

اقلیم‌شناسی رخدادهای توفان گردوخاک در فصل تابستان در استان سیستان و بلوچستان در دوره ۳۰ ساله (۲۰۱۶-۱۹۸۷)

نوشین خدام^{۱*}، سحر تاج‌بخش^۲، عباسعلی علی‌اکبری بیدختی^۳، ساویز صحت کاشانی^۴، عباس رنجبرسعادت آبادی^۵

۱- دانشجوی دکتری، هواشناسی، پژوهشگاه هواشناسی، تهران، ایران

۲ و ۴- استادیار، پژوهشگاه هواشناسی، تهران، ایران

۳- استاد، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۵- دانشیار، پژوهشگاه هواشناسی، تهران، ایران

چکیده:

شدت و فراوانی رخدادهای توفان گردوخاک در استان سیستان و بلوچستان در فصل تابستان (ژوئن، ژوئیه و اوت) با تغییر در گردش‌های بزرگ‌مقیاس جوی تغییر می‌کند. به‌منظور بررسی گردش‌های بزرگ‌مقیاس جوی با استفاده از داده‌های باز تحلیل‌شده NCEP/NCAR شاخص موسمی هند و شاخص اقلیمی کاسپین-هندوکش برای بازه زمانی ۳۰ ساله (۱۹۸۷-۲۰۱۶) در فصل تابستان محاسبه شده است. نتایج نشان داد که شدت شاخص موسمی هند در طی این دوره کاهش پیدا کرده و بر شدت شاخص کاسپین-هندوکش افزوده شده که سبب تقویت جریان‌های شمالی در مرزهای شرقی ایران و غرب افغانستان شده‌اند؛ از طرفی شاخص توفان گردوخاک که با استفاده از داده‌های دیدبانی ایستگاه‌های هواشناسی این استان محاسبه شد، روند معنی‌داری در این بازه زمانی نشان نداد. همچنین با بررسی مقادیر بیشینه یا کمینه شاخص‌های یادشده در سال‌های بحرانی مشاهده شد که مقادیر بیشینه/کمینه شاخص توفان گردوخاک با بیشینه/کمینه شاخص کاسپین-هندوکش و کمینه/بیشینه شاخص موسمی هند منطبق است.

کلید واژه‌ها: سیستان و بلوچستان، گردوخاک، شاخص موسمی هند، شاخص کاسپین-هندوکش، شاخص توفان گردوخاک

مقدمه

استان پهنای سیستان و بلوچستان که در جنوب شرقی ایران واقع شده است، علاوه بر بالا بودن دما و اندک بودن بارش‌های جوی در فصل تابستان، تحت تأثیر بادهای ۱۲۰ روزه سیستان (باد لوار) قرار داشته که خود متأثر از گردش‌های بزرگ‌مقیاس و میان‌مقیاس جوی است (مفیدی و همکاران، ۱۳۹۲). تغییرات اقلیمی در طی سالیان متوالی سبب خشک شدن تالاب‌های هامون و جازموریان در این استان شده و به دلیل خشکسالی‌های طولانی و استفاده نادرست از منابع آبی (علیزاده و همکاران، ۲۰۱۴)، این استان به یکی از مناطق گردوخاک خیز در کره زمین تبدیل شده است، به طوری که سازمان جهانی هواشناسی در سال ۲۰۱۷ (WMO, 2017)، حوضه آبریز سیستان را به‌عنوان یکی از فعال‌ترین چشمه‌های گردوخاک داخل ایران معرفی کرده است. اگرچه رخدادهای توفان گردوخاک در این منطقه در هر زمان از سال قابل‌انتظار است، اما به دلیل بارش اندک و استقرار بادهای لوار در فصل تابستان، همچنین خاک فرسایش‌پذیر در تالاب‌های خشک‌شده، مقادیر عظیمی از گردوخاک در این فصل وارد جو شده و می‌تواند مناطق دیگری را تحت تأثیر قرار دهد.

صحت کاشانی و همکاران (۲۰۰۹) در بررسی‌های خود نشان دادند که استقرار سامانه‌های تابستانی در جنوب شرق ایران منجر به ایجاد شیوهای فشاری در راستای شمالی-جنوبی می‌شوند. شب‌هنگام با توجه به سرمایش شبانه و افزایش پایداری ایستایی، کاهش متوسط جریان درون دره نسبت به شارش‌های روزانه مشاهده می‌شود. نیروی شیو فشاری سبب وزش بادهای شدید شده که همراه با رشد لایه‌مرزی به‌ویژه در بعدازظهرها و نیز تأثیر جریان‌های تراز بالای جو، تکانه افزایش پیدا کرده و با زیاد شدن سرعت شارش، توفان‌های گردوخاک شدید و طولانی‌مدت (۱۲۰ روز) را در پی خواهد داشت. پراسپرو و همکاران (۲۰۰۲، Prospero et al.) با استفاده از بررسی محصول سنجنده TOMS که بر روی ماهواره Nimbus-7 قرار دارد، در یک دوره ۱۳ ساله (۱۹۹۲-۱۹۸۰) چشمه‌های گردوخاک را در مقیاس جهانی مورد مطالعه قرار دادند. در این بررسی، مرز بین ایران و افغانستان به‌عنوان یکی از چشمه‌های فعال

گردوخاک همراه با خشک شدن دریاچه‌ها و تالاب‌ها در این منطقه معرفی شد. فعالیت چشمه‌های گردوخاک این حوضه از ماه آوریل آغاز شده، در ماه‌های ژوئن و ژوئیه شدت پیدا کرده و تا ماه سپتامبر تضعیف می‌شود. اثرات بادهای محلی که با توجه به زمان وزش و پهنه فعالیت آن دارای ویژگی‌های متفاوتی بوده، در برخی مناطق ایران به دلیل تداوم و سرعت زیاد، نمایان و فعالیت‌های ساکنین منطقه را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد که نمونه بارز آن در کشور، دره لوت است. شرایط زمین‌شناختی موجود در اطراف دره لوت نقش بسزایی در گسترش جریان‌های کانالیزه ایفا می‌نماید. امکان این امر از طریق اندرکنش بین واداشتهای زمین‌شناختی پیچیده و شرایط هواشناختی صورت می‌پذیرد. به‌علاوه فرارفت هوای سرد از عرض‌های شمالی و شیو فشاری از عوامل تعیین‌کننده این شارش محسوب می‌شوند (صحت کاشانی و همکاران، ۱۳۸۵). با هدف شناخت ویژگی‌های زمانی و بررسی امکان پیش‌بینی پدیده‌ی گردوخاک در ایستگاه زابل، به‌عنوان گردوخاکی‌ترین ایستگاه کشور، سبحانی و همکاران (۱۳۹۱) به تحلیل ویژگی‌های آماری داده‌های مربوط به فراوانی ماهانه، فصلی و سالانه‌ی روزهای توأم با گردوخاک ایستگاه زابل با آمار ۴۱ ساله پرداخته‌اند. نتایج نشان داد در طول دوره‌ی آماری مورد مطالعه، ماه ژوئیه و اوت گردوخاکی‌ترین ماه‌های سال هستند. بر اساس مطالعات صورت گرفته در یک دوره ۶۱ ساله (۲۰۱۰-۱۹۵۰) دیده شده است که با تقویت جریان‌های موسمی هند که همراه با جریان‌های بالاسوی شدید در منطقه موسمی هند است، جریان‌های فروسو در ترازهای میانی و زیرین جو روی شرق ایران افزایش می‌یابند. این شرایط می‌تواند حرکت‌های صعودی احتمالی در ترازهای زیرین جو را سرکوب کنند (خداوند و همکاران، ۱۳۹۱) در واقع، سرعت قائم روی ایران از تراز ۵۰۰ تا ۲۰۰ هکتوپاسکال همبستگی منفی و معنی‌دار با شاخص‌های موسمی هند دارد که نشان می‌دهد افزایش شدت جریان‌های موسمی، جریان‌های فروسو روی منطقه ایران را در ترازهای میانی و زیرین تقویت می‌کند. هم‌چنین مشاهده شد که در مدت موسمی قوی که با افزایش ابرناکی و بارش در منطقه‌ی موسمی هند همراه است، روی شرق

Kaskaoutis et al. بر اساس اختلاف تغییرات فشار سطح دریا بین دریای خزر و هندوکش، $CasHKI^3 = MSLPanom.Cas - MSLPanom.HK$ تعریف شده است. آن‌ها مشاهده کردند که تغییرات شدت شاخص CasHKI اثر معنی‌داری روی موسمی تابستانی هند دارد؛ به طوری که مقادیر بالای این شاخص با کاهش بارش روی جنوب شبه‌قاره هند و مناطق اقیانوسی هم‌جوارش همراه است، درحالی‌که در طول حوضه گنگ و رشته‌کوه هیمالیا با افزایش بارش روبه‌رو می‌شویم. هم‌چنین ایشان نشان دادند افزایش شدت این شاخص با افزایش بادهای لوار در شرق ایران همراه است که می‌تواند چشمه‌های گردوخاک جنوب غرب آسیا را فعال کند. در این مقاله نخست به معرفی شاخص‌ها و محاسبه آن‌ها پرداخته و سپس ضرایب همبستگی بین شاخص توفان گردوخاک در استان سیستان و بلوچستان و شاخص‌های اقلیمی به دست آمده است. در بخش بعدی نتایج به صورت آماری آمده است.

داده‌ها و روش کار

در این مطالعه داده‌های دیدبانی پنج ایستگاه هواشناسی همدیدی زابل، زاهدان، خاش، ایرانشهر و چابهار با توجه به وضعیت قابل قبول داده‌ها در بازه زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۶ انتخاب شده‌اند که مشخصات جغرافیایی آن‌ها در جدول ۱ درج شده است.

برای مطالعه رخداد‌های گردوخاک و تغییرات زمانی و مکانی آن، از شاخص توفان گردوخاک^۳ (DSI) (۲۰۰۷، McTainsh and Tews) استفاده شده است. این شاخص فراوانی و شدت رخداد‌های گردوخاک را بر اثر فرسایش باد با استفاده از داده‌های دیدبانی اندازه‌گیری می‌کند. کدهای مورد استفاده در محاسبه این شاخص عبارت‌اند از ۰۷، ۰۸، ۰۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴، ۳۵ و ۹۸ که طبق جدول ۲ برای حالت‌های متفاوت گردوخاکی در گزارش‌های دیدبانی ثبت می‌شوند.

در این مطالعه منظور از روز گردوخاکی روزی است که حداقل در دو دیدبانی متوالی کدهای مذکور گزارش شده

ایران افزایش دما در ترازهای میانی جو رخ می‌دهد؛ هرچند در ترازهای پایین همبستگی معنی‌داری وجود ندارد. علاوه بر این، دیده شد که افزایش بارندگی در شبه‌قاره هند، میزان ابرناکی در شرق و جنوب-شرق ایران را افزایش می‌دهد (خدام و همکاران، ۱۳۹۴). راشکی و همکاران (۲۰۱۲) با بررسی ویژگی‌های هواویزها و کیفیت هوا در منطقه سیستان مشاهده کردند که انتقال گردوخاک به مدت‌زمان رخداد‌های گردوخاک و نیز به سرعت باد و فاصله از محل چشمه بستگی دارد. آن‌ها با بررسی توزیع اندازه ذرات تغییرات زمانی و مکانی معنی‌داری در ویژگی ذرات گردوخاک مشاهده کردند. علیزاده و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از داده‌های مشاهداتی در دسترس و اجرای مدل^۱ WRF/Chem^۱ بادهای ۱۲۰ روزه سیستان و فعالیت‌های گردوخاکی روی حوضه سیستان را بررسی کردند. در فصل تابستان یک سامانه پرفشار روی کوه‌های بلند هندوکش در شمال افغانستان همراه با یک کم‌فشار گرمایی روی مناطق بیابانی شرق ایران و غرب افغانستان شکل گرفته و یک شیو فشاری قوی در طول مرز ایران و افغانستان به وجود می‌آید که سبب شدت گرفتن بادهای سطحی و پیدایش جت ترازپایین در این منطقه می‌شود. این جت ترازپایین گسیل قابل توجه گردوخاک از سطح حوضه سیستان و سپس انتقال نصف‌النهاری دوربرد آن را سبب می‌شود. کاسکائوتیس و همکاران (۲۰۱۴)، Kaskaoutis et al. با شبیه‌سازی توفان گردوخاک در منطقه سیستان توسط مدل^۲ RegCM^۲ نشان دادند که شرایط زمین‌شناختی محلی و منطقه‌ای در شکل‌گیری کم‌فشارهای گرمایی در حوضه سیستان همراه با همگرایی سطحی و جریان‌های فراسوی جوی نقش قابل توجهی را ایفا می‌کنند و منشأ گسیل گردوخاک از سطح هستند. هم‌چنین توفان‌های گردوخاک روی سیستان به دنبال افزایش شدت و اچرخند روی دریای خزر شکل گرفته که یک شیو فشاری غرب به شرق را به وجود می‌آورد؛ بنابراین سبب تقویت باد لوار می‌شود. یک شاخص اقلیمی توسط کاسکائوتیس و همکاران (۲۰۱۶)،

1 Weather Research Forecasting model coupled with Chemistry

2 The Regional Climate Model system

3 Caspian Hindu Kush Index

4 Dust Storm Index

رخداد‌های محلی گردوخاک (کد ۷ و ۸) است. شمارنده i تعداد ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه است. در این مطالعه با توجه به تعداد اندک ایستگاه‌های موجود، شاخص مذکور برای هر ایستگاه به تفکیک برای ایستگاه‌های منتخب استان سیستان و بلوچستان در بازه زمانی ۳۰ ساله (۱۹۸۷-۲۰۱۶) و برای فصل تابستان (ژوئن، ژوئیه و اوت) محاسبه شد.

باشد (McTainsh and Tews, ۲۰۰۷). شاخص DSI توسط رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$DSI = \sum_{i=1}^n [(5 \times SD) + MD + (0.05 \times LDE)]_i \quad (1)$$

به طوری که SD توفان شدید گردوخاک (کدهای ۳۳ تا ۳۵) با سرعت وزش باد بیش از ۳۰ نات و دید افقی کمتر از ۲۰۰ متر، MD توفان ملایم گردوخاک (کدهای ۳۰ تا ۳۲) با دید افقی کمتر از ۱۰۰۰ متر و کد ۹ و کد ۹۸ و LDE

جدول ۱-- مختصات ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی مورد مطالعه.

ردیف	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از تراز دریا (متر)
۱	زابل	۶۱/۶۸	۳۱/۰۳	۴۹۸/۲
۲	زاهدان	۶۰/۸۸	۲۹/۴۷	۱۳۷۰
۳	خاش	۶۱/۲۰	۲۸/۲۲	۱۴۲۷
۴	ایرانشهر	۶۰/۷۰	۲۷/۲۰	۵۹۱/۱
۵	چابهار	۶۰/۶۲	۲۵/۲۹	۸

جدول ۲- کدهای همدیدی مرتبط با گردوخاک.

کد	توضیحات
۰۵	غبار ^۱ : حالتی از تیرگی هوا است که در نتیجه وجود ذرات جامد و معلق در هوا ایجاد می‌شود. این ذرات ممکن است شامل دود، بخار آب، خاک و یا ذرات ماسه بسیار ریز باشند.
۰۶	گردوخاک معلق در هوا ^۲ : گردوخاک معلق در هوا و گسترده که به وسیله باد در ایستگاه و یا نزدیکی ایستگاه بلند نشده است.
۰۷	گردوخاک برخاسته ^۳ : گردوخاک و یا ماسه‌ای که در ساعت دیدبانی در اثر وزش باد در ایستگاه و یا اطراف آن به هوا بلند شده باشد.
۰۸	گردبادهای تکامل یافته ^۴ : که در زمان دیدبانی یا طی یک ساعت گذشته در ایستگاه و یا اطراف آن مشاهده شده است.
۰۹	توفان گردوخاک یا ماسه ^۵ : که در ساعت دیدبانی در اطراف ایستگاه وجود داشته یا در ساعت گذشته در خود ایستگاه وجود داشته است.
۳۰	توفان ملایم یا متوسط گردوخاک یا ماسه: طی ساعت گذشته از شدت توفان کاسته شده است (سرعت باد بیش از ۳۰ نات و دید افقی کمتر از ۱۰۰۰ متر).
۳۱	توفان ملایم یا متوسط گردوخاک یا ماسه: طی ساعت گذشته شدت توفان تغییری نکرده است (سرعت باد بیش از ۳۰ نات و دید افقی کمتر از ۱۰۰۰ متر).
۳۲	توفان ملایم یا متوسط گردوخاک یا ماسه: طی ساعت گذشته بر شدت توفان افزوده شده است (سرعت باد بیش از ۳۰ نات و دید افقی کمتر از ۱۰۰۰ متر).
۳۳	توفان شدید گردوخاک یا ماسه: طی ساعت گذشته از شدت توفان کاسته شده است (سرعت باد بیش از ۳۰ نات و دید افقی کمتر از ۱۰۰۰ متر).
۳۴	توفان شدید گردوخاک یا ماسه: طی ساعت گذشته شدت توفان تغییری نکرده است (سرعت باد بیش از ۳۰ نات و دید افقی کمتر از ۱۰۰۰ متر).
۳۵	توفان شدید گردوخاک یا ماسه: طی ساعت گذشته بر شدت توفان افزوده شده است (سرعت باد بیش از ۳۰ نات و دید افقی کمتر از ۱۰۰۰ متر).
۹۸	رعدوبرق توأم با توفان گردوخاک و یا توفان ماسه

1. Haze
- 2 Dust Haze
- 3 Rising Dust
- 4 Dust Devil
- 5 Dust storm or Sand Storm

با توجه به نمودار شکل ۲، شاخص موسمی هند در طی ۳۰ سال روند معنی‌دار^۳ کاهشی ($p\text{-value}=0.0019$) و شاخص CasHki روند معنی‌دار افزایشی ($p\text{-value}=0$) را نشان می‌دهند؛ بنابراین با کاهش گردش موسمی هند در سال‌های اخیر، اختلاف فشار سطح دریا بین دریای خزر و کوه‌های هندوکش افزایش پیدا کرده است که می‌تواند سبب افزایش شدت بادهای ۱۲۰ روزه سیستان شده و جریان‌های شمالی نسبتاً قوی در فصل تابستان روی مناطق شرق و جنوب‌شرق ایران حاکم شود. با این حال، شاخص گردوخاک در ایستگاه‌های همدیدی استان سیستان و بلوچستان تغییرات معنی‌داری از خود نشان نمی‌دهد و به نظر می‌رسد افزایش شدت باد به‌تنهایی برای افزایش شدت و فراوانی گسیل گردوخاک در این مناطق کافی نیست.

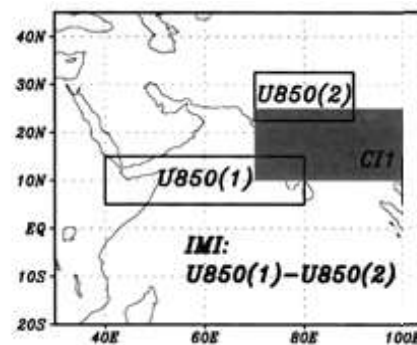
ضرایب همبستگی بین شاخص‌های موسمی هند و کاسپین-هندوکش با کمیت‌های هواشناسی دیدبانی شده در ایستگاه‌های سیستان و بلوچستان محاسبه شد و نتایج در جدول ۳ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضرایب همبستگی بین شاخص موسمی هند با کمیت‌های هواشناسی دیدبانی شده در ایستگاه‌های منتخب استان سیستان و بلوچستان در جهت مخالف ضرایب همبستگی بین شاخص کاسپین هندوکش و کمیت‌های هواشناسی است.

به این صورت که ضریب همبستگی بین شاخص موسمی هند و دما در ایستگاه‌های زابل، ایرانشهر و چابهار منفی و در سطح اطمینان ۹۹٪ معنی‌دار است، در حالی که در ایستگاه‌های زابل، زاهدان و ایرانشهر شاخص کاسپین-هندوکش در سطح اطمینان ۹۹٪ دارای همبستگی منفی با دما است.

ضریب همبستگی بین رطوبت نسبی با شاخص موسمی هند در ایستگاه زابل در سطح اطمینان ۹۹٪، مثبت و در ایستگاه زاهدان و خاش در سطح اطمینان ۹۵٪ با مقادیر مثبت دیده می‌شود، اما ضریب همبستگی رطوبت نسبی با شاخص

۳ از نظر آماری معنی‌داری مقدار درست‌نمایی بین دو یا چند متغیر است که به دلیلی غیر از شانس به هم ربط دارند. در آزمون‌های معنی‌داری یک مقدار $p\text{-value}$ محاسبه می‌شود و بر این اساس نتایج را تحلیل می‌کنند. اگر مقدار $p\text{-value}$ از ۰/۰۵ کمتر باشد از لحاظ آماری در سطح ۹۵٪ معنی‌دار است.

با استفاده از داده‌های باز تحلیل‌شده^۱ NCEP/NCAR (Kalny et al., ۱۹۹۶) شاخص دینامیکی موسمی هند^۲ (IMI) بر اساس کار وانگ و فان (۱۹۹۹، Wang and Fan) برای دوره مطالعاتی ۳۰ ساله (۱۹۸۷ تا ۲۰۱۶) محاسبه شده است. برای محاسبه شاخص دینامیکی با توجه به شکل ۱ دو منطقه انتخاب شده است: (۱) عرض جغرافیایی ۵ تا ۱۵ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۰ تا ۸۰ درجه شرقی و (۲) عرض جغرافیایی ۲۰ تا ۳۰ درجه شمالی و ۷۰ تا ۹۰ درجه شرقی. اختلاف مؤلفه مداری باد در تراز ۸۵۰ میلی باری بین این دو منطقه شدت گردش‌های موسمی هند را برآورد می‌کند.



شکل ۱- مناطق موردنظر در محاسبه شاخص دینامیکی موسمی هند در فصل تابستان

شاخص اقلیمی دیگری نیز

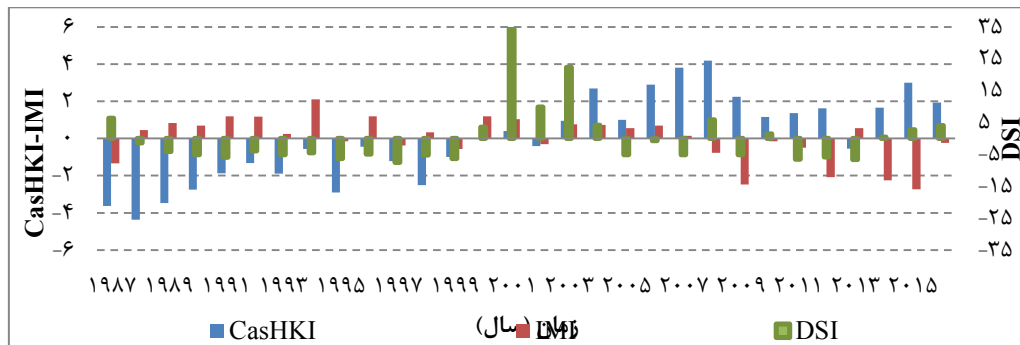
$$(CasHki = MSLPanom.Cas - MSLPanom.HK)$$

توسط کاسکائوتیس و همکاران (۲۰۱۶، Kaskaoutis et al.) تعریف شده که بر اساس اختلاف تغییرات میانگین فشار سطح دریا بین دریای خزر (۴۰ تا ۵۰ درجه عرض جغرافیایی و ۵۰ تا ۵۵ درجه طول جغرافیایی) و هندوکش (۳۵ تا ۴۰ درجه عرض جغرافیایی و ۷۰ تا ۷۵ درجه طول جغرافیایی) تعریف می‌شود و در این مطالعه برای بازه زمانی ۳۰ ساله (۱۹۸۷ تا ۲۰۱۶) در فصل تابستان (ژوئن، ژوئیه و اوت)، محاسبه شده است.

بحث و نتایج

1 National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research
2 Indian Monsoon Index

کاسپین هندوکش در ایستگاه زابل و زاهدان در سطح اطمینان ۹۹٪ و در ایستگاه خاش در سطح اطمینان ۹۵٪ دارای مقادیر منفی است؛ بنابراین، با افزایش شدت موسمی، دما و رطوبت نسبی در استان سیستان و بلوچستان به ترتیب کاهش و افزایش پیدا می‌کنند.



شکل ۲ - روند تغییرات تابستانی (ژوئن، ژوئیه و اوت) نسبت به میانگین بلندمدت ۳۰ ساله (۱۹۸۷-۲۰۱۶) برای شاخص موسمی هند، شاخص کاسپین-هندوکش و شاخص گردوخاک در ایستگاه زابل

جدول ۳- ضرایب همبستگی پیرسون بین شاخص کاسپین-هندوکش و موسمی هند با کمیت‌های هواشناسی به تفکیک ایستگاه‌های همدیدی منتخب استان سیستان و بلوچستان. خانه‌های بنفش دارای سطح اطمینان ۹۵٪ و خانه‌های نارنجی دارای سطح اطمینان ۹۹٪ هستند.

چابهار	ایران‌شهر	خاش	زاهدان	زابل	IMI
-0.468**	-0.403*	0.187	-0.195	-0.416*	دما
-0.255	-0.349	-0.274	-0.279	0.139	فشار
-0.008	0.358	0.420*	0.363*	0.522**	رطوبت نسبی
0.293	0.174	-0.005	0.199	0.361	بیشینه سرعت باد
0.709**	0.363*	-0.240	-0.009	-0.238	دید افقی
-0.025	0.363*	0.230	-0.078	0.075	DSI
CasHki					
0.189	0.679**	-0.012	0.478**	0.604**	دما
0.063	0.456*	0.417*	-0.154	-0.359	فشار
-0.307	0.049	-0.435*	-0.615**	-0.683**	رطوبت نسبی
-0.519**	-0.035	-0.001	-0.465**	0.227	بیشینه سرعت باد
-0.698**	-0.517**	0.305	-0.343	-0.096	دید افقی
-0.016	0.081	-0.553**	0.081	0.197	DSI

توفان گردوخاک شهر زابل با وجود اینکه کمتر از میانگین است، با این حال می‌توان گفت در وضعیت نرمال خود قرار دارد. در سال ۲۰۰۸ بیشترین مقدار شاخص CasHki دیده می‌شود. در این سال شاخص موسمی هند نزدیک به یک انحراف معیار کمتر از میانگین خود است که نشان می‌دهد در این سال جریان‌های موسمی نسبت به میانگین بلندمدت ضعیف‌تر بودند. این در حالی است که شاخص DSI نزدیک به یک انحراف معیار بیشتر از میانگین بلندمدت خود

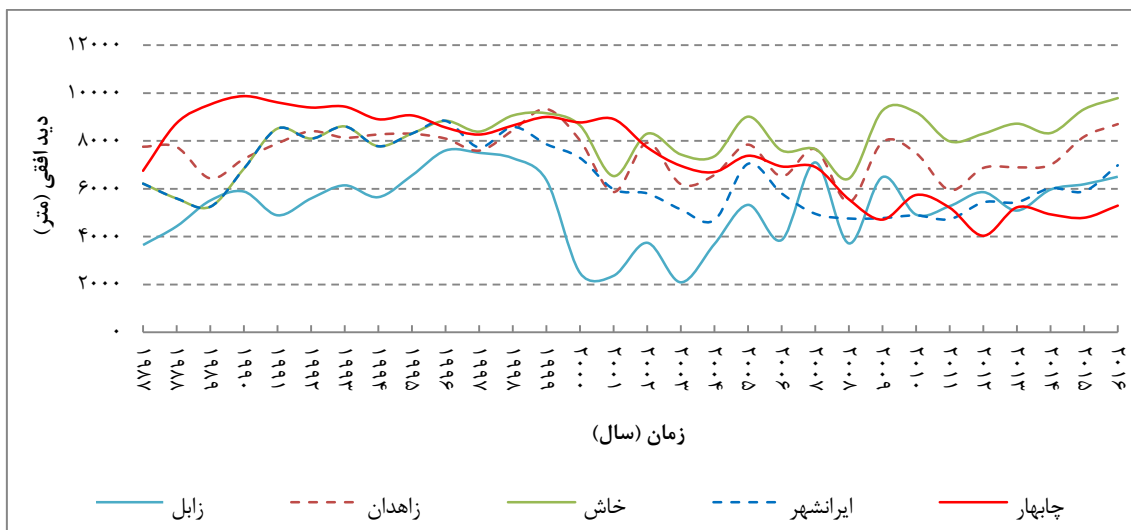
همچنین با افزایش شدت شاخص کاسپین-هندوکش شاهد افزایش دما و کاهش رطوبت نسبی در این استان هستیم. بررسی سال‌های بیشینه و کمینه شاخص‌های محاسبه‌شده نیز نشان داد که در سال ۱۹۸۸ با کمترین مقدار شاخص CasHki روبه‌رو هستیم به طوری که شاخص موسمی هند در حدود نصف انحراف معیار بیش از میانگین بلندمدت است و بنابراین فعالیت جریان‌های موسمی هند نسبت به میانگین از شدت بیشتری برخوردار هستند. ولی شاخص

است. همچنین با توجه به شکل ۳ دید افقی در ایستگاه زابل (و بیشتر ایستگاه‌های استان سیستان و بلوچستان) دارای کمینه نسبی است؛ بنابراین به نظر می‌رسد با افزایش اختلاف بین فشار تراز دریا بین دریای خزر و کوه‌های هندوکش، شیوهای فشاری در شرق ایران و غرب افغانستان تقویت شده و سبب افزایش سرعت باد در این مناطق شده که با توجه به مساعد بودن سطح زمین موجب گسیل مقادیر عظیمی از گردوخاک شده که همراه با وزش باد شدید به‌صورت توفان گردوخاک شهر زابل را درنوردیده‌اند. بیشترین مقدار شاخص موسمی هند در سال ۱۹۹۴ مشاهده می‌شود. در این سال شاخص توفان گردوخاک به اندازه نصف انحراف معیار از میانگین بلندمدت خود کمتر است و

شاخص CasHkl نیز با اندکی کاهش نسبت به میانگین بلندمدت خود روبه‌رو است؛ بنابراین با تقویت جریان‌های موسمی، بادهای شمالی تضعیف شده و از شدت و فراوانی توفان‌های گردوخاک در زابل کاسته می‌شود؛ اما ضعیف‌ترین موسمی هند در سال ۲۰۱۵ رخ داده است که در این سال شاخص CasHkl بیش از یک انحراف معیار از میانگین بلندمدت خود بیشتر است و DSI نیز مقادیر بیشتر از میانگین را نشان می‌دهد و به‌طور قابل‌قبولی می‌توان گفت که کاهش موسمی هند سبب تقویت بادهای شمالی در شرق ایران و غرب افغانستان شده و موجب افزایش توفان‌های گردوخاک می‌شود.

جدول ۴- مقایسه بیشینه و کمینه شاخص موسمی هند، شاخص توفان گردوخاک و شاخص کاسپین-هندوکش

Year	ایستگاه زابل						توضیحات
	CasHkl	اختلاف با میانگین	IMI	اختلاف با میانگین	DSI	اختلاف با میانگین	
1988	-0.8119	-4.36931	7.18214	0.45227	8.35	-1.375	کمترین مقدار CasHkl
1994	2.99608	-0.56133	8.84024	2.11037	5.2	-4.525	بیشترین مقدار IMI
2001	3.95596	0.398554	7.76153	1.03166	44.1	34.375	بیشترین مقدار DSI در زابل
2008	7.74395	4.186544	5.95918	-0.7706	15.55	5.825	بیشترین مقدار CasHkl
2013	3.01356	-0.54385	7.27945	0.54958	3.1	-6.625	کمترین مقدار DSI در زابل
2015	6.5512	2.993794	3.99248	-2.7373	12.5	2.775	کمترین مقدار IMI
میانگین	3.557406		6.729897		9.725		
انحراف معیار	2.236088		1.153433		8.858045		



شکل ۳- روند تغییرات میانگین تابستانی دید افقی در طی ۳۰ سال به تفکیک ایستگاه‌های منتخب استان سیستان و بلوچستان

بیشینه مقدار شاخص توفان گردوخاک در شهر زابل در سال ۲۰۰۱ دیده می‌شود که با کمینه دید افقی در این شهر (و بیشتر شهرهای استان سیستان و بلوچستان) همراه است (شکل-۳). در این سال موسمی هند نیز نزدیک به یک انحراف معیار بیشتر از میانگین است و جریان‌های موسمی نسبتاً قوی هستند، همچنین شاخص CasHkI نیز اندکی بیشتر از میانگین است، در واقع می‌توان گفت در وضعیت عادی خود قرار دارد؛ بنابراین به نظر می‌رسد در این سال شدت و فراوانی توفان‌های گردوخاک زابل دلایل دیگری مانند آغاز خشک شدن دریاچه هامون و خشکسالی‌های منطقه داشته که سبب بیشتر شدن خاک فرسایش‌پذیر در مناطق بالادست شهر زابل شده که با وزش بادهای شمالی سبب خیزش گردوخاک و شکل‌گیری توفان گردوخاک در این شهر شده است. کمترین مقدار شاخص DSI در شهر زابل نیز مربوط به سال ۲۰۱۳ است. در این سال موسمی هند به اندازه نصف انحراف معیار بیشتر از میانگین است و فعالیت‌های موسمی هند نسبت به میانگین از شدت بیشتری برخوردار است؛ اما شاخص CasHkI کمتر از میانگین است که سبب تضعیف شیوهای فشاری در منطقه و کاهش سرعت بادهای شمالی شده است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله ارتباط بین گردش‌های تابستانی بزرگ‌مقیاس در مجاورت شرق ایران با فراوانی و شدت توفان‌های

گردوخاک در جنوب‌شرق ایران (استان سیستان و بلوچستان) مورد بررسی قرار گرفت. شاخص‌های توفان گردوخاک، موسمی هند و شاخص اقلیمی کاسپین-هندوکش محاسبه و روند تغییرات آن‌ها در دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۷-۲۰۱۶) تحلیل شد. همچنین ضرایب همبستگی بین شاخص‌های موسمی هند و کاسپین هندوکش با کمیت‌های هواشناسی در ایستگاه‌های منتخب استان سیستان و بلوچستان محاسبه شدند. در ادامه سال‌های بیشینه و کمینه هر شاخص شناسایی و رفتار شاخص‌های دیگر در این سال‌ها مطالعه شد. نتایج نشان داد در طی دوره مطالعاتی، موسمی هند با کاهش معنی‌دار روبه‌رو بوده است، این در حالی است که شاخص کاسپین-هندوکش یک روند افزایشی معنی‌دار را نشان می‌دهد که مبین تقویت اختلاف فشار تراز دریا بین دریای خزر و کوه‌های هندوکش و در نتیجه تقویت شیو فشاری شمالی-جنوبی است که منجر به افزایش سرعت بادهای شمالی در مرزهای شرقی ایران و غرب افغانستان می‌شود. با این حال شاخص توفان گردوخاک در این دوره ۳۰ ساله، روند تغییرات معنی‌داری را از خود نشان نمی‌دهد، اگرچه در طی ۱۵ سال اخیر به صورت معنی‌دار کاهش پیدا کرده است. همچنین ضرایب همبستگی نشان دادند که افزایش شدت موسمی هند، در اکثر ایستگاه‌های استان سیستان و بلوچستان با کاهش دما و افزایش رطوبت نسبی همراه است؛ اما با افزایش شدت

شاخص کاسپین-هندوکش در اکثر ایستگاه‌های این استان، دما افزایش و رطوبت نسبی کاهش پیدا کرده است. علاوه بر این می‌توان گفت که سال‌های بحرانی موسمی هند با تغییرات فشار سطح دریا بین دریای خزر و کوه‌های هندوکش و نیز با فراوانی و شدت رخداد‌های گردوخاک در ایستگاه زابل رابطه معکوس داشته و شدت/ضعف موسمی هند با کاهش/افزایش اختلاف فشار بین دو منطقه مذکور و در نتیجه کاهش/افزایش رخداد‌های گردوخاک در ایستگاه زابل همراه است. این رابطه با سایر ایستگاه‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت و در اکثر ایستگاه‌ها به جز ایستگاه چابهار با توجه به موقعیت جغرافیایی و نزدیک بودن به دریا، این ارتباط به‌طور قابل قبولی به چشم می‌خورد.

منابع

- Mofidi, A., M. Hamidian Pour, M. Salighe, B. Alijani, 1392. Determination of the Onset, Withdrawal and Duration of Sistan Wind Using a Ckange Point Approach. *Geography and environmental Hazards*. Winter 2014, 2, 8. 87-112.
- Alizadeh-choobari, O., P. Zawar-Reza, and A. Sturman, 2014: The "wind of 120 days" and dust storm activity over the Sistan basin. *Atmos. Res.*, 143, 328-341.
- WMO Airborne dust bulletin. No.1, 2017.
- Sehatkashani, S., A. Sedaghatkardar, A.A. Bidokhti, Gh. A. Kamali, A. Ranjbar, M. Salehi, 2009: The Numerical Evaluation of Low level Jets Formation in Lut Valley Region in Winter, *envocHEALTH* 2009, India.
- Prospero, J. M., P. Ginoux, O. Torres, S. E. Nicholson, and T. E. Gill, 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, 1, 1002, doi:10.1029/2000000095.
- Sehatkashani, S., A.A. Bidokhti, A. Ranjbar, 1385: Numerical study of wind field in Lot valley using numerical simulation in two hot and cold seasons. Master's thesis, Meteorology department, Faculty of science, Islamic Azad university science and Research branch.
- Sobhani, B., B. Salahi, A. Goldost, 1391: Study the dust and evaluation of its possibility prediction based on statistical methods and ANFIS model in Zabol university. *Geography and Developemnet*, 38, 123-138.
- Khoddam, N., F. Ahamadi Givi, P. Iran Nejad, 1391: Climatological effects of the Indian monsoon in Iran. Master's thesis, Geophysics Institute, Tehran University.
- Khoddam, N., P. Iran Nejad, F. Ahamadi Givi, 1394: A study of the impact of Indian Monsoon on Summer Climate of Iran. *Iran Geophysics J.*, 9, No.2, 52-66.
- Rashki, A., D.G., Kaskaoutis, C.J.deW., Rautenbach, P. G., Eriksson, M., Qiang, and P., Gupta, 2012: Dust storms and their horizontal dust loading in the Sistan region, Iran. *Aeolian Research*, 5, 51-62.
- Kaskaoutis, D. G., A., Rashki, E. E., Houssos, A., Mofidi, D., Goto, A., Bartzokas, P., Francois, and M., Legrand, 2014: Meteorological aspects associated with dust storms in the Sistan region, southeastern Iran. *Clim. Dyn.*, 45, 407-424.
- Kaskaoutis, D. G., E. E., Houssos, A., Rashki, P., Francois, M., Legrand, D., Goto, A., Bartzokas, H. D., Kambezidis, and T., Takemura, 2016: The Caspian Sea-Hindu Kush index (CasHKI): A regularity factor for dust activity over southwest Asia. *Global and Planetary change*, 137, 10-23.
- McTainsh, G., and K., Tews (2007) Soil erosion by wind - Dust Storm Index (DSI): National Monitoring and Evaluation Framework, prepared for the National Land & Water Resources Audit, Canberra.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne, and D. Joseph, 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project". *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471.
- Wang, B., and Z. Fan, 1999: Choice of South Asian summer monsoon indices. *Amer. Meteor. Soc.*, 80, 629-638
- Webster, P. J., 1987: *The Elementary Monsoon*. John Wiley, New York, 332 pp.