

مطالعه حساسیت شدت و مسیر طوفان حاره‌ای گونو به پارامترسازی‌های شارهای سطحی مدل Advanced Hurricane WRF

حسین ملکوتی^۱ - استادیار هواشناسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
مه‌ریار علی محمدی - کارشناس ارشد هواشناسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۷/۲۶ تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۲/۱۷

چکیده

خطاهای ممکن در پیش‌بینی یک طوفان حاره‌ای می‌تواند از شدت بیش از واقعیت طوفان قبل از بارش زمینی، پارامترسازی ناکارآمد تبادل گرما، رطوبت و اندازه حرکت بین سطح اقیانوس با اتمسفر و به صورت کلی ناتوانی در پیش‌بینی دقیق شدت طوفان سرچشمه گیرد. به منظور برآورد این خطاها، چندین پارامترسازی برای تعیین دقیق تبادل گرما، رطوبت و اندازه حرکت بین سطح با اتمسفر در تفکیک‌های افقی مختلف طراحی و با به کار بردن مدل AHW (Advanced Hurricane WRF) مورد آزمایش قرار گرفته شده است. طوفان حاره‌ای شدید گونو، تشکیل شده در شمال اقیانوس هند (دریای عرب) برای برآورد این خطاها انتخاب گردید و اطلاعات بهترین مسیر حرکت طوفان گونو به منظور راست آزمایی با شبیه‌سازی‌های انجام گرفته در این تحقیق، از سازمان هواشناسی هند (IMD) دریافت شده بود. نتایج شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، حساسیت پیش‌بینی‌های شدت طوفان در عبارات‌های بیشینه سرعت باد و کمینه فشار مرکزی طوفان به انواع پارامترسازی‌های تعیین شده برای تبادل گرما، رطوبت و اندازه حرکت بین سطح با اتمسفر و همچنین تفکیک افقی را نشان داده است. حساسیت سنجی‌ها نشان داد که با رساندن تفکیک افقی تا ۹ کیلومتر، با انتخاب پارامترسازی دونلن برای تبادل اندازه حرکت و پارامترسازی لارج-پوند برای تبادل گرما و رطوبت، شدت پیش‌بینی شده طوفان به طور قابل توجهی بهبود پیدا کرده است. همچنین نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که مسیر پیش‌بینی شده برای طوفان مورد نظر، بر خلاف شدت پیش‌بینی شده با افزایش تفکیک افقی، ارتقای محسوسی پیدا نکرده و گاهی افت نشان داده و برای انواع پارامترسازی‌های شارهای سطحی حساسیت معنی داری نشان نداده بود.

کلیدواژه‌ها: AHW، شارهای سطحی، طوفان گونو، شدت طوفان، مسیر طوفان.

۱. مقدمه

طوفان‌های حاره‌ای با توجه به ریزش‌های شدید باران و سرعت بالای باد همراه آن به محض ورود به منطقه خسارات جانی و مالی جبران ناپذیری را برجای می‌گذارند. به عنوان نمونه ابر طوفان گونو در کشور عمان و مناطق جنوب شرقی ایران اشاره نمود. پس با این نگاه به طوفان‌های مخرب حاره‌ای، مراکز پیش‌بینی هواشناسی و محققان را به جد مجاب خواهد کرد تا با بهترین راهکار، رخ داد این پدیده شوم را در صورت تشکیل در آینده به درستی پیش‌بینی کنند. حدود ۷٪ طوفان‌های حاره‌ای تشکیل شده در سرتاسر جهان در محدوده شمال اقیانوس هند (شامل دریای عرب و خلیج بنگال) و حدود ۲٪ طوفان‌های حاره‌ای فقط در منطقه دریای عرب تشکیل می‌شوند که می‌توانند نواحی از ایران را متأثر کنند (گزارش سازمان جهانی هواشناسی، ۲۰۰۸: ۲۸). مدل AHW به عنوان یک ابزار پر قدرت شبیه ساز و پیش‌بینی کننده در کنار مشاهدات ماهواره‌ای و سینوپتیکی می‌تواند نقش مهمی را در پیش‌بینی مسیر و شدت طوفان ایفا کند. مطالعه همدیدی بارش‌های سنگین الگوهای کم فشاری می‌تواند کمک بسزایی در شناخت فرایندهای دینامیکی و ترویدینامیکی در گیر داشته باشد که می‌توان به مطالعه لشکری و کیخسروی (۱۳۸۹) که از یک دیدگاه همدیدی به نحوه تشکیل طوفان گونو پرداخته و به مطالعه صلاحی و عالی جهان (۱۳۹۲) که به تحلیل همدیدی بارش سنگین ۲۰ اسفند ۱۳۸۹ پرداخته اشاره نمود. همچنین مشهدی و همکاران (۱۳۹۲) به شبیه سازی عددی امواج و مد ناشی از طوفان گونو^۱ در خلیج چابهار و سالاری و همکاران (۱۳۹۰) به تحلیل دینامیکی (شار هلیسیتی) طوفان گونو پرداخته‌اند؛ اما آنچه نهایتاً در بحث طوفان‌های حاره‌ای مهم است، پیش‌بینی مطلوب از مسیر و شدت این طوفان‌ها به منظور کاهش مخاطرات انسانی و محیطی می‌باشد. در راستای این منظور ملکوتی و علی محمدی (۱۳۹۱) برای اولین بار در ایران با استفاده از مدل AHW و در نظر گرفتن حساسیت به طراحی محدوده‌ها، آشیانه سازی، تفکیک افقی و زمان شروع تا حدی قابل قبول به این مهم دست پیدا کردند. این مطالعه در ادامه مطالعه قبلی و ارتقای پیکربندی اولیه می‌باشد.

پیش‌بینی مسیر طوفان در طی سال‌های گذشته بهبود چشم‌گیری داشته که می‌توان گفت تقریباً این هدف حاصل شده است (ایلسبری^۲، ۲۰۰۵، ۶۴۴). شبیه‌سازی‌های منطقه‌ای و جهانی صورت گرفته نشان می‌دهد که بالا بردن تفکیک افقی یک ضرورت برای بهبود پیش‌بینی مسیر طوفان محسوب نمی‌شود (گورس^۳، ۲۰۰۶، ۲۵). پیش‌بینی شدت طوفان بر عکس پیش‌بینی مسیر طوفان، پیچیده‌تر بوده که این

^۱ طوفان گونو قوی‌ترین چرخند حاره‌ای است که تاکنون در دریای عرب و حتی در شمال اقیانوس هند رخ داده است.

2 Elsberry

3 Goerss

تفاوت ناشی از این می‌باشد که مسیر طوفان به فرآیندهای بزرگ مقیاس جوی و اقیانوسی وابسته بوده، درحالی که شدت طوفان به ساختار درونی و ارتباطش با محیط بیرون وابسته است (مارکس و شای^۱، ۱۹۹۸، ۳۰۷). این مفهوم نشان دهنده این است که شدت طوفان یک مسئله چند مقیاسی می‌باشد. اخیراً توانمندی‌های محاسباتی و پارامترسازی برای مسائل چند بعدی^۲ حاصل شده است. این ضرورت برای ساختار درونی طوفان شامل چشم طوفان، دیواره چشم طوفان و نوارهای باران را نزدیک دیواره چشم طوفان در نهایت به کاربرد ابزارهای عددی با تفکیک افقی فقط چند کیلومتر مانند MM5^۳ و WRF^۴ منجر شد (دویس^۵، ۲۰۰۸، ۱۹۹۵). علاوه بر اهمیت تفکیک افقی در پیش‌بینی طوفان، تبادل گرمایی و رطوبتی که بین سطح اقیانوس و اتمسفر صورت می‌گیرد و ساختار لایه مرزی و همرفتی، همچنین تغییرات به وجود آمده در پارامترسازی اندازه حرکت به خاطر امواج تولید شده به خصوص در شرایط باد سطحی زیاد در سطح اقیانوس و در نهایت تأثیرات سرد شدن لایه آمیخته اقیانوس به عنوان موضوعات کلیدی در پیش‌بینی شدت طوفان محسوب می‌شوند. در این تحقیق، حساسیت شبیه‌سازی‌های طوفان گونو به انواع مختلف پارامترسازی‌های شارهای حرارتی و رطوبت و همچنین انواع مختلف پارامترسازی‌های انتقال اندازه حرکت بین سطح و جو و تفکیک افقی مورد آزمایش قرار گرفته است. البته از حساسیت شدت طوفان به پارامترسازی‌های فیزیک ابر، لایه مرزی و همرفت در پیش‌بینی شدت طوفان نمی‌توان چشم‌پوشی کرد که در این تحقیق به آن‌ها پرداخته نشده است.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش دریای عربی می‌باشد که منشا اصلی طوفان‌های حاره ای که به دریای عمان ورود دارند می‌باشد. طوفان گونو قوی‌ترین چرخند حاره‌ای است که تاکنون در دریای عرب و حتی در شمال اقیانوس هند رخ داده است. بطور معمول طوفان‌هایی که در دریای عرب شکل می‌گیرند ضعیف و دوره زندگی آن‌ها کوتاه مدت است. طوفان گونو در میان طوفان‌های دریای عرب یک استثنا می‌باشد و علت آن حرکت غیر عادی به سمت دریای عرب و سواحل کشور عمان در شمال غربی اقیانوس هند بوده است. به گزارش سازمان هواشناسی هند (۲۰۰۸) (IMD^۶) این طوفان در تاریخ یکم ژوئن سال ۲۰۰۷ با فشار مرکزی ۱۰۰۲ هکتوپاسکال در موقعیت ۱۵ درجه شمالی و ۶۸ درجه شرقی تشکیل و در

1 Marks and Shay

2 Multiscale

3 Fifth-generation Pennsylvania State University-National Center for Atmospheric Research Mesoscale Model

4 Weather Research and Forecasting

5 Davis

6 Indian Meteorological Department

تاریخ هفت، ژوئن سال ۲۰۰۷ هنگام عبور از سواحل جنوب شرقی ایران و در طول جغرافیای ۵۸ درجه شرقی از شدت آن کاسته و رو به افول گردید. طوفان گونو در اوج شدت خود کمترین فشار مرکزی حدود ۹۲۰ هکتو پاسکال و حداکثر سرعت باد ۱۲۷ نات را تجربه کرد. میزان خسارت وارده این طوفان در کشور عمان ۴ میلیون دلار با ۵۰ نفر کشته و در کشور ایران حدود ۲,۵ میلیون دلار با ۳۲ نفر کشته گزارش شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. ابزار شبیه سازی: AHW

سازمان‌های پشتیبانی کننده WRF مانند NCEP¹ و NCAR² با استفاده از ساختار کلی مدل WRF به طراحی مدل‌هایی پرداختند که بتواند مسیر، شدت و ساختار یک طوفان را به بهترین نحو ممکن پیش‌بینی کند. مدل HWRWF³ توسط NCEP و مدل AHW توسط NCAR از این قبیل ابزارها می‌باشند. مدل AHW در واقع مدل پیشرفته WRF (ARW) برای پیش‌بینی طوفان‌های حاره‌ای می‌باشد که در این مطالعه به کار گرفته شده است. از ویژگی‌های منحصر به فرد آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. قابلیت استفاده از آشیانه‌های قابل حرکت با روش آشیانه سازی دو سویه
۲. قابلیت جفت‌شدگی با مدل‌های اقیانوسی به منظور به حساب آوردن دقیق دمای سطح دریا (SST⁴)، عمق لایه آمیخته اقیانوسی و کاهش دما با عمق در زیر لایه آمیخته اقیانوسی
۳. طرح‌واره‌های اختصاصی برای ارتقای تبادل اندازه حرکت، حرارت و رطوبت بین اقیانوس و جو خصوصاً در شرایط باد سطحی زیاد
۴. دارا بودن چندین تکنیک برای ارتقای شرایط اولیه (مانند ابزار tc.exe) که موقعیت دقیق مرکز طوفان و شدت آن در زمان شروع شبیه سازی با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای و مشاهدات محلی برای مدل می‌تواند در نظر گرفته شود.

۲-۲. داده‌ها

داده‌های اولیه و شرایط مرزی در شبیه‌سازی‌های این تحقیق، داده‌های جهانی FNL⁵ سازمان NCEP می‌باشد. این داده‌ها در واقع پس پردازش شده داده‌های سیستم پیش‌بینی جهانی (GFS⁶) می‌باشد که دارای

1 National Centers for Environmental Prediction

2 National Center for Atmospheric Research

3 Hurricane WRF

4 Sea Surface Temperature

5 Final

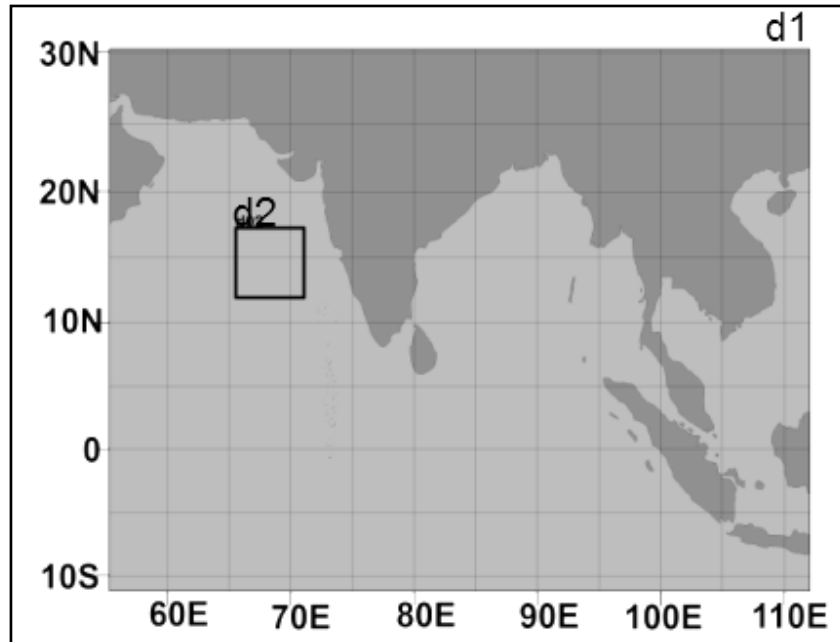
6 Global forecasting system

تفکیک $1^\circ \times 1^\circ$ و به فاصله زمانی ۶ ساعته تهیه می‌شود. داده‌های دمای سطح دریا از NCEP با تفکیک $1/12^\circ$ دریافت شد که فقط برای زمان شروع شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفت. عمق لایه آمیخته اقیانوس از سیستم همگون سازی داده‌های اقیانوسی جهانی سازمان NCEP دریافت شد که مقدار در حدود ۴۰ متر را برای ماه ژوئن نشان می‌دهد.

اطلاعات بهترین مسیر حرکت طوفان گونو به منظور راست آزمایی با شبیه‌سازی‌های انجام گرفته در این مطالعه، از سازمان هواشناسی هند (IMD) دریافت شده است.

۲-۳. روش تحقیق

مطالعه عددی قبلی روی طوفان گونو با ابزار AHW، حساسیت شبیه‌سازی‌های مسیر و شدت طوفان، تفکیک افقی و قائم و محدوده‌های انتخابی را نشان داده بودند (ملکوتی و علی‌محمدی، ۱۳۹۱: ۲۵-۳۵). از این رو موقعیت محدوده‌های انتخابی در این تحقیق برگرفته از تحقیق مذکور در حالت بهترین نتایج می‌باشد. محدوده اول با تفکیک افقی ۲۷km که دارای 110×145 نقاط شبکه در راستای محورهای X و Y می‌باشد و محدوده دوم به صورت آشیانه قابل حرکت با تفکیک ۹km (دارای 45×45 نقاط شبکه) داخل محدوده اول در نظر گرفته شد (شکل ۱). هر دو محدوده دارای ۴۱ لایه عمودی تا سطح فشاری ۰٫۵ hp می‌باشد.



شکل ۱ محدوده d1 به صورت ثابت و تفکیک افقی ۲۷km و d2 قابل حرکت و تفکیک افقی ۹ km

پارامترسازی های شار سطحی، تبادل اندازه حرکت و تبادل آنتالپی (گرما و رطوبت) را شامل می شود. دو طرحواره اصلی برای تغییرات اندازه حرکت توسط چارنوک (۱۹۹۵) و دونلن (۲۰۰۵) ارائه شده است که طرحواره چارنوک به صورت پیش فرض در مدل های عددی مورد استفاده قرار می گیرد. در رابطه چارنوک طول زبری از طریق رابطه زیر داده می شود که در آن $C_{Z0} = 0,0185$ و $O_{Z0} = 1,09 \times 10^{-5}$ می باشد.

$$z_0 = c_{z_0}(u_*^2/g) + o_{z_0} \quad (1)$$

سرعت اصطکاکی u_* ، به صورت رابطه زیر تعریف می شود که τ تنش رینولدز و ρ چگالی هوا می باشد.

$$u_* = \left(\frac{\tau}{\rho} \right)^{0.5} \quad (2)$$

رابطه بین طول زبری و سرعت اصطکاکی یک رابطه بازگشتی می باشد و مدل برای محاسبه آن از مقدارهای گام زمانی قبل استفاده و آن را تطبیق می دهد.

در لایه مرزی اتمسفری ضریب پسا به صورت رابطه زیر تعریف می شود که در آن V_{10} سرعت باد ارتفاع ۱۰ متری می باشد.

$$c_D = \left(\frac{u_*^2}{V_{10}^2} \right) \quad (3)$$

پارامتر سازی چارنوک برای ارتفاع ۱۰ متری در یک طوفان حاره ای ضریب پسا را در مقیاس ۰,۰۰۱ نشان می دهد که تا ۰,۰۰۳ برای یک طوفان حاره ای معمولی (سرعت باد ۴۰ الی ۵۰ متر بر ثانیه) افزایش پیدا می کند و این مقدار برای یک طوفان حاره ای درجه ۵ (سرعت باد بیش از ۷۰ متر بر ثانیه) به ۰,۰۰۵ می رسد. محمدی و همکاران (۱۳۹۲) در تحقیق خود جهت تعیین تأثیر توابع پایداری بر مشخصه های لایه مرزی از پارامتر سازی چارنوک استفاده کرده بودند. البته این مقدار ضریب درگ برای یک طوفان حاره ای درجه ۵ با مشاهدات محلی بلک (۲۰۰۷) که بیان کرده بود ضریب پسا در حدود ۰,۰۰۳ برای سرعت باد بالا ثابت می ماند سازگاری ندارد (دویس، ۲۰۰۸). دونلن (۲۰۰۴) با تست های آزمایشگاهی که انجام داده بود به ضریب پسا به مراتب کمتری از ضریب پسا چارنوک رسیده بود که این ضریب در آزمایشات به صورت خطی تا ۰,۰۰۲۴ برای سرعت های باد رفتار نشان داده بود. طول زبری در رابطه دونلن

$$Z_0 = 1 \cdot \exp\left(-\frac{1}{u_*^2}\right) \quad \text{از طریق معادله زیر به دست می آید:} \quad (4)$$

که دارای محدودیت کمینه $0,125 \times 10^{-6} \text{ m}$ و بیشینه $2,85 \times 10^{-3} \text{ m}$ می باشد.

موارد مطرح شده بالا بیان می کند که سرعت اصطکاک سطحی در هر دو رابطه چارنوک و دونلن مقدارهای متفاوتی از ضریب پسا تولید می کند که نهایت هر یک به طور متفاوت تغییرات محسوسی در اندازه

حرکت طوفان ایجاد می‌کنند. علاوه بر مطالب ارائه شده در خصوص تبدلات اندازه حرکت سطحی، مقیاس دمایی (θ^*) و مقیاس رطوبت سطحی (q^*) و تبدلات حرارت و رطوبت از سطح اقیانوس به لایه مرزی اتمسفری حائز اهمیت می‌باشد. ضرایب تبادل برای حرارت (C_θ) و رطوبت (C_q) با استفاده از معادلات زیر ارائه می‌شوند:

$$C_\theta = u_* \theta_* / V_1 \cdot \Delta \theta \quad C_q = u_* q_* / V_1 \cdot \Delta q \quad (5)$$

که در آن $\Delta \theta$ و Δq به ترتیب تفاوت دمای پتانسیل و رطوبت ویژه بین سطح و ارتفاع ۱۰ متری می‌باشد. رابطه‌های ۳ و ۵ نشان می‌دهد که تبادل حرارت و رطوبت سطحی با افزایش سرعت اصطکاک سطحی در نتیجه سرعت باد مخالفت می‌کند. ضریب تبادل برای آنتالپی (C_k) ترکیبی از حرارت و رطوبت می‌باشد که به صورت معادله زیر بیان می‌شود:

$$C_k = C_p \theta_* + L_v q_* \quad (6)$$

که در آن C_p و L_v به ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت و گرمای نهان ویژه می‌باشد. در پارامترسازی های مختلف تأثیرات سرعت باد در تبادل حرارت و رطوبت نسبی، C_k می‌تواند به کندی با سرعت افزایش پیدا کند (کارلسون و بولاند^۱، ۱۹۷۸، ۱۰۱۱)، با سرعت ثابت بماند (لارج و پوند^۲، ۱۹۸۱، ۳۳۴) و یا با سرعت باد کاهش پیدا کند (گارات^۳، ۱۹۹۲، ۵۵۵).

در نتیجه بحث‌های بالا، طرح‌واره‌های مختلفی برای ضرایب درگ C_D و آنتالپی C_K وجود خواهد داشت که هر یک در پیش‌بینی شدت طوفان تأثیر چشم‌گیری خواهند داشت. به‌عنوان مثال نسبت C_K به C_D در پیش‌بینی شدت طوفان از فاکتورهای حائز اهمیت می‌باشد (امانوئل^۴، ۱۹۹۵، ۳۹۷۵ و دويس، ۲۰۰۸، ۱۹۹۴). در این تحقیق، در نهایت شش شبیه‌سازی برای تفکیک افقی ۲۷ و ۹ کیلومتر و سه پارامتر شار سطحی از شروع زمان ساعت ۰۰ روز دوم ژوئن به مدت شش روز مورد آزمایش قرار گرفت. شروع زمان شبیه‌سازی‌ها ساعت ۰۰ روز دوم ژوئن برگرفته از نتایج تحقیق ملکوتی و علیمحمدی (۱۳۹۱) و کانسه (۲۰۱۱) بود که نشان دادند شروع اجرای شبیه‌سازی در زمان قبل از عمیق شدن کم فشار یا به عبارتی دیگر، زمانی که فشار مرکزی سیستم تقریباً مقدار ۱۰۰۰ هکتو پاسکال می‌باشد دارای بهترین نتایج خواهد بود. شکل ۱ محدوده

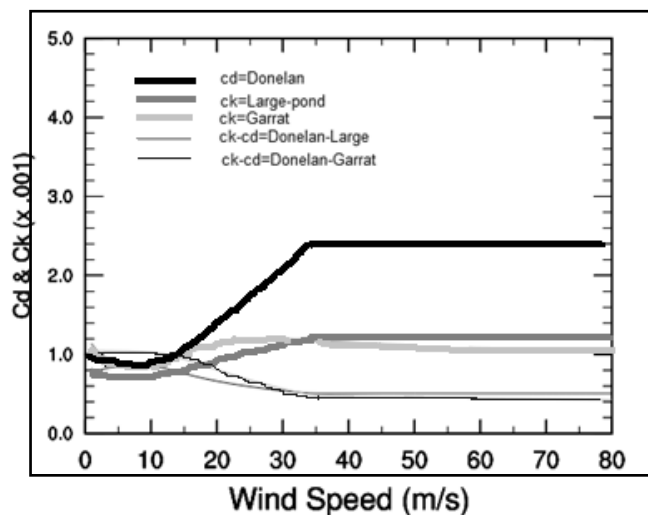
1 Carlson and Boland

2 Large and Pond

3 Garrat

4 Emanuel

انتخابی، شکل ۲ رفتار ضرایب مطرح شده با سرعت باد را در قالب نمودار، جدول ۱ پیکربندی مدل و طرح‌واره‌های فیزیکی انتخابی و جدول ۲ نام‌گذاری شش آزمایش صورت گرفته را نشان می‌دهد.



شکل ۲ تغییرات ضرایب تبادل آنتالپی (C_k) و اندازه حرکت (C_D) با سرعت باد (دودهیا، ۲۰۱۰)

جدول ۱ نمای کلی از پیکربندی مدل استفاده شده در این تحقیق

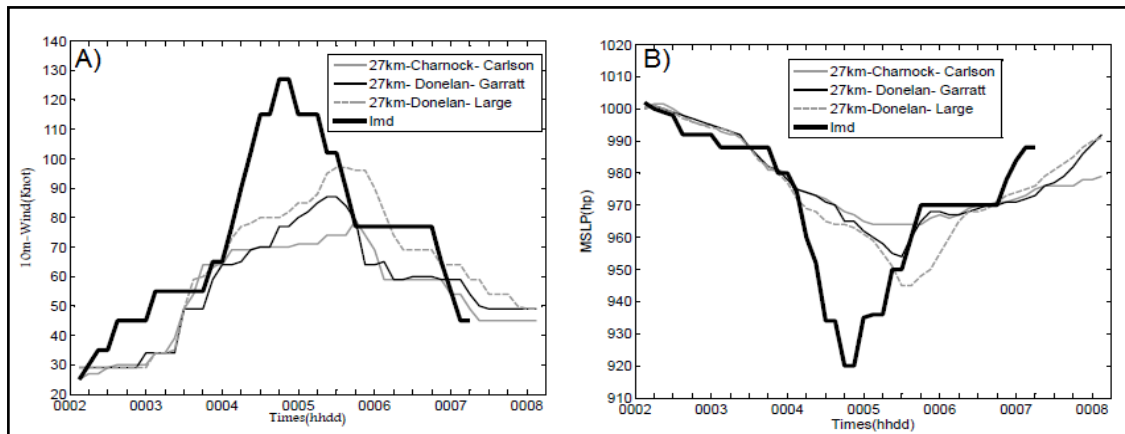
Physical parameterization	Scheme
Horizontal grid resolution	1- 27km 2- 9km
Model top	50 hp
Vertical grid mesh	41 level
Initial and Boundary conditions	(NCEP) global final analysis (FNL)
Simulation periods	146 h
Nesting	2-way
Shortwave radiation	Dudhia scheme (Dudhia, 1989)
Longwave radiation	Rapid Radiative Transfer Model (Mlawer et al., 1997)
Planetary boundary layer	Yonsei University (YSU) planetary scheme (Noh et al., 2003).
Land-surface	5-layer thermal diffusion scheme
Surface momentum exchange	1- Charnock (Charnock, 1955) 2- Donelan (Donelan et al. 2004)
Surface enthalpy exchange	1- Carlson-Boland (Carlson and Boland, 1978) 2- Large-Pond (Large and Pond, 1981) 3- Garratt (Garratt, 1992)
Ocean mixed layer feedback	Active (h_0 and Γ equal to 50 m 0.14)
Cumulus scheme	Kain-Fritsch parameterization (Kain, 2004)
microphysics scheme	WSM6 (Hong et al. 2004)

جدول ۲ اسامی شش آزمایش صورت گرفته به همراه تفکیک افقی و پارامترسازی های سطحی استفاده شده برای هر آزمایش

اسامی آزمایش ها	تفکیک افقی	C_D	C_K
27km-Charnock-Carlson	27km	Charnock	Carlson-Boland
27km-Donelan-Large	27km	Donelan	Large-Pond
27km-Donelan-Garratt	27km	Donelan	Garratt
9km-Charnock-Carlson	9km	Charnock	Carlson-Boland
9km-Donelan-Large	9km	Donelan	Large-Pond
9km-Donelan-Garratt	9km	Donelan	Garratt

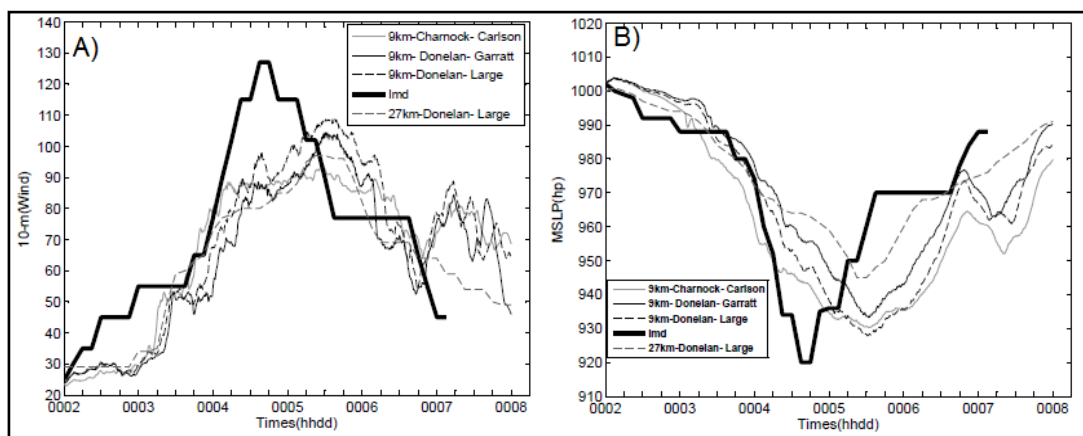
۳. بحث و نتایج

شکل ۳ نتایج شدت پیش بینی شده در دو عبارت بیشینه سرعت باد ۱۰ متری و کمینه فشار مرکزی طوفان را برای تفکیک افقی ۲۷ km نشان می دهد. به وضوح حساسیت شبیه سازی ها به سه پارامترسازی شار سطحی متفاوت در نتایج ارائه شده دیده می شود. فرمول بندی دونلن- لارج به علت ضریب پسای کمتر و ضریب آنتالپی پایدار نسبت به فرمول بندی چارنوک- کارلسون که دارای ضریب پسا بیشتر و ضریب آنتالپی افزایشی، سرعت باد بیشتر و همچنین فشار مرکزی کمتری را پیش بینی می کند. این حساسیت بعد از ۴۸ ساعت از شروع شبیه سازی زمانی که سرعت باد تا ۷۸ نات افزایش پیدا می کند، بطور واضح خود را نشان می دهد. بعد از این زمان ضریب پسای بیشتر در فرمول بندی چارنوک- کارلسون برخلاف فرمول بندی دونلن- لارج با افزایش سرعت باد مخالفت می کند. مقایسه بین دو فرمول بندی دونلن- لارج و فرمول بندی دونلن- گارات که دارای ضریب پسای یکسان و البته ضریب آنتالپی متفاوت می باشد، نشان می دهد که ضریب آنتالپی کاهشی با سرعت باد، تمایل دارد تا با افزایش سرعت باد نیز مخالفت کند. همچنین شکل ۳ برای هر سه پارامترسازی شار سطحی، نشان می دهد که در ۴۸ ساعت اول شبیه سازی سرعت باد به صورت ثابت در حال افزایش و همین طور در ۴۸ ساعت آخر شبیه سازی سرعت باد به صورت ثابت در حال کاهش می باشد. به طور کلی این نتیجه حاصل می شود که این پارامتر سازی ها در سرعت باد بالا باعث حساسیت معنی داری در شدت شبیه سازی طوفان خواهد شد و پیکربندی های فیزیکی مطلوب در طوفان های شدید می تواند نتایج دقیق تری را ارائه دهد. در مجموع برای تفکیک افقی ۲۷ km این فرمول بندی دونلن- لارج بود که پیش بینی باکیفیت تری از سرعت باد نسبت به دو فرمول بندی دیگر داشت اما همچنان ۳۰ نات سرعت بیشینه باد را کمتر نسبت به واقعیت (IMD) پیش بینی کرده است.



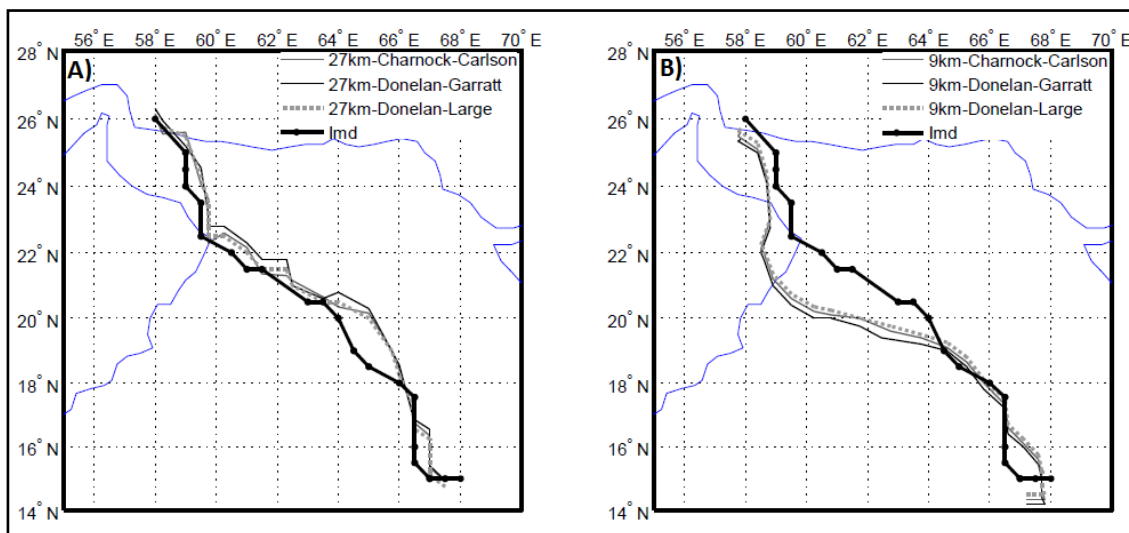
شکل ۳ شدت پیش‌بینی شده در عبارات‌های بیشینه سرعت باد ۱۰ متری (a) و فشار مرکزی طوفان (b) برای سه پارامترسازی شار سطحی در تفکیک افقی ۲۷ km

در ادامه به منظور بهبود این نتایج و مطالعه حساسیت شبیه‌سازی به قدرت تفکیک و با در نظر گرفتن تحقیقات دویسو همکاران (۲۰۱۰)، آشیانه قابل حرکت به طور جدا گانه با تفکیک‌سازی افقی ۹km داخل محدوده انتخابی (d1) در نظر گرفته شده است (شکل ۱) و برای بار دیگر سه پارامتر شار سطحی بحث شده، در این محدوده (تفکیک افقی ۹km) مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. شکل ۴ بهبود نتایج شدت پیش‌بینی شده را برای هر سه پارامترسازی شارهای سطحی در این تفکیک افقی نسبت به بهترین حالت آزمایش قبل (تفکیک افقی ۲۷km) خصوصاً در نقطه اوج شدت طوفان را نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل انتظار بود این فرمول‌بندی دونلن-لارج بود که پیش‌بینی باکیفیت‌تری از شدت طوفان به خصوص در نقطه اوج شدت طوفان نسبت به دو فرمول‌بندی دیگر ایفا کرد. فرمول‌بندی دونلن-لارج در تفکیک افقی ۹km حدود ۱۲ knot مقدار سرعت طوفان و حدود ۲۰hp فشار مرکزی طوفان را نسبت به فرمول‌بندی دونلن-لارج در تفکیک افقی ۲۷km ارتقا می‌بخشد.



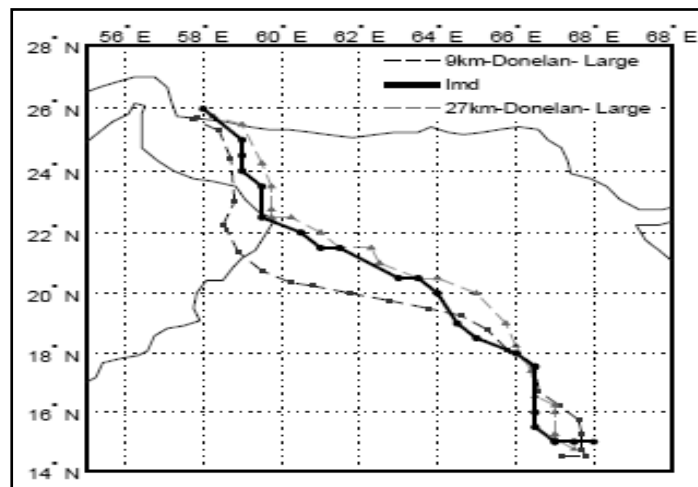
شکل ۴ شبیه شکل ۳، اما برای تفکیک افقی ۹ km و مقایسه آن با نتایج پارامترسازی بهینه دونلن-لارج در تفکیک افقی ۲۷ km

نتایج شبیه سازی‌ها نشان داده بود که مسیرهای پیش‌بینی شده، حساسیت معنی داری نسبت به پارامترهای انتخابی شار سطحی از خود نشان نمی‌دهد (شکل ۵) و البته به طور قابل توجهی نسبت به تفکیک افقی از خود حساسیت نشان داده‌اند (شکل ۶).



شکل ۵ مسیرهای پیش‌بینی شده برای سه پارامترسازی شار سطحی (تفکیک افقی ۲۷ km (a) و تفکیک افقی ۹ km (b))

همان طور که در شکل ۶ مشخص است افزایش تفکیک افقی، علی‌رغم بهبود در پیش‌بینی شدت طوفان (شکل ۴)، از کیفیت پیش‌بینی مسیر به خصوص در زمان عبور از سواحل شرقی کشور عمان کاسته است. از شکل ۶ پیداست که پیش‌بینی مدل از مسیر برای تفکیک افقی ۲۷ km در زمان برخورد به سواحل شرقی عمان با تأخیر زمانی ۱۸ ساعت، دارای اختلاف ۹ کیلومتر از IMD می‌باشد و در ادامه، طوفان با تأخیر زمانی ۱۵ ساعت و اختلاف ۴۰ کیلومتر از IMD خود را به سواحل جنوب شرقی ایران رسانده است. این در حالی است که پیش‌بینی مدل از مسیر برای تفکیک افقی ۹ km در زمان برخورد به سواحل شرقی عمان با تأخیر زمانی ۱۸ ساعت، دارای اختلاف تقریباً بیش از ۱۰۰ کیلومتر از IMD می‌باشد و البته در ادامه، طوفان با تأخیر زمانی ۲۱ ساعت و اختلاف ۴۰ کیلومتر از IMD خود را به سواحل جنوب شرقی ایران رسانده است. همان طور که در شکل ۵ و ۶ پیداست، اختلاف مسیر از واقعیت در بازه زمانی که طوفان در اوج شدت خود قرار دارد بیشینه می‌باشد، به طوری که برای تفکیک افقی ۹ km بعد از افول طوفان این اختلاف کمتر شده و مسیر پیش‌بینی شده به واقعیت نزدیک می‌شود. در نهایت این نتیجه حاصل می‌شود که بالا بردن تفکیک افقی یک ضرورت برای بهبود پیش‌بینی مسیر طوفان محسوب نمی‌شود (گورس، ۲۰۰۶، ۲۵) و چه بسا همان طور که در این تحقیق نشان داده شد مسیر را می‌تواند ضعیف‌تر نیز شبیه سازی کند.



شکل ۶ مقایسه مسیرهای پیش‌بینی شده برای تفکیک افقی ۲۷ km و تفکیک افقی ۹ km

به‌منظور ارائه خلاصه‌ای از عملکرد شش شبیه‌سازی صورت گرفته، جدول ۳ خطا در پیش‌بینی مسیر طوفان، در نزدیکی سواحل ایران و عمان و خطای فشار مرکزی و بیشینه سرعت باد ۱۰ متری طوفان در نقطه اوج شدت طوفان و همچنین خطای زمانی رسیدن طوفان به این نقاط را به طور کامل نشان می‌دهد.

جدول ۳ برای شش شبیه‌سازی صورت گرفته: خطا در پیش‌بینی مسیر طوفان، در نزدیکی سواحل ایران و عمان، خطای فشار مرکزی و بیشینه سرعت باد ۱۰ متری طوفان در نقطه اوج شدت طوفان و همچنین خطای زمانی رسیدن طوفان به این نقاط

اسامی آزمایش‌ها	ایران		عمان		نقطه اوج شدت طوفان		
	position error (km)	time error (h)	position error (km)	time error (h)	center pressure error (hp)	max wind 10m error (knot)	time error (h)
27km-Charnock-Carlson	۴۰	-۱۵	۹	-۱۸	+۴۵	-۵۰	-۲۱
27km-Donelan-Large	۴۰	-۱۵	۹	-۱۸	+۲۵	-۳۰	-۱۵
27km-Donelan-Garratt	۳۵	-۱۵	۱۹	-۱۸	+۳۵	-۴۰	-۹
9km-Charnock-Carlson	۳۳	-۲۱	۱۲۳	-۱۸	+۱۵	-۳۵	-۹
9km-Donelan-Large	۳۰	-۲۱	۱۲۰	-۱۸	+۱۰	-۱۲	-۹
9km-Donelan-Garratt	۳۵	-۱۸	۱۲۵	-۱۸	+۱۲	-۱۷	-۹

۴. نتیجه گیری

بعد از آزمایش های صورت گرفته در این تحقیق، به وضوح مشاهده گردید که شدت طوفان گونو به طور قابل توجهی نسبت به پارامترهای شار سطحی و تفکیک افقی حساسیت از خود نشان داده است. از بین پارامتر سازی های انتخابی، فرمول بندی دونلن-لارج که دارای ضریب پسا کمتر و ضریب آنتالپی ثابت با سرعت باد می باشد پیش بینی باکیفیت تری از شدت طوفان گونو نسبت به سایر پارامتر سازی های انتخابی از خود نشان داده است. نتایج حاصل شده و حساسیت نسبت به ضرایب به صورت کلی، مطالعات آزمایشگاهی موج نگاری ارائه شده توسط دونلن و چارنوک هماهنگ بوده است و تفاوت ضرایب پسا با واقعیت قابل چشم پوشی نیست که برای برآورد دقیق این ضریب نیاز به جفت شدگی مدل جوی با یک مدل موج برای پیش بینی دقیق ارتفاع موج و ضریب پسا می باشد (چن^۱، ۲۰۰۷، ۳۱۶). این راهکار از موضوعاتی است که در حال تجزیه و تحلیل و اجرایی شدن می باشد. عدم حساسیت مسیرهای شبیه سازی شده به پارامترهای شارهای سطحی به طور نمونه با نتایج دویس (۲۰۰۸) سازگاری و کیفیت مطلوب تر مسیرهای شبیه سازی شده در تفکیک افقی ۲۷ کیلومتر نسبت به تفکیک افقی ۹ km بار دیگر نتایج گورس (۲۰۰۶) را تأیید می کند که بیان کرده بود بالا بردن تفکیک افقی یک ضرورت برای بهبود پیش بینی مسیر طوفان محسوب نمی شود. در این تحقیق سعی بر این بود تا با ارزیابی آزمایش های صورت گرفته (حساسیت به پارامترهای شار سطحی و تفکیک افقی) گامی جهت ارائه پیکربندی مناسب به منظور پیش بینی مناسب تر مسیر و شدت طوفان های حاره ای منطقه دریای عربی برداشته شود. پیش بینی مطلوب از مسیر و شدت طوفان های حاره ای، می تواند پتانسیل بالای جهت مدیریت و کاهش مخاطرات انسانی و اقتصادی رخ داد یک طوفان را ایجاد کند.

کتابنامه

- سالاری، س.، فراهانی، م.، آزادی، م. (۱۳۹۰). بررسی تغییرات هلیسیتی و شار هلیسیتی در توفان استوایی گونو، مجله ژئوفیزیک ایران، شماره ۱۱۵، صفحه ۹۷-۱۱۵.
- لشکری، ح.، کیخسروی، ق.، (۱۳۸۹). تحلیل سینوپتیکی توفان گونو و اثرات آن بر جنوب شرق ایران، مجله جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، شماره ۳، صفحه ۲۰-۱.
- محمدی، ع.، فرهادیپور، س.، شیخ بهایی، ع.، (۱۳۹۲). توابع پایداری و تاثیر آن بر مشخصه های لایه مرزی اقیانوسی، موسسه ملی اقیانوس شناسی، شماره ۵، صفحه ۲۰-۳۰.

- مشهدی، ل.، حاجی زاده ذاکر، ن.، سلطانیپور، م.، مقیمی، س.، (۱۳۹۲). شبیه سازی عددی امواج و مد ناشی از توفان گنو در خلیج چابهار، فصلنامه مهندسی دریا، شماره ۱۷، صفحه ۳۷-۵۰.
- ملکوتی، ح.، علیمحمدی، م.، (۱۳۹۱). شبیه سازی طوفان حاره ای گنو با استفاده از مدل Advanced Hurricane WRF. حساسیت به طراحی محدوده ها، آشیانه سازی، تفکیک افقی و زمان شروع، مجله علوم و فنون دریایی خرمشهر، شماره ۱۵، صفحه ۲۵-۳۵.
- صلاحی، ب.، عالی جهان، م.، (۱۳۹۲). تحلیل سینوپتیک مخاطرات اقلیمی شهرستان یاسوج، مطالعه موردی: بارش سنگین ۲۰ اسفند ۱۳۸۹، مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۵، صفحه ۷۳-۸۹.
- Black, P. G., D'Asaro, E.A., Drennan, W. M., French, J. R., Niiler, P. P., Sanford, T. B., Terrill, E. J., Walsh, E. J., Zhang, J. A., 2007. Air-sea exchange in hurricanes: Synthesis of observations from the Coupled Boundary Layer Air-Sea Transfer Experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society* 88, 357-374.
- Carlson, T. N., Boland, F. E., 1978. Analysis of urban-rural canopy using a surface heat flux/temperature model. *Journal of Applied Meteorology* 17, 998-1013.
- Charnock, H., 1955. Wind stress on a water surface. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 81, 639-640.
- Chen, S. S., Price, J. F., Zhao, W., Donelan, M. A., Walsh, E. J., 2007. The CBLAST-Hurricane Program and the next-generation fully coupled atmosphere-wave-ocean models for hurricane research and prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society* 88, 311-317.
- Davis, C., Wang, W., Chen, S. S., Chen, Y., Corbosiero, K., DeMaria, M., Dudhia, J., Holland, G., Klemp, J., Michalakes, J., Reeves, H., Rotunno, R., Snyder, C., Xiao, Q., 2008. Prediction of landfalling hurricanes with the Advanced Hurricane WRF model. *Monthly Weather Review* 136, 1990-2005.
- Donelan, M. A., Haus, B. K., Reul, N., Plant, W. J., Stiassnie, M., Graber, H. C., Brown, O. B., Saltzman, E. S., 2004. On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds. *Geophysical Research Letters* 31, L18306, doi:10.1029/2004GL019460.
- Dudhia, J., Davis, C., Wang, W., Torn, R., 2011. HFIP Physics in AHW. Hurricane Tutorial NCAR/ NESL/ MMM, Apr 27 - 29, 2011.
- 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.
- Dudhia, J., Chen, S., 2004. A revised approach to ice microphysics process for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Monthly Weather Review* 132, 103-120.

- Elsberry, R. L., 2005. Achievement of USWRP hurricane landfall research goal. *Bulletin of the American Meteorological Society* 86, 643–645.
- Emanuel, K. A., 1995. Sensitivity of tropical cyclones to surface exchange coefficients and a revised steady-state model incorporating eye dynamics. *Journal of the Atmospheric Sciences* 52, 3969–3976.
- Frank, W. M., George, S. Y., 2007. The interannual variability of tropical cyclones. *Monthly Weather Review* 135, 3587–3598.
- Garratt, J. R., 1992. *The Atmospheric Boundary Layer*. Cambridge University Press, 316 pp.
- Goerss, J. S., 2006. Prediction of tropical cyclone track forecast error for Hurricanes Katrina, Rita, and Wilma. Preprints, 27th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, Monterey, CA, American Meteorological Society 11A.1., 1-12.
- Hong, S. Y., Dudhia, J., Chen, S. H., 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Monthly Weather Review* 132, 103–120.
- Indian Meteorological Department report 2008. Report on Cyclonic Disturbances over North Indian Ocean during 2007. RSMC-Tropical Cyclone, New Delhi, 1-93.
- Large, W. G., Pond, S., 1981. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *Journal of Physical Oceanography* 11, 324–336.
- Lashkari, H., Kikhosravi, GH., 2010. Synoptic Analysis of Gonu storm and its effects on the East South of Iran. *Journal of Geography and Environmental Planning* 3, 1-20.
- Malakooti, H., Alimohammadi, M., 2012. Simulation of Cyclone Gonu using the Advanced Hurricane WRF: Sensitivity to Domain Coverage, Nesting, Resolution and Starting Time. *Journal of Marine Science and Technology*, Khorramshahr 15, 25-35.
- Marks, F. D., Shay, L. K. 1998. Landfalling tropical cyclones: Forecast problems and associated research opportunities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 305–323.
- Mashhadi, L., HajizadehZaker, N., Soltanpour, M., Moghimi, S., 1392. Numerical simulation of waves and tide induced Gonu storm in Chabahar Gulf. *Journal of Marine Engineering* 17, 37-50.
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., Clough, S. A., 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the long-wave. *Journal of Geophysical Research* 102, 16663–16682.
- Mohammadi, A., Farhadipour, S., Shekhbahaei, A., 2013. Stability functions and its impact on the oceanic boundary layer characteristics. *National Institute of Oceanography* 5, 20-30.

- Noh, Y., Cheon, W. G., Hong, S. Y., 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.
- Kain, J. S., 2004. The Kain–Fritsch Convective Parameterization: An Update. *Journal of Applied Meteorology* 43, 170–181.
- Kanase, R. D., Salvekar, P. S., 2011. Numerical simulation of severe cyclonic storm LAILA (2010): Sensitivity to initial condition & cumulus parameterization scheme. *Disaster Risk Vulnerability Conference*. Germany, March 12–14, 2011.
- Salari, S., Farahani, M., Azadi, M., 2011. A study of helicity and helicity flux in the Gonu tropical storm. *Iranian Journal of Geophysics* 2, 97-115.
- Salahi, B., Alyjhan, M., 2013. Synoptic analysis of climate risks in Yasouj city, Case Study: Heavy rain on 20th Esfand 1389, *Journal of Geography and Environmental Hazards* 5, 73-89.
- World Meteorological Organization technical document, 2008. Tropical cyclone operational plan for the Bay of Bengal and the Arabian Sea. Document No. WMO/TDNo.84, 1-89.
- 54- Webb, R. H., Rathburn, S. L., 1988. Paleoflood hydrologic research in the southwestern United States. *Transportation Research Record* 1201, 9-21.