نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال هشتم، شماره٤، زمستان ١٤٠٠

صفحات ١٢٣ – ١٤٠

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

کاوه محمدپور[1]؛ دکتری اقلیم شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

دریافت مقاله :۱۳۹۹/۰۷/ ۰۳ پذیرش نهایی:۱۴۰۰/۰۵/۱۰

چکیده

در مطالعه حاضر با استفاده از داده‌های روزانه ماهواره‌ای شبیه‌سازی شده از عمق نوری آئروسل (AOD) در ۵۵۰ نانومتر بر روی گستره ایران سعی شد تا مناطق همگن آئروسل 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 آئروسل 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 آئروسل از مناطق شناسایی شده‌ی روی ایران موجب شکل‌گیری الگوهای غالب مکانی آئروسل در گوشه و کنار کشور شده است. زیرا، رشد و گسترش فرین‌های آئروسل و انتشار آنها از مناطق منبع آئروسل در سطح خاورمیانه و آسیای مرکزی نمایان کرد که تفکیک جغرافیایی آئروسل 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 نکنیک‌های 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 فالب شکلی ساده‌تر نشان داده و آن اشکال همگنِ تفکیک شده‌ی جغرافیایی را قابل تفسیرتر کرده است.

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

[1]. نویسنده مسئول: Email: kawe.m@hotmail.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.123]

مقدمه

آئروسل دارای سیستم چند فازی 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 (Mahowald et al., ۲۰۰۹; Liu et al., ۲۰۱۳). آنها بازیگران مهمی در سامانه اقلیمی هستند که منجر به گرمایش جوی، سرمایش سطح زمین و واکنش‌های دینامیکی اتمسفر می‌شوند (IPCC, ۲۰۱٤). آئروسل‌ها، 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, ۲۰۰۵□ □□□ □□ □□., 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، آئروسل‌ها با توجه به نقش مهمی که در گردش عمومی جوی و سپس اقلیم یک منطقه با تاثیرگذاری بر روی ذخیره تابشی کره زمین برجای 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 آئروسل محسوب می‌گردند. به همین منظور داده‌های ماهواره‌ای امکانات مناسبی را برای مطالعه و پراکنش فضایی پدیده‌های دینامیکی همچون آئروسل‌ها را ارائه می‌دهند. روش‌های متعددی برای بررسی آئروسل‌ها وجود دارد که از جمله مهمترین آنها می‌توان به آستانه شاخص آئروسل (UVAI) (Prospero et al., ۲۰۰۲; Awad and Mashat, ۲۰۱٤; Nabavi et al., ۲۰۱٦)، عمق اُپتیکی آئروسل (AOD) (Gkikas et al., ۲۰۰۹; Rashki et al., ۲۰۱۵; Nabavi et al., ۲۰۱٦; Kaskaoutis et al., ۲۰۱۸)، و یا ترکیبی از تصاویر ماهواره‌ای، مدلسازی مشاهدات ماهواره‌ای و زمینی برای تشخیص و توصیف آئروسل اشاره کرد (Zoljoodi et al., ۲۰۱۳; Alizadeh-Choobari et al., ۲۰۱٤; Rashki et al., ۲۰۱۵; Nabavi et al., ۲۰۱٦; Kaskaoutis et al., ۲۰۱۵; Nabavi et al., ۲۰۱۷). برای نمونه، بررسی تغییرات مکانی و روندهای آئروسل‌ها در خاورمیانه با استفاده از شاخص آئروسل (Nabavi et al., ۲۰۱٦) و عمق نوری آئروسل (AOD) (Klingmüller et al., ۲۰۱٦) بوده است. بعلاوه، حبیب و همکاران (Habib et al. ۲۰۰۶) با استفاده از شاخص آئروسل سنجنده TOMS نشان دادند که بخشهای مرکزی و جنوب پاکستان دارای بار بالایی از آئروسل 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., ۲۰۱٦)، آستانه تغییر در تفاوت‌های بین شاخص آئروسل TOMS و OMI و عمق نوری گردوغبار سنجنده MODIS نشان داد که تغییرات بلند مدت توزیع افقی طوفان‌های عمده آئروسل و به ویژه گردوغبار متاثر 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، کاسکائوتووس و همکاران (Kaskaoutis et al., ۲۰۱٤a) با استفاده از AOD سنجنده MODIS رخدادهای آئروسل را بر روی دشت هندو - گانجتیک شناسایی و طبقه‌بندی کردند که مبنای مطالعه بعدی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.123]

(Kaskaoutis et al., ٢٠١٤b) در تشخیص روزهای حدی آئروسل بر روی کانپور هند بوده است. گیتانی و پاسکوی (Gaetani and Pasqui, ٢٠١٢) با استفاده از عمق نوری آئروسل سنجنده MODIS و مدل GOCART[1] و کالاسترینی و همکاران (Calastrini et al. , ٢٠١٢) نیز بر اساس مشاهدات زمینی ذرات معلق (PM) به بررسی پراکنش آئروسل پرداخته‌اند. گوپتا و همکاران (Gupta et al., ٢٠١٣) هم با استفاده از عمق نوری آئروسل سنجنده MODIS به بررسی روندهای زمانی و مکانی آئروسل‌ها در دو کلانشهر پاکستان (کراچی و لاهور) پرداخته‌اند. بررسی بازخورهای هواشناختی آئروسل بر روی دریای عرب و شبه‌قاره هند توسط کاسکائوتیس و همکاران (Kaskaoutis et al., ٢٠١٨) نیز نشان دادند که داده‌های AOD برای مدلسازی آئروسل‌ها در سطح منطقه‌ای معیار مناسبی هستند.

مشاهدات ماهواره‌ای و مشاهدات زمینی متعددی از آئروسل‌ها بر روی شرق (Kaskaoutis et al., ٢٠١٦)، غرب و جنوبغرب (Boloorani et al., ٢٠١٤; Nabavi et al., ٢٠١٦; Namdari et al., ٢٠١٨)، شمالشرق (Kaskaoutis et al., ٢٠١۵) و یا بصورت نقطه‌ای و پراکنده (Alizadeh-Choobari et al., ٢٠١٤; Arkian & Nicholson, ٢٠١٧) بر روی پهنه ایران مستند شده است. به طوری که بلورانی و همکاران (Boloorani et al., ٢٠١٤) مشخص کردند که بیشترین آئروسل غرب ایران از بیابان‌های عراق و سوریه منشاء گرفته‌اند که به نقش مستقیم گردوغبارها در افزایش آئروسل 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 (Abdi Vishkaee et al., ٢٠١١; Goudie and Middleton, ٢٠٠٦; Jin et al., ٢٠١٨). چنین وضعیت مشابهی بر روی مناطق ساحلی خلیج‌فارس، بسترهای خشک لسی -رسوبی خوزستان به چشم می‌خورد که تحت سلطه بادهای منطقه‌ای شَمال به ویژه در فصل گرم است (Rezazadeh et al., ٢٠١٣; Rashki et al., ٢٠١٢, ٢٠١٧). روی هم رفته، علاوه بر اینکه آئروسل‌های نمکی و بیابانی از مناطق ذکر شده انتشار می‌یابند، بلکه آنها خود تحت تاثیر بادهای غالب منطقه‌ای (شَمال و لِوار) ناشی از شرایط دینامیکی-جوی هستند که موجب بار بالای AOD بر روی مناطق می‌شوند (Fattahi et al., ٢٠١٢; Zoljoodi et al., ٢٠١٣; Hamidi et al., ٢٠١٣, ٢٠١٩□ .,□□ □□ □□□□□□ □٢٠١۵ .,□□ □□ □□□□□□□□□□ □٢٠١٧). پس، شرایط ایجاد آئروسل‌ها بعلاوه بادهای غالب منطقه‌ای مناطق مختلف ایران را تحت تاثیر آئروسل‌های مختلفی قرار داده است که در برخی از مطالعات سعی داشته‌اند تا با استفاده از خوشه‌بندی و تحلیل فصلی دید افقی (Rezaei et al., ٢٠١٩; Alizaddeh Choobari et al., ٢٠١٦; Baghbanan et al., ٢٠٢٠ a, b) و یا شناسایی نقطه‌ای رخدادها (Arkian & Nicholson, ٢٠١٨; Namdari et al., ٢٠١٨) به ارائه مناطق حساس آئروسل‌های 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 (Alizaddeh Choobari et al., ٢٠١٦; Baghbanan et al., ٢٠٢٠ a, b). زیرا، شرایط فوق العاده خشک در داخل ایران با منابع بیرونی در خاورمیانه کشور را تحت تاثیر آئروسلای با منابع مختلفی قرار خواهد داده است 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 آئروسل‌ها، به نظر می‌رسد امکان

١ - Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.123]

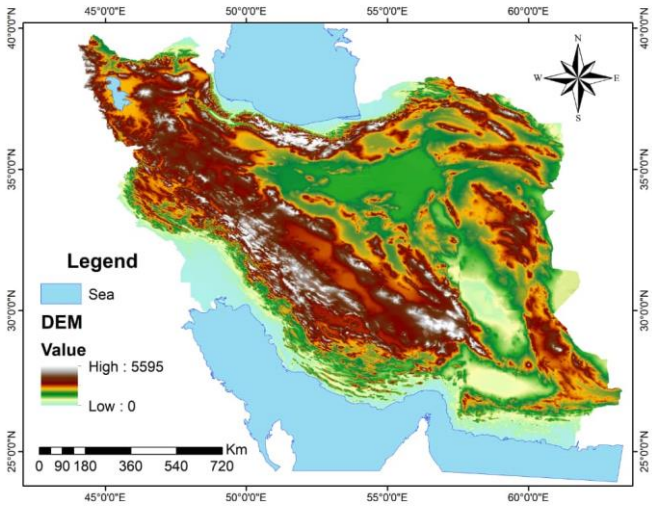
تفکیک کشور به مناطق همگن متفاوتی از آئروسل‌ها وجود دارد که مطالعات قبلی قادر به ارائه آن نبوده‌اند. بر همین اساس، استفاده از سنجش از دوری ماهواره‌ای در مقیاس مکانی بزرگتر علاوه بر اینکه کمک می‌کند تا درک بهتری از پهنه جغرافیایی پدیده نسبت به داده‌های نقطه‌ای را آشکار کند، بلکه لایه آئروسل در سطح‌های بالای وردسپهر را نیز پایش کرده و نمایش می‌دهد. بنابراین، در مطالعه حاضر، ناحیه‌بندی تکنیکی آئروسل‌ها 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 آئروسل 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 بُردارهای 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 آئروسل‌ها 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 آئروسل[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 شبیه-سازی شده است، سعی دارد تا با بکارگیری تکنیک‌های ریاضی نوین و کاربردی در اقلیم‌شناسی ماهواره‌ای، ساختار فضایی آئروسل‌های ایران (شکل ۱) را ساده کند؛ و با تبدیل تکنیکی پهنه اصلی به پهنه‌های منطقه‌ای کوچکتر از ساختارهای متفاوت با آئروسل بالا پرده بردارد (Benedetti et al., ۲۰۰۹; Morcrette et al., ۲۰۰۹؛ محمدپور و همکاران، ۱۳۹۹؛ محمدپور، ۱۳۹۸). در میان تکنیک‌های نوین، کاربردی‌ترین و مورد بحث‌ترین طبقه‌بندی بر پایه استفاده از آمار چند متغییره 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., ۱۹۹; 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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.123]



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, ۱۹۸٦; 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 ۹۹۸۵×۳۶۵۴ است. به عبارت ساده‌تر متغیرها در ستون و مشاهدات زمانی در ردیف‌های ماتریس قرار می‌گیرند. ماتریس مذکور ابتدا از نظر آماری (KMO[۲]) 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, ۱۹٦٦) و قانون نورث (North et al., ۱۹۸۲)، تعداد بُردارهای ویژه مناسب برش داده شدند. همچنین، در راستای تعیین بهترین نمایش تئوریکی داده‌ها و روابط فیزیکی جاسازی شده در داخل ماتریس ورودی (Richman, ۱۹۹۷ □□□□□□ □□□ □□□□□□□□□□□ □□□ □□□□□□ ۱۹۸۶) 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, ۱۹۸٦; 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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.123]

بی‌هنجاری روزانه سیگنال‌های آئروسل 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 می دهد. 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	۷۹/۲۶	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 آئروسل بصورت نوار شمالی-جنوبی بر روی مناطق بیابانی-رسوبی را تایید می‌کند (شکل ۳ a). دومین منطقه شناسایی شده آئروسل (شکل ۲b) 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 آئروسل منطقه مورد بحث باشد (شکل ۳ b). زیرا، علاوه بر گردوغبارهای معدنی، منطقه تحت تاثیر سایر آئروسل‌های منتشر شده از دیگر مراکز منابع طبیعی و صنعتی است که بار احتمالی آئروسل را بالا می‌برد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

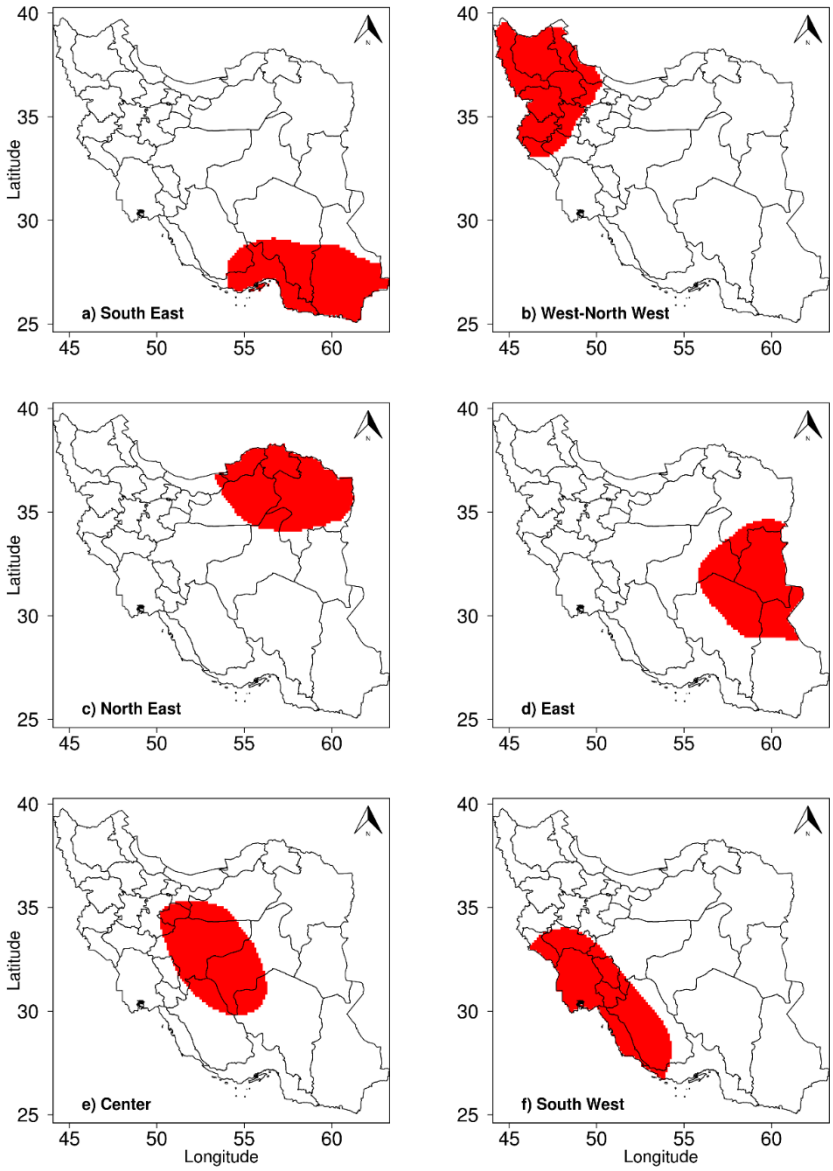
[DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.123]

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 متفاوتری از شرق و جنوبشرق کشور بوده و تحت تاثیر آئروسل با منبع متفاوت قرار دارد (در بخش فرین‌ها تشریح شده است). همچنین، مجاورت منابع ایجاد آئروسل‌های بیابانی همچون بیابان بزرگ قره‌قوم در شمال و دشت کویر (بیابان داخلی کویر) در جنوبغرب منطقه دلیل تمرکز آئروسل‌ها 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 برگرفته 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 آئروسل 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 آئروسل بر روی استان‌های شمالی در منطقه‌ی مرکزی ایران (شکل ۳ e) نشان می‌دهد که علاوه بر آئروسل‌های بیابانی، آلودگی‌های صنعتی نیز از عوامل ثانویه افزایش و شدت آئروسل در این منطقه هستند. سرانجام، ششمین منطقه شناسایی شده منطقه جنوبغرب کشور است که در شکل ۲ (f) با غلظت بالای آئروسل 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 تأثیر آئروسل‌های بیابانی منتشر شده از بیابان‌های عراق و عربستان قرار دارند (جزئیات آن در بخش توزیع مکانی فرین‌ها نشان داده شده است).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

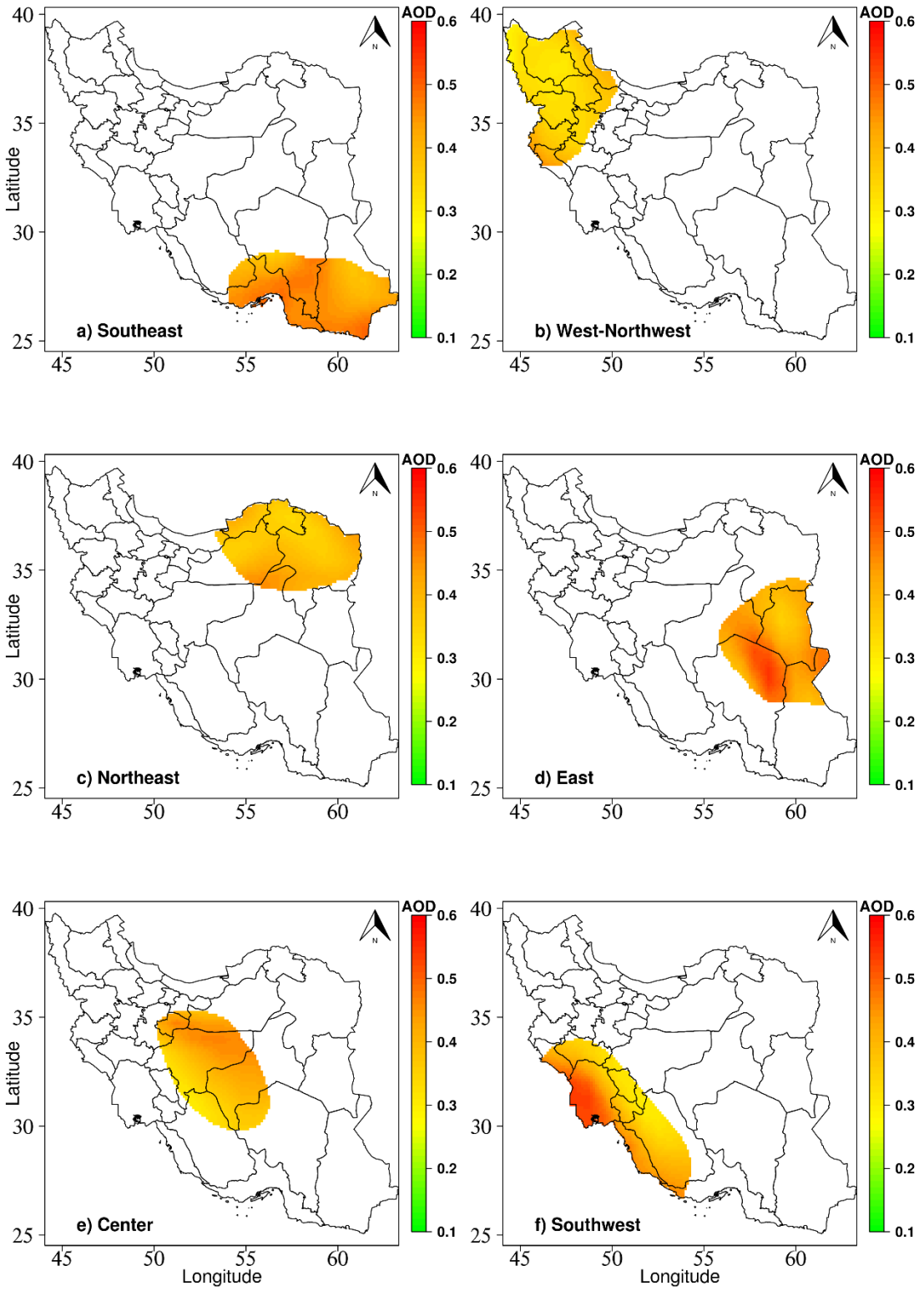
[DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.123]



شکل ۲. نقشه تفکیک مُدهای روزانه بارگویه‌های چرخش داده شده آئروسل

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.123]



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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.123]

مقدار گسترش و وسعت رخدادهای حدی آئروسل‌ها 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 آئروسل 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 تاثیر بادهای غالب منطقه‌ای در فصل گرم (Rashki et al., ۲۰۱۹؛ محمدپور، ۱۳۹۸) و فصل سرد (Alizadeh Choobari et al., ۲۰۱۳; Kaskaoutis et al., ۲۰۱۹؛ محمدپور، ۱۳۹۸) تشدید و موجب انتقال آئروسل‌های معدنی به ویژه گردوغبار از دشت سیستان به جنوب و افزایش بار AOD در منطقه جنوبشرق و شمال دریای عرب شده است (Prijith et al., ۲۰۱۳; Jish Prakash et al., ۲۰۱٤; Kaskaoutis et al., ۲۰۱٤). اما، در منطقه غرب-شمالغرب، میزان کل آئروسل‌ها به دلیل محدودیت منابع ایجاد و انتشار آئروسل نسبت به منطقه جنوبشرق از شدت کمتری برخوردار است (شکل ۴ b). زیرا، تعدد منابع و بیابان‌های عراق- سوریه در انتشار و انتقال آئروسل‌ها به شمالغرب ایران کمتر از مناطق بیابانی تاثیرگذار 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 آئروسل تحت تاثیر شدت و جهت باد شَمال قرار گیرد (Fattahi et al., ۲۰۱۲; Hamidi et al., ۲۰۱۳; Rashki et al., ۲۰۱۹). در نتیجه بار بالایی از آئروسل‌های بیابانی در طول نوار مرزی سیاسی بر منطقه شمالغرب تحمیل شده است.

همچنانکه پیشتر اشاره شد، منابع انتشار و انتقال آئروسل‌ها بسته به مجاورت منطقه با مناطق منبع آئروسل در هر منطقه متفاوت است. به همین دلیل، مجاورت منطقه شمالشرق با بیابان قره‌قوم موجب افزایش بار آئروسل 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 آئروسل‌ها افزوده است. این منطقه، تحت تاثیر 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., ۲۰۱٤؛ محمدپور، ۱۳۹۸). بعلاوه، منطقه مورد بحث تحت تاثیر انتشار آئروسل و گردوغبار از منبع بیابانی دشت کویر نیز قرار دارد. در مقابل، با وجود همجواری دو منطقه شمالشرق و شرق ایران، رخدادهای حدی آئروسل در بخش شرق کشور (شکل ۴ d) تحت تاثیر 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 آئروسل 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 بادها از ارتفاعات شمالی و شمالشرق افغانستان بسوی منطقه قابل ملاحظه است (Alizadeh Choobari et al., ۲۰۱٤; Ginoux et al, ۲۰۱۲; Rashki et al., ۲۰۱۹؛ محمدپور، ۱۳۹۸) و پهنه آئروسل شرق ایران را از دیگر مناطق شناسایی شده شمالی و جنوبی نیمه شرقی ایران جدا نموده است. در غرب منطقه شرق ایران، پراکندگی کل آئروسل‌ها در فلات مرکزی ایران (شکل ۴ e) متاثر 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

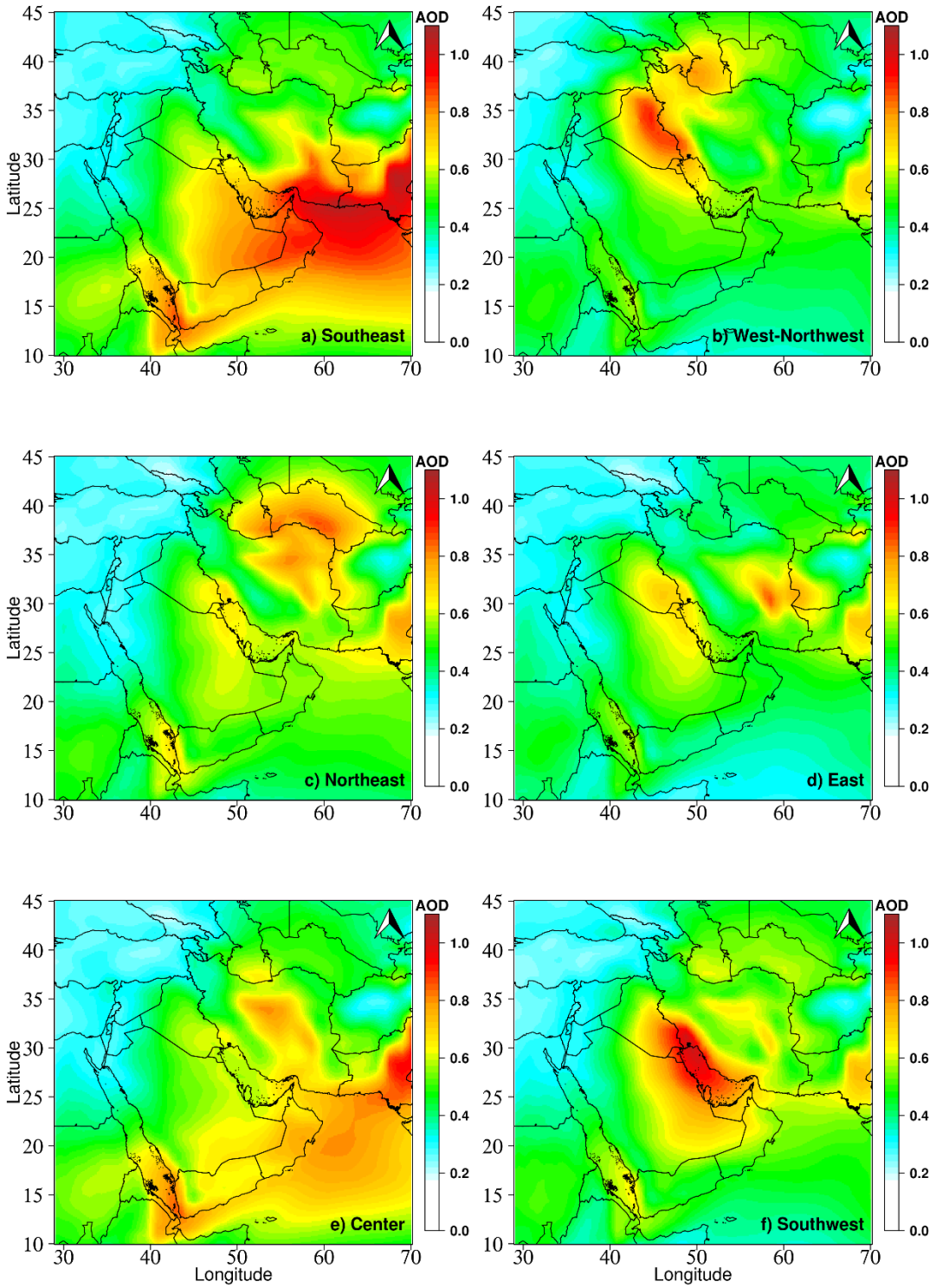
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.123]

مرکزی، مقدار آئروسل‌های آن را شدت بیشتری بخشیده است. این افزایش آئروسل 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 آئروسل‌های منطقه مرکزی بویژه بر روی استان‌های جنوبی منطقه مورد بحث شده است (محمدپور، ۱۳۹۸).

آئروسل‌های جنوبغرب (شکل ۴ f) متداولترین رخدادهای آئروسل 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؛ Hamidi et al., ۲۰۱۳; Rashki et al., ۲۰۱۹). در مجموع، مطابقت فرین‌ها با منطقه‌بندی آئروسل‌ها در ایران در طی یک دهه نشان داد که الگوهای غالب آئروسل ایران تابع رخدادهای فرین در سطح منطقه‌ای است و بجز فلات مرکزی ایران (که تحت تاثیر منابع داخلی است)، توسعه آئروسل تابع رشد و گسترش طغیان آئروسل‌های بیابانی از مناطق منبع در سطح خاورمیانه است. همچنین، بررسی-های فرین مرتبط با منابع انتشار مشخص کرد که بیشترین آئروسل‌های کشور را عمدتاً گردوغبارهای معدنی منتشر شده از مناطق بیابانی اطراف ایران تشکیل می‌دهد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.123]



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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.123]

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 منطقه‌ی 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 نشات گرفته‌اند (Nabavi et al., ۲۰۱٦; 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 نفش قابل ملاحظه‌ای در شکل گیری 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 روباد 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 آئروسلای 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., ۲۰۱٦; Rezaei et al., ۲۰۱۹; Baghbaban et al., ۲۰۲۰ a, b; Yousefi et al., ۲۰۲۰) که قادر به تحلیل و تفکیک مناطق نبوده‌اند. اما، مطالعه اخیر نه تنها 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, □□□□□□ ۲۰۱۳□؛ اکبری و فرحبخشی، ۱۳۹۵؛ آرامی و همکاران، ۱۳۹۷؛ راهی زهی و همکاران، ۱۴۰۰؛ حسینی و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.123]

رستمی، ۱۳۹۷)، بلکه توانسته است مرز مناطق تحت تاثیر آئروسل‌ها را به ساختارهای جغرافیایی کوچکتر ساده کند و پراکنش متغیر مورد مطالعه را با توجه به فرین‌های آئروسل‌ای 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 اونق ، 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 HYSPLITو 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 آئروسل 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 AODدر 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. ۱۱٦, D۰۲۰٦٥. http://dx.doi.org/۱۰,۱۰۲۹/۲۰۱۰JD۰۱٤٥۷۳.

Akbary, M., Farahbakhshi, M. ۲۰۱٥. Analyzing and Tracing of Dust Hazard in Recent Years in Kermanshah Province, Int. J. Environ. Res., **۹(۲)**:٦۷۳-٦۸۲.

Alizadeh Choobari, O., Zawar-Reza, P. and A., Sturman, .۲۰۱۳. Low level jet intensification by mineral dust aerosols. Ann. Geophysicae: **۳۱ (٤)**, ٦۲٥–٦۳۲. http://dx.doi.org/۱۰,٥۱۹٤/angeo-۳۱-٦۲٥-۲۰۱۳.

Alizadeh-Choobari O., Ghafarian P., Owlad E. ۲۰۱٦. Temporal variations in the frequency and concentration of dust events over Iran based on surface observations. International Journal of Climatology. **۳٦(۱):** PP. ۲۰٥۰_۲۰٦۲.

Alizadeh-Choobari O., Ghafarian P., Owlad E. ۲۰۱٦. Temporal variations in the frequency and concentration of dust events over Iran based on surface observations. International Journal of Climatology. **۳٦(۱)**: PP. ۲۰٥۰_۲۰٦۲.

Alizadeh-Choobari O., P. Zawar-Reza , A. Sturman .۲۰۱٤. The “wind of ۱۲۰ days” and dust storm activity over the Sistan Basin , Atmospheric Research ۱٤۳: ۳۲۸_۳٤۱.

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. ۱-۱٥.

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/۱۰,۱۰۰۷/s۱۰٦٦۱-۰۱۷-٦۳۳٦-۱.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.123]

Awad A., Mashat A.W., ۲۰۱٤. The Synoptic Patterns Associated with Spring Widespread Dusty Days in Central and Eastern Saudi Arabia, Atmosphere, ٥: ۸۸۹-۹۱۳; doi:۱۰,۳۳۹۰/atmos٥٠٤٠۸۸۹

Baghbanan P., Ghavidel Y., Farajzadeh, M., ۲۰۲۰a. Spatial analysis of spring dust storms hazard in Iran. Theor Appl Climatol. ۱۳۹: ۱٤٤۷–۱٤٥۷. https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/s۰۰۷۰٤-۰۱۹-۰۳۰٦۰-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**, ۸۸٥–۸۹۸ (۲۰۲۰). https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/s۰۰۷۰۳-۰۲۰-۰۰۷۲۸-۳.

Bangert, M., Nenes A., Vogel B., Vogel۱ H., Barahona D., Karydis V. A., Kumar P., Kottmeier۱ C., Blahak U., ۲۰۱۲. Saharan dust event impacts on cloud formation and radiation over Western Europe, Atmos. *Chem. Phys.*, **۱۲**: ٤۰٤٥–٤۰٦۳.

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.*, **۱۱٤**, D۱۳۲۰٥ doi:۱۰,۱۰۲۹/۲۰۰۸JD۰۱۱۱۱٥, ۲۰۰۹.

Boloorani, A.D., Nabavi, S.O., Bahrami, H.A., Mirzapour, F., Kavosi, M., Abasi, E., Azizi, R., ۲۰۱٤. Investigation of dust storms entering Western Iran using remotely sensed data and synoptic analysis. J. Environ. *Health Sci. Eng.***۱۲(۱):**۱۲٤. doi: ۱۰,۱۱۸٦/s٤۰۲۰۱-۰۱٤-۰۱۲٤-٤. eCollection ۲۰۱٤.

Calastrini, 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*., ۲٤٦۸۷٤ http://dx.doi.org/۱۰,۱۱٥٥/۲۰۱۲/۲٤٦۸۷٤.

Cao H., Amiraslani F., Liu J., Na Zhou., ۲۰۱٥. Identification of dust storm source areas in West Asia using multiple environmental datasets, *Science of the Total Environment***,** **٥۰۲**: ۲۲٤–۲۳٥. http://dx.doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.scitotenv.۲۰۱٤,۰۹,۰۲٥

Cattell RB. ۱۹٦٦. The scree test for the number of factors. *Multivariate Behavioral Research* **۱**: ۲٤٥–۲۷٦.

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)**: ٤۳–٤۷.

Compagnucci Rosa H., Salles Maria A., ۱۹۹۷. Surface Pressure Patterns During The Year Over Southern South America, *International Journal of Climatology*, Vol. **۱۷:** ٦۳٥–٦٥۳ .

Das, S., Dey, S., Dash, S.K., Giuliani, G., Solmon, F., ۲۰۱٥. Dust aerosol feedback on the Indian summer monsoon: sensitivity to absorption property. *J. Geophys. Res.*, **۱۲۰**, ۹٦٤۲–۹٦٥۲. http://dx.doi.org/۱۰,۱۰۰۲/۲۰۱٥JD۰۲۳٥۸۹.

Fattahi E., Noohi K., Shiravand H., ۲۰۱۲. Study of dust storm synoptical patterns in southwest of Iran. *Desert* **۱۷,** ٤۹–٥٥.

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, **۳٤**, ۸۸-۹۲, https://doi.org/https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.pce.۲۰۰۸,۰۲,۰۳۸.

Gaetani M, Pasqui M. ۲۰۱۲. Synoptic patterns associated with extreme dust events in the Mediterranean Basin. *Reg. Environ. Change* **۱٤**: ۱۸٤۷–۱۸٦۰, doi: ۱۰,۱۰۰۷/s۱۰۱۱۳-۰۱۲-۰۳۸٦-۲.

Gkikas A., Hatzianastassiou N., Mihalopoulos N., ۲۰۰۹. Aerosol events in the broader Mediterranean basin based on ۷-year (۲۰۰۰–۲۰۰۷) MODIS C۰۰٥ data, *Ann. Geophys.*, **۲۷**, ۳٥۰۹–۳٥۲۲; www.ann-geophys.net/۲۷/۳٥۰۹/۲۰۰۹.

Goudie A., Middelton, N. (Eds.), ۲۰۰٦. Desert Dust in the Global System. *Springer*

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.123]

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* **٤**: ٤٣–٥٢.

Habib, G., Venkataraman, C., Chiapello, I., Ramachandran, S., Boucher, O., Reddy, M.S., ۲۰۰٦. Seasonal and interannual variability in absorbing aerosols over India derived from TOMS: Relationship to regional meteorology and emissions. *Atmospheric Environment* **٤٠**: ١٩٠٩–١٩٢١.

Hamidi, M., Kavianpour, M.R., Shao, Y., ۲۰۱۳. Synoptic analysis of dust storms in the Middle East. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci*. **٤٩**: ٢٧٩–٢٨٦.

Hamidi, M., Kavianpour, M.R., Shao, Y., ۲۰۱۷. A quantitative evaluation of the ۳–۸ July ۲۰۰۹ Shamal dust storm. *Aeolian Res*. **٢٤**: ١٣٣–١٤٣

Huth R., ١٩٩٦. An intercomparison of computer-assisted circulation classification methods. *International Journal of Climatology* **١٦**: ٨٩٣–٩٢٢.

Huth R., Nemesova I., Klimperov ´ a N., ١٩٩٣. Weather categorization based on the average linkage clustering technique: an application to European mid-latitudes. *International Journal of Climatology*, **١٣**: ٨١٧–٨٣٥.

IPCC: The Core Writing Team Pachauri, R. K. and Meyer, L. A.: Climate Change .٢٠١٤. 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/ar٥/syr/, ٢٠١٤.

Islam M.N., Almazroui M., ٢٠١٢. 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*. **٣٩**: ٢٢٣٩–٢٢٥٠; DOI ١٠,١٠٠٧/s٠٠٣٨٢-٠١٢-١٢٩٣-٤

Jin, Q., Jiangfeng, W., Bing, P., Zong-Liang, Y., Prasad Parajuli, S., ٢٠١٨. High Summertime Aerosol Loadings Over the Arabian Sea and Their Transport Pathways,IGR Atmospheres, **١٢٣**,١٨:١٠,٥٦٨-١٠,٥٩٠.

Jish Prakash P., Stenchikov G., Kalenderski S., Osipov S., Bangalath H., ٢٠١٥. The impact of dust storms on the Arabian Peninsula and the Red Sea. *Atmos. Chem. Phys*. **١٥ (١)**, ١٩٩–٢٢٢. http://dx.doi.org/١٠,٥١٩٤/acp-١٥-١٩٩-٢٠١٥.

Jolliffe IT, Uddin M, Vines SK. ٢٠٠٢. Simplified EOFs-three alternatives to rotation. *Climate Research* **٢٠**: ٢٧١–٢٧٩.

Kaiser H. F., ١٩٥٨. 'The Varimax criterion for analytic rotation in factor analysis', *Psychometrika*, **٢٣**, ١٨٧.

Kaiser H. F., ١٩٥٩. 'Computer program for Varimax rotation in factor analysis', *Educ. Psych. Meas.*, **١٩**, ٤١٣.

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 .٢٠١٤a. Synoptic weather conditions and aerosol episodes over Indo-Gangetic Plains, India, *Clim Dyn Journal*, DOI ١٠,١٠٠٧/s٠٠٣٨٢-٠١٤-٢٠٥٥-٢

Kaskaoutis D. G., Francis D. , Rashki A., Chaboureau J.P., Umesh D.C., ٢٠١٩. Atmospheric Dynamics from Synoptic to Local Scale During an Intense Frontal Dust Storm over the Sistan Basin in Winter ٢٠١٩, *Geosciences*, **٩**, ٤٥٣; www.mdpi.com/journal/geosciences, doi:١٠,٣٣٩٠/geosciences٩١٠٠٤٥٣.

Kaskaoutis D. G., Rashki A., Houssos E. E., Mofidi A., Goto D., Bartzokas A., Francois P., Legrand M., ٢٠١٥. Meteorological aspects associated with dust storms in the Sistan region, southeastern Iran, *Climate Dynamics*, Volume **٤٥**, Issue ١–٢, pp ٤٠٧–٤٢٤, DOI ١٠,١٠٠٧/s٠٠٣٨٢-٠١٤-٢٢٠٨-٣. http://dx.doi.org/١٠,١٠١٦/j.aeolia.٢٠١٤,١٠,٠٠٣.

Kaskaoutis D.G, .A.Rashki E.E.Houssos D.Goto P.T.Nastos .٢٠١٤b. Extremely high aerosol loading over Arabian Sea during June ٢٠٠٨: The specific role of the atmospheric dynamics and Sistan dust storms, *Atmospheric Environment*, Volume **٩٤**, September ٢٠١٤, ٣٧٤-٣٨٤.

Kaskaoutis D.G., Houssos E.E., Minvielle F., Rashki A., Chiapello I., Dumka U.C., Legrand, M., ٢٠١٨. 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* **١٦٩**, ١٦–٣٣.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.123]

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:۱۰,۵۱۹٤/acp-۱٦-۵۰٦۳-۲۰۱٦.

Lau, K.-M., Kim, K.-M., ۲۰۰٦. Observational relationships between aerosol and Asian monsoon rainfall, and circulation, *Geophy. Res. Lett.* **۳۳**, L۲۱۸۱۰. http://dx.doi.org/۱۰,۱۰۲۹/۲۰۰٦GL۰۲۷۵٤٦.

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**: ۲٤۵–۲۷۸.

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.*, **۱۱٤**, D۰٦۲۰٦ 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* **۲٤**:۱۱۵–۱۳۱; http://dx.doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.aeolia.۲۰۱٦,۱۲,۰۰۵.

Nabavi S.O., Haimberger L., Samimi C., ۲۰۱٦. Climatology of dust distribution over West Asia from homogenized remote sensing data, *Aeolian Research* **۲۱**: ۹۳–۱۰۷. http://dx.doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.aeolia.۲۰۱٦,۰٤,۰۰۲

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**: ۲٦۵–۲۷٦

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**: ٦۹۹–۷۰٦.

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.* **۱۰۵–۱۰٦**: ۱٤۲–۱۵۱.

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*, **٤۰**: 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 ۲۰۱٦ case, *Aeolian Research* **۳٦**: ۲۷–٤٤; https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/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* **۱٦**: ۳۵-٤۸.

Rashki, A., Arjmand, M., Kaskaoutis, D.G. ۲۰۱۷, Assessment of dust activity and dust-plume pathways over Jazmurian Basin, southeast Iran. *Aeol. Res.* **۲٤**:۱٤۵–۱٦۰.

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: ۵۱–٦۲.

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.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.123]

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: ۱۱٤٥–۱۱٥۹.

Richman M.B., ۱۹۸٦. Review article. Rotation of principal components. *Journal of Climatology* ٦: ۲۹۳–۳۳٥.

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/۱۰,٥۱۹٤/amt-۱۰-۱۹۸۷-۲۰۱۷.

Serra C., Fernandez Mills G., Periago M.C., Lana M., ۱۹۹٦. Winter and autumn daily precipitation patterns in Catalonia, Spain. *Theoretical and Applied Climatology* ٥٤: ۱۷٥–۱۸٦

White D., Richman M., Yarnal B., ۱۹۹۱. Climate regionalization and rotation of principal components. *International Journal of Climatology* ۱۱: ۱–۲٥.

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: ٥۱٤۹-٥۱٦۲, DOI: ۱۰,۱۱۷٥/۲۰۰۹JCLI۲۸٤۷,۱

Wong, S., and A. E. Dessler .۲۰۰٥. Suppression of deep convection over the tropical North Atlantic by the Saharan air layer, Geophys. Res. Lett., ۳۲, L۰۹۸۰۸, doi:۱۰,۱۰۲۹/۲۰۰٤GL۰۲۲۲۹٥.

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: ۱۹۲۳–۱۹٥۰.

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) ۱۳۷۹۰٦; https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.scitotenv.۲۰۲۰,۱۳۷۹۰٦.

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: ۳۲۱-۳۳٦ http://dx.doi.org/۱۰,٤۲۳٦/acs.۲۰۱۳,۳۳۰۳٤.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.4.123]