

Evaluation of WRF-Chem Model Performance in Wind Field Simulation in Dust Storm April 2022 in Khuzestan Province

Mobarak Hassan, E.¹  | Karimkhani, M.²  | Noori, F.³ 

1. Department of Environment, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

2. Department of Earth Science, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

3. Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: mobarak_e@yahoo.com

(Received: 14 May 2023, Revised: 18 June 2023, Accepted: 26 Sep 2023, Published online: 6 July 2024)

Summary

The dust phenomenon is one of the natural phenomenon that is formed by both human and natural factors that causes adverse environmental consequences every year in many arid regions worldwide, including Iran.

Predicting the emission and transport of dust and aerosols can be useful to mitigate harmful effects. However, despite numerous studies, predicting dust events and their transport remains challenging. Wind speed, vegetation, and soil structure are the most important factors in local and regional dust emission. The WRF-Chem model is a popular numerical model used for simulating wind fields, dust, and air pollution, and is of interest to researchers worldwide.

The Khuzestan province, located in the southwest of Iran, is affected by both cross-border and internal dust events due to its geographical location. Wind plays a crucial role in the emission and transport of dust to this region. Due to the increasing number of dust days and their intensity in the province, predicting and simulating wind and dust fields is of utmost importance. Therefore, finding the optimal configuration of wind field during dust events in Khuzestan is necessary. Given the significance of this issue, the aim of this study is to evaluate the wind field simulated by the WRF-Chem model under both dust and non-dust conditions, and to determine the optimal configuration for each conditions.

To achieve this, meteorological and environmental data from 2020 to 2022 were collected from the Iran meteorology and environmental organizations. During the period of April 7-25, 2022, dust was recorded on some days in Khuzestan province, while on other days, no dust was observed. In the second step, the wind field of 700 hPa level was analyzed using GFS data in April 2022. The WRF-Chem model was run from 7 to 25 April 2022 with GFS data for four different model configurations with two boundary layer schemes YSU and MYJ as well as Lin and WMS6 cloud microphysics schemes for two horizontal resolutions of 27 and 9 km.

The results of the model were compared with the initial GFS data and the observed wind direction and speed of 10 meters. Statistical indicators and Taylor charts were also utilized.

The results show that, the highest number of dust days in Khuzestan province occurred in Bostan and Abadan in 2022. In the three months of May, March and July the highest number of dust days in the province was obtained. The wind field of 700 hPa simulated by all four WRF-Chem model configurations is similar to the initial GFS data, which indicates good model performance in simulation of wind field in the selected area, although there are differences in some details and in smaller scales. The maximum and mean of estimated wind speed by configuration with the YSU boundary layer scheme is lower than that for MYJ and is closer to observational data. During the analysis of the two bias error indices (MB) and normalized mean growth error (NMGE), the lowest values were observed at the Abadan, Mahshahr, and Omidieh stations, indicating excellent performance of the WRF-Chem model in these areas. However, weaker results were obtained at the Bostan and Ahvaz stations.

Taylor diagram shows good model performance in estimation of 10-meters wind in Abadan, Mahshahr, Bostan, Ahvaz and Omidieh stations. The P1M6D1 and P1M2D1 have better results than P2M2D1 and P2M6D1. In this way, the Taylor diagram shows the impact of the use of YSU boundary layer in estimating 10-meters wind is better than that of MYJ.

Dust distribution obtained from WRF-Chem model and the dust mass observed in the image of the MODIS sensor are in good harmony so that the dust emission centers in eastern Syria and northwest of Iraq, eastern Iraq and northern Saudi Arabia is well simulated by the model. In the horizontal distribution of dust prediction, the boundary layer scheme has more effect than that of the microphysical scheme.

Keywords: Khuzestan Province, 10-meter wind, dust storm, WRF-Chem model.

Cite this article: Mobarak Hassan, E., Karimkhani, M., & Noori, F. (2024). Evaluation of WRF-Chem Model Performance in Wind Field Simulation in Dust Storm April 2022 in Khuzestan Province. *Journal of the Earth and Space Physics*, 50(2), 387-408. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.358907.1007526>

E-mail: (2) mahnaz_karimkhany@yahoo.com (3) faezeh.noori@gmail.com



Publisher: University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.358907.1007526>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

بررسی کارایی مدل WRF-Chem در شبیه‌سازی میدان باد در توفان گردوغبار آوریل ۲۰۲۲ در استان خوزستان

الهام مبارک حسن^۱ | مهناز کریم‌خانی^۲ | فائزه نوری^۳

۱. گروه محیط زیست، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.
۲. گروه علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۳. پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: mobarak_e@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۲/۲/۲۴، بازنگری: ۱۴۰۲/۳/۲۸، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۷/۴، انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۴/۱۶

چکیده

برآورد صحیح جهت و سرعت باد منجر به افزایش دقت در شبیه‌سازی و پیش‌بینی گردوغبار می‌شود. با توجه به این که استان خوزستان تحت‌تأثیر گردوغبار قرار دارد، هدف از این مطالعه ارزیابی میدان باد شبیه‌سازی شده مدل WRF-Chem در شرایط وقوع و عدم‌وقوع گردوغبار است. به این منظور مدل برای روزهای ۷ تا ۲۵ آوریل سال ۲۰۲۲ برای چهار پیکربندی مختلف (دو طرح‌واره لایه‌مرزی YSU و MYJ و دو طرح‌واره خردفیزیک Lin و WSM6) و همچنین دو دامنه ۲۷ و ۹ کیلومتر اجرا شد.

ارزیابی برون‌داد مدل WRF-Chem نشان داد، پیکربندی‌های مختلف بیشترین تأثیر را در پیش‌بینی تندی باد داشته و برای در جهت باد نقش کمتری دارند. بیشینه سرعت باد برآورد شده توسط مدل در تمامی ایستگاه‌ها بیش از داده‌های مشاهده شده است. در آبادان، ماهشهر و امیدیه شاخص‌های آماری و نمودار تیلور نشان می‌دهند که مدل WRF-Chem در شبیه‌سازی سرعت باد ده متری عملکرد بسیار خوبی دارد. در سه ایستگاه اهواز، بهبهان و دزفول با افزایش تفکیک‌پذیری مدل از دامنه اول به دوم، عملکرد آن در شبیه‌سازی باد ده متری بهبود می‌یابد. با افزایش سرعت باد تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال، غلظت گردوغبار برآورد شده توسط مدل WRF-Chem افزایش می‌یابد. توزیع گردوغبار به‌دست‌آمده از مدل WRF-Chem نشان می‌دهد که تأثیر نوع طرح‌واره لایه‌مرزی بیش از خردفیزیک است. کاربرد ترکیب طرح‌واره‌های لایه‌مرزی YSU و خردفیزیک WSM6 عملکرد بسیار خوبی در شبیه‌سازی گردوغبار و میدان باد در استان خوزستان دارد.

واژه‌های کلیدی: استان خوزستان، باد ده متری، گردوغبار، مدل WRF-Chem.

۱. مقدمه

پیش‌بینی رویدادهای گردوغبار و انتقال آن همچنان چالش‌برانگیز است. سرعت باد، پوشش گیاهی و ساختار خاک از مهم‌ترین عوامل اصلی تولید گردوغبار محلی و منطقه‌ای می‌باشد (ین و همکاران، ۲۰۰۷). جهت و سرعت باد یکی از متغیرهای پیچیده اقلیمی است که تغییرات آن در کوتاه‌مدت و بلندمدت بر خصوصیات اقلیمی جهانی منطقه‌ای و محلی تأثیر می‌گذارد و از جمله عوامل مهم در تغییر اقلیم به‌شمار می‌رود. از بین کمیت‌های آب‌وهوایی مؤثر بر ایجاد و انتقال گردوغبار، باد برجسته‌ترین کمیت مؤثر بر تحرک‌پذیری ذرات می‌باشد، به‌طوری‌که در

پدیده گردوغبار یکی از انواع پدیده‌های طبیعی است که تحت‌تأثیر عوامل انسانی و طبیعی شکل می‌گیرد و هر ساله در بسیاری از مناطق خشک جهان، از جمله ایران پیامدهای زیست‌محیطی نامطلوبی به دنبال دارد. این پدیده به‌واسطه تعامل بین سطح زمین و جو، به‌خصوص در دوره‌های باد شدید و رطوبت کم ایجاد می‌شود. تأثیر طوفان‌های گردوغبار بر سلامت انسان، کشاورزی، حمل‌ونقل و محیط‌زیست به‌طور گسترده شناخته‌شده است. پیش‌بینی انتشار و انتقال گردوغبار و هواویزها برای کاهش اثرات مضر مفید خواهد بود؛ اما علی‌رغم مطالعات متعدد،

استناد: مبارک حسن، الهام؛ کریم‌خانی، مهناز و نوری، فائزه (۱۴۰۳). بررسی کارایی مدل WRF-Chem در شبیه‌سازی میدان باد در توفان گردوغبار آوریل ۲۰۲۲ در استان خوزستان. مجله فیزیک زمین و فضا، ۵۰(۲)، ۳۸۷-۴۰۸. DOI: http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.358907.1007526

رایانامه: (۲) mahnaz_karimkhani@yahoo.com (۳) afaezeh.noori@gmail.com



طوفان گردوغبار رخ داده در شبهه جزیره عربستان در تاریخ ۲۰-۱۸ مارس ۲۰۱۲ توسط مدل WRF-Chem بررسی شده است (پراکاش و همکاران، ۲۰۱۵). نتیجه این تحقیق نشان داد که با نزدیک شدن یک جبهه سرد به منطقه خاورمیانه کانون‌های گردوغبار در مناطق بیابانی فعال شده و حدود ۷۴٪ میزان کل انتشار صورت گرفته در دامنه شبیه‌سازی ته‌نشین شده است. اثر مانسون و طوفان گردوغبار بر مشخصات نوری ذرات و تابش در شمال هند در تاریخ ۲۲-۱۷ آوریل ۲۰۱۰ توسط مدل WRF-Chem بررسی شده (کومار و همکاران، ۲۰۱۴) و نتایج نشان می‌دهند که حضور ذرات گردوغبار باعث سرمايش سطح زمین و بالای جو می‌شود؛ اما میان آنها را گرم می‌کند.

در ایران نیز علیزاده چوباری و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از مدل WRF-Chem اثر بادهای ۱۲۰ روزه بر طوفان‌های گردوغبار منطقه سیستان را مورد مطالعه قرار دادند. نتیجه این بررسی نشان داد که تشکیل یک سیستم پرفشار در کوه‌های مرتفع هندوکش در شمال افغانستان و سیستم کم‌فشار گرمایی در سطوح بیابانی در شرق ایران و غرب افغانستان منجر به توسعه گرادیان فشار و افزایش سرعت باد در این منطقه می‌شود. کاربست مدل WRF-Chem نشان داد که سرعت باد به دلیل اثر کانالیزه شدن ناشی از مسیر عبوری از میان کوه‌ها تشدید می‌شود. اصغری و همکاران (۱۳۹۹) به مطالعه و ارزیابی طرح‌واره‌های گسیل گردوغبار در مدل WRF-Chem طوفان شرق و جنوب شرق کشور پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که طرح‌واره‌های گسیل AFWA و GOCART در شبیه‌سازی گسیل گردوغبار سازگاری بیشتری با مشاهدات دارند. طرح‌واره AFWA، غلظت را بیشتر از مشاهدات شبیه‌سازی کرد اما روند تغییرات آن تطابق قابل قبولی داشت.

نقش گردوغبار در تغییر کمیت‌های جوی نیز توسط مدل WRF-Chem قابل بررسی است. اثر حضور ذرات گردوغبار بر تقویت یا تضعیف جت‌های سطح پایین در منطقه سیستان به کمک مدل WRF-Chem توسط علیزاده چوباری و همکاران (۲۰۱۲) بررسی شده و مشخص شد،

مدل‌های پیش‌بینی طوفان گردوغبار، سرعت باد به‌عنوان محرک اصلی پیش‌بینی غلظت گردوغبار در نظر گرفته می‌شود (لیو و شائو، ۲۰۰۱؛ ین و همکاران، ۲۰۰۵). سرعت باد بالا و به‌صورت مداوم، باعث افزایش میزان گردوغبار در هوا و افزایش ارتفاع آن می‌شود. همچنین، جهت باد نیز تأثیر مهمی در انتقال گردوغبار از چشمه دارد، به طوری که می‌تواند به افزایش یا کاهش گردوغبار در مناطق مختلف منجر شود. انتشار گردوغبار ناشی از وزش باد بر روی سطوح خاک‌های خشک و نیمه‌خشک به‌عنوان بزرگ‌ترین منابع گردوغبار اولیه شناخته شده است (هرمان و همکاران، ۱۹۹۷؛ پرسپرو و همکاران، ۲۰۰۲). بسیاری از پژوهشگران با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی، تحلیل داده‌های سطحی و فضایی و تجربیات میدانی، به بررسی تأثیر جهت و سرعت باد در ایجاد و انتقال گردوغبار پرداخته‌اند. این تحقیقات در تعیین مناطق آلوده به گردوغبار، پیش‌بینی زمان و میزان آلودگی و تدوین سیاست‌های مدیریت گردوغبار و کاهش اثرات آن بر روی محیط‌زیست و سلامت انسان‌ها بسیار مفید واقع شده‌اند.

مدل WRF-Chem یکی از پرکاربردترین مدل‌های عددی در شبیه‌سازی میدان باد، گردوغبار و آلودگی هوا می‌باشد که مورد توجه محققان در سرتاسر جهان قرار دارد که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود. قابلیت طرح‌واره‌های مختلف مدل WRF-Chem جهت محاسبه شار عمودی گردوغبار مورد مطالعه قرار گرفته است (فلاتوناس و همکاران، ۲۰۱۷). در این پژوهش مدل ۱۲ بار اجرا شد. به این ترتیب که ۳ طرح‌واره شار گردوغبار با ۴ پیکربندی مختلف در نظر گرفته شد. در نهایت مقایسه نتایج با عمق نوری هواویز نشان داده شد که نتایج تمامی شبیه‌سازی‌ها با عمق نوری هواویز در میانگین مکانی بزرگ مقیاس تطابق دارد. اما با تمرکز بر یک منطقه خاص، تفاوت چشمگیر این شبیه‌سازی‌ها آشکار شد. همچنین نشان داده شد با تغییر ضرایب رابطه شار گردوغبار برای همسان کردن نتایج شبیه‌سازی با مشاهدات تجربی برای یک منطقه، نتایج شبیه‌سازی برای منطقه دیگر از واقعیت فاصله می‌گیرد.

(۲۰۱۹)، گیلومر و همکاران (۲۰۰۴)، کریم‌خانی و همکاران (۲۰۲۱) اشاره کرد. حساسیت چهار طرح‌واره خردفیزیک (WRF-Chem، WSM6، Lin، Morrison و Thompson) در مدل WRF در شبیه‌سازی یک پدیده توفان تندی و باد ۱۰ متری در جنوب شرقی هند بررسی شد (راجیوان و همکاران، ۲۰۱۰). نتایج نشان داد همه طرح‌واره‌ها گسترش قائم هسته‌های جریان صعودی را کم برآورد کردند. همچنین، طرح‌واره‌های خردفیزیک اشکالاتی در شبیه‌سازی حرکت نزولی نشان دادند. در شبیه‌سازی باد طرح‌واره Lin بهترین نتیجه را نشان داد.

سانگ و سون (۲۰۱۸) طرح‌واره‌های خردفیزیک WRF را برای شبیه‌سازی باران شدید بر روی شبه‌جزیره کره ارزیابی کردند و دریافتند که طرح‌واره WSM6 بهترین طرح برای شبیه‌سازی است. پنج طرح‌واره خردفیزیک ابر در مدل WRF را با استفاده از تصاویر ماهواره مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج نشان داد که طرح‌واره‌های Lin و WSM6 در شبیه‌سازی باد سطحی با مشاهدات تطابق کامل دارند (جانکو و همکاران، ۲۰۱۱).

کریم‌خانی و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی طرح‌واره‌های خردفیزیک ابر (WRF-Chem، WSM6، Lin، Morrison، Thompson و Thompson aerosol aware) در مدل WRF را در شبیه‌سازی پدیده خط تندوزه و همچنین باد سطح زمین پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که در شبیه‌سازی باد سطح زمین در مرتبه اول طرح‌واره Lin و در مرتبه دوم طرح‌واره WSM6 بهترین نتیجه را نشان دادند.

استان خوزستان واقع در جنوب غرب ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی تحت تأثیر گردوغبارهای فرامرزی و داخلی می‌باشد. به دلیل ساختارهای هم‌مدیدی متفاوت (دینامیکی و گرمایی) در فصل‌های گوناگون، ویژگی‌های میدان باد و گردوغبار مشابه نیست. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، باد در انتشار و انتقال گردوغبار به این استان نقش بسیار مهمی دارد. با توجه به افزایش روزافزون تعداد روزها و شدت گردوغبار در منطقه، پیش‌بینی و شبیه‌سازی میدان باد و گردوغبار به‌طور ویژه‌ای مدنظر قرار می‌گیرد.

حضور ذرات گردوغبار باعث کاهش دمای سطح زمین و افزایش دمای بالای جو خواهد شد.

کاربرد مدل WRF-Chem در شبیه‌سازی گردوغبار در خاورمیانه، چهار چشمه عمده گسیل گردوغبار را در سودان، عربستان سعودی، بخشی از عراق، ایران، افغانستان و پاکستان نشان داد (رضازاده و همکاران، ۱۳۹۲). در مطالعه‌ای دیگر به کارایی بیشتر طرح‌واره GOCART در مدل‌سازی گردوغبار توسط مدل WRF-Chem در شمال شرق ایران اشاره شده است (زرین و همکاران، ۱۴۰۱).

حساسیت‌سنجی مدل WRF-Chem به طرح‌واره لایه‌مرزی در شبیه‌سازی جت سطوح پایین (Low Level Jet) در توفان گردوغبار مارس ۲۰۱۲ در اهواز نشان داد که طرح‌واره لایه‌مرزی Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino (MYNN2) باد تراز 925 هکتوپاسکال را بهتر از دیگر طرح‌واره‌ها برآورد می‌کند (مبارک حسن و همکاران، ۲۰۱۹). علاوه بر آن Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) همبستگی خوبی با دید افقی داشته است در عین حال غلظت PM10 بیش از مقدار مشاهداتی برآورد شده است.

مدل WRF توانایی خوبی در شبیه‌سازی سرعت و جهت باد ده متری دارد (بهمن‌زاده و همکاران، ۲۰۱۹؛ بیلال و همکاران، ۲۰۱۶؛ دایال و همکاران، ۲۰۲۰). در تحقیق بیلال و همکاران (۲۰۱۶) به‌منظور صحت‌سنجی جهت و سرعت باد ده متری از دو شاخص آماری root mean square error (RMSE) و standard deviation (STDE) error و در تحقیق بهمن‌زاده و همکاران (۱۳۹۸) از ضریب همبستگی پیرسون و نمودار آماری تیلور استفاده شده است. مدل WRF چرخه روزانه سرعت باد ده متری را به‌خوبی نشان می‌دهد (دایال و همکاران، ۲۰۲۰).

همچنین تحقیقات مختلفی برای آشکارسازی حساسیت خردفیزیک ابر مدل‌ها در پیش‌بینی طوفان‌های تندی، پدیده تندوزه و جهت و سرعت باد در مناطق مختلف انجام شده است که از جمله می‌توان به چائولا و همکاران (۲۰۱۸)، التهان و مگودا (۲۰۱۸)، گبودی و همکاران

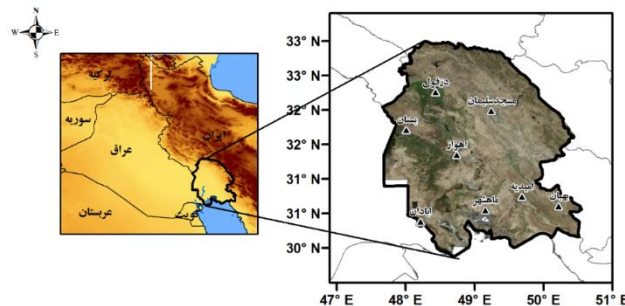
مسجد سلیمان، بهبهان و دزفول (صفی‌آباد) با ۳۱۳/۵، ۳۲۰ و ۸۲/۹ متر بیشترین ارتفاع و ماهشهر، آبادان و بستان با ۶/۶، ۶/۲ و ۷/۸ متر کمترین ارتفاع را از سطح دریای آزاد دارند.

۲-۲. داده‌های مشاهداتی

در ابتدا به منظور شناسایی زمان وقوع گردوغبار داده‌های همدیدی کنترل کیفی شده جهت و سرعت باد سطحی (ده متری)، دمای سطحی (دومتری)، دید افقی و کد پدیده حاضر، دما، رطوبت نسبی و فشار هوا مربوط به سال ۲۰۲۲ از سازمان هواشناسی کشور در ایستگاه‌های مورد نظر تهیه شدند. با استفاده از دو معیار دید افقی کمتر از ۱۰۰۰۰ متر و کد پدیده ۶، ۷، ۳۰ تا ۳۵ و ۹۸ که معرف گردوغبار می‌باشند، گزارش گردوغبار در شهرهای انتخابی استان خوزستان استخراج شد. سپس هر روزی که حداقل یک بار گردوغبار ثبت شده، به عنوان روز گردوغباری در نظر گرفته شد. علاوه بر آن داده‌های PM10 مربوط به شهر اهواز از سازمان محیط‌زیست تهیه شد.

۲-۳. داده‌های GFS

به منظور بررسی پهنه‌بندی باد، داده‌های مورد نظر از GFS (داده‌های تحلیل) با تفکیک پذیری زمانی ۶ ساعته، تفکیک پذیری مکانی $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ و در ۳۱ تراز فشاری در راستای قائم جو از ۱۰۰۰ تا ۱ هکتوپاسکال استخراج شدند. در مطالعه حاضر میدان باد در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال در روزهای وقوع گردوغبار، توسط نرم‌افزار Grads ترسیم شده‌اند.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی استان خوزستان و ایستگاه‌های انتخابی در مطالعه حاضر.

از این رو دستیابی به بهترین پیکربندی مدل عددی WRF-Chem در شبیه‌سازی میدان باد و همچنین انتشار و انتقال گردوغبار به سوی خوزستان، ضروری است. با توجه به اهمیت موضوع، هدف از این مطالعه ارزیابی میدان باد شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF-Chem در شرایط وقوع و عدم وقوع گردوغبار می‌باشد تا یک پیکربندی مناسب برای این شرایط تعیین شود.

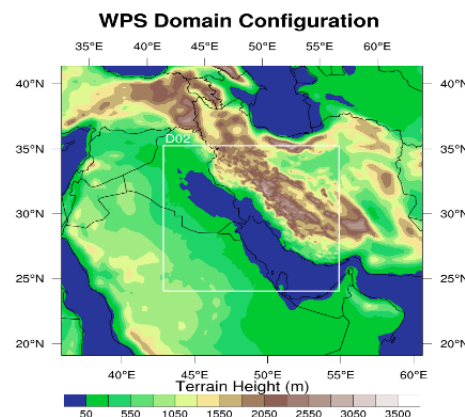
۲. روش پژوهش

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

در مطالعه حاضر استان خوزستان در محدوده ۲۹/۵ تا ۳۴/۵ شمالی و ۴۵/۵ تا ۵۰/۵ شرقی واقع در جنوب غرب ایران مدنظر می‌باشد (شکل ۱). استان خوزستان به دلیل مجاورت با کشورهای عراق و کویت و همچنین نزدیکی به عربستان، تحت تأثیر پدیده گردوغبار است. پوشش گیاهی و ساختار کوهستانی در استان خوزستان متنوع می‌باشد. ارتفاع از سطح دریای آزاد از جنوب غرب به شمال شرق استان افزایش می‌یابد. به منظور بررسی توزیع میدان باد و اثر آن بر گردوغبار در استان خوزستان چند ایستگاه هواشناسی در بخش‌های مختلف استان انتخاب شدند. در انتخاب ایستگاه‌ها پراکندگی در کل استان و موقعیت‌های جغرافیای مختلف در نظر گرفته شده است. مسجد سلیمان معرف منطقه‌ای کوهستانی، دزفول با پوشش گیاهی، بستان نزدیک به مرز عراق، اهواز در مرکز استان، امیدیه و بهبهان واقع در جنوب غرب استان با فاصله بیشتر از کانون‌های گردوغبار، آبادان نزدیک منابع گردوغبار و ماهشهر واقع در جنوب استان، از جمله ایستگاه‌های انتخابی هستند (شکل ۱).

۴-۲. تنظیم مدل

در این تحقیق از مدل WRF-Chem نسخه ۳/۴ برای شبیه‌سازی توفان گردوغبار استفاده شده است. تعداد دامنه انتخابی "دو" بوده است. این مدل با تفکیک افقی ۲۷ کیلومتر برای دامنه اول و ۹ کیلومتر برای دامنه دوم تنظیم شده است. نقطه مرکزی ۳۰/۹۸۴ شمالی و ۴۸/۲۴۴ شرقی انتخاب شده، تعداد نقاط شبکه در دامنه اول ۱۰۰ در راستای غربی-شرقی و ۹۵ در راستای شمالی-جنوبی و برای دامنه دوم ۱۴۵ در راستای غربی-شرقی و ۱۴۲ در راستای شمالی-جنوبی می‌باشد. نسبت دامنه ۱ به ۳ است. دامنه اول به گونه‌ای انتخاب شده است که علاوه بر کشور ایران، مناطقی که چشمه گردوغبار هستند (مانند عراق، عربستان و سوریه) را پوشش می‌دهد و دامنه دوم، کشور ایران را در برمی‌گیرد (شکل ۲).



شکل ۲. دامنه اول (۲۷ کیلومتر) و دامنه دوم (۹ کیلومتر)

مدل WRF-Chem

تفکیک افقی داده‌های زمینی برای دامنه اول هر ۱۰ دقیقه (نوزده کیلومتر) و دامنه دوم هر ۲ دقیقه (چهار کیلومتر) تکرار می‌شود. از نگاهت لامبرت در این مدل استفاده شده است. برای شرایط مرزی و شرایط اولیه مدل WRF-Chem از داده‌های GFS تحلیل استفاده شد. به این ترتیب داده‌های مورد استفاده در بررسی میدان باد

۷۰۰ هکتوپاسکال و ورودی مدل WRF-Chem مشابه می‌باشند. بخش فیزیکی مدل، باید در namelist.input انتخاب شود. برای هر مدل طرح‌واره‌های مختلفی وجود دارد. انتخاب صحیح طرح‌واره‌های مختلف برای منطقه‌های مختلف دنیا و در شرایط متفاوت در صحت خروجی مدل اهمیت ویژه‌ای دارد. در شبیه‌سازی انجام شده توسط مدل WRF-Chem طرح‌واره‌های انتخابی در جدول ۱ آمده است.

با توجه به نتیجه تحقیق اصغری و همکاران (۱۳۹۹)، که نشان دادند، طرح‌واره‌های گسیل AFWA در شبیه‌سازی گردوغبار سازگاری بیشتری با مشاهدات داشته و روند قابل قبولی نیز دارد، در این مطالعه از این طرح‌واره جهت شبیه‌سازی گسیل گردوغبار استفاده شد. جانکو و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند که طرح‌واره‌های Lin و WSM6 در شبیه‌سازی باد ده متری با مشاهدات تطابق کامل دارند. علاوه بر آن بر اساس نتیجه تحقیق کریم‌خانی و همکاران (۲۰۲۱) در شبیه‌سازی باد ده متری در مرتبه اول طرح‌واره Lin و در مرتبه دوم طرح‌واره WSM6 بهترین عملکرد را داشته‌اند. از همین رو در تحقیق حاضر این دو طرح‌واره به عنوان، طرح‌واره‌های برتر خردفیزیک در شبیه‌سازی باد انتخاب شدند.

با توجه به عملکرد متفاوت طرح‌واره لایه‌مرزی محلی و غیر محلی نیز دو طرح‌واره لایه‌مرزی YSU (محلی) و MYJ (غیر محلی) انتخاب شدند. ترکیب دو طرح‌واره لایه‌مرزی و دو طرح‌واره خردفیزیک منجر به چهار پیکربندی مختلف شد که در مجموع چهار اجرا انجام شد. به منظور بررسی تأثیر تفکیک پذیری نقاط شبکه در بهبود عملکرد مدل، در هر اجرا دو دامنه ۲۷ و ۹ کیلومتری در نظر گرفته شد. اسامی مختصر شده برای پیکربندی‌های مختلف در جدول ۲ آمده است.

جدول ۱. تنظیم مدل WRF-Chem در مطالعه حاضر.

ویژگی‌های مدل	طرح واره
تفکیک افقی	۳۲، ۹ و ۳ کیلومتر
ترازهای قائم	۳۲ تراز
فیزیک	
کومولوس	Grell 3D scheme (گرل و دنوی، ۲۰۰۲)
لایه مرزی	Yonsei university scheme (YSU) (هونگ و همکاران، ۲۰۰۶) MYJ Janjic (جانجیک، ۱۹۹۴)
لایه سطحی	Monin-Obukhov (Janjic Eta) scheme (چن و همکاران، ۱۹۹۷)
خردفیزیک	Lin scheme (لین و همکاران، ۱۹۸۳) WSM 6-class graupel scheme (هونگ و لیم، ۲۰۰۶)
تابش طول موج بلند	RRTM scheme (مالور و همکاران، ۱۹۹۷)
تابش طول موج کوتاه	Goddard shortwave (چو و سوارز، ۱۹۹۴)
فرآیند سطحی	Noah Land Surface Model (چن و دودهیا، ۲۰۰۱)
شیمی	
Chem_Opt = 401	4 bin Dust
طرح واره انتشار گردو خاک	AFWA (لی گرند و همکاران، ۲۰۱۹)

جدول ۲. چهار پیکربندی مدل با استفاده از دو طرح‌واره لایه‌مرزی و دو خردفیزیک در دو دامنه ۱ و ۲.

اجرا	لایه‌مرزی (P)	خردفیزیک (M)	دامنه	نام اختصاری پیکربندی
۱	طرح‌واره YSU	طرح‌واره لین	D1	P1M2D1
	طرح‌واره YSU	طرح‌واره لین	D2	P1M2D2
۲	طرح‌واره YSU	طرح‌واره WSM6	D1	P1M6D1
	طرح‌واره YSU	طرح‌واره WSM6	D2	P1M6D2
۳	طرح‌واره MYJ	طرح‌واره لین	D1	P2M2D1
	طرح‌واره MYJ	طرح‌واره لین	D2	P2M2D2
۴	طرح‌واره MYJ	طرح‌واره WSM6	D1	P2M6D1
	طرح‌واره MYJ	طرح‌واره WSM6	D2	P2M6D2

داده‌های اولیه GFS مقایسه شدند. تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال به این دلیل انتخاب شد که اثر ساختار کوهستانی در منطقه، در میدان باد تأثیر کمتری داشته باشد. سپس پهنه‌بندی گردوغبار حاصل از مدل با تصویر ماهواره مقایسه شد.

بیشینه، میانگین و سری زمانی سرعت باد ده متری در صحت‌سنجی برون‌داد مدل می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور با استفاده از سرعت باد مشاهداتی، برون‌داد مدل در هشت ایستگاه انتخابی در استان خوزستان صحت‌سنجی شد. علاوه بر آن نمودارهای سری زمانی سرعت باد مشاهداتی و مدل از ۷ تا ۲۵ آوریل ترسیم و تحلیل شدند.

دوره شبیه‌سازی از ۷ تا ۲۵ آوریل سال ۲۰۲۲ انتخاب شد. در این دوره استان خوزستان در برخی روزها گردوغبار داشته و برخی دیگر بدون گردوغبار بوده است. زمان آغازین مدل ساعت ۱۲ UTC روز ۶ آوریل است. شروع شبیه‌سازی ۱ روز قبل از وقوع توفان گردوغبار است تا احتمال اثرات منابع گردوغبارهای محلی به حداقل برسد. مدل برای هرروز به‌صورت جداگانه و با بازه زمانی ۳۶ ساعته اجرا شد که ۱۲ ساعت اول آن به‌عنوان spinup در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب مدل چهار بار و در دو دامنه اجرا شد.

به‌منظور بررسی نتایج مدل، ابتدا جهت و سرعت باد در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال به‌دست‌آمده از دامنه اول مدل با

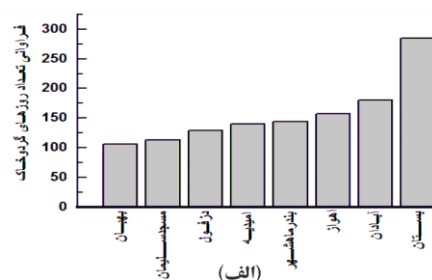
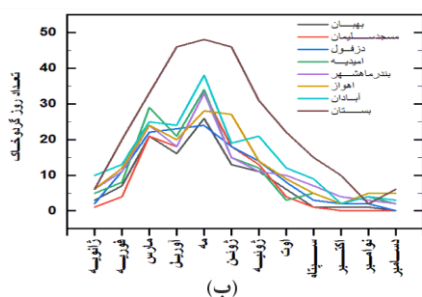
گردوغبار (عراق و سوریه) و همچنین مجاورت با تالاب هورالعظیم را می‌توان اشاره کرد. تالاب هورالعظیم در طی سال‌های اخیر با مشکلات مختلفی مواجه بوده و بخش‌های از آن خشک شده است که می‌تواند منشأ گردوغبار باشد. مسجد سلیمان واقع در شمال شرق استان با ۷۰ روز کمترین روز گردوغباری را داشته است. به این ترتیب از غرب به شرق استان از تعداد روزهای گردوغبار کاسته می‌شود. در توزیع فصلی روند افزایش گردوغبار از ماه فوریه به بعد دیده می‌شود (شکل ۳-ب). در ماه آوریل کاهش تعداد روزهای گردوغبار به دست آمده و سپس در ماه مه مجدداً افزایش رخ داده است. مجدداً در ماه ژوئن و ژوئیه به ترتیب کاهش و افزایش تعداد روزهای گردوغبار رخ داده است. به این ترتیب از ماه فوریه به بعد نوسان‌هایی در تعداد روزهای گردوغبار در ماه‌های مختلف مشاهده می‌شود. در استان خوزستان، افزایش تعداد روزهای گردوغبار در ماه مارس متأثر از ساختار همدیدی-دینامیکی دوره سرد سال، افزایش تعداد روزهای گردوغبار در ماه مه ناشی از فعالیت سامانه‌های همدیدی در فصل گذر و در ماه ژوئیه به دلیل توسعه کم‌فشار گرمایی می‌باشد. روند تغییرات فصلی تعداد روزهای گردوغبار در ایستگاه‌های مختلف در تابستان تفاوت دارد. در حالی که فصل بهار رفتار آنها کم‌وبیش مشابه است. با توجه به این که تعداد روزهای گردوغبار در ماه آوریل نسبت به دو ماه مارس و مه کاهش می‌یابد، در شبیه‌سازی مدل WRF-Chem ماه آوریل انتخاب شد؛ زیرا در این ماه‌روزی با گردوغبار و بدون گردوغبار بوده است که می‌توان عملکرد مدل را در برآورد باد در این دو شرایط مورد بررسی قرارداد.

در بخش دیگر برای تحلیل دقیق‌تر نتایج مدل، روش‌های آماری شامل بایاس خطا (Mean Bias) MB، ضریب تطابق (Index of Agreement) IOA، رشد خطای نرمال شده (Normalized Mean Gross Error) NMGE مورد ارزیابی قرار گرفت. بایاس خطا بیش یا کم برآورد خروجی مدل را نشان می‌دهد. بایاس خطا از جنس متغیر مورد بررسی بوده و مقدار کمتر آن نشان می‌دهد خطای مدل کم است. ضریب تطابق، هماهنگی سری زمانی برون‌داد مدل و مشاهداتی را نشان می‌دهد. ضریب تطابق بین ۰/۵ تا ۱ بیانگر انطباق و هماهنگی قابل قبول برون‌داد مدل با داده مشاهداتی است. رشد خطای نرمال شده نیز آهنگ افزایش خطای کمیت برآورد شده توسط مدل را با زمان نشان می‌دهد. هرچه مقدار کمتری داشته باشد عملکرد مدل بهتر خواهد بود. ضریب همبستگی و انحراف استاندارد اساس ترسیم نمودار تیلور (STD) هستند که در گام دیگر در تحقیق حاضر برای ایستگاه‌های استان خوزستان ترسیم و تحلیل شد.

۳. یافته‌ها

۳-۱. بررسی شرایط گردوغبار در سال ۲۰۲۲

در سال ۲۰۲۲، استان با ۱۴۹ روز بیشترین تعداد روزهای گردوغبار را داشته است که نسبت به دیگر شهرها تفاوت بارزی دارد (شکل ۳-الف). آبادان و اهواز به ترتیب با ۱۰۹ و ۹۶ روز در مرتبه‌های بعدی قرار دارند. در سال ۲۰۲۲، استان و آبادان واقع در غرب استان بیشترین تأثیر را از گردوغبارهای فرامرزی می‌گیرند. استان گردوغباری بیش از دیگر شهرها و از جمله آبادان را تجربه کرده است که از جمله دلایل آن نزدیکی به مهم‌ترین منابع



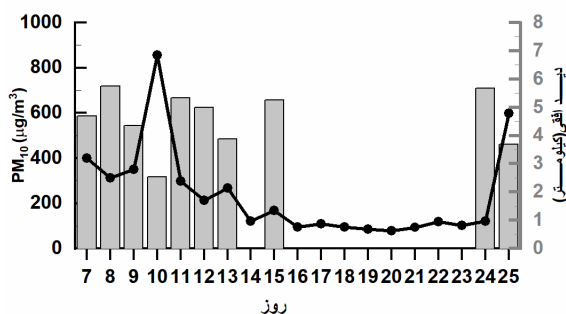
شکل ۳. الف) مجموع تعداد روزهای گردوغبار، ب) توزیع فصلی تعداد روزهای گردوغبار در ایستگاه‌های انتخابی استان خوزستان در سال ۲۰۲۲.

وقوع گردوغبار می‌گردند. با گسترش کم‌فشار در شرق ترکیه و شمال عراق همراه با ناوه ارتفاعی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و گسترش پشته فشاری آزرز به غرب عراق (نشان داده نشده) بادهای شمال غربی در این منطقه شکل می‌گیرند. وزش بادهای شمال غربی در محدوده شرق سوریه و شمال غرب عراق منجر به انتشار گردوغبار در این مناطق می‌شود. همچنین با عبور بادهای جنوب غربی در بخش شرقی کم‌فشار، توده گردوغبار در شرق عراق شکل می‌گیرد. به این ترتیب دو کانون گردوغبار فرامرزی در انتشار و انتقال آن به سوی خوزستان نقش دارند. در سامانه دیگر، با توسعه کم‌فشار عربستان (نشان داده نشده)، بادهای جنوب و جنوب غربی بر روی عربستان، کویت و جنوب شرق عراق شکل می‌گیرند که در این سامانه علاوه بر عراق، بیابان‌های عربستان و کویت هم در انتشار گردوغبار به سوی استان خوزستان تاثیر گذار هستند.

توزیع میدان باد در ساعت ۰۶ UTC روز ۹ آوریل در شکل ۵ نمایش داده شده است. بیشینه سرعت باد در شمال عربستان در راستای غربی و مرکز عراق تا شمال غرب ایران دیده می‌شود. توده گردوغبار شکل گرفته در شرق عراق (شکل ۵-ب) در راستای بادهای جنوب غربی می‌باشد. علاوه بر آن افزایش سرعت باد در شرق سوریه و شمال غرب عراق با راستای شمال غربی سرعت باد تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال همراه است که منجر به انتشار گردوغبار در این مناطق می‌شود. به این ترتیب در روز ۹ آوریل دو توده گردوغبار یکی در شمال غرب و دیگری در شرق عراق انتشار یافته‌اند که به ترتیب با دو جهت باد شمال غربی و جنوب غربی همراه هستند.

در ادامه میانگین روزانه PM10 و دید افقی در اهواز در طی روزهای ۷ تا ۲۵ آوریل بررسی می‌شود (شکل ۴). در روز ۷ آوریل دید افقی به کمتر از ۵ کیلومتر و PM10 تا حدود ۶۰۰ میکروگرم بر مترمکعب افزایش داشته است که بیانگر وقوع توفان گردوغبار است. پس از آن با کاهش PM10 و افزایش دید افقی از شدت گردوغبار کاسته شده و مجدداً در روز ۱۰م آوریل با افزایش PM10 تا ۹۰۰ میکروگرم بر مترمکعب و کاهش دید افقی تا ۲/۵ کیلومتر شدت گردوغبار افزایش می‌یابد. از روز ۱۱م به بعد از شدت گردوغبار کاسته می‌شود. از روز ۱۶م تا ۲۳ هیچ گردوغباری در اهواز گزارش نشده و مقدار PM10 کمتر از ۲۰۰ میکروگرم بر مترمکعب می‌باشد. مجدداً از روز ۲۴م توده گردوغبار دیگری منجر به کاهش دید افقی تا ۵/۵ کیلومتر و افزایش PM10 تا ۶۰۰ میکروگرم می‌شود. به این ترتیب از ۷ تا ۲۵ آوریل ۲۰۲۲، نیمه اول ماه گردوغبار داشته و نیمه دوم ماه تعداد روزهای بیشتری بدون گردوغبار بوده‌اند. همچنین در روزهای ۱۰ و ۲۵ آوریل بیشترین شدت گردوغبار در اهواز گزارش شده است. در مقایسه پهنه‌بندی گردوغبار و باد تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال روزهای ۹ و ۲۴م آوریل انتخاب شدند. به این علت یک روز پیش از گردوغبار شدید تحلیل می‌شود تا بتوان برآورد مدل را در هنگام انتشار گردوغبار در کانون و میدان باد مؤثر در انتقال آن به سوی استان خوزستان بررسی کرد.

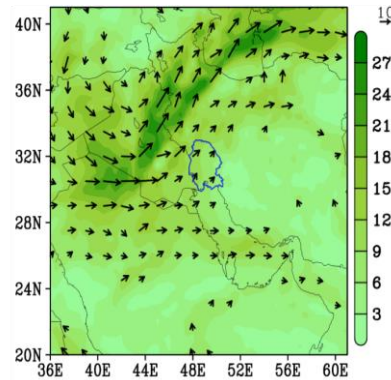
۳-۲. مقایسه پهنه‌بندی باد و گردوغبار برون داد مدل در آوریل ۲۰۲۲، دو سامانه متفاوت همدیدی منجر به



شکل ۴. میانگین روزانه PM10 (میکروگرم بر مترمکعب) و دید افقی (کیلومتر) در طی ۷ تا ۲۵ آوریل ۲۰۲۲.



(ب)



(الف)

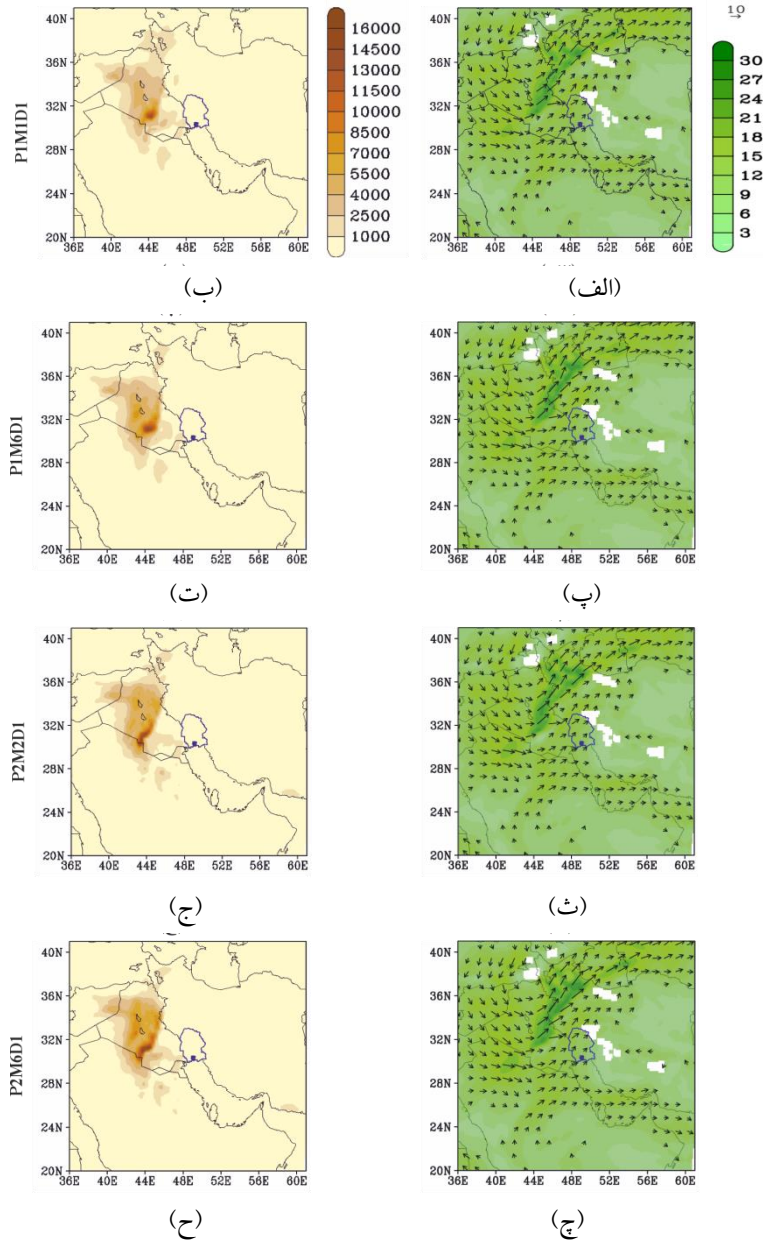
شکل ۵. الف) جهت و سرعت باد (متربرثانیه) در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکالی حاصل از GFS روز ۹ آوریل ساعت ۰۶ UTC سال ۲۰۲۲ و ب) تصویر ماهواره ترا سنجنده مادیس روز ۹ آوریل ۲۰۲۲

درحالی که در سه پیکربندی دیگر بیشینه سرعت باد ۳۳ متر بر ثانیه برآورد شده است.

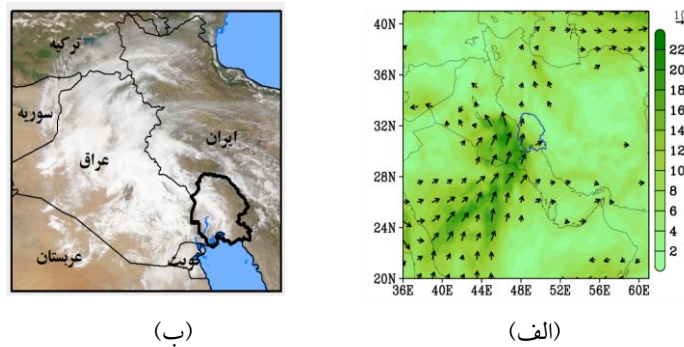
در روز ۹ آوریل، ساعت ۰۶ UTC توده گردوغبار بر روی عراق شبیه‌سازی شده است (شکل ۶). هر چهار پیکربندی گسترش شمال-جنوب گردوغبار را بر روی عراق نشان می‌دهند. بیشینه گردوغبار در جنوب عراق، شرق سوریه، جنوب دریاچه هبانیه و شرق عراق دیده می‌شود که با توده گردوغبار سنجنده مادیس در این روز (شکل ۵-ب) هماهنگی دارد. گرچه در پهنه‌بندی کلی گردوغبار ویژگی مشترک وجود دارد اما در جزئیات و مقدار آن تفاوت‌های دیده می‌شود. اجرای مدل با خردفیزیک WMS6، مقدار گردوغبار را بیش از خردفیزیک Lin برآورد کرده است. به نظر می‌رسد تأثیر لایه‌مرزی بر پهنه‌بندی کلی گردوغبار بیشتر از خردفیزیک است.

در روز ۲۴ آوریل ساعت ۰۶ UTC، بیشینه سرعت باد با جهت جنوب و جنوب غرب سرتاسر مرکز تا شمال شرق عربستان را در بر گرفته و تا جنوب شرق عراق امتداد می‌یابد (شکل ۷-الف). دو بیشینه باد یکی بر روی عربستان و دیگری بر روی کویت و جنوب شرق عراق دیده می‌شود. استان خوزستان تحت تأثیر بادهای جنوبی غربی می‌باشد.

برونداد مدل در روز ۹ آوریل ساعت ۰۶ UTC در شکل ۶ نمایش داده شده است. پیل سمت راست میدان باد و پیل سمت چپ پهنه‌بندی گردوغبار را نشان می‌دهد. جهت باد شمال غربی در شمال غرب عراق و شرق سوریه و بادهای جنوب غربی در شرق عراق در هر چهار پیکربندی مدل به‌طور مشابه شبیه‌سازی شده است (شکل ۶). منطقه توسعه بیشینه سرعت باد در شرق سوریه، شمال عربستان و شرق عراق نیز توسط هر چهار پیکربندی برآورد شده است. توزیع میدان باد تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال به‌دست آمده از مدل WRF-Chem (شکل ۶) با میدان باد داده‌های اولیه GFS هماهنگی دارند؛ اما تفاوت آنها در مقدار سرعت باد است. ساختار میدان باد در هر چهار پیکربندی مشابه بوده و بیشینه سرعت باد در P1M2D1 کمتر از سه پیکربندی دیگر است. به‌طوری که حداکثر سرعت باد در محدوده موردنظر در P1M2D1، ۳۰ متر بر ثانیه و در سه پیکربندی دیگر ۳۳ متر بر ثانیه به‌دست آمده است. جهت وزش باد و بیشینه سرعت باد در جنوب و شرق عراق برآورد شده توسط مدل (شکل ۶) با میدان باد تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال باد GFS (شکل ۵) هماهنگی دارد. بیشینه سرعت باد داده‌های GFS، ۲۷ متر بر ثانیه بوده و بیشینه سرعت در P1M2D1 نیز ۳۰ متر بر ثانیه است



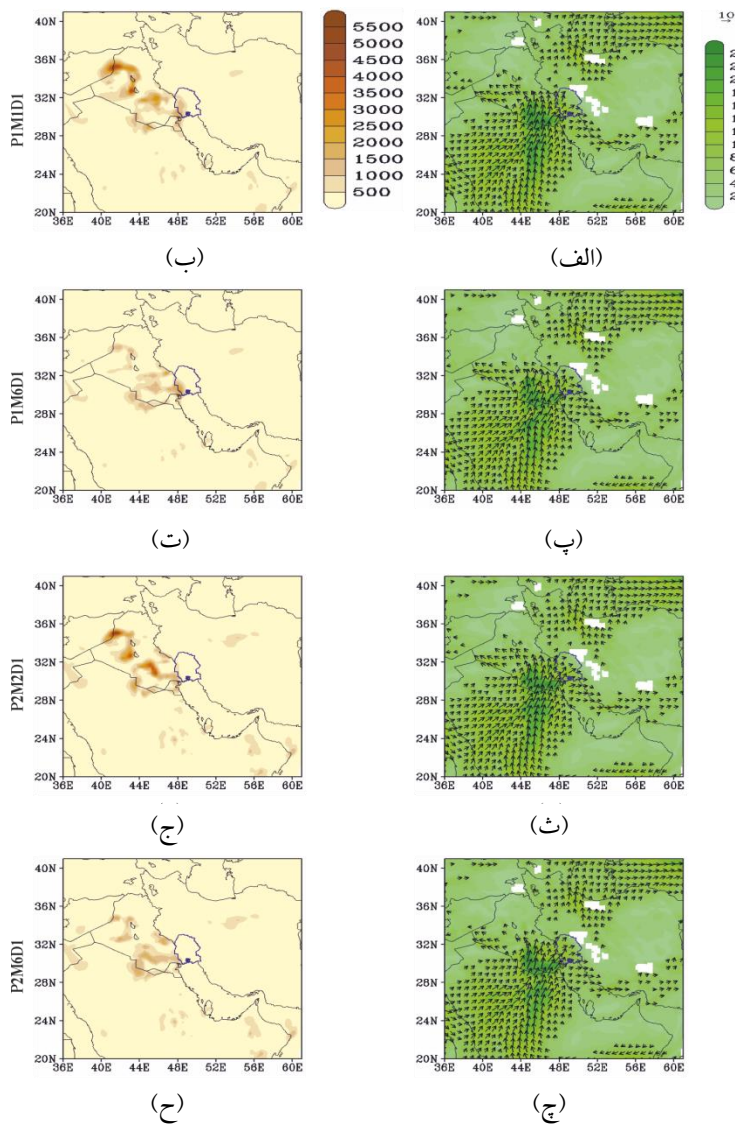
شکل ۶. برون‌داد مدل برای چهار پیکربندی انتخابی؛ پهنه‌بندی جهت و سرعت باد (متربرثانیه) (الف) P1M6D1، (ب) P1M6D1، (پ) P2M2D1 و (ت) P2M6D1؛ پهنه‌بندی گردوغبار سطحی (ث) P1M6D1، (ج) P1M6D1، (چ) P2M2D1 و (ح) P2M6D1 در ۹ آوریل ۲۰۲۲ ساعت ۶ UTC.



شکل ۷. (الف) جهت و سرعت باد (متربرثانیه) در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال حاصل از GFS روز ۲۴ آوریل ساعت ۰۶ UTC سال ۲۰۲۲ و (ب) تصویر ماهواره ترا سنجنده مادیس روز ۲۴ آوریل ۲۰۲۲.

می‌باشد. بیشینه سرعت باد نیز در محدوده مورد مطالعه در سه اجرای مدل ۲۴ متر بر ثانیه به دست آمده و فقط اجرای P2M2D1 مقدار سرعت باد را ۲۶ متر بر ثانیه برآورد کرده است. برون داد توزیع گردوغبار مدل در هر چهار پیکربندی در روز ۲۴ آوریل، توده گردوغباری را در شرق سوریه و شمال غرب عراق تا دریاچه هبانیه نشان می‌دهد (شکل ۸). توده دیگری در جنوب شرق عراق و توده ضعیف تری را در شمال عربستان نشان می‌دهد. علاوه بر آن بیشینه گردوغباری را در جنوب شرق عراق و غرب خوزستان برآورد کرده است.

بیشینه سرعت باد در محدوده مورد بررسی ۲۴ متر بر ثانیه بوده و نسبت به روز ۹ آوریل کمتر است. محل وقوع بیشینه سرعت باد و جهت وزش باد باعث می‌شود که منشأ شکل‌گیری گردوغبار نسبت به روز ۹ آوریل متفاوت باشد. در روز ۲۴م به دلیل پوشش ابری متراکمی که تمامی عراق و غرب ایران را در بر گرفته، امکان آشکارسازی گردوغبار در تصویر سنجنده مودیس نمی‌باشد (شکل ۷-الف). جهت و باد غالب برآورد شده توسط هر چهار پیکربندی (شکل ۸) مدل مشابه با داده اولیه GFS (شکل ۷-الف)



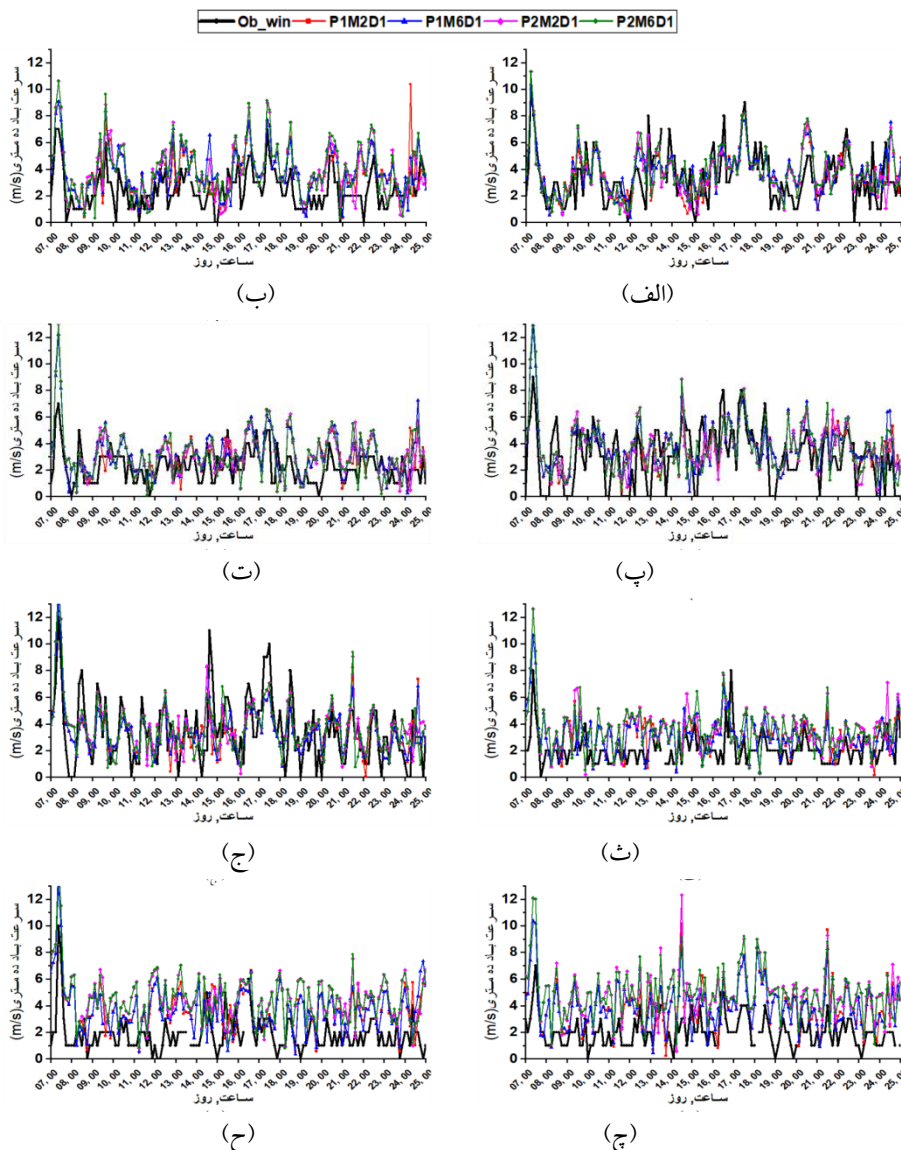
شکل ۸. برون داد مدل برای چهار پیکربندی انتخابی؛ پهنه‌بندی جهت و سرعت باد (متر بر ثانیه) الف) P1M2D1، ب) P1M6D1، پ) P2M2D1 و ت) P2M6D1؛ پهنه‌بندی گردوغبار سطحی ث) P1M2D1، ج) P1M6D1، چ) P2M2D1 و ح) P2M6D1 در ۲۴ آوریل ۲۰۲۲ ساعت ۶ UTC.

۳-۳. بررسی سری زمانی باد ده متری برون‌داد مدل ۳-۳-۱. مقایسه سری زمانی سرعت باد از ۷ تا ۲۵ آوریل سال ۲۰۲۲ در چهار پیکربندی مدل سری زمانی سرعت باد ده متری برآورد شده توسط مدل WRF-Chem در آبادان روندی مشابه با داده‌های مشاهده‌ای دارد (شکل ۹-الف). به‌ویژه در برآورد بیشینه سرعت باد در روزهای ۷ ام، ۱۰ ام و ۲۲ آوریل تطابق بسیار خوبی نشان می‌دهد.

گرچه در برخی روزها مانند روز ۲۰ ام سرعت باد برآورد شده مدل بیش از مشاهده‌ای است؛ اما در بیشتر ساعات هماهنگی خوبی بین چهار اجرای مدل و داده‌های مشاهده‌ای دیده می‌شود. در آبادان بیشترین سرعت باد در روز ۷ ام آوریل بوده است. در بستان سرعت باد برآورد شده توسط اجراهای مدل بیش از داده‌های مشاهده‌ای بوده است (شکل ۹-ب). به‌ویژه در برخی روزها مانند ۹ ام، ۱۳ ام و ۲۴ ام تفاوت بارزی بین آن دو دیده می‌شود. سرعت باد برآورد شده در بستان توسط چهار پیکربندی مدل تفاوت‌های بارزی دارند. اجرای P2M6 نسبت به دیگر اجراها سرعت باد را بیشتر برآورد کرده است. در روز ۲۴ ام اجرای P1M2 سرعت باد بسیار متفاوت از دیگر اجراهای مدل بوده است و بیشینه آن را تا ۱۰ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. در ماهشهر بین اجرای‌های مدل مشابهت بیشتری دیده شده (شکل ۹-پ) و با داده‌های مشاهده‌ای نیز هماهنگی خوبی دارند. سرعت باد مشاهده‌ای در برخی ساعات صفر بوده که این مقدار توسط مدل برآورد نشده است. بررسی سری زمانی سرعت باد ده متری در اهواز بین اجرای مدل و داده‌های مشاهده‌ای تفاوت‌های بارزی دارد (شکل ۹-ت). سرعت باد برآورد شده توسط مدل بیش از مقدار مشاهده‌ای است. سرعت باد مشاهده‌ای در اهواز تغییرات کمتری نسبت به آبادان و ماهشهر داشته و در برخی روزها برای چند ساعت متوالی مقدار سرعت باد یکسان بوده است.

در روز ۲۴ ام آوریل تفاوت‌های بارزی بین گردوغبار برآورد شده در هر چهار پیکربندی مدل دیده می‌شود. به‌طوری‌که در اجرای P1M6D1 گردوغبار در غرب و جنوب غرب استان خوزستان قابل توجه بوده اما در اجرای طرح‌واره لایه‌مرزی MYJ این گردوغبار بسیار ضعیف است. پهنه‌بندی گردوغبار در هر طرح‌واره لایه‌مرزی با دو خردفیزیک متفاوت نیز مشابه نبوده و از نظر مقدار گردوغبار مقادیر مختلفی را برآورد کرده‌اند. با توجه به ابری بودن آسمان در روز ۲۴ ام آوریل (شکل ۸) امکان مقایسه برون‌داد مدل و تصویر ماهواره مادیس وجود ندارد. غلظت گردوغبار برآورد شده و سرعت باد در روز ۲۴ ام نسبت به روز ۹ ام کمتر است. به نظر می‌رسد شکل‌گیری بادهای جنوبی در جنوب شرق عراق، کویت و جنوب غرب ایران، شرایط را برای توسعه گردوغبار محلی در استان خوزستان فراهم کرده است که باعث شده کمترین دید افقی در آبادان، بستان و اهواز در روز ۲۵ آوریل ثبت شود. ترکیب پیکربندی P1M6D1 (لایه‌مرزی YSU و خردفیزیک) بیشینه گردوغبار را در غرب و جنوب غرب استان خوزستان نشان داده است. این پیکربندی کارایی بهتری در تعیین گردوغبار محلی دارد. پیکربندی P2M2D1 بیشینه سرعت باد و بیشینه غلظت گردوغبار را بیش از دیگر پیکربندی‌ها برآورد کرده است.

در گردوغبار ۲۴ ام آوریل، جهت و سرعت باد و همچنین کانون انتشار گردوغبار نسبت به روز ۹ ام آوریل ۲۰۲۲ متفاوت می‌باشد. سرعت باد در ۲۴ ام آوریل کمتر، جهت باد جنوب غربی و کانون انتشار گردوغبار علاوه بر شرق سوریه و عراق، شمال شرق عربستان می‌باشد. سرعت باد و غلظت گردوغبار در ۲۴ ام آوریل نسبت به روز ۹ ام آوریل کمتر است. در روز ۹ ام آوریل پیکربندی P1M2D1 سرعت باد و غلظت گردوغبار کمتر و در روز ۲۴ ام آوریل پیکربندی P2M2D1 سرعت باد و غلظت گردوغبار بیشتری نسبت به دیگر پیکربندی‌ها داشته‌اند.



شکل ۹. سری زمانی سرعت باد ده متری مشاهداتی و برون داد مدل WRF-Chem توسط چهار پیکربندی مدل در ایستگاه‌های منتخب استان خوزستان (الف) آبادان، (ب) بستان، (پ) ماهشهر، (ت) اهواز، (ث) دزفول، (ج) امیدیه، (چ) بهبهان، (ح) مسجدسلیمان؛ در دوره ۷ تا ۲۵ آوریل ۲۰۲۲.

نوسان سرعت باد در دزفول بسیار کم بوده و در ساعات‌های متوالی تندی باد یکسان ثبت شده است (شکل ۹-ث). اجرای مدل سرعت باد را بیش از داده مشاهداتی برآورد کرده است. در امیدیه (شکل ۹-ج) که نوسان سرعت باد زیاد است، عملکرد مدل خوب بوده و هماهنگی مناسبی بین داده مشاهداتی و خروجی مدل دیده می‌شود.

در بهبهان با سرعت باد مشاهداتی کمتر از ۵ متر بر ثانیه و نوسان ساعتی کوچک (شکل ۹-چ)، بین داده‌های اجرای مدل و داده‌های مشاهداتی تفاوت زیادی دیده می‌شود.

سرعت باد ده متری برآورد شده توسط مدل نسبت به داده مشاهداتی بیشتر است. اجرای P2M2 مدل سرعت را بیش از دیگر اجراها برآورد کرده است. در مسجدسلیمان تغییرات ساعتی سرعت باد زیاد نیست. در این ایستگاه بین اجرای مدل و داده مشاهداتی تفاوت بارزی دیده می‌شود (شکل ۹-ح) و سرعت باد برآورد شده توسط مدل بیش از مقدار مشاهداتی است.

به‌طور کلی در هشت ایستگاه انتخابی، در سری زمانی سرعت باد ده متری در آبادان، ماهشهر و امیدیه هماهنگی خوبی بین مقدار مشاهداتی و اجرای مدل دیده می‌شود. به

P1M6 به‌دست‌آمده است. کمترین میانگین سرعت باد نیز در پیکربندی P1M2 و P1M6 به‌دست‌آمده است. بیشینه سرعت باد در ماهشهر ۹ متر بر ثانیه بوده و برون‌داد مدل بیش برآورد قابل‌توجهی داشته است (جدول ۳). نزدیک‌ترین مقدار برآورد شده مدل به داده‌های مشاهده‌ای با پیکربندی P2M2 و P2M6 بوده است. علاوه‌بر آن P2M2D2 میانگین سرعت باد ۳/۱ متر بر ثانیه را دقیقاً هم‌مقدار مشاهده‌ای برآورد کرده است. در اهواز نیز عملکرد مدل در برآورد سرعت باد ده‌متری خوب نبوده و در برخی پیکربندی‌ها اختلاف بین آنها ۲ تا ۶ متر بر ثانیه می‌رسد (جدول ۳). درحالی‌که میانگین سرعت باد توسط دو طرح‌واره P2M6D2 و P2M2D2 با ۲/۸ متر بر ثانیه نزدیک‌ترین مقدار را به داده‌های مشاهده‌ای ۲/۲ متر بر ثانیه داشته است. در دزفول نیز بیشینه باد برآورد شده در مدل بیش از داده‌های مشاهده‌ای است (جدول ۳) اما از نظر مقداری اختلاف کمتری نسبت به برآورد مدل در اهواز دارند. P1M2D2 و P1M6D2 با ۹/۶ متر بر ثانیه نزدیک‌ترین مقدار را به داده‌های مشاهده‌ای دارند. در دزفول میانگین سرعت باد برآورد شده در دامنه دوم بهتر از دامنه اول است.

نظر می‌رسد در ایستگاه‌های که نوسان ساعتی و مقدار تندی باد بیشتر بوده، مدل عملکرد بهتری داشته است. در مسجدسلیمان، دزفول و بهبهان نیز ضعیف‌ترین عملکرد مدل دیده می‌شود که علت آن را می‌توان ساختار کوهستانی، نوسان‌های ساعتی کوچک و سرعت باد کم در این سه شهر دانست.

در آبادان بیشینه و میانگین سرعت باد ۱۰ متری مشاهده‌ای به‌ترتیب ۱۰ و ۳/۵ متر بر ثانیه بوده است (جدول ۳). دو پیکربندی با طرح‌واره لایه‌مرزی YSU در دامنه اول بیشینه سرعت باد را به داده‌های مشاهده‌ای نزدیک‌تر نشان می‌دهند. در دامنه دوم بیشینه سرعت باد کمتر از مشاهده‌ای و دامنه اول به‌دست‌آمده است. میانگین سرعت باد به‌دست‌آمده در آبادان با طرح‌واره P1M2D2 و P1M2D1 به داده‌های مشاهده‌ای نزدیک‌تر است؛ بنابراین به نظر می‌رسد در شبیه‌سازی بیشینه و میانگین سرعت باد در آبادان پیکربندی لایه‌مرزی P1M2 بهتر از دیگر پیکربندی‌ها می‌باشد. در بستان بیشینه و میانگین سرعت باد مشاهده‌ای به‌ترتیب ۷ و ۲/۵ متر بر ثانیه می‌باشد (جدول ۳). در بستان برون‌داد مدل در بیشینه سرعت باد بیش برآورد داشته است. کمترین مقدار بیشینه سرعت باد توسط پیکربندی

جدول ۳. بیشینه و میانگین باد مشاهده‌ای و چهار پیکربندی مدل.

مشاهداتی	آبادان		بستان		ماهشهر		اهواز		دزفول		امیدیه		بهبهان		مسجدسلیمان	
	میانگین	بیشینه	میانگین	بیشینه	میانگین	بیشینه	میانگین	بیشینه	میانگین	بیشینه	میانگین	بیشینه	میانگین	بیشینه		
	۱۰/۰	۳/۵	۷/۰	۲/۵	۹/۰	۳/۱	۷/۰	۲/۲	۸/۰	۲/۲	۱۲/۰	۳/۵	۷/۰	۲/۱	۱۰/۰	۱/۹
P1M2D1	۱۰/۴	۳/۷	۱۰/۴	۳/۸	۱۲/۹	۳/۸	۱۲/۲	۳/۲	۱۰/۶	۳/۳	۱۳/۰	۳/۵	۱۰/۳	۴/۰	۱۳/۲	۳/۸
P1M2D2	۹/۳	۳/۶	۱۱/۳	۳/۸	۱۱/۸	۳/۶	۱۰/۵	۳/۰	۹/۶	۳/۰	۱۳/۴	۳/۷	۱۰/۲	۳/۹	۱۳/۵	۳/۸
P1M6D1	۱۰/۴	۳/۹	۹/۱	۳/۸	۱۲/۹	۳/۹	۱۲/۲	۳/۲	۱۰/۶	۳/۲	۱۳/۰	۳/۵	۱۰/۴	۴/۰	۱۳/۲	۳/۷
P1M6D2	۹/۳	۳/۷	۹/۵	۳/۹	۱۱/۸	۳/۷	۱۰/۶	۳/۱	۹/۶	۳/۰	۱۳/۴	۳/۷	۱۰/۳	۳/۹	۱۳/۵	۳/۷
P2M2D1	۱۱/۳	۳/۷	۱۰/۶	۴/۰	۱۳/۸	۳/۸	۱۳/۰	۳/۲	۱۲/۶	۳/۸	۱۴/۶	۳/۸	۱۲/۳	۴/۹	۱۵/۰	۴/۶
P2M2D2	۹/۱	۳/۲	۱۱/۳	۴/۲	۱۱/۲	۳/۱	۱۰/۱	۲/۸	۱۱/۳	۳/۱	۱۵/۶	۴/۳	۱۲/۳	۴/۶	۱۵/۷	۴/۹
P2M6D1	۱۱/۳	۳/۹	۱۰/۶	۴/۰	۱۳/۸	۳/۸	۱۳/۰	۳/۲	۱۲/۶	۳/۷	۱۴/۶	۳/۷	۱۲/۱	۴/۹	۱۵/۰	۴/۵
P2M6D2	۹/۱	۳/۳	۱۱/۳	۴/۲	۱۱/۲	۳/۰	۱۰/۱	۲/۸	۱۱/۳	۳/۱	۱۵/۶	۴/۲	۱۲/۱	۴/۶	۱۵/۷	۴/۸

به سری زمانی سرعت باد ده متری (شکل ۹) و شاخص‌های آماری عملکرد مدل را در بستان می‌توان نسبتاً خوب ارزیابی کرد.

بیشترین بایاس خطا ۰/۸، بیشترین رشد خطا ۰/۵۶، ضریب همبستگی بیش از ۰/۵ و ضریب تطابق بیش از ۰/۵۱ در ماهشهر، بیانگر توانایی مدل WRF-Chem در برآورد سرعت باد ده متری می‌باشد. مقایسه سری زمانی سرعت باد ده متری نیز این تطابق را تأیید می‌کند (شکل ۹). در اهواز بایاس خطا ۱، بیشترین رشد خطا ۰/۶۴، ضریب همبستگی بیش از ۰/۵ و ضریب تطابق بیش از ۰/۲۳ از عملکرد نسبتاً خوب مدل می‌باشد. سری زمانی سرعت باد برون‌داد مدل و مشاهداتی نیز تطابق کامل ندارند (شکل ۹) که با نتایج شاخص‌های آماری هماهنگ می‌باشد. در امیدیه حداکثر بایاس خطا ۰/۳ بوده و در اجرا با لایه‌مرزی YSU، بایاس صفر به‌دست آمده است (جدول ۴). بیشترین رشد خطا نیز ۰/۴۷ بوده است. ضریب همبستگی بیش از ۰/۵ و ضریب تطابق بیش از ۰/۵ بیانگر عملکرد خوب مدل در امیدیه است. سری زمانی تغییرات ساعتی سرعت باد ده متری نیز این هماهنگی را نشان می‌داد (شکل ۹).

در سه ایستگاه دزفول، بهبهان و مسجدسلیمان بایاس خطا بیش از ۱، رشد خطا بیش از ۰/۶۹، ضریب همبستگی کمتر از ۰/۵ و ضریب تطابق بسیار ضعیف به‌دست آمده است (جدول ۴) که بیانگر عملکرد ضعیف مدل است. گرچه در بهبهان ضریب همبستگی تنها شاخص آماری است که مقدار نزدیک به ۰/۵ را نشان می‌دهد.

شاخص‌های آماری در دامنه دوم نسبت به دامنه اول تفاوت بارزی ندارد؛ اما در سه ایستگاه اهواز، دزفول و بهبهان عملکرد مدل در دامنه دوم نسبت به دامنه اول بهبود یافته است اگرچه به نتیجه مطلوب نمی‌رسد. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تفکیک‌پذیری شبکه مدل به ۹ کیلومتر در مناطقی که ساختار سطحی و جغرافیایی پیچیده‌تری دارند، برآورد سرعت باد بهتر می‌شود. در مورد مسجدسلیمان که ارتفاع بیشتری از سطح دریای آزاد داشته و نسبت به کانون گردوغبار فاصله بیشتری نیز دارد،

در ۷ تا ۲۵ آوریل ۲۰۲۲ امیدیه با ۱۲ متر بر ثانیه بیشترین بیشینه باد سرعت باد ده متری را در بین هشت ایستگاه انتخابی داشته است (جدول ۳). بیشینه سرعت باد برآورد شده توسط مدل در امیدیه با طرح‌واره PIM2D1 و PIM6D1 با ۱۳ متر بر ثانیه نزدیک‌ترین مقدار را به سرعت باد مشاهداتی داشته است. میانگین سرعت با ۳/۵ متر بر ثانیه نیز توسط این دو طرح‌واره منطبق با داده مشاهداتی به‌دست آمده است.

در بهبهان پیکربندی با لایه‌مرزی YSU بیشینه باد را با ۱۰/۲ متر بر ثانیه نزدیک‌تر به سرعت باد مشاهداتی برآورد کرده است (جدول ۳)، گرچه مقدار برآورد شده توسط مدل نسبت به مشاهداتی اختلاف ۳/۲ متر بر ثانیه دارد. میانگین سرعت باد نیز توسط مدل بیش برآورد شده است. طرح‌واره YSU مقادیر نزدیک‌تری به سرعت باد مشاهداتی داشته است.

در مسجدسلیمان با بیشینه سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه، بیش برآورد مدل اختلاف زیادی با مشاهداتی دارد (جدول ۳). پیکربندی با طرح‌واره YSU مقادیر نزدیک‌تری به سرعت باد مشاهداتی برآورد کرده است.

۳-۳-۲. صحت‌سنجی باد ده متری برون‌داد به کمک روش‌های آماری

به‌منظور بررسی بیشتر و صحت‌سنجی مدل با دقت بالاتر، در ادامه شاخص‌های آماری مورد مقایسه قرار می‌گیرند. نتایج دامنه اول و دوم در جدول ۴ آمده است. در آبادان در دامنه اول، بیشترین بایاس خطا ۰/۴، حداکثر رشد خطا نیز ۰/۴، ضریب همبستگی بیش از ۰/۵ و ضریب تطابق بیش از ۰/۵۴ به‌دست آمده است که بیانگر عمل کرد بسیار خوب مدل است (جدول ۴). بنابراین در آبادان هم سری زمانی سرعت باد (شکل ۹) و هم شاخص‌های آماری بیانگر نتایج خوب مدل WRF-Chem است.

در بستان در دامنه اول، بیشترین بایاس خطا ۱/۵، بیشترین رشد خطا ۰/۷، ضریب همبستگی بیش از ۰/۶۳ و ضریب تطابق بیش از ۰/۲۲ به‌دست آمده است (جدول ۴). با توجه

عملکرد مدل در هردو دامنه خوب نبوده است. به نظر می‌رسد تفکیک‌پذیری شبکه مدل بایستی کمتر از ۹ کیلومتر انتخاب شود تا شرایط میدان باد را بهتر برآورد کند.

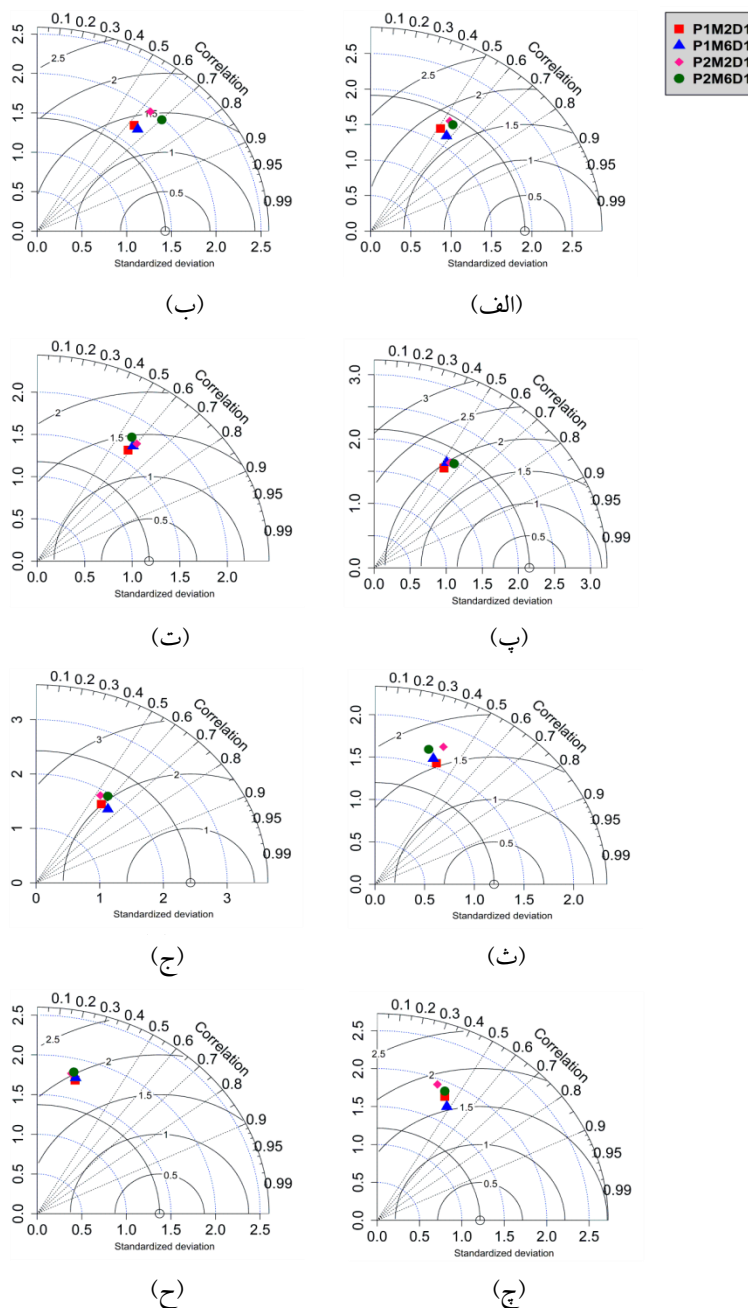
جدول ۴. شاخص‌های آماری صحت‌سنجی باد ده متری برون‌داد مدل WRF-Chem در چهار پیکربندی مدل برای دامنه اول و دوم.

دامنه دوم					دامنه اول					ایستگاه
IOA	r	NMGE	MB	پیکربندی	IOA	r	NMGE	MB	پیکربندی	
۰/۵۴	۰/۴۸	۰/۴۰	۰/۱	P1M2D2	۰/۵۴	۰/۵۱	۰/۴۰	۰/۲	P1M2D1	آبادان
۰/۵۶	۰/۵۴	۰/۳۸	۰/۲	P1M6D2	۰/۵۶	۰/۵۸	۰/۳۸	۰/۴	P1M6D1	
۰/۵۵	۰/۵۳	۰/۳۹	-۰/۳	P2M2D2	۰/۵۴	۰/۵۴	۰/۴۰	۰/۳	P2M2D1	
۰/۵۷	۰/۵۶	۰/۳۸	-۰/۲	P2M6D2	۰/۵۵	۰/۵۶	۰/۳۹	۰/۴	P2M6D1	
۰/۲۷	۰/۵۹	۰/۶۶	۱/۳	P1M2D2	۰/۳۱	۰/۶۳	۰/۶۲	۱/۲	P1M2D1	بستان
۰/۲۹	۰/۶۴	۰/۶۴	۱/۴	P1M6D2	۰/۳۱	۰/۶۶	۰/۶۲	۱/۳	P1M6D1	
۰/۱۵	۰/۶۵	۰/۷۶	۱/۷	P2M2D2	۰/۲۲	۰/۶۴	۰/۷۰	۱/۵	P2M2D1	
۰/۱۶	۰/۶۸	۰/۷۵	۱/۷	P2M6D2	۰/۲۳	۰/۷۰	۰/۶۹	۱/۵	P2M6D1	
۰/۵۱	۰/۴۷	۰/۵۵	۰/۵	P1M2D2	۰/۵۲	۰/۵۳	۰/۵۴	۰/۷	P1M2D1	بندر ماهشهر
۰/۵۰	۰/۴۹	۰/۵۶	۰/۶	P1M6D2	۰/۵۱	۰/۵۲	۰/۵۵	۰/۸	P1M6D1	
۰/۵۴	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۰	P2M2D2	۰/۵۱	۰/۵۴	۰/۵۶	۰/۷	P2M2D1	
۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۵۰	-۰/۱	P2M6D2	۰/۵۲	۰/۵۷	۰/۵۴	۰/۷	P2M6D1	
۰/۳۴	۰/۵۴	۰/۵۵	۰/۸	P1M2D2	۰/۳۰	۰/۵۹	۰/۵۸	۰/۹	P1M2D1	اهواز
۰/۳۱	۰/۵۳	۰/۵۷	۰/۸	P1M6D2	۰/۲۸	۰/۵۹	۰/۶۰	۱/۰	P1M6D1	
۰/۴۱	۰/۵۲	۰/۴۹	۰/۵	P2M2D2	۰/۲۶	۰/۶۰	۰/۶۱	۱/۰	P2M2D1	
۰/۳۸	۰/۵۳	۰/۵۱	۰/۵	P2M6D2	۰/۲۳	۰/۵۶	۰/۶۴	۱/۰	P2M6D1	
۰/۵۸	۰/۵۳	۰/۴۵	۰/۲	P1M2D2	۰/۶۰	۰/۵۸	۰/۴۴	۰/۰	P1M2D1	امیدیه
۰/۶۰	۰/۶۲	۰/۴۳	۰/۲	P1M6D2	۰/۶۲	۰/۶۴	۰/۴۱	۰/۰	P1M6D1	
۰/۵۲	۰/۴۹	۰/۵۲	۰/۷	P2M2D2	۰/۵۶	۰/۵۳	۰/۴۷	۰/۳	P2M2D1	
۰/۵۴	۰/۵۷	۰/۵۰	۰/۷	P2M6D2	۰/۵۷	۰/۵۸	۰/۴۶	۰/۲	P2M6D1	
۰/۱۵	۰/۳۵	۰/۶۳	۰/۸	P1M2D2	۰/۰۷	۰/۴۰	۰/۶۹	۱/۱	P1M2D1	دزفول
۰/۱۲	۰/۳۰	۰/۶۶	۰/۸	P1M6D2	۰/۰۸	۰/۳۷	۰/۶۹	۱/۱	P1M6D1	
۰/۱۶	۰/۴۵	۰/۶۳	۰/۹	P2M2D2	-۰/۱۴	۰/۳۹	۰/۸۷	۱/۶	P2M2D1	
۰/۱۳	۰/۳۶	۰/۶۵	۰/۹	P2M6D2	-۰/۱۲	۰/۳۲	۰/۸۵	۱/۵	P2M6D1	
-۰/۱۱	۰/۴۴	۰/۹۶	۱/۸	P1M2D2	-۰/۱۶	۰/۴۴	۱/۰۱	۱/۹	P1M2D1	بهبهان
-۰/۱۰	۰/۴۹	۰/۹۵	۱/۸	P1M6D2	-۰/۱۵	۰/۴۸	۱/۰۰	۱/۹	P1M6D1	
-۰/۳۵	۰/۴۲	۱/۳۱	۲/۵	P2M2D2	-۰/۴۱	۰/۳۷	۱/۴۴	۲/۸	P2M2D1	
-۰/۳۴	۰/۴۹	۱/۳۰	۲/۵	P2M6D2	-۰/۴۰	۰/۴۲	۱/۴۳	۲/۸	P2M6D1	
-۰/۱۶	۰/۲۴	۱/۱۸	۱/۹	P1M2D2	-۰/۱۵	۰/۲۵	۱/۱۶	۱/۹	P1M2D1	مسجد سلیمان
-۰/۱۲	۰/۲۸	۱/۱۲	۱/۸	P1M6D2	-۰/۱۴	۰/۲۴	۱/۱۴	۱/۸	P1M6D1	
-۰/۴۰	۰/۱۸	۱/۶۵	۳/۰	P2M2D2	-۰/۳۵	۰/۲۱	۱/۵۱	۲/۷	P2M2D1	
-۰/۳۹	۰/۲۳	۱/۶۲	۲/۹	P2M6D2	-۰/۳۳	۰/۲۲	۱/۴۶	۲/۶	P2M6D1	

بین ۰/۷ تا ۰/۶ بوده و کمترین انحراف استاندارد با اجرای P2M6 به دست آمده است (شکل ۱۰). چهار اجرای مدل در بستان نسبت به همدیگر تفاوت بیشتری دارند.

در ماهشهر اجراهای مختلف مدل نتیجه بسیار نزدیکی داشته و ضریب همبستگی بین ۰/۹ تا ۰/۸ داشته‌اند (شکل ۱۰). در اهواز نیز اجرای P2M6 نسبت به سه اجرای دیگر تفاوت دارد. ضریب همبستگی آنها ۰/۵ تا ۰/۶ داشته‌اند.

در شکل ۱۰ نمودار تیلور برای صحت‌سنجی سرعت باد برآورد شده با مدل WRF-Chem ترسیم شده است. این نمودار با استفاده از مقدار انحراف استاندارد و ضریب همبستگی ترسیم می‌شود. در آبادان اجرای P1M6 کمترین انحراف استاندارد را دارد گرچه هر چهار اجرای مدل در محدوده نزدیک به هم قرار دارند. ضریب همبستگی هر چهار اجرا بین ۰/۵ تا ۰/۶ قرار دارد. در بستان نیز ضریب همبستگی هر چهار اجرا



شکل ۱۰. نمودار تیلور صحت‌سنجی چهار پیکربندی مختلف مدل در پیش‌بینی باد در ایستگاه‌های انتخابی استان خوزستان، خوزستان الف) آبادان، ب) بستان، پ) ماهشهر، ت) اهواز، ث) دزفول، ج) امیدیه، چ) بهبهان، ح) مسجدسلیمان؛ ۷ تا ۲۵ آوریل ۲۰۲۲

سامانه همدیدی کم‌فشار عربستان فعال شده و منجر به انتشار گردوغبار می‌شود، غلظت گردوغبار به‌دست آمده از مدل در پیکربندی‌های مختلف، تفاوت دارد. بیشترین غلظت گردوغبار در روز ۷ آوریل برآورد شده است (شکل ۱۱). در این روز دید افقی تا ۲/۵ کیلومتر کاهش یافته است. به‌جز روزهای ۱۷، ۲۰ و ۲۲ آوریل در دیگر روزها افزایش گردوغبار با کاهش دید افقی همراه می‌باشد که نشان‌دهنده هماهنگی برون‌داد مدل و داده‌های مشاهده‌ای است. در روزهای ۱۷، ۲۰ و ۲۲ آوریل که مدل افزایش گردوغبار در آبادان را برآورد کرده، کاهش دید افقی و وقوع گردوغبار گزارش نشده است.

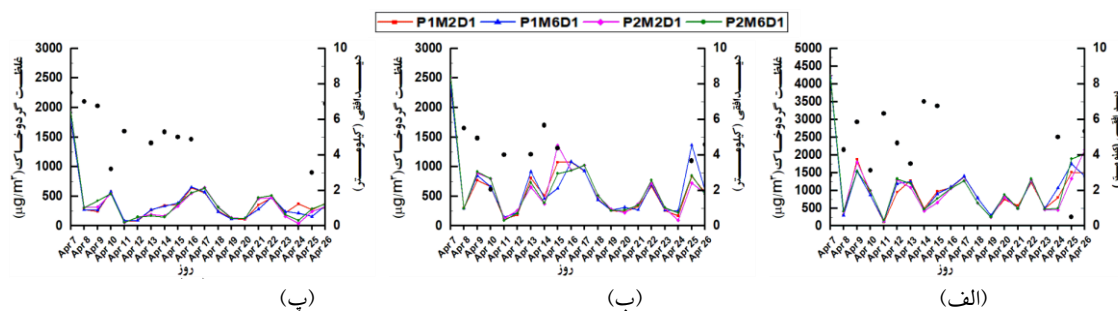
در ماهشهر و امیدیه غلظت گردوغبار کمتر از آبادان برآورد شده است. در هر سه ایستگاه انتخابی گردوغبار در نیمه اول ماه آوریل ۲۰۲۲ به‌خوبی برآورد شده و با کاهش دید افقی (گزارش گردوغبار مشاهده‌ای) هماهنگی دارند؛ اما در نیمه دوم آوریل به‌ویژه از ۲۰ تا ۲۳ام مدل گردوغبار برآورد کرده، اما در ایستگاه‌های هواشناسی گردوغبار گزارش نشده است. با مقایسه سری زمانی گردوغبار (شکل ۱۱) و سری زمانی سرعت باد (شکل ۹) نقش افزایش سرعت باد در افزایش غلظت گردوغبار به‌خوبی مشخص می‌شود.

گردوغبار برآورد شده مدل و دید افقی در آبادان در دو طرح‌واره P1M6 و P2M6 ضریب همبستگی ۰/۴۹- و در ماهشهر نیز در طرح‌واره P1M6 ضریب همبستگی ۰/۴۱- داشته‌اند. در امیدیه بین گردوغبار و دید افقی ضریب همبستگی به دست نیامد.

اجزای مدل در دزفول ضریب همبستگی کمتر از ۰/۵ و انحراف استاندارد بیش از ۲ داشته‌اند (شکل ۱۰). اجرای P1M2 نسبت به دیگر اجزای انحراف استاندارد کمتری داشته است. در امیدیه در اجرای P1M6 نسبت به دیگر اجزای نتیجه بهتری به‌دست آمده است. ضریب همبستگی نیز بین ۰/۵ تا ۰/۷ می‌باشد. در بهبهان اجرای P1M2 نتیجه بهتری نسبت به دیگر اجزای داشته و دیگر اجزای ضریب همبستگی کمتر از ۰/۵ داشته‌اند (شکل ۱۰). برون‌داد مدل در مسجدسلیمان انحراف استاندارد نزدیک ۲ متر بر ثانیه و ضریب همبستگی ۰/۳ داشته است که به نظر می‌رسد اجرای مدل با هر چهار پیکربندی در مسجدسلیمان نسبت به دیگر ایستگاه‌ها ضعیف‌تر است. در ماهشهر و مسجدسلیمان در نمودار تیلور هر چهار پیکربندی‌های نتیجه بسیار نزدیک به هم دارند (شکل ۱۰).

به‌این ترتیب در آبادان و امیدیه که اجرای مدل بسیار خوب بوده، پیکربندی P1M6 (لایه‌مرزی YSU و خردفیزیک WSM6) و در بستان و اهواز که اجرای مدل نسبتاً خوب بوده پیکربندی P2M6 عملکرد بهتری داشته‌اند. در نتیجه خردفیزیک WSM6 نسبت به Lin در شبیه‌سازی سرعت باد عملکرد بهتری دارد.

میانگین روزانه غلظت گردوغبار به‌دست آمده از چهار اجرای مدل با دامنه اول و میانگین دید افقی از ۷ تا ۲۵ آوریل ۲۰۲۲ برای سه ایستگاه آبادان، ماهشهر و امیدیه در شکل ۱۱ ارائه شده است. در آبادان عملکرد مدل در شبیه‌سازی گردوغبار در هر چهار پیکربندی بسیار مشابه بوده و نمودار تغییرات روزانه آنها تقریباً بر هم منطبق است. گرچه از روز ۲۳ آوریل به بعد که



شکل ۱۱. میانگین روزانه غلظت گردوغبار برآورد شده توسط مدل WRF-Chem و دید افقی مشاهده‌ای در الف) آبادان، ب) ماهشهر، پ) امیدیه؛

از ۷ تا ۲۵ آوریل ۲۰۲۲

۴. نتیجه گیری

در تحقیق حاضر در گام اول تحلیلی بر مبنای تعداد روزهای گردوغبار در سال ۲۰۲۲ انجام شد. نتیجه نشان داد که دو ایستگاه بستان و آبادان در استان خوزستان بیشترین تعداد روز گردوغبار را داشته‌اند. همچنین در توزیع فصلی، سه ماه مه، مارس و ژوئیه بیشترین گردوغبار در این استان رخ داده است.

در گام دوم به منظور بررسی توانایی مدل WRF-Chem در شبیه‌سازی باد و گردوغبار در استان خوزستان، بازه زمانی ۷ تا ۲۵ آوریل ۲۰۲۲ انتخاب شد.

توزیع مکانی باد تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال شبیه‌سازی شده توسط هر چهار پیکربندی مدل WRF-Chem با داده‌های اولیه GFS مشابه می‌باشند که بیانگر عملکرد خوب مدل در شبیه‌سازی میدان باد در محدوده انتخابی می‌باشد؛ گرچه در برخی جزئیات و در مقیاس‌های کوچک‌تر تفاوت‌هایی بین آنها وجود دارد.

در صحت‌سنجی سرعت باد ده متری توسط شاخص‌های آماری، کمترین میزان بایاس خطا (MB) و رشد خطا (NMGE) و بیشترین مقدار IOA در ایستگاه‌های آبادان، ماهشهر و امیدیه به دست آمد که نشان‌دهنده عمل کرد بسیار خوب مدل در این سه ایستگاه می‌باشد.

نمودار تیلور بیانگر عملکرد مناسب مدل در برآورد باد ده متری در ایستگاه‌های آبادان، ماهشهر، بستان، اهواز و امیدیه می‌باشد. دو پیکربندی P1M6 و P1M2 نتیجه بهتری نسبت به دو پیکربندی P2M2 و P2M6 داشته‌اند. همچنین بیشینه و میانگین سرعت باد ده متری در آبادان، بستان، امیدیه با YSU نتیجه بهتری داشت. به این ترتیب نمودار تیلور تأثیر لایه‌مرزی YSU را در برآورد باد ده متری بهتر از MYJ نشان می‌دهد.

در ایستگاه‌های آبادان، ماهشهر، اهواز، دزفول و بهبهان، با افزایش تفکیک‌پذیری مکانی در مدل (دامنه دوم) عمل کرد مدل در برآورد میانگین سرعت باد ده متری بهبود یافته است به طوری که مقدار آن به

داده‌های مشاهده‌ای نزدیک‌تر شده و شاخص IOA نیز افزایش یافته است. در نتیجه افزایش تفکیک‌پذیری مکانی مدل WRF-Chem منجر به بهبود شبیه‌سازی سرعت باد می‌شود.

به این ترتیب مدل WRF-Chem در شبیه‌سازی توزیع مکانی باد در تراز زیرین جو و تغییرات ساعتی سرعت باد ده متری در استان خوزستان توانایی خوبی دارد. به منظور بهبود نتیجه و افزایش کارایی مدل در ایستگاه‌های با ساختار کوهستانی پیچیده، افزایش تفکیک‌پذیری مکانی پیشنهاد می‌شود.

توزیع مکانی گردوغبار شبیه‌سازی شده با مدل WRF-Chem و توده گردوغبار مشاهده شده در تصویر سنجنده مادیس هماهنگی خوبی دارند؛ به طوری کانون‌های شکل‌گیری گردوغبار یکی در شرق سوریه و شمال غرب عراق و دیگری در شرق عراق و همچنین شمال عربستان توسط مدل به خوبی شبیه‌سازی شده است. توزیع مکانی گردوغبار به طرح‌واره لایه‌مرزی حساسیت بیشتری نسبت به طرح‌واره خردفیزیک داشت. به این معنا که با تغییر طرح‌واره لایه‌مرزی، در پهنه‌بندی مکانی گردوغبار تفاوت بارزی مشاهده شد.

در گردوغبارهای شدیدتر، توزیع مکانی در هر چهار پیکربندی تقریباً مشابه می‌باشد در حالی توزیع مکانی در گردوغبار ضعیف‌تر در چهار پیکربندی تفاوت‌های بارزتری نشان می‌دهد.

در سری زمانی گردوغبار برآورد شده توسط مدل و دید افقی مشاهده‌ای در آبادان و ماهشهر ضریب همبستگی خوبی بین آن دو به دست آمده و بهترین همبستگی با برون‌داد P1M6 تعیین شد.

نتیجه نهایی به دست آمده از تحقیق حاضر آن است که از میان چهار پیکربندی به کاررفته شده، ترکیب لایه‌مرزی YSU و خردفیزیک WMS6 بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی میدان باد و گردوغبار در استان خوزستان داشته‌اند.

استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و ایستگاه‌های همدیدی در منطقه دریای عمان و دریای عرب. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۵(۲)، ۴۴۱-۴۵۸.

رضازاده، م؛ ایران‌نژاد، پ. و شائو، ی. (۱۳۹۲). شبیه‌سازی گسیل غبار با مدل پیش‌بینی عددی وضع هوا WRF-Chem و با استفاده از داده‌های جدید سطح در منطقه خاورمیانه. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۳۹(۱)، ۱۹۱-۲۱۲.

زرین، آ؛ صالح‌آبادی، ن؛ مفیدی، ع. و داداشی رودباری، ع. (۱۴۰۱). بررسی فصلی گردوغبار در شمال شرق ایران و شبیه‌سازی عددی رخدادهای گردوغبار فرین با مدل WRF-Chem، *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۸(۲)، ۴۲۱-۴۴۰.

Alizadeh Choobari, O., Zawar-Reza, P., & Sturman, A. (2012). Atmospheric forcing of the three-dimensional distribution of dust particles over australia: A case study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D11).

Alizadeh-Choobari, O., Zawar-Reza, P., & Sturman, A. (2014). The "wind of 120 days" and dust storm activity over the sisthan basin. *Atmospheric research*, 143, 328-341.

Bahmanzade, F., Ghader, S., Haghshenas, S. A., & Yazgi, D. (2019). A case study of WRF model performance to hindcast of 10-m wind and 2-m temperature against the satellite and synoptic stations data over the gulf of oman and the arabian sea. *Journal of the Earth and Space Physics*, 45(2), 441-458. (In Perisan). <https://doi.org/10.22059/jesphys.2019.267709.1007051>

Bilal, M., Solbakken, K., & Birkelund, Y. (2016). Wind speed and direction predictions by WRF and windsim coupling over nygårdstjell. *Journal of Physics: Conference Series*, 753(8), 082018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/753/8/082018>.

Chawla, I., Osuri, K. K., Mujumdar, P. P., & Niyogi, D. (2018). Assessment of the weather research and forecasting (WRF) model for simulation of extreme rainfall events in the upper ganga basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(2), 1095-1117.

Chen, F., Janjić, Z., & Mitchell, K. (1997). Impact of atmospheric surface-layer parameterizations in the new land-surface scheme of the NCEP mesoscale Eta model. *Boundary-Layer Meteorology*, 85(3), 391-421.

حمایت مالی

مقاله حاضر از طرح پژوهشی با شماره ۴۶۲۳-۸۱۱ استخراج شده است.

مراجع

اصغری، م؛ مشکوتی، ا.ح؛ رنجبر، ع. و مرادی، م. (۱۳۹۹). مطالعه و ارزیابی طرحواره‌های گسیل گرد و خاک در مدل WRF-Chem توفان شرق و جنوب شرق کشور (مطالعه موردی ۱۱ تا ۱۳ آگوست ۲۰۱۸، *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۴۳، ۸۷-۹۸.

بهمنزاده، ف؛ قادر، س؛ حق‌شناس، س.ع. و یازگی، د. (۱۳۹۸). بررسی موردی عملکرد مدل WRF جهت پیش‌بینی میدان باد تراز ۱۰ متر و دمای تراز دومتر با

Dayal, K. K., Cater, J. E., Kingan, M. J., Bellon, G. D., & Sharma, R. N. (2020). Evaluation of the WRF model for simulating surface winds and the diurnal cycle of wind speed for the small island state of fiji. *Journal of Physics: Conference Series*, 1618(6), 062025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1618/6/062025>.

Chen, F., & Dudhia, J. (2001). Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review*, 129(4), 569-585.

Chou, M.-D., & Suarez, M. J. (1994). An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models. *Technical Memorandum*, 102 P(104606).

Eltahan, M., & Magooda, M. (2018). Sensitivity of WRF microphysics schemes: Case study of simulating a severe rainfall over egypt. *Journal of Physics: Conference Series*.

Flaounas, E., Kotroni, V., Lagouvardos, K., Klose, M., Flamant, C., & Giannaros, T. M. (2017). Sensitivity of the WRF-Chem (v3.6.1) model to different dust emission parameterisation: Assessment in the broader mediterranean region. *Geoscientific Model Development*, 10(8), 2925-2945.

Gbode, I. E., Dudhia, J., Ogunjobi, K. O., & Ajayi, V. O. (2019). Sensitivity of different physics schemes in the WRF model during a west african monsoon regime. *Theoretical and Applied Climatology*, 136, 733-751.

Gilmore, M. S., Straka, J. M., & Rasmussen, E. N. (2004). Precipitation and evolution sensitivity in simulated deep convective

- storms: Comparisons between liquid-only and simple ice and liquid phase microphysics. *Monthly Weather Review*, 132(8), 1897-1916.
- Grell, G. A., & Dévényi, D. (2002). A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*, 29(14), 38-31-38-34.
- Herman, J., Bhartia, P., Torres, O., Hsu, C., Sefstor, C., & Celarier, E. (1997). Global distribution of uv-absorbing aerosols from nimbus 7/toms data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 16911-16922.
- Hong, S.-Y., Noh, Y., & Dudhia, J. (2006). A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, 134(9), 2318-2341.
- Hong, S.-Y., & Lim, J.-O. J. (2006). The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 42(2), 129-151.
- Janjić, Z. I. (1994). The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review*, 122(5), 927-945.
- Jankov, I., Grasso, L. D., Sengupta, M., Neiman, P. J., Zupanski, D., Zupanski, M., Lindsey, D., Hillger, D. W., Birkenheuer, D. L., & Brummer, R. (2011). An evaluation of five arw-WRF microphysics schemes using synthetic goes imagery for an atmospheric river event affecting the california coast. *Journal of Hydrometeorology*, 12(4), 618-633.
- Karimkhani, M., Azadi, M., Meshkatee, A. H., & Saadatabadi, A. R. (2021). Evaluation of WRF microphysics schemes in the simulation of a squall line over iran using radar and reanalysis data. *Nexo Revista Cientifica*, 34(02), 682-697.
- Kumar, R., Barth, M., Pfister, G., Naja, M., & Brasseur, G. (2014). WRF-Chem simulations of a typical pre-monsoon dust storm in northern india: Influences on aerosol optical properties and radiation budget. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(5), 2431-2446.
- LeGrand, S. L., Polashenski, C., Letcher, T. W., Creighton, G. A., Peckham, S. E., & Cetola, J. D. (2019). The afwa dust emission scheme for the gocart aerosol model in WRF-Chem v3. 8.1. *Geoscientific Model Development*, 12(1), 131-166.
- Lin, Y.-L., Farley, R. D., & Orville, H. D. (1983). Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *Journal of Applied Meteorology and climatology*, 22(6), 1065-1092.
- Lu, H., & Shao, Y. (2001). Toward quantitative prediction of dust storms: An integrated wind erosion modelling system and its applications. *Environmental Modelling & Software*, 16(3), 233-249.
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., & Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 16663-16682.
- Mobarak Hassan, E., Ghafarian, P., Bahrami, F., Karimkhani, M., & Sabori, M. (2019). Sensitivity of mesoscale dust simulation to WRF-Chem boundary layer scheme (case study: March 14th 2012). *Journal of Air Pollution and Health*, 4(3). <https://doi.org/10.18502/japh.v4i3.1547>
- Prakash, P. J., Stenchikov, G. L., Kalenderski, S., Osipov, S., & Bangalath, H. K. (2015). The impact of dust storms on the arabian peninsula and the red sea. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(1), 199-222.
- Prospero, J. M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S. E., & Gill, T. E. (2002). Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the nimbus 7 total ozone mapping spectrometer (toms) absorbing aerosol product. *Reviews of Geophysics*, 40(1), 2-1-2-31. <https://doi.org/10.1029/2000rg000095>
- Rajeevan, M., Kesarkar, A., Thampi, S., Rao, T., Radhakrishna, B., & Rajasekhar, M. (2010). Sensitivity of WRF cloud microphysics to simulations of a severe thunderstorm event over southeast india. *Annales Geophysicae*.
- Song, H.-J., & Sohn, B.-J. (2018). An evaluation of WRF microphysics schemes for simulating the warm-type heavy rain over the korean peninsula. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 54, 225-236.
- Yin, D., Nickovic, S., Barbaris, B., Chandy, B., & Sprigg, W. A. (2005). Modeling wind-blown desert dust in the southwestern united states for public health warning: A case study. *Atmospheric Environment*, 39(33), 6243-6254. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.07.009>
- Yin, D., Nickovic, S., & Sprigg, W. A. (2007). The impact of using different land cover data on wind-blown desert dust modeling results in the southwestern united states. *Atmospheric Environment*, 41(10), 2214-2224. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.10.061>