

شناسایی کانون‌های فعال گردوغبار با روش‌های میدانی و دورسنجی به منظور تعیین سرعت آستانه فرسایش بادی (مطالعه موردی: شرق استان کرمان)

رسول خوارزمی^{۱*}، حمیدرضا عباسی^۲، سارا مرادی ثانی^۳ و فرهاد خاکساریان^۴

*- نویسنده مسئول، استادیار، بخش تحقیقات شناسایی خاک و ارزیابی اراضی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج،

ایران. پست الکترونیک: R.kharazmi@areeo.ac.ir

۲- استادیار، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد خاک‌شناسی، گروه مهندسی و علوم خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۴- محقق، گروه تحقیقات تپه‌های شنی، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۸

چکیده

این پژوهش با هدف شناسایی کانون‌های گردوغبار و حساسیت خاک به بادبردگی در شرق استان کرمان با تلفیقی از روش‌های میدانی و سنجش از دور انجام شد. در مجموع ده محدوده در منطقه مورد مطالعه با مساحت ۳۰۰۷ کیلومتر مربع بر مبنای دورسنجی و بررسی میدانی در زمستان ۱۳۹۹ شناسایی شد. مناطق مستعد تولید گردوغبار منطقه و تعیین تناوب رخداد گردوغبار در ۲۰ سال گذشته با شاخص عمق اپتیک حاصل از سنجنده مودیس ترا و آکوا تعیین شد. برای بررسی میزان فرسایش‌پذیری خاک‌ها، سرعت آستانه فرسایش بادی و میزان بادبردگی در سه کلاس سرعت ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر بر ثانیه با ۱۷ نمونه خاک در تونل باد اندازه‌گیری شد. مقادیر قابلیت هدایت الکتریکی (EC) خاک نیز با ۲۲ نمونه در آزمایشگاه تعیین و بعد نقشه شوری خاک با روش کریجینگ تهیه شد. نتایج حاصل از شاخص پوشش گیاهی تعمیم یافت و رابطه خطی EC در محیط گوگل ارث انجین محاسبه و با نتایج کریجینگ مقایسه گردید که بیانگر شوری شدید کانون‌های مورد بررسی است ($EC > 16$). نتایج تحلیل بادهای فرساینده و رژیم باد غالب بر مبنای داده‌های پنج ایستگاه هواشناسی در منطقه نشان داد، ایستگاه‌های ریگان و نصرت‌آباد به ترتیب با ۵۶۱ و ۱۱۹۹ قابلیت حمل ماسه برحسب واحد برداری و بادهای با سرعت ۴۰ نات (۲۰/۵۷ متر بر ثانیه) جزو مناطق با انرژی باد زیاد دسته‌بندی می‌شوند. نتایج تعیین فرسایش‌پذیری خاک‌ها نشان داد، بخش‌های جنوبی دارای کمترین میزان سرعت آستانه فرسایش بادی (بین شش تا هشت متر بر ثانیه) هستند که جزو مناطق حساس به فرسایش بادی گروه‌بندی شدند و میزان تجمعی بادبردگی آنها در سه کلاس سرعت باد، ۶۰ کیلوگرم بر مترمربع در دقیقه است. با توجه به نتایج، مناطق مورد مطالعه از کانون‌های داخلی مهم گردوغبار محسوب می‌شوند که نیازمند اقدامات مدیریتی برای کنترل کانون‌های برداشت است.

واژه‌های کلیدی: تونل باد، شاخص AOD، شوری خاک، گردوغبار، گوگل ارث انجین

مقدمه

از مهمترین چالش‌های زیست‌محیطی به حساب می‌آید. وقوع طوفان‌های گردوغبار در مناطق خشک و نیمه‌خشک و اثرهای آن بر جنبه اقتصادی-اجتماعی، سلامتی انسان و محیط‌زیست به یک نگرانی جهانی تبدیل شده است

پدیده گردوغبار یکی از فرایندهای جوی است که در نتیجه بادهای آشفته (جبهه‌ها و همرفت‌ها) ایجاد می‌شود و آثار و پیامدهای زیست‌محیطی نامطلوبی بر جای می‌گذارد و به‌تازگی

استان، شناسایی منشأ برداشت ریزگردهاست که از اصول اولیه کنترل و مدیریت فرسایش بادی محسوب می‌شود. امروزه با پیشرفت دانش و فناوری و تکنیک‌های سنجش از دور، تصاویر ماهواره‌ای به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر در شناسایی کانون‌های گردوغبار محسوب می‌شود (Baddock et al., 2017; Kharazmi et al., 2009). در این روش با استفاده از شناسایی پیکسل‌های آلوده به ذرات گردوغبار، رفتار طیفی آن در طول موج‌های مختلف بررسی می‌شود (Rayegani et al., 2020; Kandakji et al., 2017). با توجه به اینکه در بیشتر عرصه‌های بیابانی و مناطق مستعد فرسایش بادی آمار و اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک محدود است، استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و شاخص‌هایی مانند شاخص عمق نوری (AOD) و شاخص‌های پوشش گیاهی مانند شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) نقش بسیار مهمی را در شناسایی کانون‌های گردوغبار دارند (Godie & Middleton, 2018; Arjmand et al., 2006). این شاخص‌ها به دلیل دقت بالا در تشخیص، همچنین تفکیک زمانی، امکان پایش کانون‌های گردوغبار را در پهنه‌های وسیع فراهم می‌کنند. مقدار AOD بیشتر از ۰/۳ بیانگر تجمع بالای آئروسول‌ها (Dundar et al., 2019) و مقدار بزرگ‌تر از ۰/۵ بیانگر وجود گردوغبار در جو است (Kolios et al., 2019; Li et al., 2021). تاکنون مطالعات زیادی مبتنی بر شاخص‌های یادشده برای شناسایی مناطق مستعد گردوغبار در ایران انجام شده است که در ادامه به چند نمونه اشاره می‌شود.

Rashki و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از شاخص AOD و داده‌های سنجنده MODIS، TOMS و MISR به بررسی ارتباط بین خشکیدگی دریاچه هامون و افزایش شدت گردوغبار در جنوب شرق ایران پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد، بستر خشکیده این دریاچه یکی از مهمترین کانون‌های گردوغبار در خاورمیانه است.

Namdari و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از میانگین ماهانه شاخص AOD در یک دوره ۱۴ ساله توزیع زمانی و مکانی طوفان‌های گردوغبار را در غرب ایران بررسی کردند و نشان دادند، در ابتدای فصل تابستان میانگین این شاخص در

(Rezazadeh et al., 2013). شمال آفریقا، خاورمیانه و آسیا در رتبه اول بیشترین فراوانی این طوفان‌ها از نظر پراکنش و توزیع مکانی گردوغبار در جهان قرار دارند (Akpınar-Elci et al., 2021; Aghababaeian et al., 2021; Pan et al., 2021). در سال‌های اخیر شدت این طوفان‌ها و غلظت مواد حمل‌شده در آن به‌شدت افزایش یافته، به‌طوری‌که عرض‌های شمالی‌تر کشور نیز تحت تأثیر این پدیده قرار گرفته است. وقوع این طوفان‌ها در چند سال اخیر بر کیفیت زندگی مردم تأثیر شگرفی گذاشته و امکان کار و هرگونه فعالیت مفید دیگری را از ساکنان سلب کرده است (Khaledi, 2016; Rashki et al., 2021). تحقیقات نشان می‌دهد، بخش اعظم طوفان‌های گردوغبار در غرب ایران منشأ خارجی دارد و به دلیل مدل اشتباه توسعه، همچنین مداخلات انسانی، کشورهای سوریه و عراق تبدیل به کانون‌های مهم گردوغبار شده‌اند که نقش مهمی را در آلودگی هوای منطقه دارند (Naserpour et al., 2015; Arami et al., 2018; Miri et al., 2021; Abbasi et al., 2021). این در حالی است که سهم عمده تولید گردوغبار در شرق و جنوب شرق ایران مرتبط با کانون‌های داخلی است (Karegar et al., 2017; Araghi zade & Masoodian, 2021).

از مهمترین کانون‌های گردوغبار در شرق ایران می‌توان به تالاب هامون در سیستان، همچنین تالاب جازموریان اشاره کرد که در سال‌های اخیر به دلیل عوامل طبیعی و انسانی، تبدیل به اراضی بایر و کانون گردوغبار شده‌اند (Kharazmi et al., 2016; Rashki et al., 2017; Kharazmi et al., 2018; Abbasi et al., 2019b). در این بین، استان کرمان به دلیل شرایط اقلیمی خاص، واقع شدن در فلات مرکزی و هم‌جواری با کویر، ۲۰ درصد از اراضی بیابانی کشور را شامل می‌شود، به‌طوری‌که بیش از ۶/۵ میلیون هکتار از مساحت این استان را رخساره‌های بیابانی دربرمی‌گیرد (Khaleghi et al., 2016). در سال‌های اخیر رخداد پدیده گردوغبار در ایران، همچنین، در استان کرمان روند افزایشی داشته است (Abbasi et al., 2019a; Rashki et al., 2021). در همین رابطه، یکی از راهکارهای اساسی در کنترل و مدیریت گردوغبار در این

بالاترین حد است.

مطالعات دیگری نیز در ارتباط با خصوصیات خاک و حساسیت آن به فرسایش بادی انجام شده است. برای نمونه، Akhzari و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از شاخص تفاضل نرمال شده شوری خاک (NDSI) به مطالعه ارتباط بین شوری و حساسیت خاک به فرسایش بادی در غرب ایران پرداختند. آنان در این مطالعه از مدل Radial Basis Function Network به منظور کلاس بندی شدت فرسایش بادی در محیط ARC GIS استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد، بین شوری خاک و فرسایش پذیری ارتباط مستقیم وجود دارد.

Shahabinejad و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از تونل باد و فاکتور شوری به مطالعه حساسیت خاک های نواحی بیابانی استان کرمان پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که بین شوری خاک و فرسایش پذیری آن ارتباط مستقیم وجود دارد.

روش های مبتنی بر سنجش از دور اگرچه در پایش گردوغبار دقت بسیار مناسبی دارند، اما شناسایی دقیق منشأ گردوغبار و تعیین مرز دقیق آنها نیازمند تلفیقی از روش های میدانی، آزمایشگاهی و دورسنجی است. در روش های میدانی و آزمایشگاهی امکان محاسبه حد آستانه فرسایش بادی و تعیین میزان حساسیت اراضی به فرسایش وجود دارد که در مقیاس منطقه ای عملکرد قابل قبولی دارد.

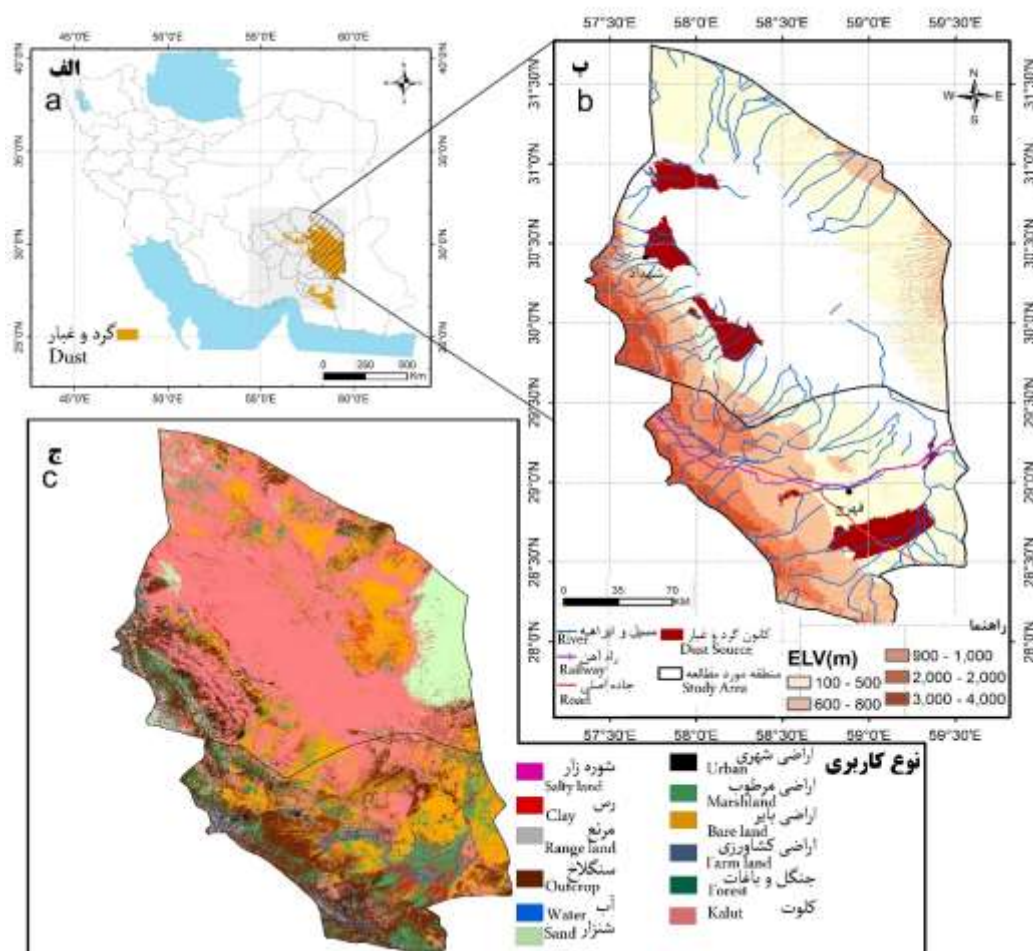
هدف از این مطالعه، مکان یابی کانون های گردوغبار در شرق استان کرمان با تلفیقی از روش های میدانی و دورسنجی و بررسی حساسیت این کانون ها به بادبردگی با استفاده از روش های آزمایشگاهی، سنجش از دور و زمین آمار است.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با مساحت ۳۵۱۳۵ کیلومتر مربع شامل شهرهای ریگان و نرماشیر در شرق استان کرمان و بخش شهداد در شمال شرقی این استان است (شکل ۱ الف).

براساس آمار بلندمدت ایستگاه هواشناسی ریگان و شهداد، میانگین بارندگی در این منطقه کمتر از ۶۰ میلی متر در سال و اقلیم آن گرم و خشک است. نوار غربی این منطقه را ارتفاعات رشته کوه بارز و کوه سیرج دربرگرفته است که رسوبات حاصل از جریان سیلاب های فصلی این ارتفاعات به سمت شرق، بستر مناسبی را برای ایجاد کانون های فرسایش بادی و گردوغبار فراهم می کنند. قسمت شرقی و شمال شرقی این منطقه به کویر لوت و دشت شوره گز منتهی می شود که به دلیل شرایط اقلیمی تقریباً عاری از پوشش گیاهی است و بخش بزرگی از این منطقه (در حدود ۵۰ هزار هکتار) در سیطره تپه های ماسه ای قرار دارد. ورود سیلاب های فصلی از سمت دشت های مرکزی ایران نیز سبب انباشت رسوبات آبی در این محدوده شده است که این رسوبات تحت فرسایش بادی قرار دارند. در این منطقه به جز باغ های مرکبات و نخلستان، جنگل های گز به صورت پراکنده وجود دارد. قسمت قابل ملاحظه ای از بخش شهداد را مناطق کویری لوت تشکیل داده است. این مناطق فاقد هرگونه امکانات زیستی و تقریباً عاری از پوشش گیاهی است، به طوری که اقلیم و زندگی ساکنان شهداد کاملاً تحت تأثیر بیابان لوت است. وقوع طوفان گردوغبار در تاریخ ۲۴ اردیبهشت ۱۴۰۱ در این منطقه گزارش شد. همان طور که نتایج شاخص AOD اعمال شده روی تصاویر سنجنده مودیس ترا و اکوا (Terra & Aqua satellites) در تاریخ یادشده نشان می دهد (شکل ۱ الف)، تقریباً تمام محدوده مورد بررسی تحت تأثیر این پدیده بوده است که خود بیانگر اهمیت مکان یابی کانون های گردوغبار در این منطقه است. قسمت میانی این منطقه را رخساره کلوت، اراضی بایر و شوره زار دربرمی گیرد و بخش شرقی آن توسط تپه های ماسه ای و رخساره های بیابانی دشت لوت پوشانده شده است. اراضی مرطوب نواحی جنوبی مرتبط با توسعه باغ های مرکبات و نخلستان و به طور پراکنده جنگل های گز است (شکل ۱ ج). طبق بررسی میدانی آب شویی اراضی شور به منظور فعالیت های کشاورزی در این نواحی، از عوامل اصلی در شور شدن اراضی مجاور است.



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه به همراه نمونه‌های از آشکارسازی گردوغبار در منطقه با استفاده از تصویر سنجنده مودیس ترا و اکوا و شاخص AOD در تاریخ ۲۴ اردیبهشت ۱۴۰۱ (الف)، حدود کانون‌های مورد مطالعه به همراه تغییرات ارتفاعی منطقه (ب) و نقشه کاربری اراضی منطقه مورد بررسی با استفاده از تصاویر سنتنل ۱ و ۲ بر مبنای محصول ۱۳ کلاسه منتشرشده در پلتفرم گوگل ارث انجین توسط Gorbanian و همکاران (۲۰۲۰) (ج)

Figure 1- Study area with a sample of dust detection in the region using MODIS derived aerosol optical depth (AOD) in May 14, 2022 (a), Dust sources boundary with elevation change in the study area (b), land cover map of study area using Sentinel-1 and Sentinel-2 Data published in GEE by Gorbanian et al. (2020) (c)

استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای و پژوهش‌های پیشین، تجزیه و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و پایش گردوغبار با استفاده از شاخص AOD در پلتفرم گوگل ارث انجین و تفسیر بصری گوگل ارث، مناطق تحت تأثیر فرسایش بادی شناسایی شد. با توجه به نقش پوشش گیاهی در تثبیت کانون‌ها، با استفاده از شاخص NDVI مناطقی که در این محدوده‌ها دارای پوشش گیاهی بودند، شناسایی شدند تا در تعیین نقاط نمونه‌برداری مستثنی شوند.

مراحل انجام پژوهش

یکی از راهکارهای اساسی در کنترل و مدیریت ریزگردها، شناسایی منشأ برداشت آنهاست. شناخت مناطق برداشت رسوبات بادی از اصول اولیه کنترل و مدیریت فرسایش بادی است. فرایند انجام این پژوهش در شکل ۲ ترسیم شده است که در ادامه این مراحل تشریح می‌شوند.

به منظور شناسایی کانون‌های بحران در منطقه، ابتدا با

روش نمونه برداری سیستماتیک نقاط نمونه برداری کانون‌ها تعیین شد. فاصله این نقاط دو کیلومتر تعیین شد که در هنگام مطالعه میدانی و با توجه به ویژگی‌های ظاهری منطقه و امکان دسترسی به نقاط، فواصل و تعداد آنها تغییر کردند. نمونه‌های برداشت شده شامل دو دسته بودند: ۱- تعداد ۲۲ نمونه خاک با هدف آنالیز مشخصات فیزیکی و شیمیایی از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر برداشت شدند، ۲- تعداد ۱۷ نمونه خاک دست‌نخورده به منظور تعیین سرعت آستانه فرسایش بادی به وزن ۲۵ کیلوگرم برداشت شدند. پس از ثبت مشخصات ظاهری خاک در فرم مخصوص، نمونه‌ها برای آنالیز به آزمایشگاه خاک مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور منتقل گردیدند.

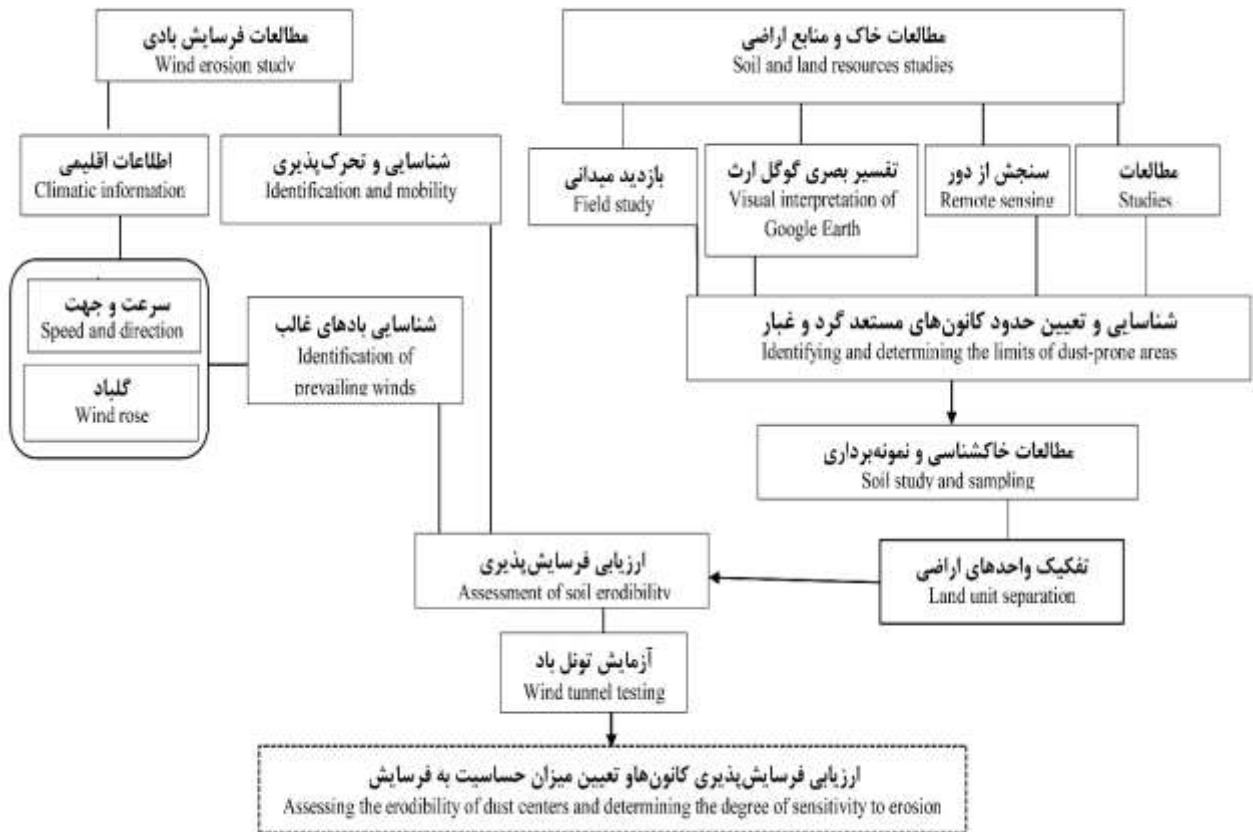
مطالعات فرسایش بادی

شناخت کامل رژیم بادی و ویژگی‌های مؤثر باد مانند سرعت باد، جهت غالب باد و فراوانی باد از پارامترهای مهم در فرسایش بادی محسوب می‌شود (Refahi, 2018). ساده‌ترین روش آماری برای نمایش داده‌های بادسنجی گل‌بادها هستند که در آنها اطلاعات مربوط به فراوانی سمت در کلاس‌های مختلف سرعت باد در هر جهت نمایش داده می‌شود. در این پژوهش با هدف تعیین بادهای غالب منطقه از گل‌بادهای ایستگاه‌های موجود استفاده شد. بدین منظور از اطلاعات ۵ ایستگاه هواشناسی موجود در منطقه مورد مطالعه استفاده شد (جدول ۱).

همچنین، مناطقی که به دلیل ناهمواری شدید نقش ناچیزی را در فرسایش بادی داشتند نیز با استفاده از داده‌های رقومی ارتفاعی ماهواره استرنا دیده گرفته شدند (ماسک شدند). این محدوده‌ها شامل تپه‌های ماسه‌ای مرتفع در شرق و کوه‌های غربی منطقه مورد مطالعه هستند. مرز اولیه کانون‌ها در محیط گوگل ارث مشخص شد. سپس با انجام بازدید میدانی و مصاحبه با افراد بومی منطقه، محدوده‌های شناسایی شده صحت‌سنجی شد (شکل ۱ ب). پس از شناسایی مناطق دارای رسوبات بادی، مرز کانون‌های برداشت در محیط گوگل ارث اصلاح شد و نقشه منطقه مورد نظر به صورت رقومی تهیه گردید (شکل ۱ ب). در مجموع ده پیکره (محدوده) در منطقه مورد مطالعه با مساحت ۳۰۰۷ کیلومتر مربع بر مبنای بررسی‌های میدانی و دورسنجی مرزبندی شد. آنچه که مسلم است، شناخت دقیق و ارزیابی نقاط برداشت از بخش‌های مهم مطالعات فرسایش بادی است که در نهایت منجر به ارائه راهکارهای مدیریتی در بخش اجرا خواهد شد.

نمونه برداری و تعیین ویژگی‌های خاک

به منظور تعیین ارتباط بین فرایندهای رسوب‌گذاری، همچنین تخمین فاصله مناطق برداشت نسبت به ترسیب و در نهایت مطالعه خصوصیات خاک منطقه برای مطالعات مربوط به میزان حساسیت، نمونه برداری انجام می‌شود. بدین منظور، در ابتدا در فضای نرم‌افزار ArcMap به



شکل ۲- نمودار جریانی مراحل انجام پژوهش

Figure 2. Schematic diagram of methodology in this study

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده

Table 1. Information of used stations

داده‌های در دسترس Available data	ارتفاع (متر) Elevation(m)	عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude	نام ایستگاه Satation name
2003-2013	490	30.41	57.71	شهداد Shahdad
1985-2013	1067	29.10	58.40	بم Bam
1995-2011	610	28.65	59.05	ریگان Rigan
1997-2011	520	30.55	57.77	ده سیف Dehseif
1995-2011	1100	29.88	59.96	نصرت‌آباد Nosrat abad

قابل توجهی شروع به حرکت کردند. این روش با تکرار اندازه‌گیری و تغییر سرعت باد در تونل باد به صورت تجربی مشخص گردید. در روش محاسباتی با اندازه‌گیری مقدار بادبردگی در سرعت‌های مختلف، با استفاده از رابطه خط بادبردگی در مقابل سرعت باد، هنگامی که میزان بادبردگی به صفر نزدیک شود، سرعت آستانه مشخص می‌شود. در واقع به کمک رابطه خط به دست آمده و قرار دادن مقدار Y برابر صفر می‌توان سرعت آستانه فرسایش را به روش ریاضی محاسبه کرد. پس از تعیین سرعت آستانه مربوط به هر یک از نمونه‌ها، برای اندازه‌گیری فرسایش‌پذیری بادی خاک، ابتدا نمونه خاک در سینی تیمار داده شد و بعد آستانه فرسایش بادی مشاهداتی تعیین شد. سپس میزان بادبردگی به مدت دو دقیقه در سرعت‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر بر ثانیه مربوط به هر نمونه تعیین و نمودار میزان بادبردگی (کیلوگرم بر مترمربع در دقیقه) در سرعت‌های مختلف تهیه شد.

تهیه نقشه یکپارچه از نقاط نمونه‌برداری

تکنیک‌های زمین‌آمار و سنجش از دور امکان پیش‌بینی پارامترهای مورد بررسی را در نقاط فاقد آمار به ما می‌دهد. با هدف تعیین نقشه یکپارچه از داده‌های نقطه‌ای، از روش کریجینگ معمولی استفاده شد. مدل کریجینگ یک روش تخمین استوار بر منطق میانگین متحرک وزن‌دار است. کریجینگ یک روش زمین‌آمار برای درون‌یابی داده‌ها بر اساس واریانس فضایی است. در این مدل واریانس فضایی تابعی از فاصله شناخته می‌شود و این تخمین به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^N \gamma_i Z(s_i) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن، $Z(s_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده برای نمونه i ام، γ_i وزن یا اهمیت وابسته به نمونه i ام، S_0 محل پیش‌بینی و N تعداد مقادیر اندازه‌گیری شده است (Ghohroudi tali, 2003; Nabiollahi et al., 2017; Ahmadi et al., 2019). با توجه به اینکه دقت روش‌های درون‌یابی متکی بر تعداد

برای تعیین آستانه فرسایش بادی و مقایسه میزان رسوب‌دهی خاک‌ها، از دستگاه تونل باد متعلق به آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور استفاده شد. این تونل متشکل از چهار قسمت اصلی شامل مولد باد، پیتوت، فشارسنج الکترونیکی و محفظه آزمایش بود. تونل باد موجود قادر به شبیه‌سازی باد در سرعت‌های مختلف بین ۰/۵ تا حداکثر ۳۰ متر بر ثانیه بود. سرعت‌های مختلف باد از طریق کنترل دور LG متصل به دستگاه تونل باد قابل تنظیم بود. محفظه آزمایش در دستگاه سنجش فرسایش بادی شامل یک تونل با عرض ۹۴ سانتی‌متر، ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر و طول ۱۶ متر است که سینی‌های آزمایش به طول ۵۰ سانتی‌متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر در قسمت میانی محفظه قرار می‌گیرند. برای اندازه‌گیری میزان فرسایش بادی، تعداد ۱۷ نمونه خاک از منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری شد و بعد در سینی آزمایش قرار داده شد و سطح آنها به وسیله یک کاردک به آرامی و بدون ایجاد فشردگی صاف شد و با ترازویی با دقت پنج گرم وزن آنها اندازه‌گیری شد. سپس سینی آزمایش در تونل باد قرار گرفت و سرعت باد به منظور تعیین سرعت آستانه فرسایش ذرات خاک، به تدریج و به آرامی افزایش یافت تا ذرات خاک از سینی آزمایش به صورت معنی‌داری شروع به حرکت کنند. منظور از حرکت معنی‌دار ذرات، اینکه ذرات خاک در زمان‌های متفاوت و به طور یکنواخت از نقاط مختلف سطح خاک واقع در سینی آزمایش شروع به حرکت کند (Ahmadi, 2008; Shahabinejad et al., 2019). تعیین سرعت آستانه فرسایش بادی از مبانی اساسی حفاظت خاک و کنترل باد در مناطق بیابانی محسوب می‌شود (Ahmadi, 2008). میزان رسوب‌دهی در سرعت‌های متفاوت و در طول مدت مشخص تعیین و نمودارهای مقدار نرخ حمل رسوب یا بادبردگی برحسب کیلوگرم بر مترمربع در دقیقه ترسیم می‌شود.

سرعت آستانه فرسایش در این پژوهش به دو روش مشاهداتی و محاسباتی مشخص شد. آستانه فرسایش در روش مشاهداتی هنگامی ثبت شد که از سطح نمونه ذرات

نقاط نمونه برداری استخراج و با مقدار EC نمونه‌های آزمایشگاهی مقایسه شدند.

نتایج

رژیم بادی

انرژی سالیانه و ماهیانه باد با استفاده از آمار ۵ ایستگاه هواشناسی با روش فرایبرگر تجزیه و تحلیل شدند (Fryberger & Dean, 1979). بر مبنای این روش، ظرفیت حمل ماسه در سه کلاس کم، متوسط و شدید برای هر یک از ایستگاه‌های هواشناسی طبقه‌بندی می‌شود (جدول ۲). ذکر این نکته لازم است که فرایبرگر در این روش پیشنهاد نمود از سرعت‌های بیشتر از ۴۰ نات صرف نظر شود، به دلیل اینکه از نظر آماری درصد بسیار ناچیزی را شامل می‌شوند. بدین ترتیب، پهنه‌بندی ظرفیت حمل ماسه در محدوده مورد بررسی نیز بر همین مبنای انجام شد. به منظور پهنه‌بندی مکانی مناسب، از داده‌های ایستگاه نصرت‌آباد متعلق به استان سیستان و بلوچستان نیز استفاده شد.

ظرفیت حمل (DP) و جهت حمل ماسه (RDD) و شاخص همگنی (RDP/DP) برای پنج ایستگاه منتخب در جدول ۳ نشان داده شده است. براین اساس بیشترین میزان انرژی بادهای فرساینده متعلق به ایستگاه‌های هواشناسی نصرت‌آباد (مرز شرقی استان کرمان) و ریگان در شرق استان کرمان است.

مطالعات مربوط به میانگین سرعت باد، همچنین مطالعات مربوط به درصد باد آرام در ایستگاه‌های مورد مطالعه در منطقه در شکل ۳ قابل مشاهده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، در بازه‌های زمانی در دسترس، در دو ایستگاه نصرت‌آباد و ریگان میانگین سرعت باد نسبت به دیگر ایستگاه‌ها بیشتر است.

نمونه‌های جمع‌آوری شده است و افزایش یا کاهش نمونه‌ها بر جزئیات نتیجه نهایی تأثیر می‌گذارد، استفاده از روش‌های سنجش از دور با تلفیق مدل‌های رگرسیونی می‌تواند جزئیات بیشتر و دقیق‌تری را در مناطق وسیع ارائه دهد (Wu et al., 2018). بدین منظور تصاویر ماهواره سنتینل ۲ در محیط GEE فراخوانی شد و پس از اعمال تصحیحات مربوط به ماسک ابر، در نهایت ۴۸ تصویر در بازه زمانی نزدیک به زمان نمونه برداری (دی تا اسفند ۱۳۹۹) انتخاب شد. به منظور تهیه نقشه شوری، از شاخص GDVI استفاده شد. طبق مطالعات انجام شده در مناطق خشک، این شاخص بهترین همبستگی را با مقادیر شوری خاک دارد (Wu et al., 2014; Da Silva et al., 2021)

$$GDVI = \frac{SR^n - 1}{SR^n + 1} = \frac{\rho_{NIR}^n - \rho_R^n}{\rho_{NIR}^n + \rho_R^n} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در این فرمول، ρ_{NIR} معادل باند مادون قرمز نزدیک و ρ_R معادل باند قرمز تصویر سنتینل ۲ است. n مقدار عددی بین یک تا n است و اگر n برابر یک باشد، GDVI معادل NDVI خواهد شد.

به منظور پیش‌بینی مقادیر EC در نقاط فاقد اطلاعات زمینی، از رابطه رگرسیونی زیر استفاده شد.

$$EC = -2.87 - 23.27 \ln(GDVI) \quad \text{رابطه (۳)}$$

با توجه به نتایج پژوهش Wu و همکاران (۲۰۱۴)، این رابطه با مقدار $R^2 = 0.87$ نتایج قابل‌قبولی را در مناطق خشک ارائه می‌دهد.

به منظور صحت‌سنجی نتایج حاصل از اعمال رابطه ۳ روی شاخص GDVI، مقدار عددی پیکسل‌های متناظر با

جدول ۲- ارزیابی ظرفیت فرسایش بادی براساس محاسبات آماری ظرفیت حمل ماسه (Fryberger & Dean, 1979)

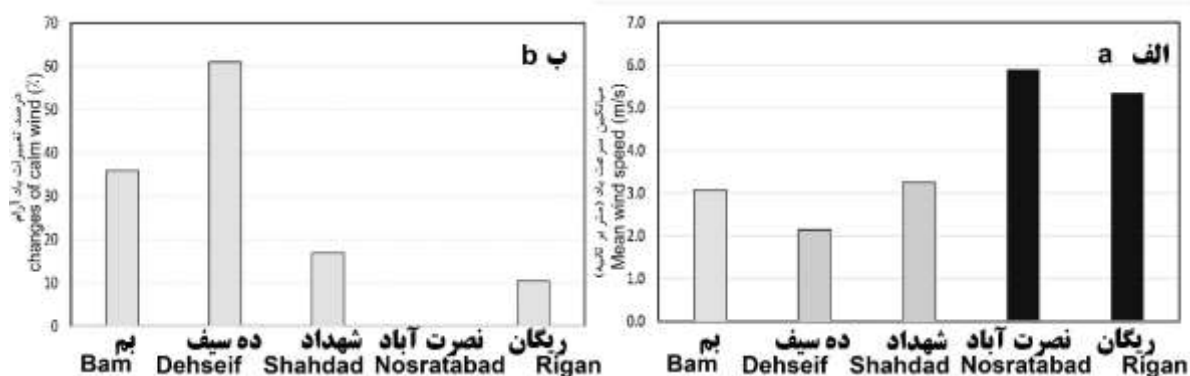
Table 2. Evaluation of wind erosion potential based on statistical calculations of sand transport potential (Fryberger & Dean, 1979)

توزیع احتمالی جهت باد Probable distribution of wind direction	تغییرپذیری جهت باد Variability of wind direction	RDP/DP	انرژی باد Wind energy	ظرفیت حمل Drift potentials
چند جهته با زاویه منفرجه Multi-directional with obtuse angle	زیاد High	<0.3	کم	<200
چند جهته با زاویه حاده Multi-directional with acute angle	متوسط Medium	0.3-0.8	متوسط	200-400
یک جهته unidirectional	کم Low	>0.8	زیاد	400-1000

جدول ۳- ویژگی‌های بادهای فرساینده در ایستگاه‌های هواشناسی شرق استان کرمان

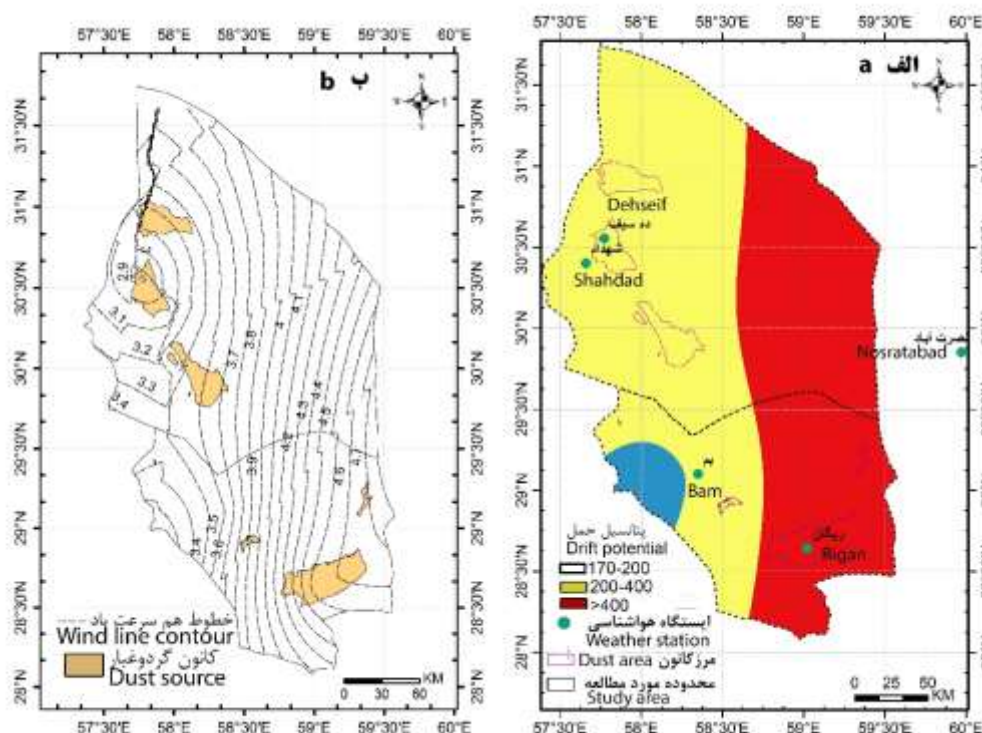
Table 3. Characteristics of erosive winds in meteorological stations in the east of Kerman province

سرعت میانگین (متر بر ثانیه) Mean speed (m/s)	RDP/DP (بدون بعد) RDP/DP (Dimensionless)	RDP (بردار) RDP (Vector unit)	RDD (درجه) RDD (Degree)	DP (بردار) DP (Vector unit)	باد آرام (%) Calm wind (%)	بازه زمانی period	ایستگاه Station	استان Province	ردیف Row
3.1	0.61	132.41	-42.48	218.08	35.89	1985-2013	بم Bam	کرمان Kerman	۱
5.4	0.10	57.93	18.90	561.68	10.40	1995-2011	ریگان Rigan		۲
3.3	0.76	269.20	-13.00	353.00	16.89	2033-2013	شهاداد Shahdad		۳
2.1	0.82	218.46	-4.76	266.70	61.00	1997-2011	دهسیف Dehseif		۴
5.9	0.17	208.26	63.60	1199.90	0.05	1995-2011	نصرت- آباد Nosrat abad	سیستان و بلوچستان Sistan and Baluchestan	۵



شکل ۳- میانگین سرعت باد (الف) و درصد تغییرات باد آرام (ب) در ایستگاه‌های مورد مطالعه

Figure3. Mean wind speed (a) and percentage change of calm wind in the studied stations (b)



شکل ۴- تغییرات انرژی باد (الف) و منحنی‌های هم‌سرعت باد (متر/ثانیه) در منطقه مورد مطالعه (ب)

Figure4. Wind energy change (a) and wind line contour in the study area (b)

مجموع ۵ ایستگاه در منطقه مورد مطالعه، ۲ ایستگاه ریگان و نصرت‌آباد در کلاس شدید و سه ایستگاه بم، ده‌سیف و شهداد در کلاس متوسط انرژی باد قرار گرفته‌اند (شکل ۴ الف) که با نتایج Abbasi و همکاران (۲۰۱۹a) همخوانی دارد.

تجزیه و تحلیل گل‌بادهای سالانه ایستگاه‌های بم، ریگان

به‌منظور پهنه‌بندی تغییرات مکانی انرژی باد در منطقه، با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ در محیط نرم‌افزار ArcMap، نقشه انرژی باد بر مبنای روش Fryberger & Dean استخراج شد (شکل ۴ الف). نتایج نشان داد، انرژی باد در قسمت شرقی منطقه مورد بررسی بالاترین مقدار و مناطق غربی کمترین میزان را دارد. نتایج نشان می‌دهد، از

با هدف پهنه‌بندی نقشه شوری با دقت و جزئیات بیشتر، رابطه ۱ روی شاخص GDVI اعمال شد (شکل ۶ ب). صحت کلی نتایج به دست آمده از این روش با مقایسه مقادیر نقاط نمونه برداری و پیکسل‌های متناظر بررسی شد. نتایج نشان‌دهنده تطابق ۸۱ درصدی مقادیر بود که مؤید صحت قابل قبول روش به کار رفته است. همان‌طور که در شکل ۶ ب نشان داده شده است، روش‌های مبتنی بر شاخص و روابط خطی بین مقادیر EC زمینی و انعکاس طیفی تصاویر ماهواره‌ای جزئیات بسیار بیشتری را از وضعیت شوری منطقه مورد مطالعه ارائه می‌دهد. با توجه به نتایج این شاخص، همچنین نتایج درون‌یابی به روش کریجینگ، نواحی جنوبی منطقه مورد مطالعه در کلاس بسیار شور قرار دارد، این موضوع نشان‌دهنده حساسیت خاک به فرسایش بادی است.

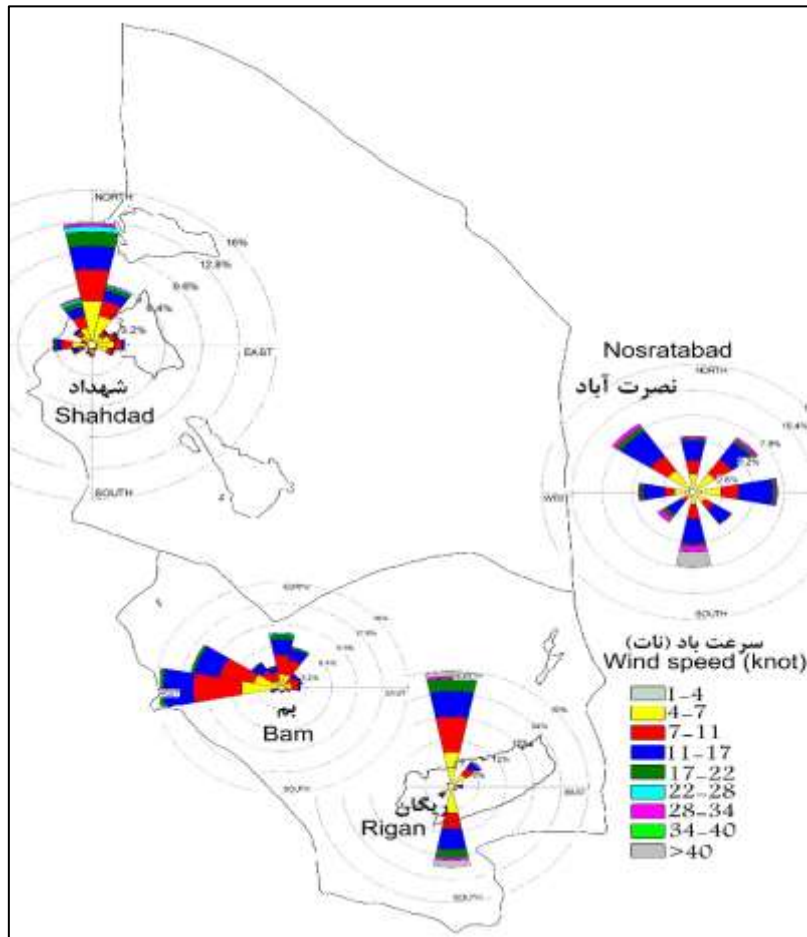
فرسایش پذیری خاک

به منظور امکان ارائه نقشه‌های استخراج شده در مقاله و نتایج حاصل از ۱۷ نمونه آزمایشی، کانون‌ها به دو قسمت محدوده ریگان و محدوده شهداد تقسیم شدند. نتایج تونل باد در کانون‌های محدوده ریگان بیانگر این مطلب است که کمترین سرعت آستانه در قسمت جنوبی است (شکل ۷ الف). سرعت آستانه فرسایش مشاهداتی در این ناحیه بین شش تا هشت متر بر ثانیه ثبت شد. با حرکت به بخش‌های مرکزی و شرقی سرعت آستانه فرسایش افزایش می‌یابد که این موضوع مرتبط با تجمع ماسه‌های روان در این مناطق است. کمترین سرعت آستانه فرسایش بادی در محدوده کانون‌های شهداد در نواحی جنوبی آن است که بین شش تا هشت متر بر ثانیه متغیر است (شکل ۷ ب).

و نصرت‌آباد نشان می‌دهد که در ایستگاه ریگان باد شمالی، در ایستگاه نصرت‌آباد باد جنوبی و در ایستگاه بم باد غربی به عنوان باد غالب شناخته شده‌اند (شکل ۵) که در دو ایستگاه نصرت‌آباد و ریگان دارای سرعت بیش از ۴۰ نات (۲۰/۵۷ متر بر ثانیه) است. در ایستگاه ریگان باد شمالی با فراوانی ۳۰ درصد و بعد باد جنوبی با فراوانی حدود ۲۰ درصد از اهمیت بیشتر برخوردارند. در ایستگاه نصرت‌آباد بادهای جنوبی و شمال‌غربی با فراوانی حدوداً ۹ درصد دارای اهمیت هستند و باد شرقی در رتبه بعدی قرار دارد. در ایستگاه بم نیز باد غربی با فراوانی ۱۶ درصد و باد شمال‌غربی با فراوانی حدود ۱۱ درصد رایج‌تر هستند (شکل ۵). در ایستگاه شهداد نیز باد شمالی با فراوانی ۱۳ درصد باد غالب منطقه است و بادهای شمال‌شرقی با ۷ درصد و بادهای شمال‌غربی با ۶ درصد در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

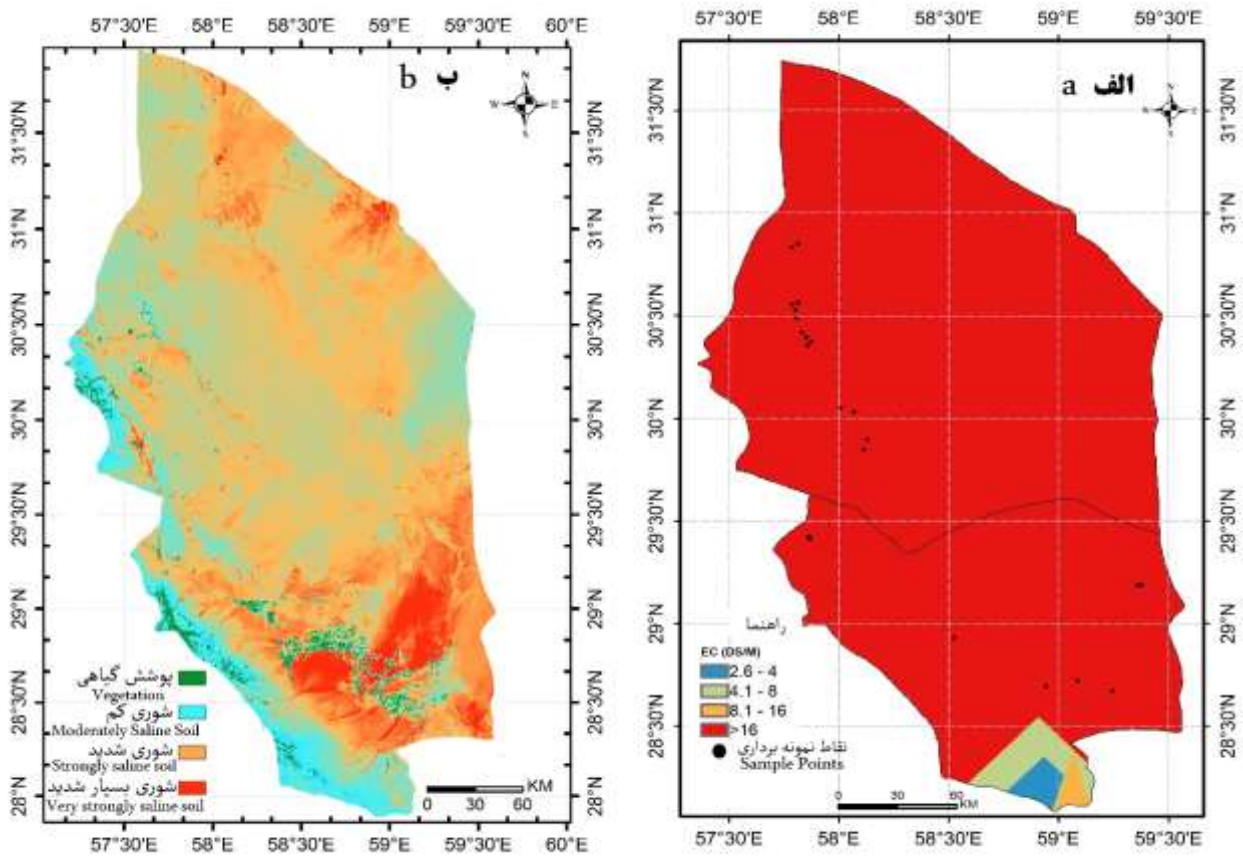
ارزیابی شوری خاک

یکی از عوامل مهم در افزایش حساسیت خاک به بادبردگی و قابلیت تثبیت بیولوژیک، شوری خاک است که این پارامتر سبب پوکی خاک و تسهیل فرسایش بادی می‌شود (Akhzari et al., 2015). بدین منظور هدایت الکتریکی نمونه‌های جمع‌آوری شده در محیط آزمایشگاه محاسبه و بعد با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ نقشه پهنه‌بندی شوری خاک استخراج شد (شکل ۶ الف). نقشه به دست آمده به چهار دسته شوری کم (۰ تا ۴)، شوری متوسط (۴ تا ۸)، شوری زیاد (۸ تا ۱۶) و به شدت شور (بیشتر از ۱۶) تقسیم شد (Salehpourjam & Tabatabaei, 2018). با توجه به نقشه درون‌یابی شوری، تقریباً تمام منطقه مورد مطالعه در دسته به شدت شور قرار دارد که این موضوع سبب کاهش استحکام خاک در مقابل بادبردگی می‌شود.



شکل ۵- گل‌بادهای سالانه نزدیک‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی به کانون‌های گردوغبار

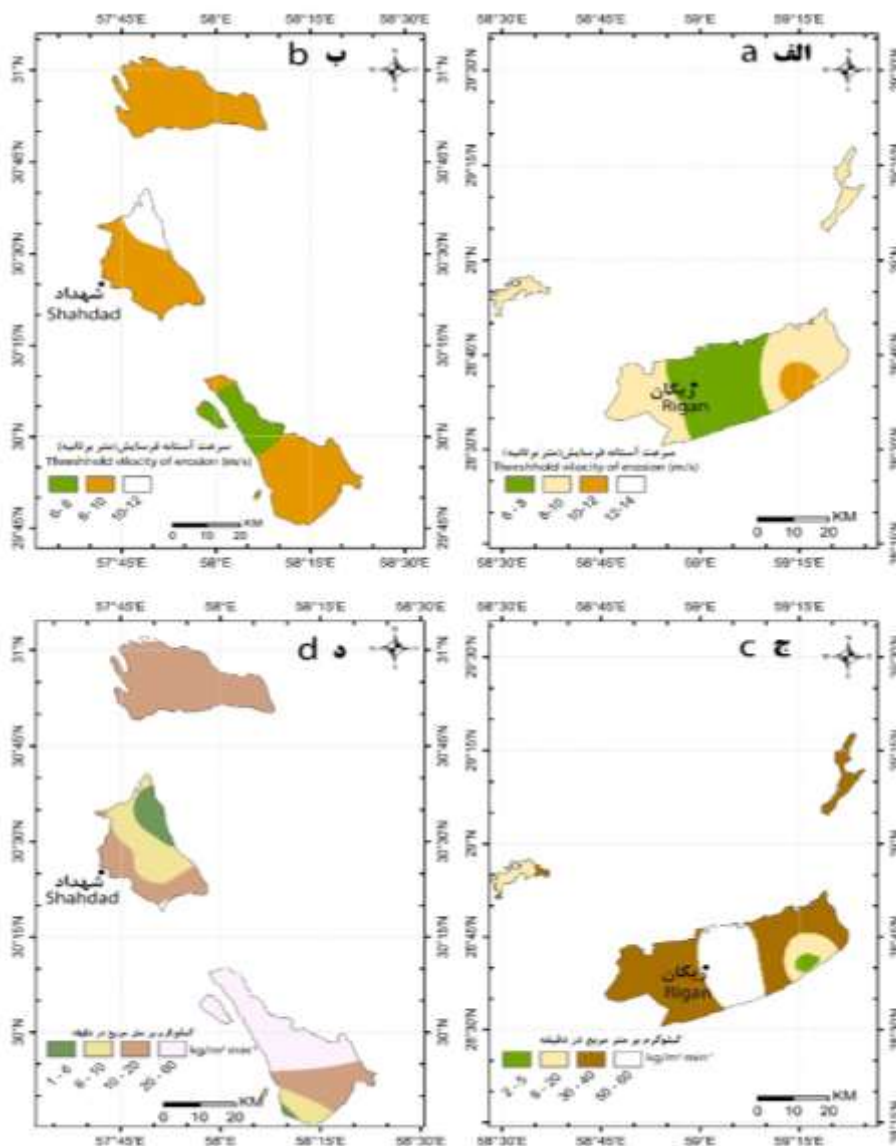
Figure 5. Annual wind rose of the closest stations to the dust sources



شکل ۶- نقشه شوری خاک با استفاده از داده‌های زمینی و زمین‌آمار (الف) و شاخص GDVI در محیط GEE (ب)
 Figure 6. Soil salinity map using field study and geostatistics (a) and GDVI index in GEE platform (b)

که در این منطقه کلوت‌های شهداد قرار دارند.

سرعت آستانه فرسایش در بخش شمالی این محدوده
 کانون گردوغبار در نزدیک شهداد ۱۲ متر بر ثانیه ثبت شد



شکل ۷- سرعت آستانه فرسایش بادی مشاهداتی (الف و ب) و پهنه‌بندی مقدار تجمعی بادبردگی در سه کلاس ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر بر ثانیه (ج و د) در کانون‌های منطقه مورد مطالعه

Figure 7. Visual threshold velocity of wind erosion (a and b) and cumulative wind erosion in the speed classes of 15, 20, and 25 m/s (c and d)

بر ثانیه بین ۰/۳۳ تا تقریباً ۱۳ کیلوگرم بر مترمربع در دقیقه خاک از دست خواهد رفت. در محدوده شهداد نیز بخش‌های جنوبی آن مقدار تجمعی بادبردگی در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه بین ۰/۰۳ تا ۱۳ کیلوگرم بر مترمربع در دقیقه خواهد بود (شکل ۷ د). از سویی دیگر، در بخش جنوبی منطقه مورد مطالعه بیشترین میزان هدررفت خاک

پهنه‌بندی میزان بادبردگی در کانون‌ها بر مبنای نتایج آزمایش تونل بادی نیز بیانگر این است که بیشترین فرسایش مرتبط با قسمت جنوبی و در محدوده شهرستان ریگان است (شکل ۷ ج). نتایج حاصل از محاسبات میزان فرسایش با توجه به آزمایش‌های تونل باد بیانگر این مطلب است که در محدوده ریگان در سرعت ۱۵ متر

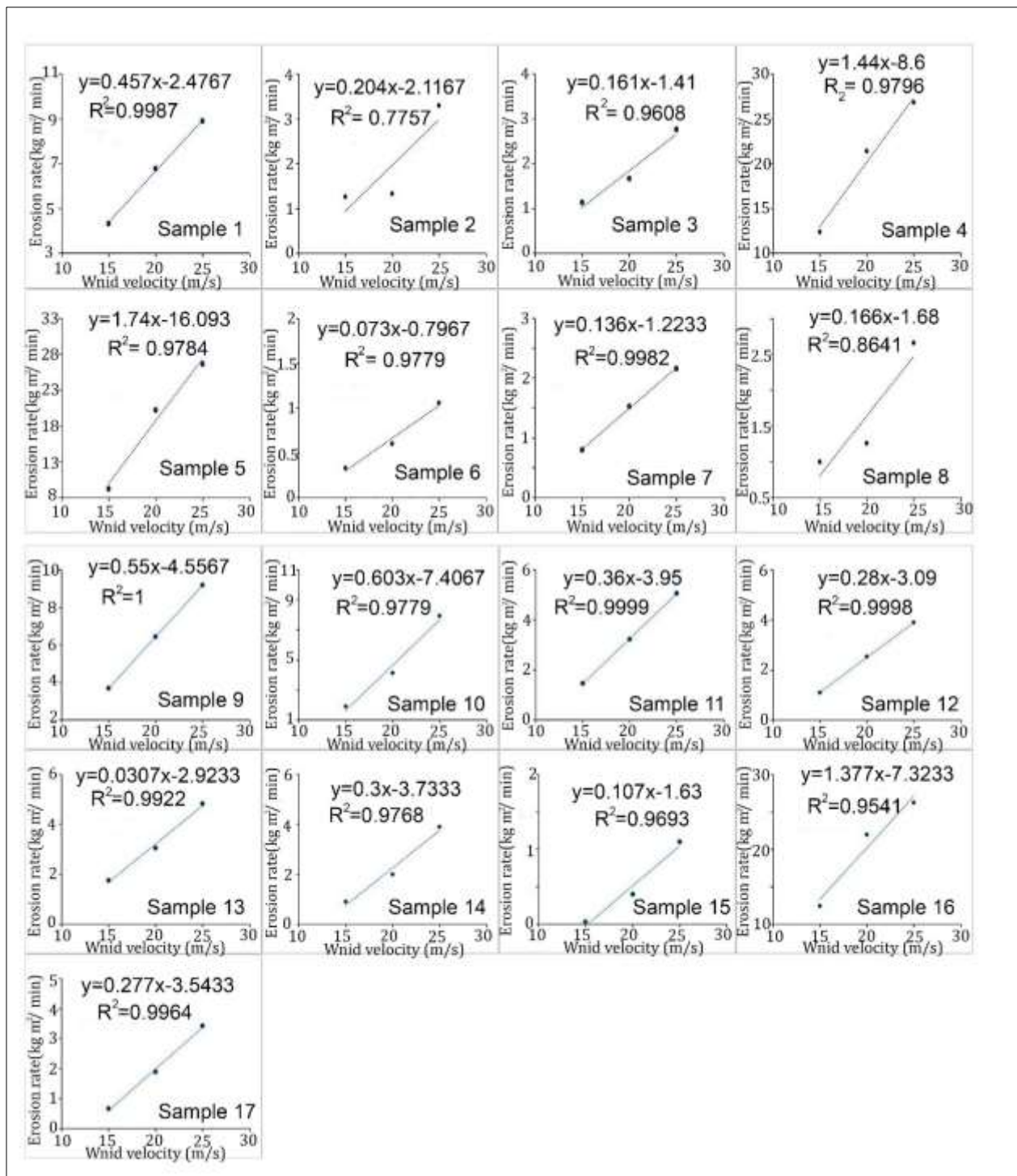
در واحدهای مرکزی کانون است و با حرکت به سمت غرب و شرق کانون از شدت هدررفت خاک کاسته می‌شود و به کمترین میزان خود می‌رسد. در بخش شمالی منطقه مورد مطالعه و در محدوده شهداد نیز بیشترین هدررفت خاک در بخش جنوب‌غربی است و در قسمت‌های مرکزی و شمالی از میزان بادبردگی کاسته می‌شود. نتایج تونل باد نشان داد، در محدوده‌هایی که سرعت آستانه فرسایش بادی بین شش تا هشت متر بر ثانیه است، میزان بادبردگی تجمعی در سه سرعت ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر بر ثانیه تقریباً ۶۰ کیلوگرم بر مترمربع در دقیقه است.

مقایسه نتایج حاصل از تونل باد و نقشه شوری خاک (شکل ۶) بیانگر این مطلب است که بین شدت شوری و فرسایش‌پذیری خاک رابطه مستقیم وجود دارد. در مناطق جنوبی که شدت شوری بیشتر است، سرعت آستانه فرسایش بادی کم و با افزایش سرعت باد، بر میزان بادبردگی افزوده می‌شود (شکل ۷ الف و ج). مطالعات پیشین در این زمینه نیز تأییدکننده همین مطلب بوده و از شوری به‌عنوان یکی از فاکتورهای مؤثر و تعیین‌کننده بر فرسایش‌پذیری خاک نام می‌برند (Panayiotopoulos *et al.*, 2004; Giuffrida *et al.*, 2016; Gillies *et al.*, 2017; Shahabinejad *et al.*, 2019).

میزان فرسایش‌پذیری هر یک از نمونه‌ها از روش محاسبه شیب خط بین نمودار میزان فرسایش در برابر سرعت باد در شکل ۸ قابل مشاهده است. تناوب رخداد گردوغبار بر مبنای شاخص AOD روی تصاویر سنجنده مودیس ترا و اکوا در یک دوره ۲۰ ساله در پلتفرم GEE نشان می‌دهد که در مرکز و شرق منطقه مورد مطالعه بین ۴۰۰ تا ۸۰۰ بار شاخص

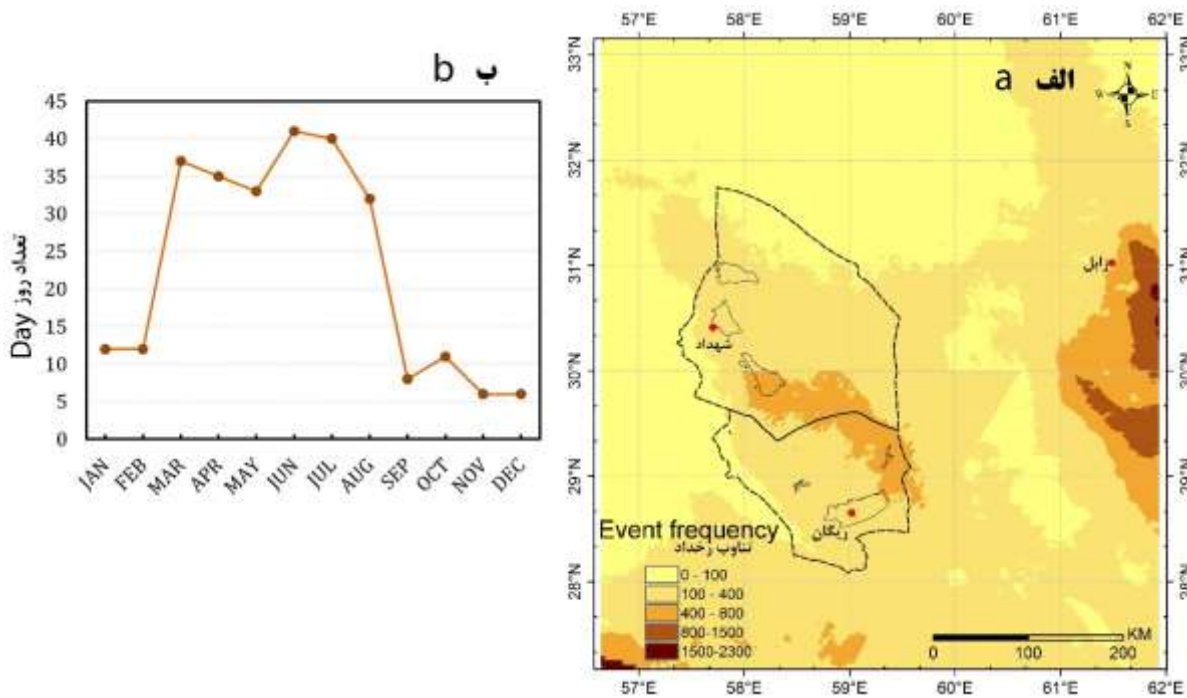
از سوی دیگر، تعداد روزهای مقادیر AOD بزرگ‌تر از ۰/۵ در هر ماه در یک دوره بیست ساله در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که بالاترین رخداد گردوغبار در منطقه در فصل تابستان است و پس از آن به ترتیب در بهار، پاییز و زمستان از شدت گردوغبار کاسته می‌شود (شکل ۹ ب).

مطالعات Jafari و sanati (۲۰۲۱) با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور روی قسمت جنوبی و جنوب‌شرقی استان کرمان نیز نشان داد، این مناطق از حساسیت شدیدی نسبت به فرسایش بادی برخوردارند که نتایج به‌دست‌آمده با نتایج این مطالعه همخوانی دارد و نشان‌دهنده صحت روش به‌کارگرفته در تعیین حساسیت کانون‌های برداشت گردوغبار است. با توجه به شکل ۹ ب، در ماه March، June و July بیشترین تعداد روزهای گردوغبار به ثبت رسیده است که بیانگر شدت فعالیت گردوغبار در ماه‌های خشک سال است. علاوه‌براین، در ماه‌های دیگر نیز رخداد گردوغبار ثبت شده است که نشان‌دهنده حساسیت منطقه به فرسایش بادی است.



شکل ۸- اندازه‌گیری فرسایش‌پذیری بادی به‌عنوان شیب خط رابطه بین مقدار فرسایش و سرعت باد در کانون‌های مورد بررسی

Figure 8. Wind erodibility measurement as the slope of the relationship line between the amount of erosion and wind speed



شکل ۹- تداوم رخداد روزانه گردوغبار بر مبنای شاخص AOD در یک دوره بیست ساله (الف) و تعداد روزهای با شاخص AOD

بزرگ‌تر از ۰/۵ در ماه در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ (ب) در منطقه مورد مطالعه

Figure 9. Daily dust event frequency based on AOD in a 20 years period (a) and the number of days with an AOD greater than 0.5 from 2001 to 2021 (b) in the study area

نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر گردوغبار یکی از مخاطرات طبیعی مهم در شرق استان کرمان به‌شمار می‌آید. سالانه گزارش‌های متعددی از خسارت طوفان شن و گردوغبار به زیرساخت‌های حمل‌ونقل، کشاورزی و بهداشتی این منطقه منتشر می‌شود. در این پژوهش با استفاده از روش‌های میدانی و دورسنجی به مکان‌یابی و ترسیم دقیق مرز کانون‌های گردوغبار شرق استان کرمان پرداخته شده است. میزان فرسایش‌پذیری هر یک از نمونه‌ها بوسیله روش محاسبه شیب خط نمودار میزان فرسایش در برابر سرعت باد با استفاده از دستگاه تونل باد محاسبه شد. نتایج حاصل از آزمایش تونل باد و رابطه خطی EC و شاخص GDVI نشان می‌دهد، بین فرسایش‌پذیری خاک و شوری رابطه مستقیم وجود دارد. از سوی دیگر، با توجه به داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی، شدت بادهای

براساس نتایج حاصل از مطالعات طرح بازنگاری مناطق تحت تأثیر و کانون‌های بحرانی فرسایش بادی کشور، همچنین مطالعات تعیین میزان کمی فرسایش و رسوب بادی در مناطق تحت تأثیر و کانون‌های بحرانی فرسایش بادی کشور، بیشترین میزان رسوب‌دهی ویژه مربوط به مناطق شرق استان کرمان، در شهرستان‌های ریگان، فهرج، نرماشیر و بم گزارش شده است (Head office of natural resources and watershed management of Kerman, 2015) که تأییدکننده نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش است. از همین روی این مناطق باید در اولویت کاری برای انجام عملیات حفاظت خاک و کنترل فرسایش بادی قرار گیرند و طرح‌های مهار گردوغبار و فرسایش بادی در آنها اجرا شود.

بخش جنوبی منطقه به دلیل سرعت آستانه فرسایش بادی پایین و مقادیر شوری بالا، قرارگیری زیرساخت‌های حمل‌ونقل بین استان کرمان و سیستان و بلوچستان در این ناحیه و تراکم جمعیتی بیشتر، همچنین، تراکم نخلستان‌ها و باغ‌ها مرکبات، از اولویت بیشتری برخوردار است. این پژوهش با تلفیقی از روش‌های میدانی و دورسنجی، به مکان‌یابی کانون‌های شرقی استان کرمان پرداخته است و با شناسایی دقیق این کانون‌ها امکان مطالعات بعدی را به منظور بررسی دقیق رژیم بادی منطقه و ظرفیت حمل ماسه و برآیند حمل ماسه و جهت بادهای فرساینده، اقدامات مدیریتی را در راستای کنترل فرسایش بادی در منطقه فراهم کرده است.

منابع مورد استفاده

- Middle East: A Review. *Journal of Environmental Health*, 84(3): 8-15.
- Araghi zade, M. and Masoodian, S., 2021. Climate analysis and study of dust storms in Khorasan Razavi. *Physical Geography Research Quarterly*, 53(3): 305-318 (In Persian).
- Arami, S.A., Ownegh, M., MohammadianBehbahani, A., Akbari, M. and Zarasvandi, A., 2018. The analysis of dust hazard studies in southwest region of Iran in 22 years (1996-2017). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 5(1): 39-66 (In Persian).
- Arjmand, M., Rashki, A. and Sargazi, H., 2018. Monitoring of spatial and temporal variability of desert dust over the Hamoun e Jazmurian, Southeast of Iran based on the Satellite Data. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 27(106): 153-168 (In Persian).
- Baddock, M.C., Bullard, J.E. and 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.
- Da Silva, D.C., Lopes, P.M.O., da Silva, M.V., de Albuquerque Moura, G.B., Nascimento, C.R., Brito, J.I.B., e Silva, Ê.F.D.F., Rolim, M.M. and de Lima, R.P., 2021. Principal component analysis and biophysical parameters in the assessment of soil salinity in the irrigated perimeter of Bahia, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 112: 103580.
- Dundar, C., Isik, A.G. and Oguz, K., 2019. Temporal analysis of sand and dust storms (SDS) between the
- فرساینده و میانگین سرعت وزش باد در این منطقه زیاد است که با در نظر گرفتن شدت شوری خاک سبب حساسیت کانون‌های منطقه به فرسایش بادی می‌شود. نتایج حاصل از شاخص AOD در یک دوره بیست ساله نیز بیانگر این مطلب است که محدوده مورد بررسی از کانون‌های مهم داخلی گردوغبار در شرق ایران است و نیازمند توجه ویژه در ارتباط با حفاظت خاک و کنترل فرسایش بادی است.
- همان‌طور که شکل ۹ نشان می‌دهد، منطقه مورد بررسی در کنار بستر خشک هامون در سیستان و تالاب جازموریان، از نقاط مهم داخلی تولید گردوغبار در شرق ایران است و با توجه به شوری شدید خاک و انرژی باد و حد آستانه پایین حمل ذرات توسط باد، نیاز به برنامه‌ریزی و مدیریت این کانون‌هاست.
- Abbasi, H.R., Opp, C., Groll, M. and Gohardoust, A., 2019b. Wind regime and sand transport in the Sistan and Registan regions (Iran/Afghanistan), *Zeitschrift für Geomorphologie*, 62(1): 41-67.
- Abbasi, H.R., Opp, C., Groll, M., Rohipour, H. and Gohardoust, A., 2019a. Assessment of the distribution and activity of dunes in Iran based on mobility indices and ground data. *Aeolian research Journal*, 41: 100539.
- Abbasi, H.R., Opp, C., Groll, M., Gohardoust, A. and Rohipour H., 2021. Wind regime and aeolian sand transport in Khuzestan Sand Sea, *Aeolian research Journal*, 53: 100746.
- Aghababaeian, H., Ostadtaghizadeh, A., Ardalan, A., Asgary, A., Akbary, M., Yekaninejad, M.S. and Stephens, C., 2021. Global health impacts of dust storms: a systematic review. *Environmental health insights*, 15: 11786302211018390.
- Ahmadi, A., Toranjzar, H. and Kazemi, A., 2019. Mapping Soil Salinity in Boulagh (Saveh) Saline Lands Using Geostatistical Methods. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 8(19): 1-14.
- Ahmadi, H., 2008 *Applied geomorphology (desert-wind erosion)*, (2nd ed.). Tehran: Tehran University Press (In Persian).
- Akhzari, D., Farokhzadeh, B., Saedi, I. and Goodarzi, M., 2015. Effects of wind erosion and soil salinization on dust storm emission in western Iran. *Journal of Rangeland Science*, 5(1): 36-48 (In Persian).
- Akpınar-Elci, M., Berumen-Flucker, B., Bayram, H. and Al-Taiar, A., 2021. Climate Change, Dust Storms, Vulnerable Populations, and Health in the

- pdf (In Persian).
- Kharazmi, R., Panidi, E. A. and Chaban, L.N., 2017. Assessment of arid ecosystems dynamics based on the results of automated processing of multispectral satellite imagery time series. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 14(3): 196-205 (In Russian).
- Kharazmi, R., Panidi, E.A. and Karkon, V.M., 2016. Assessment of dry land ecosystem dynamics based on time series of satellite images. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 13(5): 214-223 (In Russian).
- Kharazmi, R., Tavili, A., Rahdari, M.R., Chaban, L., Panidi, E. and Rodrigo-Comino, J., 2018. Monitoring and assessment of seasonal land cover changes using remote sensing: A 30-year (1987–2016) case study of Hamoun Wetland, Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 190(6): 1-23.
- Kolios, S. and Hatzianastassiou, N., 2019. Quantitative aerosol optical depth detection during dust outbreaks from METEOSAT imagery using an artificial neural network model. *Remote Sensing*, 11(9): 1022.
- Li, J., He, Q., Ge, X., Abbas, A. and Jin, L., 2021. Spatio-temporal changes of AOD in Xinjiang of China from 2000 to 2019: Which factor is more influential, natural factor or human factor? *Plos one*, 16(8): e0253942
- Miri, A., Maleki, S. and Middleton, N., 2021. An investigation into climatic and terrestrial drivers of dust storms in the Sistan region of Iran in the early twenty-first century. *Science of the Total Environment*, 757:143952.
- Nabiollahi, K., Moradian, S. and Taghizadeh-Mehrjardi, R., 2017. Mapping of soil salinity and sodicity hazard using indicator Krijing in Ghorveh, Kurdistan province. *Iranian Journal of Soil Research*, 31(1): 103-115 (In Persian).
- Namdari, S., Valizade, K.K., Rasuly, A.A. and Sarraf, B.S., 2016. Spatio-temporal analysis of MODIS AOD over western part of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(3): 1-11.
- Naserpour, S., Shahriari, A. and Zeaiean, P., 2015. Sources of dust storms in south west Iran using satellite images and weather maps. *Physical Geography Research Quarterly*, 47(1): 4-5 (In Persian).
- Pan, L., Han, Y., Lu, Z., Li, J., Gao, F., Liu, Z., Liu, W. and Liu, Y., 2021. Integrative investigation of dust emissions by dust storms and dust devils in North Africa. *Science of the Total Environment*, 756: 144128.
- Panayiotopoulos, K.P., Barbayiannis, N. and Papatolios, K., 2004. Influence of electrolyte concentration, sodium adsorption ratio, and years 2003 and 2017 in the Central Asia. In: *E3S Web of Conferences*, 99: 02004, EDP Sciences.
- Fryberger, S.G. and Dean, G., 1979. Dune forms and wind regime. In *A study of global sand seas*, 1052: 137-169.
- Ghohroudi tali, M., 2003. A survey of interpolation through the Kriging method. *Geographical Research Quarterly*, 34(43): 95-108 (In Persian).
- Ghorbanian, A., Kakooei, M., Amani, M., Mahdavi, S., Mohammadzadeh, A. and Hasanlou, M., 2020. Improved land cover map of Iran using Sentinel imagery within Google Earth Engine and a novel automatic workflow for land cover classification using migrated training samples. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 167:276-288.
- Gillies, J.A., Nickling, W.G., Nickolich, G. and Etyemezian, V.A., 2017. Wind tunnel study of the aerodynamic and sand trapping properties of porous mesh 3-dimensional roughness elements. *Aeolian Research*, 25: 23-35.
- Giuffrida, F., Carla, C., Angelo, M. and Cherubino, L., 2016. Effects of salt stress imposed during two growth phases on cauliflower production and quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97: 1552–1560.
- Godie, A.S. and Middleton, N.J., 2006. Desert dust in the global system. *Springer Science and Business Media*, 84-87 p.
- Head office of Natural Resources and Watershed Management of Kerman, 2015. Dust control plan in the east of Kerman province, Rigan, Fahraj, Narmashir and Bam cities, 31p (In Persian).
- Jafari, R. and Sanati, H., 2021. Identification of dust sources and storms in the south of Kerman province using Remote sensing data. *Journal of Water and Soil Science*, 25 (3): 145-158 (In Persian).
- Kandakji, T., Gill, T.E. and Lee, J.A., 2020. Identifying and characterizing dust point sources in the southwestern United States using Remote sensing and GIS. *Geomorphology*, 353: 107019.
- Karegar, E., Bodagh Jamali, J., Ranjbar Saadatabadi, A., Moeinaddini, M. and Goshtasb, H., 2017. Simulation and numerical analysis of severe dust storms in the east of Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 3(4): 101-119 (In Persian).
- Khaledi, K., 2016. Estimating the economic losses of dust storms on agriculture sector in the western provinces of the Iran. *Agricultural Economics and Development*, 24(4): 151-183 (In Persian).
- Khaleghi, F., Soleimani, GH. and Shojaei, S., 2016. Dust, a new challenge, an unpleasant and uninvited guest in 14 provinces of the Iran, The Head Office of the Kerman Province Environmental, from <https://kerman.doe.ir/portal/file/?542460/%D8%B1%D9%8A%D8%B2%DA%AF%D8%B1%D8%AF>.

- ed.). Tehran University Press, Tehran, 121-138 (In Persian).
- Rezazadeh, M., Irannejad, P. and Shao, Y., 2013. Climatology of the Middle East dust events. *Aeolian Research*, 10:103-109.
- Salehpourjam, A. and Tabatabaei, M., 2018. Investigation of the soil characteristics on desertification potential in alluvial fans using AHP-FUZZY SAW method (Case study: alluvial fans surrounding Halghe Dareh and Jaroo mountains, Eshtehard). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 7(17): 195-212 (In Persian).
- Shahabinejad, N., Mahmoodabadi, M., Jalalian, A. and Chavoshi, E., 2019. In situ field measurement of wind erosion and threshold velocity in relation to soil properties in arid and semiarid environments. *Environmental Earth Sciences*, 78(16): 1-22.
- Wu, W., Mhaimeed, A.S., Al-Shafie, W.M., Ziadat, F., Dhehibi, B., Nangia, V. and De Pauw, E., 2014. Mapping soil salinity changes using remote sensing in Central Iraq. *Geoderma Regional*, 2: 21-31.
- Wu, W., Zucca, C., Mhaimeed, A.S., Al Shafie, W.M., Fadhil Al Quraishi, A.M., Nangia, V., Zhu, M. and Liu, G., 2018. Soil salinity prediction and mapping by machine learning regression in Central Mesopotamia, Iraq. *Land degradation and development*, 29(11): 4005-4014.
- mechanical disturbance on dispersed clay particle size and critical flocculation concentration in Alfisols. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35: 1415-1434.
- Rashki, A., Arjmand, M. and Kaskaoutis, D.G., 2017. Assessment of dust activity and dust-plume pathways over Jazmuriyan Basin, southeast Iran. *Aeolian Research*, 24: 145-160.
- Rashki, A., Kaskaoutis, D.G., Francois, P., Kosmopoulos, P.G. and Legrand, M.J.A.R., 2015. Dust-storm dynamics over Sistan region, Iran: Seasonality, transport characteristics and affected areas. *Aeolian Research*, 16:35-48.
- Rashki, A., Kaskaoutis, D.G., Goudie, A.S. and Kahn, R.A., 2013. Dryness of ephemeral lakes and consequences for dust activity: the case of the Hamoun drainage basin, southeastern Iran. *Science of the Total Environment*, 463: 552-564.
- Rashki, A., Middleton, N.J. and Goudie, A.S., 2021. Dust storms in Iran—Distribution, causes, frequencies and impacts. *Aeolian Research*, 48: 100655.
- Rayegani, B., kheirandish, Z., Kermani, F., Mohammadi Miyab, M. and Torabinia, A., 2017. Identification of active dust sources using Remote sensing data and air flow simulation (Case study: Alborz province). *Desert Management*, 4(8): 15-26 (In Persian).
- Refahi, H., 2018. Wind erosion and its control (6th

Identification of active dust source areas using field and remote sensing methods for determining wind erosion threshold velocity (Case study: eastern Kerman province)

R. Kharazmi^{1*}, H.R. Abbasi², S. Moradi Sani³ and F. Khaksarian⁴

1* - Corresponding author, Assistant Prof., Research Division of Soil Identification and Land Valuation, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: R.kharazmi@areeo.ac.ir

2- Assistant Prof., Research Division of Desert, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

3- MSc Student of Soil Science, Department of Soil Sciences, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

4- Researcher, Research Division of Sand Dunes, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 18.01.2023

Accepted: 05.06.2023

Abstract:

This study was conducted in 2020 with the objective of identifying dust source areas and soil susceptibility to wind erosion in the eastern part of Kerman Province, through the integration of field and remote sensing methods. In total, ten study areas covering 3007 square kilometers were identified based on remote sensing and field surveys during the winter of 2020. The dust-prone areas and the determination of the dust event frequency in the past 20 years were established using the optical depth index derived from MODIS Terra and Aqua satellites. To assess soil erodibility, wind erosion threshold velocity, and wind erosion rates, soil samples (17 in total) were measured in a wind tunnel at three wind speed classes: 15, 20, and 25 meters per second. Electrical conductivity (EC) values of soil samples (22 in total) were determined in the laboratory to create a soil salinity map using the kriging method. The results of the vegetation cover index were extended, and the linear relationship between EC was computed using Google Earth Engine and compared with kriging results, indicating significant salinity in the studied areas ($EC > 16$). The analysis of prevailing wind directions and wind regimes based on data from five meteorological stations in the region demonstrated that the Rigān and Nasratābād stations, with transport potential of 561 and 1199 $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$, respectively, were classified as high-energy wind zones. Wind speeds of 40 knots (20.57 m/s) were prevalent in these areas. The assessment of soil erodibility revealed that the southern parts had the lowest wind erosion threshold velocity (between 6 to 8 m/s), classifying them as wind erosion-sensitive zones, with an accumulated wind erosion rate of 60 $\text{kg/m}^2/\text{year}$ across the three wind speed classes. Based on the findings, the study areas are considered significant internal dust source areas, requiring management actions to control dust emissions.

Keywords: AOD Index, Dust, Google Earth Engine, Soil Salinity, Wind Tunnel