

ارزیابی داده‌گواری وردشی سه‌بعدی در کاهش حساسیت شبیه‌سازی طوفان حاره‌ای گونو به محدوده‌های انتخابی

مه‌ریار علی‌محمدی^۱، حسین ملکوتی^{۳*}، مریم راه‌بانی^۳ و مجید آزادی^۴

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

^۲ مربی، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی نوشهر، نوشهر، ایران

^۳ دانشیار دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

^۴ دانشیار مرکز تحقیقاتی علوم جوی، پژوهشکده هواشناسی، سازمان هواشناسی، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۱۰)

چکیده

وابستگی مدل‌های عددی به محدوده انتخابی، بر دقت نتایج پیش‌بینی و شبیه‌سازی طوفان‌های حاره‌ای مؤثر است. در بخش اول این مطالعه، با استفاده از مدل WRF، حساسیت شبیه‌سازی مسیر و شدت طوفان حاره‌ای گونو به محدوده‌های انتخابی تعیین و در بخش دوم، عملکرد داده‌گواری وردشی سه‌بعدی در کاهش وابستگی حساسیت شبیه‌سازی این طوفان به محدوده‌های انتخابی ارزیابی می‌شود. نتایج در بخش اول نشان می‌دهد که علی‌رغم تفاوت کم در انتخاب محدوده‌های انتخابی، مسیرهای شبیه‌سازی شده اختلاف زیادی با هم دارند. نتایج در بخش دوم حاکیست که با استفاده از داده‌گواری داده‌های ماهواره‌ای و هم‌مدیدی موجود در زمان شروع مدل، کیفیت داده‌های حدس اولیه به اندازه زیادی ارتقاء پیدا کرده است؛ از این‌رو، دقت مسیرهای شبیه‌سازی شده در همه محدوده‌های انتخابی ارتقاء پیدا می‌کند و باعث کاهش حساسیت شبیه‌سازی طوفان حاره‌ای گونو به محدوده انتخابی می‌شود. صرف نظر از اختلاف زیاد در مسیرهای شبیه‌سازی شده (به ویژه در حالت بدون استفاده از داده‌گواری) که به‌نوبه خود بر شدت طوفان پیش‌بینی شده تأثیرگذار است، در همه شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، شدت طوفان در زمان اوج آن در مقایسه با داده‌های مرجع سازمان هواشناسی هند (IMD)، بیشتر و در مقایسه با داده‌های مرجع مرکز مشترک هشدار طوفان (JTWC)، کمتر پیش‌بینی شد. از آنجاکه دمای سطح دریا تأثیر زیادی بر شدت شبیه‌سازی طوفان دارد، مدل WRF جفت‌شده با یک مدل اقیانوسی، جهت تعیین دقیق دمای سطح دریا در طول مدت شبیه‌سازی می‌تواند بر دقت نتایج این مطالعه به ویژه شدت طوفان بیفزاید.

واژه‌های کلیدی: طوفان حاره‌ای، گونو، داده‌گواری، WRF

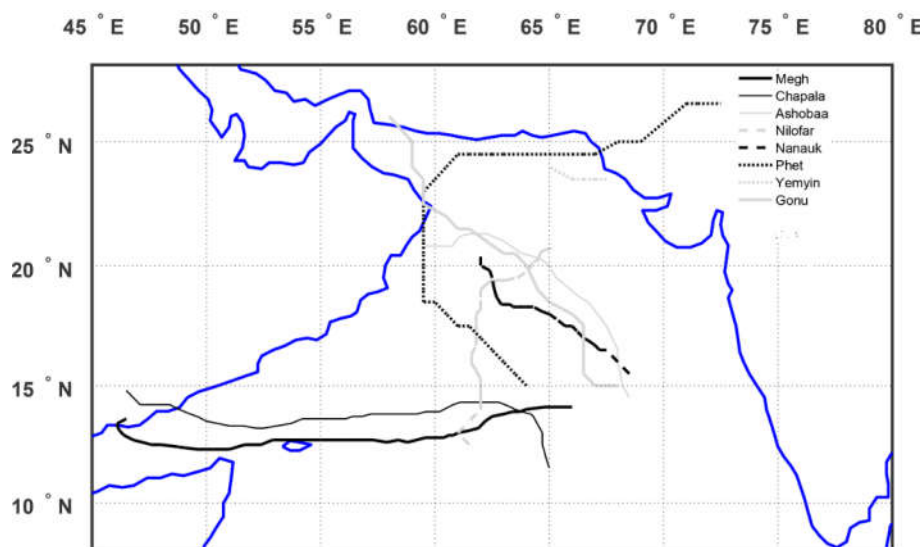
۱ مقدمه

بی‌تردید، طوفان‌های حاره‌ای ویرانگرترین پدیده‌های هواشناسی هستند. طوفان‌های حاره‌ای در حالت اولیه، سامانه‌های کم‌فشار تشکیل شده روی آب‌های گرم اقیانوس در مناطق نزدیک به استوا هستند که با برقراری شرایط لازم، تبدیل به طوفان‌های شدید حاره‌ای می‌شوند. طوفان‌های حاره‌ای در مناطق و فصول خاصی تشکیل می‌شوند. یکی از این مناطق، منطقه شمال‌غرب اقیانوس هند است. در حدود ۷٪ طوفان‌های حاره‌ای تشکیل شده در سراسر جهان در محدوده شمال اقیانوس هند (شامل شمال‌غرب و خلیج بنگال) است و از این مقدار، حدود ۲٪ طوفان‌های حاره‌ای در منطقه شمال‌غرب اقیانوس هند تشکیل می‌شود (گزارش سازمان جهانی هواشناسی، ۲۰۰۸) که برای نمونه می‌توان از طوفان‌های گونو و یمین در سال ۲۰۰۷ و فت در سال ۲۰۱۰ نام برد. در سالیان اخیر، این طوفان‌ها افزایش چشمگیری داشته‌اند؛ بنابراین، بعید نیست که این منطقه در آینده شاهد طوفان‌های حاره‌ای دیگری نیز باشد. شکل ۱ مسیر تعدادی از طوفان‌های حاره‌ای تشکیل شده در منطقه شمال‌غرب اقیانوس هند و جدول ۱ مشخصات کلی این طوفان‌ها را نشان می‌دهد. تعداد رخداد طوفان‌های تشکیل شده در منطقه شمال‌غرب اقیانوس هند در مقایسه با هر منطقه دیگری کمتر است، اما پیش‌بینی نشدن دقیق طوفان‌ها در این منطقه موجب خسارات جبران‌ناپذیری به شناورهای سطحی و مناطق ساحلی شده است (برای مثال، طوفان گونو در سال ۲۰۰۷). از طرفی، با بررسی علمی این پدیده می‌توان گفت که طوفان با منبع گرمایی نهفته در آن، که تقریباً ده برابر انرژی گرمایی نهفته در یک بمب اتمی متوسط است، یکی از اصلی‌ترین عوامل توازن گرمایی در جو زمین است (آهرنز، ۱۹۸۲). به‌عبارتی، ضرر تشکیل طوفان به مراتب کمتر از تشکیل نشدن آن است؛ از این رو، پیش‌بینی دقیق مسیر و شدت طوفان‌های حاره‌ای بسیار ضروری

است و می‌تواند نقش مهمی در کاهش خسارات جانی و مالی ایفا کند. مطالعات گذشته نشان می‌دهد که مدل‌های عددی در مقایسه با روش‌های آماری و هم‌دید می‌توانند پیش‌بینی دقیق‌تری از مسیر و شدت طوفان‌های حاره‌ای ارائه دهند (موهانتی و گوپتا، ۱۹۹۷؛ مندل و همکاران، ۲۰۰۴ و اوساری و همکاران، ۲۰۱۲). مطالعات بی‌شماری در جهت بهبود پیش‌بینی طوفان‌های حاره‌ای صورت گرفته است، اما مطالعات اندکی به اهمیت محدوده‌های انتخابی در پیش‌بینی طوفان‌های حاره‌ای پرداخته‌اند. بنابر داده‌های JTWC (Joint Typhoon Warning Center)، گونو قوی‌ترین طوفان حاره‌ای ثبت شده با فشار مرکزی حدود ۹۰۰ هکتوپاسکال در شمال‌غرب اقیانوس هند بود. جعفری (۱۳۸۸)، حبیبی و همکاران (۱۳۸۹)، لشکری و کیخسروی (۱۳۸۹)، بهرامی (۱۳۹۲) و حبیبی و بهرامی (۱۳۹۳) از دیدگاه هم‌دید به نحوه تشکیل طوفان گونو پرداختند. همچنین گلشنی و تائبی (۱۳۸۷)، مشهدی و همکاران (۱۳۹۲) و محمدمه‌دیزاده و کسبی (۱۳۹۳) به شبیه‌سازی عددی امواج طوفان گونو و خان‌سالاری و همکاران (۱۳۹۰) به تحلیل دینامیکی (شار هلیستی) طوفان گونو پرداختند. از مطالعات عددی انجام شده می‌توان به مطالعات علی‌محمدی (۱۳۹۱)، مزرعه‌فراهانی و همکاران (۱۳۹۴)، ملکوتی و علی‌محمدی (۱۳۹۳)، الف، ب)، و مدهوش (۱۳۹۳) اشاره کرد. از بین مطالعاتی که به‌طور مستقیم به حساسیت شبیه‌سازی‌ها به محدوده انتخابی پرداخته‌اند می‌توان به مطالعات میگوئز و همکاران (۲۰۰۴)، راسچر و همکاران (۲۰۰۶) و گوسامی و موهاپاترا (۲۰۱۴) اشاره کرد. کومار و همکاران (۲۰۱۱) و علی‌محمدی و ملکوتی (۲۰۱۸) نیز به‌طور ضمنی به این موضوع پرداختند. این مطالعات نشان دادند که مسیر و شدت شبیه‌سازی شده، حساسیت زیادی به انواع محدوده‌های انتخابی دارد. موضوعی که در هیچ‌کدام از مطالعات به آن اشاره نشده است، ارائه روشی جهت

طوفان به علت خطای موقعیت مرکز و شدت باد سامانه کم‌فشار داده‌های جهانی FNL در شرایط اولیه و ورودی است. به عبارت دیگر، این داده‌ها نمی‌توانند به‌طور مستقیم برای آغازگری پیش‌بینی عددی وضع هوا به کار روند و ثابت شده است که باید در یک روش سازگار دینامیکی به‌منظور به‌دست آوردن مجموعه مناسبی از داده‌ها برای آغازگری مدل اصلاح شوند.

کاهش حساسیت شبیه‌سازی‌ها به محدوده‌های انتخابی است. پیش‌بینی عددی وضع هوا یک مسئله ریاضی مقدار اولیه است که با رشد غیرخطی خطا در شرایط اولیه و نقص در نمایش مدل جو، بسیار پیچیده شده است. نبود دقت مناسب در داده‌های ورودی ناشی از کمبود داده‌های میدانی در سطح اقیانوس، به کیفیت پایین پیش‌بینی عددی طوفان‌های حاره‌ای می‌انجامد (موهانتی و همکاران، ۲۰۱۰). سهم زیادی از خطای پیش‌بینی مسیر و شدت



شکل ۱. مسیر طوفان‌های تشکیل شده در شمال غرب اقیانوس هند از سال ۲۰۰۷ (برگرفته از سازمان هواشناسی هند (IMD) به نشانی www.imd.gov.in).

جدول ۱. مشخصات طوفان‌های انتخابی تشکیل شده در منطقه شمال غرب اقیانوس هند (برگرفته از سازمان هواشناسی هند).

اسم طوفان	تاریخ تشکیل (میلادی)	تاریخ تشکیل (شمسی)	بیشینه سرعت (Knots)	کمترین فشار مرکزی (hPa)	دوره زندگی
مق	۲۰۱۵/۱۱/۰۵	۱۳۹۴/۰۸/۱۴	۹۵	۹۶۴	۵ روز
چاپالاتا	۲۰۱۵/۱۰/۲۸	۱۳۹۴/۰۸/۶	۱۱۵	۹۴۰	۷ روز
آشوبا	۲۰۱۵/۰۶/۰۷	۱۳۹۴/۰۳/۱۷	۴۵	۹۹۰	۵ روز
نیلوفر	۲۰۱۴/۱۰/۲۵	۱۳۹۳/۰۸/۳	۱۱۰	۹۵۰	۶ روز
ناناک	۲۰۱۴/۰۶/۱۰	۱۳۹۳/۰۳/۲۰	۴۵	۹۸۴	۴ روز
فت	۲۰۱۰/۰۵/۳۱	۱۳۸۹/۰۳/۱۰	۸۵	۹۶۴	۶ روز
یمین	۲۰۰۷/۰۶/۲۵	۱۳۸۶/۰۴/۴	۳۵	۹۸۶	۲ روز
گونو	۲۰۰۷/۰۶/۰۱	۱۳۸۶/۰۳/۱۱	۱۲۷	۹۲۰	۷ روز

سواحل کشور عمان در شمال غربی اقیانوس هند است. به گزارش سازمان هواشناسی هند (Indian Meteorological Department) یا به اختصار، IMD، این طوفان در اول ژوئن ۲۰۰۷ با فشار مرکزی ۱۰۰۲ هکتوپاسکال در موقعیت ۱۵ درجه شمالی و ۶۸ درجه شرقی تشکیل و در هفتم ژوئن ۲۰۰۷ هنگام عبور از سواحل جنوب شرقی ایران و در طول جغرافیای ۵۸ درجه شرقی از شدت آن کاسته شد و رو به افول گذاشت (گزارش سازمان هواشناسی هند، ۲۰۰۸). طوفان گونو در اوج شدت خود کمترین فشار مرکزی حدود ۹۲۰ هکتوپاسکال و بیشینه سرعت باد ۱۲۷ نات را تجربه کرد. تفاوت خاصی بین گزارش سازمان هواشناسی هند و مرکز مشترک هشدار طوفان در خصوص مسیر طوفان گونو وجود ندارد، اما تفاوت چشمگیری درباره شدت طوفان گونو وجود دارد. میزان خسارت وارده این طوفان در کشور عمان ۴/۲ میلیارد دلار با ۵۰ نفر کشته و در کشور ایران حدود ۲/۵ میلیون دلار با ۳۲ نفر کشته گزارش شده است (گزارش سازمان هواشناسی هند، ۲۰۰۸).

۲-۲ مدل WRF

مدل WRF یک مدل عددی میان‌مقیاس است که هم برای پیش‌بینی و هم برای پژوهش (شبیه‌سازی) استفاده می‌شود. این مدل، از هسته‌های دینامیکی چندگانه، داده‌گذاری و ردشی سه یا چهاربعدی (3/4DVAR) برای داده‌ها و نرم‌افزاری تشکیل شده است که اجازه می‌دهد محاسبات به صورت موازی صورت پذیرد. مدل برای طیف وسیعی از کاربری‌ها و برای مقیاس‌هایی از چند متر تا چند هزار کیلومتر مناسب است. پیش‌بینی و شبیه‌سازی طوفان، یکی از کاربردهای این مدل است. در این تحقیق از هسته دینامیکی ARW استفاده شده است. توصیف کاملی از این مدل در اسکاماروک (۲۰۰۸) ارائه شده است.

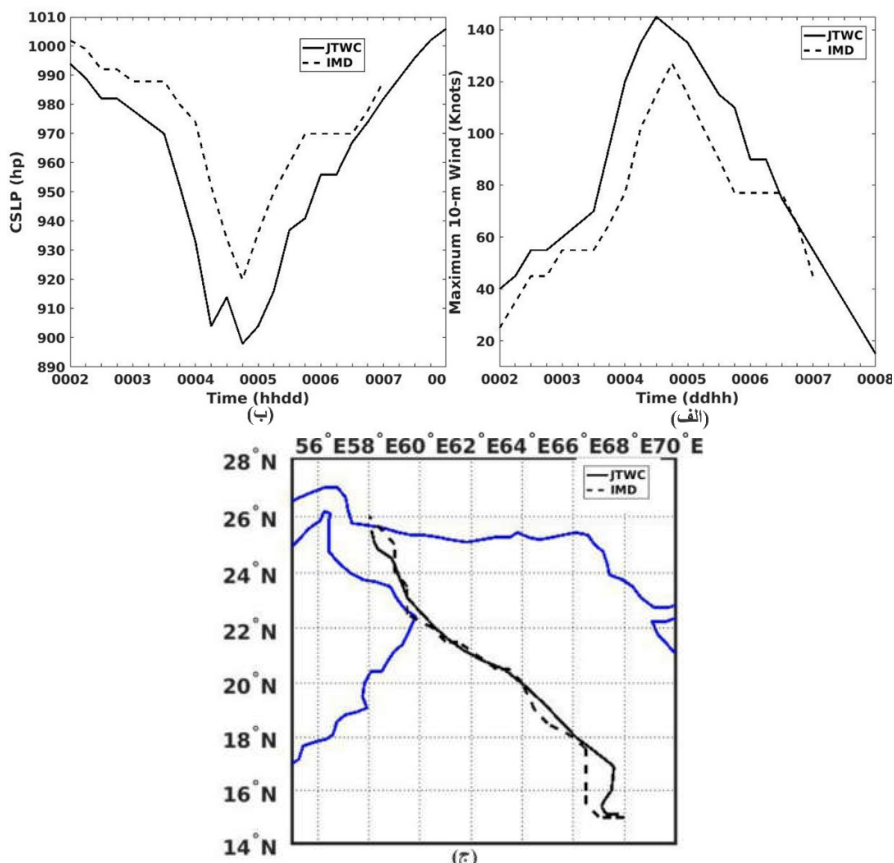
امروزه، ماهواره‌های هواشناسی سطح وسیعی از اقیانوس را جهت دیده‌بانی پوشش می‌دهند. استفاده از داده‌های استخراج شده از این ماهواره‌ها می‌تواند به کاهش خطای داده‌های اولیه بینجامد (مدال و همکاران، ۲۰۰۶؛ سینق و همکاران، ۲۰۰۸ و موهانتی و همکاران، ۲۰۱۴). همگون‌سازی این داده‌ها با داده‌های جهانی FNL در مدل‌های عددی با روش‌های متفاوتی انجام می‌پذیرد. یکی از مؤثرترین روش‌ها، روش وردشی (variational) است که در مدل‌های عددی با عنوان داده‌گذاری وردشی سه یا چهاربعدی (3/4DVAR) شناخته می‌شود.

در این تحقیق، در مرحله اول قصد بر این است که با استفاده از مدل جوی (Weather Research and Forecasting) WRF حساسیت شبیه‌سازی طوفان گونو به اندازه محدوده انتخابی ارزیابی شود. در مرحله بعد، بررسی می‌شود که ارتقای کیفیت داده‌های اولیه با انجام داده‌گذاری وردشی سه‌بعدی (3DVAR) تا چه مقدار می‌تواند از حساسیت شبیه‌سازی‌ها به محدوده انتخابی بکاهد. شرح مختصری از طوفان گونو، داده‌ها، روش داده‌گذاری داده‌ها و مدل مورد استفاده در مطالعه، در بخش ۲ ارائه و انواع آزمایش‌های حساسیت در بخش ۳ شرح داده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها و تجزیه و تحلیل آنها در بخش ۴ و نتیجه‌گیری کلی در بخش ۵ ارائه شده است.

۲ روش تحقیق

۲-۱ طوفان گونو

طوفان گونو قوی‌ترین چرخند حاره‌ای است که تاکنون در شمال غرب اقیانوس هند و حتی در شمال اقیانوس هند رخ داده است. به‌طور معمول، طوفان‌هایی که در شمال غرب اقیانوس هند شکل می‌گیرند، ضعیف هستند و دوره زندگی کوتاه‌مدتی دارند. طوفان گونو در میان طوفان‌های شمال غرب اقیانوس هند یک استثناء است که علت آن، حرکت غیرعادی به سمت دریای عرب و



شکل ۲. اطلاعات مسیر واقعی طوفان گونو طبق برآورد IMD و JTWC (الف) بیشینه سرعت باد تراز ۱۰ متر (ب) کمترین فشار مرکزی طوفان (ج) مسیر حرکت طوفان.

۳-۲ داده‌گواری وردشی سه‌بعدی

داده‌گواری روشی است که با استفاده از آن سعی بر این است که کیفیت داده‌های آغازگری یک مدل ارتقاء پیدا کند. روش‌های متفاوتی برای داده‌گواری وجود دارد که یکی از این روش‌ها، داده‌گواری وردشی سه‌بعدی (3DVAR) است (بارکر، ۲۰۰۴). هدف غایی هر سامانه داده‌گواری وردشی، تولید برآورد مطلوب از حالت جو واقعی در زمان تحلیل با حل تکراری تابع موسوم به تابع هزینه تجویز شده (رابطه ۱) است (ایده و همکاران، ۱۹۹۷):

$$J(X) = J_b(x) + J_o(x) = \frac{1}{2}(x - x^b)^T B^{-1}(x - x^b) + \frac{1}{2}(y - y^o)^T (E + F)^{-1}(y - y^o), \quad (1)$$

که $J(X)$ تابع هزینه؛ J_b و J_o به ترتیب تابع هزینه زمینه (حدس اولیه) و تابع هزینه مشاهدات؛ x بردار حالت؛ x^b زمینه یا حدس اولیه؛ B ماتریس کوواریانس خطای زمینه؛ y بردار دیده‌بانی؛ H عملگر دیده‌بانی؛ y^o مشاهدات؛ E ماتریس کوواریانس خطای مشاهده؛ F ماتریس کوواریانس خطای نماینده و T تابع انتقال از ماتریس است. معادله به‌دنبال x ‌هایی است که تابع هزینه را کمینه

بهترین زمان شروع شبیه‌سازی باید قبل از عمیق شدن کم‌فشار باشد. به بیان دیگر، باید زمانی انتخاب شود که فشار مرکزی سامانه حدود ۱۰۰۰ هکتوپاسکال باشد؛ بنابراین، زمان ۰۰ روز دوم ژوئن به مدت شش روز به‌عنوان شروع شبیه‌سازی‌ها انتخاب شد. چهار محدوده جهت مطالعه حساسیت مسیر و شدت طوفان گونو به محدوده انتخابی در نظر گرفته شد. برای دو محدوده اول که نسبت به دو محدوده دیگر کوچک‌تر هستند، تعداد ۱۵۰ × ۲۲۰ نقطه شبکه در راستای محورهای x و y با تفکیک افقی ۲۷ km در نظر گرفته شد. مراکز دو محدوده اول در طول جغرافیایی ۷۵ درجه و در عرض‌های جغرافیایی متفاوت ۱۸ و ۲۰ درجه به ترتیب برای محدوده‌های انتخابی اول و دوم قرار دارند. محدوده‌های سوم و چهارم که اندازه بزرگ‌تری در مقایسه با دو محدوده اول دارند، ۱۸۵ × ۲۴۷ نقطه شبکه در راستای محورهای x و y با تفکیک افقی ۲۷ km دارند. مراکز این محدوده‌ها در طول جغرافیایی ۶۵ درجه و در عرض‌های جغرافیایی متفاوت ۱۹ و ۲۱ درجه به ترتیب برای محدوده‌های انتخابی سوم و چهارم قرار دارند. جدول ۲ و

کند. جزئیات بیشتر از داده‌گذاری وردشی در لورنس (۱۹۸۶)، ایده و همکاران (۱۹۹۷)، اسکاماروک (۲۰۰۸)، هوانگ و همکاران (۲۰۰۹) و بارکر و همکاران (۲۰۱۲) وجود دارد.

۲-۴ پیکربندی مدل و طراحی آزمایش‌ها

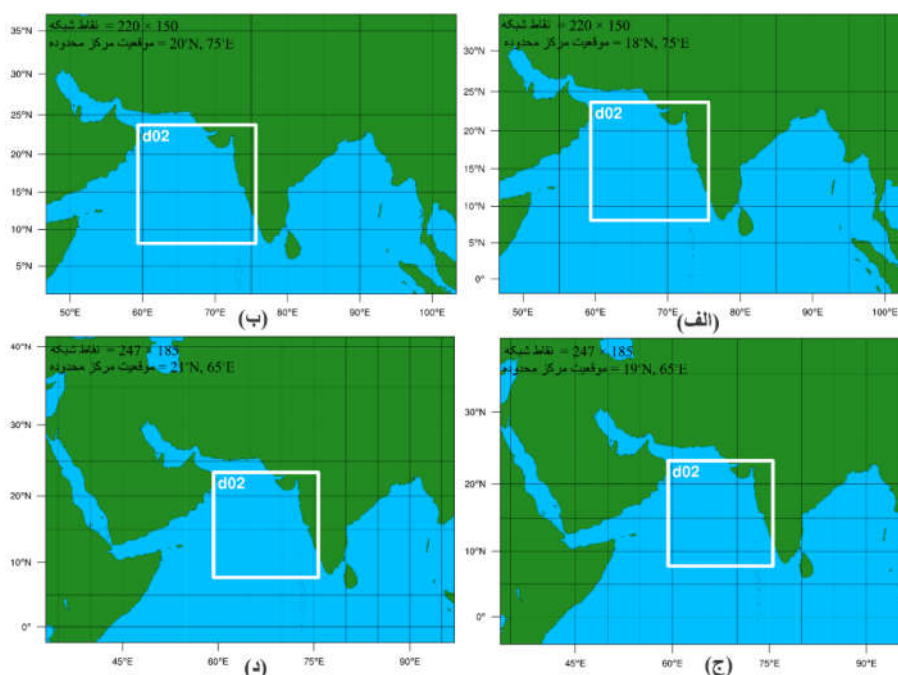
حصول نتایج با درجه اعتبار بالا در این مطالعه، در وهله اول مستلزم طراحی بهترین پیکربندی برای مدل WRF است. از این رو، برای تعیین طرح‌واره‌های فیزیکی مناسب، پس از بررسی و آزمایش طرح‌واره‌های فیزیکی متفاوت و معمول برای شبیه‌سازی طوفان‌های حاره‌ای و براساس نتایج اوساری و همکاران (۲۰۱۲)، کومار و همکاران (۲۰۱۱)، موخاپادیه و همکاران (۲۰۱۱) و علی محمدی و ملکوتی (۲۰۱۸)، که طوفان‌های حاره‌ای منطقه شمال اقیانوس هند را شبیه‌سازی کرده‌اند، در نهایت، طرح‌واره‌های فیزیکی ارائه‌شده در جدول ۲ جهت انجام آزمایش‌ها انتخاب شدند. براساس نتایج دیویس و بوسارت (۲۰۰۱)، کومار و همکاران (۲۰۱۱)، کاناس و سالویکار (۲۰۱۱) و علی محمدی و ملکوتی (۲۰۱۸)،

جدول ۲. نمای کلی از طرح‌واره‌های فیزیکی و پیکربندی مدل WRF

مدل	WRF-ARW
Time integration scheme	3rd order Runge-Kutta scheme
Spatial differencing scheme	6th order center differencing
Micro physics	WSM 6 (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۴)
Long wave Radiation scheme	RRTM (ملاور و همکاران، ۱۹۹۷)
Short wave Radiation scheme	Dudhia (دودهیا، ۱۹۸۹)
Surface layer parameterization	Thermal diffusion scheme
Planetary boundary layer physics	YSU (نوه و همکاران، ۲۰۰۳)
Cumulus scheme	Kain-Fritsch (کین، ۲۰۰۴)
Boundary-Initial conditions	NCEP FNL (تحلیل جهانی)
Surface drag exchange parameterization	(دنلان و همکاران، ۲۰۰۴)
Surface enthalpy exchange parameterization	(لارج و پوند، ۱۹۸۱)
Run time	۶ روز
time step	۱۲۰ ثانیه
Vertical resolution	۳۷ تراز
Model top	۲۰۰۰ پاسکال

جدول ۳. شبیه‌سازی‌های اجرا شده در این تحقیق

اسامی	نقاط شبکه	موقعیت مرکزی محدوده	داده‌گذاری
D1	۲۲۰ × ۱۵۰	۱۸°N, ۷۵°E	خیر
D2	۲۲۰ × ۱۵۰	۲۰°N, ۷۵°E	خیر
D3	۲۴۷ × ۱۸۵	۱۹°N, ۶۵°E	خیر
D4	۲۴۷ × ۱۸۵	۲۱°N, ۶۵°E	خیر
3VAR-D1	۲۲۰ × ۱۵۰	۱۸°N, ۷۵°E	بله
3VAR-D2	۲۲۰ × ۱۵۰	۲۰°N, ۷۵°E	بله
3VAR-D3	۲۴۷ × ۱۸۵	۱۹°N, ۶۵°E	بله
3VAR-D4	۲۴۷ × ۱۸۵	۲۱°N, ۶۵°E	بله



شکل ۳. محدوده‌های انتخابی (الف) و (ب) محدوده‌های کوچک‌تر (ج) و (د) محدوده‌های بزرگ‌تر. برای هر چهار محدوده، محدوده قابل حرکت اندازه مساوی دارد.

شبیه‌سازی‌های این تحقیق، داده‌های جهانی FNL سازمان NCEP است. در مرحله دوم این مطالعه، برای هر چهار محدوده انتخابی، داده‌گذاری وردشی سه‌بعدی (3DVAR) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و مشاهدات هم‌مدیدی زمان شروع مدل انجام شد. اطلاعات بهترین مسیر حرکت و شدت طوفان گونو برای درستی‌سنجی شبیه‌سازی‌های اجرا شده در این تحقیق از سازمان هواشناسی هند (IMD) و JTWC دریافت شده است.

شکل ۳ مشخصات و مختصات محدوده‌های انتخابی در این تحقیق را معرفی می‌کنند. در جهت ارتقای تفکیک افقی به ۹ کیلومتر، داخل هر چهار محدوده، یک محدوده قابل حرکت با 190×190 نقطه شبکه در نظر گرفته شد. موقعیت مرکزی اولیه محدوده قابل حرکت برای هر چهار محدوده در ۱۵ درجه شمالی و ۶۵ درجه شرقی فرض شد. گام زمانی برای همه شبیه‌سازی‌ها، ۱۲۰ ثانیه انتخاب شد (جدول ۳). داده‌های اولیه و شرایط مرزی در

۳ نتیجه‌گیری

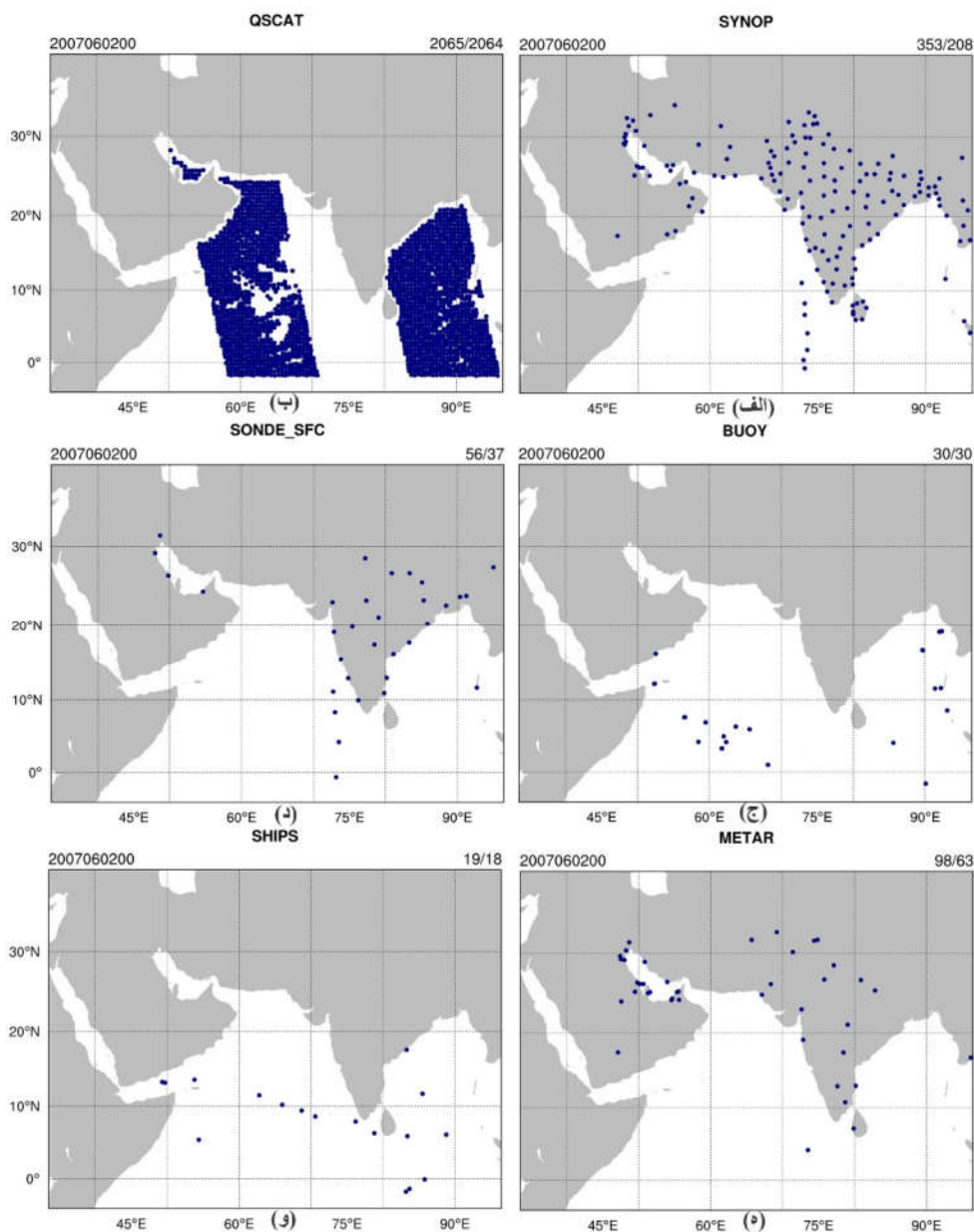
۳-۱ حساسیت آزمایش‌ها به اندازه محدوده‌ها

مسیر، بیشینه سرعت باد تراز ۱۰ متر و کمترین فشار سطحی طوفان شبیه‌سازی شده برای کل آزمایش‌های اجراشده در این مطالعه در شکل ۶ نمایش داده شده است. موقعیت کمترین فشار سطحی طوفان به فاصله زمانی هر سه ساعت برای ترسیم مسیرهای شبیه‌سازی شده استفاده شده است. البته در این قسمت فقط به نتایج حساسیت شبیه‌سازی‌ها به اندازه محدوده پرداخته می‌شود. همان‌طور که در قسمت ۲-۴ بیان شد، تفاوت محدوده اول با محدوده دوم فقط جابه‌جایی محدوده دوم به اندازه ۲ درجه به سمت جنوب است. نتایج مسیر شبیه‌سازی‌ها در شکل ۶ نشان می‌دهد که در محدوده اول، طوفان بعد از رسیدن به سواحل عمان با حرکت به سمت شمال‌غربی به کلی از مسیر واقعیت منحرف می‌شود. مسیر محدوده دوم هم بدون رسیدن به سواحل عمان، با خطای حدود ۲۲۰ کیلومتر به سواحل ایران می‌رسد. نکته جالب اینجاست که چگونه جابه‌جایی محدوده فقط به اندازه ۲ درجه تا این مقدار بر مسیر شبیه‌سازی شده تأثیر گذار است. حساسیت به محدوده انتخابی فقط محدود به این دو محدوده نمی‌شود. در راستای انجام این پژوهش و سایر پژوهش‌ها، با انتخاب انواع محدوده‌ها این تأثیر به تکرار مشاهده شد. محدوده‌های سوم و چهارم جهت در نظر گرفتن مراکز پرفشار و جریانات بزرگ مقیاس مؤثر در مسیر طوفان تا حدودی بزرگ‌تر انتخاب شدند. مسیر شبیه‌سازی طوفان در محدوده سوم تا حدود زیادی به واقعیت نزدیک است؛ در حالی که محدوده چهارم در مقایسه با سه محدوده دیگر، با بیشترین اختلاف از مسیر واقعیت منحرف می‌شود. همان‌طور که در قسمت ۲-۴ بیان شد، تفاوت محدوده سوم با محدوده چهارم فقط جابه‌جایی محدوده چهارم به اندازه ۲ درجه به سمت جنوب است. این مقدار تفاوت در دو محدوده، باعث

اختلاف چشمگیر در شبیه‌سازی مسیر شده است. وابستگی پیش‌بینی‌ها و شبیه‌سازی‌ها به محدوده انتخابی، کار را برای پژوهشگر بسیار دشوار می‌کند. از یک نگاه می‌توان تغییرات کوچک در محدوده انتخابی را شبیه حالتی در نظر گرفت که در شبیه‌سازی‌های همادی رخ می‌دهد؛ یعنی با تغییرات جزئی در داده‌های اولیه، تعداد بیشتری پیش‌بینی انجام می‌شود و در نهایت، با در نظر گرفتن همه پیش‌بینی‌ها یک پیش‌بینی به صورت همادی ارائه می‌شود. از روش‌های دیگری که می‌توان از حساسیت شبیه‌سازی‌ها به محدوده‌های انتخابی کاست، ارتقای کیفیت داده‌های اولیه است که در قسمت ۳-۲ این مطالعه به طور کامل به آن پرداخته خواهد شد. نتایج شدت شبیه‌سازی‌ها در شکل ۶ نشان می‌دهد که تقریباً هر چهار محدوده، اوج شدت طوفان را در مقایسه با داده‌های IMD، بیشتر و در مقایسه با داده‌های JTWC، کمتر پیش‌بینی می‌کنند. نکته دیگری که در شدت شبیه‌سازی‌ها به چشم می‌خورد، مقدار بیش از حد شدت شبیه‌سازی‌ها در محدوده‌های دوم، سوم و چهارم در زمان رسیدن به سواحل ایران در مقایسه با داده‌های IMD و JTWC است. دلیل اصلی موضوع می‌تواند ثابت فرض کردن دمای سطح دریا در زمان شروع برای هر چهار محدوده در طول شبیه‌سازی باشد. از سوی دیگر، مطالعات دیویس و همکاران (۲۰۰۸) و وارنر و همکاران (۲۰۱۰) نشان داده است که دمای سطح دریا در هنگام عبور طوفان‌ها به خصوص در زمان اوج شدت طوفان کاهش می‌یابد. این کاهش دمای سطح دریا به نوبه خود مانع بیش از حد شدت گرفتن طوفان‌ها می‌شود. جفت کردن یک مدل اقیانوس با مدل WRF جهت پیش‌بینی دقیق دمای سطح دریا و در نظر گرفتن کاهش دمای سطح دریا می‌تواند به دقت نتایج این تحقیق بیفزاید. شدت شبیه‌سازی شده محدوده اول با توجه به اینکه از روز پنجم شبیه‌سازی وارد خشکی عمان می‌شود، به دلیل از دست دادن منبع مرطوب گرما در مقایسه با سایر

شبیه‌سازی شده در محدوده سوم هم در روز پایانی شبیه‌سازی با توجه به عبور طوفان از روی نواحی خشکی ایران باعث کاهش شدت طوفان در مقایسه با سه محدوده دیگر شده است.

شبیه‌سازی‌ها، به یک‌باره مقدار کمتری را نشان می‌دهد. البته، در روز پایانی شبیه‌سازی با توجه به عبور کردن نیمه شمال‌غربی طوفان از آب‌های گرم دریای عمان، دوباره تا حدودی به شدت طوفان افزوده می‌شود.



شکل ۴. توزیع مکانی داده‌های استفاده‌شده در انجام داده‌گواری برای محدوده اول (الف) داده‌های SYNOP (ب) داده‌های QSCAT (ج) داده‌های BUOY (د) داده‌های SONDE_SFC (ه) داده‌های METAR (و) داده‌های SHIPS. بیشترین داده‌ها مربوط به ماهواره QSCAT و کمترین داده‌ها مربوط به داده‌های جمع‌آوری‌شده با استفاده از کشتی‌ها (SHIPS) است. اعداد نوشته‌شده در بالای سمت راست هر شکل، به ترتیب مربوط به کل داده‌های موجود سنجنده و داده‌های استفاده‌شده سنجنده مورد نظر در انجام داده‌گواری است.

جدول ۴: میانگین خطا، خطای میانگین ریشه مربع و انحراف معیار حدس اولیه (قبل از انجام داده‌گواری) و تحلیل (بعد از انجام داده‌گواری) با استفاده از انواع مشاهدات برای محدوده اول.

پارامتر/ ابزار اندازه‌گیری	حدس اولیه			تحلیل شده		
	BIAS	RMSE	STD	BIAS	RMSE	STD
QSCAT/U	-۰/۰۲۹۰	۱/۰۶۲۹	۱/۰۶۲۵	-۰/۰۵۴۹	۰/۹۹۸۴	۰/۹۹۶۹
QSCAT/V	-۰/۰۵۲۴	۱/۰۱۵۳	۱/۰۱۴۰	۰/۰۲۱۸	۰/۹۲۸۵	۰/۹۲۸۳
BUOY/P	-۱/۱۸۸۸	۱/۷۶۹۸	۱/۳۱۱۱	-۰/۹۰۰۲	۱/۵۳۵۲	۱/۲۴۳۵
METAR/U	-۰/۲۲۳۱	۱/۶۳۱۲	۱/۶۱۵۹	-۰/۰۶۶۱	۱/۳۳۲۳	۱/۳۳۰۶
METAR/V	-۰/۰۴۴۷	۱/۶۱۴۷	۱/۶۱۶۸	۰/۰۰۷۶	۱/۲۴۴۸	۱/۲۴۴۸
METAR/T	-۰/۷۳۳۴	۲/۰۲۰۳	۱/۸۸۲۴	-۰/۵۵۱۸	۱/۶۹۹۵	۱/۶۰۷۴
METAR/Q	۲/۵۱۲۵	۴/۰۳۱۸	۳/۱۵۳۲	۱/۴۸۰۰	۲/۸۷۶۵	۲/۴۶۶۵
METAR/P	-۰/۳۷۳۷	۱/۱۳۷۶	۱/۰۷۴۴	-۰/۱۱۰۲	۰/۹۷۹۱	۰/۹۷۲۹
SHIPS/U	-۰/۶۰۳۹	۱/۹۷۰۵	۱/۸۷۵۸	-۰/۵۱۹۶	۱/۷۲۶۱	۱/۶۴۶۱
SHIPS/V	-۰/۰۴۵۲	۲/۸۰۴۱	۲/۸۰۳۷	-۰/۱۴۳۱	۲/۸۰۹۴	۲/۸۰۵۷
SHIPS/T	-۰/۴۹۰۷	۱/۰۰۴۰	۰/۸۷۵۹	-۰/۵۲۷۶	۰/۹۶۵۵	۰/۸۰۸۶
SHIPS/Q	۰/۷۱۴۴	۱/۸۰۲۶	۱/۶۵۵۰	۰/۶۶۳۱	۱/۷۶۳۰	۱/۶۳۳۵
SHIPS/P	۰/۵۷۳۶	۱/۴۲۵۰	۱/۳۰۴۵	۰/۶۳۲۵	۱/۴۰۸۰	۱/۲۵۷۹
SONDE/U	۰/۳۰۹۱	۱/۲۹۹۸	۱/۲۶۲۵	۰/۱۰۹۱	۰/۷۷۴۱	۰/۷۶۶۴
SONDE/V	-۰/۶۰۷۰	۱/۳۳۴۹	۱/۱۸۸۹	-۰/۲۹۶۷	-۱/۰۸۸۵	۱/۰۷۴۳
SONDE/T	-۰/۸۰۵۲	۱/۳۴۳۰	۱/۰۷۴۹	-۰/۵۹۲۲	۰/۹۳۴۸	۰/۷۲۳۴
SONDE/Q	۱/۷۷۹۸	۳/۱۸۳۲	۱/۶۳۹۲	۱/۱۴۴۱	۲/۳۲۶۸	۲/۰۲۸۱
SONDE/P	-۰/۰۳۲۷	۱/۲۴۷۹	۱/۲۴۷۵	۰/۰۹۵۲	۱/۰۴۹۱	۱/۰۴۹۸
SYNOPT/U	-۰/۲۸۴۳	۱/۹۸۹۱	۱/۹۶۸۷	-۰/۱۰۵۸	۱/۳۳۹۰	۱/۳۳۴۸
SYNOPT/V	-۰/۳۱۱۴	۱/۶۱۶۹	۱/۵۸۶۷	-۰/۱۱۵۵	۱/۲۶۶۷	۱/۲۶۱۵
SYNOPT/T	-۰/۵۹۳۰	۱/۷۷۴۹	۱/۶۷۲۹	-۰/۴۶۲۳	۱/۴۸۱۳	۱/۴۰۷۳
SYNOPT/Q	۲/۲۴۰۱	۳/۷۷۰۱	۳/۰۳۲۵	۰/۵۰۹۱	۲/۷۹۴۵	۲/۳۵۲۰
SYNOPT/P	-۰/۲۶۵۵	۱/۰۶۹۸	۱/۰۳۶۴	-۰/۰۰۰۱	۰/۸۸۲۳	۰/۸۸۲۳

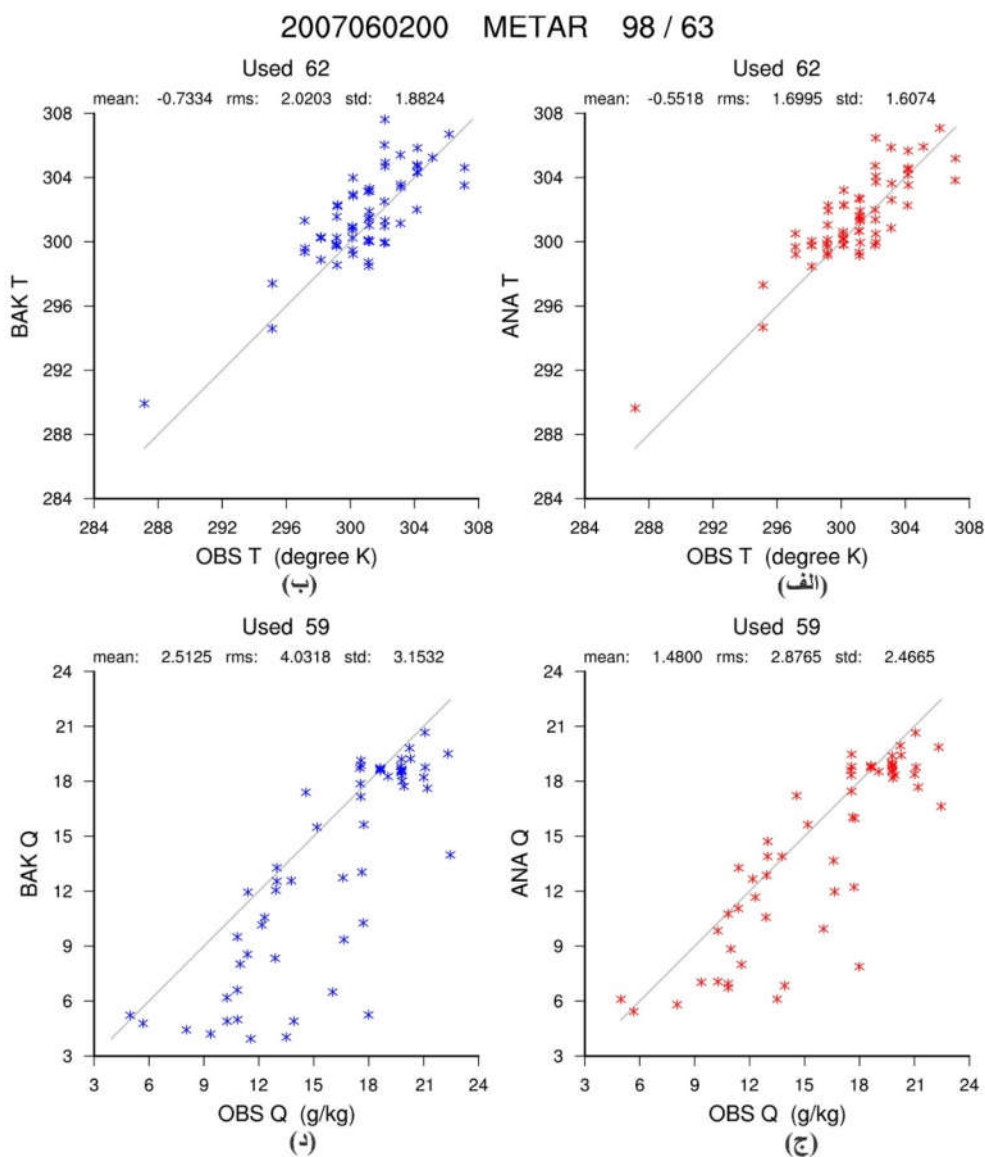
۲-۳ تأثیرگذاری داده‌گواری بر شرایط اولیه

متعلق به داده‌های جمع‌آوری شده با استفاده از کشتی‌ها به تعداد ۱۸ است (شکل ۴). انحراف داده‌های تحلیل شده (تفاوت بین مشاهدات و داده‌های تحلیل شده) برای ۱۸ پارامتر از بین ۲۳ پارامتر داده‌گواری شده در مقایسه با انحراف داده‌های حدس اولیه (تفاوت بین مشاهدات و داده‌های حدس اولیه) با روش داده‌گواری سه‌بعدی به مقدار زیادی کاهش یافت (جدول ۴). بیشترین خطای داده‌های حدس اولیه متعلق به سنجنده METAR/Q با مقدار ۲/۵۱۲۵ است. این خطا بعد از داده‌گواری به

در این قسمت به نتایج داده‌گواری داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های هم‌مدیدی سطحی با داده‌های جهانی FNL پرداخته می‌شود. شکل ۴ توزیع مکانی داده‌های استفاده شده جهت داده‌گواری و جدول ۴، تأثیرات داده‌گواری اجرا شده در این مطالعه برای محدوده اول را نشان می‌دهد. بیشترین داده‌های استفاده شده جهت داده‌گواری متعلق به سنجنده QSCAT به تعداد ۲۵۶۴ است. کمترین داده‌های استفاده شده جهت داده‌گواری

شدت شبیه‌سازی شده به اندازه شبیه‌سازی اجرا شده با استفاده توأمان از همه داده‌های ماهواره‌ای و همدیدی موجود، ارتقاء پیدا نکرد. با رجوع به جدول ۴ می‌توان دلیل آن را متوجه شد. میانگین انحراف مقدار بادهای افقی

۱/۴۸۰۰ کاهش یافت (جدول ۴ و شکل ۵). در یکی دیگر از شبیه‌سازی‌ها که فقط با استفاده از داده‌های QSCAT، روش داده‌گویی برای همین محدوده (محدوده اول) انجام شد، کیفیت داده‌های اولیه و مسیر و



شکل ۵. پراکندگی داده‌های تحلیل‌شده و داده‌های حدس اولیه در مقایسه با داده‌های مشاهدات برای داده‌گویی داده‌های METAR/T و METAR/Q. محورهای افقی برای هر چهار شکل، معرف داده‌های مشاهدات و محورهای عمودی برای شکل‌های (الف) و (ج) به ترتیب معرف داده‌های تحلیل‌شده دما و رطوبت مطلق هستند. محورهای عمودی برای شکل‌های (ب) و (د)، معرف داده‌های حدس اولیه دما و رطوبت مطلق هستند. شکل‌ها بیانگر این هستند که پراکندگی داده‌ها در حالت تحلیل‌شده کاهش یافته است و به مشاهدات نزدیک‌تر می‌شود.

به‌عنوان زمان اسپین‌آپ مدل نادیده فرض شود، در ادامه در بیشتر زمان‌ها مسیر شبیه‌سازی دقیقاً بر مسیر واقعیت JTWC قرار می‌گیرد. بیشترین انحراف مسیر شبیه‌سازی شده حدود ۱۰ کیلومتر در فاصله حدود ۱۵۰ کیلومتری از سواحل ایران است درحالی‌که مسیر شبیه‌سازی شده بدون هیچ انحرافی از مسیر واقعیت JTWC به سواحل ایران می‌رسد. همان‌طور که در بخش قبلی اشاره شد، این در حالی است که داده‌های اولیه در محدوده اول پس از انجام داده‌گذاری به مقدار شایان توجهی ارتقاء پیدا کرده بود. در شبیه‌سازی اجرا شده که در آن فقط از داده‌های ماهواره QSCAT برای این محدوده استفاده شد، مقدار ارتقای کیفیت مسیر زیاد نبود (شکل آن نشان داده نشده است). مسیر شبیه‌سازی شده در محدوده سوم در حالت بدون داده‌گذاری نسبت به سایر شبیه‌سازی‌ها از کیفیت بالاتری برخوردار است و بعد از انجام داده‌گذاری بر کیفیت مسیر شبیه‌سازی شده آن نیز اضافه شده است. در این محدوده نیز به‌مانند محدوده اول با در نظر نگرفتن بیست و چهار ساعت اول شبیه‌سازی، در بیشتر زمان‌ها مسیر شبیه‌سازی شده دقیقاً بر مسیر واقعیت JTWC قرار می‌گیرد و طوفان بدون هیچ انحرافی از مسیر واقعیت JTWC به سواحل ایران می‌رسد. در حالت شبیه‌سازی‌های محدوده دوم و محدوده چهارم، در حالت داده‌گذاری، کیفیت مسیر شبیه‌سازی شده نسبت به حالت بدون داده‌گذاری زیاد نیست. شایان ذکر است که در مدل‌های منطقه‌ای، حساسیت شبیه‌سازی‌ها به محدوده انتخابی به غیر از شرایط اولیه، به شرایط مرزی نیز بسیار وابسته است که باید به آن توجه شود. به‌عبارت‌دیگر، در مدل‌های منطقه‌ای، شرایط مرزی هم به همان اندازه شرایط اولیه در حساسیت شبیه‌سازی‌ها و پیش‌بینی‌ها تأثیرگذار است. چه بسا اتخاذ شرایط مرزی مناسب در بازه زمانی مناسب، باعث ارتقای شبیه‌سازی‌های محدوده دوم و محدوده چهارم نیز می‌شود؛ موضوعی که در آینده باید به

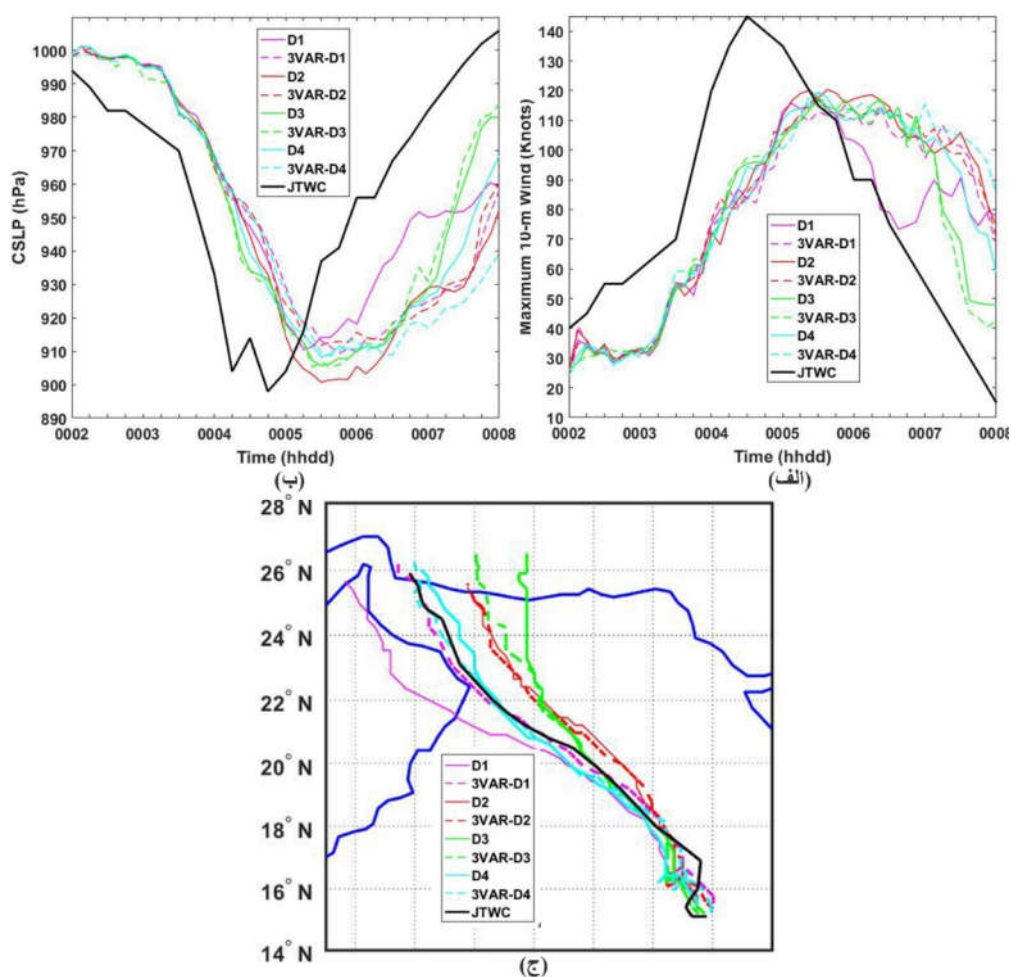
مؤلفه U در حالت حدس اولیه از ۰/۰۲۹۰ به ۰/۰۵۴۹ بعد از حالت داده‌گذاری افزایش یافت. البته این اصلاً به آن معنا نیست که داده‌های QSCAT کیفیت لازم را جهت انجام داده‌گذاری ندارند، بلکه لزوم استفاده از همه داده‌های ماهواره‌ای و همدیدی موجود را می‌رساند؛ چون در سایر داده‌گذاری‌های اجرا شده، داده‌های QSCAT به مقدار زیادی باعث کاهش میانگین انحراف مقدار بادهای افقی مؤلفه U در حالت حدس اولیه شدند. از آنجا که تعدادی از داده‌ها از نظر موقعیت مکانی هم‌پوشانی دارند، استفاده از همه داده‌های ماهواره‌ای و همدیدی موجود در روش داده‌گذاری وردشی سه‌بعدی می‌تواند تا مقدار زیادی خطای احتمالی ایجاد شده به‌وسیله بعضی از سنجنده‌ها را برطرف کند. مسیر و شدت شبیه‌سازی شده برای هر چهار محدوده در حالت انجام داده‌گذاری با استفاده از همه داده‌های ماهواره‌ای و همدیدی موجود، در مقایسه با حالت بدون داده‌گذاری نسبت به داده‌های واقعیت کمترین اختلاف را دارند.

۳-۳ تأثیرگذاری داده‌گذاری بر مسیر و شدت طوفان گونو

در شکل ۶، مسیر، بیشینه سرعت باد تراز ۱۰ متر و کمترین فشار سطحی طوفان شبیه‌سازی شده برای کل آزمایش‌های اجرا شده در این مطالعه نمایش داده شده است. در این قسمت، به تأثیرگذاری داده‌گذاری بر مسیر و شدت طوفان گونو پرداخته می‌شود. موقعیت کمترین فشار سطحی طوفان به فاصله زمانی هر سه ساعت، برای ترسیم مسیرهای شبیه‌سازی شده استفاده شده است. مسیر شبیه‌سازی شده برای محدوده اول که در مقایسه با مسیرهای شبیه‌سازی شده سایر محدوده‌ها در حالت بدون داده‌گذاری بیشترین انحراف را دارد، پس از داده‌گذاری داده‌های ماهواره‌ای و همدیدی، به مقدار زیادی ارتقای کیفیت پیدا کرد. اگر بیست و چهار ساعت اول شبیه‌سازی

هشت شبیه‌سازی انجام شده در این مطالعه، شبیه‌سازی محدوده دوم در حالت بدون استفاده از داده‌گواری در زمان اوج شدت طوفان نزدیک به واقعیت است. پیش‌بینی دقیق دمای سطح دریا در طول مدت شبیه‌سازی با استفاده از مدل اقیانوسی و استفاده کردن مدل جوی از این داده‌ها احتمالاً می‌تواند تا حدودی بر شدت شبیه‌سازی‌ها تأثیر داشته باشد.

آن پرداخته شود. به‌طور کلی با در نظر گرفتن هر چهار محدوده، نتایج شبیه‌سازی‌ها در حالت داده‌گواری به‌طور چشمگیری باعث ارتقای دقت مسیر شده است. نتایج شدت شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که با توجه به مسیر عبوری طوفان روی دریای عمان، شدت شبیه‌سازی‌شده برای محدوده اول در حالت استفاده از داده‌گواری در مقایسه با حالت بدون داده‌گواری در روزهای آخر شبیه‌سازی، مقدارهای بیشتری را نشان می‌دهد. در میان هر



شکل ۶. مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده در حالت بدون داده‌گواری با حالت استفاده از داده‌گواری (الف) بیشینه سرعت باد تراز ۱۰ متر (ب) کمترین فشار سطحی طوفان (ج) مسیرهای شبیه‌سازی‌شده.

۴ نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه در بخش نخست به حساسیت شبیه‌سازی طوفان حاره‌ای گونو به محدوده انتخابی پرداخته شد. با انتخاب چهار محدوده مشخص شد که شبیه‌سازی طوفان حاره‌ای گونو به میزان زیادی به محدوده انتخابی وابسته است. وابستگی شبیه‌سازی‌ها و پیش‌بینی‌های عددی طوفان‌های حاره‌ای به محدوده انتخابی، حتی با وجود اختلاف‌های خیلی کم در محدوده‌ها، به‌نوبه‌خود چالشی خیلی جدی محسوب می‌شود. اگر تغییرات کوچک در محدوده انتخابی شبیه‌سازی در نظر گرفته شود که در شبیه‌سازی‌های همادی رخ می‌دهد؛ یعنی با ایجاد تغییرات جزئی در داده‌های اولیه، تعداد بیشتری پیش‌بینی انجام می‌شود و در نهایت، با در نظر گرفتن همه پیش‌بینی‌ها در محدوده‌های انتخابی مختلف می‌توان یک پیش‌بینی به‌صورت همادی ارائه داد. زمان زیاد صرف‌شده در این روش (شبیه‌سازی همادی)، یک اشکال محسوب می‌شود؛ بنابراین، در این مطالعه در بخش دوم با استفاده از داده‌گذاری داده‌های ماهواره‌ای و هم‌مدیدی موجود نشان داده شد که با استفاده از این روش می‌توان به اندازه زیادی از وابستگی نتایج شبیه‌سازی‌ها به محدوده‌های انتخابی کاست. نتایج به‌طور کلی نشان می‌داد که دقت مسیرهای شبیه‌سازی‌شده در حالت استفاده از داده‌گذاری به اندازه زیادی ارتقاء پیدا می‌کند. در میان همه شبیه‌سازی‌های اجرایشده در این تحقیق، محدوده اول و سوم در حالت استفاده از داده‌گذاری بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی مسیر طوفان گونو داشتند. از آنجاکه دمای سطح دریا تأثیر زیادی بر شدت شبیه‌سازی طوفان دارد و مسیرهای متفاوت، دمای سطح دریای متفاوتی را تجربه می‌کنند؛ اختلاف زیاد در مسیرهای شبیه‌سازی‌شده چه در حالت بدون استفاده از داده‌گذاری و چه در حالت استفاده از داده‌گذاری، به‌نوبه‌خود بر شدت طوفان تأثیرگذار است. صرف‌نظر از اختلاف زیاد در مسیرهای شبیه‌سازی‌شده در

همه شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، شدت طوفان در زمان اوج شدت طوفان در مقایسه با داده‌های مرجع IMD، بیشتر و در مقایسه با داده‌های مرجع JTWC، کمتر پیش‌بینی شد. مدل WRF جفت‌شده با یک مدل اقیانوسی جهت تعیین مقادیر دمای دقیق دمای سطح دریا در طول مدت شبیه‌سازی می‌تواند بر دقت نتایج این مطالعه به‌ویژه شدت طوفان بیفزاید.

منابع

- بهرامی، س.، ۱۳۹۲، کاربرت روش‌های داده‌کاوی در تعیین اثرات طوفان حاره‌ای گونو بر وضعیت هم‌مدیدی در منطقه جنوب و جنوب‌شرق ایران: پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته هواشناسی، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- جعفری، ش.، ۱۳۸۸، بررسی شرایط هم‌مدیدی مؤثر بر شکل‌گیری طوفان حاره‌ای گونو و ورود آن به منطقه دریای عرب: پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته هواشناسی، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی.
- حبیبی، ف.، بهرامی، س.، ۱۳۹۳، تحلیل هم‌مدیدی طوفان حاره‌ای گونو و تأثیر آن بر جنوب‌شرق ایران: مجله ژئوفیزیک ایران، ۸، ۱۶۹-۱۸۹.
- حبیبی، ف.، مزرعه‌فراهانی، م.، مشیری، ب.، نوحه‌گر، ا.، کلهر، ا.، ۱۳۸۹، بررسی اصلاح پیش‌بینی فرایند طوفان حاره‌ای با انتخاب ویژگی‌های مؤثر: مجله ژئوفیزیک ایران، ۳، ۶۷-۸۲.
- خان‌سالاری، س.، مزرعه‌فراهانی، م.، آزادی، م.، ۱۳۹۰، بررسی تغییرات هلیسیتی و شار هلیسیتی در طوفان استوایی گونو، مجله ژئوفیزیک ایران، ۵(۲)، ۹۷-۱۱۵.
- علی‌محمدی، م.، ۱۳۹۱، واکاوی فرایندهای هواشناسی در خلال زندگی طوفان حاره‌ای شدید، شبیه‌سازی

- حساسیت شدت و مسیر یک طوفان حاره‌ای شدید به پارامترسازی‌های شارهای سطحی مدل Advanced Hurricane WRF: جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۹(۹)، ۹۷-۱۱۲.
- Ahrens, D., (1982-2009) *Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment*.
- Alimohammadi, M., and Malakooti, H., 2018, Sensitivity of simulated cyclone Gonu intensity and track to variety of parameterizations: Advanced hurricane WRF model application: *Journal of Earth System Science*, **127**, 41.
- Barker, D., Huang, W., Guo, Y. R., and Bourgeois, A., 2003, A three-dimensional variational (3DVAR) data assimilation system for use with MM5, NCAR Tech. Note, 68.
- Barker, D., Huang, X. Y., Liu, Z., Auligne, T., Zhang, X., Rugg, S., Ajjaji, R., Bourgeois, A., Bray, J., and Chen, Y., 2012, The weather research and forecasting models community variational/ensemble data assimilation system: WRFDA, *Bulletin of the American Meteorological Society*, **93**, 831-843.
- Davis, C., Wang, W., Chen, S. S., Chen, Y., Corbosiero, K., Demaria, M., Dudhia, J., Holland, G., Klemp, J., and Michalakes, J., 2008, Prediction of landfalling hurricanes with the advanced hurricane WRF model: *Monthly Weather Review*, **136**, 1990-2005.
- Davis, C. A., and Bosart, L. F., 2001, Numerical simulations of the genesis of Hurricane Diana (1984), Part I: Control simulation: *Monthly Weather Review*, **129**, 1859-1881.
- Donelan, M., Haus, B., Reul, N., Plant, W., Stiassnie, M., Graber, H., Brown, O., and Saltzman, E., 2004, On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds: *Geophysical Research Letters*, **31**.
- Dudhia, J., 1989, Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model: *Journal of the Atmospheric Sciences*, **46**, 3077-3107.
- Goswami, P., and Mohapatra, G., 2014, A comparative evaluation of impact of domain size and parameterization scheme on simulation of tropical cyclones in the Bay of Bengal: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **119**, 10-22.
- Hong, S. Y., Dudhia, J., and Chen, S. H., 2004, A revised approach to ice microphysical
- موردی و راست‌آزمایی با داده‌های ماهواره‌ای و محلی: پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد رشته هواشناسی، دانشگاه هرمزگان، ۱۲۰ صفحه.
- فراهانی، م.، احمدی، م.، ثقفی، م.، ۱۳۹۴، ارزیابی نیروهای مؤثر بر تشکیل و تقویت طوفان حاره‌ای گونو با استفاده از مدل کیو و بررسی عملکرد مدل‌های عددی در تعیین شدت آن: *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۱(۲)، ۲۷۳-۲۸۰.
- گلشنی، ع.، تائی، س.، ۱۳۸۷، مدلسازی عددی طوفان حاره‌ای گنو و امواج ناشی از آن در دریای عمان: *نشریه مهندسی دریا*، ۷، ۲۵-۳۴.
- لشکری، ح.، کیخسروی، ق.، ۱۳۸۹، تحلیل همدیدی طوفان گنو و اثرات آن بر جنوب شرق ایران: *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳، ۱-۲۰.
- محمدمهدیزاده، م.، کسبی، م.، ۱۳۹۳، پیش‌بینی ارتفاع امواج ناشی از مد طوفان در سواحل ایرانی دریای عمان: *مجله علوم و فنون دریایی*، ۱۳(۱)، ۴۱-۵۰.
- مدهوش، م.، ۱۳۹۳، مطالعه حساسیت شبیه‌سازی‌های طوفان‌های حاره‌ای به پارامترسازی برهم‌کنش جو و اقیانوس: کاربرد مدل جوی WRF جفت‌شده با یک مدل اقیانوسی: پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد رشته هواشناسی، دانشگاه هرمزگان، ۱۱۰ صفحه.
- مشهدی، ل.، حاجی‌زاده ذاکر، ن.، سلطانپور، م.، مقیمی، س.، ۱۳۹۲، شبیه‌سازی عددی امواج و مد ناشی از طوفان گنو در خلیج چابهار: *نشریه مهندسی دریا*، ۱۷، ۳۷-۸۷.
- ملکوتی، ح.، علی محمدی، م.، ۱۳۹۳ الف، شبیه‌سازی طوفان حاره‌ای گونو با استفاده از مدل Advanced Hurricane WRF: حساسیت به طراحی محدوده‌ها، آشیانه‌سازی، تفکیک افقی و زمان شروع: *مجله علوم و فنون دریایی خرمشهر*، ۱۳(۳)، ۱۰۱-۱۱۰.
- ملکوتی، ح.، علی محمدی، م.، ۱۳۹۳ ب، مطالعه

- processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation: *Monthly Weather Review*, **132**, 103-120.
- Huang, X. Y., Xiao, Q., Barker, D. M., Zhang, X., Michalakes, J., Huang, W., Henderson, T., Bray, J., Chen, Y., and Ma, Z., 2009, Four-dimensional variational data assimilation for WRF: Formulation and preliminary results: *Monthly Weather Review*, **137**, 299-314.
- Ide, K., Coutier, P., Ghil, M., and Lorence, A. C., 1997, Unified notation for data assimilation: Operational, sequential and variational (Special Issue on Data Assimilation in Meteorology and Oceanography: Theory and Practice): *Journal of the Meteorological Society of Japan, Ser. II*, **75**, 181-189.
- Indian Meteorological Department (IMD) report, 2008, Report on cyclonic disturbances over north Indian Ocean during 2007, New Delhi.
- Kanase, R., and Salvekar, P., 2011, Numerical simulation of severe cyclonic storm LAILA (2010): Sensitivity to initial and cumulus parameterization schemes, *Proceedings of Disaster Risk Vulnerability Conference*, 165-170.
- Kumar, A., Done, J., Dudhia, J., and Niyogi, D., 2011, Simulations of Cyclone Sidr in the Bay of Bengal with a high-resolution model: sensitivity to large-scale boundary forcing: *Meteorology and Atmospheric Physics*, **114**, 123.
- Large, W., and Pond, S., 1981, Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds: *Journal of Physical Oceanography*, **11**, 324-336.
- Lorenz, A. C., 1986, Analysis methods for numerical weather prediction: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **112**, 1177-1194.
- Mandal, M., Mohanty, U., and Das, A., 2006, Impact of satellite derived wind in mesoscale simulation of Orissa super cyclone.
- Miguez-Macho, G., Stenchikov, G. L., and Robock, A., 2004, Spectral nudging to eliminate the effects of domain position and geometry in regional climate model simulations: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **109**.
- Mawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., and Cough, S. A., 1997, Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the long wave: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **102**, 16663-16682.
- Mohanty, U., and Gupta, A., 1997, Deterministic methods for prediction of tropical cyclone tracks: *Mausam*, **48**, 257-272.
- Mohanty, U., Osuri, K. K., Nadimpalli, R., and Gopalakrishnan, S., 2014, Uncertainty in rainfall prediction of land-falling tropical cyclones over India: Impact of data assimilation: 3rd International Workshop on Tropical Cyclone Landfall Processes (IWTCLP-III), 8-10.
- Mohanty, U., Osuri, K. K., Routray, A., Mohapatra, M., and Pattanayak, S., 2010, Simulation of Bay of Bengal tropical cyclones with WRF model: Impact of initial and boundary conditions: *Marine Geodesy*, **33**, 294-314.
- Mukhopadhyay, P., Taraphdar, S., and Goswami, B., 2011, Influence of moist processes on track and intensity forecast of cyclones over the north Indian Ocean: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **116**.
- Noh, Y., Cheon, W., Hong, S., and Raasch, S., 2003, Improvement of the K-profile model for the planetary boundary layer based on large eddy simulation data: *Boundary-Layer Meteorology*, **107**, 401-427.
- Osuri, K. K., Mohanty, U., Routray, A., Kulkarni, M. A., and Mohapatra, M., 2012, Customization of WRF-ARW model with physical parameterization schemes for the simulation of tropical cyclones over North Indian Ocean: *Natural Hazards*, **63**, 1337-1359.
- Rauscher, S. A., Seth, A., Qian, J. H., and Camargo, S. J., 2006, Domain choice in an experimental nested modeling prediction system for South America: *Theoretical and Applied Climatology*, **86**, 229-246.
- Singh, R., Pal, P., Kishtawal, C., and Joshi, P., 2008, The impact of variational assimilation of SSM/I and QuikSCAT satellite observations on the numerical simulation of Indian Ocean tropical cyclones: *Weather and Forecasting*, **23**, 460-476.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., and Powers, J. G., 2005, A description of the advanced research WRF version 2: National Center for Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale.
- Warner, J. C., Armstrong, B., He, R., and Zambon, J. B., 2010, Development of a coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) modeling system: *Ocean Modeling*, **35**, 230-244.

World Meteorological Organization technical document, 2008, Tropical cyclone operational

plan for the Bay of Bengal and the Arabian Sea, Document No. WMO/TDNo. 84, 1.

Evaluation of three-dimensional variational assimilation on reducing the sensitivity of Tropical Cyclone GONU simulation to selective domains

Mehriar Alimohammad^{1&2}, Hossein Malakooti^{3*}, Maryam Rahbani³ and Majid Azadi⁴

¹ Ph.D.c., Department of Marine science and technology, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

² Lecturer, Imam Khomeini Naval University of Noshahr, Noshahr, Iran

³ Assoc. Prof., Department of Marine science and technology, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

⁴ Assoc. Prof., Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMEC), Tehran, Iran

(Received: 31 January 2019, Accepted: 01 July 2019)

Summary

The dependence of numerical models on the selected domain, in turn, affects the accuracy of prediction and simulation of Tropical Cyclones (TCs) and is considered as a very serious challenge. In the first part of this study, the WRF model was used to determine the sensitivity of the track and intensity of TC GONU to a selective domain. In the second part, the performance of assimilation 3D in order to reduce the dependence of the sensitivity of the TC GONU simulation to the selective domains was evaluated. The GONU was the strongest TC occurred over the Arabian Sea. The peak intensity of TC GONU was estimated 140 knots and 130 knots by Joint Typhoon Warning Center (JTWC) and India Meteorology Department (IMD), respectively. Four domains were separately selected. All of the simulations in this study were initialized at 00 UTC of 2 June for six days. In all simulations, authors used the data from NCEP global final analysis (FNL) on a $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ grid to provide initial and boundary conditions. Despite the little difference in selective domains, the results in the first section showed the simulated tracks differed compared with each other, considerably. For performing simulations in the second part, the QSCAT, BUOY, METAR, SHIPS, SONDE, and SYNOP data to number 2064, 30, 63, 18, 37, and 208, were used, respectively. The results in the second part showed that assimilation of the satellite and synoptic data at the time of the start of the model, lead to improving quality of the first guess data. Therefore, the accuracy of the simulated tracks in all selected domains was enhanced and reduced the sensitivity of TC GONU simulation to the selected domain. Regardless of the great difference in simulated tracks, especially in the case of no use of assimilation, which in turn influences the intensification of the TC, in all of the simulations, the simulated intensity during the intensity peak of the TC is higher compared with the IMD reference data and is less compared with JTWC reference data. Since during the simulations, the sea-surface temperature has been used constantly and on the other hand, the exact values of sea-surface temperature have a significant impact on the intensity of the TC simulation, the WRF model coupled with an ocean model for accurate determination of sea-surface temperature during simulation can improve the accuracy of the results of this study. There is, of course, another way to improve the quality of the results, when results depend on the selective domains. For every domain, one simulation is performed and the average of the simulations is considered (ensemble forecast). The high amount of time spent in this method is considered as serious trouble. It should be noted that in regional models, the sensitivity of simulations to the selected domains is also highly dependent on the boundary conditions, which should be considered.

Keywords: Tropical Cyclone, GONU, data assimilation, WRF

*Corresponding author:

malakooti@hormozgan.ac.ir