



Identification of wind erosion sources using satellite images :(Case study: Eastern area of Lake Urmia)

Ali Teymouri¹, Ali Mohammadian Behbahani^{2*} , Mohsen Hossein Alizadeh³, Khalil Valizadeh Kamran⁴

- 1- PhD Student in Desert Management and Control, Department of Arid Zone Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran,
- 2*- Corresponding author, Associate Professor, Department of Arid Zone Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran,
Email: ali.mohammadian@gau.ac.ir
- 3- Associate Professor, Department of Arid Zone Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
- 4- Professor, Department of Remote Sensing and Geographic Information System, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received:05/10/2025

Revised: 10/28/2025

Accepted: 01/30/2026

Published:04/21/2026

Abstract

Background and objectives

The recession of Lake Urmia's water levels and its progressive desiccation have formed numerous dust source areas in the region. Thus, identifying critical wind erosion hotspots represents the first step toward preventing and reducing the adverse impacts of this phenomenon. This study aimed to accurately identify internal dust source areas in part of the eastern region of Lake Urmia using an integrated approach based on Google Earth Engine (GEE) and Geographic Information System (GIS).

Methodology

In this study, wind speed, slope, soil moisture, precipitation, vegetation cover index, and soil salinity data served as the main input layers for identifying critical wind erosion hotspots. We extracted these layers through the required computational processing of Landsat 8 satellite imagery acquired from 2013 to 2021. After data preparation, we normalized all layers using the Fuzzy Membership operator. Subsequently, we integrated the layers using the Fuzzy Overlay operator and the gamma method for each season (wet and dry) in each year. A total of 18 wind erosion hotspot maps were generated for different seasons and years, and finally, we produced a stable wind erosion hotspot map for the study area.

Results

After determining the membership values of each layer associated with the effective parameters influencing wind erosion and implementing the model, we generated the final map of stable wind erosion hotspots using the Fuzzy Overlay operator and the intersection method. The results showed that areas farther from Lake Urmia or at higher elevations were less susceptible to wind



erosion. In contrast, areas closer to the lake shoreline exhibited higher wind erosion risk due to their topographic, ecological, climatic, land-use, and edaphic conditions. The findings also indicated that areas near the villages of Shangal Abad, Koshk, Qaleh Hassan Abad, Qom Tepe, Qezel Dizaj, Mahdinlu, Qeshlaq, Bahram Abad, Timorlu, and Khurkhor were major wind erosion hotspots during 2013–2021. Areas with very high wind erosion risk concentrated mainly near the lake margin, where high soil salinity, elevated temperatures, sparse vegetation cover, and stronger wind conditions increased erosion susceptibility. These areas are predominantly flat plains with low slopes.

Conclusion

Our analysis of soil, vegetation, and climatic factors affecting wind erosion at a medium scale using remote sensing, GIS, and coding within the Google Earth Engine platform demonstrated that the highest wind erosion risk occurs in the eastern parts of the study area. This arises mainly from bare lands or areas with very sparse vegetation cover, high soil salinity, degraded soil structure, saline-alkaline soils, elevated temperatures, and frequent strong winds. The applied model effectively enabled us to identify the areas most vulnerable to wind erosion. Our results revealed that approximately 77,000 hectares in Shabestar and Osku counties, out of the total 690,000 hectares of the study area, were highly susceptible to wind erosion and qualified as wind erosion hotspots. Therefore, planning and implementing management measures to prevent the expansion of this phenomenon and mitigate its impacts remains essential.

Keywords: Dust source, geographic information system, google earth engine, landsat satellite, remote sensing.

شناسایی کانون‌های فرسایش بادی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مطالعه موردی: ناحیه شرق دریاچه ارومیه

علی تیموری^۱، علی محمدیان بهبهانی^{۲*}، محسن حسینعلی‌زاده^۳ و خلیل ولیزاده کامران^۴

- ۱- دانشجوی دکتری مدیریت و کنترل بیابان، گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران.
 ۲* - نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران. پست‌الکترونیک: ali.mohammadian@gau.ac.ir
 ۳- دانشیار، گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران.
 ۴- استاد، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

تاریخ چاپ: ۱۴۰۵/۰۲/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰

تاریخ اصلاح نهایی: ۱۴۰۴/۰۸/۰۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰

چکیده

سابقه و هدف

پس‌روی آب دریاچه ارومیه و خشک شدن تدریجی آن باعث تشکیل کانون‌های متعددی از گردوغبار در این مناطق شده است. بنابراین نیاز به شناسایی کانون‌های بحرانی فرسایش بادی به عنوان اولین گام برای کنترل آن می‌باشد. این مطالعه با هدف شناسایی دقیق منابع داخلی تولید گردوغبار در بخشی از ناحیه شرقی دریاچه ارومیه با استفاده از روش ترکیبی گوگل ارث انجین (GEE) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) انجام شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش به منظور شناسایی کانون‌های بحرانی فرسایش بادی از داده‌های سرعت باد، شیب، رطوبت خاک، میزان بارش، شاخص پوشش گیاهی و شوری خاک به عنوان لایه‌های اصلی استفاده شد. لایه‌های اصلی با انجام فرایند محاسباتی لازم بر روی تصویر ماهواره لندست ۸ در بازه‌های زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۱ استخراج شد. در مرحله بعد، لایه‌های اصلی بعد از آماده‌سازی داده‌ها و بعد با استفاده از عملگر Fuzzy Membership بر روی هر یک از لایه‌ها نرمال‌سازی انجام شد. سپس لایه‌ها با عملگر Fuzzy Overlay و با روش گاما و برای هر فصل (تر-خشک) در هر سال روی هم‌گذاری گردید و نهایتاً ۱۸ نقشه کانون‌های فرسایش بادی در هر فصل و در هر سال استخراج شد و در نهایت نقشه کانون‌های پایدار فرسایش بادی در منطقه مورد مطالعه تهیه گردید.

نتایج

پس از تعیین عضویت برای هر یک از لایه‌های وابسته به پارامترهای مؤثر بر روی پدیده فرسایش بادی در منطقه مورد مطالعه و اجرای مدل، نقشه نهایی کانون‌های پایدار فرسایش بادی بر اساس عملگر Fuzzy Overlay و روش And (اشتراک) بدست آمد. نتایج تحقیق نشان داد مناطقی که موقعیت آنها دور از دریاچه ارومیه بوده و یا در ارتفاع بالاتری قرار دارند کمتر در معرض خطر فرسایش بادی قرار دارند و هر چه به سواحل حاشیه دریاچه نزدیکتر می‌شویم بعلاوه شرایط توپوگرافی، اکولوژیکی، اقلیمی، کاربری اراضی و ادافیکی، منطقه بیشتر در معرض خطر فرسایش بادی قرار می‌گیرد و اگر کانون این مناطق شناسایی نشوند در آینده نزدیک گردوغبار و طوفان‌های نمکی حاصل از آنها تهدید بزرگی برای مناطق شهری، کشاورزی، باغ‌ها و سلامتی انسانها خواهد بود و نهایتاً مشکلات زیست محیطی و اقتصادی-اجتماعی زیان باری در پی خواهد داشت. نتایج این پژوهش همچنین نشان داد که نواحی واقع در

نزدیکی روستاهای سنگل آباد، کوشک، قلعه حسن آباد، قم تپه، قزل دیزج، مهدینلو، قشلاق، بهرام آباد، تیمورلو و خورخور به عنوان کانون فرسایش بادی در طول سالهای ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۱ را تشکیل می‌دهند. براساس این نقشه سطوح با خطر بسیار زیاد به فرسایش بادی در بخش نزدیک به حاشیه دریاچه واقع شده است. در این مناطق که عمدتاً ساختار دشتی، مسطح و کم‌شیب دارند، هم‌افزایی عواملی چون شوری بالای خاک، دمای بالا، فقر پوشش گیاهی و سرعت بالای باد، موجب افزایش شدت خطر فرسایش خاک شده است.

نتیجه‌گیری

بررسی عوامل مرتبط (خاک، پوشش گیاهی، اقلیم) با تأثیر بر فرسایش بادی در مقیاس متوسط با هدف شناسایی کانون‌های پایدار فرسایش بادی و بیان روش منشأیابی آن با استفاده از سنجش از دور، گوگل ارث انجین (GEE) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) نشان داد که بیشترین خطر فرسایش بادی در بخش‌های شرقی منطقه مورد مطالعه به دلیل وجود مناطق بدون پوشش گیاهی یا با پوشش بسیار کم، شوری بالای خاک و تخریب ساختمان خاک، وجود خاک‌های شور-قلیایی، دمای زیاد و بادهای مکرر و شدید اتفاق می‌افتد و این موضوع نشان‌دهنده این واقعیت است که خطر فرسایش بادی کل منطقه را تهدید می‌کند. این مدل به ما اجازه می‌دهد تا آسیب پذیرترین مناطق در برابر فرسایش بادی را شناسایی کنیم. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد مناطقی در شهرستان شبستر و اسکو به مساحت حدود ۷۷۰۰۰ هکتار از کل ۶۹۰۰۰۰ هکتار منطقه مورد مطالعه بیشتر در معرض خطر فرسایش بادی قرار دارند و به عنوان کانون‌های فرسایش بادی تشخیص داده شد. بنابراین نیاز به برنامه ریزی برای مقابله با این پدیده به منظور جلوگیری از توسعه آن ضروری به نظر می‌رسد و محافظت مؤثر در برابر فرسایش بادی (بیولوژیکی-مدیریتی و بیومکانیکی) بایستی به منظور دستیابی به درک جامع تر از مناطق حساس به فرسایش بادی انجام شود.

واژه‌های کلیدی: سنجش از دور، سیستم اطلاعات جغرافیایی، کانون گردوغبار، گوگل ارث انجین، ماهواره لندست.

مقدمه

غیراصولی در محیط زیست احتمال بروز این پدیده را افزایش می‌دهد. طوفان گردوغبار از ذراتی با قطر کمتر از ۱۰۰ میکرون تشکیل شده است که از میان این ذرات، ذراتی با قطر کمتر از ۱۰ و ۲/۵ میکرون بدلیل اندازه کوچک نسبت به سایر ذرات و سطح ویژه زیاد تمایل به ایجاد پیوند با آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین و ریزسازواره‌ها دارند که برای سلامت انسان و محیط زیست بسیار خطرناک هستند (Abdoli et al., 2015). بنابراین توسعه برنامه‌های کاهش مناسب بر اساس آسیب پذیری سلامت انسانها و ارزیابی خطر آنها برای به حداقل رساندن آثار محیط زیستی آن بر سلامت انسان حیاتی است. تهیه نقشه و شناسایی کانون های بحرانی گردوغبار باعث می‌گردد تا آسیب‌پذیری را در فضای جغرافیایی تعریف و کمی‌سازی کرد و مناطقی را که نیاز به مداخله دارند شناسایی نمود (فیضی‌زاده و همکاران، ۲۰۲۳). اگرچه بیابان‌های ماسه‌ای مهمترین منبع تولید گردوغبار در

فرسایش بادی یک فرایند ژئومورفیک پیچیده است که باعث کاهش حاصلخیزی خاک و بروز پدیده بیابان‌زایی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک می‌گردد. این فرایند تحت تأثیر عوامل متعدد محیطی از جمله شرایط جوی، ویژگی‌های خاک، ویژگی‌های سطح زمین، کاربری اراضی و فعالیت‌های انسانی قرار می‌گیرد. انتشار گردوخاک یکی از آثار مهم فرسایش بادی و از مهمترین انواع آئروسول در جو است و آثار مثبت و منفی بر اجزای مختلف سیستم‌ها و فرایندهای اکولوژیکی زمین دارد (Kok et al., 2018؛ Cherian & Quaas, 2020؛ Kok et al., 2021). گرد و خاک و طوفان‌های نمکی یکی از پدیده‌های جوی است که آثار و پیامدهای زیست محیطی نامطلوبی بر زندگی موجودات زنده به‌ویژه انسان‌ها برجای می‌گذارد و تبعات فرهنگی، زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی زیادی را به دنبال دارد. بی شک دوره‌های خشکسالی طولانی و دخالت‌های

مکانی، سبب شده است که سنجش از دور ماهواره ای با توجه به تفکیک زمانی و مکانی قابل قبول بهترین ابزار برای بررسی توزیع مکانی و زمانی ریزگردها محسوب شود (Abdolkhani, 2010, Guo et al., 2009). برخی از مطالعات با بکارگیری شاخص های استخراج ریزگردها به ردیابی این پدیده با استفاده از تصاویر ماهواره ای پرداخته اند. این در حالی است که استفاده از تصاویر ماهواره با ارائه پارامتر کمی می تواند راهکار مناسبی برای ردیابی تغییرات کمی ریزگردها در مناطق مختلف باشد؛ به طوری که با پایش تغییرات زمانی و مکانی بلند مدت، موجبات درک بهتر تأثیرات ریزگردها بر نواحی تحت تأثیر فراهم شود (Zeinali et al., 2016). Baumgertel و همکاران (۲۰۱۹) مطالعه موردی در منطقه Vojvodina کشور صربستان با عنوان شناسایی مناطق حساس به فرسایش بادی انجام داده اند و اعلام نموده اند که در موضوع فرسایش بادی عوامل اصلی مورد استفاده برای مدل سازی مناطق آسیب پذیری در برابر فرایندهای فرسایش بادی، ویژگی های آب و هوایی (سرعت باد، دما و بارش)، وجود پوشش گیاهی و ویژگی های خاک هستند. Saadoud و همکاران (۲۰۱۸) تحقیقی در منطقه لاغوت در کشور الجزایر با رویکرد منطق فازی و با استفاده از سنجش از دور و GIS انجام دادند. هدف اصلی این مطالعه، استفاده از یک رویکرد منطق فازی برای تهیه نقشه حساسیت فرسایش بادی در منطقه مورد مطالعه بود. کاظمی و همکاران (۱۳۹۸) طی مطالعه ای با هدف پهنه بندی ظرفیت عرصه های مختلف مستعد گردوغبار با استفاده از مدل های داده کاوی و شناسایی مهمترین متغیرها بر این پدیده و بهره مندی از سنجش از دور در این راستا از شاخص های سرعت باد، رطوبت خاک، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)، توپوگرافی، حداقل و حداکثر دمای هوا، فشار بخار (Vap) با استفاده از کدنویسی در سامانه آنلاین گوگل ارث انجین (Google Earth Engine) استخراج و استفاده نمودند. پیمان حیدریان و همکاران (۲۰۱۸) با هدف شناسایی دقیق منابع داخلی گرد و غبار در استان خوزستان با استفاده از روش ترکیبی سنجش از دور و GIS، سلسله مراتبی فازی انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که تصاویر ماهواره ای به ویژه تصاویر با وضوح کارآمد مانند محصولات لندست ۸،

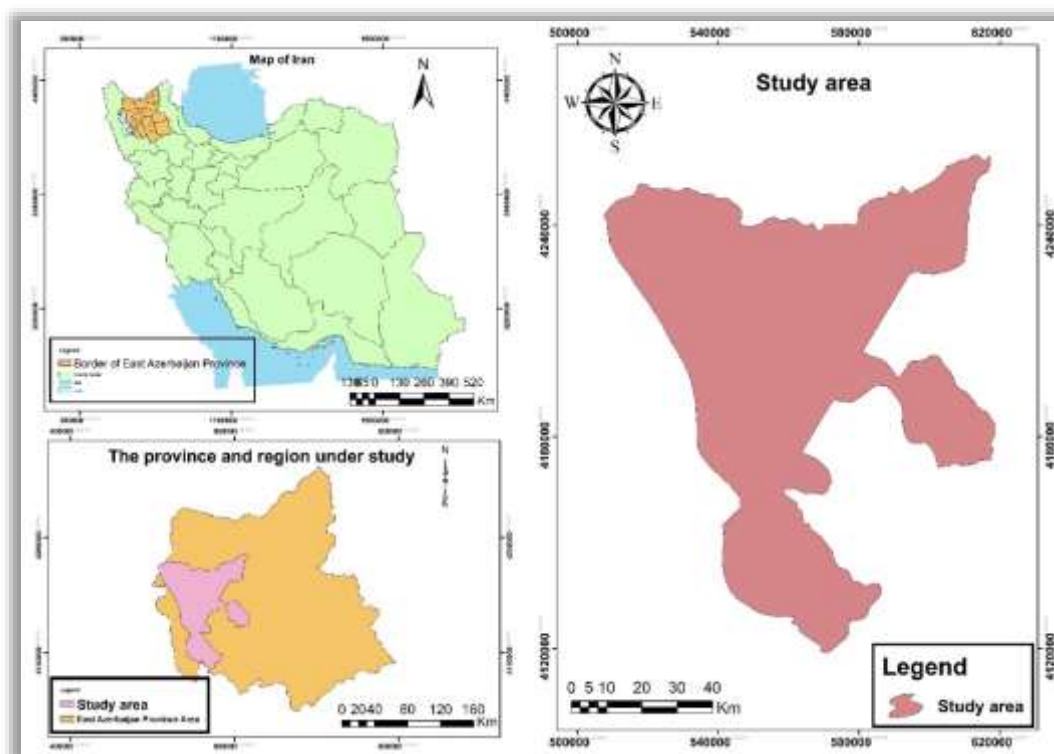
خاورمیانه هستند (Goudie & Middleton, 2006)، اما بستر دریاچه های خشک شده به دلیل خشکی شدید در نتیجه دخالت ترکیبی انسان و تغییرات اقلیمی به منابع اصلی تولید گردوغبار تبدیل شده اند (Hamidi, 2020). دریاچه ارومیه در شمال غرب ایران بزرگترین دریاچه خاورمیانه و یکی از دریاچه های شور دائمی دنیاست. آب دریاچه ارومیه قبلاً مساحتی بین ۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰ کیلومتر مربع را پوشش می داد و حدود ۳۰۰۰۰ میلیون متر مکعب آب داشت (Eimanifar, and Mohebbi, 2007). یک مطالعه جدید نشان داد که مساحت دریاچه ارومیه در دهه های اخیر ۹۰ درصد کاهش یافته است (AghaKouchak et al., 2015, Pengra, 2012, Ghale et al., 2017). دریاچه تا اوت ۲۰۱۴ برابر با ۱۰۰۰ کیلومتر مربع بود. مناطق بالادست با تخمین هشت میلیارد تن نمک، منبع اصلی آتروسل منطقه ای هستند (Tourian et al., 2015). به دلیل اهمیت این موضوع و وقوع طوفان های نمکی به علت خشک شدن بخش هایی از دریاچه ارومیه، در سالهای اخیر یکی از مسائل مورد توجه محققان بوده است. کانونهای ریزگرد اطراف دریاچه ارومیه که دارای ترکیبات نمکی است و در سالهای اخیر فعال شده، هرساله همزمان با فصل وزش بادهای موسمی، موجی از گردوغبار نمکی را در هوای برخی شهرهای همجوار منتشر می کند. بنابراین با توجه به اهمیت آثار منفی طوفان های نمکی و گردوغبار و همچنین روند افزایشی آنها در شمال غرب کشور، بررسی تغییرات زمانی و مکانی ریزگردهای دریاچه ارومیه در دهه اخیر می تواند اهمیت پدیده ریزگردهای نمکی را در سالهای پیش رو نشان دهد و یکی از شاخص های تصمیم گیری در مدیریت بحران طوفان های نمکی مورد استفاده باشد. در چند سال اخیر مطالعات آماری بسیاری در رابطه با طوفانهای ریزگردی ایران انجام شده است. بیشتر این مطالعات بر فراوانی وقوع ریزگرد ها تأکید داشته اند و یا از داده های دید افقی برای تشخیص شدت غبار در مناطق مختلف استفاده کرده اند (Zou et al., 2006, alfaghari & Abedzadeh, 2006, Vali et al., 2014; Mohammadi, 2015). محدودیت داده های ایستگاهی در برآورد شاخص های کمی ریزگردها، سطح وسیع طوفانهای ریزگردی و تغییرات شدید این پدیده از نظر زمانی و

داده‌های پایه مناسبی برای استخراج شاخص‌های (دما، رطوبت و پوشش گیاهی) منابع گرد و غبار هستند.

مواد و روش‌ها
منطقه مورد مطالعه

دریاچه ارومیه دومین دریاچه شور دنیا و بزرگترین دریاچه داخلی ایران با مساحتی حدود ۵۸۲۲ کیلومتر مربع در شمال غرب ایران واقع شده است و با موقعیت جغرافیایی 37° و $45'$ شمالی تا 38° و $30'$ شمالی و 46° و $18'$ شرقی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت (شکل ۱).

در این مطالعه از روش ترکیبی سنجش از دور، گوگل ارث انجین (GEE) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای شناسایی کانون‌های فرسایش بادی استفاده شد. گوگل ارث انجین، یک سامانه تحت وب است که با سرعت بسیار زیاد و هزینه بسیار اندک، انواع پردازشها را روی تصاویر ماهواره ای رایگان ممکن کرده است. گوگل ارث انجین یک پلتفرم علمی برای پردازش، تحلیل و بصری‌سازی تصاویر



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Figure1- Geographical location of the study area

ماهواره ای است که سازمان‌هایی مانند ناسا و سازمان فضایی اتحادیه اروپا از آن پشتیبانی می‌کنند. آنچه سامانه گوگل ارث انجین را از سایر نرم افزارها متمایز می‌کند، قابلیت آن در پردازش های مجموعه زمانی داده‌های ماهواره‌ای است. مهمترین کارایی این سامانه، کاربردی کردن بیش از پیش علم سنجش از دور در زمینه مطالعات زیست محیطی است (Gorelick *et al.*, 2017). در این روش، سنجش از دور به عنوان آماده‌سازی و پردازش

در این مطالعه از روش ترکیبی سنجش از دور، گوگل ارث انجین (GEE) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای شناسایی کانون‌های فرسایش بادی استفاده شد. گوگل ارث انجین، یک سامانه تحت وب است که با سرعت بسیار زیاد و هزینه بسیار اندک، انواع پردازشها را روی تصاویر ماهواره ای رایگان ممکن کرده است. گوگل ارث انجین یک پلتفرم علمی برای پردازش، تحلیل و بصری‌سازی تصاویر

سنجش از دور در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت.

آماده‌سازی داده‌ها و استخراج لایه‌های اصلی برای تصاویر Landsat8

در این تحقیق با توجه به نقش تعیین‌کننده سرعت باد، شیب، رطوبت خاک، میزان بارش، شاخص پوشش گیاهی (NDVI) و شوری خاک (EC) و بعلاوه اهمیت این معیارها در تولید گرد و غبار از یکسو و به‌روزرسانی و دقت بالای لایه‌های مذکور از سوی دیگر باعث شد که این لایه‌ها به عنوان اصلی‌ترین لایه‌ها در نظر گرفته شوند. از این رو، در این پژوهش میانه شاخص‌های مستخرج از تصاویر برای دو فصل یعنی فصل تر مربوط به ماه‌های مارس، آوریل و می و فصل خشک مربوط به ماه‌های جولای، آگوست و سپتامبر (میانه شاخص برای هر فصل) جمع آوری و در تحلیل‌ها استفاده شد.

تصاویر عمل می‌کند و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی به عنوان تحلیل و مدل‌سازی نقشه‌ها در نظر گرفته می‌شود. داده‌های ماهواره‌ای به دلیل به‌روزرسانی، پوشش گسترده، تکرارپذیری و کاهش زمان و هزینه مطالعه، تکنیک بسیار مناسبی برای پایش و ارزیابی مسائل زیست محیطی است. در این میان داده‌های ماهواره‌ای با تفکیک مکانی متوسط (۱۰ تا ۱۰۰ متر) برای شناسایی کانون‌های فرسایش بادی بسیار مفید هستند و قابلیت تفکیک طیفی بالای آنها امکان استخراج اطلاعات مختلف از جمله پوشش زمین، دمای سطح زمین، رطوبت خاک، تراکم پوشش گیاهی و موارد مشابه را فراهم می‌کند. به دلیل رایگان بودن و دارا بودن باندهای انعکاسی و حرارتی، تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ با تفکیک مکانی ۳۰ متر و پروداکت‌های اقلیمی مانند بارش (۵۵۶۶ متر) و سرعت باد (۴۶۳۸ متر) با استفاده از ماهواره Alos2 تهیه شد و به عنوان مناسب‌ترین داده پایه

جدول ۱- آماده‌سازی داده‌ها و استخراج لایه‌ها

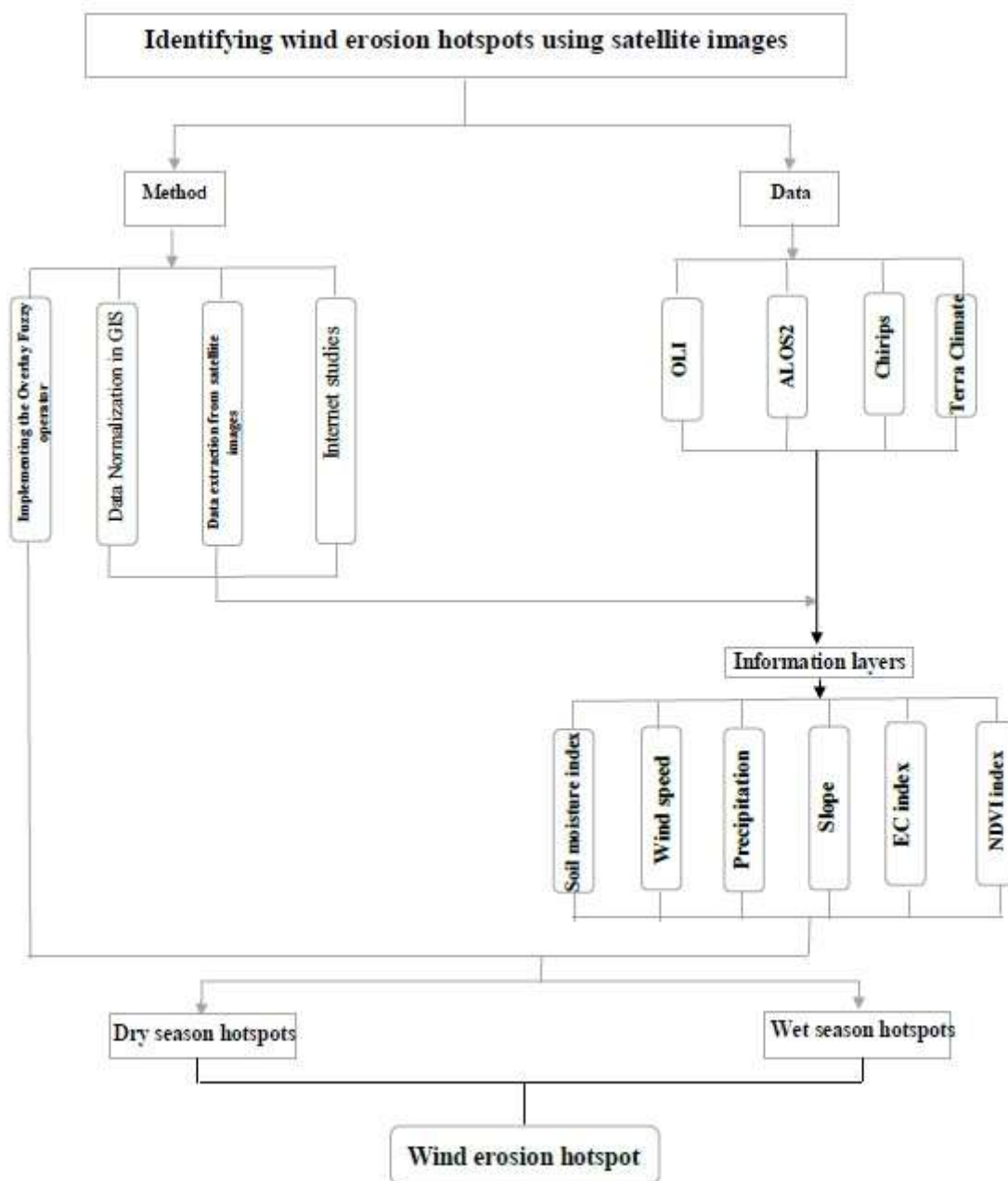
Table1- Data preparation and layer extraction

ID	Index	Relationship	Reference
Vegetation Index	NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) Landsat8	$NDVI = (R_{NIR} - R_{Red}) / (R_{NIR} + R_{Red})$	Drisy and Roshni (2018)
Electrical Conductivity	Soil Salinity (EC)	$EC = -2.87 - 23.27 \ln(GDVI) (dS/m)$ $GDVI = (SR^n - 1) / (SR^n + 1)$ $= (\rho_{NIR}^n - \rho_R^n) / (\rho_{NIR}^n + \rho_R^n)$	Wu (2014)-Wu et al., (2014)
Soil moisture	Soil moisture (SIWSI: Shortwave Infrared Water Street Index)	$SIWSI = \frac{R_{SWIR} - R_{NIR}}{R_{SWIR} + R_{NIR}}$	Fensholt and Sandholt (2003)
Precipitation	Precipitation	Product	Climate CHIRPS-Terra
Wind speed	Wind speed	Product	FLDAS
Slope	Slope	Product	Radar

جدول ۲- شاخص‌های مورد استفاده و روابط بین آنها

Table2- Indicators used and the relationships between them

Map	Resolution	Resampling	Clipping
EC	30 m	Not Resampling	*
precipitation	5566m	30m	*
Wind speed	4638m	30m	*
Slope	12.5m	30m	*
Soil moisture	30m	Not Resampling	*
NDVI	30m	Not Resampling	*



شکل ۲- داده‌ها، روش و مراحل اجرای تحقیق

Figure2- Data, method and stages of research implementation

خبیره و با هدف ساده‌سازی و کارآمدتر شدن طراحی سیستم، جایگزین و یا تا حد زیادی تکمیل می نماید. برای اجرای تکنیک فازی به عملگرهایی مانند OR (اجتماع)، AND (اشتراک)، Product (ضرب جبری)، Sum (جمع جبری) و Gamma (گاما) نیاز است.

با استفاده از نظریه فازی می توان متغیرهای نادقیق و مبهم را به شکل ریاضی درآورد (Momeni, 1999). منطق فازی شیوه‌های مرسوم برای طراحی و مدل سازی یک سیستم را که نیازمند ریاضی پیشرفته و نسبتاً پیچیده است با استفاده از مقادیر و شرایط زبانی و یا به عبارتی دانش فرد

شرایط توپوگرافی، اکولوژیکی، اقلیمی، کاربری اراضی و ادافیکی، منطقه بیشتر در معرض خطر فرسایش بادی قرار می‌گیرد، اگر کانون این مناطق شناسایی نشوند در آینده نزدیک گردوغبار و طوفان‌های نمکی حاصل از آنها تهدید بزرگی برای مناطق شهری، کشاورزی، باغ‌ها و سلامتی انسانها خواهد بود و نهایتاً مشکلات زیست محیطی و اقتصادی-اجتماعی زیادی به بار خواهد آورد. نتایج تحقیق همچنین نشان داد که نواحی واقع در نزدیکی روستاهای سنگل آباد، کوشک، قلعه حسن آباد، قم تپه، قزل دیزج، مهدینلو، قشلاق، بهرام آباد، تیمورلو و خورخور به عنوان کانون و سرچشمه فرسایش بادی در طول سالهای ۲۰۱۳ تا ۱۳۸۵ تشکیل می‌دهند. براساس این نقشه سطوح با خطر بسیار زیاد به فرسایش بادی در بخش نزدیک به حاشیه دریاچه واقع شده است و در این مناطق بعلت شوری بالای خاک، دمای زیاد، پوشش گیاهی کم و سرعت باد بیشتر در این نواحی که بیشتر دشتی و مسطح بوده و دارای شیب کمی است خطر فرسایش خاک زیاد می‌باشد. نواحی با خطر کم نیز اغلب در نواحی کوهستانی که شیب بالایی دارند، واقع شده‌اند. در شکل (۳) محدوده‌های با خطر بسیار زیاد که به عنوان کانون فرسایش بادی محسوب می‌شوند با رنگ قرمز نشان داده شده است.

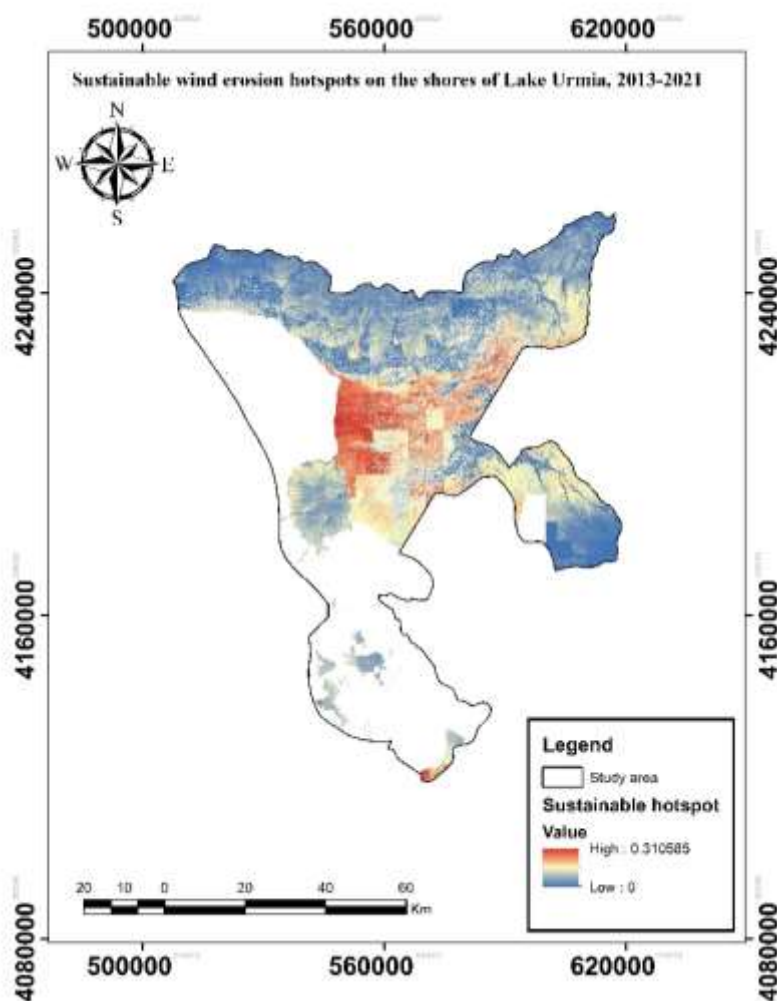
عملگر AND فقط پیکسلی که در تمامی نقشه‌های پایه ارزش یک دارد در نقشه نهایی ارزش یک خواهد داشت و جزء مناطق مناسب قرار می‌گیرد. مقدار گاما تعدیل کننده بین صفر و یک است و از طریق قضاوت کارشناسانه و مرور منابع تعیین می‌شود (Salami, 2010).

نرمال‌سازی داده‌ها

تابع عضویت هر یک از لایه‌ها در مدل بر اساس نوع رابطه ای (گوسی-خطی و ...) که هر پارامتر با پدیده فرسایش بادی در منطقه مورد مطالعه دارد، تعیین شده است.

نتایج

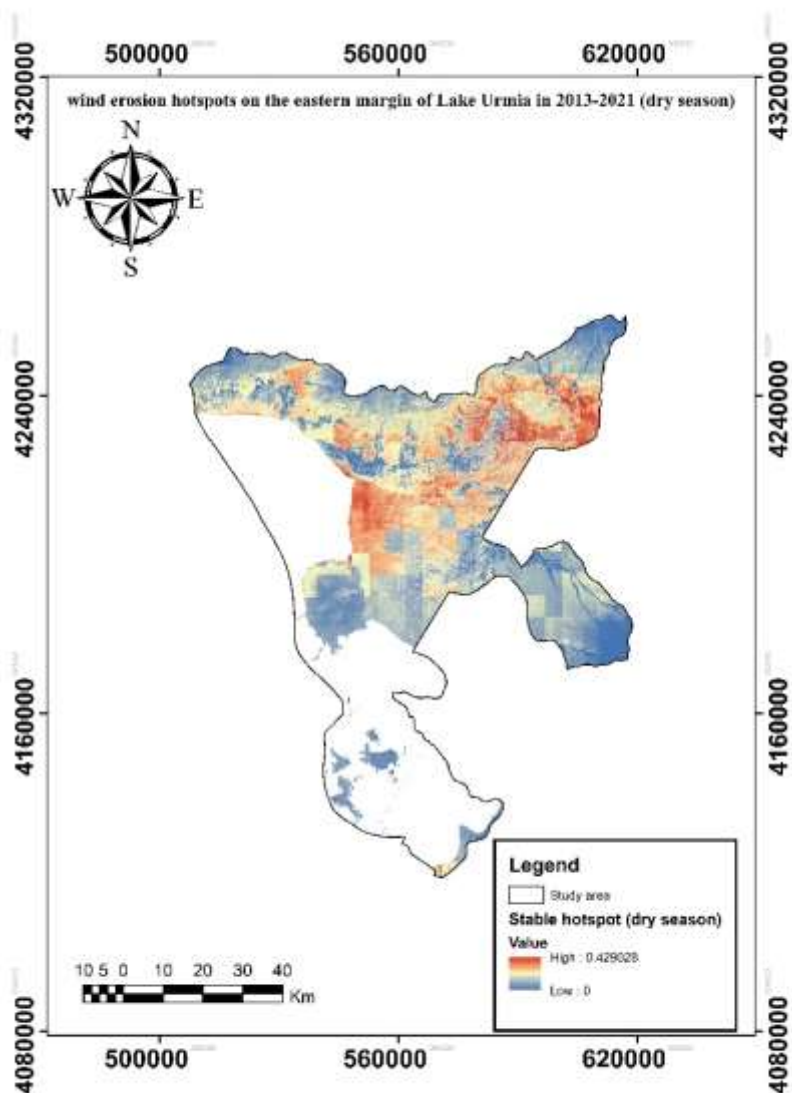
پس از تعیین عضویت برای هر یک از لایه‌های وابسته به پارامترهای مؤثر بر روی پدیده فرسایش بادی در منطقه مورد مطالعه و اجرای مدل، نقشه نهایی کانون‌های فرسایش بادی بر اساس عملگر Fuzzy Overlay و روش And (اشتراک) بدست آمد. نتایج تحقیق نشان داد مناطقی که موقعیت آنها دور از دریاچه ارومیه بوده و یا در ارتفاع بالاتری قرار دارند کمتر در معرض خطر فرسایش بادی قرار دارد و هر چه به سواحل حاشیه دریاچه نزدیکتر می‌شویم بعلت



شکل ۳- محدوده کانون فرسایش بادی در منطقه مورد مطالعه
 Figure3- Wind erosion hotspot area in the study area

برداشت محصول و تغییر آب زیرزمینی، پسروری و پیشروی آب دریاچه، پستی و بلندی متفاوت منطقه و سایر عوامل دخیل باشد.

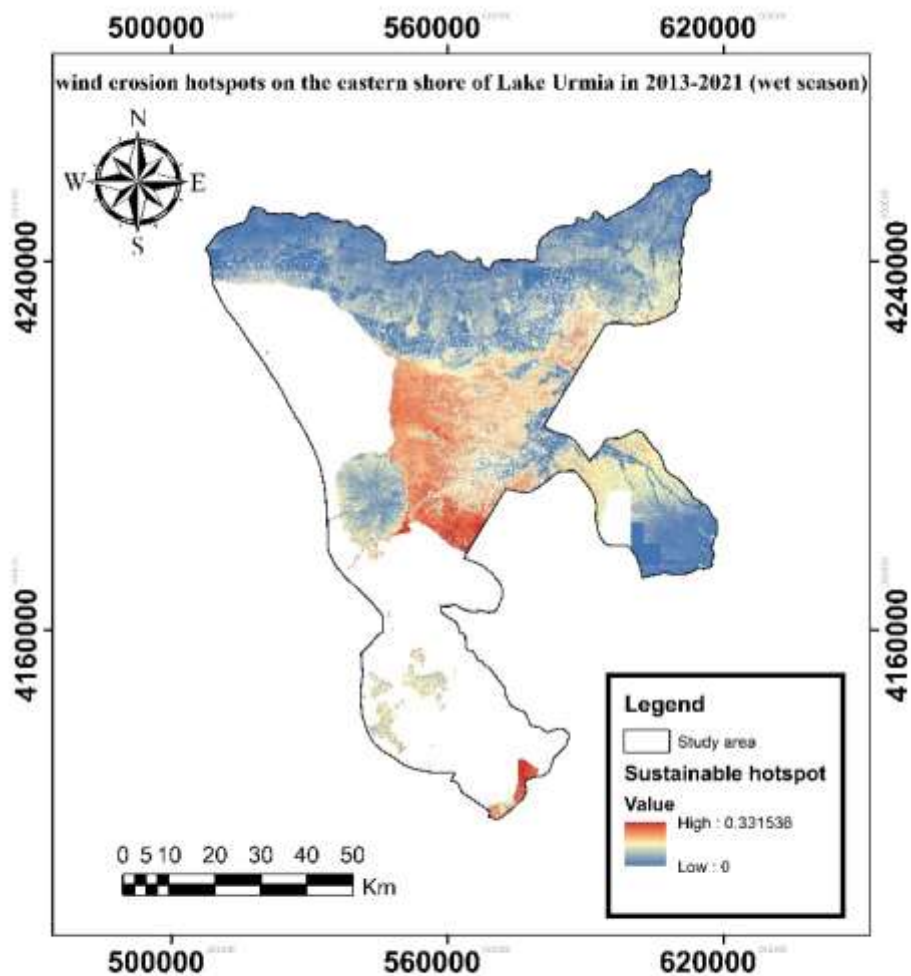
با توجه به نقشه حاصل از کانون‌های فرسایش بادی برای فصل خشک، در شکل ۴ مشاهده می‌گردد که کانون به طرف شرق گسترش می‌یابد و این موضوع می‌تواند ناشی از تغییر کاربری اراضی، عوامل اقلیمی (سرعت باد، دما، بارش)،



شکل ۴- محدوده کانون فرسایش بادی در فصل خشک
 Figure4- Wind erosion hotspot area in the dry season

گرفته است و این موضوع می تواند ناشی از تغییرات بلند مدت هیدرولوژیکی دریاچه ارومیه که باعث کاهش مساحت آبی دریاچه ارومیه و پسروی آب شده است، باشد.

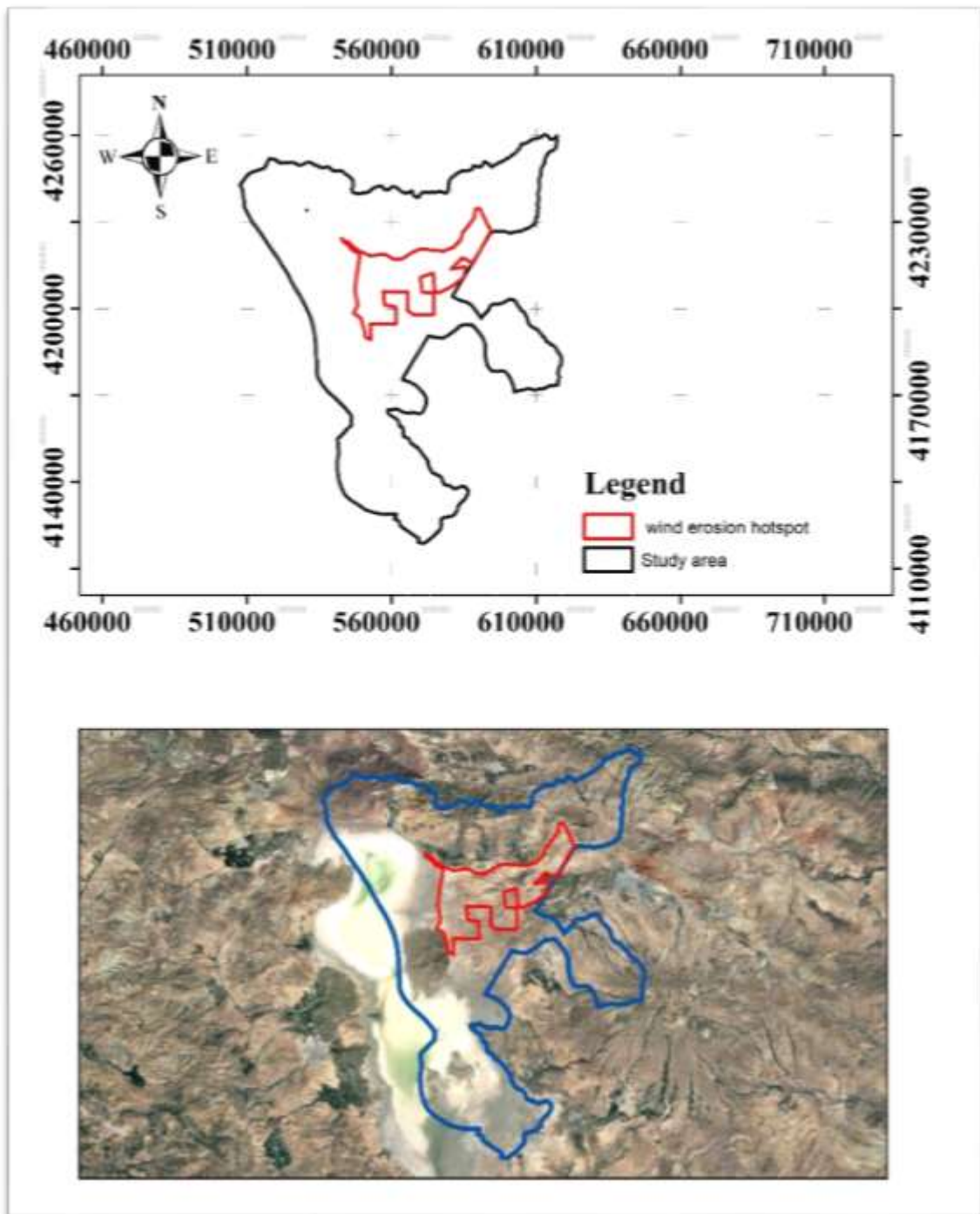
شکل ۵، نقشه حاصل از کانون های فرسایش بادی برای فصل تر را نشان می دهد، به طوری که مشاهده می گردد در فصل تر بیشترین مرکز کانون بحرانی فرسایش بادی در نزدیکی دریاچه ارومیه که پسروی آب در آن اتفاق افتاده قرار



شکل ۵- محدوده کانون فرسایش بادی در فصل تر
 Figure5- Wind erosion hotspot area in the wet season

۱۱ درصد) از کل ۶۹۰۰۰۰ هکتار منطقه مورد مطالعه بر روی محیط گوگل ارث جانمایی و در شکل ۶ نشان داده شده است.

در نهایت برای تفسیر بصری بهتر از کانون فرسایش بادی، موقعیت کانون پایدار به مساحت تقریباً ۷۷۰۰۰ هکتار(حدود



شکل ۶- کانون فرسایش بادی منطقه مورد مطالعه بر روی گوگل ارث (Google Earth)
 Figure6- Wind erosion hotspot of the study area on Google Earth

بحث

می‌کند. این مدل به ما اجازه می‌دهد تا آسیب پذیرترین مناطق در برابر فرسایش بادی را شناسایی کنیم. با این حال، اشکال آن فقدان گزینه ای برای تعیین کمیت فرایندهای فرسایش و تعیین میزان فرسایش بادی مناطق خاص در واحدهای قابل اندازه گیری است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد مناطقی از جمله روستاهای سنگل آباد، کوشک و قلعه حسن آباد در شهرستان شبستر و روستاهای خورخور، میران و مهدینلو در شهرستان اسکو به مساحت حدود ۷۷۰۰۰ هکتار از کل ۶۹۰۰۰۰ هکتار منطقه مورد مطالعه (حدود ۱۱ درصد) در معرض خطر فرسایش بادی قرار دارند و به عنوان کانون های بحرانی فرسایش بادی تشخیص داده شد. بنابراین نیاز به برنامه ریزی اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان آذربایجان شرقی، وزارت نیرو، سازمان محیط زیست و جهادکشاورزی و سازمان مدیریت بحران استان برای مقابله با این پدیده به منظور جلوگیری از توسعه آن ضروری به نظر می‌رسد. محافظت مؤثر در برابر فرسایش بادی (بیولوژیکی-مدیریتی و بیومکانیکی) بایستی به منظور دستیابی به درک جامع تر از مناطق حساس به فرسایش بادی انجام شود. علاوه بر آن، توجه محققان به عوامل دیگری که تنها در سطوح کوچک قابل مشاهده هستند، مانند تأثیر بادشکن بر مناطق حساس به فرسایش بادی نیز باید معطوف شود.

فرسایش بادی و طوفان‌های نمکی و ریزگردها در چند سال اخیر بعلت پسروری آب دریاچه ارومیه به‌ویژه در ناحیه شرقی آن (واقع در استان آذربایجان شرقی)، یکی از مهمترین چالش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی-اجتماعی منطقه محسوب می‌شود و در سال‌های اخیر نیز شدت بیشتری یافته است. به دلیل وسعت و بزرگی این پدیده، جلوگیری از ایجاد آن اجتناب ناپذیر است. با این حال، می‌توان با مطالعه و بررسی کانون‌های فرسایش بادی در ناحیه شرقی حاشیه دریاچه ارومیه و ردیابی آنها و شناسایی منشأ تولیدشان نسبت به انجام اقدامات مدیریتی، بیولوژیکی و بیومکانیکی برای از بین بردن این پدیده و یا حداقل در کاهش میزان شدت آن اقدام نمود. در این مطالعه و تحقیق به بررسی عوامل مرتبط (خاک، پوشش گیاهی، اقلیم) با تأثیر بر فرسایش بادی در مقیاس متوسط با هدف شناسایی کانون‌های بحرانی فرسایش بادی و بیان روش منشأیابی آن با استفاده از سنجش از دور، GIS و کد نویسی در محیط پلتفرم گوگل ارث انجین پرداخته شده است. بیشترین خطر فرسایش بادی در بخش‌های شرقی منطقه مورد مطالعه به دلیل وجود مناطق بدون پوشش گیاهی یا با پوشش بسیار کم، شوری بالای خاک و تخریب ساختمان خاک، وجود خاک‌های شور-قلیایی، دمای زیاد و بادهای مکرر و شدید اتفاق می‌افتد. نتایج تحقیق نشان دهنده این موضوع است که خطر فرسایش بادی کل منطقه را تهدید

References

- Abdoli, M. A., Alaei, E., Amiri, M. J., Ashrafi, K., & Bahrami, B., 2015. Journal of Environmental Studies. Journal of Environmental Studies, 41(2).
- Abdolkhani, A., 2010. Characterization and zoning of dust masses in southwestern Iran using remote sensing and GIS. Master's thesis, Faculty of Geography, Shahid Chamran University of Ahvaz. (In Persian)
- AghaKouchak, A., Norouzi, H., Madani, K., Mirchi, A., Azarderakhsh, M., Nazemi, A., Nasrollahi, N., Farahmand, A., Mehran, A., Hasanzadeh, E., 2015. Aral Sea syndrome desiccates Lake Urmia: call for action. J. Great Lakes Res. 41, 307-311.
- Baumgertel, A., Lukić, S., Simić, S. B., & Kadović, R., 2019. Identifying areas sensitive to Wind Erosion-A case study of the AP Vojvodina (Serbia). Applied Sciences (Switzerland), 9(23), 5106. <https://doi.org/10.3390/app9235106>
- Cherian, R., & Quaas, J. (2020). Trends in AOD, Clouds, and Cloud Radiative Effects in Satellite Data and CMIP5 and CMIP6 Model Simulations Over Aerosol Source Regions. Geophysical Research Letters, 47(9), e2020GL087132. <https://doi.org/10.1029/2020GL087132>
- Eimanifar, A., Mohebbi, F., 2007. Urmia Lake (northwest Iran): a brief review. Saline Syst. 3, 5

- Esmaeili, A., 2006. Primary zoning of the country's main dust production centers using remote sensing technology (Doctoral dissertation, MSc. Thesis, Faculty of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. (In Persian).
- Feizizadeh, B., Lakes, T., Omarzadeh, D., & Pourmoradian, S. (2023). Health effects of shrinking hyper-saline lakes: spatiotemporal modeling of the Lake Urmia drought on the local population, case study of the Shabestar County. *Scientific Reports*, 13(1), 1622. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28332-6>
- Ghale, A.G.Y., Baykara, M., Unal, A., 2017. Analysis of decadal land cover changes and salinization in Urmia Lake Basin using remote sensing techniques. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* <https://doi.org/10.5194/nhess-2017-212>.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Guo, J.P., Zhang, X.Y., Che, H.Z., Gong, S.L., An, X., Cao, C.X., Guang, J., Zhang, H., Wang, Y.Q., Zhang, C.X., Xue, M., Li, X.W., 2009. Correlation between PM concentrations and aerosol optical depth in eastern China, *Atmospheric Environment*, Vol: 43, PP 5876–5886
- Hamidi, M. (2020). The key role of water resources management in the Middle East dust events. *Catena*, 187, 104337. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104337>
- Heidarian, P., Azhdari, A., Joudaki, M., Khatooni, J. D., & Firoozjaei, S. F., 2018. Integrating Remote Sensing, GIS, and Sedimentology Techniques for Identifying Dust Storm Sources: A Case Study in Khuzestan, Iran. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46(7), 1113–1124. <https://doi.org/10.1007/s12524-018-0774-2>
- Kazemi, M., Naferzadegan, A., Mohammadi, F., Rezaei Latifi, A., 2019. Identifying the Origins of Atmospheric Aerosols Using Remote Sensing Data Mining, Case Study: Yazd Province, *Journal of Remote Sensing and Geographic Information Systems in Natural Resources*, Volume 12, Issue 1, pp. 961-972. (In Persian)
- Kok, J. F., Adebisi, A. A., Albani, S., Balkanski, Y., Checa-Garcia, R., Chin, M., Colarco, P. R., Hamilton, D. S., Huang, Y., Ito, A., Klose, M., Li, L., Mahowald, N. M., Miller, R. L., Obiso, V., Pérez García-Pando, C., Rocha-Lima, A., & Wan, J. S. (2021). Contribution of the world's main dust source regions to the global cycle of desert dust. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(10), 8169–8193. <https://doi.org/10.5194/acp-21-8169-2021>
- Kok, J. F., Ward, D. S., Mahowald, N. M., & Evan, A. T. (2018). Global and regional importance of the direct dust-climate feedback. *Nature Communications*, 9(1), 241.
- Mohammedi, G H., 2015. Analysis of atmospheric mechanisms of dust transport to the west of the country, Ph.D. thesis, Faculty of Geography and Planning, University of Tabriz. (In Persian)
- Momeni, M., 1999. *New Topics in Operations Research*. Second Edition. Tehran: Faculty of Management, University of Tehran. (In Persian)
- Pengra, B., 2012. *The Drying of Iran's Lake Urmia and its Environmental Consequences*. UNEP-GRID, Sioux Falls, UNEP Global Environmental Alert Service (GEAS).
- Saadoud, D., Hassani, M., Martin Peinado, F. J., & Guettouche, M. S., 2018. Application of fuzzy logic approach for wind erosion hazard mapping in Laghouat region (Algeria) using remote sensing and GIS. *Aeolian Research*, 32(May 2017), 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2018.01.002>
- Salami, M., 2010. Analysis of water quality parameters of Anzali Wetland using fuzzy mathematical method. Senior Bachelor's thesis. Faculty of Science, Tarbiat Muallem University. (In Persian)
- Tourian, M., Elmi, O., Chen, Q., Devaraju, B., Roohi, S., Sneeuw, N., 2015. A spaceborne multisensor approach to monitor the desiccation of Lake Urmia in Iran. *Remote Sens. Environ.* 156, 349–360.
- Vali, A A., Khamoshi, S., Mousavi, H., Panahi, F. and Temaski, E., 2014. Climate analysis and tracking of widespread dust storms in southern and central Iran, *Journal of Environmental Studies*, Volume 40, No. 4, pp. 961-972.
- Zeinali, B., & Asghari, S., 2016. Mapping and monitoring of dust storms in Iran by fuzzy clustering and remote sensing techniques. *Arabian Journal of Geosciences*, 9, 1-10.
- Zou alfaghari, H., & Abedzadeh, M., 2006. A synoptic analysis of dust systems at the west part of Iran. *Geography and development*, 3(6), 173-188. SID. <https://sid.ir/paper/76993/en> (In Persian)