



## **Prediction of Wind Erosion Threshold Velocity Using Portable Wind Tunnel Combined with Machine Learning Algorithms**

**Monireh Mina<sup>1</sup>** | **Abdolmajid Sameni<sup>2</sup>** | **Ali Akbar Moosavi<sup>3</sup>** | **Yaghouh Ghanbari<sup>4</sup>**

1. Department of Soil Science and Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran. E-mail:

[monirehmina@gmail.com](mailto:monirehmina@gmail.com)

2. Corresponding Author, Department of Soil Science and Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran. E-mail: [majid.baba@gmail.com](mailto:majid.baba@gmail.com)

3. Corresponding Author, Department of Soil Science and Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran. E-mail: [aamousavi@gmail.com](mailto:aamousavi@gmail.com)

4. Department of Computer Science and Information Technology, Faculty of Engineering, Hormozgan University, Bandarabbas, Iran. E-mail: [ghanbarii.yaghouh@gmail.com](mailto:ghanbarii.yaghouh@gmail.com)

### **Article Info**

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** May. 27, 2023

**Revised:** July. 21, 2023

**Accepted:** July. 26, 2023

**Published online:** Aug. 23, 2023

**Keywords:**

Feature Selection,  
Genetic Algorithm,  
Soil Erosion,  
Support Vector Regression.

### **ABSTRACT**

Wind erosion is a key process in land degradation worldwide, especially in arid and semi-arid regions of Iran. This phenomenon is affected by many soil characteristics. The main objective of this study was to estimate the wind erosion threshold velocity using easily measurable soil characteristics along with data mining methods. For this purpose, wind erosion threshold velocity was measured in 100 areas in Fars province using a portable wind tunnel. Wind erosion threshold velocity was predicted by a support vector regression algorithm using easily measurable soil properties. In this regard, a genetic algorithm was used in order to obtain a set of parameters effective in estimating wind erosion threshold velocity. The results showed that the characteristics of soil moisture ( $r = 0.77$ ), the size distribution of soil particles including the mean weight diameter of aggregate ( $r = 0.87$ ) and the wind-erodible fraction of soils ( $r = -0.81$ ), penetration resistance ( $r = 0.75$ ), and organic matter ( $r = 0.33$ ) have a high and significant correlation with wind erosion threshold velocity and play a key role in determining the threshold velocity of wind erosion in the region. According to the evaluation criteria, the combined support vector regression model with the genetic algorithm had the best performance and the most accurate estimate for wind erosion threshold velocity (RMSE = 0.53 and  $R^2 = 0.92$ ) and can be a promising method for estimation of wind erosion threshold velocity.

Cite this article: Mina, M., Sameni, A., Moosavi, A.A., & Ghanbari, Y. (2023). Prediction of Wind Erosion Threshold Velocity Using Portable Wind Tunnel Combined with Machine Learning Algorithms. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (6), 933-947. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.354837.669506>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.354837.669506>



## برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی با استفاده از تونل باد همراه با الگوریتم‌های یادگیری ماشین

منیره مینا<sup>۱</sup>، عبدالمجید ثامنی<sup>۲</sup>، سید علی اکبر موسوی<sup>۳</sup> و یعقوب قنبری<sup>۴</sup>۱. بخش علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. رایانامه: [monirehmina@gmail.com](mailto:monirehmina@gmail.com)۲. نویسنده مسئول، بخش علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. رایانامه: [majid.baba@gmail.com](mailto:majid.baba@gmail.com)۳. نویسنده مسئول، بخش علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. رایانامه: [amoussavi@gmail.com](mailto:amoussavi@gmail.com)۴. گروه علوم کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشکده مهندسی، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان، ایران. رایانامه: [ghanbarii.yaghoub@gmail.com](mailto:ghanbarii.yaghoub@gmail.com)

## چکیده

## اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۳/۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۴/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۵/۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۶/۱

## واژه‌های کلیدی:

الگوریتم ژنتیک،

توزیع اندازه ذرات،

رگرسیون بردار پشتیبان،

فرسایش خاک،

مقاومت فروری.

فرسایش بادی یک عامل تخریب زمین در سراسر جهان به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک ایران است. این پدیده تحت تأثیر ویژگی‌های خاکی زیادی قرار دارد. هدف اصلی مطالعه حاضر برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی با استفاده از ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری زودیاقت خاک همراه با روش‌های داده کاوی بود. برای این منظور، سرعت آستانه فرسایش بادی در ۱۰۰ منطقه در استان فارس با استفاده از تونل باد قابل حمل اندازه‌گیری شد. سرعت آستانه فرسایش بادی توسط الگوریتم رگرسیون بردار پشتیبان با استفاده از ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری زودیاقت پیش‌بینی شد. در همین راستا، به منظور دستیابی به مجموعه ویژگی‌های مؤثر در برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی، از الگوریتم ژنتیک استفاده شد. نتایج نشان داد که ویژگی‌های رطوبت خاک ( $r = 0.77$ )، توزیع اندازه ذرات خاک از جمله میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها ( $r = 0.87$ ) و جزء فرسایش‌پذیر خاک ( $r = -0.81$ )، مقاومت فروری ( $r = 0.75$ ) و ماده آلی ( $r = 0.33$ ) همبستگی زیاد و معنی‌داری با سرعت آستانه فرسایش بادی داشتند و همچنین در تعیین سرعت آستانه فرسایش بادی در منطقه نقش کلیدی دارند. با توجه به معیارهای ارزیابی، مدل تلفیقی رگرسیون بردار پشتیبان به همراه الگوریتم ژنتیک بهترین عملکرد و دقیق‌ترین برآورد را برای سرعت آستانه فرسایش بادی داشته است ( $RMSE = 0.53$  و  $R^2 = 0.92$ ) و می‌تواند یک روش امیدوارکننده برای برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی باشد.

استناد: مینا، منیره؛ ثامنی، عبدالمجید؛ موسوی، سید علی اکبر؛ و قنبری، یعقوب (۱۴۰۲). برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی با استفاده از تونل باد همراه با الگوریتم‌های

یادگیری ماشین. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۴ (۶)، ۹۳۳-۹۴۷. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.354837.669506>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.354837.669506>

## مقدمه

فرسایش بادی یکی از عوامل اصلی تخریب اراضی در سراسر جهان (Gholami & Mohammadifar., 2022)، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران محسوب می‌شود (Kouchami et al., 2019). کشور ایران به‌دلیل شرایط اقلیمی و محیطی از جمله کمبود بارندگی و پوشش گیاهی، برای وقوع فرسایش بادی بسیار مستعد است (Rezaei et al., 2022). تغییر کاربری اراضی (Mozaffari et al., 2021, 2022; Zahedifar, 2023a, 2023b) نیز می‌تواند با اثر بر ویژگی‌های مختلف منجر به کاهش کیفیت خاک و افزایش تخریب و در نتیجه افزایش حساسیت خاک به فرسایش بادی شود.

فرسایش بادی زمانی رخ می‌دهد که بادهای فرساینده بر روی زمین‌های با خاک خشک، صاف، نرم، دارای دانه‌بندی ریز و پوشش گیاهی ضعیف می‌وزند (Mina et al., 2020). این پدیده تهدیدی برای کشاورزی پایدار (Borrelli et al., 2014) و کیفیت محیط زیست (Azimzadeh et al., 2022) است و سبب کاهش حاصلخیزی خاک (Kheirabadi et al., 2018) می‌شود. با این وجود اطلاعات کمی درباره اثر این پدیده مهم بر تخریب خاک و اراضی وجود دارد (Sirjani et al., 2019). برای جلوگیری از فرسایش بادی شناخت کافی در زمینه عوامل مؤثر بر آن مورد نیاز است (Kouchami et al., 2019). فرسایش بادی زمانی رخ می‌دهد که هم بادهای قوی و هم سطوح فرسایش‌پذیر خاک به طور همزمان وجود داشته باشند (Chappell et al., 2018). سرعت باد باید به اندازه‌ای باشد که بتواند ذرات خاک را حمل کند که به آن سرعت آستانه فرسایش بادی می‌گویند و به عنوان یک عامل کلیدی در تعیین حساسیت خاک در بسیاری از پژوهش‌های فرسایش بادی در نظر گرفته می‌شود (Li et al., 2015). در واقع، ویژگی‌های خاک بر سرعت آستانه فرسایش بادی تأثیر گذارند (Visser et al., 2004). در این زمینه می‌توان به توزیع اندازه ذرات اولیه (بافت خاک) (Sirjani et al., 2019) و ثانویه (خاکدانه) (Kheirabadi et al., 2018)، درصد کربنات کلسیم معادل (Kouchami et al., 2019) و میزان کربن آلی (Borelli et al., 2014) و همچنین رطوبت خاک (Mina et al., 2021) اشاره کرد. یافتن روش‌هایی برای برآورد علمی و دقیق عوامل مؤثر بر فرسایش به منظور کنترل این فرآیند امری ضروری است.

استان فارس با حدود ۵ میلیون نفر جمعیت در جنوب ایران قرار دارد و کشاورزی در این استان از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا این استان یکی از بزرگترین تولیدکنندگان محصولات کشاورزی به‌ویژه غلات استراتژیک مانند گندم، برنج و ذرت در ایران است. با توجه به شرایط آب و هوایی استان فارس، فرسایش بادی در اکثر نقاط آن رخ می‌دهد. ۳۰ کانون بحرانی فرسایش بادی به مساحت ۱۲۳ هزار و ۵۰۰ هکتار در فارس شناسایی شده است (Rezaei et al., 2016). به‌ویژه دریاچه‌های زیادی در فارس خشک شده و به منبع بالقوه ذرات رسوبی ریز حاوی نمک و سایر آلاینده‌ها تبدیل شده‌اند و باد می‌تواند این مناطق را به کانون گرد و غبار تبدیل کند (Sirjani et al., 2019). بنابراین، بررسی سرعت آستانه فرسایش بادی در استان فارس برای اجرای اقدامات عملیاتی در برابر فرسایش بادی حیاتی است. با این وجود، تاکنون پژوهش‌های بسیار کمی با هدف استفاده از روش‌های یادگیری ماشینی در برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی انجام شده است.

به طور کلی، پژوهش حاضر با هدف (۱) اندازه‌گیری سرعت آستانه فرسایش بادی در صحرا با استفاده از تونل باد، (۲) برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی با استفاده از رگرسیون بردار پشتیبان (۳) تعیین ویژگی‌های مؤثر بر سرعت آستانه فرسایش بادی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، (۴) برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی با استفاده از روش رگرسیون بردار پشتیبان به همراه الگوریتم ژنتیک در خاک‌های استان فارس انجام شد.

## پیشینه پژوهش

طی نیم‌قرن گذشته تاکنون، از تونل‌های باد قابل حمل برای اندازه‌گیری فرسایش بادی در شرایط طبیعی استفاده شده است (Li et al., 2015). به‌دلیل اینکه تعیین مستقیم سرعت آستانه فرسایش بادی، هزینه‌بر و مستلزم وقت زیاد می‌باشد و نیز نتایج حاصل از آن اغلب منطقه‌ای و محدود است، امروزه پژوهشگران به استفاده از روش‌هایی غیر مستقیم برای تخمین ویژگی‌های دیر یافت خاک با استفاده از ویژگی‌های زود یافت تمایل دارند (Kouchami et al., 2020).

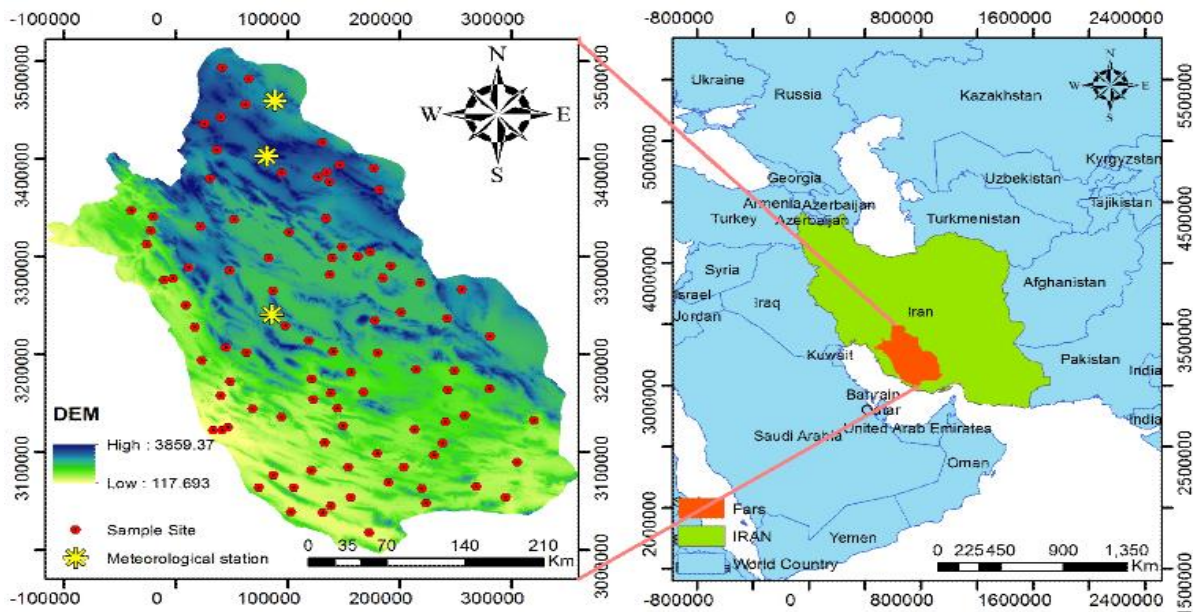
یادگیری ماشینی شاخه‌ای از هوش مصنوعی می‌باشد که الگوریتم‌ها را کشف و تنظیم می‌کند که بر اساس آن‌ها سامانه‌ها و رایانه‌ها توانایی یادگیری می‌یابند (Rezaei et al., 2016). در پیش‌بینی عوامل فرسایش بادی با استفاده از روش‌های یادگیری ماشینی از جمله رگرسیون بردار پشتیبان مطالعات بسیار اندکی در سطح جهان انجام شده است (Rezaei et al., 2016). رگرسیون بردار پشتیبان برای

مدل سازی روابط غیرخطی استفاده شده است (Vapnik et al., 1996). تاکنون از ماشین‌های بردار پشتیبان در پژوهش‌ها و زمینه‌های گوناگونی برای مدلسازی استفاده شده است (Zhou et al., 2020). به عنوان نمونه برای برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی (Liao et al., 2014)، رطوبت خاک (Lamorski et al., 2013)، برآورد هدایت هیدرولیکی (Twarakavi et al., 2009) و برآورد پایداری خاکدانه‌ها (Besalatpour et al., 2015) نیز از این روش استفاده شده است. علاوه بر این، برخی پژوهشگران بیان نموده‌اند که تلفیق الگوریتم یادگیری ماشینی با الگوریتم ژنتیک کارایی بهتری دارند (Mina et al., 2022). الگوریتم ژنتیک نوع خاصی از الگوریتم‌های تکاملی است که از تفکیک‌های زیست‌شناسی مانند وراثت و جهش نسخه‌برداری شده و اغلب گزینه خوبی برای شناسایی مؤثرترین ویژگی‌ها می‌باشد (Kouchami et al., 2020).

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

استان فارس یکی از استان‌های جنوبی ایران است. تمام مناطق این استان در طبقه‌بندی خشک و نیمه خشک قرار گرفته است (Mina et al., 2021). این استان در موقعیت جغرافیایی بین  $50^{\circ} 42'$  تا  $55^{\circ} 36'$  طول شرقی و  $27^{\circ} 2'$  تا  $31^{\circ} 42'$  عرض شمالی قرار گرفته و تحت تأثیر فرسایش بادی است. میانگین بارندگی سالانه در این استان از ۱۰۰ میلی‌متر در قسمت جنوبی تا حدود ۴۰۰ میلی‌متر در قسمت شمالی متغیر است. با توجه به هدف پژوهش، ۱۰۰ نمونه خاک در نقاط مختلف جغرافیایی استان فارس که جزء مناطق برداشت و همچنین مناطق حساس به فرسایش بادی در استان محسوب شده (Sirjani et al., 2019) و چندین منطقه کانونی مولد گرد و غبار در آن وجود دارد (Rezaei et al., 2016). برداشت شد. سه مرکز اصلی در شیراز، اقلید و آباده واقع شده‌اند که در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری

حداکثر سرعت باد در ایستگاه‌های هواشناسی از ۴ تا بیش از ۲۱ متر بر ثانیه (ارتفاع ۱۰ متر) متغیر است. این سرعت‌های زیاد باد با جهت‌های غرب به شمال غربی در شیراز، جهت‌های جنوب به جنوب غربی در اقلید و جهت‌های شمالی در آباده است. مناطق مورد مطالعه از کاربری‌های مختلف شامل اراضی فصلی و رها شده، دشت، مرتع و بستر رودخانه و دریاچه‌های خشک شده می‌باشند. شیب عمومی تمامی مناطق کمتر از ۱ درصد، و همچنین اغلب مناطق مورد مطالعه دارای پوشش گیاهی ضعیف می‌باشند.

### نمونه‌برداری خاک

به منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در نقاط مورد مطالعه، از حداکثر ۱۰ سانتی‌متری خاک سطحی در هر نقطه نمونه‌برداری

با سه تکرار انجام شد. سپس، نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن، برای خارج کردن ذرات درشت و بقایای گیاهی از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شده است.

#### اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک در آزمایشگاه

ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل بافت خاک به روش هیدرومتری (Page et al., 1982) و میزان رطوبت به روش وزنی (Page et al., 1982) اندازه‌گیری شد. برای جلوگیری از خطا، میزان رطوبت اولیه نمونه‌ها در صحرا به وسیله ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری و سپس نمونه‌ها در پلاستیک‌های مجزا قرار داده شد و در آزمایشگاه در آون با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس خشک شدند. علاوه بر این، توزیع اندازه ذرات ثانویه به روش الک خشک اندازه‌گیری شد (Kemper et al., 1986). با استفاده از داده‌های الک خشک، شاخص میانگین وزنی قطر ذرات ثانویه (خاکدانه‌ها) برای نمونه‌های خاک با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i \quad \text{رابطه ۱}$$

در معادله ذکر شده،  $n$  تعداد کلاس‌های اندازه‌های ذرات خاک،  $X_i$  متوسط اندازه ذرات در هر کلاس اندازه و  $W_i$  نسبت جرمی ذرات هر کلاس اندازه می‌باشد. جزء فرسایش‌پذیر خاک (WE) توسط چپیل در خاک‌های آمریکا در سال ۱۹۵۴ اندازه‌گیری شده که با درصد خاکدانه‌های کوچک‌تر از ۰/۸۴ mm رابطه دارد و با استفاده از الک خشک محاسبه می‌شود (رابطه ۲).

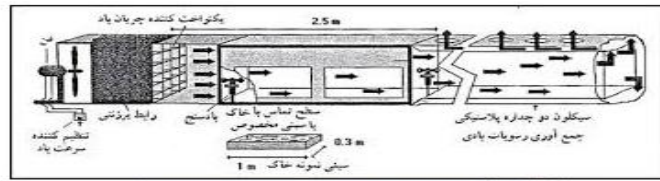
$$WE = \frac{W \leq 0.84mm}{W_t} * 100 \quad \text{رابطه ۲}$$

مقاومت فروروی با دستگاه پنترومتر اندازه‌گیری شد. ویژگی‌های شیمیایی خاک شامل، ماده آلی به روش افت حرارتی به مدت ۳ ساعت در کوره‌ای با درجه ۵۵۰ درجه سلسیوس انجام شد (هاگستن و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین درصد کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون (Nelson, 1983) و مقدار درصد گچ موجود در نمونه‌ها به روش استن (Nelson, 1983) اندازه‌گیری شد. قابلیت هدایت الکتریکی در گل اشباع با استفاده از دستگاه هدایت سنج الکتریکی (Page et al., 1982) و غلظت سدیم محلول در خاک به وسیله دستگاه شعله سنج (Page et al., 1982) اندازه‌گیری شد. غلظت کلسیم و منیزیم محلول نیز به وسیله روش تیتراسیون با EDTA اندازه‌گیری شد (Page et al., 1982). ضمناً برای محاسبه نسبت جذبی سدیم (SAR) از رابطه ۳ استفاده شد.

$$SAR(meqL^{-1})^{0.5} = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Mg^{+} + Ca^{2+}}{2}}} \quad \text{رابطه ۳}$$

#### آزمایش‌های تونل باد

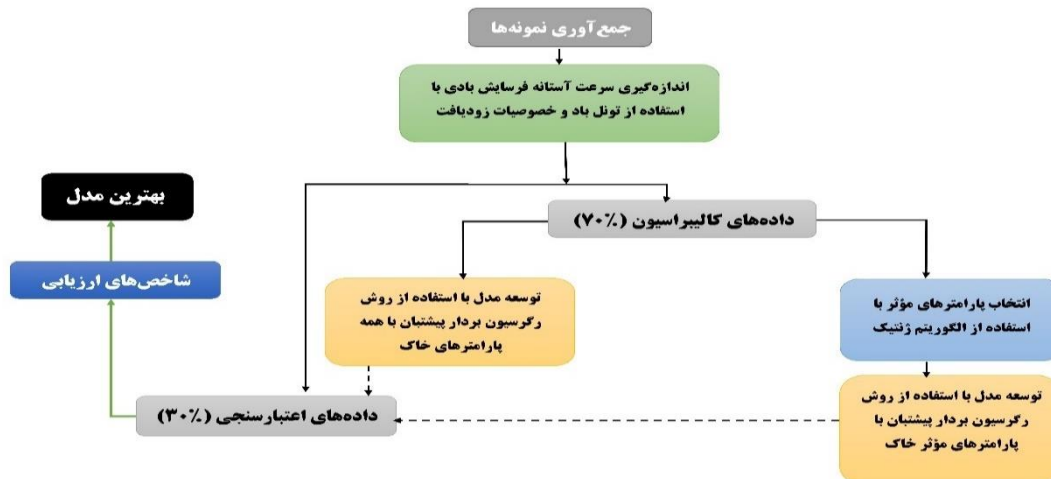
اطلاعات به دست آمده از آزمایش‌های تونل باد بخش عمده‌ای از پژوهش‌های فرسایش بادی را تشکیل می‌دهند (Shao, 2008). برای انجام آزمایش‌های تونل باد در هر منطقه مورد مطالعه، سه نقطه مختلف تعیین شد. در هر منطقه آزمایش‌های تونل باد در سطوح مسطح و تا حد ممکن عاری از پوشش گیاهی، سنگ و قلوه سنگ و بدون سله سطحی انجام شد. پس از تعیین نقاط مناسب آزمایش، تونل باد در جهت باد غالب منطقه بر روی خاک دست نخورده قرار گرفت. به منظور تعیین سرعت آستانه فرسایش بادی در تمام نقاط مورد مطالعه از روش مشاهده‌ای استفاده شد. در واقع با افزایش تدریجی سرعت باد در تونل باد تا زمانی که حرکت ذرات خاک مشاهده شود، که آن سرعت به عنوان سرعت آستانه فرسایش بادی در نظر گرفته شد. همین دستگاه با موفقیت در سایر مطالعات فرسایش بادی به کار گرفته شده است (Sirjani et al., 2019; Kouchami et al., 2022; Mina et al., 2022; Azimzade et al., 2022). شماتیک دستگاه تونل باد و استفاده در صحرا در نقاط مورد مطالعه، در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. تصویر دستگاه تونل باد و استفاده از آن در صحرا

### توسعه مدل

در ادامه برای پیش‌بینی سرعت آستانه فرسایش بادی از مراحل بیان شده در شکل ۳ بهره گرفته شده است.



شکل ۳. نمودار جریان مراحل فرآیند برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی

در این پژوهش آزمایش تونل باد در صد نقطه مختلف از استان فارس انجام شد و از هر نقطه نمونه خاک برای انجام مراحل آزمایشگاهی جمع‌آوری شد. در این بخش داده‌ها به صورت تصادفی به دو دسته واسنجی (۷۰ درصد داده‌ها) و اعتبارسنجی (۳۰ درصد داده‌ها) تقسیم‌بندی شدند. از داده‌های واسنجی برای آموزش الگوریتم و از داده‌های اعتبارسنجی برای ارزیابی مدل استفاده شد. در این پژوهش عملیات پیش‌بینی سرعت آستانه فرسایش بادی با استفاده از الگوریتم رگرسیون بردار پشتیبان و الگوریتم ژنتیک انجام شد. به منظور پیش‌بینی میزان سرعت آستانه فرسایش بادی با استفاده از ویژگی‌های زود یافت خاک، الگوریتم رگرسیون بردار پشتیبان با در نظر گرفتن دو رویکرد استفاده شد. در رویکرد اول، تمام ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری زود یافت خاک (جدول ۲) به عنوان متغیرهای ورودی برای پیش‌بینی سرعت آستانه فرسایش بادی استفاده شد. در رویکرد دوم، از الگوریتم ژنتیک برای انتخاب ویژگی‌های مؤثر از بین تمامی ویژگی‌های خاک که به راحتی قابل اندازه‌گیری هستند، استفاده شد و سپس ویژگی‌های انتخاب شده برای پیش‌بینی سرعت آستانه فرسایش بادی توسط رگرسیون بردار پشتیبان در نظر گرفته شد. رگرسیون بردار پشتیبان یکی از روش‌های یادگیری ماشینی است که دارای قابلیت بسیار بالایی در پرداختن به داده‌های پیچیده چند بعدی و غیرخطی است. در این پژوهش، کرنل و نوع آن به ترتیب خطی و اپسیلون تنظیم شده است. پارامتر C که ضریب جریمه نامیده می‌شود، که در واقع فاصله از اپسیلون است و با روش جستجوی شبکه‌ای

سیستماتیک به دست آمد (Mina et al., 2021).

الگوریتم ژنتیک برای انتخاب عوامل مؤثر از پنج گام اصلی از جمله جمعیت اولیه، برازندگی جمعیت، عملیات ترکیب، عملیات جهش و عملیات نخبه‌گرایی تشکیل شده است (Kouchami et al., 2020). در این پژوهش از کدگذاری باینری برای انتخاب یا عدم انتخاب ویژگی‌ها و از روش کمینه‌سازی استفاده شد. خطای میانگین به عنوان تابع کمینه‌سازی برای محاسبه تناسب جمعیت در نظر گرفته شد. همچنین از عملیات تک نقطه‌ای برای عملیات نوترکیبی استفاده شد. در این عملیات تک نقطه‌ای یک نقطه برای عملیات ترکیب انتخاب شده و بعد از آن بخش‌های دو جمعیت با هم تعویض می‌شوند. پس از انتخاب جمعیت، برخی از ژن‌های این جمعیت، برای عملیات جهش انتخاب شده و مقادیر این ژن‌ها معکوس می‌شوند. در نهایت از میان جمعیت‌های اولیه جمعیت بدست آمده از عملیات ترکیب و جمعیت بدست آمده از عملیات جهش، N جمعیت برتر (به اندازه جمعیت اولیه) برای تولید نسل جدید انتخاب می‌شوند (Mina et al., 2022). الگوریتم‌های ذکر شده در محیط برنامه نویسی MATLAB 2019 فرموله شده و در نهایت پیاده‌سازی شد.

### ارزیابی نتایج تخمین

برای ارزیابی روش پیشنهادی از دو معیار ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب تعیین استفاده شد (روابط ۴ و ۵).

جدول ۱. معیارهای ارزیابی مورد استفاده

آماره	رابطه	
ریشه میانگین مربعات خطا	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$	(۴)
ضریب تعیین	$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i)]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2}$	(۵)

که در این روابط  $P_i$  و  $O_i$  به ترتیب مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده ویژگی و  $n$  تعداد داده‌ها است. آماره RMSE بیانگر مقدار خطا است و هرچه مقدار RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد کارایی مدل بیشتر است (Lamorski et al., 2013).

### نتایج و بحث

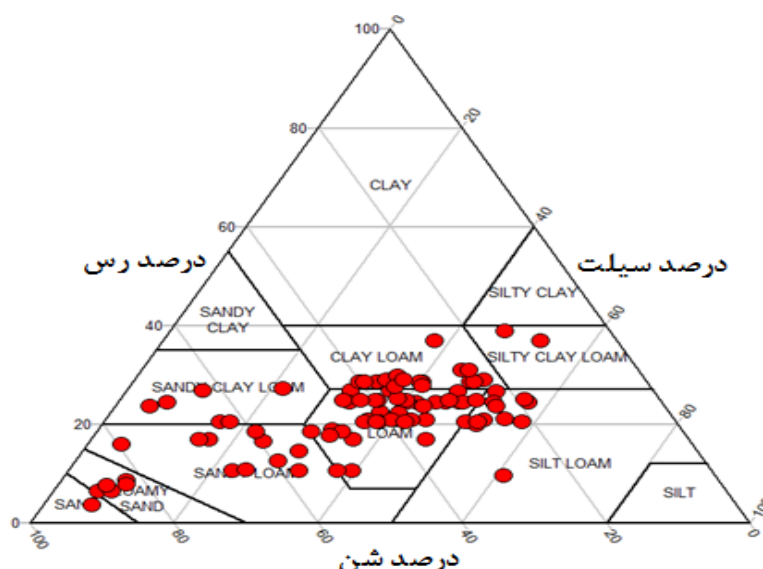
#### ویژگی‌های خاک

در جدول ۲ خلاصه آماری سرعت آستانه فرسایش بادی اندازه‌گیری شده با استفاده از تونل باد و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده خاک‌های منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. محتوای شن با میانگین ۴۱/۹۹ درصد از ۱۰/۶۸ تا ۸۹/۵۶ درصد متغیر بود. درصد سیلت از ۴/۶۴ تا ۶۰/۷۲ درصد و با میانگین ۳۵/۸۷ درصد متغیر بود و مقدار رس به طور میانگین ۲۲/۱۳ درصد و با ضریب تغییرات ۳۰/۴۵ درصد می‌باشد. مقادیر شن، سیلت و رس از کمتر از ۱۰ درصد تا ده‌ها درصد نشان می‌دهد خاک‌های مورد مطالعه از نظر کلاس بافت خاک دارای تنوع زیادی بوده و هشت کلاس بافت از ۱۲ کلاس ممکن را شامل می‌شوند که عمدتاً جز خاک‌های متوسط بافت می‌باشند (شکل ۴). کمترین انحراف استاندارد به ترتیب برای ویژگی‌های پایداری خاکدانه‌ها (۰/۱۶)، مقدار رطوبت (۰/۶۴) و مقاومت فروروی (۰/۶۹) می‌باشد. خاک‌های منطقه دارای مقدار کم ماده آلی با میانگین ۰/۹۹ درصد بودند. خاک‌ها دارای مقادیر زیاد کربنات کلسیم معادل (میانگین ۵۷/۷ درصد) بودند که نشان‌دهنده زیاد بودن آهک و آهکی بودن خاک‌های منطقه مورد مطالعه می‌باشد. از سوی دیگر، کمترین تغییرات مربوط (ضریب تغییرات برابر ۱۳/۰۹ درصد) به شاخص فرسایش‌پذیری خاک بود. در مقایسه با سایر ویژگی‌ها، تغییرات داده‌های مربوط به ویژگی‌های نسبت جذب سدیم و قابلیت هدایت الکتریکی بسیار زیاد می‌باشد به طوری که به ترتیب با مقادیر حدود ۲۰۰/۳۴ و ۲۲۸/۲۴ درصد بیشترین ضریب تغییرات را دارا می‌باشند. با توجه به اینکه مناطق مورد مطالعه شامل خاک‌های شور و غیر شور می‌باشد ویژگی‌های نسبت جذب سدیم و قابلیت هدایت الکتریکی بیشترین دامنه تغییرات را نشان داده‌اند. در حالی که سایر پژوهشگران مقادیر ضریب تغییرات کمتری را برای ویژگی‌های مذکور یا سایر ویژگی‌ها در خاک‌های مورد مطالعه در مناطق با وسعت کمتر و محدودتر گزارش نموده‌اند (Moosavi and Sepaskhah, 2012; Moradi et al., 2016; Rezaee et al., 2020a, b).

از تونل باد برابر با ۷/۲۱ متر بر ثانیه و از ۱/۵ تا ۱۲/۵ متر بر ثانیه متغیر بود.

جدول ۲. خلاصه آماری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

ویژگی‌ها	واحد	دامنه تغییرات	میانگین	انحراف استاندارد	ضریب تغییرات (%)
شن	%	۱۰/۶۸ - ۸۹/۵۶	۴۱/۹۹	۱۷/۹۴	۴۲/۷۳
سیلت	%	۴/۶۴ - ۶۰/۷۲	۳۵/۸۷	۱۳/۸۸	۳۸/۷۲
رس	%	۳/۷۲ - ۳۸/۹۶	۲۲/۱۳	۶/۷۴	۳۰/۴۵
رطوبت	%	۰ - ۳/۴۸	۱/۱۱	۰/۶۴	۵۸/۳۳
میانگین قطر خاکدانه‌ها	mm	۰/۱۶ - ۰/۹۰	۰/۵۷	۰/۱۶	۲۸/۷۷
ماده آلی	%	۰/۰۳ - ۶/۰۰	۰/۹۹	۰/۸۳	۸۳/۴۳
کربنات کلسیم معادل	%	۳۵/۹۳ - ۸۳/۵۰	۵۷/۷	۹/۰۲	۱۵/۶۳
گچ	%	۰ - ۳/۹۸	۰/۹۲	۰/۷۰	۷۶/۰۸
جزء فرسایش‌پذیر خاک	%	۵۷/۵۲ - ۱۰۰	۷۹/۴۱	۱۰/۴۰	۱۳/۰۹
مقاومت فروری	kg cm <sup>-2</sup>	۰/۲۶ - ۳/۴	۱/۳۹	۰/۶۹	۴۹/۷۰
قابلیت هدایت الکتریکی	dS m <sup>-1</sup>	۰ - ۱۸۹/۷۱	۱۹/۷۲	۴۵/۰۲	۲۲۸/۲۴
نسبت جذب سدیم	(meq L <sup>-1</sup> ) <sup>0.5</sup>	۰ - ۹۸۹/۷۸	۱۱۱/۲۴	۲۲۲/۸۷	۲۰۰/۳۴
سرعت آستانه فرسایش	m s <sup>-1</sup>	۱/۵ - ۱۲/۵	۷/۲۱	۱/۹۸	۲۷/۵۱



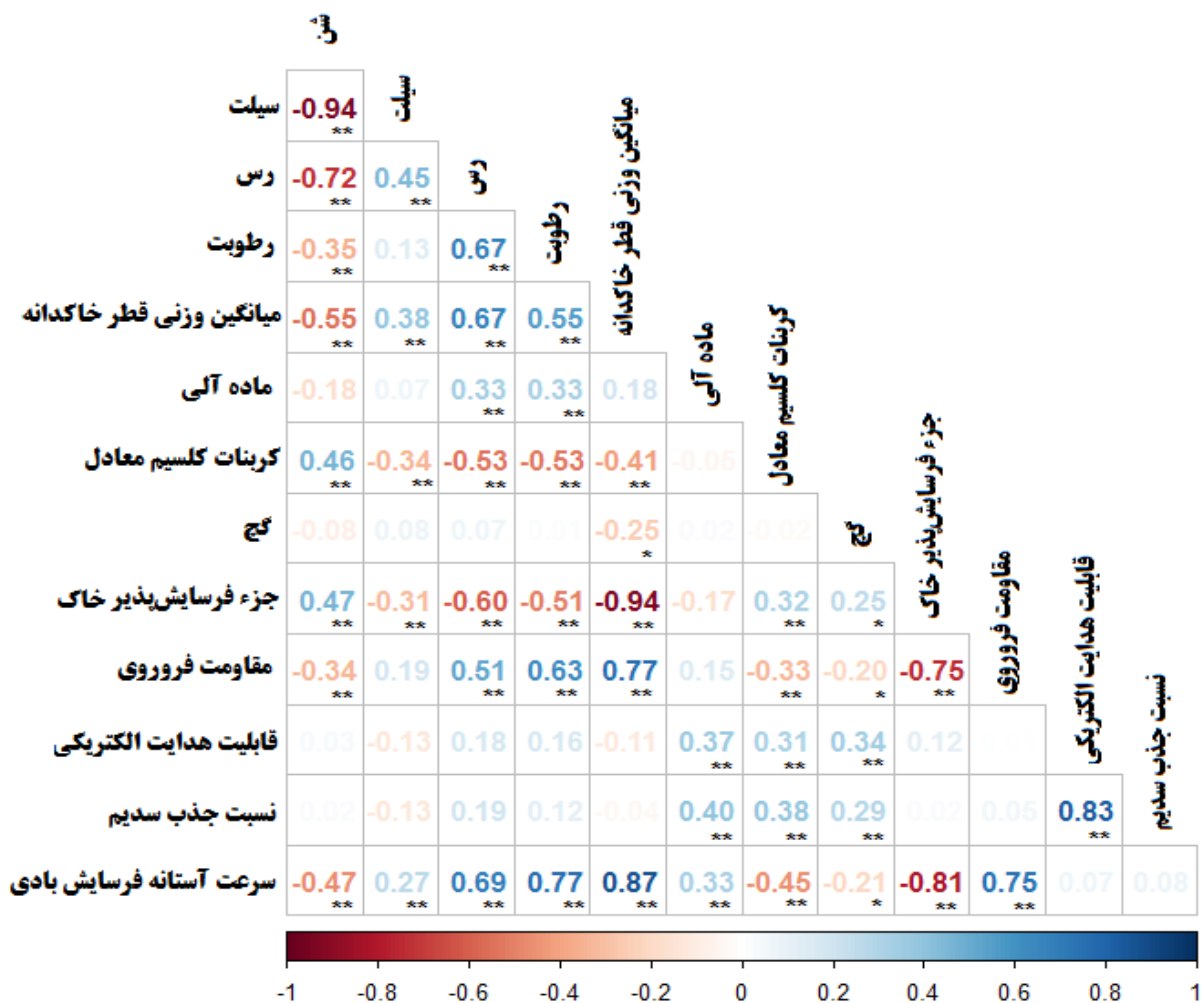
شکل ۴. توزیع کلاس بافت خاک نقاط مورد مطالعه

از بین مناطق مورد مطالعه، کمترین سرعت آستانه فرسایش نیز در جنوب غربی منطقه مطالعاتی که دارای بافت شنی و پوشش گیاهی بسیار ضعیف و همچنین دارای کمترین پوشش سنگریزه‌ای در سطح و کمترین میزان رطوبت سطحی می‌باشد به دست آمد. این منطقه به عنوان بحرانی‌ترین منطقه از نظر فرسایش بادی در استان فارس شناخته می‌شود (Rezaei et al., 2016) که نتایج حاصل از اندازه‌گیری مستقیم در این پژوهش این مطلب را تایید می‌کند. در مقابل بیشترین سرعت آستانه فرسایش بادی در شمال غربی و شمال منطقه مطالعاتی که دارای بافت لوم رسی و کاربری مرتع می‌باشد مشاهده شد که نتایج این پژوهش با نتایج سیرجانی و همکاران (Sirjani et al., 2019) مطابقت دارد.

شکل ۵ ماتریس همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های مؤثر در سرعت آستانه فرسایش بادی را نشان می‌دهد. چنانچه ملاحظه می‌شود میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، رطوبت، مقاومت فروری و رس دارای بیشترین همبستگی مثبت و همچنین جزء فرسایش‌پذیر خاک، شن و کربنات کلسیم معادل بیشترین همبستگی منفی نسبت به سایر ویژگی‌ها با سرعت آستانه فرسایش بادی دارند. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۵، سرعت آستانه فرسایش بادی دارای رابطه معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد با شن، سیلت، رس، رطوبت، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، ماده آلی، کربنات کلسیم معادل، جزء فرسایش‌پذیر خاک و مقاومت فروری است، همچنین نتایج نشان داد سرعت آستانه



فرسایش بادی با میزان گچ دارای رابطه معنی داری (در سطح احتمال ۵ درصد) می باشد. نتایج نشان داد بین سرعت آستانه فرسایش بادی با شوری و نسبت جذب سدیم در خاک‌های مورد مطالعه رابطه معنی داری وجود ندارد (شکل ۵). فرآیند فرسایش بادی توسط ویژگی‌های فیزیکی خاک و شرایط سطح خاک کنترل می شود (Sharratt & Vaddella, 2014). همچنین بافت خاک در حساسیت خاک نسبت به فرسایش بادی نقش بسزایی ایفا می کند (Pásztor et al., 2016). ذرات شن به دلیل عدم چسبندگی در اثر نیروی باد به راحتی جدا شده و به حرکت در می آیند و در مقابل رس و سیلت به دلیل خاصیت چسبندگی در برابر فرسایش بادی مقاومت می کنند (Li et al., 2015). رس و سیلت سبب افزایش خاکدانه سازی در خاک (Ciric et al., 2012) و در نتیجه سبب کاهش حرکت ذرات توسط باد می شوند (Kheirabadi et al., 2018).



شکل ۵. ضریب همبستگی پیرسون بین سرعت آستانه فرسایش بادی و ویژگی‌های اندازه‌گیری شده نمونه‌های خاک. \* معنی داری در سطح ۰/۰۵ و \*\* معنی داری در سطح ۰/۰۱.

به طور کلی خاک‌های ریزبافت به خاک‌های درشت بافت کمتر فرسایش پذیر هستند (Mina et al., 2020). نتایج به دست آمده در ارتباط با توزیع اندازه ذرات اولیه با نتایج سیرجانی و همکاران (۲۰۱۹) و کوچمی و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت دارد. پایداری خاکدانه‌های خاک، از عوامل اولیه‌ای است که بر حساسیت خاک به فرسایش بادی اثر گذار است (Borelli et al., 2014). در پژوهشی میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها را به عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار در سرعت آستانه فرسایش بادی خاک معرفی کردند (Kouchami et al., 2020). خاک‌های با خاکدانه‌های بزرگ و درشت‌تر در برابر فرسایش بادی مقاومت‌تر می باشند (Sirjani et al., 2019). اثر مثبت رطوبت خاک بر سرعت آستانه فرسایش بادی در بسیاری از مطالعات پیشین نیز گزارش شده است (Chepil, 1954; Chen et al., 1966; Sirjani et al., 2019; Mina et al., 2021). رطوبت خاک با ایجاد چسبندگی بین ذرات و از این طریق بر عوامل فرسایش بادی خاک مؤثر است. از همین رو، میزان رطوبت به‌ویژه در لایه سطحی خاک به عنوان عامل مهم و کنترل کننده فرسایش بادی دارای اهمیت است (Han et al., 2019).

Kouchami et al., 2009). در پژوهشی کربنات کلسیم معادل خاک را به عنوان ویژگی مؤثر در فرسایش بادی معرفی نمودند (Kouchami et al., 2020). همچنین در پژوهشی دیگر نیز رابطه معنی داری بین کربنات کلسیم معادل و سرعت آستانه فرسایش بادی خاک گزارش کردند (Sirjani et al., 2019). همچنین گزارش شده مقدار زیاد ماده آلی خاک سبب افزایش خاکدانه سازی و پایداری خاکدانه ها و در نتیجه افزایش سرعت آستانه فرسایش بادی خاک می شود (Négyesi et al., 2016).

مقادیر زیاد EC و SAR می تواند به دلیل وجود منبع خارجی نمک و سایر املاح در خاک های سطحی باشد و EC خاک سطحی را افزایش دهد. گزارش های مشابهی در ارتباط با تغییرات EC خاک سطحی به دلیل منابعی غیر از مواد اصلی وجود دارد (Kaewmano et al., 2016; Narimani et al., 2016). منبع نمک در خاک ها ممکن است به دلیل هوازدگی مواد معدنی موجود در مواد مادری و آزاد شدن یون در محلول خاک و در نتیجه تجمع نمک باشد (Jahanbazi et al., 2016). استفاده از زمین نیز می تواند سبب انباشت نمک، به ویژه در خاک های سطحی شود (Yan et al., 2015). در مطالعه حاضر، زمین های نمکی و دریاچه های خشک شده می توانند EC و SAR خاک سطحی را افزایش دهند. شوری و سدیم می توانند با تغییر اندازه و پایداری خاکدانه ها بر ساختار خاک تأثیر بگذارند و در خاک های سدیمی،  $Na^+$  یون اصلی است که منجر به ناپایداری خاکدانه ها و افزایش پراکندگی ذرات خاک می شود (Yan et al., 2015). در مطالعه حاضر به دلیل مواد آهکی و آهنی بودن خاک های مورد مطالعه،  $Ca^{2+}$  و  $Mg^{2+}$  یون های غالب در محلول خاک هستند که می توانند به عنوان عوامل اتصال دهنده برای ذرات رس عمل کنند و در نتیجه سبب افزایش اندازه و پایداری خاکدانه ها می شوند (Ostovari et al., 2020). با این حال، نتایج یک پژوهش نشان داد که شوری با پیوند ذرات ریز خاک می تواند سبب تشکیل خاکدانه های بزرگ شود (Sirjani et al., 2019). آنان همچنین نشان دادند که همآوری ذرات خاک معمولاً زمانی اتفاق می افتد که شوری محلول خاک بیش از ۱/۵ دسی زیمنس بر متر باشد. در نهایت می توان گفت که مقادیر شوری به دلایل گفته شده با سرعت آستانه فرسایش بادی رابطه مستقیم دارند.

### نتایج مدل سازی

در این بخش نتایج مربوط به انتخاب و عدم انتخاب عوامل مؤثر بر اساس الگوریتم پیش بینی کننده رگرسیون بردار پشتیبان بر اساس ویژگی های ارزیابی ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب تعیین نشان داده شده است.

جدول ۳. نتایج معیارهای ارزیابی بر اساس رویکردهای مورد مطالعه

روش	ضریب تعیین ( $R^2$ )	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)
و اعتبارسنجی	۰/۹۸	۰/۲۹
	۰/۹۶	۰/۴۰
	۰/۷۸	۰/۸۹
	۰/۹۲	۰/۵۳

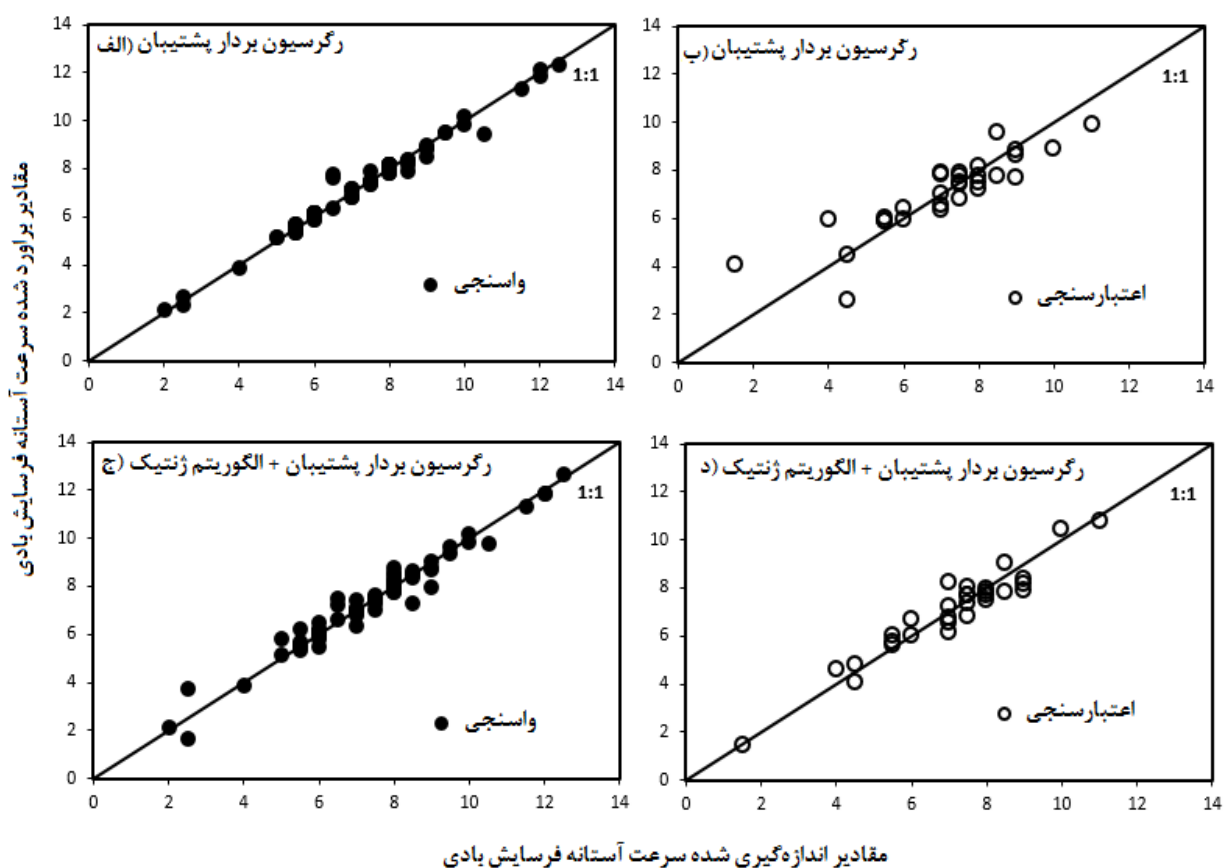
جدول ۳ نتایج داده های واسنجی و اعتبارسنجی در مدل های رگرسیون بردار پشتیبان و مدل تلفیقی رگرسیون بردار پشتیبان به همراه الگوریتم ژنتیک را نشان می دهد. ابتدا تمام ویژگی های ورودی در مدل ها قرار داده شد و سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک ویژگی های مؤثر برای هر مدل انتخاب شد و به طور مجدد کارایی مدل ها مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول ۴ نشان دهنده تعداد و ویژگی های مؤثر می باشد که ویژگی های رطوبت، پایداری خاکدانه ها، ماده آلی، جزء فرسایش پذیر خاک و مقاومت فروروی به عنوان ویژگی های ورودی انتخاب شده و سبب برآورد بهتر و دقیق تر سرعت آستانه فرسایش بادی شدند. به بیان دیگر، این مجموعه ویژگی ها به دلیل اهمیت بیشتر در سرعت آستانه فرسایش بادی، تأثیر بیشتری در عملکرد پیش بینی مدل ها دارند و همچنین ویژگی های که هم راستا با هم می باشند از طریق این روش حذف می شوند. مدل رگرسیون بردار پشتیبان با ویژگی های ورودی زیاد از دقت کمتری برخوردار بود و پس از انتخاب ویژگی های مؤثر به نتایج مطلوب دست پیدا نمود. معیار ارزیابی RMSE برای داده های واسنجی (جدول ۳) مدل تلفیقی رگرسیون بردار پشتیبان به همراه الگوریتم ژنتیک از دقت کمتری برخوردار است زیرا ویژگی های ورودی کاهش یافته است. اما برای داده های اعتبارسنجی از دقت بیشتری برخوردار است. هنگامی که تعداد ویژگی های مورد استفاده برای فرآیند مدل سازی زیاد باشند، پیچیدگی مدل ها زیاد شده

و صحت کلی آن‌ها کاهش خواهد یافت (Mina et al., 2022).

جدول ۴. تعداد و معرفی ویژگی‌های ورودی در برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی در خاک‌های مورد مطالعه

ویژگی‌های مؤثر	تعداد ویژگی‌های مؤثر	تعداد کل ویژگی‌های ورودی
رطوبت، پایداری خاکدانه‌ها، ماده آلی، جزء فرسایش‌پذیر خاک و مقاومت فروری	۵	۱۲

ماده آلی یک عامل کلیدی در افزایش کلوخه‌ای شدن (Perfect et al., 1993) و همآوری خاکدانه‌ها (Mina et al., 2020) و همچنین افزایش سرعت آستانه فرسایش بادی (Sirjani et al., 2019) و در نهایت کاهش تلفات خاک ناشی از باد (Leys et al., 1996) می‌باشد. اثر رطوبت به دلیل نیروی چسبندگی ناشی از لایه آب جذب شده در اطراف ذرات از طریق نیروی موئینگی می‌باشد. این عامل مقاومت ذرات را در مقابل فرسایش بادی افزایش می‌دهد (Visser et al., 2004). در پژوهشی به رابطه بین MWD با شدت فرسایش باد پرداختند، نتایج آنان نشان داد که بین سرعت آستانه فرسایش بادی و MWD رابطه غیرخطی و معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد وجود دارد. در واقع خاکدانه‌ها یک عامل حفاظتی در خاک‌های در حال فرسایش محسوب می‌شوند (Kheirabadi et al., 2018). فرسایش‌پذیری خاک همزمان به وسیله عوامل سطحی و ویژگی‌های خاک (مانند درصد سنگریزه در سطح خاک، اندازه خاکدانه‌ها و بافت خاک) کنترل می‌شود (Liu et al., 2007).



شکل ۶. نمودار مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده سرعت آستانه فرسایش بادی (متر بر ثانیه) در خاک‌های مورد مطالعه در دو مجموعه واسنجی (۷۰ نمونه خاک) و اعتبارسنجی (۳۰ نمونه خاک)

نتایج جداول ۳ و ۴ و شکل ۶ نشان می‌دهد که مدل تلفیقی رگرسیون بردار پشتیبان همراه با الگوریتم ژنتیک، با تعداد ویژگی‌های ورودی کمتر از دقت بهتری در پیش‌بینی سرعت آستانه فرسایش بادی برخوردار است. بررسی ویژگی‌های مؤثر نیز بیانگر آن است که ویژگی‌های مرتبط با رطوبت خاک، به طور کلی بافت و توزیع اندازه ذرات خاک از جمله میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و جزء فرسایش‌پذیر خاک، مقاومت فروری و ماده آلی، در دقت مدل‌های پیش‌بینی و در نتیجه تعیین سرعت آستانه فرسایش بادی در منطقه سهم عمده دارند. در پژوهشی به بررسی ارتباط خطی سرعت آستانه فرسایش بادی با برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک پرداختند. نتایج نشان داد

که ویژگی‌های درصد سنگریزه سطحی، پایداری خاکدانه‌ها، درصد رس و رطوبت خاک از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی و کربن آلی نیز مهم‌ترین ویژگی شیمیایی مؤثر در کاهش سرعت آستانه فرسایش بادی می‌باشد (Sirjani et al., 2019). در پژوهشی دیگر از الگوریتم ژنتیک برای پیدا کردن ویژگی‌های مؤثر در برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی استفاده و گزارش کردند که ویژگی‌های مربوط به بافت خاک، پایداری خاکدانه‌ها، کربنات کلسیم معادل و درصد سنگریزه سطحی از ویژگی‌های مؤثر در برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی هستند (Kouchami et al., 2020) که با نتایج این پژوهش همخوانی دارند. در پژوهش دیگری از رگرسیون بردار پشتیبان در برآورد هدایت هیدرولیکی استفاده و بیان کردند مدل رگرسیون بردار پشتیبان از کارایی بالایی برخوردار است (Sanikhani et al., 2015).

## نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف مقایسه دقت روش‌های رگرسیون بردار پشتیبان و همچنین روش تلفیقی رگرسیون بردار پشتیبان به همراه الگوریتم ژنتیک در برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی و شناخت ویژگی‌های خاکی مؤثر بر آن انجام شد. برای این منظور پس از اجرای مدل‌ها، دقت هر یک از روش‌ها با استفاده از معیارهای ارزیابی  $R^2$  و RMSE و با مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده در ۱۰۰ نقطه از خاک‌های استان فارس بررسی شد. به طور کلی نتایج نشان داد خاک‌های استان فارس دارای دامنه وسیعی از سرعت آستانه فرسایش بادی است و همچنین همبستگی معنی‌داری بین ویژگی‌های زودپافت خاک با سرعت آستانه فرسایش بادی وجود دارد. مقایسه کلی نشان داد که مدل تلفیقی بهترین عملکرد در اعتبارسنجی و دقیق‌ترین برآورد را برای سرعت آستانه فرسایش بادی داشت ( $R^2 = 0.92$  و  $RMSE = 0.53$ ). بنابراین روش رگرسیون بردار پشتیبان به همراه الگوریتم ژنتیک بسیار مناسب برای برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی است. با استفاده از این روش، می‌توان مناطق وسیعی را که در معرض فرسایش بادی و انتشار گرد و غبار هستند، با دقت قابل قبولی ارزیابی و به تصمیم‌گیران کمک نمود تا اقدامات حفاظت از خاک را مشخص و اولویت‌بندی نمایند. برای مشاهده بهتر عملکرد روش‌های یادگیری ماشین در مطالعات فرسایش بادی، توصیه می‌شود سایر روش‌های داده‌کاوی مانند جنگل‌های تصادفی و شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز برای پیش‌بینی سرعت آستانه فرسایش بادی برای مطالعات آینده مورد استفاده و مقایسه قرار گیرند.

## سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله از دانشگاه شیراز و کارگروه تخصصی آب، خشکسالی، فرسایش و محیط زیست ستاد معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری به دلیل فراهم نمودن امکانات و اعتبار مالی لازم برای انجام پژوهش تشکر و قدردانی می‌نمایند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## منابع

بسالت‌پور، علی اصغر، شیرانی، حسین، اسفندیارپور بروجنی، عیسی. (۱۳۹۴). مدل سازی پایداری خاکدانه‌ها با استفاده از ماشین‌های بردار پشتیبان و رگرسیون خطی چند متغیره. *مجله آب و خاک*، ۲۹(۲)، ۴۰۶-۴۱۷.

جهانبازی، لیلا، جعفرزاده، علی اصغر، فروغی‌فر، حامد. (۱۳۹۵). رابطه تکامل خاک و تنوع شکل اراضی در دشت تبریز. *دانش آب و خاک*، ۲۶، ۱۹۱-۲۰۴.

## REFERENCES

- Azimzadeh, H. R., Derakhshan, Z., & Shirgahi, F. (2022). Field scale spatio-temporal variability of wind erosion transport capacity and soil loss at Urmia Lake. *Environmental Research*, 215, 114250.
- Besalatpour, A. A., Shirani, H., & Esfandiarpour Borujeni, I. (2015). Modeling of soil aggregate stability using support vector machines and multiple linear regression. *Water and Soil*, 29(2), 406-417. (In Persian).
- Borrelli, P., Ballabio, C., Panagos, P., & Montanarella, L. (2014). Wind erosion susceptibility of European soils. *Geoderma*, 232, 471-478.
- Chappell, A., Webb, N. P., Guerschman, J. P., Thomas, D. T., Mata, G., Handcock, R. N., ... & Butler, H. J. (2018). Improving ground cover monitoring for wind erosion assessment using MODIS BRDF parameters. *Remote Sensing of Environment*, 204, 756-768.
- Chen, W., Zhibao, D., Zhenshan, L., & Zuotao, Y. (1996). Wind tunnel test of the influence of moisture on the erodibility of loessial sandy loam soils by wind. *Journal of Arid Environments*, 34(4), 391-402.

- Chepil, W. S., & Woodruff, N. P. (1954). Estimations of wind erodibility of field surfaces. *Journal of Soil and Water Conservation*, 9, 257-265.
- Ciric, V., Manojlovic, M., Nesic, L., & Belic, M. (2012). Soil dry aggregate size distribution: effects of soil type and land use. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12(4), 689-703.
- Gholami, H., & Mohammadifar, A. (2022). Novel deep learning hybrid models (CNN-GRU and DLDL-RF) for the susceptibility classification of dust sources in the Middle East: a global source. *Scientific Reports*, 12(1), 1-12.
- Han, Q., Qu, J., Zhang, K., Zu, R., Niu, Q., & Liao, K. (2009). Wind tunnel investigation of the influence of surface moisture content on the entrainment and erosion of beach sand by wind using sands from tropical humid coastal southern China. *Geomorphology*, 104(3-4), 230-237.
- Hoogsteen, M. J. J., Lantinga, E. A., Bakker, E. J., & Tittone, P. A. (2018). An evaluation of the loss-on-ignition method for determining the soil organic matter content of calcareous soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(13), 1541-1552.
- Jahanbazi, L., Jafarzadeh, A. A., & Forughyfar, H. (2016). Relation between soil evolution and landforms diversity in Dasht-E-Tabriz. *Journal of Agriculture Science*, 26(2), 191-204. (In Persian).
- Kaewmano, C., Kheoruenromne, I., Suddhiprakarn, A., & Gilkes, R. J. (2010, August). Chemistry and clay mineralogy of Thai Natraqualfs. In 19<sup>th</sup> World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World (pp. 1-6).
- Kemper, W. D., & Rosenau, R. C. (1986). Aggregate stability and size distribution. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, 425-442.
- Kheirabadi, H., Mahmoodabadi, M., Jalali, V., & Naghavi, H. (2018). Sediment flux, wind erosion and net erosion influenced by soil bed length, wind velocity and aggregate size distribution. *Geoderma*, 323, 22-30.
- Kouchami-Sardoo, I., Shirani, H., Esfandiarpour-Boroujeni, I., Álvaro-Fuentes, J., & Shekofteh, H. (2019). Optimal feature selection for prediction of wind erosion threshold friction velocity using a modified evolution algorithm. *Geoderma*, 354, 113873.
- Kouchami-Sardoo, I., Shirani, H., Esfandiarpour-Boroujeni, I., Besalatpour, A. A., & Hajabbasi, M. A. (2020). Prediction of soil wind erodibility using a hybrid Genetic algorithm–Artificial neural network method. *Catena*, 187, 104315.
- Lamorski, K., Pastuszka, T., Krzyszczak, J., Sławiński, C., & Witkowska-Walczyk, B. (2013). Soil water dynamic modeling using the physical and support vector machine methods. *Vadose Zone Journal*, 12(4), 1-12.
- Leys, J., Koen, T., & McTainsh, G. (1996). The effect of dry aggregation and percentage clay on sediment flux as measured by a portable field wind tunnel. *Soil Research*, 34(6), 849-861.
- Li, J., Flagg, C., Okin, G. S., Painter, T. H., Dintwe, K., & Belnap, J. (2015). On the prediction of threshold friction velocity of wind erosion using soil reflectance spectroscopy. *Aeolian Research*, 19, 129-136.
- Liao, K., Xu, S., Wu, J., Zhu, Q., & An, L. (2014). Using support vector machines to predict cation exchange capacity of different soil horizons in Qingdao City, China. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(5), 775-782.
- Liu, L. Y., Li, X. Y., Shi, P. J., Gao, S. Y., Wang, J. H., Ta, W. Q., ... & Xiao, B. L. (2007). Wind erodibility of major soils in the farming-pastoral ecotone of China. *Journal of Arid Environments*, 68(4), 611-623.
- Mina, M., Emami, H., & Karimi, A. (2020). Evaluation the efficiency of different mulches to combat wind erosion of sandy soil running title: Efficiency of different mulches to control wind erosion. *Sustainable Earth Review*, 1(1), 16-22.
- Mina, M., Rezaei, M., Sameni, A., Moosavi, A. A., & Ritsema, C. (2021). Vis-NIR spectroscopy predicts threshold velocity of wind erosion in calcareous soils. *Geoderma*, 401, 115163.
- Mina, M., Rezaei, M., Sameni, A., Ostovari, Y., & Ritsema, C. (2022). Predicting wind erosion rate using portable wind tunnel combined with machine learning algorithms in calcareous soils, southern Iran. *Journal of Environmental Management*, 304, 114171.
- Moosavi, A. A., & Sepaskhah, A. R. (2012). Spatial variability of physico-chemical properties and hydraulic characteristics of a gravelly calcareous soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58, 631-656.
- Moradi, F., Moosavi, A. A., & Khalili Moghaddam, B. (2016). Spatial variability of water retention parameters and saturated hydraulic conductivity in a calcareous Inceptisols (Khuzestan province of Iran) under sugarcane cropping. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62, 1686-1699.
- Mozaffari, H., Moosavi, A. A., & Sepaskhah, A. (2021). Land use-dependent variation of near-saturated and saturated hydraulic properties in calcareous soils. *Environmental Earth Sciences*, 80(23), 769.



- Mozaffari, H., Moosavi, A. A., Sepaskhah, A. R. & Cornelis, W. (2022). Long-term effects of land use type and management on sorptivity, macroscopic capillary length and water-conducting porosity of calcareous soils. *Arid Land Research and Management*, 36, 371-397.
- Nafarzadegan, A. R., Zadeh, M. R., Kherad, M., Ahani, H., Gharekhani, A., Karampoor, M. A., & Kousari, M. R. (2012). Drought area monitoring during the past three decades in Fars province, Iran. *Quaternary International*, 250, 27-36.
- Narimani, Z., & Manafi, Sh. (2016). The study of physico-chemical and mineralogical properties and classification of some saline-sodic soils in the east of Urmia plain. *Journal of Water and Soil Conservation (Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources)*, 23(1), 65-82.
- Négyesi, G., Lóki, J., Buró, B., & Szabó, S. (2016). Effect of soil parameters on the threshold wind velocity and maximum eroded mass in a dry environment. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(11), 1-10.
- Nelson, R. E. (1983). Carbonate and gypsum. *Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and microbiological properties*, 9, 181-197
- Ostovari, Y., Moosavi, A. A., & Pourghasemi, H. R. (2020). Soil loss tolerance in calcareous soils of a semiarid region: evaluation, prediction, and influential parameters. *Land Degradation & Development*. 1-12.
- Page, A. I., Miller, R. H., & Keeny, D. R. (1982). *Methods of soil analysis. Part II. Chemical and microbiological methods. Amer. Soc. Agron., Madison, Wisconsin, USA.*
- Pásztor, L., Négyesi, G., Laborczi, A., Kovács, T., László, E., & Bihari, Z. (2016). Integrated spatial assessment of wind erosion risk in Hungary. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(11), 2421-2432.
- Perfect, E., Kay, B. D., Ferguson, J. A., Da Silva, A. P., & Denholm, K. A. (1993). Comparison of functions for characterizing the dry aggregate size distribution of tilled soil. *Soil and Tillage Research*, 28(2), 123-139.
- Rezaei, M., Mina, M., Ostovari, Y., & Riksen, M. J. (2022). Determination of the threshold velocity of soil wind erosion using a wind tunnel and its prediction for calcareous soils of Iran. *Land Degradation & Development*, 33(13), 2340-2352.
- Rezaei, M., Sameni, A., Shamsi, S. R. F., & Bartholomeus, H. (2016). Remote sensing of land use/cover changes and its effect on wind erosion potential in southern Iran. *PeerJ*, 4, e1948.
- Sanikhani, H., Dinpashoh, Y., & Ghorbani, M. A. (2015). Baranduz-Chay River Flow Modeling Using the K-Nearest Neighbor and Intelligent Methods. *Water and Soil Science*, 25(1), 219-233. (In Persian).
- Shao, Y. (Ed.). (2008). *Physics and modeling of wind erosion*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Sharratt, B. S., & Vaddella, V. (2014). Threshold friction velocity of crusted windblown soils in the Columbia Plateau. *Aeolian Research*, 15, 227-234.
- Sirjani, E., Sameni, A., Moosavi, A. A., Mahmoodabadi, M., & Laurent, B. (2019). Portable wind tunnel experiments to study soil erosion by wind and its link to soil properties in the Fars province, Iran. *Geoderma*, 333, 69-80.
- Twarakavi, N. K., Šimůnek, J., & Schaap, M. G. (2009). Development of pedotransfer functions for estimation of soil hydraulic parameters using support vector machines. *Soil Science Society of America Journal*, 73(5), 1443-1452.
- Vapnik, V., Golowich, S., & Smola, A. (1996). Support vector method for function approximation, regression estimation and signal processing. *Advances in neural information processing systems*, 9.
- Visser, S. M., Sterk, G., & Ribolzi, O. (2004). Techniques for simultaneous quantification of wind and water erosion in semi-arid regions. *Journal of Arid Environments*, 59(4), 699-717.
- Yan, N., Marschner, P., Cao, W., Zuo, C., & Qin, W. (2015). Influence of salinity and water content on soil microorganisms. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(4), 316-323.
- Zahedifar, M. (2023a). Assessing alteration of soil quality, degradation, and resistance indices under different land uses through network and factor analysis. *Catena*, 222, 106807-0.
- Zahedifar, M. (2023b). Feasibility of fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) and fuzzy TOPSIS methods to assess the most sensitive soil attributes against land use change. *Environmental Earth Sciences*, 82, 1-17.
- Zhou, T., Geng, Y., Chen, J., Pan, J., Haase, D., & Lausch, A. (2020). High-resolution digital mapping of soil organic carbon and soil total nitrogen using DEM derivatives, Sentinel-1 and Sentinel-2 data based on machine learning algorithms. *Science of the Total Environment*, 729, 138244.

## Prediction of Wind Erosion Threshold Velocity Using Portable Wind Tunnel Combined with Machine Learning Algorithms

### EXTENDED ABSTRACT

#### Introduction

Wind erosion is a key process in land degradation worldwide, especially in arid and semi-arid regions. This phenomenon is affected by many soil characteristics. The main objective of the present study was to estimate the wind erosion threshold velocity using easily measurable soil characteristics along with data mining methods. Therefore, the present study aimed 1) to measure the wind erosion threshold velocity by extensive wind tunnel tests; 2) to predict the wind erosion threshold velocity using machine learning algorithms; 3) to determine features affecting the wind erosion threshold velocity using genetic algorithm coupled with machine learning algorithms in the prediction of wind erosion threshold velocity.

#### Materials and Methods

For this purpose, wind erosion threshold velocity was measured in 100 areas in Fars province using a portable wind tunnel. Fars province is located in the southwest region of Iran. Due to the climate conditions, wind erosion occurs in most parts of Fars province. Thirty critical sources of wind erosion with an area of 123,500 ha have been identified in Fars province. Therefore, investigation of the wind erosion threshold velocity in Fars province is vital for guiding the decision-makers to implement conservative practices against wind erosion. Wind erosion threshold velocity was predicted by a support vector regression algorithm using easily measurable soil properties. In this regard, a genetic algorithm was used in order to obtain a set of influential parameters in estimating wind erosion threshold velocity. In this study, the algorithms were provided in MATLAB 2019 programming software packages.

#### Results and Discussion

The results showed that with respect to sand, silt, and clay content, there are a variety of different soil textures according to USDA classification in the study area. The majority of soils had a medium texture class. The results showed that the characteristics of soil moisture ( $r = 0.77$ ), the size distribution of soil particles including the mean weight diameter of aggregates ( $r = 0.87$ ) and the wind-erodible fraction of soils ( $r = -0.81$ ), penetration resistance ( $r = 0.75$ ), and organic matter ( $r = 0.33$ ) have a high and significant correlation with wind erosion threshold velocity and play a key role in determining the threshold velocity of wind erosion in the region. According to the evaluation criteria, the combined support vector regression model with the genetic algorithm had the best performance and the most accurate estimate for wind erosion threshold velocity (RMSE = 0.53 and  $R^2 = 0.92$ ) and can be a promising method for the estimation of wind erosion threshold velocity.

#### Conclusion

The threshold velocity of wind erosion is a very important parameter for studying soil wind erosion potential in arid and semi-arid regions. Therefore, this study was conducted to determine the threshold velocity of wind erosion using a portable wind tunnel and to predict the threshold velocity of wind erosion using easily measurable soil properties with support vector regression. The results of this study can be helpful in efficiently assessing vast areas prone to wind erosion and dust emission and can help policymakers to prioritize regions for soil conservation practices. The latter is very important for developing countries where only a limited budget is available for soil conservation programmers. In addition, portable wind tunnel is not always available for wind erosion studies, such fast and easy-to-apply methods introduced in this study can be a good alternative for wind erosion monitoring without disturbing the soil. We suggest that using other data mining approaches (e.g., random forest and artificial neural networks) for predicting the threshold velocity of wind erosion in future studies.

**Keywords:** Feature Selection, Genetic Algorithm, Soil Erosion, Support Vector Regression.