

Modelling soil aggregate stability as an index of soil erodibility using geomorphometric parameters

J. Khanifar¹, A. Khademalrasoul^{*2} and H. Amerikhah³

1. Master Student of Soil Science Department, Shahid Chamran University of Ahvaz. Iran
2. Assistant Professor of Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz. Iran
3. Scientific Member of Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz. Iran

Received: 15 February 2019

Accepted: 2 June 2019

Abstract

Introduction In recent decades, the potential of soil erosion as a serious threat against sustainable land management (SLM) and soil sustainability has been recognized. Furthermore, human-induced soil erosion, which has led to harmful environmental effects and transportation of sediment to water bodies, is accompanied by loss of nutrients and eutrophication. Therefore, there is a need to focus on soil erosion outcomes to prevent its environmental impacts and mitigate the negative outcomes of soil erosion. One of the most important factors that affect the amount of erosion and sediment yield is soil erodibility (K-factor in USLE), which is an index of soil susceptibility. Moreover, K-factor is one of the 6 effective factors on soil erosion in universal soil loss equation and mainly representative of soil properties. Considering the difficulty of soil erodibility measurement, we need to find an easily measurable parameter. In this study, soil aggregate is used as an index of soil erodibility factor. Generally, topography alters from one slope to another, which conduces to dramatic changes of soil erosion intensity. Therefore, topography, in terms of geomorphometric parameters, is effective on soil erosion processes. Morphometric analysis and soil erosion modeling are robustly interconnected. Also, digital elevation model (DEM) is a base to extract geomorphometric parameters and the quality of DEM is effective on geomorphometric characteristics.

Methods and material This study was conducted with the aim of modelling the aggregate stability using multivariate linear regression and K-means clustering algorithm as an index of soil erodibility factor. For this purpose, a study area of approximately 20000 hectares was selected, which is located in Dehdez, northeast of Khuzestan province. Based on the climatologic data, this area has xeric and thermic regimes. The main land uses in this area include rangeland, where crop cover is mostly grasses, and forest. Based on the purpose of this study and degree of homogeneity, the soil sampling



was accomplished using completely randomized method. From each land use, 25 soil samples were collected (the depth of soil sampling was 0-30 cm). Then, the soil samples were prepared and the mean weight diameter (MWD), as an index of soil aggregate stability, was measured in at least 3 replications using wet sieving, soil texture with hydrometer method and organic carbon content. In another part of this project, the digital elevation model (DEM) of the study area was extracted from SRTM (Shuttle radar topographic mission) with the spatial resolution of 30 m. After DEM preparation, all preprocessing operations were performed on DEM using Arc Hydro extension in ArcGIS 10.3 software in order to remove sinks and enhance the quality of DEM. In the next step, the primary and secondary geomorphometric parameters were extracted from this DEM using ArcGIS 10.3 and SAGA 6.3. softwares. Finally, multivariate linear regression and K-means clustering models were developed between geomorphometric parameters and soil properties, as dependent variables, and aggregate stability, as independent variable, to achieve statistical indices in order to evaluate developed models.

Results and discussion Our results showed that there was a significant correlation between some geomorphometric parameters and soil aggregate stability. Therefore, there is a possibility to apply these parameters in order to parameterize aggregate stability. Moreover, the results of the modelling indicate that regression models, using geomorphometric parameters and soil properties, were able to cover approximately 75 and 70 percent of spatial variation of aggregate stability in the rangeland and forest land use of the study area, respectively. On the other hand, clustering-regression models were able to explain 77 and 82 percent of the spatial variation of the aggregates stability in the first and second cluster, respectively. Also, the results of validation of developed models in this study showed that the root mean square error (RMSE) of regression models for rangeland and forest land use was 0.33 and 0.26, respectively, and RMSE of clustering-regression models for first and second clusters was 0.93 and 0.62, respectively. Considering the effect of soil aggregate stability on soil erodibility factor (K-factor) and the difficulty of soil erodibility measurement, these developed models are useful tools to predict soil erosion. Based on the distribution of soil erosion and deposition using STI (Sediment transport index) and TWI (Topographical wetness index), these models might be able to select and apply the best management practices in the critical areas. Indeed, STI map and TWI map are indices of spatial distribution of soil erosion and deposition in the studied area, and thus we are able to control soil erosion and its negative outcomes using these geomorphometric indices.

Conclusion Regarding the difficulty of soil erodibility measurement, we used some indices to simplify this process. Our results illustrated that it is possible to develop some regression models in order to estimate aggregate stability as an index of soil erodibility. In summary, our results confirm that geomorphometric parameters are easily available parameters based on the DEM to predict soil erodibility.

Keywords: *Digital elevation model (DEM), Geomorphometry, Modelling, Soil erosion, Topographical indices*

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

جواد خنیفر^۱، عطااله خادم الرسول^{۲*} و هادی عامری خواه^۳

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

چکیده	تاریخچه مقاله
<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 تجمع، 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 ژئومورفومتری را در برآورد پایداری خاکدانه‌ها تایید می‌نماید.</p>	<p>دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۲۶ پذیرش نهایی: ۱۳۹۸/۰۳/۱۲</p> <p>کلمات کلیدی: مدل سازی، فرسایش خاک، مدل رقومی ارتفاع (DEM)، ژئومورفومتری، شاخص‌های توپوگرافیکی</p> <p>* عهده دار مکاتبات Email: a.khademalrasoul@scu.ac.ir</p>

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^۵ و لندفرم‌ها^۶ 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^۷ (۱۰) طی پژوهشی ارتباط نزدیک توپوگرافی با بافت خاک را گزارش نمودند. پیرسون و مولا^۸ (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^۱ نسبت به فرسایش مورد استفاده قرار می‌گیرد، فرسایش‌پذیری خاک^۲ است (۷ و ۲۲). فرسایش‌پذیری خاک یکی از شش فاکتور معادله‌ی جهانی فرسایش خاک (USLE)^۳ 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^۴ (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^۵ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استخراج شد.

خاکدانه‌ها^۱ (MWD)، میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها^۲ (GWD) و مقدار رس قابل پراکنش در آب^۳ (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 زودپافت، 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) به-عنوان شاخصی از پایداری خاکدانه‌ها و همچنین پیش‌بینی میزان فرسایش‌پذیری خاک از ویژگی‌های زودپافت توپوگرافی و خاک در بخشی از حوضه‌ی 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

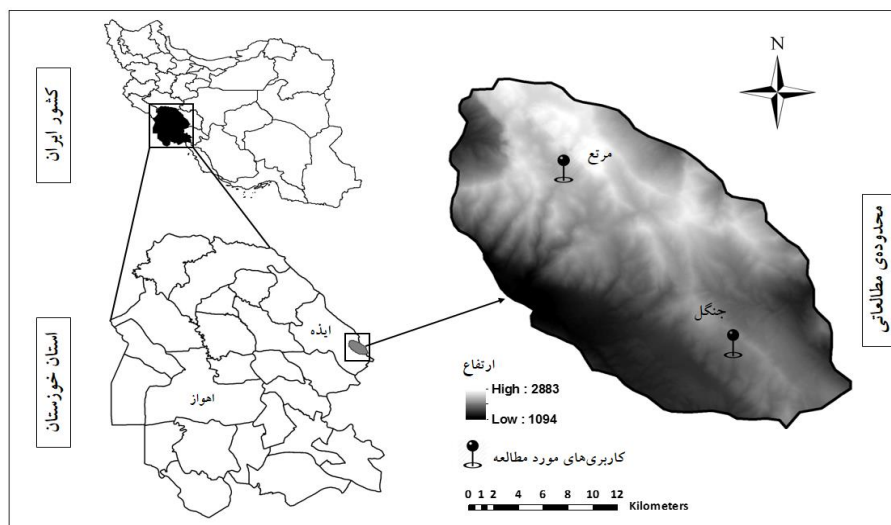
4- Yoder

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

(RMSE) و میانگین خطا^۶ (ME) انجام گردید. شاخص ME مقدار اریب پیش بینی را نشان می دهد و شاخص RMSE نیز بیانگر میزان دقت پیش بینی است. مقادیر شاخص های فوق در بهترین حالت (نا اریبی) باید تا حد امکان کوچک و نزدیک به صفر باشد بیان ریاضی این شاخص ها 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 معادله های فوق \hat{y}_i مقدار اندازه گیری شده و y_i مقدار پیش بینی شده برای متغیر مورد نظر از داده های اعتبارسنجی است. در این مطالعه به منظور بررسی تأثیر طبقه بندی داده ها بر مدل سازی رگرسیونی، ابتدا داده ها استانداردسازی شد و سپس از الگوریتم خوشه بندی k-means و معیار فاصله ای اقلیدسی برای طبقه بندی داده ها با توجه به تعداد نمونه ها و کاربری های مورد بررسی استفاده شد. روش k-means یک الگوریتم یادگیری نظارت نشده^۷ است که در آن

داده های SRTM از سایت ارث اکسپلور^۱ (وب سایت زمین شناسی ایالات متحده آمریکا) با فرمت GeoTIFF دانلود شده و سپس با سیستم تصویر UTM (WGS_1984_Zone_39N) ذخیره شده اند. همچنین عملیات پیش پردازش DEM با هدف حذف ناهنجاری های آن (خطاهای نقشه ارتفاعی DEM) مانند گودی های کوچک^۲ به وسیله افزونه ARC Hydro در محیط ArcGIS 10.3 انجام شد. پس از بررسی وضعیت نرمال بودن داده ها به وسیله شاخص های توزیعی چولگی و کشیدگی و همچنین آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (ضمناً برای نرمال سازی متغیرهایی که فاقد توزیع نرمال می باشند، بر اساس روش تبدیل جانسون^۳ عمل گردید)، از روش رگرسیون خطی چندگانه بهترین مجموعه ها^۴ جهت انجام مدل سازی استفاده شد. برای توسعه مدل خاک-زمین نما و ارزیابی عملکرد آن به ترتیب از ۷۰ و ۳۰ درصد از مجموعه ی داده ها استفاده شد. اعتبارسنجی مدل ارائه شده با استفاده از دو شاخص جذر میانگین مربعات خطا^۵

1- Earth Explorer, <https://earthexplorer.usgs.gov>

2- Sink

3- Johnson

4- Best subsets

5- Root mean square error

6- Mean error

7- Unsupervised learning

تغییرات مربوط به سیلت با ضریب تغییرات ۱۳/۵ درصد می باشد؛ پیروسون و مولاً^۲ (۱۵) نیز با بررسی هایی 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 می کند.

کمترین مقدار شاخص انتقال رسوب منطقه مطالعاتی ۱/۵ و بیشترین میزان آن حدود ۶۲/۳۱ می باشد. این شاخص با در نظر گرفتن واگرایی و همگرایی جریان، نمایانگر پتانسیل فرسایش پذیری سطوح به فرسایش های صفحه ای و شیاری است که فرم های غالب فرسایش آبی در حوضه های آبخیز محسوب می شوند و شناسایی مکان و گستردگی وقوع آنها در راستای اتخاذ بهترین شیوه های مدیریتی حفاظتی بسیار تاثیر گذار می باشد.

عموماً سطوح محذب 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 می تواند نشان دهنده این مسئله باشد که در اکثر نقاط به واسطه وجود سرایشی های ملایم، جریان آب از سرعت کمتری برخوردار است. در شکل ۲ الف نقشه ی پراکنش شاخص انتقال رسوب^۳ در محدوده ی مورد مطالعه نمایش داده شده است.

همان گونه که این نقشه نشان می دهد مقدار عددی STI بین ۰ تا ۹۹ متغیر می باشد. در این نقشه ی رستری (شکل ۲ الف) مقادیر عددی کمتر با رنگ آبی و مقادیر بالا با رنگ قرمز بر روی نقشه نمایان می باشند. شاخص STI همانند عامل LS در معادله ی جهانی فرسایش خاک، نیز نشان دهنده ی پتانسیل فرسایش پذیری سطوح بوده لیکن بر خلاف معادله ی جهانی فرسایش خاک، رخداد فرسایش خاک را در سطوح ۳ بعدی (3D) مورد بحث قرار می دهد.

مجموعه داده ها به k خوشه^۱ تقسیم بندی شده و نقاط داده به طور تصادفی به این خوشه ها تعلق می گیرند. مراحل اجرای این الگوریتم بدین شرح است: در مرحله ی نخست k مرکز اولیه برای k خوشه از میان داده ها به صورت تصادفی انتخاب می شود. در مرحله ی دوم هر یک از نمونه ها با توجه به فاصله ی آنها از مرکز خوشه بندی می شوند، بدین معنی که هر نمونه به خوشه ای تعلق می گیرد که به آن نزدیک تر باشد. پس از اینکه همه ی نمونه ها خوشه بندی شدند، مراکز جدیدی برای خوشه ها تعیین می شود که این مراکز جدید میانگین نمونه های موجود در هر خوشه است. الگوریتم به همین روال ادامه می یابد تا اینکه محل مرکز خوشه ها تغییر چندانی نسبت به محل پیشین خود نداشته باشد. آنالیزهای آماری در محیط نرم افزار SYSTAT 13.2 صورت گرفت.

نتایج و بحث

نتایج توصیف آماری ویژگی های فیزیکی - شیمیایی خاک و پارامترهای ژئومورفومتری اندازه گیری شده در دو کاربری مورد مطالعه، شامل شاخص های 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 می باشد (جدول ۲). یکی از دلایل این میزان تغییرات را می توان 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 موقعیت های مختلف زمین نما می شود (۸). به دلیل تأثیر خصوصیات توپوگرافی به ویژه شیب و انحناء بر ویژگی های هیدرولوژیکی خاک در موقعیت های مختلف زمین نما، حساسیت به فرسایش، ویژگی های خاک و متعاقباً پایداری خاکدانه ها در موقعیت های مختلف زمین نما متفاوت می شود.

همان گونه که نتایج آمار توصیفی موجود در جدول ۲ نشان می دهد، از بین متغیرهای مورد مطالعه، بیشترین تغییرات مربوط به مواد آلی با ضریب تغییرات ۵۰ درصد و کمترین

2- Pierson and Mulla

3- Sediment transport index

1- 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	Primary/اولیه
$\arctan \sqrt{p^2 + q^2}$	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	
$-\frac{q^2 r - 2 p q s + p^2 t}{\sqrt{(p^2 + q^2)^3}}$	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 _v) Profile curvature	
	انحناء، مقطع اصل، دارای، شست		انحناء حداکثر / (k _{max}) Maximal curvature	
	highest value of curvature			
Algorithm of flow direction FD8/FD8	منطقه بالادست منحنی میزان مؤثر در تولید جریان/ Upslope area	1/m	جریان تجمعی / (FA) Flow accumulation flow	
الگوریتم جهت جریان				

...نمودارها به عنوان خاکریزها و همکاران: مدل سازی پایدار خاکریزها به عنوان...

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 خبسی 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 transport / (STI) index	

θ و ψ 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: $z = f(x, y)$ از تابع جزئی‌های مشتق‌های جزئی t, s, r, q, p

جدول (۲) آمار توصیفی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در منطقه‌ی 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

خنیفر و همکاران: مدل سازی پایداری خاکدانه ها به عنوان ...

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 _p Plan curvature	1/m	-0.06	0.04	0.001	1808	-0.38
انحناء قائم/ k _v Profile curvature	1/m	-0.01	0.006	-0.001	446	-0.65
انحناء حداکثر/ k _{max} Maximal curvature	1/m	-0.004	0.01	0.002	139	0.26
جریان تجمع می / 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

پایداری خاکدانه‌ها با مواد آلی خاک نیز توسط کاناسوراس و همکاران^۲ (۴) گزارش شده است.

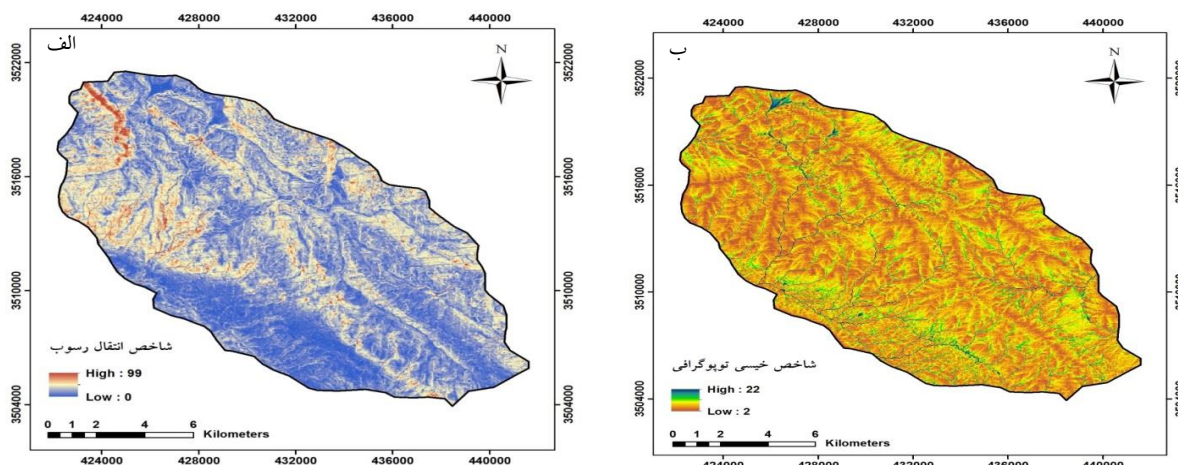
ضرایب همبستگی پیرسون بین شاخص پایداری خاکدانه و متغیرهای ژئومورفولوژیکی مورد مطالعه در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌گونه که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، شاخص پایداری خاکدانه (MWD) در منطقه‌ی مورد مطالعه همبستگی منفی و معنی‌داری با متغیر ارتفاع (در سطح ۱ درصد)، شاخص انتقال رسوب (در سطح ۵ درصد) و همبستگی مثبت 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 خیزی 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. این پارامتر با الگوهای اقلیمی و گیاهی زمین‌نما ارتباط مستقیمی دارد. شاخص‌های انتقال رسوب و انحناء مسطح به عنوان شاخص‌های فرسایشی خاک تلقی می‌شوند. 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.

بررسی‌ها نشان می‌دهند که عموماً هدر رفت خالص خاک از سلول‌هایی با انحناء مسطح منفی، بیشتر است. به بیانی دیگر، با کاهش انحناء مسطح به دلیل تمرکز جریانات آبی، میزان فرسایش خالص خاک بیشتر می‌شود.

مقادیر پایین STI نشان‌دهنده‌ی رسوب‌گذاری و مقادیر بالای آن نشان‌دهنده‌ی نواحی با خطر بالای فرسایش هستند. بدین ترتیب نقشه STI نشان‌دهنده‌ی توزیع مکانی مناطق فرسایش و رسوب می‌باشد. نقشه‌ی پراکندگی مکانی شاخص خیزی توپوگرافیکی^۱ 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 آبراه‌های حاصل از اتصال خط القعر به رنگ آبی در نقشه مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده 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 شکسته شدن ساختمانی را تحمل کنند. همچنین مواد آلی خاک موجب انسداد و افزایش اعوجاج (تورچواسیته) منافذ می‌گردد و به همین سبب مواد آلی منجر به افزایش مقاومت خاکدانه‌ها در برابر تنش‌های آبی می‌شوند (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

خنیفر و همکاران: مدل سازی پایداری خاکدانه ها به عنوان ...



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	ماده ی 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.

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 پیش‌بینی مدل‌ها می باشد (۱۴).

همان‌طور 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 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 می باشد 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 می باشند، اما نسبت به آنها دقت تخمین کمتری دارند. علت این کاهش قدرت تخمین می تواند به دلیل تداخل میان عوامل مدیریتی و محیطی مؤثر بر پایداری خاکدانه‌ها در هر کدام از خوشه‌ها در هنگام اعتبارسنجی مدل‌ها باشد.

شاخص انتقال رسوب نیز نمایش‌دهنده‌ی پتانسیل فرسایش‌پذیری سطوح به فرسایش صفحه‌ای و شیاری بوده و سطوح محذب زمین به دلیل ممانعت از تمرکز جریان آب دارای مقادیر کمتری از این شاخص هستند.

زادروا و همکاران^۱ (۲۱) در یک حوضه‌ی آبخیز، شاخص پایداری خاکدانه‌ها را با استفاده از ویژگی‌های 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 معنی‌داری دارد. در پژوهش دیگری، جکسیک و همکاران^۲ (۱۳) دریافتند که پایداری خاکدانه‌ها تحت تأثیر معنی‌دار شاخص‌های انحناء سطح، انحناء قائم و انحناء کل قرار دارد.

پارامترهای توپوگرافی و ویژگی‌های خاک شامل رس، سیلت، شن و ماده آلی به عنوان متغیرهای مستقل و شاخص پایداری خاکدانه به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شدند. مدل‌سازی رگرسیونی به صورت جداگانه برای دو کاربری مرتع و جنگل و همچنین برای کل منطقه‌ی مورد مطالعه انجام شد. معادلات بدست آمده از مدل‌سازی 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 ویژگی‌های خاک، پارامترهای مورفومتریک ارتفاع، جهت شیب، انحناء قائم و سایه‌زنی به عنوان ویژگی‌های مهم توپوگرافی نیز وارد مدل شده است. این امر گویای این موضوع است که توپوگرافی از طریق تأثیر بر فرآیندهای هیدرولوژی زمین‌نما بخشی از تغییرات پایداری خاکدانه‌ها را توجیه می کند.

1- Zadorova et al.

2- Jaksik et al.

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 ²	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	0.79*	$1.52 - 1.09(\text{FLOWC}) + 0.88(OC) + 1.04(A) - 0.86(H) - 0.74(\text{Sand}) - 0.56(\text{Silt})$	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% and *Significant at the probability level of 5%

D: ارتفاع، G: شیب، A: جهت شیب، H: سایه‌زنی، k_p : 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 ²	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

**معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد **Significant at the probability level of 1%

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.

نتیجه گیری

مناطق بحرانی و مکان‌های وقوع فرسایش و رسوب‌گذاری دارای کارایی بالایی می‌باشند و از این نقشه‌ها می‌توان به عنوان 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 به عنوان 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

References

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. Jakšik, 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., Jakšik, 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.