

## مدل سازی پایداری خاکدانه‌ها به‌عنوان شاخصی از فرسایش پذیری خاک با استفاده از پارامترهای ژئومورفومتریک

جواد خنیفر<sup>۱</sup>، عطااله خادم الرسول<sup>۲\*</sup> و هادی عامری خواه<sup>۳</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد فیزیک و حفاظت خاک دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۲- استادیار گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۳- مربی گروه خاکشناسی دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۲۶	<p>پایداری خاکدانه‌ها یکی از مهم‌ترین خصوصیات فیزیکی و ساختمانی موثر بر میزان فرسایش پذیری خاک و انتقال رسوب می‌باشد. این پژوهش با هدف مدل‌سازی رگرسیونی پایداری خاکدانه‌ها در ارتباط با ویژگی‌های زود یافت خاک و توپوگرافی در حوضه آبخیز دهدز در شمال شرق استان خوزستان مورد بررسی قرار گرفت. به منظور انجام این پژوهش خصوصیات توپوگرافیکی شامل ارتفاع، جهت شیب، سایه زنی، انحناء مسطح، انحناء قائم، انحناء حداکثر، جریان تجمعی، شاخص خیزی توپوگرافیکی و شاخص انتقال رسوب از مدل رقومی ارتفاع (DEM) با وضوح مکانی ۳۰ متر استخراج گردیدند. همچنین پارامترهای پایداری خاکدانه‌ها، درصد کربن آلی و بافت خاک در کاربری‌های مرتع و جنگل به روش‌های استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد. نتایج این پژوهش نشان داد که بین پارامترهای ژئومورفولوژیکی و پایداری خاکدانه‌ها همبستگی معنی‌داری وجود داشت. همچنین نتایج مدل‌سازی بیانگر آن است که مدل‌های رگرسیونی در کاربری‌های مرتع و جنگل منطقه‌ی مورد مطالعه، به ترتیب ۷۵ و ۷۰ درصد از تغییرات مکانی پایداری خاکدانه‌ها را به کمک داده‌های توپوگرافی و ویژگی‌های خاک توجیه می‌نمایند. در حالی که مدل‌های خوشه‌بندی-رگرسیونی برای خوشه‌ی اول و دوم به ترتیب ۷۷ و ۸۲ درصد از تغییرات مکانی پایداری خاکدانه‌ها را در محدوده‌ی مورد مطالعه تبیین نمودند (RMSE خوشه اول و دوم به ترتیب ۰/۹۳ و ۰/۶۲ بود). در مجموع نتایج حاصله امکان استفاده از پارامترهای ژئومورفومتري را در برآورد پایداری خاکدانه‌ها تایید می‌نماید.</p>
پذیرش نهایی: ۱۳۹۸/۰۳/۱۲	
<b>کلمات کلیدی:</b>	
مدل سازی،	
فرسایش خاک،	
مدل رقومی ارتفاع (DEM)،	
ژئومورفومتري،	
شاخص‌های توپوگرافیکی	
* عهده دار مکاتبات	
Email: a.khademalrasoul@scu.ac.ir	

### مقدمه

که بارزترین شکل تخریب خاک محسوب می‌شود و سالانه حجم قابل توجهی از رسوبات را تولید و حمل می‌نماید. فرسایش خاک غالب‌ترین فرآیند ژئومورفیک

یکی از مهم‌ترین مشکلات و چالش‌های زیست محیطی در سطح جهان پدیده‌ی فرسایش خاک است

بر نرخ هوازدهی خاک‌ها، پوشش گیاهی و فرسایش خاک اثر می‌گذارند و بدین ترتیب تأثیری غیر مستقیم بر ساختمان خاک دارند (۳). ویژگی‌های توپوگرافی را می‌توان به کمک روش‌های مدرن از جمله ژئومورفومتری کمی سازی نمود (۱۲). ژئومورفومتری زیر مجموعه‌ای از علم ژئومورفولوژی است و هدف اساسی آن استخراج پارامترهای سطح زمین مانند ویژگی‌های مورفومتریکی، هیدرولوژیکی و اقلیمی به واسطه یک سری عملیات‌های ریاضی و کامپیوتری از روی مدل رقومی ارتفاعی (DEM) می‌باشد. مطالعات ژئومورفولوژیکی شامل بررسی اطلاعات کیفی و کمی زمین‌نماها<sup>۵</sup> و لندفرم‌ها<sup>۶</sup> می‌باشد (۱۶). از جمله این اطلاعات کمی می‌توان به ویژگی‌های توپوگرافیکی اولیه، ثانویه و ترکیبی اشاره کرد. این ویژگی‌ها مهم‌ترین خصوصیات سطحی زمین می‌باشند که بر جریان انرژی، حرکت رواناب، رسوب، توزیع آب در یک حوضه و همچنین فرسایش خاک اثر می‌گذارند (۲۱). ویژگی‌های کمی توپوگرافیکی (پارامترهای ژئومورفولوژیکی) از مدل‌های رقومی ارتفاع (DEM) قابل محاسبه هستند و می‌توانند در مطالعات آبخیزداری و ارائه راهکارهای حفاظتی و مدیریتی خاک حائز اهمیت باشند. گبین و همکاران<sup>۷</sup> (۱۰) طی پژوهشی ارتباط نزدیک توپوگرافی با بافت خاک را گزارش نمودند. پیرسون و مولا<sup>۸</sup> (۱۵) اثر موقعیت شیب را بر پایداری خاکدانه مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین مقادیر شاخص پایداری خاکدانه‌ها در یک زمین‌نما وجود دارد و مقادیر این شاخص در موقعیت‌های پایین‌تر شیب، بزرگ‌تر از قسمت‌های فوقانی زمین‌نما می‌باشد. شاخص‌های مختلفی برای تعیین کمی پایداری خاکدانه‌ها وجود دارد که می‌توان به میانگین وزنی قطر

سطح زمین است که منجر به کاهش باروری خاک و افزایش بار رسوب در منابع آبی می‌گردد (۷)، بنابراین ارزیابی خطر فرسایش خاک در حوضه‌های آبخیز از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در این ارتباط، یکی از شاخص‌های مهمی که به منظور ارزیابی حساسیت خاک<sup>۱</sup> نسبت به فرسایش مورد استفاده قرار می‌گیرد، فرسایش‌پذیری خاک<sup>۲</sup> است (۷ و ۲۲). فرسایش‌پذیری خاک یکی از شش فاکتور معادله‌ی جهانی فرسایش خاک (USLE)<sup>۳</sup> می‌باشد (۱۸). این شاخص به طور گسترده در پیش‌بینی فرسایش خاک جهت توصیف حساسیت ذاتی یک خاک مشخص به فرسایش آبی استفاده می‌شود. به بیان دیگر فرسایش‌پذیری خاک شاخصی است که میزان حساسیت ذرات خاک به کنده شدن از بستر و حمل به وسیله‌ی عوامل فرسایشی را به صورت کمی بیان می‌کند. اندازه‌گیری شاخص فرسایش‌پذیری خاک وقت‌گیر و هزینه‌بر است، لذا توسط ویژگی‌های زودبافت خاک که دارای همبستگی بالایی با شاخص فرسایش‌پذیری می‌باشند، برآورد می‌گردد. پایداری خاکدانه‌ها با فرسایش‌پذیری خاک رابطه‌ی قوی دارد و عاملی تعیین‌کننده و مؤثر بر فرآیند فرسایش و انتقال رسوب است (۱۵). با توجه به محدودیت‌هایی که در اندازه‌گیری شاخص فرسایش‌پذیری خاک وجود دارد، لذا پایداری خاکدانه‌ها به عنوان شاخصی از میزان حساسیت خاک به رواناب و فرسایش معرفی شده است (۱). خاکدانه‌ها عبارت از گروهی از ذرات اولیه رس، شن و سیلت است که پیوستگی‌شان (توسط مواد آلی و رس) به یکدیگر بیش از پیوستگی آن‌ها به ذرات خاک اطراف این مجموعه می‌باشد (۳). توپوگرافی یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر پایداری خاکدانه‌ها است. ویژگی‌های توپوگرافی (مانند درجه‌ی شیب، جهت شیب و انحناء)

4- Digital elevation model, DEM

5- Landscape

6- Landform

7- Gobin *et al.*

8- Pierson and Mulla

1- Soil susceptibility

2- Soil erodibility (K)

3- Universal soil loss equation, USLE

مطالعاتی را انواع گون‌ها و گراس‌های یک ساله تشکیل داده‌اند.

تعداد ۵۰ نمونه خاک سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متری) به صورت کاملاً تصادفی از منطقه مورد مطالعه نمونه‌برداری شد. پس از آماده‌سازی اولیه نمونه‌ها، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) به روش یودر<sup>۴</sup> (۲۰)، بافت خاک به روش هیدرومتری (۹) و کربن آلی به روش والکی-بلک اندازه‌گیری شد (۱۷). در این پژوهش استخراج پارامترهای توپوگرافیکی از DEM بر اساس الگوریتم‌های ارائه شده در نرم‌افزارهای ArcGIS 10.3 و SAGA 6.3.0 صورت گرفت. ویژگی‌های توپوگرافیکی به شاخص‌های اولیه و ثانویه تقسیم‌بندی می‌شوند. شاخص‌های اولیه به طور مستقیم از DEM محاسبه شده و برای توصیف مورفومتری و پارامترهای سطحی دامنه‌ها و آبراهه‌ها و همچنین برای طبقه‌بندی لندفرم‌ها مانند دشت‌ها، تپه‌ها و آبراهه‌ها قابل استفاده هستند. شاخص‌های ثانویه از ترکیب دو یا چند پارامتر اولیه حاصل می‌شوند و در توصیف و کمی کردن تغییرات مکانی فرآیندهای رخ داده در زمین‌نما نقش مهمی دارند. شاخص خیسی توپوگرافیکی (TWI) و شاخص انتقال رسوب (STI) دو شاخص ثانویه مورد استفاده در این پژوهش می‌باشند که روابط ریاضی آنها از ترکیب دو پارامتر اولیه گرادیان شیب و جریان تجمعی بدست می‌آید (۱۹). پارامترهای توپوگرافیکی مورد استفاده در این پژوهش (۸ و ۱۸) در جدول ۱ ارائه شده است. نقشه‌های تمامی این پارامترها با فرمت رستر و با وضوح مشابه با DEM تهیه شد، سپس با استفاده از ابزار Extraction نرم افزار ArcGIS مقادیر پیکسل‌های هم‌ارز با نقاط نمونه‌برداری استخراج گردید. مدل رقومی ارتفاع منطقه مطالعاتی از مدل رقومی ارتفاع SRTM<sup>۵</sup> با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استخراج شد.

خاکدانه‌ها<sup>۱</sup> (MWD)، میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها<sup>۲</sup> (GWD) و مقدار رس قابل پراکنش در آب<sup>۳</sup> (WDC) (WDC) اشاره نمود. روش‌های موجود جهت تعیین این شاخص‌ها زمان‌بر، دشوار و استانداردسازی آن‌ها مشکل است (۲). با توجه به مشکلات روش‌های تعیین شاخص‌های پایداری خاکدانه به ویژه در مقیاس‌های بزرگ مانند یک حوضه آبخیز، لذا ایجاد مدلی که بتواند از طریق داده‌های زودیافت، پایداری خاکدانه‌ها را برآورد کند، بسیار کارآمد است و صرفه اقتصادی بسیاری نیز به دنبال خواهد داشت. این پژوهش در این راستا و با هدف پیش‌بینی میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) به‌عنوان شاخصی از پایداری خاکدانه‌ها و همچنین پیش‌بینی میزان فرسایش‌پذیری خاک از ویژگی‌های زودیافت توپوگرافی و خاک در بخشی از حوضه آبخیز دهدز در استان خوزستان مورد بررسی قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

محدوده‌ی مورد مطالعه با وسعت ۲۰ هزار هکتار در شمال شرق استان خوزستان و در محدوده‌ی شهر دهدز و بین طول‌های جغرافیایی ۵۰° ۰۸' تا ۵۰° ۲۰' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۱° ۳۹' تا ۳۱° ۵۰' شمالی واقع شده است (شکل ۱). از لحاظ زمین‌شناسی در این منطقه واحدهای سنگ-چینه‌ای متعلق به دوران سوم در قالب سازندهای جهرم-آسماری به چشم می‌خورند. متوسط بارندگی سالانه‌ی منطقه و میانگین دمای سالانه‌ی آن به ترتیب ۵۶۰ میلی‌متر و ۱۹ درجه‌ی سانتیگراد است (آمار هواشناسی ایستگاه دهدز سال ۲۰۱۷-۲۰۱۲). بر اساس سیستم طبقه‌بندی آمریکایی، رژیم‌های رطوبتی و حرارتی منطقه مورد مطالعه به ترتیب زیریک و ترمیک می‌باشد. همچنین پوشش گیاهی تپیک در منطقه

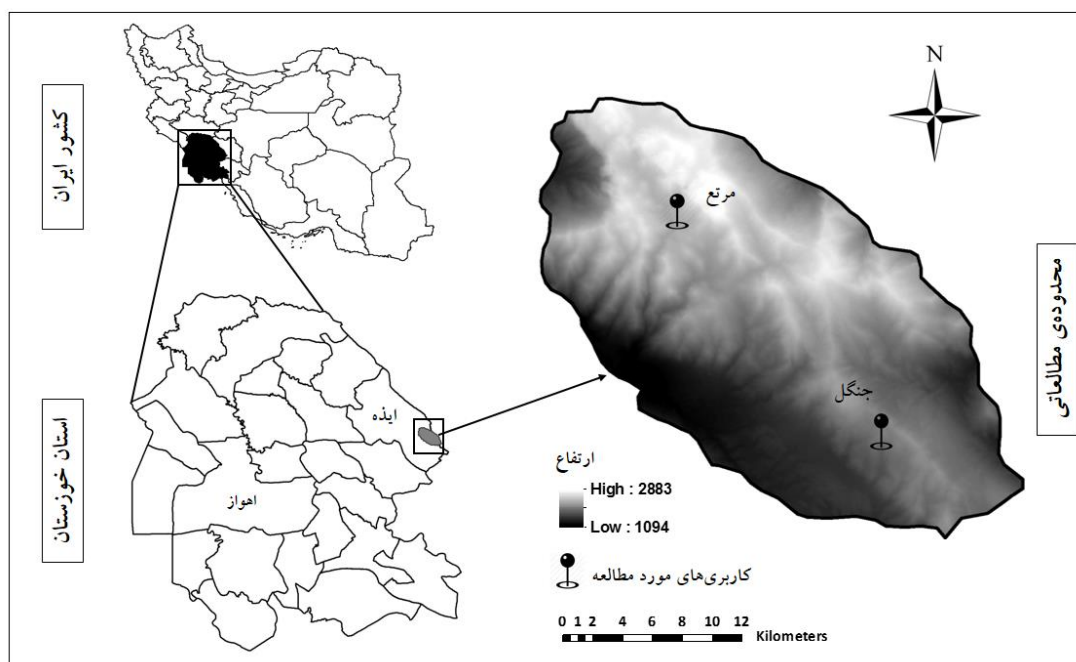
4- Yoder

5- Shuttle radar topographic mission

1- Mean weight diameter, MWD

2- Geometric mean diameter, GMD

3- Water dispersible clay, WDC



شکل (۱) موقعیت مکانی منطقه مطالعاتی  
Figure (1) Location of the study area

و ۳۰ درصد از مجموعه‌ی داده‌ها استفاده شد. اعتبارسنجی مدل ارائه شده با استفاده از دو شاخص جذر میانگین مربعات خطا<sup>۵</sup> (RMSE) و میانگین خطا<sup>۶</sup> (ME) انجام گردید. شاخص ME مقدار اریب پیش‌بینی را نشان می‌دهد و شاخص RMSE نیز بیانگر میزان دقت پیش‌بینی است. مقادیر شاخص‌های فوق در بهترین حالت (نا اریبی) باید تا حد امکان کوچک و نزدیک به صفر باشد بیان ریاضی این شاخص‌ها به صورت زیر است:

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \right]^{0.5}$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)$$

در معادله‌های فوق  $y_i$  مقدار اندازه‌گیری شده و  $\hat{y}_i$  مقدار پیش‌بینی شده برای متغیر مورد نظر از داده‌های اعتبارسنجی است. در این مطالعه به منظور بررسی تأثیر طبقه‌بندی داده‌ها

داده‌های SRTM از سایت ارث اکسپلور<sup>۱</sup> (وب‌سایت زمین‌شناسی ایالات متحده‌ی آمریکا) با فرمت GeoTIFF دانلود شده و سپس با سیستم تصویر UTM (WGS\_1984\_Zone\_39N) ذخیره شده‌اند. همچنین عملیات پیش پردازش DEM با هدف حذف ناهنجاری‌های آن (خطاهای نقشه ارتفاعی DEM) مانند گودی‌های کوچک<sup>۲</sup> به وسیله‌ی افزونه‌ی ARC Hydro در محیط ArcGIS 10.3 انجام شد. پس از بررسی وضعیت نرمال بودن داده‌ها به وسیله‌ی شاخص‌های توزیعی چولگی و کشیدگی و همچنین آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (ضمناً برای نرمال‌سازی متغیرهایی که فاقد توزیع نرمال می‌باشند، بر اساس روش تبدیل جانسون<sup>۳</sup> عمل گردید)، از روش رگرسیون خطی چندگانه بهترین مجموعه‌ها<sup>۴</sup> جهت انجام مدل‌سازی استفاده شد. برای توسعه مدل خاک-زمین‌نما و ارزیابی عملکرد آن به ترتیب از ۷۰

5- Root mean square error  
6- Mean error

1- Earth Explorer, <https://earthexplorer.usgs.gov>  
2- Sink  
3- Johnson  
4- Best subsets

حساسیت به فرسایش، ویژگی های خاک و متعاقباً پایداری خاکدانه‌ها در موقعیت‌های مختلف زمین نما متفاوت می‌شود.

همان‌گونه که نتایج آمار توصیفی موجود در جدول ۲ نشان می‌دهد، از بین متغیرهای مورد مطالعه، بیشترین تغییرات مربوط به مواد آلی با ضریب تغییرات ۵۰ درصد و کمترین تغییرات مربوط به سیلت با ضریب تغییرات ۱۳/۵ درصد می‌باشد

پیرسون و مولانا<sup>۳</sup> (۱۵) نیز با بررسی‌هایی که بر روی تغییرپذیری پارامترهای مختلف انجام دادند کمترین ضریب تغییرات را در بین خصوصیات خاک برای جزء سیلت به- دست آوردند. نتایج توصیف آماری پارامترهای ژئومورفومتریک مستخرج از DEM در جدول ۳ ارائه شده است. بررسی پارامترهای این جدول به شناخت بهتر ژئومورفولوژی نقاط نمونه برداری کمک می‌کند.

کمترین مقدار شاخص انتقال رسوب منطقه مطالعاتی ۱/۵ و بیشترین میزان آن حدود ۶۲/۳۱ می‌باشد. این شاخص با در نظر گرفتن واگرایی و همگرایی جریان، نمایانگر پتانسیل فرسایش پذیری سطوح به فرسایش‌های صفحه‌ای و شیاری است که فرم‌های غالب فرسایش آبی در حوضه‌های آبخیز محسوب می‌شوند و شناسایی مکان و گستردگی وقوع آنها در راستای اتخاذ بهترین شیوه‌های مدیریتی حفاظتی بسیار تاثیر گذار می‌باشد.

عموماً سطوح محدب زمین به دلیل ممانعت از تمرکز جریان آب دارای مقادیر کمتری از شاخص انتقال رسوب هستند. کمتر بودن متوسط شاخص انحناء قائم نقاط از مقدار صفر نیز می‌تواند نشان‌دهنده‌ی این مسئله باشد که در اکثر نقاط به‌واسطه‌ی وجود سرایشی‌های ملایم، جریان آب از سرعت کمتری برخوردار است. در شکل ۲ الف نقشه‌ی پراکنش شاخص انتقال رسوب<sup>۴</sup> در محدوده‌ی مورد مطالعه نمایش داده شده است.

بر مدل‌سازی رگرسیونی، ابتدا داده‌ها استانداردسازی شد و سپس از الگوریتم خوشه‌بندی k-means و معیار فاصله‌ای اقلیدسی برای طبقه‌بندی داده‌ها با توجه به تعداد نمونه‌ها و کاربری‌های مورد بررسی استفاده شد. روش k-means یک الگوریتم یادگیری نظارت نشده<sup>۱</sup> است که در آن مجموعه داده‌ها به k خوشه<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی شده و نقاط داده به طور تصادفی به این خوشه‌ها تعلق می‌گیرند. مراحل اجرای این الگوریتم بدین شرح است: در مرحله‌ی نخست k مرکز اولیه برای k خوشه از میان داده‌ها به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. در مرحله‌ی دوم هریک از نمونه‌ها با توجه به فاصله‌ی آنها از مرکز خوشه‌بندی می‌شوند، بدین معنی که هر نمونه به خوشه‌ای تعلق می‌گیرد که به آن نزدیک‌تر باشد. پس از اینکه همه‌ی نمونه‌ها خوشه‌بندی شدند، مراکز جدیدی برای خوشه‌ها تعیین می‌شود که این مراکز جدید میانگین نمونه‌های موجود در هر خوشه است. الگوریتم به همین روال ادامه می‌یابد تا اینکه محل مرکز خوشه‌ها تغییر چندانی نسبت به محل پیشین خود نداشته باشد. آنالیزهای آماری در محیط نرم‌افزار SYSTAT 13.2 صورت گرفت.

### نتایج و بحث

نتایج توصیف آماری و ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک و پارامترهای ژئومورفومتری اندازه‌گیری شده در دو کاربری مورد مطالعه، شامل شاخص‌های حداقل، حداکثر، میانگین، ضریب تغییرات و چولگی به ترتیب در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است. مقدار ضریب تغییرات پارامتر پایداری خاکدانه برابر با ۲۱ درصد می‌باشد (جدول ۲). یکی از دلایل این میزان تغییرات را می‌توان تأثیر پستی و بلندی منطقه بر فرآیندهای هیدرولوژیکی زمین نما از جمله انتقال سطحی و زیرسطحی آب و سایر مواد دانست که منجر به تفاوت فرآیند فرسایش و رسوب گذاری و همچنین خصوصیات خاک در موقعیت‌های مختلف زمین نما می‌شود (۸). به دلیل تأثیر خصوصیات توپوگرافی به‌ویژه شیب و انحناء بر ویژگی‌های هیدرولوژیکی خاک در موقعیت‌های مختلف زمین نما،

3- Pierson and Mulla  
4- Sediment transport index

1- Unsupervised learning  
2- Cluster

جدول (۱) پارامترهای توپوگرافیکی مورد بررسی در این مطالعه (۸ و ۱۸)

Table (1) Topographical parameters in the study area

Formula/فرمول	Description/توضیحات	واحد / unit	Parameter/ پارامتر	شاخص/ Index
DEM	بلندی از سطح دریا / Altitude from the sea level	m	Elevation/(E) ارتفاع	
$\arctan \sqrt{p^2 + q^2}$	گرادیان شیب / Slope gradient	°	Slope /(G) گرادیان شیب Gradient	
$\arctan \left(\frac{q}{p}\right)$	آزیموت شیب / Azimuth	°	Aspect/(A) جهت شیب	
$\frac{1 - p \sin \theta \cot \psi - q \cos \theta \cot \psi}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} \sqrt{1 + (\sin \theta \cot \psi)^2 + (\cos \theta \cot \psi)^2}}$	معیاری از روشنایی سطح زمین / Index of light	-	Hillshade/(H) سایه زنی	اولیه / Primary
$-\frac{q^2 r - 2 p q s + p^2 t}{\sqrt{(p^2 + q^2)^3}}$	نرخ تغییرات جهت شیب / Slope aspect variation	1/m	انحناء مسطح $(k_p)$ / Plan curvature	
$-\frac{p^2 r + 2 p q s + q^2 t}{(p^2 + q^2) \sqrt{(1 + p^2 + q^2)^3}}$	نرخ تغییرات شیب / Slope variations	1/m	انحناء قائم $(k_p)$ / Profile curvature	
$H + \sqrt{H^2 - k}$	انحنای مقطع اصلی دارای بیشترین مقدار انحناء / A curvature of a principal section with the highest value of curvature	1/m	انحناء حداکثر $(k_{max})$ / Maximal curvature	
الگوریتم جهت جریان FD8/FD8	منطقه بالادست منحنی میزان مؤثر در	1/m	جریان تجمع / (FA) Flow accumulation flow	

...کننده، همواره امکان‌پذیری پایدار می‌باشد. مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل

تولید جریان/Upslope area

ادامه جدول (۱) پارامترهای توپوگرافیکی مورد بررسی در این مطالعه (۸ و ۱۸)

Table (1) Topographical parameters in the study area

$SCA \times \tan G$	بیانگر توزیع مکانی مناطق اشباع و رطوبت خاک / Spatial distribution of saturated area	-	شاخص خیزی Topographic / (TWI) wetness index	ثانویه / Secondary
$\left(\frac{SCA}{22.13}\right)^m \cdot \left(\frac{\sin G}{0.0896}\right)^n$	نمایانگر الگوهای مکانی فرآیند فرسایش و رسوب / Soil erosion- deposition places	-	شاخص حمل رسوب Sediment / (STI) transport index	

$\theta$  و  $\psi$  به ترتیب آزیموت و ارتفاع زاویه‌ای خورشیدی / Solar azimuth angle and Solar elevation angle

$$H = -\frac{(1+p^2)r-2pqs+(1+p^2)t}{2\sqrt{(1+p^2+q^2)^3}}, K = -\frac{rt-s^2}{(1+p^2+q^2)^2}, SCA = FA \times Cell\ size, m = 0.6, n = 1.3$$

Partial derivatives of function /  $t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}, s = \frac{\partial^2 zp}{\partial z \partial y}, r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}, p = \frac{\partial z}{\partial x}, q = \frac{\partial z}{\partial y}$  می‌باشند:  $z = f(x, y)$  جزئی از تابع

جدول (۲) آمار توصیفی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک در منطقه ی مورد مطالعه (n = ۵۰)

Table (2) Descriptive statistics of soil physical and chemical properties in the study area (n=50)

متغیر/ Variable	واحد/ unit	حداقل/ Minimum	حداکثر/ Maximum	میانگین/ Average	ضریب تغییرات cv/(%)	چولگی/ Skewness
پایداری خاکدانه/ Aggregate stability	mm	0.79	2.65	1.94	21.0	-0.93
شن/ Sand	%	7.75	40.0	19.41	45.0	0.64
سیلت/ Silt	%	36.0	67.5	52.50	13.5	-0.001
رس/ Clay	%	19.5	45.5	28.09	21.2	0.93
مواد آلی/ OM	%	0.67	5.66	2.14	50.0	1.06

جدول (۳) آمار توصیفی ویژگی های ژئومورفومتری در منطقه ی مورد مطالعه (n = ۵۰)

Table (3) Descriptive statistics of geomorphometry parameters in the study area (n=50)

متغیر/ Variable	واحد/ unit	حداقل/ Minimum	حداکثر/ Maximum	میانگین/ Average	ضریب تغییرات cv (%)	چولگی/ skewness
ارتفاع/ Elevation	m	1515	2358	2089	12	-0.42
گردیان شیب/ Slope Gradient	°	2.24	26.29	14	42	0.09
جهت شیب/ Aspect	°	94.97	323.13	211	25	-0.36
سایه زنی/ Hillshade	-	106	215.0	169.14	16	-0.16
انحناء مسطح/ k <sub>p</sub> Plan curvature	1/m	-0.06	0.04	0.001	1808	-0.38
انحناء قائم/ k <sub>v</sub> Profile curvature	1/m	-0.01	0.006	-0.001	446	-0.65
انحناء حداکثر/ k <sub>max</sub> Maximal curvature	1/m	-0.004	0.01	0.002	139	0.26
جریان تجمع/ Flow accumulation	-	1625.14	476106.75	42095	196	3.81
شاخص خیسگی توپوگرافی/ Topographical wetness index	-	5.55	12.16	7.42	20	1.33
شاخص انتقال رسوب/ Sediment transport index	-	1.51	62.31	8.41	113	4.26



شکسته شدن ساختمانی را تحمل کنند. همچنین مواد آلی خاک موجب انسداد و افزایش اعوجاج (تورچواسیته) منافذ می گردد و به همین سبب مواد آلی منجر به افزایش مقاومت خاکدانه‌ها در برابر تنش های آبی می شوند (۵).

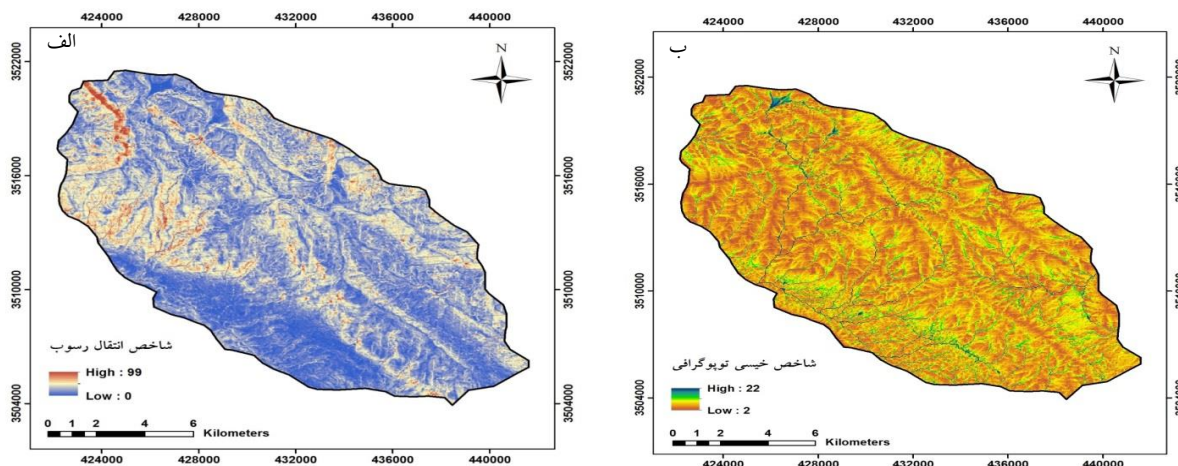
در خاک‌هایی با کانی‌شناسی مشابه و اندازه ذرات یکسان، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها رابطه خطی با کربن آلی خاک دارد (۶). همچنین همبستگی مثبت و معنی‌دار پایداری خاکدانه‌ها با مواد آلی خاک نیز توسط کاناسوراس و همکاران<sup>۲</sup> (۴) گزارش شده است.

ضرایب همبستگی پیرسون بین شاخص پایداری خاکدانه و متغیرهای ژئومورفولوژیکی مورد مطالعه در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌گونه که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، شاخص پایداری خاکدانه (MWD) در منطقه‌ی مورد مطالعه همبستگی منفی و معنی‌داری با متغیر ارتفاع (در سطح ۱ درصد)، شاخص انتقال رسوب (در سطح ۵ درصد) و همبستگی مثبت معنی‌داری با انحناء مسطح (در سطح ۵ درصد) نشان داد. دیگر ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی از جمله شیب، جهت شیب، انحناء حداکثر و قائم، جریان تجمعی و شاخص خیسی توپوگرافیکی با شاخص پایداری خاکدانه (MWD) ارتباط معنی‌داری نشان ندادند. نتایج این پژوهش نشان داد که میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به طور کلی با دو گروه اولیه (انحناء مسطح-Plan curvature) و ثانویه (شاخص حمل رسوب) توپوگرافی دارای همبستگی است که حاکی از تاثیرات عامل توپوگرافی بر روی پایداری خاکدانه‌ها می‌باشد. گرچه پارامتر ارتفاع (D) به هیچ‌یک از گروه‌های ذکر شده تعلق ندارد اما تمامی ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی به نحوی از پارامتر ارتفاع به‌دست می‌آیند و بر اساس نتایج به‌دست آمده، در منطقه‌ی مطالعاتی به موازات افزایش ارتفاع، پایداری خاکدانه‌ها روند کاهشی را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که این نقشه نشان می‌دهد مقدار عددی STI بین ۰ تا ۹۹ متغیر می‌باشد. در این نقشه‌ی رستری (شکل ۲ الف) مقادیر عددی کمتر با رنگ آبی و مقادیر بالا با رنگ قرمز بر روی نقشه نمایان می‌باشند. شاخص STI همانند عامل LS در معادله‌ی جهانی فرسایش خاک، نیز نشان دهنده‌ی پتانسیل فرسایش‌پذیری سطوح بوده لیکن بر خلاف معادله‌ی جهانی فرسایش خاک، رخداد فرسایش خاک را در سطوح ۳ بعدی (3D) مورد بحث قرار می‌دهد. مقادیر پایین STI نشان‌دهنده‌ی رسوب‌گذاری و مقادیر بالای آن نشان‌دهنده‌ی نواحی با خطر بالای فرسایش هستند. بدین ترتیب نقشه STI نشان دهنده‌ی توزیع مکانی مناطق فرسایش و رسوب می‌باشد. نقشه‌ی پراکنده‌ی مکانی شاخص خیسی توپوگرافیکی<sup>۱</sup> در شکل ۲ (ب) ارائه شده است. همان‌گونه که نقشه‌ی پراکنش TWI نشان می‌دهد، مقدار این شاخص برای محدوده‌ی مطالعاتی، بین ۲ تا ۲۲ متغیر است. این شاخص به طور عمده برای بررسی تأثیر عامل توپوگرافی بر روی فرآیندهای هیدرولوژیکی به کار گرفته می‌شود. بر اساس روش محاسباتی شاخص TWI، مقادیر بالای عددی آن نمایانگر گودترین نقاط و خط القعرها بوده و شبکه‌ی آبراه‌ای حاصل از اتصال خط القعر به رنگ آبی در نقشه مشاهده می‌شود که نشان دهنده مکان‌های تجمع جریان می‌باشد که طبیعتاً در این مناطق خطر وقوع فرسایش خاک بالا است. ضرایب همبستگی پیرسون بین شاخص پایداری خاکدانه (MWD) و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۴ ارائه شده است. بین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و ماده‌ی آلی خاک در دو کاربری مورد مطالعه همبستگی مثبت مشاهده شد و کاربری جنگل دارای ضریب همبستگی بالاتر و معنی‌دار بود. گلچین (۱۱) بیان کرد که پایداری خاکدانه‌ها با میزان مواد آلی خاک رابطه‌ی مستقیمی دارد و هر چه درصد مواد آلی خاک بالاتر باشد، پایداری ساختمان خاک بیش‌تر بوده و خاکدانه‌ها بهتر می‌توانند تنش ناشی از خیس شدن سریع و

2- Canasveras et al.

1- Topographic wetness index



شکل (۲) پراکندگی مکانی شاخص انتقال رسوب (الف) و شاخص خیزی توپوگرافی (ب) در منطقه مطالعاتی  
 Figure (2) Spatial distribution of sediment transport index (a) and topographic wetness index (b) in the study area

جدول (۴) ضرایب همبستگی پیرسون بین شاخص پایداری خاکدانه و اجزاء خاک (n=۵۰)

Table (4) Pearson's correlation coefficients between soil aggregate stability and soil components

شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	ماده‌ی آلی OM	پایداری خاکدانه Aggregate stability
0.520**	0.397*	-0.570**	0.164	مرتع/Rangeland
-0.193	0.159	0.044	0.498*	جنگل/Forest
0.080	-0.055	-0.225	0.365**	کل/Total

\* معنی دار در سطح احتمال پنج درصد و \*\* معنی دار در سطح احتمال یک درصد

\*Significant at the probability level of 5% and \*\* Significant at the probability level of 1%

جدول (۵) ضرایب همبستگی پیرسون بین پایداری خاکدانه و متغیرهای ژئومورفولوژیکی (n=۵۰)

Table (5) Pearson s correlation coefficients between soil aggregate stability and geomorphometric parameters

$k_{max}$	H	A	G	D	پایداری خاکدانه / Aggregate stability
-0.166	-0.039	-0.038	-0.210	-0.548**	مرتع/Rangeland
-0.144	0.059	0.125	-0.029	-0.091	جنگل/Forest
-0.145	0.028	0.068	-0.115	-0.322*	کل/Total
STI	TWI	FLOWC	$k_p$	$k_v$	پایداری خاکدانه
0.081	-0.093	-0.210	0.077	-0.176	مرتع/Rangeland
-0.451*	-0.056	-0.070	0.454*	-0.040	جنگل/Forest
-0.291*	-0.056	-0.138	0.292*	-0.102	کل/Total

\* معنی دار در سطح احتمال پنج درصد و \*\* معنی دار در سطح احتمال یک درصد

\*Significant at the probability level of 5% and \*\* Significant at the probability level of 1%

D: ارتفاع، G: شیب، A: جهت شیب، H: سایه زنی،  $k_{max}$ : انحناء حداکثر،  $k_v$ : انحناء قائم،  $k_p$ : انحناء مسطح، FLOWC: جریان تجمعی، TWI: شاخص خیزی توپوگرافی و STI: شاخص حمل رسوب.

برای دو کاربری مرتع و جنگل و همچنین برای کل منطقه‌ی مورد مطالعه انجام شد. معادلات بدست آمده از مدل سازی و نتایج اعتبارسنجی در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج تحلیل رگرسیون خطی چند متغیره برای پایداری خاکدانه‌ها نشان می دهد که مدل توسعه یافته توانسته است ۴۷ تا ۷۵ درصد از تنوع پایداری خاکدانه را در منطقه‌ی مورد مطالعه تبیین نماید. در این مدل علاوه بر ویژگی های خاک، پارامترهای مورفومتریک ارتفاع، جهت شیب، انحناء قائم و سایه زنی به عنوان ویژگی های مهم توپوگرافی نیز وارد مدل شده است. این امر گویای این موضوع است که توپوگرافی از طریق تأثیر بر فرآیندهای هیدرولوژی زمین نما بخشی از تغییرات پایداری خاکدانه‌ها را توجیه می کند.

با توجه به شاخص  $R^2$  می توان بیان نمود که قسمتی از تغییرات شاخص پایداری خاکدانه‌ها (MWD) نمی تواند توسط رگرسیون خطی توجیه شود که این موضوع احتمالاً به دلیل روابطی غیر خطی بین پدیده‌ها می باشد. نکته‌ی قابل توجه این است که مقدار شاخص  $R^2$  دو سایت جنگل و مرتع نسبت به کل منطقه بیشتر می باشد که این امر به دلیل اختلاف قابل توجه شرایط توپوگرافی و پوشش گیاهی این دو سایت مطالعاتی می باشد که در زمان ادغام با یکدیگر موجب کاهش چشمگیر ضریب تبیین می شوند. نتایج اعتبارسنجی مدل‌ها نیز نشان می دهد که مقدار شاخص RMSE نزدیک به صفر می باشد که این امر بیانگر دقت مناسب مدل‌های توسعه یافته در برآورد است. مقدار پایین شاخص MAE نیز مؤید غیر اریبی بودن پیش بینی مدل‌ها می باشد (۱۴).

همان طور که در جدول ۷ مشاهده می شود، معادلات رگرسیونی حاصله برای هر کدام از خوشه‌ها توانستند ۷۷ و ۸۲ درصد از کل تغییرپذیری میانگین وزنی قطر

این پارامتر با الگوهای اقلیمی و گیاهی زمین نما ارتباط مستقیمی دارد. شاخص های انتقال رسوب و انحناء مسطح به عنوان شاخص های فرسایشی خاک تلقی می شوند. نتایج این پژوهش بیانگر آن است که تمایل به افزایش پایداری خاکدانه‌ها با افزایش مقدار پارامتر انحناء مسطح و کاهش شاخص حمل رسوب همراه خواهد بود.

بررسی ها نشان می دهند که عموماً هدر رفت خالص خاک از سلول‌هایی با انحناء مسطح منفی، بیشتر است. به بیانی دیگر، با کاهش انحناء سطح به دلیل تمرکز جریانات آبی، میزان فرسایش خالص خاک بیشتر می شود. شاخص انتقال رسوب نیز نمایش دهنده‌ی پتانسیل فرسایش پذیری سطوح به فرسایش صفحه‌ای و شیاری بوده و سطوح محدب زمین به دلیل ممانعت از تمرکز جریان آب دارای مقادیر کمتری از این شاخص هستند.

زادروا و همکاران<sup>۱</sup> (۲۱) در یک حوضه‌ی آبخیز، شاخص پایداری خاکدانه‌ها را با استفاده از ویژگی های توپوگرافیکی (شیب، انحناء میانگین و مسطح، شاخص خیزی توپوگرافیکی و شاخص انتقال رسوب) بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که پایداری خاکدانه‌ها فقط با شاخص انحناء میانگین (در سطح ۵ درصد) و انحناء مسطح (در سطح ۱ درصد) همبستگی معنی داری دارد. در پژوهش دیگری، جکسیک و همکاران<sup>۲</sup> (۱۳) دریافتند که پایداری خاکدانه‌ها تحت تأثیر معنی دار شاخص های انحناء سطح، انحناء قائم و انحناء کل قرار دارد.

پارامترهای توپوگرافی و ویژگی های خاک شامل رس، سیلت، شن و ماده آلی به عنوان متغیرهای مستقل و شاخص پایداری خاکدانه به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شدند. مدل سازی رگرسیونی به صورت جداگانه

1- Zadorova et al.  
2- Jaksik et al.

خنیفر و همکاران: مدل‌سازی پایداری خاکدانه‌ها به‌عنوان...

خاکدانه‌ها را توجیه نمایند. مقدار بالای ضریب تبیین (تعدیل شده) هر کدام از خوشه‌ها احتمالاً به دلیل همگنی و شباهت زیاد داده‌های درون هر خوشه با یکدیگر است. هر چه ضریب تبیین مدل از مقدار بالاتری برخوردار باشد، نشان‌دهنده‌ی قدرت توضیح‌دهندگی مدل می‌باشد و هر چه مقدار شاخص RMSE برای مدل توسعه یافته کمتر باشد، مدل دقت و قدرت تخمین بالاتری را دارد. با توجه به جدول ۷، هر چند که مدل‌های خوشه‌بندی-رگرسیونی نسبت به مدل‌های رگرسیونی (جدول ۶) از قدرت توضیح‌دهندگی بالاتری برخوردار می‌باشند، اما نسبت به آنها دقت تخمین کمتری دارند. علت این کاهش قدرت تخمین می‌تواند به دلیل تداخل میان عوامل مدیریتی و محیطی مؤثر بر پایداری خاکدانه‌ها در هر کدام از خوشه‌ها در هنگام اعتبارسنجی مدل‌ها باشد.

جدول (۶) مدل‌های رگرسیونی پایداری خاکدانه برای کاربری مرتع و جنگل

Table (6) Regression models of soil aggregate stability for rangeland and forest land use

RMSE	MAE	Adj. R <sup>2</sup>	Regression equation/ معادله‌ی رگرسیون	کاربری / Land use
0.33	0.10	0.75**	$0.65 - 0.72(D) + 0.79(OC) + 1.6(A) + 0.45(k_v) - 1.72(H) - 1.03(\text{Silt})$	مرتع / Rangeland
0.26	0.02	0.70*	$1.52 - 1.09(\text{FLOWC}) + 0.88(OC) + 1.04(A) - 0.86(H) - 0.74(\text{Sand}) - 0.56(\text{Silt})$	جنگل / Forest
0.25	0.06	0.47*	$0.54 + 0.43(OC) - 0.72(D) + 0.95(A) - 0.87(H) - 0.52(G)$	کل / Total

\*معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و \*\*معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد    \*\* Significant at the probability level of 1%    \*Significant at the probability level of 5%

D: ارتفاع، G: شیب، A: جهت شیب، H: سایه‌زنی،  $k_v$ : انحناء قائم، FLOWC: جریان تجمعی، STI: شاخص حمل رسوب، OC: کربن آلی، Sand: درصد شن، Silt: درصد سیلت، MAE: میانگین قدر مطلق خطا و RMSE: جذر میانگین مربعات خطا.

جدول (۷) پیش‌بینی پایداری خاکدانه با استفاده از مدل‌های خوشه‌بندی - رگرسیونی

Table (7) Prediction of soil aggregate stability using clustering-regression models

RMSE	MAE	Adj. R <sup>2</sup>	Regression equation/ معادله‌ی رگرسیون	خوشه / Cluster
0.93	0.75	0.77**	$1.48(\text{FLOWC}) + 0.64(D) - 1.51(K_{max}) + 1.29(k_p) - 1.36(\text{Silt}) - (TWI)$	1
0.62	0.38	0.82**	$-1.39(\text{FLOWC}) - 0.73(D) + 1.13(OC) - 0.95(K_{max}) + 1.25(k_v) + 0.57(STI) + 0.67(H) - 0.80(G)$	2

\*\*Significant at the probability level of 1%

\*معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

D: ارتفاع، G: شیب، A: جهت شیب، H: سایه‌زنی،  $k_{max}$ : انحناء حداکثر،  $k_v$ : انحناء قائم،  $k_p$ : انحناء مسطح، FLOWC: جریان تجمعی، TWI: شاخص خیزی توپوگرافیکی، STI: شاخص حمل رسوب، Silt: درصد سیلت، OC: کربن آلی، MAE: میانگین قدر مطلق خطا و RMSE: جذر میانگین مربعات خطا.

### نتیجه‌گیری

مناطق بحرانی و مکان‌های وقوع فرسایش و رسوب‌گذاری دارای کارایی بالایی می‌باشند و از این نقشه‌ها می‌توان به‌عنوان ابزاری مدیریتی جهت تعیین مناطق بحرانی و اتخاذ شیوه‌های حفاظتی مناسب در آن مکان‌ها استفاده نمود. همچنین نتایج نشان داد که خوشه‌بندی داده‌ها با استفاده از الگوریتم K-means منجر به افزایش ضریب تبیین ( $R^2$ ) مدل‌های رگرسیونی توسعه یافته شده است به نحوی که مدل‌های رگرسیونی ۷۵ و ۷۰ درصد و مدل‌های خوشه‌بندی-رگرسیونی ۷۷ و ۸۲ درصد از کل تغییرات پایداری خاکدانه‌ها را تبیین نموده‌اند ولیکن بر اساس آماره‌های به دست آمده مدل‌های رگرسیونی دارای دقت تخمین بیشتری در برآورد شاخص پایداری خاکدانه‌ها در مقایسه با مدل‌های خوشه‌بندی-رگرسیونی می‌باشند. در مجموع نتایج این پژوهش استفاده از پارامترهای ژئومورفومتریک را جهت برآورد پایداری خاکدانه‌ها و لذا میزان فرسایش‌پذیری خاک تایید می‌نماید.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که میزان پایداری خاکدانه‌ها که توسط میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) ارزیابی گردید دارای همبستگی بالایی با مقدار ماده آلی و درصد رس خاک می‌باشد و با افزایش این دو، مقدار MWD و در نتیجه پایداری خاکدانه‌ها افزایش می‌یابد که این نتیجه جایگاه حفظ و افزایش مواد آلی خاک را جهت تحقق اهداف مدیریت پایدار خاک نشان می‌دهد. بین پایداری خاکدانه‌ها و برخی از پارامترهای ژئومورفولوژیکی همبستگی و ارتباطات معنی‌داری وجود دارد که این موضوع موید این مطلب است که توپوگرافی به‌عنوان عاملی مهم و موثر در تشکیل خاک‌ها و ایجاد ویژگی‌های متفاوت در آنها محسوب می‌شود و به همین دلیل منجر به تفاوت در میزان پایداری خاکدانه‌ها در موقعیت‌های مختلف زمین‌نما شده است. همچنین استفاده از شاخص‌های توپوگرافیکی همچون STI و TWI بالاخص به صورت نقشه‌های توزیع مکانی، در شناساندن

### منابع

1. Barthes, B. and Roose, E. 2002. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion validation at several levels. *Catena*, 47(2002):133-149.
2. Besalatpour, A.A., Ayoubi, S., Hajabbasi, M.A., Mosaddeghi, M., and Schulin, R. 2013. Estimating wet soil aggregate stability from easily available properties in a highly mountainous watershed. *Catena*, 111: 72-79.
3. Bronick, C.J. and Lal, R. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1): 3-22.
4. Canasveras, J.C., Barrón, V., Del Campillo, M.C., Torrent, J., and Gómez, J.A. 2010. Estimation of aggregate stability indices in Mediterranean soils by diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma*, 158(1-2): 78-84.

5. Caron, J., Espindola, C.R., and Angers, D.A. 1996. Soil structural stability during rapid wetting: influence of land use on some aggregate properties. *Soil Science Society of America Journal*, 60(3): 901-908.
6. Carter, M.R. 1992. Influence of reduced tillage systems on organic matter, microbial biomass, macro-aggregate distribution and structural stability of the surface soil in a humid climate. *Soil and Tillage Research*, 23(4): 361-372.
7. Deng, Z.Q., de Lima, J.L. and Jung, H.S. 2008. Sediment transport rate-based model for rainfall-induced soil erosion. *Catena*, 76(1): 54-62.
8. Florinsky, I. 2016. *Digital terrain analysis in soil science and geology*. Second ed., Academic Press, Amsterdam, PP: 7-68.
9. Gee, G.W. and Bauder, J.W. 1986. Particle-size Analysis. In Klute A. (Ed). *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy, Madison, PP: 383–441.
10. Gobin, A., Campling, P., and Feyen, J. 2001. Soil-landscape modelling to quantify spatial variability of soil texture. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 26(1): 41-45.
11. Golchin, a. 2017. *Soil organic matter*. Jahad Daneshgahi press, Zanjan. 98 pp.
12. Gopp, N.V., Nechaeva, T.V., Savenkov, O.A., Smirnova, N.V., and Smirnov, V.V. 2017. The methods of geomorphometry and digital soil mapping for assessing spatial variability in the properties of agrogray soils on a slope. *Eurasian Soil Science*, 50(1): 20-29.
13. Jakšík, O., Kodešová, R., Kubiš, A., Stehlíková, I., Drábek, O., and Kapička, A. 2015. Soil aggregate stability within morphologically diverse areas. *Catena*, 127: 287-299.
14. Odeha, I.O.A., McBratney, A.B., and Chittleborough, D.J. 1994. Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model. *Geoderma*, 63(3-4): 197-214.
15. Pierson, F.B. and Mulla, D.J. 1990. Aggregate stability in the Palouse region of Washington: effect of landscape position. *Soil Science Society of America Journal*, 54(5): 1407-1412.
16. Renschler, C.S. and Harbor, J. 2002. Soil erosion assessment tools from point to regional scales—the role of geomorphologists in land management research and implementation. *Geomorphology*, 47(2): 189-209.

17. Walkley, A. and Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1): 29-38.
18. Wang, G.G., Gartner, X., Liu, H., and Anderson, A. 2001. Uncertainty assessment of soil erodibility factor for revised universal soil loss equation. *Catena*, 46: 1-14.
19. Wilson, J.P. and Gallant, J.C. 2000. Digital terrain analysis. In Wilson, J. P. and Gallant, J. C. (Eds). *Terrain analysis: principles and applications*. John Wileys and Sons, New York, PP: 1-22.
20. Yoder, R.E. 1936. A direct method of aggregate analyses and a study of the physical nature of erosion losses. *Agronomy Journal*, 28:337–351.
21. Zadorova, T., Jakšík, O., Kodešová, R. and Penížek, V. 2011. Influence of terrain attributes and soil properties on soil aggregate stability. *Soil Water Research*, 6(3): 111-119.
22. Zhang, H.Y., Shi, Z.H., Fang, N.F., and Guo, M.H. 2015. Linking watershed geomorphic characteristics to sediment yield: Evidence from the Loess Plateau of China. *Geomorphology*, 234: 19-27.