

حساسیت‌سنجی میدان باد سطحی شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF به شرایط اولیه و طرح‌واره‌های پارامترسازی لایه مرزی سیاره‌ای (مطالعه موردی: منطقه خلیج فارس)

سیاوش غلامی^۱، سرمد قادر^{۲*}، حسن خالقی زواره^۳ و پروین غفاریان^۴

^۱دانشجوی دکتری، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، ایران

^۲دانشیار، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳دانشیار، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، ایران

^۴استادیار، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۳۰)

چکیده

در این پژوهش عملکرد مدل WRF برای میدان باد سطحی و حساسیت این مدل نسبت به شرایط اولیه و مرزی و طرح‌واره‌های لایه مرزی سیاره‌ای در طول چندین تاریخ منتخب به صورت موردی روی خلیج فارس ارزیابی می‌شود. به دلیل وجود رویکردهای متفاوت در تولید و توسعه داده‌های تحلیل و بازتحلیل (مانند سامانه داده‌گواری) و به کارگیری روش‌های مختلف پارامترسازی در طرح‌واره‌های لایه مرزی سیاره‌ای، این تحقیق برای شناسایی مناسب‌ترین انتخاب از بین شرایط اولیه و مرزی متنوع و طرح‌واره‌های مختلف لایه مرزی هدف‌گذاری شده است. برای این منظور سه مجموعه داده (دو بازتحلیل و یک تحلیل) شامل ERA-Interim، NCEP-R2 و NCEP-FNL و شش طرح‌واره لایه مرزی سیاره‌ای (دو غیر محلی و چهار محلی) به همراه طرح‌واره‌های سطحی مرتبط با آنها انتخاب شده است. برای ارزیابی مدل از ۲۲ ایستگاه هواشناسی هم‌مدیدی واقع در منطقه و مشاهدات دو ماهواره QuikSCAT و ASCAT استفاده می‌شود. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد وقتی شبیه‌سازی باد مدل با ایستگاه‌های هواشناسی هم‌مدیدی مقایسه می‌شود، صرف‌نظر از نوع طرح‌واره لایه مرزی، دو مجموعه داده ERA-Interim و NCEP-FNL که به عنوان شرایط اولیه و مرزی استفاده می‌شوند، عملکرد بهتری نسبت به NCEP-R2 دارند. با در نظر گرفتن طرح‌واره‌ها، بهترین نتایج از ترکیب طرح‌واره YSU با داده‌های شرط اولیه ERA-Interim برای سرعت باد و NCEP-FNL برای جهت باد استخراج می‌شود. مقایسه خروجی مدل با داده‌های باد دو ماهواره QuikSCAT و ASCAT نشان می‌دهد تفاوت فاحشی بین پیکربندی‌های مختلف دیده نمی‌شود. با وجود این، طرح‌واره‌های YSU و ACM2 به ترتیب منجر به تولید سرعت و جهت باد نزدیک به مشاهدات QuikSCAT می‌شوند. همه پیکربندی‌های مدل حاصل از تمام طرح‌واره‌ها، تقریباً نتایج مشابهی در مقایسه با مشاهدات ASCAT دارند به جز طرح‌واره YSU که میدان باد را اندکی بهتر از سایر طرح‌واره‌ها شبیه‌سازی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: میدان باد، مدل WRF، شرایط اولیه، داده‌های بازتحلیل، خلیج فارس

۱ مقدمه

خلیج فارس که از نظر اقتصادی، تجاری، انرژی، سیاسی، نظامی، جغرافیایی و حتی تاریخ و تمدن، پهنه آبی حساس و بی‌مانندی برای کل جهان و امور بین‌الملل محسوب می‌شود، مهم‌ترین محور ارتباطی بین ایران و آفریقا، اروپا، آسیای جنوبی و جنوب شرقی است. وجود مخازن مملو از نفت خام و گاز طبیعی در خلیج فارس و نواحی ساحلی آن و وجود گسترده‌ترین صنایع مرتبط با کشف و استخراج این منابع، بیانگر نقش بی‌نظیر این منطقه در تأمین تقاضای جهانی برای انرژی است؛ بنابراین نقش بسیار پررنگی در صادرات انرژی و سایر کالاها به دنیا ایفا می‌کند. درک و شناخت ماهیت جوی و اقلیمی این منطقه، برگ برنده منازعات اقتصادی است. در راستای شناخت پدیده‌های جوی، در عمل باید حساسیت این منطقه به‌عنوان بخشی از شناخت علمی در بین پژوهشگران احساس شود، اما آن‌چنان‌که شایسته است، مطالعات گسترده و متعدد از دیدگاه اقلیمی و هواشناسی در منطقه انجام نگرفته است.

از آنجاکه جو زمین پویا است، شرایط اولیه و مرزی (initial and boundary conditions) در مدل‌سازی و شبیه‌سازی‌های جوی، نقش کلیدی در تخمین وضعیت آینده آن ایفا می‌کنند. علاوه‌براین، دقت پیش‌بینی‌های یک مدل پیش‌بینی عددی به‌ویژه در ترازهای پایین جو به شدت به پارامترسازی‌های فیزیکی لایه مرزی سیاره‌ای و لایه سطحی وابسته است. در این تحقیق حساسیت و عملکرد مدل تحقیقاتی و پیش‌بینی وضع هوا (Weather Research and Forecasting (WRF) (اسکامارک و همکاران، ۲۰۰۸) به نوع شرایط اولیه و مرزی و تأثیر این عامل بر شبیه‌سازی باد در کنار نوع انتخاب طرح‌واره لایه مرزی سیاره‌ای یا PBL (Planetary Boundary Layer) برای شبیه‌سازی میدان باد به‌عنوان یکی از متغیرهای شاخص در هواشناسی بررسی می‌شود. با توجه به انتخاب‌های متنوع داده‌های ورودی مدل و همچنین بسته

پارامترسازی (parametrization) PBL و SFC (surface)، هدف پژوهش، یافتن جواب این سؤال است که برای میدان باد، کدام‌یک از این انتخاب‌ها برآورد بهتری نسبت به سایرین دارد. باید توجه داشت که هرچه زمان شبیه‌سازی طولانی‌تر باشد، نتایج از پوشش زمانی جامع‌تر پدیده‌های تأثیرگذار روی ناحیه شبیه‌سازی برخوردار می‌شود. به بیان دیگر بازه طولانی‌مدت به آشکارسازی عوامل مؤثر خارج از خود ناحیه تحت مطالعه منتج می‌شود و ما را به سمت اثرهای این عوامل و دلایل تأثیرپذیری حوزه شبیه‌سازی از آنها هدایت می‌کند. برای مثال یکی از عوامل تأثیرگذار در شبیه‌سازی فصلی خلیج فارس، پدیده فصلی (seasonal) و منطقه‌ای (regional) جریان مانسون است که چگونگی تأثیر مثبت یا منفی یا حتی بی‌تأثیر بودن دوره مانسون بر شبیه‌سازی‌های مدل، خود نیازمند تحلیل و تفسیر جامع است. در مقیاس زمانی طولانی‌تر شبیه‌سازی‌های چندساله، باید اثرهای پدیده‌هایی جهانی (global) مانند ال‌نینو روی خلیج فارس تحلیل و بررسی شود. حتی شبیه‌سازی در مقیاس زمانی دهه، اثرهایی خارج از خود اقلیم منطقه به‌عنوان بخشی از کره زمین به جای خواهد گذاشت (برای نمونه، فعل و انفعال لکه‌های خورشیدی). هرچند شبیه‌سازی بلندمدت بسیار باارزش و مفید است و براساس دوره شبیه‌سازی، حوزه‌های جدیدی از پژوهش را برای مطالعه اثر پدیده‌های منطقه‌ای و جهانی روی خلیج فارس معرفی می‌کند، اما هدف این مطالعه تنها تمرکز بر تأثیر ویژگی‌های بی‌نظیر خلیج فارس (مانند جغرافیای خاص آن و شکل‌گیری پدیده‌ای موسوم به باد شمال) بر شبیه‌سازی‌های مدل است و به همین دلیل در این مطالعه به تعداد محدودی از چند تاریخ اکتفا می‌شود. سایر محققان نیز پژوهش‌ها و شبیه‌سازی‌های مشابه مطالعه حاضر را به‌صورت موردی و برای چند تاریخ منتخب پیگیری کرده‌اند و حتی در برخی پژوهش‌ها به مقایسه طرح‌واره‌های مختلف لایه مرزی

نقطه‌ضعفی برای آنها محسوب می‌شود (کمپو و همکاران، ۲۰۱۱). با وجود این، مجموعه داده‌های بلندمدت بازتحلیل، امکان ارزیابی دقیق‌تر پدیده‌های جوی به‌ویژه تغییرپذیری رویدادهای حدی را فراهم می‌کند (استرلینگ و همکاران، ۲۰۰۸).

مدل WRF به‌طور گسترده در تحقیقات هواشناسی و پیش‌بینی وضعیت جوی به‌کار می‌رود. بعضی از فرایندها در جو به‌طور کامل با بخش دینامیکی قابل حل نیستند و باید پارامترسازی شوند. طی نیم قرن گذشته، پیشرفت قابل توجهی در پارامترسازی فرایندهای PBL شکل گرفته است. وظیفه اصلی طرح‌واره‌های لایه مرزی سیاره‌ای، انتقال قائم گرما، رطوبت و تکانه است. هرکدام از این طرح‌واره‌ها با یک یا چند طرح‌واره خاص لایه سطحی جفت شده‌اند و طرح‌واره‌های لایه سطحی شرایط مرزی پایین‌تر را برای PBL مهیا می‌کنند. در مدل WRF فرایندهای PBL یا با طرح‌واره‌های بستار (closure) محلی یا با بستار غیرمحلی پارامترسازی می‌شوند. در رویکرد محلی فقط از کمیت‌های معلوم نقاط مجاور عمودی برای تعیین کمیت‌های مجهول در آن نقطه استفاده می‌شود در حالی که در رویکرد غیرمحلی از مقادیر تمام عمق PBL برای به‌دست آوردن کمیت‌های مجهول استفاده می‌شود.

عمده‌ترین اختلاف مدل‌های منطقه، محدود در نوع طرح‌واره‌های پارامترسازی فیزیکی و فرمول‌بندی عددی است. در این پژوهش از بین مدل‌های منطقه محدود، مدل پیش‌بینی و تحقیقاتی وضع هوای WRF انتخاب شده است و هدف این مقاله تعیین عملکرد شرایط اولیه و مرزی و همچنین طرح‌واره‌های لایه مرزی سیاره‌ای برای مدل WRF با استفاده از مقایسه داده‌های بازتحلیل و تحلیل مختلف برای میدان باد در افق پیش‌بینی بیست‌وچهار ساعته برای منطقه خلیج فارس است.

مدل WRF دو هسته دینامیکی شامل هسته دینامیکی ARW (Advanced Research WRF) و هسته دینامیکی

سیاره‌ای در مدل WRF برای یک تک‌روز نیز پرداخته‌اند (برای مثال، شین و هونگ، ۲۰۱۱). به‌عنوان نمونه‌ای دیگر می‌توان به مطالعه بورگه و همکاران (۲۰۰۸) اشاره کرد که تحلیل حساسیت‌سنجی جامعی با استفاده از انتخاب‌های فیزیکی مختلف (از جمله در لایه مرزی سیاره‌ای) برای مدل WRF با استفاده از متغیرهای سطحی مانند باد ۱۰ متری انجام دادند و فقط به یک هفته در تابستان و زمستان برای اجرای مدل اکتفا کردند.

هنوز کاملاً برای هواشناسان مشخص نیست که پیش‌بینی‌های به‌نسبت خوب مدل WRF تنها به‌دلیل روابط واقع‌بینانه فیزیکی مدل است یا به‌دلیل تنظیمات ثابت‌های مدل (فلورز و همکاران، ۲۰۱۳)، اما چون این طرح‌واره‌ها قابلیت زیادی در پیش‌بینی‌های غیرمحلی دارند، باید از آنها در اجرای مدل استفاده شود؛ بنابراین به‌دلیل توانایی‌های بی‌مانند هرکدام از این طرح‌واره‌ها و حساسیت مدل به شرایط اولیه، در این مطالعه سعی بر این است با به‌کارگیری طرح‌واره‌های متنوع همراه با شرایط اولیه مختلف، مدل WRF اجرا و آزموده شود.

از دیرباز، درک تغییرات اقلیمی و ارزیابی شبیه‌سازی‌ها در مدل‌های اقلیمی با استفاده از داده‌های بلندمدت از موضوعات قابل تأمل بوده است (کمپو و همکاران، ۲۰۱۱). تلاش‌های ملی و بین‌المللی از سال ۱۹۹۰ منجر به شکل‌گیری مجموعه داده‌های اقلیمی به‌نام تحلیل گذشته-نگر یا بازتحلیل در مرکز ملی پیش‌بینی‌های محیطی (National Centers for Environmental Prediction) و مرکز محلی تحقیقات جوی (NCEP National Center for Atmospheric Research (NCAR)) شد که از سال ۱۹۴۸ به بعد را پوشش می‌دهد (کالنی و همکاران، ۱۹۹۶). ارزش این داده‌ها در تحقیقات و مدل‌های اقلیمی کاملاً به اثبات رسیده است، اما محدود بودن آنها به پس از نیمه دوم قرن بیستم و پوشش ندادن رویدادهای حدی قبل از آن (مانند نینو و قحطی هند از سال ۱۸۷۷ تا ۱۸۷۸)

۲-۲ شرایط اولیه و مرزی

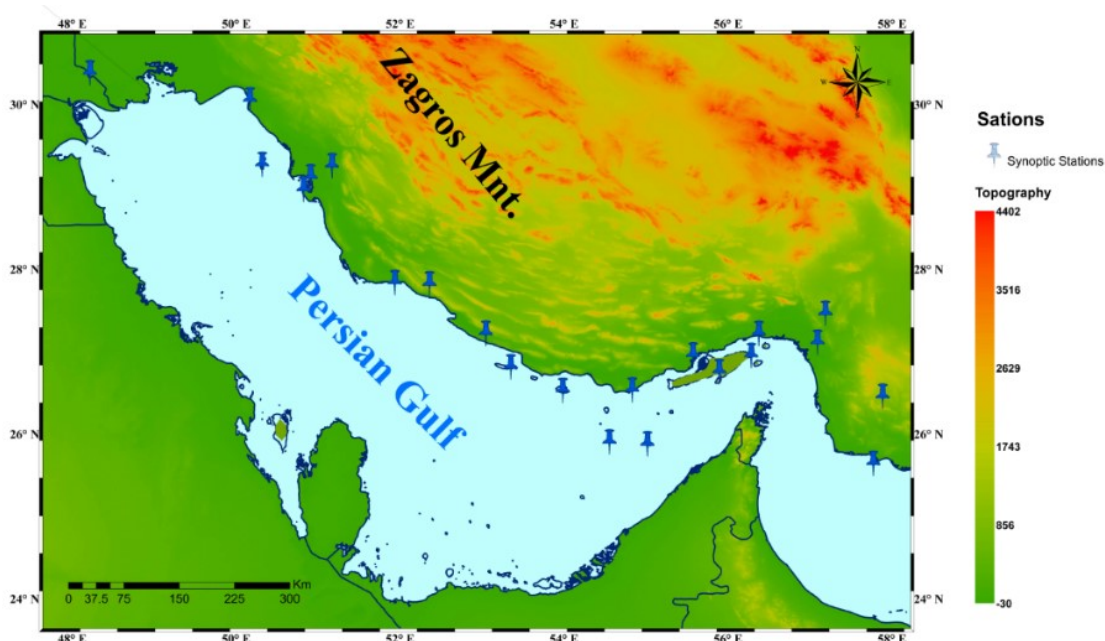
یکی از پیش‌نیازهای مهم برای افزایش دقت مدل، داده مناسب و دقیق شرایط اولیه است که امکان تولید آن در زمان و مکان با استفاده از فنون داده‌گوازی و مشاهدات مرسوم داده‌ها مانند مشاهدات همدیدی و ماهواره‌های قابل دسترس وجود دارد. مدل به دو نوع داده ورودی نیاز دارد: داده‌های زمینی (terrestrial) و داده‌های هواشناسی. داده‌های زمینی شامل توپوگرافی، پوشش گیاهی، نوع خاک، سپیدی و ... است. برای تهیه شرایط اولیه و مرزی از داده‌های هواشناسی استفاده می‌شود. در این مطالعه برای تأمین شرایط اولیه و مرزی از سه مجموعه داده NCEP-FNL، ERA-Interim و NCEP-R2 (جدول ۱) با تمام ویژگی‌ها استفاده می‌شود. گفتنی است پژوهش حاضر در ادامه و تکمیل مقاله غلامی و همکاران (۱۳۹۷) است و جزئیات بیشتر درباره داده‌ها در آن موجود است. در این مقاله در کنار نقش شرایط اولیه و مرزی، عملکرد طرح‌واره‌های PBL نیز به صورت تحلیلی بررسی می‌شود.

مدل میان‌مقیاس غیر هیدرواستاتیک NMM (Nonhydrostatic Meso-Scale Modelling) دارد. در این مقاله از هسته دینامیکی ARW استفاده شده که شرح کامل آن در وانگ و همکاران (۲۰۱۴) ارائه شده است.

۲ روش و داده

۱-۲ داده‌های مشاهده‌ای

ارزیابی و دقت هر مدل عددی با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای با تفکیک بالا انجام می‌شود. در این مطالعه از داده‌های ایستگاه‌های همدیدی واقع در محدوده خلیج فارس و همچنین مشاهدات ماهواره‌ای برای ارزیابی شبیه‌سازی‌های مدل استفاده می‌شود. برای این منظور ۲۲ ایستگاه همدیدی (شکل ۱) و دو ماهواره QuikSCAT و ASCAT انتخاب شده است (برای جزئیات بیشتر درباره این دو ماهواره به غلامی و همکاران (۱۳۹۷) مراجعه شود). در جدول ۶ ویژگی‌های بارز داده‌های مورد استفاده برای ارزیابی و تحلیل خروجی‌های مدل ارائه شده است.



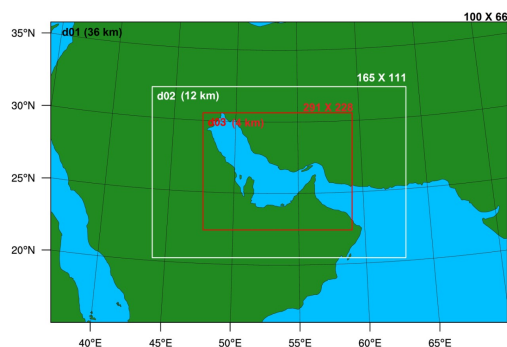
شکل ۱. توپوگرافی منطقه خلیج فارس و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی

جدول ۱. ویژگی‌های اصلی مجموعه داده‌های تأمین‌کننده شرایط اولیه و مرزی مدل

| Input data | Type of input data | Spatial resolution | Temporal resolution | Pressure level | Assimilation system | Time coverage |
|-------------|--------------------|--------------------|---------------------|----------------|---------------------|---------------|
| ERA-Interim | Reanalysis | 0.75° lat/lon | 4 records/day | 39 | 4D-Var | 1979-present |
| NCEP-FNL | Analysis | 1° lat/lon | 4 records/day | 28 | 3D-Var | 1999-present |
| NCEP-R2 | Reanalysis | 2.5° lat/lon | 4 records/day | 17 | 3D-Var | 1979-present |

۳-۲ شبیه‌سازی مدل و آغازگری

در این مطالعه نسخه ۳.۴.۱ مدل WRF برای شبیه‌سازی میدان باد سطحی روی منطقه خلیج فارس انتخاب شده است که از هسته دینامیکی ARW و رویکرد دوسویه (two way) استفاده می‌شود. حوزه شبیه‌سازی شامل سه حوزه است (شکل ۲) که فاصله شبکه‌ای حوزه مادر برابر با ۳۶ کیلومتر، فاصله شبکه‌ای اولین شبکه تودرتو (first nested network)، ۱۲ کیلومتر و فاصله شبکه‌ای داخلی-ترین حوزه ۴ کیلومتر است. با توجه به مقیاس حوزه‌های شبیه‌سازی، گام زمانی مدل برای شبیه‌سازی، ۲۱۶ ثانیه و زمان هر شبیه‌سازی سی ساعت است به طوری که شش ساعت اول به عنوان زمان تطبیق (spin-up) کنار گذاشته و بیست و چهار ساعت بعد از آن تحلیل و بررسی می‌شود.



شکل ۲. موقعیت حوزه‌های شبیه‌سازی مدل با استفاده از نگاشت تصویر لامبرت (Lambert) همراه با فاصله شبکه‌ای هر حوزه و تعداد نقاط شبکه

۴-۲ طرح‌واره‌های PBL به کاررفته در این مطالعه

در پژوهش حاضر شش طرح‌واره از بین طرح‌واره‌های لایه مرزی انتخاب شدند که درباره هر طرح‌واره و ویژگی بارز آن در ادامه توضیح داده خواهد شد.

۱-۴-۲ طرح‌واره ACM2

طرح‌واره ACM2 (پلیم، ۲۰۰۷ الف و ب) مرتبه یک، ترکیب محلی-غیرمحلی و اصلاح شده طرح‌واره ACM1 (پلیم و چانگ، ۱۹۹۲) از مدل MM5 است که مشتق شده از طرح‌واره بلاکادر (۱۹۷۶) است. حالت غیرمحلی این طرح‌واره برای شرایط ناپایدار و حالت محلی برای سایر شرایط کارایی دارد. به عبارتی دیگر، رویکرد غیرمحلی برای اختلاط بالاسو و رویکرد محلی برای اختلاط پایین‌سو طراحی شده است. پلیم (۲۰۰۷ الف) نشان داد طرح‌واره ACM2 نیم‌رخ دمای پتانسیلی و سرعت در تمام لایه مرزی سیاره‌ای را هم از دیدگاه محلی و هم غیرمحلی به خوبی پیش‌بینی می‌کند. از نقاط ضعف این طرح‌واره می‌توان به پلیم (۲۰۰۷ ب) اشاره کرد که در شامگاه، ارتفاع لایه مرزی را عمیق‌تر تخمین می‌زند.

۲-۴-۲ طرح‌واره BouLac

طرح‌واره BouLac (بولت و لکرر، ۱۹۸۹) دومین طرح‌واره‌ای است که در این پژوهش آزمایش می‌شود و طرح‌واره‌ای محلی، مرتبه یک و نیم با بستار TKE (Turbulent Kinetic Energy) است. از ویژگی‌های این طرح‌واره یکسانی ضرایب پخش برای گرما، تکانه و انرژی است (شی و همکاران، ۲۰۱۲) و برای تلاطم‌های ناشی از پستی و بلندی‌های افزایش یافته (برای مثال، پدیده‌های موجی) و اثر آن بر لایه مرزی سیاره‌ای مناسب است. همچنین این طرح‌واره در قیاس با طرح‌واره‌های غیرمحلی، ارائه بهتری از فرایندهای لایه مرزی سیاره‌ای برای رژیم‌هایی با پایداری ایستایی زیاد دارد (شین و هنگ، ۲۰۱۱).

۲-۴-۳ طرح‌واره MYJ

طرح‌واره MYJ (جانیک، ۱۹۹۰، ۱۹۹۴) نسخه اصلاح‌شده طرح‌واره ETA از مدل MM5 (بنکس، ۲۰۱۶) و ارتقاء یافته طرح‌واره‌های MY (Mellor-Yamada) مرتبه یک و نیم (ملر) و یامادا، ۱۹۷۴، ۱۹۸۲) است که هزینه محاسباتی در آن لحاظ نشده و یکی از مفیدترین طرح‌واره‌های PBL است که بیشتر برای شرایط پایدار طراحی شده است (جانیک، ۲۰۰۲). این طرح‌واره هم مانند BouLac مرتبه یک و نیم، محلی و با بستار TKE است، اما برخلاف BouLac، ضرایب پخش گرما، انرژی و تکانه در آن یکسان نیستند.

۲-۴-۴ طرح‌واره MYNN

ویژگی‌های اصلی طرح‌واره MYNN (ناکانیشی و نینو، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۶) محلی و مرتبه یک و نیم بودن آن است که نسبت به طرح‌واره MY، در مقیاس زیرشبکه (sub-grid)، TKE را بهتر ارائه می‌دهد و با توجه به تحمیل محدودیت اضافی نسبت به پارامترهای بستار MY اصلی توان فهم-پذیری و پایداری عددی بیشتری دارد. همچنین این طرح‌واره تقریباً برآوردی ناسودار (unbiased estimate) از ارتفاع PBL، رطوبت و دمای پتانسیلی در فصل بهار دارد (کانیگلو و همکاران، ۲۰۱۳).

۲-۴-۵ طرح‌واره QNSE

طرح‌واره QNSE که در زمان خود (سال ۲۰۰۸) نظریه‌ای جدید از تلاطم با چینه‌بندی پایدار و ناپایداری ضعیف ارائه داد (ساکوریانسکی، ۲۰۰۸)، طرح‌واره‌ای محلی و مرتبه یک و نیم است. ویژگی بارز این طرح‌واره، ارائه واقعی از ارتفاع PBL و دمای پتانسیلی در محیط‌های پایدار است (کوسویک و کوری، ۲۰۰۰). این طرح‌واره برای جریان‌های شارشی چینه‌بندی‌شده (stratified) پایدار مناسب است (ساکوریانسکی و همکاران، ۲۰۰۵) و عملکرد آن در شرایط خنثی و ناپایدار مشابه طرح‌واره

MYJ است، اما در حالت پایدار متفاوت عمل می‌کند (دیب و همکاران، ۲۰۱۳).

۲-۴-۶ طرح‌واره YSU

طرح‌واره YSU (هنگ و همکاران، ۲۰۰۶) طرح‌واره‌ای پر استفاده در تحقیقات لایه مرزی است. این طرح‌واره نسخه بازبینی‌شده طرح‌واره MRF (Medium Range Forecast) (هنگ و پن، ۱۹۹۶) از مدل MM5 است (دودیا، ۱۹۹۳) با این تفاوت که بالای لایه مرزی سیاره‌ای (لایه entrainment) را توصیف می‌کند. از مزایای این طرح‌واره عملکرد بهتر آن در رژیم‌های باد قوی نسبت به طرح‌واره MRF است که دقت بیشتری در شبیه‌سازی اختلاط عمودی عمیق‌تر در PBL‌های شناوری‌محور با اختلاط کم عمق‌تر دارد (هنگ و همکاران، ۲۰۰۶).

۲-۵ طرح‌واره‌های لایه سطحی

در کنار پارامترسازی‌های لایه مرزی سیاره‌ای، پارامترسازی‌هایی نیز برای لایه سطحی طراحی شده است که به طرح‌واره‌های لایه سطحی معروف هستند و مسئول محاسبه سرعت‌های اصطکاکی و ضرایب تبدیل برای محاسبه شارهای گرمای نهان و محسوس و شار تکانه هستند. این شارها شرایط مرزی پایین‌تر را برای انتقال قائم انجام‌شده در طرح‌واره‌های لایه مرزی سیاره‌ای آماده می‌کنند. هر طرح‌واره لایه مرزی سیاره‌ای فقط با یک یا چند طرح‌واره لایه سطحی می‌تواند جفت شود به‌استثنای طرح‌واره BouLac که قیدی برای استفاده ندارد (شین و هنگ، ۲۰۱۱). در این مطالعه برای لایه مرزی سیاره‌ای و لایه سطحی از سه طرح‌واره Revised MM5 Monin-Obukhov (جیمنز و همکاران، ۲۰۱۲)، Monin-Obukhov Janjic Eta (جانیک، ۱۹۹۶ و ۲۰۰۲) و QNSE (ساکورونسکی و همکاران، ۲۰۰۵) استفاده می‌شود که در آن طرح‌واره لایه سطحی Revised MM5

جدول ۲. خلاصه‌ای از طرح‌واره‌های PBL جفت‌شده با طرح‌واره‌های لایه سطحی استفاده‌شده در این مطالعه

| PBL scheme | Full name | Closure method | SFC scheme |
|------------|---|----------------------------|---------------------------|
| ACM2 | Asymmetric Convective Model, version 2 | first-order local-nonlocal | Revised MM5 Monin-Obukhov |
| BouLac | Bougeault-Lacarrère | 1.5-order local | Revised MM5 Monin-Obukhov |
| MYJ | Mellor-Yamada-Janjic | 1.5-order local | Monin-Obukhov Janjic Eta |
| MYNN2 | Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino level 2.5 | 1.5-order local | Revised MM5 Monin-Obukhov |
| QNSE | Quasi-normal scale elimination | 1.5-order local | QNSE |
| YSU | Yonsei University | first-order nonlocal | Revised MM5 Monin-Obukhov |

$$R = \frac{\sum_{n=1}^{n=N} (\psi_n^{obs} - \psi_n^{om})(\psi_n^{sim} - \psi_n^{sm})}{\left[\sum_{n=1}^{n=N} (\psi_n^{obs} - \psi_n^{om})^2 \sum_{n=1}^{n=N} (\psi_n^{obs} - \psi_n^{om})^2 \right]^{1/2}} \quad (1)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{n=N} \psi_n'^2 \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{n=N} \psi_n' \quad (3)$$

$$STDE = \sigma(\psi_n') \\ = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{n=N} \psi_n'^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{n=N} \psi_n' \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

که ψ_n' اختلاف باد شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای است ($\psi_n' = \psi_n^{sim} - \psi_n^{obs}$). همچنین ψ_n^{sim} ، ψ_n^{obs} ، ψ_n^{om} و ψ_n^{sm} به ترتیب باد شبیه‌سازی شده، باد مشاهده‌ای، میانگین باد شبیه‌سازی شده و میانگین باد مشاهده‌ای است. ممکن است بعضی از ψ_n' های مربوط به جهت باد، بزرگ‌تر از ۱۸۰ درجه باشد. برای اجتناب از این مقادیر از رابطه (۵) اختلاف جهت باد شبیه‌سازی شده با مدل و مشاهدات به دست می‌آید:

$$\psi_n = \left(\psi_n^{sim} - \psi_n^{obs} \right) * \left(1 - 360 / \left| \psi_n^{sim} - \psi_n^{obs} \right| \right) \quad (5)$$

Monin-Obukhov برای چهار طرح‌واره لایه مرزی ACM2، BouLac، MYNN2 و YSU؛ طرح‌واره لایه سطحی Monin-Obukhov Janjic Eta برای طرح‌واره لایه مرزی MYJ و طرح‌واره لایه سطحی QNSE برای طرح‌واره لایه مرزی QNSE انتخاب شدند. در جدول ۲ این انتخاب به همراه ویژگی بارز طرح‌واره‌های لایه مرزی سیاره‌ای خلاصه شده است.

۲-۶ تاریخ‌های شبیه‌سازی

با توجه به آنچه در بخش مقدمه ذکر شد، چهار روز به منظور شبیه‌سازی میدان باد منطقه خلیج فارس در نظر گرفته شده است که شامل ۲۲ سپتامبر ۲۰۰۸، ۵ فوریه ۲۰۱۱، ۲۳ آوریل ۲۰۱۱ و ۱۹ اکتبر ۲۰۱۲ است. برای اطلاعات بیشتر راجع به وضعیت همدیدی این تاریخ‌ها به غلامی و همکاران (۱۳۹۷) مراجعه شود.

۲-۷ روش‌های استفاده‌شده در تحلیل خطای مدل

روش‌های متعددی برای ارزیابی خطای مدل وجود دارد که در این بین سنج‌های آماری از قبیل ضریب همبستگی (R)، خطای جذر مربعات میانگین یا Root Mean Squared Error (RMSE)، آریبی (Bias) و انحراف معیار یا Standard Deviation (SD) بسیار پر استفاده هستند و در پژوهش حاضر نیز میزان انحراف یا حساسیت مدل براساس این پارامترها سنجیده می‌شود. این پارامترهای آماری با روابط (۱) تا (۴) (برای اطلاعات بیشتر به ویلکس و همکاران، ۲۰۱۱ مراجعه شود) تعریف می‌شوند:

جدول ۳. آمار مربوط به مقایسه باد مدل با داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی

| Dataset | Scheme | R | | RMSE | | Bias | | STDE | |
|-------------|--------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| | | Speed | Direction | Speed | Direction | Speed | Direction | Speed | Direction |
| ERA-Interim | ACM2 | 0.66 | 0.89 | 1.54 | 51.61 | 0.13 | 6.31 | 1.43 | 49.08 |
| | BouLac | 0.56 | 0.87 | 1.60 | 51.30 | 0.03 | 6.47 | 1.57 | 49.43 |
| | MYJ | 0.58 | 0.84 | 1.64 | 51.83 | 0.53 | 8.97 | 1.51 | 49.13 |
| | MYNN | 0.70 | 0.86 | 1.47 | 52.87 | 0.13 | 6.11 | 1.41 | 50.61 |
| | QNSE | 0.61 | 0.89 | 1.66 | 50.52 | 0.53 | 8.72 | 1.49 | 47.67 |
| | YSU | 0.71 | 0.85 | 1.50 | 49.19 | 0.26 | 8.61 | 1.40 | 47.07 |
| NCEP-FNL | ACM2 | 0.63 | 0.91 | 1.93 | 45.31 | 0.05 | 3.08 | 1.50 | 42.68 |
| | BouLac | 0.67 | 0.92 | 1.73 | 47.57 | -0.05 | -1.06 | 1.44 | 45.58 |
| | MYJ | 0.66 | 0.89 | 1.78 | 47.77 | 0.46 | 4.06 | 1.46 | 44.75 |
| | MYNN | 0.67 | 0.93 | 1.74 | 45.80 | 0.06 | 5.06 | 1.41 | 43.54 |
| | QNSE | 0.65 | 0.90 | 1.80 | 47.40 | 0.33 | -5.82 | 1.5 | 44.67 |
| | YSU | 0.68 | 0.94 | 1.74 | 44.32 | 0.30 | 5.72 | 1.44 | 42.38 |
| NCEP-R2 | ACM2 | 0.55 | 0.86 | 1.87 | 68.86 | 0.59 | 4.51 | 1.61 | 66.45 |
| | BouLac | 0.49 | 0.85 | 1.76 | 73.40 | 0.41 | 6.91 | 1.58 | 69.46 |
| | MYJ | 0.34 | 0.84 | 2.11 | 69.52 | 0.93 | 20.15 | 1.78 | 64.27 |
| | MYNN | 0.54 | 0.85 | 1.72 | 75.04 | 0.34 | 11.14 | 1.56 | 71.20 |
| | QNSE | 0.35 | 0.87 | 1.99 | 67.47 | 0.82 | 20.71 | 1.75 | 62.01 |
| | YSU | 0.40 | 0.79 | 2.05 | 73.52 | 0.60 | 10.74 | 1.82 | 70.11 |

جدول ۴. مقادیر سنجه‌های آماری با استفاده از مقایسه شبیه‌سازی‌های مدل و ماهواره QuikSCAT برای ۲۲ سپتامبر ۲۰۰۸

| Dataset | Scheme | R | | RMSE | | Bias | | STDE | |
|-------------|--------|-------------|-------------|-------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| | | Speed | Direction | Speed | Direction | Speed | Direction | Speed | Direction |
| ERA-Interim | ACM2 | 0.58 | 0.77 | 1.55 | 14.65 | -0.19 | 6.86 | 1.54 | 12.95 |
| | BouLac | 0.50 | 0.67 | 1.94 | 20.57 | -0.96 | 16.1 | 1.69 | 12.80 |
| | MYJ | 0.67 | 0.68 | 1.42 | 15.50 | -0.15 | 8.78 | 1.41 | 12.78 |
| | MYNN | 0.56 | 0.69 | 1.66 | 17.84 | -0.49 | 11.96 | 1.58 | 13.24 |
| | QNSE | 0.59 | 0.69 | 1.59 | 16.15 | -0.43 | 9.64 | 1.54 | 12.96 |
| | YSU | 0.73 | 0.66 | 1.37 | 18.80 | -0.43 | 11.44 | 1.30 | 14.92 |
| NCEP-FNL | ACM2 | 0.57 | 0.76 | 1.57 | 14.72 | -0.18 | 6.61 | 1.56 | 13.15 |
| | BouLac | 0.45 | 0.70 | 1.93 | 20.63 | -0.90 | 15.91 | 1.71 | 13.13 |
| | MYJ | 0.66 | 0.69 | 1.43 | 15.57 | -0.11 | 8.66 | 1.43 | 12.93 |
| | MYNN | 0.56 | 0.67 | 1.66 | 18.07 | -0.47 | 11.81 | 1.59 | 13.69 |
| | QNSE | 0.58 | 0.71 | 1.60 | 16.45 | -0.39 | 9.50 | 1.55 | 13.43 |
| | YSU | 0.72 | 0.64 | 1.36 | 18.68 | -0.38 | 11.24 | 1.31 | 14.92 |
| NCEP-R2 | ACM2 | 0.56 | 0.75 | 1.59 | 14.87 | -0.18 | 6.75 | 1.58 | 13.25 |
| | BouLac | 0.37 | 0.63 | 2.00 | 21.26 | -0.96 | 16.27 | 1.75 | 13.69 |
| | MYJ | 0.63 | 0.68 | 1.47 | 16.06 | -0.11 | 8.78 | 1.46 | 13.45 |
| | MYNN | 0.51 | 0.66 | 1.71 | 18.17 | -0.52 | 11.83 | 1.63 | 13.79 |
| | QNSE | 0.56 | 0.71 | 1.62 | 16.60 | -0.39 | 9.56 | 1.57 | 15.58 |
| | YSU | 0.70 | 0.64 | 1.39 | 18.96 | -0.38 | 11.11 | 1.34 | 15.37 |

۳ بحث و نتایج

در این بخش مقایسه خروجی مدل با مشاهدات ایستگاه-های هواشناسی همدیدی و ماهواره‌ها برای تندی و جهت باد ۱۰ متری ارائه می‌شود. جدول‌های ارائه‌شده در این بخش (جدول‌های ۳، ۴ و ۵) خلاصه‌ای از پارامترهای آماری (R، RMSE، Bias، STDE) حاصل از مقایسه خروجی مدل و ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی و ماهواره‌های ASCAT و QuikSCAT در تاریخ‌های مورد نظر است. گفتنی است که سرعت باد برحسب m/s و جهت سرعت برحسب درجه است. بهترین حالت برای معیارهای آماری در جدول‌ها، پررنگ شده و زیر آن خط کشیده شده است.

۳-۱ مقایسه باد مدل و ایستگاه‌های هواشناسی

همدیدی

در جدول ۳ مقایسه شبیه‌سازی‌های میدان باد مدل و ایستگاه‌های همدیدی منطقه براساس میانگین زمانی و مکانی کل تاریخ‌های شبیه‌سازی با توجه به داده شرایط اولیه و مرزی و طرح‌واره‌های PBL مختلف ارائه شده است. برای سرعت باد، بهترین توافق بین شبیه‌سازی‌های مدل و مشاهدات ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی مربوط به شرایط اولیه و مرزی ERA-Interim است؛ یعنی زمانی که طرح‌واره YSU برای پارامترسازی PBL اعمال می‌شود ($R=0.71$) و ضعیف‌ترین همبستگی متعلق به شرط اولیه و مرزی NCEP-R2 و طرح‌واره MYJ است ($R=0.34$).

جدول ۵. مقادیر سنجه‌های آماری با استفاده از مقایسه شبیه‌سازی‌های مدل و ماهواره ASCAT

| Dataset | Scheme | R | | RMSE | | Bias | | STDE | |
|-------------|--------|-------------|-------------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|
| | | Speed | Direction | Speed | Direction | Speed | Direction | Speed | Direction |
| ERA-Interim | ACM2 | 0.85 | 0.78 | 1.73 | 38.16 | -0.96 | -1.09 | 1.11 | 27.09 |
| | BouLac | 0.83 | 0.81 | 2.13 | 41.5 | -1.47 | 0.39 | 1.27 | 32.4 |
| | MYJ | 0.89 | 0.81 | 1.76 | 39.94 | -1.04 | 0.58 | 1.05 | 29.96 |
| | MYNN | 0.86 | 0.84 | 1.80 | 37.02 | -1.21 | 1.01 | 1.12 | 26.91 |
| | QNSE | 0.86 | 0.79 | 1.75 | 41.14 | -0.99 | -1.79 | 1.1 | 30.76 |
| | YSU | 0.89 | 0.85 | 1.72 | 36.43 | -1.1 | 0.62 | 1.07 | 26.08 |
| NCEP-FNL | ACM2 | 0.77 | 0.8 | 1.97 | 35.45 | -1.38 | -12.32 | 1.19 | 29.23 |
| | BouLac | 0.73 | 0.82 | 2.25 | 40.32 | -1.73 | -10.08 | 1.33 | 34.44 |
| | MYJ | 0.76 | 0.84 | 2.04 | 39.66 | -1.33 | -9.43 | 1.35 | 34.36 |
| | MYNN | 0.75 | 0.85 | 2.18 | 39.18 | -1.57 | -8.48 | 1.35 | 34.26 |
| | QNSE | 0.76 | 0.83 | 2.01 | 39.21 | -1.36 | -10.8 | 1.3 | 32.91 |
| | YSU | 0.76 | 0.86 | 2.13 | 38.27 | -1.46 | -8.4 | 1.35 | 34.18 |
| NCEP-R2 | ACM2 | 0.3 | 0.85 | 1.74 | 45.17 | -1.05 | -4.62 | 1.26 | 41.33 |
| | BouLac | 0.32 | 0.86 | 1.81 | 41.36 | -1 | -2.35 | 1.47 | 39.11 |
| | MYJ | 0.31 | 0.84 | 1.53 | 42.93 | -0.65 | -1.83 | 1.37 | 40.24 |
| | MYNN | 0.4 | 0.86 | 1.53 | 41.87 | -0.68 | -3.71 | 1.33 | 39.5 |
| | QNSE | 0.34 | 0.85 | 1.56 | 42.54 | -0.66 | -3.62 | 1.37 | 40.2 |
| | YSU | 0.42 | 0.85 | 1.47 | 44.48 | -0.66 | -5.48 | 1.29 | 40.85 |

جدول ۶. ویژگی‌های اصلی مجموعه داده‌های استفاده‌شده برای ارزیابی مدل

| Data used to evaluate | Type of data | Spatial resolution | Temporal resolution | Time coverage |
|-----------------------|--------------|--------------------|---------------------|---------------|
| Weather stations | Synoptic | varied | 8 records/day | varied |
| QuikSCAT | Satellite | 25 km | 1 records/day | 2006-present |
| ASCAT | Satellite | 25 km | 1 records/day | 1999-2009 |

بیکربندی‌ها، طرح‌واره BouLac با داده ERA-Interim به کمترین مقدار از اریبی می‌رسد ($Bias=0/03$).

اریبی جهت باد در تمام ترکیبات طرح‌واره‌ها با مجموعه داده‌های ERA-Interim و NCEP-R2 به صورت ساعت‌گرد است و در حالت NCEP-FNL به استثنای طرح‌واره‌های BouLac و QNSE، که پادساعت‌گرد است، در سایر طرح‌واره‌ها ساعت‌گرد است. کمترین مقدار اریبی جهت باد ($-1/06$) را Bou-Lac همراه با به کارگیری شرایط اولیه NCEP-FNL به خود اختصاص داده است درحالی‌که QNSE بیشترین اریبی را دارد.

به طور کلی عملکرد مدل تحت اعمال شرایط اولیه مختلف و طرح‌واره‌های PBL، به ساختار تشکیل‌دهنده متغیر تحت تحلیل وابسته است؛ یعنی هم سرعت و هم جهت باد (ساختار تشکیل‌دهنده باد) به نتایج متفاوتی در عملکرد مدل منجر می‌شوند. مدل تحت اعمال ERA-Interim و طرح‌واره YSU با در نظر گرفتن سرعت باد از نزدیک‌ترین حالت به مشاهدات برخوردار است، درحالی‌که همین طرح‌واره تحت شرایط اولیه NCEP-FNL بهترین همبستگی ($R=0/94$) را برای جهت باد دارد. همچنین طرح‌واره MYNN جفت‌شده با داده ورودی NCEP-FNL تطابق زیادی ($R=0/93$) برای جهت باد دارد.

تحلیل دقیق خطای مدل از حوصله این مقاله خارج است، اما توضیح و معرفی بعضی از منابع خطای مدل برای تفسیر نتایج می‌تواند مفید واقع شود. یکی از دلایل خطای مدل این است که داده‌های ایستا (static) مانند توپوگرافی همیشه محدودیت تفکیک دارند و به ناچار در فرایند محاسبات شبکه (mesh)، توپوگرافی واقعی هموارتر در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، ایستگاه‌های هواشناسی هم‌دیدگی در بخش شمالی خلیج فارس تحت تأثیر توپوگرافی ساحل هستند؛ از این رو اثر اصطکاک منجر از

طرح‌واره MYNN جفت‌شده با ERA-Interim کمترین مقدار معیار RMSE ($RMSE=1/47$) را برای سرعت باد دارد و در مرتبه بعدی، طرح‌واره YSU قرار دارد ($RMSE=1/50$). وقتی برای همه طرح‌واره‌ها شرایط اولیه و مرزی ERA-Interim اجرا می‌شود، نسبت به به کارگیری NCEP-R2 و NCEP-FNL، سرعت باد RMSE کمتری دارد. طرح‌واره MYJ جفت‌شده با NCEP-R2 بیشترین مقدار RMSE ($2/11$) را به خود اختصاص می‌دهد. محدوده (range) تغییرات RMSE سرعت باد از $1/47$ تا $2/11$ متر بر ثانیه است؛ به عبارتی، تغییرات بین کل شبیه‌سازی‌ها چندان بزرگ نیست؛ بین بهترین و بدترین حالت، اختلاف $0/66$ متر بر ثانیه دیده می‌شود. برای جهت باد، بهترین آمار RMSE ($32/44^\circ$) مربوط به ترکیب طرح‌واره YSU و مجموعه داده NCEP-FNL است، درحالی‌که بدترین آمار را ($75/04^\circ$) ترکیب MYNN و NCEP-R2 به نمایش گذاشتند. در مجموع، بدون توجه به نوع طرح‌واره PBL، مقادیر RMSE در NCEP-FNL کمترین و در NCEP-R2 بیشترین برای جهت باد است و ERA-Interim با اختلاف کمی نسبت به NCEP-FNL ظاهر شده است.

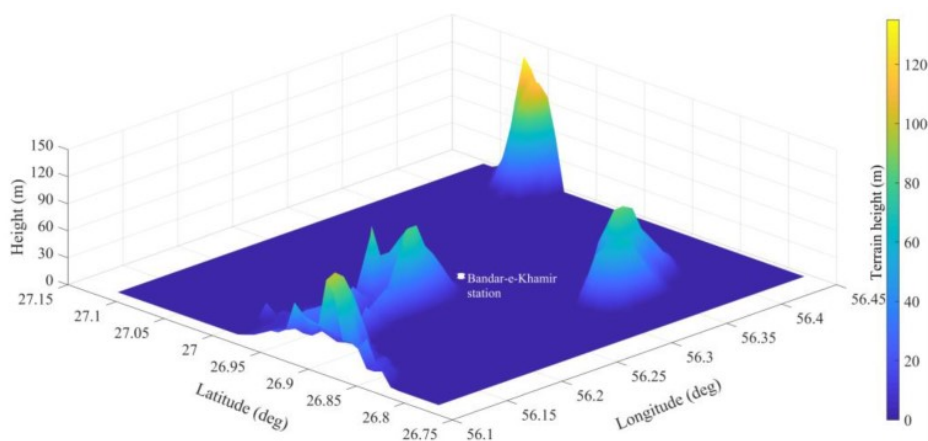
از نتایج اریبی سرعت باد به وضوح می‌توان دریافت که به استثنای طرح‌واره BouLac تحت شرط اولیه و مرزی NCEP-FNL که اریبی منفی دارد، در سایر ترکیبات مدل شاهد مقادیر مثبت اریبی هستیم. در نتیجه مدل ارائه دست بالا (over-represented) دارد و برای سرعت باد به طور سامانمند (systematic) تخمین مثبت دارد. این تخمین مثبت در طرح‌واره MYJ با توجه به تغییرات شرط اولیه از نوسان بیشتری نسبت به سایر طرح‌واره‌ها برخوردار است و در حالت NCEP-R2 به بیشترین مقدار خود می‌رسد ($Bias=0/93$)، درحالی‌که با در نظر گرفتن تمام

روابط طول زبری (roughness) به سبب حذف پسای ریخت‌شناسی (orographic drag) زیر شبکه‌ها به درستی در مدل محاسبه نمی‌شود و بنابراین تخمین سرعت باد سطحی تحت تأثیر این هموار شدن عوارض زمینی با خطا همراه است؛ یعنی در این حالت، با توجه به فرمول‌بندی طول زبری، اثر اصطکاکی کاهش می‌یابد و در مناطقی که ارتفاع مدل را کمتر از مقدار واقعی در نظر می‌گیرند، امکان فراتخمین بودن تندی باد فراهم است.

نتایج شبیه‌سازی تنها به ساده‌سازی‌های سراسری توپوگرافی و جملات خطی ناشی از اثرهای هموارسازی توپوگرافی در مدل خلاصه نمی‌شود و هم‌زمانی با شرایط خاص، اثرهای دیگری در عملکرد مدل ایجاد می‌کند؛ برای نمونه موقعیت ایستگاه در دامنه یک کوه یا حتی یک تپه نسبت به جهت وزش باد از اهمیت زیادی برخوردار است و ممکن است به یکی از منابع خطای مدل برای تخمین باد تبدیل شود. برای مثال اگر باد از شمال غرب به سمت شمال شرق در حال وزیدن باشد و ایستگاهی در جنوب شرق و مجاورت یک تپه قرار داشته باشد (مانند ایستگاه بندر خمیر در این مطالعه)، باد واقعی در ایستگاه به شدت تحت تأثیر این مانع طبیعی (کوهستان) قرار می‌گیرد و بادهایی که از شمال غرب می‌آیند به سبب حضور این کوهستان کند می‌شوند (ر.ک. شکل ۳، موقعیت

ایستگاه بندر خمیر در همسایگی یک مانع کوهستانی). اگر مدل، توپوگرافی را به حالتی در نظر بگیرد که ارتفاع کوه خیلی هموار و کمتر از واقعیت باشد، این مانع کوهساری به‌طور کامل به داخل مدل وارد نمی‌شود و در مدل، بادهایی که از شمال غرب می‌آیند فراتخمین می‌شوند؛ بنابراین اگر در این ایستگاه بادهای غالب، شمال غربی باشند؛ نتیجه کلی، فراتخمین شدن باد خواهد بود.

منبع دیگر خطای مدل ممکن است تعداد ترازهای قائم در داده‌های تأمین‌کننده شرط اولیه و مرزی باشد. بین ترازهای پایین و بالای جو جفت‌شدگی دائم وجود دارد. برهم‌کنش ترازهای بالا و پایین جو به‌طور قابل توجهی در رفتار کلی جو تأثیرگذار است (برای بررسی سازوکار تأثیر، اهمیت و درک جفت‌شدگی و برهم‌کنش ترازهای سطحی جو با ترازهای بالایی به بونیل و همکاران (۲۰۰۲) مراجعه شود). بنابراین با توجه به تعداد کم ترازهای جوی داده NCEP-R2 نسبت به ERA-Interim و NCEP-FNL ممکن است ارائه ناقصی از ترازهای قائم جو در آن وجود داشته باشد و این ارائه ناقص در شرایط اولیه و مرزی مدل ظاهر و به یکی از منابع خطا برای سرعت باد سطحی مدل منجر شود. در طرف مقابل این منابع خطا برای سرعت باد، منبعی از واداشت‌های هم‌دیدنی نیز برای همبستگی زیاد



شکل ۳. موقعیت ایستگاه بندر خمیر در همسایگی یک توپوگرافی واقعی

مشاهدات بویه‌ها مقایسه و تحلیل می‌شوند. در منطقه خلیج فارس سه اشکال اساسی درباره بویه‌ها وجود دارد: الف) تعداد بویه‌ها کم است (تراکم مکانی بسیار کم با توجه به وسعت آن)؛ ب) شکاف زمانی داده بویه بسیار زیاد است (نداشتن پوشش مناسب زمانی)؛ ج) در بیشتر مقاطع زمانی به‌علت کالیبره نبودن، داده بویه‌ها با خطا همراه است. بنابراین مقایسه هم‌زمان مدل و ماهواره با بویه خطای زیادی دارد. تنها راه ارزیابی مدل، مقایسه مستقیم آن با داده‌های ماهواره است. هدف ما در این بخش ارزیابی انحراف و خطای شبیه‌سازی میدان باد سطحی مدل (سرعت و جهت باد) از داده‌های دو ماهواره QuikSCAT و ASCAT است (جدول‌های ۴ و ۵). در این آمارها از داده‌های مناطق فرساحل به‌دلیل خطای بیشتر که نشأت گرفته از عوارض زمینی است، صرف‌نظر شده است و همچنین سرعت‌های کمتر از ۳ متر بر ثانیه و بیشتر از ۲۰ متر بر ثانیه لحاظ نشده‌اند. در شکل ۴ مشخص شده است که فقط داده‌های ماهواره‌ای محصور در پرند قرمز باید جهت محاسبات آماری استفاده شوند. تمام نقاط این ناحیه دست‌کم ۳۵ کیلومتر با ساحل فاصله دارند تا از اثر خطای مربوط به نواحی ساحلی مصون بمانند و داده‌ها از اعتبار بیشتری برخوردار باشند.

جهت باد مدل و مشاهدات ایستگاه‌های همدیدی وجود دارد که از واقعیت موقعیت جغرافیایی منطقه خلیج فارس نشأت می‌گیرد. خلیج فارس در مسیر جریان‌های عرض‌های میانه قرار گرفته است که از غرب به شرق انتشار می‌یابند (پرونه، ۱۹۷۹) و از طرفی از شمال و شمال شرق با رشته کوه‌های زاگرس محدود شده است (شکل ۱) به‌طوری که این موانع طبیعی نفوذناپذیر به شکل‌گیری باد شمال منجر می‌شوند که تقریباً در تمام مدت سال به‌صورت شمال‌شرق‌سو در حال وزیدن است؛ بنابراین توپوگرافی و جغرافیای منطقه‌ای عاملی تأثیرگذار برای هدایت بادهای خلیج فارس است و احتمال رخداد باد شمال غربی در آن زیاد است. از طرف دیگر، یکی از منابع اصلی تأمین داده‌های جهانی بازتحلیل و تحلیل همین داده‌های همدیدی است؛ در نتیجه با توجه به الگوی شمال غربی داده‌های ورودی مدل، همبستگی بالای جهت باد مدل با مشاهدات ایستگاه‌های همدیدی قابل انتظار است. در جدول ۳ مقادیر بالای R برای جهت باد مشاهده می‌شود.

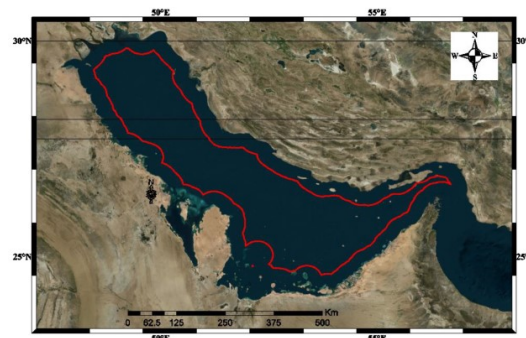
۲-۳ مقایسه شبیه‌سازی باد مدل و ماهواره

داده‌های ماهواره‌ای، بیشتر در بازه زمانی طولانی‌مدت (دست‌کم یک سال) در کنار شبیه‌سازی‌های مدل با

بهترین همبستگی را دارد. نکته جالب این است که برخلاف سرعت باد که در محاسبه آن با هر شرایط اولیه‌ای، طرح‌واره YSU نسبت به سایر طرح‌واره‌ها از بیشترین همبستگی برخوردار بود؛ برای جهت باد، YSU کمترین تطابق را دارد. به‌طور کلی اگر میانگین همبستگی کل طرح‌واره‌ها را با هر داده شرط اولیه در نظر بگیریم، بازتحلیل NCEP-R2 با اختلاف اندکی نسبت به ERA-Interim و NCEP-FNL همبستگی بهتری برای جهت باد به نمایش می‌گذارد. از نظر معیار EMSE همانند معیار R کمترین خطا متعلق به طرح‌واره ACM2 و بازتحلیل ERA-Interim است؛ بنابراین در مجموع این ترکیب (ERA-Interim و ACM2) نسبت به سایر پیکربندی‌ها عملکرد بهتری در حالت سنجش با داده ماهواره QuikSCAT وجود دارد. البته پیکربندی‌های مختلف اختلاف فاحشی با داده‌های ماهواره ندارند که احتمالاً به این واقعیت بر می‌گردد که داده‌های ارزیابی شده خیلی از ساحل دور هستند و تحت تأثیر واداشتهای ساحلی قرار ندارند. از طرفی، با توجه به مقادیر منفی اریبی می‌توان نتیجه گرفت که مدل در قیاس با ماهواره تمایل به تخمین کمتر سرعت باد دارد که برخلاف عملکرد مدل هنگام مقایسه با مشاهدات ایستگاه‌های همدیدی است. دلیل این موضوع، نبود عوامل پستی و بلندی زمین در نواحی فراساحل است که در نواحی ساحل به شدت تحت تأثیر آن قرار می‌گرفت.

۲-۲-۳ ماهواره ASCAT

جدول ۵ نمایش خلاصه‌ای از سنجه‌های آماری باد سطحی بین ترکیب‌بندی‌های مختلف مدل و مشاهدات ماهواره ASCAT برای میدان باد است. برای سرعت باد، بهترین ترکیب طرح‌واره‌های PBL و شرایط اولیه و مرزی از نظر همبستگی، متعلق به ترکیب طرح‌واره YSU و بازتحلیل ERA-Interim است ($R=0/89$) در حالی که کمترین



شکل ۴. از داده‌های داخل پریند قرمز جهت تحلیل‌های آماری ماهواره‌ها استفاده شده است.

۱-۲-۳ ماهواره QuikSCAT

جدول ۴ خلاصه‌ای از سنجه‌های آماری حاصل از مقایسه خروجی‌های مدل WRF و باد مشاهده‌ای QuikSCAT در ۲۲ سپتامبر ۲۰۰۸ است. داده‌های QuikSCAT تا سال ۲۰۰۹ در دسترس است؛ بنابراین از بین تاریخ‌های شبیه‌سازی، تنها داده‌های ۲۲ سپتامبر ۲۰۰۸ ارزیابی و مقایسه شده است. برای سرعت باد بهترین توافق با همبستگی داده بازتحلیل ERA-Interim و طرح‌واره YSU استفاده شود و ضعیف‌ترین همبستگی ($R=0/37$) مربوط به حالت استفاده از ترکیب NCEP-R2 و طرح‌واره BouLac برای شبیه‌سازی باد سطحی است. بدون توجه به نوع طرح‌واره، میزان تطابق شبیه‌سازی‌های سرعت باد تحت شرایط اولیه و مرزی به ترتیب ERA-Interim، NCEP-FNL و NCEP-FNL کاهش یافته است.

مدل با استفاده از مجموعه داده NCEP-FNL صرف-نظر از نوع طرح‌واره، بادی را شبیه‌سازی می‌کند که از نظر جهت بیشترین همبستگی را با مشاهدات QuikSCAT دارد، در حالی که با در نظر گرفتن طرح‌واره، بهترین تطابق از طرح‌واره ACM2 ($R=0/77$) با استفاده از ERA-Interim به‌عنوان شرط اولیه مدل به‌دست می‌آید. در هر سه نوع مجموعه داده، ACM2 نسبت به سایر طرح‌واره‌ها

برای سرعت باد است ($STDE=1/0.5$) و برای جهت باد، طرح‌واره YSU کمترین مقدار را دارد ($STDE=26/0.8$).

۴ نتیجه‌گیری

برای تعیین حساسیت باد سطحی به طرح‌واره‌های مختلف پارامترسازی لایه مرزی سیاره‌ای مدل WRF تحت واداشت شرایط اولیه و مرزی مختلف، کارایی سه مجموعه داده و شش طرح‌واره لایه مرزی سیاره‌ای (PBL) برای چهار تاریخ در منطقه خلیج فارس ارزیابی و بررسی شد. هدف نهایی این تحقیق پیدا کردن بهترین ترکیب ممکن از داده‌های ورودی مدل و طرح‌واره‌های PBL در پیش‌یابی میدان باد منطقه است. برای این منظور سه مجموعه داده ERA-Interim، NCEP-R2 و NCEP-FNL (دو بازتحلیل و یک تحلیل) و شش طرح‌واره ACM2، BouLac، MYJ، MYNN، QNSE و YSU (چهار طرح‌واره محلی و دو طرح‌واره غیرمحلی) انتخاب و با مدل WRF-ARW (نسخه ۳.۴.۱) اجراهای سی ساعته آزمایش شد که شش ساعت اول از این سی ساعت، زمان تطبیق و بیست و چهار ساعت باقی‌مانده، برای زمان شبیه‌سازی مدل لحاظ شد. آزمایش‌های مدل با مشاهدات بیست و دو ایستگاه هواشناسی همدیدی گسترده‌شده در منطقه شمالی خلیج فارس و دو ماهواره QuikSCAT و ASCAT ارزیابی شد. ۲۲ ایستگاه همدیدی در این مطالعه برای ارزیابی عملکرد مدل در نظر گرفته شده‌است، اما با توجه به وسعت خلیج فارس، برای ارزیابی دقیق‌تر به ایستگاه‌های بیشتری نیاز است. چگالی داده‌های مشاهده‌ای در ارزیابی مدل بسیار مهم است و نتایج مدل به چگالی زیاد ایستگاه‌های مشاهده‌ای بسیار متکی است؛ در مطالعات قبلی نیز به ضرورت تراکم زیاد داده مشاهده‌ای اشاره شده (لاپرایز و همکاران، ۲۰۰۸ و راوسکر و همکاران، ۲۰۱۰) و احتمالاً یکی از دلایل خطای مدل، همین چگالی کم مشاهدات است. البته ایجاد یک شبکه

تطابق را ترکیب طرح‌واره ACM2 و بازتحلیل NCEP-R2 به خود اختصاص می‌دهد ($R=0/3$). با وجود این، همبستگی بین اندازه‌گیری‌های ماهواره ASCAT و تمام ترکیبات طرح‌واره‌ها با بازتحلیل NCEP-R2 به اندازه کافی بیانگر تطابق آنها نیست. در بین تمام پیکربندی‌های ممکن، ترکیب طرح‌واره YSU و داده NCEP-FNL بیشترین همبستگی را برای جهت باد دارد ($R=0/86$).

محاسبه RMSE برای پیکربندی‌های مختلف مدل نشان می‌دهد کمترین مقدار آن برای سرعت باد از شرط اولیه و مرزی NCEP-R2 و اعمال طرح‌واره YSU به دست می‌آید ($RMSE=1/47$) و بیشترین مقدار آن متعلق به ترکیب داده NCEP-FNL و طرح‌واره BouLac است ($RMSE=2/25$). برای جهت باد، طرح‌واره ACM2 به همراه داده تحلیل NCEP-FNL نزدیک‌ترین مقادیر را به مشاهدات ASCAT دارد ($RMSE=35/45$) و طرح‌واره YSU در ترکیب با بازتحلیل ERA-Interim با $36/43$ $RMSE=$ در رتبه دوم نزدیک‌ترین مقدار به مشاهدات ASCAT قرار دارد.

برای تمام شبیه‌سازی‌های سرعت باد، ارزیابی ناشی از مقایسه‌های خروجی مدل و مشاهدات ASCAT مقادیر منفی را به نمایش می‌گذارد که نشان‌دهنده تمایل مدل به تخمین کمتر سرعت باد نسبت به ASCAT است و این تخمین منفی تحت شرایط اولیه و مرزی NCEP-FNL، به صورت معناداری نسبت به ERA-Interim و NCEP-R2 آشکارتر است. مجموعه داده NCEP-R2 و طرح‌واره MYJ کمترین ارزیابی سرعت باد را نسبت به سایر آزمایش‌های مدل دارد ($Bias=-0/65$) در حالی که برای جهت باد، همه شبیه‌سازی‌های ERA-Interim ارزیابی کمتری نسبت به NCEP-FNL و NCEP-R2 دارند و طرح‌واره BouLac کمترین مقدار را دارد ($Bias=0/39$).

از دیدگاه انحراف معیار، بهترین عملکرد مدل متعلق به ترکیب شرط اولیه ERA-Interim و طرح‌واره MYJ

ایجاد تأسیساتی برای بهره‌برداری از آن مدنظر قرار می‌گیرد.

دلایل خطای مدل، بیشتر از دو اثر اصلی نشأت می‌گیرد. اثر اول ناشی از این واقعیت است که همیشه در تفکیک افقی داده‌های ایستا محدودیتی وجود دارد که باعث می‌شود توپوگرافی منطقه به‌صورت تقریبی ارائه شود و می‌تواند یکی از منابع اصلی خطای مدل برای ارائه سرعت باد باشد. غیر از توپوگرافی، دیگر داده‌های ایستای زمینی مانند سپیدی، پوشش گیاهی عمق دریاچه، نوع خاک و ... نیز از همین محدودیت رنج می‌برند. اثر دوم ناشی از تفکیک پایین ترازهای افقی داده‌های تأمین‌کننده شرایط اولیه و مرزی مدل به‌ویژه برای داده بازتحلیل NCEP-R2 است؛ محدودیت ترازهای جوی منجر به ارائه ناقص از برهم‌کنش ترازهای بالا و پایین جو و کم‌رنگ شدن اثرهای متقابل می‌شود و می‌تواند یکی از منابع خطا برای شرایط اولیه و مرزی مدل باشد. البته در کنار این منابع خطای مدل برای ارائه باد، ویژگی جغرافیایی خاص منطقه خلیج فارس به هدایت خاص باد و شکل‌گیری الگویی برای آن (باد شمال) کمک می‌کند که برای جهت باد همبستگی زیادی بین مدل و مشاهدات ایستگاه‌های همدیدی اتفاق بیفتد.

۲-۴ خلاصه مقایسه مدل با مشاهدات ماهواره QuikSCAT

مدل با استفاده از همه طرح‌واره‌های PBL و همه مجموعه داده‌های تأمین‌کننده شرایط اولیه و مرزی، یک ارزیابی منفی برای سرعت باد به نمایش می‌گذارد که نشان‌دهنده تمایل مدل WRF به فروتخمین سرعت باد است. مدل برای جهت باد تمایل به چرخش ساعت‌گرد (ارایی مثبت) در قیاس با باد ماهواره QuikSCAT دارد. طرح‌واره‌های YSU و ACM2 به‌ترتیب برای سرعت و جهت باد تخمین بهتری نسبت به سایر طرح‌واره‌ها دارند. طرح‌واره MYJ و

منظم، جامع و متراکم از ابزارهای ثبت مشاهدات جوی و اقیانوسی همیشه نوعی ایدئال است که دستیابی کامل به آن ناممکن است به‌ویژه برای نواحی فراساحل که امکان دارد هیچ دستگاه اندازه‌گیری برای کمیت‌های جوی در دسترس نباشد. باوجود این، نتایج این پژوهش می‌تواند در سه بخش مقایسه مدل با مشاهدات همدیدی، مقایسه مدل با مشاهدات QuikSCAT و مشاهدات ASCAT به شرح زیر خلاصه شود:

۱-۴ خلاصه مقایسه مدل با ایستگاه‌های هوا-شناسی همدیدی

بدون در نظر گرفتن نوع طرح‌واره PBL، داده بازتحلیل NCEP-R2 به‌عنوان شرایط اولیه و مرزی مدل، خطای شبیه‌سازی بیشتری نسبت به داده‌های NCEP-FNL و ERA-Interim هم برای جهت باد و هم برای سرعت باد دارد. در بین طرح‌واره‌های آزمایش‌شده در این مطالعه و داده‌های تأمین‌کننده شرایط اولیه و مرزی مدل، طرح‌واره YSU و داده IRA-Interim از نظر همبستگی بیشترین قرابت را با مشاهدات همدیدی ایستگاه‌های هواشناسی دارد، اما همین طرح‌واره با داده NCEP-FNL بهترین همبستگی را برای جهت باد دارد. به‌طور کلی با توجه به سایر معیارهای آماری، به‌استثنای طرح‌واره BouLac که بهترین ارزیابی را به خود اختصاص داده است، تقریباً بهترین نمرات متعلق به شبیه‌سازی‌های مربوط به طرح‌واره YSU است.

ارایی نشان‌دهنده حالت میانگین متغیر مورد بررسی است که در این مطالعه زمانی که طرح‌واره BouLac به‌ترتیب همراه با داده ERA-Interim و NCEP-FNL در مدل به کار می‌رود، بهترین عملکرد را برای نمایش حالت میانگین سرعت و جهت باد دارد. این حالت بیشتر برای مطالعات ظرفیت باد منطقه به‌منظور استفاده از انرژی باد و

ب. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد اختلاف اصلی بین شبیه‌سازی‌های باد WRF و بادهای اندازه‌گیری شده بیشتر متوجه انتخاب داده شرایط اولیه و مرزی است و تغییر طرح‌واره‌های پارامترسازی PBL نسبت به شرایط اولیه و مرزی، درجه اهمیت کمتری دارد؛ در نتیجه تغییر شرایط اولیه و مرزی اثر قابل توجهی بر نتایج باد مدل دارد. در کارهای آینده تأکید و تمرکز بیشتری باید روی داده‌های تحلیل و بازتحلیل شود و انتخاب طرح‌واره‌های PBL در اولویت دوم قرار گیرد.

ج. به سبب مشابهت به نسبت خوب شبیه‌سازی‌های باد مدل با مشاهدات باد ماهواره‌های QuikSCAT و ASCAT، انتخاب باد WRF به‌عنوان پایگاه داده نواحی فراساحل به جای داده‌های این ماهواره‌ها می‌تواند کار معتبر و باارزشی باشد، به‌ویژه زمانی که با محدودیت تفکیک مکانی و نمونه‌برداری زمانی مواجه هستیم.

د. یک خروجی آشکار از نتایج، تخریب مدل است برای وقتی که از داده‌های NCEP-R2 استفاده می‌کند. به دلیل کیفیت زیاد داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی وقتی نتایج باد مدل با این داده‌ها مقایسه می‌شود، این انحراف مدل بیشتر دیده می‌شود. البته این تخریب کمتر آشکار است وقتی با داده‌های باد ماهواره ASCAT مقایسه می‌شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی و دانشگاه تهران برای حمایت از این کار پژوهشی قدردانی می‌کنند. همچنین از سازمان هواشناسی کشور به جهت در اختیار قرار دادن داده‌های ایستگاه‌های همدیدی تشکر و سپاسگزاری می‌شود.

منابع

داده NCEP-FNL بهترین تخمین را برای حالت میانگین باد دارد ($Bias=0/11$). تقریباً نتایج مدل در ارائه میانگین سرعت و جهت باد عملکرد مناسبی دارد که برای ارزیابی مطالعات انرژی به‌ویژه نواحی فراساحل ارزشمند است؛ جایی که ارائه دقیق سرعت باد میانگین ضرورت انکارناپذیری است.

۳-۴ خلاصه مقایسه مدل با مشاهدات ماهواره ASCAT

به نظر می‌رسد مدل با استفاده از داده NCEP-R2 ارائه خوبی با در نظر گرفتن مقادیر کم $RMSE$ ، $Bias$ و $STDE$ دارد، اما همبستگی آن در قیاس با داده‌های NCEP-FNL و NCEP-R2 اختلاف فاحش و مقدار ضعیفی دارد. با وجود این، وقتی NCEP-R2 و طرح‌واره MYJ در مدل به کار می‌رود، تخمین خوبی از حالت میانگین باد در قیاس با ASCAT دارد. همچنین مدل به یک فروتخمین برای سرعت باد در قیاس با ASCAT تمایل دارد به طوری که این فروتخمین هنگام استفاده از NCEP-FNL اندکی بیشتر است. به طور کلی مدل WRF وقتی با ماهواره ASCAT سنجیده می‌شود، برای سرعت باد با طرح‌واره YSU عملکرد بهتری نسبت به سایر طرح‌واره‌ها دارد، اما برای جهت باد به وضوح روشن نیست که چه طرح‌واره‌ای ارائه بهتری نسبت به سایر طرح‌واره‌ها دارد.

۴-۴ خلاصه کلی

نتایج کلی این تحقیق به صورت زیر خلاصه می‌شود:
الف. براساس تحلیل و نتایج این تحقیق در بین داده‌های تأمین‌کننده شرایط اولیه و مرزی مدل WRF، داده بازتحلیل ERA-Interim برای شبیه‌سازی سرعت باد و داده تحلیل NCEP-FNL برای جهت باد مناسب‌ترین داده هستند به شرطی که طرح‌واره YSU انتخاب پارامترسازی PBL در نظر گرفته شود.

- Deppe, A. J., Gallus Jr., W. A., and Takle, E. S., 2013, A WRF ensemble for improved wind speed forecasts at turbine height: *Weather and Forecasting*, **28**(1), 212–228.
- Dudhia, J., 1993, A nonhydrostatic version of the Penn State–NCAR mesoscale model: Validation tests and simulation of an Atlantic Cyclone: *Monthly Weather Review*, **121**(5), 1493–1513.
- Easterling, D. R., Anderson, D. M., Cohen, S. J., Gutowski, W. J., Holland, G. J., Kunkel, K. E., Peterson, T. C., Pulwarty, R. S., Stouffer, R. J., and Wehner, M. F., 2008, Measures to improve our understanding of weather and climate extremes: weather and climate extremes in a changing climate. Regions of focus: North America, Hawaii, Caribbean, and US Pacific Islands, A report by the US Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, Washington DC. Available from <http://downloads.climate-science.gov/sap/sap3-3/sap3-3-final-Chapter4.pdf>.
- Floors, R., Vincent, C. L., Gryning, S. E., Peña, A., and Batchvarova, E., 2013, The wind profile in the coastal boundary layer: Wind lidar measurements and numerical modelling: *Boundary-Layer Meteorology*, **147**(3), 469–491.
- Hong, S. Y., Noh, Y., and 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., and Pan, H. L., 1996, Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model: *Monthly Weather Review*, **124**(10), 2322–2339.
- Janjic, Z. I., 1990, The Step-Mountain coordinate: physical package: *Monthly Weather Review*, **118**(7), 1429–1443.
- Janjic, 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.
- Janjić, Z. I., 1996, The surface layer in the NCEP Eta Model, paper presented at 11th Conference on Numerical Weather Prediction: American Meteorological Society, Norfolk, Va. Preprints.
- Janjić, Z. I., 2002, Nonsingular Implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model: NCEP Office Note, **437**, p. 61. Available at:
- غلامی، س.، قادر، س.، خالقی زواره، ح. و غفاریان، پ.، ۱۳۹۷، ارزیابی پیش‌یابی میدان باد توسط مدل WRF تحت تأثیر شرایط اولیه و مرزی متفاوت در منطقه خلیج فارس: مقایسه با داده‌های همدیدی و ماهواره‌های QuikSCAT و ASCAT: *مجله فیزیک زمین و فضا*، **۴۴**(۱)، ۲۲۷–۲۴۳.
- Banks, R. F., Tiana-Alsina, J., Baldasano, J. M., Rocadenbosch, F., Papayannis, A., Solomos, S., and Tzanis, C. G., 2016, Sensitivity of boundary-layer variables to PBL schemes in the WRF model based on surface meteorological observations, lidar, and radiosondes during the HygrA-CD campaign: *Atmospheric Research*, **176**, 185–201.
- Blackadar, A. K., 1976, Modeling the nocturnal boundary layer: paper presented at Third Symposium on Atmospheric Turbulence, Diffusion and Air Quality, American Meteorological Society, Raleigh, NC.
- Borge, R., Alexandrov, V., José del Vas, J., Lumbreras, J., and Rodríguez, E., 2008, A comprehensive sensitivity analysis of the WRF model for air quality applications over the Iberian Peninsula: *Atmospheric Environment*, **42**(37), 8560–8574.
- Bougeault, P., and Lacarrere, P., 1989, Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model: *Monthly Weather Review*, **117**(8), 1872–1890.
- Bouniol, D., Lemaitre, Y., and Protat, A., 2002, Upper-and lower-troposphere coupling processes involved in the FASTEX IOP16 frontal cyclone: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Wiley Online Library, **128**(582), 1211–1228.
- Compo, G. P., Whitaker, J. S., Sardeshmukh, P. D., Matsui, N., Allan, R. J., Yin, X., Gleason, B. E., Vose, R. S., Rutledge, G., Bessemoulin, P., 2011, The twentieth century reanalysis project: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Wiley Online Library, **137**(654), 1–28.
- Coniglio, M. C., Correia Jr., J., Marsh, P. T., and Kong, F., 2013, Verification of convection-allowing WRF model forecasts of the planetary boundary layer using sounding observations: *Weather and Forecasting*, **28**(3), 842–862.

- Pleim, J. E., 2007a, A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer, Part I: Model description and testing: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **46**(9), 1383–1395.
- Pleim, J. E., 2007b, A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer, Part II: Application and evaluation in a mesoscale meteorological model: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **46**(9), 1396–1409.
- Rauscher, S. A., Coppola, E., Piani, C., and Giorgi, F., 2010, Resolution effects on regional climate model simulations of seasonal precipitation over Europe: *Climate Dynamics*, Springer, **35**(4), 685–711.
- Shin, H. H., and Hong, S. Y., 2011, Intercomparison of planetary boundary-layer parametrizations in the WRF model for a single day from CASES-99: *Boundary-Layer Meteorology*, **139**(2), 261–281.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhi, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X. Y., Wang, W., and Powers, J. G., 2008, A description of the advanced research WRF Version 3: NCAR Technical note-475+STR.
- Sukoriansky, S., 2008, Implementation of the Quasi-Normal Scale Elimination (QNSE) model of stably stratified turbulence in WRF: Report on WRF-DTC Visit.
- Sukoriansky, S., Galperin, B., and Perov, V., 2005, Application of a new spectral theory of stably stratified turbulence to the atmospheric boundary layer over sea ice: *Boundary-Layer Meteorology*, **117**(2), 231–257.
- Wang, W., Bruyère, C., Duda, M., Dudhia, J., Gill, D., Kavulich, M., Keene, K., Lin, H. C., Michalakes, J., Rizvi, S. and Others, 2014, ARW Version 3 Modeling System User's Guide January 2014: National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/contents.html.
- Wilks, D. S., 2011, Forecast verification: Academic Press, **100**, 301–394.
- Xie, B., Fung, J. C. H., Chan, A., and Lau, A., 2012, Evaluation of nonlocal and local planetary boundary layer schemes in the WRF model: *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **117**(12), 1–26.
- <http://www.emc.ncep.noaa.gov/officenotes/newernotes/on437.pdf>.
- Jimenez, P. A., Dudhia, J., Gonzalez-Rouco, J. F., Navarro, J., Montavez, J. P., and Garcia-Bustamante, E., 2012, A revised scheme for the WRF surface layer formulation: *Monthly Weather Review*, **140**(3), 898–918.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., and Joseph, D., 1996, The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project: *Bulletin of the American Meteorological Society*, **77**(3), 437–471.
- Kosovic, B., and Curry, J. A., 2000, A large eddy simulation study of a quasi-steady, stably stratified atmospheric boundary layer: *Journal of the Atmospheric Sciences*, **57**(8), 1052–1068.
- Laprise, R., De Elia, R., Caya, D., Biner, S., Lucas-Picher, P. H., Diaconescu, E., Leduc, M., Alexandru, A., Separovic, L., 2008, Challenging some tenets of regional climate modelling: *Meteorology and Atmospheric Physics*, Springer, **100**(1–4), 3–22.
- Mellor, G. L., and Yamada, T., 1974, A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers: *Journal of the Atmospheric Sciences*, **31**(7), 1791–1806.
- Mellor, G. L., and Yamada, T., 1982, Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems: *Reviews of Geophysics*, **20**(4), 851–875.
- Nakanishi, M., and Niino, H., 2004, An improved Mellor-Yamada level-3 model with condensation physics: Its design and verification: *Boundary-Layer Meteorology*, **112**(1), 1–31.
- Nakanishi, M., and Niino, H., 2006, An improved Mellor-Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog: *Boundary-Layer Meteorology*, **119**(2), 397–407.
- Perrone, T. J., 1979, Winter Shamal in the Persian Gulf: Naval environmental prediction research facility monterey, Technical Report.
- Pleim, J. E., and Chang, J. S., 1992, A non-local closure model for vertical mixing in the convective boundary layer: *Atmospheric environment, Part A, General Topics*, **26**(6), 965–981.

Sensitivity of the WRF model surface wind simulations to initial conditions and planetary boundary layer parameterization schemes (case study: over Persian Gulf)

Siavash Gholami¹, Sarmad Ghader^{2*}, Hasan Khaleghi Zavareh³, Parvin Ghafarian⁴

¹Ph. D. student, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Tehran, Iran

²Associate professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

³Associate professor, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Tehran, Iran

⁴Assistant professor, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Tehran, Iran

(Received: 01 October 2018, Accepted: 20 January 2019)

Summary

In this work, sensitivity and performance of the Weather Research and Forecasting (WRF) model for surface wind field simulations are evaluated under several initial and boundary conditions, along with different planetary boundary layer (PBL) schemes during several dates over the Persian Gulf region. Since there are differences between production approaches and development periods of analysis and reanalysis data (namely, assimilation system) on the one hand, and differences in applied method for PBL parameterization by any scheme on the other hand, this paper aims to identify a suitable set up among the whole configurations which are under examination. To this end, three datasets (two reanalyses and one analysis) including, ERA-Interim, NCEP-R2, and NCEP-FNL and six PBL schemes (two local and four nonlocal) including ACM2, BouLac, MYJ, MYNN, QNSE, and YSU accompanied by their relevant surface-layer schemes are used. To assess the WRF model wind simulations, available observational wind data including 22 synoptic weather stations located in the region and observations of QuikSCAT and ASCAT satellites are employed.

Findings of this study indicate that when the wind simulations are compared with synoptic weather stations observations, irrespective of the type of PBL scheme, ERA-Interim and NCEP-FNL datasets exhibit better performance in comparison with the NCEP-R2 and when PBL schemes are also considered, results show that combination of YSU scheme and ERA-Interim reanalysis data leads to a better estimate of wind speed and combination of YSU and NCEP-FNL data generates less error for wind direction. Moreover, comparison of model wind simulations and observations of QuikSCAT and ASCAT satellites shows that there are no substantial differences between various configurations. However, using YSU and ACM2 schemes, WRF model generates speed and direction of the wind close to the observations of QuikSCAT. Although all tests have almost similar results as ASCAT satellite observations, YSU scheme estimates are slightly better than other schemes.

Overall, the results of this study revealed that the major difference between WRF wind simulations and measured winds arises from the choice of initial conditions data and it does not depend on different PBL schemes. Consequently, changing initial and boundary conditions data has a noticeable impact on the model wind results. Thus, in future studies, emphasis must be more on reanalysis and analysis datasets and the option of WRF PBL parameterization schemes should be the second priority.

Due to the fairly good similarity of the model surface wind with QuikSCAT and ASCAT observations, the choice of WRF model simulations as offshore wind database can be a valid available alternative instead of QuikSCAT and ASCAT wind, particularly when meeting their limitation in spatial resolution (swath data) or temporal sampling.

Keywords: surface wind, WRF, initial/boundary conditions, Persian Gulf, PBL scheme

*Corresponding author:

sghader@ut.ac.ir