

The Sensitivity Analysis of Whitecapping Dissipation Term for Calibration of SWAN Model Forced with ERA5 Winds in the Gulf of Oman

Amir Siah sarani ¹✉  | Azadi, M. ²  | Layeghi, B. ³  | Babazadeh, D. ³ 

1. **Corresponding author**, I.R. of Iran Meteorological Organization (IRIMO), Tehran, Iran. E-mail: Amir_Siah sarani@yahoo.com
2. Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran. E-mail: azadi68@hotmail.com
3. I.R. of Iran Meteorological Organization (IRIMO), Tehran, Iran. E-mail: layeghi2001@yahoo.com, endavod@gmail.com

(Received: 4 Apr 2023, Revised: 27 Apr 2023, Accepted: 27 Jun 2023, Published online: 3 Sep 2023)

Abstract

Although the accuracy of wind-driven wave height simulation largely depends on the quality of the forced wind field, despite the production of high-quality wind products, the wind fields used for ocean waves modeling are more or less subject to bias. Minimizing the impact of wind errors on wave model output is not a long-term operational solution. A more common method is to calibrate the wave model, which is generally implemented by setting certain coefficients in these models. The terms of wind energy input and whitecapping dissipation in third generation wave models have been improved over time. In the present study, the sensitivity of the simulations of the significant wave height to the terms of the wind input and whitecapping dissipation in a third generation wave model has been investigated. For this purpose, 36 different configurations of the wave model have been used. In this research, several findings about the sensitivity of the SWAN model to the terms of the wind source and whitecapping dissipation by the tunable parameter C_{ds} have been presented. Therefore, the results of this study allow us to see the response of the SWAN model as a function of physical parameters. Calibration of the SWAN model using the ERA5 forced wind field significantly improved the simulation accuracy in the Oman Sea. For the Oman Sea, it is recommended to use the expressions of wind input and whitecapping dissipation based on the Janssen formulation with the coefficient $C_{ds}=4.0$ in the simulation. Considering the error statistics, the same finding was obtained when the model results were compared with the measurements of the wave recorder buoy of the I.R. of Iran Meteorological Organization (IRIMO) in the northern part of the Oman Sea.

Keywords: SWAN Wave Model, ERA5 Reanalysis Data, Whitecapping, Model Calibration

Cite this article: Siah sarani, A., Azadi, M., Layeghi, B., & Babazadeh, D. (2023). The Sensitivity Analysis of Whitecapping Dissipation Term for Calibration of SWAN Model Forced with ERA5 Winds in the Gulf of Oman. *Journal of the Nivar*, 47(120-121), 15-36. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2023.389079.1240>



تحلیل حساسیت جمله اتلاف سفیدک راس موج برای کالیبراسیون مدل SWAN با واداشت ERA5 در دریای عمان

امیر سیه سرانی^۱ | مجید آزادی^۲ | بهزاد لایقی^۳ | داود بابازاده^۳

۱. نویسنده مسئول، سازمان هواشناسی کشور، تهران، ایران. رایانامه: Amir_Siahsarani@yahoo.com
۲. گروه مدل سازی جو و اقیانوس، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران. رایانامه: azadi68@hotmail.com
۳. سازمان هواشناسی کشور، تهران، ایران. رایانامه: layeghi2001@yahoo.com و endavod@gmail.com

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۵، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۰۷، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۷، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۰۶/۱۲)

چکیده

هرچند دقت شبیه سازی ارتفاع موج تا حد زیادی به کیفیت میدان باد واداشتی بستگی دارد اما با وجود تولید محصولات باد با کیفیت بالا، هنوز میدان های باد مورد استفاده برای مدل سازی امواج دریا کم و بیش در معرض ارزیابی هستند. به حداقل رساندن تاثیر خطاهای باد بر خروجی مدل موج راه حل عملیاتی بلندمدتی نیست. روش متداول تر، کالیبره کردن مدل موج است که عموماً با تنظیم ضرایب خاصی در این مدل ها به اجرا در می آید. جملات ورودی انرژی باد و اتلاف سفیدک راس موج در مدل های موج نسل سوم در طول زمان بهبود یافته اند. در مطالعه حاضر، حساسیت شبیه سازی های ارتفاع موج شاخص به جملات ورودی باد و اتلاف سفیدک راس موج را در یک مدل موج نسل سوم بررسی شده است. برای این منظور از ۳۶ پیکربندی مختلف مدل موج استفاده شده است. در مقاله حاضر چندین یافته در مورد حساسیت مدل SWAN به جملات منبع باد و اتلاف ناشی از سفیدک راس موج بواسطه پارامتر تنظیم پذیر C_{ds} ارائه شده است. بنابراین، نتایج این مطالعه اجازه می دهد تا پاسخ مدل SWAN را به عنوان تابعی از پارامترهای فیزیکی مشاهده کنیم. کالیبراسیون مدل SWAN با استفاده از میدان باد واداشتی ERA5، دقت شبیه سازی را به طور قابل توجهی در دریای عمان بهبود بخشید. برای دریای عمان توصیه می شود که عبارت ورودی باد و اتلاف ناشی از سفیدک راس موج بر اساس فرمول بندی Janssen با ضریب $C_{ds} = 4.0$ در شبیه سازی مورد استفاده قرار گیرد. با در نظر گرفتن آمار خطا، زمانی که نتایج مدل با اندازه گیری های بویه موج نگار سازمان هواشناسی کشور در قسمت شمالی دریای عمان مقایسه شد، همبستگی به دست آمد.

کلمات کلیدی: مدل موج SWAN، داده های باز تحلیل ERA5، سفیدک راس موج، کالیبراسیون مدل.

۱. مقدمه

وجود داده های دقیقی از امواج دریا همیشه یک نیاز حیاتی برای فعالیت های دریایی در حوزه مهندسی سواحل بوده است. به ویژه آنکه نقش دریا در جوامع بشری امروزی به طور فزاینده ایرشد یافته است. برای مثال، تلاش های زیادی برای تعریف شرایط موج، با استفاده از دیدبانی های اولیه و همچنین اندازه گیری های ابزاری نوین انجام شده است. در حال حاضر، دیدبانی موج تک نقطه ای با دقت بالا دیگر مشکلی پیچیده ای نیست. ظهور ارتفاع سنج های ماهواره ای، دیدبانی با کیفیت بالای امواج را در مقیاس جهانی ممکن کرده است. با این حال، کمبود مشاهدات میدانی یا سنجش از دور و تداوم مکانی-زمانی آنها تا حدودی مانع از مطالعات عمیق امواج اقیانوس در مقیاس های چندگانه فضا و زمان می شود (Thomas & Dwarakish, 2015). خوشبختانه، مدل های عددی موج ما را به ابزاری قدرتمندی برای بررسی

استناد: سیه سرانی، امیر؛ آزادی، مجید؛ لایقی، بهزاد؛ بابازاده، داود (۱۴۰۲)، تحلیل حساسیت جمله اتلاف سفیدک راس موج برای کالیبراسیون مدل SWAN با واداشت باد ERA5 در دریای عمان، مجله نیوار، ۴۷ (۱۲۱-۱۲۰)، ۱۵-۳۶. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2023.391823.1243>



مورد طرح پارامتری‌سازی نیز صادق است. یافتنیک طرح پارامتری که بتواند به طور کامل فیزیک واقعی را نشان دهد، کار دشواری است.

روش متداول تر، کالیبره کردن مدل موج است که عموماً با تنظیم ضرایب خاصی در مدل انجام می‌شود. چندین محقق نشان داده‌اند که کالیبراسیون مدل‌های موج منجر به افزایش قابل توجهی در عملکرد مدل آنها می‌شود (Akpınar et al., 2016; Alipour et al., 2021).

به عنوان ناشناخته‌ترین جمله فیزیکی در معادلات حاکم بر مدل موج تا به امروز، جمله اتلاف سفیدک راس موج اغلب به عنوان یک "دکمه تنظیم کننده" در کالیبراسیون مدل موج عمل می‌کند (Cavaleri et al., 2018, 2019; Siah Sarani et al., 2021). این روش به طور کلی "راه حل مهندسی" نامیده می‌شود، که ارتباط نزدیکی با جبران خطا بین میدان باد واداشتی و جمله اتلاف سفیدک راس موج دارد. در واقع، این روش از نظر فیزیکی نادرست است، زیرا شدت اتلاف سفیدک راس موج منتج شده ممکن است در دنیای واقعی منعکس نشود، اما برای حل مشکل واقعی‌ترین شبیه‌سازی موج کاملاً کارآمد است.

در کاربردهای عملی، تنظیم جمله اتلاف سفیدک راس موج به طور کلی با تنظیم نمودن ضریب تنظیم‌پذیر سفیدک راس موج محقق می‌شود که می‌توان از آن برای کنترل شدت این عبارت استفاده کرد و مقدار بهینه ضریب تنظیم‌پذیر اغلب با آزمایش‌های تحلیل حساسیت تعیین می‌شود. به طور کلی، بیش از یک ضریب وجود دارد که می‌توان از آن به عنوان "تنظیم کننده" استفاده کرد و رایج‌ترین آن مقدار C_{ds} است. کوتوپ اوغلو و همکاران (۲۰۱۸) مدل SWAN را برای دریای مرمره با آزمایش مقادیر مختلف C_{ds} کالیبره کردند (Kutupoglu et al., 2018). سیه سرانی و همکاران (۲۰۲۰ و ۲۰۲۱) مدل SWAN و نیز مدل Mike 21 SW را برای دریای عبردر طی طوفان گونو با آزمایش مقادیر مختلف C_{ds} کالیبره نمودند (Siah Sarani et al., 2020, 2021). آماروشه و همکاران (۲۰۱۹) همچنین مدل SWAN را برای حوضه مدیترانه غربی به روشی مشابه کالیبره کردند

امواج اقیانوس مجهز می‌کنند. بازتولید اقلیم موج به روشی انعطاف‌پذیر عملی می‌شود و مجموعه داده‌های موج حاصل از مدلسازی عددی تا حد زیادی داده‌های موجود موج را تکمیل می‌کنند. مدل‌های عددی موج در چند دهه گذشته، از نسل اول تا سوم، به طور چشمگیری تکامل یافته‌اند. در حال حاضر، مدل‌های موج نسل سوم WAM (WAMDI Group, 1988)، WW3 (Tolman et al., 2002) و SWAN به طور گسترده در اقیانوس‌های جهانی پیاده‌سازی شده‌اند. دقت مدل موج نتیجه بسیاری از انتخاب‌ها از جمله میدان باد واداشتی، فیزیک مدل و غیره است. از نظر شبیه‌سازی ارتفاع موج، در مرور تحقیقات پیشین پیشنهاد شده است که کیفیت میدان باد واداشتی تا حد زیادی بر خروجی‌های حاصل در مدل‌سازی موج تأثیر می‌گذارد (Ardhuin & Roland, 2013; Stopa, 2018; Van Vledder & Akpinar, 2015).

به طور کلی، تمام عواملی که ممکن است بر دقت مدل موج تأثیر بگذارند، ناگزیر دارای خطا هستند و این خطاها در نهایت خروجی‌های حاصل منتشر می‌شوند. برای به دست آوردن شبیه‌سازی ارتفاع موج دقیق تر، روش‌های بهینه‌ای است که موجب کاهش خطاهای موجود در این عوامل می‌شود. به عنوان مثال، توسعه محصولات باد با کیفیت بالا، یا بهبود فیزیک مدل. با این حال، پیاده‌سازی هر دوی این روش‌ها آسان نیست. اگرچه بسیاری از محصولات باد با کیفیت تولید شده‌اند و در اقصی نقاط جهان مورد استفاده گسترده قرار گرفته‌اند، اما این غیر قابل انکار است که همه این محصولات باد کم و بیش دارای خطا هستند. چگونگی به حداقل رساندن تأثیر خطاهای باد بر خروجی مدل از اهمیت خاصی برخوردار است و به طور کلی اصلاح میدان باد واداشتی ممکن است کارساز باشد. امروتا و همکاران (۲۰۱۶) با افزایش اندک میدان باد، شبیه‌سازی ارتفاع موج را با استفاده از یک مدل موج آشیانه‌ای تو در تو برای شرق دریای عرب بهبود بخشیدند (Amrutha et al., 2016). با این حال، با توجه به ناهمگونی مکانی کیفیت میدان باد، این روش ناگزیر به تغییر در مناطق مختلف است و بنابراین، راه حل بلندمدتی نیست. همین امر در

های باد متفاوت باشد.

علاوه بر این، ممکن است با توجه به ناهمگونی فضایی در کیفیت میدان باد با مناطق متفاوت باشد. به عبارت دیگر، هیچ مجموعه جهانی از تنظیمات مدل وجود ندارد که برای هر کاربرد خاص بهینه باشد. بنابراین، تنظیمات پیش فرض اولیه در مدل موج باید با دقت استفاده شود. این عوامل همچنین اهمیت کالیبراسیون مدل را نشان می‌دهد.

قبل از بررسی یک روش کالیبراسیون کلی، ابتدا باید یک ضریب قابل تنظیم مناسب را به عنوان مبنای مطالعه خود انتخاب کنیم. لازم به ذکر است که اگرچه تنظیم چند ضریب به طور همزمان نیز ممکن است مورد استفاده قرار گیرد اما این راه برای ما جهت به دست آوردن یک رابطه کمی ساده و جهانی مساعد نیست، زیرا عدم قطعیت در کالیبراسیون مدل را افزایش می‌دهد. همانطور که در بالا ذکر شد، C_{ds} یک ضریب تنظیم پذیر سفیدک راس موج بسیار محبوب است که در کالیبراسیون مدل موج اعمال می‌شود، از این رو، کار ما بر روی C_{ds} متمرکز خواهد شد.

هدف این مقاله ارائه و بررسی یک روش کمی برای تعیین ضریب تنظیم پذیر سفیدک راس موج بهینه (مقدار بهینه C_{ds}) در مدل SWAN به منظور افزایش دقت شبیه‌سازی ارتفاع موج است. نتایج ممکن است درک ما را از نقش جمله اتلاف سفیدک راس موج در مدل‌سازی موج افزایش داده و در شبیه‌سازی موج عملیاتی اهمیت عملی داشته باشد. پنج ترکیب مختلف از جملات سفیدک راس موج و ورودی باد با مقادیر مختلف C_{ds} برای هر تنظیم در این مقاله مورد ارزیابی قرار گرفت. این مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است.

بخش ۲ به طور خلاصه منطقه مورد مطالعه را معرفی می‌کند. بخش ۳ مربوط به داده‌ها و روش‌های مورد استفاده در این کار است. دیدبانی امواج، آزمایش‌های عددی و معیارهای ارزیابی در این بخش به دقت معرفی خواهند شد. بخش ۴ بدنه اصلی کار ما است که شامل خروجی‌های مدل حاصل از آزمایش‌های عددی مختلف است. نتیجه‌گیری مختصری نیز در بخش ۵ بیان خواهد شد.

(Amarouche et al., 2019). علاوه بر این، تلاش‌هایی برای کالیبره کردن مدل موج بر اساس ضرایب قابل تنظیم چندگانه به طور همزمان وجود دارد. سیادت‌موسوی و همکاران (۲۰۱۱ الف و ب) (Siadatmousavi et al., 2011b) و بیرام‌زاده و همکاران (2011a) (Beyramzade et al., 2019) مدل SWAN را بر اساس ضرایب کلیدی متعدد از جمله مقدار C_{ds} کالیبره کردند. بیرام‌زاده و همکاران (۲۰۲۱) WW3 را بر اساس هر دو پارامتر C_{ds} و δ_1 کالیبره کردند (Beyramzadeh et al., 2021).

به طور کلی، کالیبراسیون مدل موج بر اساس ضرایب تنظیم پذیر سفیدک راس موج در حال حاضر بسیار رایج است، با این حال، روش مورد استفاده جهت تعیین مقدار بهینه برای ضرایب، کاملاً ابتدایی است. اگرچه اجرای این روش تست حساسیت در واقع می‌تواند به اهداف کالیبراسیون مدل دست یابد، اما روش قدرتمند نیست. علاوه بر این، با توجه به اینکه مقادیر تست محدود و گسسته هستند، اطمینان از کفایت نمونه‌گیری دشوار است. بنابراین، اگر روشی وجود داشته باشد که ما را قادر سازد، مقدار بهینه ضرایب قابل تنظیم را به صورت کمی تعیین کنیم، از اهمیت عملی زیادی برخوردار خواهد بود. متأسفانه تاکنون مطالعات ناچیزی در رابطه با این موضوع انجام شده است.

محصول جدید تولید شده باد ERA5 (نسل پنجم داده‌های بازتحلیل باد (Hersbach et al., 2020)) طی سالهای اخیر در دسترس محققین قرار گرفته است اما برای کالیبراسیون مدل موج در اقیانوس‌های جهانی همچون دریای سرخ و خلیج فارس اجرا شده است (Beyramzade et al., 2019; Beyramzadeh et al., 2021). با این حال، کاربرد داده‌های باد ERA5 در این موضوع در آب‌های دریای عمان و دریای عرب کاملاً تازگی دارد. این هم یکی از انگیزه‌های مطالعه ماست.

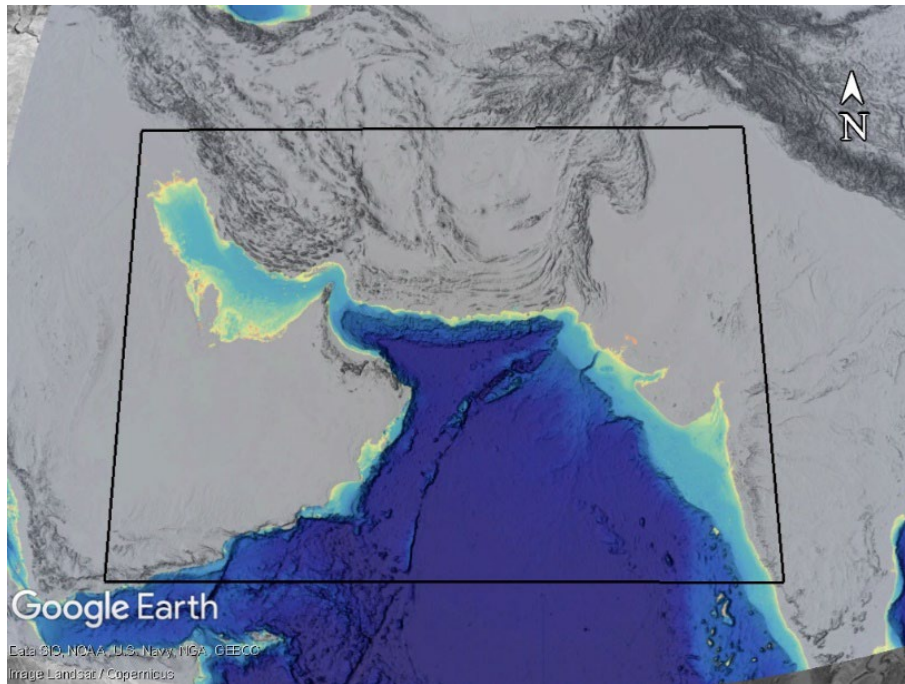
از آنجایی که هدف اصلی "راه حل مهندسی" فوق‌الذکر مقابله با خطاهای باد است، کاربرد آن با کیفیت میدان باد کاربردی مرتبط است. با توجه به اختلاف کیفیت بین محصولات مختلف باد، این روش ممکن است بسته به میدان

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

محدوده دریای عرب و دریای عمان در شمال اقیانوس هند می‌باشد. در شکل ۱ محدوده دامنه محاسباتی نشان داده شده است. شبکه محاسباتی از $14^{\circ}N$ تا $32^{\circ}N$ و $47^{\circ}E$ تا $75^{\circ}E$ امتداد یافته است.

دریای عمان به عنوان بخشی از دریای عرب است که ایران در شمال این دریا و عمان و بخش کوچکی از امارات در جنوب آن جای دارند. محدوده مدل سازی برای مدل موج شامل



شکل ۱. موقعیت و عمق سنجی دریا‌های عمان و عرب. (باکس سیاه دامنه محاسباتی مدل را نشان می‌دهد)

۲-۲. آزمایش‌های عددی

۲-۲-۱. مدل عددی SWAN

سمت چپ، بخش سینماتیکی است که نشان دهنده تغییر چگالیکنشی طیفی $N(\sigma, \theta)$ در فضا‌های جغرافیایی و طیفی است. $C_{g,x}$ و $C_{g,y}$ به ترتیب مولفه‌های X و Y سرعت گروهی در فضای جغرافیایی هستند، در حالیکه θ و σ مولفه‌های سرعت در فضای طیفی هستند. چگالی کنش طیفی دینامیکی $N(\sigma, \theta)$ ، نسبت چگالی انرژی طیفی $E(\sigma, \theta)$ به فرکانس موج σ است. سمت راست نشان دهنده چشمه و چاه‌های انرژی امواج است. شش فرآیند فیزیکی معمول که مسئول تولید،

مدل موج طیفی نسل سوم SWAN که در دانشگاه صنعتی دلفت توسعه یافته است به دلیل عملکرد فوق العاده خود در شبیه سازی امواج آب های کم عمق شناخته شده است. این ویژگی را می توان تا حد زیادی به استفاده از طر حواره انتشار ضمنی و تکنیک تکرار پایدارتر در SWAN نسبت داد. برای کاربردهای مقیاس کوچک و در مختصات دکارتی، معادله تعادل کنش طیفی که به عنوان معادله اصلی حاکم در مدل SWAN است، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_{g,x}N}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y}N}{\partial y} + \frac{\partial c_{\theta}N}{\partial \theta} + \frac{\partial c_{\sigma}N}{\partial \sigma} = \frac{\partial S_{tot}}{\sigma} \quad (1)$$

اتلاف و توزیع مجدد انرژی موج هستند در SWAN در نظر گرفته شده اند؛ از جمله رشد موج توسط باد (S_{in})، برهمکنش موج-موج سه گانه غیرخطی (S_{nl3})، برهمکنش موج-موج چهار گانه غیرخطی (S_{nl4}) و همچنین اتلاف انرژی موج به

شده‌اند، مانند یان (۱۹۸۷) (Yan, 1987) و پکیج ST6.

$$A = \begin{cases} \frac{1.5 \cdot 10^{-3}}{2\pi g^2} [U_* \cos(\theta - \theta_{wind})]^4 H & \text{for } |\theta - \theta_{wind}| \leq 90^\circ \\ 0 & \text{for } |\theta - \theta_{wind}| > 90^\circ \end{cases} \quad (۴)$$

$$H = \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma}{\sigma_{PM}^* \times 28U_*} \right)^4 \right\} \quad (۵)$$

$$\sigma_{PM}^* = \frac{0.13g}{28U_*} 2\pi \quad (۶)$$

بطوریکه H یک تابع قطع است که از رشد موج در فرکانس های پایین تر از فرکانس پیک Pierson-Moskowitz (Pierson Jr & Moskowitz, 1964) جلوگیری می کند (Tolman, 1992). U_* سرعت اصطکاکی و σ فرکانس رادیانی نسبی است.

همانطوریکه اشاره شد، برای رشد نمایی امواج توسط باد، عبارت B را می توان بر اساس فرمول های مختلفی مانند کومن و همکارانش (۱۹۸۴) و جانسن، (۱۹۹۱، ۱۹۸۹) تقریب زد که به ترتیب به شرح زیر فرموله شده اند:

$$B = \max \left[0, 0.25 \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(28 \frac{U_*}{c_{ph}} \cos(\theta - \theta_{wind}) - 1 \right) \right] \sigma \quad (۷)$$

$$B = \beta \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(\frac{U_*}{c_{ph}} \right)^2 \max [0, \cos(\theta - \theta_{wind}) - 1]^2 \sigma \quad (۸)$$

که ρ_w و ρ_a به ترتیب چگالی هوا و آب هستند. β ثابت Miles است و c_{ph} سرعت فاز است.

در مدل SWAN، سفیدک راس موج توسط تیزی موج تنظیم می شود. جمله اتلاف سفیدک راس موج در SWAN توسط مدل مبتنی بر پالس منتهجه توسط هاسلمان (۱۹۷۴) (K. Hasselmann, 1974) پیاده سازی شده است؛ عبارتی که بر

دلیلسفیدک راس موج ($S_{ds,w}$)، اصطکاک بستری ($S_{ds,b}$) و شکست ناشی از عمق ($S_{ds,br}$). بیان کل انرژی موج S_{tot} در زیر آورده شده است.

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (۲)$$

SWAN به پارامتری سازی فرآیندهای مقیاس زیر شبکه ای (فرآیندهایی که نمی توانند به اندازه کافی در یک شبیه سازی عددی حل شوند) متکی است که کنش موج را تولید و پراکنده می کنند. این پارامتری سازی بر اساس شواهد تجربی و معادلات فیزیکی است. شش فرآیند فیزیکی در ترم چشمه/چاه با استفاده از فرمول بندی های مختلف پیاده سازی می شوند. از آنجایی که تمرکز مطالعه ما بر روی جملات شرایط ورودی باد و اتلاف سفیدک راس موج است، در اینجا فقط پیشینه اولیه مربوط به این دو جمله را معرفی می کنیم. توضیحات کامل در مستندات علمی و فنی SWAN موجود است (SWAN, 2015).

مبنای نظری برای رشد موج توسط باد ناشی از دو نظریه کلاسیک، به ترتیب مکانیسم تشدید فیلیس (Phillips, 1957) و مکانیسم بازخورد مایلز (Miles, 1957) است. بر اساس این مبانی فیزیکی، جمله ورودی باد در SWAN به صورت مجموع ترم های رشد خطی (A) و رشد نمایی ($B \cdot E(\sigma, \theta)$) به صورت زیر تعریف می شود.

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + B \cdot E(\sigma, \theta) \quad (۳)$$

عبارت A بر اساس مطالعه کاوالری و مالانوت-ریزولی (۱۹۸۱) (Cavaleri & Rizzoli, 1981) است، در حالیکه می توان ضریب B را با چندین عبارت اختیاری در نظر گرفت. کومن و همکاران (۱۹۸۴) (Komen et al., 1984) عبارت اسنایدر و همکاران (۱۹۸۱) (Snyder et al., 1981) را از نظر سرعت اصطکاکی تغییر دادند و یک نسخه بهبود یافته را معرفی کرد (که از این پس طرحواره Komen-input نامیده می شود). جانسن (۱۹۸۹، ۱۹۹۱) (Janssen, 1989, 1991) بیان جدیدی را بر اساس نظریه موج باد شبه خطی پیشنهاد کرد (که از این پس طرح Janssen-input نامیده می شود). علاوه بر این، عبارات دیگری نیز با توسعه مدل سازی موج پیشنهاد

ضربناشی از تیزی و نیز تغییر در نرخ اتلاف ناشی از سفیدک راس موج است. در مدل SWAN، مقدار پیش فرض C_{ds} برای طرحواره ورودی کومن $2.36e - 5$ و برای طرحواره ورودی جانسن 4.5 است.

۲-۲-۲. برپایی مدل SWAN

در این مطالعه، SWAN cycle III 41.31A برای شبیه سازی امواج مورد استفاده قرار گرفته است. مدل در مد نسل سوم و همچنین مد غیر ایستا با مختصات کروی به اجرا درآمده است. هر دو رشد خطی و نمایی باد ورودی در مدل گنجانده شده است. تعاریف مش بندی در این مطالعه و مقادیر توصیه شده برای شبکه محاسباتی گسسته کننده دامنه محاسباتی مدل SWAN در جدول ۱ خلاصه شده اند. فضای طیفیبه ۲۸ قطعه فرکانسیو ۳۶ قطعه جهتی گسسته سازی شد. فضای جهتی تکل ۳۶۰ درجه را پوشش داد و فضای فرکانسی با حداقل 0.04 Hz و حداکثر 1 Hz در نظر گرفته شده است. این بدین معنی است که محدوده پریود امواج مدل سازی شده از ۱ ثانیه تا ۲۵ ثانیه می باشد که محدوده پریود امواج منطقه را پوشش می دهد. فرمولاسیون فرآیندهای فیزیکی موجود و ضرایب مربوط به آنها در مدل در جدول ۲ خلاصه شده است.

حسب عدد موج مجدداً فرموله شده است به شرح زیر است (Booij et al., 1999).

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \tilde{\sigma} \frac{k}{\bar{k}} E(\sigma, \theta) \quad (9)$$

که در آن $\tilde{\sigma}$ و \bar{k} به ترتیب فرکانس متوسط و عدد موج متوسط هستند. Γ یک ضریب وابسته به تیزی موج است؛ عبارت آن ابتدا توسط گروه WAMDI (WAMDI Group, 1988) ارائه شد و سپس توسط گونتر و همکاران (1988) و (Günther et al., 1992) بر اساس نظریه جانسن (1991) (Janssen, 1989) پذیرفته شد. مقدار Γ بستگی به فرمول طرحواره ورودی باد مورد استفاده دارد، زیرا با بسته شدن تعادل انرژی امواج در شرایط کاملاً توسعه یافته تخمین زده می شود. عبارت اتخاذ شده به شرح زیر است.

$$\Gamma = \Gamma_{KJ} = C_{ds} \left((1 - \delta) + \delta \frac{k}{\bar{k}} \left(\frac{\tilde{\sigma}}{S_{PM}} \right)^p \right) \quad (10)$$

جایی که $\tilde{\sigma}$ تیزی سراسری موج است. پارامتر S_{PM} ، $\sqrt{3.02 \times 10^{-3}}$ است که نشان دهنده مقدار $\tilde{\sigma}$ برای طیف Pierson-Moskowitz است (Pierson Jr & Moskowitz, 1964). پارامترهای C_{ds} ، δ و p ضرایب قابل تنظیم هستند. تغییر در ضریب قابل تنظیم C_{ds} به معنی تغییر در

جدول ۱. تعاریف شبکه در این مطالعه و مقادیر توصیه شده برای محاسبات شبکه محاسباتی در مدل SWAN

تعریف شبکه	$\Delta\theta$ تفکیک جهتی	تفکیک فرکانسی	حداقل دامنه فرکانس	حداکثر دامنه فرکانس	تفکیک مکانی
	$(\Delta\sigma/\sigma)$				$(\Delta x, \Delta y)$
مطالعه حاضر	10°	0.10	0.04 Hz	1.00 Hz	$\sim 1.8 \text{ km}$ $* 1.8 \text{ km}$
پیشنهاد شده	برای امواج ناشی از باد				
توسط توسعه - دهندگان	(امواج محلی): $\Delta\theta = 10^\circ - 15^\circ$	0.10	0.04 Hz	1.00 Hz	2 km * 2 km
مدل SWAN	برای امواج دور آ: $\Delta\theta = 2^\circ - 5^\circ$				

جدول ۲. فرمولاسیون فرآیندهای فیزیکی موجود و ضرایب مربوط به آنها در مدل SWAN.

ضریب	فرمولاسیون	جمله منبع
	Cavaleri and Malanotte-Rizzoli (1981) (Cavaleri & Rizzoli, 1981).	رشد باد خطی
	Komen et al. (1984); Janssen (1991). (Janssen, 1991; Komen et al., 1984)	رشد باد نمایی
$C_{ds} = 1.36 * 10^{-5}$; $\delta = 1$; $p = 4$; S_{PM} $= 3.02 * 10^{-3}$.	Komen et al. (1984). (Komen et al., 1984)	سفیدک های راس موج
$\lambda = 0.25$; $C_{n/4} = 3 * 10^7$; C_{sh1} $= 5.5$; C_{sh2} $= 6/7$; C_{sh3} $= -1.25$.	Hasselmann et al. (1985). (S. Hasselmann & Hasselmann, 1985)	برهمکنش چهار گانه
$\alpha_{EB} = 0.1$.	Eldeberky (1996). (Eldeberky & Battjes, 1996)	برهمکنش سه گانه
$\alpha_{BJ} = 1.0$; $\gamma_{BJ} = 0.73$.	Battjes and Stive (1985); Nelson (1994). (Battjes & Stive, 1985; Nelson, 1994)	شکست ناشی از کاهش عمق
$C_{JON} = 0.038 \text{ m}^2/\text{s}^3$.	Hasselmann (1973); Madsen et al. (1988). (K. Hasselmann et al., 1973; Madsen et al., 1988)	اصطکاک بستری

توجه: C_{ds} ، δ و p ضرایب قابل تنظیمی هستند؛ S_{PM} مقدار طیف Pierson-Moskowitz است؛ $C_{n/4}$ ، C_{sh1} ، C_{sh2} و C_{sh3} ضرایب برهمکنش موج غیر خطی هستند؛ α_{EB} یک ضریب تناسب قابل تنظیم است؛ α_{BJ} و γ_{BJ} ضرایب شکست ناشی از عمق است؛ C_{JON} ضریب اصطکاک بستر است.

۲-۲-۳. مجموعه داده های ورودی

مهمترین ورودی اولیه ای که بر دقت مدل در مدل سازی موج تأثیر می گذارد، نیروی باد است (Ardhuin & Roland, 2013). در مطالعه حاضر، کالیبراسیون مکانی و ارزیابی مدل SWAN بر اساس داده های باد باز تحلیل محبوب ERA5 از مرکز اروپایی پیش بینیمان مدتوضع هوا (ECMWF) با در نظر گرفتن ۱۳۷ لایه هیبریدی سیگما-فشاری و تراز بالایی در 0.01hPa به اجرا در آمده است. داده های باز تحلیل ERA5 با تفکیک زمانی کسانیک ساعته و تفکیک مکانی ریز $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ از سال ۱۹۷۹ کهدریک نسخه توزیع شده است، از سایر میدان های باد جهانی متمایز می شود (Hersbach et al., 2020). میدان باد منتج شده از داده های ERA5 حتی به عنوان مرجعی برای توسعه و اعتبارسنجی داده های تاریخی اقلیمی باد مورد استفاده در مطالعات پیشنگری اقلیم آینده در نظر گرفته می شوند (Akinsanola et al., 2021; Mazzaro et al., 2021). داده های ژرفاسنجی مورد نیاز برای ناحیه محاسباتی (دریای عرب و دریای عمان) با تفکیک مکانی 4 min از ETOPO 2 v.1 استخراج شده اند که به دلیل قابلیت اطمینان در بیشتر تحقیقات در سراسر جهان مورد استفاده قرار می گیرد

(Smith & Sandwell, 1997). این داده ها پس تسطیح نمودن در 420×270 گره به مدل معرفی شده اند. تنها مرز باز بر روی عرض $14^\circ N$ واقع شده است. بنابراین مشخصات موج (ارتفاع، پریود و جهت موج) بر روی مرز باز از داده های ERA5 با دقت مکانی $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ و تفکیک زمانی 1h استخراج و در ۱۹ نقطه به عنوان شرایط مرزی معرفی گردید.

۲-۲-۴. مجموعه داده های دیدبانی

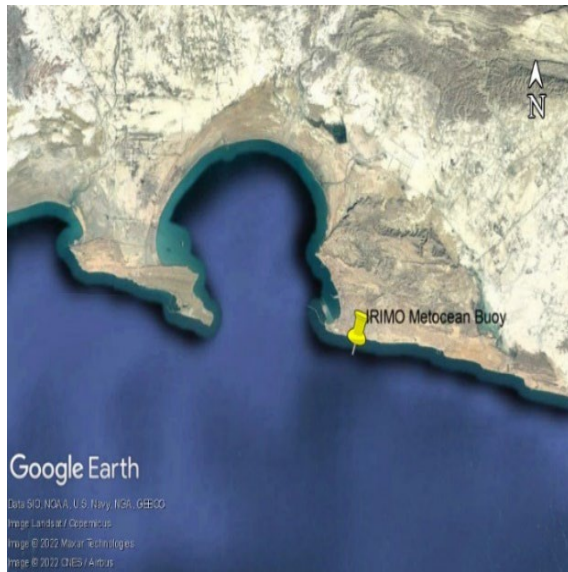
سواحل سوق الجیشی و اقتصادی مکران همواره به عنوان یکی از مناطق استراتژیک نظامی و تجاری کشور محسوب شده است. سازمان هواشناسی کشور به عنوان یکی از متولیان امور اقیانوس شناسی، در راستای وظایف حاکمیتی خود از جمله اندازه گیری پارامترهای دریایی به جمع آوری اطلاعات امواج از طریق بویه های موج نگار پرداخته است. در این مطالعه برای کالیبراسیون مدل از اطلاعات یکساله بویه موج نگار سازمان هواشناسی کشور در دریای عمان طی سال ۲۰۱۵ میلادی استفاده شده است. موقعیت قرار گیری این بویه در شکل ۲ نشان داده شده است.

۲-۲-۵. روش کالیبراسیون و طراحی آزمایش

مدل‌سازی امواج فرآیند پیچیده‌ای است که در آنبرهمکنش چندین نیرو و بسیاری از عوامل فیزیکی مسئول رشد و نیز اتلاف انرژی امواج دریا نقش کلیدی بازی می‌کنند (Cavaleri et al., 2007). عمدتاً باد عامل اصلی تولید امواج گرانشی است. بنابراین، انتقال از انرژی باد به انرژی موج به چندین جنبه فیزیکی باد، به ویژه سرعت، طول موجگاه و تداوم زمان وزش باد بستگی دارد. از سوی دیگر، پدیده‌های فیزیکی دیگری می‌توانند مسئول اتلاف و توزیع مجدد انرژی موج باد باشند، مانند سفیدک راس موج، برهم‌کنش‌های موج-موج، اتلاف امواج دورآی ناشکنا و اصطکاک بستر در نزدیکی ساحل که از جمله پدیده‌های فیزیکی هستند که باید در مدل SWAN به عنوان جملات چشمه و چاه لحاظ گردند. در نتیجه، برآورد دقیق نیروهای باد منتقل شده به سطح دریا، رشد امواج اقیانوس توسط باد و همچنین اتلاف انرژی موج تولید شده بوسیله باد مناسب‌ترین وسیله برای اطمینان از برآورد دقیق امواج است. در حال حاضر، مدل SWAN بر اساس جملات مختلف ورودی باد مربوط به فرمول‌های رشد باد، عمدتاً به‌طور پیش‌فرض که توسط کومن و همکاران (Komen et al., 1984) لحاظ گردیده است، عملیاتی می‌شود و این جملات بر اساس نظریه‌های تئوریک مایلز (Miles, 1957) و بر اساس آزمایش‌های تجربی اسنایدر و همکاران (Snyder et al., 1981) و مطابق نظریات بوئیچ و همکاران (Booij et al., 1999) به اجرا درآمده‌اند. همچنین، عبارتهای منبع باد جانسن (Janssen, 1989) و عبارتهای منابع باد یان (Yan, 1987) نیز در مدل SWAN عملیاتی هستند. در مورد جمله سفیدک راس موج استفاده شده در مدل SWAN، عمدتاً از کارهای کومن و همکاران (Komen et al., 1984)، جانسن (Janssen, 1989) و آلوز و بنر (Alves & Banner, 2003) بهره برداری می‌شود. ترکیب بین عبارات

مختلف منبع باد و جملات سفیدک راس موج اغلب ارزیابی می‌شود و ممکن است دقت نتایج را تغییر دهد. ابتدا بوئیچ و همکاران (Booij et al., 1999; Ris et al., 1999) (1999) ترکیب عبارت ورودی باد جانسن (1991) (Janssen, 1989, 1991) و ترم سفیدک راس موج کومرا آزمایش کرده‌اند (A. Van der Westhuysen, 2007). همچنین، ون در وستویسن (۲۰۰۷) (A. Van der Westhuysen, 2007) ترکیبی از عبارت ورودی باد یان (Yan, 1987) را با ترم سفیدک راس موج آلوس و بنر (۲۰۰۳) (Alves & Banner, 2003) توصیه کرد.

اخیراً، چندین مطالعه پاسخ مدل SWAN را به ترکیب‌های مختلف ممکن از این دو عبارت ارزیابی کرده‌اند (Amarouche et al., 2021; Wu et al., 2021). به عنوان مثال، آماروشه و همکاران (Amarouche et al., 2019) و کوتوپ اوغلو و همکاران (Kutupoğlu et al., 2018) نشان دادند که چنین تغییری در ترکیب عبارات فوق‌الذکر تأثیر قابل توجهی در نتایج موج شبیه‌سازی شده، به ترتیب در دریای مدیترانه غربی و در دریای مرمره دارد. از این رو، در مطالعه حاضر، پنج ترکیب عبارات مختلف برای کالیبراسیون بهینه مدل SWAN جهت استفاده عملیاتی در دریاهای عرب و عمان (اقیانوس هند شمالی) مورد ارزیابی قرار گرفته است. به‌طور همزمان، اتلاف موج به دلیل سفیدک راس موج نیز بر اساس ضریب C_{ds} کالیبره می‌شود. در مورد ترم سفیدک راس موج کمترین درک فیزیکی برای مدل‌سازی موج ناشی از باد وجود دارد و C_{ds} یک پارامتر قابل تنظیم برای کالیبره کردن تمام مدل‌های موج ناشی از باد می‌باشد (Cavaleri et al., 2018; Pallares et al., 2014). افزایش مقدار ضریب مربوط به اتلاف موج توسط ضریب C_{ds} سفیدک موج اجازه می‌دهد تا تصحیح برآورد پایین تر امواج که اغلب در مدل‌های شبیه‌سازی موج مشاهده می‌شود، رفع گردد.



ب



الف

شکل ۲. الف) خط چین ساحلی قرمز رنگ، سواحل مکران در شمال دریای عمان را نشان می دهد؛ ب) نشانگر زرد رنگ محل بویه موج نگار سازمان هواشناسی کشور به مختصات عرض جغرافیایی $25^{\circ}15'11.33''N$ و طول جغرافیایی $60^{\circ}38'27.56''E$ را در این سواحل نشان می دهد.

آمارای ایجاد می کند. پنج ترکیب مختلف از عبارات برای رشد موج ناشی از باد و فرمول‌های سفیدک راس موج در جدول ۳ نشان داده شده اند. ضرایب را در اطراف تنظیمات پیش فرض تغییر دادیم و سپس در هر مقدار جدید مدل اجرا شد. پارامترهای فیزیکی که در جدول نشان داده نشده اند در یک تنظیم پیش فرض مستقر می شوند.

همان طوری که اشاره شد، هدف کلی از این مطالعه و کالیبره کردن مدل SWAN یافتن ترکیب بهینه عبارت منبع ورودی باد و فرمول بندی سفیدک راس موج و ضرایب مربوطه است. ترکیب بهینه، ترکیبی است که بهترین توافق را با دیدبانی های ارتفاع موج شاخص (H_{m0}) در مکان بویه سازمان هواشناسی کشور در دریای عمان برای سال ۲۰۱۵ از نظر شاخص های خطای

جدول ۳. پارامترهای طراحی آزمایش و سطوح آن‌ها

Combinations Category	Setting ID	Wind Source Terms	Whitcapping Terms	C_{ds}
Komen et al., (1984) (Komen et al., 1984) & Komen et al., (1984) (Komen et al., 1984)	ERA5_KK436	Komen	Komen	4.36e-5
	ERA5_KK336	Komen	Komen	3.36e-5
	ERA5_KK236	Komen	Komen	2.36e-5
	ERA5_KK136	Komen	Komen	1.36e-5
	ERA5_KK106	Komen	Komen	1.06e-5
	ERA5_KK086	Komen	Komen	0.86e-5
Komen et al., (1984) (Komen et al., 1984) & Janssen et al., (1991,1992) (Janssen, 1991, 1992)	ERA5_KK036	Komen	Komen	0.36e-5
	ERA5_KJ060	Komen	Janssen	6.0
	ERA5_KJ055	Komen	Janssen	5.5
	ERA5_KJ050	Komen	Janssen	5.0
	ERA5_KJ045	Komen	Janssen	4.5
	ERA5_KJ040	Komen	Janssen	4.0
	ERA5_KJ035	Komen	Janssen	3.5
	ERA5_KJ030	Komen	Janssen	3
	ERA5_KJ015	Komen	Janssen	1.5
	ERA5_KJ010	Komen	Janssen	1.0
Janssen et al., (1991,1992) (Janssen, 1991, 1992) & Komen et al., (1984) (Komen et al., 1984)	ERA5_KJ005	Komen	Janssen	0.5
	ERA5_JK436	Janssen	Komen	4.36e-5
	ERA5_JK336	Janssen	Komen	3.36e-5
	ERA5_JK236	Janssen	Komen	2.36e-5
	ERA5_JK136	Janssen	Komen	1.36e-5
Janssen et al., (1991,1992) (Janssen, 1991, 1992) & Janssen et al., (1991,1992) (Janssen, 1991, 1992)	ERA5_JK036	Janssen	Komen	0.36e-5
	ERA5_JJ100	Janssen	Janssen	10
	ERA5_JJ080	Janssen	Janssen	8.0
	ERA5_JJ060	Janssen	Janssen	6.0
	ERA5_JJ050	Janssen	Janssen	5.0
	ERA5_JJ045	Janssen	Janssen	4.5
	ERA5_JJ040	Janssen	Janssen	4.0
	ERA5_JJ035	Janssen	Janssen	3.5
	ERA5_JJ030	Janssen	Janssen	3
Yan (1987) (Yan, 1987) & Van der Westhuysen (2007a, 2007b) (A. Van der Westhuysen, 2007; A. J. van der Westhuysen et al., 2007)	ERA5_YAB010	Yan	Westhuysen	1.0e-5
	ERA5_YAB020	Yan	Westhuysen	2.0e-5
	ERA5_YAB025	Yan	Westhuysen	2.5e-5
	ERA5_YAB030	Yan	Westhuysen	3.0e-5
	ERA5_YAB050	Yan	Westhuysen	5.0e-5
ERA5_YAB070	Yan	Westhuysen	7.0e-5	

۳. نتایج و بحث

۳-۱. شاخص‌های ارزیابی مهارت

مقایسه برون‌داد مدل با دیدبانی‌های متناظر برای بررسی دقت شبیه‌سازی استفاده می‌شود. برای دستیابی به ارزیابی‌های دقیق‌تر، می‌توان از شاخص‌های مهارت آماری استفاده کرد. ویلموت (۱۹۸۲) از اریبی، اریبی نرمال شده، شاخص پراکندگی (SI)، جذر میانگین مربع خطاها (RMSE) و انحراف معیار برای ارزیابی سازگاری بین دو مجموعه سری

زمانی (داده‌های دیدبانی و برون‌داد مدل) استفاده نمود (Willmott, 1981, 1982). همچنین ویلموت (۱۹۸۲) آماره شاخص توافق (d) را به عنوان معیار استاندارد شده‌ای از درجه خطای پیش‌بینی مدل پیشنهاد داد که بین ۰ و ۱ متغیر است. مقدار شاخص توافق ۱، مطابقت کامل را نشان می‌دهد و ۰ بیانگر عدم توافق کامل است. امتیازهای آماری پیش‌گفته به شرح ذیل محاسبه می‌شوند و نتایج در جدول ۴ نشان داده شده

شاخص های آماری متعدد برای جلوگیری از اشتباهات رایج به جای استفاده از یک امتیاز آماری منفرد ضروری به نظر می رسد. به عنوان مثال، اریبی، فقط میانگین دو سری زمانی را مقایسه می کند و بنابراین خطای سامانمند بین دو سری زمانی را توضیح می دهد. اما شامل هیچ اطلاعاتی در مورد توزیع داده ها پیرامون مقدار میانگین نمی باشد. یا جذر میانگین مربع خطاها پراکندگی نتایج مدل را در اطراف مشاهدات توضیح می دهد، اما کراندار نیست و زمانیکه بقدر کافی کوچک است، تصمیم گیری آسان نیست.

در جدول ۵ مقادیر هر یک از امتیازهای آماری مورد استفاده در ارزیابی ارتفاع موج شاخص که بنا به توصیه DHI ارائه گردیده، ذکر شده است (DHI, 2017). براساس مقادیر جدول ۵، نتایج آماری محاسبه شده در جدول ۴ بیشتر در محدوده قابل قبول و گاهی نیز در محدوده ایده آل هستند. ضمناً در جدول ۴، بهترین تنظیمات براساس کمترین مقادیر اریبی نرمال شده، RMSE، انحراف معیار و شاخص پراکندگی و نیز با توجه به شکل ۳ انتخاب گردیده و با رنگ قرمز مشخص شده اند. همچنین در این جدول، بیشترین مقادیر شاخص توافق و همبستگی برای هر ترکیب انتخاب و با رنگ زرد هایلایت شده است. بهترین تنظیمات براساس کمترین مقادیر اریبی نرمال شده، RMSE، انحراف معیار و شاخص پراکندگی انتخاب و با رنگ قرمز مشخص شده است. ضمناً بیشترین مقادیر شاخص توافق و همبستگی برای هر ترکیب با رنگ زرد مشخص شده است.

است.

$$\text{Bias} = \frac{1}{k} \times \sum_{i=1}^k (m(i) - \text{obs}(i)) \quad (11)$$

$$\text{Normalized Bias} = \frac{1}{k} \times \sum_{i=1}^k \left| \frac{m(i) - \text{obs}(i)}{\text{obs}(i)} \right| \quad (12)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{k} \times \sum_{i=1}^k (m(i) - \text{obs}(i))^2} \quad (13)$$

$$\text{St_Dev} = \sqrt{\frac{1}{k} \times \sum_{i=1}^k (m(i) - \text{obs}(i) - \text{Bias})^2} \quad (14)$$

$$\text{Scatter Index} = \frac{\text{Standard deviation of error}}{\text{Mean observed significant wave height}} \quad (15)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k (m(i) - \text{obs}(i))^2}{\sum_{i=1}^k (|m(i) - \overline{\text{obs}}| + |\text{obs}(i) - \overline{\text{obs}}|)^2} \quad (16)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^k ((\text{obs}(i) - \overline{\text{obs}})(m(i) - \bar{m}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^k (\text{obs}(i) - \overline{\text{obs}})^2 \sum_{i=1}^k (m(i) - \bar{m})^2}} \quad (17)$$

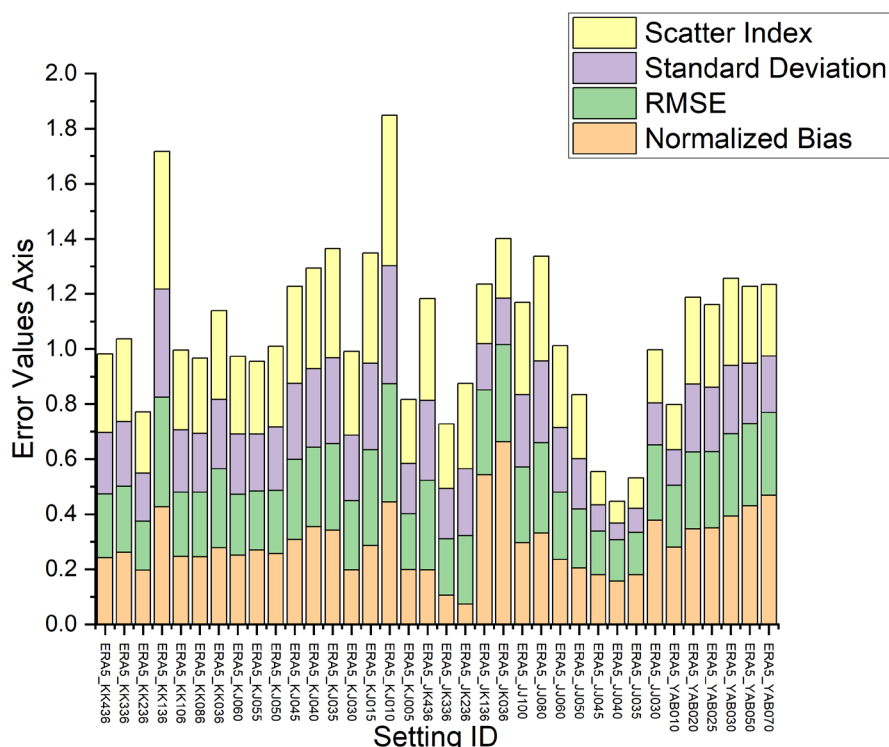
در این روابط $\text{obs}(i)$ مقدار دیدبانی شده را در زمان i ، $m(i)$ پرونداد مدل متناظر و k سایز نمونه (در اینجا سایز نمونه ۱۷۱۲۸ است) را ارائه می دهد. | | قدر مطلق است. گنجاندن

جدول ۴. نتایج امتیازهای آماری مورد استفاده برای ارزیابی ارتفاع موج شاخص شبیه سازی شده با فرمول بندی های ورودی باد و ضرایب سفیدک راس موج متفاوت

Setting ID	Bias	Normalized Bias	RMSE	Standard Deviation	Scatter Index	Index of Agreement	Correlation
ERA5_KK436	-0.0554	0.2424	0.2306	0.2238	0.2859	0.9607	0.8634
ERA5_KK336	-0.0440	0.2620	0.2392	0.2351	0.3002	0.9394	0.8390
ERA5_KK236	0.0365	0.1973	0.1779	0.1741	0.2224	0.9700	0.8831
ERA5_KK136	-0.0686	0.4270	0.3980	0.3921	0.5007	0.7962	0.3500
ERA5_KK106	0.0547	0.2469	0.2330	0.2265	0.2893	0.9423	0.8061
ERA5_KK086	0.0970	0.2456	0.2346	0.2137	0.2729	0.9032	0.7833
ERA5_KK036	0.1372	0.2782	0.2871	0.2522	0.3222	0.8955	0.6769
ERA5_KJ060	0.0151	0.2512	0.2206	0.2201	0.2811	0.9438	0.8353
ERA5_KJ055	-0.0595	0.2690	0.2153	0.2069	0.2642	0.9638	0.8704
ERA5_KJ050	0.0034	0.2567	0.2298	0.2298	0.2935	0.9420	0.8300
ERA5_KJ045	0.0887	0.3082	0.2901	0.2763	0.3528	0.8933	0.6707
ERA5_KJ040	-0.0393	0.3540	0.2885	0.2858	0.3650	0.8909	0.7401
ERA5_KJ035	0.0499	0.3420	0.3148	0.3108	0.3970	0.8870	0.6241
ERA5_KJ030	0.0777	0.1988	0.2504	0.2380	0.3040	0.9008	0.7773
ERA5_KJ015	0.1506	0.2861	0.3481	0.3138	0.4008	0.8744	0.5655
ERA5_KJ010	0.0198	0.4450	0.4287	0.4283	0.5470	0.8515	0.7277
ERA5_KJ005	0.0909	0.1989	0.2034	0.1820	0.2324	0.9420	0.8364
ERA5_JK436	0.1447	0.1985	0.3243	0.2903	0.3707	0.8904	0.6916
ERA5_JK336	0.0918	0.1059	0.2047	0.1830	0.2338	0.9683	0.9020
ERA5_JK236	0.0574	0.0736	0.2491	0.2425	0.3097	0.9416	0.8382
ERA5_JK136	-0.2561	0.5434	0.3070	0.1692	0.2162	0.9076	0.7838
ERA5_JK036	-0.3112	0.6627	0.3539	0.1685	0.2152	0.8581	0.6997
ERA5_JJ100	0.0856	0.2961	0.2756	0.2620	0.3346	0.8962	0.7084
ERA5_JJ080	0.1408	0.3312	0.3286	0.2969	0.3792	0.8673	0.5648
ERA5_JJ060	-0.0706	0.2359	0.2441	0.2336	0.2984	0.9381	0.8345
ERA5_JJ050	-0.1121	0.2055	0.2137	0.1819	0.2324	0.9627	0.8967
ERA5_JJ045	-0.1261	0.1807	0.1578	0.0948	0.1211	0.9906	0.9716
ERA5_JJ040	0.1365	0.1570	0.1498	0.0616	0.0787	0.9939	0.9235
ERA5_JJ035	-0.1262	0.1807	0.1533	0.0870	0.1111	0.9911	0.9760
ERA5_JJ030	-0.2275	0.3779	0.2735	0.1518	0.1939	0.9269	0.8399
ERA5_YAB010	-0.1837	0.2807	0.2242	0.1286	0.1642	0.9792	0.9132
ERA5_YAB020	-0.1328	0.3463	0.2801	0.2466	0.3150	0.9280	0.8234
ERA5_YAB025	-0.1469	0.3502	0.2768	0.2346	0.2996	0.9284	0.8261
ERA5_YAB030	-0.1699	0.3925	0.3000	0.2473	0.3159	0.8818	0.7698
ERA5_YAB050	-0.2030	0.4300	0.2988	0.2192	0.2800	0.8813	0.7767
ERA5_YAB070	-0.2218	0.4683	0.3015	0.2042	0.2608	0.8801	0.7774

جدول ۵. مقادیر پارامترهای آماری استاندارد مورد استفاده در ارزیابی نتایج مدل برای ارتفاع موج شاخص

محدوده ایده آل	محدوده نرمال	واحد	علامت اختصاری	پارامتر
< 0.20	0.20 – 0.50	m	Normalized Bias	ارایی نرمال شده
< 0.10	0.10 – 0.40	m	RMSE	جذر میانگین مربع خطاها
< 0.15	0.15 – 0.45	بدون واحد	SI	ضریب پراکنندگی

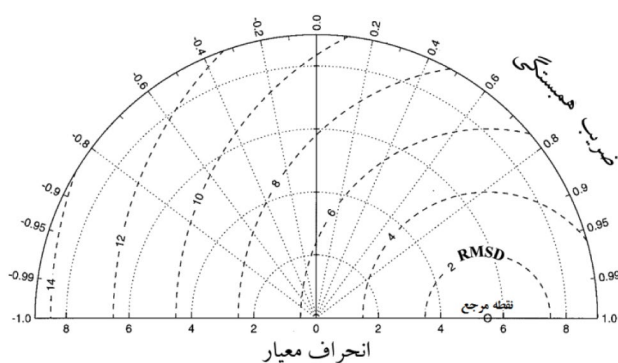


شکل ۳. آماره های خطای پرونداد ارتفاع موج شاخص شبیه سازی شده توسط مدل SWAN

۲-۳. نمودار تیلور

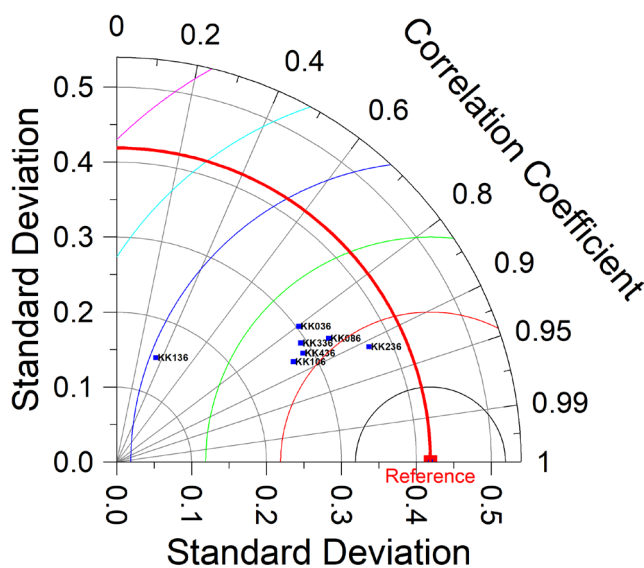
دایره و مقادیر RMSD به دو صورت دایر متحدالمرکز نسبت به نقطه مرجع (دایره توخالی روی محور افقی) ترسیم می شود. روش ارزیابی در این دیاگرام به این صورت است که موقعیت داده های مورد بررسی بر اساس RMSD، ضریب همبستگی آن با ایستگاه دیدبانی و انحراف معیار سری زمانی روی دیاگرام ترسیم می شود و هر داده ای که موقعیت مکانی آن روی نمودار به نقطه مرجع نزدیکتر باشد، با دقت بیشتری مقدار ارتفاع موج شاخص را برآورد می کند و بنابراین مناسب تر خواهد بود (شکل ۴).

دیاگرام تیلور نموداری است که برای مقایسه چندین خروجی مدل سازی عددی در یک نمودار استفاده می گردد. در این دیاگرام میزان خطا، همبستگی و همچنین انحراف معیار خروجی های مدل با مقادیر دیدبانی مقایسه می گردد (Taylor, 2001). نمودار تیلور به دو صورت نیم دایره (نمایش همبستگی منفی و مثبت) و ربع دایره (فقط نمایش همبستگی مثبت) ارائه می شود که در هر دو صورت، مقادیر ضریب همبستگی به صورت شعاع دایره روی قوس آن، مقادیر انحراف معیار به صورت دایر متحدالمرکز نسبت به مرکز



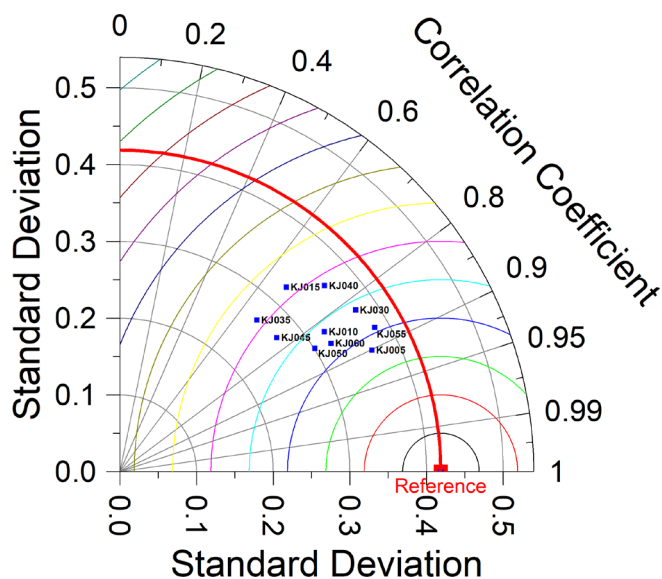
شکل ۴. نمونه ای از دیاگرام تیلور.

در شکل ۵ دیاگرام تیلور هفت ترکیب مختلف Komen et al., (1984) (Komen et al., 1984) & Komen et al., (1984) مورد ارزیابی قرار گرفته است. بهترین ترکیب ERA5_KK236 یا همان ترکیب پیش فرض مدل SWAN می باشد.



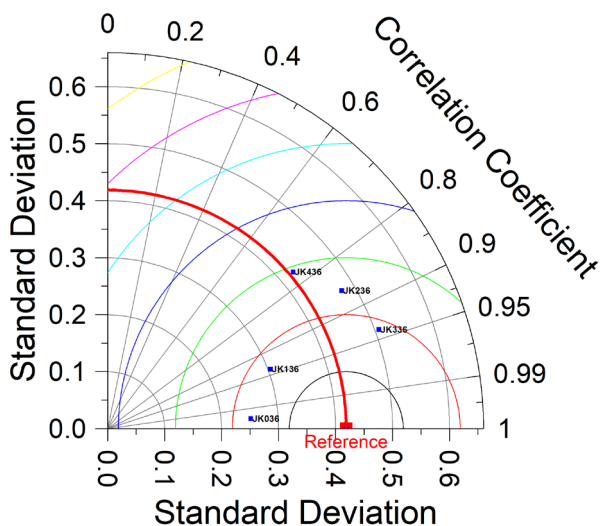
شکل ۵. دیاگرام تیلور هفت ترکیب مختلف Komen et al., (1984) & Komen et al., (1984).

در شکل ۶ دیاگرام تیلور ده ترکیب مختلف Komen et al., (1984) & Janssen et al., (1991,1992) (Janssen, 1991, 1992) مورد ارزیابی قرار گرفته است. بهترین ترکیب ERA5_KJ005 می باشد.



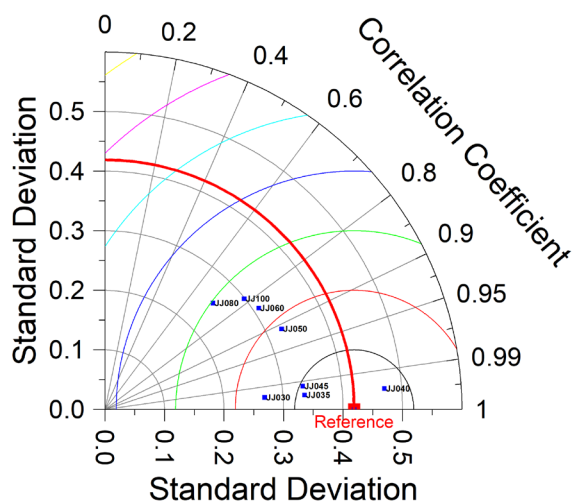
شکل ۶. دیاگرام تیلور ده ترکیب مختلف (Komen et al., (1984) & Janssen et al., (1991, 1992)

در شکل ۷ دیاگرام تیلور پنج ترکیب مختلف Janssen et al., (1991,1992) & Komen et al., (1991,1992) گرفته است. بهترین ترکیب ERA5_JK136 می‌باشد. در مورد ارزیابی فرار



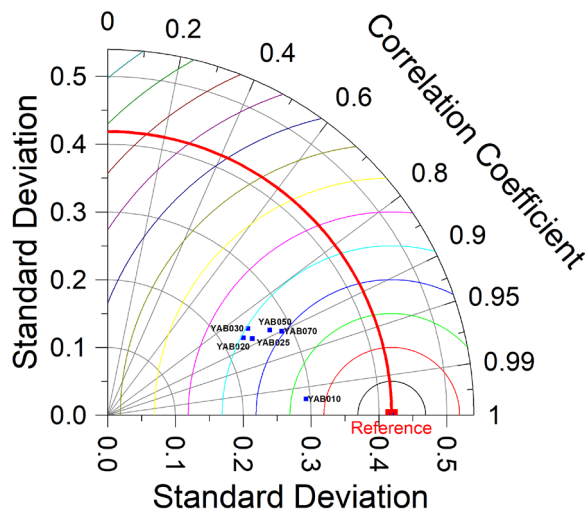
شکل ۷. دیاگرام تیلور پنج ترکیب مختلف (Janssen et al., (1991, 1992) & Komen et al., (1984)

در شکل ۸ دیاگرام تیلور هشت ترکیب مختلف Janssen et al., (1991,1992) & Janssen et al., (1991,1992) مورد ارزیابی قرار گرفته است. بهترین ترکیب ERA5_JJ040 می‌باشد.



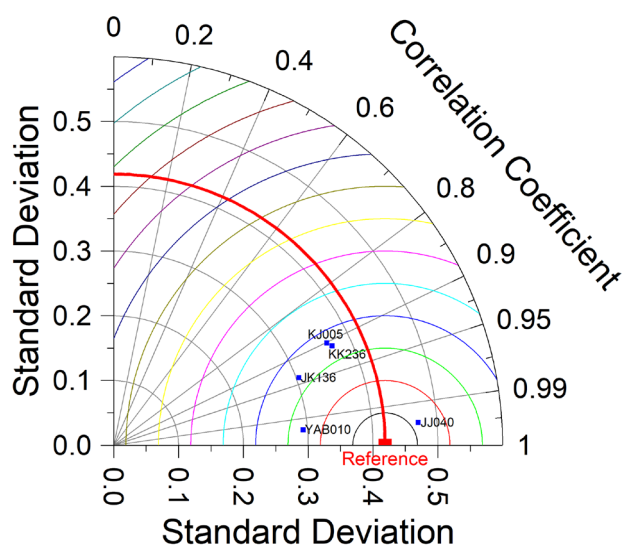
شکل ۸. دیاگرام تیلور هشت ترکیب مختلف (Janssen et al., (1991, 1992) & Janssen et al., (1991, 1992)

در شکل ۹ دیاگرام تیلور شش ترکیب مختلف (Yan (1987) & Van der Westhuysen (2007a, 2007b) (A. Van der Westhuysen, 2007; A. J. van der Westhuysen et al., 2007) مورد ارزیابی قرار گرفته است. بهترین ترکیب ERA5_YAB010 می باشد.



شکل ۹. دیاگرام تیلور شش ترکیب مختلف (Yan (1987) & Van der Westhuysen (2007a, 2007b)

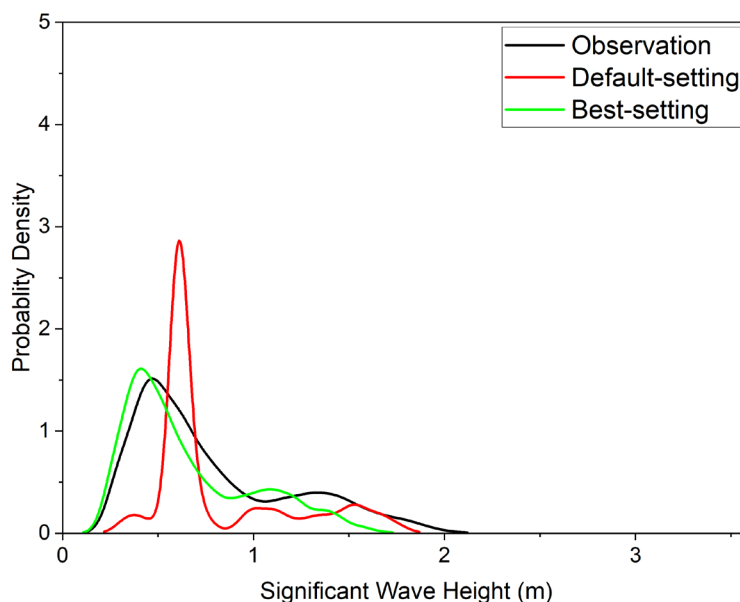
در شکل ۱۰ دیاگرام تیلور بهترین ترکیب مختلف هر پنج طبقه بندی مورد ارزیابی قرار گرفته است. بهترین ترکیب از ۳۶ ترکیب مورد مطالعه ترکیب ERA5_JJ040 می باشد.



شکل ۱۰ دیاگرام تیلور بهترین ترکیب مختلف هر پنج طبقه بندی.

در شکل ۱۱ تابع چگالی احتمال داده های دیدبانی حاصل از بویه موج نگار و داده های مدل شده ترکیب پیش فرض (ERA5_KK236) و بهترین ترکیب (ERA5_JJ040) ترسیم شده است. انطباق قابل قبول تابع چگالی بهترین ترکیب نسبت به ترکیب پیش فرض در شکل کاملاً مشهود است؛ البته با توجه به شکل، بهترین ترکیب برپا شده در پیش بینی ارتفاع امواج شاخص حدی عملکرد نسبتاً ضعیفی دارد.

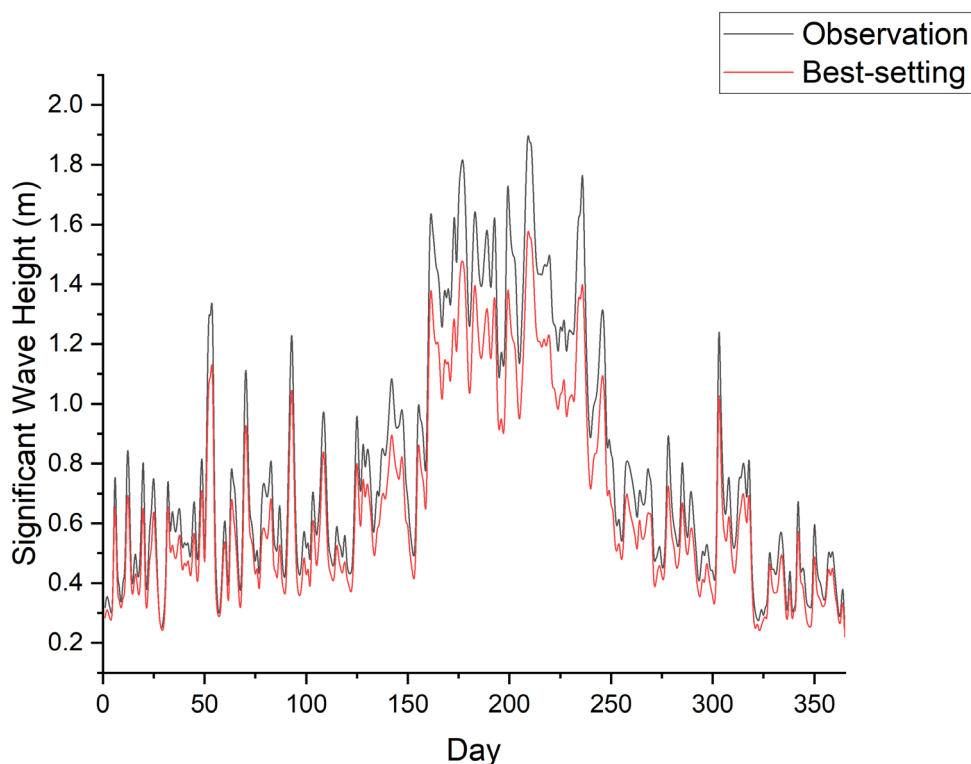
در شکل ۱۱ تابع چگالی احتمال داده های دیدبانی حاصل از بویه موج نگار و داده های مدل شده ترکیب پیش فرض (ERA5_KK236) و بهترین ترکیب (ERA5_JJ040) ترسیم شده است. انطباق قابل قبول تابع چگالی بهترین ترکیب نسبت به ترکیب پیش فرض در شکل کاملاً مشهود است؛ البته با توجه به شکل، بهترین ترکیب برپا شده در پیش بینی ارتفاع امواج شاخص حدی عملکرد نسبتاً ضعیفی دارد.



شکل ۱۱. تابع چگالی احتمالی داده های دیدبانی و داده های متناظر مدل شده ترکیب پیش فرض (ERA5_KK236) و بهترین ترکیب (ERA5_JJ040).

در شکل ۱۲ ارتفاع موج شاخص دیدبانی شده با متناظر مدل شده آن توسط بهترین ترکیب برپا شده مدل در ساعت 12UTC هر روز رسم شده است. این شکل هم نشان از انطباق مناسب دو مجموعه داده دارد. هر چند پایین بودن برآورد ارتفاع موج شاخص توسط مدل بوضوح در شکل دیده می شود.

در شکل ۱۲ ارتفاع موج شاخص دیدبانی شده با متناظر مدل شده آن توسط بهترین ترکیب برپا شده مدل در ساعت 12UTC هر روز رسم شده است. این شکل هم نشان از انطباق مناسب دو مجموعه داده دارد. هر چند پایین بودن برآورد ارتفاع موج شاخص توسط مدل بوضوح در شکل دیده می شود.



شکل ۱۲. ارتفاع موج شاخص دیدبانی شده با متناظر مدل شده آن توسط بهترین ترکیب بر پاشده مدل در ساعت 12UTC هر روز.

۴. نتیجه گیری

ERA5_JJ035 محاسبه گردید. براساس خطاهای محاسبه شده نیز تنظیمات ERA5_KJ005، ERA5_KK236، ERA5_JK336، ERA5_040 و ERA5_YAB010 در بین ترکیب‌های هم طبقه خود بهترین حالت‌ها را شامل می‌شدند. در نهایت مطالعات نشان داد که تنظیمات بهینه برای مدل SWAN به عنوان یک تنظیم کالیبره شده در دریای عمان، بر اساس عبارت منبع باد Janssen et al., (1991, 1992) و عبارت اتلاف سفیدک راس موج Janssen et al., (1991, 1992) می‌باشد که این امر در تحلیل دیاگرام تیلور نیز به وضوح دیده شد.

جمع‌بندی از تحلیل نتایج صورت گیرد. ضمناً توصیه‌ها و پیشنهادها لازم برای انجام بررسی‌های بعدی نیز در این بخش ارائه می‌شود. این مقاله حساسیت شبیه سازی ارتفاع موج شاخص به شدت اتلاف سفیدک راس موج در مدل SWAN را بررسی می‌کند. کالیبراسیون شامل تعیین بهترین پارامتری سازی مدل SWAN بر اساس دقت بسته‌های ترکیبی چندگانه از طرحواره‌های ورودی باد و طرحواره‌های سفیدک راس موج در محدوده دریای عمان است؛ دقت ارتفاع موج شاخص با استفاده از ۳۶ تنظیم فیزیکی برای میدان باد ERA5 در سال ۲۰۱۵ شبیه سازی شد. خطاهای آماری در آزمایشات طراحی شده مختلف بدست آمد. مقادیر آماره‌های شاخص توافق و همبستگی در همه ترکیب‌ها حاکی از توافق بالا و همبستگی مثبت قابل قبول بین داده‌های پیش‌بینی و دیدبانی‌های متناظر است. بهترین میزان شاخص توافق در تنظیم ERA5_JJ040 مشاهده گردید؛ بالاترین مقدار همبستگی نیز در تنظیم

۵. منابع

1. Akinsanola, A. A., Ogunjobi, K. O., Abolude, A. T., & Salack, S. (2021). Projected changes in wind speed and wind energy potential over West Africa in CMIP6 models. *Environmental Research Letters*, 16(4),

- model forced with ERA5 winds with application to Persian Gulf and Gulf of Oman. *Ocean Engineering*, 219, 108445.
12. Booij, N., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7649–7666.
 13. Cavaleri, L., Abdalla, S., Benetazzo, A., Bertotti, L., Bidlot, J.-R., Breivik, Ø., Carniel, S., Jensen, R. E., Portilla-Yandun, J., & Rogers, W. E. (2018). Wave modelling in coastal and inner seas. *Progress in Oceanography*, 167, 164–233.
 14. Cavaleri, L., Alves, J.-H., Ardhuin, F., Babanin, A., Banner, M., Belibassakis, K., Benoit, M., Donelan, M., Groeneweg, J., & Herbers, T. H. C. (2007). Wave modelling—the state of the art. *Progress in Oceanography*, 75(4), 603–674.
 15. Cavaleri, L., Barbariol, F., Benetazzo, A., & Waseda, T. (2019). Ocean wave physics and modeling: The message from the 2019 wise meeting. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(12), ES297–ES300.
 16. Cavaleri, L., & Rizzoli, P. M. (1981). Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 86(C11), 10961–10973.
 17. DHI. (2017). MIKE 21, Spectral Wave Module, Scientific Documentation.
 18. Eldeberky, Y., & Battjes, J. A. (1996). Spectral modeling of wave breaking: Application to Boussinesq equations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C1), 1253–1264.
 19. Günther, H., Hasselmann, S., & Janssen, P. A. (1992). The WAM Model Cycle 4 (No. DKRZ-TR-4 (REV. ED.)). Hamburg: Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ).
 20. Hasselmann, K. (1974). On the spectral dissipation of ocean waves due to white capping. *Boundary-Layer Meteorology*, 6(1–2), 107–127.
 21. Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D. E., Enke, K., Ewing, J. A., Gienapp, H., Hasselmann, D. E., & Kruseman, P. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). In *Ergänzungsheft 8-12*. Delft University of Technology.
 22. Hasselmann, S., & Hasselmann, K. (1985). 44033.
 2. Akpınar, A., Bingölbalı, B., & Van Vledder, G. P. (2016). Wind and wave characteristics in the Black Sea based on the SWAN wave model forced with the CFSR winds. *Ocean Engineering*, 126, 276–298.
 3. Alipour, A., Siadatmousavi, S. M., & Jose, F. (2021). Numerical simulation of waves in the Caspian Sea: calibration and verification of the observation-based source terms. *Ocean Dynamics*, 71(6), 699–714.
 4. Alves, J. H. G. M., & Banner, M. L. (2003). Performance of a saturation-based dissipation-rate source term in modeling the fetch-limited evolution of wind waves. *Journal of Physical Oceanography*, 33(6), 1274–1298.
 5. Amarouche, K., Akpınar, A., Bachari, N. E. I., Çakmak, R. E., & Houma, F. (2019). Evaluation of a high-resolution wave hindcast model SWAN for the West Mediterranean basin. *Applied Ocean Research*, 84, 225–241.
 6. Amarouche, K., Akpınar, A., Soran, M. B., Myslenkov, S., Majidi, A. G., Kankal, M., & Arkhipkin, V. (2021). Spatial calibration of an unstructured SWAN model forced with CFSR and ERA5 winds for the Black and Azov Seas. *Applied Ocean Research*, 117, 102962.
 7. Amrutha, M. M., Kumar, V. S., Sandhya, K. G., Nair, T. M. B., & Rathod, J. L. (2016). Wave hindcast studies using SWAN nested in WAVEWATCH III-comparison with measured nearshore buoy data off Karwar, eastern Arabian Sea. *Ocean Engineering*, 119, 114–124.
 8. Ardhuin, F., & Roland, A. (2013). The development of spectral wave models: coastal and coupled aspects. *Proceedings of Coastal Dynamics*, 2013, 7th.
 9. Battjes, J. A., & Stive, M. J. F. (1985). Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 90(C5), 9159–9167.
 10. Beyramzade, M., Siadatmousavi, S. M., & Nik, M. M. (2019). Skill assessment of SWAN model in the red sea using different wind data. *Regional Studies in Marine Science*, 30, 100714.
 11. Beyramzadeh, M., Siadatmousavi, S. M., & Derkani, M. H. (2021). Calibration and skill assessment of two input and dissipation parameterizations in WAVEWATCH-III

34. Phillips, O. M. (1957). On the generation of waves by turbulent wind. *Journal of Fluid Mechanics*, 2(5), 417–445.
35. Pierson Jr, W. J., & Moskowitz, L. (1964). A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of SA Kitaigorodskii. *Journal of Geophysical Research*, 69(24), 5181–5190.
36. Ris, R. C., Holthuijsen, L. H., & Booij, N. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 2. Verification. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7667–7681.
37. Siadatmousavi, S. M., Jose, F., & Stone, G. W. (2011a). Evaluation of two WAM white capping parameterizations using parallel unstructured SWAN with application to the Northern Gulf of Mexico, USA. *Applied Ocean Research*, 33(1), 23–30.
38. Siadatmousavi, S. M., Jose, F., & Stone, G. W. (2011b). The effects of bed friction on wave simulation: implementation of an unstructured third-generation wave model, SWAN. *Journal of Coastal Research*, 27(1), 140–152.
39. Siah Sarani, A., Karami Khaniki, A., Aliakbari Bidokhti, A.-A., & Azadi, M. (2020). Sensitivity analysis of the numerical aspect of the SWAN for the tropical cyclone wave simulations in the Gulf of Oman. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(15), 1–14.
40. Siah Sarani, A., Karami Khaniki, A., Aliakbari Bidokhti, A.-A., & Azadi, M. (2021). Numerical modeling of tropical cyclone-induced storm surge in the gulf of oman using a storm surge–wave–tide coupled model. *Ocean Science Journal*, 56(3), 225–240.
41. Smith, W. H. F., & Sandwell, D. T. (1997). Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science*, 277(5334), 1956–1962.
42. Snyder, R. L., Dobson, F. W., Elliott, J. A., & Long, R. B. (1981). Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 102, 1–59.
43. Stopa, J. E. (2018). Wind forcing calibration and wave hindcast comparison using multiple reanalysis and merged satellite wind datasets. *Ocean Modelling*, 127, 55–69.
44. SWAN, S. (2015). technical documentation (SWAN Cycle III version 41.01 A). In Delft University of Technology. Delft University of Technology (TU Delft).
23. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., & Schepers, D. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049.
24. Janssen, P. A. E. M. (1989). Wave-induced stress and the drag of air flow over sea waves. *Journal of Physical Oceanography*, 19(6), 745–754.
25. Janssen, P. A. E. M. (1991). Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting. *Journal of Physical Oceanography*, 21(11), 1631–1642.
26. Janssen, P. A. E. M. (1992). Consequences of the effect of surface gravity waves on the mean air flow. In *Breaking Waves* (pp. 193–198). Springer.
27. Komen, G. J., Hasselmann, K., & Hasselmann, K. (1984). On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *Journal of Physical Oceanography*, 14(8), 1271–1285.
28. Kutupoğlu, V., Çakmak, R. E., Akpınar, A., & van Vledder, G. P. (2018). Setup and evaluation of a SWAN wind wave model for the Sea of Marmara. *Ocean Engineering*, 165, 450–464.
29. Madsen, O. S., Poon, Y.-K., & Graber, H. C. (1988). Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory. *Twenty First Coastal Eng Conf*, 492–504.
30. Mazzaro, E., Palmeira, A. C. P. de A., & Libonati, R. (2021). Estimation of return periods of wind speed and gust and significant wave height in the Southwest Atlantic. *S & G J.*, 16, 84–100.
31. Miles, J. W. (1957). On the generation of surface waves by shear flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 3(2), 185–204.
32. Nelson, R. C. (1994). Depth limited design wave heights in very flat regions. *Coastal Engineering*, 23(1–2), 43–59.
33. Pallares, E., Sánchez-Arcilla, A., & Espino, M. (2014). Wave energy balance in wave models (SWAN) for semi-enclosed domains—Application to the Catalan coast. *Continental Shelf Research*, 87, 41–53.

- deep and shallow water. *Coastal Engineering*, 54(2), 151–170.
50. Van Vledder, G. P., & Akpınar, A. (2015). Wave model predictions in the Black Sea: Sensitivity to wind fields. *Applied Ocean Research*, 53, 161–178.
51. WAMDI Group. (1988). The WAM model—A third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, 18(12), 1775–1810. Willmott, C. J. (1981). On the validation of models. *Physical Geography*, 2(2), 184–194.
52. Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), 1309–1313.
53. Wu, W., Liu, Z., Zhai, F., Li, P., Gu, Y., & Wu, K. (2021). A quantitative method to calibrate the SWAN wave model based on the whitecapping dissipation term. *Applied Ocean Research*, 114, 102785.
54. Yan, L. (1987). An improved wind input source term for third generation ocean wave modelling. *Wetenschappelijk Rapport= Scientific Report*. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut.
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183–7192.
45. Thomas, T. J., & Dwarakish, G. S. (2015). Numerical wave modelling—A review. *Aquatic Procedia*, 4, 443–448.
46. Tolman, H. L. (1992). Effects of numerics on the physics in a third-generation wind-wave model. *Journal of Physical Oceanography*, 22(10), 1095–1111.
47. Tolman, H. L., Balasubramanian, B., Burroughs, L. D., Chalikov, D. V, Chao, Y. Y., Chen, H. S., & Gerald, V. M. (2002). Development and implementation of wind-generated ocean surface wave models at NCEP. *Weather and Forecasting*, 17(2), 311–333.
48. Van der Westhuysen, A. (2007). Ontwikkelingen in het spectraal modelleren van windgolven in kustgebieden= Advances in the spectral modelling of wind waves in the nearshore.
49. van der Westhuysen, A. J., Zijlema, M., & Battjes, J. A. (2007). Nonlinear saturation-based whitecapping dissipation in SWAN for