




Analysis of systems affecting the simultaneous events of precipitation and dust over West Asia (May 5-10, 2024)

Karmi, S.¹  | Ghassabi, Z.¹  | Moradi, M.² 

1. Assistant Professor, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Sciences (RIMAS).
2. Associate Professor, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Sciences (RIMAS).

Corresponding Author E-mail: z.ghassabi@gmail.com

(Received: 09 Jun 2024, Revised: 04 Nov 2024, Accepted: 05 Nov 2024, Published online: 05 Nov 2024)

Abstract

One of the issues that has been observed especially in recent years in the West Asian region is the simultaneous occurrence of snow or rain along with dust storm. On May 5-10, 2024, the presence of atmospheric fronts associated with low-pressure systems over the West Asia region caused heavy rainfall in some areas and dust storms in other areas at the same time. The aim of this study is to comprehensively investigate these simultaneous atmospheric events. For this purpose, a set of satellite data and products and reanalysis data were used. Since it is difficult to forecast these phenomena, the output of the WRF-Chem model was examined in order to qualitatively evaluate the dust and rain forecast in the region. On May 5, 2024, the Occluded front, associated with the low-pressure system, covered Turkey from the east to the center of the country. On this day, from the east of the Black Sea to the north of the Red Sea, cold and warm fronts followed each other. The warm front extended from the east of the Black Sea to the north of the Caspian Sea. There was a cold front in the northwest of Iran and cold and warm fronts in the north of Saudi Arabia and the border areas of this country with Iraq and Syria. Further, with the movement of low-pressure systems to the east and northeast, their fronts were also moved. During this period, on the one hand, strong winds caused by cold fronts over Iraq, Syria, Northern Saudi Arabia, Turkmenistan and southwest and center of Iran and on the other hand, the presence of thermal low-pressure systems over Saudi Arabia and the southern half of Pakistan caused dust emission in the region. The relative humidity (RH) and streamlines maps at 700hPa level show the transfer of moisture from the east of the Mediterranean Sea, the Black Sea and the Caspian Sea at higher latitudes and from the Red Sea, the Arabian Sea, the Persian Gulf, the Oman Sea and the northern Indian Ocean at lower latitudes in the presence of atmospheric fronts and ascending movements due to instability, caused rain over parts of the region. The severe gradient of RH over the region caused simultaneous occurrence of rain along with dust during this time interval. The output of the WRF-Chem model showed that this model was able to forecast the simultaneous occurrence of dust and precipitation in its 48-hour forecast. The pattern of precipitation and dust in the output of the WRF-Chem model is very similar to the satellite products.

Keywords: West Asia, precipitation, dust, atmospheric fronts, WRF-Chem model

Cite this article: karami, S., Ghassabi, Z., & moradi, M. (2024). Analysis of systems affecting the simultaneous events of precipitation and dust over West Asia (May 5-10, 2024). *Journal of the Nivar*, 48(126-127), 151-168. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2024.461752.1294>

E-mail: (1) karamis.62@gmail.com (2) moradim36@gmail.com



تحلیل سامانه‌های موثر بر رخداد هم‌زمان بارش و گردوخاک در غرب آسیا (۵ تا ۱۰ ماه مه ۲۰۲۴)

سارا کرمی^۱ | زهرا قصابی^۱ | محمد مرادی^۲

۱. استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو.

۲. دانشیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو.

رایانامه نویسنده مسئول: z.ghassabi@gmail.com

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۵، انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۰۸/۱۵)

چکیده

از رویدادهای جوی که به‌ویژه در سال‌های اخیر در منطقه غرب آسیا مشاهده شده است، وقوع هم‌زمان بارش برف یا باران به همراه پدیده گردوخاک است. در روزهای ۵ تا ۱۰ ماه مه سال ۲۰۲۴ گذر جبهه‌های جوی وابسته به سامانه‌های کم‌فشار حاکم بر منطقه غرب آسیا در برخی مناطق سبب وقوع بارش شدید و در مناطق دیگر به صورت هم‌زمان سبب رخداد توفان‌های گردوخاک شدند. هدف از این مطالعه، بررسی همه‌جانبه این رخدادهای جوی هم‌زمان است. به این منظور از مجموعه‌ای از داده‌ها و محصولات ماهواره‌ای و داده‌های بازتحلیل استفاده شد. از آنجا که پیش‌بینی این پدیده‌ها امری دشوار است، خروجی مدل WRF-Chem به منظور ارزیابی کیفی پیش‌بینی گردوخاک و ابرناکی در منطقه، مورد بررسی قرار گرفت. در روز ۵ مه سال ۲۰۲۴، جبهه مختلط وابسته به سامانه کم‌فشار، شرق تا مرکز ترکیه را درنوردید. در این روز جبهه‌های سرد و گرم گستره‌ای از شرق دریای سیاه تا شمال دریای سرخ را پوشش دادند. جبهه گرم این مرکز کم‌فشار از شرق دریای سیاه تا شمال خزر امتداد داشت. یک جبهه سرد در شمال غربی ایران و جبهه‌های سرد و گرمی در شمال عربستان و مناطق مرزی این کشور با عراق و سوریه وجود داشت. در ادامه با حرکت سامانه‌های کم‌فشار به سمت شرق و شمال شرقی، جبهه‌های مرتبط با آن‌ها نیز جابجا شدند. در این بازه زمانی، از یک طرف وزش بادهای شدید ناشی از حضور جبهه‌های سرد بر روی عراق، سوریه، شمال عربستان، ترکمنستان، جنوب غرب و مرکز ایران و از طرف دیگر حضور سامانه‌های کم‌فشار گرمایی بر روی عربستان و نیمه جنوبی پاکستان موجب گسیل گردوخاک در منطقه شد. نقشه رطوبت نسبی به همراه خطوط جریان تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال انتقال رطوبت از شرق دریای مدیترانه، دریای سیاه و دریای خزر در عرض‌های جغرافیایی بالاتر و از دریای سرخ، دریای عرب، خلیج فارس، دریای عمان و شمال اقیانوس هند در عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر را نشان دادند که در حضور جبهه‌های جوی و حرکات صعودی ناشی از ناپایداری، سبب بارش باران در بخش‌هایی از منطقه شد. گرادان شدید رطوبت در منطقه در این مورد مطالعاتی سبب وقوع هم‌زمان پدیده‌های گردوخاک و باران در مناطق مجاور هم شد. خروجی مدل WRF-Chem نشان داد که این مدل در این مورد مطالعاتی در پیش‌بینی ۴۸ ساعته خود تا حدودی توانسته وقوع هم‌زمان پدیده گردوخاک و بارش را پیش‌بینی کند. الگوی بارش و گردوخاک در خروجی مدل WRF-Chem تشابه زیادی با محصولات ماهواره‌ای دارد.

کلیدواژه‌ها: غرب آسیا، بارش، گردوخاک، جبهه‌های جوی، مدل WRF-Chem

۱. مقدمه

می‌باشد، دارای آب‌وهوای خشک و نیمه‌خشک است که با دمای زیاد و بارندگی محدود مشخص می‌شود. وجود تعداد زیادی کانون گردوخاک در این منطقه هر ساله سبب وقوع

بخش وسیعی از غرب آسیا که شامل کشورهای ایران، شبه جزیره عربستان، عراق، ترکمنستان، افغانستان و پاکستان

استناد: کرمی، سارا؛ قصابی، زهرا؛ مرادی، محمد. (۱۴۰۳). تحلیل سامانه‌های موثر بر رخداد هم‌زمان بارش و گردوخاک در غرب آسیا (۵ تا ۱۰ ماه مه ۲۰۲۴). مجله نیوار،

DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2024.461752.1294>. ۱۶۸-۱۵۱، (۱۲۷-۱۲۶) ۴۸

رایانامه: (۱) karamis.62@gmail.com (۲) moradim36@gmail.com



گاهی پدیده‌های خردمقیاس مانند توفان‌های تندری منجر به ایجاد پدیده گردوخاک می‌شوند که با نام هبوب شناخته می‌شود (کرمی و همکاران، ۲۰۲۳، ۲۰۱۷). هر ساله تعداد زیادی هبوب در شبه‌جزیره عربستان اتفاق می‌افتد (دایه و همکاران، ۲۰۲۱؛ میلر و همکاران، ۲۰۰۸). در برخی مواقع پدیده‌های بزرگ‌مقیاس یا میان‌مقیاس مانند جبهه‌های جوی منجر به رخداد گردوخاک می‌شوند. به طور معمول جبهه‌های جوی با بارش‌های شدید همراه هستند (اسپریدونوف و همکاران، ۲۰۲۱). در سال‌های اخیر به دلیل خشکسالی‌های پیاپی در منطقه غرب آسیا، وزش بادهای شدید ناشی از جبهه‌های جوی سبب خیزش گردوخاک از مناطق خشک می‌شود (نیپرتز، ۲۰۱۴؛ کاوای و همکاران، ۲۰۱۵). بنابراین وجود این جبهه‌ها می‌تواند در صورت وجود رطوبت کافی در جو منجر به بارش (دایان و همکاران، ۲۰۱۵) و در صورت عدم وجود رطوبت منجر به توفان گردوخاک شوند (حمزه و همکاران، ۲۰۲۱). گاهی نیز در مناطق مجاور سبب وقوع هم‌زمان گردوخاک و بارش می‌شود (کرمی و همکاران، ۲۰۲۰).

در روزهای ۵ تا ۱۰ ماه مه سال ۲۰۲۴ گذر جبهه‌های جوی وابسته به سامانه‌های کم‌فشار حاکم بر منطقه غرب آسیا در برخی مناطق سبب بارش شدید و در مناطق دیگر به صورت هم‌زمان سبب توفان‌های گردوخاک شدید شدند. هدف از این مطالعه بررسی جزئی این رخداد‌های جوی هم‌زمان است. در این مطالعه از محصولات ماهواره‌ای و داده‌های بازتحلیل استفاده شده و پیش‌بینی گردوخاک و ابرناکی خروجی مدل WRF-Chem بصورت کیفی ارزیابی شده است.

۲. داده‌ها و روش کار

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. این منطقه شامل غرب آسیا است که تعداد زیادی از کشورهای خاورمیانه و آسیای میانه را دربر می‌گیرد. منبع رطوبت در این منطقه شامل دریاهای مدیترانه، سیاه، سرخ، خزر، خلیج فارس،

توفان‌های گردوخاک فراوان و شدیدی می‌شود (کائو و همکاران، ۲۰۱۵؛ ربانی و شرفی‌کیا، ۲۰۲۳). پدیده‌های گردوخاک در غرب آسیا خسارات مالی و جانی زیادی را به دنبال دارند (میدلتون و همکاران، ۲۰۲۱؛ ویلیامز و سمرا، ۲۰۲۳). تنفس ذرات گردوخاک توسط انسان‌ها منجر به بیماری‌های قلبی و تنفسی می‌شود (برومندی و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین ذرات گردوخاک با حمل میکروب سبب انتقال بیماری‌های مختلف در منطقه می‌شوند (گودی، ۲۰۲۰). کاهش دید ناشی از توفان‌های گردوخاک منجر به تصادفات جاده‌ای و لغو پروازها می‌شود (میری و میدلتون، ۲۰۲۲) و از این طریق خسارات مالی زیادی وارد می‌کند.

در مطالعات زیادی پدیده‌های بارش شدید و گردوخاک در منطقه غرب آسیا به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. (مانند صفایی راد و همکاران، ۲۰۲۰؛ کرمی و همکاران، ۲۰۲۱a؛ یائو و همکاران، ۲۰۲۱؛ وی و همکاران، ۲۰۲۳) وقوع همزمان بارش و گردوخاک با توجه به تأثیر ترکیبی و پیچیدگی تعامل آنها، چالش پیچیده‌ای است. بارش در مناطق خشک اهمیت زیادی دارد، منابع آبی ضروری را تأمین می‌کند و بر بهره‌وری کشاورزی تأثیر می‌گذارد. با این حال، هنگامی که بارش با توفان‌های گردوخاک ترکیب می‌شود، می‌تواند توزیع و نهشت ذرات گردوخاک را تغییر دهد و بر ویژگی‌های خاک، کیفیت هوا و دید تأثیر بگذارد (کرو و همکاران، ۲۰۲۰؛ دسبوتفس و همکاران، ۲۰۲۲؛ رستسی و همکاران، ۲۰۲۲). از طرف دیگر ذرات گردوخاک می‌توانند به عنوان هسته‌های میعان ابر (CCN^1) عمل کنند و به طور بالقوه خردفیزیک ابر و الگوهای بارش را تغییر دهند (یوان و همکاران، ۲۰۲۱؛ ژائو و همکاران، ۲۰۲۲). این تعامل دوگانه چالشی برای پیش‌بینی و مدل‌سازی وضع هوا در این شرایط ایجاد می‌کند. یکی از مسائلی که به ویژه در سال‌های اخیر به وفور در منطقه غرب آسیا مشاهده شده است، وقوع هم‌زمان بارش برف یا باران به همراه پدیده گردوخاک است. البته برخی از این موارد به طور پراکنده مستند شده‌اند (فرانسیس و همکاران، ۲۰۲۱؛ بارگامتی و همکاران، ۲۰۲۲).

¹ Cloud condensation nuclei

در ایران، تالاب‌های هامون پوزک، صابری و هیرمند در ایران و افغانستان، بیابان‌های ربع‌الخالی، النفود و الدهنا در عربستان سعودی، بیابان ریگستان در جنوب غربی افغانستان و بیابان‌های قره‌قوم و قزل‌قوم در آسیای میانه واقع شده‌اند.

دریای عمان، دریای عرب و اقیانوس هند است. از دیگر ویژگی‌های این منطقه وجود کانون‌های گردوخاک وسیع و بیابان‌های بزرگ است از جمله بین‌النهرین در عراق، مناطق بیابانی در جنوب و شرق سوریه، کویر مرکزی و دشت لوت



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه.

و محاسبه AOD وجود دارد. در این مقاله، عمق نوری حاصل از ترکیب دو الگوریتم (DT) Dark Target و (DB) blue بر روی داده‌های سنجنده مادیس ماهواره ترا از وبسایت <https://worldview.earthdata.nasa.gov> اخذ شده است. لایه عمق نوری ادغام شده DT/DB، نمای کلی تری از عمق نوری هواویزها بر روی زمین و اقیانوس ارائه می‌دهد. این لایه از سه الگوریتم ایجاد شده است: دو الگوریتم (DT) برای بازیابی هواویزها بر روی اقیانوس (تاریک در طول موج‌های مرئی و بلندتر) و روی زمین‌های پوشیده از گیاه/خاک (تاریک در طول موج‌های مرئی) و الگوریتم آبی عمیق (DB) که در اصل برای بازیابی هواویزها بر روی زمین‌های بیابانی/خشک (روشن در طول موج‌های مرئی) توسعه یافته است. اینکه کدام الگوریتم برای مکان خاصی روی زمین استفاده می‌شود به پوشش سطح آن بستگی دارد. در این داده‌ها تفکیک سنجنده/الگوریتم در ندر ۱۰

۲-۲. داده‌ها

۲-۲-۱. داده‌های عمق نوری هواویزها

عمق نوری هواویزها (AOD¹) میزان جلوگیری از عبور نور در جو توسط ذرات معلق (هواویزها) را نشان می‌دهد. ذرات معلق در هوا پراکنده می‌شوند و نور خورشید را جذب نموده و باعث کاهش دید می‌شود. بر اساس معیارها و از دید یک ناظر روی زمین، AOD کمتر از ۰/۱ هوای پاک است که مشخصه آن آسمان آبی روشن، خورشید درخشان و بیشینه دید می‌باشد. با افزایش AOD به ۰/۵، ۱ و بیشتر از ۳، ذرات معلق در هوا چنان متراکم می‌شوند که خورشید پنهان می‌شود. منابع هواویزها عبارتند از آلودگی کارخانه‌ها، دود ناشی از آتش‌سوزی، گردوخاک، نمک دریا و خاکستر آتشفشانی و مه دود. از آنجایی که شناسایی ذرات معلق در هوا روی انواع مختلف سطوح خشکی و اقیانوس‌ها دشوار است، الگوریتم‌های مختلفی برای کمک به شناسایی هواویزها

¹ Aerosol optical depth

ماهواره با رنگهای قرمز، سبز و آبی (RGB) برای مرئی سازی گردوخاک از تفاضل داده‌های کانال‌های نزدیک به پنجره IR (۸.۷ میکرومتر و ۱۱ میکرومتر) استفاده می‌کند و محصول به دست آمده از خیزش گردوخاک در ستون جو را به رنگ‌های صورتی و بنفش به ترتیب در روز و شب به تصویر می‌کشد. گردوخاک بر روی آب را نیز می‌توان با رنگ صورتی مشاهده کرد. جدول ۱ رنگ‌های قرمز، سبز و آبی در تصاویر RGB گردوخاک را معرفی می‌کند. برای اطلاعات بیشتر به الناصر و انتخابی (۲۰۲۳) مراجعه کنید.

کیلومتر، تفکیک تصویر در ندر ۲ کیلومتر و تفکیک زمانی، روزانه است.

۲-۲-۲. تصاویر RGB گردوخاک ماهواره MSG
محصول RGB گردوخاک بر اساس داده‌های کانال مادون قرمز (IR) ماهواره The Meteosat Second Generation (MSG) این محصول توسط EUMETSAT برای پایش طوفان‌های گردوخاک در طول روز و شب طراحی شده است. محصولات ترکیبی امواج

جدول ۱. معرفی رنگ‌های قرمز، سبز و آبی در تصاویر RGB گردوخاک.

رنگ	کانال (میکرومتر)	ارتباط فیزیکی	کمترین سهم در سیگنال	بیشترین سهم در سیگنال
قرمز	IR12.0-IR10.8	عمق نوری ابر لایه نازک گردوخاک	ابرهای یخی نازک	گردوخاک
سبز	IR10.8-IR8.7	فاز ابر	ابرهای یخی نازک گردوخاک	ابرها در فاز آب بیابان‌ها
آبی	IR10.8	دما	ابرهای سرد	سطح گرم ابرهای گرم

داده اولیه برای لایه آهنگ بارش، داده 2AGPROFGMI است که به عنوان "الگوریتم پروفایل گودارد سطح A۲" یا "GPM_2AGPROFGPMGMI" نیز شناخته می‌شود. در خط استوا تفکیک تصویر ۲ کیلومتر و تفکیک سنجنده تقریباً ۴ کیلومتر است و برآورد باران بر روی مناطقی با عرض تقریبی ۶ کیلومتر انجام می‌شود. تفکیک زمانی این داده‌ها روزانه است.

۲-۲-۳. داده‌های بازتحلیل GDAS/FNL

داده‌های بازتحلیل و پیش‌بینی جهانی عملیاتی NCEP FNL³ بر روی شبکه ۰/۲۵ در ۰/۲۵ درجه، هر شش ساعت به صورت عملیاتی تهیه می‌شوند. این داده‌ها محصولی از سیستم داده‌گواری جهانی (GDAS⁴) است که به طور مداوم داده‌های مشاهداتی را از سیستم مخابرات جهانی (GTS⁵) و سایر منابع به منظور تحلیل‌های مختلف جمع‌آوری می‌کند.

۲-۲-۲. داده‌های آهنگ بارش ماهواره‌ای

لایه آهنگ بارش تصویرگر مایکروویو (GMI¹) اندازه‌گیری بارش جهانی (GPM²) آهنگ بارشی که به سطح زمین می‌رسد را بر حسب میلی‌متر در ساعت نشان می‌دهد. تصویرگر مایکروویو (GMI) در مجموع دارای ۱۳ کانال است که هر کدام زمین را با فرکانس متفاوت (۱۸۳-۱۰ گیگاهرتز) یا با قطبش متفاوت (عمودی یا افقی) رصد می‌کنند. هر کانال، گسیل طبیعی از سطح زمین، گازهای جوی و بارش را اندازه‌گیری می‌کند. کانال‌های GMI با فرکانس کمتر به طور مستقیم به باران پاسخ می‌دهند، در حالی که کانال‌های GMI با فرکانس بیشتر به بارش یخ (برف) در ارتفاع بالاتر که اغلب با آهنگ باران شدید در نزدیکی سطح زمین مرتبط است، پاسخ می‌دهند.

⁴ The Global Data Assimilation System

⁵ The Global Telecommunications System

¹ Microwave Imager

² The Global Precipitation Measurement

³ National Centers for Environmental Prediction Final

ابرنیکی و توده گردو خاک در منطقه نخست تصاویر رنگ حقیقی سنجنده مادیس ماهواره ترا در منطقه مشاهده می شود. سپس برای بررسی دقیق تر مناطق تحت پوشش باران و گردو خاک، محصولات ماهواره ای آهنگ بارش و عمق نوری هواویزا در منطقه ارائه می شود. موقعیت جبهه های جوی بر روی تصاویر RGB گردو خاک ماهواره MSG به همراه پربندهای میانگین فشار سطح دریا از داده های ECMWF با تفکیک افقی ۰/۷۵ درجه برای تعیین موقعیت جبهه های جوی مورد استفاده قرار می گیرند، نشان داده می شود. برای شناسایی الگوهای جوی حاکم بر منطقه و تعیین موقعیت جبهه ها از نقشه های همدیدی استفاده می شود. تحلیل همدیدی با نقشه های میانگین فشار سطح دریا ($MSLP^2$)، دما، ارتفاع ژئوپتانسیلی و باد در تراز ۸۵۰ hPa خطوط جریان و رطوبت نسبی تراز ۷۰۰ hPa و ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ hPa رسم شده با استفاده از داده های باز تحلیل GDAS/FNL با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه انجام می شود. در انتها خروجی غلظت گردو خاک، میزان ابرناکی و بارش مدل WRF-Chem در پیش بینی ۴۸ ساعته جهت بررسی توانایی مدل در پیش بینی هم زمان بارش و گردو خاک ارائه می شود. مدل WRF-Chem بر روی شبکه ای با تفکیک افقی ۲۱ کیلومتر اجرا شده و داده های پیش بینی GFS با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه به عنوان شرایط اولیه و مرزی بکار می روند. برخی طرحواره های مورد استفاده در اجرای مدل در جدول ۲ نشان داده شده اند.

مدل مورد استفاده در تولید داده های FNL مشابه مدلی است که NCEP در سامانه جهانی پیش بینی (GFS^1) استفاده می کند، اما داده های FNL با تاخیر حدود یک ساعت یا بیشتر پس از شروع اولیه داده های GFS آماده می شوند تا از داده های مشاهداتی بیشتری استفاده کنند.

داده های باز تحلیل FNL در سطح، ۲۶ تراز فشاری از ۱۰۰۰ تا ۱۰ هکتوپاسکال، لایه مرزی و برخی از ترازهای سیگما، تروپوپاز و چند سطح دیگر در دسترس هستند. کمیت ها شامل فشار سطحی، فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیلی، دما، دمای سطح دریا، رطوبت خاک، پوشش یخ، رطوبت نسبی، مولفه های افقی باد، حرکت عمودی، تاوایی و ازن می باشند.

۲-۲-۳. داده های پیش بینی GFS

داده های پیش بینی GFS مورد استفاده در این مطالعه، داده های جهانی با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه هستند. این داده های پیش بینی از ۰ تا ۲۴۰ ساعت اول با بازه زمانی ۳ ساعته و از ۲۴۰ تا ۳۸۴ ساعت بعد در یک بازه ۱۲ ساعته در دسترس هستند. مدل روزانه ۴ بار در ساعت های UTC ۰۰، ۰۶، ۱۲، و ۱۸ اجرا می شود.

۲-۳. روش کار

در این مطالعه منطقه غرب آسیا در روزهای ۵ تا ۱۰ ماه مه سال ۲۰۲۴ مورد بررسی قرار می گیرد. در این روزها در برخی مناطق، بارش شدید باران و در مناطق مجاور به صورت هم زمان توفان گردو خاک رخ داده است. به منظور مشاهده

جدول ۲. برخی طرحواره های مورد استفاده در اجرای مدل WRF-Chem.

WRF Single-Moment 5-class scheme (Hong et al., 2004)	میکروفیزیک
RRTM scheme (Mlawer et al., 1997)	تابش موج بلند
Goddard shortwave (Chou and Suarez, 1999)	تابش موج کوتاه
Noah Land Surface Model (Chen, 2004)	فیزیک سطحی
Yonsei University scheme (Noh et al. 2003; Hong et al. 2006)	لایه مرزی
Grell 3D (Grell, 1993)	طرحواره کومولوس
AFWA	گسیل گردو خاک

² Mean sea level pressure

¹ The Global Forecast System

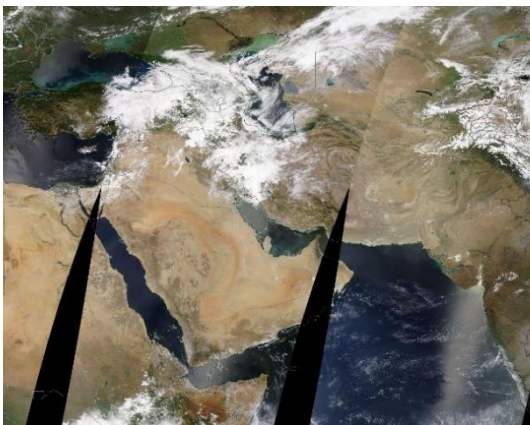
۳. بحث و نتایج

۳-۱. تصاویر ماهواره‌ای

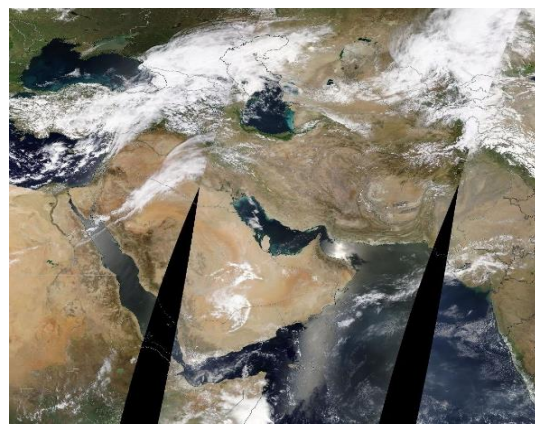
شکل ۲ تصاویر رنگ حقیقی سنجنده مادیس ماهواره ترا را نشان می‌دهد. در روز ۵ مه در تصویر ماهواره، ابرناکی زیادی بر روی شرق مدیترانه، کشور ترکیه، شرق دریای سیاه و شمال دریای خزر مشاهده می‌شود. همچنین در نواری که از مناطق غربی ایران تا شمال دریای سرخ کشیده شده است، توده ابر نشان داده شده است. در روز ۶ مه بخش وسیع‌تری از منطقه تحت پوشش ابر قرار دارد. در این روز در مناطق شرق ترکیه، شمال‌غرب، غرب و شمال ایران، شمال عراق و سوریه و همچنین دریای خزر و مناطق شرقی آن واقع در کشور

قزاقستان ابرناکی مشاهده می‌شود. همچنین گردوخاک در مناطق مرزی عراق و عربستان و شمال دریای خزر تا حدودی نشان داده شده است. در روز ۸ مه با جابه‌جایی توده ابر به سمت شرق، بر روی دریای خزر، مناطق غربی و شمال شرقی آن ابرناکی مشاهده می‌شود. در این روز در تصاویر رنگ حقیقی، گردوخاک تا حدودی در مناطق مرکزی ایران، بخش وسیعی از ترکمنستان، افغانستان و پاکستان قابل مشاهده است. در روز ۱۰ مه، همچنان غرب دریای خزر و شمال آن تحت پوشش ابر قرار دارند. در شرق ترکمنستان و بخش وسیعی از کشور عربستان ابرناکی قابل توجهی مشاهده می‌شود. وجود گردوخاک در بخش‌های وسیعی از منطقه در تصویر ماهواره‌ای قابل مشاهده است.

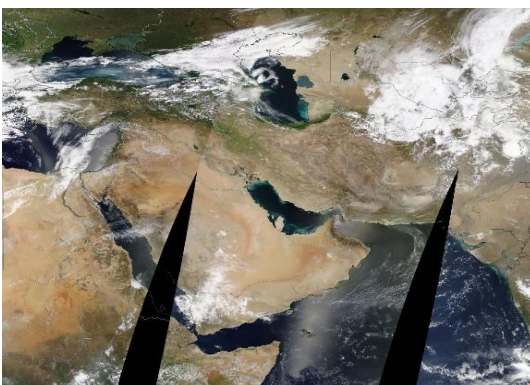
(ب)



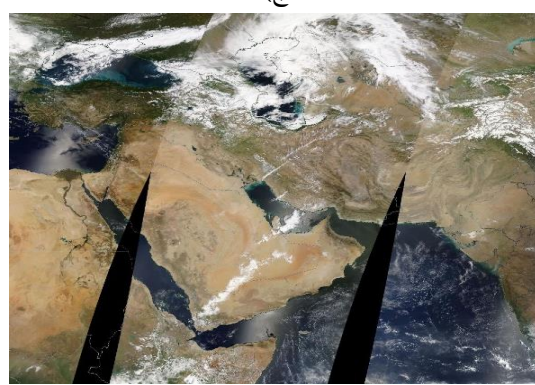
(الف)



(د)



(ج)



شکل ۲. تصاویر رنگ حقیقی سنجنده مادیس ماهواره ترا در روزهای الف) ۵، ب) ۶، ج) ۸، د) ۱۰ مه سال ۲۰۲۴.

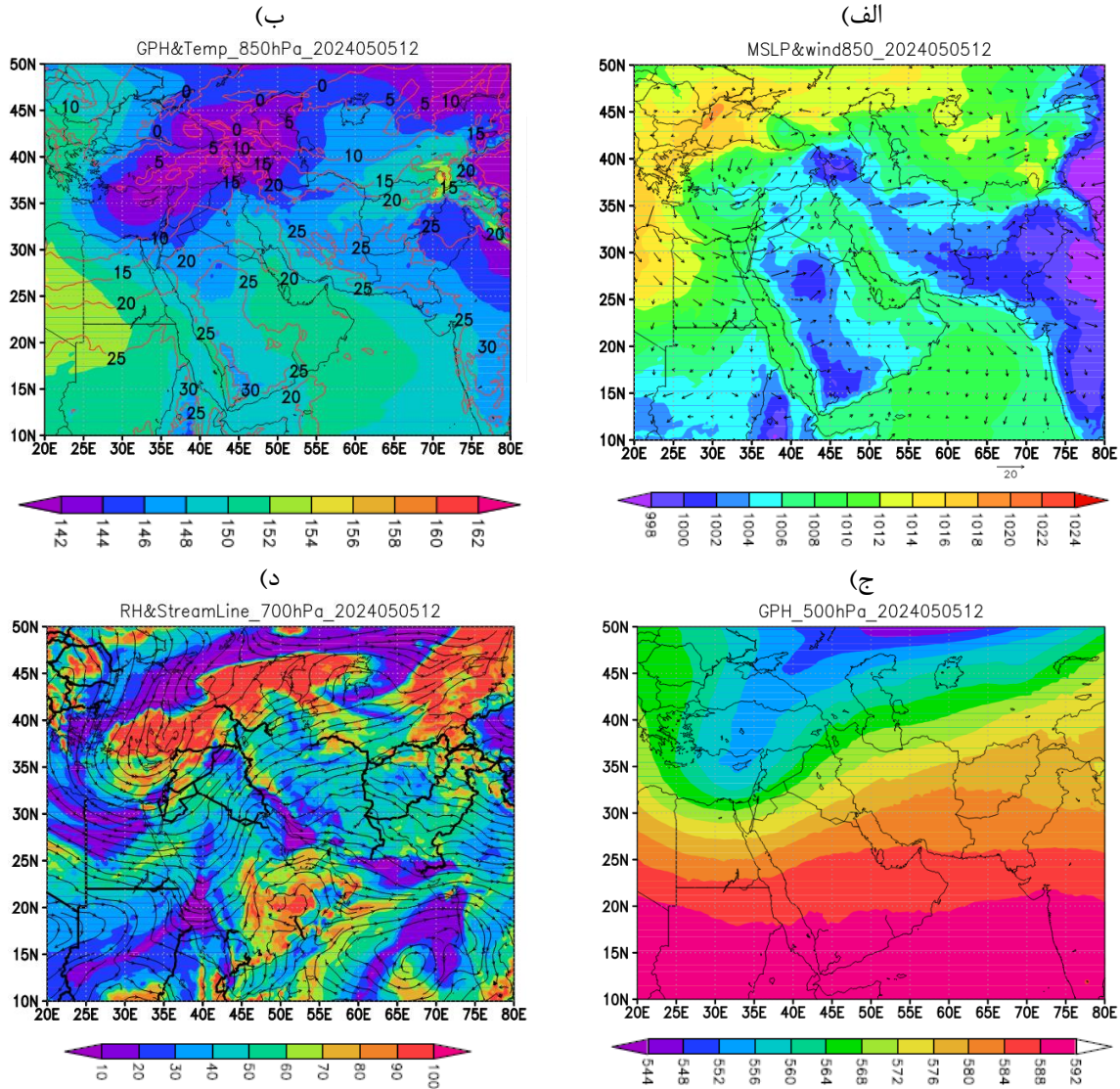
۲-۳. تحلیل همدیدی

در روز ۵ مه یک سامانه کم فشار دینامیکی بر روی شرق مدیترانه، سوریه و شمال شرق عراق وجود دارد (شکل ۳-الف)؛ جبهه سرد این سامانه از شمال عراق تا شرق سوریه رسیده است و جبهه گرم آن در غرب دریای خزر تا شرق دریای سیاه گسترش دارد (شکل ۳-الف). بعلاوه، جبهه مختلط^۱ این سامانه را می توان در شرق و جنوب دریای سیاه مشاهده کرد. در جلوی جبهه سرد بر روی مناطق غربی ایران و جنوب شرقی عراق بارش باران روی داده، همچنین در جنوب غربی ایران و جنوب شرقی عراق مقادیر زیاد AOD نشان دهنده گرد و خاک پیش جبهه ای است (شکل ۳-الف)، رطوبت نسبی این سامانه بین ۶۰ تا ۱۰۰ درصد است (شکل ۳-د). سامانه کم فشار دینامیکی قوی تری نیز روی شرق ترکیه و شمال غربی ایران مشاهده می شود (شکل ۳-الف) که جبهه سرد آن از گوشه شمال غربی ایران تا مناطق غربی کشور کشیده شده است. در تصاویر ماهواره ای این روز، ابرناکی و بارش باران در منطقه جبهه گرم دیده می شود و در مناطق مرکزی ایران جلوی جبهه سرد مقادیر AOD قابل توجه است (شکل ۳-الف). رطوبت نسبی این سامانه بین ۸۰ تا ۱۰۰ درصد است (شکل ۳-د). همزمان با دو سامانه کم فشار دینامیکی مذکور، در تراز میانی و ردسپهر، کم ارتفاعی در عرض جغرافیایی ۵۰ درجه شمالی در شمال دریای خزر وجود دارد که خط ناوه آن از شرق دریای سیاه تا روی ترکیه، شرق دریای مدیترانه و شمال دریای سرخ کشیده شده

است (شکل ۳-ج). همراهی خطوط جریان در این دو سامانه از روی دریای سیاه در راستای شمالی و سپس از روی مدیترانه در راستای غربی به سوی سوریه، شمال عراق و شمال غربی ایران، همچنین از روی دریای سرخ به سوی غرب ایران مشهود است (شکل ۳-د).

همچنین در این روز کم فشار گرمایی روی عربستان شکل گرفته است که سبب حرکات صعودی و وزش باد شدید و گسیل گرد و خاک از بیابان های واقع در عربستان به سوی شرق و شمال شرق (خلیج فارس، جنوب و جنوب غرب ایران) می شود. کم فشار گرمایی دیگری روی مناطق شمالی هند بسته شده که زبانه های آن پاکستان، جنوب افغانستان و جنوب شرق ایران را دربر گرفته است (شکل ۳-الف). در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در محل این دو سامانه گرمایی، پرا ارتفاع حاکم است (شکل ۳-ج). مطالعات بسیاری وجود کم فشار گرمایی بر روی عربستان را یکی از عوامل موثر بر رخداد گرد و خاک در این منطقه دانسته اند (مشات و همکاران، ۲۰۱۸؛ عواد و همکاران، ۲۰۱۶). در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (شکل ۳-ب) سامانه کم ارتفاعی در منطقه وسیعی از شرق دریای مدیترانه، ترکیه، دریای سیاه، شمال سوریه، شمال غربی ایران و دریای خزر مشاهده می شود که مرکز آن در نواحی مرزی ترکیه با ارمنستان و گرجستان قرار دارد. گرادیان دما در این مناطق زیاد است، طوری که حدود ۲۰ درجه اختلاف دما بین شمال شرق دریای سیاه تا شمال غرب ایران مشاهده می شود و خط همدمای صفر درجه در شمال و مرکز دریای سیاه تا شمال دریای خزر قرار دارد.

¹ Occluded front



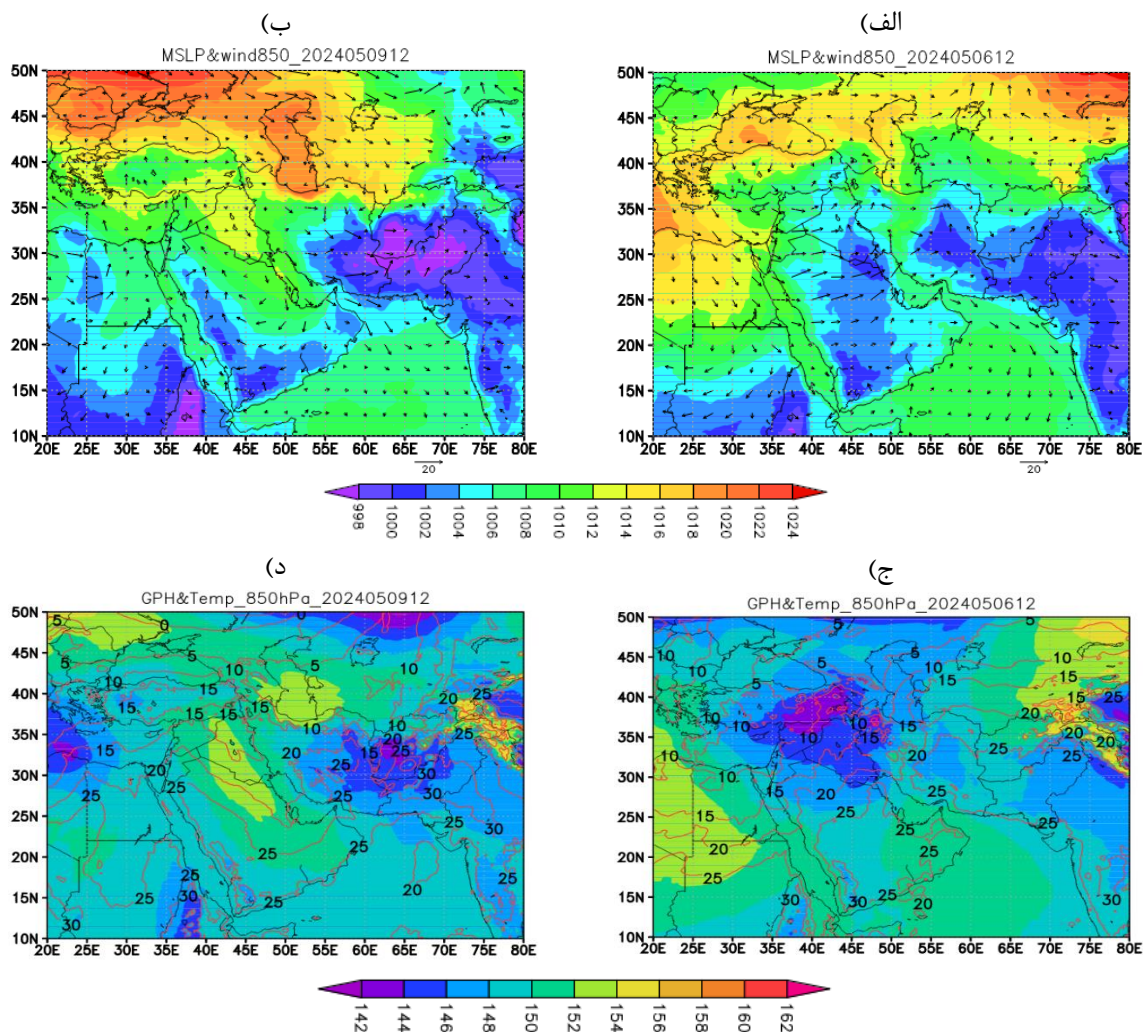
شکل ۳. الف) فشار میانگین سطح دریا (هکتوپاسکال) و باد تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (متر بر ثانیه)، ب) ارتفاع ژئوپتانسیل (ژئوپتانسیل متر) و دما (سلسیوس) در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، ج) ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (ژئوپتانسیل متر) و د) رطوبت نسبی (درصد) و خط جریان تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال در ساعت ۱۲ UTC، روز ۵ مه سال ۲۰۲۴.

تضعیف شده و در جنوب این کشور قرار گرفته است. کم-فشار گرمایی روی هند نیز تضعیف شده و در جنوب شرق ایران یک مرکز کم فشار گرمایی شکل گرفته است. در روز ۶ مه، در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال سامانه کم ارتفاع با کمی تضعیف، شمال سوریه، شرق ترکیه و بخش‌هایی از شمال غرب ایران را دربر گرفته است. گرادیان دما در این مناطق بین ۵ تا ۱۰ درجه بوده و خط همدمای صفر درجه در این الگو دیده نمی‌شود (برخی از شکل‌ها در اینجا نیامده است).

در روز ۶ مه یک سامانه کم فشار دینامیکی بر روی جنوب عراق، شمال شرق عربستان و جنوب غرب ایران دیده می‌شود (شکل ۴-الف). جبهه سرد این سامانه روی خلیج فارس قرار دارد. سامانه کم فشار دینامیکی دیگر با سرعت بیشتری به سوی شرق حرکت کرده است، جبهه سرد آن بر روی جنوب عراق، جنوب غرب و غرب ایران قرار دارد و جبهه گرم این سامانه در شمال شرق ایران تا جنوب ترکمنستان امتداد دارد. مرکز کم فشار ضعیف تری در شمال عراق در روز ۶ ام مه شکل گرفته که بارش شمال غرب ایران و شرق ترکیه ناشی از این سامانه است. در این روز کم فشار گرمایی روی عربستان

شده است بطوریکه کم فشار ۹۹۸ هکتوپاسکال در این مناطق مشاهده می‌شود. مقادیر AOD در این مناطق در تصویر ماهواره‌ای قابل توجه است که به دلیل وجود بادهای شدید ناشی از کم فشار گرمایی است. در روز ۹ ام، با توجه به گسترش سامانه پراارتفاع در عرض‌های بالا تا سواحل جنوبی دریای خزر، شمال شرقی ایران، جنوب ترکمنستان و شمال افغانستان و استقرار کم ارتفاع روی هند، پاکستان، افغانستان و جنوب شرقی ایران و بنابراین تقابل دو توده هوای سرد و گرم، گرادیان دمایی قابل ملاحظه‌ای در این مناطق وجود دارد. به گونه‌ای که گرادیان دما در شمال شرقی و شرق ایران به ۱۵ درجه می‌رسد و در غرب و مرکز افغانستان و شمال غربی پاکستان، گرادیان دما ۲۰ درجه شده است (شکل ۵-د).

در روز ۹ مه سامانه کم فشار شرق دریای خزر از منطقه خارج شده است (شکل ۴-ب)، اما جبهه سرد آن با نفوذ به عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر در بخش وسیعی از شمال افغانستان و بخش‌هایی از شمال شرق ایران منجر به بارش شدید شده است. در تصویر ماهواره‌ای، بارش در جنوب شرق ترکمنستان، شمال افغانستان و بخش‌هایی از شمال شرق ایران دیده می‌شود. همچنین پرفشار جنوب شرق اروپا با حرکت به سوی شرق و تقویت بر روی دریای خزر، سبب وزش بادهای شمالی از روی دریای خزر به سواحل جنوبی دریا شده است، به گونه‌ای که در تصویر ماهواره بارش بر روی سواحل جنوبی دریای خزر مشاهده می‌شود. در این روز کم فشار گرمایی روی جنوب عربستان همچنان حضور دارد. کم فشار گرمایی روی هند، پاکستان، جنوب افغانستان و شرق ایران تقویت



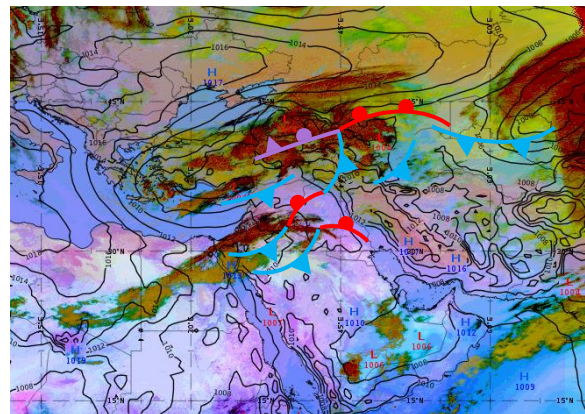
شکل ۳. فشار میانگین سطح دریا (هکتوپاسکال) و باد تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (متر بر ثانیه) در ساعت ۱۲ UTC روز الف) ۶مه، ب) ۹مه و ارتفاع ژئوپتانسیل (ژئوپتانسیل متر) و دما (سلسیوس) در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در ساعت ۱۲ UTC روز ج) ۶مه، د) ۹مه سال ۲۰۲۴.

۳-۳. موقعیت جبهه‌های جوی در منطقه

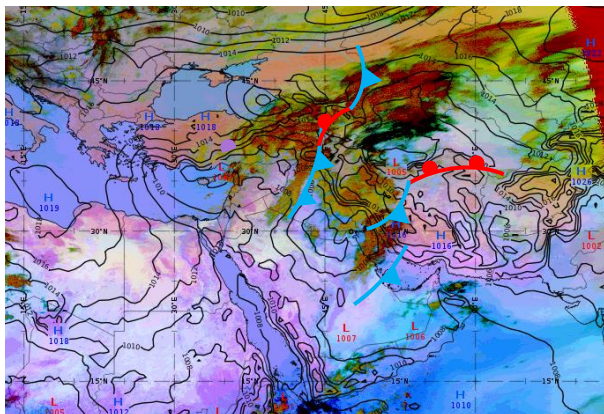
شکل ۵ تصویر RGB گردوخاک ماهواره MSG به همراه پربندهای میانگین فشار سطح دریا و موقعیت جبهه‌های جوی که با استفاده از نقشه‌های همدیدی تعیین شده‌اند، را در ساعت ۰۰ UTC روزهای ۵، ۶، ۷ و ۹ ماه مه سال ۲۰۲۴ نشان می‌دهد. در این تصاویر ماهواره‌ای، گردوخاک با رنگ صورتی تا بنفش و ابرها بسته به ارتفاع و ضخامتشان با رنگ‌های قهوه‌ای روشن تا قرمز نشان داده می‌شوند. در روز ۵ مه، جبهه مختلط وابسته به سامانه کم‌فشار واقع بر روی ترکیه، از شرق تا مرکز این کشور قرار دارد که در محل آن توده ابر ضخیمی (رنگ قرمز) مشاهده می‌شود. از شرق دریای سیاه تا شمال دریای سرخ جبهه‌های سرد و گرم به دنبال یکدیگر قرار گرفته‌اند. جبهه گرم این مرکز کم‌فشار از شرق دریای سیاه تا شمال دریای خزر امتداد دارد. یک جبهه سرد در شمال غرب ایران و جبهه‌های سرد و گرمی در شمال عربستان و مناطق مرزی این کشور با عراق و سوریه مشاهده می‌شود (شکل ۵-الف).

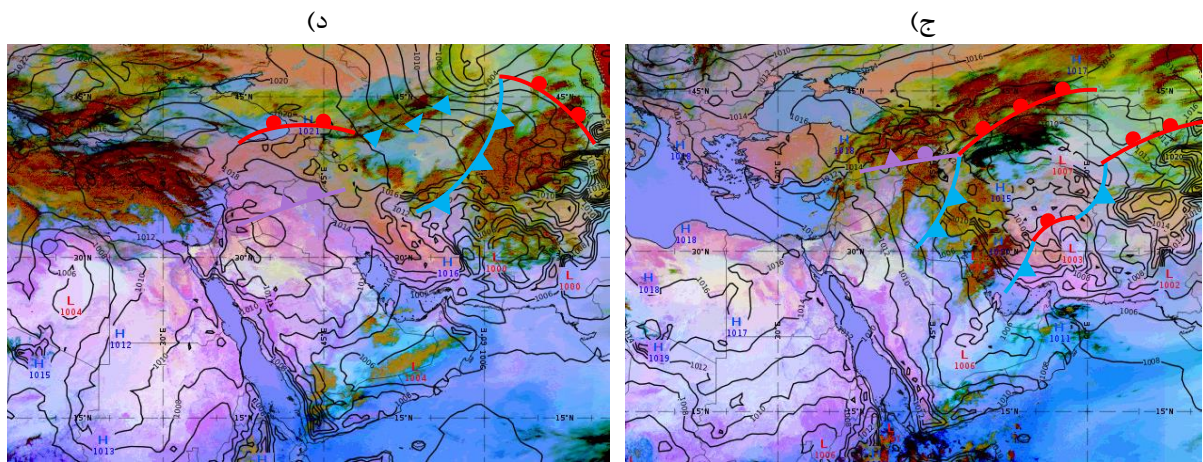
در روز ۶ مه (شکل ۵-ب) با حرکت سامانه کم‌فشار به سمت شمال شرق، جبهه‌های مرتبط با آن نیز جابجا شده‌اند. در این روز یک جبهه سرد بر روی عراق، دومی در غرب ایران و دیگری در جنوب غربی ایران مشاهده می‌شود. در تصویر ماهواره‌ای توده‌های ابر و گردوخاک در بخش‌های مختلف منطقه بویژه در اطراف جبهه‌ها مشاهده می‌شود. در مطالعه دیگری نیز نشان داده شد که وجود جبهه سرد بر روی عراق، عربستان و همچنین جنوب غرب ایران سبب ایجاد گردوخاک جبهه‌ای می‌شود (کرمی و همکاران، ۲۰۲۰). در روز ۷ مه (شکل ۵-ج) یک جبهه گرم از شمال غرب ایران تا شمال شرق دریای خزر کشیده شده است. جبهه سرد این سامانه از شمال غرب ایران تا شمال عربستان امتداد یافته و جبهه مختلط آن بر روی شرق ترکیه قرار دارد. از شمال شرق تا جنوب غرب ایران تحت تاثیر جبهه‌های سرد و گرم است. در روز ۹ مه (شکل ۵-د) جبهه سرد مرتبط با کم‌فشار واقع بر روی ازبکستان از این منطقه تا شمال ایران کشیده شده است. جبهه گرم آن نیز تا شمال غرب افغانستان امتداد یافته است. در قطاع گرم این سامانه، ابرناکی زیادی بر روی شمال افغانستان مشاهده می‌شود.

(الف)



(ب)





شکل ۵. تصویر RGB گردو خاک ماهواره MSG به همراه، پربندهای میانگین فشار سطح دریا (hPa) و موقعیت جبهه‌های جوی در ساعت ۰۰ UTC روزهای الف) ۵، ب) ۶، ج) ۷ و د) ۹ مه سال ۲۰۲۴.

۴-۳. خروجی مدل WRF-Chem

کمیت‌های عمق نوری هواویزها و آهنگ بارش سنجنده مادیس ماهواره ترا به همراه کسر ابرناکی، بارش و غلظت سطحی گردو خاک از پیش‌بینی ۴۸ ساعته مدل WRF-Chem برای ساعت ۱۲ UTC روزهای ۵ تا ۸ ماه مه سال ۲۰۲۴ در شکل ۶ نشان داده شده است. اگرچه محصولات ماهواره‌ای و خروجی مدل جهت ارزیابی کیفی خروجی مدل در کنار یکدیگر ارائه شده‌اند، اما نمی‌توان خروجی غلظت سطحی گردو خاک را به صورت کامل با AOD مقایسه کرد؛ زیرا کمیت AOD آن زیاد است، ذرات گردو خاک صرفاً در ترازهای بالای جو حضور داشته باشند. با این وجود در مناطقی که غلظت سطحی گردو خاک زیاد است، مقادیر AOD نیز باید قابل توجه باشد.

در روز ۵ مه، تصاویر آهنگ بارش نشان‌دهنده وجود مقادیر قابل توجه بارش در شرق ترکیه، شمال و شمال شرق دریای خزر و مناطقی از جنوب شرق عراق و غرب ایران در مقابل توده ابر است. مقادیر AOD در جنوب شرق عراق، نیمه غربی عربستان، مناطق جنوب غربی ایران، بر روی خلیج فارس و همچنین مناطق مرکزی ایران قابل توجه است که نشان‌دهنده وجود گردو خاک در این مناطق است. در این روز مدل در منطقه‌ای که از شرق مدیترانه تا شمال دریای خزر کشیده شده، بارش پیش‌بینی کرده است که در توافق با بارش نشان داده شده در محصولات ماهواره‌ای در این منطقه است. در

پیش‌بینی گردو خاک، مدل در شمال شرقی آفریقا، مرز سه کشور سوریه، عراق و عربستان سعودی، مناطق مرکزی عراق، شمال غربی ایران، بر روی دریای خزر و بخش‌های وسیعی از ترکمنستان و ازبکستان غلظت زیاد گردو خاک را نشان داده است. در تمامی این مناطق مقادیر AOD در محصول ماهواره‌ای نیز قابل توجه است که نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل در پیش‌بینی گردو خاک این مناطق بوده است. در پیش‌بینی ابرناکی، مدل تنها در سواحل جنوبی دریای سیاه، گرجستان و مناطق مرکزی دریای خزر ابرناکی نشان داده که وسعت آن نسبت به آنچه در تصاویر ماهواره‌ای دیده می‌شود بسیار کمتر است. از جمله مناطقی که مدل به طور هم زمان وجود گردو خاک در نزدیکی سطح و بارش را پیش‌بینی کرده است، مرز گرجستان و روسیه، منطقه کوچکی از مرز شمال شرقی ایران و ترکمنستان و همچنین مرز سه کشور ازبکستان، تاجیکستان و قرقیزستان (منطقه طوسی رنگ در شکل ۶-الف و ب) و مناطق پراکنده‌ای در شمال غربی ایران می‌باشند که آنها نیز در توافق با محصولات ماهواره‌ای هستند. بیشترین اختلاف مدل با محصولات ماهواره‌ای بر روی عربستان و مناطق مرکزی و جنوبی ایران مشاهده می‌شود که با وجود مقادیر AOD قابل توجه، گردو خاک در خروجی مدل مشاهده نمی‌شود. به ویژه در جنوب عربستان و بخش‌هایی از عمان و یمن مدل بارش پیش‌بینی کرده، در

ترکیه، شمال شرقی عراق، شمال غربی ایران، کشورهای گرجستان، ارمنستان و آذربایجان و همچنین بخش‌هایی از نیمه شمالی دریای خزر، غرب کشور قزاقستان و بخش‌هایی از مرز ترکمنستان و افغانستان پیش‌بینی کرده است. مقادیر زیاد غلظت گردوخاک در بخش‌هایی از سوریه و عراق، شمال عربستان، شمال خلیج فارس و مناطق شمال غربی عربستان، همچنین منطقه کوچکی از غرب دریای خزر و مناطق واقع در شرق دریای خزر و مرکز ایران در خروجی مدل مشاهده می‌شود. در تمامی این مناطق در تصاویر ماهواره‌ای مقادیر AOD قابل ملاحظه است؛ اگرچه اگرچه در برخی مناطق وجود ابرناکی مانع شناسایی توده گردوخاک واقع در نزدیکی سطح در تصاویر ماهواره‌ای می‌شود؛ عملکرد مدل در این روز نسبت به روز قبل در برخی مناطق اندکی بهتر شده ولی همچنان در جنوب عربستان و کشورهای عمان و یمن مدل نتوانسته گردوخاک را به درستی پیش‌بینی کند. در این روز نیز در بخش‌هایی از شمال عراق و شمال غربی ایران و همچنین سواحل شرقی و غربی دریای خزر، مدل وقوع همزمان بارش و پدیده گردوخاک را پیش‌بینی کرده است.

در روز ۹ ماه مه آهنگ بارش، نشان دهنده رخداد باران در سواحل جنوبی دریای خزر، شمال شرقی ایران، جنوب شرقی ترکمنستان، نیمه جنوبی پاکستان و بخش وسیعی از افغانستان است. مقادیر AOD در شرق ایران، جنوب غربی افغانستان، نیمه جنوبی پاکستان، مناطق مرکزی عراق و کشور عمان بیشینه است. در این روز مدل در مناطق پراکنده‌ای از شمال غربی ایران، سواحل جنوبی دریای خزر واقع در شمال ایران و همچنین شمال شرقی ایران، مرز افغانستان و ترکمنستان، مناطق شمالی افغانستان و منطقه کوچکی از مرز ترکمنستان و قزاقستان بارش پیش‌بینی کرده است. خروجی مدل، نشان‌دهنده حضور گردوخاک در مناطق کوچکی از مرکز عراق، شمال دریای سرخ، مناطق مرکزی دریای خزر، کشورهای ترکمنستان، ازبکستان و قزاقستان است. در عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر مناطق دارای گردوخاک در خروجی مدل با مقادیر زیاد AOD منطبق است ولی در بسیاری مناطق

حالی که در محصولات ماهواره‌ای، مقادیر زیاد AOD نشان‌دهنده وجود ذرات معلق در این مناطق هستند.

در روز ۶ مه بر اساس مقادیر آهنگ بارش، در بخش وسیعی از ترکیه، غرب و مرکز ایران و منطقه کوچکی در شمال عراق، بارش رخ داده است. در جنوب توده ابر واقع بر روی بخش وسیعی از کشور عراق و شمال عربستان مقادیر AOD بسیار زیاد است. در بخش‌های شرقی کشور، واقع در مرز ایران با کشورهای ترکمنستان، افغانستان و پاکستان و همچنین غرب پاکستان، مقادیر AOD نسبتاً زیاد است. در تصویر رنگ حقیقی نیز در این مناطق بویژه غرب پاکستان گردوخاک تا حدودی قابل مشاهده است. در این روز مدل در منطقه وسیعی از نیمه شرقی ترکیه، شمال عراق و سوریه، غرب و شمال غربی ایران، سواحل جنوبی دریای خزر، دامنه‌های رشته کوه زاگرس واقع در جنوب غربی ایران، بخش‌هایی از خلیج فارس، نیمه شرقی عربستان و مرز کشورهای ترکمنستان و ازبکستان بارش پیش‌بینی کرده است. خروجی بارش مدل در این منطقه که شامل بخش وسیعی می‌شود تا حد زیادی با الگوی بارشی داده‌های ماهواره‌ای در توافقی است. در پیش‌بینی گردوخاک، مدل مقادیر زیاد غلظت سطحی را در نیمه جنوبی عراق و شمال عربستان و همچنین مناطقی از شمال غربی ایران نشان داده است که با مقادیر زیاد AOD در تصاویر ماهواره‌ای این مناطق همخوانی دارد. با این وجود مدل مقادیر زیاد گردوخاک قابل مشاهده در تصاویر ماهواره‌ای در غرب کشورهای افغانستان و پاکستان را پیش‌بینی نکرده است. در ارتباط با ابرناکی در این روز نیز، مدل مقادیر را بسیار کمتر از مشاهدات نشان داده است.

در روز ۷ ماه مه مقادیر آهنگ بارش نشان می‌دهند که در نیمه شرقی ترکیه، شمال خزر و مناطقی از سواحل جنوبی آن و همچنین شمال شرق ایران بارش رخ داده است. بیشترین مقادیر AOD در مرکز، جنوب و جنوب غرب ایران، شمال خلیج فارس، جنوب عربستان، بخش وسیعی از عمان و یمن، غرب پاکستان و جنوب غربی افغانستان مشاهده می‌شود. در این روز مدل WRF-chem بارش قابل توجهی را در شرق

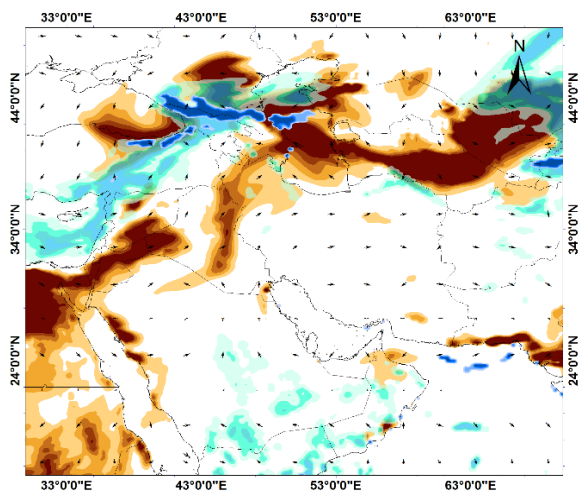
دسترسی به داده، انجام این کار امکان‌پذیر نیست. با توجه به پیچیدگی سازوکار منجر به وقوع همزمان بارش و گردوخاک ناشی از جبهه‌های جوی که به دلیل گرادیان‌های قابل توجه رطوبت در منطقه است، عملکرد مدل تا این حد نیز، قابل قبول ارزیابی می‌شود.

در یک مطالعه چهار نوع رویداد گردوخاک در منطقه خاورمیانه شامل توفان گردوخاک دینامیکی، پیش‌جبهه‌ای، پس‌جبهه‌ای و ناشی از باد شمال بررسی شد. برای هر یک از آنها، سه مورد گردوخاک شدید و فراگیر در نظر گرفته شد و عملکرد ۹ مدل عملیاتی پیش‌بینی گردوخاک از جمله مدل WRF-Chem به صورت کیفی و کمی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشتر مدل‌ها تا حدودی توانسته بودند پدیده‌های گردوخاک جبهه‌ای را شناسایی کنند (کریمی و همکاران، ۲۰۲۱b).

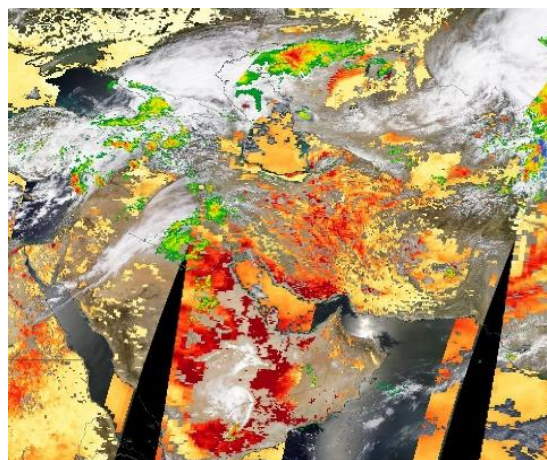
از جمله شرق و جنوب‌شرق ایران و جنوب پاکستان وسعت مناطق دارای گردوخاک بسیار کمتر نشان داده شده است. در عرض‌های جغرافیایی بالاتر نیز به دلیل وجود ابرناکی مقادیر AOD در تصاویر ماهواره‌ای به خوبی مشخص نشده‌اند ولی در برخی مناطق مقادیر زیاد آن در میان توده ابرها می‌تواند تایید‌کننده خروجی مدل باشد. در این روز نیز مدل در برخی مناطق بویژه مرز ایران و افغانستان وقوع همزمان بارش و گردوخاک را نشان داده است.

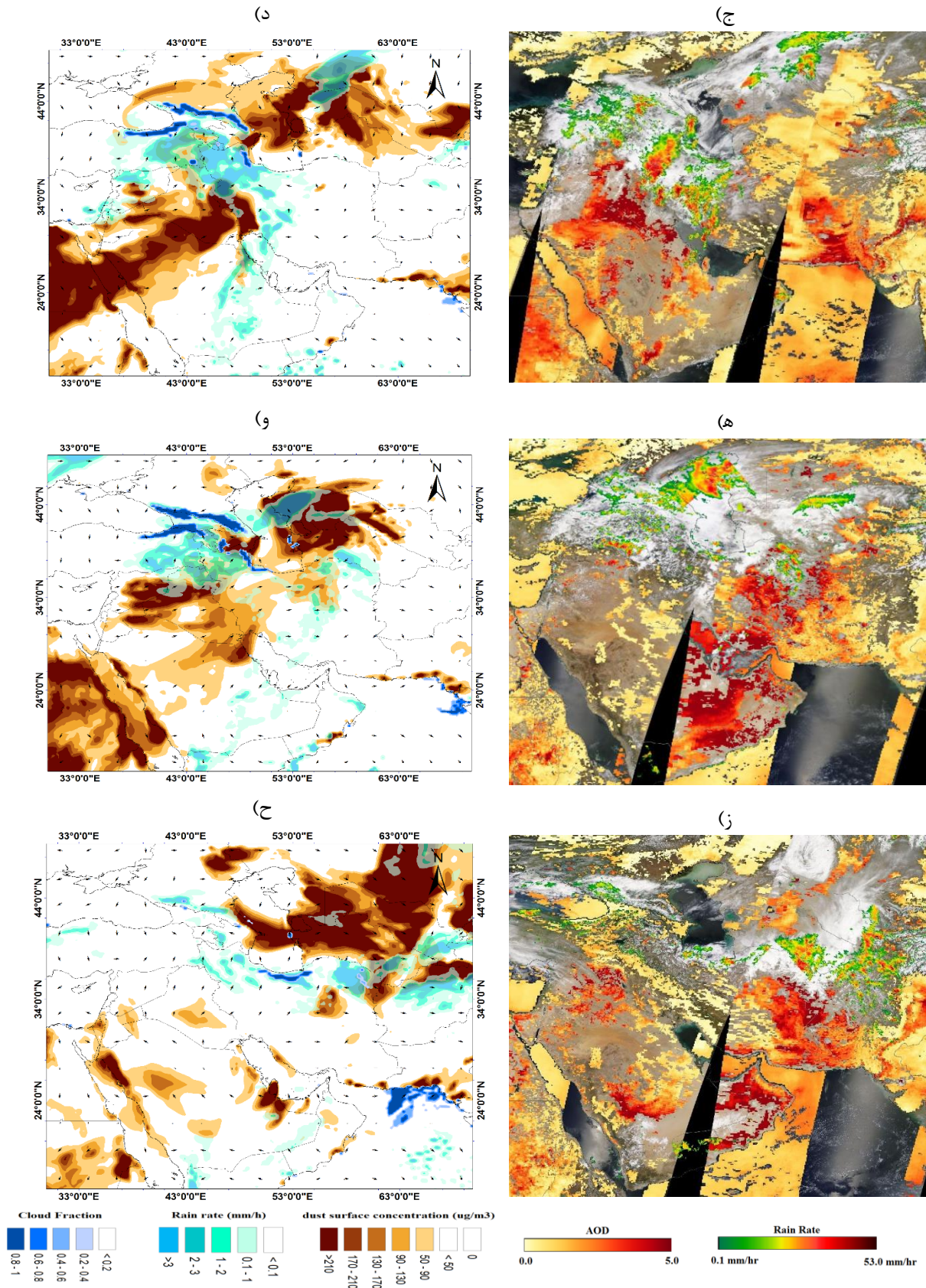
به طور کلی خروجی مدل نشان می‌دهد که مدل تا حدود زیادی توانسته بارش‌ها و گردوخاک ناشی از حضور جبهه‌های جوی در منطقه را به درستی پیش‌بینی کند و می‌توان نتیجه گرفت که مدل در شناسایی این الگوها تا حدودی موفق عمل کرده است. اگرچه برای ارزیابی دقیق خروجی مدل، به داده‌های مشاهداتی در منطقه نیاز است. متأسفانه به دلیل عدم

(ب)



(الف)





شکل ۶. عمق نوری هواویزها و آهنگ بارش سنجنده مادیس ماهواره ترا (سمت راست)، کسر ابرناکی، بارش (میلی‌متر) و غلظت سطحی گردو خاک (میکروگرم بر مترمکعب) از پیش‌بینی ۴۸ ساعته مدل WRF-Chem برای ساعت ۱۲UTC (سمت چپ) در روزهای ۵ (الف، ب)، ۶ (ج، د)، ۷ (ه، و) و ۹ (ز، ح) مه سال ۲۰۲۴.

۴. جمع‌بندی

در این مطالعه روزهای ۵ تا ۱۰ ماه مه سال ۲۰۲۴ در منطقه غرب آسیا مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این روزها در برخی مناطق بارش شدید باران و در مناطق مجاور به صورت هم‌زمان توفان گردوخاک رخ داده است. تصاویر رنگ حقیقی سنجنده مادیس ماهواره ترا وجود توده‌های ابر و گردوخاک را در منطقه نشان می‌دهد. به منظور بررسی دقیق‌تر مناطق دارای بارش و گردوخاک از محصول آهنگ بارش و عمق نوری هواویزها استفاده شد. محصولات ماهواره‌ای نشان می‌دهند که در روز ۵ مه مقادیر قابل توجه بارش در شرق ترکیه، شمال و شمال‌شرق دریای خزر و مناطقی از جنوب شرق عراق و غرب ایران رخ داده است. مقادیر AOD در جنوب شرق عراق، نیمه غربی عربستان، مناطق جنوب غربی ایران، بر روی خلیج فارس و همچنین مناطق مرکزی ایران زیاد است که نشان‌دهنده وجود گردوخاک در این مناطق است. در روز ۶ مه بارش در بخش وسیعی از ترکیه، غرب و مرکز ایران و بخش کوچکی از شمال عراق مشاهده می‌شود. در جنوب توده ابر واقع بر روی بخش وسیعی از کشور عراق و شمال عربستان، مقادیر AOD بسیار زیاد است. در بخش‌های شرقی کشور واقع در مرز ایران با کشورهای ترکمنستان، افغانستان و پاکستان، همچنین غرب پاکستان نیز مقادیر AOD نسبتاً زیاد است. در روز ۹ مه آهنگ بارش نشان می‌دهد که در شمال شرق خزر و مناطقی از ساحل غربی آن، همچنین بخش‌های پراکنده‌ای از شمال شرقی و مرکز ایران بارش رخ داده است. مقادیر AOD در این روز در نیمه شرقی عراق و مناطق مرکزی عربستان بسیار زیاد است. در بخش‌های وسیعی از مرکز و شرق ایران، شرق ترکمنستان و کشورهای پاکستان و افغانستان نیز مقادیر زیاد AOD نشان‌دهنده وجود گردوخاک در جو این مناطق است. آهنگ بارش در روز ۱۰ مه، مقادیر زیاد بارش بر روی سراسر کشور افغانستان و نیمه شرقی پاکستان را نشان می‌دهد. مقادیر AOD نیز همچنان در جنوب شرقی عراق، بخش وسیعی از کشورهای عربستان و ایران و همین‌طور غرب پاکستان بسیار زیاد است.

در ادامه، موقعیت جبهه‌های جوی بر روی تصاویر RGB گردوخاک و پربندهای میانگین فشار سطح دریا تعیین شده است. در روز ۵ مه، جبهه اکلوده وابسته به سامانه کم‌فشار واقع بر روی ترکیه از شرق تا مرکز این کشور را تحت پوشش قرار داده است. از شرق دریای سیاه تا شمال دریای سرخ جبهه‌های سرد و گرم به دنبال یکدیگر قرار گرفته‌اند. جبهه گرم این مرکز کم‌فشار از شرق دریای سیاه تا شمال خزر امتداد دارد. یک جبهه سرد در شمال غربی ایران و جبهه‌های سرد و گرمی در شمال عربستان و مناطق مرزی این کشور با عراق و سوریه مشاهده می‌شود. در روز ۶ مه با حرکت سامانه کم‌فشار به سمت شمال شرق، جبهه‌های مرتبط با آن نیز جابجا شده‌اند. در این روز جبهه سرد بر روی عراق، در غرب ایران و در جنوب غرب ایران مشاهده می‌شود. در تصویر ماهواره توده‌های ابر و گردوخاک در اطراف جبهه‌ها مشاهده می‌شود. در روز ۷ مه جبهه گرم از شمال غرب ایران تا شمال شرق دریای خزر کشیده شده است، جبهه سرد این سامانه از شمال غرب ایران تا شمال عربستان امتداد یافته و جبهه اکلوده آن بر روی شرق ترکیه قرار دارد. در روز ۹ مه جبهه سرد مرتبط با کم‌فشار بر روی ازبکستان تا شمال ایران کشیده شده است و جبهه گرم تا شمال غرب افغانستان امتداد یافته است. در قطاع گرم این سامانه، ابرناکی بر روی شمال افغانستان مشاهده می‌شود.

به طور کلی در این روزها وزش بادهای شدید ناشی از وجود جبهه در منطقه سبب رخداد پدیده گردوخاک در بخش وسیعی شده است. از طرف دیگر انتقال رطوبت از شرق دریای مدیترانه، دریای سیاه و حتی دریای خزر در عرض‌های جغرافیایی بالاتر و دریای سرخ، دریای عرب، خلیج فارس و دریای عمان و شمال اقیانوس هند در عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر در حضور جبهه‌ها و حرکات صعودی ناشی از ناپایداری، سبب بارش باران در بخش‌هایی از منطقه شده است. خروجی مدل WRF-Chem نشان داد که این مدل در این مورد مطالعاتی در پیش‌بینی ۴۸ ساعته خود توانسته وقوع پدیده گردوخاک و بارش را به خوبی پیش‌بینی کند. البته در اینجا خروجی‌ها به صورت کیفی با محصولات ماهواره‌ای

7. Dayan, U., Nissen, K. and Ulbrich, U., 2015. Atmospheric conditions inducing extreme precipitation over the eastern and western Mediterranean. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(11), pp.2525-2544.
8. Dayeh, M.A., Farahat, A., Ismail-Aldayeh, H. and Abuelgasim, A., 2021. Effects of aerosols on lightning activity over the Arabian Peninsula. *Atmospheric Research*, 261, p.105723.
9. Desboeufs, K., Fu, F., Bressac, M., Tovar-Sánchez, A., Triquet, S., Doussin, J.F., Giorio, C., Chazette, P., Disnaquet, J., Feron, A. and Formenti, P., 2022. Wet deposition in the remote western and central Mediterranean as a source of trace metals to surface seawater. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(4), pp.2309-2332.
10. Francis, D., Chaboureaud, J.P., Nelli, N., Cuesta, J., Alshamsi, N., Temimi, M., Pauluis, O. and Xue, L., 2021. Summertime dust storms over the Arabian Peninsula and impacts on radiation, circulation, cloud development and rain. *Atmospheric Research*, 250, p.105364.
11. Goudie, A.S., 2020. Dust storms and human health. *Extreme weather events and human health: International case studies*, pp.13-24.
12. Hamzeh, N.H., Karami, S., Kaskaoutis, D.G., Tegen, I., Moradi, M. and Opp, C., 2021. Atmospheric dynamics and numerical simulations of six frontal dust storms in the Middle East region. *Atmosphere*, 12(1), p.125.
13. Karami, S., Hamzeh, N.H., Alam, K. and Ranjbar, A., 2020. The study of a rare frontal dust storm with snow and rain fall: Model results and ground measurements. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 197, p.105149.
14. Karami, S., Hamzeh, N.H., Kaskaoutis, D.G., Rashki, A., Alam, K. and Ranjbar, A., 2021a. Numerical simulations of dust storms originated from dried lakes in central and southwest Asia: The case of Aral Sea and Sistan Basin. *Aeolian Research*, 50, p.100679.
15. Karami, S., Kaskaoutis, D.G., Ghassabi, Z. and Khansalari, S., 2023. Investigation and model simulation of dry and moist (haboob) convective dust storms in Yazd Province, central Iranian plateau. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(4), p.241.

مقایسه شده‌اند. برای ارزیابی دقیق‌تر مدل نیاز است که خروجی‌های آن به صورت کمی در منطقه مقایسه شود. در این مقاله به دلیل وسعت منطقه و عدم دسترسی به داده‌های مشاهداتی این کار انجام نشده است. در مطالعه‌ای حمزه و همکاران (۲۰۲۱) خروجی ۳مدل پیش‌بینی عملیاتی گردوخاک WRF-Chem، CAMS و RegCM4 را در ۶ مورد پدیده گردوخاک جبهه‌ای بررسی کردند و نتیجه گرفتند که مدل WRF-Chem بهترین عملکرد را داشته است.

منابع

1. Awad, A.M., Mashat, A.W.S., Alamoudi, A.O. and Assiri, M.E., 2016. Synoptic study of the seasonal variability of dust cases observed by the TOMS satellite over northern Saudi Arabia. *Theoretical and Applied Climatology*, 124, pp.1099-1117.
2. AlNasser, F. and Entekhabi, D., 2023, July. Tracking dust storms and identifying source areas using MSG Seviri. In *IGARSS 2023-2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 3905-3908). IEEE.
3. Bergametti, G., Rajot, J.L., Marticorena, B., Féron, A., Gaimoz, C., Chatenet, B., Coulibaly, M., Koné, I., Maman, A. and Zakou, A., 2022. Rain, wind, and dust connections in the Sahel. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(3), p.e2021JD035802.
4. Broomandi, P., Davletov, K., Kim, J.R. and Karaca, F., 2023. Dust Storm and Infant Health. In *Dust and Health: Challenges and Solutions* (pp. 113-136). Cham: Springer International Publishing.
5. Cao, H., Amiraslani, F., Liu, J. and Zhou, N., 2015. Identification of dust storm source areas in West Asia using multiple environmental datasets. *Science of the Total Environment*, 502, pp.224-235.
6. Cerro, J.C., Cerdà, V., Caballero, S., Bujosa, C., Alastuey, A., Querol, X. and Pey, J., 2020. Chemistry of dry and wet atmospheric deposition over the Balearic Islands, NW Mediterranean: Source apportionment and African dust areas. *Science of The Total Environment*, 747, p.141187.

- Europe in 2016—a representative year of the increased North African dust removal over the last decade. *Frontiers in Earth Science*, 10, p.869902.
25. Safaierad, R., Mohtadi, M., Zolitschka, B., Yokoyama, Y., Vogt, C. and Schefuß, E., 2020. Elevated dust depositions in West Asia linked to ocean-atmosphere shifts during North Atlantic cold events. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(31), pp.18272-18277.
 26. Spiridonov, V., Čurić, M., Spiridonov, V. and Čurić, M., 2021. Air Masses and Fronts. *Fundamentals of Meteorology*, pp.253-261.
 27. Wei, W., Zou, S., Duan, W., Chen, Y., Li, S. and Zhou, Y., 2023. Spatiotemporal variability in extreme precipitation and associated large-scale climate mechanisms in Central Asia from 1950 to 2019. *Journal of Hydrology*, 620, p.129417.
 28. Williams, C.G. and Samara, F., 2023. Changing particle content of the modern desert dust storm: a climate× health problem. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(6), p.706.
 29. Yao, J., Chen, Y., Chen, J., Zhao, Y., Tuoliewubieke, D., Li, J., Yang, L. and Mao, W., 2021. Intensification of extreme precipitation in arid Central Asia. *Journal of Hydrology*, 598, p.125760.
 30. Yuan, T., Huang, J., Cao, J., Zhang, G. and Ma, X., 2021. Indian dust-rain storm: Possible influences of dust ice nuclei on deep convective clouds. *Science of The Total Environment*, 779, p.146439.
 31. Zhao, X., Zhao, C., Yang, Y., Sun, Y., Xia, Y., Yang, X. and Fan, T., 2022. Distinct changes of cloud microphysical properties and height development by dust aerosols from a case study over Inner-Mongolia region. *Atmospheric Research*, 273, p.106175.
 16. Karami, S., Kaskaoutis, D.G., Kashani, S.S., Rahnama, M. and Rashki, A., 2021b. Evaluation of nine operational models in forecasting different types of synoptic dust events in the Middle East. *Geosciences*, 11(11), p.458.
 17. Karami, S., Ranjbar, A., Mohebalhojeh, A.R. and Moradi, M., 2017. A rare case of haboob in Tehran: observational and numerical study. *Atmospheric Research*, 185, pp.169-185.
 18. Kawai, K., Kai, K., Jin, Y., Sugimoto, N. and Batdorj, D., 2015. Dust event in the Gobi Desert on 22-23 May 2013: Transport of dust from the atmospheric boundary layer to the free troposphere by a cold front. *Sola*, 11, pp.156-159.
 19. Knippertz, P., 2014. Meteorological aspects of dust storms. *Mineral dust: A key player in the earth system*, pp.121-147.
 20. Middleton, N., Kashani, S.S., Attarchi, S., Rahnama, M. and Mosalman, S.T., 2021. Synoptic causes and socio-economic consequences of a severe dust storm in the Middle East. *Atmosphere*, 12(11), p.1435.
 21. Miller, S.D., Kuciauskas, A.P., Liu, M., Ji, Q., Reid, J.S., Breed, D.W., Walker, A.L. and Mandoos, A.A., 2008. Haboob dust storms of the southern Arabian Peninsula. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D1).
 22. Miri, A. and Middleton, N., 2022. Long-term impacts of dust storms on transport systems in south-eastern Iran. *Natural Hazards*, 114(1), pp.291-312.
 23. Rabbani, F. and Sharifikia, M., 2023. Prediction of sand and dust storms in West Asia under climate change scenario (RCPs). *Theoretical and Applied Climatology*, 151(1), pp.553-566.
 24. Rostási, Á., Topa, B.A., Gresina, F., Weiszbürg, T.G., Gelencsér, A. and Varga, G., 2022. Saharan dust deposition in central