

## 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

سیاوش غلامی<sup>۱</sup>، سرمد قادر<sup>۲\*</sup>، حسن خالقی زواره<sup>۳</sup> و پروین غفاریان<sup>۴</sup>

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

۲. دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

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

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

(دریافت: ۹۵/۱۲/۸، پذیرش نهایی: ۹۶/۸/۲)

### چکیده

در این مقاله عملکرد مدل میان‌مقیاس پیش‌بینی وضع هوای WRF با هسته دینامیکی ARW برای شبیه‌سازی میدان باد در منطقه خلیج فارس تحت شرایط مرزی و اولیه مختلف ارزیابی و بررسی شده است. برای این منظور از سه نوع مجموعه داده ERA-Interim، NCEP-R2 و NCEP-FNL برای تأمین شرایط اولیه و مرزی مدل استفاده شده است. سه نوع شبیه‌سازی مختلف WRF در این مقاله انجام گرفت و برای مقایسه خروجی باد مدل تحت شرایط مرزی و اولیه متفاوت از مشاهدات ایستگاه‌های همدیدی در محدوده شمالی خلیج فارس، داده‌های ماهواره QuikSCAT و داده‌های ماهواره ASCAT استفاده شد. بر اساس ارزیابی‌های انجام گرفته در این تحقیق هم برای جهت و هم تندی باد مجموعه داده ERA-Interim در مقایسه با NCEP-FNL و NCEP-R2 می‌تواند شبیه‌سازی باد نزدیک‌تر به واقعیت داشته باشد. در رتبه دوم داده‌های NCEP-FNL قرار دارد که در غیاب ECMWF ERA-Interim می‌تواند جایگزین مناسبی برای تأمین شرایط اولیه و مرزی مدل WRF باشد اما داده بازتحلیل NCEP-R2 خطای زیادی در تخمین باد به‌خصوص اندازه آن (تندی) ایجاد می‌کند.

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

### ۱. مقدمه

برگ خریدهای تأثیرگذار بر روی فعالیت‌های اقتصادی هر منطقه‌ای است اما داده‌های مشاهدات جوی در نواحی آبی در مقایسه با مناطق خشکی از فقر شدیدی رنج می‌برد. برای ایمنی زندگی بر روی دریا و نواحی ساحلی و تأسیس سازه‌های موردنیاز فراساحل (offshore) و فروساحل (onshore) شناخت و تغییرپذیری باد و امواج ناشی از آن ضرورتی انکارناپذیر است (کیرس و همکاران، ۲۰۰۴). از طرفی رایج‌ترین اثرات باد بر روی اقیانوس در جریانات و گردابه‌های بادرانده (wind-driven) و امواج دورا (sweel) و گردش‌های اقیانوسی (عامل فرایندهای فراچاهی (upwelling) و فروچاهی (downwelling)) ظاهر می‌شود (کاروالیو و همکاران، ۲۰۱۲) و همچنین تنش باد نقشی کلیدی در مدل‌سازی فرایندهای حاصل از برهم‌کنش جو و اقیانوس مانند تعیین

خلیج فارس با اقلیم جنب حاره بین عرض‌های ۲۳ تا ۳۰ درجه شمالی قرار دارد که سواحل آن در یک طرف به کشورهای عراق، کویت، عربستان سعودی، قطر و امارات متحده عربی و در طرف دیگر به ایران منتهی می‌شود. عرض خلیج فارس در عریض‌ترین منطقه آن ۳۷۰ کیلومتر و طول ۹۹۰ کیلومتر است و عمده‌ترین پدیده هواشناسی ویژه خلیج فارس بادی است معروف به باد "شمال" که دارای جهت شمال غربی است و در تمام مدت سال می‌وزد (امری، ۱۹۵۶؛ کمپف و صدری نسب، ۲۰۰۵؛ پرونه، ۱۹۷۹).

مطالعه منطقه خلیج فارس به‌عنوان یکی از منابع بزرگ انرژی جهان و یکی از مسیرهای ارتباطی کشورهای حاشیه آن با سایر نقاط دنیا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (رینولدز، ۱۹۹۳). باد روی دریا و اقیانوس یکی از

ضریب پسا (drag) ایفا می‌کند.

به طور سنتی داده‌های باد از طریق بویه‌ها، کشتی‌ها و ماهواره‌ها به دست می‌آید اما همه این مجموعه داده‌ها دارای محدودیت‌های مکانی و زمانی مختص به خود است زیرا مشاهدات در یک نقطه (ایستگاه هواشناسی) ساحل یا فرساحل (بویه) نمی‌تواند منطقه وسیعی را نمایندگی کند؛ هرچند داده‌های ماهواره‌ای از نظر پوشش مکانی این نقص را برطرف کرده‌اند اما کماکان از نظر پوشش زمانی دچار ضعف هستند (الوارز و همکاران، ۲۰۱۴؛ کاروالیو و همکاران، ۲۰۱۳)؛ بنابراین استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی باد می‌تواند مکمل خوبی برای از بین بردن فقدان و ضعف مکانی و زمانی پوشش میدان باد در منطقه خلیج فارس باشد.

از آنجایی که انتگرال‌گیری زمانی مدل جوی یک مسئله مقدار اولیه است، تعیین شرایط اولیه و مرزی برای مدل‌های میان‌مقیاس یک مسئله کلیدی به شمار می‌رود که اولین بار توسط برکنس (۱۹۰۴) بیان شد. وی معتقد بود حالت کنونی جو باید تا حد امکان دقیق باشد که با استفاده از قوانین فیزیکی حاکم بر جو به پیش‌بینی آینده نائل آمد. یکی از ابزارهای تأمین شرایط اولیه برای شبیه‌سازی از جمله میدان باد، استفاده از داده‌های بازتحلیل و تحلیل است.

یکی از مسائل چالش‌برانگیز برای تحلیل‌گران حوزه داده، استفاده از انواع مختلف داده تحلیل و بازتحلیل به عنوان ورودی مدل‌های میان‌مقیاس نظیر WRF است (خیمیز و همکاران، ۲۰۱۲). به هر حال در هر کدام از این داده‌های بازتحلیل و تحلیل به نوعی عدم قطعیت وجود دارد که

یکی از راه‌های نشان‌دادن این عدم قطعیت، درون‌مقایسه (intercomparison) آن‌ها است. از مطالعاتی که در زمینه استفاده از داده‌های بازتحلیل و تحلیل انجام گرفته‌اند، می‌توان به کارهای کاروالیو و همکاران (۲۰۱۴a)، (۲۰۱۴b)، خیمیز و همکاران (۲۰۱۲)، لیلنو و پاتریک (۲۰۱۱)، گیرس و همکاران (۲۰۰۴)، مایسنر و همکاران (۲۰۰۱) و استوپا و چونگ (۲۰۱۴) اشاره کرد که اختصاصاً روی میدان باد با تمرکز متفاوت کار کرده‌اند. از جمله مطالعات نزدیک به کار حاضر می‌توان به مطالعه کاروالیو و همکاران (۲۰۱۲) اشاره کرد که نشان دادند از بین مجموعه داده‌های بازتحلیل ERA-NCEP-R2، Interim و NCEP-CFSR در شبیه‌سازی میدان باد سطحی توسط مدل WRF، مجموعه داده ERA-Interim به عنوان شرایط اولیه و مرزی مدل دارای خطای کمتری از دو مجموعه داده دیگر است. همچنین در مطالعه کاروالیو و همکاران (۲۰۱۴b) با بیشترین قرابت به مطالعه حاضر، شبیه‌سازی باد سطحی توسط مدل WRF و با استفاده از چهار مجموعه داده بازتحلیل ERA-NCEP-R2، Interim، NCEP-CFSR و NASA-MERRA و دو مجموعه داده تحلیل (NCEP-FNL و NCEP-GFS) به عنوان شرایط اولیه و مرزی انجام گرفت. آن‌ها نشان دادند که مجموعه داده ERA-Interim در مقایسه با سایر داده‌ها در تغییرپذیری زمانی میدان باد خطای کمتری دارد، درحالی که برای میانگین باد داده NCEP-R2 دارای کمترین آریبی است و همچنین با اعمال NCEP-R2 در برآورد شار، توان باد در ناحیه فراساحل دارای کمترین خطا در مقایسه با سایر داده‌ها است.

جدول ۱. ویژگی‌های اصلی مجموعه داده‌ها.

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

## ۲. روش و داده

مراکز و سازمان‌های مهمی در دنیا به تهیه و تولید داده‌های بازتحلیل مشغول هستند که قدیمی‌ترین نسل از داده‌های بازتحلیل توسط مراکز ملی پیش‌بینی‌های محیطی (National Centers for Environmental Prediction)) و مرکز ملی تحقیقات جوی ((National Center for Atmospheric Research (NCAR) موسوم به NCEP-1 یا NCEP/NCAR یا NCEP-R1 تهیه گردید (کالتی و همکاران، ۱۹۹۶). بعدها NCEP-R1 توسط NCEP و مرکز ابررایانه تحقیقات انرژی ملی (National Energy Research Supercomputing Center (NERSC)) در گروه انرژی ((Department of Energy (DOE)) توسعه یافت و به بازتحلیل NCEP/DOE AMIP-II Atmospheric Model Intercomparison Project)) یا NCEP-R2 معروف گردید؛ مزیت NCEP-R2 به NCEP-R1 خطای کمتر و کاربرد تحقیقاتی بیشتر بود (کانامیتسو و همکاران، ۲۰۰۲).

مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت اروپا (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)) نیز یکی از مراکز معتبر است که به تهیه داده‌های بازتحلیل با پیشوند اختصاری ERA برگرفته از ECMWF Re-Analysis برای تمام مجموعه داده‌ها اقدام کرد که نسل قدیمی آن شامل بازتحلیل چهار ساله ECMWF موسوم به ERA-40 است (اپالا و همکاران، ۲۰۰۵). بعدها این مرکز داده بازتحلیل نسل جدید خود را با عنوان بازتحلیل موقت ECMWF موسوم به ERA-Interim ارائه داد که در مقایسه با ERA-40 از نظر سامانه گوارد (assimilation system) ارتقا یافته بود (از 3D-Var در ERA-40 به 4D-Var در ERA-Interim) و به طور سازمان‌یافته پیش‌بینی‌های بهتری به ویژه برای نیمکره جنوبی داشت (کریستینا و لارس، ۲۰۱۱؛ سیمونز و همکاران، ۲۰۰۷؛ اپالا و همکاران، ۲۰۰۵). جزئیات بیشتر راجع به داده ERA-Interim توسط دی و همکاران (۲۰۱۱) ارائه شده است.

با وجود کاستی‌هایی در مجموعه داده‌های تحلیل و بازتحلیل، تاریخچه مطالعات متعدد و معتبر در استفاده گسترده از این مجموعه داده‌ها ثابت کرده است که در تحقیقات علوم جوی بسیار کارآمد هستند؛ بنابراین مقایسه مجموعه داده‌های بازتحلیل و تحلیل در شبیه‌سازی میدان باد به عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار در حوزه علوم جوی کاری بارز است.

یکی از ضعف‌های بازتحلیل‌های جهانی وجود تفکیک پایین شبکه برای ریخت‌شناسی (orography) و پوشش زمین (Land-mask) است و بنابراین قادر به آشکارسازی پدیده‌های کوچک‌مقیاس نیستند که این مشکل از طریق جفت‌شدگی مدل‌های منطقه محدود (Limited Area Models (LAMs)) اصلاح شده است. برای توصیف کمیت‌های هواشناسی مانند میدان باد سطحی، اولین اقدام تعیین نوع مدل منطقه محدود است و بعد موضوعاتی مانند تعریف حوزه (domain)، شرایط اولیه و مرزی، تفکیک زمانی و مکانی و نهایتاً انتخاب نوع پارامترسازی فیزیکی مد نظر قرار می‌گیرد (منندز و همکاران، ۲۰۱۱) که تمام این موارد به همراه شیوه‌های گوارد داده و سوق‌دادن (nudging) می‌توانند به نتایج متفاوت منجر شوند. با وجود اینکه مطالعه همه‌جانبه تمام این عوامل جذاب است اما در کار حاضر تمرکز بیشتر روی شرایط اولیه و مرزی است.

در کار حاضر از بین مدل‌های منطقه محدود، مدل پیش‌بینی و تحقیقاتی وضع هوای WRF (Weather Research and Forecasting) (اسکامارک و همکاران، ۲۰۰۸) با هسته دینامیکی تحقیقاتی پیشرفته (ARW) (Advanced Research WRF) (وانگ و همکاران، ۲۰۱۴) انتخاب شده است و هدف این مقاله تعیین عملکرد مدل WRF با استفاده از مقایسه داده‌های بازتحلیل و تحلیل مختلف (به عنوان شرایط اولیه و مرزی) برای تخمین میدان باد در افق پیش‌بینی ۲۴ ساعته در منطقه خلیج فارس است.

نهایتاً با استفاده از انواع داده‌های مشاهداتی مقایسه و ارزیابی می‌شوند. در این مطالعه از دو نوع داده برای ارزیابی مدل استفاده شده است:

۱. داده‌های ایستگاه‌های همدیدی؛

۲. داده‌های ماهواره‌ای.

در این تحقیق با توجه به امکان دسترسی، داده‌های ۲۳ ایستگاه هواشناسی جناح ایرانی خلیج فارس برای آزمایش و مقایسه آماری WRF انتخاب شده است. شکل ۱ موقعیت این ایستگاه‌ها را در منطقه خلیج نشان می‌دهد.

#### ۲-۲. مشاهدات ماهواره‌ای

سنجنده‌های ماهواره‌ای سرعت باد در سطح دریا را مستقیم اندازه‌گیری نمی‌کنند، بلکه سیگنال تابش الکترومغناطیسی پراکنده شده از سطح دریا و مقطع عرضی رادار سطح اقیانوس را دریافت و بر اساس دامنه موج سطحی آب اندازه‌گیری می‌کنند (رانی و همکاران، ۲۰۱۴). یک تابع مدل ژئوفیزیکی (geophysical model function (GMF)) مقطع عرضی رادار را بر اساس تابعی از زاویه برخورد، زاویه سمت نسبی (relative azimuth angle)، فرکانس رادار، قطبش (polarization) و بردار باد معادل ارتفاع ۱۰ متری تهیه می‌کند (هرسبرچ و همکاران، ۲۰۰۷) که حاصل وارون‌سازی عددی GMF به اندازه‌گیرهای باد توسط سنجنده ماهواره‌ای منتج می‌شود.

معمولاً داده‌های ماهواره‌ای در بازه زمانی طولانی مدت (حداقل یک سال) در کنار شبیه‌سازی‌های مدل با مشاهدات بویه‌ها مقایسه و تحلیل می‌شوند. در منطقه خلیج فارس سه اشکال اساسی راجع به بویه‌ها وجود دارد:

۱. تعداد بویه‌ها کم است (ترکم مکانی پایین)؛ ۲. شکاف زمانی داده بویه بسیار بالاست (عدم پوشش مناسب زمانی)؛
۳. به علت عدم کالیبراسیون در بیشتر مقاطع زمانی داده بویه‌ها قابل استناد نیست. بنابراین مقایسه همزمان مدل و ماهواره با بویه امکان‌پذیر نیست و تنها راه ارزیابی مدل، مقایسه مستقیم آن با داده‌های ماهواره است که البته در مقایسه با مقایسه همزمان مدل و ماهواره با مشاهدات بویه (حالت معمول ارزیابی) از دقت کمتری برخوردار است.

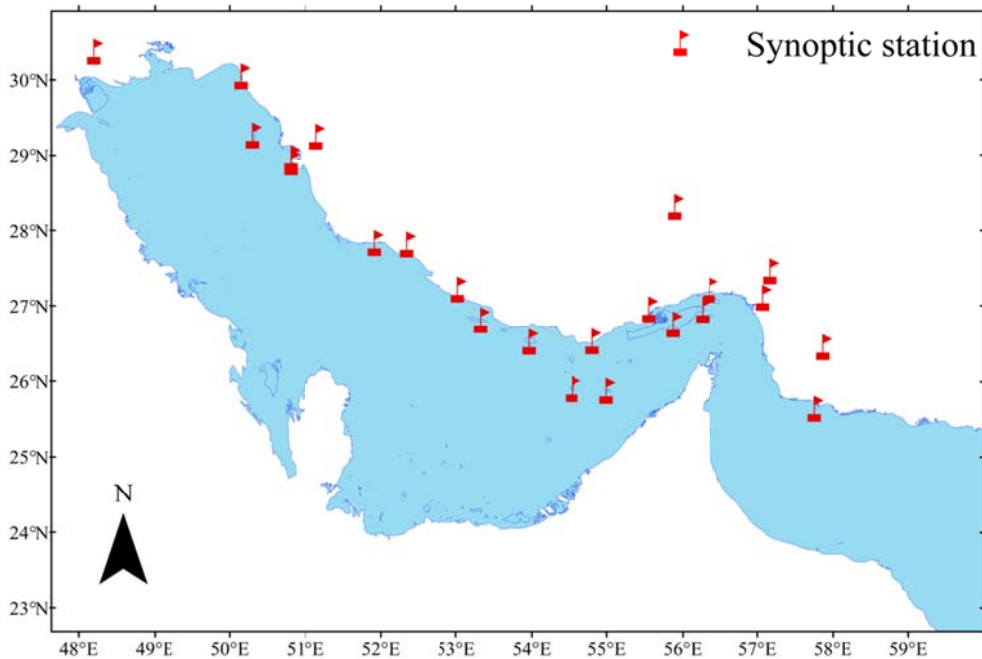
در کنار مجموعه داده‌های بازتحلیل ذکرشده، مجموعه داده‌های تحلیل نیز موجود است که NCEP به تولید آن‌ها تحت عناوین تحلیل نهایی NCEP موسوم به NCEP-FNL (NCEP- Final Analysis) اقدام کرده است؛ چنان‌که می‌تواند گزینه خوبی برای تأمین شرایط اولیه و مرزی برای مدل‌های میان‌مقیاس باشد (برای دریافت جزئیات بیشتر داده‌های NCEP-FNL به تارنمای <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.0> مراجعه شود).

مجموعه داده‌های بازتحلیل و تحلیل که شرایط اولیه را برای مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا فراهم می‌کنند، از نظر نوع داده، تفکیک مکانی و زمانی، تراز قائم، پوشش زمانی و سامانه گوارد با هم دارای شباهت‌ها و تفاوت‌هایی هستند. خلاصه‌ای از ویژگی‌های مربوط به این مجموعه داده‌های مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ نشان داده شده است.

به‌علاوه باید اشاره کرد که به طور کلی اجماع کاملی راجع به پیاده‌سازی انواع داده‌های بازتحلیل و تحلیل به عنوان شرایط اولیه و مرزی وجود ندارد که در آن نوع خاصی از داده‌ها از سایرین عملکرد بهتری داشته باشد و اغلب عملکرد مدل به نوع متغیر تحت تحلیل نیز وابسته است. اینکه تفکیک بالای داده ورودی مدل به نتایج بهتر شبیه‌سازی‌های آن منتج شود، از قبل قابل اثبات نیست و باید داده توسط مدل آزمایش شود. به عنوان نمونه مطالعه کاروالیو و همکاران (۲۰۱۴a) نشان دادند که داده ERA-Interim با اینکه تفکیک پایین‌تری در مقایسه با داده NCEP-CFSR دارد، اما نتایج نزدیک به مشاهدات را برآورد می‌کند.

#### ۲-۱. داده‌های مشاهداتی

بزرگ‌ترین مانع برای ارزیابی و صحت‌سنجی مدل فقدان داده مشاهداتی تفکیک بالا به‌ویژه برای نواحی فراساحل است که خوشبختانه در نواحی ساحلی با حضور ایستگاه‌های هواشناسی این مشکل تا حدی برطرف شده است و برای نواحی فراساحل بهترین داده‌ها از نظر پوشش مکانی داده‌های ماهواره‌ای است. شبیه‌سازی‌های مدل



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی مورد استفاده در کار حاضر در منطقه خلیج فارس.

(۲۰۱۱)، جینگ و همکاران (۲۰۱۳)، کاراگلی و همکاران (۲۰۱۳)، کاراگلی و همکاران (۲۰۱۴) و هسگر و همکاران (۲۰۱۵) اشاره کرد و اختصاصاً در ایران و روی خلیج فارس می‌توان به کارهای گلشنی و تائبی (۱۳۸۷)، مظاهری و همکاران (۲۰۱۳) و قادر و همکاران (۲۰۱۶a)، (۲۰۱۶b) اشاره کرد.

#### ۲-۲-۲. ASCAT

ASCAT پراکنش‌سنجی است که توسط سازمان ماهواره هواشناسی اروپایی (European Meteorological Satellite Organization (EUMESAT) در نوامبر ۲۰۰۶ راه‌اندازی شد که یکی از اهداف اصلی آن ثبت داده‌های مرتبط به باد سطحی روی اقیانوس‌هاست (بنتامی و همکاران، ۲۰۰۸) و کاربرد دیگر این داده‌ها در داده‌های مدل‌های عددی است. از نقاط ضعف پراکنش‌سنج ASCAT وجود یک خطای سامان‌مند تخمین منفی در بیشتر مطالعات به‌ویژه برای سرعت‌های بالا است که برای نمونه در مطالعه بنتامی و همکاران (۲۰۰۸) دیده می‌شود. از جمله مطالعاتی که از داده‌های باد ASCAT استفاده کرده‌اند، می‌توان به مراجع بنتامی و

#### ۲-۲-۱. QuikSCAT

سنجنده ماهواره‌ای QuikSCAT توسط ناسا طراحی شده و از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۹ به منظور ارائه سمت و سوی باد روی اقیانوس‌ها در ارتفاع تقریبی ۸۰۰ کیلومتری سطح زمین به کار گرفته شد و در زمینه‌هایی مانند مدل‌سازی عددی جو اقیانوس و پیش‌بینی عددی وضع هوا کاربرد فراوان دارد (تانگ و لیو، ۱۹۹۶؛ کاراگلی، ۲۰۱۴). اطلاعات این ماهواره برای تعیین باد در ارتفاع ۱۰ متری سطح دریا در تراز 1B، تراز 2A و 2B و تراز ۳ بر اساس درجه پردازش داده قابل دسترس است که برای جزئیات بیشتر این تقسیم‌بندی‌ها به مطالعه دانبر و همکاران (۲۰۰۶) مراجعه شود. در این مطالعه از تراز 2B، QuikSCAT با تفکیک افقی ۲۵ کیلومتری استفاده می‌شود که دقت تندی و جهت باد به ترتیب  $\pm 2$  متر بر ثانیه و  $\pm 20$  درجه است. در نقاط مختلف دنیا برای مطالعه باد سطح دریا از QuikSCAT بسیار بهره برده‌اند که می‌توان به کارهای گریما و همکاران (۱۹۹۹)، لیو و همکاران (۲۰۰۴)، پیمنتا و همکاران (۲۰۰۸)، لیو و همکاران (۲۰۰۸)، کپس و زندر (۲۰۱۰)، سینگ و همکاران (۲۰۱۱)، فورویک و همکاران

برای لایه سطحی طرحواره همانندی (MM5 (Similarity) (بلجارس، ۱۹۹۵)، برای خردفیزیک روش Lin (لین و همکاران، ۱۹۸۳)، برای تابش موج بلند طرحواره RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) (املور و همکاران، ۱۹۹۸)، برای تابش موج کوتاه طرحواره Goddard (چو و سوارز، ۱۹۹۹؛ چو و همکاران، ۲۰۰۱)، برای همرفت طرحواره Kain-Fritsch (کین، ۲۰۰۴) و برای سطح زمین طرحواره پخش گرمایی پنج لایه‌ای (5-layer Therm Diffusion) (دودها، ۱۹۹۶).

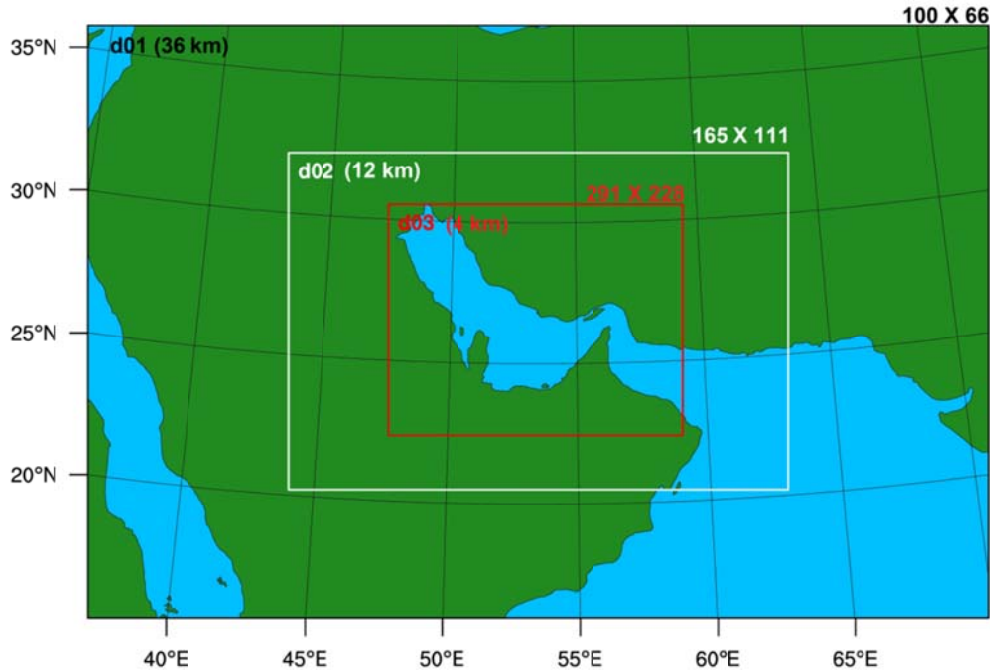
#### ۲-۴. تاریخ‌های شبیه‌سازی

روزهای مورد نظر برای شبیه‌سازی شامل ۲۲ سپتامبر ۲۰۰۸، ۵ فوریه ۲۰۱۱، ۲۳ آوریل ۲۰۱۱ و ۱۹ اکتبر ۲۰۱۲ است. این تاریخ‌ها عمدتاً بر اساس حالت‌های حدی پدیده‌های جوی و نبود پدیده‌ای خاص انتخاب شده است و هیچ مزیت دیگری به سایر روزها ندارد. میانگین بلندمدت تندی باد ایستگاه‌های مد نظر در این مطالعه ۳/۳۵ متر بر ثانیه است؛ بنابراین سرعت‌های بیشتر از ۷ متر بر ثانیه به بالا سرعت‌های زیاد محسوب می‌شوند. موقعیت همدیدی روزهای انتخاب‌شده را می‌توان چنین خلاصه کرد: در ۲۲ سپتامبر ۲۰۰۸ کم‌فشاری با هسته ۱۰۰۵ میلی بار روی خلیج فارس مستقر است که ناوه معکوس آن کاملاً با خلیج فارس همپوشانی دارد و در آن سرعت‌های باد متوسط بر منطقه حکم‌فرماست. عمده شرایط همدیدی در ۵ فوریه ۲۰۱۱ وجود یک پشته به‌ویژه در ناحیه جنوبی خلیج فارس و سرعت‌های باد ۱۰ متر بر ثانیه در بعضی ایستگاه‌ها و همچنین پوشش ابری در بعضی ساعات روز است. در ۲۳ آوریل ۲۰۱۱ کم‌فشار ضعیفی روی خلیج فارس و عرض‌های پایین‌تر حاکم است که سرعت‌های ۷ و ۸ متر بر ثانیه در بیشتر ایستگاه‌ها و اندکی ابرناکی مشاهده می‌شود. در ۱۹ اکتبر ۲۰۱۲ منطقه خلیج فارس بین پرفشار و کم‌فشار ضعیفی قرار گرفته است که سرعت‌های باد عمدتاً در حد متوسط در بعضی ایستگاه‌ها در حد ۷ و ۸ متر بر ثانیه و هوای کاملاً آفتابی به ثبت رسیده است.

همکاران (۲۰۱۲ و ۲۰۰۸)، فیگا-سالدانا و همکاران (۲۰۰۲)، رانی و همکاران (۲۰۱۴)، کاروالیو و همکاران (۲۰۱۶) و قادر و همکاران (۲۰۱۶a) اشاره کرد.

#### ۲-۳. شبیه‌سازی مدل و آغازگری

در این مطالعه از نسخه 3.4.1 مدل WRF (اسکامارک و همکاران، ۲۰۰۸) به عنوان یکی از مدل‌های منطقه محدود با هسته دینامیکی ARW برای شبیه‌سازی میدان باد سطحی روی منطقه خلیج فارس استفاده شده است. با توجه به نوع ارتباط و تبادل اطلاعات بین حوزه‌ها، در شبیه‌سازی‌های حوزه از راهبرد دوسویه (Tow way) استفاده شده است. با توجه به اینکه هدف ما صرفاً ارزیابی اثرات شرایط مرزی و اولیه مختلف (با استفاده از مجموعه داده‌های بازتحلیل و تحلیل) روی شبیه‌سازی است، برای تمام شبیه‌سازی‌ها تعداد حوزه‌ها و اندازه شبکه‌های متناظر، برابر در نظر گرفته شده‌اند. برای این شبیه‌سازی سه حوزه در نظر گرفته شده است (شکل ۲) که حوزه مادر تقریباً کل منطقه خاورمیانه را از غرب و بخش‌هایی از خاور دور را از شرق با فاصله شبکه‌ای ۳۶ کیلومتر پوشش می‌دهد. اولین شبکه تودرتو (First nested network) نیمه جنوبی ایران را به همراه کشورهای حاشیه خلیج فارس با فاصله شبکه‌ای ۱۲ کیلومتر در بر می‌گیرد و نهایتاً داخلی‌ترین حوزه کل منطقه خلیج فارس به همراه بخش‌هایی از دریای عمان را با فاصله شبکه‌ای ۴ کیلومتر شامل می‌شود. گام زمانی (Time step) برای شبیه‌سازی‌ها ۲۱۶ ثانیه و زمان هر شبیه‌سازی ۳۰ ساعت در نظر گرفته شده است که ۶ ساعت اول به عنوان زمان تطبیق (Spin-up) و ۲۴ ساعت باقی‌مانده برای تحلیل انتخاب شد. برای تهیه شرایط اولیه و مرزی از سه مجموعه داده NCEP-ERA-Interim، NCEP-R2 و FNL معرفی شده در جدول ۱ استفاده می‌شود. در مدل WRF انتخاب‌های فیزیکی متنوعی برای لایه مرزی سیاره‌ای، لایه سطحی، خردفیزیک، تابش، همرفت و مدل سطح زمین وجود دارد. طرحواره‌های مورد استفاده در این مطالعه عبارتند از: برای لایه مرزی سیاره‌ای طرحواره YSU (هونگ و همکاران، ۲۰۰۶)،



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

مؤلفه‌هایش به صورت زیر است:

$$x_n = \cos \alpha_n \quad (1)$$

$$y_n = \sin \alpha_n \quad (2)$$

برای محاسبه میانگین جهت یک میدان باد که اساسی‌ترین اصل برای محاسبه همبستگی (correlation) است، کافی است هر یک از مقادیر آن را به صورت یک بردار واحد در دستگاه مختصات دکارتی با زاویه مورد نظر تجسم کنیم و تک تک مقادیر جهت باد به مؤلفه‌های آن مانند مؤلفه‌های بردار  $I_n$  طبق رابطه ۱ و ۲ تجزیه شود. مجموع مؤلفه‌های جهت باد طبق روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha_x = \sum_{n=1}^N \cos \alpha_n \quad (3)$$

$$\alpha_y = \sum_{n=1}^N \sin \alpha_n \quad (4)$$

و در نهایت زاویه میانگین ( $\alpha_m$ ) از رابطه ۵ به دست می‌آید.

$$\alpha_m = \arctan\left(\frac{\alpha_y}{\alpha_x}\right) \quad (5)$$

## ۲-۵. روش‌های مورد استفاده تحلیل خطای مدل

روش‌های آماری ابزاری مفید برای ارزیابی مدل است که آیا شبیه‌سازی‌های مدل با رفتار طبیعی پدیده‌های جوی دارای شباهت هست یا برعکس تفاوت‌ها بیشتر به چشم می‌آیند. آمارهای علوم جوی بر اساس دو روش متفاوت تحلیل می‌شوند: ۱. آمار خطی یا همان روش رایج که با استفاده از مقیاس خطی ارزیابی می‌شود (مانند تندی باد)؛ ۲. آمار دایره‌ای که با استفاده از مقیاس زاویه‌ای تحلیل می‌شود (مانند جهت باد)؛ بنابراین فن‌های آماری برای هر کدام مختص به خود است. به عنوان مثال میانگین دو زاویه ۳۵۰ و ۱۰ درجه بر اساس آمار رایج (خطی) ۱۸۰ درجه است، در حالی که بر اساس آمار دایره‌ای صفر درجه است. بنابراین آمار خطی برای داده‌هایی که ماهیت دوره‌ای دارند، کاملاً گمراه‌کننده است. برای جزئیات بیشتر درباره کارهای انجام گرفته در زمینه آمارهای دایره‌ای به کار یامارتینو (۱۹۸۴) رجوع شود.

اگر بردار واحد  $I_n$  با زاویه  $\alpha_n$  در دستگاه مختصات دکارتی دوبعدی در نظر گرفته شود، تجزیه آن به

مدل و داده‌های مشاهده‌ای را نشان می‌دهد. RMSE مقدار اختلاف بین شبیه‌سازی مدل و مشاهدات را، صرف‌نظر از اینکه کدامیک مقدار بیشتر یا کدامیک مقدار کمتری دارند، آشکار می‌سازد. Bias مقدار اختلاف شبیه‌سازی مدل و مشاهدات است که مقادیر مثبت (منفی) بیانگر تخمین بیشتر (کمتر) مدل در مقایسه با مقادیر مشاهده‌ای است؛ البته برای جهت باد Bias مثبت (منفی) تخمین ساعت‌گرد (پادساعت‌گرد) شبیه‌سازی مدل نسبت به مشاهدات است و نهایتاً انحراف معیار، انحراف اختلاف شبیه‌سازی مدل و مشاهدات را از میانگین اختلاف شبیه‌سازی مدل و مشاهدات نشان می‌دهد.

### ۳. بحث و نتایج

#### ۳-۱. مقایسه بین شبیه‌سازی مدل و ایستگاه‌های

##### هواشناسی

در این بخش به منظور درک حساسیت مدل WRF در استفاده از شرایط اولیه و مرزی مختلف، دقت سرعت و جهت باد شبیه‌سازی شده توسط آن برای تفکیک مکانی مختلف با مقادیر مشاهده‌ای ایستگاه‌های هواشناسی تحت سنجش‌های آماری توصیف شده در بخش ۲-۵ (روابط ۶ تا ۹) ارائه می‌شود. خلاصه مکانی و زمانی سنجش‌های آماری کل زمان‌های شبیه‌سازی برای هر کدام از شرایط اولیه و مرزی در جدول ۲ نمایش داده شده است که تندی باد برحسب متر بر ثانیه و جهت باد برحسب درجه است.

جدول ۲ ارائه‌ای از سنجش‌های آماری (Bias، RMSE، R) و STDE) حاصل از مقایسه شبیه‌سازی‌های میدان باد مدل و باد ایستگاه‌های همدیدی منطقه، بر اساس میانگین زمانی و مکانی کل تاریخ‌های شبیه‌سازی در هر حوزه با شرایط اولیه و مرزی مختلف است که بالاترین مقادیر همبستگی و کمترین Bias، RMSE و STDE برجسته شده و زیر آن‌ها خط کشیده شده است.

اما برای متغیرهای غیردایره‌ای از همان میانگین‌گیری جبری ساده استفاده می‌شود. برای ارزیابی مدل از مفاهیم آماری مانند ضریب همبستگی (R)، خطای جذر مربعات میانگین (Root Mean Squared Error (RSME))، اُریبی (Bias) و انحراف معیار (Standard Deviation (STDE)) استفاده می‌شود که با استفاده از روابط ۶ تا ۹ تعریف می‌شوند:

$$R = \frac{\left[ \sum_{n=1}^N ((\psi_n^{obs} - \psi_n^{om})(\psi_n^{sim} - \psi_n^{sm})) \right]}{\left[ SQRT \left( \sum_{n=1}^N (\psi_n^{obs} - \psi_n^{om})^2 \sum_{n=1}^N (\psi_n^{sim} - \psi_n^{sm})^2 \right) \right]} \quad (6)$$

$$RMSE = \left( \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \psi_n'^2 \right)^{1/2} \quad (7)$$

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \psi_n' \quad (8)$$

$$STDE = \sigma(\psi_n') = \left( RMSE^2 - Bias^2 \right)^{1/2} \quad (9)$$

به طوری که  $\psi_n'$  اختلاف تندی باد (wind speed) شبیه‌سازی و مشاهدات است ( $\psi_n' = \psi_n^{sim} - \psi_n^{obs}$ ). همچنین  $\psi_n^{sim}$ ،  $\psi_n^{obs}$ ،  $\psi_n^{om}$  و  $\psi_n^{sm}$  به ترتیب تندی باد شبیه‌سازی، تندی باد مشاهدات، میانگین تندی باد شبیه‌سازی و میانگین تندی باد مشاهدات است. برای آمارهای جهت باد همین روابط ۶ تا ۹ استفاده می‌شود؛ با این تفاوت که ابتدا مقدار میانگین جهت باد از رابطه ۵ به دست می‌آید و در ادامه برای اجتناب از  $\psi_n'$  با زاویه‌های بزرگ‌تر از ۱۸۰ درجه باید از رابطه ۱۰ مقدار اختلاف جهت باد شبیه‌سازی و مشاهدات را به دست آورد.

$$\psi_n = (\psi_n^{sim} - \psi_n^{obs}) * \left( 1 - 360 / |\psi_n^{sim} - \psi_n^{obs}| \right) \quad (10)$$

به طور خلاصه همبستگی (R) رابطه خطی بین شبیه‌سازی



جدول ۲. مقادیر سنج‌های آماری با استفاده از مقایسه شبیه‌سازی‌های مدل و ایستگاه‌های هواشناسی برای تمام ایستگاه‌ها در کل زمان شبیه‌سازی.

Input data (Domain)	R		RMSE		Bias		STDE	
	Speed (ms <sup>-1</sup> )	Direction (°)	Speed (ms <sup>-1</sup> )	Direction (°)	Speed (ms <sup>-1</sup> )	Direction (°)	Speed (ms <sup>-1</sup> )	Direction (°)
ERA-Interim(D1)	0.60	0.87	1.72	<b>38.00</b>	-0.32	-14.46	1.52	<b>33.46</b>
ERA-Interim(D2)	0.68	<b>0.89</b>	1.65	39.88	<b>0.02</b>	-14.94	1.48	35.92
ERA-Interim(D3)	<b>0.73</b>	<b>0.89</b>	<b>1.58</b>	41.19	0.05	-12.90	1.44	37.59
NCEP-FNL(D1)	0.61	0.86	2.01	43.09	0.36	-15.13	<b>1.40</b>	38.74
NCEP-FNL(D2)	0.58	0.87	2.05	42.24	0.57	-16.06	1.44	38.08
NCEP-FNL(D3)	0.57	0.88	2.03	43.12	0.61	-16.03	1.47	39.30
NCEP-R2(D1)	0.36	0.79	2.30	68.89	1.16	12.08	1.74	60.29
NCEP-R2(D2)	0.30	0.81	2.36	71.29	1.15	11.01	1.93	69.44
NCEP-R2(D3)	0.32	0.80	2.41	74.16	1.04	<b>1.42</b>	2.09	71.69

شبیه‌سازی بیشتر می‌شود. در واقع تفکیک پایین داده‌های باز تحلیل NCEP-R2 به‌عنوان شرایط اولیه و مرزی قادر به نمایش دقیق تندی باد در شرایط اولیه و مرزی مدل WRF نیست. بهترین RMSE مربوط به تندی باد نیز برای داخلی‌ترین حوزه (D3) در حالتی که ERA-Interim شرط اولیه و مرزی مدل را فراهم می‌کند، رخ می‌دهد اما برای جهت باد حوزه مادر (D1)، ERA-Interim دارای بهترین عملکرد است و ضعیف‌ترین عملکرد، هم از نظر تندی و هم از نظر جهت متعلق به NCEP-R2 است.

برای ارزیابی (Bias) تندی باد همچنان بهترین عملکرد از آن ERA-Interim است؛ با این تفاوت که در این حالت اولین حوزه تودرتو (D2) در مقایسه با دو حوزه دیگر دارای ارزیابی کمتر است و مطابق انتظار NCEP-R2 دارای انحراف معیار بیشتری برای تندی باد است اما برای جهت باد داخلی‌ترین حوزه تحت اعمال NCEP-R2 از کیفیت بهتری برخوردار و دارای کمترین ارزیابی است که این نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل WRF در برآورد میانگین

چنانچه در جدول ۲ دیده می‌شود بهترین همبستگی بین باد شبیه‌سازی شده توسط مدل با داده‌های باد ایستگاه‌های همدیدی هم از نظر جهت و هم از نظر سرعت به داده‌های ERA-Interim به‌ویژه در داخلی‌ترین حوزه (D3) متعلق است و ضعیف‌ترین همبستگی به NCEP-R2 (به‌ویژه برای تندی باد) تعلق دارد. همبستگی جهت باد در شرایط اولیه‌های مختلف (داده‌های بازتحلیل و تحلیل) تقریباً دارای رفتار مشابهی هستند اما از نظر تندی در NCEP-R2 افت شدیدی در مقایسه با ERA-Interim و NCEP-FNL مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد NCEP-R2 تخمین خوبی برای تندی میدان باد در منطقه خلیج فارس ندارد. یکی از دلایلی که این اختلاف برای جهت باد دیده نمی‌شود این است که میدان باد خلیج فارس در بیشتر مقاطع سال از نظر جهت دارای الگوی مشابهی (باد شمال) است یعنی تغییرات شدید در جهت باد رخ نمی‌دهد، اما از نظر تندی این الگو متغیر است و با توجه به تفکیک مکانی پایین NCEP-R2 (۲/۵ درجه‌ای) که عمدتاً نقاط کمتری را از شبکه مدل نمایندگی می‌کند، امکان خطای

اندکی از ERA-Interim بهبود دارد اما برای جهت باد ERA-Interim بهتر ظاهر شده است و با تفاوت، NCEP-R2 عملکرد ضعیف تری دارد.

### ۳-۲. مقایسه بین شبیه‌سازی مدل و داده‌های مشاهداتی ماهواره‌ها

هدف ما در این بخش ارزیابی انحراف و خطای شبیه‌سازی‌های میدان باد سطحی مدل (سرعت و جهت باد) از داده‌های دو ماهواره QuikSCAT و ASCAT است. جدول‌های ۳ و ۴ نتایج مقایسه سمت و سوی باد مدل به ترتیب با QuikSCAT و ASCAT هستند.

#### ۳-۲-۱. داده‌های ماهواره QuikSCAT

با توجه به اینکه داده‌های ماهواره‌ای خود یکی از منابع تأمین داده‌های بازتحلیل است (آن‌جی و همکاران، ۲۰۰۷) و بسیاری از کاربری‌های علوم جوی و اقیانوسی نیازمند داده‌های تفکیک بالای میدان باد هستند (گریما و همکاران، ۱۹۹۹؛ گرادوسکی و کرتز، ۲۰۰۱؛ بلنک، ۲۰۰۵؛ ریزینو و چلتون، ۲۰۰۸؛ بنتامی و همکاران، ۲۰۱۲؛ رانی و همکاران، ۲۰۱۴؛ هسگر و همکاران، ۲۰۱۵؛ کاروالیو و همکاران، ۲۰۱۶) و از طرفی به دلیل هزینه‌های زیاد احداث ایستگاه‌های هواشناسی در مناطق فراساحل، تخمین‌های مدل‌های میان‌مقیاس منبع مناسبی برای جایگزینی داده‌های مشاهداتی باد است (سمپریویا و همکاران، ۲۰۰۸)، مقایسه خروجی‌های باد مدل با مشاهدات سنجش از دور ماهواره‌ای روی نواحی دریایی و اقیانوسی می‌تواند مفید واقع شود. هرچند از نظر دقت در مقایسه با داده‌های ایستگاه‌های هم‌مدیدی، به‌ویژه برای مقادیر سرعت کمتر از ۳ و بیشتر از ۲۰ متر بر ثانیه، مرتبه پایین‌تری دارند (بنتامی و همکاران، ۲۰۰۸).

جهت باد تحت اعمال NCEP-R2 به عنوان شرایط اولیه و مرزی است. برای تندی باد در مجموع ERA-Interim دارای تخمین دست پایین (تخمین منفی) و NCEP-FNL و NCEP-R2 دارای تخمین دست بالا (تخمین مثبت) هستند. برای جهت باد ERA-Interim و NCEP-FNL تخمین دست پایین (پادساعت‌گرد) اما NCEP-R2 تخمین دست بالا (ساعت‌گرد) را شبیه‌سازی می‌کند. به دلیل اینکه ایستگاه‌ها عمدتاً نزدیک ساحل و ساحلی هستند، از توپوگرافی ساحل تأثیر می‌پذیرند و با توجه به اینکه تفکیک NCEP-R2 پایین است بنابراین اثر هموار کردن (smoothing) عوارض زمینی بیشتر به چشم می‌خورد و بنا بر کارهای کاروالیو و همکاران (۲۰۱۴b) و مس و اونس (۲۰۱۱) به سبب تخت‌تر گرفتن عوارض زمینی (ارتفاع کوه‌ها و عمق دره‌ها در شبکه شبیه‌سازی نسبت به مقدار واقعی کمتر است)، مدل WRF مقادیر سرعت بیشتری را تخمین می‌زند. یعنی در این حالت اثرات اصطکاکی با توجه به فرمول‌بندی طول زبری (roughness) کاهش می‌یابد و در مناطقی که مدل ارتفاع را از مقدار واقعی کمتر در نظر می‌گیرد، تخمین بیشتر تندی باد در مقایسه با مقدار واقعی توسط مدل امکان‌پذیرتر است. با توجه به مطالعه کاروالیو و همکاران (۲۰۱۴b) مدل‌های میان‌مقیاس تمایل بیشتری به تخمین بیشتر تندی باد در ارتفاعات و تخمین کمتر در مناطق پست دارند؛ یعنی با توجه به تفکیک پایین NCEP-R2 در مقایسه با ERA-Interim و NCEP-FNL منطقی است که به عنوان شرایط اولیه توپوگرافی را تخت‌تر در نظر بگیرد و تخمین دست بالا برای تندی باد به دست آورد. مقایسه انحراف معیارها تحت شرایط اولیه و مرزی متفاوت نشان می‌دهد که برای تندی باد، ERA-Interim و NCEP-FNL مقادیر مشابهی دارند که NCEP-FNL

جدول ۳. مقادیر سنججه‌های آماری با استفاده از مقایسه شبیه‌سازی‌های مدل و ماهواره QuikSCAT برای ۲۲ سپتامبر ۲۰۰۸.

Input data(Domain)	R		RMSE		Bias		STDE	
	Speed (ms <sup>-1</sup> )	Direction (°)	Speed (ms <sup>-1</sup> )	Direction (°)	Speed (ms <sup>-1</sup> )	Direction (°)	Speed (ms <sup>-1</sup> )	Direction (°)
ERA-Interim(D1)	<b>0.84</b>	0.74	<b>1.36</b>	39.06	-0.55	12.64	<b>1.03</b>	<b>26.75</b>
ERA-Interim(D2)	0.83	0.74	1.37	39.66	-0.47	12.47	1.09	27.41
ERA-Interim(D3)	0.83	0.74	1.38	39.89	<b>-0.45</b>	12.54	1.11	27.65
NCEP-FNL(D1)	0.69	0.86	1.97	<b>36.51</b>	-1.58	7.44	1.17	35.26
NCEP-FNL(D2)	0.69	0.86	1.96	39.24	-1.54	6.92	1.21	38.28
NCEP-FNL(D3)	0.68	0.87	1.97	39.59	-1.53	<b>6.64</b>	1.23	38.73
NCEP-R2(D1)	0.14	<b>0.90</b>	2.11	50.84	-1.49	-24.43	1.28	44.55
NCEP-R2(D2)	0.11	0.89	2.1	52.65	-1.43	-23.68	1.36	46.89
NCEP-R2(D3)	0.12	0.89	2.1	52.29	-1.41	-23.51	1.37	46.58

اختلاف بالا در مقایسه با ERA-Interim و NCEP-FNL این عملکرد نازل را دارد. با وجود این جهت باد برخلاف سرعت آن، ERA-Interim از نظر همبستگی وضعیت مطلوبی ندارد و رفتار جالب مربوط به NCEP-R2 با همبستگی ۰/۹۰ است و بعد از آن NCEP-FNL با همبستگی ۰/۸۷ قرار دارد. احتمالاً در تولید NCEP-R2 علاوه بر داده‌های همدیدی از داده‌های ماهواره QuikSCAT با وزن زیاد استفاده کرده‌اند که NCEP-R2 از این تطابق خوب برخوردار است. تغییرات RMSE بین ۱/۳۶ و ۲/۱ متر بر ثانیه برای تندی باد در تمام حالت‌های به کارگیری شرایط اولیه در همه حوزه‌ها است که ERA-Interim دارای کمترین مقدار (۱/۳۶) و NCEP-R2 دارای بیشترین مقدار (۲/۱) است. نوسانات RMSE برای جهت باد بین ۳۶/۵۱ و ۵۲/۲۹ متر بر ثانیه قرار دارد که کمترین مقدار به NCEP-FNL و بیشترین مقدار به NCEP-R2 تعلق دارد؛ البته ERA-Interim و NCEP-FNL تقریباً در یک سطح قرار دارند و فقط حوزه D1 در ERA-Interim با اختلاف ناچیز از دو حوزه دیگر

جدول ۳ خلاصه‌ای از سنججه‌های آماری حاصل از مقایسه خروجی‌های مدل WRF تحت شرایط اولیه مختلف (ERA-Interim، NCEP-FNL و NCEP-R2) در سه حوزه شبیه‌سازی (D1، D2 و D3) و باد QuikSCAT در ۲۲ سپتامبر ۲۰۰۸ است که بزرگ‌ترین مقدار همبستگی (R) و کمترین مقادیر RMSE، Bias و STDE مشخص و زیر آن‌ها خط کشیده است. به دلیل اینکه داده‌های QuikSCAT تا سال ۲۰۰۹ در دسترس است، از بین تاریخ‌های شبیه‌سازی تنها ۲۲ سپتامبر ۲۰۰۸ مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. در این آمارها از داده‌های مناطق فروساحل به دلیل خطای بیشتر که نشئت گرفته از عوارض زمینی است، صرف‌نظر شده است و همچنین سرعت‌های کمتر از سه متر بر ثانیه و بیشتر از ۲۰ متر بر ثانیه لحاظ نگردیده است. برای تندی باد بهترین توافق بین داده‌ها با همبستگی ۰/۸۴ متعلق به وضعیتی است که از داده‌های ERA-Interim و ضعیف‌ترین همبستگی (R=0.11) در حالتی است که از NCEP-R2 به عنوان شرایط اولیه WRF استفاده شده است؛ با این توضیح که NCEP-R2 با

عملکرد بهتری دارد. برای سنجۀ Bias، تندی باد تحت اعمال ERA-Interim به مدل با  $0/45$  - متر بر ثانیه، بهترین و NCEP-R2 با اریبی  $1/49$  - متر بر ثانیه ضعیف‌ترین شرایط اولیه را برای تخمین میدان باد داشته‌اند و در کل مدل در مقایسه با ماهواره تمایل به تخمین منفی برای تندی باد در تمام شبیه‌سازی‌ها دارد و این تمایل در NCEP-FNL و NCEP-R2 تا حدودی بالاست، در حالی که در ERA-Interim اختلاف چندانی دیده نمی‌شود. در مورد اریبی جهت باد تخمین مثبت (پادساعت‌گرد) را برای ERA-Interim و NCEP-FNL و تخمین منفی (ساعت‌گرد) را برای NCEP-R2 شاهد هستیم که در این میان NCEP-FNL به‌ویژه در حوزه ۳ (D3) کمترین انحراف را از میدان باد WRF دارد ( $Bias=6.64^\circ$ ). برای انحراف معیار ERA-Interim با انحراف معیار (STDE)  $1/03$  متر بر ثانیه و  $26/75$  درجه به ترتیب برای سرعت و جهت باد، برای انتخاب به عنوان شرایط اولیه مدل شرایط مناسب‌تری دارد. به عنوان یک نتیجه کلی از مقایسه میدان باد شبیه‌سازی شده توسط مدل WRF و باد QuikSCAT از بین مجموعه داده بازتحلیل و تحلیل، ERA-Interim بهترین انتخاب برای اعمال شرایط اولیه است.

### ۲-۲-۳. داده‌های ماهواره ASCAT

جدول ۴ نمایش سنجه‌های آماری محاسبه شده برای مقایسه میدان باد شبیه‌سازی شده توسط مدل تحت شرایط اولیه مختلف (ERA-Interim، NCEP-FNL و NCEP-R2) و میدان باد حاصل از مشاهدات ماهواره ASCAT است که کمترین خطای RMSE، Bias و STDE و بیشترین R (همبستگی) برای سرعت و جهت باد، مشخص و زیر آن‌ها خط کشیده شده است. در این آمارها همانند مقایسه‌های QuikSCAT داده‌های مناطق فرساحل و همچنین سرعت‌های کمتر از ۳ متر بر ثانیه و بیشتر از ۲۰

متر بر ثانیه لحاظ نگردیده است. چنانچه در این جدول مشاهده می‌شود بهترین همبستگی بین خروجی تندی باد WRF و ماهواره، مختص حالتی است که مدل تحت شرایط اولیه ERA-Interim اجرا شده و در حوزه مادر (D1) است ( $R=0.60$ ) اما در مجموع و بدون بررسی تک‌تک حوزه‌ها تندی باد مدل تحت شرایط اولیه NCEP-FNL با اندکی اختلاف، از همبستگی بهتری با تندی باد ماهواره برخوردار است و همانند مقایسه آمارهای ایستگاه‌های همدیدی با خروجی مدل، در این حالت نیز ضعیف‌ترین عملکرد برای همبستگی تندی باد، مربوط به به‌کارگیری داده بازتحلیل NCEP-R2 به عنوان شرایط اولیه است. ERA-Interim برای جهت باد با اختلاف فاحش از NCEP-FNL و NCEP-R2 با همبستگی  $0.89$ ، از وضعیت بهتری برخوردار است. برای سایر سنجه‌های آماری (RMSE، Bias و STDE)، ERA-Interim بهترین مقادیر را نسبت به NCEP-FNL و NCEP-R2 به خود اختصاص داده است. در کل مدل WRF برای تندی باد در تمام مجموعه داده‌ها و تمام تفکیک‌های شبکه‌ای در مقایسه با داده‌های ASCAT به تخمین منفی تمایل دارد ( $Bias < 0$ ) و همچنین برای جهت باد این تخمین منفی به‌استثنای NCEP-R2 نیز برقرار است و جهت باد مدل کمتر از ASCAT (پادساعت‌گرد) برای ERA-Interim و NCEP-FNL است. محدوده تغییرات انحراف معیار برای تندی باد در تمام حوزه‌ها و تحت شرایط اولیه مختلف بین  $0.94$  تا  $1/35$  متر بر ثانیه و برای جهت باد بین  $29$  تا  $42$  درجه قرار دارد که نشان می‌دهد در مجموع میدان باد مدل WRF با میدان باد ماهواره ASCAT تطابق خوبی دارد و برای زمان‌هایی که امکان پایش این ماهواره روی خلیج فارس وجود ندارد، مدل WRF همراه با هسته دینامیکی ARW برای شبیه‌سازی میدان باد به‌ویژه در نواحی فراساحل جایگزین مناسب و کارآمدی است.

جدول ۴. مقادیر سنج‌های آماری با استفاده از مقایسه شبیه‌سازی‌های مدل و ماهواره ASCAT.

Input data(Domain)	R		RMSE		Bias		STDE	
	Speed (ms <sup>-1</sup> )	Direction (°)	Speed (ms <sup>-1</sup> )	Direction (°)	Speed (ms <sup>-1</sup> )	Direction (°)	Speed (ms <sup>-1</sup> )	Direction (°)
ERA-Interim(D1)	<b>0.60</b>	0.88	<b>1.50</b>	<b>33.34</b>	-1.10	-8.71	<b>0.94</b>	<b>29.75</b>
ERA-Interim(D2)	0.55	<b>0.89</b>	1.51	33.95	-1.04	-9.21	1.03	30.34
ERA-Interim(D3)	0.54	<b>0.89</b>	1.52	34.00	<b>-1.03</b>	-9.31	1.06	30.39
NCEP-FNL(D1)	0.57	0.80	2.28	36.87	-1.30	<b>-1.32</b>	1.51	33.03
NCEP-FNL(D2)	0.58	0.81	2.28	37.46	-1.24	-2.74	1.55	33.36
NCEP-FNL(D3)	0.58	0.81	2.28	37.13	-1.22	-2.62	1.56	33.10
NCEP-R2(D1)	0.52	0.83	1.78	43.06	-1.18	8.38	1.29	42.16
NCEP-R2(D2)	0.53	0.83	1.79	43.36	-1.15	8.26	1.34	42.53
NCEP-R2(D3)	0.53	0.83	1.80	42.99	-1.14	8.28	1.35	42.15

## ۴. نتیجه‌گیری

مجموعه داده‌های ERA-Interim و NCEP-FNL در تخمین میدان باد عملکرد نزدیک دارند، اما ERA-Interim دارای بیشترین همبستگی با مشاهدات است و کمترین خطا را دارد. با وجود این برای جهت باد NCEP-R2 دارای همبستگی قابل قبولی است درحالی‌که برای تندی باد این گونه نیست. تقریباً همه مجموعه داده‌ها مایل به تخمین دست بالا برای تندی باد هستند، درحالی‌که جهت باد ERA-Interim و NCEP-FNL تمایل به تخمین دست پایین (پادساعت‌گرد) دارند، اما NCEP-R2 تمایل به تخمین مثبت (ساعت‌گرد) دارد.

- در کل، همبستگی برای جهت باد در قیاس با سرعت آن، هنگامی که خروجی مدل با داده‌های ایستگاه‌های همدیدی مقایسه می‌شوند، بهتر است زیرا در بیشتر مواقع سال‌ها روی خلیج فارس دارای الگوی تقریباً ثابت شمال غربی است.

- مقایسه خروجی مدل با داده‌های QuikSCAT همانند مقایسه مدل با ایستگاه‌های همدیدی است. سرعت باد مدل با انتخاب ERA-Interim و NCEP-FNL به عنوان شرایط اولیه و مرزی دارای خطای کمتر و همبستگی بیشتر نسبت

در این کار ما نتایج شبیه‌سازی‌های باد مدل میان‌مقیاس WRF-ARW را با استفاده از مجموعه داده‌های ERA-Interim، NCEP-FNL و NCEP-R2 به عنوان شرایط اولیه و مرزی روی منطقه خلیج فارس ارزیابی و مقایسه کردیم؛ هدف اصلی دریافت این بود که کدام یک از مجموعه داده‌ها میدان باد را با دقت مناسب‌تری تولید می‌کند. در این مقاله، مدل WRF، مجموعه داده‌های بازتحلیل و تحلیل و داده‌های مشاهداتی با جزئیات در بخش‌های مختلف تشریح شده است. نتایج این کار به طور خلاصه در جدول‌های ۳ تا ۵ تحت سنج‌های آماری R، RMSE، Bias و STDE برای تفکیک‌های بالاتر و کمتر مدل ارائه شد. به‌طور خلاصه نتایج این تحقیق به قرار زیر است:

- از مقایسه باد مدل با داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های همدیدی به دست می‌آید که مدل تحت اعمال مجموعه داده بازتحلیل ERA-Interim و NCEP-FNL در هر دو کمیت سرعت و جهت باد قادر به تولید شبیه‌سازی‌های با خطای کمتر در مقایسه با NCEP-R2 است. با اینکه هر دو

حالات شاهد تخمین منفی (پادساعت گرد) هستیم. نهایتاً در کنار خیلی از عوامل تأثیرگذار، نتایج این مقاله نشان می‌دهد که یکی از منابع خطا در شبیه‌سازی باد مدل WRF انتخاب شرایط اولیه و مرزی (داده‌های ورودی) است. در این میان داده‌های نسل جدید بازتحلیل مانند ERA-Interim به دلیل گوارد داده بهتر و همچنین اندازه‌گیری‌های جدیدتر در مقایسه با نسل قدیم مانند NCEP-R2 در شبیه‌سازی باد مدل میان‌مقیاس WRF کارآمدتر هستند. بنابراین ERA-Interim باید به عنوان داده شرایط اولیه و مرزی انتخابی مناسب برای شبیه‌سازی باد توسط مدل WRF باشد اگرچه داده تحلیل NCEP-FNL نیز دارای کارایی قابل انتظاری بوده و می‌تواند در فقدان ERA-Interim جایگزینی کاملاً مناسب باشد؛ البته برای جهت باد مجموعه داده NCEP-R2 نیز کارایی دارد و فقط برای تندی باد نتایج آن با خطای زیاد به دست می‌آید.

##### ۵. مراجع

گلشنی، ع. و تائبی، س.، ۱۳۸۷، ارزیابی میدان باد ماهواره‌ای QuikSCAT در دریاهای مجاور ایران با استفاده از داده‌های باد ایستگاه‌های سینوپتیک و مدل‌های عددی جوی، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی دریا، ۴، ۴۷-۶۳.

Alvarez, I., Gomez-Gesteira, M., deCastro, M. and Carvalho, D., 2014, Comparison of different wind products and buoy wind data with seasonality and interannual climate variability in the southern Bay of Biscay (2000-2009). *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 106, 38-48. doi:10.1016/j.dsr2.2013.09.028.

Beljaars, A., 1995, The parametrization of surface fluxes in large-scale models under free convection. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 121, 255-270.

Bentamy, A., Croize-Fillon, D. and Perigaud, C., 2008, Characterization of ASCAT measurements based on buoy and QuikSCAT wind vector observations. *Ocean Science* 4, 265-274. doi:10.5194/os-4-265-2008.

به انتخاب NCEP-R2 است. در کل، مدل برای تندی باد تمایل به تخمین کمتر در مقایسه با مشاهدات QuikSCAT دارد که این تخمین منفی برای شرط مرزی و اولیه ERA-Interim (کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه) قابل اغماض است، در حالی که برای NCEP-FNL و NCEP-R2 تقریباً برابر ۱/۵ متر بر ثانیه است. برخلاف تندی باد، مدل تحت ورودی NCEP-R2 از همبستگی زیادی با جهت باد QuikSCAT برخوردار است و فقط در همبستگی دارای این ویژگی بارز است. در مجموع برای جهت باد عملکرد هر سه مجموعه داده شبیه به هم است و با اختلاف نزدیک، ERA-Interim دارای خطای کمتری است.

- راجع به ارزیابی میدان باد مدل با ماهواره ASCAT به‌طور اجمالی تمام مجموعه داده‌های بازتحلیل و تحلیل، عملکرد مشابهی داشته‌اند و تفاوت آشکاری که در ارتباط با QuikSCAT مشاهده شد، در این حالت به آن شدت وجود ندارد. با این وجود هنگامیکه باز تحلیل ERA-Interim به عنوان شرط اولیه و مرزی انتخاب می‌شود، خروجی باد مدل تحت مقایسه ASCAT دارای بهترین تطابق و کمترین خطا است. همانند نتایج مقایسه QuikSCAT شبیه‌سازی‌های مدل تحت تأثیر تک‌تک مجموعه داده‌ها برای تندی باد تخمین کمتر از ASCAT دارد و برای جهت باد هم به‌استثنای

NCEP-R2 که با تخمین مثبت همراه است، در سایر Bentamy, A., Grodsky, S. A., Carton, J. A., Croize-Fillon, D. and Chapron, B., 2012, Matching ASCAT and QuikSCAT winds. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 117, 1-15. doi:10.1029/2011JC007479.

Bjerknes, V., 1904, The problem of weather prediction, as seen from the standpoints of mechanics and physics. *Meteorologische Zeitschrift*.

Blanke, B., 2005, Modeling the structure and variability of the southern Benguela upwelling using QuikSCAT wind forcing. *Journal of Geophysical Research* 110, C07018. doi:10.1029/2004JC002529.

Caires, S., Sterl, A., Bidlot, J.-R., Graham, N. and Swail, V., 2004, Intercomparison of Different Wind - Wave Reanalyses. *Journal of*

- Climate 17, 1893–1913.
- Capps, S. B. and Zender, C. S., 2010, Estimated global ocean wind power potential from QuikSCAT observations, accounting for turbine characteristics and siting. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 115, 1–13. doi:10.1029/2009JD012679.
- Carvalho, D., Rocha, A. and Gómez-Gesteira, M., 2012, Ocean surface wind simulation forced by different reanalyses: Comparison with observed data along the Iberian Peninsula coast. *Ocean Modelling* 56, 31–42. doi:10.1016/j.ocemod.2012.08.002.
- Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M., Alvarez, I. and Silva Santos, C., 2013, Comparison between CCMP, QuikSCAT and buoy winds along the Iberian Peninsula coast. *Remote Sensing of Environment* 137, 173–183. doi:10.1016/j.rse.2013.06.005.
- Carvalho, D., Rocha, A., Gomez-Gesteira, M. and Santos, C. S., 2016, Offshore winds and wind energy production estimates derived from ASCAT, OSCAT, NWP models and buoys - a comparative study for the Iberian Peninsula Atlantic coast 1–12. doi:10.1016/j.renene.2016.10.063.
- Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M. and Silva Santos, C., 2014a, Offshore wind energy resource simulation forced by different reanalyses: Comparison with observed data in the Iberian Peninsula. *Applied Energy* 134, 57–64. doi:10.1016/j.apenergy.2014.08.018.
- Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M. and Silva Santos, C., 2014b, WRF wind simulation and wind energy production estimates forced by different reanalyses: Comparison with observed data for Portugal. *Applied Energy* 117, 116–126. doi:10.1016/j.apenergy.2013.12.001.
- Christina, T. and Lars, I., 2011, Data usage and quality control in ERA-40, ERA-Interim and the operational DA system, *Journal of Chemical Information and Modeling*. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- Chou, M.-D. and Suarez, M. J., 1999, A solar radiation parameterization for atmospheric studies. *NASA Tech. Memo* 104606, 40.
- Chou, M.-D., Suarez, M. J., Liang, X.-Z., Yan, M. M. -H. and Cote, C., 2001, A thermal infrared radiation parameterization for atmospheric studies.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Holm, E. V., Isaksen, L., Kallberg, P., Kohler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J. J., Park, B. K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thepaut, J. N. and Vitart, F., 2011, The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137, 553–597. doi:10.1002/qj.828.
- Dudhia, J., 1996, A multi-layer soil temperature model for MM5, in: *Preprints, The Sixth PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop*. pp. 22–24.
- Dunbar, R. S., Lungu, T., Weiss, B., Stiles, B., Huddleston, J., Callahan, P. S., Shirliffe, G., Perry, K., Hsu, C., Mears, C. and Wentz, F., 2006, QuikSCAT Science Data Product User Manual, Version 3.0, JPL Document D-18053 - Rev A. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory.
- Emery, K. O., 1956, Sediments and water of Persian Gulf. *AAPG Bulletin* 40, 2354–2383.
- Figa-Saldana, J., Wilson, J.J.W., Attema, E., Gelsthorpe, R., Drinkwater, M. R. and Stoffelen, A., 2002, The advanced scatterometer (ASCAT) on the meteorological operational (MetOp) platform: A follow on for European wind scatterometers. *Canadian Journal of Remote Sensing* 28, 404–412.
- Furevik, B. R., Sempreviva, A. M., Cavaleri, L., Lefèvre, J.-M. and Transerici, C., 2011, Eight years of wind measurements from scatterometer for wind resource mapping in the Mediterranean Sea. *Wind Energy* 14.
- Ghader, S., Yazgi, D., Haghshenas, S. A., Arab, A. R., Attari, M. J., Bakhtiari, A. and Zinsazboroujerdi, H., 2016a, Hindcasting Tropical Storm Events in the Oman Sea. *Journal of Coastal Research* 1087–1091.
- Ghader, S., Yazgi, D., Soltanpour, M. and Nemat, M. H., 2016b, On the use of an ensemble forecasting system for prediction of surface wind over the Persian Gulf. In *proceedings of the 12th International Conference on Coasts, Ports and Marine* 355–372. doi:10.1002/wee Structure (ICOPMAS 2016), Tehran, Iran, 31 Oct - 2 Nov. 2016.
- Grima, N., Bentamy, A., Katsaros, K., Quilfen, Y., Delecluse, P. and Levy, C., 1999, Sensitivity of an oceanic general circulation model forced by satellite wind stress fields. *Journal of Geophysical Research-Oceans* 104, 7967–7989. doi:10.1029/1999JC900007.
- Grodsky, S. A. and Carton, J. A., 2001, Coupled land/atmosphere interactions in the West African monsoon 28, 1503–1506.
- Hasager, C. B., Mouche, A., Badger, M., Bingöl, F., Karagali, I., Driesenaar, T., Stoffelen, A., Peña, A. and Longépé, N., 2015, Offshore wind climatology based on synergetic use of

- Envisat ASAR, ASCAT and QuikSCAT. *Remote Sensing of Environment* 156, 247–263. doi:10.1016/j.rse.2014.09.030.
- Hersbach, H., Stoffelen, A. and de Haan, S., 2007, An improved C-band scatterometer ocean geophysical model function: CMOD5. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 112.
- 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, 2318–2341.
- Jiang, D., Zhuang, D., Huang, Y., Wang, J. and Fu, J., 2013, Evaluating the spatio-temporal variation of China's offshore wind resources based on remotely sensed wind field data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24, 142–148. doi:10.1016/j.rser.2013.03.058.
- Jimenez, B., Moennich, K., Rey, J. and Durante, F., 2012, Use of different globally available long-term data sets and its influence on expected wind farm energy yields.
- Kain, J. S., 2004, The Kain-Fritsch convective parameterization: an update. *Journal of Applied Meteorology* 43, 170–181.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., R, K., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J. and Zhu, Y., 1996, The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society* 77, 437–471. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO; 2.
- Kämpf, J. and Sadrinasab, M., 2005, The circulation of the Persian Gulf: a numerical study. *Ocean Science Discussions* 2, 129–164. doi:10.5194/osd-2-129-2005.
- Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S. K., Hnilo, J. J., Fiorino, M. and Potter, G. L., 2002, NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society* 83, 1631–1643+1559. doi:10.1175/BAMS-83-11-1631.
- Karagali, I., Badger, M., Hahmann, A. N., Peña, A., B. Hasager, C. and Sempreviva, A. M., 2013, Spatial and temporal variability of winds in the Northern European Seas. *Renewable Energy* 57, 200–210. doi:10.1016/j.renene.2013.01.017.
- Karagali, I., Peña, A., Badger, M. and Hasager, C. B., 2014, Wind characteristics in the North and Baltic Seas from the QuikSCAT satellite. *Wind Energy* 17, 123–140.
- Liléo, S. and Petrik, O., 2011, Investigation on the use of NCEP / NCAR , MERRA and NCEP / CFSR reanalysis data in wind resource analysis. *European Wind Energy Conference and Exhibition (EWEC)* 10.
- Lin, Y.-L., Farley, R. D. and Orville, H. D., 1983, Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 22, 1065–1092.
- Liu, C. X., Wang, J., Qi, Y. Q. and Wan, Q. L., 2004, A Preliminary study on QuikSCAT wind data assimilation using model WRF. *J. Trop. Oceanogr* 23, 69–74.
- Liu, W. T., Tang, W. and Xie, X., 2008, Wind power distribution over the ocean. *Geophysical Research Letters* 35. doi:10.1029/2008GL034172.
- Mass, C. and Ovens, D., 2011, 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.
- Mazaheri, S., Kamranzad, B. and Hajivalie, F., 2013, Modification of 32 years ECMWF wind field using QuikSCAT data for wave hindcasting in Iranian Seas. *Journal of Coastal Research* 344-349.
- Meissner, T., Smith, D. and Wentz, F., 2001, A 10 year intercomparison between collocated Special Sensor Microwave Imager oceanic surface wind speed retrievals and global analyses. *Journal of Geophysical Research* 106, 11731. doi:10.1029/1999JC000098.
- Menendez, M., Tomas, A., Camus, P., Garcia-Diez, M., Fita, L., Fernandez, J., Mendez, F. J. and Losada, I. J., 2011, A methodology to evaluate regional-scale offshore wind energy resources. *OCEANS 2011 IEEE - Spain* 1–8. doi:10.1109/Oceans-Spain.2011.6003595.
- Michael Reynolds, R., 1993, Physical oceanography of the Gulf, Strait of Hormuz, and the Gulf of Oman-Results from the Mt Mitchell expedition. *Marine Pollution Bulletin* 27, 35–59. doi:10.1016/0025-326X(93)90007-7.
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J. and Clough, S. A., 1998, Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 102, 16663–16682.
- NCEP-FNL, 2016, operational model global tropospheric analyses, continuing from July 1999, Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, Boulder, CO. Available: <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083>
- Onogi, K., Tsutsui, J., Koide, H., Sakamoto, M., Kobayashi, S., Hatsushika, H., Matsumoto, T., Yamazaki, N., Kamahori, H., Takahashi, K., Kadokura, S., Wada, K., Kato, K., Oyama, R., Ose, T., Mannoji, N. and Taira, R., 2007, The



- JRA-25 Reanalysis. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II 85, 369–432. doi:10.2151/jmsj.85.369.
- Perrone, T. J., 1979, Winter Shamal in the Persian Gulf, Naval Environmental Prediction Research Facility, Monterey.
- Pimenta, F., Kempton, W. and Garvine, R., 2008, Combining meteorological stations and satellite data to evaluate the offshore wind power resource of Southeastern Brazil. *Renewable Energy* 33, 2375–2387. doi:10.1016/j.renene.2008.01.012.
- Rani, S. I., Das Gupta, M., Sharma, P. and Prasad, V. S., 2014, Intercomparison of Oceansat-2 and ASCAT Winds with In Situ Buoy Observations and Short-Term Numerical Forecasts. *Atmosphere-Ocean* 52, 92–102. doi:10.1080/07055900.2013.869191.
- Risien, C. M. and Chelton, D. B., 2008, A Global Climatology of Surface Wind and Wind Stress Fields from Eight Years of QuikSCAT Scatterometer Data. *Journal of Physical Oceanography* 38, 2379–2413. doi:10.1175/2008JPO3881.1.
- Sempreviva, A. M., Barthelmie, R. J. and Pryor, S. C., 2008, Review of methodologies for offshore wind resource assessment in European seas. *Surveys in Geophysics* 29, 471–497. doi:10.1007/s10712-008-9050-2.
- Simmons, A., Uppala, S., Dee, D. and Kobayashi, S., 2007, ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. *ECMWF Newsletter* 110, 25–35. doi:ECMWF Newsletter n.110.
- Singh, R., Kishitawal, C. M., Pal, P. K. and Joshi, P. C., 2011, Assimilation of the multisatellite data into the WRF model for track and intensity simulation of the Indian Ocean tropical cyclones. *Meteorology and Atmospheric Physics* 111, 103–119. doi:10.1007/s00703-011-0127-y.
- 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. Technical Report 113. doi:10.5065/D6DZ069T.
- Stopa, J. E. and Cheung, K. F., 2014, Intercomparison of wind and wave data from the ECMWF Reanalysis Interim and the NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Ocean Modelling* 75, 65–83. doi:10.1016/j.ocemod.2013.12.006.
- Tang, W. and Liu, W. T., 1996, Equivalent neutral wind. Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration.
- Uppala, S. M., Kållberg, P. W., Simmons, A. J., Andrae, U., Bechtold, V. D. C., Fiorino, M., Gibson, J. K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G. A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R. P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M. A., Beljaars, A. C. M., Berg, L. Van De, Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hólm, E., Hoskins, B. J., Isaksen, I., Janssen, P. A. E. M., Jenne, R., McNally, A. P., Mahfouf, J.-F., Morcrette, J.-J., Rayner, N. A., Saunders, R. W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K. E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P. and Woollen, J., 2005, The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 131, 2961–3012. doi:10.1256/qj.04.176.
- Wang, W., Bruyère, C., Duda, M., Dudhia, J., Gill, D., Kavulich, M., Keene, K., Lin, H. C., Michalakes, J., Rizvi, S., 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](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3).
- Yamartino, R. J., 1984, A Comparison of Several "Single-Pass" Estimators of the Standard Deviation of Wind Direction. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23, 1362–1366. doi:10.1175/1520-0450(1984)023<1362:ACOSPE>2.0.CO; 2.

## Verification of WRF wind field hindcast forced by different initial and boundary conditions over the Persian Gulf: Comparison with synoptic data and QuikSCAT and ASCAT satellites data

Gholami, S.<sup>1</sup>, Ghader, S.<sup>2\*</sup>, Khaleghi Zavareh, H.<sup>3</sup> and Ghafarian, P.<sup>4</sup>

1. Ph.D. Student, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Tehran, Iran
2. Associate Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran
3. Associate Professor, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Tehran, Iran
4. Assistant Professor, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Tehran, Iran

(Received: 26 Feb 2017, Accepted: 24 Oct 2017)

### Summary

The Persian Gulf with subtropical climate is located between latitudes of 23-30 degrees, with its coast adjoining Iraq, Kuwait, Saudi Arabia, Qatar and United Arab Emirates from one side and Iran from the other side. The Persian Gulf's width in its widest part is 370 km and its length is 990 km. For people living near the sea and the surrounding coastal area as well as construction of onshore and offshore structures, knowledge and understanding of the wind field and its variability is essential. In addition, the most common effect of wind is seen in wind driven currents, swells, upwelling and down-welling systems. Moreover wind stress plays a key role in the modeling of air sea interaction phenomenon, e.g., determination of the drag coefficient. Although other factors such as wind pattern and oceanic current are also contributing to the determination of this coefficient but the wind is the main governing factor. In other words, any inaccuracy in determination of the sea surface wind field could cause a large over or under estimations in atmospheric and oceanic estimations.

This work is devoted to verify the effects of different initial and boundary condition in global data (using reanalysis and analysis datasets) on numerical simulations of WRF (Weather Research and Forecasting) model over the Persian Gulf area. The main obstacle in the verification and evaluation of a model simulation is the lack of observation data with fine spatial and temporal resolution, in particular for offshore areas. Fortunately, in onshore areas, the existence of weather stations has solved the problem somehow, and for offshore areas satellite data are found to be the best dataset considering the spatial coverage. In the present study, simulations of WRF model are compared with different type of observation data. In this research, two types of data are used for verifying the model, i.e. Synoptic stations data and Satellite data (QuikSCAT and ASCAT).

The WRF model version 3.4.1 is employed with ARW dynamical core for simulating of sea surface wind field over the Persian Gulf region. Considering the connection and information exchange between the domains, a two way nesting method is applied in simulations. As the goal was just to verify the effects of different initial and boundary conditions on simulations, therefore, for all the simulations the number of domains and their analogous grid sizes are considered the same. For these simulations three domains are considered the main domain approximately covers the whole area of the Middle East, from West and some parts of Far East with 36km spatial grid spacing. First nested domain covers the southern half of Iran along with marginal countries of Persian Gulf, with a 12km spatial grid resolution and ultimately, the innermost domain of the Persian Gulf that also includes some parts of Oman Sea with 4km grid spacing. The time step for simulations is assumed 216seconds and the time period for each simulation is 30hours, from which the first 6 hours are assumed as spin-up time. To provide the initial and boundary conditions three datasets of ERA-Interim (ECMWF Re-Analysis Interim), NCEP-FNL and NCEP-R2 are employed.

Along with lots of effective factors, results from this research show that one of the sources of error in the WRF model wind simulations is the selection of initial and boundary conditions (input data). The obtained results of this work reveal that for the surface wind hindcast simulations over the Persian Gulf using WRF model, the ECMWF ERA-Interim data is a more suitable dataset to provide the initial and boundary conditions, rather than the NCEP-FNL and NCEP-R2 data. However, the NCEP-FNL is an alternative data set when the ERA-Interim data has some lacks.

**Keywords:** Wind field, WRF model, Initial condition, Reanalysis, Persian Gulf.

\* Corresponding author:

sghader@ut.ac.ir