

## Using Environmental Covariates and Soil Digital Mapping Technique in Predicting Soil Crusting Index of East Azerbaijan Province

Hossein Rezaei<sup>1\*</sup>, Ali Asghar Jafarzadeh<sup>2</sup>, Esmaeil Sheidai-Karkaj<sup>3</sup>, Behzad Mohammadhosseini-Sagayesh<sup>4</sup>, Farshid Pashaeizadeh<sup>4</sup>, Saba Hasani<sup>5</sup>, Farzin Shahbazi<sup>2</sup>

(Received: March 2023      Accepted: October 2023)

### Abstract

Soil crusting is one of the degradation features which causes to decrease the land quality. To fix the crises due to soil crusting, it is therefore needed to identify the degraded areas and improve soil resource management. Since the soil properties have a spatial continuity, providing the digital maps using environmental covariates could be an interesting issue to study the spatial distribution. For this, a total of 107 soil samples were randomly taken over the East Azerbaijan Province, subsequently soil crusting index was calculated based on FAO method. To predict the soil crusting index across the study area, two models i.e., random forests (RF) and multiple linear regression (MLR) within the R programming environment using the data derived from digital elevation model (DEM) (18 indices) as well as remote sensing (eight indices) were evaluated. Results showed that the calculated soil crusting index for the entire study area varied from 0.07 to 2.25. Based on the results, RF was superior to MLR when using DEM-derived data, while MLR was distinguished as a parsimonious model when using RS data. It is concluded that selection of the best-fit model mainly depends on the available soil and covariates data used in modelling. Despite somewhat differences in pixel values between provided maps by the relevant models, the final maps demonstrated a similar trend. Generally, based on the results, the highest soil crusting index was found for west and central part of province, followed by south-eastern and north-eastern areas. The provided maps show that the forest and pasture areas have low value of crusting index, while the cultivated and miscellaneous lands were in the following orders which was consistent with field observations. This research further supports the importance of the digital soil mapping (DSM) technique in soil resources management.

**Keywords:** Crusting index, Digital Soil Mapping, Modeling, Multiple Liner Regression, Random Forest

Rezaei H., Jafarzadeh A.A., Sheidai-Karkaj E., Mohammadhosseini-Sagayesh B., Pashaeizadeh F., Hasani S. and Shahbazi F. 2024. Using Environmental Covariates and Soil Digital Mapping Technique in Predicting Soil Crusting Index of East Azerbaijan Province. *Applied Soil Research*, 12(2): 31-45.

1- Assistant Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

2- Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

3- Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University

4- PhD Student, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

5- Former MSc Student, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

\* Corresponding Author Email: [hosseinrezaei@tabrizu.ac.ir](mailto:hosseinrezaei@tabrizu.ac.ir)

## کاربرد متغیرهای محیطی و تکنیک نقشه‌برداری رقومی خاک در پیش‌بینی شاخص سله بستن خاک‌های استان آذربایجان شرقی

حسین رضائی<sup>۱\*</sup>، علی‌اصغر جعفرزاده<sup>۲</sup>، اسماعیل شیدای کرکج<sup>۳</sup>، بهزاد محمدحسینی سقایش<sup>۴</sup>،  
فرشید پاشائی‌زاده<sup>۴</sup>، صبا حسنی<sup>۵</sup>، فرزین شهبازی<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۶)

### چکیده

تشکیل سله یکی از نمودهای تخریب خاک است که موجب افت کیفیت اراضی می‌شود. رفع چالش‌های ناشی از سله بستن خاک مستلزم شناسایی عرصه‌های تخریب یافته و بهبود مدیریت منابع خاک است. با توجه به اینکه ویژگی‌های خاک دارای پیوستگی مکانی هستند، لذا تهیه نقشه‌های رقومی به کمک متغیرهای محیطی می‌تواند اقدام مؤثری در مطالعات پراکنش مکانی باشد. بدین منظور، تعداد ۱۰۷ نمونه به‌طور تصادفی از سطح استان آذربایجان شرقی تهیه و شاخص سله‌بندی بر اساس روش فائو محاسبه شد. به‌منظور پیش‌بینی شاخص سله‌بندی خاک برای محدوده مورد مطالعه، دو مدل جنگل تصادفی و رگرسیون خطی چندگانه در محیط برنامه‌نویسی R و با کاربرد دو گروه از متغیرهای محیطی مشتق بر مشتقات مدل رقومی ارتفاع (۱۸ شاخص) و شاخص‌های دورسنجی (۸ شاخص) مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت نقشه‌های رقومی با استفاده از مدل برتر تهیه گردید. نتایج نشان داد شاخص سله‌بندی خاک‌های منطقه مورد مطالعه از ۰/۰۷ تا ۲/۲۵ متغیر می‌باشد. همچنین مدل جنگل تصادفی با استفاده از داده‌های مشتقات مدل رقومی ارتفاع و مدل رگرسیون خطی چندگانه با کاربرد شاخص‌های دورسنجی به‌عنوان مدل‌های برتر در پیش‌بینی شاخص سله بستن خاک شناسایی شدند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب مدل برتر بستگی به نوع متغیرهای محیطی و داده‌هایی دارد که در مدل استفاده قرار می‌شوند. علیرغم وجود تفاوت‌های جزئی در مقادیر پیکسل‌های هر دو نقشه مستخرج از مدل‌های برتر معرفی شده، نقشه‌های نهایی دارای روند تقریباً یکسانی هستند. نتایج نشان داد که حداکثر مقدار شاخص سله‌بندی در قسمت‌های غربی و مرکز استان، سپس جنوب شرقی و شمال شرقی استان می‌باشد. نقشه‌های رقومی تهیه شده نشان می‌دهد که شاخص مذکور در اراضی جنگلی و مرتعی دارای حداقل مقدار بوده و اراضی زراعی و متفرقه در رتبه‌های بعدی جای داشتند که با مشاهدات میدانی نیز همخوانی دارد. این تحقیق اهمیت تکنیک نقشه‌برداری رقومی خاک در مدیریت منابع خاک را بیش از پیش نمایان می‌سازد.

**واژه‌های کلیدی:** جنگل تصادفی، رگرسیون خطی چندگانه، سله‌بندی، مدل‌سازی، نقشه‌برداری رقومی خاک

رضائی ح، جعفرزاده ع، شیدای کرکج ا، محمدحسینی سقایش ب، پاشائی‌زاده ف، حسنی ص، شهبازی ف. ۱۴۰۳. کاربرد متغیرهای محیطی و تکنیک نقشه‌برداری رقومی خاک در پیش‌بینی شاخص سله بستن خاک‌های استان آذربایجان شرقی. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۲، شماره ۲. صفحه: ۳۱-۴۵.

۱- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز (مکانبه کننده)

۲- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

۳- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه ارومیه

۴- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

۵- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

\* پست الکترونیکی: [hosseinrezaei@tabrizu.ac.ir](mailto:hosseinrezaei@tabrizu.ac.ir)

## مقدمه

است، زیرا با ارائه اطلاعات ارزشمند از وضعیت خاک در بخش‌های مختلف اراضی باعث حفظ کیفیت خاک‌ها و مقابله با انواع تخریب و هدر رفت آن می‌شوند (Brungard *et al.*, 2015). مطالعات خاک‌شناسی در مقیاس‌های محلی و استانی با توجه به پیوستگی مکانی ویژگی‌ها با مشکلاتی همچون صرف زمان و هزینه بالا همراه می‌باشد که خوشبختانه با معرفی تکنیک نقشه‌برداری رقومی خاک (DSM) توسط مک‌براتنی و همکاران (McBratney *et al.*, 2003) و کاربرد متغیرهای محیطی تحول شگرفی در علم خاک‌شناسی پدید آمده و اخیراً نیز در تحقیقات متعددی مورد استفاده قرار گرفته است. در این راستا متغیرهای محیطی به‌عنوان مولد اطلاعات اولیه خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند (Lagacherie, 2008). در نقشه‌برداری رقومی خاک، اطلاعات مکانی خاک‌ها با استفاده از مشاهدات میدانی و آزمایشگاهی جمع‌آوری و از طریق استنتاج مکانی و غیرمکانی منجر به ایجاد خروجی به‌صورت نقشه رستری تخمین همراه با عدم قطعیت پیش‌بینی می‌شود (Lagacherie *et al.*, 2006). به‌طور کلی متغیرهای محیطی مانند مشتقات مدل رقومی ارتفاع (DEM) و شاخص‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای نماینده فاکتورهای خاک‌سازی هستند که تأثیر ویژگی‌هایی نظیر ژئومورفولوژی و موقعیت خاک در زمین‌نما، تکامل و عمق آن، مقدار و توزیع مکانی رطوبت، توزیع پوشش گیاهی، شرایط توپوگرافی، نوع زمین‌شناسی و اثر انسان را در محاسبات لحاظ می‌نمایند (McBratney *et al.*, 2003; Heuvelink *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2018).

ابزارهای مختلفی برای مدل‌سازی و نقشه‌برداری رقومی خاک استفاده می‌شوند که روش یادگیری ماشین<sup>۱</sup> یک اصطلاح کلی برای مجموعه گسترده‌ای از مدل‌ها همچون مدل‌های جنگل تصادفی<sup>۲</sup> و رگرسیون خطی چندگانه<sup>۳</sup> برای کشف الگوهای موجود در داده‌ها و پیش‌بینی متغیرهای مورد مطالعه خاک است (Witten *et al.*, 2010; Shaker Shahmarbeigloo *et al.*, 2019; Lema *et al.*, 2019). استفاده از نقشه‌های پراکنش مکانی ویژگی‌های خاک و شاخص‌های مستخرج از آن‌ها همچون استعداد سله‌بندی در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی ضروری

تشکیل سله در خاک یکی از نمودهای تخریب فیزیکی خاک می‌باشد که باعث افت کیفیت آن شده و متعاقباً با معضلاتی مانند کاهش جوانه‌زنی، ایجاد غیریکنواختی در سطح سبز مزرعه، قطع ریشه‌های نازک و موئین، کاهش تبادل هوا در ناحیه توسعه ریشه، کاهش نفوذ آب به درون خاک و افزایش میزان رواناب، هدررفت آب از طریق شکاف‌ها و فرسایش همراه می‌باشد (Awadhwal & Thierstein, 1985; Valentin & Bresson, 1998; Moore & Singer, 1990). تشکیل سله که حاصل تخریب خاکدانه‌ها و ایجاد لایه سطحی با نفوذپذیری کم در نتیجه انسداد منافذ خاک می‌باشد (Valentin & Bresson, 1998)، به عوامل مختلفی از قبیل انرژی و شدت باران، پوشش گیاهی، وضعیت رطوبتی، خصوصیات خاک از جمله بافت، پایداری خاکدانه‌ها، ماده آلی و همچنین توپوگرافی بستگی دارد (Janeau *et al.*, 2003; Gallardo *et al.*, 2007; Badorreck *et al.*, 2013). مدیریت اراضی در راستای مقابله با این معضل مستلزم برآورد استعداد خاک‌های منطقه برای سله بستن و نیز بررسی پراکنش مکانی آن است که در مطالعه کروسیل و وان‌اوست (Crucil & Van Oost, 2021) این اقدام مورد توجه قرار گرفته و با کمک گرفتن از داده‌های محیطی نتایج ارزشمندی حاصل شده است. بنابراین، علاوه بر شناخت عوامل تشکیل و توسعه سله، تهیه نقشه‌های پراکنش مکانی آن نیز بسیار ضروری می‌باشد.

شاخص‌های متعددی برای نشان دادن استعداد خاک‌ها برای سله بستن معرفی شده‌اند که ویژگی‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی خاک در محاسبه آن‌ها مدنظر قرار گرفته‌اند (Skidmore & Powers, 1982; Fryrear *et al.*, 2000; Lujan, 2003). لیکن چنین به نظر می‌رسد که شاخص معرفی شده توسط فائو (FAO, 1979) از جمله کاربردی‌ترین آن‌ها بوده که در تحقیقات متعددی مورد استفاده قرار گرفته است (Gebremariam & Kebede, 2010; Shaker Shahmarbeigloo *et al.*, 2019; Lema *et al.*, 2019). استفاده از نقشه‌های پراکنش مکانی ویژگی‌های خاک و شاخص‌های مستخرج از آن‌ها همچون استعداد سله‌بندی در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی ضروری

3- Multiple Liner Regression (MLR)

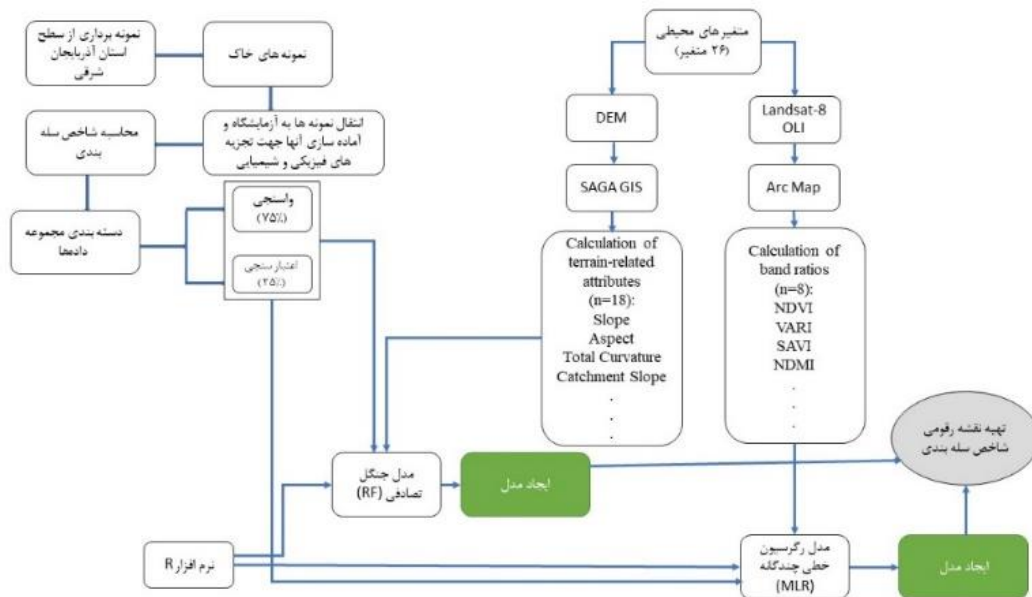
1- Machine Learning  
2- Random Forest (RF)

**منطقه مورد مطالعه**

استان آذربایجان شرقی در شمال غرب ایران در محدوده جغرافیایی ۴۵° ۴۵' تا ۳۶° ۲۶' عرض شمالی و ۴۵° ۰۵' تا ۴۸° ۲۲' طول شرقی واقع شده و دارای مساحتی حدود ۴۵۷۵۶ کیلومتر مربع و ارتفاع ۱۳۷ تا ۴۰۷۸ متر از سطح آب‌های آزاد می‌باشد. تکامل زمین‌شناسی استان متعلق به دوره‌های ائوسن (دوران سوم) و کواترنر (دوران چهارم) بوده و سنگ‌های آن عموماً از انواع آذرین، خاکسترهای مواد آتشفشانی مرکب و رسوبی هستند (Darvishzadeh, 2003). مطابق آمار و اطلاعات مستخرج از سازمان هواشناسی کشور در دوره ۲۰ ساله ۱۴۰۰-۱۳۸۰ (IRIMO, 2021)، اقلیم استان به‌طور کلی سرد و خشک بوده و دارای بارندگی متوسط سالانه ۳۰۰ میلی‌متر و میانگین دمای هوای آن ۱۵ درجه سلسیوس است. به‌منظور تسهیل در ارائه فرآیند تحقیق، فلوچارت مربوطه تهیه و در شکل ۱ نشان داده شده است.

قرار گرفته‌اند که از جمله می‌توان به بررسی توزیع کلاس‌های خاک (Shahbazi *et al.*, 2019)، کربن آلی خاک (Mousavi *et al.*, 2021)، شکل‌های مختلف آهن (Mousavi *et al.*, 2020) اشاره نمود. مطالعات متعددی در ارتباط با پراکنش مکانی سله بستن خاک در مقیاس‌های بزرگ‌تر با استفاده از روش‌های دورسنجی انجام گرفته است (Alavipanah *et al.*, 2016; Ferrenberg *et al.*, 2017)، لیکن با توجه به قابلیت‌های اثبات شده نقشه‌برداری رقومی خاک در پیش‌بینی پراکنش مکانی برخی پارامترهای دیریافت، هدف اصلی این تحقیق نیز معرفی مدل‌های جنگل تصادفی و رگرسیون خطی چندگانه برای پیش‌بینی شاخص سله‌بندی خاک در مقیاس استانی می‌باشد که در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی جایگاه ویژه‌ای خواهد داشت.

**مواد و روش‌ها**



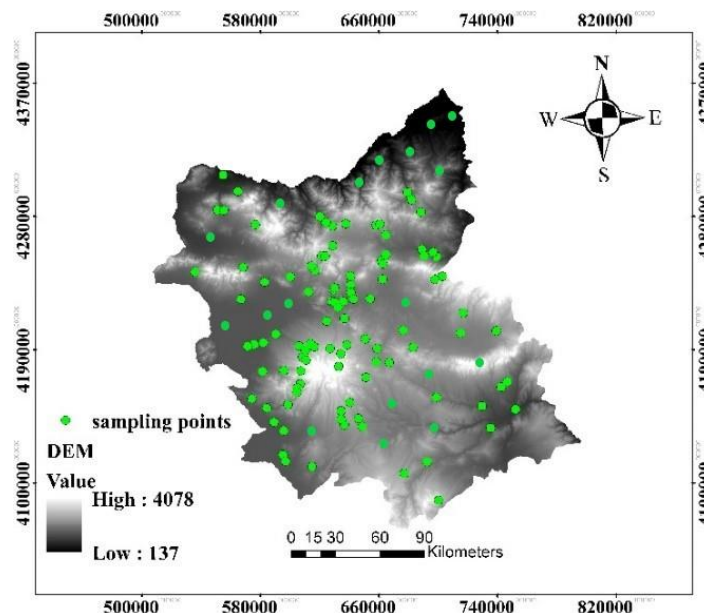
شکل ۱- شمایی از مراحل انجام تحقیق

Figure 1. The scheme of research processes

شاخص سله‌بندی خاک شامل توزیع اندازه ذرات و ماده آلی با استفاده از روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شدند. در این راستا از روش پیپت برای اندازه‌گیری مقادیر سیلت ریز (۰/۰۲ تا ۰/۰۰۲ میلی‌متر)، سیلت درشت (۰/۰۲ تا ۰/۰۵ میلی‌متر)، رس خاک (Day, 1965) و نیز از روش هضم تر برای تعیین کربن آلی (Nelson and Sommers, 1996) استفاده شد.

**نمونه‌برداری و تجزیه‌های آزمایشگاهی**

نمونه‌برداری بر مبنای الگوی تصادفی از عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری از ۱۰۷ نقطه استان در واحدهای فیزیوگرافی و کاربری‌های مختلف به‌صورت نمونه‌های دست‌خورده انجام شد (شکل ۲). در مرحله آزمایشگاهی پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در



شکل ۲- مدل رقومی ارتفاع استان آذربایجان شرقی و مکان‌های نمونه‌برداری  
Figure 2. DEM of East Azerbaijan Province associated with sampling points

خاک‌سازی در نقشه‌برداری رقومی خاک می‌باشند (McBratney *et al.*, 2003). مدل رقومی ارتفاع (DEM) و همچنین نسبت‌های باندی مستخرج از تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ مربوط به جولای ۲۰۱۷ با درجه وضوح مکانی ۳۰ متر تهیه گردید. بنابراین، ۱۸ مشتق مدل رقومی ارتفاع در سه گروه مورفومتری، هیدرولوژی و کانال‌ها (جدول ۱) با استفاده از نرم‌افزار SAGA GIS و همچنین ۸ شاخص دورسنجی در چهار گروه مرتبط با خاک و پوشش گیاهی، آب، منظر اراضی و زمین‌شناسی (جدول ۲) با استفاده از نرم‌افزار ArcMap 10.3 استخراج و نقشه‌های مربوطه برای منطقه مورد مطالعه تهیه شدند.

#### محاسبه شاخص سله‌بندی خاک

برای بررسی استعداد سله‌بستن خاک شاخص سله‌بندی ارائه شده توسط فائو (FAO, 1979) به کار رفت (رابطه ۱). این شاخص بر اساس ترکیب بافت و مقدار ماده آلی خاک طراحی شده (Lal and Shukla, 2005)، که در آن،  $I_c$  شاخص سله‌بندی،  $S_f$  درصد سیلت ریز،  $S_c$  درصد سیلت درشت،  $Cl$  درصد رس و  $SOM$  نشان دهنده درصد ماده آلی می‌باشد.

$$I_c = \frac{1.5S_f + 0.75S_c}{Cl + (10 \times SOM)} \quad (1)$$

#### متغیرهای محیطی

در این تحقیق از متغیرهای محیطی به‌عنوان داده‌های کمکی استفاده گردید که بیانگر نقش فاکتورهای

جدول ۱- مشتقات مدل رقومی ارتفاع مورد استفاده در برآورد شاخص سله بستن خاک

Table 1. The used DEM-derived data for predict soil crusting index

Type	Index			
	Aspect	Slope	Topographic Position Index	Elevation
Morphometry	Plan Curvature	Profile Curvature	Total Curvature	General Curvature
	Valley Depth	Flow Line Curvature	Multiresolution Index of The Ridge Top Flatness	Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness
	Catchment Slope	Modified Catchment Area	Catchment Area	Topographic Wetness Index
Channel	Strahler Order	Flow Direction		

جدول ۲- شاخص‌های دورسنجی مورد استفاده در برآورد شاخص سله بستن خاک  
Table 2. The used remotely sensed data for predict soil crusting index

Type	Description	Environmental covariates
Soil and vegetation indices	$(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
	$(\text{Green} - \text{Red}) / (\text{Green} + \text{Red} - \text{Blue})$	Visible Atmospherically Resistant Index (VARI)
	$((\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red} + \text{L}^*)) \times (1 + \text{L})$	Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)
Water indices	$(\text{NIR} - \text{SWIR1}) / (\text{NIR} + \text{SWIR1})$	Normalized Difference Moisture Index (NDMI)
	$(\text{Green} - \text{SWIR1}) / (\text{Green} + \text{SWIR1})$	Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)
Landscape indices	$(\text{NIR} - \text{SWIR2}) / (\text{NIR} + \text{SWIR2})$	Normalized Burn Ratio (NBR)
Geological indices	$(\text{Red} - \text{NIR}) / (\text{Red} + \text{NIR})$	Salinity Ratio (SR)
	$\text{SWIR1} / \text{SWIR2}$	Clay Minerals Ratio (CMR)

درختان برای ساخت (*n tree*) بر روی ۱۰۰۰ تنظیم گردید و تعداد متغیرها (*m try*) در دو حالت جداگانه به ترتیب بر روی ۱۸ (مشتقات مدل رقومی ارتفاع) و ۸ (شاخص‌های دورسنجی) تنظیم و سپس مدل اجرا گردید. مدل رگرسیون خطی چندگانه نیز که یک مدل حداقل مربعات است، بر مبنای نحوه ارتباط متغیر وابسته (*Y*) با متغیرهای مستقل (*X*) عمل می‌کند (Manly, 2016). بر اساس تحلیل رگرسیونی، مدل مذکور نیز در دو حالت جداگانه بین متغیر وابسته (شاخص سله‌بندی) و متغیرهای مستقل (مشتقات مدل رقومی ارتفاع و شاخص‌های دورسنجی) اجرا گردید.

#### واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها

برای ارزیابی کیفیت مدل خروجی، مجموعه داده‌ها به دو دسته واسنجی (۷۵ درصد) و اعتبارسنجی (۲۵ درصد) تقسیم گردیدند. سپس از معیارهای آماری جذر میانگین خطای باقی‌مانده<sup>۱</sup>، اریب<sup>۲</sup>، ضریب تعیین<sup>۳</sup> و همچنین ضریب توافق یا سازگاری کونکوردانس<sup>۴</sup> (Lin, 1989) برای ارزیابی مدل‌ها استفاده شد که در روابط ۲ تا ۵ ارائه شده‌اند. در این روابط  $obs_i$  و  $pred_i$  به ترتیب ویژگی خاک مشاهده شده و پیش‌بینی شده،  $n$  تعداد مشاهده‌ها،  $\mu_{pred}$  و  $\mu_{obs}$  نیز به ترتیب نشان دهنده میانگین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده می‌باشد. همچنین  $\sigma_{pred}^2$  و  $\sigma_{obs}^2$  نشان‌دهنده واریانس مقادیر مربوطه می‌باشد و  $\rho$  نشان‌دهنده ضریب همبستگی کونکوردانس بین مقادیر

مدل‌سازی شاخص سله‌بندی بر پایه متغیرهای محیطی به‌منظور مدل‌سازی شاخص سله‌بندی در این تحقیق، دو مدل جنگل تصادفی و رگرسیون خطی چندگانه در محیط نرم‌افزار R با استفاده از ۱۸ شاخص مشتقات مدل رقومی ارتفاع و همچنین ۸ شاخص دورسنجی به‌صورت جداگانه بکار رفت. نقشه‌های پراکنش مکانی شاخص مذکور با استفاده از مدلی که دارای بیشترین مقدار  $R^2$  باشد تهیه گردید. شایان ذکر است داده‌های اولیه با استفاده از روش اندرسون-دارلینگ مورد آزمون قرار گرفت (Anderson & Darling, 1952). شرط نرمال بودن داده‌ها در روش مذکور آن است که مقدار  $p$  محاسبه شده بزرگ‌تر از  $0.05$  باشد و با توجه به اینکه مقدار  $p$  برای مجموعه داده‌های شاخص سله‌بندی  $0.01$  به‌دست آمد، لذا با تبدیل داده‌ها به مجذور آن‌ها ( $\sqrt{\text{}}$ ) داده‌ها نرمال شده و در مدل‌سازی خطی و غیرخطی به‌کار رفتند.

مدل جنگل تصادفی یکی از روش‌های توسعه درخت تصمیم‌گیری است که پیش‌بینی چندین الگوریتم منفرد را هم‌زمان و با استفاده از قوانین مبتنی ترکیب می‌کند (Breiman, 2001). یکی از مزایای مدل مذکور آن است که رشد درختان تصمیم بدون نیاز به هرس بوده و اولویت متغیرهای محیطی را در پیش‌بینی نیز نشان می‌دهد (Peters et al., 2007). به‌منظور اجرای مدل جنگل تصادفی، بسته "randomForest" در نرم‌افزار R بازخوانی و نصب گردید. در اجرای این مدل پارامتر اصلی تعداد

3 - Coefficient of Determination (R2)

4 - Concordance coefficient (CCC)

1 - Root Mean Square Error (RMSE)

2 - Bias

## نتایج و بحث

توصیف آماری ویژگی‌های ۱۰۷ نمونه خاک تهیه شده از محدوده مورد مطالعه برای محاسبه شاخص سله‌بندی در جدول ۳ خلاصه شده است. مقادیر شاخص سله‌بندی حاصل از محاسبه بر مبنای ویژگی‌های خاک در سطح استان نشان داد که حداقل، حداکثر و میانگین آن به ترتیب ۰/۰۷، ۲/۲۵ و ۰/۸۲ می‌باشند که حداکثر مقدار شاخص سله‌بندی در غرب و حداقل آن در شمال شرق استان بوده است. با توجه به اینکه مقادیر شاخص سله‌بندی توزیع نرمال نداشتند، لذا مدل‌سازی با مجذور داده‌های اصلی انجام گرفت ولی نقشه‌های نهایی با تبدیل آن‌ها به صورت داده‌های اصلی ارائه شدند.

پیش‌بینی و مشاهده شده است. مدل‌های مطلوب ضرایب تعیین و توافق برابر یا نزدیک به یک و جذر میانگین خطای باقی‌مانده نزدیک به صفر دارند. بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی مدل جهت پیش‌بینی مقادیر شاخص‌های سله‌بندی نیز به وسیله میزان اریب سنجیده شدند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (obs_i - pred_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$bias = \frac{\sum_{i=1}^n (obs_i - pred_i)}{n} \quad (3)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (obs_i - \overline{obs})(pred_i - \overline{pred})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (obs_i - \overline{obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (pred_i - \overline{pred})^2}} \quad (4)$$

$$\rho_c = \frac{2\rho\sigma_{pred}\sigma_{obs}}{\sigma_{pred}^2 + \sigma_{obs}^2 + (\mu_{pred} - \mu_{obs})^2} \quad (5)$$

جدول ۳- توصیف آماری شاخص سله‌بندی و ویژگی‌های مورد استفاده خاک در محاسبه شاخص

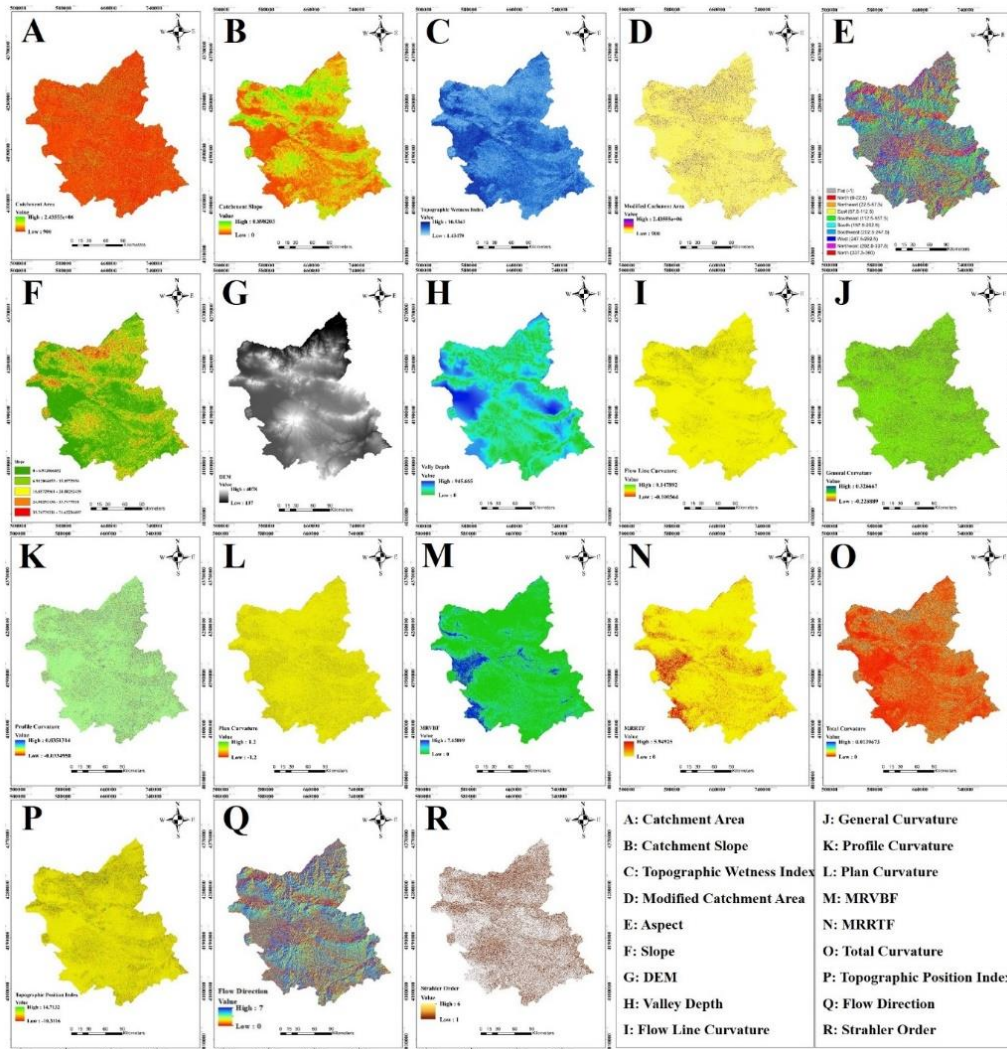
Table 3. Statistical description of soil crusting index and used soil properties in calculating index

	Min	Max	Mean	SD	CV (%)
Clay (%)	6.5	67	29.14	11.4	39.27
Silt (%)	7.5	51.75	28.11	9.2	32.85
Sand (%)	1	83.5	42.74	16.7	39.04
OM (%)	0.12	13.02	2.58	2.2	85.2
I <sub>c</sub>	0.07	2.25	0.83	0.35	42.5

I<sub>c</sub>: Crusting Index

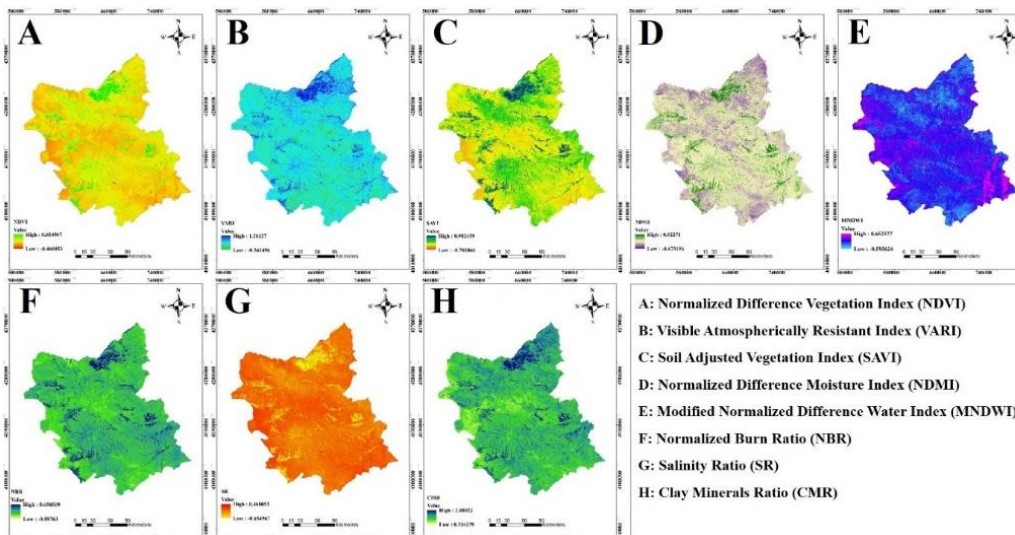
توزیع مکانی متغیرهای محیطی اعم از ویژگی‌های مورفومتری، هیدرولوژی، کانال، پوشش گیاهی، منظر اراضی و زمین‌شناسی مورد بحث در این تحقیق مشاهده نشد. در مرحله بعدی، به منظور انتخاب بهترین مدل و مجموعه متغیرهای محیطی در پیش‌بینی شاخص سله‌بندی، کارایی هر دو مدل مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۴).

متغیرهای محیطی مورد نیاز برای مدل‌سازی در این مطالعه شامل مشتقات مدل رقومی ارتفاع و شاخص‌های دورسنجی بودند که نقشه‌های رستری مربوطه با استفاده از نقشه DEM با وضوح ۳۰ متری و تصویر ماهواره لندست ۸ برای استان آذربایجان شرقی تهیه شدند (شکل‌های ۳ و ۴). با توجه به وسعت محدوده مورد مطالعه که شامل انواع واحدهای فیزیوگرافی و کاربری بود تنوع توپوگرافیکی، ژئومورفولوژیکی و پوشش گیاهی در نواحی مختلف منطقه بالا است، از این‌رو هیچ‌گونه الگوی خاص مشابهی برای



شکل ۳- نقشه‌های رستری مشتقات مدل رقومی ارتفاع

Figure 3. Raster map of DEM-derived data



شکل ۴- داده‌های دورسنجی برگرفته از تصویر لندست ۸

Figure 4. Remotely sensed data acquired from Landsat-8 OLI



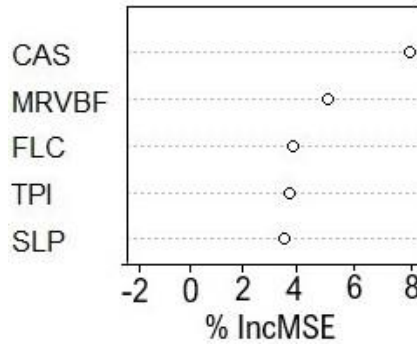
جدول ۴- کارایی مدل‌های جنگل تصادفی و رگرسیون خطی چندگانه در پیش‌بینی پراکنش مکانی شاخص سله‌بندی با استفاده از متغیرهای محیطی

Table 4. The performance of RF and MLR to predicting the spatial distribution of crust index using various environmental covariates

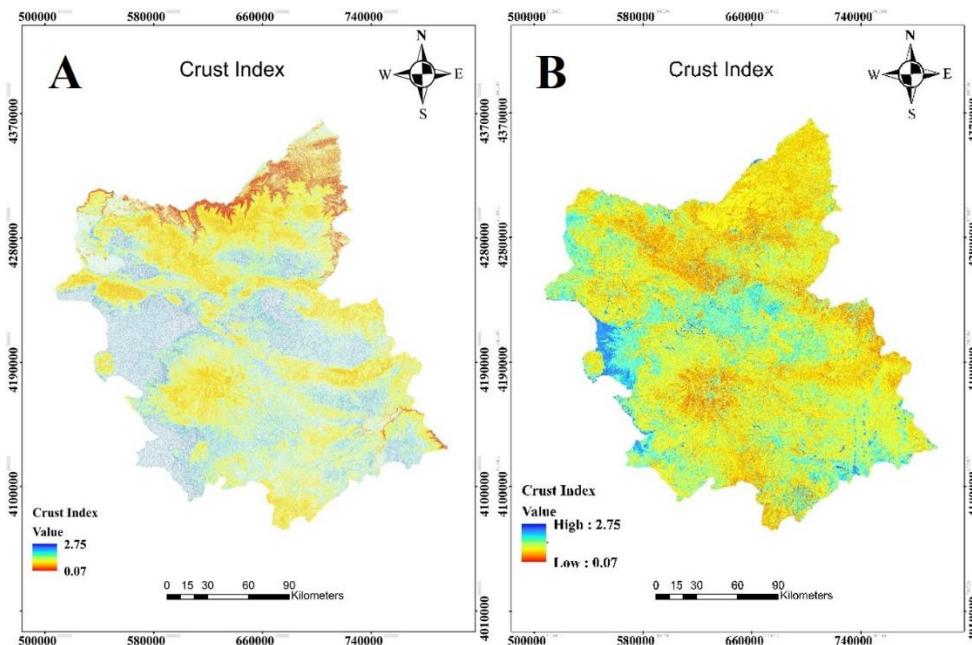
Model	Data Source	Calibration (80 samples)				Validation (27 samples)			
		R <sup>2</sup>	CCC	RMSE	Bias	R <sup>2</sup>	CCC	RMSE	Bias
Random Forest	DEM	0.92	0.84	0.08	0	0.19	0.25	0.19	-0.06
	RS	0.88	0.82	0.088	0	0.07	0.18	0.19	0.06
Multiple Linear Regression	DEM	0.42	0.59	0.14	0	0.01	0.01	0.29	-0.08
	RS	0.17	0.3	0.01	-2.33	0.12	0.21	0.19	0.07

نتیجه گرفت که نوع مدل و منبع متغیرهای محیطی هر دو در پیش‌بینی شاخص مذکور دارای اهمیت می‌باشند. کاربرد مدل جنگل تصادفی که خروجی آن در شکل ۵ منعکس شده است، نشان داد که شیب حوضه آبریز (CAS) و شاخص همواری انتهایی دره (MRVBF) با اختلاف فاحشی نسبت به سایر متغیرهای ورودی اهمیت زیادی در پیش‌بینی داشته و به نوعی اهمیت مشتقات مدل رقومی ارتفاع را بیش از پیش نمایان می‌سازد. با توجه به اینکه مقادیر شن، سیلت، رس و ماده آلی به‌عنوان اجزای اصلی فرمول محاسبه شاخص سله‌بندی می‌باشند، لذا هر متغیری که در پیش‌بینی اجزای محاسبه شاخص سله‌بندی مهم باشد، قطعاً در پیش‌بینی خود شاخص نیز مهم تلقی خواهد شد. ژانگ و زی (Zhang *et al.*, 2019) اهمیت مشتقات مدل رقومی ارتفاع به‌ویژه شاخص همواری انتهایی دره را در پیش‌بینی ماده آلی گزارش نموده‌اند. ردی و همکاران (Reddy *et al.*, 2021) نیز نقش مشتقات مدل رقومی ارتفاع را در پیش‌بینی رس گزارش نموده‌اند. در مرحله بعدی با استناد به نتایج مدل‌سازی پیش‌بینی سله‌بندی خاک، نقشه‌های رقومی شاخص مذکور در دو حالت: الف) مدل جنگل تصادفی با استفاده از مشتقات مدل رقومی ارتفاع؛ و ب) مدل رگرسیون خطی چندگانه با استفاده از داده‌های دورسنجی تهیه گردید (شکل ۶).

به‌طور کلی نتایج نشان داد که مدل‌ها در مرحله اعتبارسنجی دارای مقادیر R<sup>2</sup> و CCC پایینی هستند. نظر به ماهیت متفاوت پیش‌بینی‌کننده‌ها مانند متغیرهای محیطی و شاخص سله‌بندی این مقادیر نیز قابل قبول می‌باشد، به‌طوری‌که در مطالعات مشابهی مانند پیش‌بینی فاکتور غنی‌شدگی عناصر سنگین در ساحل شرقی دریاچه ارومیه (Alvyar *et al.*, 2021) و یا ترکیبات نمکی (Omran *et al.*, 2021) علی‌رغم پایین بودن مقادیر معیارهای اعتبارسنجی در نهایت نقشه‌های مربوطه با موفقیت تهیه شدند. بر اساس نتایج جدول ۴ مشاهده می‌شود که ترتیب کارایی مدل‌ها در پیش‌بینی شاخص سله‌بندی با استفاده از منابع داده مختلف به‌صورت مدل جنگل تصادفی با استفاده از داده‌های مشتقات مدل رقومی ارتفاع، مدل رگرسیون خطی چندگانه با استفاده از داده‌های دورسنجی، مدل جنگل تصادفی با کاربرد داده‌های دورسنجی و در نهایت مدل‌سازی با روش رگرسیون خطی چندگانه با استفاده از داده‌های مشتقات مدل رقومی ارتفاع می‌باشد. بررسی‌های بیشتر نشان می‌دهد که وقتی از مشتقات مدل رقومی ارتفاع به‌تنهایی در پیش‌بینی پراکنش مکانی شاخص سله‌بندی استفاده می‌شود، کارایی مدل جنگل تصادفی بیشتر از مدل رگرسیون خطی چندگانه بوده ولی موقع استفاده از شاخص‌های دورسنجی نتیجه معکوس حاصل گردید. با توجه به ترتیب حاصله در خصوص انتخاب نوع مدل و منبع داده‌های محیطی مناسب مورد استفاده برای مدل‌سازی می‌توان



شکل ۵- رتبه‌بندی اهمیت متغیرهای محیطی مورد استفاده در این مطالعه با استفاده از مدل جنگل تصادفی  
 Figure 5. The ranking of environmental covariates importance used in this study with application of RF model



شکل ۶- نقشه‌های توزیع پراکنش مکانی شاخص سله‌بندی خاک: الف) مدل جنگل تصادفی با استفاده از مشتقات DEM؛ ب) رگرسیون خطی چندگانه با استفاده از داده‌های دورسنجی

Figure 6. Spatial distribution maps of soil crust index: A) using RF model and DEM-derived data, B) using MLR model and RS data

سله بستن که در شاخص سله‌بندی مورد استفاده در این تحقیق منعکس شده‌اند نیز خود متأثر از متغیرهای محیطی که در واقع نماینده فاکتورهای خاک‌سازی هستند، می‌باشد. از این‌رو نگاهی به شرایط فاکتورهای خاک‌سازی در نواحی مختلف که نقشه‌های رستری مستخرج برای متغیرهای محیطی (شکل‌های ۲ و ۳) نماینده آنها است با تفسیر عوامل مؤثر در تشکیل و توسعه سله می‌تواند راه‌گشای تحلیل استعداد اراضی برای سله بستن در نواحی مختلف استان باشد.

به‌طور کلی نقشه‌های حاصل از مدل‌سازی شاخص سله‌بندی خاک با استفاده از هر دو مدل جنگل تصادفی و رگرسیون خطی چندگانه نشان داد که نواحی غرب و مرکز استان مستعدترین بخش‌ها برای تشکیل سله خاک بوده و نواحی شمال‌شرق استان حداقل استعداد برای سله بستن را دارند. همچنین قابلیت سله بستن خاک‌های اراضی واقع در بخش‌های شمالی، شرقی و جنوبی استان متوسط برآورد شد (شکل ۴). استعداد نواحی مختلف در تشکیل سله برگرفته از ویژگی‌های خاک است که در محاسبه شاخص سله‌بندی به‌کار رفته‌اند. توزیع ویژگی‌های خاک دخیل در

2021). از این رو انتظار بر این است که در اراضی شور به خصوص زمانی که سدیم عامل اصلی شوری است استعداد خاک‌ها برای سله بستن بالا باشد. شاهد این امر در مطالعه حاضر بخش‌های غربی استان شامل اراضی شور حاشیه دریاچه ارومیه است که نقشه شاخص شوری (شکل ۴-G) با روندی تقریباً مشابه با نقشه‌های مدل‌سازی شده برای شاخص سله‌بندی خاک منطبق بر توجیه ارائه شده در فوق می‌باشد.

پوشش گیاهی نواحی شمال شرقی استان که عموماً شامل جنگل و مراتع متراکم می‌باشد نیز یکی دیگر از علت‌های پایین بودن استعداد سله‌بندی خاک‌های این منطقه است. صرف نظر از نقش مستقیم پوشش گیاهی در ممانعت از تشکیل سله به واسطه جلوگیری از برخورد مستقیم نزولات جوی و تخریب خاکدانه‌ها، کاستن از میزان و شدت رواناب سطحی، افزایش نفوذپذیری خاک نسبت به آب، جلوگیری از بروز شرایط مانداب، پوشش گیاهی با دخالت در ترکیب و فابریک خاک به صورت غیرمستقیم نیز در کاستن از استعداد خاک‌ها برای تشکیل سله ایفای نقش می‌نماید (Mills & Fey, 2006). بقایای گیاهی به عنوان منبع اصلی ماده آلی خاک نقش مهمی در تحکیم خاکدانه‌ها، بهبود ساختمان خاک، نگهداشت رطوبت خاک و کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش نفوذپذیری و در نتیجه کاستن از میزان تشکیل سله دارد (Lado et al., 2004; Nsabimana et al., 2023). از این رو تشخیص نواحی شمال شرقی استان به عنوان مناطق با کمترین مقدار شاخص سله‌بندی و نیز مشاهده حداکثر مقدار این شاخص در بخش‌های غربی استان طی مدل‌سازی‌های صورت گرفته در انطباق کامل با توزیع پوشش گیاهی می‌باشد که وضعیت آن در سطح محدوده مورد مطالعه از طریق شاخص‌های دورسنجی شامل شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص مقاومت جوی مرئی (VARI) و شاخص گیاهی متعادل با خاک (SAVI) نیز در شکل ۴-A، B و C نشان داده شده است. از این رو کاربرد شاخص‌های دورسنجی مرتبط با وضعیت پوشش گیاهی در مدل‌سازی شاخص سله‌بندی خاک را می‌توان اقدامی کارساز در افزایش دقت و صحت این نوع از مطالعات دانست.

تحولات خاک در هر دو سوی تکامل و تخریب متأثر از توپوگرافی نیز می‌باشد (Jenny, 2011). بنابراین توجه به وضعیت پستی و بلندی از موارد مهم در مدل‌سازی شاخص

اقلیم به عنوان یکی از فاکتورهای خاک‌سازی نقش بسیار مهمی در تحولات خاک دارد (Jenny, 2011). گزارش‌های متعددی از نقش اقلیم در تشکیل سله به عنوان یکی از نمودهای تخریب خاک ارائه شده است (Hare, 1977; Kassas, 1995; Sivakumar, 2007). نقشه‌های پراکنش مکانی شاخص سله‌بندی حاصل از مدل‌سازی در این مطالعه نیز تا حدودی نقش اقلیم را در استعداد خاک‌های اراضی محدوده مورد مطالعه برای سله بستن نشان می‌دهند. بخش‌های شمال شرقی که شامل نواحی ارسباران است و حداقل مقادیر شاخص سله‌بندی طی مدل‌سازی در آن دیده می‌شود، اقلیم مرطوب‌تری نسبت به سایر نواحی استان دارد. مطالعات نشان داده‌اند که مقدار اولیه رطوبت خاک متأثر از اقلیم بر استعداد سله‌بندی مؤثر است، بدین نحو که چنانچه خاکدانه‌ها به صورت اولیه خشک باشند و به طور ناگهانی خیس شوند راحت‌تر از هم پاشیده می‌شوند و تشکیل سله تسریع می‌شود (Valentin & Janeau, 1989; Chamzio et al., 2011; Hardie & Almajmaei, 2019). از سوی دیگر اثبات شده که با افزایش میزان بارش و مرطوب شدن اقلیم میزان رس خاک افزایش می‌یابد و به واسطه نقش مثبت رس به همراه ماده آلی در تشکیل خاکدانه‌ها و بهبود ساختمان از استعداد خاک برای تشکیل و توسعه سله کاسته می‌شود (Barshad, 1957; Pagliai, 2010). بررسی مقادیر رس حاصل از تجزیه‌های خاک مطالعه حاضر نیز حکایت از بیشترین مقادیر رس در خاک‌های نواحی شمال شرقی داشت که بالاترین مقادیر شاخص نسبت کانی رس (CMR) ارائه شده در شکل ۴-H همراه با گزارش مطالعات پیشین در خصوص حضور آلفی‌سول‌ها با مقادیر بالای مواد آلی خاک در این مناطق اثبات کننده این مدعا است (Rezaei et al., 2017). شرایط ذکر شده در نواحی شمال شرق منطقه در حالی برقرار است که بخش‌های غرب و مرکز استان با کمبود رطوبت و اقلیم خشک مواجه هستند که این امر می‌تواند منجر به استعداد بالای این نواحی در تشکیل سله شود. بنابراین می‌توان در این مطالعه، صحت مدل‌سازی صورت گرفته را از طریق نقش اقلیم در تشکیل سله نیز تأیید نمود.

شوری و سدیمی بودن خاک نیز از عواملی است که در تشکیل سله نقش دارد. شوری که از معضلات تخریب خاک است از طریق تخریب خاکدانه‌ها منجر به کاهش نفوذپذیری شده و قابلیت تشکیل سله را افزایش می‌دهد (Stavi et al.,

مقدار این شاخص دارند. نواحی جنگلی عموماً در بخش‌های شمال شرق استان واقع شده‌اند که کمترین مقدار شاخص سلبندی نیز متعلق به این نواحی است. همچنین عمده مراتع استان در نواحی شمالی، شرقی و جنوبی توسعه پیدا کرده‌اند که مقادیر نسبتاً کم شاخص سلبندی در این بخش‌ها دیده می‌شود. اراضی زراعی که در کنار نواحی جنگلی و مرتعی جای دارند نیز مقدار متوسطی از این شاخص را نشان دادند. همچنین حداکثر مقادیر شاخص سلبندی عمدتاً در نواحی مرکزی و غربی استان که اراضی بایر، تخریب شده و متفرقه می‌باشد دیده شد.

### نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه نقشه‌برداری رقومی خاک برای بررسی مکانی استعداد تشکیل سله در اراضی با مقیاس وسیع به کار رفت و با توجه به پیوستگی ویژگی‌های خاک و دشواری‌های مطالعات خاک‌شناسی در سطوح وسیع، نتایج تحقیق امکان استفاده از این روش را در راستای ارتقا بهره‌وری بخشی از مطالعات مرتبط با تحولات خاک با ماهیت پیوسته و تغییرپذیری تدریجی نشان داد. با توجه به دقت حاصله از مدل‌سازی و مشاهدات میدانی از واقعیت‌های زمینی در خصوص تشکیل سله در عرصه و با توجه به ارتباط مشتقات مدل رقومی ارتفاع و شاخص‌های دورسنجی با عوامل محیطی یا به عبارتی فاکتورهای خاک‌سازی و ویژگی‌های خاک، استفاده از متغیرهای کمکی برای مدل‌سازی شاخص سلبندی خاک اقدامی کارساز شناخته شد. همچنین مشخص شد که نوع مدل و منبع داده‌های محیطی به کار رفته در مدل‌سازی هر دو در دقت و صحت مدل خروجی مهم می‌باشند، بدین نحو که در مطالعه حاضر مدل جنگل تصادفی بهترین خروجی را با استفاده از داده‌های مشتقات مدل رقومی ارتفاع و مدل رگرسیون خطی چندگانه بهترین کارایی را با کاربرد شاخص‌های دورسنجی از خود نشان داد. بنابراین بایستی هماهنگی بین نوع متغیرهای محیطی مورد استفاده و نوع روش مدل‌سازی جهت افزایش کارایی نقشه خروجی وجود داشته باشد. اگرچه الگوی پراکنش شاخص سلبندی خاک همخوانی مناسبی با شرایط اقلیم، پستی و بلندی و پوشش گیاهی نشان داد لیکن بیشترین انطباق نقشه‌های مدل‌سازی با کاربری اراضی بوده است. کمترین مقادیر شاخص سلبندی طی مدل‌سازی در اراضی جنگلی و مرتعی دیده شد و اراضی زراعی و تخریب شده و متفرقه

سلبندی است. در این راستا مقدار نگهداشت رطوبت خاک ناشی از موقعیت توپوگرافیک یک نقطه از موارد دخیل در تشکیل و توسعه سله شناخته شده است (Chamzio *et al.*, 2019; Hardie & Almajmaei, 2011). بررسی نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) نشان داد که در بخش‌هایی از استان که مقدار این شاخص بالا است میزان شاخص سلبندی مدل‌سازی شده نیز بیشتر برآورد شده است. بالا بودن مقدار این شاخص که محدوده زون‌های رطوبتی را نشان می‌دهد به معنی نگهداشت سطحی رطوبت زیاد در نتیجه انتقال رطوبت از نواحی مجاور می‌باشد. مقدار شیب اراضی بر روی خصوصیات فیزیکی سطح خاک مؤثر است (Riboliz *et al.*, 2011; Zhang & Xie, 2019). همچنین از بررسی مقادیر شاخص سلبندی خاک در نقاط مختلف با مقادیر متفاوت از شیب مشخص شد که درصد شیب اراضی با استعداد سله بستن اراضی رابطه عکس دارد (Chen *et al.*, 2022). این امر در مقایسه نقشه شیب اراضی با شاخص سلبندی خاک مدل‌سازی شده نیز محرز می‌باشد. چنین به نظر می‌رسد در اراضی شیب‌دار عموماً به دلیل زهکشی سطحی و نگهداشت سطحی رطوبت کم استعداد سلبندی اراضی کاهش می‌یابد (Zhu *et al.*, 2022). از طرفی در اراضی شیب‌دار شدت برخورد قطرات باران و تخریب خاکدانه‌ها و در نتیجه تشکیل سله حداقل می‌باشد. همچنین بررسی شاخص انحنای کل نشان می‌دهد که اراضی با مقدار متوسط این شاخص که نواحی مسطح می‌باشد حداکثر مقدار شاخص سلبندی را دارند زیرا در نواحی مسطح نگهداشت رطوبت سطحی روی می‌دهد. از سویی این نواحی شدت ضربات قطرات باران بر خاکدانه‌ها بیشتر بوده که منجر به جدایش ذرات اولیه و تخریب فیزیکی خاک و تشکیل سله می‌شود (Ghani *et al.*, 2020). مشاهدات میدانی نظارت شده از محدوده مورد مطالعه بیشترین قرابت نقشه‌های شاخص سلبندی مدل‌سازی شده را با کاربری‌های مختلف اراضی نشان می‌دهد. کاربری اراضی نیز از عوامل دخیل در سله بستن خاک‌ها شناخته شده است (Bajracharya & Lal, 1999; Mills & Fey, 2004). علت این امر را اثرپذیری عوامل محیطی از کاربری اراضی و بالعکس می‌توان دانست. بر این مبنای حداقل مقادیر شاخص سلبندی برآورد شده توسط مدل‌ها که در شکل ۴ نشان داده شده در نواحی جنگلی و مرتعی استان دیده می‌شود، سپس اراضی زراعی و متفرقه رتبه‌های بعدی را در

ارزشمند در مدیریت عملیات اجرایی حفاظت از منابع خاک باشد. در این راستا بررسی ارتباط انواع شاخص‌های سله بستن با متغیرهای محیطی و نیز استفاده از سایر متغیرهای محیطی در قالب مدل‌های مختلف می‌تواند در برنامه مطالعات آتی به‌منظور افزایش کارایی مدل‌سازی‌های مربوط به اقدامات مدیریتی در کنترل پیامدهای سله بستن اراضی در دستور کار قرار گیرد

مقادیر بالاتری از این شاخص را نشان دادند. به لحاظ جغرافیایی نقشه‌های خروجی نشان دادند که بخش‌های شمال‌شرق استان کمترین استعداد را برای تشکیل سله داشتند و نواحی شرقی مستعدترین بخش برای تشکیل سله بودند. در نهایت می‌توان اذعان داشت استفاده از نقشه‌برداری رقومی خاک نه‌تنها ابزاری مناسب در تحقیقات خاک‌شناسی است، بلکه می‌تواند راه‌کاری

## References

- Alavipanah S.K., Damavandi A.A., Mirzaei S., Rezaei A.A., Hamzeh S., Matinfar H.R., Teimouri H., and Javadzarrin I. 2016. Remote sensing application in evaluation of soil characteristics in desert areas. *Natural Environment Change*, 2 (1): 1-24. (In Persian)
- Alvyar Z., Shahbazi F., Oustan S.H., Dengiz O and Minasny B. 2021. Digital mapping of potentially toxic elements enrichment in soils of Urmia Lake due to water level decline. *Elsevier, Science of the Total Environment*, 808: 1-12.
- Anderson T.W., and Darling D.A. 1952. Asymptotic theory of certain goodness of fit criteria based on stochastic processes. *Annals of Mathematical Statistics*, 23: 193-212.
- Awadhwal N.K., and Thierstein G.E. 1985. Soil crust and its impact on crop establishment: A review. *Soil and Tillage Research*, 5 (3): 289-302.
- Badorreck A., Gerke H.H., and Huttli R.F. 2013. Morphology of physical soil crusts and infiltration patterns in an artificial catchment. *Soil and Tillage Research*, 129: 1-8.
- Bagheri Bodaghabadi M., Salehi M.H., Martínez-Casasnovas J.A., Mohammadi J., Toomanian N., and Esfandiarpour Borujeni I. 2011. Using Canonical Correspondence Analysis (CCA) to identify the most important DEM attributes for digital soil mapping applications. *Catena*, 86:66-74.
- Bajracharya R.M., and Lal R. 1999. Land use effects on soil crusting and hydraulic response of surface crusts on a tropical Alfisol. *Hydrological Processes*, 13 (1): 59- 72.
- Barshad I. 1957. Factors Affecting Clay Formation. *Designing Environments*, 6: 110- 132.
- Breiman L. 2001. Randomforests. *Machin Learning*, 45: 5–32.
- Brungard C.W., Boettinger J.L., Duniway M.C., Wills S.A., and Edwards T.C. 2015. Machine learning for predicting soil classes in three semi-arid landscapes. *Geoderma*, 239-240: 68-83.
- Chamizo S., Stevens A., Cantón Y., Miralles I., Domingo F., and Van Wesemael B. 2011. Discriminating soil crust type, development stage and degree of disturbance in semiarid environments from their spectral characteristics. *European Journal of Soil Science*, 63 (1): 42- 53.
- Chen S., Zhang G., Zhu P., Wang C.H., and Wan Y. 2022. Impact of slope position on soil erodibility indicators in rolling hill regions of northeast China. *Catena*, 217.
- Crucill G., and Van Oost K. 2021. Towards Mapping of Soil Crust Using Multispectral Imaging. *Sensors (Basel)*, 21 (1850):1-20.
- Darvishzadeh A. 2003. Geology of Iran. *Amirkabir Publication, Tehran*, p: 902. (In Persian)
- Day R.P. 1965. Pipette method of particle size analysis. In: *Methods of Soil Analysis. Agronomy 9, ASA, USA*, pp: 553-562.
- FAO 1979. A provisional methodology for soil degradation assessment. *Food and Agricultural organization of the United Nation, Rome*, pp: 47.
- Ferrenberg S., Tucker C.L., and Reed S.C. 2017. Biological soil crusts: diminutive communities of potential global importance. *Frontiers in Ecology and the Environmental*, 15 (3): 160- 167.
- Fryrear D.W., Bilbro J.D., Saleh A., Schomberg H., Stout J.E., and Zobeck T.M. 2000. RWEQ: Improved wind erosion technology. *Journal of Soil and Water Conservation*, 55 (2): 183- 189.
- Gallardo-Carrera A., Leonard J., Duval Y., and Durr C. 2007. Effects of seedbed structure and water content at sowing on the development of soil surface crusting under rainfall. *Soil and Tillage Research*, 95: 207–217.

- Gebremariam M., and Kebede F. 2010. Land Use Change Effect on Soil Carbon Stock, Above Ground Biomass, Aggregate Stability and Soil Crust: A Case from Tahtay Adyabo, North Western Tigray, Northern Ethiopia. *Journal of the Drylands*, 3 (2): 220- 225.
- Ghani A.N.C., Taib A.M., and Hasbollah D.Z.A. 2020. Effect of Rainfall Pattern on Slope Stability. *Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development*, 62: 887- 892.
- Gray J., Karunaratne S., Bishop T., Wilson B., and Veeragathipillai M. 2019. Driving factors of soil organic carbon fractions over New South Wales, Australia. *Geoderma*, 353: 213-226.
- Hardie M., and Almajmaie A. 2019. Measuring and estimating the hydrological properties of a soil crust. *Journal of Hydrology*, 574: 12- 22.
- Hare F.K. 1977. Connections between Climate and Desertification. *Environmental Conservation*, 4 (2): 81-90.
- Heuvelink G.B.M., Schoorl M., Veldkamp A., and Pennock D.J. 2006. Space-time Kalman filtering of soil redistribution. *Geoderma*, 133: 124-137.
- Islamic Republic of Iran Meteorological Organization (IRIMO). 2020. Statistics and information and climate data for 20 years (2001-2021). (In Persian)
- Janeau J.L., Bricquet J.P., Planchon O., and Valentin C. 2003. Soil crusting and infiltration on steep slopes in northern Thailand. *European Journal of Soil Science*, 54: 543-553.
- Jenny H. 2011. Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology. *Environmental Science*.
- Kassas M. 1995. Desertification: a general review. *Journal of Arid Environments*, 30 (2): 115- 128.
- Lado M., Paz A., and Ben-Hur M. 2004. Organic Matter and Aggregate Size Interactions in Infiltration, Seal Formation, and Soil Loss. *Soil Science Society of America Journal*, 68 (3): 935- 942.
- Lagacherie P.h., McBratney A.B., and Voltz M. 2006. Digital Soil Mapping: An Introductory Perspective. *Elsevier, Amsterdam*, 31: 3-22.
- Lagacherie P.h. 2008. Digital Soil Mapping: a state of the art. Digital soil mapping with limited data. *Springer-Verlag*, pp: 181.
- Lal R., and Shukla M.K. 2005. Principles of Soil Physics. *European Journal of soil Science*, 56: 681- 687.
- Lema B., Mesfin S., Kebede F., Abraha Z., Fitiwy I., and Haileselassie H. 2019. Evaluation of soil physical properties of long-used cultivated lands as a deriving indicator of soil degradation, north Ethiopia. *Physical Geography*, 40(4): 1–16.
- Lin L.I. 1989. A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility. *Biometrics*, 45: 255-268.
- Lujan L. D. 2003. Soil Properties Affecting Soil Erosion in Tropical Soils. *Lecture at the College of Soil Physics, Trieste, Italy*, pp: 233- 243.
- Manly B.F.G. 2016. Multivariate Statistical Methods. A Primer. Fourth Edition. *Chapman and Hall*.
- McBratney A.B., Mendonça Santos, M.L., and Minasny, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117: 3-52.
- Mills A.J., and Fey M.V. 2004. Declining soil quality in South Africa: effects of land use on soil organic matter and surface crusting. *South African Journal of Plant and Soil*, 21 (5): 388- 398.
- Mills A.J., and Fey M.V. 2006. Effects of vegetation cover on the tendency of soil to crust in South Africa. *Soil Use and Management*, 20 (3): 308- 317.
- Moore D.D., and Singer M.J. 1990. Crust Formation Effects on Soil Erosion Processes. *Soil Science Society of America Journal*, 54 (4): 1117- 1123.
- Mousavi A., Shahbazi F., Oustan S., Jafarzadeh A.A., and Minasny B. 2020. Spatial distribution of iron forms and features in the dried lake bed of Urmia Lake of Iran. *Geoderma Regional*, 21.
- Mousavi S.R.O., Sarmadian F., Omid M., and Bogaert P. 2022. Three-dimensional mapping of soil organic carbon using soil and environmental covariates in an arid and semi-arid region of Iran. *Measurement*, 201.
- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: *Sparks D.L. (Ed.), Methods of Soil Analysis. Chemical Methods. Part 3. ASA, CSSA, and SSSA, Madison*, pp: 961-1010.
- Nsabimana G., Hong L., Yuhai B., Nambajimana J.D., Jinlin L., Ntacyabukura T., and Xiubin H. 2023. Soil aggregate disintegration effects on soil erodibility in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Environmental Research*, 217.
- Omrani M., Shahbazi F., Feizizadeh B., Oustan S.H and Najafi N. 2021. Application of remote sensing indices to digital soil salt composition and ionic strength mapping in the east shore of Urmia Lake, Iran. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22: 1-11.

- Pagliai M. 2010. College on Soil Physics: Soil Physical Properties and Processes under Climate Change. *International Centre for Theoretical Physics, Firenze*.
- Peters J., de Baets B.D., Verhoest N., Samson R., Degroeve S., de Becker P., and Huybrechts W. 2007. Random forests as a tool for Ecohydrological distribution modelling. *Ecological Modeling*, 207(2-4): 304-318.
- Reddy N.N., Chakraborty P., Roy S., Singh K., Minasny B., McBratney A.B., Biswas A., and Das B.S. 2021. Legacy data-based national-scale digital mapping of key soil properties in India. *Geoderma*, 381, e114684.
- Rezaei H., Jafarzadeh A.A., Alijanpour A., Shahbazi F., and Valizadeh Kamran K.H. 2017. Genetically Evolution of Arasbaran Forests Soils along Altitudinal Transects of Kaleybar Chai Sofla Sub-Basin. *Water and Soil Science*, 26 (1/4): 151- 166. (In Persian).
- Ribolzi O., Patin J., Bresson L.M., Latschack K.O., Mouche E., Sengtaheuanghoung O., Silvera N., Thiébaux J.P., and Valentin C. 2011. Impact of slope gradient on soil surface features and infiltration on steep slopes in northern Laos. *Geomorphology*, 127 (1-2): 53- 63.
- Shahbazi F., McBratney A.B., Malone B.P., Oustan S., and Minasny B. 2019. Retrospective monitoring of the spatial variability of crystalline iron in soils of the east shore of Urmia Lake, Iran using remotely sensed data and digital maps. *Geoderma*, 337: 1196-1207.
- Shaker Shahmarbeigloo P., Khodaverdiloo H., and Momtaz H.R. 2019. Testing of new inputs to predict near-saturated soil hydraulic conductivity. *Applied Soil Research*, 7(1): 54-69. (In Persian).
- Sivakumar M.V.K. 2007. Interactions between climate and desertification. *Agricultural and Forest Meteorology*, 142 (2-4): 143- 155.
- Skidmore E.L., and Powers D.H. 1982. Dry-soil aggregate stability: energy-based index. *Soil Science Society of America Journal*, 46:1274-1279.
- Stavi I., Thevs N., and Priori S. 2021. Soil Salinity and Sodicyty in Drylands: A Review of Causes, Effects, Monitoring, and Restoration Measures. *Front Environmental Science*, 9.
- Valentin C., and Bresson L.M. 1998. Soil Crusting. *Methods for Assessment of Soil Degradation*, pp: 89- 107.
- Valentin C., and Janeau J.L. 1989. Les risques de dégradation structurale de la surface des sols en savane humide. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, 25:41-52.
- Wang B., Waters C., Orgill S., Gray J., Cowie A., Clark A., and Li Liu D. 2018. High resolution mapping of soil organic carbon stocks using remote sensing variables in the semi-arid rangelands of eastern Australia. *Science of the Total Environment*, 630, 367-378.
- Witten I.H., Frank E., and Hall M.A. 2011. Data mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques. *Morgan Kaufmann, Burlington*.
- Zhang G.H., and Xie Z.F. 2019. Soil surface roughness decay under different topographic conditions. *Soil and Tillage Research*, 187: 92- 101.
- Zhang Y., Zhang G., Pan J., Fan Z., Chen F., and Liu Y. 2019. Soil organic carbon distribution in relation to terrain & land use—a case study in a small watershed of Danjiangkou reservoir area, China. *Global Ecology and Conservation*, 20, e00731.
- Zhu X., Liang Y., Qu L., Cao L., Tian Z.H., Gu Z.H., Guo H., and Li M. 2022. Quantification of physical soil crust thickness and its effects on runoff and sediment yield. *Soil Science Society of America Journal*, 86 (3): 630- 642.