

PM_{2.5} Spatial Analyzing and Modeling of Spring Season in Iran Scope by Random Forest Algorithm

Nafiseh Rahimi¹| Abdollah Faraji²| Seyed Hossein Mirmousavi³| Kohzad Raispour⁴

1. Department of Physical Geography, Faculty of Literature and Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
2. Corresponding Author, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: abfaraji@znu.ac.ir
3. Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
4. Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 19 Apr 2025 Received in revised form: 03 Aug 2025 Accepted: 07 Aug 2025 Available online: 23 Sep 2025 Keywords: Random forest algorithm, Iran, Spatial analysis, Trend, Spring season, Particulate matter PM_{2.5}.	PM_{2.5} particulate matter represents one of the most critical environmental challenges globally, with far-reaching impacts on human health, quality of life, and ecosystem functionality. In this study, the MERRA-2 dataset—covering the period from 1983 to 2023—was utilized to analyze the long-term behavior and spatiotemporal patterns of PM_{2.5} concentrations during the months of April, May, and June. The research was conducted in three phases: Preprocessing and Preliminary Analysis: Initial steps involved data cleaning, reconstruction, and exploratory analysis to prepare the dataset for spatial modeling. Spatial Distribution and Trend Analysis: The spatial distribution and temporal trends of PM_{2.5} were examined, along with their correlations with climatic and environmental variables. Modeling with Random Forest Algorithm: PM_{2.5} concentrations were modeled using the random forest algorithm to assess predictive accuracy and spatial representation. The spatial analysis revealed that the highest concentrations of PM_{2.5} occurred in the southwestern regions of the country, while the lowest levels were observed in the northwest. Trend analysis showed a significant positive trend in PM_{2.5} levels in southwestern areas—particularly in parts of Khuzestan Province—with increases exceeding 4 Mg/m² in April and May, and over 5 Mg/m² in June. The random forest model demonstrated strong performance in spatial modeling of PM_{2.5}. The coefficient of determination (R²) values for environmental parameters were 0.87, 0.88, and 0.98 for April, May, and June, respectively. For climatic parameters, the R² values were 0.86, 0.98, and 0.97. These results confirm the robustness and suitability of the random forest algorithm in capturing the spatial and temporal dynamics of PM_{2.5} concentrations.

Cite this article: Rahimi, N., Faraji, A., Mirmousavi, S. H., & Raispour, K. (2025). PM_{2.5} Spatial Analyzing and Modeling of Spring Season in Iran Scope by Random Forest Algorithm. *Geography and Environmental Sustainability*, 15(3), 131-155. <https://doi.org/10.22126/GES.2025.12002.2858>



© The Author (s).

DOI: <https://doi.org/10.22126/GES.2025.12002.2858>

Publisher: Razi University

واکاوی و مدل‌سازی فضایی PM_{2.5} فصل بهار بر گستره ایران زمین با بهره‌گیری از الگوریتم جنگل تصادفی

نقیسه رحیمی^۱ | عبدالله فرجی^۲ | سیدحسین میرموسوی^۳ | کوهزاد رئیس‌پور^۴

۱. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
۲. نویسنده مسئول، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: abfaraji@znu.ac.ir
۳. گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.
۴. گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۳۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۶ دسترسی آنلاین: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱ کلیدواژه‌ها: الگوریتم جنگل تصادفی، ایران، تحلیل فضایی، روند، فصل بهار، ذرات معلق (PM_{2.5}).	ذرات معلق PM_{2.5} یکی از جدی‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در سطح جهانی است و تأثیرات گسترده‌ای بر سلامت انسان، کیفیت زندگی و عملکرد سامانه‌های اکولوژی دارد. از این‌رو در این مطالعه باهدف تحلیل رفتار بلندمدت و الگوهای فضایی - زمانی PM_{2.5} از مجموعه داده MERRA-2 با پوشش زمانی ۱۹۸۳-۲۰۲۳ برای ماه‌های آوریل، می و ژوئن استفاده شد. در گام نخست عملیات پیش‌پردازش، بازسازی و تجزیه و تحلیل‌های مقدماتی صورت گرفت، در گام دوم پراکنش فضایی و روند آلاینده PM_{2.5} و ارتباط آن با متغیرهای اقلیمی و محیطی مورد بررسی قرار گرفت و در گام آخر آلاینده PM_{2.5} با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی مدل‌سازی گردید. بررسی توزیع فضایی میانگین نشان داد که بیشینه ذرات معلق (PM_{2.5}) در مناطق جنوب غربی کشور و کمینه آن در مناطق شمال غربی کشور بوده است. توزیع فضایی معنی‌داری روند نیز بیانگر آن بود که جنوب غرب کشور (بخش‌هایی از استان خوزستان) در ماه آوریل و می با بیش از ۴ Mg/m² و ژوئن با بیش از ۵ Mg/m² روند معنی‌دار مثبت داشته است. بر اساس یافته‌های حاصل از عملکرد الگوریتم جنگل تصادفی در مدل‌سازی مکانی PM_{2.5} با توجه به مقادیر ضریب تبیین با پارامترهای محیطی به ترتیب در ماه‌های آوریل، می و ژوئن، ۰/۸۷، ۰/۸۸، ۰/۹۸ و پارامترهای اقلیمی، ۰/۸۶، ۰/۹۸ و ۰/۹۷ گواهی بر مناسب بودن مدل این الگوریتم در بازنمایی الگوهای فضایی و زمانی غلظت ذرات معلق است.

استناد: رحیمی، نقیسه؛ فرجی، عبدالله؛ میرموسوی، سیدحسین؛ رئیس‌پور، کوهزاد (۱۴۰۴). واکاوی و مدل‌سازی فضایی PM_{2.5} فصل بهار بر گستره ایران زمین با بهره‌گیری از الگوریتم جنگل تصادفی. *جغرافیا و پدیده‌های محیط*، ۱۵ (۳)، ۱۳۱-۱۵۵. <https://doi.org/10.22126/GES.2025.12002.2858>

مقدمه

آلاینده‌ها شامل هر ماده طبیعی یا مصنوعی‌اند که به مقدار غیرطبیعی وارد جو می‌شوند و در طی سال‌های اخیر میزان آن‌ها با سرعت هشدار دهنده‌ای روبه افزایش می‌باشد، با توجه به تاثیرات وسیع آلاینده‌ها در تغییر اقلیم در مقیاس جهانی و محلی، افزایش آنها تهدید جدی برای کل دنیا بویژه برای کشورهای در حال توسعه که با افزایش جمعیت روبرو هستند، محسوب می‌شود. آلاینده‌ها براساس ترکیب شیمیایی (مواد آلی، مواد معدنی، گازها، ذرات معلق و...)، میزان خطرناک بودن (مواد سرطان‌زا، مواد سمی، مواد گازی ایجاد کننده اثر گلخانه‌ای و...)، و منبع انتشار (احتراق سوخت‌های فسیلی، فرآیندهای صنعتی، فعالیتهای کشاورزی و...) روی کیفیت هوا تاثیر می‌گذارند (Mathew et al., 2017).

یکی از آلاینده‌های مهم که توزیع و پراکندگی آن همواره آثار منفی بر کیفیت هوا برجا می‌گذارد، ذرات معلق^۱ می‌باشد. ذرات معلق که هواویز نیز نامیده می‌شود شامل مجموعه‌ای از جامدات و مایعات معلق‌اند که به صورت کلونید پراکنده شده‌اند و از کربن آلی و معدنی، نمک‌های سولفات و نیترات، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAHs) و فلزات (شبه فلزات) و... تشکیل شده‌اند که مستقیماً توسط منابع طبیعی (آتشفشان‌ها، طوفان‌های شن و ماسه و آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع و...) و یا صنایع ساخت بشر (دود خروجی از آگروز اتومبیل‌ها و دود حاصل از سوخت کارخانه‌ها و نیروگاه‌ها و...) و یا بر اثر ترکیب با مولکول‌های موجود در هوا وارد جو کره زمین می‌شوند (زارع شحنه و ارحامی، ۱۴۰۰). اندازه این ذرات به انواع مختلفی همچون ذرات درشت (PM_{10})، ذرات ریز ($PM_{2.5}$)، ذرات بسیار ریز ($PM_{0.1}$) قابل تقسیم‌بندی است و هر کدام از آن‌ها با توجه به میزان سمی بودنشان تاثیرات منفی متفاوتی به همراه دارند. ذرات ریز ($PM_{2.5}$) دربرگیرنده گردوغبار، دود، مه، دود و فیوم است، که از بین آنها گردوغبار یکی از فراوان‌ترین و مهم‌ترین نوع ریزگرد موجود در جو است (Cakmur et al., 2004) و عمدتاً در محیط‌های خشک و نیمه خشک تولید می‌شود و هر ساله حدود ۲۰۰ تن از آن‌ها به جو منتقل می‌شود و حدود ۴۰ درصد از آن‌ها منشأ بیابانی دارند (Banks & Brindley., 2013).

انتشار و جابه‌جایی این گرد و غبار در یک چرخه سه مرحله‌ای صورت می‌گیرد که به ترتیب شامل ۱- انتشار گردوغبار؛ ۲- ترابرد گردوغبار ۳- نهشت گردوغبار است (Sun et al., 2006). گردو غبارها در این چرخه‌ای که طی می‌کنند اثرات بهداشتی و زیست محیطی متعددی به همراه دارند که می‌توان به ریزش مواد مغذی و نمک به خاک‌های کشاورزی، ماسه‌زدگی و کاهش کیفیت محصولات زراعی، آلودگی منابع آب، دفن سازه‌ها و راه‌های ارتباطی، کاهش دید و بسته شدن فرودگاه‌ها، تغییر الگوهای باد، پراکندگی تابش خورشید و تغییر ضخامت ابر، مشکلات تنفسی و بینایی در انسان (Middleton & Sternberg., 2013)، جهش DNA، ناباروری، حملات قلبی و مرگ زودرس اشاره کرد (Höflinger & Laminger., 2017).

با توجه تاثیرات گسترده ریزگردها در مقیاس منطقه‌ای و جهانی بر متغیرهای آب‌وهوایی و انسانی و محیط زیستی، همواره مورد توجه بسیاری از محققین در سراسر جهان قرار گرفته است که می‌توان به مطالعات حسین و همکاران اشاره کرد که به بررسی تغییرات زمانی و مکانی گرد و غبار کشور پاکستان در بازه زمانی ۲۰۰۰-۱۹۶۱ پرداختند و به این نتایج رسیدند که طوفان‌های گردوغبار در کل ۲۹/۵ درصد کاهش داشته‌اند، اما در بخش مرکزی، مناطق کوهپایه‌ای پنجاب، برخی نواحی بلوچستان، سند، ایلات مرکزی و مناطق شمالی افزایش داشته است (Hussain et al., 2005).

در تحقیقی دیگر کاسکاوتیس و همکاران با اخذ داده از سنجنده OMI ماهواره Aura توزیع زمانی و مکانی آلاینده‌ها را در یونان مورد واکاوی قرار دادند، نتایج مطالعات آنها نشان داد که مقدار آلاینده‌ها در بخش‌های جنوبی یونان بیشتر از بخش‌های شمالی آن است و یک گرادیان قوی بین شمال و جنوب یونان وجود دارد (Kaskaoutis et

(al., 2010).

شین و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی آلاینده‌های گازی و ریزگردهای شرق آسیا به کمک داده‌های لیدار پرداختند و به این نتایج رسیدند که گردوغبارهای شرق آسیا در دو طبقه جای می گیرند، طبقه اول لایه گردوغبار با ارتفاع بالا در سراسر کشور چین می باشد و لایه دوم شامل گردوغبار و آلاینده‌های گازی هستند که در ارتفاع پایین حرکت می کنند (Shin & et al., 2015).

کانگ و همکاران آلاینده‌های معدنی فلات تبت را با پوشش زمانی ۲۰۱۰ - ۱۹۶۰ مورد واکاوی قرار دادند و به این نتایج رسیدند که از دهه ۱۹۷۰ گردوغبار و از دهه ۱۹۹۰ سرعت باد گردوغبار کاهش داشته است (Kang et al., 2016). کای و همکاران تغییرات زمانی و مکانی $PM_{2.5}$ و NO_2 منطقه چنگدو واقع در کشور چین را برای پوشش زمانی ۲۰۰۵-۲۰۱۵ به کمک سنجش از دور مطالعه کردند و نتایج بررسی آنها بیانگر این بود که نزدیک به ۵۰ درصد از تراکم $PM_{2.5}$ و NO_2 در این منطقه ناشی از فعالیت‌های صنعتی بوده است (Cai et al., 2018).

اسکوئیزاتو و همکاران نیز به بررسی تغییرات زمانی و مکانی $PM_{2.5}$ ایالت نیویورک در بازه زمانی ۲۰۰۵-۲۰۱۶ پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مقادیر $PM_{2.5}$ از سال ۲۰۱۲ به بعد افزایش یافته است (Squizzato et al., 2018). در مطالعه‌ای دیگر بشیر و همکاران، $PM_{2.5}$ شهر لاهور پاکستان را مورد پایش قرار دادند و به این نتیجه رسید که انتشار $PM_{2.5}$ همبستگی مثبتی با گازهای صنعتی، آلاینده‌های خودرو و بقایای محصولات کشاورزی دارد (Basheer et al., 2019).

آلبوگامی و همکاران، تغییرات زمانی مکانی طوفان‌های گردوغباری عربستان سعودی را با استفاده از ۲۷ ایستگاه زمینی طی دوره ۲۰۰۰ - ۲۰۱۶ بررسی کردند نتایج مطالعات آنها نشان داد وقوع طوفان گردوغبار در قسمت شرقی و غربی عربستان (مناطق الاحسا و جده) روند افزایشی داشته است و شمال عربستان (مناطق الاسلام و قیسومه) گردوغبار روندی کاهشی داشته است (Albugami et al., 2019).

خو و همکاران، $PM_{2.5}$ منطقه دلتای رودخانه یانگ تسه واقع در چین را برای پوشش زمانی ۲۰۱۶-۱۹۹۸ مورد واکاوی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که مقدار $PM_{2.5}$ همبستگی مثبتی با تراکم جمعیت و بخش صنعت دارد (Xu et al., 2020).

در مطالعه‌ای دیگر یانگ و همکاران به بررسی توزیع مکانی-زمانی غلظت $PM_{2.5}$ در سه شهر بزرگ چین با پوشش زمانی ۲۰۲۰-۲۰۱۳ به کمک مدل رگرسیون دومرحله‌ای (GWR + LME) پرداختند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که توزیع زمانی متغیر مذکور در زمستان افزایشی و در تابستان کاهشی بوده است و توزیع فضایی نیز بیانگر این است که مقادیر بیشینه در مناطق پست جنوبی و کمینه در ارتفاعات شمالی بوده است. همچنین نتایج نشان داد که در سال ۲۰۲۰ در مقایسه با ۲۰۱۳ مقدار میانگین سالانه $PM_{2.5}$ کاهش چشمگیری داشته است (Yang et al., 2020).

لیو و دینگ، توزیع مکانی و زمانی $PM_{2.5}$ و O_3 را با توجه به الگوها و مکانیسم‌های موثر بر آن با پوشش زمانی ۲۰۲۰-۲۰۱۱ برای شمال چین بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که روند O_3 در فصل تابستان و پاییز افزایشی و در بهار و زمستان کاهشی بوده است. روند $PM_{2.5}$ نیز در بهار و زمستان افزایشی و در تابستان و پاییز کاهشی بوده است. همچنین نتایج نشان داد که الگوی فشار، میانگین دمای سالانه و تراکم جمعیت همگی تأثیرات چشمگیری بر مقدار $PM_{2.5}$ داشته است، در حالی که تغییرات در غلظت O_3 عمدتاً متأثر از عوامل هواشناسی بوده است (Liu & Ding., 2023).

از مطالعات صورت گرفته در زمینه آلاینده‌ها در ایران می توان به تحقیقات زیر اشاره نمود، امیدوار و همکاران (۱۳۹۳) با روش خوشه بندی الگوهای همدید روزهای آلوده به ذرات معلق شیراز را در بازه زمانی ۲۰۱۱-۲۰۰۵ مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که وجود یک سامانه پرفشار در تراز دریا با ریزش هوای سرد به همراه یک سامانه‌ی واپرخندی در تراز ۸۵۰ و حاکمیت جو فشار ورد در تراز ۵۰۰ در دوره سرد، عامل اصلی الگوهای همدید روزهای آلوده به ذرات می باشد.

فیض‌نیا و همکاران (۱۳۹۹) نیز تغییرات فصلی و مکانی ذرات $PM_{2.5}$ ، PM_{10} و TSP در حومه شهر اصفهان و ارتباط آن با پارامترهای هواشناسی را برای بازه زمانی تیر ۱۳۹۴-۱۳۹۵ بررسی کردند، نتایج تحقیقات آنها گویای آن بود که میزان غلظت ذرات $PM_{2.5}$ در تمام ایستگاه‌ها اغلب بیش از حد استاندارد بوده است و با رطوبت نسبی و دما به ترتیب همبستگی منفی و مثبتی و با باد همبستگی ضعیفی داشته است. انصاری و همکاران (۱۴۰۰)، به بررسی تغییرات زمانی-مکانی ذرات معلق $PM_{2.5}$ و PM_{10} شهر تهران با کمک GIS با پوشش زمانی ۱۳۹۲-۱۳۹۹ پرداختند و به این نتیجه رسیدند که $PM_{2.5}$ در فصل تابستان در مناطق غربی و جنوبی تهران و $PM_{2.5}$ در همه فصول در مناطق غربی و جنوبی، مناطق مرکزی دارای غلظت بالایی است.

رئیس‌پور (۱۴۰۰) با ارزیابی زمانی-مکانی غلظت ستونی ذرات معلق ($PM_{2.5}$) در ایران به کمک داده‌های بازتحلیل NASA/MERRA-2 با پوشش زمانی ۲۰۱۹-۱۹۸۰ بیان کرد که تراکم ذرات معلق $PM_{2.5}$ در ایران به ویژه در سال‌های آخر دوره آماری روند صعودی داشته است.

از مطالعات دیگر صورت گرفته در این زمینه می‌توان به مطالعه رنگزن و همکاران (۱۴۰۱) اشاره کرد که با بررسی مکانی و زمانی غلظت $PM_{2.5}$ استان خوزستان و بررسی عوامل موثر بر آن برای بازه زمانی ۲۰۱۶-۱۹۹۸ به این نتیجه رسیدند که غلظت $PM_{2.5}$ در بخش جنوبی و مرکزی بیشتر از سایر نواحی می‌باشد.

سلگی و پارسی‌مهر (۱۴۰۱) نیز به پیش‌بینی و مدل‌سازی غلظت روزانه ذرات معلق $PM_{2.5}$ و PM_{10} زمستانه شهر همدان با شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه پرداختند و به این نتیجه رسیدند که قرارگیری کوه الوند بین باد غالب نواحی غربی کشور و شهر همدان، تاثیر عوامل هواشناسی بر غلظت $PM_{2.5}$ را کم می‌کند، اما افزایش $PM_{2.5}$ زمستانه ناشی افزایش مصرف سوخت و تولید آلاینده‌های حاصل از احتراق در زمستان می‌باشد.

بشردوست و مسگری (۱۴۰۳) با مدل‌سازی مکانی ذرات معلق هوا ($PM_{2.5}$ و PM_{10}) شهر تهران با پوشش زمانی ۲۰۲۲-۲۰۱۲ با استفاده از شبکه عصبی کانولوشن به این نتیجه رسیدند که آلودگی PM_{10} خطر بیشتری را در مناطق غرب و جنوب غرب و $PM_{2.5}$ بیشترین خطر را در مناطق جنوبی ایجاد می‌کند.

مرور ادبیات پژوهشی نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات انجام شده در زمینه آلاینده $PM_{2.5}$ همچون مطالعات فیض‌نیا و همکاران (۱۳۹۹)، رنگزن و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی محلی و کوتاه‌مدت محدود بوده‌اند و یا از مدل‌های آماری سنتی برای مدل‌سازی استفاده کرده‌اند؛ لذا تاکنون مطالعه جامعی برای تحلیل فضایی آلاینده $PM_{2.5}$ با استفاده از مدل‌سازی فضایی یادگیری ماشین در مقیاس ملی صورت نگرفته است. با توجه به پیچیدگی روابط بین متغیرهای مستقل با متغیر وابسته و تغییرات زمانی و مکانی این متغیرها، برآورد فضایی غلظت آلاینده‌ها با به‌کارگیری مدل‌های یادگیری ماشین برای زمان و مکان خاصی که امکان استفاده از آلاینده سنج و... وجود ندارد، می‌تواند راهگشا باشد (شمس‌الدینی و احمدی، ۱۳۹۹).

از این‌رو در این پژوهش نخست سعی بر آن بود توزیع فضایی $PM_{2.5}$ در یک بازه زمانی چهار دهه‌ای (۱۹۸۴-۲۰۲۳)، با تمرکز بر فصل بهار به‌عنوان یکی از بحرانی‌ترین دوره‌های زمانی از نظر ناپایداری‌های جوی و افزایش گردوغبار در ایران، صورت گیرد. سپس با تلفیق داده‌های بازتحلیل MERRA-2 و بهره‌گیری از الگوریتم یادگیری ماشین، کارایی و دقت مدل‌سازی الگوریتم جنگل تصادفی در مقیاس ملی بررسی شود. استفاده از روش‌های زمین‌آمار، مدل‌سازی فضایی در مقیاس ملی و تمرکز بر فصل پر گردوخاک بهار، از نوآوری‌های این پژوهش محسوب می‌شود که می‌تواند به شناسایی مناطق بحرانی و ارائه پیشنهادها مؤثر برای سیاست‌گذاری محیط‌زیستی کمک کند.

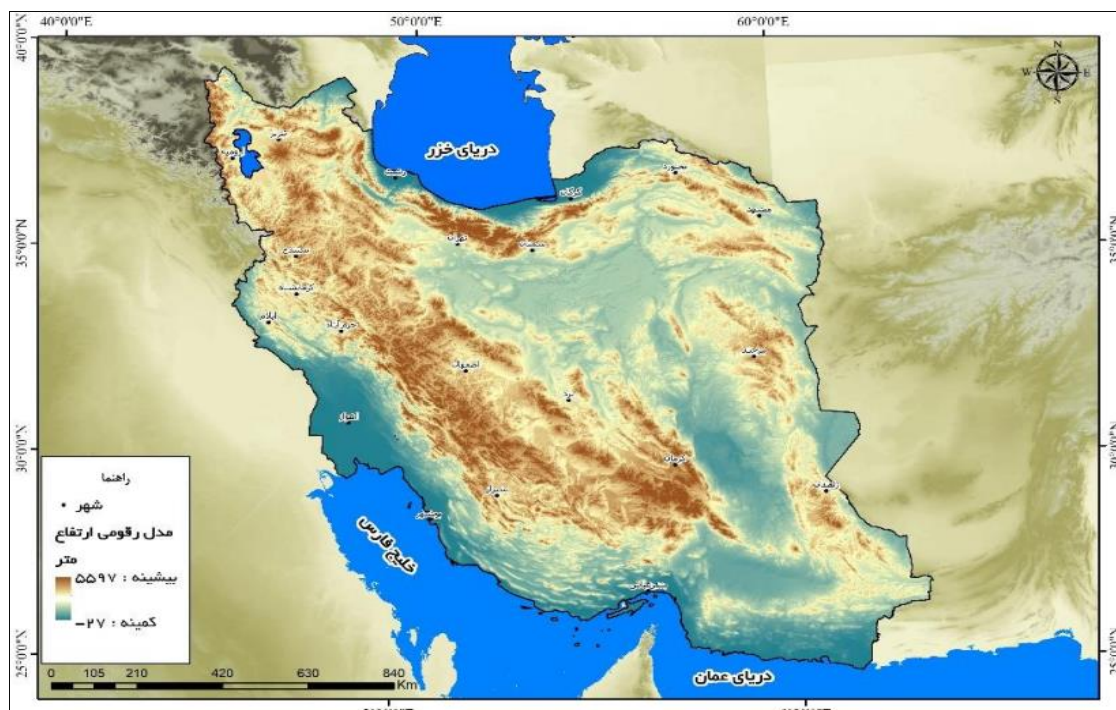
مواد و روش

معرفی منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این تحقیق کل کشور ایران با مساحتی بالغ بر ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع در نظر گرفته شده است (شکل ۱). ایران یکی از کشورهای نسبتاً وسیع جهان است که در نیمکره شمالی، در قاره آسیا و در قسمت غربی

فلات ایران در محدوده ۲۵ درجه و سه دقیقه الی ۳۹ درجه و ۴۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۴ درجه و پنج دقیقه الی ۶۳ درجه و ۱۸ دقیقه طول شرقی واقع شده است و از منظر زمین شناسی، ژئومورفولوژی و اقلیمی از تنوع ویژه ای برخوردار است. میانگین بارش سالانه این کشور حدود ۲۵۰ میلی متر در سال است، لذا جزء کشورهای خشک و کم بارش محسوب می شود. بر همین اساس در سال های اخیر افزایش رخداد گردوغبار به دلیل اقلیم خشک و نیمه خشک به یکی از مهم ترین مخاطرات اقلیمی و زیست محیطی در ایران تبدیل شده است (رئیس پور، ۱۴۰۰).

در سراسر ایران فعالیت های گردوغباری با دشت کویر و لوت قسمت هایی از هامون و دشت سیستان و حوضه جازموریان در جنوب شرقی ایران (داداشی، ۱۳۹۹:۹۴)، دریاچه نمک و همچنین فعالیت شبکه ای از رودخانه و دریاچه های فصلی، باتلاق ها و کانال های انتقال آب ناشی از بارندگی مرتبط است؛ لذا وادی های میان کوهی، مناطق نمکی و دریاچه های زودگذر جزء منابع عمده گردوغباری ایران بشمار می آیند (علیزاده چوبری و نجفی، ۱۳۹۶)، هم جوار با برخی از کشورها همچون عراق، سوریه و کمی دورتر اردن و عربستان نیز در افزایش گردوغبار در ایران دخیل بوده است.



شکل ۱. مدل رقومی ارتفاعی ایران

مواد و روش پژوهش

کارایی مدل های مبتنی بر داده های ماهواره ای، در مقیاس مکانی چندکیلومتری با استفاده از رادیومترهای فضایی و طیف سنج ها به منظور سنجش آلاینده ها در تروپوسفر ارتقا یافته است (Veefkind & et al., 2007). امروزه سنجنده های فضایی گوناگونی با استفاده از الگوریتم های مختلف همانند AVHRR, OMI, TOMS, MODIS, CALIOP هواویزها را پایش نموده اند (بیات، ۱۳۹۲، داداشی، ۱۳۹۹: ۵۱). در این زمینه شاخص و پارامترهای گوناگونی همچون عمق نوری هواویزها (AOD)، توان آنگستروم (AE) و شاخص جذب هواویز (AAI) و ضخامت نوری آئروسول (AOT) و غلظت ستونی ذرات معلق (DUCMASS) و... برای پایش هواویزهای جوی ارائه شده است (Hu et al., 2018; de Leeuw., 2018).

غلظت ستونی ذرات معلق^۱ (DUCMASS) یکی از پارامترهای مهم در بررسی گردوغبار در مقیاس ماهانه است،

این محصول یکی از محصولات مجموعه داده بازتحلیل MERRA-2 با تفکیک افقی $0.625^\circ \times 0.5^\circ$ درجه قوسی است. مجموعه داده های MERRA-2 یک داده بازتحلیل بلندمدت جوی است که از سال ۱۹۸۰ ناسا برای ایجاد مجموعه داده های جوی در مقیاس بزرگ تولید کرده است (Liu et al., 2022) و از کیفیت، دقت و قابلیت اعتماد بالایی برخوردار است و مطالعات متعددی موفقیت آن را تأیید کرده اند (Colarco et al., 2010; Rienecker., 2011; Bian et al., 2013; Buchard et al., 2016).

در این مطالعه به منظور سنجش ذرات معلق ($PM_{2.5}$) و مدل سازی آن با متغیرهای اقلیمی و محیطی برای گستره ایران زمین از مجموعه داده های MERRA-2 با پوشش زمانی ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۳ با مقیاس ماهانه اخذ شده از وبگاه ^۱ Earth data با فرمت NetCDF استفاده شد. برای درستی سنجی داده های اخذ شده از MERRA-2 بدلیل برخی از محدودیت ها در این مطالعه همچون طول دوره آماری ناکافی ایستگاه های زمینی، نبود اعتبارسنجی محلی و در نهایت نبود متغیر اندازه گیری شده ای در کشور برای غلظت گردوخاک (کاتورانی و همکاران، ۱۴۰۳) امکان استفاده از داده های زمینی وجود نداشت. اگرچه در برخی مناطق ایران مانند تهران و خوزستان ایستگاه های پایش کیفیت هوا فعال هستند، اما پراکندگی محدود این ایستگاه ها و ناسازگاری زمانی داده ها با بازه بلندمدت داده های بازتحلیل امکان درستی سنجی محصول DUCMASS را در سطح گسترده با موانعی روبرو کرد.

در این مطالعه با توجه به اینکه مجموعه داده های MERRA-2 به عنوان یکی از معتبرترین و گسترده ترین منابع بازتحلیل جهانی شناخته می شوند و از کیفیت، دقت و قابلیت اعتماد بالایی برخوردار است و مطالعات متعددی موفقیت آن را تأیید کرده اند (Colarco et al., 2010; Rienecker., 2011; Bian et al., 2013; Buchard et al., 2016)، بدون اعتبارسنجی با داده های زمینی استفاده شد. لازم به ذکر است که این داده ها با ترکیب مدل های عددی پیشرفته GEOS-5 و مشاهدات ماهواره ای تولید شده اند و بدلیل اینکه محصولات DUCMASS از داده های ماهواره های MISR، MODIS و AVHRR و داده های اندازه گیری شده AERONET در ایستگاه های زمینی استفاده می کنند، دارای قطعیت بالایی هستند (کاتورانی و همکاران، ۱۴۰۳) و در مطالعات متعددی در سطح منطقه ای و جهانی برای تحلیل های اقلیمی و آلودگی هوا استفاده شده اند (داداشی و همکاران، ۲۰۲۰؛ رئیس پور، ۱۳۹۹؛ Colarco et al., 2010; Buchard et al., 2016).

در مطالعه پیش رو به منظور کاهش برخی از محدودیت های مجموعه داده MERRA-2 همچون عدم وجود ایستگاه های زمینی گسترده برای اعتبارسنجی، وابستگی شدید به مدل های بازتحلیل و دقت پایین در مناطق با توپوگرافی پیچیده (Gelaro et al., 2017) سعی شد این محدودیت ها در فرایند تفسیر نتایج مدنظر قرار گیرد؛ لذا با استفاده از عملیات پیش پردازش بر روی داده ها در محیط نرم افزار R نسخه ۲.۳.۴، ابتدا وجود مقادیر مفقود، پرت و نرمال بودن توزیع داده ها به کمک بسته ^۲ nortest بررسی شد، سپس آمار توصیفی آن ها توسط توابع ارائه شده در بسته ^۳ psych بررسی شد. داده های منتخب شامل غلظت ستونی ذرات معلق، میانگین دمای حداکثر و حداقل، بارش، سرعت باد، فشار، رطوبت خاک، دمای خاک و ارتفاع لایه مرزی بود (جدول ۱).

در این مطالعه، فصل بهار (ماه های آوریل، می و ژوئن) به عنوان بازه زمانی منتخب در نظر گرفته شد؛ چرا که در بسیاری از مناطق غرب، جنوب غرب و مرکز ایران، بیشترین ناپایداری های جوی، وقوع طوفان های گردوغبار، و افزایش تمرکز ذرات معلق $PM_{2.5}$ عمدتاً در این بازه زمانی رخ می دهد (Mahmoudi & Ikegaya., 2023) همچنین فعالیت کانون های گردوغبار خارجی (عراق، عربستان و سوریه) در فصل بهار بسیار قوی است و منجر به انتقال گردوغبار به کشورهای همسایه می شود (Velletri et al., 2023) لذا مجموع این موارد موجب گردید فصل بهار به عنوان بازه زمانی منتخب استفاده گردد تا تحلیل داده ها در این فصل، تصویر دقیق تری از روندهای بحرانی این آلاینده ارائه دهد.

1. NASA Goddard Earth Sciences (GES) Data and Information Services Center (DISC)

2. Gross, J.J., & Hennig, C. (2020). Nortest: Tests for normality. R package version 1.0.4

3. Revelle, w. (2020). psych: Procedures for psychological, psychometric, and personality research (version 2.0.12)

جدول ۱. مشخصات پارامترهای اقلیمی و محیطی مجموعه داده های باز تحلیل MERRA-2

نام محصول	قدرت تفکیک	تاریخ	مقیاس	DOI
غلظت ستونی ذرات معلق	۰/۵ × ۰/۶۲۵	۲۰۲۳-۱۹۸۴	ماهانه	M2IMNPASM_5.12.4
میانگین دمای حداکثر	۰/۵ × ۰/۶۲۵	۲۰۲۳-۱۹۸۴	ماهانه	M2IMNPASM_5.12.4
میانگین دمای حداقل	۰/۵ × ۰/۶۲۵	۲۰۲۳-۱۹۸۴	ماهانه	M2SMNXSLV v5.12.4
مجموع بارش روزانه	۰/۵ × ۰/۶۲۵	۲۰۲۳-۱۹۸۴	ماهانه	M2IMNPASM_5.12.4
سرعت باد	۰/۵ × ۰/۶۲۵	۲۰۲۳-۱۹۸۴	ماهانه	M2IMNPASM_5.12.4
فشار	۰/۵ × ۰/۶۲۵	۲۰۲۳-۱۹۸۴	ماهانه	M2IMNPASM_5.12.4
رطوبت خاک	۰/۵ × ۰/۶۲۵	۲۰۲۳-۱۹۸۴	ماهانه	M2TMNXLND v5.12.4
دمای خاک	۰/۵ × ۰/۶۲۵	۲۰۲۳-۱۹۸۴	ماهانه	M2TMNXLND v5.12.4
ارتفاع لایه مرزی	۰/۵ × ۰/۶۲۵	۲۰۲۳-۱۹۸۴	ماهانه	M2IMNPASM_5.12.4

در گام دوم به منظور تحلیل رفتار متغیر ذرات معلق (PM_{2.5}) در بازه زمانی موردنظر بعد از انجام عملیات پیش پردازش، نقشه توزیع مکانی میانگین و توزیع فضایی روند با سطح اطمینان ۹۵ درصد با روش رگرسیون خطی با عملیات زمین آماری به صورت ماتریسی بر روی هر پیکسل بررسی شد تا دید بهتری از رفتار متغیر ذرات معلق (PM_{2.5}) به دست آید. در گام سوم، پارامترهای مورد استفاده در دودسته پارامترهای اقلیمی (دمای حداقل و دمای حداکثر، بارش، باد، فشار) و پارامترهای محیطی (رطوبت خاک، دمای خاک، ارتفاع لایه مرزی، ارتفاع از سطح دریا) طبقه بندی شدند. سپس ارتباط بین پارامترهای اقلیمی و محیطی در مقیاس زمانی ماهانه با انتخاب روش تحلیل همبستگی مناسب بر اساس توزیع داده ها (نرمال و غیرنرمال بودن) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و بصری سازی نتایج حاصل از ماتریس همبستگی شامل ضرایب همبستگی و معنی داری آماری ضرایب در سطح اطمینان ۹۹/۹ درصد با به کارگیری بسته ^۱Corrplot فراهم گردید و تفسیر ضرایب همبستگی بر اساس معیارهای ارائه شده توسط موکا کا در سال ۲۰۱۲ در ۵ طبقه بسیار ضعیف (<۰/۳)، ضعیف (۰/۳-۰/۴۹)، متوسط (۰/۴۹-۰/۵۹)، همبستگی قوی (۰/۵۹-۰/۷۹) و بسیار قوی (۰/۷۹-۱) صورت گرفت (Mukaka., 2012). سپس به تبیین روابط ذرات معلق (PM_{2.5}) با پارامترهای اقلیمی و محیطی و مدل سازی آن در کل گستره ایران زمین پرداخته شد. بدین منظور از الگوریتم جنگل تصادفی که از زیرمجموعه های یادگیری ماشین است و قابلیت محاسبه داده های کلان را داراست و می تواند مفروضاتی فراتر از مفروضات مدنظر در مدل های مرسوم را مدنظر قرار دهند،

با هدف مدل سازی مبتنی بر داده های موجود استفاده شد. الگوریتم جنگل تصادفی یکی از پرکاربردترین الگوریتم های یادگیری ماشین با قابلیت استفاده آسان حتی بدون تنظیم پارامترها است که توانایی مدیریت تعداد زیادی از متغیرهای مدل سازی را بدون برازش اضافی دارد و می تواند تخمین های دقیقی ارائه دهد. به عبارت دیگر مدل جنگل تصادفی ^۲ (RF) یک روش یادگیری نظارت شده است که از درخت های چندگانه در طبقه بندی استفاده می کنند و الگوریتم آن با جایگزینی و تغییر مداوم عوامل مؤثر و مرتبط باهدف، منجر به ایجاد تعداد زیادی درخت تصمیم گیری می شوند سپس تمام درختان به منظور مدل سازی با هم ترکیب می گردند (Vorpahl et al., 2012). تنظیم پارامترهای موجود در این پژوهش براین اساس بود که پارامترهای اقلیمی و محیطی به عنوان متغیر مستقل باهدف برآورد و مدل سازی متغیر وابسته یا هدف یعنی ذرات معلق (PM_{2.5}) وارد مدل شدند، سپس با توجه به اینکه الگوریتم برای آموزش و آزمایش نیاز به داده های آموزشی و آزمون دارد. داده ها به دودسته ۸۰ درصد به عنوان آموزشی و ۲۰ درصد به عنوان آزمون تقسیم شدند که این روش تقسیم بندی جزء معمولی ترین تقسیم بندی هاست (آذری و همکاران، ۱۴۰۳)؛

در این مقاله نیز از یک تقسیم مشابه استفاده شد و داده ها به صورت تصادفی به این دو نسبت تقسیم شدند که

مجموعه آموزشی آن شامل پارامترهای محیطی و اقلیمی بود. در ادامه جهت دست‌یافتن به مناسب‌ترین مدل مکانی بهینه‌ترین مقادیر دو متغیر تنظیمی یعنی تعداد درخت (n_{tree}) و تعداد داده‌های ورودی در مدل جنگل تصادفی (m_{try}) در هر عمق مطالعاتی مدنظر قرار گرفتند. بدین منظور از روش آزمون و خطا استفاده شد و مقادیر مختلفی برای پارامترهای n_{tree} و m_{try} مورد بررسی قرار گرفت. در هر اجرا، عملکرد مدل با استفاده از معیار دقت یا خطای پیش‌بینی ارزیابی شد و مقادیری انتخاب شدند که کمترین میزان خطا و بیشترین دقت را داشتند. این فرایند به انتخاب مقادیر بهینه منجر شد. تمامی مراحل مدل‌سازی مکانی ذرات معلّق ($PM_{2.5}$) بر اساس رویکرد داده‌کاوی جنگل تصادفی از بسته ^۱ Random Forest، در نرم‌افزار RStudio نسخه ۱.۱۲.۲۰۲۴ صورت گرفت.

در این روش اهمیت متغیرها^۲ نیز به تفکیک تعیین شدند. اهمیت متغیرها ویژگی‌های مؤثرتر در مجموعه داده‌ها را شناسایی می‌کند، تا ارتباط بین ویژگی‌ها و متغیر هدف بهتر درک شود. در حقیقت اهمیت ویژگی، اندازه‌گیری می‌کند که هر ویژگی چقدر به دقت مدل‌سازی کمک می‌کند. این معیار با میانگین گرفتن کاهش ناخالصی بر روی همه درختان تصمیم در جنگل مشخص می‌شود، در این مرحله مقادیر درست متغیرها با مقادیری که به طور تصادفی برای هر درخت تولید شده است جایگزین می‌شود و اثر این تغییر را روی طبقه‌بندی اندازه‌گیری می‌شود، اگر این جایگزینی اثری روی خطای اندازه‌گیری نداشته باشد اهمیت آن متغیر کم است و اگر مقدار خطای اندازه‌گیری افزایش یابد آن متغیر مهم است.

برای تحلیل اهمیت^۳ متغیرهای محیطی و اقلیمی نیز از شاخص درصد افزایش میانگین خطای مدل‌سازی IncMSE% از تابع var Important استفاده گردید و مهم‌ترین متغیر با در نظر گرفتن حداقل مقدار میانگین ریشه مربعات خطا برای هر یک از ماه‌های آوریل، می و ژوئن انتخاب شد. سپس صحت‌سنجی و اعتبارسنجی مدل به کمک شاخص‌های آماری میانگین حداقل مربعات خطا (RMSR)، میانگین خطای مطلق (Mae) و ضریب تبیین (R^2) صورت گرفت، لازم به ذکر است که در RMSR و Mae هر چه خطا کوچک و به صفر نزدیک‌تر باشد، نشانگر این است که مقادیر مدل‌سازی شده، به مقادیر واقعی نزدیک‌تر هستند و دقت و صحت مدل بالاتر است، ولی هر چقدر مقدار R^2 بیشتر و به یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر بهتر بودن مدل‌سازی است، چنانچه در مدل‌سازی رقومی ذرات معلّق ($PM_{2.5}$) ضریب تبیین در بین دامنه‌های کمتر از ۴۱/۴ تا ۰/۱۰ باشد بیانگر ضعیف‌بودن مدل، بین ۰/۶ - ۴۱/۲ باشد، مدل متوسط است و اگر ۰/۶۱ تا ۰/۸ باشد مدل خوب است و چنانچه بین ۰/۸۱ تا ۱۰۰ باشد، بیانگر عالی بودن مدل‌سازی است (Rossel & McBratney, 2008).

در گام آخر به منظور بصری‌سازی نتایج حاصل از الگوریتم جنگل تصادفی، نقشه مدل‌سازی مکانی غلظت ذرات معلّق برای تمامی ماه‌ها ترسیم گردید سپس همبستگی آنها با نقشه واقعی بررسی شد و در نهایت به منظور تحلیل مکانی دقیق‌تر مدل‌سازی‌ها، نقشه بایاس بین نقشه‌های مدل‌سازی شده و نقشه واقعی در محیط نرم‌افزار ArcGIS تولید گردید و با استفاده از استانداردسازی به روش Z-score مقادیر اختلاف نرمال‌سازی شدند. باتوجه به اینکه مقادیر استاندارد شده فراتر از محدوده متعارف Z-score کلاسیک بودند، طبقه‌بندی در ۵ بازه مساوی بر اساس حداقل و حداکثر مقادیر انجام گرفت تا تحلیل مکانی به صورت نسبی و قابل تفسیر باشد.

نتایج

بر اساس نقشه توزیع مکانی میانگین غلظت ستونی ذرات معلّق ($PM_{2.5}$) حاصله از مجموعه داده‌های MERRA-2 (شکل ۲)، نتایج گویای این است که میزان تراکم ذرات معلّق ($PM_{2.5}$) بر فراز جو ایران در ماه‌های آوریل، می و ژوئن از الگوی پراکنش فضایی یکنواختی برخوردار هستند، در ماه آوریل الگوی پراکنش فضایی ذرات معلّق ($PM_{2.5}$) در نیمه

1. Liaw, A., & Wiener, M. (2002). randomForest: Breiman and cutler's Random Forests for Classification and Regression. R package version 4.6-14.

2. Variable importance

3. Relative important

جنوبی کشور بالاست و بیشترین غلظت آن در جنوب غرب با 174 Mg/m^2 در قسمت هایی از استان خوزستان و کمینه آن در شمال غرب با 45 Mg/m^2 در قسمت هایی از آذربایجان غربی است. در مرتبه بعدی مقادیر بیشینه در نواحی جنوب غرب و جنوب و بخش های بسیار محدودی از نواحی شرقی و مرکزی کشور و کمینه آن نیز منطبق با ارتفاعات کل گستره ایران زمین به ویژه ارتفاعات زاگرس و ارتفاعات کرمان و بخش هایی گسترده ای از شمال غرب می باشد (شکل ۲ - الف).

در ماه می نیز توزیع فضایی بیشینه و کمینه ذرات معلق ($PM_{2.5}$) مشابه با ماه آوریل به ترتیب در جنوب غرب با 179 Mg/m^2 و شمال غرب با 40 Mg/m^2 می باشد، با این تفاوت جزئی که مقادیر ذرات معلق ($PM_{2.5}$) در سیستان و بلوچستان، کرمان، هرمزگان گستردگی بیشتری داشته است (شکل ۲ - ب).

در ماه ژوئن توزیع تراکم ذرات معلق ($PM_{2.5}$) بر فراز ایران نسبت به دو ماه قبلی مذکور افزایش چشمگیری داشته است و نواحی بیشینه آن علاوه بر فراز ناحیه جنوب غرب در بخش هایی از جنوب و جنوب شرق در امتداد سواحل دریای عمان و خلیج فارس به صورت نوار باریک تقریباً به هم پیوسته ای گسترده شده است، طوری که در بخش هایی از استان سیستان و بلوچستان، هرمزگان و بوشهر با 156 Mg/m^2 مقادیر تراکم ذرات معلق ($PM_{2.5}$) چشمگیر می باشد. کمینه ذرات معلق ($PM_{2.5}$) در این ماه نیز منطبق با ارتفاعات البرز، زاگرس و ارتفاعات شرق و شمال شرق و بخش هایی از شمال غرب به ویژه آذربایجان غربی با 28 Mg/m^2 می باشد (شکل ۲ - ج).

بررسی روند تغییرات حاکی از آن بود که در ماه آوریل تمامی نیمه جنوبی نیمه جنوبی کشور روند مثبت و معنی داری را تجربه کرده اند، بیشترین میزان روند هم مربوط به استان خوزستان، بخش هایی از استان سیستان و بلوچستان و کرمان بیشتر در محدوده کویر لوت بوده است (۲-د).

در ماه می نیز به جز جنوب شرق و جنوب غرب کشور بقیه نواحی روند معنی داری را تجربه نکرده اند و بیشینه آن نیز منطبق با بخش هایی از استان خوزستان و سیستان و بلوچستان بوده است (۲-ر).

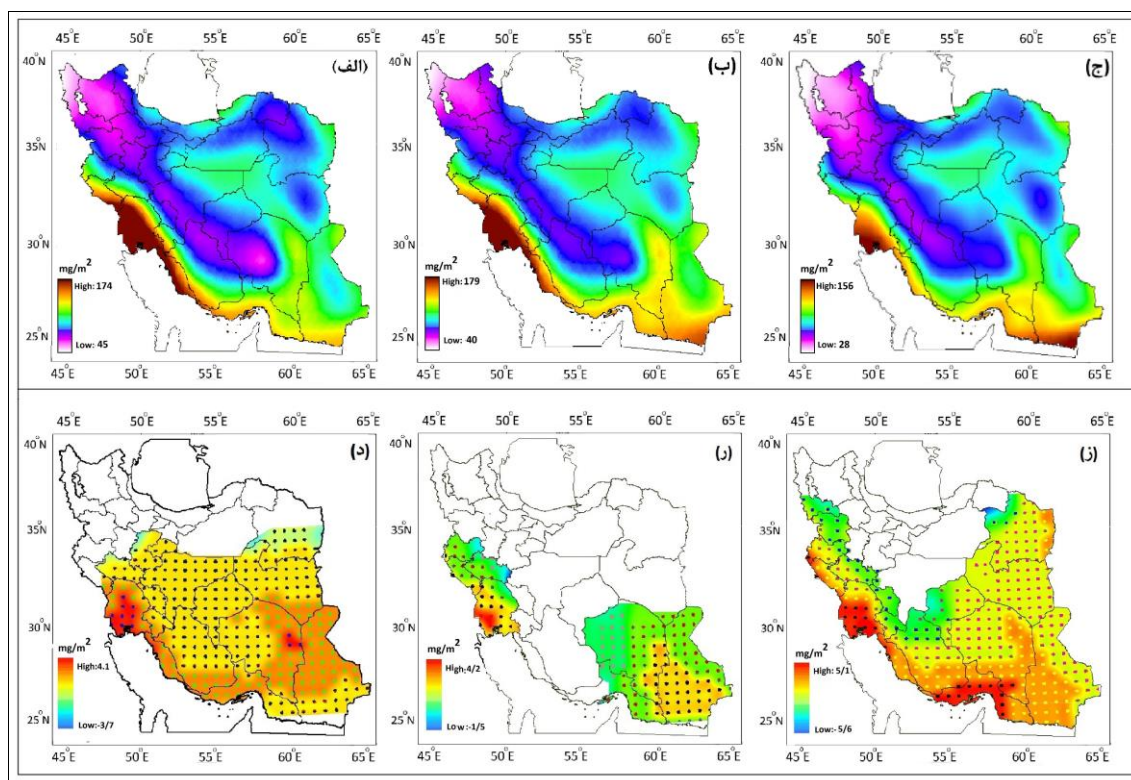
بررسی معنی داری توزیع فضایی روند برای ماه ژوئن نیز نشان داد که متغیر مذکور در نیمه جنوبی کشور و قسمت بسیار محدودی از نیمه شمالی توزیع فضایی روند مثبت داشته است و بیشینه آن نیز در بخش هایی از استان خوزستان و هرمزگان می باشد (۲-ز).

تحلیل فضایی ضرایب همبستگی پیرسون در مقیاس زمانی ماهانه برای کل گستره ایران زمین با سطح اطمینان ۹۹/۹ درصد حاکی از همبستگی مثبت بسیار ضعیف ذرات معلق ($PM_{2.5}$) با پارامتر فشار با مقدار ۰/۱۵، همبستگی ضعیف مثبت با حداقل و حداکثر دما و باد به ترتیب با مقادیر ۰/۴۳، ۰/۳۸، ۰/۴۲ و همبستگی ضعیف منفی با بارش با مقدار ۰/۴۹- در ماه آوریل بوده است. در ماه می نیز ذرات معلق ($PM_{2.5}$) همبستگی بسیار قوی مثبت با حداقل دما ۰/۹، همبستگی قوی مثبت با حداکثر دما، باد و فشار به ترتیب با مقادیر ۰/۷۸، ۰/۷۶، ۰/۸۵ و همبستگی متوسط منفی با بارش ۰/۵۳- داشته است. در ماه ژوئن نیز ذرات معلق ($PM_{2.5}$) همبستگی قوی مثبت با حداقل و حداکثر دما و فشار به ترتیب با مقادیر ۰/۸۳، ۰/۷۱، ۰/۷۷ و، همبستگی ضعیف منفی با بارش ۰/۳۰- و همبستگی مثبت با باد ۰/۱۶ داشته است.

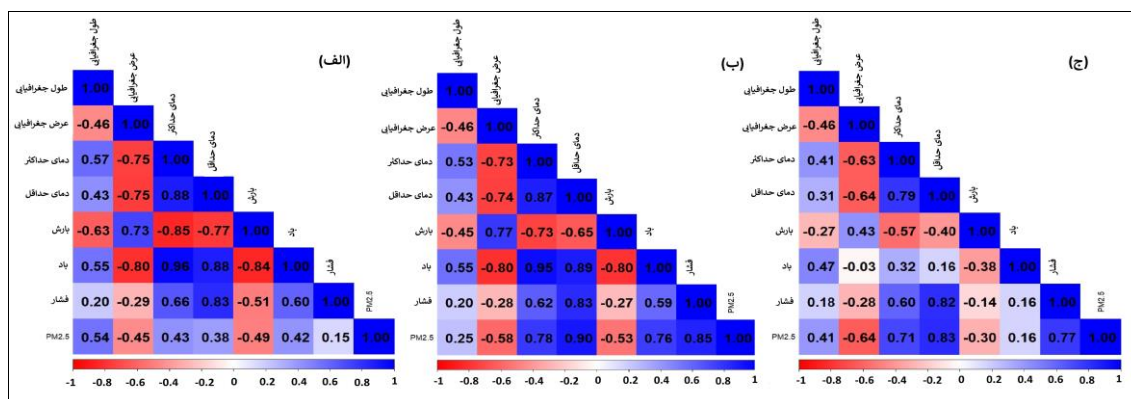
بررسی ضریب همبستگی $PM_{2.5}$ با پارامترهای محیطی در ماه آوریل نیز گویای این است که ذرات معلق ($PM_{2.5}$) بیشترین ضریب همبستگی مثبت را با دمای خاک با مقدار ۰/۴۴ و ضریب همبستگی منفی را با رطوبت خاک با مقدار ۰/۴۳- دارد همچنین همبستگی بسیار ضعیف مثبت و منفی به ترتیب با ارتفاع لایه مرزی و ارتفاع از سطح دریا با مقادیر ۰/۲۱ و ۰/۱۱- دارد. در ماه می نیز $PM_{2.5}$ همبستگی متوسط منفی با رطوبت خاک با مقدار ۰/۵۳-، همبستگی ضعیف مثبت با دمای خاک ۰/۴۵، همبستگی بسیار ضعیف مثبت با ارتفاع لایه مرزی با مقدار ۰/۱۴ و همبستگی ضعیف منفی با ارتفاع با مقدار ۰/۱۳- دارا است. در ماه ژوئن ذرات معلق ($PM_{2.5}$) همبستگی قوی مثبت با دمای خاک با مقدار ۰/۸۷، همبستگی متوسط منفی با ارتفاع از سطح دریا با مقدار ۰/۶۶- و همبستگی ضعیف منفی با ارتفاع

لایه‌مرزی و رطوبت خاک به ترتیب با مقادیر ۰/۳۹- و ۰/۳۲- داشته است.

نتایج کلی حاصل از مقایسه ضریب همبستگی ذرات معلق ($PM_{2.5}$) با پارامترهای اقلیمی و محیطی حاکی از وجود رابطه مستقیم $PM_{2.5}$ با دمای حداکثر و حداقل، باد و فشار، دمای خاک، ارتفاع لایه‌مرزی (در ماه آوریل و می) و رابطه معکوس با رطوبت خاک، ارتفاع و بارش است. تحلیل فضایی همبستگی بین متغیرها نیز گویای این است که در ماه آوریل، می و ژوئن بیشترین ضریب همبستگی مثبت باد با حداکثر دما، فشار با حداقل دما، ارتفاع از سطح دریا با ارتفاع لایه‌مرزی و همبستگی منفی حداکثر و حداقل دما، فشار و باد با بارش، ارتفاع لایه‌مرزی (در ماه ژوئن) و دمای خاک با رطوبت خاک و دمای خاک با ارتفاع از سطح دریا است (شکل ۳).



شکل ۲. نقشه توزیع مکانی و روند میانگین ماهانه ذرات معلق ($PM_{2.5}$) در ماه‌های آوریل (الف - د)، می (ب - ر)، ژوئن (ج - ز) برای گستره ایران زمین ۲۰۲۳-۱۹۸۴. مناطق همراه با نقطه در نقشه معنی‌داری روند را در سطح اطمینان ۹۵ درصد بر اساس روش رگرسیون خطی نشان می‌دهند (واحد: میلی‌گرم/مترمربع/ماهانه)



شکل ۳. ضرایب همبستگی بین غلظت ذرات معلق ($PM_{2.5}$)، متغیرهای اقلیمی و محیطی در گستره ایران زمین به ترتیب برای ماه آوریل (الف - د)، می (ب - ر) و ژوئن (ج - ز) با معناداری آماری در سطح اطمینان ۹۹/۹ درصد.

در ادامه داده ها با به کارگیری الگوریتم جنگل تصادفی فرایندهای فضایی به صورت کاملاً تصادفی به دو گروه آموزشی و آزمون ۸۰ به ۲۰ تقسیم شدند. ۳۸۹ نقطه به عنوان داده های آموزشی و تعداد ۷۲ نقطه به عنوان داده های آزمون در نظر گرفته شد. از این رو پارامترهای محیطی و پارامترهای اقلیمی برای هر ماه به صورت جداگانه با نمونه برداری تصادفی و تصادفی سازی ویژگی ها برای افزایش دقت و جلوگیری از Overfitting بررسی شد و اهمیت نسبی متغیرها در توضیح تغییرپذیری غلظت ذرات معلق (PM 2.5) تعیین شد.

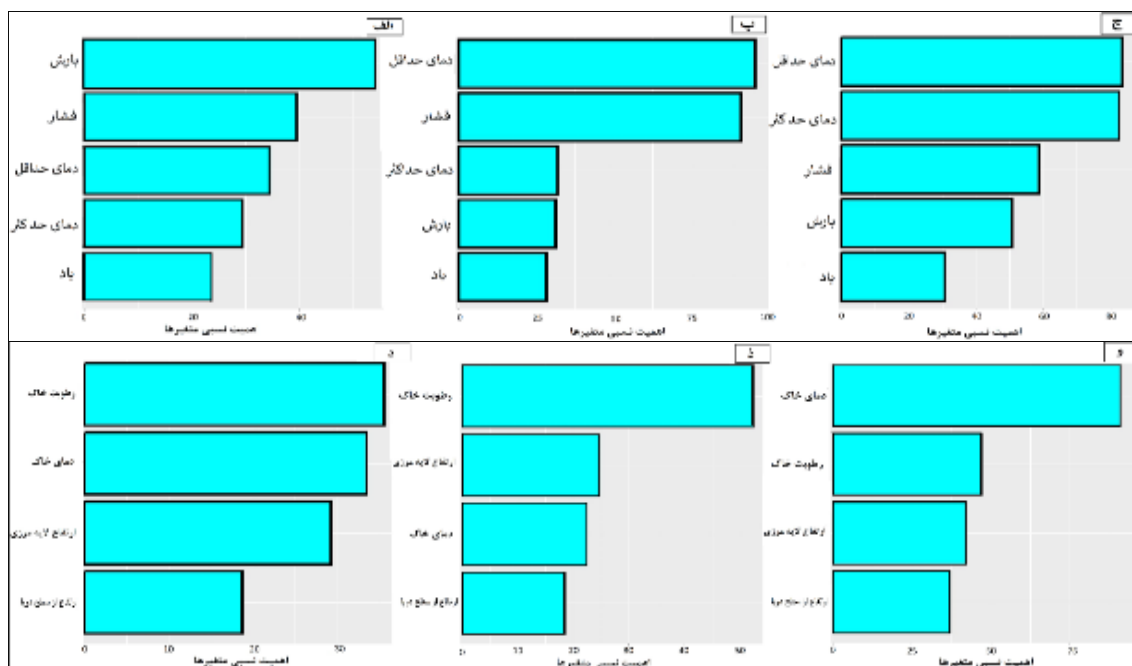
نتایج اهمیت نسبی پارامترهای اقلیمی گویای این بود که به ترتیب در ماه آوریل بارش، فشار، حداقل دما، حداکثر دما و باد، در ماه می حداقل دما، فشار، حداکثر دما، بارش و باد و در ماه ژوئن حداقل دما، حداکثر دما، بارش و باد مهم ترین متغیر اقلیمی بوده است. تحلیل نتایج اهمیت نسبی پارامترهای محیطی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی نیز گویای این است که در ماه آوریل پارامترهای مهم به ترتیب رطوبت خاک، دمای خاک، ارتفاع لایه مرزی و ارتفاع از سطح دریا، در ماه می رطوبت خاک، ارتفاع لایه مرزی، دمای خاک و ارتفاع از سطح دریا، در ماه ژوئن دمای خاک، رطوبت خاک، ارتفاع لایه مرزی و ارتفاع از سطح دریا بوده است (شکل ۴).

نتایج ارزیابی مدل سازی ذرات معلق (PM 2.5) با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی به کمک متغیرهای اقلیمی و محیطی برای ماه آوریل، می و ژوئن در جدول ۲ آمده است، نتایج اعتبارسنجی بر اساس شرایط اقلیمی گویای این است که در ماه آوریل، می و ژوئن خطای جذر میانگین مربعات به ترتیب برای متغیرهای اقلیمی ۴/۰۵، ۲/۳ و ۸/۳ میلی گرم بر مترمربع و متغیرهای محیطی ۳/۱، ۸/۲ و ۸/۳ میلی گرم بر مترمربع بود. میانگین خطای مطلق نیز به ترتیب در ماه های ذکر شده برای متغیرهای اقلیمی ۲/۴، ۱/۷ و ۵/۷ میلی گرم بر مترمربع و متغیرهای محیطی ۲/۲، ۵/۶ و ۵/۷ میلی گرم بر مترمربع بود. به عبارت دیگر میانگین خطای مدل سازی شده مقادیر کمتری دارد؛ بنابراین مدل بهتر می تواند مجموعه داده را مدل سازی کند.

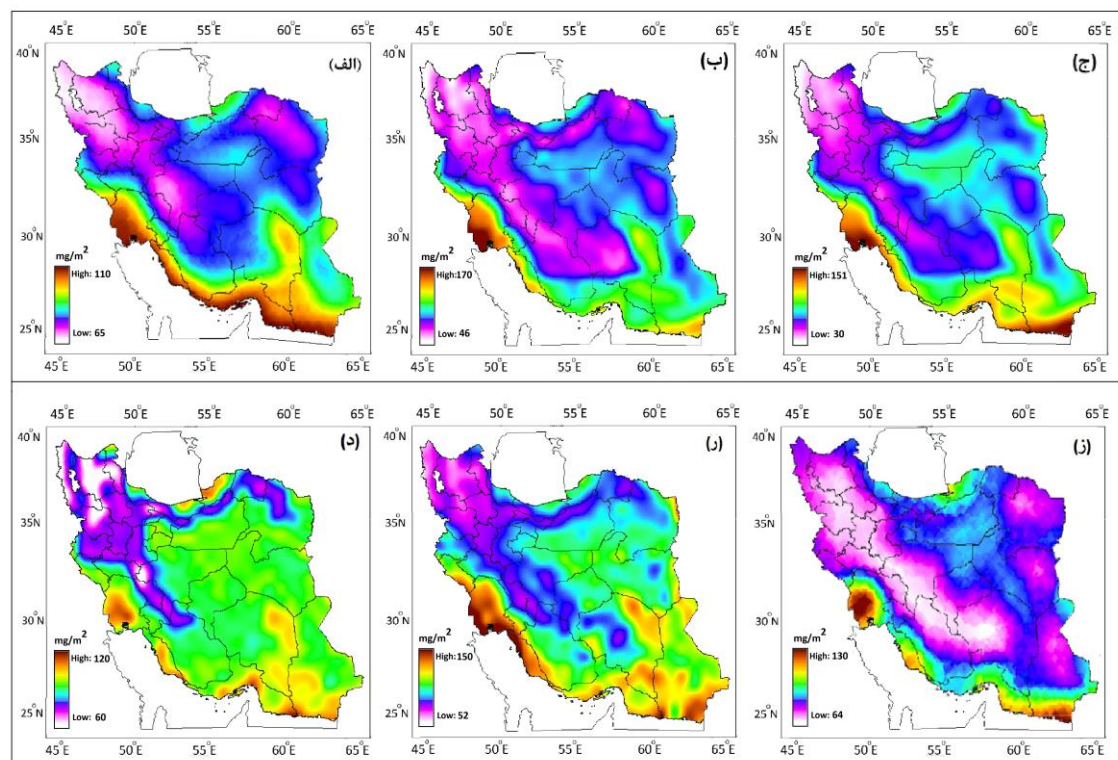
ضریب تبیین هم به ترتیب در ماه های ذکر شده برای متغیرهای اقلیمی ۰/۹۷، ۰/۹۸ و ۰/۸۶ میلی گرم بر مترمربع و برای متغیرهای محیطی ۰/۹۸، ۰/۸۸ و ۰/۸۷ میلی گرم بر مترمربع بوده است که نشان دهنده عالی بودن نوع مدل سازی است؛ لذا می توان نتیجه گرفت که با استفاده از مدل جنگل تصادفی می توان شبیه سازی ذرات معلق (PM 2.5) را با صحت بالایی برآورد کرد. در نتیجه با نتایج حاصل از مناسب بودن الگوریتم جنگل تصادفی نقشه مدل سازی مکانی برای هر سه ماه مذکور ترسیم شد (شکل ۵). نقشه مدل سازی مکانی ذرات معلق (PM 2.5) بر اساس شرایط اقلیمی نشان داد که در ماه آوریل مقدار غلظت ذرات معلق (PM 2.5) بین ۱۱۰ تا ۶۵ میلی گرم بر مترمربع، ماه می بین ۱۷۰ تا ۴۶ میلی گرم بر مترمربع و در ماه ژوئن بین ۱۵۱ تا ۳۵ میلی گرم بر مترمربع بوده است.

توزیع مکانی نقشه های مدل سازی شده بر اساس پارامترهای اقلیمی بیانگر آن بود که در ماه آوریل قسمت هایی از استان خوزستان، بوشهر، هرمزگان و سیستان و بلوچستان، در ماه می خوزستان و در ماه ژوئن قسمت هایی از خوزستان و سیستان و بلوچستان بیشترین مقدار مدل سازی را داشته اند و در ماه آوریل و ژوئن در آذربایجان غربی و در ماه می قسمت هایی از آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و اردبیل کمترین مقدار را داشته اند. نقشه مدل سازی با پارامترهای محیطی بیانگر آن است که در ماه آوریل مقدار غلظت ذرات معلق (PM 2.5) بین ۱۲۰ تا ۶۰ میلی گرم بر مترمربع، ماه می بین ۱۵۰ تا ۵۲ میلی گرم بر مترمربع و در ماه ژوئن بین ۱۳۰ تا ۶۴ میلی گرم بر مترمربع است.

طبق نقشه های مذکور در ماه آوریل مقادیر بیشینه عمدتاً در خوزستان و کمینه در شمال غرب شامل بخش هایی از آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی، اردبیل و کردستان و به صورت جزئی در نقاط مرزی بین اصفهان و لرستان است، در ماه می مناطق بیشینه و کمینه عمدتاً در استان خوزستان و آذربایجان غربی و در ماه ژوئن بیشه در بخش هایی از خوزستان و سیستان و بلوچستان و کمینه منطبق با ارتفاعات زاگرس هست (شکل ۶).



شکل ۴. اهمیت نسبی متغیرهای اقلیمی و محیطی در تبیین تغییرپذیری ذرات معلق (PM_{2.5}) در گستره ایران زمین به ترتیب برای ماه‌های آوریل (الف-د)، می (ب-د) و ژوئن (ج-و).

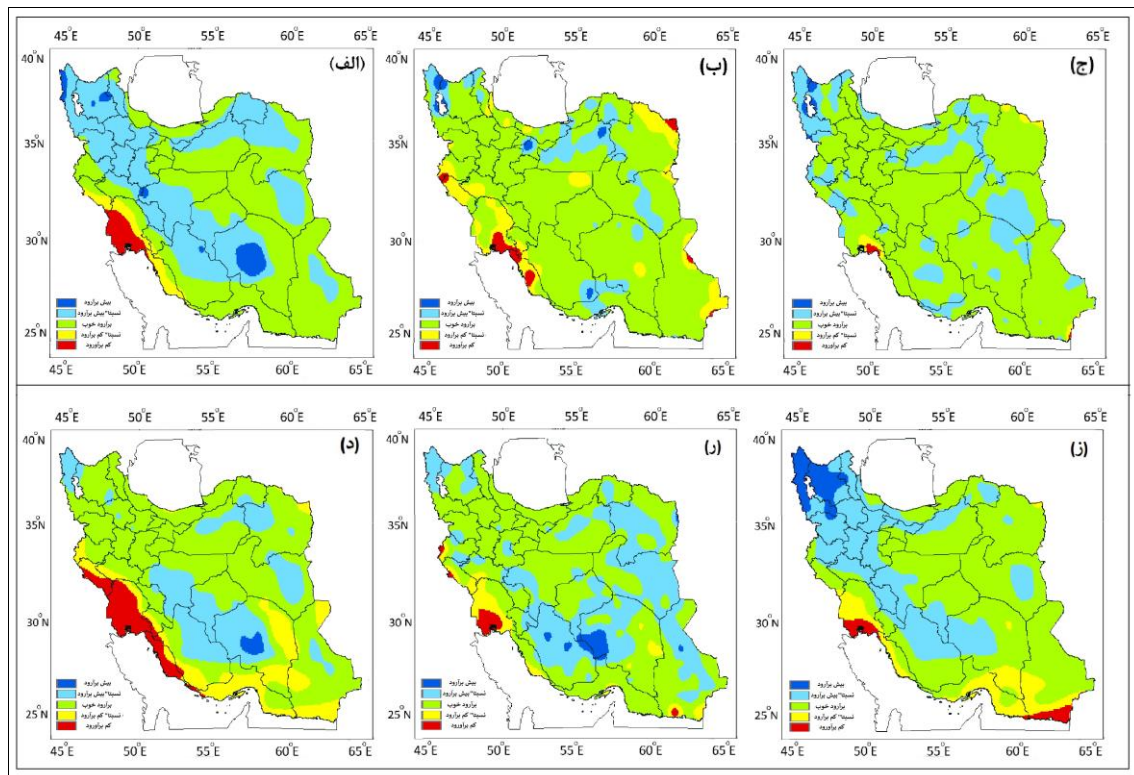


شکل ۵. نقشه مدل‌سازی مکانی غلظت ذرات معلق (PM_{2.5}) با پارامترهای اقلیمی و محیطی به ترتیب برای ماه‌های آوریل (الف-د)، می (ب-و) و ژوئن (ج-ی) با الگوریتم جنگل تصادفی برای گستره ایران زمین.

نتایج حاصل از مدل‌سازی غلظت ذرات معلق PM_{2.5} با الگوریتم جنگل تصادفی^۱ برای ماه‌های آوریل، می و ژوئن بر پایه داده‌های اقلیمی و محیطی نشان‌دهنده دقت مطلوب مدل در بیشتر نواحی کشور است. ارزیابی عملکرد مکانی مدل

با نقشه های اختلاف طبقه بندی شده در ۵ کلاس بر اساس Z-score نشان داد که در داده های اقلیمی، مدل سازی موفق (انطباق بالا با واقعیت) بیش از ۷۰ درصد در ماه می و ژوئن و بیش از ۵۴ درصد در ماه آوریل بوده است. همچنین در داده های محیطی، این مقدار کمی پایین تر بوده و در حدود ۵۹ درصد برای ماه آوریل و می و ۵۶ درصد برای ماه ژوئن بوده است. این موضوع نشان دهنده عملکرد قابل قبول مدل در بازنمایی سطوح غلظت $PM_{2.5}$ باتوجه به داده های مکانی ورودی است.

با این وجود در نواحی جنوبی و جنوب غرب کشور مانند خوزستان، بوشهر و سیستان و بلوچستان عمدتاً برآورد پایین کمتر از ۶ درصد در تمامی ماه ها دیده شد. در حالی که در نواحی شمال غربی مانند آذربایجان غربی و اردبیل، بیش برآورد مدل با کمتر از ۵ درصد مشاهده شد و داده های مدل سازی شده بالاتر از مقادیر واقعی بودند (جدول ۳). در نهایت، بررسی همبستگی بین داده های واقعی و مدل سازی شده نشان داد که بالاترین همبستگی در ماه می (۰/۹۸) و پایین ترین آن در آوریل (۰/۵۴) برای داده های اقلیمی به دست آمد. همبستگی ۹۶ درصد در ماه ژوئن برای داده های اقلیمی و برای داده های محیطی ۶۹ درصد، ۹۲ درصد و ۶۳ درصد به ترتیب برای ماه های آوریل، می و ژوئن حاکی از انطباق مناسب الگوهای مکانی با مدل سازی انجام شده است.



شکل ۶. نقشه مکانی بایاس مدل استاندارد شده برای پارامترهای اقلیمی و محیطی به ترتیب برای ماه های آوریل (الف - د)، می (ب - و) و ژوئن (ج - ی) با الگوریتم جنگل تصادفی برای گستره ایران زمین.

جدول ۲. نتایج اعتبار سنجی مدل سازی مکانی ذرات معلق ($PM_{2.5}$) با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی برای گستره ایران

متغیرها	R2	MAE	RMSE	M _{tree}	N _{tree}	ماه
ویژگی اقلیمی	۰/۸۶	۵/۷۱	۸/۳۷	۲	۱۴۰۰	آوریل
ویژگی محیطی	۰/۸۷	۵/۷۶	۸/۳۳	۲	۱۲۰۰	آوریل
ویژگی اقلیمی	۰/۹۸	۱/۷۱	۲/۳۸	۴	۲۰۰۰	می
ویژگی محیطی	۰/۸۸	۵/۶۸	۸/۲۴	۲	۷۰۰	می
ویژگی اقلیمی	۰/۹۷	۲/۴۵	۴/۰۵	۴	۱۸۰۰	ژوئن
ویژگی محیطی	۰/۹۸	۲/۲۷	۳/۱۸	۲	۱۶۰۰	ژوئن

جدول ۳. دسته‌بندی مکانی بایاس استاندارد شده پارامترهای اقلیمی و محیطی ذرات معلق ($PM_{2.5}$)

ماه	پارامتر	کم بر آورد	نسبتاً کم بر آورد	بر آورد خوب	نسبتاً بیش بر آورد	بیش بر آورد
آوریل	ویژگی اقلیمی	۲۱.۲	۷.۲	۵۴/۰۴	۵۵.۳۸	۵.۲
	ویژگی محیطی	۳۷.۵	۷۴.۱۲	۰۴.۵۹	۰۵.۲۲	۸.۰
می	ویژگی اقلیمی	۵۷.۱	۷.۹	۴۵.۷۶	۳۰.۱۱	۹۸.۰
	ویژگی محیطی	۱۷.۱	۱.۴	۰۷.۵۹	۹۸.۳۳	۶۸.۱
ژوئن	ویژگی اقلیمی	۲۳.۰	۲۰.۱	۲.۷۶	۷۸.۲۱	۵۹.۰
	ویژگی محیطی	۷.۱	۹.۷	۳.۵۶	۹.۲۹	۲.۴

بحث

تحلیل فضایی تغییرات و ناهنجاری غلظت ذرات معلق $PM_{2.5}$ در فصل بهار بر گستره ایران نشان داد که بیشینه این آلاینده عمدتاً در مناطق جنوب غرب، جنوب و جنوب شرق کشور، به‌ویژه در نواحی ساحلی خلیج فارس و دریای عمان متمرکز بوده است. این تمرکز مکانی عمدتاً تحت تأثیر هم‌زمان چندین عوامل جغرافیایی، اقلیمی و محیطی همچون نزدیکی به منابع بزرگ گردوغبار فرامرزی مانند بیابان‌های عراق، عربستان و یمن، کاهش رطوبت خاک (اسعدی اسکویی و همکاران، ۱۴۰۱) و فعالیت کشاورزی و صنعتی محلی است که تأثیر هم‌زمان این عوامل سبب تشدید غلظت این آلاینده در این مناطق شده است.

یافته‌های این مطالعه با نتایج برزو و همکاران (۱۴۰۰) و رئیس‌پور (۱۴۰۰) که نقش منابع فرامرزی و شرایط اقلیمی را در افزایش این آلاینده در نیمه جنوبی کشور نشان داده‌اند و قسمت‌هایی از نیمه جنوبی کشور از جمله بخش‌هایی از استان خوزستان و سیستان و بلوچستان را به‌عنوان مناطق دارای بیشینه $PM_{2.5}$ معرفی کرده‌اند، همخوانی دارد. در مقابل، کمترین غلظت $PM_{2.5}$ عمدتاً در ارتفاعات کشور، از جمله رشته‌کوه‌های البرز، زاگرس و بخش‌هایی از شمال غرب مشاهده شد. به نظر می‌رسد ارتفاع زیاد، نفوذ جریان‌های هوایی مرطوب، آسمان ابری و بارش‌های بیشتر و پوشش گیاهی متراکم منجر به کاهش تجمع ذرات معلق در این مناطق شده است. این نتایج با مطالعات رحیمیان و همکاران (۱۳۹۲) و ذوالفقاری و همکاران (۱۳۹۵) که تأثیر ویژگی‌های توپوگرافیک و اقلیمی در کنترل آلودگی هوای ارتفاعات را تأیید کرده‌اند، مطابقت دارد.

علاوه بر این، بیشترین میزان روند غلظت $PM_{2.5}$ ماهانه در طی چهل سال مورد بررسی در ماه‌های آوریل، می و ژوئن در قسمت‌هایی از استان خوزستان بوده است. این روند ناشی از ترکیب خشکسالی‌های متعدد در اطراف هورالعظیم و دریاچه هامون (ذوالفقاری و همکاران، ۱۳۹۵)، تغییرات کاربری اراضی و افزایش زمین‌های کشاورزی آیش و رها شده به دلیل خشکسالی (خوش‌اخلاق و همکاران، ۱۳۹۱)، کاهش رطوبت خاک و منفصل شدن ذرات آن به دلیل کاهش روند بارش در نواحی کویر مرکزی (موحدی و همکاران، ۱۳۹۲) و افزایش فرسایش بادی بوده است. تغییرات فضایی - زمانی الگوی ذرات معلق ($PM_{2.5}$) باتوجه به یافته‌های فوق حاکی از آن است که تراکم این آلاینده در ایران حاصل تعامل پیچیده عوامل اقلیمی و محیطی است.

متغیرهایی همچون بارش، فشار، دمای حداقل و حداکثر، باد، ارتفاع لایه مرزی و ارتفاع از سطح دریا، رطوبت خاک، دمای خاک همگی در نوسانات غلظت $PM_{2.5}$ نقش دارند و اهمیت نسبی آن‌ها در طول فصل بهار و از ماهی به ماه دیگر نه تنها از نظر نوع بلکه از نظر شدت نیز تغییر می‌کند؛ لذا به‌منظور شناسایی اهمیت نسبی این متغیرها، شناسایی رابطه ذرات معلق ($PM_{2.5}$) با پارامترهای اقلیمی و محیطی و ارتباط پارامترها با یکدیگر و مدل‌سازی $PM_{2.5}$ برای ماه‌های فصل بهار، از الگوریتم جنگل تصادفی استفاده شد. این الگوریتم به دلیل توانایی بالا در مدل‌سازی روابط غیرخطی، مقاومت در برابر نویز، انعطاف‌پذیری در مواجهه با داده‌های ناقص و عملکرد بهتر نسبت به روش‌هایی مانند SVM و شبکه‌های عصبی انتخاب شد (Hughes et al., 2022; Zhang et al., 2024).

نتایج مدل جنگل تصادفی در بررسی اهمیت نسبی متغیرها نشان داد که در ماه آوریل بارش با ۵۵ درصد در رتبه اول و در ماه می و ژوئن به ترتیب با ۲۸ درصد و ۳۱ درصد در رتبه چهار اهمیت نسبی قرار گرفته است. به عبارت دیگر بارش در ماه

آوریل بیشترین نقش را در شست و شوی ذرات معلق از جو و کاهش غلظت PM_{2.5} داشته است. بررسی میانگین بارش در ماه های مختلف این فصل نیز نشان داد که بارش در ماه آوریل نسبت به سایر ماه های این فصل بیشترین میزان را داشته است (حقیقی و همکاران، ۱۳۹۶)، که این امر می تواند به فرایند شسته شدن ذرات معلق^۱ توسط بارش اشاره داشته باشد. این امر با یافته های وانگ و همکاران (۲۰۲۴)، در زمینه تأثیر بارش بر آلاینده PM_{2.5} در شرق آسیا مطابقت دارد.

اهمیت نسبی متغیر فشار در آوریل (با ۴۰ درصد) و می (با ۸۵ درصد) رتبه دوم و در ژوئن (با ۵۹ درصد) رتبه سوم بوده است. این کاهش رتبه ماه ژوئن می تواند متأثر از کاهش میانگین فشار ماهانه در ژوئن و افزایش ناپایداری جوی، پخش بهتر آلاینده ها به ارتفاعات بالاتر و کاهش غلظت آن ها در سطح زمین باشد. بررسی اهمیت نسبی دما حداقل حاکی از آن است که این متغیر در ماه آوریل با ۳۴ درصد در رتبه سوم اهمیت قرار دارد، اما در ماه می و ژوئن در رتبه اول اهمیت (رتبه اول) به ترتیب با ۹۷ و ۸۴ درصد قرار گرفته است.

تغییر رتبه در اهمیت نسبی این متغیر در ماه های می و ژوئن با توجه شرایط اقلیمی ایران و گذر از فصل بهار به تابستان و ادامه فعالیت سامانه های جوی سرد - گرم و افزایش تدریجی شرایط تابستانه است. به عبارت دیگر افزایش دمای حداقل در این ماه ها منجر به افزایش تبخیر از سطح خاک در روز، افزایش رطوبت نسبی شبانه و ایجاد وارونگی حرارتی می شود و این امر باعث تثبیت و افزایش تجمع توده های گردوغبار در نزدیکی سطح زمین می گردد (Huang et al., 2021). این الگو مطابق با یافته های فرزانه پی و همکاران (۱۴۰۳) برای مناطق خشک ایران می باشد.

دمای حداکثر در ماه ژوئن با ۸۲ درصد، ماه می با ۲۹ درصد و آوریل با ۳۰ درصد به ترتیب در رتبه دوم و سوم و چهارم اهمیت قرار گرفته است. در ماه ژوئن با تسلط سیستم های گرم و خشک و افزایش شدت تابش خورشید، افزایش دما موجب تشدید تبخیر و خشکی سطح زمین می شود و این امر فرایندهای فرسایش بادی را تسهیل می کند و منجر به افزایش آلاینده ها می گردد (ابراهیمی، ۱۳۹۹). هر چند در ماه می و آوریل دمای حداکثر در فرایندهای تبخیر و خشک شدن خاک اهمیت دارد، ولی به دلیل شرایط اقلیمی این ماه با بارندگی بالاتر، دمای بالا بیشتر صرف تبخیر و خشک شدن خاک می شود؛ لذا تأثیر آن بر گردوغبار چشمگیر نیست.

متغیر باد در ماه های آوریل (۲۳ درصد)، می (۲۶ درصد) و ژوئن (۳۱ درصد) در رتبه آخر اهمیت نسبی قرار گرفته است. اهمیت پایین سرعت باد در این فصل برخلاف برخی مطالعات که باد را عامل اصلی خیزش گردوغبار می دانند (Shao et al., 2011)، نشان می دهد رطوبت بالای خاک و پایداری جو به ویژه در آوریل و می مانع اثرگذاری باد می شود. مطالعات پیشین نیز نشان داده اند که نقش باد در تولید گردوغبار زمانی اهمیت می یابد که شرایط خشکی هوا، پوشش گیاهی کم و سرعت باد از حد آستانه فراتر رود، اما در ماه آوریل و تا حدودی می به دلیل رطوبت خاک و بارش های فصلی، این شرایط کمتر حاکم است؛ لذا این یافته ها نشان دهنده این است که در ماه آوریل، بارش و فشار هوا نقش مهم تری نسبت به باد در تراکم غلظت PM_{2.5} دارند.

تحلیل اهمیت نسبی پارامترهای محیطی نشان دهنده این است که رطوبت خاک در ماه های آوریل، می به ترتیب با ۴۱ درصد و ۵۳ درصد در رتبه اول اهمیت و در ماه ژوئن با ۴۷ درصد در رتبه دوم اهمیت قرار گرفته است. رطوبت خاک به عنوان مانعی فیزیکی از آزاد شدن و پراکندگی گردوغبار در جو جلوگیری می کند؛ لذا در ماه ژوئن هم زمان با افزایش دما و کاهش بارش نسبت به ماه های قبل، خاک های مناطق مستعد گردوغبار (به ویژه جنوب غرب، شرق و مرکز ایران) در شرایط بحرانی تری قرار می گیرند و توانایی مقاومت در برابر فرسایش بادی را از دست می دهند. به عبارت دیگر رطوبت خاک یک کنترل کننده مهم در شدت غبارهای فصلی بهار به ویژه برای مناطق جنوب شرق و مرکز ایران می باشد (Zou & Zhai, 2004). متغیر دمای خاک در ماه ژوئن با اهمیت نسبی ۹۰ درصد در رتبه اول قرار دارد. در این ماه با افزایش دما، دمای خاک نیز به طور قابل توجهی افزایش می یابد، این افزایش دما باعث تشدید تبخیر و خشک شدن سطح خاک و غبارخیزی آن به ویژه در نواحی بیابانی و خشک ایران (مانند سیستان، خوزستان، و شرق ایران) شده است. در واقع دمای خاک یکی از پیش عامل های

بی‌ثباتی سطح خاک است و به طور غیرمستقیم با غلظت $PM_{2.5}$ ارتباط دارد (Zhang et al., 2019). دمای خاک در ماه آوریل با ۳۶ درصد اهمیت در رتبه دوم و در ماه می با اهمیت نسبی ۲۲ درصد در رتبه سوم قرار گرفته است. لازم به ذکر است که باوجود اینکه در ماه می نیز با افزایش تابش خورشید دمای خاک افزایش می‌یابد، اما این افزایش دما منجر به تبخیر سطحی و خشکی خاک می‌شود؛ ولی چون تأثیر آن به صورت غیرمستقیم و کندتر است، در بررسی اهمیت نسبی در رتبه پایین‌تری نسبت به رطوبت خاک آوریل قرار گرفته است. ارتفاع لایه‌مرزی تعیین‌کننده میزان تراکم ذرات معلق در جو است (قانقرمه و شکرالهی، ۱۴۰۱). تغییر اهمیت نسبی آن نیز به دلیل نوسانات ماهانه در ساختار حرارتی جوی قابل‌توجه است. در ماه آوریل به دلیل پایداری بیشتر و گرمایش محدودتر لایه‌مرزی به طور کامل توسعه نمی‌یابد؛ لذا تأثیر آن بر آلاینده‌ها محدودتر است (Cheng et al., 2024)، درحالی‌که در ماه می با افزایش تابش و ناپایداری جوی، توسعه عمودی این لایه افزایش یافته و نقش برجسته‌ای در تهویه آلودگی‌ها ایفا می‌کند و به رتبه دوم اهمیت نسبی با ۲۵ درصد ارتقا می‌یابد.

در ماه ژوئن اگرچه میانگین ارتفاع لایه‌مرزی بیشتر است، اما به دلیل پایداری نسبی این متغیر و کاهش تغییرات روزانه آن، تأثیر نسبی آن در مدل کاهش یافته و مجدداً در رتبه سوم اهمیت نسبی قرار می‌گیرد. ارتفاع از سطح دریا بیشتر یک متغیر ایستا و ساختاری است. تأثیر این متغیر در توزیع و پراکندگی آلاینده $PM_{2.5}$ در مقایسه با پارامترهای پویا (مانند رطوبت خاک یا باد) معمولاً کمتر است و تأثیرش عمدتاً غیرمستقیم است، و در آوریل با ۱۸ درصد، ماه می با ۱۹ درصد و ژوئن با ۳۷ درصد اهمیت نسبی در رتبه آخر قرار دارد. لازم به ذکر است که اهمیت پایین این متغیر در مدل نافی نقش ساختاری آن در توزیع و پراکندگی آلاینده نیست، بلکه ناشی از ویژگی آماری و ایستایی آن است.

مدل‌سازی صورت گرفته با توجه به اهمیت نسبی این متغیرها نشانگر این است که مدل جنگل تصادفی با دقت مناسب سطوح مکانی غلظت $PM_{2.5}$ را در سه ماه بهار با استفاده از پارامترهای اقلیمی و محیطی با ضریب تبیین بالای ۸۵ درصد، میانگین خطای مطلق کمتر از ۶ درصد و حداقل مربعات خطا کمتر از ۹ درصد بازسازی کرده است که این امر نشان‌دهنده قدرت بالای مدل جنگل تصادفی برای بازسازی مکانی ذرات معلق در سطح ملی است و نقشه‌های اختلاف طبقه‌بندی شده‌ای که به منظور درک دقیق‌تری از الگوی مکانی خطاهای مدل در ۵ کلاس بر اساس Z-score ترسیم شده است نیز به خوبی بازسازی مکانی مطلوب مدل را نشان می‌دهد، طوری که در تمامی نقشه‌ها مقادیر آلاینده را با دقت بالا (بین ۵۰ تا ۷۶ درصد) مدل‌سازی کرده است، باین وجود در بخش‌هایی از کشور همچون مناطق مرزی و کوهستانی دقت مدل‌سازی پایین‌تر است و انطباق کمی با واقعیت دارند.

بر اساس نقشه‌های اختلاف نواحی با انطباق پایین عمدتاً در جنوب و جنوب غرب کشور به‌ویژه خوزستان و بخش‌هایی از سیستان و بلوچستان دیده می‌شود. این اختلاف می‌تواند ناشی از نقش مهم گردوغبارهای فرامرزی در منطقه باشد که منشأ آن عمدتاً خارج از مرزهای ایران است (مانند بیابان‌های عراق و سوریه برای خوزستان و بیابان‌های شرق افغانستان و پاکستان برای سیستان)، در حقیقت به دلیل فقدان داده‌های مرزی در مدل، داده‌های ورودی قادر به درک و بازنمایی دقیق این مناطق نیستند و این امر یکی از چالش‌های اصلی در مدل‌سازی آلودگی هوا در ایران می‌باشد. از سوی دیگر، در نواحی شمال غرب کشور مانند آذربایجان شرقی، غربی و اردبیل، مدل تمایل به بیش‌برآوردی مقادیر $PM_{2.5}$ نسبت به داده‌های واقعی دارد. این امر می‌تواند ناشی از پیچیدگی‌های توپوگرافی، شرایط جوی خاص منطقه باشد که در داده‌های اقلیمی یا محیطی به درستی منعکس نشده‌اند.

تحلیل همبستگی نقشه‌ها نیز گویای این است که ضرایب همبستگی بالای نقشه‌های مدل‌سازی شده با داده‌های واقعی نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل در بازسازی الگوهای مکانی - زمانی $PM_{2.5}$ در این دوره‌ها است به‌ویژه در ماه‌های می و ژوئن که شرایط جوی متفاوت‌تری از ماه آوریل دارد، نتایج حاکی از دقت بالای مدل در بازنمایی شرایط پایداری و گرم‌تر است، تفاوت در همبستگی بین ماه‌های موجود با مطالعات مشابه همخوانی دارد و اهمیت توجه به شرایط اقلیمی را در مدل‌سازی آلاینده مذکور برجسته می‌سازد (Di et al., 2019; Zhu et al., 2021).

نتیجه‌گیری

نوسان ذرات معلق (PM_{2.5}) تأثیر چشمگیری بر متغیرهای آب‌وهوایی، انسانی، محیط زیستی و... می‌گذارد. از این رو آگاهی از رفتار طولانی‌مدت آن و شناسایی متغیرهای تأثیرگذار بر آن یک نیاز اساسی برای بسیاری از مطالعات است؛ لذا به کمک داده‌های حاصل از مجموعه داده MERRA-2 با پوشش زمانی ۴۰ ساله برای ماه‌های آوریل، می و ژوئن اقدام به واکاوی PM_{2.5} گردید. بدین منظور ابتدا بعد از انجام عملیات پیش‌پردازش بر روی داده‌ها، توزیع فضایی مکانی و روند هر سلول با روش رگرسیون خطی با سطح اطمینان ۹۵ درصد مورد آزمون قرار گرفت و مشخص شد که بیشترین توزیع فضایی ذرات معلق (PM_{2.5}) در ماه‌های آوریل، می و ژوئن عمدتاً در استان خوزستان بوده است.

بررسی روند نیز بیانگر این بود که در ماه آوریل نیمه جنوبی کشور به‌ویژه بخش‌هایی از استان خوزستان و کرمان و سیستان و بلوچستان، در ماه می بخش‌هایی از جنوب شرق و جنوب غرب و در ماه ژوئن نیمه جنوبی و قسمت‌هایی از شمال شرق و غرب کشور روند مثبت معناداری را تجربه کرده‌اند. بررسی روابط بین PM_{2.5} با متغیرهای اقلیمی و محیطی نیز نشان داد که در ماه آوریل ذرات معلق (PM_{2.5}) بالاترین ضریب همبستگی را با بارش و دما خاک، در ماه می با حداقل دما و رطوبت خاک، در ماه ژوئن نیز با حداقل دما و دمای خاک داشته است.

نقش مؤثر پارامترهای اقلیمی و محیطی در تغییر غلظت ذرات معلق (PM_{2.5}) در گستره جغرافیایی ایران توسط رئیس پور (۱۴۰۰)، کاتورانی و همکاران (۱۴۰۳) نیز گزارش شده است. بررسی اهمیت نسبی متغیرها در توضیح تغییرپذیری غلظت ذرات معلق (PM_{2.5}) با به‌کارگیری الگوریتم جنگل تصادفی نیز گویای این بود که در ماه آوریل، می و ژوئن به ترتیب پارامتر بارش و رطوبت خاک، دمای حداقل و رطوبت خاک، دمای حداقل و دمای خاک بالاترین اهمیت نسبی را در مقایسه با سایر متغیرها داشته است. یافته‌های حاصل از ارزیابی عملکرد الگوریتم جنگل تصادفی برآزش یافته بر اساس پارامترها در این مطالعه حاکی از عملکرد خوب این الگوریتم در مدل‌سازی است که این یافته‌ها همسو با نتایج کهراری و همکاران (۱۴۰۳)، جواد و همکاران (۱۴۰۰) است.

هرچند در برخی از مناطق همچون آذربایجان غربی و خوزستان مقدار PM_{2.5} مدل شده متفاوت با مقادیر واقعی است. این اختلاف عمدتاً به دلیل ورود گردوغبار فرامرزی است که در داده‌های MERRA-2 به طور کامل ثبت نمی‌شود و همچنین محدودیت‌های داده‌های ورودی یا عوامل ژئوپلیتیکی همچون بی‌ثباتی منابع گردوغبار محلی و شرایط پیچیده و غیرقابل کنترل محیطی و اقلیمی است. این محدودیت‌ها نشان می‌دهد که برای بهبود دقت مدل و کاربرد آن در سیاست‌گذاری، نیاز به تلفیق داده‌های محلی با رزولوشن بالاتر و بررسی عوامل اقلیمی و محیطی به‌صورت هم‌زمان و همچنین توجه به منابع فرامرزی گردوغبار وجود دارد. براین اساس، پیشنهاد می‌شود علاوه بر اقدامات کنترل محلی گردوغبار، همکاری‌های منطقه‌ای و بین‌کشوری برای مدیریت منابع گردوغبار فرامرزی تقویت شود تا کاهش مؤثرتری در آلودگی هوا حاصل گردد.

سپاسگزاری

مقاله حاضر با عنوان «واکاوی و مدل‌سازی فضایی PM_{2.5} فصل بهار بر گستره ایران زمین با بهره‌گیری از الگوریتم جنگل تصادفی» مستخرج از رساله دکتری آب‌وهواشناسی دانشگاه زنجان است که با پشتیبانی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (بنیاد ملی علم ایران) (INSF) انجام شد. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از بنیاد ملی علم ایران، دانشگاه زنجان و داوران نشریه «جغرافیا و پایداری محیط» که ما را در انجام و ارتقای کیفی این پژوهش یاری دادند، اعلام نمایند.

منابع

آذری، لطفعلی؛ ناجی میدانی، علی‌اکبر؛ صالح‌نیا، نرگس (۱۴۰۳). پیش‌بینی تأثیر شرایط آب‌وهوایی بر تولید اقتصادی استان‌های ایران با رویکرد الگوریتم جنگل تصادفی. *نظریه‌های کاربردی اقتصاد*، ۱۱ (۲)، ۱-۳۴. doi: 10.22034/eco.2024. 60935.3292.۳۴-۱

- ابراهیمی خوسفی، زهره (۱۳۹۹). تحلیل تغییرات زمانی رویدادهای گردوغبار و تعیین سهم عوامل اقلیمی مؤثر بر آن در مناطق خشک بر اساس تحلیل رگرسیون ريج (مطالعه موردی: شهر یزد). *نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)*، (۲۴)، ۱۴۵-۱۵۸. doi: 10.47176/jwss.24.1.41171.۱۵۸-۱۴۵
- اسعدی اسکویی، ابراهیم؛ گودرزی، لیلا؛ هلالی، جلیل (۱۴۰۱). بررسی تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک سطحی در ایران با استفاده از محصول SMAPL4 نیوار، ۴۶ (۱۶)، ۱۴-۲۷. doi: 10.30467/nivar.2022.315991.120.۲۷-۱۴
- امیدوار، کمال؛ نارنگی فرد، مهدی؛ حاتمی بهمن بیگلر، خداکرم (۱۳۹۳). شناسایی الگوهای همدید روزهای آلوده به ذرات معلق به روش واکاوی خوشه‌ای شهر شیراز. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۳ (۴)، ۸۱-۹۳. doi: 10.22111/jneh.2014.2470.۹۳-۸۱
- انصاری، مریم؛ احمدی، محمود؛ گودرزی، غلامرضا (۱۴۰۰). بررسی تغییرات زمانی مکانی ذرات معلق (PM_{2.5} و PM₁₀) شهر تهران با استفاده از (۹۹-۹۲) GIS. *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۶ (۲)، ۱۲۷-۱۴۰. doi: 10.30495/jest.2022.61846.5441.۱۴۰-۱۲۷
- برزو، فرزانه؛ ذوالفقاری، حسن؛ معصوم پور سماکوش، جعفر؛ صحرایی، جلیل (۱۴۰۰). تحلیل فضایی طوفان‌های گردوغباری در ایران بر اساس ویژگی‌های آب‌وهوایی و پوشش گیاهی. *جغرافیا و پایداری محیط*، ۱۱ (۳۸)، ۱-۲۳. doi: 10.22126/ges. 2021.6478.2395
- بشردوست، عابد؛ مسگری، محمد سعدی (۱۴۰۳). مدل‌سازی مکانی ذرات معلق هوا PM₁₀ و PM_{2.5} در شهر تهران با استفاده از شبکه عصبی کانولوشن. *نیوار*، ۴۸ (۱۲۴)، ۳۱-۴۹. doi: 10.30467/nivar.2024.430255.1276.۴۹-۳۱
- بیات، علی (۱۳۹۲). *دسته‌بندی هواویزهای جوی با استفاده از داده‌های قطبیده شیدسنج خورشیده*. پایان‌نامه دکتری فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان.
- جواد، پدیده؛ اسدی، حسین؛ وظیفه‌دوست، مجید (۱۴۰۰). برآورد تغییرات مکانی رطوبت خاک با بهره‌گیری از روش جنگل تصادفی و ویژگی‌های محیطی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای در حوضه مرغاب خوزستان. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۲ (۱۱)، ۲۸۵۹-۲۸۷۵. doi: 10.22059/ijswr.2021.331962.669094.۲۸۷۵
- حقیقی، اسماعیل؛ قلی‌زاده، محمدحسین؛ دوستکامیان، مهدی؛ قادری، فاطمه (۱۳۹۶). بررسی ماهیت و ساختار ورودش‌های جوی به هنگام بارش‌های بهاری فراگیر ایران. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۹ (۳)، ۵۳۹-۵۲۳. doi: 10.22059/jphgr.2017. 218909.1006955
- خوش‌اخلاق، فرامرز؛ عزیزی، قاسم؛ رحیمی، مجتبی (۱۳۹۱). الگوهای همدید خشکسالی و ترسالی زمستانه در جنوب غرب ایران. *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی)*، ۱۲ (۲۵)، ۵۷-۷۷. <http://jps.khu.ac.ir/article-1-652-fa.html>
- داداشی رودباری، عباسعلی (۱۳۹۹). *واکاوی وردایی زمانی - مکانی الگوهای قائم و افقی ریزگردها و ارزیابی بازخوردهای آب‌وهوایی آن در ایران*. رساله دکتری آب‌وهواشناسی، دانشگاه شهید بهشتی.
- ذوالفقاری، حسن؛ صحرایی، جلیل؛ معصوم پور سماکوش، جعفر؛ برزو، فرزانه (۱۳۹۵). بررسی شار گرمای محسوس و ارتباط آن با تغییرات دما و باد طی دوره گرم سال در ایران. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۸ (۳)، ۴۳۱-۴۵۰. doi: 10.22059/jphgr.2016.60100
- رحیمیان، حسن؛ پورمحمدی، سمانه؛ هاشمی‌نژاد، یوسف؛ مشکوه، محمدعلی (۱۳۹۲). تأثیر تغییر اقلیم بر شوری‌زایی در پهنه‌های مرکزی و شرق ایران. *پژوهش‌های خاک*، ۲۷ (۱)، ۱-۱۱. doi: 10.22092/ijsr.2013.126216.۱۱-۱
- رنگزن، کاظم؛ زراسوندی، علیرضا؛ کابلی‌زاده، مصطفی؛ محمدی، شاهین؛ میاحی، جاسم (۱۴۰۱). ارزیابی مکانی و زمانی غلظت PM_{2.5} در استان خوزستان و بررسی عوامل مؤثر بر آن. *فصلنامه علوم محیطی*، ۲۰ (۲)، ۱۹۹-۲۲۲. doi: 10.52547/envs.2022.33613
- رئیس‌پور، کوهزاد (۱۴۰۰). ارزیابی زمانی - مکانی غلظت ستونی ذرات معلق (PM_{2.5}) ناشی از رویدادهای گردوغباری در ایران با استفاده از داده‌های بازتحلیل NASA/MERRA-2. *فیزیک زمین و فضا*، ۴۷ (۲)، ۳۳۳-۳۵۴. doi: 10.22059/jesphys.2021. 316499.1007273
- زارع شحنه، مریم؛ ارحامی، محمد (۱۴۰۰). بررسی میزان مشارکت منابع تولید آلاینده‌ی ذرات معلق ریز به کمک ترکیبی از مدل‌های پذیرنده در شهر تهران. *مجله مهندسی عمران شریف*، ۲ (۴)، ۵۸-۵۱. doi: 10.24200/j30.2021.57146.2889.۵۸-۵۱
- سلگی، عیسی؛ پارسی‌مهر، محمد (۱۴۰۱). پیش‌بینی و مدل‌سازی غلظت روزانه ذرات معلق (PM_{2.5} & PM₁₀) زمستانه شهر همدان با شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه. *پژوهش‌های محیط‌زیست*، ۲۶ (۱۳)، ۹۹-۱۱۴. doi: 10.22034/eiap.2023. ۱۱۴-۹۹

169982

شمس الدینی، علی؛ احمدی، وانکو (۱۳۹۹). تخمین مکانی-زمانی آلاینده های منو اکسید کربن و دی اکسید نیتروژن شهر تهران مبتنی بر داده های حاصل از سنجش از دور و داده های کمکی. *جغرافیا و پایداری محیط*، ۱۰(۳)، ۱۰۷-۱۲۴. doi: 10.22126/ges.

2020.4227.2057

علیزاده چوبری، امید؛ نجفی، محمد سعید (۱۳۹۶). روند تغییرات دمای هوا و بارش در مناطق مختلف ایران. *مجله فیزیک زمین و فضا*،

۴۳ (۳)، ۵۶۹-۵۸۴. doi: 10.22126/ges.2020.4227.2057

فرزانه پی، فاطمه؛ رنجبر فردوئی، ابوالفضل؛ خسروی، حسن؛ موسوی، سید حجت (۱۴۰۳). ارزیابی روند تغییرات گردوغبار و ارتباط آن با دما (مطالعه موردی: استان خوزستان). *مدیریت جامع حوزه های آبخیز*، ۱۴(۱)، ۱۶-۲۹. doi: 10.22034/

iwm.2024.2014553.1112

فیض نیا، سادات؛ روغنی، ربانه؛ سلطانی، سعید (۱۳۹۹). تغییرات فصلی و مکانی ذرات PM_{10} ، $PM_{2.5}$ و TSP در حومه شهر اصفهان و ارتباط آن با پارامترهای هواشناسی. *مرتع و آبخیزداری (منابع طبیعی ایران)*، ۷۳(۲)، ۳۹۳-۴۰۴. doi:

10.22059/jrwm.2018.250800.1220

قانقرمه، عبدالعظیم؛ شکرالهی، دلارام (۱۴۰۱). بررسی نقش کنترلی ارتفاع لایه مرزی اتمسفر در ارتباط با متغیرهای آلودگی در موقعیت های شهری استان اصفهان. *پژوهش های تغییرات آب و هوایی* ۳(۱۲)، ۶۹-۹۰. doi: 10.30488/ccr.2023.386658.

1117

کاتورانی، شلیب؛ احمدی، محمود؛ داداشی رودباری، عباسعلی (۱۴۰۳). بررسی پراکنش فضایی و روند غلظت گردوخاک در غرب آسیا و

ارتباط آن با متغیرهای اقلیمی. *آب و خاک*، ۳۸(۳)، ۴۱۱-۴۲۷. doi: 10.22067/jsw.2024.86233.1367

کهراری، پریسا؛ خالدی، شهریار؛ کیخسروی، قاسم؛ علوی، سید جلیل (۱۴۰۴). بررسی اثرات آلاینده های جوی معیار و پارامترهای هواشناسی بر تغییر غلظت کربن سیاه در تهران و تبریز. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۴(۴۳)، ۳۵-۵۸. doi: 10.22111/

jneh.2024.47935.2028

موحدی، سعید؛ سلطانیان، محمود؛ حلبیان، امیرحسین؛ پورشهبازی، جواد (۱۳۹۲). تحلیل روند بارش کویر مرکزی ایران طی دوره

۱۳۰۷-۱۹۵۱. *مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۲(۲)، ۴۷-۵۶. https://deej.kashanu.ac.ir/article_112496.html

References

- Albugami, S., Palmer, S., Cinnamon, J., & Meersmans, J. (2019). Spatial and Temporal Variations in the Incidence of Dust Storms in Saudi Arabia Revealed from In Situ Observations. *Geosciences*, 9(4), 162-173. doi: 10.3390/geosciences9040162.
- Alizadeh choobari, O., & Najafi, M.S. (2017). Trends and changes in air temperature and precipitation over different regions of the earth and space physics, 43(3), 569-584. doi: 10.22126/ges.2020.4227.2057. (In Persian).
- Ansari, M., Ahmadi, M., & Goudarzi, Gh. (2024). Investigation of Temporal – spatial variations of particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}) in Tehran city Using GIS (2013-2020). *Journal of Environmental Sciences and Technology*, 26(2), 127-140. doi: 10.30495/jest.2022.61846. 5441. (In Persian).
- Asadi Oskouei, E., Godarzi, L., & Helali, J. (2022). Introducing the SMAP L4 Products and Investigating the Spatio-Temporal Variability of Soil Moisture in Iran. *Nivar*, 46 (116-117), 14-27. doi: 10.30467/nivar.2022.315991.1206. (In Persian).
- Azari, L., Naji meidani, A., Salehnia, N. (2024). Predicting the Impact of Climate Conditions on the Economic Production of Iranian Provinces with The Approach of Random Forest Algorithm. *Quarterly Journal of Applied Theories of Economics*, 11(2), 1-34. doi: 10.22034/eco.j.2024.60935.3292. (In Persian).
- Banks, J. R., & Brindley, H. E. (2013). Evaluation of MSG-SEVIRI mineral dust retrieval products over North Africa and the Middle East. *Remote Sensing of Environment*, 128(2), 58-73. doi: 10.1016/j.rse.2012.07.017.
- Bashar Doost, A., & Mesgari, M. S. (2024). Spatial Modeling of Airborne Particles ($PM_{2.5}$ and PM_{10}) in Tehran city Using Convolutional Neural Network. *Nivar*, 48(124-125), 31-49. doi: 10.30467/nivar.2024.430255.1276. (In Persian).
- Basheer, S., Rashid, H., Nasir, A., & Nawaz, R.A. (2019). Spatial and temporal variability analysis

- of PM_{2.5} concentration in Lahore city. *Environmental Contaminants Reviews*. 2(1),6-10. doi: 10.26480/ecr.01.2019.06.10.
- Bayat, A. (2013). Classification of atmospheric aeronautics using polarized solar shader data, PhD thesis, Zanjan University of Postgraduate Studies. (In Persian).
- Bian, H., Colarco, P. R., Chin, M., Chen, G., Rodriguez, J. M., Liang, Q., & Wisthaler, A. (2013). Source attributions of pollution to the Western Arctic during the NASA ARCTAS field campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(9), 4707-4721. doi: 10.5194/acpd-12-8823-2012
- Borzou, F., Zolfaghari, H., Masoompour Samakosh, J., & Sahraei, J. (2021). Spatial Analysis of Dust Storms in Iran based on Climatic and Vegetation Characteristics. *Geography and Environmental Sustainability*, 11(1), 1-23. doi: 10.22126/ges.2021.6478.2395. (In Persian).
- Buchard, V., Colarco, P. R., da Silva, A. M., Randles, C. A., Kawa, S. R., & Hair, J. W. (2016). Evaluation of PM_{2.5} surface concentrations simulated by version 1 of the NASA MERRA aerosol reanalysis. *Atmospheric Environment*, 140, 1-10. doi: 10.1016/j.atmosenv.2016.05.03
- Cai, K., Zhang, Q., Li, S., Li, Y., & Ge, W. (2018). Spatial–Temporal Variations in NO₂ and PM_{2.5} over the Chengdu–Chongqing Economic Zone in China during 2005–2015 Based on Satellite Remote Sensing. *Sensors*, 18(11), 1-16. doi: 10.3390/s18113950
- Cakmur, R. V., Miller, R. L., & Torres, O. (2004). Incorporating the effect of small scale circulations upon dust emission in an atmospheric general circulation model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(7), 2-10. doi: 10.1029/2003JD004067
- Cheng, B., Ma, Y., Zhao, Y., Zhao, Y., Qin, P., Feng, F., Liu, Z., Wang, W., & Zhang, Y. (2024). Influence of topography and synoptic weather patterns on air quality in a valley basin city of Northwest China. *The Science of The Total Environment*, 934(4), 173362. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.173362.
- Colarco, P., da Silva, A., Chin, M., & Diehl, T. (2010). Online simulations of global aerosol distributions in the NASA GEOS-4 model and comparisons to satellite and ground-based aerosol optical depth. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D14). doi: 10.1029/2009JD012820
- Dadashi-Roudbari, A. (2019). Analysis of the temporal-spatial variability of vertical and horizontal patterns of dust and evaluation of its climatic feedbacks in Iran. PhD thesis in Meteorology, Shahid Beheshti University. (In Persian).
- de Leeuw, G., L. Sogacheva, E., Rodriguez, K., Kourtidis, A.K., Georgoulas, G., Alexandri, V., Amiridis, E., Proestakis, E., & Marinou, Y. Xue. (2018). Two decades of satellite observations of AOD over mainland China using ATSR-2, AATSR and MODIS/Terra: data set evaluation and large-scale patterns. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(3):1573-1592. doi: 10.5194/acp-18-1573-2018
- Di, M., Liu, Y., Zhang, L., & Wang, X. (2019). Multimodel simulations of a springtime dust storm over northeastern Asia: Model intercomparison and source attribution. *Geoscientific Model Development*, 12(11), 4603–4625. doi: 10.5194/gmd-12-4603-2019gmd.copernicus.org
- Ebrahimikhusfi, Z. (2020). Analysis of Temporal Changes of Dust Events and Determination of the Contribution of Climate Factors Affecting it in Arid Regions Based on the Ridge Regression Analysis (A Case Study: Yazd City). *Journal of Hydrology and Soil Science*, 24(1), 145-158. doi: 10.47176/jwss.24.1.41171. (In Persian).
- Farzanehpoy, F., Ranjbar-Fordoe, A., Khosravi, H., & Mosavi, S. H. (2024). Evaluation of dust changes and its relationship with temperature (Case study: Khuzestan province). *Integrated Watershed Management*, 4(1), 16-29. doi: 10.22034/iwm.2024.2014553.1112. (In Persian).
- Feiznia, S., Roghani, R., & Soltani, S. (2019). Seasonal and spatial variations of PM_{2.5}, PM₁₀ and TSP particles in the suburbs of Isfahan and their relationship with meteorological parameters. *Rangeland and Watershed Management (Iranian Natural Resources)*, 73(2), 393-404. doi: 10.22059/jrwm.2018.250800.1220. (In Persian).
- 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., & Zhao, B. (2017). The Modern-

- Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*, 30(14), 5419–5454. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
- Ghanghermeh, A., & Shokrollahi, D. (2023). An investigation of the relationship between atmospheric boundary layer height changes and air pollution variables in the cities of Isfahan. *Climate Change Research*, 3(12), 69-90. doi: 10.30488/ccr.2023.386658. 1117.(In Persian).
- Haghighi, E., Gholizadeh, M. H., Doostkamian, M., & Ghaderi, F. (2017). Nature and structure of the atmospheric circulation in pervasive rains of spring, Iran. *Physical Geography Research*, 49(3), 523-539. doi: 10.22059/jphgr.2017.218909.1006955 . (In Persian).
- HKhoshakhlagh, F., Azizi, Gh., & Rahimi, M. (2012). The Synoptic Patterns Of Wintertime Drought And Wet Period In Southwestern Of Iran. *Journal Of Geographical Sciences*, 12(25), 57-77. <http://jps.khu.ac.ir/article-1-652-fa.html>. (In Persian).
- Höflinger, Wilhelm., & Laminger, Thomas. (2017). PM_{2.5} or respirable dust measurement and their use for assessment of dust separators. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 94. 10.1016. doi: 10.1016/j.jtice.2017.07.035
- Hu, K., Kumar,R.K., Kang,N., Boiyo,R., & Wu,J. (2018). Spatiotemporal characteristics of aerosols and their trends over mainland China with the recent Collection 6 MODIS and OMI satellite datasets. *Environmental Science and Pollution Research*. 25(7): 6909-6927. doi: 10.1007/s11356-017-0715-6
- Huang, R. J., Zhang, Y., & Bozzetti, C. (2021). Nighttime temperature and surface inversions as drivers of PM_{2.5} pollution in semi-arid regions. *Environmental Science & Technology*, 55(6), 3474–3483. <https://www.nature.com/articles/nature13774>
- Hughes, A., Brown, T., & Silva, M. (2022). Comparison of Random Forest and Support Vector Machine classifiers for satellite image classification. *Remote Sensing*, 14(8), 1552. doi: 10.3390/rs14081552
- Hussain, A., Mir,H., & Afzal, M. (2005). Analysis of dust storms frequency over pakistan during 1961-2000 . *Journal of Meteorology* 2(3).<https://www.researchgate.net/publication/285097369>.
- Javadi, P., Asadi, H. & Vazifehdoust, M. (2022). Prediction of Spatial Variations of Soil Moisture Using Random Forest Method and Environmental Features derived from Satellite Images in Marghab Basin of Khuzestan. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(11), 2859-2874. doi: 10.22059/ijswr.2021.331962.669094 (In Persian).
- Kahrari, P., Khaledi, S., Keikhosravi, G., & Alavi, S. J. (2025). Investigating the effects of criteria air pollutants and meteorological parameters on the change of black carbon concentration in Tehran and Tabriz. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 14(43), 35-58. doi: 10.22111/jneh.2024.47935.2028. (In Persian).
- Kang, L., Huang, J., Chen, S., & Wang, X. (2016). Long-term trends of dust events over Tibetan Plateau during 1961–2010. *Atmospheric environment*. 125(2), 188-198. doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.10.085.
- Kaskaoutis, D. G., Nastos, P. T., Kosmopoulos, P. G., Kambezidis, H. D., Kharol, S. K., & Badarinath, K. V. S. (2010). The aura–OMI aerosol index distribution over Greece. *Atmospheric Research*. 98(1), 28-39. doi: 10.1016/j.atmosres.2010.03.018
- Katorani, S., Ahmadi, M., & Dadashi-Roudbari, A. (2024). Investigating the Spatial Distribution and Trend of Dust Mass Density in West Asia and Its Relationship with Climate Variables. *Water and Soil*, 38(3), 427-411. doi: 10.22067/jsw.2024.86233.1367. (In Persian).
- Liu, C., Yin, Z., He, Y., & Wang, L. (2022). Climatology of dust aerosols over the Jiangnan Plain revealed with space-borne instruments and MERRA-2 reanalysis data during 2006–2021. *Remote Sensing*, 14(17), 44-14. doi: 10.3390/rs14174414.
- Liu,J., & Ding, W.(2023). Spatial and temporal distribution of PM_{2.5} and O₃ in north China from 2011 to 2020: Patterns and influence mechanisms. *Atmospheric Pollution Research*,14(11), 101906, 1309-1042, doi: 10.1016/j.apr.2023.101906.
- Mahmoudi, L., & Ikegaya, N. (2023). Identifying the distribution and frequency of dust storms in Iran based on long-term observations from over 400 weather stations. *Sustainability*, 15(16), 12294. doi: 10.3390/su151612294

- Mathew, B. B., Singh, H., Biju, V. G., & Krishnamurthy, N. B. (2017). Classification, Source, and Effect of Environmental Pollutants and Their Biodegradation. *Journal of Environmental Pathology Toxicology and Oncology* 36(1),5. doi: 10.1615/JEnvironPatholToxicolOncol.2017015804
- Middleton, N. J., & Sternberg, T. (2013). Climate hazards in drylands: A review. *Earth-Science Reviews*, 126, 48-57. doi: 10.1016/j.earscirev.2013.07.008.
- Movahedi, S., Soltanian, M., Halabian, A.h., & Porshehbazi, J. (2013). Analysis of precipitation trends in the central desert of Iran during the period 1951-2007. *Journal of Desert Ecosystem Engineering*, 2(2), 47-56, https://deej.kashanu.ac.ir/article_112496.html.(In Persian).
- Mukaka, M. M. (2012). A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. *Malawi Medical Journal*, 24(3), 69-71. PMID: 23638278; PMCID: PMC3576830.
- Omidvar, K., narangifard, M., & Hatami Bahman Beiglou, K. (2014). Identification CirculationsPatterns of DustPollutantDays with Applying ClusteringAnalysis in Shiraz. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 3(4), 81-93. doi: 10.22111/jneh.2014.2470. (In Persian).
- Rahimian, M., Poormohammadi, S., Hasheminejhad, Y. & Meshkat, M. (2013). Impact of Climate Change on Salinization in Iran. *Iranian Journal of Soil Research*, 27(1), 1-11. doi: 10.22092/ijsr.2013.126216.(In Persian).
- Raispour, K. (2021). Evaluation of Spatiotemporal Column Particulate Matter Concentration (PM_{2.5}) Due to Dust Events in Iran Using Data from NASAN / MERRA-2 Reanalysis Model. *Journal of the Earth and Space Physics*, 47(2), 333-354 . doi: 10.22059/jesphys.2021.316499. 1007273. (In Persian).
- Rangzan, K., Zarasvandi, A., kabolizadeh, M., mohammadi, S., & mayahi, J. (2022). Spatiotemporal evaluation of PM2.5 concentration in Khuzestan province and examining the factors affecting it. *Environmental Sciences*, 20(2), 199-222 . doi: 10.52547/envs.2022.33613. (In Persian).
- Rienecker, M. M., Suarez, M. J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J., Liu, E., & Woollen, J. (2011). MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. *Journal of Climate*, 24(14), 3624-3648. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00015.1.
- Rossel, R. V., McBratney, A. B. (2008). *Diffuse reflectance spectroscopy as a tool for digital soil mapping*. In *Digital soil mapping with limited data*. 165-172. Springer:Dordrecht. doi: 10.1007/978-1-4020-8592-5_13.
- Shamsoddini, A., & Ahmadi, W. (2020). Spatio – Temporal Estimation of Carbon Monoxide and Nitrogen Dioxide based on Remote Sensing Data and Ancillary Data in Tehran. *Geography and Environmental Sustainability*, 10(3), 107-124. doi: 10.22126/ges.2020.4227.2057. (In Persian).
- Shao, Y., Ishizuka, M., Mikami, M., & Leys, J. (2011). Parameterization of size-resolved dust emission. *Geoscientific Model Development*, 4(5), 853–868. doi: 10.1029/2010JD014527.
- Shao, Y., Wyrwoll, K. H., Chappell, A., Huang, J., Lin, Z., McTainsh, G. H., & Yoon. S. (2011). Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science. *Aeolian Research*, 2(4): 181-204. doi: 10.1016/j.aeolia.2011.02.001
- Shin, S. K., Müller, D., Lee, K. H., Shin, D., Kim, Y. J., & Noh, Y. M.(2015).Vertical variation of optical properties of mixed Asian dust/pollution plumes according to pathway of air mass transport over East Asia. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*.15(3), 3381-3413. doi: 10.5194/acpd-15-3381-2015
- Solgi, E., & Parsi Mehr, M. (2023). Predicting and Modeling of Daily Concentration of Particulate Matter (PM_{2.5} & PM₁₀) in Hamadan Winter with Multilayer Perceptron Neural Network. *Environmental Researches*, 13(26), 99-114. doi: 10.22034/eiap.2023.169982. (In Persian).
- Squizzato, S., Masiol, M., Rich, D. Q. and Hopke, P. K. (2018). PM_{2.5} and gaseous pollutants in NewYork State during 2005–2016: Spatial variability, temporal trends, and economic influences. *Atmospheric Environment*. 183(2), 209-224. doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.03.045
- Sun, J., L. Zhao, S. Zhao., & Zhang, R. (2006). An integrated dust storm prediction system suitable for east Asia and its simulation results. *Global and Planetary Change*. 52(1-4), 71-87. doi: 10.1016/j.gloplacha.2006.02.005

- Veefkind, P., Van Oss, R.F., Eskes, H., Borowiak, A., Dentner, F., & Wilson, J. (2007). *The Applicability of Remote Sensing in the Field of*. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC35373>
- Velletri, S., Giannaros, T. M., & Zittis, G. (2023). Dust in western Iran: The emergence of new sources and the role of regional atmospheric patterns. *Scientific Reports*, 13(2), 14616. doi: 10.1038/s41598-023-42173-3.
- Vorpahl, P., Elsenbeer, H., Märker, M., & Schröder, B. (2012). *How can statistical models help to determine driving factors of landslides Ecological Modelling*, 239, 27-39. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2011.12.007
- Wang, J., Li, Q., Zhang, L., & Chen, H. (2024). Impact of precipitation on air quality and $PM_{2.5}$ concentration: Evidence from observational data in China. *Atmospheric Pollution Research*, 15(1), 120-130. doi: 10.1016/j.apr.2024.01.015.
- Xu, G., Ren, X., Xiong, K., Li, L., Bi, X., & Wu, Q. (2020). Analysis of the driving factors of $PM_{2.5}$ concentration in the air: A case study of the Yangtze River Delta, China. *Ecological Indicators*, 110(3), 105889. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105889
- Yang, X., Dengpan, X., Jianzhao, T., & Wei, W. (2022). Spatiotemporal Distributions of $PM_{2.5}$ Concentrations in the Beijing–Tianjin–Hebei Region From 2013 to 2020. *Frontiers in Environmental Science*, 10(5), 2296-665X. doi: 10.3389/fenvs.2022.842237.
- Zare Shahneh, M., & Arhami, M. (2022). Source apportionment of fine particulate matter using combined receptor models in Tehran. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 37.2(4.2), 51-58. doi: 10.24200/j30.2021.57146.2889. (In Persian).
- Zhang, Y., Li, Y., & Wang, W. (2019). Influence of soil temperature on aerosol emissions. *Environmental Pollution*, 248(7), 203–211. doi: 10.1316/j.soilbio.2020.107756
- Zhang, Y., Liu, X., Zhou, Y., & Chen, X. (2024). Land-use classification using Random Forest, SVM, and ANN: A comparative study in tropical urban regions. *Frontiers in Environmental Science*, 12(5), 1130- 1134. doi: 10.3389/fenvs.2024.01134
- Zhu, Y., Liu, Y., Wang, X., & Zhang, L. (2021). Inverse modeling of the 2021 spring super dust storms in East Asia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(10), 6393–6411. doi: 10.5194/acp-22-6393-2022research.tudelft.nl+1acp.copernicus.org+1.
- Zolfaghari, H., Sahraei, J., Masoompoor Samakoosh, J., & Borzoi, F. (2016). Study of Sensible Heat Flux and its Relationship with Temperature Changes and Wind during Warm Periods of Year in Iran. *Physical Geography Research*, 48(3), 431-450. doi: 10.22059/jphgr.2016.60100. (In Persian).
- Zou, X. K., & Zhai, P. M. (2004). Relationship between vegetation coverage and spring dust storms over northern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D3), 3104-3110. doi: 10.1029/2003JD003913