

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1404.11.1.4.3

درصد همانندی: ۴٪

پایش نشست خشک ذرات گردو خاک در خلیج فارس و تنگه هرمز با استفاده از مدل WRF-CHEM و مقایسه با CAMS (مطالعه موردی ۲۸ تا ۳۱ ژوئیه ۲۰۱۸)

روح‌اله داودی^۱، حسین ملکوتی^۲، سارا کرمی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه علوم دریایی و جوی (غیر زیستی)، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران. r.davoodi.phd@hormozgan.ac.ir

^۲ نویسنده مسئول، استاد، گروه علوم دریایی و جوی (غیر زیستی)، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران. malakooti@hormozgan.ac.ir

^۳ استادیار هواشناسی، گروه آلودگی هوا و گرد و خاک، پژوهشکده علوم جوی و هواشناسی (ASMERC)، تهران، ایران. karamis.62@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۷

چکیده:

گرد و خاک یکی از مهمترین آلاینده‌های جوی است که تأثیرات قابل توجهی بر کیفیت هوا، سلامت انسان و اکوسیستم‌های دریایی و زمینی در منطقه غرب آسیا دارد. در این مطالعه، نشست خشک ذرات گرد و خاک در طی طوفان گرد و خاک در خلیج فارس و تنگه هرمز از ۲۸ تا ۳۱ ژوئیه ۲۰۱۸ به عنوان مطالعه موردی بررسی شده است. به منظور شبیه‌سازی نشست خشک، از مدل WRF-CHEM استفاده شد و نتایج با داده‌های بازتحلیل CAMS مقایسه شد. در این دوره، طوفان گرد و خاک از مناطق بیابانی جنوب غربی آسیا (به ویژه شبه جزیره عربستان) با بادهای غالب شمال غربی (شمال) همراه بود. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر شار نشست همزمان با افزایش غلظت ذرات معلق سطحی و تشدید سرعت باد بوده است. الگوی مکانی حداکثر نشست در بخش‌های شمالی و شمال غربی خلیج فارس نشان می‌دهد که مسیرهای انتقال گرد و خاک با شرایط دینامیکی جو سازگار است. خروجی WRF-CHEM از نظر توزیع زمانی و مکانی نشست خشک، با داده‌های CAMS مطابقت خوبی دارد، اگرچه تفاوت‌هایی، به ویژه در زمان اوج غلظت گرد و غبار وجود دارد. نتایج این پژوهش همچنین نشان‌دهنده همبستگی قوی بین دو مجموعه داده است ($R=0.76$)، به این معنی که WRF-Chem با موفقیت تغییرات زمانی نشست ذرات گرد و خاک خشک را ثبت می‌کند. این یافته بر اهمیت شبیه‌سازی‌های عددی دقیق و استفاده از داده‌های بازتحلیل برای بهبود درک ارزیابی ورودی‌های معدنی به اکوسیستم‌های دریایی خلیج فارس تأکید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: ذرات گردو خاک، نشست خشک، خلیج فارس، CAMS*WRF-CHEM

۱. مقدمه

گرد و خاک یکی از مهم ترین اجزای ذرات معلق جوی در مناطق خشک و نیمه خشک به شمار می رود و نقش قابل توجهی در سامانه اقلیم، کیفیت هوا، سلامت انسان و چرخه های زیست ژئوشیمیایی ایفا می کند [۱ و ۲]. ذرات گرد و خاک از طریق فرآیندهای انتقال دوربرد می توانند از مناطق منبع بیابانی به نواحی دوردست منتقل شده و از طریق سازوکارهای نشست خشک و تر از جو حذف شوند. در میان این فرآیندها، نشست خشک به ویژه در مناطق کم بارش، نقش غالبی در حذف ذرات از جو دارد و سهم عمده ای در ورودی مواد معدنی به زیست بوم های خشکی و دریایی ایفا می کند [۳ و ۴].

منطقه خلیج فارس به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود، مجاورت با کانون های فعال گرد و خاک در جنوب غرب آسیا، شبه جزیره عربستان و بین النهرین، و همچنین شرایط اقلیمی گرم و خشک، به طور مکرر تحت تأثیر رویدادهای شدید گرد و خاک قرار می گیرد [۵]. در فصل تابستان، غلبه سامانه های پرفشار جنب حاره ای و وزش بادهای شمال غربی موسوم به شمال، انتقال گسترده توده های گرد و خاک به سوی خلیج فارس را تسهیل می کند [۶]. این شرایط موجب افزایش غلظت ذرات معلق و تشدید فرآیندهای نشست خشک بر سطح دریا می شود که می تواند پیامدهای مهمی برای شیمی آب، بهره روری زیستی و زیست بوم های دریایی منطقه داشته باشد [۴].

با وجود اهمیت بالای نشست خشک گرد و خاک، پایش مستقیم این فرآیند به دلیل محدودیت های مکانی و زمانی داده های مشاهده ای، به ویژه بر روی پهنه های آبی، با چالش های جدی همراه است. از این رو، مدل های شیمی-انتقالی جو به عنوان ابزاری کارآمد برای شبیه سازی انتشار، انتقال و نشست ذرات گرد و خاک به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته اند [۲]. در این میان، مدل WRF-Chem با قابلیت شبیه سازی همزمان فرآیندهای دینامیکی، فیزیکی و شیمیایی جو، یکی از پر کاربردترین مدل ها در مطالعات گرد و خاک محسوب می شود [۷]. این مدل امکان برآورد شار

نشست خشک را از طریق پارامترسازی های فیزیکی، از جمله طرح Zhang و همکاران [۸]، فراهم می کند که به طور گسترده در شبیه سازی نشست ذرات معلق مورد استفاده قرار گرفته است.

در کنار شبیه سازی های عددی، داده های بازتحلیل CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) به عنوان منبعی معتبر برای پایش غلظت و نشست ذرات معلق در مقیاس منطقه ای و جهانی، به طور گسترده در مطالعات ارزیابی و مقایسه مدل ها مورد استفاده قرار می گیرند [۹ و ۱۰]. مقایسه خروجی های WRF-Chem با داده های CAMS می تواند به شناسایی عدم قطعیت ها، ارزیابی عملکرد مدل و بهبود شبیه سازی فرآیندهای نشست خشک، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک، کمک کند.

با وجود مطالعات متعدد در زمینه شبیه سازی گرد و خاک در غرب آسیا و ایران، تمرکز اغلب پژوهش ها بر غلظت ذرات معلق و مسیرهای انتقال بوده و بررسی جامع الگوهای مکانی و زمانی نشست خشک ذرات گرد و خاک در مقیاس این منطقه با استفاده از WRF-Chem و داده های CAMS همچنان محدود است. علاوه بر این، تنوع بالای شرایط اقلیمی، مکان نگاری و کاربری اراضی سواحل، ضرورت بررسی دقیق نقش این عوامل در تغییرپذیری نشست خشک ذرات را برجسته می سازد.

در این راستا، هدف اصلی این پژوهش بررسی و شبیه سازی نشست خشک ذرات گرد و خاک در خلیج فارس طی یک رویداد شدید گرد و خاک در بازه ۲۸ تا ۳۱ ژوئیه ۲۰۱۸ است. در این مطالعه، با استفاده از مدل WRF-Chem و بهره گیری از داده های ERA5 به عنوان شرایط اولیه، الگوهای زمانی و مکانی شار نشست خشک گرد و خاک شبیه سازی شده و نتایج حاصل با داده های بازتحلیل CAMS مورد مقایسه و ارزیابی قرار می گیرد. همچنین تأثیر پارامترهای هواشناسی و اندازه ذرات بر تغییرات نشست خشک مورد بررسی قرار می گیرد. این مطالعه موردی می تواند به درک بهتر نقش شرایط دینامیکی جو، مسیرهای انتقال گرد و خاک و فرآیندهای سطحی در کنترل نشست خشک گرد و خاک به ویژه در

داده بود (بر اساس داده‌های مشاهداتی و بازتحلیل)، یکی از رویدادهای شدید گردو خاک تابستانه در منطقه خلیج فارس به شمار می‌رود انتخاب و مورد ارزیابی و شبیه سازی قرار گرفت.

۲-۳. داده‌های هواشناسی

داده‌های هواشناسی مورد استفاده در این مطالعه شامل کمیت‌های دید افقی، وزش باد و کد ۰۶ از ایستگاه هواشناسی همدیدی (بندرعباس، بو شهر و ماهشهر) نواحی ساحلی خلیج فارس هستند که ۸ بار در روز در بازه زمانی ۳ ساعته در ساعت‌های UTC، ۰۳، ۰۶، ۰۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸ و ۲۱ گزارش می‌شوند. همچنین جهت پیکربندی مدل و شرایط اولیه و مرزی در مدل WRF-CHEM از داده‌های بازتحلیل ERA5 با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه استفاده شده است که از <https://cds.climate.copernicus.eu> بدست آمده است. همچنین جهت اعتبارسنجی خروجی‌های مدل از داده‌های بازتحلیل CAMS و تصاویر ماهواره مادیس بهره گرفته شد.

۲-۴. داده‌های بازتحلیل CAMS

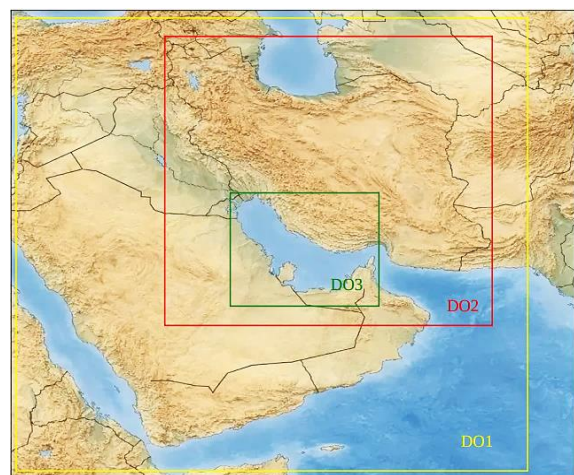
به منظور ارزیابی و مقایسه نتایج مدل، از داده‌های بازتحلیل سرویس پایش جوّی کوپرنیک (CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) استفاده شده است. این داده‌ها غلظت ذرات معلق و مؤلفه‌های گردو خاک را در مقیاس جهانی با تفکیک زمانی منظم ارائه می‌کنند؛ به طوری که داده‌ها دارای تفکیک مکانی $1^\circ \times 1^\circ$ جغرافیایی و تفکیک زمانی روزانه هستند. متغیرهایی شامل ضخامت نوری ذرات معلق جوی، نوع، غلظت ذرات و نرخ نشست آن‌ها در این مجموعه داده موجود است. بازتحلیل جهانی CAMS با ادغام مشاهدات ماهواره‌ای در سیستم پیش‌بینی یکپارچه ECMWF، میدان‌های ذرات معلق جوی سازگار و مبتنی بر فیزیک را فراهم می‌کند و به طور گسترده به عنوان شرایط مرزی و داده‌های مرجع در مطالعات مدل‌سازی منطقه‌ای گردو خاک مورد استفاده قرار گرفته است [۹ و ۱۱].

تابستان خلیج فارس کمک کرده و کاهش عدم قطعیت در برآورد بار نشست ذرات گردو خاک و مبنایی برای بهبود شبیه‌سازی‌های آینده فراهم آورد.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه و رویداد گردو خاک

منطقه مورد مطالعه شامل خلیج فارس و نواحی پیرامونی آن است (شکل ۱) که یکی از مناطق حساس به انتقال و نشست ذرات گردو خاک در جنوب غرب آسیا محسوب می‌شود. این پهنه آبی در مجاورت کانون‌های فعال گردو خاک در عراق، سوریه و شبه جزیره عربستان قرار دارد و به ویژه در فصل تابستان به طور مکرر تحت تأثیر بادهای فصلی قرار می‌گیرد [۶].



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه و دامنه اجرا شده در مدل WRF-CHEM

۲-۲. رویداد گردو خاک مورد مطالعه

در این پژوهش رویداد گردو خاک مورد مطالعه با شرایط زیر انتخاب شد:

۱. شدت طوفان گردو خاک
۲. فراگیری طوفان
۳. تداوم بیش از ۴۸ ساعت

که از بین چند طوفان با شرایط فوق با بررسی کد ۰۶ در گزارشات ایستگاه‌های همدیدی سازمان هواشناسی و همچنین تصاویر ماهواره‌ای، طوفانی که طی ۲۸ تا ۳۱ ژوئیه ۲۰۱۸ رخ

$$v_d = \frac{1}{r_t} = \frac{1}{r_a + r_b + r_a r_b v_s} + v_s \quad (3)$$

مقاومت سطح را می توان با استفاده از فرمول های تجربی بر اساس زبری سطح، نوع پوشش گیاهی و اندازه ذرات نیز محاسبه کرد [۸ و ۱۴].

۲-۶. پیکربندی مدل WRF-CHEM

در این پژوهش، از مدل WRF-Chem (Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry) نسخه ۴.۴ به منظور شبیه سازی هم زمان و برخط فرآیندهای دینامیکی، فیزیکی و شیمیایی جو استفاده شده است [۷] این مدل با فراهم سازی کوپل کامل میان متغیرهای هواشناسی و ترکیبات شیمیایی، امکان بررسی برهم کنش های دوطرفه میان گردش جو و هواویزها، از جمله ذرات گردوغبار، را فراهم می کند [۷ و ۱۵].

دامنه محاسباتی شبیه سازی منطقه خاورمیانه و خلیج فارس را در بر می گیرد و با تفکیک افقی ۱۰ کیلومتر و ۴۰ لایه عمودی در راستای قائم پیکربندی شده است. داده های اولیه و مرزی هواشناسی از مجموعه بازتحلیل ERA5 مرکز پیش بینی های میان مدت اروپا (ECMWF) با تفکیک زمانی ۳ ساعته استخراج و به مدل اعمال شده اند [۱۶].

به منظور شبیه سازی گسیل و انتقال ذرات گردو خاک، از طرحواره GOCART استفاده شده است که یکی از متداول ترین و معتبرترین طرحواره های گسیل گردو خاک در مدل های شیمی-اقليم به شمار می رود [۱۷ و ۱۸]. طرحواره GOCART گسیل گردو خاک را بر اساس ویژگی های سطح زمین، سرعت اصطکاکی باد و توزیع اندازه ذرات محاسبه می کند و در مدل سازی گردوغبار به طور گسترده به کار رفته است. همچنین نسخه ها و اصلاحات مبتنی بر این طرحواره در سال های اخیر نیز در مطالعات منطقه ای و شبیه سازی های غرب آسیا و کل آسیا عملکرد قابل قبولی نشان داده اند و اهمیت نمایش درست ویژگی های سطحی و منابع پویا را در بهبود برآورد گسیل گردوغبار تأیید کرده اند [۱۹ و ۲۰].

۲-۵. محاسبه نشست خشک ذرات گرد و خاک

نشست خشک به حذف ذرات گرد و خاک از جو به سطح زمین به دلیل ته نشینی گرانشی و انتشار آشفته اشاره دارد.

فرآیند نشست را می توان به موارد زیر تقسیم کرد:

۱. نشست گرانشی: ذرات گرد و خاک به دلیل وزن خودشان به سطح زمین سقوط می کنند.

۲. انتشار آشفته: گرد و خاک توسط گرداب های آشفته در جو

منتقل می شود و در نتیجه روی سطح نشست می کند. بطور

کلی F_{dry} ، شار نشست خشک است که توسط رابطه زیر داده می شود [۱ و ۸]:

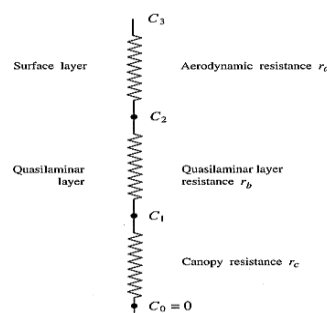
$$F_{dry} = V_d \cdot C \quad (1)$$

که در آن F_{dry} شار نشست خشک (kgm^{-2})، V_d سرعت نشست (ms^{-1}) و C غلظت گرد و خاک در هوا (kgm^{-3}) است. سرعت نشست V_d به عواملی مانند اندازه ذرات، شرایط جوی و زبری سطح بستگی دارد. فرآیند نشست خشک ذرات عموماً شامل سه مرحله است (شکل ۲):

۱. انتقال آیرودینامیکی از طریق لایه سطحی جو به لایه نازکی از هوای راکد که درست در مجاورت سطح قرار دارد

۲. انتقال براونی از طریق این لایه نازک هوای راکد، که زیر لایه شبه لاکتیکی نامیده می شود، به خود سطح می رسد.

۳. جذب در سطح. هر یک از این مراحل در مقدار سرعت نشست گذاری، V_d ، نقش دارند [۸، ۱۲ و ۱۳].



شکل ۲. مدل مقاومت در برابر نشست خشک

$$V_d^{-1} = r_t = r_a + r_b + r_c \quad (2)$$

در شبیه سازی حاضر، فرآیندهای فیزیکی اصلی شامل طرحواره لایه مرزی سیاره ای (PBL)، ریز فیزیک ابر و طرحواره های تابشی موج کوتاه و موج بلند فعال بوده اند تا باز نمایی واقع بینانه ای از تبادل انرژی، انتقال عمودی و فرآیندهای ترمودینامیکی جو فراهم شود [۸]. این پیکربندی امکان بررسی دقیق نقش شرایط دینامیکی و فیزیکی جو در گسترش و ته نشینی ذرات گرد و غبار را فراهم می سازد. نشست خشک ذرات گرد و خاک در مدل WRF-CHEM با استفاده از پارامتر سازی اندازه محور Zhang et al. (2001) محاسبه شده است. در این طرح، سرعت نشست خشک به عنوان تابعی از اندازه ذره، زبری سطح، پایداری جو و ویژگی های آیرودینامیکی محاسبه می شود. این روش به طور گسترده در مطالعات مربوط به نشست ذرات در مناطق خشک و

نیمه خشک مورد استفاده قرار گرفته و کارایی مناسبی در شبیه سازی نشست گرد و خاک نشان داده است [۸ و ۱۲]. در این مطالعه، تمرکز اصلی بر نشست خشک بوده و سهم نشست مرطوب به دلیل شرایط کم بارش تابستانه منطقه خلیج فارس ناچیز در نظر گرفته شده است. در جدول ۱ برخی طرحواره های استفاده شده در مدل WRF-CHEM به همراه دلایل انتخاب آورده شده است.

همچنین تفکیک قائم و افقی در مدل WRF-CHEM با ۳۸ لایه عمودی در راستای قائم و شبکه تودرتو در سه دامنه افقی ۹، ۳ و ۲۷ کیلومتر با گام زمانی ۳ ساعته تهیه شد که در جدول ۲ شرح داده شده است.

جدول ۱. طرحواره های مورد استفاده در اجرای مدل WRF-CHEM

دلائل انتخاب طرحواره ها	مرجع	طرحواره	فرآیندهای فیزیکی / دینامیکی
پایداری عددی مناسب و عملکرد قابل قبول در شبیه سازی ریز فیزیک ابرها در مطالعات گرد و خاک	(Hong et al., 2004)	WRF Single-Moment 5-class scheme	میکروفیزیک
دقت بالا در محاسبه انتقال تابش موج بلند و سازگاری مناسب با اثرات ذرات معلق جوی	(Mlawer et al., 1997)	RRTM scheme	بلند موج تابش
توانایی مناسب در شبیه سازی برهم کنش تابش موج کوتاه با ذرات معلق جوی	(Chou and Suarez, 1999)	Goddard Shortwave	کوتاه موج تابش
شبیه سازی واقع بینانه تبادل انرژی و رطوبت سطح - جو که در فرایند خیزش گرد و خاک نقش کلیدی دارد	(Chen and Dudhia, 2004)	Noah LSM	فیزیک سطح
عملکرد مناسب در باز نمایی ساختار لایه مرزی و اختلاط عمودی ذرات معلق جوی	(Noh et al., 2003; Hong et al., 2006)	YSU PBL	لایه مرزی
انعطاف پذیری بالا و کارایی مناسب در شبیه سازی همرفت	(Grell, 1993)	Grell 3D	کومولوس
سازگار با داده های پایداری CAMS	(Ginoux et al., 2001; Chin et al., 2002)	GOCART	گسیل گرد و خاک
مناسب در شبیه سازی نشست خشک ذرات معلق جوی	(Zhang et al., 2001; Zhang et al., 2003)	Zhang	نشست خشک ذرات گرد و خاک

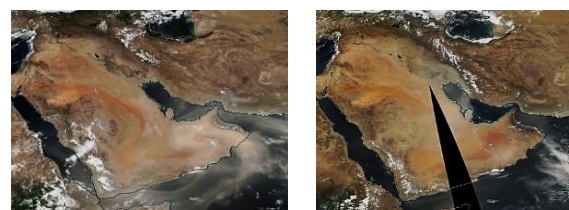
جدول ۲. تفکیک افقی و شبکه بندی مورد استفاده در اجرای مدل WRF-CHEM

ناحیه پوشش	دامنه	تفکیک افقی (km)	نقاط شبکه (e _{we} × e _{sn})
غرب آسیا	D01	۲۷	۱۲۰ × ۱۰۰
ایران سواحل جنوبی خلیج فارس و بخش هایی از عراق	D02	۹	۱۵۰ × ۱۳۰
خلیج فارس و تنگه هرمز	D03	۳	۱۸۰ × ۱۶۰

۳. بحث و نتایج

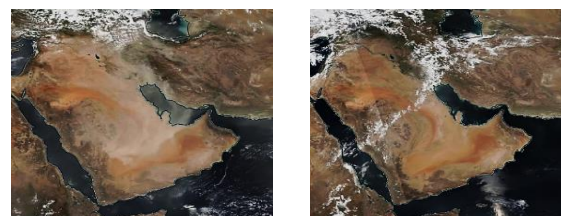
۳-۱. تصاویر ماهواره‌ای

شکل ۳ تصاویر رنگ حقیقی سنجنده مادیس ماهواره ترا را نشان می‌دهد. در روز ۲۸ ژوئیه در تصویر ماهواره‌ای، ابرناکی ضعیفی از ناحیه زاگرس تا کشور ترکیه و همچنین در شمال ایران و سواحل دریای خزر مشاهده می‌شود. همچنین گردوخاک در مناطق مرزی عراق و عربستان و شمال خلیج فارس نشان داده شده است. در روز ۲۹ ژوئیه با جابه جایی توده گردوخاک تا حدودی در مناطق مرکزی ایران، علاوه بر خلیج فارس در بخش وسیعی از دریای عمان و دریای عرب و نواحی ساحلی آنها قابل مشاهده است. در روزهای ۳۰ و ۳۱ ژوئیه همچنان وجود گردوخاک در بخش‌های وسیعی از منطقه در تصویر ماهواره ای قابل مشاهده است.



ب

الف



د

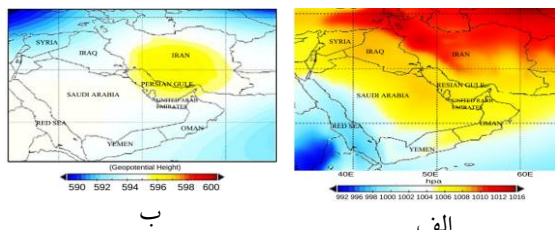
ج

شکل ۳. تصاویر رنگ حقیق ماهواره مادیس سنجنده ترا طی طوفان گردوخاک الف. ۲۸. ب. ۲۹. ج. ۳۰ و د- ۳۱ ژوئیه ۲۰۱۸

۳-۲. تحلیل شرایط همدیدی

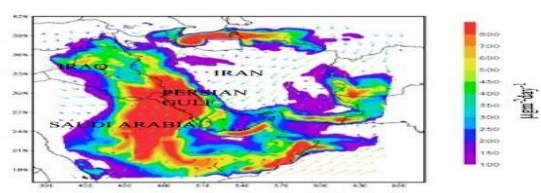
با بررسی طوفان گردوخاک مورد نظر از لحاظ همدیدی و همچنین گزارشات مشاهداتی هواشناسی در برخی ایستگاه‌های منطقه در طی طوفان گردوخاک جهت ارزیابی متغیرهای هواشناسی مشخص شد که طی طوفان منتخب از ۲۸ تا ۳۱ ژوئیه ۲۰۱۸ شرایط همدیدی با استفاده از داده‌های Ncep/Ncar تهیه و بررسی شد. طی این طوفان سطح زمین تحت نفوذ کم فشار سطحی بوده در حالیکه در سطح میانی

جو (۵۰۰ هکتوپاسکال) پشته ارتفاعی بر جو منطقه حاکم شده بود. با استقرار یک سامانه حرارتی، وزش باد سطحی به طرف خلیج فارس از منابع تولید گردوخاک شرایط برای انتقال و در نهایت نشست خشک ذرات گردوخاک از منابع کشورهای عراق و شمال عربستان بر روی خلیج فارس فراهم می‌آورد (شکل ۴).



الف

ب



ج

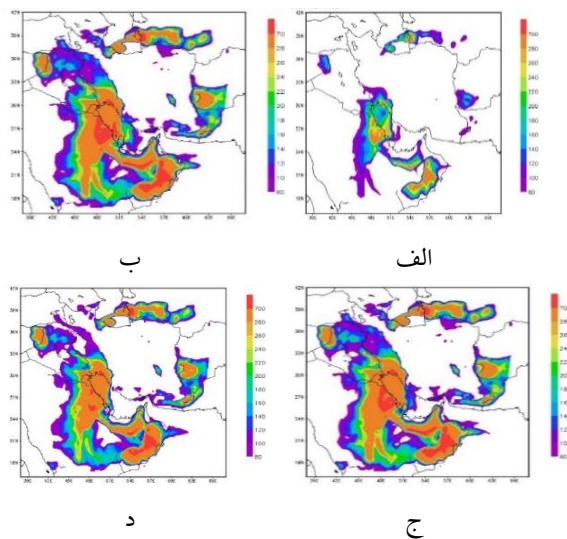
شکل ۴. نقشه الف. سطح زمین ب. سطح میانی جو ج. الگوی باد و نشست ذرات در روز ۲۸ ژوئیه ۲۰۱۸

۳-۳. ارزیابی و تحلیل داده‌ها

تصاویر ماهواره‌ای حین طوفان تهیه و مورد مطالعه قرار گرفت. نشست خشک ذرات معلق طی روزهای مختلف طوفان با مدل منطقه‌ای WRF-CHEM طوفان شبیه سازی و با داده‌های مشاهداتی (ماهواره و ایستگاه‌های هواشناسی منطقه) اعتبار سنجی شد. در مرحله بعد کشف کانون داغ آلودگی نشست خشک ذرات گردوخاک در منطقه خلیج فارس و تنگه هرمز و ارزیابی اندازه مختلف ذرات در نشست خشک صورت گرفت. سپس داده‌های CAMS برای بازه زمانی ۲۸-۳۱ ژوئیه ۲۰۱۸ استخراج شده و پس از هم‌مقیاس سازی مکانی و زمانی، با خروجی‌های WRF-CHEM مقایسه شده‌اند. این مقایسه امکان ارزیابی الگوهای زمانی و مکانی نشست خشک گردوخاک بر سطح خلیج فارس را فراهم می‌کند [۱۰].

برای تحلیل نتایج، توزیع‌های زمانی و مکانی شار نشست خشک گردوخاک از خروجی‌های مدل استخراج و ترسیم شدند. همچنین، به منظور ارزیابی عملکرد مدل، شاخص‌های

همچنین بیشترین نشست خشک ذرات گردوخاک در نواحی شمالی و شمال غرب خلیج فارس اتفاق افتاده و کانون داغ و بحرانی نشست در خلیج فارس محسوب می شود اما در مقابل کمترین میزان نشست در مناطق شرقی تر و در تنگه هرمز رخ داده است این رفتار و سازوکارهای شناخته شده انتقال و نشست گردوخاک در این شرایط با باد فصلی شمال غربی یا باد شمال سازگار است. که این موضوع در خروجی مدل WRF-CHEM کاملاً مشهود بوده و بخوبی شبیه سازی شده است (شکل ۵).



شکل ۵. نشست خشک ذرات گردوخاک ($\mu\text{gm}^{-2}\text{day}^{-1}$) خروجی مدل WRF-CHEM طی روز ۳۰ ژوئیه ۲۰۱۸ بر اساس اندازه ذرات الف. BIN4 ب. BIN3 ج. BIN2 و د. BIN1

همانطور که در شکل ۶ شار نشست خشک ذرات گردوخاک نشان داده شده که بیشترین مقادیر نشست خشک در بخش های شمالی و غربی خلیج فارس متمرکز بوده است. این نواحی به دلیل نزدیکی به مسیرهای اصلی انتقال گردوخاک و شدت بالاتر بادهای سطحی، بیشترین سهم را در نشست ذرات گردوخاک دریافت کرده اند. مقادیر شبیه سازی شده شار نشست خشک ذرات گردوخاک نشان دهنده یک گرادین مکانی مشخص از شمال غرب به جنوب شرق خلیج فارس است (تنگه هرمز)، به طوری که با افزایش فاصله از کانون های گردوخاک و کاهش شدت باد، میزان نشست خشک به تدریج کاهش می یابد. این الگو با نتایج مطالعات پیشین در منطقه خلیج فارس همخوانی مناسبی دارد [۲ و ۶].

آماري متداول شامل میانگین، انحراف معیار، بایاس (Bias) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین نتایج مدل WRF-Chem و داده های بازتحلیل CAMS محاسبه شد. استفاده از این شاخص ها یکی از روش های رایج در ارزیابی عملکرد مدل های شیمی-اقلیم و شبیه سازی گردوغبار به شمار می رود [۲۱ و ۲۲].

علاوه بر این، تحلیل الگوهای همدیدی و میدان باد در سطوح مختلف جو به منظور بررسی نقش باد شمال در انتقال و تشدید نشست خشک ذرات گردوغبار انجام شد، زیرا مطالعات اخیر نشان داده اند که الگوهای گردش منطقه ای و جت های کم ارتفاع نقش مهمی در انتقال و توزیع گردوغبار در خاورمیانه دارند [۲۶-۲۳]. این رویکرد امکان تفسیر فیزیکی نتایج و ارتباط آن ها با شرایط دینامیکی حاکم بر منطقه را فراهم می سازد.

۴-۳. تغییرات زمانی نشست طی رویداد طوفان گردوخاک

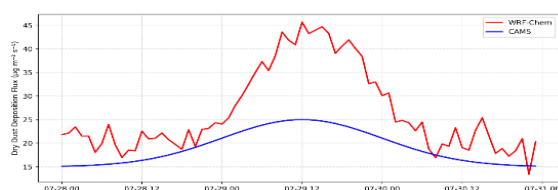
نتایج نشان می دهد که نشست خشک سازوکار غالب حذف گردوخاک از جو طی این رویداد تابستانی بوده و سهم نشست تر، به دلیل فقدان بارش مؤثر، ناچیز است. ذرات درشت تر BIN4 بعلا سازه کار نشست بر اساس گرانش در مناطق نزدیک منبع یا چشمه گردوخاک نشست می کردند و ذرات با اندازه ریزتر BIN1-3 بعلا انتقال دوربردتر به شمال خلیج فارس و حتی تا مناطق مرکزی ایران انتقال یافته و نشست می کنند. در جدول ۳ محدوده اندازه هر دسته از ذرات شرح داده شده است.

جدول ۳. محدوده اندازه ذرات مورد استفاده در اجرای مدل-Chem WRF.

نوع ذرات	محدوده قطر ذرات (μm)
Bin1	$d \leq 0.5$
Bin2	$0.5 < d \leq 1.4$
Bin3	$1.4 < d \leq 2.4$
Bin4	$2.4 < d \leq 4.5$
Bin5	$4.5 < d \leq 8$

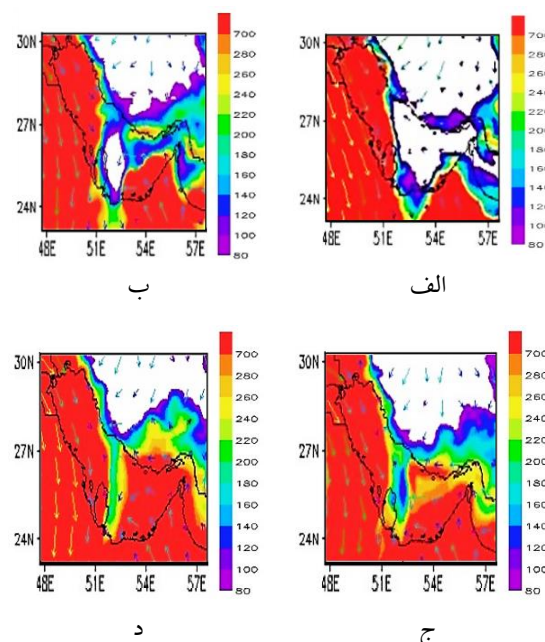
استفاده از CAMS به عنوان مرجع، رویکردی متداول در مطالعات ارزیابی مدل های شیمی-انتقالی جو محسوب می شود [۹].

مقایسه سری زمانی خروجی های WRF-CHEM با داده های بازتحلیل CAMS در شکل ۷ شان می دهد که هر دو مجموعه داده الگوهای زمانی و مکانی مشابهی از افزایش غلظت گردو خاک و تشدید نشست خشک را طی دوره مورد مطالعه شبیه سازی کرده اند. با این حال، تفاوت هایی در مقدار مطلق شار نشست خشک مشاهده می شود که می تواند ناشی از تفاوت در پارامترسازی های فیزیکی، تفکیک مکانی و منابع گردو خاک باشد. بطوریکه نقاط بیشینه در خروجی های WRF-CHEM نمایان تر بوده و افت و خیز نشست ذرات را در طی زمان های مختلف طوفان بهتر از CAMS نمایش می دهد.



شکل ۷. مقایسه سری زمانی خروجی WRF-CHEM و CAMS در برآورد شار نشست خشک گردو خاک در طول طوفان ۲۸-۳۰ تیر ۱۳۹۸ در خلیج فارس و تنگه هرمز.

همچنین عملکرد مدل WRF-Chem در شبیه سازی نشست خشک ذرات گرد و خاک با استفاده از معیارهای آماری استاندارد در مقایسه با داده های بازتحلیل CAMS ارزیابی شد. نتایج در جدول ۴ نشان دهنده همبستگی قوی بین دو مجموعه داده ($R=0.76$) است که نشان می دهد WRF-Chem با موفقیت تغییرات زمانی نشست خشک ذرات گرد و خاک را ثبت می کند. بایاس میانگین منفی ($MB=-0.12$) گرم بر متر مربع در روز) و NMB برابر با $-9/4$ درصد نشان دهنده تخمین اندک نشست خشک ذرات گرد و خاک توسط WRF-Chem نسبت به CAMS است. به طور کلی، شاخص های آماری توافق رضایت بخشی را بین شبیه سازی های مدل و داده های CAMS در طول رویداد گرد و خاک ۲۸ تا ۳۱ ژوئیه ۲۰۱۸ نشان می دهند.



شکل ۶. شبیه سازی شار نشست خشک گردو خاک به صورت میانگین گیری مکانی (area-averaged) در طول طوفان به ترتیب الف تا د (۲۸ تا ۳۱ ژوئیه ۲۰۱۸ در خلیج فارس و تنگه هرمز با مدل WRF-CHEM)

بررسی ها نشان می دهد که بخش عمده رخداد های گرد و غبار ایران منشأ غیرمحلّی داشته و ناشی از انتقال توده های گرد و غبار از دشت های بین النهرین است که پس از عبور از خلیج فارس به مناطق ساحلی ایران می رسند. در نتیجه، این فرآیند می تواند منجر به ورود ذرات معدنی و رسوبات جوی به آب های خلیج فارس شود و به طور بالقوه بر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی محیط دریایی و اکوسیستم های این منطقه اثر بگذارد [۲۶]. در زمان اوج این طوفان در منطقه خلیج فارس، نرخ نشست ذرات به صورت تقریبی در حدود ۵ تا ۲۰ گرم بر متر کربع در روز برآورد می شود، هرچند بسته به شدت رخداد، فاصله از منبع، شرایط باد و رطوبت، این مقدار می تواند به طور موضعی بیشتر نیز باشد.

۳-۴. مقایسه WRF-CHEM و CAMS

با توجه به محدودیت مشاهدات مستقیم نشست خشک بر روی پهنه های آبی، اعتبار سنجی این مطالعه بر اساس مقایسه غیرمستقیم خروجی های WRF-CHEM با داده های مستقل بازتحلیل CAMS و تحلیل هم زمان پارامترهای کلیدی مرتبط با گردو خاک (مانند غلظت و AOD) انجام شده است.

نشست در مناطق شرقی تر و در تنگه هرمز رخ داده است بطور کلی الگوی نشست خشک ذرات گردوخاک یک تمایل شمال غربی به جنوب شرقی دارد که طی این الگوی از شدت نشست خشک ذرات گردوخاک کاسته می شود. نتایج اعتبارسنجی نشان می دهد که WRF-CHEM قادر است الگوهای اصلی انتقال و نشست خشک گردوخاک در خلیج فارس را با دقت قابل قبولی شبیه سازی کند. یافته های این پژوهش بر اهمیت شبیه سازی عددی دقیق و استفاده از داده های بازتحلیل برای بهبود درک چرخه گردوخاک و ارزیابی ورودی مواد معدنی به بوم سازگان دریایی خلیج فارس تأکید می کند. با این حال، وجود عدم قطعیت ها، ضرورت استفاده از مشاهدات مستقل (مانند AOD ماهواره ای یا داده های ایستگاهی) و بهبود پارامترسازی نشست خشک در مطالعات آینده را برجسته می سازد.

سپاسگزاری

نویسندگان از سازمان هواشناسی کشور بعلت در اختیار قرار دادن داده های ایستگاه های همدیدی و همچنین از داوران محترم مقاله که سبب غنای محتوای مقاله شدند سپاسگزاری می نمایند.

منابع

1. Seinfeld JH, Pandis SN. Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change. 3rd ed. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons; 2016. doi:10.1002/9781119221166.
2. Textor C, Schulz M, Guibert S, Kinne S, Balkanski Y, Bauer S, et al. Analysis and quantification of the diversities of aerosol life cycles within AeroCom. Atmospheric Chemistry and Physics. 2006;6:1777-1813. doi:10.5194/acp-6-1777-2006.
3. Prospero JM, Ginoux P, Torres O, Nicholson SE, Gill TE. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust. Reviews of Geophysics. 2002;40(1):1002. doi:10.1029/2000RG000095.
4. Jickells TD, An ZS, Andersen KK, Baker AR, Bergametti G, Brooks N, et al. Global iron connections between desert dust and ocean biogeochemistry. Science. 2005;308(5718): 67-71. doi:10.1126/science.1105959.
5. Alizadeh Choobari O, Zawar-Reza P, Sturman A. Dust storms in the Middle East: Dynamics and modeling. Atmos Environmental.

جدول ۴. مقایسه آماری نشست خشک گرد و خاک بین خروجی WRF-CAMS و Chem

شاخص آماری	مقدار	واحد	تفسیر
MB	-۰/۱۲	$\text{g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$	کم برآورد خفیف WRF-Chem
MAE	۰/۳۵	$\text{g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$	خطای متوسط
RMSE	۰/۴۸	$\text{g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$	پراکندگی خطا
R	۰/۷۶	-	همبستگی قوی
NMB	-۹/۴	%	کم برآورد کلی

۴. نتیجه گیری

در منطقه خلیج فارس و تنگه هرمز، طوفان های گردوغبار که عمدتاً از دشت های خشک عراق، سوریه و بخش هایی از شبه جزیره عربستان منشأ می گیرند، موجب انتقال مقادیر قابل توجهی از ذرات معلق به روی سطح دریا می شوند. نرخ نشست خشک ذرات گردوخاک بسته به شدت طوفان، سرعت باد، فاصله از منبع تولید گردوغبار و شرایط جوی منطقه متغیر است و در برخی رخدادهای بسیار شدید ممکن است به طور موضعی مقادیر بیشتری نیز ثبت شود. این رسوب ذرات معدنی علاوه بر تأثیر بر کیفیت هوا، می تواند بر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی آب های خلیج فارس، از جمله افزایش مواد مغذی و تغییر شفافیت آب، نیز اثرگذار باشد.

طی رویداد طوفان گردوخاک در این مطالعه موردی طیف مختلفی از ذرات معلق گردوخاک در منطقه خلیج فارس و تنگه هرمز نشست می کنند و سری زمانی استخراج شده از شار نشست خشک نشان می دهد که اوج نشست خشک ذرات گردوخاک هم زمان با حداکثر شدت باد شمال و بیشینه غلظت گردوخاک رخ داده است. در بازه های زمانی با تضعیف میدان باد، کاهش قابل توجهی در میزان نشست خشک مشاهده می شود که بیانگر نقش غالب فرآیندهای دینامیکی در کنترل این پدیده است. همچنین بیشترین نشست خشک ذرات گردوخاک در نواحی شمالی و شمال غرب خلیج فارس اتفاق افتاده و کانون داغ و بحرانی نشست در خلیج فارس محسوب می شود اما در مقابل کمترین میزان

- distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*. 2001;106(D17):20255-73. doi:10.1029/2000JD000053.
18. Chin M, Ginoux P, Kinne S, Holben BN, Duncan BN, Martin RV, et al. Tropospheric aerosol optical thickness from the GOCART model. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2002;59(3):461-83. doi:10.1175/1520-0469(2002)059<0461:TAOTFT>2.0.CO;2.
 19. Eskes H, Benedictow A, Blechschmidt AM, Chabrillat S, Christophe Y, Cuevas E, et al. CAMS atmospheric composition reanalysis 2003–2018. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2020;20:3515-56. doi:10.5194/acp-20-3515-2020.
 20. Inness A, Ades M, Agustí-Panareda A, Barré J, Benedictow A, Blechschmidt AM, et al. CAMS reanalysis of atmospheric composition (update). *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022;22:4617-4660. doi:10.5194/acp-22-4617-2022.
 21. Parajuli SP, Yang ZL, Kocurek G. Dust emission and transport modeling with WRF-Chem. *Atmos Environmental*. 2020;224:117220. doi:10.1016/j.atmosenv.2019.117220.
 22. Nabavi SO, Haimberger L, Samimi C. Dust transport pathways and synoptic patterns over the Middle East. *ATMOS Research*. 2021;249:105550. doi:10.1016/j.atmosres.2021.105550.
 23. Alizadeh Choobari O, Ghanei M, Middleton N, Prospero JM. Meteorological drivers of dust storms over the Middle East. *Aeolian Research*. 2023;63:100879. doi:10.1016/j.aeolia.2023.100879.
 24. Qin Y, Lin J, Chen Y, Fu TM, Zhuang B, Zhang L. A revised mineral dust emission scheme in GEOS-Chem. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2021;21:4319-39. doi:10.5194/acp-21-4319-2021.
 25. Chen Y, Liu Y, Ma S, Kok JF, Li Q. Impacts of dynamic dust sources coupled with WRF-Chem 3.9.1 on dust simulation over East Asia. *Geoscientific Model Development*. 2023;16(4):1233-54. doi:10.5194/gmd-16-1233-2023.
 26. Kaskaoutis DG, Houssos EE, Rashki A, Legrand M, Dumka UC, Mofidi A, et al. Long-term variability of dust events in southwestern Iran. *Atmosphere*. 2021;12(10):1350. doi:10.3390/atmos12101350.
 - 2014;82:343-353. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.10.031.
 6. Yu Y, Notaro M, Kalashnikova OV, Garay MJ. The climatology of Shamal wind events over the Persian Gulf. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2016;121(1):289-305. doi:10.1002/2015JD024063.
 7. Grell GA, Peckham SE, Schmitz R, McKeen SA, Frost G, Skamarock WC, et al. Fully coupled online chemistry within the WRF model. *Atmos Environmental*. 2005;39(37):6957-75. doi:10.1016/j.atmosenv.2005.04.027.
 8. Zhang L, Gong S, Padro J, Barrie L. A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module. *Atmos Environmental*. 2001;35(3):549-60. doi:10.1016/S1352-2310(00)00426-0.
 9. Inness A, Ades M, Agustí-Panareda A, Barré J, Benedictow A, Blechschmidt AM, et al. The CAMS reanalysis of atmospheric composition. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019;19:3515-56. doi:10.5194/acp-19-3515-2019.
 10. Eskes H, Huijnen V, Arola A, Benedictow A, Blechschmidt AM, Bouarar I, et al. Validation of the CAMS global reanalysis. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2020;13(6):2961-87. doi:10.5194/amt-13-2961-2020.
 11. Benedetti A, Morcrette JJ, Boucher O, Dethof A, Engelen RJ, Fisher M, et al. Aerosol analysis and forecast in the ECMWF Integrated Forecast System. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres - AGU Journals*. 2009;114:D13210. doi:10.1029/2008JD011235.
 12. Wesely ML. Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition. *Atmos Environmental*. 1989;23(6):1293-1304. doi:10.1016/0004-6981(89)90153-4.
 13. Slinn WGN. Predictions for particle deposition to vegetative canopies. *Atmos Environmental*. 1982;16(7):1785-94. doi:10.1016/0004-6981(82)90271-2.
 14. Zhang L, Brook JR, Vet R. A revised parameterization for gaseous dry deposition in air quality models. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2003;3:2067-82. doi:10.5194/acp-3-2067-2003.
 15. Fast JD, Gustafson WI Jr, Easter RC, Zaveri RA, Barnard JC, Chapman EG, et al. Evolution of ozone, particulates, and aerosol direct radiative forcing near Houston. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres - AGU Journals*. 2006;111:D24S19. doi:10.1029/2005JD006721.
 16. Hersbach H, Bell B, Berrisford P, Hirahara S, Horányi A, Muñoz-Sabater J, et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020;146(730):1999-2049. doi:10.1002/qj.3803.
 17. Ginoux P, Chin M, Tegen I, Prospero JM, Holben B, Dubovik O, et al. Sources and