

## ارزیابی زمانی-مکانی غلظت ستونی ذرات معلق ( $PM_{2.5}$ ) ناشی از رویدادهای گردوغباری در ایران با استفاده از داده‌های بازتحلیل NASA/MERRA-2

کوهزاد رئیس‌پور\*

استادیار، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

(دریافت: ۹۹/۱۰/۱۷، پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۳/۴)

### چکیده

ذرات معلق کوچک‌تر از  $2/5$  میکرون یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های هوا هستند که از تنوع و انتشار گسترده‌ای برخوردار می‌باشند. رویدادهای گردوغبار یکی از مهم‌ترین منابع طبیعی انتشار ذرات معلق در جو می‌باشند. مطالعه حاضر با هدف بررسی تراکم و پراکنش فضایی-زمانی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  ناشی از رویدادهای گردوغباری در جو ایران طی دوره آماری (۲۰۱۹-۱۹۸۰) بر اساس سامانه ماهواره مبنای MERRA-2 انجام شده‌است. داده‌های مربوطه با قدرت تفکیک زمانی ماهانه، فصلی و سالانه و مکانی  $0/625^\circ \times 0/5^\circ$  تهیه و پس از اعمال پیش پردازش‌های لازم، بارزسازی، تجزیه و تحلیل شد. نتایج حاصله به خوبی بیانگر افت و خیزهایی در تراکم ذرات معلق  $PM_{2.5}$  طی سال‌های آماری مورد مطالعه‌است. اما به‌طور کلی تراکم ذرات معلق  $PM_{2.5}$  رو به افزایش بوده و روند صعودی آن به‌خصوص در سال‌های آخر دوره آماری مشاهده شد. تحلیل‌های آماری تفاوت‌های زیادی را به لحاظ زمانی و مکانی در میزان ذرات معلق  $PM_{2.5}$  نشان می‌دهد. در میان ماه‌های مورد مطالعه، بیشترین/کمترین تراکم ذرات معلق  $PM_{2.5}$  به ترتیب در ماه‌های می، آوریل و جولای/دسامبر، ژانویه و نوامبر برآورد شد. به لحاظ فصلی هم بیشترین/کمترین تراکم  $PM_{2.5}$  در فصول تابستان/زمستان اتفاق افتاده‌است. توزیع مکانی حاکی از بیشترین تراکم ذرات معلق در بخش‌های جنوبی، شرقی و شمال شرقی می‌باشد که بیانگر تأثیر قابل توجه کانون‌های محلی و فرامحلی گردوغبار بر افزایش تراکم ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در این نواحی می‌باشد. تحلیل همبستگی نیز رابطه مثبت معناداری میان میزان ذرات معلق  $PM_{2.5}$  با دمای سطح زمین و رابطه منفی معناداری با رطوبت سطح خاک و بارش نشان داده‌است.

واژه‌های کلیدی: ذرات معلق،  $PM_{2.5}$ ، سامانه مدل‌سازی MERRA-2، آلودگی هوا، رویدادهای گردوغبار، ایران.

### ۱. مقدمه

کیفیت هوا و سلامت انسان به رشته تحریر درآمده است که از جمله آنها می‌توان به مطالعات (جیاناداکی و همکاران، ۲۰۱۴؛ قریوج و قدیرا، ۲۰۱۶) اشاره کرد. در دهه‌های اخیر آلودگی هوا در بسیاری از مناطق جهان باعث افزایش نگرانی‌های عمومی در خصوص ایجاد عوارض بهداشتی شده است (گیو و همکاران، ۲۰۱۶؛ تیتیر و همکاران، ۲۰۱۳). علاوه بر منابع انسان‌زاد آلودگی هوا، منابع طبیعی نیز نقش به‌سزایی در ایجاد آلودگی هوا دارند (شاهسونی و همکاران، ۲۰۱۲). یکی از مهم‌ترین منابع طبیعی آلودگی هوا، رویدادهای گردوغبار می‌باشند که سالانه میلیاردها تن ذرات معلق معدنی توسط آنها به جو منتقل می‌شود (وانگ و همکاران، ۲۰۰۸). وقایع گردوغبار به‌عنوان یکی از رخداد‌های اقلیمی مقادیر

اهمیت هواشناسی و اقلیمی ذرات معلق جوی را می‌توان به اثرات آن بر روی تراز انرژی سیستم جو زمین، تغییرات فیزیکی، دینامیکی و شیمی جو در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی، جذب و انتشار تابش در جو، تغییرات میکروفیزیکی و خصوصیات تابشی ابرها و تغییراتی که در سطح برف و یخ اتفاق می‌افتد، تبیین کرد (قریوج و همکاران، ۲۰۱۷). همچنین مستقیماً بر سلامت انسان (سرطان ریه، مشکلات تنفسی و غیره) اثرگذار می‌باشند. علاوه بر این، عناصر فلزی می‌توانند به ذرات  $PM_{2.5}$  متصل شده و با افزایش میزان رسوب مواد رادیواکتیو ارتباط داشته باشند (کین و همکاران، ۲۰۱۸). در سال‌های اخیر، مطالعات پرشماری در راستای شناخت نقش مهم ذرات معلق جوی و پیش‌بینی تأثیرات آنها بر اقلیم جهانی،

قابل توجهی از ذرات معلق (Particulate Matter) را از مناطق خشک، نیمه‌خشک و صحراها انتشار داده (کروساکی و همکاران، ۲۰۰۳) و سلامت انسان و دیگر موجودات زنده را تحت تأثیر قرار می‌دهند (مینگ و ژانگ، ۲۰۰۷). این ذرات با توجه به اندازه آنها، به انواع ذرات درشت (coarse particles) یا  $PM_{10}$ ، ذرات ریز (fine particles) یا  $PM_{2.5}$ ، ذرات بسیار ریز (ultra-fine particles) یا  $PM_{0.1}$  تقسیم می‌شوند (فلاگان و سینفلد، ۱۹۸۸). اثرات بهداشتی ذرات معلق ناشی از وقایع گردوغبار در کوتاه‌مدت و بلندمدت، از دیرباز توجه دانشمندان را به خود جلب کرده‌است (حسینی و رستمی، ۱۳۹۷). مطالعات اپیدمیولوژیک نشان داده‌است که بیماری‌های ریوی، بیماری‌های قلبی و عروقی و مرگ‌ومیر ناشی از آنها با ذرات معلق گردوغبارها در ارتباط می‌باشد (هنگ و همکاران، ۲۰۱۰؛ تایوو و همکاران، ۲۰۱۴؛ حجازی و همکاران، ۱۳۹۱، خوش‌سیما و همکاران، ۱۳۹۴). برآوردها نشان داده‌است که سالانه ۵۰۰۰۰۰ نفر بر اثر مواجهه با ذرات ریز معلق موجود در هوای آزاد، دچار مرگ زودرس شده و به افزایش ۱/۷ درصد مرگ‌ومیر منجر شده‌است (کیلی و همکاران، ۲۰۱۲؛ فرانکلین و همکاران، ۲۰۰۷؛ غلامپور و همکاران، ۱۳۹۳). بر اساس نتایج مطالعات برخی از محققان، افرادی که در مناطق غیرصنعتی چین زندگی می‌کنند ولی نزدیک به منابع انتشار ذرات معلق معدنی هستند، در طول ۳-۶ روز پس از وقایع گردوغبار، به دلیل عفونت دستگاه تنفسی فوقانی، التهاب ریه و فشار خون بالا مراجعات بیشتری برای بستری شدن‌های روزانه دارند (گریفین و همکاران، ۲۰۰۱؛ مینگ و همکاران، ۲۰۰۷؛ لی و همکاران، ۲۰۱۰؛ اوانز و همکاران، ۲۰۱۳). دانشمندان تأیید کرده‌اند که هر گرم از ذرات معلق  $PM_{2.5}$  حاوی حدود یک میلیون سلول باکتریایی است که همزمان با ایجاد گردوغبار حتی می‌تواند منجر به اپیدمی‌های مرگبار جهانی شود. آنها نشان دادند؛ ذرات ریز آفریقا منشأ، حاوی میکروب‌هایی هستند که می‌تواند سبب بروز بیماری‌های مرگباری در

موجودات زنده شوند (کون و همکاران، ۲۰۱۲؛ گینگ و همکاران، ۲۰۰۶؛ گریفین، ۲۰۰۷؛ سندستروم و فورسبرگ، ۲۰۰۸؛ دراکسلر و همکاران، ۲۰۱۰؛ چن و همکاران، ۲۰۱۲؛ ندافی و همکاران، ۲۰۱۲؛ کانگ و همکاران، ۲۰۱۲؛ گرو و همکاران، ۲۰۱۳؛ مارکس و مک‌گون، ۲۰۱۴؛ هی و همکاران، ۲۰۱۷؛ رین و همکاران، ۲۰۱۹). مشعلی و برزگر (۱۳۹۸) با بررسی تأثیر ذرات معلق هوا ( $PM_{2.5}$ ) بر میزان ابتلا کودکان به اوتیسم، به این نتیجه رسیدند که قرارگیری در معرض ذرات معلق هوا، بر سیستم ایمنی و رشد شبکه عصبی تأثیر گذاشته و با اختلال در رشد مغز، کودک را به اوتیسم مبتلا می‌کند. جمع‌بندی حاصل از نتایج برخی از مطالعات نشان داده‌است که صحرای بزرگ آفریقا (بزرگ‌ترین منبع گردوغبار معدنی در جهان) تقریباً یک میلیارد تن گردوغبار را در سال منتشر می‌کند (مولین و همکاران، ۱۹۹۷). از سویی دیگر غرب چین و بخش‌هایی از مغولستان به‌عنوان دومین منبع بزرگ تولید گردوغبار آسیایی (وانگ و همکاران، ۲۰۰۸) و شبه‌جزیره عربستان به‌عنوان سومین منبع گردوغبار بیابانی، به‌طور قابل توجهی در انتقال ذرات گردوغبار در سراسر جهان دخالت دارد (گائودی و میدلتون، ۲۰۱۱). این منابع به‌طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته که می‌توان به مطالعات انجام شده در لیبی توسط (أهرا و همکاران، ۲۰۰۶)، مغولستان (ناتسگدورج و همکاران، ۲۰۰۳)، کره جنوبی (کاون و همکاران، ۲۰۱۲)، ژاپن (آکاتا و همکاران، ۲۰۰۷)، تایوان (لیو و همکاران، ۲۰۰۶)، و به‌ویژه در چین توسط (هی و همکاران، ۲۰۱۷؛ زنگ و همکاران، ۲۰۱۰) اشاره کرد. در برخی از این مطالعات غلظت  $PM_{2.5}$  را بیشتر از ۲۵۰۰ و میکروگرم در مترمکعب (کویت و عربستان سعودی) گزارش کرده‌اند (لیون و لگراند، ۲۰۰۳). در ایران نیز رویدادهای گردوغباری از جنبه‌های مختلفی از قبیل شدت، تداوم، منشأیابی، کانی‌شناسی و اثرات نامطلوب مورد مطالعه قرار گرفته است. به‌عنوان مثال؛ هادنی و همکاران (۱۳۹۷) مشخصات ترکیبات یونی کل

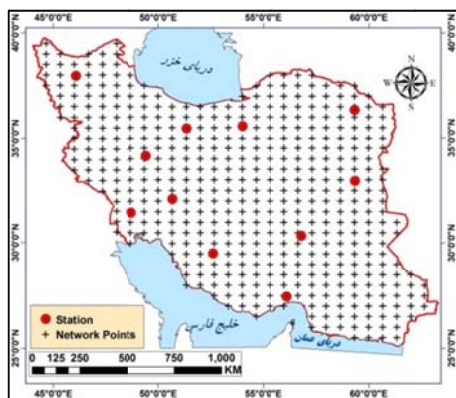
بوچارد و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از شاخص هواویز OMI و عمق آپتیکی هواویز (AOD) حاصل از داده‌های باز کاوی شده هواویز مدل MERRA استفاده کرده و نتایج حاصله را در مقایسه با دیگر روش‌ها بسیار خوب ارزیابی کردند. آنها همچنین در تحقیقات دیگری داده‌های هواویز مربوط به نسخه ۱ مدل MERRA را برای ارزیابی میزان غلظت ذرات معلق  $PM_{2.5}$  بر روی ایالات متحده و اروپا به کار گرفته و غلظت ذرات  $PM_{2.5}$  را با دقت بالایی برآورد کردند (بوچارد و همکاران، ۲۰۱۶a). از مطالعات مبتنی بر داده‌های باز کاوی شده نسخه ۲ مدل MERRA می‌توان به تحقیقات (رینکر و همکاران، ۲۰۱۱؛ جیانگ و همکاران، ۲۰۱۵؛ راندلس و همکاران، ۲۰۱۷؛ بوچارد و همکاران، ۲۰۱۷؛ گلارو و همکاران، ۲۰۱۷؛ ریچل و همکاران، ۲۰۱۷؛ سونگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ احمدی و داداشی رودباری، ۱۳۹۸؛ رئیس‌پور و همکاران، ۱۳۹۸) اشاره کرد. در سال‌های اخیر، اثرات بهداشتی طوفان‌های گردوغبار به یک نگرانی عمده در ایران تبدیل شده‌است (فلاح‌ز زولی و همکاران، ۱۳۹۷). بخش‌های وسیعی از کشور ایران تا حد قابل توجهی تحت تأثیر ذرات معلق گردوغبار حمل شده توسط جریانات مختلف قرار می‌گیرد. بر همین اساس مطالعات متعددی در خصوص تراکم ذرات معلق جوی و اندازه‌گیری نرخ فرونشست ذرات معلق در ایران انجام شده‌است. در این خصوص می‌توان به پژوهش‌های انجام شده توسط (حمیدی و همکاران، ۲۰۱۲؛ راشکی و همکاران، ۲۰۱۲؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۳؛ حجتی و همکاران، ۲۰۱۲ و ...) اشاره کرد. این محققان نقش عواملی از قبیل نزدیکی به کانون‌های بیابانی، ارتفاع، اقلیم، بارش، باد و عوامل محلی را در تراکم و ترسیب ذرات معلق جوی معرفی کردند. از آنجایی که ذرات معلق از تنوع، پیچیدگی و انتشار گسترده‌ای برخوردار بوده و اندازه، غلظت و ترکیب شیمیایی از مهم‌ترین ویژگی آنها می‌باشد، علی‌رغم پژوهش‌های فراوان در این خصوص، هنوز در بسیاری از جنبه‌های آن سوالات زیادی مطرح می‌باشد. این پژوهش

ذرات معلق در هوا را در طول مدت گردوغبارهای خاورمیانه در اهواز مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند که غلظت ذرات  $PM_{2.5}$  در روزهای گردوغباری تا چهار برابر بیشتر از روزهای عادی بوده‌است. گودرزی و همکاران (۱۳۹۴) نیز در پژوهشی مشابه به بررسی اثر ذرات معلق موجود در هوا بر سلامت شهروندان ساکن در دو کلان‌شهر بزرگ ایران از جمله تهران و اهواز پرداخته و در همین راستا پس از شناسایی روزهای دارای  $PM_{10}$  و  $PM_{2.5}$  با غلظت بیشتر از ۱۵۰ میکروگرم بر متر مکعب و ارتباط مرگ‌ومیر روزانه با این ذرات در دو شهر مورد مطالعه (با استفاده از مدل Case-Crossover مبتنی بر رگرسیون پواسون مشروط)، به این نتیجه رسیده‌اند که اثرگذاری ذرات معلق در شهر اهواز بدون تأخیر زمانی ارتباط معناداری با افزایش مرگ‌ومیر روزانه داشته‌است، در حالی که در شهر تهران بیشترین معناداری این ارتباط با تأخیر زمانی ۲ تا ۳ روزه صورت گرفته‌است. امروزه دانشمندان از وسایل متعددی (ابزار کنترل زمینی، هواپیما و ماهواره‌ها) برای نمایش و اندازه‌گیری ذرات معلق (آلاینده‌ها) استفاده می‌کنند. سنجنده‌های ماهواره‌ای که میزان تشعشعات امواج الکترومغناطیسی (نور) را مشخص می‌کنند، عمق نوری هواویزها را گزارش کرده و میزان نور منعکس شده یا جذب شده توسط هواویزها در هوا را اندازه‌گیری می‌کنند. از جمله آلاینده‌هایی که برآورد آن توسط فناوری سنجنش از دور میسر می‌باشد، غلظت ذرات معلق می‌باشد. گرچه در طی چند دهه گذشته، اثرات ذرات معلق هوا، هم بر آب‌وهوا و هم بر کیفیت هوا مشهود بوده اما باز هم پایش مداوم آنها بسیار مهم خواهد بود. طی سال‌های اخیر تکنیک‌ها و مدل‌های مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای کمک قابل توجهی به پایش ذرات معلق هوا کرده‌اند. نسخه‌های مختلف سامانه ماهواره مبنای MERRA (The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2) (MERRA-2) قابلیت بسیار خوبی در بررسی هواویزهای معلق در هوا و تحلیل سری زمانی آن دارند.

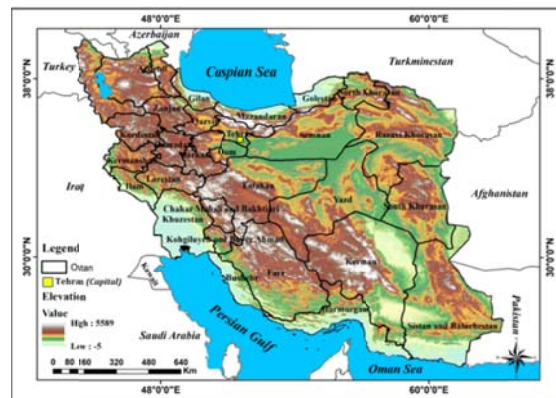
با هدف بررسی غلظت ستوتی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  ناشی از رویدادهای گردوغباری طی یک دوره آماری ۴۰ ساله (۲۰۱۹-۱۹۸۰) در گستره جو ایران طراحی و انجام شد تا به این سوال اساسی که میزان تمرکز و روند ذرات معلق معدنی  $PM_{2.5}$  چگونه بوده است، پاسخ دهد. اهداف ویژه این مطالعه تعیین روند کلی غلظت ذرات معلق  $PM_{2.5}$ ، استخراج الگوی تغییرات ماهانه، فصلی و سالانه، تعیین روند تغییرات زمانی، تحلیل آمار توصیفی و تعیین میزان تمرکز ذرات معلق در گستره ایران زمین می باشد.

## ۱-۲. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه پژوهش گستره جغرافیایی کشور ایران است که از منظر زمین شناسی، ژئومورفولوژی و اقلیمی از تنوع ویژه ای برخوردار بوده و به لحاظ جغرافیایی با وسعتی معادل  $1/648/195$  کیلومتر مربع در مختصات  $25^{\circ}$  تا  $40^{\circ}$  عرض شمالی و  $44^{\circ}$  تا  $64^{\circ}$  طول شرقی، نسبت به نیمروز گرینویچ قرار دارد (شکل ۱-الف). میانگین بارش سالانه ایران حدود ۲۵۰ میلی متر و بر بیش از ۷۰ درصد از وسعت آن اقلیم خشک و فراخشک حاکم می باشد. بر همین اساس رویدادهای گردوغباری یکی از مهم ترین مخاطرات اقلیمی و زیست محیطی ایران می باشد (شاهسونی و همکاران، ۱۳۸۹). دو دلیل برای انتخاب کل پهنه ایران وجود دارد: ۱- تأثیر پذیری زیاد آن از ذرات معلق ناشی از رویدادهای گردوغباری و ۲. وجود سطوح مختلف ارتفاعی و نواحی متفاوت جغرافیایی که امکان ارزیابی زمانی- مکانی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  را در پهنه آن بهتر میسر می کند. شکل ۱: (ب) توزیع نقاط شبکه بندی شده سامانه MERRA-2 را به همراه ۱۱ ایستگاه انتخابی پایش کیفی هوا در گستره ایران نشان می دهد که جهت صحت سنجی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  سامانه MERRA-2 مورد استفاده قرار گرفت.



(ب)



(الف)

شکل ۱. الف) نقشه مدل ارتفاعی، ب) پراکنش نقاط شبکه بندی شده سامانه MERRA-2 و ایستگاه های انتخابی پایش کیفی هوا جهت صحت سنجی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  مدل MERRA-2 در پهنه ایران.

## ۲-۲. داده‌های پژوهش

استفاده از محصولات سامانه MERRA-2 است. داده‌های مورد استفاده که به صورت رقومی بوده و مقادیر آنها ارزش عددی غلظت PM<sub>2.5</sub> بر حسب میلی گرم بر مترمربع (Mg/m<sup>3</sup>) به ازای هر پیکسل است، با اعمال پردازش‌های لازم، تبدیل به داده‌های شبکه‌ای و جداول اطلاعاتی شده و خروجی‌های لازم براساس مرز جغرافیایی ایران استخراج شد. به طور کلی خروجی‌های حاصل از محصولات PM<sub>2.5</sub> سامانه MERRA-2 نتیجه اعمال محاسبات بر روی دو ماتریس ماهانه به ابعاد ۵۱۲×۴۸۰ (۴۸۰ معرف تعداد مشاهدات در ماه‌های پیاپی از ۴۰ سال مورد مطالعه (۱۲×۴۰) و ۵۱۲ معرف تعداد نقاط شبکه‌بندی شده مدل MERRA-2 با قدرت تفکیک مکانی افقی ۰/۶۲۵° × ۰/۵° در پهنا ایران) و فصلی به ابعاد ۵۱۲ × ۱۶۰ (۱۶۰ معرف تعداد مشاهدات در فصول پیاپی (۴×۴۰)) است (شکل ۱). به عبارتی دیگر، میانگین غلظت ماهانه PM<sub>2.5</sub> از میانگین غلظت روزانه متعلق به هر ماه و میانگین فصلی از میانگین سه ماه مربوط به هر فصل برای ایران استخراج شد. به لحاظ مکانی نیز، مقادیر هر پیکسل شرایط میانگین غلظت PM<sub>2.5</sub> مربوط به هر سری زمانی (ماهانه، فصلی و سالانه) در طول دوره آماری است. در مرحله نهایی جهت درک هر چه بهتر رفتار زمانی-مکانی غلظت PM<sub>2.5</sub> در ایران، نتایج به صورت نقشه، گراف و نمودار ارائه شد و به واکاوی، تفسیر و استنباط‌های استدلالی یافته‌ها برای دست‌یابی به هدف تحقیق پرداخته شد.

## ۲-۲-۱. سامانه MERRA-2

سامانه MERRA-2 (دومین بازنگری تحلیلی تحقیقات و برنامه‌های کاربردی دفتر ارزیابی و سامانه جهانی ناسا به نام MERRA-2 نامیده می‌شود) بر اساس بازتحلیل داده‌های جو با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای عمل کرده (مولود و همکاران، ۲۰۱۵) و یکی از قابل اعتمادترین مدل‌هایی می‌باشد که برای کمک به محققین مختلف علوم محیطی برای پاسخ‌گویی به مسائل مربوط به تحقیقات آب‌وهوایی و تغییرات اقلیمی، برای بهره‌برداری

در این تحقیق منظور از ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> ستونی، اندازه‌گیری ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> با منشأ گردوغبار می‌باشد که در یک ستون عمودی از زمین به فضا رفته‌است. ذرات PM<sub>2.5</sub> شامل ذراتی هستند که اندازه آنها بین ۰/۱ تا ۲/۵ میکرون (ذرات کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون) می‌باشد. طی سال‌های اخیر روش‌های متعددی جهت پایش ذرات معلق موجود در جو کره زمین به کار گرفته شده‌است. در این میان، استفاده از مدل‌های مبتنی بر داده‌های سنجش از دوری از جمله سامانه MERRA-2 کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌است. متغیرهای پایش شده توسط این مدل، عمدتاً مبتنی بر مشاهدات ماهواره‌ای بوده که از سنجنده‌های مختلفی دریافت می‌شوند. در این تحقیق نیز از محصولات PM<sub>2.5</sub> ستونی ناشی از رویدادهای گردوغباری سامانه MERRA-2 (MERRA-2 Model M2TMNXAER v5.12.4 tavg1\_2d\_slv\_Nx: 2d,2-monthly,Time-Averaged, (Assimilation, Single-Level Diagnostics V5.12.4) که از وب‌گاه Earth data و از طریق لینک (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/mdisc/>) قابل دریافت است، استفاده شد. داده‌های مورد نیاز با فرمت‌های NetCDF و CSV استخراج و پس از کنترل کیفی و پیش‌پردازش، در محیط برخی از نرم‌افزارهای کاربردی از قبیل Grads، ArcGIS و EXCEL مورد پردازش قرار گرفته‌اند. NetCDF یا nc فرمتی از داده‌ها برای نگهداری داده‌های چندبُعدی (طول جغرافیایی یا Lon، عرض جغرافیایی یا lat، تراز یا lev و بُعد زمان یا time) می‌باشد که قابلیت استفاده از آن را به وسیله نرم‌افزارهایی از قبیل ArcGIS و Grads برای ساخت لایه‌های رستری، وکتوری و جداول اطلاعاتی به کاربر می‌دهد. فرمت CSV نیز امکان پشتیبانی و پردازش آن را توسط نرم‌افزارهای آماری میسر می‌کند. هدف از انجام این تحقیق، تحلیل بلندمدت (۲۰۱۹-۱۹۸۰) توزیع فضایی-زمانی غلظت ذرات معلق (PM<sub>2.5</sub>) ستونی ناشی از رویدادهای گردوغباری در گستره جو منطقه ایران با

مکانی و زمانی بالا به همراه سیستم مدل سازی ترکیبی داده های سنجش از دور و مشاهدات زمینی از ویژگی های منحصر به فرد این مدل است. این مدل متغیرهای سیستم جو زمین را در مقیاس زمانی ماهانه و ۳ ساعته با قدرت تفکیک مکانی ۱ و ۰/۲۵ درجه جغرافیایی برآورد می کند. در این تحقیق نیز از داده های دو متغیر بارش و رطوبت سطح خاک (۲۰۱۹-۱۹۸۲) مربوط به سامانه GLDAS با دقت مکانی ۰/۲۵ × ۰/۲۵ درجه جغرافیایی در گستره اقلیمی ایران که از مرکز HDISC دریافت و پردازش شد، استفاده شد. مطالعات متعددی با استفاده از داده های این مدل انجام شده است که از جمله آنها می توان به پژوهش پاکدل خمسخی و همکاران (۱۳۹۳) اشاره کرد که به ارزیابی داده های بارش و رواناب این مدل در مقابل داده های ایستگاه های هیدرومتری حوضه پلرود استان گیلان پرداخته و بیان کردند خروجی های این مدل از دقت مناسبی برخوردار است. فرجی و همکاران (۱۳۹۳) نیز با ارزیابی داده های مربوط به رطوبت سطح خاک و بیلان آب سطحی حاصل از سامانه GLDSA بر اساس ضریب همبستگی طی یک دوره آماری دو ساله (۱۳۸۹ و ۱۳۹۰) نشان دادند که دقت داده های این مدل مناسب است.

#### ۲-۳. صحت سنجی داده ها

صحت سنجی داده های مدل مبنای یکی از مهم ترین الزامات قبل از ارائه یافته های حاصل از به کارگیری داده ها است. به منظور نشان دادن دقت داده های سامانه MERRA-2 نیاز به استفاده از داده های زمینی (مشاهداتی) وجود دارد. در این مطالعه، جهت بررسی صحت داده های  $PM_{2.5}$  سامانه MERRA-2 از داده های ذرات معلق  $PM_{2.5}$  ۱۱ ایستگاه پایش کیفی هوا (از مجموعه ایستگاه های پایش کیفی هوا وابسته به سازمان حفاظت محیط زیست کشور) که صرفاً مقادیر  $PM_{2.5}$  آنها طی یک دوره آماری مشترک (۲۰۱۹-۲۰۱۵) در دسترس و فاقد خلأ آماری بود، استفاده شد (شکل ۱). در گام بعدی مقادیر  $PM_{2.5}$  مربوط به

بهینه از مشاهدات ماهواره ای ایجاد شده است (مولود و همکاران، ۲۰۱۴؛ کوستر و همکاران، ۲۰۱۶). این مدل که در راستای تحقیقات و برنامه های کاربردی راه اندازی شده است (وو و همکاران، ۲۰۰۲)، با استفاده از داده های نسخه ۵ سیستم مشاهدات مرکز فضایی گودارد ناسا (GEOS-5) و داده های طرحواره درون یابی آماری جهانی GIS پشتیبانی می شود. تمرکز پروژه MERRA که بر روی تجزیه و تحلیل شرایط آب و هوای تاریخی (روند بلندمدت) می باشد، برای طیف وسیعی از مقیاس های آب و هوا، مجموعه ای از مشاهدات و نتایج جوی باز کاوی شده مبتنی بر پایش های ماهواره ای و الگوریتم های سنجش از دور را در اختیار پژوهش گران قرار می دهد (بوسیلوویچ و همکاران، ۲۰۱۶). در میان کاربردهای متعدد پروژه MERRA-2، یکی از مهم ترین کاربردهای آن، اولین بازنگری بلندمدت جهانی است که به بررسی مشاهدات فضایی هواویزها و آشکارسازی تعاملات آنها با سایر فرآیندهای فیزیکی در سیستم آب و هوایی می پردازد (بوچارد و همکاران، ۲۰۱۶b). محصولات هواویز این مدل از قدرت تفکیک خوبی برخوردار بوده و از کیفیت و دقت بسیار بالاتری نسبت به ابزارهای مشابه برخوردار می باشد. مدل مذکور می تواند با دقت زیادی بسیاری از نمایه های ذرات معلق  $PM_{2.5}$  ناشی از رویدادهای گردوغباری را اندازه گیری کرده و همچنین روند بلندمدت زمانی و مکانی آن را پایش کند.

#### ۲-۲-۲. سامانه GLDAS (Global Land Data Assimilation System)

سامانه جهانی همسان سازی داده های زمینی (GLDAS) به طور مشترک توسط دانشمندان سازمان ملی هوانوردی و فضا (ناسا)، مرکز فضایی پروازهای گودارد، سازمان ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی (نوا) و مرکز بین المللی پیش بینی محیط زیست با هدف شبیه سازی دقیق متغیرهای جریان و شرایط چرخه آب و انرژی توسعه داده شد (رادل و همکاران، ۲۰۰۴). پوشش جهانی، قدرت تفکیک

PM<sub>2.5</sub> و توزیع فضایی میانگین ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> در گستره جو ایران (۲۰۱۹-۱۹۸۰) را بر اساس سامانه MERRA-2 نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، میانگین ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> در گستره جو ایران  $61/3 \text{ Mg/m}^2$ ، بیشینه ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> برابر با  $288 \text{ Mg/m}^2$  و کمینه آن برابر با  $3/3 \text{ Mg/m}^2$  با انحراف معیار  $35 \text{ Mg/m}^2$  بوده است شکل ۲-الف. همچنین شکل ۲-ب بیانگر توزیع فضایی میانگین ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> در جو ایران می‌باشد. در این شکل بیشترین میزان تمرکز ذرات مذکور در جنوب غرب ایران، نواحی ساحلی جنوب، نواحی شرقی، بیابان‌های ایران مرکزی و بخشی از شمال ایران می‌باشد. اما به طور کلی بیشترین میزان تمرکز ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> بر فراز جنوب غرب ایران با میانگین  $162 \text{ Mg/m}^2$  و کمترین میزان آن با میانگین  $37 \text{ Mg/m}^2$  بر فراز ارتفاعات زاگرس برآورد شد. در این میان نقش بیابان‌های فرامنطقه‌ای همجوار و بیابان‌های داخلی در بالابردن میزان تمرکز ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> جو ایران بسیار آشکار می‌باشد. تمرکز بالای ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> در ناحیه جنوب غرب ایران را می‌توان به عوامل متعددی از قبیل خشکی منطقه، گرمی هوا، کمبود بارش، سرعت بیشتر باد و همجواری با چشمه‌های گردوغباری از جمله بیابان‌های عربستان، آفریقا، عراق و سوریه دانست که همواره از سوی سامانه‌های گردوغبار منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای متأثر می‌شود. گرچه بروز این پدیده در مناطق جنوب، جنوب غرب و غرب کشور تازگی ندارد، اما در سال‌های اخیر دامنه فعالیت گسترده‌تری یافته است و بیش از ۲۰ استان کشور را با مساحت بیش از یک میلیون کیلومتر مربع تحت تأثیر قرار می‌دهد (رئیس پور، ۱۳۹۷). در ناحیه همجوار با شرق دریای خزر (استان گرگان) نیز تراکم بالای ذرات معلق مشهود می‌باشد. در این خصوص می‌توان به اهمیت نقش بیابان قره‌قوم ترکمنستان به‌عنوان مهم‌ترین خاستگاه فرامنطقه‌ای گسیل ذرات معلق به این ناحیه از ایران اشاره کرد. در بخشی از ایام سال فراهم شدن سازوکار دینامیکی و هواشناسی لازم بر روی بیابان قره‌قوم (مرکز کم‌فشار) و

پیکسل‌هایی (۱۱ پیکسل و هر پیکسل با ابعاد تقریبی ۶۲/۵ در ۵۰ کیلومتر) که ایستگاه‌های پایش کیفی هوا بر روی آنها قرار می‌گرفتند، برآورد شد. سپس با استفاده از روش‌های آماری ضریب تعیین  $R^2$  (Coefficient of determination) و ریشه میانگین مربع خطا RSME (Root Mean Square Error) به بررسی صحت مقادیر PM<sub>2.5</sub> مربوط به سامانه MERRA-2 اقدام شد. نتایج به‌دست آمده از ۱۱ ایستگاه پایش کیفی هوا به‌خوبی نشان داد؛ که کاربست داده‌های ماهواره مبنای سامانه MERRA-2 جهت برآورد زمانی-مکانی ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> در گستره ایران زمین راه‌کاری مؤثر و کم‌هزینه می‌باشد. همان‌طوری که آزمون‌های آماری نشان داده‌اند مقادیر PM<sub>2.5</sub> برآورد شده از داده‌های سامانه MERRA-2 از توانایی بالایی در گستره ایران (به‌خصوص در نیمه جنوبی) برخوردار است (جدول ۱).

جدول ۱. صحت‌سنجی مقادیر PM<sub>2.5</sub> سامانه MEERA-2 با استفاده از داده‌های PM<sub>2.5</sub> ایستگاه‌های پایش کیفی هوا (۲۰۱۹-۲۰۱۵).

ردیف	ایستگاه	ضریب تعیین ( $R^2$ )	ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)
۱	تهران	۰/۸۳۲	۷/۳۴۰
۲	تبریز	۰/۷۸۵	۸/۲۰۱
۳	سمنان	۰/۷۹۶	۸/۱۲۵
۴	مشهد	۰/۸۱۴	۷/۴۵۶
۵	اراک	۰/۸۴۳	۷/۱۷۶
۶	بیرجند	۰/۸۵۱	۷/۰۱۲
۷	شهرکرد	۰/۸۶۷	۶/۹۰۲
۸	اهواز	۰/۸۹۶	۶/۴۰۷
۹	کرمان	۰/۸۲۱	۷/۱۱۶
۱۰	شیراز	۰/۸۸۷	۶/۵۲۸
۱۱	بندرعباس	۹/۰۱۱	۶/۲۰۷

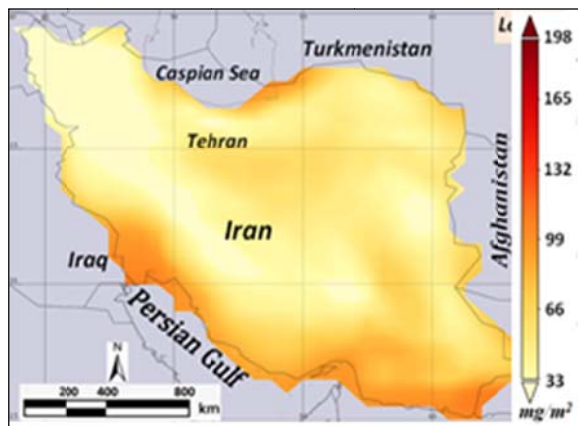
### ۳. شرح و تفسیر نتایج

#### ۳-۱. توزیع بلندمدت

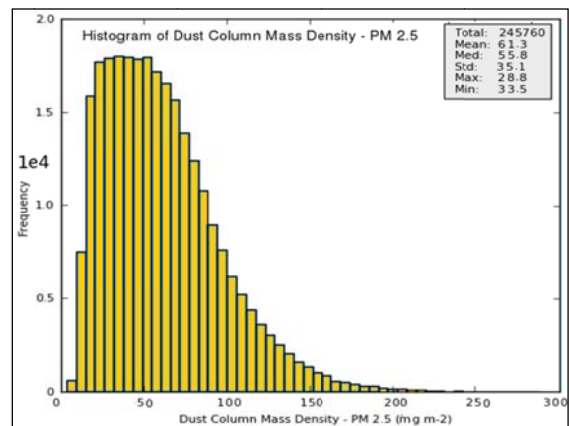
شکل ۲، برخی از پارامترهای آمار توصیفی ذرات معلق

کوچک‌تر از ۰/۰۰۱) میزان ذرات معلق  $PM_{2.5}$  مورد مطالعه از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۹ در جو ایران است به طوری که میانگین ذرات معلق  $PM_{2.5}$  از  $54 \text{ Mg/m}^2$  در سال ۱۹۸۰ به حدود  $70 \text{ Mg/m}^2$  در سال ۲۰۱۹ رسیده است. بدین مفهوم که از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۹م تراکم ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در جو ایران از غلظت فزاینده‌ای برخوردار بوده است. البته مقادیر سالانه در سال‌های آخر دوره آماری از جهش بیشتری برخوردار بوده است که توجه آن را می‌توان در تداوم خشکسالی‌های مفرط، کاهش پوشش گیاهی و افزایش رویدادهای گردوغباری دانست (شکل ۴).

نیمه جنوبی دریای خزر (مرکز پرفشار) منجر به ایجاد ناپایداری و صعود هوا در ناحیه بیابانی مذکور و غلبه جریان شمال شرقی-جنوب غربی باد، شرایط را برای خیزش گردوغبار و انتقال ذرات معلق به این ناحیه فراهم کرده و میانگین بلندمدت غلظت ذرات معلق را بالا می‌برد (رئیس‌پور، ۱۳۹۸). شکل ۳، سری زمانی میانگین ذرات معلق  $PM_{2.5}$  را در گستره جو ایران، بر اساس خروجی حاصل از داده‌های سامانه MERRA-2 با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال نشان می‌دهد. در این نمودار شیب خط روند (خط قرمز) حاکی از روند افزایشی معنی‌دار (p-مقدار

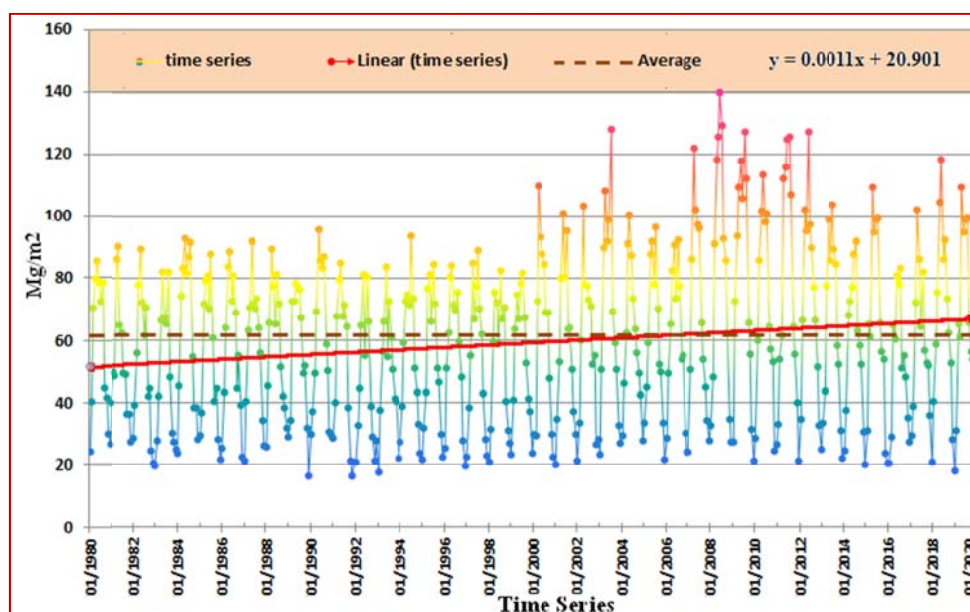


(ب)



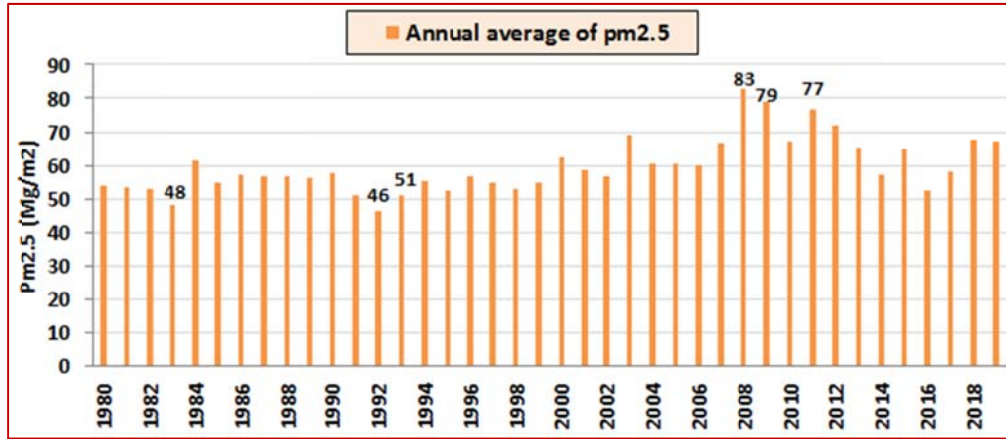
(الف)

شکل ۲. الف) هیستوگرام و پارامترهای آمار توصیفی و ب) توزیع فضایی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در گستره‌ی جو ایران (۱۹۸۰-۲۰۱۹).



شکل ۳. سری زمانی (۴۸۰ ماه پیاپی) غلظت ذرات معلق  $PM_{2.5}$  و روند آن در گستره جو ایران (۱۹۸۰-۲۰۱۹).



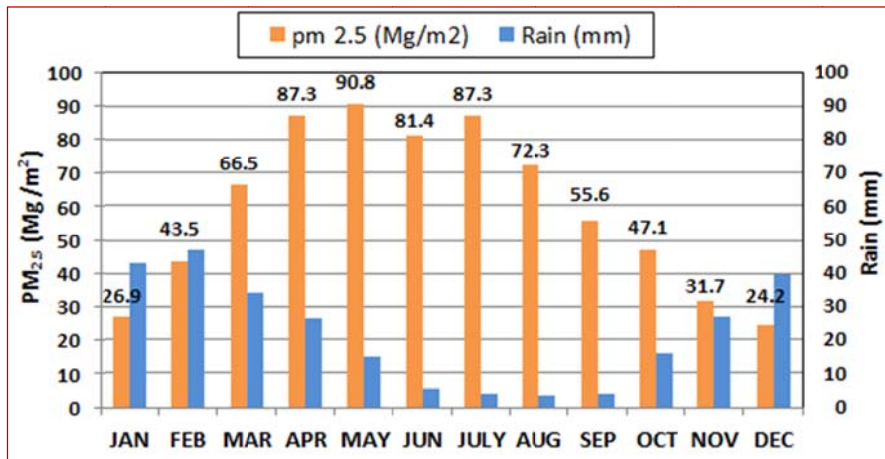


شکل ۴. نمودار میانگین سالانه ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> در گستره جغرافیایی ایران (۲۰۱۹-۱۹۸۰).

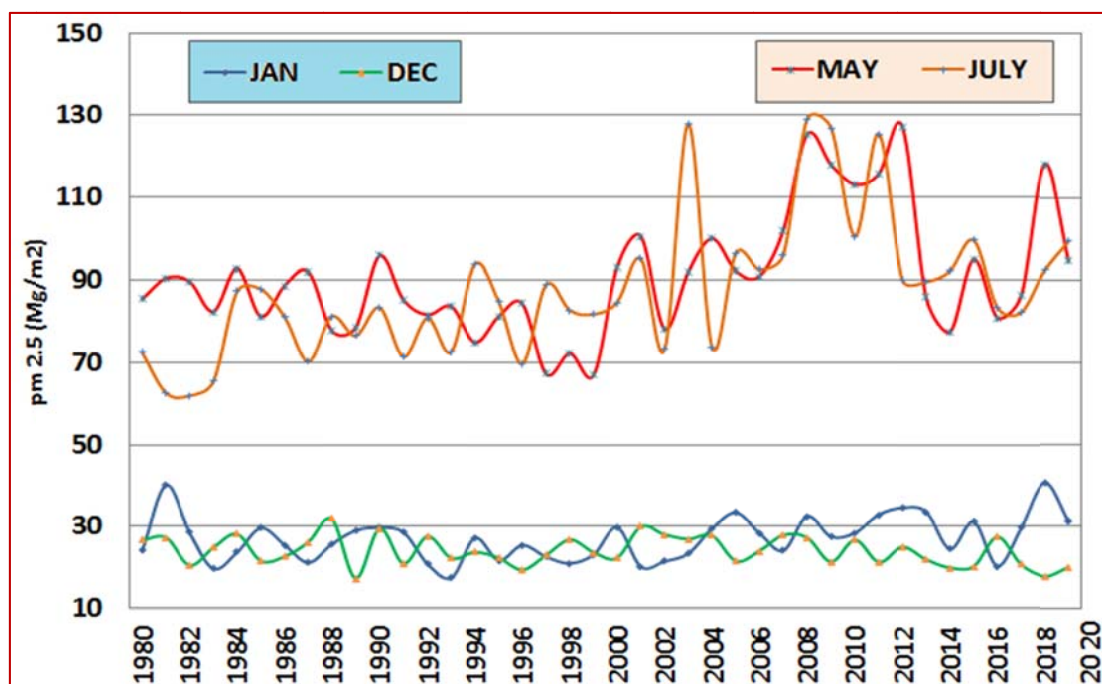
معلق PM<sub>2.5</sub> موجود در جو به وسیله بارندگی باعث کاهش تراکم ستونی ذرات معلق در این دوره از سال باشد (شکل ۵). بررسی درصد فراوانی تراکم ستونی ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> ماهانه در نمودار ستونی، به خوبی تبیین کننده تفاوت معنادر ماهانه تراکم ستونی ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> در جو ایران است. بر اساس این نمودار ماه می با ۱۳ درصد و ماه دسامبر با ۳ درصد بیشترین/کمترین درصد میانگین ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> را به خود اختصاص داده‌اند. بدین مفهوم که مقدار تراکم ستونی ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> در ماه بیشینه بیش از ۴ برابر در ماه کمینه است. در این میان می توان به مقادیر بیشینه ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> در ماه های جولای ۲۰۰۴، می ۲۰۱۲ و می ۲۰۱۹ اشاره کرد که در برخی از این ماهها میزان ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> به ۱۳۰Mg/m<sup>2</sup> رسیده است (شکل ۶).

۲-۳. توزیع ماهانه

بررسی میانگین ماهانه تراکم ستونی ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> جو ایران در شکل های ۵ تا ۷ ترسیم شده است. در مجموع، بیشترین تراکم ستونی ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> (۹۰/۸Mg/m<sup>2</sup>) و کمترین مقدار آن (۲۴/۲ Mg/m<sup>2</sup>) به ترتیب در ماه های می و دسامبر رخ می دهد. پس از ماه می تراکم ستونی ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> در ماه های آوریل و جولای با میانگین ۸۷/۳Mg/m<sup>2</sup> برآورد شد. به طور کلی تراکم ستونی ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> جو ایران در دوره گرم سال (از ماه مارس تا سپتامبر) بالا می باشد. ولی از ماه اکتبر تا فوریه به دلیل افزایش میزان بارندگی، میانگین ماهانه تراکم ستونی ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> کاهش قابل ملاحظه ای می یابد. احتمال می رود انسجام ذرات سطحی خاک به دلیل افزایش رطوبت و زدایش حجم زیادی از ذرات



شکل ۵. نمودار میانگین ماهانه بارش و ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> در گستره جو ایران (۲۰۱۸-۱۹۸۰).



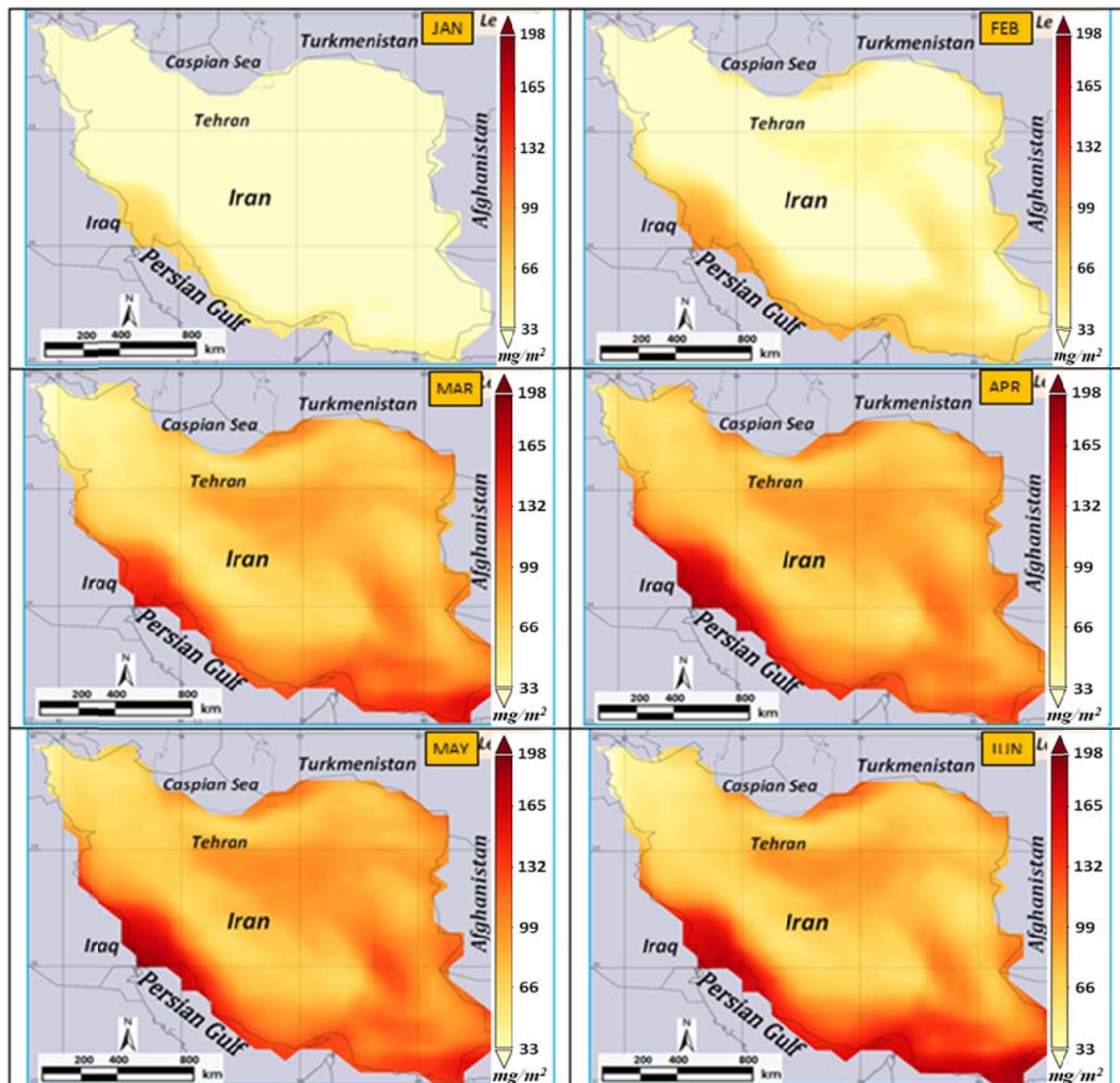
شکل ۶. سری زمانی ماه‌های کمینه و بیشینه ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در گستره جو ایران (۱۹۸۰-۲۰۱۸).

می‌کند. مهبیایی مکانیسم‌های منجر به ناپایداری هوا و فراوانی وقوع رویدادهای گردوغباری در این دوره از سال، در تمامی گستره ایران و نواحی بیابانی همجوار افزایش یافته و شرایط را برای افزایش تراکم ستونی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در ماه‌های مذکور ایجاد می‌کند. با شروع فصل بارندگی از ماه اکتبر و افزایش مقدار آن در ماه‌های پیش رو (نوامبر، دسامبر، ژانویه، فوریه و مارس)، تراکم ستونی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در تمامی گستره ایران به‌علت افزایش رطوبت و انسجام ذرات قشر سطحی خاک از یک‌سو و عبور سامانه‌های جوی از سوی دیگر، شرایط محیطی و هواشناسی را برای کاهش غلظت ذرات معلق  $PM_{2.5}$  فراهم می‌کند. به‌طوری که بیشینه تراکم ستونی ذرات معلق در این ماه‌ها به‌ندرت به  $66 Mg/m^2$  می‌رسد. در این ماه‌ها نیز، نواحی بیشینه تراکم ستونی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  منطبق بر نواحی بیشینه ماه‌های گرم سال است. به‌طور خاص دو منطقه ساحلی جنوب و جنوب‌غرب ایران به‌ویژه در ماه‌های گرم سال از تمرکز بالای ذرات معلق  $PM_{2.5}$  برخوردار می‌باشند. مناطق خشک و

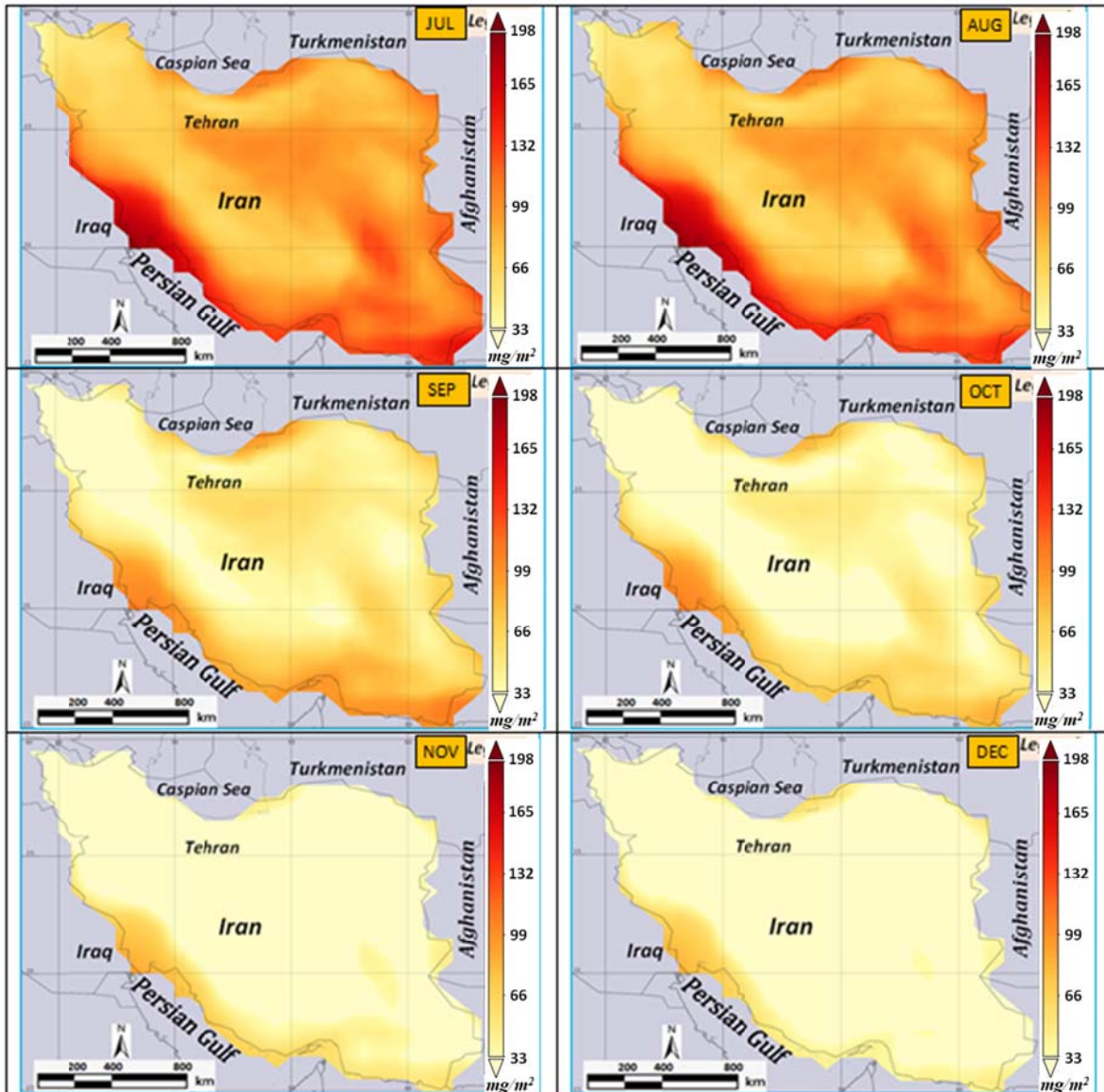
تحلیل توزیع مکانی میانگین ماهانه تراکم ستونی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  نشان می‌دهد که بیشینه تراکم ستونی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  (تا  $198 Mg/m^2$ ) در ماه‌های آوریل تا آگوست بر فراز ناحیه به‌هم پیوسته‌ای از جنوب تا جنوب‌غرب، بخشی از نواحی شرقی و مرکزی ایران و ناحیه مجاور شرق دریای خزر رخ می‌دهد. در همین ایام کمینه تراکم ستونی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  بر فراز ناحیه کوهستانی البرز و زاگرس از  $33 Mg/m^2$  تا  $66 Mg/m^2$  متغیر است. نواحی کوهستانی به‌دلیل ارتفاع نسبتاً زیاد نسبت به سطح دریا، ماهیت فیزیکی سطوح خود، توپوگرافی پیچیده به‌همراه پوشش گیاهی مناسب و برخورداری از بارش بیشتر، پتانسیل کمتری در گسیل ذرات معلق به درون جو دارند. در ماه‌های گرم سال، عوامل متعددی از قبیل گرمایش ناشی از تابش عمودی تر خورشید، خشکی مفرط سطح خاک و از هم گسیختگی یا عدم انسجام ذرات سطحی ریزدانه، شرایط لازم را برای برداشت و انتقال هرچه بیشتر ذرات معلق  $PM_{2.5}$  از کانون‌های داخلی و خارجی (فرامرزی) به جو ایران فراهم

دادند، مناطق جنوب و جنوب غرب ایران در ماه های گرم سال به دلیل خشکی هوا از یک سو و افزایش هواویزهای ورودی با منشأ نواحی بیابانی خارج از مرز جغرافیایی ایران از سوی دیگر، از تمرکز بالای ذرات معلق برخوردار می باشند (شکل های ۷ و ۸).

نیمه خشک واقع در نواحی جنوبی و جنوب غرب ایران به دلیل خشکی هوا، درجه حرارت بالا و کمبود بارش، پتانسیل بالاتری برای انتقال ذرات معلق از سطح خاک های خشک ریزدانه و منفصل به درون جو دارند. احمدی و همکاران (۱۳۹۸) نیز در تأیید نتایج به دست آمده نشان



شکل ۷. نقشه های توزیع فضایی میانگین ماهانه ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در گستره جو ایران (۲۰۱۸-۱۹۸۰).



شکل ۸. نقشه‌های توزیع فضایی میانگین ماهانه ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در گستره جو ایران (۲۰۱۸-۱۹۸۰).

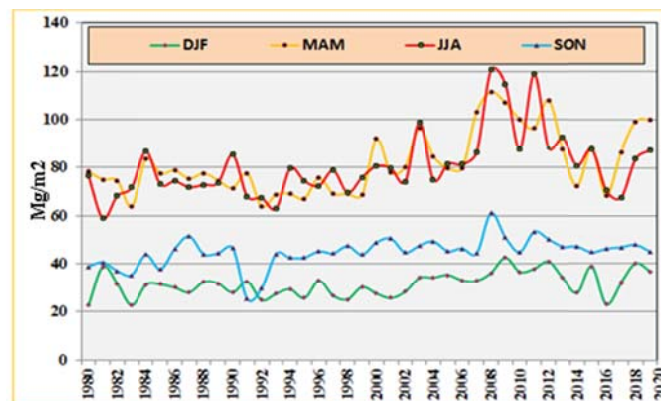
### ۳-۳. توزیع فصلی

شکل‌های ۹ و ۱۰ تراکم ستونی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  را برای فصول بهار (ماه‌های مارس، آوریل، می یا MAM)، تابستان (ژوئن، جولای، آگوست یا JJA)، پاییز (سپتامبر، اکتبر، نوامبر یا SON) و زمستان (دسامبر، ژانویه و فوریه یا DJF) نشان می‌دهد. بر اساس این شکل مقدار ذرات معلق  $PM_{2.5}$  به ترتیب از بیشترین به کمترین میزان فصلی شامل فصل تابستان (JJA)، بهار (MAM)، پاییز (SON) و زمستان (DJF) می‌باشد. توزیع مکانی تراکم ستونی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در ایران نشان می‌دهد که در فصل تابستان،

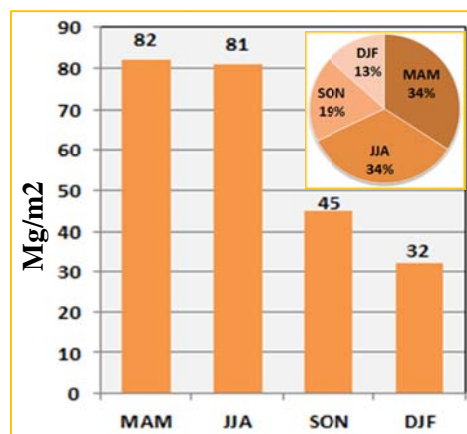
بیشینه تراکم ستونی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در نواحی جنوب‌غرب و جنوب‌ایران ( $198 \text{ mg/m}^3$ ) و در اولویت‌های بعدی نواحی شرقی و مرکزی کشور و ناحیه مجاور شرق دریای خزر تا به  $132 \text{ mg/m}^3$  اتفاق می‌افتد. کمینه تراکم ستونی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در این فصل منطبق بر ناحیه کوهستانی زاگرس و البرز برآورد شد. بالا بودن تراکم ستونی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  فصل تابستان در کل گستره ایران را می‌توان به عواملی از قبیل خشکی مفرط سطح خاک ناشی از عدم بارندگی، تابش شدید آفتاب، از هم گسیختگی انسجام خاک سطحی و فراهم

فرایندی می‌تواند شرایط محلی و فرامحلی را برای خیزش و انتقال ذرات معلق  $PM_{2.5}$  و افزایش تراکم ستونی آن در ایران فراهم کند. در فصل پاییز گرچه تراکم ستونی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  کاهش قابل‌ملاحظه‌ای یافته است ولی همچنان تراکم بیشینه ذرات معلق بر جنوب‌غرب، جنوب، بخش‌های از شرق ایران و ناحیه مجاور شرق دریای خزر تمرکز دارد. با آغاز فصل پاییز روزهای بارندگی در سرتاسر ایران افزایش یافته و بر تعداد آنها از جنوب به شمال افزوده می‌شود. افزایش میزان بارندگی از یک‌سو منجر به کاهش انتشار ذرات معلق از سطح زمین به درون جو و از سوی دیگر منجر به نشست (رسوب تر) درصد زیادی از ذرات معلق جو به سطح زمین شده و کاهش غلظت آن را به دنبال دارد. تداوم و تقویت هرچه بیشتر این شرایط در فصل زمستان، زمینه‌ساز برخورداری این فصل از حداقل مقدار ذرات معلق در میان سایر فصول سال می‌شود (شکل‌های ۱۰ و ۱۱).

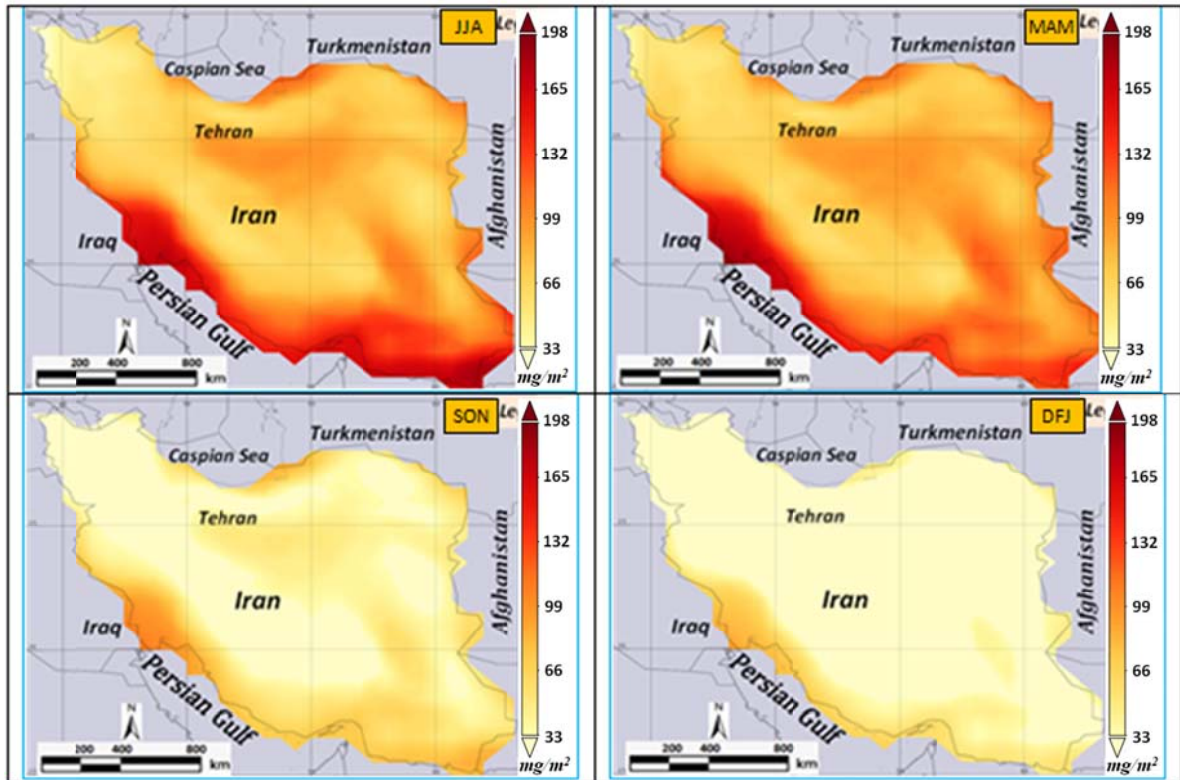
بودن شرایط محیطی (خشک، شوره‌زار و عاری از پوشش گیاهی بودن بخش وسیعی از ایران) و اقلیمی برای خیزش ذرات ریز معلق به درون جو نسبت داد. در مجموع، تابستان ایران در گستره وسیعی از کشور به‌ویژه در نواحی نیمه جنوبی و شرقی کشور از تراکم ستونی بالای ذرات معلق  $PM_{2.5}$  برخوردار است. فقط در نواحی کوهستانی به‌خاطر شرایط خاص فیزیکی و زمین‌شناسی سطح زمین غلظت کمتری از تراکم ستون ذرات معلق  $PM_{2.5}$  مشهود است. تراکم ستونی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در فصل بهار انطباق بسیار خوبی با الگوی پراکنش فضایی فصل تابستان دارد. بدین مفهوم که نواحی بیشینه و کمینه همان نواحی هستند که در فصل تابستان معرفی شده‌اند. دلایل بالا بود تراکم ستونی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در فصل بهار را می‌توان ناشی از تداوم ورود و حاکمیت الگوهای ناپایدار جوی از یک‌سو و از سوی دیگر تشدید تابش قائم آفتاب بر بخش‌های وسیعی از گستره جغرافیایی ایران دانست. چنین



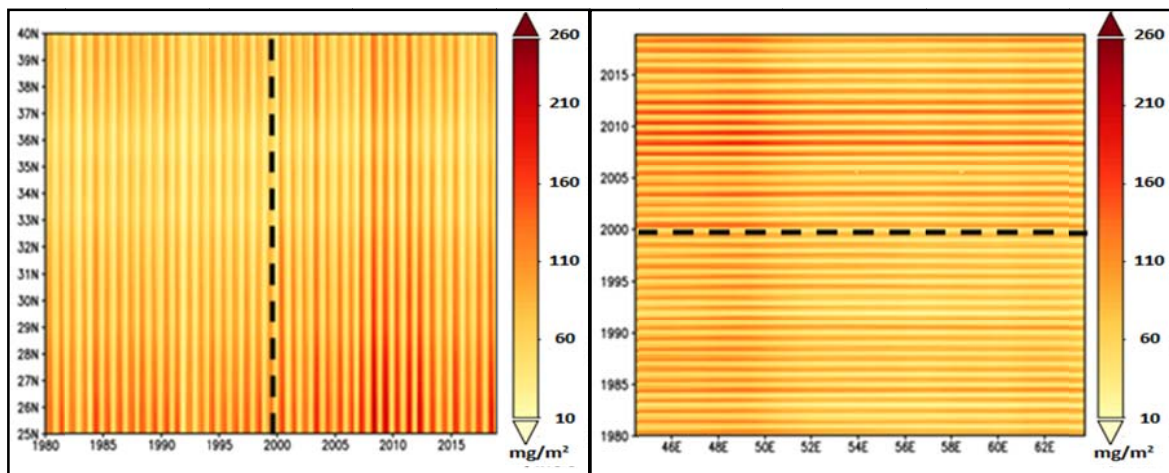
شکل ۹. سری زمانی فصلی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در گستره‌ی جو ایران (۲۰۱۸-۱۹۸۰).



شکل ۱۰. نمودار میانگین فصلی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در گستره جو ایران (۲۰۱۸-۱۹۸۰).



شکل ۱۱. نقشه‌های توزیع فضایی میانگین فصلی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در گستره جو ایران (۲۰۱۸-۱۹۸۰).



شکل ۱۲. نمودار سری زمانی هوف مولر ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در جو ایران: الف) طول جغرافیایی و زمان، ب) عرض جغرافیایی و زمان. طی دوره آماری (۲۰۱۸-۱۹۸۰).

### ۳-۴. نمودارهای هوف مولر

در اغلب مطالعات هم‌دید و به‌ویژه شناسایی و ردیابی الگوهای پیوند از دور که به الگوهای کلان‌مقیاس جوی-اقیانوسی مشهور شده‌اند، از نمودارهای هوف مولر استفاده می‌شود. نمودارهای هوف مولر در واقع نیم‌رخ‌های عمودی و افقی فراسنج‌های جوی محسوب می‌شوند که برای

ارزیابی یا تشخیص رفتار یک متغیر جوی در امتداد طول و عرض جغرافیایی در طی زمان به کار می‌روند. در نمودارهای هوف مولر ابعاد چهارگانه ژئوفیزیکی (طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی، تراز و زمان) دوبه‌دو با هم متغیر یا ثابت هستند که از ترکیب چهار بُعد به صورت دوبه‌دو، شش حالت یا نوع از نمودارهای هوف مولر

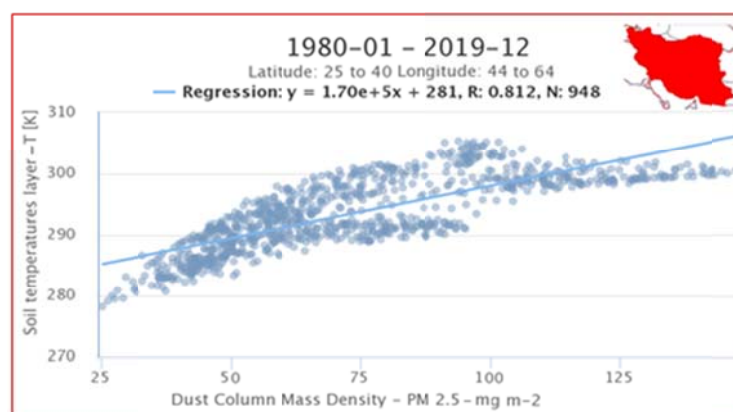
### ۳-۵. بررسی ارتباط میان ذرات معلق $PM_{2.5}$ با متغیرهای محیطی

دمای سطح زمین، رطوبت سطح خاک و بارش از مهم‌ترین شاخص‌ها در اندرکنش‌های میان سطح زمین-جو می‌باشند. به نظر می‌رسد این سه متغیر نیز (دمای سطح خاک  $LST$  (Land Surface Temperature) رطوبت سطح خاک  $SSM$  (Surface Soil Moisture) و بارش، تأثیر به‌سزایی در شدت و وسعت رویدادهای گردوغباری و انتشار غبار معدنی ناشی از آنها به درون جو را دارا بوده و دارای تغییرات وابسته به هم نیز می‌باشند. در این بخش از تحقیق، میزان همبستگی میان ذرات معلق  $PM_{2.5}$  (متغیر وابسته) به‌طور جداگانه با فراسنج‌های مستقل دمای سطح خاک رطوبت سطح خاک و بارش، با استفاده از آزمون همبستگی پیرسون با سطح اطمینان  $95\%$  ( $\alpha=0/05$ ) در نظر گرفته شده‌است. قبل از انجام آزمون همبستگی، نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف تأیید شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، مقدار سطح معناداری برای هر سه متغیر دمای سطح خاک، رطوبت سطح خاک و بارش بسیار کوچک‌تر از مقدار خطا  $0/05$  بوده و در نتیجه وجود رابطه معنادار میان ذرات معلق با هر سه متغیر موردتأیید قرار گرفت. بررسی ضریب همبستگی میان ذرات معلق  $PM_{2.5}$  و دمای سطح خاک نشان‌دهنده رابطه خطی مستقیم (مثبت) بین این دو متغیر است، به‌طوری که در میان مقادیر ماهانه دمای سطح خاک و مقادیر ماهانه ذرات معلق  $PM_{2.5}$ ، ضریب همبستگی برابر با  $(R=81\%)$  و میزان ضریب تعیین برابر با  $(=65R^2\%)$  برقرار می‌باشد. این میزان همبستگی به‌خوبی تبیین‌کننده اثرگذاری نسبتاً زیاد دمای سطح خاک بر خیزش و انتشار ذرات معلق  $PM_{2.5}$  به جو ایران می‌باشد. بدین مفهوم که یک رابطه خطی مثبت معناداری (همبستگی قوی) میان دمای سطح خاک و مقدار ذرات معلق  $PM_{2.5}$  موجود در جو ایران حاکم است (شکل ۱۳).

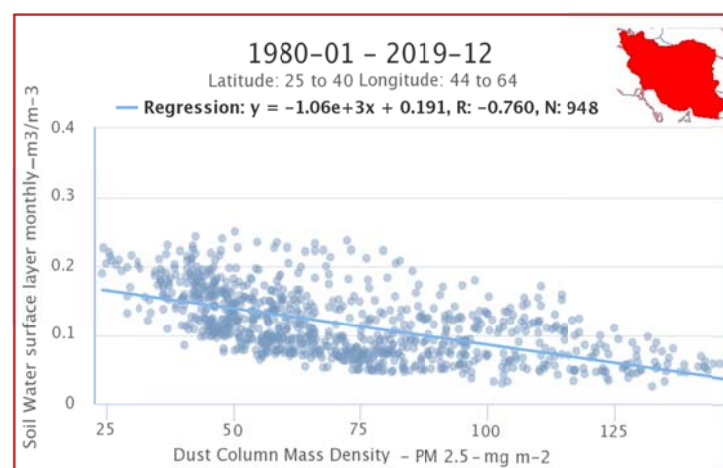
قابل ترسیم می‌باشد (هوف مولر، ۱۹۴۹). شکل ۱۲ نمودارهای هوف مولر مربوط به میانگین سالانه مقادیر ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در گستره جو ایران را برای دو حالت طول جغرافیایی و زمان (شکل ۱۲-الف) و همچنین عرض جغرافیایی و زمان (شکل ۱۲-ب) نشان می‌دهد. بر اساس هردو نمودار، در طی دوره آماری مورد مطالعه افت و خیزهای چشم‌گیری در میزان ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در گستره جو ایران مشهود است اما غلظت آن در نیمه دوم سال‌های آماری (به‌خصوص از سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۳) بیشتر است. از جهتی دیگر بر اساس نمودار هوف مولر شکل ۱۲-الف، تراکم ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در نیمه غربی ایران در مقایسه با نیمه شرقی بیشتر است. غرب ایران هر ساله به‌طور مکرر تحت تأثیر رویدادهای گردوغباری قرار گرفته و این ناحیه به‌لحاظ نزدیکی به مناطق منشأ گردوغبار در غرب آسیا (بیابان‌های عراق سوریه و شمال عربستان)، شرایط مستعدتری برای انتشار ذرات معلق به درون جو و افزایش غلظت ذرات معلق  $PM_{2.5}$  دارد. از جهتی دیگر، نحوه استقرار رشته‌کوه زاگرس به‌همراه توپوگرافی پیچیده آن، مانع پیشروی بیشتر گردوغبار به نواحی مرکزی و شرقی ایران شده و با تجمع گردوغبار در نواحی پست مجاور و دامنه‌های غربی خود، افزایش تراکم ذرات معلق  $PM_{2.5}$  را در این بخش از کشور سبب می‌شود؛ همچنین در نمودار هوف مولر نوع دوم (شکل ۱۲-ب)، پراکنش ذرات معلق  $PM_{2.5}$  از جنوب به شمال ایران کاهش می‌یابد به‌طوری که حداکثر مقدار آن در عرض‌های جغرافیایی پایین (کرانه جنوبی ایران) و به‌خصوص در راستای  $44$  تا  $50$  درجه طول شرقی (جنوب غرب ایران) مشهود است. عوامل متعددی از جمله خشکی منطقه، خاک‌های سست ریزدانه و عمدتاً عاری از پوشش گیاهی، شرایط اقلیمی مساعدی را برای وقوع گردوغبار و انتشار ذرات معلق  $PM_{2.5}$  به درون جو کرانه‌های جنوبی ایران فراهم می‌آورد.

تغییر رطوبت سطح خاک و کیفیت هوا می‌شود. با این تفاسیر، میزان بارش بر مقادیر ذرات معلق وارده به جو مؤثر خواهد بود. برحسب رابطه رگرسیون خطی پیرسون، میان مقدار بارش با غلظت ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در جو ایران رابطه منفی معناداری برقرار است به طوری که میزان همبستگی  $(R = -۰.۶۱)$  و ضریب تعیین میان این دو متغیر  $(R^2 = -۰.۳۷)$  می‌باشد (شکل ۱۵ و ۱۶-ج). در فرایند تحقیق مشخص شد، در ماه‌های سرد سال که مقدار بارش بیشتر و دمای هوا پایین‌تر می‌باشد، غلظت ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در جو ایران کاهش می‌یابد. ولی در ماه‌های گرم سال که کاهش شدید مقدار بارش و افزایش قابل ملاحظه دما بر گستره ایران مستولی می‌شود، فراهم شدن شرایط، محیط سطحی را برای رخداد رویدادهای گردوغبار و انتشار هرچه بیشتر ذرات معلق به درون جو ایران فراهم می‌کند.

همچنین بررسی ضریب همبستگی میان ذرات معلق  $PM_{2.5}$  و رطوبت سطح خاک نشان‌دهنده رابطه خطی معکوس معنادار (منفی) در میان دو متغیر می‌باشد. مقدار عددی ضریب همبستگی در بین این دو متغیر برابر با  $(R = -۰.۷۶)$  و میزان ضریب تعیین برابر با  $(R^2 = -۰.۵۸)$  می‌باشد. بدین مفهوم که افزایش رطوبت سطح خاک منجر به کاهش میزان ذرات معلق  $PM_{2.5}$  موجود در جو ایران می‌شود یا به عبارتی دیگر هرچه از میزان رطوبت سطح خاک کاسته شود احتمال انتشار ذرات معلق  $PM_{2.5}$  به درون جو نیز افزایش می‌یابد (شکل ۱۴). همچنین به دلیل اثرگذاری بارش بر میزان رطوبت سطح خاک از یک سو و از سوی دیگر تأثیر آن بر کیفیت هوا، تبیین ارتباط میان ذرات معلق  $PM_{2.5}$  با متغیر بارش ضرورت پیدا می‌کند. بارش یکی از فراسنج‌های هواشناختی است که تغییرات آن منجر به

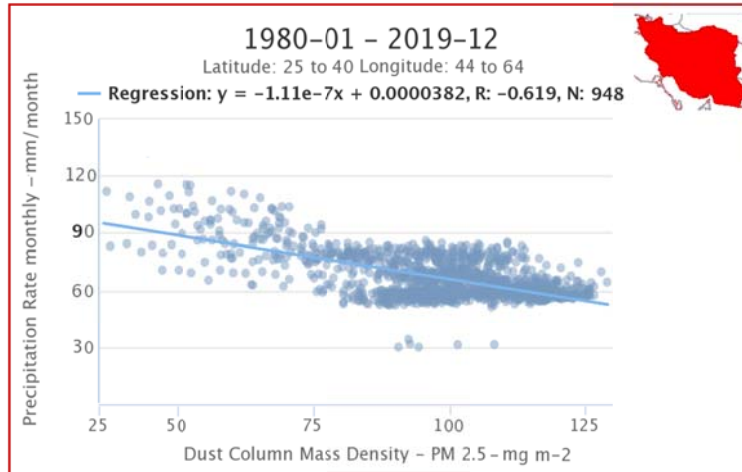


شکل ۱۳. همبستگی (معادله خط رگرسیون) بین دو متغیر ذرات معلق  $PM_{2.5}$  و دمای سطح خاک در گستره جو ایران (۲۰۱۹-۱۹۸۰).

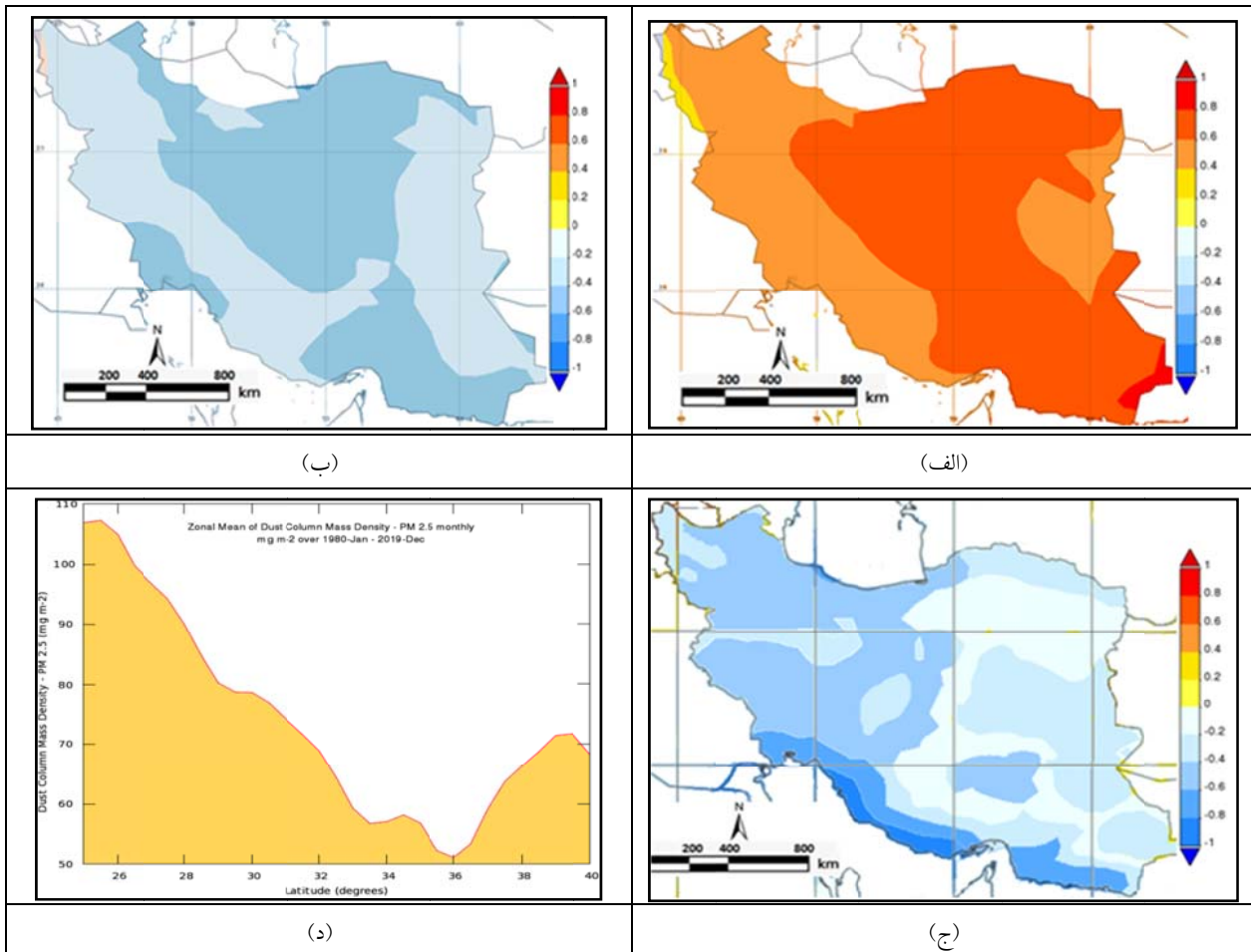


شکل ۱۴. همبستگی (معادله خط رگرسیون) بین دو متغیر ذرات معلق  $PM_{2.5}$  و رطوبت سطح خاک در گستره جو ایران (۲۰۱۹-۱۹۸۰).





شکل ۱۵. همبستگی (معادله خط رگرسیون) بین دو متغیر ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> و نرخ بارش ماهانه در گستره جو ایران (۲۰۱۹-۱۹۸۰).



شکل ۱۶. همبستگی فضایی میان ذرات معلق PM<sub>2.5</sub>: (الف) دمای سطح خاک، (ب) رطوبت سطح خاک، (ج) بارش و (د) توزیع مداری ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> در گستره جو ایران طی دوره آماری (۲۰۱۹ - ۱۹۸۰).

پهنه به هم پیوسته‌ای منطبق بر جنوب شرق، ایران مرکزی و شمال شرق ایران حاکم می‌باشد (شکل ۱۶-الف). همبستگی مکانی میان ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> و میزان رطوبت

به‌لحاظ مکانی نیز همبستگی مکانی مستقیم (مثبت) میان ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> و میزان دمای سطح خاک در کل گستره ایران مشهود است، اما بیشترین میزان همبستگی در

سطح خاک در گستره ایران بیانگر وجود رابطه معنادار منفی در کل گستره ایران به خصوص با همبستگی بالاتری در سه ناحیه مجزا (بخش‌هایی از جنوب ایران، جنوب غرب ایران و ناحیه گسترده‌ای از ایران مرکزی تا شمال ایران) مشهود می‌باشد (شکل ۱۶-ب). همبستگی مکانی ذرات مذکور با بارش نیز گویای رابطه مکانی قوی و منفی میان این دو متغیر می‌باشد به طوری که میزان همبستگی در کرانه ساحلی جنوب از مقدار بالاتری نسبت به سایر نواحی برخوردار است. این شرایط به خوبی اثر بارش را بر نواحی بیشینه انتشار ذرات معلق به درون جو مشخص کرده و نقش بارندگی را در کاهش غلظت ذرات معلق جوی آشکار می‌کند (شکل ۱۶-ج). از دیگر نتایج این مطالعه می‌توان به نقش عوامل مکانی در توزیع جغرافیایی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  اشاره کرد، که در این میان عرض جغرافیایی بیشترین تأثیر را در توزیع مکانی داشته است. بدین مفهوم که در عرض‌های پایین جغرافیایی ذرات معلق از تمرکز بیشتری برخوردار بوده و با حرکت به سمت عرض‌های بالاتر غلظت آن کاهش می‌یابد (شکل ۱۶-د).

##### ۵. نتیجه گیری

ذرات معلق کوچک‌تر از  $2/5$  میکرون ( $PM_{2.5}$ ) یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های هوا هستند که رویدادهای گردوغبار یکی از مهم‌ترین عوامل طبیعی انتشار آن است. مطالعه حاضر به ارزیابی مقدار و پراکنش فضایی-زمانی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  ناشی از رویدادهای گردوغبار در جو ایران بر اساس محصولات مدل مبتنی بر داده‌های سنجش از دور MERRA-2 پرداخته است. نتایج نشان داد سامانه MERRA-2 در پایش غلظت ذرات معلق  $PM_{2.5}$  جو ایران، در مقایسه با داده‌های مشاهداتی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  مربوط به ایستگاه‌های پایش کیفی هوا کارایی بالایی دارد. میانگین ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در گستره جو ایران  $61/3 \text{ Mg/m}^2$  است که بیانگر غلظت بالای ذرات مذکور

در جو ایران در مقایسه با سایر نقاط جهان از جمله آمریکا (بوچارد و همکاران، ۲۰۱۶)، تایوان (پرووانسا و همکاران، ۲۰۱۷a) و اروپا (پرووانسا و همکاران، ۲۰۱۷b) می‌باشد. از سوی دیگر بیشترین میزان تمرکز ذرات مذکور در جنوب غرب ایران، نواحی ساحلی جنوب، نواحی شرقی، بیابان‌های ایران مرکزی و بخشی از شمال ایران و کمترین میزان بر فراز ارتفاعات زاگرس برآورد شده است. توزیع فضایی میزان ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در جو ایران به عواملی از قبیل فصول سال، بارندگی و دیگر فراسنج‌های اقلیمی (دمای سطح زمین، رطوبت سطح خاک و...) بستگی دارد. بدین مفهوم در ماه‌ها و فصول گرم سال که با افزایش دما، کاهش بارش و به تبع آن کاهش رطوبت سطح خاک همراه می‌باشد، شرایط برای شکل‌گیری رویدادهای گردوغبار انتشار ذرات معلق به جو ایران مهیاتر است. به طوری که در میان ماه‌های سال، ماه می/دسامبر و در میان فصول، تابستان/زمستان از بیشترین/کمترین مقدار غلظت ستونی ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در جو ایران برخوردار بوده‌اند. تحلیل مقادیر همبستگی مبتنی بر رابطه رگرسیون خطی پیرسون میان ذرات معلق  $PM_{2.5}$  جو ایران (متغیر پاسخ) با برخی از فراسنج‌های هواشناختی (متغیرهای مستقل) از قبیل بارش، رطوبت سطح خاک و دمای سطح خاک در گستره جغرافیایی ایران، به خوبی بیانگر معناداری ارتباط میان این متغیر با فراسنج‌های مذکور است. به طوری که در این میان؛ مقدار همبستگی بین ذرات معلق  $PM_{2.5}$  جو ایران با دمای سطح خاک حاکی از وجود رابطه معنادار مثبت ( $R= 81\%$ )، با رطوبت سطح خاک رابطه معنادار منفی قوی ( $R= -76\%$ ) و با نرخ بارش ماهانه نیز رابطه معنادار منفی ( $R= -61\%$ )، بوده است. این بدان معناست که غلظت ذرات معلق  $PM_{2.5}$  جو ایران، به شدت تحت تأثیر فراسنج‌های محیطی بوده به طوری که در تجزیه و تحلیل سری زمانی وجود رفتار فصلی بیانگر الگوی زمانی نسبتاً پایدار از پراکنش ذرات معلق  $PM_{2.5}$  در جو ایران است.

## مراجع

- احمدی، م. و داداشی رودباری، ع.، ۱۳۹۸، توزیع زمانی- مکانی ذرات معلق (PM<sub>2.5</sub>) با رویکرد محیط محیط زیست در غرب و جنوبغرب ایران بر مبنای سنجنده‌های MODIS، MISR، SeaWifs، م. محیط شناسی، ۴۵(۳)، ۳۹۴-۳۷۹.
- احمدی، م.، شکبیا، ع. و داداشی رودباری، ع.، ۱۳۹۸، بررسی نقش شاخص‌های پوشش گیاهی و مؤلفه‌های جغرافیایی مکان بر عمق نوری هواپزهای فصلی ایران، م. فیزیک زمین و فضا، ۴۵، ۲۳۳-۲۱۱.
- پاکدل خشمخی، ح.، طاهری تیزرو، ع.، معروفی، ص. و وظیفه دوست، م.، ۱۳۹۳، ارزیابی محصول بارش و رواناب مدل همسان‌سازی جهانی GLDAS در حوضه پلرود، دومین همایش ملی مهندسی و مدیریت کشاورزی و محیط زیست و منابع طبیعی پایدار، تهران، مرکز همایش‌های بین‌المللی دانشگاه شهید بهشتی.
- حجازی، ا.، مباشری، م. و احمدیان مرج، ا.، ۱۳۹۱، تهیه نقشه توزیع مکانی ذرات معلق (PM<sub>2.5</sub>) در هوای شهر تهران، با استفاده از داده‌های سنجنده مودیس، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۶، ۱۷۸-۱۶۱.
- حسینی، س. ا. و رستمی، د.، ۱۳۹۷، واکاوی و ردیابی پدیده گردوغبار در جنوب و جنوب شرق ایران با استفاده از اصول سنجنش ازدور و مدل HYSPLIT، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال پنجم، شماره ۳، ۱۰۹-۱۰۳.
- خوش‌سیما، م.، ثابت‌قدم، س. و علی‌اکبری بیدختی، ع.، ۱۳۹۴، تخمین تمرکز ذرات معلق (PM<sub>10</sub>) در جو با استفاده از داده‌های سنجنش از دور ماهواره‌ای و زمین پایه و فراسنج‌های هواشناختی: کاربری شبکه عصبی مصنوعی، م. فیزیک زمین و فضا، ۴۱، ۵۱۰-۴۹۹.
- رئیس‌پور، ک.، ۱۳۹۷، تحلیلی بر رویدادهای گردوغبار با استفاده از پایش ماهواره‌ای و تحلیل همدیدی در جنوب غرب ایران، م. پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۱(۱)، ۹۳-۷۴.
- رئیس‌پور، ک.، ۱۳۹۸، بررسی نقش بیابان قره‌قوم ترکمنستان به‌عنوان مهم‌ترین خاستگاه فرامنطقه‌ای طوفان‌های گردوغبار در استان خراسان رضوی، دومین کنفرانس ملی آب‌وهواشناسی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد.
- شاهسونی، ع.، یاراحمدی، م.، جعفرزاده، ن.، نعیم‌آبادی، ا.، محمودیان، م. و صاکی، ح.، ۱۳۸۹، اثرات طوفان‌های گردوغباری بر سلامت و محیط زیست، م. دانشگاه علوم پزشکی خراسان شمالی، ۲(۴)، ۵۶-۴۵.
- غلامپور، ا.، نبی‌زاده، ر.، حسنونند، م. ص.، تقی‌پور، ح.، فریدی، س.، و امیرحسین، م.، ۱۳۹۳، بررسی غلظت ذرات معلق هوای آزاد و ارزیابی اثرات بهداشتی متناسب به آنها در شهر تبریز، م. سلامت و محیط، ۴(۴)، ۵۵۶-۵۴۱.
- فرجی، ز.، وظیفه دوست، م.، شکبیا، ع. و کاویانی، ع.، ۱۳۹۳، ارزیابی اجزای بیلان آب سطحی در مناطق فاقد آمار با استفاده از مدل جهانی سطح زمین GLDAS، (مطالعه موردی: دشت نیشابور، خراسان رضوی)، دومین همایش ملی بحران آب، دانشگاه شهرکرد.
- فلاح ززولی، م.، وفایی نژاد، ع.، خیرخواه زرکش، م. و احمدی دهکا، ف.، ۱۳۹۷، منشاء‌یابی گردوغبار غرب و جنوب غرب ایران و تحلیل سینوپتیکی آن با استفاده از سنجنش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، سنجنش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۵(۴)، ۷۷-۶۱.
- گودرزی، غ.، گراوندی، س.، سعیدی مهر، س.، محمدی، م. ج. و وثوقی نیری، م.، ۱۳۹۴، برآورد اثرات بهداشتی ناشی از مواجهه با آلاینده ذرات معلق کمتر از ۱۰ میکرون با استفاده از مدل Air Q در شهر اهواز، سلامت و محیط زیست، ۸(۱)، ۱۲۶-۱۱۷.
- مشعلی، ه. و برزگر، گ.، ۱۳۹۸، تأثیر ذرات معلق هوا (PM<sub>2.5</sub>) بر میزان ابتلا کودکان به اوتیسم، دوازدهمین همایش تازه‌های علوم بهداشتی ایران،

- تهران. غلظت‌های ذرات ریز (PM2.5) در هوای شهرهای هادثی، م.، شاهسونی، ع.، نامور، ز. و یاراحمدی، م.، ۱۳۹۷، روند تغییرات سالانه، فصلی، ماهانه و روزانه درگیر پدیده گردوغبار در ایران (۱۳۹۵-۱۳۹۳)، دومین همایش بین‌المللی گرد و غبار، دانشگاه ایلام.
- Akata, N., Hasegawa, H., Kawabata, H., Chikuchi, Y., Sato, T. and Ohtsuka, Y., 2007, Deposition of 137Cs in Rokkasho, Japan and its relation to Asian dust, *Journal of Environmental Radioactivity*, 95, 1-9.
- Bosilovich, M. G. R., Lucchesi, M. and Suarez, F., 2016, MERRA-2: File Specification. GMAO Office Note No. 9 (Version 1.1), 73 pp.
- Buchard, V., da Silva, A. M., Colarco, P. R., Darmenov, A., Govindaraju, R., Torres, O., Campbell, J. and Spurr, R., 2015, Using the OMI aerosol index and absorption aerosol optical depth to evaluate the NASA MERRA Aerosol Reanalysis, *Journal of Atmospheric Chemistry Physics*, 15, 5743-5760.
- Buchard, V., da Silva, A. M., Leduc, R. and Barrette, N., 2016a, Evaluation of PM surface concentrations simulated by Version 1 of NASA's MERRA Aerosol Reanalysis over Europe, *Journal of Atmospheric Pollution Research*, 132, 248-264.
- Buchard, V., da Silva, A.M., Randles, C.A., Colarco, P., Ferrare, R., Hair, J. and Winker, D., 2016b, Evaluation of the surface PM2.5 in Version 1 of the NASA MERRA Aerosol Reanalysis over the United States, *Journal of Atmospheric Environment*, 125, 100-111.
- Buchard, V., Randles, C.A., da Silva, A. M., Darmenov, A., Colarco, P. R., Govindaraju, R. and Yu, H., 2017, The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part II: Evaluation and case studies, *Journal of Climate*, 30, 6851-6872.
- Chien, L. C., Yang, C. H. and Yu, H. L., 2012, Estimated Effects of Asian Dust Storms on Spatiotemporal Distributions of Clinic Visits for Respiratory Diseases in Taipei Children (Taiwan), *Journal of Environmental Health Perspectives*, 120, 1215-20.
- Draxler, R. R., Gillette, D. A. and Heller, J., 2010, Estimating PM10 air concentrations from dust storms in Iraq, Kuwait and Saudi Arabia, *Journal of Atmospheric Environment*, 35, 4315-30.
- Evans, J., Van Donkelaar, A., Martin, R. V., Burnett, R., Rainham, D. G. and Birkett, N.J., 2013, Estimates of global mortality attributable to particulate air pollution using satellite imagery *Journal of Environment Research*, 120, 33-42.
- Flagan, R. C. and Seinfeld, 1988, *Fundamental of Air Pollution Engineering*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Franklin, M., Zeka, A. and Schwartz, J., 2007, Association between PM2.5 and all-cause and specific-cause mortality in 27 US communities. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 17(3), 279-87.
- Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M. J., Todling, R., Molod, A. and Takacs, L., 2017, The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2), *Journal of Climate*, 30 (14), 5419-5454.
- Geng, H., Meng, Z. and Zhang, Q., 2006, In vitro responses of rat alveolar macrophages to particle suspensions and water-soluble components of dust storm PM2.5, *Journal of Toxicology in Vitro*, 20, 575-84.
- Gherboudj, I. and Ghedira, H., 2016, Assessment of solar energy potential over the United Arab Emirates using remote sensing and weather forecast data, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 1210-1224.
- Gherboudj, I., Beegum, S. N. and Ghedira, H., 2017, Identifying natural dust source regions over the Middle-East and North-Africa: Estimation of dust emission potential, *Earth-science reviews*, 165, 342-355.
- Giannadaki, D., Pozzer, A. and Lelieveld, J., 2014, Modeled global effects of airborne desert dust on air quality and premature mortality, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 957-968.
- Goudi, A. S. and Middleton, N. J., 2011, Desert dust in the global system, Translated by: Dariush Yarahmadi, Lorestan University, Khorramabad.
- Griffin, D. W., 2007, Atmospheric movement of microorganisms in clouds of desert dust and implications for human health, *Journal of Oral Microbiology*, 20, 459-77.
- Griffin, D. W., Garrison, V. H., Herman, J. R. and Shinn, E. A., 2001, African desert dust in the Caribbean atmosphere, *Journal of microbiology and public health Aerobiological*, 17, 203-213.
- Groll, M., Opp, C. and Aslanov, I., 2013, Spatial and temporal distribution of the dust deposition in Central Asia results from a long-term monitoring program. *Aeolian Res.* 9: 49-62.
- Guo, J., He, J., Liu, H., Miao, Y., Liu, H. and Zhai, P., 2016, Impact of various emission control schemes on air quality using WRF-Chem during APEC China 2014, *Journal of Atmospheric Environment*, 140, 311-319.
- Hamidi, M., Kavianpour, M. R. and Shao, Y., 2012, Synoptic analysis of dust storms in the Middle East. *Asia-Pac. J. Atmospheric. Sci.* 49:279-286.
- He, J., Gong, S., Yu, Y., Yu, L., Wu, L., Mao, H. and Li, R., 2017a, Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014-2015 in major Chinese cities, *Journal of Environmental Pollution*, 223, 484-496.
- He, K., Yang, F., Ma, Y., Zhang, Q., Yao, X. and Chan, CK., 2017b, The characteristics of PM2.5

- in Beijing, China, *Journal of Atmospheric Environment*, 35, 4959-70.
- Hojati, S., Khademi, H., Faz Cano A. and Landi, A., 2012, Characteristics of dust deposited along a transect between central Iran and the Zagros Mountains. *Catena*. 88: 27-36. <http://lance-odis.eosdis.nasa.gov>.
- Hong, Y. C., Pan, X. C., Kim, S. Y., Park, K., Park, E. J. and Jin, X., 2010, Asian dust storm and pulmonary function of school children in Seoul, *Science of the Total Environment*, 408, 754-9.
- Hovmoller, E., 1949, The Trough and Ridge diagram, *Tellus*, 1:2, 62-66, DOI: 10.3402/tellusa.v1i2.8498.
- Jiang, J. H., Su, H., Zhai, C., Wu, L., Minschwane, K., Molod, A. M. and Tompkins, A. M., 2015, An assessment of upper troposphere and lower stratosphere water vapor in MERRA, MERRA2, and ECMWF reanalyzes using Aura MLS observations, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 120 (22), 11468-11485.
- Kang, J. H., Keller, J. J., Chen, C. S. and Lin, H. C., 2012, Asian dust storm events are associated with an acute increase in pneumonia hospitalization, *Journal of Annals of Epidemiology*, 22, 257-63.
- Kelly, F. J. and Fussell, J. C., 2012, Size, source and chemical composition as determinants of toxicity attributable to ambient particulate matter, *Journal of Atmospheric Environment*, 60, 504-26.
- Koster, R. D., McCarty, W., Coy, L., Gelaro, R., Merkova, D. and Wargan, K., 2016, MERRA-2 input observations: Summary and assessment, *Journal of Geophysical Research*, 105, 809-822.
- Kurosaki, Y. and Mikami, M., 2003, Recent frequent dust events and their relation to surface wind in East Asia, *Journal of Geophysical Research Letters*, 30, 421- 6.
- Kwon, H. J., Cho, S. H., Chun, Y., Lagarde, F. and Pershagen, G., 2012, Effects of the Asian dust events on daily mortality in Seoul, Korea, *Environment Research*, 90, 1-5.
- Léon, J. F. and Legrand, M., 2003, Mineral dust sources in the surroundings of the north Indian Ocean, *Journal of Geophysical Research Letters*, 30, 543-551.
- Li, Y., Gibson, J. M., Jat, P., Puggioni, G., Hasan, M. and West, J. J., 2010, Burden of disease attributed to anthropogenic air pollution in the United Arab Emirates: estimates based on observed air quality data, *Science of the Total Environment*, 408, 5784-93.
- Liu, C. M., Young, C. Y. and Lee, Y. C., 2006, Influence of Asian dust storms on air quality in Taiwan, *Science of the Total Environment*, 368, 884-897.
- Marx, S. A. and McGowan, H. A., 2014, Dust transportation and deposition in a super humid environment, West Coast, South Island, New Zealand. *Catena*. 59, 147-171.
- Meng, Z. and Zhang, Q., 2007, Damage effects of dust storm PM<sub>2.5</sub> on DNA in alveolar macrophages and lung cells of rats, *Journal of Food and Chemical Toxicology*, 45, 1368-1374.
- Molod, A., Takacs, L., Suarez, M. and Bacmeister, J., 2014, Development of the GEOS-5 Atmospheric General Circulation Model: Evolution from MERRA to MERRA2, *Geoscientific Model Development* 8 (5), 1339-1356.
- Molod, A., Takacs, L., Suarez, M. and Bacmeister, J., 2015, Development of the GEOS-5 atmospheric general circulation model: evolution from MERRA to MERRA2, *Journal of Geoscientific Model Development*, 8, 1339-1356.
- Moulin, C., Lambert, C. E., Dulac, F. and Dayan, U., 1997, Control of atmospheric export of dust from North Africa by the North Atlantic Oscillation, *Nature*, 387, 691-697.
- Naddafi, K., Hassanvand, M. S., Yunesian, M., Momeniha, F., Nabizadeh, R. and Faridi, S., 2012, Health impact assessment of air pollution in megacity of Tehran, Iran, *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 9(1), 1-7.
- Natsagdorj, L., Jugder, D. and Chung, Y., 2003, Analysis of dust storms observed in Mongolia during 1937-1999, *Journal of Atmospheric Environment*, 37, 1401-1411.
- O'Hara, S. L., Clarke, M. L. and Elatrash, M. S., 2006, Field measurements of desert dust deposition in Libya, *Journal of Atmospheric Environment*, 40, 3881- 97.
- Qin, W., Liu, Y., Wang, L., Che, H. and Zhang, M., 2018, Characteristic and driving factors of aerosol optical depth over mainland China during 1980-2017, *Journal of Remote sensing*, 10, 1064-1073.
- Randles, C. A., Da Silva, A. M., Buchard, V., Colarco, P. R., Darmenov, A., Govindaraju, R. and Shinozuka, Y., 2017, The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part I: System description and data assimilation evaluation, *Journal of Climate*, 30, 6823-6850.
- Rashki, A., Kaskaoutis, D. G., Rautenbach, C. J., Eriksson, P. G., Qiang, M. and Gupta, P., 2012, Dust storms and their horizontal dust loading in the Sistan region, Iran. *Aeolian Res.* 5: 51-62.
- Reichle, R., Liu, Q., Koster, R., Draper, C., Mahanama, S. and Partyka, G., 2017, Land Surface Precipitation in MERRA-2, *Journal of Climate*, 16, 245-258.
- Ren, Y., Li, H., Meng, F., Wang, G., Zhang, H., Yang, T., Li, W., Ji, Y., Bi, F. and Wang, X., 2019, Impact of emission controls on air quality in Beijing during the 2015 China Victory Day Parade: Implication from organic aerosols, *Journal of Atmospheric Environment*, 198, 207-214.
- Rienecker, M. M., Suarez, M. J., Gelaro, M., Ruddick, A. G., Sienkiewicz, M. and Woollen, J., 2011, MERRA: NASA's Modern-Era

- Retrospective Analysis for Research and Application, *Journal of Climate*, 3624-3648.
- Rodell, M., P. R., Houser, U., Jambor, J., Gottschalck, K., Mitchell, C.-J. and Meng, K., 2004, The Global Land Data Assimilation System, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85, 381-394.
- Sandstrom, T. and Forsberg, B., 2008, Desert dust: an unrecognized source of dangerous air pollution? *Journal of Epidemiology*, 19, 808-809.
- Shahsavani, A., Naddafi, K., Jafarzade Haghhighifard, N., Yunesian, M. and Nabizadeh, R., 2012, The evaluation of PM10, PM2.5, and PM1 concentrations during the Middle Eastern Dust (MED) events in Ahvaz, Iran, from april through september 2010, *Journal of Arid Environment*, 77, 72-83.
- Song, Z., Fu, D., Zhang, X., Wu, Y., Xia, X., He, J. and Che, H., 2018, Diurnal and seasonal variability of PM2.5 and AOD in North China plain: Comparison of MERRA-2 products and ground measurements, *Journal of Atmospheric Environment*, 191, 70-78.
- Taiwo, A. M., Harrison, R. M. and Shi, Z. A., 2014, review of receptor modeling of industrially emitted particulate matter, *Journal of Atmospheric Environment*, 97, 109-120.
- Teather, K., Hogan, N., Critchley, K., Gibson, M., Craig, S. and Hill, J., 2013, Examining the links between air quality, climate change and respiratory health in Qatar, *Avicenna Journal of Microbiology*, 6, 142-8.
- Wang, S., Wang, J., Zhou, Z. and Shang, K., 2005, Regional characteristics of three kinds of dust storm events in China, *Journal of Atmospheric Environment*, 39, 509-520.
- Wang, X., Huang, J., Ji, M. and Higuchi, K., 2008, Variability of East Asia dust events and their long-term trend, *Journal of Atmospheric Environment*, 42, 3156-3165.
- Wu, W. S., Purser, R. J. and Parrish, D. F., 2002, Three-dimensional variational analysis with spatially inhomogeneous covariance's, *Monthly Weather Review*, 130(12), 2905-2916.
- Zhang, X., Shi, P., Liu, L., Tang, Y., Cao, H. and Zhang, X., 2010, Ambient TSP concentration and dustfall in major cities of China: Spatial distribution and temporal variability, *Journal of Atmospheric Environment*, 44, 1641-16.

## Evaluation of Spatiotemporal Column Particulate Matter Concentration (PM<sub>2.5</sub>) Due to Dust Events in Iran Using Data from NASA / MERRA-2 Reanalysis Model

Raispour, K.\*

*Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran*

*(Received: 6 Jan 2021, Accepted: 25 May 2021)*

### Summary

Mineral suspended particles, in addition to being important components of the Earth's atmosphere, play an important role in the atmosphere-Earth energy interactions and geochemical cycles of the Earth system. The meteorological and climatic importance of atmospheric particulate matter can be attributed to its effects on the energy level of the Earth-Earth system, physical, dynamic, and chemical changes in the atmosphere at regional and global scales, absorption and emission of radiation in the atmosphere, micro physical changes and radiative properties of clouds and changes in snow and ice levels that occur. Fine particles smaller than 2.5 microns are one of the most important air pollutants with a wide variety, complexity and diffusion. Dust events are one of the most important natural sources of particulate matter in the atmosphere. In recent decades, air pollution in many parts of the world has raised public concerns about their health effects. Epidemiological studies have shown that lung disease, cardiovascular disease, and their mortality are associated with particulate matter. Although the effects of particles on both climate and air quality has been evident over the past few decades, continuous monitoring will still be important. In recent years, techniques, and models based on satellite data has made significant contributions to the monitoring of particles. Different versions of the MERRA-based satellite model have excellent capabilities in the study of particles and its time series analysis. The MERRA-2 model (the Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 called MERRA-2) is based on the analysis of satellite data (Moloud et al., 2012) and is one of the most reliable models for assisting various environmental scientists to answer questions related to climate research and climate change, to make optimal use of the created satellite observations. This study aims to investigate the spatio-temporal density and dispersion of PM<sub>2.5</sub> suspended particles due to dust events in the Iranian atmosphere during the statistical period (1980-2019) based on the MERRA-2 based satellite model. Here, the meaning of column PM<sub>2.5</sub> suspended particles is PM<sub>2.5</sub> suspended particles of dust in a vertical column from the ground. Relevant data was prepared with monthly, seasonal, annual and spatial time steps of 0.5°x 0.625° and after applying the necessary preprocessing, they were identified and analyzed. The results show good fluctuations in PM<sub>2.5</sub> particulate matter density during the statistical years studied. But in general, the density of PM<sub>2.5</sub> suspended particles increasing and its upward trend is observed especially in the last years of the statistical period. The results showed that MERRA-2 model has a good performance in monitoring the concentration of PM<sub>2.5</sub> particulate matter in the vertical column of the atmosphere. The average of particulate matter PM<sub>2.5</sub> in the atmosphere of this area is 61/23 Mg/m<sup>2</sup>, which indicates the high concentration of these particles in the atmosphere compared to other parts of the world, including the United States (Bouchard et al., 2016a), Taiwan (Provence et al., 2017a) and Europe (Provence et al., 2017b). On the other hand, the highest concentrations of these particles are in the southwest of Iran, southern coastal areas, eastern regions, deserts of central Iran and part of northern Iran and the lowest is estimated over the Zagros highlands. The spatial distribution of PM<sub>2.5</sub> suspended particles over the Iran area depends on the frequency of dust events, distance from emission centers, seasons, rainfall and other climatic parameters (soil surface temperature, soil moisture, etc.). In this sense, in the warm months and seasons of the year, which are associated with the increasing land surface temperature, decreasing rainfall and, consequently, decreasing soil surface moisture, the conditions for the formation of the dust events are the release of suspended particles into the atmosphere. So that among the months of the year, May/December and between the seasons, summer/winter had the highest/the lowest value of column concentration of PM<sub>2.5</sub> suspended particles in the over Iran. Analysis of correlation values based on Pearson linear regression relationship between PM<sub>2.5</sub> suspended particles in the atmosphere (response variable) with some meteorological parameters (independent variables) such as; precipitation, soil surface moisture and soil surface temperature in the geographical area of Iran, well indicate the significant relationship between this variable and the above parameters. So that in the meantime; the amount of correlation between PM<sub>2.5</sub> suspended particles over Iran with soil surface temperature indicates a significant positive relationship (R = 81%), a strong negative relationship with soil surface moisture (R = - 76%) and a significant relationship with monthly precipitation, negative (R = - 61%). This means that the concentration of PM<sub>2.5</sub> suspended particles over Iran is strongly influenced by environmental parameters, so that in the time series analysis, the presence of seasonal behavior indicates a relatively stable time pattern of PM<sub>2.5</sub> suspended particles distribution in the atmosphere over Iran.

**Keywords:** Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub>), MERRA-2 Model, Atmospheric Pollution, Dust Phenomena, Iran.

---

\* Corresponding author:

raispour@znu.ac.ir