



Hakim Sabzevari University

Arid Regions Geographic Studies

Homepage: jargs.hsu.ac.ir

P- ISSN: 2228-7167

E- ISSN: 2981-1910



Spatio-temporal variations of wind erosion potential in Razavi Khorasan province using the RWEQ model

Alireza Rashki¹ | Sajjad Taleghani²

1. Corresponding Author, Department of Arid and Desert Areas Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran a.rashki@um.ac.ir

2. Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran sajjadtaleghani@gmail.com

Article Information

Research Paper

Vol: 16
No: 61
P: 120-144
Received: 2024-12-15
Revised: 2024-12-22
Accepted: 2025-01-19
Published: 2025-11-01

Keywords:

- RWEQ
- SWEP
- Wind erosion
- Google Earth Engine

Cite this Article:

Rashki, Alireza & Taleghani, Sajjad. (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.
doi: 10.22034/jargs.2025.478055.1144

Publisher: Hakim Sabzevari University

Authors retain the copyright and full publishing rights.



Abstract

Aim: Long-term wind erosion data is essential for sustainable land management. Razavi Khorasan province experiences wind erosion, resulting in dust storms that cause considerable damage. The sources of wind erosion and dust storms appear to change over time. This research aims to understand the dynamic patterns of wind erosion and its main drivers.

Materials & Methods: This study examines the spatial and temporal variations in wind erosion potential in Razavi Khorasan Province using the RWEQ model. It investigates how factors such as soil sensitivity, geography, and climate influence wind erosion by analyzing data from the period 2000-2021. Results were validated using AAI and BDI satellite data.

Finding: Significant differences in erosion sensitivity were observed in Razavi Khorasan, mainly due to geographical factors such as vegetation distribution, soil characteristics, and weather patterns. Areas with less vegetation and looser surface soils are particularly affected. The southwestern and southeastern parts of Razavi Khorasan show a broader distribution of wind erosion potential. On the contrary, the northern region has a relatively lower soil erosion potential due to its different climatic conditions, including higher precipitation and lower temperatures.

Conclusion: The most significant expansion of erosion-prone areas occurs during the spring and summer seasons. In the summer months, intense wind erosion activities shift from the southeast and southwest parts (such as Khaf and Bardskan) to the central regions (such as Taibad, Torbet Jam, Sarkhs, and Bejestan). However, specific microclimate conditions in certain parts of Razavi Khorasan, such as the western parts of Sabzevar and Davarzen, result in increased wind erosion in spring compared to summer.

Innovation: Utilizing erosion models on the Google Earth Engine platform overcomes local and traditional computational limitations, enabling the rapid processing of extensive spatial data. This approach greatly simplifies the creation of wind erosion maps and potentially enables long-term practical applications.

Extended Abstract

1. Introduction

In recent decades, climate change and human activities have turned land degradation into one of the major global environmental challenges. Over 83% of this degradation is attributed to soil erosion, which poses a significant threat to land productivity, agricultural sustainability, and food security. Soil erosion is particularly concerning in arid and semi-arid regions, where the loss of topsoil due to wind erosion significantly threatens ecosystem stability and agricultural productivity. In these regions, wind erosion plays a more prominent role, removing fertile topsoil and directly impacting crop yields and the ability to sustain agricultural practices. Furthermore, sand and dust storms, which are severe consequences of wind erosion, contribute to air quality deterioration and exacerbate respiratory problems, having profound negative effects on human health. Given the limited number of dust monitoring stations and the challenges of collecting field data over vast areas, the use of advanced technologies for predicting wind erosion, such as remote sensing data and erosion models, has become increasingly essential. Among these models, the RWEQ model is proposed as an effective tool for estimating wind erosion potential at large scales. This model enables the simulation of soil loss using climatic and land data, providing valuable insights into the extent and variability of wind erosion over time and space, which can inform the development of strategies to mitigate its effects.

2. Materials and Methods

Khorasan Razavi Province, situated in the northeast of Iran, has a dry and semi-arid climate, making it prone to wind erosion and dust storms. The factors influencing this phenomenon include reduced vegetation cover, improper land use, flat plains, and severe drought conditions. This study utilizes the RWEQ model to create maps of spatial-temporal changes in wind erosion potential and its driving factors in the province. Climatic data, including soil moisture (FEWS NET), wind speed, and snow depth (ERA5), as well as soil texture (HWSO and OLM) and vegetation index (MODIS), were extracted. Additionally, the digital elevation model (DEM) from SRTM data was used to calculate the slope. Moreover, wind erosion indices (BDI and AAI) were applied for model validation. Data processing and map generation were carried out using the Google Earth Engine platform. This study examines the impact of factors such as soil sensitivity, geography, and climate on wind erosion occurrence by analyzing data from the period 2000-2021.

3. Results and Discussion

The results indicate that the spatial distribution of wind erosion in Khorasan Razavi Province exhibits significant spatial and temporal variability, with a range between 0 and 600 kg per square meter per year. This variability is primarily attributed to geographical factors such as vegetation distribution, soil characteristics, and climate patterns, particularly in areas with sparse vegetation and looser surface soils. The southern, eastern, and southwestern regions of the province have the highest wind erosion potential, whereas the northern areas, due to their higher moisture and vegetation cover, experience less erosion. Ten percent of the province's area is in a critically endangered state, with Khaf County accounting for the largest share among other counties. An analysis of the last 22 years reveals that wind erosion intensity increased in 2007 and 2014, primarily due to severe droughts. Seasonal variations in wind erosion revealed the highest intensity during the spring and summer seasons. The effect of wind speed on wind erosion was also examined, showing a significant positive correlation between average wind speed and erosion levels. In terms of temporal trends, global wind calm changed after 2010, and an increase in wind speed has exacerbated wind erosion in the region. The RWEQ model results were compared and validated with satellite indices, which indicated that the eastern and southern regions of the province have the highest dust levels.

4. Conclusions

In this study, an automated algorithm for generating wind erosion maps was developed using the Google Earth Engine platform and processing spatial and temporal data over 22 years (2000 to 2021). The RWEQ model, which does not require ground data, is particularly useful in sparsely populated and developing areas. This method uses climatic data, soil characteristics, vegetation, and topography to produce wind erosion maps. The results showed that wind speed is the main factor affecting wind erosion ($r = 0.78$, $p < 0.001$), and after an initial decrease, it increased starting in 2011. The RWEQ model, based on the Google Earth Engine cloud computing platform, enabled rapid processing of extensive spatial data, and its results were validated with satellite data generated through the AAI and BDI indices. Therefore, the use of this model can support management decisions for controlling erosion in erosion-prone areas.

5. Acknowledgment & Funding

We acknowledge support by the Iran National Science Foundation (INSF) under project No 99003984 and the Natural Resources and Watershed Management department of Razavi Khorasan Province under project No 215310-14773

6. Conflict of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper



مطالعات خرافیابی مناطق خشک

تغییرات مکانی - زمانی، روند و عوامل محرک پتانسیل فرسایش بادی در

استان خراسان رضوی بر اساس مدل RWEQ

علیرضا راشکی¹✉، سجاد طالقانی

۱- نویسنده مسئول، گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

a.rashki@um.ac.ir

۲- گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران sajjadtaleghany@gmail.com

چکیده

هدف: وجود داده‌های بلندمدت فرسایش بادی جهت مدیریت پایدار سرزمین ضروری است. استان خراسان رضوی تحت تأثیر فرسایش بادی و در نتیجه توفان‌های گرد و غبار است که سالانه خسارات‌های زیادی را وارد می‌کند. هدف این پژوهش درک الگوهای دینامیکی فرسایش بادی و محرک‌های اساسی آن است.

روش و داده: این مطالعه به تحلیل تفاوت‌های مکانی و زمانی پتانسیل فرسایش بادی با استفاده از مدل RWEQ در استان خراسان رضوی می‌پردازد و چگونگی تأثیر عواملی مانند حساسیت خاک، جغرافیا و آب و هوا را بر وقوع آن با تجزیه و تحلیل داده‌ها در دوره‌ی زمانی ۲۰۰۰-۲۰۲۱ بررسی می‌کند. در نهایت با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای AAI, BDI نتایج به دست آمده اعتبارسنجی می‌شود.

یافته‌ها: تفاوت‌های قابل توجهی در حساسیت به فرسایش در خراسان رضوی تشخیص داده شد که در درجه اول به عوامل جغرافیایی مانند توزیع پوشش گیاهی، ویژگی‌های خاک و الگوهای آب و هوایی به ویژه، مناطقی با پوشش گیاهی کم و خاک‌های سطحی سست‌تر نسبت داده می‌شود. بخش‌های جنوب غربی و جنوب شرقی خراسان رضوی، توزیع گسترده‌تری از پتانسیل فرسایش بادی را نشان می‌دهند. برعکس، بخش‌های شمالی پتانسیل فرسایش خاک نسبتاً کمتری را به دلیل شرایط اقلیمی متفاوت از جمله بارش بیشتر و دمای پایین‌تر تجربه می‌کنند.

نتیجه‌گیری: بیشترین گسترش مناطق مستعد فرسایش در طول فصول بهار و تابستان رخ می‌دهد. فعالیت‌های شدید فرسایش بادی در طول ماه‌های تابستان از بخش‌های جنوب شرقی و جنوب غربی (مانند خواف و بردسکن) به سمت مناطق مرکزی (مانند تایباد، تربت‌جام، سرخس و بجستان) جابه‌جا می‌شوند. با این حال، شرایط ریزاقلیمی خاص در مناطق خاص خراسان رضوی، مانند بخش‌های غربی سبزوار و داورزن، منجر به افزایش فرسایش بادی در فصل بهار نسبت به تابستان می‌شود.

نوآوری، کاربرد نتایج: کاربرد مدل‌های فرسایشی در پلتفرم گوگل ارث انجین، محدودیت‌های محاسباتی محلی و سستی را از بین می‌برد و داده‌های فضایی گسترده را در یک بازه زمانی کوتاه پردازش می‌کند. این رویکرد به طور قابل توجهی فرآیند تولید نقشه‌های فرسایش بادی را ساده می‌کند و به طور بالقوه کاربردهای عملی طولانی مدت را امکان‌پذیر می‌کند.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

شماره:

۱۶

دوره:

۶۱

صفحه:

۱۲۰-۱۴۴

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۶/۲۵

تاریخ ویرایش:

۱۴۰۳/۱۰/۰۲

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۱۰/۳۰

تاریخ انتشار:

۱۴۰۴/۰۸/۱۰

کلیدواژه‌ها:

- فرسایش بادی اصلاح شده
- پتانسیل فرسایش بادی
- فرسایش بادی
- گوگل ارث انجین

نحوه ارجاع به این مقاله:

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.

doi: 10.22034/jargs.2025.478055.1144

ناشر: دانشگاه حکیم سبزواری



نویسندگان حق نشر و حقوق انتشار

کامل را حفظ می‌کند.



10.22034/jargs.2025.478055.1144

۱- مقدمه

در طی چند دهه گذشته، تغییرات اقلیمی و مداخلات انسانی سبب شده که تخریب اراضی به یکی از جدی‌ترین مشکلات محیط زیستی قرن بیست و یکم تبدیل شود (Borrelli et al., 2017). علی‌رغم نبود اراده سیاسی قوی، مشکل تخریب اراضی توجه زیادی را در سراسر جهان به خود جلب کرده است. امروزه، بیش از ۱۲۰ کشور به برنامه هدف‌گذاری خنثی‌سازی تخریب سرزمین (LDN¹) متعهد شده‌اند، که تلاش می‌کنند تا قبل از سال ۲۰۳۰ به یک دنیای عاری از تخریب سرزمین دست یابند (Chasek et al., 2019). فرسایش خاک مهم‌ترین تهدید جهانی برای تخریب خاک، زمین، آب شیرین و اقیانوس‌ها است (Borrelli et al., 2020). بیش از ۸۳ درصد از وسعت ناشی از تخریب سرزمین در اثر فرسایش خاک به وجود می‌آید (Oldeman, 1994). به دلیل فعالیت‌های انسانی و تغییرات اقلیمی؛ فرسایش خاک می‌تواند باعث از بین رفتن خاک سطحی شود که این مسئله منجر به تخریب سرزمین مانند کاهش بهره‌وری خاک و کاهش پوشش گیاهی می‌شود که بازبایی آن به قرن‌ها زمان نیاز دارد (Faq., 2020; Lal, 2003). در مناطق خشک، باد نقش مهم‌تری نسبت به آب در از بین بردن سطح حاصلخیز خاک دارد (Borrelli et al., 2017). از بین رفتن فزاینده خاک سطحی توسط فرسایش بادی یک تهدید بالقوه برای کشاورزی پایدار است که ارتباط نزدیکی با امنیت غذایی دارد (Pimentel and Burgess, 2013). در اثر باد شدید نزدیک به سطح، مواد آلی خاک و چندین ماده مغذی دیگر موجود در خاک به راحتی از بین می‌روند و در نتیجه حاصلخیزی خاک و بهره‌وری گیاه کاهش می‌یابد. بر اساس گزارش مرکز داده‌های خاک اروپا (ESDAC²)، حدود ۲۸ درصد از مناطق متأثر از تخریب سرزمین در جهان در اثر فرآیند فرسایش خاک ناشی از باد به وجود آمده‌اند (Center, 2020). علاوه بر این، خطر توفان‌های شن و گرد و غبار یکی از بزرگترین پیامدهای فرسایش بادی است. ذرات خاک معلق در باد و مواد شیمیایی که منجر به آلودگی هوا می‌شوند، می‌توانند بر سیستم تنفسی انسان تأثیر بگذارند (Rashki et al., 2013). بنابراین، فرسایش بادی یک تهدید مهم برای سلامت انسان و امنیت غذایی به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود و تهیه نقشه‌های فرسایش بادی و تجزیه و تحلیل آن برای کنترل تخریب اراضی، مدیریت کشاورزی مناسب به ویژه در مناطق خشک امری ضروری است (Jiang et al., 2019; Duniway et al., 2019). توفان‌های شن در مناطق خشک و نیمه خشک؛ به ویژه در صحرای ساهارا، خاورمیانه و مغولستان سرچشمه می‌گیرند. تخمین زده می‌شود که این توفان‌ها در سراسر صحرای آفریقا، خاورمیانه و آسیا سالانه بیش از ۲۰۰ تا ۵۰۰۰ میلیون تن گرد و غبار معدنی را وارد جو زمین می‌کنند (Tegen and Fung., 1994). ایران در کمربند خشک و نیمه خشک جهان قرار گرفته و حدود ۶۴/۷ درصد از وسعت این کشور (معادل ۱۰۵ میلیون هکتار) جزء اقلیم خشک و نیمه خشک است (Bagheed et al., 2011)؛ بنابراین بررسی تغییرات پتانسیل فرسایش بادی خراسان رضوی با توجه به اقلیم خشک و نیمه خشکی که در آن قرار دارد، برای این استان امری حیاتی است. ارزیابی فرسایش بادی و تخمین مقدار خاکی که تحت تأثیر آن از بین می‌رود و نیز مقایسه مناطق مختلف، احتیاج به نصب ایستگاه‌های اندازه‌گیری مستقیم و تجهیزات دارد؛ ولی احداث و تجهیز این تعداد ایستگاه و فراهم آوردن وسایل مورد نیاز آن‌ها، نیازمند صرف هزینه و زمان زیادی است (Jafari et al., 2017). از آنجا که محدودیت امکانات، مانع از تحقق این امر شده است، در فناوری پیش‌بینی فرسایش بادی و تغییرات مکانی زمانی فرسایش بادی با استفاده از داده‌های عمق نوری ذرات (AOD³) توسط سنجنده‌های تصویربرداری پرتوسنج طیفی با توان تفکیک متوسط (MODIS⁴) و همچنین استفاده از مدل‌های فرسایش بادی (مدل‌های تجربی تا مدل‌های فیزیکی) امری اجتناب‌ناپذیر است. از مناسب‌ترین مدل‌های تهیه شده برای مطالعه فرسایش بادی به طور کمی می‌توان به معادله فرسایش بادی (WEQ⁵)، معادله فرسایش بادی اصلاح شده (RWEQ⁶)، سیستم پیش‌بینی فرسایش بادی (WEPS⁷) و مدل ارزیابی فرسایش بادی تک‌رخدادی (SWEEP⁸) اشاره کرد (Jarrah et al., 2020). با توجه به پارامترها و داده‌های محدودی که در دسترس است، شبیه‌سازی از دست رفت خاک به وسیله مدل‌های فرسایش بادی در مقیاس جغرافیایی بزرگ مشکل است؛ اما از بین مدل‌های ذکر شده مدل RWEQ برای مقیاس جغرافیایی بزرگ در مقایسه با سایر مدل‌ها، توسط فرایر و همکاران پیشنهاد شده است. مدل RWEQ به عنوان مدلی نیمه تجربی (حد واسطه مدل‌های تجربی و فیزیکی) بر پایه یکسری از معادلات ریاضی استوار است (Fryrear et al., 2001). این مدل از مجموعه‌ای از معادلات ریاضی و داده‌های آب و هوا، خاک، محصولات زراعی و...

1. Land Degradation Neutrality

2. European Soil Data Centre

3. Aerosol optical depth

4. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

5. Wind Erosion Equation

6. Revised Wind Erosion Equation

7. Wind Erosion Prediction System

8. Single-event Wind Erosion Evaluation Program

استفاده می‌کند. علاوه بر این، مدل RWEQ با داده‌های فرسایش ثبت شده از ۴۵ سال قبل در چندین ایالت کشور آمریکا اعتبارسنجی شده است (Fryrear et al., 2000). مدل‌های فرسایش خاک، یکی از مهم‌ترین ابزارهای سودمند برای ارزیابی و پیش‌بینی مقدار شدت فرسایش خاک و اثرات آن هستند.

چی و همکاران، از مدل RWEQ برای محاسبه مدل فرسایش بادی بر اساس رگرسیون داده‌های نقطه نمونه‌برداری میدانی و داده‌های سنجش از دور در چین استفاده کردند. هدف از این مطالعه (۱) بررسی الگوهای مکانی - زمانی مدل فرسایش بادی (SWEM¹) در چین از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۵، و (۲) نشان دادن رابطه تغییرات پوشش و کاربری زمین در مدل SWEM بود. نتایج نشان داد که مناطقی که فرسایش شدید بادی (SWEM > 50 (t/ha.a)) را تجربه کردند، ۸/۹۱ درصد از کل چین را به خود اختصاص دادند. SWEM در مناطق بدون پوشش دو برابر بیشتر از مناطق با پوشش گیاهی تنک، زمین‌های زراعی و جنگلی بود. علاوه بر این، پوشش گیاهی متراکم در مناطق خشک و نیمه خشک کمترین میزان فرسایش را داشت (Chi et al., 2019). ونگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ یک مدل معادله فرسایش بادی اصلاح شده (RWEQ) مبتنی بر گوگل ارث انجین، به نام GEE-RWEQ، برای تعیین پتانسیل فرسایش بادی (SWEP²) ایجاد کردند. بر اساس مدل GEE-RWEQ، چندین ترابایت داده‌های سنجش از دور (RS³)، داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و برخی داده‌های مکانی دیگر برای تولید SWEP ماهانه با وضوح مکانی بالا (۵۰۰ متر) در سراسر آسیای مرکزی بین سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۹ استفاده شد. نتایج نشان داد که میانگین SWEP با شاخص توفان شن (DSI⁴) مبتنی بر مشاهدات زمینی، AOD مبتنی بر ماهواره و شاخص هواویز جذبی AAI⁵ مطابقت خوبی دارد و بر کارا بودن GEE-RWEQ به عنوان یک مدل فرسایش بادی صحت می‌گذارد (Wang et al., 2020).

یانگ و همکاران به ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی فرسایش بادی در سطح جهانی بر اساس مدل RWEQ پرداختند. مدل DRWEQ⁶ از داده‌های هواشناسی، خاک، توپوگرافی و سنجش از دور برای شبیه‌سازی فرسایش بادی جهانی از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ استفاده کردند. این مطالعه نشان داد که نرخ از دست دادن خاک در تابستان به علت افزایش پوشش گیاهی و کاهش سرعت باد در سطح جهانی کمتر بود و از ژانویه تا آوریل (دی تا فروردین) فرسایش بادی به اوج خود رسید. روش ارائه شده در این مطالعه بر اساس مبادله دقت و در دسترس بودن داده‌های جهانی توسعه یافته است و پتانسیل پیش‌بینی فرسایش بادی از مقیاس منطقه‌ای به جهانی را دارد (Yang et al., 2022).

وی و همکاران با استفاده از معادله RWEQ به بررسی مکانی و زمانی پتانسیل فرسایش بادی در فلات مغولستان از سال ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۸ پرداختند. نتایج این 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 ۴۶.۵ تن برهکتار 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. این مطالعه به شناسایی مناطق پرخطر فرسایش بادی در فلات مغولستان و اتخاذ تدابیر مؤثر برای سازگاری با تغییرات اقلیمی کمک می‌کند (Wei et al., 2023).

هن و همکاران با استفاده از مدل G2 و معادله بهبودیافته فرسایش بادی (RWEQ)، فرسایش آبی و بادی ماهانه در مناطق خشک چین را در بازه ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که فرسایش آبی و بادی در مناطق خشک چین به ترتیب (۴۷.۳۵٪) و (۵۸.۷۶٪) است. فرسایش آبی در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ افزایش یافت، در حالی که فرسایش بادی کاهش پیدا کرده است. فرسایش آبی ۵۰.۶۴٪ از مناطق خشک چین را تحت تأثیر قرار داد، در حالی که فرسایش بادی ۴۷.۸۸٪ از مناطق چین را در برمی‌گیرد. با این حال، این مطالعه نشان می‌دهد که الگوی فرسایش در مناطق خشک چین در حال تغییر است (Han et al., 2023).

افزایش میزان فرسایش بادی در طول سال‌های آینده می‌تواند از پیامدهای خشکسالی و تغییرات اقلیمی و ایجاد پهنه‌های بیابانی به عنوان منبع و سرچشمه فرسایش بادی باشد. تهیه نقشه کمی فرسایش بادی به ویژه در مناطقی با اقلیم خشک و نیمه خشک امری ضروری است. با این حال، تقریباً هیچ مطالعه‌ای برای شبیه‌سازی پتانسیل فرسایش بادی خاک با استفاده از مدل RWEQ به ویژه در خراسان رضوی انجام نشده است. با توجه به این مسائل، اهداف این مطالعه عبارتند از (۱) تهیه نقشه پتانسیل فرسایش بادی خاک

1. Soil wind erosion modulus
2. Soil Wind Erosion Potential
3. Remote Sensing
4. Dust Storm Index

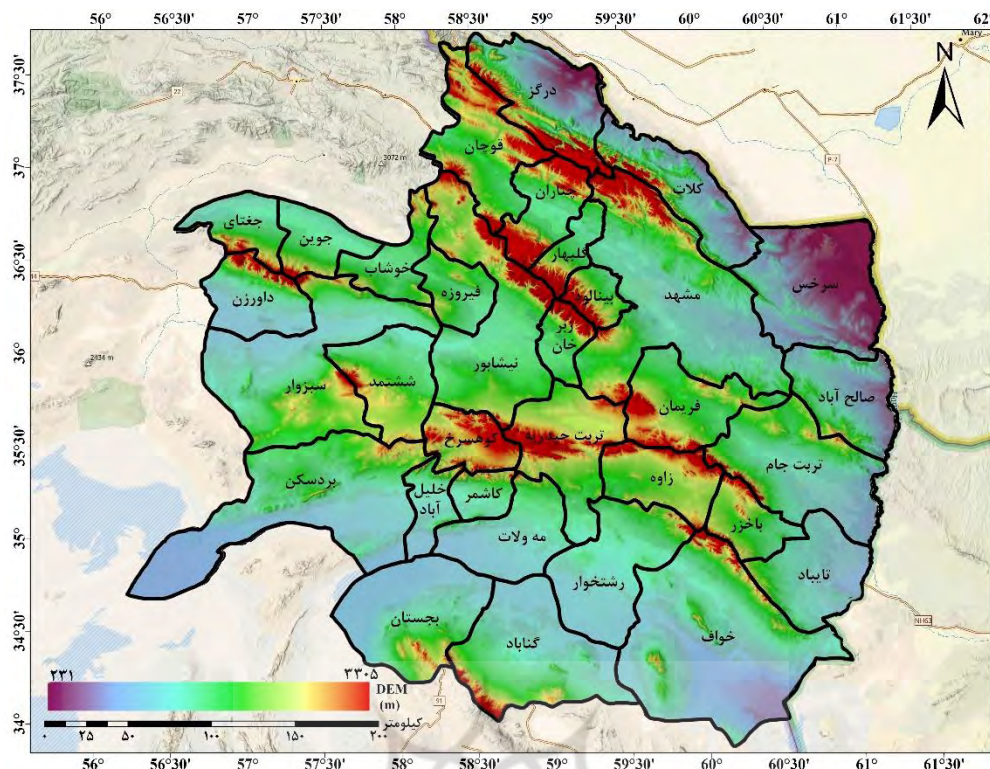
5. Absorbing Aerosol Index
6. Distributed version of the revised wind erosion equation

(SWEP) به صورت کمی در خراسان رضوی و تحلیل تغییرات ماهانه و فصلی فرسایش بادی بر اساس مدل RWEQ با استفاده از پلتفرم گوگل ارث انجین، (۲) ارزیابی روند سرعت باد در خراسان رضوی و بررسی پویایی فرسایش بادی نسبت به تغییرات سرعت باد. این اولین مطالعه‌ای است که مدل فرسایش بادی را بر روی پلت فرم گوگل ارث انجین اجرا می‌کند. همچنین این مطالعه ایده‌های جدیدی را برای ساخت و استفاده از مدل‌های تجربی مبتنی بر بانک داده‌های جغرافیایی و محاسبات قدرتمند ارائه می‌کند. نتایج کلی آن می‌تواند به توسعه برنامه‌های مؤثر در جهت مقابله با چالش‌های مرتبط با فرسایش بادی و بیابان‌زایی در خراسان رضوی کمک کنند.

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

استان خراسان رضوی در شمال شرقی کشور ایران با مساحت ۱۱۸۸۵۱ کیلومتر مربع با طول جغرافیایی 56° و $45'$ تا 61° و $45'$ شرقی و عرض جغرافیایی 33° و $52'$ تا 37° و $40'$ شمالی قرار دارد (شکل ۱). این استان از جنوب به استان‌های خراسان جنوبی و یزد، از غرب به استان سمنان، از شمال به استان خراسان شمالی و از شرق با کشور افغانستان هم مرز است. ارتفاعات هزارمسجد، کپه داغ و بینالود در شمال استان در راستای شمال شرقی- جنوب شرقی و ارتفاعات پراکنده دیگر در راستای شرقی در مرکز و در راستای جنوب شرقی در مرکز و جنوب استان وجود دارد. بلندترین نقطه استان در ارتفاعات بینالود با ارتفاع ۳۲۱۱ متر از سطح دریا و دشت سرخس در حاشیه مرز ایران و ترکمنستان با ارتفاع ۳۰۰ متر از سطح دریا کم ارتفاع‌ترین منطقه در شمال شرق استان، کویر بجنستان در جنوب شرقی استان و دشت کویر در غرب استان قرار دارد. شمال به جنوب استان از ارتفاع کاسته شده و دشت هموار و حاصلخیز در بین ارتفاعات و اطراف آن‌ها قرار دارد. استان خراسان رضوی دارای اقلیم خشک و نیمه خشک با وزش جریان‌های غالب چرخنده‌های تابستانه (بادهای لوار) و جریان‌ات غربی زمستانه است و میانگین بارش سالیانه مناطق مختلف این استان بین ۷۵ تا ۳۹۰ میلی‌متر متغیر است (Sarnouba et al., 2017)، عوامل مختلفی باعث وجود منابع فرسایش بادی در این منطقه شده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان وزش بادهای ۱۲۰ روزه سیستان یا لوار که عموماً از اواخر بهار شروع می‌شوند و تا اواخر شهریورماه ادامه دارند نام برد. این بادها از مهم‌ترین بادها در منطقه هستند (Hamidianpour et al., 2022)، و به دلیل این‌که از طرف کشور ترکمنستان و افغانستان می‌وزند، بیشتر محدوده شرقی خراسان رضوی را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند. انواع کاربری اراضی که دارای خصوصیات با پوشش گیاهی کم یا نواحی که تحت تغییرات طبیعی و انسانی، پوشش گیاهی آن‌ها از بین رفته باعث شده این مناطق نقش بیشتری در برداشت ذرات خاک و ایجاد مناطق مستعد فرسایش بادی در خراسان داشته باشند. همچنین وجود دشت‌ها و زمین‌های مسطح و با شیب و ارتفاع کم که به علت مسطح بودن زمین، باد زودتر به آستانه فرسایش بادی می‌رسد و باعث برداشت ذرات خاک و ایجاد توفان گرد و غبار و کانون‌های فرسایش بادی می‌شود. بیشترین کانون‌های گرد و غبار در کاربری‌های مراتع فقیر و اراضی دیم با تعداد ۲۳ و ۱۸ کانون، که حدود ۳۸/۳۵ و ۶۹/۲۷ درصد کل کانون‌های منطقه مورد مطالعه را شامل می‌شود، قرار دارد؛ زیرا مراتع فقیر و اراضی دیم حدود ۳۵ درصد سطح استان را پوشش داده‌اند (Pourhashemi et al., 2019). همچنین، منطقه از لحاظ ژئومورفولوژی از جمله کانون‌های مستعد گرد و غبار در مناطقی همچون دشت‌سر، واحد پلایا و حتی کوهستان یافت می‌شوند (Pourhashemi et al., 2019). به علاوه این‌که وقوع توفان‌های گرد و غبار و وجود منابع فرسایش بادی با خشکسالی ارتباطی مستقیم داشته و در سال‌هایی که شدت خشکسالی زیاد بوده بر تعداد وقوع گرد و غبار و بالتبع منابع بالقوه فرسایش بادی در خراسان رضوی نیز افزوده شده است (Pourhashemi et al., 2016). بنابراین، خراسان رضوی از جمله مناطقی است که به دلیل قرارگیری در معرض بادهای شدید فرساینده و بیابان‌زایی شدید در اکثر مناطق آن مستعد برای تولید و انتشار گرد و غبار و فرسایش بادی است. علاوه بر وجود کانون‌های متعدد گرد و غباری در این منطقه، در سال‌های اخیر به تعداد آن‌ها نیز افزوده شده و مناطق جدیدی به عنوان منشأ گرد و غبار به وجود آمده است (Broghni et al., 2015). با توجه به اهمیت این موضوع تهیه نقشه کمی فرسایش بادی در این استان می‌تواند اطلاعات مفیدی به همراه داشته باشد. در پژوهش حاضر علاوه بر تهیه نقشه تغییرات مکانی- زمانی پتانسیل فرسایش بادی در خراسان رضوی، روند و عوامل محرک آن نیز توسط مدل RWEQ نیز تعیین شد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی شهرستان‌های خراسان رضوی به همراه مدل رقومی ارتفاعی منطقه

۲-۲- روش پژوهش

۲-۲-۱- جمع‌آوری داده‌ها و منبع آن‌ها

جهت محاسبه پتانسیل فرسایش بادی با استفاده از مدل RWEQ، داده‌های اقلیمی شامل رطوبت خاک با استفاده از شبکه سامانه‌های هشدار سریع قحطی (FEWS NET^۱)، همچنین داده‌های سرعت باد و عمق برف از داده‌های بازتحلیل شده جوی نسل پنجم (ERA5) ECMWF^۲، مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۱). ترکیب مکانیکی خاک (درصد سیلت، رس و ماسه) و چندین ویژگی دیگر خاک از پایگاه داده جهانی خاک همگن شده (HWSD^۳) و (OLM^۴) به دست آمد که بر اساس پیش‌بینی‌های صورت گرفته توسط یادگیری ماشین از بانک داده‌های پروفیل‌ها و نمونه‌های خاک است. اطلاعات موجود در مجموعه داده OLM در قالب شش عمق استاندارد (۰، ۱۰، ۳۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سانتی‌متر) تقسیم شدند. به دلیل عدم وجود داده‌های مربوط به میزان کربنات کلسیم خاک در مجموعه داده‌های GEE^۵ در نتیجه از پارامتر pH استفاده شد؛ زیرا رابطه مثبت غیرخطی بین pH و کربنات کلسیم خاک وجود دارد (Liu et al., 2002; Huang et al., 2008). طی مطالعاتی که در چین انجام شد لئو و همکاران دریافتند که pH خاک و غلظت CaCO_3 یک همبستگی مثبت غیرخطی نشان می‌دهد. بر اساس بیش از ۱۵۰۰۰ واحد مختلف نقشه‌برداری خاک، ما یک معادله نمایی معادله (۱) برای کمی کردن رابطه بین pH خاک و کربنات کلسیم خاک (CaCO_3) پیشنهاد شده است.

$$\text{PH} = 4.576 * \text{CaCO}_3^{0.09089} + 2.378 \quad (۱)$$

که در آن منظور همان درصد pH انواع مختلف خاک در HWSD و CaCO_3 مقدار کربنات کلسیم خاک برحسب درصد است.

1. Famine Early Warning Systems Network
2. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

3. <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub>
4. <https://openlandmap.org/>
5. Google Earth Engine

NDVI^۱ از شاخص‌های پوشش گیاهی (MOD13Q1) تابش سنج طیفی تصویربرداری با وضوح متوسط ناسا (MODIS) (MOD13Q1) به دست آمد. داده‌های مدل رقومی ارتفاعی (DEM^۲) از مأموریت توپوگرافی رادار شاتل سازمان ملی هوانوردی و فضایی (NASA-SRTM^۳) گرفته شد که در محاسبه شیب استفاده شد. علاوه بر موارد فوق، روش‌های سنجش از دور دیدگاه جدیدی در مورد اعتبارسنجی فرسایش بادی خاک فراهم آورده است. داده‌های هواویز شامل شاخص دمای روشنایی گرد و غبار (BDI^۴) و شاخص جذب هواویز (AAI) است که برای مقایسه و اعتبارسنجی فرسایش بادی در این مطالعه استفاده شد. شاخص BDI با استفاده از MODIS و شاخص AAI از ماهواره Sentinel-5 Precursor گرفته شده است که در ۱۳ اکتبر ۲۰۱۷ راهاندازی شد. جزئیات مربوط به داده‌های این مطالعه در جدول (۱) بیان شده است.

جدول ۱. جمع‌آوری داده‌ها منابع آن‌ها

پارامتر	داده	منبع	زمان	دقت مکانی	دقت زمانی
مدل RWEQ	سرعت باد و عمق برف	ERA5 *	۲۰۰۰-۲۰۲۱	۰.۲۵ درجه	روزانه
	رطوبت خاک	FLDAS *	۲۰۰۰-۲۰۲۱	۰.۱ درجه	ماهانه
	ویژگی‌های خاک	OLM *	-	۲۵۰ متر	روزانه
		HWSD	-	۳۰ ثانیه قوس	
	شاخص گیاهی NDVI	MODIS (MOD13Q1) *	۲۰۰۰-۲۰۲۱	۲۵۰ متر	۱۶ روزه
	DEM	NASA-SRTM *	-	۹۰ متر	-
اعتبارسنجی	BDI	ماهواره MODIS	۲۰۲۱	۱۰۰۰ متر	روزانه
	AAI	NRTI/L3_AER_AI*	۲۰۲۱		روزانه

* این داده‌ها در GEE (Google Earth Engine) قابلیت دسترسی دارند.

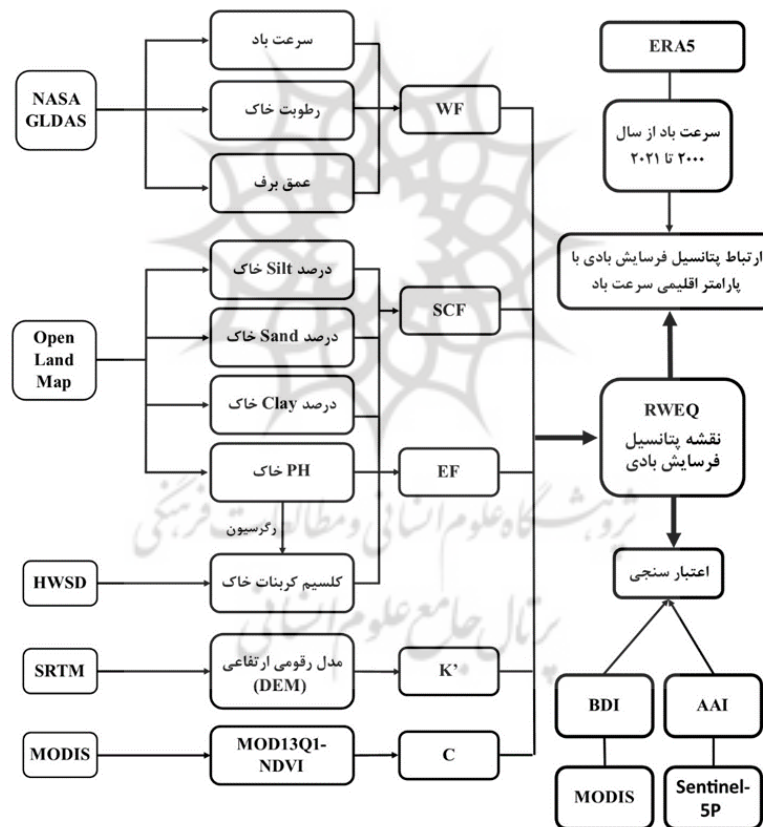
۲-۲-۲- معادله فرسایش بادی اصلاح شده (RWEQ)

ارزیابی جامع فرسایش بادی در منطقه‌ای در مقیاس بزرگ پیچیده و چالشی است. پارامترهای متعددی برای محاسبه مدل فرسایش بادی خاک با استفاده از مدل‌های در مقیاس صحرایی، مانند WEPS^۵، استفاده می‌شوند. اکثر کشورهای در حال توسعه که از منابع محدودی برخوردار هستند، دچار مشکلات زیست محیطی مختلفی، از جمله خشکسالی، سیل، جنگل‌زدایی، تخریب خاک و توفان‌های گرد و غبار ناشی از فرسایش بادی هستند (Fenta et al., 2020; Chi et al., 2019). این کشورها اغلب فاقد مکان‌ها و شبکه‌های پایشی برای مدیریت مسائل زیست محیطی خود هستند که این مسأله مشکلات آن‌ها را شدیدتر می‌کند (Kalantari et al., 2018; Symeonakis et al., 2004). در این مطالعه، ما با استفاده از داده‌های مکانی چندمنبعی در سامانه گوگل ارث انجین یک الگوریتم برای تهیه نقشه پویایی فرسایش بادی برای سری زمانی مختلف در خراسان رضوی اجرا شده است. داده‌های محدود برگرفته از مشاهدات زمینی چالش بزرگی در شبیه‌سازی فرسایش بادی خاک است؛ بنابراین، لازم است مدلی ساده‌تر و کاربردی‌تر ساخته شود که بتواند پتانسیل فرسایش بادی را در مقیاس گسترده برآورد کند. اگرچه این مدل نسبتاً ساده از دقت کمتری نسبت به مدل‌های فرسایش بادی مکانیکی برخوردار است؛ اما با عواملی همچون داده‌های کم ورودی، مکان و مقیاس منطقه مورد مطالعه محدود نمی‌شود. RWEQ به طور گسترده آزموده شده است، و ارتباط بسیار خوبی بین نتایج مدل و اندازه‌گیری‌های میدانی در مطالعات قبلی پیدا یافت شده است. در این مطالعه، مدل RWEQ برای تهیه نقشه کمی فرسایش بادی خاک در یک منطقه با تعداد داده محدود اندازه‌گیری شده زمینی ایجاد شد. اگرچه بسیاری از پارامترهای ورودی در RWEQ ذخیره می‌شوند؛ اما برآورد ضریب زبری خاک (K') در فرایند تولید محصولات کشاورزی در مقیاس منطقه‌ای امری دشوار است. مدل اصلی RWEQ به منظور محاسبه میزان فرسایش باد در مقیاس مزرعه طراحی شده است. عملیات شخم‌زنی باعث تغییر زبری سطح خاک می‌شود و باقیمانده‌های محصولات کشاورزی را صاف کرده و آن‌ها را دفن می‌کند (Nelson et al., 1993)؛ اما هنگامی مقیاس به سطح منطقه‌ای گسترش می‌یابد، زبری ناشی از توپوگرافی جایگزین زبری ناشی از شیارهای خاک می‌شود. زبری توپوگرافی با استفاده از معادله اسمیت-کارسون محاسبه می‌شود (Ouyang et al., 2016). این معادله به طور گسترده در مناطق متعددی که از مقیاس

1. Normalized difference vegetation index
2. Digital Elevation Model
3. Shuttle Radar Topography Mission

4. Brightness temperature dust index
5. Wind Erosion Prediction System

میدانی به منطقه‌ای گسترش می‌یابد، استفاده شده است (Zhang et al., 2019; Xu et al., 2019). مقدار پوشش گیاهی در سطح خاک تأثیر به سزایی در فرسایش بادی دارد، برای تعیین کمیت اثر پوشش گیاهی در مدل RWEQ، از سه عامل برای ارزیابی پوشش گیاهی استفاده می‌شود که شامل کسری از سطح خاک که با مواد گیاهی غیرقابل فرسایش (باقیای مسطح) پوشیده شده، نمای گیاهی از باقیمانده ایستاده^۲ و همچنین سایبان‌های گیاهی در حال رشد (سایبان زراعی)^۳ (Bilbro and Fryear, 1994) است. با توجه به محدودیت‌های موجود در برآورد فرسایش بادی در مقیاس منطقه‌ای در این مطالعه، ضریب محصول ترکیبی (C) بر اساس یافته‌های قبلی که به عنوان تابعی از خاک که با هر نوع پوشش گیاهی پوشیده شده است، ساده‌سازی شد (Jiang et al., 2016; Lee et al., 2020). بر اساس هدف این مطالعه، این کار مطابق آنچه در نمودار جریان فنی ارائه شده است سازماندهی شده است (شکل ۲). در این تحقیق ابتدا، با استفاده از داده‌های چندمنبعی مکانی، پتانسیل فرسایش ماهانه در خراسان رضوی بر اساس مدل RWEQ تولید شد و تغییرات مکانی و زمانی فرسایش بادی را بین سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۱ بررسی گردید، در مرحله بعدی واکنش فرسایش بادی نسبت به تغییرات سرعت باد مورد در فصول و سال‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. با افزایش سرعت باد، توانایی آن در جابجایی ذرات خاک نیز به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، هنگامی که سرعت باد به حدی برسد که بتواند ذرات ریز خاک را از سطح زمین جدا کند، این ذرات به راحتی به هوا منتقل می‌شوند و موجب فرسایش می‌گردند. این موضوع اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا تغییرات سرعت باد می‌تواند الگوهای فرسایش و رسوب‌گذاری را تحت تأثیر قرار دهد. بررسی و در نهایت، اعتبار پتانسیل فرسایش بادی خاک سالانه بر اساس شاخص‌های BDI و AAI مبتنی بر ماهواره آزموده شد.



شکل ۲. پارامترها و شکل مفهومی مدل RWEQ

RWEQ شامل معادله‌های پایه زیر می‌شود (Fryrear et al., 2001):

$$SWEP = \frac{2x}{s^2} Q_{max} e^{-\left(\frac{x}{s}\right)^2} \quad (2)$$

1. Flat residues
2. Standing residues

3. Crop canopy

در رابطه (۲) مقدار پتانسیل فرسایش بادی در واحد سطح (kg/m^2) است. x فاصله از لبه باد مخالف میدان (m) که برای مناطق خشک ۵۵ متر در نظر گرفته شده است (Wang et al., 2020); s و $Q_{\max}^1$ به ترتیب طول میدان بحرانی (m) و حداکثر ظرفیت انتقال (kg/m) است که با استفاده از روابط (۳ و ۴) به دست می‌آیند.

$$S = 150.71 * (WF * EF * SCF * K' * C) - 0.371 \quad (3)$$

$$Q_{\max} = 109.8 * WF * EF * SCF * K' * C \quad (4)$$

WF^2 فاکتور اقلیمی (kg/m) است؛ EF^3 جزء فرسایش‌پذیر خاک (بدون بعد) است؛ SCF^4 ضریب پوسته خاک (بدون بعد) است. K' ضریب زبری خاک (بدون بعد) و C نشان‌دهنده ضریب ترکیبی محصول (بدون بعد) است.

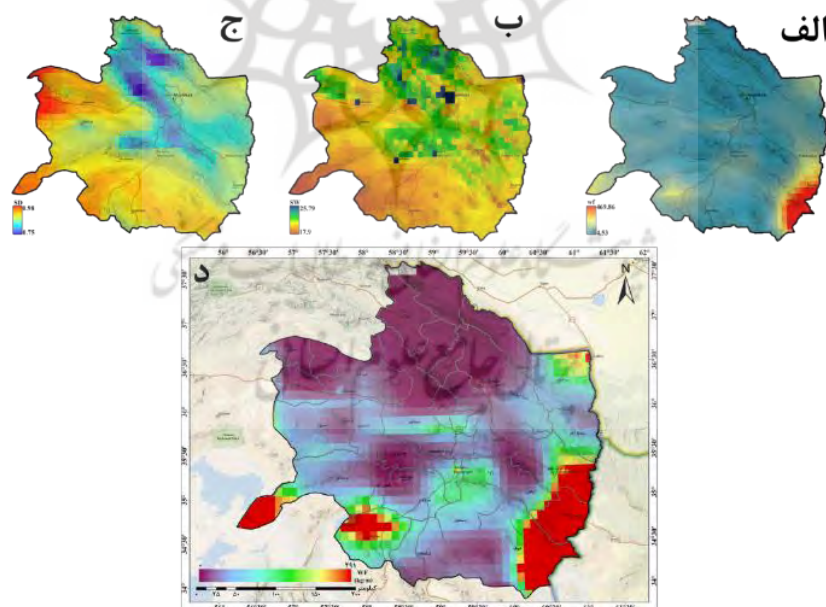
فاکتور اقلیمی توسط رابطه (۵) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$WF = wf * \left(\frac{\rho}{g}\right) * SW * SD \quad (5)$$

که در آن SW^5 رطوبت خاک (بدون بعد)، SD^6 ضریب پوشش برف (بدون بعد) که نشان‌دهنده نسبت روزهای بدون پوشش برفی به تعداد کل روزهای مطالعه شده است، عمق پوشش برفی کمتر از ۲۵.۴ میلی‌متر نشان‌دهنده عدم وجود پوشش برفی است. WF نشان‌دهنده سرعت باد است که توسط رابطه (۶) به دست می‌آید:

$$wf = \frac{\sum_{i=1}^N U_2(U_2 - U_t)^2}{500} * N_d \quad (6)$$

که در آن U_2 سرعت باد در ۲ متر (متر بر ثانیه)، U_t سرعت آستانه باد در ۲ متر، N تعداد مشاهدات سرعت باد ($U_2 > U_t$) در دوره مورد مطالعه، N_d^7 تعداد روزهای دوره مورد نظر، ρ چگالی هوا (kg/m^3) و g شتاب ناشی از گرانش (m/s^2) است. که داده‌های مورد نظر از سامانه گوگل ارث انجین و با استفاده از ERA5⁸ (قدرت تفکیک مکانی ۱۱ کیلومتر) استخراج می‌شوند. شکل ۳ عامل اقلیم و فاکتورهای آن را در خراسان رضوی نشان می‌دهد.



شکل ۳. الف- نقشه سرعت باد wf، ب- نقشه رطوبت خاک SW، ج- نقشه ضریب پوشش برف SD
د- نقشه عامل اقلیم WF

1. Maximum transport capacity
2. Weather factor
3. Erodible fraction
4. Soil crust factor
5. Soil moisture

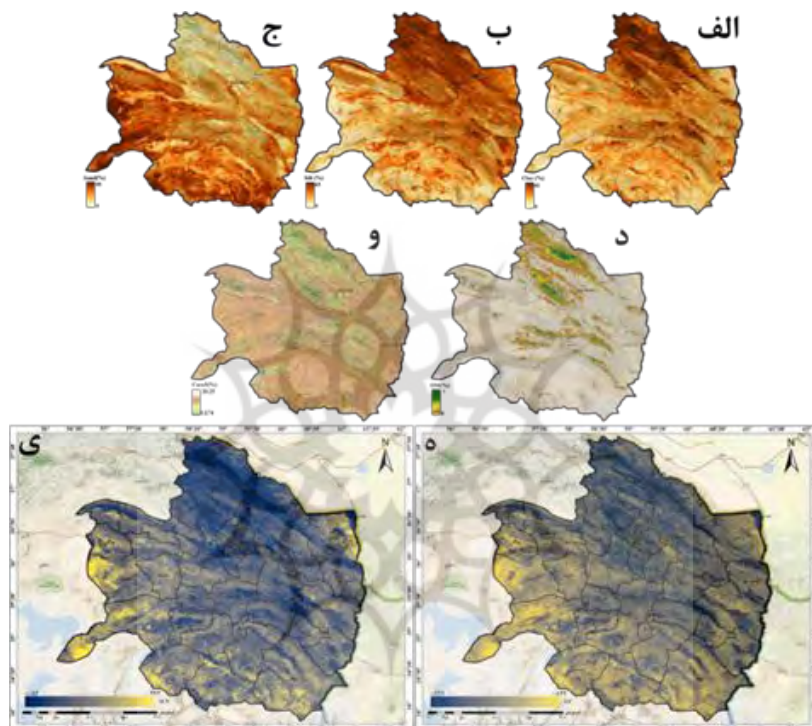
6. Snow depth
7. Number of days in the period
8. Fifth generation ECMWF atmospheric reanalysis of the global climate

جزء فرسایش پذیر (EF) و ضریب پوسته خاک (SCF) را می توان توسط روابط (۷ و ۸) به صورت زیر محاسبه کرد:

$$EF = \frac{29.09 + 0.31Sa + 0.17Si + 0.33 \frac{Sa}{Cl} - 2.59 OM - 0.95CaCO_3}{100} \quad (7)$$

$$SCF = \frac{1}{1 + 0.0066(Cl)^2 + 0.021(OM)^2} \quad (8)$$

که در آن مقدار ماسه (٪)، Si مقدار سیلت (٪)، Sa/Cl نسبت ماسه به رس (٪)، OM ماده آلی (٪)، $CaCO_3$ کربنات کلسیم (٪) و مقدار رس (٪) است. مجموعه داده موردنظر از پایگاه داده جهانی خاک همگن شده (HWS^1) و (OLM^2) (با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر) که بر اساس پیش بینی های صورت گرفته توسط یادگیری ماشین از بانک داده های پروفیل ها و نمونه های خاک است، استفاده می شود (شکل ۴).



شکل ۴. الف- درصد رس خاک، ب- درصد سیلت خاک، ج- درصد ماسه خاک، د- درصد مواد آلی خاک (OM)، ه- درصد کربنات کلسیم خاک ($CaCO_3$)، ه- نقشه عامل جزء فرسایش پذیر (EF)، ی- نقشه عامل ضریب پوسته خاک (SCF)

ضریب زبری خاک (K') را می توان با استفاده از رابطه (۹) به صورت زیر محاسبه کرد:

$$K' = \cos \alpha \quad (9)$$

که در آن α گرادیان شیب (برحسب درجه) است که می تواند توسط مدل رقومی ارتفاعی (DEM) محاسبه شود (شکل ۵). داده ی مدل رقومی ارتفاعی (DEM) از (NASA-SRTM) (با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر) با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین به دست می آید.

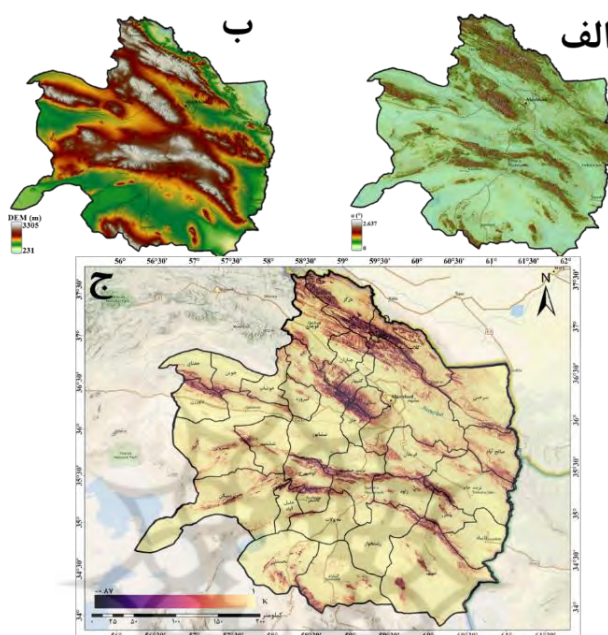
عامل پوشش گیاهی توسط رابطه (۱۰) به دست می آید:

$$C = e^{-0.0483(SC)} \quad (10)$$

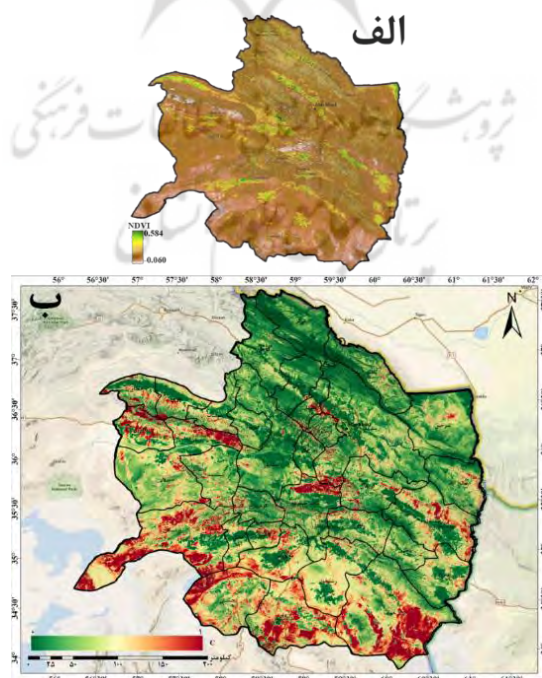
که در آن SC پوشش گیاهی به درصد است و توسط رابطه (۱۱) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$SC = \frac{(NDVI - NDVI_{soil})}{(NDVI_{veg} - NDVI_{soil})} \quad (11)$$

NDVIsoil مقدار NDVI محاسبه شده در یک پیکسل خاک بدون پوشش و NDVIveg حداکثر مقدار NDVI در منطقه مورد مطالعه است. مقدار NDVI در فرکانس تجمعی ۹۵٪ و ۵٪ به ترتیب نشان دهنده NDVIveg و NDVIsoil است. NDVI از طریق ماهواره MODIS (با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر) با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین به دست خواهد آمد. شکل (۶) شاخص نرمال شده و عامل پوشش گیاهی را نشان می‌دهد.



شکل ۵. الف- گرادیان شیب (a)، ب- مدل رقومی ارتفاع (DEM)، ج- نقشه عامل ضریب زبری خاک (K')



شکل ۶. الف- شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)، ب- نقشه عامل پوشش گیاهی (C)

۲-۳-۲- ارزیابی عملکرد مدل

به دلیل تنوع پوشش زمین و گستردگی منطقه، اندازه‌گیری زمینی فرسایش بادی برای کل منطقه بسیار دشوار است. علاوه بر این، در دو دهه گذشته، مطالعه میدانی اندکی در مورد فرسایش بادی در خراسان رضوی انجام شده است که بخشی مطالعات کانون‌های بحرانی فرسایش بادی است که با داده‌های جدید مورد تطابق قرار گرفت. با توجه به اینکه توفان گرد و غبار مشاهده شده روی زمین می‌تواند تناوب و شدت رخداد‌های فرسایش بادی را نشان دهد، از این‌رو از داده‌های برگرفته از ماهواره برای صحت‌سنجی پتانسیل فرسایش بادی خاک شبیه‌سازی شده توسط مدل RWEQ نیز استفاده شد. چندین محصول هواویز ماهواره‌ای وجود دارد که وضوح مکانی و زمانی متفاوتی دارند، مانند داده‌های CALIPSO Lidar Tropospheric Aerosol Profiles All Sky، داده‌های روزانه هواویز VIIRS/SNPP Deep Blue L3، داده‌های چند طول موجی AOD روزانه MODIS MO(Y)D08_M3 Terra (Aqua)، داده‌های عمق نوری هواویز زمینی Sentinel-5P NRTI AER AI و MODIS MCD19A2 Terra & Aqua MAIAC. با این حال، بیشتر داده‌های هواویز برگرفته از ماهواره، وضوح مکانی پایینی دارند و جهت مقایسه کمی مکانی کارایی لازم را ندارند (Lin et al., 2020). در این مطالعه، ما از مجموعه داده MODIS با استفاده از باندهای ۳۱، ۳۲ و ۲۰ برای محاسبه شاخص BDI استفاده شد. شاخص $(BADI^1)$ یک معیار ویژه استفاده شده در سنجش از دور برای شناسایی و ارزیابی حضور گرد و غبار یا ذرات معلق در جو است. شاخص گرد و غبار (BDI) داده‌های دمای روشنایی از تصاویر ماهواره‌ای را جهت افزایش دقت در تشخیص گرد و غبار و نظارت بر ویژگی‌های آن به کار می‌برد. BADI با تجزیه و تحلیل انتشارات حرارتی یا دمای روشنایی در طول موج‌های خاص در طیف الکترومغناطیس معمولاً در محدوده مادون قرمز عمل می‌کند. ذرات گرد و غبار در جو می‌توانند تأثیری بر روی نحوه انتشار تابش حرارتی سطح زمین داشته باشند و این تأثیر توسط داده‌های دمای روشنایی ضبط می‌شود. با تحلیل این تغییرات دما به همراه اطلاعات هواشناسی دیگر مانند الگوهای باد و رطوبت، BADI می‌تواند اطلاعات دقیق‌تر و جزئی‌تری در مورد حضور و خصوصیات گرد و غبار معلق ارائه دهد. استفاده از داده‌های دمای روشنایی (BDI) توانایی تشخیص و پیگیری توفان‌های گرد و غبار را افزایش دهد که آن را به یک ابزار ارزشمند در نظارت و پیش‌بینی این پدیده تبدیل می‌کند. به ویژه برای ارزیابی کیفیت هوا، پیش‌بینی آب و هوا و نظارت بر محیط زیست در مناطقی که تمایل به توفان‌های گرد و غبار و مسائل مرتبط با ذرات معلق دارند، حیاتی است. این روش قادر است نه تنها به طور مؤثر محل هسته‌های اصلی توفان‌های گرد و غبار را شناسایی کند، بلکه می‌تواند گرد و غبار را از زمین‌های لخت و ابرها تشخیص دهد. شاخص دمای روشنایی گرد و غبار (BDI) از داده‌های MODIS با استفاده از باندهای ۳۱، ۳۲ و ۲۰ حضور گرد و ذرات معلق در جو را تشخیص می‌دهد. اختلاف باند ۳۲ و ۳۱ گرد و غبار را مشخص می‌کند و اضافه کردن باند ۲۰ امکان محاسبه تراکم و شدت گرد و غبار را فراهم می‌کند. برای محاسبه این شاخص ابتدا (ΔT) تفاوت دما بین باندهای ۳۱ و ۳۲ (ΔT_{31-32}) رابطه (۱۲) و بین باندهای ۳۱ و ۲۰ (ΔT_{31-20}) رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود. این اطلاعات در مورد حضور گرد و ذرات و تراکم گرد و غبار ضروری است.

$$\Delta T_{31-32} = Tb_{31} - Tb_{32} \quad (12)$$

$$\Delta T_{31-20} = Tb_{31} - Tb_{20} \quad (13)$$

این تفاوت باعث جدایی گرد و غبار می‌شود، میزان این تفاوت برای گرد و غبار مثبت و برای سایر پدیده‌ها منفی است؛ بنابراین اعداد مثبت نشان‌دهنده وجود گرد و غبار در جو است. این تفاوت برای گرد و غبار غلیظ و با تراکم بیشتر عدد بزرگتری را نشان می‌دهد. در نهایت تفاوت‌های دمایی را ترکیب می‌کند و با وزن‌دهی مناسب به ΔT_{31-32} و ΔT_{31-20} تا یک مقدار یکپارچه BADI ایجاد می‌کند (رابطه ۱۴). این ترکیب به ایجاد الگوریتم خاص BADI منجر می‌شود.

$$BDI = (\Delta T_{31-32}) * (\Delta T_{31-20})^2 \quad (14)$$

مقدار آستانه خاص برای ΔT ممکن است بسته به منطقه و حساسیت محاسبات BADI به پدیده‌های گرد و غبار و ذرات معلق متغیر باشد. پژوهشگران معمولاً این مقادیر را بر اساس ویژگی‌های منطقه تنظیم می‌کنند. در این مطالعه یک مقدار آستانه صفر برای BDI تعیین کننده است و زمانی که BDI از این آستانه تجاوز می‌کند، نشان می‌دهد که گرد و غبار و ذرات در هوا حضور دارند و هر چقدر مقدار آن بیشتر باشد نشان‌دهنده تراکم بیشتر گرد و غبار است. با توجه به اینکه مکان‌های ابری این شاخص را تغییر می‌دهد

ابتدا با اعمال الگوریتم‌های مختلف، نقاط ابری از روی تصاویر حذف شدند و سپس با اعمال این الگوریتم بر روی تصاویر ماهواره‌ای، مقدار شاخص برای استان خراسان رضوی محاسبه گردید. این شاخص به صورت روزانه برای سال ۲۰۲۱ مجموعه داده هواویز دیگری به نام شاخص هواویز جذبی (AAI)، با وضوح مکانی ۰.۰۱ درجه، از داده‌های Sentinel-5P NRTI AER AI استخراج شد. شاخص‌های ماوراء بنفش آتروسول ابزار مناسبی است که اطلاعاتی را برای جذب آتروسول‌ها به نمایش می‌گذارد. به دلیل آلودگی پایین سطح خشکی در درون طول موج ماوراءبنفش، محدوده این طیف الکترومغناطیس برای آشکارسازی آتروسول بر روی خشکی مناسب است. مقایسه طیفی بین دو طول موج ماوراءبنفش برای محاسبه مقدار AI مناسب است. این کنتراست طیفی به دلیل تفاوت در رفتار جذبی آتروسول و پدیده‌های دیگر همچون انعکاس سطح زمین، پخش رالی، جذب گازی و ابر و پخش آتروسول را نمایان می‌کند (Graaf et al., 2005). در نتیجه مشاهدات ماهواره‌ای، شاخص آتروسول (AI) برای شناسایی منابع هوای آلوده بر روی کل کره زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد. تا انتقال آلاینده‌های هوا را در عرض قاره‌ها مشخص و کیفیت هوا و پیش‌بینی (آلودگی) را مدل‌سازی و بیان انرژی تابشی و واداشت و برهمکنش‌های اقلیم را مطالعه کند (Ahmad et al., 2006). شاخص آتروسول تفاوت بین کنتراست طیفی محاسبه شده یا مدل‌شده و اندازه‌گیری شده را در دو طول موج ماوراء بنفش نزدیک (۲۸۰-۳۱۵ و ۳۱۵-۴۰۰ نانومتر) نشان می‌دهد (Herman and Celarier., 1965). مقدار شاخص آتروسول به عمق نوری آتروسول، نوع آتروسول (آلوده پخش)، ارتفاع لایه آتروسول و دید ژئومتری بستگی دارد (Prospero et al., 2002). جذب آتروسول‌هایی همچون دود و گرد و غبارهای بیابانی دارای ارزش‌های مثبت در شاخص آتروسول هستند در صورتی که که پخش‌کننده‌های خالص و بدون قابلیت جذب دارای مقدار منفی هستند (Graaf et al., 2005)؛ بنابراین مقدارهای دارای ارزش منفی شاخص آتروسول ممکن است در نتیجه اشکال دیگری همچون ابرهای پر ارتفاع، دامنه طیفی انعکاس سطح زمین در میان طول موج‌های انعکاسی اتفاق بیفتند (Baddock et al., 2005). مقدارهای نزدیک صفر شاخص آتروسول وجود ابرها را نشان می‌دهند، در حالی که مقدارهای بیشتر از یک به طور تپیک متعلق به جذب آتروسول‌ها همچون ذرات دوده ناشی از آتش‌سوزی و گرد و غبارهای بیابانی یا معدنی هستند (Hsu et al., 1965). از آنجایی که Sentinel-5P در ۱۳ اکتبر ۲۰۱۷ پرتاب شد، مجموعه داده‌های هواویز آن در ۱۰ جولای ۲۰۱۸ منتشر شد؛ بنابراین، در این مطالعه ما از میانگین سالانه شاخص هواویز جذبی سال ۲۰۲۱ برای مقایسه با پتانسیل فرسایش بادی خاک استفاده شد.

۳- یافته‌ها

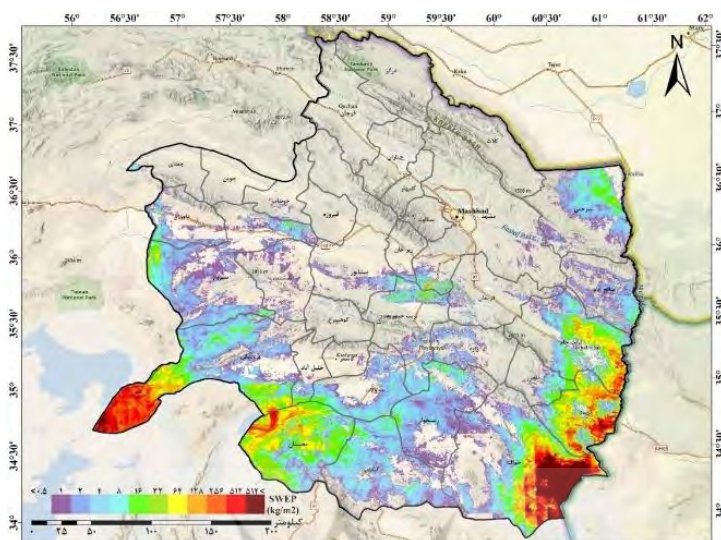
۳-۱- توزیع فضایی میانگین پتانسیل فرسایش بادی با استفاده از مدل RWEQ

توزیع فضایی فرسایش بادی در کل استان خراسان رضوی در شکل ۸ ارائه شده است. پتانسیل فرسایش بادی خاک تنوع مکانی قابل توجهی را نشان می‌دهد که دامنه آن بین $0-600 \text{ kg/m}^2$ در سال است. پتانسیل فرسایش بادی خاک در جنوب، شرق و جنوب غربی استان دارای پتانسیل بالای فرسایش بادی است که در این مناطق پوشش گیاهی و رطوبت خاک پایین‌تر از بخش‌های شمالی و مرکزی خراسان رضوی است. با توجه به شکل ۸ می‌توان دریافت که شهرستان‌های در معرض فرسایش شامل سرخس، صالح آباد، تربت جام، تایباد، خواف، رشتخوار، گناباد، بجستان، بردسکن و سبزوار است. ۱۰ درصد از مساحت کل استان (۱۱۹۹۱.۳۴۸ کیلومتر مربع) در وضعیت فوق بحرانی از لحاظ فرسایش بادی قرار دارند (پیش از ۲۵۶ کیلوگرم بر مترمربع). که از این میزان شهرستان خواف با میزان 3346.7697 کیلومتر مربع بیشترین مساحت در بین سایر شهرستان‌ها و به ترتیب بردسکن، بجستان، تایباد، تربت جام، باخرز و سرخس در رتبه‌های بعدی قرار دارند. بخش‌های شمالی استان به دلیل وجود رطوبت، بارندگی و پوشش گیاهی بیشتر و توپوگرافی نامنظم که مانع از به حداکثر رسیدن سرعت باد به آستانه فرسایش بادی می‌شود پتانسیل فرسایش به مراتب کمتری دارند.

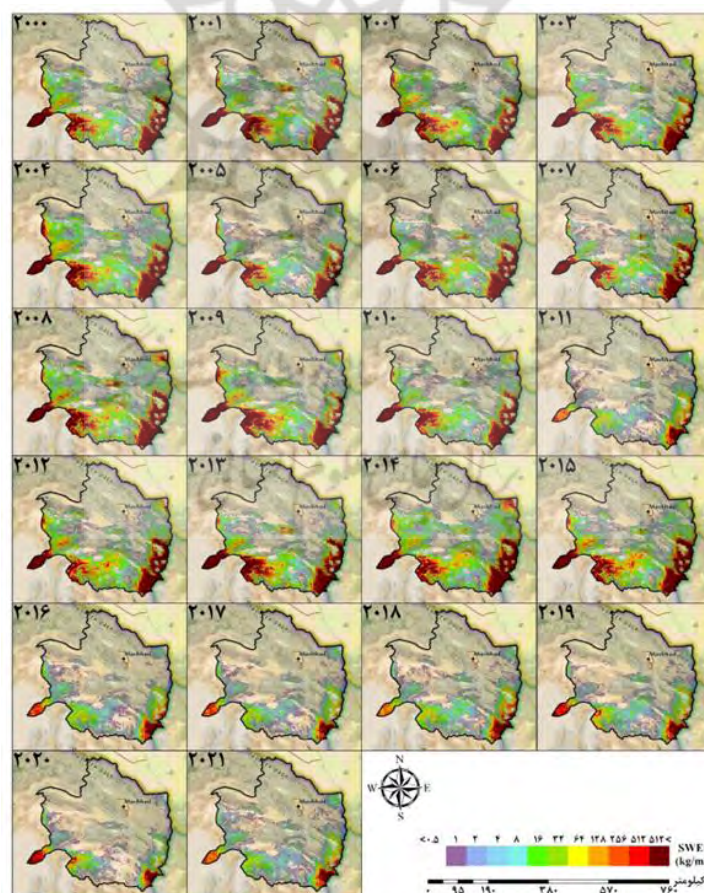
۳-۲- تغییرات مکانی و زمانی پتانسیل فرسایش بادی در خراسان رضوی

شکل ۹ توزیع میانگین سالانه پتانسیل فرسایش بادی در خراسان رضوی را در ۲۲ سال اخیر (۲۰۲۱-۲۰۰۰) نشان می‌دهد. در ۲۲ سال گذشته، شهرستان خواف یکی از فعال‌ترین منابع گرد و غبار محسوب می‌شود، شدیدترین منطقه فرسایش بادی در خراسان رضوی بوده است و پس از آن به ترتیب بردسکن، بجستان، تایباد، تربت جام، باخرز و سرخس در رتبه‌های بعدی قرار دارند، بیشترین میزان فرسایش بادی در سال ۲۰۰۷ و ۲۰۱۴ و کمترین مقدار آن مربوط به سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۲۰ است. علت افزایش پتانسیل فرسایش بادی در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۴ خشکسالی شدید در استان در طی این ۲ سال است که باعث افزایش میزان آتروسول‌های موجود در جو شده است (Broghni et al., 2015). شهرستان‌های شرقی تا جنوبی استان همچنین جنوب غربی بردسکن یکی از

فعال‌ترین منابع گرد و غبار محسوب می‌شود، شدیدترین منطقه فرسایش بادی در خراسان رضوی خاف بوده که ۱۶۹ هکتار (۱۷ درصد) از مساحت این شهرستان در کلاس آخر فرسایش بادی قرار می‌گیرد. به دلیل انقباض گسترده دریاچه نمک فصلی (پایا) در جنوب غربی بردسکن بستر خشک آن که تحت عنوان کویر نمکی نیز شناخته می‌شود، از انواع نمک‌ها و مواد شیمیایی پوشانده شده است.

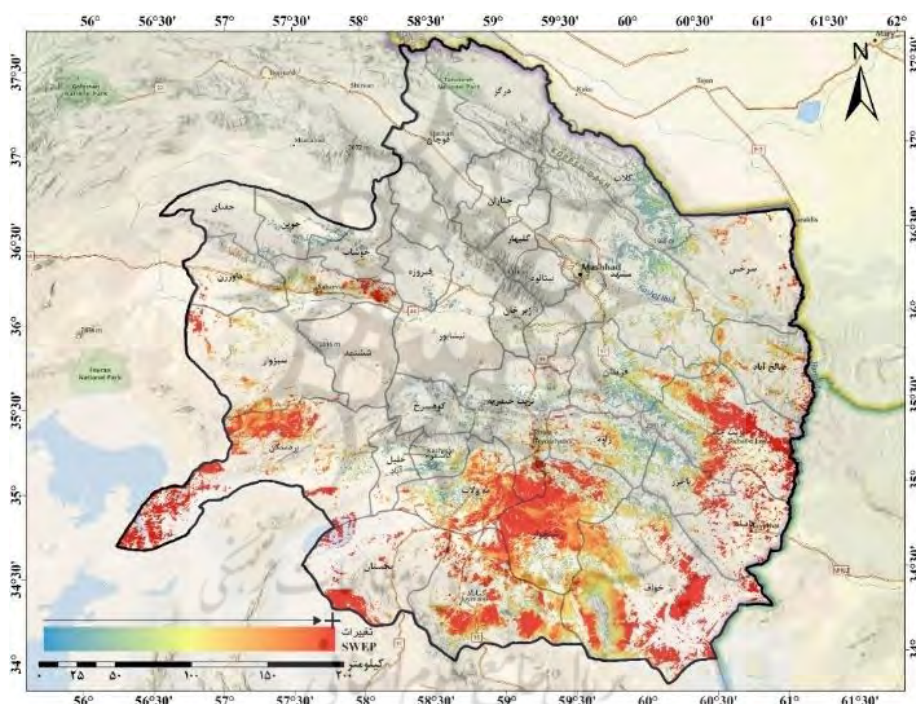


شکل ۷. نقشه میانگین پتانسیل فرسایش بادی خراسان رضوی از سال ۲۰۰۰-۲۰۲۱



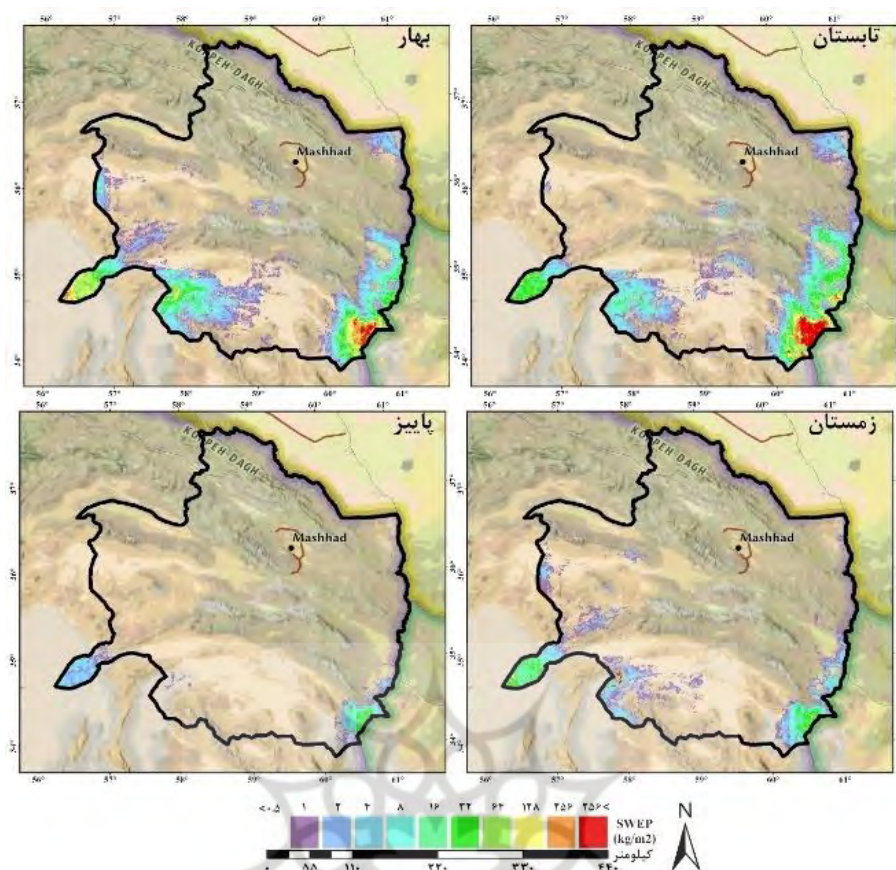
شکل ۸. تغییرات مکانی پتانسیل فرسایش بادی خاک (SWEP) در خراسان رضوی بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱

از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱، میانگین سالانه پتانسیل فرسایش بادی خاک ۲۴.۲۶ کیلوگرم بر متر مربع بود که کمترین مقدار آن در سال ۲۰۲۰ و بیشترین مقدار در سال ۲۰۰۷ رخ داد. همان‌طور که در بالا ذکر شد، به علت خشکسالی که حدود سال ۲۰۰۸ در خراسان رضوی اتفاق افتاد پتانسیل فرسایش در استان افزایش قابل توجهی را نشان داد و به همین ترتیب مساحت و شدت فرسایش بادی نیز از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ به طور چشمگیری افزایش یافته است (شکل ۹). همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود میزان پتانسیل فرسایش بادی در استان خراسان رضوی در سال‌های مختلف متفاوت است و مناطق مختلفی در سال‌های مختلف محل برداشت و تحت تأثیر گرد و غبار قرار می‌گیرند. در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲، ۲۰۰۸، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۴ این مدل در استان بالاترین میزان را نشان می‌دهد؛ اما به صورت منطقه‌ای می‌توان تغییرات میزان گرد و غبار را در مناطق مختلف مشاهده نمود. به عنوان مثال جنوب غرب استان در سال ۲۰۱۲ پتانسیل بالایی را داشته است، در حالی که در منطقه سرخس ۲۰۰۱، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴ پتانسیل بالاتری داشته است. مطابق شکل ۹، مناطق شمال شرق استان همان‌طوری که انتظار می‌رود از پوشش گیاهی بالاتری برخوردار هستند؛ بنابراین پتانسیل فرسایش بادی کمتری نسبت به منطقه پیرامون خود دارند. برای درک بهتر از تغییرات فضایی پتانسیل فرسایش بادی نقشه شیب تغییرات آن در طی ۲۲ سال با استفاده از رگرسیون خطی تهیه شده است (شکل ۱۰). بیشترین تغییرات مثبت فرسایش بادی در رشتخوار، مه ولات، کلات، زاوه، و تربت‌جام است و نشان می‌دهد شدت تخریب و از بین رفتن پوشش گیاهی در سال‌های اخیر در این شهرستان‌ها بیشتر بوده است.



شکل ۹. شیب (روند) تغییرات SWEP (۲۰۰۰-۲۰۲۱)

تغییرات فصلی پتانسیل فرسایش بادی خاک در خراسان رضوی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. اگرچه معمولاً با توزیع مکانی میانگین سالانه فرسایش همخوانی دارد؛ اما الگوی مکانی روند پتانسیل فرسایش در فصول مختلف متفاوت است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، در بهار و تابستان مساحت بیشتری از زمین در خراسان رضوی نسبت به سایر فصول تحت تأثیر فرسایش شدید بادی قرار گرفته‌اند (تابستان: $9.30 <$ بهار: $4.28 <$ زمستان: $1.34 <$ پاییز: 0.95 kg/m^2) علاوه بر این، فرسایش بادی آشکاری در چندین منطقه بیابانی معروف همچون سرخس، جنوب و شرق خواف، جنوب بجستان و پلایای بردسکن در فصل بهار وجود دارد. با توجه به تأثیر پوشش برف، فرسایش بادی کمتری در شمال خراسان رضوی در فصل زمستان وجود دارد. با این حال، سرعت باد در خاف و بردسکن در زمستان به طور قابل توجهی بیشتر از سایر فصول است. بنابراین، این مناطق در زمستان از پتانسیل فرسایش بیشتری برخوردار هستند. علاوه بر این، پتانسیل فرسایش بادی در تابستان مقدار قابل توجهی را در شرق خراسان رضوی نشان می‌دهد (شکل ۱۱).



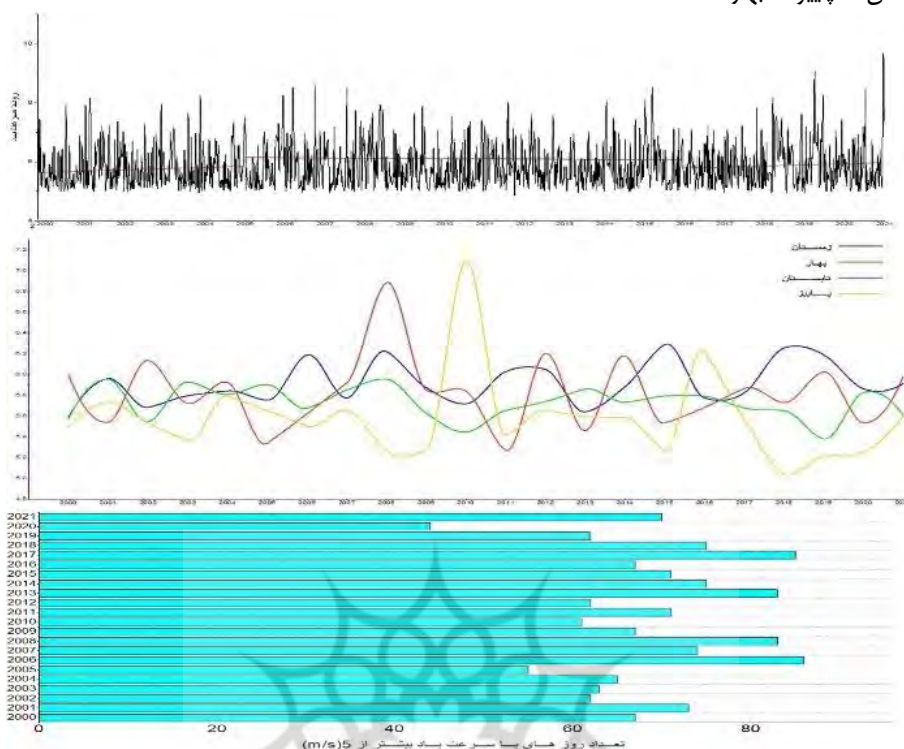
شکل ۱۰. تغییرات فصلی پتانسیل فرسایش در بهار (آوریل، می، ژوئن)، تابستان (جولای، آگوست، سپتامبر)، پاییز (اکتبر، نوامبر، دسامبر)، و زمستان (ژانویه، فوریه، مارس) در دوره بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱

۳-۳- اثرات تغییرات سرعت باد بر پتانسیل فرسایش بادی

تغییرات سرعت باد به عنوان عاملی کلیدی در فرسایش بادی، نقش حیاتی در پویایی فرسایش بادی دارد. در مطالعات متعددی گزارش شده است که یک روند کاهشی در سرعت جهانی باد نزدیک به سطح از سال ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۰ وجود داشته است (McVicar et al., 2008; Guo et al., 2011; Zhang et al., 2019). با این حال، در مطالعه‌ای که به تازگی صورت گرفته، افزایش سرعت جهانی باد را در طی یک سال خاص توصیف می‌کند (Zeng et al., 2019). دریافتند که پس از چندین دهه آرامش جهانی زمین، سرعت باد از سال ۲۰۱۰ در سراسر جهان به سرعت افزایش یافته است. اگرچه آن‌ها تغییرات زمانی جهانی سرعت باد را بررسی کرده‌اند؛ اما به دلیل نیاز به مطالعات محلی تغییرات اقلیمی، مطالعات بیشتری مورد نیاز است.

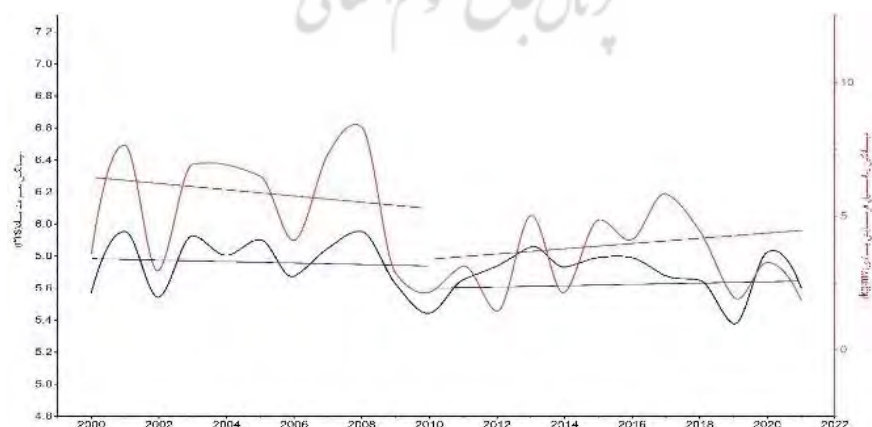
برای درک بهتر تغییرات زمانی سرعت باد، می‌توان داده‌های سری زمانی سرعت باد را با یک مدل تجزیه سری زمانی به مؤلفه‌های فرعی تجزیه کرد. در این مطالعه، ما از یک مدل تجزیه ضربی سری زمانی برای داده‌های سرعت باد اندازه‌گیری شده (ERA5) استفاده شد. محاسبه این مدل شامل موارد زیر بود (Kendall et al., 1983). مؤلفه روند ابتدا با استفاده از روش میانگین متحرک تعیین شد. سپس سرعت‌های باد بیشتر از حداقل میزان جهت فرسایش خاک ۵ m/s جدا و مؤلفه فصلی با میانگین‌گیری تمام دوره‌ها برای هر واحد زمانی محاسبه شد و در نهایت تعداد کل روزهایی که سرعت باد از ۵ m/s بیشتر بود در هر سال مشخص شد. شکل ۱۲ نشان می‌دهد که داده‌های سری زمانی به مؤلفه‌های فرعی مختلفی (مؤلفه روند، مؤلفه فصلی و مؤلفه تعداد روزها با سرعت باد بیشتر از ۵ m/s تجزیه شدند. با توجه به مؤلفه روند سری زمانی، متوجه شدیم که طی دوره زمانی ۲۰۰۵-۲۰۰۰ روند افزایشی و در دوره زمانی ۲۰۰۶-۲۰۱۶ دارای نوسانات ثابت یا یک روند نزولی جزئی است. علاوه بر این، سرعت باد روند صعودی را پس از سال ۲۰۱۶ از خود نشان می‌دهد. جهت مشخص نمودن سال‌هایی که باد به حداقل جهت فرسایش در منطقه نیاز دارد تعداد روزهایی که در هر سال سرعت باد بیشتر از ۵ m/s بود مشخص شد، سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۰۸، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۷ تعداد روزهای

بیشتری سرعت باد فراتر از ۵ m/s داشتند. سری زمانی مؤلفه‌های فصلی نشان داد که بیشترین مقدار میانگین روزانه سرعت باد بیشتر از ۵ m/s در فصل تابستان و کمترین مقدار در بهار رخ داده است. رابطه میانگین روزانه سرعت باد در فصول مختلف به صورت تابستان < زمستان < پاییز < بهار است.



شکل ۱۱. تجزیه سری زمانی میانگین اندازه‌گیری زمینی سرعت باد (GMWS) در خراسان رضوی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱

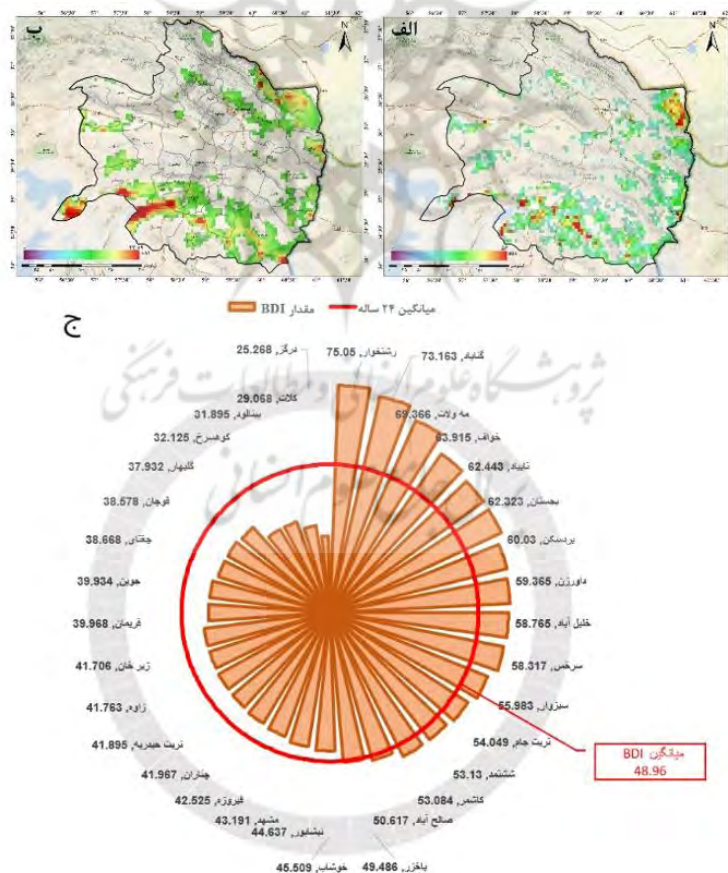
بر اساس نتایج تحقیقات ذکر شده در بالا، سرعت باد به‌عنوان عامل غالب فرسایش بادی تعیین شد. بنابراین، در این مطالعه، ما تأثیر سرعت باد را به عنوان یک عامل تغییر اقلیم بر فرسایش بادی مورد بررسی قرار دادیم. بر اساس داده‌های سرعت باد، ما تأثیر تغییرات سرعت باد را بر فرسایش بادی بررسی کردیم. شکل ۱۳ همبستگی مثبت قوی و معنادار ($p < 0.001$, $r = 0.78$) را بین میانگین سرعت باد و میانگین SWEP را نشان می‌دهد. با توجه به خط روند این دو مجموعه از داده‌های سری زمانی، نقطه عطف تقریباً بین سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ رخ داده است. در حالی که در طول دوره بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۱ روند افزایشی بوده است. میانگین SWEP و سرعت باد نیز در دوره بین سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۱۰ روند کاهشی را نشان داد. بر اساس مطالعات فعلی، منطقی به نظر می‌رسد که روند گرد و غبار را با روند اقلیمی، به ویژه معکوس شدن آرامش جهانی زمینی را مرتبط بدانیم.



شکل ۱۲. میانگین سرعت باد و میانگین پتانسیل فرسایش بادی در خراسان رضوی از سال ۲۰۰۰ تا سال ۲۰۲۱

۳-۴- اعتبارسنجی

به دلیل عدم وجود سری‌های زمانی طولانی و طیف گسترده‌ای از داده‌های فرسایش بادی اندازه‌گیری شده زمینی در خراسان رضوی، اعتبارسنجی مدل RWEQ با چالش‌هایی روبه‌رو است. علاوه بر این، به دلیل وسعت زیاد و شرایط پیچیده زمین، تقریباً هیچ مطالعه قبلی میدانی در رابطه با فرسایش بادی در خراسان رضوی انجام نشده است. با توجه به اینکه بیشتر توفان‌های گرد و غبار محلی ناشی از فرسایش بادی سطحی در خراسان رضوی است، شاخص‌های مبتنی بر ماهواره می‌تواند به عنوان یک پارامتر جایگزین برای ارزیابی عملکرد مدل فرسایش بادی مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین، ما از شاخص‌های BDI و AAI برای ارزیابی قابلیت اطمینان توزیع مکانی پتانسیل فرسایش بادی استفاده کردیم. شکل ۱۴ الگوی مکانی BDI و AAI در سال ۲۰۲۱ را نشان می‌دهد. در شاخص AAI، میزان بیشتر از ۰/۲ نشان‌دهنده گرد و غبار است؛ ولی گرد و غبار منطقه‌ای که منشأ محلی دارند مانند آنچه برای استان اتفاق می‌افتد میزان این شاخص برای توفان‌های گرد و غبار ۰/۷ در نظر گرفته شد. بنابراین این شاخص برای کل روزهای سال محاسبه گردید و روزهایی که گرد و غبار بیشتر از این مقدار داشتند با هم جمع شدند تا فراوانی حضور گرد و غبار محاسبه گردد. این فراوانی بر اساس روزهای سال بین یک تا ۳۶۵ روز متغیر است. با مقایسه‌ی نتایج این دو نقشه با پتانسیل فرسایش بادی در خراسان رضوی، می‌بینیم که مناطق مرزی از شرق استان تا جنوب استان بیشترین میزان فرسایش و گرد و غبار را در خراسان رضوی دارند. اگرچه تأیید مقدار پتانسیل فرسایش از این طریق دشوار است؛ اما نتایج مقایسه به دست آمده از منظر الگوهای توزیع مکانی نشان داد که داده‌های پتانسیل فرسایش مبتنی بر RWEQ در خراسان رضوی قابل اعتماد هستند. بررسی این شاخص‌ها نشان می‌دهد که مناطق مختلفی از منطقه تحت تأثیر میزان متفاوتی از گرد و غبار قرار می‌گیرند. همان‌طور که انتظار می‌رفت بیشترین پایداری گرد و غبار در مناطق سرخس و قسمت‌های جنوبی و جنوب غربی استان تا نزدیک به ۵۶ روز را این مناطق تجربه می‌کنند. قسمت‌های شمالی و شمال شرقی استان به دلیل رطوبت و بارندگی بیشتر در منطقه میزان ماندگاری گرد و غبار کاهش چشمگیری داشته است.



شکل ۱۳. الف- فراوانی حضور شاخص (BDI)، ب- فراوانی حضور شاخص (AAI)، ج- میانگین شاخص (BDI) در شهرستان‌های خراسان رضوی

۴- بحث و نتیجه گیری

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تفاوت‌های مکانی و زمانی قابل توجهی در فرسایش بادی در خراسان رضوی وجود دارد. با توجه به عرض جغرافیایی، مقادیر پتانسیل فرسایش بادی عمدتاً در بخش جنوب غربی و شرقی خراسان رضوی که پوشش گیاهی کم و خاک سطحی سست‌تر است، توزیع گسترده‌تری دارند. این در حالی است که پتانسیل فرسایش بادی خاک در قسمت‌های شمالی کمتر است. همچنین به دلیل زونالیته عرض جغرافیایی و زونالیته عمودی، بارش در این مناطق بیشتر از سایر نقاط خراسان رضوی است و دما در این مناطق کمتر است. بنابراین، رطوبت بیشتر خاک ناشی از تبخیر و تعرق کمتر، از میزان فرسایش بادی تا حدودی می‌کاهد. علاوه بر این، نتایج ما نشان می‌دهد که پتانسیل فرسایش بادی خاک دارای تغییرات فصلی روشنی است. زمین‌های در معرض تهدید فرسایش بادی بیشترین گسترش خود را در فصل بهار و تابستان دارد. با توجه به اینکه زمان وزش بادهای فرساینده، گرمای تابش خورشیدی در طول و عرض جغرافیایی مختلف، دوره ذوب برف در مناطق مختلف خراسان رضوی متفاوت است. مناطق شدید فرسایش بادی از جنوب شرقی و غربی خراسان رضوی (خواف و بردسکن) به میانه‌های خراسان رضوی (تایباد، تربت‌جام، سرخس و بجستان) در طول تابستان منتقل می‌شود. با این حال، به دلیل شرایط خاص هواشناسی در مناطق خاصی از خراسان رضوی، مانند بخش‌های غربی سبزوار و داورزن، فرسایش بادی بیشتری در بهار رخ می‌دهد تا تابستان. شدیدترین مقدار سرعت باد سطحی در خراسان رضوی در فصل تابستان وجود داشت، این نتیجه نشان می‌دهد که سرعت باد نقش کلیدی در توزیع مکانی پتانسیل فرسایش بادی خاک دارد.

تغییرپذیری سرعت باد، مانند پدیده‌های آرامش باد یا معکوس شدن آن که عامل اصلی فرسایش بادی است، مسئول بیشتر تغییرات مکانی - زمانی فرسایش بادی در خراسان رضوی است. اگرچه آرامش جهانی زمین در بسیاری از پژوهش‌ها به اثبات رسیده؛ اما بیشتر این مطالعات تنها تغییرات سرعت جهانی یا منطقه‌ای باد را از دهه ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ بررسی کرده‌اند و تعداد کمی از آن‌ها به تغییرات اخیر سرعت باد (پس از سال ۲۰۱۰) پرداخته‌اند (McVicar et al., 2008, Guo et al., 2011, Zhang et al., 2019, Azorin et al., 2018). با توجه به چندین مجموعه داده گواری اقلیمی (ERA5)، ما نقطه عطفی از آرامش باد را در دوره ۲۰۱۰-۲۰۱۱ در خراسان رضوی یافتیم. این یافته توسط مطالعات دیگری تأیید شد که در آن گزارش شده که آرامش جهانی زمین در چند دهه گذشته بازگشته است و از سال ۲۰۱۰ به سرعت افزایش یافته است (McVicar et al., 2015, Zeng et al., 2019, Kim et al., 2015, al., 2008). این مطالعه ثابت می‌کند که در واقع نتیجه، یک همبستگی مثبت قوی و معنادار ($r = 0.78$) بین میانگین سرعت باد و میانگین پتانسیل فرسایش بادی خاک ($p < 0.001$) نشان می‌دهد. در حالی که بر همگان روشن است که بازگشت شدت سرعت باد جهانی برای صنعت تولید برق بادی برای آینده نزدیک مفید است؛ اما این مطالعه نشان می‌دهد که فعالیت شدیدتری از فرسایش بادی در خراسان رضوی رخ داده است.

در این مطالعه، مدل RWEQ به عنوان یک مدل فرسایش بادی در بستر محاسبات ابری گوگل ارث انجین مورد استفاده قرار گرفت. در مقایسه با بسترهای محاسباتی محلی، این ابزار می‌تواند حجم زیادی از داده‌های مکانی را در زمان کوتاهی پردازش کند، به این معنی که قدرت پردازش آن محدود به زمان و مکان نمی‌شود؛ بنابراین، نیازی به صرف زمان زیاد برای دانلود، پیش‌پردازش و اجرای مدل داده‌های مکانی وجود ندارد که این می‌تواند زمان مورد نیاز برای تهیه نقشه فرسایش بادی که به طور بالقوه عملی طولانی مدت است را تا حد زیادی کوتاه نماید. همان‌طور که در بالا ذکر شد، RWEQ امکان پایش فرسایش بادی را در مناطق در حال توسعه فاقد داده‌های قابل پایش در محل فراهم می‌کند. در همین حال، بستر گوگل ارث انجین امکان انتشار نتایج پژوهشگران را برای تصمیم‌گیرندگان و حتی عموم آسان‌تر می‌کند. بنابراین، این کار نسبت به مطالعات قبلی در مورد فرسایش بادی، ارزش کاربردی بیشتری برای تصمیم‌گیرندگان دارد.

RWEQ یک مدل تجربی مبتنی بر فرایند، در مقیاس میدانی است که می‌تواند فرسایش بادی را به صورت کمی برآورد کند. با این حال، RWEQ در ابتدا برای منطقه غرب میانه ایالات متحده ارائه شد. بنابراین، همچنان محدودیت‌هایی را در مناطق دیگر دارد. اگرچه مهم‌ترین پارامترهای ورودی در این مطالعه حفظ شد؛ اما برخی داده‌های مورد نیاز از برخی پارامترها در پلتفرم‌های گوگل ارث انجین موجود نیست. بنابراین، چندین عامل برای شبیه‌سازی مؤثرتر و دقیق‌تر فرسایش بادی در مقیاس جهانی ساده‌سازی شد. داده‌های رطوبت خاک برای شبیه‌سازی اینکه چگونه رطوبت سطح زمین بر سرعت باد لازم برای فرسایش خاک تأثیر می‌گذارد استفاده شد. علاوه بر این، کسینوس گرادیان شیب که توسط مدل رقومی ارتفاع (DEM) محاسبه شد برای ضریب زبری خاک

استفاده شد. از سوی دیگر، فقط از داده‌های مرتبط با فرسایش بادی مانند داده‌های سنجش از راه دور برای صحت‌سنجی پتانسیل فرسایش بادی در خراسان رضوی استفاده شد؛ اما هنوز این‌گونه داده‌ها در مقیاس جهانی دارای عدم قطعیت است. خراسان رضوی که در زمره شدیدترین مناطق واجد فرسایش بادی است، از نظر مطالعات مدل‌سازی فرسایش بادی به دلیل نبود داده‌های اندازه‌گیری شده برای این منطقه دچار محدودیت‌هایی است. بنابراین، برای انجام مطالعات صحت‌سنجی باید داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی از میزان تلفات خاک در مقیاس جهانی به دست آید.

در این مطالعه، یک الگوریتم خودکار برای تهیه نقشه فرسایش بادی با استفاده از پلتفرم گوگل ارث انجین برای پردازش چندین ترابایت داده مکانی و زمانی پتانسیل فرسایش بادی به‌صورت سالانه و فصلی در خراسان رضوی برای ۲۲ سال (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱) ایجاد شد. با توجه به روش‌های رایج، RWEQ نیازی به داده‌های اندازه‌گیری زمینی وجود ندارد که به ویژه در کشورهای در حال توسعه یا مناطق کم جمعیت که نیاز به نیروی انسانی و منابع زیادی برای اندازه‌گیری زمینی دارند بسیار کارا است. با این حال، بر اساس پلتفرم محاسبات ابری، گوگل ارث انجین از مجموعه داده‌های اقلیمی داده‌های ویژگی‌های خاک، داده‌های پوشش گیاهی، داده‌های عوارض زمین و سایر داده‌های زیرسطحی برای تولید خودکار محصولات بالقوه فرسایش بادی خاک NRT با وضوح مکانی بالا استفاده می‌کند. پس از آن با استفاده از AAI و BDI مبتنی بر ماهواره، نتایج به دست آمده اعتبارسنجی شدند که بر دقت این مدل جهت تهیه نقشه کمی فرسایش بادی تأکید می‌کند. این روش ایده‌های جدیدی را برای تهیه و استفاده از مدل‌های تجربی مبتنی بر داده‌های مکانی و محاسبات با عملکرد بالا ارائه می‌دهد. با توجه به مقایسه داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های پتانسیل فرسایش، سرعت باد عامل اصلی ایجاد فرسایش بادی است ($p < 0.001$, $r = 0.78$). به واسطه تغییر سرعت باد، پتانسیل فرسایش بادی خاک ابتدا کاهش و در طول سال ۲۰۱۱ افزایش یافت. از منظر پراکنش زمانی و مکانی، به دلیل پراکندگی پوشش گیاهی کم و شرایط خاص اقلیمی، شهرستان‌های جنوبی و جنوب شرقی و غربی استان بیشترین تأثیر را از فرسایش بادی، به ویژه در شهرستان خواف و بردسکن را دارند. همچنین دوره فرسایش بادی شدید خراسان رضوی در فصل تابستان و بهار رخ داد. از طرف دیگر ترسالی و خشکسالی میزان فرسایش بادی را تغییر می‌دهد به طوری که سال ۲۰۲۰ کمترین مقدار به دلیل ترسالی و بیشترین مقدار در سال ۲۰۰۸ به علت خشکسالی این دوره رخ داده است؛ اما روند تغییرات به خصوص افزایشی بیشتر مناطق جنوبی از جمله شهرستان مهاباد و رشتخوار را در بر گرفته است و این نشان‌دهنده این است که در سالیان جدید مناطق جدیدی به مناطق فرسایشی افزوده شده است.

۵- سپاس‌گزاری

این مقاله برگرفته از طرح شماره ۲۱۵۳۱۲-۱۴۷۷۳ با حمایت‌های مادی و معنوی سازمان مدیریت برنامه‌ریزی استان خراسان رضوی و طرح شماره ۹۹۰۰۳۹۸۴ با حمایت‌های مادی بنیاد علم ایران است که بدین‌وسیله از آن‌ها تشکر و قدردانی می‌گردد.

۶- فهرست منابع

- باعقیده، محمد و ضیائی، پرویز. (۱۳۹۰). بررسی امکان استفاده از شاخص پوشش گیاهی NDVI در تحلیل خشکسالی‌های استان اصفهان. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۲(۴)، ۱-۱۶.
- بروغنی، مهدی، مرادی، حمیدرضا و زنگنه اسدی، محمدعلی. (۱۳۹۴). پهنه‌بندی و تعیین بهترین شاخص خشکسالی در استان خراسان رضوی. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۶(۱۹)، ۷۰-۸۴.
- سیما پورهایمی، مهدی بروغنی، ابوالقاسم امیراحمدی، محمدعلی زنگنه، مهدی صالحی، (۱۳۹۸). اولویت‌بندی مناطق برداشت گرد و غبار با استفاده از مدل‌های آماری (مطالعه موردی: خراسان رضوی)، نشریه مرتع و آبخیزداری، ۷۲(۲)، ۳۴۳-۳۵۸.
- سیما پورهایمی، مهدی بروغنی، محمد علی زنگنه اسدی، ابوالقاسم امیراحمدی، (۱۳۹۴). تحلیل ارتباط پوشش گیاهی بر وقوع تعداد گرد و غبار استان خراسان رضوی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور، نشریه سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۶(۴)، ۳۳-۴۵.

References

- Ahmad, S. P., Torres, O., Bhartia, P., Leptoukh, G., & Kempler, S. (2006). Aerosol index from TOMS and OMI measurements. 86th AMS Annual Meeting.
- Azarin-Molina, C.; Rehman, S.; Guijarro, J.A.; McVicar, T.R.; Minola, L.; Chen, D.; Vicente-Serrano, S.M. Recent trends in wind speed across Saudi Arabia, 1978–2013: A break in the stilling. *Int. J. Climatol.* 2018, 38, e966–e984. <https://doi.org/10.1002/joc.5423>
- Baddock, M. C., Bullard, J. E., & Bryant, R. G. (2009). Dust source identification using MODIS: A comparison of techniques applied to the Lake Eyre Basin, Australia. *Remote Sensing of Environment*, 113(7), 1511–1528. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.03.002>
- Bagheeda, 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?lang=en [In Persian]
- Bilbro J D, Fryear D W, 1994. Wind erosion losses as related to plant silhouette and soil cover. *Agronomy Journal*, 86(3): 550–553. doi: 10.2134/agronj 1994.00021962008600030017x
- Borrelli, P.; Lugato, E.; Montanarella, L.; Panagos, P. A New Assessment of Soil Loss due to Wind Erosion in European Agricultural Soils Using a Quantitative Spatially Distributed Modelling Approach. *Land Degrad. Dev.* 2017, 28, 335–344. <https://doi.org/10.1002/ldr.2588>
- Borrelli, P.; Robinson, D.A.; Panagos, P.; Lugato, E.; Yang, J.E.; Alewell, C.; Wuepper, D.; Montanarella, L.; Ballabio, C. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015–2070). *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2020, 117, 21994. <https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117>
- Broghni, M., Moradi, H. R., and Zanganeh Asadi, M. (2015). Zoning and determination of the best drought index in Razavi Khorasan province. *Geographical Studies of Dry Areas*, 6(19), 70-84. <https://www.magiran.com/p1478257> [In Persian]
- Chasek, P.; Akhtar-Schuster, M.; Orr, B.J.; Luise, A.; Rakoto Ratsimba, H.; Safriel, U. Land degradation neutrality: The science-policy interface from the UNCCD to national implementation. *Environ. Sci. Policy* 2019, 92, 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.11.017>
- Chi, W.; Zhao, Y.; Kuang, W.; He, H. Impacts of anthropogenic land use/cover changes on soil wind erosion in China. *Sci. Total Environ.* 2019, 668, 204–215. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.015>
- De Graaf, M., Stammes, P., Torres, O., & Koelemeijer, R. B. A. (2005). Absorbing Aerosol Index: Sensitivity analysis, application to GOME and comparison with TOMS. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D1). <https://doi.org/10.1029/2004JD005178>
- De Leeuw, Gerrit, Cheng Fan, Zhengqiang Li, Jiantao Dong, Yinna Li, Yang Ou & Sifeng Zhu. 2022. Spatiotemporal variation and provincial scale differences of the AOD across China during 2000–2021. *Atmospheric Pollution Research* 13.101359. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101359>
- De Vries, J.; Voors, R.; Barend, O.; Jos, D.; Pepijn, V.; Antje, L.; Quintus, K.; Ruud, H.; Ilse, A. TROPOMI on ESA's Sentinel 5p ready for launch and use. *Proc. SPIE* 2016. <https://doi.org/10.1117/12.2240839>
- Duniway, M.C.; Pfennigwerth, A.A.; Fick, S.E.; Nauman, T.W.; Belnap, J.; Barger, N.N. Wind erosion and dust from US drylands: A review of causes, consequences, and solutions in a changing world. *Ecosphere* 2019, 10, e02650. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2650>
- Ect Using an Optimized Artificial Neural Network. *Remote Sens.* 2018, 10, 1022.
- Fenta, A.A.; Tsunekawa, A.; Haregeweyn, N.; Poesen, J.; Tsubo, M.; Borrelli, P.; Panagos, P.; Vanmaercke, M.; Broeckx, J.; Yasuda, H.; et al. Land susceptibility to water and wind erosion risks in the East Africa region. *Sci. Total Environ.* 2020, 703, 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. RWEQ: Improved wind erosion technology. *J. Soil Water Conserv.* 2000, 55, 183. <https://doi.org/10.1080/00224561.2000.12436392>
- Fryrear, D.; Sutherland, P.; Davis, G.; Hardee, G.; Dollar, M. Wind erosion estimates with RWEQ and WEQ. In *Proceedings of the 10th International Soil Conservation Organization Meeting*; Purdue University and USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory: West Lafayette, IN, USA, 2001; pp. 760–765.
- Ge, Y.; Abuduwaili, J.; Ma, L. Lakes in Arid Land and Saline Dust Storms. *E3s Web Conf.* 2019, 99, 01007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199901007>
- Guo, H.; Xu, M.; Hu, Q. Changes in near-surface wind speed in China: 1969–2005. *Int. J. Climatol.* 2011, 31, 349–358. <https://doi.org/10.1002/joc.2091>

- Hamidianpour, M., Jahanshahi, S. M. A., Kaskaoutis, D. G., Rashki, A., & Nastos, P. G. (2021). Climatology of the Sistan Levar wind: Atmospheric dynamics driving its onset, duration and withdrawal. *Atmospheric Research*, 260, 105711. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105711>
- Han, X., Chang, C., Guo, Z., Yin, S., Li, J., Li, H., Wang, R., & Li, Q. (2023). Comparison of deterministic wind speed generation models for wind erosion modeling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 334, 109438. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109438>
- Herman, J.R. and Celarier, E. (1997) Earth Surface Reflectivity Climatology at 340-380 nm from TOMS Data. *Journal of Geophysical Research*, 102, 28003-28011. <https://doi.org/10.1029/97JD02074>
- Hsu, N. C., J. R. Herman, O. Torres, B. N. Holben, D. Tanre, T. F. Eck, A. Smimov, B. Chatenet, and F. Lavenu (1999), Comparison of the TOMS aerosol index with Sun-photometer aerosol optical thickness: Results and applications, *J. Geophys. Res.*, 104, 6269– 6280. <https://doi.org/10.1029/1998JD200086>
- Huang, D.K.; Xin-Qing, L.; Wei, J.; Zhao, Y.L.; Wen, C.; Ding, W. Geographic variation of carbonate content and pH in surface soil in East Central Asia: Significance as climate proxies. *Geochimica* 2008, 37, 129–138.
- Jafari, Reza, Hossein Bashari & Mostafa Tarkesh. 2017. Discriminating and monitoring rangeland condition classes with MODIS NDVI and EVI indices in Iranian arid and semi-arid lands. *Arid Land Research and Management* 31.94-110. <https://doi.org/10.1080/15324982.2016.1224955>
- Jarrah, Mahboube, Sonia Mayel, John Tatarko, Roger Funk & Katrin Kuka. 2020. A review of wind erosion models: Data requirements, processes, and validity. *CATENA* 187.104388. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104388>
- Jiang, L.; Xiao, Y.; Zheng, H.; Ouyang, Z. Spatio-temporal variation of wind erosion in Inner Mongolia of China between 2001 and 2010. *Chin. Geogr. Sci.* 2016, 26, 155–164. <https://doi.org/10.1007/s11769-016-0797-y>
- Jiang, C.; Liu, J.; Zhang, H.; Zhang, Z.; Wang, D. China's progress towards sustainable land degradation control: Insights from the northwest arid regions. *Ecol. Eng.* 2019, 127, 75–87. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.11.014>
- Joint Research Centre; European Soil Data Centre. Wind Erosion. Available online: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/wind-erosion> (accessed on 21 July 2020).
- Kalantari, Z.; Ferreira, C.S.S.; Keesstra, S.; Destouni, G. Nature-based solutions for flood-drought risk mitigation in vulnerable urbanizing parts of East-Africa. *Curr. Opin. Environ. Sci. Health* 2018, 5, 73–78. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.06.003>
- Kendall, M.K.; Stuart, A. The Advanced Theory of Statistics. *J. R. Stat. Soc.* 1983, 3, 410–414.
- Kim, J.; Paik, K. Recent recovery of surface wind speed after decadal decrease: A focus on South Korea. *Clim. Dyn.* 2015, 45, 1699–1712. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2546-9>
- Lal, R. Soil degradation and global food security: A soil science perspective. In *Land Quality, Agricultural Productivity, and Food Security: Biophysical Processes and Economic Choices at Local, Regional, and Global Levels*; Wiebe, K., Ed.; Edward Elgar Publishing: London, UK, 2003; pp. 16–35. <https://doi.org/10.4337/9781781956977.00008>
- Lee, S.; Pinhas, A.; Alexandra, C.A. Aerosol pattern changes over the dead sea from west to east—Using high-resolution satellite data. *Atmos. Environ.* 2020, 117737. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117737>
- Lin, J.; Guan, Q.; Pan, N.; Zhao, R.; Yang, L.; Xu, C. Spatiotemporal Variations and Driving Factors of the Potential Wind Erosion Rate in the Hexi Region. *Land Degrad. Dev.* 2020. <https://doi.org/10.1002/ldr.3702>
- Liu, S.; Zhang, S.; Wu, J.; Pang, X.; Yuan, D. The relationship between soil pH and calcium carbonate content. *Soil* 2002, 5. <https://doi.org/10.11766/trxb201605140243>
- McVicar, T.R.; Van Niel, T.G.; Li, L.T.; Roderick, M.L.; Rayner, D.P.; Ricciardulli, L.; Donohue, R.J. Wind speed climatology and trends for Australia, 1975–2006: Capturing the stilling phenomenon and comparison with near-surface reanalysis output. *Geophys. Res. Lett.* 2008, 35. <https://doi.org/10.1029/2008GL035627>
- Oldeman, L. The Global Extent of Soil Degradation; ISRIC: Wageningen, The Netherlands, 1994; pp. 19–36. <http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/299739>
- Ouyang, Z.; Zheng, H.; Xiao, Y.; Polasky, S.; Liu, J.; Xu, W.; Wang, Q.; Zhang, L.; Xiao, Y.; Rao, E.; et al. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science* 2016, 352, 1455. DOI: 10.1126/science.aaf2295
- Pimentel, D.; Burgess, M. Soil Erosion Threatens Food Production. *Agriculture* 2013, 3, 443–463. <https://doi.org/10.3390/agriculture3030443>

- Sima Pourhashemi, Mehdi Boroghani, Mohammad Ali Zangane Asadi, Abolghasem Amir Ahmadi, (2016). Analysis relation of vegetation cover on the number of dust event in Khorasan Razavi using geographic information system and remote sensing, *Journal of Rs and Gis for natural Resources*, 6(4), 33-45. <https://www.magiran.com/p1503800> [In Persian]
- Pourhashemi, S., Boroghani, M., Amirahmadi, A., Asadi Zanganeh, M., & Salehi, M., (2019). Priority Ranking of Dust Collection Areas Using Statistical Models (Case Study: Khorasan Razavi). *Range and Watershed Management (Iranian Journal of Natural Resources)*, 72(2), 343-358. <https://www.magiran.com/p2041511> [In Persian]
- Prospero, J. M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S. E., & Gill, T. E. (2002). ENVIRONMENTAL CHARACTERIZATION OF GLOBAL SOURCES OF ATMOSPHERIC SOIL DUST IDENTIFIED WITH THE NIMBUS 7 TOTAL OZONE MAPPING SPECTROMETER (TOMS) ABSORBING AEROSOL PRODUCT. *Reviews of Geophysics*, 40(1), 2-1-2-31. <https://doi.org/10.1029/2000RG000095>
- Qin, W.; Wang, L.; Lin, A.; Zhang, M.; Bilal, M. Improving the Estimation of Daily Aerosol Optical Depth and Aerosol Radiative Effect Using an Optimized Artificial Neural Network. *Remote Sens.* 2018, 10, 1022. <https://doi.org/10.3390/rs10071022>
- Rashki, A.; Eriksson, P.G.; Rautenbach, C.J.d.W.; Kaskaoutis, D.G.; Grote, W.; Dykstra, J. Assessment of chemical and mineralogical characteristics of airborne dust in the Sistan region, Iran. *Chemosphere* 2013, 90, 227–236. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.06.059>
- Sarnouba, S., Sarnouba, S., & Vasei Chaharmahali, S. (2017). "Study of Micro Dust Centers and Presentation of Solutions to Counteract Them (Case Study: Khorasan Razavi Province)." *International Conference on Innovative Research in Civil Engineering, Architecture, Urban Management, and Environmental Studies*.
- Symeonakis, E.; Drake, N. Monitoring desertification and land degradation over sub-Saharan Africa. *Int. J. Remote Sens.* 2004, 25, 573–592. <https://doi.org/10.1080/0143116031000095998>
- Tegen, I., & Fung, I. (1994). Modeling of mineral dust in the atmosphere: Sources, transport, and optical thickness. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D11), 22897-22914. <https://doi.org/10.1029/94JD01928>
- UNCCD. What is Desertification? Available online: <https://www.unccd.int/frequently-asked-questions> faq (accessed on 21 July 2020).
- Wang, Wei, Alim Samat, Yongxiao Ge, Long Ma, Abula Tuheti, Shan Zou & Jilili Abuduwaili. 2020b. Quantitative Soil Wind Erosion Potential Mapping for Central Asia Using the Google Earth Engine Platform. *Remote Sensing* 12.3430. <https://doi.org/10.3390/rs12203430>
- 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, 160829. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160829>
- Xu, J.; Xiao, Y.; Xie, G.; Wang, Y.; Jiang, Y. Computing payments for wind erosion prevention service incorporating ecosystem services flow and regional disparity in Yanchi County. *Sci. Total Environ.* 2019, 674, 563–579. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.361>
- Yang, G., Sun, R., Jing, Y., Xiong, M., Li, J., & Chen, L. (2022). Global assessment of wind erosion based on a spatially distributed RWEQ model. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 46(1), 28-42. <https://doi.org/10.1177/03091333211030608>
- Zeng, Z.; Ziegler, A.D.; Searchinger, T.; Yang, L.; Chen, A.; Ju, K.; Piao, S.; Li, L.Z.X.; Ciais, P.; Chen, D.; et al. A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production. *Nat. Clim. Chang.* 2019, 9, 979–985. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0622-6>
- Zhang, G.; Azorin-Molina, C.; Shi, P.; Lin, D.; Guijarro, J.A.; Kong, F.; Chen, D. Impact of near-surface wind speed variability on wind erosion in the eastern agro-pastoral transitional zone of Northern China, 1982–2016. *Agric. For. Meteorol.* 2019, 271, 102–115. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.039>
- Zhang, J.; Li, X.; Buyantuev, A.; Bao, T.; Zhang, X. How Do Trade-Offs and Synergies between Ecosystem Services Change in the Long Period? The Case Study of Uxin, Inner Mongolia, China. *Sustainability* 2019, 11, 6041. <https://doi.org/10.3390/su11216041>