

## Simulation of sea waves and investigation of extractable energy from waves in Makran coastal zone by using SWAN model

Kashizonozi, M.<sup>1</sup>  | Layeghi, B.<sup>2</sup>  | Ranjbar, A.<sup>3</sup>  | Tajbakhs Mosalman, S.<sup>4</sup>  | Rahnama, M.<sup>5</sup> 

1. **Corresponding Author**, Ph.D. Student in Meteorology, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science, Tehran, Iran. E-mail: [kashimona86@yahoo.com](mailto:kashimona86@yahoo.com)
2. Ph.D. of Physical Oceanography, Department of Islamic Azad University Science and Research Branch, Tehran, Iran. [layeghi2001@yahoo.com](mailto:layeghi2001@yahoo.com)
3. Associate Prof., Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science, Tehran, Iran. [aranjbar@gmail.com](mailto:aranjbar@gmail.com)
4. Assistant Prof., Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science, Tehran, Iran. [sahartajbakhsh@gmail.com](mailto:sahartajbakhsh@gmail.com)
5. Assistant Prof., Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science, Tehran, Iran. [me.rahnama@gmail.com](mailto:me.rahnama@gmail.com)

(Received: 21 Nov 2023, Revised: 1 Jan 2024, Accepted: 31 Jan 2024, Published online: 31 Jan 2024)

### Abstract

In recent years, the need for energy in the world has increased. Due to climate change and its problems and the increasing global need for energy, the desire to use fossil energy has decreased and the development of new energy has become one of the most important issues of the day. In this research, one of the new types of energy, called wind wave energy, has been investigated. In this research, the Swan model (SWAN: Simulating Waves Nearshore) was used to simulate the characteristics of the waves (Significant wave height, wave direction and wave period) were predicted in a period of 6 years. The output of the WRF model was used to generate the wind field of the SWAN model input. After simulating the waves, the Chabahar buoy and Era5 data were used to verify the wave characteristics, including the height of the wave index (Hs) and the period of wave repetition (Ts). Then, the amount of energy that can be extracted in Makran beaches was calculated. The results of the six-year averaging showed that the highest wave power can be obtained in the summer season in the areas near the Indian Ocean, which was estimated about 7.84 W/m.

**Keywords:** New energy, SWAN model, Wave power, Monsoon.

**Cite this article:** Kashizonozi, M., Layeghi, B., Ranjbar, A., tajbakhsh, S., & Rahnama, M. (2024). Simulation of sea waves and investigation of extractable energy from waves in Makran coastal zone by using SWAN model. *Journal of the Nivar*, 47(122-123), 195-210. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2024.426307.1274>



## شبیه‌سازی امواج دریا و بررسی انرژی قابل استحصال از امواج در سواحل مکران با استفاده از مدل SWAN

مونا کاشی زنوزی<sup>۱</sup> | بهزاد لایقی<sup>۲</sup> | عباس رنجبر<sup>۳</sup> | سحر تاجبخش مسلمان<sup>۴</sup> | مهدی رهنما<sup>۵</sup>

۱. نویسنده مسئول، دانشجوی دکترای هواشناسی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران. رایانامه: [kashimona86@yahoo.com](mailto:kashimona86@yahoo.com)

۲. دکترای فیزیک دریا، گروه دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران. رایانامه: [layeghi2001@yahoo.com](mailto:layeghi2001@yahoo.com)

۳. دانشیار پژوهشکده هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران. رایانامه: [aranjbar@gmail.com](mailto:aranjbar@gmail.com)

۴. استادیار پژوهشکده هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران. رایانامه: [sahartajbakhsh@gmail.com](mailto:sahartajbakhsh@gmail.com)

۵. استادیار پژوهشکده هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران. رایانامه: [me.rahnama@gmail.com](mailto:me.rahnama@gmail.com)

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۳۰، بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۱، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۱۱/۱۱)

### چکیده

طی سال‌های اخیر نیاز به انرژی در جهان افزایش یافته است. با توجه به تغییر اقلیم و مشکلات آن و نیاز روز افزون جهانی به انرژی، تمایل به استفاده از انرژی‌های فسیلی کاهش یافته و توسعه انرژی‌های نو به یکی از مهم‌ترین مسائل روز تبدیل شده است. در این پژوهش به بررسی یکی از انواع انرژی‌های نو به نام انرژی امواج ناشی از باد پرداخته شده است. در این پژوهش از مدل سوان (SWAN: Simulating Waves Nearshore) برای شبیه‌سازی مشخصات امواج استفاده شد و مشخصات امواج (ارتفاع موج شاخص، جهت موج و پریود موج) در بازه زمانی ۶ ساله پیش‌بینی گردید. برای تولید میدان باد ورودی مدل SWAN از خروجی مدل WRF اطلس باد پژوهشگاه هواشناسی در بازه زمانی ۲۰۱۳-۲۰۱۵ و اجرای سه ساله این مدل در بازه ۲۰۱۹-۲۰۲۱ استفاده شد. پس از شبیه‌سازی امواج، از داده‌های ثبت شده بویه چابهار و داده‌های جهانی بازتحلیل Era5 به صورت ساعتی در بازه زمانی ۲۰۱۳-۲۰۱۵ و ۲۰۱۹-۲۰۲۱ برای واسنجی و اعتبارسنجی مشخصه‌های موج از جمله ارتفاع موج شاخص (Hs) و دوره‌ی تناوب موج (Ts) استفاده شد. سپس میزان انرژی قابل استحصال در سواحل مکران محاسبه شد. نتایج حاصل از میانگین گیری شش ساله نشان داد که بیشترین توان موج در فصل تابستان در نواحی نزدیک به اقیانوس هند قابل استحصال است که به میزان ۷.۸۴ وات بر متر برآورد شد.

**کلمات کلیدی:** انرژی‌های نو، مدل سوان، توان موج، مونسون.

### ۱. مقدمه

چگالی انرژی بالاتری بر واحد سطح دارد (Ringwood, 2008). در کشور ایران با توجه به ۱۲۵۹ کیلومتر مرز دریایی با خلیج فارس، ۷۸۴ کیلومتر با دریای عمان و ۶۵۷ کیلومتر با دریای خزر، بحث استفاده از انرژی امواج بسیار حائز اهمیت است (Zabihian, 2003). متأسفانه هنوز توجه زیادی به انرژی امواج به عنوان منبعی تجدید پذیر و ارزان نشده است.

تغییر اقلیم یکی از مشکلات روز جهان است. استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر که سازگاری خوبی با محیط زیست دارند، می‌تواند این مشکل که ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی است را حل کند. یکی از انرژی‌های تجدید پذیر، انرژی موجود در امواج ناشی از باد است. انرژی امواج دریا نسبت به انرژی خورشیدی،

**استناد:** کاشی زنوزی، مونا؛ لایقی، بهزاد؛ رنجبر، عباس؛ تاج‌بخش، سحر و رهنما، مهدی. (۱۴۰۲). شبیه‌سازی امواج دریا و بررسی انرژی قابل استحصال از امواج در سواحل مکران

با استفاده از مدل SWAN، مجله نویار، ۴۷(۱۲۲-۱۲۳)، ۱۹۵-۲۱۰. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2024.426307.1274>

جنوب بریتانی دیده شد. تغییرات فصلی زیادی در انرژی موج دیده شد به طوری که بیشترین انرژی در فصل زمستان در ماه ژانویه و کمترین انرژی در تابستان در ماه جولای به دست آمد (Pau Sierra et al., 2017).

تونده آدرینتو و هووالی به بررسی تکنولوژی های برداشت انرژی موج و وضعیت تکامل و وضعیت کنونی صنعت پرداختند. روش های مشخص سازی منابع موج، هیدرودینامیک برهمکنش موج با مبدل انرژی موج، سیستم های دریافت برق و چالش های مختلف شناسایی و مورد بحث قرار گرفتند. راه حل هایی نیز در حین بحث در مورد چالش ها به منظور افزایش آگاهی و سرمایه گذاری در صنعت انرژی موج به طور کلی پیشنهاد شد. بر اساس بررسی ها مشخص شد که یکی از چالش های عمده ای که در برابر طراحی و استقرار مبدل های انرژی موج وجود دارد این است که این فناوری ها در مقایسه با سایر فناوری های انرژی تجدیدپذیر بالغ مانند باد و خورشید، با وجود نمونه های اولیه و ثبت اختراعات گزارش شده در بسیاری از متون، هنوز در مرحله نوپایی است. مفهوم این است که یک استراتژی عملیاتی و نگهداری جامع باید برای این سیستم ها در مرحله طراحی برنامه ریزی شود، که قطعاً هزینه های اضافی را به همراه خواهد داشت. یکی دیگر از ملاحظات مهم برای فعالیت برنامه ریزی بهره برداری و تعمیر و نگهداری، دسترسی به تاسیساتی است که در خارج از ساحل باشد. تجربه به دست آمده از صنعت انرژی فراساحلی از جمله صنایع بادی و نفت و گاز فراساحلی می تواند به درک ریسک ها و هزینه های مرتبط با نگهداری یک تاسیسات دریایی کمک کند (Aderinto and Li, 2018).

مارتینزا و ایگلسیاسا به طبقه بندی منابع موج در جهان پرداختند. آنها با رویکردی جدید به انتخاب مناطق مناسب برای توسعه انرژی پرداختند. یک رویکرد جدید بر اساس ترکیبی از دو عنصر شاخص بهره برداری موج (WEI)، و طبقه بندی منبع بر اساس توان موج متوسط. توسط آنها ارائه شد. آنها از داده های ERA-5 در بازه زمانی ۱۹۷۹-۲۰۱۹ استفاده کردند. بر اساس

بر اساس برآوردهای انجام شده کل انرژی امواج در جهان معادل ۲ تراوات انرژی الکتریکی است. به طور تقریبی حداکثر ۲۰ درصد از این انرژی قابل استحصال است (Chegini, 2011). انرژی موج به علت ارتفاع آن و انرژی جنبشی ناشی از حرکات ذرات آب آن ترکیبی از انرژی پتانسیل و جنبشی است. مبدل انرژی موج می تواند از هر دو فرم برق تولید کند. یکی از مزیت های انرژی موج چگالی بالای انرژی موج در مقایسه با انرژی های خورشیدی است. در حقیقت انرژی موج نوع خاصی از انرژی خورشیدی و بادی است. در حالی که امکان دسترسی به انرژی موج بسیار بیشتر از انواع دیگر انرژی های تجدید پذیر است و برخلاف انرژی خورشیدی و بادی، انرژی موج نیازی به سواحل وسیع ندارد و قابل دسترس تر می باشد به عنوان مثال برای جزیره هایی که با خشکی ارتباط ندارند و هزینه تامین برق بالاست انرژی موج گزینه مطلوبی محسوب می شود. علیرغم مزایا و منابع گسترده، انرژی موج مشارکت زیادی در تامین انرژی جهان نداشته است (IEA, 2021). این حداقل مشارکت به علت چالش های موجود در این زمینه است. یک مطالعه اخیر حدود ۳۲۰۰ مقاله انرژی اقیانوسی را در ۱۰ سال گذشته تجزیه و تحلیل کرد و نتایج ارزشمندی را در مورد ساختار دانش در این زمینه ارائه کرد (Hu et al., 2022). این قبیل مطالعات می توانند به رفع چالش های موجود کمک کنند.

در زمینه امکان سنجی انرژی امواج کارهای زیادی انجام شده است که در زیر به بیان موارد اخیر آن ها خواهیم پرداخت: پائو سیرا و همکارانش به ارزیابی پتانسیل انرژی در سواحل اطلس فرانسه با استفاده از داده های ۵۸ ساله اتخاذ شده از مدل سازی عددی پرداختند. داده های ۵۴ نقطه در طول ساحل برای تحلیل توزیع فضایی قدرت موج مورد استفاده قرار گرفتند. مشخص شد که میانگین توان موج میزان قابل توجهی دارد. بیشتر انرژی در قسمت سواحل شمال غربی محدوده مورد مطالعه به دست آمد و نقاطی با انرژی کم در سواحل شمال غربی و

اقلیم در طبقه کم انرژی بودند که شامل دریاهای محصور و دریاهای محافظت شده می شود. دو اقلیم در طبقه متوسط انرژی بودند که شامل دریاهای تحت تاثیر موج دورآ و توفان‌های محلی می شود. از دو کلاس انرژی بالاتر، یکی اغلب در نیمکره شمالی و دیگری پرانرژی ترین، عمدتاً در نوک قاره ها در نیمکره جنوبی یافت می شود. عملکرد دستگاه‌ها در حال حاضر برای دو طبقه بالای انرژی خوب است. پیشنهاد می شود تلاش‌های بیشتری برای بهینه‌سازی دستگاه‌ها برای سایر طبقات بشود (Iain Fairley et al., 2020).

یوران چن و همکارانش به پیش بینی ارتفاع موج شاخص از طریق هوشمند مصنوعی برای مدیریت انرژی موج پرداختند. از دید آن‌ها مهم‌ترین عامل در مدیریت انرژی امواج، پیش بینی صحیح ارتفاع موج شاخص است. در این تحقیق یک طبقه بندی برای سری زمانی ارتفاع موج شاخص بر اساس رمزگذاری ترانسفورماتور (TF<sup>۱</sup>) و تجزیه حالت تجربی (EMD<sup>۲</sup>) ایجاد شده است. سری SWH3 ابتدا از طریق رویکرد EMD تجزیه می شود و منجر به چندین تابع حالت ذاتی (IMFs<sup>۴</sup>) می شود. متعاقباً، SWH و آن سری‌های فرعی به هم متصل می شوند و تحت مراحل پیش پردازش قرار می گیرند. مجموعه‌های آموزشی به دست آمده برای یادگیری الگوهای غیرخطی بین گام زمانی و ویژگی‌ها به دو رمزگذار TF وارد می شوند. سپس از ادغام میانگین جهانی برای کاهش بعد تانسور به دو لایه متراکم خروجی لایه متراکم استفاده می شود. در نهایت، دو لایه متراکم کاملاً متصل (یکی مخفی و دیگری خروجی) برای ارائه ماتریس احتمال سطح موج اضافه می شوند. آن‌ها نتایج خود را با داده‌های اندازه‌گیری بویه در اقیانوس اطلس مقایسه کردند و مشخص شد که دقت این مدل با دوره جرای ۶ ساعت و دوره آموزش ۷۵ ثانیه، ۹۹/۱ درصد است. این مطالعه ابزار و منابع ارزشمندی را برای کاربردهای پیش بین ارتفاع موج شاخص در

نتایج پژوهش آنها بالاترین مقادیر WEI در مناطق استوایی و عرض‌های جغرافیایی میانی رخ می دهد، که پتانسیل آنها را برای بهره برداری از انرژی موج برجسته می کند. کمترین مقادیر WEI (زیر ۰.۰۶) در دریاهای (نیمه) محصور مانند دریای مدیترانه یا خلیج مکزیک رخ می دهد. با توجه به طبقه بندی منبع، کلاس‌های IV و V، با توان موج متوسط بیش از ۴۰ کیلووات بر متر، در مناطقی اتفاق می افتند که علاقه زیادی به بهره‌برداری از انرژی موج نشان داده‌اند اما اغلب به دلیل تنوع منابع، مقادیر WEI بالایی ندارند (به عنوان مثال، اروپای غربی). کلاس I با توان موج متوسط زیر ۱۰ کیلووات بر متر که معمولاً در دریاهای محصور دیده می شود، مورد توجه کمی است. در نهایت، کلاس‌های II و III با توان موج متوسط بین ۱۰ تا ۴۰ کیلووات بر متر در مناطق باز به اقیانوس در عرض‌های جغرافیایی پایین تر و میانی پایین (به عنوان مثال، شیلی، جنوب غربی استرالیا) رخ می دهد. این مناطق بالاترین مقادیر WEI را ارائه می دهند، بنابراین پتانسیل بالایی بهره‌برداری از انرژی موج دارند اما تاکنون توجه اندکی را به خود جلب کرده‌اند (Martinez and Iglesias, 2020).

این فرلی و همکارانش به طبقه بندی منابع انرژی موج جهانی بر اساس خوشه بندی چند متغیره پرداختند. از دید آن‌ها درک بهتر اقلیم موج جهانی برای طراحی دستگاه‌های استحصال انرژی موج لازم است. آن‌ها منابع انرژی موج را با استفاده از داده‌های بازتحلیل era5 به ۶ طبقه تقسیم کردند. طبقه بندی بر اساس دو مجموعه داده انجام گرفت:

الف) مجموعه‌ای شامل داده‌های ارتفاع و پریرود موج (ب) مجموعه‌ای جامع شامل طیف گسترده‌ای از پارامترهای آب و هوای موج مربوطه.

هر دو مجموعه طبقاتی با ویژگی‌های یکسان نشان دادند. ۵۵ درصد از نقاط تست شده در طبقات یکسان قرار گرفتند. دو

<sup>3</sup> Significant Wave Height

<sup>4</sup> intrinsic mode functions

<sup>1</sup> Transformer encoder

<sup>2</sup> empirical mode decomposition

موج  $N$  توسط معادله تعادل کنش زیر کنترل می‌شود (مشهدی و همکاران، ۱۳۹۲):

$$\frac{\delta N}{\delta t} + (\vec{C}_g + \vec{U}) \cdot \nabla N + \frac{\delta C_\sigma}{\delta \sigma} N + \frac{\delta C_\theta}{\delta \theta} N = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (1)$$

جمله اول نشان دهنده تغییرات چگالی نسبت به زمان است. جمله دوم نشان دهنده انتشار انرژی موج در فضای دو بعدی است.  $\vec{C}_g$  سرعت گروه و  $\vec{U}$  جریان است. این جمله را می‌توان در مختصات کارتیزین و کروی بازسازی کرد. جمله سوم اثر جابه‌جایی فرکانس نسبی در اثر تغییرات عمق و جمله چهارم انکسار در اثر عمق یا جریان را نشان می‌دهد.  $C_\theta$  و  $C_\sigma$  سرعت‌های انتشار در فضای طیفی  $(\sigma, \theta)$  هستند  $\sigma$  فرکانس نسبی و  $\theta$  جهت انتشار است. جمله سمت راست نشان دهنده چشمه و چاه است. فرایندهای تولید و اتلاف عبارتند از تولید موج توسط باد، اثرات برهم‌کنش امواج، اتلاف ناشی از ایجاد سفیدک در راس موج، اتلاف ناشی از اصطکاک بستر و اتلاف ناشی از شکست امواج ناشی از کاهش عمق. این ۶ فرایند در  $S_{tot}$  خلاصه می‌شوند:

(۲)

$$S_{tot} = S_{wind} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{wc} + S_{bot} + S_{db}$$

جملات معادله (۲) به ترتیب، ورودی انرژی توسط باد، انتقال غیر خطی انرژی موج در اثر برهم‌کنش سه‌گانه و چهارگانه امواج، استهلاک ناشی از سفیدک راس موج، اصطکاک بستر و شکست موج را نشان می‌دهند. در مدل SWAN می‌توان باد را به صورت ایستا و غیر ایستا در نظر گرفت. امکان حل معادله به صورت کارتیزین و کروی نیز وجود دارد.

در این تحقیق جهت تعیین انرژی موج از نسخه ۴۱۳۱ مدل SWAN جهت محاسبه پارامترهای موج (ارتفاع موج شاخص، جهت موج و پریود موج) استفاده شده است. جهت تنظیم ورودی مدل از داده‌های خروجی مدل WRF اطلس باد

دنیای واقعی فراهم می‌کند (Yaoran Chen et al., 2023).

هدف از این تحقیق، محاسبه توان قابل دریافت از امواج ناشی از باد در دریای عمان جهت جایگزین کردن انرژی های فسیلی با انرژی تجدیدپذیر امواج در منطقه است. در این تحقیق سعی بر آن است که توزیع مکانی برای بهره برداری از این انرژی تجدید پذیر و تغییرات زمانی آن تجزیه و تحلیل شود. با این کار امکان برنامه ریزی برای استفاده از انرژی موج در منطقه مکران میسر می‌شود.

## ۲. مواد و روش ها

در طول دو دهه اخیر، تعدادی مدل به عنوان مدل‌های نسل سوم گسترش یافتند که مدل SWAN یکی از آنها است. در ابتدا این مدل تنها قادر به بررسی شرایط موج در حالت مانا و با در نظر گرفتن شبکه تمام مستطیلی بوده است. با گذشت زمان، نسل دوم مدل محدودیت‌های قبلی را نداشته و قادر به در نظر گرفتن شرایط مانا و غیر مانا و شبکه بندی غیر مستطیلی را جهت محاسبات دارد. در نظر گرفتن پدیده های فیزیکی و پیشرفت فرمولاسیون مدل منجر به ایجاد نسل سوم شده است.

مدل SWAN توسط دانشگاه صنعتی دلفت هلند در سال ۲۰۰۹ تهیه شده است. این مدل به صورت رایگان در دسترس است و به طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل SWAN یک مدل موج نسل سومی کاملاً طیفی (در تمامی جهت‌ها و فرکانس‌ها) است که با استفاده از آن می‌توان به برآوردهای واقع‌گرایانه‌ای از پارامترهای موج بویژه در نواحی ساحلی دست یافت (دردی زاده بصیر آبادی، ۱۳۹۱). این مدل بر اساس حل عددی معادله تعادل کنش طیفی کار می‌کند. این معادله اثرات انتشار مکانی، انکسار، تولید، استهلاک و برهم‌کنش‌های غیر خطی موج-موج را نشان می‌دهد. در این مدل امواج توسط طیف دو بعدی چگالی کنش توصیف می‌شوند. چگالی کنش

شکل ۱- دامنه اجرای مدل SWAN

داده های مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از: داده های ERA5 (داده های ساعتی ارتفاع موج و دوره تناوب موج برای درستی سنجی مدل SWAN): داده بازتحلیلی است که توسط ECMWF1 تولید شده است و داده های ساعتی بسیاری از پارامترهای جوی، سطح زمین و دریا را همراه با تخمین عدم قطعیت ارائه می دهد. این داده در واقع جانشین ERA-Interim2 است. سیستم پیش بینی یکپارچه ECMWF با یک مدل سطحی و یک مدل اقیانوسی موج جفت شده است و این داده ها را در اختیار ما گذاشته است. داده های ERA5 در شبکه هایی با طول و عرض جغرافیایی منظم با تفکیک افقی  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  هستند و پارامترهای جوی در  $37^\circ$  سطح فشاری در دسترس هستند. مهمترین نقطه قوت این داده ها این است که مجموعه داده های مکانی و زمانی کامل متغیرهای متعدد با تفکیک مکانی و زمانی بالا که بهتر از نسل های قبلی داده های باز تحلیل می توانند پدیده هایی مثل توفان را توصیف کنند، را در اختیار ما قرار می دهد (Hersbach and Dee, 2019).

داده های بویه (داده ساعتی بویه چابهار برای واسنجی مدل SWAN)

داده های ارتفاع سنجی ETOPO2 (ارتفاع کف دریا در شبکه طول و عرض جغرافیایی ۲ دقیقه ای)

لازم به ذکر است که در این پژوهش داده های مربوط به محدوده تنگه هرمز تا پسابندر در ۳ نقطه با مختصات های:

۲۵.۵۹ N و ۵۷.۷۷E

۲۵.۲N و ۵۹.۵۶E

۲۵.۰۴N و ۶۱.۴۱E

پژوهشگاه هواشناسی در بازه ۳ ساله (۲۰۱۳-۲۰۱۵) و خروجی باد اجرای مدل WRF توسط ما در بازه ۳ ساله (۲۰۱۹-۲۰۲۱) به

صورت ساعتی و داده های ارتفاع سنجی ETOPO2 از سایت NOAA استفاده شده است. تفکیک مکانی مدل SWAN، ۸ کیلومتر و تفکیک زمانی آن ۱۵ دقیقه در نظر گرفته شد. دامنه اجرای مدل در شکل شماره ۱ نشان داده شده است. در آخر خروجی مدل به فایل اکسل جهت انجام محاسبات لازم تبدیل شد.

لازم به ذکر است که جهت تولید میدان باد ورودی مدل سوان علاوه بر داده های اطلس باد پژوهشگاه هواشناسی در بازه زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵، از خروجی اجرای نسخه 3.9.1 مدل WRF در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۱ نیز استفاده شده است. مدل پیش بینی و تحقیقاتی وضع هوا یا همان WRF یک مدل پیش بینی عددی و شبیه سازی جوی است که برای کارهای تحقیقاتی و عملیاتی طراحی شده است. شبیه سازی به حالت آشیانه ای (nested) و در دو دامنه با تفکیک افقی ۱۵ و ۵ کیلومتر انجام شده است. از خروجی دمنه کوچکتر با تفکیک افقی ۵ کیلومتر برای تولید ورودی باد مدل سوان استفاده شد. مدل سوان در دامنه نمایش داده شده در شکل ۱ اجرا شد. تفکیک مکانی مدل ۸ کیلومتر و تفکیک زمانی آن ۱۵ دقیقه در نظر گرفته شد. در آخر خروجی مدل به فایل اکسل جهت انجام محاسبات لازم تبدیل شد.



<sup>2</sup> ECMWF Reanalysis - Interim

<sup>1</sup> European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

مقدار انرژی منتقل شده توسط موج که بیانگر مقدار انرژی در دسترس آن است، توان موج نامیده می‌شود که با استفاده از رابطه شماره (۴) به دست می‌آید (Falnes, 2015):

$$P = EC_g = \frac{1}{8} \rho g H_s^2 C_g \left[ \frac{W}{m} \right] \quad (4)$$

$C_g$  سرعت گروه موج بر حسب متر بر ثانیه است. در آب عمیق ارتباط بین سرعت گروه و سرعت موج (c) با استفاده از رابطه زیر بیان می‌شود:

$$C_g = \frac{gT}{4\pi} \quad (5)$$

T دوره تناوب موج بر حسب ثانیه است. با استفاده از دو رابطه (۴) و (۵) به رابطه زیر برای توان موج می‌رسیم:

$$P = \frac{1}{32\pi} \rho g^2 H_s^2 T \left[ \frac{W}{m} \right] \quad (6)$$

چگالی توان موج یعنی انرژی موج به ازای پیروی موج برابر است با (Vining, 2007):

$$P_{density} = \frac{\rho g^2 H_s^2}{8T} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (7)$$

جهت ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل از ابزارهای میانگین قدر مطلق خطا، جذر جذر میانگین مربعات خطا و ضریب هم‌بستگی استفاده شده است که در ادامه به اختصار توضیح داده خواهند شد (Layeghi et al., 2017).

یکی از ابزارهای آماری میانگین قدر مطلق خطا است که به اختصار MAE نیز نامیده می‌شود. در محاسبه خطا MAE فقط میزان فاصله و نه جهت فاصله به کار می‌رود. بنابراین MAE، میانگین قدر مطلق تفاضل بین مقدار پیش‌بینی و واقعی را محاسبه

مورد تحلیل قرار می‌گیرد. نقاط مورد بررسی در شکل شماره ۲ نشان داده شده‌اند. هر نقطه نماینده یک بخش (غربی، مرکزی و

شرقی) از سواحل مکران در نظر گرفته شد تا بتوان تحلیل زمانی بهتری انجام داد.



شکل ۲- نقاط مورد مطالعه

برای طراحی سیستم استخراج انرژی، ابتدا نیاز به برآورد انرژی در دسترس است. پس از اجرای دو مدل و به دست آمدن مشخصه‌های مورد نیاز موج به بررسی میزان انرژی در دسترس در منطقه پرداخته شد.

انرژی امواج دارای دو بخش انرژی پتانسیل و جنبشی است. انرژی کل موج که مجموع آنها است با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید (Tautra, 2009):

$$E = \frac{1}{2} \rho g H_s^2 \left[ \frac{Ws}{m^2} \right] \quad (3)$$

E انرژی کل موج است که به آن چگالی موج نیز گفته می‌شود (Vining, 2007).  $H_s$  ارتفاع موج شاخص،  $\rho$  چگالی آب بر حسب  $\frac{kg}{m^3}$  و g ثابت گرانشی ( $\frac{m}{s^2}$ ) است. (۹.۸۱)

ضریب همبستگی مثبت باشد، به این مفهوم است که افزایش در مقادیر یک متغیر با افزایش در مقادیر متغیر دیگر همراه است.

می‌کند. شیوه بدست آوردن MAE در رابطه شماره ۸ نوشته شده است:

$$MAE = \frac{|\sum y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (8)$$

### ۳. نتایج و بحث

با توجه به عمق منطقه پارامترهای فیزیکی دیگر مانند شکست موج ناشی از عمق و اصطکاک بستر اثر قابل توجهی بر مشخصه

در رابطه شماره ۸،  $y_i$  مقادیر پیش بینی و  $\hat{y}_i$  مقادیر واقعی برای کمیت مورد نظر هستند.  $n$  تعداد مقادیر پیش بینی و مشاهده و آمارنده است. دو ابزار دیگر به نام‌های پارامتر بیزی و شاخص پراکندگی نیز در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند:

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - \hat{y}_i}{N} \quad (9)$$

جدول ۱: واسنجی داده ارتفاع موج شاخص از خروجی مدل SWAN با استفاده از بویه چابهار در بازه زمانی ۱۶۰ ساعته

SI	BIAS
۲۵,۰۲	-۰,۱۴

$$SI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\frac{n}{\sum_{i=1}^n \hat{y}_i}}} \times 100 \quad (10)$$

جدول ۲: واسنجی داده پریرود موج از خروجی مدل SWAN با استفاده از بویه چابهار در بازه زمانی ۱۶۰ ساعته

SI	BIAS
۲۱,۴۱	-۰,۸۷

هرچه مقادیر این دو پارامتر به صفر نزدیکتر باشد؛ دقت مدل بالاتر است.

ضریب همبستگی پیرسون یکی دیگر از ابزارهای آماری است که تحت تأثیر واحد متغیرها نیست و از رابطه شماره ۱۱ به دست می‌آید:

$$CC = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - \bar{y})(y_i - \bar{y})}{s_x s_y} \quad (11)$$

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (12)$$

پارامتر بیزی بین ۱- و ۱+ و پارامتر پراکندگی بین ۰ تا ۱۰۰ است. زمانی که مقادیر پیش‌بینی و واقعی با هم یکی شوند این دو پارامتر صفر می‌شوند. در نتیجه هر چه این دو پارامتر به صفر نزدیکتر شوند دقت اندازه‌گیری بیشتر خواهد شد. در جداول شماره ۱ و ۲ اعداد این دو پارامتر به صفر نزدیک نیستند و این نشان‌دهنده خطای مدل است. در واسنجی مدل، آهنگ تغییر اتلاف سفیدک رأس موج طوری تنظیم و انتخاب شد تا خطا

ضریب همبستگی همواره عددی بین ۱ و -۱ است. این ضریب دو بخش دارد: مقدار عددی و علامت. مقدار عددی نشان می‌دهد که چقدر رابطه خطی بین دو متغیر قدرتمند است. علامت نشان می‌دهد جهت این رابطه مثبت است یا منفی. اگر

<sup>3</sup> scatter index

<sup>1</sup> rate of whitecapping dissipation

<sup>2</sup> Bias

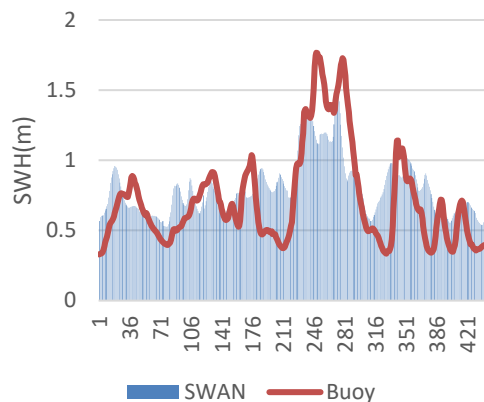


دوم (مرکز سواحل مکران)	۰,۶۸	۰,۱۷
سوم (شرق سواحل مکران)	۰,۶۳	۰,۲

در شبیه سازی ارتفاع موج شاخص به کوچکترین مقدار ممکن برسد. شکل شماره (۳) مقایسه کیفی سری زمانی ساعتی ارتفاع موج حاصل از مدل و داده‌های بویه را پس از واسنجی نشان می‌دهد.

جدول ۴: درستی سنجی داده پریرود موج از خروجی مدل SWAN با استفاده از داده های Era5 در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۱ و ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵

شماره نقطه	CC	MAE
اول (غرب سواحل مکران)	۰,۷۳	۰,۸۴
دوم (مرکز سواحل مکران)	۰,۷۹	۰,۸۱
سوم (شرق سواحل مکران)	۰,۶۹	۰,۸۸



شکل ۳- مقایسه ارتفاع موج اندازه گیری شده توسط بویه چابهار و شبیه سازی شده توسط مدل سوان پس از واسنجی در بازه زمانی ۴۵۰ ساعته

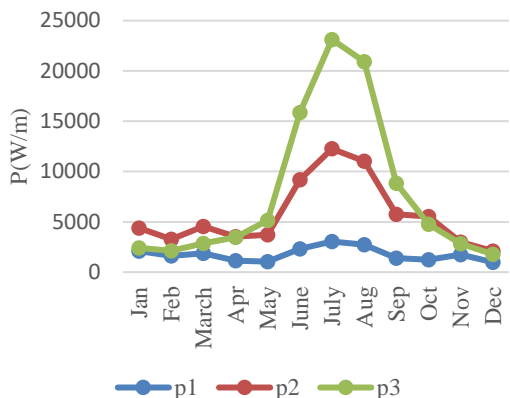
با توجه به جداول شماره ۳ و ۴ ضریب همبستگی پیرسون بالای برای تمام نقاط و هر دو کیمت بالای ۰.۵ به دست آمد. هر چه این کیمت به ۱ نزدیک شود یعنی پیش بینی ما و مقادیر واقعی همبستگی خوبی دارند. میزان پارامتر قدر مطلق خطا نیز برای کیمت ارتفاع موج زیر ۲۰ سانتی متر و برای کیمت پریرود موج زیر ۱ ثانیه به دست آمد. دقت مدل در پیش بینی پریرود موج و در نواحی مرکزی و غربی سواحل مکران بیشتر است. با توجه به اینکه سواحل شرقی مکران به اقیانوس هند نزدیکتر هستند و بیشتر تحت تاثیر اثرات مانسون قرار می‌گیرند، در آینده بهتر است محدوده اجرای مدل را بزرگتر در نظر گرفته و اثرات اقیانوس هند نیز لحاظ شوند. در کل مدل SWAN تا حد قابل قبولی توانسته است ارتفاع موج شاخص و پریرود موج را برآورد کند. با توجه به خروجی قابل قبول مدل می‌توانیم به محاسبه انرژی امواج ناشی از امواج در منطقه نیز پردازیم.

سپس از داده های بازتحلیل ERA5 (ساعتی) برای درستی سنجی داده ارتفاع موج شاخص ( $SWH^1$ ) و پریرود موج از خروجی مدل SWAN در نقاط مورد مطالعه استفاده شد. با توجه به کمبود بویه و اطلاعات مورد نظر در سواحل کشور، داده‌های ERA5 بهترین داده در دسترس جهت بررسی صحت خروجی مدل SWAN در نقاط مورد نظر بودند. نتایج حاصل از درستی سنجی ارتفاع موج و پریرود موج در جداول شماره (۳) و (۴) آمده است.

جدول ۳: درستی سنجی داده ارتفاع موج شاخص از خروجی مدل SWAN با استفاده از داده های Era5 در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۱ و ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵

شماره نقطه	CC	MAE
اول (غرب سواحل مکران)	۰,۶۶	۰,۱۸

<sup>1</sup> Significant Wave Height

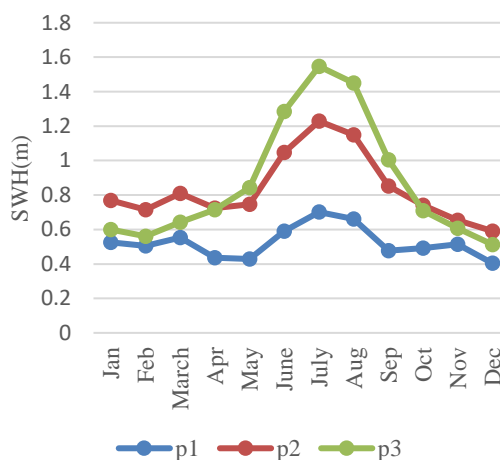


شکل ۶- میانگین ماهانه توان موج بر حسب وات بر متر (در دوره آماری ۲۰۱۳-۲۰۱۵ و ۲۰۱۹-۲۰۲۱) در هر سه نقطه

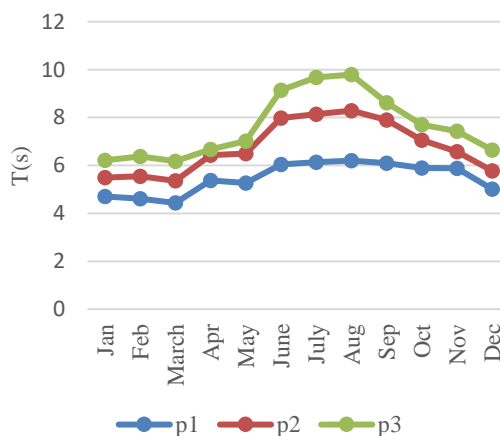
با توجه به شکل‌های شماره ۴ و ۵ میانگین ارتفاع موج شاخص در بازه ۰.۴ تا ۱.۶ متر و میانگین پریرود موج در بازه ۴ تا ۹ ثانیه در سواحل دریای عمان پیش بینی گردید. در نقطه شماره ۳ (شرق سواحل دریای عمان) با توجه به نزدیکتر بودن به اقیانوس هند پدیده مونسون نسبت به سایر نقاط تاثیر گذارتر خواهد بود، به همین خاطر بیشینه میانگین ارتفاع موج شاخص با مقدار عددی ۱.۵۴ متر در ماه جولای و بیشینه میانگین پریرود موج در بازه تابستان با مقدار عددی ۹ ثانیه در این نقطه در ماه جولای به دست آمد. با توجه به شکل شماره ۶ بیشینه انرژی در ماه جولای به دست خواهد آمد. این نمودارها نیز اثر مونسون تابستانه را به خوبی نشان می دهند. در نقطه شماره ۳ (شرق سواحل دریای عمان) همان طور که گفتیم پدیده مونسون نسبت به نقطه شماره ۱ (غرب سواحل دریای عمان) و ۲ (مرکز سواحل دریای عمان) تاثیر گذارتر خواهد بود، به همین خاطر توان موج با مقدار عددی ۲۳.۱۳ مگاوات بر متر در این نقطه در ماه جولای اختلاف زیادی با سایر ماه‌ها خواهد داشت.

جهت بررسی جهت غالب موج، گلموج‌های فصلی نیز ترسیم شدند. همانند گلباد، برای رسم گلموج نیاز به اطلاعات اندازه و جهت است. یکی از خروجی‌های مدل SWAN علاوه بر ارتفاع و پریرود موج، جهت موج است. با استفاده از اطلاعات شش ساله خروجی مدل و نرم افزار مایک ۲۱ گلموج‌ها به صورت فصلی

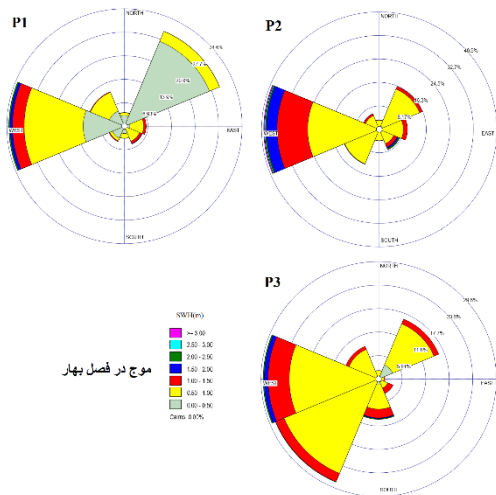
پس از اطمینان از خروجی مدل، ابتدا به بررسی ماهانه خروجی مدل سوان در سه نقطه مورد نظر خواهیم پرداخت. نتایج حاصل از خروجی مدل در شکل‌های شماره ۴ تا ۶ آمده است.



شکل ۴- میانگین ماهانه ارتفاع موج شاخص بر حسب متر (در دوره آماری ۲۰۱۳-۲۰۱۵ و ۲۰۱۹-۲۰۲۲) در هر سه نقطه



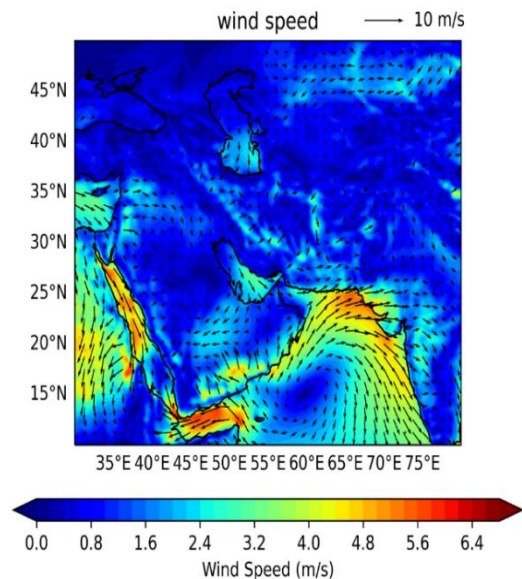
شکل ۵: میانگین ماهانه پریرود موج بر حسب ثانیه (در دوره آماری ۲۰۱۳-۲۰۱۵ و ۲۰۱۹-۲۰۲۱) در هر سه نقطه



شکل ۸: گلموج سه نقطه مورد مطالعه در فصل بهار

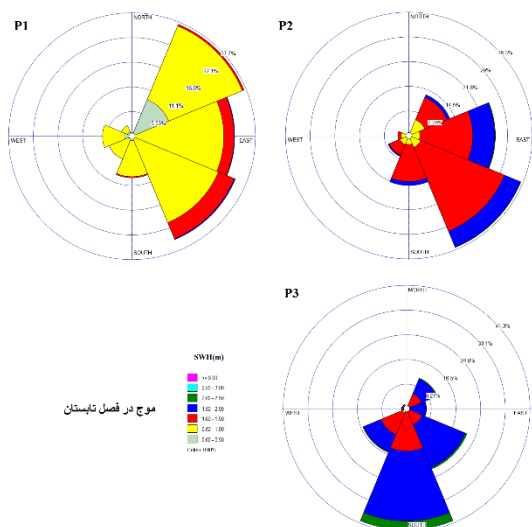
طبق نتایج به دست آمده از مدل سوان، جهت غالب موج در سه نقطه مورد مطالعه در فصل بهار مطابق شکل ۸ است. طبق این شکل جهت غالب موج غربی و شمال شرقی است. جهت شمال شرقی به این علت است که با توجه به راستای سواحل دریای عمان (شمال غربی - جنوب شرقی) جهت موج در نزدیک سواحل به جهت شمال شرقی تغییر یافته است. جهت غالب غربی باد در جهت غالب موج نیز به وضوح دیده می شود اما جهت جنوب غربی باد به علت طول موجگاه کم در نقطه اول و دوم به جهت شمال شرقی موج منجر شده اند و در نقطه سوم به علت طول موجگاه زیاد در جهت غالب موج نیز به خوبی دیده می شود.

ترسیم شدند. جهت بررسی صحت و تحلیل گلموج‌ها از پهنه بندی میانگین ۱۱ ساله باد داده‌های ERA5 در فصول مختلف استفاده شد. نتایج در شکل‌های شماره ۷ تا ۱۴ آمده است.



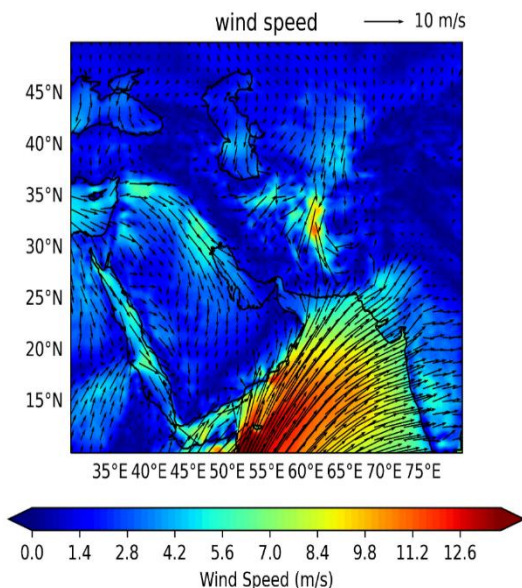
شکل ۷: میانگین جهت و اندازه سرعت بر حسب متر بر ثانیه در فصل بهار (از مارس تا می در دوره آماری ۲۰۰۵-۲۰۱۵)

در شکل ۷ میانگین ۱۱ ساله باد در فصل بهار با استفاده از داده های ERA5 آمده است. با توجه به شکل ۷ که بیانگر حضور و اثر گذاری واچرخند در اقیانوس هند و در غرب کشورانتظار می رود که باد غالب در سواحل جنوبی کشور در جهت غربی، شمال غربی و جنوب غربی و میزان باد در نواحی شرقی دریای عمان بیشتر از نواحی غربی باشد.



شکل ۱۰: گلموج سه نقطه مورد مطالعه در فصل تابستان

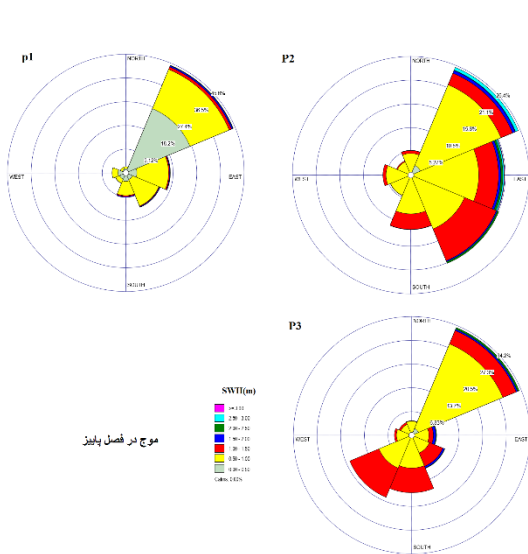
طبق نتایج به دست آمده از مدل سوان، جهت غالب موج در سه نقطه مورد مطالعه در فصل تابستان مطابق شکل ۱۰ است. طبق این شکل جهت غالب موج جنوب، جنوب شرقی، شرقی و شمال شرقی است. جهت شمال شرقی به این علت است که با توجه به راستای ساحل دریای عمان (شمال غربی - جنوب شرقی) جهت موج در نزدیک سواحل به جهت شمال شرقی تغییر یافته است. جهت غالب جنوب و جنوب شرقی باد در جهت غالب موج نیز به وضوح دیده می شود. جهت شرقی باد به علت طول موجگاه کم در نقطه سوم دیده نمی شود اما در نقاط اول و دوم به وضوح قابل مشاهده است.



شکل ۹: میانگین جهت و اندازه سرعت بر حسب متر بر ثانیه در فصل تابستان (از ژوئن تا آگوست در دوره آماری ۲۰۰۵-۲۰۱۵)

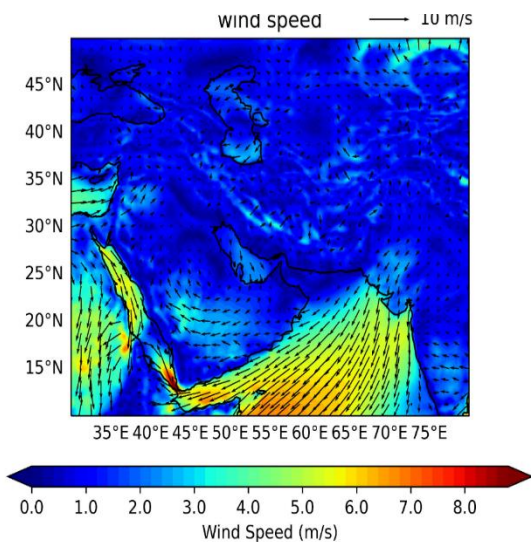
در شکل ۹ میانگین ۱۱ ساله باد در فصل تابستان با استفاده از داده های ERA5 آمده است. باتوجه به شکل ۹ که بیانگر حضور و اثر گذاری چرخند در اقیانوس هند و واچرخند در غرب کشور است، انتظار می رود که باد غالب در سواحل خلیج فارس در جهت شمال غربی و در سواحل عمان با توجه به حرکت کم فشار اقیانوس هند به عرض های بالاتر در جهت

جنوبی، جنوب شرقی و شرقی باشد. در این فصل با توجه به تقویت چرخندها و افزایش گرادیان فشار در سواحل جنوبی کشور، شدت باد نسبت به فصل بهار افزایش یافته است و میزان باد در نواحی شرقی دریای عمان بیشتر از نواحی غربی است.

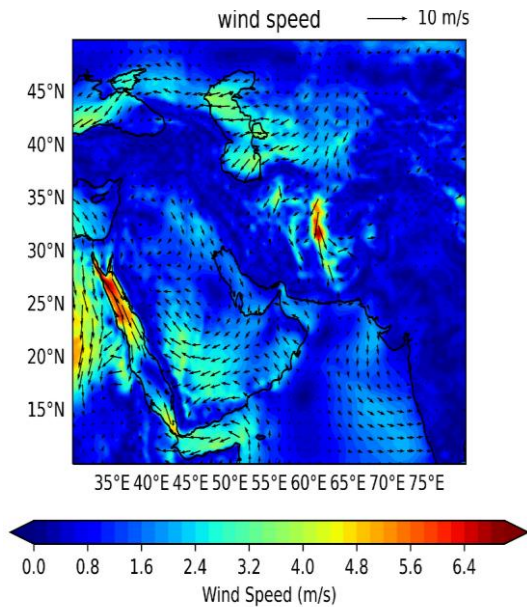


شکل ۱۲: گلموج سه نقطه مورد مطالعه در فصل پاییز

طبق نتایج به دست آمده از مدل سوان، جهت غالب موج در سه نقطه مورد مطالعه در فصل پاییز مطابق شکل ۱۲ است. طبق این شکل جهت غالب موج جنوب، جنوب شرقی، شرقی و شمال شرقی است. جهت شمال شرقی به این علت است که شدت وزش بادها در فصل پاییز کم است و منجر به موج‌های قابل توجهی نمی‌شود، در نتیجه با توجه به راستای ساحل دریای عمان (شمال غربی - جنوب شرقی) جهت شمال شرقی بازگشت موج غالب است.

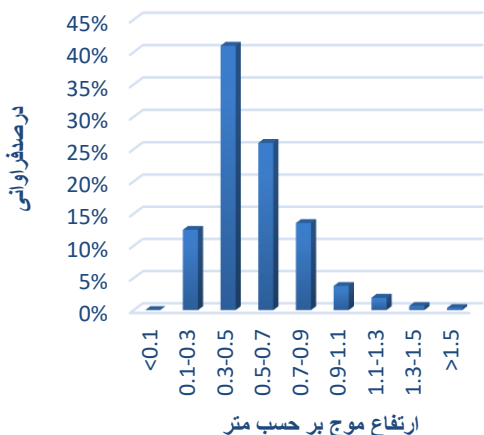


شکل ۱۳: میانگین جهت و اندازه سرعت بر حسب متر بر ثانیه در فصل زمستان (از دسامبر تا فوریه در دوره آماری ۲۰۰۵-۲۰۱۵)



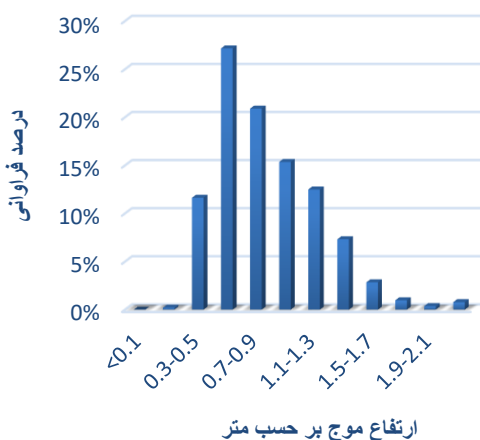
شکل ۱۱: میانگین جهت و اندازه سرعت بر حسب متر بر ثانیه در فصل پاییز (از سپتامبر تا نوامبر در دوره آماری ۲۰۰۵-۲۰۱۵)

در شکل ۱۱ میانگین ۱۱ ساله باد در فصل پاییز با استفاده از داده های ERA5 آمده است. با توجه به شکل ۱۱ که بیانگر حضور و اثر گذاری چرخند تضعیف شده در اقیانوس هند و اچرخند از سمت از غرب کشور است، انتظار می رود که باد غالب در سواحل خلیج فارس در جهت شمال غربی باشد. در سواحل عمان نیز (با توجه به حرکت کم فشار اقیانوس هند به عرض های پایین تر و کاهش گرادیان فشار، از شدت وزش باد نسبت به فصل تابستان کاسته شده) همچنان باد در جهت جنوبی، جنوب شرقی و شرقی است و اختلاف فاحشی در میزان باد در کل سواحل دریای عمان به چشم نمی خورد.



شکل ۱۵: نمودار فراوانی ارتفاع موج شاخص بر حسب متر در نقطه اول (دوره آماری ۲۰۱۳-۲۰۱۵ و ۲۰۱۹-۲۰۲۱)

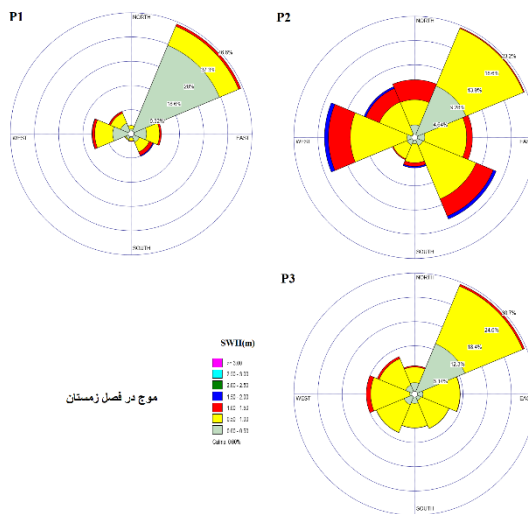
طبق نمودار ۱۵، ارتفاع موج‌ها در بازه ۰/۱ تا ۱/۵ متر هستند و فراوانی بیشینه در بازه ۰/۳ تا ۰/۵ متر است.



شکل ۱۶: نمودار فراوانی ارتفاع موج شاخص بر حسب متر در نقطه دوم (دوره آماری ۲۰۱۳-۲۰۱۵ و ۲۰۱۹-۲۰۲۱)

طبق نمودار ۱۶، ارتفاع موج‌ها در بازه ۰/۳ تا ۲ متر هستند و فراوانی بیشینه در بازه ۰/۵ تا ۰/۷ متر است.

در شکل ۱۳ میانگین ۱۱ ساله باد در فصل زمستان با استفاده از داده های ERA5 آمده است. باتوجه به شکل ۱۳ که بیانگر حضور و اثر گذاری واپرخند در کل کشور است، انتظار می رود که جهت غالب باد در سواحل جنوب کشور غربی و شمال غربی باشد. از شدت وزش باد در منطقه نسبت به فصل گرم سال کاسته شده و اختلاف فاحشی در میزان باد در کل سواحل دریای عمان به چشم نمی خورد.



شکل ۱۴: گلموج سه نقطه مورد مطالعه در فصل پاییز

طبق نتایج به دست آمده از مدل سوان، جهت غالب موج در سه نقطه مورد مطالعه در فصل زمستان مطابق شکل ۱۴ است. طبق این شکل جهت غالب موج غربی، شمال غربی و شمال شرقی است. جهت شمال شرقی به علت بازگشت موج از ساحل است. جهت غالب غربی باد به وضوح در جهت غالب موج دیده می شود.

جهت بررسی بازه ارتفاع موجود در منطقه، نمودار فراوانی ارتفاع موج هر سه نقطه ترسیم شد. این نمودار در شکل های شماره ۱۵ تا ۱۷ آمده است.

دو نقطه دیگر است. در نتیجه همان‌طور که جدول شماره ۵ نیز نشان می‌دهد انتظار داشتیم که هر چه به اقیانوس هند نزدیکتر شویم، انرژی حاصل از موج افزایش خواهد یافت. به صورت کلی بیشترین انرژی در دسترس در طی سال برابر ۶۸.۶۷ مگاوات ساعت در طول ساحل خواهد بود. اگر طول ساحل چابهار را در نظر بگیریم که برابر ۲۶۵.۳ کیلومتر است، در طی سال حداکثر حدود ۱۸ گیگاوات ساعت انرژی در این سواحل در دسترس خواهد بود.

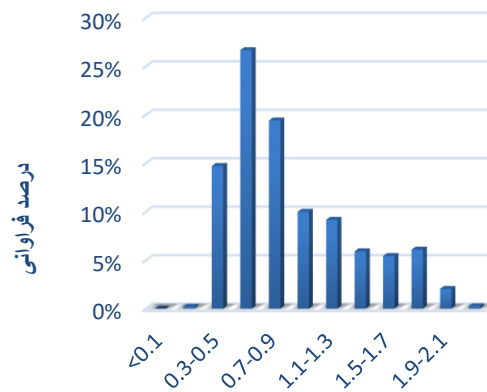
#### ۴. نتیجه گیری و جمع بندی

در این تحقیق میانگین ماهانه و ساعتی چگالی توان موج در هر سه نقطه محاسبه گردید. بیشترین توان موج در ماه جولای به دست آمد.

میانگین انرژی موج در یک سال در نقطه اول ۱۶.۲۹ مگاوات ساعت در واحد طول ساحل، در نقطه دوم ۵۰.۰۴ مگاوات ساعت در واحد طول ساحل و در نقطه سوم ۶۸.۶۷ مگاوات ساعت در واحد طول ساحل محاسبه شد.

نقطه سوم (شرق سواحل مکران) قابلیت بیشتری جهت استفاده از انرژی موج نسبت به سایر نقاط دارد. به طور کلی با توجه به نتایج به دست آمده به نظر می‌رسد که سواحل شرقی دریای عمان شرایط مناسبی جهت استخراج انرژی از امواج دریا بویژه در فصل تابستان را دارا می‌باشد. در ادامه راه، کل سواحل مکران به صورت پهنه بندی بررسی می‌شود و نتایج در مقالات بعدی ارائه می‌گردد.

پیشنهاد می‌شود مطالعات بیشتری در زمینه انرژی موج در نقاط بیشتری از کشور انجام شود و از تجربیات کشورهای که در این زمینه مطالعات زیادی انجام داده‌اند، استفاده شود تا بتوان به راه حل‌هایی جهت جایگزین کردن انرژی سوخت‌های فسیلی پیدا کرد. علاوه بر این در ادامه راه باید توربین‌های مختلف نیز بررسی شوند و مناسبترین توربین برای منطقه انتخاب شود تا بتوان از پتانسیل موجود در کشور استفاده بهینه کرد.



ارتفاع موج بر حسب متر

شکل ۱۷: نمودار فراوانی ارتفاع موج شاخص بر حسب متر در نقطه سوم (دوره آماری ۲۰۱۳-۲۰۱۵ و ۲۰۱۹-۲۰۲۱)

طبق نمودار ۱۷، ارتفاع موج‌ها در بازه ۰/۳ تا ۲/۱ متر هستند و فراوانی بیشینه در بازه ۰/۵ تا ۰/۷ متر است. با توجه به اینکه ارتفاع موج حدی ۰/۵ متر حداقل ارتفاع موج بسیاری از توربین‌های تجاری موجود است (Chee Loon, 2016)، با استفاده از شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ می‌توان نتیجه گرفت که به طور کلی در نواحی مرکزی و شرقی دریای عمان در بالای ۸۰ درصد از ایام سال می‌توان از انرژی موج استفاده کرد. در ادامه میانگین کل برای کمیت‌های توان موج و چگالی انرژی موج با استفاده از فرمول‌های شماره ۱ و ۲ در هر سه نقطه مورد مطالعه در طی ۶ سال محاسبه گردید. نتایج محاسبات در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵: توان موج (کیلووات بر متر) و چگالی انرژی (مگاوات ساعت بر متر) در هر سه نقطه در طی ۶ سال

	Point1	Point2	Point3
P	۱,۸۶	۵,۶۸	۷,۸۴
E	۱۶,۲۹	۵۰,۰۴	۶۸,۶۷

با توجه به شکل‌های ۴ تا ۶ و ۱۵ تا ۱۷، میزان ارتفاع موج و پیروید موج در نقطه شماره سوم (شرق سواحل مکران) بیشتر از

University, Faculty of Civil Engineering (In Persian).

9. Pau Sierra, J., White, A., Möso, C. and Mestres, M., 2017. Assessment of the intra-annual and inter-annual variability of the wave energy resource in the Bay of Biscay (France), doi:10.1016/j.energy.2017.09.112
10. Purbaa, N., Kelvinb, J., Sandrob, R., Gibranb, S., A.I. Permatan, R., Maulidab, F. and K. Martasuganda, M., 2015. Suitable Locations of Ocean Renewable Energy (ORE) in Indonesia Region – GIS Approached. Energy Procedia 65 ( 2015 ) 230 – 238; doi: 10.1016/j.egypro.2015.01.035.
11. Ringwood, J., 2008. Practical challenges in harvesting wave energy. ECOR Symposium, St. John's, Newfoundland, 23-24 October 2008.
12. Shahidian, H., 2016. Measuring the renewable energy potential of waves in Nowshahr using SWAN numerical model. Master of Science Thesis, Tehran University, Campus of technical faculties (In Persian). Tautra Hoen, M. K., 2009. Modeling and control of wave energy converters. NTNU. Master of Science Thesis, Norwegian University of Science and Technology. Norway.
13. Vining, J. G., 2007. Ocean Wave energy converters. Master of Science Thesis, Electrical Engineering, University of Wisconsin, Madison.
14. Yusefi Khiaban, P., Abbaszade, M., Khorshidghazani, A. and Etefagh, M., 2016. Investigating the performance of the wave star energy converter under the parameters of Caspian Sea waves by simulating regular waves and landing force of krylov. Marine engineering journal, 45-55; URL: <http://marine-eng.ir/article-1-420-fa.html> (In Persian).
15. Zabihian, F., 2004. Evaluating the energy of Iranian sea waves and building and testing a method to extract this energy. 19th

## ۵. تشکر و قدردانی

از پژوهشگاه هواشناسی، اساتید محترم و تمامی عزیزانی که در طول انجام این پروژه مرایاری کرده‌اند کمال تشکر و قدردانی را ابراز می‌نمایم.

## ۶. مراجع و منابع

۱. دودی زاده بصیرآبادی، ا. (۱۳۹۱). بررسی انرژی امواج در بندر امیرآباد دریای خزر با استفاده از مدل SWAN، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه هرمزگان.
۲. مشهدی، ل. حاجی زاده ذاکر، ن. سلطانیپور، م. و مقیمی، س. (۱۳۹۲). شبیه سازی عددی امواج و مد ناشی از توفان گنو در خلیج چابهار، نشریه مهندسی دریا.
3. Aderinto, T., and Hua Li, L., 2018. Ocean wave energy converter: Status and challenges. Energies 2018,11, 1250; doi:10.3390/en11051250.
4. Chegini, v., 2011. Estimating the potential of renewable energy production in the sea. The research project report (In Persian).
5. Falnes, J., 2015. Fundamental formulae for wave-energy conversion. Royal Society Open Science, Vol. 2, 34 pages, 18 March 2015; doi: 10.1098/rsos.140305.
6. Lari, K., Abbasian, g. and Mohseni Arasteh, A., 2011. Investigating sea wave energy converter systems in Anzali port, journal of marine science and technology research (In Persian).
7. Layeghi, B., Ghader, S., Bidokhti, A. and., 2017. Sensitivity analysis of WRF mode simulations to physical parametrizations in Persian Gulf and Oman sea area during the summer monsoon. Iran Geophysics Journal (In Persian).
8. Mardani, M. and Zare, M., 2015. Investigating the energy production potential of waves, tides and wind currents in Hormozgan province . Master of Science Thesis, Hormozgan



- International electricity Conference (In Persian).
16. IEA, 2021. Ocean Power. <https://www.iea.org/reports/ocean-power>.
17. Hu, H., Xue, W., Jiang, P. and Li, Y., (2022). Bibliometric analysis for ocean renewable energy: an comprehensive review for hotspots, frontiers, and emerging trends. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 167, 112739.
18. Martineza, A. and Iglesiasa, G., 2020. Wave exploitability index and wave resource classification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 134 (2020) 110393. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110393>
19. Chena, Y., Zhangb, D., Lib, X., Yan Penga, Wud, C., Pub, H., Zhoue, D., Caoe, Y. and Zhangf, J., 2023. Significant wave height prediction through artificial intelligent mode decomposition for wave energy management. *Energy and AI* 14 (2023) 100257. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2023.100257>
20. Fairley, I., Lewis, M., Robertson, B., Hemerd, M., Mastersa, I., Horrillo-Caraballoa, J., Karunarathnaa, H. and E. Reevea, D. 2020. A classification system for global wave energy resources based on multivariate clustering. *Applied Energy* 262 (2020) 114515. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114515>.
21. Hersbach, H., and Dee, D., ERA5 reanalysis is in production, ECMWF Newsletter 147, ECMWF, Reading, UK, available at: <https://www.ecmwf.int/en/newsletter/147/news/era5-reanalysis-production> (last aRess: May2020), 2019 (data available at: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form,ast> aRess: May 2020).
22. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form,ast> aRess: May 2020).
23. Chee Loon, S. and Koto, J., (2016). Wave Energy for Electricity Generation in Malaysia -Merang Shore, Terengganu. *International Journal of Environmental Research & Clean Energy* 30nd October 2016. Vol.4 No.1.