

Assessment of the relationship between climatic variable trends and dust storms in the southwest of the country using remote sensing indicators

Sadaf Piri, Hamidreza Moradi*, Vahid Mousavi

Watershed Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* Corresponding author: harmoradi@modares.ac.ir

(Received: 27 May 2024

Revised: 05 August 2024

Accepted: 30 November 2024)

Extended Abstract

Introduction: Dust storms are a consequence of desertification and land degradation, particularly in arid and hyper-arid regions worldwide. The factors influencing the spatial distribution of dust storms are largely dependent on altitude and latitude. Among natural disasters, droughts stand out as climatic anomalies that develop gradually and insidiously, exerting pressure on various societies. Drought can significantly affect the conditions and characteristics of dust storms. The primary objectives of this research are to examine the temporal and spatial distribution of dust storms in Ilam and Khuzestan provinces, and to explore the relationship between meteorological drought characteristics and the occurrence of dust storms in these regions.

Materials and Methods: This study investigates the temporal and spatial variations of dust storms and the impact of drought characteristics on them during the statistical period of 1989-2019. The characteristics of drought were identified using the Standardized Precipitation Index (SPI) method. Dust storm data were extracted from synoptic station records related to the horizontal visibility on dusty days. Monthly, seasonal, and annual distributions of dust storms were analyzed. The trends in dust storms, precipitation, and temperature changes were determined using the Mann-Kendall method and Sen's slope estimator. Additionally, satellite images from the MODIS sensor were analyzed for days associated with dust storms, and the Aerosol Optical Depth (AOD) and Normalized Difference Dust Index (NDDI) were derived. The relationship between drought characteristics and dust storm characteristics was then assessed using correlation and linear regression analyses, and the effects of drought on dust storm occurrences were examined.

Results and Discussion: The years 1990, 1995, 2007, 2008, 2010, 2011, and 2017 experienced widespread droughts, with 2008 recording the highest drought intensity and extent. Meteorological data indicated that January and August, as well as the winter and autumn seasons, had the highest and lowest incidences of dust storms, respectively. According to the AOD index, April and December, and the spring and autumn seasons, exhibited the highest and lowest dust storm occurrences, respectively. During the studied period, the frequency of dust storms increased at 11 stations and decreased at 8 stations. The trend of maximum temperature was upward at all stations, while minimum temperature trends were upward at most stations. Precipitation trends were generally decreasing across the studied stations. The NDDI index provided a good estimate of regional dustiness, although in some cases, the index data did not align with ground observations and contained significant errors. Statistical tests revealed correlations between maximum temperature, minimum temperature, and precipitation data. However, the AOD index generally showed no correlation with other variables.

Conclusion: The analysis of the relationship between drought characteristics and dust storms indicated that 2008 saw the most frequent and severe dust storms, as well as the most widespread drought, though this trend was not consistent in other years with widespread droughts. Comparing Ilam and Khuzestan provinces, it was observed that southwest Ilam, which borders Khuzestan, shares similar dust storm characteristics due to comparable topography and climatic conditions. Overall, there is a significant difference in the intensity and frequency of dust storms between the two provinces, largely due to Ilam's mountainous terrain, especially in its central and northern regions. Additionally, it appears that the primary source of dust storms in the region originates from neighboring countries southwest of Iran. The flatness of the Khuzestan plain also contributes significantly to the intensity of wind activity, leading to higher frequency and severity of dust storms.

Keywords: SPI index, NDDI index, AOD index, drought characteristics.

Citation: Piri, S., Moradi, H.R. & Mousavi, V. (2025). Assessment of the relationship between climatic variable trends and dust storms in the southwest of the country using remote sensing indicators. *Integrated Watershed Management*, 5(2), 25-50. doi= 10.22034/iwm.2024.2029264.1155

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).





ارزیابی ارتباط بین روند متغیرهای اقلیمی و طوفان‌های گردوغبار در جنوب غرب کشور با استفاده از شاخص‌های سنجش از دوری

صدف پیری، حمیدرضا مرادی*، وحید موسوی

گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

*نویسنده مسئول: hmradi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۷

چکیده مبسوط

مقدمه: طوفان‌های گردوغبار یکی از اثرات بیابان‌زایی و تخریب زمین به‌ویژه در مناطق خشک و فراخشک جهان می‌باشد. عوامل تأثیرگذار در توزیع مکانی پدیده طوفان گردوغبار اکثراً ارتفاع از سطح دریا، عرض جغرافیایی و فعالیت‌های انسانی می‌باشد. از سوی دیگر، در میان بلایای طبیعی مؤثر بر جامعه انسانی، پدیده خشکسالی به‌عنوان یک ناهنجاری اقلیمی به‌صورت تدریجی و خزنده رخ داده و جوامع مختلف را تحت فشار قرار می‌دهد. این پدیده می‌تواند بر شرایط وقوع و مشخصات طوفان گردوغبار نقش موثری داشته باشد. لذا مهم‌ترین اهداف پژوهش حاضر عبارتند از بررسی توزیع زمانی و مکانی طوفان‌های گردوغبار در استان‌های ایلام و خوزستان و بررسی ارتباط بین مشخصات خشکسالی هواشناسی و وقوع طوفان‌های گردوغبار در این استان‌ها.

مواد و روش‌ها: در پژوهش حاضر، تغییرات زمانی و مکانی طوفان‌های گردوغبار و اثر مشخصات خشکسالی روی آن‌ها طی دوره آماری ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۹ مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، مشخصات خشکسالی با استفاده از روش SPI استخراج شد. سپس از طریق داده‌های ایستگاه‌های هم‌دید مربوط به دید افقی، روزهای همراه با گردوغبار استخراج شد. توزیع زمانی طوفان گردوغبار به صورت ماهانه، فصلی و سالانه انجام شد. تعیین روند تغییرات طوفان گردوغبار، بارش و دما با استفاده از روش من کندال و شیب Sen انجام شد. در ادامه تصاویر ماهواره‌ای مربوط به سنجنده MODIS برای روزهای همراه با وقوع طوفان گردوغبار دریافت و شاخص‌های شاخص عمق نوری آئروسول (AOD) و شاخص اختلاف نرمال شده‌ی گردوغبار (NDDI) که مربوط به طوفان‌های گردوغبار هستند، استخراج گردید. سپس ارتباط بین مشخصات خشکسالی و ویژگی‌های طوفان گردوغبار با روش‌های آماری همبستگی و رگرسیون خطی بررسی و اثرات مشخصات خشکسالی بر وقوع این طوفان‌ها تحلیل شد.

نتایج و بحث: سال‌های ۱۹۹۰، ۱۹۹۵، ۲۰۰۷، ۲۰۰۸، ۲۰۱۰، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۷ دارای خشکسالی فراگیر بوده‌اند که در این میان سال ۲۰۰۸ با بیشترین میزان شدت و سطح گسترش خشکسالی روبرو بوده است. بر اساس داده‌های هواشناسی ماه‌های ژانویه و آگوست و فصل‌های زمستان و پاییز به‌ترتیب بیشترین و کمترین وقوع طوفان گردوغبار را داشته‌اند. بر اساس شاخص AOD ماه‌های آوریل و دسامبر و فصل‌های بهار و پاییز به‌ترتیب بیشترین و کمترین وقوع طوفان گردوغبار را داشته‌اند. روند فراوانی وقوع طوفان گردوغبار در طی دوره آماری مورد مطالعه در ۱۱ ایستگاه صعودی و در ۸ ایستگاه نزولی بوده است. روند دمای بیشینه در تمام ایستگاه‌ها و دمای کمینه در اغلب ایستگاه‌های مورد مطالعه صعودی است. در اغلب ایستگاه‌های مورد مطالعه روند بارش به صورت کاهشی می‌باشد. شاخص NDDI نیز برآورد خوبی از وضعیت کلی غبارآلودی منطقه دارد؛ اما در پاره‌ای از موارد داده‌های حاصل از این شاخص، با واقعیت زمینی هم‌خوانی ندارد و با خطاهای فاحشی همراه است. در نهایت آزمون‌های آماری نشان دادند که بین داده‌های دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش همبستگی وجود دارد. شاخص AOD در اکثر موارد با سایر متغیرها فاقد همبستگی است.

نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از ارتباط مشخصات خشکسالی با طوفان گردوغبار نشان داد بیشترین وقوع طوفان گردوغبار و همچنین شدیدترین خشکسالی فراگیر در سال ۲۰۰۸ رخ داده است، اما این موضوع در خصوص دیگر سال‌های همراه با خشکسالی فراگیر صدق نمی‌کند. در مقایسه دو استان ایلام و خوزستان، ملاحظه می‌گردد که جنوب‌غرب ایلام که در همسایگی با استان خوزستان است به دلیل همگنی شرایط توپوگرافی و وضعیت اقلیمی از مشخصات طوفان‌های گردوغبار استان خوزستان بیشتر تبعیت می‌کند. در مجموع بین شدت و فراوانی وقوع طوفان گردوغبار در هر دو استان تفاوت فاحشی وجود دارد و این تفاوت فاحش به شرایط کوهستانی بودن استان ایلام به‌ویژه در بخش‌های مرکز و شمال برمی‌گردد. همچنین به نظر می‌رسد منشأ عمده طوفان‌های گردوغبار در منطقه، از سمت همسایگان مستقر در جنوب‌غرب ایران باشد. علاوه بر این، هموار بودن دشت خوزستان بر شدت فعالیت باد و در نتیجه فراوانی و شدت وقوع طوفان گردوغبار در این منطقه تأثیر فراوانی می‌گذارد.

واژه‌های کلیدی: شاخص SPI، شاخص NDDI، شاخص AOD، مشخصات خشکسالی.

استناد: پیری، ص؛ مرادی، ح. ر؛ موسوی، و. (۱۴۰۴). ارزیابی ارتباط بین روند متغیرهای اقلیمی و طوفان‌های گردوغبار در جنوب غرب کشور با استفاده از شاخص‌های سنجش از دوری. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، (۲)۵، ۲۵-۵۰.

حق چاپ:



حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وبسایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل دسترس است.

مقدمه

خشکسالی^۱ به عنوان بلای طبیعی و پدیده‌ای اجتناب‌ناپذیر، از دیرباز در پهنه وسیع کشورهای مختلف به خصوص کشورهای واقع در مناطق گرم و خشک به دفعات وقوع یافته و می‌یابد (Heim, 2002). ویژگی‌های خشکسالی در اقلیم‌های مختلف، متفاوت و یک معضل موقت است. خشکسالی نتیجه کاهش طبیعی میزان بارش در مدت زمانی طولانی و معمولاً در یک فصل یا بیشتر است. به طور مسلم یکی از زمینه‌هایی که خشکسالی در آن تأثیر اساسی می‌گذارد، منابع آب سطحی و زیرزمینی هر کشوری است (Nohegara et al., 2016).

وقوع خشکسالی منجر به افزایش پدیده گردوغبار در مناطق خشک و نیمه‌خشک شده است. طوفان‌های گردوغبار^۲ ناشی از مناطق فرسایش‌پذیر سطحی مانند بیابان‌ها در سال‌های اخیر از اصلی‌ترین بلایای طبیعی هستند که کشورهای منطقه خاورمیانه از جمله ایران با آن درگیر می‌باشند (Soleimani et al., 2022).

سنجش‌ازدور^۳، فرآیند گردآوری اطلاعات مربوط به سطح زمین از فاصله دور با استفاده از تصاویر هوایی یا ماهواره‌ای است. یکی از مزایای اصلی سنجش‌ازدور این است که امکان پوشش گسترده و به‌هنگام را فراهم می‌کند. ماهواره‌ها و هواپیماها می‌توانند تصاویری از مناطق بزرگ را ثبت کنند و دید جامعی از سطح زمین فراهم آورند که با روش‌های سنتی زمینی امکان‌پذیر نیست. همچنین راهی غیرمخرب برای جمع‌آوری اطلاعات محسوب می‌شود. این بدان معنی است که نیازی به دسترسی فیزیکی به سطح زمین ندارد و ابزاری مفید برای پایش نواحی حساس یا صعب‌العبور به شمار می‌آید. شاخص عمق نوری آئروسول^۴ (AOD) و شاخص اختلاف نرمال شده‌ی گردوغبار^۵ (NDDI)

نیز بر اساس مشاهدات حاصل از تصاویر ماهواره‌ای استخراج می‌گردند. این شاخص‌ها به ارزیابی وضعیت ذرات گردوغبار موجود در جو می‌پردازند. AOD یک اندازه‌گیری یکپارچه ستونی از ضریب خاموشی می‌باشد که تضعیف تابش خورشیدی توسط پراکندگی و جذب آئروسول‌ها از جمله گردوغبار را نشان می‌دهد (Namdari et al., 2017). این شاخص یک کمیّت بدون بعد است و عبارت است از مقدار جلوگیری از گذر پرتو نور در جوّ به خاطر جذب و انتشار حاصل از وجود گردوغبار در مسیر عبور نور (Arjmand et al., 2018). بیشتر بودن مقادیر AOD از یک مقدار معین بیانگر تراکم گردوغبار در امتداد ستون عمودی هوا بوده و به عبارتی دید در امتداد آن ستون پایین می‌باشد. همچنین این شاخص از نظر دقت در تشخیص و محدوده زمانی و مکانی، امکان پایش زمانی و مکانی را در گستره‌ی زیاد و در بسیاری از مناطق فراهم می‌کند (Pan et al., 2010). اولین گام در شناسایی طوفان‌های گردوغبار با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، جداسازی آنها از دیگر پدیده‌های جوی مانند ابر است (Mehrabi et al., 2015). شاخص NDDI برای شناسایی ذرات گردوغبار در مناطقی با سطوح روشن استفاده می‌شود که محصولات عمق نوری گردوغبار MODIS در دسترس نیستند (John et al., 2006).

در سال‌های اخیر، فراوانی وقوع طوفان‌های گردوغبار در سطح جهانی و همچنین منطقه‌ای، به خصوص در غرب و جنوب‌غرب کشور ایران رو به افزایش بوده است. طوفان‌های گردوغبار از پدیده‌های هواشناسی هستند که معمولاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک با بارش سالانه کمتر از ۲۰۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر در مواقع وزش تندبادهایی با سرعت بیش از سرعت آستانه فرسایش بادی رخ می‌دهند (Alipour et al., 2018). رخ دادن

4- Aerosol Optical Depth

5- Normalized Difference Dust Index

1- Drought

2- Dust storms

3- Remote sensing

(۲۰۲۲) فعالیت طوفان ماسه و گردوغبار و عوامل اقلیمی و زمینی آن در منطقه دریاچه آرال را با استفاده از شاخص EDI⁷ مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصله نشان داد که با خشکسالی منطقه‌ای، فعالیت‌های طوفان گردوغبار در طول ۲۰ سال گذشته افزایش یافته است (Wang *et al.*, 2022).

Ahmadi و Ali Mohammadi (۲۰۲۱) نیز برای پهنه‌بندی مناطق حساس به خشکسالی در استان کردستان با استفاده از ترکیب شاخص‌های EVI⁸ و SPI نشان دادند که خشکسالی ناشی از تغییرات بارشی دارای راستای غرب به شرق است و پدیده خشکسالی در مناطق شرقی شدت بیشتری دارد و مناطق جنوبی حساسیت بالاتری نشان داده‌اند که در مجموع، مناطق جنوبی، به‌ویژه جنوب‌شرق استان، بیشترین آسیب‌پذیری را از پدیده خشکسالی داشته‌اند (Ahmadi & Ali Mohammadi, 2021).

هر منطقه دارای مشخصات اقلیمی، هیدرولوژی و توپوگرافی خاص خود بوده که این مشخصات بر شرایط وقوع طوفان گردوغبار تأثیر دارد. به دلیل اثرات منفی که طوفان‌های گردوغبار بر بوم‌سازگان و سلامتی انسان دارند، بررسی مشخصات خشکسالی هواشناسی بر تغییرات زمانی و مکانی طوفان‌های گردوغبار از اهمیت زیادی برخوردار است و نقش مهمی در مدیریت و ساماندهی پدیده گردوغبار دارد. همچنین تحقیقی که بر اساس مشخصات خشکسالی و شاخص‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای، تغییرات زمانی و مکانی پدیده طوفان گردوغبار را بررسی نماید، در سطح ایران و جهان بسیار محدود می‌باشد. استان ایلام به دلیل نزدیکی به بیابان‌های کشورهای همسایه همواره در معرض نفوذ گردوغبار قرار دارد. هرچند تاکنون تلاش‌های فراوانی برای کنترل و کاهش ورود گردوغبارها انجام شده است؛ اما با نتیجه رضایت‌بخشی همراه نبوده و هر سال این پدیده خطرناک در مقیاس

این پدیده، تحت تأثیر سامانه‌های زمین و اتمسفر می‌باشد. به طوری که دلایل اصلی وقوع آن سرعت زیاد باد، کمبود رطوبت خاک و اراضی لخت بدون پوشش می‌باشد (Shamshiri *et al.*, 2014). مطالعات زیادی در استفاده از داده‌ها و روش‌های متنوع در زمینه ارزیابی روند تغییرات گردوغبار انجام پذیرفته است. به طور مثال Zucca و همکاران (۲۰۲۲) در بررسی شواهد علمی در مورد سهم فعالیت‌های انسانی در تولید طوفان‌های گردوغبار و طوفان‌های ماسه‌ای در سطح جهانی بیان داشتند که فعالیت‌های انسانی در تغییر اقلیم اثرگذار هستند و می‌توانند به عنوان محرک‌های غیرمستقیم طوفان‌های گردوغبار و طوفان‌های ماسه‌ای در نظر گرفته شوند (Zucca *et al.*, 2022). همچنین Awadh (۲۰۲۳)، به بررسی تعیین علل افزایش فراوانی طوفان‌های گردوغبار و طوفان‌های ماسه‌ای و شناسایی منابع و راهکارهای کاهش آنها پرداخت. داده‌های اقلیمی دوره زمانی ۶۰ سال (۲۰۲۲-۱۹۶۰) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج بیانگر آن بود که افزایش دمای هوا در عراق (به طور متوسط ۲ درجه سانتی‌گراد)، طی ۶۰ سال گذشته موجب افزایش طوفان‌های گردوغبار از ۷۵ به ۲۰۰ واقعه در سال شده است (Awadh, 2023).

در مورد ارتباط پدیده خشکسالی و پدیده طوفان گردوغبار نیز مطالعاتی انجام شده است. Labban و Butt (۲۰۲۱) به تجزیه و تحلیل طوفان ماسه و گردوغبار در عربستان سعودی در رابطه با مؤلفه‌های هواشناسی و ENSO⁶ پرداختند. برای این منظور، داده‌های ۳۰ ساله (۱۹۸۵ تا ۲۰۱۴) از سازمان‌های مربوطه گردآوری و تحلیل شد. نتایج حاکی از تحلیل رویدادهای طوفان گردوغبار (SDS) در رابطه با دما، بارش و سرعت باد، نشان داد که SDS بیشترین همبستگی را با دما و کمترین همبستگی را با بارش دارند (Labban & butt., 2021). Wang و همکاران

8- Enhanced Vegetation Index

6- El Niño Southern Oscillation

7- Effective Drought Index

مناطق مختلف سردسیری، گرمسیری و معتدل را می‌توان در این استان مشاهده کرد (Statistical Yearbook of Ilam Province, 2011).

استان خوزستان در جنوب غرب ایران و در موقعیت جغرافیایی بین $29^{\circ}58'$ تا $33^{\circ}4'$ عرض شمالی از خط استوا و $47^{\circ}31'$ تا $50^{\circ}39'$ طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار گرفته است. مساحت این استان 64057 کیلومتر مربع می‌باشد که در جنوب غربی ایران قرار دارد. شمال و شرق استان خوزستان را سلسله کوه‌های زاگرس فراگرفته است که به سمت جنوب غربی از ارتفاع آن کاسته شده تا نواحی جنوبی تر به صورت تپه‌ماهورهایی ظاهر می‌شود. مناطق کوهستانی عمدتاً در شمال و شرق استان قرار دارند و حدود دو پنجم مساحت کل استان را شامل می‌شوند. منطقه جلگه‌ای در استان خوزستان از جنوب دزفول، مسجدسلیمان، رامهرمز و بهبهان آغاز شده تا کرانه‌های خلیج فارس و اروندرود ادامه دارد (Statistical Yearbook of Khuzestan Province, 2014). موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است. برای به دست آوردن تغییرات زمانی و مکانی رخداد طوفان‌های گردوغبار در دو استان مذکور، از داده‌های دید افقی و بارش ایستگاه‌های هم‌دید منطقه برای طول دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۹ تا ۲۰۱۹) استفاده گردید. داده‌های دید به صورت روزانه و داده‌های بارش به صورت ماهانه تهیه شد. داده‌های مربوط به دید که برای تعیین طوفان گردوغبار در منطقه مورد استفاده قرار گرفته است بر اساس میانگین دید روزانه از طرف سازمان هواشناسی کشور در اختیار قرار گرفت؛ بنابراین در تعیین دید از کدهای هواشناسی استفاده نشده است. در این پژوهش همه ایستگاه‌های هم‌دید موجود در استان‌های ایلام و خوزستان مورد بررسی قرار گرفتند. ایستگاه‌هایی که دارای طول دوره آماری کوتاه‌مدت و داده‌های ناقص بودند، حذف شدند و در نهایت ۱۹ ایستگاه که دارای طول دوره آماری مناسبی بودند، مورد استفاده قرار گرفتند (شکل ۱). مراحل اجرای پژوهش

وسیع و با خطرات بیشتر تکرار می‌شود. همچنین استان خوزستان نیز به دلیل شرایط زمین‌شناسی خاص خود در معرض فرسایش بادی قرار دارد. بخش وسیعی از این استان را نهشته‌های آبرفتی جوان تشکیل می‌دهند که عمدتاً مربوط به دوره کواترنری است. بسیاری از رودخانه‌های این استان که از کوه‌های زاگرس سرچشمه می‌گیرند، عمدتاً دارای بار رسوبی زیادی هستند. در سال‌های اخیر با مهار گسترده این رودخانه‌ها و احداث سدهای متعدد بر روی آنها، آب رودخانه در پایین دست سد به طور طبیعی کاهش یافته و بخش زیادی از رودخانه خشک شده است. این شرایط سطح زمین را برای فرسایش بادی مستعد می‌کند و باد به راحتی می‌تواند رسوبات آبرفتی رودخانه‌های مختلف در خوزستان را برداشت و حمل کند (Pourali & Taghizadeh, 2011). از جمله عوامل موثر و تشدید کننده شرایط ذکر شده عامل خشکسالی است؛ بنابراین بررسی تأثیر خصوصیات خشکسالی بر وقوع طوفان گردوغبار می‌تواند بسیار کارا و برای مدیریت این پدیده ضروری باشد؛ لذا مهمترین اهداف پژوهش حاضر شامل ۱. بررسی توزیع زمانی و مکانی طوفان‌های گردوغبار در استان‌های ایلام و خوزستان ۲. بررسی ارتباط بین مشخصات خشکسالی هواشناسی و وقوع طوفان‌های گردوغبار در این استان‌ها می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

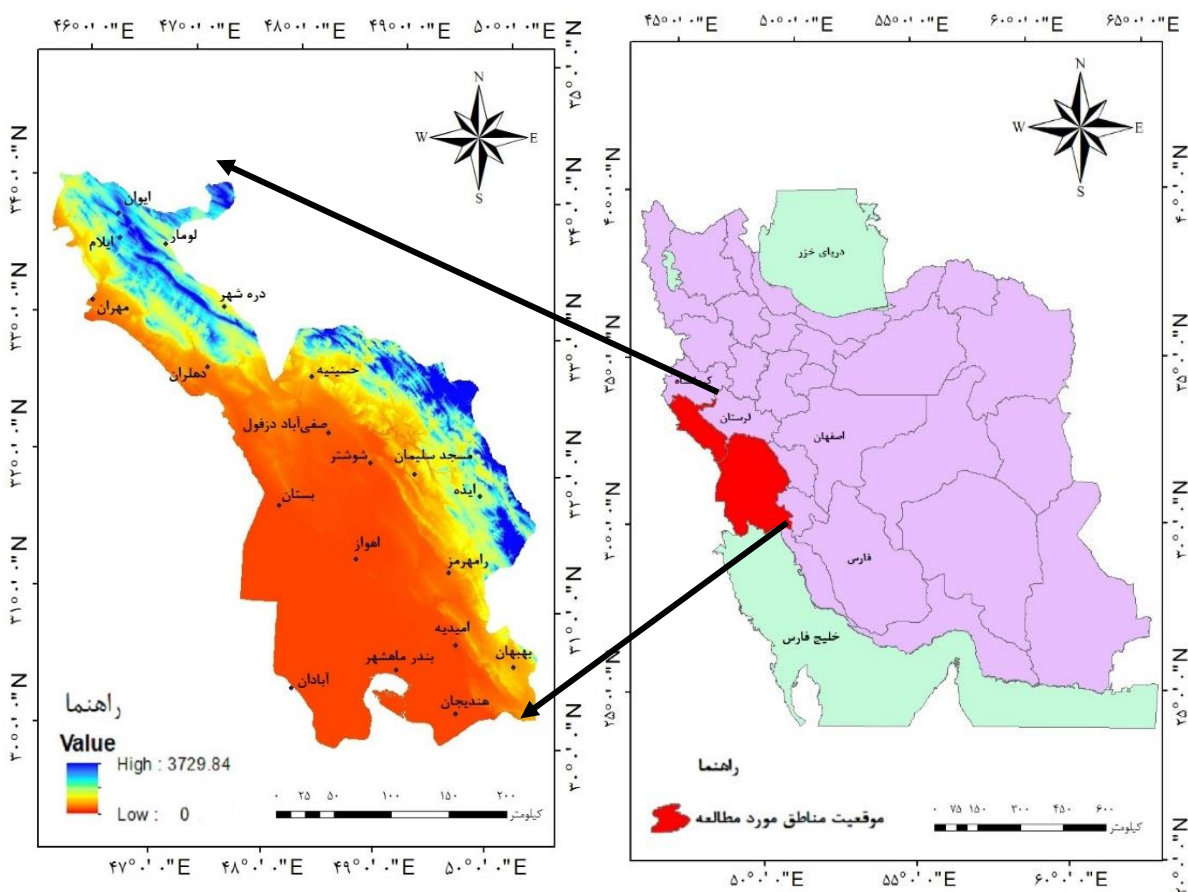
استان ایلام در غرب سلسله کوه‌های زاگرس بین $31^{\circ}58'$ تا $34^{\circ}15'$ عرض شمالی از خط استوا و $45^{\circ}44'$ تا $48^{\circ}10'$ طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ در گوشه‌ی غربی کشور واقع شده است. از لحاظ زمین‌شناسی، این منطقه در بخشی از زاگرس چین‌خورده قرار دارد که روند کلی آن هم‌راستا با زون روآندگی هاست. مرز شمال شرقی آن محدود به زاگرس روآنده، و مرز جنوب غربی آن محدود به استان خوزستان و کشور عراق است. از نظر شرایط اقلیمی،

سنجنده که روی دو ماهواره اکوا و ترا نصب شده است، به منظور تعیین ویژگی‌های رخداد گردوغبار و پایش آن استفاده می‌شود (Zhao, 2012). سنجنده MODIS با در اختیار داشتن ۳۶ باند طیفی مختلف از محدوده ۰/۴۱۵ میکرومتر مرئی تا ۱۴/۲۳۵ میکرومتر مادون قرمز، داده‌هایی با سه قدرت تفکیک مکانی شامل ۲۵۰، ۵۰۰ متر و ۱ کیلومتر دارند. تصویربرداری ۴ بار در روز از یک منطقه صورت می‌گیرد و تصاویر تنوع تفکیک مکانی دارند، لذا در تحلیل رخداد گردوغبار مفید است (Sehatkashani et al., 2016). روزهای همراه با طوفان، طبق عامل دید که بر اساس طبقه‌بندی طوفان گردوغبار ذکر شده در جدول (۱) تعیین گردید.

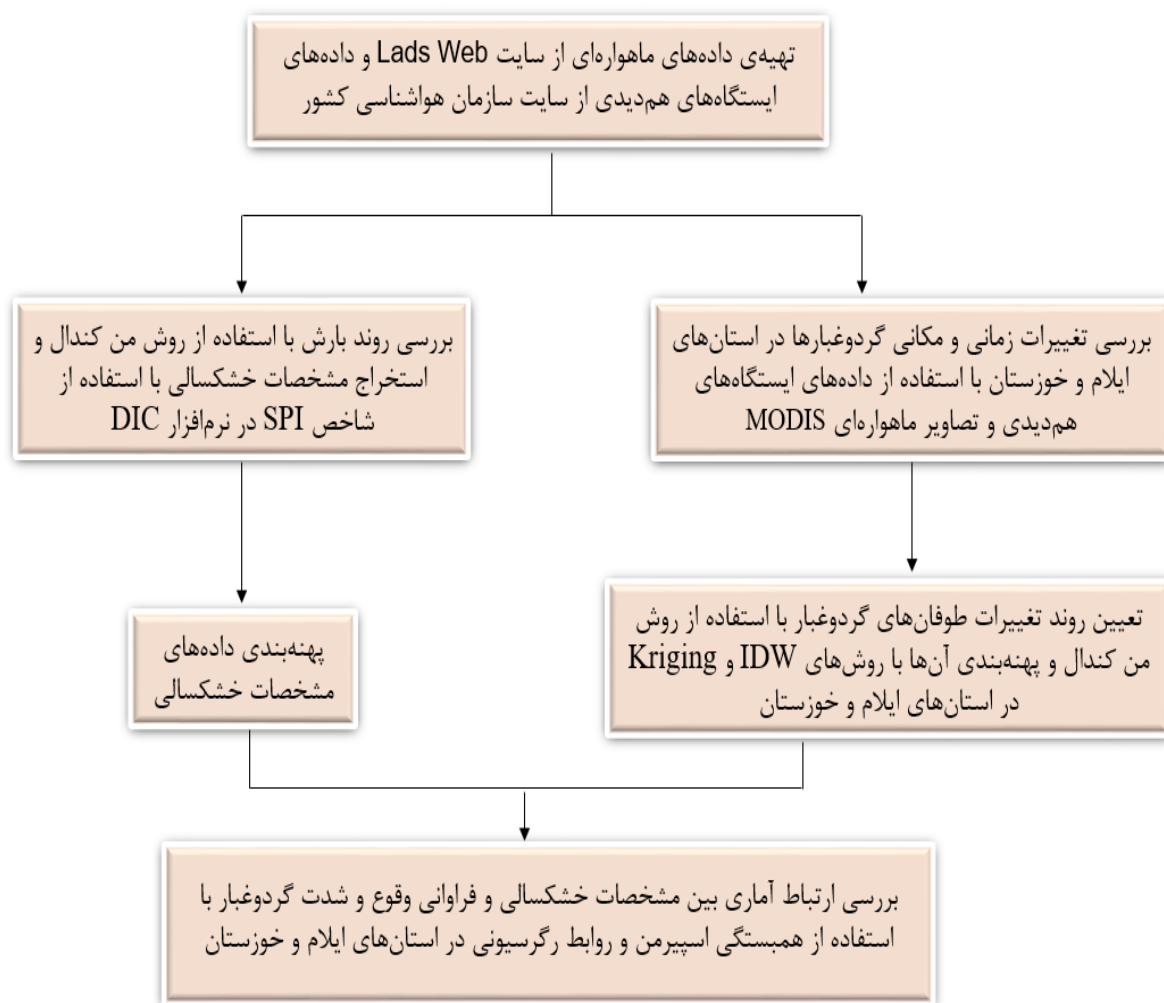
حاضر بر اساس نمودار جریانی ارائه شده در شکل ۲ تنظیم و اجرا شده است.

روش تحقیق

برای به دست آوردن تغییرات زمانی و مکانی رخداد طوفان‌های گردوغبار در استان‌های ایلام و خوزستان، از داده‌های دید افقی و بارش ایستگاه‌های هم‌دید منطقه برای طول دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۹ تا ۲۰۱۹) استفاده شد. سپس به بررسی ارتباط مشخصات خشکسالی با تغییرات زمانی و مکانی طوفان‌های گردوغبار در این استان‌ها در طول دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۹-۲۰۱۹) پرداخته شد. در سایت Lads Web، از تصاویر سنجنده MODIS استفاده شد. این



شکل ۱- موقعیت مناطق مورد مطالعه و پراکنش ایستگاه‌های هم‌دید
 Figure 1- The location of the studied areas and distribution of synoptic stations



شکل ۲- نمودار جریان‌ی پژوهش
Figure 2- Flow chart of the research

گردید. در این پژوهش از شاخص SPI ۱۲ ماهه که با استفاده از توزیع گاما اندازه‌گیری شده و سپس شدت خشکسالی منطقه تعیین شد. در ادامه با استفاده از داده‌های مربوط به دید و ایستگاه‌های هم‌دیدگی منطقه مورد مطالعه طی دوره آماری ۳۰ ساله، وقایع مربوط به طوفان گردوغبار به دست آمد. تحلیل روند دما، بارش و خشکسالی و نیز پدیده دید با استفاده از روش‌های آماری من-کندال و تخمین گر شیب Sen مورد بررسی قرار گرفت. (Heydari Alamdarloo *et al.*, 2021).

در این پژوهش برای پهنه‌بندی از روش‌های درون‌یابی Kriging و روش معکوس وزنی فاصله (IDW) در محیط نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. روش Kriging از

جدول ۱- طبقه‌بندی طوفان‌های گردوغبار با دید افقی
(Beroghani *et al.*, 2019)

Table 1- Horizontal visibility classification of dust storms (Beroghani *et al.*, 2019)

دید افقی Horizontal visibility	شدت طوفان گردوغبار Dust storms intensity
200<	طوفان خیلی شدید
200-1000	طوفان شدید
1000-2000	طوفان متوسط

تصویرهای ماهواره‌ای روزهای همراه با طوفان گردوغبار برای پژوهش نیز از سایت Lads Web تهیه شد. در گام بعدی تغییرات زمانی و مکانی طوفان گردوغبار در استان ایلام با استفاده از روش‌های زمین‌آمار بررسی

و نیمه‌خشک) از خشکسالی سالانه (۱۲ ماهه) استفاده و با استفاده از نرم‌افزار DIC شاخص بارش استاندارد شده (SPI) برای ۱۰ ایستگاه هواشناسی محاسبه شد. شاخص SPI از رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$SPI = \frac{Pi \pm \bar{p}}{S} \quad (7)$$

Pi مقدار بارش موردنظر، \bar{p} میانگین درازمدت بارش برای دوره موردنظر و S انحراف معیار مقدار بارش می‌باشد. درنهایت، به منظور تعیین شدت خشکسالی و یا ترسالی‌ها از جدول (۲) استفاده می‌شود.

جدول ۲- طبقات مختلف خشکسالی و ترسالی بر اساس

مقادیر SPI

Table 2- Different classes of dry and wet years based on SPI values

SPI	طبقه	SPI	طبقات
	خشکسالی Classes drought years		ترسالی Classes wet years
0_-0.99	خشکسالی ملایم	2<	ترسالی خیلی شدید
-1_-1.49	خشکسالی متوسط	1.5_1.99	ترسالی شدید
-1.5_-1.99	خشکسالی شدید	1_1.49	ترسالی ملایم
>-2	خشکسالی خیلی شدید	0.99_0	نرمال

شاخص عمق نوری گردوغبار^۹ (AOD)

به منظور بررسی طوفان گردوغبار در مناطق مورد مطالعه از شاخص عمق نوری گردوغبار (AOD) همراه با داده‌های ایستگاه‌های هم‌دیدگی استفاده شد.

این شاخص با استفاده از نرم‌افزار Google Earth Engine استخراج شد. این کمیت وابسته به طول موج بوده و به صورت کاهش نور در واحد طول روی یک مسیر مشخص عنوان می‌شود. شاخص AOD شاخص عمق نوری (هواویز/گردوغبار) به لحاظ دقت در تشخیص و گستره زمانی و مکانی، امکان پایش زمانی و مکانی را در گستره‌ی زیادی در اختیار می‌گذارد.

پراکندگی بیشترین روش‌های درون‌یابی است که سطح سلولی تولیدشده از آن دقیق و معتبر است. در این روش فرض بر این است که فاصله و جهت بین نقاط نمونه روی همبستگی مکانی تأثیر می‌گذارد (Ghafari *et al.*, 2018). روش IDW از روش‌های متداول برای درون‌یابی به شمار می‌آید. در پیش‌بینی با استفاده از این روش، عامل وزن براساس فاصله نقاط از همدیگر تعیین می‌گردد. به نقاط نزدیک محل نمونه وزن بیش‌تر و به نقاط دورتر وزن کم‌تری اختصاص می‌یابد. رابطه (۵) بیانگر معادله کریجینگ می‌باشد.

$$Z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (5)$$

که در آن: Z^* مقدار متغیر مکانی برآورد شده، $Z(x_i)$ مقدار متغیر مکانی مشاهده شده در نقطه x_i و λ_i وزن آماری که به نمونه x_i نسبت داده می‌شود و بیانگر اهمیت نقطه x_i در برآورد است. رابطه (۶) معادله روش معکوس وزنی فاصله (IDW) را نشان می‌دهد.

$$Z^* = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^a}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^a}} \quad (6)$$

که در آن: d_i فاصله میان نقطه مشاهداتی و محاسباتی، a توان (عدد صحیح)، Z^* مقدار محاسباتی و n تعداد نقاط مشاهداتی هستند.

شاخص SPI

برای استخراج و تحلیل مشخصات خشکسالی از شاخص SPI استفاده گردید. مقادیر SPI در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه قابل محاسبه است (McKee *et al.*, 1993). سه مقیاس اول به عنوان مقاطع کوتاه‌مدت و سه مقطع آخر، به عنوان شاخصی برای تعیین خشکسالی‌های بلندمدت در نظر گرفته می‌شود. شاخص‌های خشکسالی کوتاه‌مدت (۳، ۶، ۹ ماهه) معمولاً برای مناطق مرطوب کاربرد دارد در حالی‌که برای مناطق خشک و نیمه‌خشک از شاخص سالانه و نیز شاخص‌های بلندمدت (۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه) استفاده می‌شود (Moradi *et al.*, 2011). بر این اساس در پژوهش حاضر به دلیل شرایط اقلیم منطقه (خشک

شاخص NDDI

در این تحقیق، برای شناسایی طوفان‌های گردوغبار از شاخص NDDI استفاده شد. در این خصوص، تصاویر ماهواره‌ای مربوط به روزهایی که همراه با طوفان گردوغبار فراگیر (وقوع رویداد طوفان گردوغبار در بیشتر از نصف ایستگاه‌ها) بوده‌اند استخراج شده و مورد استفاده قرار گرفت. این شاخص با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$NDDI = (p2.13 - p0.469) / (p2.13 + p0.469) \quad (8)$$

که در آن: $p2.13$ و $p0.469$ به ترتیب مقادیر بازتابندگی در بالای جو، در طول موج‌های $2/13$ میکرومتر (باند ۷ MODIS) و $0/469$ میکرومتر (باند ۳ MODIS) می‌باشند.

شیب Sen

برای تعیین مقدار شیب روند از روش Sen استفاده می‌گردد. این روش برای محاسبه شیب واقعی (میزان تغییر در واحد زمان)، از روش ناپارامتری ساده‌ی Sen (Sen, 1968) استفاده می‌کند. شیب Sen در جایی استفاده می‌شود که فرض خطی بودن روند پذیرفته شود. در این روش مقادیر موجود در سری زمانی، در تعیین شیب اثر کمی دارند که این حالت باعث برتری اصلی این روش نسبت به رگرسیون خطی می‌باشد (Ahmadi & Radmanesh, 2014).

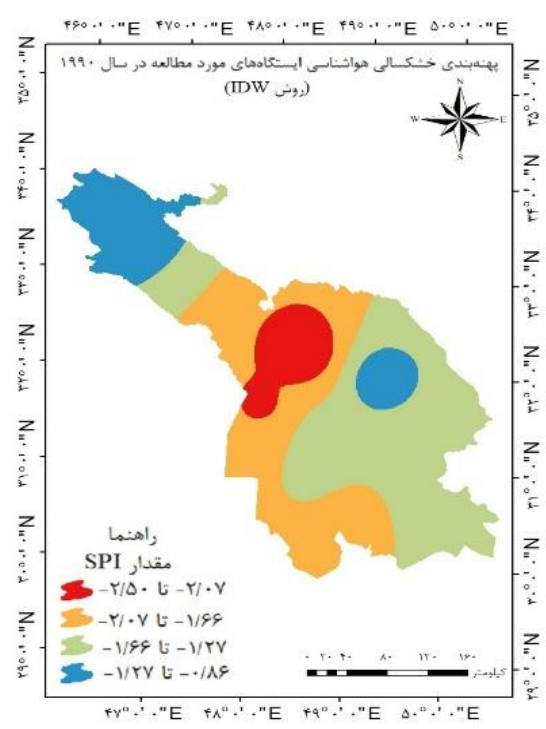
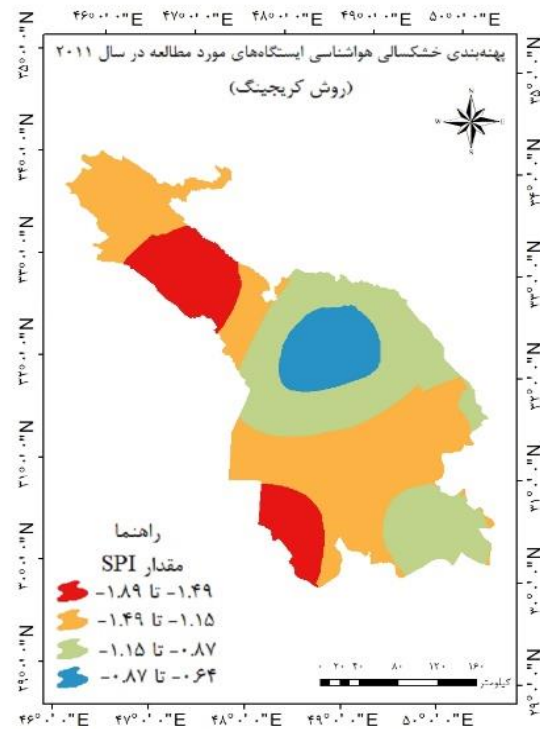
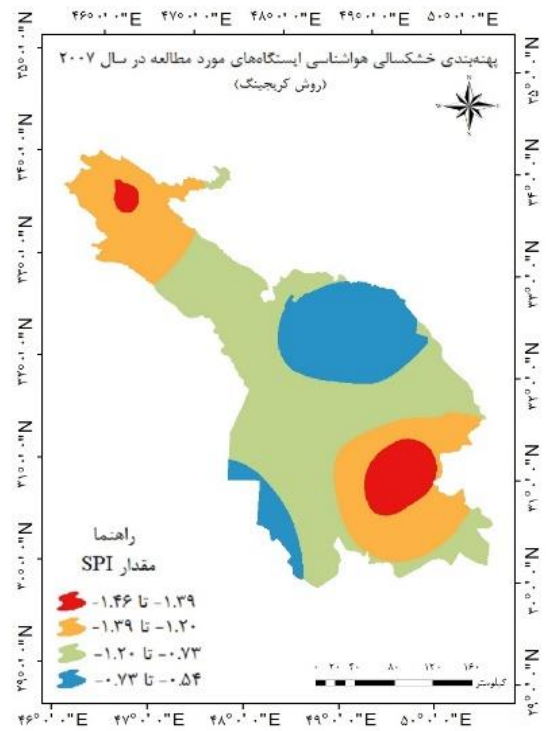
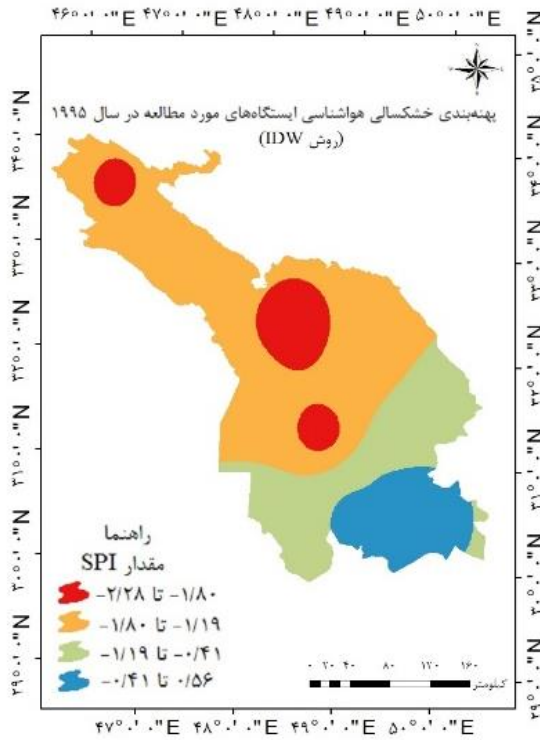
اگر آماره‌ی روند سری داده‌ها مثبت باشد افزایشی و در صورت منفی بودن آن، روند کاهشی می‌باشد. اندازه‌گیری میزان روند را می‌توان با محاسبه شیب تخمینی β از رابطه‌ای که توسط Sen ارائه و Hirsch و همکاران (۱۹۸۲) آن را توسعه دادند، به دست آورد. شیب Sen طبق رابطه (۹) محاسبه گردید.

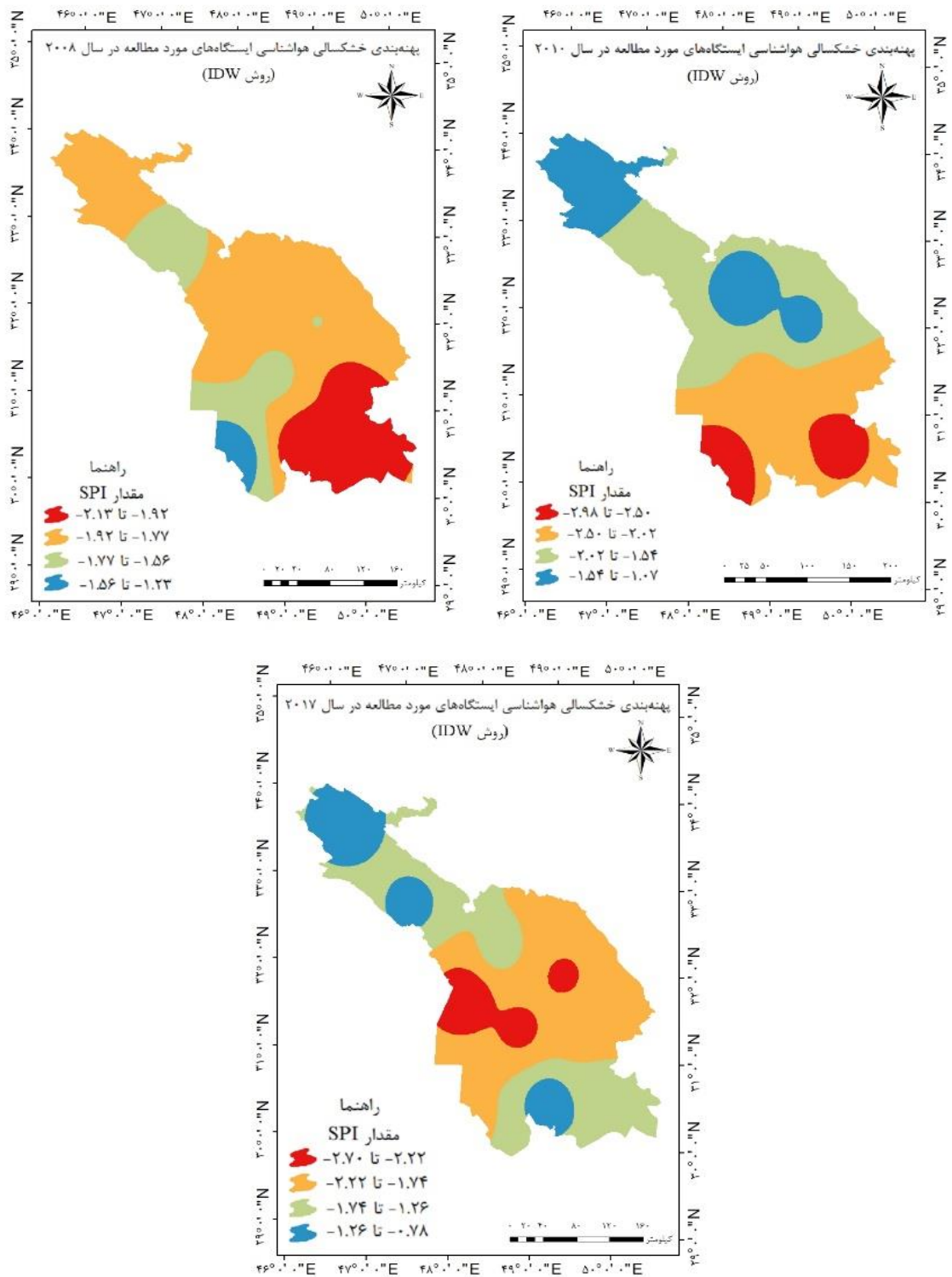
$$\beta = \frac{X_t - X_s}{t - s} \quad (9)$$

که در آن: X_t داده‌های مشاهده‌ای در زمان t و X_s داده‌های مشاهده‌ای در زمان s ، به طوری که t یک واحد زمانی بعد از s است، می‌باشد. با اعمال رابطه (۹) یک سری زمانی از شیب‌های محاسبه‌شده به دست می‌آید که شیب‌خط روند (β_{med}) از محاسبه‌ی میانه‌ی این سری زمانی به وجود می‌آید. مقدار منفی (β_{med}) حاکی از نزولی بودن روند و مقدار مثبت آن نشان‌دهنده‌ی صعودی بودن روند داده‌ها می‌باشد (Vafakhah *et al.*, 2012). برای بررسی ارتباط آماری میان مشخصات خشکسالی با تغییرات زمانی و مکانی طوفان‌های گردوغبار در استان‌های ایلام و خوزستان، از آزمون‌های آماری همبستگی اسپیرمن و رگرسیون خطی استفاده شد. برای انجام تحلیل‌های آماری، پس از گردآوری داده‌های موردنیاز، از محیط نرم‌افزار SPSS برای محاسبات آماری از قبیل همبستگی بین داده‌ها و تحلیل واریانس انجام پذیرفت.

نتایج**نتایج مربوط به خشکسالی و شاخص SPI**

برای محاسبه این شاخص، از ایستگاه‌های با طول دوره آماری کامل (۲۰۱۹-۱۹۸۹) استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان داد که سال‌های ۱۹۹۰، ۱۹۹۵، ۲۰۰۷، ۲۰۰۸، ۲۰۱۰، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۷ دارای خشکسالی فراگیر و سال ۲۰۰۸ با بیشترین میزان خشکسالی فراگیر روبرو بوده است (شکل ۳). نتایج پهنه‌بندی سال‌های همراه با خشکسالی فراگیر در دو استان نشان می‌دهد که بیشترین مقدار در پهنه خشکسالی‌ها از نوع خشکسالی شدید و متوسط می‌باشد.





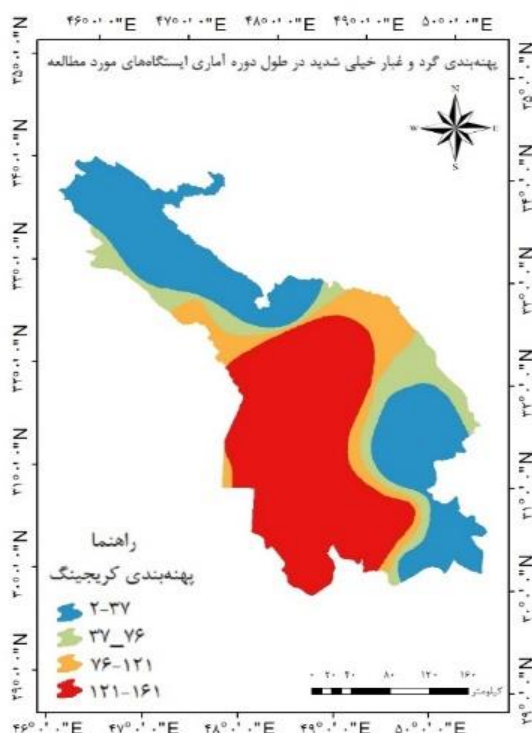
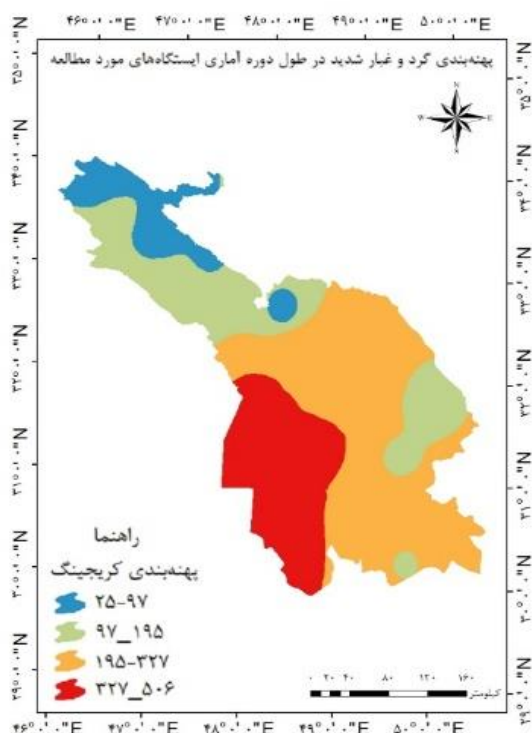
شکل ۳- پهنه‌بندی خشکسالی‌های فراگیر در طول دوره آماری ایستگاه‌های مورد مطالعه

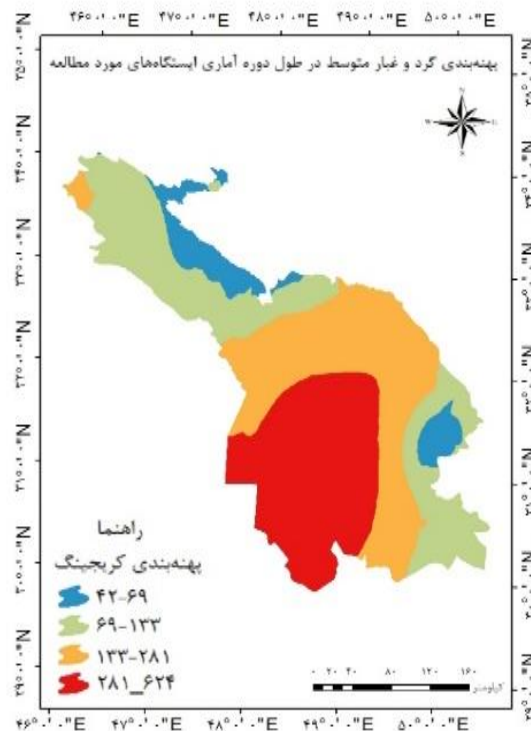
Figure 3- Zoning of widespread dry years during the statistical period of the studied stations

توزیع زمانی طوفان‌های گردوغبار

پس از استخراج داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های همدیدی استان‌های ایلام و خوزستان، نتایج شدت وقوع روزهای غبارآلود ناشی از طوفان گردوغبار در طی دوره مورد مطالعه قرار گرفت. منظور از تعداد طوفان گردوغبار، تعداد روزهای با دید افقی کمتر از ۲۰۰۰ متر می‌باشد. در طول دوره‌ی آماری ۳۰ ساله با توجه به اطلاعات ثبت شده در ایستگاه‌های مورد مطالعه و معیارهای شناسایی و تفکیک روزهای همراه با طوفان گردوغبار در این پژوهش در طول دوره آماری مشترک ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۹، ایستگاه اهواز به طور متوسط با ثبت بیش از ۴۵ وقوع در سال و در مجموع ۱۲ سال با ۵۵۸ وقوع، بیشترین میزان طوفان‌های گرد و غبار را به همراه داشته است. لذا ایستگاه ایوان به طور متوسط با ثبت سالانه حدود ۵ وقوع و در مجموع ۱۲ سال با ۵۷ واقعه،

کمترین تعداد وقوع طوفان گردوغبار را داشته است (شکل ۴). همچنین طول دوره آماری ایستگاه‌های مورد مطالعه یکسان نمی‌باشد؛ بنابراین به منظور مقایسه باید ایستگاه‌هایی با یکدیگر مقایسه گردد که دارای طول دوره آماری مشترک باشد. به عنوان مثال ایستگاه مهران با مجموع ۲۷۵ مورد طوفان طی دوره آماری ۱۴ ساله (۲۰۰۵-۲۰۱۹) در مقایسه با ایستگاه ایلام با مجموع ۳۷۰ واقعه طوفان در طی دوره آماری ۳۰ ساله (۲۰۱۹-۱۹۸۹) در ظاهر دارای واقعه طوفان کمتری است و این در حالی است که طول دوره آماری ایستگاه مهران کمتر از نصف طول دوره آماری ایستگاه ایلام است؛ بنابراین نتیجه کلی آن است که واقعه طوفان گردوغبار در ایستگاه مهران فراوانی وقوع خیلی بیشتری نسبت به ایستگاه ایلام دارد.





شکل ۴- پهنه‌بندی شدت گردوغبار ایستگاه‌های مورد مطالعه

Figure 4- Dust intensity zoning of the studied stations

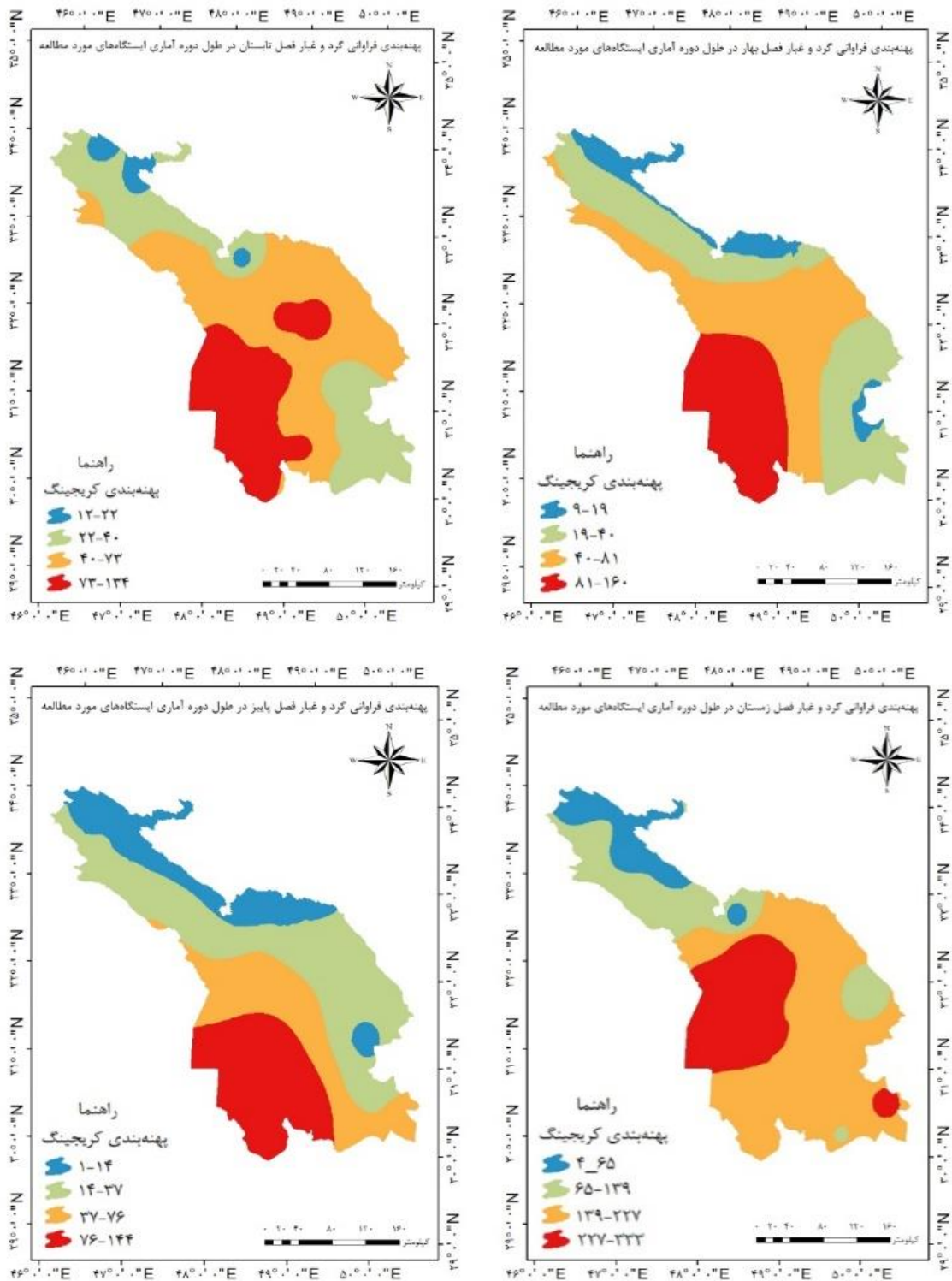
سالانه نشان داد که در سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۲ میلادی بالاترین تعداد وقوع طوفان گردوغبار ثبت شده است و این ارقام، به ترتیب شامل ۷۰۷، ۵۶۷ و ۵۴۸ عدد می‌باشد. رویدادهای طوفان گردوغباری که دارای تداوم یک روزه و دو روزه بوده نسبت به سایر تداوم‌ها، دارای فراوانی وقوع بیشتری می‌باشد.

توزیع مکانی طوفان‌های گردوغبار

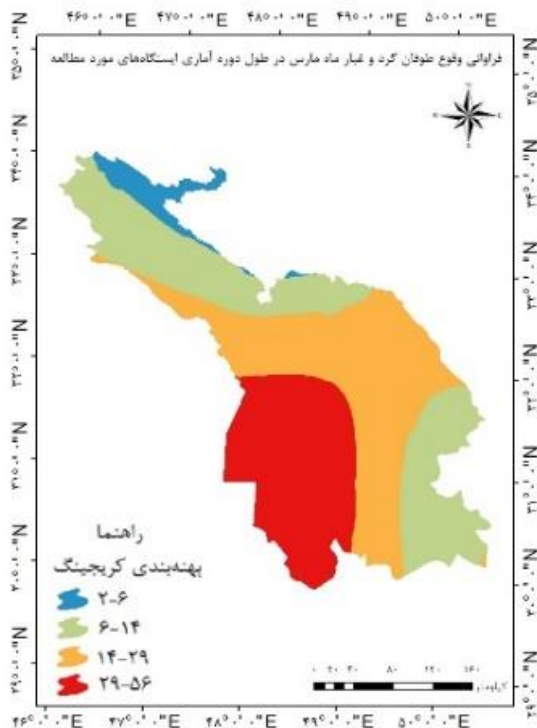
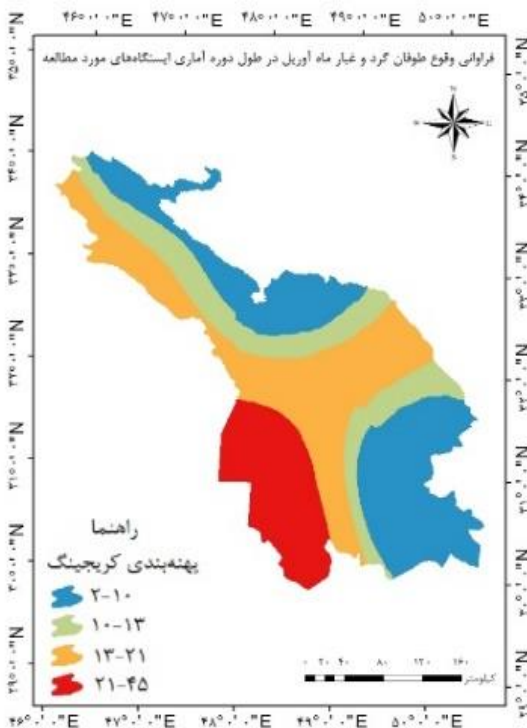
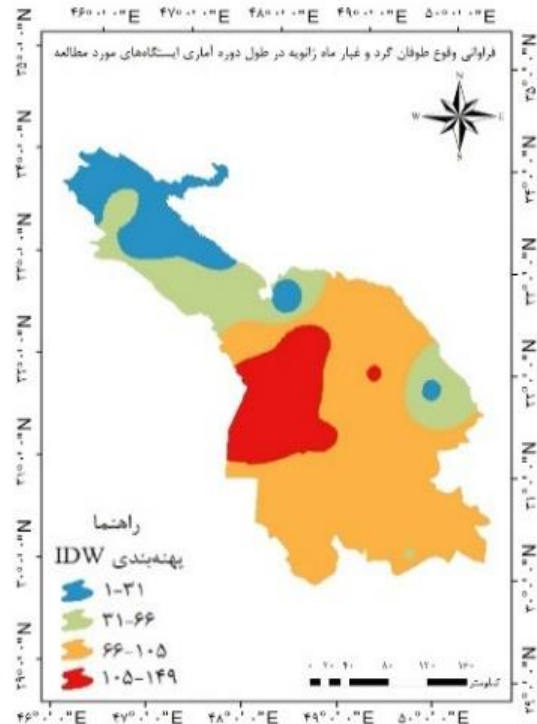
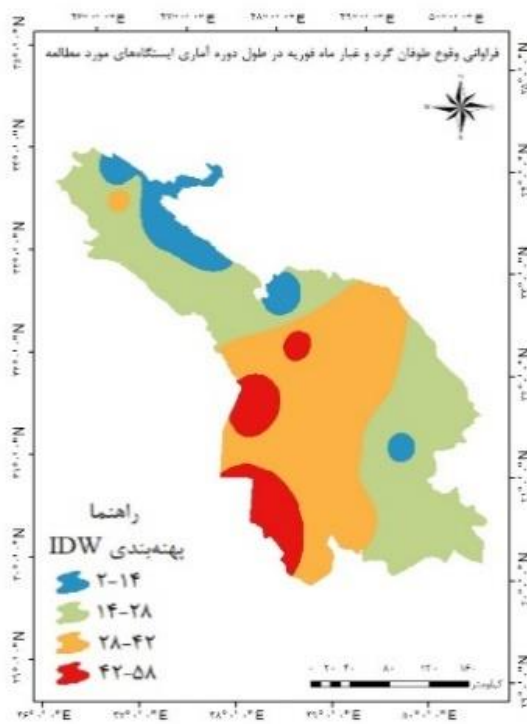
نتایج حاصل از فراوانی وقوع فصلی و ماهانه طوفان‌های گردوغبار به ترتیب در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. طبق نتایج به دست آمده از پهنه‌بندی تغییرات وقوع طوفان‌های گردوغبار، هرچه از غرب استان‌های ایلام و خوزستان به سمت شرق آنها حرکت کنیم، فراوانی و شدت وقوع طوفان‌های گردوغبار کاهش پیدا می‌کند.

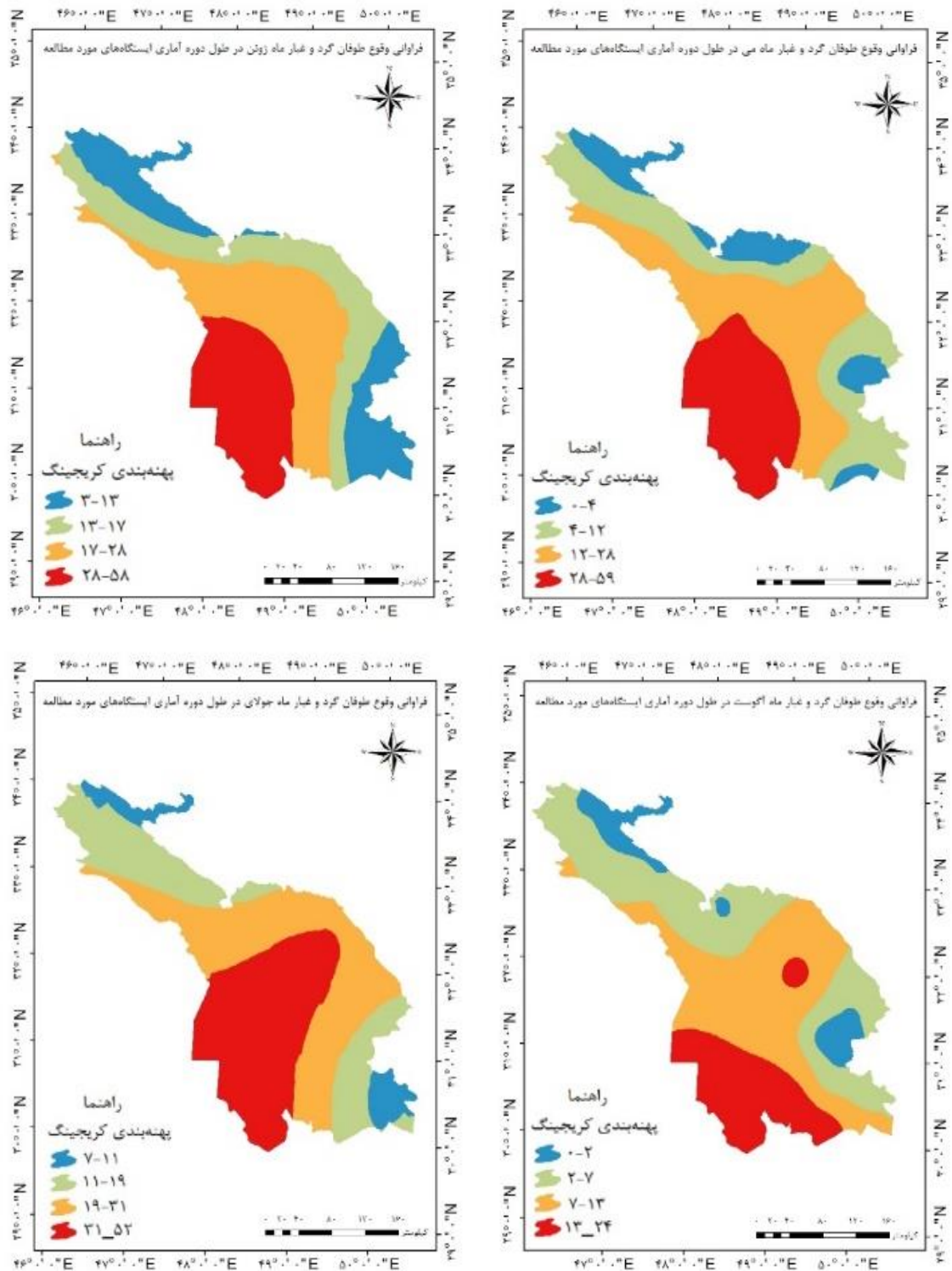
نتایج توزیع ماهانه تعداد روزهای گردوغبار ناشی از طوفان گردوغبار نیز حاکی از آن بود که در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه، ماه ژانویه با ثبت ۱۲۸۷ روز همراه با طوفان گردوغبار دارای بیشترین و ماه آگوست با ۱۵۸ روز ثبت این پدیده، دارای کمترین وقوع پدیده گردوغبار می‌باشد. همچنین پراکنش فصلی روزهای همراه با طوفان گردوغبار در فصل زمستان با ۲۹۵۶ روز بیشترین و فصل پاییز با ۷۷۸ روز کمترین وقوع پدیده گردوغبار را داشته‌اند.

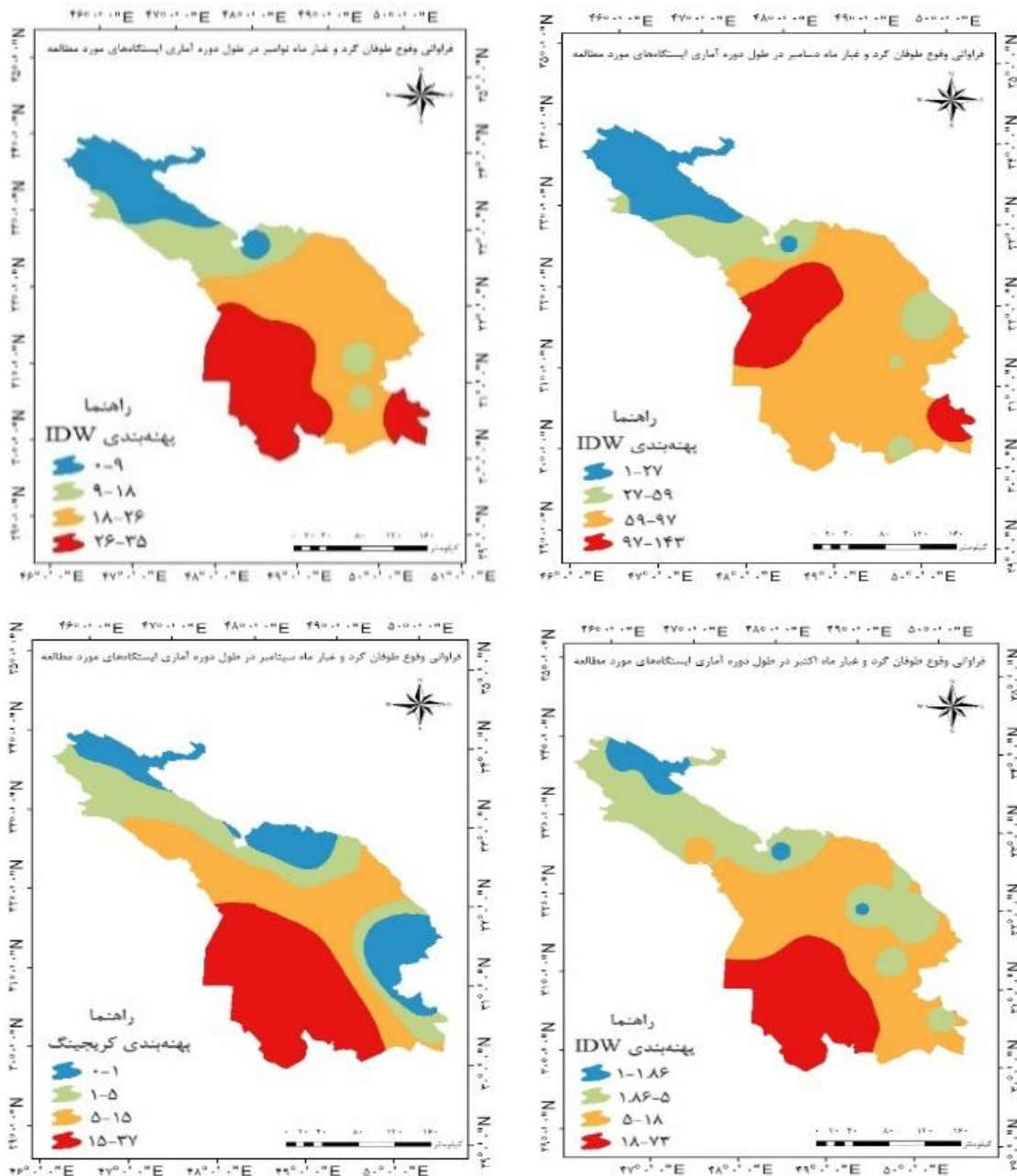
بررسی نتایج توزیع سالانه طوفان‌های گردوغبار در مناطق مورد مطالعه در دو استان ایلام و خوزستان، نشانگر آن است که در تمامی مناطق بیش‌ترین فراوانی این رویداد در سال ۲۰۰۸ به وقوع پیوسته است. کمترین فراوانی طوفان گردوغبار متعلق به سال ۱۹۹۰ می‌باشد. به طور کلی نتایج به دست آمده از توزیع



شکل ۴- بهمنبندی فصلی گردوغبار ایستگاههای مورد مطالعه
Figure 4- Seasonal dust zoning of the studied stations







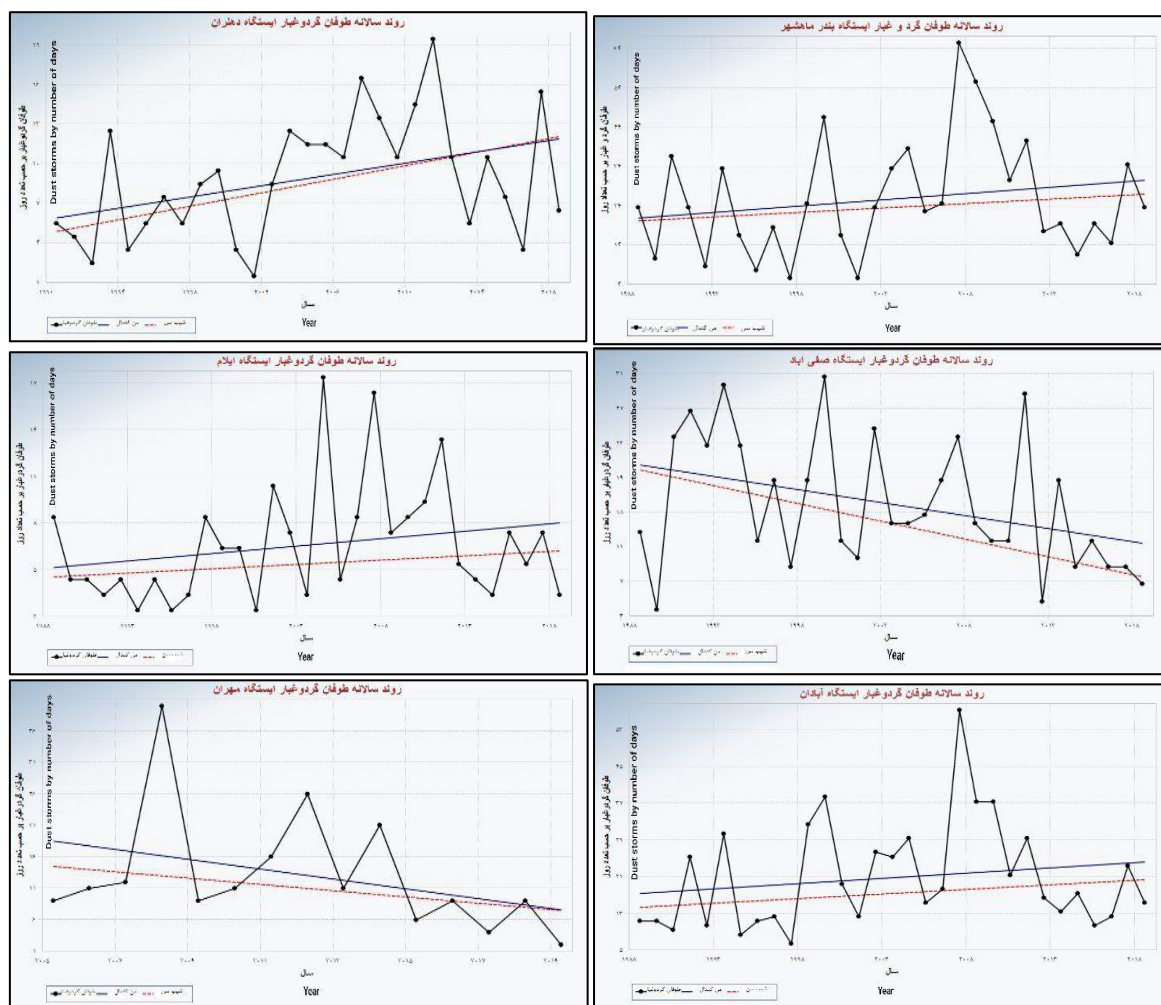
شکل ۵- پهنه‌بندی ماهانه گردوغبار ایستگاه‌های مورد مطالعه

Figure 5- Monthly dust zoning of the studied stations

گردوغبار بود. همچنین ایستگاه‌های آبادان، بندر ماهشهر و صفی‌آباد دزفول در استان خوزستان به ترتیب با ۱۰۹۷، ۸۱۳ و ۸۰۸ روز و ایستگاه‌های ایلام، دهلران و مهران به ترتیب با ۳۷۰، ۳۲۲، ۲۷۵ روز در استان ایلام، همراه با طوفان گردوغبار و دید کمتر از ۲۰۰۰ متر بوده‌اند.

روند تغییرات فراوانی وقوع طوفان گردوغبار و دیگر متغیرهای اقلیمی

نتایج به دست آمده از روند تغییرات زمانی متغیرهای دمای کمینه و بیشینه، بارش و طوفان گردوغبار بر اساس آزمون من-کندال و تخمین گر شیب Sen گزارش شد (شکل ۶). نتایج نشان داد که ایستگاه اهواز با ثبت ۱۱۳۵ روز دارای بیشترین روز همراه با طوفان



شکل ۶- نمودارهای مربوط به روند طوفان گردوغبار برخی از ایستگاه‌ها در دو استان مورد مطالعه
 Figure 6 - Graphs of dust storm trends for selected stations in the two studied provinces

نتایج آزمون همبستگی اسپیرمن نتایج آزمون همبستگی اسپیرمن بین ایستگاه‌های مورد مطالعه برای داده‌های دمای بیشینه و کمینه و بارش در اغلب ایستگاه‌ها همبستگی معنی‌داری را در سطح ۱ یا ۵ درصد نشان داد. همچنین نتایج همبستگی طوفان گردوغبار، بیشینه و کمینه دما، بارش و شاخص AOD در برخی از ایستگاه‌های مورد مطالعه ارائه شد که نتایج بیانگر آن بود که بین داده‌های دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش همبستگی بالایی وجود دارد. همچنین در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه، میان طوفان گردوغبار و شاخص AOD همبستگی وجود دارد. جدول (۳) نتایج همبستگی طوفان گردوغبار، بیشینه و کمینه دما، بارش و شاخص AOD در ایستگاه ایلام را نشان می‌دهد.

روند بارش در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه استان خوزستان دارای شیب نزولی گزارش شد. در حالی که ایستگاه‌های هندیجان و حسینیه دارای شیب صعودی بودند. در استان ایلام نیز ایستگاه‌های ایوان، دره‌شهر، مهران و لومار با روند صعودی بارش و ایستگاه‌های ایلام و دهلران با روند کاهشی همراه بوده‌اند. روند تغییرات دمای بیشینه در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان‌گر روند صعودی در تمام ایستگاه‌ها بود. روند تغییرات دمای کمینه در همه ایستگاه‌های استان خوزستان صعودی بوده و تنها در ایستگاه‌های ایلام، ایوان و لومار شیب صعودی داشت.

جدول ۳- نتایج همبستگی طوفان گرد و غبار، بیشینه و کمینه دما، بارش و شاخص AOD ایستگاه ایلام

Table 3 - Correlation results of dust storms, maximum and minimum temperatures, precipitation, and AOD index at Ilam station

AOD	بارش Precipitation	دمای کمینه Minimum temperatures	دمای بیشینه Maximum temperatures	طوفان گردوغبار Dust storms	متغیر Variable
*0.581	-0.366	**0.534	0.268	1.000	طوفان گردوغبار
-0.032	-0.166	**0.752	1.000	0.268	دمای بیشینه
0.072	-0.279	1.000	**0.752	**0.534	دمای کمینه
-0.350	1.000	-0.279	-0.166	-0.366	بارش
1.000	-0.350	0.072	-0.032	*0.581	AOD

معنی داری در سطح 0.05 *
معنی داری در سطح 0.01 **

صعودی می‌باشند. نتایج توزیع فصلی مقدار شاخص AOD نیز بیانگر آن بود که بیشترین و کمترین مقدار میانگین این شاخص در فصول بهار و پاییز مشاهده می‌شود. توزیع ماهانه شاخص AOD نیز نشان داد بیشترین و کمترین مقدار میانگین این شاخص مربوط به ماه آوریل و دسامبر می‌باشد.

روند تغییرات عمق نوری گردوغبار (AOD) روند تغییرات AOD به صورت توزیع سالانه و ماهانه در ایستگاه‌ها، مورد مطالعه قرار گرفت. طبق نتایج جدول (۴) مقدار AOD برای ۶ سال از سال‌های مورد مطالعه در ایستگاه‌های بهبهان، ایذه، مسجدسلیمان و رامهرمز دارای شیب نزولی و بقیه ایستگاه‌ها دارای شیب

جدول ۴- توزیع سالانه روند AOD در ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 4- Annual distribution of AOD trends in the studied stations

شرایط روند Trends process	آماره من کندال Mann_Kendall statistic	آماره شیب سن Sen slope statistic	سال Year	ایستگاه Stations
صعودی	1.03	0.00289	1989-2019	صفی‌آباد دزفول
صعودی	1.395	0.00779	1989-2019	بستان
نزولی	-0.412	-0.00063	1994-2019	بهبهان
صعودی	1.237	0.0069	2001-2019	هندیجان
صعودی	1.03	0.00289	2005-2019	حسینیه
صعودی	1.03	0.00289	1994-2019	شوشتر
نزولی	-1.122	-0.00258	1993-2019	ایذه
صعودی	1.237	0.00669	1989-2019	امیدیه
نزولی	-1.979	-0.00483	1989-2019	مسجدسلیمان
صعودی	1.237	0.00669	1989-2019	بندر ماهشهر
نزولی	-0.989	-0.00209	1989-2019	رامهرمز
صعودی	1.359	0.00779	1989-2019	اهواز
صعودی	1.857	0.00337	1989-2019	ایلام
صعودی	1.112	0.00093	1991-2019	دهلران
صعودی	1.857	0.00337	1999-2019	ایوان
صعودی	1.114	0.00235	2003-2019	دره شهر
صعودی	1.857	0.00337	2005-2019	مهران
صعودی	1.857	0.00337	2008-2019	لومار
صعودی	0.783	0.004	1989-2019	آبادان

روابط رگرسیونی

در محیط نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۶ رابطه رگرسیونی بین داده‌های مربوطه ایستگاه‌های مورد مطالعه برقرار شد. روابط رگرسیونی مربوط به برخی از ایستگاه‌ها در جدول (۵) نشان داده شده است.

به‌منظور بررسی روابط بین پدیده گردوغبار با دمای بیشینه و کمینه و بارش و شاخص AOD ایستگاه‌های مورد مطالعه

جدول ۵- روابط رگرسیونی دمای بیشینه و کمینه و بارش و شاخص AOD در برخی از ایستگاه‌های مورد مطالعه
Table 5 - Regression relationships of maximum and minimum temperatures, precipitation, and AOD index for selected studied stations

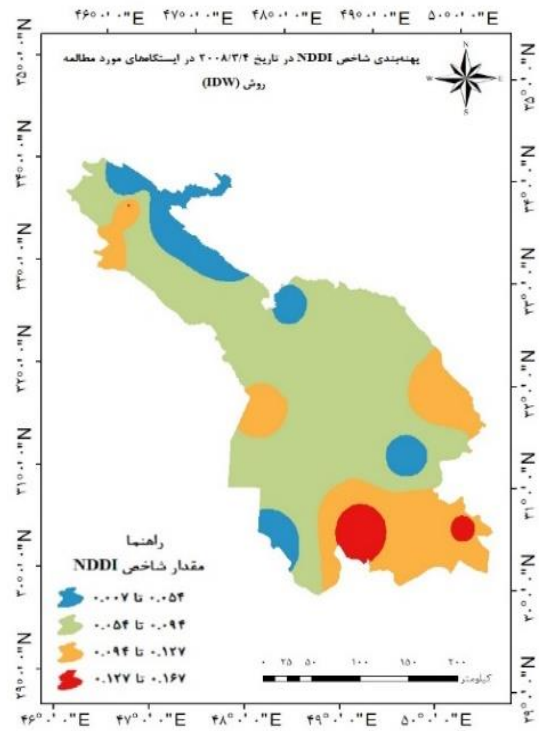
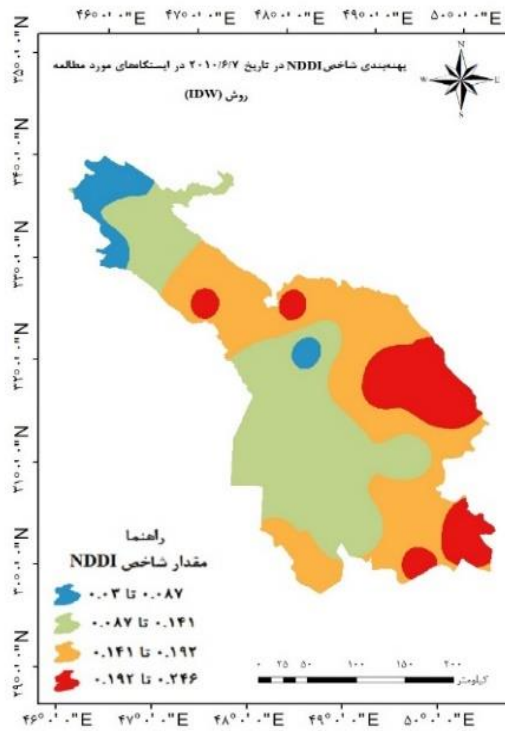
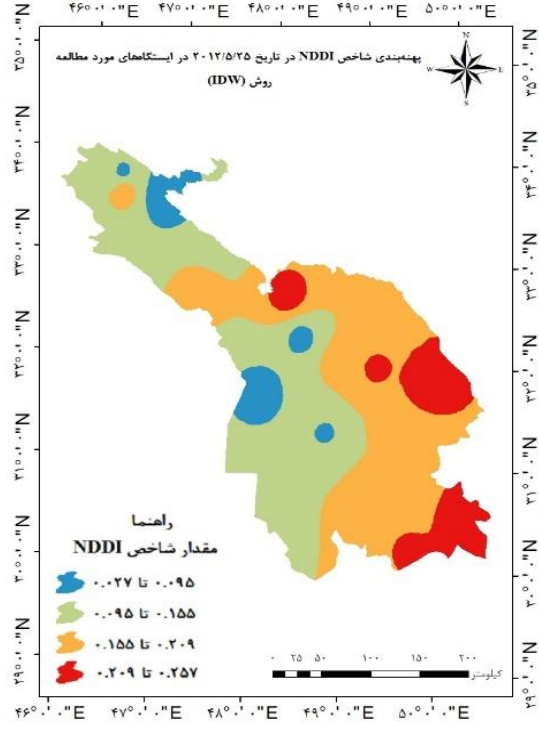
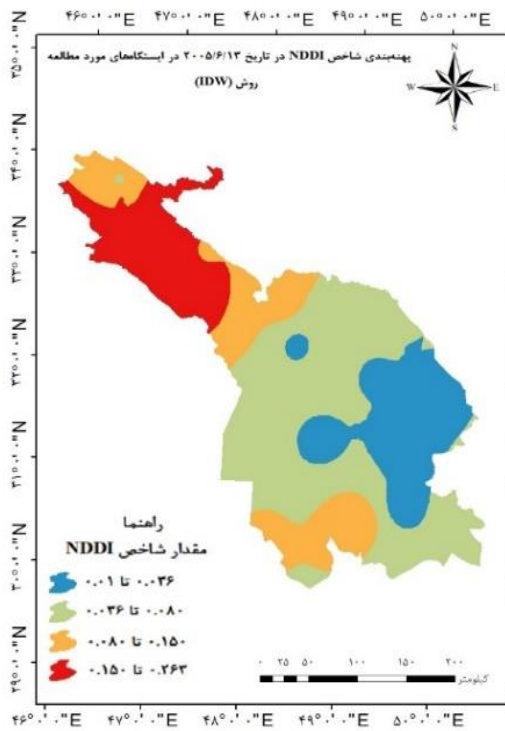
R ²	R	روابط رگرسیونی Regression relationships	ایستگاه Stations
0.475	0.690	$y = 278.87 - 9.52\text{Max} + 1.37\text{Min} - 0.026R + 92.35A$	صفی آباد دزفول
0.629	0.793	$y = 77.72 + 1.21\text{Max} - 11.46\text{Min} - 0.3R + 232.19A$	آبادان
0.781	0.884	$y = 28.46 + 10.33\text{Max} - 22.16\text{Min} + 0.027R + 139.36A$	بندر ماهشهر
0.316	0.562	$y = 46.18 - 5.79\text{Max} + 7.1\text{Min} + 0.002R + 31.5A$	رامهرمز
0.368	0.606	$y = 94.37 - 3.84\text{Max} - 1.54\text{Min} - 0.013R + 120.36A$	ایلام
0.489	0.699	$y = 11.29 - 3.75\text{Max} + 4.86\text{Min} - 0.029R + 60.77A$	دهلران
0.204	0.452	$y = 213.18 - 8.57\text{Max} + 3.46\text{Min} - 0.009R + 85.9A$	مهران

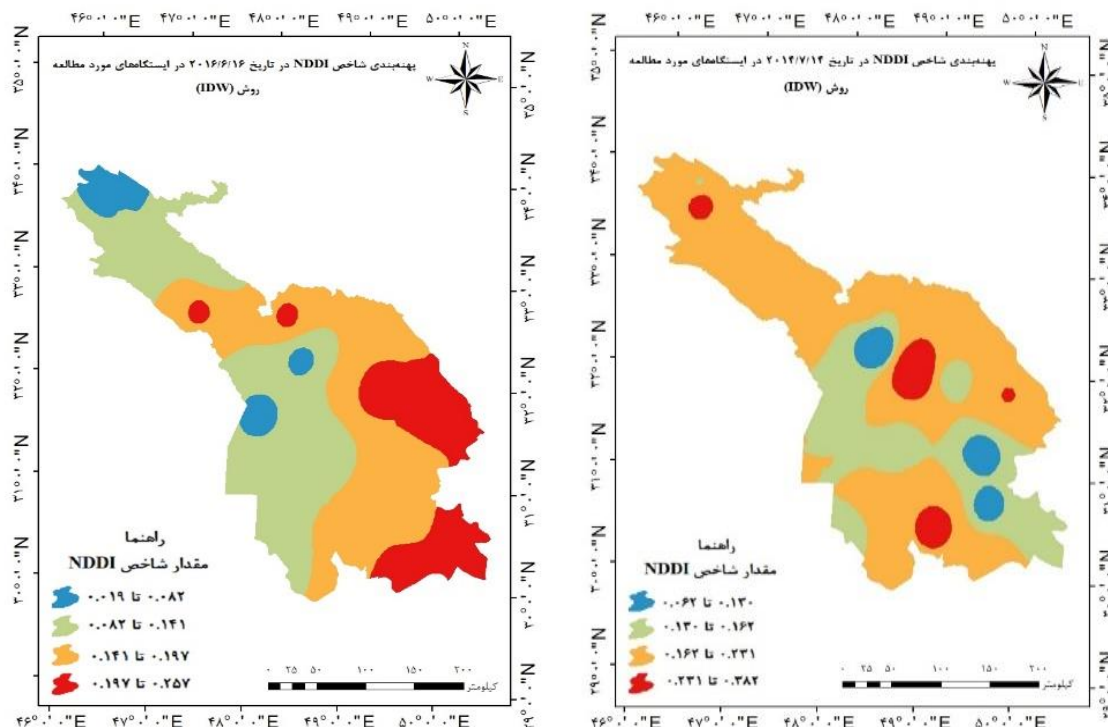
Y: تعداد طوفان گردوغبار، A: مقدار شاخص Aod، Max: مقدار دمای بیشینه، Min: مقدار دمای کمینه و R: مقدار بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه می‌باشد. نتایج حاصله نشان داد که در اغلب ایستگاه‌ها روابط رگرسیونی دارای r و R² نسبتاً بالایی هستند.

نتایج شاخص NDDI

فراگیر را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج حاصل از شاخص NDDI و داده‌های مربوط به دید افقی نشان داد که این شاخص توانسته است شرایط غبارآلودی منطقه را به طور کلی ترسیم نماید؛ اما همخوانی دقیقی در خصوص داده‌های دید افقی و شاخص NDDI مشاهده نمی‌گردد.

برای بررسی روزهای همراه با طوفان گردوغبار فراگیر در ایستگاه‌ها، تاریخ‌های مربوط به این روزها در طول سال‌های آماری مورد مطالعه استخراج شد. شکل (۷) پهنه‌بندی روزهای معرف همراه با طوفان گردوغبار





شکل ۷- پهنه‌بندی تعدادی از روزهای همراه با طوفان گردوغبار فراگیر بر اساس شاخص NDDI
Figure 7 - Zoning of the number of days with pervasive dust storms based on the NDDI index

مقایسه با استان ایلام هموارتر و از ارتفاع پایین‌تری برخوردار است. لذا می‌توان بیان داشت که فعالیت فرسایش بادی در مناطق هموارتر و با وسعت بیشتر و ارتفاع کمتر، از شدت بالاتری برخوردار می‌باشد. این نتایج با یافته‌های (Arami *et al.*, 2018) همسو می‌باشد. هر قدر از سمت غرب به شرق هر دو استان پیش برویم، از شدت، تداوم و فراوانی طوفان گردوغبار کاسته می‌شود؛ زیرا پیش‌روی از غرب به سمت شرق سبب افزایش ارتفاع منطقه شده و فرسایش بادی از شدت کمتری برخوردار است. همچنین به نظر می‌رسد منشأ عمده طوفان‌های گردوغبار در دو استان، در مناطق غربی خارج از کشور واقع شده‌اند که هر چقدر از غرب به شرق استان می‌رویم، به دلیل دور شدن از منشأ و نقاط برداشت از میزان شدت، فراوانی وقوع و تداوم طوفان گردوغبار کاسته می‌شود. این یافته‌ها با نتایج تحقیقات (Arami *et al.*, 2018) همخوانی دارد. نتایج بررسی همبستگی بارش و دمای بیشینه و دمای کمینه بر اساس یافته‌های ارائه شده در جدول (۳) نشان

بحث و نتیجه‌گیری

طوفان‌های گردوغبار و خشکسالی از جمله بلایای طبیعی کشور به شمار می‌آیند. تغییرات عملکرد طبیعی از جمله کاربری اراضی، تغییر رژیم آب رودخانه‌ها و تالاب‌ها به دلیل تغییرات اقلیمی هم‌چون کاهش بارندگی و عملکرد انسانی در دهه‌های اخیر افزایش یافته است. این شرایط تأثیر به‌سزایی بر وقوع و شکل‌گیری گردوغبار و تشدید خشکسالی و به‌تبع آن پدید آمدن آسیب‌هایی بر جوامع بشری دارد. استان‌های ایلام و خوزستان از مناطقی هستند که به دلیل قرارگیری در غرب و جنوب‌غرب ایران و مجاورت با بیابان‌های عراق، سوریه و عربستان، درگیر این پدیده شده‌اند.

نتایج بررسی طوفان‌های گردوغبار در دو استان مورد مطالعه بیانگر آن است که ایستگاه‌های واقع در استان خوزستان از نظر شدت و فراوانی وقوع و تداوم در مقایسه با استان ایلام از شرایط نامناسب‌تری برخوردارند. زیرا از نظر توپوگرافی، استان خوزستان در

می‌باشد که این نشانگر آن است که میزان وقوع گردوغبار در فصل سرد سال روبه‌فزونی است که علت احتمالی آن می‌تواند خشک شدن هورها و کمی دبی جریان رودهای دجله و فرات باشد که موجب شده تا سطح وسیع‌تری از پهنه‌های مناطق با بافت دانه‌ریز به عنوان منشأ طوفان گردوغبار به منابع قبلی افزوده شود و به این ترتیب فراوانی وقوع و شدت طوفان گردوغبار را در منطقه بیشتر کند. اگرچه شرایط تغییر اقلیم و افزایش معنی‌دار دماهای بیشینه و کمینه در وقوع این نتایج می‌تواند موثر باشد (جدول ۴). عوامل مختلفی باعث تغییرات مکانی-زمانی AOD در فصل زمستان می‌شود و طوفان گردوغبار و دینامیک (پویایی) هواشناسی مرتبط با آن، نقش محوری در تغییرات AOD در فصل زمستان دارند (Yousefi et al., 2023). بر اساس نتایج حاصله در جدول (۳) بین طوفان گردوغبار و شاخص AOD در اکثر ایستگاه‌ها همبستگی معنی‌دار دیده می‌شود و این امر بیانگر آن است که این شاخص می‌تواند معیار خوبی برای نشان دادن شرایط طوفان گردوغبار برای منطقه مورد مطالعه باشد. این یافته‌ها با نتایج تحقیقات (Zheng & Singh, 2018) هم‌خوانی دارد. همچنین بین داده‌های دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش با پدیده گردوغبار در بسیاری از ایستگاه‌های مورد مطالعه همبستگی معنی‌دار دیده می‌شود و این امر بیانگر آن است که شرایط بارشی و دمایی می‌تواند در تعدیل و یا تشدید فراوانی وقوع طوفان گردوغبار مورد مطالعه موثر باشد. لازم به ذکر است که همبستگی بین طوفان گردوغبار و داده‌های بارش و دمای بیشینه در ایستگاه‌هایی که دارای ارتباط معنی‌داری بودند، عموماً به صورت منفی می‌باشد؛ یعنی انتظار می‌رود که با افزایش بارش، وقوع طوفان گردوغبار کاهش یابد و برعکس. از سوی دیگر علت آن که بین دمای بیشینه و طوفان گردوغبار رابطه معنی‌دار منفی دیده می‌شود، این است که همان‌طور که در نتایج قبلی دیده شد، بیشترین وقوع طوفان گردوغبار در فصل سرد سال

داد که اغلب ایستگاه‌ها دارای همبستگی معنی‌دار می‌باشد که این امر بیانگر آن است که شرایط اقلیمی به‌ویژه در مناطق هموار غربی، مرکزی و جنوبی دو استان مورد مطالعه دارای شرایط همگن و یکنواختی می‌باشد. در حالی که ایستگاه‌های واقع در مناطق کوهستانی از شرایط اقلیمی با ناپایداری بیشتر برخوردار هستند.

نتایج پهنه‌بندی فراوانی وقوع و شدت طوفان گردوغبار (شکل ۴) نیز نشان داد هر قدر از جنوب‌غرب منطقه مورد مطالعه به سمت شرق و شمال‌شرق می‌رویم، از شدت و فراوانی وقوع این طوفان‌ها کاسته می‌شود. در مقایسه دو استان ایلام و خوزستان نیز ملاحظه می‌گردد که جنوب‌غرب ایلام که در همسایگی با استان خوزستان است به دلیل همگنی شرایط توپوگرافی و وضعیت اقلیمی از مشخصات طوفان‌های گردوغبار استان خوزستان بیشتر تبعیت می‌کند. در مجموع بین شدت و فراوانی وقوع طوفان گردوغبار در دو استان ایلام و خوزستان تفاوت فاحشی وجود دارد و این تفاوت فاحش به شرایط کوهستانی استان ایلام به‌ویژه در بخش‌های مرکز و شمال برمی‌گردد. همچنین به نظر می‌رسد منشأ عمده طوفان‌های گردوغبار در منطقه، از سمت همسایگان مستقر در جنوب‌غرب ایران باشد. علاوه بر این، هموار بودن دشت خوزستان نیز بر شدت فعالیت باد و در نتیجه فراوانی و شدت وقوع طوفان گردوغبار تأثیر فراوانی می‌گذارد.

همان‌طور که در نتایج ارائه شده در شکل (۳) مشاهده گردید، رخداد خشکسالی در منطقه مورد مطالعه از الگوی مشخصی تبعیت نمی‌کند و در مجموع تعداد سال‌های فراگیر خشک و مرطوب در دوره مورد مطالعه در منطقه نسبتاً محدود می‌باشد و بیشترین رویداد مربوط به شرایط نرمال است. توزیع روند ماهانه AOD در ایستگاه‌های مورد مطالعه بیانگر آن است که در ایستگاه‌های مختلف شرایط یکسان نیست؛ ولی در مجموع می‌توان گفت که مقدار AOD برای ماه‌های گرم عموماً منفی و برای ماه‌های سرد عمدتاً مثبت

این شاخص را با ویژگی‌های سطح زمین از جمله تفاوت‌های توپوگرافی، کاربری، پوشش اراضی و خصوصیات شیمیایی کانی‌های گردوغبار مرتبط دانسته‌اند.

به طور کلی نتایج حاصل از پژوهش حاضر بیانگر آن است بررسی رابطه و روند تغییرات طوفان گردوغبار، بارش، دما و بررسی شاخص‌های سنجش‌ازدوری از جمله AOD و NDDI می‌تواند دید وسیع‌تری در مدیریت بهینه و صحیح به مسئولان بدهد؛ اما شاخص‌های سنجش‌ازدوری به تنهایی نمی‌تواند معیار خوبی برای نشان دادن شرایط طوفان گردوغبار باشد. همچنین بین شدت و فراوانی وقوع طوفان گردوغبار در دو استان ایلام و خوزستان تفاوت فاحشی وجود دارد و این تفاوت به شرایط کوهستانی بودن استان ایلام به‌ویژه در بخش‌های مرکز و شمال برمی‌گردد و به نظر می‌رسد منشأ عمده طوفان‌های گردوغبار در منطقه از سمت همسایگان مستقر در جنوب‌غرب ایران باشد. به‌طور کلی در هر دو استان مورد مطالعه از سمت غرب به شرق از شدت، تداوم و فراوانی طوفان گردوغبار کاسته می‌شود. وقوع خشکسالی در منطقه مورد مطالعه نیز از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند و عموماً تعداد کل سال‌های خشک و مرطوب در دوره مورد مطالعه نسبتاً محدود بوده و اکثر رویدادها مربوط به شرایط نرمال است.

اتفاق می‌افتد. در حالی که بیشینه دما معمولاً مربوط به فصل گرم سال می‌باشد. به همین دلیل رابطه معکوس بین بیشینه دما و فراوانی وقوع طوفان گردوغبار می‌تواند قابل تفسیر و توجیه‌پذیر باشد. این یافته‌ها با نتایج (Yang et al., 2007; Mohammadkhan, 2017) هم‌خوانی دارد.

طبق نتایج جدول (۵)، در اغلب ایستگاه‌ها معادلات رگرسیونی با ضریب تبیین نسبتاً بالا به دست آمده است که نشانگر ارتباط نزدیک بین پارامترهای مستقل مورد مطالعه در این تحقیق با طوفان گردوغبار به عنوان متغیر پاسخ می‌باشد.

نتایج حاصل از پهنه‌بندی تعدادی از روزهای همراه با طوفان گردوغبار فراگیر بر اساس شاخص NDDI بیانگر پایین بودن مقدار این شاخص است که برآورد خوبی از وضعیت کلی غبارآلودی منطقه دارد. در پاره‌ای از موارد ملاحظه می‌گردد داده‌های حاصل از شاخص NDDI با واقعیت زمینی هم‌خوانی ندارد که این بیانگر آن است که شاخص مذکور در پاره‌ای موارد با خطاهای فاحشی همراه می‌باشد؛ بنابراین صرف اتکا به شاخص NDDI برای تعیین شرایط غبارآلودی یک منطقه نمی‌تواند از صحت و دقت قابل قبولی برخوردار باشد (شکل ۷). یافته‌های (Mehrabi et al., 2015) مبنی بر دقت نسبتاً پایین NDDI در تعیین غبارآلودی مناطق مورد مطالعه با پژوهش حاضر هم‌سو می‌باشد. آنها علت کارایی پایین

References

- Ahmadi, F. & Radmanesh, F. (2014). Trend Analysis of Monthly and Annual Mean Temperature of the Northern Half of Iran Over the Last 50 Years. *Water and Soil*, 28(4), 855-865. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.29721> (In Persian)
- Ahmadi, V. & Alimohamadi, A. (2021). Combination of EVI and SPI Indices for Mapping of Drought-Prone Areas (Case Study: Kurdistan Province). *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 13(2), 1-22. <https://doi.org/10.52547/gisj.13.2.1> (In Persian)
- Alipour, N., Mesbahzadeh, T., Ahmadi, H., Malekian, A. & Jafari, M. (2018).

Synoptic analysis of dust events and its relation with drought in Alborz and Qazvin provinces. *Geography (Regional Planning)*, 8(30), 59-68. <https://doi.org/20.1001.1.22286462.1397.8.2.4.3> (In Persian)

- Arami, S. A., Ownegh, M., Mohammadian Behbahani, A., Akbari, M. & Zarasvandi, A. (2018). Statistical Analysis of Spatio-Temporal Pattern of Dust Storms in West and Southwest of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(1), 61-83. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.14107.2883> (In Persian)

- Arjmand, M., Rashki, A. & 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. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2018.32339> (In Persian)
- Awadh, S. M. (2023). Impact of North African sand and dust storms on the Middle East using Iraq as an example: Causes, sources, and mitigation. *Atmosphere*, 14(1), 180. <https://doi.org/10.3390/atmos14010180>
- Beroghani, M., Moradi, H.R., Zanganeh Asadi, M.A. & Pour Hashemi, S. (2019). Evaluation of the role of drought in frequency of dust in Khorasan Razavi province. *Journal of Environmental Science and Technology*. 21(5), 109-121. <https://doi.org/10.22034/jest.2019.10464> (In Persian)
- Ghafari, S., Moradi, H. & Modares, R. (2018). Comparison of Temporal and Spatial Changes of Groundwater Level in Isfahan-Borkhar, Najafabad and Chadegan Plains. *Physical Geography Research*, 50(1), 141-160. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2018.226430.1006999> (In Persian)
- John, J., Qu., Xianjun, H., Menas, K. & Lingli, W. (2006). Asian dust storm monitoring combining Terra and Aqua MODIS SRB Measurements. *IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters*, 3(4), 484 – 486. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2006.877752>
- Heim Jr, R.R. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1149-1166. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1149>
- Heydari Alamdarloo, E., Moradi, E., Abdolshahnejad, M., Fatahi, Y., Khosravi, H. & da Silva, A.M. (2021). Analyzing WSTP trend: a new method for global warming assessment. *Environmental monitoring and assessment*, 193, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09600-2>
- Labban, A. H. & Butt, M. J. (2021). Analysis of sand and dust storm events over Saudi Arabia in relation with meteorological parameters and ENSO. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(1), 22. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06291-w>
- McKee, T. B., Doesken, N. J. & Kleist, J. (1993). *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 17(22), 179-183.
- Mehrabi, S., Soltani, S. & Jafari, R. (2015). Investigating the relationship between climatic parameters and the occurrence of dust storm (case study: Khuzestan province). *Journal of Soil and Water Sciences*, 71(19), 69-80. <http://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.19.71.69> (In Persian)
- Mohammadkhan, S. (2017). Status and trends of dust storms in Iran from 1364 to 1384. *Journal of Range and Watershed Management*, 70(2), 495-514. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2017.123300.867> (In Persian)
- Moradi, H.R., Rajabi, M. & Faragzadeh, M. (2011). Investigation of meteorological drought characteristics in Fars province, Iran. *Catena*, 84(1-2), 35-46. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.08.016>
- Namdari, S., Karimi, N. K. & Mohammadi, G. (2017). Pattern analysis of dust storms in the west and southwest provinces of Iran and its relation to the Middle East dust storms. *Journal of Climate Research*, 1396(31), 103-122. (In Persian)
- Nohegar, A., Heydarzadeh, M., Eydoon, M. & Pannahi, M. (2016). Assessment of drought and its impact on surface and groundwater resources (Case study: River basin Minab). *Researches in Earth Sciences*, 7(3), 28-43. <https://doi.org/20.1001.1.20088299.1395.7.3.2.7> (In Persian)
- Pan, L., Che, H., Geng, F., Xia, X., Wang, Y., Zhu, C., Chen, M., Gao, M. & Guo, J. (2010). Aerosol optical properties based on ground measurements over the Chinese Yangtze Delta Region. *Atmospheric Environment*, 44(21-22), 2587-2596.

- <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.04.013>
- Pourali, M. & Taghizadeh, A. (2011). Source and causes of dust in Khuzestan Province. *Geography Education Journal*, 25(3), 8-13. (In Persian)
- Qu, J. J., Hao, X., Kafatos, M. & Wang, L. (2006). Asian dust storm monitoring combining Terra and Aqua MODIS SRB measurements. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 3(4), 484-486. <http://doi.org/10.1109/LGRS.2006.877752>
- Qu, J. J., Hao, X., Kafatos, M. & Wang, L. (2006). Asian dust storm monitoring combining Terra and Aqua MODIS SRB measurements. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 3(4), 484-486. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2006.877752>
- Sehatkashani, S., Kamali, A., Vazifedoust, M. & A. Bidokhti, A. (2016). Study of air quality over west and south west iran using aerosol optical thickness products of MODIS. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 32(1-2), 91-97. <https://doi.org/dor/20.1001.1.26764768.1395.322.12.10.3> (In Persian)
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*, 63(324), 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Shamshiri, S., Jafari, R., Soltani, S. & Ramezani, N. (2014). Dust detection and mapping in Kermanshah province using MODIS satellite imagery. *Iranian Journal of Applied Ecology*, 3(8), 29-42. <http://doi.org/20.1001.1.24763128.1393.38.3.3> (In Persian)
- Soleimani Sardoo, F., Hosein Hamzeh, N., Karami, S., Nateghi, S. & Hashemi nezhad, M. (2022). Emission and transport of dust particles in Jazmourian basin (Case study: Dust storm 24 to 26 November 2016). *Journal of Climate Research*, 1400(48), 41-54. (In Persian)
- Statistical Yearbook of Ilam Province, Publications of Program and Budget Organization, (2011).
- Statistical Yearbook of Khuzestan Province, Publications of Program and Budget Organization, (2014).
- Vafakhah, M, Bakhshi Tiragani, M. & Khazaei, M. (2012). Analysis of rainfall and discharge trend in Kashafrood Watershed. *Geography and Development*, 10(29), 77-90. <https://doi.org/22111/GDIJ.2013.123>
- Samat, A., Abuduwaili, J., Ge, Y., De Maeyer, P. & Van de Voorde, T. (2022). Temporal characterization of sand and dust storm activity and its climatic and terrestrial drivers in the Aral Sea region. *Atmospheric Research*, 275, 106242. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106242>
- Yang, B., Bräuning, A., Zhang, Z., Dong, Z. & Esper, J. (2007). Dust storm frequency and its relation to climate changes in Northern China during the past 1000 years. *Atmospheric Environment*, 41(40), 9288-9299. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.025>
- Yousefi, R., Wang, F., Ge, Q., Shaheen, A. & Kaskaoutis, D.G. (2023). Analysis of the winter AOD trends over Iran from 2000 to 2020 and associated meteorological effects. *Remote Sensing*, 15(4), 905. <https://doi.org/10.3390/rs15040905>
- Zhao, X. (2012). Asian dust detection from the satellite observations of moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS). *Aerosol and Air Quality Research*, 12(6), 1073-1080. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2011.11.0206>
- Zheng, S. & Singh, R. P. (2018). Aerosol and meteorological parameters associated with the intense dust event of 15 April 2015 over Beijing, China. *Remote Sensing*, 10(6), 957. <https://doi.org/10.3390/rs10060957>
- Zucca, C., Fleiner, R., Bonaiuti, E. & Kang, U. (2022). Land degradation drivers of anthropogenic sand and dust storms. *Catena*, 219, 106575. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106575>