

## پهنه‌بندی فرسایش پذیری بادی خاک سواحل شرقی دریاچه ارومیه

ساغر چاخرلو<sup>۱\*</sup>، علی اصغر جعفرزاده<sup>۲</sup>، عباس احمدی<sup>۳</sup>، بختیار فیضی زاده<sup>۴</sup>، فرزین شهبازی<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۲۲

۱- دانشجوی دکترای پیدایش، رده‌بندی و ارزیابی خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تبریز

۲- استاد پیدایش، رده‌بندی و ارزیابی خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تبریز

۳- استادیار فرسایش و حفاظت خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تبریز

۴- دانشیار سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS، دانشگاه تبریز

۵- دانشیار پیدایش، رده‌بندی و ارزیابی خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تبریز

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیک: saghar.chakherloo@yahoo.com

### چکیده

فرسایش بادی خاک زمانی رخ می‌دهد که سرعت باد از آستانه فرسایش خاک بیشتر شده و سطح خاک با گیاهان یا باقیمانده آن‌ها، ناهمواری‌های سطح و یا موانع دیگر حفاظت نشده باشد. همچنین فرسایش‌پذیری بادی یکی از مهمترین پارامترهای تعیین‌کننده فرسایش بادی تحت شرایط آب و هوایی معین می‌باشد. هدف اصلی این تحقیق تهیه نقشه فرسایش‌پذیری بادی خاک از طریق ارتباط تجربی بین تصاویر ماهواره‌ای و ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی در سواحل شرقی دریاچه ارومیه می‌باشد. برای این تحقیق نمونه‌برداری خاک در ۱۵۳ نقطه سه لایه ارتفاعی (۱۲۷۱-۱۲۷۳، ۱۲۷۳-۱۲۷۵ و ۱۲۷۵-۱۲۷۸ متر ارتفاع از سطح دریا) انجام و از ۴ روش نظارت شده مانند حداقل فاصله، حداکثر احتمال، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) در طبقه‌بندی و نقشه‌برداری از فرسایش‌پذیری استفاده شد. ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی نمونه‌های خاک نیز اندازه‌گیری و ۲۶ نمونه از آن‌ها بصورت تصادفی جهت بررسی فرسایش‌پذیری بادی در تونل باد انتخاب گردید. نتایج حاصله از آزمایش‌های تونل باد با ارتفاع ۲۰ سانتیمتر از کف تونل، بیانگر فرسایش‌پذیری بادی میانگین  $(\text{g m}^{-2} \text{ min}^{-1})/(\text{m s}^{-1})$  ۲/۹۲ است. نتایج رگرسیون گام به گام نیز نشان داد که از بین ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی خاک‌ها، جزء فرسایش‌پذیر مهمترین ویژگی خاک است که در تخمین فرسایش‌پذیری مورد استفاده قرار می‌گیرد و با فرسایش‌پذیری بادی خاک همبستگی مثبت دارد. میانگین وزن قطر خاکدانه‌ها با فرسایش‌پذیری خاک همبستگی منفی معنی‌داری داشته و هیچ رابطه‌ای بین ویژگی‌های شیمیایی خاک و فرسایش‌پذیری یافت نشد. از ۴ روش طبقه‌بندی نظارت شده، شبکه عصبی مصنوعی قابلیت بالاتری در طبقه‌بندی و نقشه‌برداری فرسایش‌پذیری داشته و در نهایت نتایج نشان داد که دقت کلی طبقه‌بندی ۵۷/۱٪ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تونل باد، ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی، دریاچه ارومیه، نقشه‌برداری رقومی، فرسایش‌پذیری خاک

## Soil Wind Erodibility Zonation of the Eastern Shores of Urmia Lake Saghar Chakherlou<sup>1\*</sup>, Ali Asghar Jafarzadeh<sup>2</sup>, Abbas Ahmadi<sup>3</sup>, Bakhtiar Feizizadeh<sup>4</sup>, Farzin Shahbazi<sup>5</sup>

Received: December 26, 2019

Accepted: October 7, 2020

<sup>1</sup> PhD student in Soil Genesis, Classification and Evaluation, Soil Science Department, University of Tabriz

<sup>2</sup> Professor of Soil Genesis, Classification and Evaluation, Soil Science Department, University of Tabriz

<sup>3</sup> Assistant Professor of Soil Erosion and Protection, Soil Science Department, University of Tabriz

<sup>4</sup> Associate Professor of Remote Sensing and GIS, Department of Remote Sensing and GIS, University of Tabriz

<sup>5</sup> Associate Professor of Soil Genesis, Classification and Evaluation, Soil Science Department, University of Tabriz

\*Corresponding author: saghar.chakherloo@yahoo.com

### Abstract

The wind erosion occurs when wind speed exceeds the soil erosion threshold and plants or their residues, surface roughness, or other obstacles do not protect the soil surface. Also, wind erodibility is one of the most important determining parameters of wind erosion under certain climatic conditions. The main objective of this research was mapping of soil erodibility through empirical relationship between satellite imagery and physicochemical properties and estimation of soil erosion using a comprehensive assessment model on the east shore of the Urmia Lake. For this research work soil sampling carried out in 153 points of three elevation classes (1271-1273, 1273-1275 and 1275-1278 meters) and 4 supervised classification methods such as, support vector machine (SVM), maximum likelihood classification (MLC), minimum distance and artificial neural network (ANN) were used for classifying and mapping of soil erodibility. Soil physic-chemical properties measured and 26 samples of them randomly were selected for wind erodibility measurement in an artificial wind tunnel. Wind tunnel experiments at a distance of 20 cm from the tunnel floor, revealed wind erodibility of 2.92 ((g m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>)/ (m s<sup>-1</sup>)). Also, stepwise regression results showed that among the physic-chemical properties of soils, erodible fraction was the most important soil property which used in estimating erodibility and has a positive correlation with soil erodibility. The mean weight of aggregate diameter had negative correlation with soil erodibility and no relationship was found between soil chemical properties and erodibility. Among the four supervised classification methods, the ANN has a higher capability in classifying and mapping of erodibility. Finally, the results showed that the overall classification accuracy is 57.1%.

**Keywords:** Wind tunnel, Physico-chemical properties, Urmia Lake, Digital mapping, Soil erodibility

## مقدمه

ریزبافت گزارش نموده‌اند. همچنین شاخص جزء فرسایش‌پذیر یکی از پرکاربردترین شاخص‌های فرسایش‌پذیری بادی می‌باشد که اولین بار توسط چپیل در سال ۱۹۵۰ معرفی و پس از آن این شاخص به طور وسیعی در مطالعات مربوط به فرسایش بادی استفاده شده است (سیکس و همکاران ۲۰۱۱).

خشک شدن دریاچه ارومیه به عنوان یک بحران ملی می‌تواند نقش مهمی در ایجاد مشکلات و خطرات طبیعی و انسانی داشته باشد. کاهش سطح آب دریاچه ارومیه با توجه به اینکه سال‌ها شاهد ورود و رسوب انواع زباله-های مختلف و رسوب خود نمک‌های مختلف بوده حائز اهمیت می‌باشد. برخاستن این مواد رسوب یافته از بستر دریاچه در اثر پسرقت آب و فرسایش بادی خواهد توانست مناطق مختلف دور و نزدیک را تحت تاثیر قرار دهد. از این رو هدف اصلی این تحقیق ایجاد رابطه بین فرسایش‌پذیری بادی خاک با ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آن و شبیه‌سازی ساحل شرقی دریاچه از لحاظ فرسایش‌پذیری بادی در محیط ArcMap 10.5.3 می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

## موقعیت منطقه مورد مطالعه

دریاچه ارومیه بین  $37^{\circ}9'$  تا  $38^{\circ}12'$  عرض شمالی و  $45^{\circ}6'$  تا حدود  $46^{\circ}$  طول شرقی قرار گرفته و سطح اکولوژی آن ۱۲۷۴ متر می‌باشد. در سال ۱۳۹۶ که نمونه‌برداری این تحقیق از ساحل دریاچه انجام گردید سطح تراز دریاچه ۱۲۷۰/۹۹ متر بوده و در شرایط فعلی (۱۳۹۹) به ۱۲۷۲ متر رسیده است. مطالعاتی درمورد کلیات منطقه مورد مطالعه انجام و منطقه به سه سایت مطالعاتی (شمالی، میانی، جنوبی) تقسیم‌بندی گردید که هرکدام از این سایت‌ها براساس ارتفاع از سطح آب‌های آزاد به سه لایه ارتفاعی طبق شکل ۱ تقسیم‌بندی شده

باد به عنوان یکی از محرک‌های اصلی فرسایش خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ذرات خاک را حمل کرده و منجر به فرسایش بادی در اراضی فرسایش‌پذیر می‌شود. از جمله مناطق تحت تأثیر فرسایش بادی برونزدگی‌های حاصل از پس‌روی دریاچه ارومیه است که احتمال می‌رود با خشک شدن دریاچه ارومیه و افزایش رسوبات فرسایش‌پذیر، شدت آن در منطقه افزایش یابد. مطالعه عوامل تأثیرگذار بر فرسایش بادی می‌تواند در کنترل این فرآیند مفید باشد. فرسایش‌پذیری بادی خاک یکی از مهمترین پارامترهای تعیین‌کننده فرسایش بادی تحت شرایط آب و هوایی معین می‌باشد (حسن و مصطفی ۲۰۱۱). فرسایش‌پذیری خاک توسط ویژگی‌های ذاتی خاک‌ها کنترل شده و می‌توان آن را از روابط تجربی بین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مانند محتوای ماده آلی و ترکیب شیمیایی آن تخمین زد (ژانگ و همکاران ۲۰۰۴). تاکنون مطالعات نشان داده‌اند که فرسایش‌پذیری تحت تأثیر ویژگی‌های خاک به ویژه توزیع اندازه ذرات، پایداری خاکدانه‌ها، محتوای ماده آلی و ترکیبات شیمیایی است (مصطفی و مدنی ۲۰۰۴). همچنین مطالعات نسبتاً زیادی به بررسی و آنالیز رابطه بین فرسایش‌پذیری و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک از قبیل درصد ذرات سیلت، شن، رس و نیز نسبت‌های آنها، مواد آلی، کربنات کلسیم معادل، کربن آلی، هدایت الکتریکی، رطوبت، زبری سطح، میانگین وزنی خاکدانه‌ها، جرم مخصوص ظاهری و غیره پرداخته‌اند (زمانی و محمود آبادی ۲۰۱۳). بر اساس تحقیقات نگیزی و همکاران (۲۰۱۶) اندازه و پایداری خاکدانه‌های خاک از عوامل تأثیرگذار بر فرسایش‌پذیری بادی می‌باشد. پاستور و همکاران (۲۰۱۶) بافت خاک را به عنوان یک عامل بسیار مهم و موثر بر فرسایش‌پذیری بادی خاک گزارش نموده و کولازو و بوچیازو (۲۰۱۰) نیز خاک‌های شنی را به طور ذاتی فرسایش‌پذیرتر از خاک‌های

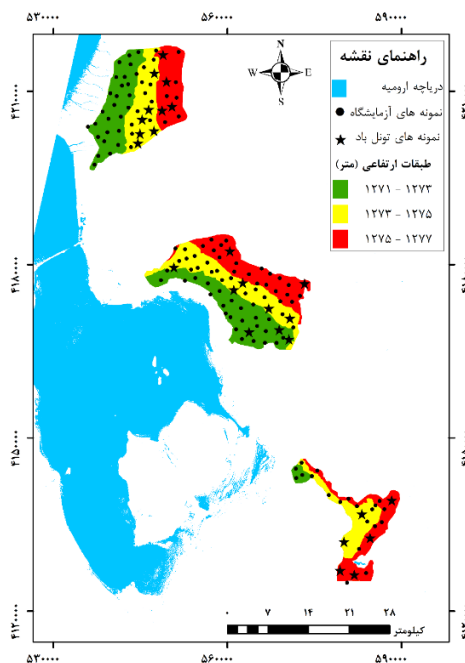
جنوبی دارای ۱۱۵ کیلومتر مربع مساحت انتخاب شدند (شکل ۱).

در سایت‌ها از عمق ۰-۱۰ سانتی‌متری تهیه و به آزمایشگاه انتقال داده شدند. سپس ۲۶ نمونه تصادفی از این سه سایت انتخاب و از هر یک حدود ۱۰ کیلوگرم برای مطالعه فرسایش‌پذیری خاک به آزمایشگاه تونل باد منتقل و مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۱).

است. منطقه شمالی دارای مساحت ۲۲۳ کیلومتر مربع، منطقه میانی با مساحت ۲۷۴ کیلومتر مربع و منطقه

### مرحله مقدماتی و صحرایی

جهت بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها، نمونه‌ها از ۱۵۳ نقطه با مختصات ثبت شده در دستگاه مکان‌یاب جغرافیایی (GPS<sup>۱</sup>) از سه لایه ارتفاعی موجود



شکل ۱- موقعیت نقاط نمونه برداری شده از سه منطقه شمالی، میانی و جنوبی برای آزمایشات فیزیکی و شیمیایی و تونل باد.

### مرحله آزمایشگاهی

از دستگاه pH متر (ریچارد ۱۹۶۹)، قابلیت هدایت الکتریکی با استفاده از دستگاه EC سنج، نسبت جذب سدیم (ریچارد ۱۹۶۶)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها با روش الک خشک (احمدی ۲۰۰۹) مشخص گردید.

به منظور اندازه‌گیری جزء فرسایش‌پذیر (ذرات کوچکتر از ۰/۸۵ میلی‌متر) مربوط به هر یک از نمونه‌های خاک، ابتدا ۱۰۰ گرم از نمونه‌های هوا خشکی که از الک ۸ میلی‌متری عبور داده شده بود، جدا گردید و سپس با

نمونه‌های خاک (۱۵۳ نمونه) از الک ۲ میلی‌متری عبور و برای اندازه‌گیری‌های فیزیکی و شیمیایی آماده شد. بافت خاک (گی و اور ۲۰۰۲)، ظرفیت تبادل کاتیونی (باور و همکاران ۱۹۵۲)، درصد رطوبت اشباع خاک (گاردرن ۱۹۸۶)، کربنات کلسیم معادل (ریچارد ۱۹۶۹)، کربن آلی خاک (نلسون و سامرز ۱۹۹۶)، واکنش خاک با استفاده

<sup>۱</sup> Global Positioning System

شدت فرسایش هر نمونه تحت یک سرعت باد مشخص، در نهایت فرسایش‌پذیری بادی از طریق محاسبه شیب خط نمودار شدت فرسایش بادی در مقابل سرعت باد برای هر نمونه خاک تعیین شد (زمانی و محمودآبادی ۲۰۱۳).

### پردازش آماری و نرم‌افزاری

نرمال بودن داده‌های بدست آمده از آزمایشگاه و تونل باد توسط آزمون کولموگروف-سمیرنوف در نرم-افزار SPSS v.25 انجام گرفت. برای تعیین فراوانی نمونه-ها در هر دو گروه A و B از آمار توصیفی و نیز جهت ایجاد رابطه بین فرسایش‌پذیری و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی از رگرسیون گام به گام استفاده شد که تاکنون گسترده‌ترین تکنیک مورد استفاده برای این منظور بوده است (گوتز و همکاران ۲۰۱۵). با بهره‌گیری از داده‌های زمین در نقاط نمونه‌برداری، از رابطه بین فرسایش‌پذیری و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک برای تخمین فرسایش‌پذیری سایر نمونه‌ها استفاده گردید. در این روش ابتدا متغیرهای مؤثر بر فرسایش‌پذیری شناسایی و سپس یک یا چند رابطه رگرسیون خطی بین این متغیرهای مهم و فرسایش‌پذیری برقرار شد که در رگرسیون خطی چند مرحله‌ای (SMLR) ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی اندازه‌گیری شده خاک بعنوان متغیر وابسته و مقادیر مربوط به اندازه‌گیری تونل باد بعنوان متغیرهای مستقل استفاده گردید. همچنین تمامی نقاط نمونه‌برداری وارد شده به GPS همراه با مختصات طول و عرض جغرافیایی وارد محیط نرم افزار Arc Map 10.5.3 گردیده و روی تصویر DEM قرار گرفته و مناطق مورد مطالعه برش داده شدند. سپس با الحاق ویژگی‌هایی مثل ضریب فرسایش‌پذیری خاک به بانک اطلاعاتی لایه، نقاط نمونه برداری شده ارزش‌گذاری شدند. برای محاسبه ضریب فرسایش‌پذیری خاک بین دو نقطه نمونه‌برداری

استفاده از سری الک‌های ۰/۰۵۳، ۰/۰۲۵، ۰/۱، ۰/۵، ۱/۷، ۱/۸۵، ۲ و ۴/۷۵ به مدت پنج دقیقه با بزرگی نوسان<sup>۱</sup> ۱ میلی‌متر غربال شد. در نهایت درصد ذرات کوچکتر از ۰/۸۵ میلی‌متر برای هر یک از نمونه‌ها محاسبه گردید و به عنوان جزء فرسایش‌پذیر در نظر گرفته شد (لوپز و همکاران ۲۰۰۷).

برای اندازه‌گیری سرعت آستانه فرسایش‌پذیری بادی، ابتدا نمونه‌های هوا خشک خاک (کوچکتر از ۸ میلی‌متر) در سینی آزمایش قرار گرفته و سطح آن‌ها به وسیله یک خطکش چوبی به آرامی و بدون ایجاد فشرده‌گی، صاف گردید. پس از جای‌گذاری سینی آزمایش در تونل باد، سرعت باد به تدریج و به آرامی تا جایی افزایش یافت که ذرات از سطح سینی به صورت محسوس (ذرات از موقعیت‌های مختلف سینی آزمایش در زمان‌های مختلف شروع به حرکت کنند به طوری که ذرات رسوب به طور ادامه‌داری از سینی آزمایش جریان داشته باشد) شروع به حرکت نمایند. سرعت مذکور به عنوان سرعت آستانه فرسایش بادی در نظر گرفته شد. سرعت باد در تونل با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج HOT-WIRE-1341 در ارتفاع ۲۰ سانتی‌متری سینی خاک از کف تونل اندازه‌گیری شد.

برای اندازه‌گیری فرسایش‌پذیری بادی ابتدا هر یک از نمونه‌های خاک در سینی آزمایش قرار گرفته و پس از پر شدن و قرار گرفتن سینی آزمایش در داخل تونل باد، هر نمونه در هر آزمایش به مدت ۱۰ دقیقه در معرض یکی از سرعت‌های ۹/۵، ۱۱، ۱۲/۵، ۱۴/۱ و ۱۵ متر بر ثانیه قرار داده شد و شدت فرسایش خاک ( $\text{g m}^{-2} \text{min}^{-1}$ ) تحت هر یک از سرعت‌های مذکور اندازه‌گیری گردید. این سرعت‌ها بر اساس سرعت آستانه نمونه‌های خاک که در مرحله قبل تعیین شده بودند و همچنین با توجه به حداکثر توان موتور تونل باد در ایجاد سرعت باد انتخاب شدند. این کار برای هر نمونه در سه تکرار انجام و پس از تعیین

<sup>2</sup> Amplitude (vertical vibration height)

شده از کریجینگ<sup>۱</sup> استفاده و در نهایت نقشه فرسایش- پذیرى بادی خاک مناطق مورد مطالعه در محیط نرم افزار ترسیم گردید.

نتایج حاصله در این تحقیق در دو گروه A و B مورد مطالعه قرار گرفتند که گروه A شامل ۲۶ نمونه انتخابی برای اندازه‌گیری در تونل باد بوده و در گروه B از ۱۲۷ نمونه دیگر از کل ۱۵۳ نمونه استفاده شد. انتخاب نمونه برای تونل باد جهت نشان دادن کلیه نمونه‌های جمع‌آوری شده از منطقه انجام شد و آمار توصیفی از ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی و فرسایش‌پذیری نمونه‌های خاک گروه (A) در جدول ۱ و گروه (B) در جدول ۲ ارائه شده است.

## نتایج و بحث

جدول ۱ - ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی نمونه های گروه A.

	SE	EF	MWD	Sa	Si	Cl	OC	EC	CCE
	((g m <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup> )/(m s <sup>-1</sup> ))	(%)	(mm)	(%)	(%)	(%)	(%)	(dS m <sup>-1</sup> )	(%)
میانگین	۲/۹۲	۵۹/۵۷	۰/۸۴	۳۲/۸۲	۲۹/۸۵	۳۷/۳۱	۲/۰۴۸	۲۸/۵۱	۳۱/۸۵
انحراف استاندارد	۱/۰۱	۱۴/۶۴	۰/۲۲	۲۲/۱۲	۱۵/۳۱	۱۳/۸۰	۱/۱۴۰	۱۰/۵۴	۱۲/۰۸
واریانس	۱/۰۲	۲۱۴/۴۶	۰/۰۵	۴۸۹/۵۴	۲۳۴/۶۴	۱۹۰/۶۵	۱/۳۰	۱۱۱/۲۸	۱۴۵/۹۹
حداقل	۰/۸	۱۹/۷۰	۰/۴۸	۰/۲۲	۱/۹۷	۱۹/۸۲	۰/۹۲	۹/۱۷	۱۴/۶۰
حداکثر	۴/۶۶	۸۲/۸۰	۱/۴۰	۷۴/۹۳	۶۱/۹۴	۶۹/۴۹	۴/۸۳	۵۲/۸۰	۴۹/۰۰

SE: فرسایش پذیری خاک، EF: جزء فرسایش پذیر، MWD: میانگین وزنی خاکدانه ها، Sa: شن، Si: سیلت، Cl: رس، OC: کربن آلی، EC: هدایت الکتریکی، CCE: کربنات کلسیم معادل

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی نمونه های گروه B.

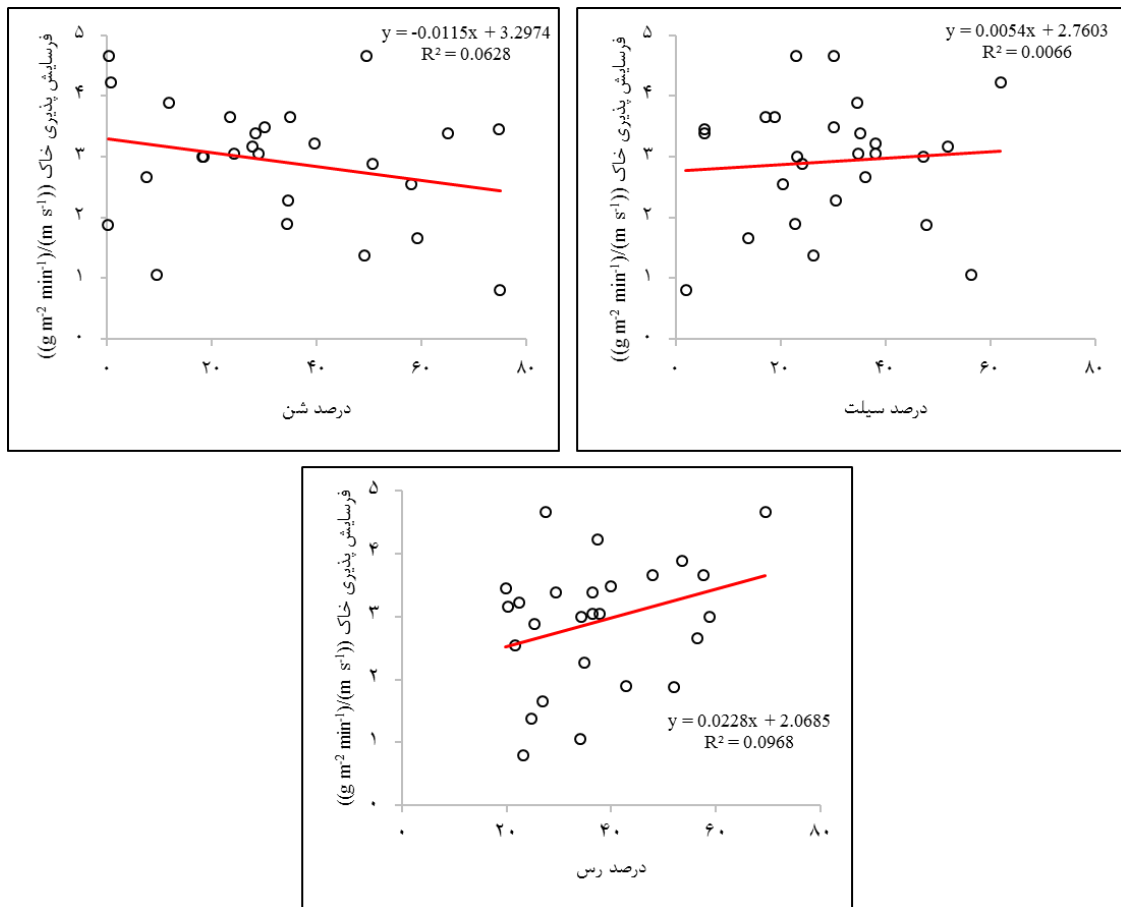
	SE	EF	MWD	Sa	Si	Cl	OC	EC	CCE
	((g m <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup> )/(m s <sup>-1</sup> ))	(%)	(mm)	(%)	(%)	(%)	(%)	(dS m <sup>-1</sup> )	(%)
میانگین	۳/۰۵	۶۳/۶۲	۰/۷۱۱	۳۶/۱۷	۲۵/۴۳	۳۸/۳۸	۲/۴۵	۳۰/۲۴	۳۲/۸۷
انحراف استاندارد	۰/۵۶	۱۴/۷۰	۰/۱۰۷	۲۷/۴۹	۱۷/۷۴	۱۴/۷۳	۱/۴۶	۱۶/۹۶	۱۲/۴۵
واریانس	۰/۳۲	۲۱۶/۳	۰/۰۱۲	۷۵۶/۱۵	۳۱۴/۹۳	۲۱۷/۰۷	۲/۱۳	۲۸۷/۹۴	۱۵۵/۱۶
حداقل	۱/۴۸	۲۱/۸۵	۰/۴۶	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۸۳	۰/۶۱	۱۱/۲۰
حداکثر	۴/۲۳	۹۴/۴۳	۱/۰۰	۸۹/۷۸	۵۹/۲۶	۷۹/۵۴	۵/۲۲	۱۲۲/۰۰	۴۹/۸۰

SE: فرسایش پذیری خاک، EF: جزء فرسایش پذیر، MWD: میانگین وزنی خاکدانه ها، Sa: شن، Si: سیلت، Cl: رس، OC: کربن آلی، EC: هدایت الکتریکی، CCE: کربنات کلسیم معادل

طوری که می‌توان عنوان نمود که اثرگذاری اصلی بافت خاک بر فرسایش‌پذیری بادی در منطقه مورد مطالعه به صورت غیرمستقیم و از طریق تأثیر بر توزیع اندازه ذرات ثانویه بوده است و این تأثیرگذاری ممکن است در تقابل با عوامل دیگر و اثرات متقابل آن‌ها تشدید و یا کاهش یابد و راعی (۲۰۱۹) نیز در تحقیقی که در منطقه شرق دریاچه ارومیه انجام داده، به نتایج مشابه دست یافته است.

#### اثر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی بر فرسایش‌پذیری بادی

در این پژوهش ذرات رس، شن و سیلت خاک به ترتیب توانایی تبیین ۹، ۷ و ۲ درصد از تغییرات فرسایش‌پذیری خاک‌های منطقه مورد مطالعه را دارا می‌باشند (شکل ۲). به نظر می‌رسد این امر حاکی از تأثیر غیرمستقیم ذرات اولیه بر فرسایش‌پذیری باشد؛ به



شکل ۲ - رابطه رگرسیونی فرسایش پذیری بادی با هرکدام از سه گروه ذرات شن، رس و سیلت.

بررسی‌های انجام گرفته در رابطه با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و فرسایش پذیری بادی خاک بیانگر این است که بین ویژگی‌های شیمیایی با فرسایش پذیری بادی خاک ارتباطی وجود نداشته و در بین ویژگی‌های فیزیکی خاک، میانگین وزنی قطر خاکدانه و جزء فرسایش پذیر خاک ارتباط قوی و معنادار با فرسایش پذیری بادی دارند (شکل ۳ و جدول ۳). نتایج تحقیقات دیگر نیز همانند (راککار و همکاران ۲۰۱۹، وانگ و همکاران ۲۰۱۹ و زمانی و محمودآبادی ۲۰۱۳) ارتباط این دو ویژگی را با فرسایش پذیری بادی خاک مورد تایید قرار داده‌اند. شاخص جزء فرسایش پذیر یکی از پرکاربردترین شاخص‌های فرسایش پذیری بادی می‌باشد که اولین بار توسط چپیل در سال ۱۹۵۰ معرفی شده است و پس از آن از این شاخص به طور وسیعی در مطالعات مربوط به فرسایش بادی استفاده شده است (راککار و همکاران

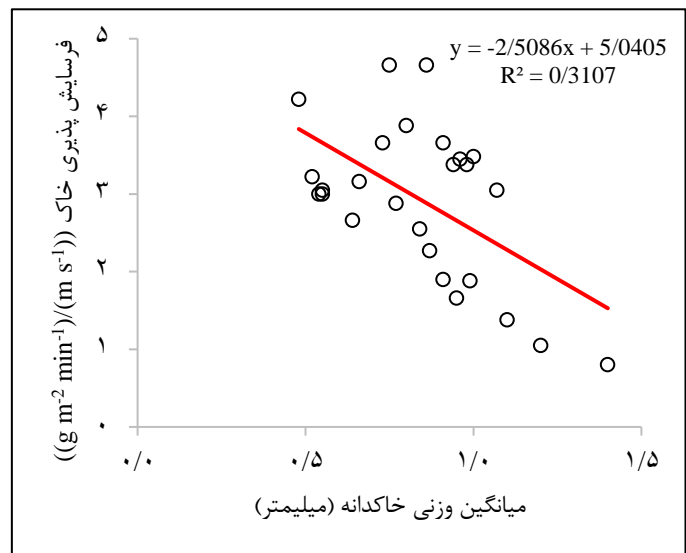
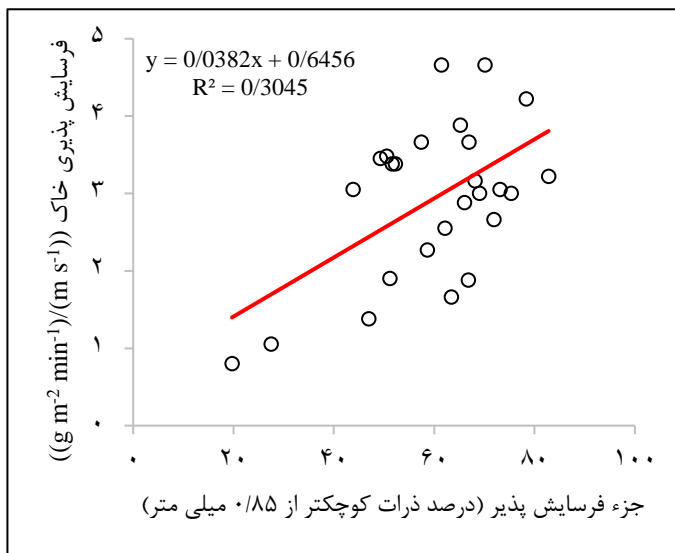
بافت خاک یکی از اثرگذارترین ویژگی‌های خاک بر فرسایش پذیری می‌باشد و نتایج تحقیقات ژائو و همکاران (۲۰۰۶)، سعیدیان و مرادی (۲۰۱۱) و نهتانی و همکاران (۲۰۰۴) نشان دهنده تاثیر کاهش درصد رس و افزایش درصد شن بر افزایش فرسایش پذیری خاک می‌باشد. در این تحقیق همبستگی فرسایش پذیری خاک با هرکدام از سه گروه ذرات شن، سیلت و رس معنی‌دار بوده (جدول ۳)، به طوری که با افزایش مقدار شن فرسایش پذیری افزایش و با افزایش سیلت و رس، فرسایش پذیری کاهش نشان می‌دهد. در یافته‌های کولازو و بوچیاژو (۲۰۱۰) خاک‌های شنی به طور ذاتی فرسایش پذیرتر از خاک‌های ریزبافت بوده و با توجه به مقدار کم سیلت و رس، این خاک‌ها از توانایی تشکیل سله فیزیکی و یا تشکیل خاکدانه برخوردار نیستند و خاک‌های شنی ذاتاً فرسایش پذیرتر از خاک‌های دانه‌ریز می‌باشند.



متفاوت نشان دادند که با افزایش مقدار MWD مقدار فرسایش پذیری بادی خاک کاهش می یابد. بر اساس تحقیقات نگیزی و همکاران (۲۰۱۶) اندازه و پایداری خاکدانه‌ها در خاک از عوامل تأثیرگذار بر فرسایش پذیری بادی می‌باشند.

جدول ۳ همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های خاک را نشان می‌دهد و بیانگر این واقعیت است که بین SE با EF، MWD رابطه معنی‌داری وجود دارد.

۲۰۱۹، وانگ و همکاران (۲۰۱۹). این شاخص در برخی از مدل‌های مربوط به فرسایش بادی از قبیل WEQ و RWEQ به عنوان عامل فرسایش پذیری خاک به کار گرفته شده است. مطابق تحقیقات نگیزی و همکاران (۲۰۱۶) و زمانی و محمودآبادی (۲۰۱۳)، اندازه و ثبات خاکدانه‌های خاک عوامل مؤثر در فرسایش پذیری باد هستند و با افزایش MWD میزان فرسایش پذیری خاک کاهش یافته است. زمانی و محمودآبادی (۲۰۱۳) با بررسی فرسایش پذیری بادی در سه نوع خاک با MWD های



شکل ۳- بررسی رابطه فرسایش‌پذیری بادی با جزء فرسایش‌پذیر و میانگین وزنی خاکدانه‌ها.

جدول ۳- ضریب همبستگی پیرسون بین نمونه های خاک.

	SE	EF	MWD	Sand	Silt	Clay	OC	EC	CCE
SE	۱								
EF	۰/۵۹۳**	۱							
MWD	-۰/۵۵۷**	-۰/۸۸۲**	۱						
Sand	۰/۳۱۱	۰/۱۶	۰/۳۸	۱					
Silt	۰/۰۸۱	۰/۲۵۹	-۰/۳۸۸	۰/۱۵۱	۱				
Clay	-۰/۲۲۳	-۰/۲۸۱	۰/۳۸	-۰/۶۹۶**	۰/۸۰۲**	۱			
OC	۰/۰۵	۰/۰۲۷	-۰/۰۰۶	۰/۰۵۲	۰/۲۱۱	۰/۱۷	۱		
EC	۰/۱۶۴	۰/۳۱۹	-۰/۳۴۴	-۰/۱۲	۰/۴۷۹*	-۰/۲۶	-۰/۰۰۳	۱	
CCE	-۰/۱۰۳	-۰/۲۰۶	۰/۳۴۸	-۰/۱۶۲	-۰/۵۸۷**	۰/۵۴۴**	۰/۲۲۷	۰/۲۹۵	۱

\*همبستگی در سطح ۱ درصد

\*\*همبستگی در سطح ۵ درصد

همانطور که در نتایج حاصله از تکنیک‌های رگرسیون خطی گام به گام مشاهده می‌شود، جزء فرسایش‌پذیر و میانگین وزنی خاکدانه‌ها می‌توانند منجر به پیش‌بینی دقیق‌تر فرسایش‌پذیری خاک شود. همبستگی بین جزء فرسایش‌پذیر و فرسایش‌پذیری بادی خاک مثبت و معنی‌دار و همبستگی بین میانگین وزنی خاکدانه‌ها با فرسایش‌پذیری بادی خاک منفی و معنی‌دار بوده و این

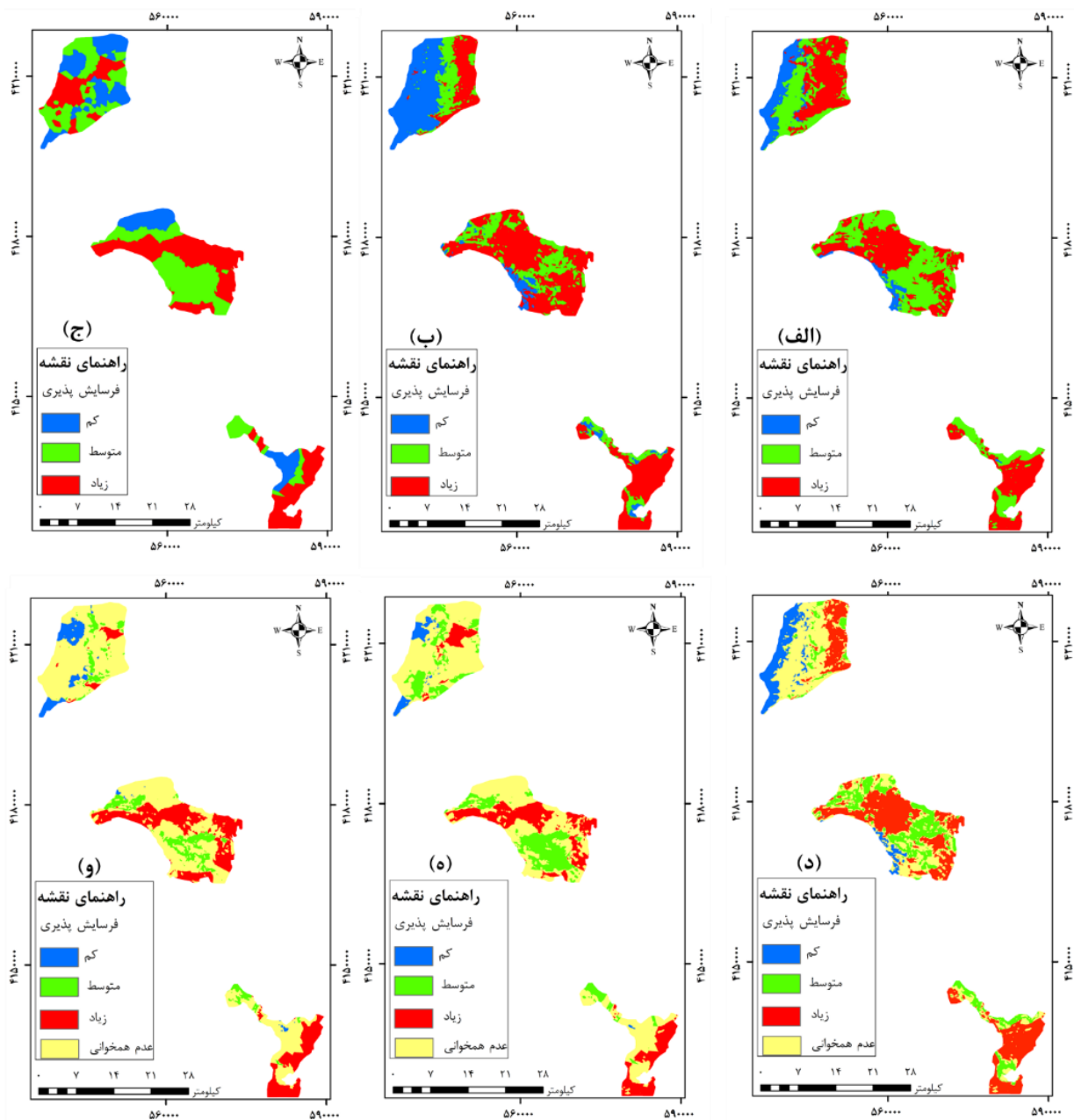
بدان معنی است که با افزایش درصد ذرات فرسایش‌پذیر، ضریب فرسایش‌پذیری افزایش می‌یابد. شاخص جزء فرسایش‌پذیر ویژگی مؤثر در برآورد فرسایش-پذیری است و می‌تواند به عنوان یک شاخص برای نشان دادن حساسیت خاک مورد استفاده قرار گیرد. معادله رگرسیون خطی ایجاد شده بین ضریب فرسایش‌پذیری خاک و ویژگی‌های فوق در معادله ۱ قابل مشاهده است.

$$\text{Soil Erodibility (SE)} = 0.038 \times \text{Erodible Fraction (EF)} + 0.64 \quad [1]$$

#### نقشه فرسایش‌پذیری بادی

برای کالیبراسیون این طبقه‌بندی، فرسایش‌پذیری بادی برآورد شده توسط معادله توسعه یافته در ۱۲۷ نمونه و برای ارزیابی صحت طبقه‌بندی، فرسایش‌پذیری

بادی که توسط یک تونل باد روی ۲۶ نمونه اندازه‌گیری شده بود استفاده گردید که نقشه فرسایش‌پذیری تولید شده توسط تصویر Landsat-8 و Sentinel-2 با روش ANN<sup>1</sup> و روش درون‌یابی کریجینگ در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- نقشه فرسایش پذیری خاک منطقه مورد مطالعه ایجاد شده از تصاویر الف) entinel-2 (ب) Landsat-8 و روش ANN، ج) نقشه فرسایش پذیری ایجاد شده روش درون‌یابی کریجینگ. همخوانی و تعارض بین نقشه‌های ایجاد شده از (د) تصاویر Landsat-8 و Sentinel-2، (ه) درون‌یابی کریجینگ و Sentinel-2، و) درون‌یابی کریجینگ و Landsat-8.

فرسایش بادی، لذا این منطقه از اهمیت بالایی در محافظت از خاک و کنترل و پیشگیری از فرسایش بادی برخوردار است. با توجه به بررسی‌های میدانی صورت گرفته، یکی از مهم‌ترین دلایل این امر را می‌توان به وجود دامپروری در منطقه جنوبی ساحل اشاره نمود که به دلیل چرای مفرط موجب از بین رفتن پوشش گیاهی شده و عبور و

همان‌طور که در نقشه مذکور مشاهده می‌شود قسمت جنوبی ساحل شرقی فرسایش‌پذیرتر از قسمت‌های میانی و شمالی می‌باشند. در قسمت شمالی، میانی و جنوبی ساحل شرقی میانگین فرسایش‌پذیری بادی به ترتیب  $۲/۹۴$ ،  $۳/۰۲$  و  $۳/۲۳$   $((g\ m^{-2}\ min^{-1})/(m\ s^{-1}))$  می‌باشد. با توجه به حساسیت بیشتر مناطق جنوبی در مقابل

شامل کلاس بافتی متوسط و سبک بوده و این امر نیز می‌تواند به عنوان یکی از دلایل بالا بودن میزان فرسایش‌پذیری بادی در این منطقه مطرح شود که در نتایج تحقیقات قبلی نیز مطرح شده است.

مرور حیوانات نیز موجب تخریب سله سطحی و یا ساختمان خاک سطحی می‌شوند که این امر موجب فراهمی ذرات ریزتر و فرسایش‌پذیر در سطح خاک می‌گردد. از طرفی بافت خاک در منطقه جنوبی بیشتر

جدول ۴- توزیع کلاس‌ها، فرآیند همپوشانی و مطابقت بین نقشه‌های تولید شده توسط تصاویر Landsat-8 و Sentinel-2.

داده-روش	تعارض			
	پایین	متوسط	بالا	درصد
لندست	۲۳/۸۸	۲۴/۶۴	۵۱/۳۹	-
سنتینل	۱۰/۶۴	۴۱/۹۷	۴۷/۳۹	-
کرجینگ	۲۱/۵	۳۸/۳	۴۰/۲	-
لندست-سنتینل	۹/۶	۱۶/۸	۳۶/۸	۳۶/۸
کرجینگ-سنتینل	۲/۵۶	۱۷/۹۵	۲۱/۷۹	۵۷/۷
کرجینگ-لندست	۴/۷۸	۹/۷۸	۲۴/۷۵	۶۰/۶۹

افزایش صحت نقشه با استفاده از روش ANN حاصل گردید. که نتایج حاصله از ماتریس خطا نشان دهنده بیشترین صحت روش ANN در مقایسه با سایر روش‌ها برای طبقه‌بندی Landsat-8 و Sentinel-2 می‌باشد (جدول ۵). همچنین نتایج طبقه‌بندی نشان داد که دقت طبقه‌بندی کلی ۵۷/۱٪ بوده و برای کلاس‌های مختلف فرسایش-پذیری در طبقه‌بندی Landsat-8 و Sentinel-2 ۵۲٪ می‌باشد. در کلاس عدم دقت در فرسایش‌پذیری، کلاس یک با ۲۷٪ کمترین دقت را در بین کلاس‌های فرسایش‌پذیر داشته و در کلاس فرسایش‌پذیری میانگین، دقت طبقه‌بندی ۶۳٪ است که بالاترین درجه دقت می‌باشد (جدول ۵). کلاس یک با مساحت ۱۴۰ و ۲۴۵ کیلومتر مربع و فرسایش‌پذیری کم به ترتیب در نقشه Sentinel-2 و Landsat-8 برابر با ۴/۴ درصد و ۷/۹ درصد مساحت بوده و همپوشانی بین دو نقشه برای منطقه با فرسایش‌پذیری کم ۱۰۸ کیلومتر مربع است. کلاس دو با فرسایش‌پذیری متوسط، مساحت ۹۳۲ km<sup>2</sup> یا ۳۰/۱٪ مساحت را در نقشه Landsat-8 شامل می‌شود و مساحت ۱۳۷۱ km<sup>2</sup> یا ۴۴/۲٪

در شکل و جدول ۴ همپوشانی بین نقشه‌های تولید شده و کرجینگ قابل مشاهده می‌باشد. کرجینگ به تنهایی قادر به نشان دادن دقت بیشتری در نقشه نبوده، اما تلفیق تصاویر ماهواره و روش درونیابی باهم منجر به افزایش دقت نقشه می‌گردد که تحقیقات پژوهشگران دیگر نیز این مطلب را تایید می‌کند. شهبازی و همکاران (۲۰۱۹) نیز توزیع مکانی رس و آهن خاک را با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۷ و ۸، در طول سال‌های ۲۰۱۷-۱۹۹۹ در ساحل شرقی دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار دادند و مدلی را برای پیش‌بینی مقدار رس و آهن خاک ارائه نمودند.

مکبراتی و همکاران (۲۰۰۳) تکنیک‌های مختلفی از مدل‌سازی مورد استفاده در نقشه‌برداری دیجیتال خاک، رگرسیون خطی و غیرخطی، شبکه‌های عصبی، سیستم‌های فازی، سطوح روند و کرجینگ را مورد بررسی قرار دادند.

مساحت کل برای نقشه Landsat-8 و  $1589 \text{ km}^2$  یا  $51/3$  % از مساحت کل برای نقشه Sentinel-2 را در بر می‌گیرد.

مساحت را در نقشه Sentinel-2 نشان می‌دهد. کلاس سه با فرسایش‌پذیری بالا مساحتی برابر با  $1923 \text{ km}^2$  یا  $7/62$  %

جدول ۵- نتیجه اعتبارسنجی برای سه مدل طبقه بندی مختلف برای تصاویر Landsat-8 و Sentinel-2 (تعداد = ۲۶).

ماهواره	آماره	روش طبقه‌بندی تصویر			
		ANN	حداقل فاصله	حداکثر احتمال	SVM <sup>1</sup>
Landsat-8	دقت کلی <sup>۲</sup>	۰/۵۷	۰/۳۴	۰/۲۸	۰/۲۷
	ضریب کاپا <sup>۳</sup>	۰/۲۷	-۰/۱۳	-۰/۱۴	-۰/۰۶
Sentinel-2	دقت کلی	۰/۵۲	۰/۲۵	۰/۳۱	۰/۳۰
	ضریب کاپا	۰/۱۹	-۰/۱۴	-۰/۰۱	۰

## نتیجه گیری کلی

معنی‌داری بین فرسایش‌پذیری بادی با دو ویژگی جزء فرسایش‌پذیر (ذرات ثانویه کوچکتر از  $0/85$  میلی‌متری) و میانگین وزنی خاکدانه‌ها مشاهده شد، بهتر است مطالعاتی به منظور تعیین مهم‌ترین عوامل موثر بر این ویژگی‌ها در منطقه مورد نظر انجام شود تا در صورت نیاز به کنترل فرسایش‌پذیری، در اقدامات مدیریتی از اطلاعات به دست آمده برای ایجاد ذرات ثانویه مقاوم به فرسایش بادی در خاک و کنترل فرسایش بادی استفاده گردد.

## سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از رساله دکتری گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز می‌باشد. بدین وسیله از امور پژوهش و فناوری دانشگاه تبریز برای تامین مالی این تحقیق قدردانی می‌شود.

یافته‌های این مطالعه نشان داد که تصاویر Landsat-8 و Sentinel-2 اطلاعات مشابهی در مورد فرسایش‌پذیری نشان داده و استفاده از هر دو در نقشه‌برداری فرسایش‌پذیری در کنار هم ضروری نیست. استفاده از تصاویر ماهواره دقت و صحت بیشتری نسبت به روش درون‌یابی دارند. فرسایش‌پذیری منجر به کاهش بازتاب طیفی در اغلب مناطق طیفی مخصوصا در باندهای مرئی شده و در بین متغیرهای فیزیکی‌شیمیایی بالاترین همبستگی را با دو ویژگی جزء فرسایش‌پذیر و میانگین وزنی خاکدانه نشان داد، به گونه‌ای که با کاهش میانگین وزنی خاکدانه‌ها و با افزایش جزء فرسایش‌پذیر و ذرات شن مقدار فرسایش‌پذیری بادی افزایش می‌یابد. با توجه به این که در ساحل شرقی دریاچه همبستگی قوی و

1 Support vector machine

2 Overall accuracy

3 Kappa

## منابع مورد استفاده

- Ahmadi A, 2009. Artificial neural networks applicability in erosion and runoff simulation using fractal dimensions. PhD dissertation, Soil Science Department, University of Tabriz, Iran (in Persian with English abstract).
- Bower CA, Reitemeier F and Fireman M, 1952. Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Journal of Soil Science* 73:251-261.
- Chepil W, 1950. Methods of estimating apparent density of discrete soil grains and aggregates. *Soil Science* 70: 351-362.
- Colazo JC and Buschiazzi DE, 2010. Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. *Geoderma* 159: 228-236.
- Gardner WH, 1986. Water Content. Pp. 493-544. In: Klute A, (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1, Physical and Mineralogical Methods*, ASA and SSSA, Madison, Wisconsin.
- Gee GW and Or D, 2002. Particle size analysis. Pp. 255-293. In: Dane JH and Topp GC (eds). *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin.
- Goetz J, Brenning A, Petschko H and Leopold P, 2015. Evaluating machine learning and statistical prediction techniques for landslide susceptibility modeling compute. *Geosciences* 81: 1-11.
- Hassan AA and Mustafa MA, 2011. Assessment and mapping of wind erodibility of aridisols and entisols in the River Nile State, Sudan. Pp. 425-442. The 5th Annual Conference on Agricultural and Veterinary Research, February. Khartoum.
- Lopez MV, Herrero JM, Hevia GG, Gracia R and Buschiazzi DE, 2007. Determination of the wind-erodible fraction of soils using different methodologies. *Geoderma* 139: 407-411.
- McBratney AB, Santos MLM and Minasny B, 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117: 3-52.
- Mustafa MA and Medani GH, 2004. Wind erodibility of soils from Khartoum State. *Journal of Agricultural Sciences* 11: 149-164.
- Négyesi G, Lóki J, Buró B and Szabó S, 2016. Effect of soil parameters on the threshold wind velocity and maximum eroded mass in a dry environment. *Arab Journal Geoscience* 9: 1-10.
- Nelson DW and Sommers LE, 1996. Total Carbon, Organic Carbon, and organic Matter. Pp. 961-1010. In: Sparks DL, (ed). *Methods of Soil Analysis. Chemical Methods*. Soil Science Society of America Journal. Madison.
- Nohtani M, Pahlavan Ravi A, Dehvari A, Jahantigh M and Hashemi Z, 2014. Effect of soil physical and Chemical characteristic on soil erodibility by wind and its zoning. (Zahak as a Case Study). Master thesis, Department of watershed and management, University of Zabol, Iran (In Persian with English abstract).
- Pasztor L, Négyesi G, Laborcz A and Kovacs T, 2016. Integrated spatial assessment of wind erosion risk in Hungary. *Hazards Earth System Science* 16: 2421-2432.
- Raei B, 2019. Evaluation of some artificial and hybrid intelligence techniques in modeling the inherent erosion of soil against wind (Case study: Tabriz plain). PhD dissertation, Soil Science Department, University of Tabriz, Iran (In Persian with English abstract).
- Rakkar MK, Blanco-Canqui H and Tatarko J, 2019. Predicting soil wind erosion potential under different corn residue management scenarios in the central Great Plains. *Geoderma* 353: 25-34.
- Richard LA, 1969. *Diagnosis and Improvements of Saline and Alkali Soils*. P. 60. Agricultural Handbook. USDA.
- Saidian H and Moradi HR, 2011. Investigation on some of soil indices and land uses in Gachsaran formation deposits using multiple variable regression. *Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi)* 90: 78-86. (In Persian with English abstract).
- Shahbazi F, McBratney A, Malone B, Oustan Sh and Minasny B, 2019. Retrospective monitoring of the spatial variability of crystalline iron in soils of the east shore of Urmia Lake. *Geoderma* 337: 1196-1207.
- Six J, Guggenberger G, Paustian K, Haumaier L, Elliott ET and Zech W, 2001. Sources and composition of soil organic matter fractions between and within soil aggregates. *European Journal of Soil Science* 52: 607-618.
- Wang R, Li Q, Zhou N, Chang CH, Gou ZH and Li J, 2019. Effect of wind speed on aggregate size distribution of windblown sediment. *Aeolian Research* 36: 1-8.
- Zamani S and Mahmoodabadi M, 2013. Effect of particle –size distribution on wind erosion rate and soil erodibility. *Archives of Agronomy and Soil Science* 59: 1743-1753.
- Zhang KL, Li S, Peng W and Yu B, 2004. Erodibility of agricultural soils on the Loess Plateau of China. *Soil Tillage Research* 76:157-165.
- Zhao HL, Yi XY, Zhou RL, Zhao XY, Zhang TH and Drake S, 2006. Wind erosion and Sand Accumulation Effects on Soil Properties in Horqin Sandy Farmland. *Catena* 65: 71-79.