

## **Evaluation of Wind Erosion Risk in Abarkouh Plain Using Landsat Satellite Imageries**

A. Jebali<sup>1</sup>, A. Zare Chahouki<sup>2\*</sup>

1. Postdoctoral researcher, Environmental and Desert Studies School, Yazd University, Yazd, Iran.
2. Assistant professor, Environmental and Desert Studies School, Yazd University, Yazd, Iran.

\* Corresponding Author: zare.chahouki@yazd.ac.ir

Received date: 06/09/2021

Accepted date: 15/10/2021

 [10.22034/JDMAL.2021.538377.1350](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2021.538377.1350)

### **Abstract**

Wind erosion is one of the problems in arid and semi-arid regions that is associated with the process of detachment and transportation of soil particles by wind. The Wind Erosion Risk Index is a framework for modelling wind erosion that examines the sensitivity of land to wind erosion based on a set of surface and climate thresholds. The purpose of the study is to assess the risk of wind erosion in various geobiofaces at Abarkouh plain, Yazd province, using the WEHI model from 2003 to 2017. Three factors including frequency of erosive winds, percentage of bare land and soil surface moisture were used to run the model. Wind erosion risk map was produced under three categories: low, moderate and severe. To evaluate the effectiveness of the model, aerosol optical depth (AOD) data were used that confirmed the accuracy and significance of the model ( $\alpha=0.01$ ). The results showed that 107,369 ha of lands in the severe wind erosion category was increased. Wind erosion is widespread in the study area, particularly in the geobiofaces of the salt-lake and saline lands. The risk of wind erosion is reduced only on near-dense farmlands. This may expose the land upstream of the study area to the hazards of salt storms given biological, economic and social threats.

**Keywords:** Abarkouh; Aerosol optical depth; Erosive wind; Soil surface moisture





## ارزیابی خطر فرسایش بادی دشت ابرکوه با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای لندست

عاطفه جبال<sup>۱</sup>، اصغر زارع چاهوکی<sup>۲\*</sup>

۱. پژوهشگر پسادکتری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد ایران.

۲. استادیار، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

\* نویسنده مسئول: [zare.chahouki@yazd.ac.ir](mailto:zare.chahouki@yazd.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۳

 [10.22034/JDMAL.2021.538377.1350](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2021.538377.1350)

### چکیده

فرسایش بادی از مخاطره‌های طبیعی در مناطق خشک و نیمه خشک است که با فرآیند کنده شدن و جابجایی ذرات خاک توسط باد همراه است. شاخص خطر فرسایش بادی (WEHI) چهارچوبی از مدل‌سازی فرسایش بادی است که با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از آستانه‌های سطحی، اقلیمی و با بهره‌گیری از سیستم اطلاعات جغرافیایی، حساسیت زمین نسبت به فرسایش بادی را تعیین می‌کند. هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی خطر فرسایش بادی رخساره‌های زیستی-ژئومورفولوژی متنوع دشت ابرکوه واقع در استان یزد با بهره‌گیری از مدل خطر فرسایش بادی WEHI در سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۶ است. در اجرای مدل، از سه مولفه فراوانی بادهای فرساینده، درصد اراضی بدون پوشش و رطوبت سطحی خاک استفاده شد و نقشه خطر فرسایش بادی در سه طبقه کم، متوسط و شدید تولید شد. به منظور ارزیابی کارایی مدل، از داده‌های عمق نوری هواویزها بهره گرفته شد و دقت و معنی‌داری مدل تأیید گردید ( $\alpha = 0/01$ ). نتایج نشان داد که ۱۰۷۳۶۹ هکتار بر سطح اراضی با خطر فرسایش بادی شدید افزوده شده است. فرسایش بادی در منطقه مورد مطالعه به‌ویژه در رخساره‌های زیستی - ژئومورفولوژی دریاچه نمکی کویر و اراضی شور در حال گسترش است. در اراضی کشاورزی و دارای پوشش گیاهی تقریباً متراکم، خطر فرسایش بادی کم است. این موضوع می‌تواند اراضی بالادست منطقه را نسبت به مخاطره حاصل از توفان‌های نمکی با پیامدهای زیستی، اقتصادی و اجتماعی مواجه سازد.

**واژگان کلیدی:** ابرکوه؛ باد فرساینده؛ رطوبت سطحی خاک؛ عمق نوری هواویز



## ■ مقدمه

فرسایش بادی از جمله دشواری‌های حاکم بر مناطق خشک و نیمه خشک است که با فرآیند کنده‌شدن و جابجایی ذرات خاک توسط باد همراه است (۲، ۱۲، ۲۶). پژوهش‌ها نشان می‌دهد که در حدود ۲۸٪ از سطح خشکی‌های کره زمین تحت تأثیر فرآیند فرسایش بادی قرار دارند (۲۸، ۳۹) و از این مقدار،  $2960000 \text{ Km}^2$  در وضعیت شدیدی از فرسایش بادی قرار دارد (۲۴). این نوع از فرسایش، یکی از علل اصلی محدود کننده حاصلخیزی خاک بر روی کره زمین است (۴۱) و به‌طور معمول در خاک‌های خشک و سست، بدون هرگونه پوشش حفاظتی مانند پوشش گیاهی و یا سنگفرش شدت اثر بیشتری دارد و منجر به افزایش تراکم ذرات گردوغبار در اتمسفر می‌شود (۳۱). پراکنش ذرات ریز معلق در سطح اتمسفر با تأثیر بر کیفیت هوا و ایجاد آلودگی بر روی شهرها و مناطق مسکونی واقع در مسیر گردوغبار سلامتی ساکنان این مناطق را دچار آسیب‌های جدی می‌سازد (۸، ۳۲).

در مجموع فرسایش بادی تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل و روابط متقابل آن‌ها شامل نیروی باد، بافت و تراکم خاک، مواد آلی خاک، پوشش گیاهی، رطوبت خاک و زبری سطح قرار می‌گیرد (۴، ۹، ۱۰، ۱۱). بنابراین، مدیریت و کنترل آن نیازمند تلاش‌های چند جانبه متشکل از سیاست، مدیریت بوم‌نظام، اقتصاد و ظرفیت‌سازی است. شناسایی مناطق حساس به فرسایش بادی و به‌ویژه کانون‌های فرسایشی، گامی ضروری در مدیریت و کنترل فرسایش بادی است. استفاده از مدل‌های ساده و کارآمد با توانایی ارزیابی فرسایش بادی در مقیاس‌های مختلف و در بازه‌های مختلف زمانی ماهانه تا سالانه نیاز مبرم تحقیقات آینده است. شاخص خطر فرسایش بادی  $WEHI^1$  چهارچوبی از مدل‌سازی فرسایش زمین است که با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از آستانه‌های سطحی، اقلیمی و با بهره‌گیری از سیستم اطلاعات جغرافیایی به بررسی حساسیت زمین به فرسایش بادی در کشور استرالیا ارائه شده است و پایش فرآیند فرسایش بادی را در مقیاس‌های

مختلف زمانی امکان‌پذیر ساخته است. نتایج حاصل از مدل مذکور توانسته است که اطلاعات با ارزشی را در راستای کمک به هدف‌گذاری بهتر برنامه‌های سرمایه‌گذاری و پایش مستمر این فرآیند، فراهم آورد و در مدیریت کاهش فرسایش بادی و بهبود وضعیت خاک متمرکز باشد (۴۰). ارزیابی شدت فرسایش بادی دشت سگری اصفهان با استفاده از مدل شاخص خطر فرسایش بادی نشان می‌دهد که اراضی جنگل دست‌کاشت همراه با رخساره‌های فرسایش بادی، پهنه‌های ماسه‌ای و منطقه حمل از شدت زیاد فرسایش بادی برخوردار است (۵). بهره‌گیری از شاخص‌های مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای مانند بافت و رطوبت خاک، پوشش گیاهی و سرعت باد نقش مؤثری را در شناسایی وضعیت حساسیت اراضی به فرسایش بادی دارد. در پژوهشی بر روی وضعیت فرسایش بادی در حوزه دریاچه ارومیه نشان می‌دهد که در زمان کاهش رطوبت سطح خاک، و افزایش سرعت باد احتمال وقوع گرد و غبار و پیشروی فرآیند فرسایش بادی افزایش می‌یابد (۱۳). تجزیه و تحلیل همبستگی مکانی بین تغییرات فرسایش بادی، تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در پویایی مکانی - زمانی فرسایش بادی فلات تبت<sup>۲</sup> براساس مدل فرسایش بادی اصلاح شده  $RWEQ^3$  طی دوره ۳۵ ساله نشان داد که شدت فرسایش بادی در این منطقه از جهت جنوب شرقی به سمت شمال غربی در حال افزایش است. در مناطق با تغییر قابل توجه در تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی، تغییر قابل توجهی را در فرآیند فرسایش بادی نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در این منطقه، توزیع فرسایش بادی از منظر فعالیت‌های انسانی در مقیاس محلی و به‌صورت لکه‌ای است (۳۵). بهره‌گیری از رابطه فرسایش بادی اصلاح شده تخمین نرخ بالقوه فرسایش بادی<sup>۴</sup> در منطقه هکسی چین در سهم‌بندی عوامل اقلیمی و الگوهای کاربری اراضی فرسایش بادی نشان دهنده کاهش نرخ بالقوه فرسایش بادی در طی ۳۳ سال گذشته است. پژوهشگران این مطالعه بیان داشته‌اند که عامل اقلیمی مهمترین نقش را در تغییرات نرخ

<sup>3</sup> Revised Wind Erosion Equation (RWEQ)

<sup>4</sup> Potential Wind Erosion Rate (PWER)

<sup>1</sup> Wind Erosion Hazard Index

<sup>2</sup> Qinghai-Tibet

برنامه‌های توسعه‌ای پایدار راهگشا باشد. هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی خطر فرسایش بادی در ژئوبیوفاسیس‌های متنوع بخش بهمن ابرکوه با بهره‌گیری از مدل خطر فرسایش بادی WEHI و به‌کارگیری روش‌های سنجش از دوری در ایجاد این نوع از فرسایش است.

## ■ مواد و روش

### منطقه مورد بررسی

دشت ابرکوه جزئی از رون مرکزی ایران است و شهرستان ابرکوه در آن قرار گرفته است. منطقه مورد مطالعه بخش بهمن با مساحت تقریبی ۳۰۰۰۱۴ ha در موقعیت  $29^{\circ} 07' 53''$  تا  $31^{\circ} 01' 17''$  طول شرقی و  $39^{\circ} 39' 19''$  تا  $31^{\circ} 14' 52''$  عرض شمالی، از بخش‌های مهم شهرستان ابرکوه محسوب می‌شود (شکل ۱). در این بخش شهری به نام مهردشت، ۲ دهستان به نام‌های اسفندار و مهرآباد و ۱۱ روستای دارای دهیاری است. جمعیت ساکن در این بخش، نزدیک به ۱۵۰۰۰ نفر است. کویر ابرکوه با ارتفاع کمتر از ۱۴۵۰m، پست‌ترین محل در این بخش است. منطقه مورد بررسی در اقلیم گرم و خشک بیابانی قرار گرفته است. رژیم بارندگی در این منطقه از نوع مدیترانه‌ای و بیشترین مقدار بارندگی در ماه‌های بهمن و فروردین ریزش دارد. چاله ابرکوه نوعی چاله تراکمی است که در پست‌ترین قسمت آن، کویر پوشیده از رس و نمک ایجاد شده است. کفه نمکی با سطح سخت و هموار و بدون پوشش گیاهی، غالباً از رسوبات تبخیری نمک همراه با گچ و مارن تشکیل شده است. جلگه رسی و نمکی در اطراف کفه نمکی، دارای درصد شوری خاک زیاد است و در اثر تابش آفتاب شدید قشر رسی زیرین بعلت خشک شدن و انقباض، رس ترک خورده و قشر نمک سطحی را به طرف بالا حرکت می‌دهد. کفه ابرکوه در دوره ژوراسیک زیر آب بوده و در اثر خشکسالی و تبخیر آب آن، خشک شده و در حال حاضر به‌صورت دریاچه نمکی قسمت شرق منطقه را پوشانیده است. در نزدیکی کفه نمکی کویر چربه حاوی از رسوبات ریزدانه میوسن، غنی از املاح  $CaCl_2$  و  $NaCl$  است (۲۲). براساس گزارش سازمان جنگل‌ها، مراتع و

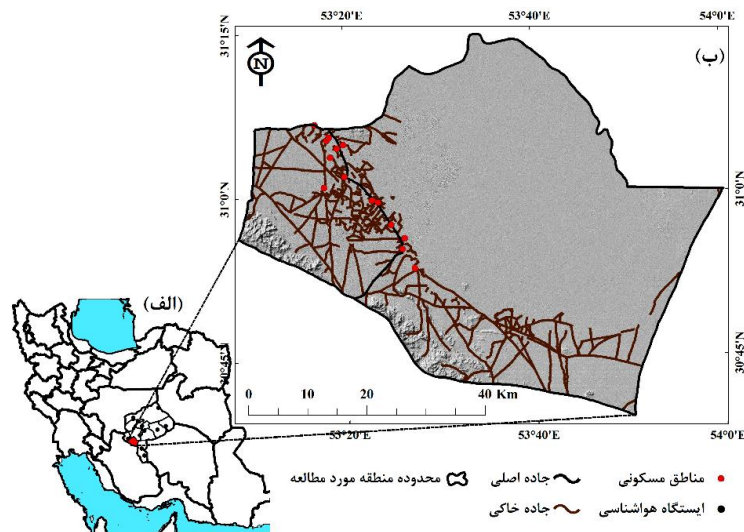
فرسایش بادی این منطقه دارد و سرعت باد عامل اصلی کنترلی شدت فرسایش بادی است (۲۵).

اندازه‌گیری‌های سنتی با روش‌های میدانی به دلیل محدودیت پوشش زمانی و مکانی، به تنهایی قابلیت آشکارسازی و پایش کانون‌ها و مناطق تحت‌تأثیر فرسایش بادی را در مقیاس وسیع ندارند. از سویی دیگر، پیشرفته‌ترین مدل‌ها، بسیار پیچیده و در مقیاس‌های کوچک میدانی نتایج مناسب و قابل قبولی را ارائه می‌دهند و در تعیین کانون‌ها و مناطق حساس به فرسایش بادی در مقیاس‌های بزرگتر و منطقه‌ای، انجام آن با محدودیت‌های زیادی مواجه است (۱۵). در مقیاس‌های بزرگ و منطقه‌ای، بهره‌گیری از ابزارهایی مانند سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل‌سازی عوامل مؤثر در فرسایش بادی، ابزاری مناسب برای تشخیص مناطق حساس به فرسایش بادی است. در این مقیاس با حفظ عوامل کلیدی مؤثر بر فرسایش بادی، از مدل‌هایی با پیچیدگی کمتر استفاده می‌شود (۶). مدل‌های متعددی برای ارزیابی حساسیت اراضی به فرسایش بادی در مقیاس‌های مختلف بر پایه GIS و RS طراحی شده است، که عملکرد هر مدل در شناسایی مناطق حساس به فرسایش با توجه به عوامل مؤثر در نظر گرفته شده و همچنین نحوه جمع‌آوری داده‌های هریک از این عوامل متفاوت است. با این وجود تأثیر نوع رخساره‌های ژئومرفولوژیکی بر روی خطر فرسایش بادی مورد توجه قرار نگرفته است.

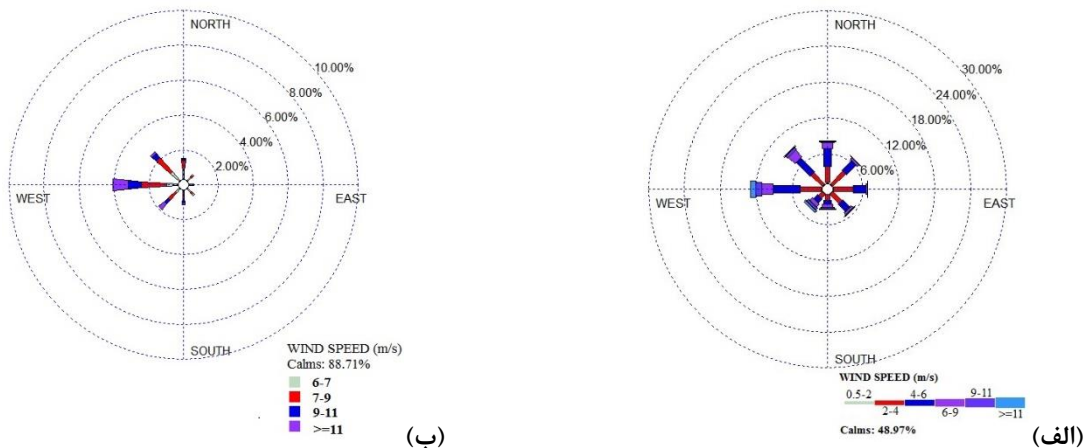
استان یزد، از مناطق شاخص در رخدادن فرسایش بادی و ایجاد رخساره‌های متنوع فرسایشی در کشور ایران است. در این استان مناطق تحت‌تأثیر و کانون‌های فرسایش بادی با شدت‌های مختلف زیاد تا کم وجود دارد. شناسایی این مناطق از اولویت‌های مطالعات مدیریت و کنترل مناطق بیابانی است. شناسایی رخساره‌های زیستی ژئومرفولوژیکی و یا در اصطلاح ژئوبیوفیس<sup>۱</sup> و حساسیت هر یک از رخساره‌های مذکور بر میزان خطرپذیری هر یک از آنها در گسترش فرسایش بادی و تولید ذرات گردوغبار، نیز می‌تواند در مقابله با بیابانزایی و گسترش طوفان‌های گردوغبار، و اجرای

آبخیزداری کشور سطح مناطق تحت تأثیر فرسایش بادی در بخش بهمن ابرکوه، در حدود ۱۵۱۴۷۶ ha است که ۸۶٪ از آن، شامل اراضی برداشت است. کانون‌های بحرانی فرسایش بادی این منطقه در سمت غربی بخش بهمن با مساحت ۷۲۶۱۱ ha به‌ویژه با شدت زیاد قرار گرفته است. براساس اطلاعات حاصل از داده‌های مربوط به ویژگی‌های باد در ایستگاه همدیدی (سینوپتیک) ابرکوه (۱۳۸۲-۱۳۹۶)، جهت باد غالب، غربی و در حدود ۱۲٪ از کل باد سالیانه را شامل می‌شود، بعد از آن بادهای شمال غربی بیشترین فراوانی را در منطقه دارد (شکل ۲- الف). وزش باد در منطقه مورد مطالعه تقریباً در تمام ماه‌های سال مشاهده می‌شود اما از اسفند تا مرداد فراوانی آن‌ها بیشتر است. بیشترین فراوانی وقوع توفان‌های گردوغبار در

اردیبهشت ماه ثبت شده است (جدول ۱). بادهای با سرعت کمتر از ۵۱ m/s، به‌عنوان هوای آرام، بادهای با سرعت ۴ تا ۱۱ knot بادهای متوسط و نیمه‌قوی است، و وزش باد با سرعت بیشتر از ۱۱ knot معادل با ۶ m/s بادهای فرساینده‌ای هستند که در تشکیل تندبادها و توفان‌های شدید تأثیرگذار هستند (جدول ۱). گل‌توفان حاصل از داده‌های سرعت و جهت بادهای فرساینده بیشتر از ۶ m/s نشان می‌دهد که جهت غالب توفان‌های منطقه از سمت غرب و شمال غرب است (شکل ۲- ب). براساس تصاویر گل‌باد و گل‌توفان منطقه مورد بررسی، از ۱۲٪ باد غالب غربی، ۴٪ از آن را بادهای فرساینده تشکیل می‌دهند و از تقریباً ۸٪ از بادهای شمال غربی، در حدود ۲/۵٪ را بادهای فرساینده تشکیل می‌دهند (شکل ۲).



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در الف) ایران و موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک هواشناسی استان یزد، ب) موقعیت مناطق مسکونی و راه‌های ارتباطی



شکل ۲. پلات الف) گل‌باد و ب) گل‌توفان ایستگاه همدیدی ابرکوه طی سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۶

جدول ۱. فراوانی طبقه‌های مختلف وزش سرعت باد ماهانه ایستگاه همدیدی ابرکوه (۱۳۸۲-۱۳۹۶)

سالانه	طبقه سرعت باد											
	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
(m/s)	آوریل	می	ژوئن	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	ژانویه	فوریه	مارس
۰/۵-۲	۳۲	۲۳	۲۶	۲۵	۱۹	۲۰	۲۵	۴۳	۶۱	۳۹	۴۱	۳۸
۲-۴	۵۶۱	۵۱۲	۵۴۳	۶۴۹	۶۸۰	۶۶۷	۷۵۰	۷۱۴	۶۵۶	۵۹۵	۵۴۹	۵۶۵
۴-۶	۵۷۹	۷۸۳	۸۰۰	۷۸۲	۷۲۸	۷۱۴	۶۲۸	۴۲۲	۳۵۱	۴۲۵	۴۲۳	۶۲۴
۶-۹	۲۸۱	۳۴۴	۲۹۹	۲۶۹	۲۶۷	۱۵۳	۱۲۲	۱۲۸	۱۲۵	۱۴۷	۲۴۴	۲۵۵
۹-۱۱	۱۶۴	۱۴۶	۷۰	۶۱	۳۶	۲۵	۲۶	۵۱	۶۹	۹۷	۱۳۴	۱۴۵
>=۱۱	۱۰۳	۸۰	۲۰	۷	۵	۸	۸	۲۶	۳۳	۵۱	۱۲۷	۱۶۲
هوای آرام	۱۴۰۰	۱۳۳۶	۱۳۶۲	۱۴۳۱	۱۴۸۹	۱۵۳۳	۱۶۶۵	۱۷۳۶	۱۹۱۹	۱۸۷۰	۱۴۱۸	۱۴۳۵
مجموع	۳۱۲۰	۳۲۲۴	۳۱۲۰	۳۲۲۴	۳۲۲۴	۳۱۲۰	۳۲۲۴	۳۱۲۰	۳۲۱۴	۳۲۲۴	۲۹۳۶	۳۲۲۴

## روش انجام پژوهش

## مدل خطر فرسایش بادی WEHI

مدل خطر فرسایش بادی WEHI از جمله مدل‌های کارآمدی است که قابلیت اجرا در مقیاس مختلف مکانی (مزرعه تا وسیع در سطح ملی و منطقه‌ای) و همچنین مقیاس‌های زمانی روزانه تا سالانه دارد (۴۰). اساس این مدل در رابطه ۱ ارائه شد.

$$WEHI = \frac{(V \times S)}{M} \quad (1)$$

که در آن:

WEHI: شاخص خطر فرسایش بادی

V: سرعت باد (m/s)

S: فاکتور خاک بدون پوشش (در محدوده صفر تا ۱)

M: رطوبت خاک (شاخص رطوبت خاک در محدوده صفر

تا ۱)

## تعیین باد فرساینده

با توجه به اینکه فراوانی وزش بادهای فرساینده در سطح یک منطقه تأثیر به‌سزایی را در افزایش شدت فرسایش بادی دارد. در پژوهش حاضر، از فراوانی بادهای فرساینده به جای عامل سرعت باد در اجرای مدل استفاده

شد (۵). سرعت باد فرساینده در محدوده مطالعاتی ۶ m/s در نظر گرفته شد. داده‌های فراوانی بادهای فرساینده ۱۱ ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی استان یزد (شکل ۱) برای تولید لایه باد استفاده شد. نقشه پهنه‌بندی فراوانی بادهای فرساینده براساس روش درون‌یابی IDW در سامانه سیستم اطلاعات جغرافیایی برای سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۹۶ تهیه شد.

## اراضی بدون پوشش

از تصاویر ماهواره‌ای لندست مربوط به سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۹۶، برای تهیه نقشه پوشش اراضی استفاده شد (جدول ۲). با توجه به شدت وقوع رخداد‌های گردوغبار در اردیبهشت و خرداد ماه - معادل با ماه‌های می و ژوئن میلادی - تصاویر ماهواره‌ای مربوط به این ماه‌ها برای تهیه نقشه پوشش اراضی در نظر گرفته شد. ضمن اینکه در این ماه‌ها تصاویر برای تهیه نقشه پوشش اراضی از کیفیت بیشتری برخوردار است و بدون پدیده ابرناکی بود. همچنین تقریباً تمام پوشش‌های اراضی موجود در منطقه مورد مطالعه در ماه‌های مورد استفاده قابل شناسایی است.

جدول ۲. مشخصات تصاویر ماهواره‌ای لندست در منطقه مورد مطالعه

ردیف/گذر	قدرت تفکیک مکانی	تاریخ		سنجنده	ماهواره
		شمسی	میلادی		
۱۶۲/۳۹؛ ۱۶۲/۳۸	۳۰ m	۱۳۸۲/۰۳/۰۲	۲۰۰۳/۰۵/۲۶	ETM	لندست ۷
		۱۳۹۶/۰۴/۰۴	۲۰۱۷/۰۶/۲۵	OLI_TIRS	لندست ۸

بعد از انجام مراحل پیش‌پردازش تصاویر و انجام تصحیحات رادیومتریک (۳۷)، اتمسفریک (۱۸) و هندسی (۱۶)، نقشه پوشش اراضی از روش طبقه‌بندی نظارت شده با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان و بهره‌گیری از تابع شعاعی<sup>۱</sup> (۳۴) تهیه گردید. صحت نقشه‌های پوشش اراضی با ارزیابی نقاط کنترل واقعیت زمینی برگرفته شده از پیمایش میدانی بر روی تصاویر گوگل ارث (۷) سال ۱۳۸۲، و نقاط واقعیت میدانی در سال ۱۳۹۶ تعیین شد. با تأیید صحت نقشه‌های تولید شده، لایه درصد خاک بدون پوشش در محدوده صفر تا یک وزندهی شد (جدول ۳). امتیاز مربوط به طبقه‌های درصد اراضی بدون پوشش، با توجه به طبقه‌بندی عددی ارائه شده در پژوهش‌های مرتبط با مدل مذکور (۵، ۴۰) و مشاهدات میدانی در نظر گرفته شد.

### رطوبت خاک

به منظور تهیه نقشه رطوبت خاک از شاخص اختلاف نرمال شده رطوبت خاک<sup>۲</sup> سنجنده لندست برگرفته از سامانه گوگل ارث انجین برای سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۹۶ استفاده شد (رابطه ۲).

$$NDMI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \quad (2)$$

که در آن:

NDMI: شاخص اختلاف نرمال رطوبت خاک

SWIR: باند مادون قرمز میانی

NIR: باند مادون قرمز نزدیک

مقادیر این شاخص در محدوده -۱ تا +۱ به دست آمد. به طوری که مقادیر مثبت نزدیک به ۱ بیانگر وجود مناطق آبی با پوشش گیاهی و مقادیر نزدیک به -۱ نشان‌دهنده مناطق با میزان آب کم مانند خاک لخت و ساختمان‌ها است (۱۷).

قبل از اجرای مدل خطر فرسایش بادی، تمام لایه‌های ورودی به مدل در محدوده صفر تا ۱ نرمال‌سازی (رابطه ۳) و سپس مدل WEHI اجرا شد. در آخر، نقشه خطر فرسایش بادی در سه طبقه کم، متوسط و شدید طبقه‌بندی شد (جدول ۴).

$$x = \frac{x - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (3)$$

که در آن:

X: مقدار داده

X<sub>min</sub>: مقدار کمینه داده

X<sub>max</sub>: مقدار بیشینه داده

جدول ۳. جزئیات امتیازدهی درصد اراضی بدون پوشش (سازه S)

امتیاز	شرح محدوده عددی	شرح طبقه بندی	سازه
صفر	۰ - ۰/۲۵	اراضی دارای درصد خاک بدون پوشش کمتر از ۱۰٪	
۰/۲۵	۰/۲۵ - ۰/۵	اراضی با درصد خاک بدون پوشش بین ۱۰ تا ۲۵٪	
۰/۵	۰/۵ - ۰/۷۵	اراضی بدون پوشش (٪) اراضی با درصد خاک بدون پوشش ۲۵ تا ۵۰٪	
۱	۰/۷۵ - ۱	اراضی با درصد خاک بدون پوشش بیشتر از ۵۰٪ (مناطق فاقد پوشش گیاهی و یا سنگریزه)	

جدول ۴. جزئیات طبقه‌بندی مدل WEHI

طبقه	امتیاز	شرح محدوده عددی
کم	۱	۰ - ۰/۲۵
متوسط	۲	۰/۲۵ - ۰/۵
شدید	۳	> ۰/۵

ارزیابی صحت

عمق نوری هواویز<sup>۱</sup> کمیتی بدون بعد و نشان‌دهنده میزان جذب و پراکنش نور ناشی از هواویزها در مسیر عبوری نور در جو است (۳۶). مقدار این کمیت، نسبت به میزان تراکم هواویزهای جو متغیر است. ذرات گردوغبار با تغییر دمای سطح زمین و جو، تبادل انرژی بین سطح و جو و همچنین دینامیک جو را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این فرآیند موجب تولید عمق نوری بالایی می‌شود (۳). با توجه به اینکه میزان AOD در مناطق دارای اراضی تحت تأثیر فرسایش بادی زیاد است و این اراضی مناطق برداشت، حمل و یا رسوبگذاری ذرات گردوغبار هستند، بنابراین ارزیابی تغییرات AOD، می‌تواند ابزار مناسبی در تعیین صحت نقشه خطر فرسایش بادی باشد. در پژوهش حاضر، از محصول عمق نوری هواویزهای سنجنده مودیس برگرفته از سامانه گوگل ارث انجین در شش ماه اول سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۹۶، برای ارزیابی صحت نقشه‌های مدل خطر فرسایش بادی استفاده گردید. معیارهای ریشه میانگین مجذور خطا<sup>۲</sup> (رابطه ۴)، میانگین مطلق خطا<sup>۳</sup> (رابطه ۵)، معیار درصد میانگین مطلق خطاهای پیش‌بینی<sup>۴</sup> (رابطه ۶) برای اندازه‌گیری دقت پیش‌بینی مدل مورد بررسی در سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۹۶ ارزیابی شد، و معنی‌داری ارتباط بین داده‌های حاصل از مدل خطر فرسایش بادی و AOD

با بررسی مقایسه میانگین به روش ANOVA یک طرفه بررسی شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Y_i - Y_{i'})^2}{n}} \quad (۴)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_i - Y_{i'}}{Y_i} \right| \times 100 \quad (۵)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - Y_{i'}| \quad (۶)$$

که در آن:

n: تعداد داده‌های مورد استفاده

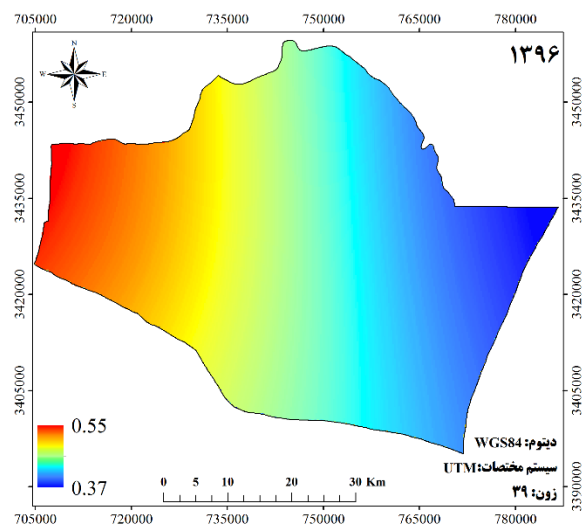
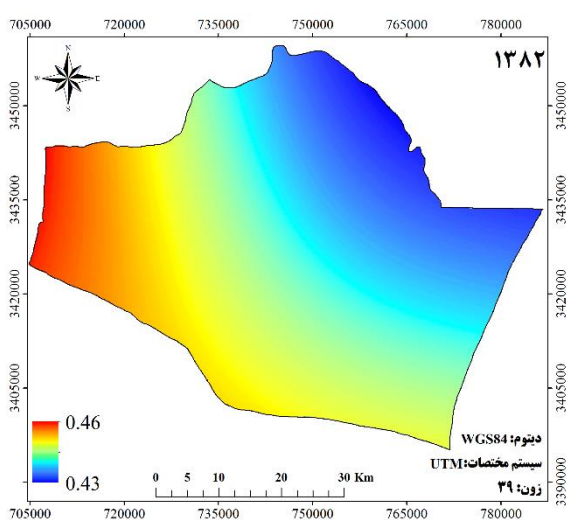
Y<sub>i</sub>: مقادیر واقعی

Y<sub>i'</sub>: مقادیر پیش‌بینی شده

نتایج و بحث

ارزیابی وضعیت بادهای فرساینده

پهنه‌بندی بادهای فرساینده در محدوده مورد مطالعه، افزایش فراوانی بادهای فرساینده را طی ۱۵ سال مورد بررسی نشان داد. وضعیت پراکنش فراوانی بادهای فرساینده استاندارد شده در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. فراوانی بادهای فرساینده استاندارد شده در بخش بهمن ابرکوه در سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۹۶

<sup>3</sup> Mean Absolute Error (MAE)

<sup>4</sup> Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

<sup>1</sup> Aerosol Optical Depth (AOD)

<sup>2</sup> Root Mean Squared Error (RMSE)

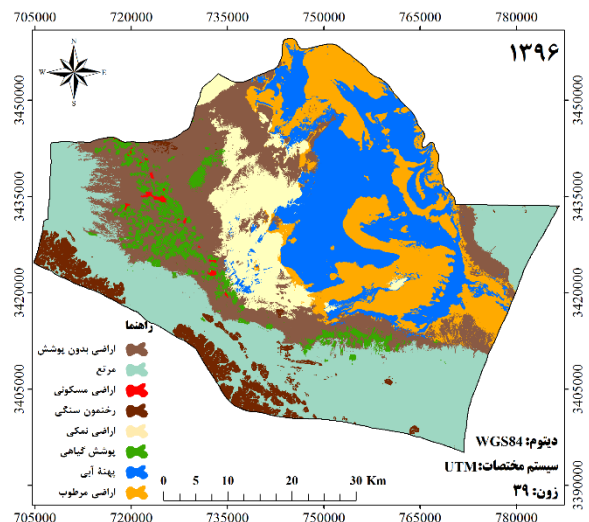
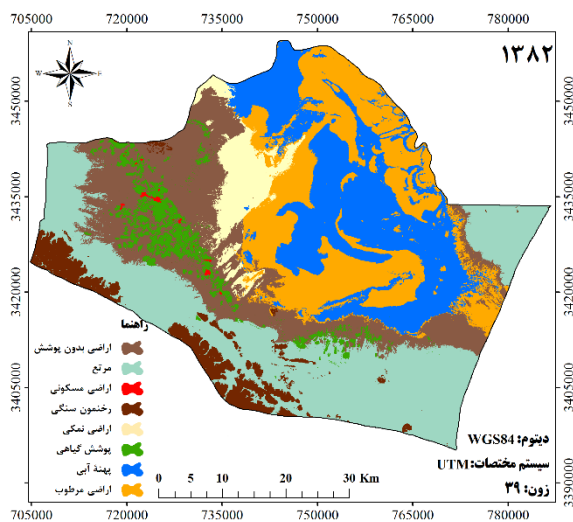


آشکارسازی گردید (شکل ۳). لازم به توضیح است که مراتع منطقه مورد مطالعه دارای پوشش گیاهی فقیر است. پوشش گیاهی ارائه شده در شکل ۳ شامل اراضی کشاورزی و باغی، و اراضی شور مرطوب بود. دریاچه نمکی واقع در منطقه با نام پهنه آبی در نقشه طبقه‌بندی شده حاضر نشان داده شد و اراضی مرطوب در نقشه مذکور مربوط به کفه نمکی واقع در پلاپای ابرکوه بود. صحت کلی و ضریب کاپای نقشه‌های تولیدی، ۹۳٪ و کاپای کلی آن ۰/۹۲ شد و نقشه‌ها از صحت کاملاً مناسبی برای استفاده در مدل خطر فرسایش بادی برخوردار بودند (جدول ۵).

با توجه به قرارگیری بادهای فرساینده با فراوانی بیش از ۵/۰ در طبقات بالای فرسایش بادی (۵)، محدوده مورد مطالعه از منظر فراوانی بادهای فرساینده در وضعیت متوسط تا شدید قرار دارد.

**ارزیابی اراضی بدون پوشش**

در تهیه نقشه پوشش اراضی منطقه، با توجه به پیمایش میدانی، و بررسی تصاویر گوگل ارث، ۸ نوع پوشش اراضی از منظر رخساره‌های ژئوبیوفاسیس شامل اراضی بدون پوشش، مرتع، پوشش گیاهی، اراضی نمکی، پهنه آبی، اراضی مرطوب، اراضی مسکونی، و رخنمون سنگی



شکل ۳. پوشش اراضی در بخش بهمن ابرکوه به روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان

جدول ۵. ارزیابی صحت نقشه‌های پوشش اراضی بخش بهمن ابرکوه سال‌های ۱۳۸۲-۱۳۹۶

سال	پوشش اراضی	اراضی بدون پوشش	مرتع	اراضی مسکونی	رخنمون سنگی	اراضی شور	پوشش گیاهی	پهنه آبی	حاشیه مرطوب
۱۳۸۲	صحت کاربر	۰/۹۹	۰/۹۲	۰/۸۸	۰/۹۷	۰/۸۹	۰/۹۴	۰/۹۲	صحت کلی ۵/۹۳٪
	صحت تولید کننده	۰/۸۱	۰/۹۵	۱	۱	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۱	۰/۹۴
۱۳۹۶	کاپای جزئی	۰/۷۸	۰/۹۴	۱	۱	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۸۹	کاپای کلی: ۰/۹۲
	مساحت (ha)	۵۰۹۹۱	۸۱۶۸۷	۳۸۸	۱۵۰۱۲	۱۴۰۱۷	۱۳۲۵۷	۶۰۶۱۲	۶۴۰۵۱
۱۳۹۶	صحت کاربر	۰/۷۹	۰/۹۷	۱	۱	۰/۹۱	۰/۹۵	۰/۹۵	صحت کلی ۹۳٪
	صحت تولید کننده	۱	۱	۰/۸۵	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۷۸	۰/۹۱	۰/۹۳
۱۳۹۶	کاپای جزئی	۰/۷۶	۰/۹۶	۱	۱	۰/۹	۰/۹۵	۰/۹۴	کاپای کلی: ۰/۹۲
	مساحت (ha)	۶۰۸۰۹	۸۱۰۰۸	۵۸۱	۱۵۰۱۲	۲۷۲۲۱	۱۰۲۴۹	۴۷۰۸۷	۵۸۰۴۷

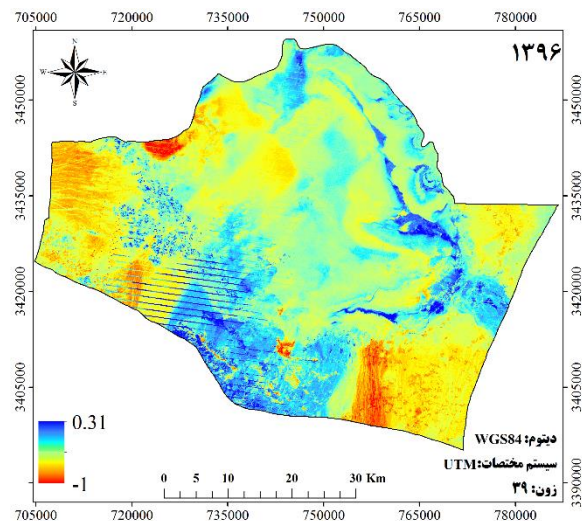
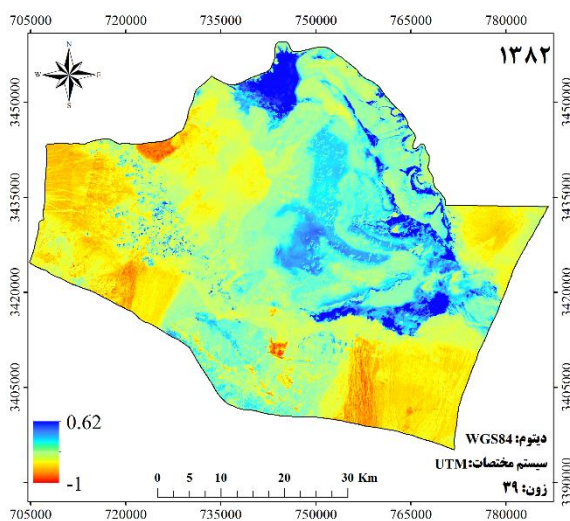
### خطر فرسایش بادی WEHI

ارزیابی خطر فرسایش بادی با بهره‌گیری از سه سازه مؤثر در وقوع فرآیند فرسایش بادی شامل فراوانی بادهای فرساینده، درصد اراضی بدون پوشش و میزان رطوبت سطحی خاک در پوشش‌های اراضی مختلف بررسی شد. نتایج نشان داد که در طی ۱۵ سال مورد مطالعه، سطح اراضی دارای خطر فرسایش شدید، افزایش داشته است، به طوری که اختلاف سطح اراضی با وضعیت شدید طی سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۶، ۱۰۷۳۶۹ ha بود (جدول ۶). با توجه به خشکسالی‌های اخیر و کاهش رطوبت سطحی خاک به ویژه در محدوده دریاچه نمکی، بیشترین تغییر وضعیت خطر فرسایش بادی در این ناحیه مشاهده شد. به طوری که، اراضی با خطر فرسایش بادی متوسط در سال ۱۳۸۲ به وضعیت شدید در سال ۱۳۹۶ تبدیل شده است. پژوهش بر روی وضعیت فرسایش بادی دریاچه مهارلو در سال ۱۳۹۷ نشان می‌دهد که میزان گردوغبار جمع‌آوری از رسوبات دریاچه مهارلو بالاتر از حد معمول است و حساسیت زیاد این منطقه را نسبت به فرسایش بادی نشان می‌دهد. این موضوع به دلیل خشک شدن دریاچه در طی سال‌های گذشته بوده است (۲۱). در پژوهش حاضر شرایط مشابه وجود دارد و خشک بودن دریاچه نمکی در فصل بادخیز، خطر فرسایش بادی منطقه را دو چندان ساخته است.

در پیمایش میدانی از منطقه مورد مطالعه و تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث سال ۱۳۸۲، سطح اراضی بدون پوشش منطقه به جز در مناطق دارای پوشش گیاهی زارعی بیشتر از ۵۰٪ مشاهده شد. سطح مناطق بدون پوشش سال ۱۳۹۶ در اراضی کشاورزی نیز در محدوده ۵۰-۲۵٪ و در سال ۲۰۰۳، ۲۵-۱۰٪ بود.

### رطوبت خاک سطحی

میانگین شاخص رطوبتی خاک در شش ماه نخست سال ۲۰۰۳-۱ تا ۰/۶ است؛ در حالیکه در بازه زمانی مشابه سال ۲۰۱۳، این مقدار ۱- تا ۰/۳ است (شکل ۴). کاهش رطوبت طی دوره مورد بررسی، می‌تواند به دلیل خشکسالی و کاهش سطح بارندگی منطقه مورد بررسی باشد. مقایسه چشمی نقشه‌های برگرفته از شاخص NDMI نشان داد که محدوده دریاچه نمکی در سال ۱۳۹۶ از شاخص رطوبت کمتری نسبت به سال ۱۳۸۲ برخوردار است. این کاهش رطوبت می‌تواند شرایط را برای تسهیل در برداشت ذرات نمک و وقوع توفان‌های نمکی در سطح منطقه مهیا سازد. نتایج پژوهشی بر روی ارزیابی تغییرات شاخص اختلاف نرمال شده رطوبتی خاک NDMI در مینجیانگ کشور چین، نشان می‌دهد که بیشترین میزان سطح رطوبتی خاک در مناطق آبی، اراضی کشاورزی مشاهده می‌شود و در مناطق غیرقابل نفوذ کمترین میزان رطوبت وجود دارد (۴۲).



شکل ۴. شاخص اختلاف نرمال شده رطوبت سطحی (NDMI) در بخش بهمن ابرکوه در سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۹۶

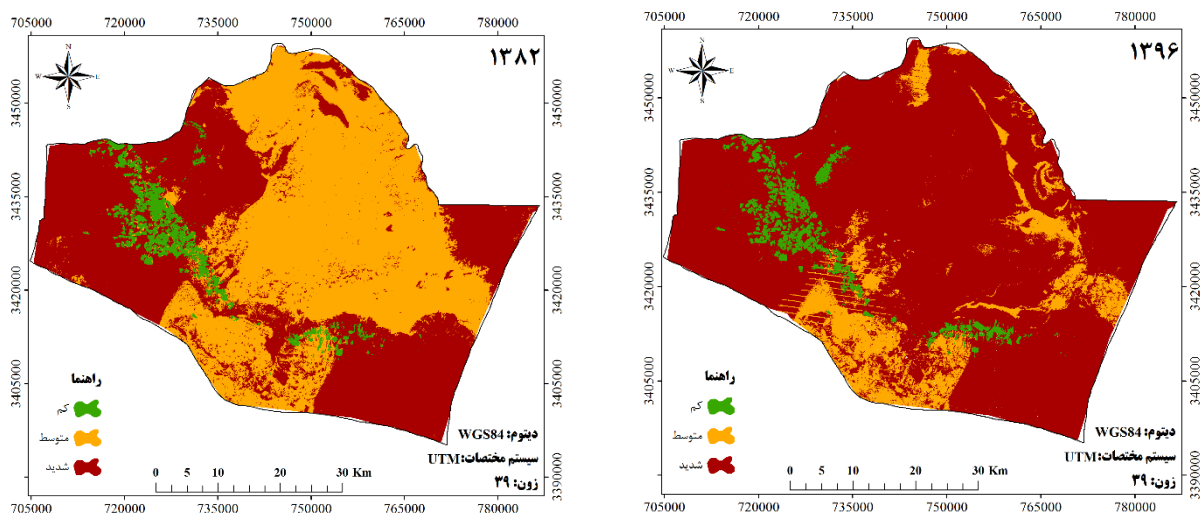
با مشاهده تصاویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه، مناطقی با پوشش گیاهی از سنگریزه مشاهده می‌شود که می‌تواند همانند اراضی دارای پوشش با فرسایش‌پذیری ناچیز، نقش کاهنده گسترش فرسایش بادی را ایفا نمایند. علاوه بر بررسی نقشه موقعیت مناطق برداشت و کانون‌های بحرانی فرسایش بادی ارائه شده توسط سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، مشاهده‌های میدانی پوشش اراضی رخساره ژئوبیوفا سیس مرتع، نشان داد که این مناطق، دارای سنگریزه‌های سطحی با درصد کمتر از حد متوسط بوده و خاک زیرین آن نیز خاکی مستعد به فرسایش است که با وزش باد فرساینده قابلیت جدا شدن ذرات از سطح خاک را دارد.

معیارهای ریشه میانگین مجذور خطا، میانگین مطلق خطا، و درصد میانگین مطلق خطاهای پیش‌بینی در سال‌های مورد بررسی، مقادیری کمتر از یک را نشان داد.

بخش دیگری از تغییرات شرایط فرسایش بادی در اراضی مرطوب اطراف دریاچه نمکی مشاهده گردید که در سال ۱۳۹۶ به اراضی شور تبدیل شده بود و باعث تغییر وضعیت خطر فرسایش بادی از متوسط به شدید شد. از دیگر تغییرات وضعیت خطر فرسایش بادی در اراضی زراعی مشاهده گردید (شکل ۵). کاهش سطح اراضی زراعی و آیش گذاشتن اراضی زراعی سبب گردیده تا فواصل بدون پوشش اراضی زراعی از نظر خطر فرسایش بادی در وضعیت متوسط تا شدید قرار گیرند. پژوهش بر روی تأثیر کاربری اراضی بر روی فرسایش بادی نشان می‌دهد که نبود پوشش گیاهی بیشترین عامل تأثیرگذار بر فرسایش پوشش‌های مختلف اراضی است (۲۹). در مجموع بیشترین تغییر وضعیت خطر فرسایش بادی در دوره مورد مطالعه، در حالت شدید و کمترین تغییر در حالت کم وجود داشت (جدول ۶).

جدول ۶. سطوح تغییر وضعیت خطر فرسایش بادی WEHI بخش بهمن ابرکوه در طی سال‌های ۱۳۸۲-۱۳۹۶

وضعیت تغییر	میزان تغییر (ha)	مساحت (ha)		خطر فرسایش بادی
		۱۳۹۶	۱۳۸۲	
افزایشی	+۲۹۵	۱۲۷۴۶	۱۲۴۵۱	کم
کاهشی	-۱۰۷۶۶۴	۳۹۲۰۳	۱۴۶۸۶۷	متوسط
افزایشی	+۱۰۷۳۶۹	۲۴۵۲۳۲	۱۳۷۸۶۳	شدید
-	۰	۲۹۷۱۸۱	۲۹۷۱۸۱	مجموع



شکل ۵. نقشه خطر فرسایش بادی (WEHI) بخش بهمن ابرکوه سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۹۶

غیرمستقیم در نظر گرفته شده‌است. به‌طوری‌که، چنانچه خاک منطقه‌ای سرشار از مواد آلی باشد در آن قسمت امکان رویش پوشش گیاهی به صورت طبیعی و یا انسانی وجود دارد، بنابراین امتیاز کمتری برای پارامتر درصد خاک بدون پوشش در نظر گرفته می‌شود. در مواردی که خاک بدون پوشش و فاقد زبری سطحی باشد برای امتیاز پارامتر مذکور مقدار یک در نظر گرفته می‌شود. با این وجود به نظر می‌رسد که برای افزایش صحت نتایج به‌دست آمده، اصلاح و بهینه‌سازی این مدل، با به‌کارگیری لایه‌های مؤثر در ایجاد یا کاهش فرسایش بادی، مانند درصد سنگریزه سطحی به‌عنوان عاملی مؤثری در کاهش میزان فرسایش بادی، می‌تواند کارایی مدل WEHI را تحت‌تأثیر قرار دهد.

#### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر از مدل خطر فرسایش بادی WEHI، برای ارزیابی مناطق حساس و مخاطره برانگیز فرسایش بادی استفاده شد. این مدل به‌دلیل به‌کارگیری سه عامل مؤثر در فرسایش بادی شامل میزان رطوبت سطحی خاک، سرعت و فراوانی بادهای فرساینده و درصد سطح اراضی بدون پوشش، ابزار مناسبی برای شناسایی مناطق حساس به فرسایش بادی است. مقایسه نقشه خطر فرسایش بادی در طی سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۶ نشان داد که در بخش بهمن ابرکوه، فرسایش بادی به شدت در حال گسترش است. تنها در اراضی کشاورزی و دارای پوشش گیاهی تقریباً متراکم کاهش خطر فرسایش بادی مشاهده شد؛ در حالی که در دیگر مناطق به‌ویژه در اراضی شور و دریاچه نمکی که طی سال‌های گذشته به‌دلیل خشکسالی با کاهش سطح رطوبت خاک مواجه بوده‌است، خطر فرسایش بادی به شدت افزایشی بوده‌است.

با توجه به این نکته، که هر اندازه مقادیر معیارهای مذکور کمتر باشد، پیش‌بینی مطلوب‌تر است، اعتبار مدل WEHI را می‌توان تأیید نمود. نتایج مقایسه میانگین یک‌طرفه، بین WEHI و AOD نیز نشان داد که ارتباط معنی‌داری بین آن‌ها وجود دارد (جدول ۷). پژوهش‌های متعددی که در زمینه بررسی فرسایش بادی و توفان‌های گردوغبار با بهره‌گیری از محصول AOD (سنجنده مودیس) انجام شده‌اند (۱۴، ۱۹، ۲۰، ۲۳، ۲۷، ۳۰، ۳۸)، آنرا مناسب برای بررسی این پدیده معرفی کرده‌اند. در پژوهشی بر روی مطالعه رویدادهای گردوغبار بیان شده است که بین پراکنش زمانی و مکانی فراوانی رخداد‌های گردوغبار در ایستگاه‌های زمینی و AOD انطباق کاملی وجود دارد (۱۴). بنابراین بهره‌گیری از محصول AOD سنجنده مودیس برای ارزیابی نتایج پژوهش حاضر با نتایج حاصل از پژوهش‌های مذکور انطباق دارد.

به‌کارگیری مدل WEHI در دشت سگزی نیز نشان داد که مطابقت و همبستگی بیشتری در مدل WEHI با واقعیت زمینی نسبت به مدل اریفر وجود دارد. این موضوع می‌تواند به دلیل بررسی کمی داده‌ها در مقایسه با تحلیل کیفی و نظر کارشناسی در مدل‌های کیفی باشد (۵). محدودیت هزینه و زمان در مطالعات فرسایش بادی مبتنی بر اندازه‌گیری و مشاهدات میدانی، بکارگیری مدل‌های پیشرفته فرسایش بادی مبتنی بر به‌کارگیری فناوری‌های سنجنش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی به‌ویژه در مقیاس‌های منطقه‌ای و وسیع را قوت می‌بخشد (۱، ۳۳). در پژوهش حاضر، کارایی مدل WEHI در ارزیابی خطر فرسایش بادی منطقه مورد مطالعه تأیید گردید. اگرچه در مدل WEHI فاکتورهایی مانند زبری، بافت و مواد آلی خاک به‌طور مستقیم به‌کار گرفته نشده است. اما در امتیازدهی فاکتور درصد خاک بدون پوشش، این مهم به‌طور

جدول ۷. ارزیابی صحت نقشه خطر فرسایش بادی (WEHI) بخش بهمن ابرکوه در سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۹۶

معیار	۱۳۸۲	۱۳۹۶
RMSE	۰/۶۴	۰/۴۲
MAE	۰/۶۲	۰/۳۸
MAPE	۰/۶۸	۰/۱۲
Sig.	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱

فرسایش بادی مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای همچون مدل WEHI گامی مؤثر در شناسایی مناطق تحت‌تأثیر فرسایش بادی و منشأ گردوغبار در نواحی درگیر با این معضل در سطح وسیع و دور از دسترس است. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که عملکرد مدل مذکور برای آشکارسازی خطر فرسایش بادی در مناطق تحت‌تأثیر قابل قبول است. اما محدودیت عمده این مدل استفاده نکردن از دیگر متغیرهای تأثیرگذار همانند بافت خاک، درصد زبری سطحی و میزان مواد آلی موجود در خاک است. پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آینده با اصلاح مدل مذکور و به‌کارگیری دیگر سازه‌های مؤثر بر تعیین خطر فرسایش بادی، صحت مدل مذکور ارتقاء داده‌شود.

در تهیه نقشه خطر فرسایش بادی از فراوانی بادهای فرساینده استفاده شده‌است، و به تمام منطقه از زاویه وجود این خطر نگاه شده‌است. نتایج حاصل از پژوهش حاضر بیان می‌دارد که پوشش‌های مختلف اراضی در محدوده مورد بررسی، در زمان وزش بادهای فرساینده تا چه اندازه با توانایی ایجاد فرسایش و برداشت ذرات خاک قابلیت خطرپذیری را برای محدوده مورد بررسی و همچنین اراضی واقع در مسیر بادهای فرساینده دارند. به‌کارگیری برنامه‌های مدیریتی و اجرایی سازگار با این مناطق برای جلوگیری از برداشت ذرات خاک و به‌ویژه نمک، می‌تواند اراضی بالادست منطقه را از مخاطرات حاصل از توفان‌های نمکی این منطقه محافظت نماید. بهره‌گیری از مدل‌های

## References

1. Afrasiab, P., & Delbari, M. (2013). Assessing the risk of soil vulnerability to wind erosion through conditional simulation of soil water content in Sistan plain, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 70(6), 2895-2905.
2. Al-Bakri, J. T., Brown, L., Gedalof, Z. E., Berg, A., Nickling, W., Khresat, S., Salahat, M., & Saoub, H. (2016). Modelling desertification risk in the north-west of Jordan using geospatial and remote sensing techniques. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(2), 531-549.
3. Alpert, P., Kaufman, Y. J., Shay-El, Y., Tanre, D., Da Silva, A., Schubert, S., & Joseph, J. H. (1998). Quantification of dust-forced heating of the lower troposphere. *Nature*, 395(6700), 367-370.
4. Bagnold, R. A. (1943). *The physics of blown sand and desert dunes*. New York: William Morrow and Co.
5. Boali, A., & Mohammadian Behbahani, A. (2020). Comparative Evaluation of Wind Erosion Intensity Modeling using WEHI and IRIFR Models for Presentation of Segazi Plain Management in Isfahan. *Water and Soil Conservation*, 27(4), 129-147. (in Farsi)
6. Borrelli, P., Panagos, P., Ballabio, C., Lugato, E., Weynants, M., & Montanarella, L. (2016). Towards a Pan-European Assessment of Land Susceptibility to Wind Erosion. *Land Degradation & Development*, 27(4), 1093-1105.
7. Cha, S.Y., & Park, C. H. (2007). The utilization of Google Earth images as reference data for the multitemporal land cover classification with MODIS data of North Korea. *Korean Journal of Remote Sensing*, 23(5), 483-491.
8. Chen, L., Zhao, H., Wang, W., Bai, Z., Wang, Z., Sun, F., Hou, L., Liu, G., Shi, M., & Miao, Y. (2017). Effect of windblown dust from local and regional sources on the air quality of the central district in Jinan, China. *Atmospheric Research*, 185, 44-52.
9. Chepil, W. S. (1945). Dynamics of wind erosion: i. Nature of movement of soil by wind. *Soil Science*, 60(4), 305-320.

10. Chepil, W. S., & Woodruff, N. P. (1963). The Physics of Wind Erosion and its Control, Contribution from Soil and Water Conservation Research Division, Agricultural Research Service, USDA, with Kansas Agricultural Experiment Station cooperating. Department of Agronomy Contribution No. 795. In A. G. Norman (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 15, pp. 211-302): Academic Press.
11. Doetterl, S., Berhe, A. A., Nadeu, E., Wang, Z., Sommer, M., & Fiener, P. (2016). Erosion, deposition and soil carbon: A review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes. *Earth-Science Reviews*, 154, 102-122.
12. Du, H., Xue, X., Wang, T., & Deng, X. (2015). Assessment of wind-erosion risk in the watershed of the Ningxia-Inner Mongolia Reach of the Yellow River, northern China. *Aeolian Research*, 17, 193-204.
13. Effati, M., Bahrami, H.-A., Gohardoust, M., Babaeian, E., & Tuller, M. (2019). Application of Satellite Remote Sensing for Estimation of Dust Emission Probability in the Urmia Lake Basin in Iran. *Soil Science Society of America Journal*, 83(4), 993-1002.
14. Ensafi Moghaddam, T. (2021). Investigation of Aerosol Optical Depth Index (AOD) in dust events over Southwestern of Iran. *Iran Nature*, 5(6), 55-67. (in Farsi)
15. Fenta, A. A., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., Poesen, J., Tsubo, M., Borrelli, P., Panagos, P., Vanmaercke, M., Broeckx, J., Yasuda, H., Kawai, T., & Kurosaki, Y. (2020). Land susceptibility to water and wind erosion risks in the East Africa region. *Science of The Total Environment*, 703, 135016.
16. Gill, T., Collett, L., Armston, J., Eustace, A., Danaher, T., Scarth, P., Flood, N., & Phinn, S. (2010). Geometric correction and accuracy assessment of Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM imagery used for vegetation cover monitoring in Queensland, Australia from 1988 to 2007. *Spatial Science*, 55(2), 273-287.
17. Han-Qiu, X. (2005). A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI). *Remote Sensing*, 5, 589-595.
18. Ilori, C. O., Pahlevan, N., & Knudby, A. (2019). Analyzing performances of different atmospheric correction techniques for Landsat 8: application for coastal remote sensing. *Remote Sensing*, 11(4), 469.
19. Jafari, R. & Malekian, M. (2015). Comparison and evaluation of dust detection algorithms using MODIS Aqua/Terra Level 1B data and MODIS/OMI dust products in the Middle East. *Remote Sensing*, 36(2), 597-617.
20. Jebali, A., Zare, M., Ekhtesasi, M. R., & jafari, r. (2020). Investigating of Change Extent of Horizontal Visibility in Regions Affected by Dust events in Yazd Province. *Desert Management*, 8(15), 21-3. (in Farsi).
21. Kazemi, M., Feiznia, S., Khosravi, H., & Mesbah, H. (2019). Investigating of Susceptibility of Maharloo Lake Sediments to Wind Erosion and Determination of Dust Movement Direction. *Desert Management*, 6(12), 49-60 (in Farsi).
22. Kiani, T., Ramesht, M. H., Maleki, A., & Safakish, F. (2016). Assessment and review the environmental risks resulting from climatic changes in Abarkooh basin. *Geography and Development*, 14(43), 19-3 (in Farsi).
23. Kim, H., & Choi, M. (2015). Impact of soil moisture on dust outbreaks in East Asia: Using satellite and assimilation data. *Geophysical Research Letters*, 42(8), 2789-2796.
24. Lal, R. (2003). Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International*, 29(4), 437-450.

25. Lin, J., Guan, Q., Pan, N., Zhao, R., Yang, L., & Xu, C. (2021). Spatiotemporal variations and driving factors of the potential wind erosion rate in the Hexi region, PR China. *Land Degradation & Development*, 32(1), 139-157.
26. Mirmousavi, S. H. (2016). Regional modeling of wind erosion in the North West and South West of Iran. *Eurasian Soil Science*, 49(8), 942-953.
27. Mohammadpour, K., Saligheh, M., Darvishi Bloorani, A & ,Raziei, T. (2020). Analysis and comparing satellite products and simulated of AOD in west Iran (2000-2018). *Spatial Analysis Environmental Hazards*, 7(1), 15-32. (in Farsi)
28. Natarajan, S., & Palaniswami, C. G. (2002). *Remote sensing and GIS techniques for land degradation assessment due to water erosion*. Paper presented at the 17th World congress of soil science, Bangkok (Thailand).
29. Nazari Samani, A. A., Ehsani, A. H., Golivari, A., & Abdolshahnejad, M. (2016). Comparing the Results of RWEQ and IRIFR Models for Determining of Land Management Effects on Wind Erosion. *Desert Management*, 3(6), 39-53. (in Farsi)
30. Noroozi, A., & Shoaie, Z. (2018). Identifying areas with dust generation potential in the south west of Iran, case study: Khuzestan Province. *Watershed Engineering and Management*, 10(3), 398-409. (in Farsi)
31. Pi, H., Huggins, D. R., & Sharratt, B. (2021). Wind erosion of soil influenced by clay amendment in the inland Pacific Northwest, USA. *Land Degradation & Development*, 32(1), 241-255.
32. Sharratt, B. S., & Lauer, D. (2006). Particulate matter concentration and air quality affected by windblown dust in the Columbia plateau. *Environmental Quality*, 35(6), 2011-2016.
33. Shi, H., Gao, Q., Qi, Y., Liu, J., & Hu, Y. (2010). Wind erosion hazard assessment of the Mongolian Plateau using FCM and GIS techniques. *Environmental Earth Sciences*, 61(4), 689-697.
34. Tehrany, M. S., Pradhan, B., & Jebur, M. N. (2014). Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *Hydrology*, 512, 332-343.
35. Teng, Y., Zhan, J., Liu, W., Sun, Y., Agyemang, F. B., Liang, L., & Li, Z. (2021). Spatiotemporal dynamics and drivers of wind erosion on the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Ecological Indicators*, 123, 107340.
36. Tian, J., & Chen, D. (2010). A semi-empirical model for predicting hourly ground-level fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) concentration in southern Ontario from satellite remote sensing and ground-based meteorological measurements. *Remote Sensing of Environment*, 114(2), 221-229.
37. Vicente-Serrano, S. M., Perez-Cabello, F., & Lasanta, T. (2008). Assessment of radiometric correction techniques in analyzing vegetation variability and change using time series of Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, 112(10), 3916-3934.
38. Wang, W., Samat, A., Ge, Y., Ma, L., Tuheti, A., Zou, S., & Abuduwaili, J. (2020). Quantitative soil wind erosion potential mapping for central Asia using the Google Earth engine platform. *Remote Sensing*, 12(20), 3430.
39. Webb, N., McGowan, H., Phinn, S., & McTainsh, G. (2006). AUSLEM (AUStralian Land Erodibility Model): A tool for identifying wind erosion hazard in Australia. *Geomorphology*, 78, 179-200.

40. Yang, X., & Leys, J. (2014). *Mapping wind erosion hazard in Australia using MODIS-derived ground cover, soil moisture and climate data*. Paper presented at the IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.
41. Zhao, H.-L., Yi, X.-Y., Zhou, R.-L., Zhao, X.-Y., Zhang, T.-H., & Drake, S. (2006). Wind erosion and sand accumulation effects on soil properties in Horqin Sandy Farmland, Inner Mongolia. *Catena*, 65(1), 71-79.
42. Zheng, H., Chen, Y., Pan, W., Cai, Y., & Chen, Z. (2019). Impact of land use/land cover changes on the thermal environment in urbanization: A case study of the natural wetlands distribution area in Minjiang River Estuary, China. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(4), 3025.