

بررسی اثر مد ناشی از طوفان حاره‌ای آشوبا بر سواحل بوشهر و چابهار (خلیج فارس و دریای عمان)

رویا فروتنی^۱، مریم راهبانی^{۲*}، محمد پاخیره‌زن^۳

۱- کارشناسی ارشد فیزیک دریا، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، پست الکترونیکی: r111.foroutani@gmail.com

۲- استادیار گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، پست الکترونیکی: maryamrahbani@yahoo.com

۳- دانشجوی دکتری فیزیک دریا، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، پست الکترونیکی: mht_pa@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۰/۲۰

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۶/۶/۲۰

چکیده

هدف از این تحقیق، بررسی اثر طوفان آشوبا در شکل‌گیری مدطوفان در سواحل ایرانی خلیج فارس و دریای عمان است، که در ژوئن ۲۰۱۵ رخ داد. به دلیل ویژگی‌های این مناطق، مطالعه‌ی طوفان‌های پدید آمده در این مناطق حائز اهمیت است. به منظور شبیه‌سازی مدطوفان ناشی از چرخندهای حاره‌ای آشوبا از مدول هیدرودینامیک نرم‌افزار MIKE، نسخه ۲۱ استفاده شد. بدین‌منظور پس از کالیبره کردن، مدل به دو صورت با و بدون تأثیر باد اجرا شده و نتایج حاصل در بنادر بوشهر و چابهار مورد بررسی قرار گرفت. این نتایج نشان‌دهنده‌ی وجود مدطوفان مثبت (افزایش تراز آب حدود ۵۰ cm) در چابهار است، درحالی‌که تغییر تراز سطح در بوشهر جزئی بود. همچنین مطالعه‌ی اثر باد بر جریان نشان می‌دهد که طوفان مذکور اثر قابل ملاحظه‌ای بر سرعت و جهت جریان در ایستگاه چابهار داشته است. در حالی‌که سرعت و جهت جریان در بوشهر تأثیر قابل ملاحظه‌ای از طوفان نپذیرفته است.

کلمات کلیدی: طوفان آشوبا، مدطوفان، نرم‌افزار MIKE21، شبیه‌سازی جریان، بوشهر، چابهار.

۱. مقدمه

زیادی در داخل و خارج از کشور در این زمینه فعالیت داشته‌اند که از تحقیقات داخل کشور می‌توان به کارهای مشهدی و همکاران (۱۳۹۲)، محمدمهدیزاده و کسبی (۱۳۹۳) و زنگانه (۱۳۹۴) اشاره نمود. مدطوفان به عواملی چون بزرگی، مسیر، سرعت و شدت سیستم طوفان، وضعیت عمق در نزدیکی ساحل (عمق آب) و شکل خط ساحلی وابسته است (Arns et al., 2015). به علاوه مدطوفان تحت تأثیر ویژگی‌های ساحل از جمله توپوگرافی، تغییرات عمق و زبری بستر قرار دارد (Graham et al., 2017).

سایکلون‌های حاره‌ای در شمال اقیانوس هند از ۵۵ تا ۹۰ درجه طول شرقی و ۵ تا ۳۰ درجه عرض شمالی گسترش

چرخندهای (سایکلون‌ها) حاره‌ای نمونه‌ای از پدیده‌های جوی هستند که سالانه چندین بار مناطق نزدیک به استوا را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این طوفان‌ها که انرژی خود را از گرما و رطوبت اقیانوس‌ها و دریاها دریافت می‌کنند، بر جریان آب تأثیر گذاشته و هنگام رسیدن به سواحل موجب بالا آمدن سطح آب و جاری شدن سیلاب در این نواحی می‌شوند. با توجه به این که ۴۴ درصد از جمعیت جهان در ۱۵۰ کیلومتری سواحل زندگی می‌کنند (Resio and Westerink, 2008)، مدطوفان تهدیدی اساسی برای زندگی و فعالیت انسان‌ها محسوب می‌شود. بدین سبب محققان

بیشتر آشکار می‌شود. طوفان آشوبا از نظر دسته‌بندی طوفان‌های سایکلونی^۱ طوفان شدیدی محسوب نمی‌شود. با این وجود خروجی‌های حاصل از اجرای مدل، نشان‌دهنده‌ی تأثیر آن بر سواحل ایران هرچند به صورت جزئی است. بنابراین می‌توان پیش‌بینی کرد افزایش شدت و مدت زمان طوفان موجب افزایش اثر آن بر سواحل ایرانی شود. این تأثیر زمانی بیشتر خواهد شد که مدطوفان با مد نجومی مرتفع‌تر هم‌زمان شود، چرا که در این وضعیت احتمال خطر به وجود آمدن سیلاب ناشی از طوفان نیز بالا خواهد رفت. اهمیت مدل‌سازی تراز سطح آب حاصل از طوفان و مطالعه‌ی آن می‌تواند در جهت پیش‌بینی میزان خطرات طوفان‌های آینده و چگونگی مواجهه با آن‌ها حائز اهمیت باشد. همین‌طور خطر آسیب‌های سازه‌ای فاجعه‌ساز ناشی از طراحی ضعیف یا زیان‌های مالی بزرگ ناشی از طراحی اضافی را به حداقل رساند (Haigh et al., 2014).

تصویری از مدطوفان حاصل از طوفان چرخندی آشوبا در شکل ۲ نشان داده شده است که نتیجه‌ی مدل اجرا شده توسط GDACS^۲ می‌باشد. با توجه به مقیاس رنگ‌ها در این تصویر می‌توان مشاهده نمود که در اثر این طوفان، کاهش سطح آب در بخش وسیعی از خلیج فارس و از جمله بندر بوشهر رخ داده‌است، که آن را می‌توان به مد منفی طوفان نسبت داد. این مقدار بر اساس مقیاس تصویر مقادیری کمتر از ۲۰ سانتی‌متر است. با توجه به مسیر حرکت طوفان این احتمال داده شد که سطح آب در چابهار تحت تأثیر طوفان افزایش یابد. بنابراین در این تحقیق با هدف بررسی چگونگی تأثیر طوفان آشوبا بر تغییرات تراز سطح آب در سواحل جنوبی ایران، دو بندر بوشهر و چابهار در دو سمت سواحل ایران انتخاب گردیدند. سپس با استفاده از مدل MIKE، نسخه ۲۱ اقدام به شبیه‌سازی اثر طوفان بر آب‌های منطقه شد، تا بدین‌وسیله بتوان تأثیر باد را در افزایش و کاهش تراز سطح کلی آب که به ترتیب در ایستگاه‌های اندازه‌گیری آب‌های ساحلی چابهار و بوشهر ثبت شده است بررسی نمود.

علت انتخاب بندر چابهار نزدیکی آن به مسیر طوفان و تأثیر بخش شمالی سیستم طوفانی بر آن بود، اما بندر بوشهر براساس نتایج مشاهده شده در شکل ۲ مبنی بر به وجود آمدن مدطوفان

می‌یابند (Webster et al., 2005). در این قسمت از کره‌ی زمین دو نوع سایکلون، شامل پیش‌مونسون (می) و مونسون شمال‌شرقی (اکتبر و نوامبر) وجود دارد. برخی سایکلون‌ها نیز مربوط به مونسون جنوب‌غربی هستند و در ماه‌های ژوئن و سپتامبر شکل می‌گیرند (Krishna, 2009). به علت موقعیت جغرافیایی خلیج فارس و دریای عمان نفوذ سایکلون‌ها به این مناطق به ندرت اتفاق می‌افتد و وقوع چرخنده‌های قدرتمندی چون گونو که در سال ۲۰۰۷ رخ داد، روی دریای عربی بسیار نادر است، به‌طوری که چرخنده‌ها در دریای عربی در مقایسه با خلیج بنگال با نسبت یک به چهار به وجود می‌آیند (Dube et al., 1997).

یکی از چرخنده‌هایی که در ژوئن ۲۰۱۵ در منطقه شکل گرفت طوفان آشوبا بود. این طوفان در روز هفتم ژوئن در موقعیت جغرافیایی $14/5^{\circ}N$ و $68/5^{\circ}E$ روی شرق بخش مرکزی دریای عربی تشکیل شده و در جهت شمال‌غربی به سمت سواحل شرقی کشور عمان حرکت نمود. شدت این طوفان تا روز دهم ژوئن ادامه داشت، اما از روز یازدهم به علت برش عمودی زیاد باد، همچنین نفوذ هوای خشک از سمت غرب از شدت آن کاسته شده و به یک کم‌فشار عمیق تبدیل شد (Mujumdar et al., 2015). این طوفان نسبت به پیش‌بینی‌های انجام‌شده بارها تغییر جهت داد که در شکل ۱ مسیر واقعی طوفان (خط تیره‌تر) نسبت به یکی از جهت‌های پیش‌بینی شده (خط روشن‌تر) نشان داده شده است. نحوه‌ی حرکت این طوفان و تأثیرات آن بر منطقه توسط برخی محققان مورد بررسی قرار گرفته است (نعمتی و همکاران، ۱۳۹۵; Prasad et al., 2016).

با توجه به این‌که طوفان‌های پدید آمده در دریای عربی به ندرت به دریای عمان نفوذ پیدا می‌کنند و رویداد مدطوفان که بر خلیج عمان تأثیرگذار باشد تا حدودی نادر است (Dube et al., 2009)، مطالعه‌ی هر طوفانی که در این محدوده اتفاق می‌افتد دارای اهمیت است. طوفان آشوبا پیش از رسیدن به قدرت یک شدید به خشکی برخورد نموده و از شدت آن کاسته شده است. با این حال بر اساس گزارش سالانه‌ی وقایع و اقلیم (۲۰۱۵) موجب ایجاد طوفان در سواحل شرقی خلیج عمان گشته است.

پیش‌بینی میزان افزایش یا کاهش احتمالی سطح آب‌های ساحلی می‌تواند در جهت ایمن‌سازی زیرساخت‌های مناطق ساحلی مورد توجه قرار گیرد، به ویژه به دلیل موقعیت اقتصادی، صنعتی و گردشگری بندر جنوبی ایران اهمیت این پیش‌بینی

¹ Saffir Simpson

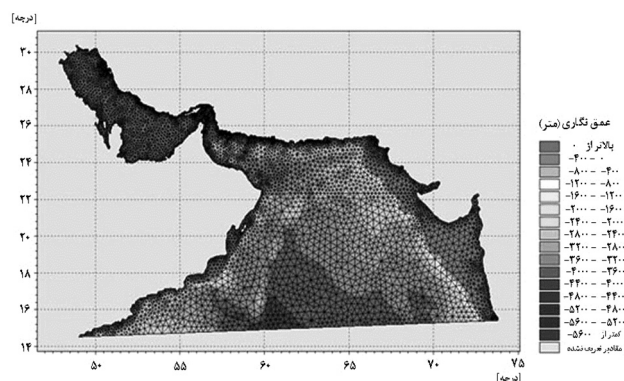
² Global Disaster Alert and Coordination System

داده‌های اندازه‌گیری شده اعتبارسنجی و کالیبره شد. جهت شبیه‌سازی، اطلاعات ورودی به مدل شامل داده‌های عمق‌سنجی، باد، فشار و همچنین داده‌های مربوط به شرایط مرزی منطقه به‌گونه‌ای که قابل استفاده توسط مدل باشند، آماده شد و مدل اجرا گردید. سپس تغییرات سطح آب محاسبه شده توسط نرم‌افزار MIKE، نسخه ۲۱ با داده‌های اندازه‌گیری شده در بنادر بوشهر و چابهار مقایسه شد و با تغییر ضرایب واسنجی شامل ضریب مقاومت بستر و لزجت گردابی کالیبره گردید.

داده‌های عمق از دو منبع C-Maps Chart Norwegian و TPX08-ATLAS با دقت 0.03×0.03 درجه تهیه شدند و اطلاعات مربوط به باد و فشار با دقت 0.125×0.125 درجه و با گام زمانی ۶ ساعت از سایت ECMWF به‌دست آمد. همچنین داده‌های جزر و مدی بندر مکلا از سایت tides4fishing و بندر مارماگائو از سایت mobilegeographics به صورت تراز سطح آب تهیه شد.

۱-۲ منطقه‌ی مورد مطالعه

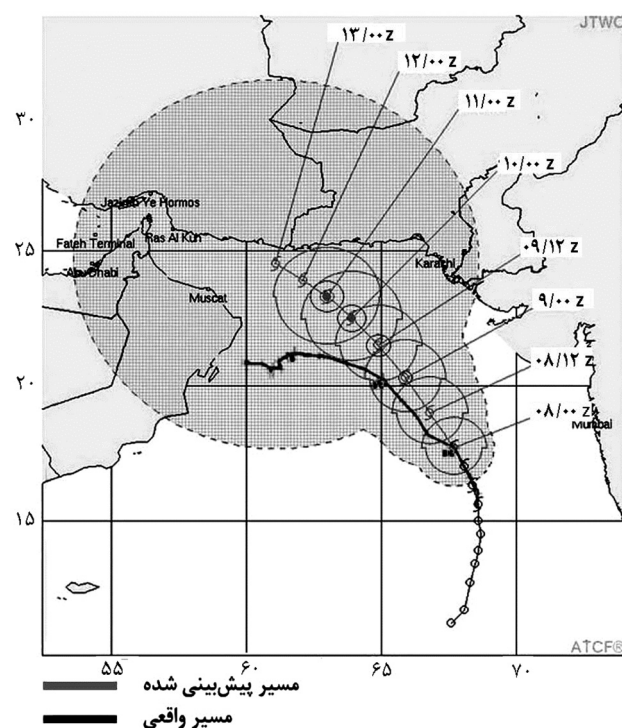
برای شبیه‌سازی اثر طوفان آشوبا، دریای عربی که محل تشکیل و مسیر حرکت طوفان در آن قرار دارد و همچنین دریای عمان و خلیج فارس انتخاب شدند که دارای یک مرز باز در بخش جنوبی حد فاصل بنادر مارماگائو در هند و مکلا در یمن هستند (شکل ۳).



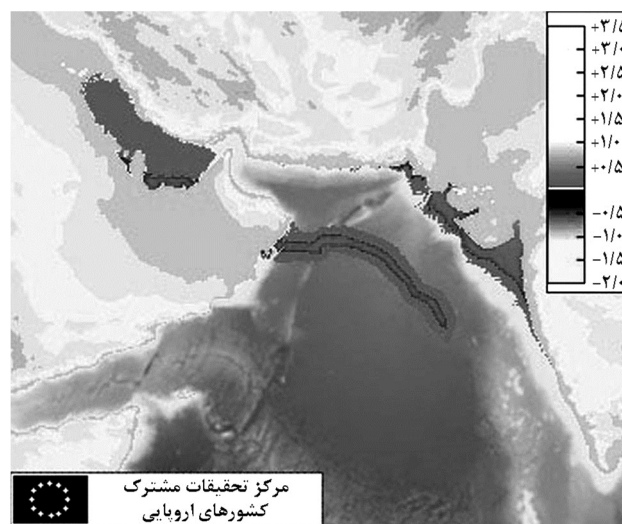
شکل ۳: فایل عمق‌سنجی و شبکه‌بندی منطقه‌ی مورد مطالعه

همان‌طور که گفته شد جهت بررسی اثر طوفان بر سواحل ایرانی، بندر بوشهر و چابهار انتخاب شدند که اولی در بخش کم‌عمق منطقه‌ی مورد مطالعه یعنی شمال‌غربی خلیج فارس قرار دارد و عمق آب در نزدیکی سواحل آن کمتر از ده متر است و

منفی و همچنین امکان دسترسی به داده‌های اندازه‌گیری شده انتخاب گردید.



شکل ۱: مسیر پیش‌بینی شده و مسیر واقعی طوفان آشوبا (JTWC و Unisys)



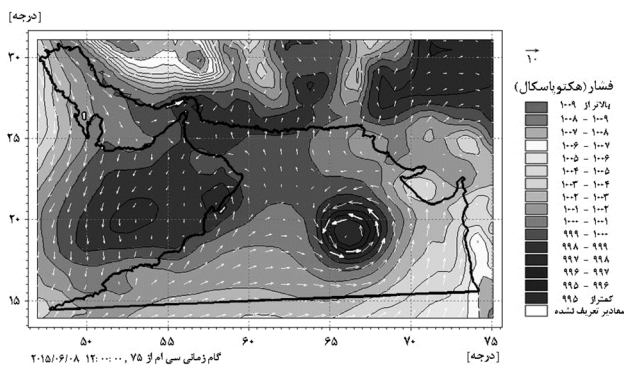
شکل ۲: مدطوفان ایجاد شده توسط طوفان آشوبا (GDACS)

۲. مواد و روش‌ها

در این تحقیق تغییرات سطح آب در منطقه‌ی مورد مطالعه به کمک نرم‌افزار MIKE، نسخه ۲۱ (مدول FM) شبیه‌سازی شد که توسط انیستیتو هیدرولیک دانمارک تهیه گردید. سپس به کمک

عمیق‌تر دارای بزرگی بیشینه 1 deg ، در شمال دریای عربی 0.05 deg ، در دریای عمان 0.04 deg ، در تنگه‌ی هرمز 0.03 deg و در خلیج فارس 0.02 deg می‌باشد. در بنادر بوشهر و چابهار که هدف اصلی این تحقیق هستند، حداکثر بزرگی شبکه‌های ایجاد شده 0.01 deg تعیین شده‌است. در شکل ۳ عمق‌نگاری و شبکه‌بندی منطقه ارائه شده است که داده‌های عمق از دو منبع پیش‌تر ذکر شده‌ی C-Maps Chart و Norwegian TPX08-ATLAS به مدل داده شده است.

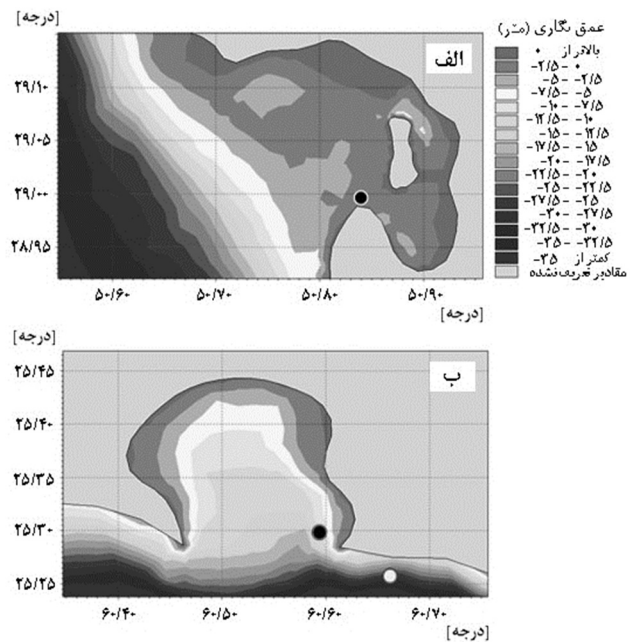
به‌منظور ارائه‌ی داده‌های باد به مدل، شامل مؤلفه‌های سرعت‌های مداری ($u10$) و نصف‌النهاری ($v10$) در ارتفاع ۱۰ متری از سطح دریا به همراه فشار سطحی، از آمار باد مؤسسه‌ی CAMS Near Real Time استفاده شد. این داده‌ها از نوع ECMWF هستند. با توجه به این‌که مرکز کم‌فشار در روز هفتم ژوئن در موقعیت جغرافیایی 14°N و 68.5°E تشکیل شده است، داده‌های باد و فشار برای محدوده‌ی جغرافیایی 14°N تا 31°N و 47°E تا 75°E تهیه شده و به کمک آن‌ها فایل باد مورد نیاز به صورت متغیر در زمان و مکان، شامل داده‌های شش ساعته‌ی باد و فشار جو در ۷۵ گام زمانی از ساعت صفر روز اول ژوئن تا ساعت هیجده روز نوزدهم همان ماه با دقت 0.125×0.125 درجه ساخته شده است. در شکل ۵ تغییرات بردارهای سرعت و فشار در ساعت ۱۲ روز هشتم ژوئن مشاهده می‌شوند که مکان طوفان آشوبا در این تصویر به خوبی مشخص است.



شکل ۵: گام زمانی سی‌ام از تغییرات سرعت باد و فشار جو

منطقه‌ی مورد مطالعه تنها یک مرز باز در بخش جنوبی حد فاصل بنادر مارماگائو در هند و مکلا در یمن دارد (شکل ۳). در بسیاری از مطالعات عددی مناطق ساحلی، اعمال نیروی جزر و مدی به مدل عمدتاً از طریق مرز باز انجام می‌شود (Haigh et al., 2014). در این تحقیق نیز داده‌های جزر و مدی به‌عنوان شرایط

دومی در شمال‌شرقی دریای عمان واقع شده است و به آب‌های نسبتاً عمیق راه دارد. ژرفای آب در کرانه‌های خلیج چابهار کم است که به سمت دهانه‌ی خلیج افزایش یافته و به $14/5$ متر می‌رسد (مروتی و علی‌محمدی، ۱۳۸۵). در شکل ۴ عمق‌نگاری آب‌های نزدیک این دو بندر و مکان ایستگاه‌هایی که در آن‌ها اعتبار‌سنجی مدل به کمک داده‌های اندازه‌گیری شده انجام گرفته، نشان داده شده است.



شکل ۴: عمق‌نگاری آب‌های نزدیک بندر بوشهر (الف) و چابهار (ب) و مکان ایستگاه‌های واقع در این دو بندر

۳-۲ برایی مدل

در تهیه فایل عمق‌سنجی، شبکه‌بندی مثلثی نامنظم استفاده شده است که امکان تمرکز دقت فضایی در نواحی با خطر بالای مدطوفان و نواحی پیچیده‌ی هیدرودینامیک را فراهم می‌کند. علاوه بر این با استفاده از مش‌بندی نامنظم، زمان اجرای شبیه‌سازی به حداقل رسیده و نیازی به استفاده از شبکه‌بندی تودرتو نیست (Burston et al., 2013). فایل تهیه شده دارای 7425 گره و 13263 المان می‌باشد که اندازه‌ی شبکه‌ها جهت افزایش دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی در نزدیکی سواحل ایرانی خلیج فارس و دریای عمان کوچکتر است. همچنین برای کاهش زمان اجرای مدل در مناطق دورتر، شبکه‌بندی بزرگتری به‌کار رفته است. به‌طوری‌که المان‌های ایجاد شده در بخش‌های

است، لزجت گردابی ۰/۰۰۵ و نیز استفاده از مقاومت بستر به صورت عدد مانینگ و به مقدار ۸۱ مدل کالیبره شد. جهت بررسی دقیق‌تر میزان درستی مدل، داده‌های محاسبه شده نسبت به داده‌های واقعی به کمک پارامترهای آماری چون Bias، RMSE^۱، ضریب همبستگی پیرسون (CC^۲) و ضریب ناش-ساتکلیف (NSE^۳) اعتبارسنجی شدند (معادلات ۱ تا ۴) که نتایج حاصل برای هر دو بندر بوشهر و چابهار در جدول ۱ آمده است. در معادلات ۱ تا ۴ که به کمک آن‌ها پارامترهای ذکر شده محاسبه شده‌اند، مقدار اندازه‌گیری شده، y_i مقدار محاسبه شده توسط مدل، x_i میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و \bar{y} میانگین مقادیر محاسبه شده است. لازم به ذکر است که RMSE نشان-دهنده خطای کلی مدل است که تأکید آن بر دوره‌های مقادیر بزرگتر حاصل از مدل است (Bastidas et al., 2016).

مقادیر نزدیک به صفر برای Bias و RMSE نشان‌دهنده دقت بیشتر مدل و در نتیجه کمتر بودن خطای مدل است. ضریب همبستگی بین ۱ و -۱ تغییر می‌کند و به‌ازای مقدار صفر میان مدل و واقعیت هیچ همبستگی وجود ندارد. درحالی که هرچه مقدار به یک نزدیکتر باشد، نشان‌دهنده همبستگی بیشتر است و اعداد منفی همبستگی معکوس را نشان می‌دهند. مقدار NSE بین یک تا ∞ - تغییر می‌کند که مقادیر منفی نشان‌دهنده عدم توافق خوب بین مدل و واقعیت است. مقادیر بین صفر و یک صحت مدل را در مقایسه با داده‌های میدانی نشان می‌دهد و هرچه مقدار به یک نزدیکتر باشد درستی نتایج بیشتر است (Moriassi et al., 2007).

$$\text{Bias} = \bar{y} - \bar{x} \quad (1)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (2)$$

$$\text{CC} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

مرزی به مرز باز اعمال شده است. برای تهیه فایل شرایط مرزی، داده‌های جزر و مدی بندر مارماگائو از سایت mobilegeographics (tides.mobilegeographics.com) و اطلاعات مربوط به مگلا از سایت tides4fishing (http://www.tides4fishing.com) از ساعت صفر روز اول ژوئن تا ساعت صفر روز نوزدهم ژوئن برداشت شد و پروفایل سری مربوط به این مرز با گام زمانی ۳۰۰ ثانیه جهت ورود به مدل تهیه گردید. لازم به ذکر است، با توجه به وسعت منطقه در تهیه فایل‌های داده‌های ورودی به مدل، تمام اطلاعات و همچنین نتایج به‌دست آمده و داده‌های اندازه‌گیری شده جهت اعتبارسنجی، برحسب ساعت جهانی هستند.

پس از ورود داده‌های آماده شده به مدل، مدل با گام‌های زمانی متفاوتی چون ۵۰، ۱۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ ثانیه اجرا شد و در نهایت گام زمانی ۳۰۰ ثانیه به‌عنوان مناسب‌ترین گام زمانی از جهت پایداری مدل و نزدیکی نتایج به داده‌های اندازه‌گیری شده انتخاب شد و مدل به مدت هیجده روز یعنی از اول تا ۱۸ ژوئن اجرا گردید. با توجه به بازه‌ی زمان فعالیت طوفان یعنی هفتم تا دوازدهم ژوئن، مدت زمان مدل‌سازی با در نظر گرفتن زمان گرم شدن مدل، همچنین زمان لازم جهت انتقال کامل اثر طوفان به خلیج فارس و دریای عمان، از شش روز قبل تا شش روز بعد از مدت زمان فعالیت طوفان انتخاب شد. اعتبارسنجی مدل در بندر ایرانی بوشهر و چابهار با مقایسه‌ی نتایج تغییر سطح به‌دست آمده و داده‌های اندازه‌گیری شده مربوط به ایستگاه بوشهر در موقعیت جغرافیایی $22^{\circ} 74' N$ و $50^{\circ} 50' 14/90'' E$ و ایستگاه چابهار در موقعیت جغرافیایی $28^{\circ} 59' N$ و $60^{\circ} 36' E$ که از سازمان نقشه‌برداری کشوری تهیه شد، انجام گرفت.

۳-۲ اعتبارسنجی و واسنجی مدل

جهت اعتبارسنجی، داده‌های تراز سطح حاصل از مدل در ایستگاه‌های بوشهر و چابهار با مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی هم‌ارز مقایسه شدند. برای نزدیک شدن نتیجه‌ی شبیه‌سازی به مقادیر واقعی، ضرایب واسنجی مدل شامل ضریب مقاومت بستر و ضریب لزجت گردابی تغییر داده شد. همچنین در اجرای مدل‌ها چند فایل عمق‌سنجی با شبکه‌بندی‌های مختلف به کار برده شد و در نهایت با استفاده از فایل عمق‌سنجی که در شکل ۳ ارائه شده

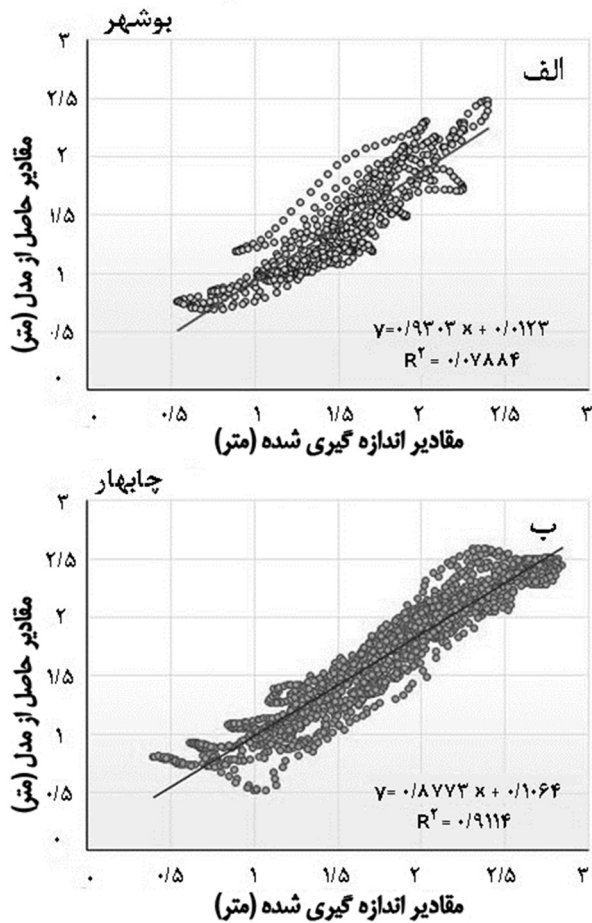
¹ Root Mean Square Error

² Correlation Coefficient

³ Nash-Sutcliffe Efficiency

با توجه به آنچه در مورد پارامترهای آماری گفته شد، از مقایسه‌ی مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده توسط پارامترهای آماری، میزان صحت نتایج مدل بیشتر مشخص می‌شود (جدول ۱). مقایسه‌ی نتایج آماری به‌دست آمده با محدوده‌ی مورد قبول این پارامترها نشان‌دهنده‌ی توافق میان نتایج حاصل از مدل و مقادیر واقعی است. همچنین براساس این‌که اندازه‌های NSE بزرگتر از ۰/۶۵ به عنوان مقادیر خوب تا بسیار خوب مشخص می‌شوند (Moriasi et al., 2007; Hiza, 2017) می‌توان نتیجه گرفت، کالیبراسیون انجام شده می‌تواند در محدوده‌ی خوب تا بسیار خوب درجه‌بندی شود.

در ادامه جهت بررسی نحوه‌ی پراکنش داده‌های تراز سطح، نمودار پراکندگی داده‌های تراز سطح حاصل از مدل و اندازه‌گیری شده مطابق شکل ۷ تهیه شده‌شد. شکل ۷ الف و ب، به ترتیب نمودار پراکندگی مربوط به ایستگاه بوشهر و چابهار را نشان می‌دهند.



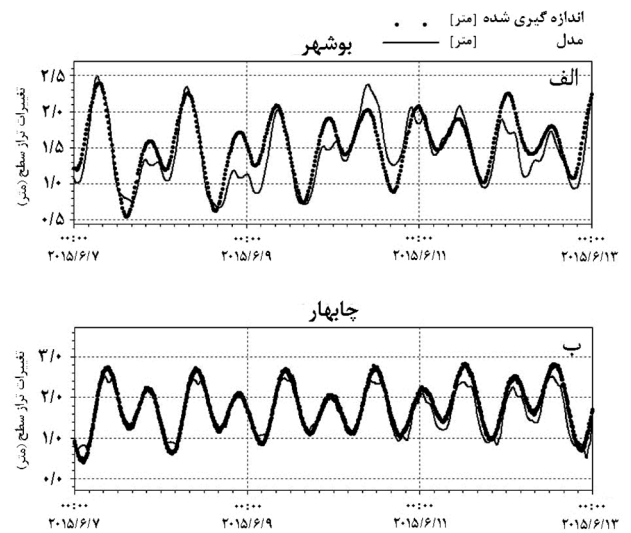
شکل ۷: نمودار پراکندگی تغییرات تراز سطح آب (الف) بندر بوشهر، (ب) بندر چابهار

جدول ۱: پارامترهای آماری برای نتایج شبیه‌سازی بندر بوشهر و چابهار

ایستگاه	بوشهر	چابهار
Bias	-۰/۰۹۵	-۰/۱۱
RMSE	۰/۲۲	۰/۲۰۸
CC	۰/۸۹	۰/۹۵۴
NSE	۰/۷۱	۰/۸۷۵

۳. نتایج و بحث

جهت مقایسه‌ی تراز سطح آب به‌دست آمده از شبیه‌سازی طوفان و تراز سطح آب اندازه‌گیری شده، سری‌های زمانی حاصل از مدل و داده‌های واقعی مربوط به دو بندر بوشهر و چابهار در شکل ۶ ارائه شده است. با دقت در شکل ۶ الف می‌توان دریافت که در بندر بوشهر توافق نسبتاً خوبی میان مدل و واقعیت در مد با ارتفاع بیشتر^۱ نسبت به مد با ارتفاع کمتر^۲ وجود دارد. مقایسه‌ی سری‌های زمانی بندر چابهار نیز نشان دهنده‌ی توافق قابل قبولی میان مدل و واقعیت است (شکل ۶ ب). لازم به ذکر است که دلیل خطای مشاهده شده در تراز سطح، بین نتایج مدل و داده‌های میدانی بخشی ناشی از خطای مدل و بخشی ناشی از خطا در داده‌های اندازه‌گیری است. خطای دوم به خصوص در مورد بندر بوشهر بسیار محتمل‌تر است.



شکل ۶: مقایسه‌ی داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده‌ی تغییرات سطح آب در (الف) بندر بوشهر، (ب) بندر چابهار

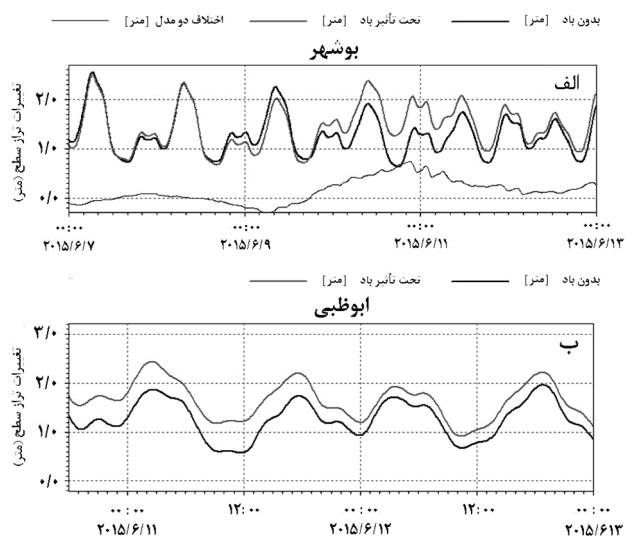
¹ Higher High Water
² Lower High Water

همان‌طور که در شکل ۷ و نیز جدول ۱ دیده می‌شود، شرایط مدل در ایستگاه چابهار بهتر از بوشهر است. با این حال معادله بهترین خط روند و نزدیکی آن به محور $x=y$ نشان از قابل قبول بودن نتایج مدل است.

۱-۳ تأثیر جهت و سرعت وزش باد بر ارتفاع تراز سطح آب بوشهر و چابهار

جهت بررسی اثرات طوفان بر جریان و تراز سطح آب، گلبادهای نشان داده شده در شکل ۸ با استفاده از خروجی مؤلفه‌های باد (ECMWF) از مدل اجرا شده، برای بنادر بوشهر و چابهار در بازه‌ی زمانی فعالیت طوفان تهیه شده است. همچنین آنجا که در روند تحقیق مشخص شد، تغییرات تراز سطح آب در بوشهر می‌تواند ناشی از اثرات طوفان در سواحل جنوبی خلیج فارس باشد. گلباد بندر ابوظبی نیز در همان بازه‌ی تهیه شد که در شکل ۸ نشان داده شده است. گلباد مربوط به بندر بوشهر نشان می‌دهد، باد غالب این ایستگاه به سمت جنوب شرقی در حال وزیدن بوده که حداکثر سرعت آن به بیش از $6/8$ متر بر ثانیه رسیده است.

دائمی آب در خلیج فارس است (Reynolds, 1993) و در ابوظبی رو به ساحل می‌وزد. بنابراین می‌تواند موجب افزایش تراز سطح آب در سواحل ابوظبی (مدطوفان مثبت) و کاهش ارتفاع آب (مدطوفان منفی) در سواحل بوشهر شود. دقت در گلباد بوشهر نشان می‌دهد، ۱۷ درصد از کل بازه‌ی زمانی طوفان در این بندر جو آرامی داشته است که به علت فاصله‌ی این بندر از مکان تشکیل طوفان است. به عبارت دیگر طوفان آشوبا در مسیر حرکت خود به بندر بوشهر نرسیده و تنها در اواخر دوره‌ی فعالیت خود آن را تحت تأثیر قرار داده است. تأثیر باد بر بندر چابهار با توجه به باد غالب رو به شمال‌غربی و غرب می‌تواند موجب افزایش سرعت جریان به داخل خلیج و در نتیجه افزایش تراز سطح آب شود. این بندر در تمام مدت فعالیت طوفان دارای جو ناآرامی بوده و سرعت باد غالب به بیش از $6/8$ متر بر ثانیه رسیده است. در اینجا به منظور بررسی وضعیت منطقه و نحوه‌ی تأثیر چرخند آشوبا بر ایستگاه‌های مورد نظر، از مدل کالیبره شده با ضرایب کالیبراسیون مشابه استفاده گردید تا شرایط بدون در نظر گرفتن اثر طوفان نیز شبیه‌سازی شود. سپس، نتایج تغییرات تراز سطح تحت تأثیر طوفان و بدون اثر آن با هم مقایسه شدند (شکل ۹).

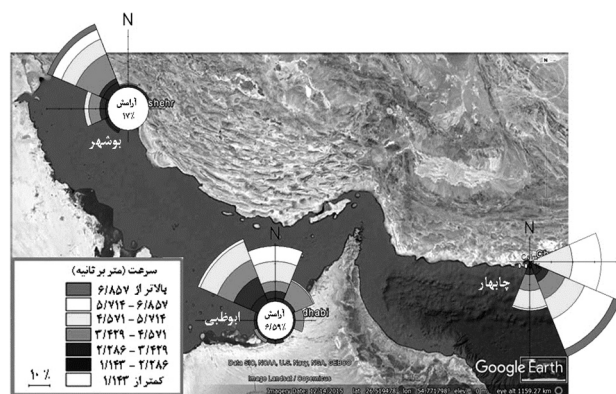


شکل ۹: تغییرات سطح آب در بنادر بوشهر و ابوظبی در مدل تحت تأثیر باد و در غیاب باد و جریان پسماند حاصل، در بندر بوشهر

مقایسه‌ی سری‌های زمانی تراز سطح مربوط به ابوظبی (شکل ۹ ب)، نشان می‌دهند که در حضور طوفان، تراز سطح آب در مقایسه با شرایط بدون حضور طوفان حدود $27/7$ سانتی‌متر در

۱-۳ تأثیر جهت و سرعت وزش باد بر ارتفاع تراز سطح آب بوشهر و چابهار

شکل ۸: گلبادهای مربوط به بوشهر، چابهار و ابوظبی در بازه‌ی زمانی فعالیت طوفان



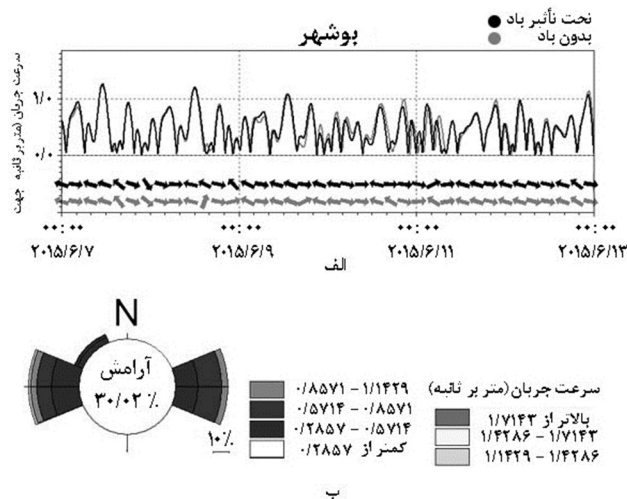
شکل ۸: گلبادهای مربوط به بوشهر، چابهار و ابوظبی در بازه‌ی زمانی فعالیت طوفان

در ابوظبی نیز باد غالب اول رو به جنوب شرقی و باد غالب دوم رو به جنوب بوده اما بیشینه‌ی سرعت آن از حدود $6/8$ متر بر ثانیه بیشتر نشده است. این جهت باد غالب که به علت وجود یک ناحیه‌ی کم‌فشار (طوفان آشوبا) در جنوب شرقی و یک ناحیه پرفشار در شمال بوشهر به وجود آمده است، در بندر بوشهر در امتداد خط ساحل و خلاف جهت الگوی جریان

شده است. همان‌طور که دیده می‌شود برخلاف جریان پسماند در بندر بوشهر، در چابهار این مقدار برای کل دوره‌ی طوفان همواره مقداری مثبت را نشان می‌دهد که مشخصاً نشان از مدطوفان مثبت در این ایستگاه دارد.

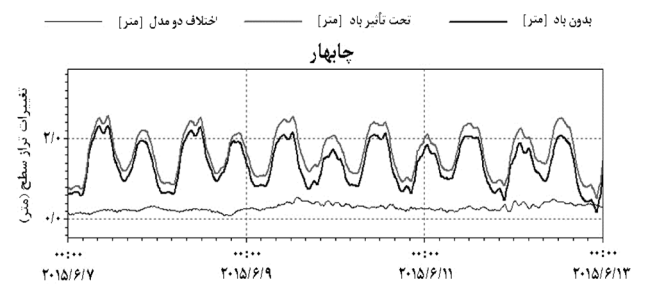
۳-۲ تأثیر جهت و سرعت وزش باد بر جریان آب بوشهر و چابهار

به منظور بررسی تغییرات سرعت و جهت جریان در اثر طوفان آشوبا نقاط نشان داده شده در شکل ۴ (یک نقطه در بندر بوشهر و دو نقطه در بندر چابهار) در نظر گرفته شد. سپس داده‌های مربوطه از مدل‌های اجرا شده تحت تأثیر جزر و مد تنها و در نظر گرفتن هم‌زمان اثر جزر و مد و طوفان استخراج شد. نتایج برای بندر بوشهر در شکل ۱۱ و برای بندر چابهار در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نمایش داده شده است. در شکل ۱۱ الف به وضوح می‌توان دید که تأثیر باد بر سرعت جریان بوشهر قابل توجه نیست و جریان غالب منطقه از نوع جزر و مدی است. برای بررسی دقیق‌تر با رسم گلجریان مربوط به مدت زمان فعالیت طوفان در نقطه‌ی مورد نظر (شکل ۱۱ ب) مشخص می‌شود که در ایستگاه بوشهر جهت جریان‌های غالب، رو به شرق هنگام مد و به سمت غرب در هنگام جزر هستند. در عین حال جریان غرب‌سو اندکی سرعت بیشتری دارد که دلیل آن همسو بودن با گردش کلی خلیج فارس می‌تواند باشد.



شکل ۱۱: الف) تغییرات سرعت و جهت جریان (با اعمال باد به مدل و در غیاب باد) و ب) گلجریان ایستگاه بندر بوشهر

روز یازدهم ژوئن افزایش پیدا کرده است و با شروع روز دوازدهم این افزایش کمی کاهش یافته است که با گزارش GDACS مبنی بر افزایش تراز سطح آب ۳۰ سانتی‌متری در ابوظبی مقارن ساعت ۲۲ روز یازدهم ژوئن هم‌خوانی دارد. همچنین سری‌های زمانی تراز سطح مربوط به بوشهر (شکل ۹ الف) نشان می‌دهند، که تأثیر طوفان در ابتدا قدری موجب افزایش سطح آب شده است. اما این افزایش به سرعت میرا شده به نحوی که در روز دوازدهم افزایش سطح قابل صرف‌نظر است. می‌توان گفت جهت باد ناشی از چرخند آشوبا (شکل ۸) در منطقه موجب هدایت آب به سمت جنوب شرقی و لذا افزایش ارتفاع تراز سطح آب در ابوظبی شده و به همین دلیل تراز سطح آب در بوشهر تحت تأثیر باد و جزر و مد نسبت به مدلی که تنها با جزر و مد اجرا شده تغییرات قابل ملاحظه‌ای را نشان نمی‌دهد. اما می‌توان گفت که وقوع مدطوفان مثبت در ابوظبی در اثر طوفان آشوبا موجب کاهش جزئی تراز سطح آب در بوشهر شده باشد. همچنین در شکل ۱۰ الف مقدار جریان پسماند^۱ برای بندر بوشهر در قسمت زیرین شکل به صورت یک خط باریک آورده شده است، تا بتوان اثر وضعیت جوی را در هنگام طوفان در ارتفاع سطح آب منطقه دقیق‌تر بررسی کرد (Pugh and Spencer et al., 2015 Woodworth, 2014). همان‌طور که دیده می‌شود جریان پسماند در این دوره در بندر بوشهر ابتدا به شکل جزئی مد منفی را نشان می‌دهد که در ادامه به مد مثبت تغییر می‌یابد.



شکل ۱۰: تغییرات تراز سطح آب در بندر چابهار در مدل تحت تأثیر باد و در غیاب باد و جریان پسماند حاصل

سری زمانی تراز سطح آب مربوط به چابهار که در شکل ۱۰ آمده است، در تمام زمان‌ها افزایش تراز سطح آب را نشان می‌دهد. همچنین در این شکل مقدار جریان پسماند نیز مشخص

^۱ Residual

کرده‌اند. با توجه به نزدیکی ایستگاه ۲ (شکل ۴) به ایستگاه رودیک، حداکثر سرعت جریان حاصل در ایستگاه ۲ (شکل ۱۳) مطابقت خوبی با یافته‌های نعمتی و همکاران (۱۳۹۵) نشان می‌دهد.

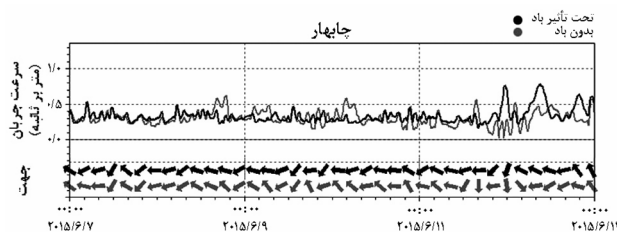
۳-۳ بررسی ماهواره‌ای اثر طوفان آشوبا بر ارتفاع موج در بندر چابهار

در این بخش به منظور نشان دادن تأثیر طوفان آشوبا بر آب‌های مجاور بندر چابهار سعی شد با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای ارائه شده توسط مؤسسه‌ی ECMWF، تأثیر این طوفان در منطقه به شکل تصویری برای قبل و هنگام طوفان مقایسه شود. با توجه به این‌که در کل منطقه‌ی مورد مطالعه داده‌های تراز سطح موجود نبود، به‌ناچار از داده‌های ارتفاع موج شاخص جهت تهیه‌ی تصاویر استفاده شد. شکل ۱۴ (الف) و (ب) به ترتیب ارتفاع موج شاخص را در تاریخ ۱ ژوئن (پیش از شروع طوفان)، و ۱۱ ژوئن (هنگامی که طوفان در چابهار مشاهده شده) در سال ۲۰۱۵ نشان می‌دهد. با این‌که افزایش ارتفاع امواج لزوماً به مفهوم مدطوفان نمی‌باشند، اما همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است، افزایش ارتفاع کلی امواج در منطقه تا بیش از دو برابر بی‌تأثیر بر افزایش تراز سطح آب نیست.

۴. نتیجه‌گیری

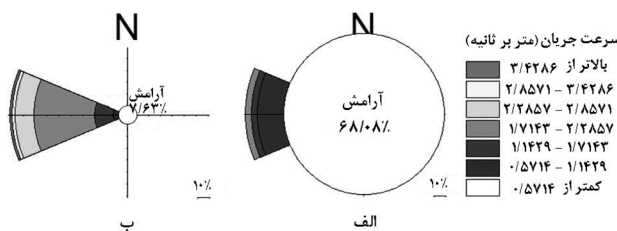
این تحقیق با هدف پی‌بردن به چگونگی اثر طوفان آشوبا بر تغییر ارتفاع تراز سطح آب سواحل ایرانی خلیج فارس و دریای عمان به انجام رسید. برای این منظور از مدول FM نرم‌افزار MIKE، نسخه ۲۱ جهت شبیه‌سازی تغییرات ارتفاع سطح آب در دو بندر بوشهر و چابهار استفاده شد. با توسعه و اجرای مدل، کالیبراسیون و اعتبارسنجی انجام گرفت و دقت مدل کالیبره شده به کمک داده‌های میدانی تأیید شد. به‌علاوه به کمک پارامترهای آماری نظیر اریبی، جذر میانگین مربع خطاها (RMSE)، ضریب همبستگی پیرسون و ضریب ناش-ساتکلیف نیز میزان دقت کالیبراسیون مدل امتحان شد که برای پارامترهای یادشده به ترتیب در بندر بوشهر مقادیر $0/095$ ، $0/22$ ، $0/89$ ، $0/71$ و در بندر چابهار به ترتیب $0/11$ ، $0/208$ ، $0/954$ و $0/875$ به‌دست آمد. با توجه به محدودی‌مورد قبول برای پارامترهای مذکور، مقادیر به‌دست آمده نشان دادند که کالیبراسیون مدل از دقت نسبتاً مطلوبی برخوردار است.

از سویی تغییرات سرعت جریان در نقطه‌ی ۱ ایستگاه چابهار (شکل ۱۲) نشان می‌دهد که برخلاف بوشهر، وزش باد تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر سرعت جریان این ایستگاه داشته است که به علت نزدیک بودن چابهار به مسیر حرکت طوفان است. جهت بردارهای جریان در این نقطه نشان می‌دهند که آب به سمت شمال‌غربی تا جنوب‌غربی در جریان بوده و تأثیر باد بر جهت جریان در این شکل کاملاً آشکار است.



شکل ۱۲: تغییرات سرعت و جهت جریان (با اعمال باد به مدل و در غیاب باد) ایستگاه بندر چابهار (نقطه‌ی ۱)

با توجه به این‌که مکان نقطه‌ی ۱ به‌طور مستقیم تحت تأثیر طوفان قرار ندارد، برای نشان دادن اثر باد بر سرعت جریان، گلجریان‌های مربوط به نقطه‌ی ۲ (شکل ۴)، برای زمان قبل از طوفان (شکل ۱۳ الف) و در مدت طوفان (شکل ۱۳ ب) تهیه شد. همان‌طور که در تصویر نشان داده شده است، در این نقطه قبل از طوفان حدود ۶۸ درصد آب به آرامی جریان داشته، در حالی‌که در هنگام طوفان، مدت زمان جریان آرام تا حدود $7/6$ درصد کاهش یافته و بیشینه‌ی سرعت جریان از $3/4$ متر بر ثانیه بالاتر رفته است.



شکل ۱۳: گلجریان بندر چابهار در ایستگاه ۲ (الف) قبل از طوفان، (ب) بازه‌ی زمانی فعالیت طوفان

نعمتی و همکاران (۱۳۹۵)، با استفاده از دستگاه‌های جریان‌سنج که در ایستگاه رودیک (با فاصله حدود ۵۰ کیلومتر در جنوب شرقی نقطه ۲) نصب بوده به سرعت جریان‌های نسبتاً بالا (حدود ۴ متر بر ثانیه) حتی در عمق، ناشی از طوفان آشوبا اشاره

منطقه‌ی نکا. چهاردهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، زاهدان، ۸ صفحه.

مروتی، ح؛ علی محمدی، ح.ر.، ۱۳۸۵. مطالعه، بررسی، آنالیز و نحوه‌ی جداسازی میزان ارتفاع جزر و مد و خیز آب طوفان دریایی در خلیج چابهار. هفتمین همایش بین‌المللی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی تهران، ۶ صفحه.

مشهدی، ل؛ حاجی‌زاده ذاکر، ن؛ سلطانپور، م؛ مقیمی، س.، ۱۳۹۲. شبیه‌سازی عددی امواج و مد ناشی از توفان گنو در خلیج چابهار.

نشریه مهندسی دریا، سال نهم، شماره ۱۷، صفحات ۵۰ - ۳۷. محمدمه‌دی‌زاده، م؛ کسبی، م.س.، ۱۳۹۳. پیش‌بینی ارتفاع امواج ناشی از مد توفان در سواحل ایرانی دریای عمان. مجله‌ی علوم و فنون دریایی، سال سیزدهم، شماره ۱، صفحات ۴۱-۵۰.

نعمتی، م.ح؛ کوهستانی، ک؛ باقری، م؛ سلیمی، ح.، ۱۳۹۵. تغییرات با فرکانس پایین‌تر از لختی محلی در اثر طوفان آشوبا. هیجدهمین همایش صنایع دریایی جزیره‌ی کیش، ۶ صفحه.

Arns, A.; Wahl, T.; Dangendorf, S.; Jensen, J., 2015. The impact of sea level rise on storm surge water levels in the northern part of the German Bight. Coastal Engineering, 96:118-131.

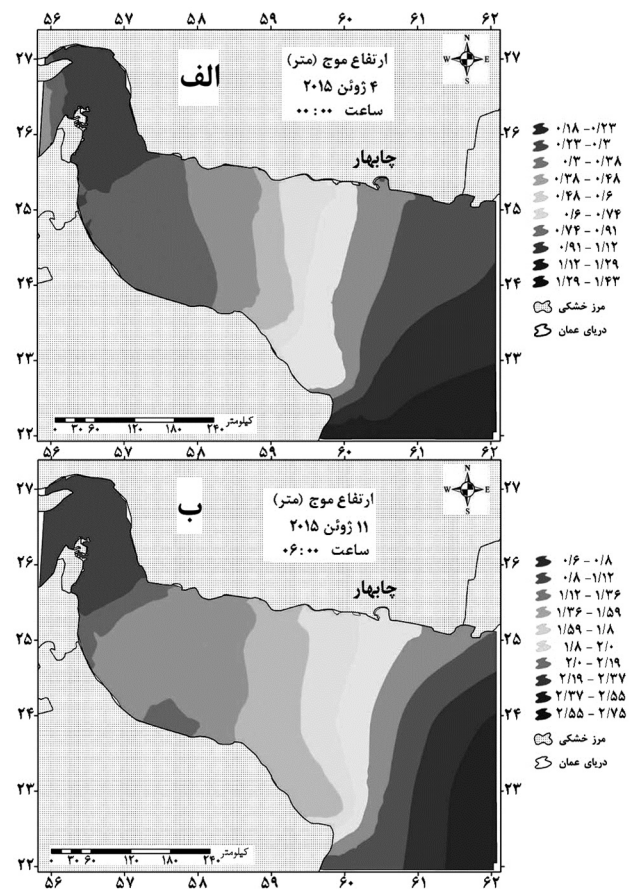
Burston, J.; Nose, T.; Tomlinson, R., 2013. Real-time numerical simulation of storm surge inundation using high-performance computing for disaster management, Queensland. In Proceeding of the 20th international congress on modelling and simulation, Adelaide, Australia, 2047-2053PP.

Bastidas, L.A.; Knighton, J.; Kline, S.W., 2016. Parameter sensitivity and uncertainty analysis for a storm surge and wave model. Natural Hazards and Earth System Sciences, 16(10): 2195.

Dube, S.K.; Rao, A.D.; Sinha, P.C.; Murty, T.S.; Bahulayan, N., 1997. Storm surge in the Bay of Bengal and Arabian Sea: the problem and its prediction. MAUSAM, 48(2): 283-304.

Dube, S.K.; Jain, I.; Rao, A.D.; Murty, T.S., 2009. Storm surge modelling for the Bay of Bengal and Arabian Sea. Natural Hazards, 51(1): 3-27.

Graham, L.; Butler, T.; Walsh, S.; Dawson, C.; Westerink,



شکل ۱۴: ارتفاع موج شاخص در منطقه‌ی خلیج عمان در تاریخ الف) ۱ ژوئن ساعت صفر، ب) ۱۱ ژوئن ساعت ۶ صبح

در مرحله‌ی بعد جهت تحقیق چگونگی تأثیر باد بر تراز سطح آب، از مدل اجرا شده و کالیبره شده اثر طوفان حذف و مدل دوباره اجرا شد. مقایسه‌ی نتایج این دو مدل نشان داد که وضعیت جوی مورد بررسی (طوفان آشوبا) تأثیر قابل ملاحظه‌ای در تراز سطح آب در ایستگاه بوشهر نداشته است. این در حالی است که تقریباً در تمام مدت زمان فعالیت طوفان در ایستگاه چابهار افزایش تراز سطح آب مشاهده شده است. همچنین بررسی جریان‌ها در منطقه بیانگر این مطلب بود که باد تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر سرعت و جهت جریان ایستگاه بوشهر نداشته، اما در ایستگاه چابهار طوفان موجب تغییرات زیادی در سرعت و حتی جهت جریان شده است.

منابع

زنگانه، م.، ۱۳۹۴. تخمین میزان بالآمدگی آب ناشی از طوفان در

- research report on the 2015 Southwest Monsoon. ESSO/IITM/SERP/SR/02 (2015)/185. <http://www/tropmet.res.in>.
- Pugh, D.; Woodworth, P., 2014. Sea-level science: understanding tides, surges, tsunamis and mean sea-level changes. Cambridge University Press, 407P.
- Prasad, V.S.; Johny, C.J.; Sodhi, J.S., 2016. Impact of 3D Var GSI-ENKF hybrid data assimilation system. *Journal of Earth System Science*, 125(8): 1509-1521.
- Reynolds, R.M., 1993. Physical oceanography of the Persian Gulf, Strait of Hormuz, and the Gulf of Oman- Results from the Mt Mitchell expedition. *Marine Pollution Bulletin*, 27: 35-59.
- Resio, D.T.; Westerink, J.J., 2008. Modeling the physics of storm surges. *Physics Today*, (9): 33-38.
- Spencer, T.; Brooks, S.M.; Evans, B.R.; Tempest, J.A.; Möller, I., 2015. Southern North Sea storm surge event of 5 December 2013: water levels, waves and coastal impacts. *Earth-Science Reviews*, 146: 120-145.
- Webster, P.J.; Holland, G.J.; Curry, J.A.; Chang, H.R., 2005. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science*, 309(5742): 1844-1846.
- J.J., 2017. A measure-theoretic algorithm for estimating bottom friction in a coastal inlet: case study of bay st. Louis during hurricane gustav (2008). *Monthly Weather Review*, 145(3): 929-954.
- Haigh, I.D.; Wijeratne, E.M.S.; MacPherson, L.R.; Pattiaratchi, C.B.; Mason, M.S.; Crompton, R.P.; George, S., 2014. Estimating present day extreme water level exceedance probabilities around the coastline of Australia: tides, extra-tropical storm surges and mean sea level. *Climate Dynamics*, 42(1-2): 121-138.
- Hiza, B.S., 2017. Groundwater and tidal controls on wetland hydrology, Julie J. Metz wetland mitigation bank. Woodbridge, Virginia (Doctoral dissertation, Old Dominion University), 136P.
- Krishna, K.M., 2009. Intensifying tropical cyclones over the North Indian Ocean during summer monsoon-global warming. *Global and Planetary Change*, 65(1): 12-16.
- Moriasi, D.N.; Arnold, J.G.; Van Liew, M.W.; Bingner, R.L.; Harmel, R.D.; Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3): 885-900.
- Mujumdar, M.; Gnanaseelan, C.; Rajeevan, M., 2015. A