

## تخمین مقاومت برشی خاک با استفاده از توابع انتقالی و توابع پیش بینی فضایی خاک

بیژن خلیل مقدم<sup>\*۱</sup> - مجید افیونی<sup>۲</sup> - احمد جلالیان<sup>۳</sup> - کریم عباسپور<sup>۴</sup> - امیر احمد دهقانی<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۸۹/۴/۲

تاریخ پذیرش: ۸۹/۸/۲

## چکیده

مقاومت برشی لایه رویین خاک (SSS) از پارامترهای موثر در مدل سازی فرسایش خاک و روان آب و شاخصی برای فرسایش پذیری خاک محسوب می شود. این پژوهش به منظور بررسی و برآورد مقاومت برشی لایه رویین خاک در زاگرس مرکزی با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره خطی صورت گرفت. منطقه ی مورد بررسی به مساحت ۲۳۵۶۲ هکتار با کاربری های مرتع و مرتع تخریب شده انتخاب گردید. این منطقه بر اساس نقشه های توپوگرافی، زمین شناسی، کاربری اراضی و منابع و قابلیت اراضی، به ۱۸ واحد کاری تقسیم گردید. در هر واحد کاری به صورت تصادفی نظارت شده، نمونه برداری (۳-۰ سانتی متری) انجام گرفت و در مجموع، ۱۲۰ نمونه در ۳ تکرار با در نظر گرفتن تنوع هر واحد برداشت گردید. پارامترهای زود یافت خاک شامل اندازه ذرات، کربن آلی و کربنات کلسیم به همراه شیب، جهت شیب، ارتفاع و شاخص پوشش گیاهی NDVI به عنوان پارامترهای ورودی انتخاب گردیدند. در این پژوهش سه مدل رگرسیونی مورد آزمون قرار گرفت. از ضریب همبستگی اسپیرمن، متوسط مربعات خطای نرمال شده (NMSE)، متوسط خطای مطلق (MAE)، میانگین هندسی خطا (GMER)، انحراف معیار هندسی خطا (GSDER) بین مقادیر اندازه گیری شده و تخمینی، جهت بررسی کارایی مدل های مختلف استفاده شد. نتایج نشان داد که تخریب اراضی به طور معنی داری مقاومت برشی لایه رویین را کاهش داد. کاربرد خواص توپوگرافی و پوشش گیاهی به همراه خواص زود یافت لایه رویین خاک باعث بهبود کارایی برآورد مقاومت برشی لایه رویین خاک گردید.

واژه های کلیدی: مقاومت برشی لایه رویین خاک، فرسایش پذیری خاک، زاگرس مرکزی

## مقدمه

فرسایش پذیری خاک عبارت است از، جداسازی ذرات لایه رویینی به وسیله برخورد قطرات باران یا رواناب که به عنوان یک ویژگی ذاتی خاک با مقداری ثابت شناخته شده است (۲۳). این فاکتور بیان گر این حقیقت می باشد که خاک های مختلف دارای نرخ فرسایش متفاوتی هستند، به شرطی که سایر پارامترهای موثر در فرسایش خاک ثابت باشند (۱۴). تعیین فرسایش پذیری خاک معمولاً به صورت پژوهشی (اندازه گیری فرسایش در پلات های کنترل شده) یا با استفاده از نمودار ویشمایر و همکاران (۲۸) محاسبه می گردد.

پژوهش های گذشته در زمینه فرسایش خاک نشان داده است که شرایط خاک زمانی که به حد آستانه فرسایش پذیری به وسیله جریان شیار برسد، به وسیله مقاومت برشی لایه رویین خاک کنترل می گردد (۲۴). همچنین فرآیند جداسازی ذرات به وسیله قطرات باران به مقاومت برشی لایه رویین خاک وابسته است (۴). بنابراین مقاومت برشی لایه رویین خاک به عنوان شاخص مناسبی برای فرسایش پذیری خاک شناخته شده است (۶). مقاومت برشی لایه رویین خاک می تواند همان مقاومت اصطکاکی ناشی از لغزیدن ذرات روی همدیگر، حرکت غلتک مانند بین دانه های مجاور و قفل شدن دانه ها در یکدیگر باشد. همین طور پیوندهای شیمیایی بین ذرات رس خاک باعث چسبندگی و مقاومت در برابر نیرو و تنش وارده می گردد (۲). مقاومت برشی لایه رویین خاک تحت تاثیر ویژگی های متفاوتی از خاک می باشد که این ویژگی ها عبارتند از: شیمی کانی ها و کلوئیدهای آلی که بر چسبندگی خاکدانه ها اثر می گذارند؛ اندازه، شکل و ساختمان ذرات و خاکدانه ها که مقاومت اصطکاکی خاک را تحت تاثیر قرار می دهند؛ وجود شبکه ریشه ها که ساختار بزرگتری از

۱- استادیار گروه خاک شناسی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان  
\* نویسنده مسئول: Email:moghaddam623@yahoo.ir

۲-۳- استادان گروه خاک شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۴- عضو هیأت علمی گروه علوم و تکنولوژی آب موسسه تحقیقاتی EWAG سوئیس

۵- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

خاکدانه‌ها را تشکیل می‌دهند.

برخی از پژوهش‌های انجام شده در ارتباط با اندازه گیری مقاومت برشی لایه رویین خاک شامل کریشنامورتی (۱۴)، توری و همکاران (۲۷)، مرز و بریان (۱۸)، قبرسیوس و همکاران (۹)، فرانتی و همکاران (۶) و جمینز و گاورز (۱۰) می‌باشند. این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که معمولاً مقاومت برشی لایه رویین خاک در شرایط اشباع یا نزدیک به اشباع اندازه گیری می‌گردد و برای اندازه گیری آن از دستگاه پره برشی استفاده می‌شود. قطر پره برشی مورد استفاده بین ۱/۳ تا ۱/۵ سانتی متر بوده است. زیمبون و همکاران (۳۱) با مقایسه دستگاه‌های مختلف اندازه گیری مقاومت برشی لایه رویین خاک به این نتیجه رسیدند که پره برشی و پره دستی برای تعیین مقاومت برشی لایه رویین خاک مناسب‌ترند، به دلیل این که نوعی از برش که نشان دهنده جداسازی ذرات خاک به وسیله جریان است را شبیه سازی می‌نمایند.

لئونارد و ریچارد (۱۶) رابطه ای خطی بین مقاومت برشی لایه رویین خاک و تنش برشی بحرانی رواناب برای خاک‌های طبیعی مختلف (مقاومت برشی بین ۰ تا ۲۰ کیلوپاسکال) به دست آوردند بنابراین مقاومت برشی لایه رویین خاک می‌تواند شاخصی برای تنش برشی بحرانی رواناب باشد.

مدل‌های فرسایش خاک مانند <sup>۱</sup>RUSLE، <sup>۲</sup>EUROSEM، <sup>۳</sup>WEPP و <sup>۴</sup>GUEST برای شبیه سازی فرسایش و رواناب نیازمند پارامترهای ورودی زیادی از جمله مقاومت برشی لایه رویین خاک می‌باشند. به دلیل تغییرات مکانی این پارامترها، نیاز به جمع آوری تعداد زیادی نمونه خاک دست نخورده می‌باشد و اندازه گیری آنها به روش مستقیم در مقیاس‌های بزرگ به مشکلی اساسی در این مدل‌ها تبدیل شده است (۳). برای حل این مشکل از روش‌های غیرمستقیم مانند توابع انتقالی خاک<sup>۵</sup> (PTFs) و توابع پیش بینی فضایی خاک<sup>۶</sup> (SSPFs) استفاده می‌گردد. PTFs، توابع پیش بینی کننده ای هستند که داده‌های زود یافت خاک<sup>۷</sup> مانند توزیع اندازه ذرات، چگالی ظاهری و ماده آلی را به ویژگی‌های دیر یافت خاک مانند ویژگی‌های هیدرولیکی و مکانیکی مرتبط می‌کنند. SSPFs، توابع پیش بینی کننده ای هستند که در آنها علاوه بر ویژگی‌های زود یافت خاکی از ویژگی‌های زود یافت غیر خاکی مانند توپوگرافی و پوشش گیاهی برای برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی و مکانیکی استفاده می‌شود (۱۵).

اگرچه پژوهشی در زمینه استفاده از توابع انتقالی و توابع پیش

بینی فضایی خاک برای برآورد مقاومت برشی لایه رویین خاک وجود ندارد، ولی تحقیقاتی در زمینه ایجاد توابع انتقالی خاک برای برآورد مقاومت برشی خاک با کاربردهای مهندسی انجام گرفته است. هیراتا و همکاران (۱۲) از روش تحلیل رگرسیون چندگانه برای تعیین روابط بین ویژگی‌های زود یافت خاک و مقاومت برشی خاک‌های چسبنده استفاده کردند. ویژگی‌های زود یافت مورد نظر، حدود آتربرگ و مقدار رس بوده است. مایو و بین (۲۰) بررسی‌هایی در مورد مقاومت برشی خاک غیر اشباع انجام دادند. آن‌ها در این پژوهش، مدل هذلولی را برای مقاومت برشی بر اساس آزمایش برش سه محوری در خاک غیر اشباع ارائه دادند. فردلوند و همکاران (۷) مدلی را برای پیش بینی مقاومت برشی خاک‌های غیر اشباع ارائه کردند. از این رو در این پژوهش، از روش رگرسیون چند متغیره خطی برای برآورد مقاومت برشی لایه رویین خاک استفاده شد. اهداف این مطالعه عبارتند از:

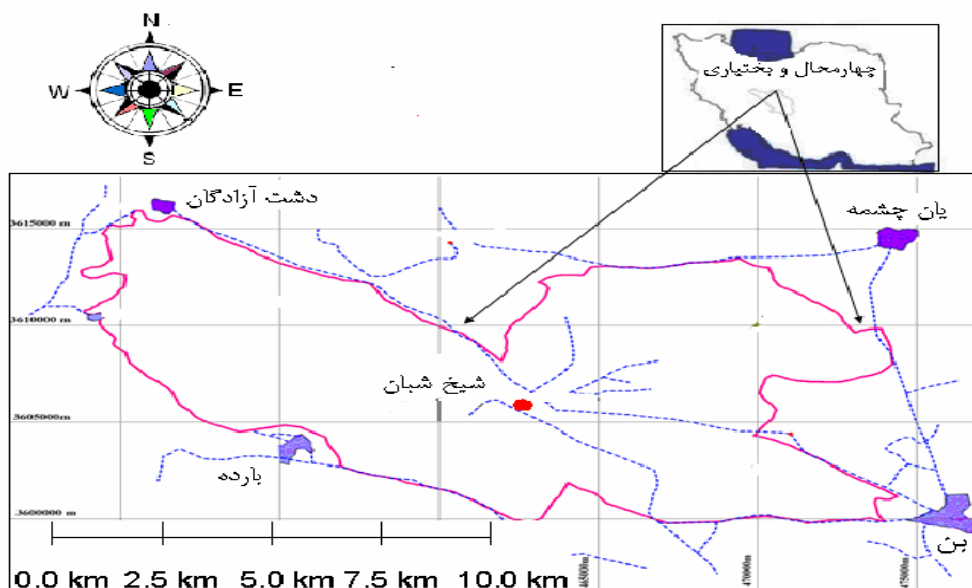
- ۱- بررسی مقاومت برشی لایه رویین خاک در منطقه و اثر تخریب اراضی روی آن
- ۲- برآورد مقاومت برشی لایه رویین خاک با استفاده از توابع انتقالی خاک و توابع پیش بینی فضایی خاک

## مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه بخشی از مراتع زاگرس مرکزی واقع در استان چهارمحال و بختیاری با موقعیت  $35^{\circ} 43' 50''$  تا  $13^{\circ} 17' 27''$  شرقی و  $48^{\circ} 40' 33''$  تا  $12^{\circ} 32' 32''$  شمالی می‌باشد. مساحت تقریبی منطقه مورد مطالعه ۲۵۲ کیلومتر مربع است، که متوسط حداقل و حداکثر بلند مدت بارندگی و درجه حرارت در این منطقه به ترتیب ۶۰۰-۳۳۰ میلی متر و ۱۲-۵ درجه سانتی گراد می‌باشد. ارتفاع منطقه بین ۲۱۰۰ تا ۳۱۰۰ متر بالاتر از سطح دریا است، بنابراین توپوگرافی منطقه کوهستانی می‌باشد. جهت شیب غالب منطقه شمال شرقی و شمال و ۹۰ درصد از منطقه شیبی بیش از ۱۵ درصد دارد. کاربری اراضی غالب منطقه مرتع و مرتع تخریب شده (۷۲ درصد از مساحت) با ۱۳ درصد کشاورزی و ۱۵ درصد صخره می‌باشد. زمین شناسی غالب منطقه نهشته‌های تراس‌های قدیمی غنی شده از گچ و سنگ آهک با هوازدگی و فرسایش پذیری متوسط است (۱). خاک‌های منطقه بر اساس کلید رده بندی خاک آمریکایی (۲۶) و بر اساس طبقه بندی جهانی<sup>۸</sup> (WRB) (۲۹) در جدول ۱ آمده است. بافت خاک غالب منطقه شامل لوم شنی، لوم رسی سیلتی، رسی سیلتی، لوم سیلتی، لوم، لوم شنی، لوم رسی و رسی می‌باشد.

- 1- Revised universal soil loss equation
- 2- European soil erosion model
- 3- Water erosion prediction project
- 4- Griffith university erosion system template
- 5- Pedotransfer functions
- 6- Soil spatial prediction functions
- 7- Easily-available soil properties

8- World Reference Base



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی

جدول ۱- تیپ اراضی، اجزاء واحد اراضی در منطقه مورد بررسی

تیپ اراضی	اجزاء واحد اراضی	سطح (درصد)	طبقه بندی جهانی (۲۰۰۶) (۲۸)	رده بندی آمریکایی (۲۰۰۶) (۲۵)
1	1.1.1	۶/۲۶	Leptic Regosols	Lithic Xerorthents
	1.1.2	۲۱/۳۲	Haplic Calsisols	Typic Haploxerepts
	1.2.1	۴/۷۷	Haplic Cambisols	Typic Haploxerepts
	1.2.2	۳/۲۱	Haplic Cambisols	Typic Haploxerepts
	2.1.1	۱/۲۳	Haplic Cambisols	Typic Haploxerepts
2	2.1.2	۷/۳۰	Leptic Regosols	Lithic Xerorthents
	2.1.3	۲/۹۸	Leptic Regosols	Typic Haploxerepts
	2.2.1	۱/۶۴	Leptic Regosols	Lithic Xerorthents
	2.2.2	۵/۹۳	Haplic Cambisols	Typic Haploxerepts
3	3.1.1	۲/۸۸	Haplic luvisols	Typic Haploxeralfs
	3.1.2	۱/۹۹	Haplic Cambisols	Typic Haploxerepts
	3.2.1	۴/۸۹	Haplic Cambisols	Typic Haploxerepts
	3.2.2	۲/۵۸	Haplic Cambisols	Typic Haploxerepts
	3.3.1	۱۰/۳۶	Haplic Cambisols	Typic Calcixerepts
	3.3.2	۱/۶۶	Leptic Regosols	Typic Xerorthents
	8.1.1	۷/۳۶	Haplic Cambisols	Typic Haploxerepts
3+8	4.1.1+3.1.1	۱۳/۰۳	Haplic Cambisols	Typic Haploxerepts
	3.1.1+8.1.1	۰/۶۲	Haplic Regosols	Typic Xerorthents
جمع		۱۰۰		

۱: تیپ کوهها؛ 1.1: کوه با شیب و صخره بیشتر از ۷۵ درصد؛ 1.2: کوه با شیب و صخره (۵۰-۷۵٪)؛ 2: تپه ها؛ 2.1: تپه با شیب (۲۵-۵۰٪) و صخره (۵۰-۷۵٪)؛ 2.2: تپه با شیب و صخره (۲۰-۳۰٪)؛ 3: فلات ها؛ 3.1: فلات با پستی و بلندی کم؛ 3.2: فلات با پستی و بلندی زیاد؛ 3.3: فلات با پستی و بلندی میانگین و مقداری سنگریزه؛ 8: واریزه های بادبزنی شکل سنگریزه دار؛ 8.1: واریزه های بادبزنی شکل سنگریزه دار با پستی و بلندی بالا و مقداری سنگریزه؛ 4: دشت های دامنه ای؛ 4.1: دشت دامنه ای با پستی و بلندی کم و مقداری سنگریزه

مورد نظر اندازه گیری شد.



شکل ۲- دستگاه پره برشی

### مشخصه‌های پوشش گیاهی

برای ارزیابی پوشش گیاهی از شاخص پوشش گیاهی<sup>۲</sup> (NDVI) استفاده شد، که این شاخص بیان کننده سبزینه‌ای است که در ارتباط با درصد تابش های جذب شده فتوسنتزی و منعکس کننده فعالیت کلروفیل در گیاهان می‌باشد (۱۸). افزایش میزان NDVI در پیکسل های سنجش از دور همراه با افزایش پوشش سبز است، که این شاخص در منطقه مورد بررسی با استفاده از داده های IRS-ID با وضوح ۳۰ در ۳۰ متر زمان نمونه برداری استخراج گردید (۱۳). مقادیر NDVI بین ۱- تا ۱ می‌باشد. به دلیل انعکاس زیاد اشعه مادون قرمز طیف الکترومغناطیس، به پوشش گیاهی سالم، مقادیر بالای بین ۰/۵ تا ۱ داده می‌شود. بر عکس سطوح مرطوب مقادیر منفی به خود می‌گیرند. به دلیل انعکاس زیاد نسبت مادون قرمز و مرئی طیف الکترومغناطیس، خاک بدون پوشش دارای NDVI نزدیک صفر می‌باشد (۱۸).

### روش‌های مدل‌سازی توابع انتقالی خاک

در این پژوهش سه مدل رگرسیونی مورد بررسی و آزمون قرار گرفت (جدول ۲). متغیرهای زود یافت مدل ۱ (توابع انتقالی خاک) شامل توزیع اندازه ذرات، مقدار کربن آلی و مقدار کربنات کلسیم خاک بود. در مدل ۲ (توابع پیش بینی فضایی خاک) از توزیع اندازه ذرات خاک به همراه مشخصه‌های پستی و بلندی و پوشش گیاهی استفاده شده است و نهایتاً در مدل ۳ (توابع پیش بینی فضایی خاک) از ویژگی‌های پستی و بلندی و شاخص پوشش گیاهی به همراه ویژگی‌های لایه رویین خاک استفاده گردید. برای ایجاد توابع انتقالی و پیش بینی فضایی خاک از روش رگرسیون چندمتغیره خطی استفاده گردید. برای این کار با استفاده از نرم افزار آمار SAS در سطح آمار ۵ درصد (۲۵)، توابع انتقالی و پیش بینی فضایی خاک مقاومت برشی خاک ایجاد گردید. تجزیه واریانس به وسیله نرم افزار آمار SAS برای تعیین معنی دار بودن تفاوت بین مدل های مختلف در پیش بینی پارامتر مقاومت برشی خاک انجام شده است.

هم اکنون پوشش گیاهی بوته ای، علفی و گندمیان پوشش غالب منطقه را تشکیل می‌دهند. عمده ترکیب گیاهی محدوده مورد بررسی، از گیاهان کلاس سه و مهاجم تشکیل شده است. از مهمترین تیپ های گیاهی می‌توان به *Cousinia Astragalus susianus* و *Serratula latifolia bachtiarica* اشاره کرد (۱). منطقه مورد بررسی تحت تاثیر فعالیت هایی همچون چرای بی رویه، چرای زودهنگام و سوزاندن بوته ها، شخم در جهت شیب، بهره برداری از معادن و جاده سازی دستخوش تغییر شده است (۱).

### روش نمونه برداری

این منطقه بر اساس ویژگی‌های توپوگرافیکی، زمین شناسی، کاربری اراضی و قابلیت اراضی به واحدهای کاری مجزایی تفکیک شده است (۱۱). برای این کار در محیط نرم افزار آرک ویو<sup>۱</sup> با استفاده از نقشه‌های توپوگرافیکی (۱:۵۰۰۰۰)، زمین شناسی (۱:۱۰۰۰۰۰)، کاربری اراضی (۱:۲۵۰۰۰۰) و منابع و قابلیت اراضی (۱:۲۵۰۰۰۰)، ۱۸ واحد کاری ایجاد شده است. در هر واحد کاری به صورت تصادفی نظارت شده، با در نظر گرفتن سطح هر واحد، نمونه برداری صورت گرفت، که در کل منطقه ۱۲۰ نمونه در ۳ تکرار برداشت گردید. نمونه برداری از لایه ۰-۳ سانتی متری خاک از اوایل تیر ماه تا اواخر مهر ماه ۱۳۸۶ برداشت شد.

### ویژگی‌های خاک

توزیع اندازه ذرات خاک به روش هیدرومتري (۸)، درصد سنگریزه خاک به روش حجمی، درصد رطوبت خاک به روش وزنی، چگالی ظاهری به روش سیلندرهایی نمونه‌گیری، مقدار کربن آلی خاک به روش والکلی و بلاک (۲۱) و مقدار کربنات کلسیم خاک با تیتراسیون (۲۲) اندازه گیری شد. در این پژوهش، برای اندازه گیری مقاومت برشی لایه رویین خاک از پره برشی (مدل BS1377) در شرایط اشباع استفاده شد. روش کار بدین صورت است که پره برشی در داخل خاک تا جایی که پره‌ها کاملاً در خاک قرار بگیرد وارد می‌شود. سپس شروع به دوران پره برشی در جهت عقربه‌های ساعت کرده و تا برش (گسیختگی) خاک، ادامه می‌دهیم که حدود ۵ تا ۱۰ ثانیه طول می‌کشد. حداکثر مقدار تنش وارده روی صفحه مدرج در بالای پره برشی ثبت می‌گردد. این وسیله قادر به اندازه گیری تنش‌های بین صفر تا ۱۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد (شکل ۲).

### مشخصه‌های پستی و بلندی

با استفاده از نقشه مدل های رقومی ارتفاع ۱۰ در ۱۰ متر (۲) مشخصه‌های پستی و بلندی نظیر شیب، جهت شیب و ارتفاع نقاط

2- Normalized Difference Vegetation Index

1- Arc view

جدول ۲- ویژگی‌های زود یافت مورد استفاده برای ایجاد توابع انتقالی (مدل ۱) و توابع پیش بینی فضایی خاک (مدل‌های ۲ و ۳).

شماره	متغیرها
۱	ویژگی‌های لایه رویینی خاک: توزیع اندازه ذرات، مقدار کربن آلی و مقدار کربنات کلسیم خاک
۲	توزیع اندازه ذرات خاک به همراه مشخصه‌های پستی و بلندی و پوشش گیاهی: توزیع اندازه ذرات خاک، شیب، جهت شیب، ارتفاع و NDVI
۳	۱+۲

### شاخص‌های ارزیابی

از ضریب همبستگی اسپیرمن ( $r$ )، میانگین مربعات خطای نرمال شده (NMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین هندسی نسبت خطا (GMER) و انحراف معیار هندسی نسبت خطا (GSDER) برای بررسی کارایی مدل‌های مختلف استفاده شد (۳۰).

$$NMSE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{s^2} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \quad (2)$$

$$GMER = \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \frac{\hat{y}_i}{y_i}\right) \quad (3)$$

$$GSDER = \exp\left[\left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\ln \frac{\hat{y}_i}{y_i} - \ln GMER\right)^2\right)^{0.5}\right] \quad (4)$$

که در این روابط،  $y_i$ : مقادیر اندازه گیری شده،  $\hat{y}_i$ : مقادیر پیش بینی شده،  $\bar{y}_i$ : میانگین مقادیر اندازه گیری شده و  $n$ : تعداد کل مشاهدات،  $S^2$ : واریانس.

### نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک منطقه مورد بررسی که برای ایجاد توابع انتقالی

و توابع پیش بینی فضایی مقاومت برشی لایه رویین خاک به کار رفته است، در جدول ۳ آمده است. بر اساس توزیع اندازه ذرات خاک، بافت غالب خاک شامل لوم رسی، لوم سیلتی، لومی و لوم رسی سیلتی است. کربن آلی خاک بین ۰/۰۸ تا ۲/۰۲ درصد و NDVI به ترتیب دارای حداقل، حداکثر، متوسط و میانه صفر، ۰/۳۶، ۰/۲۶ و ۰/۲۷ می‌باشد، که بیان کننده درصد پوشش گیاهی بین صفر (در مراتع تخریب شده) تا ۶۰ درصد (در مراتع) می‌باشد. مقدار زیاد کربنات کلسیم خاک به دلیل وجود مواد مادری مارن غنی شده از گچ و آهک و وجود افق کلسیک در منطقه می‌باشد که دارای کربنات کلسیم زیادی است. شیب منطقه بین صفر تا ۷۳ درصد با متوسط ۱۹/۵۶ درصد می‌باشد، که نشان دهنده پستی و بلندی زیاد منطقه می‌باشد.

### مقاومت برشی لایه رویین در منطقه مورد بررسی

مقاومت برشی لایه رویین خاک تحت تاثیر مدیریت های نادرست همچون چرای بی رویه، چرای زودهنگام، سوزاندن بوته‌ها و شخم در جهت شیب دستخوش تغییر قرار گرفت. آزمون نرمالیته کولموگروف-اسمیرنوف نشان داد که مقاومت برشی رویین خاک دارای توزیع نرمال می‌باشد. اختلاف معنی داری (در سطح آماری ۵ درصد) بین حداقل و متوسط مراتع تخریب شده با مراتع وجود دارد (جدول ۴).

جدول ۳ - محاسبه‌های آماری ورودی‌ها و خروجی توابع انتقالی و توابع پیش بینی فضایی خاک

متغیرهای مستقل و وابسته	متوسط	میانه	انحراف معیار	حداقل	حداکثر
درصد سیلت	۴۴/۸	۴۶/۳۷	۸/۳۹	۱۶/۴	۶۰/۸
درصد شن	۲۹/۷۲	۲۷/۶۵	۱۱/۵۶	۶/۷۳	۶۴/۰۵
درصد کربن آلی	۰/۸۷	۰/۸۵	۰/۳۸	۰/۰۸	۲/۰۲
درصد کربنات کلسیم	۱۶/۳۷	۱۲/۵	۱۱/۹۲	۰/۵	۶۲
ارتفاع (متر)	۲۴۱۱	۲۴۰۶	۱۲۴/۲۳	۲۰۹۰	۲۹۴۰
درصد شیب	۱۹/۵۶	۱۴/۹۵	۱۹/۲۵	۰	۷۳
جهت شیب (درجه)	۱۶۱	۱۷۵	۱۰۶/۹۹	۰	۳۵۴/۵۶
NDVI	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۰۴	۰	۰/۳۶

می‌باشد. شیب و NDVI از جمله عوامل خاکساز می‌باشند و بر شدت هوازدگی خاک و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک اثر می‌گذارند. با ترکیب همه ورودی‌ها با هم (مدل ۳) ضریب همبستگی بیشتری حاصل گردید.

MAE و NMSE (جدول ۶) همان روند ضریب همبستگی را نشان می‌دهند، به گونه ای که کمترین NMSE و MAE با بیشترین ضریب همبستگی به‌دست آمد. متوسط هندسی خطا (GMER)، نشان دهنده متوسط مقاومت برشی خاک می‌باشد. اگر GMER مقاومت برشی تخمین شده بیشتر از ۱ باشد نشان دهنده این می‌باشد که مقاومت برشی خاک بیشتر از میزان واقعی برآورد شده است. اگر GMER کمتر از ۱ باشد نشان دهنده این است که مقاومت برشی خاک کمتر از میزان واقعی برآورد شده است. مقادیر GMER (جدول ۵) نشان دهنده این مطلب است که اکثر توابع ایجاد شده، مقاومت برشی خاک را بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌کنند. مقادیر GMER از مدل ۱ به طرف مدل ۳ کاهش یافته و به سمت ۱ میل نمود. انحراف معیار هندسی نسبت خطا (GSDER)، نشان دهنده انحراف از میانگین است، در صورتی که GSDER برابر با ۱ شود، برآورد کاملاً دقیق است. میزان GSDER روند GMER را تأیید می‌نماید به طوری که از مدل ۱ به طرف مدل ۳ میزان GSDER به سمت ۱ میل می‌نماید.

برازش مقادیر برآوردشده مقاومت برشی لایه رویین خاک در مقابل اندازه‌گیری شده آن در نمودار ۱:۱ برای هر سه مدل نشانگر برتری SSPFs (مدل ۲ و ۳) بر PTFs (مدل ۱) می‌باشد (شکل ۳). و نشان دهنده این است که مقاومت برشی رویین خاک دارای تغییرپذیری زیادی است و رابطه بین مقاومت برشی و پارامترهای زودیافت غیر خطی است.

با توجه به پژوهش‌های انجام شده، حد بالایی مقدار مقاومت برشی لایه رویین خاک، ۲۰ کیلو پاسکال برای خاک های طبیعی می‌باشد. اگرچه سله های لایه رویینی و خاک های تخریب شده دارای مقاومت برشی بالاتر از ۲۰ کیلو پاسکال هستند (۱۷). در منطقه مورد بررسی، مقاومت برشی لایه رویین خاک در مراتع و مراتع تخریب شده دارای تغییرپذیری زیادی (جدول ۴) است که می‌تواند به دلیل تغییرات خاکدانه‌ها در گروه های بافتی مختلف و کاربری های متفاوت باشد.

کاهش مقاومت برشی در مراتع تخریب شده در مقایسه با مراتع به دلیل تخریب خاکدانه‌ها (به‌وسیله شخم و تردد دام) و کاهش کربن آلی و ریشه گیاهی (به دلیل چرای بی رویه و سوزاندن بوته ها) می‌باشد. شخم مراتع باعث تخریب خاکدانه‌ها می‌شود (۵) و رواناب به راحتی ذرات ریز را از مناطق مرتفع به طرف مناطق پست حمل می‌نماید. بنابراین مقاومت برشی لایه رویین خاک در مناطق بالادست به دلیل از دست رفتن خاک و تجمع سنگریزه کاهش یافته و در پایین دست به دلیل تشکیل سله افزایش می‌یابد (مقادیر بزرگتر از ۲۰ کیلو پاسکال).

#### برآورد مقاومت برشی لایه رویین خاک

تخمین مقاومت برشی لایه رویین خاک با مدل‌های مختلف به وسیله رگرسیون چند متغیره خطی در جدول ۵ و ۶ آمده است. با کاربرد توزیع اندازه ذرات، کربن آلی و کربنات کلسیم خاک (مدل ۱) به عنوان ویژگی‌های زودیافت در مقایسه با سایر مدل‌ها ضریب همبستگی کمتری به‌دست آمد. افزودن شیب و NDVI به همراه ویژگی‌های توزیع اندازه ذرات خاک (مدل ۲)، باعث افزایش ضریب همبستگی گردید. ضریب همبستگی از مدل ۱ به طرف مدل ۳ افزایش یافت، که این نشان دهنده رابطه معنی دار شیب با توزیع اندازه ذرات خاک و به تبع آن با مقاومت برشی لایه رویین خاک

جدول ۴ - مقاومت برشی لایه رویین خاک (بر حسب کیلو پاسکال) در کاربری های مختلف در منطقه مورد نظر

متغیرهای مستقل و وابسته	متوسط	میان	انحراف معیار	حداقل	حداکثر
مراتع تخریب شده	b5/26	3/06	5/95	b1/22	a31/63
مراتع	a9/13	6/63	6/58	a2/04	a26/7

در هر ستون حروف متفاوت در سطح آماری ۵ درصد دارای اختلاف معنی دار می‌باشند.

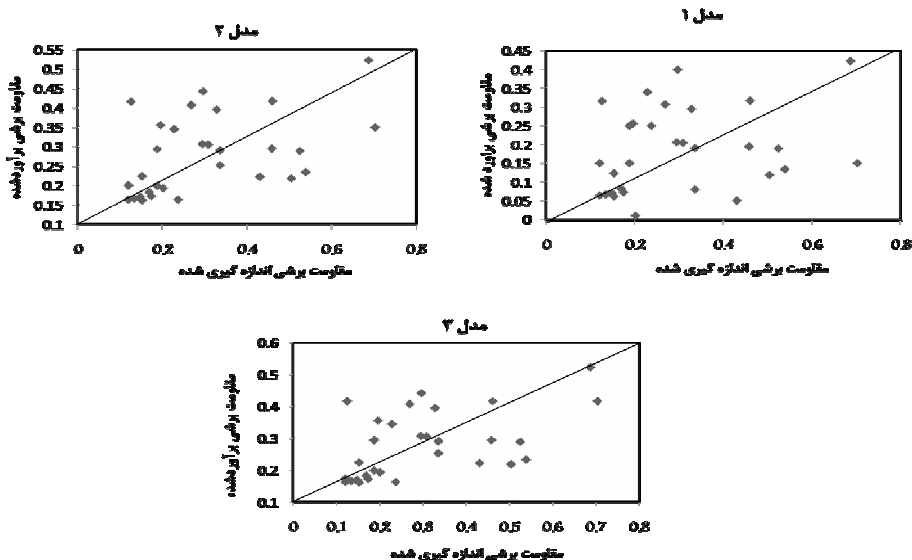
جدول ۵ - مدل های رگرسیونی برای پیش بینی مقاومت برشی لایه رویین خاک

مدل	مدل پیش بینی مقاومت برشی رویین خاک	R <sup>2</sup>
۱	SSS = 0.17 + 0.29 % Sand + 0.36 % OC + 0.19 % CaCO <sub>3</sub>	R <sup>2</sup> = 3.24
۲	SSS = -0.13 + 0.621 % Clay - 0.93 % Slope + 61.95 NDVI	R <sup>2</sup> = 22.09
۳	SSS = -0.541 + 0.17 % Clay + 0.33 % CaCO <sub>3</sub> - 1.04 % Slope + 52.81 NDVI	R <sup>2</sup> = 27.04

SSS: مقاومت برشی لایه رویین خاک; Sand: درصد شن; OC: درصد کربن آلی; CaCO<sub>3</sub>: درصد کربنات کلسیم; Slope: درصد شیب; Clay: درصد رس; NDVI: شاخص پوشش گیاهی

جدول ۶ - کارایی مدل های رگرسیونی برای پیش بینی مقاومت برشی لایه رویین خاک

مدل	r	NMSE	MAE	GMR	GSDER
۱	۰/۱۸	۰/۷۵	۰/۱۵	۱/۵۵	۱/۲۲
۲	۰/۴۷	۰/۶۸	۰/۱۴	۱/۴۲	۱/۱۹
۳	۰/۵۲	۰/۶۶	۰/۱۲	۱/۳۳	۱/۱۳



شکل ۳- مقاومت برشی اندازه گیری شده و برآورد شده

### نتیجه گیری

اند. اثر غیرمستقیم رس، کربنات کلسیم، مشخصه های پستی و بلندی و پوشش گیاهی روی مقاومت برشی لایه رویین خاک و قابلیت دسترسی به آنها در تفکیک پذیری کم با استفاده از روش های پیشرفته سنجش از دور و داده های چند طیفی هوایی، استفاده از توابع انتقالی و توابع پیش بینی فضایی را در مقیاس زمین نما مناسب تر می نماید.

نتایج این پژوهش نشان می دهد که تخریب اراضی به طور معنی داری مقاومت برشی لایه رویین خاک را کاهش داده است. با کاربرد مشخصه های پستی و بلندی و پوشش گیاهی به همراه ویژگی های فیزیکی خاک به عنوان ورودی مدل ها تخمین مقاومت برشی لایه رویین خاک بهبود یافت. شیب، NDVI، کربنات کلسیم و رس به عنوان عوامل موثر بر مقاومت برشی لایه رویین خاک شناخته شده

### منابع

- ۱- بی نام. مطالعات جامع منطقه حفاظت شده شیدا. ۱۳۸۶. مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی شهرکرد.
- ۲- وفائیان م. ۱۳۷۶. خواص مهندسی خاک، نشر ارکان اصفهان.
- 3- Bachmann J., Contreras K., Hartge K.H., and Macdonald R. 2006. Comparison of soil strength data obtained in situ with penetrometer and with vane shear test. *Soil and Tillage Research*, 87: 112-118.
- 4- Brunori F., Penzo M.C., and Torri D. 1989. Soil shear strength: its measurement and soil detachability. *Catena*, 16: 59-71.
- 5- Filho C.C., Lourenco A., Guimaraes M.D.F., and Fonseca I.C.B. 2002. Aggregate stability under different soil management systems in a red Latosol in the state of Parana, Brazil. *Soil and Tillage Research*. 65: 45- 51.
- 6- Franti T.G., Laflen, J.M., and Watson D.A. 1999. Predicting soil detachment from high-discharge concentrated flow. *Transactions of the ASAE*, 42: 329-335.
- 7- Fredlund D.G., Morgenstem N.R., and Widger R.A. 1978. The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotech Journal*. 16: 121-139.
- 8- Gee G.W., and Bauder J.W. 1986. Particle size analysis. In: *Methods of Soil Analysis: Part 1* (ed. A. Klute), pp.

- 383-411. *Agronomy Handbook No 9*, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI.
- 9- Ghebreyessus Y.T., Gantzer C.J., Alberts E.E., and Lentz R.W. 1994. Soil erosion by concentrated flow: shear stress and bulk density. *Transactions of the ASAE*, 37: 1791- 1797.
  - 10- Giménez R., and Govers G. 2002. Flow detachment by concentrated flow on smooth and irregular beds. *Soil Science Society of American Journal*, 66: 1475- 1483.
  - 11- Gunn R.H., and Aldrick J.M. 1988. *Australian Soil and Land Survey Handbook: Guidelines for Conducting Surveys*. Inkata Press, Melbourne.
  - 12- Hirata S., Yao S., and Nishida K. 1990. Multiple regression analysis between the mechanical and physical properties of cohesive soils. *Soils and Foundations*, 30: 91-108.
  - 13- Indian Space Applications Centre (ISRO). Ahmedabad-380 015, 2007. Data Products Software Division, Signal and Image Processing Group, SAC/ISRO, Ahmadabad – 380 015, Government of India.
  - 14- Krishnamurthy M. 1983. Incipient motion of cohesive soils. *Proceedings of the Conference on Frontiers in Hydraulic Engineering*, New York, PP. 96- 101.
  - 15- Lagacherie P., and Mcbratney A.B. 2006. Chapter 1 spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives fordigital soil mapping, *Developments in Soil Science*, 31: 3-22.
  - 16- Le´Onard J., and Richard G. 2004. Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength. *Catena*, 57: 233-249.
  - 17- Léonard J., Perrier E., and Rajot J.L. 2004. Biological macropores effect on runoff and infiltration: a combined experimental and modelling approach. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104: 277-285.
  - 18- Lillesand T.M., and Keifer W. 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation*, John Wiley & Sons, New York.
  - 19- Merz W., and Bryan R. 1993. Critical conditions for rill initiation on sandy loam brunisols: laboratory and field experiments in southern Ontario, Canada. *Geoderma*, 57: 357-385.
  - 20- Miao L., and Yin Z. 1999. Shear strength of unsaturated soils. *Rock and Soil Mechanics*, 20: 1-6.
  - 21- Nelson D.W., and Sommers L.P. 1986. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: *Methods of Soil Analysis: Part 2* (ed.A.L. Page), pp.539-579. *Agronomy Handbook No 9*, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI.
  - 22- Nelson R.E. 1982. Carbonate and gypsum. In: *Methods of Soil Analysis: Part I* (ed.A.L. Page), pp. 181-197. *Agronomy Handbook No 9*, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI.
  - 23- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., Mccool D.K., and Yoder D.C. 1997. Predicting soil erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S.Department of Agriculture, *Agriculture Handbook*.
  - 24- Rauws G., and Govers G. 1988. Hydraulic and soil mechanical aspects of till generation on agricultural soils. *Journal of Soil Science*, 39: 111-124.
  - 25- SAS Institute Inc. 1999. *SAS/STAT User’s Guide*. Ver. 8.0. SAS Institute Inc., Cary, NC.
  - 26- Soil Survey Staff. 2006. *Keys to Soil Taxonomy*. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
  - 27- Torri D., Sfalanga M., and Chisci G. 1987. Threshold conditions for incipient rilling. *Catena*, 8: 97-105.
  - 28- Wischmeier W.H., Johnson C.B., and Cross B.V. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, 26: 189-193.
  - 29- World soil resources reports. 2006. *World Reference Base for Soil Resources*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
  - 30- Wo’sten J.H.M., Pachepsky Ya.A., and Rawls W.J. 2001. Pedotransfer functions: Bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251: 123-150.
  - 31- Zimbone S.M., Vickers A., Morgan R.P.C., and Vella P. 1996. Field investigation of different techniques for measuring surface soil shear strength. *Soil Technology*, 9: 101-111.



## Estimation Surface Soil Shear Strength by Pedo-Transfer Functions and Soil Spatial Prediction Functions

B. Khalil Moghadam<sup>1\*</sup>- M. Afyuni<sup>2</sup>- A. Jalalian<sup>3</sup>- K.C. Abbaspour<sup>4</sup>- A.A. Dehghani<sup>5</sup>

Received:23-6-2010

Accepted:24-10-2010

### Abstract

Surface soil shear strength is an effective parameter in soil erosion and runoff modeling, and known as soil erodibility index. This study was conducted to investigate and predict soil shear strength in central Zagros region using multiple linear regressions (MLR). The study site was selected in rangeland and degraded-rangeland landuse with an area of 23562 ha. Based on the maps of geology, topography, landuse and soil capability, 18 Land Unit Tracts (LUT) was created. Supervised random sampling was used to collect samples in every land unit. A total of 120 samples were collected in triplicates to determine sample variability in each LUT. Soil samples were collected from the 0-3 cm of soil depth. Routinely measured (available) parameters included particle size distribution, soil organic carbon, CaCO<sub>3</sub> in addition to slope, aspect; elevation and normalized difference vegetation index (NDVI) were used. Three MLR models were tested and investigated for soil shear strength in this study. The performances of the different models were evaluated using spearman's correlation coefficient (r) between the observed and the estimated values, normalized mean square error (NMSE), mean absolute error (MAE), geometric mean of error ratio (GMER) and geometric standard deviation of the error ratio (GSDER). Results showed that land degradation significantly reduced surface soil shear strength. Addition of slope, aspect, elevation and NDVI to soil attributes as input parameters improved the performance criteria for soil shear strength.

**Keywords:** Surface soil shear strength, Soil erodibility, Central Zgros

1- Assistance Professor of Soil Sciences, Khuzestan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Ahvaz  
(\*- Corresponding Author Email: moghaddam623@yahoo.ie)

2,3- Professors, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology

4- EWAG, Swiss Federal Institute for Aquatic Science and Technology

5- Assistance Professor, Department of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources