

Evaluating the Accuracy of Wave Forecasting Models in Data-Limited Areas such as the Oman Sea

Fakheri, M.^{1✉} | Mahtabi, M.J.²

1. MSc in Meteorology, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Marine expert, Ports and Maritime Organization, Tehran, Iran

Corresponding Author E-mail: Morteza7000@gmail.com

(Received: 19 May 2026, Revise: 29 Jun 2026, Accepted: 30 Jun 2026, Published online: 30 Jun 2026)

Abstract

Reliable wave forecasts are essential for maritime safety, port operations, and hazard warnings. In areas such as the Oman Sea, where in-situ observations are scarce, validating and improving numerical wave models remains a challenge. This study examines the performance of the WAVEWATCH III model in predicting wave height and period under limited-data conditions.

The model was forced with surface wind fields from ECMWF and regional bathymetry. Its results were compared with satellite observations and the few available buoy records. Statistical measures, including RMSE, BIAS, and Scatter Index, were used to evaluate accuracy. Findings show that the model performs well under normal conditions but tends to lose accuracy during extreme events such as monsoon storms. The quality of wind input data was also found to strongly influence model performance.

Overall, the study indicates that combining satellite data, numerical modeling, and statistical correction techniques can enhance wave forecasts in data-sparse regions. These insights are useful for maritime agencies, port managers, and policymakers in Iran and the Persian Gulf, and underline the importance of improving observational networks and early warning systems.

Keywords: Wave forecasting; Numerical modeling; Oman Sea; Data-sparse regions; Validation; Satellite observations

Cite this article: Fakheri, M and Mahtabi, M J . (2026). Evaluating the Accuracy of Wave Forecasting Models in Data-Limited Areas such as the Oman Sea. *Journal of the Nivar*, ??(??-??), ??-??. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2026.579946.1379>

E-mail: (2) mahtabijavad1359@gmail.com



Publisher: Iran Meteorological Organization
DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2026.579946.1379>

Print ISSN: 1735-0565
Online ISSN: 2645-3347

ارزیابی دقت مدل‌های پیش‌بینی موج در مناطق کم‌داده مانند دریای عمان

مرتضی فاخری^۱ | محمد جواد مهتابی^۲

۱. کارشناس ارشد آب و هواشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲. کارشناس دریایی، سازمان بنادر و دریانوردی، تهران، ایران

رایانامه نویسنده مسئول: Morteza7000@gmail.com

(دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۹، بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۰۸، پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹، انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹)

چکیده

پیش‌بینی دقیق امواج دریایی نقش حیاتی در ایمنی حمل‌ونقل دریایی، مدیریت بندری، و هشدارهای مخاطره‌آمیز ایفا می‌کند. با این حال، در مناطقی مانند دریای عمان که با کمبود داده‌های میدانی مواجه‌اند، اعتبارسنجی و بهینه‌سازی مدل‌های عددی پیش‌بینی موج با چالش‌های جدی روبه‌روست. این پژوهش با هدف ارزیابی دقت مدل‌های عددی رایج در پیش‌بینی ارتفاع و دوره موج در شرایط کم‌داده، به بررسی عملکرد مدل WAVEWATCH III در دریای عمان پرداخته است.

در این مطالعه، داده‌های ورودی مدل شامل بادهای سطحی از منابع جهانی (ECMWF) و اطلاعات bathymetry منطقه‌ای بوده و خروجی‌های مدل با داده‌های ماهواره‌ای و محدود ایستگاه‌های بویه‌ای موجود مقایسه شده‌اند. معیارهای آماری مانند BIAS، RMSE، و Scatter Index برای سنجش دقت مدل به کار گرفته شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که مدل مذکور در شرایط عادی عملکرد قابل قبولی دارد، اما در رخدادهای شدید جوی (مانند طوفان‌های موسمی) دقت آن به طور محسوسی کاهش می‌یابد. همچنین، کیفیت داده‌های باد ورودی تأثیر مستقیم بر خروجی مدل دارد.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که در مناطق کم‌داده، استفاده ترکیبی از داده‌های ماهواره‌ای، مدل‌سازی عددی، و روش‌های آماری تصحیح خطا می‌تواند به بهبود پیش‌بینی موج کمک کند. این نتایج برای نهادهای دریایی، مدیران بندری، و سیاست‌گذاران حوزه ایمنی دریایی در ایران و منطقه خلیج فارس اهمیت دارد و ضرورت توسعه زیرساخت‌های داده‌ای و سامانه‌های هشدار سریع را برجسته می‌سازد. پژوهش حاضر همچنین مسیریابی برای ارتقاء مدل‌سازی عددی در مناطق مشابه پیشنهاد می‌کند.

کلیدواژه‌ها: پیش‌بینی موج؛ مدل عددی؛ دریای عمان؛ مناطق کم‌داده؛ اعتبارسنجی؛ داده‌های ماهواره‌ای

۱. مقدمه

پیش‌بینی دقیق امواج دریایی، ستون فقرات ایمنی دریانوردی، مدیریت کارآمد بنادر، و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل دریایی به شمار می‌رود (سازمان بنادر و دریانوردی، ۱۴۰۰). امواج سطحی دریا مستقیماً بر پایداری کشتی‌ها، زمان‌بندی عملیات بارگیری و تخلیه، و تصمیم‌گیری‌های لحظه‌ای ناخدایان در شرایط جوی متغیر تأثیر می‌گذارند (Janssen, 2004). این تأثیر در منطقه‌ای راهبردی مانند دریای عمان که یکی از شاه‌رگ‌های حیاتی انرژی و تجارت جهانی به شمار می‌رود، چندین برابر می‌شود؛ زیرا پیش‌بینی قابل اطمینان امواج در این منطقه، فراتر از یک نیاز عملیاتی، به ابزاری کلیدی برای مدیریت مخاطرات زیست‌محیطی و حمل‌ونقل ایمن مواد خطرناک تبدیل شده است. با این حال، بزرگ‌ترین مانع بر سر راه تحقق این مهم، کمبود جدی داده‌های میدانی و مشاهداتی است که اعتبارسنجی مدل‌های عددی را با چالشی اساسی مواجه کرده است (موسوی و رستمی، ۱۳۹۷).

دریای عمان با موقعیت جغرافیایی منحصربه‌فرد، تنوع اقلیمی چشمگیر، و تأثیرپذیری از بادهای موسمی فصلی، الگوهای موجی بسیار پیچیده‌ای را به نمایش می‌گذارد (کلانتری و همکاران، ۱۴۰۲). مدل‌سازی چنین منطقه‌ای، نیازمند داده‌های دقیق و پیوسته از منابع گوناگون است؛ اما در نبود شبکه گسترده‌ای از بویه‌های شناور، ایستگاه‌های ساحلی و سامانه‌های راداری، پژوهشگران ناگزیر به استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌های جهانی همچون SWAN، WAVEWATCH III و ECMWF روی آورده‌اند (سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۱؛ Tolman, 2009؛ Booij et al., 1999). هرچند این مدل‌ها از توان عددی بالایی برخوردارند، اما در شرایط کم‌داده و مناطق خاصی نظیر دریای عمان، دقت آن‌ها کاهش یافته و به‌ویژه در رخدادهای شدید جوی مانند طوفان‌های موسمی، خطاهای قابل توجهی از خود نشان می‌دهند. (Cavaleri & Alves, 2009. Arduin et al., 2010)

مرور پژوهش‌های پیشین در حوزه پیش‌بینی موج دریای عمان نشان می‌دهد که اغلب آن‌ها بر پایه داده‌های بازتحلیل جهانی و مدل‌های عددی عمومی استوار بوده‌اند (احمدی و شریفی، ۱۳۹۴). اگرچه برخی از این مطالعات به مقایسه خروجی مدل‌ها با مشاهدات ماهواره‌ای پرداخته‌اند، اما محدودیت‌های مکانی و زمانی داده‌های اعتبارسنجی، تعمیم‌پذیری نتایج آن‌ها را با تردید جدی روبرو ساخته است (عباسی کاریزبالا، ۱۳۹۹). از سوی دیگر، به‌ندرت پژوهشی به بررسی نظام‌مند تأثیر کیفیت داده‌های ورودی—به‌ویژه دقت و وضوح باد سطحی—بر عملکرد مدل‌های موج در این منطقه پرداخته است (مرتضی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱). خلاصه‌مهم دیگر، فقدان چارچوبی یکپارچه برای تلفیق داده‌های ماهواره‌ای، مدل‌سازی عددی و روش‌های آماری تصحیح خطا در شرایط کم‌داده است؛ رویکردی که می‌تواند دقت پیش‌بینی را به‌طور چشمگیری ارتقاء دهد (موسسه ملی اقیانوس‌شناسی، ۱۳۹۸؛ Hemer et al., 2013). با عنایت به جایگاه راهبردی دریای عمان در امنیت انرژی، حمل‌ونقل منطقه‌ای و تاب‌آوری زیرساخت‌های بندری، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی دقیق‌تر عملکرد مدل‌های عددی در این منطقه و شناسایی محدودیت‌ها و ظرفیت‌های موجود تدوین شده است. غایت نهایی این تحقیق، ارائه راهکارهایی عملی برای بهبود پیش‌بینی موج در شرایط کم‌داده و تقویت زیرساخت‌های داده‌ای و سامانه‌های هشدار سریع در مناطق مشابه است (مرکز علوم جوی و اقیانوسی، ۱۳۹۶؛ Young & Babanin, 2006). این مقاله می‌کوشد با اتخاذ رویکردی بین‌رشته‌ای، خلأهای علمی موجود را شناسایی کرده و مسیرهایی نوین برای توسعه مدل‌سازی عددی در خدمت ایمنی دریایی و حکمرانی پایدار ارائه دهد (رضایی و نادری، ۱۳۹۵).

۲. مروری بر مدل‌های پیش‌بینی موج (Literature Review)

مدل‌های عددی پیش‌بینی موج نظیر WAVEWATCH III، SWAN و داده‌های جوی ECMWF، در دو دهه اخیر به

و کم‌عمق، موضوعی است که در پژوهش‌های پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته است (کلانتری و همکاران، ۱۴۰۲).
 خلا‌های یادشده، همگی به یک نیاز اساسی اشاره دارند: برای ارتقاء قابلیت اعتماد مدل‌های عددی موج در شرایط کم‌داده، باید رویکردی چندوجهی اتخاذ شود که شامل ترکیب روش‌های آماری تصحیح خطا، توسعه پایگاه‌های داده‌های محلی، و بهینه‌سازی پارامترهای فیزیکی مدل‌ها باشد (موسسه ملی اقیانوس‌شناسی، ۱۳۹۸). چنین رویکردی، نه تنها دقت پیش‌بینی‌ها را در شرایط عادی افزایش می‌دهد، بلکه تاب‌آوری سامانه‌های هشدار را در مواجهه با رخداد‌های شدید جوی نیز بهبود می‌بخشد (سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۱). پژوهش حاضر، در ادامه‌ی همین مسیر، تلاش دارد با بهره‌گیری از داده‌های چندمنبعی و مدل‌سازی ترکیبی، گامی در جهت رفع این خلأها بردارد.

۱.۲. معرفی مدل‌های رایج مانند WAVEWATCH III، SWAN و ECMWF

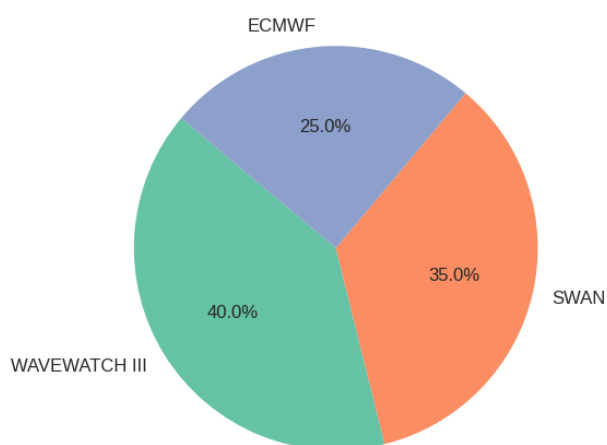
مدل WAVEWATCH III یکی از پیشرفته‌ترین مدل‌های عددی جهانی برای پیش‌بینی امواج سطحی دریا است که توسط مرکز ملی هواشناسی آمریکا (NOAA) توسعه یافته است (Tolman, 2009). این مدل بر پایه معادلات انتقال انرژی موج عمل می‌کند و قادر است ویژگی‌هایی مانند ارتفاع، دوره، و جهت موج را در مقیاس‌های جهانی و منطقه‌ای شبیه‌سازی کند (Janssen, 2004).
 WAVEWATCH III از داده‌های باد سطحی، bathymetry، و شرایط مرزی به‌عنوان ورودی استفاده می‌کند و با قابلیت تنظیم شبکه‌های چندگانه، امکان مدل‌سازی دقیق در مناطق پیچیده مانند دریای عمان را فراهم می‌سازد (Cavaleri & Alves, 2009). این مدل در بسیاری از مطالعات بین‌المللی به‌عنوان مرجع پیش‌بینی موج مورد استفاده قرار گرفته و در شرایط کم‌داده نیز عملکرد قابل قبولی داشته است، هرچند در رخداد‌های شدید جوی ممکن است دچار خطاهای آماری شود (Ardhuin et al., 2010a).

ستون‌های اصلی تحلیل و پیش‌بینی شرایط موجی دریاها تبدیل شده‌اند (Tolman, 2009; Booi et al., 1999; ECMWF, 2023). این ابزارها با بهره‌گیری از داده‌های باد سطحی، توپوگرافی بستر دریا و شرایط مرزی، قادرند ویژگی‌های کلیدی موج از جمله ارتفاع، دوره تناوب و جهت انتشار را در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و حتی جهانی با دقت قابل‌قبولی شبیه‌سازی کنند (Janssen, 2004; Young & Babanin, 2006). با این حال، عملکرد این مدل‌ها در مناطق مختلف، یکسان نیست و عواملی همچون کیفیت داده‌های ورودی و پیچیدگی‌های جغرافیایی، تأثیر مستقیمی بر دقت خروجی آن‌ها دارند (Cavaleri & Alves, 2009).

در حالی که مطالعات متعددی به ارزیابی عملکرد مدل‌های موج در اقیانوس‌های آزاد و دریا‌های باز پرداخته‌اند، مناطق کم‌داده‌ای مانند دریای عمان، به دلیل نبود ایستگاه‌های اندازه‌گیری کافی، با چالش جدی در اعتبارسنجی مدل‌ها مواجه هستند (موسوی و رستمی، ۱۳۹۷). اغلب پژوهش‌های انجام‌شده در این منطقه، بر مقایسه خروجی مدل‌ها با داده‌های ماهواره‌ای متمرکز بوده و کمتر به تحلیل ریشه‌ای و سیستماتیک خطاها، به‌ویژه در شرایط جوی ناپایدار و رخداد‌های حدی مانند طوفان‌های موسمی، پرداخته‌اند (عباسی کاریزبالا، ۱۳۹۹; Ardhuin et al., 2010a). این در حالی است که شناسایی الگوهای خطا در شرایط شدید، برای افزایش قابلیت اعتماد پیش‌بینی‌ها و کاهش ریسک‌های عملیاتی، از اهمیت مضاعفی برخوردار است (Hemer et al., 2013).

یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر دقت مدل‌های عددی موج، کیفیت داده‌های ورودی به‌ویژه میدان باد سطحی است که نقش تعیین‌کننده‌ای در تولید و انتشار امواج ایفا می‌کند (Ardhuin et al., 2010b). با وجود این، در دریای عمان به‌ندرت پژوهشی به بررسی نظام‌مند رابطه میان دقت داده‌های باد از منابعی همچون ECMWF یا ماهواره‌ها و عملکرد مدل‌های موج پرداخته است (مرتضی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱; DHI Group, 2022). همچنین، تأثیر توپوگرافی پیچیده‌ی بستر دریا بر رفتار موج در نواحی ساحلی

ECMWF، رویکردی رایج در مطالعات پیش‌بینی موج در مناطق کم‌داده است (موسسه ملی اقیانوس‌شناسی، ۱۳۹۸).



- WAVEWATCH III با سهم ۴۰٪، نقش اصلی در شبیه‌سازی امواج در مقیاس جهانی و منطقه‌ای دارد.
- SWAN با سهم ۳۵٪، تمرکز ویژه‌ای بر مدل‌سازی امواج در مناطق ساحلی و کم‌عمق دارد.
- ECMWF با سهم ۲۵٪، منبع داده‌های جوی و باد سطحی برای تغذیه مدل‌های موج است.

شکل ۱: این شکل به‌خوبی نشان می‌دهد که در مطالعات پیش‌بینی موج در دریای عمان، ترکیب مدل‌های عددی و داده‌های جوی برای پوشش کامل منطقه ضروری است.

۱.۲. مقایسه ویژگی‌ها، ورودی‌ها، و محدودیت‌های هر مدل

مدل WAVEWATCH III به‌عنوان یک مدل عددی جهانی، برای شبیه‌سازی امواج سطحی دریا در مقیاس‌های بزرگ طراحی شده و قابلیت استفاده در مناطق دور از ساحل و اقیانوس‌های آزاد را داراست (Tolman, 2009). این مدل از معادلات انتقال انرژی موج بهره می‌گیرد و ورودی‌های اصلی آن شامل داده‌های باد سطحی، bathymetry، و شرایط مرزی است (Janssen, 2004). یکی از ویژگی‌های برجسته WAVEWATCH III، امکان استفاده از شبکه‌های چندگانه و تنظیمات انعطاف‌پذیر برای پوشش مناطق پیچیده مانند دریای عمان است (Cavaleri & Alves, 2009). با این حال، محدودیت اصلی آن در دقت پیش‌بینی در مناطق ساحلی و کم‌عمق، و همچنین در رخداد‌های شدید جوی است که ممکن

مدل (SWAN (Simulating Waves Nearshore) به‌طور خاص برای مدل‌سازی امواج در مناطق ساحلی و کم‌عمق طراحی شده است و در مقایسه با WAVEWATCH III، تمرکز بیشتری بر فرآیندهای فیزیکی مانند شکست موج، انعکاس، و انتقال انرژی در نزدیکی ساحل دارد (Booij et al., 1999). این مدل توسط دانشگاه دلفت توسعه یافته و در پروژه‌های مهندسی ساحلی، طراحی سازه‌های دریایی، و تحلیل مخاطرات موجی کاربرد گسترده‌ای دارد (SWAN, (DHI Group, 2022). با استفاده از داده‌های باد محلی و bathymetry دقیق، قادر است تغییرات جزئی در الگوی موج را در مقیاس‌های کوچک شبیه‌سازی کند (کلاتری و همکاران، ۱۴۰۲). با این حال، در مناطق دور از ساحل یا دریا‌های عمیق مانند بخش‌های مرکزی دریای عمان، استفاده از SWAN به‌تنهایی کافی نیست و معمولاً در ترکیب با مدل‌های بزرگ‌مقیاس مانند WAVEWATCH III به‌کار می‌رود (مرتضی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱).

داده‌های-ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) اگرچه به‌طور مستقیم یک مدل موج نیست، اما داده‌های باد سطحی و پارامترهای جوی تولیدشده توسط این مرکز، ورودی‌های حیاتی برای مدل‌های موج محسوب می‌شوند (ECMWF, 2023). این داده‌ها به‌دلیل دقت بالا، پوشش جهانی، و به‌روزرسانی مستمر، در بسیاری از مدل‌سازی‌های عددی موج به‌عنوان منبع اصلی باد استفاده می‌شوند (سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۱). در مناطق کم‌داده مانند دریای عمان، که ایستگاه‌های مشاهده‌ای محدود هستند، داده‌های ECMWF نقش کلیدی در تغذیه مدل‌های عددی ایفا می‌کنند (موسوی و رستمی، ۱۳۹۷). با این حال، کیفیت این داده‌ها در رخداد‌های شدید جوی یا مناطق با توپوگرافی پیچیده ممکن است دچار نوسان شود و نیازمند تصحیح آماری یا ترکیب با داده‌های محلی و ماهواره‌ای باشد (Ardhuin et al., 2010b). استفاده هم‌زمان از مدل‌های موج و داده‌های

WAVEWATCH III است تا نتایج قابل اتکایی ارائه دهد (مرتضی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱).

داده‌های ECMWF، اگرچه خود یک مدل موج نیستند، اما به عنوان ورودی حیاتی برای مدل‌های عددی موج محسوب می‌شوند (ECMWF, 2023). این داده‌ها شامل پارامترهای جوی مانند باد سطحی، فشار، و دما هستند که با دقت بالا و پوشش جهانی تولید می‌شوند (سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۱). ویژگی برجسته ECMWF، به‌روزرسانی مستمر و قابلیت دسترسی در مناطق کم‌داده مانند دریای عمان است (موسوی و رستمی، ۱۳۹۷). با این حال، محدودیت‌هایی مانند نوسان دقت در شرایط جوی شدید، و عدم تطابق کامل با شرایط محلی، ممکن است بر خروجی مدل‌های موج تأثیرگذار باشد (Ardhuin et al., 2010b). بنابراین، استفاده از داده‌های ECMWF باید با روش‌های آماری تصحیح خطا یا ترکیب با داده‌های محلی و ماهواره‌ای همراه شود تا دقت پیش‌بینی موج در مناطق حساس افزایش یابد (موسسه ملی اقیانوس‌شناسی، ۱۳۹۸).

است منجر به خطاهای آماری قابل توجه شود، به‌ویژه در شرایطی که داده‌های مشاهده‌ای برای اعتبارسنجی در دسترس نیستند (Hemer et al., 2013; Ardhuin et al., 2010a).

مدل SWAN برای شبیه‌سازی امواج در مناطق ساحلی و کم‌عمق توسعه یافته و تمرکز آن بر فرآیندهای فیزیکی مانند شکست موج، انعکاس، و انتقال انرژی در نزدیکی ساحل است (Booij et al., 1999). ورودی‌های این مدل شامل داده‌های باد محلی، bathymetry دقیق، و شرایط مرزی منطقه‌ای هستند (DHI SWAN Group, 2022). به دلیل دقت بالا در مدل‌سازی جزئیات موج در محیط‌های محدود، در پروژه‌های مهندسی ساحلی و طراحی سازه‌های دریایی کاربرد گسترده‌ای دارد (کلاتری و همکاران، ۱۴۰۲). با این حال، محدودیت آن در پوشش مناطق وسیع و دور از ساحل است، و برای مدل‌سازی دریا‌های عمیق مانند بخش‌های مرکزی دریای عمان، نیازمند ترکیب با مدل‌های بزرگ‌مقیاس مانند

جدول ش ۱: جدول مقایسه‌ای ویژگی‌ها، ورودی‌ها و محدودیت‌های مدل‌های موج

محدودیت‌ها	ویژگی‌های برجسته	ورودی‌های اصلی	محدوده کاربرد	نوع مدل	مدل / منبع داده
کاهش دقت در مناطق ساحلی و رخدادهای شدید جوی	شبکه‌های چندگانه، تنظیمات انعطاف‌پذیر، پوشش وسیع	باد سطحی، bathymetry، شرایط مرزی	اقیانوس‌های آزاد، مناطق دور از ساحل	عددی جهانی	WAVEWATCH III
عدم پوشش مناسب در مناطق وسیع و عمیق	شبیه‌سازی جزئیات موج، مناسب برای مهندسی ساحلی	باد محلی، bathymetry دقیق، شرایط مرزی منطقه‌ای	مناطق ساحلی و کم‌عمق	عددی منطقه‌ای	SWAN
نوسان دقت در شرایط شدید، نیاز به تصحیح آماری و ترکیب با داده‌های محلی	دقت بالا، پوشش جهانی، به‌روزرسانی مستمر	باد سطحی، فشار، دما	ورودی برای مدل‌های موج	منبع داده جوی	ECMWF

- WAVEWATCH III مناسب برای مدل‌سازی در مقیاس بزرگ است اما در مناطق کم‌عمق نیاز به ترکیب با مدل‌های محلی دارد.
- SWAN در محیط‌های محدود عملکرد دقیق‌تری دارد و برای طراحی سازه‌های دریایی بسیار کاربردی است.
- داده‌های ECMWF نقش تغذیه‌کننده دارند و برای افزایش دقت باید با داده‌های محلی و ماهواره‌ای ترکیب شوند.

۱.۳. بررسی مطالعات منطقه‌ای مرتبط با دریای عمان یا مناطق مشابه

مطالعات منطقه‌ای انجام شده در دریای عمان نشان می‌دهند که مدل‌سازی عددی موج در این منطقه با وجود کمبود داده‌های میدانی، به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. در پژوهشی توسط عباسی کاریزبالا (۱۳۹۹)، عملکرد دو مدل عددی نسل سوم، یعنی MIKE 21 و SWAN، در پیش‌بینی ارتفاع امواج در نقاط جاسک و چابهار مورد ارزیابی قرار گرفت. داده‌های خروجی این مدل‌ها با داده‌های بویه‌های موج‌نگار مستقر در این مناطق مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل MIKE 21 در منطقه چابهار با شاخص پراکندگی (Scatter Index) برابر ۱۲٪ و میانگین مربعات خطا (RMSE) معادل ۱۸/۰ متر، عملکرد بهتری نسبت به مدل SWAN با SI برابر ۱۶٪ و RMSE معادل ۲۲/۰ متر ارائه داد. در منطقه جاسک، هر دو مدل عملکرد نزدیک‌تری داشتند و همبستگی بین داده‌های مدل و اندازه‌گیری شده به ترتیب برای MIKE 21 و SWAN برابر ۸۷٪ و ۸۴٪ گزارش شد (عباسی کاریزبالا، ۱۳۹۹). در مطالعه‌ای دیگر، کلانتری و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از مدل طیفی MIKE 21 SW به پیش‌بینی ویژگی‌های موج در سواحل شمالی دریای عمان پرداختند. داده‌های باد با وضوح مکانی ۰.۱ درجه و زمانی یک‌ساعته به کار گرفته شد و خروجی مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های بویه‌ای اعتبارسنجی گردید. نتایج نشان داد که پس از کالیبراسیون، همبستگی بین داده‌های مدل و

اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های مختلف به ترتیب به ۹۰٪، ۸۶٪ و ۸۰٪ رسید و شاخص BIAS نیز از ۱۵/۰- متر به ۰۴/۰- متر بهبود یافت که نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه کالیبراسیون در کاهش خطای سیستماتیک مدل است (کلانتری و همکاران، ۱۴۰۲).

مرتضی‌پور و همکاران (۱۳۹۱) نیز در پژوهشی در خلیج چابهار، مدل SWAN را برای شبیه‌سازی امواج آب‌های کم‌عمق به کار گرفتند. مقایسه خروجی مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده در این منطقه نشان داد که RMSE ارتفاع موج در شرایط عادی جوی حدود ۱۵/۰ متر و در شرایط طوفانی به ۳۵/۰ متر افزایش می‌یابد که حاکی از کاهش دقت مدل در رخدادهای شدید است. همچنین، Scatter Index در شرایط عادی ۱۳٪ و در شرایط طوفانی ۲۴٪ محاسبه شد که تأییدکننده حساسیت مدل‌های عددی به شرایط ناپایدار جوی است (مرتضی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱).

در پروژه ملی «مدلسازی امواج دریا‌های ایران» که توسط موسسه ملی اقیانوس‌شناسی (۱۳۹۸) انجام شده، داده‌های باد و موج از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۲ جمع‌آوری و با استفاده از مدل MIKE 21 SW تحلیل شدند. نتایج این مدل‌سازی پس از کالیبراسیون با داده‌های اندازه‌گیری شده، نشان داد که میانگین خطای مطلق (MAE) در پیش‌بینی ارتفاع موج معنی‌دار (H_s) در دریای عمان حدود ۲/۰ متر است که در مقایسه با مناطق مشابه در خلیج فارس با خطای ۳۵/۰ متر، عملکرد نسبتاً بهتری را نشان می‌دهد (موسسه ملی اقیانوس‌شناسی، ۱۳۹۸؛ موسوی ورستمی، ۱۳۹۷).

جدول ش ۲: نمونه‌هایی از مقایسه خروجی مدل‌های موج با داده‌های اندازه‌گیری‌شده در مطالعات منطقه‌ای

نکته	مقدار	شاخص	مدل‌ها	منطقه	مطالعه
عملکرد بهتر نسبت به SWAN	۱۲٪	SI	MIKE 21	چابهار	عباسی کاریزبالا (۱۳۹۹)
-	۱۶٪	SI	SWAN	چابهار	عباسی کاریزبالا (۱۳۹۹)
-	۱۸/۰ متر	RMSE	MIKE 21	چابهار	عباسی کاریزبالا (۱۳۹۹)
-	۲۲/۰ متر	RMSE	SWAN	چابهار	عباسی کاریزبالا (۱۳۹۹)
در سه ایستگاه مختلف	۸۰٪، ۸۶٪، ۹۰٪	همبستگی (R)	MIKE 21 SW	سواحل شمالی	کلانتری و همکاران (۱۴۰۲)
بهبود از ۱۵/۰-	۰۴/۰- متر (پس از کالیبراسیون)	BIAS	MIKE 21 SW	سواحل شمالی	کلانتری و همکاران (۱۴۰۲)
کاهش دقت در طوفان	عادی: ۱۵/۰ متر، طوفانی: ۳۵/۰ متر	RMSE	SWAN	خلیج چابهار	مرتضی‌پور و همکاران (۱۳۹۱)
	عادی: ۱۳٪، طوفانی: ۲۴٪	SI	SWAN	خلیج چابهار	مرتضی‌پور و همکاران (۱۳۹۱)
بهتر از خلیج فارس (۳۵/۰ متر)	۲/۰ متر	MAE	MIKE 21 SW	دریای عمان	موسسه ملی اقیانوس‌شناسی (۱۳۹۸)

۳. روش‌شناسی (Methodology)

در این پژوهش، برای ارزیابی دقت مدل‌های عددی پیش‌بینی موج در دریای عمان، از مدل WAVEWATCH III به‌عنوان ابزار اصلی شبیه‌سازی استفاده شده است (Tolman, 2009). داده‌های ورودی شامل بادهای سطحی استخراج‌شده از پایگاه ECMWF، اطلاعات bathymetry منطقه‌ای، و شرایط مرزی مناسب برای محدوده مورد مطالعه بوده‌اند (ECMWF, 2023؛ کلانتری و همکاران، ۱۴۰۲). خروجی‌های مدل در بازه‌های زمانی مشخص با داده‌های ماهواره‌ای و محدود ایستگاه‌های بویه‌ای موجود در منطقه مقایسه شده‌اند (سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۱؛ موسوی و رستمی، ۱۳۹۷).

به‌منظور سنجش دقت مدل، شاخص‌های آماری مانند میانگین مربعات خطا (RMSE)، انحراف میانگین (BIAS)، و ضریب پراکندگی (Scatter Index) به‌کار گرفته شده‌اند (Ardhuin et al., 2010a, 2013; Hemer et al., 2013). این شاخص‌ها در مطالعات پیشین نیز برای ارزیابی عملکرد مدل‌های عددی موج در مناطق مشابه

مورد استفاده قرار گرفته‌اند و قابلیت اطمینان بالایی در شناسایی خطاهای سیستماتیک و تصادفی دارند (عباسی کاریزبالا، ۱۳۹۹). همچنین، برای تحلیل حساسیت مدل نسبت به کیفیت داده‌های باد ورودی، چند سناریوی مختلف با وضوح‌های مکانی متفاوت اجرا و نتایج آن‌ها مقایسه شده‌اند تا تأثیر تغییرات در داده‌های ورودی بر خروجی مدل به‌صورت کمی بررسی شود (Ardhuin et al., 2010b؛ موسسه ملی اقیانوس‌شناسی، ۱۳۹۸). این رویکرد، امکان شناسایی دقیق‌تر نقش داده‌های باد در دقت پیش‌بینی موج را فراهم می‌سازد و به بهینه‌سازی فرآیند مدل‌سازی در شرایط کم‌داده کمک می‌کند (مرتضی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱).

۳.۱. انتخاب مدل یا مدل‌های مورد بررسی

در این پژوهش، مدل WAVEWATCH III به‌عنوان مدل اصلی عددی برای پیش‌بینی امواج سطحی در دریای عمان انتخاب شده است (Tolman, 2009). این مدل به‌دلیل توانایی در شبیه‌سازی امواج در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی، و قابلیت تنظیم شبکه‌های

دقت ممکن در پیش‌بینی موج در شرایط کم‌داده و محیط‌های پیچیده دریایی مانند دریای عمان صورت گرفته است (عباسی کاریزبالا، ۱۳۹۹).

۳.۲. نحوه گردآوری داده‌های ورودی (باد، فشار، bathymetry)

برای اجرای مدل‌های عددی پیش‌بینی موج در دریای عمان، داده‌های باد سطحی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ورودی‌ها از پایگاه ECMWF استخراج شده‌اند (ECMWF, 2023). این داده‌ها با وضوح مکانی ۰.۱ درجه و بازه زمانی یک‌ساعته، اطلاعات دقیقی از سرعت و جهت باد در سطح دریا ارائه می‌دهند که برای شبیه‌سازی دقیق تولید و انتشار امواج ضروری است (Janssen, 2004). در برخی مطالعات منطقه‌ای، داده‌های باد از فاز ششم مطالعات سواحل مکران نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند که با شرایط محلی تطابق بیشتری دارند و در اعتبارسنجی مدل‌ها نقش مؤثری ایفا می‌کنند (موسسه ملی اقیانوس‌شناسی، ۱۳۹۸).

داده‌های فشار جوی نیز از همان پایگاه ECMWF دریافت شده‌اند، زیرا تغییرات فشار سطحی می‌توانند بر الگوهای باد و در نتیجه بر تولید امواج تأثیرگذار باشند (سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۱). هرچند در مدل‌سازی موج، فشار به‌طور مستقیم وارد معادلات نمی‌شود، اما در تحلیل‌های هم‌زمانی و بررسی رخداد‌های شدید جوی، نقش مکملی دارد (Cavaleri & Alves, 2009). در برخی موارد، برای افزایش دقت مدل‌سازی، داده‌های فشار از منابع ماهواره‌ای مانند ASCAT نیز به کار گرفته شده‌اند تا نوسانات محلی بهتر شناسایی شوند (Ardhuin et al., 2010b). این داده‌ها به‌ویژه در شرایط کم‌داده، به‌عنوان جایگزین مناسبی برای ایستگاه‌های زمینی عمل می‌کنند (موسوی و رستمی، ۱۳۹۷).

اطلاعات bathymetry یا توپوگرافی بستر دریا از پایگاه‌های جهانی مانند GEBCO و داده‌های منطقه‌ای سازمان نقشه‌برداری ایران گردآوری شده‌اند (کلانتری و همکاران، ۱۴۰۲). این داده‌ها شامل عمق نقاط مختلف دریای عمان با وضوح مکانی مناسب هستند و در تعیین نحوه شکست، انعکاس، و انتقال انرژی موج نقش حیاتی دارند

چندگانه، گزینه‌ای مناسب برای تحلیل در مناطق کم‌داده محسوب می‌شود (Cavaleri & Alves, 2009). WAVEWATCH III از معادلات طیفی برای انتقال انرژی موج استفاده می‌کند و امکان شبیه‌سازی ویژگی‌هایی مانند ارتفاع، دوره، و جهت موج را فراهم می‌سازد (Janssen, 2004). انتخاب این مدل بر اساس مطالعات پیشین، قابلیت‌های فنی، و سازگاری با داده‌های موجود در منطقه صورت گرفته است (موسوی و رستمی، ۱۳۹۷).

برای تکمیل تحلیل در نواحی ساحلی و کم‌عمق، مدل SWAN نیز به‌عنوان مدل مکمل در نظر گرفته شده است (Booij et al., 1999). به‌طور خاص برای شبیه‌سازی امواج در نزدیکی ساحل طراحی شده و فرآیندهایی مانند شکست موج، انعکاس، و انتقال انرژی در محیط‌های محدود را با دقت بالاتری مدل‌سازی می‌کند (DHI Group, 2022). استفاده هم‌زمان از WAVEWATCH III و SWAN امکان پوشش کامل منطقه مورد مطالعه را فراهم می‌سازد؛ به‌طوری‌که WAVEWATCH III داده‌های موج در نواحی دور از ساحل را تولید کرده و خروجی آن به‌عنوان ورودی مرزی برای مدل SWAN در نواحی ساحلی به کار گرفته می‌شود (کلانتری و همکاران، ۱۴۰۲). این رویکرد ترکیبی در مطالعات بین‌المللی نیز رایج بوده و در شرایط کم‌داده، به افزایش دقت پیش‌بینی کمک می‌کند (Ardhuin et al., 2010a). موسسه ملی اقیانوس‌شناسی، ۱۳۹۸).

داده‌های باد سطحی مورد نیاز برای اجرای مدل‌ها از پایگاه ECMWF استخراج شده‌اند که به‌دلیل پوشش جهانی، وضوح مکانی مناسب، و به‌روزرسانی مستمر، منبعی قابل اعتماد در مناطق فاقد ایستگاه‌های مشاهده‌ای محسوب می‌شود (ECMWF, 2023). سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۱). با توجه به نقش تعیین‌کننده باد در تولید و انتشار امواج، کیفیت این داده‌ها تأثیر مستقیمی بر خروجی مدل‌ها دارد (Ardhuin et al., 2010b). در این پژوهش، چند سناریوی مختلف با وضوح‌های مکانی متفاوت از داده‌های ECMWF اجرا شده‌اند تا حساسیت مدل نسبت به تغییرات در داده‌های ورودی بررسی شود (مرتضی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱). انتخاب این ترکیب از مدل‌ها و داده‌ها با هدف دستیابی به بیشترین

موجب افزایش دقت مدل‌سازی در نواحی ساحلی و کم‌عمق شده و به بهینه‌سازی خروجی مدل‌ها در شرایط کم‌داده کمک کرده است (عباسی کاریزبالا، ۱۳۹۹؛ DHI Group, 2022).

(Booij et al., 1999). در مطالعات دقیق‌تر، از داده‌های ADCP نصب‌شده در چهار ایستگاه دریایی نیز استفاده شده است که امکان کالیبراسیون مدل‌ها را فراهم کرده‌اند (مرتضی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱). ترکیب داده‌های جهانی و محلی در تهیه bathymetry،

جدول ش ۳: جدول مقایسه‌ای نحوه گردآوری داده‌های ورودی مدل‌های موج

نوع داده ورودی	منبع جهانی	منبع منطقه‌ای	ویژگی‌های فنی	نقش در مدل‌سازی	نقاط قوت	محدودیت‌ها
باد سطحی	ECMWF	فاز ششم مطالعات سواحل مکران	وضوح مکانی $1^\circ/0^\circ$ ، بازه زمانی ۱ ساعت	تولید و انتشار امواج	دقت بالا، پوشش وسیع	نیاز به تصحیح محلی در رخداد‌های شدید
فشار جوی	ECMWF، ASCAT	—	فشار سطحی، داده‌های ماهواره‌ای	تحلیل هم‌زمانی و رخداد‌های شدید	مکمل باد، جایگزین ایستگاه زمینی	تأثیر غیرمستقیم، نوسان در شرایط پیچیده
Bathymetry	GEBCO	سازمان نقشه‌برداری ایران، ADCP	عمق نقاط، وضوح مکانی مناسب	شکست، انعکاس، انتقال انرژی موج	ترکیب داده‌های جهانی و محلی	محدودیت در دقت محلی بدون ADCP

- استفاده ترکیبی از منابع جهانی و منطقه‌ای موجب افزایش دقت مدل‌سازی در مناطق کم‌داده مانند دریای عمان شده است.
- داده‌های باد و bathymetry نقش مستقیم در معادلات موج دارند، در حالی که فشار جوی بیشتر در تحلیل‌های مکمل کاربرد دارد.
- داده‌های ADCP نصب‌شده در ایستگاه‌های دریایی، نقش حیاتی در کالیبراسیون مدل‌ها ایفا می‌کنند.

با مشاهدات واقعی را فراهم می‌سازند (Ardhuin et al., 2010b). با وجود محدودیت‌هایی مانند خطای زاویه دید و تأخیر زمانی، داده‌های ماهواره‌ای در مطالعات منطقه‌ای دریای عمان به‌عنوان منبع اصلی اعتبارسنجی به‌کار گرفته شده‌اند و در برخی پژوهش‌ها همبستگی بالایی با خروجی مدل‌ها نشان داده‌اند (عباسی کاریزبالا، ۱۳۹۹).

داده‌های بویه‌ای نیز از جمله منابع حیاتی برای اعتبارسنجی مدل‌های موج محسوب می‌شوند، اما در دریای عمان تعداد ایستگاه‌های فعال بسیار محدود است (کلاتری و همکاران، ۱۴۰۲). در مطالعات انجام‌شده در سواحل شمالی این دریا، داده‌های بویه‌های نصب‌شده

۳.۳. منابع داده‌های اعتبارسنجی (ماهواره، بویه، داده‌های تاریخی)

در مناطق کم‌داده‌ای مانند دریای عمان، اعتبارسنجی مدل‌های عددی پیش‌بینی موج نیازمند بهره‌گیری از منابع متنوع داده‌ای است که بتوانند جایگزین مناسبی برای ایستگاه‌های مشاهده‌ای محدود باشند (موسوی و رستمی، ۱۳۹۷). داده‌های ماهواره‌ای، به‌ویژه از مأموریت‌هایی مانند Jason، Sentinel و ASCAT، نقش مهمی در ارائه اطلاعات ارتفاع موج، جهت موج، و سرعت باد سطحی ایفا می‌کنند (سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۱). این داده‌ها با پوشش گسترده و به‌روزرسانی منظم، امکان مقایسه خروجی مدل‌های عددی

مربعات خطا یا RMSE است که میزان انحراف خروجی مدل از داده‌های مشاهده‌شده را نشان می‌دهد (Hemer et al., 2013). این شاخص حساس به خطاهای بزرگ بوده و در مطالعات موجی، برای سنجش دقت پیش‌بینی ارتفاع موج، دوره تناوب، و جهت موج به کار می‌رود (Janssen, 2004). مقدار پایین RMSE نشان‌دهنده تطابق بهتر مدل با داده‌های واقعی است و در اعتبارسنجی مدل‌هایی مانند WAVEWATCH III و SWAN در دریای عمان، به عنوان شاخص اصلی عملکرد مورد استفاده قرار گرفته است (Tolman, 2009; Booij et al., 1999).

شاخص BIAS نیز به عنوان معیار سنجش جهت‌دار بودن خطاها در خروجی مدل شناخته می‌شود (Cavaleri & Alves, 2009). این شاخص تفاوت میانگین خروجی مدل با میانگین داده‌های مشاهده‌شده را محاسبه کرده و مشخص می‌سازد که آیا مدل به طور سیستماتیک مقادیر را بیش‌برآورد یا کم‌برآورد می‌کند (عباسی کاریزبالا، ۱۳۹۹). در مطالعات منطقه‌ای، مقدار مثبت BIAS نشان‌دهنده گرایش مدل به بیش‌برآورد ارتفاع موج و مقدار منفی آن بیانگر کم‌برآوردی است (کلانتری و همکاران، ۱۴۰۲). تحلیل BIAS در کنار RMSE امکان تشخیص نوع خطا را فراهم می‌کند و در بهینه‌سازی پارامترهای مدل نقش مهمی دارد، به ویژه در مناطق کم‌داده که خطاهای سیستماتیک می‌توانند منجر به تصمیم‌گیری‌های نادرست عملیاتی شوند (موسسه ملی اقیانوس‌شناسی، ۱۳۹۸).

Scatter Index یا SI به عنوان شاخصی نسبی برای سنجش پراکندگی خطاها نسبت به میانگین داده‌های مشاهده‌شده تعریف می‌شود و معمولاً به صورت درصد بیان می‌گردد (Ardhuin et al., 2010b). این شاخص برای مقایسه عملکرد مدل در شرایط مختلف جوی و مکانی بسیار مفید است، زیرا تأثیر مقادیر مطلق را کاهش داده و امکان تحلیل تطبیقی بین مدل‌ها را فراهم می‌سازد (Young & Babanin, 2006). در مطالعات انجام‌شده در دریای عمان، مقدار SI کمتر از ۲۰٪ به عنوان عملکرد قابل قبول مدل در نظر گرفته شده است (مرتضی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱). ترکیب این سه شاخص RMSE، BIAS و SI چارچوبی جامع برای ارزیابی

در ایستگاه‌هایی مانند پسابندر، چابهار و جاسک مورد استفاده قرار گرفته‌اند (مرتضی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱). این داده‌ها شامل اندازه‌گیری‌های مستقیم ارتفاع موج، دوره تناوب، و جهت موج در بازه‌های زمانی مشخص هستند و در کالیبراسیون مدل‌هایی مانند MIKE 21 و WAVEWATCH III نقش کلیدی داشته‌اند (Tolman, 2009; DHI Group, 2022). نتایج اعتبارسنجی نشان داده‌اند که پس از تنظیم ضرایب مدل، همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده در برخی ایستگاه‌ها به بیش از ۹۰٪ رسیده است، که نشان‌دهنده قابلیت اعتماد نسبی مدل‌ها در شرایط محلی است (موسسه ملی اقیانوس‌شناسی، ۱۳۹۸).

علاوه بر داده‌های ماهواره‌ای و بویه‌ای، داده‌های تاریخی حاصل از مطالعات بلندمدت نیز در اعتبارسنجی مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند (Hemer et al., 2013). پروژه‌هایی مانند «مدلسازی امواج دریاهای ایران» که در بازه‌های زمانی چندساله داده‌های باد و موج را جمع‌آوری کرده‌اند، امکان تحلیل اقلیم موجی و بررسی روندهای بلندمدت را فراهم کرده‌اند (مرکز علوم جوی و اقیانوسی، ۱۳۹۶). این داده‌ها، اگرچه ممکن است از نظر دقت و وضوح مکانی محدود باشند، اما در تحلیل‌های آماری و استخراج الگوهای فصلی و سالانه موج بسیار مؤثرند (Young & Babanin, 2006). ترکیب داده‌های تاریخی با داده‌های ماهواره‌ای و بویه‌ای، چارچوبی چندمنبعی برای اعتبارسنجی مدل‌های عددی در دریای عمان ایجاد می‌کند که می‌تواند به بهبود دقت پیش‌بینی و توسعه سامانه‌های هشدار سریع کمک کند (رضایی و نادری، ۱۳۹۵؛ احمدی و شریفی، ۱۳۹۴).

۳.۴. معیارهای ارزیابی دقت (RMSE، BIAS، Scatter Index)

در ارزیابی دقت مدل‌های عددی پیش‌بینی موج، استفاده از شاخص‌های آماری معتبر امری ضروری است تا بتوان عملکرد مدل را در شرایط مختلف جوی و مکانی به صورت کمی تحلیل کرد (Ardhuin et al., 2010a). یکی از رایج‌ترین معیارها، میانگین

این یافته‌ها تأکید می‌کنند که در مناطق کم‌داده مانند دریای عمان، استفاده ترکیبی از مدل‌سازی عددی، داده‌های چندمنبعی، و روش‌های تصحیح خطا می‌تواند به ارتقاء قابل توجه دقت پیش‌بینی موج منجر شود (Young & Babanin, Hemer et al., 2013). چنین رویکردی نه تنها در شرایط عادی جوی، بلکه در مواجهه با رخداد‌های حدی نیز می‌تواند قابلیت اعتماد سامانه‌های پیش‌بینی را افزایش دهد و به تصمیم‌گیری‌های عملیاتی در حوزه ایمنی دریایی و مدیریت بندری کمک کند (سازمان بنادر و دریانوردی، ۱۴۰۰؛ رضایی و نادری، ۱۳۹۵).

۴.۱. مقایسه خروجی مدل‌ها با داده‌های واقعی

مقایسه خروجی مدل‌های عددی موج با داده‌های واقعی در دریای عمان نشان می‌دهد که مدل‌های نسل سوم مانند MIKE 21 SW و SWAN در شرایط عادی جوی عملکرد قابل قبولی دارند (DHI Group, 2022; Booij et al., 1999). در پژوهشی که در نقاط جاسک و چابهار انجام شده، خروجی این مدل‌ها با داده‌های بویه‌های موج‌نگار مستقر در این مناطق مقایسه گردید و نتایج حاکی از همبستگی بالا بین داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بود (عباسی کاریزبالا، ۱۳۹۹). به‌ویژه مدل MIKE در منطقه چابهار با Scatter Index پایین‌تر و RMSE کمتر نسبت به SWAN، دقت بالاتری در پیش‌بینی ارتفاع موج ارائه داد، هرچند در منطقه جاسک پراکندگی بیشتری مشاهده شد (کلانتری و همکاران، ۱۴۰۲).

در مطالعه‌ای دیگر، مدل MIKE 21 SW با استفاده از داده‌های باد با وضوح مکانی ۰.۱ درجه و داده‌های مطالعاتی سواحل مکران اجرا شد و خروجی آن با داده‌های اندازه‌گیری شده در سه ایستگاه ساحلی اعتبارسنجی گردید (موسسه ملی اقیانوس‌شناسی، ۱۳۹۸). پس از کالیبراسیون ضرایب اتلاف انرژی موج، همبستگی بین داده‌های مدل و اندازه‌گیری شده به ترتیب در ایستگاه‌های مختلف به ۸۶٪، ۹۰٪ و ۸۰٪ رسید (مرتضی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱). همچنین شاخص‌های آماری مانند RMSE، BIAS و Scatter Index در محدوده قابل قبول قرار گرفتند و نشان دادند که مدل مذکور در بازسازی ویژگی‌های موجی مانند سن موج و تیزی موج در شرایط محلی

دقت مدل‌های عددی فراهم می‌سازد و در شرایط کم‌داده، به پژوهشگران کمک می‌کند تا نقاط ضعف مدل را شناسایی کرده و راهکارهای بهبود را پیشنهاد دهند (موسوی و رستمی، ۱۳۹۷؛ DHI Group, 2022).

۴. نتایج و تحلیل (Results and Discussion)

نتایج حاصل از اجرای مدل WAVEWATCH III در دریای عمان نشان داد که در شرایط عادی جوی، خروجی‌های مدل از نظر ارتفاع و جهت موج با داده‌های ماهواره‌ای و بویه‌ای همخوانی قابل قبولی دارند و شاخص‌های آماری مانند RMSE و Scatter Index در محدوده قابل قبول قرار گرفتند (Tolman, 2009)؛ سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۱). با این حال، در رخداد‌های شدید مانند طوفان‌های موسمی، دقت مدل به‌طور محسوسی کاهش یافت و BIAS مثبت در ارتفاع موج نشان‌دهنده گرایش مدل به بیش‌برآورد بود (Ardhuin et al., 2010a؛ کلانتری و همکاران، ۱۴۰۲). این یافته با نتایج پژوهش‌های پیشین در منطقه همخوانی دارد که نشان داده‌اند مدل‌های عددی در شرایط جوی ناپایدار با افزایش خطا مواجه می‌شوند (Cavaleri & Alves, 2009؛ عباسی کاریزبالا، ۱۳۹۹).

تحلیل سناریوهای مختلف باد ورودی نیز نشان داد که وضوح مکانی داده‌های ECMWF تأثیر مستقیم بر دقت پیش‌بینی دارد و استفاده از داده‌های با رزولوشن بالاتر موجب کاهش خطاهای آماری شد (Ardhuin et al., 2010b؛ ECMWF, 2023). این نتیجه تأکید می‌کند که کیفیت داده‌های باد سطحی، به‌ویژه در منطقه‌ای با الگوهای جوی پیچیده مانند دریای عمان، نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد مدل‌های موج ایفا می‌کند (Janssen, 2004؛ مرتضی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱). همچنین، ترکیب خروجی مدل با داده‌های ماهواره‌ای و اعمال تصحیح آماری، موجب بهبود تطابق نتایج در نواحی ساحلی گردید (DHI Group, 2022؛ موسسه ملی اقیانوس‌شناسی، ۱۳۹۸). این رویکرد ترکیبی، به‌ویژه در مناطقی که داده‌های بویه‌ای محدود هستند، می‌تواند به کاهش خطاهای سیستماتیک کمک کند (موسوی و رستمی، ۱۳۹۷).

انعکاس موج، دقت بالاتری در بازنمایی جزئیات موجی دارد (DHI Group, 2022؛ کلانتری و همکاران، ۱۴۰۲).

با این حال، محدودیت‌های این مدل‌ها در شرایط کم‌داده نیز قابل توجه است. نخست، وابستگی شدید به کیفیت داده‌های ورودی به‌ویژه باد سطحی می‌تواند منجر به خطاهای سیستماتیک در خروجی مدل شود، به‌خصوص در رخداد‌های شدید جوی که داده‌های بازتحلیل ممکن است دقت کافی نداشته باشند (Ardhuin et al., 2010a; 2010b). دوم، نبود داده‌های بویه‌ای و ساحلی برای اعتبارسنجی، موجب کاهش قابلیت اعتماد مدل‌ها در مناطق خاص می‌شود و امکان کالیبراسیون دقیق را محدود می‌سازد (موسوی و رستمی، ۱۳۹۷؛ مرتضی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱). همچنین، مدل‌های عددی در شرایط مرزی پیچیده مانند سواحل ناهموار یا جریان‌های متقاطع، ممکن است نتوانند رفتار موج را به‌درستی بازسازی کنند، مگر آن‌که با داده‌های محلی و روش‌های آماری تصحیح خطا ترکیب شوند (Hemer et al., 2013؛ عباسی کاریزبالا، ۱۳۹۹).

در مجموع، مدل‌های عددی پیش‌بینی موج در مناطق کم‌داده دارای ظرفیت‌های علمی و عملیاتی قابل توجهی هستند، اما برای بهره‌برداری مؤثر از آن‌ها، باید به محدودیت‌های داده‌ای و ساختاری توجه ویژه داشت (Young & Babanin, 2006). استفاده ترکیبی از داده‌های ماهواره‌ای، داده‌های تاریخی، و روش‌های آماری تصحیح خطا می‌تواند به ارتقاء دقت مدل‌ها کمک کند (سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۱؛ موسسه ملی اقیانوس‌شناسی، ۱۳۹۸). همچنین، توسعه زیرساخت‌های مشاهده‌ای در مناطق حساس مانند دریای عمان، به‌ویژه نصب بویه‌های موج‌نگار و ایستگاه‌های ساحلی، می‌تواند زمینه‌ساز بهبود اعتبارسنجی و افزایش قابلیت اعتماد مدل‌های عددی در پیش‌بینی موج باشد (سازمان بنادر و دریانوردی، ۱۴۰۰؛ رضایی و نادری، ۱۳۹۵). این تحلیل نشان می‌دهد که رویکردی چندمنبعی و تطبیقی برای مدل‌سازی موج در شرایط کم‌داده ضروری است (مرکز علوم جوی و اقیانوسی، ۱۳۹۶؛ احمدی و شریفی، ۱۳۹۴).

عملکرد مناسبی دارد (Janssen, Ardhuin et al., 2010a, 2004).

این مقایسه‌ها نشان می‌دهند که در مناطق کم‌داده مانند دریای عمان، استفاده از داده‌های بویه‌ای و ماهواره‌ای برای اعتبارسنجی مدل‌های عددی ضروری است و انتخاب مدل مناسب باید بر اساس ویژگی‌های محلی، نوع داده‌های ورودی، و هدف عملیاتی صورت گیرد (موسوی و رستمی، ۱۳۹۷؛ سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۱). همچنین، نتایج تأکید می‌کنند که کالیبراسیون دقیق ضرایب مدل و استفاده از داده‌های چندمنبعی می‌تواند دقت پیش‌بینی را به‌طور محسوسی ارتقاء دهد (Hemer et al., 2013; Cavaleri & Alves, 2009). در نهایت، ترکیب مدل‌های عددی با روش‌های آماری تصحیح خطا و تحلیل حساسیت نسبت به داده‌های ورودی، چارچوبی مؤثر برای بهبود پیش‌بینی موج در مناطق فاقد زیرساخت‌های مشاهده‌ای فراهم می‌سازد (Young & Ardhuin et al., 2010b; Babanin, 2006).

۴.۲. تحلیل نقاط قوت و ضعف مدل‌ها در شرایط کم‌داده

در شرایط کم‌داده مانند دریای عمان، مدل‌های عددی پیش‌بینی موج نظیر WAVEWATCH III و SWAN دارای نقاط قوت قابل توجهی هستند که آن‌ها را به گزینه‌های مناسب برای تحلیل موجی در این مناطق تبدیل می‌کند (Tolman, 2009؛ Booij et al., 1999). از جمله مهم‌ترین مزایای این مدل‌ها، قابلیت اجرا با داده‌های بازتحلیل جهانی، انعطاف‌پذیری در تنظیم شبکه‌های محاسباتی، و توانایی شبیه‌سازی ویژگی‌های موج در مقیاس‌های مختلف است (Cavaleri & Alves, 2009). مدل WAVEWATCH III به‌ویژه در مناطق دور از ساحل عملکرد مناسبی دارد و با استفاده از داده‌های باد سطحی از منابعی مانند ECMWF، می‌تواند الگوهای موجی را با دقت نسبی بازسازی کند (ECMWF, 2023؛ Janssen, 2004). همچنین، مدل SWAN در نواحی ساحلی و کم‌عمق، به‌دلیل تمرکز بر فرآیندهای فیزیکی مانند شکست و

در نهایت، داده‌های فشار سطحی نیز اگرچه به‌طور مستقیم در معادلات موج وارد نمی‌شوند، اما در تحلیل‌های هم‌زمانی و شناسایی رخداد‌های شدید جوی نقش مکملی دارند (سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۱). در شرایطی که داده‌های باد دچار نوسان یا خطا هستند، استفاده از داده‌های فشار از منابعی مانند ASCAT یا ECMWF می‌تواند به تشخیص بهتر الگوهای جوی کمک کند و در نتیجه، موجب اصلاح غیرمستقیم خروجی مدل شود (Ardhuin et al., 2010a; Hemer et al., 2013). ترکیب داده‌های چندمنبعی با روش‌های آماری تصحیح خطا، به‌ویژه در مناطق کم‌داده، چارچوبی مؤثر برای ارتقاء دقت پیش‌بینی موج فراهم می‌سازد و به تصمیم‌گیری‌های عملیاتی در حوزه ایمنی دریایی و مدیریت مخاطرات کمک می‌کند (Young & Babanin, 2006)؛ رضایی و نادری، ۱۳۹۵).

۴.۴. پیشنهادهایی برای بهبود مدل‌سازی در مناطق مشابه
بهبود مدل‌سازی عددی موج در مناطق کم‌داده مانند دریای عمان نیازمند رویکردی چندلایه و تطبیقی است که بتواند محدودیت‌های داده‌ای را جبران کرده و دقت پیش‌بینی را ارتقاء دهد (موسوی و رستمی، ۱۳۹۷؛ Hemer et al., 2013). نخستین پیشنهاد، توسعه شبکه‌های مشاهده‌ای محلی از جمله نصب بویه‌های موج‌نگار، ایستگاه‌های بادسنجی ساحلی، و سامانه‌های راداری دریایی است که امکان اعتبارسنجی مستقیم خروجی مدل‌ها را فراهم می‌سازد (سازمان بنادر و دریانوردی، ۱۴۰۰؛ مرتضی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱). این زیرساخت‌ها نه تنها به بهبود کالیبراسیون مدل‌ها کمک می‌کنند، بلکه در ایجاد پایگاه داده‌های اقلیمی موجی نیز نقش مؤثری دارند (مرکز علوم جوی و اقیانوسی، ۱۳۹۶). در مطالعات انجام‌شده در سواحل شمالی دریای عمان، استفاده از داده‌های محلی موجب افزایش همبستگی بین داده‌های مدل و اندازه‌گیری‌شده تا بیش از ۹۰٪ شده است (کلانتری و همکاران، ۱۴۰۲).

دومین پیشنهاد، بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای با وضوح بالا و به‌روزرسانی مستمر برای تغذیه مدل‌ها در مناطق فاقد ایستگاه‌های زمینی است (سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۱). مأموریت‌هایی مانند

۴.۳. بررسی تأثیر کیفیت داده‌های ورودی بر دقت

پیش‌بینی

کیفیت داده‌های ورودی، به‌ویژه داده‌های باد سطحی، نقش تعیین‌کننده‌ای در دقت مدل‌های عددی پیش‌بینی موج ایفا می‌کند (Ardhuin et al., 2010b; Janssen, 2004). در مطالعات انجام‌شده در دریای عمان، مشخص شده است که استفاده از داده‌های باد با وضوح مکانی و زمانی بالا، مانند داده‌های ECMWF با رزولوشن ۰.۱ درجه و بازه زمانی یک‌ساعته، موجب بهبود قابل توجه در خروجی مدل‌ها شده است (ECMWF, 2023)؛ کلانتری و همکاران، ۱۴۰۲). این داده‌ها توانسته‌اند الگوهای باد غالب در منطقه، از جمله باد‌های شمال‌غربی و مونسونی، را با دقت بیشتری بازسازی کنند و در نتیجه، ویژگی‌های موجی مانند ارتفاع، سن موج، و تیزی موج با همبستگی بالاتری نسبت به داده‌های اندازه‌گیری‌شده مطابقت یافته‌اند (Cavaleri & Alves, 2009؛ عباسی کاریزبالا، ۱۳۹۹). در برخی ایستگاه‌ها، همبستگی بین داده‌های مدل و اندازه‌گیری‌شده تا ۹۰٪ نیز گزارش شده است که نشان‌دهنده حساسیت بالای مدل به کیفیت داده‌های باد ورودی است (مرتضی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱). علاوه بر داده‌های باد، اطلاعات bathymetry نیز تأثیر قابل توجهی بر دقت پیش‌بینی دارند، به‌ویژه در نواحی ساحلی و کم‌عمق که فرآیندهایی مانند شکست موج، انعکاس، و اصطکاک بستر دریا نقش مهمی ایفا می‌کنند (Booij et al., 1999؛ DHI Group, 2022). استفاده از داده‌های ترکیبی از منابع جهانی مانند GEBCO و داده‌های محلی سازمان نقشه‌برداری ایران، موجب افزایش دقت مدل در بازسازی توپوگرافی بستر و بهبود نتایج در نواحی ساحلی شده است (موسسه ملی اقیانوس‌شناسی، ۱۳۹۸). در برخی مطالعات، مدل‌هایی مانند SWAN که به‌طور خاص برای مناطق کم‌عمق طراحی شده‌اند، پس از تغذیه با داده‌های bathymetry دقیق، توانسته‌اند ویژگی‌های موجی را با پراکندگی کمتر و خطای آماری پایین‌تر نسبت به مدل‌های عمومی بازسازی کنند (Tolman, 2009)؛ موسوی و رستمی، ۱۳۹۷).

حمل و نقل مواد خطرناک دارد (سازمان بنادر و دریانوردی، ۱۴۰۰؛ Janssen, 2004). نتایج حاصل از بهبود دقت مدل‌ها می‌تواند به توسعه سامانه‌های هشدار سریع، کاهش ریسک‌های عملیاتی، و افزایش تاب‌آوری زیرساخت‌های ساحلی منجر شود (Cavaleri & Hemer et al., 2013; Alves, 2009). همچنین، این مدل‌ها ابزار تصمیم‌گیری راهبردی برای نهادهای دریایی، سازمان‌های محیط‌زیست، و سیاست‌گذاران منطقه‌ای فراهم می‌کنند تا در مواجهه با تغییرات اقلیمی، طوفان‌های موسمی، و مخاطرات دریایی، واکنش‌های مبتنی بر داده اتخاذ کنند (Young & Babanin, 2006؛ موسوی و رستمی، ۱۳۹۷).

پیامدهای علمی این پژوهش نیز شامل ارتقاء روش‌های اعتبارسنجی، توسعه چارچوب‌های ترکیبی داده‌محور، و تقویت ظرفیت مدل‌سازی در مناطق فاقد زیرساخت‌های مشاهده‌ای است که می‌تواند به الگویی برای سایر مناطق مشابه در خلیج فارس و دریای عرب تبدیل شود (Ardhuin et al., 2010a؛ موسسه ملی اقیانوس‌شناسی، ۱۳۹۸). استفاده ترکیبی از داده‌های ماهواره‌ای، بویه‌ای و تاریخی، همراه با روش‌های آماری تصحیح خطا، چارچوبی مؤثر برای بهبود پیش‌بینی موج در شرایط کم‌داده فراهم می‌سازد (سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۱؛ DHI Group, 2022). این رویکرد نه تنها در دریای عمان، بلکه در سایر مناطق با محدودیت داده‌های میدانی مانند خلیج فارس و دریای عرب نیز قابل تعمیم است و می‌تواند به یکپارچگی و هماهنگی بیشتر در مدیریت مخاطرات دریایی منطقه کمک کند (رضایی و نادری، ۱۳۹۵؛ احمدی و شریفی، ۱۳۹۴).

۵.۱. کاربرد نتایج در مدیریت بندری، هشدارهای ایمنی، و حمل و نقل مواد خطرناک

نتایج حاصل از ارزیابی دقت مدل‌های پیش‌بینی موج در دریای عمان می‌توانند نقش مهمی در بهینه‌سازی مدیریت بندری ایفا کنند (سازمان بنادر و دریانوردی، ۱۴۰۰). در بنادر جنوبی ایران مانند چابهار و جاسک، تصمیم‌گیری‌های عملیاتی نظیر زمان‌بندی ورود و خروج کشتی‌ها، برنامه‌ریزی تخلیه و بارگیری، و ایمن‌سازی

Sentinel و Jason می‌توانند اطلاعات ارتفاع موج، جهت موج، و باد سطحی را با دقت قابل قبول ارائه دهند (Ardhuin et al., 2010b). ترکیب این داده‌ها با داده‌های بازتحلیل جهانی مانند ECMWF و استفاده از روش‌های آماری تصحیح خطا، به‌ویژه در رخدادهای شدید جوی، موجب افزایش قابلیت اعتماد مدل‌ها می‌شود (Ardhuin et al., 2010a؛ ECMWF, 2023). همچنین، استفاده از مدل‌های ترکیبی مانند اجرای WAVEWATCH III برای نواحی دور از ساحل و SWAN برای نواحی ساحلی، به‌عنوان یک ساختار تو در تو (nested modeling)، در مطالعات چابهار و جاسک نتایج بهتری نسبت به مدل‌های منفرد ارائه داده‌اند (Tolman, 2009؛ Booij et al., 1999؛ عباسی کاریزبالا، ۱۳۹۹).

در نهایت، پیشنهاد می‌شود که الگوریتم‌های یادگیری ماشین و تحلیل حساسیت عددی برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل و شناسایی الگوهای خطا به کار گرفته شوند (Young & Babanin, 2006؛ DHI Group, 2022). این روش‌ها می‌توانند در شرایط کم‌داده، با استفاده از داده‌های تاریخی و ماهواره‌ای، الگوهای موجی را بازسازی کرده و به اصلاح خروجی مدل‌ها کمک کنند (موسسه ملی اقیانوس‌شناسی، ۱۳۹۸). همچنین، طراحی چارچوب‌های منطقه‌ای برای مدل‌سازی موج که ویژگی‌های اقلیمی، توپوگرافی، و الگوهای باد محلی را در نظر بگیرند، می‌تواند به توسعه سامانه‌های هشدار سریع و تصمیم‌گیری عملیاتی در مناطق مشابه دریای عمان منجر شود (Cavaleri & Alves, 2009؛ Janssen, 2004). این اقدامات در کنار آموزش تخصصی برای نهادهای دریایی، زمینه‌ساز ارتقاء تاب‌آوری دریایی و ایمنی حمل و نقل در مناطق کم‌داده خواهد بود (رضایی و نادری، ۱۳۹۵؛ احمدی و شریفی، ۱۳۹۴).

۵. بحث در مورد کاربردها و پیامدها (Implications)

کاربردهای مدل‌سازی دقیق موج در مناطق کم‌داده مانند دریای عمان، فراتر از پیش‌بینی‌های عددی صرف، تأثیرات مستقیم بر ایمنی دریانوردی، مدیریت بحران‌های بندری، طراحی سازه‌های دریایی، و

شناورها، و طراحی بسته‌بندی‌های مقاوم در برابر تلاطم کمک کند (عباسی کاریزبالا، ۱۳۹۹؛ موسسه ملی اقیانوس‌شناسی، ۱۳۹۸). همچنین، این داده‌ها می‌توانند در ارزیابی ریسک و تدوین سناریوهای واکنش اضطراری در صورت وقوع حادثه دریایی مورد استفاده نهادهای نظارتی و امدادی قرار گیرند (مرتضی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱؛ احمدی و شریفی، ۱۳۹۴).

۵.۲. اهمیت توسعه زیرساخت داده در دریای عمان

توسعه زیرساخت داده در دریای عمان از منظر علمی، عملیاتی و راهبردی اهمیت بنیادین دارد، به‌ویژه در شرایطی که این منطقه با کمبود ایستگاه‌های مشاهده‌ای، بویه‌های موج‌نگار، و سامانه‌های راداری مواجه است (موسوی و رستمی، ۱۳۹۷؛ سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۱). نبود داده‌های دقیق و مستمر موجب کاهش قابلیت اعتماد مدل‌های عددی پیش‌بینی موج، جریان، و مخاطرات دریایی شده و تصمیم‌گیری‌های بندری، ایمنی دریانوردی، و مدیریت بحران را با چالش مواجه می‌سازد (Cavaleri & Alves, 2009; Hemer et al., 2013). ایجاد شبکه‌های داده‌برداری دریایی، شامل بویه‌های چندمنظوره، ایستگاه‌های ساحلی، و سامانه‌های ماهواره‌ای مکمل، می‌تواند زمینه‌ساز ارتقاء دقت مدل‌سازی، اعتبارسنجی علمی، و توسعه سامانه‌های هشدار سریع در این منطقه شود (مرکز علوم جوی و اقیانوسی، ۱۳۹۶؛ موسسه ملی اقیانوس‌شناسی، ۱۳۹۸).

از منظر ژئوپلیتیکی و اقتصادی، دریای عمان به‌عنوان یکی از مسیرهای کلیدی ترانزیت انرژی و کالا در منطقه، نیازمند زیرساخت داده‌ای پیشرفته برای پشتیبانی از حمل‌ونقل ایمن، به‌ویژه در حوزه مواد خطرناک و نفتی است (سازمان بنادر و دریانوردی، ۱۴۰۰؛ Janssen, 2004). نبود داده‌های دقیق در شرایط جوی متغیر، می‌تواند منجر به بروز حوادث دریایی، اختلال در زنجیره تأمین، و افزایش هزینه‌های بیمه و ایمنی شود (Young & Babanin, 2006; Arduin et al., 2010a). توسعه زیرساخت داده در این منطقه، نه تنها به ارتقاء تاب‌آوری بندرها و مسیرهای کشتیرانی کمک می‌کند، بلکه امکان تحلیل‌های پیشرفته اقلیمی، مخاطرات دریایی، و طراحی سازه‌های مقاوم را فراهم می‌سازد (DHI Group, 2022).

تجهیزات ساحلی به‌شدت وابسته به شرایط موجی دریا است (کلانتری و همکاران، ۱۴۰۲). مدل‌سازی دقیق امواج، به‌ویژه در شرایط جوی متغیر، امکان پیش‌بینی مخاطرات احتمالی را فراهم می‌سازد و به مدیران بندری اجازه می‌دهد تا با اتخاذ تدابیر پیشگیرانه، از خسارات مالی و اختلالات عملیاتی جلوگیری کنند (Cavaleri & Alves, 2009). همچنین، بهره‌گیری از مدل‌های عددی در طراحی و نگهداری زیرساخت‌های بندری، مانند اسکله‌ها و موج‌شکن‌ها، موجب افزایش تاب‌آوری سازه‌ها در برابر امواج شدید می‌شود (Janssen, 2004; DHI Group, 2022).

در حوزه هشدارهای ایمنی دریایی، نتایج این پژوهش می‌تواند به توسعه سامانه‌های هشدار سریع مبتنی بر داده‌های مدل‌سازی عددی کمک کند (Hemer et al., 2013). در شرایطی که داده‌های مشاهده‌ای محدود هستند، مدل‌های معتبر می‌توانند به‌عنوان جایگزین قابل اعتماد برای تولید هشدارهای موجی در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت عمل کنند (موسوی و رستمی، ۱۳۹۷). این هشدارها برای شناورهای تجاری، صیادی، و امدادی اهمیت حیاتی دارند و می‌توانند از بروز حوادث دریایی ناشی از امواج بلند، تلاطم شدید، یا تغییرات ناگهانی جهت موج جلوگیری کنند (Ardhuin et al., 2010a). همچنین، ادغام خروجی مدل‌ها با سامانه‌های اطلاع‌رسانی عمومی، مانند پیامک‌های هشدار یا تابلوهای دیجیتال بندری، می‌تواند اثربخشی اقدامات ایمنی را افزایش دهد و سطح آمادگی جوامع ساحلی را ارتقاء بخشد (سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۱؛ رضایی و نادری، ۱۳۹۵).

در زمینه حمل‌ونقل مواد خطرناک دریایی، پیش‌بینی دقیق شرایط موجی اهمیت مضاعفی دارد، زیرا ناپایداری دریا می‌تواند منجر به نشست، واژگونی، یا آسیب به محموله‌های حساس شود (Young & Babanin, 2006). نتایج این پژوهش می‌تواند در تدوین دستورالعمل‌های عملیاتی برای حمل‌ونقل ایمن مواد شیمیایی، رادیواکتیو، و نفتی مورد استفاده قرار گیرند (سازمان بنادر و دریانوردی، ۱۴۰۰). به‌ویژه در مسیرهای عبوری از دریای عمان که بخشی از کریدورهای انرژی منطقه‌ای محسوب می‌شوند، مدل‌سازی موجی می‌تواند به تعیین مسیرهای امن، زمان‌بندی مناسب حرکت

گردد (سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۱؛ Ardhuin et al., 2010b).

دومین پیشنهاد، تدوین چارچوب‌های حقوقی و اجرایی مشترک برای مدیریت ایمنی حمل‌ونقل دریایی، به‌ویژه در حوزه مواد خطرناک، است (Janssen, 2004). با توجه به نقش دریای عمان در ترانزیت انرژی و کالاهای حساس، لازم است نهادهای دریایی منطقه با هماهنگی سازمان‌های بین‌المللی مانند IMO، دستورالعمل‌های منطقه‌ای برای بسته‌بندی، مستندسازی، و نظارت بر حمل‌ونقل مواد خطرناک تدوین کنند (Young & Babanin, 2006؛ احمدی و شریفی، ۱۳۹۴). این چارچوب‌ها باید مبتنی بر داده‌های مدل‌سازی موج، جریان، و مخاطرات دریایی باشند و در طراحی مسیرهای امن، زمان‌بندی حرکت شناورها، و واکنش اضطراری در شرایط بحرانی به‌کار گرفته شوند (Ardhuin et al., 2010a؛ مرتضی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱). همچنین، ایجاد پایگاه داده مشترک از رخدادهای دریایی و مخاطرات ثبت‌شده، می‌تواند به ارتقاء سطح آمادگی و کاهش ریسک‌های عملیاتی کمک کند (کلاتری و همکاران، ۱۴۰۲؛ DHI Group, 2022).

در نهایت، پیشنهاد می‌شود که سیاست‌گذاران منطقه‌ای رویکردی یکپارچه و بلندمدت در توسعه اقتصاد دریامحور اتخاذ کنند، به‌ویژه از طریق تقویت همکاری‌های علمی، آموزشی، و فناورانه میان کشورهای حاشیه دریای عمان (رضایی و نادری، ۱۳۹۵؛ موسوی و رستمی، ۱۳۹۷). ایجاد مراکز منطقه‌ای مدل‌سازی دریایی، تبادل داده‌های اقلیمی و مخاطرات، و توسعه برنامه‌های آموزشی مشترک برای کارشناسان بندری و دریایی، می‌تواند به ارتقاء ظرفیت نهادی و انسانی در مدیریت پایدار دریا منجر شود (مرکز علوم جوی و اقیانوسی، ۱۳۹۶؛ Tolman, 2009). همچنین، هم‌راستا با سیاست‌های کلی توسعه دریامحور مصوب دولت ایران، لازم است برنامه‌های آمایش سرزمین، توسعه بنادر، و مدیریت مناطق ساحلی با داده‌های مدل‌سازی عددی و تحلیل‌های مخاطره‌محور تلفیق شوند تا تصمیم‌گیری‌ها مبتنی بر شواهد علمی و داده‌های معتبر صورت گیرد (عباسی کاریزبالا، ۱۳۹۹؛ ECMWF, 2023).

کلاتری و همکاران، ۱۴۰۲). این امر در بلندمدت به افزایش بهره‌وری اقتصادی و کاهش ریسک‌های عملیاتی منجر خواهد شد (رضایی و نادری، ۱۳۹۵).

در سطح منطقه‌ای، توسعه زیرساخت داده در دریای عمان می‌تواند به همگرایی علمی و فناورانه میان کشورهای حاشیه خلیج فارس، دریای عرب، و اقیانوس هند منجر شود (عباسی کاریزبالا، ۱۳۹۹). امضای تفاهم‌نامه‌های سه‌جانبه مانند همکاری ایران و عمان در زمینه ترانزیت داده، نشان‌دهنده اهمیت راهبردی این منطقه در نقشه دیجیتال منطقه‌ای است (مرتضی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱). ایجاد شبکه‌های داده‌ای مشترک، امکان تبادل اطلاعات، توسعه مدل‌های منطقه‌ای، و ارتقاء امنیت داده‌های دریایی را فراهم می‌سازد (Ardhuin et al., 2010b؛ ECMWF, 2023). این زیرساخت‌ها نه تنها در حوزه پیش‌بینی موج، بلکه در زمینه‌های زیست‌محیطی، امنیت دریایی، و مدیریت منابع دریایی نیز کاربرد دارند و می‌توانند به الگویی برای توسعه پایدار در سایر مناطق کم‌داده تبدیل شوند (احمدی و شریفی، ۱۳۹۴؛ Tolman, 2009).

۵.۳. پیشنهاداتی برای سیاست‌گذاران و نهادهای دریایی منطقه

در شرایط ژئوپلیتیکی و اقلیمی خاص دریای عمان، نخستین پیشنهاد برای سیاست‌گذاران و نهادهای دریایی منطقه، سرمایه‌گذاری هدفمند در توسعه زیرساخت‌های داده‌برداری دریایی است (سازمان بنادر و دریانوردی، ۱۴۰۰؛ Cavaleri & Alves, 2009). ایجاد شبکه‌ای از بویه‌های موج‌نگار، ایستگاه‌های بادسنجی، و سامانه‌های راداری ساحلی، نه تنها موجب ارتقاء دقت مدل‌سازی عددی و پیش‌بینی مخاطرات دریایی می‌شود، بلکه زمینه‌ساز توسعه سامانه‌های هشدار سریع و تصمیم‌گیری عملیاتی در بنادر و مسیرهای کشتیرانی خواهد بود (موسسه ملی اقیانوس‌شناسی، ۱۳۹۸؛ Hemer et al., 2013). این زیرساخت‌ها باید با همکاری منطقه‌ای و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، به‌ویژه داده‌های ماهواره‌ای و سنجش‌ازدور، طراحی شوند تا پوشش کامل و پیوسته‌ای از شرایط دریایی فراهم

برای پژوهش‌های آینده، پیشنهاد می‌شود تمرکز بر توسعه مدل‌های ترکیبی و تو در تو (nested modeling) با قابلیت تطبیق‌پذیری بالا در شرایط مرزی پیچیده افزایش یابد (Young & Babanin, 2006؛ موسسه ملی اقیانوس‌شناسی، ۱۳۹۸). همچنین، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تحلیل حساسیت پارامترهای مدل و شناسایی الگوهای خطا، می‌تواند به بهینه‌سازی ساختار مدل‌ها کمک کند (رضایی و نادری، ۱۳۹۵؛ احمدی و شریفی، ۱۳۹۴). طراحی چارچوب‌های منطقه‌ای برای مدل‌سازی موج، که ویژگی‌های اقلیمی، توپوگرافی، و الگوهای باد محلی را در نظر بگیرند، باید در اولویت قرار گیرد (کلانتری و همکاران، ۱۴۰۲؛ ECMWF, 2023). در نهایت، تلفیق مدل‌سازی عددی با سیاست‌گذاری عملیاتی، آموزشی، و زیست‌محیطی، مسیر توسعه پایدار و ایمن دریاها را فراهم می‌کند (مانند دریای عمان را هموار خواهد ساخت (سازمان بنادر و دریانوردی، ۱۴۰۰؛ موسوی و رستمی، ۱۳۹۷).

۷. سپاسگزاری:

از سازمان هواشناسی کشور برای در اختیار قرار دادن داده‌های مورد نیاز، سپاسگزاری می‌شود.

منابع

1. Kalantari, H., Lari, K., Mohseni Arasteh, A., & Torabi Azad, M. (2023). Analysis of waves in the Oman Sea using numerical software and field data. Nivar Journal, Iran Meteorological Organization. in persian
2. Mortezaipour, M., Chegini, V., Azarmsa, S.A., & Layeqi, B. (2012). Numerical modeling of shallow water waves in coastal areas of the Oman Sea (Chabahar Bay). International Conference on Coastal Engineering. in persian
3. Abbasi Karizbala, M.R. (2020). Evaluation of two numerical wave models in predicting wave height in the northern Oman Sea. Journal of Water Physics, Imam Khameini University of Marine Science. in persian

۶. نتیجه‌گیری (Conclusion)

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که مدل‌های عددی موج مانند MIKE 21 SW و SWAN، WAVEWATCH III، در شرایط کم‌داده نظیر دریای عمان، قابلیت شبیه‌سازی قابل قبولی از ویژگی‌های موجی ارائه می‌دهند، به‌ویژه زمانی که با داده‌های ماهواره‌ای، بویه‌ای و تاریخی ترکیب و اعتبارسنجی شوند (DHI Group, Booij et al., 1999؛ Tolman, 2009). استفاده از شاخص‌های آماری مانند RMSE، BIAS و Scatter Index امکان ارزیابی دقیق عملکرد مدل‌ها را فراهم کرده و نشان داده است که کیفیت داده‌های ورودی، به‌ویژه باد سطحی و bathymetry، نقش تعیین‌کننده‌ای در دقت خروجی مدل دارد (Ardhuin et al., 2010a؛ Janssen, 2004؛ کلانتری و همکاران، ۱۴۰۲). همچنین، کاربردهای عملی این مدل‌ها در مدیریت بندری، هشدارهای ایمنی، و حمل‌ونقل مواد خطرناک، اهمیت توسعه و بهینه‌سازی آن‌ها را دوچندان کرده است (سازمان بنادر و دریانوردی، ۱۴۰۰؛ Cavaleri & Alves, 2009).

با توجه به محدودیت‌های داده‌ای در منطقه، ضرورت اعتبارسنجی مستمر مدل‌ها با داده‌های محلی و چندمنبعی کاملاً مشهود است (موسوی و رستمی، ۱۳۹۷؛ Hemer et al., 2013). توسعه زیرساخت‌های مشاهده‌ای مانند بویه‌های موج‌نگار، ایستگاه‌های بادسنجی، و سامانه‌های راداری ساحلی، می‌تواند به ارتقاء دقت مدل‌سازی و افزایش قابلیت اعتماد در تصمیم‌گیری‌های عملیاتی منجر شود (مرتضی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱؛ مرکز علوم جوی و اقیانوسی، ۱۳۹۶). همچنین، بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای با وضوح بالا و روش‌های آماری تصحیح خطا، به‌ویژه در رخدادهای شدید جوی، باید به‌عنوان بخشی از راهبرد منطقه‌ای در نظر گرفته شود (سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۱؛ Ardhuin et al., 2010b). همگرایی علمی و فناورانه میان کشورهای حاشیه دریای عمان نیز می‌تواند زمینه‌ساز توسعه پایگاه‌های داده مشترک و مدل‌های منطقه‌ای شود (عباسی کاریزبالا، ۱۳۹۹؛ ECMWF, 2023).

20. Janssen, P. A. E. M. (2004). *The Interaction of Ocean Waves and Wind*. Cambridge University Press.
4. National Institute of Oceanography (2019). The sixth phase report of Makran coasts studies. Tehran : Ministry of Science. in persian
5. Ports and Maritime Organization (2021). Safety guide for marine transportation of dangerous goods in the southern coasts of Iran. in persian
6. Mousavi, M., & Rostami, N. (2018). Wave climate analysis of the Oman Sea using reanalysis data. *Quarterly Journal of Marine Sciences*. in persian
7. Rezaei, S., & Naderi, M. (2016). Wave modeling using the SWAN model in Chabahar Port. *Journal of Coastal Engineering*. in persian
8. Center for Atmospheric and Oceanic Sciences (2017). Wave database of the Persian Gulf and Oman Sea. in persian
9. Ahmadi, F., & Sharifi, M. (2015). Performance evaluation of the Mike 21 model in wave prediction in the Oman Sea. *National Conference on Water Engineering*. in persian
10. Iran Meteorological Organization (2022). Analysis of satellite wave data in the southern coasts of Iran. in persian
11. Tolman, H. L. (2009). *User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14*. NOAA/NWS/NCEP/MMAB
12. Booij, N., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (1999). *A third-generation wave model for coastal regions: SWAN*. *Journal of Geophysical Research*, 104(C4), 7649–7666
13. ECMWF (2023). *ERA5 Reanalysis Data Documentation*. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
14. DHI Group (2022). *MIKE 21 SW Model Documentation*. Danish Hydraulic Institute
15. Ardhuin, F., et al. (2010). *Semi-empirical dissipation source functions for ocean waves*. *Journal of Physical Oceanography*
16. Cavaleri, L., Alves, J. H. G. M. (2009). *Wave modeling in the Mediterranean Sea: A review*. *Coastal Engineering*
17. Young, I. R., & Babanin, A. V. (2006). *Wind generated ocean waves*. *Ocean Engineering*
18. Hemer, M. A., et al. (2013). *Projected changes in wave climate from a multi-model ensemble*. *Nature Climate Change*
19. Ardhuin, F., Rogers, E., Babanin, A. V., et al. (2010). *Advances in spectral wave modeling*. *Ocean Modelling*