

چشمه‌های موثر بر وقوع گردوخاک در منطقه تهران با کاربری داده‌های MERRA-2

رامین احمدی^۱، امید علیزاده^{۲*} و سمانه ثابت‌قدم^۲

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد هواشناسی، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۲ دانشیار، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۴، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۱)

چکیده

برای بررسی اقلیم‌شناسی و شناسایی چشمه‌های موثر بر رخداد گردوخاک در منطقه تهران در ماه‌های مختلف سال از داده‌های بازتحلیل MERRA-2 با تفکیک افقی $0.5^\circ \times 0.625^\circ$ درجه طی دوره ۱۹۸۰-۲۰۲۲ استفاده شده است. نتایج نشان داد که غلظت جرمی گردوخاک سطحی در منطقه تهران در اواخر بهار و اوایل تابستان، به ویژه در ماه ژوئیه به بیشترین مقدار خود می‌رسد. شار نهشت خشک در ماه‌های آوریل و می، و شار نهشت تر در ماه‌های مارس و آوریل در تهران بیشینه است. شار گسیل گردوخاک در منطقه تهران در بهار و تابستان بیشتر از دو فصل دیگر است و بیشینه مقدار آن در ماه‌های ژوئن و ژوئیه رخ می‌دهد که با بیشینه شار گسیل گردوخاک در منطقه دشت کویر هم‌زمان است. منطقه ورامین تنها چشمه گردوخاک قابل شناسایی توسط داده‌های MERRA-2 در منطقه تهران است. در این منطقه در تابستان میزان شار گسیل گردوخاک بالاتر نسبت به مناطق اطراف و قرارگیری در منطقه تهران تعیین شده‌اند: ۱- منطقه غرب خاورمیانه؛ ۲- منطقه دشت کویر؛ ۳- چشمه‌های درون منطقه تهران. در همه این مناطق شار گسیل گردوخاک و غلظت جرمی گردوخاک سطحی در اواخر بهار و در تابستان، بویژه در ماه‌های ژوئن و ژوئیه به بیشینه مقدار خود می‌رسد. بررسی همبستگی بین شار گسیل گردوخاک در چشمه‌های احتمالی و غلظت جرمی گردوخاک در منطقه تهران نشان داد که در بیشتر ماه‌های سال، بویژه در زمستان و اوایل بهار (ژانویه-آوریل) منطقه غرب خاورمیانه کانون اصلی وقوع گردوخاک در منطقه تهران است. در تابستان و اوایل پاییز (ژوئن-اکتبر)، علاوه بر چشمه‌های گردوخاک خارج از ایران، دشت کویر و چشمه‌های واقع در منطقه تهران به کانون‌های اصلی گردوخاک اضافه می‌شوند.

کلمات کلیدی: شار گسیل گردوخاک، شار نهشت گردوخاک، غلظت جرمی گردوخاک سطحی

۱ مقدمه

پدیده گردوخاک در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک و بیابانی جهان رخ می‌دهد و امروزه به یکی از بحران‌های مهم زیست‌محیطی کشور ایران نیز تبدیل شده است و اثرات نامطلوب اقلیمی، زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی به همراه دارد. گسیل گردوخاک ایجاد شده توسط فرسایش بادی، بزرگ‌ترین چشمه گسیل هواویزهای جوّی است (تیان و همکاران، ۲۰۲۱؛ چن و همکاران، ۲۰۲۱) که با پراکنش و جذب مولفه‌های گوناگون تابش به‌طور مستقیم و با تغییر ویژگی‌های نوری و طول عمر ابرها به‌طور غیرمستقیم بر ترازمندی تابش جوّ و ازاین‌رو بر اقلیم جهانی تاثیر می‌گذارد (هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۱۳). هواویزها باعث کاهش کیفیت هوا و دید افقی در مناطق شهری و صنعتی و اثرات نامطلوب بر سلامتی انسان‌ها می‌شوند (فازی و همکاران، ۲۰۱۵) و همچنین بر دینامیک جوّ، نمایه قائم دما و سرعت باد تاثیر می‌گذارند (لائو و کیم، ۲۰۰۶).

مناطق مستعد برای وقوع گردوخاک عمدتاً در عرض‌های جغرافیایی ۲۰ تا ۴۵ درجه شمالی و جنوبی واقع شده‌اند. کمربند گردوخاک در مقیاس جهانی از سواحل غربی آفریقای شمالی آغاز می‌شود و تا خاورمیانه، مرکز، جنوب و جنوب‌غرب آسیا و چین ادامه دارد (جینوکس و همکاران، ۲۰۱۲). منابع انتشار ذرات گردوخاک به دو دسته طبیعی و انسان‌زاد تقسیم می‌شوند. پدیده گردوخاک از چشمه‌های طبیعی عمدتاً در مناطق بیابانی جهان در صورت وجود باد شدید اتفاق می‌افتد (میدلتون و کنگ، ۲۰۱۷). از سوی دیگر، فعالیت‌های بشری آشفته‌گی‌های جدی در محیط طبیعی ایجاد کرده است. استفاده نامطلوب از منابع طبیعی توسط انسان مانند تغییر کاربری زمین، چرای بی‌رویه دام و همچنین مدیریت ضعیف منابع آب (مانند ایجاد سدهای متعدد) از عوامل تاثیرگذار در وقوع پدیده گردوخاک است (گودی و میدلتون، ۲۰۰۶). چرخه رویداد

پدیده گردوخاک شامل ۳ بخش انتشار گردوخاک، انتقال گردوخاک و نهشت گردوخاک است (بالداسانو، ۲۰۱۳). ذرات گردوخاک با اندازه‌های ریز (کوچک‌تر از ۰/۶ میکرومتر) می‌توانند به مدت طولانی در هوا معلق بمانند، اما ذرات بزرگ‌تر تنها در نزدیکی سطح زمین حرکت می‌کنند و وارد ترازهای بالاتر نمی‌شوند (تسوآور و پای، ۱۹۸۷).

با توجه به اقلیم نیمه‌خشک و خشک ایران و در نظر گرفتن مناطق بیابانی گسترده‌ای که در کشورهای همسایه ایران وجود دارد، پدیده گردوخاک دفعات زیادی در طول سال مناطق مختلف ایران (برای نمونه، علیزاده و همکاران، ۲۰۲۲؛ بیرانوند و همکاران، ۲۰۲۳؛ مبارک حسن و همکاران، ۲۰۲۳) از جمله تهران را تحت تاثیر قرار می‌دهد (بیدختی و همکاران، ۲۰۱۶). بیشتر مناطق ایران ویژگی‌های اقلیمی متفاوتی در فصول مختلف سال تجربه می‌کنند و این ویژگی‌ها باعث تغییرات زیادی در توزیع زمانی و مکانی گردوخاک می‌شود (ثابت قدم و همکاران، ۲۰۱۸)، اما فقط مطالعات محدودی برای مدت زمان‌های کوتاه و در برخی مناطق شهری ایران انجام شده است (برای نمونه، معصومی و همکاران، ۲۰۱۳؛ خوش سیما و همکاران، ۲۰۱۵؛ راشکی و همکاران، ۲۰۲۱). شدت و فراوانی وقوع این پدیده در ایران بویژه در سال‌های اخیر، به‌واسطه خشکسالی‌های متوالی و تغییرات عوارض سطح زمین در کشورهای مجاور نظیر عراق و افغانستان که ناشی از فعالیت‌های بشر است، افزایش یافته است (علیزاده چوبری و همکاران، ۲۰۱۶؛ ثابت قدم و همکاران، ۲۰۲۱). به همین دلیل، تعیین کانون‌های گردوخاک در داخل و خارج از کشور به‌همراه پیش‌بینی زمان وقوع و شدت رخداد گردوخاک در مناطق مختلف ایران، از جمله تهران که جمعیت بالایی دارد، اهمیت زیادی دارد.

مطالعات مختلفی از گذشته تا کنون در زمینه تعیین مناطق مستعد در گسیل گردوخاک و فراوانی رخداد این پدیده در دنیا انجام شده است. از اولین مطالعات مربوط به فراوانی

داد که وقوع رویداد گردوخاک در ایران تغییرات فصلی قابل توجهی دارد، به نحوی که بیشترین فعالیت به ترتیب در فصول تابستان و بهار و کمترین فعالیت در زمستان اتفاق می‌افتد.

با در نظر گرفتن اهمیت موضوع، در مقاله حاضر کانون‌های موثر بر رخداد گردوخاک در منطقه تهران در ماه‌های مختلف سال با استفاده از محاسبه شار قائم گردوخاک از نتایج داده‌های بازتحلیل MERRA-2 تعیین و اولویت‌بندی می‌شوند. همچنین تغییرات ماهانه و فصلی وقوع گردوخاک در منطقه تهران بررسی می‌شود. با توجه به نتایج مطالعه حاضر، می‌توان اقدامات مؤثرتری را جهت کاهش اثرات ناشی از رخداد گردوخاک در مناطقی از تهران که پتانسیل تاثیرپذیری بالاتری را دارند اعمال کرد.

۲ داده‌ها و روش تحقیق

۲-۱ داده‌ها

در این مطالعه برای بررسی گردوخاک و کمیت‌های مرتبط با آن از داده‌های بازتحلیل MERRA-2 استفاده شده است. MERRA-2 نسل دوم داده‌های بازتحلیل جوی NASA است که از مدل جوی GEOS-5، جفت شده با GOCART، استفاده می‌کند. MERRA-2 دارای تفکیک افقی 0.5×0.625 درجه (حدود ۵۰ کیلومتر) است که از سال ۱۹۸۰ در دسترس است (جلارو و همکاران، ۲۰۱۷). در دسترس بودن داده‌های MERRA-2 برای دوره طولانی ۴۳ ساله (۱۹۸۰-۲۰۲۲) امکان بررسی بلندمدت متغیرهای مربوط به گردوخاک و روند آن‌ها را فراهم می‌کند. بدین منظور از میانگین ماهانه داده‌های MERRA-2 برای بررسی گردوخاک طی دوره ۱۹۸۰-۲۰۲۲ استفاده شده است. متغیرهای استفاده شده از داده‌های MERRA-2 شامل شار گسیل و نهشت گردوخاک، عمق نوری هواویزها (AOD) و غلظت جرمی گردوخاک سطحی است. همچنین در این مطالعه برای ترسیم بردار باد تراز ۱۰ متر از

پدیده گردوخاک می‌توان به مطالعه میدلتون (۱۹۸۶) اشاره کرد که با استفاده از مشاهده‌های مربوط به ایستگاه‌های هواشناسی نشان داد که بیشترین فراوانی وقوع پدیده گردوخاک در منطقه جنوب غرب آسیا در مرز مشترک ایران، افغانستان و پاکستان یعنی منطقه‌ای به نام دشت مارگو رخ می‌دهد. از سوی دیگر بررسی تغییرات زمانی رویداد گردوخاک در منطقه خاورمیانه توسط فرمن (۲۰۰۳) برای یک دوره ۲۱ ساله از ۱۹۷۳ تا ۱۹۹۳ نشان می‌دهد که از نظر زمانی بیشترین فعالیت پدیده گردوخاک روی ایران در تابستان اتفاق می‌افتد. در برخی مطالعات داده‌های ماهواره جهت شناسایی منشا گردوخاک و انتقال آن در جو نیز به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. پروسپرو و همکاران (۲۰۰۲) با استفاده از داده‌های TOMS نشان دادند که رویداد گردوخاک در ایران در آوریل-می آغاز می‌شود، به بیشینه شدت فعالیت خود در ژوئن-ژوئیه می‌رسد و در ماه سپتامبر فعالیت آن به شدت کاهش می‌یابد. مطالعات آنها نشان داد که دشت کویر و دشت سیستان عمده‌ترین کانون‌های گردوخاک در ایران هستند. جینوکس و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS، هفت کانون گردوخاک در ایران تشخیص دادند، که شامل یک کانون عمده در امتداد سواحل خلیج فارس، سواحل جنوبی دریاچه ارومیه، هامون ماشکیل در نزدیکی مرز ایران و پاکستان، دشت کویر، دشت لوت، دریاچه‌های موقتی در نزدیکی شهر زابل واقع در دشت سیستان و بخشی از بیابان مکران در امتداد سواحل دریای عمان است. استفاده از مدل‌های عددی نیز برای بررسی پدیده گردوخاک بسیار مرسوم است. برای نمونه علیزاده چوبری و همکاران (۲۰۱۴) از مدل WRF-Chem جهت بررسی بادهای ۱۲۰ روزه و وقوع پدیده گردوخاک در منطقه سیستان ایران و همچنین داده‌های بلندمدت ماهواره‌ها جهت شناسایی کانون‌های عمده گردوخاک که ایران را تحت تاثیر قرار می‌دهند استفاده نمودند. مطالعه آنها نشان

سطح دوباره ممکن است به سمت بالا حرکت کرده و از نواحی چشمه خارج شوند، از سرعت نهشت موثر استفاده می‌شود که به صورت زیر است (جینوکس و همکاران، ۲۰۰۱).

$$\hat{v}_d = \begin{cases} v_d(w+(1-w)\exp[-(u_{10}-u_{tp})]) & \text{اگر } u_{10} > u_{tp} \\ v_d & \text{در غیر اینصورت} \end{cases} \quad (2)$$

در این رابطه w رطوبت سطح است. همچنین این رابطه نشان می‌دهد که در زمان وقوع باد سطحی شدید روی سطح خشک، \hat{v}_d از v_d کوچک‌تر است اما روی سطح مرطوب \hat{v}_d با v_d برابر است (جینوکس و همکاران، ۲۰۰۱). برای ذرات گردو خاک بزرگ نهشت خشک بیشتر از طریق نیروی گرانی صورت می‌گیرد. سرعت نهشت گردو خاک از طریق نیروی گرانی برای ذرات به شعاع r از طریق قانون استوکس به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$v_{stk} = \frac{2}{9} \frac{\rho_p g}{\mu} r^2 C_{Cunn} \quad (3)$$

در این رابطه ρ_p چگالی ذرات، g شتاب گرانی، μ C_{Cunn} همبستگی کانیکهام است. همبستگی کانیکهام وابستگی گرانی به فشار و دمای هوا را نشان می‌دهد (جینوکس و همکاران، ۲۰۰۱).

نهشت تر گردو خاک شامل نهشت ناشی از بارش به دو صورت هسته‌زایی در ابر و شسته شدن در زیر ابر توسط برف و باران است (کیم و همکاران، ۲۰۲۱). در داده‌های MERRA-2 نهشت تر برای بارش‌های بزرگ مقیاس و بارش‌های همرفتی محاسبه می‌شود (رندلز و همکاران، ۲۰۱۷). برای محاسبه AOD در جو که شامل گردو خاک نیز می‌شود، از سنجنده‌های ماهواره‌ای مانند MODIS و MISR استفاده می‌شود (بوچارد و همکاران، ۲۰۱۷). همچنین غلظت جرمی از طریق مشاهدات AOD و مدل انتقال محاسبه می‌شود (ون دونکلار، ۲۰۱۰).

نسل پنجم داده‌های مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت وضع‌هوا (ERA5) با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه طول و عرض جغرافیایی استفاده شده است (هرسبچ و همکاران، ۲۰۲۰).

در داده‌های MERRA-2 از طرح‌واره GOCART برای محاسبه شار گسیل گردو خاک استفاده شده است (جلارو و همکاران، ۲۰۱۷). این طرح‌واره کانون‌های بالقوه گردو خاک را بر اساس کسری از خاک که فرسایش پذیر است در نظر می‌گیرد (کاوزوس گوئرا، ۲۰۱۱). شار گسیل گردو خاک در طرح‌واره GOCART به صورت زیر محاسبه می‌شود (جینوکس و همکاران، ۲۰۰۱):

$$F = \begin{cases} c S s_p u_{10} (u_{10} - u_{tp}) & \text{اگر } u_{10} > u_{tp} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases} \quad (1)$$

در این رابطه $c = 9/1 \mu\text{gs}^2 \text{m}^{-2}$ ثابت تجربی، u_{10} سرعت باد در تراز ۱۰ متر، u_{tp} سرعت آستانه برای فرسایش بادی ذره s_p کسر هر دسته گردو خاک و S کسر نشست جمعی در نواحی که سطوح فرسایش پذیری کمی دارند، است. سرعت آستانه برای فرسایش بادی به اندازه ذرات و رطوبت خاک بستگی دارد (چین و همکاران، ۲۰۰۳).

نهشت گردو خاک به دو صورت خشک و تر صورت می‌گیرد. نهشت خشک از طریق غلظت و سرعت نهشت محاسبه می‌شود و نهشت تر به صورت مستقیم اندازه‌گیری می‌شود (پروسپرو، ۱۹۹۶). نهشت خشک گردو خاک به وسیله نهشت سطحی و نیروی گرانی صورت می‌گیرد. نهشت از طریق سطح تابعی از جنس سطح و شرایط جوی است و نهشت از طریق نیروی گرانی به اندازه ذرات و گرانی هوا بستگی دارد (وزلی، ۲۰۰۷). برای محاسبه شار نهشت سطحی که به وسیله تلاطم صورت می‌گیرد از کمیت سرعت نهشت (v_d) استفاده می‌شود. این کمیت برابر با سرعت تبادل گرما و رطوبت در سطح در نظر گرفته می‌شود. به دلیل این که بخشی از گردو خاک منتقل شده به

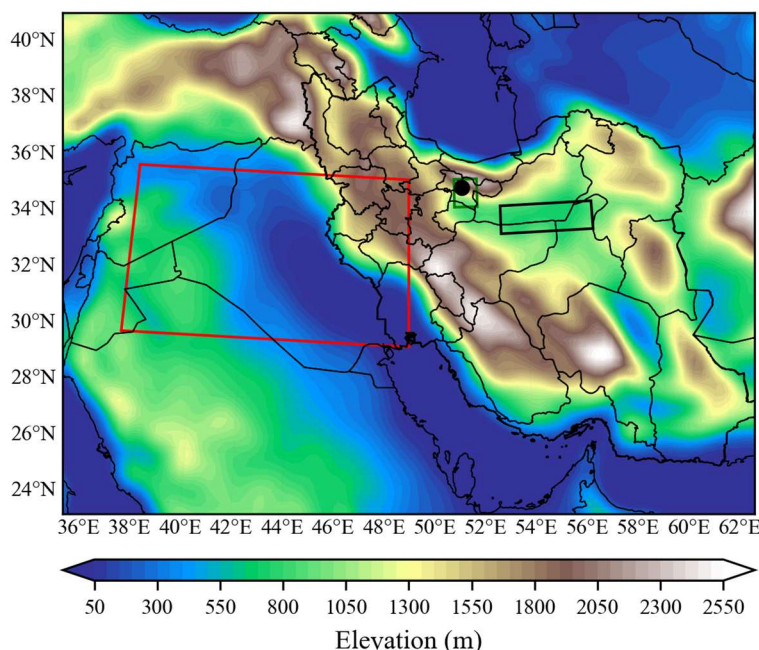
گونه‌ای انتخاب شده است که بتوان نقش کانون‌های متفاوت در میزان گرد و خاک در منطقه تهران را تعیین کرد. منطقه غرب خاورمیانه که شامل کانون‌های گردوخاک عراق و اردن (جینوکس و همکاران، ۲۰۱۲) است در مسیر سامانه‌های غربی قرار دارد. همچنین منطقه دشت کویر که یکی از کانون‌های گردوخاک از هفت کانون اصلی گردوخاک در ایران است (جینوکس و همکاران، ۲۰۱۲) به دلیل نزدیکی به منطقه تهران و جهت باد شرقی در ماه‌های گرم سال به عنوان یکی از کانون‌های احتمالی موثر در میزان گردوخاک استان تهران انتخاب شده است. برای بررسی کانون‌های محلی منطقه تهران، ارتباط بین گسیل گردوخاک و میزان گردوخاک در این منطقه بررسی می‌شود.

برای بررسی نقش چشمه‌های گردوخاک موثر بر منطقه تهران، ابتدا اقلیم‌شناسی گردوخاک و کمیت‌های مرتبط با آن با استفاده از داده‌های بازتحلیل MERRA-2 در مقیاس زمانی بلند مدت و ماهانه در منطقه مورد مطالعه بررسی

برای شناسایی چشمه‌های موثر بر وقوع گردوخاک در منطقه تهران از مجموع طیف کامل اندازه ذرات استفاده می‌شود. طیف اندازه شعاع ذرات در داده‌های MERRA-2 بین ۰/۱ تا ۱۰ میکرومتر است. در این مطالعه شارهای گسیل و نهشت گردوخاک برای اندازه‌های مختلف به تفکیک بررسی نمی‌شوند. با این وجود می‌توان رابطه بین گسیل و نهشت گردوخاک با اندازه آنها را در روابط (۱)، (۲) و (۳) مشاهده کرد. در روابط (۱) و (۲) اندازه ذرات از طریق تاثیر بر U_{tp} ، برگسیل و نهشت تلاطمی گردوخاک تاثیر می‌گذارند. همچنین طبق رابطه (۳)، نهشت از طریق نیروی گرانی با مجذور شعاع ذرات رابطه مستقیم دارد.

۲-۲ روش تحقیق

موقعیت مکانی و ارتفاع از سطح دریا در منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر و همچنین موقعیت منطقه تهران در شکل ۱ نشان داده شده است. محدوده مورد نظر با در نظر گرفتن مطالعات پیشین و موقعیت چشمه‌های گسیل احتمالی به



شکل ۱. موقعیت مکانی و ارتفاع از سطح دریا در منطقه مورد مطالعه. منطقه تهران (مستطیل سبز)، منطقه غرب خاورمیانه (قرمز) و منطقه دشت کویر (سیاه) نیز در شکل نشان داده شده‌اند.

می‌شوند. سپس برای شناسایی چشمه‌های موثر بر منطقه تهران، ضریب همبستگی پیرسون بین شار گسیل در چشمه‌های احتمالی گردوخاک (شکل ۱) و غلظت جرمی گردوخاک سطحی در منطقه تهران برای ماه‌های مختلف سال طی دوره ۱۹۸۰-۲۰۲۲ محاسبه می‌شود. مقدار همبستگی پیرسون بین ۱ و ۱- تغییر می‌کند. ۱ به معنای همبستگی مثبت کامل، ۰ به معنی نبود همبستگی و ۱- به معنی همبستگی کامل منفی است. اگر همبستگی بین شار گسیل گردوخاک با هر یک از چشمه‌های احتمالی با شدت گردوخاک سطحی منطقه تهران در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنادار باشد، آن منطقه به عنوان چشمه‌ای که باعث وقوع گردوخاک می‌شود، شناخته می‌شود.

نتایج

۱-۳ اقلیم‌شناسی گردوخاک

شکل ۲ میانگین شار گسیل گردوخاک را برای دوره ۱۹۸۰-۲۰۲۲ با استفاده از داده‌های MERRA-2 نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است، از شمال و شرق سوریه تا خلیج فارس که شامل بیشتر مناطق عراق و بخش‌هایی از غرب و جنوب غرب ایران می‌شود، مقادیر شار گسیل گردوخاک زیاد است که شدت آن در ماه‌های گرم از ماه‌های سرد سال بیشتر است. در تابستان افزایش تندی باد شمال‌غربی شمال در این مناطق با افزایش شار گسیل گردوخاک همراه است، به طوری که در ماه‌های ژوئن و ژوئیه گسیل گردوخاک در نواحی جنوبی عراق به بیش از $1500 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ می‌رسد. گسیل گردوخاک در غرب سوریه، اردن، مرکز و غرب عربستان کمتر از عراق و مناطق جنوب‌غربی ایران است. همچنین در دشت کویر یک بیشینه نسبی شار گسیل گردوخاک مشاهده می‌شود که در ماه‌های ژوئن و ژوئیه به بیش از mg m^{-2} 320 day^{-1} می‌رسد و در ماه‌های دسامبر و ژانویه به همراه کاهش تندی باد در نزدیک سطح زمین کمینه می‌شود. در

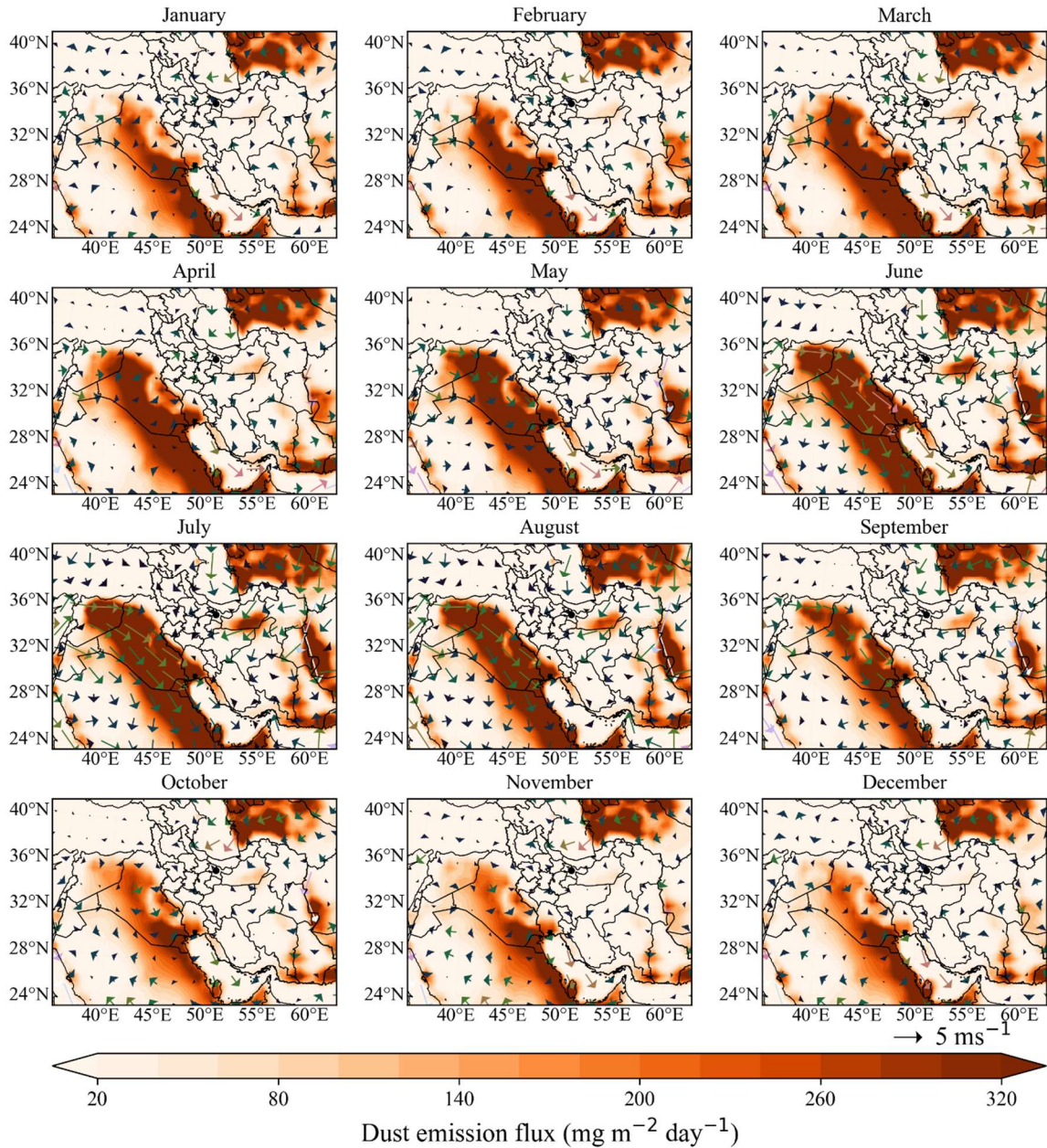
ماه‌های فصل تابستان منطقه گسیل گردوخاک در دشت کویر بسیار گسترده می‌شود و حتی به قم و مناطق جنوب‌شرقی منطقه تهران نیز می‌رسد. شدت گسیل گردوخاک در دشت کویر در ژوئن و ژوئیه بیشینه و از اکتبر تا ژانویه کمینه می‌شود. در تابستان علاوه بر افزایش شدت باد، جهت باد غالب تراز ۱۰ متر در دشت کویر شرقی می‌شود (شکل ۲). در این فصل کم‌فشار حرارتی روی دشت کویر تقویت می‌شود (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۹) و از این رو یک جریان از شمال استان سمنان به سمت نواحی مرکزی ایران ایجاد می‌شود. این جریان به دلیل استقرار مرکز پرفشار روی ارتفاعات البرز (نشان داده نشده)، گردش و اچرخندی پیدا می‌کند و باعث می‌شود که جهت باد غالب در دشت کویر و نواحی جنوبی دامنه‌های ارتفاعات البرز شرقی شود. بنابراین، با توجه به جهت باد، دشت کویر می‌تواند یکی از چشمه‌های اصلی تولید گردوخاک استان تهران در تابستان باشد.

شکل ۳ میانگین شار نهشت خشک گردوخاک را طی دوره ۱۹۸۰-۲۰۲۲ با استفاده از داده‌های MERRA-2 نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که شار نهشت خشک در مناطق و ماه‌هایی که شار گسیل بالای گردوخاک وجود دارد، بیشتر از دیگر مناطق و دیگر ماه‌ها است. شدت شار نهشت خشک گردوخاک در ایران از جمله تهران از ماه مارس تا ژوئیه از بقیه ماه‌ها بیشتر است. شار نهشت خشک گردوخاک در مناطق داخلی ایران و منطقه تهران در بهار (آوریل و می) شدت بیشتری دارد. در ماه دسامبر میزان شار نهشت گردوخاک نه تنها در ایران بلکه در اغلب مناطق خاورمیانه کمینه است.

شار نهشت تر گردوخاک در منطقه مورد مطالعه برای دوره ۱۹۸۰-۲۰۲۲ در شکل ۴ نشان داده شده است. در اواخر زمستان و اوایل بهار شار نهشت تر در اغلب مناطق به بیشینه مقدار خود می‌رسد. در ماه مارس هم‌زمان با رخداد بیشترین مقدار بارش در ایران و بیشتر مناطق خاورمیانه،

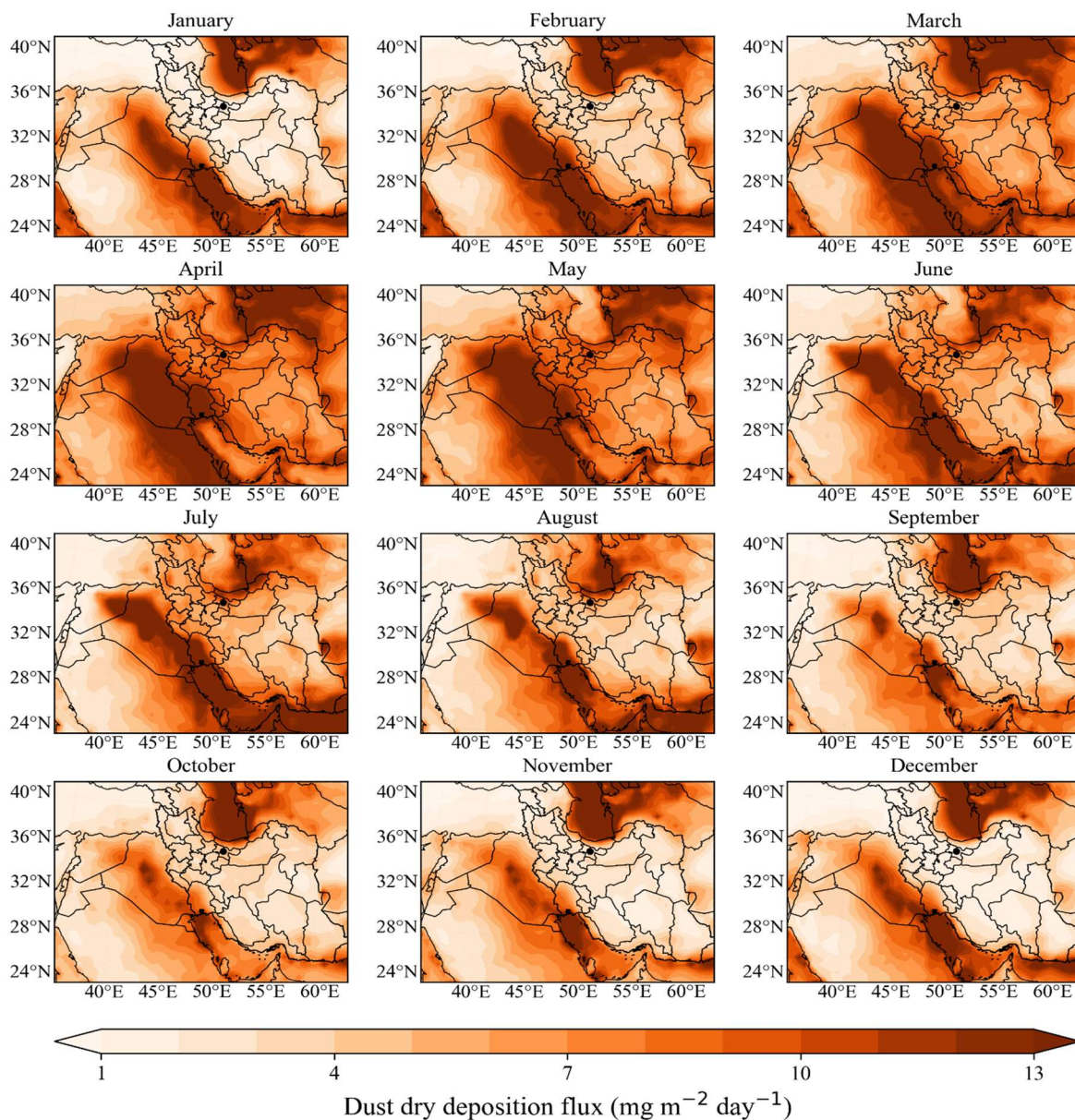
شمالی و ارتفاع‌های شمالی البرز قابل توجه است. بیشینه نهشت تر گردوخاک در اواخر زمستان و اوایل بهار رخ می‌دهد، به طوری که در ماه مارس تقریباً در کل نواحی ایران شار نهشت تر به بیش از $13 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ می‌رسد.

نهشت تر گردوخاک افزایش می‌یابد. به‌طور کلی با افزایش میزان بارش، شار نهشت تر گردوخاک نیز افزایش می‌یابد. نهشت تر نسبتاً زیاد گردوخاک در رشته کوه‌های البرز و زاگرس به دلیل بارش بیشتر در این مناطق است. در تابستان، نهشت تر گردوخاک در ایران تنها در سواحل

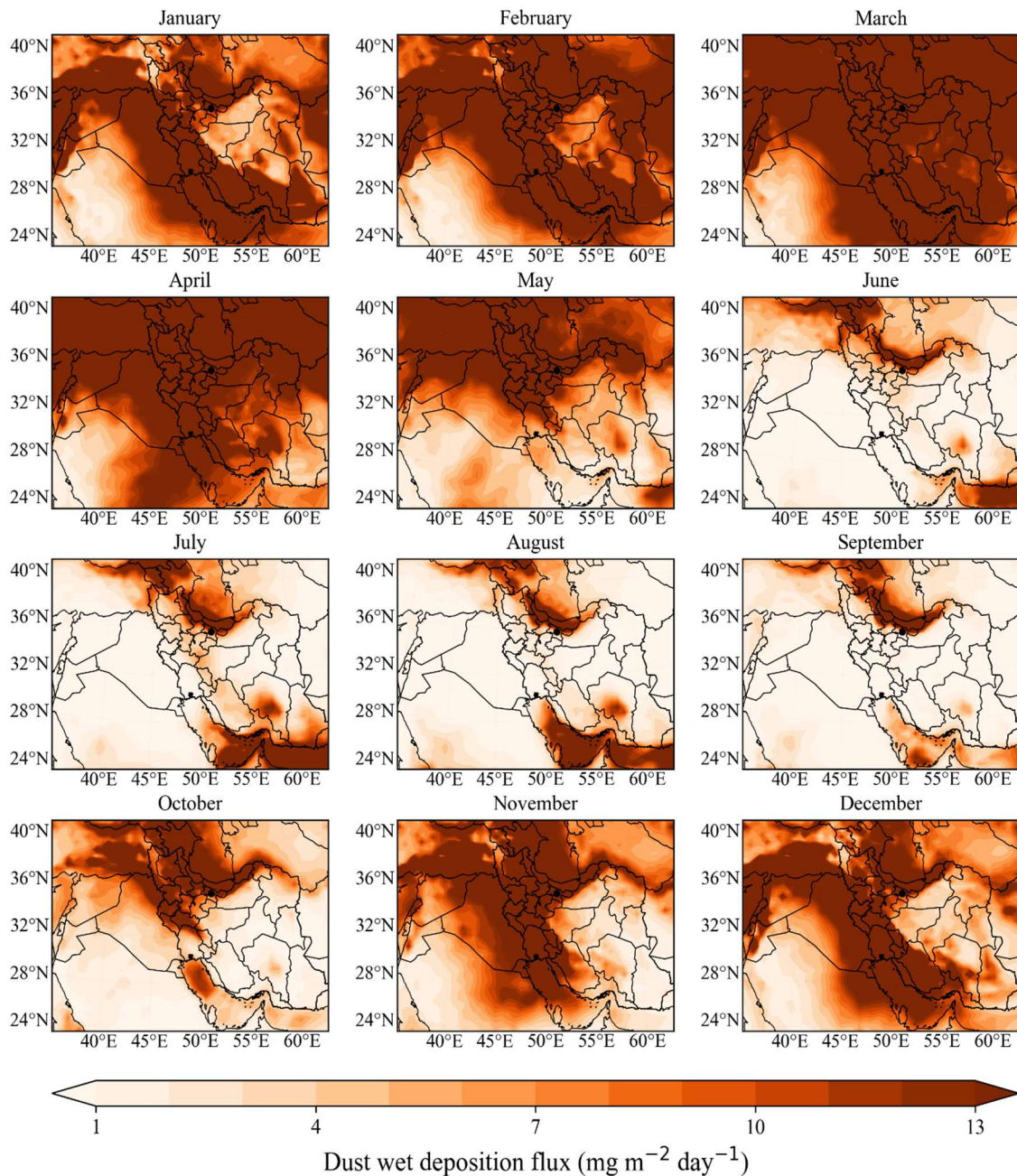


شکل ۲. میانگین شار گسیل گردوخاک و بردار باد تراز ۱۰ متر طی دوره ۱۹۸۰-۲۰۲۲ در ماه‌های مختلف سال به ترتیب با استفاده از داده‌های MERRA-2 و

ERA5



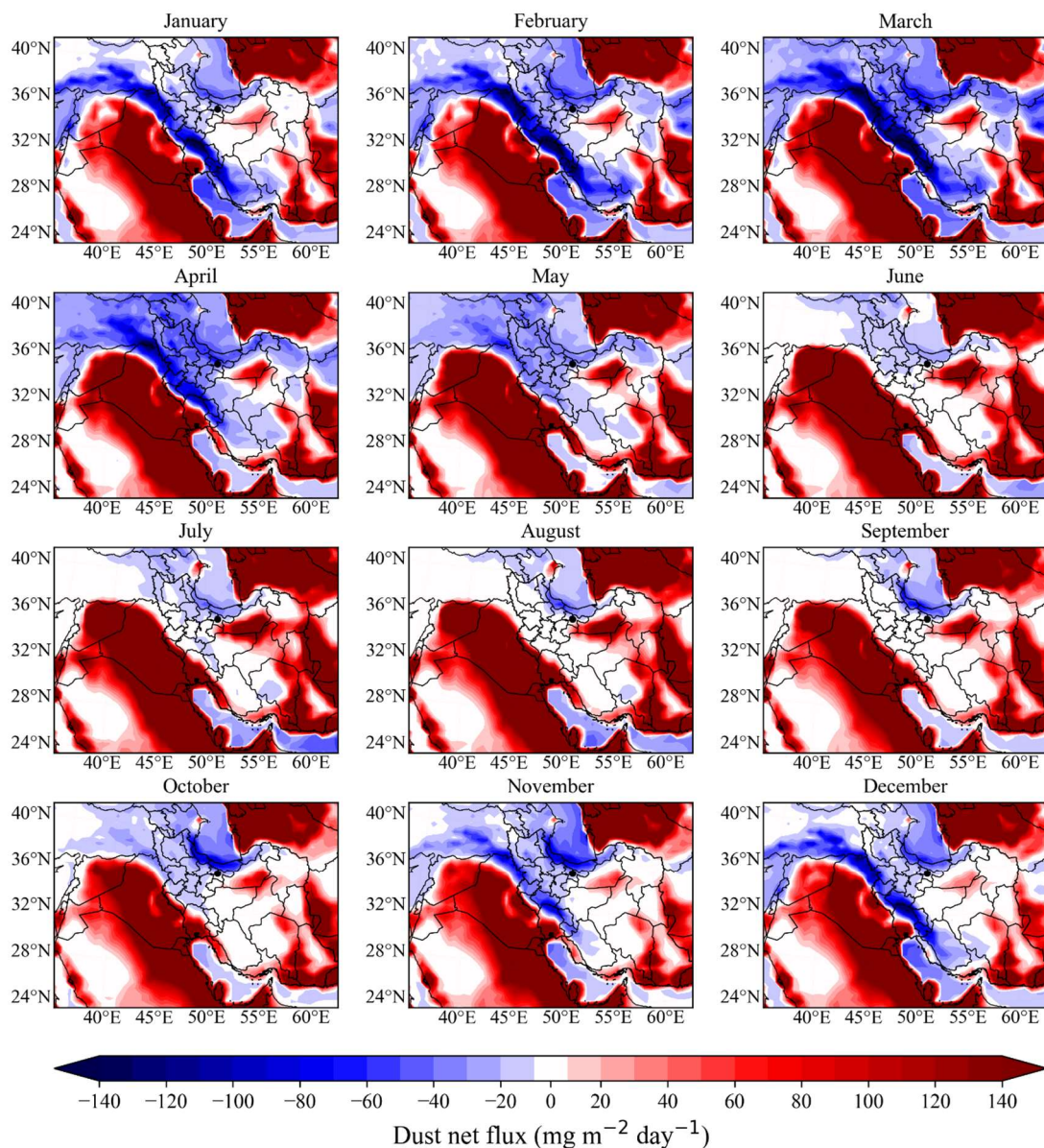
شکل ۳. مانند شکل ۲، ولی برای میانگین شار نهشت خشک گردو خاک.



شکل ۴. مانند شکل ۲ ولی برای میانگین شار نهشت تر گردوخاک.

گردوخاک از مناطق شمالی سوریه تا جنوب خلیج فارس کشیده شده‌است. شدت گسیل گردوخاک و همچنین میزان شار خالص بالاسو در این مناطق در ژوئن و ژوئیه به بیشترین مقدار خود می‌رسد که همزمان با بیشینه شدت باد شمال نیز در این دو ماه است.

میانگین تفاضل بین شار گسیل و نهشت در دوره ۱۹۸۰-۲۰۲۲ در شکل ۵ نشان داده شده است. بر اساس این شکل، مناطق شرقی سوریه و اردن، عراق، جنوب غرب ایران و شمال و شرق عربستان در همه‌های ماه‌های سال چشمه گردوخاک هستند. گستره منطقه بزرگ‌ترین کانون



شکل ۵. مانند شکل ۲ ولی برای میانگین تفاضل بین شار گسیل و نهشت (گسیل منهای نهشت) گردوخاک.

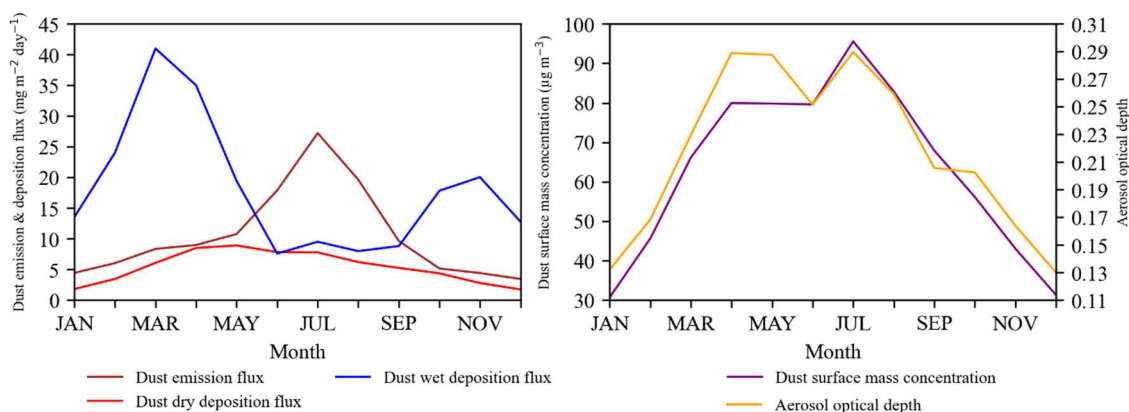
(گسیل منهای نهشت) در بخش‌های وسیعی از استان سمنان به بیش از $140 \text{ mg m}^{-2} \text{day}^{-1}$ می‌رسد. جهت باد شرقی در ماه‌های ژوئن و ژوئیه می‌تواند گردوخاک گسیل شده از دشت کویر، غرب سمنان، قم و جنوب شرق تهران را به شهر تهران و حتی مناطق غربی و شمالی تهران منتقل کند. منطقه تهران بویژه مناطق شمالی آن چاه گردوخاک است که در زمستان و بهار نمود بیشتری دارد. بنابراین،

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، یکی از گسترده‌ترین چشمه‌های گردوخاک ایران در دشت کویر واقع شده است که در تقریباً در همه ماه‌های سال فعال است. این چشمه در ماه‌های ژوئن و ژوئیه گسترده‌تر و شدت آن نیز بیشتر است و حتی وارد مناطق جنوب شرق منطقه تهران (منطقه ورامین) نیز می‌شود. طی ماه‌های می تا سپتامبر، تفاضل بین شار گسیل گردوخاک و نهشت گردوخاک

که در تابستان (ژوئن-سپتامبر) ذرات گردوخاک در کمترین ارتفاع و در بهار (آوریل-می) در بیشترین ارتفاع قرار دارند. همچنین شکل ۶ نشان می‌دهد که شار گسیل گردوخاک در منطقه تهران که سهم قابل توجهی از آن مربوط به منطقه ورامین است، در تابستان، بویژه در ماه ژوئیه از ماه‌های دیگر بیشتر است. در ماه ژوئیه شار گسیل گردوخاک حدود $25 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ است اما در ماه‌های نوامبر، دسامبر و ژانویه به کمتر از $5 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ می‌رسد. شار نهشت تر گردوخاک در ماه مارس، به همراه افزایش بارش (نشان داده نشده)، به مقدار بیشینه می‌رسد و در تابستان کاهش می‌یابد. شار نهشت خشک در ماه‌های آوریل و می نسبت به ماه‌های دیگر بیشتر است. در همه ماه‌ها به غیر از ماه ژوئن، میزان شار نهشت تر از نهشت خشک بیشتر است و در ماه مارس شار نهشت تر حدود ۷ برابر شار نهشت خشک است. همچنین شکل ۶ نشان می‌دهد که شار گسیل گردوخاک تنها در ماه‌های ژوئن تا اوت از مجموع شار نهشت خشک و تر بیشتر است. در ماه‌های ژوئن، ژوئیه و اوت شار گسیل گردوخاک به ترتیب به اندازه 2 ، 10 و 5 از مجموع شار نهشت خشک و تر بیشتر است که نشان می‌دهد در تابستان منطقه تهران خود به عنوان چشمه گردوخاک عمل می‌کند.

گردوخاک منطقه تهران اغلب به دلیل انتقال گردوخاک از چشمه‌های بیرون از منطقه تهران است.

شکل ۶ میانگین ماهانه AOD، غلظت جرمی گردوخاک سطحی، شار گسیل و شار نهشت خشک و تر گردوخاک در منطقه تهران را طی دوره ۱۹۸۰-۲۰۲۲ نشان می‌دهد. در ژانویه میانگین غلظت جرمی گردوخاک سطحی در منطقه تهران نسبت به دیگر ماه‌های سال کمتر است. غلظت جرمی گردوخاک سطحی در ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه کمتر از $40 \mu\text{g m}^{-3}$ است، اما از فوریه تا آوریل با شیب نسبتاً زیاد افزایش پیدا می‌کند و به حدود $80 \mu\text{g m}^{-3}$ می‌رسد، سپس از آوریل تا ژوئن میانگین بلندمدت آن تغییری نمی‌کند، اما در ماه ژوئیه دوباره افزایش پیدا کرده و به بیش از $90 \mu\text{g m}^{-3}$ می‌رسد و سپس با یک شیب ثابت تا دسامبر کاهش می‌یابد. با وجود همبستگی بالا بین غلظت جرمی گردوخاک سطحی و AOD، در تابستان نسبت AOD به غلظت جرمی گردوخاک سطحی از دیگر فصل‌ها کمتر است زیرا گردوخاک ناشی از کم فشار حرارتی در نزدیکی سطح زمین تجمع بیشتری دارد (ریوندی و همکاران، ۱۳۹۲)، اما در فصل‌های پاییز، زمستان و بویژه بهار احتمالاً به دلیل ناپایداری بیشتر، ذرات گردوخاک به ارتفاع بالاتری از سطح زمین حرکت کرده و این نسب افزایش می‌یابد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت

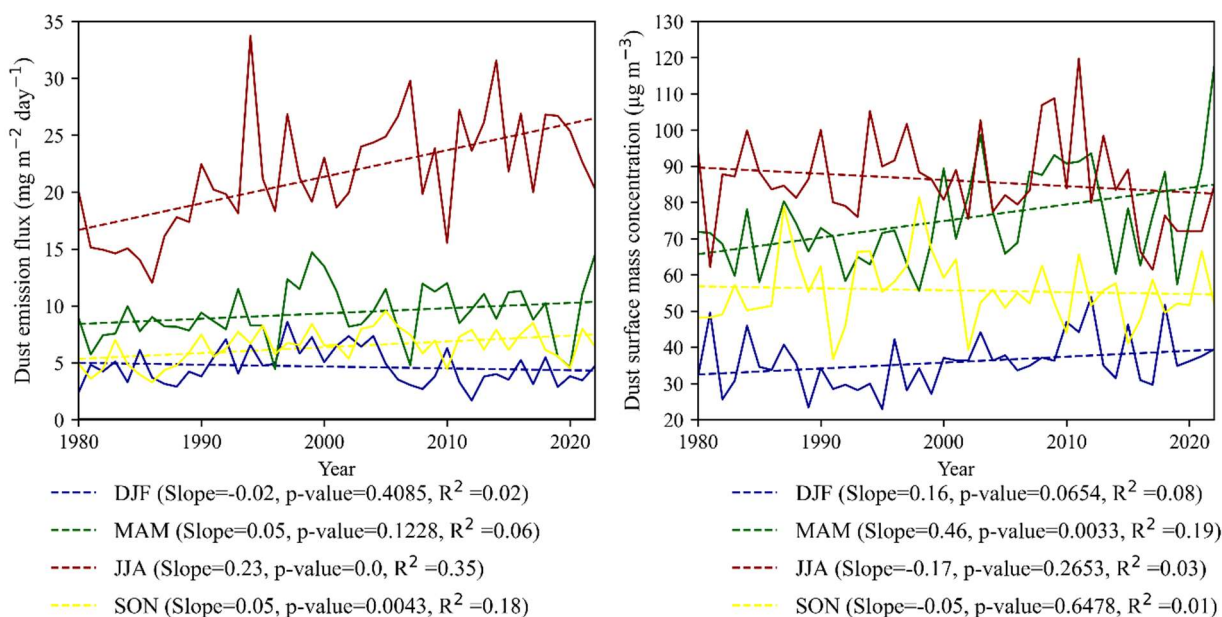


شکل ۶. میانگین ماهانه عمق نوری هواویزها (AOD)، غلظت جرمی گردوخاک سطحی، شار گسیل و نهشت گردوخاک در منطقه تهران در ماه‌های مختلف سال در دوره ۱۹۸۰-۲۰۲۲.

حدود ۵ برابر پاییز است. با توجه به رابطه (۱)، به نظر می‌رسد که افزایش تنیدی باد تراز ۱۰ متر در برخی ماه‌های پاییز و تابستان، بویژه ماه‌های ژوئن و سپتامبر (نشان داده نشده) سبب افزایش گسیل در این دو فصل است. از سوی دیگر، غلظت جرمی گردو خاک سطحی منطقه تهران تنها در بهار روند مثبت و معنادار دارد که دلیل احتمالی آن افزایش گردو خاک انتقالی از چشمه‌های گردو خاک غرب خاورمیانه است. زیرا گسیل گردو خاک در منطقه تهران و دشت کویر نسبت به منطقه غرب خاورمیانه در این فصل بسیار کمتر است. همچنین در بهار AOD نیز همانند غلظت جرمی گردو خاک سطحی افزایش یافته است (نشان داده نشده) که نشان می‌دهد افزایش غلظت گردو خاک تنها مربوط به نزدیک سطح نیست.

۲-۳ روند تغییرات زمانی گسیل گردو خاک در منطقه تهران

سری زمانی شار گسیل و غلظت جرمی گردو خاک و روند آن در دوره ۱۹۸۰-۲۰۲۲ برای چهار فصل سال در منطقه تهران در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل، در بیشتر سال‌ها زمستان کمترین و تابستان بیشترین شار گسیل و غلظت جرمی گردو خاک سطحی را دارد. میانگین شار گسیل گردو خاک در تابستان نه تنها از سه فصل دیگر بسیار بیشتر است، بلکه روند افزایش آن نیز در این فصل معنادار بوده و از سه فصل دیگر بیشتر است. در فصل‌های تابستان و پاییز، روند شار گسیل گردو خاک طی دوره مورد مطالعه افزایشی و معنادار است که میزان افزایش آن در تابستان



شکل ۷. سری زمانی شار گسیل (سمت راست) و غلظت جرمی (سمت چپ) گردو خاک سطحی در فصل‌های بهار (سبز)، تابستان (قرمز)، پاییز (زرد) و زمستان (آبی) در دوره ۱۹۸۰-۲۰۲۲ در منطقه تهران. خط‌چین‌ها نشان‌دهنده خط روند با استفاده از روش حداقل مربعات است.

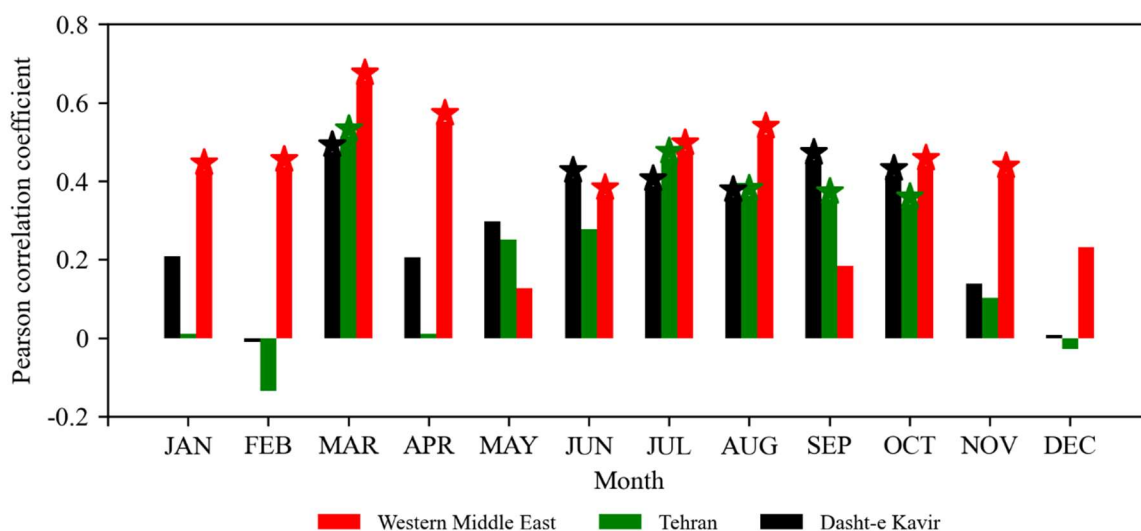
چشمه‌ها بر گردو خاک منطقه تهران، همبستگی بین میانگین ماهانه شار گسیل گردو خاک در چشمه‌های احتمالی و غلظت جرمی گردو خاک سطحی در منطقه تهران بررسی می‌شود (شکل ۸). برای این منظور چشمه‌ها به ۳ منطقه

۳-۳ تعیین چشمه‌های موثر بر وقوع گردو خاک در تهران

پس از بحث در مورد اقلیم‌شناسی گردو خاک در منطقه و تعیین چشمه‌های گسیل، برای بررسی نقش هر یک از این

گردوخاک منطقه تهران، چشمه‌های گردوخاک موجود منطقه غرب خاورمیانه است اما در ماه‌های گرم سال علاوه بر کانون‌های گردوخاک خارج از ایران، نقش منطقه دشت کویر و چشمه‌های درون منطقه تهران در غلظت جرمی گردوخاک سطحی منطقه تهران افزایش می‌یابد. شار گسیل گردوخاک در منطقه غرب خاورمیانه، منطقه دشت کویر و منطقه تهران به ترتیب در ۹، ۶ و ۴ ماه از سال با غلظت جرمی گردوخاک سطحی منطقه تهران همبستگی مثبت و معنادار دارد. شایان ذکر است در ماه‌های می و دسامبر گسیل گردوخاک در هیچ یک از کانون‌های احتمالی با غلظت جرمی گردوخاک سطحی منطقه تهران ارتباط معنادار ندارد.

تقسیم شده (محدوده‌ها در شکل ۱) و سهم هریک به تفکیک در میزان گردوخاک منطقه تهران بررسی شده است. شکل ۸ نشان می‌دهد که در همه ماه‌های سال به غیر از می، اکتبر و سپتامبر، همبستگی بین شار گسیل گردوخاک در غرب خاورمیانه و غلظت جرمی گردوخاک سطحی منطقه تهران مثبت و معنادار است. در ماه‌های مارس، ژوئن، ژوئیه، اوت، سپتامبر و اکتبر همبستگی بین شار گسیل گردوخاک و غلظت جرمی گردوخاک سطحی منطقه تهران مثبت و معنادار است. همچنین شار گسیل گردوخاک در چشمه‌های گردوخاک درون منطقه تهران با غلظت جرمی گردوخاک سطحی در ماه‌های مارس، ژوئیه، اوت و سپتامبر همبستگی مثبت و معنادار دارد. بنابراین، در اغلب ماه‌های سرد سال منشا



شکل ۸. همبستگی بین میانگین ماهانه شار گسیل گردوخاک در (قرمز) غرب خاورمیانه، (سبز) منطقه تهران و (سیاه) منطقه دشت کویر با غلظت جرمی گردوخاک سطحی در منطقه تهران با استفاده از داده‌های MERRA-2 طی دوره ۱۹۸۰-۲۰۲۲. ستاره‌ها معناداری آماری در سطح اعتماد ۹۵ درصد را نشان می‌دهند.

و با شدت کمتر در مناطق جنوب شرقی تهران واقع شده است که مرکز آن در مناطق جنوبی سمنان و شمال شرقی اصفهان است. در مطالعات پیشین نیز منطقه دشت کویر به عنوان یکی از کانون‌های داخلی گردوخاک ایران معرفی شده است (مبارک حسن و همکاران، ۱۳۹۹؛ سلیمانی و

۴ بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور بررسی اقلیم‌شناسی گردوخاک در خاورمیانه و مناطق داخلی ایران از جمله منطقه تهران از داده‌های MERRA-2 در دوره ۱۹۸۰-۲۰۲۲ استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نزدیک‌ترین منطقه گسترده گسیل گردوخاک به منطقه تهران در دشت کویر

همکاران، ۱۴۰۰). مقادیر شار گسیل گردوخاک در دشت کویر و منطقه غرب خاورمیانه در ماه‌های ژوئن، ژوئیه و اوت به بیشینه مقدار خود می‌رسد زیرا در این سه ماه به ترتیب شدت باد تراز ۱۰ متری روی دشت کویر و باد شمال روی منطقه غرب خاورمیانه افزایش می‌یابد که با مطالعات شهابی و همکاران (۲۰۲۳) مطابقت دارد. منطقه گسیل گردوخاک در دشت کویر بسیار گسترده است، به طوری که در ماه‌های ژوئن و ژوئیه منطقه گسیل گردوخاک وارد مناطق جنوبی و جنوب شرقی منطقه تهران و منطقه ورامین می‌شود که به عنوان یک منطقه جداگانه بررسی شده است. بنابراین، با توجه به اینکه در تابستان باد شرقی تراز ۱۰ متر در دشت کویر و نواحی جنوب شرقی استان تهران غالب است، گردوخاک گسیل شده در این مناطق به منطقه تهران منتقل می‌شود. بنابراین، منطقه ورامین می‌تواند یکی از چشمه‌های گردوخاک منطقه تهران در تابستان باشد. همچنین میزان شار نهشت خشک و تر گردوخاک در ایران و منطقه تهران در بهار به بیشینه مقدار خود می‌رسد. میزان شار نهشت تر گردوخاک در ارتفاعات البرز و زاگرس از دیگر مناطق بیشتر و بیشینه مقدار آن در ماه مارس رخ می‌دهد که احتمالاً دلیل آن میانگین بارش بیشتر در این مناطق و در این ماه است که با مطالعات علیپور (۲۰۲۳) مبنی بر همبستگی بالای بین نهشت تر و بارش باران مطابقت دارد. شار گسیل گردوخاک در منطقه تهران اغلب از میزان مجموع شار نهشت خشک و نهشت تر گردوخاک کمتر است. در ماه‌های ژوئن، ژوئیه و اوت میزان گسیل گردوخاک در منطقه ورامین از میزان نهشت آن بیشتر است. با تضعیف چشمه‌های گردوخاک دشت کویر از سپتامبر، گردوخاک عمدتاً از مناطق غربی و جنوب غربی وارد منطقه تهران می‌شود. این گردوخاک احتمالاً به همراه سامانه‌های غربی از همسایه‌های غربی ایران و مناطق غربی و جنوب غربی ایران به دامنه‌های جنوبی البرز می‌رسد. همبستگی مثبت و معنادار بین غلظت جرمی گردوخاک

سطحی در تهران و شار گسیل گردوخاک در چشمه‌های گردوخاک غرب خاورمیانه به این ادعا قوت می‌بخشد. بنابراین، می‌توان گفت که تنها در تابستان چشمه‌های داخلی باعث افزایش شدت وقوع گردوخاک در منطقه تهران می‌شوند، در حالی که در فصل‌های پاییز، زمستان و با شدت بیشتر در بهار چشمه‌های گردوخاک خارج از ایران باعث گردوخاک در تهران می‌شوند. در تابستان حضور پر ارتفاع جنب حاره از ورود بادهای غربی به ایران جلوگیری می‌کند، اما در برخی مواقع این پراترفاع عقب نشینی می‌کند و شرایط را برای صعود هوا و ناپایداری جوی در چشمه‌های گردوخاک واقع در کشورهای غربی ایران را فراهم می‌کند (ریوندی و همکاران، ۱۳۹۲). با ایجاد این ناپایداری‌ها، این امکان وجود دارد که گردوخاک برخاسته از این مناطق در تابستان به دامنه‌های البرز نیز برسد. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که تابستان نیز همبستگی بین شار گسیل گردوخاک در چشمه‌های غرب خاورمیانه و غلظت جرمی گردوخاک سطحی منطقه تهران ارتباط معنادار دارد که می‌تواند ناشی از نوسانات و جابه‌جایی‌های پر ارتفاع جنب حاره باشد.

بررسی غلظت جرمی گردوخاک سطحی و AOD نشان داد که در بهار و تابستان غلظت جرمی گردوخاک سطحی در دشت کویر و منطقه تهران افزایش می‌یابد. از ماه سپتامبر غلظت جرمی گردوخاک سطحی و AOD کاهش می‌یابد و در دسامبر و ژانویه به کمترین مقدار خود می‌رسد. در تابستان کم‌فشار حرارتی مستقر بر دشت کویر (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۹) می‌تواند عامل ایجاد کانون‌های گردوخاک در استان سمنان، اصفهان، قم و تهران باشد. از طرفی با توجه به اینکه گردوخاک برخاسته از کم‌فشارهای حرارتی نمی‌تواند از تراز فشاری ۸۵۰ و نهایتاً ۷۰۰ هکتوپاسکال فراتر برود (ریوندی و همکاران، ۱۳۹۲)، غلظت جرمی گردوخاک سطحی مناطق کانون

پژوهشی علوم جغرافیایی و مطالعات اجتماعی دانشگاه

حکیم سبزواری، ۴۱، ۹۳-۱۱۳.

مبارک حسن، ا.، رنجبر، ع.، رنجبر، ع. و فتاحی، ا. (۱۳۹۹).

بررسی گردوخاک در گستره ایران توسط مدل باز

تحلیل MERRA-2 NASA (دوره آماری ۲۰۱۷-۲۰۰۷)

تحقیقات آب و خاک ایران، دانشگاه تهران،

۵۱ (۹)، ۲۲۱۹-۲۲۰۳.

Alipor, H. (2023). Dust temporal and spatial deposition affected by climate and soil mineralogical and chemical properties in a semi-arid area. *J Heliyon*, 94, 2405-8440.

Alizadeh Choobari, O., Sturman, A., and Zawar-Reza, P. (2014). A global satellite view of the seasonal distribution of mineral dust and its correlation with atmospheric circulation. *Dyn Atmos Oceans* 68, 20-34.

Alizadeh Choobari, O., Ghafarian, P., and Owlad, E. (2016). Temporal variations in the frequency and concentration of dust events over Iran based on surface observations. *Int J Climatol*, 36, 2050-2062.

Alizadeh, O., Abniki, M., Babaei, M., and Irannejad, P. (2022). Climatology and the dynamic mechanism of the Levant wind and dust events in eastern Iran. *International Journal of Climatology*, 42(16), 9288-9303.

Azizi, G., Khosh Akhlagh, F., Shamsipour, A., Negah, S., and Farid mojtahedi, N. (2022). Thermal low pressures of the Iran plateau. *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 11(41), 93-113. (In Persian).

Baldasano, J. M. (2013). Mineral dust modeling from meso to global scale. In: *Barcelona Supercomputing Center (BSC), Portugal, Evora*, 1-16.

Beyranvand, A., Azizi, G., Alizadeh, O., Darvishi Bolorani, A. (2023). Dust in Western Iran: the emergence of new sources in response to shrinking water bodies. *Scientific Reports*, 13, 16158.

Bidokhti, A.A.A., Gharaylou, M., Pegahfar, N., Sabetghadam, S. and Rezazadeh, M. (2016). Characteristics of extreme dust events observed over two urban areas in Iran. *Journal of Earth System Science*, 125, 431-442.

Buchard, V., Randles, C. A., da Silva, A. M., Darmenov, A., Colarco, P. R., Govindaraju, R., Ferrare, R., Hair, J., Beyersdorf, A., Ziemba, L., Scarino, A. J., Wasilewski, A., McGill, M., Jethva, H., Delgado, R., Kittaka, C., Tackett, J.,

گردوخاک و مناطق اطراف از جمله منطقه تهران در

تابستان هم‌زمان با تقویت کم‌فشار حرارتی افزایش می‌یابد.

سیاسگزاری

بدینوسیله از اداره کل هواشناسی استان تهران که از این

مطالعه حمایت مالی و معنوی نموده است تقدیر و تشکر

می‌شود.

منابع

خوش سیما، م.، ثابت قدم، س.، علی اکبری بیدختی، ع.

(۲۰۱۵). تخمین تمرکز ذرات معلق (PM10) در جو با

استفاده از داده‌های سنجش از دور ماهواره‌ای و

زمین‌پایه و پراسنج‌های هواشناسی: کاربرد شبکه

عصبی مصنوعی. *فیزیک زمین و فضا*، ۴۱(۳)، ۴۹۹-

۵۱۰.

ریوندی، ا.، میررکنی، م. و محمدیها، ا. (۱۳۹۲). بررسی

تشکیل و انتشار طوفان‌های گرد و خاک ورودی به

غرب و جنوب‌غرب ایران با استفاده از مدل پخش

لاگراتژی ذرات HYSPLIT. *پژوهش‌های*

اقلیم‌شناسی، سازمان هواشناسی کشور، پژوهشکده اقلیم

شناسی، ۱۳(۱)، ۱-۱۶.

سلیمانی ساردو، ف.، مصباح زاده، ط.، سلاجقه، ع.،

زهتاییان، غ.، رنجبر، ع.، میگلیتا، ماریو مارسلو. و

کرمی، س. (۱۴۰۰). شناسایی کانون‌های گردوغبار با

استفاده از مدل WRF - Chem و طرح‌واره‌های

فرسایش بادی GOCART و AFWA (طوفان شبیه

سازی شده ۲ خرداد ۱۳۹۷). *فصلنامه علوم محیطی*،

۱۹(۲)، ۹۱-۱۱۰.

عزیزی، ق.، خوش اخلاق، ف.، شمسی‌پور، ع.، نگاه، س.

و فریدمجهدی، ن. (۱۳۹۹). کم‌فشارهای گرمایی

فلات ایران. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، مرکز

- Geophysical Research, 106(D17), 20255–20273.
- Ginoux, P., Prospero, J.M., Gill, T.E., Hsu, 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, RG3005.
- Goudie, A.S., and Middleton, N.J. (2006). *Desert dust in the global system*. Springer, New York.
- Hersbach, H., Bell, B., and Berrisford, P. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc*, 146, 1999–2049.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. Retrieved from Cambridge Books Online.
- Khoshsima, M., Sabet Ghadam, S. S., and Aliakbari Bidokhti, A. (2015). Estimation of atmospheric particulate matter (PM10) concentration based on remote sensing measurements and meteorological parameters: application of artificial neural network. *Journal of the Earth and Space Physics*, 41(3), 499-510. (In Persian).
- Kim, K.D., Lee, S., Kim, J.-J., Lee, S.-H., Lee, D., Lee, J.-B., Choi, J.-Y., and Kim, M.J. (2021). Effect of Wet Deposition on Secondary Inorganic Aerosols Using an Urban-Scale Air Quality Model. *Atmosphere*, 12(2), 168.
- Lau, K.M., and Kim, K.M. (2006). Observational relationships between aerosol and Asian monsoon rainfall, and circulation. *Geophy Res Lett*, 33, L21810.
- Masoumi, A., Khalesifard, H.R., Bayat, A., and Moradhaseli, R. (2013). Retrieval of aerosol optical and physical properties from ground-based measurements for Zanjan, a city in Northwest Iran. *Atmos Res*, 120, 343–355.
- Middleton, N.J. (1986). A geography of dust storms over southwest Asia. *J Climatol*, 6, 183–196.
- Middleton, N., and Kang, U. (2017). Sand and Dust Storms: Impact Mitigation. *Sustainability*, 9(6), 1053.
- Mobarak Hassan, E., Saadat Abadi, A., and Fatahi, E. (2020). Dust Investigation by MERRA-2 Model in Iran: (during 2007-2017). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(9), 2203-2219. (In Persian)
- Mobarak Hassan, E., Karimkhani, M., and Alizadeh, O. (2023). Synoptic analysis and simulation of a widespread dust event in the Urmia Basin. *Natural Hazards*.
- Thornhill, K. L., Winker, D., Levy, R., Kim, J., Omar, A., Kalashnikova, O. V., Lin, G., Yue, Q., Redemann, J., Livingston, J. M., Russell, P. B., and Livingston, J. (2017). The MERRA-2 Aerosol Reanalysis, 1980 Onward. Part II: Evaluation and Case Studies. *Journal of Climate*, 30, 6851–6872.
- Cavazos Guerra, C.D.C. (2011). *Modelling the Atmospheric Controls and Climate Impact of Mineral Dust in the Sahara Desert* (PhD dissertation). UCL (University College London).
- Chen, Y., Li, R., Wang, Y., Zhang, W., and Wang, W. (2021). Validation and comparison of high-resolution MAIAC aerosol products over Central Asia. *Atmospheric Environment*, 251, 118273.
- Chin, M., Ginoux, P., Lucchesi, R., Huebert, B., Weber, R., Anderson, T., Masonis, S., Blomquist, B., Bandy, A., and Thornton, D. (2003). A global aerosol model forecast for the ACE-Asia field experiment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D23).
- Furman, H.K.H. (2003). Dust storms in the Middle East: Sources of origin and their temporal characteristics. *Indoor Built Environ*, 12, 419–426.
- Fuzzi, S., Baltensperger, U., Carslaw, K., Decesari, S., van der Gon, H.D., Facchini, M.C., Fowler, D., Koren, I., Langford, B., Lohmann, U., Nemitz, E., Pandis, S., Riipinen, I., Rudich, Y., Schaap, M., Slowik, J.G., Spracklen, D.V., Vignati, E., Wild, M., Williams, M., and Gilardoni, S. (2015). Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs. *Atmos Chem Phys*, 15, 8217–8299.
- Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M. J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., Randles, C. A., Darmenov, A., Bosilovich, M. G., Reichle, R., Wargan, K., Coy, L., Cullather, R., Draper, C., Akella, S., Buchard, V., Conaty, A., da Silva, A. M., Gu, W., Kim, G. K., Koster, R., Lucchesi, R., Merkova, D., Nielsen, J. E., Partyka, G., Pawson, S., Putman, W., Rienecker, M., Schubert, S. D., Sienkiewicz, M., and Zhao, B. (2017). The Modern-Era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*, 30, 3541-3563.
- Ginoux, P., Chin, M., Tegen, I., Prospero, J.M., Holben, B., Dubovik, O., and Lin, S.J. (2001). Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. *Journal of*

- Tian, Y., Zhang, L., Liu, J., and Sun, Y. (2021). Effects of dust emissions from wind erosion of soil on ambient air quality. *Atmospheric Pollution Research*, 12(7), 101108.
- Tsoar, H., and Pye, K. (1987). Dust transport and the question of desert loess formation. *Sedimentology*, 34, 139-153.
- Van Donkelaar, A., Martin, R. V., Brauer, M., Kahn, R., Levy, R., Verduzco, C., and Villeneuve, P. J. (2010). Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: Development and application. *Environmental Health Perspectives*, 118, 847-855.
- Wesely, M.L. (2007). Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models. *Atmospheric Environment*, 41, 52-63.
- Prospero, J. M. (1996). The atmospheric transport of particles to the ocean. In V. Ittekkot, P. Schafer, S. Honjo, and P. J. Depetris (Eds.), *Particle flux in the ocean* (pp. 19-52). Chichester: Wiley.
- 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, 1002.
- Randles, C. A., Hoffman, M. J., Xu, J., Lenschow, D. A., Da Silva, A. M., Gupta, S. K., Huang, J.-P., Kim, M. J., Schumacher, C. R., Zhang, S., Darmenov, A. S., and Benjamin, C. G. (2017). The MERRA-2 Aerosol Reanalysis, 1980 Onward. Part I: System Description and Data Assimilation Evaluation. *Journal of Climate*, 30, 6823–6850.
- Rashki, A., Middleton, N. J., and Goudie, A. S. (2021). Dust storms in Iran—Distribution, causes, frequencies and impacts. *Aeolian Research*, 48, 100655.
- Rivandi, A., Mirrokni, M., and Mohammadiha, A. (2013). Investigation of Formation and Propagation of Dust Storms Entering to the West and Southwest of Iran Using Lagrangian Particle Diffusion Model, HYSPLIT. *Journal of Climate Research*, 1392(13), 1-16. (In Persian).
- Sabetghadam, S., Khoshsima, M., and Alizadeh Choozari, O. (2018). Spatial and temporal variations of satellite-based aerosol optical depth over Iran in Southwest Asia: Identification of a regional aerosol hot spot. *Atmos Poll Res*, 9, 849–856.
- Sabetghadam, S., Alizadeh, O., Khoshsima, M., and Pierleoni, A. (2021). Aerosol properties, trends and classification of key types over the Middle East from satellite-derived atmospheric optical data. *Atmos Environ*, 246, 118100.
- Shahabi, H., Safarrad, T., Hashim, M., and Al-Ansari, N. (2023). Satellite-Synoptic Monitoring of Dominant Dust Entering Western Iran. *Journal of Sensors*.
- Soleimani Sardoo, F., Mesbahzadeh, T., Salajeghe A., Zehtabian, G., Ranjbar, A., Miglietta, M.M., and Karami, S. (2021). Identifying dust springs using WRF-Chem model and GOCART and AFWA wind erosion schemas (simulated dust storm on 05/22/2018). *Journal of Environmental Sciences*, 19(2), 91:110. (In Persian).

Identification of sources of dust that influence Tehran using the MERRA-2 data

Ramin Ahmadi¹, Omid Alizadeh^{2*} and Samaneh Sabetghadam²

¹ M.Sc., Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

² Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 15 November 2023, Accepted: 31 January 2024)

Summary

We utilized the *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications*, version 2 (MERRA-2) data with a horizontal resolution of $0.5^\circ \times 0.625^\circ$ for the period 1980-2022 to identify sources of dust that influence Tehran province in different months of the year. The results indicated that surface dust mass concentration in Tehran reach peak levels in late spring and during summer, particularly in July. The maximum dry deposition flux in Tehran is in April and May, whereas the maximum wet deposition flux is in March and April. Wet deposition flux is higher in highlands and in areas where precipitation is relatively high compared to lowlands and areas with low precipitation. Dust emission flux is higher during spring and summer in Tehran compared to other seasons, with the highest values in June and July, concurrent with the maximum dust emission flux in Dasht-e Kavir. Varamin is the only region in Tehran province that contributes to extensive dust emissions. In this region, dust emission flux is higher than dust deposition flux in summer. The analysis of dust emission flux and dust surface mass concentration in Tehran during the period 1980-2022 indicates significant increasing trends in spring and summer, respectively. In this study, we also identified potential dust sources that influence the Tehran province. We examined those sources that have a high level of dust emission flux and are either located in or near Tehran or along the path of weather systems moving from the west to the east. These sources include (1) the western Middle East region; (2) Dasht-e Kavir; and (3) sources in Tehran. In all these areas, the maximum dust emission flux and surface dust mass concentration occur in late spring and during summer, particularly in June and July, whereas their minimum values are in autumn and early winter (October to January). Although dust dry deposition flux shows high values in the vicinity of or near the regions with high dust emission flux, dust wet deposition flux has high values in areas with relatively high precipitation such as the Alborz and Zagros Mountains. In the western Middle East and Dasht-e Kavir, dust emission flux is higher than the sum of dry and wet deposition fluxes in all months of the year. The correlation analysis between dust emission flux in the abovementioned potential sources of dust and surface dust mass concentration in Tehran indicates that from January to April, the western Middle East region is the main source of dust that contributes to the occurrence of dust events in Tehran. In summer and early autumn, in addition to dust sources in the western Middle East, the contribution of Dasht-e Kavir and dust sources in the Tehran province becomes significant. This explains the observed maximum dust surface mass concentration in Tehran during summer. The results of this study have important implications for better understanding potential sources of dust that influence Tehran in different months, based on which monthly variation in terms of the health and environmental impacts of dust can be obtained.

Keywords: Dust emission flux, dust deposition flux, dust mass concentration