




Assessment of spatial and temporal variation of dry and wet deposition of Soil-borne particulate matter over the Persian Gulf and the Sea of Oman

Davoodi, R.¹  | Malakooti, H.²  | Karami, S.³ 

1. PhD student, Department of Marine and Atmospheric Sciences (Non-Biological), University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran..
2. Professor, Department of Marine and Atmospheric Sciences (Non-Biological), University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.
3. Assistant Professor of Meteorology, Air and Dust Department, Atmospheric Sciences and Meteorology Research Center (AS MERC), Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: malakooti@hormozgan.ac.ir

(Received: 12 Feb 2026, Revise: 18 Feb 2026, Accepted: 20 Feb 2026, Published online: 29 Mar 2026)

Abstract

Dust is one of the most important atmospheric pollutants in the West Asian region, which has significant impacts on air quality, human health, and marine and terrestrial ecosystems. This study analyzes the spatial and temporal fluctuations in dry and wet deposition fluxes of dust-borne suspended particles (Dust Deposition) in the Persian Gulf and Oman Sea (Makran) basin over ten years (2014 to 2023) using MERRA-2 and CAMS reanalysis data. The main goal is to identify critical points, determine temporal patterns (monthly, seasonal, and long-term), and analyze the scale of deposition types over the region, and then compare the performance of each data set in the Persian Gulf and Oman Sea (Makran). The results showed that the most critical dry deposition points are the western and northwestern coasts of the Persian Gulf, with an annual average of about 5.2 ton/km², which is affected by proximity to dust sources and seasonal processes. Also, the peak of dry deposition occurs in the warm seasons of the year (late spring and summer) and in July at a daily rate of 22.46 µg/m². Wet deposition is also dominant in areas with higher precipitation, including the northwestern coasts of the Persian Gulf and the eastern Oman Sea, with an annual average of about 2.4 ton/km², and its maximum in February is 24.95 µg/m² per day, which occurs for the northern Persian Gulf. Also, the results of the correlation analysis of meteorological factors in the region showed that dry deposition has a higher correlation with surface wind speed (R=0.234) and wet deposition has a stronger correlation with rainfall (R=0.445). These findings are essential in air quality management and environmental impact assessment.

Keywords: Soil-borne particulate matter, dry and arid deposition, Persian Gulf and Oman Sea, MERRA-2, CAMS

Cite this article: davoodi,R. , Malakooti,H. and karami,S. (2026). Evaluation of spatial and temporal fluctuations of dry and wet deposition of soil-borne particulate matter over the Persian Gulf and the Sea of Oman. Nivar, 50(132-133), 176-185. doi: 10.30467/nivar.2026.574531.1372

E-mail: (1) r.davoodi.phd@hormozgan.ac.ir (3) karamis.62@gmail.com



ارزیابی نوسانات فضایی و زمانی نشست خشک و مرطوب ذرات معلق خاکزاد بر خلیج فارس و دریای عمان

روح اله داودی^۱ | حسین ملکوتی^۲ | سارا کرمی^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه علوم دریایی و جوی (غیر زیستی)، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.
۲. استاد، گروه علوم دریایی و جوی (غیر زیستی)، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.
۳. استادیار هواشناسی، گروه آلودگی هوا و گرد و غبار، پژوهشکده علوم جوی و هواشناسی، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: malakooti@hormozgan.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۳، بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۹، پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۱، انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۰۱/۰۹)

چکیده

گرد و خاک یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های جوی در منطقه غرب آسیاست که اثرات قابل توجهی بر کیفیت هوا، سلامت انسان، زیست بوم‌های دریایی و خشکی دارد. در این پژوهش به تحلیل نوسانات فضایی-مکانی شار نشست خشک و مرطوب ذرات معلق خاکزاد (Dust Deposition) در حوضه خلیج فارس و دریای عمان (مکران) طی یک دوره ده ساله (۲۰۱۴ تا ۲۰۲۳) با بهره‌گیری از داده‌های بازتحلیل MERRA-2 و CAMS پرداخته می‌شود. هدف اصلی ضمن شناسایی نقاط بحرانی، تعیین الگوهای زمانی (ماهانه، فصلی و بلندمدت) و تحلیل مقیاس انواع نشست روی منطقه است و سپس عملکرد هر مجموعه داده، در خلیج فارس دریای عمان (مکران). مقایسه می‌شود. نتایج نشان داد از بحرانی‌ترین نقاط نشست خشک سواحل غربی و شمال غربی خلیج فارس با میانگین سالانه حدود ۵/۲ تن بر کیلومتر مربع که متاثر از نزدیکی به منابع گرد و خاک و فرآیندهای فصلی است. همچنین اوج نشست خشک در فصول گرم سال (اواخر بهار و تابستان) و در ماه جولای روزانه به میزان ۲۲/۴۶ میکروگرم بر مترمربع اتفاق می‌افتد. نشست مرطوب نیز در نواحی دارای بارش بیشتر، غالب است، از جمله سواحل شمال غربی خلیج فارس و شرق دریای عمان با میانگین سالانه حدود ۲/۴ تن بر کیلومتر مربع و بیشینه آن در ماه فوریه روزانه به میزان ۲۴/۹۵ میکروگرم بر مترمربع و برای شمال خلیج فارس رخ می‌دهد. همچنین نتایج تحلیل همبستگی عوامل هواشناسی در منطقه نشان داد که نشست خشک همبستگی بالاتری با سرعت باد سطحی ($R=0/234$) و نشست مرطوب ارتباط قوی تری با بارندگی ($R=0/445$) دارد. این یافته‌ها در مدیریت کیفیت هوا و ارزیابی پیامدهای زیست محیطی ضروری است.

کلیدواژه‌ها: ذرات معلق خاکزاد، نشست خشک و مرطوب، خلیج فارس و دریای عمان، MERRA-2، CAMS

۱. مقدمه

گرد و خاک در جهان به شمار می‌رود. خلیج فارس و دریای عمان به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود، در مسیر انتقال ذرات معلق خاکزاد از منابع داخلی و خارجی قرار دارند (میدلتون، ۲۰۱۷). تأثیر مستقیم بر کیفیت هوا، سلامت انسان، دید ناوبری و اکوسیستم‌های دریایی منطقه اهمیت بررسی و شناخت نشست این ذرات در این منطقه را نشان می‌دهد (پراسپرو و همکاران، ۲۰۱۶). حذف ذرات معلق خاکزاد از

گرد و خاک یکی از پدیده‌های اقلیمی-محیطی مهم در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است که در دهه‌های اخیر به دلیل تغییرات اقلیمی، خشکسالی‌های مکرر و فعالیت‌های انسانی، شدت و فراوانی آن افزایش یافته است (گوید، ۲۰۱۴؛ علیزاده و همکاران، ۲۰۱۶). منطقه غرب آسیا، به‌ویژه فلات ایران و کشورهای همسایه، یکی از کانون‌های اصلی تولید و انتقال

استناد: داودی، روح اله، ملکوتی، حسین و کرمی، سارا. (۱۴۰۵). ارزیابی نوسانات فضایی و زمانی نشست خشک و مرطوب ذرات معلق خاکزاد بر خلیج فارس و دریای

عمان. نیوار، ۵۰(۱۳۲-۱۳۳)، ۱۷۶-۱۸۵. doi: 10.30467/nivar.2026.574531.1372

رایانامه: (۱) r.davoodi.phd@hormozgan.ac.ir (۳) karamis.62@gmail.com

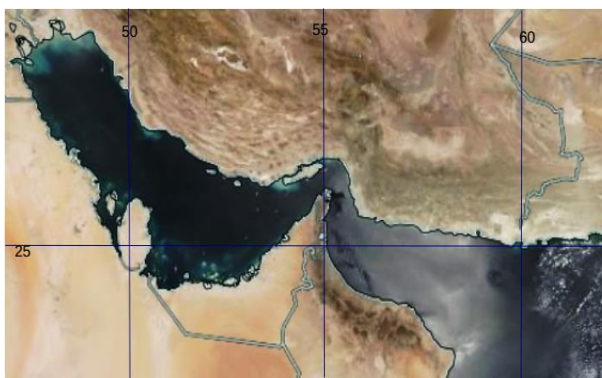


خلأ مطالعاتی، به‌ویژه در ارتباط با تفکیک سهم نشست خشک و مرطوب و تحلیل مکانی-زمانی آن‌ها در خلیج فارس و دریای عمان، ضرورت استفاده از داده‌های بازتحلیل با وضوح بالا را برجسته می‌سازد. بر همین اساس در این پژوهش، تلاش شده است برای نخستین بار با استفاده از این داده‌ها، الگوهای نشست خشک و مرطوب ذرات معلق خاکزاد در خلیج فارس و دریای عمان در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۳ مورد تحلیل قرار گیرد.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

(شکل ۱) منطقه مورد بررسی در این پژوهش، حوزه‌ی آبی و ساحلی خلیج فارس و دریای عمان را در بر می‌گیرد. موقعیت راهبردی این حوزه، آن را به یک مسیر مهم برای انتقال ذرات معلق خاکزاد از بیابان‌های عراق، عربستان و ایران به سمت اقیانوس هند تبدیل کرده است (شپرد و همکاران، ۲۰۱۰؛ شاهشونی و همکاران، ۲۰۱۹). شرایط اقلیمی متنوع، از آب‌های کم‌عمق و گرم خلیج فارس تا آب‌های عمیق‌تر و تحت تأثیر مونسون دریای عمان، بر الگوهای نشست خشک و مرطوب گرد و خاک تأثیر می‌گذارد (راو و همکاران، ۲۰۱۶).



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

۲-۲. داده‌ها

MERRA-2: بازتحلیل (Modern-Era MERRA-2 Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2) توسط ناسا تهیه شده است و

جو عمدتاً از طریق دو فرآیند اصلی انجام می‌شود: نشست خشک (Dry Deposition) و نشست مرطوب (Wet Deposition). نشست خشک شامل فرآیندهایی نظیر جذب سطحی ذرات توسط سطوحی مانند خاک و پوشش گیاهی، و همچنین برخورد اینرسی ذرات با سطح زمین در غیاب بارش است. در مقابل، نشست مرطوب به حذف آئروسول‌ها توسط بارش‌ها شامل باران و برف از طریق فرآیند شستشو (Scavenging) اطلاق می‌شود. درک دقیق این دو فرآیند برای ارزیابی اثرات گرد و خاک بر محیط زیست، منابع آب و سلامت انسان ضروری است. مطالعات متعددی به بررسی پدیده گردوخاک در ایران و منطقه خلیج فارس پرداخته‌اند. برای نمونه در برخی مطالعه‌ای مشخص شد که مناطق غربی و جنوبی ایران به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر انتقال ذرات گردوخاک از کانون‌های فعال واقع در عراق و عربستان سعودی قرار دارند (علیزاده و همکاران، ۲۰۱۶) به‌گونه‌ای که الگوهای گردش جوی منطقه‌ای نقش کلیدی در تشدید وقوع طوفان‌های گردوخاک ایفا می‌کنند. همچنین با تمرکز بر جنوب‌شرق ایران، به شناسایی منابع اصلی گردوخاک و مسیرهای انتقال آن پرداختند و اهمیت انتقال دوربرد از بیابان‌های پیرامونی و نقش بادهای غالب را برجسته کردند (رشکی و همکاران، ۲۰۱۲). با وجود گستردگی مطالعات مربوط به منابع، انتقال و ویژگی‌های فیزیکی گرد و خاک، تحقیقات مرتبط با نشست گردوخاک، به‌ویژه در منطقه خلیج فارس، همچنان محدود است. در پژوهشی دیگری با بررسی برهم‌کنش گردوخاک و فرآیندهای بارش در جنوب‌غرب آسیا نشان دادند که ذرات گردوخاک می‌توانند بسته به شرایط دینامیکی و ترمودینامیکی جو، منجر به کاهش یا افزایش بارش شوند (کلینگ مولر و همکاران، ۲۰۱۶) موضوعی که بر پیچیدگی نقش گردوخاک در سیستم اقلیمی منطقه تأکید دارد. در سال‌های اخیر، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌های بازتحلیل مانند MERRA-2 و CAMS به دلیل پوشش گسترده‌ی زمانی-مکانی و دقت نسبتاً بالا، به‌عنوان ابزاری قدرتمند در مطالعات ذرات گردوخاک مورد توجه قرار گرفته است.

که در آن a و b ضرایب تجربی وابسته به اندازه‌ی ذره هستند. این رابطه برای تخمین نرخ حذف ذرات معلق خاکزاد توسط بارش به کار رفت (ساینفیلد و پانديس، ۲۰۱۶).

۳-۲-۳ روش تحلیل

استخراج داده‌های روزانه نرخ نشست خشک و مرطوب ذرات معلق خاکزاد از MERRA-2 و CAMS برای بازه ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۳.

میانگین‌گیری ماهانه، فصلی و سالانه برای تحلیل روندها. ترسیم نقشه‌های زمانی-مکانی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS. میانگین وزنی معکوس خطا برای هر مجموعه داده MERRA-2 و CAMS و بهینه‌سازی انواع نشست تحلیل مقیاس میزان نشست خشک و مرطوب در منطقه تحلیل همبستگی بین عوامل هواشناسی (بارش، سرعت باد، رطوبت خاک) و نرخ انواع نشست گرد و خاک.

۳-۲-۳ ترکیب مدلها

اثر ترکیبی MERRA-2 و CAMS با روش میانگین وزنی معکوس خطا (Inverse Variance Weighted Mean - IWA) بگونه‌ای عمل می‌شود که هر داده‌ای با عدم قطعیت کمتر، وزن بیشتری بگیرد (تامپسون مولر و هیگنس، ۲۰۰۳؛ پالو و همکاران، ۲۰۱۴). در (جدول ۱) اثر ترکیب مدلها و بهینه‌سازی نتایج آورده شده است. همچنین با مقایسه فیزیکی مدلها در ادامه پیامدهای هر یک از مدلها با ویژگی‌های خاص خود در برآورد نشست خشک و مرطوب در منطقه در جدول ۲ آورده شده است.

$$x_{\text{merge}} = \frac{x_{\text{CAM5}}/\sigma_{\text{CAM5}} + x_{\text{MERRA2}}/\sigma_{\text{MERRA2}}}{1/\sigma_{\text{CAM5}} + 1/\sigma_{\text{MERRA2}}} \quad (3)$$

جدول ۱- اثر ترکیبی MERRA-2 و CAMS و بهینه‌سازی (ton km⁻²y⁻¹)

Total_D_Avg	Wet_D_Avg	Dry_D_Avg	Model
۸/۹	۲/۸	۶/۱	MERRA-2
۶/۹	۲/۱	۴/۸	CAMS
۷/۷	۲/۴	۵/۳	MERGE

* تعادل در داده‌های نشست: متعلق به ترکیب مدلهاست.

شامل پارامترهایی مانند نرخ نشست خشک و مرطوب گرد و خاک، سرعت باد، رطوبت خاک، دمای سطح زمین و ارتفاع لایه تراز جو است. داده‌ها با تفکیک مکانی ۰.۵°×۰.۵° جغرافیایی و تفکیک زمانی روزانه در دسترس هستند.

CAMS: سرویس پایش جو کوپرنیک (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) داده‌هایی مانند ضخامت نوری آئروسول (AOD)، نوع آئروسول، غلظت ذرات PM10 و PM2.5 و نرخ نشست آئروسولها را ارائه می‌دهد. داده‌ها با تفکیک مکانی ۰.۱°×۰.۱° جغرافیایی و تفکیک زمانی روزانه در دسترس هستند.

داده‌های بارش: برای اعتبارسنجی نتایج نشست مرطوب، از داده‌های بارش ایستگاههای سازمان هواشناسی کشور و GPCP (Global Precipitation Climatology Project) نیز استفاده شده است.

۳-۲-۳ اندازه‌گیری، مشاهده و محاسبه انواع نشست خشک

نشست خشک ذرات معلق خاکزاد بر اساس معادله‌ی سرعت نشست (Deposition Velocity) در مدل مقاومتی محاسبه می‌شود این سرعت از ترکیب مقاومت‌های مختلف به دست می‌آید (وسلی، ۱۹۸۹).

$$\frac{1}{v_d} = \frac{1}{v_g} + \frac{1}{v_a} + \frac{1}{v_s} \quad (1)$$

که در آن:

v_g مقاومت ناشی از لایه‌ی مرزی

v_a مقاومت آیرودینامیکی

v_s مقاومت ناشی از ویژگی‌های سطح است.

۳-۲-۲ نشست مرطوب

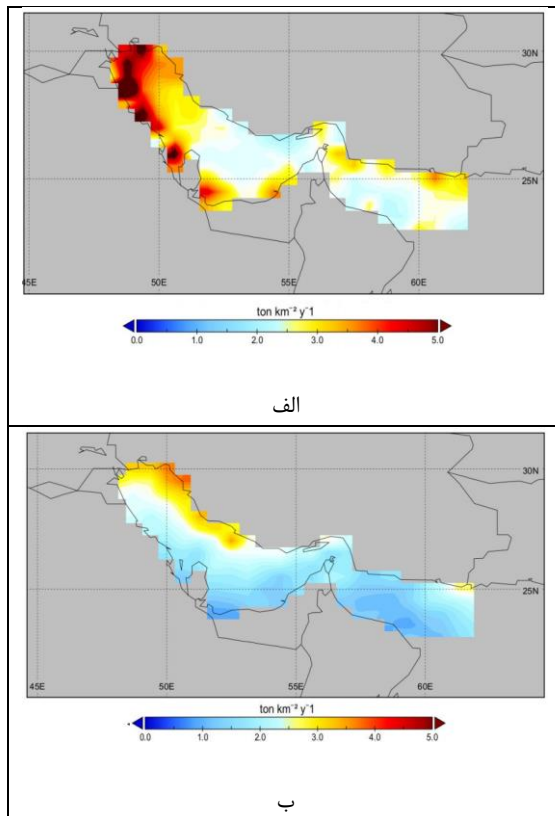
نشست مرطوب بر اساس پارامترسازی‌های جذب (Scavenging) مدل‌سازی شد. نسبت شستشو (Λ) اغلب به صورت تابعی از نرخ بارش (R ، بر حسب mm/h) و قطر ذره (d_p) بیان می‌شود:

$$\Lambda(d_p, R) = aR^b \quad (2)$$

۲-۳-۴. مقایسه فیزیکی مدلها

جدول ۲- مقایسه ویژگی های MERRA-2 و CAMS

عامل	MERRA-2	CAMS	پیامد در مقایسه
نشست خشک (DD)	معمولاً مبتنی بر یک مدل فیزیکی با پارامترهای ساده‌تر برای مقاومت‌های سطحی است.	استفاده از طرح‌های فیزیکی پیچیده‌تر شامل جزئیات بیشتری از پوشش گیاهی و نوع خاک	اختلافات بزرگ: نشست خشک اغلب بزرگترین منبع اختلاف بین مدل‌ها در مناطق خشک است.
نشست مرطوب (WD) (Scavenging)	طرح‌های حذف مرطوب (به‌ویژه برای باران) ممکن است در نواحی با بارش کم، دقت متفاوتی داشته باشند.	به دلیل فیزیک ابربارش متفاوت، پاسخ متفاوتی به رویدادهای بارشی دارد.	اختلافات جزئی: در مناطق کم‌بارش خاورمیانه، تأثیر این عامل معمولاً کمتر از نشست خشک است.



شکل ۲- میانگین مکانی الف- نشست خشک و ب-نشست مرطوب در دوره ده ساله (۲۰۱۴-۲۰۲۳)

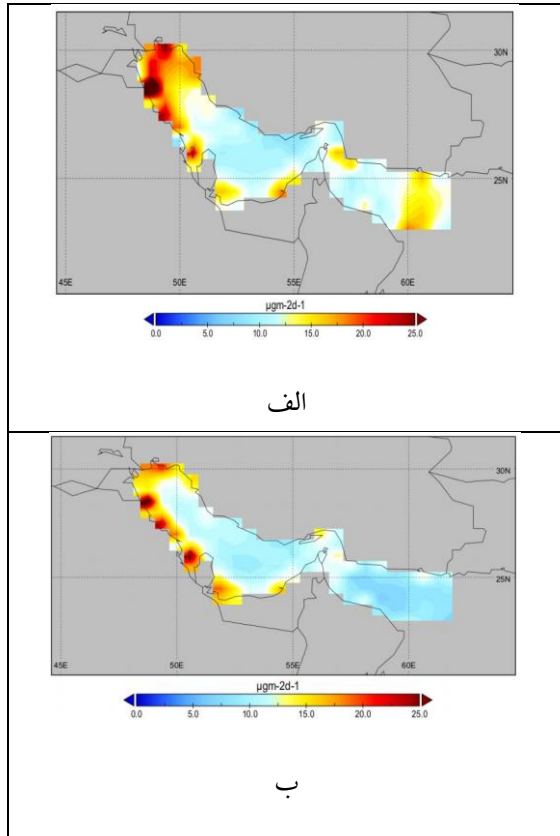
۲-۴-۲. تحلیل زمانی

تحلیل روندها نشان می‌دهد که طی دوره ۲۰۱۴-۲۰۲۳ بار ذرات معلق جوی و به‌ویژه سهم گرد و خاک در منطقه مورد مطالعه دارای نوسانات بین‌ساله قابل توجه همراه با یک روند افزایشی ملایم در سال‌های اخیر است. این روند افزایشی به‌ویژه پس از سال ۲۰۱۷ (در خلیج فارس) و ۲۰۲۰ (در دریای عمان) برجسته‌تر شده و می‌تواند با افزایش خشکسالی‌های منطقه‌ای، کاهش پوشش گیاهی سواحل جنوبی و تقویت منابع داخلی گرد و غبار مرتبط باشد. بطوریکه در سال‌های خشک‌سالی (مانند ۲۰۱۷ و ۲۰۲۱)، نرخ نشست خشک افزایش یافته و در سال‌های مرطوب‌تر (مانند ۲۰۱۹)، نرخ نشست مرطوب غالب شده است (شکل ۳).

۲-۴-۱. الگوهای نشست

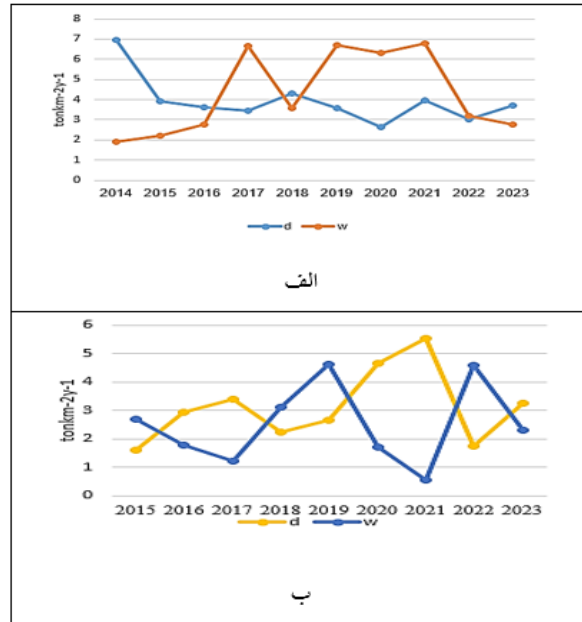
۲-۴-۱-۱. الگوهای مکانی نشست خشک و مرطوب

نقشه‌های مکانی نشان می‌دهند که نرخ نشست خشک گردوخاک در نواحی غربی و شمالی خلیج فارس (نزدیک به سواحل عراق و عربستان سعودی) بیشترین مقدار را دارد. میانگین سالانه نرخ نشست خشک در این مناطق سالانه به بیش از حدود ۵/۲ تن بر کیلومتر مربع در سال می‌رسد. این مناطق نزدیک به منابع اصلی گردوخاک هستند و شرایط جوی (کمبود بارش، سرعت باد بالا) نیز به افزایش نشست خشک کمک می‌کند (شکل ۲). در مقابل، در نواحی جنوبی‌تر مانند دریای عمان، نرخ نشست خشک کمتر است و به‌طور میانگین سالانه کمتر از ۱/۲ تن بر کیلومتر مربع است. اما در نشست مرطوب مناطق بیشینه، عبارتند از سواحل شمال غربی خلیج فارس و شرق دریای عمان که بعلاوه بارش سالانه بالاتر بطور میانگین نشستی در حدود ۲/۴ تن بر کیلومتر مربع در سال دارند.



شکل ۴- میانگین فصلی بیشینه نشست خشک طی دوره ده ساله (۲۰۲۳-۲۰۱۴) الف- تابستان ب- بهار

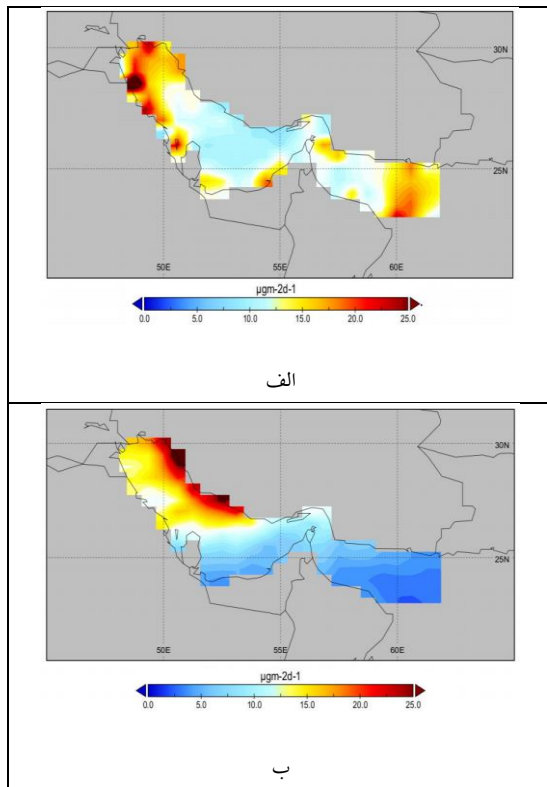
اما فصول بیشینه نشست مرطوب (زمستان و اوایل بهار):، غلظت ذرات معلق جوی به طور کلی کاهش می‌یابد. با این وجود، طوفان‌های ناشی از ورود سامانه‌های کم‌فشار مدیترانه‌ای منجر به افزایش موقتی نشست مرطوب (Dwet) می‌شوند. در این بازه زمانی (زمستان و اوایل بهار) به دلیل افزایش بارش، نرخ نشست مرطوب به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در این مناطق، میانگین نرخ نشست مرطوب در برخی فصول (زمستان برای خلیج فارس) روزانه به بیش از میزان ۱۸/۱۴ میکروگرم بر مترمربع و در فصل تابستان برای شرق دریای عمان به علت بارش‌های موسمی تابستانه روزانه به میزان ۱۰/۴۶ میکروگرم بر مترمربع می‌رسد (شکل ۵). همچنین بیشترین نشست ماهانه به ترتیب برای نشست خشک در ماه جولای میانگینی در حدود ۲۲/۴۶ میکروگرم بر مترمربع و برای نشست مرطوب بیشترین نشست ماهانه در ماه فوریه رخ داده بود با میانگینی در حدود میزان ۲۴/۹۵ میکروگرم بر مترمربع بدست آمد (شکل ۶).



شکل ۳- میانگین زمانی نشست خشک و مرطوب در دوره ده ساله (۲۰۱۴-۲۰۲۳) الف خلیج فارس ب- دریای عمان

۳-۴-۲. تحلیل فصلی

در اواخر بهار (ماه مه) و تابستان، به دلیل افزایش فعالیت توده‌های گرد و خاک، نرخ نشست خشک بیشتر است، این امر به دلیل افزایش سرعت باد، کاهش پوشش گیاهی و خشک شدن سطح خاک در مناطق مبدأ گرد و خاک است. بر اساس مشاهدات و داده‌های موردی (از جمله طوفان‌های بزرگ سال ۲۰۱۸)، مشخص شد که تابستان‌ها (اواخر بهار تا اوایل پاییز) فصل اوج فعالیت گرد و خاک در منطقه است. در مناطق بحرانی، میانگین نرخ نشست خشک در برخی فصول (تابستان و بهار) به بیش از میزان ۴۴/۱۸ میکروگرم بر مترمربع در روز می‌رسد و میانگین نشست خشک در فصل تابستان برای کل منطقه نیز از میزان ۲۲/۳۶ میکروگرم بر مترمربع تجاوز می‌کند. بطور کلی ماه‌های خرداد، تیر و مرداد بیشترین سهم از نشست خشک را به خود اختصاص می‌دهند. این دوره هم‌زمان با شرایط خشک و کم‌بارش است و در برخی مناطق حدود ۷۰٪ از کل نشست سالانه را تشکیل می‌دهد (شکل ۴).



شکل ۶- میانگین ماهانه بیشینه نشست استالفا - ماه جولای برای نشست خشک ب- ماه فوریه برای نشست مرطوب طی دوره ده ساله (۲۰۱۴-۲۰۲۳)

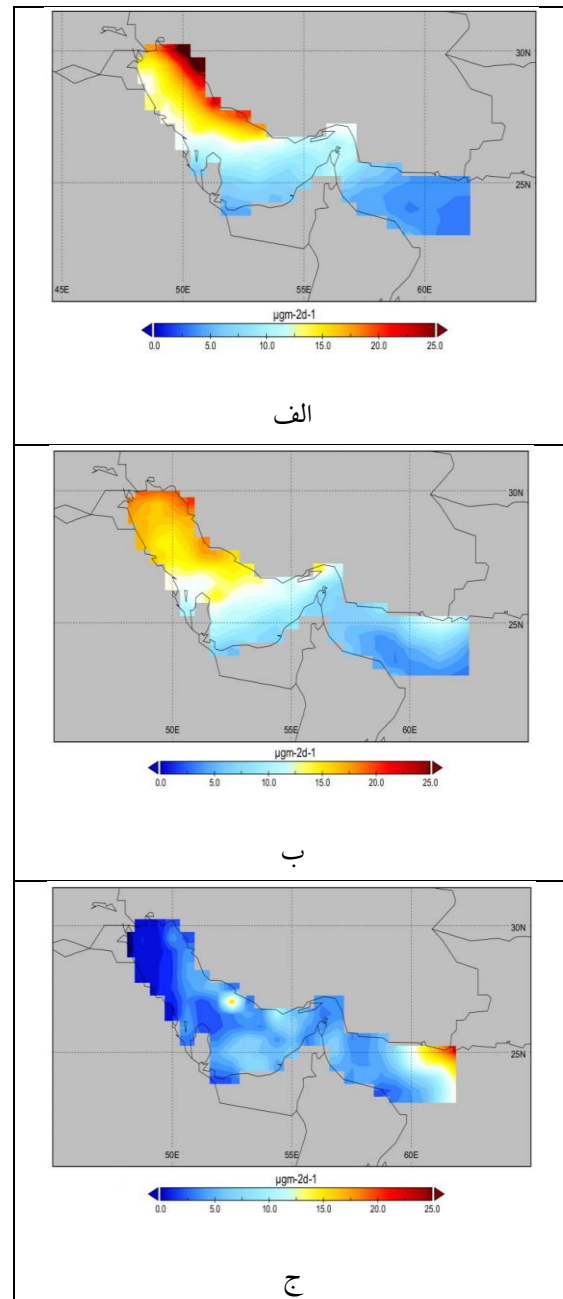
۲-۴-۴. مقایسه منطقه‌ای (خلیج فارس در برابر دریای عمان)

الگوی توزیع و سازوکارهای نشست ذرات معلق خاکزاد در خلیج فارس و دریای عمان تفاوت‌های قابل توجهی را نشان می‌دهد که عمدتاً ناشی از تفاوت در الگوهای گردش جوی و فاصله از کانون‌های اصلی تولید گرد و خاک است. بطور خلاصه:

• خلیج فارس:

۱. به دلیل مجاورت با منابع اصلی گرد و خاک (عراق و عربستان سعودی)، غلظت‌های بالای ذرات معلق در ترازهای پایین جو غالب است.
۲. در این منطقه، نشست خشک در طول سال نسبت به نشست مرطوب نقش غالب دارد.
۳. شرایط جوی خشک، پایداری زیاد و دمای بالا، انتقال و ته‌نشینی خشک ذرات را تسهیل می‌کند.

• دریای عمان:



شکل ۵- میانگین فصلی بیشینه نشست مرطوب طی دوره ده ساله (۲۰۱۴-۲۰۲۳) الف- زمستان ب- بهار ج- تابستان (برای دریای عمان)

بارندگی ($R=0/445$) دارد. بر همین اساس، رابطه سایر عوامل جوی و انواع نشست ذرات معلق خاکزاد تحلیل شده و در (جدول ۴) به اختصار بیان شده است.

جدول ۴. محاسبه ضرایب همبستگی و میانگین مجذور مربعات خطا برای هر عامل هواشناسی در ارتباط با انواع نشست

	Dry Deposition			Wet Deposition		
	R	R2	RMSE	R	R2	RMSE
RH	-۰/۲۵۳	۰/۰۶۴۰۹	۵/۴۷۶	-۰/۲۵۳	۰/۰۶۴۰۹	۵/۴۷۶
Rain	۰/۶۵۳	۰/۴۲۶۴۹	۲*۱۰ ^{-۶}	۰/۶۵۳	۰/۴۲۶۴۹	۲*۱۰ ^{-۶}
SLP	۰/۰۲۶۲	۰/۰۰۰۶۸۶	۳/۹۹۳	۰/۰۲۶۲	۰/۰۰۰۶۸۶	۳/۹۹۳
Wind	۰/۱۵۳	۰/۰۲۳۴۰۹	۰/۶۸۹	۰/۱۵۳	۰/۰۲۳۴۰۹	۰/۶۸۹

۳. نتیجه گیری

بطور کلی شرایط در منطقه خلیج فارس و دریای عمان یک سامانه پیچیده از ذرات معلق جوی را تشکیل می‌دهد که تحت سلطه الگوهای فصلی باد و تغییرات اقلیمی بزرگ مقیاس قرار دارد. در این سامانه، نشست خشک (به‌ویژه در تابستان) عامل غالب در تعیین بار ذرات معلق جوی به ویژه ذرات معلق خاکزاد، در ترازهای پایین جو و سطح دریاست. همچنین نشست مرطوب بیشتر در زمستان و وایل بهار نمود دارد و در کاهش غلظت ذرات معلق خاکزاد در این منطقه مؤثر است. روند کلی طی دوره ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۳ حاکی از افزایش تدریجی منشأهای داخلی گردو خاک و شدت نسبی انتقال آن به سمت شرق است.

اثر ترکیبی MERRA-2 و CAMS با روش میانگین وزنی معکوس سبب بهینه شدن نتایج و دقت در محاسبات شد. ضمن تحلیل مقیاس انواع نشست در منطقه مشخص شد که الگوهای نشست به‌شدت تحت تأثیر شرایط اقلیمی منطقه‌ای و محلی قرار دارد. بیشترین نرخ نشست خشک، سالانه حدود ۵/۲ تن بر کیلومتر مربع در نواحی غربی و شمالی خلیج فارس (نزدیک سواحل عراق و عربستان) رخ می‌دهد، در حالی که نشست مرطوب در مناطق جنوبی‌تر (سواحل جنوبی ایران و دریای عمان) که بارش بیشتری دارند، غالب است و سالانه حدود ۲/۴ تن بر کیلومتر مربع است. تحلیل فصلی حاکی از اوج نشست خشک در بهار و تابستان و افزایش نشست

۱. تحت تأثیر انتقال گردو خاک از خلیج فارس و شبه‌جزیره عربستان به سمت اقیانوس هند قرار دارد.

۲. به دلیل نزدیکی به خطوط جبهه‌ای و سامانه‌های حاره‌ای، احتمال وقوع نشست مرطوب در برخی فصول (به‌ویژه زمستان و اوایل بهار) بیشتر است.

۲-۴-۵. تأثیر عوامل آب‌وهوایی

نشست ذرات معلق خاکزاد به‌شدت تحت تأثیر الگوهای آب‌وهوایی منطقه‌ای و جهانی قرار دارد. مهمترین عوامل هواشناسی در انواع نشست این ذرات عبارتند از:

الف) بادهای غالب:

بادهای شمالی و شمال‌غربی (منشأ گرفته از شمال عراق و غرب ایران) نقش کلیدی در هدایت گرد و خاک از بین‌النهرین به سمت خلیج فارس دارند. این بادهای موجب انتقال سریع ذرات و در نتیجه افزایش سهم نشست خشک می‌شوند.

ب) رطوبت:

در فصول سردتر یا دوره‌های بارشی، کارایی نشست مرطوب ذرات معلق خاکزاد افزایش می‌یابد. رابطه‌ای معکوس بین رطوبت جو و فراوانی طوفان‌های خشک مشاهده می‌شود: با افزایش رطوبت و تشکیل ابرهای باران‌زا، سازوکار پاکسازی مرطوب تقویت می‌شود.

۲-۴-۶. تحلیل همبستگی بین عوامل هواشناسی و

انواع نشست

با توجه به مطالعات جهانی گرد و خاک همیشه بر نقش عوامل هواشناسی (به ویژه سرعت باد و بارش) در انتقال و نشست ذرات گرد و خاک تأکید می‌شود. پس بررسی عوامل هواشناسی به تفکیک مشاهده شد که همبستگی معناداری بین سرعت باد و نرخ نشست خشک ذرات معلق خاکزاد وجود دارد. همچنین میزان بارش و نرخ نشست مرطوب در این مناطق ارتباط تنگاتنگی باهم دارند همانطور که در جدول ۴ نشان داد که نشست خشک همبستگی بالاتری با سرعت باد سطحی ($R=0/234$) و نشست مرطوب ارتباط قوی تری با

- Iran and the Middle East, often confirming the role of land-use change and drought.
- Goudie, A. S. (2014). Desert dust and its implications: Inter-annual variability.
 - Klingmüller, K., Metzger, S., Abdelkader, M., Karydis, V. A., Stenchikov, G. L., Pozzer, A., & Lelieveld, J. (2016). Dust radiative effects on atmospheric thermodynamics and tropical cyclone activity over the Atlantic Ocean. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 1047–1064. <https://doi.org/10.5194/acp-16-1047-2016>
 - Middleton, N. J. (2017). Aeolian dust in the Middle East.
 - Paliou, C., Karympali, E., Bais, A. F., & Kazadzis, S. (2014). Combining satellite observations of aerosol optical depth over land. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7, 3899–3916. <https://doi.org/10.5194/amt-7-3899-2014>
 - Prospero, J. M., & Lamb, P. J. (2003). African dust in the Caribbean. *Global Change Biology*, 9, 1029–1041. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00667.x>
 - Rao, V. B., & Sreejith, O. P. (2017). The Indian summer monsoon: Climate change and variability. Springer.
 - Rashki, A., Kaskaoutis, D. G., Rautenbach, C. J. de W., Eriksson, P. G., Qiang, M., & Gupta, P. (2012). Dust storms and their horizontal dust loading in the Sistan region, Iran. *Aeolian Research*, 5, 51–62. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2012.07.001>
 - Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change* (3rd ed.). Wiley.
 - Shahsavani, A., Naimabadi, A., & Najafi, A. (2019). Monitoring and analysis of dust storms in the Middle East using satellite data and modeling. *Atmospheric Environment*, 198, 186–198. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.10.016>
 - Sheppard, C. R. C., Al-Husiani, M., Al-Jamali, F., Al-Yamani, F., Baldwin, R., Bishop, J., Tourenq, C. (2010). The Gulf: A young sea in decline. *Marine Pollution Bulletin*, 60, 13–38. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.10.017>
 - Thompson, S. G., & Higgins, J. P. T. (2002). How should we deal with heterogeneity in

مرطوب در زمستان و اوایل بهار است. همچنین اوج نشست خشک در فصول گرم سال و در ماه جولای روزانه به میزان ۲۲/۴۶ میکروگرم بر مترمربع اتفاق می افتد. نشست مرطوب نیز در نواحی دارای بارش بالاتر، نمود بیشتری دارد، این مناطق شامل سواحل شمال غربی خلیج فارس و شرق دریای عمان می شود و بیشینه آن در ماه فوریه، روزانه به میزان ۲۴/۹۵ میکروگرم بر مترمربع است که در این زمان کانون داغ آن در شمال خلیج فارس رخ می دهد. نتایج این پژوهش نشان می دهد که الگوهای نشست ذرات معلق خاکزاد در خلیج فارس و دریای عمان به شدت تحت تأثیر شرایط اقلیمی منطقه ای و محلی قرار دارد. مناطق نزدیک به منابع گردوخاک (مانند عراق و عربستان سعودی) بیشتر تحت تأثیر نشست خشک هستند، در حالی که مناطق جنوبی تر که بارش بیشتری دارند، غالباً متأثر از نشست مرطوب هستند. همچنین، مشخص شد که تغییرات فصلی و سالانه در میزان بارش، رطوبت خاک و پوشش گیاهی نقش کلیدی در تعیین نوع و میزان نشست گردوخاک دارند. در ادامه نتایج تحلیل همبستگی عوامل هواشناسی در منطقه نشان داد که نشست خشک همبستگی بالاتری با سرعت باد سطحی ($R=0.234$) و نشست مرطوب ارتباط قوی تری نسبت به سایر عوامل هواشناسی با بارندگی ($R=0.445$) دارد. نتایج این پژوهش نشان داد که ترکیب داده های MERRA-2 و CAMS می تواند ابزار قدرتمندی برای بررسی فرآیندهای نشست ذرات معلق خاکزاد در مقیاس منطقه ای باشد. نتایج حاصل می تواند در برنامه ریزی های زیست محیطی، مدیریت منابع آب و خاک، و ارزیابی مخاطرات سلامتی ناشی از گردوخاک مورد استفاده قرار گیرد. پیشنهاد می شود در پژوهش های آینده، از داده های ایستگاه های زمینی برای اعتبارسنجی دقیق تر نتایج استفاده شود و همچنین، اثرات زیست محیطی نشست ذرات معلق خاکزاد بر زیست بوم دریایی مورد بررسی قرار گیرد.

منابع

- Alizadeh-Choobari, O., et al. (2016). Studies focusing on dust sources and transport over

gaseous material. Atmospheric
Environment, 23, 1293–1304.
[https://doi.org/10.1016/0004-
6981\(89\)90153-4](https://doi.org/10.1016/0004-6981(89)90153-4)

meta-analysis? BMJ, 327, 557–560.
<https://doi.org/10.1136/bmj.327.7414.557>
13. Wesely, M. L. (1989). Parameterization of
surface resistances to dry deposition of