

Monitoring and investigation of wind erosion warning areas in the northwest of Golestan Province (Case study: Aq Qala and Gomishan Cities)

Abdolhossein Boali¹ , Hamid Reza Asgari² , Ali Mohammadian Behbahani^{3*} , Abdolrassoul Salmanmahiny⁴ , Babak Naimi⁵ 

¹ Ph.D. Student, Department of Arid Zone Management, Faculty of Range and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

² Associate Professor, Department of Arid Zone Management, Faculty of Range and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

³ Assistant Professor, Department of Arid Zone Management, Faculty of Range and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

⁴ Professor, Department of Environmental Sciences, Faculty of Fisheries and Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

⁵ Researcher, Department of Biology, University of Utrecht, Utrecht, Netherlands

Extended Abstract

Introduction

In recent years, one of the most significant environmental crises has been the phenomenon of wind erosion and dust emission. Wind erosion is considered one of the effective factors in desertification and land degradation in dry regions. The process of wind erosion, due to the transport of soil nutrients along with fine particles, is recognized as one of the limiting factors for soil fertility in many parts of the world. Evaluating this type of erosion and estimating the soil loss requires the installation of various measuring stations. Establishing and equipping these stations and providing the necessary equipment require large costs and a long time. In addition to direct measurement methods in wind erosion, the use of modeling results, especially in combination with remote sensing techniques, to study and predict environmental effects, trends, and risk assessment has greatly contributed to research in the last two decades. Therefore, this study aims to monitor and investigate the warning zones of wind erosion in northwest Golestan Province using the wind erosion hazard index (WEHI) model.

Materials and Methods

To assess wind erosion in the western part of Golestan Province, the WEHI model was implemented. This model predicts the sensitivity of the landscape to wind erosion by considering a set of surface and climatic thresholds and using a geographic information system (GIS). In this model, wind erosion severity is determined in three classes: low, moderate, and severe, by multiplying wind speed by the percentage of bare soil and dividing it by the percentage of soil moisture percentage. To monitor wind erosion, the normalized difference moisture index (NDMI) was used to evaluate soil moisture, and the modified bare soil index (MBI) was used to assess bare soil. For validation, these indices were compared to field data and plots in each working unit. Additionally, three statistical parameters, Pearson correlation coefficient, coefficient of determination (R^2), and root mean square error (RMSE), were employed to calculate the correlation between these indices and ground data. Furthermore, a Markov chain model was used to examine changes in wind erosion classes. Finally, after monitoring wind erosion and considering a threshold value for this model, the area of warning zones during the statistical period was investigated.

Results and Discussion

The results obtained from the WEHI model indicate severe wind erosion intensity in the working units of Atark floodplain deposits, saline lands, longitudinal dunes, Barchan dunes, bare lands, and margins area of wetlands. According to the WEHI model, the region was divided into three classes: low (54% frequency), moderate (21% frequency), and severe (25% frequency). The model classified the northern regions into severe and moderate classes, while the southern areas of the region fell into the low wind erosion class. High correlation coefficients between the WEHI model indices based on remote sensing and field data demonstrate the model's ability to

monitor wind erosion over time and at different scales. Wind erosion monitoring results showed that the high wind erosion class increased from 59,940.88 ha to 71,698.3 ha, indicating an increase of 11,757.43 ha. Spatial analysis of wind erosion classes indicated that most changes occurred in central areas, with most areas around the Sangartappeh playa and central regions changed to severe wind erosion class, while western, eastern, and central areas changed to the low wind erosion class. Finally, monitoring the warning zones revealed an increase of 41,000 hectares in the areas under warning, in the western, northwestern, and central regions.

Conclusion

In this study, the performance of the WEHI model in assessing wind erosion risk in the western part of Golestan Province was confirmed. Although factors such as roughness, soil structure, and organic matter content are not directly considered in the model, they are indirectly incorporated in scoring the percentage of bare soil. To control wind erosion in these areas, planting salt-tolerant species and implementing soil fertility enhancement strategies, such as soil mulching in heavy-textured areas, are recommended. Finally, mechanical operations and the establishment of windbreak networks are suggested for controlling wind erosion in abandoned land units. This research can serve as a useful approach for planning and managing vulnerable areas to wind erosion in northwest Golestan Province.

Keywords: Golestan Province, Modeling, Monitoring, Wind erosion, Warning

Article Type: Research Article

Acknowledgment

This research has been done in the form of a doctoral dissertation. The authors thank the Research Vice-Chancellor of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources for facilitating this research.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Abdolhossein Boali: Writing-original draft preparation; **Hamid Reza Asgari:** Manuscript editing; **Ali Mohammadian Behbahani:** Analysis and investigation, conceptualization, methodology; **Abdolrassoul Salmanmahiny:** Visualization, supervision; **Babak Naimi:** Software, manuscript editing.

*Corresponding Author, E-mail: ali.mohammadian@gau.ac.ir

Citation: Boali, A., Asgari, H., Mohammadian Behbahani, A., Salmanmahini, A., & Naimi, B. (2024). Monitoring and investigation of wind erosion warning areas in the northwest of Golestan Province (Case study: Aq Qala and Gomishan Cities). *Water and Soil Management and Modelling*, 4(2), 343-356.
DOI: 10.22098/mmws.2023.13540.1348

Received: 22 August 2023, Received in revised form: 02 October 2023, Accepted: 03 October 2023,
Published online: 03 October 2023

Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 2, pp. 343-356

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





پایش و بررسی محدوده‌های هشدار فرسایش بادی در شمال غرب استان گلستان (مطالعه موردی: شهرستان‌های آق قلا و گمیشان)

عبدالحسین بوعلی^۱، حمیدرضا عسگری^۲، علی محمدیان بهبهانی^{۳*}، عبدالرسول سلمان ماهینی^۴، بابک نعیمی^۵

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
^۲ دانشیار، گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
^۳ استادیار، گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
^۴ استاد، گروه محیط زیست، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
^۵ محقق، گروه زیست‌شناسی، دانشگاه اوترخت، اوترخت، هلند

چکیده

فرسایش بادی، طوفان‌های گرد و غبار و مدیریت آن همواره یکی از مباحث مهم مناطق خشک و نیمه‌خشک بوده و چالشی جدی در برابر اهداف توسعه پایدار محسوب می‌شود. در استان گلستان به دلیل وجود دشت‌های وسیع بیابانی در نواحی شمالی آن وقوع پدیده فرسایش بادی در سال‌های اخیر فراوانی بیش‌تری پیدا کرده است. لذا، با توجه به اهمیت موضوع، پژوهش حاضر با هدف پایش و بررسی محدوده‌های هشدار فرسایش بادی در شمال غرب استان گلستان با استفاده از مدل WEHI انجام شد. همچنین، از مدل زنجیره مارکوف برای بررسی تغییرات کلاس فرسایش در بازه زمانی ۲۰۰۲-۲۰۲۱ استفاده شد. پس از محاسبه شدت فرسایش بادی، با در نظر گرفتن حد آستانه برای این مدل مساحت مناطق تحت هشدار در طول دوره آماری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان داد که شدت فرسایش بادی در واحدهای کاری رسوبات آبرفتی اترک، اراضی شورزار، تپه ماسه‌ای طولی، تپه بارخانی، اراضی بایر و حاشیه تالاب در کلاس شدید قرار دارد. همچنین، نتایج حاصل از پایش فرسایش بادی نشان داد که کلاس فرسایش بادی زیاد و از ۵۹۹۴۰/۸۸ هکتار به ۷۱۶۹۸/۳ هکتار رسیده که نشان‌دهنده افزایش چهار درصدی در دوره آماری مورد مطالعه است. شدت فرسایش بادی در مناطق اطراف کویر سنگرتپه و نواحی مرکزی به کلاس فرسایش بادی شدید و در نواحی غربی و شرقی منطقه به کلاس فرسایش بادی کم تغییر کرده است. نهایتاً، پایش مناطق تحت هشدار نشان‌دهنده افزایش ۴۱ هزار هکتاری این مناطق در نواحی غربی، شمال غربی و مرکزی منطقه مورد مطالعه در ۲۰ سال گذشته است. بر اساس نتایج این پژوهش و با توجه به تشدید فراوانی وقوع گرد و غبار در سال‌های اخیر و پیامدهای جبران‌ناپذیر آن، اجرای برنامه جامع مقابله با پدیده گرد و غبار در استان گلستان ضروری و فوری است. بر اساس نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، اقدامات اصلاحی و بیولوژیکی شامل کشت و توسعه پوشش گیاهی مقاوم به شوری آب و خاک، راهبرد افزایش گیاهان مقاوم به شوری و خشکی در مراتع ضعیف، انجام عملیات کشاورزی حفاظتی به‌ویژه حفظ باقی‌مانده‌های زراعی پس از برداشت و احداث شبکه بادشکن در حاشیه اراضی زراعی پیشنهاد می‌شود.

کلمات کلیدی: استان گلستان، پایش، فرسایش بادی، مدل‌سازی، هشدار

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ali.mohammadian@gau.ac.ir

استناد: بوعلی، حسین، عسگری، حمیدرضا، محمدیان بهبهانی، علی، سلمان ماهینی، عبدالرسول، و نعیمی، بابک (۱۴۰۳). پایش و بررسی محدوده‌های هشدار فرسایش بادی در شمال غرب استان گلستان (مطالعه موردی: شهرستان‌های آق قلا و گمیشان). *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۲)، ۳۴۳-۳۵۶.
DOI: 10.22098/mmws.2023.13540.1348

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۳۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۱۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۱۱

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۱، شماره ۲، ۱۴۰۳، صفحه ۳۴۳ تا ۳۵۶

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان



۱- مقدمه

امروزه یکی از مهم‌ترین بحران‌های محیط زیستی، پدیده فرسایش بادی و انتشار گرد و غبار است. فرسایش بادی از جمله عوامل مؤثر در بیابان‌زایی و تخریب زمین در مناطق خشک به شمار می‌رود (Lal., 2012). به‌طوری‌که فرآیند فرسایش بادی به دلیل حمل عناصر غذایی خاک همراه با ذرات ریزدانه، به‌عنوان یکی از عوامل محدودکننده حاصل‌خیزی خاک در بسیاری از نقاط جهان محسوب می‌شود (Mohammadian Behbahani et al., 2016) و با کاهش عمق خاک سطحی، به‌عنوان چالشی جدی در برابر تولید پایدار و مدیریت اراضی کشاورزی محسوب می‌شود (Santra et al., 2017). هر چند فرسایش بادی به‌دلیل گستره وسیع فعالیت نسبت به فرسایش آبی از عملکرد تخریبی کم‌تری برخوردار است، اما به‌علت تداوم و وسعت فرسایش‌دهی زمانی و مکانی آن، این نوع فرسایش در مناطق خشک به‌مراتب بیش‌تر از فرسایش آبی مورد توجه می‌باشد و خسارات و آسیب‌های اقتصادی-اجتماعی قابل‌توجهی را وارد می‌کند (Fozooni, 2007).

ارزیابی فرسایش بادی و برآورد هدررفت خاکی که تحت تأثیر آن از دست می‌رود و نیز مقایسه حساسیت‌پذیری مناطق مختلف، مستلزم نصب ایستگاه‌های اندازه‌گیری و تجهیز آن‌ها به ادواتی نظیر تله‌های رسوب‌گیر و اندازه‌گیرهای گرد و غبار ثابت و قابل حمل می‌باشد. احداث و تجهیز این تعداد ایستگاه و فراهم آوردن وسایل مورد نیاز آن‌ها نیازمند صرف هزینه‌های زیاد و زمان طولانی است. در کنار نمونه‌برداری‌ها و روش‌های اندازه‌گیری مستقیم فرسایش بادی، استفاده از نتایج مدل‌سازی‌ها به‌ویژه در تلفیق با تکنیک‌های سنجش از دوری جهت مطالعه و پیش‌بینی اثرات محیط زیستی، روندیابی و ارزیابی خطر و ریسک در دو دهه اخیر به کمک پژوهش‌گران آمده است. از سوی دیگر غالب مدل‌های موجود در زمینه برآورد فرسایش بادی دارای ضرایبی هستند که دستیابی به آن‌ها مستلزم یک سری پژوهش‌های جدید در هر منطقه و یا واسنجی کردن مدل با توجه به شرایط منطقه‌ای است (Demissie et al., 2015). لذا تا زمان فراهم شدن امکانات جهت استفاده از این مدل‌ها یا ساخت مدل‌های پویا و مبتنی بر فرآیند چاره‌ای جز استفاده از مدل‌های ساده‌تر از جمله مدل‌های شاخص مبنا نیست (Yaghmaieyan et al., 2017). برای مثال، اریفر (Iran research institute of forest and rangelands. Ekhtesasi. Ahmadi=IRIFR.E.A) ^۱ به‌عنوان مدل ایرانی ارزیابی شدت فرسایش بادی در واحدهای کاری به

طور گسترده در ایران مورد استفاده قرار گرفته است. در پژوهشی، Ildoromi and Moradi (2018) با هدف ارزیابی شدت فرسایش بادی در دشت قهاوند همدان با به‌کارگیری مدل اریفر نقشه شدت فرسایش بادی منطقه را تهیه کردند. در بررسی‌های به عمل آمده از کل نقشه مشخص شد که بیش از ۶۹ درصد از منطقه در کلاس فرسایشی شدید و خیلی‌شدید قرار دارد. در پژوهش دیگری، Alipour et al. (2016) با استفاده از مدل اریفر به ارزیابی فرسایش بادی در منطقه‌ی علای سمنان پرداختند. بدین‌منظور امتیازات واحدهای کاری تعیین شده در منطقه با توجه به نُه عامل مؤثر در این روش محاسبه شد. نتایج نشان داد بیش‌ترین امتیاز مربوط به واحدهای کاری آبراهه و اراضی رسی همراه با کلوکت به‌ترتیب با رسوب‌دهی سالانه ۲/۴ و ۶/۵ تن بر کیلومترمربع است. بر این اساس مشخص شد که ۳۰ درصد از منطقه در کلاس فرسایش بادی شدید قرار دارد. چالش اصلی در استفاده از مدل‌های فرسایش بادی از قبیل اریفر این است که به داده‌های مکانی و زمانی گسترده نیاز دارد و در بخش‌های مبتنی بر بازدهی‌های میدانی و نظر کارشناسی است. با توجه به این‌که فرسایش بادی در مناطق خشک رخ می‌دهد، استخراج اطلاعات در مقیاس بزرگ و دراز مدت دشوار است (Elnashar et al., 2022). از این‌رو، ایجاد یک فرآیند استخراج اطلاعات فرسایش بادی بر اساس تکنیک‌های سنجش از دوری برای ارزیابی خطر و پایش وضعیت فرسایش بادی ضروری است.

در پژوهش‌های مختلفی از جمله، Yang and Leys (2014) برای پیش‌بینی حساسیت اراضی در برابر فرسایش یک شاخص خطر فرسایش بادی ^۲ (WEHI) در استرالیا ارائه کردند. شاخص WEHI یک چهارچوب مدل‌سازی فرسایش‌پذیری زمین است که با بهره‌گیری از یک قاعده کلی، مجموعه‌ای از آستانه‌های سطحی و اقلیمی را در نظر گرفته و از طریق سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای پیش‌بینی حساسیت به فرسایش بادی اقدام می‌کند. این مدل به تازگی جهت ارزیابی فرسایش بادی استفاده شده و با توجه به همبستگی بالای مدل با سیستم اطلاعات جغرافیایی و امکان پایش در مقیاس‌های مختلف انتظار می‌رود استفاده از این مدل نیز نتایج قابل‌قبولی به همراه داشته باشد (Boali and Mohammadian Behbahani, 2020; Jabali and Zare Chahouki, 2021). در مطالعه‌ای، Boali and Mohammadian Behbahani (2020) به ارزیابی شدت فرسایش بادی دشت سگزی اصفهان با استفاده از دو مدل WEHI و IRIFR پرداختند. نتایج نشان‌دهنده همبستگی بیش‌تر نقشه به‌دست آمده از مدل WEHI با واقعیت زمینی است. نتایج

¹ Iran research institute of forest and rangelands. Ekhtesasi. Ahmadi

² Wind erosion hazard index

و غبار استان گلستان به‌شمار می‌رود. همچنین، وجود صحرای قره قوم و حوضه دریاچه آرال به‌عنوان اصلی‌ترین منشاء خارجی گرد و غبار به نواحی شمال‌شرق کشور و استان گلستان محسوب می‌شود. هر چند در مورد برخی رخدادها، پژوهش‌ها نشان‌دهنده رسیدن توده‌های گرد و غبار از مرزهای غربی کشور به استان گلستان نیز است (Razavizadeh et al., 2021). با وجود اهمیت و برخلاف مناطق غربی و جنوب‌شرقی کشور، مطالعات و منابع علمی اندکی در زمینه فرسایش بادی در استان‌های شمال شرقی ایران جود دارد. لذا، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی شدت فرسایش بادی شمال غرب استان گلستان در محدوده شهرستان‌های آق قلا و گمیشان انجام گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

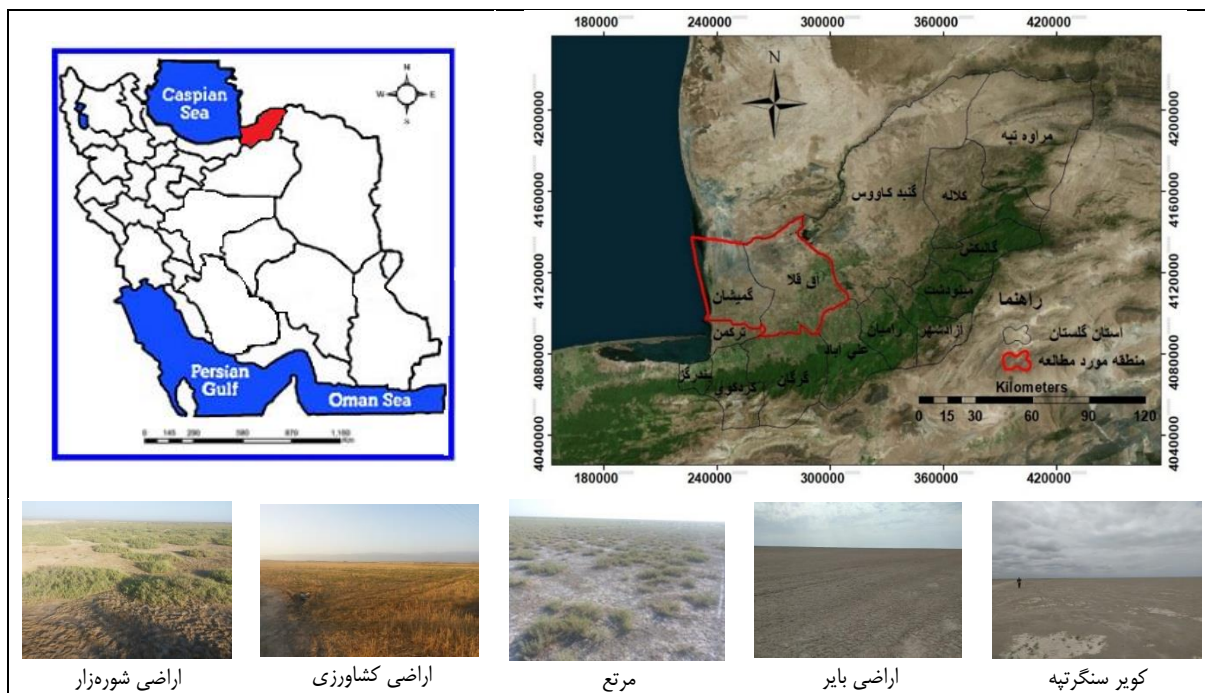
۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با مساحتی حدود ۲۹۱۶ کیلومترمربع در شمال غرب استان گلستان واقع شده و دارای مختصات جغرافیایی ۳۶ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۲۸ دقیقه عرض شمالی و ۵۴ درجه و ۲۱ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی است. منطقه مورد مطالعه از شمال به اراضی کویری و پلایایی کشور ترکمنستان، از غرب به جلگه ساحلی دریایی خزر، از جنوب به شهرستان‌های گرگان، بندر ترکمن، علی‌آباد کنول و از شرق به شهرستان گنبد کاووس محدود می‌شود. این منطقه در جنوب‌شرقی بزرگ‌ترین دریاچه جهان (خزر) و در جنوب غربی بیابان قره قوم ترکمنستان واقع شده است. به‌طوری‌که همواره از دو منبع رطوبتی و خشکی یاد شده متأثر هست. منطقه طی ادوار گذشته در معرض فرونشینی، پیشروی و پسروی‌های مکرر آب دریای خزر و سایر رخدادها از جمله طوفان‌های بادی و سیلاب‌های شدید قرار داشته است. ژئومورفولوژی منطقه شامل دشت سر و دشت هست که در نتیجه عقب‌نشینی دریا ایجاد شده است و قسمتی از آن به‌صورت رخساره‌های کولابی یا مرداب ساحلی، دریاچه‌های فصلی، گل‌فشان‌های فعال و غیرفعال، تپه‌های منفرد ساحلی و حوضه انتهایی (شبه پلایا) با اراضی شور و ماندابی است. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان گلستان را نشان می‌دهد. در این مطالعه بررسی روند تغییرات فرسایش بادی در سطح واحدهای کاری ارزیابی شد. واحدهای کاری در منطقه مورد مطالعه با استفاده از نقشه‌های شیب، زمین‌شناسی، کاربری اراضی و پوشش سطحی به‌همراه تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و بازبیدهای میدانی به‌دست آمد.

حاصل از مدل IRIFR نشان داد که عامل سرعت و وضعیت باد با امتیاز ۲۷۶ و عامل خاک و پوشش سطحی آن با امتیاز ۲۱۲ مهم‌ترین عوامل مؤثر در فرسایش بادی و پتانسیل تولید رسوب در منطقه مورد مطالعه هستند. از طرفی نتایج حاصل از مدل WEHI نیز نشان‌دهنده شدت فرسایش بادی در واحدهای کاری اراضی دست کاشت همراه با رخساره‌های فرسایش بادی، پهنه‌های ماسه‌ای و منطقه حمل است. در دشت ابرکوه واقع در استان یزد نیز (Jabali and Zare Chahouki (2021) با استفاده از مدل WEHI به ارزیابی خطر فرسایش بادی رخساره‌های زیستی-ژئومورفولوژی متنوع بین سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۶ پرداختند. نتایج نشان داد که ۱۰۷۳۶۹ هکتار بر سطح اراضی با خطر فرسایش بادی شدید افزوده شده و فرسایش بادی در رخساره‌های زیستی-ژئومورفولوژی دریاچه نمکی کویر و اراضی شور در حال گسترش است.

از طرفی توسعه سیستم‌های پایش و کنترل فرسایش بادی به منظور پیش‌گیری از آسیب‌های ناشی از آن، اهمیت ویژه‌ای دارد. در صورت تعیین حد آستانه برای شاخص‌های مبتنی بر سنجش از دور می‌توان اقدام به پایش محدوده‌های هشدار در یک سری زمانی مشخص نمود و در صورت لزوم اقدامات مناسب جهت کاهش فرسایش بادی و پیش‌گیری از آسیب به خاک و محیط زیست را پیشنهاد نمود. در این راستا، (Webb et al. (2020) با معرفی شاخص‌ها و معیارهای مختلف به نظارت، ارزیابی و مدیریت فرسایش بادی در مناطق مختلف جهان پرداختند و شاخص‌هایی مانند تحلیل سری زمانی داده‌های باد، شاخص‌های مانیتورینگ خصوصیات خاک، شاخص‌های مانیتورینگ آلودگی هوا و غیره مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی‌که سطح قابل توجهی از مساحت کشور در معرض بیابان‌زایی و فرسایش بادی قرار دارد، مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح برای این عرصه‌ها مستلزم شناخت عوامل، شاخص‌ها و معیارهای تأثیرگذار است (Poornazari et al., 2021). در منطقه مورد مطالعه به‌دلیل وجود واحدهای صنعتی، محدودیت منابع آب (مصارف بالای آب در بخش‌های شرب و کشاورزی) و به خاطر اقلیم خشک و نیمه خشک حاکم بر منطقه، ضرورت دارد به بررسی عوامل تأثیرگذار در افزایش فرسایش بادی منطقه پرداخته و مشکلات موجود شناسایی شود.

در سال‌های اخیر بحران بیابانی شدن اراضی شمال استان گلستان و پدیده گرد و غبار با منشاءهای داخلی و خارجی به آستانه‌های پرخطر خود نزدیک شده است. تالاب‌های خشک شده و اراضی حاشیه آن، بخشی از مراتع ضعیف واقع در شمال استان و اراضی زراعی دیم و بایر به‌عنوان سه کانون بحرانی داخلی گرد



شکل ۱ - موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در ایران و استان گلستان
Figure 1 - Geographical location of the study area in Iran (A) and Golestan Province

های مورد نظر در نرم افزار ArcGIS 10.3 به صورت رستر تهیه شد. قبل از اجرای مدل WEHI تمامی لایه های ورودی مدل باید نرمال سازی (صفر تا یک) شود. در آخر نقشه خطر فرسایش بادی در سه کلاس کم، متوسط و شدید طبقه بندی شد (جدول ۲). در این مطالعه روند تغییرات فرسایش بادی به صورت سالانه طی ۲۰ سال (۲۰۰۲-۲۰۲۱) مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱- کلاس ها و پارامترهای مدل WEHI

امتیاز	شرح شاخص	کلاس	شاخص
0 - 0.25	0 - 25	1	فراوانی بادهای فرساینده (درصد)
0.26 - 0.5	25 - 50	2	
0.51 - 0.75	50 - 75	3	
0.76 - 1	75 - 100	4	خاک لخت (درصد)
0 - 0.25	< 10	1	
0.26 - 0.5	10 - 25	2	
0.51 - 0.75	25 - 50	3	
0.76 - 1	> 50	4	رطوبت خاک (درصد)
0 - 0.25	10 - 20	1	
0.26 - 0.5	20 - 40	2	
0.51 - 0.75	40 - 60	3	
0.76 - 1	> 60	4	

جدول ۲- کلاس های مدل WEHI

کلاس	امتیاز
کم	0 - 0.25
متوسط	0.26 - 0.5
شدید	0.5 <

۲-۲- مدل فرسایش بادی WEHI

شاخص های انتخاب شده جهت برآورد فرسایش بادی در مدل WEHI شامل درصد رطوبت خاک، سرعت باد و درصد پوشش سطح زمین هستند. این مدل با استفاده از شاخص های ذکر شده می تواند در بازه زمانی روزانه تا سالانه و در مقیاس مزرعه تا در سطح ملی فرسایش بادی را برآورد کند (Yang and Leys, 2014). در این شاخص درصد رطوبت خاک به روش غیرمستقیم با استفاده از دستگاه TDR، تعیین شد. تعیین درصد خاک لخت با استفاده از پلات های یک مترمربعی در طول ترانسکت ۱۰۰ متری به صورت سیستماتیک در هر پنج متر یک پلات مستقر انجام شد و سپس درصد خاک لخت در هر پلات با نظر کارشناسی تعیین و به کل واحد کاری تعمیم داده شد. اطلاعات مربوط به فراوانی بادهای فرساینده در منطقه مورد مطالعه بر اساس آمار ایستگاه های هواشناسی منطقه طی یک دوره آماری ۲۰ ساله (۲۰۰۲ - ۲۰۲۱) به دست آمد. رابطه (۱)، ارتباط بین شاخص های مدل WEHI را نشان می دهد که در آن رطوبت خاک لخت به بر حسب درصد می باشد (Yang and Leys, 2014).

$$(1) \text{ رطوبت خاک لخت} \times \text{فراوانی بادهای فرساینده} = \text{WEHI}$$

در جدول ۱ کلاس بندی پارامترهای مدل WEHI را نشان می دهد. برای تهیه نقشه هر یک از پارامترهای مدل WEHI، توجه به وضع موجود در منطقه و استانداردهای تعیین کننده کیفیت، امتیازی بین صفر تا یک تعلق گرفت (جدول ۱) و نقشه

میزان همبستگی شاخص‌های مدل WEHI با داده‌های زمینی، پایش فرسایش بادی با استفاده از این مدل در طول دوره آماری انجام شد. همچنین، برای بررسی روند تغییرات فرسایش از زنجیره مارکوف و سلول خودکار استفاده و بر همین اساس تغییرات کلاس شاخص فرسایش در بازه زمانی ۲۰ ساله از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۱ در مناطق هشدار ارزیابی شد. جهت بررسی این تغییرات بر اساس استانداردهای موجود و تغییرات محلی و منطقه‌ای حد آستانه‌ای محاسبه شده است و تغییرات در طول دوره زمانی ارزیابی شد (Akbari et al., 2020) تا بر اساس روند تغییرات محدوده‌های هشدار برنامه‌های مدیریتی جهت کنترل فرسایش بادی در این مناطق ارائه شود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- واحدهای کاری منطقه مورد مطالعه

واحدهای کاری در محدوده شهرستان‌های آق‌قلا و گمیشان با استفاده از نقشه‌های شیب، زمین‌شناسی، کاربری اراضی و پوشش سطحی به همراه تحلیل تصاویر ماهواره‌ای (ماهواره لندست ۸ سنجنده OLI مربوط به سال ۲۰۱۹) و بازبندیهای میدانی در دو واحد، پنج تیپ و ۱۴ رخساره به‌دست آمد. در جدول ۳ مشخصات واحدهای کاری آورده شده و شکل ۲ نیز نقشه واحدهای کاری را در منطقه نشان می‌دهد. مساحت بزرگ‌ترین رخساره مربوط به اراضی تپه ماهوری در تیپ دشت سیلابی-دلتایی گرگان‌رود (واحد ۱۳) با مساحت ۴۹۵۸۶ هکتار و مساحت کوچک‌ترین رخساره مربوط به واحد کاری تپه بارخانی (واحد ۱۰) با مساحتی در حدود ۶۴۴ هکتار است.

۲-۳- مقدار تطابق شاخص‌های مدل WEHI با واقعیت زمینی به‌منظور پایش فرسایش بادی با استفاده از مدل WEHI، دو شاخص NDMI برای ارزیابی رطوبت خاک و شاخص MBI برای ارزیابی خاک لخت در نظر گرفته شد (Jabali and Zare, 2021). بر این اساس برای صحت‌سنجی این شاخص‌ها از داده‌های پروفیل خاک و پلات‌هایی در نظر گرفته شده در هر واحد کاری استفاده شد. همچنین، از سه پارامتر آماری ضریب همبستگی پیرسون، ضریب تعیین (R^2) و ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) جهت محاسبه همبستگی بین این شاخص‌ها و داده‌های زمینی استفاده شد.

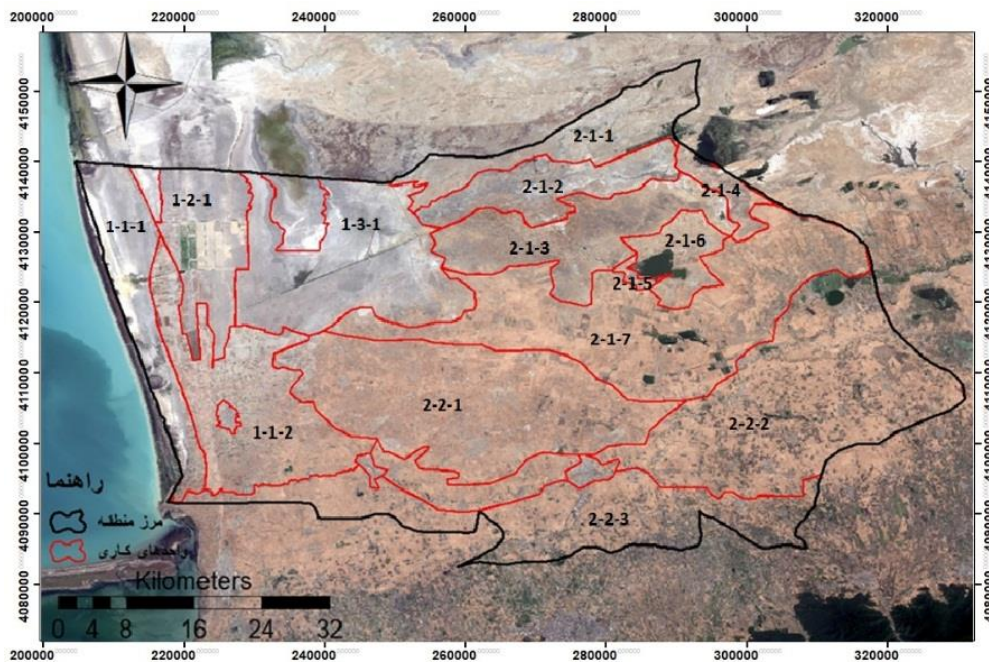
۲-۴- پایش و بررسی تغییرات مکانی فرسایش بادی

پس از اجرای مدل‌سازی‌ها جهت پایش و بررسی تغییرات مکانی فرسایش بادی در بازه زمانی مورد نظر از روش‌های مختلفی از جمله زنجیره مارکوف و مدل سلول‌های خودکار استفاده می‌شود. زنجیره مارکوف تشکیل شده از مقادیر تصادفی است که احتمالات یک بازه زمانی در آن وابسته به مقدار عددی آن در گذشته است و تغییرات مکانی اراضی را نشان می‌دهد (Mohammadian and Heidarizadi, 2019). مدل سلول‌های خودکار نیز دارای سیستمی گسسته و دینامیکی است؛ که دارای سه جزء سلول‌ها، همسایگی‌های سلول و قوانین انتقال است. سلول، از عنصر اصلی مدل سلول‌های خودکار است که این سلول‌ها در یک شبکه سازمان یافته قرار گرفته‌اند. قانون انتقال وضعیت هر سلول برای مرحله آخر را مشخص می‌کند که این بستگی به وضعیت فعلی سلول و سلول‌های همسایگی آن دارد (Zandi et al., 2020). در این مطالعه پس از بررسی

جدول ۳- توزیع درصد فراوانی واحدهای کاری منطقه مورد مطالعه

Table 3- Frequency distribution of work units in the study area

واحد	کد واحد	تیپ	کد تیپ	رخساره	کد رخساره	مساحت (هکتار)	درصد فراوانی		
پلایا	1	ساحل -توکاسپین پسین (مختوم قلی)	1-1	حاشیه تالاب رسوبات ساحلی (ساحل برآمده)	1-1-1	14484.42	4.96		
		ساحل -توکاسپین میانی (گمیشان)	1-2	ارضی شور- ماندابی (به‌صورت فرورفتگی طولی)	1-2-1	9124.87	3.12		
		ساحل -توکاسپین پیشین (سنگر تپه)	1-3	ارضی شور حاشیه پلایا	1-3-1	27874.87	9.55		
دشت سر	2	دشت سیلابی- دلتایی اترک	2-1	رسوبات آبرفتی اترک	2-1-1	11981.39	4.1		
				ارضی شورزار با مورفولوژی سبختا	2-1-2	11497	3.94		
				ارضی شورزار	2-1-3	18765.78	6.43		
		تپه بارخانی	2-2	تپه ماسه‌ای طولی	2-1	تپه ماسه‌ای طولی	2-1-4	3307.94	1.13
						تپه بارخانی	2-1-5	644.55	0.22
						ارضی یابر (رها شده)	2-1-6	5419.9	1.85
						ارضی تپه ماهوری	2-1-7	43272.1	14.83
						دشت سیلابی	2-2-1	40569.43	13.91
						ارضی تپه ماهوری	2-2-2	49586.11	17
						رسوبات آبرفتی قدیمی گرگان رود	2-2-3	29373.11	10.15



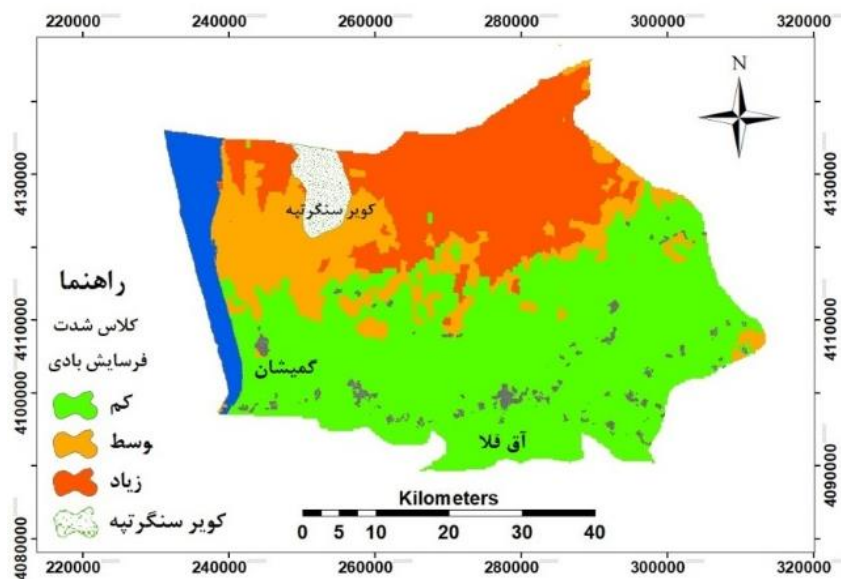
شکل ۲- نقشه واحدهای کاری منطقه مورد مطالعه

Figure 2 - Map of the study area's work units

شورزار و رسوبات آبرفتی اترک است. واحد کاری اراضی بایر و رها شده به دلیل عدم فشردگی لایه سطحی خاک، حساسیت بالایی نسبت به فرسایش بادی دارند. همچنین، کمبود رطوبت و در نهایت کمبود پوشش گیاهی و عدم مدیریت و استفاده از زمین در این واحد باعث ایجاد رخساره نیکای فعال شده که نشان‌دهنده افزایش حمل ذرات در فرآیند فرسایش بادی در این واحد است. در این راستا، Zho et al. (2008) در پژوهش خود اظهار داشتند که خالی شدن پای بوته و تشکیل نیکاهای می‌تواند دال بر شدت برداشت رسوبات و افزایش فرسایش بادی در منطقه باشد. در واحد کاری اراضی شورزار و رسوبات آبرفتی بافت خاک ماسه‌ای و فاقد چسبندگی، خشک بودن خاک سطحی و بدون چسبندگی ناشی از رطوبت و عدم مدیریت زمین باعث فعالیت زیاد و حرکت آن‌ها است. همچنین، Fozooni (2007) نیز در پژوهش خود به این نکته اشاره دارد که اگر آثار ناشی از فرسایش در سطح زمین قابل دیدن باشد (مانند پهنه‌ها و تپه‌های ماسه‌ای، باد بردگی اراضی و غیره)، نشان از تحت هشدار بودن وضعیت از نظر فرسایش بادی است که علت آن را می‌توان عدم پایداری و حساس بودن ذرات تشکیل‌دهنده آن‌ها نسبت به رژیم باد دانست (Fozooni, 2007; Eftekhari et al., 2014).

۳-۲- ارزیابی فرسایش بادی با استفاده از مدل WEHI
بر اساس مدل WEHI منطقه در سه کلاس کم با فراوانی ۵۴ درصد، کلاس متوسط با فراوانی ۲۱ درصد و کلاس شدید فرسایش بادی با فراوانی ۲۵ درصد دسته بندی می‌شود (شکل ۳). نتایج نشان داد که تمرکز شدت فرسایش بادی در نواحی شمالی منطقه در دو کلاس شدید و متوسط می‌باشد و نواحی جنوبی منطقه نیز در کلاس فرسایش بادی کم قرار گرفتند. در این راستا، Sabeti et al. (2006) در مطالعه خود در بررسی مکانیسم فرسایش بادی در دشت‌های شمال آق‌قلا، کلاس خطر فرسایش بادی را زیاد به دست آوردند. اقلیم نیمه‌خشک و بیابانی منطقه با بادهای گرم و خشک و خاک‌هایی با بافت ریزدانه و درصد املاح بسیار بالا، پوشش گیاهی پراکنده و تنک، منطقه‌ای شکننده و حساس در برابر فرسایش و تخریب و بروز پدیده بیابان‌زایی است که تپه‌های ماسه‌ای طولی، برخانی فسیل شده و نیکاهای فعال شاهدهی بر این ادعا است. نتایج پژوهش Sabeti et al. (2006) و Alinejad et al. (2017) نیز نشان‌دهنده حاکمیت فرسایش بادی به‌خصوص در فصول خشک و حمل ماسه‌های ریزدانه و ذرات سیلت و تجمع آن در اطراف بوته‌های گیاهی در این مناطق است.

نتایج حاصل از این مدل نیز نشان‌دهنده شدت فرسایش بادی در واحدهای کاری اراضی رها شده، حاشیه تالاب، اراضی



شکل ۳- نقشه فرسایش بادی منطقه مورد مطالعه در سال ۲۰۲۱ با استفاده از مدل WEHI
Figure 3- Wind erosion map of the study area in 2021 using the WEHI model

نشان‌دهنده قابلیت این مدل برای پایش فرسایش بادی در طول زمان و در مقیاس‌های مختلف است (جدول ۴).

۳-۳- همبستگی بین شاخص‌های مدل با داده‌های زمینی ضرایب همبستگی نسبتاً بالا بین پارامترهای مدل WEHI که مبتنی بر شاخص‌های سنجش از دوری است با داده‌های میدانی

جدول ۴- انتخاب شاخص‌ها بر اساس میزان همبستگی با داده‌های سطح زمین

Table 4- Selection of indicators based on the degree of correlation with ground surface data

شماره	شاخص	شاخص سنجش از دور	داده‌های میدانی	همبستگی بین شاخص‌های ماهواره‌ای و داده‌های زمینی
1	رطوبت خاک	NDMI	پروفیل خاک	R2: 0.56, RMSE: 0.69, ضریب پیرسون: 0.77
2	خاک لخت	MBI	پلات در طول ترانسکت	R2: 0.63, RMSE: 0.74, ضریب پیرسون: 0.81

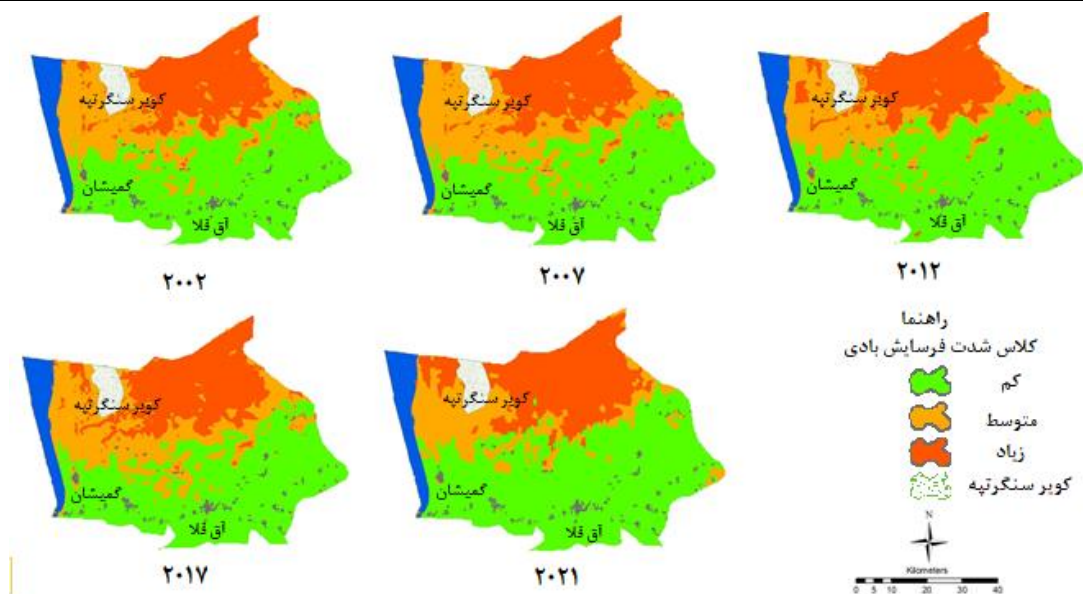
رسیده که نشان‌دهنده افزایش ۱۱۷۵۷/۴۳ هکتار است (جدول ۵ و شکل ۴). نتایج نشان‌دهنده کاهش کلاس فرسایش بادی کم و شدید و افزایش کلاس متوسط است (شکل ۵). بررسی تغییرات مکانی کلاس فرسایش بادی نیز نشان داد بیش‌تر تغییرات در مناطق مرکزی منطقه مورد مطالعه اتفاق افتاده است، هم‌چنین بیش‌تر مناطق اطراف کویر سنگرتپه و نواحی مرکزی به کلاس فرسایش بادی شدید و نواحی غربی، شرقی و مرکزی به کلاس فرسایش بادی کم تغییر کرده است (شکل ۶).

۳-۴- پایش فرسایش بادی بر اساس مدل WEHI

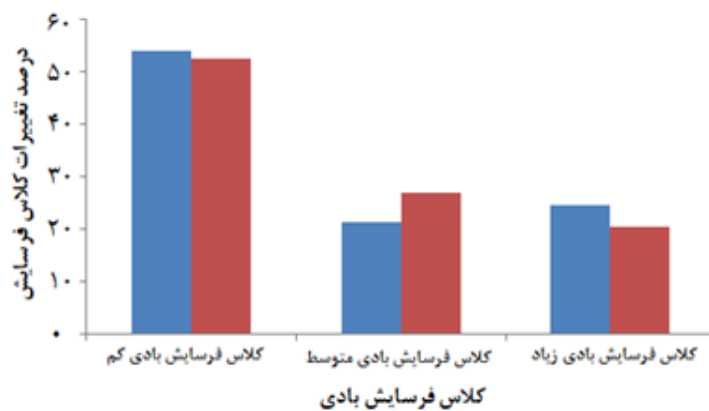
پایش فرسایش بادی در سطح سه کلاس و به صورت سالانه در طول ۲۰ سال انجام شد. نقشه فرسایش بادی هر پنج سال (۲۰۰۲، ۲۰۰۷، ۲۰۱۲، ۲۰۱۷ و ۲۰۲۱) در شکل ۴ نشان داده شده است. بر این اساس کلاس فرسایش بادی کم از ۱۵۳۴۸۵/۷ هکتار به ۱۵۷۸۵۹/۷ هکتار رسیده که نشان‌دهنده افزایش ۴۳۷۳/۹۲ هکتاری هست. کلاس فرسایش بادی متوسط نیز از ۷۸۱۹۳/۵۸ هکتار به ۶۲۰۶۲/۲۳ هکتار رسیده که نشان‌دهنده کاهش ۱۶۱۳۱/۴ هکتاری هست. نهایتاً کلاس فرسایش بادی زیاد از ۵۹۹۴/۸۸ هکتار به ۷۱۶۹۸/۳ هکتار

جدول ۵- بررسی روند تغییرات کلاس فرسایش بادی بر حسب مساحت در منطقه مورد مطالعه
Table 5- Investigating the trend of wind erosion class changes based on area in the study area

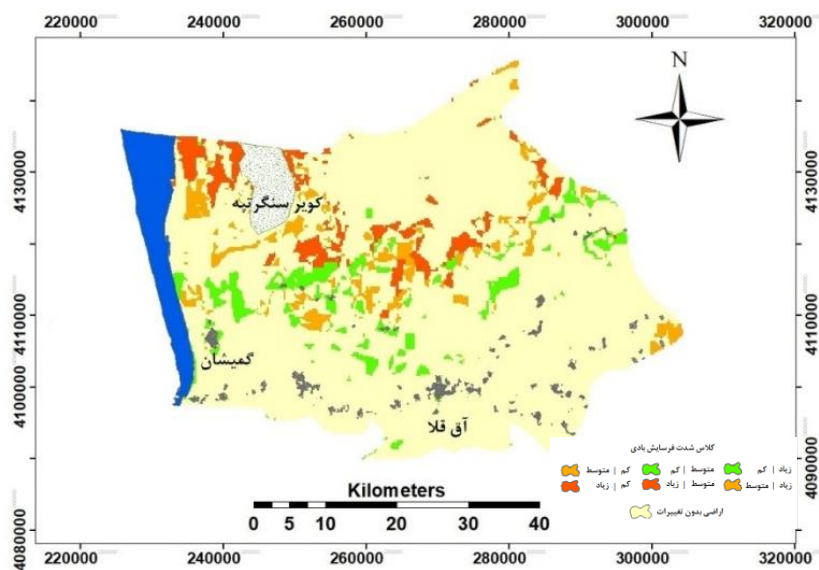
کلاس	مساحت (۲۰۰۲)		مساحت (۲۰۲۱)		روند تغییرات (۲۰۰۲-۲۰۲۱)
	درصد	هکتار	درصد	هکتار	
کم	52.63	153485.7	54.13	157859.7	1.49
متوسط	26.81	78193.58	21.28	62062.23	-5.53
شدید	20.55	59940.88	24.58	71698.3	4.03
	100	2916020.2	100	2916020.2	



شکل ۴- پایش فرسایش بادی (۲۰۰۲ - ۲۰۲۱) در منطقه مورد مطالعه
Figure 4- Wind erosion monitoring (2002-2021) in the study area



شکل ۵ - تغییرات کلاس فرسایش بادی از سال ۲۰۰۲ تا سال ۲۰۲۱
Figure 5 - Changes in wind erosion class from 2002 to 2021



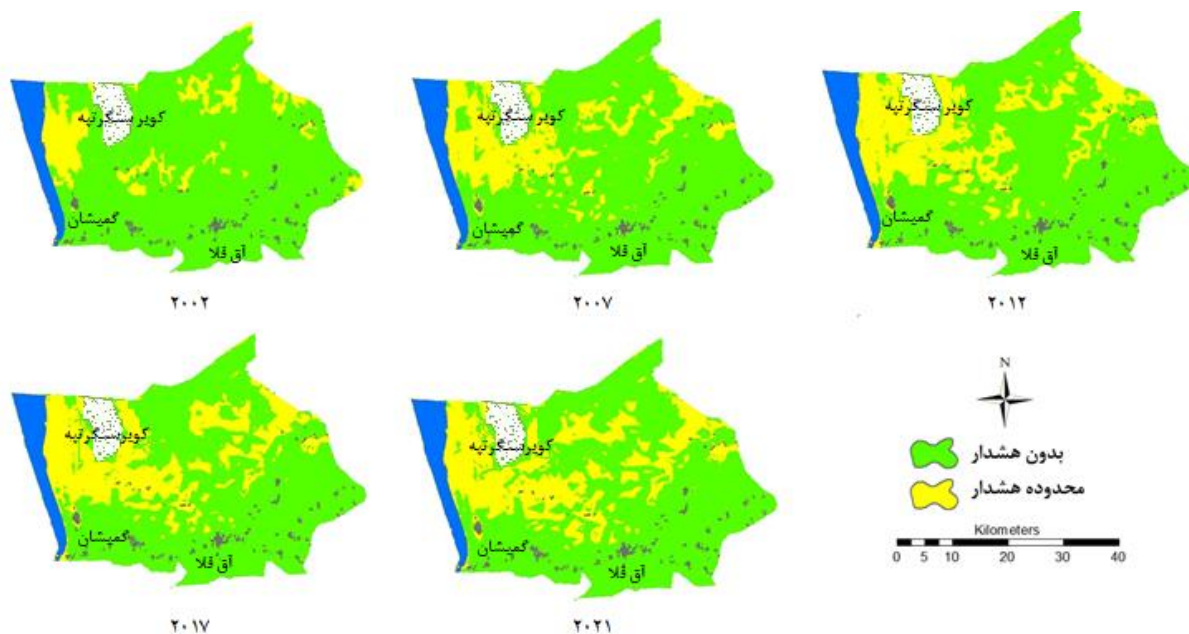
شکل ۶- بررسی روند تغییرات مکانی کلاس فرسایش بادی از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۱
figure 6- Investigating the trend of spatial changes in wind erosion class from 2002 to 2021

بادی قرار دارند. بر اساس نتایج به دست آمده از پایش محدوده هشدار شاخص‌ها در طول دوره آماری، مشخص شد که مناطق شمالی و شمال غربی در محدوده هشدار قرار گرفته و این مناطق هشدار در حال گسترش به طرف مناطق مرکزی منطقه مورد مطالعه هستند. به طوری که نتایج این پژوهش در بازه ۲۰ ساله نشان می‌دهد که فاصله آستانه‌های هشدار تا وضعیت بحرانی در محدوده مورد مطالعه به پنج سال رسیده است و ادامه وضعیت فعلی از نظر اقلیمی و مدیریتی و استفاده از زمین می‌تواند در آینده‌ای نه چندان دور این منطقه و استان گلستان را با بحران فرسایش بادی و وقوع گرد و غبار مواجه نماید.

۳-۵- بررسی مناطق تحت هشدار فرسایش بادی در طی

بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۱

دامنه کلی تغییرات در مدل فرسایش بادی WEHI بین صفر تا یک متغیر است. با توجه به بررسی منابع انجام شده حد آستانه هشدار برای این شاخص ارزش عددی بیش‌تر از $0/3$ در نظر گرفته شد. شکل ۷ روند تغییرات مناطق تحت هشدار این شاخص در طول دوره آماری را نشان می‌دهد. مناطق تحت هشدار این شاخص، مناطق غربی، شمال غربی (تالاب) و مرکزی هست. مساحت مناطق تحت هشدار این شاخص از ۶۷۱۳۶ هکتار در سال ۲۰۰۲ به ۱۰۹۱۰۱ هکتار در سال ۲۰۲۱ رسیده است. همچنین، واحدهای کاری اراضی شور حاشیه پلایا، اراضی حاشیه تالاب و دشت سیلابی در محدوده هشدار فرسایش



شکل ۷- مناطق در محدوده هشدار و بدون هشدار فرسایش بادی (۲۰۰۲-۲۰۲۱) در منطقه مورد مطالعه

Figure 7- Areas within the range of warning and without warning of wind erosion (2002-2021) in the study area

پوشش جامعه گیاهی مقاوم به شوری خاک و آب، راهبرد افزایش گیاهان مقاوم به شوری و خشکی در مراتع ضعیف، انجام عملیات کشاورزی حفاظتی به ویژه حفظ باقی مانده‌های زراعی پس از برداشت و احداث شبکه بادشکن در حاشیه اراضی زراعی پیشنهاد می‌شود. برای بوم‌سازگان‌های آبی خشک شده تالابی به نظر تأمین حق آب، مرطوب نگهداشتن سطوح و حفظ گیاهان شورپسند به عنوان تنها اقدامات پایدار جلوگیری از انتشار گرد و غبار و فرسایش بادی است. هر چند به نظر می‌رسد با توجه به گذر از آستانه‌های بحرانی و این که زمان بسیاری از دست رفته و ممکن است اقدامات نیز اثر بخشی مورد نظر را در پی نداشته باشد، اما با توجه به تشدید فراوانی وقوع گرد و غبار

۴- نتیجه گیری

این مطالعه به منظور پایش فرسایش بادی در محدوده دو شهرستان بیابانی در شمال غرب استان گلستان با استفاده از مدل WEHI در سطح سه کلاس و به صورت سالانه در طول ۲۰ سال انجام شد. بر این اساس ضروری است برنامه‌های مدیریتی جهت جلوگیری از تشدید فرسایش بادی در نیمه شمال غربی منطقه مورد مطالعه (واحدهای کاری اراضی شور حاشیه پلایا و تالاب، دشت سیلابی، اراضی بایر شده، تپه طولی و بارخانی، اراضی شورزار و رسوبات آبرفتی اترک) که از محدوده هشدار عبور کرده و در شرایط بحرانی قرار دارند، ارائه شود. بر این اساس اقدامات اصلاحی و بیولوژیکی شامل کشت و توسعه

در سال‌های اخیر و پیامدهای جبران‌ناپذیر آن اجرای برنامه جامع مقابله با پدیده گرد و غبار در استان گلستان ضروری و فوری است. نقشه‌های شدت خطر فرسایش بادی به‌دست آمده در این پژوهش می‌تواند ابزاری کارآمد و مناسب در مدیریت و کاهش اثرات فرسایش بادی و تخریب سرزمین باشد.

سپاسگزاری

این پژوهش در قالب رساله دکتری انجام شده است. نویسندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان که موجبات تسهیل انجام پژوهش حاضر را فراهم نمودند تشکر می‌نمایند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش وجود ندارند.

دسترسی به داده‌ها

تمامی اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

عبدالحسین بوعلی: تهیه و تدوین پیش‌نویس و اصل مقاله؛ **حمیدرضا عسگری:** ویرایش مقاله؛ **علی محمدیان بهبهانی:** تحلیل و بررسی، مفهوم‌سازی و روش‌شناسی؛ **عبدالرسول سلمان ماهینی:** تصویرسازی، نظارت؛ **بابک نعیمی:** نرم‌افزار و ویرایش مقاله.

منابع

- ایلدرمی، علیرضا، مرادی، مینا، و قربانی، محمد (۱۳۹۶). تأثیر شدت فرسایش بادی و بیابان‌زایی در تخریب زیستگاه منطقه همدان. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۲۹(۲۹)، ۴۲-۲۱. doi:10.22108/gep.2017.101162.1009
- افتخاری، راحله، شهریاری، علیرضا، و اختصاصی، محمد (۱۳۹۴). ارزیابی و تهیه نقشه وضعیت بالفعل و بالقوه بیابان‌زایی با تأکید بر معیار فرسایش بادی در جنوب غربی شهرستان هیرمند با استفاده از مدل MICD. *جغرافیا و توسعه*، ۳۸(۱۳)، ۱۳۹-۱۵۰. doi:10.22111/gdij.2015.1936
- بوعلی، عبدالحسین، و محمدیان بهبهانی، علی (۱۳۹۹). ارزیابی مقایسه‌ای مدل‌سازی شدت فرسایش بادی با استفاده از مدل‌های WEHI و IRIFR برای ارائه برنامه مدیریتی دشت

سگری در اصفهان. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۷(۴)، ۱۲۹-۱۴۷. doi: 10.22069/jwsc.2020.17540.3305

محمدیان بهبهانی، علی، و حیدری‌زادی، زاهده (۱۳۹۷). پایش و پیش‌بینی روند تغییرات پهنه‌های ماسه‌ای با استفاده از مدل زنجیره مارکف (مطالعه موردی: دشت ابوغویر دهلران، استان ایلام). *علوم محیطی*، ۱۶(۴)، ۱۵۳-۱۶۶.

ثابتی، شقایق (۱۳۸۶). بررسی مکانیسم فرسایش بادی و اثر آن بر خطر بیابان‌زایی در دشت‌های شمال آق‌قلا (استان گلستان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

جبال، عاطفه، و زارع چاهوکی، اصغر (۱۴۰۰). ارزیابی خطر فرسایش بادی دشت ابرکوه با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای لندست. *مدیریت بیابان*، ۹(۳)، ۱۷-۳۳. doi: 10.22034/jdmal. 2021.538377.1350

رضوی‌زاده، سمانه، عباسی، حمیدرضا، و درگاهیان، فاطمه (۱۴۰۰). بررسی پدیده گرد و غبار در استان گلستان، با تأکید بر شاخص عمق اپتیکی و سمت و سرعت باد. *علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران*، ۱۵(۵۳)، ۵۸-۶۷. doi: 20.1001.1.20089554.1400.15.53.3.7

زند، رحمان، شهابی، هزار، و اکبری ابراهیم (۱۳۹۸). بررسی و پیش‌بینی تغییرات پوشش جنگل‌ها با استفاده از طبقه‌بندی شیء‌گرا فازی تصاویر ماهواره‌ای و زنجیره مارکوف، مطالعه موردی: شهرستان رومشکان. *پژوهش و فناوری محیط زیست*، ۶(۶)، ۱۰۳-۱۱۴. doi:20.1001.1.26763060.1398.4.6.12.1

علی‌پور، ناهید، فرزانه پی، فاطمه، ترابی، علی، بخشی‌نیا، سمیرا، و مصباح‌زاده، طیب (۱۳۹۵). ارزیابی شدت فرسایش بادی در منطقه علاء سمنان با استفاده از مدل IRIFR. *مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۱۰(۵)، ۹۹-۱۰۷.

علی‌نژاد، محمد، حسینعلی‌زاده، محسن، اونق، مجید، و محمدیان بهبهانی، علی (۱۳۹۶). بررسی ژئومورفولوژیکی رخساره نیکا در دشت صوفیکم (آق‌قلا) استان گلستان. *مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۶(۱۶)، ۵۹-۷۰.

فزونی، لیلیا (۱۳۸۶). ارزیابی وضعیت فعلی بیابان‌زایی با استفاده از مدل مدالوس در دشت سیستان با تأکید بر معیارهای فرسایش آبی و بادی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زابل.

یغماییان، نفیسه، اسدی، حسین، و رضایی، صدیقه (۱۳۹۷). پهنه‌بندی و ارزیابی خطر تخریب اراضی با استفاده از روش مدالوس در حوضه سیاهپوش استان اردبیل. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳۴(۱)، ۱۷۳-۱۸۷. doi:10.22069/jwfst.2017.11351.2576

References

- Akbari, M., Modarres, R., & Noughani, M.A. (2020). Assessing early warning for desertification hazard based on E-SMART indicators in arid regions of northeastern Iran. *Journal of Arid Environments*, 63(32), 174-183. doi:10.1016/j.jaridenv.2019.104086
- Alinejad, M., Hosseinalizadeh, M., Ownegh., M. & Mohammadian Behbahani, A. (2017). Geomorpho-pedological analysis of Nebka landscape in Sufikam Plain, Golestan Province. *Desert Ecosystem Engineering*, 6(16), 59-70. [In Persian]
- Alipour, A., Farzanehpey, F., Torabi, A., Bakhshinia., S., & Mesbahzadeh, T. (2016). The severity of wind erosion assessment in ala region of Semnan using IRIFR. E.A Model. *Desert Ecosystem Engineering*, 5(10), 99-107. [In Persian]
- 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. *Journal of Water and Soil Conservation*, 27(4), 129-147. doi:10.22069/jwsc.2020.17540.3305. [In Persian]
- Demissie, G., Tesfamariam, S., & Sadiq, R. (2015). Prediction of soil corrosivity index: a Bayesian belief network approach. 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, Vancouver, Canada, Pp. 1-9.
- Eftekhari, R., Shahriari, A., & Ekhsati, M. (2014). Evaluation and preparation of a map of the actual and potential state of desertification with an emphasis on wind erosion criteria in the southwest of Hirmand city using the MICD model. *Geography and Development*, 38(13), 139-150. doi:10.22111/gdij.2015.1936. [In Persian]
- Elnashar, A., Zeng, H., Wu, B., Gebremicael, T.G. & Marie, K. (2022). Assessment of environmentally sensitive areas to desertification in the Blue Nile Basin driven by the MEDALUS-GEE framework. *Science of The Total Environment*, 815, 152925. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.152925
- Fozooni, Leila (2007). Evaluation of the current state of desertification using Medalos model in Sistan plain with emphasis on water and wind erosion criteria. Master's Thesis, Zabol University, Zabol, Iran. [In Persian]
- Ildoromi, A., Moradi, M., & Ghorbani, M. (2017). Invest the effect of the intensity of wind erosion and desertification on the destruction of the habitat of hamedan region. *Geography and Environmental Planning*, 29(1), 21-42 doi:10.22108/gep.2017.101162.1009. [In Persian]
- Jebali, A., & Zare Chahouki, A. (2021). Evaluation of wind erosion risk in Abarkouh Plain using landsat satellite imageries. *Desert Management*. 9(3), 17-32. doi:10.22034/jdmal.2021.538377.1350. [In Persian]
- Lal, R. (2012). Land degradation and pedological processes in a changing climate. *Pedologist*, 55(3), 315-325. doi:10.18920/pedologist.55.3_315
- Mohammadian Behbahani, A., Fister, W., Heckrath, G., & Kuhn, N.J. (2016). Dust and nutrient enrichment by wind erosion from Danish soils in dependence of tillage direction. In EGU General Assembly Conference Extended Abstracts, (pp. EPSC2016-16217).
- Mohammadian Behbahani, A., & Heidarizadi, Z. (2018). Monitoring and predicting the trend of sand zone changes using the CA-Markov model (Case study: Abu Ghovair plain, Dehloran, Ilam Province). *Environmental Sciences*, 16(4), 153-166. [In Persian]
- Poornazari, N., Khalilimoghadam, B., Hazbavi, Z., & Bagheri Bodaghabadi, M. (2021). Land degradation assessment in the dust hotspot of southeastern Ahvaz, Iran. *Land Degradation & Development*, 32(2), 896-913. doi:10.1002/ldr.3748
- Razavizadeh, S., Abbasi, H., & Dargahian, F. (2021). Investigating the phenomenon of dust in Golestan Province, with emphasis on optical depth index and wind direction and speed. *Iran watershed science and engineering*, 15(53), 58-67. dor:20.1001.1.20089554.1400.15.53.3.7. [In Persian]
- Santra, P., Moharana, P.C., Kumar, M., Soni, M.L., Pandey, C.B., Chaudhari, S.K., & Sikka, A.K. (2017). Crop production and economic loss due to wind erosion in hot arid ecosystem of India. *Aeolian Research*, 28(6), 71-82. doi:10.1016/j.aeolia.2017.07.009
- Sabeti, Sh. (2006). Investigating the mechanism of wind erosion and its effect on the risk of desertification in the plains of North Aqqla (Golestan Province). Master's Thesis, Gorgan

- University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. [In Persian]
- Webb, N.P., Kachergis, E., Miller, S.W., McCord, S.E., Bestelmeyer, B.T., Brown, J.R., Chappell, A., Edwards, B.L., Herrick, J.E., Karl, J.W. & Leys, J.F. (2020). Indicators and benchmarks for wind erosion monitoring, assessment and management. *Ecological Indicators*, 110, 105881. doi:10.1016/j.ecolind.2019.105881
- Yaghmaieyan, N., Asadi, H., & Rezaie, S., (2017). Mapping and Assessment of Land Degradation Risk using MEDALUS Model in Siyahpoush Watershed, Ardabil Province. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(1), 173-187. doi:10.22069/jwfst.2017.11351.2576. [In Persian]
- Yang, X., & Leys, J. (2014). Mapping wind erosion hazard in Australia using MODIS-derived ground cover, soil moisture and climate data. IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 17(1), 124-133. doi:10.1088/1755-1315/17/1/012275
- Zho, X., LIN, H.S., & White, E.A. (2008). Surface soil hydraulic properties in four soil series under different land use and their temporal change. *Catena*. 73(42), 180-188. doi:10.1016/j.catena.2007.09.009
- Zandi, R., Shahabi, H., & Akbari, E. (2020). Investigation and prediction on forests covers changes using fuzzy object-based satellite image classification and Ca-Markov (case study: City of Romeshkan). *Journal of Environmental Research and Technology*, 5(6), 103-114. dor:20.1001.1.26763060.1398.4.6.12.1. [In Persian]