



دانشگاه گواران و منابع آب

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و هفتم، شماره اول، ۱۳۹۹

۱-۲۳

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2020.16883.3225

تحلیل طوفان‌های گردوغبار سیستان با استفاده از شاخص‌های DDI و DSI و پارامترهای سرعت باد، دید افقی و غلظت PM10

*عباس میری

استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه زابل

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۴

چکیده

سابقه و هدف: در طی دهه‌های اخیر طوفان‌های گردوغبار به یکی از مخاطرات جدی طبیعی در دنیا تبدیل شده‌اند. اگرچه این پدیده از جنبه‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است، تغییرات لحظه‌ای پارامترهای مرتبط با این پدیده و همچنین تغییرات فراوانی ماهانه و سالانه این پدیده در مناطق تحت‌تأثیر نیاز به بررسی دارد. از این رو در این پژوهش تغییرات لحظه‌ای سرعت باد و دید افقی در طی شبانه‌روز، ماه‌های مختلف سال و همچنین تغییرات فراوانی ماهانه و سالانه طوفان‌های گردوغبار در منطقه سیستان مورد مطالعه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها: از آنجایی که منطقه سیستان در جنوب شرق ایران سال‌ها درگیر پدیده گردوغبار است این منطقه به‌عنوان منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد. منطقه سیستان دارای اقلیم گرم و خشک با متوسط بارندگی سالانه کم (۵۹ میلی‌متر)، درجه حرارت بالا (میانگین سالانه ۲۲ درجه سانتی‌گراد) و بادهای ۱۲۰ روزه می‌باشد. جهت بررسی تغییرات لحظه‌ای سرعت باد و دید افقی داده‌های ثبت شده در مقیاس زمانی سه‌ساعته در ایستگاه سینوپتیک زابل از سازمان هواشناسی کشور برای بازه زمانی ۱۳۷۰-۱۳۹۷ دریافت گردید. همچنین جهت بررسی تغییرات فراوانی طوفان‌های گردوغبار و غبارناکی منطقه مورد مطالعه از دو شاخص DDI (روزهایی که سرعت باد بیش‌تر از ۱۵ متر بر ثانیه و دید افقی کم‌تر از ۱۰۰۰ متر می‌باشد) و DSI (شاخص غبارناکی) استفاده شد. تغییرات روزانه، ماهانه و سالانه PM10 (ذرات معلق در هوا با قطر کم‌تر از ۱۰ میکرون) نیز در بازه زمانی ۱۳۹۲-۱۳۹۷ مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: الگوی تغییرات لحظه‌ای باد و دید افقی و همچنین غلظت PM10 در طی شبانه‌روز در تمامی ماه‌های سال و در بازه زمانی مورد بررسی یکسان بوده و حداکثر غلظت PM10 و حداقل دید افقی در ساعت ۱۰:۳۰ صبح منطبق با حداکثر سرعت باد رخ می‌دهند. همچنین در ساعت ۷:۳۰ بعدازظهر منطبق با به حداقل رسیدن سرعت باد و غلظت PM10 میزان دید افقی به حداکثر می‌رسد. فراوانی ماهانه شاخص‌های DDI و DSI و همچنین غلظت PM10 نشان داد که ماه تیر بالاترین مقادیر این شاخص‌ها یعنی DDI برابر ۸ روز، DSI برابر ۱۵ روز و PM10 برابر ۶۶۲

* مسئول مکاتبه: miri.abbas@uoz.ac.ir

میکروگرم در مترمکعب را دارا است. در طول دوره موردبررسی سال ۱۳۸۰ با ۳۱۸۶۰ دقیقه (۵۳۱ ساعت) زمان طوفانی و دارا بودن شاخص DDI با ۷۴ روز از بالاترین فراوانی این پدیده برخوردار بوده است. به‌طورکلی بازه زمانی ۱۳۷۸-۱۳۸۳ از شرایط غبارناکی شدیدتری نسبت به بازه‌های زمانی ۱۳۷۰-۱۳۷۷ و ۱۳۸۴-۱۳۹۷ برخوردار می‌باشد. در این بازه‌های زمانی شاخص DSI به‌ترتیب ۱۷۴، ۱۴ و ۶۶ روز برآورد گردیده است. ارتباط معنی‌دار بین تغییرات سرعت باد و دید افقی، بین سرعت باد و غلظت مواد معلق در هوا و بین دید افقی و غلظت مواد معلق در هوا نشان داد که میزان دید افقی و غلظت مواد معلق در هوا کاملاً به سرعت باد وابسته می‌باشد. همچنین ارتباط معنی‌داری بین غلظت مواد معلق در هوا (PM10) با شاخص‌های DDI و DSI نیز برقرار گردید. با برقراری ارتباط بین شاخص‌های PM10، DDI، DSI و متوسط سالانه سرعت باد مشخص گردید که تغییرات این پارامترها نیز کاملاً وابسته به تغییرات سرعت باد می‌باشد.

نتیجه‌گیری: در بازه زمانی ۲۷ ساله موردبررسی شرایط غبارناکی بر منطقه سیستان حاکم بوده و در مقایسه با سایر مناطق ایران از وضعیت بحرانی‌تری از غبارناکی برخوردار بوده است. به‌طوری‌که فراوانی و شدت طوفان‌های گردوغبار در این منطقه نسبت به سایر مناطق بیش‌تر می‌باشد. از آنجایی‌که غبارناکی منطقه سیستان به وضعیت تالاب هامون مرتبط است به‌نظر می‌رسد بهترین راه جهت کاهش طوفان‌های گردوغبار احیای این دریاچه بوده تا بتوان شرایط تشکیل این پدیده را به حداقل رساند.

واژه‌های کلیدی: دید افقی، سرعت باد، سیستان، طوفان‌های گردوغبار

مقدمه

داده است مستعد برای وقوع این پدیده می‌باشد. خشک‌سالی‌های چندساله اخیر سبب شده است مناطق وسیعی از ایران درگیر طوفان‌های گردوغبار گردند. این طوفان‌ها در شرق و غرب از شدت و فراوانی بالایی نسبت به سایر مناطق ایران برخوردارند به‌طوری‌که جنوب‌شرق کشور به‌عنوان یکی از منابع اصلی گردوغبار در جهان شناخته شده است (۵، ۱۴، ۱۸، ۳۷، ۴۵ و ۴۷). غرب ایران نیز در چندساله اخیر به‌دلیل وقوع خشک‌سالی‌های ممتد درگیر این مسأله بوده به‌طوری‌که میانگین روزهای غبار آلود در شهرهای اهواز، آبادان، کرمانشاه و بوشهر در طی ۵۰ سال گذشته به‌ترتیب ۶۸، ۷۶، ۲۷ و ۷۵ روز گزارش شده است (۱۵ و ۴۹).

دامنه تأثیرات محیطی طوفان‌های گردوغبار گسترده بوده به‌طوری‌که علاوه بر محیط‌های منشأ (که نتیجه آن

امروزه طوفان‌های گردوغبار به یکی از مخاطرات طبیعی در دنیا به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک تبدیل شده‌اند (۳۱). این پدیده در مناطقی مشهود است که خشک‌سالی‌های ممتد، بارش اندک و کاهش رطوبت، خاک سست و حساس به فرسایش، پوشش گیاهی اندک و وزش بادهای شدید را تجربه می‌کنند (۱۹). در مناطقی که پوشش گیاهی مناسب و شرایط محیطی و اکولوژیکی مساعد می‌باشد، فراوانی این طوفان‌ها اندک و برعکس در مناطق با اقلیم گرم و خشک با پوشش گیاهی کم و پراکنده از فراوانی بیش‌تری برخوردارند (۲۱، ۵۲ و ۵۷).

از آنجایی‌که ایران بر روی کمربند بیابان‌زایی و فرسایش بادی قرار گرفته و بیش از ۳۰ درصد مساحت آن را مناطق خشک و نیمه‌خشک تشکیل

می‌گردند (۲۹ و ۴۰). به طوری که بر اساس تعریف سازمان هواشناسی جهانی (WMO) چنانچه سرعت باد به بیش از ۱۵ متر بر ثانیه و دید افقی به کم‌تر از ۱۰۰۰ متر برسد، طوفان گردوغبار اطلاق می‌شود (۲۰). از این رو در پژوهش حاضر تغییرات لحظه‌ای سرعت باد و دید افقی مورد مطالعه قرار می‌گیرد تا به اطلاعات بیش‌تری راجع به تغییرات لحظه‌ای طوفان‌های گردوغبار دست یافت.

منطقه سیستان به دلیل دارا بودن اقلیمی گرم و خشک مستعد برای وقوع طوفان‌های گردوغبار است. خشک‌سالی‌های پی‌درپی در چند دهه اخیر و در پی آن کاهش پوشش گیاهی به همراه بادهای شدید و فرساینده همچنین خاک فرسایش‌پذیر زمینه را جهت شکل‌گیری این طوفان‌ها فراهم نموده است. به طوری که این منطقه به یکی از کانون‌های مهم تولید غبار در آسیا تبدیل شده است (۳۸ و ۳۹). اگرچه طوفان‌های گردوغبار در منطقه سیستان از جنبه‌های مختلف از جمله منشأ و فراوانی آن‌ها، عوامل مؤثر در شکل‌گیری و نحوه وقوع آن‌ها، تغییرات مکانی و زمانی و گستره تحت‌تأثیر آن‌ها و همچنین اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی مورد مطالعه قرار گرفته است (۲۴، ۳۴، ۳۷، ۴۴ و ۴۷)، بررسی و مطالعه بیش‌تر این رخداد اطلاعات بیش‌تری را از فراوانی و تشدید آن در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد.

اختصاصی و همکاران (۲۰۱۱) روند غبارناکی در محدوده شهر اصفهان را با استفاده از دو شاخص دید افقی و شاخص تعداد روزهای طوفان‌های گردوغبار (DDI) مورد مطالعه قرار دادند (۱۱). ولی و روستایی (۲۰۱۷) با استفاده از شاخص DSI^۱ به بررسی روند فرسایش بادی در ایران مرکزی در بازه زمانی ۱۹۶۵-۲۰۱۴ پرداختند (۵۳). در پژوهش حاضر علاوه بر این که با استفاده از شاخص‌های DDI^۱ و DSI^۲ به بررسی فراوانی ماهانه

هدررفت میلیون‌ها تن ذرات خاک می‌باشد)، محیط‌های حمل و رسوب را نیز تحت‌تأثیر قرار می‌دهند. آلودگی هوا (به دلیل بالا رفتن غلظت ذرات غبار در هوا) و در پی آن تهدید سلامت انسان، کاهش دید و وقوع تصادفات جاده‌ای، تخریب زمین‌های کشاورزی و کاهش عملکرد گیاهان زراعی و مدفون شدن مناطق مسکونی از نتایج مخرب این پدیده می‌باشد (۳۱، ۳۴، ۳۷، ۵۴ و ۵۷). طوفان‌های شدید گردوغباری که در دشت سیستان رخ می‌دهند نه تنها کشورهای افغانستان و پاکستان بلکه دریای عمان و کشور هند را نیز متأثر می‌سازند (۴۴ و ۴۷). طوفان‌های گردوغبار غرب ایران نیز علاوه بر شهرهای غربی ایران کشورهای سوریه و عراق را نیز تحت‌تأثیر قرار می‌دهند (۴). بنابراین با توجه دامنه تأثیر این پدیده و گستردگی اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی و اجتماعی آن مطالعه طوفان‌های گردوغبار مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است و این پدیده از جنبه‌های گوناگون از جمله منشأ و نحوه وقوع، عوامل مؤثر در شکل‌گیری و تشدید آن‌ها و همچنین فراوانی آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (۴، ۱۱، ۱۵، ۱۶ و ۳۹).

در کنار سایر عوامل (کاهش پوشش گیاهی، خاک سست و حساس، نبود رطوبت و غیره) سرعت باد یکی از فاکتورهای مهم در شکل‌گیری طوفان‌های گردوغبار می‌باشد به طوری که با تغییر سرعت باد شرایط غبارناکی تغییر می‌نماید (۵۱). هنگامی که سرعت باد از یک مقدار معین که سرعت آستانه نام دارد بالاتر رود باد قادر خواهد بود تا ذرات خاک را جابجا نماید که در این حالت فرسایش بادی و طوفان گردوغبار رخ می‌دهد (۶). بنابراین آگاهی از تغییرات سرعت باد به صورت لحظه‌ای در شبانه‌روز، ماه و سال به منظور تحلیل طوفان‌های گردوغبار ضروری به نظر می‌رسد (۴۹). از طرفی دو شاخص سرعت باد و قابلیت دید در تحلیل طوفان‌های گردوغبار استفاده

1- Dusty Days Index

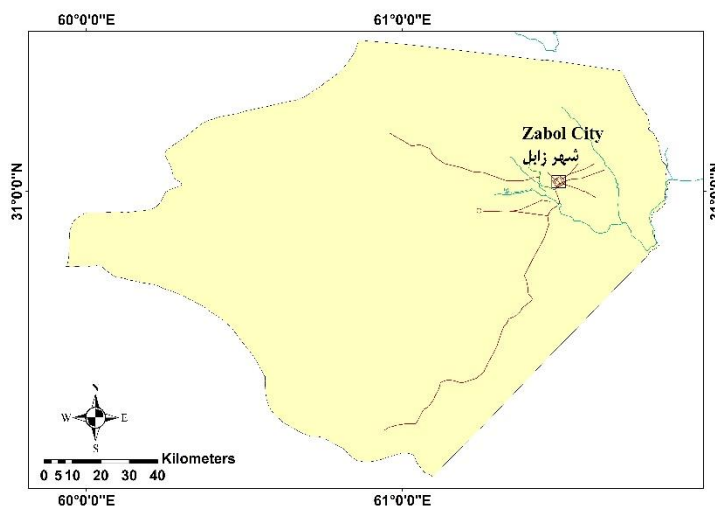
2- Dust Storm Index

تبخیر سالانه حدود ۴۷۷۵ میلی‌متر بوده که قسمت اعظم آن مربوط به ماه‌های خرداد تا شهریور می‌باشد. بادهای غالب و فرساینده منطقه که معروف به بادهای ۱۲۰ روزه می‌باشد، از اواخر اردیبهشت تا اواخر شهریور می‌وزند و جهت حرکت آن‌ها شمال تا شمال‌غرب می‌باشد. تیر با متوسط سالانه ۳۵ درجه سانتی‌گراد و دی با ۸/۹ درجه سانتی‌گراد به ترتیب گرم‌ترین و سردترین ماه‌های سال است. براساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن منطقه از اقلیم فراخشک و طبق روش آمبرژه از اقلیم بیابانی برخوردار است (۳۷).

و سالانه طوفان‌های گردوغبار در طی یک بازه زمانی طولانی پرداخته می‌شود، به‌منظور بررسی روند غبارناکی منطقه تغییرات روزانه، ماهانه و سالانه دو پارامتر سرعت باد و دید افقی موردبررسی قرار می‌گیرد. هم‌چنین تغییرات روزانه، ماهانه و سالانه غلظت PM10 نیز موردبررسی قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه: منطقه سیستان در جنوب‌شرق ایران و در شمال استان سیستان و بلوچستان با مساحتی حدود ۱۵۱۹۷ کیلومترمربع واقع گردیده است (شکل ۱). رژیم بارندگی در این منطقه مدیترانه‌ای با میانگین سالانه ۶۶/۶ میلی‌متر است.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه.

Figure 1. The study area.

سال موردنظر مرتب شدند. نمونه‌ای از این جداول در زیر آورده شده است (جدول ۱). با استفاده از این جداول تغییرات سرعت باد و دید افقی مورد تحلیل قرار گرفتند. تغییرات لحظه‌ای این دو پارامتر در طی شبانه‌روز با میانگین‌گیری داده‌ها در هر ساعت برای هر ماه در طی دوره موردبررسی صورت پذیرفت.

روش تحقیق: به‌منظور بررسی تغییرات ساعتی، ماهانه و سالانه سرعت باد و دید افقی و تحلیل طوفان‌های گردوغبار، داده‌های سرعت باد و دید افقی در مقیاس زمانی سه‌ساعته از سازمان هواشناسی کشور برای بازه زمانی ۱۳۷۰-۱۳۹۷ دریافت گردید. سپس جداولی تشکیل و داده‌ها در این سری‌های زمانی برای ماه و

جدول ۱- نمونه‌ای از نحوه استخراج داده‌های سرعت باد (متر بر ثانیه) در طی ساعات شبانه‌روز برای ۳۱ روز ماه مرداد ۱۳۹۶.

Table 1. A sample of extracting wind speed data (m/s) during day and night, 31 July 2017.

| 9:00 PM | 6:00 PM | 3:00 PM | 12:00 PM | 9:00 AM | 6:00 AM | 3:00 AM | 12:00 AM | روز Day |
|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|-----------------|
| 14 | 7 | 10 | 11 | 12 | 14 | 13 | 9 | 1 |
| 12 | 13 | 12 | 10 | 13 | 12 | 13 | 13 | 2 |
| 15 | 11 | 10 | 10 | 11 | 12 | 13 | 12 | 3 |
| | | | | | | | | 0 |
| 11 | 10 | 8 | 8 | 9 | 13 | 8 | 10 | 31 |
| 9.55 | 9.06 | 7.65 | 8.39 | 9.71 | 11.94 | 10.35 | 9.68 | میانگین Mean |

که در آن، DSI شاخص تعداد روزهای غبارناکی، SD تعداد روزهای طوفان گردوغبار شدید و معادل تعداد روزهای طوفان گردوغبار با قدرت دید افقی کم‌تر از ۲۰۰ متر (کدهای ۳۳-۳۵)، MD تعداد روزهای طوفان گردوغبار با شدت متوسط و معادل تعداد روزهای طوفان گردوغبار با قدرت دید افقی ۱۰۰۰-۲۰۰ متر (کدهای ۳۰-۳۲ و ۹۸) و LDE تعداد روزهای با گردوغبار محلی و معادل تعداد روزهای غبارآلود ناشی از گردوغبار با قدرت دید بیش از ۱۰۰۰ متر و چگالی غبار بیش از ۰/۱۵ گرم در مترمکعب (کدهای ۰۷ و ۰۹) می‌باشند. شاخص DSI برای ماه‌ها و سال‌های مختلف برآورد گردید. به‌منظور بررسی تغییرات روزانه، ماهانه و سالانه غلظت PM10 از داده‌های ثبت‌شده در ایستگاه هواشناسی و مرکز ثبت غلظت مواد معلق در هوا توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست استان سیستان و بلوچستان برای بازه زمانی ۱۳۹۲-۱۳۹۷ که داده‌های از دست‌رفته کم‌تر بود، استفاده گردید.

نتایج و بحث

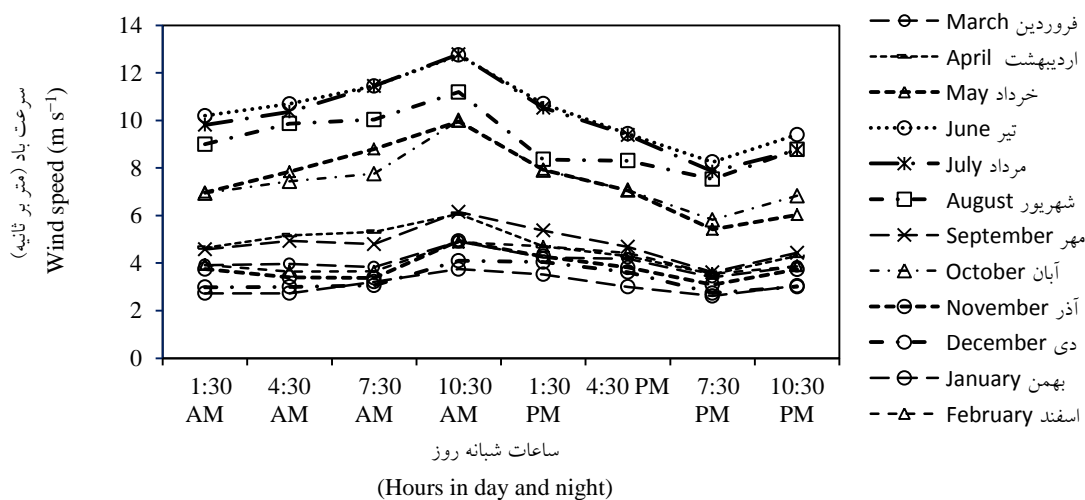
تغییرات سرعت باد، دید افقی و PM10 در طی شبانه‌روز: تغییرات سرعت باد در طی شبانه‌روز برای دوازده ماه سال در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که سرعت باد در طی شبانه‌روز تغییرات

به‌منظور تحلیل فراوانی ماهانه و سالانه طوفان‌های گردوغبار در بازه زمانی موردنظر شاخص DDI به‌عنوان روزهای با طوفان گردوغبار تعریف گردید و جهت برآورد این شاخص از تعریف روزهای با طوفان گردوغبار توسط سازمان هواشناسی جهانی (WMO) استفاده شد. براساس این تعریف روزهایی که سرعت باد بیش‌تر از ۱۵ متر بر ثانیه و دید افقی کم‌تر از ۱۰۰۰ متر است به‌عنوان یک روز با طوفان گردوغبار در نظر گرفته می‌شود (۲۱). در تحلیل طوفان‌های گردوغبار از کدهای هواشناسی نیز استفاده می‌گردد؛ اما در پژوهش حاضر تنها از شاخص DDI استفاده گردید. از آنجایی‌که شاخص DSI توسط شورای حفاظت محیط‌زیست استرالیا- نیوزلند تأیید و برای اولین بار جهت بررسی شاخص‌های کشاورزی پایدار در برنامه همکاری ملی در استرالیا به‌کار گرفته شد، این شاخص به‌عنوان شاخص گردوغباری در مطالعات فرسایش بادی استفاده می‌گردد (۵۶). از طرفی این شاخص دقیق‌تر از شاخص تعداد روزهای گردوغبار (DDI) وضعیت غبارناکی یک منطقه را نشان می‌دهد (۴۰). ازاین‌رو از این شاخص نیز جهت بررسی غبارناکی منطقه مورد مطالعه و تحلیل طوفان‌های گردوغبار استفاده گردید. این شاخص از طریق رابطه ۱ زیر محاسبه گردید (۴۰):

$$DSI = (5SD) + MD + LDE/20 \quad (1)$$

مقایسه الگوی تغییرات سرعت باد در طی شبانه‌روز در منطقه مورد مطالعه با سایر مناطق کشور نشان می‌دهد که الگوی تغییرات در منطقه سیستان برخلاف الگوی رایج در سایر نقاط کشور است (۲۴). به‌عنوان مثال مهرشاهی و نکونام (۲۰۰۹) دریافتند که ۷۱ درصد از طوفان‌های گردوغبار در شهرستان سبزوار در بعدازظهر رخ می‌دهند (۳۰). حمیدیان پور و همکاران (۲۰۰۶) در تحلیل ماهیت و ساختار بادهای منطقه سیستان علت تفاوت زمانی تشدید طوفان‌های گردوغبار بین منطقه سیستان و سایر مناطق کشور را به شرایط تشکیل و تکوین بادهای سیستان مرتبط دانستند و بدین‌منظور مطالعه لایه‌های زیرین جو در رابطه با بادهای سیستان پرداختند (۲۴). نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد بادهای منطقه سیستان از دو هسته بیشینه سرعت برخوردارند و این دو هسته در طول ساعات شب بسیار قوی‌تر و برجسته‌تر از ساعات روز می‌باشند. از طرفی هسته بیشینه در طول شب در ارتفاع پایین‌تری از ساعات روز قرار می‌گیرد. همچنین از جریان‌های تلاطمی و همرفتی کاسته شده که منتج به کاهش میزان اصطکاک و افزایش سرعت باد در طی ساعات شب می‌گردد.

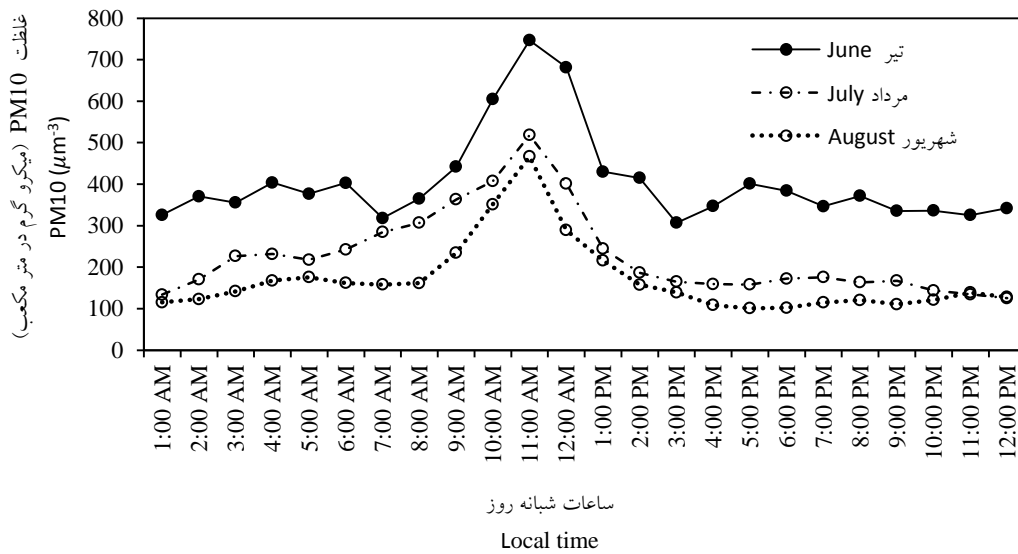
قابل‌ملاحظه‌ای داشته و الگوی این تغییرات در تمامی ماه‌ها یکسان است. در طول ساعات شب و صبح، باد از سرعت بالاتری برخوردار بوده و در بعدازظهر آرام می‌گیرد. سرعت باد از بعدازظهر افزایش یافته و در ساعت ۱۰:۳۰ صبح به حداکثر مقدار خود می‌رسد و پس‌از آن روند کاهشی به‌خود گرفته و در ساعت ۷:۳۰ بعدازظهر به حداقل می‌رسد. به‌عنوان مثال در تیرماه متوسط سرعت باد ۷/۸ متر بر ثانیه در ساعت ۷:۳۰ بعدازظهر بوده و در ساعت ۱۰:۳۰ شب به ۸/۷ متر بر ثانیه رسیده است. در هر سه ساعات سرعت باد حدود یک متر بر ثانیه افزایش یافته و در ساعات ۱:۳۰، ۴:۳۰، ۷:۳۰ و ۱۰:۳۰ صبح به ترتیب به ۹/۸، ۱۰/۴، ۱۱/۴ و ۱۲/۷ متر بر ثانیه رسیده است. سپس روند کاهشی داشته و به ۱۰/۵ متر بر ثانیه در ساعت ۱:۳۰ بعدازظهر و ۹/۴ متر بر ثانیه در ساعت ۴:۳۰ بعدازظهر رسیده است. اختلاف حداقل و حداکثر سرعت باد در طی شبانه‌روز (بین ساعات ۱۰:۳۰ صبح و ۷:۳۰ بعدازظهر) حدود ۵ متر بر ثانیه می‌باشد. روند تغییرات سرعت باد (کاهشی و افزایشی) با زمان از توابع خطی، لگاریتمی و نمایی پیروی می‌کند و این رابطه بسیار معنی‌دار می‌باشد ($R^2 > 98$).



شکل ۲- تغییرات لحظه‌ای متوسط سرعت باد در طی شبانه‌روز در ماه‌های مختلف طی دوره ۱۳۷۸-۱۳۹۷.
 Figure 2. Diurnal variation of mean wind speed in different month during 1999-2018.

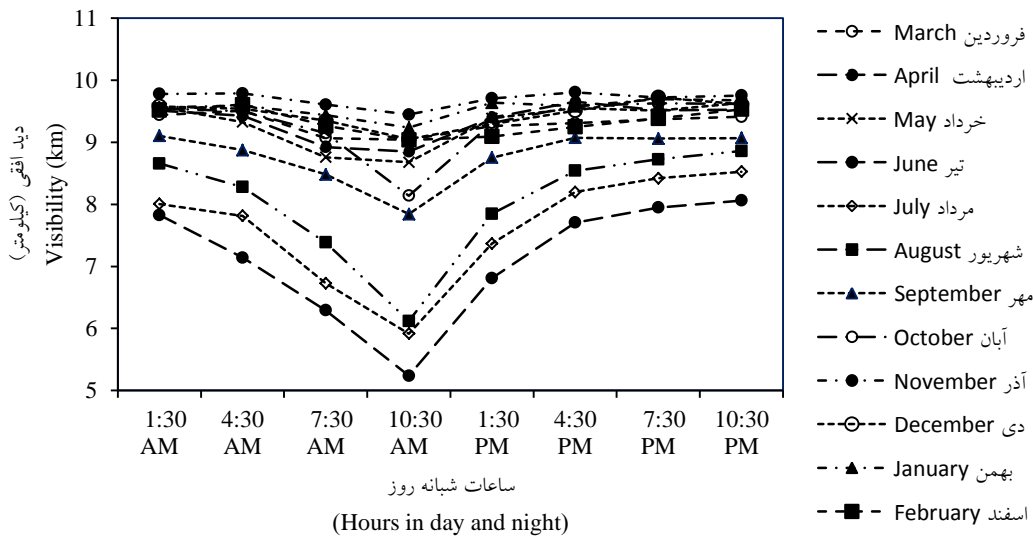
PM10 در شهر زاهدان در ظهر و بعدازظهر به حداکثر مقدار در طی شبانه‌روز می‌رسد (۴۵).
عمارلوثی و همکاران (۲۰۱۱) با بررسی تغییرات غلظت PM10 دریافتند که در طی دوره موردبررسی (۱۳۹۱-۱۳۹۲) مقدار این پارامتر در ساعات ۲:۳۰، ۱۳-۱۵ و ۱۸-۲۱ به حداکثر مقدار در طی شبانه‌روز می‌رسد (۴). ثقفی و همکاران (۲۰۱۴) نیز در شهر تهران مشاهده نمودند که مقادیر PM10 در ساعات بعدازظهر و شب به حداکثر مقدار در طی شبانه‌روز می‌رسد (۴۸). اختلاف الگوی تغییرات غلظت PM10 در منطقه مورد مطالعه با شهرهای ذکر شده مرتبط با تفاوت در الگوی نوسانات سرعت باد در طی شبانه‌روز می‌باشد. ثقفی و همکاران (۲۰۱۴) تغییرات غلظت مواد معلق در هوای شهر تهران در طی شبانه‌روز را با تغییرات باد مرتبط دانسته و علت به حداکثر رسیدن غلظت مواد معلق در هوا در بعدازظهر و شب را افزایش سرعت باد ذکر نموده‌اند (۴۸).
اختلاف حداقل و حداکثر متوسط دید افقی در طی شبانه‌روز (بین ساعات ۱۰:۳۰ صبح و ۷:۳۰ بعدازظهر) حدود ۳ کیلومتر بوده که این مقدار قابل ملاحظه است. این نتایج نشان می‌دهد که شرایط غبارناکی در منطقه سیستان در طی شب و هم‌چنین ساعات صبح بالا رفته و در بعدازظهر از غبارناکی هوا کاسته شده و هوا صاف‌تر می‌گردد.

تغییرات لحظه‌ای غلظت PM10 (شکل ۳) و دید افقی (شکل ۴) در طی شبانه‌روز نشان می‌دهد که تغییرات این دو پارامتر در طی شبانه‌روز نیز به مانند سرعت باد از یک الگوی یکسان در تمامی ماه‌های سال برخوردار است. در تمامی ماه‌ها، به دلیل بالارفتن غلظت ذرات معلق در هوا (بالارفتن مقدار PM10) در صبح دید افقی کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است اما به طرف بعدازظهر و شب به دلیل کاهش غلظت ذرات معلق در هوا بر مقدار دید افزوده می‌گردد. به عنوان مثال در تیرماه در ساعت ۱۰:۳۰ صبح متوسط غلظت ذرات معلق در هوا (PM10) حدود ۷۴۷ میکروگرم در مترمکعب و دید افقی حدود ۵/۲ کیلومتر ثبت شده است. سپس به طرف بعدازظهر و شب غلظت ذرات معلق در هوا روند کاهشی داشته و به کم‌تر از ۴۰۰ میکروگرم در مترمکعب تنزل می‌یابد. این کاهش منجر به افزایش دید افقی شده به طوری که دید افقی در ساعت ۱۰:۳۰ شب به حداکثر مقدار در طی شبانه‌روز و حدود ۸ کیلومتر رسیده است. الگوی تغییرات PM10 در منطقه مورد مطالعه مطابق با تغییرات سرعت باد می‌باشد. به طوری که در ساعاتی از شبانه‌روز که سرعت باد بالا می‌باشد غلظت مواد معلق افزایش یافته و دید افقی کاهش می‌یابد. الگوی تغییرات غلظت PM10 در منطقه مورد مطالعه با الگوی تغییرات در سایر نقاط ایران مطابقت ندارد. راشکی و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که غلظت



شکل ۳- تغییرات ساعتی متوسط PM10 (ذرات با قطر کم‌تر از ۱۰ میکرون) در طی شبانه‌روز در ماه‌های تیر، مرداد و شهریور طی دوره ۱۳۹۲-۱۳۹۷.

Figure 3. Hourly variation of average PM10 in June, July and August during 2013-2018.



شکل ۴- تغییرات لحظه‌ای متوسط دید افقی در طی شبانه‌روز در ماه‌های مختلف طی دوره ۱۳۷۸-۱۳۹۷.

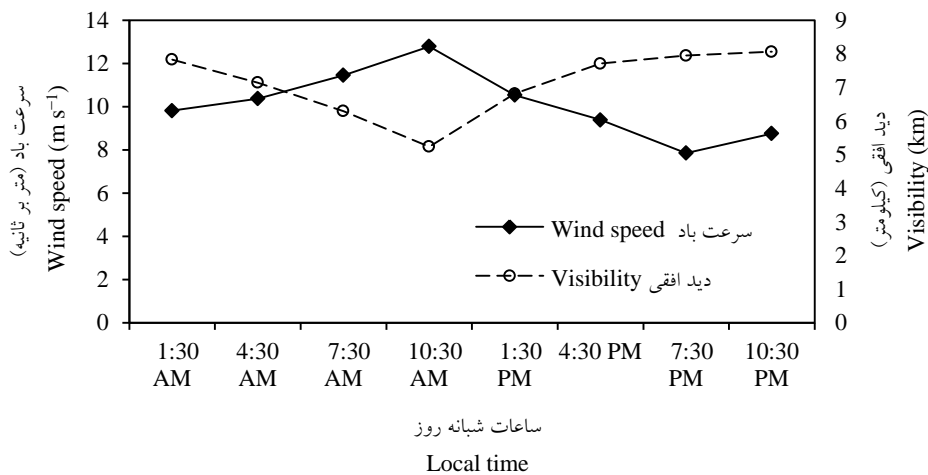
Figure 4. Diurnal variation of mean wind speed in different month during 1999-2018.

بوده به طوری که در ساعاتی که سرعت باد بالا می‌باشد دید افقی کم و غلظت مواد معلق بالا می‌باشد. در شکل ۵ الگوی تغییرات سرعت باد و دید افقی در طی شبانه‌روز در ماه تیر نشان داده شده است. در ساعت ۱۰:۳۰ صبح که سرعت باد حداکثر می‌باشد (۱۲/۷ متر

الگوی تغییرات سرعت باد، دید افقی و غلظت مواد معلق در هوا نشان می‌دهد که دید افقی و غلظت مواد معلق در هوا وابسته به سرعت باد می‌باشد. الگوی تغییرات دید افقی برخلاف سرعت باد و الگوی تغییرات غلظت مواد معلق با سرعت باد

طوفان‌های گردوغبار در منطقه سیستان با سایر مناطق ایران مطابقت نداشته باشد. شاهسونی و همکاران (۲۰۱۲) عنوان نمودند که گردوغبار محلی در شهر اهواز عمدتاً در اوایل ظهر و اواخر شب رخ می‌دهد (۴۹). راشکی و همکاران (۲۰۱۷) نیز مشاهده نمودند که حداکثر شدت گردوغبار در منطقه جازموریان در جنوب استان سیستان و بلوچستان بعدازظهر (بین ساعات ۳:۳۰ تا ۶:۳۰ بعدازظهر) رخ می‌دهد (۴۶). آرامی و همکاران (۲۰۱۸) با تحلیل آماری طوفان‌های گردوغبار در غرب و جنوب‌غرب ایران بیان نمودند که طوفان‌های گردوغبار در این مناطق به‌وقت محلی در ساعت ۱۲:۳۰ از بیش‌ترین شدت و در ساعت ۳:۳۰ از کم‌ترین شدت برخوردارند (۵).

بر ثانیه) دید افقی حداقل است (۵/۲ کیلومتر) و به‌طرف بعدازظهر با کاهش سرعت باد مقدار دید افزایش می‌یابد. در مقایسه با ساعات روز در طی ساعات شب به‌دلیل کم‌بودن سرعت باد دید از شرایط بهتری برخوردار می‌گردد. از طرفی الگوی تغییرات سرعت باد و دید افقی (به‌عنوان دو شاخص طوفان‌های گردوغبار) نشان می‌دهد که طوفان‌های گردوغبار در ساعات صبح و شب از شدت بالاتری برخوردار می‌باشد و شدت آن‌ها در ساعت ۱۰:۳۰ صبح به حداکثر و در ساعت ۷:۳۰ بعدازظهر به حداقل مقدار می‌رسد. با توجه به عدم انطباق الگوی تغییرات سرعت باد و غلظت مواد معلق در هوا در منطقه مورد مطالعه با سایر مناطق ایران که قبلاً ذکر گردید، به‌نظر می‌رسد الگوی تغییرات شدت



شکل ۵- الگوی تغییرات سرعت باد و دید افقی در طی شبانه‌روز در ماه تیر در طی سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۷۸.

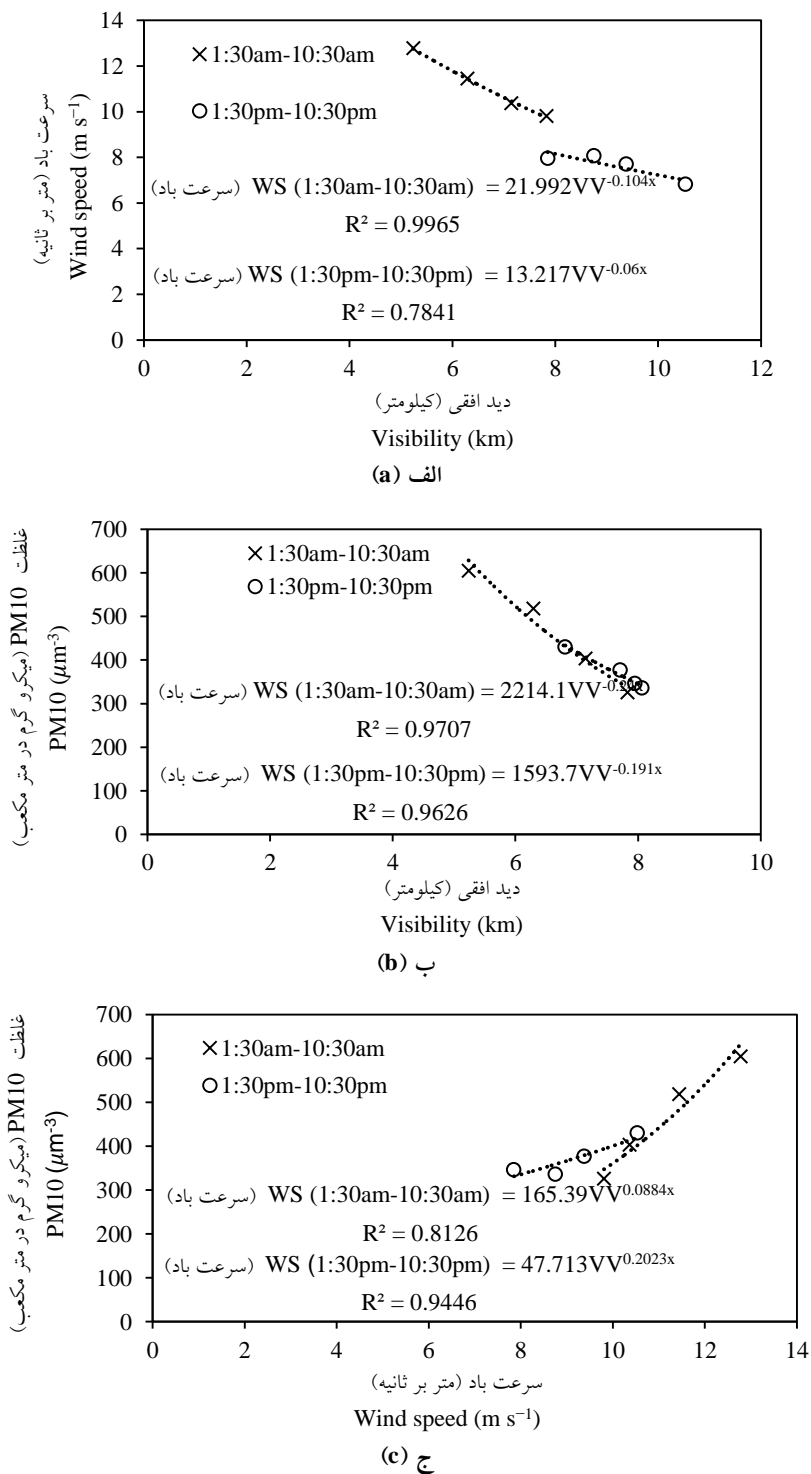
Figure 5. Diurnal variation pattern of wind speed and visibility in June during 1999-2018.

توانی و بین دید افقی و غلظت PM10 رابطه منفی و توانی برقرار می‌باشد. این نتایج بیانگر آن است که با افزایش سرعت باد، باد قادر است ذرات بیش‌تری را از سطح زمین جدا نموده و در هوا معلق نماید. به‌دلیل افزایش غلظت مواد معلق در هوا دید افقی کاهش می‌یابد که منطبق بر یافته‌های دنگ و همکاران

شکل ۶ نشان می‌دهد که ارتباط معنی‌داری بین تغییرات سرعت باد و دید افقی ($R^2 = 0.74 - 0.99$)، سرعت باد و غلظت PM10 ($R^2 = 0.94 - 0.96$)، دید افقی و غلظت PM10 ($R^2 = 0.94 - 0.95$) در طی شبانه‌روز وجود دارد. بین سرعت باد و دید افقی رابطه منفی و توانی، بین سرعت باد و غلظت PM10 رابطه مثبت

تغییرات روزانه غلظت PM10 و سرعت باد در شهر زاهدان رابطه معنی‌داری مشاهده نمودند (۴۵).

(۲۰۰۸) می‌باشد (۱۰). این پژوهشگران دریافتند که در شهر گوانژو با افزایش غلظت PM10 از دید افقی کاسته شده است. راشکی و همکاران (۲۰۱۳) نیز بین



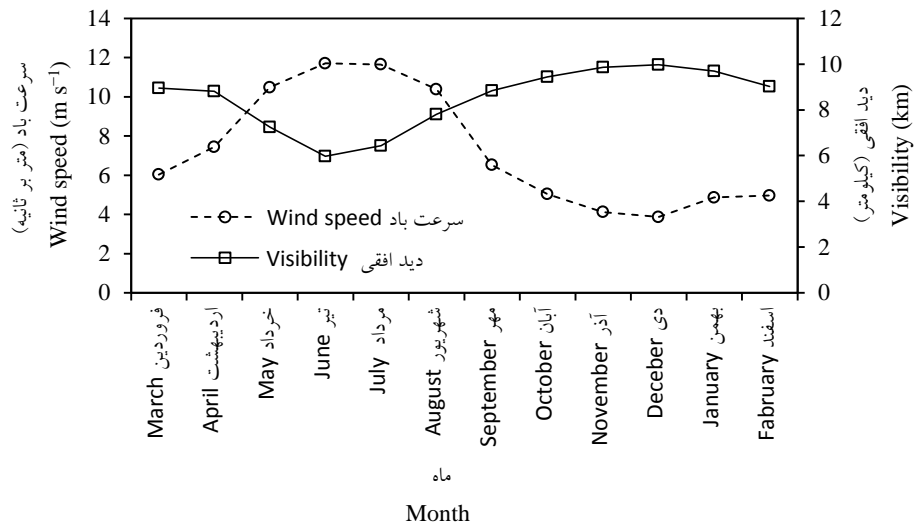
شکل ۶- رابطه بین سرعت باد و دید افقی (الف)، دید افقی و غلظت PM10 (ب) و سرعت باد و غلظت مواد معلق در هوا. Figure 6. The relationship between wind speed and visibility (a), visibility and PM10 (b), and PM10 and wind speed.

دید افقی و دی‌ماه از حداقل سرعت باد و حداکثر دید افقی برخوردار می‌باشند. نکته قابل توجه آن است که در فصل بهار متوسط سرعت باد بالاتر و دید افقی کم‌تر از فصول پاییز و زمستان بوده که خود نشان‌دهنده بادناکی منطقه سیستان در فصل بهار می‌باشد.

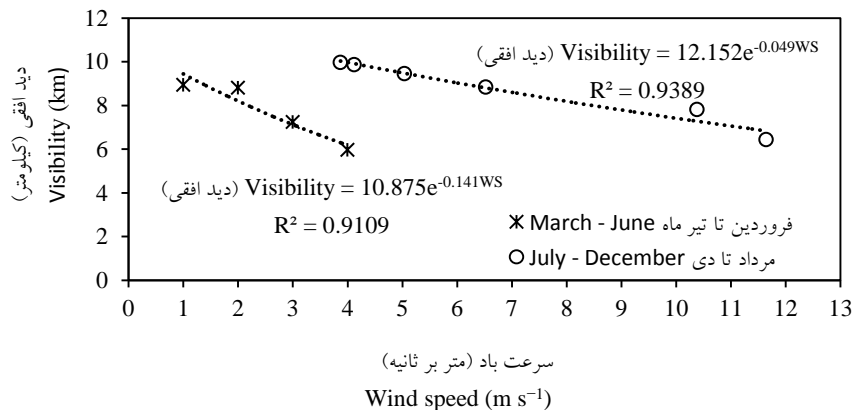
نتایج بالا نشان می‌دهد که سرعت باد نقش بسیار مهمی در تشدید فرسایش بادی، شکل‌گیری طوفان‌های گردوغبار و افزایش غبارناکی دارد. هنگامی که سرعت باد از حد آستانه بالاتر رود باد قادر خواهد بود تا ذرات خاک را جابجا نماید که در این حالت فرسایش بادی و طوفان گردوغبار رخ می‌دهد (۶ و ۲۳). هرچه مقدار سرعت باد از حد آستانه بالاتر رود قدرت باد جهت جابجایی ذرات افزایش یافته و در نتیجه مقدار بیش‌تری از ذرات توسط باد جابجا و حمل می‌گردد (۶). از طرفی از آنجایی که حجم زیادی از رسوبات حمل شده در یک رخداد طوفان گردوغبار در منطقه مورد مطالعه از تالاب هامون برداشت می‌گردد و این رسوبات بسیار حساس به فرسایش می‌باشد (۴۷)، در بادهای با سرعت بالا حجم رسوبات حمل شده افزایش یافته که خود باعث افزایش غلظت ذرات در هوا و کاهش دید می‌گردد. از طرفی وجود ذرات خاک حساس به فرسایش در تالاب هامون باعث می‌گردد که بادهای با سرعت نزدیک به آستانه نیز با حمل مقادیر بالایی از رسوبات همراه گردند که این خود می‌تواند بر فراوانی طوفان‌های گردوغبار بیافزاید. زیائو و همکاران (۲۰۰۸) عنوان نمود که بین فراوانی طوفان‌های گردوغبار تاکلاماکان چین با سرعت باد و همچنین تعداد روزهای با سرعت بیش از ۵ متر بر ثانیه رابطه مستقیم وجود دارد (۵۷).

در مطالعات طوفان‌های گردوغبار دید افقی نشان‌دهنده وضعیت غبارناکی و فرسایش بادی بوده به طوری که قبل از استفاده از دانش سنجش‌ازدور این پارامتر جهت تعیین وضعیت غبارناکی و فرسایش بادی یک منطقه مورد استفاده قرار گرفته است (۱۹)، ۲۹، ۳۲ و ۴۱؛ بنابراین یافتن ارتباط بین دید افقی و غلظت مواد معلق در هوا مورد نظر بسیاری از پژوهشگران فرسایش بادی و طوفان‌های گردوغبار قرار گرفته است (۱، ۱۲ و ۵۰). چیپیل و وودروف (۱۹۵۷)، پترسون و جیللتی (۱۹۷۷) و وانگ و همکاران (۲۰۰۶) دریافتند که بین دید افقی و غلظت مواد معلق در هوا رابطه معنی‌دار قوی و توانی برقرار می‌باشد ($R^2 = 0/6$) (۸، ۴۲ و ۵۴). دنگ و همکاران (۲۰۰۶) نیز ارتباط توانی معنی‌داری را بین دید افقی و غلظت PM_{10} در شهر گوانژو در بازه زمانی ۲۹-۱۵ نوامبر ۲۰۰۵ دریافتند ($R^2 = 0/62$) (۱۰). اورلونگسیتی و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از داده‌های ایستگاه میلدورا طی سال‌های ۲۰۰۴-۲۰۰۷ نیز به ارتباط مشابهی بین دید افقی و غلظت مواد معلق ($R^2 = 0/9$) دست یافتند (۴۰). در مطالعه حاضر نیز بین این دو پارامتر رابطه توانی قوی برقرار گردید ($R^2 = 0/94-0/95$).

شکل ۷ نشان می‌دهد که الگوی تغییرات ماهانه سرعت باد برخلاف دید افقی است و ارتباط معنی‌داری بین تغییرات سرعت باد و دید افقی در طی شبانه‌روز وجود دارد. این ارتباط مثبت و نمایی وابستگی دید افقی با سرعت باد را در ماه‌های سال تأیید می‌نماید. در فصل تابستان در نتیجه افزایش سرعت باد دید افقی کاهش یافته و در سایر فصول سال به دلیل کاهش سرعت باد دید افقی افزایش می‌یابد. تیر و مرداد از حداکثر سرعت باد و حداقل



(الف) الف



(ب) ب

شکل ۷- (الف-ا) تغییرات ماهانه متوسط سرعت باد و دید افقی در ساعت ۱۰:۳۰ صبح در طی سال‌های ۱۳۸۷-۱۳۹۷ و (ب) رابطه بین تغییرات ماهانه سرعت باد و دید افقی.

Figure 7. (a) Monthly variation of mean wind speed and visibility at 10:30am during 1999-2018 and (b) The relationship between monthly variation of wind speed and visibility.

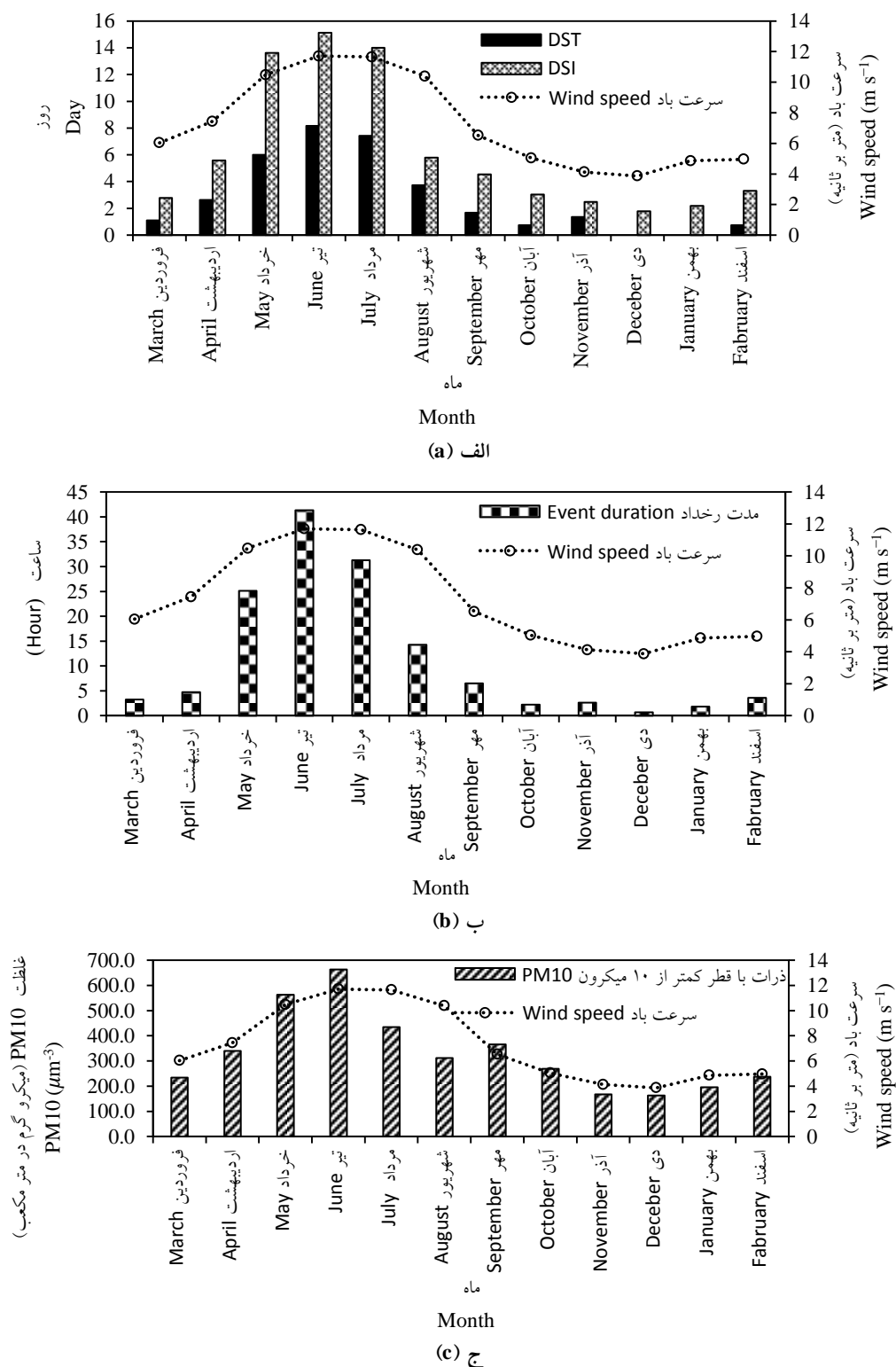
فصول بهار و تابستان طوفان‌های گردوغبار از فراوانی بیش‌تر و تعداد ساعات گردوغباری بیش‌تری نسبت به فصول پاییز و زمستان برخوردارند. فصل تابستان به‌عنوان یک فصل گردوغباری از بیش‌ترین روزهای با گردوغبار و بالاترین میزان شاخص DSI، غلظت PM10 و ساعات گردوغباری برخوردار می‌باشد. در این فصل نیز ماه تیر بالاترین مقادیر این شاخص‌ها یعنی DDI برابر ۸ روز، DSI برابر ۱۵ روز و

فراوانی ماهانه تعداد رخداد طوفان گردوغبار (DDI)، شاخص غبارناکی (DSI) و غلظت مواد معلق در هوا (PM10): شکل ۸ نشان می‌دهد که تعداد رخداد طوفان گردوغبار (DDI)، شاخص غبارناکی (DSI) و غلظت مواد معلق در هوا (PM10) از فراوانی یکسانی در طی سال برخوردار نمی‌باشند. هم‌چنین ساعات گردوغباری نیز در طی ماه‌های مختلف متفاوت می‌باشد (شکل ۸-ج). در

این پدیده در فصل گرم سال و ماه تیر و کم‌ترین در فصل سرد سال و در ماه‌های آذر و دی رخ می‌دهد. بیش‌ترین فراوانی طوفان‌های گردوغبار در شهرهای کرج و قزوین در ماه‌های خرداد و تیر (می و ژوئن) (۳)، در شهر اهواز طی سال‌های ۱۳۵۰-۱۳۸۰ در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد و طی سال‌های ۱۳۷۸-۱۳۸۱ در ماه‌های اردیبهشت، خرداد و تیر (۴۹)، در شهرستان سبزوار در ماه‌های اردیبهشت و خرداد (۳۰) و در شهرهای غربی ایران مانند آبادان و بستان در ماه‌های تیر و مرداد گزارش شده است (۵). راشکی و همکاران (۲۰۱۷) نیز مشاهده نمودند که بیش‌ترین فراوانی طوفان‌های گردوغبار در منطقه جازموریان استان سیستان و بلوچستان در ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور رخ می‌دهد (۶). ندافی و همکاران (۲۰۰۸) دریافتند که غلظت PM10 در شهر یزد در ماه‌های فروردین، اردیبهشت، خرداد، تیر و مرداد به حداکثر مقدار سالیانه می‌رسد (۳۹). عمارلویی و همکاران (۲۰۱۴) به ارزیابی غلظت ذرات معلق در هوا از جمله مقادیر PM10 در شهر ایلام طی سال‌های ۱۳۹۱-۱۳۹۲ پرداختند و نتایج آن‌ها بیانگر بالا بودن غلظت PM10 در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد و حداکثر غلظت در ماه خرداد می‌باشد (۴). در سایر کشورها نیز شرایط به همین‌گونه گزارش شده است. گودی و میدلتون (۲۰۰۱) بیان نمودند که طوفان‌های گردوغبار در کشور سوریه در ماه‌های تیر، مرداد و شهریور حداکثر می‌باشد (۲۲). مالون و همکاران (۲۰۱۲) حداکثر غلظت PM10 در شهر روم ایتالیا (که از منطقه صحرا در افریقا سرچشمه می‌گیرد) را در فصل تابستان مشاهده نمودند (۲۶). فیدلر و همکاران (۲۰۱۴) با مطالعه طوفان‌های گردوغبار در شمال افریقا دریافتند که حداکثر این پدیده در ماه‌های جون تا سپتامبر (تیر تا مهر) به وقوع می‌پیوندد (۱۴).

PM10 برابر ۶۶۲ میکروگرم در مترمکعب و متوسط ماهانه ساعت گردوغبار ۲۴۸۲ دقیقه (۴۱ ساعت) و دی پایین‌ترین مقادیر این شاخص‌ها با متوسط DDI ۰ روز، DSI برابر ۳۴ روز و PM10 برابر ۱۶۲ میکروگرم در مترمکعب و متوسط ماهانه ساعت گردوغبار ۴۲ دقیقه را دارا می‌باشند. البته مقادیر این شاخص‌ها برای ماه‌های خرداد و مرداد نیز قابل‌ملاحظه است که نشان می‌دهد این ماه‌ها نیز از غبارناکی بالایی برخوردار می‌باشند. ماه‌های شهریور و مهر نیز از مقادیر بالایی از این شاخص‌ها برخوردارند که خود نشان‌دهنده شرایط غبارناکی این ماه‌ها است. نکته قابل‌توجه این است که ماه‌های دیگر سال (آبان، آذر، دی، بهمن، اسفند، فروردین و اردیبهشت) نیز از مقادیری از این شاخص‌ها برخوردار می‌باشند که بیانگر شرایط غبارناکی منطقه سیستان در تمام طول سال می‌باشد. غلظت مواد معلق در هوا در تمامی ماه‌ها (که ممکن است در پاره‌ای از روزهای ماه باشد) باعث کاهش کیفیت هوا می‌گردد. به‌عنوان مثال در ماه‌های دی، بهمن و اسفند علی‌رغم این‌که متوسط سرعت باد در طی سال به حداقل می‌رسد و هوا آرام می‌گیرد (شکل ۸-ج) مقادیر متوسط غلظت PM10 به ترتیب ۱۶۲، ۱۹۵ و ۲۳۷ میکروگرم در مترمکعب می‌باشد که این مقادیر بالاتر از شاخص استاندارد آلودگی هوا (میزان PM10 در مدت شبانه‌روز بیش‌تر از ۱۵۰ میکروگرم در مترمکعب) است. در ماه‌های مهر، آبان، آذر، فروردین و اردیبهشت نیز شرایط به همین‌گونه است.

نتایج نشان می‌دهد که الگوی تغییرات فراوانی ماهانه طوفان‌های گردوغبار در منطقه سیستان منطبق بر الگوی تغییرات در سایر مناطق ایران و هم‌چنین برخی از مناطق درگیر در سایر کشورها است. در اکثر مناطق درگیر با گردوغبار در ایران بیش‌ترین فراوانی



شکل ۸- فراوانی ماهانه تعداد روزهای با طوفان گردوغبار (DDI)، شاخص DSI و متوسط سرعت باد در طی سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۷۸ (الف)، مدت زمان رخداد و متوسط سرعت باد در طی سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۷۸ (ب) و میانگین ماهانه PM10 و متوسط سرعت باد در طی سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۹۲.

Figure 8. Monthly variation of the number of days with dust storms (DDI), DSI and wind speed during 1999-2018 (a), monthly variation of the duration of event and mean wind speed during 1999-2018 (b) and monthly variation of averaged PM10 and mean wind speed during 2013-2018 (b).

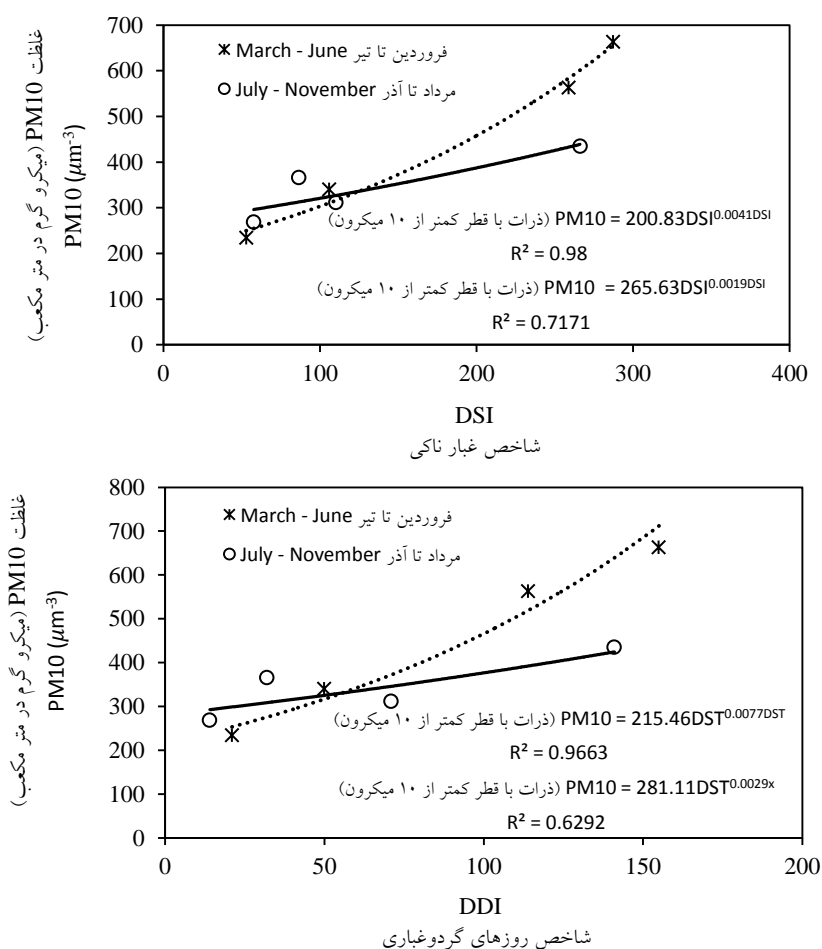
(۲۸). اورلونگسیق و همکاران (۲۰۱۴) نیز همبستگی بالا بین غلظت مواد معلق در هوا و شاخص DSI گزارش نمودند (۴۰).

فراوانی سالانه تعداد رخداد طوفان گردوغبار (DDI) و ساعات طوفانی، شاخص غبارناکی (DSI) و غلظت مواد معلق در هوا (PM₁₀): شکل ۱۰ نشان می‌دهد که در دوره آماری ۲۷ ساله شرایط غبارناکی همواره بر منطقه مورد مطالعه حاکم بوده است. مقادیر شاخص‌های DDI و DSI نشان می‌دهد که اگرچه طوفان‌های گردوغبار از پدیده‌های قابل مشهود در منطقه سیستان بوده اما پس از سال ۱۳۷۸ فراوانی این پدیده افزایش یافته است. در طول دوره مورد بررسی سال ۱۳۸۰ با ۳۱۸۶۰ دقیقه (۵۳۱ ساعت) زمان طوفانی (شکل ۱۰ ب) و دارا بودن شاخص DDI برابر ۷۴ روز از بالاترین فراوانی این پدیده برخوردار بوده است (شکل ۱۰ الف). در این حین سال ۱۳۸۲ دارای بالاترین مقدار شاخص DSI (۳۲۷ روز) می‌باشد که بیانگر شرایط غبارناکی شدید در این سال نسبت به سال‌های دیگر است. به‌طور کلی بازه زمانی ۱۳۷۸-۱۳۸۳ از شرایط غبارناکی شدیدتری نسبت به بازه‌های زمانی ۱۳۷۰-۱۳۷۷ و ۱۳۸۴-۱۳۹۷ برخوردار بوده‌اند به‌طوری‌که تعداد ۹، ۵۳ و ۱۱ طوفان گردوغبار (DDI) برای بازه‌های زمانی ۱۳۷۰-۱۳۷۷، ۱۳۷۸-۱۳۸۳ و ۱۳۸۴-۱۳۹۷ رخ داده است. در این بازه‌های زمانی شاخص DSI به ترتیب ۱۴، ۱۷۴ و ۶۶ برآورد گردیده است. هم‌چنین به ترتیب تعداد ۲، ۵۶ و ۴۵ طوفان گردوغبار شدید نیز در این بازه‌های زمانی ثبت گردیده است (شکل ۱۰). شاخص PM₁₀ (غلظت مواد معلق در هوا) در بازه زمانی ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۷ (شکل ۱۰ ج) نیز نشان می‌دهد که از سال ۱۳۹۲ غلظت مواد معلق روند افزایشی داشته است و حداکثر غلظت مواد معلق در سال ۱۳۹۷ ثبت گردیده است.

بالا بودن فراوانی طوفان‌های گردوغبار و غلظت مواد معلق در هوا در فصل تابستان و در ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور در منطقه مورد مطالعه را علاوه بر بالا بودن سرعت باد می‌توان به خشک بودن سطح تالاب هامون و هم‌چنین کاهش پوشش گیاهی مرتبط دانست. پس از وقوع خشک‌سالی سال ۱۳۷۸ به دلیل کاهش آب ورودی به منطقه سیستان تالاب هامون که در شمال منطقه قرار دارد به خشکی گراییده و به بستری مناسب جهت برداشت رسوبات تبدیل گشته است (۴۷). بنابراین به‌عنوان منبع اصلی برخاست گردوغبار شناسایی گردیده است (۱۷ و ۴۵). در پی خشک شدن تالاب هامون پوشش گیاهی آن کاهش یافته و یا از بین می‌رود و این شرایط زمینه را جهت برداشت ذرات خاک که بسیار حساس به فرسایش‌اند فراهم می‌نماید (۱۹). راشکی و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی میزان آب تالاب هامون و فراوانی طوفان‌های گردوغبار طی بازه زمانی ۱۹۸۵-۲۰۰۵ پرداختند و نتایج مطالعه آن‌ها بیانگر وجود ارتباط معنی‌دار بین خشک بودن سطح تالاب هامون و فراوانی طوفان‌های گردوغبار دارد (۴۷). آن‌ها مشاهده نمودند که فراوانی طوفان‌های گردوغبار در طی ماه‌های ژوئن، جولای و اوت بیش‌تر از سایر ماه‌های سال بوده که در این ماه‌ها سطح تالاب هامون خشک بوده است (۴۷). هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که ارتباط معنی‌داری بین غلظت PM₁₀ با شاخص‌های DDI و DSI وجود دارد (شکل ۹). این ارتباط به‌صورت مثبت و نمایی و طی ماه‌های فرودین تا تیر قوی‌تر می‌باشد ($R^2 > 0/96$). این نتایج نشان می‌دهد که متوسط غلظت مواد معلق در هوا در منطقه سیستان تابعی از فراوانی طوفان‌های گردوغبار است. مک‌تینش (۲۰۰۷) در منطقه برون‌گای استرالیا بین غلظت مواد معلق در هوا و شاخص DSI همبستگی مثبت بیش‌تر از ۹۹ درصد در بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۰۲ به‌دست آورد

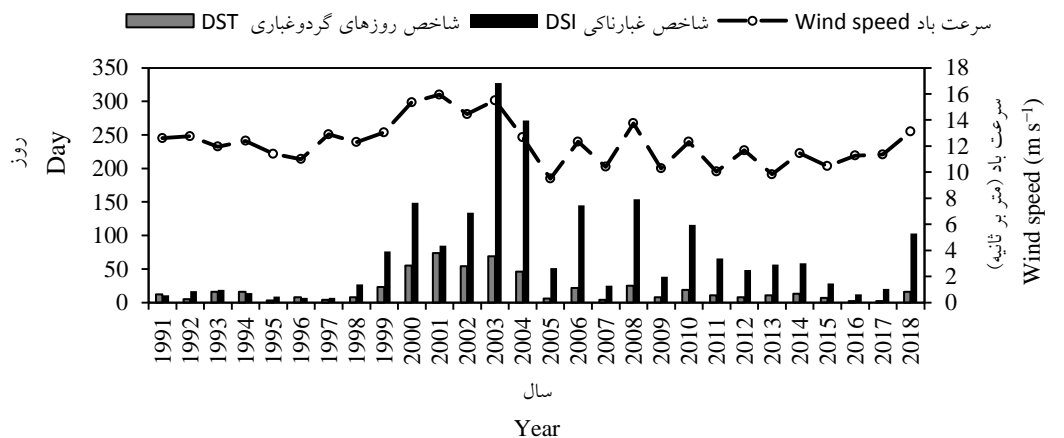
شهرهای اهواز، اردبیل، ایرانشهر، بندرعباس، خاش، زاهدان، طبس، کرمان و یزد به ترتیب ۱۰، ۱۰، ۵۹، ۱۰، ۱۵، ۴۹، ۱۵ و ۱۳ عنوان نمودند (۱۳). آرامی و همکاران (۲۰۱۸) میانگین فراوانی طوفان گردوغبار در آبادان را ۱۶ روز در سال گزارش نموده‌اند (۵). تفاوت در فراوانی روزهای با گردوغبار در مناطق مختلف کشور می‌تواند به تفاوت اقلیم در مناطق مختلف کشور باشد (۱۳).

به‌طورکلی شاخص DSI برای بازه زمانی ۲۷ ساله موردبررسی (۱۳۷۰-۱۳۹۷) برابر با ۲۰۷۶ روز می‌باشد. هم‌چنین ۵۴۷ روز با طوفان گردوغبار (DDI = ۵۴۷) در این بازه زمانی در منطقه سیستان رخ داده است که قابل‌مقایسه با مناطق دیگر ایران می‌باشد. براساس مطالعه فرج‌زاده اصل و علیزاده (۲۰۱۰) با تحلیل زمانی و مکانی طوفان‌های گردوغبار در ایران تعداد روزهای با گردوغبار (استفاده‌شده از کدهای ۳۰-۳۵) در یک بازه زمانی ۱۹ ساله (۱۹۸۷-۲۰۰۶) در

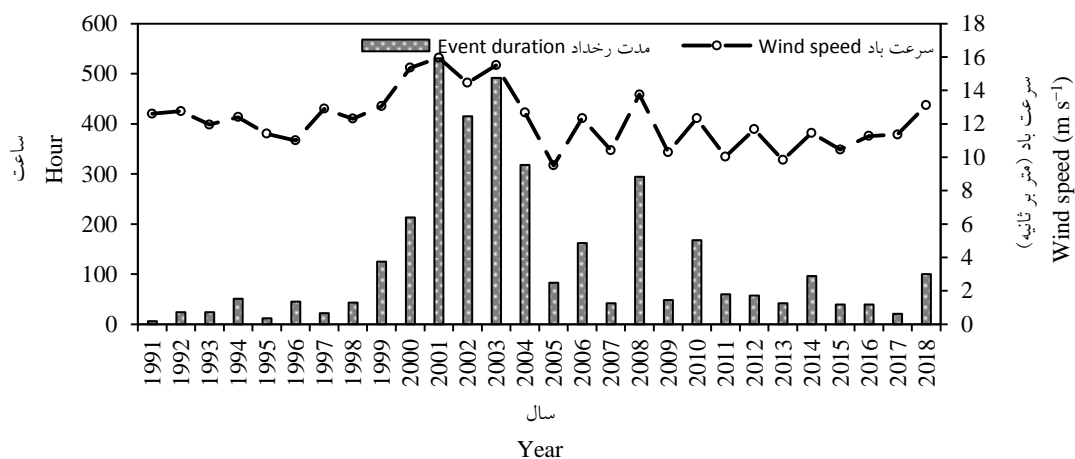


شکل ۹- رابطه بین متوسط ماهانه PM10 و متوسط ماهانه شاخص‌های DDI و DSI

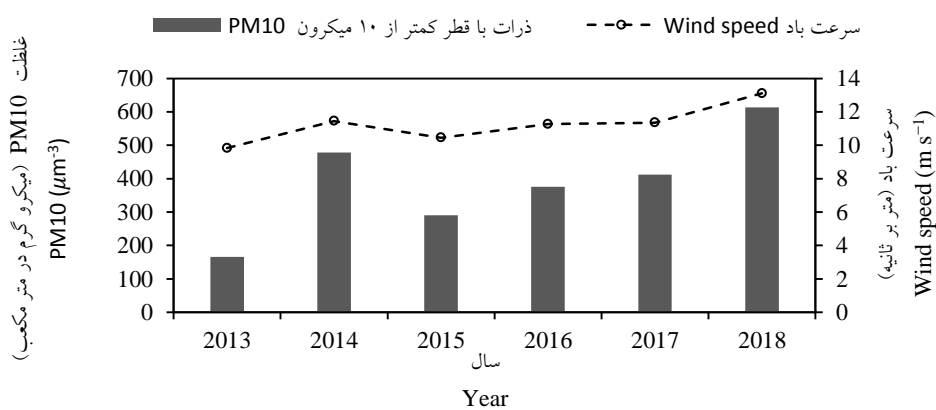
Figure 9. The relationship between the average PM10 and monthly average of DDI and DSI.



(a) الف



(b) ب



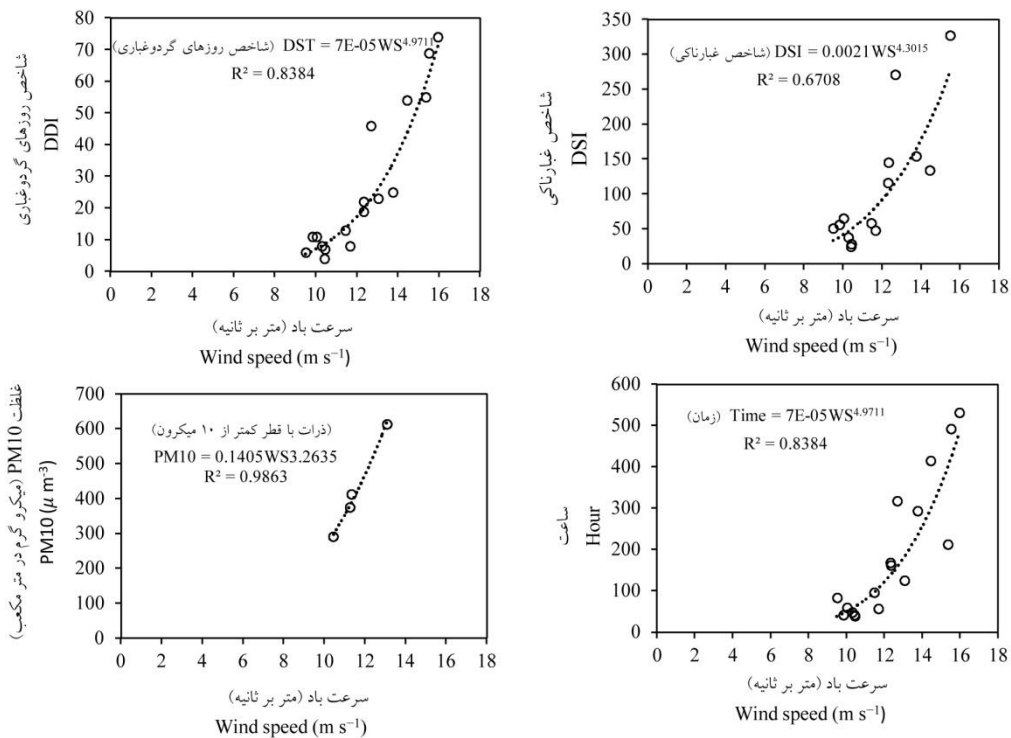
(c) ج

شکل ۱۰- فراوانی سالانه تعداد روزهای با طوفان گردوغبار (DDI)، شاخص غبارناکی (DSI) و متوسط سالانه سرعت باد در دوره آماری ۱۳۷۰-۱۳۹۷ (الف)، فراوانی سالانه ساعات طوفانی در بازه زمانی ۱۳۷۰-۱۳۹۷ (ب) و میانگین سالانه PM10 در طی سالهای ۱۳۹۲-۱۳۹۷ (ج).

Figure 10. Annual variability of the number of days of dust storm (DDI) and dusty index (DSI) and annual variation of wind speed during 1991-2018 (a), annual variation of the average duration of dust storms (in hours) during 1991-2018 and annual variation of mean PM10 during 2013-2018.

و افریقای شمالی پرداخت و عنوان نمود که اکثر گردوغبار ایجاد شده در چاد، مصر، تونس، آرژانتین، الجزایر، سودان و ایران مرتبط با خشکیدگی دریاچه‌ها بوده است (۱۹). جینوکس (۲۰۱۲) معتقد است که ۳۰ درصد از گردوغبار در سطح جهان با دریاچه‌های خشکیده مرتبط می‌باشد (۱۷). راشکی و همکاران (۲۰۱۷) خشک شدن دریاچه جازمورین را عامل اصلی گردوغبار منتقله به دریای عمان، جنوب شرقی عربستان و غرب پاکستان عنوان نمودند (۴۶). بیرکت (۲۰۰۰) و کویی و فولی (۲۰۰۱) خشکیدگی دریاچه چاد در صحارا در شمال افریقا را عامل برخاست حجم زیادی از گردوغبار معرفی نموده‌اند (۷ و ۹). افزایش فراوانی طوفان‌های گردوغبار در صحارا در اوایل دهه ۱۹۷۰ کاملاً مرتبط با وقوع خشک‌سالی گزارش شده است (۳۳). هم‌چنین کاهش بارندگی و پوشش گیاهی به‌عنوان عوامل دخیل دیگر در افزایش فراوانی طوفان‌های گردوغبار در این منطقه عنوان شده است (۳۳ و ۴۳). با بررسی تغییرات شاخص‌های PM_{10} ، DSI ، DDI و مدت زمان وقوع طوفان‌های گردوغبار و متوسط سالانه سرعت باد در شکل ۱۰ و با برقراری ارتباط بین شاخص‌های ذکرشده و سرعت باد (شکل ۱۱) می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات این پارامترها وابسته به تغییرات سرعت باد بوده به‌طوری‌که در بازه زمانی ۱۳۷۸-۱۳۸۳ که طوفان‌های گردوغبار از فراوانی بیش‌تری برخوردارند سرعت باد از مقدار میانگین در کل دوره موردبررسی بالاتر و در بازه زمانی ۱۳۸۴-۱۳۹۷ پایین‌تر می‌باشد (شکل ۱۰). بین پارامترهای ذکرشده و سرعت باد رابطه معنی‌دار مثبتی برقرار می‌باشد که نشان می‌دهد با افزایش سرعت باد غبارناکی در منطقه مورد مطالعه تشدید می‌گردد (شکل ۱۱). ژیانو و همکاران (۲۰۰۸) و تان (۲۰۱۴) رابطه مثبت بین افزایش سرعت باد و تشدید غبارناکی به‌دست آوردند و بیان نمودند که سرعت باد به‌طور مستقیم بر شاخص DSI تأثیر دارد (۵۲ و ۵۷).

بالا بودن فراوانی طوفان‌های گردوغبار در برخی سال‌ها در دوره موردبررسی علاوه بر سرعت باد همان‌طور که اشاره گردید، به پوشش گیاهی و مرطوب بودن سطح تالاب هامون بستگی دارد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد وقوع خشک‌سالی بلندمدت در منطقه سیستان پس از سال ۱۳۷۸ منجر به خشکیدگی تالاب هامون و کاهش پوشش گیاهی شده و شکل‌گیری و تشدید طوفان‌های گردوغبار را در پی داشته است؛ بنابراین علاوه بر وزش بادهای شدید عواملی هم‌چون کاهش بارندگی، کاهش رطوبت خاک و پوشش گیاهی (در سطح دریاچه و در سطح منطقه) مهم‌ترین عوامل شکل‌گیری و تشدید طوفان‌های گردوغبار می‌باشد (۴۷). پژوهش‌های گسترده‌ای نشان داده است که بین تشدید فرسایش بادی و طوفان‌های گردوغبار و میزان رطوبت سطح خاک و هم‌چنین پوشش گیاهی رابطه معنی‌دار وجود دارد (۲۷، ۳۵، ۳۶، ۴۳ و ۵۸). راشکی و همکاران (۲۰۱۳) با برقراری ارتباط بین فراوانی سالیانه طوفان‌های گردوغبار در طی سال‌های ۱۹۸۵-۲۰۰۵ با میزان بارندگی و مرطوب بودن سطح تالاب هامون دریافتند که طی سال‌هایی که فراوانی طوفان‌های گردوغبار بالا می‌باشد سطح دریاچه از کم‌ترین مقدار رطوبت برخوردار بوده است و هم‌چنین بارندگی رخ نداده یا حداقل بوده است (۴۵). خوارزمی و همکاران (۲۰۱۸) بازه زمانی ۲۰۰۵-۲۰۱۶ (۱۳۸۴-۱۳۹۵) را بازه احیای تالاب هامون عنوان نموده‌اند و در این حین در برخی سال‌ها از مقدار آب کاسته شده است که می‌تواند دلیل افزایش فراوانی طوفان‌ها و تشدید آن‌ها باشد (۲۵). نتایج مشابه در سایر نقاط دنیا نیز گزارش شده است به‌طوری‌که دریاچه‌های خشکیده به‌عنوان منبع اصلی برخاست ذرات خاک و مهم‌ترین فاکتور دخیل در شکل‌گیری و تشدید طوفان‌های گردوغبار معرفی گردیده‌اند (۱۹). قربوج (۲۰۱۷) در یک مطالعه مروری به بررسی طوفان‌های گردوغبار در خاورمیانه



شکل ۱۱- رابطه بین متوسط سالیانه سرعت باد و پارامترهای DDI, DSI, PM10 و مدت زمان وقوع طوفان‌های گردوغبار.

Figure 11. The relation between wind speed and DDI, DSI, PM10 and the duration of dust storms.

به حداکثر رسیدن غلظت مواد معلق در هوا به حداقل می‌رسد. در بعدازظهر به دلیل کاهش سرعت باد و غلظت مواد معلق، هوا صاف‌تر می‌گردد. اگرچه در تمام طول سال شرایط غبارناکی بر منطقه مورد مطالعه حاکم است، ماه‌های تیر، مرداد و شهریور بحرانی‌ترین ماه‌ها است که این با بالا بودن سرعت باد و خشک بودن تالاب هامون مرتبط است. بازه زمانی ۱۳۷۸-۱۳۸۳ از بیش‌ترین فراوانی شاخص‌های DDI و DSI برخوردار است که نشان می‌دهد در این بازه زمانی منطقه مورد مطالعه بیش‌ترین تعداد رخداد طوفان گردوغبار و شدیدترین آن‌ها را تجربه نموده است. در مقایسه با سایر مناطق ایران، منطقه مورد مطالعه از وضعیت بحرانی‌تری از غبارناکی برخوردار است به طوری که فراوانی و شدت طوفان‌های گردوغبار در این منطقه نسبت به مناطق درگیر با این پدیده بیش‌تر است. از آنجایی که غبارناکی منطقه سیستان به وضعیت تالاب هامون مرتبط است به نظر می‌رسد بهترین راه

نتیجه‌گیری کلی

در پژوهش حاضر تغییرات روزانه، ماهانه و سالانه سرعت باد، دید افقی و غلظت PM10 در یک بازه زمانی ۲۷ ساله (۱۳۷۰-۱۳۹۷) در منطقه سیستان مورد بررسی قرار گرفت. فراوانی ماهانه و سالانه طوفان‌های گردوغبار با استفاده از تحلیل شاخص‌های DDI و DSI نیز مورد آنالیز قرار گرفت. الگوی تغییرات دید افقی، سرعت باد و PM10 بیانگر آن است که دید افقی برخلاف سرعت باد و غلظت PM10 موافق با سرعت باد تغییر می‌کند. این الگو در تمامی ماه‌های سال و سال‌های مورد بررسی یکسان است. برقراری ارتباط رگرسیونی بین این پارامترها نشان داد که در ساعاتی از شبانه‌روز و در روزها و سال‌هایی که سرعت باد افزایش یافته است بر غلظت PM10 افزوده شده که خود منتج به کاهش دید افقی می‌گردد. در منطقه مورد مطالعه در ساعت ۱۰:۳۰ صبح باد به حداکثر مقدار خود می‌رسد و دید افقی به دلیل

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه زابل با شماره پژوهانه ۹۶۱۸-۴۶-UOZ-GR انجام گرفت.

جهت کاهش وقوع طوفان‌های گردوغبار احیای این دریاچه بوده تا بتوان شرایط تشکیل و وقوع این پدیده را به حداقل رساند.

منابع

- Ackerman, S.A., and Cox, S.K. 1989. Surface weather observations of atmospheric dust over the southwest summer monsoon region. *Meteorol. Atmos. Phys.* 41: 9-34.
- Ahmadi, H., Dadashi Roudbari, A.A., and Jafari, M. 2016. The effect of boundary layer height on dust storm in southwest of Iran (Case study: February 21-24, 2016). *J. Natural Environ. Hazard.* 8: 9. 151-74. (In Persian)
- Alipour, G. 2001. Suitable plants and tropical desert reclamation. *Almighty.* 106p. (In Persian)
- Amarloei, A., Jonidi Jafari, A., Asilian Mahabadi, H., and Asadollahi, K. 2011. The evaluation of Pm10, Pm2.5 and Pm1 concentration during dust storm events in Ilam city, from Mar 2013 through Feb 2014. *Sci. J. Ilam Uni. Med. Sci.* 22: 240-59. (In Persian)
- Arami, S.A., Ownegh, M., Mohammadian Behbahani, M., Akbari, M., and Zarasvandi, A.R. 2018. Statistical analysis of spatio-temporal pattern of dust storms in the west and southwest of Iran. *J. Water Soil Cons.* 25: 61-83.
- Bagnold, R.A. 1935. The movement of desert sand. *Geogr. J.* 342-65.
- Birkett, C.M. 2000. Synergistic remote sensing of lake Chad: variability of basin inundation. *Remote Sens. Environ.* 72: 218-36.
- Chepil, W.S., and Woodruff, N.P. 1957. Sedimentary characteristics of dust storms; part II, visibility and dust concentration. *Am. J. Sci.* 255: 104-14.
- Coe, M.T., and Foley, J.A. 2001. Human and natural impacts on the water resources of the lake Chad Basin. *J. Geophys. Res.* 106: 3349-56.
- Deng, X., Tie, X., Wu, D., Zhou, X., Bi, X., Tan, H., Li, F., and Jiang, C. 2008. Long-term trend of visibility and its characterizations in the Pearl River Delta (PRD) region, China. *Atmos. Environ.* 42: 1424-35.
- Ekhtesasi, M.R., Moradi, N., and Rostami, F. 2002. Investigate the change pattern of dust storms using horizontal visibility Index (Hv) and the standard precipitation index (SPI) (a case study of Esfahan city). The fifth conference of The fifth conference of science and watershed engineering, Esfahan, Iran (2002).
- Ette, A.I.I., and Olorode, D.O. 1988. The effects of the Harmattan dust on air conductivity and visibility at Ibadan, Nigeria. *Atmos. Environ.* 22: 2625-27.
- Farajzadeh Asl, M., and Alizadeh, K. 2010. Spatio temporal analysis of dust storms in Iran. *Plan. Space Plan.* 15: 65-86. (In Persian)
- Fiedler, S., Schepanski, K., Knippertz, P., Heinold, B., and Tegen, I. 2014. How important are atmospheric depressions and mobile cyclones for emitting mineral dust aerosol in north Africa? *Atmos. Chem. Phys.* 14: 8983-9000.
- Ghaderi, F., Karami, M., Shekaari, P., and Jafari, J. 2018. Atmospheric dust deposition trend and its relation with selected climatic and spatial factors in Javanrood township. *J. Water Soil Cons.* 24: 123-140.
- Gherboudj, I., Beegum, S.N., and Ghedira, H. 2017. Identifying natural dust source regions over the middle-east and north-Africa: estimation of dust emission potential. *Earth-Sci. Rev.* 165: 342-55.
- Ginoux, P.J.M., Prospero, T.E., Hsu Gill, N.C., and Zhao, M. 2012. Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on modis deep blue aerosol products. *Rev. Geophys.* 50: 3.
- Gong, S.L., Zhang, X.Y., and Zhao, T.L. 2004. Sensitivity of asian dust storm tonatural and anthropogenic factors. *Geophys. Res. Lett.* 31: 7.

19. Goudie, A.S. 2018. Dust storms and ephemeral lakes. *Desert*. 23: 153-64.
20. Goudie, A.S., and Middleton, N.J. 1992. The changing frequency of dust storms through time. *Clim. Change*. 20: 197-225.
21. Goudie, A.S, and Middleton, N.J. 2006. *Desert dust in the global system*. Springer.
22. Goudie, A.S., and Middleton, N.J. 2001. Saharan dust storms: nature and consequences. *Earth-Sci. Rev.* 56: 179-204.
23. Hagen, L.J. 1976. A wind erosion predication system to meet user needs. *J Soil Water Conserves.* 46: 106-11.
24. Hamidianpour, M., Mofidi, A., and Saligheh, M. 2016. Analysis of the nature and structure of the wind of Sistan. *Iran. J. Geogra.* 10: 83-109. (In Persian)
25. Kharazmi, R., Tavili, A., Rahdari, M.R., Chaban, L., Panidi, E., and Rodrigo-Comino, J. 2018. Monitoring and assessment of seasonal land cover changes using remote sensing. *J. Environ. Monit. Asses.* 190: 356. (In Persian)
26. Mallone, S., Stafoggia, M., Faustini, A., Paolo Gobbi, G., Marconi, A., and Forastiere, F. 2011. Saharan dust and associations between particulate matter and daily mortality in Rome, Italy. 119: 1409-14.
27. McTainsh, G.H., Chan, Y.C., and McGowan, H. 2005. The 23rd October 2002 dust storm in eastern Australia: characteristics and meteorological conditions. *Atmos. Environ.* 39: 1227-36.
28. Mctainsh, G., and Tews, E. 2007. *Soil Erosion by wind: Dust Storm Index (DSI)*. National monitoring and evaluation framework, prepared for the National Land and Water Resources Audit (NLWRA), Canberra. 27p.
29. McTainsh, G.H., and Pitblado, J.R. 1987. Dust storms and related phenomena measured from meteorological records in Australia. *Earth Surf. Proc. Land.* 12: 415-24.
30. Mehrshahi, D., Nekonam, Z. 2009. Dust storm statistics and dust wind blowing patterns analysis in Sabzevar city. *Iran. J. Geogra Soc.* 7: 83-104. (In Pesian)
31. Middleton, N.J. 2017. Desert dust hazards: a global review. *Aeolian Res.* 24: 53-63.
32. Middleton, N.J. 1986. Dust storms in the middle east. *J. Arid Environ.* 10: 83-96.
33. Middleton, N.J. 1985. Effect of drought on dust production in the Sahel. *Nature.* 6027: 431.
34. Miri, A., Ahmadi, H., Ghanbari, A., and Moghaddamia, A. 2007. Dust storms impacts on air pollution and public health under hot and dry climate. *Int. J. Energy Environ.* 2: 101-05.
35. Miri, A., Dragovich, D., and Dong, Z. 2019. Wind-borne sand mass flux in vegetated surfaces–wind tunnel experiments with live plants. *Catena.* 172: 421-34.
36. Miri, A., Dragovich, D., and Dong, Z. 2017. Vegetation morphologic and aerodynamic characteristics reduce aeolian erosion. *Sci. Rep.* 7: 12831-13084-x.
37. Miri, A., Ahmadi, H., Ekhtesasi, M.R., Panjehkeh, N., and Ghanbari, A. 2009. Environmental and socio-economic impacts of dust storms in Sistan region, iran. *Int. J. Environ. Stud.* 66: 343-55.
38. Modarres, R. 2008. Regional maximum wind speed frequency analysis for the arid and semi-arid regions of Iran. *J. Arid Environ.* 72: 1329-42.
39. Naddafi, K., Ahrampush, M.H., Jafari, V., and Yonesyan, M. 2008. Investigation of total suspended particles and its ingredients in the central area of Yazd. University of medical sciences–Health Services of Sadoughi, s martyr of Yazd. 16: 25-21. (In Persian)
40. O’Loingsigh, T., McTainsh G.H., Tews, E.K., Strong, C.L., Leys, J.F., Shinkfield, P., and Tapper, N.J. 2014. The dust storm index (Dsi): A method for monitoring broadscale wind erosion using meteorological records. *Aeolian Res.* 12: 29-40.
41. Orgill, M.M., and Sehmel, G.A. 1976. Frequency and diurnal variation of dust storms in the contiguous USA. *Atmos. Environ.* 10: 813-25.
42. Patterson, E.M., and Gillette, D.A. 1977. Commonalities in measured size distributions for aerosols having a soil-derived component. *J. Geophys. Res.* 82: 2074-82.

43. Prospero, J.M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S.E., and 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. *Rev. Geophys.* 40: 2-1-2-31.
44. Rashki, A., Kaskaoutis, D.G., Eriksson, P.G., Qiang, M., and Gupta, P. 2012. Dust storms and their horizontal dust loading in the Sistan region, Iran. *Aeolian Res.* 5: 51-62.
45. Rashki, A., Rautenbach, C.J., Eriksson, P.G., Kaskaoutis, D.G., and Gupta, P. 2013. Temporal changes of particulate concentration in the ambient air over the city of Zahedan, Iran. *Air Qual. Atmos. Health.* 6: 123-35.
46. Rashki, A., Arjmand, M., and Kaskaoutis, D.G. 2017. Assessment of dust activity and dust-plume pathways over Jazmurian basin, southeast Iran. *Aeolian Res.* 24: 145-60.
47. Rashki, A., Kaskaoutis, D.G., Goudie, A.S., and Kahn, R.A. 2013. Dryness of ephemeral lakes and consequences for dust activity: The case of the Hamoun drainage basin, southeastern Iran. *Sci. Total Environ.* 463: 552-64.38.
48. Saghafi, M.A., and Aliakbari, B., AA. 2014. Investigate diurnal and seasonal variation of wind, temperature in the surface atmospheric layers in Tehran city. *J. Spatial Anal. Environ. Hazard.* 1: 17-34. (In Persian)
49. Shamsavani, A., Yarahmadi, M., Mesdaghinia, A., Younesian, M., Jaafarzadeh, N., and Naimabadi, M. 2012. Analysis of dust storms entering Iran with emphasis on khuzestan province. *Hakim Res. J.* 15: 192-202. (In Persian)
50. Shao, Y., and Wang, J. 2003. A climatology of northeast Asian dust events. *Meteorologische Zeitschrift.* 12: 187-196.
51. Stewart, D.A., and Essenwanger, O.M. 1978. Frequency distribution of wind speed near the surface. *J. Appl. Meteorol.* 17: 1633-42.
52. Tan, M. 2016. Exploring the relationship between vegetation and dust-storm intensity (Dsi) in China. *J. Geogr. Sci.* 26: 387-96.
53. Vali, A., and Roustae, F. 2018. Investigation of the wind erosion trend in central Iran using dust storm index in the last fifty years. *J. Water Soil Sci.* 21: 189-200. (In Persian)
54. Wang, S., Yuan, W., and Shang, K. 2006. The impacts of different kinds of dust events on PM10 pollution in northern China. *Atmos. Environ.* 40: 7975-82.
55. Williams, G. 1964. Some aspects of the aeolian saltation load. *Sedimentology.* 3: 257-87.
56. Williams, P., and Young, M. 1999. Costing dust: How much does wind erosion cost the people of south Australia. Policy and economic research unit, CSIRO land and water: Canberra.
57. Xiao, F., Zhou, C., and Liao, Y. 2008. Dust storms evolution in Taklimakan desert and its correlation with climatic parameters. *J. Geogr. Sci.* 18: 415-24.
58. Yang, B., Bräuning, A., and Zhang, Z. 2007. Dust storm frequency and its relation to climate changes in northern China during the past 1000 Years. *Atmos. Environ.* 41: 9288-99.



Dust storms analysis in the Sistan region using DDI and DSI indices and wind speed, visibility and PM10 parameters

***A. Miri**

Assistant Prof., Dept. of Range and Watershed Management, University of Zabol

Received: 07.13.2019; Accepted: 01.04.2020

Abstract

Background and Objectives: During the recent decades dust storms have become serious natural hazards in the world. Although dust storms have been investigated in various aspects, variation in wind speed and visibility and the frequency of dust storms require more investigation. In this study, diurnal, monthly and yearly variation of parameters including wind speed, visibility and PM10 (particulate matter 10 micrometers or less in diameter) and frequency of dust storms was studied in the Sistan region for the twenty seven-year period.

Materials and Methods: Sistan in the southeast part of Iran is considered as the study area. Sistan has an arid and semi-arid climate with very low precipitation (59 mm) and humidity and high evaporation (nearly 4820 mm) and annual temperature (22 °C). To analysis the diurnal, monthly and yearly variations of wind speed and visibility, the collected data at the Zabol meteorological station were obtained from the Iran Meteorological Organization for the study period. DDI (Dusty Days Index; the days with wind speed more than 15 m/s and visibility less than 1000 m) and DSI (Dusty Index) were applied in this study to analysis the monthly and yearly frequency of dust storms during 1991-2018. Furthermore, the hourly concentration of PM10 was received from the meteorological and environmental stations of the respective centers during 2013-2018.

Results: The results show that the diurnal variation of wind speed, visibility and PM10 was similar in all months during the study period. The highest PM10 concentration and lowest visibility were observed at 10:30 am in accords with highest wind speed. The highest visibility occurred at 7:30 pm when PM10 and wind speed were lowest. The highest DDI, DSI and PM10 values- 8 days, 15 days and 662 $\mu\text{g m}^{-3}$ respectively, were observed in June. The highest DDI and dust storm duration- 74 days and 3186 minutes (531 hours) were observed in 2001. The period of 1999-2004 is dustier than the periods of 1990-1999 and 2005-2018. DSI were 174, 14 and 66 days in these periods, respectively. Strong correlations were observed between wind speed and visibility, wind speed and PM10 and, visibility and PM10. These correlations show that PM10 and visibility are dependent on wind speed. Furthermore, positive correlations were observed between PM10 and wind speed, DSI and wind speed and DDI and wind speed. These correlations indicate that variations of PM10, DSI and DDI are highly dependent on wind speed.

Conclusion: In the study period of 27 years, the Sistan region is dustier than other parts of Iran due to higher intensity and frequency of dust storms in this region. Dustiness in the Sistan region is highly dependent on the situation of Hamoun Lake and thus the recovery of the lake is the best controlling approach to reduce the intensity and frequency of dust storms.

Keywords: Dust storms, Sistan, Visibility, Wind speed

* Corresponding Author; Email: miri.abbas@uoz.ac.ir

Arci