برای اولین بار به‌وقوع پیوسته‌اند و یا لغزش‌های قدیمی هستند که دست‌کم یک بار جابه‌جایی داشته‌اند. سن بقیه زمین‌لغزش‌ها بر اساس مورفولوژی زمین‌لغزش‌ها و شواهد صحرایی قدیمی تعیین شده است (Talaei, 2014). لغزش‌های منفرد در گروه‌های انتقالی، چرخشی و ترکیب این دو و پهنه‌های لغزشی در گروه‌های خزشی، غیر قابل نقشه‌برداری و گسترش یابنده قرار می‌گیرند (شکل ۱). ۷۵/۴ درصد از زمین‌لغزش‌ها در فاصله صفر تا هشت کیلومتری از گسل‌های اصلی اتفاق افتاده‌اند. ۸۵/۶۸ درصد از آن‌ها در دامنه‌های با شیب ۳۰-۱۰ درصد، ۲۹/۴ درصد در دامنه‌های با جهت رو به شمال و شمال شرق، ۷۴/۶ درصد در مناطق با بارندگی ۳۸۰-۳۰۰ میلی‌متر قرار گرفته‌اند. در ۸۰ درصد از لغزش‌های موجود در منطقه، عامل زیرشویی رودخانه‌ها دخالت مستقیم دارند (Talaei, 2014).

**رابطه ترکیب سنگی با ناپایداری دامنه‌ای:** در فرورفتگی‌های حاصل از سامانه گسلی در مناطق جنوبی استان اردبیل لایه‌های رسوبی قرمز رنگ مربوط به دوره نئوژن متشکل از سنگ‌های کنگلومرا، ماسه‌سنگ، سیلتستون، گل‌سنگ، مارن و به‌طور متناوب لایه‌های گچ و رس‌دار ته‌نشین شده‌اند. این رسوبات معادل سازند قرمز فوقانی<sup>۴</sup> هستند (Davies و همکاران، ۱۹۷۲). با توجه به تنوع سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه و حساسیت متفاوت واحدهای سنگی به زمین‌لغزش، ترکیب سنگ‌ها و خاک‌های روی آن‌ها نقش موثری در پراکنش لغزش‌ها در منطقه دارند (Talaei, 2014). در نقشه ترکیب سنگی تهیه شده از نقشه زمین‌شناسی منطقه، واحدهای سنگی به ۱۳ گروه تقسیم شد (شکل ۳). نتایج آزمون ناپارامتری نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین فراوانی پیکسل‌های درگیر زمین‌لغزش در واحدهای سنگی می‌باشد ( $X^2 = 54238, df = 12, p = 0.000$ ).

خاک‌های منطقه شامل درصد ذرات ریزدانه، خصوصیات خمیری و حد روانی، درجه فعالیت و خصوصیات شیمیایی هستند. ارزیابی پتانسیل تورم‌پذیری خاک‌ها بر اساس معیارهای فوق و در مقایسه با مقادیر استاندارد و تعریف شده انجام گرفت. برای ارزیابی غیر مستقیم پتانسیل تورم خاک‌ها از روش‌های چن<sup>۱</sup>، داکشانمورتی و رامان<sup>۲</sup>، واندرو<sup>۳</sup> و واندرو اصلاح شده، خصوصیات شیمیایی-حد روانی خاک‌ها و روش تلفیقی مبتنی بر روش چن، داکشانمورتی و رامان استفاده شد. پتانسیل تورم‌پذیری خاک‌ها بر اساس نمودارها و دیاگرام‌های مختلف تعیین شد. همچنین، برای ارزیابی مستقیم پتانسیل تورمی خاک‌های مناطق لغزشی، خصوصیت فشار تورمی خاک‌ها با استفاده از آزمایش تحکیم تعیین شد (Sudjianto و همکاران، ۲۰۱۱). برای تعیین رابطه خاک‌های تورم‌پذیر با پراکنش زمین‌لغزش‌ها موقعیت آن‌ها با نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش تقاطع داده شد. در این مطالعه، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقه، به روش توابع مطلوب انجام گرفت. در این روش، برای هر کدام از لایه‌ها اطلاعاتی (متغیرهای مستقل یا همان عوامل موثر در لغزش)، توابع توزیع فراوانی چند متغیره بر اساس تابع احتمال نسبی محاسبه شد و یک مدل پیشگویی، برای تعیین مناطقی که احتمال وقوع زمین‌لغزش در آینده در آن‌ها وجود دارد، ساخته شد. احتمال وقوع زمین‌لغزش در دو گروه متغیر طبقه‌بندی شده و پیوسته به‌طور جداگانه محاسبه شد (Talaei, 2018).

## نتایج و بحث

**ویژگی زمین‌لغزش‌ها:** زمین‌لغزش‌های منفرد و پهنه‌های لغزشی در ۱۱/۹۱ درصد از مساحت منطقه به‌وقوع پیوسته‌اند. مساحت ۴۳۳ مورد زمین‌لغزش در منطقه برابر ۱۹۳۸۹/۷۵ هکتار می‌باشد که ۲۳۰۲/۲۰ هکتار آن به لغزش‌های منفرد و ۱۷۰۸۲/۵۵ هکتار دیگر به پهنه‌های لغزشی مربوط می‌شود (جدول ۱). تعداد ۴۳۳ زمین‌لغزش شناسایی و موقعیت فضایی

<sup>1</sup> Chen

<sup>2</sup> Dakshanamurthy and Raman

<sup>3</sup> Van Der Merwe

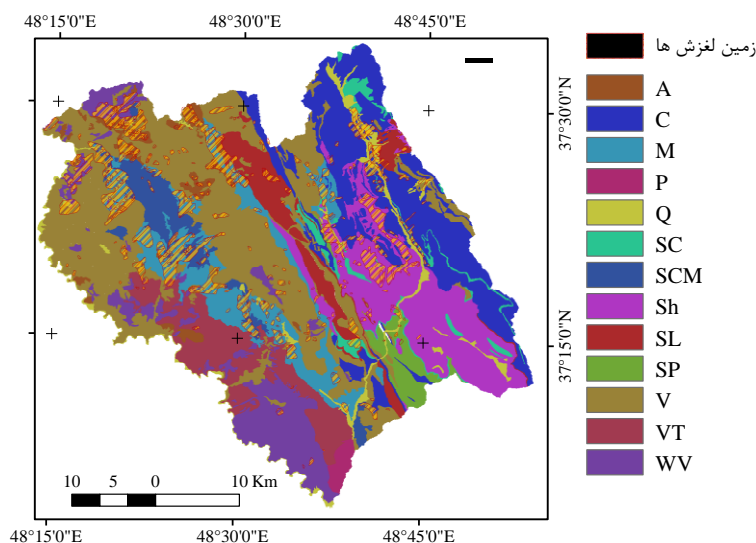
<sup>4</sup> Upper red formation

ترکیب اصلی کانی‌های رسی لایه‌های رسوبی نئوژن در این منطقه بیشتر از نوع مونت‌موریلونیت بوده (Talaei و همکاران، ۲۰۱۳) و گرهک‌ها و لایه‌های نازک گچی به وفور در آن‌ها یافت می‌شود که حاکی از منشاء کولابی است (Davies و همکاران، ۱۹۷۲). بنابراین، یکی از عوامل اصلی تمرکز زمین‌لغزش‌ها در لایه‌های رسوبی نئوژن منطقه می‌تواند وجود کانی‌های رسی باشد (Galeandro و همکاران، ۲۰۱۴).

گدازه‌های آندزیتی، بازالتی، داسیتی و تراکیتی بسیار کمتر از واحدهای رسوبی رس‌دار دچار لغزش شده‌اند. همچنین، در ۳۲/۸۰ درصد از مساحت لایه‌های رسوبی مارنی، رس‌دار و گچی (M) و در ۱۹/۱۶ درصد از مساحت محدوده‌های با لایه‌های ماسه‌سنگی، کنگلومرایی و مارنی (SCM) زمین‌لغزش به‌وقوع پیوسته است (جدول ۲). نتایج مطالعات دیفراکتومتری اشعه ایکس (XRD) نشان می‌دهد که

جدول ۱- فراوانی و مساحت زمین‌لغزش‌ها بر اساس نوع آن‌ها

مساحت (هکتار)	درصد	فراوانی	نوع زمین‌لغزش
۸۰۷/۹۸	۴/۴	۱۹	جریان‌ها
۲۶۴/۶۲	۴/۲	۱۸	چرخشی
۳۶۱/۰۴	۱۶/۶	۷۲	انتقالی
۸۶۸/۵۶	۶۶/۵	۲۸۸	چرخشی-انتقالی
۴۳۷۲/۷۴	۱/۶	۷	خزش‌ها
۵۰۴۹/۰۰	۲/۵	۱۱	غیرقابل نقشه‌برداری
۵۵۳/۵۸	۳/۷	۱۶	گسترش یابنده
۷۱۱۲/۲۳	۰/۵	۲	گسترش یابنده-جریانی با سرعت بسیار پایین
۱۹۳۸۹/۷۵	۱۰۰	۴۳۳	جمع



شکل ۳- نقشه ترکیب سنگی منطقه لغزش خیز جنوب استان اردبیل مستخرج از نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۰۰۰۰

می‌گیرند (ASTM، ۱۹۹۲). روش چن: ۷۶ درصد از نمونه‌های خاک منطقه برحسب درصد ذرات ریزتر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر در گروه خاک‌های با پتانسیل تورم متوسط و متوسط به بالا قرار می‌گیرند (Chen، ۱۹۷۵). دلیل انتخاب این معیار را می‌توان به نیروهای الکتریکی که روی سطح این

ارزیابی پتانسیل تورمی خاک و رسوبات رس‌دار در دامنه‌های ناپایدار: ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و حدود آتربرگ مواد رس‌دار در نقاط مختلف منطقه در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده است. بیشتر خاک‌های رس‌دار مورد مطالعه از نظر طبقه‌بندی یکنواخت بوده، در گروه خاک‌های رسی (CL) قرار

متوسط تا بالا هستند.

نتایج پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که بین پتانسیل تورمی خاک‌های رس‌دار با درصد ذرات کوچک‌تر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر، حد روانی و تعداد ضربات در آزمایش ضربه و نفوذ استاندارد رابطه مستقیم وجود دارد (Chen, ۱۹۸۸). چون حد روانی و پتانسیل تورمی خاک‌های رسی به مقدار آبی که رس‌ها جذب می‌کنند، بستگی دارد، لذا وجود رابطه بین این دو، دور از انتظار نیست. پتانسیل تورمی نمونه‌های خاک منطقه بر اساس این سه خصوصیت و بر مبنای استانداردهای روش چن (Chen, ۱۹۷۵) تعیین شد (شکل ۴). با توجه به موقعیت نمونه‌ها در نمودار، بیش از ۸۰ درصد از نمونه‌های خاک منطقه در قلمرو پتانسیل تورمی متوسط تا بالا قرار می‌گیرند.

ذرات عمل می‌کنند، مربوط دانست، چون نیروهای الکتریکی خیلی بیشتر از نیروهای ثقلی بوده، تاثیر زیادی بر خصوصیات تورمی خاک‌ها می‌گذارند (Bakhshipouri و همکاران، ۲۰۱۴). بر اساس این معیار، افزایش درصد ذرات ریزتر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر در خاک‌های منطقه رابطه مستقیم با افزایش پتانسیل تورمی آن‌ها خواهد داشت (Mahmodi و همکاران، ۲۰۱۴) و نمونه‌هایی از خاک‌ها که دارای بیش از ۳۰ درصد ذرات رسی هستند، می‌توانند پتانسیل تورمی بالایی داشته باشند (جدول ۵). شاخص خمیری بالای ۱۵ نیز به‌عنوان مقدار رهنمود برای تعیین خاک‌های دارای پتانسیل تورم در نظر گرفته شده است (Chen, ۱۹۸۸). با در نظر گرفتن این شاخص ۱۰۰ درصد نمونه‌های خاک منطقه دارای پتانسیل تورمی با درجه

جدول ۲- مشخصات و مساحت واحدهای زمین‌شناسی در منطقه لغزش خیز جنوب استان اردبیل و مساحت زمین‌لغزش‌ها در هر واحد سنگی

علامت اختصاری	ترکیب سنگ‌شناسی	مساحت ترکیب سنگی (هکتار)	مساحت زمین‌لغزش‌ها (هکتار)	نسبت مساحت زمین‌لغزش به مساحت واحد سنگی
Q	پادگانه‌های آبرفتی و رسوبات جدید کواترنری	۵۴۴۸/۵۰	۸۸۷/۱۵	۰/۱۶۳
SC	ماسه‌سنگ‌ها و کنگلومراها	۳۸۶۴/۱۴	۲۹۱/۴۵	۰/۰۷۵
SP	سنگ‌های اسلیتی و فیلیتی (دگرگونی)	۳۷۶۸/۷۹	۱۰۸/۰۷	۰/۰۲۹
A	پهنه‌های دگرسانی	۴۱۵۱/۹۸	۱۸۲۵/۸۸	۰/۴۴۰
VT	لایه‌های سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری‌ها	۱۲۵۸۵/۳۶	۳۵۲۲/۱۷	۰/۲۸۰
V	سنگ‌های آتشفشانی	۵۰۳۸۰/۷۹	۱۸۹/۰۱	۰/۰۰۴
P	مجموعه‌های نیمه‌نفوذی و نفوذی	۱۱۹۸/۱۷	۰	۰/۰۰۰
SCM	تناوب ماسه‌سنگ‌ها، کنگلومراها و مارن‌ها	۷۰۱۰/۰۸	۱۳۴۳/۲۷	۰/۱۹۲
WV	سنگ‌های هوازده و برشی شده آتشفشانی	۱۴۹۹۵/۴۶	۱۳۵۴/۹۴	۰/۰۹۰
M	مارن‌های گچی	۱۶۰۳۸/۱۳	۵۲۶۱/۴۰	۰/۳۲۸
Sh	سنگ‌های رسوبی و شیستی	۲۲۰۸۱/۰۳	۲۶۵۵/۷۴	۰/۱۲۰
C	سنگ‌های آهکی	۲۷۰۶۶/۲۲۶	۱۳۴۶/۶۴	۰/۰۵۰
SL	سنگ‌های آهکی سیلتی و ماسه‌ای	۸۵۴۰/۹۹	۶۰۴/۰۳	۰/۰۷۱

جدول ۳- ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی برای ۳۸ نمونه از خاک‌های منطقه

شماره نمونه	عمق (متر)	درصد ذرات			حدود آتربریگ (درصد)		شاخص خمیری
		ماسه	سیلت	رس	حد خمیری	حد روانی	
۱	(۱)	۰	۷۲	۲۸	۴۴/۳۰	۲۵/۷۵	۱۸/۵۵
۲	(۱)	۱۰/۵	۵۲/۵	۳۶	۵۹/۷۳	۲۵/۳۵	۳۴/۳۸
۳	(۴)	۸/۵	۴۸/۵	۴۳	۶۷/۶۶	۲۱/۳۱	۴۶/۳۵
۴	(۸)	۱۱	۵۰	۳۹	۶۰/۳۲	۲۰/۸۴	۳۹/۴۸
۵	(۱)	۰	۴۸	۵۲	۵۹/۱۶	۳۳/۱۳	۲۶/۰۳
۶	(۱)	۱۷	۴۹	۳۴	۵۸/۰۵	۱۹/۳۰	۳۸/۷۵
۷	(۶)	۱۵	۶۶/۵	۱۸/۵	۴۱/۶۳	۱۹/۵۰	۲۲/۱۳
۸	۰	۱۲	۷۲	۱۶	۴۲/۷۶	۲۴/۵۱	۱۸/۲۵
۹	(۱)	۲۱	۴۱/۵	۳۷/۵	۵۷/۱۱	۲۲/۵۶	۳۴/۵۵
۱۰	(۵)	۱۱	۴۳	۴۶	۵۱/۱۸	۲۳/۷۲	۲۷/۴۶
۱۱	(۱۰)	۰	۵۲/۵	۴۷/۵	۵۳/۷۱	۲۳/۳۲	۳۰/۳۹
۱۲	(۱/۵)	۰	۴۷	۵۳	۳۳/۱۹	۲۲/۵۳	۱۰/۶۶
۱۳	(۲)	۰	۳۷	۶۳	۴۳/۵۱	۲۰/۹۳	۲۲/۵۸
۱۴	(۰/۸)	۲۶/۹	۵۹/۱	۱۴	۴۲/۳	۲۲/۱	۲۲/۲
۱۵	(۰/۵)	۲۵/۳	۳۶/۲	۳۸/۵	۴۹	۲۵/۷	۲۳/۳
۱۶	(۲)	۲۴/۹	۴۰/۳	۳۴/۸	۴۴/۲	۲۴/۵	۱۹/۷
۱۷	(۰/۳)	۲۸/۱	۳۷/۷	۳۴/۲	۴۱/۲	۲۳/۴	۱۷/۸
۱۸	(۰/۶)	۳۳/۷	۲۹/۹	۳۶/۷	۴۱/۲	۲۳/۴	۱۷/۸
۱۹	(۰/۹)	۲۴/۴	۵۷/۷	۱۷/۹	۳۹/۹	۲۳/۱	۱۶/۸
۲۰	(۱/۲)	۲۶/۳۶	۴۰/۸	۳۲/۸	۴۴/۵	۲۱/۴	۲۳/۱
۲۱	(۰/۸)	۲۷/۷	۴۰/۳	۳۲	۴۴	۲۱/۹	۲۲/۱
۲۲	(۰/۲)	۱۹/۷	۲۲/۵	۵۴/۵	۵۵/۶	۲۹/۳	۲۶/۳
۲۳	(۰/۵)	۱۶/۸	۳۴/۵	۴۸/۷	۵۳	۳۰	۲۳
۲۴	(۰/۸)	۳۲/۷	۵۱	۱۶/۳	۴۱/۲	۲۳/۴	۱۷/۸
۲۵	(۱/۵)	۲۴/۱	۳۳	۳۲/۹	۳۸	۱۹	۱۹
۲۶	(۳)	۲۹/۶	۳۷/۸	۳۲/۶	۳۵/۴	۱۹/۵	۱۵/۹
۲۷	(۱)	۳۰/۷	۳۲/۵	۲۶/۸	۳۹/۷	۲۰/۳	۱۹/۴
۲۸	(۰/۵)	۲۱/۶	۳۷/۷	۴۰/۷	۴۶/۶	۲۵/۴	۲۱/۲
۲۹	(۰/۳)	۲۸/۱	۶۱/۴	۱۰/۵	۴۴/۶	۲۲/۸	۲۱/۸
۳۰	(۰/۶)	۲۷/۹	۳۷/۶	۳۴/۵	۴۷	۲۶/۳	۲۰/۷
۳۱	(۰/۵)	۲۹/۱	۳۰/۳	۴۰/۶	۴۵/۵	۲۴/۸	۲۰/۷
۳۲	(۰/۸)	۲۹/۳	۳۱/۵	۳۹/۲	۳۹/۹	۲۱/۵	۱۸/۴
۳۳	(۱)	۳۶/۸	۲۳/۴	۳۹/۸	۴۱/۲	۲۳/۴	۱۷/۸
۳۴	(۰/۴)	۲۹/۹	۶۲/۱	۸	۳۶/۷	۱۹/۹	۱۶/۸
۳۵	(۰/۳)	۲۴/۴	۳۲/۶	۴۳	۳۹/۹	۲۳/۱	۱۶/۸
۳۶	(۱/۸)	۳۲/۷	۲۹/۴	۳۷/۹	۴۱/۲	۲۳/۴	۱۷/۸
۳۷	(۱/۲)	۲۸/۱	۳۴/۸	۳۷/۱	۴۴/۶	۲۲/۸	۲۱/۸
۳۸	(۰/۳)	۳۹/۹	۳۲/۶	۳۷/۵	۳۶/۷	۱۹/۹	۱۶/۸

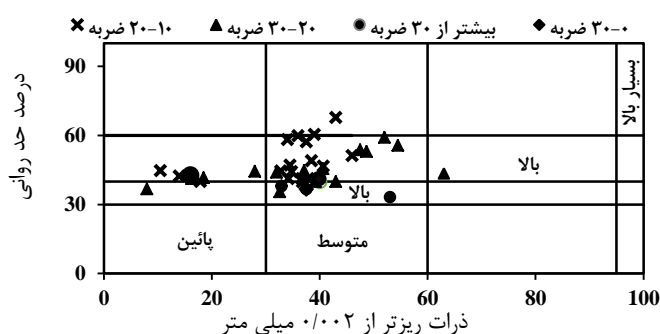


جدول ۴- ویژگی‌های شیمیایی برای ۱۳ نمونه از خاک منطقه مورد مطالعه

شماره نمونه	pH	ظرفیت تبادل کاتیونی (میلی اکی والان در ۱۰۰ گرم خاک)
۱	۹/۰۲	۵۲/۱۷
۲	۸/۷۷	۵۲/۱۷
۳	۸/۵۹	۵۴/۲۶
۴	۸/۷۶	۵۲/۸۷
۵	۸/۹۱	۷۶/۵۲
۶	۸/۴۸	۷۱/۶۵
۷	۸/۷۳	۷۳/۷۴
۸	۸/۸۸	۵۸/۴۳
۹	۸/۰۳	۵۰/۷۸
۱۰	۸/۳۲	۳۸/۹۶
۱۱	۸/۳۹	۴۳/۸۳
۱۲	۷/۹۴	۳۰/۴۱
۱۳	۸/۴۷	۳۰/۷۹

جدول ۵- تعیین درجه تورم خاک‌های منطقه بر اساس معیارهای درصد ذرات ریز و شاخص خمیری (Chen, ۱۹۸۸)

پتانسیل تورم	معیار درصد ذرات ریزتر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر		معیار شاخص خمیری	
	درصد ذرات ریزتر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر	درصد نمونه‌های منطقه	شاخص خمیری	درصد نمونه‌های منطقه
ضعیف	۰ - ۳۰	۲۳/۶۸	۰-۱۵	۰
متوسط	۳۰ - ۶۰	۷۳/۶۸	۱۰-۳۵	۱۰۰
بالا	۳۰ - ۹۵	۲/۶۳	۲۰-۵۵	۱۰۰
خیلی بالا	بیش از ۹۵	۰	بیش از ۳۵	۰



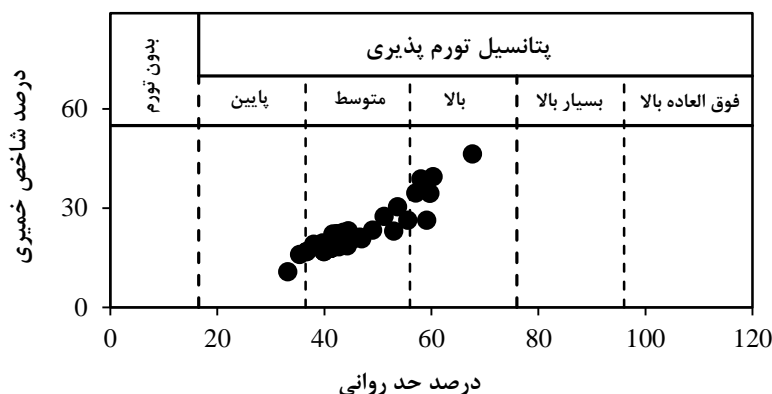
شکل ۴- موقعیت نمونه‌های خاک منطقه در نمودار درجه پتانسیل تورم خاک‌ها بر حسب سه خصوصیت: تعداد ضربات نفوذ استاندارد، ذرات ریزتر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر و حد روانی (تغییر داده شده از روش چن (Chen, ۱۹۷۵))

می‌شود، حد خمیری گفته می‌شود. حد خمیری و حد روانی، معیارهای خوبی برای تعیین خاصیت تورمی رس‌ها هستند، چرا که مقادیر بالای آن‌ها نمایشگر تمایل هرچه بیشتر خاک‌ها به انقباض در اثر خشک

روش داکشانمورتی و رامان: به مقدار رطوبتی که خاک در کمتر از آن از حالت مایع به حالت خمیری تبدیل می‌شود، حد روانی و مقدار رطوبتی که کمتر از آن از حالت نیمه خمیری به نیمه جامد تبدیل

شاخص خمیری و حد روانی تعیین شد (Khemissa و Mahamedi، ۲۰۱۴). بر این اساس، بیش از ۹۰ درصد از نمونه‌ها در گروه خاک‌های با درجه تورم متوسط تا بالا قرار گرفتند (شکل ۵).

شدن و تورم در اثر افزایش رطوبت است (Yilmaz، ۲۰۰۶). در این روش، شاخص خمیری بر اساس اختلاف بین حد روانی و حد خمیری محاسبه شد و درجه پتانسیل تورمی در یک نمودار با دو محور درصد



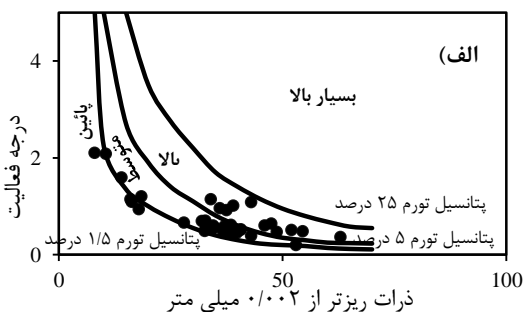
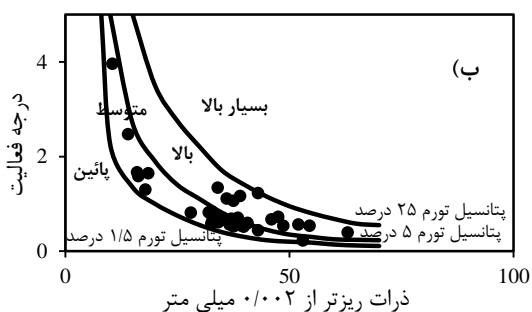
شکل ۵- موقعیت نمونه‌ها در نمودار دو محوری درصد شاخص خمیری و حد روانی (Dakshanamurthy و Ramana، ۱۹۷۳؛ Yilmaz، ۲۰۰۶)

که در آن‌ها،  $A$  درجه فعالیت،  $I_p$  نشانه خمیری،  $C$  درصد ذرات ریز خاک (کوچک‌تر از  $0.075$  میلی‌متر) و  $n$  برای خاک‌های طبیعی ۵ و خاک‌های مصنوعی با ترکیب مختلف ۱۰ در نظر گرفته می‌شود. موقعیت نمونه‌های خاک در نمودار دو محوری ذرات ریزتر از  $0.075$  میلی‌متر و درجه فعالیت بر اساس رابطه (۱) نشان می‌دهد که بیش از ۹۰ درصد از نمونه‌ها در محدوده خاک‌های با پتانسیل تورمی متوسط و بالا قرار می‌گیرند. در صورتی که بر اساس درجه فعالیت به‌دست آمده از رابطه (۲) تمام نمونه‌های خاک منطقه دارای پتانسیل تورمی متوسط و بالا هستند (شکل ۶ الف و ب).

روش واندرومرو و واندرومرو اصلاح شده: روش ارائه شده به‌وسیله واندرومرو بر مبنای درجه فعالیت خاک‌های رسی است (van der Merwe، ۱۹۶۴). درجه فعالیت یک خاک از تقسیم شاخص خمیری بر درصد ذرات رس به‌دست می‌آید و هر چقدر بیشتر باشد، انتظار می‌رود، خاک پتانسیل تورمی بالایی داشته باشد (Fakher و Asgarei، ۱۹۹۳). درجه فعالیت خاک‌های رسی منطقه بر اساس دو رابطه (۱) (Skempton، ۱۹۵۳) و رابطه (۲) (Williams و Donaldson، ۱۹۸۰) محاسبه شد.

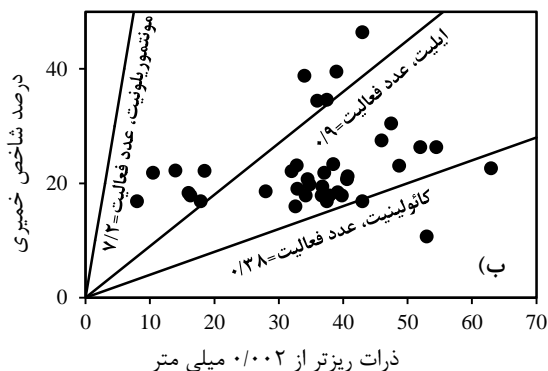
$$A = \frac{I_p}{C} \quad (1)$$

$$A = \frac{I_p}{C-n} \quad (2)$$

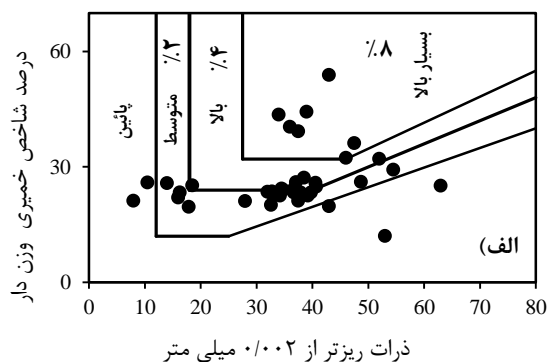


شکل ۶- درجه تورم‌پذیری خاک‌های منطقه برحسب درصد ذرات ریز و درجه فعالیت بر مبنای روابط ۱ (الف) و ۲ (ب) (Yilmaz، ۲۰۰۶)

نشان‌دهنده حضور هر سه نوع کانی ایلیت، کائولینیت و مونت‌موریلونیت در منطقه است (Talaei و همکاران، ۲۰۰۴). موقعیت نمونه‌های خاک منطقه در نمودار دو محوری درصد ذرات رس-درصد شاخص خمیری نشان می‌دهد که درجه فعالیت آن‌ها از ایلیت تا مونت‌موریلونیت تغییر می‌کند (۷-ب). افزایش درجه فعالیت کانی‌ها از ایلیت به مونت‌موریلونیت نشان‌دهنده رفتار تورمی کانی‌های رسی در حضور آب به‌دلایل سطح ویژه بزرگ در کانی‌های رسی، خواص ساختمانی این کانی‌ها و قطبی بودن مولکول‌های آب است (Azañón و همکاران، ۲۰۱۰).



نتایج ارزیابی موقعیت نمونه‌های ترسیم شده در نمودار دو محوری مبتنی بر معیارهای درصد ذرات رس و درصد شاخص خمیری وزن‌دار شده نشان می‌دهد که ۸۷ درصد از آن‌ها در محدوده خاک‌های با درجه تورم متوسط به بالا قرار می‌گیرند. بر این اساس، انتظار می‌رود، تورم در خاک‌های منطقه بین دو تا هشت درصد تغییر کند (شکل ۷-الف). برای وزن‌دار کردن نشانه خمیری، درصد ذرات عبوری از الک شماره ۴۰ در نشانه خمیری ضرب و بر ۱۰۰ تقسیم شد (Weston, ۱۹۸۰). ترکیب کانی‌شناسی کانی‌های رسی منطقه به روش دیفراکتومتری اشعه X



شکل ۷- درجه تورم‌پذیری خاک‌های منطقه بر اساس الف) درصد ذرات رس و نشانه خمیری وزن‌دار شده (درصدها نشان‌دهنده تورم محتمل هستند) (Weston, ۱۹۸۰) و ب) درصد ذرات ریز در مقابل شاخص خمیری و بر مبنای درجه فعالیت انواع کانی‌های رسی (Hunt, ۱۹۸۴)

به‌صورت رابطه (۳) تعریف شده است (Yilmaz, ۲۰۰۶).

$$\%S = 0.155LL - 0.00763CEC - 2.04 \quad (3)$$

$$R^2 = 0.91$$

که در آن، %S درصد تورم برآوردی، LL درصد حد روانی نمونه، CEC ظرفیت تبادل کاتیونی (میلی-اکی‌والان در ۱۰۰ گرم خاک) و  $R^2$  ضریب همبستگی است.

در آزمون رابطه رگرسیون پیشنهادی، فرضیاتی مفروض است. تمام داده‌های اندازه‌گیری شده برای متغیرهای درصد حد روانی و مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی مستقل هستند. فرض بر این است که برای متغیرهای ذکر شده توزیع مقادیر متغیر وابسته یعنی درصد تورم‌پذیری خاک‌ها نرمال می‌باشد. همچنین، رابطه بین درصد تورم و مقادیر درصد حد روانی و مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی خطی است. مطابق با

روش‌های مبتنی بر خصوصیات شیمیایی-حد

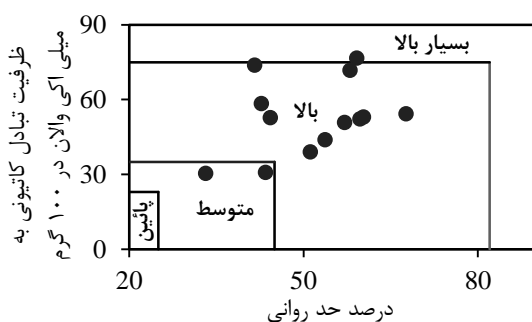
روانی: علاوه بر درصد حد روانی، مقادیر pH و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک‌های حاوی کانی‌های رسی نیز جزو معیارهای مهم در ارزیابی پتانسیل تورمی هستند (Yilmaz, ۲۰۰۶). بر اساس استانداردهای موجود انتظار می‌رود، pH در خاک‌های تورم‌پذیر بالا باشد (ASTM, ۲۰۰۰c). همچنین، افزایش pH خاک‌های حاوی کانی‌های رسی با افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی رابطه مستقیم دارد (Aprile و Lorandi, ۲۰۱۲). از طرف دیگر، بین ظرفیت تبادل کاتیونی و حد روانی خاک‌ها همبستگی معنی‌دار وجود دارد، به‌طوری که با افزایش درصد حد روانی و مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی پتانسیل تورم‌پذیری خاک‌ها نیز افزایش می‌یابد (Yilmaz, ۱۹۹۹). برای پیشگویی درصد تورم-پذیری خاک‌ها بر اساس درصد حد روانی و مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی رابطه رگرسیون چند متغیره

ضریب همبستگی بالا ( $R^2 = 0.91$ )، توان پیشگویی مدل رگرسیون نیز قوی ارزیابی می‌شود.

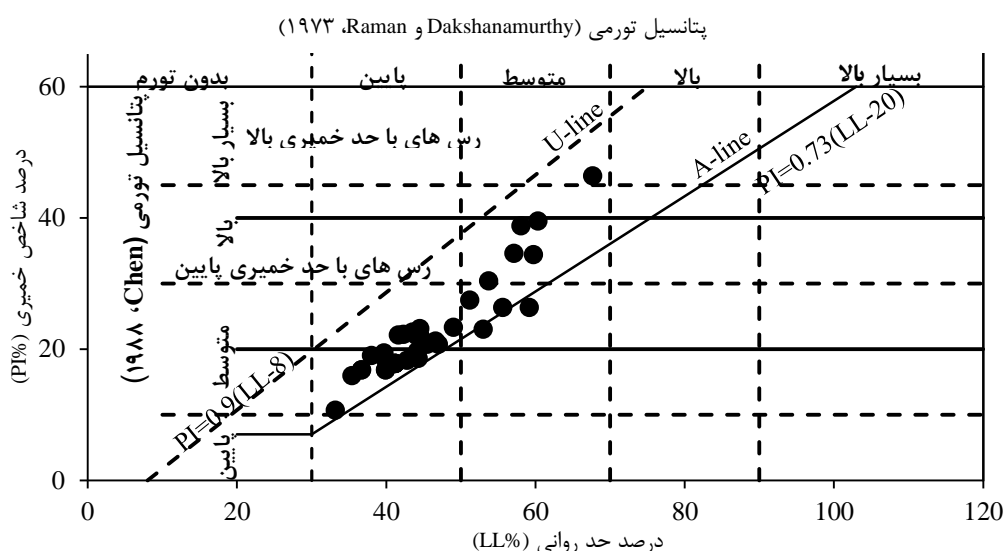
pH بالای هشت، برای تمام خاک‌های رس‌دار منطقه تائید کننده تورم‌پذیر بودن آن‌ها است. تغییرات درصد حد روانی در مقابل ظرفیت تبادل کاتیونی نشان‌دهنده پتانسیل تورمی متوسط تا بالای نمونه‌های خاک منطقه است (شکل ۸). بر این اساس کمینه، میانگین و بیشینه درصد تورم نمونه‌های خاک منطقه برابر  $۲/۸۷$ ،  $۵/۵۷$  و  $۸/۰۳$  به دست آمده است. اگر مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی رس‌های کائولینیت، ایلیت و مونت‌موریلونیت به ترتیب سه تا پنج، ۴۰-۱۰ و بیشتر از ۴۰ میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم در نظر گرفته شود (Jordaan, ۲۰۰۷) خاک‌های رس‌دار منطقه در گروه خاک‌های با پتانسیل تورمی بالا طبقه‌بندی

می‌شوند.

**روش تلفیقی:** چنان‌که در مطالب فوق نیز اشاره شد، پتانسیل تورمی خاک‌های رس‌دار منطقه بر اساس درصد حد روانی (Dakshanamurthy و Ramana, ۱۹۷۳) و مقادیر شاخص خمیری (Chen, ۱۹۸۸) تعیین شد. در این بخش با تلفیق دو روش فوق، به صورت نمودار دو محوری، درجه تورم‌پذیری نمونه‌های خاک منطقه تعیین شد. در این نمودار، محور افقی برحسب حد روانی و محور عمودی برحسب شاخص خمیری هستند. بر اساس این نمودار پتانسیل تورمی نمونه‌های خاک منطقه متوسط تا بالا تعیین شد (شکل ۹). نتایج گروه‌بندی هر دو روش کاملاً با هم مطابقت دارند.



شکل ۸- درجه پتانسیل تورمی خاک‌های منطقه بر اساس درصد حد روانی و مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی (Yilmaz, ۲۰۰۶)



شکل ۹- گروه‌بندی خاک‌های منطقه بر اساس درصد شاخص خمیری و حد روانی، خط A مرز جدایی مواد با خاصیت شبیه خاک‌های رسی از مواد سیلتی را نشان می‌دهد؛ خط U نیز حد نهایی مرز خاک‌های معمولی را تعیین می‌کند، اگر ماده‌ای در بالای این خط قرار گیرد، باید دوباره آزمایش شود (Dakshanamurthy و Ramana, ۱۹۷۳؛ Chen, ۱۹۸۸؛ Yalcin, ۲۰۰۷)

مستقیم پتانسیل تورم به معنی اندازه‌گیری مستقیم فشار تورم و درصد تورم خاک است. بر اساس نتایج این آزمون دو نمونه از پنج نمونه دارای پتانسیل تورمی متوسط هستند (جدول ۶). بر این اساس، می‌توان نتیجه‌گیری‌های روش‌های غیرمستقیم را در خصوص تورم‌پذیر بودن خاک‌های منطقه تأیید کرد.

**آزمایش تحکیم:** تمام روش‌های که برای ارزیابی پتانسیل تورمی خاک‌های منطقه به کار گرفته شدند، از نوع غیر مستقیم بودند. اما نتایج آزمایش تحکیم می‌تواند به‌عنوان یک روش مستقیم برای ارزیابی پتانسیل تورمی خاک‌های منطقه مورد توجه قرار گیرد (Mahmoudi و همکاران، ۲۰۱۴). ارزیابی

جدول ۶- خلاصه نتایج آزمایش تحکیم بر روی پنج نمونه خاک منطقه و پتانسیل تورم‌پذیری آن (ASTM, ۲۰۰۰d)

ردیف	ارتفاع نمونه (میلی‌متر)		بار وارده (کیلوگرم)	درصد تورم	فشار تورم (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	تورم‌پذیری
	قبل از آزمون	بعد از آزمون				
۱	۲۰	۲۰/۵۶	۱۱/۴	۲/۸	۰/۵۷	متوسط
۲	۲۰	۲۰/۱۴۶	۲/۶	۰/۷۳	۰/۱۳	کم
۳	۲۰	۲۰/۰۳	۰/۹۴	۰/۱۵	۰/۰۴۷	کم
۴	۲۰	۲۰/۰۴	۱/۱۶	۰/۲۲	۰/۰۵۸	کم
۵	۲۰	۲۰/۳۰	۷/۶	۱/۵	۰/۳۸	متوسط

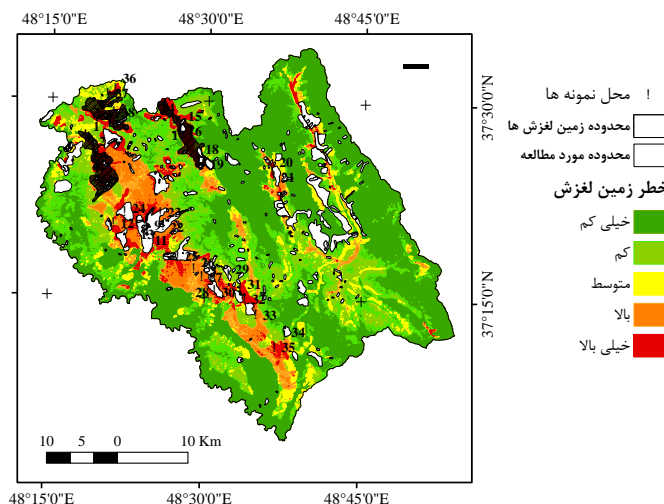
باعث ایجاد اختلاف در مقاومت و نفوذپذیری سنگ‌ها و خاک‌ها شده و به‌عنوان یک عامل اصلی در وقوع زمین‌لغزش‌ها دخالت می‌کنند (Pradhan و Lee، ۲۰۱۰). بنابراین، ترکیب و جنس لایه‌های تشکیل‌دهنده دامنه‌ها یکی از مهمترین و بهترین شاخص‌ها برای پیش‌بینی وقوع زمین‌لغزش در این منطقه است. ذرات رسی خاک‌های سازندهای نئوژن منطقه که معمولاً دارای کانی‌های رسی نیز هستند، به‌علت داشتن پتانسیل تورمی بالا در جریان بارندگی و یا بعد از بارندگی سبب وقوع زمین‌لغزش شده‌اند و در آینده نیز خواهند شد. خاک‌های رس‌دار با پتانسیل تورمی بالا به‌عنوان یک عامل اصلی در ناپایداری شدن دامنه‌ها در نقاط دیگر نیز مورد تأکید قرار گرفته است (Yang و Zheng، ۲۰۰۹). بر اساس نتایج این پژوهش می‌توان مرطوب و خشک شدن متناوب خاک‌های رس‌دار را دلیل اصلی تورم و یا انقباض شدید در آن‌ها دانست (Majidi و همکاران، ۲۰۱۷) که در شیب‌های کمتر از پنج درجه موجب خرابی سازه‌ها، زمین‌های زراعی و مرتعی شده و در شیب‌های بالاتر از پنج درجه منجر به وقوع زمین‌لغزش شده‌اند.

مقایسه نتایج به‌دست آمده از ارزیابی پتانسیل تورمی خاک‌های منطقه به روش‌های مختلف نشان می‌دهد که در تمام روش‌های به کار برده شده نتایج تقریباً مشابه به‌دست آمده است. نمونه‌های خاک شماره ۱۲، ۲۹ و ۳۴ در بیشتر طبقه‌بندی‌ها در گروه خاک‌های بدون تورم و یا با پتانسیل تورمی پائین قرار گرفته‌اند و بقیه نمونه‌ها دارای پتانسیل تورم متوسط تا بالا هستند (جدول ۷).

**نقش خاک‌های متورم شونده در ناپایداری دامنه‌های منطقه:** انطباق موقعیت نمونه‌های خاک منطقه با نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (Talaei، ۲۰۱۸) نشان می‌دهد که ۸۷/۲ درصد از نمونه‌ها در پهنه‌هایی که خطر زمین‌لغزش برای آن‌ها بالا و بسیار بالا پیش‌بینی شده است، قرار دارند. از خاک‌های مورد آزمایش دو نمونه در پهنه با خطر متوسط و سه نمونه در پهنه بدون خطر واقع شده‌اند (شکل ۱۰). بیشترین تعداد و مساحت زمین‌لغزش‌ها در پهنه‌های با خطر زمین‌لغزش بالا و بر روی رسوبات و خاک‌های رس‌دار مربوط به سازند قرمز فوقانی مربوط به دوره نئوژن به‌وقوع پیوسته است. این نتیجه نشان می‌دهد که شرایط زمین‌شناسی مناطق لغزش‌خیز به‌علت تغییرات ترکیب سنگی و ساختاری، اغلب

جدول ۷- مقایسه نتایج پتانسیل تورم‌پذیری نمونه‌های خاک منطقه بر اساس روش‌های مختلف

شماره نمونه	چن (ذرات ریزتر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر و ۰/۰۰۲ میلی‌متر و حد روانی)	واندرمرو (ذرات ریزتر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر و درجه فعالیت بر اساس رابطه ۳)	واندرمرو (ذرات ریزتر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر و درجه فعالیت بر اساس رابطه ۴)	داکشانمورتی و رامان (شاخص خمیری و حد روانی)	روش واندرمرو اصلاح شده (درصد ذرات رس و نشانه خمیری وزن‌دهی شده)	واندرمرو اصلاح شده (ذرات ریزتر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر و شاخص خمیری برحسب درجه فعالیت انواع کانی‌های رسی)
۱	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	پائین-متوسط
۲	بالا	بالا	بالا	بالا	خیلی بالا	متوسط-بالا
۳	بالا	بالا	خیلی بالا	بالا	خیلی بالا	بالا-بسیار بالا
۴	بالا	بالا	بالا	بالا	خیلی بالا	متوسط-بالا
۵	بالا	بالا	بالا	بالا	بالا	متوسط-بالا
۶	بالا	بالا	بالا	بالا	خیلی بالا	متوسط-بالا
۷	پائین	متوسط	متوسط	متوسط	بالا	پائین-متوسط
۸	پائین	پائین	متوسط	متوسط	متوسط	پائین-متوسط
۹	بالا	بالا	بالا	بالا	خیلی بالا	متوسط-بالا
۱۰	بالا	بالا	متوسط	متوسط	خیلی بالا	متوسط-بالا
۱۱	متوسط	بالا	بالا	متوسط	خیلی بالا	متوسط-بالا
۱۲	پائین	پائین	پائین	پائین	پائین	پائین-متوسط
۱۳	متوسط	بالا	بالا	متوسط	پائین	پائین-متوسط
۱۴	پائین	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	پائین-متوسط
۱۵	متوسط	متوسط	بالا	متوسط	بالا	پائین-متوسط
۱۶	بالا	متوسط	متوسط	متوسط	بالا	پائین-متوسط
۱۷	بالا	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	پائین-متوسط
۱۸	بالا	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	پائین-متوسط
۱۹	پائین	پائین	متوسط	متوسط	متوسط	پائین-متوسط
۲۰	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	پائین-متوسط
۲۱	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	پائین-متوسط
۲۲	متوسط	بالا	بالا	بالا	متوسط	متوسط-بالا
۲۳	بالا	بالا	بالا	متوسط	متوسط	متوسط-بالا
۲۴	پائین	پائین	متوسط	متوسط	متوسط	پائین-متوسط
۲۵	بالا	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	پائین-متوسط
۲۶	متوسط	متوسط	متوسط	پائین	متوسط	پائین-متوسط
۲۷	بالا	متوسط	متوسط	متوسط	بالا	پائین-متوسط
۲۸	بالا	متوسط	متوسط	متوسط	بالا	پائین-متوسط
۲۹	پائین	پائین	متوسط	متوسط	پائین	پائین-متوسط
۳۰	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	بالا	پائین-متوسط
۳۱	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	بالا	پائین-متوسط
۳۲	بالا	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	پائین-متوسط
۳۳	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	پائین-متوسط
۳۴	پائین	پائین	پائین	پائین	پائین	پائین-متوسط
۳۵	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	پائین	پائین-متوسط
۳۶	بالا	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	پائین-متوسط
۳۷	بالا	متوسط	متوسط	متوسط	بالا	پائین-متوسط
۳۸	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	پائین-متوسط



شکل ۱۰- انطباق موقعیت نمونه‌های خاک با پهنه‌های مختلف خطر زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه (نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، (Talaei, ۲۰۱۸))

قرار گیرد. همچنین، حد روانی بالا و ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد، شاخص اصلی تورم‌پذیری خاک‌های حاوی کانی‌های رسی در دامنه‌های ناپایدار منطقه است. بسیاری از تخریب‌ها و مشکلات به‌وجود آمده در پی سازه‌ها و اراضی محدوده مربوط به این زمین لغزش‌ها می‌باشد. بنابراین، باید در هرگونه برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری از اراضی این منطقه اصول مهندسی رعایت شود. نحوه به‌کارگیری روش‌های بهسازی خاک نیز نیاز به انجام پژوهش‌های تکمیلی دارد. همچنین، در مطالعات آتی می‌توان با نمونه‌برداری سیستماتیک از خاک و با استفاده از روش‌های آماری خطر تورم‌پذیری را نیز پهنه‌بندی کرد.

در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که در منطقه مورد مطالعه محدوده لغزشی با مساحت ۵۵۲۰ هکتار وجود دارد که در آن جنس اصلی توده‌های لغزشی از رسوبات و خاک‌های رس‌دار می‌باشد. ۳۲/۸۰ درصد از مساحت مناطقی که از رسوبات نئوژن ساخته شده‌اند، درگیر زمین لغزش هستند. وجود خاک‌های رس‌دار با پتانسیل تورمی متوسط به بالا و نفوذ آب بارندگی‌ها به داخل این لایه‌ها باعث تغییرات حجم خاک‌ها در دوره‌های مرطوب و خشک شده و در نهایت با ایجاد گسیختگی منجر به ناپایداری دامنه می‌شوند. بنابراین، معیار پتانسیل تورمی خاک‌ها می‌تواند شاخص ارزیابی بسیار مهمی برای خطر زمین لغزش باشد و در تحلیل و پیش‌بینی احتمال وقوع زمین لغزش‌ها مورد استفاده

#### منابع مورد استفاده

- Aprile, F. and R. Lorandi. 2012. Evaluation of Cation Exchange Capacity (CEC) in tropical soils using four different analytical methods. *Journal of Agricultural Science*, 4(6): 278-289.
- Asgarei, F., A. Fakher. 1993. Swelling and dispersivity of soils: from geotechnical engineer point of view. *Jahād-e Dāneshgāhi of Tehran University*, 245 pages (in Persian).
- ASTM. 1992. Standard test method for particle-size analysis of soils. *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04-08, D422-63.
- Azañón, J.M., A. Azor, J. Yesares, M. Tsige, R. M. Mateos, F. Nieto, J. Delgado, M. López-Chicano, W. Martín and J. Rodríguez-Fernández. 2010. Regional-scale high-plasticity clay-bearing formation as controlling factor on landslides in Southeast Spain. *Geomorphology*, 120: 26–37.
- Bakhshipouri, Z., M. Abbaspour, M. Beygi and S. Nikdel. 2014. A comparison between methods for determining divergence of soil and proposed a new method based on soil activity number. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE)*, 19, Bund, G.: 1471-1480.
- Baynes, F.J. 2008. Anticipating problem soils on linear projects. In: *Conference proceedings on Problem Soils in South Africa*, 3–4: 9–21.

7. Castellanos Abella, E.A., 2008. Multi-scale landslide risk assessment in Cuba. ITC, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands, ITC dissertation number 154, 293 pages.
8. Chen, F.H. 1975. Foundation on expansive soils. Elsevier Scientific Publishing Company, New York.
9. Chen, F.H. 1988. Foundations on expansive soils. Elsevier, New York, 461 pages.
10. Dakshanamurthy, V. and V. Ramana. 1973. A simple method of identifying an expansive soil. Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 13(1): 97-104.
11. Davies, R.G., G.C. Clark, B. Hamzpour and C.R. Jones. 1975. Explanatory text of the Bandar-e-Pahlavi quadrangle map, 1:250000. Geological Survey of Iran, No. D3, 203 pages.
12. Davies, R.G., C.R. Jones, B. Hamzpour and G.C. Clark. 1972. The Geology of the Masuleh Sheet (northwest Iran). Geology Survey of Iran, Report No. 24, 110 pages.
13. Faridi, M. and A. Anvari. 2000. Geological map of the Hashtchin area, 1:100000. Geological Survey of Iran, No. 5664 (in Persian).
14. Galeandro, A., A. Doglioni, V. Simeone and J. Šimůnek. 2014. Analysis of infiltration processes into fractured and swelling soils as triggering factors of landslides. Environmental Earth Sciences, 71:2911-2923.
15. Hunt, R.E., 1984. Geotechnical engineering investigation manual. McGraw Hill, 896 pages.
16. Jie, X., T. Chao and X. He-ping. 2017. Causes of shallow landslides of expansive soil slopes. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 11(1): 1-6.
17. Jordaan, W.J., 2007. Meaningful CEC values of clay minerals from heavy mineral deposits. The 6th International Heavy Minerals Conference 'Back to Basics', the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 163-166.
18. Khemissa, M. and A. Mahamedi. 2014. Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay. Applied Clay Science: 95: 10-110.
19. Kojima, H., F. Chung Chang-Jo, and C.J. van Westen. 2000. Strategy on the landslide type analysis based on the expert knowledge and the quantitative prediction model. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXIII, B7: 701-707.
20. Mahmodi, K., H. Mehrnahad and K. Barkhordari. 2014. Laboratory studies to diagnosis problematic soils of Ardakan. Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic) 46(1): 29- 31 (in Persian).
21. Majidi, A., G. Lashkaripour and Z. Shoaie. 2017. Prediction of swelling potential of marl soils of Salt Lake Watershed. Watershed Engineering and Management, 9(3): 292-307 (in Persian).
22. Manish, D., 2016. Damage mechanism in problematic soils. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), 7(5): 232-241.
23. Meisina, C., 2006. Characterisation of weathered clayey soils responsible for shallow landslides. Natural Hazards and Earth System Sciences, 6: 825-838.
24. Mohammady, M., H.R. Pourghasemi and B. Pradhan. 2012. Landslide susceptibility mapping at Golestan Province, Iran: a comparison between frequency ratio, Dempster-Shafer and weights-of-evidence models. Journal of Asian Earth Sciences, 61: 221-236.
25. Mugagga, F., V. Kakembo and M. Buyinza. 2012. A characterisation of the physical properties of soil and the implications for landslide occurrence on the slopes of Mount Elgon, Eastern Uganda. Natural Hazards, 60(3): 1113-1131.
26. OFDA/CRED, 2007. EM-DAT, International emergency disaster database. www.em-dat.net, Université Catholique de Louvain, Brussels, Belgium.
27. Pradhan, B. and S. Lee. 2010. Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modeling. Environmental Modelling and Software, 25: 747-759.
28. Raghuvanshi, T.K., J. Ibrahim and D. Ayalew. 2014. Slope Stability Susceptibility Evaluation Parameter (SSEP) rating scheme, an approach for landslide hazard zonation. Journal of African Earth Sciences, 99: 595-612.
29. Schulz, W.H., J.B. Smith, G. Wang, Y. Jiang, and J.J. Roering. 2018. Clayey landslide initiation and acceleration strongly modulated by soil swelling. Geophysical Research Letters, <https://www.researchgate.net/publication/323232586>.
30. Skempton, A.W. 1953. The colloidal activity of clays. 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Switzerland, Vol. 1.
31. Sudjianto, A.T., K.B. Suryolelono, A. Rifai and I.B. Mochtar. 2011. The effect of water content change and variation suction in behavior swelling of expansive soil. International Journal of Civil and Environmental Engineering, IJCEE-IJENS, 11(03): 11-17.
32. Talaei, R. 2018. A combined model for landslide susceptibility, hazard and risk assessment. AUT Journal of Civil Engineering, 2(1): 11-28.



33. Talaei, R., 2014. Landslide susceptibility zonation mapping using logistic regression and its validation in Hashtchin region, northwest of Iran. *Journal of the Geological Society of India*, 84(1): 68-86.
34. Talaei, R., H. Peyrowan, A. Jafari ardekani, B. Beyrami and J. Ghayomian. 2013. Classification and determination of erodibility indices of Ardabil Province marls. Final Research Report, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, 113 pages (in Persian).
35. Talaei, R., J. Gauomian, M. Shariat jafari and E. Aliakbarzadehe. 2004. Study on effective factor causing landslide. Final Research Report, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, 154 pages (in Persian).
36. Van Der Merwe, D.H. 1964. The prediction of heave from the plasticity index and percentage clay fraction of soils. *Civil Engineer in South Africa*, 6(6):103-106.
37. Weston, D.J., 1980. Expansive roadbed treatment for Southern Africa. *Proceedings of the Conference on Expansive Soils ASCE, Denver, Colorado, June 16-18.*
38. Williams, A.B. and G.W. Donaldson. 1980. Developments relating to building on expansive soils in South Africa: 1973-1980. *Proceedings of the 4th International Conference on Expansive Soils, Denver, 2: 834-844.*
39. Yalcin, A. 2007. The effects of clay on landslides: a case study. *Applied Clay Science*, 38: 77-85.
40. Yilmaz, I., 1999. Relationships among cation exchange capacity, liquid limit and swelling percent: an example from Niksar and Erbaa Basin (in Turkish), in: Yenyol, M., Öngen, S., Ustaömer, P.A., (Eds.), 9th National Clay Symposium, Istanbul, 39-42.
41. Yilmaz, I., 2006. Indirect estimation of the swelling percent and a new classification of soils depending on liquid limit and cation exchange capacity. *Engineering Geology*, 85: 295- 301.
42. Yukselen-Aksoy, Y. and A. Kaya. 2010. Predicting soil swelling behaviour from specific surface area. *Proceeding of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*, 163 (GE4): 229-238.
43. Zheng, J.L. and H.P. Yang. 2009. *Expansive soil engineering of highway*. Beijing: China Communication Press.