

## حساسیت‌سنجی شبیه‌سازی‌های مدل WRF به پارامترسازی‌های فیزیکی در محدوده خلیج فارس و دریای عمان در زمان مونسون تابستانی

بهزاد لایقی<sup>۱</sup>، سرمد قادر<sup>۲\*</sup>، عباسعلی علی اکبری بیدختی<sup>۳</sup> و مجید آزادی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

<sup>۲</sup>دانشیار، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup>استاد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۴</sup>دانشیار، پژوهشکده هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۱۳، تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۲/۲۹)

### چکیده

در کار حاضر اثر انتخاب پارامترسازی‌های متفاوت فرایندهای فیزیکی بر شبیه‌سازی عددی مشخصه‌های هواشناسی حاصل از مدل WRF بر روی خلیج فارس و دریای عمان از زمان شروع تا پایان فصل مونسون تابستانی حساسیت‌سنجی شده است. داده‌های تحلیلی FNL از مرکز ملی پیش‌بینی محیطی NCEP برای تامین شرایط اولیه و شرایط مرزی شبیه‌سازی‌های مدل WRF مورد استفاده قرار گرفتند. بازه زمانی شبیه‌سازی، دوره شروع تا پایان مونسون تابستانی اقیانوس هند در سال ۲۰۱۱ است. مقادیر شبیه‌سازی‌شده دما، رطوبت و سمت و سرعت باد برای نُه پیکربندی مختلف مدل با داده‌های ایستگاه‌های هم‌دیدی مجاور سواحل و جزایر جمهوری اسلامی ایران، بویه هواشناسی دریایی ایستگاه چابهار و داده‌های سمت و سرعت باد ماهواره WINDSAT مقایسه شد. مقایسه‌ها نشان داد که برای شبیه‌سازی دما و رطوبت، پیکربندی ۳ شامل طرحواره‌های خردفیزیک لین، لایه مرزی سیاره‌ای MRF، همرفت کومه‌ای کین فریج، تابش موج بلند RRTM، تابش موج کوتاه گوآرد، لایه سطحی REVISED-MM5 و سطح زمین NOAA و برای سرعت باد پیکربندی ۲ شامل طرحواره‌های خردفیزیک لین، لایه مرزی سیاره‌ای ACM2، همرفت کومه‌ای کین فریج، تابش موج بلند RRTM، تابش موج کوتاه گوآرد، لایه سطحی و سطح زمین PLEIM-XIU خطای کمتری نسبت به سایر پیکربندی‌ها دارد. این امر نشان‌دهنده آن است که دما و باد سطحی به نوع طرحواره‌های لایه مرزی حساسیت بیشتری دارند تا دیگر طرحواره‌ها که عمدتاً مربوط به جو آزاد هستند.

واژه‌های کلیدی: مدل WRF، حساسیت‌سنجی، خلیج فارس، دریای عمان

## ۱ مقدمه

تعیین میدان باد و شار دما و رطوبت بر روی محیط‌های اقیانوسی کاربردهای فراوانی به‌خصوص در زمینه شبیه‌سازی امواج ناشی از باد و همچنین مدل‌های اقیانوسی دارد. استفاده از مدل‌های عددی هواشناسی یکی از روش‌های متداول برای این کار است. در بین مدل‌های عددی موجود، مدل WRF (Weather Research and Forecasting) یکی از پرکاربردترین مدل‌های عددی هواشناسی است که هم در مطالعات و تحقیقات و هم در زمینه پیش‌بینی عددی در مراکز مختلف تحقیقاتی و سازمان‌های هواشناسی کشورها مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای حساسیت‌سنجی، درستی‌سنجی و افزایش دقت این مدل در پیش‌بینی و شبیه‌سازی مشخصه‌های هواشناسی، روش‌های مختلفی به کار می‌رود. تغییر مقادیر اولیه مدل، روش‌های مختلف اجرای مدل، و همچنین استفاده از روش‌های مختلف پارامترسازی فرایندهای فیزیکی جو، از جمله این روش‌ها است. مطالعات متعددی در خصوص حساسیت‌سنجی مدل عددی WRF در نقاط مختلف جهان صورت گرفته است.

اسکاک و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از روش ارزیابی فرایابی شیء‌بنیان (Method for Object-based Diagnostic Evaluation) به درستی‌سنجی شبیه‌سازی بارش در منطقه حاره‌ای با مدل WRF پرداختند. ژنگ و همکاران (۲۰۱۲) مدل WRF را به‌عنوان مدل اقلیمی منطقه‌ای بر روی جزایر هاوایی تنظیم کردند. نیلسن-گامون و همکاران (۲۰۱۰) ارزیابی حساسیت به طرحواره لایه مرزی سیاره‌ای را با تخمین پارامتری انجام دادند. رویز و همکاران (۲۰۱۰) حساسیت‌سنجی مدل WRF را به انتخاب نوع پارامترسازی بر روی آمریکای جنوبی با اعتبارسنجی از طریق متغیرهای سطحی انجام دادند. چین و همکاران (۲۰۱۰) اثر فیزیک و میزان تفکیک مدل WRF را بر پیش‌بینی باد سطوح پایین بررسی کردند. سانتوس و

همکاران (۲۰۱۳) حساسیت باد شبیه‌سازی شده با مدل WRF را به پارامترسازی فیزیکی در اندلس (جنوب اسپانیا) مورد بررسی قرار دادند. چالا و همکاران (۲۰۰۸) حساسیت مدل پخش جوئی را به تنظیمات مدل WRF بررسی کردند. قادر و همکاران (۲۰۱۴) به ارزیابی فرایابی میدان باد شبیه‌سازی شده بر روی دریای خزر با مدل WRF پرداختند.

در این تحقیق، در سطح دریای عمان و خلیج فارس که یک منطقه جنب حاره‌ای و دارای پوشش دریا و خشکی است، حساسیت‌سنجی مدل WRF به انتخاب طرح‌واره‌های پارامترسازی فیزیکی لایه مرزی سیاره‌ای و لایه سطحی انجام می‌شود. همچنین وضعیت هواشناختی در زمان وقوع پدیده مونسون تابستانی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای انجام درستی‌سنجی نتایج مدل از داده‌های دیدبانی در دسترس در منطقه مورد مطالعه از جمله داده‌های ایستگاه‌های همدیدی، داده‌های بویه و داده‌های اندازه‌گیری شده توسط سنجنده‌های ماهواره‌ای استفاده می‌شود.

## ۲ منطقه مورد مطالعه

خلیج فارس از طریق تنگه هرمز به دریای عمان و از آنجا به دریاهای آزاد مرتبط است. از بین کشورهای همسایه خلیج فارس، ایران بیشترین مرز آبی را در امتداد خلیج فارس دارد. طول مرز آبی ایران در امتداد خلیج فارس، با احتساب جزایر در حدود ۱۸۰۰ کیلومتر و بدون احتساب جزایر در حدود ۱۴۰۰ کیلومتر است. طول خلیج فارس از تنگه هرمز تا آخرین نقطه پیشروی آن در جهت غرب در حدود ۸۰۵ کیلومتر است. عریض‌ترین بخش خلیج فارس ۱۸۰ مایل (۲۹۰ کیلومتر) است. عمیق‌ترین نقطه خلیج فارس با عمق ۹۳ متر در ۱۵ کیلومتری تنب بزرگ و کم‌عمق‌ترین نقطه آن با عمقی بین ۱۰ تا ۳۰ متر در سمت غرب قرار دارد. همچنین جزایر متعددی در خلیج فارس

در وضعیت هواشناسی این منطقه بادهای شدید موسمی، توفان‌شن، رگبارهای سیل‌آسا، رطوبت زیاد و مه صبحگاهی پدیده‌های شایان توجه است. این منطقه تابستان‌های گرم و طولانی و زمستان‌های کوتاه دارد. عمده بارندگی در زمستان صورت می‌گیرد. این ناحیه دو فصل متمایز زمستان با دمای معتدل و خنک در ماه‌های آذر، دی و بهمن و تابستان گرم در بقیه فصل‌های سال دارد. باد جهت شمال‌غرب (شمال) در خلیج فارس غالب است. جهت غالب باد در حوالی جزیره کیش به غرب-شمال‌غرب و در بندرلنگه در حوالی ورودی تنگه هرمز به غرب تغییر می‌یابد. میدان باد در حوالی عسلویه از توزیع گسترده‌تری در ربع شمال‌غرب برخوردار است که می‌تواند به دلیل قرار گرفتن در سایه دلتای رودخانه مُند باشد. تنگه هرمز می‌تواند در دو ناحیه مد نظر قرار گیرد؛ بخش غربی از بندر لنگه تا کوهستک و بخش شرقی از سیریک تا کوه مبارک و جاسک. باد در بخش غربی بیشتر از جهات غرب و غرب-شمال‌غرب است و در بخش شرقی از آنجایی که باد شمال را شبه‌جزیره عربستان سد می‌کند، باد غالب از جهات غرب و شمال‌غرب است. دریای عمان تحت تأثیر دو گونه باد است؛ یکی باد غربی یا شمال و دیگری بادهای موسمی (مونسون) از سمت جنوب-جنوب‌غرب. شبه‌جزیره عربستان (شامل عربستان، یمن، عمان و دبی و سایر کشورهای حاشیه جنوبی خلیج فارس) نیمه‌غربی دریای عمان را از بادهای موسمی مصون داشته است. بدین دلیل، میدان باد به تدریج از جهت غالب غرب-شمال‌غرب در جاسک به جهت غالب غرب در مرز استان‌های هرمزگان و سیستان-بلوچستان و آنگاه به جنوب غرب در خلیج گواتر در نزدیکی مرز پاکستان تغییر می‌یابد. با حرکت از سمت محفوظ دریای عمان به سمت بادسوی آن، از غلبه بادهای غربی کاسته می‌شود (پارساپور، ۲۰۱۳).

وجود دارند. اقلیم خلیج فارس خشک و نیمه‌استوایی است. در تابستان دما گاهی تا ۵۰ درجه سلسیوس می‌رسد و میزان تبخیر بیشتر از میزان آب‌های وارده می‌شود. در زمستان دما تا ۳ درجه سلسیوس هم گزارش شده است. به دلیل محصور بودن، اثر اقیانوس بر خلیج فارس بسیار ناچیز است و به همین علت سرعت جریان‌های زیرین و افقی آن بسیار کم و در حدود ۱۰ سانتی‌متر بر ثانیه است. شوری بیشتر خلیج فارس نسبت به اقیانوس موجب پیدایش جریان آبی از اقیانوس هند به خلیج فارس می‌شود که به موازات ساحل ایران و در جهت پادساعتگرد است. جریان ذکر شده با کاهش دما و شوری همراه است به طوری که در تنگه هرمز مقدار نمک ۳۶٫۶ گرم بر لیتر و در انتهای شمال غربی و در دهانه کارون در حدود ۴۰ گرم بر لیتر است. میزان بارندگی سالانه در سواحل جنوبی کمتر از ۵ سانتی‌متر و در سواحل شمالی بین ۲۰ تا ۵۰ سانتی‌متر است. دریای عمان دریای جنوب شرقی ایران است که در واقع ادامه اقیانوس هند به شمار می‌رود. از شمال به سواحل مکران ایران و از جنوب به دریای عربستان و کشور عمان محدود است و مدار راس السرطان از جنوب آن می‌گذرد. عرض آن از دماغه حد، در شمال شرقی کشور عمان، تا بندر گواتر، در منتهی‌الیه جنوب شرقی ایران (در مرز ایران و پاکستان)، حدود ۳۲۰ کیلومتر و طول آن حدود ۵۶۰ کیلومتر است. در شمال غربی از طریق تنگه استراتژیک هرمز، در شمال شبه‌جزیره مسندم (راس مسندم)، به خلیج فارس یکی از مهم‌ترین کانون‌های تامین انرژی جهان می‌پیوندد. اقلیم این منطقه با توجه به موقعیت جغرافیایی، از یک طرف تحت تأثیر جریان‌های جوئی متعدد مانند مونسون و به تبع آن باران‌های موسمی اقیانوس هند است و از طرف دیگر تحت تأثیر فشار زیاد عرض‌های متوسط قرار دارد که گرمای شدید مهم‌ترین پدیده مشهود اقلیمی آن است (پارساپور، ۲۰۱۳).

### ۳ روش تحقیق

در این تحقیق، شبیه‌سازی وضعیت جوئی در محدوده خلیج فارس و دریای عمان با استفاده از مدل WRF انجام می‌شود. مدل پیشرفته تحقیقاتی WRF (ARW) نسخه 3.5.1 برای این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت (اسکاماروک و همکاران، ۲۰۰۸؛ ونگ و همکاران، ۲۰۱۵). مدل WRF یک مدل کاملاً تراکم‌پذیر، اویلری و ناآب‌ایستایی است که از یک دستگاه مختصات قائم فشاری آب‌ایستایی تابع عوارض زمین به همراه شبکه قائم نایکنواخت است به طوری که سطوح قائم نزدیک سطح زمین به هم نزدیک می‌شوند و با دور شدن از سطح زمین، فاصله آنها افزایش می‌یابد. برای هسته دینامیکی ARW، نوع شبکه افقی آراکاوا-C است. برای انتگرال‌گیری زمانی معادلات، از یک طرحواره رونگ-کوتا و با گام زمانی کوچک‌تر برای امواج تند (مانند امواج صوتی) استفاده می‌شود.

شبیه‌سازی به حالت آشیانه‌ای (nested) و در دو حوزه انجام شد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و حوزه‌های مورد

استفاده را نشان می‌دهد.

مقدار تفکیک مکانی در حوزه اول ۲۷ کیلومتر و در حوزه دوم ۹ کیلومتر و گام زمانی ۱۸۰ ثانیه است. برای تامین شرایط اولیه و شرایط مرزی مورد نیاز از داده‌های FNL (Global FiNaL analysis) استفاده شده است. سال ۲۰۱۱ به‌عنوان سال هدف و سه دوره زمانی ابتدا، اوج و انتهای مونسون در این سال به مدت یک هفته برای انجام شبیه‌سازی انتخاب شد. سپس نُه پیکربندی مختلف بر اساس طرحواره‌های لایه مرزی سیاره‌ای، تابش موج کوتاه و موج بلند، همرفت، لایه سطحی، جنس سطح زمین و خردفیزیک انتخاب شد (رویز و همکاران، ۲۰۱۰؛ چین و همکاران، ۲۰۱۰؛ سانتوس و همکاران، ۲۰۱۳؛ قادر و همکاران، ۲۰۱۴). فهرست این پیکربندی‌ها در جدول ۱ آمده است. در جدول مذکور برای هر یک از این پیکربندی‌ها یک علامت اختصاری تعریف شده است تا به کمک آنها بتوان به نتایج حاصل از هر یک از آنها ارجاع داد.

جدول ۱. پیکربندی‌های متفاوت مورد آزمایش در مدل WRF.

شماره پیکربندی	علامت اختصاری	خردفیزیک	لایه مرزی سیاره‌ای	همرفت کومه‌ای	تابش موج بلند	تابش موج کوتاه	لایه سطحی	سطح زمین
۱	WRFP01	WRFSM3	YSU	کین فریج	RRTM	Dudhia	MM5	Noah
۲	WRFP02	لین	ACM2	کین فریج	RRTM	Goddard	Pleim-Xiu	Pleim-Xiu
۳	WRFP03	لین	MRF	کین فریج	RRTM	Goddard	Revised MM5	Noah
۴	WRFP04	لین	MYJ	کین فریج	RRTM	Goddard	Eta	Noah
۵	WRFP05	لین	MYNN 2.5	کین فریج	RRTM	Goddard	MYNN	Noah
۶	WRFP06	لین	YSU	کین فریج	RRTM	Goddard	Revised MM5	Noah
۷	WRFP07	WRFSM6	MYJ	کین فریج	RRTM	Dudhia	Eta	Noah
۸	WRFP08	WRFSM3	MRF	کین فریج	RRTM	Dudhia	MM5	5-layer thermal diffusion
۹	WRFP09	WRFSM6	YSU	کین فریج	RRTM	Dudhia	MM5	5-layer thermal diffusion

جدول ۳. نقاط منتخب داده‌های سنجنده ماهواره‌ای WINDSAT.

ردیف	نام نقطه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	A	50.25° E	28° N
۲	B	53° E	26° N
۳	C	57.5° E	25° N
۴	D	60.25° E	24° N
۵	E	51.5° E	27° N
۶	F	59° E	24.5° N



شکل ۱. حوزه‌های مورد استفاده در مدل WRF در کار حاضر (شکل به کمک Google Earth تولید شده است).

#### ۴ مقایسه داده‌های ایستگاه‌های هم‌دید با نتایج شبیه‌سازی

بعد از اجرای مدل در بازه‌های زمانی مربوط به مونسون ۲۰۱۱، مقادیر محاسبه شده در حوزه محاسباتی شماره ۲ با تفکیک ۹ کیلومتر مربوط به موقعیت ایستگاه‌های هم‌دید در نوار ساحلی خلیج فارس و دریای عمان و همچنین جزیره‌های خارک و ابوموسی تعیین و با مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده در هر ایستگاه مقایسه شد.

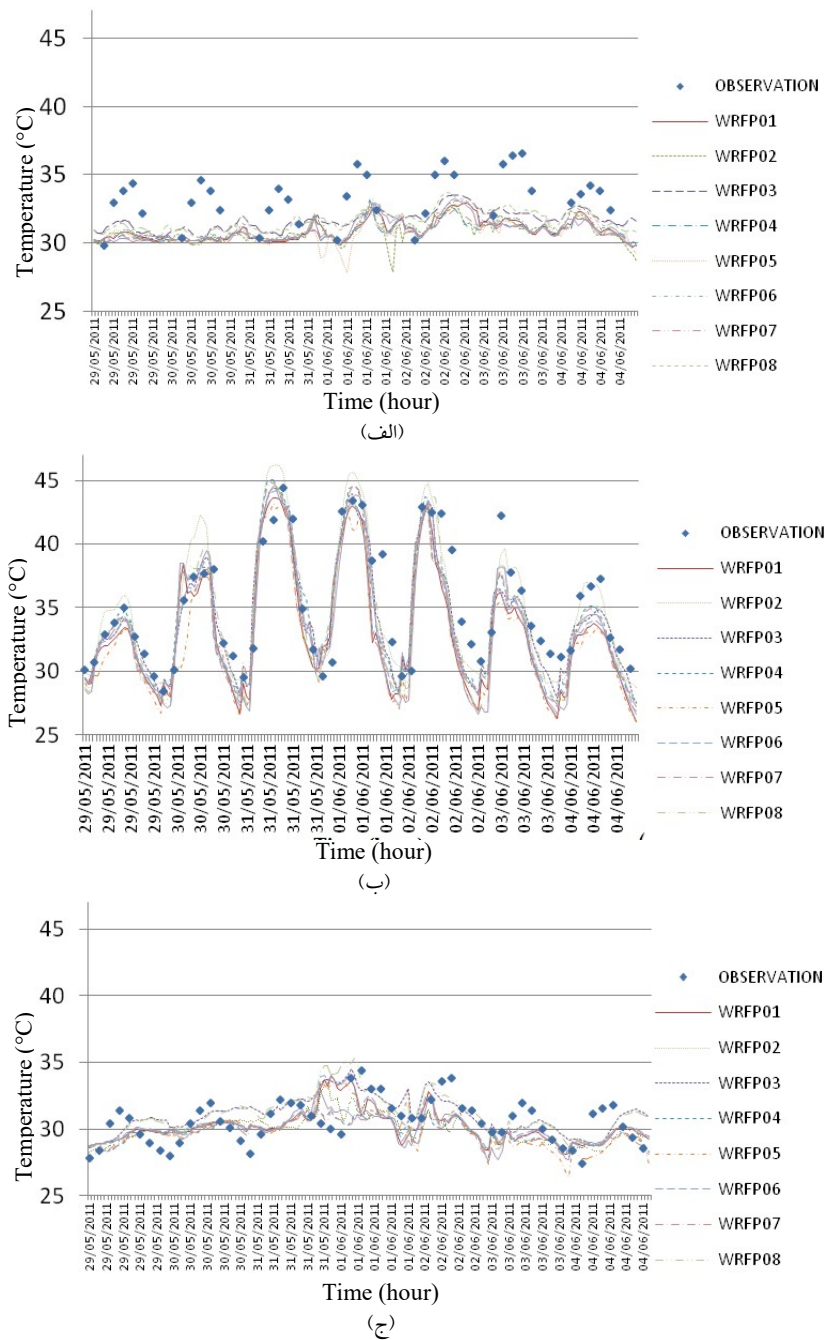
مقادیر دمای شبیه‌سازی شده مدل WRF با نُه پیکربندی مختلف در سه دوره شروع، اوج و انتهای مونسون ۲۰۱۱ اقیانوس هند با داده‌های ایستگاه‌های هم‌دید ساحلی و جزیره‌ای مقایسه شد. شکل‌های ۲ تا ۴ نمودار این مقایسه‌ها را در سه دوره مختلف مونسون ۲۰۱۱ نشان می‌دهد.

در شکل ۲ سری‌های زمانی دما در سه ایستگاه هم‌دید به همراه خروجی مدل با نُه پیکربندی مختلف در دوره ابتدای مونسون نمایش داده شده است. روند تغییرات در هر شش ایستگاه با نتایج مدل‌سازی تقریباً همسو است. بیشترین اختلاف در ایستگاه‌های واقع در خلیج فارس و کمترین اختلاف در ایستگاه‌های دریای عمان دیده می‌شود. کمترین مقدار خطا مربوط به پیکربندی ۳ (۱/۲۵) درجه سلسیوس) و بیشترین مقدار خطا مربوط به پیکربندی ۲ (۳/۷۵) درجه سلسیوس) است. همین‌طور به نظر می‌رسد که خطاها به سمت شمال و انتهای خلیج فارس بیشتر می‌شود.

زمان اجرای مدل در بازه‌های زمانی ۲۰۱۱/۰۵/۲۹ - ۲۰۱۱/۰۶/۰۴، ۲۰۱۱/۰۶/۱۷ - ۲۰۱۱/۰۶/۱۱، ۲۰۱۱/۰۹/۲۳ - ۲۰۱۱/۰۹/۳۰ انتخاب و برای انجام شبیه‌سازی‌ها هر یک از بازه‌های زمانی به بازه‌های زمانی کوچک‌تر ۲۴ ساعته همراه با یک زمان ۶ ساعته برای spin up (لو و همکاران، ۲۰۰۸) تقسیم شده و اجراها انجام شده‌اند. برای مقایسه نتایج با داده‌های واقعی، ایستگاه‌های هم‌دید بوشهر، خارک، ابوموسی، بندرعباس، چابهار و جاسک انتخاب شدند (جدول ۲). متغیرهایی که برای این کار استفاده شدند شامل دمای خشک و نقطه شبنم در تراز دو متر، و سرعت باد در تراز ۱۰ متر بود. علاوه بر این از داده‌های سمت و سرعت باد بویه چابهار و همچنین داده‌های سنجنده ماهواره‌ای WINDSAT (گایسر، ۲۰۰۶) در شش نقطه منتخب در خلیج فارس و دریای عمان (جدول ۳) برای مقایسه با داده‌های مدل استفاده شد.

جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌های هم‌دید هواشناسی مورد استفاده در کار حاضر.

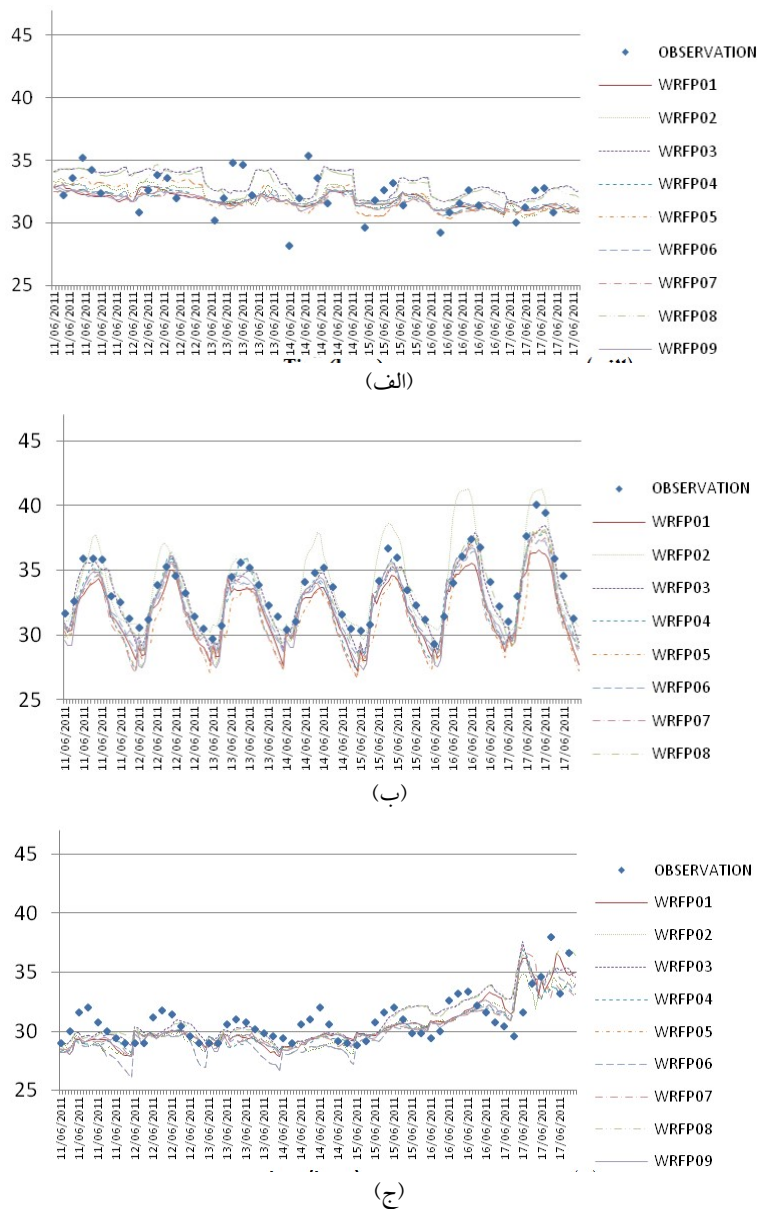
ردیف	نام ایستگاه	علامت اختصاری	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	بوشهر	40858	50.81° E	28.9° N
۲	خارک	40845	50.30° E	29.25° N
۳	ابوموسی	40890	54.83° E	25.83° N
۴	بندرعباس	40875	56.73° E	27.21° N
۵	جاسک	40893	57.76° E	25.63° N
۶	چابهار	40898	60.61° E	25.28° N



شکل ۲. مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده دما برای ایستگاه‌های همدیدی (الف) ابوموسی، (ب) بندرعباس و (ج) چابهار در شروع دوره مونسون ۲۰۱۱ (2011/05/29-2011/06/04).

و ایستگاه بندرعباس (۰/۶۲ درجه سلسیوس) و بیشترین مقدار خطا مربوط به پیکربندی ۹ و ایستگاه جاسک (۶/۱۵) درجه سلسیوس) است.

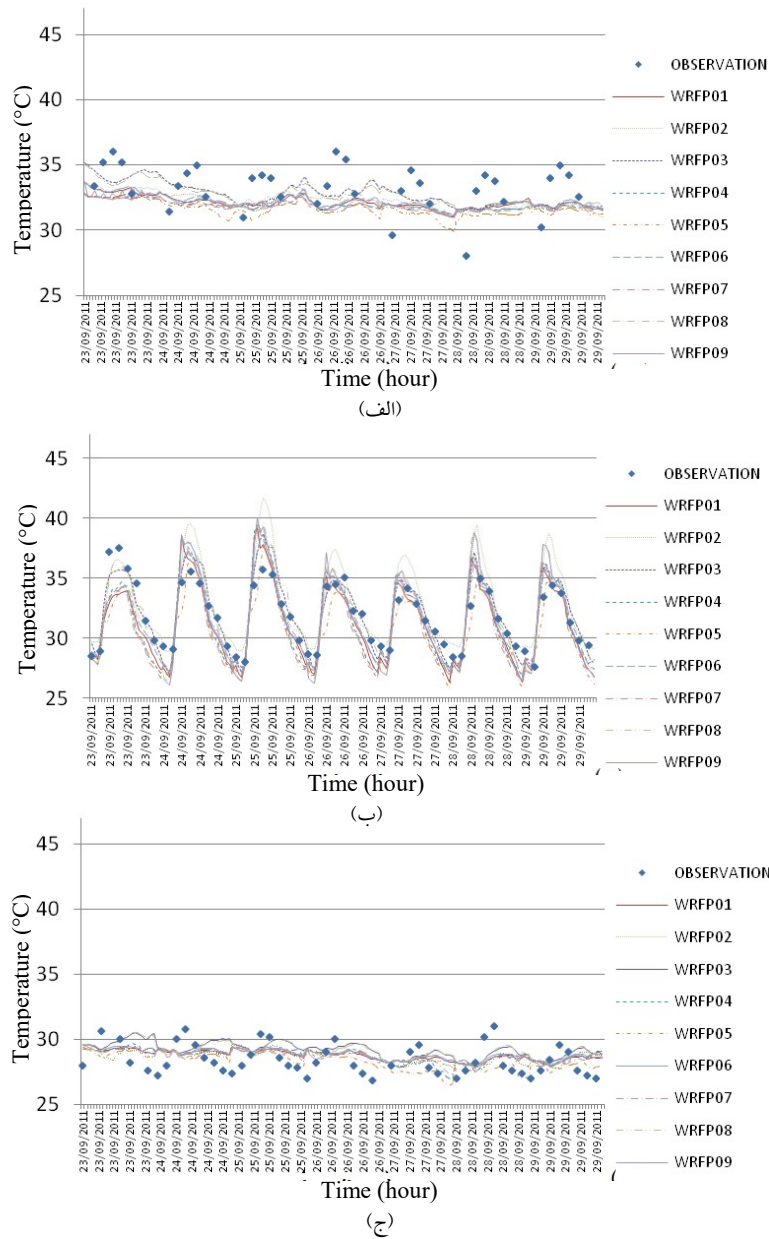
شکل ۳ مقایسه نتایج شبیه‌سازی دما در شش ایستگاه همدیدی را با ۹ پیکربندی مختلف در دوره اوج مونسون نمایش می‌دهد. کمترین مقدار خطا مربوط به پیکربندی ۳



شکل ۳. مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده دما برای ایستگاه‌های همدیدی (الف) ابوموسی، (ب) بندرعباس و (ج) چابهار در اوج دوره مونسون ۲۰۱۱ (2011/06/11-2011/06/17).

چابهار بود. همچنین در پیکربندی‌های نه‌گانه، کمترین مقدار خطا از آن پیکربندی ۹ (درجه سلسیوس) و بیشترین مقدار خطا از آن پیکربندی ۳ (درجه سلسیوس) بود.

در شکل ۴ مقادیر شبیه‌سازی شده دما با نه پیکربندی مختلف مدل WRF با مقادیر اندازه‌گیری شده در سه ایستگاه همدیدی در انتهای دوره مونسون ۲۰۱۱ مقایسه شده است. در این مقایسه بیشترین مقدار خطا مربوط به ایستگاه بوشهر و کمترین مقدار خطا مربوط به ایستگاه

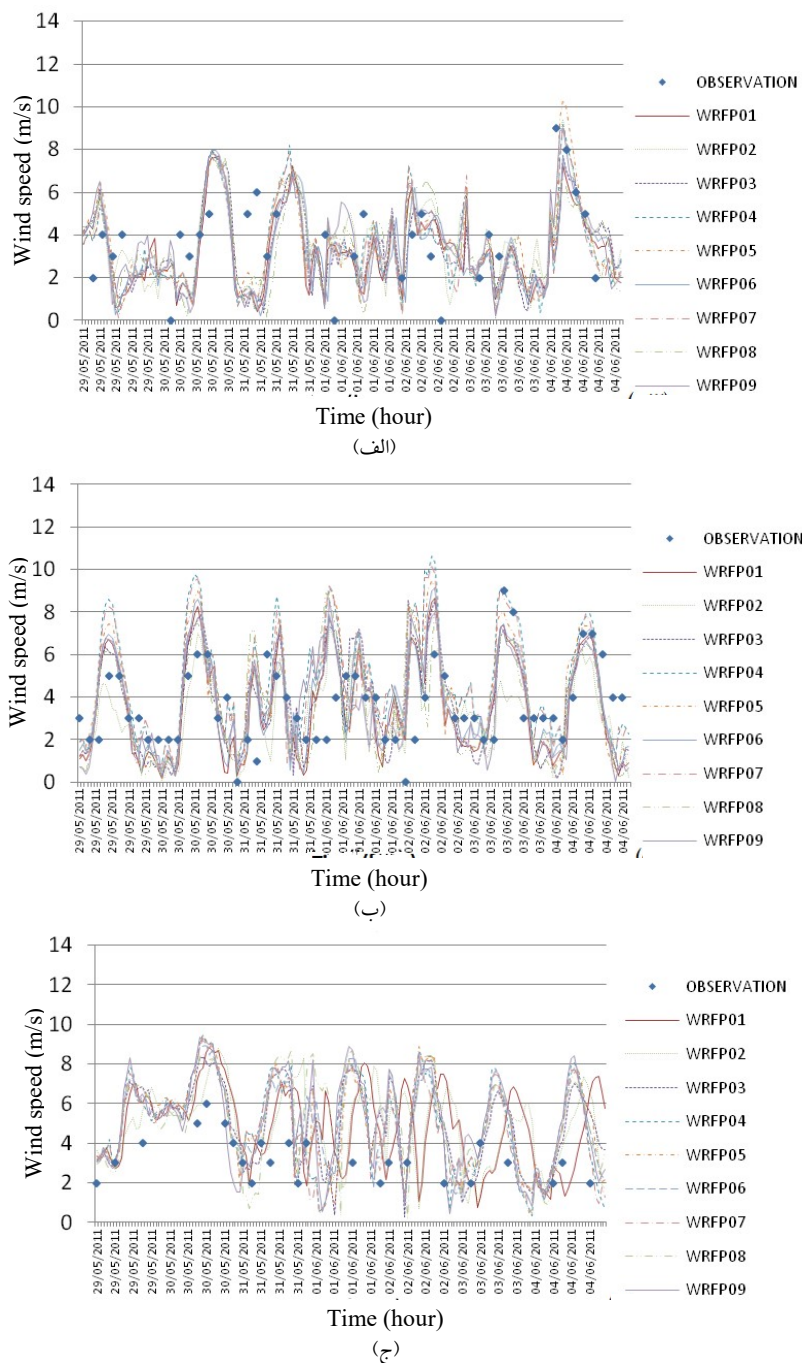


شکل ۴. مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده دما برای ایستگاه‌های همدیدی (الف) ابوموسی، (ب) بندرعباس و (ج) چابهار در انتهای دوره مونسون ۲۰۱۱ (2011/09/23-2011/09/30).

شده در سه ایستگاه همدیدی مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار خطا مربوط به ایستگاه چابهار و کمترین مقدار خطا مربوط به ایستگاه خارک است. همچنین کمترین مقدار خطا مربوط به پیکربندی ۹ (۱/۱۷ متر بر ثانیه) و بیشترین مقدار خطا مربوط به پیکربندی ۸ (۲/۴۹ متر بر ثانیه) است.

در ادامه مقادیر اندازه سرعت باد شبیه‌سازی شده مدل WRF با نه پیکربندی مختلف در سه دوره شروع، اوج و انتهای مونسون ۲۰۱۱ اقیانوس هند با داده‌های ایستگاه‌های همدیدی ساحلی و جزیره‌ای مقایسه شد. در شکل ۵ نمودار مقادیر شبیه‌سازی شده سرعت باد با نه پیکربندی مختلف مدل WRF و مقادیر اندازه‌گیری

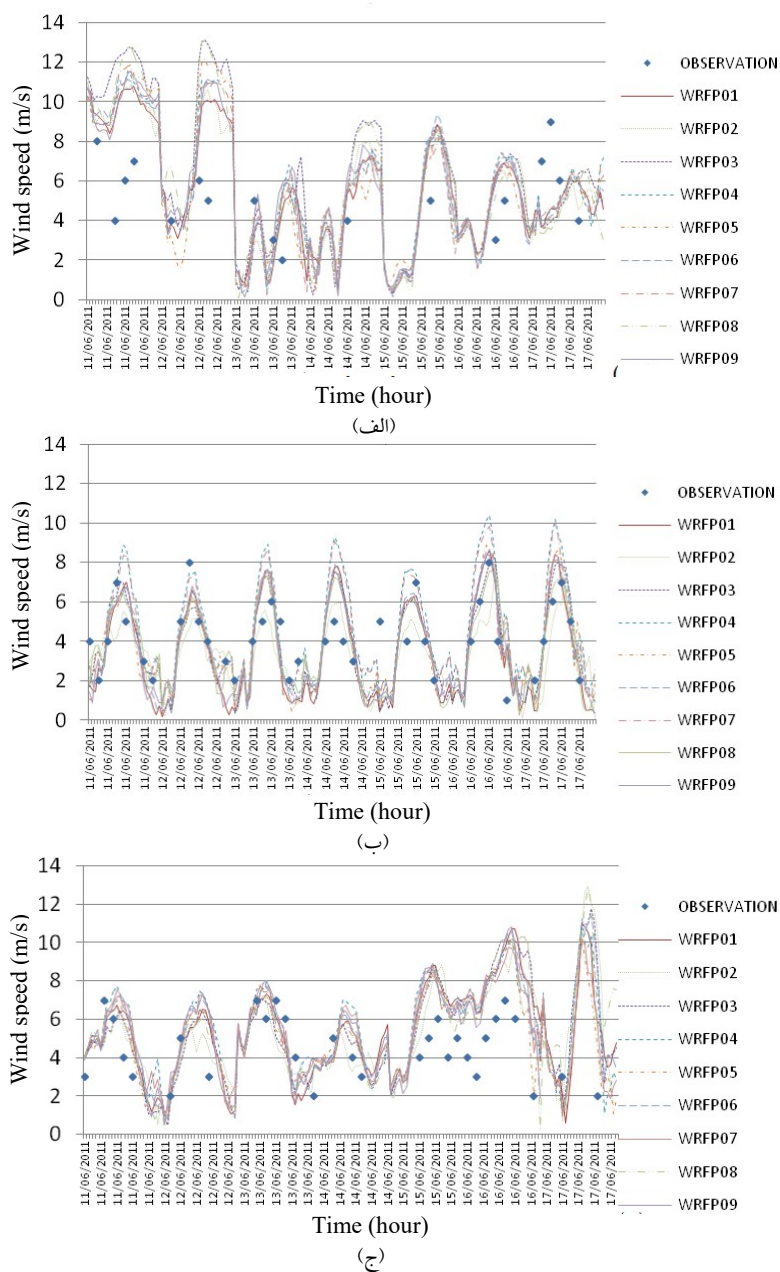




شکل ۵. مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده سرعت باد برای ایستگاه‌های همدیدی (الف) ابوموسی، (ب) بندرعباس، (ج) چابهار در ابتدای دوره مونسون ۲۰۱۱ (2011/05/29-2011/06/04).

مربوط به ایستگاه بندرعباس است. همچنین کمترین خطا مربوط به پیکربندی ۸ (۱/۱۰ متر بر ثانیه) و بیشترین خطا مربوط به پیکربندی ۳ (۳/۵۹ متر بر ثانیه) است.

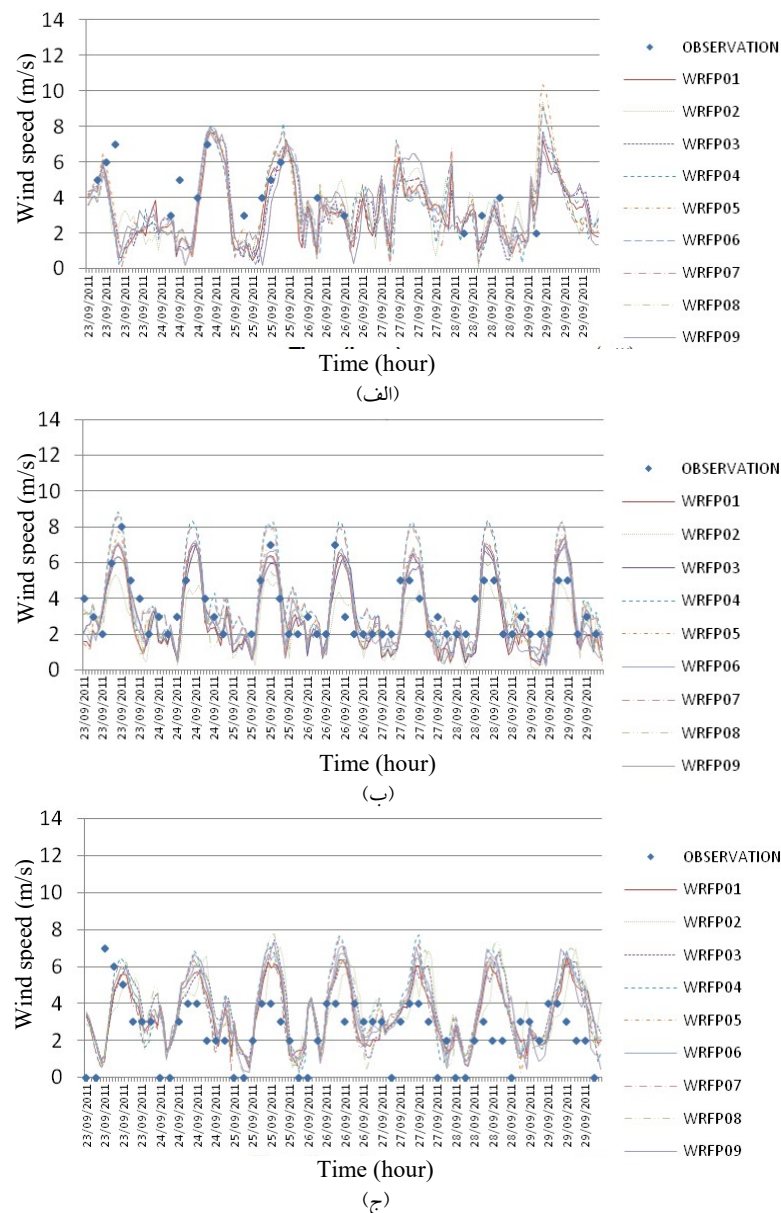
در شکل ۶ مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده  $\theta_e$  پیکربندی مدل WRF با مقادیر اندازه‌گیری شده در سه ایستگاه همدیدی در دوره اوج مونسون نشان داده شده است. بیشترین خطا مربوط به ایستگاه بوشهر و کمترین خطا



شکل ۶. مقایسه مقادیر شبیه‌سازی‌شده بزرگی سرعت باد برای ایستگاه‌های همدیدی (الف) ابوموسی، (ب) بندرعباس و (ج) چابهار در اوج دوره مونسون ۲۰۱۱ (2011/06/11-2011/06/17).

کمترین خطا مربوط به ایستگاه بندرعباس است. همچنین کمترین خطا مربوط به پیکربندی ۶ (۱/۰۴ متر بر ثانیه) و بیشترین خطا مربوط به پیکربندی ۳ (۳/۴۷ متر بر ثانیه) است.

در شکل ۷ مقادیر شبیه‌سازی‌شده سرعت باد با نُه پیکربندی مختلف مدل WRF با مقادیر اندازه‌گیری شده در سه ایستگاه همدیدی در دوره انتهای مونسون مقایسه شده است. بیشترین مقدار خطا مربوط به ایستگاه خارک و

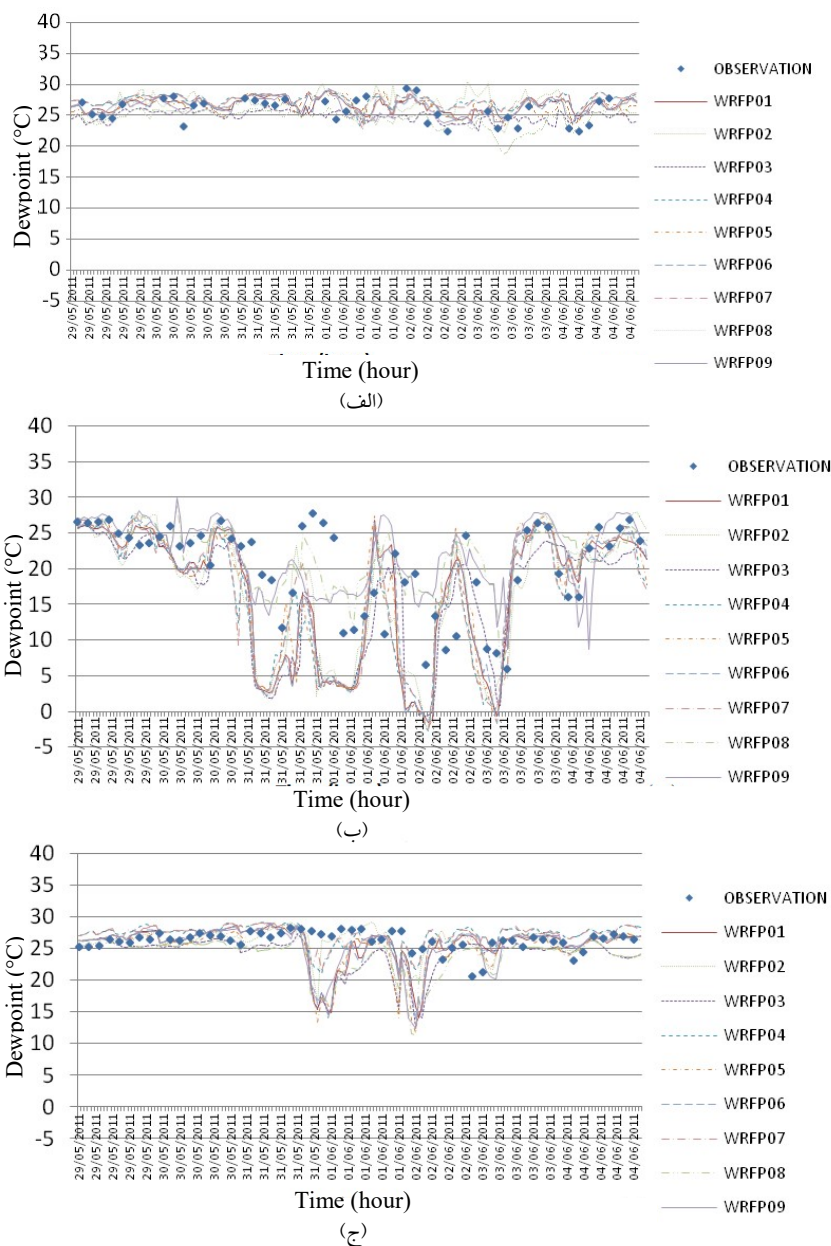


شکل ۷. مقایسه مقادیر شبیه‌سازی‌شده بزرگی سرعت باد در ایستگاه‌های همدیدی (الف) ابوموسی، (ب) بندرعباس و (ج) چابهار در انتهای دوره مونسون ۲۰۱۱ (2011/09/23-2011/09/30).

شده در سه ایستگاه همدیدی در دوره ابتدای مونسون با یکدیگر مقایسه شده است. بیشترین مقدار خطا مربوط به ایستگاه بندرعباس و کمترین مقدار خطا مربوط به ایستگاه ابوموسی بوده است. کمترین مقدار خطا را پیکربندی ۲ (۳۰/۱ درجه سلسیوس) و بیشترین مقدار خطا را پیکربندی ۴ (۳۰/۶ درجه سلسیوس) داشته است.

پارامتر دیگری که مورد مقایسه قرار گرفته دمای نقطه شبنم می‌باشد. مقادیر دمای نقطه شبنم شبیه‌سازی‌شده مدل WRF با نُه پیکربندی مختلف در سه دوره شروع، اوج و انتهای مونسون ۲۰۱۱ اقیانوس هند با داده‌های ایستگاه‌های همدیدی ساحلی و جزیره‌ای مقایسه شده است.

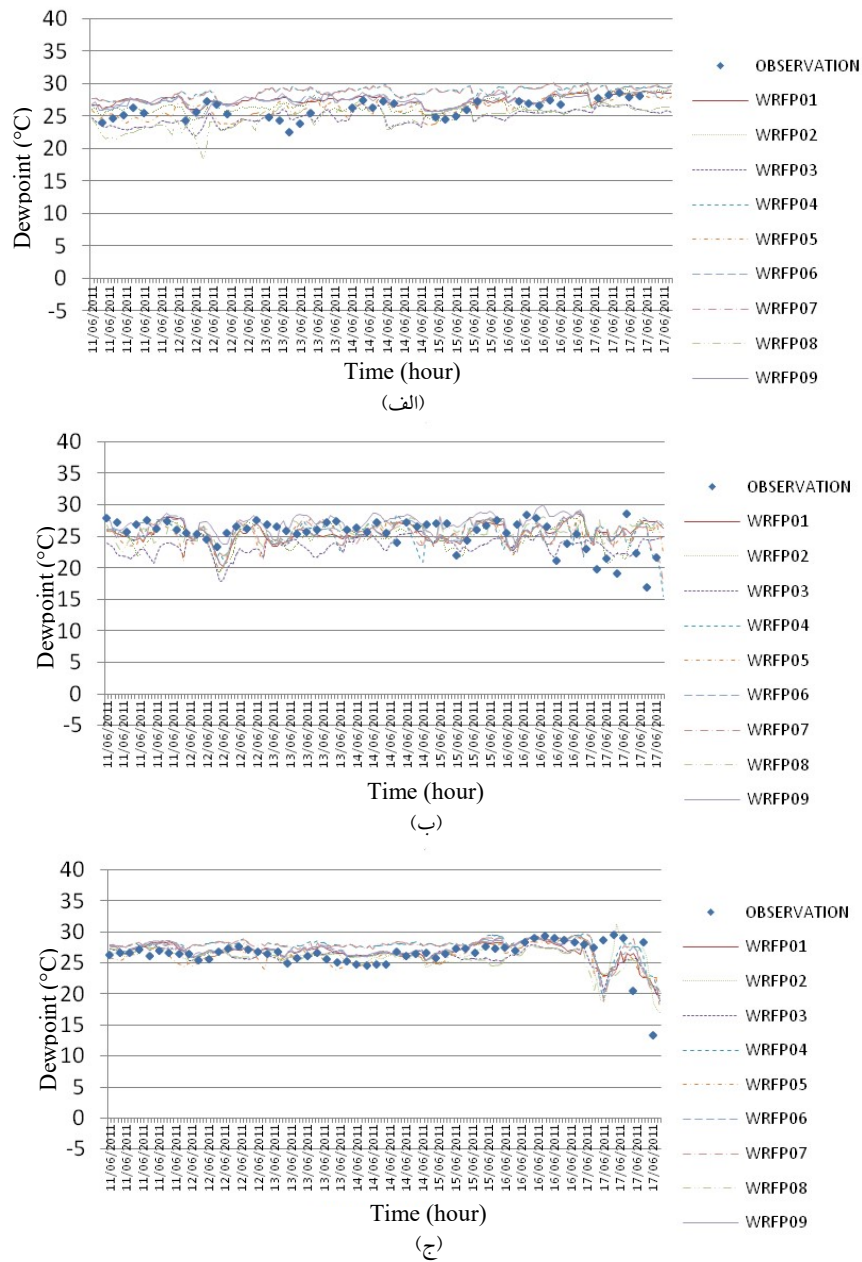
در شکل ۸ مقادیر شبیه‌سازی شده دمای نقطه شبنم با نُه پیکربندی مختلف مدل WRF و داده‌های اندازه‌گیری



شکل ۸. مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده دمای نقطه شبنم برای ایستگاه‌های همدیدی (الف) ابوموسی، (ب) بندرعباس و (ج) چابهار در ابتدای دوره مونسون ۲۰۱۱ (2011/05/29-2011/06/04).

(ابوموسی) داشته است. همچنین کمترین و بیشترین خطا به ترتیب مربوط به پیکربندی ۲ (۰/۹۵ درجه سلسیوس) و پیکربندی ۹ (۵/۲۸ درجه سلسیوس) بوده است (جدول ۸).

شکل ۹ مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده دمای نقطه شبنم با نُه پیکربندی مختلف مدل WRF و مقادیر اندازه‌گیری شده در سه ایستگاه همدیدی را در دوره اوج مونسون نشان می‌دهد. بیشترین (کمترین) خطا را ایستگاه خارک

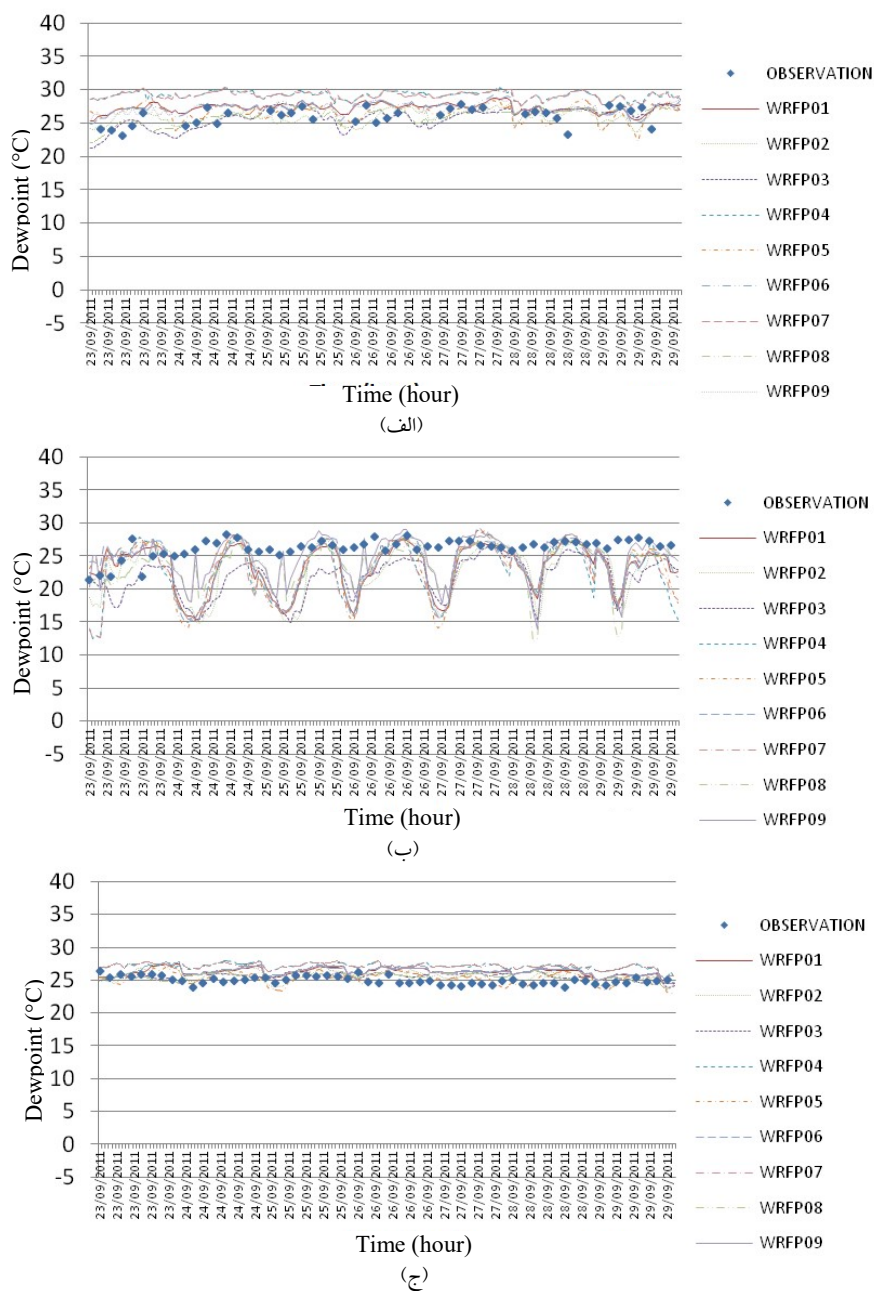


شکل ۹. مقایسه مقادیر شبیه‌سازی‌شده دمای نقطه شبنم برای ایستگاه‌های همدیدی (الف) ابوموسی، (ب) بندرعباس و (ج) چابهار در اوج دوره مونسون ۲۰۱۱ (2011/06/11-2011/06/17).

(چابهار) بوده است. از طرف دیگر، کمترین و بیشترین خطا را به ترتیب پیکربندی ۸ (۰/۸۳) درجه سلسیوس و پیکربندی ۳ (۴/۴۳) درجه سلسیوس داشته‌اند.

شکل ۱۰ مقایسه مقادیر شبیه‌سازی‌شده دمای نقطه شبنم با نه پیکربندی مختلف و مقادیر اندازه‌گیری شده سه ایستگاه همدیدی را در دوره انتهای مونسون نشان می‌دهد. بیشترین (کمترین) خطا مربوط به ایستگاه بندرعباس





شکل ۱۰. مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده دمای نقطه شبنم برای ایستگاه‌های همدیدی (الف) ابوموسی، (ب) بندرعباس و (ج) چابهار در انتهای دوره مونسون ۲۰۱۱ (2011/09/23-2011/09/30).

مقایسه به صورت کمی، مقادیر عددی ریشه میانگین مربعات خطا موسوم به RMSE برای این سه کمیت برای ایستگاه‌های همدیدی مربوطه در جدول ۴ ارائه می‌شود.

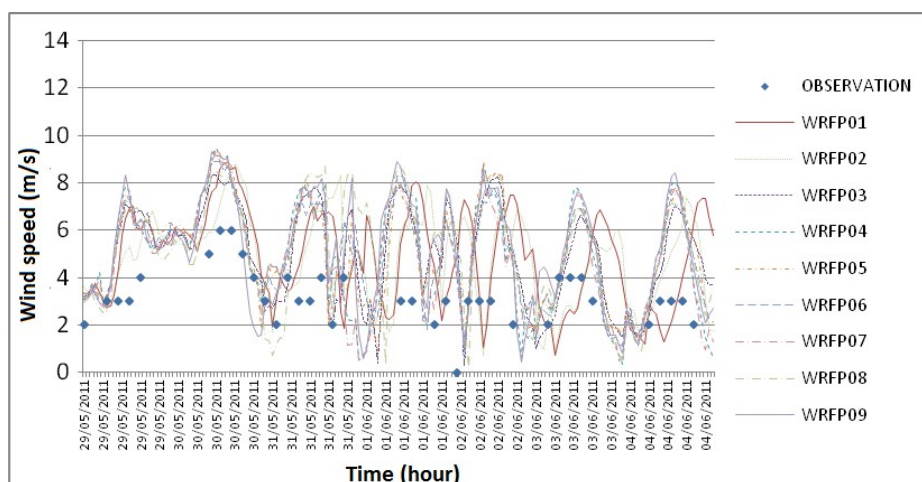
تا اینجا با ارائه سری زمانی کمیت‌های دما، تندی باد و دمای نقطه شبنم مقایسه کیفی میان خروجی مدل و داده‌های دیدبانی انجام گرفت. حال در ادامه برای امکان



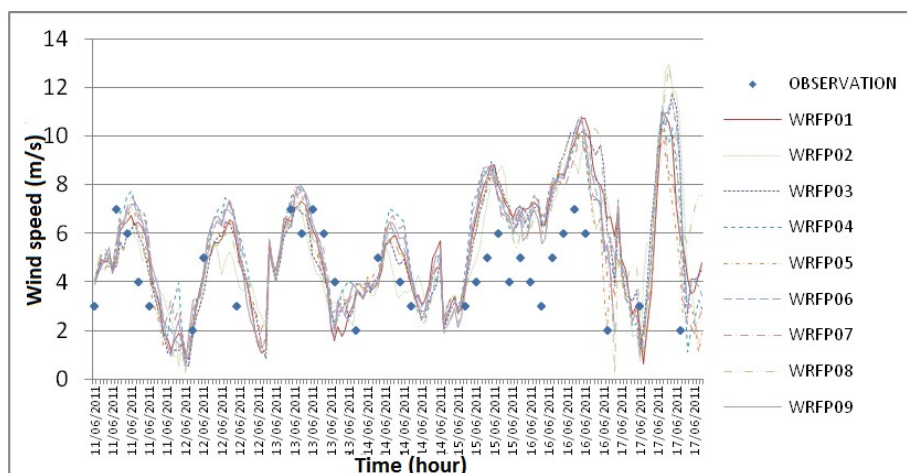
### ۵ مقایسه با داده های بویه چابهار

به منظور مقایسه مقادیر به دست آمده از مدل با داده های اندازه گیری شده بر روی دریا، نتایج شبیه سازی با مقادیر اندازه گیری شده در مکان استقرار بویه هواشناسی دریایی چابهار مقایسه شد. در شکل ۱۱ مقایسه مقادیر شبیه سازی سرعت باد با نه پیکربندی مختلف مدل WRF با مقادیر اندازه گیری شده در دوره ابتدای مونسون ۲۰۱۱ ارائه شده است. کمترین (بیشترین) مقدار خطا مربوط به پیکربندی ۵ (۶) به (۳) به میزان ۱/۹۶ (۲/۵۷) متر بر ثانیه بوده است. شکل ۱۲

همان مقایسه را برای دوره اوج مونسون نشان می دهد. کمترین (بیشترین) مقدار خطا مربوط به پیکربندی ۵ (۶) به میزان ۱/۸۲ (۲/۲۵) متر بر ثانیه بوده است. سرانجام، شکل ۱۳ مقایسه اندازه گیری و شبیه سازی سرعت باد را در مکان بویه چابهار با نه پیکربندی مختلف مدل WRF در دوره انتهای مونسون نشان می دهد. کمترین (بیشترین) مقدار خطا را پیکربندی ۱ (۸) به میزان ۱/۴۲ (۱/۸۴) متر بر ثانیه تولید کرده است.

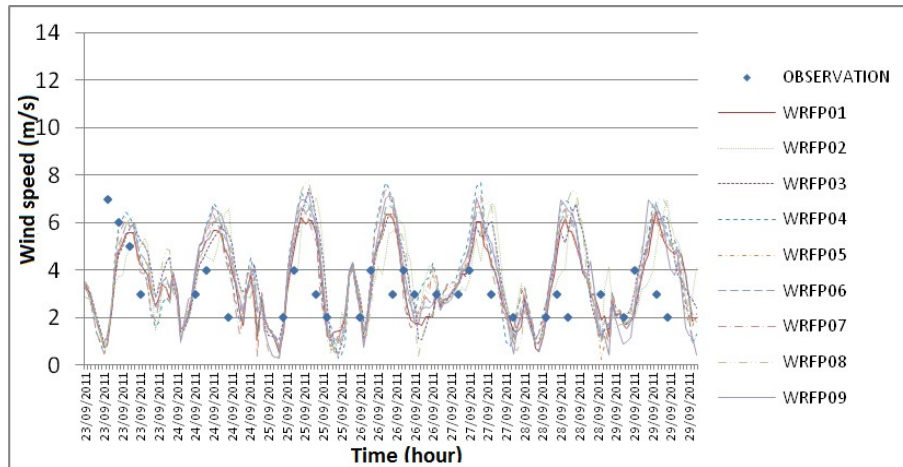


شکل ۱۱. مقایسه مقادیر شبیه سازی شده سرعت باد با مقادیر اندازه گیری شده بویه چابهار در ابتدای دوره مونسون ۲۰۱۱ (2011/05/29-2011/06/04).



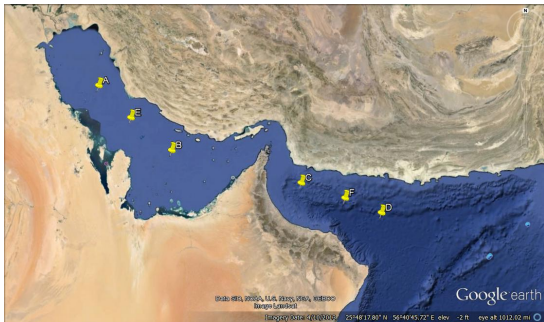
شکل ۱۲. مقایسه مقادیر شبیه سازی شده سرعت باد با مقادیر اندازه گیری شده بویه چابهار در اوج دوره مونسون ۲۰۱۱ (2011/06/11-2011/06/17).





شکل ۱۳. مقایسه مقادیر شبیه‌سازی‌شده سرعت باد با مقادیر اندازه‌گیری شده بویه چابهار در انتهای دوره مونسون ۲۰۱۱ (2011/09/23-2011/09/30).

کمترین (بیشترین) خطا را داشته است (جدول ۶). نتایج مربوط به بزرگی سرعت باد در جدول ۷ ارائه شده است.



شکل ۱۴. ایستگاه‌های A, B, C, D, E, F بر روی خلیج فارس و دریای عمان (شکل به کمک Google Earth تولید شده).

## ۶ مقایسه با داده‌های سنجنده ماهواره‌ای

### WINDSAT

علاوه بر داده‌های ایستگاه بویه، از داده‌های ماهواره WINDSAT برای مقایسه نتایج مدل بر روی دریای عمان و خلیج فارس استفاده شد. شش نقطه A, B, C, D, E, F برای این مقایسه طبق شکل ۱۴ انتخاب شد. برای مولفه مداری سرعت باد، کمترین (بیشترین) مقدار RMSE مربوط به نقطه D (E) و در بین پیکربندی‌ها، کمترین (بیشترین) خطا مربوط به پیکربندی ۴ (۶) بود (جدول ۵). برای مولفه نصف‌النهاری، کمترین (بیشترین) مقدار خطا در نقطه C (B) دیده شده و در بین پیکربندی‌ها، پیکربندی ۵ (۷)

جدول ۵. مقادیر RMSE برای مولفه مداری سرعت باد برحسب متر بر ثانیه با نُه پیکربندی مختلف در شش نقطه A تا F

WRFP09	WRFP08	WRFP07	WRFP06	WRFP05	WRFP04	WRFP03	WRFP02	WRFP01	
۲/۰۵	۲/۱۵	۱/۸۰	۲/۰۸	۱/۸۱	۱/۸۳	۲/۱۶	۱/۹۶	۲/۰۳	ایستگاه A
۳/۹۱	۳/۸۲	۳/۹۶	۴/۰۶	۳/۸۴	۳/۹۹	۳/۹۸	۳/۹۱	۳/۸۳	ایستگاه B
۴/۰۲	۳/۷۷	۴/۱۶	۳/۹۹	۳/۶۴	۴/۱۱	۴/۵۲	۳/۲۴	۳/۲۸	ایستگاه C
۲/۴۵	۲/۲۸	۲/۵۳	۲/۴۱	۲/۵۲	۲/۵۵	۲/۳۰	۲/۲۶	۲/۳۱	ایستگاه D
۴/۹۲	۴/۹۲	۵/۲۳	۵/۳۱	۵/۱۱	۵/۲۲	۵/۰۶	۲/۵۲	۲/۶۷	ایستگاه E
۳/۰۷	۲/۸۶	۳/۱۹	۳/۱۰	۳/۱۵	۳/۰۳	۲/۸۲	۲/۵۸	۲/۶۵	ایستگاه F

جدول ۶. مقادیر RMSE برای مولفه نصف‌النهاری سرعت باد برحسب متر بر ثانیه با نه پیکربندی مختلف در شش نقطه A تا F.

WRFP09	WRFP08	WRFP07	WRFP06	WRFP05	WRFP04	WRFP03	WRFP02	WRFP01	
۵/۱۳	۵/۵۴	۴/۹۵	۵/۰۰	۴/۸۵	۴/۹۲	۵/۵۱	۵/۱۲	۴/۹۲	ایستگاه A
۵/۱۶	۵/۵۵	۵/۱۲	۵/۲۷	۵/۲۷	۵/۱۱	۵/۵۵	۵/۱۵	۵/۰۳	ایستگاه B
۰/۹۹	۱/۱۳	۱/۶۷	۰/۹۸	۰/۹۴	۱/۰۳	۱/۰۳	۰/۴۴	۰/۳۶	ایستگاه C
۴/۰۴	۳/۸۴	۳/۹۸	۴/۰۲	۴/۱۰	۴/۱۵	۳/۷۶	۳/۸۳	۳/۸۲	ایستگاه D
۶/۳۱	۶/۷۸	۶/۰۷	۶/۲۵	۶/۲۵	۶/۰۷	۶/۷۲	۱/۴۳	۱/۵۶	ایستگاه E
۲/۸۶	۲/۷۲	۲/۹۲	۲/۸۱	۲/۷۴	۲/۸۶	۲/۷۳	۲/۵۳	۲/۴۸	ایستگاه F

جدول ۷. مقادیر RMSE برای بزرگی سرعت باد برحسب متر بر ثانیه با نه پیکربندی مختلف در شش نقطه A تا F.

WRFP09	WRFP08	WRFP07	WRFP06	WRFP05	WRFP04	WRFP03	WRFP02	WRFP01	
۲/۷۶	۳/۰۳	۲/۳۱	۳/۱۱	۲/۲۰	۲/۳۸	۳/۲۱	۳/۳۴	۲/۷۳	ایستگاه A
۴/۵۷	۵/۱۳	۴/۶۴	۵/۱۳	۴/۵۸	۴/۶۶	۵/۵۷	۴/۶۴	۵/۵۳	ایستگاه B
۱/۲۶	۱/۳۲	۲/۴۸	۱/۲۵	۱/۶۱	۱/۳۶	۱/۲۹	۱/۰۸	۰/۷۲	ایستگاه C
۱/۷۸	۱/۴۵	۱/۶۷	۱/۶۳	۱/۷۷	۱/۸۳	۱/۲۷	۱/۷۳	۱/۴۹	ایستگاه D
۲/۴۸	۳/۰۳	۲/۵۲	۲/۵۵	۲/۴۷	۲/۳۸	۳/۱۳	۳/۴۸	۱/۷۳	ایستگاه E
۱/۷۴	۱/۷۸	۲/۲۰	۱/۶۶	۱/۷۶	۱/۸۳	۱/۷۴	۱/۱۸	۱/۱۹	ایستگاه F

اندازه‌گیری شده ماهواره WINDSAT در شش ایستگاه در خلیج فارس و دریای عمان، پیکربندی ۵ کمترین و پیکربندی ۷ بیشترین خطا را داشت.

#### ۷ نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، اثر پارامترسازی فیزیکی فرایندهای هواشناختی بر روی نتایج مدل پیش‌بینی عددی WRF بر روی خلیج فارس و دریای عمان مورد بررسی قرار گرفت و سناریوهای در نظر گرفته شده به گونه‌ای انتخاب شد که بیشترین تغییرات در روش پارامترسازی لایه مرزی و سطح زمین متمرکز باشد. همچنین مشخصه‌های انتخاب شده (دما، سمت و سرعت باد، و دمای نقطه شبنم) به منزله شاخصی برای کیفیت شار تکانه، گرما و رطوبت بین محیط جوئی و اقیانوسی در خلیج فارس و دریای عمان در نظر گرفته شدند. بنابراین نتایج به دست آمده بیانگر روش مناسب پارامترسازی لایه مرزی برای شبیه‌سازی عددی مشخصه‌های هواشناختی است.

با توجه به نتایج به دست آمده، در شبیه‌سازی دما با مدل WRF بر روی خلیج فارس و دریای عمان، پیکربندی ۳ کمترین خطا را داشت. همچنین مقدار خطا در دوره اوج مونسون بیشتر از دوره ابتدا و انتهای آن بود. در شبیه‌سازی سرعت باد، پیکربندی‌های ۹، ۸ و ۶ به ترتیب در دوره‌های ابتدا، اوج و انتهای مونسون کمترین مقدار خطا را داشتند. در شبیه‌سازی دما، پیکربندی ۲ در دوره ابتدا و اوج مونسون و پیکربندی ۸ در دوره انتهای مونسون کمترین مقدار خطا را داشت.

در مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده سرعت باد با مدل WRF و مقادیر اندازه‌گیری شده بویه چابهار، پیکربندی ۱ کمترین خطا و پیکربندی ۸ بیشترین خطا را داشت. در مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده مولفه مداری سرعت باد با مدل WRF و مقادیر اندازه‌گیری شده ماهواره WINDSAT در شش ایستگاه در خلیج فارس و دریای عمان، پیکربندی ۴ کمترین خطا و پیکربندی ۶ بیشترین خطا را داشت. در مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده مولفه نصف‌النهاری سرعت باد با مدل WRF و مقادیر

- field over the Caspian Sea using WRF model: ICOPMAS 2014.
- Lo, J., Yang, Z., and Pielke, A., 2008, Assessment of three dynamical climate downscaling methods using the Weather Research and Forecasting (WRF) model: *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **113**, (D9), DOI: 10.1029/2007JD009216.
- Nielson-Gamon, J. W., Hu, X. M., Zhang, F. and Pleim, J. E., 2010, Evaluation of planetary boundary layer scheme sensitivities for the purpose of parameter estimation: *Monthly Weather Review*, **138**, 3400–3417.
- ParsaPoor, R., 2013, Persian Gulf Science and Technology Park [http://www.pgstp.ir/uploads/PGSTP\\_English\\_trans-1.png](http://www.pgstp.ir/uploads/PGSTP_English_trans-1.png)
- Ruiz, J., Saulo, C., and Paegle, J. N., 2010, WRF model sensitivity to choice of parameterization over South America: Validation against surface variables: *Monthly Weacather Review.*, **138**, 3342–3355.
- Santos, F. J., Vazquez, D. P., and Ruiz, J. A., 2013, Analysis of WRF model wind estimate sensitivity to physics parameterization choice and terrain representation in Andalusia (Southern Spain): *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **52**, 1592–1609.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X., Wang, W., and Powers, J., 2008, A description of the advanced research WRF version 3, NCAR/TN-475+STR.
- Skok, G., Tribbia, J., and Pakovec, J., 2010, Object-based analysis and verification of WRF model precipitation in the low- and mid-latitude Pacific Ocean: *Monthly Weather Review*, **138**, 4561–4575.
- Wang, W., Bruyere, C., Duda, M., Dudhia, J., Gill, D., Lin, H., Michalakes, J., Rizvi, S., Zhang, X., Beezley, J. D., Coen, J. L., and Mandel, J., 2015, User's guide for the advanced research WRF (ARW) Version 3.6, NCAR.
- Zhang, C. H., Wang, Y., Lauer, A., and Hamilton, K., 2012, Configuration and evaluation of the WRF Model for the study of Hawaiian regional climate: *Monthly Weather. Review*, **140**, 3259–3277.
- از نتایج به‌دست آمده در این تحقیق می‌توان برای شبیه‌سازی عددی با استفاده از مدل WRF در نقاط مورد آزمایش بهره برد. البته این نتایج قابلیت تعمیم به کل منطقه خلیج فارس و دریای عمان نداشته و این کار نیازمند تحقیق و بررسی بیشتری است.
- ### تشکر و قدردانی
- بدین وسیله از مسئولین سازمان هواشناسی کشور که شرایط لازم را برای تهیه داده‌های مورد نیاز و اجرای این تحقیق فراهم نمودند، خصوصاً معاونت پژوهشی و دفتر خدمات فناوری اطلاعات تشکر و قدردانی به عمل می‌آید. از مسئولین سازمان بنادر و دریانوردی به‌خصوص اداره کل حفاظت سواحل و بنادر که در تهیه داده‌های مورد نیاز تحقیق همکاری نمودند، تشکر و قدردانی می‌شود.
- ### منابع
- Chala, V. S., Indrcanti, J., and Baham, J. M., 2008, Sensitivity of atmospheric dispersion simulations by HYSPLIT to the meteorological predictions from a meso-scale model: *Environmental Fluid Mechanics*, **8**, 367–387.
- Chin, H. S., Glascoe, L., Lundquist, J. and Wharton, S., 2010, Impact of WRF physics and grid resolution on low-level wind prediction: Towards the assessment of climate change impact on future wind power: Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering, Chapel Hill, NC, United States.
- Gaiser, P., 2006, WindSat space borne polarimetric microwave radiometer: Mission overview and sensor performance: Second Symposium: Toward a Global Earth Observation System of Systems — Future National Operational Environmental Satellite Systems, Atlanta, GA, January 31.
- Ghader, S., Montazeri, M., Chegini, F., and Bohlouli, A., 2014, Hindcast of surface wind

## Sensitivity of WRF model simulations to physical parameterization over the Persian Gulf and Oman Sea during summer monsoon

Behzad Layeghi<sup>1</sup> Sarmad Ghader<sup>\*2</sup>, Abbas-Ali Akbari Bidokhti<sup>3</sup> and Majid Azadi<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Ph. D. Student of Geophysics, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>4</sup>Associate Professor, Atmospheric Science and Meteorology Research Center, Tehran, Iran

(Received: 03 January 2016, Accepted: 18 May 2016)

### Summary

The proper parameterizations of exchange processes between air and sea are critically important in better predictions of the atmosphere and ocean characteristics using numerical simulations. These exchanges mainly include sensible, latent and momentum fluxes between the two media. Using numerical weather prediction models is a common way to prepare input data for the numerical ocean models. The meteorological data obtained by this method are often used as forcing for the ocean models. For semi-enclosed seas like the Persian Gulf, using meso-scale numerical weather prediction models are preferred. The Weather and Research Forecasting (WRF) model is one of the most popular scientific and operational numerical weather prediction models that has been widely used in many studies and projects. In the present work, sensitivity to the choice of different physical parameterizations in WRF model simulations have been studied over the Persian Gulf and Oman Sea for the period of 2011 summer monsoon. Monsoon is the most important phenomena that affects the meteorology of the Oman Sea and the Persian Gulf.

The main domain of the model is selected from Arvandrood in the northern Persian Gulf, to the northern part of the Indian Ocean. To provide the initial and boundary data for the WRF model simulations, the FNL data from NCEP are used. The Simulations are carried out for a period starting from the beginning to the end of summer monsoon of the Indian Ocean in 2011. To run the model for a given period of time, namely 7 days, the time period is divided into daily periods. Then, the model is run for every 1.25 days (30 hours) with 6 hours of spin up. When the daily (1.25 days) simulations are done, the first 6 hours of individual simulations are discarded and the resulting daily simulations are concatenated to form a pseudo-continuous dataset. Different choices of physical parameterizations are used to create nine WRF model configurations. The parameters simulated include temperature, humidity and wind velocity for nine different configurations of parameterization schemes. Then the results are compared with the meteorological observations of the coastal and island synoptic stations of I.R. of Iran Meteorological Organization (including Abumooza, Bushehr, Jask, Qeshm, Khark, and Chabahar), Chabahar buoy and WINDSAT satellite data. To compare results of the model with the satellite data, six points (three in Persian Gulf and three in Oman Sea) are selected. The time interval between two successive observations is three hours for the synoptic stations, one hour for the Chabahar Buoy, and the satellite data are gathered two times per day. The amount of absolute, relative and “root mean square errors” (RMSE) of wind speed at 10 m height, the dry bulb and dew point temperatures at 2 m height are calculated. The results show that configuration No. 3 including Lin microphysics, MRF planetary boundary layer, Kain–Fritsch cumulus convection, RRTM longwave radiation, Goddard shortwave radiation, Revised-MM5 surface layer and NOAA land surface produce less error for temperature and humidity parameters, and configuration No. 2 including Lin microphysics, ACM2 planetary boundary layer, Kain–Fritsch cumulus convection, RRTM longwave radiation, Goddard shortwave radiation, Pleim–Xiu surface layer and land surface had the least error for simulation of surface wind speeds.

**Keywords:** WRF model, sensitivity to parameterizations schemes, Persian Gulf, Oman Sea

\*Corresponding author: