





## Evaluating the performance of SWAN model in forecasting storm surges over the Persian Gulf and Oman Sea in a case study (June 7-10, 2023)

Ghassabi, Z.<sup>1</sup>  | Karami, S.<sup>1</sup>   | Layeghi, B.<sup>2</sup> 

1. Assistant Professor, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Sciences(RIMAS), Tehran, Iran.
2. PhD in Marine Physics.

**Corresponding Author E-mail:** [karamis.62@gmail.com](mailto:karamis.62@gmail.com)

(Received: 08 Apr 2024, Revised: 29 May 2024, Accepted: 09 Jun 2024, Published online: 09 Jun 2024)

### Abstract

Today, a large part of the world's economy depends on the seas, and many people work on the waters every day; therefore, accurately predicting the height of waves and their characteristics is more important than ever. In this study, the ability of the SWAN model to predict storm surges in the Persian Gulf and the Oman Sea on June 7-9, 2023, when the National Meteorological Organization had issued several orange and red warnings, was investigated. For this purpose, the SWAN model was run once with the wind data obtained from the ERA5 reanalysis data and again with the output of the WRF model. For bathymetric data, gebco data with a resolution of 15 arc seconds were used. The results showed that at sometimes, the pattern of the significant wave height (Hs) in the output of the SWAN model using ERA5 data and the forecast of the WRF model are somewhat similar, but in the forecast, the Hs in the Strait of Hormuz and its surroundings has been overestimated in many cases. The comparison of the 10-meter wind of ERA5 data and the WRF forecast showed that the WRF model predicted the wind speed on the Strait of Hormuz slightly higher at sometimes, which caused a significant difference in the Hs. Therefore, it can be concluded that in areas with more complex topography, such as the Strait of Hormuz, a small error in wind data leads to a large error in wave prediction. Collaborative analysis showed that the WRF model has shown the pattern of sea level pressure and geopotential height at 500hPa somewhat similar to ERA5, but it has predicted a decrease in pressure and lower height over the Persian Gulf and Oman Sea, which can lead to errors in wind speed prediction. To be Examining the time series of the wave height index and some other quantities from the SWAN model output using ERA5 wind data and the WRF model showed that although at sometimes, the change process of the outputs is similar, the error is still significant and for point use of the forecast, the marine model still needs a lot of improvements. Quantitative comparison of two SWAN model outputs showed that the highest error in wave forecasting was related to point 2 located in the west of Strait of Hormuz. In such a way that the highest wave height indicated by the output of SWAN model with WRF wind equal to 0.96 m and with ERA5 equal to 0.45 m have been obtained. The maximum difference in the height of the index wave at point 1 located in the northeast of the Persian Gulf was equal to 0.03 m and at point 2 in the northeast of the Oman Sea was equal to 0.14 m.

**Keywords:** SWAN model, wind driven waves, Persian Gulf, Oman Sea, forecast.

**Cite this article:** hassabi, Z., Karami, S., & Layeghi, B. (2024). Evaluating the performance of SWAN model in forecasting storm surges over the Persian Gulf and Oman Sea in a case study (June 7-10, 2023). Journal of the Nivar, 48(124-125), 128-145. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2024.451624.1287>

**E-mail:** (1) [z.ghassabi@gmail.com](mailto:z.ghassabi@gmail.com) (2) [layeghi2001@yahoo.com](mailto:layeghi2001@yahoo.com)



## ارزیابی عملکرد مدل SWAN در پیش‌بینی امواج بادرانده بر روی خلیج فارس و دریای عمان در یک مطالعه موردی (۷ تا ۱۰ ژوئن ۲۰۲۳)

زهرا قصابی<sup>۱</sup> | سارا کرمی<sup>۱</sup> | بهزاد لایقی<sup>۲</sup>

۱. استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران.

۲. دکترای فیزیک دریا.

رایانامه نویسنده مسئول: [karamis.62@gmail.com](mailto:karamis.62@gmail.com)

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۰۹، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰، انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰)

### چکیده

پیش‌بینی دقیق ارتفاع امواج بادرانده توسط مراکز ملی پیش‌بینی جوی و اقیانوسی برای طیف گسترده‌ای از فعالیت‌های انسانی در دریا از اهمیت حیاتی برخوردار است. در این مطالعه، توانایی مدل SWAN در پیش‌بینی امواج بادرانده در خلیج فارس و دریای عمان طی روزهای ۷ تا ۹ ژوئن سال ۲۰۲۳ که سازمان هواشناسی کشور چندین هشدار دریایی نارنجی و قرمز صادر کرده بود، مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور مدل SWAN یک بار با میدان باد حاصل از داده‌های بازتحلیل ERA5 و بار دیگر با خروجی مدل WRF اجرا شد. برای عمق سنجی از داده‌های GEBCO با تفکیک ۱۵ آرک ثانیه استفاده شد. نتایج نشان داد که در برخی زمان‌ها، الگوی ارتفاع موج شاخص در خروجی مدل SWAN با استفاده از میدان‌های باد بازتحلیل ERA5 و تولید شده توسط مدل WRF تا حدودی تشابه دارند، ولی در برآورد ارتفاع امواج حاصل از میدان باد WRF در تنگه هرمز و اطراف آن در بسیاری مواقع بیش برآورد شده است. مقایسه باد ۱۰ متری دو میدان باد نشان داد که مدل WRF سرعت باد بر روی تنگه هرمز را در برخی زمان‌ها اندکی بیش برآورد کرده بود که این مساله سبب تفاوت قابل توجه در ارتفاع امواج شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در مناطق با توپوگرافی پیچیده‌تر مانند تنگه هرمز وجود خطای کوچک در داده‌های باد، منجر به خطای بزرگی در برآورد ارتفاع موج شاخص می‌شود. تحلیل همبستگی نشان داد که مدل WRF الگوی فشار سطح دریا و ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی را تا حدودی مشابه ERA5 نشان داده است ولی کاهش فشار و ارتفاع کمتری را بر روی خلیج فارس و دریای عمان تخمین زده است که همین عامل می‌تواند منجر به خطا در برآورد سرعت باد شود. بررسی سری زمانی ارتفاع موج شاخص و برخی کمیت‌های دیگر از خروجی مدل SWAN با استفاده از میدان‌های باد ERA5 و مدل WRF نشان داد که اگرچه در برخی زمان‌ها، روند تغییر خروجی‌ها مشابه است ولی همچنان خطا قابل توجه است و برای استفاده نقطه‌ای از مدل‌های عددی پیش‌بینی موج همچنان اصلاحات زیادی مورد نیاز است. مقایسه کمی دو خروجی مدل SWAN نشان داد که بیشترین خطا در پیش‌بینی موج مربوط به نقطه ۲ واقع در غرب تنگه هرمز بوده به گونه‌ای که بیشترین ارتفاع موج شاخص توسط خروجی مدل SWAN با باد WRF برابر ۰/۹۶ متر و با ERA5 برابر ۰/۴۵ متر برآورد شده است. اختلاف بیشینه ارتفاع موج شاخص دو خروجی در نقطه ۱ واقع در شمال شرقی خلیج فارس برابر ۰/۰۳ متر و در نقطه ۲ در شمال شرقی دریای عمان برابر ۰/۱۴ متر بوده است.

**کلیدواژه‌ها:** مدل SWAN، امواج بادرانده، خلیج فارس، دریای عمان، پیش‌بینی.

### ۱. مقدمه

**استناد:** قصابی، زهرا؛ کرمی، سارا و لایقی، بهزاد. (۱۴۰۳). ارزیابی عملکرد مدل SWAN در پیش‌بینی امواج بادرانده بر روی خلیج فارس و دریای عمان در یک مطالعه موردی (۷ تا ۱۰ ژوئن ۲۰۲۳). مجله نیوار، ۴۸(۱۲۴-۱۲۵)، ۱۲۸-۱۴۵. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2024.451624.1287>

رایانامه: (۱) [z.ghassabi@gmail.com](mailto:z.ghassabi@gmail.com) (۲) [layeghi2001@yahoo.com](mailto:layeghi2001@yahoo.com)

ناشر: سازمان هواشناسی کشور.



DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2024.451624.1287>

آورد. در این میان، هر چه داده‌های باد که مهمترین ورودی مدل موج است، دقیق‌تر باشد، می‌تواند به پیش‌بینی بهتر امواج، وضعیت دریا و اقیانوس منجر شود.

امروزه مدل‌های دریایی نسل سوم مختلفی مانند SWAN (بویج و همکاران، ۲۰۰۴) ارائه شده‌اند که در مناطق مختلف دنیا مورد استفاده قرار گرفته و در برآورد امواج دقت قابل قبولی دارند (فولی و همکاران، ۲۰۲۲). مدل SWAN در ایران نیز به صورت گسترده‌ای بکار می‌رود. در یک مطالعه عملکرد مدل SWAN برای مدل‌سازی عددی امواج ناشی از باد در منطقه خلیج فارس با استفاده از داده‌های میدان باد CCMP و با سه روش مدل‌سازی متفاوت در تولید و زوال انرژی انجام شد. نتایج نشان داد که روش AB4-WAM در مقایسه با روش‌های 3WAM3-WAM و WAM4- WAM4 دارای عملکرد بهتری در شبیه‌سازی و مدل‌سازی ارتفاع موج شاخص، دوره تناوب قله طیف و جهت موج است (طاهری و همکاران، ۱۳۹۶). در یک پژوهش قابلیت‌های مدل‌های SWAN و Mike21 در برآورد ارتفاع امواج شمال دریای عمان در دو نقطه جاسک و چابهار مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج با داده‌های میدانی بویه‌های موج‌نگار مستقر مقایسه شد. در نهایت، دقت بالای این دو مدل در پیش‌بینی مشخصه‌های امواج در هر دو نقطه تأیید شد (عباسی، ۱۳۹۹).

دقت SWAN در پیش‌بینی ارتفاع موج شاخص بیشتر از دقت آن در پیش‌بینی دوره تناوب موج است در حالی که برای MIKE 21 برعکس است (معینی و شهیدی، ۲۰۰۷).

از آنجائیکه مدل SWAN برای آب‌های کم عمق ساحلی طراحی شده است، در یک مطالعه امواج باد رانده در خلیج بوشهر با استفاده از داده‌های باد GFS و بویه هواشناسی بوشهر شبیه‌سازی و اعتبار سنجی شد. نتایج نشان داد که میانگین شاخص پراکندگی مدل برای موج بلند و دوره تناوب به ترتیب ۲۳/۴۴ و ۱۸/۴۵ درصد است. بنابراین می‌توان از مدل SWAN برای پیش‌بینی ویژگی‌های امواج باد رانده و ارائه اطلس هیدرودینامیکی خلیج بوشهر استفاده کرد (فرجامی و همکاران، ۲۰۱۲). ذوالجودی (۲۰۱۷) نیز از میدان باد

پیش‌بینی و برآورد امواج دریا در فعالیت‌های مناطق ساحلی از جمله: فعالیت‌های نفتی (گرت و شاو، ۲۰۰۱)، محاسبه میزان انتقال رسوب (وارنر و همکاران، ۲۰۱۰)، طراحی سازه‌های ساحلی (نا و همکاران، ۲۰۱۱)، صیادی صنعتی (فینیس و همکاران، ۲۰۱۹)، کشتیرانی و مدیریت بندری (مکریس و همکاران، ۲۰۲۱) و حمل‌ونقل دریایی (شارما و همکاران، ۲۰۲۳) و از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین امواج و جریان‌ها نقش بسیار مهمی در تغییر هندسه و شکل ناحیه ساحلی دارند (فرجامی و همکاران، ۲۰۱۲). بنابراین پیش‌بینی دقیق ارتفاع امواج و ویژگی‌های آن‌ها در اقیانوس-شناسی بویژه برای آب‌های ساحلی بیش از پیش اهمیت دارد. صدور هشدارهای دریایی صحیح و به موقع می‌تواند تا حدود زیادی از خسارات مالی و جانی بکاهد (الفیری و همکاران، ۲۰۱۲). پیش‌بینی ارتفاع موج شاخص<sup>۱</sup> ابزاری مهم برای اطمینان از ایمنی، حفاظت از محیط زیست و ترویج توسعه پایدار در مناطق ساحلی ایران است.

امواج باد رانده به دلیل انرژی بالا یکی از مهمترین پدیده‌های هیدرودینامیکی دریا هستند و اهمیت ویژه‌ای در مهندسی دریا دارند (سنجو و سانگیهارا، ۲۰۲۳). برای تعیین خصوصیات موج ناشی از وزش باد در مناطقی که اندازه‌گیری محلی امکان‌پذیر نیست، می‌توان از مدل‌های تجربی یا مدل‌های ریاضی استفاده کرد. در دهه‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای تخمین مشخصات موج انجام شده است. دانشمندان در دهه‌های پنجاه و شصت میلادی به این نتیجه رسیدند که بهترین توصیف برای ماهیت تصادفی امواج دریا استفاده از تجزیه طیفی است (دزواره رسانی و همکاران، ۱۳۹۸). راه‌حل‌های گوناگونی برای تعیین مشخصات موج توسط محققین ارائه شده است. اندازه‌گیری‌های میدانی، بررسی‌های تحلیلی، روش‌های تجربی و نیمه‌تجربی و مدل‌سازی بر اساس روش‌های طیفی-عددی از جمله شیوه‌هایی هستند که استفاده می‌شوند (گلشنی، ۱۳۸۹). با ترکیب مدل‌های عددی، میدان باد و داده‌های میدانی دیگر می‌توان پارامترهای مهم موج از قبیل ارتفاع، دوره تناوب، جهت و انرژی موج را به دست

<sup>۱</sup> Significant Wave Height

قبولی توانسته است ارتفاع موج شاخص و دوره تناوب موج را برآورد کند.

هدف از این مطالعه بررسی توانایی مدل SWAN در پیش‌بینی امواج در خلیج فارس و دریای عمان و اثر کمیت‌های هواشناسی بر خروجی این مدل در شرایط هشدار است. در این مقاله قابلیت مدل عددی پیش‌بینی موج SWAN برای پیش‌بینی امواج در روزهای ۷ تا ۱۰ ژوئن سال ۲۰۲۳ که در بازه زمانی مذکور سازمان هواشناسی کشور برای ارتفاع موج در خلیج فارس و دریای عمان هشدارهای دریایی نارنجی و قرمز صادر کرده بود، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱. منطقه مورد مطالعه

خلیج فارس آبراهی پراهمیت در آسیای غربی و منطقه خاورمیانه است که در امتداد دریای عمان و در میان ایران و شبه‌جزیره عربستان قرار دارد. خلیج فارس از شرق از طریق تنگه هرمز و دریای عمان به اقیانوس هند و دریای عرب راه دارد. مهمترین پدیده هواشناسی خلیج فارس، باد شمال‌غربی است که با عنوان "باد شمال" شناخته می‌شود و سرعت آن به ندرت بیش از ۱۰ متربرثانیه می‌شود. باد شمال در دو نوع تابستانی و زمستانی است. باد شمال تابستانی عمدتاً بین ماه‌های مه تا ژوئیه می‌وزد و می‌تواند تا سپتامبر هم ادامه داشته باشد. باد شمال زمستانی در بازه زمانی دسامبر تا ابتدای ماه مارس اتفاق می‌افتد (عبدی ویشکایی، ۲۰۱۲).

دریای عمان، پیشروی آب اقیانوس هند به داخل خشکی در جنوب‌غربی آسیا است. سواحل جنوب‌شرقی ایران در شمال آن و کشورهای عمان و امارات در جنوب آن قرار دارند. دریای عمان از سمت غرب توسط تنگه هرمز به خلیج فارس و از سمت شرق و جنوب‌شرقی به دریای عرب و اقیانوس هند وصل می‌شود.

شکل ۱ منطقه مورد مطالعه که شامل خلیج فارس و دریای عمان است و سه نقطه (جدول ۱) که در آنها سری زمانی مشخصات موج بررسی شده را نشان می‌دهد.

خروجی مدل WRF جهت اجرای مدل SWAN بر روی دریای عمان و خلیج فارس استفاده کرد. اعتبارسنجی نتایج نشان داد که پیش‌بینی ۹ تا ۲۴ ساعته ارتفاع موج بیشترین دقت را دارد.

زارع و گلشنی (۱۳۹۸)، در بررسی بلندمدت مشخصات موج در منطقه بوشهر با استفاده از مدل SWAN با میدان باد NCEP، و مقایسه نتایج با داده‌های بویه، نشان دادند که مدل پیشینه مشخصات امواج را فروتخمین می‌نماید؛ آنها پیشنهاد کردند که با اعمال یک ضریب اصلاحی، می‌توان با دقت قابل‌قبولی از این مدل برای پیش‌بینی مشخصات امواج ناشی از باد استفاده نمود. به منظور بررسی اثر توپوگرافی دریا، عامری و همکاران (۱۳۹۹)، امواج بادرانده تحت تاثیر پیچیدگی‌های جغرافیایی در تنگه هرمز را شبیه‌سازی کردند. ابتدا مدل موج SWAN با داده‌های باد سطحی حاصل از داده‌های بازتحلیل ERA5 و سپس با استفاده از داده‌های میدان باد سطحی مدل WRF اجرا شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی در دو ایستگاه در غرب و شرق تنگه هرمز عملکرد خوب مدل موج SWAN جفت‌شده با مدل جوی WRF را برای منطقه مورد مطالعه نشان داد. در یک پژوهش دیگر برهم‌کنش هوا و دریا با بررسی ارتباط دمای سطح دریا و سرعت باد در سواحل استان هرمزگان نشان داد که در فصل تابستان و زمستان به ترتیب ۷۵ و ۳۳ درصد موارد با افزایش (کاهش) انحراف از میانگین دمای سطحی، انحراف از میانگین سرعت باد نیز افزایش (کاهش) می‌یابد (ترابی‌آزاد و محمدی، ۱۳۹۴).

سیه‌سرانی و همکاران (۱۴۰۲) در مقاله‌ای به تحلیل حساسیت جمله اتلاف سفیدک راس موج در کالیبراسیون مدل SWAN با واداشت باد ERA5 در دریای عمان پرداختند. کالیبراسیون مدل SWAN دقت شبیه‌سازی را به طور قابل توجهی در دریای عمان بهبود بخشید. کاشی‌زنوزی و همکاران (۱۴۰۲) به منظور برآورد انرژی موج که از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر است، مدل SWAN را در سواحل مکران مطالعه کرده و بیان کردند که این مدل تا حد قابل



شکل ۱. منطقه مطالعه و ۳ نقطه در بررسی سری زمانی موج

جدول ۱. موقعیت جغرافیایی نقاط در شکل ۱

عرض جغرافیایی (درجه شمالی)	طول جغرافیایی (درجه شرقی)	نقطه
۲۸/۲۳	۵۰/۳۲	نقطه ۱
۲۵/۹	۵۴/۵۵	نقطه ۲
۲۵/۰	۵۹/۰	نقطه ۳

۲-۲. داده‌ها  
 برای اجرای مدل SWAN داده‌های عمق‌سنجی از وبسایت <https://www.gebco.net> با تفکیک ۱۵ آرک ثانیه بدست آمده‌اند. به منظور تهیه داده‌های باد، نقشه‌های همدیدی و بررسی تغییرات دمای سطح دریا در دوره مطالعه نسبت به میانگین بلندمدت (۲۰۲۲-۱۹۹۳) از داده‌های ERA5 با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه بازتحلیل داده‌های پیش‌بینی GFS در ساعت ۱۲ UTC روز ۶ ژوئن سال ۲۰۲۳ با تفکیک افقی ۰/۵ درجه به عنوان شرایط اولیه و مرزی در اجرای مدل WRF بکار گرفته شده‌اند. داده‌های ورودی موردنیاز برای اجرای دو مدل SWAN و WRF در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. داده‌های ورودی دو مدل SWAN و WRF

مدل	داده‌های ورودی	محل اخذ
	داده‌های عمق‌سنجی	<a href="https://www.gebco.net">https://www.gebco.net</a>
SWAN	داده‌های باد ERA5	<a href="https://cds.climate.copernicus.eu">https://cds.climate.copernicus.eu</a>
	داده‌های باد مدل WRF	خروجی مدل WRF
مدل WRF	داده‌های پیش‌بینی GFS	<a href="http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/">http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/</a>

## ۲-۳. روش کار

در این مقاله مدل عددی پیش‌بینی موج SWAN در روزهای ۷ تا ۱۰ ژوئن سال ۲۰۲۳ که سازمان هواشناسی کشور برای ارتفاع موج در خلیج فارس و دریای عمان هشدارهای دریایی نارنجی و قرمز صادر کرده بود، اجرا می‌شود. از آنجا که یکی از عوامل مهم در شکل‌گیری امواج، دمای سطح آب است، نخست بی‌هنجاری دمای سطح خلیج فارس و دریای عمان در این روزها نسبت به میانگین بلندمدت بررسی می‌شود. به

منظور بررسی توانایی مدل SWAN در برآورد امواج، مدل یک بار با استفاده از میدان باد حاصل از داده‌های بازتحلیل ERA5 با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه و بار دیگر با خروجی مدل WRF اجرا می‌شود. مدل WRF با تفکیک افقی ۲۷ کیلومتر از ساعت ۱۲ UTC روز ۶ ژوئن به مدت ۸۴ ساعت اجرا شده که ۱۲ ساعت اول به عنوان زمان spin up در نظر گرفته می‌شود. جدول ۳ طرحواره‌های مورد استفاده در اجرای مدل WRF را نشان می‌دهد.

جدول ۳. طرحواره‌های به کار رفته در اجرای مدل WRF

طرحواره	خردفیزیک
Lin et al. scheme	تابش موج بلند
RRTM scheme: Rapid Radiative Transfer Model	تابش موج کوتاه
Dudhia scheme	لایه سطحی
Monin-Obukhov (Janjic Eta) Similarity scheme	مشخصات سطح زمین
Noah Land-Surface Model	لایه مرزی
MYNN 2.5 level TKE scheme	کومولوس
Kain-Fritsch (new Eta) scheme	

در طول دو دهه گذشته، تعدادی از مدل‌های پیشرفته طیفی موج-باد، معروف به مدل‌های نسل سوم، مانند WAM (گروه WAMDI، ۱۹۸۸)، WAVEWATCH III (تولمن، ۱۹۹۱) TOMAWAC (بنویت و همکاران، ۱۹۹۶) و SWAN (بویج و همکاران، ۱۹۹۹) توسعه یافته‌اند. این مدل‌ها معادله توازن عمل طیفی ۱ را بدون هیچ‌گونه محدودیت طیفی، برای تکامل رشد موج حل می‌کنند. این معادله اثرات انتشار فضایی، شکست، کاهش عمق ۲، تولید، اتلاف و برهمکنش‌های غیرخطی موج-موج را نشان می‌دهد. مدل موج آب کم عمق SWAN توسعه‌ای از مدل‌های موج نسل سوم آب عمیق است. این مدل، فرمول‌بندی‌های پیشرفته برای فرآیندهای تولید موج، اتلاف و فعل‌وانفعالات موج-

به منظور تعیین عوامل موثر بر خطای مدل SWAN در پیش‌بینی امواج، سرعت باد ۱۰ متری خروجی مدل WRF با ERA5 مقایسه می‌شود. عوامل زیادی در پیش‌بینی سرعت باد موثر هستند که از آن میان، کمیت‌های میانگین فشار سطح دریا و ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰hPa از خروجی مدل WRF با داده‌های بازتحلیل ERA5 مقایسه می‌شوند. در نهایت سری زمانی کمیت‌های سرعت باد ۱۰ متری، ارتفاع موج شاخص و دوره تناوب امواج در ۳ نقطه مشخص شده در شکل ۱ از خروجی مدل SWAN با استفاده از داده‌های ERA5 و خروجی مدل WRF رسم می‌شوند.

## ۲-۴. مدل SWAN

<sup>2</sup> shoaling<sup>1</sup> spectral action balance equation

است. عبارت چهارم نشان دهنده شکست ناشی از عمق و جریان القا شده است. کمیت‌های  $C_\theta$  و  $C_\sigma$  سرعت انتشار در فضای طیفی  $(\sigma, \theta)$  هستند. سمت راست معادله  $S_{tot}$  عبارت چشمه/چاهه است که نشان‌دهنده تمام فرآیندهای فیزیکی است که انرژی موج را تولید، پراکنده یا توزیع مجدد می‌کنند. برخی از این عوامل در آب عمیق عبارتند از اثر وزش باد، برهمکنش چهارتایی موج‌ها با هم و اتلاف انرژی در اثر white-capping (کومن و همکاران، ۱۹۹۶). در آب کم‌عمق و انتقالی، به خصوص در شرایطی که انرژی زیاد باشد (لی و مائو، ۱۹۹۲) فرایندهایی مانند اثر اصطکاک کف، شکست موج، گل‌ولای موجود در بستر دریا و برهمکنش سه‌تایی امواج نیز اهمیت دارد (گربر و مدسن، ۱۹۸۸). برای اطلاعات بیشتر در ارتباط با مدل SWAN به بانگ (۱۹۹۹) و بویج و همکاران (۱۹۹۹) مراجعه کنید.

### ۳. بحث

تغییرات دمای سطح آب دریاها و اقیانوس‌ها که در اثر جذب انرژی خورشیدی است، نقش مهمی در اندازه سرعت و جهت باد دارد. براساس مطالعه خزایی (۱۳۹۸) که در آن میانگین ماهانه دمای سطح آب خلیج فارس و دریای عمان طی یک دوره اقلیمی ۴۰ ساله (۱۳۵۸-۱۳۹۷) بررسی شده است، کمترین دمای میانگین ماهانه سطح آب در خلیج فارس در ماه فوریه، در حدود ۱۶ درجه سلسیوس مشاهده می‌شود و بیشترین دمای سطح آب در ماه اوت، در حدود ۳۴ درجه سلسیوس است. در مقابل کمترین دمای میانگین ماهانه سطح آب در دریای عمان در ماه‌های ژانویه و فوریه قابل مشاهده است که به حدود ۲۴ درجه سلسیوس می‌رسد و بیشینه میانگین ماهانه دمای سطح آب در این پهنه آبی در ماه ژوئن به ۲۸ تا ۲۹ درجه سلسیوس می‌رسد. شکل ۲ تغییرات دمای سطح دریا را در ۷ تا ۹ ژوئن سال ۲۰۲۳ نسبت به میانگین بلندمدت ۳۰ ساله (۲۰۲۲-۱۹۹۳) نشان می‌دهد. در خلیج-فارس افزایش دما بین ۰/۵ تا ۲ درجه سلسیوس مشاهده می‌شود و در بخش‌های شمالی و غربی دریای عمان نیز تا ۱ درجه سلسیوس افزایش دما دیده می‌شود.

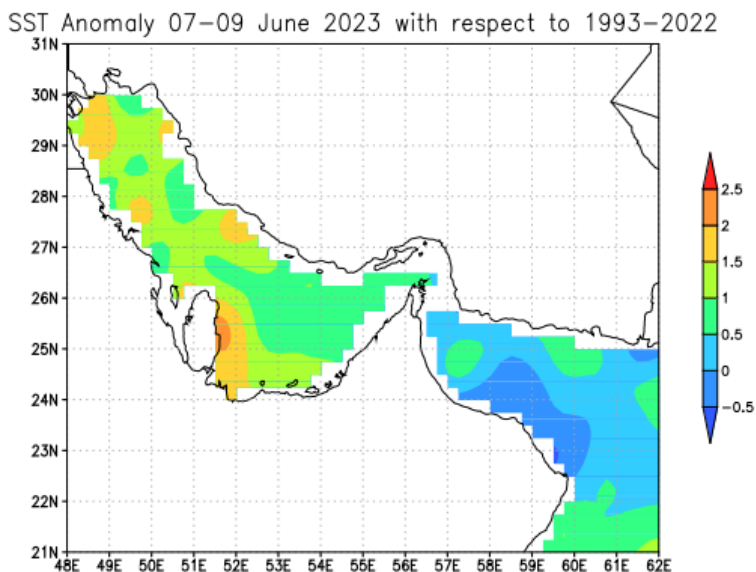
موج چهارگانه آب عمیق را در نظر می‌گیرد (کومن و همکاران، ۱۹۹۶). در آب‌های کم عمق، این فرآیندها با معادلات پیشرفته برای اتلاف به دلیل اصطکاک کف، برهمکنش‌های موج-موج سه‌گانه و شکست ناشی از عمق تکمیل شده‌اند. SWAN در همه جهات و فرکانس‌ها کاملاً طیفی است و تکامل امواج بادرانده را در مناطق ساحلی با آب کم عمق و جریان محیط محاسبه می‌کند (طاهری و همکاران، ۱۳۹۶).

مدل SWAN در دانشگاه صنعتی دلفت هلند توسعه یافته است. این مدل توسط بسیاری از مقامات دولتی، موسسات تحقیقاتی و مشاوران در سراسر جهان استفاده می‌شود. بازخورد گسترده، قابلیت SWAN در موارد مختلف آزمایشی و میدانی را نشان داده است. در ابتدا مدل عددی SWAN تنها قادر به بررسی شرایط موج در حالت مانا و با در نظر گرفتن شبکه‌بندی تمام مستطیلی بوده است، با گذشت زمان و گذر از نسل اول، نسل دوم SWAN محدودیت‌های نسل قبل را نداشته و توانایی در نظر گرفتن شرایط مانا و غیرمانا در صورت نیاز و نیز شبکه‌بندی غیر مستطیلی را جهت محاسبه انتشار موج دارد (گلشنی، ۱۳۸۹). اکنون مدل SWAN می‌تواند در مختصات دکارتی (فقط برای مقیاس‌های کوچک) یا کروی (برای مقیاس‌های کوچک و بزرگ) اجرا شود.

بر اساس معادله توازن عمل موج، کمیت چگالی عمل  $N$  به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود، (به عنوان مثال، می، ۱۹۸۳؛ کومن و همکاران، ۱۹۹۶):

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\vec{x}} \cdot [(\vec{c}_g + \vec{U})N] + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (1)$$

سمت چپ بخش سینماتیکی این معادله است. عبارت دوم نشان دهنده انتشار انرژی موج در جغرافیای دو بعدی (فضای  $x$ )، با سرعت گروه  $\vec{c}_g = \frac{\partial \sigma}{\partial \vec{k}}$  و رابطه پراکندگی  $\sigma^2 = g|\vec{k}| \tanh(|\vec{k}|d)$  است که در آن  $\vec{k}$  بردار عدد موج و  $d$  عمق آب است. عبارت سوم نشان دهنده اثر جابجایی فرکانس رادیانی به دلیل تغییرات در عمق و جریان متوسط

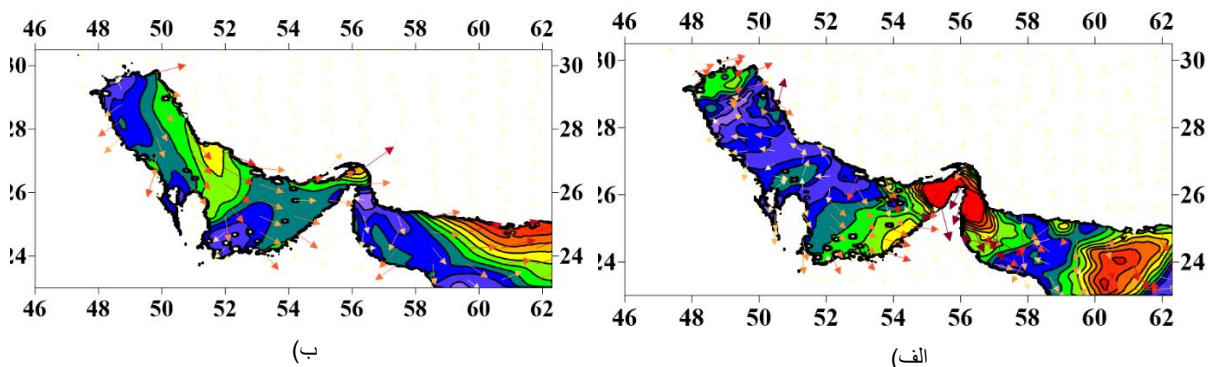


شکل ۱. تغییرات دمای سطح آب خلیج فارس و دریای عمان نسبت به میانگین بلندمدت

خلیج فارس وجود دارند. در این روز الگوی ارتفاع موج پیش‌بینی شده در خلیج فارس تا حدود زیادی مشابه خروجی مدل SWAN با استفاده از داده‌های بازتحلیل است ولی در پیش‌بینی ارتفاع موج در تنگه هرمز و شرق دریای عمان، مدل فراتخمین زیادی داشته است. در روز ۹ ژوئن بویژه در ساعت ۱۲UTC اختلاف ارتفاع موج در دو خروجی بیشتر شده است. مقایسه نتایج این سه روز نشان می‌دهد که الگوی ارتفاع موج بدست آمده در روز ۸ ژوئن (پیش‌بینی ۳۶ تا ۶۰ ساعته) شباهت بیشتری با خروجی مدل با داده‌های بازتحلیل دارد. نتایج عامری و همکاران (۱۳۹۹) نیز عملکرد خوب مدل موج SWAN جفت‌شده با مدل جوی منطقه‌ای WRF را برای ایستگاه جاسک در دریای عمان و ایستگاه لارک در خلیج فارس نشان داد.

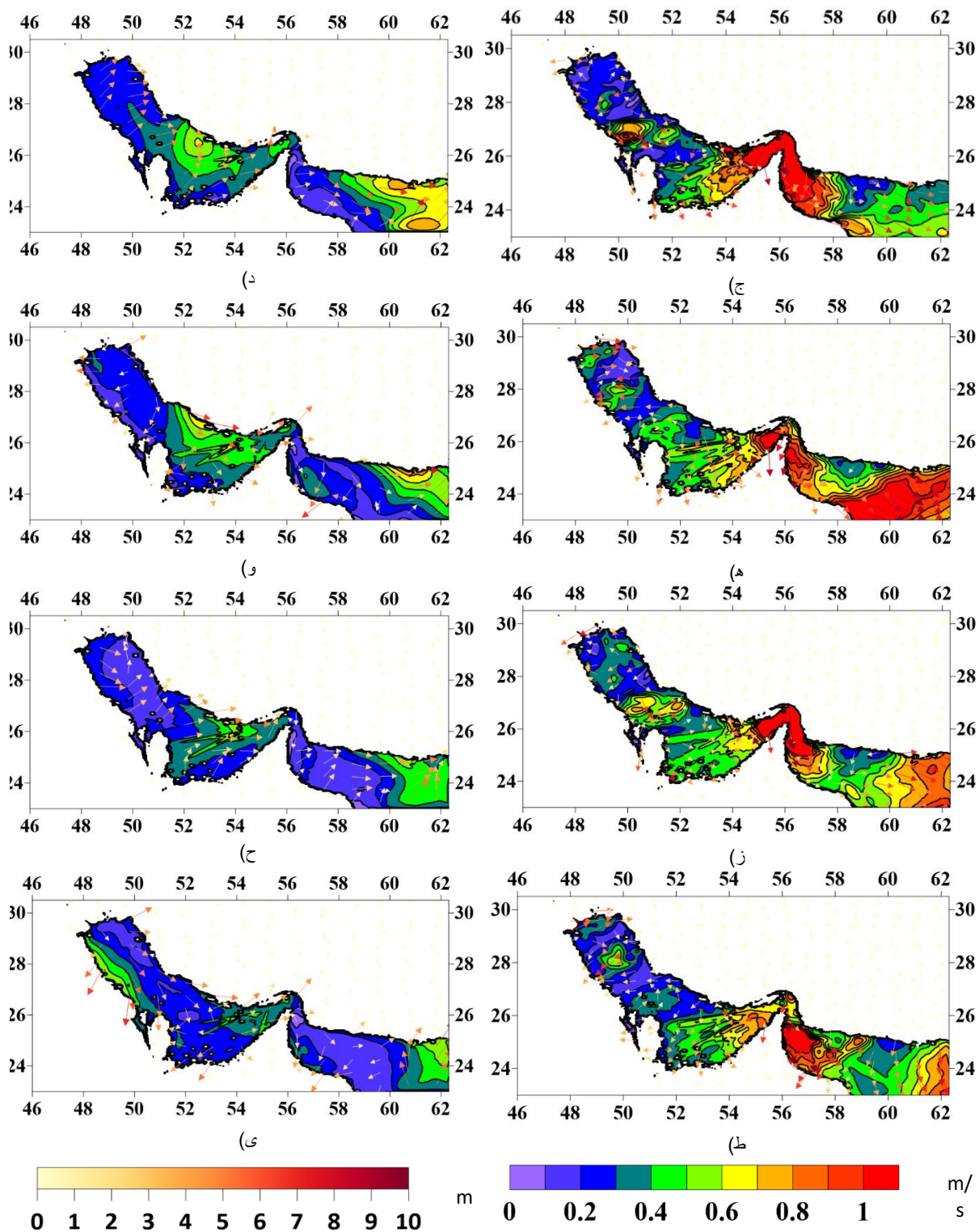
### ۱-۳. خروجی مدل SWAN

شکل ۳ ارتفاع موج شاخص و باد ۱۰ متری خروجی مدل SWAN که با استفاده از میدان باد ERA5 و خروجی مدل WRF اجرا شده، از ساعت ۱۲UTC روز ۷ ژوئن تا ۹ ژوئن با بازه زمانی ۱۲ ساعته را نشان می‌دهد. در روز ۷ ژوئن در حالی که در اجرا با داده‌های ERA5 بیشترین ارتفاع موج در سواحل شمالی خلیج فارس مشاهده می‌شود؛ در پیش‌بینی، امواج با ارتفاع بیشینه در شرق خلیج فارس نشان داده شده‌اند. در تنگه هرمز مدل، ارتفاع موج را فراتخمین کرده است. در شرق عمان اگرچه الگوی بدست آمده توسط مدل با داده‌های بازتحلیل تفاوت دارد ولی مدل توانسته ارتفاع زیاد موج در این منطقه را به درستی نشان دهد. در روز ۸ ژوئن در خروجی با داده‌های بازتحلیل، امواج با ارتفاع بیشتر در نیمه شرقی



(ب)

(الف)



شکل ۳. ارتفاع موج شاخص و باد ۱۰ متری خروجی مدل SWAN، با استفاده از داده‌های باد ERA5 (ستون چپ) و خروجی مدل WRF (ستون راست) در الف) و ب) ۱۲ UTC روز ۷ ج) و د) ۰۰ UTC روز ۸ ه) و و) ۱۲ UTC روز ۸ ز) و ح) ۰۰ UTC روز ۹ ط) و ی) ۱۲ UTC روز ۹ ماه ژوئن سال ۲۰۲۳.

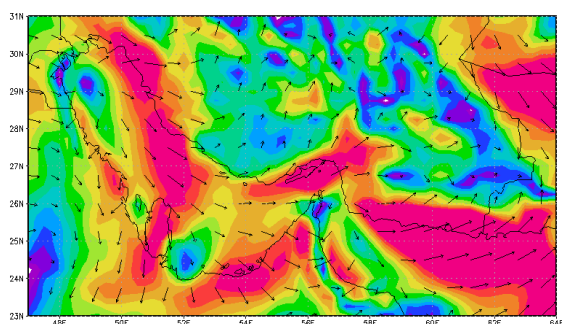
### ۲-۳. تحلیل همدیدی

پیش‌بینی مدل WRF از ساعت ۱۲ UTC روز ۷ تا ۹ ژوئن در شکل ۴ نشان داده شده است. در ساعت ۱۲ UTC روز ۷ ژوئن در نیمه غربی خلیج فارس بادهای شمال غربی و در نیمه شرقی

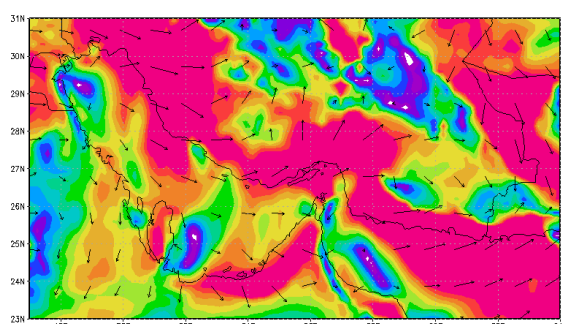
به منظور بررسی علل تفاوت در خروجی ارتفاع موج مدل SWAN، داده‌های سرعت باد ۱۰ متری حاصل از ERA5 و

تنگه هرمز را فراتخمین کرده است. در روز ۹ ژوئن ساعت ۰۰UTC سرعت باد در غرب دریای عمان اندکی بیشتر تخمین زده شده و در ساعت ۱۲UTC در سواحل شمالی مناطق مرکزی خلیج فارس و تنگه هرمز مدل WRF در پیش‌بینی سرعت باد فراتخمین داشته و در سواحل شمالی دریای عمان سرعت باد را اندکی کمتر نشان داده است. به طور کلی عملکرد مدل در پیش‌بینی جهت باد بر روی خلیج فارس و دریای عمان خوب بوده است و جهت باد تقریباً در تمام ساعت‌ها به درستی پیش‌بینی شده است.

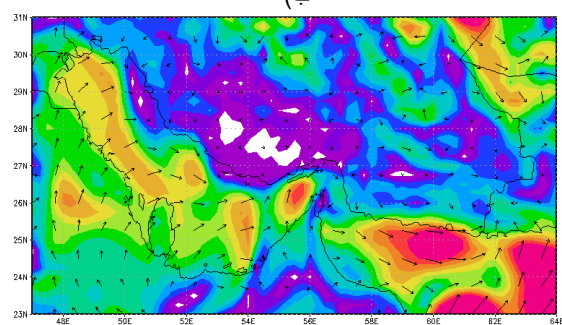
آن غربی هستند. در غرب دریای عمان بادهای شمال‌غربی و شمال‌شرقی بوده و در شرق آن غربی و جنوب‌غربی می‌باشند. بر اساس نتایج، عملکرد مدل WRF در پیش‌بینی سرعت باد در این ساعت بر روی خلیج فارس و دریای عمان قابل قبول بوده و الگوها شباهت زیادی دارند. در روز ۸ ژوئن مدل WRF جهت باد بر روی خلیج فارس و دریای عمان را به درستی پیش‌بینی کرده است. در ساعت ۰۰UTC همان روز سرعت باد در شرق خلیج فارس را اندکی فراتخمین کرده ولی در ساعت ۱۲UTC سرعت باد در شرق خلیج فارس و



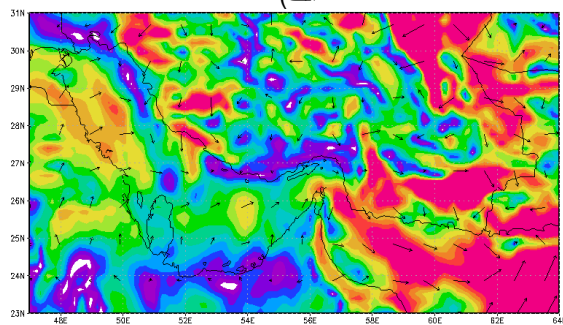
(ب)



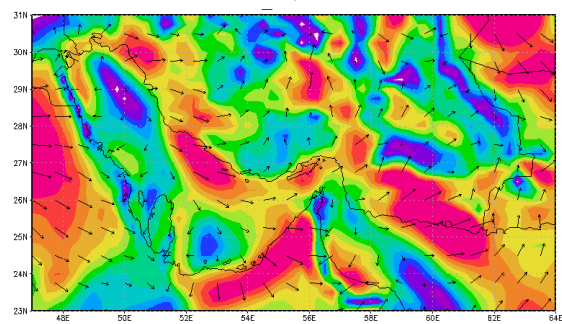
(الف)



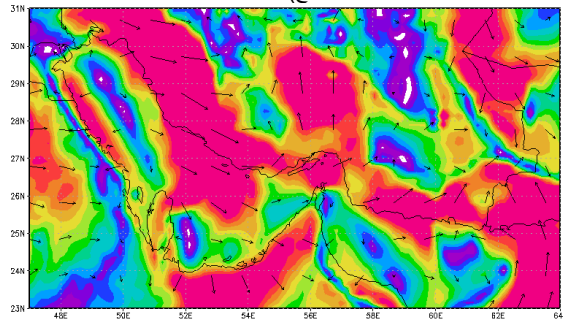
(د)



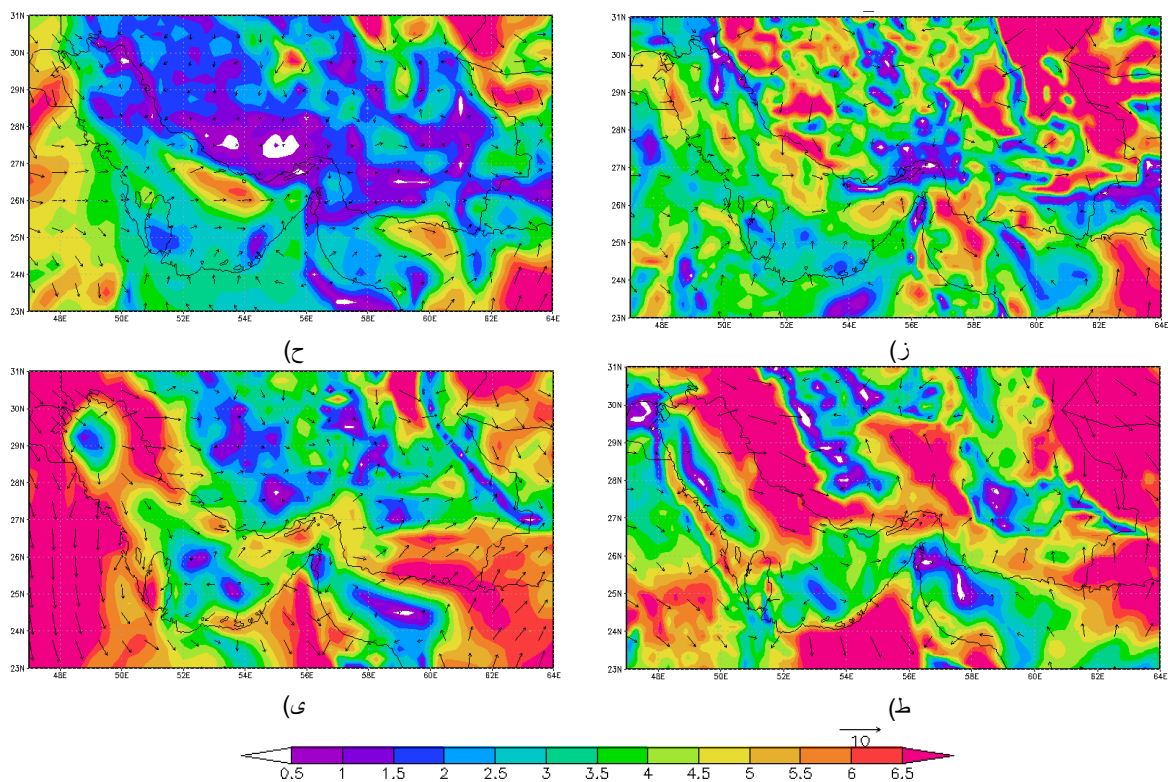
(ج)



(و)



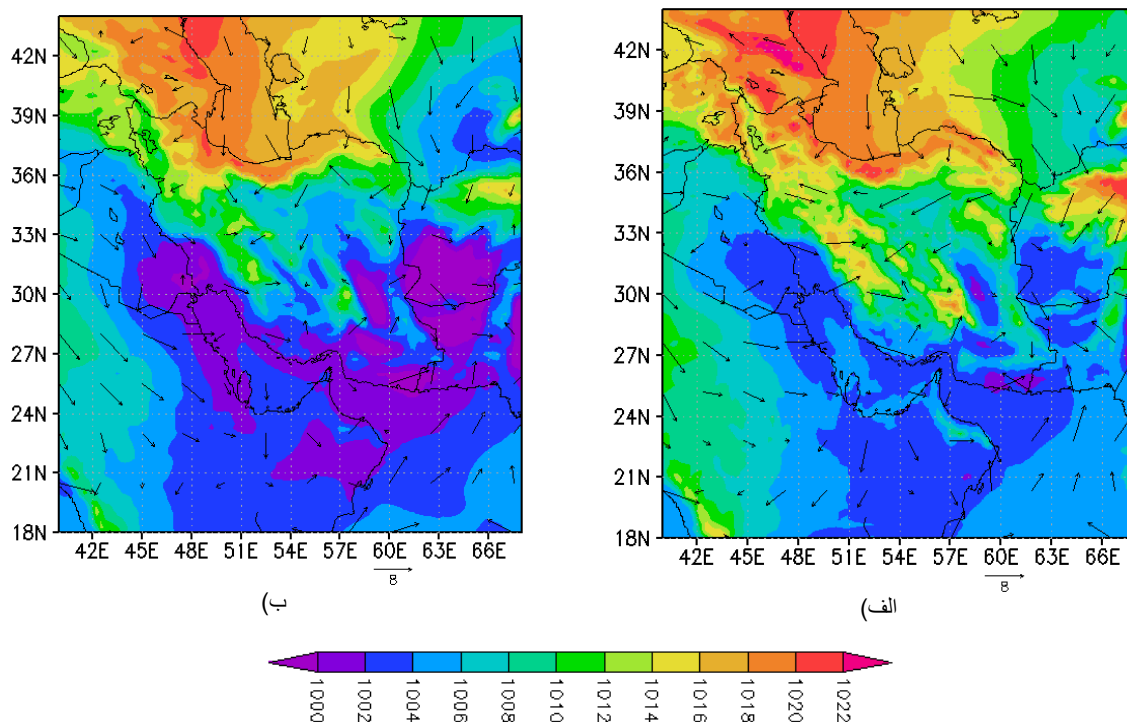
(ه)



شکل ۴. سرعت باد ۱۰ متری حاصل از الف) پیش‌بینی مدل WRF (ستون راست) ب) بازتحلیل ERA5 (ستون چپ) در الف) و ب) ۱۲ UTC روز ۷ ج) و د) ۰۰ UTC روز ۸ هـ) و و) ۱۲ UTC روز ۸ ز) و ح) ۰۰ UTC روز ۹ ط) و ی) ۱۲ UTC روز ۹ ماه ژوئن سال ۲۰۲۳.

و دریای عمان تحت تاثیر زبانه‌های کم فشار قرار گرفته‌اند. خروجی مدل WRF اگرچه مراکز کم فشار را به درستی پیش‌بینی کرده است ولی کاهش فشار بر روی خلیج فارس و دریای عمان را به درستی نشان نداده و مقادیر فشار در این منطقه را فراتخمین کرده است.

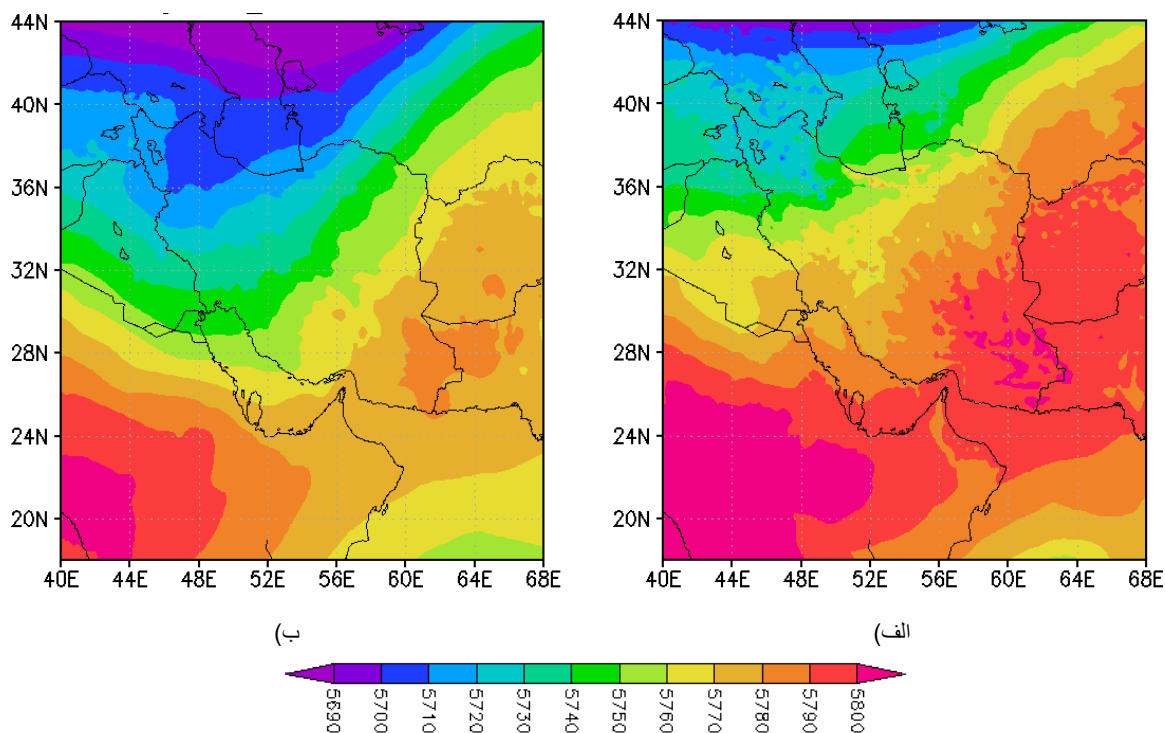
شکل ۵ نقشه میانگین فشار سطح دریا و سرعت باد ۱۰ متری را با استفاده از داده‌های بازتحلیل ERA5 و خروجی مدل WRF در ساعت ۱۲ UTC روز ۸ ژوئن نشان می‌دهد. در این ساعت یک مرکز کم فشار در جنوب شرقی ایران و شمال دریای عمان و یک مرکز کم فشار دیگر در جنوب غربی ایران و جنوب شرقی عراق شکل گرفته است و سراسر خلیج فارس



شکل ۵. میانگین فشار سطح دریا و سرعت باد ۱۰ متری با داده‌های الف) خروجی مدل WRF (ب) بازتحلیل ERA5 در ساعت ۱۲ UTC، ۸ ژوئن ۲۰۲۳

ایران است. عملکرد مدل WRF در پیش‌بینی الگوی ارتفاع ژئوپتانسیلی در این تراز خوب نبوده و مدل شدت ناوه و عمق نفوذ آن را کمتر نشان داده است به گونه‌ای که نفوذ زبان‌های آن را تا مناطق غربی ایران پیش‌بینی کرده و سراسر خلیج فارس را متأثر از زبان‌های پرارتفاع جنب‌حاره‌ای نشان داده است. به طور کلی مدل ارتفاع ژئوپتانسیلی بر روی خلیج فارس و دریای عمان را فراتخمین کرده است.

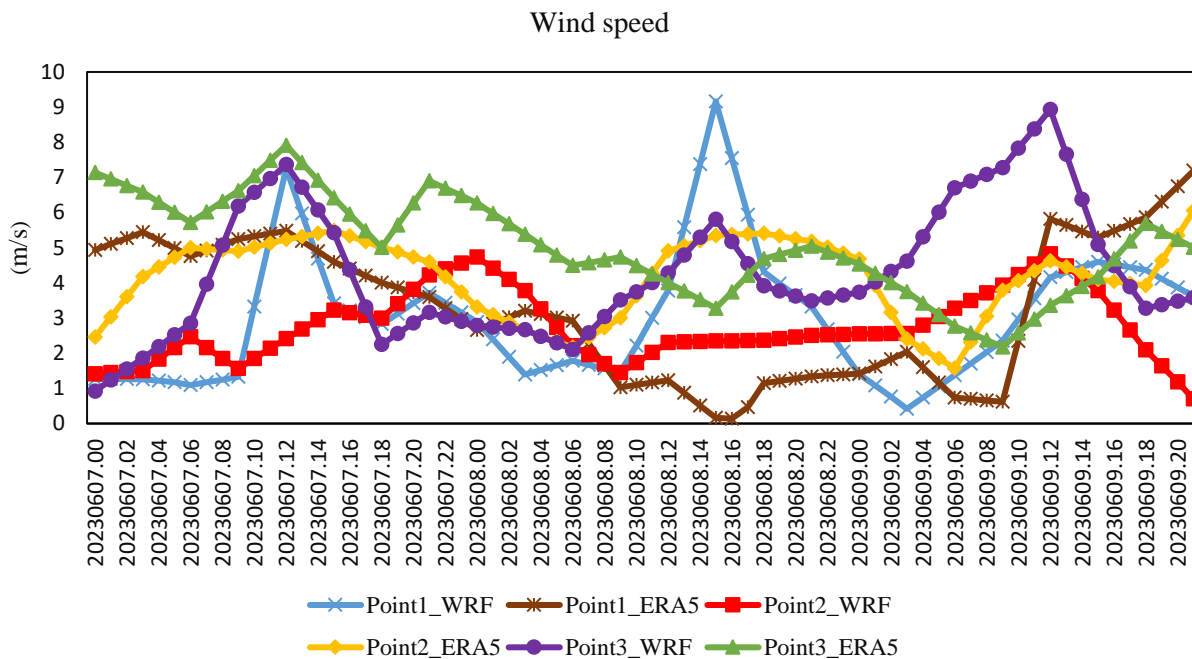
نقشه ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ hPa در ساعت ۱۲ UTC روز ۸ ژوئن با داده‌های بازتحلیل و خروجی مدل WRF در شکل ۶ مشاهده می‌شود. در این روز زبان‌های کم‌ارتفاع از سمت عرض‌های جغرافیایی شمالی تا نیمه شمالی خلیج فارس رسیده است؛ در حالی که نیمه جنوبی آن متأثر از زبان‌های پرارتفاع جنب‌حاره‌ای واقع بر روی عربستان است. بنابراین گرادیان ارتفاع زیادی بر روی خلیج فارس وجود دارد. دریای عمان نیز تحت تاثیر زبانه مرکز پرارتفاع واقع در جنوب شرقی



شکل ۶. ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰hPa با داده‌های الف) خروجی مدل WRF (ب) بازتحلیل ERA5 در روز ۸ ژوئن ۲۰۲۳.

نقطه ۳ واقع در شمال شرقی دریای عمان است و در اواخر روز ۸ ام سرعت باد در نقطه ۲ واقع در شمال شرقی خلیج فارس اندکی بیشتر می‌شود. مقایسه خروجی مدل با داده‌های بازتحلیل و پیش‌بینی نشان می‌دهد که بیشترین خطا در پیش‌بینی سرعت باد مربوط به نقطه ۱ واقع در غرب خلیج فارس و در ساعت حدود ۱۵ UTC روز ۸ ژوئن است که مدل فراتخمین زیادی داشته است (شکل ۷).

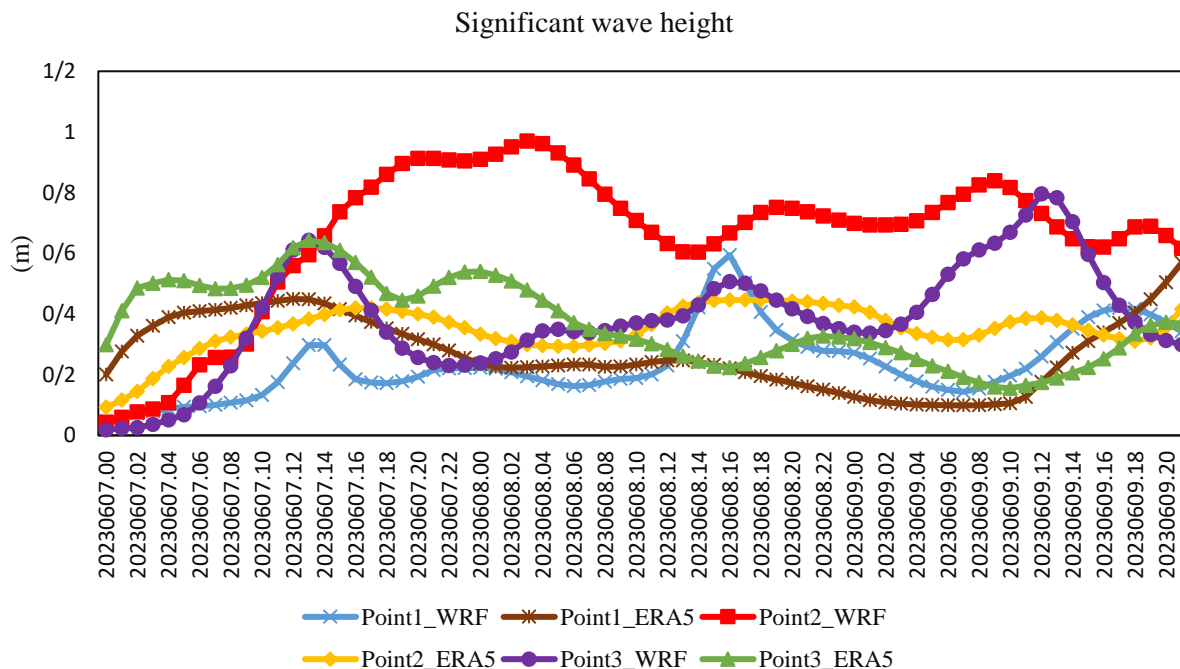
سری زمانی کمیت‌های سرعت باد تراز ۱۰ متری، ارتفاع موج شاخص و دوره تناوب امواج در ۳ نقطه مشخص شده در شکل ۱ از ساعت ۰۰ UTC روز ۷ ژوئن تا ساعت ۲۱ UTC روز ۹ ژوئن سال ۲۰۲۳ از خروجی مدل SWAN با استفاده از داده‌های ERA5 و خروجی مدل WRF در شکل‌های ۷ تا ۹ نشان داده شده است. بر اساس داده‌های بازتحلیل بیشترین سرعت باد ۱۰ متری از ابتدای دوره تا حدود ساعت ۱۰ UTC روز ۸ ژوئن مربوط به



شکل ۷. سری زمانی سرعت باد ۱۰ متری در ۳ نقطه مشخص شده در شکل ۱، طی ۷ تا ۹ ژوئن از خروجی مدل SWAN با استفاده از داده‌های ERA5 و خروجی مدل WRF

ارتفاع موج شاخص مربوط به نقطه ۲ واقع در غرب تنگه هرمز است. بیشترین مقدار خطا در نقطه ۲ در اواخر روز ۷ و اوایل روز ۸ ژوئن رخ داده است و مدل ارتفاع موج را بسیار فراتخمین کرده است.

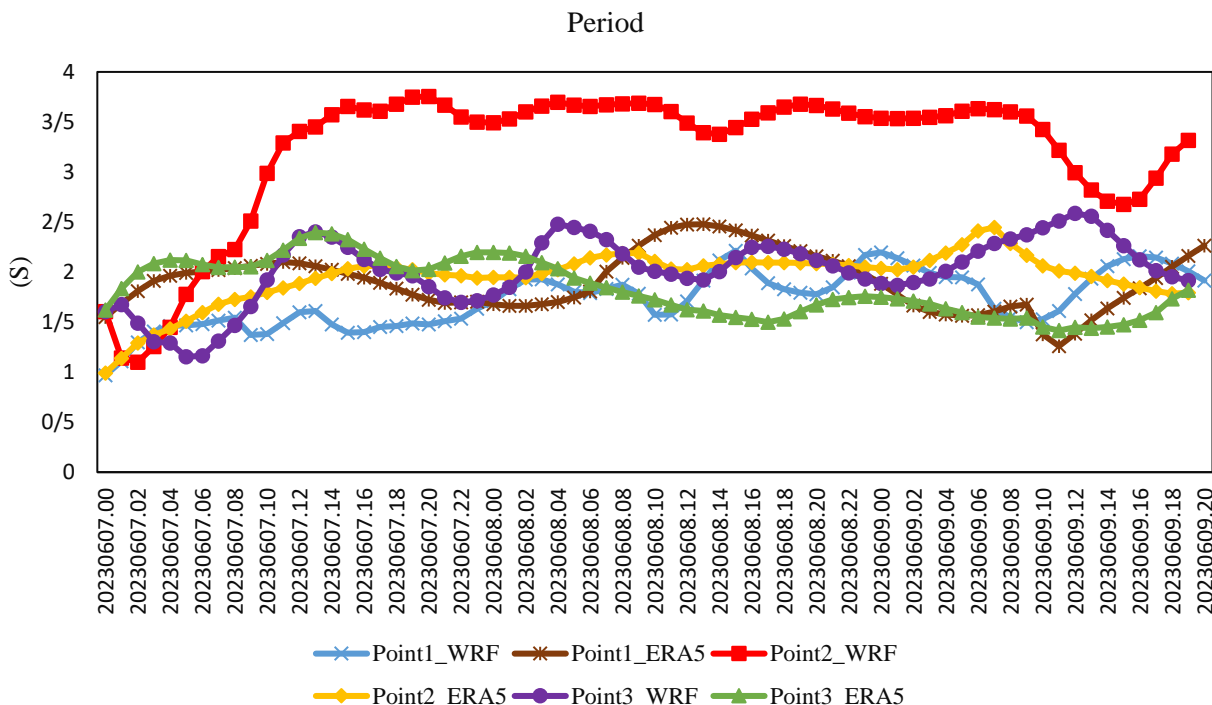
سری زمانی ارتفاع موج شاخص در شکل ۸ با استفاده از داده‌های بازتحلیل ERA5 نشان می‌دهد که تا حدود ساعت ۱۰ UTC روز ۸ ژوئن بیشترین ارتفاع در نقطه ۳ که سرعت باد در آن بیشینه بوده، مشاهده شده است و پس از آن بیشترین



شکل ۸. سری زمانی ارتفاع موج شاخص در ۳ نقطه مشخص شده در شکل ۱، طی ۷ تا ۹ ژوئن از خروجی مدل SWAN با استفاده از داده‌های ERA5 و خروجی مدل WRF

روز ۹ ژوئن در نقطه ۲ مشاهده شده است. در اینجا نیز بیشترین خطا مربوط به نقطه ۲ است.

سری زمانی دوره تناوب موج (شکل ۹) نشان می‌دهد که بر اساس داده‌های بازتحلیل در روز ۷ و اوایل روز ۸ ژوئن بیشترین دوره تناوب امواج در نقطه ۳ و پس از آن تا اوایل



شکل ۹. سری زمانی دوره تناوب موج در ۳ نقطه مشخص شده در شکل ۱، طی ۷ تا ۹ ژوئن از خروجی مدل SWAN با استفاده از داده‌های ERA5 و خروجی مدل WRF

#### ۴. نتیجه‌گیری

کیلومتر اجرا شد. تفکیک مدل WRF به گونه‌ای در نظر گرفته شد که تفاوت زیادی با داده‌های ERA5 نداشته باشد تا اثر اختلاف در تفکیک داده‌ها در نظر گرفته نشود. خروجی مدل SWAN با داده‌های بازتحلیل به خوبی وجود امواج با ارتفاع بیش از ۰/۵ متر را در سواحل شمالی خلیج فارس و با ارتفاع بیش از ۱ متر را در تنگه هرمز و مناطق شرقی دریای عمان در زمان‌هایی از این دوره مطالعاتی نشان داد. مقایسه دو خروجی مدل با استفاده از داده‌های بازتحلیل و پیش‌بینی مدل WRF نشان داد که مدل تا حدودی توانسته الگوی موج بر روی خلیج فارس و دریای عمان را نشان دهد و بیشترین تشابه مربوط به روز ۸ ژوئن بوده که با داده‌های پیش‌بینی ۳۶ تا ۶۰ ساعته مدل WRF اجرا شده است. به طور کلی در بیشتر زمان‌ها مدل SWAN ارتفاع موج در تنگه هرمز و مناطق شرقی دریای عمان را فراتخمین کرده است. کاشی زنوزی و همکاران (۱۴۰۲) نیز نشان دادند که مدل SWAN ارتفاع

در روزهای ۷ تا ۱۰ ژوئن سال ۲۰۲۳ سازمان هواشناسی کشور برای ارتفاع موج در خلیج فارس و دریای عمان چندین هشدار دریایی نارنجی و قرمز صادر کرد. بنابراین به منظور بررسی قابلیت پیش‌بینی ارتفاع امواج در این منطقه مدل SWAN در این مورد مطالعاتی اجرا شد. یکی از عوامل مهم در رخداد امواج با ارتفاع زیاد دمای سطح آب است. بی‌هنجاری دمای آب در این مورد مطالعاتی نسبت به میانگین سی ساله در سراسر خلیج فارس و دریای عمان به جز بخش‌های کوچکی از جنوب دریای عمان مثبت است که نشان‌دهنده افزایش دمای آب است. مهمترین عامل در ارتفاع امواج سرعت باد است. بنابراین به منظور بررسی اثر باد در پیش‌بینی امواج در این مورد مطالعاتی، مدل SWAN یک بار با استفاده از میدان باد حاصل از داده‌های بازتحلیل ERA5 با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه و بار دیگر با خروجی مدل WRF با تفکیک افقی ۲۷

- ۱۲۰، صفحات ۳۶-۱۵.
۳. خزایی، م. ۱۳۹۸، بررسی و تحلیل دمای سطح آب خلیج فارس و دریای عمان طی یک دوره اقلیمی ۴۰ ساله، ۱۳۹۷-۱۳۵۸؛ ۱۹۷۹-۲۰۱۸، نخستین کنفرانس بین‌المللی شهر هوشمند چالش‌ها و راهبردها، شیراز، <https://civilica.com/doc/998599>.
۴. زارع، ع. و ع. ا. گلشنی، ۱۳۹۸، پیش‌بینی بلندمدت مشخصات امواج بندر بوشهر با استفاده از مدل SWAN به روش شبه‌زمانی، بیست و یکمین همایش صنایع دریایی (MIC2019).
۵. عامری، ف.، س. قادر و س. ع. حق‌شناس، ۱۳۹۹، شبیه‌سازی امواج ناشی از باد تحت تأثیر پیچیدگی‌های جغرافیایی در تنگه هرمز، مجله ژئوفیزیک ایران، دوره ۱۴، شماره ۲، صفحات ۱۰۳-۱۲۰.
۶. عباسی، م. ر.، ۱۳۹۹، ارزیابی دو مدل عددی موج در پیش‌بینی ارتفاع امواج شمال دریای عمان، هیدروفیزیک، دوره ۶، شماره ۱، صفحات ۴۳-۳۵. DOR: 20.1001.1.24767131.1399.6.1.4.8
۷. طاهری، ح.، م. ح. کاظمی‌نژاد و ع. یگانه‌بختیاری، ۱۳۹۶، ارزیابی عملکرد مدل SWAN در پیش‌بینی امواج ناشی از باد خلیج فارس (مطالعه موردی: جزایر فارور و لاوان)، نشریه علمی پژوهشی اقیانوس‌شناسی، دوره ۸، شماره ۳۲، صفحات ۴۳-۵۱.
۸. کاشی‌زنوزی، م.، ب. لایقی، ع. رنجبر، س. تاج‌بخش مسلمان و م. رهنما، ۱۴۰۲، شبیه‌سازی امواج دریا و بررسی انرژی قابل استحصال از امواج در سواحل مکران با استفاده از مدل SWAN، نیوار، دوره ۴۷، شمره ۱۲۲-۱۲۳، صفحات ۱۹۵-۲۱۰. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2024.426307.1274>.
۹. گلشنی، ع. ا.، ۱۳۸۹، پیش‌بینی ۶۰ ساله مشخصات امواج در جنوب خلیج فارس با استفاده از مدل SWAN به روش شبه‌زمانی، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی دریا، دوره ۶، شماره ۱۲، صفحات ۷۳-۸۷.
10. Abdi Vishkaee, F., Flamant, C., Cuesta, J., Oolman, L., Flamant, P. and Khalesifard,

موج شاخص و پیروید موج را تا حد قابل قبولی در نواحی مرکزی و غربی سواحل مکران برآورد می‌کند؛ زیرا سواحل شرقی مکران به اقیانوس هند نزدیک هستند و بیشتر تحت تأثیر مونسون قرار می‌گیرند. همچنین فرجامی و همکاران (۱۳۹۰) نیز نشان دادند که مدل SWAN در منطقه خلیج بوشهر ارتفاع موج و دوره تناوب موج شاخص را با دقت قابل قبولی برآورد می‌کند. به منظور بررسی عوامل موثر بر این اختلاف داده‌های باد تراز ۱۰ متری، میانگین فشار سطح دریا و ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ hPa خروجی مدل WRF با داده‌های بازتحلیل ERA5 مقایسه شد. بررسی نتایج نشان داد که مدل WRF جهت باد در منطقه را به خوبی پیش‌بینی کرده است ولی در برآورد میزان سرعت باد بویژه بر روی تنگه هرمز و مناطق شرقی و غربی آن خطا داشته و در برخی مواقع سرعت در این مناطق را فراتخمین کرده است. در نقشه فشار سطح دریا اگرچه مدل WRF توانسته مراکز کم‌فشار در منطقه را نشان دهد ولی شدت آنها را کمتر برآورد کرده است. در نقشه ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ hPa نیز مراکز پرارتفاع را با شدت بیشتری پیش‌بینی کرده و نفوذ ناوه از عرض‌های شمالی به نیمه شمالی خلیج فارس را نشان نداده است. بررسی سری زمانی ارتفاع موج شاخص و برخی کمیت‌های دیگر از خروجی مدل SWAN با استفاده از داده‌های باد ERA5 و مدل WRF نشان داد که اگرچه در برخی زمان‌ها، روند تغییر خروجی‌ها مشابه است ولی همچنان خطا قابل توجه است و بیشترین خطا مربوط به نقطه ۲ واقع در غرب تنگه هرمز بوده است.

## ۵. مراجع

۱. ترابی‌آزاد، م. و ع. محمدی، ۱۳۹۴، مطالعه دمای سطحی آب دریا (SST) و سرعت باد در سواحل استان هرمزگان بر اساس داده‌های ماهواره‌ای، مجله پژوهش‌های علوم و فنون دریایی، شماره ۳، صفحات ۶۹-۷۷.
۲. سیه‌سرانی، ا.، آزادی، م.، لایقی، ب.، و بابازاده، د.، ۱۴۰۲، تحلیل حساسیت جمله اتلاف سفیدک راس موج برای کالیبراسیون مدل SWAN با واداشت باد ERA5 در دریای عمان، نشریه نیوار، دوره ۴۷، شماره پیاپی ۱۲۱-

21. Komen, G.J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S. and Janssen, P.A.E.M., 1996. Dynamics and modelling of ocean waves (p. 554).
22. Li, C.W. and Mao, M., 1992. Spectral modelling of typhoon-generated waves in shallow waters. *Journal of Hydraulic Research*, 30(5), pp.611-622.
23. Makris, C., Baltikas, V., Androulidakis, Y., Kontos, Y., Nagkoulis, N., Kazakis, I., Karambas, T., Papadimitriou, A., Metallinos, A., Chondros, M. and Emmanouilidou, M.E., 2021, June. Integrated modeling of sea-state forecasts for safe navigation near and inside ports: the Accu-Waves platform. In *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference* (pp. ISOPE-I). ISOPE.
24. Mei, C.C., 1983. *The applied dynamics of ocean surface waves*. Wiley.
25. Moeini, M.H. and Etemad-Shahidi, A., 2007. Application of two numerical models for wave hindcasting in Lake Erie. *Applied Ocean Research*, 29(3), pp.137-145.
26. Na, S.J., Do, K.D. and Suh, K.D., 2011. Forecast of wave run-up on coastal structure using offshore wave forecast data. *Coastal engineering*, 58(8), pp.739-748.
27. Sanjou, M. and Sugihara, Y., 2023. Experimental study on characteristics of turbulence and sediment transport produced by wind-induced water waves. *Physics of Fluids*, 35(2).
28. Sharma, T., Bedi, J., Anand, A. and Aggarwal, A., 2023. Wave Height Prediction in Maritime Transportation Using Decomposition Based Learning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.
29. Tolman, H.L., 1991. A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady, and inhomogeneous depths and currents. *Journal of Physical Oceanography*, 21(6), pp.782-797.
30. Warner, J.C., Armstrong, B., He, R. and Zambon, J.B., 2010. Development of a coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) modeling system. *Ocean modelling*, 35(3), pp.230-244.
31. Whitham, G.Á., 1965. A general approach to linear and non-linear dispersive waves H.R., 2012. Dust transport over Iraq and northwest Iran associated with winter Shamal: A case study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D3).
11. Alfieri, L., Salamon, P., Pappenberger, F., Wetterhall, F. and Thielen, J., 2012. Operational early warning systems for water-related hazards in Europe. *Environmental Science & Policy*, 21, pp.35-49.
12. Benoit, M., Marcos, F. and Becq, F., 1997. Development of a third generation shallow-water wave model with unstructured spatial meshing. In *Coastal Engineering 1996* (pp. 465-478).
13. Booij, N.R.R.C., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of geophysical research: Oceans*, 104(C4), pp.7649-7666.
14. Bower, A.S., Hunt, H.D. and Price, J.F., 2000. Character and dynamics of the Red Sea and Persian Gulf outflows. *Journal of geophysical research: Oceans*, 105(C3), pp.6387-6414.
15. Farjami, H., Hosseini, S.T., Chegini, V. and Mohammadi, S., 2012. Simulating Wind Driven Waves by SWAN Numerical Wave Model in Bushehr Bay. *Journal of Oceanography*, 2(8), pp.79-87.
16. Finnis, J., Shewmake, J.W., Neis, B. and Telford, D., 2019. Marine forecasting and fishing safety: improving the fit between forecasts and harvester needs. *Journal of agromedicine*, 24(4), pp.324-332.
17. Foli, B.A.K., Appeaning Addo, K., Ansong, J.K. and Wiafe, G., 2022. Ocean state projections: A review of the West African marine environment. *Journal of Coastal Conservation*, 26(6), p.61.
18. Graber, H.C. and Madsen, O.S., 1988. A finite-depth wind-wave model. Part I: Model description. *Journal of physical oceanography*, 18(11), pp.1465-1483.
19. Grant, C. and Shaw, C., 2001. Operational oceanographic needs for the offshore oil and gas industry. *GOOS data products and services bulletin*. Volume, 1.
20. Group, T.W., 1988. The WAM model—A third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, 18(12), pp.1775-1810.

33. Zoljoodi, M., 2017. Validation and coupling of the SWAN wave prediction model by WRF for the Persian gulf. *Open Journal of Marine Science*, 7(01), p.22
32. Young, I.R., 1999. Wind generated ocean waves. Elsevier. using a Lagrangian. *Journal of Fluid Mechanics*, 22(2), pp.273-283.