

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

الهام مبارک حسن^{۱*}، مهناز کریم‌خانی، فائزه نوری

*-گروه محیط‌زیست، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

09123613977 mobarak_e@yahoo.com

۲- گروه علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

09123018896 mahnaz_karimkhany@yahoo.com

۳- کارشناس پژوهش، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

faezeh.noori@gmail.com

Elham Mobarak Hassan^{1*} Mahnaz Karimkhani² and Faezeh Noori

^{1*} Department of Environment, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

mobarak_e@yahoo.com, 9123613977

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

mahnaz_karimkhany@yahoo.com, 09123018896

³ Research expert, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science, Tehran, Iran

faezeh.noori@gmail.com

چکیده

برآورد صحیح جهت و سرعت باد منجر به افزایش دقت در شبیه‌سازی و پیش‌بینی گردوغبار می‌شود. با توجه به این که استان خوزستان تحت تاثیر گردوغبار قرار دارد، هدف از این مطالعه ارزیابی میدان باد شبیه‌سازی شده مدل WRF-Chem در شرایط وقوع و عدم وقوع گردوغبار است. به این منظور مدل برای روزهای ۷ تا ۲۵ آوریل سال ۲۰۲۲ برای چهار پیکربندی مختلف (دو طرح‌واره لایه‌مرزی MYJ و YSU و دو طرح‌واره خردفیزیک Lin و WSM6) و همچنین دو دامنه ۲۷ و ۹ کیلومتر اجرا شد. ارزیابی برون داد مدل WRF-Chem نشان داد، پیکربندی‌های مختلف بیشترین تأثیر را در تنیدی باد داشته و در جهت باد نقش کمتری دارند. بیشینه سرعت باد برآورد شده توسط مدل در تمامی ایستگاه‌ها بیش از داده‌های مشاهده‌ای بوده 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 به‌دست آمده از مدل WRF-Chem نشان می‌دهد که تأثیر 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

پدیده گردوغبار یکی از انواع پدیده‌های طبیعی است که تحت تأثیر 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، 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** آب و هوایی مؤثر بر ایجاد و انتقال گردوغبار، باد برجسته‌ترین **کمیت** مؤثر بر تحرک پذیری ذرات **می‌باشد**، به‌طوری‌که در 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. به‌طوری‌که 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 شناخته‌شده 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 موردتوجه محققان در سرتاسر جهان قرار دارد که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. قابلیت طرح‌واره‌های مختلف مدل WRF-Chem **جهت** محاسبه‌ی شار عمودی گردوغبار مورد مطالعه قرار گرفته است (فلائوناس و همکاران، ۲۰۱۷). در این پژوهش مدل ۱۲ بار اجرا شد. به این ترتیب که ۳ طرح‌واره‌ی شار گردوغبار با ۴ پیکربندی مختلف در نظر گرفته شد. در نهایت مقایسه‌ی 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 منطقه‌ی خاص، تفاوت چشمگیر این شبیه‌سازی‌ها آشکار گردید. همچنین نشان داده شد با تغییر ضرایب رابطه‌ی شار گردوغبار برای **همسان‌کردن** نتایج شبیه‌سازی با مشاهدات تجربی برای یک منطقه، نتایج شبیه‌سازی برای منطقه‌ی دیگر از واقعیت فاصله می‌گیرد. طوفان گردوغبار رخ داده در شبه 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 جبهه‌ی سرد به منطقه‌ی خاورمیانه کانون‌های گردوغبار در مناطق بیابانی فعال شده و حدود ۷۴٪ میزان کل انتشار صورت گرفته در دامنه‌ی شبهه‌سازی 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 سرمایش سطح زمین و بالای جو می‌شود اما میان آن‌ها را گرم می‌کند.

در ایران نیز عزیزاده چوباری و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از مدل WRF-Chem اثر بادهای ۱۲۰ روزه بر طوفان‌های گردوغبار منطقه‌ی 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. کاربرد مدل WRF-Chem نشان داد که سرعت باد به دلیل اثر **کانالیزه‌شدن** ناشی از مسیر عبوری از میان کوه‌ها تشدید می‌شود. **اصغری و همکاران، (۱۳۹۹) به مطالعه و ارزیابی طرح‌واره‌های گسیل گردوغبار در مدل WRF-Chem توفان شرق و جنوب شرق کشور پرداختند. نتایج به‌دست 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 منطقه‌ی سیستم‌ها به کمک مدل WRF-Chem توسط عزیززاده چوباری و همکاران، (۲۰۱۲) بررسی شده و مشخص شد، 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 (رضا زاده 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).

حساسیت سنجی 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 می‌نماید (مبارک حسن و همکاران، ۲۰۱۹). علاوه بر آن Mellor-Yamada- (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 (بهمن زاده و همکاران، ۲۰۱۹؛ بیلال و همکاران، ۲۰۱۶؛ دایال و همکاران، ۲۰۲۰). در تحقیق بیلال و همکاران (۲۰۱۶) به منظور صحت سنجی جهت و سرعت باد ده متری از دو شاخص آماری root mean square error (RMSE) و standard deviation error (STDE) و در تحقیق بهمن زاده و همکاران (۱۳۹۸) از ضریب همبستگی پیرسون و نمودار آماری تیلور استفاده شده است. مدل WRF چرخه روزانه سرعت باد ده متری را به خوبی 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 همکاران، ۲۰۱۸؛ گبودی و همکاران، ۲۰۱۹؛ گیلومور و همکاران، ۲۰۰۴؛ کریم خانی و همکاران، ۲۰۲۱) اشاره نمود. حساسیت چهار طرح‌واره خردفیزیک (Thompson و Morrison، WSM6، Lin) در مدل WRF در شبیه‌سازی یک پدیده طوفان تندی و باد ۱۰ متری در جنوب شرقی هند بررسی شد (راجیوان و همکاران، ۲۱۰). 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 WSM6 و Lin در شبیه‌سازی باد سطحی با مشاهدات تطابق کامل دارند (جانکو و همکاران، ۲۰۱۱).

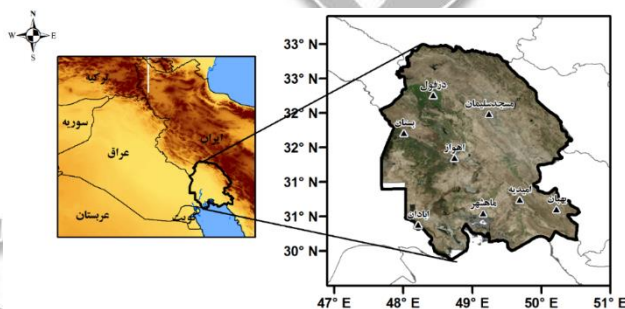
کریم خانی و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی طرح‌واره‌های خردفیزیک ابر (Thompson، Morrison، WSM6، Lin) و Thompson aerosol aware در مدل WRF را در شبیه‌سازی پدیده خط تندوزه و همچنین باد سطح زمین پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که در شبیه‌سازی باد سطح زمین در مرتبه اول طرح‌واره Lin و در مرتبه دوم طرح‌واره WSM6 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 همدیدی 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. از این رو دستیابی به بهترین پیکربندی مدل عددی WRF-Chem در شبیه‌سازی میدان باد و همچنین انتشار و انتقال گردوغبار به‌سوی

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 **بیکربندی مناسب** برای این شرایط تعیین گردد.

۲. روش پژوهش

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



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

داده‌های مشاهداتی

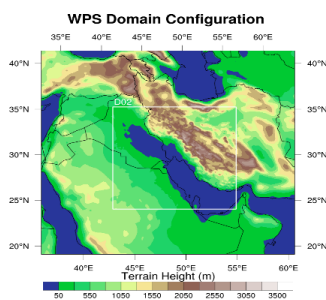
در ابتدا به منظور شناسایی زمان وقوع گردوغبار داده‌های همدیگه کنترل کیفی شده جهت و سرعت باد سطحی (ده متری)، دمای سطحی (دومتری)، دید افقی و کد پدیده حاضر، دما، رطوبت نسبی و فشار هوا مربوط به سال ۲۰۲۲ از سازمان هواشناسی کشور در ایستگاه‌های موردنظر تهیه شدند. با استفاده از دو معیار دید افقی **کمتر از ۱۰۰۰ 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 یک‌بار گردوغبار ثبت شده، به‌عنوان روز گردوغباری در نظر گرفته شد. علاوه بر آن داده‌های PM10 مربوط به شهر اهواز از سازمان محیط‌زیست تهیه شد.

داده‌های GFS

به‌منظور بررسی پهنه‌بندی باد، داده‌های موردنظر از GFS (داده‌های تحلیل) با تفکیک‌پذیری زمانی ۶ ساعته، تفکیک‌پذیری مکانی $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ و در ۳۱ تراز فشاری در راستای عمودی 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.

تنظیم مدل

در این تحقیق از مدل WRF-Chem نسخه ۳/۴ برای شبیه‌سازی توفان گردوغبار استفاده شده است. تعداد دامنه‌ی انتخابی " دو " بوده است. این مدل با تفکیک افقی ۲۷ کیلومتر برای دامنه‌ی اول و ۹ کیلومتر برای دامنه‌ی 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. دامنه‌ی اول به گونه‌ای انتخاب شده است که علاوه بر کشور ایران، مناطقی که چشمه‌ی گردوغبار هستند، (مانند عراق، عربستان و سوریه) را پوشش می‌دهد و دامنه‌ی 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 دامنه‌ی اول هر ۱۰ دقیقه (نوزده کیلومتر) و دامنه‌ی دوم هر ۲ دقیقه (چهار کیلومتر) تکرار می‌شود. از نگاشت 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.

جدول ۱ تنظیم مدل WRF-Chem

Model Properties	Scheme
Resolution	27, 9 & 3 km
Vertical level	32 level
Physics	
Cumulus	Grell 3D scheme(Grell, Denvery2002)
PBL	Yonsei university scheme (YSU) (Hong, Noh and Dudhia (2006)) MYJ Janjic (1994, MWR)
Surface Layer	Monin-Obukhov (Janjic Eta) scheme(Chen,1997)
Microphysics	Lin scheme (Lin, Farley and Orville (1983, JCAM)) WSM 6-class graupel scheme Hong and Lim (2006, JKMS)
Longwave Radiation	RRTM scheme (Mlawer et al. (1997, JGR))
Shortwave Radiation	Goddard shortwave(Chou and Suarez (1994, NASA Tech Memo))
Land surface process	Noah Land Surface Model(Chen and Dudhia,2001)
Chemical	
Chem_Opt =401	4 bin Dust
emissions scenario Dust Scheme	AFWA (LeGrand et al., 2019)

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 (۲۰۱۰) 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 به‌عنوان، 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. به‌منظور بررسی تأثیر تفکیک‌پذیری 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 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
1	YSU	Lin	D1	P1M2D1
	YSU	Lin	D2	P1M2D2
2	YSU	WSM6	D1	P1M6D1
	YSU	WSM6	D2	P1M6D2
3	MYJ	Lin	D1	P2M2D1
	MYJ	Lin	D2	P2M2D2
4	MYJ	WSM6	D1	P2M6D1
	MYJ	WSM6	D2	P2M6D2

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. به‌این ترتیب مدل چهار بار و در دو دامنه اجرا شد.

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

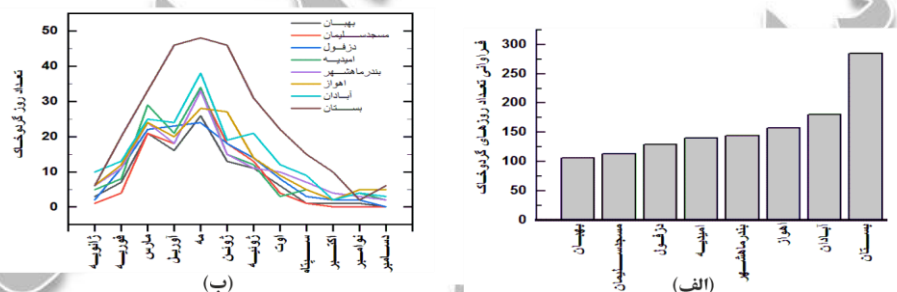
بیشینه، میانگین و سری زمانی سرعت باد ده متری در صحت‌سنجی برون‌داد مدل می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور با استفاده از **سرعت باد مشاهداتی**، برون‌داد مدل در هشت ایستگاه انتخابی در استان خوزستان صحت‌سنجی شد. علاوه بر آن نمودارهای سری زمانی **سرعت باد مشاهداتی** و مدل از ۷ تا ۲۵ آوریل ترسیم و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

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

بررسی شرایط گردوغبار در سال ۲۰۲۲

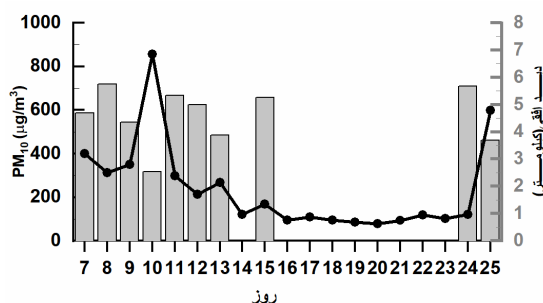
در سال ۲۰۲۲، بستان با ۱۴۹ روز بیشترین تعداد روزهای گردوغبار را داشته است که نسبت به دیگر شهرها تفاوت بارزی دارد (شکل ۳-الف). آبادان و اهواز به ترتیب با ۱۰۹ و ۹۶ روز در مرتبه‌های بعدی قرار دارند. در سال ۲۰۲۲، بستان و آبادان واقع در غرب استان بیشترین تأثیر را از گردوغبارهای فرامرزی می‌گیرند. بستان گردوغباری بیش از دیگر شهرها و از جمله آبادان را تجربه نموده است که از جمله دلایل آن نزدیکی به مهم‌ترین منابع گردوغبار (عراق و سوریه) و **همچنین مجاورت با تالاب هورالعظیم را می‌توان اشاره نمود. تالاب هورالعظیم در طی سال‌های اخیر با مشکلات مختلفی مواجه بوده و بخش‌های آن خشک شده است که می‌تواند منشأ گردوغبار باشد.** مسجدسلیمان واقع در شمال شرق استان با ۷۰ روز کمترین روز گردوغباری را داشته است. به‌این 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. به‌این 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 در 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 موردبررسی قرارداد.



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

در ادامه میانگین روزانه PM_{10} 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 PM_{10} تا حدود ۶۰۰ میکروگرم بر مترمکعب افزایش داشته است که بیانگر وقوع توفان گردوغبار است. پس از آن با کاهش PM_{10} و افزایش دید افقی از شدت گردوغبار کاسته شده و مجدداً در روز ۱۰ آوریل با افزایش PM_{10} تا ۹۰۰ میکروگرم بر مترمکعب و **کاهش** دید افقی تا ۲/۵ کیلومتر شدت گردوغبار افزایش می‌یابد. از روز ۱۱ ام به بعد از شدت گردوغبار کاسته می‌شود. از روز ۱۶ ام تا ۲۳ هیچ گردوغباری در اهواز گزارش نشده و مقدار PM_{10} کمتر از ۲۰۰ میکروگرم بر مترمکعب می‌باشد. مجدداً از روز ۲۴ ام توده گردوغبار دیگری منجر به کاهش دید افقی تا ۵/۵ کیلومتر و افزایش PM_{10} تا ۶۰۰ میکروگرم می‌شود. به‌این 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 ۲۴ ام آوریل انتخاب شدند. به‌این علت یک روز پیش از

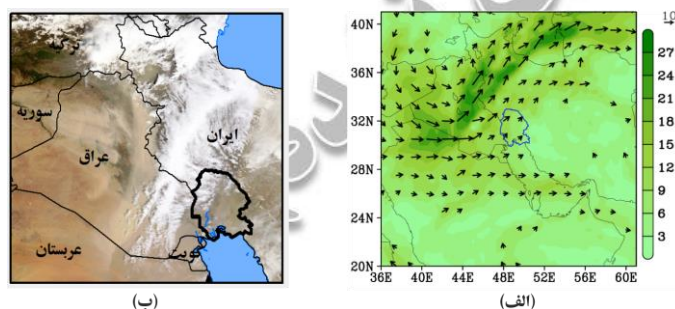
گردوغبار شدید تحلیل می‌شود تا بتوان برآورد مدل را در هنگام انتشار گردوغبار در کانون و میدان باد مؤثر در انتقال آن به سوی استان خوزستان بررسی نمود.



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

مقایسه پهنه‌بندی باد و گردوغبار برون‌داد مدل

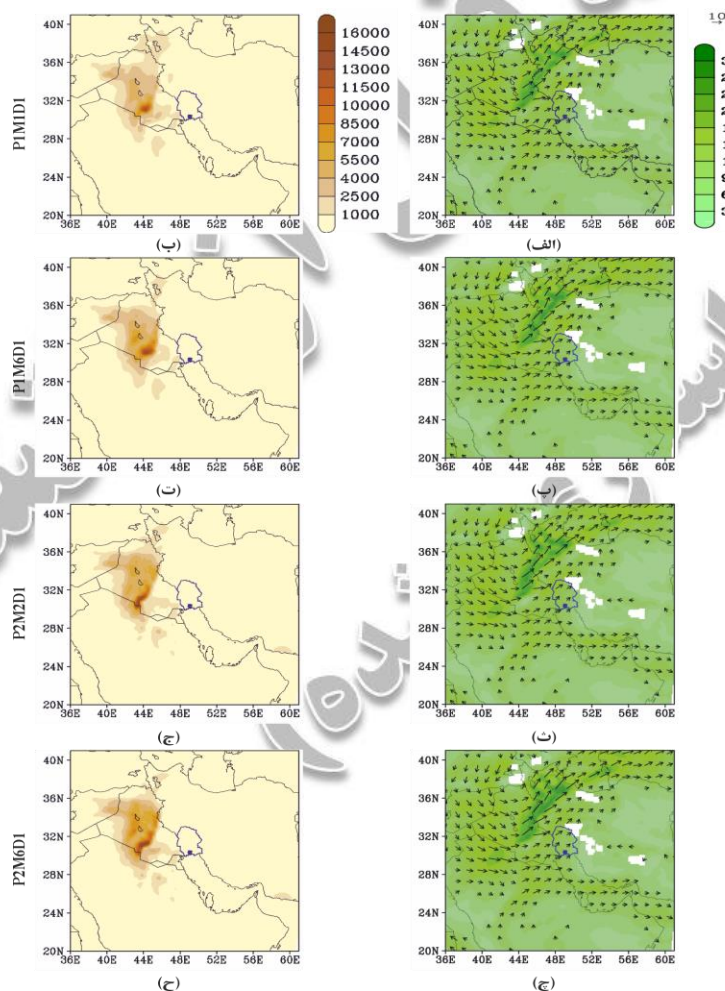
در آوریل ۲۰۲۲، دو سامانه متفاوت همدیدی منجر به وقوع گردوغبار می‌گردند. با گسترش کم‌فشار در شرق ترکیه و شمال عراق همراه با ناوه ارتفاعی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و گسترش پشته فشاری آزرورز به غرب عراق (نشان داده نشده) بادهای شمال غربی در این منطقه شکل می‌گیرند. **وزش بادهای شمال غربی در محدوده شرق سوریه و شمال 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 تاثیرگذار 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.



شکل ۵ الف) جهت و سرعت باد (متر بر ثانیه) 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

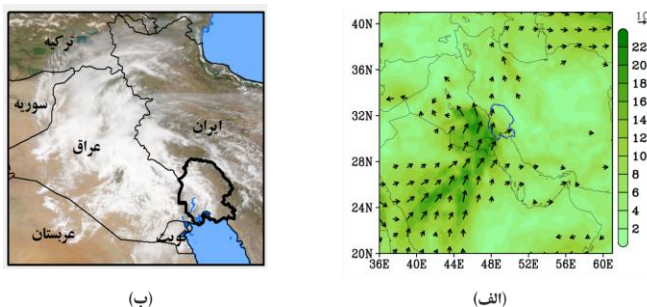
برون‌داد مدل در روز ۹ آوریل ساعت ۰۶ UTC در شکل ۶ نمایش داده شده است. پیل سمت راست میدان باد و پیل سمت چپ پهنه‌بندی گردوغبار را نشان می‌دهد. **جهت باد شمال غربی در شمال غرب عراق و شرق سوریه و بادهای جنوب غربی در شرق عراق در هر چهار پیکربندی مدل به طور مشابه شبیه‌سازی شده است (شکل ۶).** منطقه توسعه بیشینه سرعت باد در شرق سوریه،

شمال عربستان و شرق عراق نیز توسط هر چهار پیکربندی برآورد شده است. توزیع میدان باد تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال به دست 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. به طوری که حداکثر سرعت باد در محدوده مورد نظر در P1M2D1، ۳۰ متر بر ثانیه و در سه پیکربندی دیگر ۳۳ متر بر ثانیه به دست 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 در حالی 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 هبانه 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 نموده است. به نظر می‌رسد تأثیر لایه‌مرزی بر پهنه‌بندی کلی گردوغبار بیشتر از **خردفیزیک** است.



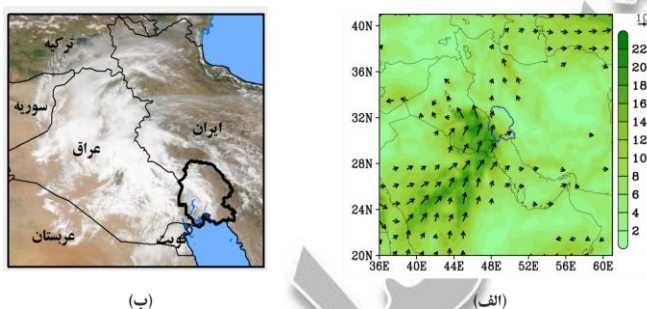
شکل ۶ برون داد مدل برای چهار پیکربندی انتخابی؛ پهنه‌بندی جهت و سرعت باد (متر بر ثانیه) (الف) P1MP2D1، (ب) P1M6D1، (پ) P2M2D1 و (ت) P2M6D1؛ پهنه‌بندی گردوغبار سطحی (ث) P1MP2D1، (ج) P1M6D1، (چ) P2M2D1 و (ح) P2M6D1 در ۹ آوریل ۲۰۲۲ ساعت ۶ UTC

در روز ۲۴ آوریل ساعت ۰۶ UTC، بیشینه سرعت باد با جهت جنوب و جنوب غربی سر تا سر مرکز تا شمال شرق عربستان را در



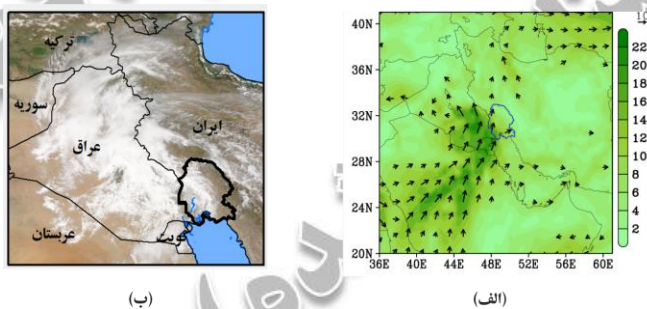
برگرفته و تا جنوب شرق عراق امتداد می یابند)

شکل ۷-الف). دو بیشینه باد یکی بر روی عربستان و دیگری بر روی کویت و جنوب شرق عراق دیده می شود. استان خوزستان تحت تأثیر بادهای جنوبی غربی می باشد.



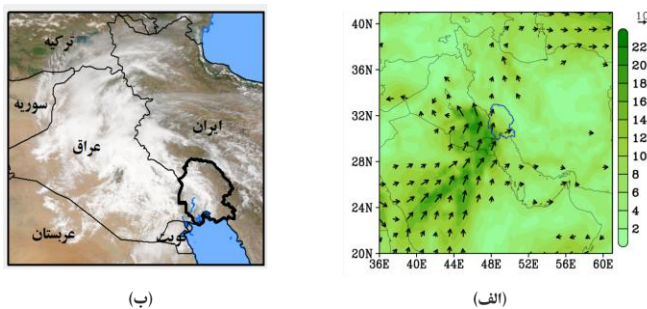
شکل ۷ الف) جهت و سرعت باد (متر بر ثانیه) در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال حاصل از GFS روز ۲۴ آوریل ساعت ۰۶ UTC سال ۲۰۲۲ و (ب) تصویر ماهواره ترا سنجنده مادیس روز ۲۴ آوریل ۲۰۲۲

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 می شود که منشأ شکل گیری گردوغبار نسبت به روز ۹ آوریل متفاوت باشد. در روز ۲۴ ام به دلیل پوشش ابری متراکمی که تمامی عراق و غرب ایران را در برگرفته، امکان آشکار سازی گردوغبار در تصویر سنجنده مادیس نمی باشد)

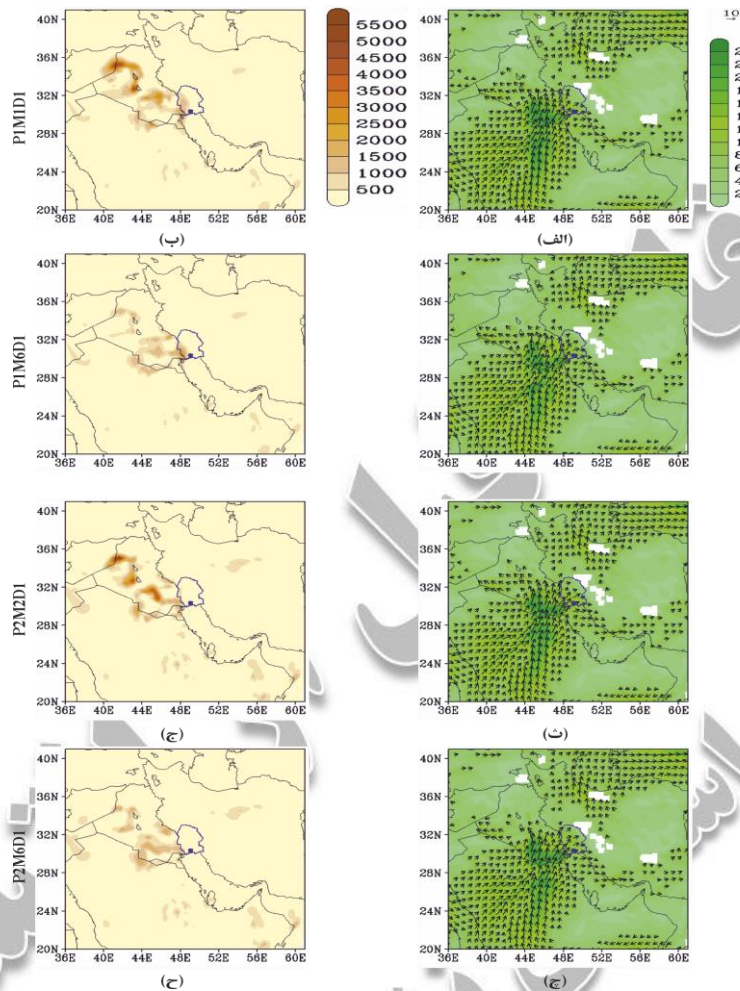


شکل ۷-الف).

جهت و باد غالب بر آورد شده توسط هر چهار پیکربندی (شکل ۸) مدل مشابه با داده اولیه GFS)



شکل ۷-الف) 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 نموده 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 هبانه 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 نموده است.



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

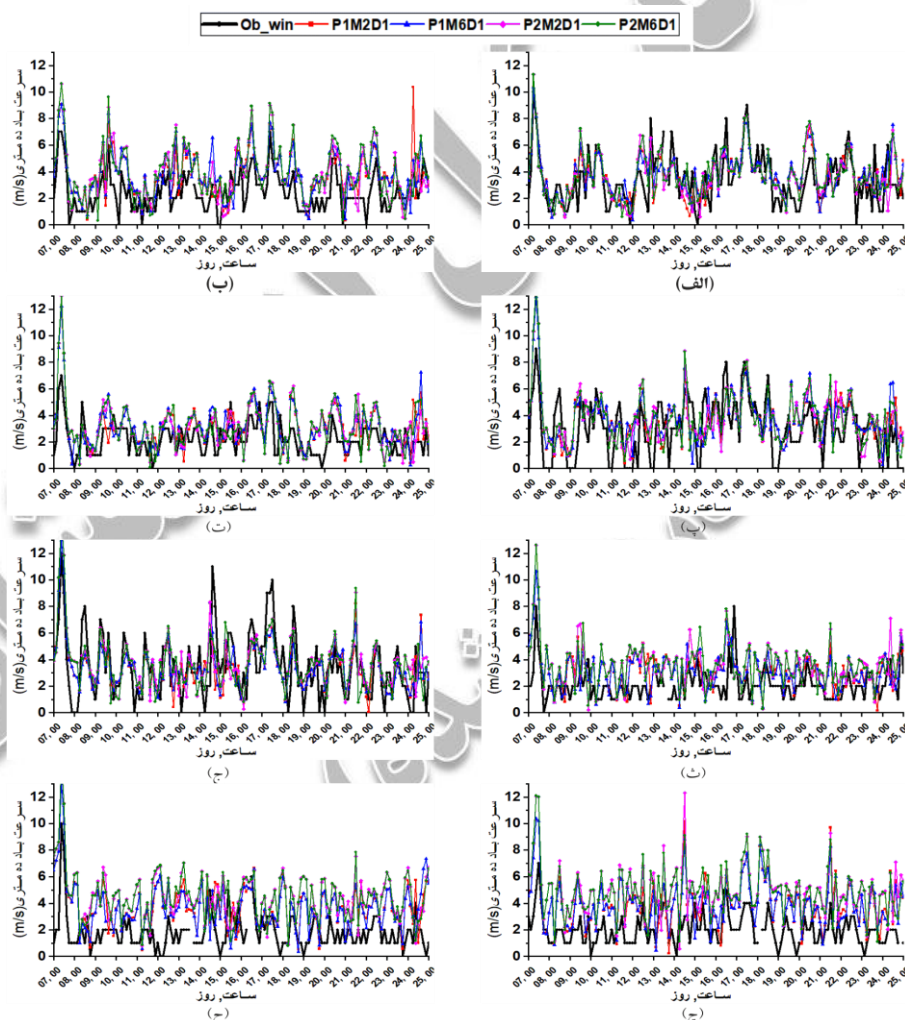
در روز ۲۴ ام آوریل تفاوت‌های بارزی بین گردوغبار برآورد شده در هر چهار پیکربندی مدل دیده می‌شود. به طوری که در اجرای P1M6D1 گردوغبار در غرب و جنوب غرب استان خوزستان قابل توجه بوده اما در اجرای طرح‌واره لایه‌مرزی MYJ این گردوغبار بسیار ضعیف است. پهنه‌بندی گردوغبار در هر طرح‌واره لایه‌مرزی با دو **خردفیزیک** متفاوت نیز مشابه نبوده و از نظر مقدار گردوغبار مقادیر مختلفی را برآورد نموده‌اند. با توجه به ابری بودن آسمان در روز ۲۴ ام آوریل (شکل ۸) امکان مقایسه برون داد 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 نموده 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 نموده 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.

بررسی سری زمانی باد ده متری برون داد مدل

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 ام آوریل تطابق بسیار خوبی نشان می‌دهد.



شکل ۹ سری زمانی سرعت باد ده متری مشاهده‌ای و برون‌داد 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 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 مشاهداتی 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 نموده 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 اجرای های مدل مشابهت بیشتری دیده شده (شکل ۹-پ) و با داده مشاهداتی نیز هماهنگی خوبی دارند. سرعت باد مشاهداتی در برخی ساعت‌ها صفر بوده که این مقدار توسط مدل برآورد نشده است. بررسی سری زمانی سرعت باد ده متری در اهواز بین اجرای مدل و داده مشاهداتی تفاوت‌های بارزی دارد (شکل ۹-ت). سرعت باد برآورد شده توسط مدل بیش از مقدار مشاهداتی است. سرعت باد مشاهداتی در اهواز تغییرات کمتری نسبت به آبادان و ماهشهر داشته و در برخی روزها برای چند ساعت متوالی مقدار سرعت باد یکسان بوده است.

نوسانان سرعت باد در دزفول بسیار کم بوده و در ساعت‌های متوالی تندی باد یکسان ثبت شده است (شکل ۹-ث). اجرای مدل سرعت باد را بیش از داده مشاهداتی برآورد نموده 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 سرعت را بیش از دیگر اجراها برآورد نموده 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 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 مشاهداتی به ترتیب 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 داده مشاهداتی نزدیک‌تر نشان می‌دهند. در دامنه دوم بیشینه سرعت باد کمتر از مشاهداتی و دامنه اول به‌دست آمده است. میانگین سرعت باد به‌دست آمده در آبادان با طرح‌واره P1M2D2 و P1M2D1 به داده مشاهداتی 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 مشاهداتی به ترتیب 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 P1M6 به‌دست آمده است. کمترین میانگین سرعت باد نیز در پیکربندی P1M2 و P1M6 به‌دست آمده است.

بیشینه سرعت باد در ماهشهر ۹ متر بر ثانیه بوده و برون‌داد مدل بیش برآورد قابل توجه ای داشته است (جدول ۳). نزدیک‌ترین مقدار برآورد شده مدل به داده مشاهداتی با پیکربندی P2M2 و P2M6 بوده است. علاوه بر آن P2M2D2 میانگین سرعت باد ۳/۱ متر بر ثانیه را دقیقاً هم‌مقدار مشاهداتی برآورد نموده است. در اهواز نیز عملکرد مدل در برآورد سرعت باد ده متری خوب نبوده و در برخی پیکربندی‌ها اختلاف بین آن‌ها ۲ تا ۶ متر بر ثانیه می‌رسد (جدول ۳). در حالی که میانگین سرعت باد توسط دو طرح‌واره P2M6D2 و P2M2D2 با ۲/۸ متر بر ثانیه نزدیک‌ترین مقدار را به داده مشاهداتی ۲/۲ متر بر ثانیه داشته است. در دزفول نیز بیشینه باد برآورد شده در مدل بیش از داده مشاهداتی 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 داده مشاهداتی دارند. در دزفول میانگین سرعت باد برآورد شده در دامنه دوم بهتر از دامنه اول است.

جدول ۳ بیشینه و میانگین باد مشاهداتی و چهار پیکربندی مدل

مشاهداتی	آبادان		بستان		ماهشهر		اهواز		دزفول		امیدیه		بهبهان		مسجدسلیمان	
	بیشینه	میانگین	بیشینه	میانگین	بیشینه	میانگین	بیشینه	میانگین	بیشینه	میانگین	بیشینه	میانگین	بیشینه	میانگین	بیشینه	میانگین
	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	۳/۲	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	۳/۱	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	۳/۲	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	۳/۲	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

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 P1M2D1 و P1M6D1 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 نموده 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 نزدیکی‌تری به سرعت باد مشاهداتی برآورد نموده است.

صحت سنجی باد ده متری برون‌داد به کمک روش‌های آماری

به‌منظور بررسی بیشتر و صحت سنجی 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 به سری زمانی سرعت باد ده متری (شکل ۹) و شاخص‌های آماری عملکرد مدل را در بستان می‌توان نسبتاً خوب ارزیابی نمود.

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 می‌نماید (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 برون داد 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.

جدول ۴ شاخص‌های آماری صحت سنجی باد ده متری برون داد مدل WRF-Chem در چهار پیکربندی مدل برای دامنه اول و دوم

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

-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

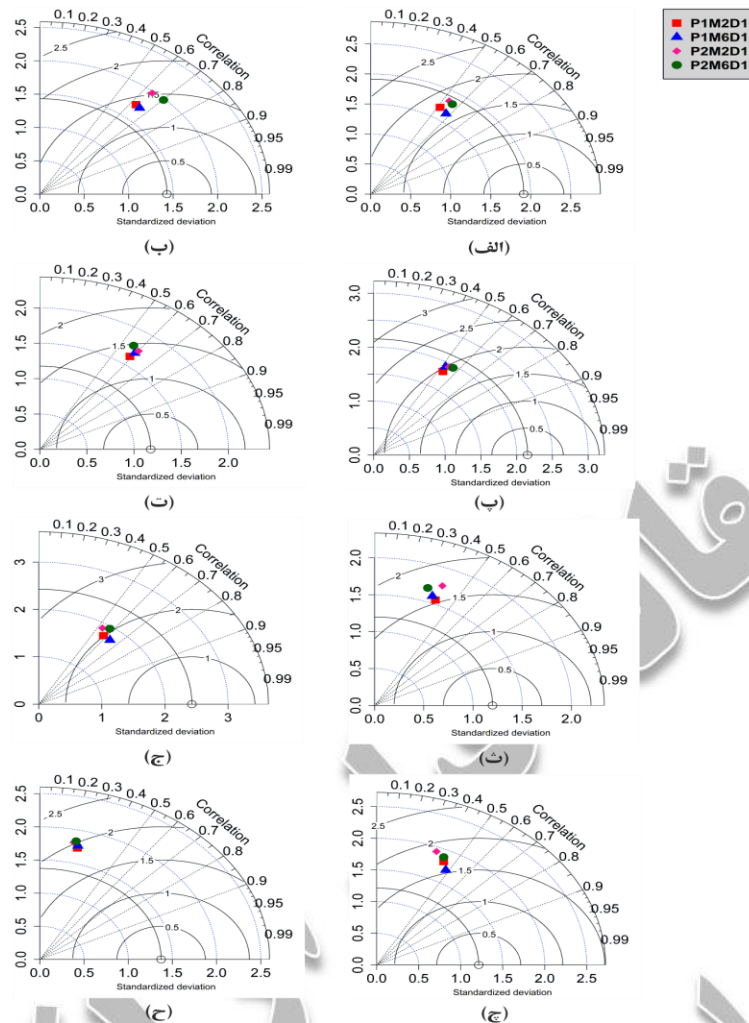
شاخص‌های آماری در دامنه دوم نسبت به دامنه اول تفاوت بارزی ندارد؛ اما در سه ایستگاه اهواز، دزفول و بهبهان عملکرد مدل در دامنه دوم نسبت به دامنه اول بهبود یافته است اگرچه به نتیجه مطلوب نمی‌رسد. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تفکیک پذیری شبکه مدل به ۹ کیلومتر در مناطقی که ساختار سطحی و جغرافیایی پیچیده‌تری 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، عملکرد مدل در هر دو دامنه خوب نبوده است. به نظر می‌رسد تفکیک‌پذیری شبکه مدل بایستی کمتر از ۹ کیلومتر انتخاب شود تا شرایط میدان باد را بهتر برآورد نماید.

در شکل ۱۰ نمودار تیلور برای صحت سنجی 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 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.

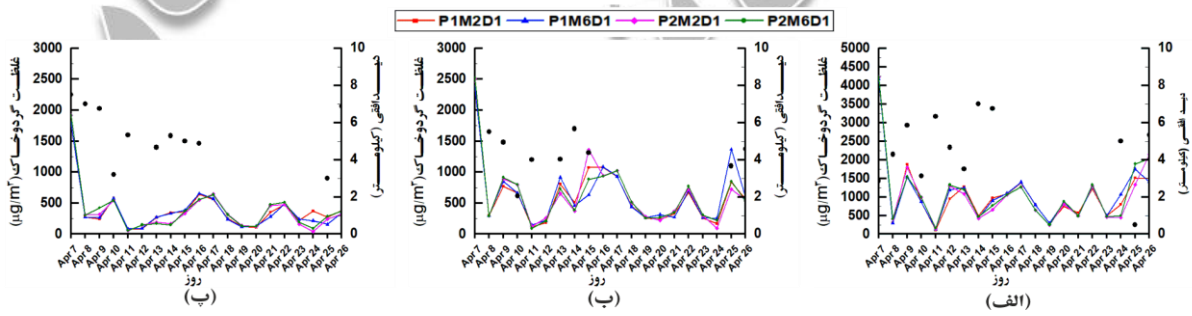
اجراهای مدل در دزفول ضریب همبستگی کمتر از ۰/۵ و انحراف استاندارد بیش از ۲ داشته‌اند (شکل ۱۰). اجرای P1M2 نسبت به دیگر اجراها انحراف استاندارد کمتری داشته است. در امیدیه در اجرای P1M6 نسبت به دیگر اجراها نتیجه بهتری به دست آمده است. ضریب همبستگی نیز بین ۰/۵ تا ۰/۷ می‌باشد. در بهبهان اجرای P1M2 نتیجه بهتری نسبت به دیگر اجراها داشته و دیگر اجراها ضریب همبستگی کمتر از ۰/۵ داشته‌اند (شکل ۱۰). برون داد 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).

به این ترتیب در آبادان و امیدیه که اجرای مدل بسیار خوب بوده، پیکربندی P1M6 (لایه مرزی 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.



شکل ۱۰ نمودار تیلور صحت سنجی 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

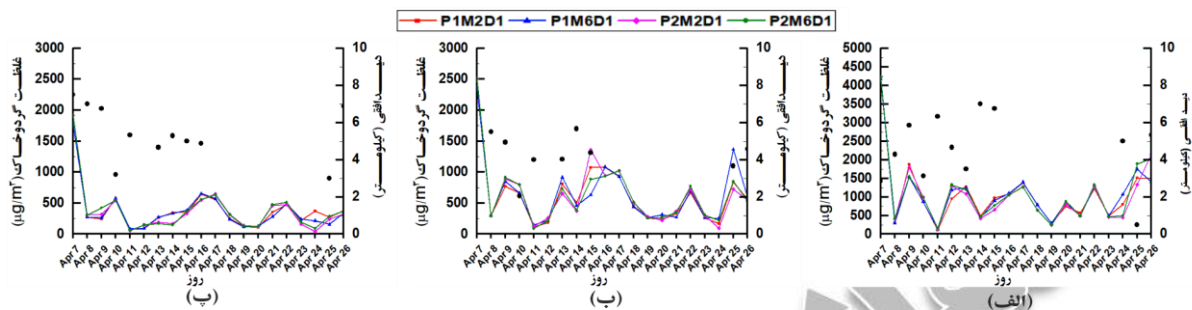
میانگین روزانه غلظت گردوغبار به دست آمده از چهار اجرای مدل با دامنه اول و میانگین دید افقی از ۷ تا ۲۵ آوریل ۲۰۲۲ برای سه ایستگاه آبادان، ماهشهر و امیدیه در



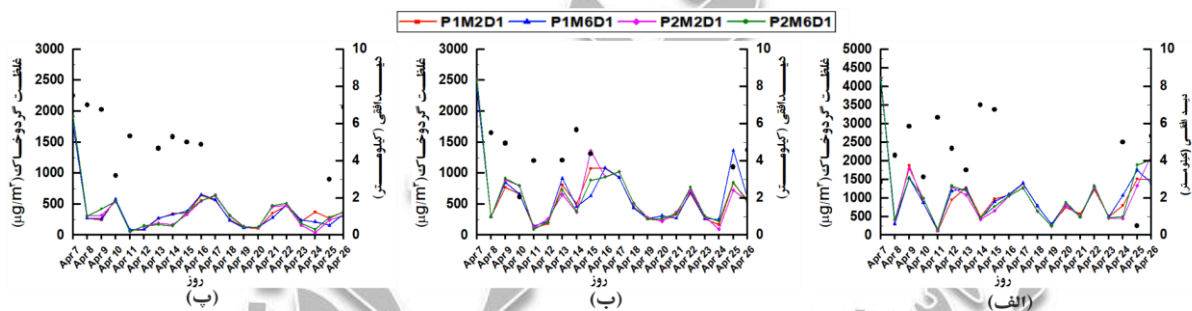
شکل ۱۱ ارائه شده است. در آبادان عملکرد مدل در شبیه‌سازی گردوغبار در هر چهار پیکربندی بسیار مشابه بوده و نمودار تغییرات روزانه آن‌ها تقریباً بر هم منطبق است. گرچه از روز ۲۳ آوریل به بعد که سامانه همدیدی کم‌فشار عربستان فعال شده و منجر به انتشار گردوغبار می‌شود، غلظت گردوغبار به دست آمده از مدل در پیکربندی‌های 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. به جز روزهای ۱۷، ۲۰ و ۲۲ آوریل در دیگر روزها افزایش گردوغبار با کاهش دید افقی همراه می‌باشد که نشان‌دهنده هماهنگی برون‌داد مدل و داده

مشاهداتی است. در روزهای ۱۷، ۲۰ و ۲۲ آوریل که مدل افزایش گردوغبار در آبادان را برآورد نموده، 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 به خوبی برآورد شده و با کاهش دید افقی (گزارش گردوغبار مشاهداتی) هماهنگی دارند؛ اما در نیمه دوم آوریل به ویژه از ۲۰ تا ۲۳ ام مدل گردوغبار برآورد نموده، 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 به خوبی مشخص می‌گردد. 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.



شکل ۱۱ میانگین روزانه غلظت گردوغبار برآورد شده توسط مدل WRF-Chem و دید افقی مشاهداتی در الف) آبادان، ب) ماهشهر، پ) امیدیه؛ از ۷ تا ۲۵ آوریل ۲۰۲۲

۴. نتیجه‌گیری

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 صحت سنجی 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 لایه مرزی YSU را در برآورد باد ده متری بهتر از MYJ نشان می‌دهد.

در ایستگاه‌های آبادان، ماهشهر، اهواز، دزفول و بهبهان، با افزایش تفکیک پذیری 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 تفکیک پذیری 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 تفکیک پذیری 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 که 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 لایه مرزی حساسیت بیشتری نسبت به طرح‌واره **خردفیزیک** داشت. به این معنا که با تغییر طرح‌واره لایه مرزی، در پهنه‌بندی مکانی گردوغبار تفاوت بارزی مشاهده شد.

در گردوغبارهای شدیدتر، توزیع مکانی در هر چهار پیکربندی تقریباً مشابه می‌باشد در حالی که 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 برون داد P1M6 تعیین شد. نتیجه نهایی به دست آمده از تحقیق حاضر آن است که از میان چهار پیکربندی به کاررفته شده، ترکیب لایه مرزی YSU و **خردفیزیک** WMS6 بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی میدان باد و گردوغبار در استان خوزستان داشته‌اند.

حمایت مالی

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

منابع

بهمن‌زاده، فاطمه، قادر، سرمد، حق‌شناس، سیدعباس و یازجی، دانیال. (۱۳۹۸). بررسی موردی عملکرد مدل WRF جهت پیش‌یابی میدان باد تراز ۱۰ متر و دمای تراز دومتر با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و ایستگاه‌های هم‌دید در منطقه دریای عمان و دریای عرب. فیزیک زمین و فضا، ۴۵(۲)، ۴۴۱-۴۵۸.

<https://doi.org/10.22059/jesphys.2019.267709.1007051>

رضازاده، مریم، ایران‌نژاد، پرویز و شائو، یاپینگ. (۲۰۱۳). شبیه‌سازی گسیل غبار با مدل پیش‌بینی عددی وضع هوا WRF-Chem و با استفاده از داده‌های جدید سطح در منطقه خاورمیانه. فیزیک زمین و فضا، ۳۹(۱)، ۱۹۱-۲۱۲.

<https://doi.org/10.22059/jesphys.2013.31955>

زرین، آذر، صالح‌آبادی، نرگس، مفیدی، عباس و داداشی رودباری، عباسعلی. (۲۰۲۲). بررسی فصلی گردوغبار در شمال شرق ایران و شبیه‌سازی عددی رخدادهای گردوغبار فرین با مدل WRF-Chem فیزیک زمین و فضا، ۴۸(۲)، ۴۲۱-۴۴۰.

<https://doi.org/10.22059/jesphys.2022.330319.1007361>

- 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 sistan basin. *Atmospheric research*, 143, 328-341.
- Asghari, M., Ranjbar, A., Moradi, M., & Mashkooti, A. H. (2020). Tudy and evaluation of dust and soil dispersion patterns in WRF-Chem model during the east and southeast storm of iran (case study: August 11-13, 2018). *Climatology Research, ISC 43*, 87-89.(In Persian).
- 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 nygårdstfjell. *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.
- 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>
- 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 parametrisation: 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.
- Herman, J., Bhartia, P., Torres, O., Hsu, C., Seftor, C., & Celarier, E. (1997). Global distribution of uv-absorbing aerosols from nimbus 7/toms data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 16911-16922.
- 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.
- 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.
- 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*.
- Rezazadeh, M., Irannejad, P., & Shao, Y. (2013). Dust emission simulation with the WRF-Chem model using new surface data in the middle east region. *Journal of the Earth and Space Physics*, 39(1), 191-212. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jesphys.2013.31955>
- 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>
- Zarrin, A., Salehabadi, N., Mofidi, A., & Dadashi-Roudbari, A. A. (2022). Investigation of seasonal dust in northeastern iran and numerical simulation of extreme dust events using WRF-Chem model. *Journal of the Earth and Space Physics*, 48(2), 421-440. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jesphys.2022.330319.1007361>
- Zarrin, A., Salehabadi, N., Mofidi, A., & Dadashi-Roudbari, A. A. (2022). Investigation of seasonal dust in northeastern iran and numerical simulation of extreme dust events using WRF-Chem model. *Journal of the Earth and Space Physics*, 48(2), 421-440. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jesphys.2022.330319.1007361>

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

Introduction

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 transmission of dust and aerosols can be useful to mitigate harmful effects. However, despite numerous studies, predicting dust events and their transmission remains challenging. Wind speed, vegetation, and soil structure are the most important factors in local and regional dust generation. 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 due to its geographical location. Wind plays a crucial role in the emission and transmission 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 for the wind field during dust events and transferring it to Khuzestan is necessary. Given the significance of this issue, the aim of this study was 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 scenario.

Data and Method

To achieve this, meteorological and environmental data from 2020 to 2022 were collected from the Iran meteorology and environmental organization. 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 scheme YSU and MYJ as well as Lin and WMS6 cloud microphysics scheme for two horizontal resolution of 27 and 9 km.

Conclusion

The results of the model were compared with the initial GFS data and the direction and wind speed of 10 meters observed. 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 the 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 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 the 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 YSU boundary layer in estimating 10-meters wind better than 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 formation center in eastern Syria and northwest of Iraq, eastern Iraq and northern Saudi Arabia is well simulated by model. In the horizontal distribution of dust, the boundary layer scheme has more effect than the microphysical scheme.

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