



بررسی تنش تسلیم خاک در موقعیت‌های شیب گوناگون در یک شیب تپه با پوشش مرتع با وقوع فرسایش خمیری شکل

الناز زینلی^۱، علی اصغر بسالت‌پور^۲، حسین شیرانی^۳، عیسی اسفندیارپور^۴، حسین شکفته^۵ و حسین دشتی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، (نویسنده مسؤل: e_zeinali95@yahoo.com)

۲، ۳- ۴- استادیار، استاد و دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

۵- استادیار گروه علوم خاک، دانشگاه جیرفت

تاریخ دریافت: ۹۶/۳/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۲/۷

صفحه: ۱۶۸ تا ۱۷۸

چکیده

فرسایش توده‌ای یکی از مهم‌ترین انواع فرسایش آبی است. خاک‌هایی که از ذرات ریزدانه (به‌ویژه سیلت) تشکیل شده‌اند، پایداری کمی در مقابل فرسایش دارند. چراکه ظرفیت نگهداری آب بیش‌تری را داشته و سبب افزایش رطوبت اشباع در خاک می‌شوند و احتمال وقوع فرسایش توده‌ای را افزایش می‌دهند. در این پژوهش، تنش تسلیم خاک در موقعیت‌های شیب گوناگون در یک شیب تپه با پوشش مرتعی با وقوع فرسایش خمیری شکل در منطقه رابر استان کرمان بررسی شده است. برای این منظور در گام نخست سه پروفیل به ترتیب در بالای شیب، میانه شیب و پایین شیب، یک شیب تپه‌ای که فرسایش خمیری شکل در آن رخ داده بود، حفر گردید. پس از تعیین و تشخیص لایه‌های خاک، نمونه‌برداری خاک در عمق‌های گوناگون انجام شد. سپس برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل میزان کربنات کلسیم معادل، درصد شن، رس، سیلت، اجزا سیلت، درصد رطوبت اشباع و حد روانی اندازه‌گیری شد. همچنین آزمایشات رئولوژیکی خاک نظیر تنش تسلیم و ویسکوزیته به‌منظور تعیین رفتار جریان‌ی خاک نیز انجام شد. نتایج نشان دادند که در منطقه مورد مطالعه دو موقعیت پایین و بالای شیب تپه دارای شاخص فرسایش‌پذیری بالا هستند ($K=+0/54$ پایین و $K=+0/52$ بالا). همچنین موقعیت بالای شیب دارای بالاترین میزان سیلت درشت ($28/33$ درصد)، رطوبت اشباع ($57/29$ درصد) و کم‌ترین میزان رس ($16/45$ درصد) بود و در پی آن تنش برشی خیلی پایین‌تری را نسبت به دو موقعیت دیگر شیب تحمل می‌نماید. بهترین مدل برای پیش‌بینی رفتار جریان‌ی خاک برای بیشتر نمونه‌ها مدل هرتسل‌بالکلی بود که دارای ضریب تبیین بالاتری ($R^2 > 0/90$) نسبت به مدل بینگهام و کاسون بود. میزان سیلت ریز و کربنات کلسیم معادل بر رفتار و خواص رئولوژیکی اثر گذار بود به‌گونه‌ای که میزان سیلت ریز بر تنش برشی و میزان کربنات کلسیم معادل بر ویسکوزیته و تنش تسلیم اثر گذار بودند و تنش تسلیم معیار خوبی برای پیش‌بینی رفتار خاک در برابر فرسایش خمیری شکل و شناسایی نقاط حساس به این فرسایش شناخته شد.

واژه‌های کلیدی: کربنات کلسیم معادل، حرکت توده‌ای، اجزای سیلت، فرسایش‌پذیری خاک، مقاومت برشی، ویسکوزیته

مقدمه

کشور ایران به دلیل شرایط خاص و مناسب عوامل مؤثر در ایجاد حرکت‌های توده‌ای از جمله کشورهایی است که کم و بیش با این حوادث طبیعی روبه‌رو است. از مهم‌ترین این شرایط می‌توان به عوامل زمین‌شناسی، آب و هوایی، وضعیت پوشش گیاهی، جنگلی، لرزه‌خیزی و غیره اشاره نمود (۱۷). با وقوع بارندگی، انواع گوناگونی از فرسایش خاک ممکن است رخ دهد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها فرسایش توده‌ای^۱ است (۱۵). فرسایش توده‌ای خود به چهار شکل گوناگون شامل زمین لغزش^۲، فرسایش خزشی^۳، فرسایش واریزه‌ای یا ریزشی^۴ و فرسایش خمیری شکل^۵ رخ می‌دهد که فرسایش سیلان‌گل^۶ یا خمیری‌شکل از مهم‌ترین انواع آن می‌باشد. عوامل اصلی ایجاد سیلان‌گل، وقوع بارش‌های سنگین، ذوب شدید برف و یخ و طغیان آب رودخانه‌ها می‌باشد (۸). به‌وقوع پیوستن و پیشرفت فرسایش خمیری شکل از فاکتورهای مختلفی هم‌چون خصوصیات مورفولوژیکی و پوشش گیاهی منطقه، ویژگی‌های ژئوپدیکالی و هیدرولیکی خاک، درجه شیب، توزیع اندازه خاکدانه‌ها، کانی‌شناسی و ویژگی‌های مخلوط آب و گل مثل غلظت فاز جامد، شوری و pH در طول شیب‌های متفاوت تاثیر می‌پذیرد (۳) و حرکت آن بیش از آنکه در اثر لغزش یا ریزش باشد، تحت تاثیر

حرکت بین ذرات است (۱۵، ۱۸). فرسایش خمیری شکل بیش‌تر در خاک‌های چسبیده به‌دلیل ظرفیت نگهداری آب بیش‌تر مشاهده می‌شود (۱۴). جریان گل در واقع نه جامد است و نه مایع بلکه حالت بینابینی دارد (۱۸). در فرسایش خمیری‌شکل، خاک حالتی بین مایع و جامد دارد و شبیه سیالات رفتار می‌کند پس ویژگی‌های رئولوژیکی^۷ می‌توانند چگونگی رخداد این پدیده را بیان کنند (۳). رئولوژی^۸ علم جریان‌یابی ماده در اثر یک نیرو می‌باشد که درباره‌ی تغییر فرم و سیلان خمیرها و سوسپانسیون‌ها بحث می‌کند (۲). علم رئولوژی به‌عنوان یک ابزار مهم برای مطالعه حرکت سریع زمین شناخته شده است و اخیراً برای بررسی اثر پایداری کربن آلی در خاک استفاده شده است (۳). بررسی چگونگی انتقال و نهشته شدن رسوبات چسبیده، به علت دخالت ماهیت شیمیایی و الکترومغناطیسی ذرات، پیچیدگی بسیاری دارد (۹). یکی از ویژگی‌های رئولوژیکی رسوب، تنش تسلیم^۹ (τ) است که به صورت کم‌ترین تنش لازم برای جریان یافتن رسوب تعریف شده است (۲۵). به بیان دیگر، زمانی که تنش اعمال شده کمتر از تنش تسلیم است، جریان خیلی میکروسکوپی نیست و تغییر شکل گل، قابل بازگشت و الاستیک است. در مقابل زمانی که تنش اعمال شده بیش از تنش تسلیم باشد تغییر شکل غیر قابل بازگشت بوده و گل،

1- Rheology

2- Yield stress

3- *Convolvulus arvensis*

4- *Cirsium vulgare*

5- Sezgi

شده است رفتار سنگ‌ها در مقابل هوازدگی و فرسایش متفاوت بوده و فرم پستی و بلندی‌های منطقه متفاوت می‌باشد. سازند غالب این منطقه، سازند قرمز بالایی است که ماهیت مارنی دارد. مارن‌ها به دلیل حساسیت به هوازدگی به طور گسترده، تحت تأثیر حرکت توده‌ای قرار دارند (۵). کاربری مرتع شامل ۸۰ درصد پوشش مرتعی شامل گونه‌های گون، درمنه، پیچک^۳ و کنگر^۴ و همچنین دارای ۱۵ درصد سنگریزه سطحی می‌باشد که شواهدی بسیاری از وقوع فرسایش‌های شیاری و توده‌ای در آن دیده می‌شود (شکل ۱).

مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی

به‌منظور تعیین و بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در منطقه مورد مطالعه، نمونه‌برداری خاک با استفاده از حفر پروفیل انجام شد. بدین منظور براساس روش پیشنهادی سزگی و همکاران (۲۲)، سه پروفیل به ترتیب در بالای شیب و در موقعیت طول جغرافیایی $4^{\circ} 57'$ و عرض جغرافیایی $31^{\circ} 15/3''$ (بیش‌ترین احتمال وقوع فرسایش)، میانه‌ی شیب و در موقعیت طول جغرافیایی $3^{\circ} 59'$ و عرض جغرافیایی $31^{\circ} 15/7''$ (احتمال وقوع فرسایش متوسط) و انتهای شیب و در موقعیت طول جغرافیایی $3^{\circ} 58'$ و عرض جغرافیایی $31^{\circ} 16/9''$ (کم‌ترین احتمال وقوع فرسایش) شیب‌تپه‌ای که در آن فرسایش سیلان‌گل رخ داده بود، حفر گردید (۲۲). سپس مطالعات صحرایی و تشریح پروفیلی بدون‌های حفر شده براساس راهنمای طبقه‌بندی اراضی انجام و نهایتاً رده‌بندی خاک‌ها بر اساس سیستم طبقه‌بندی آمریکایی انجام شد (۲۰). در سه پروفیل حفر شده، از افق‌های گوناگون نمونه‌های خاک جهت تعیین ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی در سه تکرار تهیه گردید.

آزمایش‌های فیزیکی - شیمیایی

پس از نمونه‌برداری، نمونه‌های خاک هوا خشک گردیدند و پس از عبور دادن از الک ۲ میلی‌متری (۱۳) به آزمایشگاه منتقل شدند و آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی مختلف بر روی آن‌ها انجام گرفت. در نمونه خاک‌های برداشت شده از هر لایه، ویژگی‌هایی همچون بافت، سیلت، اجزا سیلت، کربنات کلسیم معادل، رطوبت اشباع و حد روانی در سه تکرار اندازه‌گیری شد.

میزان کربنات کلسیم معادل خاک نیز با روش تیتراسیون معکوس اندازه‌گیری شد (۱۶). برای تعیین رطوبت اشباع، ابتدا ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر به ۵۰ گرم از نمونه سیلت اضافه گردید و پس از گذشت یک هفته، آب رویی را خارج کرده و مقداری از رسوب اشباع را برداشته و داخل آون قرار داده و رطوبت آن به صورت وزنی محاسبه شد (۲۲).

آزمایش‌های تعیین رفتار رئولوژیک خاک

برای انجام آزمایش‌های تعیین رفتار رئولوژی ذرات در اندازه سیلت، نیاز به تهیه نمونه‌های سیلت و جداسازی آن از ذرات رس و شن بود. برای این منظور ابتدا بخش شن با الک $0/053$ میلی‌متر از بخش سیلت و رس جدا گردید و سپس جداسازی سیلت از بخش رس به روش سانتریفیوژ انجام گرفت (۱۲). اجزاء سیلت نیز به روش ته‌نشینی تعیین شدند (۷). میزان آب مورد نیاز برای آماده‌سازی نمونه‌های خاک از

شروع به روان شدن کرده و جریان می‌یابد. بنابراین تنش تسلیم می‌تواند به عنوان تنش بحرانی مورد نیاز برای شروع فرسایش خاک باشد (۲۵). یکی دیگر از ویژگی‌های سیالات، چسبندگی و یا ویسکوزیته می‌باشد. ویسکوزیته یک مقیاس عددی از مقاومت سیال در برابر جریان است و عامل پیوستگی ذرات سیال می‌باشد. هر چقدر سیالی لزج تر باشد، ویژگی‌های سیال گونه آن کم‌تر است (به‌طور مثال سخت تر روان می‌گردد نظیر عسل). بنابراین با بررسی رفتار رئولوژی خاک، می‌توان شرایط لازم برای کاهش خسارت‌ها و تخریب‌های ناشی از این فرسایش را فراهم آورد. بنابراین به‌نظر می‌رسد که بتوان از این علم و ویژگی‌های مرتبط همچون تنش تسلیم در علوم خاک نیز بهره برد و حداقل تنش برشی را که سبب به‌وجود آمدن و جاری شدن توده گل می‌شود را مورد بررسی قرار داد (۱). با توجه به این که در سیلان گل، خاک نیز رفتاری شبیه سیالات نشان می‌دهد، بنابراین ویژگی‌هایی رئولوژیکی مانند تنش تسلیم می‌تواند بیان‌گر چگونگی وقوع این پدیده باشد (۳). این پژوهش نیز برای اولین بار با هدف اصلی بررسی نقش ذرات در اندازه سیلت بر تنش تسلیم در موقعیت‌های گوناگون یک شیب تپه با کاربری مرتع انجام شد. همچنین تعیین مدل مناسب برای شبیه‌سازی رفتار رئولوژیک خاک در این شیب تپه از دیگر اهداف این پژوهش بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، بخشی از حوزه آبخیز شهرستان رابر استان کرمان می‌باشد که دارای مساحتی بالغ بر ۲۵۶ هزار هکتار بوده و در بخش جنوب خاوری کشور و در موقعیت طول جغرافیایی $8^{\circ} 4' 29''$ و عرض جغرافیایی $71^{\circ} 16' 29''$ واقع گردیده است. و دارای سه نوع کاربری اراضی غالب مرتع، پوشش جنگلی و زراعت است. این حوزه آبریز از بخش شمالی به حوزه آبریز کویر لوت، از خاور به حوزه آبریز رودخانه سجد (از سرشاخه‌های شمالی هلیل‌رود) و از بخش جنوبی و باختری به حوزه آبخیز رودخانه شور و دهرچ (از سرشاخه‌های شمال باختری هلیل‌رود) محدود می‌گردد. قلمرو مطالعاتی با سیمای کاملاً کوهستانی و مرتفع از مناطق سردسیر و بیابانی حوزه آبریز هامون جازموریان و استان کرمان محسوب می‌شود که متوسط ارتفاع آن از سطح دریا ۴۳۸۰ متر می‌باشد. خاک‌های موجود در این منطقه دارای رژیم رطوبتی زریک و آریدیک می‌باشد که گروه هیدرولوژیکی غالب آن‌ها C است، اگرچه در برخی مناطق خاک‌های با گروه هیدرولوژیکی AD نیز دیده می‌شود. میانگین میزان بارندگی سالیانه ۲۵۰ میلی‌متر و در برخی بخش‌های این منطقه بیش از حدود ۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد و میانگین دمای سالیانه در این منطقه ۱۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

محدوده مورد مطالعه بر اساس تقسیمات ساختمانی ایران در زون ساختاری ایران مرکزی واقع شده است که یکی از فعال‌ترین زون زمین‌ساختی ایران می‌باشد. وجود سنگ‌های آذرآواری، آذرین بیرونی و آذرین درونی در کمر بند آن باعث

مدل‌های ریاضی بینگهام، هرشل بالکلی و کاسون بر داده‌های تجربی به‌دست آمده از دستگاه رنومتر برازش داده شدند. مناسب‌ترین مدل ریاضی بر اساس شاخص‌های ضریب تبیین^۴ و خطای استاندارد^۵ تعیین شد. سرانجام، شاخص‌های رئولوژی برای هر یک از نمونه‌های خاک گزارش شد. به‌منظور توصیف رفتار جریان‌ی نمونه‌های خاک نیز نمودارهای تنش برشی در مقابل نرخ (سرعت) برشی اعمال شده برای همه نمونه‌ها رسم و با برازش دادن مدل پاورلا بر آن‌ها ضریب پایداری یا قوام (k) و شاخص رفتار جریان (n) بدست آمد.

مدل‌سازی رفتار رئولوژیک خاک

داده‌های به‌دست آمده از آزمایش‌های رئولوژی با استفاده از نرم‌افزار Excel و us200 به‌منظور تعیین مدل ریاضی مناسب از بین سه مدل ریاضی بینگهام (معادله ۱) و هرشل بالکلی (معادله ۲) و مدل کاسون (معادله ۳) (۲۳)، مورد برازش قرار گرفت. سپس مناسب‌ترین مدل ریاضی بر اساس شاخص‌های ذکر شده در بالا انتخاب و سرانجام، شاخص‌های رئولوژیکی برای هر یک از نمونه‌ها گزارش شد.

$$\sigma = \tau_{pl}(\gamma^0) + \sigma_0 \quad (۱)$$

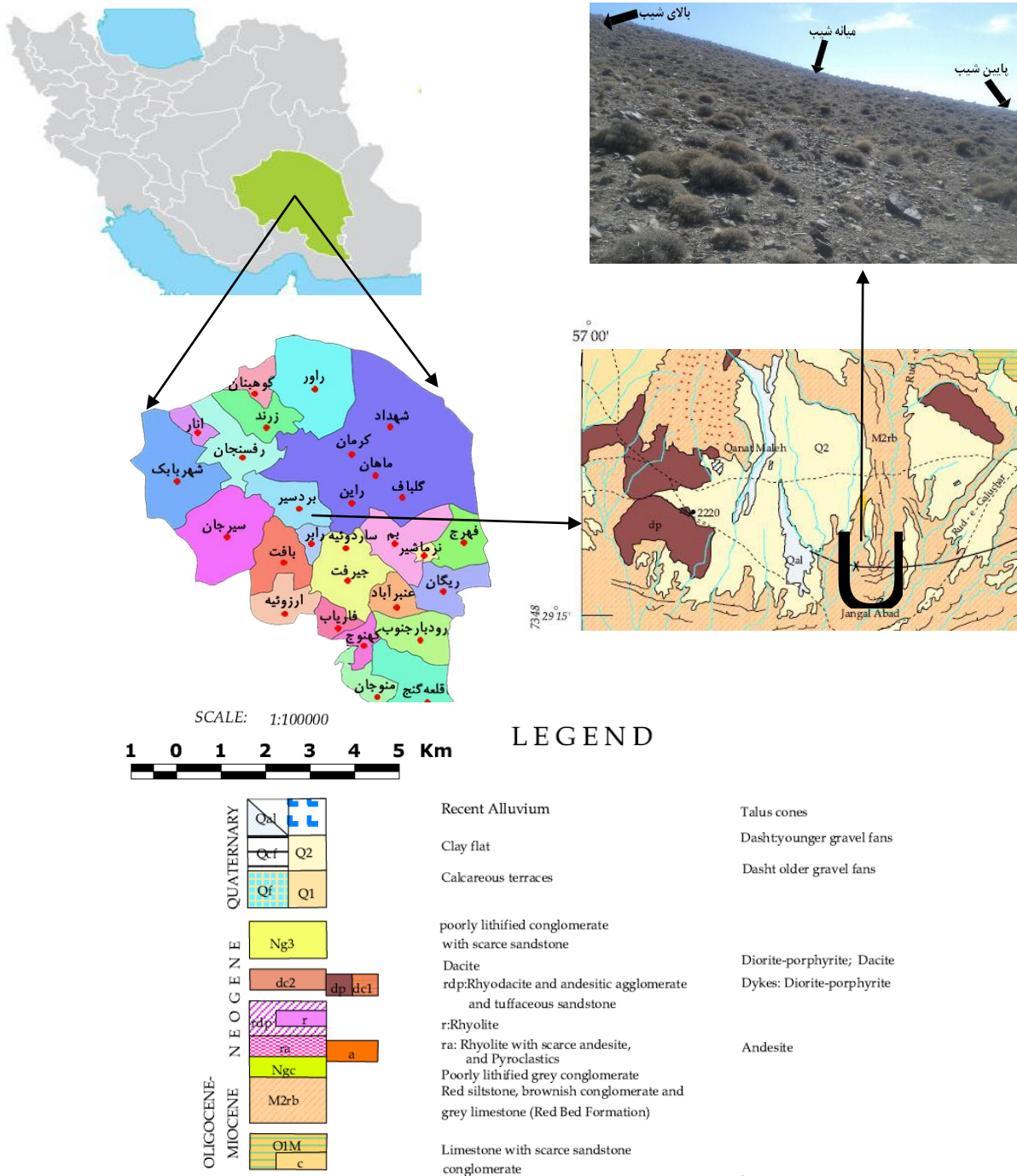
$$\sigma = k\gamma^{0n} \quad (۲)$$

$$(\sigma)^{0.5} = k_1(\gamma)^{0.5} + (\sigma_0)^{0.5} \quad (۳)$$

در معادلات آورده شده، σ - تنش برشی (Pa)، σ_0 - تنش تسلیم (Pa)، τ_{pl} - ویسکوزیته پلاستیک (Pa.s)، γ^0 - نرخ برشی، k شاخص قوام (ضریب همسانی) و n شاخص رفتار جریان می‌باشند (۲۵).

تقسیم رطوبت اشباع بر رطوبت قابل استفاده حاصل شد و به نمونه سیلت اضافه گردید (۲۲).

برای تعیین رفتار رئولوژیک نمونه‌های خاک، از دستگاه رنومتر Physica Anton Paar، مدل MCR 300 ساخت اتریش که مجهز به سیستم اندازه‌گیری صفحات موازی PP۲۵ بود، استفاده شد. کلیه آزمون‌ها در این پژوهش در حالت کنترل سرعت برش یا CSR انجام شد. به‌منظور انجام آزمون‌های رئولوژیک، تغییرات ویسکوزیته نمونه‌های خاک با نرخ برشی و هم‌چنین تغییرات تنش برشی با نرخ برشی مورد بررسی قرار گرفت. بدین گونه که پیش از اعمال تنش برشی و انجام آزمایش، به‌منظور همگن‌سازی و جلوگیری از ته‌نشینی، تمامی نمونه‌ها با نرخ برش 100 Sec^{-1} به مدت ۳۰ ثانیه توسط دستگاه هم زده شدند و سپس با رعایت فاصله زمانی بیشینه یک دقیقه، نمونه‌ها در محفظه نمونه تخلیه شدند. آن‌گاه با استفاده از سیستم (صفحه- صفحه)^۶ و در دمای ثابت ۲۵ درجه سلسیوس میزان تغییرات تنش برشی به‌عنوان تابعی از نرخ برشی در دامنه 0.1 تا 1000 Sec^{-1} (شیب افزایشی) و 1000 تا 0.1 Sec^{-1} (شیب کاهش)، هر کدام به مدت سه دقیقه با استفاده از اسپیندل دستگاه رنومتر که دارای قطر ۲۵ میلی‌متر بود، اندازه‌گیری شد. برای تنظیم دمای سیستم، صفحه‌ی پلتیر^۳ با حساسیت 0.1 درجه سلسیوس مجهز به چرخنده آب به‌کار رفت. در هر تغییر سرعتی (سه ثانیه) فاکتورهای نرخ برش، تنش برشی، ویسکوزیته و گشتاور قرائت و ثبت گردید. به‌منظور بررسی رفتار تیکسوتروپی نمودار هیسترسیس تنش برشی-نرخ برش برشی رسم گردید که برای رسم آن نیاز بود که نرخ برش اعمال شده در مسیر برگشت، به‌صورت کاهشی و در فواصل زمانی یکسان با مسیر رفت بر دوغاب اعمال شود. سپس



شکل ۱- شیب تپه مورد مطالعه واقع در حوزه آبخیز شهرستان رابر در استان کرمان (موقعیت جغرافیایی شیب تپه ۳۸° ۵۷' طول جغرافیایی و ۲۹° ۱۶' ۷" عرض شمالی)
Figure 1. Geographical location of the studied hill slope

شد. هم‌چنین مقایسه میانگین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در موقعیت شیب نیز براساس آزمون LSD و در سطح احتمال پنج درصد انجام شد (۲۱).

تجزیه و تحلیل آماری

پس از اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک، آماده‌سازی داده‌ها و تجزیه و تحلیل آماری در محیط نرم‌افزار SAS انجام و تجزیه واریانس‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی ساده انجام

نتایج و بحث

توصیف آماری برخی ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی خاک

با توجه به نتایج تجزیه و تحلیل آماری (جدول ۱)، وجود بالاترین میزان سیلت کل و سیلت ریز در پایین شیب، می‌تواند حاکی از وقوع فرسایش آبی و حرکت مواد ریز دانه به سمت پایین دست شیب باشد. بیشترین میزان درصد سیلت درشت و سیلت متوسط در قسمت بالای شیب مشاهده شد که باقی ماندن ذرات سیلت درشت‌تر در بالای شیب و حرکت ذرات سیلت در اندازه ریزتر را به پایین شیب در اثر فرسایش نشان می‌دهد. سیلت هم از نظر اندازه و هم از نظر چسبندگی مقاومت کمی در برابر فرسایش دارد (۱۸). بر اساس توزیع اندازه‌ی ذرات خاک، بافت غالب خاک در شیب تپه، لوم سیلتی

و لوم رس سیلتی بود. این کاربری با میانگین ۶۶/۰۳ درصد، میزان سیلت بالایی را دارا است. سیلت هم از نظر اندازه و هم از نظر چسبندگی مقاومت کمی در برابر فرسایش دارد و در زمان جذب آب، احتمال وقوع تجمع آن‌ها در میانه‌ی و پایین شیب تپه است. بیشترین میزان رطوبت اشباع، در موقعیت بالا و میانه‌ی شیب مشاهده شد که می‌تواند به دلیل وجود بیشترین میزان سیلت متوسط و درشت و ماده‌آلی در موقعیت بالای شیب و بالاترین درصد رس در قسمت میانه‌ی شیب باشد که سبب افزایش ظرفیت نگهداری آب می‌شوند. بالاترین میزان رس نیز در قسمت میانه‌ی شیب و پایین‌ترین درصد رس در بالای شیب مشاهده گردید که نشان دهنده وقوع فرسایش در بالا دست و حرکت ذرات رس از بالای شیب و تجمع در میانه‌ی شیب است.

جدول ۱- خلاصه‌ی آماری برخی ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی خاک شیب تپه مورد مطالعه

Table 1. Soil physical, mechanical and chemical properties in the studied hill slope

موقعیت شیب	پارامتر	بیشینه	کمینه	میانگین	انحراف معیار	چولگی
بالای شیب	کربنات کلسیم معادل (%)	۴۶/۵۰	۳۹/۲	۴۴/۳	۲/۱۴	-۱/۴۱
	شن (%)	۲۵/۹۴	۷/۵۲	۱۵/۵	۵/۶۶	۰/۴۰
	رس (%)	۲۷/۲	۱۴/۱	۱۴/۴	۳/۳۸	۲/۲۶
	سیلت (%)	۷۴/۹	۵۷/۷	۶۷/۰	۵/۱۶	-۰/۲۶
	سیلت ریز (%)	۳۳/۳	۲۳/۳	۲۶/۵	۲/۸۸	۱/۱۷
	سیلت متوسط (%)	۶۰/۰	۳۳/۳	45/1	۹/۵۲	۰/۸۶
	سیلت درشت (%)	۴۰/۰	۶۶/۶	۲۸/۳	۱۱/۸	-۰/۹۸
	رطوبت اشباع (%)	۸۱/۱	۳۶/۸	۵۷/۳	۱۰/۷	۰/۴۹
	حد روانی	۴۷/۴	۳۲/۷	۳۸/۸	۴/۵۶	۰/۶۱
	کربنات کلسیم معادل (%)	۳۳/۰	۲۳/۲	۲۶/۵	۲/۶۰	۲/۰۰
میانه‌ی شیب	شن (%)	۱۲/۴	۵/۳۰	۸/۵۰	۲/۴۰	۰/۴۰
	رس (%)	۲۹/۵	۲۳/۱	۲۵/۹	۲/۶۰	۰/۳۰
	سیلت (%)	۷۱/۲	۶۱/۲	۶۵/۵	۳/۱۵	۰/۶۷
	سیلت ریز (%)	۴۶/۷	۲۶/۶	۳۵/۹	۷/۶۰	۰/۱۱
	سیلت متوسط (%)	۵۰/۰	۲۳/۳	۳۷/۴	۹/۹۷	۰/۰۵
	سیلت درشت (%)	۴۶/۶	۱۳/۳	۲۶/۷	۱۰/۳	۰/۹۲
	رطوبت اشباع (%)	۶۳/۹	۵۱/۱	۵۶/۲	۴/۵۰	۰/۶۰
	حد روانی	۳۴/۹	۳۰/۷	۳۲/۶	۱/۵۰	۰/۳۰
	کربنات کلسیم معادل (%)	۲۶/۵۰	۲۱/۲	۲۳/۰	۱/۹۰	۱/۶۰
	شن (%)	۲۱/۶	۳/۳۰	۱۲/۰	۹/۴۰	۰/۰۲
پایین شیب	رس (%)	۲۲/۱	۱۳/۴	۱۷/۵	۴/۲۰	۰/۰۳
	سیلت (%)	۷۵/۷	۶۵/۲	۷۰/۵	۵/۲۶	-۰/۰۱
	سیلت ریز (%)	۵۶/۶	۳۰/۰	۴۲/۲	۱۱/۵	۰/۲۵
	سیلت متوسط (%)	۳۳/۳	۳۰/۰	۳۲/۵	۱/۳۹	-۱/۵۴
	سیلت درشت (%)	۳۶/۶	۱۳/۳	۲۵/۳	۱۰/۶	-۰/۲۴
	رطوبت اشباع (%)	۴۳/۴	۳۴/۷	۳۹/۳	۴/۳۰	-۰/۱
	حد روانی	۳۱/۲	۲۴/۳	۲۶/۹	۲/۷۰	۰/۶۰

رطوبت اشباع و حد روانی در سطح آماری ۱ درصد ($p < 0.01$) معنی‌دار است. اثر عمق نیز بر سیلت و رطوبت اشباع در سطح آماری ۵ درصد ($p < 0.05$) و برای کربنات کلسیم معادل، شن و اجزا سیلت در سطح آماری ۱ درصد ($p < 0.01$) معنی‌دار بود.

بررسی اثر موقعیت شیب و موقعیت عمق بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

جدول (۲) نتایج تجزیه واریانس تاثیر موقعیت عمق، شیب و اثرات متقابل آن‌ها بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی را نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن بود که اثر موقعیت شیب بر کربنات کلسیم معادل و شن، رس، سیلت متوسط، سیلت ریز،

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) موقعیت شیب و عمق بر ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی خاک
Table 2. Analysis of variance (ANOVA) slope position and depth on physical, mechanical and chemical soil properties

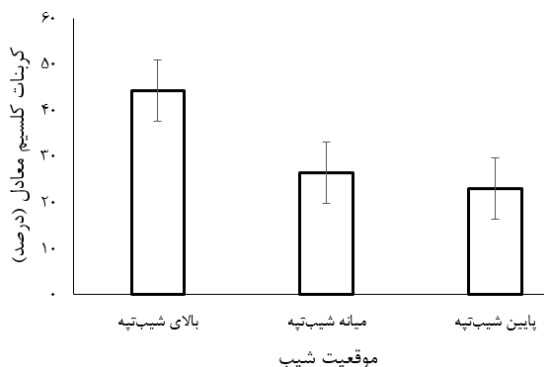
میانگین مربعات						درجه آزادی	منابع تغییر
سیلت درشت (%)	سیلت متوسط (%)	سیلت ریز (%)	سیلت (%)	رس (%)	شن (%)		
۱۹/۹۳ ^{ns}	۳۵۶/۶۱ ^{**}	۵۴۵/۱۶ ^{**}	۴۵/۱۳ ^{ns}	۲۱۰/۷۶ ^{**}	۱۲۴/۲۹ ^{**}	۲	موقعیت شیب
۵۶۹/۱۸ ^{**}	۵۱۱/۵۲ ^{**}	۸۴/۸۳ ^{**}	۶۳/۴ [*]	۶/۷۵ ^{ns}	۹۹/۱ ^{**}	۳	عمق
۳۰/۹۶	۳۸/۴۸	۱۲/۶۵	۱۳/۸۹	۴/۷۴	۶/۸۶	۱۸	خطا
حد روانی						درجه آزادی	منابع تغییر
کربنات کلسیم معادل (%) رطوبت اشباع (%)							
۲۹۴/۸۷ ^{**}						۲	موقعیت شیب
۱۵۸/۸۴ ^{**}						۳	عمق
۱/۶۲						۱۸	خطا

**، * و ns: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪، ۵٪ و عدم معنی‌داری آزمون دانکن

اثر موقعیت شیب بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

باتوجه به (شکل ۱) میزان کربنات کلسیم معادل از بالای شیب به قسمت پایین دست، روندی کاهشی را دارا است. مقدار

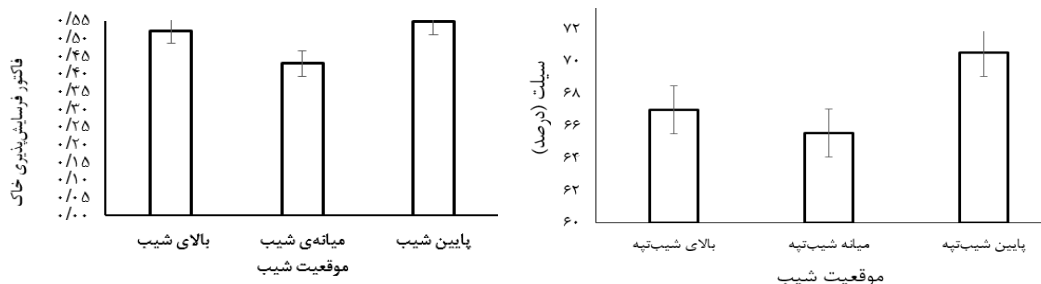
کم کربنات‌ها در پایین شیب ناشی از دریافت آب از اراضی بالادست و آب‌شویی بیشتر می‌باشد. یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعه خرمالی و همکاران (۱۰) هم‌خوانی دارد.



شکل ۱- تغییرات کربنات کلسیم معادل در موقعیت‌های گوناگون شیب
Figure 1. changes in the position of various calcium carbonate equivalent slope

یافتند (۶). کم‌ترین میزان فاکتور فرسایش در قسمت میانه شیب است که به دلیل وجود رس بالا و سیلت کم نسبت به دو موقعیت دیگر شیب می‌باشد. سازند زمین‌شناسی موجود در منطقه مطالعاتی به‌ویژه بالای شیب‌تپه عمدتاً ماری می‌باشد. خاک‌های سیلتی معمولاً خوب دانه‌بندی می‌شوند، ولی خاک‌های حاصله به سهولت شکسته و ذرات سیلت جدا و به‌وسیله آب و باد منتقل می‌شوند (۱۴). در بالای شیب‌تپه که میزان فرسایش بالا وجود دارد، میزان سیلت نیز زیاد است.

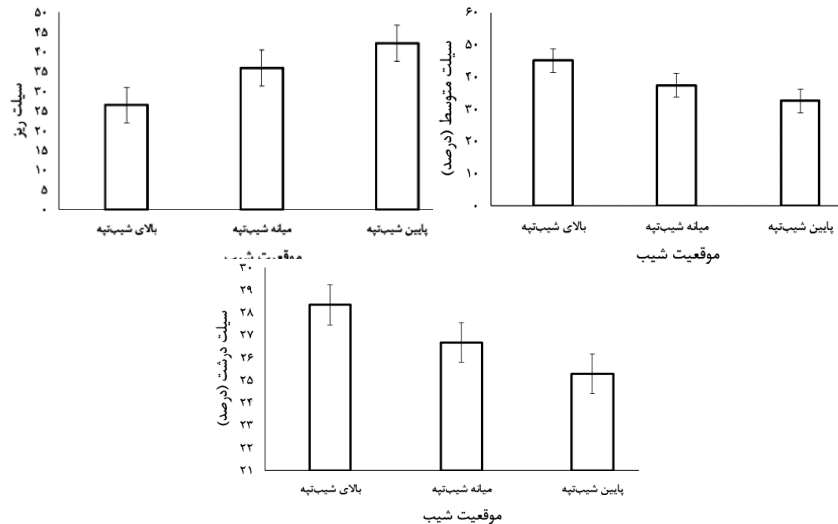
در بالا و میانه‌ی شیب تپه در اثر فرسایش توده‌ای، ذرات سیلت به پایین شیب‌تپه منتقل شده و میزان سیلت نیز کم است (شکل ۲). علاوه بر آن به دلیل رسوب‌گذاری مواد حاصل از فرسایش خمیری‌شکل، میزان سیلت در پایین شیب‌تپه نیز زیاد می‌باشد. این امر سبب افزایش فاکتور فرسایش‌پذیری در این موقعیت شیب و در پی آن، افزایش خطر وقوع مجدد فرسایش می‌گردد. اسماعیل‌نژاد و همکاران در سال ۱۳۹۴ نیز در پژوهش خود به نتایج مشابهی دست



شکل ۲- تغییرات سیلت و فاکتور فرسایش‌پذیری خاک در موقعیت‌های گوناگون شیب
Figure 2. Changes in silt and soil erodibility factor in various situations slope

دلیل انتخاب ذرات ریزتر و انتقال آسان‌تر آن‌ها در اثر فرسایش به قسمت پایین دست شیب و تجمع سیلت درشت و سیلت متوسط در بالای شیب تپه باشد.

با توجه به (شکل ۳) بیش‌ترین میزان سیلت ریز در قسمت پایین شیب و بیش‌ترین میزان سیلت متوسط و سیلت درشت، در موقعیت بالای شیب وجود دارد. این امر می‌تواند به



شکل ۳- تغییرات سیلت ریز، متوسط و درشت در موقعیت‌های گوناگون شیب
Figure 3. Changes in fine silt, medium and coarse silt contents in various situations slope

که آن خاک برای جاری شدن به تنش بیش‌تری نیاز دارد. به دیگر سخن می‌توان گفت که با افزایش ضریب k میزان تنش تسلیم در خاک نیز افزایش می‌یابد.

همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، شاخص رفتار جریان (n) در محدوده‌ی نرخ برشی اعمال‌شده، به غیر از عمق ۷۵-۴۰ موقعیت میانه‌ی شیب، کوچک‌تر از یک می‌باشد. نمونه‌های خاک زیر سطحی عمق (۴۰-۱۵) و (۷۵-۴۰) سانتی‌متری موقعیت میانه‌ی شیب و عمق (۱۰-۱۰) و (۳۰-۱۰) موقعیت پایین شیب به علت این که دارای شاخص جریان نزدیک به ۱ هستند، با گذشت زمان و در یک بازه از نرخ برشی تمایل بیش‌تری دارند تا رفتار غیر نیوتونی از نوع اتساعی را از خود بروز داده تا اینکه رفتار شبه پلاستیک داشته باشند. اما به‌طور کلی نمونه‌های خاک که رفتار غیر نیوتونی از نوع شبه پلاستیک را داشته، همگی رفتار رقیق‌شونده با برش از خود نشان دادند (۲۴). می‌توان این رفتار را به میزان بالای مواد جامد (سیلت، کربنات کلسیم معادل) در نمونه‌های خاک نسبت داد که خاک در حالت سیال مانند یک مایع واقعی عمل نمی‌کند و خواص جریان غیر نیوتونی را نشان می‌دهد (۴) و هم‌چنین موجب افزایش برهم کنش‌های داخلی بین ذرات شده و ماده (سیال) از خود خاصیت شبه‌پلاستیک نشان می‌دهد (۱۱).

با توجه به جدول (۳) مشخص است که در پروفیل بالای شیب تپه میزان شاخص رفتار جریان در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری نسبت به سه عمق زیر سطحی خود بیش‌تر است. خاک موجود در سطح پروفیل از ویسکوزیته کم‌تری برخوردار می‌باشد که می‌تواند به دلیل میزان کم‌تر کربنات کلسیم معادل و سیلت این عمق در موقعیت بالای شیب باشد. به بیان بهتر می‌توان گفت از آنجا که میزان شاخص قوام خاک موجود

آزمایش‌های تعیین رفتار رئولوژی خاک

نتایج حاصل از تعیین شاخص رفتار جریان (n) و شاخص پایداری یا قوام (k) در جدول (۳) آمده است. این دو شاخص از برازش مدل رئولوژیکی پاورلا^۱ بر نمودار غیرخطی تنش برشی- نرخ برش حاصل گردیدند. شاخص رفتار جریان، معیاری برای بیان میزان غیر نیوتونی بودن سیال (مثلاً خاک اشباع) است به‌گونه‌ای که برای سیال نیوتونی برابر یک و برای سیال شبه‌پلاستیک^۲ کوچک‌تر از یک می‌باشد (۱۹). هرچه n به یک نزدیک‌تر باشد نشان دهنده نزدیک شدن رفتار خاک به رفتار نیوتونی و کاهش رفتار شبه پلاستیک است (۲۳). هر چه این عدد کوچک‌تر شود، بیان‌گر قوی‌تر شدن خاصیت شبه‌پلاستیک یک سیال است (۱۹). در صورتی که شاخص n بزرگ‌تر از یک باشد، نشان‌گر تمایل سیال به جریان غیرنیوتونی دایلاتانت^۳ و اعداد کوچک‌تر از یک و نزدیک به صفر، نشان‌گر جریان‌های غیرنیوتونی شبه‌پلاستیک است k نیز بیان‌گر شاخص قوام سیال است که معیاری برای قابلیت تحرک و روان شدن سیال است (۱۹).

میزان شاخص قوام در پروفیل بالا و پایین شیب تپه از سطح به عمق خاک موجود در سطح خاک نسبت به دو عمق دیگر فرسایش‌پذیرتر است. در حالی که در پروفیل میانی شیب تپه میزان شاخص قوام از سطح خاک به عمق کاهش می‌یابد، که این امر نشان می‌دهد که خاک موجود در عمق، فرسایش‌پذیرتر از خاک سطحی است. این تفاوت در میزان شاخص قوام در عمق‌های مختلف و هم‌چنین قسمت‌های مختلف شیب را می‌توان مربوط به مقادیر متفاوت ذرات جامد خاک (سیلت و کربنات کلسیم معادل) نسبت داد (۳). هم‌چنین هرچه میزان شاخص قوام در خاک بیش‌تر باشد، نشان می‌دهد

در پروفیل میانه‌ی شیب‌تپه میزان شاخص n در عمق سطحی نسبت به خاک زیر سطحی کم‌تر است، که این امر نشان می‌دهد که در اثر تنش وارد شده میزان ویسکوزیته آن سریع‌تر کاهش می‌یابد.

در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری کم‌تر است در اثر تنش وارده سریع‌تر از خاک‌های موجود در عمق ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ و ۹۰-۱۲۰ سانتی‌متری شروع به روان شدن می‌کند و ویسکوزیته آن کاهش می‌یابد.

جدول ۳- مقادیر شاخص رفتار جریان و شاخص قوام

Table 3. Values of flow behavior index and consistency index

نمونه‌های خاک	نمونه‌های خاک	شاخص رفتار جریان	شاخص قوام	ضریب تبیین
بالای شیب	p1 ۰-۳۰	-۰/۶۹	۱/۰۹	۰/۹۵
	p1 ۳۰-۶۰	-۰/۲۶	۶۱/۵۹	۰/۸۴
	p1 ۶۰-۹۰	-۰/۴۹	۴/۶۲	۰/۹۳
میانه‌ی شیب	p1 ۹۰-۱۲۰	-۰/۲۲	۷۵/۶	۰/۸۳
	p2 ۰-۱۵	-۰/۶۴	۵/۸۱	۰/۹۶
	p2 ۱۵-۴۰	-۰/۸۷	۰/۸۲	۰/۹۶
پایین شیب	p2 ۴۰-۷۵	۱/۰۱	۰/۹۶	۰/۹۷
	p3 ۰-۱۰	-۰/۸۱	۱/۸۱	۰/۹۹
	p3 ۱۰-۲۰	-۰/۹۱	۱/۹۵	۰/۹۸

P_1 و P_2 و P_3 : به ترتیب بیان‌گر پروفیل پایین شیب‌تپه، پروفیل میانی شیب‌تپه و پروفیل بالایی شیب‌تپه و اعداد جلوی آن‌ها عمق‌های نمونه‌برداری بر حسب سانتی‌متر می‌باشند.

مدل‌سازی رفتار رئولوژیک خاک

هرشل‌بالکلی با ضریب تبیین ۰/۹۰ بهترین مدل سازگار با نمونه‌های خاک مورد آزمایش در این پژوهش بود و پس از آن مدل بینگهام دارای بالاترین کارایی بود (جدول ۴). برای خاک (۱۵-۴۰) P مدل بینگهام و خاک (۴۰-۷۵) P مدل کاسون با ضریب تبیین بالاتر و خطای استاندارد کم‌تر نسبت به مدل هرشل‌بالکلی، به‌عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب گردید.

پس از تعیین مقادیر شاخص رفتار جریان (n) و شاخص قوام (k) مدل‌های ریاضی بینگهام و هرشل‌بالکلی بر داده‌های تجربی به‌دست آمده برازش داده شدند. برای تعیین بهترین مدل از ضریب تبیین (R^2) و خطای استاندارد (SD) استفاده شد (۲۴) به‌گونه‌ای که مدل با بالاترین R^2 و کم‌ترین (SD) به عنوان بهترین مدل انتخاب گردید. نتایج نشان داد که مدل

جدول ۴- پارامترها، ضرایب تبیین و تنش تسلیم در مدل‌های رئولوژی مورد مطالعه

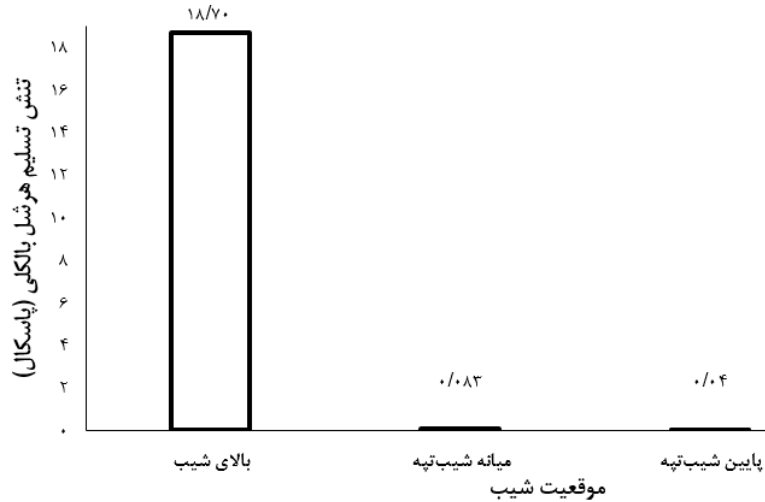
Table 4. Parameters, determination coefficients and yield stress of rheology models studied

پارامترها	A	B	R	SD	تنش تسلیم (Pa)
مدل بینگهام					
p1 ۰-۳۰	-۰/۱۵	-۰/۳	-۰/۸۱	۲۴/۹	-۰/۱۵
p1 ۳۰-۶۰	۴۰/۵۶	-۰/۸۸	-۰/۸۲	۸۴/۶	۴۰/۵۶
p1 ۶۰-۹۰	۱/۵۳	-۰/۳۳	-۰/۷۵	۳۰/۸	۱/۵۳
p1 ۹۰-۱۲۰	۵۳/۰۹	-۰/۷۶	-۰/۸۱	۷۹/۶	۵۳/۰۹
p2 ۰-۱۵	-۰/۳۲	۱/۱۴	-۰/۶۲	۱۱۴	-۰/۳۲
p2 ۱۵-۴۰	-۰/۰۵	-۰/۴	-۰/۹۶	۲۸/۸	-۰/۰۵
p2 ۴۰-۷۵	-۰/۰۳	-۰/۵۱	-۰/۸۴	۹۷/۹	-۰/۰۳
p3 ۰-۱۰	-۰/۰۷	-۰/۸۷	-۰/۷۴	۷۶/۹	-۰/۰۷
p3 ۱۰-۲۰	-۰/۰۵	۱/۲۳	-۰/۸۳	۱۰۴	-۰/۰۵
مدل هرشل‌بالکلی					
p1 ۰-۳۰	-۰/۱۳	-۰/۴۵	-۰/۹۶	۱۲/۲	-۰/۱۳
p1 ۳۰-۶۰	۳۱/۹	۱۱/۶۴	-۰/۹۷	۳۱/۹	۳۱/۹
p1 ۶۰-۹۰	۱/۰۸	۱/۶۶	-۰/۹۵	۱۴/۷	۱/۰۸
p1 ۹۰-۱۲۰	۴۱/۷	۱۳/۷۷	-۰/۹۶	۳۴/۳	۴۱/۷
p2 ۰-۱۵	-۰/۱۵	۳/۶۵	-۰/۹۷	۳۱/۱	-۰/۱۵
p2 ۱۵-۴۰	-۰/۰۶	-۰/۳۳	-۰/۹۴	۳۷/۸	-۰/۰۶
p2 ۴۰-۷۵	-۰/۰۴	-۰/۴۱	-۰/۸۸	۸۶/۶	-۰/۰۴
p3 ۰-۱۰	-۰/۰۴	۱/۴۵	-۰/۹۸	۲۰/۹	-۰/۰۳
p3 ۱۰-۲۰	-۰/۰۴	۱/۳۶	-۰/۹۱	۷۸/۶	-۰/۰۴
مدل کاسون					
p1 ۰-۳۰	-۰/۳	-۰/۵	-۰/۹۱	۱۷/۲	-۰/۹
p1 ۳۰-۶۰	۵/۸۸	-۰/۷۶	-۰/۸۸	۷۱/۱	۳۴/۶
p1 ۶۰-۹۰	۱/۰۶	-۰/۵۵	-۰/۶۸	۳۳/۹	۱/۱۲
p1 ۹۰-۱۲۰	۶/۸۲	-۰/۶۸	-۰/۸۷	۶۵/۳	۴۶/۵۵
p2 ۰-۱۵	-۰/۶۳	۱/۰۵	-۰/۵۹	۱۱۷	-۰/۴
p2 ۱۵-۴۰	-۰/۱۳	-۰/۶۱	-۰/۹۵	۳۲/۳	-۰/۰۲
p2 ۴۰-۷۵	-۰/۰۶	-۰/۷۵	-۰/۸۸	۸۴/۵	-۰/۰۴
p3 ۰-۱۰	-۰/۲	-۰/۹	-۰/۸۱	۶۷/۲	-۰/۰۴
p3 ۱۰-۲۰	-۰/۱۲	۱/۰۹	-۰/۸۵	۱۰۱	-۰/۰۱

P_1, P_2, P_3 : به ترتیب بیان‌گر پروفیل بالایی شیب‌تپه، پروفیل میانی شیب‌تپه و پروفیل پایین شیب‌تپه و اعداد مقابل آن‌ها عمق‌های نمونه‌برداری بر حسب سانتی‌متر می‌باشند. A و B ضرایب مدل و R و SD به ترتیب ضریب تبیین و خطای استاندارد می‌باشند.

و گل مثل غلظت که ناشی از مقادیر متفاوت ذرات جامد خاک (سیلت و کربنات کلسیم معادل) می‌باشد، نسبت داد (۳). در موقعیت پایین شیب، خاک سطحی کم‌ترین میزان تنش تسلیم و خاک زیر سطحی (۳۰-۱۰) تنش تسلیم بیش‌تری داشت. مقایسه مقدار تنش تسلیم سه موقعیت شیب‌تپه از بالای شیب به سمت پایین شیب‌تپه نمایان‌گر آن بود که تنش تسلیم روندی کاهشی را دارا است. میزان کربنات کلسیم معادل کم‌تر در نمونه P32 بر روی این روند کاهشی تأثیر بسزایی داشت. تنش تسلیم در عمق‌های گوناگون در شیب‌تپه نیز تحت تأثیر کربنات کلسیم معادل قرار داشت.

باتوجه به جدول (۴) مشخص است که در موقعیت بالای شیب، خاک سطحی کم‌ترین میزان تنش تسلیم و خاک زیر سطحی (۹۰-۱۲۰)، بیش‌ترین تنش تسلیم را دارا بود که نشان از فرسایش‌پذیرتر بودن خاک سطحی است. در پروفیل میانه‌ی شیب، تنش تسلیم هرشل بالکلی از سطح به عمق دارای روند کاهشی بود. این موضوع بیان‌گر آن است که در پروفیل میانه‌ی شیب‌تپه، دو عمق زیر سطحی فرسایش‌پذیرتر است چراکه دارای کربنات کلسیم معادل کم‌تر نسبت به خاک سطحی بوده و بنابراین در اثر تنش یکسان وارد شده خیلی سریع‌تر از خاک سطحی شروع به روان شدن می‌کند. این موضوع را می‌توان مربوط به خصوصیات متفاوت مخلوط آب



شکل ۴- تغییرات تنش تسلیم در موقعیت‌های گوناگون شیب
Figure 4. Changes yield stress in various situations slope

شیب‌تپه از بالای شیب به سمت پایین شیب‌تپه نمایان‌گر آن بود که تنش تسلیم روندی کاهشی را دارا است. میزان کربنات کلسیم معادل کم‌تر در نمونه P32 بر روی این روند کاهشی تأثیر بسزایی داشت. هرچه نمونه خاک تنش تسلیم بالاتری داشته باشد ویسکوزیته و مقاومت برشی خاک بیشتر خواهد بود و در پی آن سبب می‌شود تا خاک دیرتر جریان یابد و خطر وقوع فرسایش کاهش می‌یابد. توصیه می‌گردد تأثیر ذرات در اندازه رس بر رفتار و خصوصیات رئولوژیکی خاک در پژوهش‌های آینده مورد بررسی قرار گیرد.

نتایج نشان داد که با استفاده از خواص و رفتار رئولوژیک خاک از جمله تنش تسلیم می‌توان احتمال وقوع دوباره فرسایش خمیری شکل در شیب‌تپه مطالعاتی را تخمین زد. تنش تسلیم معیار خوبی برای پیش‌بینی رفتار خاک در برابر فرسایش خمیری شکل و شناسایی نقاط حساس به این فرسایش شناخته شد. تنش تسلیم در هر موقعیت از شیب‌تپه با یکدیگر تفاوت دارد و در موقعیت‌های گوناگون شیب و در عمق‌های گوناگون در شیب‌تپه تحت تأثیر کربنات کلسیم معادل قرار داشت. مقایسه مقدار تنش تسلیم سه موقعیت

منابع

1. Bitraf, Sh., S. Abbasi and Z. Hamidi. 2002. Production of low-calorie dark chocolate prebiotics using inulin, poly dextrose and maltodextrin. *Journal of Nutrition Sciences and Food Industry*, eighth year, Spring, 2003(1): 49-62 (In Persian).
2. Blocki, H., H. Sarpoulaki and A. M faghihisani. 2003. The impact time wear the rheology of clay suspensions. *Iranian Journal*, Summer, 2003(34): 68-60 (In Persian).
3. Carotenuto, C., M.C. Merola, M. Alvarez-Romero and E. Coppola. 2015. Rheology of natural slurries involved in a rapid mudflow with different soil organic carbon content. *Journal of Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, (466): 57-65.
4. Chevalley, J. 1999. The Chocolate Flow Properties. In: *Industrial Chocolate Manufacture and Use*. Beckett, S.T. 3rd ed. Oxford: Blackwell Science, 182-199.
5. Emami, S.N., A. Jalalian and A. Khosravi. 2016. The Role of Soil Chemical and Physical characteristics in landslide occurrence (Case Study: Afsar Abad Area in Chaharmahal and Bakhtiari Province). *Journal of Watershed Management Research*, Vol. 7(13): 182-192 (In Persian).
6. Esmaeilnejad, L., C. Ramazanipour and J. Seyedmohammadi. 2005. Development of the different types of erosion alters the physical properties of soil and clay minerals marmie lands in the southern province of Gilan. *Journal of Research Engineering and watershed management*, (4): 535-523 (In Persian).
7. Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle-size Analysis. In: A. Klute (Editor), *Methods of Soil Analysis*. Part 1. 2nd ed. Agronomy, 9: 383-399.
8. Hillel, D. (Ghahreman, b.). 2011. *Environment soil physics*. Publications Ferdowsi University of Mashhad. Mashhad. Iran, 988 pp (In Persian).
9. Khashtar Boroujeni, M., H. Samadi Boroujeni and K. Esmaili. 2003. Experimental study of shear stress threshold silty- clay sediments at different concentrations. *Journal of Water Research*, (13): 131-138 (In Persian).
10. Khormali, F. and H. Tazikeh. 2010. Evolution of clay minerals in saline-sodic soils as influenced by topography and ground water table in northern Atrak watershed. *Journal Water Soil Conserv*, (17: 2). 107-123 (In Persian).
11. Koksoy, A. and M. Kilic. 2004. Use of hydrocolloids in textural stabilization of a yoghurt drink, *Ayran*. *Food Hydrocolloids*, (18): 593-600.
12. Kroetsch, D. and C. Wang. 2007. *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 2nd edn. CRC Press, Ottawa, Ontario, Canada. 1262 pp.
13. Maleki, S., F. Khormali, F. Kiyani and A. Karimi. 2013. Effects of slope direction and position on some physical and chemical characteristics of the soil in the loess sloping lands, Tushan area in golestan province. *Journal of Soil and Water Conservation*, 20(3): 93-112 (In Persian).
14. Maquaire, O., J.P. Malet, A. Remaitre, J. Locat, S. Klotz and J. Guillon. 2003. Instability conditions of Marly hillslopes: towards landsliding or gullying, The case of the Barcelonnette Basin, South East France. *Engineering Geology*, (70): 109-130.
15. Nejadasadi, R., A. Besalatpour and H. Shirani. 2018. Relationship between the slope position and land use in hill slopes whit mudflow erosion to soil activity coefficient and atterberg limits. *Journal of Watershed Management Research*, 9(17): 155-167 (In Persian).
16. Nelson, R.E. 1982. Carbonate and gypsum. *Methods of soil analysis: Part 2*, Agronomy Handbook No 9, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, 181-197.
17. Pournader, M., H. Ahmadi, J. Ghodousi and J. Jafari. 2002. Zoning mass movements and factors in its occurrence in Ilam dam catchment. *Journal of Watershed Management Engineering*, 2002, 4(2): 110-118 (In Persian).
18. Refahi, H.GH. 2006. *Water erosion and control*. Tehran University Publication. Tehran. Iran. 671 pp (In Persian).
19. Salarieh, M. and R. Kharat. 2000. Effect of drispac polymer on the rheological behaviour of drilling mud. *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, 13(48): 83-88 (In Persian).
20. Schoeneberger, P.J., D.A. Wysocki, E.C. Benham and W.D. Broderson (ed.). 2002. *Field book for describing and sampling soils*, 2nd Version. Natural Resources Conservation Service. 254 pp., National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
21. Soltani, A. *Application of SAS in statistical analysis (for agricultural science)*. 2005. 2ed. 4nd. University Jihad (University of Mashhad), 184 pp (In Persian).
22. Szegi, T. and Z.S. Tombacz. 2006. Quantitative rheological indicators for soil physical degradation. *Agrokemia Es Talajtan*, 1(55): 69-78.
23. Tabatabaei Yazdi, F., A. Alghoneh, D. khodaei and B. Alizadeh Behbahani. 2016. Modeling of the rheological flow behavior index and optimize the formulation of ice cream using response surface methodology. *Journal of Food Science and Technology*, volume 13(55): 33-51 (In Persian).
24. Tavakolipour, C. and A. Kalbasi Ashtary. 2013. Check rheological properties of wine. *Journal of Food Science and Technology*, 10(4): 129-137 (In Persian).
25. Wang, Y.C. 2013. *Effects of physical properties and rheological characteristics on critical shear stress of fine sediment*, Ph.D. dissertation, Georgia Institute of Technology, Georgia University, 292 pp.

Check the Soil Yield Stress in Situations with different Slope on a Hill Slope with Pasture Cover with the Occurrence Sulification Erosion

Elnaz Zeinalipour¹, Ali Asghar Besalatpour², Hossein Shirani³, Isa Esfandiarpour², Hossein Shekofteh⁵ and Hossein Dashti⁴

1- M.Sc. Student, Dept. of Soil Science, Vali-e-Asr University of Rafsanjan,
(Corresponding author: e_zeinali95@yahoo.com)

2, 3 and 4- Assistant Professor, Professor and Associate Professor and Dept. of Soil Science, Vali-e-Asr University of Rafsanjan

5- Assistant Professor Dept. of Soil Science, Jiroft University of Jiroft

Received: June 10, 2017

Accepted: February 26, 2019

Abstract

One of the most important types of water erosion, is massive erosion. Soils with fine particles (especially silt particles) have little stability against erosion, because they have more water holding capacity and thus increase the saturation moisture and the likelihood of this type of erosion. So In this study, to investigate the relationship between particle size of silt, with behavior and rheological properties of soil in the rabor region of Kerman province, three profiles were studied respectively, at the top of the slope, middle slope and down hill slope. After identifying the soil layers, soil sampling was conducted at various depths. Then some physical and chemical characteristics of the soil, Includes equivalent calcium carbonate, sand, clay, silt, silt components, saturated moisture content and psychological limits was measured in triplicates. The rheological tests such as yield stress and viscosity were also performed to determine the flow behavior of the soil. The results showed that in the study area are high erodibility index position of the bottom and top of hill slope ($k=0/54$ down the slope and $k=0/52$ above the slope. The soil profile at the top of hill slope had the highest amount of coarse (28.33%) and saturation moisture (57.29%) and the lowest amount of clay (16.45%). Subsequently it had shear stress much lower than the position of the tilt tolerance and thus faster flow decreases. The shear stress was much lower than the position of the tilt tolerance. The best model to predict the flow behavior of soil was herschel-bulkley model, which has a higher coefficient of determination ($R^2>0.90$) and lower SD than the Bingham and Kasson models. The results also showed that all samples have thixotropic behavior. The fine silt and calcium carbonate equivalent affected behavior and thixotropic properties. The fine silt mostly influenced the shear stress while the calcium carbonate equivalent affected the recovery process structure, viscosity and yield stress and yield stress was a good criterion for predicting soil behavior against sulification erosion and identifying the critical points of this erosion.

Keywords: Calcium carbonate equivalent, mass movement, Components silt, soil erodibility, shear strength, viscosity