

بررسی ویژگی‌های رخداد پدیده گردوخاک خراسان بزرگ در دوره گرم سال و شبیه‌سازی مسیر آن توسط مدل HYSPLIT (دوره آماری ۲۰۰۰-۲۰۱۷)

الهام مبارک حسن* - گروه محیط‌زیست، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
عباس رنجبر سعادت‌آبادی - گروه شیمی جو و آلودگی هوا، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جوی، تهران، ایران
ابراهیم فتاحی - پژوهشگاه هواشناسی و علوم جوی، تهران، ایران
فائزه نوری - پژوهشگاه هواشناسی و علوم جوی، تهران، ایران

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۹

دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۰۲

چکیده

هدف از این تحقیق بررسی پدیده گردوخاک خراسان بزرگ واقع در شمال شرق و شرق ایران است. این مطالعه در دو بخش آماری و همدیدی در دوره ۲۰۰۰-۲۰۱۷ انجام شد. داده‌های سازمان هواشناسی کشور و داده‌های بازتحلیل ERA-Interim و همچنین مدل HYSPLIT به کار گرفته شد. نتایج نشان داد روند تغییرات میانگین روزهای گردوخاک در استان خراسان جنوبی نسبت به خراسان رضوی و شمالی متفاوت است. بیشترین گردوخاک در خراسان رضوی و شمالی در ژوئن و در خراسان جنوبی در مه و ژوئیه رخ می‌دهد. بیشترین فراوانی طوفان شدید گردوخاک در گناباد و فراوانی تعداد روزهای گردوخاک در طبس و سرخس است. روند تغییرات دید افقی در نهبندان در فصل بهار و تابستان با $+۰/۳۴$ و $+۰/۲۷$ افزایشی و در طبس با $-۰/۲۸$ و $-۰/۳$ کاهش می‌دهد. تغییر دید افقی در بجنورد (خراسان شمالی) در هر دو فصل روند معناداری نشان نمی‌دهد. در فصل بهار گسترش پرفشار در غرب و کم‌فشار در شرق ایران به توسعه بادهای غربی با میانگین سرعت ۱۰ متر بر ثانیه منجر شده و گردوخاک را از مناطق مرکزی به خراسان بزرگ انتقال می‌دهد. در تابستان توسعه پرفشار افغانستان همراه با بادهای شمالی ۱۸ متر بر ثانیه گردوخاک را از بیابان‌های ترکمنستان و افغانستان انتقال می‌دهد.

واژگان کلیدی: دسته‌بندی گردوخاک، دید افقی، روند تغییرات، ساختار همدیدی، منشأ گردوخاک.

مقدمه

پدیده گردوخاک در کشورهای واقع در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان در طول ده‌های گذشته افزایش چشم‌گیری داشته و عمده نگرانی‌های جامعه پژوهشی را متوجه خود ساخته است (آل جومیلی و ابراهیم، ۲۰۱۳). در کشورهای خاورمیانه، مانند ایران، طوفان‌های گردوخاک تأثیر مخربی در جوامع انسانی گذارده و مشکلات اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی، سیاسی، و امنیتی ایجاد کرده است. از اصلی‌ترین عوامل ایجاد این پدیده وزش بادهای متلاطم و قوی بر سطح بیابان است که شرایط مساعد برای ایجاد گردوخاک ایجاد می‌کند. شناخت سازوکار شکل‌گیری گردوخاک و چگونگی تأثیرگذاری آن در شهرهایی که در مجاورت منشأ گردوخاک قرار دارند کمک شایانی به مدیران اجرایی می‌کند؛ به طوری که به اتخاذ تصمیم‌های مناسب برای کاهش اثرهای منفی گردوخاک منجر می‌شود. منطقه شرق و شمال شرق ایران به دلیل مجاورت با مناطق بیابانی از این پدیده جوی تأثیر می‌پذیرد. بنابراین، تلاش‌هایی در جهت شناخت این

پدیده در آن مناطق انجام شده است. در برخی مطالعه‌ها به بررسی گردوخاک خراسان رضوی، خراسان جنوبی، یا شمال شرق ایران با دیدگاه‌های مختلف و در بازه‌های زمانی متفاوتی پرداخته شده است؛ از جمله آن‌ها می‌توان اشاره کرد به تحقیق دوستان (۱۳۹۵): تحلیل زمانی و مکانی گردوخاک در سال‌های ۱۹۶۱-۲۰۱۰ در شمال شرق ایران؛ مهرشاهی و نکونام (۱۳۸۸): بررسی آماری پدیده گردوخاک در شهرستان سبزوار (۱۳۶۷-۱۳۸۷)؛ کارکن سیستانی (۱۳۹۱): بررسی آماری و پهنه‌بندی گردوخاک در استان خراسان رضوی در دوره آماری ۱۹۸۷-۲۰۰۵؛ بروغنی و همکاران (۱۳۹۴): تحلیل و پهنه‌بندی گردوخاک در استان خراسان رضوی در دوره آماری ۲۰۰۴-۲۰۱۰؛ امیدوار و همکاران (۱۳۹۴): واگوی همدیدی طوفان‌های سیاه غرب خراسان رضوی و سبزوار در دوره ۱۳۶۷-۱۳۸۷؛ لشکری و کیخسروی (۱۳۸۷): تحلیل آماری سینوپتیکی طوفان‌های گردوخاک خراسان رضوی در فاصله زمانی ۱۹۹۳-۲۰۰۵؛ احمدی و همکاران (۱۳۹۴): تحلیل همدیدی گردوخاک نیمه گرم سال در استان خراسان جنوبی در دوره ۱۹۹۱-۲۰۰۸؛ هاشمی دوین و جلالی (۱۳۹۴): مطالعه همدیدی- آماری گردوخاک در خراسان شمالی؛ الهی گل و هاشمی دوین (۱۳۹۴): طوفان‌های گردوخاک بجنورد. در ادامه با توجه روند ارائه مطالب، به نتیجه حاصل از آن‌ها اشاره خواهد شد.

از دیدگاه زمانی در توزیع سالانه گردوخاک‌های خراسان رضوی بیشترین تعداد تکرار در فصل بهار و به‌ویژه در ماه مه (بروغنی و همکاران، ۱۳۹۴) و در خراسان جنوبی نیز ماه مه (احمدی و همکاران، ۱۳۹۴) رخ می‌دهد. بررسی گردوخاک در سبزوار (خراسان رضوی) نیز مبنی بر احتمال وقوع گردوخاک در اردیبهشت و خرداد است (مهرشاهی و نکونام، ۱۳۸۸). کمترین وقوع گردوخاک در ماه اکتبر است (احمدی و همکاران، ۱۳۹۴). در بازه ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰ در خراسان رضوی، سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۸ به‌ترتیب دارای کمترین و بیشترین تعداد وقوع گردوخاک در سطح استان بوده‌اند (بروغنی و همکاران، ۱۳۹۴).

سرخس، مشهد و گناباد بیشترین و قوچان، تربت‌حیدریه و کاشمر کمترین گردوخاک را دارند (کارکن سیستانی، ۱۳۹۱؛ بروغنی و همکاران، ۱۳۹۴). گرچه با توجه به بازه زمانی و ایستگاه‌های انتخابی در مطالعه‌های مختلف نتیجه متفاوت است، در همه آن‌ها از سرخس به‌عنوان ایستگاهی با بیشترین گردوخاک یاد شده است (دوستان، ۱۳۹۵). در شمال استان خراسان رضوی با توجه به وجود ارتفاعات و بارش‌های بیشتر، گردوخاک کمتری اتفاق می‌افتد (کارکن سیستانی، ۱۳۹۱). بررسی تعداد وقوع گردوخاک و پراکنش پوشش گیاهی در استان خراسان رضوی نشان داد که آن دو ارتباط نزدیکی داشته و با کاهش پوشش گیاهی، بر تعداد وقوع گردوخاک افزوده می‌شود (پورهاشمی و همکاران، ۱۳۹۷). از دیدگاه توزیع مکانی گردوخاک استان خراسان رضوی از شرق استان به‌سوی غرب و جنوب کاهش می‌یابد (دوستان، ۱۳۹۵).

از دیدگاه همدیدی، توسعه شیو فشاری^۱ افقی بین دو سامانه چرخندی (کم‌فشار) و واچرخندی (پرفشار) وجه مشترک همه طوفان‌های گردوخاک است (تسای و همکاران، ۲۰۰۸) که باعث افزایش سرعت باد سطحی می‌شود و انتشار گردوخاک را به دنبال دارد. اگر سرعت باد در منطقه‌ای با خاک خشک و پوشش گیاهی تنک از حد آستانه‌ای بیشتر شود، ذره‌های گردوخاک را با خود وارد جو می‌کند (وست پال و همکاران، ۱۹۸۸؛ چن و همکاران، ۲۰۱۳؛ لیو و شائو، ۱۹۹۹؛ تگن، ۲۰۰۳).

از دیدگاه همدیدی گردوخاک‌های استان خراسان رضوی، جنوبی، و شمالی در فصل‌های مختلف سال الگوهای جوی متفاوتی دارند (علیجانی و رئیس‌پور، ۱۳۹۰؛ لشکری و کیخسروی، ۱۳۸۷؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۴؛ الهی گل و هاشمی

دوین، ۱۳۹۴). گرچه نکته درخورتأمل آن است که دوره گرم شامل بهار و تابستان و دوره سرد شامل پاییز و زمستان است، در مطالعه‌های انجام‌شده تفکیک زمانی متفاوتی دیده می‌شود. در دوره گرم سال، با تقویت کم‌فشار موسمی هند، دو مرکز کم‌فشار در محدوده جنوب پاکستان و جنوب افغانستان با فشار مرکزی کمتر از ۱۰۰۰ هکتوپاسکال بسته می‌شود. در مقابل مرکز پُرفشاری بر روی دریای خزر، که عموماً فشار مرکزی آن بیش از ۱۰۲۰ هکتوپاسکال است، مستقر می‌شود (علیجانی و رئیس‌پور، ۱۳۹۰). در الگوی تابستانی، اختلاف فشار بین جنوب شرق ایران (کم‌فشار) و دریای خزر (پُرفشار) در سطح زمین به شکل‌گیری شیو فشاری در شرق ایران منجر می‌شود (علیجانی و رئیس‌پور، ۱۳۹۰؛ لشکری و کیخسروی، ۱۳۸۷؛ الهی گل و هاشمی دوین، ۱۳۹۴). درحالی‌که در مطالعه‌ای دیگر جابه‌جایی جنوب سوی پُرفشار ترکمنستان عامل افزایش شیو افقی بین آن سامانه و کم‌فشار پاکستان ذکر شده است که به تقویت باد و انتشار گردوخاک در خراسان جنوبی منجر می‌شود (احمدی و همکاران، ۱۳۹۴). جریان‌های جوی و باد با عبور از بیابان‌های ترکمنستان، شرق دریای خزر، و کویرهای مرکزی و شرقی ایران شرایط را برای انتشار و انتقال گردوخاک در نواحی شمال شرق تا جنوب شرق کشور فراهم می‌کند (احمدی و همکاران، ۱۳۹۴).

در دوره گرم سال مسیر گردوخاک‌های خراسان از بیابان و ریگزارهای ترکمنستان و دشت‌های خشک کم‌ارتفاع شرق منطقه است (لشکری و کیخسروی، ۱۳۸۷؛ هاشمی دوین و جلالی، ۱۳۹۴). بیابان‌های غربی (دشت کویر) و کویر بجنستان در جنوب غرب در گردوخاک‌های تابستانی نقش کمتری دارند (دوستان، ۱۳۹۵).

در دوره سرد سال پُرفشار سیبری همراه با هوای سرد و خشک با فشار مرکزی بیش از ۱۰۴۰ هکتوپاسکال بر روی دریای خزر مستقر می‌شود و حضور کم‌فشار و وجود ناهه‌های ارتفاعی در غرب منطقه به شیو فشار شمالی-جنوبی در خراسان جنوبی منجر می‌شود (علیجانی و رئیس‌پور، ۱۳۹۰؛ لشکری و کیخسروی، ۱۳۸۷). احمدی و همکاران (۱۳۹۴) الگوی بهار را مشابه الگوی سرد سال (پاییز و زمستان) توصیف کرده‌اند. در دوره سرد سال گردوخاک‌های رخ داده در منطقه در جهت و مسیرهای مختلف که عمدتاً غربی است به این منطقه می‌رسد (دوستان، ۱۳۹۵).

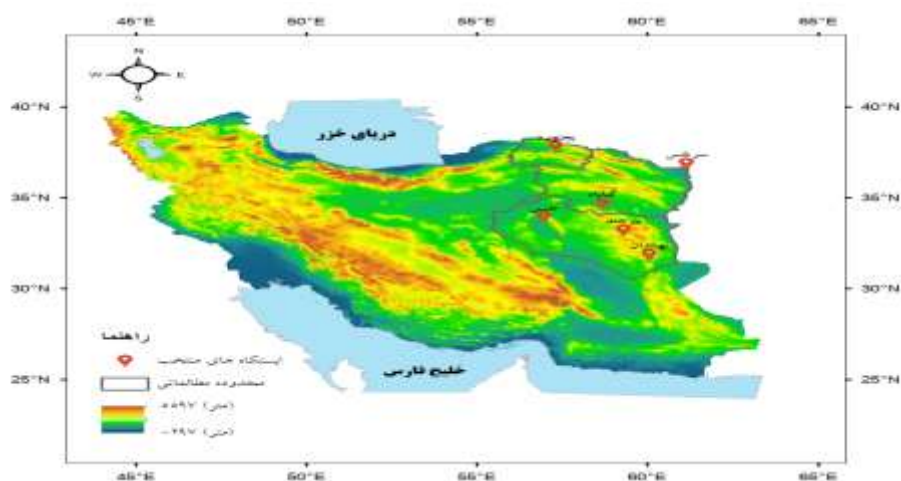
با وجود اینکه مطالعاتی در ارتباط با وقوع پدیده گردوخاک‌های شرق و شمال شرق ایران انجام گرفته، عمده مطالعه‌ها در ارتباط با خراسان رضوی بوده است. همچنین، تعریف و بررسی مشترکی از فصل سرد و گرم در مطالعه‌های مختلف مشاهده نشد. علاوه بر آن، در بررسی‌های همدیدی پیشین، سامانه‌های آب‌وهوایی و منطقه شکل‌گیری شیو فشار مشابه تعیین نشده‌اند. از این رو، هدف از اجرای تحقیق بررسی جامعی در منطقه شرق و شمال شرق ایران بود که شامل استان‌های خراسان شمالی، رضوی، و جنوبی بوده و خراسان بزرگ نامیده شد. به این منظور، توزیع زمانی و مکانی گردوخاک، روند تغییرات دید افقی، بررسی ساختار همدیدی، منشأ گردوخاک، و تعیین باد غالب در دو فصل بهار و تابستان در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ تحقیق شد.

محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه خراسان بزرگ واقع در شمال شرق و شرق ایران انتخاب شده است (شکل ۱). آب‌وهوای محدوده موردنظر، با توجه به وسعت زیاد و گستردگی، از نظر شرایط طبیعی مانند وجود رشته‌کوه‌های مرتفع و مناطق کویری، فاصله زیاد از منابع رطوبتی، وزش باد در جهت‌ها تنوع بسیار زیادی دارد (برگرفته از تارنمای سازمان هواشناسی). ایستگاه سرخس با ۲۷۸ متر کمترین و بیرجند با ۱۴۹۱ متر بلندترین ارتفاع را نسبت به سطح دریای آزاد دارد (شکل ۱). به جز

سرخس و طبس، دیگر ایستگاه‌های همدیدی ارتفاعی بیش از ۹۰۰ متر دارند که نشان از تنوع ساختار کوهساری منطقه دارد (شکل ۱).

خراسان بزرگ از سال ۱۳۸۳ (۲۰۰۴) به سه استان خراسان شمالی، رضوی، و جنوبی تقسیم شد. تعداد ایستگاه‌های همدیدی در خراسان رضوی ۱۷، خراسان شمالی ۷، و خراسان جنوبی ۱۱ است. برخی ایستگاه‌ها در سال‌های اخیر تأسیس شده و برخی دیگر در هشت نوبت شبانه‌روز گزارش ثبت‌شده ندارند. بنابراین، در راستای انتخاب بازه زمانی مشترک، ایستگاه‌هایی که پس از سال ۲۰۰۰ تأسیس شده و کمبود داده داشتند از تحلیل‌ها حذف شدند و در نهایت ۱۵ ایستگاه باقی ماند. از میان آن‌ها، با توجه به تداوم و شدت گردوخاک ایستگاه‌های بجنورد در خراسان شمالی، سرخس و گناباد در خراسان رضوی و طبس، بیرجند، و نهبندان خراسان جنوبی به‌عنوان ایستگاه‌های شاهد انتخاب شدند (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت خراسان بزرگ، ایستگاه‌های انتخابی، و ساختار کوهساری (برحسب متر)

مواد و روش‌ها

این تحقیق در دو بخش آماری و همدیدی انجام شد: در بخش اول داده‌های مربوط به تعداد روزهای گردوخاک از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ از سازمان هواشناسی تهیه و بر اساس آن توزیع سالانه و ماهانه گردوخاک بررسی شد.

با توجه به اینکه خراسان بزرگ شامل سه استان است، تعداد روزهای گردوخاک در هر استان با توجه به تعداد ایستگاه‌های انتخابی میانگین‌گیری شد که در ادامه متن به‌عنوان میانگین تعداد روزهای گردوخاک شناخته خواهد شد. در ادامه بحث‌ها دو فصل بهار شامل ماه مارس، آوریل، و مه و فصل تابستان شامل ژوئن، ژوئیه، و اوت به‌عنوان دوره گرم انتخاب شدند. موقعیت منطقه مورد مطالعه و توزیع مکانی تعداد روزهای گردوخاک در دو فصل بهار و تابستان توسط نرم‌افزار ArcGIS ترسیم شده است.

فراوانی و روند تغییرات گردوخاک در پنج ایستگاه انتخابی شامل طبس، سرخس، نهبندان، بیرجند، گناباد، و بجنورد تحلیل شد. در هر روز دیدبانی در بازه سه‌ساعته و هشت بار انجام می‌شود. از این‌رو، تعداد تکرار ساعتی گردوخاک فراوانی مطلق ساعتی در نظر گرفته شد. تعداد تکرار روزانه از حاصل تقسیم تعداد گزارش ساعتی به تعداد روزهای گردوخاک به‌دست آمد. نسبت تعداد گزارش در فصل بهار و تابستان نسبت به کل سال نیز فراوانی نسبی نامیده شد.

در گام دیگر گردوخاک‌های رخ داده بر اساس معیار شائو و وانگ (۲۰۰۳) طبقه‌بندی شد. در این طبقه‌بندی رویدادهای گردوخاک بر مبنای کاهش دید افقی به چهار گروه شامل گردوخاک بادی^۱، گردوخاک وزشی^۲، طوفان گردوخاک^۳، و طوفان‌های گردوخاک شدید^۴ تقسیم می‌شود.

به منظور بررسی روند تغییرات ساعتی دید افقی در زمان وقوع گردوخاک از تکنیک روند خطی^۵ (معادله ۱) و بررسی روند تغییرات میانگین تعداد روزهای گردوخاک از برازش چندجمله‌ای^۶ (معادله ۲) استفاده شد (تیریکی و همکاران، ۲۰۱۴؛ ژو و همکاران، ۲۰۱۴). در این معادله شیب خط روند با افزایش توان متغیر مشخص می‌شود.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x^1 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x^1 + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 + \dots + \beta_n x^n + \varepsilon \quad \text{رابطه (۲)}$$

β_0 مقدار ثابت و β_1 شیب خط است. معادله‌ها توسط روش‌های برازش موجود در نرم‌افزار OriginPro بررسی شده‌اند. در این نرم‌افزار معنی‌داری خط روند توسط جدول ANOVA مشخص می‌شود. ترسیم شکل‌ها و برازش چندجمله‌ای توسط نرم‌افزار OriginPro انجام شده است.

به منظور یافتن سال‌های کمینه و بیشینه شدت گردوخاک از روش هموارسازی داده‌ها استفاده شد. تکنیک هموارسازی داده سعی دارد الگوی کلی را حفظ کند، اما اغتشاش‌ها را کاهش می‌دهد (شبکه جهانی). لوس^۷ برای هموارسازی محلی و لویس^۸ برای هموارسازی محلی وزنی نمودارهای پراکندگی به کار می‌رود. این روش یکی از روش‌های رگرسیون ناپارامتریک است و انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به دیگر روش‌های هموارسازی دارد. یکی دیگر از مزیت‌های این تکنیک استفاده در مواردی است که تعداد داده زیاد و شناسایی روند تغییرات به صورت چشمی دشوار باشد. در روش محلی معمولاً داده‌های تأثیرگذار در هموارسازی در همسایگی همدیگر قرار داشته‌اند. بنابراین، تعداد کمی از داده‌ها در محاسبه لحاظ می‌شوند. به این معنا که کل سری داده در نظر گرفته نمی‌شود. در این مطالعه از روش لوس استفاده شد. برای محاسبه در هر نقطه از نقاط اطراف استفاده‌شده و اختلاف آن‌ها با نقطه مرکزی به توان ۳ می‌رسد. x نقاط مجاور، x_i نقطه مرکزی، و d_i فاصله بین آن دو است.

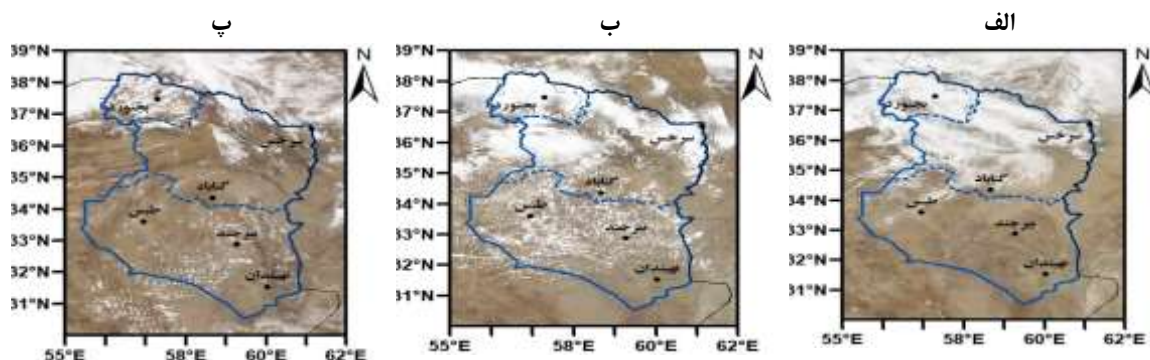
$$w_i(x) = \left(1 - \left(\frac{|x - x_i|}{d_i}\right)^3\right)^3 \quad \text{رابطه (۳)}$$

در بخش انتهایی، ساختار همیدی تحلیل شد. تحلیل همیدی شامل ساختار فشار سطح دریای آزاد، ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال، سرعت و جهت باد سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال و با استفاده از داده‌های ERA_Ineterim (<https://apps.ecmwf.int/datasets/>) انجام شد. این داده‌ها تفکیک مکانی ۰٫۷۵ درجه و تفکیک زمانی شش ساعته دارند. یکی از ویژگی‌های این تحقیق محاسبه و ترسیم مقدار و جهت شیو فشار است که تعیین منطقه شکل‌گیری آن عامل مهمی در شناسایی ارتباط سامانه‌های کم‌فشار و پرفشار است. به منظور شبیه‌سازی مسیر ذره در

1. Dust Haze
2. Blowing dust
3. Dust storm
4. Severe dust storm
5. Linear fit
6. Polynomial fit
7. Locally Scatterplot Smoothing(LOESS)
8. Locally Weighted Scatterplot Smoothing(LOWESS)

رویدادهای گردوخاک انتخابی از مدل بر خط HYSPLIT استفاده شد. در این مدل محاسبه مسیر و غلظت آلاینده‌ها با استفاده از حداقل پارامترهای هواشناسی انجام می‌شود (اسکودرو و همکاران، ۲۰۰۶). مدل HYSPLIT با ترکیب دو دیدگاه اولیری و لاگرانژی اجرا شده و به همین دلیل به آن مدل هیبریدی گفته می‌شود. برای اجرای بر خط مدل در این مطالعه، از داده‌های هواشناسی سامانه همادی داده‌های جهانی^۱ (GDAS) استفاده شد. این داده‌ها در تفکیک یک درجه بوده و توسط داده‌های مشاهداتی، برون‌داد مدل‌های عددی، داده‌های بالون‌ها، نمایه باد، گزارش هواپیما، بویه‌های دریایی، رادار و ماهواره آماده می‌شوند. همچنین، برای بررسی میدان باد و مقایسه آن با برون‌داد مدل HYSPLIT، در ایستگاه‌های انتخابی گل غبار از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ ترسیم شد. ذکر این نکته لازم است که در ترسیم گل غبار سمت و سرعت باد در زمان وقوع گردوخاک (دید افقی کمتر از ۱۰ کیلومتر با کدهای گردوخاک) در نظر گرفته شده‌اند. مدل HYSPLIT برای دوازده ساعت مسیر پس‌گردی اجرا و زمان انتهایی نیز ساعت ۱۲ روز انتخاب شد. با توجه به شرایط کوهساری منطقه، ارتفاع ۱۵۰۰ متر در نظر گرفته شد.

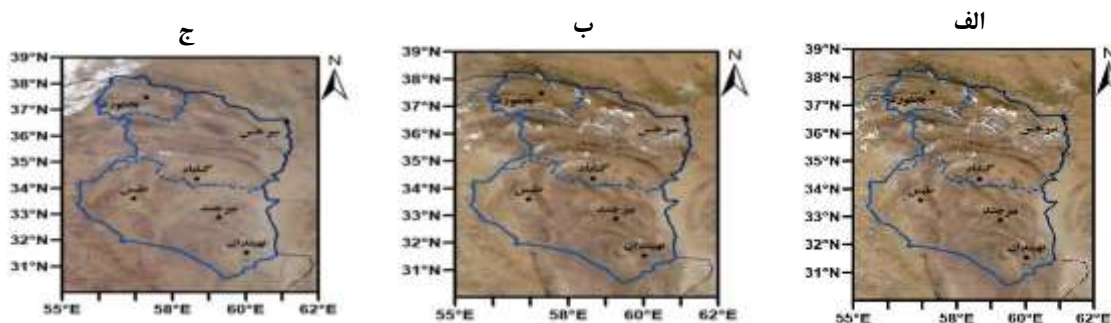
معیار انتخاب گردوخاک کدهای مربوطه (۶ و ۷) با دید افقی کمتر از ۱۰۰۰۰ متر در نظر گرفته شد. در این تحقیق گردوخاک‌های شدید و تداوم زیاد و فراگیر در سه استان موردنظر بوده و گردوخاک‌های ضعیف، محلی، یا کوتاه‌مدت حذف شدند. بنابراین، در گزینش نهایی رویدادهایی انتخاب شد که کاهش دید افقی به کمتر از ۱۰۰۰ متر و تداوم یک روز یا بیشتر داشته‌اند. منطقه شکل‌گیری و توزیع گردوخاک به کمک تصویر مرئی ماهواره آکوا سنجنده مودیس بررسی شد (شکل ۲ و شکل ۳).



شکل ۲. تصویر سنجنده مادیس ماهواره آکوا برای رویدادهای گردوخاک انتخاب شده در فصل بهار؛ (الف) ۵ مارس ۲۰۱۲؛ (ب) ۱۲ مارس ۲۰۱۲؛ (ج) ۱۷ مارس ۲۰۱۲

با توجه به معیارهای یادشده رویدادهای ۵ مارس ۲۰۱۲، ۲۳ مه ۲۰۱۲، و ۱۷ مارس ۲۰۱۷ نماینده فصل بهار (شکل ۲) در نظر گرفته شدند. به دلیل ابرناکی در فصل بهار، در برخی موارد گردوخاک به خوبی آشکار نمی‌شود. بنابراین، در انتخاب گردوخاک‌های بهاری محدودیت وجود داشت. تصویر ماهواره توده‌های گردوخاک را در بخش‌های مختلف منطقه نشان می‌دهد (شکل ۲).

رویدادهای ۳ اوت ۲۰۰۸، ۲۳ اوت ۲۰۱۲، و ۱ ژوئیه ۲۰۱۴ معرف تابستان (شکل ۳) در نظر گرفته شد. در این فصل به دلیل عدم حضور ابر توده گردوخاک به خوبی قابل مشاهده بوده و در هر سه مورد موقعیت آن در مرز شرقی آشکار است.



شکل ۳. تصویر سنجنده مادیس ماهواره آکوا برای رویدادهای گردوخاک انتخاب شده در فصل تابستان؛ (الف) ۳ اوت ۲۰۰۸؛ (ب) ۲۳ اوت ۲۰۱۲؛ (ج) ۱ ژوئیه ۲۰۱۴

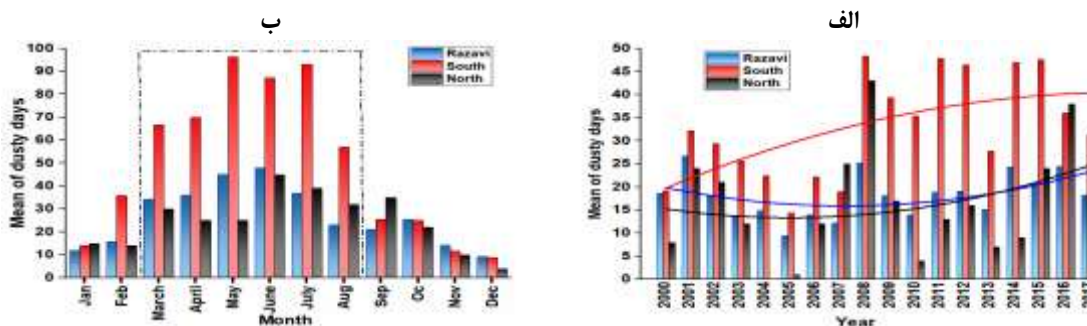
یافته‌های پژوهش

در این بخش یافته‌های حاصل از تحقیق در دو بخش ارائه می‌شود: در ابتدا بررسی‌های آماری و در انتها مباحث همدیدی مطرح می‌شود.

توزیع سالانه و ماهانه میانگین روزهای گردوخاک در خراسان بزرگ

میانگین تعداد روزهای گردوخاک در توزیع سالانه (شکل ۴-الف) نمایش داده شده است. روند تغییر میانگین روزهای گردوخاک در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ در هر سه استان مشابه نیست (شکل ۴-الف). در استان خراسان جنوبی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ روند افزایشی و در استان خراسان رضوی و شمالی در همین بازه روند کاهشی مشاهده می‌شود. در ادامه و با توجه به تحلیل‌های بعدی علت آن بیان خواهد شد.

خراسان شمالی در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۶ با ۴۳ و ۳۸ روز، خراسان رضوی در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۸، ۲۰۱۴، و ۲۰۱۶ با ۲۴ تا ۲۶ روز و خراسان جنوبی در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۶ با ۴۶ تا ۴۸ روز گردوخاک را تجربه کرده‌اند (شکل ۴-الف). همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر سه استان، سال ۲۰۰۸ بیشترین گردوخاک رخ داده است (شکل ۴-الف).



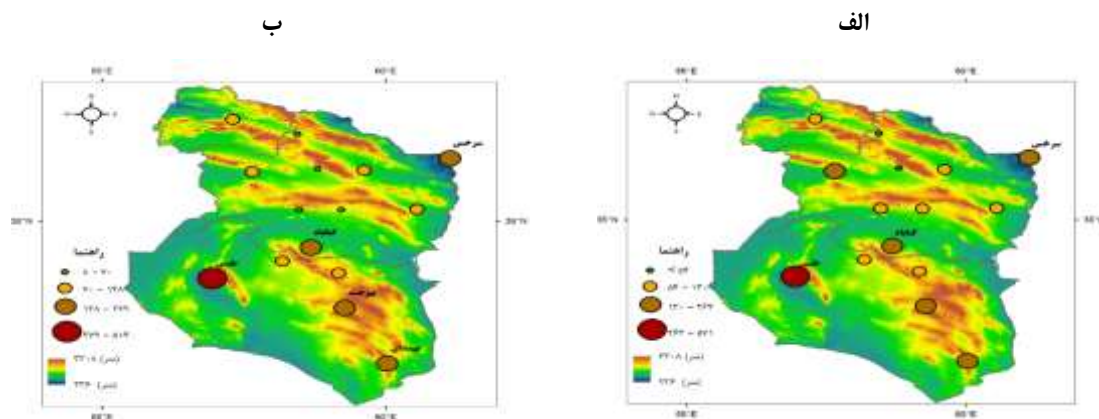
شکل ۴. میانگین تعداد روزهای گردوخاک در استان خراسان شمالی، رضوی، و جنوبی: (الف) سالانه (سمت راست)؛ (ب) ماهانه (سمت چپ) از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷

در توزیع ماهانه، رفتار میانگین تعداد روزهای گردوخاک در خراسان جنوبی نسبت به خراسان رضوی و شمالی تفاوت دارد. به طوری که افزایش گردوخاک در خراسان جنوبی از ماه فوریه و در خراسان رضوی و شمالی از ماه مارس آغاز می‌شود. در هر سه استان روند کاهشی گردوخاک از ماه اوت به بعد رخ می‌دهد؛ گرچه استان خراسان شمالی در ماه سپتامبر اندکی افزایش دارد. با توجه به افزایش گردوخاک از ماه مارس و روند کاهشی پس از ماه اوت، این بازه به‌عنوان دوره گرم در نظر گرفته شد.

بیشترین میانگین روزهای گردوخاک در خراسان جنوبی به‌ترتیب در ماه‌های مه (اردیبهشت) و ژوئیه (تیر)، در خراسان رضوی در ماه ژوئن (خرداد) و مه (اردیبهشت) و در خراسان شمالی نیز در ماه ژوئن (خرداد) است (شکل ۴-ب). یافته اخیر نشان می‌دهد خراسان رضوی و شمالی بیشترین گردوخاک را در ماه ژوئن (بهار) دارند. کمترین وقوع گردوخاک در ماه نوامبر و دسامبر است.

توزیع مکانی گردوخاک در دوره گرم سال

تعداد روزهای گردوخاک در دو فصل بهار و تابستان در شکل ۵ آمده است. در هر دو فصل بیشترین تعداد روزهای گردوخاک مربوط به استان خراسان جنوبی بوده و کمترین مربوط به خراسان شمالی است. همان‌طور که دیده می‌شود، در هر دو فصل بهار و تابستان طبس، سرخس، و گناباد بیشترین تعداد روزهای گردوخاک را داشته‌اند. در فصل تابستان، علاوه بر این سه ایستگاه، دو ایستگاه بیرجند و نهبندان در استان خراسان جنوبی نیز افزایش تعداد روزهای گردوخاک را تجربه می‌نمایند. بنابراین، در فصل تابستان استان خراسان جنوبی نسبت به دو استان دیگر بیشتر تحت تأثیر گردوخاک است که با نتیجه به‌دست آمده از شکل ۴ هماهنگ است.



شکل ۵. توزیع مکانی فراوانی مطلق تعداد روزهای گردوخاک فصل بهار (الف- سمت راست) و فصل تابستان (ب- سمت چپ) از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷

همچنین، با توجه به افزایش گردوخاک در بیرجند و نهبندان در فصل تابستان، می‌توان علت آن را کوه‌های مرتفع این مناطق دانست که مانع عبور گردوخاک با منشأ بیابان‌های مرکزی ایران بوده و این دو منطقه نسبت به دیگر مناطق استان گردوخاک بیشتری را تجربه می‌کنند. بنابراین، تعداد روزهای گردوخاک در این استان در فصل تابستان بیش از خراسان رضوی و شمالی است.

وجود دشت‌ها و کوه‌های متعدد در مجاورت همدیگر و تنوع ساختار کوهساری منطقه می‌تواند از جمله دلایل‌های تفاوت گردوخاک در ایستگاه‌های نزدیک به هم باشد. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌ها نسبت به ساختار کوهساری در جهت و سرعت باد تأثیر دارد که در نتیجه آن میانگین روزهای گردوخاک در استان‌ها متفاوت به دست می‌آید. زیرا امتداد و ارتفاع کوه بر میدان باد تأثیر می‌گذارد و می‌تواند مانع انتقال گردوخاک به منطقه شود (شکل ۵).

در خراسان جنوبی امتداد شمالی- جنوبی کوه‌ها باعث شده تا ایستگاه‌های واقع در دامنه غربی کوه گردوخاک بیشتری تجربه کنند (شکل ۵). در حالی که امتداد غربی- شرقی کوه در استان خراسان رضوی مانع انتقال گردوخاک به منطقه شده و در نتیجه تعداد روزهای گردوخاک کمتری نسبت به خراسان جنوبی دارد.

گروه‌بندی گردوخاک‌های خراسان بزرگ در دوره گرم سال

در این مرحله فراوانی رخداد گردوخاک و سرعت باد بر اساس طبقه‌بندی شائو و وانگ (۲۰۰۳) ارائه می‌شود. در این محاسبه فقط دید کمتر از ۱۰۰۰۰ متر و سه گروه گردوخاک وزشی، طوفان گردوخاک، و طوفان شدید گردوخاک در نظر گرفته شد (جدول ۱). در این بخش پنج ایستگاهی که بیشترین میانگین تعداد روزهای گردوخاک را داشته‌اند انتخاب شدند و گروه‌بندی گردوخاک در فصل بهار و تابستان انجام شد.

در فصل بهار بیرجند و طبس هر کدام یک مورد و در تابستان گناباد چهار مورد و طبس با دو مورد طوفان شدید را تجربه کرده‌اند. بنابراین، از بین ایستگاه‌های انتخابی شدیدترین طوفان‌های گردوخاک در گناباد و در فصل تابستان رخ داده است. گناباد و طبس در بهار با ۸ و ۱۳ مورد و در تابستان با ۹ و ۲۲ مورد بیشترین تعداد تکرار طوفان گردوخاک را داشته‌اند. به این ترتیب، گناباد در استان خراسان رضوی و طبس در استان خراسان جنوبی بیشترین تعداد تکرار طوفان و طوفان‌های شدید گردوخاک را داشته‌اند. در بجنورد (خراسان شمالی) طوفان شدید و طوفان گردوخاک رخ نداده است.

جدول ۱. فراوانی مطلق (تعداد) و میانگین سرعت باد (متر بر ثانیه) در گروه‌های مختلف گردوخاک در ایستگاه‌های منتخب از سال

۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷

فصل	ایستگاه	فراوانی مطلق (تعداد)			میانگین سرعت باد (متر بر ثانیه)		
		طوفان شدید	طوفان	وزشی	طوفان شدید	طوفان	وزشی
بهار	سرخس		۱	۵۶۶		۱۲	۹/۴
	گناباد		۸	۳۳۳		۷/۹	۷/۵
	بیرجند	۱	۳	۳۰۵	۱۲	۷/۵	۷
	نهبندان		۳	۳۴۶		۸/۳	۵/۵
	طبس	۱	۱۳	۲۰۴۱	۸	۳	۳/۱
تابستان	بجنورد		۴	۹۹		۶/۷	۸
	سرخس		۱	۸۲۱		۱۱	۸/۷
	گناباد	۴	۹	۴۳۳	۸/۲	۷/۵	۷/۸
	بیرجند		۴	۵۴۲		۵/۶	۷/۲
	نهبندان		۵	۶۲۸		۱۲/۴	۹
	طبس	۲	۲۲	۱۹۸۰	۳	۳	۳/۱
	بجنورد			۱۶۳			۷/۷

گناباد نسبت به سرخس، طبس، و بیرجند تعداد روز گردوخاک کمتری دارد، اما شدت گردوخاک در آن بیشتر است. طبس بیشترین روزهای گردوخاک و بیشترین ساعت‌های گردوخاک را داشته و شدیدترین گردوخاک‌ها در این ایستگاه ثبت شده است. کمترین سرعت باد میانگین در فصل تابستان و در طبس با ۲/۹۸ متر بر ثانیه به دست آمد؛ در طبس ساختار سطحی مستعد شکل‌گیری گردوخاک بوده و با کمترین وزش باد گردوخاک ایجاد می‌شود. بر اساس گزارش ستاد مقابله با گردوخاک سازمان محیط زیست (۱۳۹۸)، در غرب طبس کانون محلی گردوخاک وجود دارد. میانگین سرعت باد در سرخس در بهار ۱۲ و در تابستان ۱۱ متر بر ثانیه است که با توجه به گروه‌بندی گردوخاک به نظر می‌رسد وزش باد شدید با گردوخاک ضعیف همراه است.

در بیرجند، گناباد، و طبس با سرعت باد ۸ و ۱۲ متر بر ثانیه طوفان شدید رخ داده است. همچنین، در نهبندان سرعت باد در تابستان ۱۲/۴ متر بر ثانیه بوده که به طوفان گردوخاک منجر شده است. در بهار نیز با میانگین سرعت باد ۸/۳ متر بر ثانیه طوفان به وقوع پیوسته است. بنابراین، به نظر می‌رسد ساختار سطحی در منطقه به گونه‌ای است که با سرعت باد بیشتری گردوخاک توسعه می‌یابد.

در ادامه مطلب فراوانی ساعتی گردوخاک در پنج ایستگاه بررسی می‌شود. فراوانی مطلق ساعتی گردوخاک در طبس با ۴۹۴۱ و سرخس با ۲۱۷۰ بار تکرار تفاوت بارزی نسبت به دیگر ایستگاه‌ها دارند (جدول ۲). با توجه به اینکه این دو کمترین ارتفاع از سطح دریای آزاد را نسبت به دیگر ایستگاه‌ها دارند، به نظر می‌رسد بیشترین تأثیر را از چشمه‌های گردوخاک پیرامون می‌گیرند.

تعداد تکرار در روز (نسبت فراوانی مطلق به تعداد روزهای گردوخاک) در جدول ۲ آمده است. طبس با ۳/۶ بیشترین تعداد تکرار کاهش دید را در طی یک روز داشته است؛ به این معنا که از ۸ بار دیدبانی در طی روز ۳/۶ دفعه کاهش دید گزارش شده است. این نسبت در سرخس و نهبندان ۲/۴ و در بجنورد ۱/۲ است. در نهبندان در بازه سالانه ۴۸۳ روز و در مجموع ۱۱۷۵ ساعت گردوخاک گزارش شده و نسبت ۲/۴ به دست آمده است که نشان می‌دهد تعداد ساعت گردوخاک در هر روز در مقایسه با بیرجند و گناباد بیشتر است.

جدول ۲. فراوانی مطلق (تعداد ساعت کاهش دید افقی) و نسبی (درصد) تعداد روزهای گردوخاک از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ در ایستگاه‌های منتخب خراسان شمالی، رضوی، و جنوبی

ایستگاه	خراسان رضوی		خراسان جنوبی		خراسان شمالی
	سرخس	گناباد	طبس	بیرجند	نهبندان
ارتفاع از سطح دریای آزاد (متر)	۲۷۸	۱۰۵۶	۷۱۱	۱۴۹۱	۱۱۸۸
تعداد روز گردوخاک	۸۹۹	۵۰۴	۱۳۸۰	۵۳۳	۴۸۳
فراوانی مطلق ساعتی	۲۱۷۰	۹۹۳	۴۹۴۱	۱۰۱۶	۱۱۷۵
تعداد تکرار در روز	۲/۴	۲/۰	۳/۶	۱/۹	۲/۴
فراوانی نسبی ساعتی (درصد)	۲۶	۳۴	۴۲	۳۰	۲۹
	بهار تابستان	۳۸	۴۵	۴۱	۵۴

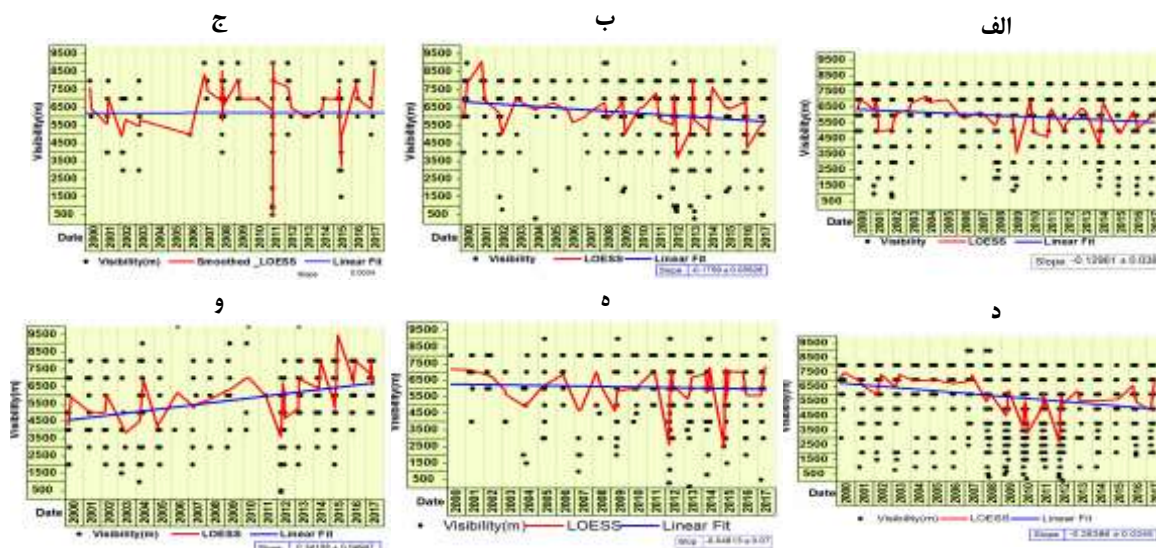
به جز طبس، در دیگر ایستگاه‌ها فراوانی گردوخاک ساعتی در تابستان از بهار بیشتر است. در طبس در دو فصل تابستان و بهار تعداد روزهای گردوخاک با فراوانی ۴۱ و ۴۲ درصد تقریباً یکسان است.

بررسی نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که فراوانی نسبی گردوخاک در چهار ایستگاه نهبندان، بیرجند، طبس، و گناباد در مجموع دو فصل تابستان و بهار ۸۰ درصد است. اگرچه سرخس در بازه سالانه گردوخاک زیادی داشته است، نسبت گردوخاک در بهار و تابستان نسبت به چهار ایستگاه دیگر کمتر است. با استفاده از جدول ۲ می‌توان دریافت که تعداد تکرار گزارش گردوخاک هر روز در خراسان جنوبی نسبت به دو استان دیگر بیشتر است. نتیجه حاصل با شکل ۵ هماهنگ است. بیرجند و نهبندان (خراسان جنوبی) بیشترین فراوانی نسبی گردوخاک را در فصل تابستان دارند که با نتیجه شکل ۵ هماهنگ است.

طبس بیشترین تعداد روز گردوخاک، بیشترین تکرار ساعتی، شدیدترین طوفان و سرعت باد را دارد. با توجه به اینکه با کمترین سرعت باد بیشترین تعداد تکرار طوفان گردوخاک رخ می‌دهد، اثر شرایط سطحی و محلی در وقوع گردوخاک تأیید می‌شود. همچنین، باد غالب جهت‌های مختلفی را نشان می‌دهد که با توجه به موقعیت و ارتفاع ایستگاه می‌توان بیان کرد این منطقه متأثر از چشمه‌های محلی و فرامحلی بوده و بیشتر از دیگر مناطق تحت تأثیر گردوخاک است. سرخس در آخرین امتدادهای ارتفاعات کپه‌داغ و در مجاورت بیابان قره‌قوم ترکمنستان و گناباد در فلات سیاه‌کوه و در مجاورت کویر بجستان و ابتدای کویر مرکزی ایران قرار دارد که باعث می‌شود تعداد روزها و تعداد تکرار ساعتی گردوخاک قابل توجهی داشته باشد. اما با وجود سرعت باد زیاد، در این منطقه طوفان گردوخاک رخ نمی‌دهد.

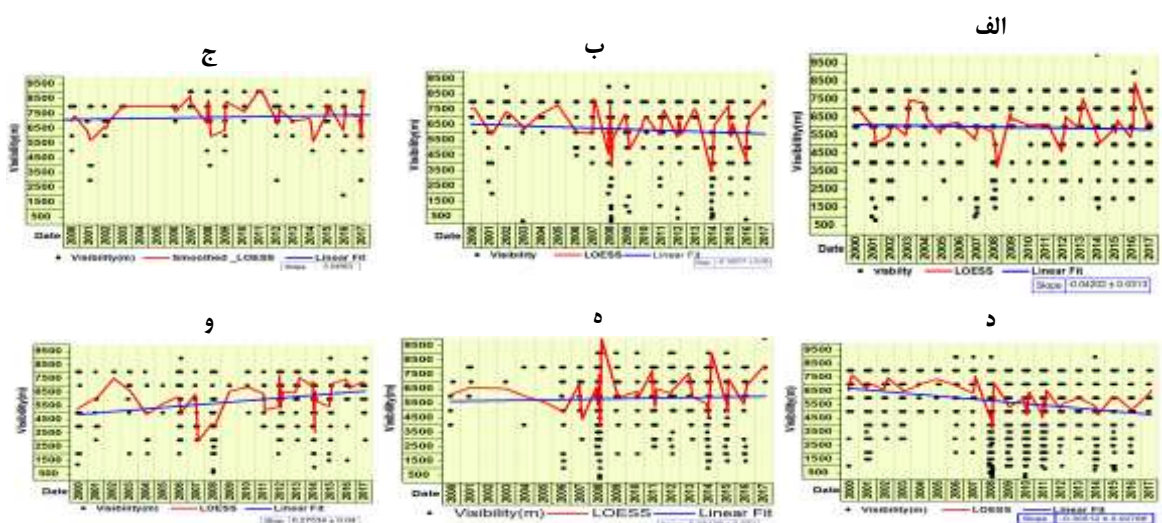
روند تغییرات دید افقی در دوره آماری ۲۰۱۷-۲۰۰۰

بررسی تغییرات دید افقی در دو فصل بهار و تابستان و در ایستگاه‌های انتخابی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ انجام شد (شکل ۷). به‌منظور بررسی تغییرات دید افقی از روند خطی (رنگ آبی) استفاده شد. روش لوس نیز برای هموارسازی و تعیین کمینه و بیشینه‌های دید افقی به‌کار گرفته شد (رنگ قرمز). در فصل بهار دید افقی در نهبندان با شیب $+۰/۳۴$ رو به افزایش بوده، درحالی‌که در طبس، گناباد، سرخس با شیب $-۰/۲۸$ ، $-۰/۱۷$ و $-۰/۱۲$ روند کاهشی مشاهده می‌شود (شکل ۶). در بیرجند و بجنورد خط روند با شیب $+۰/۰۵$ و $+۰/۰۳۴$ تغییر ویژه‌ای نداشته و روند معنی‌داری نشان نمی‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در یک فصل شدت گردوخاک و روند تغییرات دید افقی در ایستگاه‌ها مشابه نیست. در سرخس، طبس، و گناباد در فصل بهار به‌طور متوالی در سراسر سال‌ها کاهش دید بین ۶۰۰۰ تا ۹۰۰۰ ثبت شده است. در طبس بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲ به‌طور متوالی دید افقی کمتر از ۵۰۰۰ متر ثبت شده است. درحالی‌که در سرخس از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ کمترین دید افقی رخ داده است. در نهبندان، گناباد، و بیرجند کمترین دید افقی به‌طور مشترک سال ۲۰۱۲ رخ داده است. در بررسی‌ها، سال ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴ به‌عنوان بیشترین تعداد وقوع گردوخاک تعیین شد که نشان از فراگیر بودن گردوخاک داشت، اما در بررسی کمترین دید افقی سال ۲۰۱۲ به‌عنوان سال مشترک در شدیدترین گردوخاک‌ها شناخته می‌شود.



شکل ۶. روند تغییرات دید افقی (متر) در فصل بهار از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷: الف) سرخس؛ ب) گناباد؛ ج) بجنورد؛ د) طبرس؛ ه) بیرجند؛ و) نهبندان

در فصل تابستان نیز طبرس با شیب $-۰/۳۰$ روند کاهشی داشته و نهبندان با $+۰/۲۷$ افزایشی است (شکل ۷) و در دیگر ایستگاه‌ها شیب خط روند بیرجند با $+۰/۰۵$ ، بجنورد با $+۰/۰۴$ ، گناباد با $-۰/۱۰$ ، و سرخس با $-۰/۰۴$ تغییر معناداری ندارد. در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴ در برخی ایستگاه‌ها شدیدترین کاهش دید افقی در فصل تابستان رخ داده است. آن در گناباد، بیرجند، نهبندان، و طبرس بسیار زیاد است؛ درحالی‌که در بجنورد دید تا ۵۰۰۰ متر کاهش یافته است. با مقایسه شکل ۶ و شکل ۷ می‌توان مشاهده کرد که در نهبندان در شش ماه گرم سال از شدت گردوخاک کاسته شده؛ درحالی‌که در طبرس در هر دو فصل بر شدت گردوخاک افزوده شده است. از جمله دلیل‌های افزایش شدت گردوخاک در طبرس افزایش تأثیرگذاری گردوخاک مناطق مرکزی ایران است.

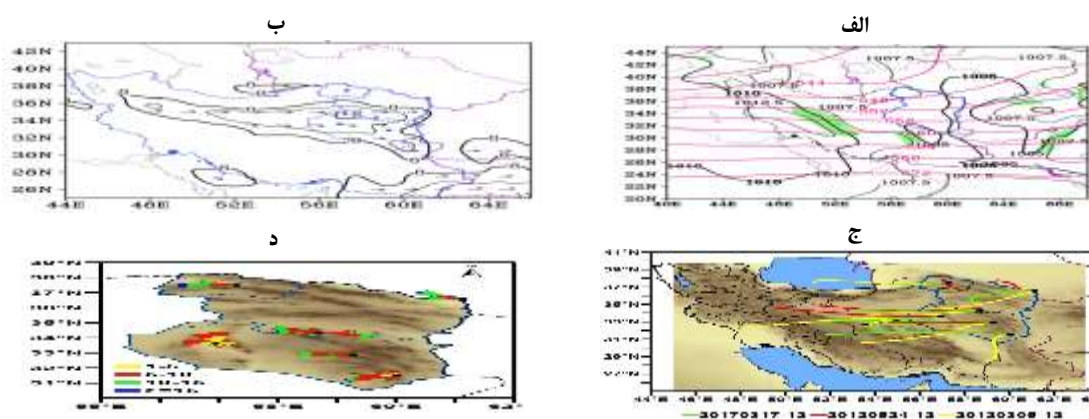


شکل ۷. روند تغییرات دید افقی (متر) در فصل تابستان از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷: الف) سرخس؛ ب) گناباد؛ ج) بجنورد؛ د) طبرس؛ ه) بیرجند؛ و) نهبندان

ساختار همدیدی و منشأ گردوخاک

در این بخش میانگین ساختار همدیدی و میدان باد سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال و برون داد مدل HYSPLIT برای رویدادهای انتخابی فصل بهار و تابستان تحلیل شد. همچنین، به منظور تعیین منشأ شکل‌گیری و مقایسه میدان باد، گل غبار در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ ترسیم شد. در فصل بهار، کم‌فشار ۱۰۰۵ هکتوپاسکال در نواحی شرقی ایران مشاهده می‌شود. زبانه پرفشار ۱۰۱۰ هکتوپاسکال نیز در غرب و مناطق مرکزی ایران قرار دارد (شکل ۸-الف). در حد فاصل این دو خط هم‌فشار، شیو فشار در منطقه مرکزی ایران به‌ویژه در دامنه شرقی زاگرس توسعه یافته است که به شکل‌گیری باد غربی ۱۰ متر بر ثانیه در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال در جنوب البرز (استان‌های سمنان، اصفهان، و یزد) منجر می‌شود (شکل ۸-الف و ب). با توجه به ساختار سطحی این منطقه، باد ۱۰ متر بر ثانیه می‌تواند موجب انتشار گردوخاک شود و جهت غربی آن گردوخاک را به سوی خراسان بزرگ انتقال دهد. علاوه بر آن، سلول ۱۰۰۵ هکتوپاسکال در جنوب خراسان مشاهده می‌شود که با گسترش پشته فشاری ۱۰۰۷/۵ هکتوپاسکال، شیو فشاری بر روی کرمان و یزد شکل گرفته و بادهای جنوب غربی ۱۲ متر بر ثانیه (سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال) همراه است (شکل ۸-الف و ب). به این ترتیب، بخش غربی و مرکزی خراسان جنوبی نسبت به خراسان رضوی از بادهای غربی تأثیر بیشتری گرفته و احتمال وقوع گردوخاک در این منطقه بیشتر است. ساختار حاضر با نتیجه ارائه شده در شکل ۴-ب هماهنگی دارد. در شکل ۴ در ماه مه، خراسان جنوبی گردوخاک بیشتری نسب به خراسان رضوی داشت. خراسان شمالی نسبت به دو استان دیگر کمترین تأثیر را می‌گیرد. از یافته‌های مهم این تحقیق این است که ساختار همدیدی که در فصل بهار به گردوخاک در خراسان بزرگ منجر می‌شود کم‌فشار دینامیکی مهاجر غربی و پرفشار سیبری نیست. محاسبه شیو فشار و ترسیم موقعیت آن یکی از نقاط قوت این مطالعه به‌شمار می‌رود؛ زیرا در بسیاری از مطالعه‌ها اشاره به شیو فشار شده است، اما موقعیت آن به‌طور چشمی و با توجه به موقعیت کم‌فشار و پرفشار تحلیل شده است. محاسبه و ترسیم شیو فشار عامل مهمی در شناخت بهتر موقعیت بیشینه باد و اثر آن در گردوخاک است. در مطالعه‌های پیشین به شکل‌گیری شیو فشار در محدوده کرمان و یزد و نقش آن در گردوخاک بهاری خراسان جنوبی اشاره نشده است. در بررسی برون داد مدل HYSPLIT، منشأ گردوخاک‌های ایستگاه‌های مرکزی و غربی خراسان بزرگ در فصل بهار مناطق مرکزی ایران به‌ویژه اصفهان و یزد تعیین می‌شود (شکل ۸-ج). در سه مورد گردوخاک مورد بررسی، باد غربی در یک مورد سرخس را تحت تأثیر قرار داده است. باد غربی مؤثر بر بجنورد (خراسان شمالی) از دریای خزر عبور می‌کند و می‌تواند عاملی در جهت عدم انتشار گردوخاک به این منطقه باشد. همچنین، ایستگاه‌های خراسان جنوبی تحت تأثیر مناطق خشک کرمان هستند. به این ترتیب، برون داد مدل HYSPLIT با میدان باد سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال هماهنگی دارد. باد غالب منطقه در همه ایستگاه جهت غربی را نشان می‌دهد (شکل ۸-د). در طبس فراوانی باد شمال از باد غربی بیشتر است. در گناباد، علاوه بر باد غربی، باد شرقی و جنوب شرقی نیز مشاهده می‌شود. در نهبندان نیز جهت باد غالب جنوب غربی است. در بیرجند فقط ایستگاه‌هایی است که باد غالب آن کاملاً غربی است. در فصل بهار، در بجنورد، سرعت باد غالب (بیش از ۱۵ متر بر ثانیه) بیشترین و در طبس (۱ تا ۵ متر بر ثانیه) کمترین سرعت باد را نسبت به ایستگاه‌های دیگر دارند. طبس با باد غالب شمالی و کمترین سرعت (۱-۵ متر بر ثانیه) (شکل ۸-د) بیشترین فراوانی (۴۲ درصد) را در فصل بهار دارد و نسبت به دیگر ایستگاه‌ها تفاوت بارزی دارد. در فصل بهار، گناباد، بیرجند، و نهبندان بیشترین فراوانی سرعت باد (۵ تا ۱۰ متر بر ثانیه) را دارند. در فصل بهار بجنورد بیشترین سرعت باد (۱۵ متر بر ثانیه) را نسبت به دیگر ایستگاه‌های انتخابی دارد که

به کاهش تعداد وقوع گردوخاک منجر می‌شود. همچنین، با توجه به جهت باد غالب، که غربی است، مسیر حرکت ذره از دریای خزر به سوی این مناطق است. با توجه به مسیر عبور ذره از منابع آبی، احتمال انتقال گردوخاک کاهش می‌یابد. در فصل تابستان، هسته کم‌فشار ۹۹۵ هکتوپاسکال در جنوب شرق افغانستان و هسته پرفشار ۱۰۰۷/۵ هکتوپاسکال در شمال افغانستان دیده شده که به شکل‌گیری شیو فشار شمالی- جنوبی منجر می‌شود (شکل ۹- الف). حضور پشته ارتفاعی در منطقه نشان می‌دهد که کم‌فشار ساختار گرمایی دارد. بیشترین مقدار شیو فشار بر روی افغانستان بوده، اما بخش‌های از مرز شرق و شمال شرق ایران را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (شکل ۹- الف). در مطالعه‌های پیشین به پرفشار شمال افغانستان و تأثیر آن در شکل‌گیری شیو فشار در منطقه اشاره نشده است. بادهای شمال و شمال شرقی حاصل از شیو فشار با بیشینه سرعت ۱۸ متر بر ثانیه (سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال) در مرز شرق و شمال شرق ایران توسعه می‌یابند (شکل ۹- الف و ب). کوه‌های افغانستان و خراسان، به‌ویژه کوه‌های خراسان جنوبی، اهمیت فراوانی در افزایش شیو فشاری و افزایش سرعت باد دارند.



شکل ۸. میانگین الف) فشار سطحی دریای آزاد بر حسب هکتوپاسکال (مشکی)، شیو فشار (هاشور و پیکان سبز) و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بر حسب دکامتر (قرمز)؛ ب) سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه (خط مشکی)، جهت باد پیکان در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال برای سه واقعه گردوخاک فراگیر شامل ۵ مارس ۲۰۱۲، ۲۴ مه ۲۰۱۲، و ۱۷ مارس ۲۰۱۷؛ ج) مسیر ۱۲ ساعته پس‌گردی ذره حاصل برون‌داد مدل HYSPLIT در ارتفاع ۱۵۰۰ متری برای سه واقعه گردوخاک فراگیر؛ د) گل باد بر حسب متر بر ثانیه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ در فصل بهار

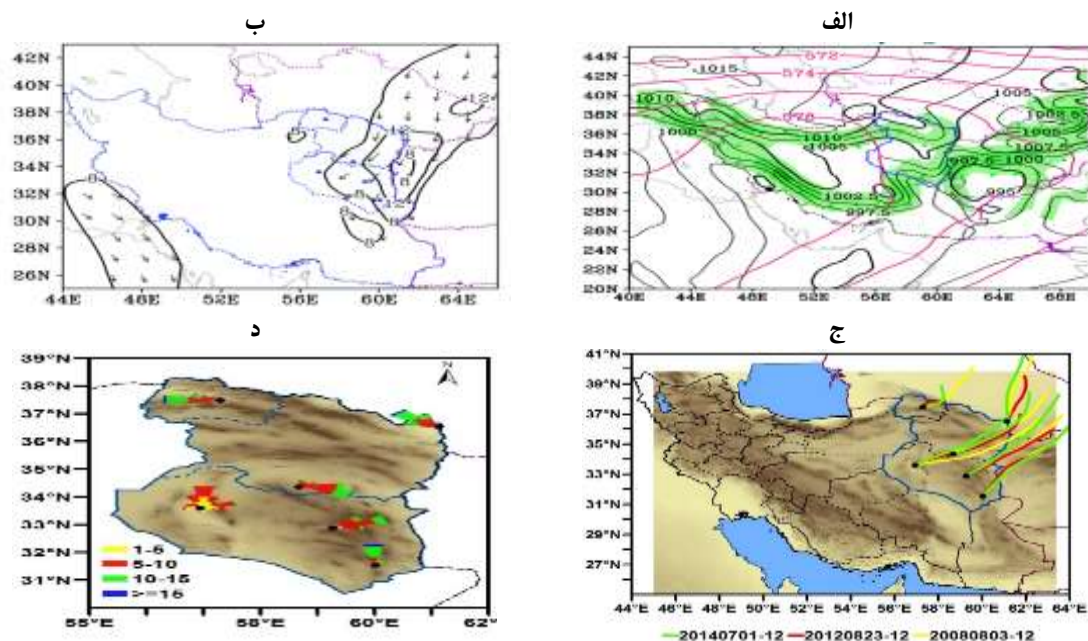
همچنین، گسترش پشته فشاری ۱۰۱۰ هکتوپاسکال از دریای خزر و شرق و شمال شرق ایران به عرض‌های جنوبی‌تر شیو فشاری را در راستای شمال- جنوب در خراسان جنوبی ایجاد می‌کند. این فرایند به توسعه بادهای شمال شرقی منجر شده و افزایش سرعت باد تا ۱۲ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد (شکل ۹- الف و ب). افزایش گردوخاک خراسان جنوبی در ماه ژوئیه (شکل ۴) نسبت به دو استان دیگر متأثر از این ساختار است.

برون‌داد مدل HYSPLIT در ایستگاه‌های منتخب مسیر پس‌گردی ذره را از افغانستان و تاجیکستان نشان می‌دهد (شکل ۹- پ). این مسیر با بادهای شمالی و شمال شرقی سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال هماهنگی دارد (شکل ۹- ب). جهت وزش باد در نهبندان و طبس شمالی، بیرجند، و گناباد به ترتیب شمال شرقی و غربی، طبس شمال غربی، و بجنورد غربی است (شکل ۹- ج). بیشترین سرعت باد (بیش از ۱۵ متر بر ثانیه) در نهبندان و کمترین سرعت باد (۵-۱۰ متر بر ثانیه) در طبس مشاهده می‌شود. در بهار باد غالب غربی در همه ایستگاه‌های انتخابی مشاهده شد؛ در حالی که در تابستان جهت باد غالب در ایستگاه‌ها متفاوت است (شکل ۸- د و شکل ۹- د). در طی تابستان، ساختار کوهساری منطقه

تأثیر ویژه‌ای در جهت وزش بادها دارد و جهت و سرعت باد غالب را در هر ایستگاه تغییر می‌دهد. به عبارتی، ایجاد گردوخاک‌های محلی در فصل تابستان احتمال وقوع بیشتری دارد. درحالی‌که بادهای غربی در فصل بهار از ساختار کوهساری تأثیر کمتری پذیرفته و ایستگاه‌های مرکزی و غربی منطقه شرایط نسبتاً مشابهی را تجربه می‌کنند. طمس در هر دو فصل باد غالب شمالی داشته و به‌نظر می‌رسد گردوخاک‌های این ایستگاه بیشتر تحت تأثیر شرایط محلی بوده و سامانه‌های همدیدی تأثیر کمتری داشته باشند.

بر اساس گزارش ستاد مقابله با گردوخاک سازمان محیط زیست (۱۳۹۸)، شمال و شرق گناباد، شمال غرب و غرب طمس، و جنوب نهبندان به‌عنوان کانون‌های داخلی گردوخاک شناخته شده‌اند. جهت باد غالب گناباد در بهار هر دو سوی غربی و شرقی بوده و در تابستان غربی است. بنابراین، گناباد در هر دو فصل بهار و تابستان تحت تأثیر گردوخاک محلی است. باد غالب طمس نیز در هر دو فصل شمال غرب و غربی است که گردوخاک را از کانون‌های محلی انتقال می‌دهد. اما باد غالب نهبندان در بهار جنوب غرب و در تابستان شمالی است. از این‌رو، به‌نظر می‌رسد اثر کانون محلی در گردوخاک گناباد به‌ویژه در تابستان ضعیف‌تر است.

در تابستان مسیر شبیه‌سازی مدل HYSPLIT و جهت باد غالب در بجنورد متفاوت است. گرچه باد غالب منطقه غربی است، هرگاه به دلیل توسعه ساختار همدیدی جهت باد شمالی شود (مسیر مدل HYSPLIT)، گردوخاک از بیابان‌های ترکمنستان به خراسان شمالی انتقال می‌یابد.



شکل ۹. نقشه‌های میانگین: الف) فشار سطحی دریای آزاد بر حسب هکتوپاسکال (مشکی)، شیو فشار (هاشور و بیکان سبز)، و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بر حسب دکامتر (قرمز)؛ ب) سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه (خط مشکی)، جهت باد بیکان، سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال؛ ج) مسیر ۱۲ ساعته پس‌گردی ذره حاصل برون‌داد مدل HYSPLIT در ارتفاع ۱۵۰۰ متری برای سه واقعه گردوخاک فراگیر شامل ۳ اوت ۲۰۰۸، ۲۴ اوت ۲۰۱۲، و ۱ ژوئیه ۲۰۱۴؛ د) گل‌باد بر حسب متر بر ثانیه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ در فصل تابستان

در هر دو فصل بهار و تابستان عملکرد سازوکار شکل‌گیری و منشأ گردوخاک و همچنین ساختار سطحی در استان خراسان جنوبی نسبت به دو استان دیگر (شمالی و رضوی) متفاوت است (شکل ۸ و ۹). استان خراسان جنوبی به دلیل موقعیت جغرافیایی بیشترین تأثیر را از ساختار همدیدی و افزایش سرعت باد می‌گیرد. از همین رو، تعداد روزهای گردوخاک آن بیش از دو استان دیگر است. همچنین، امتداد شمالی-جنوبی ساختار کوهساری در خراسان جنوبی عامل مهمی در تشدید شیو فشار و افزایش سرعت باد در فصل تابستان است. همچنین، باعث می‌شود تا مشخصه‌های گردوخاک در مناطق مختلف استان یکسان نباشد.

با مقایسه دو شکل ۸ و ۹ می‌توان دریافت که خراسان رضوی و جنوبی در تابستان تحت تأثیر بادهای شمال و شمال شرقی قرار داشته و گردوخاک بیشتری در این دوره دارند. اما جهت باد غالب و مسیر گردوخاک در خراسان شمالی متفاوت است. خراسان جنوبی و شمالی در فصل بهار تأثیر بیشتری از بادهای غربی می‌گیرند. در خراسان جنوبی باد از مناطق بیابانی عبور می‌کند، درحالی که در خراسان شمالی باد از فراز دریای خزر گذر می‌نماید.

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج آماری و بررسی توزیع سالانه نشان داد که روند تغییر میانگین روزهای گردوخاک در استان خراسان جنوبی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ به‌طور معنی‌داری افزایشی و در استان خراسان رضوی و شمالی در همان دوره به‌طور معنی‌داری کاهش یافته است. در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴ فراگیرترین و در سال ۲۰۱۲ شدیدترین گردوخاک‌ها رخ داده است و هر سه استان (خراسان بزرگ) را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در توزیع ماهانه بیشترین گردوخاک در خراسان رضوی و شمالی در ماه ژوئن و در استان خراسان جنوبی در ماه مه و ژوئیه به‌دست آمد.

در بررسی مکانی گردوخاک می‌توان مشاهده کرد که سرخس و گناباد در خراسان رضوی و طبس در خراسان جنوبی در هر دو فصل بهار و تابستان بیشترین تعداد تکرار گردوخاک را دارند.

بر اساس طبقه‌بندی شدت طوفان‌های گردوخاک گناباد و طبس با ۴ و ۲ مورد طوفان شدید رخ داده و در بیرجند و طبس نیز یک مورد طوفان گردوخاک رخ داده است. گناباد، به‌رغم ارتفاع قابل‌توجه از سطح دریای آزاد، بیشترین تعداد طوفان گردوخاک شدید را دارد. بر اساس گزارش ستاد مقابله با گردوخاک سازمان محیط زیست (۱۳۹۸)، محدوده گناباد به‌عنوان کانون محلی گردوخاک شناخته شده است. همچنین، در بجنورد، نماینده خراسان شمالی، طوفان گردوخاک شدید رخ نداده است.

فراوانی مطلق ساعتی گردوخاک در طبس با ۴۹۴۱ و سرخس با ۲۱۷۰ بار تکرار تفاوت بارزی نسبت به دیگر ایستگاه‌ها دارد. با توجه به اینکه این دو کمترین ارتفاع از سطح دریای آزاد را نسبت به دیگر ایستگاه‌ها دارند، بیشترین تأثیر را از چشمه‌های گردوخاک پیرامونی می‌گیرند.

بررسی تغییرات دید افقی در نهبندان در هر دو فصل بهار و تابستان با شیب $+۰/۳۴$ و $+۰/۲۷$ روند افزایشی و طبس با $-۰/۲۸$ و $-۰/۳$ روند کاهش‌دهنده دارد. به این معنا که در نهبندان شدت گردوخاک در حال کاهش و در طبس در حال افزایش است. در فصل بهار سه ایستگاه گناباد و سرخس روند دید افقی کاهش‌دهنده دارند. به‌نظر می‌رسد وقوع گردوخاک در فصل بهار رو به افزایش است.

تغییرات دید افقی در بجنورد در دو فصل بهار و تابستان روند معنی‌داری نشان نمی‌دهد. به این معنا که افزایش یا کاهش بارزی در مقدار دید افقی دیده نمی‌شود.

در بررسی میانگین ساختار همدیدی در گردوخاک‌های شدید و فراگیر در منطقه در دو فصل بهار و تابستان سازوکار شکل‌گیری، آستانه سرعت باد، مسیر و منشأ گردوخاک الگوی‌های متفاوت به‌دست آمد. در بهار توسعه کم‌فشار در مرز شرقی و پرفشار در مرز غربی ایران به توسعه شیو فشار در جهت غربی- شرقی در مناطق مرکزی ایران منجر می‌شود. بادهای غربی منطبق با شیو فشار با سرعت باد میانگین ۱۰ متر بر ثانیه در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال می‌تواند شرایط را برای انتشار گردوخاک و انتقال آن به‌سوی خراسان بزرگ فراهم کنند. ساختار همدیدی به‌دست‌آمده در گردوخاک‌های بهاری در این تحقیق با مطالعه‌های پیشین تفاوت دارد. بر اساس نتیجه احمدی و همکاران (۱۳۹۴)، جابه‌جایی جنوب سوی پرفشار ترکمنستان عامل افزایش شیو افقی بین آن سامانه و کم‌فشار پاکستان بوده و به تقویت باد و انتشار گردوخاک در خراسان جنوبی منجر می‌شود. با توجه به اینکه تحقیق‌های انجام‌شده موردی بوده و همچنین انتخاب بازه زمانی و فصل‌ها متفاوت است، دستیابی به ساختارهای متفاوت همدیدی دور از ذهن نیست.

در تابستان توسعه کم‌فشار گرمایی و دو هسته پرفشار یکی در شمال افغانستان و دیگری بر روی دریای خزر به توسعه شیو فشار شمالی- جنوبی منجر شده و بادهای شمال شرقی و شمالی با میانگین سرعت ۱۸ متر بر ثانیه شکل می‌گیرد. این باد گردوخاک را از بیابان‌های ترکمنستان و افغانستان به شرق و مرکز خراسان بزرگ می‌رساند (مطابق با دوستان، ۱۳۹۵). در الگوی تابستانی، با توجه به جهت باد جنوبی، امتداد کوه‌های افغانستان و خراسان به‌ویژه کوه‌های خراسان جنوبی تأثیر فراوانی در افزایش شیو فشاری و افزایش سرعت باد در منطقه دارند. در فصل تابستان بیابان و ریگزارهای ترکمنستان و دشت‌های خشک پست شرق منشأ گردوخاک‌های خراسان بزرگ می‌باشند.

مسیرهای شبیه‌سازی‌شده توسط مدل HYSPLIT با جهت باد غالب هماهنگی داشته؛ به‌طوری‌که می‌توان منشأ و ترابرد گردوخاک را تعیین کرد. بیابان‌های مرکزی ایران منشأ گردوخاک‌های بهاری و بیابان‌های ترکمنستان و افغانستان منشأ گردوخاک‌های تابستانی خراسان بزرگانند.

سپاس‌گزاری

از مسئولان محترم پژوهشگاه هواشناسی که شرایط را برای تهیه مقاله حاضر فراهم کردند تشکر می‌نمایم.

منابع

- احمدی، ز.؛ دوستان، ر. و مفیدی، ع. (۱۳۹۴). تحلیل همدیدی گردوغبار نیمه گرم سال در استان خراسان جنوبی، فصل‌نامه جغرافیای طبیعی، ۸: ۴۱-۶۲.
- الهی گل، علی و هاشمی دوین، مهری (۱۳۹۴). مطالعه طوفان‌های گردوغبار بجنورد با خروجی‌های سودار، مجله نیوار، ۸۸-۸۹: ۳۱-۴۳.
- امیدوار، ک.؛ ابراهیمی، ر. و نکونام، ز. (۱۳۹۴). واکاوی همدیدی طوفان‌های سیاه غرب خراسان رضوی و سبزوار، فصل‌نامه علوم و مهندسی محیط زیست، ۳: ۳۹-۵۴.
- بروغنی، م.؛ مرادی، ح. ر.؛ زنگنه اسدی، م.ح. (۱۳۹۴). تحلیل وقوع گردوغبار و پهنه‌بندی آن در استان خراسان رضوی، مجله پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۴: ۴۵-۵۷.
- پورهاشمی، س.؛ امیراحمدی، ا.؛ زنگنه اسدی، م.ح. و صالحی، م. (۱۳۹۷). شناسایی و تعیین خصوصیات کانون‌های گردوغبار در استان خراسان رضوی، تحقیقات جغرافیایی، ۱: ۱-۹.
- دوستان، ر. (۱۳۹۵). تحلیل فضایی گردوغبار در شمال شرق ایران، مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، ۲: ۶۷-۹۰.
- ستاد مقابله با گردوخاک سازمان محیط‌زیست (۱۳۹۸). طرح منشأیابی کانون‌های بحرانی داخلی فرسایش بادی، طوفان ماسه و گردوخاک.
- علیجانی، ب. و رئیس‌پور، ک. (۱۳۹۰). تحلیل آماری، همدیدی طوفان‌های گردوخاک در جنوب شرق ایران (مطالعه موردی: منطقه سیستان)، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۵: ۱۰۷-۱۳۲.
- کارکن سیستانی، م. (۱۳۹۱). بررسی آماری و پهنه‌بندی طوفان‌های گردوغبار در استان خراسان رضوی، اولین همایش ملی بیابان، ۲۷ و ۲۸ خرداد ۱۳۹۱، کرج، ایران.
- لشکری، ح. و کیخسروی، ق. (۱۳۸۷). تحلیل آماری سینوپتیکی طوفان‌های گردوغبار استان خراسان رضوی در فاصله زمانی ۱۹۹۳-۲۰۰۵، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۰: ۱۷-۳۳.
- مهرشاهی، د. و نکونام، ز. (۱۳۸۸). بررسی آماری پدیده گرد و غبار و تحلیل الگوی ورزش بادهای گرد و غبارزا، مجله جغرافیا، ۲۲: ۸۳-۱۰۴.
- هاشمی دوین، م. و جلالی، م. (۱۳۹۴). مطالعه همدیدی- آماری گردوغبار ماندگار در خراسان شمالی، کنفرانس بین‌المللی گردوغبار، دانشگاه شهید چمران اهواز
- Ahmadi, Z.; Dostan, R. and Mofidi, A. (2016). Synoptic analysis of semi-warm dust of the year in South Khorasan Province, *Journal of Natural Geography*, No. 8, PP. 41-62.
- Alijani, B. and Raispour, K. (2012). Statistical Analysis, Synopticity of Dust Storms in South East of Iran (Case Study: Sistan Region), *Geographical Studies of Arid Regions*, No.5, PP. 107-132.
- Al-Jumaily, K. J. and Ibrahim, M. K. (2013). Analysis Of Synoptic Situation For Dust Storms In Iraq, *International Journal Of Energy And Environment*, Vol. 4, PP. 851-858.
- Barkan, J. and Alpert, P. (2010). Synoptic analysis of a rare event of Saharan dust reaching the Arctic region, *Weather*, No. 8, PP. 208-211.
- Borghni, M.; Moradi, H. R. and Zanganeh Asadi, M.A. (2016). Analysis of dust occurrence and its zoning in Khorasan Razavi province, *Journal of Environmental Erosion Research*, No. 4, PP. 45-57.

- Chen, S.; Huang, J.; Zhao, C.; Qian, Y.; Leung, L. R. and Yang, B. (2013). Modeling the transport and radiative forcing of Taklimakan dust over the Tibetan Plateau: A case study in the summer of 2006, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, No. 2, PP. 797-812.
- Doostan, R. (2017). Dust Spatial Analysis in Northeastern Iran, *Journal of Geography and Regional Development*, No. 2, PP. 67-90.
- Dust Control Headquarters of the Environment Organization (2020). *The Project of internal critical source dust with wind erosion, sandstorms and dust*.
- ElahiGol, A. and Hashemi Duin, M. (2016). Study of Bojnourd Dust Storms with Sodar, *Newar Magazine*, No. 88-89, PP. 43-31.
- Escudero, M.; Stein, A.; Draxler, R.R.; Querol, X.; Alastuey, A.; Castillo, S. and Avila, A. (2006). Determination of the contribution of northern Africa dust source areas to PM10 concentrations over the central Iberian Peninsula using the Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model (HYSPLIT) model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, No. 111, PP. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005JD006395>.
- Hashemi Duin, M. and Jalali, M. (2016). Synoptic-statistical study of persistent dust in North Khorasan. *International Dust Conference*, Shahid Chamran University of Ahvaz.
- Karkon Systani, M. (2012). Statistical study and zoning of dust storms in Khorasan Razavi province. *First National Desert Conference*, June 27 and 28, 2012, Karaj, Iran.
- Lashkar, H. and Kikhosravi, Gh. (2009). Synoptic Statistical Analysis of Dust Storms of Khorasan Razavi Province in the Period 2005-2005, *Natural Geography Research*, No. 40, PP. 33-17.
- Lu, H. and Shao, Y. (1999). A new model for dust emission by saltation bombardment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, No. 104, PP. 16827-16842.
- Mehrshahi, D. and Nekonomam, R. (2010). Statistical Analysis of Dust Phenomena and Analysis of Dust Winds Exercise Pattern, *Geography*, No.22, PP.104-83.
- Omidvar, K.; Ebrahimi, R. and Nekoonam, Z. (2016). Synoptic Analysis of the Black Storms of Khorasan Razavi and Sabzevar, *Journal of Environmental Science and Technology*, No. 3, PP. 39-54.
- Poorhashemi, S.; Amirahmadi, A.; Zanganeh, M. and Salehi, M. (2019). Identification and characterization of dust source in Khorasan Razavi province, *Geographical Research*, No.1, PP. 1-9.
- Shao, Y. and Wang, J. (2003). A climatology of Northeast Asian dust events. *Meteorologische Zeitschrift*, 12(4): 187-196.
- Tegen, I. (2003). Modeling the mineral dust aerosol cycle in the climate system. *Quaternary Science Reviews*, No. 22, PP. 1821-1834.
- Tiryaki, S.; Özşahin, Ş. and Yıldırım, İ. (2014). Comparison of artificial neural network and multiple linear regression models to predict optimum bonding strength of heat treated woods. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, No. 55, PP. 29-36.
- Tsai, F.; Chen, G. T. J.; Liu, T. H.; Lin, W. D. and Tu, J. Y. (2008). Characterizing the transport pathways of Asian dust. *Journal of geophysical research: atmospheres*, No. 113, PP. 1-15.
- Westphal, D. L.; Toon, O. B. and Carlson, T. N. (1988). A case study of mobilization and transport of Saharan dust. *Journal of the Atmospheric Sciences*, No. 45, PP. 2145-2175.
- WMO, UNEP (2013). Establishing a WMO Sand and Dust Storm Warning Advisory and Assessment System Regional Node for West Asia: Current Capabilities and Needs: https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=15840#.Xf9S1c5S8dU.

Zhou, Q.; Jiang, H.; Wang, J. and Zhou, J. (2014). A hybrid model for PM2.5 forecasting based on ensemble empirical mode decomposition and a general regression neural network. *Science of the Total Environment*, No. 496, PP. 264-274.

<http://www.irimo.ir/far/services/climate/802%E2%80%8E>.