

شبیه‌سازی میدان باد سطحی در منطقه دریای عمان با مدل WRF با شرایط اولیه و مرزی متفاوت

پروین غفاریان^{۱*}، نفیسه پگاه‌فر^۱ و محمدرضا محمدپور پنجاه^۲

۱. استادیار، پژوهشکده علوم جوی، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، ایران
 ۲. دانشجوی دکتری، گروه علوم غیر زیستی جوی و اقیانوسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، تهران

(دریافت: ۹۷/۳/۱، پذیرش نهایی: ۹۷/۷/۳)

چکیده

در این تحقیق کارایی مدل میان‌مقیاس WRF برای شبیه‌سازی باد سطحی تحت شرایط اولیه و مرزی متفاوت در سواحل و فراساحل دریای عمان ارزیابی شده است. بدین منظور از داده بازتحلیل Era-interim و داده‌های تحلیلی NCEP-FNL و NCEP-GFS به‌عنوان شرایط اولیه و مرزی استفاده شده است. خروجی میدان باد حاصل از شبیه‌سازی مدل با داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیکی واقع در سواحل دریای عمان در کشورهای ایران و عمان، داده بویه قشم و داده ماهواره ترکیبی مقایسه شده‌اند. از روش کشانش (Nudging) برای بهبود در نتایج خروجی مدل استفاده شده است. نتایج هر سه شبیه‌سازی نشان می‌دهند که مدل در نقاط ساحلی، مقادیر سرعت باد را پیش‌برآورد کرده است. به گونه‌ای که بیشترین برآورد مربوط به داده Era-Interim و کمترین مربوط به داده FNL بوده است. برای مناطق فراساحلی، میانگین اریبی روی کل دامنه مورد مطالعه نشان داد که شبیه‌سازی‌هایی که با داده‌های GFS و FNL انجام شده بود، تمایل به کم‌برآوردی داشته، درحالی‌که داده‌های Era-Interim سرعت باد را بیش‌برآورد کرده‌اند. از مقایسه نمودار هیستوگرام سرعت باد مشخص شد که در هر سه شبیه‌سازی بیشترین میزان خطا در بازه‌های زمانی که سرعت باد کم بوده، رخ داده است. ارزیابی جهت باد نیز نشان داد که داده FNL نسبت به دو داده دیگر عملکرد بهتری را به‌عنوان شرایط اولیه و مرزی برای شبیه‌سازی در منطقه مورد مطالعه داشته است. در کل بهترین عملکرد مدل برای شبیه‌سازی میدان باد در دوره مورد مطالعه با داده‌های FNL در نقاط ساحلی و فراساحلی بوده است.

واژه‌های کلیدی: میدان باد، مدل WRF، دریای عمان، داده بازتحلیل و تحلیلی، شرایط اولیه و مرزی، کشانش.

۱. مقدمه

قدرتمند و مفیدی برای مطالعه و شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی از جمله میدان باد سطحی هستند. مهم‌ترین مسأله در مدل‌سازی پیش‌بینی عددی وضع هوا در میان‌مقیاس، شرایط مرزی و آغازینی است که به مدل خورنده می‌شود. به‌طور کلی برای مطالعات ارزیابی انرژی باد و شبیه‌سازی باد، داده‌های مرزی و آغازین از داده‌های بازتحلیل به‌دست می‌آید که تمام اطلاعات جوی مورد نیاز برای مدل‌ها را فراهم می‌کند. داده‌های بازتحلیل داده‌های شبکه‌بندی شده‌ای هستند که از ترکیب داده‌های به‌دست آمده از مدل گردش کلی جو با داده‌های مشاهداتی حاصل شده و قابل‌دسترس در چارچوب یک مدل فیزیکی هستند (ترنبرث و همکاران، ۲۰۱۰). از جمله داده‌های بازتحلیل نسل جدید می‌توان به NCEP-R2

باد سطحی بر روی دریاها و اقیانوس‌ها، نقش کلیدی بر بسیاری از پدیده‌های جوی اعم از تغییر در توده‌های هوا، شارهای رطوبتی ناشی از تبخیر بر روی سطح دریا، خیزاب طوفان و امواج دارد (منندز و همکاران، ۲۰۱۴). صنعت رو به رشد استفاده از انرژی بادی و افزایش رخداد پدیده‌های فرین جوی نیاز به شبیه‌سازی میدان باد را که هنوز به عنوان چالشی مهم برای پیش‌بین‌ها و مدل‌سازان جوی است را بیش از پیش مهم می‌سازد (کاروالیو و همکاران، ۲۰۱۲). از این رو شبیه‌سازی و پیش‌بینی دقیق باد سطحی بر روی دریاها و اقیانوس‌ها در سال‌های اخیر از اهمیت ویژه‌ای در تحقیقات علمی و صنعتی برخوردار بوده است (کاروالیو و همکاران، ۲۰۱۲؛ منندز و همکاران، ۲۰۱۴). مدل‌های هواشناسی منطقه‌ای ابزار

داده‌های NCEP-FNL و NCEP-GFS در دوره‌های زمانی پیکربندی عملیاتی متفاوتی را تجربه کرده که موجب برخی ناسازگاری‌ها میان آنها شده است. تمام ویژگی‌های عملیاتی میان NCEP-FNL و NCEP-GFS شامل مدل جوی و پیکربندی‌های آن یکسان است. مهم‌ترین تفاوت میان این دو داده تحلیلی این است که NCEP-FNL نسبت به NCEP-GFS داده‌های اندازه‌گیری شده بیشتری را داده‌گواری می‌کند. زیرا NCEP-FNL از داده‌های همدیدی سه ساعت گذشته استفاده می‌کند که داده‌های مشاهداتی بیشتری را پوشش می‌دهد. در عوض NCEP-GFS داده‌های مشاهداتی کمتری را داده‌گواری می‌کند و قدرت تفکیک قائم و افقی بهتری دارد (کاروالیو و همکاران، ۲۰۱۴a). برای ERA-Interim سامانه داده‌گواری چهاربعدی یکی از مزایای بزرگ به‌شمار آمده و در مقایسه با سایر بازتحلیل‌ها که از تحلیل متغیر سه‌بعدی استفاده می‌کنند نتایج بهتری تولید می‌کنند.

در مبحث شبیه‌سازی باد، تاباتا و همکاران (۲۰۱۱) باد افقی وردسپهر زیرین اندازه‌گیری شده را با داده‌های بازتحلیل‌های جهانی بر روی اندونزی مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که ERA-Interim بالاترین ضریب همبستگی و پایین‌ترین انحراف استاندارد را نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده تولید می‌کند. مندز و همکاران (۲۰۱۴)، میدان باد سطحی دور از ساحل بر روی دریای مدیترانه را با مدل WRF که توسط چندین داده بازتحلیل مختلف شبیه‌سازی شده بود را ارزیابی کردند. از بین داده‌های بازتحلیل ERA-40, JRA-25, NCEP-R1, ERA-Interim، شبیه‌سازی با استفاده از ERA-Interim بالاترین دقت را تولید کرد. حساسیت‌سنجی شرایط اولیه و مرزی مدل WRF با داده‌های بازتحلیل مختلف برای شبیه‌سازی میدان باد در سواحل و فراساحل شبه جزیره ایبری نشان داد (کاروالیو و همکاران، ۲۰۱۴b). که شبیه‌سازی با استفاده از ERA-Interim بالاترین دقت را دارد و استفاده از بازتحلیل‌های نسل جدید در مقایسه با باز

(National Centers for Environmental Prediction-) (second version) (کانامیتسو و همکاران، ۲۰۰۲) و ECMWF Era-Interim (سیمونز، ۲۰۰۶) اشاره کرد. در مدل‌سازی میان مقیاس باد که در مطالعات امواج، طوفان‌های حاره‌ای و غیره به‌کار گرفته می‌شود معمولاً از دو مجموعه داده تحلیلی که توسط NCEP تولید شده‌اند، NCEP-GFS (NCEP Global Forecast System) و NCEP-FNL (NCEP Final Analysis) استفاده می‌شود (کاروالیو و همکاران، ۲۰۱۴a). البته این دو مجموعه داده تحلیلی با داده‌های بازتحلیل تفاوت‌هایی دارند که در ادامه با جزئیات بیان خواهد شد. ERA-Interim، NCEP-R2 و NCEP-FNL و NCEP-GFS مجموعه داده‌های در دسترس شرایط مرزی و آغازین هستند که به‌صورت رایگان و عمومی تا زمان حال در اختیار قرار دارند و کل جغرافیای زمین را پوشش می‌دهند. مهم‌ترین تفاوت میان آنها را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد. NCEP-R2 کمترین تفکیک افقی و قائم را در میان این چهار مجموعه داده دارد و تنها مقدار محدودی از مشاهدات ماهواره‌ای را در داده‌گواری استفاده می‌کند. ERA-Interim از جمله مهم‌ترین داده‌های بازتحلیل جهانی است که در اروپا تولید شده و بر خلاف سایر بازتحلیل‌ها از روش داده‌گواری چهاربعدی استفاده می‌کند (دی و آپالا، ۲۰۰۹؛ دی و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین در این مجموعه داده از روش تصحیح اریبی (Bias) متغیر استفاده می‌شود که موجب ارتقاء چشم‌گیر و تصحیح اریبی‌های مرتبط با تابش ماهواره می‌شود. بدین‌گونه که داده‌های بازتحلیل عموماً حجم بزرگ‌تری از داده‌های مشاهداتی و اندازه‌گیری شده موجود را در بر می‌گیرند. درحالی‌که NCEP-FNL و NCEP-GFS به‌صورت روزانه تولید می‌شوند ولی داده‌های بازتحلیل بعد از چند روز یا چند ماه به‌منظور تحلیل همگنی در دسترس قرار می‌گیرند. همچنین از مزایای داده‌های بازتحلیل این است که برای پارامترسازی از مدلی با فیزیک و پارامترسازی‌های مشابه استفاده می‌کنند تا کل داده را تولید کنند. درحالی‌که

شبیه‌سازی شده با مقادیر دیدبانی شده باد در ۱۱ ایستگاه هواشناسی در سواحل دو کشور ایران و عمان، یک بویه هواشناسی و داده‌های ماهواره بر روی دریا مقایسه شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. داده‌های دیدبانی باد

داده‌های مشاهداتی باد سطحی در سواحل دریای عمان و خلیج فارس از ۱۱ ایستگاه همدیدی در دو کشور ایران و عمان به همراه یک بویه انتخاب شدند. مختصات ایستگاه‌ها در جدول ۱ آمده است. با توجه به اینکه بویه سمت و سرعت باد را در ارتفاع ۲ متری اندازه‌گیری می‌کند با استفاده از رابطه (۱) باد ارتفاع ۱۰ متری برای مقایسه با داده‌های مدل محاسبه شده است.

$$U_{10} = U_{z_m} \frac{\ln\left(\frac{10}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_m}{z_0}\right)} \quad (1)$$

تاریخ مورد مطالعه جون ۲۰۰۹ انتخاب شد، به علت اینکه در ماه جون شرایط مانسون تابستانی بر روی منطقه حاکم است و همچنین داده‌های مشاهداتی در این تاریخ در دسترس بود.

تحلیل‌های قدیمی می‌توانند پیشرفت چشم‌گیری در شبیه‌سازی میدان باد اقیانوسی ایجاد کنند (کاروالیو و همکاران، ۲۰۱۴b).

قادر و همکاران (۲۰۱۴) میدان باد سطحی را بر روی دریای خزر با استفاده از مدل WRF، شبیه‌سازی کردند. با کاربست داده باز تحلیل ERA-Interim به عنوان شرایط اولیه و مرزی در مدل WRF نتایج قابل‌قبولی بین برون‌داد مدل و داده‌های دیدبانی به دست آمد. همچنین قادر و همکاران (۱۳۹۴) سامانه‌ای همادی برای مدل WRF جهت پیش‌بینی میدان باد سطحی در محدوده خلیج فارس را توسعه دادند. نتایج حاصل نشان از عملکرد مناسب میانگین همادی در مقایسه با پیش‌بینی قطعی برای پیش‌بینی میدان باد داشت. لایقی و همکاران (۱۳۹۶)، میدان دما، رطوبت و باد را نسبت به شرایط فیزیکی متفاوت با مدل WRF در منطقه خلیج فارس و دریای عمان شبیه‌سازی کرده و حساسیت مدل را در پیش‌بینی میدان باد نسبت به طرحواره لایه مرزی به دست آوردند. هدف از این تحقیق ارزیابی عملکرد مدل میان‌مقیاس WRF با استفاده از شرایط اولیه و مرزی متفاوت (ERA-Interim, GFS, FNL) برای شبیه‌سازی میدان باد سطحی در مناطق ساحلی و فراساحلی دریای عمان است. باد

جدول ۱. مختصات ایستگاه‌های مورد استفاده در این مطالعه.

نام اختصاری	نام ایستگاه	کشور	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
S1	چابهار	ایران	۲۵/۲۸۳	۶۰/۶۱۶
S2	کنارک چابهار	ایران	۲۵/۴۳۳	۶۰/۳۶۶
S3	جاسک	ایران	۲۵/۶۳۳	۵۷/۷۶۶
S4	قشم	ایران	۲۶/۹۱۶	۵۵/۹۱۶
S5	بویه قشم	ایران	۲۶/۹۱۶	۵۶/۲۸۰
S6	بندر عباس	ایران	۲۷/۲۱۶	۵۶/۳۶۶
S7	دیبا	عمان	۲۵/۶۱۶	۵۶/۲۴۷
S8	خصب	عمان	۲۶/۱۶۲	۵۶/۲۳۷
S9	مسقط	عمان	۲۳/۵۹۵	۵۸/۲۹۸
S10	راس الحد	عمان	۲۲/۳۰۱	۵۹/۸۱۷
S11	سوهار	عمان	۲۴/۴۶۷	۵۶/۶۴۴
S12	قلهات	عمان	۲۲/۶۶۵۳	۵۹/۴۰۱۹

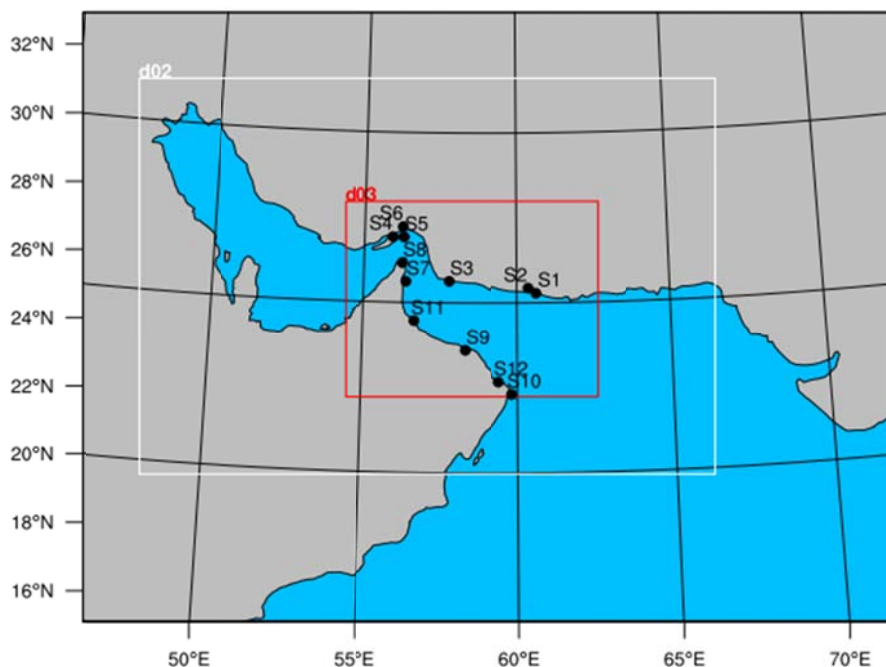
۲-۲. داده‌های ماهواره

برای داده‌های باد دور از ساحل از داده باد ماهواره‌ای ترکیبی در ارتفاع ۱۰ متری سطح دریا استفاده شد. این داده‌ها بادهای اقیانوسی ترکیبی مرکز ملی داده‌های اقلیمی (The National Climatic Data Center) NCDC-BSW (Blended Sea Winds) داده‌های شبکه‌بندی شده از بردارهای باد سطحی دور از ساحل هستند که تمام کره زمین را با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه و با گام زمانی شش ساعت پوشش می‌دهند (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۶).

۳-۲. تنظیمات مدل

نسخه ۱-۷-۳ مدل پژوهش و پیش‌بینی وضع هوا (WRF) با هسته دینامیکی ARW در این پژوهش استفاده شده است (اسکاماروک و همکاران، ۲۰۰۸). این مدل یک مدل غیر هیدرواستاتیک با گزینه‌های متعددی برای پارامترسازی فرآیندهای فیزیکی است. مدل با سه دامنه تو در تو با تفکیک افقی ۲۷، ۹ و ۳ کیلومتر و نگاشت تصویر لامبرت (Lambert) اجرا شد که کوچکترین دامنه

دریای عمان و قسمت‌هایی از خلیج فارس را شامل می‌شود. دامنه‌های تعریف شده در مدل WRF در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. در اجرای مدل از روش کشانش (Nudging) جهت بهبود نتایج استفاده شده است. کشانش یکی از روش‌های داده‌گواری است که در حل معادلات عددی جواب‌ها را به مقادیر اندازه‌گیری (یا تحلیلی) نزدیک می‌کند (اوت، ۲۰۰۸؛ آزادی و همکاران، ۱۳۹۵). روش کشانش برای کمیت‌های دما، باد و رطوبت در بالای دهمین تراز مدل (تقریباً بالای لایه مرزی) به کار گرفته شد. ضریب کشانش برای هر یک از کمیت‌های به کار گرفته شده برابر با ۰/۰۰۰۳ در نظر گرفته شد. همچنین دمای روزانه سطح دریا (SST) از پایگاه تجزیه و تحلیل داده NCEP با تفکیک مکانی ۰/۰۸۳ به دست آمده و به مدل داده شده است. تنظیمات فیزیکی مدل که در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته شد در جدول ۲ آمده است. مدل برای ماه جون ۲۰۰۹ در بازه‌های ۶۰ ساعته اجرا شد که ۱۲ ساعت اول آن به‌عنوان زمان تطبیق در نظر گرفته شد.



شکل ۱. دامنه‌های تعریف شده در مدل WRF با استفاده از نگاشت تصویر لامبرت. مستطیل قرمز نشان‌دهنده محدوده دامنه سوم بوده و نقاط سیاه نشان‌دهنده ایستگاه‌های استفاده شده برای ارزیابی مدل هستند.

جدول ۲. پارامتره‌سازی‌های فیزیکی به کار گرفته شده برای شبیه‌سازی میدان باد.

پارامترسازی فیزیکی	طرحواره انتخاب شده
لایه سطحی	MM5 similarity
لایه مرزی	Yonsei University
سطح زمین	5-layer
تابش طول موج بلند	RRTM scheme
تابش طول موج کوتاه	Dudhia
خردفیزیک	WRF Single-Moment 6-class scheme

۲-۴. ارزیابی مدل

مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا توسط روش‌های مختلفی ارزیابی می‌شوند و این روش‌ها مکمل یکدیگر هستند، (پیلکه، ۲۰۰۲). در تحقیق حاضر برای ارزیابی نتایج مدل بر روی خشکی از داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های هواشناسی و بر روی دریا از داده‌های ماهواره به‌عنوان داده مشاهداتی استفاده شده است. برای ارزیابی عملکرد مدل، سه فرانسج آماری استفاده شد:

ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE= The Root Mean Squared Error)

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\theta'_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

که

$$\theta'_i = \theta_i^x - \theta_i^{obs} \quad (3)$$

θ'_i معرف انحراف (اختلاف) میان مقدار سرعت باد شبیه‌سازی شده و سرعت باد مشاهداتی در همان مکان و زمان و N تعداد کل جفت مقادیر شبیه‌سازی - دیدبانی است.

برای جهت باد، θ' که متغیری مدور است و نه خطی، به دلیل اینکه انحراف مطلق جهت باد نمی‌تواند در قدرمطلق از ۱۸۰ درجه تجاوز کند، تفسیر متفاوتی خواهد داشت. برای این مطالعه θ' توسط رابطه زیر تفسیر می‌شود:

$$\theta'_i = (\theta_i^x - \theta_i^{obs}) [1 - 360/|\theta_i^x - \theta_i^{obs}|] \quad (4)$$

$$if |\theta_i^x - \theta_i^{obs}| > 180^\circ$$

برای نیم کره شمالی، θ' مثبت معرف انحراف ساعتگرد و

θ' منفی انحراف پادساعتگرد است.

اریبی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta'_i \quad (5)$$

توسط اریبی می‌توان گرایش داده‌ها را تخمین زد. اگر اریبی مثبت باشد، مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر واقعی بیشتر تخمین زده شده است و اگر منفی باشد مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر واقعی کمتر تخمین زده شده است. برای جهت باد، اریبی مثبت/منفی به معنای انحراف ساعتگرد/پادساعتگرد است.

خطای انحراف معیار: STDE=The Standard Deviation Error

خطای انحراف معیار سرعت باد از رابطه ۵ محاسبه شد:

$$STDE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\theta'_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta'_i \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \left[(RMSE)^2 - (Bias)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

این رابطه بسیار مهم است تا پراکندگی خطا تخمین زده شود. اولویت به ارزش‌ها از انحراف معیار به دست خواهد آمد و این فرض از آنجا ناشی می‌شود که حتی اگر در یک شبیه‌سازی انحراف معیار یا بایاس مقادیر بالایی داشته باشند، ولی مقدار انحراف معیار پایین باشد، به این معنی است که خطا تا حدودی ثابت است و فیزیک شبیه‌سازی صحیح است. اگر در یک شبیه‌سازی مقادیر انحراف معیار بالا داشته باشد، خطا تصادفی است و شبیه‌سازی معنای فیزیکی کمی دارد، حتی اگر مقادیر نسبتاً کمی از میانگین مربعات خطا یا اریبی داشته باشد.

۲-۵. شرایط اولیه و مرزی

در این پژوهش از سه نوع داده برای شرایط اولیه و مرزی مدل میان مقیاس WRF استفاده شده است. این داده‌ها شامل: داده Era-Interim، NCEP-FNL و NCEP-GFS هستند. برای اختصار از این به بعد در متن NCEP-FNL را با FNL و NCEP-GFS را با GFS بیان کرده‌ایم.

داده Era-Interim از یک نسخه ثابت سامانه پیش‌بینی عددی وضع هوا (IFS-Cy31r2) برای تولید داده‌های بازتحلیل استفاده می‌کند. در تولید این داده علاوه بر کاهش تفکیک افقی نسبت به نسل قبلی داده مرکز ECMWF (Era-40) از سامانه داده گواری ۴ بعدی (4DVar) نیز استفاده می‌شود (سیمونز و همکاران، ۲۰۰۶). داده گواری ۴ بعدی، بسط زمانی داده گواری ۳ بعدی است که تنها مشاهدات را در زمانی خاص داده گواری می‌کرد.

داده‌های مدل GFS که یک مدل پیش‌بینی هواشناسی است توسط مرکز ملی پیش‌بینی محیط زیست آمریکا (NCEP) تهیه شده است. مدل GFS یک مدل تلفیقی است که از چهار مدل مجزا (مدل جو، مدل اقیانوس، مدل زمین/خاک و مدل یخ دریا) تشکیل شده است که با هم کار می‌کنند تا تصویر دقیق از شرایط آب و هوایی کل دنیا را ارائه دهد. تغییراتی به‌طور منظم در مدل GFS ایجاد شده تا بهبودی عملکرد مدل و دقت پیش‌بینی صورت گیرد.

داده‌های تحلیلی عملیاتی جهانی FNL داده‌هایی با تفکیک افقی ۱ درجه هستند. این محصول از سیستم همگام‌سازی داده‌های جهانی (GDAS) گرفته شده که به‌طور مداوم داده‌های مشاهداتی از سیستم مخابراتی جهانی (GTS) و سایر منابع را برای بسیاری از تحلیل‌ها جمع‌آوری می‌کند. داده FNL با همان مدل ساخته می‌شود که NCEP در داده GFS استفاده می‌کند، اما FNL ها حدود یک ساعت یا بیشتر پس از شروع GFS تولید می‌شود. این تأخیر باعث می‌شود تا داده‌های مشاهداتی بیشتری در FNL مورد استفاده قرار گیرند. خلاصه‌ای از

مشخصات این داده‌ها در جدول شماره ۳ بیان شده‌است.

۳. نتایج و بحث

مقادیر اریبی، ریشه میانگین مربعات خطا و انحراف معیار بین داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی مدل با استفاده از سه شرایط اولیه و مرزی متفاوت در جدول ۴ نشان داده شده است. مقادیر محاسبه شده در این جدول با استفاده از مقادیر معتبر داده مشاهداتی و با توجه به دوره در دسترس داده اندازه‌گیری به‌دست آمده‌اند. در انتهای جدول ۴، مقادیر میانگین کل ایستگاه‌ها به‌صورت میانگین وزنی (با در نظر گرفتن تعداد داده در دسترس هر ایستگاه به عنوان وزن) نشان داده شده است. مقادیر اریبی در ایستگاه‌های مختلف تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد. سرعت باد سطحی در بعضی نقاط بیش‌برآورد و در برخی دیگر کم برآورد شده است. بیشترین بیش‌برآورد در ایستگاه چابهار بوده که در هر سه شبیه‌سازی رخ داده‌است. کمترین برآورد سرعت باد در ایستگاه‌های کنارک و قشم بوده است. در بیشتر شبیه‌سازی‌ها مدل تمایل به بیش‌برآورد داشته است. اریبی‌های کم در جزایر و ایستگاه‌های کشور عمان مشاهده شده است.

به‌طور کلی، نتایج اریبی نشان می‌دهد که برای هر سه شرایط اولیه و مرزی به کار گرفته شده، مدل مقادیر باد را بیش از واقعیت پیش‌بینی کرده است. که بیشترین این برآورد مربوط به داده Era-Interim و کمترین مربوط به داده FNL است. همان‌گونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود در میانگین کل ایستگاه‌ها بهترین عملکرد در بین سه شبیه‌سازی مختلف، مربوط به شبیه‌سازی با داده‌های FNL است. نتایج نشان می‌دهد که تفکیک بالاتر داده ورودی به‌تنهایی نمی‌تواند باعث بهبود شبیه‌سازی شود به‌گونه‌ای که شبیه‌سازی با داده‌های FNL که پایین‌ترین تفکیک افقی بین داده‌ها را دارا می‌باشد، بهترین عملکرد بین سه شبیه‌سازی مختلف را داشته است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که داده‌های NCEP (GFS و FNL) نسبت به Era-Interim دارای

تعداد داده‌های بیشتری نسبت به استفاده می‌کند). از این رو می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های مشاهده‌ای اولیه برای تهیه داده‌های تحلیلی یکی از عوامل تأثیرگذار در شبیه‌سازی‌های میان‌مقیاس است. به صورت معمول داده FNL حدود ۱۰ درصد داده‌های بیشتری نسبت به داده GFS دارد.

عملکرد بهتری در شبیه‌سازی میدان باد در منطقه مورد مطالعه هستند. همچنین داده‌های GFS و FNL هر دو در مرکز NCEP تولید می‌شوند و از روش‌های داده‌گذاری و سامانه پیش‌بینی مشابهی استفاده می‌کنند و اختلاف عمده آنها در تعداد داده‌های مشاهده‌ای به کار گرفته شده در ایجاد داده تحلیلی است (داده FNL از

جدول ۳. مشخصات داده‌های استفاده شده برای شرایط مرزی و اولیه مدل WRF.

نام داده	نوع داده	تفکیک افقی (درجه)	تعداد لایه‌های قائم	بازه در دسترس داده	سامانه داده‌گذاری
ERA-Interim	بازتحلیل	۰/۷۵	۶۰	۱۹۷۹ تا حال	4D-Var
NCEP-FNL	تحلیل	۱	۵۲	۱۹۹۹ تا حال	3D-Var
NCEP-GFS	تحلیل	۰/۵	۶۴	۲۰۰۴ تا حال	3D-Var

جدول ۴. مقایسه بین داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی سرعت باد در ایستگاه‌های مورد مطالعه.

نام ایستگاه	Bias	RMSE	STDE	GFS	FNL	Era-Interim
بندر عباس	-0.79	1.89	1.72	-0.71	-0.56	-0.56
	1.84	2.01	1.88	2.01	1.84	1.84
	1.75	1.88	1.72	1.88	1.75	1.75
چابهار	2.43	3.07	2.43	2.52	2.54	2.54
	3.21	3.16	3.07	3.16	3.21	3.21
	1.96	1.91	1.88	1.91	1.96	1.96
کنارک-چابهار	-0.72	2.57	2.57	-0.78	-0.70	-0.70
	2.77	2.66	2.57	2.66	2.77	2.77
	2.68	2.54	2.47	2.54	2.68	2.68
جاسک	1.03	2.16	2.16	1.13	1.31	1.31
	2.40	2.21	2.16	2.21	2.40	2.40
	2.01	1.90	1.90	1.90	2.01	2.01
قشم	-0.67	2.76	2.76	-0.60	-0.73	-0.73
	2.67	2.80	2.76	2.80	2.67	2.67
	2.57	2.74	2.68	2.74	2.57	2.57
قشم-بویه	0.48	1.76	1.76	0.45	0.61	0.61
	1.98	2.08	1.76	2.08	1.98	1.98
	1.88	2.03	1.69	2.03	1.88	1.88
دیبا	-0.15	2.60	2.60	0.07	0.45	0.45
	2.95	2.64	2.60	2.64	2.95	2.95
	2.91	2.64	2.59	2.64	2.91	2.91
خصب	-0.10	3.07	3.07	-0.22	0.52	0.52
	3.14	3.00	3.07	3.00	3.14	3.14
	3.10	3.00	3.07	3.00	3.10	3.10
مسقط	0.88	2.93	2.93	0.83	1.05	1.05
	3.28	3.00	2.93	3.00	3.28	3.28
	3.11	2.89	2.80	2.89	3.11	3.11
کلهات	0.20	2.88	2.88	0.54	0.54	0.54
	3.40	3.05	2.88	3.05	3.40	3.40
	3.35	3.00	2.87	3.00	3.35	3.35
راس الحد	-0.49	2.63	2.63	-0.77	-0.05	-0.05
	2.19	2.70	2.63	2.70	2.19	2.19
	2.19	2.59	2.58	2.59	2.19	2.19
سوهار	0.17	2.33	2.33	0.21	0.47	0.47
	2.41	2.25	2.33	2.25	2.41	2.41
	2.36	2.24	2.32	2.24	2.36	2.36
میانگین کل ایستگاه‌ها	0.19	2.59	2.59	0.22	0.45	0.45
	2.73	2.66	2.59	2.66	2.73	2.73
	2.70	2.65	2.58	2.65	2.70	2.70

شبهه‌سازی با داده‌های Era-Interim مقادیر بالاتر از مشاهدات را پیش‌بینی کرده است. در اینجا نیز می‌توان نتیجه گرفت بهترین عملکرد مربوط به شبهه‌سازی با داده FNL است. دو شبهه‌سازی با داده GFS و FNL اختلاف کمی در برخی از بازه‌های سرعت باد دارند که این نزدیکی نتایج می‌تواند ناشی از یکسان بودن مدل‌های مورد استفاده در این دو نوع داده باشد. این در حالی است که شبهه‌سازی با داده Era-Interim اختلاف چشم‌گیری با دو شبهه‌سازی دیگر از خود نشان می‌دهد.

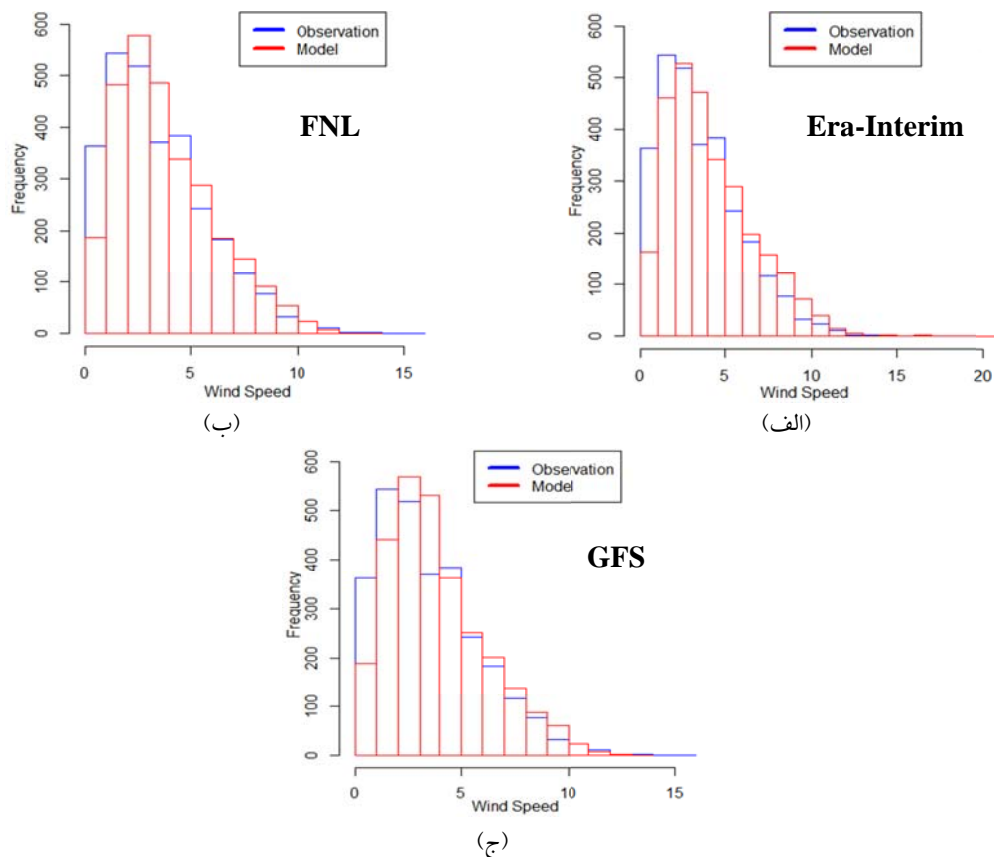
به منظور ارزیابی خطای شبهه‌سازی در بازه‌های مختلف سرعت باد، پارامترهای آماری اریبی و ریشه میانگین مربعات خطا محاسبه و نتایج آن در جدول شماره ۶ آورده شده است. جدول ۶ مقایسه سرعت باد شبهه‌سازی شده و دیدبانی را در بازه‌های مختلف سرعت باد مشاهداتی را به صورت میانگین وزنی کل ایستگاه‌ها نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در بازه‌های میانی سرعت باد (بین ۳ تا ۱۲ متر بر ثانیه) شبهه‌سازی‌ها کمترین خطا را نشان می‌دهند. نکته قابل توجه دیگر این است که به جز در بازه پایین سرعت باد (کمتر از ۳ متر بر ثانیه) در بقیه بازه‌های سرعت باد مدل سرعت باد را کمتر برآورد کرده است (مقادیر اریبی منفی است). همچنین هر چقدر به سمت بازه‌های بالاتر سرعت باد پیش می‌رویم مقدار بایاس منفی‌تر شده است. در بادهای بیش از ۱۲ متر بر ثانیه، کمترین کم‌برآوردی مربوط به داده Era-Interim و بیشترین مربوط به FNL است. در صورتی که در سرعت‌های پایین عملکرد FNL بهتر بوده است.

برای ارزیابی اینکه آیا نتایج شبهه‌سازی سرعت باد توسط مدل تا چه میزان موفق بوده است، اختلاف سرعت باد بین مقادیر دیدبانی شده در ایستگاه‌های مورد مطالعه با داده‌های Era-Interim، FNL و GFS به صورت مستقیم صورت گرفت و نتایج آن با نتایج حاصل از شبهه‌سازی مقایسه شد. نتایج این ارزیابی در جدول شماره ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود میزان خطای داده‌های اولیه بیشتر از داده‌های شبهه‌سازی شده مدل WRF بوده است. این خطا مربوط به تفکیک پایین داده‌های جهانی و همچنین عدم در نظر گرفتن کامل فیزیک جو در این داده‌ها است. همچنین دو داده GFS و FNL خطای کمتری نسبت به داده Era-Interim دارند. نکته قابل توجه کم‌برآوردی داده Era-Interim در میانگین کل ایستگاه‌ها نسبت به داده دیدبانی است، در صورتی که نتایج شبهه‌سازی نشان از بیش‌برآورد داشته است.

شکل ۲ مقایسه نمودار هیستوگرام سرعت باد را بین داده‌های مشاهداتی و شبهه‌سازی برای داده‌های کل ایستگاه‌ها نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، در هر سه شبهه‌سازی بیشترین میزان خطا مربوط به بازه‌هایی است که سرعت باد کمتر از ۳ متر بر ثانیه است. در بازه‌های میانی (۳ تا ۱۲ متر بر ثانیه)، مدل در شبهه‌سازی سرعت باد عملکرد مناسبی داشته است. همچنین در مقادیر بالای سرعت باد (بالای ۱۲ متر بر ثانیه) شبهه‌سازی‌ها رفتار متفاوتی از خود نشان داده‌اند. در مقادیر بالای سرعت باد دو شبهه‌سازی با داده‌های GFS و FNL مقادیر کمتر از مشاهدات را پیش‌بینی کرده‌اند در حالی که

جدول ۵. مقایسه بین داده‌های سرعت باد دیدبانی و داده‌های FNL، GFS و Era-Interim در ایستگاه‌های مورد مطالعه.

Era-Interim	GFS	FNL		
-0.68	0.48	0.52	Bias	میانگین کل ایستگاه‌ها
3.75	3.12	3.27	RMSE	
3.69	3.10	3.23	STDE	



شکل ۲. مقایسه هیستوگرام داده‌های مشاهداتی (خط آبی) و داده‌های شبیه‌سازی شده (خط قرمز) برای سه شبیه‌سازی مختلف برای کل ایستگاه‌های مورد مطالعه. الف) Era-Interim، ب) FNL، ج) GFS.

جدول ۶. مقایسه خطای شبیه‌سازی مدل WRF در بازه‌های سرعت مختلف.

>12 m/s		8-12 m/s		3-8 m/s		<3 m/s		شبیه‌سازی
Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE	
-4.31	4.75	-1.73	2.88	-0.83	2.51	2.28	3.32	FNL
-4.46	4.81	-1.85	2.90	-0.90	2.53	2.43	3.47	GFS
-3.93	4.94	-1.69	2.85	-0.91	2.57	2.54	3.64	Era-Interim

میانگین مربعات خطا و انحراف معیار مربوط به اجرای FNL است. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که برای جهت باد نیز این داده FNL است که نسبت به دو داده دیگر عملکرد بهتری را به‌عنوان شرایط اولیه و مرزی برای شبیه‌سازی در منطقه مورد مطالعه از خود نشان داده است.

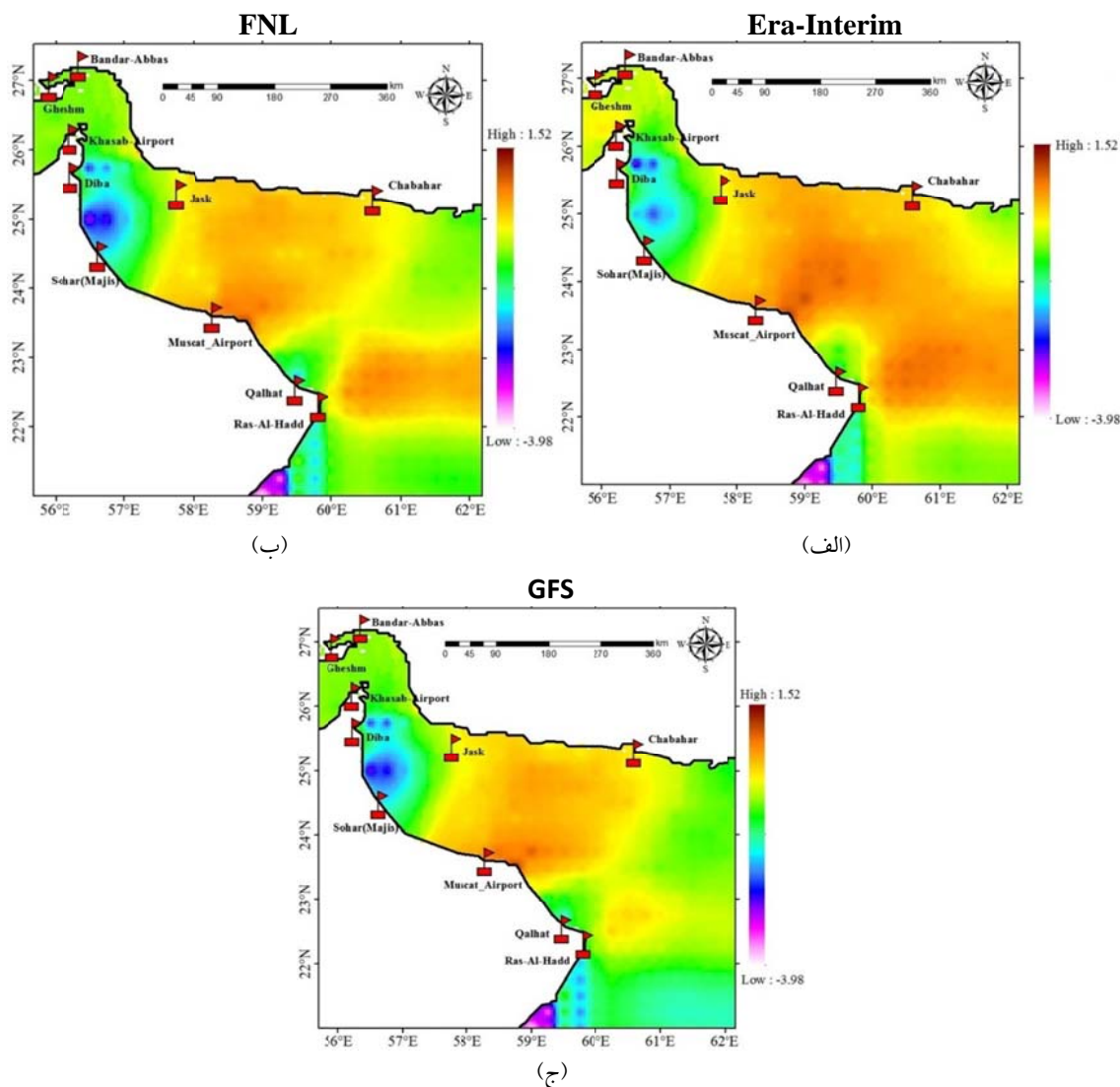
کمیت‌های آماری اریبی، ریشه میانگین مربعات خطا و انحراف معیار مانند سرعت باد برای جهت باد نیز محاسبه شده است که برای اختصار تنها میانگین کل ایستگاه‌ها در جدول ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود Era-Interim کمترین اریبی را نشان داده ولی کمترین ریشه

جدول ۷. مقایسه بین داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی جهت باد در میانگین کل ایستگاه‌های مورد مطالعه.

Era-Interim	GFS	FNL	نام ایستگاه	
4.26	6.82	5.87	Bias	میانگین کل ایستگاه‌ها
84.17	85.34	83.99	RMSE	
84.06	85.06	83.78	STDE	

دیده می‌شود در هر سه پیکربندی مورد مطالعه بیشترین میزان خطا در سواحل غربی دریای عمان مشاهده شده که می‌تواند ناشی از این واقعیت باشد که سواحل دریای عمان دارای پیچیدگی عوارض زمینی نسبتاً پیچیده‌ای برخوردارند. باید این نکته را نیز در نظر داشته باشیم که داده‌های باد ماهواره در مناطق نزدیک به ساحل نسبت به مناطق دور از ساحل دارای خطای بیشتری هستند (پیکت و همکاران، ۲۰۰۳؛ تانگ و همکاران، ۲۰۰۴).

برای بررسی توزیع خطا روی منطقه مورد مطالعه از داده‌های ماهواره‌ای استفاده شده است. با توجه به اینکه داده ماهواره بر روی شبکه منظم با تفکیک ۰/۲۵ درجه وجود داشته، ابتدا داده‌های خروجی مدل نیز به صورت شبکه منظم ۰/۲۵ درجه در آمده و سپس اختلاف بین داده شبیه‌سازی و ماهواره (WRF-Satellite) محاسبه شده که توزیع آن در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳



شکل ۳. توزیع خطای بین داده‌های باد شبیه‌سازی شده و داده‌های ماهواره برای سه شبیه‌سازی مختلف در منطقه مورد مطالعه. (الف) Era-Interim، (ب) FNL، (ج) GFS.

است که سرعت باد کم است. در بازه‌های میانی، مدل در شبیه‌سازی سرعت باد عملکرد مناسبی داشته است. در مقادیر بالای سرعت باد دو شبیه‌سازی با داده‌های GFS و FNL مقادیر کمتر از مشاهدات را پیش‌بینی کرده‌اند در حالی که شبیه‌سازی با داده‌های ECMWF مقادیر بالاتر از مشاهدات را پیش‌بینی کرده است. دو شبیه‌سازی با داده GFS و FNL اختلاف کمی در برخی از بازه‌های سرعت باد دارند که این نزدیکی نتایج می‌تواند ناشی از یکسان بودن مدل‌های مورد استفاده در این دو نوع داده باشد. این در حالی است که شبیه‌سازی با داده Era-Interim اختلاف چشم‌گیری با دو شبیه‌سازی دیگر از خود نشان می‌دهد. برای جهت باد این داده FNL است که نسبت به دو داده دیگر عملکرد بهتری را به‌عنوان شرایط اولیه و مرزی برای شبیه‌سازی در منطقه مورد مطالعه از خود نشان داده است. برای بررسی توزیع خطا روی منطقه مورد مطالعه در هر سه پیکربندی مورد مطالعه بیشترین میزان خطا در سواحل غربی دریای عمان مشاهده شده که می‌تواند ناشی از این واقعیت باشد که سواحل دریای عمان دارای پیچیدگی عوارض زمینی نسبتاً پیچیده‌ای برخوردارند. البته تفکیک پایین داده‌های توپوگرافی مدل را نیز می‌توان از عوامل دیگر تشدید خطای مدل در نزدیکی سواحل برشمرد. میانگین بایاس روی کل دامنه مورد مطالعه مقادیر منفی را در هر دو شبیه‌سازی با داده‌های GFS و FNL را نشان داده در حالی که برای شبیه‌سازی با داده‌های ECMWF مقدار مثبت را نشان می‌دهد. که نشان از تمایل شبیه‌سازی‌ها با داده‌های GFS و FNL به کم‌برآوردی و تمایل به بیش-برآوردی با استفاده از داده‌های Era-Interim را در منطقه مورد مطالعه دارد. بهترین عملکرد را بین سه شبیه‌سازی مورد بررسی، شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های FNL از خود نشان داده است. همان‌گونه که از نتایج مشاهده شد تفکیک بالاتر داده ورودی به‌تنهایی نمی‌تواند باعث بهبود شبیه‌سازی شود به‌گونه‌ای که شبیه‌سازی با داده‌های FNL که پایین‌ترین تفکیک افقی بین داده‌ها را دارا است بهترین عملکرد بین سه شبیه‌سازی مختلف را داشته است. همچنین

البته تفکیک پایین داده‌های توپوگرافی مدل را نیز می‌توان از عوامل دیگر تشدید خطای مدل در نزدیکی سواحل برشمرد. برای مثال رجوع شود به (کاروالیو و همکاران، ۲۰۱۲؛ مس و اونز، ۲۰۱۱). بررسی‌ها هم نشان از پیچیدگی توپوگرافی در سواحل غربی دریای عمان دارد که تأیید کننده این امر است. میانگین اریبی روی کل دامنه مورد مطالعه مقادیر منفی را در هر دو شبیه‌سازی با داده‌های GFS و FNL را نشان داده در حالی که برای شبیه‌سازی با داده‌های Era-Interim مقدار مثبت را نشان می‌دهد که نشان از تمایل شبیه‌سازی‌ها با داده‌های GFS و FNL به کم‌برآوردی و تمایل به بیش‌برآوردی با استفاده از داده‌های Era-Interim در منطقه مورد مطالعه دارد. بهترین عملکرد را بین سه شبیه‌سازی مورد بررسی، شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های FNL از خود نشان داده است (میانگین خطای مطلق (MAE) روی کل دامنه برابر با ۰/۴۷ است).

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش عملکرد مدل میان‌مقیاس WRF با شرایط مختلف اولیه و مرزی برای شبیه‌سازی باد سطحی در مناطق ساحلی و فراساحل دریای عمان ارزیابی شده است. سه مجموعه داده (Era-Interim، FNL، GFS) برای شبیه‌سازی باد سطحی مورد استفاده قرار گرفت و نتایج آن با داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیکی در سواحل عمان، داده بویه قشم و داده‌های ماهواره ترکیبی در مناطق فراساحل مقایسه شده است. نتایج نشان داد که مقادیر اریبی ایستگاهی تفاوت بارزی با هم دارند که کمترین مقادیر آن مربوط به جزایر و ایستگاه‌های واقع در سواحل جنوبی دریای عمان است. در کل برای هر سه شرط اولیه و مرزی به کار گرفته شده، مدل مقادیر باد را بیش از واقعیت پیش‌بینی کرده است. بیشترین این برآورد مربوط به داده Era-Interim و کمترین مربوط به داده FNL است. مقایسه نمودار هیستوگرام سرعت باد نشان می‌دهد که در هر سه شبیه‌سازی بیشترین میزان خطا مربوط به بازه‌هایی

۰۱-۳۲-۳۹۵ و با استفاده از اعتبارات پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی انجام شده است. از سازمان هواشناسی کشور و اداره هواشناسی کشور عمان به خاطر در اختیار گذاشتن داده‌های دیدبانی تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

آزادی، م.، صوفیانی، م.، و کیلی، غ. و قائمی، ه.، ۱۳۹۵، مطالعه موردی اثر گوارد داده‌های ایستگاه‌های دیدبانی و جو بالا بر برون‌داد بارش مدل WRF روی منطقه ایران، م. ژئوفیزیک ایران، جلد ۱۰، ۲، ۱۱۰-۱۱۹.

غلامی، س.، قادر، س.، خالقی زواره، ح. و غفاریان، پ.، ۱۳۹۷، ارزیابی پیش‌بینی میدان باد توسط مدل WRF تحت تأثیر شرایط اولیه و مرزی متفاوت در منطقه خلیج فارس: مقایسه داده‌های همیدی و ماهواره‌های QuickSCAT و ASCAT، م. فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۴، ۱، ۲۲۷-۲۴۳.

قادر، س.، یازجی، د.، سلطان‌پور، م. و نعمتی، م. ح.، ۱۳۹۴، به کارگیری یک سامانه همادی توسعه داده شده برای مدل WRF جهت پیش‌بینی میدان باد سطحی در محدوده خلیج فارس. دو فصلنامه هیدرو فیزیک-دوره اول، ۱، ۴۱-۵۴.

لایقی، ب.، قادر، س.، علی اکبری بیدختی، ع. و آزادی، م.، ۱۳۹۶، حساسیت‌سنجی شبیه‌سازی‌های مدل WRF به پارامترسازی‌های فیزیکی در محدوده خلیج فارس و دریای عمان در زمان مونسون تابستانی. مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۱(۱)، ۱-۱۹.

Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M. and Santos, C., 2012, A sensitivity study of the WRF model in wind simulation for an area of high wind energy. *Environmental Modelling and Software*, 33, 23-34.

Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M. and Santos, C. S., 2014a, WRF wind simulation and wind energy production estimates forced by different reanalyses: comparison with observed data for Portugal. *Applied Energy*,

نتایج نشان می‌دهد که داده‌های NCEP (GFS و FNL) نسبت به ECMWF دارای عملکرد بهتری در شبیه‌سازی میدان باد در منطقه مورد مطالعه هستند. درحالی‌که برخی مطالعات پیشین که بر روی مناطق دیگری در دنیا انجام شده است حاکی از این است که داده باز تحلیل Era-Interim برای در نظر گرفتن شرایط اولیه و مرزی در مدل WRF مناسب‌تر هستند، مانند تحقیقی که کاروالیو و همکاران در سال ۲۰۱۴b در سواحل پرتغال انجام دادند و یا غلامی و همکاران در سال ۱۳۹۷ برای سواحل خلیج فارس انجام دادند، که می‌تواند به دلیل کمبود داده‌های مشاهداتی استفاده شده در منطقه عمان در داده‌های گواری داده باز تحلیل Era-Interim باشد.

با توجه به اینکه داده‌های GFS و FNL هر دو در مرکز NCEP تولید می‌شوند و از روش‌های داده‌گواری و سامانه پیش‌بینی مشابهی استفاده می‌کنند و اختلاف عمده آنها در تعداد داده‌های مشاهداتی به کار گرفته شده در ایجاد داده تحلیلی است (داده FNL از تعداد داده مشاهداتی بیشتری نسبت به GFS استفاده می‌کند) می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های مشاهداتی اولیه برای تهیه داده‌های تحلیلی یکی از عوامل تأثیرگذار در شبیه‌سازی‌های میان‌مقیاس است. به صورت معمول داده FNL حدود ۱۰ درصد داده مشاهداتی بیشتری نسبت به داده GFS دارد. در میانگین کل ایستگاه‌ها بهترین عملکرد در بین سه شبیه‌سازی مختلف، مربوط به شبیه‌سازی با داده‌های FNL است.

۵. تشکر و قدردانی

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی به شماره ۰۱-۲۱-

117, pp.116-126.

Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M. and Santos, C. S., 2014b, Offshore wind energy resource simulation forced by different reanalyses: comparison with observed data in the Iberian Peninsula. *Applied Energy*, 134, 57-64.

Dee, D. P. and Uppala, S., 2009, Variational bias correction of satellite radiance data in the ERA-Interim reanalysis. *Quarterly Journal of*

- the Royal Meteorological Society, 135(644), pp.1830-1841.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P. and Bechtold, P., 2011, The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 137(656), pp. 553-597.
- Ghader, S., Montazeri Namin, M. and Chegini, F., Bohluly, A., 2014, Hindcast of Surface Wind Field over the Caspian Sea Using WRF Model. The 11th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures (ICOPMAS 2014), Tehran.
- Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S.K., Hnilo, J.J., Fiorino, M. and Potter, G.L., 2002, NCEP-DEO AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83, 1631-1643.
- Mass, C. and Ovens, D., 2011, January. Fixing WRF's high speed wind bias: A new subgrid scale drag parameterization and the role of detailed verification. In 24th Conference on Weather and Forecasting and 20th Conference on Numerical Weather Prediction, Preprints, 91st American Meteorological Society Annual Meeting (Vol. 23727).
- Menendez, M., García-Díez, M., Fita, L., Fernández, J., Méndez, F. J. and Gutiérrez, J. M., 2014, High-resolution sea wind hindcasts over the Mediterranean area. *Climate dynamics*, 42(7-8), pp.1857-1872.
- Otte, T. L., 2008, The impact of nudging in the meteorological model for retrospective air quality simulations. Part I: Evaluation against national observation networks. *Journal of applied meteorology and climatology*, 47(7), pp.1853-1867.
- Pickett, M. H., Tang, W., Rosenfeld, L. K. and Wash, C. H., 2003, QuikSCAT satellite comparisons with nearshore buoy wind data off the U.S. west coast. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 20, 1869-1879.
- Pielke Sr., R. A., 2002, *Mesoscale Meteorological Modeling*, second ed. Academic Press, San Diego, CA.
- Simmons, A., 2006, ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. *ECMWF newsletter*, 110, pp.25-36.
- Simmons, A., Uppala, S., Dee, D. and Kobayashi, S., 2006, ERAInterim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. *ECMWF Newsletter*, No. 110, ECMWF, Reading, United Kingdom, 25-35.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Huang, X. Y., Wang, W. and Powers, J. G., 2008, A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR TECHNICAL NOTE, NCAR/TN-475STR, pp. 113.
- Tabata, Y., Hashiguchi, H., Yamamoto, M. K., Yamamoto, M., Yamanaka, M. D., Mori, S., Syamsudin, F. and Manik, T., 2011, Lower tropospheric horizontal wind over Indonesia: a comparison of wind profiler network observations with global reanalyses. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73(9), pp.986-995.
- Tang, W., Liu, W. T. and Stiles, B. W., 2004, Evaluation of highresolution ocean surface vector winds measured by QuikSCAT scatterometer in coastal regions. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 42, 1762-1769.
- Trenberth, K. E., Dole, R., Xue, Y., Onogi, K., Dee, D., Balmaseda, M., Bosilovich, M., Schubert, S. and Large, W., 2010, Atmospheric reanalyses: A major resource for ocean product development and modeling. *Proc." OceanObs*, 9.
- Zhang, H. M., Reynolds, R. W. and Bates, J. J., 2006, P2. 23 BLENDED AND GRIDDED HIGH RESOLUTION GLOBAL SEA SURFACE WIND SPEED AND CLIMATOLOGY FROM MULTIPLE SATELLITES: 1987-PRESENT. American Meteorological Society 2006 Annual Meeting, Paper #P2.23, Atlanta, GA, January 29 - February 2, 2006.

Simulation of the surface wind field by the WRF model in Oman Sea region with different initial and boundary conditions

Ghafarian, P.^{1*}, Pegahfar, N.¹ and Mohammadpour Penchah, M. R.²

1. Assistant Professor, Atmospheric Science Center, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Tehran, Iran

2. Ph.D. Graduated, Department of Non-biologic Atmospheric and Oceanic Sciences, Faculty of Marine Science and Technology, University of Hormozgan, Bandaabbas, Iran

(Received: 22 May 2018, Accepted: 25 Sep 2018)

Summary

Oman Sea and its coastlines have an important role in the international trade, coastal management and marine industries. Large weather instability and intense wind occur in Oman Sea due to tropical cyclones. The wind field simulated by atmospheric models can be used in ocean model for wave prediction. The main purpose of this research is to investigate applicability of WRF mesoscale model version 3-7-1 in surface wind simulation using various boundary and initial conditions over Oman Sea. For this aim, three data sets including Era-Interim reanalysis data, FNL and GFS analysis data have been used. Simulated wind at the coasts of Oman has been evaluated using observational data measured at synoptic stations in Iran and Oman and also data measured by buoy at Gheshm Island. Evaluation of simulated offshore wind has been done using data from National Climatic Data Center Blended Sea Winds with 0.25 degree horizontal resolution and 6-hourly time step. Moreover, SST data from NCEP dataset with 0.083 degree in horizontal resolution have been used as WRF input data. Model outputs have been improved based on nudging technique. In this research, WRF model has been run using three 3-, 9- and 27-km nests, that the smaller one covers Oman Sea and some portions of the Persian Gulf. The model has been run for a time of 60 hour with 12 hour spin-up period for June 2009. Finally, fifteen “2-day re-started” simulations were performed to complete one month simulations. Results show that all three simulations overestimate wind speed at the considered coast area and the largest error belong to simulations that used Era-Interim dataset and the smallest error occurred in simulations that used FNL dataset. Comparison of the three datasets (analysis and reanalysis ones) with observational data indicated that using GFS dataset provided more accurate data due to its higher resolution. Moreover, ECMWF datasets underestimated them, while simulations using ECMWF them data as initialization and boundary conditions overestimated the winds.

Bias-averaged values over the offshore areas demonstrated that using GFS and FNL datasets leads to underestimation, while using Era-Interim dataset resulted in overestimation in of predicted winds. Histogram of wind speed reveals that maximum error occurred for low wind speed for all three datasets (wind speed smaller than 3 m/s). In the mid-range (wind speed between 3-12 m/s), the model has an appropriate performance for simulating wind speed. Using GFS and FNL underestimates wind speed larger than 12 m/s, while using Era-Interim data overestimates that. Simulations using GFS and FNL have little discrepancy for various wind speeds, due to same model in producing these datasets. While results obtained from Era-Interim differ significantly with those from GFS and FNL datasets. Using FNL dataset produced the least error in wind direction. Since both GFS and FNL datasets are produced in NCEP with the same data assimilation techniques and forecast systems, the significant difference between these two datasets refers to the number of used observational data in producing analysis dataset (more observational datasets have been used in producing FNL dataset, comparing with those used in producing GFS dataset). Therefore, it can be concluded that dense grid of observational data in producing analysis dataset has an important role in mesoscale simulations. As a conclusion, using FNL dataset an input of WRF model led to the best performance in simulation of wind speed and wind direction for coasts and offshore part of Oman Sea.

Keywords: Wind field, WRF model, Oman Sea, reanalysis and analysis data, Initial and boundary conditions, Nudging.

* Corresponding author:

p.ghafarian@inio.ac.ir