

کاربرد تکنیک‌های چندمتغیره در منطقه‌بندی عمق نوری آئروسول (AOD) بر روی ایران

کاوه محمدپور^۱؛ دکتری اقلیم شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۰۵/۱۰

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۰۳

چکیده

در مطالعه حاضر با استفاده از داده‌های روزانه ماهواره‌ای شبیه‌سازی شده از عمق نوری آئروسول (AOD) در ۵۵۰ نانومتر بر روی گستره ایران سعی شد تا مناطق همگن آئروسول بر روی ایران با استفاده از تکنیک‌های چند متغیره مدلسازی و آشکار گردد. تکنیک‌های بُرداری با کاهش حجم متغیرها به بُردارهای ویژه و صدک ۸۵، شش الگوی مجزای مکانی را منطقه‌بندی و تفکیک کرد که از پهنه‌های عمده تحت تاثیر آئروسول بر روی پهنه ایران هستند. جزئیات پراکنش رخداد‌های حدی بر پایه صدک ۹۵ بی‌هنجاری روزانه‌ی سیگنال‌ها نشان داد که انتشار و دوری و نزدیکی مناطق منبع آئروسول از مناطق شتاسایی شده‌ی روی ایران موجب شکل‌گیری الگوهای غالب مکانی آئروسول در گوشه و کنار کشور شده است. زیرا، رشد و گسترش فرین‌های آئروسول و انتشار آنها از مناطق منبع آئروسول در سطح خاورمیانه و آسیای مرکزی نمایان کرد که تفکیک جغرافیایی آئروسول به ساختارهای فضایی-مکانی ساده و همگن با شباهت‌های درون گروهی زیاد در حین تفاوت آشکار برون گروهی تایید می‌کند که هر کدام از مناطق همگن ایران تحت تاثیر جریان و پراکنش مکانی فرین‌های منطقه‌ای متفاوتی تشکیل شده است. بنابراین، تلفیق معیارهای ماهواره‌ای با تکنیک‌های کاربردی بُرداری در علوم جوی-دینامیکی، نه تنها خلاء داده‌های مشاهداتی سطحی را پر کرده است، بلکه رویکردی به مراتب جغرافیایی‌تر از مخاطرات محیطی را در قالب شکلی ساده‌تر نشان داده و آن اشکال همگن تفکیک شده‌ی جغرافیایی را قابل تفسیرتر کرده است.

واژه های کلیدی: عمق نوری آئروسول (AOD)، تکنیک‌های چند متغیره، منطقه‌بندی، ایران

مقدمه

آئروسول دارای سیستم چند فازي مرکب از ذرات جامد، مایع و گاز حامل ذرات معلق در اتمسفر است که بیلان تابش و انرژی سامانه جو-زمین را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد (Liu et al., ۲۰۱۳; Mahowald et al., ۲۰۰۹). آنها بازیگران مهمی در سامانه اقلیمی هستند که منجر به گرمایش جوی، سرمایه‌ش سطح زمین و واکنش‌های دینامیکی اتمسفر می‌شوند (IPCC, ۲۰۱۴). آئروسول‌ها، ذرات ریز معلق در هوا (شامل: گردوغباری معدنی بیابانی، نمک دریاها، خاکسترهای آتشفشانی، سولفات، نیترات و دود ناشی از سوزاندن سوخت‌های فسیلی و زیست بومها) هستند که انتقال انرژی تابشی را به صورت مستقیم (جذب و پخش تابش) (Islam and Almazroui, ۲۰۱۲; Das et al., ۲۰۱۵) و غیرمستقیم (ویژگی‌های میکروفیزیک، تشکیل هسته تراکم و نور) (Bangert et al., ۲۰۱۲) تحت تاثیر قرار می‌دهند. بدین صورت که بر روی تغییر دمای هوا، شکل‌گیری ابر، همرفت و میزان بارش اثر می‌گذارند (Lohmann and Feichter, ۲۰۰۵; Wong and Dessler, ۲۰۰۶; Wong et al., ۲۰۰۹). و یا به عنوان هسته‌های تراکم، شکل‌گیری و عمر ابر و سپس بارش را دچار تحول می‌کنند (Figueras i Ventura and Russchenberg, ۲۰۰۹; Sarna and Russchenberg, ۲۰۱۷). پس، آئروسول‌ها با توجه به نقش مهمی که در گردش عمومی جوی و سپس اقلیم یک منطقه با تاثیرگذاری بر روی ذخیره تابشی کره زمین بر جای می‌گذارند، دارای اهمیت قابل ملاحظه‌ای در مطالعات جهانی و منطقه‌ای هستند (Lohmann and Feichter, ۲۰۰۵; IPCC, ۲۰۱۳).

در دو دهه اخیر، معیارهای سنجش از دور به عنوان مهم‌ترین ابزار در جهت پایش آئروسول محسوب می‌گردند. به همین منظور داده‌های ماهواره‌ای امکانات مناسبی را برای مطالعه و پراکنش فضایی پدیده‌های دینامیکی همچون آئروسول‌ها را ارائه می‌دهند. روش‌های متعددی برای بررسی آئروسول‌ها وجود دارد که از جمله مهم‌ترین آنها می‌توان به آستانه شاخص آئروسول (UVAI) (Nabavi et al., ۲۰۱۶; Nabavi et al., ۲۰۱۴; Prospero et al., ۲۰۰۲)، عمق آپتیکی آئروسول (AOD) (Nabavi et al., ۲۰۱۶; Kaskaoutis et al., ۲۰۱۵; Rashki et al., ۲۰۱۵; Gkikas et al., ۲۰۰۹)، و یا ترکیبی از تصاویر ماهواره‌ای، مدل‌سازی مشاهدات ماهواره‌ای و زمینی برای تشخیص و توصیف آئروسول اشاره کرد (Zoljoodi et al., ۲۰۱۳; Nabavi et al., ۲۰۱۶; Kaskaoutis et al., ۲۰۱۵; Nabavi et al., ۲۰۱۴; Rashki et al., ۲۰۱۵; Alizadeh-Choozari et al., ۲۰۱۷). برای نمونه، بررسی تغییرات مکانی و روندهای آئروسول‌ها در خاورمیانه با استفاده از شاخص آئروسول (Nabavi et al., ۲۰۱۶) و عمق نوری آئروسول (AOD) (Klingmüller et al., ۲۰۱۶) بوده است. بعلاوه، حبیب و همکاران (Habib et al., ۲۰۰۶) با استفاده از شاخص آئروسول سنجنده TOMS نشان دادند که بخش‌های مرکزی و جنوب پاکستان دارای بار بالایی از آئروسول بوده است که عمدتاً با چرخه فصلی گردوغبار و آتش سوزی زیست توده‌ها ارتباط داشت. در مطالعه‌ای مشابه بر روی غرب و جنوب غرب ایران (Nabavi et al., ۲۰۱۶)، آستانه تغییر در تفاوت‌های بین شاخص آئروسول TOMS و OMI و عمق نوری گردوغبار سنجنده MODIS نشان داد که تغییرات بلند مدت توزیع افقی طوفان‌های عمده آئروسول و به ویژه گردوغبار متأثر از دو منبع بیابانی عراق-سوریه و عربستان بوده است که منطقه شمالغرب ایران تا دریای خزر را تحت تاثیر طوفان قرار داده است. همچنین، کاسکائوتوس و همکاران (Kaskaoutis et al., ۲۰۱۴a) با استفاده از AOD سنجنده MODIS رخدادهای آئروسول را بر روی دشت هندو - گانجتیک شناسایی و طبقه‌بندی کردند که مبنای مطالعه بعدی

(Kaskaoutis et al., ۲۰۱۴b) در تشخیص روزهای حدی آئروسول بر روی کانپور هند بوده است. گیتانی و پاسکوی (۲۰۱۲, Gaetani and Pasqui) با استفاده از عمق نوری آئروسول سنجنده MODIS و مدل GOCART^۱ و کلاسترینی و همکاران (۲۰۱۲, Calastrini et al.) نیز بر اساس مشاهدات زمینی ذرات معلق (PM) به بررسی پراکنش آئروسول پرداخته- اند. گوپتا و همکاران (۲۰۱۳, Gupta et al.) هم با استفاده از عمق نوری آئروسول سنجنده MODIS به بررسی روندهای زمانی و مکانی آئروسول‌ها در دو کلانشهر پاکستان (کراچی و لاهور) پرداخته‌اند. بررسی بازخورهای هواشناختی آئروسول بر روی دریای عرب و شبه‌قاره هند توسط کاسکائوتیس و همکاران (۲۰۱۸, Kaskaoutis et al.) نیز نشان دادند که داده‌های AOD برای مدلسازی آئروسول‌ها در سطح منطقه‌ای معیار مناسبی هستند.

مشاهدات ماهواره‌ای و مشاهدات زمینی متعددی از آئروسول‌ها بر روی شرق (۲۰۱۶, Kaskaoutis et al.)، غرب و جنوبغرب (۲۰۱۸, Namdari et al.; ۲۰۱۶, Nabavi et al.; ۲۰۱۴, Boloorani et al.)، شمالشرق (Kaskaoutis et al., ۲۰۱۵) و یا بصورت نقطه‌ای و پراکنده (۲۰۱۷, Arkian & Nicholson; ۲۰۱۴, Alizadeh-Choobari et al.) بر روی پهنه ایران مستند شده است. به طوری که بلورانی و همکاران (۲۰۱۴, Boloorani et al.) مشخص کردند که بیشترین آئروسول غرب ایران از بیابان‌های عراق و سوریه منشأ گرفته‌اند که به نقش مستقیم گردوغبارها در افزایش آئروسول برمی‌گردد. بعلاوه، در مطالعاتی مشابه بر روی نشان دادند که غبارهای منتشر شده از مناطق خشک و نیمه خشک دشت‌های ساحلی مکران، دو بیابان عمده دشت کویر و دشت لوت، دشت سیستان و بستر خشک جازموریان موجب شده‌اند تا شرق و جنوبشرق ایران در معرض طوفان‌های گردوغباری رسوبی- نمکی قرار داشته باشند (۲۰۱۱, Abdi Vishkaee et al.; ۲۰۱۸, Jin et al.; ۲۰۰۶, and Middleton). چنین وضعیت مشابهی بر روی مناطق ساحلی خلیج فارس، بسترهای خشک لسی-رسوبی خوزستان به چشم می‌خورد که تحت سلطه بادهای منطقه‌ای شمال به ویژه در فصل گرم است (۲۰۱۷, Rashki et al.; ۲۰۱۳, et al.). روی هم رفته، علاوه بر اینکه آئروسول‌های نمکی و بیابانی از مناطق ذکر شده انتشار می‌یابند، بلکه آنها خود تحت تاثیر بادهای غالب منطقه‌ای (شمال و لوار) ناشی از شرایط دینامیکی-جوی هستند که موجب بار بالای AOD بر روی مناطق می‌شوند (۲۰۱۳, Hamidi et al.; ۲۰۱۳, Zoljoodi et al.; ۲۰۱۲, Fattahi et al.; ۲۰۱۹, ۲۰۱۵, ۲۰۱۷). پس، شرایط ایجاد آئروسول‌ها بعلاوه بادهای غالب منطقه‌ای مناطق مختلف ایران را تحت تاثیر آئروسول‌های مختلفی قرار داده است که در برخی از مطالعات سعی داشته‌اند تا با استفاده از خوشه‌بندی و تحلیل فصلی دید افقی (۲۰۱۶, Baghbanan et al.; ۲۰۱۶, Alizaddeh Choobari et al.; ۲۰۱۹, Rezaei et al., ۲۰۲۰ a, b) و یا شناسایی نقطه‌ای رخدادها (۲۰۱۸, Namdari et al.; ۲۰۱۸, Arkian & Nicholson) به ارائه مناطق حساس آئروسول‌های پهنه ایران بپردازند. اما، به دلایلی همچون اثر توپوگرافی و میکروکلیمای یک منطقه، امکان طبقه‌بندی و تفکیک مناطق بر مبنای دید افقی را دچار نقض کرده است (۲۰۲۰, Baghbanan et al.; ۲۰۱۶, Alizaddeh Choobari et al., a, b). زیرا، شرایط فوق العاده خشک در داخل ایران با منابع بیرونی در خاورمیانه کشور را تحت تاثیر آئروسول‌های با منابع مختلفی قرار خواهد داد که با استفاده از تحلیل‌های نقطه‌ای و یا سنجش از دوری در مقیاس محلی و فصلی امکانپذیر نخواهد بود. بنابراین، بسته به تنوع و تعدد منابع تولید و رژیم‌های غالب جوی در انتشار آئروسول‌ها، به نظر می‌رسد امکان

^۱ - Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport

تفکیک کشور به مناطق همگن متفاوتی از آئروسول‌ها وجود دارد که مطالعات قبلی قادر به ارائه آن نبوده‌اند. بر همین اساس، استفاده از سنجش از دوری ماهواره‌ای در مقیاس مکانی بزرگتر علاوه بر اینکه کمک می‌کند تا درک بهتری از پهنه جغرافیایی پدیده نسبت به داده‌های نقطه‌ای را آشکار کند، بلکه لایه آئروسول در سطح‌های بالای وردسپهر را نیز پایش کرده و نمایش می‌دهد. بنابراین، در مطالعه حاضر، ناحیه‌بندی تکنیکی آئروسول‌ها با استفاده از متغیرهای سنجش از دوری در سطح ایران این امکان را می‌سازد تا پهنه جغرافیایی کشور به دور از تفکیک سلیقه‌ای محقق به زیر منطقه‌هایی حساس تحت تاثیر آئروسول تفکیک گردد. زیرا، با تبدیل یک پهنه جغرافیایی بزرگتر به چندین پهنه کوچکتر، امکان ساده‌سازی منطقه مورد مطالعه فراهم شده و ارائه آن در الگوهای مکانی کوچکتر قابل تفسیر است. بنابر موارد ذکر شده بالا، استفاده از بُرداری‌های ویژه‌ی در تکنیک‌های بُرداری تنها راه حلی است که می‌تواند از هدف و سوال تحقیق رونمایی کند و یک سیمای کلی با رویکرد جغرافیایی را بدون توجه به مطالعات ایستگاهی و مرز استانی ارائه نماید. سرانجام، پراکنش مکانی آئروسول‌ها در ساختارهای کوچکتر و ساده‌تر و در قالب زیر منطقه‌های مکانی جداگانه ترسیم شده و بسته به فرین‌های هر منطقه قابل تفسیر می‌گردد.

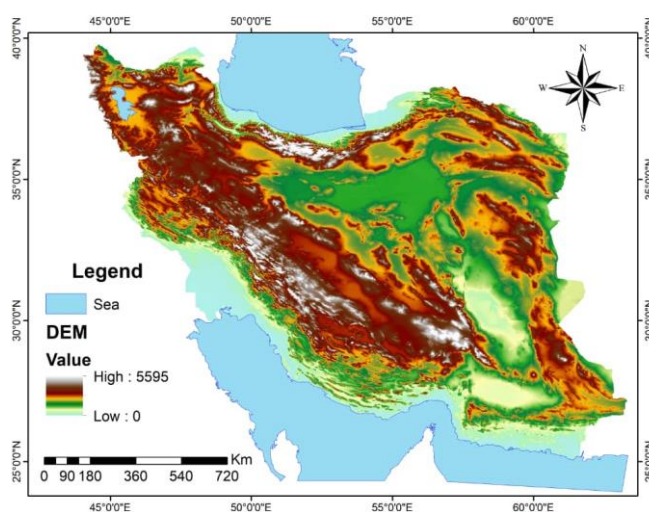
داده‌ها و روش کار

مطالعه حاضر با استفاده از سری‌های زمانی عمق نوری آئروسول^۱ در ۵۵۰ نانومتر سنجنده MODIS (ماهواره‌های Terra و Aqua) که در مدل MACC با تفکیک مکانی ۱۴ کیلومتر مربع و مقیاس زمانی روزانه در طی دوره ۲۰۰۳-۲۰۱۳ شبیه‌سازی شده است، سعی دارد تا با بکارگیری تکنیک‌های ریاضی نوین و کاربردی در اقلیم‌شناسی ماهواره‌ای، ساختار فضایی آئروسول‌های ایران (شکل ۱) را ساده کند؛ و با تبدیل تکنیکی پهنه اصلی به پهنه‌های منطقه‌ای کوچکتر از ساختارهای متفاوت با آئروسول بالا پرده بردارد (Morcrette et al., ۲۰۰۹; Benedetti et al., ۲۰۰۹; محمدپور و همکاران، ۱۳۹۹؛ محمدپور، ۱۳۹۸). در میان تکنیک‌های نوین، کاربردی‌ترین و مورد بحث‌ترین طبقه‌بندی بر پایه استفاده از آمار چند متغیره تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA^۲) و یا توابع متعامد تجربی (EOFs^۳) است. این روش‌شناسی با موضوعات علمی مختلفی و با هدف کاهش پر حجم داده‌ها، تفسیر و طبقه‌بندی آنها کاربردی است (Huth et al., ۱۹۹۳; Huth, ۱۹۹۶; Serra et al., ۱۹۹۶; White et al., ۱۹۹۶; Yarnal, ۱۹۹۳; Barry and Carleton, ۲۰۰۱; Yarnal et al., ۲۰۰۱) که ضمن کاهش حجم داده‌ها، در حد امکان تغییرات موجود در داده‌ها و واریانس اولیه داده‌ها را حفظ و در دسته‌هایی مشخصی از هم مجزا می‌کند (Richman, ۱۹۸۶).

^۱ - Aerosol Optical Depth

^۲ - Principal Component Analysis

^۳ - Experimental Orthogonal Functions



شکل ۱. توپوگرافی منطقه مورد مطالعه

در تکنیک‌های بُرداری^۱، تعیین مُد معیار (O, P, Q, R, S, T) مرحله‌ای پایه‌ای در جهت رسیدن به هدف و نتایج مطالعه است (Richman, ۱۹۸۱, ۱۹۸۶; White et al., ۱۹۹۱; Yarnal, ۱۹۹۳). بر این مبنا، رویکردی از آرایه S در مطالعه حاضر بکارگرفته شد که تلاش دارد تا زیرگروه‌های با همبستگی مشابه مکانی را بر اساس نقاط جدا و تفکیک نماید (Richman, ۱۹۸۶). به عبارت ریاضی، اگر ستون داده ورودی در ماتریس Z تحت عنوان متغیرهای ریاضی اعمال شده باشد و ماتریس Z دارای n نقطه در سری‌های زمانی مورد مطالعه و m گام زمانی باشد؛ پس آرایه Z_s دارای نظم و ترتیب ۳۶۵۴×۹۹۸۵ است. به عبارت ساده‌تر متغیرها در ستون و مشاهدات زمانی در ردیف‌های ماتریس قرار می‌گیرند. ماتریس مذکور ابتدا از نظر آماری (KMO^2) ارزیابی (برابر با ۰/۹۹ یا عالی) شده تا قابلیت تحلیل ماتریس بوسیله تکنیک‌های بُرداری بر پایه تحلیل مولفه‌های اصلی مورد سنجش قرار گیرد (Cerny and Kaiser, ۱۹۷۷). سپس، به ترتیب و با اعمال ماتریس کواریانس، تست غربالگری^۳ (Cattell, ۱۹۶۶) و قانون نورث (North et al., ۱۹۸۲)، تعداد بُردارهای ویژه مناسب برش داده شدند. همچنین، در راستای تعیین بهترین نمایش تئوریک داده‌ها و روابط فیزیکی جاسازی شده در داخل ماتریس ورودی (Richman, ۱۹۹۷)، از چرخش عمودی (Kaiser, ۱۹۵۸, ۱۹۵۹) برای تحلیل مکانی آسانتر مولفه‌های اصلی و اجتناب از وابستگی شکل قلمرو استفاده شد؛ که در عین حال، محدودیت تعامد و حالت عمودی بُردارهای ویژه را نگه می‌دارد (Richman, ۱۹۸۶; Yarnal, ۱۹۹۳). زیرا چرخش عمودی قلمرو کاملاً مستقل مکانی را نمایان و ساختار بارگویه‌ها را به ساده‌ترین شکل ممکن با به حداکثر رساندن ضرایب واریانس همبستگی (بارگویه‌ها) بین هر مولفه چرخش داده شده با هر مولفه اولیه را نشان می‌دهد (Kaiser, ۱۹۵۸; Jolliffe et al., ۲۰۰۲). سپس، در مطالعه حاضر به ترتیب از دو شاخص صدک ۸۵ بُردارهای ویژه برای تفکیک مرز مناطق (مساحت هر منطقه برابر با ۱۹۳۵۰ کیلومتر مربع) و صدک ۹۵

^۱ - Eigentechnique

^۲ - Kaiser-Meyer-Olkin test

^۳ - Scree plot

بی‌هنجاری روزانه سیگنال‌های آئروسول هر منطقه برای نمایش الگوهای حدی مکانی در سطح منطقه‌ای استفاده شده است که در آن به ترتیب هم الگوهای نقشه‌ای مناطق شناسایی شده دارای مرزهای مشخصی بوده و با هم همپوشانی ندارند و هم میانگین روزهای فرین هر منطقه (صدک ۹۵ درصد) در سطح منطقه‌ای به صورت توزیع مکانی مشخص شده است.

شرح و تفسیر نتایج

روش تکنیک‌های چند متغیره بر پایه تحلیل مولفه‌های اصلی با کاهش تعداد متغیرها و با استفاده از نمودار غربالگری و مقدارهای ویژه، شش مولفه اصلی را شناسایی و تفکیک کرد. جدول (۱) درصد واریانس و واریانس تجمعی مولفه‌های انتخابی را پیش و پس از چرخش نشان می‌دهد. بر اساس جدول (۱) بیشترین میزان واریانس داده‌ها به مولفه اول تعلق دارد، اما فرایند چرخش موجب شده تا واریانس‌ها تقسیم و فیزیک بهتری از توزیع داده‌ها را به نمایش بگذارد. پس، چرخش عمودی داده‌ها موجب پراکنش بهتر متغیر در بین مولفه‌های اصلی و توزیع بهتر درصد واریانس داده‌ها در شناسایی مناطق شد.

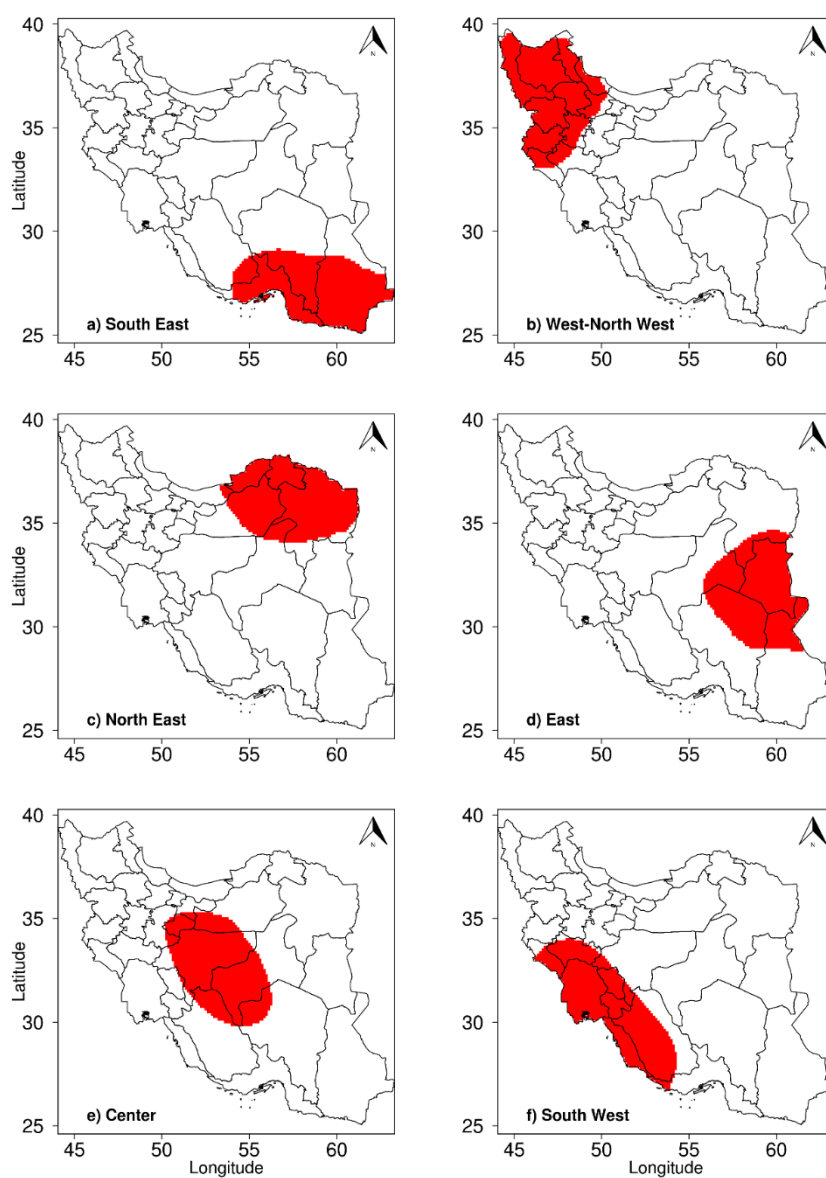
جدول ۱. درصد کل واریانس‌های توضیح داده شده پیش و پس از چرخش به روش عمودی

مولفه	چرخش واریماکس (درصد)		بدون چرخش (درصد)	
	واریانس تجمعی	واریانس	واریانس تجمعی	واریانس
۱	۱۸/۹۱	۱۸/۹۱	۵۹/۱۵	۵۹/۱۵
۲	۳۷/۸۱	۱۸/۹۰	۶۹/۶۷	۱۰/۵۲
۳	۵۴/۷۵	۱۶/۹۴	۷۷/۳۹	۷/۷۲
۴	۶۷/۴۴	۱۲/۶۹	۸۱/۵۴	۴/۱۵
۵	۷۹/۳۶	۱۱/۸۲	۸۴/۷۱	۳/۱۷
۶	۸۷/۷۳	۸/۴۷	۸۷/۷۳	۳/۰۲

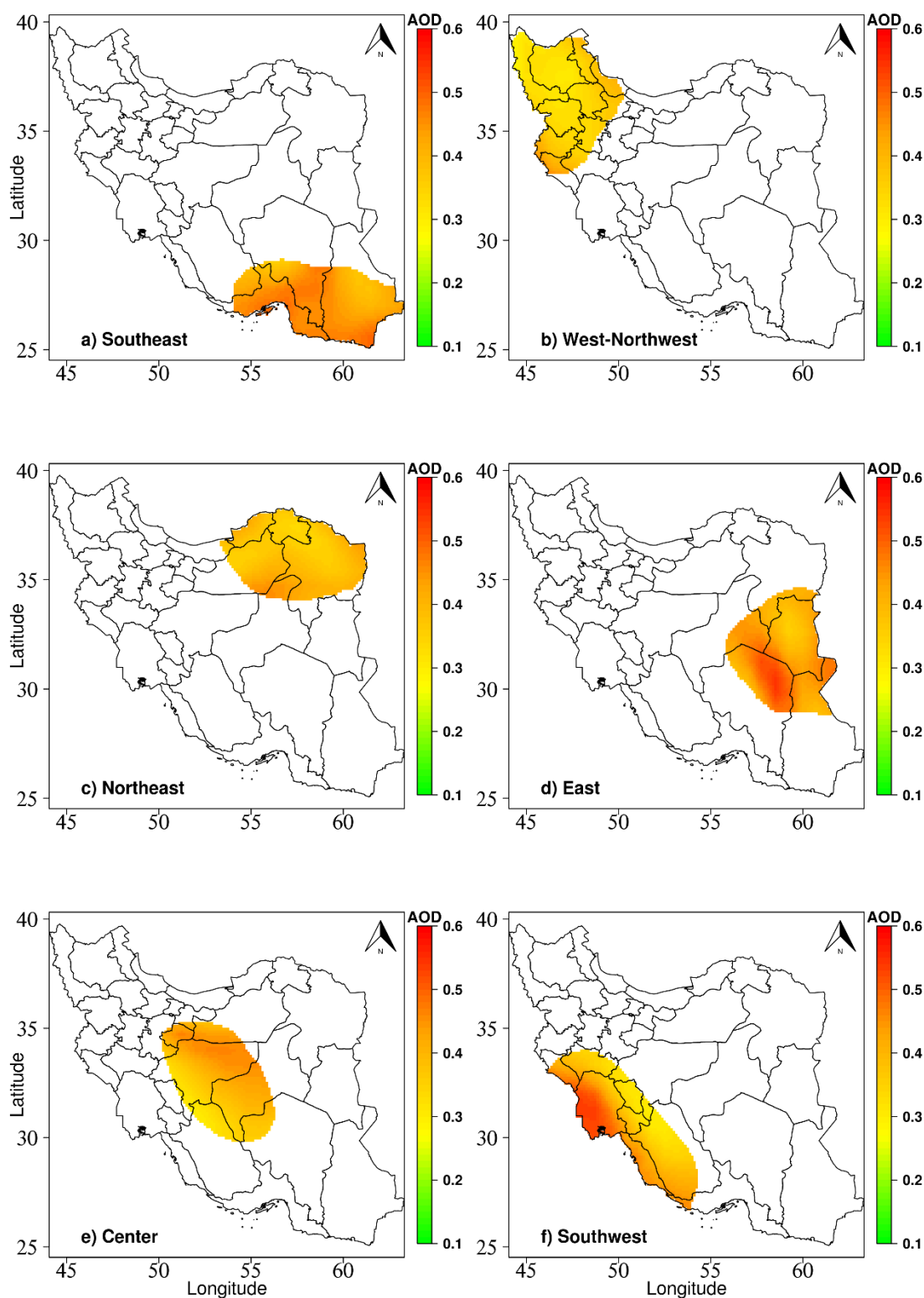
شکل ۲ نقشه پراکنش مکانی حداکثر بارگویه‌های مولفه‌های انتخابی را بر روی ایران را نشان می‌دهد که دارای الگوهای بصری و ساختاری ساده با تقسیم ایران به یک منطقه‌بندی منسجم و جامع است. اولین منطقه آلوده ایران همچنانکه در شکل ۲ (a) نشان داده شده است، متعلق به جنوبشرق کشور و شامل نواحی ساحلی و جنوبشرق ایران از جمله استان‌های جنوبشرق فارس، بخش بزرگی از هرمزگان، نیمه جنوبی کرمان و سیستان و بلوچستان است. در این منطقه بسترهای خشک دریاچه‌ای -بیابانی قرار دارند؛ چنانکه میانگین بالای سالانه آئروسول بصورت نوار شمالی-جنوبی بر روی مناطق بیابانی-رسوبی را تایید می‌کند (شکل ۳ a). دومین منطقه شناسایی شده آئروسول (شکل ۲ b) بر روی منطقه غرب-شمالغرب کشور قرار گرفته است که از شمال استان ایلام شروع و کل استان‌های غربی و شمالغربی کشور تا غرب دریای خزر را دربر می‌گیرد. بعلاوه، وجود نمک‌های اطراف دریاچه ارومیه و مناطق شنزار شمالشرق دریاچه ارومیه در داخل منطقه می‌تواند از جمله عامل ثانویه و فزاینده تشکیل آئروسول منطقه مورد بحث باشد (شکل ۳ b). زیرا، علاوه بر گردوغبارهای معدنی، منطقه تحت تاثیر سایر آئروسول‌های منتشر شده از دیگر مراکز منابع طبیعی و صنعتی است که بار احتمالی آئروسول را بالا می‌برد.

سومین منطقه در گوشه شمالشرقی کشور واقع شده است (شکل ۲ c) که تقریباً اتمسفر شش استان گلستان، خراسان شمالی، خراسان رضوی، بخشهای از شرق سمنان، شمال خراسان جنوبی و شمال شرق یزد را دربر می‌گیرد. در مطالعه حاضر تفکیک مناطق مشخص کرد که دارای یک پهنه متفاوتی از شرق و جنوبشرق کشور بوده و تحت تاثیر آئروسول با منبع متفاوت قرار دارد (در بخش فرین‌ها تشریح شده است). همچنین، مجاورت منابع ایجاد آئروسول‌های بیابانی همچون بیابان بزرگ قره‌قوم در شمال و دشت کویر (بیابان داخلی کویر) در جنوبغرب منطقه دلیل تمرکز آئروسول‌ها به ترتیب در نوار شمالی و بخش جنوبی منطقه شمالشرق است (شکل ۳ c). چهارمین منطقه شناسایی شده، در دست سیستان و بیابان لوت واقع شرق کشور است (شکل ۲ d) که جو استان‌های خراسان جنوبی، شرق یزد، بخش بزرگی از شرق کرمان و شمال سیستان و بلوچستان را در بر گرفته است (شکل ۳ d) و احتمالاً همراه با افزایش فعالیت طوفان‌های گردوغبار در زمان شروع و تشدید باد ۱۲۰-روزه است.

ازجمله مناطق دیگر شناسایی شده با بار آئروسول بالا، فلات مرکزی ایران (شکل ۲ e) است که در شمال بوسیله رشته کوه البرز، در غرب توسط رشته‌کوه زاگرس و در شرق بوسیله کوهستان‌های شمالی-جنوبی ایران محصور شده است که مرکز ثقل آن بر روی منطقه خشک کویری قرار دارد. میزان غلظت بالای آئروسول بر روی استان‌های شمالی در منطقه‌ی مرکزی ایران (شکل ۳ e) نشان می‌دهد که علاوه بر آئروسول‌های بیابانی، آلودگی‌های صنعتی نیز از عوامل ثانویه افزایش و شدت آئروسول در این منطقه هستند. سرانجام، ششمین منطقه شناسایی شده منطقه جنوبغرب کشور است که در شکل ۲ f) با غلظت بالای آئروسول در طول نوار ساحلی خلیج فارس مشاهده می‌شود (شکل ۳ f). این منطقه شامل بخش‌های جنوبی استان‌های ایلام و لرستان و استان‌های خوزستان، فارس، کهکیلویه و بویراحمد، چهارمحال و بختیاری، فارس، و بوشهر در طول دامنه‌های جنوبغرب زاگرس است که تحت تاثیر آئروسول‌های بیابانی منتشر شده از بیابان‌های عراق و عربستان قرار دارند (جزئیات آن در بخش توزیع مکانی فرین‌ها نشان داده شده است).



شکل ۲. نقشه تفکیک مدهای روزانه بارگویه‌های چرخش داده شده آتروس



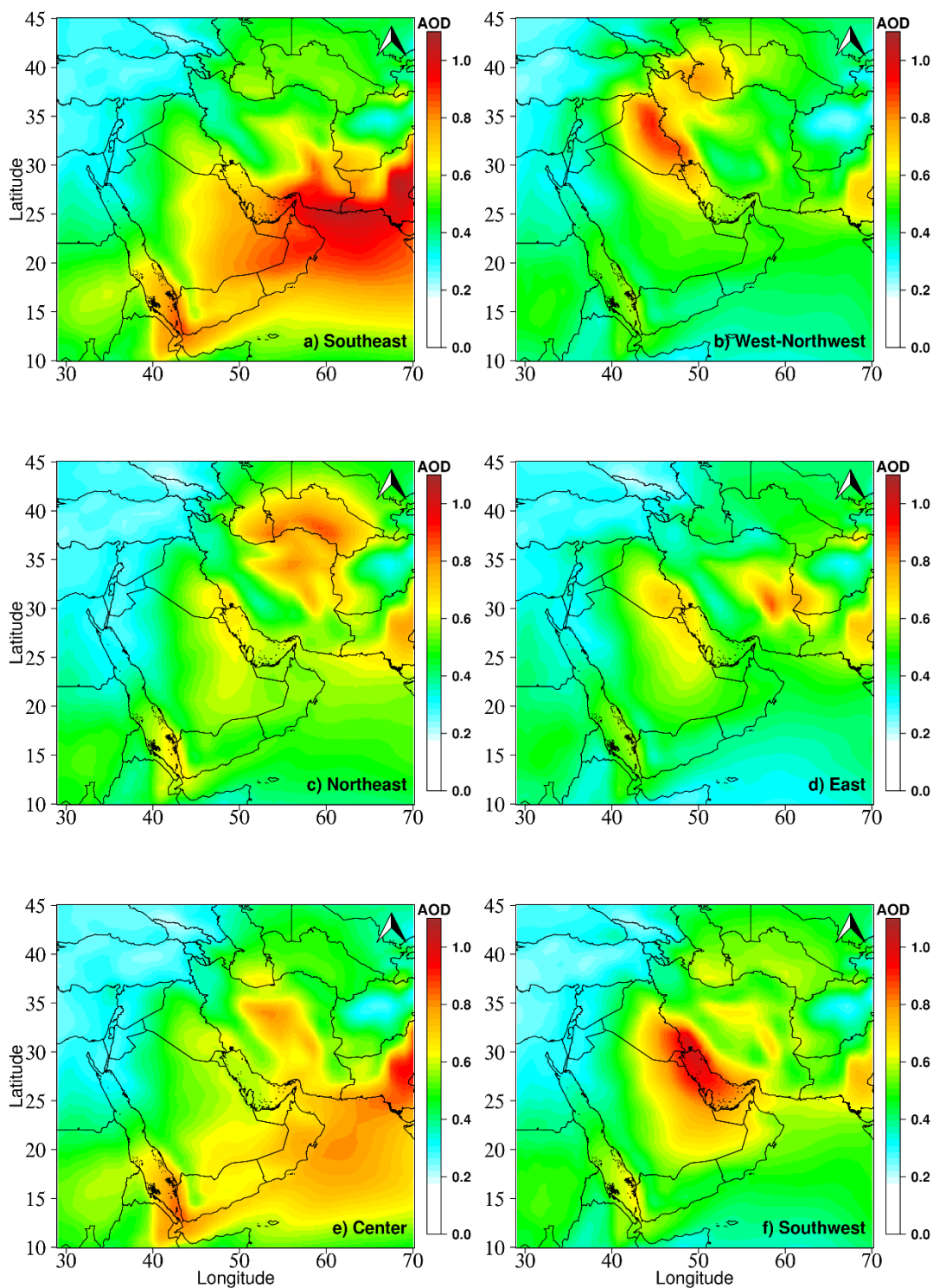
شکل ۳. نقشه میانگین تغییرات عمق نوری آئروسول (AOD) در مناطق شناسایی شده

مقدار گسترش و وسعت رخدادهای حدی آئروسول‌ها بر روی خاورمیانه در شکل ۴ ارائه شده است که بر مبنای ۹۵ درصد بی‌هنجاری مثبت رخدادها در مناطق شناسایی شده (۱۸۳ روز برای هر منطقه) میانگین گرفته شده است. اولین منطقه شناسایی شده ایران واقع در جنوبشرق کشور نشان داد که این منطقه تحت تأثیر مقدار آئروسول منتشر شده از دریاهای مجاور (نمک دریا)، سرزمین‌های بیابانی شبه جزیره عربستان و بیابان‌ها و دشت‌های رسوبی داخلی است (شکل ۴ a)؛ زیرا، طغیان‌ها در نیمه شرقی کشور معمولاً تحت تأثیر بادهای غالب منطقه‌ای در فصل گرم (Rashki et al., ۲۰۱۹؛ محمدپور، ۱۳۹۸) و فصل سرد (Kaskaoutis et al., ۲۰۱۹؛ Alizadeh Choobari et al., ۲۰۱۳؛ محمدپور، ۱۳۹۸) تشدید و موجب انتقال آئروسول‌های معدنی به ویژه گردوغبار از دشت سیستان به جنوب و افزایش بار AOD در منطقه جنوبشرق و شمال دریای عرب شده است (Kaskaoutis et al., ۲۰۱۴؛ Jish Prakash et al., ۲۰۱۴؛ Prijith et al., ۲۰۱۳). اما، در منطقه غرب-شمالغرب، میزان کل آئروسول‌ها به دلیل محدودیت منابع ایجاد و انتشار آئروسول نسبت به منطقه جنوبشرق از شدت کمتری برخوردار است (شکل ۴ b). زیرا، تعدد منابع و بیابان‌های عراق-سوریه در انتشار و انتقال آئروسول‌ها به شمالغرب ایران کمتر از مناطق بیابانی تأثیرگذار بر روی جنوبشرق هستند. اما، با توجه مجاورت منطقه غرب-شمالغرب با بیابان‌های سوریه-عراق و حرکت انتقالی بادهای غربی همزمان با گسترش کمفشار خلیج فارس در شروع فصل گرم موجب شده است تا میزان تشدید آئروسول تحت تأثیر شدت و جهت باد شمال قرار گیرد (Rashki et al., ۲۰۱۳؛ Hamidi et al., ۲۰۱۲؛ Fattahi et al., ۲۰۱۹). در نتیجه بار بالایی از آئروسول‌های بیابانی در طول نوار مرزی سیاسی بر منطقه شمالغرب تحمیل شده است.

همچنانکه پیشتر اشاره شد، منابع انتشار و انتقال آئروسول‌ها بسته به مجاورت منطقه با مناطق منبع آئروسول در هر منطقه متفاوت است. به همین دلیل، مجاورت منطقه شمالشرق با بیابان قره‌قوم موجب افزایش بار آئروسول تا نوار ساحلی در شرق دریای خزر شده است (شکل ۴ c) که بار احتمالی تزریق نمک دریای خزر به جو منطقه نیز بر بار آئروسول‌ها افزوده است. این منطقه، تحت تأثیر جریان‌های شمالی و شمالشرقی پرفشار شرق دریای خزر و یا حرکت بادهای سطح زمین در نتیجه بادهای غربی حاکم بر روی منطقه موجب انتشار گردوغبار از بیابان قره‌قوم به شمالشرق و یا در طول مرز ایران و افغانستان شده است (Alizadeh Choobari et al., ۲۰۱۴؛ محمدپور، ۱۳۹۸). بعلاوه، منطقه مورد بحث تحت تأثیر انتشار آئروسول و گردوغبار از منبع بیابانی دشت کویر نیز قرار دارد. در مقابل، با وجود همجواری دو منطقه شمالشرق و شرق ایران، رخدادهای حدی آئروسول در بخش شرق کشور (شکل ۴ d) تحت تأثیر شرایط جوی حاکم بر روی بیابان‌های مارگو و ریگستان در افغانستان، بسترهای خشک رسوبی-دریاچه‌ای مشترک ایران-افغانستان و بیابان لوت شکل گرفته است. پس، موقعیت ویژه جغرافیایی و اقلیمی موجب افزایش نصف‌النهاری آئروسول و به ویژه گردوغبار بر روی منطقه شرق شده است (شکل ۴ d)؛ به طوریکه نقش توپوگرافی پست منطقه و کانالیزه شدن گردوغبار همراه با تسریع بادهای ارتفاعات شمالی و شمالشرق افغانستان بسوی منطقه قابل ملاحظه است (Rashki et al., ۲۰۱۲؛ Ginoux et al., ۲۰۱۴؛ Alizadeh Choobari et al., ۲۰۱۹؛ محمدپور، ۱۳۹۸) و پهنه آئروسول شرق ایران را از دیگر مناطق شناسایی شده شمالی و جنوبی نیمه شرقی ایران جدا نموده است. در غرب منطقه شرق ایران، پراکندگی کل آئروسول‌ها در فلات مرکزی ایران (شکل ۴ e) متأثر از منابع داخلی دشت کویر و به تبعیت از گرادیان شمالی و غربی جوی بر روی منطقه موجب شده تا میزان حداکثر AOD در جنوب دشت کویر مشاهده شود؛ شرایط مذکور به همراه استقرار شهرهای صنعتی در غرب و شمالغربی واقع در منطقه

مرکزی، مقدار آئروسول‌های آن را شدت بیشتری بخشیده است. این افزایش آئروسول با استقرار کمفشار حرارتی بر روی فلات مرکزی ایران در دوره گرم و همگرایی بادهای منشا گرفته از ارتفاعات شمالی و غربی در اثر اختلاف گردایان موجب تشدید بیشتر آئروسول‌های منطقه مرکزی بویژه بر روی استان‌های جنوبی منطقه مورد بحث شده است (محمدپور، ۱۳۹۸).

آئروسول‌های جنوبغرب (شکل ۴ f) متداولترین رخدادهای آئروسول بر روی کناره جنوبغربی و سواحل خلیج فارس هستند که در نتیجه مجاورت منطقه جنوبغرب ایران با بیابان‌های عمده شبه جزیره عربستان، عراق-سوریه و دشت‌های رسوبی مجاور (دجله و فرات) در کنار منابع داخلی (بسترهای خشک خوزستان و سواحل خلیج فارس) حاصل شده است. بدین صورت که عوامل دینامیکی جوی همچون کمفشار حاکم بر روی خلیج فارس موجب شده تا در نتیجه همگرایی سیکلونی بر روی منطقه و جلگه خوزستان بار AOD بطور غم‌انگیزی افزایش یابد (محمدپور، ۱۳۹۸؛ Rashki et al., ۲۰۱۳; Hamidi et al., ۲۰۱۹). در مجموع، مطابقت فرین‌ها با منطقه‌بندی آئروسول‌ها در ایران در طی یک دهه نشان داد که الگوهای غالب آئروسول ایران تابع رخدادهای فرین در سطح منطقه‌ای است و بجز فلات مرکزی ایران (که تحت تاثیر منابع داخلی است)، توسعه آئروسول تابع رشد و گسترش طغیان آئروسول‌های بیابانی از مناطق منبع در سطح خاورمیانه است. همچنین، بررسی‌های فرین مرتبط با منابع انتشار مشخص کرد که بیشترین آئروسول‌های کشور را عمدتاً گردوغبارهای معدنی منتشر شده از مناطق بیابانی اطراف ایران تشکیل می‌دهد.



شکل ۴. نقشه توزیع مکانی فرین‌های آئروسول در مناطق شناسایی شده

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به منطقه‌بندی آئروسل با استفاده از تکنیک‌های چند متغیره بر روی پهنه جغرافیای ایران پرداخته تا بدون توجه به مرز استانی و یا ایستگاهی، پراکنش آئروسل در ساختارهای ساده‌تر و کوچک‌تر روی ایران را نشان دهد. نتایج نشان داد که الگوهای توزیع مکانی متغیر AOD در سطح شش منطقه‌ای مجزا جنوب‌شرق، غرب-شمالغرب، شمالشرق، شرق، مرکز و جنوبغرب ایران شناسایی و تفکیک شد. این مناطق شناسایی شده از مناطق با گرادیان زیاد یا مناطق تحت تاثیر آئروسل هستند که تحت تاثیر طغیان‌های فرین آئروسل در سطح منطقه‌ای شکل می‌گیرند و بسته به دوری و نزدیکی هر منطقه به منابع انتشار آئروسل دارای پراکنش و عمق متفاوتی بر روی جو منطقه هستند. پس، موقعیت جغرافیایی هر منطقه موجب شده تا جو آن منطقه تحت تاثیر طوفان‌هایی باشد که از بیابان‌ها و مناطق منبع آلاینده اطراف هر منطقه نشأت گرفته‌اند (Nabavi et al., ۲۰۱۶; Rashki et al., ۲۰۱۹). بنابراین، موضوع منطقه‌بندی آئروسل‌ها بر روی ایران نه تنها خلأ مطالعات قبلی را پر نموده است، بلکه با استخراج سیگنال‌ها حدی برای هر کدام از مناطق شناسایی شده نشان داد که منابع آلاینده داخلی و بیرونی نقش قابل ملاحظه‌ای در شکل‌گیری مناطق دارند. بدین صورت که آئروسل‌های مناطق شمالشرق، شرق و جنوبشرق به روشنی و به دور از انتخاب سلیقه‌ای محقق تفکیک مکانی شد و تفاوت مرزی این مناطق با توجه به توزیع واریانس داده‌های ماهواره‌ای نشان داده شد. همچنین تکنیک‌های چند متغیره آشکار کرد که مکانیسم شکل‌گیری آئروسل در منطقه فلات مرکزی مستقل است و تابع فرین‌های آئروسل‌ها در مرکز کشور است؛ مگر در مواردی که طغیان‌های آئروسل تحت تاثیر شرایط روبات حاکم بر جنوبغربی ایران و شرایط دینامیکی مربوط به آن در سطوح پایین جو موجب شده تا آلاینده‌های بیابانی و صنعتی در جلو فرود روی ایران از نیمه غربی و کوهستان‌های زاگرس عبور کرده و بار آئروسل منطقه مرکزی را افزایش دهند (Namdari et al., ۲۰۱۸). نتایج مطالعه حاضر در نتیجه تفکیک تکنیکی منطقه غرب-شمالغرب از جنوبغرب نیز نشان داد که تفاوت استان‌های شمالی و جنوبی از نظر منطقه‌بندی و چگونگی گسترش آئروسل به تفکیک مرز استانی ارتباط ندارد و پدیده دینامیکی همچون آئروسل باید با تکنیک مناسب مورد بررسی قرار گیرد تا به دور از نگاه انتخابی محقق، به مرزبندی بین مناطق بپردازد. بنابراین، مطالعه اخیر توانست مرز مناطق آئروسلاهی ایران را بدون توجه به مرز استانی و یا ایستگاهی، تفکیک کند و با توجه به ماهیت دینامیکی آئروسل و به دور از دستکاری و سلیقه محقق به بررسی آن بپردازد. در مجموع، تفاوت چشمگیر تحقیق حاضر در این مساله است که مطالعات پیشین بر اساس رخدادهای فرین موردی، تفکیک سلیقه‌ای مناطق، بررسی سنجش از دوری بصورت استانی و یا تحلیل خوشه‌ای دید افقی نقاط ایستگاهی به بررسی موضوع آئروسل‌ها پرداخته‌اند (Alizadeh Choobari et al., ۲۰۱۶; Rezaei et al., ۲۰۱۹; Baghbaban et al., ۲۰۲۰ a, b; Yousefi et al., ۲۰۲۰). توانست استان‌های شمالی و جنوبی نیمه غربی، نیمه شرقی و مرکز کشور را با رویکرد منطقه‌بندی جدا کند، بلکه با استفاده از فرین‌های آئروسل‌های هر منطقه به تحلیل پدیده پرداخته است. بنابراین، مناطق شناسایی شده تحت تاثیر آئروسل‌ها در جهات مختلف جغرافیایی ایران، علاوه بر اینکه بوسیله تحقیقات پیشین سینوپتیکی و سنجش از دوری بکارگرفته شده در نواحی مختلف ایران مورد تایید است (e.g. Akbary and Farahbakhshi, ۲۰۱۵; Fattahi et al., ۲۰۱۲; Hamidi et al., ۲۰۱۹). اکبری و فرحبخشی، ۱۳۹۵؛ آرامی و همکاران، ۱۳۹۷؛ راهی زهی و همکاران، ۱۴۰۰؛ حسینی و

رستمی، ۱۳۹۷)، بلکه توانسته است مرز مناطق تحت تاثیر آئروسول‌ها را به ساختارهای جغرافیایی کوچکتر ساده کند و پراکنش متغیر مورد مطالعه را با توجه به فرین‌های آئروسول‌ای که هر منطقه را تحت تاثیر قرار داده است، قابل تفسیر کند. در نهایت، استفاده از مشاهدات ماهواره‌ای نه تنها خلاء داده‌های مشاهداتی سطح زمین را پر می‌کند، بلکه رویکردی به مراتب جغرافیایی‌تر در تحلیل مخاطرات محیطی است.

منابع

- اکبری، مهری و فرحناز فرحبخشی. ۱۳۹۵. تحلیل سینوپتیکی و شبیه‌سازی حرکت طوفان‌های شدید گردوغبار (مطالعه مورد: جنوب غرب ایران)، فصلنامه‌ی علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی، ۱۶(۵۵): ۲۷۳-۲۹۱.
- آرامی، سید عبدالحسین؛ مجید اونیق، علی محمدیان بهبهانی، مهری اکبری و علیرضا زراسوندی. ۱۳۹۷. تحلیل مطالعات مخاطره گردوغبار در جنوب غرب ایران در دوره ۲۲ ساله (۱۹۹۶ - ۲۰۱۷)، مجله تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۵(۱): ۳۹-۶۶.
- حسینی، سید اسعد و دانا رستمی. ۱۳۹۷. واکاوی و ردیابی پدیده گردوغبار در جنوب و جنوب شرق ایران با استفاده از مدل HYSPLIT و اصول سنجش ازدور. نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۵(۳): ۱۰۳-۱۰۹.
- راهی زهی، حسین؛ محمود خسروی و محسن حمیدیان‌پور. ۱۴۰۰. تغییرات زمانی-فضایی غلظت آئروسول در استان سیستان و بلوچستان (۲۰۰۰-۲۰۱۸). ۸ (۴).
- محمدپور، کاوه. ۱۳۹۸. اقلیم‌شناسی ماهواره‌ای و سینوپتیک پدیده گردوغبار در ایران، رساله دکتری، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی تهران.
- محمدپور، کاوه؛ محمد سلیقه، علی درویشی بلورانی و طیب رضیئی. ۱۳۹۹. واکاوی و مقایسه تولیدات ماهواره‌ای و شبیه‌سازی شده AOD در تحلیل گردوغبارهای غرب ایران (۲۰۰۰ - ۲۰۱۸)، تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۷(۱): ۱۵-۳۲.
- Abdi Vishkaee, F., Flamant, C., Cuesta, J., Flamant, P. and H.R., Khalesifard, ۲۰۱۱. Multiplatform observations of dust vertical distribution during transport over northwest Iran in the summertime. J. Geophys. Res. ۱۱۶, D۰۲۰۶۵. <http://dx.doi.org/10.1029/2010JD014573>.
- Akbary, M., Farahbakhshi, M. ۲۰۱۵. Analyzing and Tracing of Dust Hazard in Recent Years in Kermanshah Province, Int. J. Environ. Res., ۹(۲): ۶۷۳-۶۸۲.
- Alizadeh Choobari, O., Zawar-Reza, P. and A., Sturman, ۲۰۱۳. Low level jet intensification by mineral dust aerosols. Ann. Geophysicae: ۳۱ (۴), ۶۲۵-۶۳۲. <http://dx.doi.org/10.5194/angeo-31-625-2013>.
- Alizadeh-Choobari O., Ghafarian P., Owlad E. ۲۰۱۶. Temporal variations in the frequency and concentration of dust events over Iran based on surface observations. International Journal of Climatology. ۳۶(۱): PP. ۲۰۵۰-۲۰۶۲.
- Alizadeh-Choobari O., Ghafarian P., Owlad E. ۲۰۱۶. Temporal variations in the frequency and concentration of dust events over Iran based on surface observations. International Journal of Climatology. ۳۶(۱): PP. ۲۰۵۰-۲۰۶۲.
- Alizadeh-Choobari O., P. Zawar-Reza, A. Sturman. ۲۰۱۴. The “wind of ۱۲۰ days” and dust storm activity over the Sistan Basin, Atmospheric Research ۱۴۳: ۳۲۸-۳۴۱.
- Arkian F., Nicholson S. E. ۲۰۱۸. Long-term variations of aerosol optical depth and aerosol radiative forcing over Iran based on satellite and AERONET data, Environ Monit Assess ۱۹۰(۱): PP. ۱-۱۵.
- Arkian F., Nicholson S. E., ۲۰۱۸. Long-term variations of aerosol optical depth and aerosol radiative forcing over Iran based on satellite and AERONET data, Environ Monit Assess ۱۹۰(۱) <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6336-1>.

- Awad A., Mashat A.W., ۲۰۱۴. The Synoptic Patterns Associated with Spring Widespread Dusty Days in Central and Eastern Saudi Arabia, *Atmosphere*, ۵: ۸۸۹-۹۱۳; doi:10.3390/atmos5040889
- Baghbanan P., Ghavidel Y., Farajzadeh, M., ۲۰۲۰a. Spatial analysis of spring dust storms hazard in Iran. *Theor Appl Climatol.* ۱۳۹: ۱۴۴۷-۱۴۵۷. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-0360-y>
- Baghbanan, P., Ghavidel, Y., Farajzadeh, M. ۲۰۲۰b. Temporal long-term variations in the occurrence of dust storm days in Iran. *Meteorol Atmos Phys.* ۱۳۲, ۸۸۵-۸۹۸ (۲۰۲۰). <https://doi.org/10.1007/s00703-020-00728-3>.
- Bangert, M., Nenes A., Vogel B., Vogel H., Barahona D., Karydis V. A., Kumar P., Kottmeier C., Blahak U., ۲۰۱۲. Saharan dust event impacts on cloud formation and radiation over Western Europe, *Atmos. Chem. Phys.*, ۱۲: ۴۰۴۵-۴۰۶۳.
- Barry R.G., Carleton A.M. ۲۰۰۱. Synoptic and Dynamic Climatology. Routledge: London.
- Benedetti, A., Morcrette, J.-J., Boucher, O., Dethof, A., Engelen, R. J., Fisher, M., Flentjes, H., Huneeus, N., Jones, L., Kaiser, J. W., Kinne, S., Mangold, A., Razinger, M., Simmons, A. J., Suttie, M., and the GEMS-AER team, ۲۰۰۹. Aerosol analysis and forecast in the ECMWF Integrated Forecast System. Part II: Data assimilation, *J. Geophys. Res.*, ۱۱۴, D۱۳۲۰۵ doi:10.1029/2008JD01111۵, ۲۰۰۹.
- Bolloorani, A.D., Nabavi, S.O., Bahrami, H.A., Mirzapour, F., Kavosi, M., Abasi, E., Azizi, R., ۲۰۱۴. Investigation of dust storms entering Western Iran using remotely sensed data and synoptic analysis. *J. Environ. Health Sci. Eng.* ۱۲(۱):۱۲۴. doi: 10.1186/s130۲۱-0۱۴-۰۱۲۴-۴. eCollection ۲۰۱۴.
- Calatrini, F., Guarnieri, F., Becagli, S., Busillo, C., Chiari, M., Dayan, U., Lucarelli, F., Nava, S., Pasqui, M., Traversi, R., Udisti, R., Zipoli, G., ۲۰۱۲. Desert dust outbreaks over Mediterranean basin: a modeling, observational, and synoptic analysis approach. *Adv. Meteorol.*, ۲۴۶۸۷۴ <http://dx.doi.org/10.1155/2012/246874>.
- Cao H., Amiraslani F., Liu J., Na Zhou., ۲۰۱۵. Identification of dust storm source areas in West Asia using multiple environmental datasets, *Science of the Total Environment*, ۵۰۲: ۲۲۴-۲۳۵. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.02۵>
- Cattell RB. ۱۹۶۶. The scree test for the number of factors. *Multivariate Behavioral Research* ۱: ۲۴۵-۲۷۶.
- Cerny C.A., Kaiser H.F., ۱۹۷۷. A study of a measure of sampling adequacy for factor-analytic correlation matrices. *Multivar Behav Res* ۱۲(۱): ۴۳-۴۷.
- Compagnucci Rosa H., Salles Maria A., ۱۹۹۷. Surface Pressure Patterns During The Year Over Southern South America, *International Journal of Climatology*, Vol. ۱۷: ۶۳۵-۶۵۳.
- Das, S., Dey, S., Dash, S.K., Giuliani, G., Solmon, F., ۲۰۱۵. Dust aerosol feedback on the Indian summer monsoon: sensitivity to absorption property. *J. Geophys. Res.*, ۱۲۰, ۹۶۴۲-۹۶۵۲. <http://dx.doi.org/10.1029/2015JD023۵۸۹>.
- Fattahi E., Noohi K., Shiravand H., ۲۰۱۲. Study of dust storm synoptical patterns in southwest of Iran. *Desert* ۱۷, ۴۹-۵۵.
- Figueras i Ventura, J. and Russchenberg, H. ۲۰۰۹. Towards a better understanding of the impact of anthropogenic aerosols in the hydrological cycle: IDRA, IRCTR drizzle radar, *Physics and Chemistry of the Earth*, Parts A/B/C, ۳۴, ۸۸-۹۲, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.02.03۸>.
- Gaetani M, Pasqui M. ۲۰۱۲. Synoptic patterns associated with extreme dust events in the Mediterranean Basin. *Reg. Environ. Change* ۱۴: ۱۸۴۷-۱۸۶۰, doi: 10.1007/s101۱۳-0۱۲-۰۳۸۶-۲.
- Gkikas A., Hatzianastassiou N., Mihalopoulos N., ۲۰۰۹. Aerosol events in the broader Mediterranean basin based on ۷-year (۲۰۰۰-۲۰۰۷) MODIS C۰۰۵ data, *Ann. Geophys.*, ۲۷, ۳۵۰۹-۳۵۲۲; www.ann-geophys.net/27/3509/2009/.
- Goudie A., Middleton, N. (Eds.), ۲۰۰۶. Desert Dust in the Global System. Springer

- Gupta, P., Khan, M.N., da Silva, A., Patadia, F., ۲۰۱۳. MODIS aerosol optical depth observations over urban areas in Pakistan: Quantity and quality of the data for air quality monitoring. *Atmospheric Pollution Research* ۴: ۴۳-۵۲.
- Habib, G., Venkataraman, C., Chiapello, I., Ramachandran, S., Boucher, O., Reddy, M.S., ۲۰۰۶. Seasonal and interannual variability in absorbing aerosols over India derived from TOMS: Relationship to regional meteorology and emissions. *Atmospheric Environment* ۴۰: ۱۹۰۹-۱۹۲۱.
- Hamidi, M., Kavianpour, M.R., Shao, Y., ۲۰۱۳. Synoptic analysis of dust storms in the Middle East. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.* ۴۹: ۲۷۹-۲۸۶.
- Hamidi, M., Kavianpour, M.R., Shao, Y., ۲۰۱۷. A quantitative evaluation of the ۳-۸ July ۲۰۰۹ Shamal dust storm. *Aeolian Res.* ۲۴: ۱۳۳-۱۴۳.
- Huth R., ۱۹۹۶. An intercomparison of computer-assisted circulation classification methods. *International Journal of Climatology* ۱۶: ۸۹۳-۹۲۲.
- Huth R., Nemesova I., Klimperov A N., ۱۹۹۳. Weather categorization based on the average linkage clustering technique: an application to European mid-latitudes. *International Journal of Climatology*, ۱۳: ۸۱۷-۸۳۵.
- IPCC: The Core Writing Team Pachauri, R. K. and Meyer, L. A.: Climate Change ۲۰۱۴. Synthesis Report. *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, Geneva, Switzerland, <http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>, ۲۰۱۴.
- Islam M.N., Almazroui M., ۲۰۱۲. Direct effects and feedback of desert dust on the climate of the Arabian Peninsula during the wet season: a regional climate model study, *Clim Dyn.* ۳۹: ۲۲۳۹-۲۲۵۰; DOI ۱۰.۱۰۰۷/s۰۰۳۸۲-۰۱۲-۱۲۹۳-۴
- Jin, Q., Jiangfeng, W., Bing, P., Zong-Liang, Y., Prasad Parajuli, S., ۲۰۱۸. High Summertime Aerosol Loadings Over the Arabian Sea and Their Transport Pathways, *IGR Atmospheres*, ۱۲۳, ۱۸: ۱۰,۵۶۸-۱۰,۵۹۰.
- Jish Prakash P., Stenchikov G., Kalenderski S., Osipov S., Bangalath H., ۲۰۱۵. The impact of dust storms on the Arabian Peninsula and the Red Sea. *Atmos. Chem. Phys.* ۱۵ (۱), ۱۹۹-۲۲۲. <http://dx.doi.org/۱۰.۵۱۹۴/acp-۱۵-۱۹۹-۲۰۱۵>.
- Jolliffe IT, Uddin M, Vines SK. ۲۰۰۲. Simplified EOFs-three alternatives to rotation. *Climate Research* ۲۰: ۲۷۱-۲۷۹.
- Kaiser H. F., ۱۹۵۸. 'The Varimax criterion for analytic rotation in factor analysis', *Psychometrika*, ۲۳, ۱۸۷.
- Kaiser H. F., ۱۹۵۹. 'Computer program for Varimax rotation in factor analysis', *Educ. Psych. Meas.*, ۱۹, ۴۱۳.
- Kaskaoutis D. G., E. E. Houssos, D. Goto, A. Bartzokas, P. T. Nastos, P. R. Sinha, S. K. Kharol, P. G. Kosmopoulos, R. P. Singh, T. Takemura. ۲۰۱۴a. Synoptic weather conditions and aerosol episodes over Indo-Gangetic Plains, India, *Clim Dyn Journal*, DOI ۱۰.۱۰۰۷/s۰۰۳۸۲-۰۱۴-۲۰۵۵-۲
- Kaskaoutis D. G., Francis D., Rashki A., Chaboureaux J.P., Umesh D.C., ۲۰۱۹. Atmospheric Dynamics from Synoptic to Local Scale During an Intense Frontal Dust Storm over the Sistan Basin in Winter ۲۰۱۹, *Geosciences*, ۹, ۴۵۳; www.mdpi.com/journal/geosciences, doi: ۱۰.۳۳۹۰/geosciences۹۱۰۰۴۵۳.
- Kaskaoutis D. G., Rashki A., Houssos E. E., Mofidi A., Goto D., Bartzokas A., Francois P., Legrand M., ۲۰۱۵. Meteorological aspects associated with dust storms in the Sistan region, southeastern Iran, *Climate Dynamics*, Volume ۴۵, Issue ۱-۲, pp ۴۰۷-۴۲۴, DOI ۱۰.۱۰۰۷/s۰۰۳۸۲-۰۱۴-۲۲۰۸-۳. <http://dx.doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.aeolia.۲۰۱۴.۱۰.۰۰۳>.
- Kaskaoutis D.G., A.Rashki E.E.Houssos D.Goto P.T.Nastos. ۲۰۱۴b. Extremely high aerosol loading over Arabian Sea during June ۲۰۰۸: The specific role of the atmospheric dynamics and Sistan dust storms, *Atmospheric Environment*, Volume ۹۴, September ۲۰۱۴, ۳۷۴-۳۸۴.
- Kaskaoutis D.G., Houssos E.E., Minvielle F., Rashki A., Chiapello I., Dumka U.C., Legrand, M., ۲۰۱۸. Long-term variability and trends in the Caspian Sea – Hindu Kush Index: influence on atmospheric circulation patterns, temperature and rainfall over the Middle East and southwest Asia. *Glob. Planet. Change* ۱۶۹, ۱۶-۳۳.

- Kaskaoutis, D.G., Houssos, E.E., Rashki, A., Francois, P., Legrand, M., Goto, D., Bartzokas A., Kambezidis H.D., Takemura T., ۲۰۱۶. The Caspian Sea – Hindu Kush Index (CasHKI): a regulatory factor for dust activity over southwest Asia. *Glob. Planet. Change* ۱۳۷: ۱۰–۲۳.
- Klingmüller K., Andrea P., Swen M., Georgiy L. Stenchikov, Jos Lelieveld., ۲۰۱۶. Aerosol optical depth trend over the Middle East, *Atmos. Chem. Phys.*, ۱۶, ۵۰۶۳–۵۰۷۳. www.atmos-chem-phys.net/۱۶/۵۰۶۳/۲۰۱۶/ doi:۱۰.۵۱۹۴/acp-۱۶-۵۰۶۳-۲۰۱۶.
- Lau, K.-M., Kim, K.-M., ۲۰۰۶. Observational relationships between aerosol and Asian monsoon rainfall, and circulation, *Geophys. Res. Lett.* ۳۳, L۲۱۸۱۰. <http://dx.doi.org/۱۰.۱۰۲۹/۲۰۰۶GL۰۲۷۵۴۶>.
- Liu, X.; Gu, J.; Li, Y.; Cheng, Y.; Qu, Y.; Han, T.; Wang, J.; Tian, H.; Chen, J.; Zhang, Y. ۲۰۱۳. Increase of aerosol scattering by hygroscopic growth: Observation, modeling, and implications on visibility. *Atmos. Res.*, ۱۳۲&۱۳۳: ۹۱–۱۰۱.
- Lohmann, U., Feichter, J., ۲۰۰۵. Global indirect aerosol effects: a review. *Atmospheric Chemistry and Physics* ۵:۷۱۵–۷۳۷.
- Mahowald, N.M.; Engelstaedter, S.; Luo, C.; Sealy, A.; Artaxo, P.; Benitez-Nelson, C.; Bonnet, S.; Chen, Y.; Chuang, P.Y.; Cohen, D.D.; et al. ۲۰۰۹. Atmospheric iron deposition: Global distribution, variability, and human perturbations. *Ann. Rev. Mar. Sci.*, ۱: ۲۴۵–۲۷۸.
- Morcrette J.-J., Boucher O., Jones L., Salmond D., Bechtold P., Beljaars A., Benedetti A., Bonet A., Kaiser J. W., Razinger M., Schulz M., Serrar S., Simmons A. J., Sofiev M., Suttie M., Tompkins A. M., Untch, A., ۲۰۰۹. Aerosol analysis and forecast in the ECMWF integrated forecast system. Part I: Forward modelling, *J. Geophys. Res.*, ۱۱۴, D۰۶۲۰۶ doi:۱۰.۱۰۲۹/۲۰۰۸JD۰۱۱۲۳۵.
- Nabavi S. O., Haimberger L., Samimi C., ۲۰۱۷. Sensitivity of WRF-chem predictions to dust source function specification in West Asia, *Aeolian Research* ۲۴:۱۱۵–۱۳۱; <http://dx.doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.aeolia.۲۰۱۶.۱۲.۰۰۵>.
- Nabavi S.O., Haimberger L., Samimi C., ۲۰۱۶. Climatology of dust distribution over West Asia from homogenized remote sensing data, *Aeolian Research* ۲۱: ۹۳–۱۰۷. <http://dx.doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.aeolia.۲۰۱۶.۰۴.۰۰۲>
- Namdari S., Karimi N., Sorooshian A., Mohammadie Gh.H., Sehatkashani S., ۲۰۱۸. Impacts of climate and synoptic fluctuations on dust storm activity over the Middle East, *Atmospheric Environment* ۱۷۳: ۲۶۵–۲۷۶
- North G.R., Bell T.L., Cahalan R.F., Moeng F.J. ۱۹۸۲. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Monthly Weather Review* ۱۱۰: ۶۹۹–۷۰۶.
- Prijith S.S., Rajeev K., Thampi B.V., Nair S.K., Mohan M., ۲۰۱۳. Multi-year observations of the spatial and vertical distribution of aerosols and the genesis of abnormal variations in aerosol loading over the Arabian Sea during Asian summer monsoon season. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* ۱۰۵–۱۰۶: ۱۴۲–۱۵۱.
- Prospero J., Ginoux M., Torres P., Nicholson S. E., Gill T. E., ۲۰۰۲. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the NIMBUS ۷ total ozone mapping spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product, *Reviews of Geophysics*, ۴۰: ۲–۳۱.
- Rashki A., Kaskaoutis D.G., Mofidi A., Minvielle F., Chiapello I., Legrand M., Dumka U.C., Francois P., ۲۰۱۹. Effects of Monsoon, Shamal and Levar winds on dust accumulation over the Arabian Sea during summer – The July ۲۰۱۶ case, *Aeolian Research* ۳۶: ۲۷–۴۴; <https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.aeolia.۲۰۱۸.۱۱.۰۰۲>
- Rashki A., Kaskaoutis D. G., Francois P., Kosmopoulos P.G., Legrand M., ۲۰۱۵. Dust – storm dynamics over Sistan Region, Iran: seasonality, Transport, characteristics and affected areas, *Aeolian research* ۱۶: ۳۵–۴۸.
- Rashki, A., Arjmand, M., Kaskaoutis, D.G. ۲۰۱۷, Assessment of dust activity and dust-plume pathways over Jazmurian Basin, southeast Iran. *Aeol. Res.* ۲۴:۱۴۵–۱۶۰.
- Rashki, A., Kaskaoutis, D.G., Rautenbach, C.J.W., Eriksson, P.G., Qiang, M., Gupta, P., ۲۰۱۲. Dust storms and their horizontal dust loading in the Sistan region. Iran. *Aeolian Res.* ۵: ۵۱–۶۲.
- Rezaei, M., Farajzadeh, M., Mielonenb, T. Ghavidel, Y., ۲۰۱۹. Analysis of spatio-temporal dust aerosol frequency over Iran based on satellite data, *Atmospheric Pollution Research*, ۱۰ (۲): ۵۰۸–۵۱۹.

- Rezazadeh M., Irannejad P., Shao Y., ۲۰۱۳. Climatology of the Middle East dust events. *Aeol. Res.* ۱۰: ۱۰۳–۱۰۹.
- Richman M.B., ۱۹۸۱. Obliquely rotated principal components: an improved meteorological map typing technique? *Journal of Applied Meteorology*. ۲۰: ۱۱۴۵–۱۱۵۹.
- Richman M.B., ۱۹۸۶. Review article. Rotation of principal components. *Journal of Climatology* ۶: ۲۹۳–۳۳۵.
- Sarna, K. and Russchenberg, H. W. J. ۲۰۱۷. Monitoring aerosol–cloud interactions at the CESAR Observatory in the Netherlands, *Atmospheric Measurement Techniques*, ۱۰: ۱۹۸۷–۱۹۹۷, <https://doi.org/10.5194/amt-10-1987-2017>.
- Serra C., Fernandez Mills G., Periago M.C., Lana M., ۱۹۹۶. Winter and autumn daily precipitation patterns in Catalonia, Spain. *Theoretical and Applied Climatology* ۵۴: ۱۷۵–۱۸۶.
- White D., Richman M., Yarnal B., ۱۹۹۱. Climate regionalization and rotation of principal components. *International Journal of Climatology* ۱۱: ۱–۲۵.
- Wong Sun, Andrev E. Dessler, Natalie M. Mahowald Ping Yang and Qian Feng. ۲۰۰۹. Maintenance of Lower Tropospheric Temperature Inversion in the Saharan Air Layer by Dust and Dry Anomaly, *American Meteorological Society*, Volume ۲۲: ۵۱۴۹–۵۱۶۲, DOI: ۱۰.۱۱۷۵/۲۰۰۹JCLI۲۸۴۷,۱
- Wong, S., and A. E. Dessler. ۲۰۰۵. Suppression of deep convection over the tropical North Atlantic by the Saharan air layer, *Geophys. Res. Lett.*, ۳۲, L۰۹۸۰۸, doi:۱۰.۱۰۲۹/۲۰۰۴GL۰۲۲۹۵.
- Yarnal B. ۱۹۹۳. Synoptic Climatology in Environmental Analysis. Belhaven Press: London.
- Yarnal B., Comrie A.C., Frakes B., Brown D.P., ۲۰۰۱. Developments and prospects in synoptic climatology. *International Journal of Climatology* ۲۱: ۱۹۲۳–۱۹۵۰.
- Yousefi, R., Wang, F., Ge, Q., Shaheen, A., ۲۰۲۰. Long-term aerosol optical depth trend over Iran and identification of dominant aerosol types, *Science of the Total Environment* ۷۲۲ (۲۰۲۰) ۱۳۷۹۰۶; <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137906>.
- Zoljoodi M., Didevarasl A., Ranjbar Saadatabadi A., ۲۰۱۳. Dust Events in the Western Parts of Iran and the Relationship with Drought Expansion over the Dust-Source Areas in Iraq and Syria, *Atmospheric and Climate Sciences*, ۳: ۳۲۱–۳۳۶ <http://dx.doi.org/10.4۲۳۶/acs.۲۰۱۳.۳۳۰۳۴>.