

ارزیابی عملکرد طرحواره‌های همرفت کومه‌ای در مدل HWRf در پیش‌بینی مشخصه‌های توفان حاره‌ای، مطالعه موردی توفان حاره‌ای گونو

نقیسه پگاه‌فر*

استادیار، پژوهشکده علوم جوی، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، ایران

(دریافت: ۹۹/۷/۸، پذیرش نهایی: ۹۹/۱۱/۵)

چکیده

حساسیت‌سنجی مدل‌های عددی در پیش‌بینی ویژگی‌های پدیده چرخند حاره‌ای کاری مهم است. در این پژوهش عملکرد ۵ طرحواره پارامترسازی همرفت کومه‌ای شامل BMJ، KF، SAS، SASAS و TiedTKE با اجرای مدل HWRf برای شبیه‌سازی چرخند حاره‌ای گونو بررسی شد. نتایج نشان داد که هیچ یک از طرحواره‌ها انتهای مسیر چرخند را درست پیش‌بینی نکرده و در شرایط شدت بیش از دسته ۳، روند تغییر فشار سطحی و روند باد بیشینه هم درست پیش‌بینی نشد. البته، در شدت‌های کمتر طرحواره SAS دقیق‌ترین نتیجه را تولید کرد. مشابهت قابل‌قبولی میان الگوهای شبیه‌سازی شده و تحلیلی برای نیمرخ‌های قائم دمای پتانسیلی و سرعت افقی مشاهده شد. شدت جریان‌های نزولی و صعودی شبیه‌سازی شده بیش از مقادیر تحلیلی و نزدیک‌تر به مرکز چرخند بودند. طرحواره‌های SAS و SASAS نیز به‌ترتیب با کمترین خطا جریان‌های نزولی و صعودی را تولید کردند. الگوی واگرایی تراز زیرین توسط میدان‌های تحلیلی و شبیه‌سازی شده رؤیت شد، اما همگرایی تراز زیرین در هیچ‌کدام دیده نشد. بیشینه مقدار انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر همرفتی شبیه‌سازی شده نسبت به تحلیلی در فاصله دورتری از سواحل عمان پیش‌بینی شد. تنها طرحواره SASAS توانست شکل‌گیری شدیدترین هسته تاوایی پتانسیلی در نزدیکی سطح را شبیه‌سازی کند. بیشینه مقدار بارش تجمعی پیش‌بینی شده تمام طرحواره‌ها یکسان و نصف مقدار مشاهداتی بود. چینش افقی باد شبیه‌سازی شده توسط هر ۵ طرحواره کمتر از مقادیر تحلیلی بود. در ایستگاه چاهپار، طرحواره‌های KF، TiedTKE و SASAS به‌ترتیب در پیش‌بینی مقادیر سطحی سرعت باد، فشار تراز دریا و دما دقیق‌ترین نتایج را تولید کردند.

واژه‌های کلیدی: مدل HWRf، طرحواره‌های پارامترسازی همرفت کومه‌ای، چرخند حاره‌ای گونو، تاوایی پتانسیلی، بارش.

۱. مقدمه

پیش‌بینی مسیر توفان در سال‌های اخیر، اما هنوز در پیش‌بینی شدت توفان محدودیت‌هایی (از جمله آمار کم و عدم وجود داده با قدرت تفکیک بالا) وجود دارد (امانوئل و ژنگ، ۲۰۱۶). شدت توفان به دینامیک هسته داخلی و فرایندهای فیزیکی در مقیاس‌های کوچک‌تر بستگی دارد که هر دو به‌خوبی در مدل‌ها پارامتره نمی‌شوند (ژنگ و همکاران، ۲۰۱۱-الف). در این بین چگونگی پارامترسازی همرفت کومه‌ای بر پیش‌بینی مسیر و شدت چرخند حاره‌ای و بدنال آن بر عملکرد مدل عددی پیش‌بینی وضع هوا تأثیرگذار است (لی و پو، ۲۰۰۹). انواع مختلفی از طرحواره‌های همرفت کومه‌ای توسعه یافته‌اند که هر یک بسته به شرایط اقلیم و وضع هوا، مزایا و معایب خاص خود را دارند. اغلب تفاوت‌های

چرخندهای حاره‌ای از مخرب‌ترین پدیده‌های هواشناسی هستند که به دلیل ایجاد بادهای قوی، بارش‌های سنگین و آب‌کوه مناطق ساحلی را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند (سینگ و تیاگی، ۲۰۱۸). لازم به ذکر است که نه تنها دینامیک حاکم بر این پدیده با توجه به بستر آبی دارای تنوع قابل‌ملاحظه‌ای است، بلکه این پدیده کنش و برهم‌کنش‌های متقابلی با انواع واداشت‌ها در مقیاس‌های متنوع (از مقیاس سیاره‌ای تا خردمقیاس) نیز دارد. این امر، پیش‌بینی دقیق باد قوی و بارش سنگین ناشی از این پدیده مدل‌سازان را به چالش کشیده است. دقت پیش‌بینی‌ها به نمایش مناسب فرایندهای فیزیکی (سینگ و باسکاران، ۲۰۱۸) و دقت شرایط آغازگری (تورن، ۲۰۱۶؛ سینگ و باسکاران، ۲۰۱۷) بستگی دارد. علی‌رغم بهبود چشم‌گیر

می‌شود. این خطا از طریق میعان در ابرهای سندانی منجر به گرمایش وردسپهر زبرین شده و از سوی دیگر از طریق تبخیر بارشی موجب سرمايش وردسپهر زیرین شده و در نهایت به عملکرد متفاوت آن طرحواره منجر می‌شود.

با توجه به اینکه این پدیده توانسته است بر سواحل جنوبی کشور ایران (به‌ویژه منطقه چابهار) تأثیر گذاشته و هزینه‌های جبران‌ناپذیر اقتصادی بر جامعه وارد کند، لذا بررسی پدیده چرخند حاره‌ای برای کشور ایران نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. در این میان، عدم دسترسی به داده‌های با قدرت تفکیک بالا در زمان چرخندهای حاره‌ای که سواحل ایران را تحت تأثیر قرار داد، ضرورت شناخت فیزیک حاکم بر این پدیده در منطقه دریای عرب استفاده از شبیه‌سازی عددی را قوت می‌بخشد. بنابراین استفاده از یک مدل پیشرفته که دارای هسته‌های دینامیکی و فیزیکی به‌روز است می‌تواند زمینه‌های تحقیقاتی متنوع و گسترده‌ای را ایجاد کند. در این تحقیق تأثیر برخی طرحواره‌های همرفت کومه‌ای از مؤلفه جوی مدل Hurricane Weather Research System (HWRF) (یعنی، مدل WRF-ARW) بررسی می‌شود تا عملکرد هر طرحواره برای یک چرخند حاره‌ای منتخب مشخص شود. در این پژوهش سعی شده تا تأثیر چند طرحواره همرفت کومه‌ای در پیش‌بینی (الف) مسیر و شدت چرخند منتخب و (ب) برخی پارامترهای هواشناسی در زمان اوج شدت چرخند و (ج) پارامترهای متداول هواشناسی در ایستگاه چابهار روشن شود. بدین‌منظور بعد از بیان برخی ویژگی‌های چرخند حاره‌ای منتخب در بخش ۲، ویژگی‌ها و پیکربندی مدل HWRF در بخش ۳، توصیف داده‌های استفاده شده در بخش ۴، نتایج به‌دست آمده حاصل از شبیه‌سازی‌ها در بخش ۵ ارائه می‌شود. در انتها نیز جمع‌بندی نتایج ارائه خواهد شد.

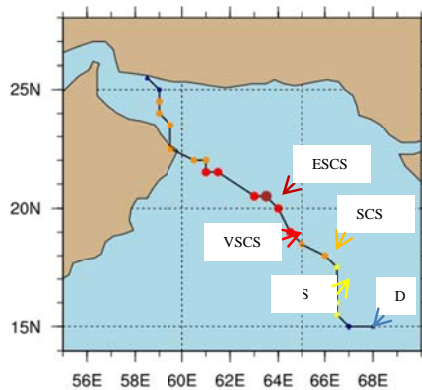
۲. چرخند حاره‌ای منتخب

این تحقیق با تمرکز بر چرخند حاره‌ای گونو (Tropical Cyclone Gonu, TCG) انجام شده است.

به‌دست آمده حاصل از کاربست طرحواره‌های مختلف همرفت کومه‌ای در پیش‌بینی شدت چرخند حاره‌ای عمدتاً ناشی از تفاوت در رفتار بارندگی همرفتی و آزاد شدن گرمای نهان است (کاری آمپوتی و همکاران، ۱۹۹۸). طرحواره‌های همرفت کومه‌ای نه تنها از طریق بارش نقش اساسی در چرخه آب‌شناختی ایفا می‌کنند، بلکه نقش حیاتی در الگوی بزرگ‌مقیاس جریان نیز دارند که از طریق آزاد شدن گرمای نهان، شار گرمای محسوس، شار تکانه و بخار آب محقق می‌شود. از این رو برای بهبود پیش‌بینی وضع هوا و اقلیم، درک عمیق‌تر از برهم‌کنش طرحواره‌های همرفت کومه‌ای با محیط بزرگ‌مقیاس الزامی است. از این‌رو، آزمایش‌های تحقیقاتی بسیاری برای شبیه‌سازی چرخندهای حاره‌ای روی شمال اقیانوس هند برای تعیین بهترین طرحواره با استفاده از انواع مدل‌های میان‌مقیاس اعم از ARW-WRF و WRF-NMM تعریف شده است (کاناسی و سالوکار، ۲۰۱۴؛ سای کومار و رماشری، ۲۰۱۷). در اغلب تحقیق‌های انجام شده طرحواره‌های همرفت کومه‌ای به‌منظور آزمودن مقدار پیش‌بینی شده (الف) تغییرات زمانی بیشینه باد سطحی (Maximum Surface Wind) MSW، آسوری و همکاران، ۲۰۱۷، (ب) کمینه فشار مرکزی MCP (Minimum Central Pressure)، سینگ و همکاران، ۲۰۱۹ و (ج) بارش (فهد و احمد، ۲۰۱۵) بررسی شده‌اند، درحالی‌که بررسی فراتخمین و یا فروتخمین سایر پارامترهای دینامیکی و ترمودینامیکی نیز از ارزش تحقیقاتی خاصی برخوردار است. سان و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که از دلایل اصلی تفاوت عملکرد طرحواره‌های پارامترسازی همرفت کومه‌ای نقش آنها در تولید نیمرخ قائم دما، گرمایش دررو، توسعه افقی و قائم ابرهای سندانی و در نهایت میزان تولید آب شهاب‌ها در منطقه دیواره است. چنان‌چه یک طرحواره پارامترسازی همرفت کومه‌ای همرفت عمیق در منطقه دیواره و به‌دنبال آن توسعه قائم ابرهای سندانی را به‌درستی شبیه‌سازی نکند، شبیه‌سازی گرمای نهان خردفیزیکی با خطا مواجه

دسته ۳) تقویت شود. سپس TCG در UTC ۰۳ روز ۴ ژوئن تا توفان حاره‌ای بسیار شدید (Very Severe Cyclonic Storm, VS-CS، دسته ۴) شدت یافت. در UTC ۱۵ روز ۴ ژوئن در 64°E و 20°N از مرحله چرخند حاره‌ای فوق شدید (Extremely Sever Cyclonic Storm, ESCS، دسته ۵) نیز عبور کرد که در دریای عرب چنین چرخندی برای اولین بار ثبت شد. از آن زمان به بعد TCG وارد مرحله تضعیف شد و در UTC ۰۰ روز ۷ ژوئن در موقعیت جغرافیایی 59°E و 25°N وارد خشکی (سواحل جنوبی ایران) شد و سه ساعت بعد میرا شد. لازم به ذکر است که TCG اولین چرخند حاره‌ای بود که توانسته بود از سال ۱۸۹۸ به سواحل جنوبی ایران برسد. با توجه به رفتار غیر عادی TCG در منطقه (شامل سرعت باد در تراز ۱۰ متری m/s ۷۲/۵ و کمینه مقدار فشار در تراز دریا ۸۹۸ hPa) و با توجه به خسارات زیادی که برجا گذاشته بود (۶۱۰ mm بارش در سواحل شرقی عمان)، در بسیاری از تحقیق‌ها مورد توجه واقع شد (مزرعه فراهانی و همکاران، ۱۳۹۴؛ پگاه‌فر، ۱۳۹۸؛ الله‌دادی و همکاران، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸). فهرست مشخصات TCG در جدول ۱ نشان داده شده است.

شکل ۱ مسیر و شدت TCG را نشان می‌دهد. این شکل با استفاده از داده‌های IMD (India Meteorological Department) تهیه شده است که جزئیات آن در بخش داده‌ها ارائه خواهد شد. شکل‌گیری TCG با تشکیل یک وافشاری (Depression, D) در ۱ ژوئن در ساعت UTC ۱۸ شروع شد که با همرفت چرخندی یا فعالیت توفان تندی و گردش‌های شناخته شده ترازهای میانی همراه بود. از این رو، وافشاری مذکور در UTC ۰۳ روز ۲ ژوئن تا وافشاری عمیق (Deep Depression, DD) شدت یافت. در ابتدا در تراز میانی گردش قابل توجهی همراه این وافشاری نبود، در حالی که واگرایی قوی در مرکز کم‌فشار سطحی وجود داشت. مساعد بودن شرایط محیطی مناسب در ترازهای زیرین جو موجب شکل‌گیری همرفت عمیق در محل شد (دشپنده و همکاران، ۲۰۱۰). بنابراین این وافشاری عمیق در UTC ۰۰ روز ۳ ژوئن به توفان حاره‌ای (Cyclonic Storm, CS، دسته ۲) تبدیل شد که مرکز آن در $66/5^{\circ}\text{E}$ و $15/5^{\circ}\text{N}$ قرار داشت. با عبور از منطقه‌ای که مستعد همرفت عمیق است و وجود آب‌های گرم در سطح موجب شد تا با حرکت TCG در جهت شمال‌غرب، در UTC ۱۸ روز ۳ ژوئن TCG تا درجه توفان حاره‌ای شدید (Sever Cyclonic Storm, SCS،



شکل ۱. مسیر و شدت TCG در بازه ۲ تا ۷ ژوئن ۲۰۰۷ با استفاده از داده‌های IMD. شدت چرخند در بازه‌های زمانی ۶ ساعته با دایره‌های رنگی نشان داده شده است. رنگ آبی تیره نشانه مرحله وافشاری (D)، رنگ زرد نشانه چرخند حاره‌ای (CS)، رنگ نارنجی نشانه چرخند حاره‌ای شدید (SCS)، رنگ قرمز نشانه چرخند حاره‌ای بسیار شدید (VS-CS) و رنگ قهوه‌ای نشانه چرخند حاره‌ای فوق شدید (ESCS) است.

جدول ۱. مشخصات مکانی، شدت، کمینه فشار و بیشینه شدت باد در دوره عمر TCG.

ردیف	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	شدت	سال	ماه	روز	ساعت	فشار (هکتوپاسکال)	سرعت باد ۱۰ متری (متر بر ثانیه)
۱	۱۵	۶۸	D	۲۰۰۷	۶	۱	۱۸۰۰	۱۰۰۲	۱۲/۵
۲	۱۵	۶۸	D	۲۰۰۷	۶	۲	۰	۱۰۰۲	۱۲/۵
۳	۱۵	۶۸	CS	۲۰۰۷	۶	۲	۱۲۰۰	۹۹۲	۲۲/۵
۴	۱۵	۶۷	CS	۲۰۰۷	۶	۲	۱۸۰۰	۹۹۲	۲۲/۵
۵	۱۵/۵	۶۶/۵	SCS	۲۰۰۷	۶	۳	۰	۹۸۸	۲۷/۵
۶	۱۶	۶۶/۵	SCS	۲۰۰۷	۶	۳	۶۰۰	۹۸۸	۲۷/۵
۷	۱۷/۵	۶۶/۵	SCS	۲۰۰۷	۶	۳	۱۲۰۰	۹۸۸	۲۷/۵
۸	۱۸	۶۶	VSCS	۲۰۰۷	۶	۳	۱۸۰۰	۹۸۰	۳۲/۵
۹	۱۸/۵	۶۵	VSCS	۲۰۰۷	۶	۴	۰	۹۷۴	۳۸/۵
۱۰	۱۹	۶۴/۵	ESCS	۲۰۰۷	۶	۴	۶۰۰	۹۵۲	۵۱
۱۱	۲۰	۶۴	ESCS	۲۰۰۷	۶	۴	۱۲۰۰	۹۳۴	۵۷/۵
۱۲	۲۰/۵	۶۳/۵	ECSC*	۲۰۰۷	۶	۴	۱۸۰۰	۹۲۰	۶۳/۵
۱۳	۲۰/۵	۶۳	ESCS	۲۰۰۷	۶	۵	۰	۹۳۶	۵۷/۵
۱۴	۲۱/۵	۶۱/۵	ESCS	۲۰۰۷	۶	۵	۶۰۰	۹۵۰	۵۱
۱۵	۲۱/۵	۶۱	ESCS	۲۰۰۷	۶	۵	۱۲۰۰	۹۶۰	۴۵
۱۶	۲۲	۶۰/۵	VSCS	۲۰۰۷	۶	۵	۱۸۰۰	۹۷۰	۳۸/۵
۱۷	۲۲/۵	۵۹/۵	VSCS	۲۰۰۷	۶	۶	۰	۹۷۰	۳۸/۵
۱۸	۲۳/۵	۵۹/۵	VSCS	۲۰۰۷	۶	۶	۶۰۰	۹۷۰	۳۸/۵
۱۹	۲۴	۵۹	VSCS	۲۰۰۷	۶	۶	۱۲۰۰	۹۷۰	۳۸/۵
۲۰	۲۴/۵	۵۹	VSCS	۲۰۰۷	۶	۶	۱۸۰۰	۹۷۸	۳۲/۵
۲۱	۲۵	۵۹	CS	۲۰۰۷	۶	۷	۰	۹۸۸	۲۲/۵

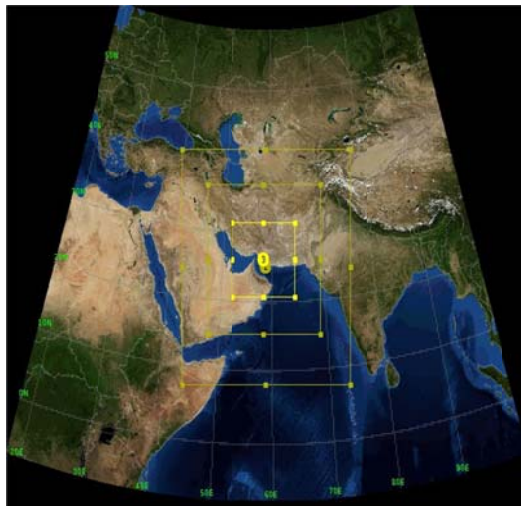
۳. پیکربندی و تنظیمات مدل HWRF

مدل HWRF یک مدل عملیاتی- تحقیقاتی پیش‌بینی وضعیت آب‌وهوا برای توفندها است که توسط NCEP/EMC و با به‌کارگیری مدل پایه WRF پایه‌ریزی و طراحی شد و سپس توسط محققین توسعه یافت (گوپالاکریشنان و همکاران؛ ۲۰۱۰). این مدل در سال ۲۰۰۷ تحقیقاتی شد و برای سه توفند فصلی در سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۶ آزموده شد. در سال ۲۰۱۱ مدل جفت شده HWRF-POM به‌عنوان مدلی برای چرخند حاره‌ای در انجمن علمی آمریکا پذیرفته شد. با حمایت پروژه ارتقاء پیش‌بینی توفند توسط NOAA (پروژه HFIP)، مدل

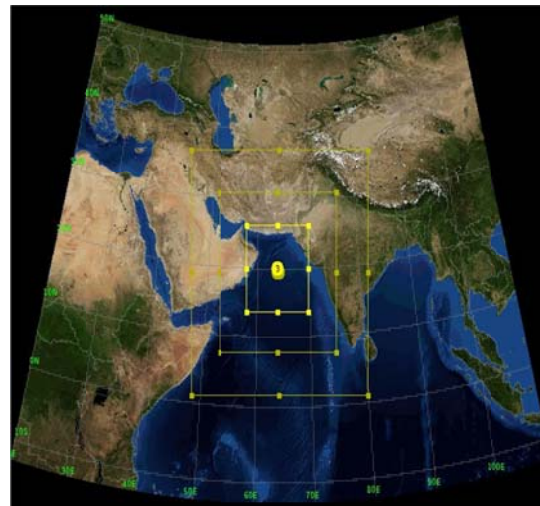
HWRF به سرعت پیشرفت کرد و مهم‌ترین مدل تحقیقاتی- عملیاتی برای چرخند حاره‌ای برای تمام حوضه‌های اقیانوسی شناخته شد. آنچه این مدل را بیش از همه کاربردی کرده است، ویژگی‌های آن است. مدل HWRF یک مدل جفت شده جوی- اقیانوسی است که بر اساس معادلات غیرهیدروستاتیک تهیه شده و مؤلفه‌های جوی آن از هسته دینامیکی مدل میان‌مقیاس و غیرهیدروستاتیکی NMM برگرفته شده است. این مدل قابلیت stagger کردن شبکه و افزایش اندازه آشیانه مادر تا ۸۰ درجه با فاصله شبکه‌ای ۱۸ کیلومتر را دارد. مرکز آشیانه مادر با توجه به مکان چرخند حاره‌ای مشخص

فاصله‌های شبکه‌ای ۹ km و ۳ km انجام شده است (مشابه با پیکربندی انتخاب شده توسط بیسواز و همکاران (۲۰۱۴) برای ۲۵۰ نمونه مطالعه موردی). در جدول زیر تعداد نقاط دامنه مادر و دو شبکه درونی برای هر روز اجرا فهرست شده است. با توجه به دوره عمر شش روزه TCG، برای هر روز آشیانه مجزایی به مرکز TCG در نظر گرفته شد تا از افزایش تعداد نقاط شبکه‌ای و به دنبال آن افزایش هزینه محاسباتی جلوگیری شود. لازم به ذکر است که مدل HWRf یک مدل با هزینه محاسباتی بسیار بالا است و بر روی رایانه‌های شخصی قابل نصب و اجرا نیست. با توجه به محدود بودن تعداد هسته‌های سیستم کامپیوتری در دسترس، افزایش تعداد نقاط شبکه‌ای به گونه‌ای که درونی‌ترین دامنه تمام طول مسیر TCG را پوشش دهد، موجب قطع اجرا می‌شد. از این رو، تنها راه ممکن محدود کردن تعداد نقاط شبکه‌ای در آشیانه‌های دو و سه بود. شکل‌های ۲-الف و ۲-ب به ترتیب چیدمان دامنه‌ها را برای روزهای ۴ و ۷ ژوئن ۲۰۰۷ که به ترتیب مربوط به زمان اوج و میرایی TCG است، نشان می‌دهد.

می‌شود. آشیانه میانی و درونی نیز به ترتیب قابلیت افزایش تا فاصله شبکه‌ای ۶ km و ۲ km را دارند. آشیانه‌ها قابلیت حرکت با حرکت چرخند را هم دارند و از برهم کنش دو طرفه میان آشیانه‌ها استفاده می‌کنند. تعداد تراز قائم انتخابی و وابسته به حوضه است و قابلیت حرکت پس‌سو و پیکربندی با قدرت تفکیک متنوع در این مدل حفظ شده است. این مدل یک مدل هیبریدی است که در مرکز NCEP برای تمامی حوضه‌ها اجرا می‌شود. آغازگری مدل شامل فرایند رشد تاوه و خورداند داده می‌شود. کاربرد مدل برای اهداف کاربردی در منطقه حاره‌ای شامل: (۱) پیش‌بینی وضع هوا در زمان واقعی، (۲) تحقیقات در زمینه‌های مختلف (اعم از پیش‌بینی، پارامترسازی فیزیکی، جفت‌شدگی جو - اقیانوس و آموزش) و (۳) شبیه‌سازی‌های آرمانی است. با توجه به ویژگی‌های مدل HWRf، راه‌اندازی و ارزیابی نتایج شبیه‌سازی‌های آن برای فراهم‌آوردن زمینه‌های تحقیقاتی برای محققین داخلی بسیار مورد ثمر خواهد بود. در این تحقیق آشیانه‌بندی مدل با ایجاد یک دامنه مادر با فاصله شبکه‌ای ۲۷ km و دو آشیانه تودرتو به ترتیب با



(ب)



(الف)

شکل ۲. توزیع دامنه‌های انتخاب شده برای (الف) روز ۴ ژوئن ۲۰۰۷ و (ب) روز ۷ ژوئن ۲۰۰۷، شامل بزرگ‌ترین دامنه با توان تفکیک ۲۷ کیلومتر، دامنه میانی با توان تفکیک ۹ کیلومتر و کوچک‌ترین دامنه با توان تفکیک ۳ کیلومتر.

جدول ۲. تعداد نقاط شبکه‌ای دامنه مادر و آشیانه‌ها برای هر روز اجرای مدل.

تعداد نقاط (nx × ny)			روز (ژوئن ۲۰۰۷)	ردیف
آشیانه درونی (۳ km)	آشیانه میانی (۹ km)	دامنه مادر (۲۷ km)		
۵۴۴×۵۱۴	۲۸۶×۳۸۲	۱۲۸×۱۸۲	دوم	۱
۵۴۴×۵۱۴	۲۸۶×۳۸۲	۱۲۸×۱۸۲	سوم	۲
۲۹۲×۶۴۰	۱۸۴×۳۹۴	۹۴×۲۰۲	چهارم	۳
۳۴۶×۷۰۰	۱۹۶×۳۹۴	۱۰۲×۱۹۴	پنجم	۴
۲۸۶×۷۲۴	۱۷۲×۴۱۲	۸۶×۱۹۶	ششم	۵
۲۸۶×۵۳۸	۱۷۲×۳۶۴	۸۶×۱۹۲	هفتم	۶

در ادامه SAS نامیده می‌شود) و طرحواره Scale Aware SAS (هانا و پن، ۲۰۱۱؛ ییسواز و همکاران، ۲۰۱۶؛ که در ادامه SASAS نامیده می‌شود). طرحواره KF، طرحواره همرفت عمیق و کم عمق است و از روش شار-جرم با فراهنج و مقیاس زمانی حذف CAPE استفاده می‌کند. این طرحواره از پایستاری جرم و مدل یک بعدی درون‌آمیزی-برون‌آمیزی پرشار که فراهنج‌ها را هم همراه فروهنج‌ها پارامترسازی می‌کند، استفاده می‌کند. اختلاط در تمام ترازها در خلال درون‌آمیزی و برون‌آمیزی مجاز است. این طرحواره CAPE را از طریق سازماندهی مجدد جرم در راستای قائم در هر نقطه شبکه حذف می‌کند. این طرحواره شامل تابع هدف همرفتی، فرمولاسیون شار جرم و فرض‌های بستر است. طرحواره BMJ از نوع تنظیمی است و گمانه‌زنی‌ها را در هر نقطه به سمت نیم‌رخ مرجع برای دما و رطوبت ویژه پیش می‌برد. ساختار این طرحواره به گونه‌ای است که در مواردی که مقدار قابل توجهی از رطوبت در ترازهای پایین و میانی و همچنین CAPE مثبت وجود داشته باشد، فعال می‌شود. این نمایش با محدود کردن میدان‌های دما و رطوبت توسط میدان ابر همرفتی انجام می‌شود. این طرحواره تغییر رطوبت کلی را در هر تراز در ستون جو توصیف می‌کند، اما شار قائم رطوبت یا درون‌آمیزی با پرشار همرفتی را توصیف نمی‌کند. طرحواره TiedTKE طرحواره شار-جرم است و سه نوع همرفت اعم از همرفت کم عمق، همرفت میانی و همرفت نفوذی را شامل می‌شود. طرحواره SAS طرحواره

از تمایزهای مهم میان طرحواره‌های پارامترسازی همرفت کومه‌ای تفاوت آنها در تولید شارهای گرما و رطوبت است، زیرا هنگامی که این شارها توسط گردش ثانویه به سمت بالا انتقال می‌یابند، همرفت کومه‌ای عامل مهم شده و بازخورد مثبت پیوسته‌ای بین انتقال قائم شارها، افزایش گرادیان‌های فشار بین مرکز و دیواره و افزایش بادهای سطحی و عمیق‌تر شدن لایه جو رخ می‌دهد (گوپالاکریشنان و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین، طرحواره‌های پارامترسازی همرفت کومه‌ای در برآورد و بازتوزیع آزادشدن گرمای نهان توسط ابرهای کومه‌ای و کومه‌ای‌بارا نقش دارند. آزاد شدن گرمای نهان توسط ابرهای کومه‌ای در خلال میعان و بارش برای حفظ اغتشاش‌های بزرگ مقیاس و جریان‌های میان‌مقیاس ضروری است. در نظر گرفتن گرایش تکانه در یک طرحواره پارامترسازی همرفت موجب ارتقاء پیش‌بینی توفان‌های با شدت کم می‌شود (سینگ و همکاران، ۲۰۱۹). در این تحقیق، در اجرای مدل از ۳۸ تراز قائم فشاری استفاده شد و قله جو در ۵۰ hPa تنظیم شد. همچنین، پنج طرحواره پارامترسازی همرفت کومه‌ای مورد استفاده عبارت بودند از: طرحواره Kain-Fritsch (کین، ۲۰۰۴؛ که در ادامه KF نامیده می‌شود)، طرحواره Betts-Miller-Janjic (جانجیک) ۱۹۹۴ و ۲۰۰۰؛ که در ادامه BMJ نامیده می‌شود)، طرحواره TiedTKE (تیتکه، ۱۹۸۹؛ ژنگ و همکاران، ۲۰۱۱-ب)، طرحواره Simplified Arakawa-Schubert (هانا و پن، ۲۰۱۱؛ که

در کوچک‌ترین دامنه (با توان تفکیک ۳ کیلومتر) دارد و در نهایت بر خردفیزیک تفکیک‌پذیر در کوچک‌ترین دامنه تأثیرگذار است. قابل توجه است که مدل HWRf در شرایطی که مقدار یک میدان در دامنه دوم با میانگین وزنی بین مقادیر دامنه دوم و میانگین نقاط شبکه‌ای در دامنه سوم جایگزین شود، از ۵۰ درصد بازخورد جزئی استفاده می‌کند. بیسواز و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که با عدم‌تثبیت همرفت عمیق در دامنه سوم، خردفیزیک و دینامیک به‌طور دقیق‌تری ساختار دیواره کج شده را تفکیک می‌کند. با اینکه دامنه کوچک‌تر طرحواره همرفت ندارد، دامنه والد برخی اثرات نیمرخ گرما را از پارامترسازی همرفت خود بدلیل بازخورد جزئی حفظ می‌کند و این اثر از طریق مرزهایش منتشر می‌شود. در این تحقیق، دلیل انتخاب طرحواره‌های همرفت کومه‌ای فهرست شده در جدول ۳ نیز اجرای بهتر و عملکرد قابل‌قبول آنها در شبیه‌سازی چرخند است که توسط طراحان مدل HWRf در مستندات علمی مربوط به مدل HWRf معرفی شده است (گوپالاکریشنان و همکاران، ۲۰۱۰؛ بیسواز و همکاران، ۲۰۱۸).

شار-جرم با مؤلفه‌های عمیق و کم‌عمق و انتقال تکانه است. طرحواره SASAS نیز از ویژگی آگاه از مقیاس (scale-aware) برای تعدیل مناطق فراهنج طبق فاصله شبکه‌ای افقی استفاده می‌کند. سایر جزئیات همچون گرایش‌های رطوبت، گرایش‌های تکانه، تابع هدف، بستارها و شار جرم برای هر طرحواره در جدول ۳ ذکر شده است.

سایر ویژگی‌های فیزیکی مدل بدون تغییر حفظ شده‌اند که در جدول ۴ فهرست شده است. از آنجایی که در توان تفکیک‌های بالا (عموماً ۳ کیلومتر و بالاتر) مدل‌ها به‌طور صریح قادر به تشخیص ویژگی‌های همرفت هستند (ویزمن و همکاران، ۲۰۰۸؛ شوارتز و همکاران، ۲۰۱۰)، از این‌رو برای داخلی‌ترین آشیانه هیچ طرحواره همرفتی در نظر گرفته نشد. البته وارنر و سو (۲۰۰۰) و گنتری و لاکمن (۲۰۰۶) اثبات کردند که انتخاب طرحواره همرفت کومه‌ای برای دامنه بزرگ‌تر می‌تواند بر همرفت تفکیک شده در دامنه کوچک‌تر تأثیر قابل توجهی داشته باشد. طبق نتایج بیسواز و همکاران (۲۰۱۴) تغییر طرحواره کومه‌ای در دامنه‌های ۲۷ و ۹ کیلومتر تأثیر چشم‌گیری بر توزیع دما و رطوبت

جدول ۳. جزئیات طرحواره‌های همرفت کومه‌ای.

شماره	نام	گرایش‌های زمانی رطوبت	گرایش‌های زمانی تکانه	تابع هدف	بستار	نوع شار جرم/نوع تنظیمی
۱	KF	Q_i, Q_r, Q_c Q_s	-	حرکت قائم تراز پایین	بستار مقیاس زمانی حذف CAPE	شارجرم: فراهنج، فروهنج، درون‌آمیزی، برون‌آمیزی
۲	TDK	Q_i, Q_c	+	MC		شار جرم: فراهنج، فروهنج
۳	BMJ	-	-	بر اساس عمق ناپایداری ابر	بر اساس تنظیم نیمرخ مرجع متوازن	تنظیمی: واهلش به‌سمت ارسال گمانه همرفتی
۴	SAS	Q_i, Q_c	+	حد فوقانی توقف همرفت	شبه متوازن با ناپایداری بزرگ مقیاس، $d(\text{CAPE})/dt$	شار جرم: فروهنج و تک ابر ساده
۵	SASAS					

جدول ۴. پیکربندی مدل HWRf

		پیکربندی مؤلفه WRF	مؤلفه‌های جوی
	دامنه مدل		
	فاصله افقی شبکه		
۳۸	تعداد تراز قائم		
۱ ساعته	گام زمانی		
rotated_ll (Lat-Lon)	MAP projection		
Arakawa E-grid	سامانه شبکه افقی		
تفاضل گیری مرکزی مرتبه شش‌م	طرحواره تفاضل گیری مکانی		
GFDL	طرحواره‌های پارامترسازی تابش (موج- کوتاه و موج بلند)		
Eta	طرحواره لایه سطحی		
Noah	مدل سطح خشکی		
Mellor-Yamada-Janjic	طرحواره لایه مرزی		
Ferrier-Aligo	خردفیزیک		
طرحواره KF طرحواره BMJ طرحواره SAS طرحواره SASAS طرحواره Tiedtke	پارامترسازی همرفت		
icloud isfflx	سایر گزینه‌های استفاده شده		
		آغازگری تاوه	
-	تنظیم تاوه		
+	جایابی مجدد تاوه		
		مؤلفه‌های اقیانوسی	
	برگرفته از GDEM climatology		
	شمال اقیانوس هند	آغازگری اقیانوس	

(وو و همکاران، ۲۰۰۶). فرایند آغازگری چرخند حاره‌ای در مدل HWRf به‌طور خودکار انجام می‌شود و فقط مراحل پیش‌پردازش برای هر اجرا بایستی توسط کاربر انجام شود. در فرایند آغازگری چنان‌چه مدل در داده‌های تحلیلی GFS تاوه‌ای را تشخیص دهد آن را حذف می‌کند و سپس با استفاده از داده‌های در دسترس و پیش‌بینی شده تاوه‌ای را تولید می‌کند. این تاوه برخلاف تاوه‌های حقیقی متقارن است. در این تحقیق برای هر روز اجرا یکپارچه‌سازی (spin-up) به مدت شش ساعت لحاظ شده

آغازگری چرخند حاره‌ای در مدل HWRf شامل چهار مرحله مهم است: (۱) درون‌یابی میدانهای تحلیل جهانی از GFS به شبکه مدل HWRf، (۲) حذف تاوه GFS از تحلیل جهانی، (۳) افزودن تاوه ترکیبی متقارن-محور (که بر اساس مجموعه‌ای از پیش‌بینی‌های مدل HWRf ساخته شده است) و (۴) افزودن از طریق گوارد داده برای هر نوع داده مشاهداتی در دسترس در مجاورت چرخند. گام‌های ۳ و ۴ در خلال فرایند قراردادی آغازگری چرخند حاره‌ای GFDL پیشرفت‌های بزرگی ایجاد کرده است

است. داده‌های بهترین برازش مسیر چرخند از IMD استخراج شده است. اعتبار و دقت داده‌های IMD برای تحقیق در زمینه چرخندهای حاره‌ای در منطقه شمال اقیانوس هند به اثبات رسیده است (داس و همکاران، ۲۰۱۵؛ آسوری و همکاران، ۲۰۱۷؛ سینگ و همکاران، ۲۰۱۹). طبق دسته‌بندی IMD برای شدت چرخندهای حاره‌ای، دسته‌بندی سرعت باد ۱۰ متری (Wind Speed, WS) در هر دسته به شرح زیر است: $27 < WS(\text{knots}) < 27$: DD, $28 < WS(\text{knots}) < 33$: CS, $34 < WS(\text{knots}) < 47$: SCS, $48 < WS(\text{knots}) < 63$: VSCS, $64 < WS(\text{knots}) < 89$: ESCS و $90 < WS(\text{knots}) < 119$: جمعی شیه‌سازی شده از داده‌های Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) 3B42 استفاده شده است. تمامی داده‌ها در بازه زمانی دوره عمر TCG استفاده شده‌اند.

لازم به ذکر است که برای بررسی جامع TCها، پارامترها در دو منطقه هسته درونی (شامل چشم و دیواره TC) و محیط اطراف TC مطالعه می‌شوند. به‌طور عمومی، برای مطالعه هسته درونی از اطلاعات موجود در مربعی به ابعاد $2^\circ \times 2^\circ$ به مرکز TC استفاده می‌شود (مارین و همکاران، ۲۰۰۹؛ بگه‌فر و قرایلو، ۲۰۲۰). برای مطالعه محیط اطراف TC نیز، اطلاعات از مربعی به ابعاد $10^\circ \times 10^\circ$ به مرکز TC استخراج می‌شود (تانگ، ۲۰۱۰)، زیرا این منطقه به اندازه کافی از اثرات میان‌مقیاس پیرامون TC دور است. در این تحقیق نیز سعی شده تا عملکرد مدل HWRf در هر دو منطقه هسته درونی و محیط اطراف TCG مطالعه شود. این امر موجب بالا رفتن تعداد نقاط شبکه و بزرگ‌شدن دامنه‌ها شد. البته برای برآورد دقت مدل در تخمین مسیر و شدت TC و همچنین پارامترهایی که مربوط به هسته درونی TC هستند، نیاز است تا اطلاعات از درونی‌ترین آشیانه استخراج شود که در این تحقیق این موضوع رعایت شده است (مشابه با روش اتخاذ شده توسط بیسواز و همکاران، ۲۰۱۴).

است. لازم به ذکر است که نسخه عمومی این مدل برای منطقه شمال اقیانوس هند فقط یک گزینه برای مؤلفه اقیانوسی دارد (Message Passing Interface Princeton Ocean Model-Tropical Cyclone, MPIPOM-TC). آغازگری آن فقط با داده‌های ماهانه دما و شوری GDEM انجام می‌شود. در این تحقیق مدل HWRf با هسته سرد اجرا شد. همچنین به‌غیر از اجرای اولیه، فرایند بازنشانی تاوه انجام شد تا تاوه موجود در داده‌های GFS حذف شود و در هر زمان از تاوه‌ای که توسط مدل HWRf در زمان پیشین تولید شده بود، استفاده شده است.

۴. داده‌ها و روش کار

زمان آغازگری در هر اجرا ۱۸ UTC روز قبل است و طول یکپارچه‌سازی (spin-up) مدل ۶ ساعت است. برای شرایط مرزی و آغازگری مدل از داده‌هایی با توان تفکیک $1^\circ \times 1^\circ$ از مجموعه داده‌های تحلیلی (NCEP-National Centre for Environmental Prediction-Global Forecast System) استفاده شده و شرط مرز جانبی هر ۶ ساعت به روز شده است. روشن است که مدل‌های عددی به داده‌های به‌کار رفته برای آغازگری حساس هستند. به‌طور نمونه، دیویس و همکاران (۲۰۰۸) نتایج حاصل از آغازگری مدل WRF را با استفاده از داده‌های GFS تحلیلی و داده‌های GFS پیش‌بینی مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که کاربست داده‌های GFS تحلیلی نسبت به داده‌های GFS پیش‌بینی به مراتب خطای کمتری تولید می‌کند. از آنجایی که یکی از اهداف این تحقیق، روشن کردن نقش طرحواره‌های پارامترسازی همرفت به‌کار رفته در مدل HWRf در مشخصات TCG بود، استفاده از داده‌های GFS تحلیلی در اولویت قرار گرفت. لازم به ذکر است که طبق دستورالعمل معرفی شده توسط طراحان HWRf، استفاده از داده‌های GFS جزو تنظیمات مدل است. برای توپوگرافی دامنه‌های مدل از داده‌های United States Geological Survey (USGS) با توان تفکیک ده دقیقه برای دامنه بزرگ‌تر و توان تفکیک ۳۰ ثانیه برای دامنه کوچک‌تر استفاده شده

۵. نتایج و بحث

هدف از این تحقیق این است که عملکرد طرحواره‌های مختلف همرفت کومه‌ای مدل HWRf در بازتولید مشخصات TCG نسبت به اطلاعات موجود در داده‌های تحلیلی GFS روشن شود. در برخی موارد هم که داده‌های مشاهده‌ای و یا تحلیلی وجود نداشته باشد، نتایج شبیه‌سازی‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شود. در انتها نیز با توجه به تأثیرپذیری سواحل جنوبی ایران از TCG، نتایج شبیه‌سازی‌های ۵ طرحواره همرفت کومه‌ای مدل HWRf در ایستگاه چابهار با مقادیر مشاهده‌ای ارزیابی می‌شود. بدین منظور کمیت‌های سرعت باد در تراز ۱۰ متری، فشار در تراز دریا، شعاع باد بیشینه، دمای پتانسیلی، تاوایی پتانسیلی و گرایش زمانی آن، انرژی پتانسیل دسترس‌پذیر همرفتی (Convective Available Potential Energy, CAPE)، بردار باد (مولفه‌های افقی و قائم)، چینش قائم باد افقی، بارش و بازتاب راداری بررسی و تحلیل می‌شوند.

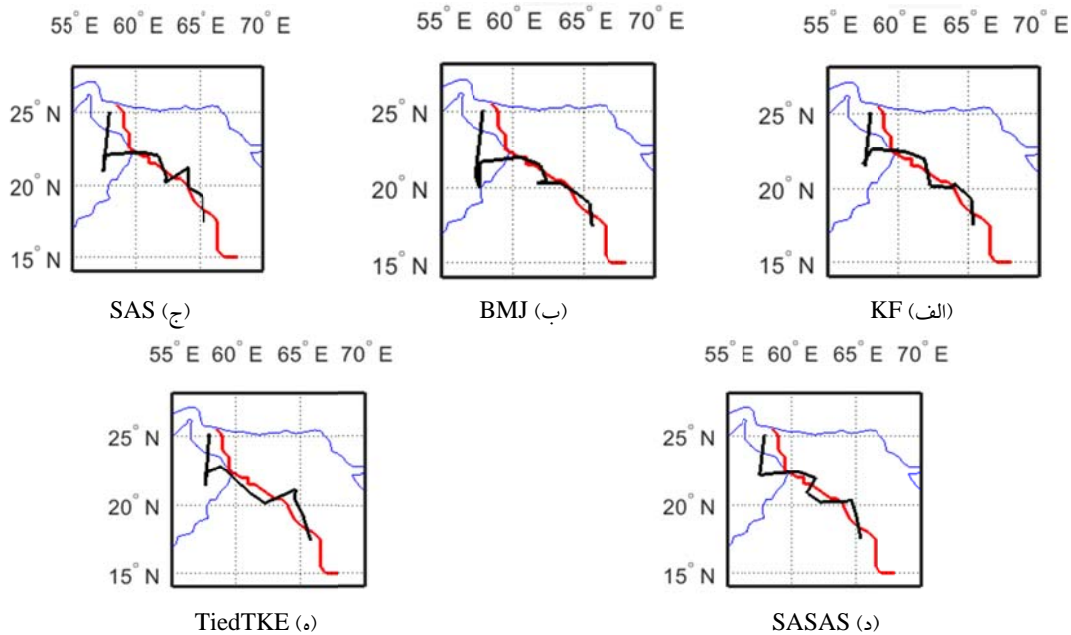
دلیل انتخاب تاوایی پتانسیلی این است که این پارامتر قابلیت استفاده در پیش‌بینی مسیر TC را دارد (وو و ونگ، ۲۰۰۰)، زیرا TC به سمت مقادیر مثبت گرایش تاوایی پتانسیلی که نشانه افزایش همرفت است حرکت می‌کند. از طرفی بررسی تغییر تاوایی پتانسیلی در تراز ۵۰۰ hPa و سطوح زیرین می‌تواند در پیش‌بینی توسعه و شدت TC مؤثر باشد (آلاکا و همکاران، ۲۰۱۷؛ کاریو و همکاران، ۲۰۱۷). ستون حلقوی تاوایی پتانسیلی در منطقه دیواره، ناشی از همرفت مرطوب، با فرایندهای متقارن و نامتقارنی که در شدت TC نقش دارند، مرتبط است. با افزایش اختلاط درون‌سوی تاوایی پتانسیلی از منطقه چشم‌چرخند به سمت منطقه دیواره، کج‌شدگی قائم TC و به دنبال آن شدت TC کاهش می‌یابد (یانگ و همکاران، ۲۰۰۷). از آنجایی که اطلاعات توزیع قائم تاوایی پتانسیلی دید کلیدی از تحول زمانی توزیع قائم TC فراهم می‌کند، شبیه‌سازی تاوایی پتانسیلی در نزدیکی مرکز TC نقش اساسی در بررسی توانایی بازتولید شدت در طی فرایند

توسعه TC بازی می‌کند (دیویس و بوزارت، ۲۰۰۲). لذا، توانایی یک طرحواره در تشخیص برهم‌کنش چندمقیاسی (از بزرگ‌مقیاس تا مقیاس تفکیک تاوه) به همراه الگوی جریان باد می‌تواند در افزایش دقت شبیه‌سازی مسیر و شدت به کار آید. یکی دیگر از پارامترهایی که در چرخندزایی حاره‌ای نقش به‌سزایی ایفا می‌کند، چینش قائم باد است که با اختلاف بردار باد بین دو تراز ۸۵۰ و ۲۰۰ هکتوپاسکال محاسبه می‌شود. اگر تأثیر چینش و بدنبال آن کاهش آنتروپی از بین برود، موتور گرمایی TC به بیشینه کارآیی خود رسیده و TC تا شدیدترین حالت ممکن تقویت می‌شود. مشاهدات و شبیه‌سازی‌ها نشان داده‌اند که اگر چینش به اندازه کافی قوی باشد می‌تواند از توسعه تاوه اولیه جلوگیری کند، در حالی که چینش قائم ضعیف بردار باد از طریق ایجاد حرکات صعودی در مقیاس همدیدی به‌ویژه در محیط کژفشار به چرخندزایی کمک می‌کند (نولان و مک گالی، ۲۰۱۲). چینش قائم باد نه تنها حرکت بالاسو (در منطقه چینش پایین‌سو) و هم حرکت پایین‌سو (در منطقه چینش بالاسو) را تولید می‌کند، بلکه موجب کج‌شدگی تاوه می‌شود و با تولید گردش عمودی ثانویه‌ای سعی می‌کند تا جریان را متوازن نگه دارد (جونز، ۲۰۰۰). اهمیت بررسی توزیع دمای پتانسیلی با توجه به تأثیر آن بر شارهای گرما در خلال چرخندهای حاره‌ای در مطالعات هیل و لاکمن (۲۰۰۹) روشن می‌شود، زیرا گرایش و ساختار قائم دما در اجزای مختلف متفاوت است و در تشخیص هسته گرم به کار می‌آید (لی و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین توزیع دمای پتانسیلی به منظور بررسی همرفت مرطوب قائم، تفکیک تاوه هسته گرم و شناسایی انتقال قائم گرما به ترازهای زیرین به کار می‌رود (بیسواز و همکاران، ۲۰۱۴). از دیگر کاربردهای دمای پتانسیلی، استفاده از آن در محاسبه آنتالپی است که در بررسی‌های ترمودینامیکی چرخند حاره‌ای حائز اهمیت است (دیویس و همکاران، ۲۰۰۸).

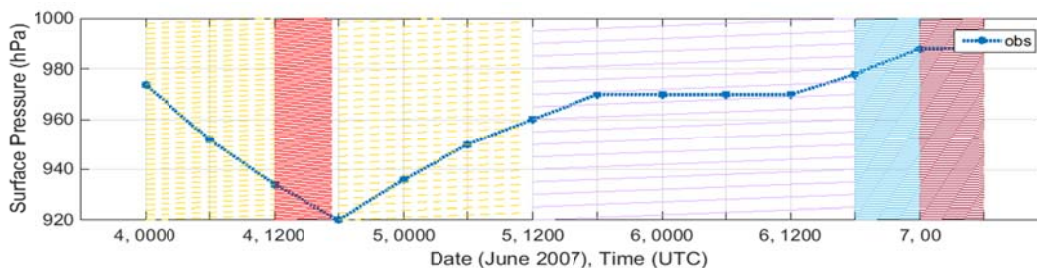
۱-۵. مسیر و شدت TCG

برای محاسبه شدت، بیشینه مقدار سرعت باد در تراز ۱۰ متری مورد توجه قرار گرفته و مسیر چرخند نیز با استفاده از مکان کمینه مقدار فشار در تراز دریا، که نشانه مکان چشم چرخند (TC eye) است، مشخص شده است. مقادیر مشاهداتی نیز از گزارش‌های IMD استخراج شده است. در شکل ۳ مسیر TCG مشاهداتی و پیش‌بینی شده توسط هر یک از طرحواره‌های همرفت کومه‌ای به تصویر کشیده شده است. علی‌رغم اختلاف میان مسیرهای پیش‌بینی شده حاصل از کاربری انواع طرحواره‌های همرفت کومه‌ای با مسیر مشاهداتی، جالب توجه است که در هیچ یک از مسیرهای پیش‌بینی شده رسیدن TCG به سواحل جنوبی ایران پیش‌بینی نشد. نکته قابل ذکر دیگر این است که هر ۵ طرحواره مسافت ورود به سواحل عمان را بیش از واقعیت پیش‌بینی کرده‌اند. بررسی اختلاف مسیر مشاهداتی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط طرحواره‌های KF, BMJ, SAS, SASAS و TiedTKE به ترتیب برابر $1/852 \times 10^3$, $2/350 \times 10^3$, $1/994 \times 10^3$

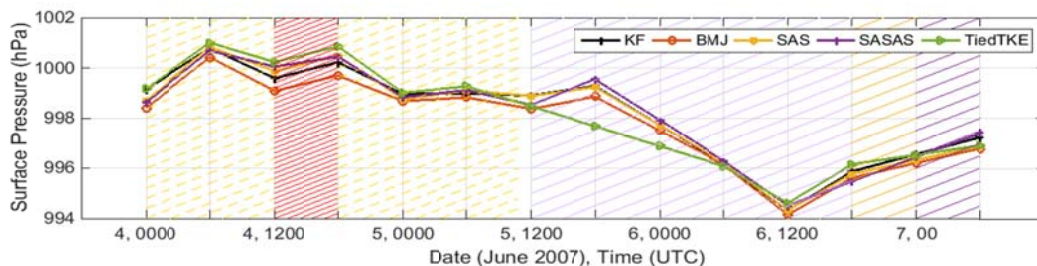
به‌منظور ارزیابی عملکرد طرحواره‌ها در پیش‌بینی شدت TCG، کمینه فشار پیش‌بینی شده توسط هر یک از طرحواره‌ها به همراه مقدار مشاهداتی در شکل ۴ نشان داده شده است. به‌وضوح روشن است که هیچ یک از پنج طرحواره نه روند کاهش فشار و نه مقدار این کاهش را درست پیش‌بینی کرده‌اند. مقدار مشاهداتی که از داده‌های IMD برگرفته شده است مقدار اُفت فشار تا ۹۲۰ hPa را در ۱۸ UTC روز ۴ ژوئن ثبت کرده و قبل و بعد از این زمان نیز به ترتیب روند نزولی و صعودی برای فشار مشاهده شده است. بعد از ۱۸ UTC روز ۵ ژوئن نیز مقدار فشار به مدت ۱۸ ساعت ثابت مانده و سپس به مدت ۱۲ ساعت افزایش یافته و دوباره ثابت شده است. در حالی که، حداقل مقدار فشار حاصل از شبیه‌سازی‌ها در ۱۲ UTC روز ۶ ژوئن به مقدار ۹۹۴ hPa بوده است، تا قبل از این زمان نیز هر پنج طرحواره روند نسبتاً نزولی با اُفت و خیزهایی را نتیجه داده‌اند و بعد از این زمان نیز روند افزایشی را پیش‌بینی کرده‌اند.



شکل ۳. مسیر پیش‌بینی شده توسط طرحواره‌های (الف) KF، (ب) BMJ، (ج) SAS، (د) SASAS و (ه) TiedTKE با توان تفکیک ۳ کیلومتر. مسیر مشاهداتی مرکز TCG با رنگ قرمز نشان داده شده است. مسیر مشاهداتی شامل وافشاری و وافشاری عمیق نیز می‌باشد (برگرفته از داده‌های IMD)، اما مسیرهای پیش‌بینی شده از زمانی است که TCG وارد مرحله چرخندی شد.



(الف)



(ب)

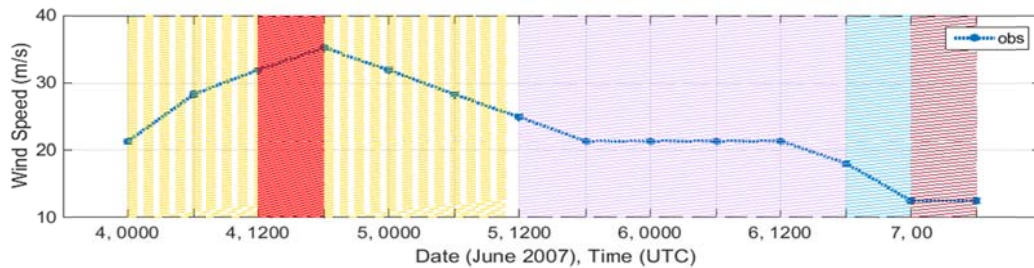
شکل ۴. سری زمانی کمینه مقدار فشار مشاهداتی (الف) و پیش‌بینی شده توسط طرحواره‌های KF, BMJ, SAS, SASAS و TiedTKE با تفکیک ۳ کیلومتر (ب). در هر دو زیرشکل مناطق هاشور خورده به‌ترتیب از سمت چپ دسته ۵، حالت آبرچرخند، دسته ۵، دسته ۴، دسته ۳ و دسته ۲ را برای شدت TCG طبق تعریف IMD نشان می‌دهد.

مقدار سرعت باد ۱۰ متری مشاهداتی و پیش‌بینی شده توسط ۵ طرحواره همرفت کومه‌ای مدل HWRf نشان داد که در شدت‌های بالا مدل HWRf قادر به پیش‌بینی درست بیشینه مقدار سرعت باد ۱۰ متری نبوده و با رسیدن به دسته‌هایی با شدت کمتر به‌ترتیب دو طرحواره TiedTKE و SAS نتایج بهتری داشته‌اند. لازم‌به‌ذکر است که در سایر تحقیقات انجام شده در شمال اقیانوس هند نیز فروتخمین مقدار سرعت باد با کاربست انواع طرحواره‌های پارامترسازی همرفت برای توفان‌های شدید ثبت شده است و نشان داده شده که چنانچه در طرحواره پارامترسازی همرفت گرایش تکانه در دسترس باشد، توسعه توفان‌های با شدت کمتر بهتر پیش‌بینی می‌شود، نسبت به طرحواره‌های با گرایش‌های بدون تکانه (سینگ و همکاران، ۲۰۱۹). به‌طور کلی، تشابه نمودارهای شبیه سازی شده سرعت باد ۱۰ متری توسط ۵ طرحواره و تفاوت آنها با مقادیر مشاهداتی (گزارش شده توسط IMD) ممکن است به دلیل تأثیر طرحواره‌هایی باشد که در تمام اجراها بدون تغییر بوده‌اند، همچون طرحواره لایه

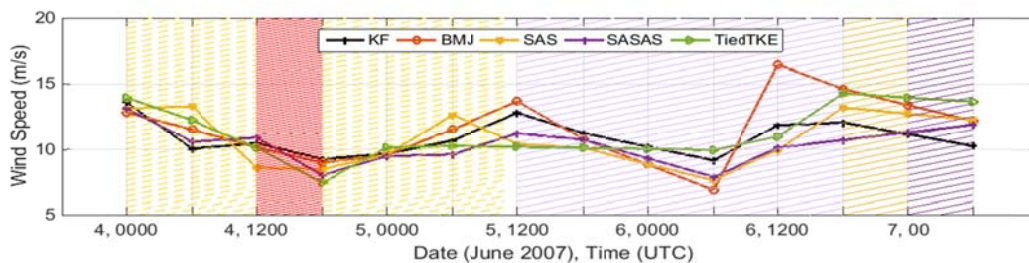
در شکل ۵ مقادیر مشاهده شده بیشینه سرعت باد در تراز ۱۰ متری در بازه‌های زمانی ۶ ساعته که توسط IMD گزارش شده است با مقادیر پیش‌بینی شده به تصویر کشیده شده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، به‌غیر از یک مورد، بیشینه مقدار سرعت باد پیش‌بینی شده توسط هر پنج طرحواره در تمام زمان‌ها کمتر از ۱۵ متر بر ثانیه بوده است، در حالی که مقادیر مشاهداتی بیشینه سرعت باد ۱۰ متری گزارش شده توسط IMD تا 35 m/s نیز رشد داشته است. روند سری‌های زمانی مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده بیشینه سرعت باد ۱۰ متری تا قبل از UTC ۱۲ روز ۵ ژوئن به‌طور کامل معکوس بوده‌اند. از این زمان با رسیدن شدت TCG به دسته ۴ طرحواره TiedTKE رفتار مشابه‌تری به روند مشاهداتی نشان داده است. با ورود TCG به دسته‌های شدت ۳ و ۲، هم رفتار و هم مقدار بیشینه سرعت پیش‌بینی شده نسبت به مقدار مشاهداتی همخوانی مناسبی را نشان داد که از بین آنها طرحواره SAS کمترین اختلاف را با مقادیر مشاهداتی تولید کرده است. مقایسه مقادیر و روند بیشینه

عملکرد طرحواره‌های همرفت در مدل HWRf با یکدیگر، این کمیت پیش‌بینی شده با استفاده از خروجی‌های مدل محاسبه شده و در شکل ۶ ترسیم شده است. همان‌طور که شکل ۶ نشان می‌دهد حداکثر شعاع پیش‌بینی شده برای TCG نزدیک ۶۰ km بوده است که مبین کوچک بودن این چرخند است. رفتار هر ۵ طرحواره هنگام گذر از شدت دسته ۵ و رسیدن به حالت آبرچرخند با کاهش شعاع باد بیشینه همراه است که طبق انتظار است. در کل با کاهش شدت چرخند انتظار می‌رود که شعاع باد بیشینه افزایش یابد. شروع زمان این روند افزایشی در کاربری طرحواره‌های مختلف، متفاوت است. این روند با کاربری طرحواره TiedTKE در زمان ۰۰ UTC روز ۵ شروع شده در حالی که با کاربری چهار طرحواره دیگر این روند افزایشی با تأخیر ۶ ساعته شروع شده است. در اواخر دوره عمر TCG نیز مقدار شبیه‌سازی شده شعاع باد بیشینه کاهش شدیدی پیدا کرده است که می‌تواند به دلیل عدم کارایی روابط محاسباتی شعاع باد بیشینه باشد. البته، با توجه به در دسترس نبودن مقادیر مشاهداتی امکان اظهار نظر قطعی در این زمینه وجود ندارد.

مرزی MYJ. البته هیل و لاکمن (۲۰۰۹) نشان دادند که تمایز میان عملکرد طرحواره MYJ با Yonsei (YSU) University Scheme در سرعت‌های کمتر از ۱۰ متر بر ثانیه قابل توجه است. آسوری و همکاران (۲۰۱۲) تفاوت عملکرد MYJ و YSU را برای پیش‌بینی سرعت باد در تراز ۱۰ متری ۲ m/s و برای فشار تراز دریا ۲ hPa ارزیابی کردند. همچنین بانو و همکاران (۲۰۱۲) حساسیت به طرحواره لایه مرزی برای شبیه‌سازی چرخند حاره‌ای را بررسی کردند و نشان دادند که با تعدیل طرحواره‌های MYJ و YSU برای طول‌های زبری اقیانوس نتایج به مشاهدات نزدیک‌تر می‌شود. گویالاکریشنان و همکاران (۲۰۱۳) نیز نشان دادند که با تغییر پخش پیچکی در طرحواره لایه مرزی نتایج به مشاهدات نزدیک‌تر می‌شود. لازم به ذکر است که تعدیل طرحواره لایه مرزی و ارزیابی عملکرد سایر طرحواره‌هایی که در این تحقیق ثابت در نظر گرفته شده‌اند، فراتر از اهداف این تحقیق است. در داده‌های مشاهداتی شعاع باد بیشینه (فاصله میان مرکز چرخند و مکان شدیدترین باد تراز ۱۰ متری در پیرامون مرکز چرخند) گزارش نشده است، اما برای مقایسه

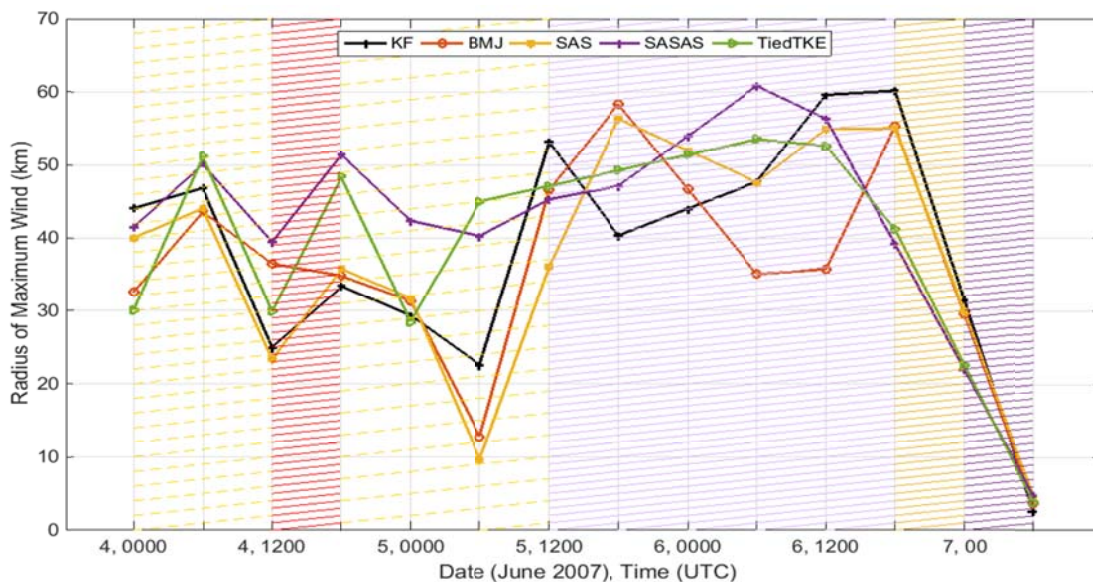


(الف)



(ب)

شکل ۵. سری زمانی مقدار سرعت باد بیشینه مشاهداتی گزارش شده توسط IMD (الف) و حاصل از شبیه‌سازی‌های طرحواره‌های همرفت کومه‌ای مدل HWRf با کاربری طرحواره‌های KF, BMJ, SAS, SASAS و TiedTKE با توان تفکیک ۳ کیلومتر (ب). در هر دو زیرشکل مناطق هاشور خورده به ترتیب از سمت چپ دسته ۵، دسته ۴، دسته ۳ و دسته ۲ را برای شدت TCG طبق تعریف IMD نشان می‌دهد.



شکل ۶. سری زمانی شعاع باد بیشینه شبیه‌سازی شده با کاربری ۵ طرحواره همرفت کومه‌ای با توان تفکیک ۳ کیلومتر. مناطق هاشور خورده به ترتیب از سمت چپ دسته ۵، حالت آب‌چرخند، دسته ۵، دسته ۴، دسته ۳ و دسته ۲ را برای شدت TCG طبق تعریف IMD نشان می‌دهد.

حسب کیلومتر در محور افقی لحاظ می‌شود. در حالی که در این بررسی وسط محور افقی مکان TCG را نشان می‌دهد. برای رفع نکته دوم خط عمودی در تمام زیرشکل‌ها ترسیم شده که مکان TCG را نشان می‌دهد. لذا برای تعیین فاصله در شرق و غرب خط عمود به ترتیب باید قدر مطلق شعاع از مقدار ۵۰۰ km در نظر گرفته شود.

۵-۲-۱. تاوایی پتانسیلی

نیمرخ قائم تاوایی پتانسیلی (سایه-روشن) در راستای طول جغرافیایی با استفاده از داده‌های تحلیلی GFS و نتایج حاصل از کاربری ۵ طرحواره همرفت کومه‌ای در مدل HWRP در ۱۸ UTC روز ۴ ژوئن در شکل ۷ نشان داده شده است. شکل ۷-الف نشان می‌دهد که حداکثر تا شعاع ۱۵۰ km از مرکز TCG ($63^{\circ} E$) تاوایی پتانسیلی تحلیلی در سطوح زیرین و ردسپهر (زیر ۸۵۰ hPa) مقدار کوچک‌تر از ۱/۵ PVU دارد، در حالی که در فواصل کمتر از ۵۰ km در شبیه‌سازی با کاربری طرحواره‌های همرفت کومه‌ای حتی مقادیر کمتر هم مشاهده می‌شود. به‌طور مثال تا شعاع‌های ۱۳۰، ۵۰، ۱۰، ۲۰ و کوچک‌تر از ۱۰ کیلومتر، به ترتیب در شبیه‌سازی‌های انجام شده با استفاده

۵-۲. مقایسه با داده‌های تحلیلی و ماهواره TRMM

برای روشن شدن اینکه آیا کاربری مدل HWRP به درک برهم‌کنش‌های چندمقیاسی و ارتقاء شناخت فیزیک حاکم بر پدیده در طول شبیه‌سازی کمک می‌کند و اینکه آیا به تفکیک بهتر فرایندهای همرفتی در داخل تاوه منجر می‌شود یا نه، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها با پارمترهای مستخرج از میدآنهای تحلیلی که به‌عنوان شرایط مرزی و اولیه استفاده شده بود، مقایسه می‌شود. این روش توسط ڈلدا و همکاران (۲۰۱۱)، چن و گوپالاکریشنان (۲۰۱۵) و آلاکا و همکاران (۲۰۱۷) نیز به‌کار گرفته شده بود. قابل توجه است که مدل HWRP از شبکه E-staggered با rotated latitude-projection برای استخراج longitude استفاده می‌کند. نرم‌افزار مناسب برای استخراج پارمترهای مورد نیاز از خروجی‌های مدل HWRP، نرم‌افزار RIP است. یکی از ایرادات این نرم‌افزار تداخل برچسب‌های محور افقی در ترسیم شکل‌های نیمرخ قائم است. نکته دیگر اینکه در این نرم‌افزار برای ترسیم نیمرخ قائم بایستی طول و عرض جغرافیایی نقطه ابتدایی و انتهایی خطی که در آن راستا نیمرخ قائم ترسیم می‌شود، تعیین شود و بعد از ترسیم شکل از سمت چپ شعاع بر

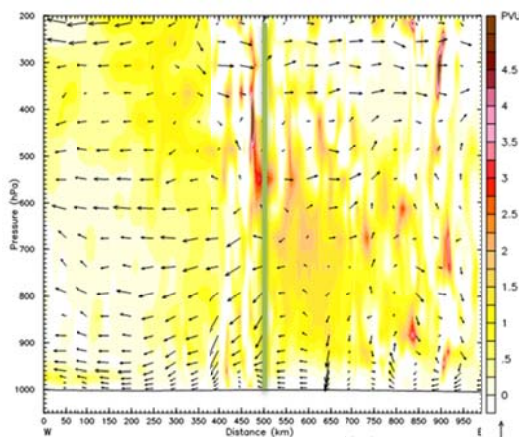
طرحواره TiedTKE تاوایی پتانسیلی با بیشترین گستره قائم به‌ویژه در ترازهای بالاتر از ۳۰۰ hPa را تولید کرد، در حالی که بیشترین توسعه شعاعی با کاربست طرحواره BMJ تولید شده است.

۲-۲-۵. دمای پتانسیلی

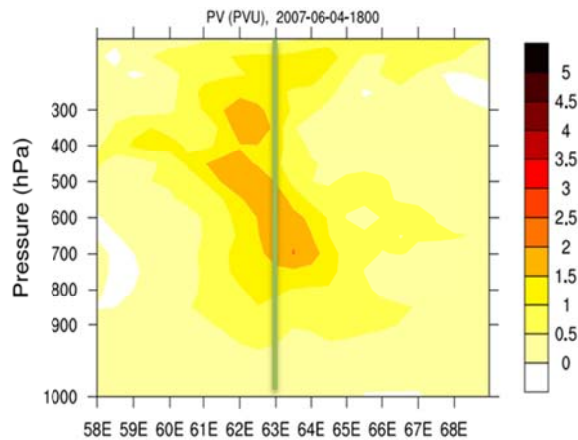
در شکل ۸ پربندهای دمای پتانسیلی تحلیلی و حاصل از شبیه‌سازی‌های مدل HWRf بر اساس طرحواره‌های متنوع همرفت کومه‌ای در شبکه ۳ km برای ۱۸ UTC روز ۴ ژوئن ۲۰۰۷ نشان داده شده است. توزیع قائم پربندهای شبیه‌سازی شده مشابه با یکدیگر است، البته با وجود تفاوت در اعوجاج‌های کوچک. هر ۵ طرحواره کمینه مقدار ۳۰۰ K را برای دمای پتانسیلی نشان دادند، هر چند کمینه مقدار تحلیلی دمای پتانسیلی برابر ۳۰۵ K بود. با دور شدن از مرکز TCG به سمت غرب، هم روند نزولی پربندهای دمای پتانسیلی در ترازهای پایین‌تر از ۷۰۰ hPa و همچنین روند صعودی پربندهای دمای پتانسیلی در ترازهای بالاتر از ۷۰۰ hPa حاصل از نتایج شبیه‌سازی شده و تحلیلی مشابه است. با دور شدن از مرکز TCG به سمت شرق، روندهای دمای پتانسیلی شبیه‌سازی شده با کاربست ۵ طرحواره با یکدیگر مشابه بوده ولی با روندهای تحلیلی کمی تفاوت دارند. البته بردارهای باد شبیه‌سازی شده توسط ۵ طرحواره نیز اندکی متفاوت است. روند ثابت دمای پتانسیلی در شرق مرکز TCG ثابت‌گردان دمایی را نشان می‌دهد. اما، در غرب مرکز TCG، وجود روند نزولی از سطح تا ۷۰۰ hPa و روند نسبتاً صعودی برای ترازهای بالاتر از آن حاکی از فرارفت قائم گرما در ترازهای بالای ۷۰۰ hPa و در مسیر پیش روی چرخند است. شکل ۸ نشان می‌دهد که در زمان بیشینه شدت TCG فرارفت قائم خیلی قوی در سطوح زیرین جو وجود نداشته، اما فرارفت گرمی در ترازهای میانی روی داده است. برای مقایسه، شکل ۵ از پگاه‌فر و غفاریان (۱۳۹۵) برای چرخند حاره‌ای هیان مشاهده شود که انتقال گرما را از سطح تا سطوح زیرین جو به‌وضوح نشان می‌دهد.

از طرحواره‌های KF، BMJ، SAS، SASAS و TiedTKE مقادیر نزدیک به صفر مشاهده می‌شود. شکل ۷-الف وجود مرکز تاوایی پتانسیلی به بزرگی ۲/۵ UPV را نشان می‌دهد که از ۷۵۰ hPa تا ۳۰۰ hPa کشیده شده است. این مرکز شعاع ۳۰۰ km دارد. در شبیه‌سازی‌های با کاربست طرحواره‌های مختلف، الگوی تاوایی پتانسیلی پیش‌بینی شده در سطوح زیرین و زیرین و همچنین بزرگی تاوایی پتانسیلی تفاوت‌های قابل‌توجهی دارند. به‌طور نمونه، در شبیه‌سازی با طرحواره KF هسته باریکی با بزرگ‌ترین مقدار ۴/۵ PVU در شعاع غربی کمتر از ۵۰ km و با کشیدگی از تراز ۶۰۰ hPa تا ۲۵۰ hPa پیش‌بینی شده در حالی که در شبیه‌سازی با طرحواره BMJ این هسته به‌طور متقارن در هر دو طرف مرکز TCG به چشم می‌خورد که نمونه غربی به مراتب قوی‌تر است. در شبیه‌سازی با طرحواره SAS تعداد هسته‌های تاوایی پتانسیلی بیشتر شده و در فاصله بیشتری از مرکز دیده می‌شود و نه تنها از توزیع قائم تک‌تک آنها کاسته شده است بلکه از شدت آنها نیز کاسته شده است. تنها در پیش‌بینی حاصل از طرحواره SASAS هسته تاوایی پتانسیلی تا سطح زمین کشیده شده است. وسعت و توسعه قائم مراکز تاوایی پتانسیلی ترازهای میانی و زیرین با بزرگی ۴/۵ PVU در شبیه‌سازی با طرحواره TiedTKE به مراتب بیش از سایر طرحواره‌ها است.

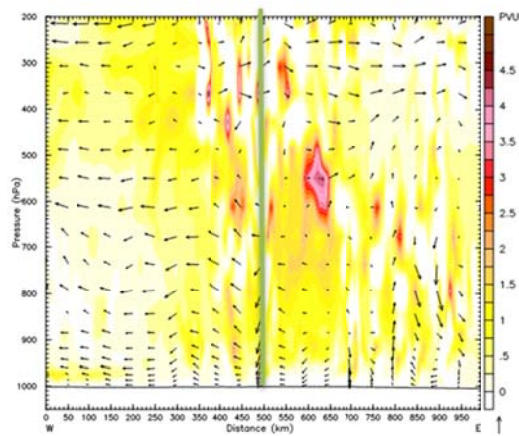
مقایسه گرایش زمانی تاوایی پتانسیلی تحلیلی و شبیه‌سازی شده (شکل‌ها نشان داده نشده است) روشن می‌کند که گرایش تاوایی پتانسیلی تحلیلی حداکثر ۰/۳ PVU/h تغییرات تاوایی پتانسیلی را در مدت ۶ ساعت نشان می‌دهد، در حالی که شبیه‌سازی مدل HWRf تا ۰/۸۳ PVU/h قادر به تشخیص ساختارهای ریز بوده است. از بین طرحواره‌ها فقط طرحواره‌های SASAS (با گستره قائم تا ۶۵۰ هکتوپاسکال) و KF (با گستره قائم تا ۸۵۰ هکتوپاسکال) تولید گرایش زمانی تاوایی پتانسیلی در نزدیکی مرکز TCG در ترازهای پایین را نشان دادند. در ترازهای بالاتر از ۶۰۰ hPa و در بازه زمانی ۶ ساعته،



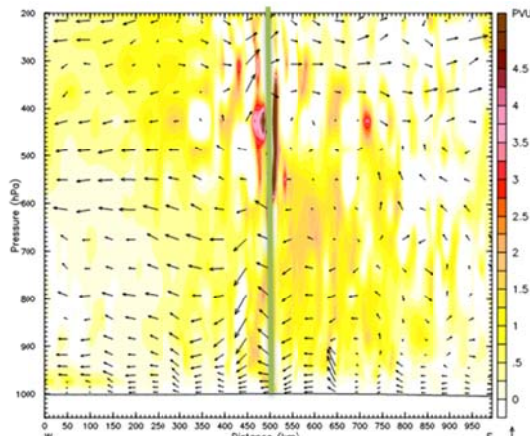
KF (ب)



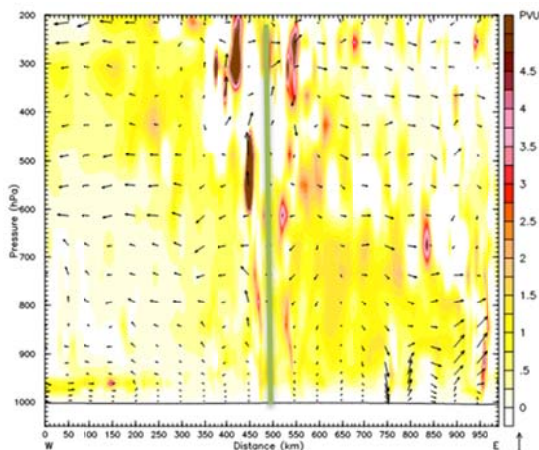
GFS (الف)



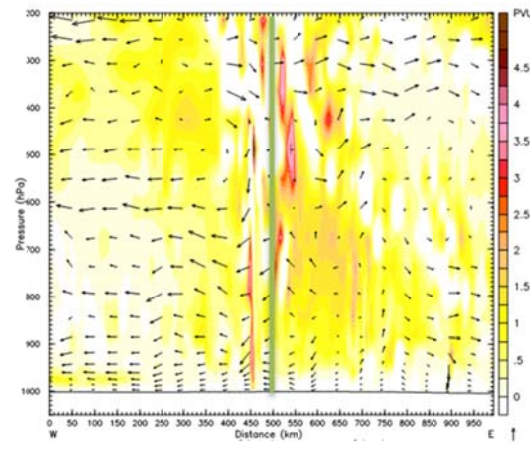
SAS (د)



BMJ (ج)

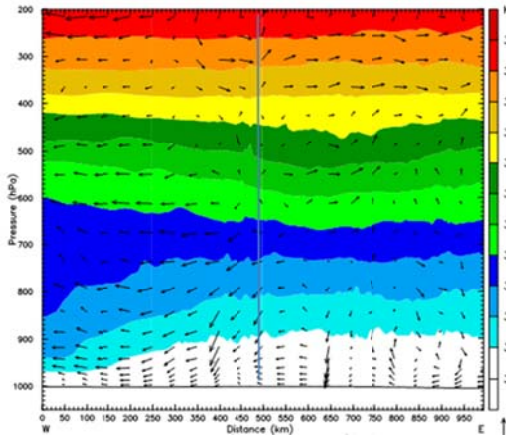


TiedTKE (و)

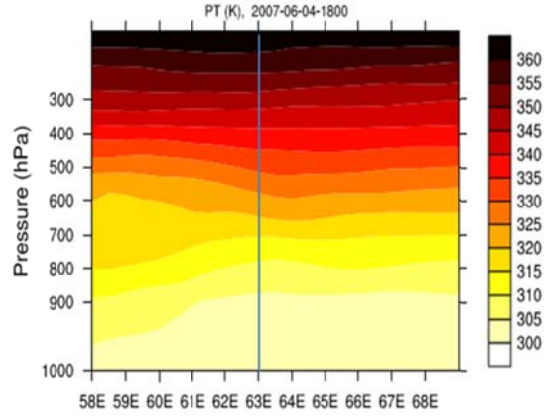


SASAS (ه)

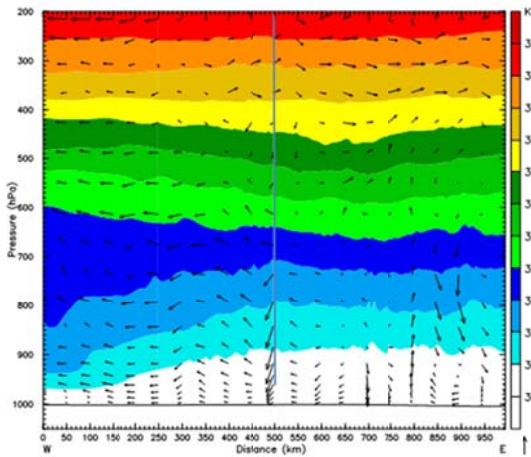
شکل ۷. نیمرخ قائم تاوایی پتانسیلی (سایه-روشن) و بردار باد با استفاده از داده‌های GFS (الف)، شبیه‌سازی مدل HWRf با طرحواره‌های همرفت کومه‌ای KF (ب)، BMJ (ج)، SAS (د)، SASAS (ه)، TiedTKE (ز) با تفکیک ۳ کیلومتر. محور قائم فشار (hPa) و محور افقی در (الف) طول جغرافیایی (درجه) و در سایر زیرشکل‌ها فاصله از مرکز TCG (کیلومتر) را نشان می‌دهد. خط عمود سبز در تمام زیرشکل‌ها محل TCG را نشان می‌دهد.



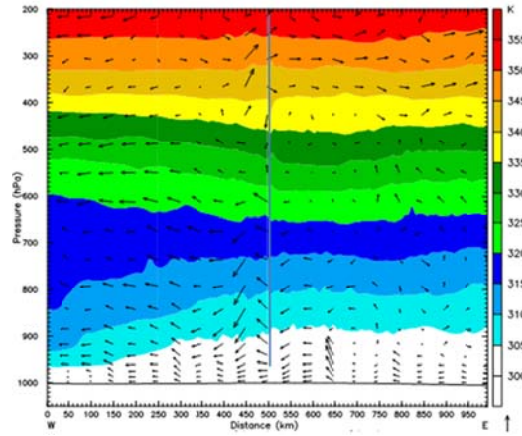
KF (ب)



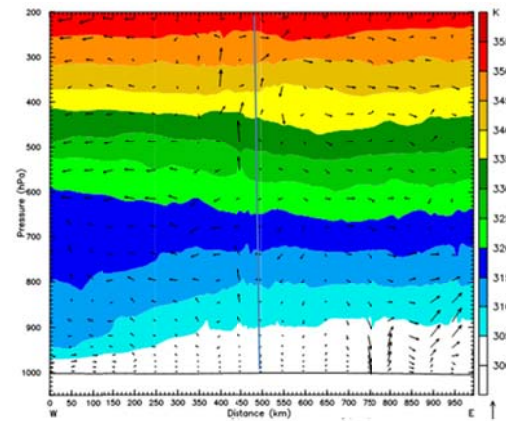
GFS (الف)



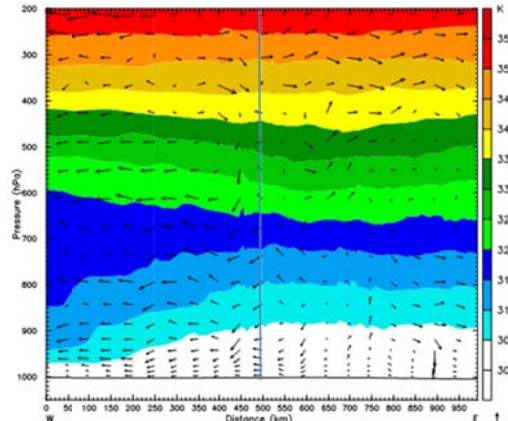
SAS (د)



BMJ (ج)



TiedTKE (و)



SASAS (ه)

شکل ۸. نیم‌رخ قائم دمای پتانسیلی (سایه-روشن) و بردار باد با استفاده از داده‌های GFS (الف)، شبیه‌سازی مدل HWRf با طرحواره‌های همرفت کومه‌ای KF (ب)، BMJ (ج)، SAS (د)، SASAS (ه)، TiedTKE (و) با توان تفکیک ۳ کیلومتر. محور قائم فشار (hPa) و محور افقی در (الف) طول جغرافیایی (درجه) و در سایر زیرشکل‌ها فاصله از مرکز TCG (کیلومتر) را نشان می‌دهد. خط عمود تیره در تمام زیرشکل‌ها محل TCG را نشان می‌دهد.

۵-۲-۳. انرژی پتانسیل دسترس پذیر همرفتی

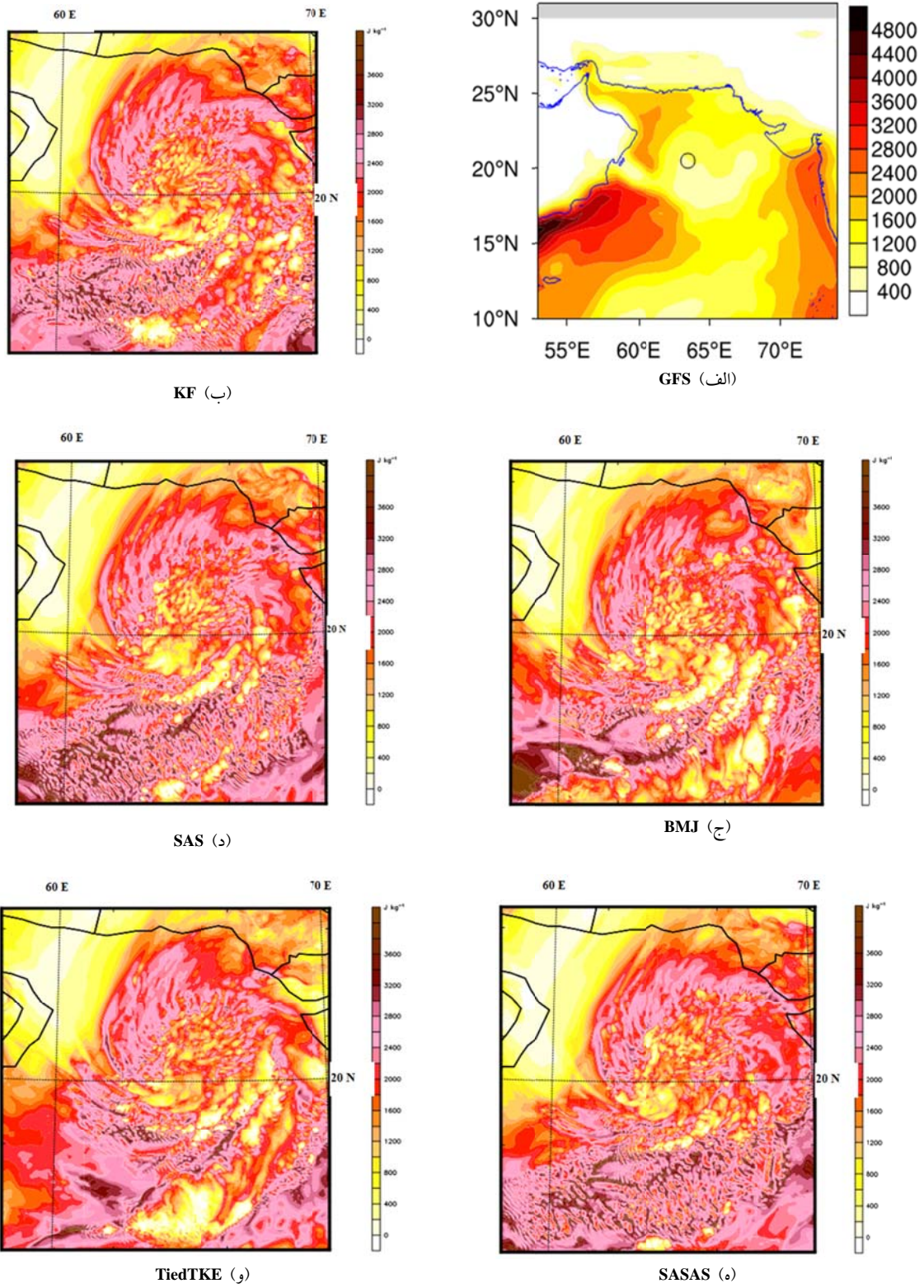
برای مقایسه تفاوت عملکرد طرحواره‌های مورد نظر در پیش‌بینی وضعیت پایداری، نتایج شبیه‌سازی شده پارامتر انرژی پتانسیل دسترس پذیر همرفتی به همراه مقدار تحلیلی آن در UTC ۱۸ روز ۴ ژوئن ۲۰۰۷ در شکل ۹ نشان داده شده است. در مقایسه با مقادیر تحلیلی، تمامی طرحواره‌ها بیشینه مقدار ناپایداری را دورتر از سواحل عمان نشان داده‌اند. همچنین تمامی طرحواره‌ها مقادیر این پارامتر را در قطاع شمال‌غربی بیش از 3000 (J/kg) نشان دادند در حالی که مقادیر تحلیلی در این قطاع کمتر از این مقدار بود.

۵-۲-۴. الگوی باد و چینش قائم

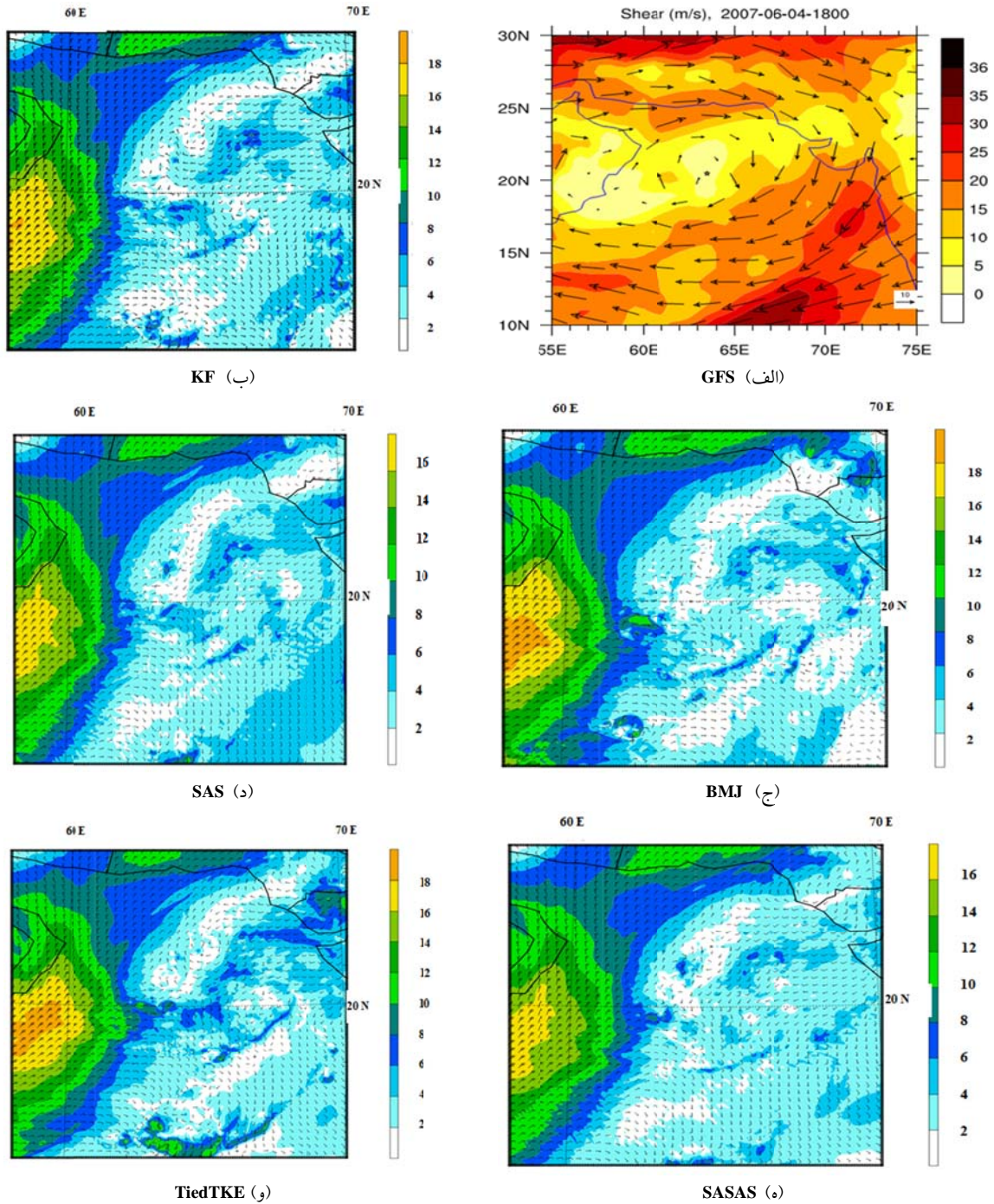
به منظور بررسی چینش قائم باد، الگوی همگرایی بردار باد در سطوح زیرین و الگوی واگرایی آن در سطوح زبرین، نزول هوا در منطقه چشم چرخند، صعود آن در نوارهای باران‌زا در منطقه دیواره چرخند یا به طور کلی جریان‌های همرفتی، الگوهای پیش‌بینی شده توسط هر ۵ طرحواره بررسی شد (شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲).

همان‌طور که انتظار می‌رفت داده‌های تحلیلی GFS به وضوح قرارگیری مرکز TCG در منطقه‌ای با چینش کم را نشان می‌دهد. مقایسه پهنه افقی مقدار چینش قائم باد (شکل‌های ۱۰-الف تا ۱۰-و) نشان می‌دهد که مقادیر پیش‌بینی شده چینش قائم باد به مراتب کمتر از مقادیر تحلیلی است، به ویژه در سواحل جنوبی ایران. مقادیر زیاد چینش قائم باد در سواحل شرقی عمان با کشیدگی در راستای عمودی توسط هر ۵ طرحواره به طور کم و بیش یکسان پیش‌بینی شده است، در حالی که در داده‌های GFS چنین وضعی به چشم نمی‌خورد. چنین سدی (مقادیر

زیاد چینش قائم باد) در الگوهای پیش‌بینی شده به راحتی الگوی حرکت TCG را نشان می‌دهند. مقایسه توزیع‌های افقی چینش قائم باد شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که بزرگ‌ترین مقادیر و بیشترین گستره با اتخاذ طرحواره‌های BMJ و TiedTKE رخ داده است و شبیه‌سازی با استفاده از طرحواره SASAS کمترین چینش قائم باد را پیش‌بینی کرده است. البته طبق نتایج چن و گوپالاکریشنان (۲۰۱۵)، مقایسه مستقیم و نقطه به نقطه چینش تحلیلی و شبیه‌سازی شده توسط مدل HWRP اشتباه است و مهم هم‌فاز بودن مقادیر تحلیلی و شبیه‌سازی است و حتی میانگین شعاعی چینش در دایره‌ای به مرکز TC نیز می‌تواند ۵ متر بر ثانیه نسبت به مقادیر تحلیلی خطا داشته باشد. دلیل آن این است که چینش ضعیف‌تر کج‌شدگی کمتری برای تاوه تولید می‌کند و از این رو در مناطق مختلف تاوه (مناطق که چینش‌بالاسو و چینش پایین‌سو را تجربه می‌کنند) همرفت با شدت‌های مختلفی تولید می‌شود (چن و فنگ ۲۰۱۲). بنابراین، با توجه به نامتقارن بودن تاوه‌ها در واقعیت و با در نظر گرفتن اینکه مدل HWRP خود تاوه متقارنی تولید می‌کند این تفاوت در میدان‌های چینش شبیه‌سازی شده و تحلیلی دور از انتظار نیست. در UTC ۱۸ روز ۴ ژوئن، مقدار چینش قائم باد در ایستگاه چابهار با اتخاذ طرحواره KF، BMJ، SAS، SASAS و TiedTKE و داده‌های تحلیلی GFS به ترتیب برابر 8 m/s ، 6 m/s ، 8 m/s و 8 m/s بوده است. در انتهای دوره عمر TCG (UTC ۰۰ روز ۷ ژوئن ۲۰۰۷) نیز به ترتیب مقادیر 12 m/s ، 18 m/s ، 10 m/s و 12 m/s با کاربری طرحواره‌های KF، BMJ، SAS، SASAS و TiedTKE پیش‌بینی شده است، در حالی که مقدار تحلیلی این پارامتر با استفاده از داده‌های تحلیلی GFS برابر 15 m/s بوده است.



شکل ۹. پهنه افقی CAPE (J/kg) با استفاده از داده‌های GFS (الف)، شبیه‌سازی مدل HWRf با طرحواره‌های همرفت کومه‌ای KF (ب)، BMJ (ج)، SAS (د)، SASAS (ه)، TiedTKE (ز) با توان تفکیک ۳ کیلومتر.



شکل ۱۰. توزیع افقی چینش قائم باد (200-850 hPa) با استفاده از داده‌های GFS (الف)، شبیه‌سازی مدل HWRf با طرحواره‌های همرفت کومه‌ای KF (ب)، BMJ (ج)، SAS (د)، SASAS (ه)، TiedTKE (ز) با توان تفکیک ۳ کیلومتر در ۱۸ UTC روز ۴ ژوئن ۲۰۰۷.

۱۸ UTC روز ۴ ژوئن ۲۰۰۷ نشان می‌دهد. نتایج حاصل از اجرای مدل HWRf در زیرشکل‌های ۱۱-ب تا ۱۱-و (۱۲-ب تا ۱۲-و) نشان داده شده است. در حالت کلی

نیمرخ قائم سرعت باد افقی و مؤلفه قائم باد در شکل‌های ۱۱-الف و ۱۲-الف نشان داده شده است. شکل ۱۱-الف (۱۲-الف) نتیجه حاصل از داده‌های تحلیلی GFS را در

طرحواره مختلف همرفت نیز بررسی شد (شکل‌ها نشان داده نشده‌اند). در ۱۸ UTC روز ۴ ژوئن، بیشینه مقدار بارش تجمعی شبیه‌سازی شده توسط هر ۵ طرحواره برابر ۸۰ mm در شش ساعت گذشته بوده است. علی‌رغم شباهت توزیع‌های بارش شبیه‌سازی شده به یکدیگر، گستره بارش بیشینه حاصل از انتخاب هر طرحواره منحصر به فرد بوده است. مقدار بارش گزارش شده توسط TRMM حداکثر برابر ۲۵ mm در یک ساعت بوده است. این مقایسه نشان می‌دهد که تمامی طرحواره‌ها مقدار بارش را فروتخمین کرده‌اند.

۳-۵. کمیت‌های هواشناختی در ایستگاه چابهار

در این زیربخش به منظور ارزیابی عملکرد مدل HWRf با کاربست ۵ طرحواره متفاوت همرفت کومه‌ای در سواحل جنوبی ایران، ایستگاه چابهار به‌عنوان ایستگاهی که بیشترین تأثیر را از TCG داشته است، انتخاب شد. در شکل ۱۳ تفاوت عملکرد این طرحواره‌ها در پیش‌بینی بازتاب در سواحل جنوبی ایران به‌وضوح قابل مشاهده است. از آنجایی که داده‌های مشاهده‌ای برای ارزیابی بازتاب راداری در دسترس نبود، اجزایی که با انتخاب طرحواره KF انجام شده بود را به‌عنوان اجرای کنترلی در نظر گرفته و نتیجه حاصل از سایر شبیه‌سازی‌ها با آن مقایسه می‌شود (مشابه با کریجر و همکاران، ۲۰۰۹). شکل ۱۳ نشان می‌دهد که اجرای کنترلی با کاربست طرحواره KF کمترین گستره افقی بازتاب راداری را با مقادیری حدود ۶۰ dbz تولید کرده است. همچنین شبیه‌سازی با کاربست طرحواره SASAS بیشترین گستره افقی بازتاب راداری را با مقادیری حدود ۶۰ dbz تولید کرده است. نه‌تنها الگوی توزیع افقی همرفت و همچنین تعداد مراکز بازتاب بیشینه در قالب بازتاب شبیه‌سازی شده توسط طرحواره‌های مختلف یکسان نیست، بلکه الگوی مشاهده شده برای دنباله‌های همرفتی در عرض‌های پایین‌تر نیز متفاوت است. بررسی مقدار بازتاب در مکان ایستگاه چابهار نشان داد که طرحواره‌های TiedTKE، SAS و BMJ مقادیر

الگوی قائم بردار باد افقی پیش‌بینی شده و تحلیلی مشابه بوده است. البته تمامی طرحواره‌ها حداکثر مقدار سرعت باد را در تراز ۶۰۰ hPa برابر ۲۰ m/s نشان داده‌اند، در حالی که در این تراز سرعت باد تحلیلی تا ۲۴ m/s هرچند با وسعت بسیار کم رسیده است. تمایز اصلی بین سرعت باد تحلیلی و شبیه‌سازی شده در شرق TCG مشاهده می‌شود. سرعت ۲۲ m/s در الگوی تحلیلی تا ۵۰۰ hPa کشیده شده است (شکل ۱۱). طرحواره TiedTKE کمترین سرعت باد ۱۰ متری را شبیه‌سازی کرده است.

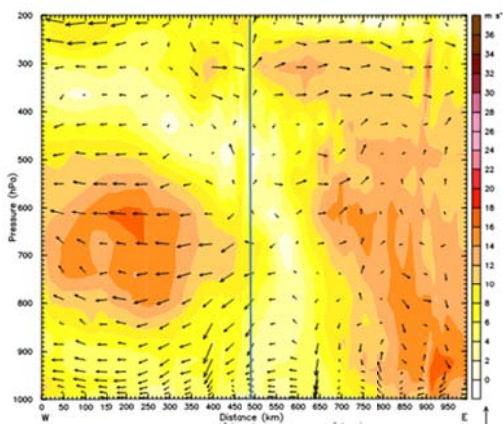
همگرایی در سطوح زیرین نه در الگوی باد تحلیلی و نه شبیه‌سازی شده رؤیت نشد، در حالی که واگرایی الگوی باد در سطوح زیرین هم در میدانهای تحلیلی و هم شبیه‌سازی نشان داده شد. نکته جالب توجه تفاوت سرعت نزولی در مرکز TCG در شبیه‌سازی‌های HWRf است که به ترتیب ۱۹/۱۷، ۴۲/۸، ۵/۱۹، ۵۰/۳۹- و ۱۴/۷۱- در کاربست طرحواره‌های KF، BMJ، SAS، SASAS و TiedTKE بوده است، در حالی که شدیدترین مقدار تحلیلی باد نزولی ۶ cm/s بوده که به مراتب در فواصل دورتری از مرکز بوده است (شکل ۱۲). در شبیه‌سازی‌های با استفاده از طرحواره‌های KF، SAS و SASAS نزول هوا در منطقه چشم نسبت به شبیه‌سازی با طرحواره‌های TiedTKE و BMJ از بقیه واضح‌تر است. سرعت صعودی در غرب مرکز TCG نیز در شبیه‌سازی‌های فوق به ترتیب عبارت بودند از ۱۸ cm/s، ۳۲، ۵، ۱۶ و ۲۷/۸، در حالی که بیشینه مقدار تحلیلی جریان صعودی ۱۵ cm/s در ترازهای بالا بوده است (شکل ۱۲). با توجه به فاصله میان جریانات صعودی و نزولی در شرق و غرب مرکز TCG، TiedTKE وسیع‌ترین منطقه چشم چرخند را تولید کرده است. شکل ۱۲ نشان می‌دهد که گستره مناطق چشم و دیواره توسط طرحواره‌ها یکی نیست.

۵-۲-۵. بارش

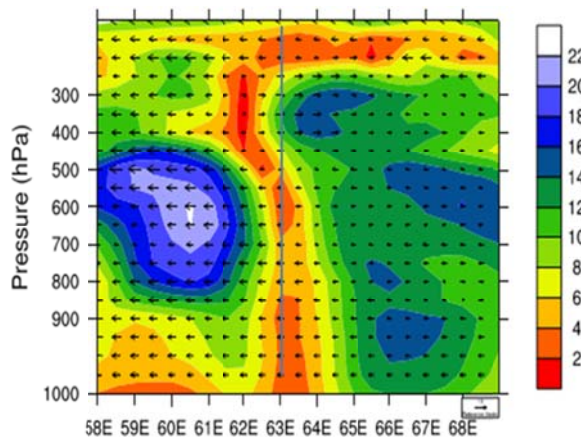
میزان بارش با استفاده از مقادیر شبیه‌سازی شده بر اساس ۵

نتایج با استفاده از طرحواره‌های مختلف همرفت را نشان می‌دهد.

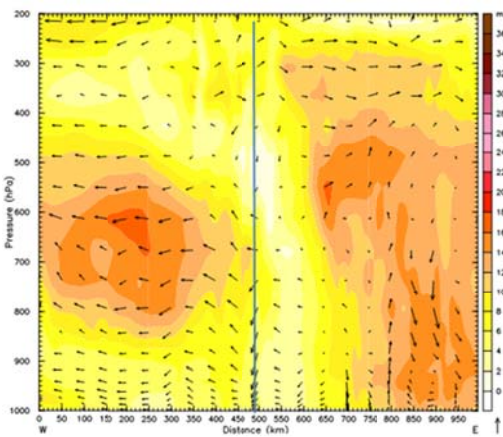
کمتر از ۵ dbz، KF در حد ۲۰ dbz و SASAS مقدار ۳۵ dbz را شبیه‌سازی کرده‌اند. این مقادیر به وضوح تنوع



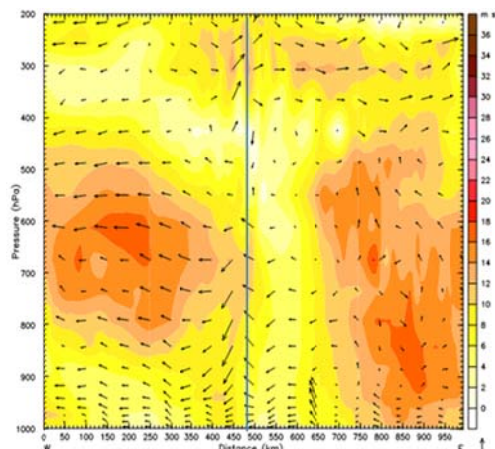
KF (ب)



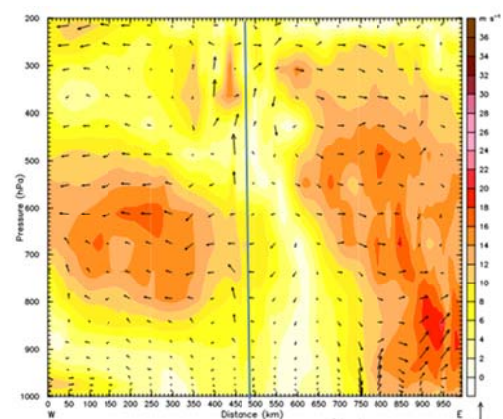
GFS (الف)



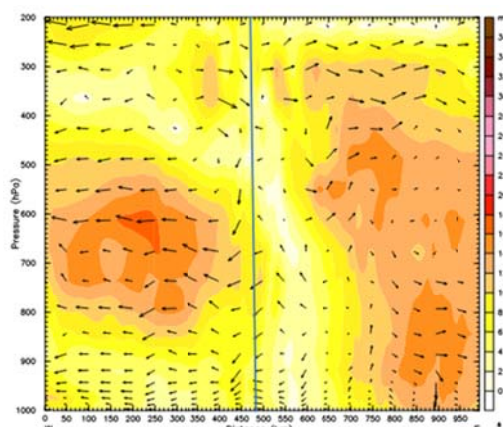
SAS (د)



BMJ (ج)

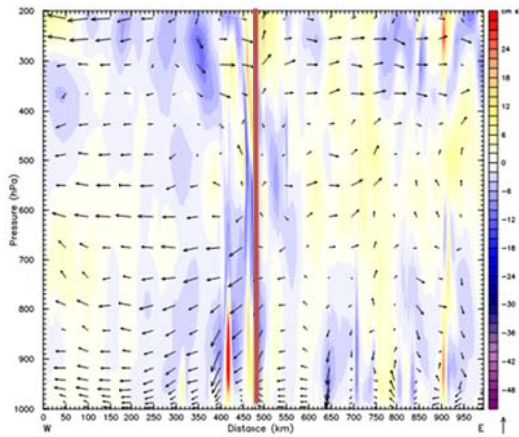


TiedTKE (و)

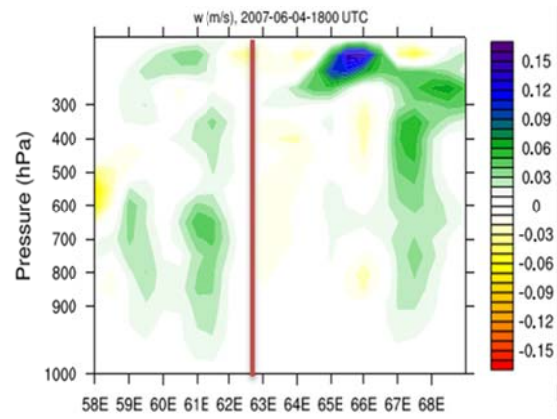


SASAS (ه)

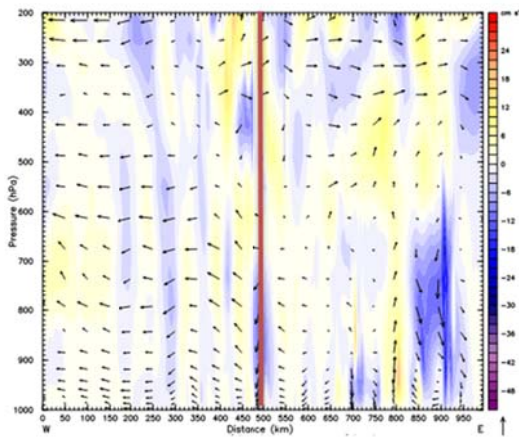
شکل ۱۱. نیرمخ قائم سرعت باد (سایه-روشن) و بردار باد در ۱۸ UTC روز ۴ ژوئن ۲۰۰۷. با استفاده از داده‌های تحلیلی GFS (الف) و شبیه‌سازی‌های مدل HWRf با اتخاذ ۵ طرحواره همرفت کومه‌ای KF (ب)، BMJ (ج)، SAS (د)، SASAS (ه) و TiedTKE (و) با توان تفکیک ۳ کیلومتر. خط عمود سبز رنگ در هر زیر شکل مکان مرکز TCG را نشان می‌دهد.



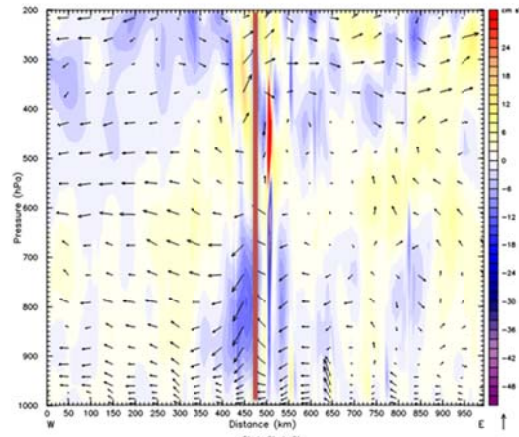
KF (ب)



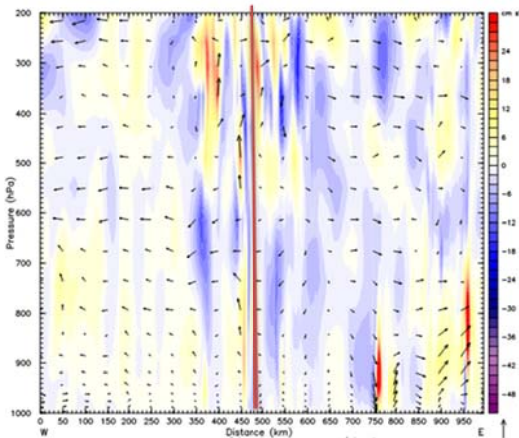
GFS (الف)



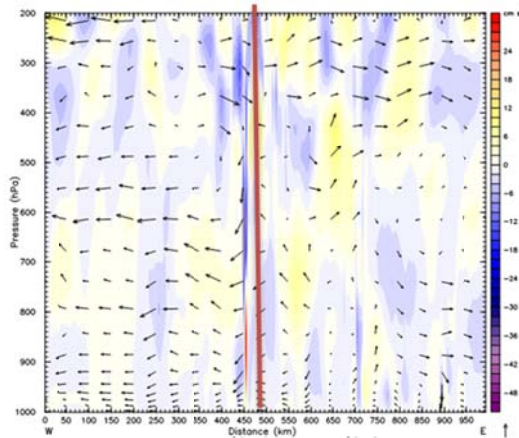
SAS (د)



SASAS
BMJ (ج)

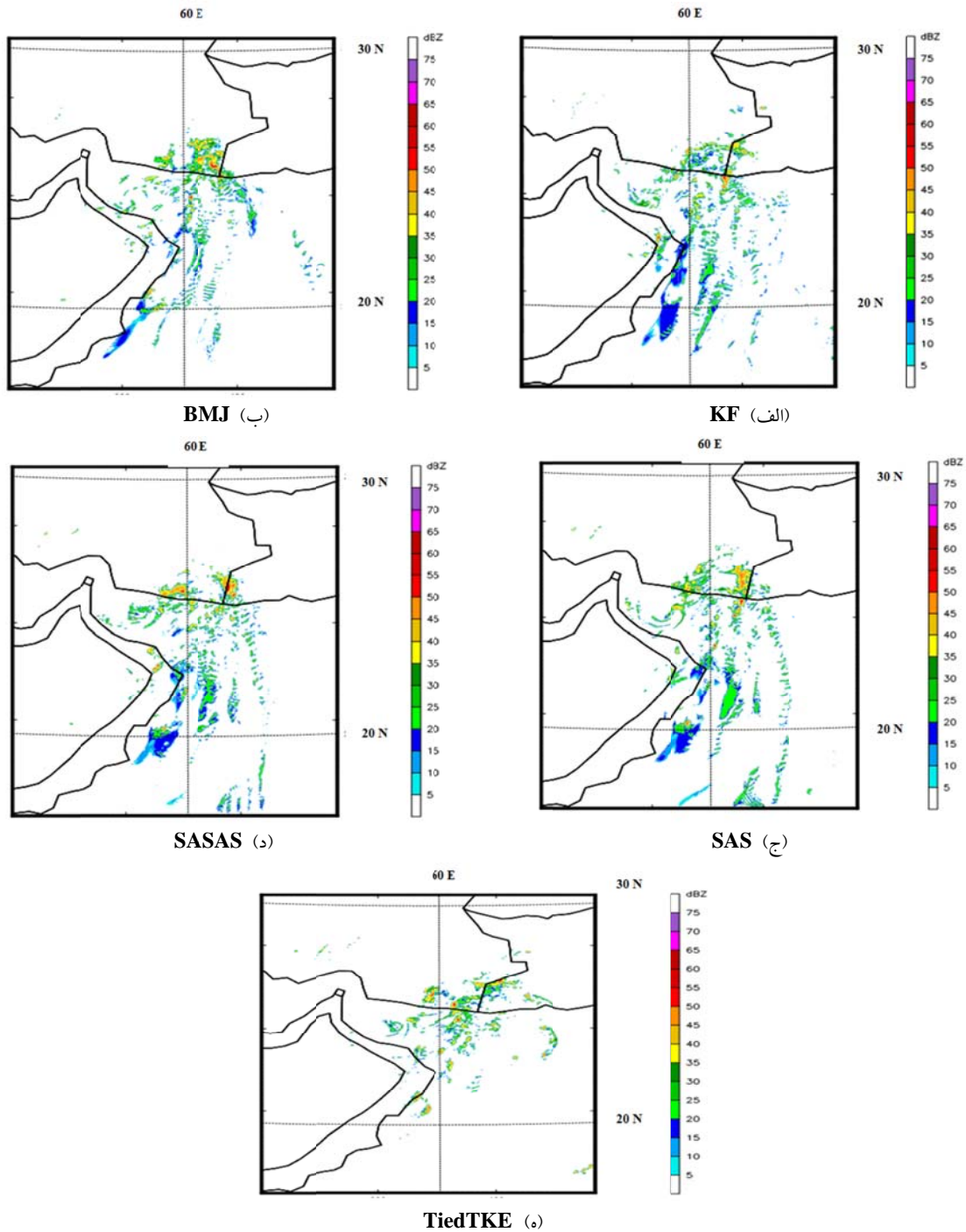


TiedTKE (و)



SASAS (ه)

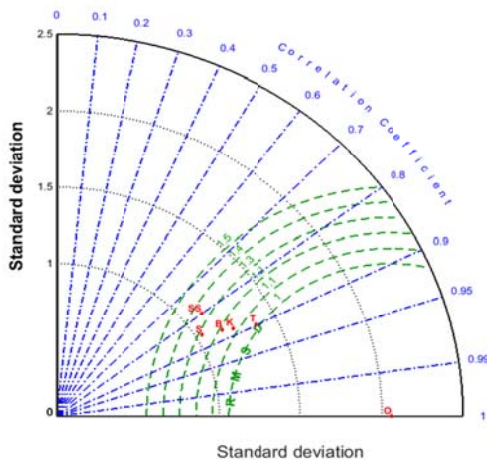
شکل ۱۲. نیمرخ قائم مولفه قائم سرعت باد (سایه-روشن) و بردار باد در ۱۸ UTC روز ۴ ژوئن ۲۰۰۷. با استفاده از داده‌های تحلیلی GFS (الف) و شبیه‌سازی-های مدل HWRF با اتخاذ ۵ طرحواره همرفت کومه‌ای KF (ب)، BMJ (ج)، SAS (د)، SASAS (ه) و TiedTKE (ز) با توان تفکیک ۳ کیلومتر. خط عمود قرمز رنگ در هر زیر شکل مکان مرکز TCG را نشان می‌دهد.



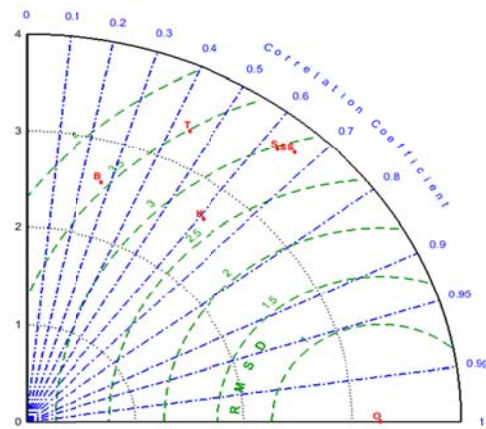
شکل ۱۳. توزیع افقی بازتاب راداری (dbz) محاسبه شده از شبیه‌سازی‌های مدل HWRF با کاربست طرحواره‌های همرفت کومه‌ای (الف) KF، (ب) BMJ، (ج) SAS، (د) SASAS و (ه) TiedTKE با تفکیک ۳ کیلومتر.

ضریب همبستگی 0.9 و انحراف معیار 1.4 hPa. عملکرد هر ۵ طرحواره برای برآورد دما بسیار مشابه بوده که در میان آنها طرحواره SASAS از همه بهتر بوده است، البته با ریشه میانگین مربعات خطا برابر با $2/3$ K، ضریب همبستگی تقریبی 0.7 و انحراف معیار کمتر از 1 K (شکل ۱۴-ج). شکل ۱۴-د نشان می‌دهد که ضریب همبستگی میان بارش شبیه‌سازی شده با هر ۵ طرحواره و مقدار مشاهداتی بسیار پایین بوده و انحراف معیار کمتر از 4 mm بوده است. طرحواره KF با پایین‌ترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا، بهترین عملکرد را در پیش‌بینی دمای نقطه شبنم داشته است، البته تمام طرحواره‌ها ضریب همبستگی منفی داشته و انحراف معیار زیر 1 K را تولید کرده‌اند (شکل ۱۴-ه).

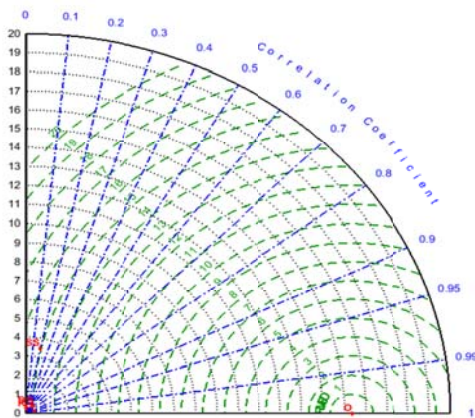
در ادامه، نمودار تیلور برای بررسی سنجه‌های آماری برای کمیت‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه چابهار (شامل سرعت باد 10 متری، فشار تراز دیا، دمای 2 متری، دمای نقطه شبنم در 2 متری و بارش) در شکل ۱۴ ترسیم شده است. برای این منظور از نتایج شبیه‌سازی در روز ۶ و ۷ ژوئن در بازه زمانی ۶ ساعته استفاده شده است. شکل ۱۴-الف نشان می‌دهد که عملکرد طرحواره KF در پیش‌بینی سرعت باد 10 متری بهتر از سایر طرحواره‌ها بوده است، البته با ریشه میانگین مربعات خطا برابر با $2/5$ m/s، ضریب همبستگی تقریبی 0.8 و انحراف معیار $2/6$ m/s. شکل ۱۴-ب نشان می‌دهد که عملکرد طرحواره TiedTKE در پیش‌بینی فشار بهتر از سایر طرحواره‌ها بوده است، البته با ریشه میانگین مربعات خطا برابر با 1 hPa،



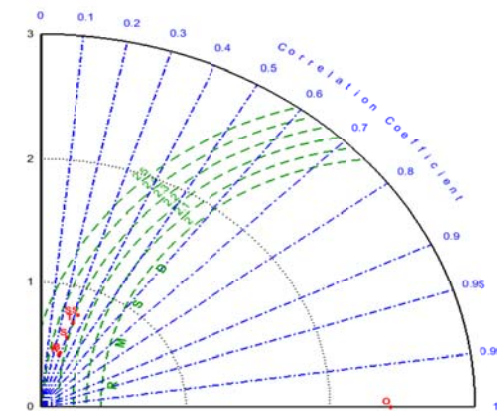
(ب)



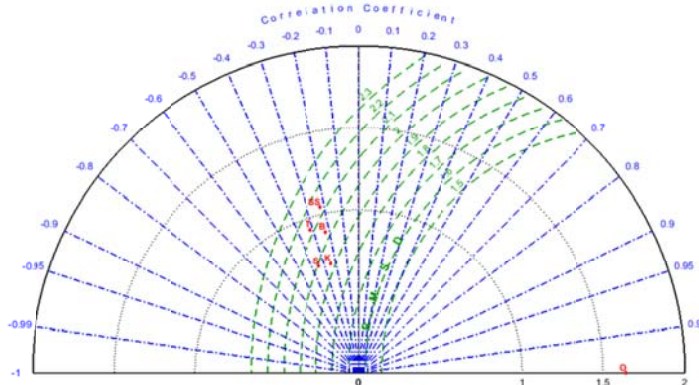
(الف)



(د)



(ج)



(ه)

شکل ۱۴. نمودار تیلور برای مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل HWRf و کاربست طرحواره‌های KF (نماد K)، BMJ (نماد B)، SAS (نماد S)، SASAS (نماد SS) و TiedTKE (نماد T) با توان تفکیک ۳ کیلومتر، برای سرعت باد (بر حسب m/s، الف)، فشار (بر حسب hPa، ب)، دما (بر حسب K، ج)، بارش (بر حسب mm، د) و دمای نقطه شبنم (بر حسب K، ه).

۶. جمع‌بندی

شبیه‌سازی با طرحواره KF به‌عنوان اجرای کنترلی. قابل توجه است که طرحواره TiedTKE ۶ ساعت زودتر از سایر طرحواره‌ها رسیدن به حالت اَبَرچرخند را نشان داده است.

پربندهای دمای پتانسیلی در راستای قائم و با افزایش شعاع (فاصله از مرکز TCG) در تمام طرحواره‌ها، به‌غیر از وجود تفاوت‌های اندکی در اعوجاج‌های منتج، تقریباً مشابه یکدیگر بوده است. با دور شدن از مرکز TCG در جهت غرب، روند دمای پتانسیلی تحلیلی و شبیه‌سازی شده مشابه است، هرچند با دور شدن از مرکز TCG در جهت شرق در ترازهای بالاتر از ۷۰۰ hPa تفاوت‌هایی به چشم می‌خورد.

نتایج بررسی نیم‌رخ قائم تاوایی پتانسیلی نشان داد که تمام طرحواره‌ها قادر به شبیه‌سازی هسته‌هایی با شدت PVU ۴/۵ بوده‌اند در حالی که در داده‌های GFS به‌دلیل توان تفکیک داده‌ها چنین مراکزی رویت نشد. وسعت افقی، کشیدگی قائم و تعداد هسته‌هایی با بزرگی PVU ۴/۵ در شبیه‌سازی‌های مختلف متفاوت بوده و تنها طرحواره SASAS توانست شکل‌گیری تاوایی پتانسیلی با این بزرگی را در نزدیکی سطح زمین شبیه‌سازی کند.

مقایسه مقدار و پهنه‌بندی افقی پارامتر چینش قائم باد افقی شبیه‌سازی شده با کاربست ۵ طرحواره متفاوت همرفت

در این تحقیق سعی شد که عملکرد مدل HWRf با کاربست چند طرحواره همرفت کومه‌ای اعم از KF، SAS، BMJ و TiedTKE در پیش‌بینی مسیر و شدت TCG و همچنین برخی کمیت‌های هواشناسی هم در زمان اوج شدت TCG بر روی اقیانوس هند و هم در زمان میرایی آن در سواحل جنوبی ایران ارزیابی شود. برای این منظور از داده‌های مشاهداتی IMD و ایستگاه هواشناسی چابهار و داده‌های تحلیلی GFS استفاده شد. با کاربست طرحواره TiedTKE کمترین اختلاف در طول مسیر شبیه‌سازی شده به‌دست آمد. قابل توجه است که هیچ طرحواره‌ای ورود به سواحل جنوبی ایران را پیش‌بینی نکرد. مقایسه روند فشار پیش‌بینی شده و مشاهداتی حاکی از آن است که هر ۵ طرحواره در زمان‌هایی که شدت TCG در دسته‌های ۵، اَبَرچرخند و دسته ۴ بوده است، نتوانسته‌اند فشار و روند آن را به‌درستی پیش‌بینی کنند. بررسی کمیت شعاع باد بیشینه با استفاده از خروجی‌های مدل HWRf و با کاربست ۵ طرحواره همرفت کومه‌ای نشان داد که مقدار و روند تغییر این کمیت با تغییر شدت TCG تطابق خوبی دارد، البته به‌غیر از ۱۲ ساعت پایان دوره عمر TCG. در برآورد شعاع باد بیشینه، عملکرد هر ۵ طرحواره کم و بیش مشابه بود، البته با در نظر گرفتن

۲ متری به ترتیب با کاربست طرحواره‌های KF، TiedTKE و SASAS بهترین نتیجه را تولید کرد. تعیین میزان دقیق و تفکیک نقش عواملی همچون شبیه‌سازی گرمای نهان خردفیزیکی، گرمایش دررو، توسعه افقی و قائم ابرهای سندانی و در نهایت میزان تولید آب شهاب‌ها و همچنین روشن ساختن نقش تعاملی طرحواره‌های همرفت کومه‌ای با طرحواره‌های لایه مرزی و خردفیزیک نیاز به تحقیقات وسیع‌تری دارد که در دستور کار محقق برای تحقیقات آتی قرار دارد.

تشکر و قدردانی

بخشی از نتایج ارائه شده در این تحقیق برگرفته از طرح پژوهشی مصوب پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی به شماره ۰۲-۰۲۴-۰۱-۰۳۱-۰۳۹۵ می‌باشد.

مراجع

پگاه‌فر، ن. و غفاریان، پ.، ۱۳۹۵، بررسی فراسنج‌های هواشناختی در وردسپهر زیرین و زبرین در دوره عمر چرخند حاره‌ای هیان، اقیانوس‌شناسی، ۱۳، ۵۵-۶۷.

پگاه‌فر، ن.، ۱۳۹۸، بررسی همدیدی‌مقیاس شارهای آنتروپی در چرخند حاره‌ای گونو، فیزیک زمین و فضا، ۴۵(۲)، ۴۵۹-۴۷۲.

مزرعه فراهانی، م.، احمدی، م. و ثقفی، م.ع.، ۱۳۹۴، ارزیابی نیروهای مؤثر بر تشکیل و تقویت توفان حاره‌ای گونو با استفاده از مدل تحلیلی کیو و بررسی عملکرد مدل‌های عددی در تعیین شدت آن، م. فیزیک زمین و فضا، ۴۱، ۲۷۳-۲۸۰.

کومه‌ای با مقادیر حاصل از داده‌های تحلیلی GFS نشان داد که مقادیر شبیه‌سازی به مراتب کمتر از مقادیر تحلیلی بوده است. همچنین وجود سدی با مقادیر زیاد چینش قائم باد در سواحل شرقی عمان در شبیه‌سازی‌های مدل HWRf به‌روشنی مسیر حرکت TCG را در ساعات آینده نشان داد، در حالی که این الگو در میدان تحلیلی رؤیت نشد.

شدت جریان‌های نزولی شبیه‌سازی شده به مراتب بیش از مقدار تحلیلی آن بوده و در فواصل نزدیک‌تری به مرکز TCG بوده‌اند. کمترین اختلاف در شبیه‌سازی جریان نزولی در کاربست طرحواره SAS روی داد. شدت جریان‌های صعودی شبیه‌سازی شده نیز بیش از مقادیر تحلیلی بوده است و طرحواره SASAS کمترین خطا در تولید شدت جریان صعودی را داشت. الگوی واگرایی سطوح زبرین هم توسط تمام طرحواره‌ها و هم میدان تحلیلی به‌خوبی نشان داده شد. الگوی قرارگیری سرعت‌های بالاسو (در غرب مرکز چرخند) و پایین‌سو (در شرق مرکز چرخند) مطابق یافته‌های پگاه‌فر (۱۳۹۸) بود که وجود مکش در جلوی چرخند و دم‌ش در عقب چرخند را تأیید می‌کرد.

توزیع افقی بارش شبیه‌سازی شده با استفاده از ۵ طرحواره تفاوت چشمگیری نداشته و هر ۵ طرحواره بیشینه مقدار بارش تجمعی در ۱۸ UTC روز ۴ ژوئن را ۸۰ mm پیش‌بینی کرده‌اند. البته، گستره بارش بیشینه شبیه‌سازی شده حاصل از انتخاب هر طرحواره منحصر به فرد بوده است.

در ایستگاه چابهار نیز مدل HWRf در پیش‌بینی هر یک از کمیت‌های سرعت باد ۱۰ متری، فشار تراز دریا و دمای

p.131.

Alaka Jr., G.J., Zhang, X., Gopalakrishnan, S.G., Goldenberg, S.B. and Marks, F.D., 2017, Performance of basin-scale HWRf tropical cyclone track forecasts. *Weather and Forecasting*, 32(3), 1253-1271.

Allahdadi, M.N., Chaichitehrani, N., Allahyar, M. and McGee, L., 2017, Wave spectral patterns during a historical cyclone: a numerical model for cyclone Gonu in the northern Oman Sea. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 7(02),

Allahdadi, M.N., Chaichitehrani, N., Jose, F., Nasrollahi, A., Afshar, A. and Allahyar, M., 2018, Cyclone-generated Storm Surge in the Northern Gulf of Oman: A Field Data Analysis during Cyclone Gonu. *American Journal of Fluid Dynamics*, 8(1), 10-18.

Bao, J.W., Gopalakrishnan, S.G., Michelson, S.A., Marks, F.D. and Montgomery, M.T., 2012, Impact of physics representations in the

- HWRFX on simulated hurricane structure and pressure–wind relationships. *Monthly weather review*, 140(10), 3278-3299.
- Biswas, M.K., Bernardet, L., Ginis, I., Kwon, Y., Liu, B., Liu, Q., Marchok, T., Mehra, A., Newman, K., Sheinin, D., Subramanian, S., Tallapragada, V., Thomas, B., Tong, M., Trahan, S., Wang, W., Yablonsky, R. and Zhang, X., 2016, Hurricane Weather Research and Forecasting (HWRF) Model: 2016, Scientific Documentation.
- Biswas, M.K., Bernardet, L. and Dudhia, J., 2014, Sensitivity of hurricane forecasts to cumulus parameterizations in the HWRF model. *Geophysical Research Letters*, 41(24), 9113-9119.
- Biswas, M.K., Bernardet, L., Ginis, I., Kwon, Y., Liu, Q., Marchok, T., Sheinin, D., Tallapragada, V., Thomas, B., Tong, M. and Trahan, S., 2018, Hurricane weather research and forecasting (HWRF) model: 2017, scientific documentation.
- Carrió, D.S., Homar, V., Jansa, A., Romero, R. and Picornell, M.A., 2017, Tropicalization process of the 7 November 2014 Mediterranean cyclone: Numerical sensitivity study. *Atmospheric Research*, 197, 300-312.
- Chen, H. and Gopalakrishnan, S.G., 2015, A study on the asymmetric rapid intensification of Hurricane Earl (2010) using the HWRF system. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 72(2), 531-550.
- Chen, Q. and Fang, J., 2012, Effects of vertical wind shear on intensity and structure of tropical cyclone. *Journal of Tropical Meteorology*, 18(2).
- Das, A.K., Rao, Y.R., Tallapragada, V., Zhang, Z., Bhowmik, S.R. and Sharma, A., 2015, Evaluation of the Hurricane Weather Research and Forecasting (HWRF) model for tropical cyclone forecasts over the North Indian Ocean (NIO). *Natural Hazards*, 75(2), 1205-1221.
- Davis, C. and Bosart, L.F., 2002, Numerical simulations of the genesis of Hurricane Diana (1984). Part II: Sensitivity of track and intensity prediction. *Monthly weather review*, 130(5), 1100-1124.
- Davis, C., Wang, W., Chen, S.S., Chen, Y., Corbosiero, K., DeMaria, M., Dudhia, J., Holland, G., Klemp, J., Michalakes, J. and Reeves, H., 2008, Prediction of landfalling hurricanes with the advanced hurricane WRF model. *Monthly weather review*, 136(6), 1990-2005.
- Deshpande, M., Pattnaik, S. and Salvekar, P.S., 2010, Impact of physical parameterization schemes on numerical simulation of super cyclone Gonu. *Natural Hazards*, 55(2), 211-231.
- Dodla, V.B., Desamsetti, S. and Yerramilli, A., 2011, A comparison of HWRF, ARW and NMM models in Hurricane Katrina (2005) simulation. *International journal of environmental research and public health*, 8(6), 2447-2469.
- Emanuel, K. and Zhang, F., 2016, On the predictability and error sources of tropical cyclone intensity forecasts. *J. Atmos. Sci.* 73(9), 3739-3747.
- Fahad, A.A. and Ahmed, T., 2015, Impacts of different cumulus physics over south Asia region with case study tropical cyclone Viyaru. arXiv preprint arXiv:1506.01481.
- Gentry, M.S. and Lackmann, G.M., 2006, April. The sensitivity of WRF simulations of Hurricane Ivan to choice of cumulus parameterization. In *Preprints, 27th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology*, Monterey, A, Amer. Meteor. Soc. P (Vol. 5).
- Gopalakrishnan, S., Liu, Q., Marchok, T., Sheinin, S., Surgi, N., Tuleya, R., Yablonsky, R. and Zhang, X., 2010, Hurricane Weather Research and Forecasting (HWRF) Model Scientific Documentation. Edited By L. Bernardet. 75pp.
- Gopalakrishnan, S.G., Marks Jr, F., Zhang, J.A., Zhang, X., Bao, J.W. and Tallapragada, V., 2013, A study of the impacts of vertical diffusion on the structure and intensity of the tropical cyclones using the high-resolution HWRF system. *Journal of the atmospheric sciences*, 70(2), 524-541.
- Gopalakrishnan, S.G., Marks Jr, F., Zhang, X., Bao, J.W., Yeh, K.S. and Atlas, R., 2011, The experimental HWRF system: A study on the influence of horizontal resolution on the structure and intensity changes in tropical cyclones using an idealized framework. *Monthly Weather Review*, 139(6), 1762-1784.
- Han, J. and Pan, H.L., 2011, Revision of Convection and Vertical Diffusion Schemes in the NCEP Global Forecast System. *Weather Forecast*. 26, 520-533.
- Hill, K.A. and Lackmann, G.M., 2009, Analysis of idealized tropical cyclone simulations using the Weather Research and Forecasting model: Sensitivity to turbulence parameterization and grid spacing. *Monthly weather review*, 137(2), 745-765.
- Janjic, Z. I., 1994, The step–mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927–945.
- Janjic, Z. I., 2000, Comments on “Development and Evaluation of a Convection Scheme for Use in Climate Models. *J. Atmos. Sci.*, 57, p. 3686.

- Jones, S.C., 2000, The evolution of vortices in vertical shear. II: Large-scale asymmetries. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 126(570), 3137-3159.
- Kain, J.S., 2004, The Kain-Fritsch convective parameterization: an update, *J. Applied Meteorol.* 4:170-181.
- Kanase, R.D. and Salvekar, P.S., 2014, Study of weak intensity cyclones over Bay of Bengal using WRF model. *Atmos. Climate Sci.* 4(04), 534.
- Karyampudi, V.M., Lai, G.S. and Manobianco, J., 1998, Impact of initial conditions, rainfall assimilation and cumulus parameterization on simulations of Hurricane Florence. *Mon. Weather Rev.* 126, 3077-3101.
- Krieger, J.R., Zhang, J., Atkinson, D.E., Zhang, X. and Shulski, M.D., 2009, P1. 2 Sensitivity of WRF model forecasts to different physical parameterizations in the beaufort sea region. In *The Eighth Conference on Coastal Atmospheric and Oceanic Prediction and Processes*. <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/150439.pdf>.
- Li, X. and Pu, Z., 2009, Sensitivity of numerical simulations of the early rapid intensification of Hurricane Emily to cumulus parameterization schemes in different model horizontal resolutions. *J. Meteorol Soc. Japan. Ser. II.* 87(3), 403-421.
- Marin, J.C., Raymond, D.J. and Raga, G.B., 2009, Intensification of tropical cyclones in the GFS model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(4), 1407-1417.
- Nolan, D.S. and McGauley, M.G., 2012, Tropical cyclogenesis in wind shear: Climatological relationships and physical processes. *Cyclones: Formation, triggers, and control*, pp.1-36.
- Osuri, K.K., Mohanty, U.C., 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(3), 1337-1359.
- Osuri, K.K., Nadimpalli, R., Mohanty, U.C. and Niyogi, D., 2017, Prediction of rapid intensification of tropical cyclone Phailin over the Bay of Bengal using the HWRf modelling system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143(703), 678-690.
- Pegahfar, N. and Gharaylou, M., 2020, Entropy evolution characteristics during an intense tropical cyclone. *Meteorology and Atmospheric Physics*, pp.1-22.
- Saikumar, P.J. and Ramashri, T., 2017, Impact of Physics Parameterization Schemes in the Simulation of Laila Cyclone Using the Advanced Mesoscale Weather Research and Forecasting Model. *Inte. J. Applied Engineering Res.* 12(22), 12645-12651.
- Schwartz, C.S., Kain, J.S., Weiss, S.J., Xue, M., Bright, D.R., Kong, F., Thomas, K.W., Levit, J.J., Coniglio, M.C. and Wandishin, M.S., 2010, Toward improved convection-allowing ensembles: Model physics sensitivities and optimizing probabilistic guidance with small ensemble membership. *Weather and Forecasting*, 25(1), 263-280.
- Singh, K.S. and Bhaskaran, P.K., 2017, Impact of PBL and convection parameterization schemes for prediction of severe land-falling Bay of Bengal cyclones using WRF-ARW model, *J. Atmos. Solar Terres. Phys.* 165, 10-24.
- Singh, K.S. and Bhaskaran, P.K., 2018, Impact of lateral boundary and initial conditions in the prediction of Bay of Bengal cyclones using WRF model and its 3D-VAR data assimilation system, *J. Atmos. Solar Terres. Phys.* 175, 64-75.
- Singh, K.S. and Tyagi, B., 2018, Impact of data assimilation and air-sea interaction parameterization schemes for prediction of Bay of Bengal cyclone Phailin. *Meteorol. Applications* DOI: 10.1002/met.1734.
- Singh, K.S., Tyagi, B., Verma, V.K. and Maity, S., 2019, Assessing the performance evaluation of different convective parameterization schemes in simulating the intensity of severe cyclonic storms over the Bay of Bengal region. *Meteorological Applications*, 26(4), 597-609.
- Sun, Y., Zhong, Z., Lu, W. and Hu, Y., 2014, Why are tropical cyclone tracks over the western North Pacific sensitive to the cumulus parameterization scheme in regional climate modeling? A case study for Megi (2010). *Monthly Weather Review*, 142(3), 1240-1249.
- Tang, B.H.A., 2010, Midlevel ventilation's constraint on tropical cyclone intensity. *Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology*. <http://hdl.handle.net/1721.1/62321>.
- Tiedtke, M., 1989, A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Mon. Weather Rev.* 117, 1779-1800.
- Torn, R.D., 2016, Evaluation of atmosphere and ocean initial condition uncertainty and stochastic exchange coefficients on ensemble tropical cyclone intensity forecasts. *Mon. Weather Rev.* 144(9), 3487-3506.
- Warner, T.T. and Hsu, H.M., 2000, Nested-model simulation of moist convection: The impact of coarse-grid parameterized convection on fine-grid resolved convection. *Monthly weather*

- review, 128(7), 2211-2231.
- Weisman, M.L., Davis, C., Wang, W., Manning, K.W. and Klemp, J.B., 2008, Experiences with 0–36-h explicit convective forecasts with the WRF-ARW model. *Weather and Forecasting*, 23(3), 407-437.
- Wu, C.-C., Chou, K-H., Wang, Y. and Kuo, Y-H., 2006, Tropical cyclone initialization and prediction based on four-dimensional variational data assimilation. *J. Atmos. Sci.*, 63, 2383–2395.
- Wu, L. and Wang B., 2000, A potential vorticity tendency diagnostic approach for tropical cyclone motion. *Monthly Weather Review*, 128, 1899-1911.
- Yang, B., Wang, Y. and Wang, B., 2007, The effect of internally generated inner-core asymmetries on tropical cyclone potential intensity. *Journal of the atmospheric sciences*, (4)64, 1165-1188.
- Zhang, C., Wang, Y. and Hamilton, K., 2011a, Improved Representation of Boundary Layer Clouds over the Southeast Pacific in ARW-WRF using a Modified Tiedtke Cumulus Parameterization Scheme. *Mon. Weather Rev.* 3489-3513, DOI: 0.1175/MWR-D-10-05091.1.
- Zhang, C., Wang, Y and Hamilton, K., 2011b, Improved Representation of Boundary Layer Clouds over the Southeast Pacific in ARW-WRF using a Modified Tiedtke Cumulus Parameterization Scheme. *Mon. Weather Rev.* 3489-3513, DOI: 0.1175/MWR-D-10-05091.1

Evaluation of cumulus schemes of HWRF model in forecasting tropical cyclone characteristics, Gonu tropical cyclone case study

Pegahfar, N.*

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

(Received: 29 Sep 2020, Accepted: 24 Jan 2021)

Summary

Sensitivity of numerical models in the prediction of Tropical Cyclone (TC) characteristics has been considered in numerous research studies. In this research, application of five cumulus schemes of HWRF (Hurricane Weather Research and Forecasting) model, including KF, SAS, BMJ, TiedTKE and SASAS has been examined during Tropical Cyclone Gonu (TCG) from 4 to 7 June 2007. The simulations have been conducted using three nests with 27, 9 and 3 km resolutions. To this aim, the performance of schemes in predicting TCG intensity using minimum surface pressure and maximum 10-m wind speed are analyzed. Following, their effect on forecasting the radius of maximum wind is evaluated. The parameters of lower-level divergence, upper-level convergence, potential temperature, potential vorticity, Convective Available Potential Energy (CAPE), wind vector (both horizontal and vertical components), wind shear, precipitation and radar reflectivity have been analyzed. The results of the simulations have been compared with the analysis data, IMD and TRMM observational data and routine atmospheric parameter measured at the Chabahar station. The comparison was done in different time of TCG lifetime. To examine the performance of HWRF cumulus schemes for track and intensity of the TCG, the whole life cycle of TCG was considered. To test the efficiency of HWRF cumulus schemes in predicting some dynamical and thermodynamical parameters, the time of maximum intensity of TCG (18 UTC on 4 June 2007) was focused on. To evaluate the functionality of HWRF cumulus schemes in the coastal area, the outputs were discussed in the last two days of the TCG life cycle.

Results showed that based on the used configuration, none of the five cumulus schemes predicted the TCG reaching the southern coast of Iran. Moreover, neither the pressure decrease nor the maximum wind speed were predicted accurately at the time of maximum intensity of TCG. Until TCG intensity was more than category-3, neither minimum surface pressure trend and nor the maximum wind speed trend have been forecasted well. However, for the less intense conditions, two schemes of TiedTKE and SAS produced the nearest values. The performance of all five cumulus schemes, similarly predicted the radius of the maximum wind, except TiedTKE scheme that predicted the super cyclone 6 hours earlier. The analysed and simulated of the vertical cross sections of potential temperature and horizontal wind were similar, respectively. The simulated values of the vertical component of wind were considerably larger than those from the analysis data and were also closer to the TCG center. The maximum values of simulated CAPE were off the Oman coast compared to the analysis values. Only the simulations using SASAS cumulus schemes showed the strongest potential vorticity near the surface. The simulated updrafts and downdrafts were larger than those from the analysis data. The simulated values of the major updrafts and downdrafts were closer to the center of the TCG, comparing to those from the analysis data. The upper-level divergence patterns were seen in both simulations using all 5 cumulus schemes and also in the analysis data, while the lower-level convergences were not captured neither in the simulations nor in the analysis data. The maximum value of the simulated accumulated precipitation using all 5 cumulus schemes were 80 mm in a 6 hour interval, however, the observational value from the TRMM was 25 mm/h. The predicted radar reflectivity from the simulations were similar and the simulated maximum values were the same, but the expansions of the simulated maximum values were different. All cumulus schemes predicted the wind shear values less than the analytical values. At Chabahar station, the observational values of the 10-m wind speed, sea level pressure, and temperature have been compared to the simulated values using all 5 cumulus schemes, in the period of 6-7 Jun 2007. The statistical parameters of correlation, standard deviation and root mean square were used to identify the best cumulus scheme. The least error prediction was obtained using KF cumulus schemes to predict the 10-m wind, the TiedTKE cumulus scheme to simulate sea level pressure the observed, and SASAS cumulus schemes to produce temperature.

Keywords: HWRF model, cumulus parametrization schemes, Tropical cyclone Gonu, potential vorticity, precipitation.

* Corresponding author:

pegahfar@inio.ac.ir