

## **Integrated Modeling of Land Vulnerability to Dust Emission and Flood Inundation in Khuzestan Province**

M. Bagherpour<sup>1</sup>, AA. Nazari Samani<sup>2\*</sup>, F. Pourasef<sup>3</sup>, Gh. Rahi<sup>4</sup>

1. Ph.D. Student, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, University of Tehran.
2. Professor, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, University of Tehran.
3. Research Expert, Khuzestan Water and Electricity Organization.
4. Assistant Professor in Research, Bushehr Agricultural Research and Training Center.

\* Corresponding Author: aknazari@ut.ac.ir

Received date: 17/10/2024

Accepted date: 2025/01/2025



[10.22034/JDMAL.2025.2043634.1487](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2025.2043634.1487)

### **Abstract**

Global warming, through its impact on precipitation and temperature, has intensified natural hazards such as floods and droughts, leading to significant damage to fisheries, agriculture, infrastructure, and human health. In this study, the landscape vulnerability of Khuzestan province to flood inundation and dust emission was simultaneously analyzed using the maximum entropy method. All driving factors were prepared in raster format, and training samples were collected separately from areas of flood and dust occurrence. These training points were verified through land surveying. The modeling was performed using the MaxEnt GUI software. Model validation was conducted using the ROC curve (AUC), and the importance of variables was assessed through the jackknife approach. The results indicated that, for both dust emission and floods, the AUC values for both training and validation were categorized as very good and good, respectively, demonstrating high model performance. Effective factors influencing dust emission included AOD (Aerosol Optical Depth), precipitation, elevation, population density, and NDVI. In contrast, variables such as distance from rivers, surface coarse fragments, NDWI, surface temperature, and land use had significant impacts on increasing vulnerability to floods. The integration of flood and dust storm maps revealed that 4% of the province's surface exhibited high vulnerability to both hazards, primarily in the southwestern regions. Additionally, 27% of the province was classified as having medium vulnerability. The northern half of the province, covering an area of 42,000 km<sup>2</sup>, showed low or no vulnerability to flooding and dust storms. Given the accuracy of the model used, the findings of this study could be useful for decision-making and management, aiding in the organization and design of appropriate engineering and operational projects.

**Keywords:** Maximum entropy; jackknife; AOD; Distance from river; Land use

### **How to cite this article**

Bagherpour, M., Nazari Samani, AA. and Pourasef, F. (2025). Integrated Modeling of Land Vulnerability to Dust Emission and Flood Inundation in Khuzestan Province. *Desert Management*, 13(1), 1-22. DOI: [10.22034/jdmal.2025.2043634.1487](https://doi.org/10.22034/jdmal.2025.2043634.1487)



## Extended Abstract

### Introduction

The phenomenon of global warming and its effects on the environment is a pressing global issue that negatively impacts various systems, including water resources, agriculture, ecosystems, and evapotranspiration, among others (8). Warmer air has a greater capacity to retain moisture, leading to increased atmospheric humidity, which in turn results in more intense precipitation and the occurrence of floods (1). Conversely, reduced humidity increases the albedo of the soil surface, thereby intensifying and prolonging the warming effect (1). As a result, climate change contributes to the rise in extreme events such as droughts and floods. Iran is situated within the global desert belt, with two-thirds of its surface covered by arid and desert regions. In these areas, wind erosion causes dust storms, resulting in significant damage to biological and economic resources (19). The climatic diversity in Iran leads to sharp, short-term fluctuations in annual rainfall, which have contributed to recent flood events (14). Sustainable management of natural resources requires the identification of vulnerable areas, which is a critical step in the protective framework. Machine learning methods are among the primary approaches for determining these vulnerable areas, and previous research has demonstrated the reliability of results obtained through such methods (20). The present study aims to assess the vulnerability of Khuzestan Province to floods and dust storms by analyzing factors that influence the occurrence of each, using Shannon's maximum entropy method for modeling. Determining vulnerability to floods and dust storms can assist in risk management and help mitigate the associated damages.

### Material and Method

The study area in this research is Khuzestan Province, located in the southwest of Iran (Fig. 1). A significant portion of the province is covered by wind erosion hotspots. Recent droughts have led to the degradation of water resources and the occurrence of floods. To assess vulnerability to dust storms and floods, credible scientific sources were reviewed, and the factors influencing the generation of dust storms and floods were categorized into five groups: climatic factors, human factors, top-hydrological factors, soil factors, and land use/land cover factors (Table 1). The layers of these factors were prepared in raster format. In this study, MaxEnt software was used for modeling. Locations of flood events and areas prone to dust storms were compiled into separate CSV files and introduced into the software as presence point data for modeling vulnerability to dust storms and floods. In this method, 25% of the data were used for model testing, while 75% were used for training (Table 2). Subsequently, the factor maps influencing flood and dust storm generation were converted to ASCII format, and separate modeling was conducted to determine vulnerability to floods and dust storms using the relevant data for each. The importance of variables was assessed using the Jackknife method, and the model's accuracy was validated using the ROC curve. Finally, vulnerability maps for floods and dust storms in Khuzestan Province were prepared. In the final step, the vulnerability of various land uses to dust storms was examined using the frequency ratio index.

### Result and Discussion

The results of the present study revealed that, for dust storms, the most influential factors were aerosol optical depth (AOD), precipitation, elevation (DEM), population density, and the normalized difference vegetation index (NDVI) (Fig. 2). For floods, the critical factors included distance from rivers, the normalized difference water index (NDWI), land surface temperature (LST), the percentage of stones and gravel, and land use (Fig. 3). The model's performance was evaluated using the area under the curve (AUC) from the ROC curve. During the training phase, the prediction accuracy for dust storms and floods was classified as "very good," with AUC values of 0.804 and 0.825, respectively (Fig. 4). In the validation phase, the accuracy for dust storms and floods was classified as "good" (0.784) and "very good" (0.861), respectively. According to the results, approximately 60% of the province's surface area has no dust storm potential, while 15% exhibits low dust storm potential. About 9% of Khuzestan Province has a very high dust storm potential. Furthermore, approximately 4.4% of the province's area demonstrates very high flood potential, while 5% has low flood potential. The area with no flood potential accounts for 74.5% of the province (Table 3). In general, the southern half of the province, particularly the southern and southwestern regions, is more susceptible to dust storms compared to other areas (Fig. 5). Areas along the main rivers on the western and southern sides of the province are at a higher risk of flooding (Fig. 6). The southwestern areas of the province were classified as having moderate to very high vulnerability to both floods and dust storms (Fig. 7, Table 5). Examining dust storm vulnerability across various land uses is a critical tool for

managing risks and minimizing damages caused by dust storms. Land use significantly influences the generation and transport of dust. The results from the frequency ratio index for dust storm vulnerability across different land uses in the province indicated that rainfed agriculture exhibited the highest vulnerability (Table 4). Irrigated agriculture ranked second, followed by rangelands and water bodies. In both irrigated and rainfed agricultural systems, soil conditions and management practices can directly impact the occurrence of dust storms. Conservation agriculture, by reducing mechanical disturbances and employing appropriate vegetation cover, helps prevent soil displacement and mitigate wind erosion. Overall, the vulnerability maps produced in this study can play a crucial role in environmental planning, management strategies, and restoration efforts.

### Conclusion

This study underscores the critical importance of assessing land vulnerability and sensitivity to dust storms and floods for effective risk management and damage mitigation in Khuzestan Province. By utilizing the Maximum Entropy Model, the research demonstrated a high level of accuracy in identifying areas susceptible to these hazards, thereby facilitating the creation of detailed risk maps. The study identified key factors influencing dust storm susceptibility, including aerosol optical depth (AOD), precipitation, elevation, population density, and the normalized difference vegetation index (NDVI). The results revealed that lands designated for agricultural use, rangelands, and dry farming exhibit the highest potential for dust storm generation. This is primarily due to factors such as reduced vegetation cover, soil moisture loss, and wind erosion, particularly during dry seasons. Effective land and resource management, alongside conservation agricultural practices—such as minimizing mechanical disturbances and enhancing vegetation cover—are essential strategies to mitigate soil erosion and reduce the impacts of dust storms in the region.

**Keywords:** Maximum entropy; jackknife; AOD; Distance from river; Land use

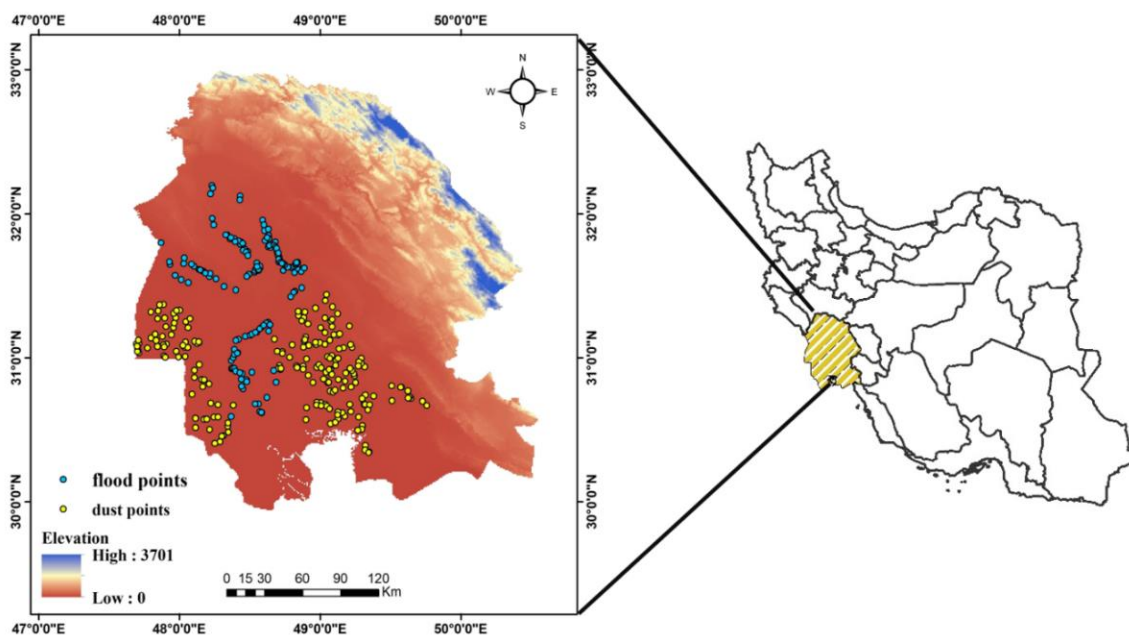


Fig 1. Digital Elevation Model (DEM) map of study area (Khuzestan Province)

**Table 1. Factors influencing land susceptibility to floods and dust storm**

Indicators	Groups	Selected influential indices	Dust Storm	Flood	Sources of Maps
1	Climate	AOD	✓	-	MODIS Satellite Imagery
2		SPI	✓	✓	Metrological Station Data
3		Average annual precipitation	✓	✓	Metrological Station Data
4		Minimum temperature	✓	✓	Metrological Station Data
5		Average temperature	✓	✓	Metrological Station Data
6	Human Factors	Population	✓	✓	Statistical Centre of Iran
7		Livestock	✓	✓	Statistical Centre of Iran
8		immigration	✓	✓	Statistical Centre of Iran
9		Education	✓	✓	Statistical Centre of Iran
10	Topo -hydrology	Digital Elevation Model (30*30m)	✓	✓	USA Geological Survey Website
11		Flow Accumulation	✓	✓	DEM Map and GIS Software
12		Distance form River	✓	✓	DEM Map and GIS Software
13		TPI	✓	✓	DEM Map and GIS Software
14		TWI	✓	✓	DEM Map and GIS Software
15	Soil	GSI	✓	✓	Landsat 8 Satellite Imagery
16		Bulk density	✓	✓	Ground Data and Soil Grid Data
17		Clay	✓	✓	Ground Data and Soil Grid Data
18		Silt	✓	✓	Ground Data and Soil Grid Data
19		Percentage of gravel	✓	✓	Ground Data and Soil Grid Data
20	Land use / land cover	EVI	✓	✓	MODIS Satellite Imagery
21		NDVI	✓	✓	MODIS Satellite Imagery
22		LST	✓	✓	MODIS Satellite Imagery
23		NDWI	✓	✓	MODIS Satellite Imagery
24		Land Use	✓	✓	Sentinel Satellite Imagery

**Table 2. Classification of AUC (4)**

Classification	Poor	Moderate	Good	Very Good	Excellent
AUC	0.5 – 0.6	0.6 – 0.7	0.7 – 0.8	0.8 – 0.9	0.9 - 1

**Table 3. Spatial extent and percentage distribution of areas with potential for dust storms and floods**

Susceptibility Potential	Dust Storm		Flood	
	Area (km <sup>2</sup> )	Area (%)	Area (km <sup>2</sup> )	Area (%)
No Potential	37653.669	60.95	46112.54	74.63
Low	9374.4345	15.18	3228.31	5.39
Moderate	4680.7349	7.58	6871.14	11.12
High	4502.8037	7.29	2668.40	4.48
Very High	5562.479	9.00	2709.81	4.39

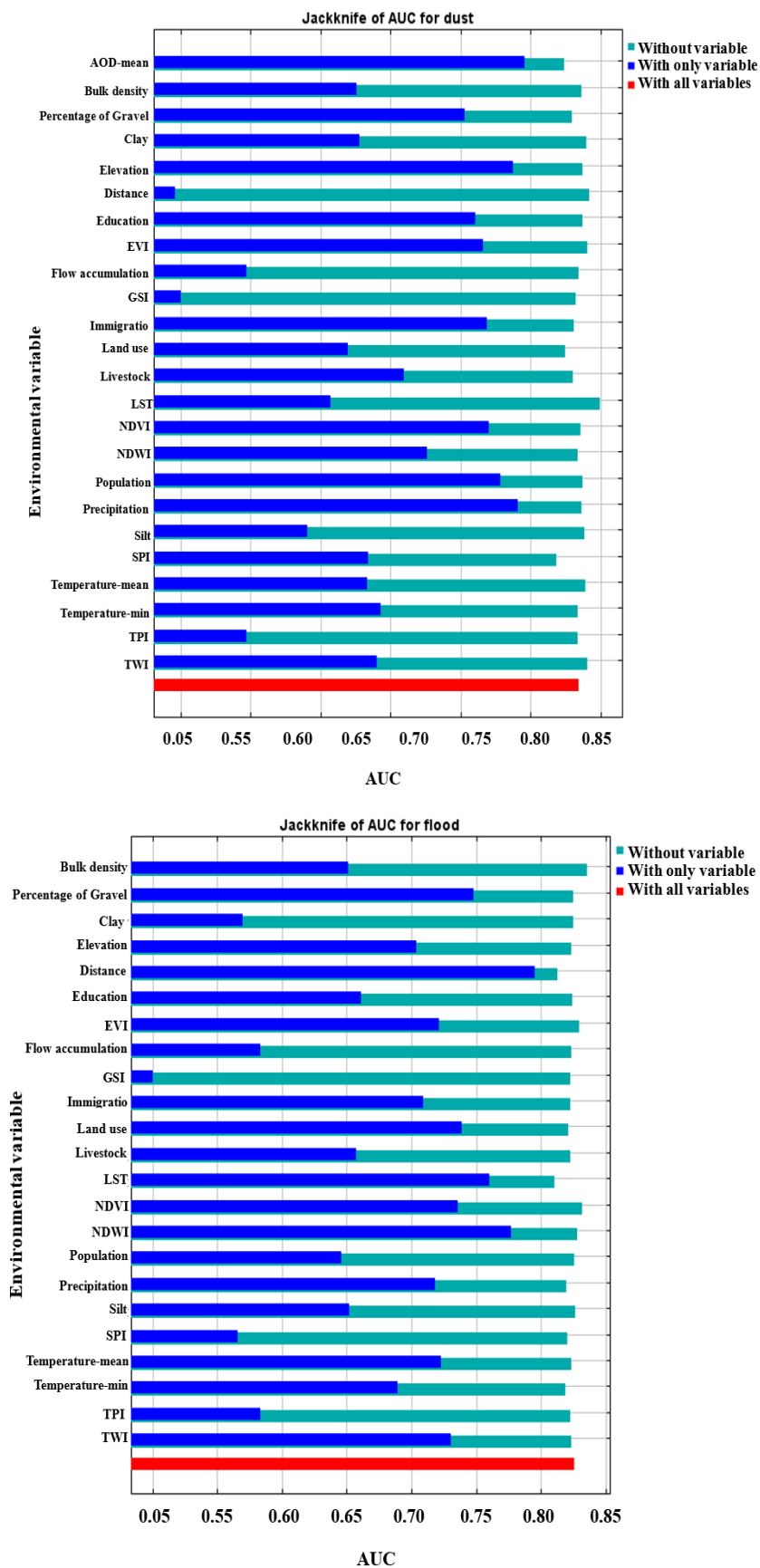


Fig 2. The results of Jackknife test for identifying the most influential parameters

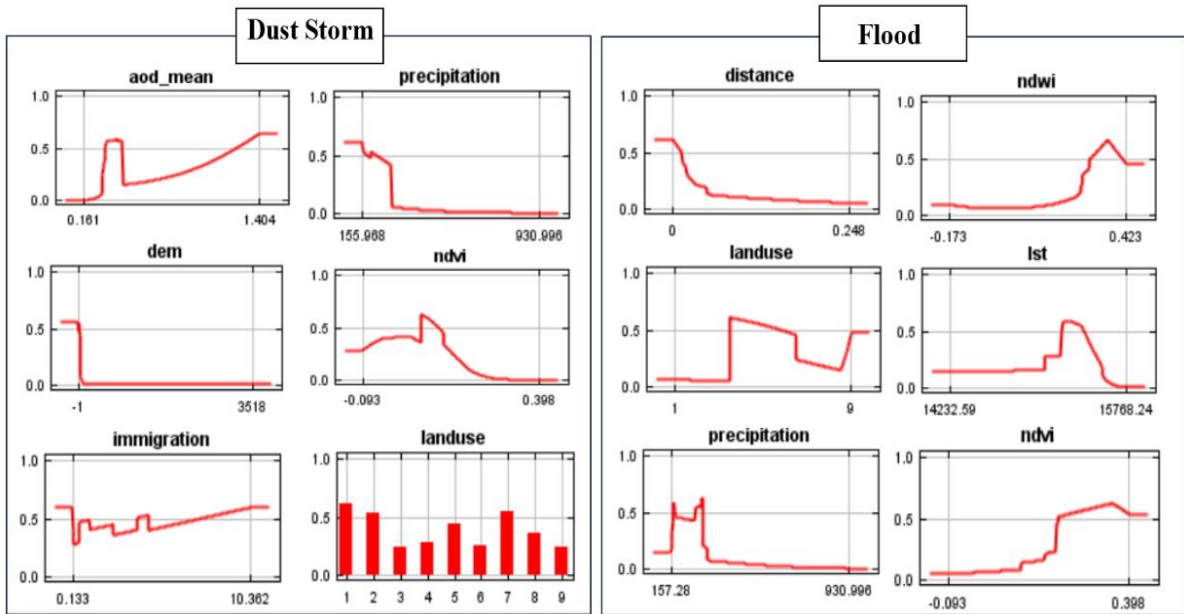


Fig 3. Response curves of influencing variables on dust storms and floods

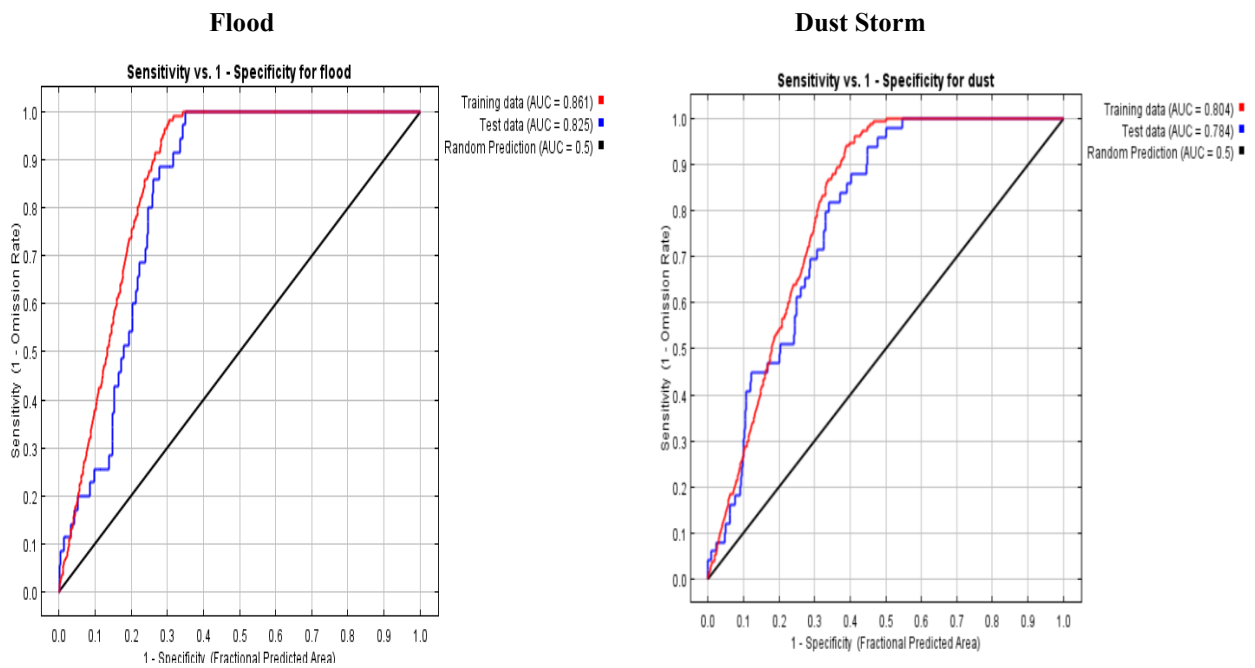


Fig 4. AUC values for testing and validation phases in dust storm and flood modeling

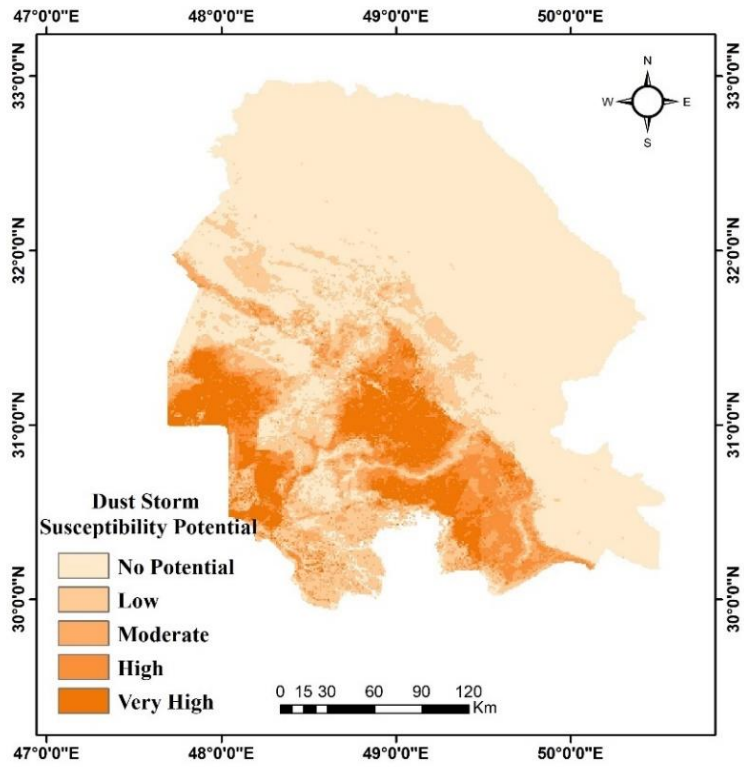


Fig 5. Map of land susceptibility to dust storms

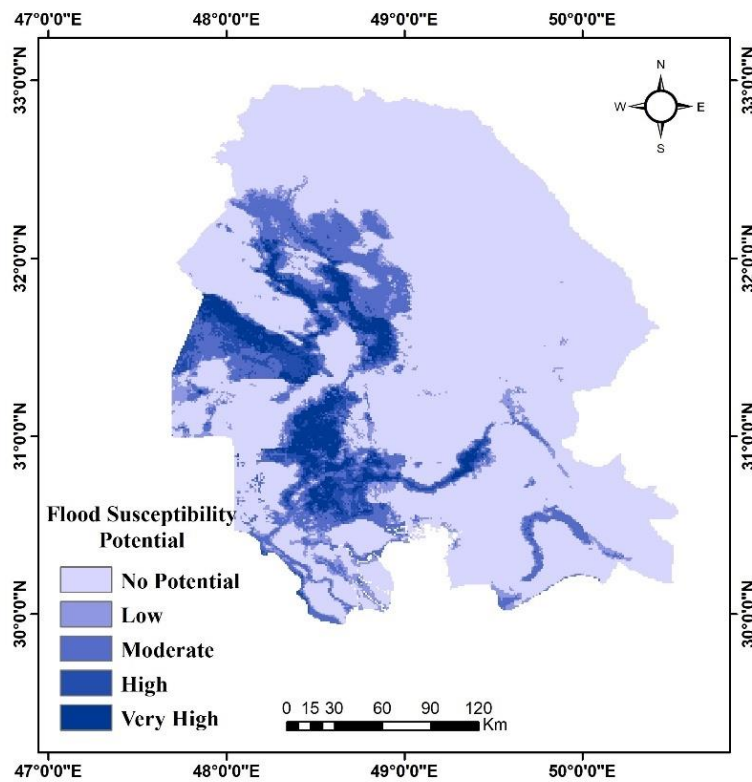


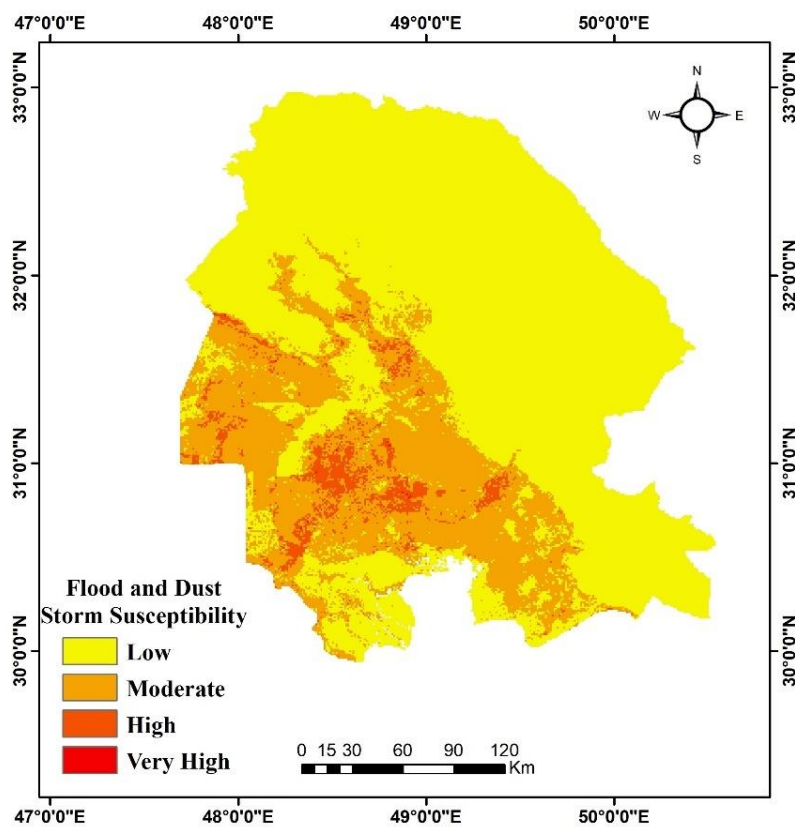
Fig 6. Map of land susceptibility to floods

**Table 4. Dimensionless frequency ratio index of dust storm vulnerability across land uses in Khuzestan Province**

Land use	Rangeland	Irrigated Agriculture	Rained Agriculture	Sand Dunes	Forested areas	Water Bodies	Residential Areas
Dimensionless Frequency Ratio	0.18	0.19	0.35	0.03	0.01	0.16	0.15

**Table 5. Spatial extent and percentage distribution of area sensitive to floods and dust storm**

Classification	Area (km <sup>2</sup> )	Area (%)
Low	42785.60	69
Moderate	16651.84	27
High	2323.08	4
Very High	13.61	0.02



**Fig 7. Zoning map illustrating areas sensitive to floods and dust storms**



## مدل سازی تلفیقی آسیب پذیری اراضی نسبت به گردوغبار و سیلاب در استان خوزستان

مریم باقرپور<sup>۱</sup>، علی اکبر نظری سامانی<sup>۲\*</sup>، فرشته پورآصف<sup>۳</sup>، غلامرضا راهی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکتری گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران.

۲. استاد، گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران.

۳. کارشناس پژوهشی، سازمان آب و برق خوزستان.

۴. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان بوشهر.

\*. نویسنده مسئول: [aknazari@ut.ac.ir](mailto:aknazari@ut.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۶



[10.22034/jdmal.2025.2043634.1487](https://doi.org/10.22034/jdmal.2025.2043634.1487)

### چکیده

گرم شدن کره زمین، با تأثیر بر بارندگی و دما، موجب افزایش مخاطرات طبیعی به ویژه سیلاب و خشکسالی و افزایش خسارت به بخش‌های کشاورزی، شیلات، مسکن، زیرساخت‌ها و سلامت انسان شده است. در این پژوهش حساسیت اراضی نسبت به در معرض سیلاب بودن و گسیل گردوغبار در استان خوزستان به‌طور همزمان و با روش پیشینه آنتروپی مورد واکاوی قرار گرفت. بدین منظور لایه رستری متغیرهای مؤثر بر سیلاب و گردوغبار به‌طور جداگانه تهیه شد. نقطه‌های دارای رویدادهای قطعی سیلاب و نقاط مستعد گردوغبار در استان خوزستان تهیه و مدل سازی در نرم افزار MaxEnt انجام شد. اعتبارسنجی مدل با منحنی ROC و درصد اهمیت متغیرها با استفاده از آزمون جک‌نایف بررسی شد. نتایج نشان داد در بخش گردوغبار مقدار AUC برای بخش آموزش و اعتبارسنجی به ترتیب برابر با خیلی خوب، خوب و در بخش سیلاب برابر با خوب و خیلی خوب است، که نشان از دقت زیادی مدل است. متغیرهای عمق اپتیکی آئروسول، بارش، ارتفاع، جمعیت و شاخص پوشش گیاهی نرمال شده نقش مؤثری در ایجاد گردوغبار و متغیرهای فاصله از رودخانه، سنگ و سنگ‌ریزه، شاخص تفاضل نرمال شده رطوبت، دمای سطح زمین و کاربری اراضی تأثیر زیادی در افزایش آسیب پذیری به سیلاب دارند. تلفیق نقشه‌های سیلاب و گردوغبار نشان داد ۴٪ از سطح استان دارای قابلیت شدید از نظر حساسیت به سیلاب و گردوغبار هستند. این مناطق بیشتر نواحی جنوب غربی استان را تشکیل می‌دهند. همچنین، ۲۷٪ از استان را مناطقی با حساسیت متوسط تشکیل می‌دهد. تقریباً بیشتر نواحی نیمه شمالی استان و بخش‌هایی از نیمه جنوبی آن دارای حساسیت کم نسبت به سیلاب و گردوغبار است و سطحی بیش از ۴۲۰۰۰ km<sup>2</sup> را به خود اختصاص می‌دهد. با توجه به دقت مدل مورد استفاده، می‌توان از نتایج پژوهش حاضر در برنامه‌ریزی‌های استانی و پروژه‌های مدیریتی و اصلاحی توسط دولت، سازمان‌ها و ادارات اجرایی مرتبط و مهندسان بهره‌گیری کرد.

**واژگان کلیدی:** پیشینه آنتروپی، جک‌نایف، عمق اپتیکی آئروسول، فاصله از رودخانه، کاربری اراضی.

### استناد به این مقاله

باقرپور، مریم، نظری سامانی، علی اکبر و پورآصف، فرشته. (۱۴۰۴). مدل سازی تلفیقی آسیب پذیری اراضی نسبت به گردوغبار و سیلاب در استان خوزستان. مدیریت بیابان، ۱۳(۱)، ۱-۲۲. DOI: [10.22034/jdmal.2025.2043634.1487](https://doi.org/10.22034/jdmal.2025.2043634.1487)



## ■ مقدمه

پدیده گرم‌شدن زمین و تأثیر آن بر محیط‌زیست، موضوعی جهانی و مورد تأکید دانشمندان می‌باشد. در واقع افزایش دمای جو زمین و تغییرات در مقدار، نوع و الگوهای بارندگی، جزء عناصر اصلی تغییر اقلیم هستند که تقریباً تمام یا بخش‌هایی از چرخه آب را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۸). این تغییرات می‌توانند بر سیستم‌های مختلفی از جمله منابع آب، کشاورزی، محیط‌زیست، بهداشت، چرخه آب و غیره تأثیرهای منفی بگذارند (۱۲). کشور ایران به دلیل قرارگرفتن بر روی کمربند بیابان جهانی از یکسو و تغییرات انسانی وارد شده به بوم‌سازگان‌های آن طی چند دهه گذشته همواره در معرض تشدید مخاطرات سیلاب، گردوغبار، خشکسالی قرار دارد. خشکسالی یکی از شدیدترین پدیده‌های آب‌وهوایی، بیشترین تأثیر را بر جمعیت جهان دارد (۱۲). علاوه بر این، هوای گرم توانایی نگهداری رطوبت بیشتری دارد که افزایش تبخیر از سطوح مرطوب را به همراه دارد. با افزایش رطوبت در جو، بارش‌های شدیدتر وقوع سیلاب‌ها افزایش می‌یابد. همچنین کاهش رطوبت خاک موجب افزایش بازتابش خورشیدی از سطح خاک شده که به شدت و مدت گرم شدن می‌افزاید (۱). بنابراین، تغییر اقلیم موجب افزایش پدیده‌های حدی نظیر سیلاب و خشکسالی می‌شود. سیلاب موجب ایجاد خسارت زیادی به زیرساخت‌های بخش‌های مختلف می‌شود و پیامدهای نامطلوب (مستقیم و غیرمستقیم) زیادی دارد (۱۴). در این مناطق، فرسایش بادی موجب توفان‌های گردوغبار و خسارات زیاد به منابع زیستی و اقتصادی نظیر تأسیسات، زیرساخت‌ها، مناطق مسکونی و اراضی کشاورزی می‌شود (۱۹). به‌منظور کاهش اثرات زیان‌بار مخاطراتی نظیر گردوغبار و سیلاب، لازم است مناطق مستعد به آن‌ها و عامل مؤثر بر آسیب‌پذیری شناسایی شود. مدیریت پایدار منابع طبیعی مستلزم شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و حساس است که این یکی از گام‌های مهم در چارچوب حفاظتی محسوب می‌شود (۱۳). روش‌های یادگیری ماشین به دلیل گسترش دانش و پیچیدگی فرآیند تصمیم‌گیری، اهمیت زیادی پیدا کرده‌اند. این روش‌های آماری امکان تشخیص الگوهای پیچیده بر اساس داده‌های موجود را فراهم می‌کنند

(۲۰). مدل بیشینه آنتروپی<sup>۱</sup>، به‌عنوان یک رویکرد در تئوری اطلاعات و یادگیری ماشین، با استفاده از مفهوم کمینه‌سازی آنتروپی به‌عنوان ابزار اصلی بهینه‌سازی فرآیند یادگیری شناخته می‌شود. این مدل به تازگی میان حفظ دقت در مدل‌های آماری و انعطاف‌پذیری در حضور اطلاعات جدید می‌پردازد. مفهوم بیشینه آنتروپی ابتدا توسط شانون<sup>۲</sup> در حوزه تئوری اطلاعات مطرح شد (۱۵). آنتروپی به‌عنوان اندازه‌گیری عدم قطعیت در یک سیستم اطلاعاتی تعریف می‌شود. مدل بیشینه آنتروپی با کمینه کردن آنتروپی در فرآیند یادگیری، به دستیابی به یک توزیع احتمال بهینه برای پدیده مورد مطالعه می‌پردازد. این رویکرد تلاش می‌کند تا از تمامی اطلاعات موجود در داده‌ها برای بهبود کارایی مدل‌ها استفاده کند. داده‌هایی که آنتروپی بیشتری دارند، به‌عنوان داده‌های مهم‌تر و مفیدتر در فرآیند یادگیری در نظر گرفته می‌شوند. همچنین عدم نیاز به نقاط عدم حضور پدیده مورد نظر از دیگر مزیت‌های این روش می‌باشد. استفاده از مدل‌هایی که تنها به داده‌های حضور نیاز دارند، می‌تواند از خطاهای ناشی از به‌کارگیری داده‌های عدم حضور اشتباه جلوگیری کند (۳).

از مدل بیشینه آنتروپی در علوم مختلف و در زمینه‌های مخاطرات طبیعی نظیر پیش‌بینی رخداد سیل، زمین لغزش، فرونشست زمین و فرسایش خندقی بهره‌گیری شد و بررسی‌های گوناگونی توسط محققان انجام شد. برای تهیه نقشه احتمال وقوع سیلاب در حوزه آبخیز هراز، از موقعیت ۲۱۱ نقطه سیلابی استفاده شد که ۷۰٪ آنها برای مدل‌سازی و ۳۰٪ آنها برای اعتبارسنجی به‌کار رفت. نتایج مدل‌سازی مذکور نشان داد از بین ۱۰ متغیر مورد بررسی، مؤثرترین متغیر در وقوع سیلاب شاخص NDVI<sup>۳</sup> و کم‌اهمیت‌ترین شاخص، انحنای زمین می‌باشد. مقادیر سطح زیر منحنی ROC<sup>۴</sup> در قسمت آموزش و پیش‌بینی به ترتیب برابر با ۰/۹۲ و ۰/۹۱ می‌باشد که نشان از قابل‌اعتماد بودن مدل است (۹).

محققان زمین‌شناسی به منظور منشأیابی داخلی توفان‌های گردوغبار با روش تلفیقی مبتنی بر فناوری

<sup>1</sup> Maximum Entropy

<sup>2</sup> Shannon

<sup>3</sup> Normalized difference vegetation index

<sup>4</sup> Receiver operating characteristic

محققان از مدل بیشینه آنتروپی جهت منشأیابی گردوغبار در شرق ایران استفاده کردند. بدین منظور ابتدا منابع گردوغبار شناسایی و به‌عنوان نقاط حضور مورد استفاده قرار گرفت. از این نقاط به نسبت ۷۰ به ۳۰ برای آموزش و اعتبارسنجی استفاده به عمل آمد. همچنین از ۸ متغیر مؤثر بر وقوع گردوغبار برای مدل‌سازی استفاده شد و نتایج نشان‌داد سرعت باد، کاربری اراضی و بارندگی از مهم‌ترین عوامل شناسایی اراضی غبارخیز هستند (۱۱). نتایج ارزیابی حساسیت زمین لغزش در حوضه دوآب صمصامی به‌وسیله دو مدل بیشینه آنتروپی شانون و دمپستر شفر نشان داد از بین ۱۵ عامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش، عوامل بارش سالیانه، سنگ‌شناسی، فاصله از جاده، و فاصله از آبراهه بیش‌ترین تأثیر را دارند. سطح زیر منحنی در مدل‌سازی به روش دمپستر-شفر برابر ۰/۹۵ بود که دقت بالا طبقه‌بندی را نشان می‌دهد (۱۶). بررسی عوامل مرفولوژیک، هیدرولوژیک و اقلیمی بر وقوع سیلاب در حوضه گرگان‌رود به‌وسیله مدل‌های بیشینه آنتروپی شانون و وزن شواهد نشان داد عوامل کاربری اراضی، ارتفاع و شاخص پوشش گیاهی نرمال شده بیش‌ترین تأثیر را در وقوع سیلاب در این منطقه دارند. به‌منظور اجرای مدل‌های ذکر شده از ۷۰٪ داده‌های پهنه‌های رخ‌داد سیلاب برای مدل‌سازی و ۳۰٪ باقی‌مانده جهت اعتبارسنجی استفاده شد. نتایج نشان داد در مجموع هر دو مدل در پهنه‌بندی و پیش‌بینی رخ‌داد سیل در آبخیز گرگان‌رود استان گلستان کارآمد و مناسب بودند (۱۷).

واکای بررسی‌های انجام‌شده قبلی، نشان داد، اگرچه در زمینه پهنه‌بندی مخاطرات سیلاب و گردوغبار بررسی‌های متعددی انجام شده است ولیکن به منظور احصاء نتایج کاربردی نیاز است تا آسیب‌پذیری به آنها به‌طور هم‌زمان و تلفیقی انجام شود. در این زمینه بررسی‌های کمتری انجام شده است. همچنین مدل بیشینه آنتروپی از کارایی زیادی در تهیه نقشه آسیب‌پذیری و حساسیت اراضی نسبت به مخاطرات طبیعی برخوردار است. بنابراین تعیین آسیب‌پذیری نسبت به سیلاب و گردوغبار می‌تواند در زمینه مدیریت خطر و افزایش ظرفیت سازگاری کمک‌کننده باشد. بدین منظور هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی حساسیت اراضی استان خوزستان به هردو مخاطره

سنجش از دور و فازی AHP<sup>۱</sup> نشان‌دادند که ۹٪ از مساحت دشت خوزستان با سطحی بیش از ۳۴۹۰۰۰ha منشأ تولید گردوغبار هستند. ایشان کاربری‌های مراتع تخریب‌شده، زمین‌های کشاورزی دیم رهاشده، زمین‌های بدون پوشش، تالاب‌ها و آبگیرهای خشک‌شده و زمین‌های کشاورزی آبی جزء کانون‌های گردوغبار بیان کردند (۶). همچنین نتایج پژوهش بهره‌گیری از مدل بیشینه آنتروپی برای ارزیابی خطر سیلاب با استفاده از متغیرهای مؤثر مانند: شیب، جهت، انحنای زمین، تراکم زهکشی، سنگ‌شناسی، نوع خاک، کاربری اراضی نشان داد دقت مدل فوق بر پایه شاخص سطح زیر منحنی ROC برابر با ۷۳/۵٪ می‌باشد (۵). ارزیابی حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل‌های دمپستر-شفر و بیشینه آنتروپی شانون در منطقه سرخون نشان‌داد، کاربری اراضی مهم‌ترین عامل است. نتایج ارزیابی سطح زیر منحنی مدل‌های بیشینه آنتروپی شانون و دمپستر-شفر در بخش آموزش (۷۰٪) به‌ترتیب برابر با ۰/۸۲ و ۰/۸۱ در بخش آزمون (۳۰٪) برابر با ۰/۷۶ و ۰/۷۵ بود که نشان از دقت زیاد مدل بیشینه آنتروپی شانون نسبت به مدل دمپستر-شفر<sup>۲</sup> است (۱۸).

برای مدل‌سازی مکانی حساسیت کانون‌های گردوغبار در شرق ایران توسط ۸ عامل مؤثر، ۱۴۷ کانون گردوغبار را شناسایی گردید و از آنها برای مدل‌سازی و ارزیابی استفاده به‌عمل آمد. نتایج حاصل از ارزیابی منحنی ROC<sup>۳</sup> نشان داد که مدل BRT<sup>۴</sup> کارایی نسبتاً بالایی در تهیه نقشه حساسیت گردوغبار در منطقه مورد مطالعه را داشت و سطح زیر منحنی برابر با ۷/۶ بود. همچنین شایان ذکر است، شاخص پوشش گیاهی، ارتفاع و درجه شیب بیش‌ترین تأثیر بر وقوع گردوغبار را داشتند (۲).

پهنه‌بندی حساسیت اراضی در تولید گردوغبار در استان البرز، با بهره‌گیری از متغیرهایی مانند: پوشش گیاهی، اقلیم، زبری سطح خاک، فرسایش‌پذیری نشان داد که زمین‌های بدون پوشش موجود در غرب و جنوبی استان البرز نقش مهمی در تولید گردوغبار در این استان را دارند (۷).

<sup>۱</sup> Analytical Hierarchy process

<sup>۲</sup> Dempster-Shafer theory

<sup>۳</sup> Area under the curve

<sup>۴</sup> Boosted regression tree

منابع علمی معتبر، تعدادی متغیر مؤثر در تولید گردوغبار و سیلاب در پنج گروه عوامل اقلیمی، عوامل انسانی، عوامل توپوهیدرولوژیک، عوامل مرتبط با خاک و عوامل مرتبط با کاربری اراضی/پوشش انتخاب (جدول ۱) و لایه‌های آن‌ها به صورت رستری تهیه شد (شکل ۲).

### مدل‌سازی به روش بیشینه آنتروپی

مدل بیشینه آنتروپی، بایره‌گیری از اصل آنتروپی، شبکه ارتباطی بین متغیرها را بر اساس وزن تأثیر و منحنی پاسخ هر متغیر تعیین می‌کند. این مدل توانایی استخراج توزیع احتمالاتی داده‌های لایه‌های رستری مرتبط با عوامل مؤثر بر وقوع گردوغبار و سیلاب را دارد. یکی از ویژگی‌های بارز مدل بیشینه آنتروپی، توانایی پردازش هم‌زمان یا جداگانه متغیرهای مستقل است. این ویژگی موجب می‌شود که این مدل برای تحلیل داده‌های پیچیده مناسب باشد. علاوه بر این، نیاز مدل به داده‌های حضور واقعی و عدم نیاز به داده‌های عدم رخداد آن را به گزینه‌ای مناسب جهت انجام فرآیند مدل‌سازی تبدیل کرده‌است (۱۶).

سیلاب و گردوغبار با استفاده از روش بیشینه آنتروپی و واکاوی تلفیق آنها می‌باشد.

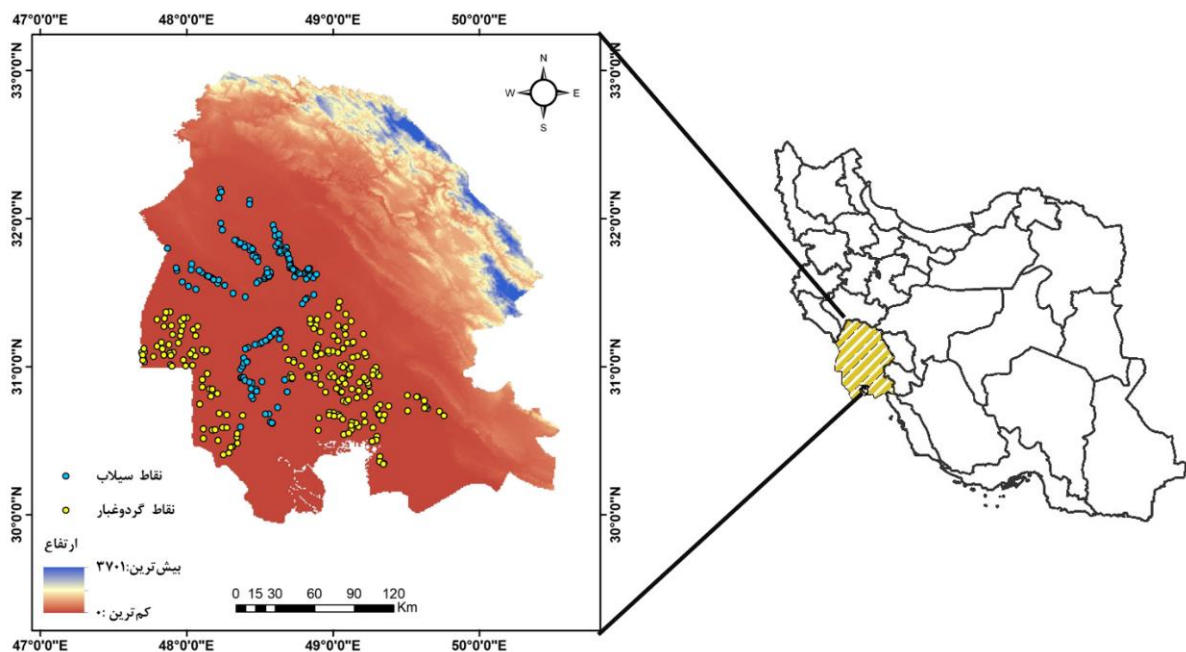
### ■ مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد بررسی

استان خوزستان با موقعیت جغرافیایی  $38^{\circ}47'$  تا  $33^{\circ}50'$  و  $57^{\circ}29'$  تا  $50^{\circ}$  در جنوب غربی ایران، منطقه مورد مطالعه در این پژوهش می‌باشد (شکل ۱). مساحت این استان حدود  $64055 \text{ km}^2$  است و با جمعیتی حدود  $4/711$  میلیون نفر در سال  $1395$  در رتبه پنجم از نظر پرجمعیت‌ترین استان کشور قرار دارد. میانگین بارش سالیانه درازمدت در استان  $266 \text{ mm}$ ، بیشینه ارتفاع  $3707 \text{ m}$  و متوسط دمای هوا  $26^{\circ} \text{C}$  می‌باشد. سطح وسیعی از استان را کانون‌های بحرانی فرسایش بادی می‌پوشاند وقوع خشکسالی‌های اخیر، موجب بروز پدیده تخریب منابع آبی و ایجاد سیلاب شده‌است.

#### داده‌های مورد استفاده

در پژوهش حاضر به منظور تعیین حساسیت اراضی گردوغبار و سیلاب در استان خوزستان، با کنکاش در



شکل ۱. نقشه مدل رقومی ارتفاع و موقعیت منطقه مورد بررسی (استان خوزستان)

جدول ۱. متغیرهای مؤثر در تعیین حساسیت اراضی نسبت سیلاب و گردوغبار

شماره شاخص	گروه‌بندی	شاخص‌های مؤثر انتخابی	گردوغبار	سیلاب	نحوه تهیه نقشه شاخص مورد بررسی
۱		عمق اپتیکی آتروسول (AOD)	✓	-	تصاویر ماهواره‌ای (MODIS)
۲		شاخص بارش استاندارد شده (SPI)	✓	✓	داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی
۳	اقلیم	میانگین بارش سالیانه	✓	✓	داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی
۴		دمای حداقل	✓	✓	داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی
۵		دمای میانگین	✓	✓	داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی
۶		جمعیت	✓	✓	سالنامه مرکز آمار
۷		دام	✓	✓	سالنامه مرکز آمار
۸	انسانی	مهاجرت	✓	✓	سالنامه مرکز آمار
۹		میزان تحصیلات	✓	✓	سالنامه مرکز آمار
۱۰		مدل رقومی ارتفاع (DEM) *۳۰m	✓	✓	پایگاه سازمان زمین‌شناسی USA
۱۱		جریان تجمعی آبراهه (Flow Accumulation)	✓	✓	نقشه DEM و GIS
۱۲	توپو هیدرولوژیک	فاصله از رودخانه	✓	✓	نقشه DEM و GIS
۱۳		موقعیت توپوگرافی (TPI)	✓	✓	نقشه DEM و GIS
۱۴		رطوبت توپوگرافی (TWI)	✓	✓	نقشه DEM و GIS
۱۵		شاخص مقاومت زمین‌شناسی	✓	✓	تصاویر ماهواره‌ای (Landsat 8)
۱۶		وزن مخصوص ظاهری خاک	✓	✓	داده‌های زمینی و داده‌های Soil grid
۱۷	خاک	میزان رس	✓	✓	داده‌های زمینی و داده‌های Soil grid
۱۸		میزان سیلت	✓	✓	داده‌های زمینی و داده‌های Soil grid
۱۹		درصد سنگ و سنگ‌ریزه	✓	✓	داده‌های زمینی و داده‌های Soil grid
۲۰		شاخص پوشش گیاهی بهبودیافته (EVI)	✓	✓	تصاویر ماهواره‌ای (MODIS)
۲۱		شاخص پوشش گیاهی (NDVI)	✓	✓	تصاویر ماهواره‌ای (MODIS)
۲۲	کاربری اراضی / پوشش	دمای سطح زمین (LST)	✓	✓	تصاویر ماهواره‌ای (MODIS)
۲۳		شاخص آب تفاضلی نرمال شده (NDWI)	✓	✓	تصاویر ماهواره‌ای (MODIS)
۲۴		کاربری اراضی	✓	✓	تصاویر ماهواره‌ای (Sentinel)

توزیع می‌شود. قیدهای اطلاعاتی تضمین می‌کند که میانگین متغیرهای محیطی در توزیع پیش‌بینی شده  $p(x)$  برابر با مقادیر مشاهده شده در نقاط حضور باشد (رابطه ۲):

$$\sum_{x \in X} p(x) f_j(x) = \bar{f}_j, \quad \forall j. \quad (2)$$

که در آن  $f_j(x)$  مقدار متغیر  $j$ ام در نقطه حضور  $x$  و  $\bar{f}_j$  میانگین مشاهده شده متغیر  $j$ ام در داده‌های حضور می‌باشد.

توزیع احتمالی حضور پدیده مانند گردوغبار یا سیلاب به صورت زیر ارائه می‌شود (رابطه ۳):

$$p(x) = \frac{1}{Z} \exp \left( \sum_j \lambda_j f_j(x) \right) \quad (3)$$

در پژوهش حاضر، از نرم‌افزار MaxEnt برای مدل‌سازی استفاده شد. این نرم‌افزار با استفاده از اصل بیشینه آنتروپی، توزیعی را پیش‌بینی می‌کند که با داده‌های مشاهده شده بیش‌ترین سازگاری را داشته و در عین حال از اعمال فرضیات غیرضروری جلوگیری می‌کند. توزیع پیش‌بینی شده توسط MacEnt با بیشینه‌سازی تابع آنتروپی شانون تعریف می‌شود (رابطه ۱):

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

که در آن  $X$  مجموعه‌ای از همه حالت‌های ممکن و  $p(x)$  احتمال رخداد هر حالت  $x$  می‌باشد. در این حالت تابع بهینه  $p(x)$  تحت قیود ناشی از داده‌های مشاهده شده،

AUC مطابق با جدول ۲ طبقه‌بندی شد (۴).

سپس لایه‌های اطلاعاتی حاصل از مدل‌سازی به نرم‌افزار Arc map 10.8 منتقل و دو نقشه حساسیت اراضی استان خوزستان از نظر سیلاب و گردوغبار در پنج طبقه بدون پتانسیل، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد پهنه‌بندی و تهیه گردید. با استفاده از لایه‌های پهنه‌های آبی و مناطق مسکونی استان خوزستان، آسیب‌پذیری این دو از نظر سیلاب و گردوغبار نیز بررسی گردید. در انتها به منظور شناسایی مناطقی که هم از نظر سیلاب و هم از نظر گردوغبار در شرایط حساس و آسیب‌پذیر قرار دارند، لایه‌های مناطق دارای پتانسیل گردوغبار و سیلاب با یکدیگر تلفیق و نقشه به‌دست‌آمده در چهار طبقه حساسیت به سیلاب و گردوغبار کم، متوسط، شدید و خیلی شدید طبقه‌بندی شد.

در گام آخر، آسیب‌پذیری کاربری‌های مختلف در استان نسبت به گردوغبار بررسی شد. این شاخص ابزار مناسبی برای مقایسه توزیع پدیده گردوغبار، بارش یا وقوع حوادث در مناطق مختلف یا شرایط متفاوت است. شاخص نسبت فراوانی بدون بعد، ضمن حذف اثر تفاوت واحدها، امکان مقایسه سهم هر منطقه یا بازه زمانی را از کل رویدادها فراهم می‌سازد. جهت محاسبه این شاخص برای طبقه زیاد و خیلی زیاد حساسیت اراضی نسبت به گردوغبار و سیلاب، از رابطه ۴ استفاده شد:

$$F_x = \frac{\frac{a_x}{b}}{\frac{c_x}{d}} \quad (4)$$

که در آن  $F_x$  برابر با نسبت فراوانی بدون بعد کاربری  $x$ ، برابر با مساحت اراضی با آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد در کاربری  $x$ ،  $b$  برابر با مساحت اراضی با آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد در استان خوزستان،  $c_x$  برابر با مساحت کاربری  $x$  و  $d$  برابر با مساحت کل استان خوزستان می‌باشد.

که در آن  $p(x)$  احتمال وقوع پدیده در موقعیت مکانی  $x_i$ ،  $f_j(x)$  مقدار متغیر محیطی  $Z$  ام در موقعیت  $x_i$ ،  $\lambda_j$  ضریب بهینه‌شده مرتبط با متغیر  $Z$  که اهمیت آن متغیر را مشخص می‌کند و  $Z$  عامل نرمال‌سازی که مجموع احتمالات را برابر با یک می‌سازد.

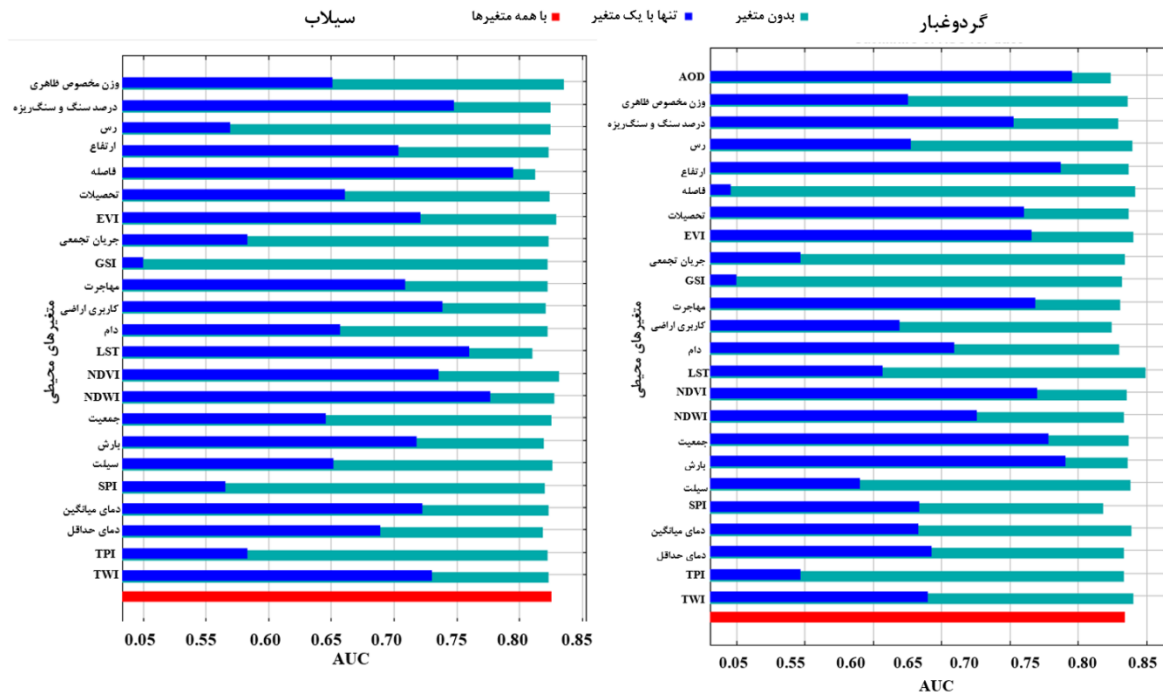
برای مدل‌سازی در بخش سیلاب، نقاط خسارت‌دیده در ۱۴۰ روستای آسیب‌دیده از سیلاب سال ۱۳۹۸ که توسط ستاد مدیریت بحران و سازمان آب و برق استان ثبت شده بودند، انتخاب شد و به‌عنوان نقاط وقوع قطعی سیلاب در یک فایل با فرمت CSV به مدل معرفی گردید. برای تهیه فایل CSV حاوی نقاط حضور گردوغبار، از داده‌هایی که براساس پژوهش‌های میدانی انجام شده توسط پژوهشگران مختلف و سازمان‌های مرتبط گردآوری شده بودند، استفاده شد. لازم به ذکر است تعداد نقاط حضور برای سیلاب برابر با ۱۵۰ نقطه و برای گردوغبار برابر با ۲۰۰ نقطه می‌باشد. در این روش از ۲۵٪ داده‌ها برای آزمون مدل و از ۷۵٪ آن‌ها برای آموزش مورداستفاده قرار گرفتند. سپس نقشه‌های متغیرهای مؤثر در ایجاد سیلاب و گردوغبار به فرمت ASCII تبدیل شدند و مدل‌سازی به‌صورت جداگانه برای تعیین آسیب‌پذیری نسبت به سیلاب و گردوغبار با داده‌های مختص هر یک انجام شد.

برای ارزیابی اهمیت متغیرها از روش جک‌نایف<sup>۱</sup> استفاده شد. این روش یکی از مزایای مهم مدل MaxEnt است که به کاربر امکان شناسایی متغیرهای تأثیرگذار و تحلیل حساسیت آن‌ها را می‌دهد (۱۰). برای اعتبارسنجی مدل، از منحنی ROC استفاده شد. در این منحنی، احتمال تشخیص نقاط مشابه عدم حضور مقایسه می‌شود (۴). سطح زیر نمودار AUC که به دست آمده‌است، به‌عنوان معیاری از قدرت تفکیک مدل در تشخیص نقاط حضور و عدم حضور عمل می‌کند. در پژوهش حاضر، مقدار

<sup>1</sup> Jackknife

جدول ۲. طبقه‌بندی مقادیر AUC (۴)

کلاس‌بندی	ضعیف	متوسط	خوب	خیلی خوب	عالی
مقدار AUC	۰/۵ - ۰/۶	۰/۶ - ۰/۷	۰/۷ - ۰/۸	۰/۸ - ۰/۹	۰/۹ - ۱



شکل ۲. نتایج حاصل از آزمون جک‌نایف جهت تعیین تأثیرگذارترین پارامترها

نتایج و بحث

بر اساس نتایج حاصل از نمودار جک‌نایف برای شناسایی مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار در پیش‌بینی مناطق مستعد گسیل گردوغبار، متغیر عمق اپتیکی آئروسول، بارش، ارتفاع، جمعیت، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده، مهاجرت، شاخص پوشش گیاهی بهبودیافته، تحصیلات و درصد سنگ و سنگریزه جزو مهم‌ترین شاخص‌های تأثیرگذار هستند (شکل ۲).

در ارتباط با مدل‌سازی سیلاب، متغیرهای فاصله از رودخانه، شاخص‌های NDWI، LST، درصد سنگریزه، کاربری‌های اراضی و شاخص پوشش گیاهی NDVI از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در پیش‌بینی عرصه‌های دارای پتانسیل سیل‌خیزی هستند (شکل ۳). در تحقیقی محققان معتقدند شاخص پوشش گیاهی NDVI و کاربری‌های اراضی بایر، پهنه‌های آبی و منطقه

مسکونی دارای بیش‌ترین تأثیر در وقوع سیلاب هستند (۹). این موضوع با یافته‌های پژوهش حاضر همخوانی دارد.

نتایج آزمون جک‌نایف نشان‌داد در بخش گردوغبار و سیلاب به ترتیب شاخص عمق اپتیکی آئروسول (AOD) و فاصله از رودخانه دارای بیش‌ترین اهمیت را دارد. شاخص فاصله از رودخانه کم‌ترین اهمیت را در مدل‌سازی گردوغبار دارد. از نظر مدل‌سازی سیلاب، کم‌اهمیت‌ترین شاخص، مقاومت زمین‌شناسی بود.

منحنی‌های پاسخ، نشان‌دهنده رفتار متغیرهای بر مخاطره مورد نظر می‌باشد و دامنه تأثیرگذاری متغیرها را بر احتمال رخداد پدید نشان می‌دهند. متغیر عمق اپتیکی آئروسول، عامل تأثیرگذار در این مدل‌سازی بود (شکل ۳). منحنی پاسخ این متغیر نشان‌دهنده این است که در بازه ۰/۳ - ۰/۴ بیشترین تأثیر را بر شناسایی اراضی غبارخیز

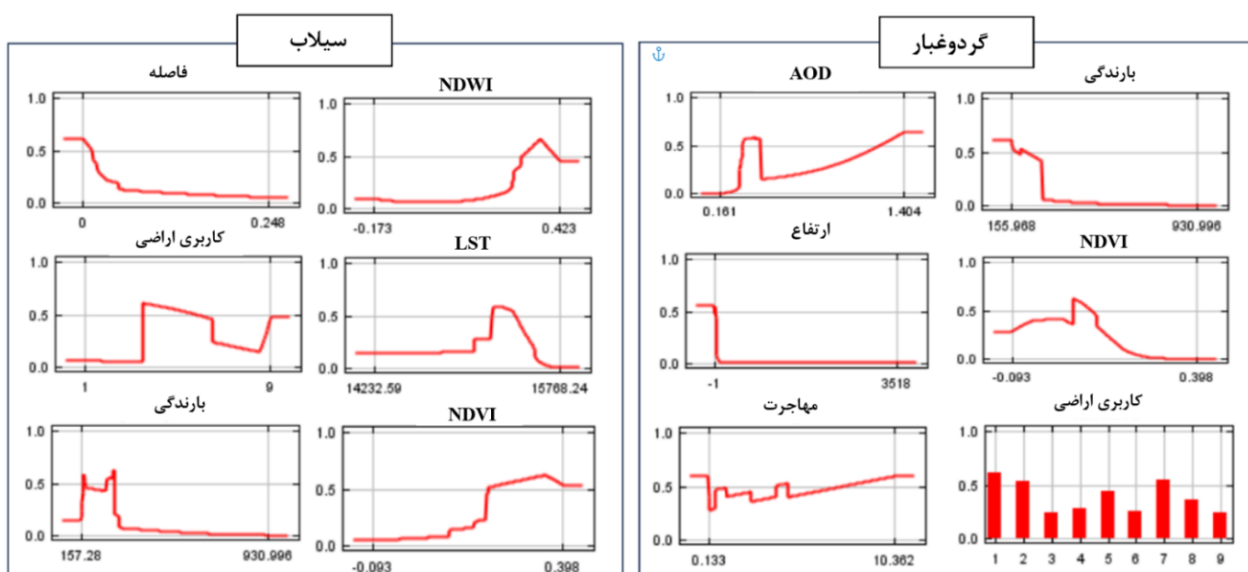
نتایج حاصل از پژوهش‌هایی در این زمینه می‌باشد؛ برای مثال، پژوهشگران فاصله از رودخانه را به عنوان عامل مهم و تأثیرگذار در وقوع سیلاب معرفی کردند و احتمال وقوع سیلاب در فاصله صفر تا ۵۰۰m از رودخانه‌ها بیشتر است (۹). بارندگی از دیگر عامل‌های مهم در وقوع سیل است که در این زمینه اهمیت زیادی دارد و در مناطقی که بارش در ۱۵۰-۳۰۰mm در سال است، بیشترین آسیب‌پذیری نسبت به سیلاب را دارند و پس‌از آن روند نزولی وجود دارد (شکل ۳). در واقع در این مناطق انسان برای جبران کمبود آب سعی میکند تا در مناطق نزدیک‌تر به منابع آب رودخانه‌ای ساکن شود و لذا در معرض خطر سیلاب قرار می‌گیرند. هم‌چنین افزایش سیل‌گیری با افزایش مقدار رس به دلیل کاهش نفوذپذیری اراضی می‌باشد.

بر اساس نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد مدل در آموزش و اعتبارسنجی بر اساس AUC به‌دست‌آمده از منحنی ROC، میزان دقت پیش‌بینی مدل در بخش آموزش برای گردوغبار و سیلاب در طبقه خیلی‌خوب با مقادیر به‌ترتیب برابر با ۰/۸۰۴ و ۰/۸۲۵ قرار دارد. دقت پیش‌بینی مدل در بخش اعتبارسنجی برای گردوغبار و سیلاب به ترتیب در طبقه خوب با مقدار ۰/۷۸۴ و طبقه خیلی‌خوب با مقدار ۰/۸۶۱ قرار دارد (شکل ۴). نتایج بسیاری از پژوهش‌ها نیز بر قابل‌اعتماد بودن مدل بیشینه آنتروپی تأکید دارد (۲، ۵، ۹، ۱۷).

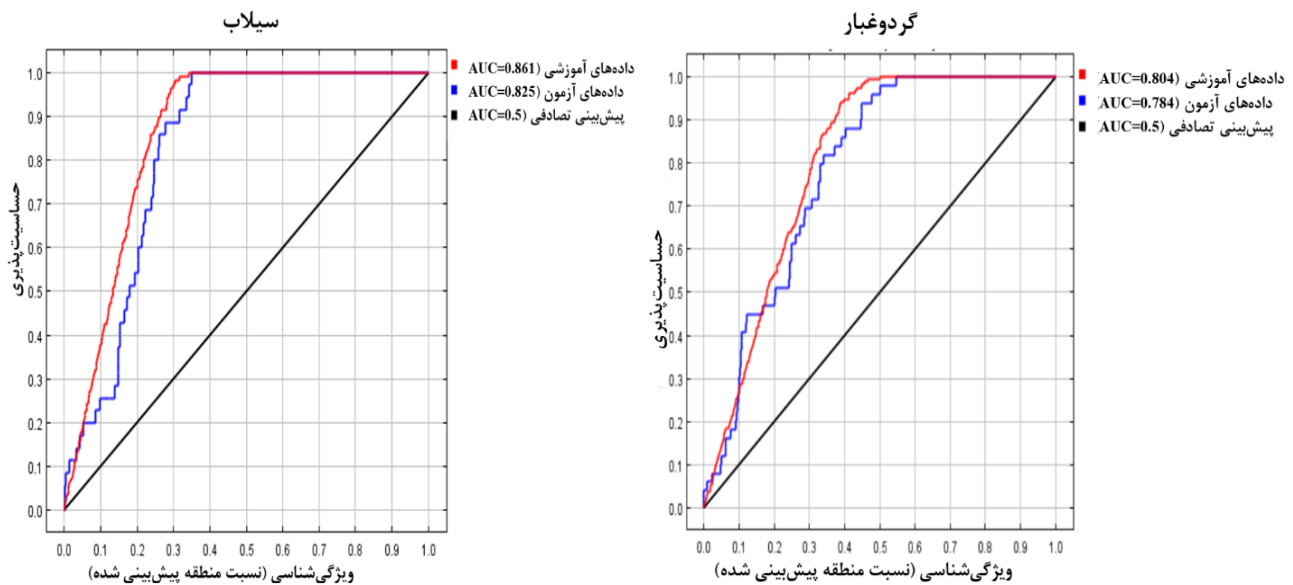
دارد و پس‌از آن با افت ناگهانی، روند صعودی را طی می‌کند. در عمل مقدار آستانه شاخص AOD که نشان‌دهنده حضور گردوغبار است، عددی بین ۰/۴ - ۰/۵ است. علت افت و روند نزولی این شاخص در منحنی پاسخ را، می‌تواند به مه‌آلود بودن و بخار ناشی موجود در نواحی سواحلی استان نسبت داد؛ زیرا شاخص AOD هرگونه ذرات در سطح هوا را شناسایی کرده و به‌عنوان گردوغبار در نظر می‌گیرد.

کاربری‌هایی اراضی بدون پوشش، مراتع، اراضی دیم و پهناهای آبی که به ترتیب با کدهای ۱، ۷، ۲ و ۵ نشان داده می‌شوند، به‌عنوان مؤثرترین اراضی بر پتانسیل غبارخیزی در استان هستند. پهناهای آبی تالاب‌های فصلی نیز پس از خشک شدن بستر خود تبدیل به اراضی غبار خیز می‌شود. محققان پژوهش‌های مختلف معتقدند کاربری‌های اراضی نظیر تالاب‌ها و آبگیرها، اراضی کشاورزی رهاشده نقش مهمی در ایجاد گردوغبار در یک منطقه را دارند (۸، ۶، ۱۱).

در مدل‌سازی سیلاب، منحنی‌های پاسخ چگونگی ارتباط متغیرها با وقوع سیلاب را نشان می‌دهد. فاصله از رودخانه، یکی از عوامل تأثیر در این مدل‌سازی می‌باشد (شکل ۳). منحنی پاسخ این متغیر، روند نزولی را طی می‌کند؛ یعنی هرچه فاصله از رودخانه بیشتر می‌شود، احتمال ایجاد سیلاب کمتر می‌شود. این موضوع همسو با



شکل ۳. منحنی‌های پاسخ حاصل از مدل‌سازی متغیرهای مؤثر بر گردوغبار و سیلاب



شکل ۴. نتایج مقادیر AUC در بخش آزمون و اعتبار سنجی مدل سازی گردوغبار و سیلاب

جدول ۳. مساحت و درصد مساحت مناطق دارای پتانسیل گردوغبار و سیلاب

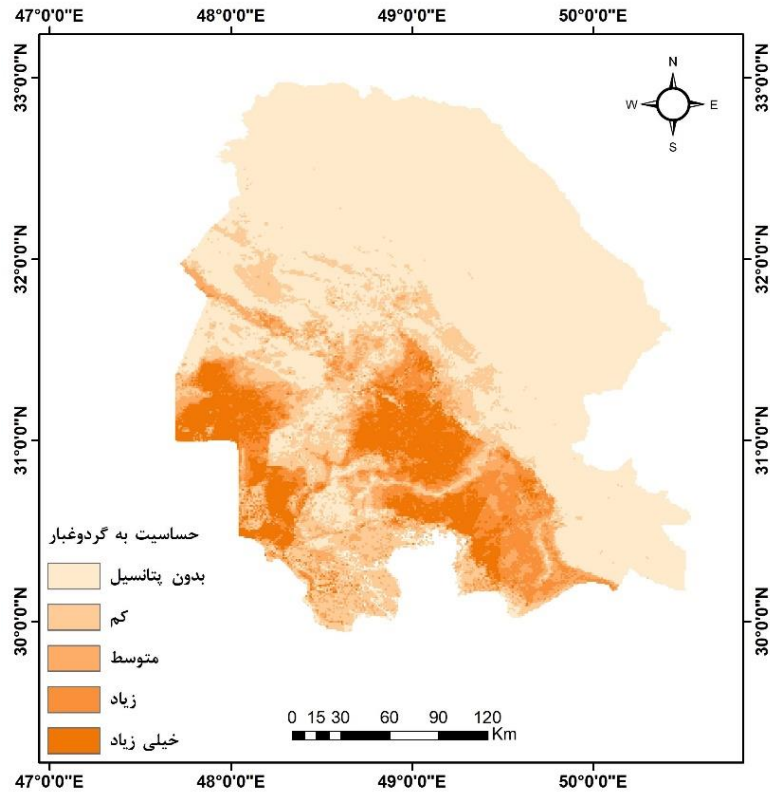
سیلاب		گردوغبار		پتانسیل حساسیت پذیری
مساحت (Km <sup>2</sup> )	مساحت (%)	مساحت (Km <sup>2</sup> )	مساحت (%)	
۷۴/۶۳	۴۶۱۱۲/۵۴	۳۷۶۵۳/۶۷	۶۰/۹۵	بدون خطر
۵/۳۹	۳۲۲۸/۳۱	۹۳۷۴/۴۳	۱۵/۱۸	کم
۱۱/۱۲	۶۸۷۱/۱۴	۴۶۸۰/۷۳	۷/۵۸	متوسط
۴/۴۸	۲۶۶۸/۴۰	۴۵۲۰/۸۰	۷/۲۹	زیاد
۴/۳۹	۲۷۰۹/۸۱	۵۵۶۲/۴۸	۹	خیلی زیاد

استان (شکل ۵) فعال تر و نواحی که در مسیر رودخانه‌های اصلی در سمت غرب و جنوب استان قرار دارند، در خطر بیش‌تری نسبت به دیگر مناطق از نظر سیلاب قرار دارند (شکل ۶).

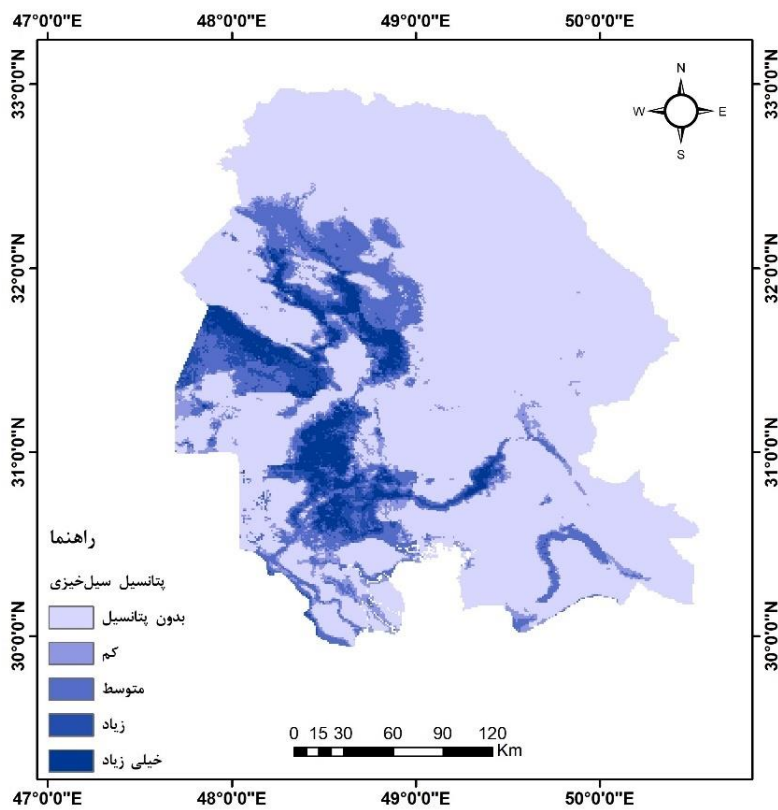
بررسی شاخص نسبت فراوانی بدون بعد در کاربری‌های اراضی مختلف استان نشان داد بیش‌ترین میزان این شاخص متعلق به کاربری زراعت دیم با مقدار ۰/۳۵ می‌باشد. کاربری زراعت آبی با مقدار ۰/۱۹ در جایگاه دوم قرار دارد و پس از آن کاربری‌های مرتع و پهنه‌های آبی می‌باشد (جدول ۴).

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، حدود ۶۰٪ از سطح استان بدون پتانسیل گردوغبار و ۱۵٪ از آن دارای پتانسیل گردوغبار کم قرار دارد. ۹٪ از سطح استان خوزستان دارای پتانسیل خیلی زیاد از نظر گردوغبار قرار دارد. حدود ۴/۴٪ از سطح استان خوزستان دارای پتانسیل خیلی زیاد سیل‌خیزی و ۵٪ از سطح استان دارای پتانسیل کم می‌باشد. سطحی از استان که در طبقه بدون خطر قرار دارد برابر با ۷۴/۵٪ است (جدول ۳).

به‌طور کلی نیمه‌جنوبی استان، به‌طور ویژه جنوب و جنوب غربی از نظر قابلیت غبارخیزی نسبت به دیگر نواحی



شکل ۵. نقشه پهنه‌بندی شده حساسیت اراضی نسبت به گردوغبار



شکل ۶. نقشه پهنه‌بندی شده حساسیت اراضی نسبت به سیلاب

گردوغبار ۲۷٪ از سطح استان را پوشش می‌دهند. بیش‌تر بخش‌های شمالی و بخش‌هایی از نواحی جنوبی استان دارای حساسیت کم نسبت به سیلاب و گردوغبار می‌باشد (شکل ۶) و سطحی بیش از ۴۲۰۰۰km<sup>2</sup> را به خود اختصاص می‌دهد (جدول ۵).

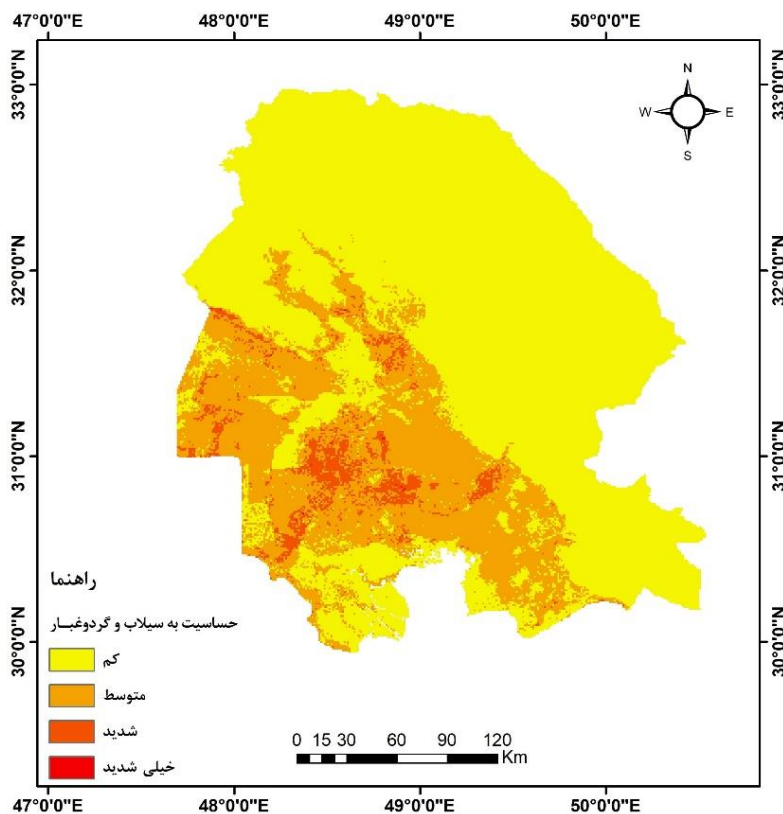
نتایج حاصل از تلفیق نقشه‌های سیلاب و گردوغبار نشان داد ۴٪ از سطح استان دارای پتانسیل شدید از نظر حساسیت به سیلاب و گسیل گردوغبار هستند (جدول ۴). این مناطق بیش‌تر نواحی جنوب غربی استان را تشکیل می‌دهند. مناطقی با حساسیت متوسط نسبت به سیلاب و

جدول ۴. شاخص نسبت فراوانی بدون آسیب‌پذیری گردوغبار در کاربری‌های مختلف استان خوزستان

نوع کاربری	مرتع	زراعت آبی	زراعت دیم	تپه ماسه‌ای	بیشه‌زار	پهنه‌های آبی	مناطق مسکونی
نسبت فراوانی بدون بعد	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۳۵	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۱۶	۰/۱۵

جدول ۵. مساحت و درصد مساحت مناطق حساس به سیلاب و گردوغبار

طبقه‌بندی	مساحت (Km <sup>2</sup> )	مساحت (%)
کم	۴۲۷۸۵/۶	۶۹
متوسط	۱۶۶۵۱/۸۴	۲۷
شدید	۲۳۲۳/۰۸	۴
خیلی شدید	۱۳/۶۱	۰/۰۲



شکل ۷. نقشه پهنه‌بندی شده مناطق حساس به سیلاب و گردوغبار

## ■ نتیجه‌گیری

باتوجه به اهمیت تعیین آسیب‌پذیری و حساسیت اراضی نسبت به پدیده گردوغبار و سیلاب در اقدامات مدیریت خطر و کاهش خسارت‌های ناشی از آن، در پژوهش حاضر حساسیت اراضی استان خوزستان نسبت به در معرض سیلاب بودن و گسیل گردوغبار با استفاده از مدل بیشینه آنتروپی انجام شد. نتایج حاصل از پژوهش حاضر، نشان داد مدل بیشینه آنتروپی کارایی بسیار خوبی در تعیین حساسیت مناطق نسبت به گردوغبار و سیلاب را دارد و از این مدل برای تهیه نقشه پهنه‌بندی شده حساسیت اراضی نسبت به سیلاب و گردوغبار می‌توان استفاده کرد. همچنین در ارتباط با گردوغبار، متغیرهای عمق اپتیکی آئروسول، بارش، ارتفاع، جمعیت و شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده نقش مؤثری در ایجاد در استان خوزستان را دارند. در ارتباط با سیلاب، فاصله از رودخانه، شاخص NDWI، شاخص LST، درصد سنگ و سنگ‌ریزه و کاربری اراضی جزو مؤثرترین متغیرها در فرآیند مدل‌سازی است. به‌طور کلی، نواحی جنوب غربی استان نسبت به سیلاب و گردوغبار در طبقه آسیب‌پذیری متوسط تا خیلی شدید قرار دارد. از آنجایی که نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل در طبقه خوب تا خیلی خوب قرار دارد، می‌توان از نتایج پژوهش حاضر در برنامه‌ریزی‌های استانی و پروژه‌های مدیریتی و اصلاحی توسط دولت، سازمان‌ها و ادارات اجرایی مرتبط و مهندسان استفاده به‌عمل آورد. یکی از روش‌های مهم برای مدیریت مخاطرات طبیعی نظیر سیلاب و گردوغبار و افزایش تاب‌آوری در برابر آن‌ها تلفیق نتایج پهنه‌بندی در قالب نقشه کاربری‌های اراضی می‌باشد. نوع کاربری، عامل مهمی است که در تشدید و تخفیف گسیل گردوغبار و انتقال آن نقش دارد. مناطقی با پوشش گیاهی کم یا بدون پوشش گیاهی

می‌توانند منبع مهمی برای تولید گردوغبار باشند. بیشترین سطح از مناطق استان که دارای پتانسیل زیاد و خیلی‌زیاد نسبت به گردوغبار هستند، به‌ترتیب اراضی با کاربری‌های کشاورزی دیم، آبی و کاربری مرتع است. در زراعت دیم، به‌دلیل کمبود آب و پراکنش نامنظم بارش، رشد گیاهان تحت تأثیر شرایط اقلیمی می‌باشد که این وضعیت منجر به ایجاد پوشش گیاهی کم تراکم و پراکنده می‌شود. تقلیل پوشش گیاهی و رطوبت موجود در خاک به‌ویژه در فصل‌های خشک موجب می‌شود تا ذرات خاک سست شود و در معرض نیروی باد قرار گیرد و ایجاد فرسایش بادی سبب تولید گردوغبار می‌شود. از طرفی مدیریت منابع و اراضی در زراعت آبی امری مهم است. در سامانه‌های زراعت آبی و دیم، شرایط زمین و نحوه مدیریت خاک می‌تواند تأثیر مستقیمی بر کاهش یا افزایش گردوغبار داشته باشد. کشاورزی حفاظتی از طریق کاهش تداخل‌های مکانیکی و استفاده از پوشش گیاهی مناسب به جلوگیری از جابه‌جایی خاک و کاهش فرسایش بادی کمک می‌نماید. روش‌هایی مانند حفظ پوشش گیاهی باقی‌مانده از کشت قبلی (مالچ گیاهی)، کاهش شخم و خاک‌ورزی، کاشت گیاهان پوششی در زراعت آبی و شخم حداقلی، کاشت تناوبی در خطوط تراز و تنوع در کشت از جمله روش‌های کشاورزی حفاظتی در زراعت دیم می‌باشد. همچنین نظر به هزینه بر بودن ابزار و ماشین‌های کشاورزی حفاظتی در قالب ایجاد تعاونی و حمایت‌های دولتی امکان پیاده‌سازی آن قابل دستیابی است. به‌طور کلی نقشه‌های آسیب‌پذیری تهیه شده در پژوهش حاضر می‌تواند ضمن مورد استفاده قرار گرفتن در برنامه‌ریزی‌های محیط‌زیستی، نقش حیاتی را در اقدامات مدیریتی و احیایی ایفا کند.

## ■ References

1. Azari, M., Moradi, H.R., Saghafian, B., & Faramarzi, M. (2013). Assessment of Hydrological Effects of Climate Change in Gorganroud River Basin. *Journal of Water and Soil*, 27(3), 537-547. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.26051> [In Persian]
2. Boroughani, M., Pourhashemi, S., Zarei, M., & Aliabadi, K. (2019). Spatial modeling of the sensitivity of dust centers to its spread in eastern Iran Using the augmented regression tree model. *Arid Regions Geographic Studies*, 10(35), 14-28. [In Persian]
3. Farzi, H., Bayat, A., Vakili Tajareh, F., Rahmani, M. & Asadi Nalivan, O. (2022). Zonation of Flood

- Susceptibility and Determining the Factors Affecting it Using the Maximum Entropy Method. *Iran Watershed Management Science and Engineering*, 16(59), 1-11. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.20089554.1401.16.59.6.9> [In Persian]
4. Golkarian, A., & Rahmati, O. (2018). Use of a maximum entropy model to identify the key factors that influence groundwater availability on the Gonabad Plain, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 77(10), 1-20. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7551-y>
  5. Haghizadeh, A., Siahkamari, S., Hamzeh Haghiabi, A., & Rahmati, O. (2017). Forecasting flood-prone areas using Shannon's entropy model. *Journal of Earth System Science*, 126(3), 1-39. <http://dx.doi.org/10.1007/s12040-017-0819-x>
  6. Heidarian, P., Azhdari, A., Jodaki, M., Darvishi Khatooni, J., & Shahbazi, R. (2017). Identifying interior sources of dust storms using remote sensing, GIS and geology (case study: Khuzestan province). *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 27(105), 33-46. <https://doi.org/10.22071/gsj.2017.53928> [In Persian]
  7. Hojati, K., Abedi, Z., Raigani, B., & Panahi, M. (2022). Assessment of land sensitivity to determine areas dust sources (Case study: Alborz province). *Journal of Environmental Science and Technology*, 23(11), 151-164. <https://doi.org/10.30495/jest.2021.55807.5184> [In Persian]
  8. Muttiyah, R.S. & Wurbs, R.A. (2002). Modeling the impacts of climate change on water supply reliabilities. *Water International*, 27(3), 407-419. <https://doi.org/10.1080/02508060208687020>
  9. Nohani, E., Darabi, F., Maroufinia, E., & Khosravi, Kh. (2017). Evaluation of Shannon Entropy in Order to Flood Probability and Susceptibility Mapping at Haraz Catchment. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 5(10), 99-116. <https://doi.org/10.22111/jneh.2017.2958> [In Persian]
  10. Phillips, S.J., Anderson, R.P., & Schapire, R.E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4), 231-259. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
  11. Rajabzadeh, F. (2022). Identifying Sources of Dust Using Maximum Entropy Model in Eastern Iran. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 11(37), 1-14. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.25386336.1401.11.37.1.5> [In Persian]
  12. Rajaei, F. (2022). Drought forecasting under the approach of future climate change (Case study: Qarakhil). *Journal of Environmental Sciences Studies*, 7(2), 4990-5001. <https://doi.org/10.22034/JESS.2022.330098.1724> [In Persian]
  13. Sahoo, S., Dhar, A., & Kar, A. (2016). Environmental vulnerability assessment using Grey Analytic Hierarchy Process based model. *Environmental Impact Assessment Review*, 56, 145-154. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eiar.2015.10.002>
  14. Sajedi Hosseini, F. (2021). *Spatial modelling of flood hazard, vulnerability and risk based on machine learning methods in Kashkan basin*. PhD thesis, University of Tehran. [In Persian]
  15. Shannon, C.E. (1948). A Mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379-423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
  16. Shirani, K., & Naderi Samani, R. (2022). Prioritization of effective parameters and landslide susceptibility zonation using maximum entropy and Dempster Shafer in Doab Samsami, Chaharmahal Bakhtiari. *Journal of Range and Watershed Management*, 75(1), 51-72. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2022.324882.1592>
  17. Shirani, K., & Sadri, M.A. (2023). Prioritization of effective factors and flood susceptibility zonation using probabilistic models and GIS in Gorganrood Watershed Golestan Province. *Watershed Management Research*, 36(1), 111-131. <https://doi.org/10.22092/wmrj.2022.358648.1473>
  18. Shirani, K., Padandi, M., & Arabameri, A. (2018). Landslide susceptibility assessment by Dempster-Shafer and Index of Entropy models, Sarkhoun basin, Southwestern Iran. *Natural Hazards*, 93(3), 1379-1418. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3356-2>
  19. Sirjani, E., Sameni, A., Moosavi, A. A., Mahmoodabadi, M., & Laurent, B. (2019). Portable wind tunnel experiments to study soil erosion by wind and its link to soil properties in the Fars province, Iran.

*Geoderma*, 333, 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.012>

20. Steinfath, M., Gärtner, T., Lisek, J., Meyer, R.C., Altmann, T., Willmitzer, L., & Selbig, J. 2010. Prediction of hybrid biomass in *Arabidopsis thaliana* by selected parental SNP and metabolic markers. *Theoretical and Applied Genetics* 120(2), 239-247. <https://doi.org/10.1007%2Fs00122-009-1191-2>
21. Wu, L. (2007). Impact of Saharan air layer on hurricane peak intensity. *Geophysical Research Letters*, 34(9), 1-5. <https://doi.org/10.1029/2007GL029564>