

منشأیابی گردوغبار با استفاده از مدل پیشینه آنتروپی در شرق ایران

فائزه رجبزاده^۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۳

چکیده

گردوغبار به عنوان یکی از مهم ترین انواع آلودگی های جوی و محیط زیستی، اثرات بحرانی بر سلامت انسان، کشاورزی و صنعت می گذارد؛ از این رو گام اصلی در کنترل خطرات طوفان گردوغبار، شناسایی منابع دارای پتانسیل گردوغبار است. در پژوهش حاضر، الگوریتم مدرن پیشینه آنتروپی به منظور پیش بینی منابع پتانسیل گردوغبار در شرق ایران مورد استفاده قرار گرفت. بنابراین مکان هایی که توسط سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی به عنوان منابع گردوغبار شناسایی شده بود، به عنوان متغیر وابسته استفاده شد. منابع گردوغبار شناسایی شده به نسبت ۷۰ به ۳۰ برای مجموعه داده های آموزش و اعتبارسنجی تفکیک شد. در گام بعدی، ۸ فاکتور مؤثر بر وقوع گردوغبار شامل، سنگ شناسی، کاربری اراضی، بارندگی، شیب، لندفرم، سرعت باد، حداکثر دما و پوشش گیاهی به عنوان متغیرهای پیشگویانه به کار گرفته شد، سپس نتایج حاصل از نقشه پیش بینی به وسیله روش سطح زیر منحنی ROC، اعتبارسنجی شد. نتایج نشان داد الگوریتم پیشینه آنتروپی دارای عملکرد خوب ۷۵٪ برای پیش بینی مکان های دارای پتانسیل منبع گردوغبار است. سرعت باد، بارندگی، لندفرم و کاربری اراضی مهم ترین فاکتورها در شناسایی موقعیت منابع گردوغبار بودند. مطابق نقشه پیش بینی، مهم ترین منابع دارای پتانسیل گردوغبار در بخش های شرقی منطقه مطالعاتی شناسایی شدند. لذا پیشنهاد می شود مدل پیشینه آنتروپی به عنوان یک مدل مؤثر در نواحی با سابقه طوفان های گردوغبار به منظور کنترل طوفان استفاده شود.

کلیدواژه ها: آلودگی محیط زیست، پتانسیل منابع گردوغبار، کنترل طوفان.

۱. استادیار گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرقدس، تهران، ایران؛ faizehrajabzadeh@yahoo.com

* این مقاله برگرفته از پژوهش مستقل است.

مقدمه

آلودگی محیطی مشکل بزرگی است که سلامت انسان و اکوسیستم را از طریق آلودگی محیط هوا، لندفرم و آب متأثر می‌سازد. آلودگی هوا به دلیل تأثیر مستقیم بر محیط و سلامت انسان می‌تواند بسیار مهم باشد (هان^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). از طرف دیگر، واکنش‌های شیمیایی بین آلودگی‌های هوا و دیگر اجزای اتمسفر با ته‌نشست آلودگی‌ها و مشتقات آن‌ها روی سطح زمین نمود بیشتری پیدا می‌کند (جی^۲ و همکاران، ۲۰۱۹؛ نوبخت^۳ و همکاران، ۲۰۲۱). گردوغبار به‌عنوان یک رخداد طبیعی در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک جهان گسترش دارد. در عرض‌های جغرافیایی جنب حاره‌ای، ترکیب عوامل تغییرات اقلیمی، فعالیت‌های انسانی و الگوهای سکونتگاهی موجب تخریب ساختار لندفرم، کاهش مواد مغذی مورد نیاز گیاهان، از بین رفتن هوموس و کربن آلی لندفرم و در نهایت فرسایش بادی و تولید گردوغبار می‌شود (رایگانی و همکاران، ۲۰۱۷). با افزایش وقایع آلودگی هوا، طوفان‌های گردوغبار به‌صورت معنی‌داری تمرکز ذرات معلق را در مناطق تأثیرپذیر افزایش داده و اثرات منفی بر سیستم تنفسی انسان، کشاورزی، میزان دید، میزان مهاجرت، نرخ بیکاری، شرایط زیستگاهی حیات وحش و جوامع در مقیاس محلی و منطقه‌ای به دنبال دارد (میدلتون و کانگ^۴، ۲۰۱۷؛ تیانگانگ^۵ و همکاران، ۲۰۱۹). با اینکه فواید قابل توجه شبیه‌سازی و کاهش خطرات وقایع گردوغبار به اثبات رسیده است؛ اما فرایند کنترل تغییرات زمانی و مکانی انتشار گردوغبار مانند فرایند حمل لحظه‌ای میکرومقیاس، تلفیق اثرات لندفرم و ترکیبات آن بر فرسایش‌پذیری مواد قابل دسترس، به‌طور کامل درک نشده است (ریچر و جیل^۶، ۲۰۱۸).

رفع مکانیسم‌های حاکم به دلیل گسیل جریان گردوغبار که کنترل آن را با مشکل مواجه می‌سازد، به‌صورت قابل

توجهی چالش برانگیز است. با وجود این، شناسایی کانون‌های تولید گردوغبار امکان مدیریت و برنامه‌ریزی جهت کنترل و مقابله با خطرات ناشی از گردوغبار را فراهم می‌سازد. روش‌های متعددی به‌منظور شناسایی کانون‌های تولید گردوغبار مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجاکه اندازه‌گیری به روش سنتی به دلیل پوشش زمانی و مکانی محدود و نیز هزینه بالای پیمایش صحرائی، نمی‌تواند به‌تنهایی برای شناسایی و پایش کانون‌های گردوغبار مناسب باشد، در این رابطه روش دورسنجی مناسب‌تر و مقرون‌به‌صرفه است (وانگ^۷ و همکاران، ۲۰۰۳). افزون بر سنجش از دور، بسیاری از مدل‌های آئروسول به‌منظور پیش‌بینی مسیر و انتشار رو به عقب و جلو گردوغبار توسعه داده شده است. مدل‌سازی عددی نیز از دیگر روش‌های مؤثر در شناسایی کانون‌های تولید گردوغبار است (وانگ و همکاران، ۲۰۰۳). مطالعات متعددی به‌منظور شناسایی سرچشمه گسیل گردوغبار و فعالیت آن از طریق تجزیه و تحلیل داده‌های هواشناسی، تکنیک سنجش از دور، اطلاعات زمین‌شناسی، مدل‌سازی و... صورت پذیرفته است (نوبخت و همکاران، ۲۰۲۱؛ زانگ و لو^۸، ۲۰۲۰).

طی دو دهه اخیر، رویکردهای مبتنی بر ماهواره، اطلاعات مناسبی از پراکنش گردوغبار، الگوهای انتشار و تغییرات زمانی آن به اثبات رسانده‌اند (بادوک^۹ و همکاران، ۲۰۲۱؛ چیاپلو^{۱۰}، ۲۰۱۴؛ یاسین^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۸). تکنیک نیمه‌خودکار پیش‌تاز، به‌صورت گسترده‌ای برای شناسایی منابع گردوغبار فعال از طریق دورکاوی در مقیاس منطقه‌ای به‌ویژه در حوزه پیش‌بینی عملیاتی مورد استفاده قرار گرفته است (کانداکجی^{۱۲} و همکاران، ۲۰۲۰). رابطه بین پدیده بیابان‌زایی و کانون‌های تولید گردوغبار در غرب آسیا با استفاده از آنالیز تصاویر مودیس و لندست در طی سه دهه در برخی مطالعات مورد بررسی قرار گرفته است (میریدنژاد^{۱۳} و

7. Wang
8. Zhuang and Lu
9. Baddock
10. Chiapello
11. Yassin
12. Kandakji
13. Moridnejad

1. Han
2. Ji
3. Nobakht
4. Middleton and Kang
5. Tiangang
6. Richter and Gill

مقابله با اثرات منفی انتشار گردوغبار دارد. از این رو هدف پژوهش حاضر، پتانسیل‌یابی مناطق مستعد تولید گردوغبار برای وقوع طوفان‌های با منشأ داخلی با در نظر گرفتن عوامل محیطی مؤثر و با به‌کارگیری الگوریتم پیشینه آنتروپی در شرق ایران است.

مواد و روش‌ها

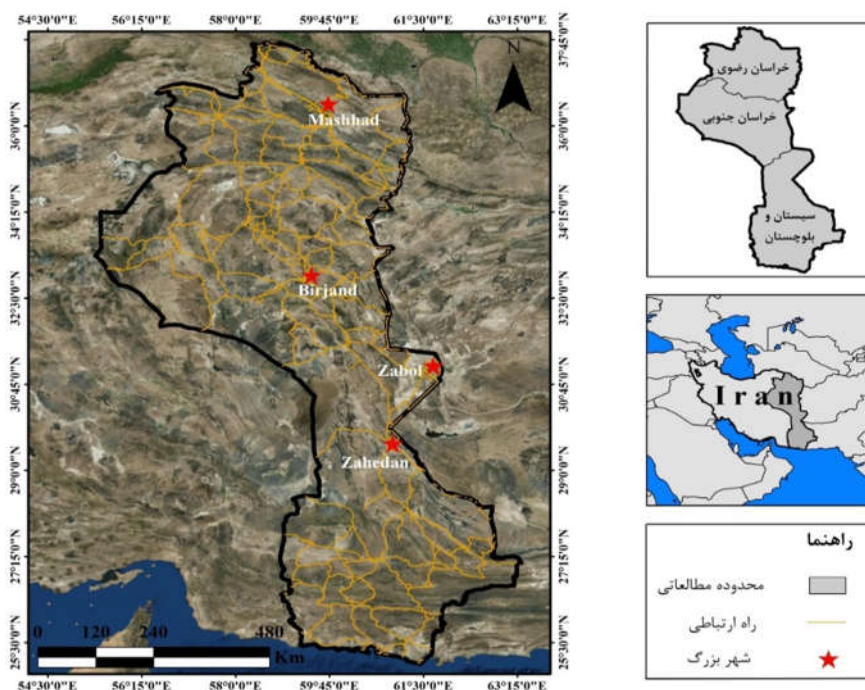
منطقه مطالعاتی

محدوده مطالعاتی به وسعت تقریبی 444904 km^2 در شرق ایران قرار دارد که سه استان سیستان و بلوچستان، خراسان جنوبی و رضوی را در بر می‌گیرد. این منطقه در محدوده جغرافیایی 55° درجه و $37'$ دقیقه طول شرقی جغرافیایی و 25° درجه و $10'$ دقیقه عرض شمالی جغرافیایی، با ارتفاع 3899 m از سطح دریا واقع شده است و از شرق با کشورهای افغانستان و پاکستان، از شمال با ترکمنستان و از جنوب در همسایگی دریای عمان قرار دارد (شکل ۱). ارتفاعات تفتان و بینالود از بلندی‌های مهم منطقه است. این منطقه دارای آب‌وهوای متأثر از رطوبت دریای عمان، توده‌های مانسون و جبهه پرفشار دریای خزر است که در برخورد با جبهه کم‌فشار حاکم بر شرق کشور، طوفان‌های گردوغبار شدیدی را به وجود می‌آورد که نمونه بارز آن بادهای 120 روزه سیستان می‌باشد که زندگی مردم شرق کشور را متأثر ساخته است.

همکاران، ۲۰۱۵). همچنین در پژوهشی در سواحل خلیج می‌سی‌سی‌پی، روند انتشار تولید گردوغبار با استفاده از مدل HYSPLIT و WRF مورد بررسی قرار گرفته است (یرامیلی^۱ (یرامیلی^۱ و همکاران، ۲۰۱۲). در مطالعه‌ای دیگر، به‌منظور شناسایی منشأ داخلی طوفان‌های گردوغبار در استان خوزستان، اقدام به به‌کارگیری روش ترکیبی سنجش از دور، سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و رسوب‌شناسی شد؛ نتایج نشان داد ۹٪ از مساحت دشت خوزستان منشأ تولید گردوغبار داخلی می‌باشد که بر اساس نوع کاربری مراتع تخریب‌شده، اراضی کشاورزی رهاشده، تالاب‌ها و آبگیرهای خشک‌شده به ترتیب بیشترین سهم را در تولید گردوغبار داخلی دارند (حیدریان و همکاران، ۲۰۱۷). نتایج ردیابی با استفاده از مدل HYSPLIT و ERA-Interim ECMWF نشان داد که منشأ اصلی گردوغبار در منطقه دزفول، رسوبات آبرفتی دجله و فرات در عراق است (صلاحی و بهروزی، ۲۰۲۰). همچنین نتایج حاصل از مدل HYSPLIT نشان داد که منشأ گردوغبار در جنوب غرب ایران، رسوبات آبرفتی دجله و بیابان‌های بین سوریه و عراق است (برومندی و همکاران، ۲۰۱۷). بنابراین منشأ گردوغبار الزاماً مناطق بیابانی نزدیک نیست و گردوغبار می‌تواند از مناطق دور به آن منطقه وارد شده باشد. ارزیابی گردوغبار با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat و Hyperion، به‌منظور نظارت بر محیط زیست نشان داد که بیشترین میزان گردوغبار در نزدیکی شبکه حمل‌ونقل معدنی، اطراف معادن، حوضچه‌های معدنی، و مناطق معدنی متمرکز شده است (نرایان^۲ و همکاران، ۲۰۱۹).

بررسی مطالعات انجام‌شده حاکی از به‌کارگیری روش‌های دورکاوی، زمینی و مدل‌سازی عددی به‌منظور شناسایی کانون‌های فعال تولید گردوغبار است؛ درحالی‌که در هیچ‌کدام از مطالعات، پتانسیل‌یابی مناطقی که هم‌اکنون غیرفعال بوده و در تولید گردوغبار نقشی ندارند، مورد بررسی قرار نگرفته است. به‌عبارتی، شناسایی مناطق دارای پتانسیل تولید گردوغبار نقش مهمی در پیشگیری، کنترل و

1. Yerramilli
2. Narayan



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی شرق ایران در منطقه و کشور

Figure (1): Geographical location of eastern Iran in the region and the country

نشان می‌دهد که سرعت در قسمت شرقی منطقه بالا و در قسمت غربی متوسط است. وزش باد در بخش شمالی منطقه مورد مطالعه کمتر است.

سنگ‌شناسی: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه شده است. نقشه سنگ‌شناسی شرق کشور نیز با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شیت‌های اسپکه، سراوان، بشرویه، زابل، دیهوک، دریاچه هامون، چهل‌کوره، زاهدان، بیرجند، گوهرکوه و چابهار استخراج و رقومی شد (شکل ۲ ج). سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه از آبرفت، افیولیت، کنگلومرا، ماسه‌سنگ، اسیدی و بازی تشکیل شده است (استوکلین^۲، ۱۹۶۸). پیروکلاست‌ها، آبرفت‌ها، سنگ آهک، ماسه‌سنگ، سنگ‌های اساسی و فوق پایه و افیولیت‌ها به راحتی توسط باد فرسایش می‌یابند و منابع فراوانی برای تولید گردوغبار فراهم می‌کنند.

دمای هوا: دمای هوا نقش مهمی در تولید گردوغبار دارد. دمای بالای هوا موجبات تجزیه سنگ را به سرعت افزایش داده، مقادیر قابل توجهی از ذرات گردوغبار تولید می‌کند

انتخاب متغیرهای مؤثر در تولید گردوغبار

در فرایند مدل‌سازی، فاکتورهای مؤثر در تولید گردوغبار شامل شیب زمین، نوع لندفرم، پوشش گیاهی، بارندگی، سرعت باد، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی و حداکثر دمای هوا، به‌عنوان متغیرهای مستقل در وقوع طوفان گردوغبار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

سرعت باد: باد عامل اصلی برای فرسایش بادی است (بورلی^۱ و همکاران، ۲۰۱۴). به‌طور کلی، باد می‌تواند ماسه و گردوغبار را در ارتفاعات مختلف منتقل کند. در این تحقیق داده‌های سرعت باد از ایستگاه‌های هواشناسی به دست آمد. چندین تکنیک درون‌یابی برای تولید نقشه سرعت باد استفاده شد و دقت آن‌ها مقایسه شد. پس از آن، کریجینگ به‌عنوان تکنیک مورد استفاده انتخاب شد، زیرا کمترین ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) را به همراه داشت. سرعت باد در منطقه مورد مطالعه به‌طور متوسط بین ۱۰ تا ۱۷ متر بر ثانیه در سطح است (شکل ۲ ث). بنابراین سرعت باد یک عامل ضروری برای نقشه‌برداری پتانسیل منبع گردوغبار است، زیرا احتمال جذب گردوغبار را افزایش می‌دهد. نقشه سرعت باد

بارندگی: بارندگی بر رطوبت خاک تأثیر می‌گذارد و به‌طور قابل توجهی بر استحکام برخی از خاک‌ها در برابر فرسایش و در نتیجه تولید ذرات تأثیر می‌گذارد. اگر بارندگی یا رطوبت خاک کاهش یابد، گردوغبار افزایش می‌یابد. بنابراین تأثیر قابل توجهی بر توزیع فضایی پتانسیل گردوغبار دارد. در این مطالعه، داده‌های بارش از اداره مدیریت منابع آب کشور به دست آمد. نقشه بارندگی نیز با استفاده از روش کریجینگ تهیه شد. منطقه مورد مطالعه تحت تسلط مناظر بوته‌های پراکنده و گیاهان یکساله است که منعکس‌کننده آب‌وهوای خشک با بارش کم است. بخش‌های شمالی و جنوبی نسبت به ناحیه مرکزی مورد مطالعه بارش بیشتری دریافت می‌کنند (شکل ۲ پ).

پوشش زمین: پوشش زمین با پتانسیل منشأ گردوغبار مرتبط است. پوشش زمین بر حساسیت خاک به فرسایش تأثیر می‌گذارد. در مقایسه با جنگل‌ها، تخریب زمین در زمین‌هایی با پوشش گیاهی کم، شدیدتر است. نقشه پوشش اراضی منطقه مورد مطالعه از سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور تهیه شد (شکل ۲ ت). لایه پوشش گیاهی با استفاده از شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) در محیط نرم‌افزار ENVI و با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ سنجنده OLI تهیه شد.

موقعیت کانون‌های تولید گردوغبار

موقعیت کانون‌های تولید گردوغبار در مدل‌سازی به‌عنوان متغیر وابسته مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در پژوهش حاضر، واحدهای اراضی در مسیر جاده‌های قابل دسترس از خراسان جنوبی تا جنوب بلوچستان مورد بازدید میدانی قرار گرفت و با توجه به سطح وسیع منطقه مطالعاتی که نزدیک به یک‌سوم از سطح کل کشور را شامل گردید، امکان بررسی میدانی کل منطقه مقدور نبود؛ لذا با استناد به گزارش‌های فنی ارائه‌شده از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، نقاط حساس به فرسایش بادی و کانون‌های تولید گردوغبار داخلی شناسایی شده مورد استفاده قرار گرفت (سازمان

(کیمورا، ۲۰۱۲). اندازه‌گیری دمای هوای محیط از ایستگاه‌های هواشناسی در منطقه مورد مطالعه به دست آمد. مانند نقشه سرعت باد، چندین تکنیک درونیابی برای تولید یک نقشه دمای هوا مقایسه شد و کریجینگ به دلیل RMSE مناسب‌ترین تلقی شد. حداکثر دمای هوا در منطقه مورد مطالعه از ۴۹ درجه سانتی‌گراد تا ۴۲/۱ درجه سانتی‌گراد متغیر بود (شکل ۲ ج).

کاربری زمین: کاربری زمین نیز شاخصی است که برای ترسیم پتانسیل گردوغبار استفاده می‌شود (کیمورا، ۲۰۱۲). کاربری زمین منعکس‌کننده شدت فعالیت‌های انسانی و پتانسیل تخریب محیطی و اختلال در سطح است. این مطالعه از نقشه کاربری زمین مشتق‌شده از تصویر Landsat OLI 2016 با استفاده از تکنیک طبقه‌بندی تصویر مبتنی بر شیء (شکل ۲ ح) استفاده شده است. تصویر رادیومتری با یک تکنیک پیش‌پردازش با تبدیل رادیومتریکی‌های شناسایی‌شده به مقادیر بازتاب تصحیح شد.

شیب: شیب برای تولید گردوغبار بسیار مهم است و مدل‌های انتشار و انتقال منابع گردوغبار به‌طور گسترده‌ای وجود دارد که در نواحی شیب‌های پایین‌تر توزیع شده و با داده‌های سری زمانی سنجش از دور قابل شناسایی و ارزیابی است (کیمورا، ۲۰۱۲) که بیشترین مقدار شیب ۱۸۵/۳ بود (شکل ۲ الف). لایه شیب زمین در مطالعه حاضر از مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر سنجنده Aster ماهواره Terra استخراج شد.

لندفرم: ویژگی‌های لندفرم به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر شروع طوفان گردوغبار، اندازه ذرات فرسایش‌یافته متفاوت است (کیمورا، ۲۰۱۲). برای مثال، ذرات سنگین‌تر توسط باد قابل انتقال نبوده و اما ذرات گردوغبار در فواصل طولانی توسط باد منتقل شده و در هنگام برخورد با موانع موجود در مسیر و یا زمانی که سرعت باد کاهش می‌یابد و ظرفیت خود را برای حرکت ذرات از دست می‌دهد، ذرات شروع به رسوب می‌کنند. توزیع انواع لندفرم غالب در منطقه را نشان می‌دهد (شکل ۲ ب).

نظر، ln لگاریتم طبیعی، x مقدار ارزش هر سلول و X مجموعه‌ای از داده‌های یک لایه رستری است. توزیع احتمالاتی Gibbs برای هریک از متغیرهای مستقل مطابق رابطه (۲) به دست آمد (الیس^۵ و همکاران، ۲۰۱۱):

$$q_{\lambda}(x) = \frac{e^{\lambda \cdot f(x)}}{Z_{\lambda}} \quad (2)$$

که در آن، $q_{\lambda}(x)$ تابع توزیع Gibbs، λ وزن متغیر مورد نظر، Z_{λ} ثابت نرمال‌کننده تابع Gibbs هستند. به منظور تعیین رابطه وقایع فرسایش بادی و کانون‌های تولید گردوغبار، هریک از عوامل مؤثر بر تولید گردوغبار، با بسط «اصل آنتروپی» و استخراج منحنی‌های پاسخ یادگیری ماشینی صورت گرفت (انصاری، ۲۰۱۷).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

در پژوهش حاضر، با استفاده از الگوریتم حداکثر آنتروپی و به کمک نرم‌افزار MAXENT نسخه ۳.۳.۳، نواحی دارای پتانسیل تولید گردوغبار مورد بررسی قرار گرفت. نقاط مستعد تولید گردوغبار آموزش مدل انتخاب و به عنوان لایه اطلاعاتی «نقاط حضور» به مدل معرفی شد. در این روش، همبستگی پارامترهای مؤثر بر کانون تولید گردوغبار با نقاط مستعد تولید گردوغبار محاسبه و با همبستگی متغیرها با ۵۰۰۰۰۰ نقطه تصادفی از منطقه به عنوان نقاط زمینه یا شبه عدم حضور مقایسه شد. در نهایت، مدلی با بیشترین قدرت تشخیص مناطق دارای پتانسیل زیاد و مستعد تولید گردوغبار به دست آمد. سپس، با استفاده از نرم‌افزار MAXENT عملکرد مدل ارزیابی شد.

در نرم‌افزار MAXENT برای ارزیابی عملکرد مدل، نسبت به محاسبه سطح زیرمنحنی ROC^۶ اقدام شد. از سطح زیرمنحنی ROC به عنوان معیاری از عملکرد مدل به دست آمده در تشخیص نقاط حضور (مستعد تولید گردوغبار) از نقاط شبه عدم حضور استفاده شد. در این منحنی، ضریب حساسیت^۷ مدل شامل، احتمال تشخیص صحیح نقاط حضور با ضریب اختصاصیت^۸ شامل احتمال

زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور^۱، ۲۰۱۷). همچنین با استفاده از تکنیک سنجش از دور و با تهیه تصاویر سنجنده MODIS از ماهواره‌های Aqua و Terra نسبت به پراکنش تپه‌های ماسه‌ای، اراضی لخت بدون پوشش گیاهی، بستر خشک دریاچه‌ها، تالاب‌ها و سایر نقاطی که در مسیر باد غالب منطقه قرار داشته و موجب تولید گردوغبار می‌شوند، اقدام شد. پس از بررسی‌های گسترده، موقعیت مکانی نزدیک به ۱۰۰ کانون گردوغبار ثبت و به عنوان نقشه پراکنش کانون‌های تولید گردوغبار در نرم‌افزار Arc Map 10.2 تهیه شد. از میان نقاط ثبت شده ۷۰٪ نقاط به عنوان کانون‌های گردوغبار گروه آموزش^۲ و ۳۰٪ باقی‌مانده به عنوان گروه اعتبارسنجی^۳ به طور تصادفی انتخاب شدند.

مدل حداکثر آنتروپی

به منظور استفاده از مدل حداکثر آنتروپی برای تعیین کانون‌های تولید گردوغبار، ابتدا متغیرهای مستقل شامل عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش بادی و تولید گردوغبار و متغیر وابسته شامل شناسایی کانون‌های تولید گردوغبار به فرمت مورد نیاز تبدیل شد و به نرم‌افزار MAXENT معرفی گردید. شایان ذکر است که در این مرحله، تنها از داده‌های کانون‌های تولید گردوغبار گروه آموزش که در مراحل قبلی تهیه شده است، برای واسنجی مدل استفاده گردید. مدل حداکثر آنتروپی بر اساس «اصل آنتروپی» شبکه ارتباطات بین متغیرهای مستقل و وابسته را تعیین نموده که بر اساس نقش هر متغیر مستقل و وزن تأثیر و منحنی پاسخ آن به دست می‌آید. این مدل قادر است توزیع احتمالاتی داده‌های هریک از لایه رستری مربوط به عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش بادی و تولید گردوغبار را استخراج نماید. آنتروپی این توزیع‌ها بر اساس رابطه (۱) محاسبه شد (فیلیپس^۴ و همکاران، ۲۰۰۶):

$$H(\hat{\pi}) = - \sum_{x \in X} \hat{\pi}(x) \ln \hat{\pi}(x) \quad (1)$$

که در آن، $H(\hat{\pi})$ مقدار آنتروپی توزیع احتمالاتی متغیر مورد

5. Elith
6. Receiver operating characteristic
7. Sensitivity
8. Specificity

1. Geological and Mineral Exploration Organization of Iran
2. Training group
3. Validation group
4. Phillips

است. نقشه سنگ‌شناسی منطقه حاکی از حضور واحدهای مارن، سیلت و تپه‌های ماسه‌ای است که به‌شدت به فرسایش حساس می‌باشد (شکل ۲ ج). بررسی کاربری اراضی منطقه مطالعاتی نشان از سطح زیاد اراضی شوره‌زار و بایر است که نزدیک به ۶۰٪ از سطح منطقه را در بر می‌گیرد (شکل ۲ ح). نقشه لندفرم منطقه نیز از حضور آنتی‌سول‌ها، اینسپتی‌سول‌ها و اریدی‌سول‌ها حکایت دارد که بیش از ۵۵٪ سطوح خاکزایی را در بر می‌گیرند و باقی سطوح شامل پهنه‌های آبی، مرداب‌ها، مناطق مسکونی و صنعتی است (شکل ۲ ب). نقشه سرعت باد گویای سرعت زیاد باد در منطقه سرخس خراسان رضوی و منطقه سیستان است که نزدیک به ۱۲ m/s می‌باشد (شکل ۲ ث). شایان ذکر است منطقه زابل بادخیزترین منطقه بوده و آمار ایستگاه سینوپتیک زابل گویای این موضوع است. نقشه مربوط به حداکثر دمای هوا نیز گویای دمای بالای منطقه است که دارای محدوده دمایی ۴۲ تا ۴۹ می‌باشد. بیشترین دما مربوط به منطقه سیستان و جنوب غرب استان سیستان و بلوچستان است (شکل ۲ ج). بررسی نقشه مربوط به میزان بارندگی سالانه نیز به‌استثنای شمال منطقه مطالعاتی که از بارش ۲۹۰ mm برخوردار می‌باشد، سایر نقاط نشان‌دهنده بارش بسیار پایین و کمتر از ۱۰۰ mm است (شکل ۲ پ). بررسی وضعیت پوشش گیاهی حاکی از نسبت بالای اراضی فاقد پوشش گیاهی نسبت به اراضی دارای پوشش گیاهی است (شکل ۲ ت). نقشه شیب منطقه مطالعاتی از صفر درصد در مناطق دشتی و مسطح تا بیش از ۱۸۰٪ در مناطق کوهستانی متغیر است (شکل ۲ الف). ویژگی لندفرم‌های منطقه مطالعاتی در جدول (۱) آمده است.

تشخیص صحیح نقاط شبه عدم حضور مورد مقایسه قرار گرفت و منحنی به‌صورت نموداری ارائه شد. نقاط حضور با فرمت CSV و همچنین لایه‌های مربوط به پارامترهای مؤثر بر گردوغبار با فرمت ASCII وارد آنالیز شد. ضرایب حساسیت و اختصاصیت به‌ترتیب بر اساس روابط (۳) و (۴) محاسبه شدند.

$$Se = \frac{Tp}{Tp+Fn} \quad (3)$$

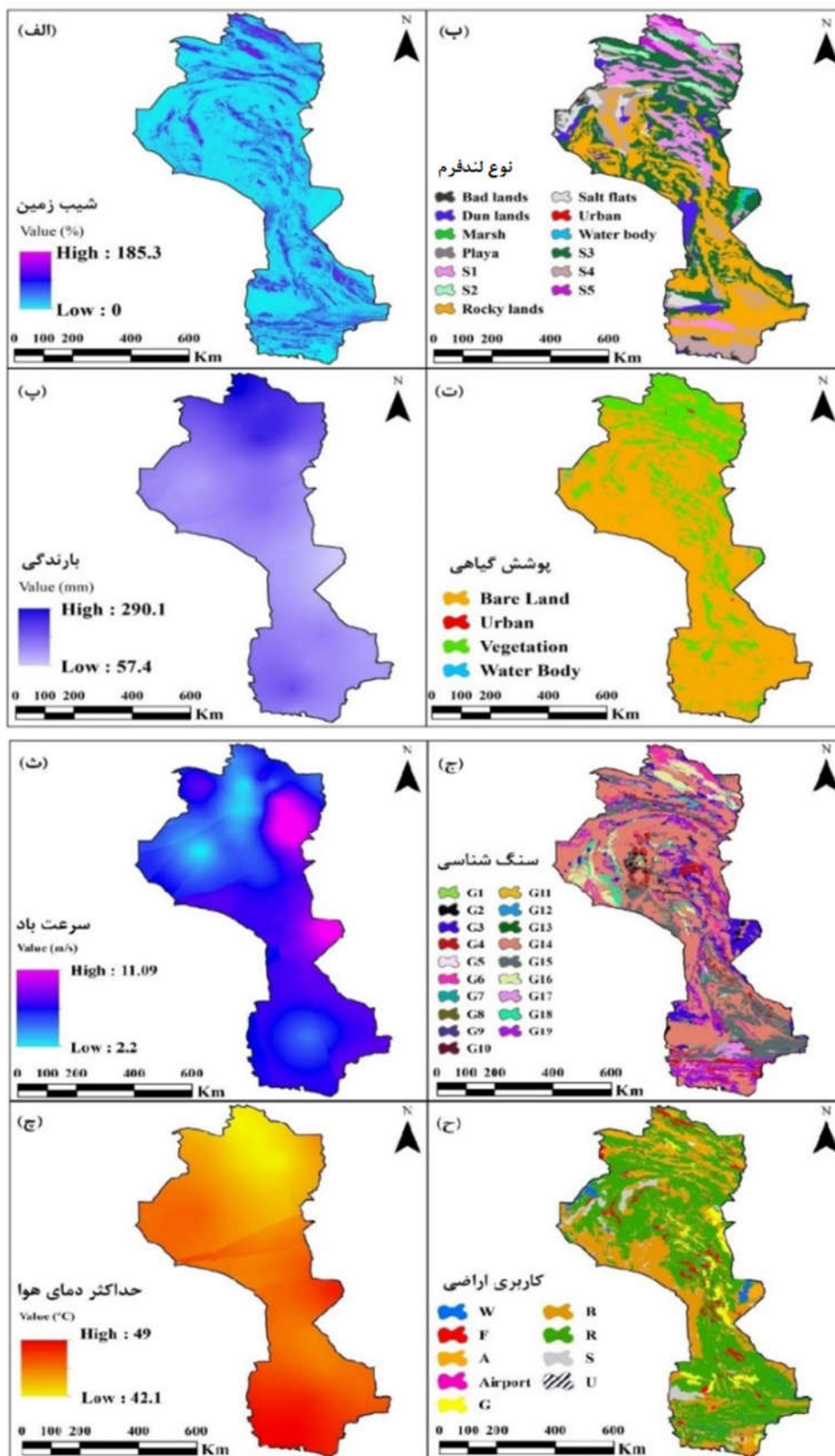
$$Sp = \frac{Tn}{Fn+Fp} \quad (4)$$

که در آن‌ها، Tp و Tn تعداد پیکسل‌هایی هستند که به‌درستی به‌صورت وقوع و عدم وقوع گردوغبار طبقه‌بندی شده‌اند. ضرایب Fp و Fn نیز تعداد پیکسل‌هایی هستند که به‌اشتباه به‌صورت وقوع و عدم وقوع تولید گردوغبار طبقه‌بندی شده‌اند.

پس از وارد کردن نقاط حضور و متغیرهای مورد نظر در نرم‌افزار MAXENT پتانسیل کل منطقه برای پتانسیل‌یابی مناطق مستعد تولید گردوغبار محاسبه و لایه اطلاعاتی حاصل به فرمت رستری به نرم‌افزار ArcGIS منتقل شد. همچنین با به‌کارگیری الگوریتم حداکثر آنتروپی به‌کمک نرم‌افزار MaxEnt، برای شناسایی مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار و تعیین اهمیت نسبی هر یک از عوامل مؤثر بر شناسایی کانون‌های تولید گردوغبار و تحلیل حساسیت مدل به روش Jackknife اقدام شد. در این روش پس از ایجاد مدل کامل با دخالت تمامی متغیرها، مدل‌سازی به تعداد متغیرها تکرار شد و هر بار یکی از متغیرها از روند مدل‌سازی حذف گردید. بدین ترتیب مقدار تأثیر هر یک از متغیرها در پیش‌بینی نواحی مطلوب مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج و بحث

نقشه عوامل مؤثر بر تولید گردوغبار در شکل (۲) ارائه شده



شکل (۲): نقشه متغیرهای محیطی در منطقه مطالعاتی

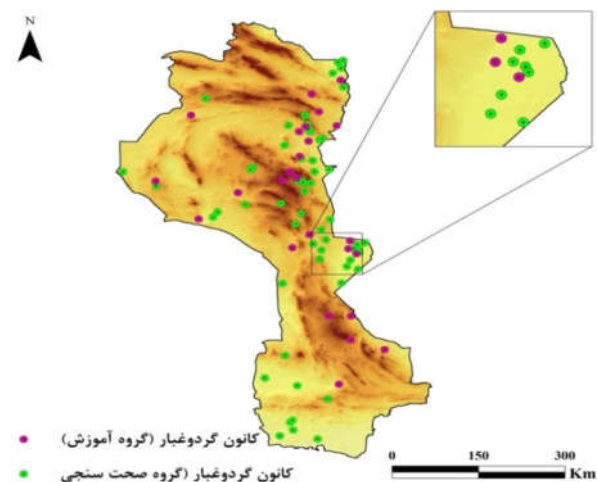
Figure (2): Map of environmental variables in the study area

جدول (۱): ویژگی‌های لندفرم‌های منطقه مطالعاتی			
Table (3): Landform characteristics of the study area			
ردیف	کد اختصاصی	نوع لندفرم	سطح (درصد)
۱	Bad lands	بدلند	۰/۷۵
۲	Dune lands	ماسه‌زارها	۴/۱۵
۳	Marsh	مرداب	۰/۲۶
۴	Playa	پلایا (دریاچه نمک)	۱/۱۲
۵	S1	برونزد سنگی / آنتی‌سول‌ها	۱۱/۵۷
۶	Rocky lands	اراضی سنگی	۳۱/۷۱
۷	Salt flats	پهنه‌های نمکی	۳/۵۸
۸	Urban	مناطق مسکونی	۰/۰۲
۹	S3	اریدی‌سول‌ها	۲۹/۸۶
۱۰	S4	آنتی‌سول‌ها / اریدی‌سول‌ها	۱۳/۲۰

درد (لباب‌پور، ۲۰۲۰). یکی از مزیت‌های استفاده از این مدل، بالا بردن قطعیت در پیش‌بینی کانون‌های تولید گردوغبار است؛ زیرا فرایند مدل‌سازی بر اساس وقوع فرسایش بادی و تولید گردوغبار ثبت شده انجام می‌گیرد و این امر موجب کاهش عدم قطعیت مدل‌سازی می‌شود. برخلاف مدل‌های آماری که قبل از مدل‌سازی تعدادی فرضیات آماری تعریف می‌نمایند، مدل حداکثر آنتروپی از ابتدا سعی در یافتن روابط بین متغیرهای مستقل و وابسته دارد تا بر اساس آن پیش‌بینی مکانی مبتنی بر واقعیت را ارائه دهد (لباب‌پور، ۲۰۲۰). همچنین مدل حداکثر آنتروپی فقط بر اساس موقعیت کانون‌های تولید گردوغبار مدل‌سازی را انجام می‌دهد؛ درحالی‌که مدل‌های آماری مانند رگرسیون لجستیک علاوه بر موقعیت‌های وقوع گردوغبار، نیازمند موقعیت‌های عدم وقوع فرسایش بادی و تولید گردوغبار نیز است (پارک، ۲۰۱۵). بر اساس نتایج حاصل، بخش‌های حساسی مانند بستر رودخانه هیرمند، دریاچه هامون، درمیان، نهبندان، بخش‌های شرقی استان خراسان جنوبی، منطقه سرخس، طبس، ایرانشهر پتانسیل بالایی در تولید گردوغبار دارند. بر اساس نقشه‌های ورودی مدل پیشینه آنتروپی، بخش‌های مستعد تولید گردوغبار در محدوده گسترش تپه‌های ماسه‌ای که فاقد پوشش گیاهی‌اند، قرار دارد. این بخش‌ها در مسیر بادهای با سرعت بالای بیش از ۱۰ m/s بوده و از میزان بارندگی کمتر از ۱۰۰ mm برخوردارند و

نقشه نقاط تولید گردوغبار

نقشه پراکنش کانون‌های تولید گردوغبار در شکل (۳) آمده است. از میان نقاط ثبت‌شده، ۷۰٪ نقاط به‌عنوان کانون‌های گردوغبار گروه آموزش و ۳۰٪ باقی‌مانده به‌عنوان گروه اعتبارسنجی است.

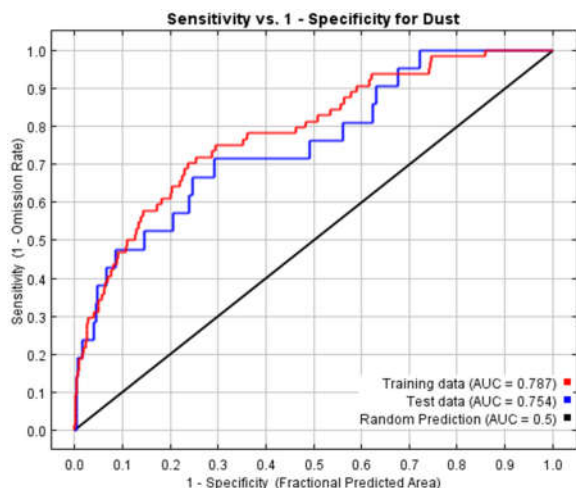


شکل (۳): نقشه نقاط تولید گردوغبار در شرق ایران
Figure (3): Map of dust production points in eastern Iran

نقشه پیش‌بینی نواحی دارای پتانسیل تولید گردوغبار تهیه‌شده بر اساس الگوریتم حداکثر آنتروپی در شکل (۴) نشان داده شده است. مدل حداکثر آنتروپی یکی از فناوری‌های یادگیری ماشین^۱ (MLTs) است که قابلیت پیش‌بینی مکانی بالایی در زمینه‌های مختلف علوم محیطی

1. Machine learning techniques

می‌گیرد. بر اساس منابع علمی در زمینه تحلیل روش منحنی ROC و اعتبارسنجی مدل‌های پیش‌بینی مکانی می‌توان بیان کرد که چون مدل بیشینه آنتروپی دارای دقت بیش از ۷۰٪ است، کارایی خوبی در پیش‌بینی مناطق مستعد تولید گردوغبار داشت.



شکل (۵): منحنی ROC و مقدار AUC محاسبه شده برای ارزیابی

عملکرد مدل

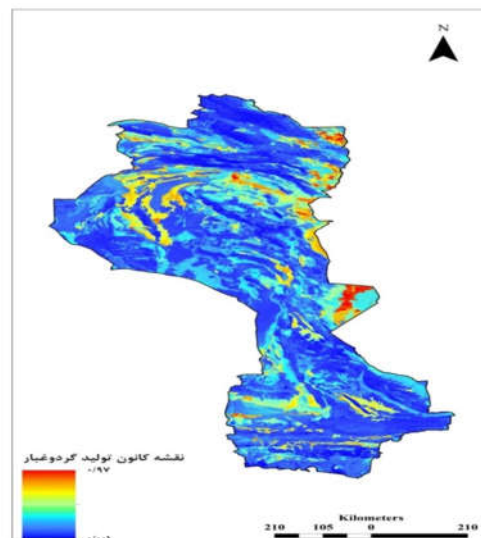
Figure (5): ROC curve and AUC value calculated to evaluate model performance

عوامل مؤثر بر تولید گردوغبار

یکی از مهم‌ترین مزایای به‌کارگیری الگوریتم حداکثر آنتروپی به‌کمک نرم‌افزار MaxEnt، قابلیت این مدل در شناسایی مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار و تعیین اهمیت نسبی عوامل مؤثر بر شناسایی کانون‌های تولید گردوغبار و تحلیل حساسیت مدل به روش Jackknife است (لباب‌پور، ۲۰۲۰). نتایج حاصل از روش Jackknife به‌عنوان شاخص اهمیت متغیرهای مورد بررسی در فرایند تولید گردوغبار و تحلیل حساسیت مدل در شکل (۶) نشان داده شده است. بر این اساس، پارامترهای سرعت باد، بارندگی، لندفرم، پوشش گیاهی و کاربری اراضی مهم‌ترین متغیرهای اثرگذار بر پیش‌بینی کانون‌های تولید گردوغبار هستند و مدل بیشترین حساسیت را به این پارامترها نشان داد. عوامل حداکثر دمای هوا، شیب و سنگ‌شناسی تأثیر کمتری در تولید گردوغبار در منطقه مطالعاتی داشتند.

نتایج حاصل از تحلیل روابط میان عوامل مؤثر و وقوع گردوغبار در آزمون Jackknife نشان داد که بیشترین تراکم

همچنین، دارای شیب کم و دمای حداکثر بسیار بالا بوده و بیشتر در اراضی شوره‌زار، بایر و پیکره‌های آبی خشک‌شده گسترش دارد. نتایج پژوهش حاضر با نتایج مطالعه انجام‌شده در شناسایی منشأهای داخلی گردوغبار در استان خوزستان همخوانی دارد (حیدریان و همکاران، ۲۰۱۷).



شکل (۴): نقشه پیش‌بینی کانون‌های تولید گردوغبار

Figure (4): Prediction map of dust production centers

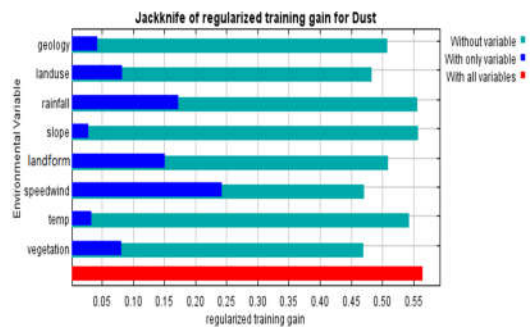
اعتبارسنجی نقشه نقاط تولید گردوغبار

نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد مدل در نرم‌افزار MAXENT، بر اساس میانگین مساحت زیرمنحنی AUC^۱ به‌دست‌آمده از منحنی ROC نیز نشان داد که مدل تولیدشده عملکرد بسیار خوبی در پیش‌بینی کانون‌های تولید گردوغبار دارد (شکل ۵). مقدار AUC در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب برابر با ۰/۷۸ و ۰/۷۵ به دست آمد. از آنجا که یافتن نقاط عدم مستعد تولید گردوغبار و اطمینان از این عدم استعداد مشکلات زیادی در مطالعات دارد (انصاری، ۲۰۱۷)، استفاده از مدل MAXENT به‌عنوان روشی که فقط وابسته به نقاطی است که مستعد تولید گردوغبارند، می‌تواند منجر به حذف بسیاری از ناکارآمدی‌ها و عدم قطعیت ناشی از نقاط عدم حضور گردد (فیلیپس و همکاران، ۲۰۰۶). سطح زیر نمودار AUC به‌دست‌آمده به‌عنوان معیاری از قدرت تفکیک مدل در تشخیص نقاط حضور از عدم حضور مورد توجه قرار

1. The average area under the curve

پتانسیل یابی کانون‌های تولید گردوغبار دارد. این مدل برای تهیه و تولید نقشه پیش‌بینی مناطق مستعد تولید گردوغبار از کانون‌های مولد گردوغبار قدیمی (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۲۰۱۷۶) به‌عنوان متغیر وابسته استفاده نموده و روابط بین متغیرهای مستقل و وابسته را بر اساس میزان آنتروپی شناسایی می‌کند تا خطای پیش‌بینی به حداقل ممکن برسد. بنابراین میزان عدم قطعیت پیش‌بینی‌های آن کم بوده و نتایج حاصل از آن برای مدیریت و کنترل فرسایش حوضه‌های آبخیز مفید و قابل اعتماد است. همچنین تحلیل نتایج نشان داد تراکم و احتمال وقوع گردوغبار در بخش‌های مختلف منطقه متفاوت بوده و یافتن مناطق مستعد تولید گردوغبار اولین گام در مدیریت حفاظت خاک، کنترل فرسایش و تولید رسوب منطقه است. مدل حداکثر آنتروپی نشان داد که افزایش سرعت باد و دمای سطح زمین در منطقه مطالعاتی با کاهش نزولات جوی که تأثیر مستقیمی بر سطح پوشش گیاهی منطقه دارد، در مناطق پست و دشتی که محل پراکنش تپه‌های ماسه‌ای، اراضی بایر و نیز بستر خشک پهنه‌های آبی می‌باشد، شرایط بحرانی برای وقوع طوفان گردوغبار هستند که توجه به آن‌ها در مدیریت و حفاظت خاک منطقه حائز اهمیت است. بنابراین توجه به این نکات کلیدی در خصوص وضعیت پتانسیل کانون‌های گردوغبار در برنامه‌ها و اقدامات حفاظت خاک می‌تواند راهگشا باشد. در نهایت، به‌کارگیری مدل حداکثر آنتروپی و سایر مدل‌های داده‌کاوی به‌منظور شناسایی مناطق مستعد تولید رسوب برای وقوع طوفان‌های گردوغبار برای تمرکز هرچه بهتر پروژه‌های اجرایی در مناطق حساس به فرسایش بادی پیشنهاد می‌شود.

تولید گردوغبار در مناطق پستی که اراضی بایر، شوره‌زارها، تپه‌های ماسه‌ای و بستر خشک پیکره‌های آبی در آن گسترش دارند، وجود دارد که این مناطق فاقد پوشش گیاهی بوده و در مسیر باد محلی منطقه قرار دارد و سرعت جریان باد در آن‌ها بالاست؛ به‌طوری‌که می‌توان گفت بیشترین کانون‌های تولید گردوغبار در آن مناطق حضور دارند.



شکل (۶): نتایج حاصل از آزمون Jackknife برای شناسایی میزان

تأثیر متغیرها در مدل

Figure (6): Results from Jackknife test to identify the effect of variables in the model

نتیجه‌گیری

از بین عوامل مؤثر بر تولید گردوغبار، فاکتور سرعت باد، مقدار بارندگی، لندفرم و کاربری اراضی نسبت به سایر عوامل در پیش‌بینی کانون‌های تولید گردوغبار کارایی بیشتری را نشان داد. سرعت باد به‌عنوان فاکتور آغازکننده و محرک گردوغبار در سطوح بستر خشک و سست خاک در اراضی هموار دشتی، اراضی بایر رهاشده و بستر خشک رودخانه و تالاب‌ها که فاقد پوشش گیاهی است و تپه‌های ماسه‌ای محدوده مورد مطالعه، شرایط بحرانی برای تولید گردوغبار را ایجاد نموده است.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر، می‌توان بیان نمود که مدل حداکثر آنتروپی کارایی بسیار بالایی در

منابع

1. Ansari, A., 2017. Determination of dust emissions concentration in desert wetlands (Case study: Meighan wetland, Iran). *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences* 10(2), 89-97.
2. Baddock, M.C., Bryant, R.G., Domínguez Acosta, M., and Gill, Th.E., 2021. Understanding dust sources through remote sensing: making a case for CubeSats. *Journal of Arid Environments* 104, 104335.
3. Borrelli, P., Ballabio, C., Panagos, P., and Montanarella, L., 2014. Wind erosion susceptibility of European soils. *Geoderma* 232, 471-478.
4. Broomandi, P., Dabir, B., Bonakdarpour, B., and Rashidi, Y., 2017. Identification of the sources of dust storms in the City of Ahvaz by HYSPLIT. *Journal of Pollution* 3(2), 341-348.

5. Chiapello, I., 2014. Dust observations and climatology. *Mineral Dust* 149-177.
6. Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y., and Yates, C.J., 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions* 17(1), 43-57.
7. Geological and Mineral Exploration Organization of Iran. 2017. Preliminary report on physical and chemical characteristics of dust storm. April, 340 p.
8. Han, Q., Wang, M., Cao, J., Gui, C., Liu, Y., He, X., He, Y., and Liu, Y., 2020. Health risk assessment and bioaccessibilities of heavy metals for children in soil and dust from urban parks and schools of Jiaozuo. *Ecotoxicol Environ Saf* 191, 110157.
9. Heidarian, P., Azhdari, A., Jodaki, M., Darvishi Khatooni, J., and Shahbazi, R., 2017. Identifying interior sources of dust storms using remote sensing, GIS and geology (case study: Khuzestan province). *Journal of Geosciences* 27(105), 33-64. (In Persian).
10. Ji, Y., Chen, X., Li, Y., Zhang, W., Shi, Q., Chen, J., Gao, Y., Li, G., Wang, J., Tian, P., and An, T., 2019. The mixing state of mineral dusts with typical anthropogenic pollutants: A mechanism study. *Journal of Atmospheric Environment* 209, 12-200.
11. Kimura, R., 2012. Factors contributing to dust storms in source regions producing the yellow-sand phenomena observed in Japan from 1993 to 2002. *J. Arid Environ.* 80, 40-44.
12. Kandakji, T., Gill, Th.E., and Lee, J.A., 2020. Identifying and characterizing dust point sources in the southwestern United States using remote sensing and GIS. *Journal of Geomorphology* 353, 107019.
13. Lababpour, A., 2020. The response of dust emission sources to climate change: Current and future simulation for southwest of Iran. *Journal of Science of the Total Environment* 714, 136821.
14. Middleton, N., Kang, U., 2017. Sand and dust storms: impact mitigation. *Journal of Sustainability* 9(6), 1053.
15. Moridnejad, A., Karimi, N., and Ariya, P. A., 2015. Newly desertified regions in Iraq and its surrounding areas: Significant novel sources of global dust particles. *Journal of Arid Environments* 116, 1-10.
16. Narayan, K., Khanindra, P., Abhisek, C., Subodh, K., Chowdary, V.M., Singh, C.P., Satiprasad, S., and Samrat, B., 2019. Assessment of foliar dust using Hyperion and Landsat satellite imagery for mine environmental monitoring in an open cast iron ore mining area. *Journal of Cleaner Production* 218, 993-1006.
17. Nobakht, M., Shahgedanova, M., and White, K., 2021. New inventory of dust emission sources in central asia and northwestern China derived from MODIS imagery using dust enhancement technique. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 126(4), 1-19.
18. Park, N.W., 2015. Using maximum entropy modeling for landslide susceptibility mapping with multiple geo environmental data sets. *Journal of Environmental Earth Science* 73, 937-949.
19. Phillips, S., Anderson, R., and Schapire, R., 2006. Maximum entropy modelling of species geographic distributions. *Journal of Ecological Modelling* 190(3), 231-259.
20. Raygani, B., Kheyrandish, 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). *Journal of Desert Management*, 4(8), 15-26. (In Persian).
21. Richter, D., and Gill, T. (2018). Challenges and opportunities in atmospheric dust emission, chemistry and transport. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(7), 115-118.
22. Salahi, B., and Behrouzi, M. (2020). Detection of dust canons and Physico-chemical analysis of its particles in Dezful area. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 9(23), 187-208. (In Persian).
23. Stocklin, J., 1968. Structural History and Tectonic of Iran: A Review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 52, 1229-1258.
24. Tiangang, Y., Siyu, C., Jianping, H., Xiaorui, Z., Yuan, L., Xiaojun, M., and Guolon, Z. (2019). Sensitivity of simulating a dust storm over Central Asia to different dust schemes using the WRF-Chem model. *Atmospheric Environment* 15(207), 16-29.
25. Wang, Y.S., Wang, Y.M., Lin, H.H. and Tang, T.I., 2003. Determinants of user acceptance of Internet banking: an empirical study. *International journal of service industry management*, 14(5), 501-519.
26. Yassin, M.F., Almutairi, S.K., and Al-Hemoud, A., 2018. Dust storms backward Trajectories' and source identification over Kuwait. *Journal of Atmospheric Research* 212, 158-171.
27. Yerramilli, A., Dodla, V.B.R., Challa, V.S., Myles, L., Pendergrass, W.R., Vogel, C.A., Dasari, H.P., Tuluri, F., Baham, J.M., and Hughes, R.L., 2012. An integrated WRF/HYSPLIT modeling approach for the assessment of PM_{2.5} source regions over the Mississippi Gulf Coast region. *Air Quality. Atmosphere & Health* 5(4), 1-12.
28. Zhuang, S., and Lu, X., 2020. Environmental risk evaluation and source identification of heavy metal(loid)s in agricultural soil of Shangdan Valley. Northwest China. *Sustainability* 12, 5806.

Identifying Sources of Dust Using Maximum Entropy Model in Eastern Iran

Faezeh Rajabzadeh^{1*}

Received: 23/04/2022

Accepted: 07/04/2023

Extended Abstract

Introduction: As a major type of atmospheric and environmental pollutant, dust bears terribly harmful consequences for agriculture, industry, and human health. In this regard, identifying the potential sources of dust is the main required step in managing and controlling the dust phenomenon and reducing its risks, especially in arid and semi-arid environments. Therefore, this study used the modern maximum entropy algorithm to predict the potential sources of dust in eastern Iran by considering the effective environmental factors.

Materials and Methods: As for the modeling process, eight effective factors in dust generation, including land slope, landform, vegetation, precipitation, wind speed, lithology, land use, and maximum air temperature were analyzed as independent variables involved in the occurrence of dust storms. Moreover, petrologic, land use, pedologic, precipitation, vegetation, and slope maps were prepared.

On the other hand, the locations identified by Iran's Geological Survey as the sources of dust were used as dependent variables. Furthermore, the distribution of sand dunes, bare lands, dried beds of lakes, dried wetlands, and other places along the region's dominant wind route was determined using the remote sensing technique and the MODIS sensor images extracted from Aqua and Terra satellites. Moreover, 70% and 30% of the identified sources of dust were randomly assigned to training and validation datasets, respectively. Then, the potential areas for generating dust were investigated using the maximum entropy algorithm and the MAXENT software.

Finally, a model was developed for identifying the potential areas of dust generation with the highest accuracy. After developing a complete model comprising of all relevant variables, the modeling was replicated to the number of variables, whereby each individual variable was removed from the modeling process in each replication of the process. Therefore, the influence of each variable in predicting the desired areas was evaluated and the forecast map of dust generation centers was improved. Then, the results of the forecast map were validated using the method under the ROC curve.

Results and Discussion: This study found that sensitive areas such as the Helmand River bed, Hamoon Lake, Darmian, Nehbandan, eastern parts of South Khorasan Province, Sarakhs, Tabas, Iranshahr, etc. had a high potential for dust generation. According to the input maps extracted from the maximum entropy model, the dust-prone areas fell within the range of sand dunes, whose lands lacked any vegetation. Located in the direction of winds with more than 10 meters per second velocity, the areas are mostly spread in saline lands, barren lands, and dried water bodies, possessing less than 100 mm precipitation rate, low slope, and maximum temperature rate. It was also found that the AUC values were 0.78 and 0.75 in the calibration and validation stages, respectively.

On the other hand, according to the validation of spatial forecasting models and the current literature in the field of ROC curve method analysis, it can be argued that due to its over 70% accuracy, the maximum entropy model can perform well in predicting dust-prone areas. Also, the results of the Jackknife test indicated that wind speed, precipitation, pedology, vegetation, and land use were the most important variables involved in the

1. Assistant Professor, Department of Agronomy, Faculty of agriculture, shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; faizehrajabzadeh@yahoo.com
DOI: 10.22052/deej.2023.248205.0

prediction of dust generation centers, with the model being highly sensitive to such variables.

However, factors such as maximum air temperature, slope, and lithology were found to have exerted a minimal effect on the occurrence of the dust storm in the study area. Moreover, according to the results of analyzing the correlation between the studied factors and the occurrence of the dust storm, the highest density of dust generation was observed in lowland areas where barren lands, salt marshes, sand dunes, and dried beds of water bodies existed. Possessing no vegetation, the areas are also located in the region's local wind direction with high velocity.

Conclusion: Based on the study's results, it can be argued that the maximum entropy model performs highly efficiently in identifying the potential dust-generation areas, considering the old dust-generating centers as dependent variables to prepare and produce a forecast map of dust-prone areas. Moreover, the model identifies the correlation between independent and dependent variables based on the extent of entropy to minimize the possibility of prediction error. Therefore, the model's predictions are made with the lowest degree of uncertainty, whose results could be used and relied on for managing and controlling watershed erosion.

On the other hand, the results suggested that the density and probability of dust storm occurrence varied in different parts of the region and that identifying dust-generation-prone areas was the first step in protecting the soil, controlling erosion, and managing sediment production. Moreover, the maximum entropy model showed an increase in wind speed and surface temperature throughout the study area, with a decrease in precipitation rate exerting a direct influence on the vegetation of the lowlands and plains where sand dunes, barren lands, and dried beds of wetlands are located. Finally, the maximum entropy model and other data mining models are recommended to be used for identifying potential areas of sediment production involved in the occurrence of dust storms to help improve the concentration of relevant executive projects in areas sensitive to wind erosion.

Keywords: Storm Control, Potential Dust Sources, Environmental Pollution.