

Large-Scale Estimation of Wind Erosion in Iran through Integration of the Revised Wind Erosion Model and Google Earth Engine

ABSTRACT

Given the adverse consequences of wind erosion, the lack of long-term, spatially gridded data in this field has hindered sustainable land management in arid and semi-arid regions, including Iran. Field-based methods for mapping wind erosion are time-consuming and costly. In the present study, the Revised Wind Erosion Equation (RWEQ) was integrated with the Google Earth Engine platform (GEE-RWEQ) to examine the spatiotemporal variations of soil wind erosion potential (SWEP) across Iran from 2014 to 2024. The results revealed a significant correlation between SWEP and aerosol optical depth ($r = 0.59$, $p < 0.01$), as well as the absorbing aerosol index ($r = 0.64$, $p < 0.01$). This correlation confirms the relative validity of the GEE-RWEQ model. According to the GEE-RWEQ model, wind erosion, with a mean annual rate of 4.75 t ha^{-1} , affects approximately 53% of the country's area. The largest wind erosion hotspot (exceeding 150 t ha^{-1}) was located in the southeast (including the Sistan plains and the areas surrounding Hamoun) and the northeast of the country. Summer was also identified as the most critical season in terms of wind erosion intensity. Overall, the combination of inherently high soil erodibility with erosive winds and sparse vegetation cover, particularly during the warm season, plays a key role in the formation of wind erosion hotspots in Iran. It can therefore be concluded that the GEE-RWEQ model provides an efficient, scalable, and cost-effective approach for national-scale wind erosion monitoring and for informing soil conservation policies in Iran. Nevertheless, limitations such as the accuracy of soil data and the effect of soil background reflectance in arid regions introduce uncertainty into the model results, which should be addressed in future research.

Keywords: *Soil erodibility, Soil conservation, Remote sensing, Aerosol optical depth, Absorbing aerosol index*

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Wind erosion is a widespread form of land degradation that poses severe threats to agricultural productivity, air quality, human health, and regional climate systems, particularly across arid and semi-arid environments. Global estimates indicate that approximately 312.5 billion tons of soil are lost annually to wind erosion, with nearly 70% of this loss concentrated in only ten countries, most of which are located in Africa and the Middle East. Iran, situated within the global arid and semi-arid belt, is dominated by hyperarid, arid, and semi-arid climates across roughly 95% of its territory, and wind erosion has been recognized as a critical environmental hazard affecting more than 17 provinces nationwide. Despite the severity of the problem, prior studies conducted in Iran have been largely confined to local or regional scales and have relied on a heterogeneous range of methods, including the Iranian Research Institute of Forest and Rangelands model (IRIFR), field sediment traps, UAV-based imagery, and various empirical approaches. A spatially and temporally consistent, nationally comprehensive assessment of wind erosion potential has been notably absent from the scientific literature on Iran. Among the most widely adopted physically based models, the Revised Wind Erosion Equation (RWEQ) integrates climatic, vegetative, and soil surface parameters within a coherent analytical framework and has been extensively validated across diverse environmental settings worldwide. When coupled with cloud-based geospatial platforms such as Google Earth Engine (GEE), RWEQ enables efficient integration of multi-source datasets at spatial and temporal resolutions that were previously unattainable through conventional GIS-based approaches. Building on this foundation, the present study integrates RWEQ with GEE to address the existing knowledge gap by producing, for the first time, a comprehensive and nationally consistent assessment of soil wind erosion potential (SWEP) across Iran. The

specific objectives of this research were: (1) to quantitatively map the spatiotemporal dynamics of SWEP across Iran at both monthly and annual timescales for the period 2014–2024; and (2) to identify the principal driving factors and seasonal patterns governing wind erosion intensity at the national

Materials and Methods

The study area encompasses the entire territory of Iran, covering approximately 1.65 million square kilometers with elevations ranging from 25 to 5,600 meters above sea level. The country's diverse geomorphology spans the vast central plateau and interior deserts (Dasht-e Kavir and Dasht-e Lut), the Alborz and Zagros mountain ranges, and the Caspian coastal lowlands, with mean annual precipitation of approximately 257 millimeters, varying from below 50 millimeters in desert zones to over 1,500 millimeters along the Caspian coast. A comprehensive multi-source dataset was compiled and processed within the GEE environment to simulate monthly SWEP across the country from 2014 to 2024. Input layers included daily wind speed components at 10 meters from the ECMWF ERA5-Land reanalysis, daily soil moisture from the GLDAS dataset, daily precipitation from GPM IMERG, daily air temperature from ERA5-Land, 16-day NDVI composites from MODIS MOD13Q1, soil texture and organic carbon content from OpenLandMap, elevation data from the SRTM digital elevation model, land cover classification from Dynamic World, aerosol optical depth (AOD) from MODIS MAIAC (MCD19A2), and the absorbing aerosol index (AAI) from Sentinel-5P/TROPOMI. The RWEQ model was implemented within GEE to estimate monthly SWEP by integrating five primary factors: the weather factor (WF), the soil erodible fraction (EF), the soil crust factor (SCF), the surface roughness factor (K'), and the combined vegetation cover factor (COG). The weather factor was derived from wind speed, air density, precipitation, and soil moisture data, while EF and SCF were calculated from soil sand, silt, clay, organic matter, and calcium carbonate content. Fractional vegetation cover was estimated from MODIS NDVI using a pixel-based rescaling approach, and annual SWEP values were obtained by aggregating monthly estimates. To identify the temporal drivers of SWEP variability, WF, fractional vegetation cover, and COG were normalized and analyzed jointly with monthly SWEP throughout the study period. Model validation was conducted by comparing long-term mean SWEP with satellite-derived aerosol proxies (AOD and AAI) using a spatial buffer sampling approach based on 200 randomly distributed points across Iran, with Pearson correlation coefficients computed between SWEP and each aerosol index within 100-kilometer buffer zones. Erosion intensity was subsequently classified into six categories, ranging from slight to catastrophic, following established international thresholds.

Results

Model validation demonstrated statistically significant positive correlations between long-term mean SWEP and both aerosol optical depth ($r = 0.59$, $p < 0.01$) and the absorbing aerosol index ($r = 0.64$, $p < 0.01$), confirming that areas of greater wind erosion intensity are associated with higher atmospheric mineral aerosol concentrations and supporting the relative validity of the GEE-RWEQ framework, though residual scatter likely reflects transboundary dust inputs from Iraq, Syria, Saudi Arabia, and Central Asia that are not captured by local SWEP estimates. The annual mean SWEP across Iran for 2014–2024 was 4.75 tons per hectare per year, ranging from 4.15 in 2021 to 5.53 in 2017, and wind erosion was detected across roughly 53% of the country's territory, a value that substantially exceeds established soil loss tolerance thresholds for Iranian arid and semi-arid rangelands. Erosion class analysis showed that 84.16% and 11.66% of the wind-affected area fell within the slight and minor classes, respectively, while 1.86% experienced moderate, 0.70% severe, and 0.46% very severe erosion; notably, 9,679.5 square kilometers (1.16%) was classified as catastrophic (greater than 150 tons per hectare per year), concentrated primarily in the Sistan Plain and surrounding Hamoun basin in southeastern Iran, where the hyper arid climate and locally renowned 120-day winds create extreme aeolian conditions, with a secondary hotspot in the desert zones of northeastern Iran. Seasonal analysis identified summer as the most erosion-prone period, with mean SWEP of 3.38 tons per hectare, far exceeding autumn (0.49), spring (0.22), and winter (0.20), reflecting intense soil desiccation, reduced vegetation cover, and strong prevailing winds during the warm season. Spatial analysis of the soil erodible fraction (EF) and soil crust factor (SCF), both reflecting intrinsic soil susceptibility, showed that 41.83% of Iran's soil-bearing area exhibits very high erodibility (EF greater than 0.45) and correspondingly high SCF values, concentrated in the same eastern and southeastern regions identified as erosion hotspots, while the lowest values occurred along the Caspian coast and the Alborz and Zagros ranges; since soil crusting can either mitigate or exacerbate erosion depending on texture, the co-occurrence of high EF and SCF in these regions indicates

pronounced structural susceptibility to wind erosion. Because intrinsic soil erodibility remains relatively stable throughout the year, the pronounced seasonal variation in SWEP is primarily attributable to the weather factor (WF) and vegetation dynamics: analysis of monthly drivers confirmed that WF and the combined vegetation cover factor (COG) varied in phase with SWEP, while fractional vegetation cover (FVC) showed an inverse relationship, indicating that the co-occurrence of strong winds and low soil moisture with sparse vegetation, particularly in July and August, was the principal mechanism driving peak erosion. This pattern is consistent with findings from Central Asia and the Middle East, where comparable summer maxima have been attributed to arid landscapes, sparse vegetation, and strong seasonal winds, but contrasts with temperate regions such as the Mongolian Plateau and eastern Austria, where spring erosion dominates and adequate vegetation cover during the warm season can offset high WF values. Overall, the convergence of inherently high soil erodibility, erosive summer winds, and diminished vegetation protection explains the formation and persistence of Iran's principal wind erosion hotspots, particularly in the Sistan.

Conclusions

This study presents the first nationally consistent, cloud-computing-based assessment of wind erosion potential across Iran, integrating the Revised Wind Erosion Equation with the Google Earth Engine platform and multi-source remote sensing and reanalysis data for the period 2014–2024. The results reveal that wind erosion affects approximately 53% of Iran's territory, with a mean annual SWEP of 4.75 tons per hectare, and that catastrophic erosion rates exceeding 150 tons per hectare per year are concentrated primarily in the Sistan Plain and its surrounding areas, with a secondary hotspot in the desert zones of northeastern Iran. Summer is confirmed as the critical season for wind erosion, driven by the interplay of high climatic erosivity and diminished vegetation protection, while the significant correlations identified between modeled SWEP and satellite-derived aerosol indices, namely aerosol optical depth and the absorbing aerosol index, validate the GEE-RWEQ framework as a reliable tool for national-scale wind erosion monitoring. The approach adopted in this study, which leverages freely available remote sensing and meteorological reanalysis data within a cloud-computing environment, offers a cost-effective, reproducible, and scalable alternative to traditional field-based assessment methods, enabling dynamic and up-to-date monitoring of wind erosion across large territories. The outputs of this research, particularly the spatial maps of erosion hotspots and temporal trend patterns, can serve as a scientific foundation for prioritizing soil conservation interventions, guiding desertification control programs, and informing climate change adaptation policies at the national level. Certain limitations should nonetheless be acknowledged. The unavailability of globally gridded data for several RWEQ parameters, including cumulative irrigation, random surface roughness, and flat and standing crop residues, necessitated simplifying assumptions that introduce a degree of uncertainty into the model outputs. Future research should therefore focus on incorporating local field calibration data, accounting explicitly for transboundary dust sources, and improving the spatial and temporal resolution of input datasets to further enhance the accuracy and applicability of the GEE-RWEQ framework for long-term wind erosion monitoring.

برآورد بزرگ مقیاس فرسایش بادی در ایران از طریق تلفیق مدل اصلاح شده فرسایش بادی و

گوگل ارث انجین

چکیده فارسی

باتوجه به پیامدهای ناگوار فرسایش بادی، فقدان داده‌های بلندمدت و شبکه‌بندی‌شده در این زمینه، مانع مدیریت پایدار اراضی در مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله ایران شده‌است. روش‌های میدانی پهنه‌بندی فرسایش بادی زمان‌بر و پرهزینه‌اند. در پژوهش حاضر، معادله بازنگری‌شده فرسایش بادی (RWEQ) با پلتفرم گوگل ارث‌انجین (GEE-RWEQ) تلفیق و تغییرات مکانی-زمانی پتانسیل فرسایش بادی خاک (SWEP) در سطح کشور ایران از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ بررسی شد. نتایج نشان داد که هم‌بستگی معنادار بین SWEP با ضخامت نوری هواویز ($r = 0.59, p < 0.01$) و شاخص جذبی هواویز ($r = 0.64, p < 0.01$) وجود دارد. این هم‌بستگی، مؤید تایید نسبی اعتبار مدل GEE-RWEQ است. بر اساس مدل GEE-RWEQ، فرسایش بادی با میانگین سالانه برابر ۴/۷۵ تن در هکتار، حدود ۵۳ درصد از مساحت کشور را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. بزرگ‌ترین کانون فرسایش بادی (بیش از ۱۵۰ تن در هکتار) در جنوب شرقی (شامل دشت‌های سیستان و مناطق اطراف هامون) و شمال شرقی کشور بود. همچنین تابستان، بحرانی‌ترین فصل سال از لحاظ شدت فرسایش بادی شناخته شد. در مجموع، ترکیب فرسایش‌پذیری ذاتی بالای خاک با بادهای فرساینده، و پوشش گیاهی ضعیف، به‌ویژه در فصل گرم سال نقش اصلی را در شکل‌گیری کانون‌های فرسایش بادی در ایران ایفا می‌کنند. بنابراین می‌توان نتیجه‌گرفت مدل GEE-RWEQ رویکردی کارآمد، مقیاس‌پذیر و کم‌هزینه برای پایش ملی فرسایش بادی و تدوین سیاست‌های حفاظت خاک در ایران فراهم می‌سازد. بااین‌حال، محدودیت‌هایی مانند دقت داده‌های خاک و اثر بازتابش خاک در مناطق خشک، عدم قطعیتی به نتایج مدل وارد می‌کنند که در پژوهش‌های آینده باید موردتوجه قرار گیرد.

کلید واژه: فرسایش بادی، خاک، حفاظت خاک، سنجش از راه دور، شاخص جذبی هواویز، ضخامت نوری هواویز

مقدمه

فرسایش بادی، فرآیندی طبیعی برای حمل و رسوب‌گذاری خاک توسط باد است. این فرآیند عمدتاً در خاک‌های شنی خشک یا خاک‌های ریزدانه، سست و خشک رخ می‌دهد (Zhang et al., 2024). فرسایش بادی، خطرات زیست‌محیطی قابل‌توجهی به‌همراه دارد و حوزه‌های گوناگونی، از اراضی کشاورزی تا سلامت انسان، را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Funk 2016; Wu et al., 2022). این فرآیند، سهم قابل‌توجهی در تولید گرد و غبار اتمسفری دارد. گرد و غبار اتمسفری نیز بر کیفیت هوا (Li et al., 2020; Wu et al., 2022)، سلامت انسان و سامانه‌های اقلیمی در مقیاس‌های منطقه‌ای و حتی قاره‌ای تأثیر می‌گذارد (Chi et al., 2019; Chen et al., 2022). باتوجه به پیامدهای زیان‌بار و اثرات گسترده، فرسایش بادی خاک یک مسئله علمی حیاتی در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود (Zhang et al., 2024). برآوردها حاکی از هدررفت سالیانه ۳۱۲/۵ میلیارد تن خاک در اثر فرسایش بادی است (Sun et al., 2024). تقریباً ۷۰ درصد از فرسایش بادی، تنها در ده کشور رخ می‌دهد. بسیاری از این کشورها در آفریقا و خاورمیانه قرار دارند (Chu et al., 2024). اندازه‌گیری فرسایش بادی و بررسی میزان حساسیت‌پذیری مناطق مختلف، برای شناسایی نقاط بحرانی و اولویت‌بندی عملیات حفاظت خاک، حائز اهمیت فراوان است. بااین‌حال، مدیریت فرسایش بادی به‌دلیل تعاملات پیچیده میان عوامل محرک، فشار و وضعیت اکوسیستم، یک چالش بزرگ محسوب می‌شود (Middleton & Kang, 2017). دو روش برجسته، یعنی تکنیک ردیابی سزیوم-۱۳۷ و آزمایش تونل باد، می‌توانند فرسایش بادی را بادقت بیشتری برآورد کنند (Hu et al., 2005; Zhang et al., 2007). بااین حال، این روش‌ها محدودیت‌هایی دارند. اندازه‌گیری با این روش‌ها کاری فشرده و نیازمند نیروی کار زیاد است. همچنین، به‌دلیل فرآیندهای فیزیکی پیچیده و مکانیزم‌های محرک فرسایش بادی، پایش و اندازه‌گیری کمی آن در مقیاس بزرگ همچنان دشوار است (Wang et al., 2020). درمقابل، براساس مطالعات میدانی منطقه‌ای در مقیاس کوچک و آزمایش‌های تونل باد، چندین مدل ارزیابی کمی فرسایش بادی توسعه یافته‌است (Shao, 2008). براساس مطالعات مربوط به مدل‌سازی فرسایش خاک، پرکاربردترین مدل‌های ارزیابی فرسایش بادی شامل معادله تجربی فرسایش بادی^۱ (WEQ) و نسخه بازنگری‌شده آن (RWEQ)، برنامه ارزیابی

^۱Wind Erosion Equation

^۲Revised Wind Erosion Equation

فرسایش بادی تک‌رویدادی^۱ (SWEEP) با رویکرد فرآیندمحور سیستم پیش‌بینی فرسایش بادی^۲ (WEPS) هستند (Scheper et al., 2021). مدل RWEQ یکی از متداول‌ترین مدل‌های تجربی برای برآورد فرسایش بادی در اراضی کشاورزی است (Fryrear et al., 2000). مدل RWEQ به دلیل در نظر گرفتن کامل عوامل اقلیمی و سطحی، و سهولت دسترسی داده‌ها در مناطق تحت‌تاثیر فرسایش بادی به طور گسترده استفاده شده است. نتایج برآورد آن نیز به طور کلی تأیید شده است (Fryrear et al., 2016; Van Pelt et al., 2004). راشکی و طالقانی (۱۴۰۴)، تفاوت‌های قابل توجهی در حساسیت به فرسایش بادی در استان خراسان رضوی بر اساس مدل RWEQ شناسایی کردند. این تفاوت‌ها در درجه اول به عوامل جغرافیایی مانند توزیع پوشش گیاهی، ویژگی‌های خاک و الگوهای آب و هوایی نسبت داده می‌شود؛ به ویژه، در مناطقی با پوشش گیاهی کم و خاکهای سطحی سست‌تر.

مدل ایرانی اریفر (IRIFR) نیز به طور گسترده‌ای در ایران استفاده شده است. این مدل نیازمند تجارب کارشناسی و جمع‌بندی نظر خبرگان برای برآورد مقدار رسوب‌دهی ناشی از فرسایش بادی است. به عنوان مثال، ایل‌درومی و مرادی (۱۳۹۶)، نقشه شدت فرسایش بادی در دشت قهاوند همدان را با به کارگیری مدل اریفر تهیه کردند. در پژوهش دیگری علی‌پور و همکاران (۱۳۹۵)، با استفاده از همین مدل، فرسایش بادی را در منطقه علاء سمنان ارزیابی کردند. این مدل‌ها به طور کلی امکان کمی‌سازی نرخ هدررفت خاک و تعیین مناطق پرخطر را فراهم می‌کنند (Jarrah et al., 2020). با این حال، چالش اصلی استفاده از مدل‌های مانند اریفر این است که به داده‌های مکانی و زمانی گسترده نیاز دارند. همچنین بخش‌هایی از این مدل‌ها، مبتنی بر بازدیدهای میدانی و نظر کارشناسی است.

مدل RWEQ توسط Fryrear et al. (2000) ارائه شده است. این مدل به طور کامل عوامل مؤثر بر فرسایش بادی مانند شرایط اقلیمی، وضعیت پوشش گیاهی و خصوصیات خاک را در نظر می‌گیرد، و می‌تواند سری‌های زمانی طولانی فرسایش بادی را در مقیاس منطقه‌ای برآورد کند (Zobeck et al., 2000). تحقیقات گسترده نشان داده‌اند که تلفیق RWEQ با فناوری‌های زمین‌مکانی (RS، GIS، و GPS)، به طور قابل توجهی، دقت ارزیابی‌های فرسایش را در مناطق و مقیاس‌های فضایی متنوع افزایش می‌دهد، به ویژه در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک (Walch et al., 2022; Webb et al., 2011). با این حال، رویکردهای سنتی مبتنی بر GIS در یکپارچه‌سازی داده‌های چندمنبعی در مقیاس بزرگ با مشکل مواجه هستند (Wang et al., 2020). برای رفع این مشکل، می‌توان از گوگل ارث انجین^۴ (GEE) استفاده کرد. این، پلتفرم مبتنی بر ابر، داده‌های مستشعر از دور، هواشناسی و پوشش زمین را با وضوح مکانی و زمانی بالا به طور کارآمد پردازش می‌کند (Ji et al., 2020). GEE با موفقیت در تحلیل تغییرات پوشش زمین، پایش پوشش گیاهی و مدل‌سازی فرسایش خاک به کار گرفته شده است (Ji et al., 2020; Wang et al., 2020). تلفیق GEE با مدل‌های تجربی فرسایش بادی، به عنوان مثال با RWEQ که به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد، تحلیل کارآمد فرآیندهای بادی در مقیاس بزرگ را امکان‌پذیر می‌سازد، بدون این که روش‌شناسی بنیادین مدل‌سازی فرسایش بادی تغییر کند (Yao et al., 2025). نتایج مطالعه Wang et al. (2020) نشان داد که میانگین پتانسیل فرسایش بادی خاک برآورده شده با مدل RWEQ در پلتفرم GEE، با شاخص توفان شن مبتنی بر مشاهدات زمینی، ضخامت نوری هواویز^۵ (AOD) و شاخص هواویز جذبی^۶ (AAI) مطابقت خوبی دارد. راشکی و طالقانی (۱۴۰۴)، با بررسی تغییرات مکانی-زمانی، روند و عوامل محرک پتانسیل فرسایش بادی در استان خراسان رضوی بر اساس مدل RWEQ از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱، میانگین سالانه پتانسیل فرسایش بادی

^۱Single-event Wind Erosion Evaluation Program

^۲Wind Erosion Prediction System

^۳Iran Research Institute of Forest and Rangeland

^۴Google Earth Engine

^۵Aerosol Optical Depth

^۶Absorbing Aerosol index

خاک را ۲/۴۲ تن بر هکتار گزارش دادند. (Chi et al. 2019) از مدل RWEQ برای بررسی الگوهای مکانی-زمانی مدل فرسایش بادی در چین، از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۵، استفاده کردند. نتایج آن مطالعه نشان داد مناطقی که فرسایش بادی بیش از ۵۰ تن در هکتار سال را تجربه کردند، ۸/۹۱ درصد از کل مساحت چین را به خود اختصاص دادند. (Wang et al. 2020) یک مدل RWEQ مبتنی بر گوگل ارث انجین، به نام GEE-RWEQ، برای تعیین پتانسیل فرسایش بادی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ توسعه دادند. بر اساس این مدل، میانگین سالانه پتانسیل فرسایش بادی خاک معادل ۳۰/۴۵ کیلوگرم بر هکتار بود؛ کمترین مقدار آن در سال ۲۰۱۰ و بیشترین مقدار آن در سال ۲۰۱۵ رخ داد.

اکثر مطالعات در زمینه مقدار و شدت فرسایش بادی در ایران، تنها به مناطق محلی محدود شده‌اند و از روش‌های مختلفی استفاده کرده‌اند. به عنوان مثال، (Azimzadeh et al. 2008) با استفاده از نمونه‌گیری‌های فرسایش بادی، نرخ فرسایش بادی در اراضی آیش یزد را ۱۳/۵۶ تن در هکتار در سال گزارش کردند. در مطالعه دیگری، نرخ فرسایش بادی منطقه سیستان در یک دوره هفت ماه با استفاده از تصاویر برداری هوایی پهباد، ۲۰۱ تن در هکتار برآورد شد (Poormorteza et al., 2023).

بیشتر مساحت کشور ایران از نواحی فراخشک، خشک و نیمه‌خشک تشکیل شده است. به دلیل ویژگی‌های خاص محیطی این مناطق، از قبیل بارندگی کم و پوشش گیاهی اندک، شرایط برای رخ دادن فرسایش بادی به شدت مهیا است (Bashari et al., 2024). فرسایش بادی یکی از بحران‌های بیش از ۱۷ استان کشور به شمار می‌آید (عابدی و جعفری، ۱۴۰۰). با این حال، مطالعات فرسایش بادی در ایران فاقد یک چارچوب روش‌شناختی یکپارچه و مقیاس ملی هستند. مطالعات اندکی به‌طور جامع به بررسی پتانسیل فرسایش بادی و ویژگی‌های پویای آن در کل فلات ایران پرداخته‌اند. به عنوان مثال، اختصاصی و زارع‌چاهوکی (۱۳۹۵) با بررسی فرسایش بادی در ۲۳ کاربری مختلف اراضی ایران با استفاده از مدل اریفر ۱ و ۲، مقدار فرسایش ویژه بادی کشور را ۷/۸ تن در هکتار در سال را برآورد کردند. آنها همچنین توزیع کلاس‌های فرسایش بادی اراضی بر اساس روش اریفر را نیز ارائه کردند. پهنه‌بندی فرسایش بادی در سطوح وسیع، با روش‌های میدانی نیازمند وقت و هزینه بسیار زیادی است (عابدی و جعفری، ۱۴۰۰). بنابراین، ایجاد یک فرآیند استخراج اطلاعات فرسایش بادی بر اساس تکنیک‌های سنجش از دور، برای ارزیابی خطر و پایش وضعیت فرسایش بادی در ایران ضروری است. با توجه به این موارد، اهداف این مطالعه عبارت‌اند از: (۱) نقشه‌برداری کمی پتانسیل فرسایش بادی خاک^۱ (SWEP) و (۲) تحلیل تغییرات زمانی-مکانی آن در ایران با استفاده از مدل RWEQ در پلتفرم GEE.

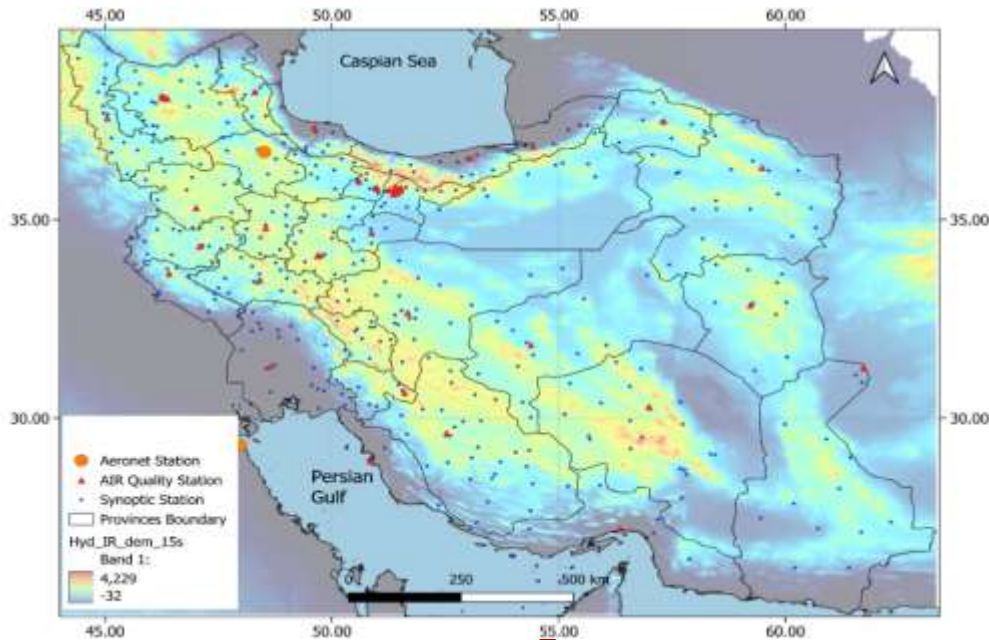
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شامل کل کشور ایران است (شکل ۱). سرزمین ایران عمدتاً پوشیده از مراتع خشک و نیمه‌خشک، زمین‌های لخت و دارای پوشش گیاهی پراکنده است. شکل‌های زمین در ایران تنوع بسیار بالایی دارند و تحت سلطه فلات مرکزی وسیعی قرار دارند که توسط رشته‌کوه‌های ناهموار و مرتفعی احاطه شده است. ارتفاعاتی از ۲۵ متر تا ۵۶۰۰ متر، نواحی جغرافیایی متنوع کشور، تنوع اقلیمی گسترده‌ای را پدید آورده است. بارندگی سالانه برای کل کشور حدود ۲۵۷ میلی‌متر (۳۷۰ کیلومتر مکعب) است در حالی که بارندگی می‌تواند از مقداری به کمی ۵۰ میلی‌متر در سال در بیابان‌ها تا بیش از ۱۵۰۰ میلی‌متر در سال در مناطق ساحلی دریای خزر و دامنه‌های شمالی رشته‌کوه البرز متغیر باشد. مجموع بارندگی سالانه معادل ۴۱۲ میلیارد متر مکعب است بارش‌ها در این کشور در پاییز و زمستان رخ می‌دهد. در تابستان، زمانی که مصرف آب گیاهان در اوج خود قرار دارد، اقلیم ایران

¹ Soil Wind Erosion Potential

فاقد بارش مؤثر است (Vazifiedoust et al., 2024). کل خشکی‌های ایران حدود ۱۶۵ میلیون هکتار است که از این میان، مساحت کل خاک‌ها حدود ۹۶ میلیون هکتار یا ۵۸ درصد از کل زمین را شامل می‌شود. مناطق بدون خاک و انواع زمین‌های متفرقه نیز حدود ۶۸ میلیون هکتار یا ۴۲ درصد از کل مساحت خشکی‌ها را تشکیل می‌دهند (Roozitalab et al., 2020).



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

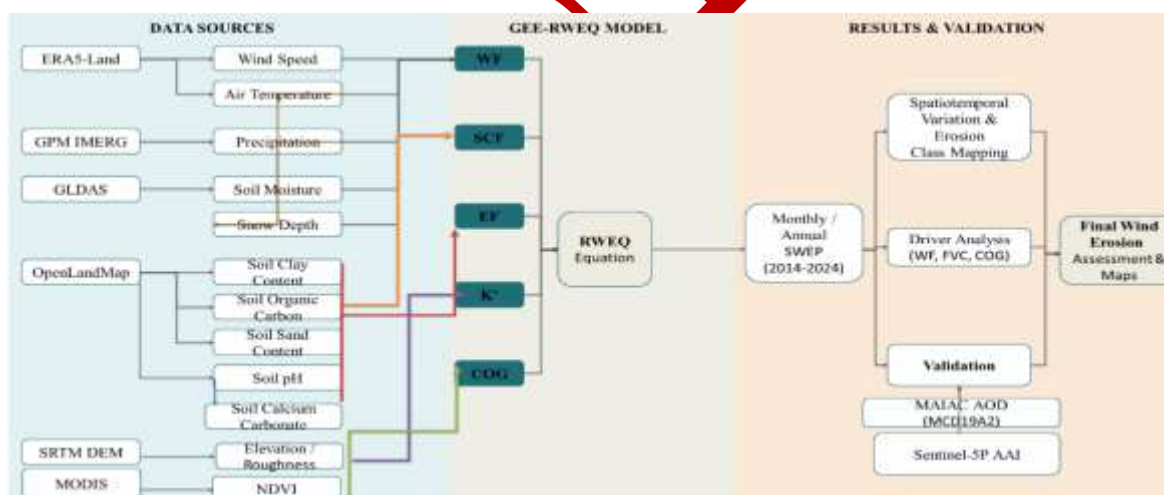
جمع‌آوری و پردازش داده

این پژوهش، مجموعه‌ای جامع از داده‌های چندمنبعی، شامل محصولات سنجش از دور و داده‌های بارتحلیل هواشناسی را در پلتفرم GEE ادغام کرد تا پویایی پتانسیل فرسایش بادی خاک را در ایران طی دوره ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۳ ارزیابی کند. منبع دسترسی به هر لایه در پلتفرم GEE در جدول ۱ ارائه شده‌است. مراحل کلی روش‌شناسی این پژوهش، شامل گردآوری داده‌های ورودی، محاسبه عاملهای مدل RWEQ در بستر GEE و تخمین و اعتبارسنجی پتانسیل فرسایش بادی خاک (SWEP) در فلوچارت شکل ۲ به صورت شماتیک نشان داده شده‌است.

جدول ۱. گردآوری داده‌ها و منابع مورد استفاده

نام متغیر	نام لایه	منبع دسترسی به لایه در GEE	دوره زمانی	وضوح زمانی	وضوح مکانی
ویژگی‌های خاک	SOL_CLAY-WFRACTION SOL_SAND-WFRACTION SOL_ORGANIC-CARBON SOL_PH-H2O	OpenLandMap	۲۰۱۴-۲۰۲۳	سالانه	۲۵۰ متر
سرعت باد	u_component_of_wind_10m v_component_of_wind_10m	ERA5-Land-ECMWF ECMWF/ERA5_LAND/DAILY_AGGR	۲۰۱۴-۲۰۲۳	روزانه	۰/۱ درجه

رطوبت خاک	SoilMoist_S_tavg	GLDAS NASA/GLDAS/V022/CLSM/G025/DA1D	۲۰۱۴-۲۰۲۴	روزانه	۰/۲۵ درجه
ارتفاع بارش	Precipitation	NASA/GPM_L3/IMERG_V07 GPM - IMERG	۲۰۱۴-۲۰۲۴	روزانه	۰/۱ درجه
دما	temperature_2m	ECMWF/ERA5_LAND/DAILY_AGGR	۲۰۱۴-۲۰۲۴	روزانه	۰/۱ درجه
شاخص گیاهی	NDVI	MODISVegetation Indices (MOD13Q1) MODIS/061/MOD13Q1	۲۰۱۴-۲۰۲۴	۱۶ روزه	۲۵۰ متر
ارتفاع از سطح دریای آزاد	Elevation	NASA-STRM USGS/SRTMGL1_003	-	-	۹۰ متر
ضخامت نوری هواویز	ADO550_ADO470	MODIS MAIAC Land Aerosol Optical Depth (MCD19A2) MODIS/061/MCD19A2_GRANULES	۲۰۱۴-۲۰۲۴	روزانه	۱۰۰۰ متر
شاخص جذبی هواویز	NRTI/L3_AER_AI	COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_AER_AI	۲۰۱۸-۲۰۲۴	روزانه	۱۱۱۳/۲ متر
پوشش زمین	Class Cover Type (LULC)	Dynamic World GOOGLE/DYNAMICWORLD/V1	۲۰۱۴-۲۰۲۴	سالانه	۱۰ متر



شکل ۲. مراحل انجام پژوهش

مدل معادله بازنگری شده فرسایش بادی (RWEQ)

مدل RWEQ، عوامل متعددی از جمله عامل آب و هوایی (WF)، عامل جزء فرسایش‌پذیر (EF)، عامل سله خاک (SCF)، زبری سطح (K') و پوشش گیاهی یا بقایای محصول روی زمین (COG) را شامل می‌شود. علاوه بر این، پارامترهای مزرعه مانند اندازه و جهت‌گیری مزرعه و همچنین سرعت باد را که تحت تأثیر شیب و ارتفاع تپه‌ها قرار دارد، در نظر می‌گیرد (Youssef et al., 2012). با استفاده از مدل RWEQ، پتانسیل فرسایش بادی خاک (SWEP) یا مقدار فرسایش بادی در واحد سطح بر حسب kg m^{-2} (با استفاده از رابطه ۱ برآورد شد):

رابطه ۱)

$$SWEF = \frac{2x}{s^2} Q_{\max} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{s^2}\right)$$

که در آن، $Q_{\max}$ حداکثر ظرفیت انتقال رسوب توسط نیروی باد برحسب $(kg\ m^{-1})$ ، s طول بحرانی مزرعه بوده و به فاصله‌ای اطلاق می‌شود که در آن ۶۳ درصد از حداکثر ظرفیت انتقال رسوب حاصل می‌گردد. x فاصله از مرز غیرقابل‌فرسایش مزرعه برحسب (m) است که در مقیاس جهانی، مقدار آن برابر ۵۰ متر در نظر گرفته شده است (Van Pelt et al., 2004). $Q_{\max}$ و s به ترتیب توسط روابط ۲ و ۳ محاسبه شدند:

$$Q_{\max} = 109.8(WF \times EF \times SCF \times K' \times COG) \quad \text{رابطه ۲}$$

$$s = 150.71(WF \times EF \times SCF \times K' \times COG)^{-0.3711} \quad \text{رابطه ۳}$$

WF ، عامل آب و هوا (kgm^{-1}) ، جزء فرسایش‌پذیر (بدون بعد) و SCF ، عامل سله خاک (بدون بعد)، K' ، عامل زبری (بدون بعد) و COG عامل ترکیبی محصول (بدون بعد) است. عامل آب و هوا (WF) بر حسب (kgm^{-1}) توسط رابطه ۴ محاسبه شد:

$$WF = \sum_{i=1}^N \rho \frac{(U_2 - U_i)^2 U_2}{N_g} \times N_d \times SW \times SD$$

$$\rho = 348.01 \left(\frac{1.013 - 0.1183 \times EL + 0.0048EL^2}{T} \right) \quad \text{رابطه ۵}$$

U_2 بیانگر سرعت باد اندازه‌گیری شده در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (ms^{-1}) است و U_i سرعت آستانه باد در همان ارتفاع است. مقدار U_i برابر با $5\ ms^{-1}$ در نظر گرفته شد. متغیر N_d تعداد روزهای دوره مورد بررسی (به عنوان مثال، ماهانه در این پژوهش) را نشان می‌دهد و N بیانگر تعداد کل مشاهدات سرعت باد است. SD ، عامل پوشش برف است که برابر با تعداد روزهایی در یک دوره مشخص است که ضخامت برف از ۲۵/۴ میلی‌متر بیشتر می‌باشد. این عامل بر اساس روش Guo et al. (2013) و از طریق شمارش تعداد روزهایی که میانگین دمای روزانه کمتر از صفر درجه سلسیوس و بارش بیش از ۲/۵ میلی‌متر بوده است محاسبه شد. چگالی هوا (ρ) بر حسب $(kg\ m^{-3})$ پارامتری است که بر اساس دمای مطلق و ارتفاع از سطح دریا مطابق با روش ارائه شده توسط Zhang et al. (2018) محاسبه می‌شود. در این رابطه، EL ارتفاع از سطح دریا (km) است که داده‌های آن از مجموعه داده‌های GMTED2010 استخراج شده است (Danielson & Gesch, 2011)؛ T دمای مطلق (K) و g شتاب گرانش (ms^{-2}) می‌باشد.

جزء فرسایش‌پذیر (EF) و عامل سله خاک (SCF) به صورت زیر محاسبه شدند:

$$EF = \frac{29.09 + 0.31Sa + 0.17Si + 0.33 \frac{Sa}{Cl} - 2.585OM - 0.95CaCO_3}{100} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$SCF = \frac{1}{1 + 0.0066Cl^2 + 0.021OM^2} \quad \text{رابطه ۷}$$

Sa، Si، Cl، OM و $CaCO_3$ به ترتیب مقدار شن، سیلت، رس، ماده آلی و کربنات کلسیم (%) و Sa/Cl نسبت مقدار شن به رس است.

با توجه به عدم وجود داده کربنات کلسیم خاک (CaCO_3) در مجموعه داده‌های GEE و بر اساس یافته‌های پیشین که همبستگی غیرخطی و مثبتی میان pH خاک و مقدار کربنات کلسیم خاک نشان داده‌اند، مقدار کربنات کلسیم خاک از طریق رابطه ارائه شده توسط Wang et al. (2020) به صورت زیر برآورد شد:

$$pH = 4.576 \times \text{CaCO}_3^{0.09089} + 2.378 \quad \text{رابطه (۸)}$$

عامل زبری خاک (K') به صورت زیر محاسبه شد:

$$K' = e^{1.86K_r - 2.41K_r^{0.934} - 0.124C_{rr}} \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$K_r = 0.2 \frac{\Delta H^2}{L} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

K_r ، به عنوان طول زبری زمین (cm) تعریف می‌شود که براساس ΔH : میانگین اختلاف ارتفاع بین قله و دره‌ها (cm) و L : میانگین فاصله بین قله‌هایی که توسط دره‌ها یا برجستگی‌های متوالی از هم جدا شده‌اند (cm) و C_{rr} : زبری تصادفی (cm) محاسبه می‌شود (Smith & Karson, 1977). در این مطالعه، K_r با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) به دست آمد. مقدار K_r عمدتاً تحت تأثیر زاویه بین برجستگی‌های خاک و جهت غالب باد قرار دارد. به دلیل دشواری ارزیابی C_{rr} در مقیاس این مطالعه، C_{rr} برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. Sun et al. (2024) بیان کردند که اگرچه فرض C_{rr} برابر با صفر ممکن است منجر به برآورد بیش از حد فرسایش خاک شود، اما محاسبات در مقیاس بزرگ را ساده‌تر می‌کند.

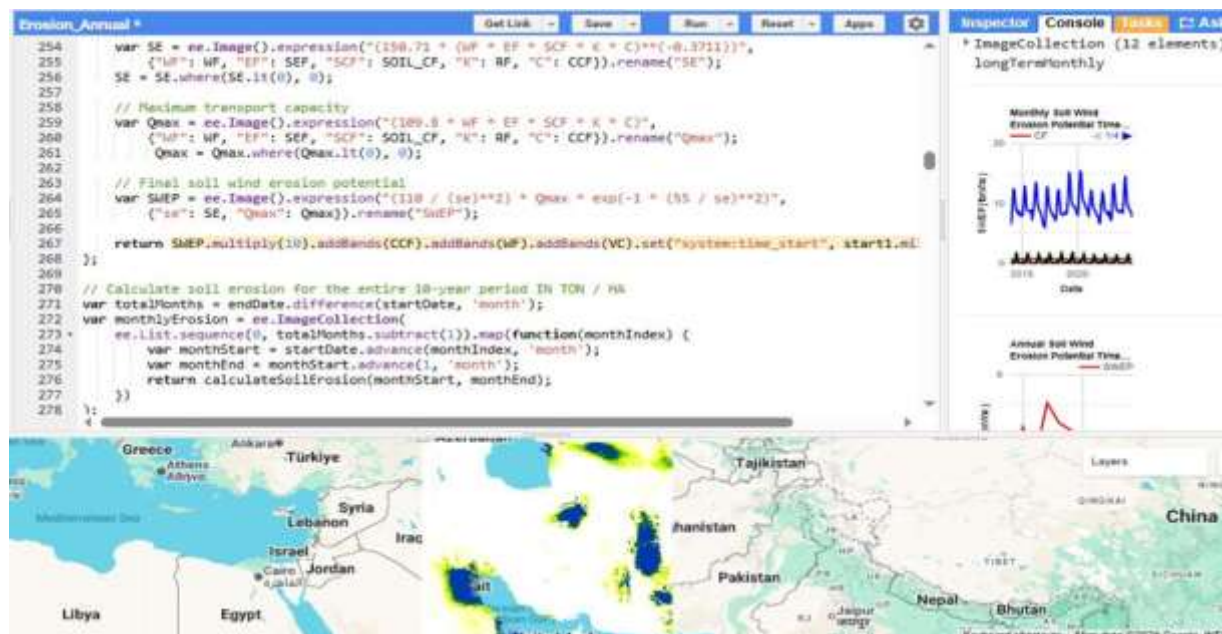
عامل ترکیبی محصول (COG) توسط رابطه ۱۱ قابل محاسبه است (Wu et al., 2019):

$$COG = e^{-0.483(FVC)} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$FVC = \frac{100NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

FVC پوشش کسری گیاهی (درصد) است، NDVI شاخص نرمال شده تفاضلی پوشش گیاهی است.

بر اساس هدف این پژوهش، ابتدا با استفاده از داده‌های مکانی چندمنبعی، پتانسیل فرسایش بادی خاک (SWEP) ماهانه در منطقه مورد مطالعه با مدل RWEQ در پلتفرم GEE (که در ادامه GEE-RWEQ نامیده می‌شود) محاسبه شد. سپس میانگین SWEP سالانه، با تجمع مقادیر میانگین SWEP ماهانه محاسبه و توزیع مکانی و زمانی آن بررسی شد. نمونه‌ای از کد پیاده‌سازی شده در محیط GEE جهت محاسبه پارامترهای مدل RWEQ و برآورد SWEP، به همراه خروجی‌های نمودار زمانی و نقشه فضایی حاصل، در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳. نمایی از محیط کدنویسی GEE جهت محاسبه ظرفیت انتقال حداکثر (Q_{max}) و پتانسیل فرسایش بادی خاک (SWEP) بر اساس مدل RWEQ.

در اراضی تحت تاثیر فرسایش بادی، بر اساس طبقه‌بندی مورد استفاده توسط Liu et al. (2022) مساحت تحت پوشش شش کلاس فرسایشی: ضعیف (۰-۲ تن بر هکتار سال)، جزئی (۲-۲۵ تن بر هکتار سال)، متوسط (۲۵-۵۰ تن بر هکتار سال)، شدید (۵۰-۸۰ تن بر هکتار سال)، بسیار شدید (۸۰-۱۵۰ تن بر هکتار سال) و وخیم (>150 تن بر هکتار سال) تعیین شد. سپس درصد نسبی سطح تحت پوشش هر کلاس فرسایشی به مجموع سطوح دارای فرسایش بادی محاسبه شد.

درک عمیق‌تر الگوی مکانی-زمانی فرسایش بادی، مستلزم بررسی عوامل زمینه‌ای دخیل در آن است؛ از این رو، وضعیت فرسایش‌پذیری خاک و ارتباط عوامل آب‌وهوایی و پوشش گیاهی با پتانسیل فرسایش بادی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، پس از محاسبه مقادیر جزء فرسایش‌پذیر (EF) و عامل سله خاک (SCF)، کلاس‌بندی آنها انجام شد. به دلیل رویکردهای مختلف برای ارزیابی فرسایش‌پذیری، طبقه‌بندی مقادیر EF در مطالعات مختلف متفاوت است. به عنوان مثال López et al. (2007) مقدار EF را برای خاک‌های اروپایی به سه کلاس $EF < 0.4$ (فرسایش‌پذیری کم)، $0.4 \leq EF < 0.5$ (فرسایش‌پذیری متوسط) و $EF > 0.5$ (فرسایش‌پذیری زیاد) طبقه‌بندی کردند. تمایز بیشتری در مقادیر EF توسط Jugder et al. (2018) در مورد خاک‌های مغولستان با طبقه‌بندی به کلاس‌های $EF \leq 0.28$ (فرسایش‌پذیری بسیار کم)، $0.28 < EF \leq 0.32$ (فرسایش‌پذیری کم)، $0.32 < EF \leq 0.35$ (فرسایش‌پذیری متوسط)، $0.35 < EF \leq 0.40$ (فرسایش‌پذیری زیاد) و $EF > 0.4$ (فرسایش‌پذیری بسیار زیاد) ایجاد شده است. در پژوهش حاضر از کلاس‌بندی مشابه با Jugder et al. (2018) با اندکی تمایز استفاده شد و به منظور افزایش دقت در شناسایی مناطق بحرانی، بازه کلاس فرسایش‌پذیری بسیار زیاد به دو کلاس مجزا $0.40 < EF \leq 0.45$ و $EF > 0.45$ تفکیک شد. کلاس‌بندی مقادیر SCF توسط روش مشابه با Scheper t al. (2021) استفاده و SCF به شش کلاس: $SCF \leq 0.17$ ، $0.17 < SCF \leq 0.33$ ، $0.33 < SCF \leq 0.50$ ، $0.50 < SCF \leq 0.67$ ، $0.67 \leq SCF < 0.83$ و $SCF > 0.83$ طبقه‌بندی شد.

سپس جهت ارزیابی وضعیت فرسایش پذیری خاک در منطقه مورد مطالعه، نقشه توزیع مکانی EF و SCF بر اساس طبقه‌بندی‌های فوق‌الذکر تهیه شد.

جهت بررسی ارتباط بین پتانسیل فرسایش بادی و عوامل متغیر آب وهوایی و گیاهی، در ابتدا نرمال‌سازی داده‌های عامل آب و هوایی (WF)، پوشش کسری گیاهی (FVC) و عامل ترکیبی محصول (COG) در محدوده مقدار صفر تا یک توسط رابطه ۱۳ و بر اساس محدوده حداکثر (Max) و حداقل (Min) داده‌ها انجام شد. سپس ارتباط بین مقدار نرمال‌شده پتانسیل فرسایش بادی (SWEP) با مقادیر نرمال WF، FVC و COG در مقیاس زمانی ماهانه بررسی شد.

$$\text{Normalized value} = \frac{\text{Value} - \min}{\text{Max} - \min} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

Value، Normalized value: مقدار واقعی و نرمال‌شده داده.

اعتبار سنجی فرسایش بادی برآوردی توسط مدل GEE-RWEQ

در این پژوهش از داده‌های ماهواره‌ای ضخامت نوری هواویز (AOD) از محصول MODIS-MCD19A2 و شاخص جذبی هواویز (AAI) استخراج شده از Sentinel-5P/TROPOMI به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی شده مدل GEE-RWEQ استفاده شد. به دلیل سهم محدود منابع انسان‌زاد در بسیاری از نواحی خشک و نیمه‌خشک و نقش غالب ذرات معدنی ناشی از فرسایش بادی، هواویزهای جوی می‌توانند به عنوان شاخصی غیرمستقیم برای ارزیابی شدت فرسایش بادی مورد استفاده قرار گیرند (Wang et al., 2020). محصول MCD19A2 مبتنی بر الگوریتم MAIAC بوده و اطلاعات AOD را با تفکیک مکانی بالا و بهبود قابل توجه در بازیابی هواویزها بر روی سطوح ناهمگن و مناطق خشک ارائه می‌کند. نتایج ارزیابی دقت محصول MCD19A2 در مقایسه با داده‌های زمینی فتومتر خورشیدی ۱۰ ایستگاه در مناطق خشک آسیای مرکزی نشان داد که این محصول، با ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۵ و خطای جذر میانگین مربعات در محدوده ۰/۱ یا کمتر، برای مطالعات هواویز در اقلیم‌های خشک قابل اعتماد است (Zhu et al., 2023). علاوه بر AOD، شاخص AAI حاصل از سنجش TROPOMI نیز قابلیت شناسایی هواویزهای جاذب نظیر گردوغبار معدنی را داشته و به عنوان شاخص مناسب برای پایش رخداد‌های گردوغبار و انتقال ذرات در مقیاس منطقه‌ای شناخته می‌شود. فرض اصلی آن بود که مناطق دارای شدت بیشتر فرسایش بادی، به دلیل افزایش انتشار ذرات معدنی به جو، مقادیر بالاتری از شاخص‌های هواویز AOD و AAI را نشان دهند.

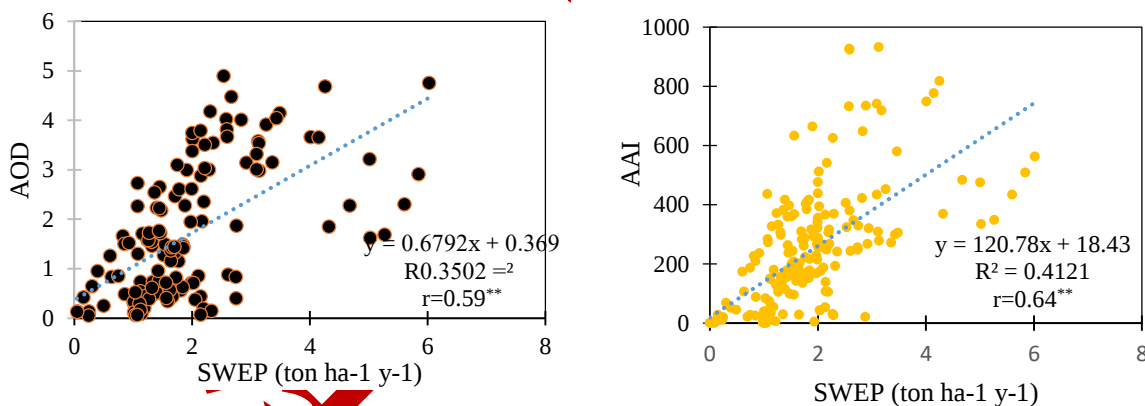
اعتبارسنجی در محیط GEE و بر پایه مقایسه میانگین بلندمدت فرسایش بادی و شاخص‌های هواویز انجام شد. بدین منظور، ابتدا نقشه میانگین بلندمدت SWEP سالانه طی دوره ۲۰۱۴-۲۰۲۴ از خروجی مدل RWEQ استخراج شد. سپس میانگین بلندمدت AOD و AAI در همان بازه زمانی تهیه گردید. به منظور کاهش ناهمگنی مکانی و ایجاد قابلیت مقایسه، تصاویر AOD و AAI با استفاده از تابع reproject() به سیستم تصویر (Projection) خروجی SWEP بازسازی شدند. سپس با استفاده از تابع resample("bilinear") یا reduceResolution() به قدرت تفکیک مکانی پنج کیلومتر تبدیل و با شبکه مکانی SWEP هم‌مرجع‌سازی شدند. برای ارزیابی رابطه بین فرسایش بادی و شاخص‌های هواویز، از روش نمونه‌برداری فضایی مبتنی بر نواحی بافر استفاده شد. ابتدا ۲۰۰ نقطه تصادفی در محدوده مورد مطالعه تولید شد و سپس برای هر نقطه یک ناحیه بافر دایره‌ای با شعاع ۱۰۰ کیلومتر ایجاد گردید. در هر ناحیه، میانگین مقادیر SWEP، AOD و AAI با استفاده از تابع کاهنده در GEE محاسبه شد. تابع کاهنده مورد استفاده در این پژوهش، image.reduceRegion() بود. این تابع، عملیات کاهش را بر روی تمام پیکسل‌های واقع در بافر دایره‌ای به شعاع ۱۰۰ کیلومتر اطراف هر نقطه اعمال کرد و یک مقدار میانگین نماینده برای آن ناحیه ارائه داد. به منظور حذف مقادیر

غیرواقعی، نمونه‌هایی که دارای داده مفقود یا مقادیر خارج از محدوده تعریف شده بودند حذف شدند. در مرحله بعد، رابطه بین میانگین بلندمدت SWEP و AOD با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون و ضریب تعیین ارزیابی گردید. همچنین نمودار پراکنش همراه با خط روند خطی جهت بررسی الگوی ارتباط بین متغیرها ترسیم شد. در این چارچوب، همبستگی مثبت بین SWEP و شاخص‌های هواویز به عنوان نشانه‌ای از توانایی مدل GEE-RWEQ در بازنمایی الگوهای فضایی فرسایش بادی و انتشار گردوغبار در مقیاس منطقه‌ای در نظر گرفته شد.

یافته‌های پژوهش

اعتبارسنجی مدل RWEQ-GGE

داده‌های AOD و AAI به عنوان شاخصی برای تعیین شدت فرسایش بادی در منطقه مورد مطالعه به کار رفتند (شکل ۴). نتایج نشان داد که رابطه خطی مثبت و معنی‌داری بین پتانسیل فرسایش بادی (SWEP) و دو پارامتر هواویز (AAI و AOD) مشاهده می‌شود. ضریب همبستگی SWEP برای AOD برابر ۰/۵۹ و برای AAI برابر ۰/۶۴ است که هر دو در سطح یک درصد معنی‌دار هستند و نشان می‌دهند با افزایش شدت فرسایش بادی، غلظت ذرات معلق و گرد و غبار در جو نیز افزایش می‌یابد.

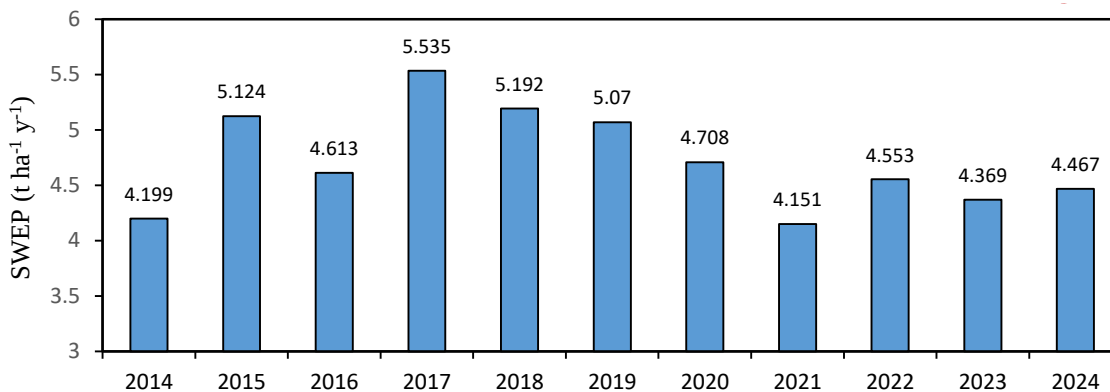


شکل ۴. ارتباط بین AOD و AAI (a) و پتانسیل فرسایش بادی (SWEP)

توزیع زمانی و مکانی پتانسیل فرسایش بادی خاک

نتایج بررسی مقدار پتانسیل فرسایش بادی خاک (SWEP) طی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ در منطقه مورد مطالعه نشان داد که SWEP سالانه با مقدار میانگین ۴/۷۵ تن در هکتار در سال از مقدار ۴/۱۵ در سال ۲۰۲۱ تا ۵/۵۳ تن در هکتار در سال ۲۰۱۷ متغیر بوده است (شکل ۵). نتایج بررسی میانگین سالانه SWEP (جدول ۲) نشان می‌دهد که فرسایش بادی در مساحتی حدود ۰/۸۳ میلیون کیلومتر مربع (حدود ۵۳ درصد) از مساحت ۱/۵۶ میلیون کیلومتر مربع منطقه مورد مطالعه رخ می‌دهد. در اراضی تحت تاثیر فرسایش بادی، بر اساس طبقه‌بندی مورد استفاده توسط Liu et al. (2022) مساحت تحت پوشش ۶ کلاس فرسایشی ضعیف (۲-۰

تن بر هکتار سال)، جزئی (۲-۲۵ تن بر هکتار سال)، متوسط (۲۵-۵۰ تن بر هکتار سال)، شدید (۵۰-۸۰ تن بر هکتار سال)، بسیار شدید (۸۰-۱۵۰ تن بر هکتار سال) و وخیم (>۱۵۰ تن بر هکتار سال) و درصد نسبت سطح تحت پوشش هر کلاس فرسایشی به مجموع سطح مناطق دارای فرسایش بادی محاسبه شد (جدول ۲). بر اساس نتایج حاصل، ۸۴/۱۶ و ۱۱/۶۶ درصد از اراضی دارای فرسایش بادی به ترتیب در کلاس فرسایش ضعیف و جزئی قرار می گیرند. حدود ۱/۸۴ درصد دچار فرسایش متوسط، ۰/۷ درصد تحت فرسایش شدید و ۰/۴۶ درصد در معرض فرسایش بسیار شدید قرار دارند. ۹۶۷۹/۵ کیلومتر مربع (۱/۱۶ درصد) نیز اراضی با فرسایش بادی وخیم یا فاجعه بار است.

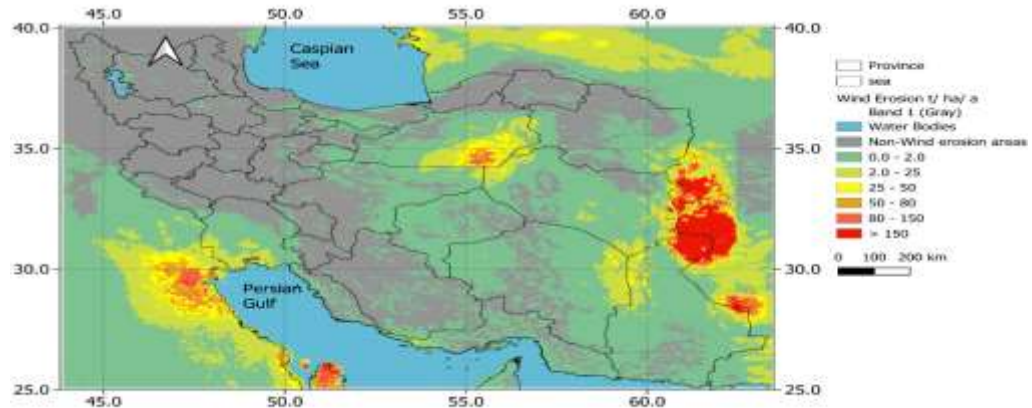


شکل ۵. پتانسیل فرسایش بادی خاک (SWEP) سالانه در سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴

جدول ۲. پتانسیل فرسایش بادی خاک (SWEP) سالانه در انواع کلاس‌های فرسایشی

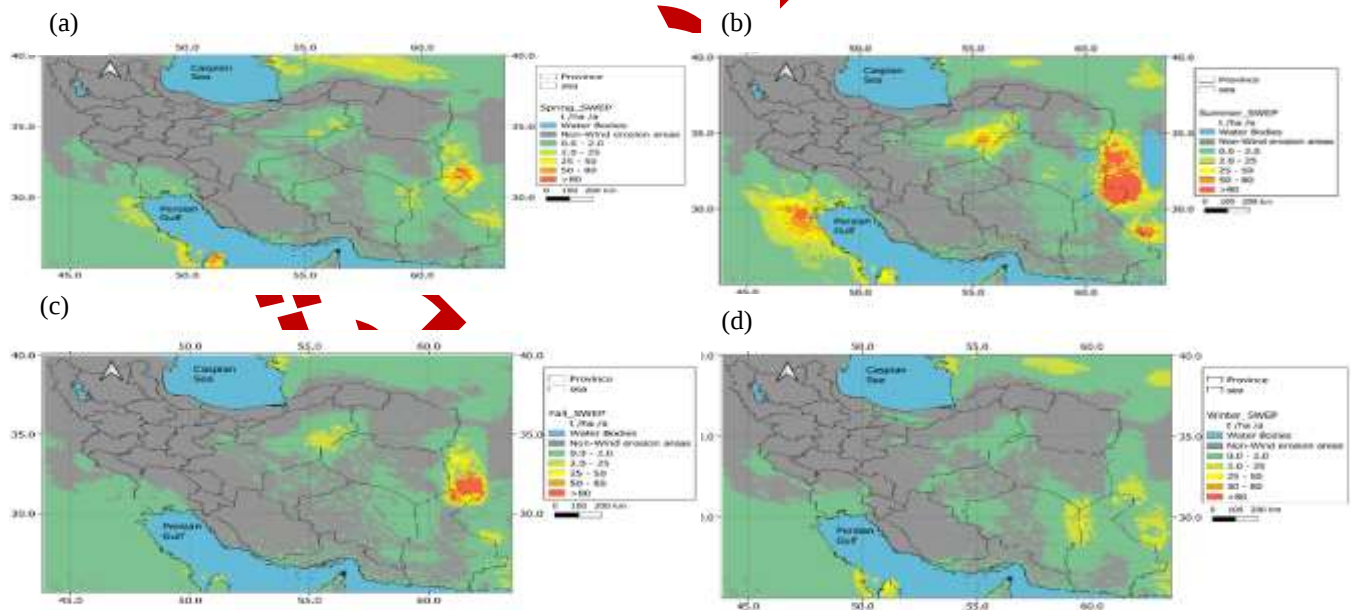
کلاس فرسایش	دامنه فرسایش (تن بر هکتار سال)	مساحت کلاس فرسایش (کیلومتر مربع)	نسبت سطح تحت پوشش کلاس فرسایشی به سطح مناطق دارای فرسایش بادی (%)
ضعیف	۰-۲	۶۹۹۲۱۲/۲۵	۸۴/۱۶
جزئی	۲-۲۵	۹۶۸۹۶/۲۵	۱۱/۶۶
متوسط	۲۵-۵۰	۱۵۴۵۰/۷۵	۱/۸۶
شدید	۵۰-۸۰	۵۸۳۲	۰/۷
بسیار شدید	۸۰-۱۵۰	۳۷۸۶/۷۵	۰/۴۶
وخیم	>۱۵۰	۹۶۷۹/۵	۱/۱۶

بر اساس نقشه پتانسیل فرسایش بادی ایران (شکل ۶)، نقاط کانونی با فرسایش شدید (بیش از ۱۵۰ تن در هکتار سال) عمدتاً در دو منطقه متمرکز هستند: جنوب شرق ایران در استان سیستان و بلوچستان که بزرگ‌ترین کانون فرسایش بادی کشور را تشکیل می دهد و احتمالاً شامل دشت‌های سیستان و مناطق اطراف هامون است، و همچنین شمال شرق کشور در مناطق بیابانی خراسان جنوبی. مناطق با فرسایش بادی شدید تا خیلی شدید (۸۰ تا ۱۵۰ تن در هکتار) شامل مرکز کشور، چند لکه در جنوب نزدیک خلیج فارس و مناطقی در اطراف کانون اصلی جنوب شرق می باشد. فرسایش متوسط تا شدید (۲۵ تا ۸۰ تن در هکتار) نیز در نواحی وسیعی از شرق، جنوب شرق، مرکز و جنوب کشور شامل بخش‌هایی از کویر مرکزی و دشت‌های کویری مشاهده می شود. در مقابل، مناطق با فرسایش بادی جزئی و خفیف (صفر تا ۲۵ تن در هکتار) عمدتاً در شمال، شمال غرب و غرب کشور قرار دارند.



شکل ۶. نقشه توزیع مکانی میانگین SWEP سالانه (تن بر هکتار سال).

تغییرات میانگین فصلی SWEP در محدوده مورد مطالعه (شکل ۷) نیز نشان می‌دهد اگرچه توزیع مکانی SWEP در فصول مختلف با توزیع مکانی میانگین سالانه آن مطابقت دارد اما الگوی مکانی SWEP در فصول مختلف فرق دارد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، بیشترین SWEP بر حسب تن بر هکتار در میان تمام فصول در فصل تابستان مشاهده می‌شود (تابستان: $3/38 < \text{پاییز: } 49/ < \text{بهار: } 22/ < 0/$ و زمستان: $20/$).

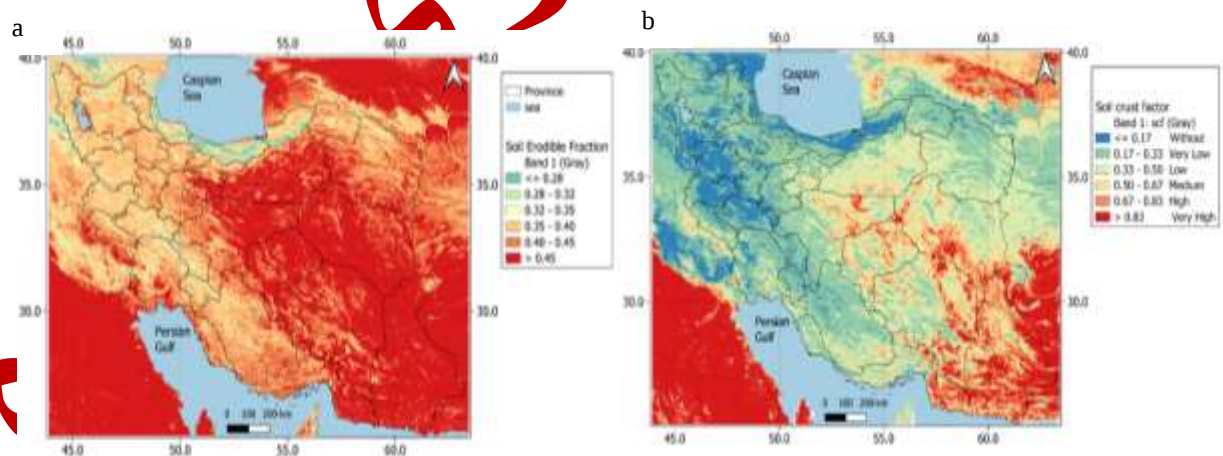


شکل ۷. تغییرات میانگین فصلی SWEP در (a) بهار (مارس، آوریل، می)، (b) تابستان (ژوئن، ژولای، اوت)، (c) پاییز (سپتامبر، اکتبر، نوامبر)، و (d) زمستان (دسامبر، ژانویه، فوریه) طی دوره ۲۰۱۴-۲۰۲۴.

جزء فرسایش‌پذیر و عامل سله خاک

مقدار جزء فرسایش‌پذیر (EF) و عامل سله خاک (SCF) با تلفیق داده‌های مقدار رس، شن، سیلت، کربنات کلسیم و ماده آلی محاسبه و نقشه توزیع مکانی کلاس‌های مختلف آنها در شکل ۸ آورده شده‌است. نقشه توزیع مکانی EF در محدوده مورد مطالعه، الگو مکانی قابل مقایسه‌ای را نشان می‌دهد (شکل ۸a). شش کلاس جزء فرسایش‌پذیر ($EF \leq 0.28$ ، $0.28 < EF \leq 0.32$ ، $0.32 < EF \leq 0.35$ ، $0.35 < EF \leq 0.40$ ، $0.40 < EF \leq 0.45$ ، $EF > 0.45$) به ترتیب حدود ۱/۰۳، ۱/۹۰، ۵/۱۳، ۲۵/۹۳، ۲۴/۱۶ و ۴۱/۸۳ درصد از منطقه را پوشش می‌دهند. سطح زیادی از خاک منطقه مورد مطالعه دارای فرسایش‌پذیری بسیار زیاد هستند، به‌طوری‌که بیشترین مقادیر EF (بیش از ۰/۴۵) در مناطق شرقی، جنوب‌شرقی (استان سیستان و بلوچستان، جنوب استان خراسان جنوبی و بخش‌هایی از خراسان رضوی و بخش‌های وسیعی از مناطق مرکزی کویری کشور (کویر لوت و دشت‌های اطراف آن، کویر مرکزی، استان یزد، مناطق بیابانی استان کرمان) مشاهده می‌شود. مناطق غربی، جنوب‌غربی و بخش‌هایی از شمال غرب ایران دارای مقادیر EF ۳۲/ تا ۴۵/ هستند، در حالی‌که کمترین مقادیر EF (کمتر از ۰/۲۸) در نوار ساحلی دریای خزر و ارتفاعات رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس دیده می‌شود (شکل ۸a).

بیشترین مقادیر SCF (بیش از ۰/۸۳) در مناطق جنوبی، جنوب‌شرقی و شرقی کشور به‌ویژه در استان‌های سیستان و بلوچستان، هرمزگان، کرمان و بخش‌هایی از خراسان مشاهده می‌شود. مقادیر متوسط تا بالا (۰/۵۰ تا ۰/۸۳) در مناطق مرکزی کویری و بخش‌هایی از شمال شرقی پراکنده است، در حالی‌که کمترین مقادیر (کمتر از ۰/۳۳) عمدتاً در نواحی غربی، شمال‌غربی، شمال ساحلی دریای خزر و ارتفاعات زاگرس قرار دارد. این توزیع نشان‌دهنده آن است که مناطق خشک و بیابانی جنوب و شرق کشور دارای پتانسیل پایینی برای تشکیل سله خاک هستند که این امر می‌تواند هم به‌عنوان یک عامل حساسیت در برابر فرسایش بادی عمل کند و منجر به افزایش فرسایش بادی شود، در حالی‌که مناطق مرطوب و کوهستانی غرب و شمال، SCF پایین‌تری دارند. در مجموع می‌توان گفت در شرق و جنوب شرق ایران (سیستان و بلوچستان، کرمان) هم EF و هم SCF بالا است و در نوار ساحلی دریای خزر هر دو SCF و EF پایین هستند. (شکل ۸b).

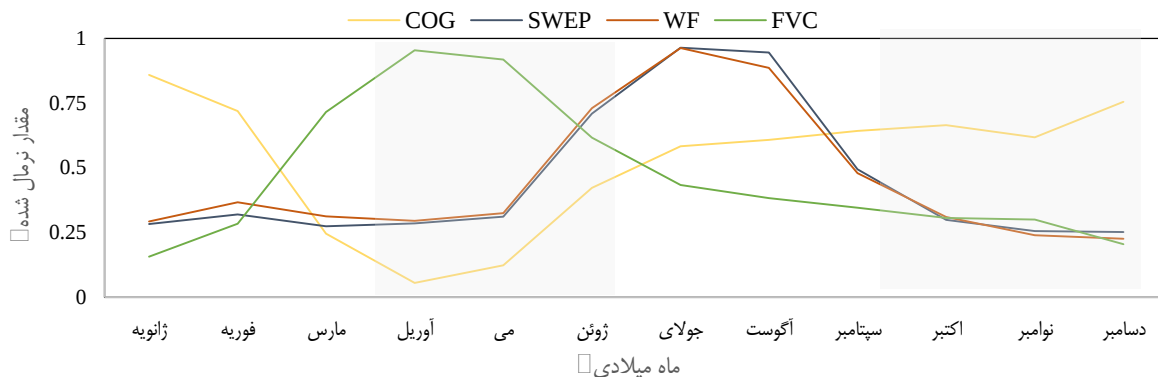


شکل ۸. نقشه جزء فرسایش‌پذیر (a) و عامل سله خاک (b)

ارتباط پتانسیل فرسایش بادی با عوامل آب و هوایی و پوشش گیاهی

جهت بررسی عوامل متغیر موثر بر تغییرات ماهانه SWEP، ارتباط میانگین ماهانه SWEP با میانگین ماهانه WF، پوشش کسری گیاهی (FVC) و عامل ترکیبی محصول (COG) در دوره ۲۰۲۴-۲۰۱۴ بررسی شد (شکل ۹). نمودار فوق نشان می‌دهد که تغییرات

ماهانه SWEP در راستای WF و COG و در مقابل FVC قرار دارد (شکل ۹). این وابستگی متقابل به این معناست که شرایطی با پوشش نسبتاً کم خاک و همزمان با مقادیر بالای WF (مانند باد شدید، رطوبت کم در ماه‌های جولای و آگوست) باعث تلفات شدید خاک می‌شود.



شکل ۹. تغییرات ماهانه WF (عامل آب و هوایی)، FVC (پوشش کسری گیاهی)، COG (عامل ترکیبی محصول)، پتانسیل فرسایش بادی (SWEP) در مقیاس نرمال سازی شده حداقل-حداکثر.

بحث

نتایج اعتبارسنجی مدل GEE-RWEQ نشان داد که پتانسیل فرسایش بادی (SWEP) با هر دو شاخص هواویزی: AOD و AAI، همبستگی مثبت و معنی‌داری دارد (به ترتیب $r=0.59$ و $r=0.64$). این ارتباط، اعتبار نسبی چارچوب مدل سازی به کاررفته را تأیید می‌کند. ضرایب همبستگی به دست آمده بیان گر آن است که بخش قابل توجهی از تغییرات هواویز توسط فرسایش بادی توضیح داده می‌شود، پراکندگی داده‌ها و عدم انطباق کامل بین SWEP و شاخص‌های هواویز تنها به عوامل محلی مانند رطوبت و جهت باد محدود نمی‌شود، بلکه بخشی از این تفاوت می‌تواند ناشی از ورود گرد و غبار برون مرزی از کانون‌های خارجی باشد که مستقیماً در مقادیر AOD و AAI منعکس می‌شود اما در SWEP محلی لحاظ نمی‌گردد. این موضوع برای ایران به ویژه اهمیت دارد، چرا که بخش مهمی از بار هواویز فرامرزی کشور ناشی از انتقال گرد و غبار از بین‌النهرین، جنوب عراق، سوریه و شبه جزیره عربستان در غرب و جنوب غرب، و از آسیای مرکزی در شمال شرق است (Abadi et al., 2025; Vishkaee et al., 2011; Wu et al., 2022b). بنابراین شاخص‌های ماهواره‌ای AOD و AAI در ایران نه تنها فرسایش بادی داخلی، بلکه بار گرد و غبار وارداتی را نیز پوشش می‌دهند. همین موضوع می‌تواند دلیل عدم انطباق کامل بین دو مجموعه داده باشد. با این حال، همبستگی معنادار مشاهده شده، اعتبار نسبی مدل GEE-RWEQ را برای بازنمایی الگوهای فضایی فرسایش بادی در مقیاس ملی تأیید می‌کند.

مقایسه مقدار میانگین SWEP سالانه به دست آمده در این پژوهش ($4/73$ تن در هکتار سال) در مقایسه با نرخ فرسایش قابل تحمل مراتع خشک و نیمه خشک ایران ($0/25$ تا $1/25$ تن در هکتار سال؛ سکوتی و عرب خدری، ۱۳۹۷) رقمی قابل توجه و هشداردهنده است. ایران در کمربند خشک و نیمه خشک جهان قرار گرفته و اقلیم خشک و نیمه خشک در حدود $64/7$ درصد از کشور غلبه دارد (باعقیده و همکاران، ۱۳۹۰). فرسایش آبی به دلیل گستردگی مناطق کوهستانی، پرشیب و دارای بارش‌های شدید فرایند غالب فرسایش خاک در سطح ایران محسوب می‌شود و انتظار می‌رود فرسایش بادی در قیاس با آن نقش کمتری در تخریب خاک داشته باشد. بر اساس مطالعات متعدد انجام شده از سال ۱۳۸۴ تا ۲۰۲۱ نرخ فرسایش آبی کشور را عمدتاً بین ۶ تا $16/5$ تن در هکتار در سال برآورد کرده‌اند (اسدی و همکاران، ۱۴۰۱). بنابراین قرارگرفتن مقدار میانگین SWEP پژوهش حاضر ($4/75$ تن

در هکتار در سال) در دامنه پایینی نرخ‌های ثبت‌شده برای فرسایش آبی، با انتظارات منطقی و فیزیکی این دو پدیده هم‌خوانی دارد. با این حال، روند افزایشی بیش از سه‌برابری فرسایش بادی در ایران طی سی سال گذشته (والی و روستایی، ۱۳۹۵)، نشان می‌دهد که حتی مقادیر نسبتاً پایین SWEP نیز نباید نادیده گرفته شوند، چراکه تشدید تدریجی آن می‌تواند ذخایر خاک و منابع زیست‌محیطی را با خطرات جدی مواجه کند.

بررسی الگوی مکانی میانگین سالانه SWEP نشان داد که فرسایش بادی، مساحتی حدود 0.83 میلیون کیلومتر مربع (حدود 53 درصد) از کل مساحت 1.56 میلیون کیلومتر مربع منطقه مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همان‌طور که در معرفی منطقه مورد مطالعه نیز اشاره شد حدود 42 درصد از مساحت کشور را اراضی متفرقه نظیر صخره‌های سنگی ($27/76\%$)، برونزدهای صخره‌ای ($1/78\%$)، پهنه‌های آبی ($2/15\%$) و غیره می‌پوشانند (Roozitalab et al., 2020)، که فرسایش‌پذیری خاک در آنها قابل تعریف نمی‌باشد. عابدی و جعفری (۱۴۰۰)، از منظر عوامل محرک در بررسی فرسایش بادی در استان اصفهان، تغییرات سرعت باد را 0.6 تا $4/8$ متر بر ثانیه گزارش دادند و بیان کردند که سرعت آستانه فرسایش بادی در دشت‌های ریگی به علت زبری سطح خاک و مقاومت ریگ‌ها افزایش می‌یابد. در مطالعه دیگری، اختصاصی و زارع‌چاهوکی (۱۳۹۵) با استفاده از مدل اریفر، توزیع کلاس‌های فرسایش بادی اراضی ایران را ارائه کردند. بر اساس نتایج آن پژوهش، 28 درصد از اراضی در کلاس فرسایش خیلی شدید (بیش از 60 تن در هکتار)، 21 درصد در کلاس فرسایش شدید (15 تا 60 تن در هکتار)، 18 درصد در کلاس فرسایش متوسط (5 تا 15 تن در هکتار)، 29 درصد در کلاس فرسایش ناچیز ($2/5$ تا 5 تن در هکتار)، 4 درصد در کلاس غیرحساس (کمتر از $2/5$ تن در هکتار) قرار داشتند. بر اساس نقشه پهنه‌بندی کلاس‌های مختلف فرسایش بادی (از ناچیز تا وخیم) در پژوهش حاضر، نقاط بحرانی فرسایش بادی (با نرخ بیش از 150 تن در هکتار سال) عمدتاً در جنوب شرق ایران در استان سیستان و بلوچستان (شامل دشت‌های سیستان و مناطق پیرامون هامون) و شمال شرق کشور در مناطق بیابانی خراسان جنوبی متمرکز هستند. فرسایش بادی شدید (80 تا 150 تن در هکتار) در سایر نقاط از قبیل نقاط مرکزی و جنوب کشور و مناطقی در اطراف کانون اصلی جنوب شرق مشاهده شد. بر اساس نتایج بررسی توزیع فصلی فرسایش بادی، تابستان بحرانی‌ترین فصل برای فرسایش بادی است. Wei et al. (2023) با استفاده از معادله RWEQ به بررسی مکانی و زمانی پتانسیل فرسایش بادی در فلات مغولستان از سال 1982 تا 2018 پرداختند. نتایج آن مطالعه نشان داد که فرسایش بادی از شمال شرقی به جنوب غربی در فلات مغولستان افزایش پیدا کرده است. میانگین سالانه فرسایش بادی در این منطقه $46/5$ تن بر هکتار در سال بوده است. شدت فرسایش بادی در بهار بیشترین و پس از آن پاییز و تابستان و در زمستان به کمترین میزان خود می‌رسد. در پژوهشی دیگر، نرخ سالانه فرسایش بادی خاک توسط مدل RWEQ در آسترای شرقی، بخشی از مناطق اروپا که در برابر فرسایش بادی آسیب‌پذیرند، $3/7$ تن در هکتار فرسایش خاک برآورد شد. همچنین ماه آگوست در تابستان با میانگین $0/49$ تن در هکتار در ماه، بیشترین میزان فرسایش خاک مدل‌سازی شده را داشت که به پوشش گیاهی کم و عامل آب و هوایی نسبتاً بالای ناشی از سرعت زیاد باد و رطوبت کم خاک نسبت داده شد (Scheper et al., 2021).

تفسیر الگوهای مکانی-زمانی مشاهده‌شده در فرسایش بادی کشور نیز، مستلزم بررسی نقش عوامل زمینه‌ای مؤثر بر آن، از جمله فرسایش‌پذیری خاک و عوامل آب‌وهوایی و گیاهی است. فرسایش‌پذیری و حساسیت خاک در برابر فرسایش بادی در مدل RWEQ توسط جزء فرسایش‌پذیر (EF) و عامل سله خاک (SCF) توصیف می‌گردد. بررسی شاخص‌های فرسایش‌پذیری، نشان‌دهنده حساسیت بالای بخش قابل توجهی از خاک‌های منطقه مورد مطالعه بود. به گونه‌ای که مناطق شرقی، جنوب شرقی و بخش‌های وسیعی از مناطق مرکزی کویری کشور دارای بیشترین مقادیر EF و مناطق جنوبی، جنوب شرقی و شرقی کشور دارای بیشترین مقادیر SCF بودند. EF و SCF امکان تمایز خوبی از فرسایش‌پذیری خاک را فراهم می‌کند زیرا مقادیر شاخص تدریجی از صفر تا یک ارائه می‌دهند. EF علاوه بر مقدار کربن آلی خاک، محتوای کربن معدنی را نیز شامل می‌شود و خاک‌های آهکی اغلب خاکدانه‌سازی بیشتر و در نتیجه فرسایش‌پذیری کمتری دارند (Tatarko, 2001). تأثیر قطرات باران بر سطح خاک منجر به توزیع

مجدد ذرات خاک می‌شود و سله سطحی را ایجاد می‌کند (Belnap, 2003). بسته به خصوصیات خاک، سله سطحی ممکن است پتانسیل فرسایش بادی را کاهش یا افزایش دهد (Zobeck, 1991). خاک‌های لومی (لوم شنی، لوم سیلتی) آسیب‌پذیرترین خاک‌ها برای تشکیل سله هستند و بنابراین نسبت به خاک‌های شنی کمتر حساس به فرسایش بادی هستند (Scheper et al., 2021). اگرچه تأثیر سله خاک بر فرسایش بادی مدت‌هاست که شناخته شده‌است (Tatarko, 2001)، اما SCF که شاخصی برای سله‌بندی خاک در مدل RWEQ است در سایر مدل‌های فرسایش بادی به این شکل مشخص وجود ندارد (Scheper et al., 2021). در شرق و جنوب‌شرق ایران هم EF و هم SCF بالا بود که بیان‌گر فرسایش‌پذیری بالای خاک‌های این مناطق در برابر فرسایش بادی است. فرض بر این است فرسایش‌پذیری خاک در طول یک سال نسبتاً ثابت هستند. زیرا ویژگی‌های خاک را در طول سال می‌توان نسبتاً ثابت در نظر گرفت، اما میزان پوشش گیاهی و وضعیت آب و هوایی در ماه‌های مختلف متفاوت است. عامل آب و هوا (WF) نقش تعیین‌کننده‌ای در پویایی فرسایش بادی ایفا می‌کند و این نقش عمدتاً از طریق تأثیر آن بر سرعت باد، بارش و دما اعمال می‌شود (Sun et al., 2024). رابطه مستقیم SWEP با COG و WF در پژوهش حاضر به این معناست که شرایطی با پوشش نسبتاً کم خاک (COG بالا) و مقادیر بالای WF (مانند باد شدید، رطوبت کم در ماه‌های جولای و آگوست) باعث تلفات شدید خاک می‌شود. نقطه بحرانی فرسایش بادی، منطقه سیستان دارای اقلیم شدیداً خشک و بادهای شدید موسوم به بادهای ۱۲۰ روزه است (Mirakzehi et al., 2018) و کاهش ذخایر آب سطحی و زیرزمینی و کاهش رشد پوشش گیاهی موجب تشدید فرسایش بادی در این منطقه است (علی‌صوفی و شهریار، ۱۳۹۹). پوشش گیاهی مناسب می‌تواند موجب کاهش اثرات آب و هوایی نظیر باد شدید شود. در همین راستا Scheper et al. (2021) گزارش دادند که در آسترایای شرقی زمانی که مزارع توسط پوشش گیاهی پوشیده شده‌اند مقادیر بالای WF نمی‌توانند به‌طور مؤثری موجب فرسایش بادی خاک شوند (به‌عنوان مثال، آوریل/می). Chu et al. (2024) در بررسی تغییرات فصلی فرسایش بادی گزارش دادند که طی ماه‌های ژوئن تا جولای، فرسایش بادی شدید در مناطق آسیای مرکزی و خاورمیانه رخ می‌دهد. این فرسایش توسط پهنه‌های گسترده خشک و نیمه‌خشک که با چشم‌اندازهای بیابانی و پوشش گیاهی پراکنده مشخص می‌شوند، تشدید می‌گردد. همچنین افزایش شدت بادهای تجاری و شرایط خشک و گرم که ذرات خاک را برای انتقال توسط باد مستعدتر می‌کند، در این تشدید نقش دارد (Fenta et al., 2020). بنابراین شرایطی مانند فرسایش‌پذیری ذاتی زیاد خاک و به‌همراه بادهای شدید و فرساینده و رطوبت کم و پوشش گیاهی ضعیف به‌ویژه در فصول گرم سال، نقش مهمی در ایجاد کانون‌های فرسایش بادی در کشور ایران دارند.

نتیجه‌گیری

فرسایش بادی یکی از بحران‌های زیست‌محیطی است و پهنه‌بندی این پدیده در چنین سطح وسیعی توسط روش‌های میدانی نیازمند وقت و هزینه بسیار زیادی است. پژوهش حاضر با تلفیق مدل RWEQ با پلتفرم گوگل ارث‌انجین برای نخستین‌بار تصویری جامع، یکپارچه و قابل‌مقایسه از پتانسیل فرسایش بادی خاک (SWEP) در سطح کل کشور ایران طی دوره ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ ارائه کرد. هم‌خوانی معنادار میان SWEP برآوردی و شاخص‌های ماهواره‌ای مرتبط با تولید گرد و غبار AOD و AAI اعتبار و کارایی مدل RWEQ در پلتفرم گوگل ارث‌انجین را برای پایش فرسایش بادی در مقیاس ملی تأیید کرد. نتایج نشان داد میانگین سالانه SWEP در این بازه ۴/۷۵ تن در هکتار بوده و از ۴/۱۵ تن در هکتار در سال ۲۰۲۱ تا ۵/۵۳ تن در هکتار در سال ۲۰۱۷ نوسان داشته‌است. فرسایش بادی حدود ۵۳ درصد از مساحت کشور را تحت تأثیر قرار می‌دهد و بزرگ‌ترین کانون فرسایش شدید (بیش از ۱۵۰ تن در هکتار در سال) در بخش‌های شمالی و شمال‌شرقی استان سیستان و بلوچستان، در پیوند با اقلیم فراخشک و بادهای ۱۲۰ روزه منطقه، شناسایی شد. الگوی فصلی SWEP نیز نشان داد که تابستان به‌دلیل خشکی شدید خاک، کاهش پوشش گیاهی و وزش بادهای شدید، بحرانی‌ترین فصل از نظر فرسایش بادی در کشور است. در مجموع،

ترکیب فرسایش‌پذیری ذاتی بالای خاک با عوامل آب و هوایی و گیاهی: بادهای شدید و فرساینده، رطوبت کم و پوشش گیاهی ضعیف، به‌ویژه در فصول گرم سال و در فقدان اقدامات حفاظتی مناسب، نقش اصلی را در شکل‌گیری کانون‌های فرسایش بادی در ایران ایفا می‌کند. رویکرد مورد استفاده در این تحقیق، با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور و بازتحلیل هواشناسی در دسترس به‌صورت رایگان، می‌تواند جایگزینی کارآمد، کم‌هزینه و قابل تکرار برای روش‌های میدانی سنتی باشد و امکان پایش پویا و به‌روز فرسایش بادی و برنامه‌ریزی برای اقدامات حفاظتی خاک را در مقیاس وسیع فراهم آورد. با این حال، این پژوهش با چند محدودیت همراه است. نخست، فقدان داده‌های شبکه‌بندی‌شده جهانی برای برخی متغیرهای مدل RWEQ (مانند آبیاری تجمعی و زبری تصادفی) ساده‌سازی این مؤلفه‌ها را ضروری ساخت که می‌تواند عدم قطعیتی به نتایج وارد کند. دوم، داده‌های بافت و مواد آلی خاک از پایگاه OpenLandMap استخراج شده‌اند که به دلیل تراکم پایین نقاط نمونه زمینی در برخی مناطق خشک و کوهستانی، ممکن است دقت برآورد EF و SCF را در این نواحی کاهش داده باشد. سوم، برآورد پوشش گیاهی در این مطالعه بر اساس مطالعات مشابه قبلی، بر پایه NDVI انجام شد؛ در حالی که استفاده از شاخص‌هایی که اثر بازتابش خاک را تصحیح می‌کنند، مانند SAVI نیز می‌تواند در مناطق خشک مورد توجه قرار گیرد. چهارم، اعتبارسنجی مدل با داده‌های ماهواره‌ای صورت گرفت و همبستگی به دست آمده را می‌توان بیشتر یک اعتبارسنجی نسبی در نظر گرفت تا مقایسه مستقیم با داده‌های میدانی. بنابراین پژوهش‌های آینده می‌توانند با اعتبارسنجی میدانی، استفاده از داده‌های خاک با دقت بالاتر، شاخص‌های گیاهی اصلاح‌شده و اعتبارسنجی مستقیم با ایستگاه‌های زمینی، دقت چارچوب مدل GEE-RWEQ را بهبود دهند.

منابع

- اختصاصی، محمدرضا و زارع چاهوکی، اصغر (۱۳۹۵). برآورد حجم فرسایش بادی کشور ایران به روش اریفر ۱ و ۲ و راهبردهای کاهش اثرات آن. کارگاه‌های آموزشی و سی‌وچهارمین گردهمایی و دومین کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین، ۵-۳ اسفند ۱۳۹۴، تهران، ایران.
- اسدی، حسین، بشارتی، حسین، و گرجی، منوچهر (۱۴۰۱). چالش‌ها و محدودیت‌های منابع خاک و اراضی در ایران. نشریه علمی ترویجی مدیریت اراضی (علوم خاک و آب)، ۱۰(۱)، ۱۱۱-۱۳۴.
- ایل‌درومی، علی‌رضا و مرادی، مینا (۱۳۹۶). ارزیابی شدت فرسایش بادی با بهره‌گیری از مدل IRIFR.E.A (بررسی موردی: دشت قهاوند همدان). جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۱(۶۰)، ۴۳-۶۰.
- باعقیده، محمد، علیجانی، بهلول، و ضیائی‌ان، پرویز. (۱۳۹۰). بررسی امکان استفاده از شاخص پوشش گیاهی NDVI در تحلیل خشکسالی‌های استان اصفهان. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۲(۴)، ۱-۱۶.
- راشکی، علیرضا و طالقانی، سجاد (۱۴۰۴). تغییرات مکانی-زمانی، روند و عوامل محرک پتانسیل فرسایش بادی در خراسان رضوی بر اساس مدل RWEQ. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱۶(۶۱)، ۱۲۰-۱۴۴.
- سکوتی، رضا و عرب‌خدری، محمود. (۱۳۹۷). تدوین روش مناسب برای تعیین فرسایش قابل تحمل خاک در ایران. نشریه علمی ترویجی مدیریت اراضی (علوم خاک و آب)، ۱۶(۱)، ۱-۲۰.
- عابدی، مائده و جعفری، رضا (۱۴۰۰). ارزیابی قابلیت داده‌های سنجش از دور در تهیه نقشه فرسایش بادی استان اصفهان با استفاده از مدل IRIFR. نشریه مدیریت بیابان، ۹(۱۷)، ۱-۱۴.
- علی‌پور، ناهید، فرزانه‌پی، فاطمه، ترابی، علی، بخشی‌نیا، سمیرا و مصباح‌زاده، طیب (۱۳۹۵). ارزیابی شدت فرسایش بادی در منطقه علاء سمنان با استفاده از مدل IRIFR.E.A. مجله مهندسی اکوسیستم بیابان، ۵(۱۰)، ۹۹-۱۰۷.
- علی‌صوفی، مسعود و شهریار، علی (۱۳۹۹). بررسی برخی خصوصیات شیمیایی و میزان برخی عناصر غذایی همراه با گرد و غبار در دشت سیستان. فصلنامه مخاطرات محیط طبیعی، ۹(۲۳)، ۹۹-۱۱۶.
- والی، عباسعلی و روستایی، فاطمه (۱۳۹۵). بررسی روند فرسایش بادی در ایران مرکزی با استفاده از شاخص طوفان گرد و غبار در پنجاه سال

References

- Abadi, A. R. S., Hamzeh, N. H., Kaskaoutis, D., Opp, C., & Kazemi, A. F. (2025). Long-Term Spatio-Temporal Analysis, Distribution, and Trends of Dust Events over Iran. *Atmosphere*. <https://doi.org/10.3390/atmos16030334>
- Abedi, M., & Jafari, R. (2021). The potential of remote sensing data in mapping of wind erosion in Isfahan Province using the IRIFR model. *Desert Management*, 9(1), 1–14. <https://doi.org/10.22034/jdmal.2021.244522> [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]
- AliSoufi, M., & Shahriari, A. (2020). Investigation of some chemical properties and amounts of some nutrient elements of dust in Sistan Plain. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 9(23), 99–116. [In Persian]
- Asadi, H., Besharati, H., & Gorji, M. (2022). Challenges and limitations of soil and land resources in Iran. *Journal of Land Management (Soil and Water Sciences)*, 10(1), 111–134. [In Persian]
- Azimzadeh, H. R., Ekhtesasi, M., Refahi, H., Rohipour, H., & Gorji, M. (2008). Wind erosion measurement on fallow lands of Yazd-Ardakan plain, Iran. *Desert*, 13(2), 167–174. <https://doi.org/10.22059/jdesert.2008.36300>
- Bagheede, M., Alijani, B., & Ziaian, P. (2011). Evaluating the possibility of using the NDVI index to analyze and monitor droughts in Esfahan Province. *Arid Regions Geographic Studies*, 2(4), 1–16. https://jargs.hsu.ac.ir/article_161277.html [In Persian]
- Bashari, H., Boali, A., & Soltani, S. (2024). Accommodating uncertainty in soil erosion risk assessment: Integration of Bayesian belief networks and MPSIAC model. *Natural Hazards Research*. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.09.009>
- Belnap, J. (2003). Biological soil crusts and wind erosion. In J. Belnap & O. L. Lange (Eds.), *Biological soil crusts: Structure, function, and management* (pp. 339–347). Springer.
- Chen, W., Meng, H., Song, H., & Zheng, H. (2022). Progress in dust modelling, global dust budgets, and soil organic carbon dynamics. *Land*, 11, Article 176. <https://doi.org/10.3390/land11020176>
- Chi, W., Zhao, Y., Kuang, W., & He, H. (2019). Impacts of anthropogenic land use/cover changes on soil wind erosion in China. *Science of the Total Environment*, 668, 204–215. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.414>
- Chu, Z., Liu, M., Zhang, Q., Cai, X., Zhang, Y., Hu, T., Qiu, X., Huang, Z., & Wang, X. (2024). Spatiotemporal distribution of global wind erosion over the past four decades. *Environmental Research Letters*, 19(11), Article 114019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad7d22>
- Danielson, J. J., & Gesch, D. B. (2011). *Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010)* [Dataset]. U.S. Geological Survey Open-File Report. <https://doi.org/10.3133/ofr20111073>
- Ekhtesasi, M. R., & Zare Chahouki, A. (2016). *Estimation of wind erosion in Iran with IRIFR1 and 2 models and strategies for reducing its effects*. Paper presented at the 33rd and 34th Educational Workshops and 2nd International Congress of Earth Sciences, February 22–24, 2016, Tehran, Iran. [In Persian]

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, Article 135016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135016>

Fryrear, D. W., Bilbro, J. D., Saleh, A., Schomberg, H., Stout, J. E., & Zobeck, T. M. (2000). RWEQ: Improved wind erosion technology. *Journal of Soil and Water Conservation*, 55(2), 183–189. <https://doi.org/10.1080/00224561.2000.12436392>

Fryrear, D. W., Chen, W., & Lester, C. (2016). Revised wind erosion equation. *Annals of Arid Zone*, 40, 199–203. <https://doi.org/10.56093/aaz.v40i3.65816>

Funk, R. (2016). Assessment and measurement of wind erosion. In L. Mueller, A. K. Sheudshen, & F. Eulenstein (Eds.), *Novel methods for monitoring and managing land and water resources in Siberia* (pp. 425–449). Springer.

Guo, Z., Zobeck, T.M., Zhang, K., Li, F., 2013. Estimating potential wind erosion of agricultural lands in northern China using the Revised Wind Erosion Equation and geographic information systems. *Journal of Soil and Water Conservation*, 68, 13–21. <https://doi.org/10.2489/jswc.68.1.13>.

Hu, Y., Liu, J., Zhuang, D., Cao, H., Yan, H., & Yang, F. (2005). Distribution characteristics of ¹³⁷Cs in wind-eroded soil profile and its use in estimating wind erosion modulus. *Chinese Science Bulletin*, 50(11), 1155–1159. <https://doi.org/10.1360/04wd0312>

Ildoromi, A. R., & Moradi, M. (2017). Assessment of wind erosion intensity by IRIFR.E.A model (Case study: Qahavand, Hamedan). *Journal of Geography and Planning*, 21(60), 43–60. [In Persian]

Jarrah, M., Mayel, S., Tatarko, J., Funk, R., & Kuka, K. (2020). A review of wind erosion models: Data requirements, processes, and validity. *Catena*, 187, Article 104388. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104388>

Ji, H., Li, X., Wei, X., Liu, W., Zhang, L., & Wang, L. (2020). Mapping 10-m resolution rural settlements using multi-source remote sensing datasets with the Google Earth Engine platform. *Remote Sensing*, 12(18), Article 2832. <https://doi.org/10.3390/rs12182832>

Jugder, D., Gantsetseg, B., Davaanyam, E., & Shinoda, M. (2018). Developing a soil erodibility map across Mongolia. *Natural Hazards*, 92(Suppl 1), 71–94. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3409-6>

Jarrah, M., Mayel, S., Tatarko, J., Funk, R., & Kuka, K. (2020). A review of wind erosion models: Data requirements, processes, and validity. *Catena*, 187, Article 104388. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104388>

Li, J., Ma, X., & Zhang, C. (2020). Predicting the spatiotemporal variation in soil wind erosion across Central Asia in response to climate change in the 21st century. *Science of the Total Environment*, 709, Article 136060. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136060>

Liu, J., Wang, X., Zhang, L., Guo, Z., Chang, C., Du, H., Wang, H., Wang, R., Li, J., & Li, Q. (2022). Regional potential wind erosion simulation using different models in the agro-pastoral ecotone of Northern China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, Article 9538. <https://doi.org/10.3390/ijerph19159538>

López, M. V., de Dios Herrero, J. M., Hevia, G. G., Gracia, R., & Buschiazzi, D. E. (2007). Determination of the wind-erodible fraction of soils using different methodologies. *Geoderma*, 139, 407–411. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.03.006>

Middleton, N. J., & Kang, U. (2017). Sand and dust storms: Impact mitigation. *Sustainability*, 9(6), Article 1053. <https://doi.org/10.3390/su9061053>

Mirakzehi, K., Pahlavan-Rad, M., Shahriari, A., & Bameri, A. (2018). Digital soil mapping of deltaic soils: A case study from Hirmand (Helmand) river delta. *Geoderma*, 313, 233–240. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.046>

Poormorteza, S., Gholami, H., Rashki, A., & Moradi, N. (2023). High-resolution, spatially resolved quantification of wind erosion rates based on UAV images (case study: Sistan region, southeastern Iran). *Environmental Science and Pollution Research*, 30(8), 21694–21707. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23611-7>

Rashki, A., & Taleghani, S. (2025). Spatio-temporal variation of wind erosion potential in Razavi Khorasan province using the RWEQ model. *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 16(61), 120–144. <https://doi.org/10.22034/jargs.2025.478055.1144> [In Persian]

Roozitalab, M. H., Siadat, H., & Farshad, A. (Eds.). (2020). *The soils of Iran*. Springer.

Scheper, S., Weninger, T., Kitzler, B., Lackóová, L., Cornelis, W., Strauss, P., & Michel, K. (2021). Comparison of the spatial wind erosion patterns of erosion risk mapping and quantitative modeling in Eastern Austria. *Land*, 10, Article 974. <https://doi.org/10.3390/land10090974>

Shao, Y. (2008). Integrated wind-erosion modelling. In *Physics and modelling of wind erosion* (pp. 303–360). Springer.

Sokouti, R., & Arabkhedri, M. (2018). Developing a suitable method for determining soil loss tolerance in Iran. *Journal of Land Management (Soil and Water Sciences)*, 6(1), 1–20. [In Persian]

Sun, R., He, H., Jing, Y., Leng, S., Yang, G., & Lü, Y. (2024). Global wind erosion reduction driven by changing climate and land use. *Earth's Future*, 12, e2024EF004930. <https://doi.org/10.1029/2024EF004930>

Tatarko, J. (2001). Soil aggregation as a factor in wind erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*, 56(4), 135–140.

Van Pelt, R. S., & Zobeck, T. M. (2004). Validation of the wind erosion equation (WEQ) for discrete periods. *Environmental Modelling & Software*, 19(2), 199–203. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00123-3](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00123-3)

Vali, A., & Roustaei, F. (2016). Investigation of the wind erosion trend in Central Iran using dust storm index in the last fifty years. *JWSS - Isfahan University of Technology*, 21, 189–200. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3326-en.html> [In Persian]

Vazifedoust, M., Keshavarz, M., Mokhtari, A., et al. (2024). Comprehensive assessment of irrigation water requirements in Iran. *AIMS Agriculture and Food*, 9(1), 282–303. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2024017>

Vishkaee, F. A., Flamant, C., Cuesta, J., Flamant, P., & Khalesifard, H. (2011). Multiplatform observations of dust vertical distribution during transport over northwest Iran in the summertime. *Journal of Geophysical Research*, 116. <https://doi.org/10.1029/2010jd014573>

Walch, D. M. R., Singh, R. K., Søreide, J. E., Lantuit, H., & Poste, A. (2022). Spatio-temporal variability of suspended particulate matter in a high-Arctic estuary (Adventfjorden, Svalbard) using Sentinel-2 time-series. *Remote Sensing*, 14, Article 3123. <https://doi.org/10.3390/rs14123123>

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), Article 3430. <https://doi.org/10.3390/rs12203430>

Webb, N. P., & Strong, C. L. (2011). Soil erodibility dynamics and its representation for wind erosion and dust emission models. *Aeolian Research*, 3, 165–179. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.04.001>

Wei, X., Wu, X., Wang, D., Wu, T., Li, R., Hu, G., Zou, D., Bai, K., Ma, X., Liu, Y., Yan, X., Fan, X., Cao, X., & Dashtseren, A. (2023). Spatiotemporal variations and driving factors for potential wind erosion on the Mongolian Plateau. *Science of the Total Environment*, 862, Article 160829. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160829>

Wu, D., Zou, C., Cao, W., Xiao, T., & Gong, G. (2019). Ecosystem services changes between 2000 and 2015 in the Loess Plateau, China: A response to ecological restoration. *PLoS ONE*, 14, Article e0209483. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209483>

Wu, J., Zheng, X., Zhao, L., Fan, J., & Liu, J. (2022a). Effects of ecological programs and other factors on soil wind erosion between 1981–2020. *Remote Sensing*, 14(21), Article 5322. <https://doi.org/10.3390/rs14215322>

Wu, N., Ge, Y., Abuduwaili, J., Issanova, G., & Saparov, G. (2022b). Insights into Variations and Potential Long-Range Transport of Atmospheric Aerosols from the Aral Sea Basin in Central Asia. *Remote Sensing*, 14, 3201. <https://doi.org/10.3390/rs14133201>

Yao, F., Ding, J., Bao, A., & Li, J. (2025). Attribution and risk assessment of wind erosion in the Aral Sea regions using multi-source remote sensing and RWEQ on GEE. *Remote Sensing*, 17, Article 2788. <https://doi.org/10.3390/rs17162788>

Youssef, F., Visser, S., Karssenbergh, D., Bruggeman, A., & Erpul, G. (2012). Calibration of RWEQ in a patchy landscape: A first step towards a regional scale wind erosion model. *Aeolian Research*, 3, 467–476. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.03.001>

Zhang, C.-L., Zou, X.-Y., Yang, P., Dong, Y.-X., Li, S., Wei, X.-H., Yang, S., & Pan, X.-H. (2007). Wind tunnel test and ¹³⁷Cs tracing study on wind erosion of several soils in Tibet. *Soil and Tillage Research*, 94, 269–282. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.08.002>

Zhang, H., Fan, J., Cao, W., Harris, W., Li, Y., Chi, W., & Wang, S. (2018). Response of wind erosion dynamics to climate change and human activity in Inner Mongolia, China during 1990 to 2015. *Science of the Total Environment*, 639, 1038–1050. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.082>

Zhu, Z., Zhang, Z., Liu, F., Chen, Z., Ren, Y., and Guo, Q. (2023). Study on accuracy evaluation of MCD19A2 and spatiotemporal distribution of AOD in arid zones of Central Asia. *Sustainability*, 15(18), 13959. <https://doi.org/10.3390/su151813959>

Zhang, Q., Gu, F., Zhang, S., Chen, X., Ding, X., & Xu, Z. (2024). Spatiotemporal variation in wind erosion in Tarim River Basin from 2010 to 2018. *Land*, 13(3), Article 330. <https://doi.org/10.3390/land13030330>

Zobeck, T. M. (1991). Soil properties affecting wind erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46, 112–118.

Zobeck, T. M., Parker, N. C., Haskell, S., & Guoding, K. (2000). Scaling up from field to region for wind erosion prediction using a field-scale wind erosion model and GIS. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 82, 247–259. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00229-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00229-2)