



Spatial Analysis of Dust Storms in Iran based on Climatic and Vegetation Characteristics

Farzaneh Borzou¹, Hassan Zolfaghari^{1*}, Jafar Masoompour Samakosh¹, Jalil Sahraei²

¹ Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Razi University, Kermanshah, Iran

² Department of Physics, Faculty of Science, Razi University, Kermanshah, Iran

ARTICLE INFO

Article Type: Research article

Article history:

Received 14 May 2021

Accepted 12 June 2021

Available online 12 June 2021

Keywords:

Environmental Factors,
Radiative-Convective
Models, NDVI, Dust
Sources, Spatial Analysis,
Iran.

Citation: Borzou, F., Zolfaghari, H., Masoompour Samakosh, J., Sahraei, J. (2021). Spatial Analysis of Dust Storms in Iran based on Climatic and Vegetation Characteristics. *Geography and Environmental Sustainability*, 11 (1), 1-22.

doi: [10.22126/GES.2021.6478.2395](https://doi.org/10.22126/GES.2021.6478.2395)

ABSTRACT

Dust storms are one of the harmful climatic hazards that occur as a result of extensive ecological imbalances. Geographical location of Iran, i.e., the arid and semi-arid belt of the world, provides proper conditions for the occurrence of dust storm hazards. The present study aims to identify and spatially analyze the sources of Iran dust storms by using the National Centers for Environmental Prediction (NCEP/DOE); European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational (ECMWF) ERA-Interim reanalysis datasets and the records of 52 synoptic stations from 1984 to 2016. Since Dust storms occur in areas with disrupted ecological balance One-dimensional radiative-convective model (RCM) implemented to calculate the heat fluxes and heat balance at the ground. Finally, eight environmental parameters have been selected to identify dust sources in Iran. Combining the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Index-Overlay (IO) method, the dust sources were detected and evaluated through the land-use maps and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). The results indicated that before dust storm, the stored energy of the surface is high due to the increase in surface temperature and dry air. Therefore, the released energy through the surface instability forms severe winds in the stormy areas. After energy discharge, the amount of stored energy at the surface decreases drastically on the dusty day. In recent years, due to higher NDVI variations and exacerbation of soil erosion, higher potential dust sources have been found in the southern, southeastern and southwestern parts of Iran. In addition, considering the fundamental changes in NDVI, around the Lake Urmia in the northwest of Iran and eastern Caspian Sea, these areas also have more potential dust sources.





تحلیل فضایی طوفان‌های گردوغباری در ایران براساس ویژگی‌های آب‌وهوایی و پوشش گیاهی

فرزانه برزو^۱، حسن ذوالفقاری^{۱*}، جعفر معصوم‌پور سماکوش^۱، جلیل صحرایی^۲

^۱ گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
^۲ گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

چکیده

طوفان‌های گردوغباری جزء مخاطرات اقلیمی هستند و بر اثر به‌هم‌خوردن تعادل‌های گسترده اکولوژیکی رخ می‌دهند. موقعیت جغرافیایی ایران در جنوب غرب آسیا و در کمربند اقلیمی خشک و نیمه‌خشک جهان شرایط مناسبی را برای رخداد این مخاطره فراهم آورده است. با هدف شناسایی و تحلیل فضایی طوفان‌های گردوغبار در ایران، داده‌های باز تحلیلی ERA، NCEP/DOE و داده‌های زمینی ۵۲ ایستگاه سینوپتیک طی دوره ۳۶ ساله (۱۹۸۰ تا ۲۰۱۶) انتخاب شدند. شارهای گرمایی و ذخیره انرژی سطحی با استفاده از مدل تابشی - همرفتی یک‌بعدی محاسبه شد. هشت متغیر محیطی با بررسی ارتباط بین عوامل محیطی و رخداد گردوغبار با استفاده از روش همبستگی پیرسون، برای تحلیل‌های فضایی چشمه‌های گردوغبار در ایران انتخاب شد. مکان‌یابی چشمه‌های گردوغبار با تلفیق روش تحلیل سلسله‌مراتبی و روش هم‌پوشانی شاخص‌ها انجام و نقشه‌های به‌دست‌آمده با نقشه‌های کاربری زمین و شاخص تفاضل گیاهی نرمال‌شده مطابقت داده شدند. نتایج نشان داد که ذخیره انرژی سطح زمین پیش از وقوع طوفان گردوغبار، به دلیل افزایش دمای سطحی و خشکی هوا، بالا بوده و انرژی آزادشده از راه ناپایداری‌های سطحی موجب شکل‌گیری بادهای شدیدی در مناطق طوفانی می‌شود. پس از شکل‌گیری بادهای شدید و تخلیه انرژی، میزان ذخیره انرژی سطحی در روز وقوع طوفان به شدت (به‌طور متوسط تا ۱۴۲ وات بر متر مربع) کاهش می‌یابد. بخش‌های جنوب و جنوب شرقی (استان‌های سیستان و بلوچستان، هرمزگان و بخش‌های جنوبی استان فارس)، شرقی (بخش شرقی استان‌های خراسان رضوی و یزد) و نواحی مرکزی ایران، پتانسیل بالایی برای تبدیل به چشمه‌های گردوغبار دارند. طی سال‌های اخیر با افزایش تغییرات شاخص تفاضل گیاهی نرمال‌شده و تشدید فرسایش خاک، پتانسیل نواحی مستعد منشأ گردوغبار در بخش‌های جنوبی، جنوب شرقی و جنوب غربی ایران افزایش یافته و اطراف دریاچه ارومیه در شمال غرب ایران و شرق دریای خزر نیز طی سال‌های اخیر با تغییرات شدید در شاخص پیش‌گفته به نواحی مستعد منشأ گردوغبار تبدیل شده‌اند.

مشخصات مقاله

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۴ اردیبهشت ۱۴۰۰

پذیرش ۲۲ خرداد ۱۴۰۰

دسترسی آنلاین ۲۲ خرداد ۱۴۰۰

کلیدواژه‌ها:

عوامل محیطی، مدل‌های تابشی - همرفتی، چشمه‌های گردوغبار، تحلیل فضایی، ایران.

استناد: برزو، فرزانه؛ ذوالفقاری، حسن؛ معصوم‌پور سماکوش، جعفر؛ صحرایی، جلیل (۱۴۰۰). تحلیل فضایی طوفان‌های گردوغباری در ایران براساس ویژگی‌های آب‌وهوایی و پوشش گیاهی. جغرافیا و پایداری محیط، ۱۱ (۱)، ۱-۲۲.
doi: 10.22126/GES.2021.6478.2395

مقدمه

طوفان گردوغبار در بسیاری از نواحی خشک و نیمه خشک دنیا رخ می دهد و موجب فرسایش خاک در نواحی کشاورزی شده و بر کیفیت هوا اثر منفی دارد و همه ساله خسارت های جبران ناپذیری بر اکوسیستم های جهانی وارد می سازد. بیشترین منابع گردوغبار در حال حاضر به نواحی با بارش کمتر از ۲۵۰ میلی متر محدود شده است (شائو^۱، ۲۰۰۸). اگر طوفان های گردوغبار را نتیجه آشکار افزایش فعالیت های باد در مناطق خشک بدانیم (گودی^۲، ۲۰۰۸)، منطقه خاورمیانه با اقلیمی گرم و خشک، به ویژه در طول دوره گرم سال، یکی از مستعدترین مناطق برای وقوع این پدیده به شمار می رود (حمیدی^۳ و همکاران، ۲۰۱۴).

کشور ایران به دلیل قرارگیری در محل فرونشینی پرفشار دینامیکی جنب حاره، در طول دوره گرم سال نزول مداوم هوا را در ترازهای میانی و فوقانی وردسپهر تجربه می کند. ساختار گردشی پیش گفته در ترکیب با ویژگی های پوشش سطحی و آبرفت های ریزدانه فراوانی که داخل کشور و کشورهای همسایه وجود دارد، منطقه خاورمیانه و ایران را به یکی از مهم ترین مناطق وقوع طوفان های گردوغبار در دنیا تبدیل کرده است (مفیدی و جعفری، ۱۳۹۰). هر ساله بخش های وسیعی از کشور ایران به ویژه مناطق غربی و جنوب غربی و جنوب شرقی تحت تأثیر این پدیده بوده و همواره خسارت های جانی و مالی فراوان در پی دارد.

بیشترین منابع گردوغبار در حال حاضر به نواحی با بارش کمتر از ۲۵۰ میلی متر محدود شده است (شائو، ۲۰۰۸)؛ بنابراین این مخاطره در بسیاری از نواحی خشک و نیمه خشک دنیا رخ می دهد و موجب فرسایش خاک در نواحی کشاورزی شده و بر کیفیت هوا اثر منفی دارد. منطقه خاورمیانه نیز یکی از مناطقی است که این مخاطره با شدت های مختلف در دوره گرم سال در آن به وقوع می پیوندد. تاناکا و چیبا^۴ (۲۰۰۶) و میلر^۵ و همکاران (۲۰۰۴)، پیش بینی کرده اند که ۱۵٪ تا ۲۰٪ گردوغبار جهانی از شبه جزیره عربستان و آسیای مرکزی انتشار می یابد. سودان، عراق، عربستان و خلیج فارس نواحی ای هستند که بیشترین رخداد طوفان گردوغبار را در خاورمیانه نشان داده اند (کوتیل و فورمن^۶، ۲۰۰۳).

تحلیل های اولیه از طوفان گردوغبار در منطقه خاورمیانه نشان می دهد که بالاترین فراوانی در محل تلاقی مرزهای ایران، پاکستان و افغانستان، حوضه آبخیز سیستان، صحرای ریگستان و شمال غرب بلوچستان روی می دهد (میدلتون^۷، ۱۹۸۶)؛ افزون بر این نواحی، بالاترین فراوانی در بیابان مکران در نواحی ساحلی دریای عمان نیز مشاهده شده است (پروسپرو^۸ و همکاران، ۲۰۰۲). ویلکرسون^۹ (۱۹۹۱) برای اولین بار چشمه های گردوغبار خاورمیانه را با استفاده از تصاویر ماهواره نوا^{۱۰} شناسایی کرد. او با بررسی طوفان های گردوغبار طی سال های (۱۹۸۵ تا ۱۹۹۱)، چهارده نقطه از جمله دو نقطه در غرب و جنوب غرب ایران شناسایی کرد. در مطالعات بعدی مشخص شد که تمام نواحی ای که به وسیله ویلکرسون تعیین شده اند، بر روی رسوبات کواترنر، آبرفتی، پلایا، لس، دریاچه های خشک قدیمی و بستر رودخانه های خشک شده قرار دارند (گریوانی^{۱۱} و

- 1- Shao
- 2- Goudie
- 3- Hamidi
- 4- Tanaka & Chiba
- 5- Miller
- 6- Kutiel & Furman
- 7- Middleton
- 8- Prospero
- 9- Wilkerson
- 10- NOAA
- 11- Gerivani

همکاران، ۲۰۱۱).

بیابان‌هایی که از ایران تا افغانستان و پاکستان و شمال غرب هندوستان گسترش یافته‌اند نیز مهم‌ترین چشمه‌های گردوغبار در آسیای جنوب غربی هستند که در زمستان و بهار موجب عبور ذرات معلق از روی خلیج فارس شده‌اند (پیز و همکاران^۱، ۱۹۹۸). شبیه‌سازی عددی طوفان‌های گردوغبار در خاورمیانه، نواحی با پتانسیل بالای چشمه گردوغبار را در آبرفت‌های دجله و فرات، فلات عربستان، بیابان‌های شمال و مرکز سودان، نواحی بیابانی مرکز و سواحل جنوبی ایران، نواحی مرزی بین ایران، پاکستان و افغانستان و در نهایت ناحیه دریای خزر-آرال در ترکمنستان، ازبکستان و قزاقستان نشان می‌دهد (حمیدی و همکاران، ۲۰۱۳).

بررسی‌های دقیق‌تر با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده مودیس^۲ و ترکیب کردن نقشه چشمه‌های تولید گردوغبار با نقشه‌های شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده^۳، نواحی شرق سوریه، عراق و نیز بیابان‌های عربستان به‌عنوان چشمه‌های گردوغبار شناسایی و مشخص شد که با حرکت طوفان به سمت شرق، غلظت ذرات معلق افزایش یافته و غرب و جنوب غرب ایران را تحت تأثیر قرار داده است (کریمی و همکاران، ۱۳۹۰؛ رنجبر سعادت‌آبادی و عزیز، ۱۳۹۱؛ عزیز^۴ و همکاران، ۲۰۱۲؛ طاهری شهرآیینی^۵ و همکاران، ۲۰۱۵).

در مطالعات انجام‌شده مشخص شد که ایران در مسیر وزش باد برخی از بزرگ‌ترین چشمه‌های گردوغبار شامل دشت‌های خشک الجزیره، دشت‌های آبرفتی دجله و فرات و صحرای زبیر در عراق، صحرای سوریه که بیشتر گردوغبار غرب عراق را تولید می‌کند و سه ناحیه مهم بیابانی النفوذ و الدهنا و رب الخالی در شبه جزیره عربستان قرار دارد (کومت^۶، ۲۰۰۳) و تحت تأثیر بادهای تابستانه شمال نیز هست (عبدی ویشکایی^۷ و همکاران، ۲۰۱۲). این شرایط موجب شده که غرب و جنوب غرب ایران اغلب به‌وسیله گردوغبارهای حمل‌شده از این چشمه‌ها متأثر شود (زایتچیک^۸ و همکاران، ۲۰۰۷)؛ به‌طوری که در بررسی فراوانی وقوع گردوغبار در ایران پنج منطقه با استفاده از تحلیل خوشه‌ای، با روند مشابه در فراوانی وقوع شامل: ۱- جنوب شرق؛ ۲- جنوب و نواحی مرکزی؛ ۳- غربی؛ ۴- شرقی و مرکزی و ۵- نواحی شمالی ایران شناسایی شدند (باغبانان^۹ و همکاران، ۲۰۲۰).

در پژوهش‌های صورت‌پذیرفته براساس دید افقی و ویژگی‌های سطح زمین، نواحی شرقی، جنوب شرقی و مرکزی ایران به‌عنوان مستعدترین نواحی برای تبدیل به چشمه گردوغبار نیز شناسایی شدند (شائو، ۲۰۰۸). گسترش نواحی بیابانی و نیمه‌بیابانی در مرکز، شرق، جنوب شرق ایران و وزش بادهای ۱۲۰ روزه سیستان از اواسط می تا اواسط سپتامبر این نواحی را به مهم‌ترین نواحی بالقوه چشمه‌های گردوغبار در خاورمیانه تبدیل کرده است. بررسی چشمه‌های گردوغبار در جنوب شرق کشور به‌وسیله ایرانمنش و همکاران (۱۳۸۴) نیز اصلی‌ترین منطقه برداشت گردوغبار را روی دریاچه هامون ساپوری نشان می‌دهد. بررسی‌ها نشان داده است که دریاچه خشک هامون در حوضه سیستان حاوی مقادیر زیادی از رسوبات قابل فرسایش است که می‌تواند منبع مهمی برای تولید گردوغبار باشد (میری^{۱۰}، ۲۰۰۹)؛ به‌طوری که در مطالعات انجام‌شده با توجه به

1- Pease

2- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

3- Normalized difference vegetation index (NDVI)

4- Azizi

5- Taheri Shahraini

6- COMET

7- Abdi Vishkaee

8- Zaitchik

9- Baghbanan

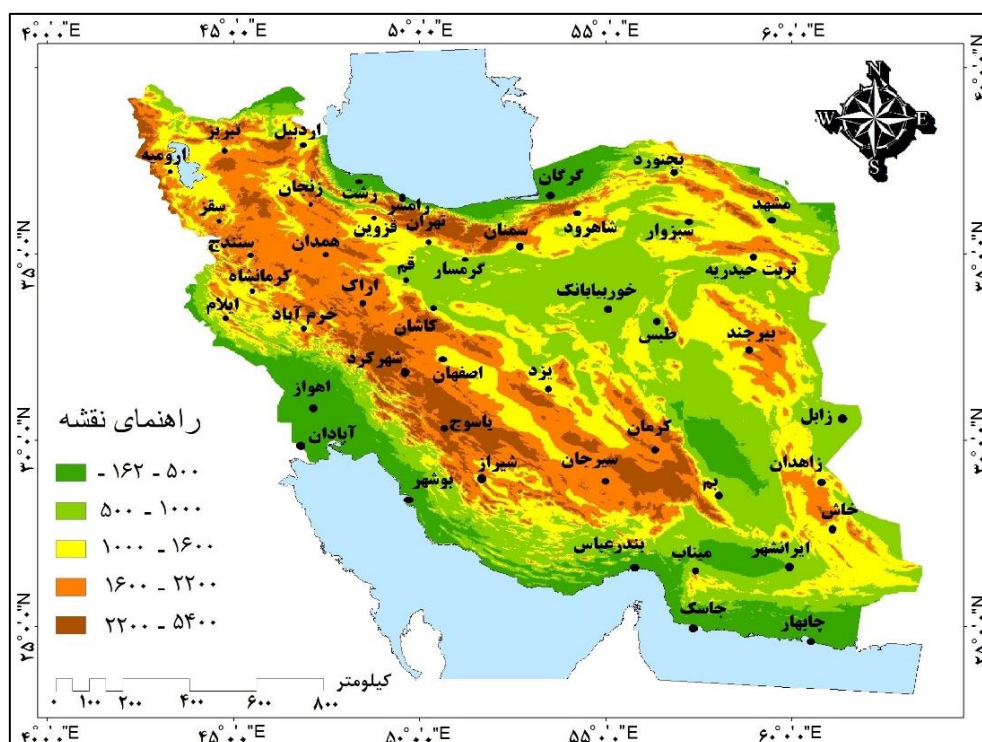
10- Miri

شاخص‌های فرسایش خاک به نواحی مرکزی کشور، تالاب هورالعظیم در جنوب غرب و حوضه آبریز سیستان در جنوب شرق به‌عنوان منشأ گردوغبار اشاره شده است (کائو^۱ و همکاران، ۲۰۱۵). نتایج بیشتر پژوهش‌ها در زمینه چشمه‌های گردوغبار در ایران نشان می‌دهد که طی سال‌های گذشته، فراوانی و شدت آن‌ها به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است (علیزاده چوباری^۲ و همکاران، ۲۰۱۶). بررسی چشمه‌های گردوغبار در پنج استان غرب و جنوب غربی کشور افزایش تعداد چشمه‌ها را در این نواحی نشان داد (جلالی و همکاران، ۱۳۹۶).

از آنجاکه چرخه گردوغبار شامل انتشار، حمل، رسوب و تثبیت ذرات به توازن انرژی سیستم زمین وابسته است (شائو و همکاران، ۲۰۱۱)، با افزایش رخداد این مخاطره در سال‌های اخیر، اثرات انکارناپذیری بر میزان تابش دریافتی و تغییرات شارهای گرمایی سطح زمین ایجاد شده است؛ به همین منظور در نوشتار پیش رو افزون بر ویژگی‌های آب‌وهوایی، عوامل تابشی در هنگام وقوع طوفان گردوغبار در ایران بررسی شد و نواحی بالقوه منشأ این طوفان‌ها با به‌کارگیری شاخص‌های مناسب آب‌وهوایی و تابشی و یک مدل تابشی - همرفتی شناسایی شده‌اند.

مواد و روش‌ها

برای شناسایی و تحلیل طوفان‌های گردوغبار در ایران از داده‌های روزانه ۵۲ ایستگاه سینوپتیک با یک دوره آماری ۳۶ ساله (۱۹۸۰-۲۰۱۶) استفاده شد (شکل ۱). اطلاعات هواشناسی مورد نیاز شامل سرعت و جهت باد، دمای بیشینه و کمینه، میانگین روزانه دما، دمای نقطه شبنم، رطوبت نسبی، بارش، تبخیر، ابرناکی و حداقل دمای سطح، از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد.



شکل ۱. نقشه توپوگرافی و موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه

1- Cao

2- Alizadeh-choobari

به‌منظور جداسازی روزهای وقوع گردوغبار از باد، وضعیت هوای حاضر و دید افقی استفاده شده است. اطلاعات مورد نیاز برای شناسایی و تحلیل طوفان‌های گردوغبار براساس کدهای صدگانه هوای حاضر (کدهای ۰۰ تا ۹۹) سازمان هواشناسی جهانی^۱ استخراج شده است. از بین کدهای صدگانه، ۱۰ کد که به فرسایش خاک و طوفان گردوغبار مربوط می‌شود (جدول ۱)، در پژوهش حاضر استفاده شده است. بدین ترتیب با بررسی کدهای پیش‌گفته، بیش از ۴۰۰ طوفان گردوغبار در نواحی مختلف ایران شناسایی شده است. برای محاسبه ویژگی‌های تابشی از جمله شارهای حرارتی و میزان انرژی ذخیره سطح زمین در روز وقوع طوفان گردوغبار و پیش از آن، از داده‌های بازتحلیلی NCEP/DOE^۲ و داده‌های ERA-Interim^۳ (با تفکیک‌پذیری $2/5 \times 2/5$ درجه) و به‌صورت روزانه و ماهانه در یک دوره آماری (۱۹۸۰-۲۰۱۶) استفاده شده است. در کنار دسته‌بندی‌های مربوط به گردوغبارها، میزان دید افقی نیز گزارش می‌شود. گرچه مشخص شده است که این متغیر می‌تواند از رطوبت جو و ذرات معلق متأثر شود و از آنجا که ذرات معلق عامل تعیین‌کننده‌ای در طی یک طوفان گردوغبار هستند؛ بنابراین می‌توان غلظت گردوغبار را از راه روابط آماری با استفاده از میزان دید افقی از رابطه ۱ محاسبه کرد (شائو و همکاران، ۲۰۰۳):

$$c = \begin{cases} 3802.29D_V^{0.84} & D_V \leq 3.5 \text{ km} \\ \exp(-0.11D_V + 7.62) & D_V \geq 3.5 \text{ km} \end{cases} \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه، C: غلظت ذرات به میلی‌گرم بر متر مکعب و D_V : برحسب کیلومتر است. با توجه به رابطه پیش‌گفته در زمانی که میزان دید افقی کمتر یا برابر با $3/5$ کیلومتر باشد، بین میزان دید افقی و غلظت ذرات گردوغبار رابطه معکوسی وجود دارد؛ بنابراین از میزان دید افقی به‌عنوان معیاری برای شدت طوفان گردوغبار استفاده شد. در این مرحله بیش از ۴۰۰ مورد طوفان گردوغبار در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه مشخص شد. مجموع و میانگین فراوانی کدهای مربوط به گردوغبار (جدول ۱) برای کل ایستگاه‌های سینوپتیک (شکل ۱) محاسبه و نقشه‌های مجموع فراوانی در کل دوره آماری (۱۹۸۰-۲۰۱۶) رسم شد. برای هریک از موارد بررسی‌شده متغیرهای هواشناسی استخراج و تجزیه و تحلیل آماری شد. ارتباط و همبستگی بین میزان دید افقی با هریک از متغیرها با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون در سطح خطای ۰/۰۵ محاسبه شده است.

جدول ۱. کدهای مربوط به طوفان‌های گردوغبار و فرسایش بادی، سازمان هواشناسی جهانی شماره ۲۰۶

| شماره کد | مشخصات |
|----------|---|
| ۰۶ | گردوخاک معلق در هوا که در اثر طوفان شن و خاک نقاط خارج از ایستگاه آمده |
| ۰۷ | گردوخاک یا شنی که به‌وسیله باد در ایستگاه یا نزدیکی آن در ساعت دیدبانی بلند شده |
| ۰۹ | طوفان گردوخاک در ساعت دیدبانی در اطراف ایستگاه |
| ۳۰ | طوفان، ملایم یا متوسط گردوخاک یا شن - طی ساعت گذشته از شدت طوفان کاسته شده |
| ۳۱ | طوفان، ملایم یا متوسط گردوخاک یا شن - طی ساعت گذشته شدت طوفان تغییر نکرده |
| ۳۲ | طوفان، ملایم یا متوسط گردوخاک یا شن - طی ساعت گذشته بر شدت طوفان افزوده شده |
| ۳۳ | طوفان شدید، گردوخاک یا شن - طی ساعت گذشته از شدت طوفان کاسته شده |
| ۳۴ | طوفان شدید، گردوخاک یا شن - طی ساعت گذشته شدت طوفان تغییر نکرده |
| ۳۵ | طوفان شدید، گردوخاک یا شن - طی ساعت گذشته بر شدت طوفان افزوده شده |

1 World Meteorological Organization (WMO)

2- <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data>

3- <http://apps.ecmwf.int/datasets/data>

برای محاسبه انرژی ذخیره سطح زمین در زمان وقوع طوفان گردوغبار، از مدل تابشی - همرفتی یک‌بعدی^۱ استفاده شده است. از آنجاکه دمای سطح زمین حاصل ترازمندی گرمایی آن است و چگونگی گرم‌شدن زمین به‌طور معمول تابع خصوصیتی است که زمین یا سطح زیر آن دارند، ذرات گردوغبار با تغییر در میزان انرژی دریافتی سطح بر ترازمندی گرمایی آن اثر می‌گذارند. این مدل‌ها فرایندهای تابشی را به‌شیوه صریح مدل‌سازی و نیم‌رخ عمودی دما را محاسبه می‌کنند (رابطه ۲). بدین‌منظور از رابطه زیر برای محاسبه میزان انرژی ذخیره سطح زمین در روز وقوع طوفان و پیش از آن استفاده شده است (مک‌گوفی و هندرسون سلرز^۲، ۲۰۰۵):

$$R_g + F - \varepsilon \sigma T^4 - H_L - H_S = SE \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه، SE : انرژی ذخیره سطح؛ H_S : شار گرمای محسوس از سطح زمین بر حسب وات بر متر مربع؛ HL : شار گرمای نهان تبخیر از سطح زمین بر حسب وات بر مترمربع؛ R_g : تابش‌های خورشیدی جذب‌شده به زمین بر حسب وات بر مترمربع؛ F : شار تابش‌های بلندی است که به سطح زمین وارد می‌شود بر حسب وات بر مترمربع؛ ε : گسیلندگی سطح؛ σ : ثابت استفان بولتزمان $8 - 10 \times 10^{-8}$ و T : دمای سطح زمین بر حسب درجه کلوین هستند.

برای محاسبه شارهای گرمایی ایران نیز از رابطه حجمی استفاده شده است. فرمول‌های آیرودینامیکی حجمی از روش شباهت مونین - ابوخوف^۳ مشتق شده‌اند (رابطه ۳ و ۴). فرمول شار تلاطمی مربوط به مقادیر متوسط از متغیرهای هواشناسی سطحی مانند دمای سطح زمین یا سطح دریا، باد و دمای هوا و رطوبت است. روابطی که برای محاسبه شار گرمای محسوس و گرمای نهان استفاده شده است عبارت‌اند از (لیو^۴ و همکاران، ۱۹۷۹):

$$Q_{LH} = \rho C_e C_h V (q_s - q_a) \quad \text{رابطه ۳}$$

$$Q_{SH} = \rho C_p C_h V (T_a - \theta) \quad \text{رابطه ۴}$$

در روابط بالا، Q_{SH} : شار گرمای محسوس؛ Q_{LH} : شار گرمای نهان؛ C_p : ظرفیت گرمایی ویژه هوا $1004/67$ ژول بر کیلوگرم بر درجه سانتی‌گراد $(1 \text{ K}^{-1} \text{ kg}^{-1} \text{ J})$ ، ρ : چگالی هوای سطح $1/2928$ کیلوگرم بر مترمکعب (kg m^{-3}) ، Le : گرمای نهان تبخیر؛ V : سرعت باد سطحی در ارتفاع ۱۰ متری؛ q_a : رطوبت ویژه هوا نزدیک سطح؛ T_s : دمای سطح زمین و Ch و C_e : به ترتیب ضریب آیرودینامیکی گرمای محسوس و نهان است. در محاسبات تجربی نتایج اندازه‌گیری شار برای تعیین مقادیر این دو ضریب استفاده شده است (مانند پوند^۵ و همکاران، ۱۹۷۴؛ فری و اشمیت^۶، ۱۹۷۶؛ ازینسن و رینولدز^۷، ۱۹۸۱؛ مارت^۸، ۱۹۹۶؛ یانگ^۹ و همکاران، ۲۰۰۷) این ضرایب به‌طور معمول ثابت در نظر گرفته می‌شوند (لیو و همکاران، ۱۹۷۹). در این

1- Radiative-Convective Models (RCM)

2- McGuffie & Henderson Selers

3- Monin-Obukhov

4- Liu

5- Pond

6- Friehe & Schmidt

7- Esbensen & Reynolds

8- Mahrt

9- Yang

پژوهش براساس تجربه Dunhuang، مقدار Ch و Ce مقدار (۳-۱۰ × ۳/۰۲) برای مناطق خشک و نیمه‌خشک مناسب در نظر گرفته شده است (ژانگ^۱ و همکاران، ۲۰۰۱).

$$q_s = 0.98q_{sat}(T_s) \quad \text{رابطه ۵}$$

$$\theta_i = T_i \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R}{C_p}} \quad \text{رابطه ۶}$$

Θ: دمای پتانسیل؛ T_a: دمای هوا در ارتفاع ۲ متری؛ q_s: رطوبت ویژه هوای سطحی؛ q_{sat}: رطوبت اشباع؛ T_s: دمای پوستی^۲؛ T: دمای هوا به کلونین؛ P₀: فشار استاندارد؛ P: فشار بسته هوا وقتی به‌طور آدیاباتیکی سرد می‌شود؛ R: ثابت گازها؛ C_p: ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت (R/C_p = 0.286).

به‌منظور شناسایی چشمه‌های گردوغبار با تلفیق روش هم‌پوشانی شاخص‌ها^۳ و روش تحلیل سلسله‌مراتبی^۴ متغیرهای مناسب انتخاب و وزن مناسب به هر متغیر اختصاص داده شد. بدیهی است که اهمیت یا وزن هر معیار متفاوت خواهد بود و به همین دلیل، لازم است اولویت نسبی هر معیار را با توجه به سایر معیارها با مقایسه‌های زوجی^۵ با استفاده از مقیاس عددی با استفاده از روش ساتی (۲۰۱۲) در مدل تحلیل سلسله‌مراتبی به‌دست آورد. در این روش برای محاسبه وزن عوامل به‌منظور تهیه یک ماتریس بهینه، تمام متغیرها براساس اولویت میزان تأثیر در مکان‌یابی با یکدیگر مقایسه شده‌اند (یانگ^۶ و همکاران، ۲۰۱۰).

بر این اساس با هدف شناسایی چشمه‌های گردوغبار، متغیرها به دو دسته عوامل آب‌وهوایی و تابشی تقسیم شدند و متغیرهای دمای سطح زمین، فشار سطح، رطوبت نسبی، شار گرمای محسوس و نهان، سرعت باد، خروجی موج‌بلند^۷ و انرژی ذخیره سطح در سطح دوم تصمیم‌گیری در این مدل قرار گرفتند. با تلفیق دو روش هم‌پوشانی شاخص‌ها و تحلیل سلسله‌مراتبی روی نقشه‌های هر متغیر، نقشه اولیه مکان‌یابی تهیه شد. با تلفیق این دو روش، افزون بر وزن‌دهی به واحدها در هر لایه، به عوارض مختلف و کلاس‌های متفاوت موجود با توجه به میزان همبستگی، آستانه‌ها و شاخص‌های تعیین‌شده، وزن‌های مختلف داده شده و ترکیبات انعطاف‌پذیری از نقشه‌ها به‌دست آمد که دامنه‌ای از اعداد را دربر می‌گیرد. به‌منظور بررسی تغییرات پوشش گیاهی در مکان‌های شناسایی‌شده، نتایج حاصل از مکان‌یابی چشمه‌های گردوغبار با نقشه‌های شاخص تفاضل گیاهی نرمال‌شده بر پایه داده‌های ۲۵۰ متر سنجنده مودیس نیز مقایسه شده است.

نتایج

فراوانی وقوع گردوغبار در ایران

به‌طور کلی توزیع جغرافیایی طوفان‌های گردوغباری در کشور (با توجه به کدهای جدول ۱) بیانگر این مطلب است که از شمال به جنوب بر تعداد روزهای همراه با گردوغبار افزوده شده است (شکل ۲). این شرایط در نواحی شرقی نسبت به نواحی غربی شدیدتر است. از نظر میانگین فراوانی روزهای گردوغباری، ایستگاه رامسر با میانگین ۰/۳ روز کمترین و ایستگاه زابل با میانگین ۱۸۴ روز در سال بیشترین فراوانی را در طول دوره

1- Zhang

2- skin temperature

3- Index overlay (IO)

4- Analytic Hierarchy Process (AHP)

5 -Pair-wise comparison

6- Young

7- Outgoing Longwave Radiation (OLR)

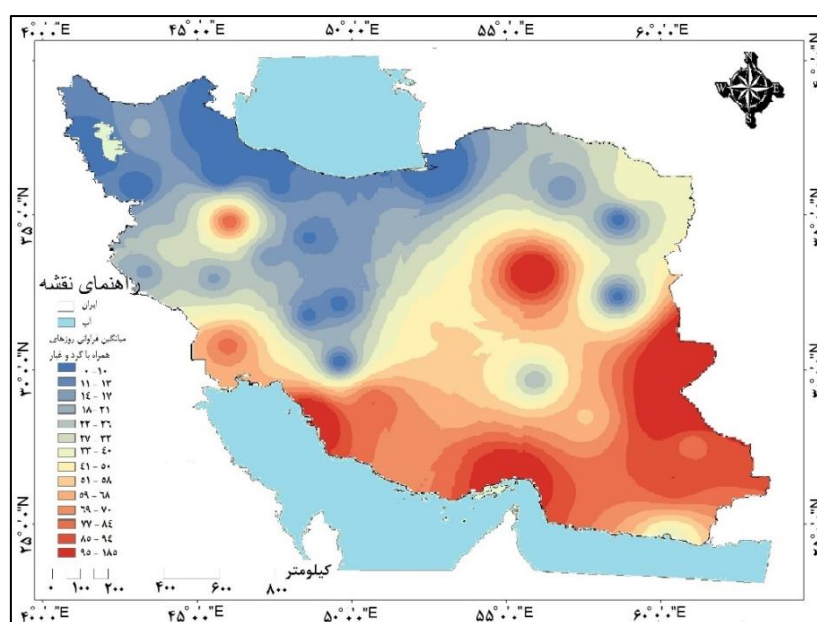
آماري نشان می‌دهند. در مناطق سواحل جنوبی دریای خزر، به دلیل بالابودن رطوبت هوا و خاک، امکان برخاستن ذرات خاک به حداقل ممکن می‌رسد. ایستگاه‌های رامسر با مجموع فراوانی ۶ روز و رشت با ۱۱ روز همراه با گردوغبار در کل دوره آماری، کمترین مقادیر را در کشور به خود اختصاص داده و هسته‌های کمینه گردوغبار را در نواحی شمالی تشکیل داده‌اند. با افزایش دما و کاهش رطوبت در شرق سواحل جنوبی دریای خزر، فراوانی روزهای همراه با گردوغبار در گرگان به ۴۶ روز طی دوره آماری می‌رسد.

با توجه به اینکه تقریباً تمام چشمه‌های اصلی گردوغبار امروزه در نواحی پست خشک که فعالیت آبرفتی در آن جریان دارد، مشاهده می‌شود (پروسپرو و همکاران، ۲۰۰۲)؛ بنابراین دشت‌های آبرفتی بیشترین فراوانی طوفان گردوغبار در خاورمیانه را دارند (سفر^۱، ۱۹۸۰). در نظر گرفتن الگوی کلی وقوع گردوغبار در کشور و گستردگی دشت‌های وسیع و کاهش میانگین سالانه بارش در نواحی مرکزی و جنوبی، بیشترین فراوانی وقوع این پدیده در نواحی جنوبی کشور مشاهده می‌شود، به گونه‌ای که بیش از ۵۰٪ طوفان‌های گردوغبار گزارش شده در طول دوره آماری در این نواحی روی داده است.

بیش از ۹٪ طوفان‌های گردوغبار در کشور در ایستگاه زابل روی داده است. افزون بر نواحی پیش گفته در شمال استان یزد نیز هسته بیشینه طوفان گردوغبار مشاهده می‌شود. در نواحی کوهستانی کشور مانند آذربایجان، به علت وجود پوشش گیاهی و جنس زمین و همچنین ورود توده‌های هوایی مختلف، مقدار روزهای همراه با پدیده گردوغبار در حد فاصل نواحی کمینه و بیشینه قرار دارد.

بررسی شرایط هواشناسی در زمان وقوع گردوغبار

شرایط آب‌وهوایی در زمان رخداد طوفان گردوغبار با توجه به کدهای جدول (۱) و متغیرهای سرعت باد و میزان دید افقی برای روزهای همراه با طوفان گردوغبار در طول دوره آماری بررسی شد. شدیدترین طوفان‌های گردوغبار در نواحی جنوب، جنوب غرب، جنوب شرق و بخش‌های مرکزی کشور (شکل ۲) رخ داده است. میانگین عناصر هواشناسی در روز وقوع گردوغبار و پیش از آن در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۲. میانگین فراوانی وقوع روزهای همراه با گردوغبار در ایران، دوره آماری (۱۹۸۰-۲۰۱۶)

جدول ۲. میانگین عناصر آب‌وهوایی در روز قبل و زمان وقوع گردوغبار، دوره آماری (۱۹۸۰-۲۰۱۶)

| متغیرهای هواشناسی | روز قبل از وقوع | روز وقوع طوفان |
|-------------------------------------|-----------------|----------------|
| سرعت باد (m/s) | ۴/۷ | ۱۵ |
| رطوبت نسبی (%) | ۳۴ | ۲۹/۰۷ |
| فشار هوا (hp) | ۸۸۰/۷ | ۹۱۶/۲ |
| دمای هوا (°C) | ۲۶ | ۲۴ |
| بیشینه دمای هوا (°C) | ۳۳ | ۳۱ |
| کمینه دمای هوا (°C) | ۱۶ | ۱۸ |
| دامنه تغییرات دمایی روزانه (°C) | ۱۷ | ۱۳ |
| دمای نقطه شبنم (°C) | ۲۵/۶ | ۲۳ |
| دمای پتانسیل (°C) | ۲۶ | ۲۵ |
| دمای سطح - Tg (°C) | ۱۷/۲ | ۱۶ |
| اختلاف دمای بین هوا و سطح زمین (°C) | ۳/۲ | ۲/۵ |

با افزایش غلظت گردوغبار و کاهش دید افقی در نمونه‌های بررسی شده، میانگین دمای هوا در روز وقوع گردوغبار در ۶۷٪ موارد نسبت به روز قبل از وقوع به‌طور میانگین ۲ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است (جدول ۲). در ۲۴٪ موارد بررسی شده، اختلاف دمای هوای روز پیش و روز وقوع گردوغبار بیش از ۴ درجه سانتی‌گراد است. عدم استقرار کامل سامانه‌های پرفشار تابستانه و یکنواخت‌نبودن گرمایش سطح زمین در فصل بهار، موجب شده که بیشترین کاهش دما در روز وقوع گردوغبار در اواخر این فصل مشاهده شود. ناهنجاری بیشتر در تغییرات سرعت باد و شار گرمای محسوس نسبت به فصل تابستان (ذوالفقاری و همکاران، ۱۳۹۵)، موجب بیشتربودن دامنه تغییرات دمایی فصل بهار نسبت به تابستان است. با این شرایط در دوره فصلی اوج طوفان‌های گردوغبار در بهار و تابستان متمرکز شده است (باغبان و همکاران، ۲۰۲۰).

با وجود هسته بیشینه طوفان در جنوب شرق کشور (شکل ۲)، در شدیدترین طوفان‌ها در این منطقه با میزان دید افقی کمتر از ۱۰۰ متر، سرعت باد به ۲۰ متر بر ثانیه نیز رسیده است (ایستگاه زابل ۱۱ ژوئن ۲۰۰۱). افزایش سرعت باد موجب افزایش آمیختگی تلاطمی شده (بونان^۱، ۲۰۰۲: ۱۴) و این آمیختگی، تضاد حرارتی بین شب و روز را کاهش می‌دهد (فوکن^۲، ۲۰۰۸: ۱۹). در چنین شرایطی کاهش دامنه تغییرات دمایی در بیش از ۷۰٪ موارد، به‌طور میانگین به میزان ۴ درجه سانتی‌گراد در روز وقوع طوفان رسیده است (جدول ۲).

اختلاف دمای هوا و دمای نقطه شبنم، نبود رطوبت کافی در جو را نشان می‌دهد (لارنس^۳، ۲۰۰۵) و کاهش رطوبت نسبی در روز قبل نشان‌دهنده نبود رطوبت کافی برای اشباع هوا و بارش است. رطوبت نسبی در زمان وقوع گردوغبار نسبت به روز قبل، از ۲٪ تا ۱۰٪ کاهش یافته است (جدول ۲). در ۷۰٪ موارد بررسی شده رطوبت نسبی در زمان وقوع گردوغبار بیش از ۵٪ کاهش و در ۲۴٪ موارد بیش از ۲٪ کاهش یافته است. بیشترین میزان کاهش رطوبت نسبی در ایستگاه‌های اهواز و بوشهر در طوفان گردوغبار جولای ۲۰۰۷ مشاهده می‌شود.

بررسی شارهای حرارتی و دیگر ویژگی‌های تابشی سطح

میانگین ویژگی‌های تابشی سطح در زمان وقوع گردوغبار و روز قبل آن شامل شارهای گرمایی و ویژگی‌های

1- Bonan
2- Foken
3- Lawrence

تابشی سطح زمین، جهت تعیین متغیرهای مناسب، با استفاده از رابطه حجمی و تابشی - همرفتی یک بعدی برای تمام نمونه‌ها، (برحسب وات بر مترمربع) برای دوره آماری (۱۹۸۰-۲۰۱۶) محاسبه و مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفته است (جدول ۳).

بررسی شرایط آب و هوایی پیش از شروع طوفان گردوغبار نشان می‌دهد که توازن انرژی سطح زمین در روز قبل از وقوع گردوغبار با انتقال بیشتر گرمای محسوس به اتمسفر برقرار شده است (جدول ۲). شروع یک طوفان گردوغبار که با کاهش دمای هوا و رطوبت جو همراه است (جدول ۲)، به‌ویژه در نواحی فاقد پوشش گیاهی موجب کاهش شار گرمای محسوس و نهان در بیش از ۷۸٪ موارد شده است (جدول ۳)؛ به طوری که شار گرمای محسوس در روز وقوع گردوغبار به‌طور میانگین به ۱۱۸ وات بر متر مربع رسیده است.

وجود ذرات گردوغبار در جو به‌میزان زیادی امواج کوتاه خورشیدی را پخش کرده (از ۳۶۰ در روز قبل از طوفان به ۲۹۲ وات بر مترمربع رسیده است) (جدول ۳) و موجب کاهش دمای هوا و دمای سطح زمین شده (جدول ۲) و بر روی شارهای گرمایی نیز در هنگام وقوع طوفان اثر داشته است. با توجه به غلظت گردوغبارها و اندازه ذرات آن، مقدار تابش‌های موج‌بلند نیز متفاوت خواهد بود. پیش از وقوع گردوغبار، به‌علت کاهش رطوبت جو، مقدار تابش‌های موج‌بلند کاهش یافته است. در بیش از ۸۰٪ نمونه‌های بررسی شده در روز وقوع طوفان مقدار آن‌ها افزایش یافته و به‌طور میانگین به ۳۱۱ وات بر متر مربع رسیده است.

افزایش شار گرمای محسوس و کاهش شار گرمای نهان در روز پیش از وقوع طوفان، ذخیره انرژی سطح را افزایش داده است. این افزایش انرژی که با توجه به اندازه ذرات و غلظت گردوغبارها متفاوت است، شرایط مناسبی را در سطح زمین برای ایجاد همرفت، افزایش سرعت باد و بلندکردن گردوغبارها از سطح زمین فراهم آورده است؛ به طوری که انرژی ذخیره سطح زمین پیش از وقوع طوفان به‌طور میانگین ۲۱۵ وات بر متر مربع است و در طوفان‌های شدید با میزان دید افقی کمتر از ۱۰۰ متر به ۲۳۵ وات بر متر مربع نیز رسیده است (ایستگاه اهواز ۶ جولای ۲۰۰۵).

برای بررسی بهتر تأثیر شارهای گرمایی و تابش‌های خورشیدی بر انرژی ذخیره سطح، از تابش خروجی موج‌بلند استفاده شد. با افزایش میانگین دمای هوا و زیادبودن دامنه تغییرات دمایی (جدول ۲)، گرمایش سطح به‌شکل تابش‌های موج‌بلند از سطح زمین ساطع شده و میزان آن با کمی تفاوت در روز وقوع طوفان کاهش یافته و به‌طور میانگین به ۲۷۶ وات بر متر مربع رسیده است (جدول ۳). اختلاف تابش خروجی موج‌بلند و تابش موج‌بلند ورودی، به‌طور میانگین پیش از وقوع طوفان به ۲۸ وات بر متر مربع و در روز وقوع به ۳۵ وات بر متر مربع رسیده است. چگونگی توزیع این انرژی در اتمسفر، فراهم‌بودن شرایط برای ایجاد حرکات همرفتی در جو و وقوع طوفان گردوغبار را نشان می‌دهد.

جدول ۳. میانگین ویژگی‌های تابشی سطح در روز قبل و زمان وقوع گردوغبار طی دوره آماری (۱۹۸۰-۲۰۱۶)

| متغیرهای تابشی | روز پیش از وقوع | روز وقوع طوفان |
|---------------------------------------|-----------------|----------------|
| شار گرمای محسوس (w/m^2) | ۱۲۴ | ۱۱۸ |
| شار گرمای نهان (w/m^2) | ۱۶/۵ | ۱۹ |
| تابش موج‌کوتاه ورودی (w/m^2) | ۳۶۰ | ۲۹۲/۶ |
| تابش موج‌بلند دریافتی (w/m^2) | ۳۰۸ | ۳۱۱/۸ |
| تابش خروجی موج‌بلند (OLR) (w/m^2) | ۲۸۰ | ۲۷۶/۲ |
| انرژی ذخیره سطح (w/m^2) | ۲۱۵ | ۲۰۴ |

ارتباط عناصر هواشناسی با تابش و دید افقی

پس از بررسی عناصر هواشناسی در زمان طوفان‌های گردوغبار، به‌منظور تعیین متغیرهای مناسب برای شناسایی منشأ این طوفان‌ها و تحلیل فضایی آن‌ها، شناخت روابط موجود بین متغیرها لازم است؛ بدین ترتیب همبستگی تمام متغیرهای بررسی شده با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون در سطح خطای ۰/۰۵ محاسبه شده است (جدول ۴ و ۵).

بررسی میزان معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ نشان می‌دهد که با احتمال ۰/۹۵، تمام متغیرهای آب‌وهوایی به‌جز دمای نقطه شبنم و رطوبت نسبی، ارتباط معنی‌داری با دید افقی دارند. بالاترین ضریب همبستگی را در ارتباط سرعت باد و میانگین دمای هوا با میزان دید افقی به ترتیب به‌میزان ۰/۷ و ۰/۵ می‌توان مشاهده کرد. ارتباط مستقیم دمای هوا و دید افقی نشان می‌دهد که با افزایش غلظت گردوغبارها و کاهش دید افقی، در ۶۷٪ نمونه‌های بررسی شده، میانگین دمای هوا کاهش یافته است (جدول ۲). با افزایش سرعت باد، افزایش آمیختگی دمایی و کاهش دامنه تغییرات دمایی، دمای هوا در لایه‌های بالای سطح تعدیل شده و تغییرات آن کم است (جدول ۲)؛ بدین سبب اختلاف دمای هوا و سطح زمین، کمترین ضریب همبستگی را به میزان ۰/۰۹۳ نشان می‌دهد (جدول ۴). بررسی ارتباط و همبستگی متغیرها نشان می‌دهد که تأثیر عناصر آب‌وهوایی به‌ویژه متغیرهای دمایی در رخداد گردوغبار در نواحی بدون پوشش گیاهی یا پوشش اندک که در آن‌ها هسته‌های بیشینه فراوانی گردوغبار (شکل ۲) قرار دارند، بارزتر است (جدول ۴).

بیشترین همبستگی، بین تابش خروجی موج‌بلند و میزان دید افقی (به‌میزان ۰/۴۳) مشاهده می‌شود (جدول ۵). کاهش تابش موج‌بلند خروجی در ۷۳٪ موارد با کاهش دید افقی و غلظت بیشتر طوفان همراه است. سایر متغیرهای تابشی به‌جز شار گرمای نهان و تابش‌های طول موج‌بلند در روزهای وقوع طوفان، رابطه مستقیمی با دید افقی ندارند. به‌طوری که افزایش غلظت ذرات گردوغبار موجب پخش بیشتر تابش‌های موج کوتاه خورشیدی می‌شود (جدول ۳)

جدول ۴. همبستگی عناصر آب‌وهوایی و دید افقی در روز وقوع گردوغبار، دوره آماری (۱۹۸۰-۲۰۱۶)

| میزان همبستگی | متغیرهای هواشناسی |
|---------------|-------------------------------------|
| -۰/۶۹۱* | سرعت باد (m/s) |
| ۰/۲۲۲ | رطوبت نسبی (%) |
| -۰/۳۷۱** | فشار هوا (hp) |
| ۰/۴۹۴** | دمای هوا (°C) |
| ۰/۴۱۴* | دامنه تغییرات دمایی روزانه (°C) |
| ۰/۲۲۹ | دمای نقطه شبنم (°C) |
| ۰/۳۲۲** | دمای سطح - Tg (°C) |
| ۰/۰۹۳* | اختلاف دمای بین هوا و سطح زمین (°C) |

** معنی‌داری در سطح ۰/۰۱؛ * معنی‌داری در سطح ۰/۰۵

جدول ۵. همبستگی ویژگی‌های تابشی سطح و دید افقی در روز وقوع طوفان گردوغبار، دوره آماری (۱۹۸۰-۲۰۱۶)

| میزان همبستگی | متغیرهای تابشی |
|---------------|---------------------------------------|
| ۰/۲۰۵* | شار گرمای محسوس (w/m^2) |
| -۰/۱۷۴ | شار گرمای نهان (w/m^2) |
| ۰/۰۱۸ | تابش موج کوتاه ورودی (w/m^2) |
| -۰/۰۹۱ | تابش موج بلند دریافتی (w/m^2) |
| ۰/۴۳۱* | تابش خروجی موج‌بلند (OLR) (w/m^2) |
| ۰/۱۴۰* | انرژی ذخیره سطح (w/m^2) |

** معنی‌داری در سطح ۰/۰۱؛ * معنی‌داری در سطح ۰/۰۵

چنین شرایطی روی دمای هوا نیز مؤثر است. بررسی میزان معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ نشان می‌دهد که با احتمال ۰/۹۵، تابش خروجی موج‌بلند، انرژی ذخیره سطح و شار گرمای محسوس ارتباط معنی‌داری با دید افقی در زمان وقوع طوفان دارند (جدول ۵).

تحلیل فضایی چشمه‌های گردوغبار

پس از بررسی، شناسایی و تحلیل آماری شرایط آب‌وهوایی، ویژگی‌های تابشی سطح و شارهای حرارتی طوفان‌های گردوغبار (جدول ۲ و ۳) و به‌منظور تعیین متغیرهای لازم برای مکان‌یابی چشمه‌های گردوغبار در ایران، نوع رابطه و میزان همبستگی همه متغیرها محاسبه و بررسی شد؛ بدین ترتیب هشت متغیر (جدول ۶) با بیشترین وزن از میان تمام متغیرهای بررسی‌شده برای تعیین چشمه‌های گردوغبار انتخاب شدند. متغیرهای انتخاب‌شده با احتمال ۰/۹۵ ارتباط معنی‌داری با میزان دید افقی داشته و از ضریب همبستگی بالایی برخوردار هستند (جدول ۴ و ۵). با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی، هریک از متغیرها براساس اولویت میزان تأثیر در طوفان گردوغبار با یکدیگر مقایسه و به‌منظور تعیین یک ماتریس بهینه، به هر متغیر وزنی اختصاص داده شد (جدول ۶).

الف: شناسایی و رتبه‌بندی متغیرها

بررسی وزن‌های انتخابی در روش تحلیل سلسله‌مراتبی نشان می‌دهد که از میان متغیرهای آب‌وهوایی، براساس اولویت، دمای سطح زمین تأثیر بیشتری در آغاز یک طوفان گردوغبار دارد. در واقع دمای سطح زمین نماینده عناصر دمایی است که همگی از نظر میزان ارتباط با دید افقی همبستگی بالایی را نشان می‌دهند (جدول ۴). با توجه به اینکه در نمونه‌های بررسی‌شده در شرایط بهینه، سرعت باد بیش از ۲۰ تا ۲۵ متر بر ثانیه نیز ثبت شده است، این متغیر در روش تحلیل سلسله‌مراتبی، با وزن ۰/۲۶ در اولویت بعدی قرار دارد. در بین متغیرهای آب‌وهوایی در مراحل بعد رطوبت نسبی و فشار هوا قرار دارند که به ترتیب اولویت، به میزان ۰/۲ و ۰/۱ در روش تحلیل سلسله‌مراتبی وزن‌دهی شده‌اند.

از میان متغیرهای تابشی براساس اولویت تأثیر در طوفان گردوغبار، انرژی ذخیره سطح، وزن بیشتری را به خود اختصاص داده است. تغییرات شدید انرژی ذخیره سطح زمین، پیش از وقوع گردوغبار و در هنگام رخداد آن (جدول ۳) و ارتباط آن با دید افقی (با احتمال ۰/۹۵) نشان می‌دهد که این متغیر، شرایط سطح زمین را در هنگام وقوع طوفان به خوبی نشان داده و در تحلیل فضایی چشمه‌های گردوغبار بسیار مؤثر است. در مین عوامل تابشی در مرحله دوم، تابش خروجی موج‌بلند وزن بیشتری دارد. این متغیر ارتباط و همبستگی بالایی با دید افقی دارد (جدول ۵).

انتخاب این متغیر به دلیل تأثیری است که غلظت ذرات گردوغبار بر پخش تابش‌های خورشیدی دارد. در ماتریس مدل تحلیل سلسله‌مراتبی، شار گرمای محسوس و نهان وزن‌های کمتری دارند. هردو این متغیرها با احتمال ۰/۹۵ ارتباط معنی‌داری با میزان دید افقی نشان داده‌اند (جدول ۵).

جدول ۶. وزن هریک از متغیرهای آب‌وهوایی و تابشی با استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی

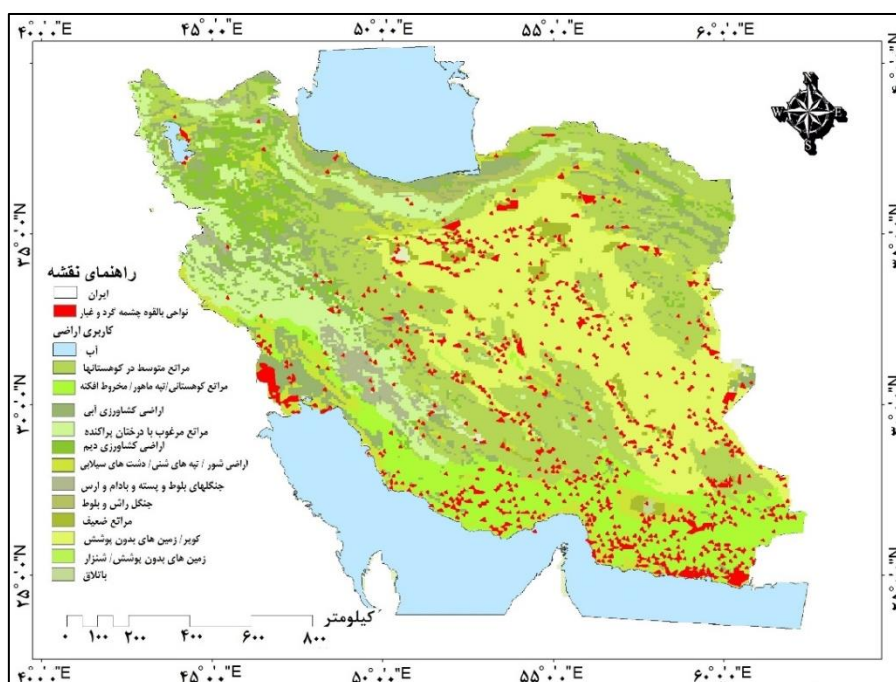
| وزن AHP | متغیرهای هواشناسی | وزن AHP | متغیرهای تابشی |
|---------|---------------------------------|---------|---------------------------------------|
| ۰/۲۶۱ | سرعت باد (m/s) | ۰/۱۸۶ | شار گرمای محسوس (w/m^2) |
| ۰/۱۹۷ | رطوبت نسبی (%) | ۰/۰۷۸ | شار گرمای نهان (w/m^2) |
| ۰/۱۲۴ | فشار هوا (hp) | ۰/۲۴۰ | تابش خروجی موج‌بلند (OLR) (w/m^2) |
| ۰/۴۱۸ | دمای سطح - Tg ($^{\circ}C$) | ۰/۴۹۶ | انرژی ذخیره سطح (w/m^2) |

مبادله این شارهای حرارتی بین سطح زمین و اتمسفر که به‌علت اختلاط آمیخته هوا در محل چشمه گردوغبار و جابه‌جایی گرما و رطوبت روی می‌دهد، تغییرات محسوسی در زمان رخداد این مخاطره (جدول ۳) نشان می‌دهد و بدین‌جهت این متغیرها برای شناسایی چشمه‌های گردوغبار مناسب هستند. نواحی بیشینه طوفان گردوغبار (شکل ۲)، در جنوب شرق، نواحی مرکزی و جنوبی کشور که به‌طور کلی در نواحی بدون پوشش گیاهی یا پوشش اندک قرار دارند و با توجه به اینکه این پدیده نتیجه آشکار فعالیت باد در نواحی خشک است (گودی، ۲۰۰۸: ۱۰۴)، برای بررسی دقیق‌تر یا توان‌سنجی چشمه‌های گردوغبار در ایران، تعیین کاربری اراضی و بررسی نواحی از نظر نوع پوشش گیاهی و نوع خاک لازم است. بدین‌منظور از نقشه کاربری اراضی و جنس خاک نیز استفاده شده است.

ب: تحلیل نقشه‌های مکان‌یابی

با توجه به وزن هریک از متغیرهای آب‌وهوایی و تابشی (جدول ۶) و رتبه‌بندی آن‌ها براساس وزن متغیرها در مدل تحلیل سلسله‌مراتبی، تحلیل آماری (میانگین و مقادیر بیشینه و کمینه) و همچنین نقشه‌های چندکلاسه (مدل هم‌پوشانی شاخص‌ها)، لایه‌های هر متغیر تهیه و با نقشه‌های کاربری اراضی تلفیق شد (شکل ۳) که نشان‌دهنده مناطق با پتانسیل مناسب (کم، متوسط و زیاد) برای تبدیل شدن به چشمه طوفان گردوغبار از نظر شرایط آب‌وهوایی، تابش سطح، پوشش گیاهی و پوشش خاک است. نقاط انتخابی براساس احتمال تبدیل شدن به چشمه طوفان گردوغباری، در سه دسته با مطلوبیت متفاوت دسته‌بندی و میزان درصد پوشش نسبت به مساحت کشور برای هریک از رده‌ها محاسبه شد (جدول ۷).

با توجه به پهنه‌های وسیع نواحی بیابانی در ایران و شایع بودن طوفان‌های گردوغبار در نیمه شرقی و مرکزی، غرب و جنوب غرب و پهنه ساحلی خلیج فارس (میری، ۲۰۰۹) (شکل ۲)، چشمه‌های گردوغبار به‌طور عمده در نواحی پیش‌گفته مشاهده می‌شوند. به‌طور کلی نواحی شناسایی‌شده به‌عنوان چشمه گردوغبار ۸٪ از مساحت کشور را شامل می‌شوند (شکل ۳).



شکل ۳. نقشه مقایسه نوع کاربری اراضی نواحی بالقوه چشمه‌های گردوغبار (شدید - متوسط و کم، نواحی رنگی) در ایران

جدول ۷. طبقه‌بندی نواحی حاصل از مکان‌یابی از نظر پتانسیل تبدیل به چشمه‌های گردوغبار

| میزان کیفیت | شاخص هم‌پوشانی شاخص‌ها | درصد مساحت چشمه‌های گردوغبار |
|-------------|------------------------|------------------------------|
| شدید | ۱۹-۱۵ | ۵۱ |
| متوسط | ۱۵-۱۰ | ۴۱ |
| کم | کمتر از ۱۰ | ۸ |

نواحی مستعد با پتانسیل بالا در جنوب سیستان و بلوچستان، هرمزگان، جنوب فارس، شرق خراسان جنوبی، شرق یزد، کرمانشاه، ایلام و خوزستان قرار دارد که ۵۰٪ مناطق مستعد طوفان گردوغبار را به خود اختصاص داده است. با توجه به شاخص‌های مدل ارزیابی پتانسیل بیابان‌زایی نواحی پیش‌گفته از لحاظ سرعت باد و افت سطح آب‌های زیرزمینی پتانسیل بالایی در بیابان‌زایی دارند (حقگو و همکاران، ۱۳۹۶). ۴۱٪ نواحی حاصل از مکان‌یابی با پتانسیل متوسط شامل مرکز کرمان، جنوب غرب خراسان رضوی، غرب سمنان اصفهان و فارس است. ۸٪ نواحی نیز احتمال بسیار کمتری برای تبدیل شدن به چشمه گردوغبار دارند؛ اما در صورت فراهم‌بودن شرایط، پتانسیل این نواحی افزایش خواهد یافت. این نواحی که در منطقه سه قرار می‌گیرند، شامل استان‌های چهارمحال و بختیاری، شرق لرستان، شمال شرق گلستان و در اطراف دریاچه ارومیه است (شکل ۳ و جدول ۷).

در صورتی که هر یک از متغیرهای مؤثر در توان‌سنجی چشمه‌های گردوغبار، اعم از عوامل آب‌وهوایی، تابشی و پوشش گیاهی و خاک در نواحی‌ای که پتانسیل متوسط یا کمی دارند تغییر کند، پتانسیل این نواحی نیز برای تبدیل به چشمه گردوغبار افزایش خواهد یافت.

ج: بررسی نواحی شناسایی‌شده از نظر پوشش گیاهی و خاک

وقوع خشک‌سالی‌های متعدّد و از بین رفتن یا کاهش پوشش گیاهی موجب از بین رفتن چسبندگی ذرات خاک شده و با کاهش تبخیر و تعرق (جدول ۲ و ۳) موجب کاهش شار گرمای نهان در زمان وقوع طوفان، به‌ویژه در نواحی بیشینه فراوانی وقوع گردوغبار شده است؛ بنابراین نواحی شناسایی‌شده از نظر نوع پوشش گیاهی و خاک بررسی شده‌اند؛ از این جهت جنگل‌های انبوه، مراتع متراکم و جنگل‌کاری‌های مصنوعی نواحی مستعدی برای وقوع طوفان گردوغبار نیستند (شکل ۳).

زمین‌های بدون پوشش و لخت، زمین‌های آیش، مراتع بسیار تنک، تپه‌های ماسه‌ای، کویرها، مسیل‌ها، زمین‌های لخت، شوره‌زارها، به‌همراه فلات‌ها و دشت‌ها، مناطق مستعدتری برای شکل‌گیری چشمه‌های گردوغبار هستند. چنین شرایطی را می‌توان در نواحی کویری و خشک مرکزی کشور مشاهده کرد (شکل ۳). مقایسه نواحی با پتانسیل بالا (نواحی قرمز رنگ)، با نقشه کاربری اراضی (شکل ۳) نشان می‌دهد که نواحی یادشده عاری از پوشش گیاهی بوده یا شامل مراتع بسیار ضعیف، زمین‌های کشاورزی آیش و رهاشده هستند که به دلیل داشتن خاک‌های سست و منفصل، برای منشأ یک طوفان گردوغبار، شرایط مناسبی دارند.

د: بررسی تغییرات شاخص گیاهی تفاضل نرمال شده

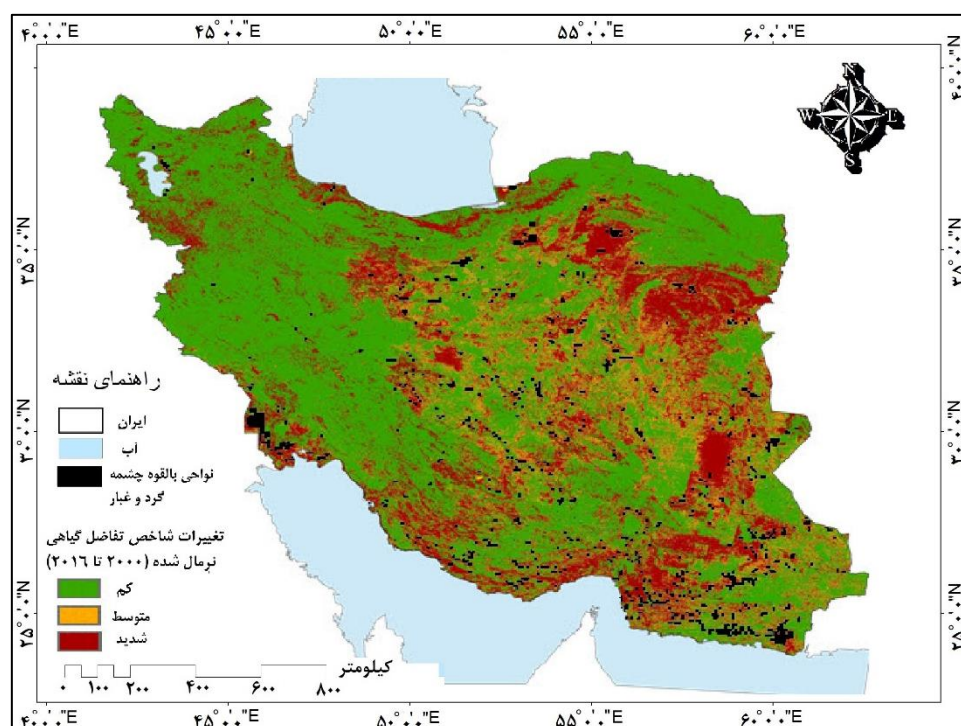
با توجه به اینکه چشمه‌های شناسایی‌شده که پتانسیل بالایی دارند، در نواحی عاری از پوشش گیاهی با خاک قابل فرسایش قرار گرفته‌اند؛ به‌منظور بررسی دقیق‌تر، از نقشه‌های شاخص گیاهی تفاضل نرمال شده^۱ استفاده شده است؛ زیرا در غیاب اندازه‌گیری‌های مربوط به بیوماس، تصاویر مربوط به شاخص‌های گیاهی و نقشه‌های حاصل از آن‌ها برای بررسی میزان نسبی حضور گیاهان و وضعیت آن‌ها در هر منطقه کاربرد وسیعی دارد.

۱- این ترکیبات در طی برنامه (GLAM) به‌وسیله بخش جغرافیای دانشگاه مرینلند تهیه شده است.

مقایسه تغییرات شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ در اواخر می تا اواسط ژوئن نشان می‌دهد که شرایط آب‌وهوایی منجر به تغییرات شدیدی در میزان نسبی پوشش گیاهی در بخش‌های وسیعی از کشور شده است (جدول ۸).
 ۶۱٪ چشمه‌های گردوغبار شدیدترین تغییرات شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده را در نواحی جنوبی، جنوب غرب، جنوب شرق کشور و سواحل جنوبی دریای خزر، در شمال غرب در اطراف دریاچه ارومیه و بخش‌هایی از نواحی مرکزی و شرقی نشان داده‌اند (شکل ۴ و جدول ۸).

بحث

پس از بررسی فراوانی طوفان‌های گردوغبار، شرایط آب‌وهوایی، ویژگی‌های تابشی سطح و شارهای حرارتی (جدول ۲ و ۳) شناسایی و تجزیه و تحلیل آماری شد. به‌منظور تعیین متغیرهای لازم برای مکان‌یابی چشمه‌های گردوغبار در ایران، نوع رابطه و میزان همبستگی همه متغیرها محاسبه و بررسی شد. بدین ترتیب با استفاده از هشت متغیر (جدول ۶) و با تلفیق روش تحلیل سلسله‌مراتبی و مدل هم‌پوشانی شاخص‌ها، نواحی بالقوه منشأ طوفان گردوغبار در ایران شناسایی شد. از بین متغیرهای تابشی براساس اولویت تأثیر در طوفان گردوغبار، انرژی ذخیره سطح که با مدل تابشی - همرفتی محاسبه شده، وزن بیشتری را به خود اختصاص داده است (جدول ۳).



شکل ۴. نقشه مقایسه تغییرات شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده در نواحی بالقوه چشمه گردوغبار (نقاط سیاه‌رنگ) در ایران (۲۰۱۶-۲۰۰۰)

جدول ۸. مقایسه درصد نواحی شناسایی شده با تغییرات شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده در ایران، (۲۰۱۶-۲۰۰۰)

| تغییرات شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده | مساحت چشمه‌های گردوغبار (درصد) |
|------------------------------------|--------------------------------|
| شدید | ۶۱ |
| متوسط | ۳۰ |
| کم | ۹ |

نتایج نشان می‌دهد با توجه به اینکه این متغیر، شرایط تابشی و شارهای حرارتی سطح زمین را در هنگام وقوع طوفان به خوبی نشان می‌دهد، در تحلیل فضایی چشمه‌های گردوغبار بسیار مؤثر است. انتشار ذرات گردوغبار به عنوان یک آبروسل، به طور مشخص از راه جذب و پخش تابش به اتمسفر و جذب و انتشار مجدد تابش‌های خروجی موج‌بلند و تعدیل ویژگی‌های اپتیکی ابرها، سطوح یخ و برف، توازن انرژی سیستم زمین (شائو و همکاران، ۲۰۱۱) را برهم می‌زند. در بین عوامل تابشی در مرحله دوم، تابش خروجی موج‌بلند وزن بیشتری دارد. این متغیر ارتباط و همبستگی بالایی با دید افقی دارد (جدول ۵). انتخاب این متغیر به دلیل تأثیری است که غلظت ذرات گردوغبار بر پخش تابش‌های خورشیدی دارد.

با مقایسه نتایج حاصل از مکان‌یابی (شکل ۳) با نقشه فراوانی وقوع گردوغبار در طی دوره آماری (شکل ۲)، می‌توان بیشترین پراکندگی چشمه‌ها را در نواحی بیشینه وقوع گردوغبار مشاهده کرد. به طور کلی چشمه‌های گردوغبار در شرق، جنوب شرق، مرکز، جنوب و جنوب غرب کشور فراوانی بیشتری دارند. چشمه‌های تعیین شده در استان‌های سیستان و بلوچستان، هرمزگان، سمنان، کرمان، یزد، اصفهان، جنوب و غرب خوزستان فراوانی بیشتری دارند و در استان مرکزی، استان‌های خراسان (شمالی، جنوبی و رضوی)، استان‌های غرب کشور (کرمانشاه، لرستان و ایلام) و شمال استان گلستان نیز می‌توان پراکندگی کمتر چشمه‌های گردوغبار را مشاهده کرد. در اطراف دریاچه ارومیه (استان‌های آذربایجان شرقی و غربی) نیز نواحی مستعد شکل‌گیری طوفان گردوغباری شناسایی شده‌اند که می‌تواند ناشی از روند خشک‌شدگی دریاچه ارومیه در سال‌های اخیر باشد (روشن^۱ و همکاران، ۲۰۱۶).

بررسی نواحی شناسایی شده از نظر نوع پوشش گیاهی و خاک نشان می‌دهد که نواحی شناسایی شده یا پهنه‌های عاری از هر نوع پوشش گیاهی هستند یا نواحی‌ای که در طی سالیان متمادی بر اثر شرایط آب‌وهوایی و وقوع خشک‌سالی‌های متعدد یا عدم مدیریت صحیح منابع آب پوشش گیاهی خود را از دست داده‌اند. بیشترین نواحی بالقوه منشأ گردوغبار در نواحی پیش‌گفته شناسایی شده‌اند. بررسی شکل ۳ نشان می‌دهد که مراتع بسیار ضعیف، زمین‌های کشاورزی آیش و رها شده که به طور عمده بر روی کویرها، تپه‌های ماسه‌ای، شوره‌زارها و مسیل‌ها قرار گرفته‌اند، به علت داشتن خاک‌های سست و منفصل، در زمان بالابودن دما و خشک‌بودن هوا مکان مناسبی برای برخاستن خاک و شروع یک طوفان گردوغبار هستند، چنین نواحی‌ای دارای پتانسیل بالایی برای منشأ گردوغبار هستند؛ به عنوان نمونه می‌توان به نواحی زیر اشاره کرد: در اطراف دریاچه هامون در استان سیستان و بلوچستان که دارای زمین‌های باتلاقی خشک‌شده در اثر خشک‌سالی‌های مکرر هستند (میر^۲ و همکاران، ۲۰۰۶؛ زارعی و همکاران، ۱۳۹۶؛ ذوالفقاری^۳ و همکاران، ۲۰۱۶ ب)، تپه‌ماهورها و شن‌زارهای منتهی به دریا در سواحل خلیج فارس و دریای عمان که در هر سال به طور میانگین با بیش از ۸۰ مورد طوفان گردوغبار روبه‌رو هستند (شکل ۲).

شمال شرق و شرق کشور به‌ویژه شرق خراسان جنوبی که فاقد پوشش گیاهی و شن‌زارهای حاوی صفحات نمکی با خاک آنتی‌سول هستند (روزی‌طلب^۴ و همکاران، ۲۰۱۸؛ مؤمنی، ۱۳۸۹). جنوب غرب ایران به‌ویژه استان خوزستان، به علت افزایش روند خشک‌شدن تالاب‌ها (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۸) و دارابودن زمین‌های کشاورزی رها شده بر اثر فراوانی دوره‌های خشک‌سالی (خوش‌اخلاق و همکاران، ۱۳۹۱)، یا شورش آب و

1- Roshan

2- Meijer

3- Zolfaghari

4- Roozitalab

وجود باتلاق‌های شور و تپه‌های شنی و خاک لیتوسل آهکی متشکل از مارن‌های نمکی و گچی (رحیمیان^۱ و همکاران، ۲۰۱۳)، چشمه‌های گردوغبار متعدّد با پتانسیل متفاوت ایجاد شده است که موجب وقوع طوفان‌های مکرّر در منطقه شده است (برای نمونه از ایستگاه اهواز بیش از ۲۲۸۰ روز همراه با گردوغبار در طی دوره آماری گزارش شده است). کاهش رطوبت در شرق سواحل دریای خزر در استان گلستان، ایجاد نوسانات رطوبتی زیاد، خشک‌سالی‌های مکرّر و نزدیکی با بیابان ترکمنستان این ناحیه را به یکی از نواحی مستعدّ چشمه گردوغبار تبدیل کرده است (اکبری^۲ و همکاران، ۲۰۱۶؛ جوانمرد^۳ و همکاران، ۲۰۱۷؛ فرخزاده و همکاران، ۱۳۹۶؛ رضایی و قربانی، ۱۳۹۷). خشک‌شدن دریاچه ارومیه در اثر تغییر کاربری اراضی و تغییر نوع کشت (ضرغامی^۴، ۲۰۱۱؛ آقاچوک^۵ و همکاران، ۲۰۱۵؛ روشن و همکاران، ۲۰۱۶؛ اشرف^۶ و همکاران، ۲۰۱۹؛ اسکندری دامنه و همکاران، ۱۳۹۹)، زمین‌های اطراف دریاچه را که به‌طور عمده دشت‌های شور، تپه‌های شنی و دشت‌های سیلابی هستند، به بستر مناسبی برای برخاستن گردوغبار همراه با ذرات نمک تبدیل کرده است. با توجه به ادامه روند کاهش سطح دریاچه، به‌نظر می‌رسد پتانسیل این نواحی برای تبدیل شدن به چشمه گردوغبار روزبه‌روز افزایش خواهد یافت.

به‌منظور بررسی بیشتر پوشش گیاهی نواحی شناسایی‌شده و تأثیر آن در پتانسیل نواحی از شاخص تفاضل گیاهی نرمال‌شده استفاده شد. بدین‌منظور پس از تلفیق نقشه‌های تغییر شاخص تفاضل گیاهی نرمال‌شده با نقشه‌های مکان‌یابی، چشمه‌های شناسایی‌شده در نواحی دارای تغییرات شدیدتر شاخص مشاهده شدند (شکل ۴). در این نواحی، تأثیر تغییرات نسبی پوشش گیاهی بر شرایط آب‌وهوایی و تابشی و ایجاد چشمه‌های گردوغبار بیشتر بوده است. تغییرات شدید شاخص تفاضل گیاهی نرمال‌شده در بررسی عمق اپتیکی در زمان وقوع گردوغبار در خاورمیانه نیز مشاهده شده است (ژینوکس^۷ و همکاران، ۲۰۱۲). در ۳۹٪ از چشمه‌های گردوغبار شناسایی‌شده تغییرات شاخص ملایم بوده، اما با توجه به روند افزایشی تغییرات پوشش گیاهی در سال‌های اخیر، احتمال تبدیل شدن این مناطق به چشمه گردوغبار افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

عناصر آب‌وهوایی برای طوفان‌های گردوغبار ۵۲ ایستگاه سینوپتیک برای دوره آماری ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۶ و روز پیش از آن استخراج، شرایط آب‌وهوایی، تابشی و شارهای گرمایی هر مورد محاسبه و تجزیه و تحلیل آماری شد. در نوشتار پیش رو ترکیبی از پارامترهای هواشناسی و تابش استفاده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که هنگام وقوع گردوغبار، به‌سبب تضعیف پخش تابش‌های طول موج کوتاه خورشیدی و کاهش تابش‌های خروجی موج‌بلند، دمای هوا و دمای سطح زمین و شارهای گرمایی کاهش می‌یابد (جدول ۳). شرایط پیش‌گفته بیانگر این است که ذخیره انرژی سطح زمین در روز پیش از وقوع گردوغبار به‌سبب افزایش دمای سطح و خشکی هوا زیاد بوده و انرژی آزادشده از این ناپایداری، بادهای شدیدی در منطقه ایجاد کرده است. گرادیان حرارتی ایجادشده، همگرایی، جریان‌های صعودی و بالاروی شدید هوا را به‌همراه دارد که با توجه به کاهش رطوبت نسبی و شار گرمای نهان موجب صعود ذرات گردوغبار از سطح زمین می‌شود و با

1- Rahimian

2- Akbari

3- Javanmard

4- Zarghami

5- AghaKouchak

6- Ashraf

7- Ginoux

تخلیه این انرژی، میزان ذخیره انرژی سطح در روز وقوع طوفان به میزان زیادی کاهش می‌یابد (جدول ۳)؛ بنابراین با توجه به تأثیر ذرات گردوغبار در تابش‌های دریافتی، استفاده از این شاخص به دلیل اینکه شرایط تابشی و شارهای حرارتی سطح زمین را نشان می‌دهد، می‌تواند شاخص مناسبی برای تعیین نواحی بالقوه منشأ گردوغبار و میزان پتانسیل آن‌ها باشد.

بررسی شناسایی منابع احتمالی گردوغبار در ایران، نشان می‌دهد که به‌طور عمده در غرب و جنوب غرب، پهنه ساحلی خلیج فارس، نیمه شرقی و مرکزی ایران (منطقه سیستان در اطراف دریاچه هامون و استان‌های شرق و شمال شرق کشور به‌ویژه در شرق خراسان جنوبی)، سواحل دریای عمان و جنوب شرق کشور، (شکل ۳)، چشمه‌های گردوغبار با پتانسیل بالا شناسایی شده‌اند. این نواحی همچنین تغییرات شدید شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده دارند (شکل ۴). در مناطق غربی، جنوب غربی، شمال شرقی ایران (استان گلستان) و مناطق دریاچه ارومیه می‌توان با پتانسیل کم و متوسط نواحی بالقوه‌ای برای تبدیل به منشأ گردوغبار مشاهده کرد که با تغییرات شدید پوشش گیاهی همراه است. شرایط یادشده ارتباط بین تشکیل منابع گردوغبار با مقدار نسبی پوشش گیاهی و عناصر هواشناسی و تابشی مؤثر بر آن را نشان می‌دهد.

نتایج نشان می‌دهد که افزون بر تغییر کاربری اراضی، تغییرات زیاد ناشی از تحولات آب‌وهوایی در سال‌های اخیر، روی تابش دریافتی زمین، شارهای حرارتی و تغییرات آن‌ها در فصل‌های مختلف سال اثر گذاشته و با تغییر در انرژی ورودی و خروجی زمین، مؤلفه‌های آب‌وهوایی را متأثر می‌سازد. در نتیجه وجود تغییرات زیاد در آب‌وهوای محلی و منطقه‌ای می‌تواند باعث تشدید مخاطرات آب‌وهوایی شود. بررسی و شناخت این تغییرات، راهکار مؤثری در پیش‌بینی و درنهایت پیشگیری از وقوع چنین مخاطرات و کاستن از خسارت‌های ناشی از آن است.

منابع

- اسکندری دامنه، هادی؛ غلامی، حمید؛ خسروی، حسن؛ مهدوی نجف‌آبادی، رسول؛ خورانی، اسدالله؛ لی، جیمی (۱۳۹۹). مدل‌سازی تغییرات مکانی و زمانی کاربری و پوشش اراضی حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از ترکیب سول خودکار و زنجیره مارکوف. *جغرافیا و پایداری محیط*، ۱۰ (۲)، ۵۷-۷۲.
- ایرانمنش، فاضل؛ عرب‌خدری، محمود؛ مجتبی، اکرم (۱۳۸۴). بررسی مناطق برداشت ذرات گردوغبار و ویژگی‌های انتشار آن‌ها در طوفان‌های منطقه سیستان با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای. *پژوهش و سازندگی*، ۱۸ (۲)، ۲۵-۳۳.
- جلالی، نادر؛ داوودی، محمدهادی؛ ایرانمنش، فاضل (۱۳۹۶). شناسایی منشأ و مناطق تحت تأثیر طوفان‌های گردوغبار در جنوب غرب ایران با استفاده از تصاویر مادیس. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۹ (۳)، ۳۱۸-۳۳۱.
- حقگو، کامران؛ رستمی، نورالدین؛ حشمتی، مسیب؛ فرامرزی، مرزبان (۱۳۹۶). بررسی وضعیت بیابان‌زایی با استفاده از مدل ایرانی ارزیابی پتانسیل بیابان‌زایی (مطالعه موردی: دشت گندمبان، قصرشیرین). *جغرافیا و پایداری محیط*، ۲۱ (۱)، ۲۱-۳۳.
- خوش‌اخلاق، فرامرزی؛ عزیزی، قاسم؛ رحیمی، مجتبی (۱۳۹۱). الگوهای هم‌دید خشک‌سالی و ترسالی زمستانه در جنوب غرب ایران. *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۱۲ (۲۵)، ۵۷-۷۷.
- ذوالفقاری، حسن؛ صحرایی، جلیل؛ معصوم‌پور سماکوش، جعفر؛ برزو، فرزانه (۱۳۹۵). بررسی شار گرمای محسوس و ارتباط آن با تغییرات دما و باد طی دوره گرم سال در ایران. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۸ (۳)، ۴۳۱-۴۴۵.
- رحیمی، لایلا؛ ملک‌محمدی، بهرام؛ یآوری، احمدرضا (۱۳۹۸). ارزیابی خدمات اکوسیستمی تالاب‌ها براساس طبقه‌بندی

- ساختارها و کارکردهای هیدرولوژیکی - اکولوژیکی (مطالعه موردی: تالاب شادگان). *جغرافیا و پایداری محیط*، ۹ (۱)، ۵۱-۷۲.
- رضایی قلعه، لاله؛ قربانی، خلیل (۱۳۹۷). تحلیل تطبیقی رفتار شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی SPI و SPEI در ایستگاه‌های منتخب استان گلستان. *هواشناسی کشاورزی*، ۶ (۱)، ۳۱-۴۰.
- رنجبر سعادت‌آبادی، عباس؛ عزیزی، قاسم (۱۳۹۱). مطالعه الگوهای هواشناسی و شناسایی چشمه‌های تولید گردوغبار و مسیر حرکت ذرات معلق برای طوفان جولای ۲۰۰۹. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۴ (۳)، ۷۳-۹۲.
- زارعی، عبدالرسول؛ مقیمی، محمد مهدی؛ بهرامی، مهدی (۱۳۹۶). پایش و پیش‌بینی خشک‌سالی ماهانه با استفاده از شاخص استاندارد بارش و زنجیره مارکوف (مطالعه موردی: جنوب شرق ایران). *جغرافیا و پایداری محیط*، ۷ (۲)، ۳۹-۵۱.
- فرخ‌زاده، بهنوش؛ منصور، شهرزاد؛ سپهری، عادل (۱۳۹۶). تعیین میزان همبستگی بین شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI و EVI با شاخص خشک‌سالی هواشناسی SPI مطالعه موردی: مراتع دشتی استان گلستان. *هواشناسی کشاورزی*، ۵ (۲)، ۵۶-۶۵.
- کریمی، خدیجه؛ طاهری شهرآیینی، حمید؛ حبیبی نوخندان، مجید؛ حافظی مقدس، ناصر (۱۳۹۰). شناسایی خاستگاه‌های تولید طوفان‌های گردوغباری در خاورمیانه با استفاده از سنجش‌ازدور. *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۲ (۷ و ۸)، ۵۷-۷۲.
- مفیدی، عباس؛ جعفری، سجاد (۱۳۹۰). بررسی نقش گردش عمومی جو بر روی خاورمیانه در وقوع طوفان‌های گردوغباری تابستانه در جنوب غرب ایران. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۲ (۵)، ۱۷-۴۵.
- مؤمنی، عزیز (۱۳۸۹). پراکنش جغرافیایی و سطح شوری منابع خاک ایران. *پژوهش‌های خاک (منابع آب‌وخاک)*، ۲۴ (۳)، ۲۰۳-۲۱۵.

References

- Abdi Vishkaee, F., Flamant C., Cuesta J., Oolman L., Flamant P. & Khalesifard H. R. (2012). Dust transport over Iraq and northwest Iran associated with winter Shamal: a case study. *Journal of Geophysical Research*, 117, D03201.
- AghaKouchak, A., Norouzi, H., Madani, K., Mirchi, A., Azarderakhsh, M., Nazemi, A., Nasrollahi, N., Farahmand, A., Mehran, A. & Hasanzadeh, E. (2015). Aral Sea syndrome desiccates Lake Urmia: Call for action. *Journal of Great Lakes Research*, 41 (1), 307-311.
- Akbari, M., Ownegh, M., Asgari, H., Sadoddin, A. & Khosravi, H. (2016). Drought Monitoring Based on the SPI and RDI Indices under Climate Change Scenarios (Case Study: Semi-Arid Areas of West Golestan Province). *Modares Ecopersia*, 4 (4), 1585-1602.
- Alizadeh-choobari, A., Ghafarian P. & Owlad, E. (2016). Temporal variations in the frequency and concentration of dust events over Iran based on surface observations. *International Journal of Climatology*, 36, 2050-2062.
- Ashraf, S., Aghakouchak, A., Nazemi, A., Mirchi, A., Sadegh, M., Moftakhari, H. R., Hassanzadeh, E., Miao, CH. Y., Madani, K., Mousavi Beygi, M., Anjileli, H., Arab, D. R., Norouzi, H., Mazdiyasi, O., Azaderakhsh, M., Alborzi, A., Tourian, M. J., Mehran, A., Farahmand, A. & Mallakpour, I. (2019). Compounding effects of human activities and climatic changes on surface water availability in Iran. *Climatic Change*, 152, 379-391. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2336-6>.
- Azizi, GH., Shamsipour, A. & Miri, M. (2012). Synoptic and remote sensing analysis of dust events in southwestern Iran. *Natural Hazards*, 65, 1625-1638.
- Baghbanan, P., Ghavidel, Y. & Farajzadeh, M. (2020). Temporal long-term variations in the occurrence of dust storm days in Iran. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 132, 885-898.
- Bonan, G. (2002). *Ecological climatology*. Cambridge university press, England.
- Cao, H., Liu, J., Wang, G., Yang, G. & Luo, L. (2015). Identification of sand and dust storm source areas in Iran. *Journal of Arid Land*, 7 (5), 567-578.

- COMET. (2003). *Forecasting dust storms*. University Corporation for Atmospheric Research. <http://meted.ucar.edu/mesoprime/dust/>.
- ERA Intrim data, *The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)*, <http://www.ecmwf.int>.
- Esbensen, S. K. & Reynolds, R. W. (1981). Estimating monthly averaged air- sea transfer of heat and momentum using the bulk aerodynamic method. *Journal of physical oceanography*, 11, 457-465.
- Eskandari Damaneh, H., Gholami, H., Khosravi, H., Mahdavi Najafabadi, R., Khoorani, A. & Li, J. (2020). Modeling Spatial and Temporal Changes in Land-Uses and Land Cover of the Urmia Lake Basin Applying Cellular Automata and Markov Chain. *Geography and Environmental Sustainability*, 10 (2), 57-72 (In persian).
- Farrokhzadeh, B. (2018). Determining the correlation between NDVI and EVI vegetation indices and SPI drought index (Case Study: Golestan rangelands). *Research and Scientific Journal of Agricultural Meteorology*, 5 (2), 56-65 (In persian).
- Foken, TH. (2008). *Micrometeorology*. Springer Berlin Heidelberg.
- Friehe, C. A. & Schmitt, K. F. (1976). Parameterization of air- sea interface fluxes of sensible heat and moisture by bulk aerodynamic formulas. *Journal of physical oceanography*, 6, 801-809.
- Gerivani, H., Lashkaripour, G. R., Ghafoori, M. & Jalali, N. (2011). The source of dust storm in Iran: A case study based on geological information and rainfall data. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 6 (1), 297-308.
- Ginoux, P., Prospero, J. M., Gill T. E., Hsu, N. C. & Zhao, M. (2012). Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products. *Reviews of Geophysics*, 50 (3), RG3005.
- Goudie, A. S. (2008). The history and nature of wind erosion in desert, *Annual review of earth and planetary science*, 36, 97-119.
- Haghgoo, K., Rostami, N., Heshmati, M. & Faramarzi, M. (2017). Investigation of Desertification Potential Using IMDPA Model (Case Study: The Gandomban Plain, Qasr-e-Shirin). *Geography and Environmental Sustainability*, 7 (1), 21-33 (In persian).
- Hamidi, M., Kavianpour, M. R. & Shao, Y. (2013). Synoptic analysis of dust storms in the Middle east. *Asia- Pacific Journal of Atmospheric Science*, 49 (3), 279-286.
- Hamidi, M., Kavianpour, M. R. & Shao, Y. (2014). Numerical Simulation of Dust Events in the Middle East. *Aeolian Research*, 13, 59-70.
- Iranmanesh, F., Arabkhedri, M., Jalali, N., Partovi, A. & Rashki, A. (2008). Investigation of specifications of Sistan dust storms and assessment of sediment load using satellite image processing and field measurements. SCWMRI-Soil. *Conservation and Watershed Management Institute*, 18 (2), 25-33 (In persian).
- Javanmard, S., Emam hadi, M., Bodagh Jamali, J. & Didehvarasl, A. (2017). Spatial –Temporal Analysis of Drought in Iran Using SPI During a Long - Term Period. *Earth Sciences*, 6 (2), 15-29.
- Karimi, Kh., Taheri Shahraiyni, h., Habibi Nokhandanm., M. & Hafezi Moghaddas, N. (2012). Identification of the Point Sources of Dust Storms in the Middle East Using Remote Sensing. *Journal of Climate Research*, 2 (7), 57-72 (In persian).
- Khoshakhlagh, F., Azizi, GH. & Rahimi, M. (2012). The synoptic patterns of wintertime drought and wet period in southwestern of Iran. *Journal of Geographical Sciences*, 12 (25), 57-77 (In persian).
- Kutieli, H. & Furman, H. (2003). Dust storms in the middle east: sources of origin and their temporal characteristics. *Indoor built environment*, 12, 419-426.
- Lawrence, M. G. (2005). The Relationship between Relative Humidity and the Dew point Temperature in Moist Air: A Simple Conversion and Applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86 (2), 225-233.
- Liu, W. T., Katsaros, K. B. & Businger, J. A. (1979). Bulk parameterization of air–sea exchanges of heat and water vapor including the molecular constraints at the interface. *Journal of*

- atmospheric science*, 36, 1722-1735.
- Mahrt, L. (1996). The bulk aerodynamic formulation over heterogeneous surfaces. *Boundary-Layer Meteorology*, 78, 87-119.
- McGuffie, K. & Henderson-Sellers, A. (2005). *A Climate Modelling Primer*. John Wiley & Sons Ltd, England.
- Meijer, K., Beek, E.V. & Roest, K. (2006). Integrated Water Resources Management for the Sistan Closed Inland Delta, Iran. Annex C-Water Supply and Demand. *Water Research Institute in cooperation with ITC and Alterra*, V1.2.
- Middleton, N. J. (1986). A geography of dust storms in south-west Asia. *Journal of Climatology*, 6, 183-196.
- Miller, R., Tegen, I. & Perlwitz, Z. (2004). Surface radiative forcing by soil dust aerosols and the hydrologic cycle. *Journal of Geophysical Research*, 109 (D4), D04, 203, doi:10.1029/2003JD004,085.
- Miri, A., Ahmadi, H., Ekhtesasi, M.R., Panjehkeh, N. & Ghanbari, A. (2009). Environmental and socio-economic impacts of dust storms in Sistan region, Iran. *International Journal of Environmental Studies*, 66, 343-355.
- Moameni, A. (2011). Geographical distribution and salinity levels of soil resources of Iran. *Iranian Journal of soil research (Formerly Soil and Water Sciences)*, 24 (3), 203-215 (In Persian).
- MODIS/NDVI Time Series Database from the Global Agriculture Monitoring (GLAM) Project*, Geographic Department of Maryland University, <http://pekko.geog.umd.edu/usda/beta/>.
- Mofidi, A. & Jafari, S. (2011). The role of regional atmospheric circulation over the Middle East on the occurrence of summer dust storms in southwest Iran. *Arid regions geographic studies*, 2 (5), 17-46 (In Persian).
- NOAA reanalysis data*, U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration Earth System Research Laboratory, Physical Sciences Division, <http://www.esrl.noaa.gov>.
- Pease, P. P., Tchakerian, V. P. & Tindale, N. W. (1998) Aerosols over the Arabian Sea: geochemistry and source areas for aeolian desert dust. *Journal of Arid Environments* 39, 477-496.
- Pond, S., Fissel, D. B. & Paulson, C. A. (1974). A note on bulk aerodynamic coefficients for sensible heat and moisture fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, 6, 333-340.
- Prospero, J. M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S. E. & Gill, T. E. (2002). Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the NIMBUS 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Reviews of Geophysics*, 40 (1), 1002.
- Rahimi, L., Malekmohammadi, B. & Yavari, A. (2019). The Ecosystem Services Assessment of Wetlands Based on the Classification of Hydrological-Ecological Structures and Functions (Case Study: Shadegan Wetland). *Geography and Environmental Sustainability*, 9 (1), 51-72 (In Persian).
- Rahimian, M.H., Poormohammadi, S., Hasheminejad, Y. & Meshkat, M. A. (2013). Impact of climate change on salinization in Iran. *Iranian Journal of soil research (Formerly Soil and Water Sciences)*, 27 (1), 1-11.
- Ranjbar Saadatabadi, A. & Azizi, G.H. (2012). Studying of meteorological patterns, Identifying of dust sources and motion track of particles for dust storm, July 2009. *Physical Geography Research Quarterly*, 44 (3), 73-92 (In Persian).
- Rezaei Ghaleh, L. & Ghorbani, K.H. (2018). Comparative analyses of SPI and SPEI meteorological drought indices (Case study: Golestan province). *Research and Scientific Journal of Agricultural Meteorology*, 6 (1), 31-40 (In Persian).
- Roostitalab, M. H., Siadat, H. & Farshad, A. (2018). *The soils of Iran (World soils book series)*, Springer international publishing.
- Roshan, G.H., Masoompour Samakosh, J. & Orosa, J. A. (2016). The impact of drying of Lake Urmia on changes of degree day index of the surrounding cities by meteorological

- modeling. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1387.
- Safar, M. I. (1980). *Frequency of Dust in Day-time Summer in Kuwait*. Directorate General of Civil Aviation, Kuwait.
- Shao, Y. (2008). *Physics and modeling of wind erosion*. Springer Verlag.
- Shao, Y., Wyrwoll, K.H., Chappell, A., Huang, J., Lin, Zh., McTainsh, G.H., Mikami, M., Tanaka, T.Y., Wang, X. & Yoon, S. (2011). Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science. *Aeolian Research*, 2, 181-204.
- Shao, Y., Yang, Y., Wang, J. J., Song, Z. X., Leslie, L. M., Dong, C. H., Zhang, Z. H., Lin, Z. H., Kanai, Y., Yabuki, S. & Chun, Y. S. (2003). Northeast Asian dust storms: real-time numerical prediction and validation. *Journal of Geophysical Research*, 108 (D22), 4691, doi:10.1029/2003JD003667, 2003.
- Taheri Shahraiyini, H., Karimi, KH., Habibi Nokhandan, M. & Hafezi Moghadas, N. (2015). Monitoring of dust storm and estimation of aerosol concentration in the Middle East using remotely sensed images. *Arabian Journal of Geosciences*, 8 (4), 2095-2110.
- Tanaka, T. Y. & Chiba, M. (2006). A numerical study of the contributions of dust source regions to the global dust budget. *Global Planet Change*, 52, 88-104.
- Wilkerson, W.D. (1991). Dust and sand forecasting in Iraq and adjoining countries. *Air weather service, Scot Air Force Base, Illinois*, 5008-62225.
- Yang, K., Koike, T., Ishakawa, H., Kim, J., Li, X., Liu, H., Liu, SH., Ma, Y. & Wang, J. (2007). Turbulent flux transfer over bare- soil surfaces: characteristics and parameterization. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47, 276-290.
- Young, K. D., Younos, T., Dymond, R. L., Kibler, D. F. & Lee, D. H. (2010). Application of the Analytic Hierarchy Process for Selecting and Modeling Storm water Best Management Practices. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 146, 50-63.
- Zaitchik, B. F., Evans J. P. & Smith, R. B. (2007). Regional impact of an elevated heat source: The Zagros plateau of Iran. *Journal of climate*, 20, 4133-4146.
- Zarei, A., Moghimi, M. M. & Bahrami, M. (2017). Monitoring and Prediction of Monthly Drought using Standardized Precipitation Index and Markov Chain (Case study: southeast of Iran). *Geography and Environmental Sustainability*, 7 (2), 39-51 (In persian).
- Zarghami, M. (2011). Effective watershed management: case study of Urmia Lake, Iran. *Lake and Reservoir Management*, 27 (1), 87-94, DOI: 10.1080/07438141.2010.541327.
- Zhang, Q., Wei, G. A. & Huang, R. H. (2001). Momentum and bulk sensible heat transfer coefficient over Gobi northwest China. *Science China*, 31 (D), 783-792.
- Zolfaghari, H., Sahraei, J., Masoompour Samakosh, J. & Borzou, F. (2016 a). Investigation of sensible heat flux and its relationship with temperature and wind variations during warm months of the year in Iran. *Natural Geography Research*, 48 (3), 431-445 (In persian).
- Zolfaghari, H., Masoompour Samakosh, J., Yeganefar, M. & Akbary, M. (2016 b). Studying spatial and temporal changes of aridity in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 9, 375.