

بهبود شبیه‌سازی امواج در یک خلیج نیمه‌بسته با استفاده از اصلاح میدان باد ERA5 در مدل SWAN: مطالعه موردی خلیج بوتانی

حسین قائمی بجگان^۱، مریم راه‌بانی^{۲*}

h.ghaemi.phd@hormozgan.ac.ir

^۱ دانشجوی دکتری فیزیک دریا، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

m_rahbani@hormozgan.ac.ir

^{۲*} نویسنده مسئول، استاد، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۳

چکیده

شبیه‌سازی دقیق امواج در محیط‌های نیمه‌بسته و کم‌عمق، به دلیل پیچیدگی‌های هیدرودینامیکی و محدودیت دقت داده‌های باد ورودی، همچنان با عدم قطعیت‌های قابل توجهی همراه است. در این مطالعه، عملکرد مدل نسل سوم SWAN در شبیه‌سازی میدان موج در خلیج نیمه‌محصور بوتانی با تمرکز بر بهبود داده‌های باد ERA5 و تنظیم پارامترهای فیزیکی مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور، داده‌های باد ERA5 ابتدا با استفاده از مشاهدات ایستگاه هواشناسی ارزیابی و سپس با به کارگیری چندین روش اصلاح Bias شامل رگرسیون خطی، اصلاح سرعت-جهت، نگاشت کمی و الگوریتم یادگیری ماشین تصحیح شدند. در ادامه، داده‌های باد اصلاح‌شده به عنوان ورودی مدل SWAN مورد استفاده قرار گرفت و حساسیت مدل نسبت به سه بسته فیزیکی اصلی شامل WST، KOMEN و ST6 با ترکیب‌های مختلف ورودی باد، سفیدک موج، اصطکاک بستر و شکست ناشی از کم‌عمقی بررسی شد. ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از شاخص‌های آماری کلاسیک و نمودارهای تشخیصی دیاگرام تیلور، توزیع چگالی احتمال و نمودار Q-Q در چهار ایستگاه ساحلی با شرایط هیدرودینامیکی متفاوت انجام گرفت. نتایج نشان داد که بسته WST در ایستگاه‌های بازتر و متأثر از امواج دورآ بهترین عملکرد را ارائه می‌دهد، در حالی که در ایستگاه‌های محافظت‌شده و کم‌عمق‌تر تنظیم هدفمند ضرایب سفیدک و کاهش سهم انرژی موج دورآ در بسته‌های KOMEN و ST6 منجر به بهبود قابل توجه نتایج شد. به طور کلی، این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب اصلاح داده‌های باد ERA5 با روش‌های یادگیری ماشین و کالیبراسیون هدفمند پارامترهای فیزیکی SWAN، نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش دقت شبیه‌سازی موج در محیط‌های نیمه‌بسته دارد و استفاده از یک پیکربندی یکنواخت برای کل خلیج می‌تواند منجر به خطای سیستماتیک در برآورد انرژی موج شود.

واژه‌های کلیدی: امواج، سواحل درون خلیجی، SWAN، باد ERA5

۱. مقدمه

سواحل نیمه‌باز شامل خلیج‌ها، مصب‌ها، تالاب‌ها و بندرگاه‌ها، به دلیل قرارگیری در محیط‌های نیمه‌بسته و محافظت‌شده، رفتار هیدرودینامیکی متفاوتی نسبت به سواحل باز اقیانوسی دارند. در این نواحی، ورودی انرژی موج از اقیانوس به‌طور طبیعی محدود می‌شود؛ زیرا دهانه باریک، هندسه محصورکننده، و توپوگرافی ساحل موجب کاهش قابل توجه انرژی امواج دورآ و امواج بادی با پریود بلند می‌گردد [۱،۲]. در نتیجه، برخلاف سواحل اقیانوسی که تحت تأثیر مستقیم امواج دورآ با انرژی بالا قرار دارند، دینامیک ساحلی در این محیط‌ها عمدتاً توسط امواج محلی و جزرومد کنترل می‌شود، که نقش اصلی را در فرایندهای رسوب‌گذاری، فرسایش و تحول مورفولوژیک ساحل ایفا می‌کنند [۳]. این ویژگی‌ها سبب می‌شود که تحلیل و پیش‌بینی فرایندهای ساحلی در سواحل درون‌خلیجی پیچیده‌تر از سواحل باز باشد. با توجه به اهمیت انرژی موج در شکل‌دهی فرایندهای ساحلی، شبیه‌سازی دقیق رفتار امواج در محیط‌های بسته و نیمه‌بسته ضروری است. مدل‌های نسل سوم مانند SWAN^۱ که مبتنی بر حل معادله موازنه طیفی کش موج هستند، طی چند دهه اخیر به‌طور گسترده در مطالعات جهانی و محلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۴،۵،۶،۷]. این مدل امکان شبیه‌سازی نسبتاً دقیق فرایندهای فیزیکی موج را فراهم می‌کند. با این حال، عملکرد این مدل در محیط‌های نیمه‌بسته همچنان با محدودیت‌هایی مواجه است، خصوصاً در شرایطی که داده‌های باد ورودی دقت کافی ندارند [۸]. داده‌های بازتحلیل جوی مانند ERA5 رایج‌ترین داده‌های ورودی برای شبیه‌سازی موج در مقیاس منطقه‌ای هستند، اما در محیط‌های نیمه‌بسته اغلب با خطا همراه‌اند. این خطاها می‌توانند باعث شبیه‌سازی نادرست انرژی موج شده و در نهایت دقت مدل را کاهش دهند [۸].

با توجه به این محدودیت‌ها، این مطالعه با هدف ارزیابی عملکرد مدل SWAN در شبیه‌سازی موج در یک خلیج نیمه‌بسته در جنوب شرق استرالیا-بوتانی انجام شده است. ابتدا

عملکرد مدل با استفاده از داده‌های ERA5 بدون هیچ‌گونه اصلاحی مورد ارزیابی قرار گرفت تا میزان خطا و حساسیت مدل در منطقه بوتانی مشخص شود. در ادامه برای کاهش این عدم قطعیت، داده‌های ERA5 با استفاده از چندین روش اصلاح از جمله الگوریتم یادگیری ماشین، بهبود داده شد و سپس برای شبیه‌سازی موج به کار گرفته شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی امکان بررسی مستقیم تأثیر بهبود داده‌های باد بر عملکرد مدل در خلیج بوتانی را فراهم کرد.

از سوی دیگر، تنظیم پارامترهای فیزیکی مدل نیز یکی از مهم‌ترین منابع عدم قطعیت در شبیه‌سازی موج به‌شمار می‌رود. یکی از حساس‌ترین این فرایندها، اتلاف انرژی ناشی از سفیدک موج است، پدیده‌ای که هنوز به‌طور کامل شناخته نشده است ولی به شدت بر ارتفاع موج شاخص و پارامترهای طیفی تأثیر می‌گذارد [۹،۱۰،۱۱]. برای مدل‌سازی این فرآیند، فرمول‌های مختلفی ارائه شده است. بدین صورت که فرمول‌بندی Komen^۲ مبنی بر شرایط دریای کاملاً توسعه‌یافته است [۱۲]، در حالی که فرمول‌های Janssen و WST^۳ بر اساس مشاهدات و بهینه‌سازی برای محیط‌های نزدیک ساحل بهبود یافته‌اند [۱۳،۱۴]. به‌طور کلی مدل SWAN شش فرمول مختلف برای سفیدک موج و ۱۹ ضریب قابل تنظیم ارائه می‌کند که در این میان ضرایب سفیدک موج بیشترین تأثیر را بر میزان اتلاف انرژی دارد [۱۵،۱۶]. مطالعات متعدد نشان داده‌است که مقدار بهینه این ضرایب وابسته به شرایط باد، موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های بستر است و استفاده از مقادیر پیش‌فرض اغلب منجر به بیش‌برآوردی فرکانس پیک طیف و کم‌برآوردی انرژی موج خصوصاً در شرایط باد شدید می‌شود [۱۷،۱۸،۱۹،۲۰،۲۱]. در محیط‌های نیمه‌بسته مانند خلیج بوتانی، ویژگی‌هایی همچون عمق بسیار کم، محافظت نسبی خلیج، و تأثیر بادهای محلی و امواج دورآ، باعث می‌شود که شبیه‌سازی دقیق موج به تنظیم دقیق ضرایب و انتخاب مناسب فرمول سفیدک موج و همچنین اتلاف ناشی از اصطکاک بستر و شکست ناشی از کم‌عمق شدگی نیاز داشته باشد. به همین دلیل، بررسی عملکرد SWAN در چنین محیط‌هایی

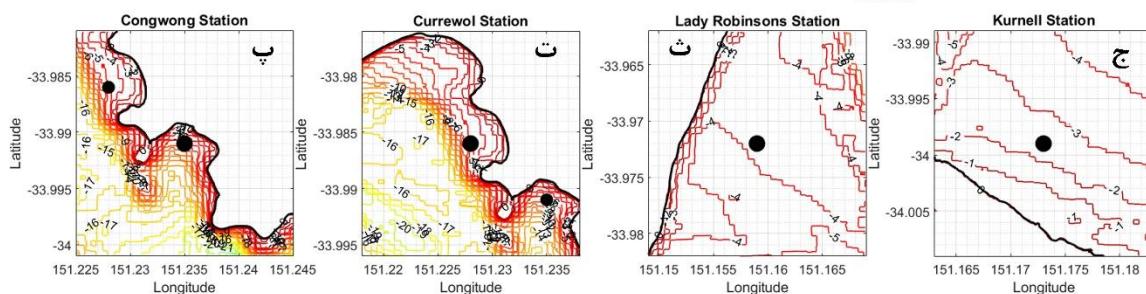
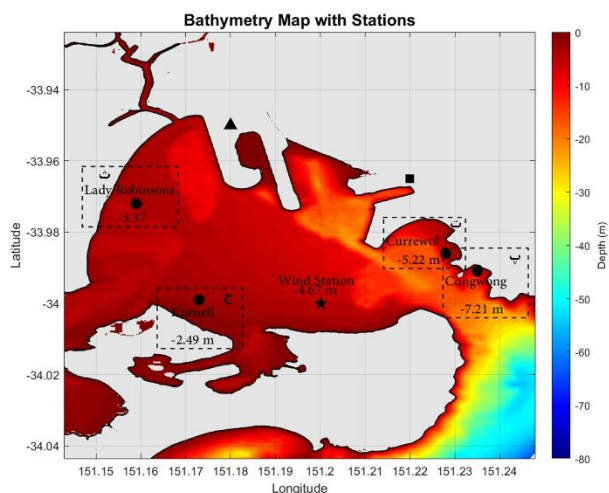
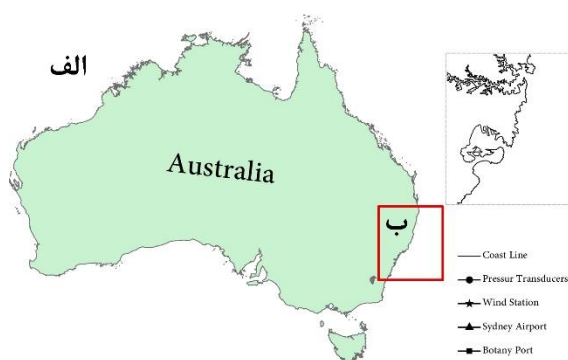
اهمیت بالایی دارد. از این‌رو چهار ایستگاه ساحلی درون خلیجی با موقعیت مکانی، ویژگی‌های توپوگرافی و هیدرودینامیکی متفاوت انتخاب شدند تا عملکرد مدل SWAN و تأثیر تنظیمات مختلف آن با باد اصلاح شده در محیط‌های نیمه‌بسته به‌طور جامع ارزیابی شود.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

خلیج بوتانی یک سیستم نیمه‌محصور و کم‌عمق در جنوب سیدنی (ایالت نیوسوت ولز، استرالیا) است که مساحت ۳۹/۶ کیلومتر مربع و عمق متوسط ۱۱/۴ متر دارد. ورودی خلیج با عرض ۱/۱ کیلومتر به دریای تاسمان-اقیانوس آرام متصل است (شکل ۱) و بنابراین علاوه بر امواج محلی ناشی از باد، تحت تأثیر امواج اقیانوسی دورآ نیز قرار می‌گیرد. در کنار این دو منبع، امواج بلند (فراگرانشی) نیز در داخل خلیج

مشاهده شده‌اند، هرچند انرژی آن‌ها نسبتاً ضعیف است [۲۲]. ساختار نیمه‌محصور خلیج باعث می‌شود که بادهای محلی بتوانند در بیشتر نقاط، موج‌زایی کنند؛ از سوی دیگر، لایروبی و تغییرات انسانی در دهانه، موجب تغییر در الگوی نفوذ امواج دورآ شده‌است. این شرایط خلیج بوتانی را به محیطی پیچیده برای شبیه‌سازی امواج تبدیل کرده و اهمیت استفاده از مدل‌های عددی مانند SWAN را برجسته می‌سازد. چهار ایستگاه اصلی مورد بررسی در این مطالعه شامل کنگونگ و کروول (نزدیک دهانه و در معرض انرژی بیشتر)، لیدی رابینسون (دورترین نقطه از دهانه و تحت تأثیر محدود امواج محلی با رخدادهای طوفانی دورآ) و کرنل (ساحل جنوبی با انرژی پایین و حفاظت طبیعی توسط زیستگاه‌های حرا و مراتع دریایی) هستند [۲۲]. این تنوع شرایط ساحلی، آزمونی مناسب برای ارزیابی توانایی مدل SWAN در بازتولید رژیم موجی در یک خلیج نیمه‌محصور به‌شمار می‌رود.



شکل ۱. موقعیت خلیج بوتانی در (الف) استرالیایی، و (ب) خلیج بوتانی و محل مبدل‌های فشار (دایره‌های مشکی) و ایستگاه باد (علامت ستاره). خطوط ساحلی (پ) کنگونگ، (ت) کروول، (ث) لیدی رابینسون و (ج) کرنل، داده‌های عمق‌سنجی با دقت ۱۰ متر

۲-۲. معرفی مدل SWAN

مدل SWAN یک مدل فاز میانگین طیفی نسل سوم است که بر پایه معادله پخش-انتقال چگالی کنش موج عمل می کند [۲۳]. در این مدل، N تغییرات چگالی کنش موج با در نظر گرفتن انتشار مکانی، تغییرات فرکانس ناشی از عمق و جریان، و انحراف جهت انتشار موج به صورت زیر محاسبه می شود.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (۱)$$

که C_x و C_y سرعت انتشار موج در راستای x و y ، C_σ و C_θ سرعت گروه در راستای فرکانس-جهت می باشد. طرف راست معادله S_{tot} مجموع تمامی پدیده های فیزیکی تولید و اتلاف انرژی موج است:

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

این جملات به ترتیب نشان دهنده: رشد موج ناشی از باد، انتقال غیرخطی انرژی موج از طریق برهمکنش سه و چهارگانه موج، اتلاف انرژی توسط سفیدک موج، اصطکاک بستر و شکست موج ناشی از عمق هستند [۲۳].

برای بازنمایی دقیق فرآیندهای تولید و اتلاف انرژی موج SWAN چندین بسته از منبع-چاهک ارائه کرده است که هر یک با روش خاصی ورودی باد و اتلاف انرژی ناشی از سفیدک موج را مدل می کنند. در این مطالعه بسته Komen، WST و ST6 مورد استفاده قرار گرفتند. فرمول بندی KOMEN سفیدک موج را به صورت وابسته به فرکانس میانگین مدل سازی می کند و در بسیاری از مطالعات ساحلی مورد استفاده قرار می گیرد، با این حال، در شرایطی که امواج کوتاه و بلند همزمان وجود دارند ممکن است موجب افزایش انرژی در فرکانس های بالا و در نتیجه برآورد بیش از حد انرژی امواج بادی شود [۱۲].

فرمول سفیدک موج در بسته KOMEN به صورت زیر است:

$$S_{ds.w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \tilde{\sigma} \frac{k}{k} E(\sigma, \theta) \quad (۳)$$

که در آن به ترتیب $\tilde{\sigma}$ و $\tilde{k}$ فرکانس و عدد موج متوسط هستند، و k عدد موج محلی است. ضریب Γ که به شیب موج وابسته است به صورت زیر تعریف می شود [۲۴، ۲۵].

$$\Gamma = C_{ds} \left((1 - \delta) + \delta \frac{k}{\tilde{k}} \right) \left(\frac{\tilde{S}}{\tilde{S}_{pm}} \right)^p \quad (۴)$$

در اینجا، $\tilde{S}$ شیب کلی موج، و $\tilde{S}_{pm} = \sqrt{3.02 \times 10^{-3}}$ مقدار شیب موج برای طیف پیرسون-موسکویچ است [۲۶]. $C_{ds} \cdot \delta \cdot p$ پارامترهای قابل تنظیم هستند.

در فرمول بندی WST با استفاده از یک مدل مبنی بر اشباع غیرخطی برای سفیدک، وابستگی به فرکانس را حذف کرده است [۱۴] یعنی روش اتلاف انرژی را به دو حالت موج شکسته و غیرشکسته تقسیم کرده، که در بخش های مختلف طیف فعال هستند.

$$S_{d.sw}(\sigma, \theta) = f_{br}(\sigma) S_{ds.break} + [1 - f_{br}(\sigma)] S_{br.non-break} \quad (۵)$$

که $S_{ds.break}$ و $S_{br.non-break}$ به ترتیب سهم موج های شکسته و غیرشکسته هستند. سهم موج های شکسته به صورت زیر محاسبه می شوند.

$$S_{ds.break}(\sigma, \theta) = -C_{ds} \left(\frac{B(k)}{B_r} \right)^{p/2} (\tanh(kh))^{\frac{2-p_0}{4}} \sqrt{gkE(\sigma, \theta)} \quad (۶)$$

که $B(k)$ اشباع طیفی یکپارچه شده از جهت و B_r سطح آستانه اشباع است. این ویژگی باعث می شود که WST در مناطق کم عمق و نیمه محصور عملکرد بهتری داشته باشد. و معمولاً همراه با ورودی باد با روش Yan در مدل استفاده می شود.

$$S_{in.YAN}(\sigma, \theta) = \left\{ \left[C_1 \frac{U_*^2}{C_{ph}^2} + C_2 \frac{U_*}{C_{ph}} + C_3 \right] \cos(\theta - \theta_w) + C_4 \right\} E(\sigma, \theta) \quad (۷)$$

C_1, C_2, C_3, C_4 مقادیر ثابت هستند. U_* سرعت اصطکاک و C_{ph} سرعت فاز موج است.

بسته ST6 جدیدترین بسته موجود در SWAN است و ویژگی های پیشرفته ای، از جمله ورودی باد مبتنی بر تنش برشی، سفیدک با آستانه شکست و رفتار تجمعی، و اتلاف مستقل امواج دور آ دارد [۱۴]. این بسته در مطالعات اخیر،

عملکرد مطلوبی در بازتولید طیف موج در شرایط محیطی متنوع نشان داده‌است [۲۷]. فرمول ورودی باد در این روش به شکل زیر است:

$$S_{in,ST6}(\sigma, \theta) = \frac{\rho_a}{\rho_w} \sigma \{2.8 - [1 + \tanh(10\sqrt{B_n}W - 11)]\} \sqrt{B_n}W E(\sigma, \theta) \quad (8)$$

$$W = W_1(\sigma, \theta) - a_0 W_2(\sigma, \theta) \quad (9)$$

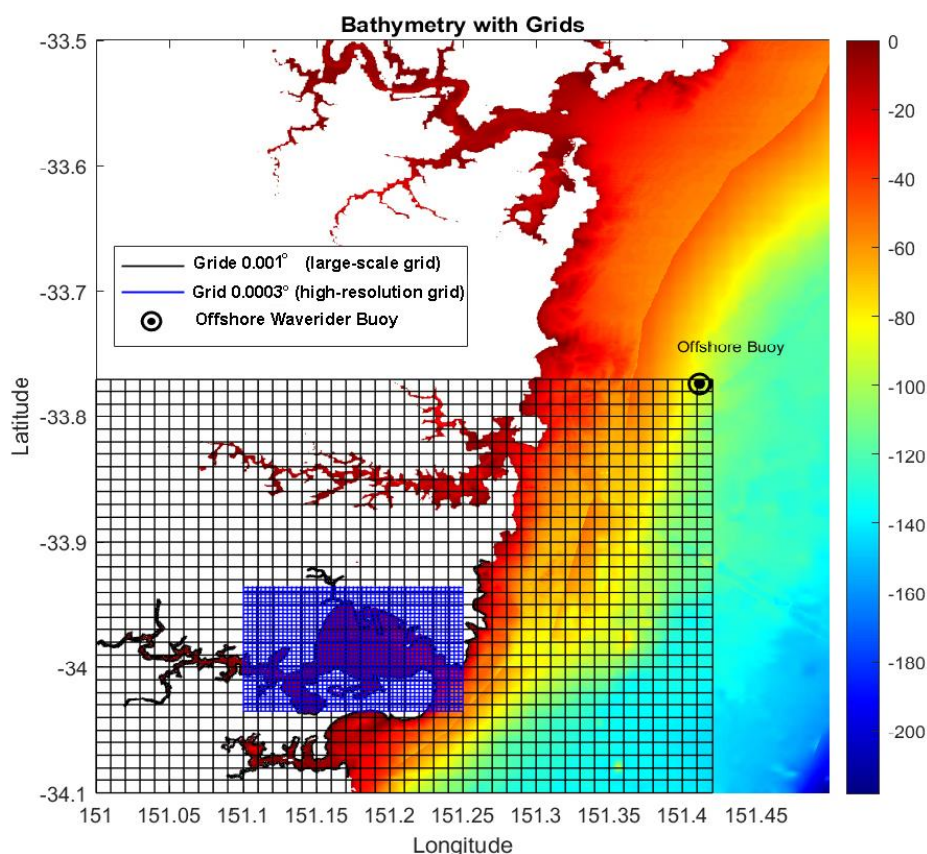
که در آن B_n اشباع طیفی، W_1 و W_2 توابع ورودی باد مثبت و منفی وابسته به سرعت اصطکاک و a_0 ضریب مقیاس باد است. در این مطالعه، بسته ST6 همراه با سه فرمول‌بندی مختلف درگ استفاده شد تا اثر پارامترسازی باد بر خروجی مدل مشخص گردد.

۲-۳. تنظیمات مدل و داده‌های ورودی

در این مطالعه از مدل SWAN Cycle III نسخه ۴۱/۴۱ استفاده شد. مدل در حالت نسل سوم و غیرایستا اجرا شد. برای شبیه‌سازی طیفی امواج، طیف JONSWAP به کار گرفته شد که در آن طیف به ۳۶ جهت و بازه‌های فرکانسی بین ۰/۰۳ تا ۱ هرترتز تقسیم شد. گام زمانی مدل ۶۰ دقیقه بود، هر گام زمانی حداکثر تا ۵ بار تکرار می‌شد تا همگرایی حاصل شود. برای بررسی حساسیت، گام‌های ۱۸۰۰، ۶۰۰، ۱۰۰ ثانیه نیز تست شد که تفاوت معناداری در نتایج نداشت، بنابراین ۶۰ دقیقه به عنوان گام زمانی نهایی انتخاب شد. در این تحقیق، برای افزایش دقت شبیه‌سازی، از ساختار شبکه‌بندی تودرتو استفاده شد. شبکه بزرگ مقیاس با تفکیک مکانی ۰/۰۱° و بر اساس داده‌های عمق‌سنجی با دقت ۵۰ متر ایجاد شد که محدوده‌ای وسیع از خلیج بوتانی تا دریای

تاسمان را تا عمق ۱۰۰ متر پوشش داد (شکل ۲). شبکه ریزمقیاس داخلی با تفکیک ۰/۰۰۰۳° بر اساس داده‌های عمق‌سنجی دقیق‌تر با دقت ۱۰ متر به کار گرفته شد. مجموعه داده‌های عمق ۱۰ و ۵۰ متری توسط گروه تحقیقاتی دانشکده علوم محیط‌زیستی دانشگاه نیوکاسل گردآوری شده‌اند (شکل ۱ب و ۲) [۲۸]. شرایط مرزی مدل بزرگ مقیاس بر اساس داده‌های طیفی یک بویه فراساحلی در عمق ۹۰ متر تعریف شد. داده‌ها شامل ارتفاع موج شاخص، پرپود غالب و جهت موج با گام زمانی یک‌ساعته برای ورودی مدل آماده شدند. شرایط مرزی شبکه ریزمقیاس به صورت طیفی و با حفظ پیوستگی مکانی و زمانی از خروجی‌های شبکه بزرگ مقیاس استخراج و به شبکه کوچک منتقل شد.

ورودی باد، از داده‌های ۱۰ متری مجموعه‌ی ERA5، توسعه‌یافته توسط مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت هواشناسی، استفاده شد [۲۹]. داده‌ها با تفکیک مکانی ۰/۲۵° و تفکیک زمانی یک‌ساعته استخراج گردیده و شامل مؤلفه‌های u و v بودند که برای کل دامنه محاسباتی به SWAN معرفی شدند. از آنجا که دقت میدان باد ورودی یکی از عوامل کلیدی در شبیه‌سازی امواج ساحلی و نواحی کم‌عمق است [۳۰، ۳۱]، پیش از به‌کارگیری داده‌های ERA5، صحت آن‌ها در مقیاس محلی باید ارزیابی گردد [۵۸، ۳۲]. بدین منظور، داده‌های ERA5 با استفاده از درون‌یابی مکانی در محل ایستگاه هواشناسی کرنل استخراج و با داده‌های مشاهداتی این ایستگاه مقایسه شد. نتایج این مقایسه در بخش بعدی به‌طور کامل ارائه شده‌است.



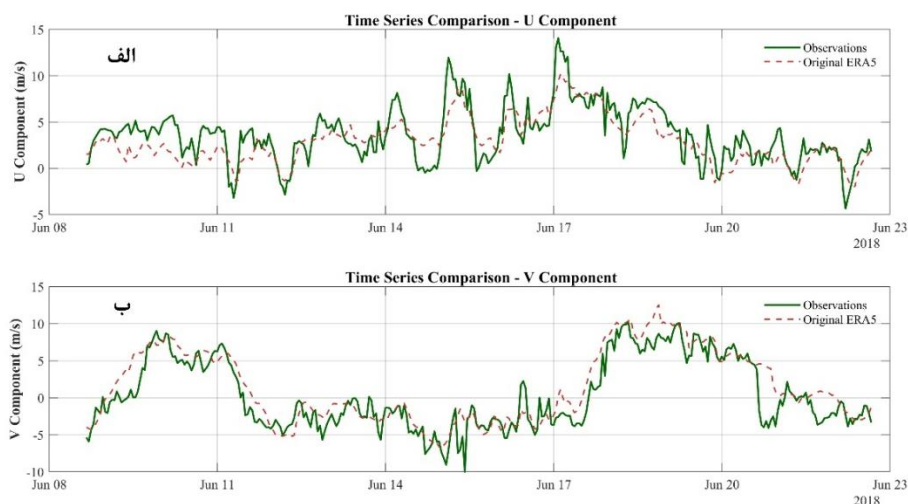
شکل ۲. شبکه‌بندی منطقه مطالعاتی با عمق سنجی ۵۰ متر، خطوط مشکی شبکه بزرگ، خطوط آبی شبکه کوچک و دایره موقعیت مکانی بویه موج نگار

۳. بحث و نتایج

۳-۱. اصلاح داده‌های باد

داد ERA5 که در منطقه ایستگاه کرنل دارای خطای سیستماتیک است، به گونه‌ای که در برخی از دوره‌ها سرعت باد بیش‌برآورد شده و در برخی موارد نیز جهت باد انحراف محسوسی نسبت به مشاهدات داشت که نیازمند اصلاح برای ورود به مدل SWAN بود (شکل ۳).

ابتدا مدل SWAN با باد خام ERA5 اجرا شد تا عملکرد اولیه مدل بررسی شود. برای ارزیابی دقت باد ورودی، سری زمانی مؤلفه‌های باد ERA5 در محل ایستگاه هواشناسی کرنل با داده‌های مشاهداتی این ایستگاه مقایسه گردید. نتایج نشان



شکل ۳. (الف) و (ب) مقایسه سری زمانی مؤلفه u و v ایستگاه هواشناسی کرنل با میدان باد ERA5 قبل از اصلاح

در این رابطه، F_{ERA5} تابع توزیع تجمعی داده‌های مدل و F_{obs}^{-1} معکوس تابع توزیع تجمعی داده‌های مشاهداتی است.

۴. یادگیری ماشین جنگل تصادفی^۵:

برای در نظر گرفتن روابط غیر خطی میان داده‌های مدل و مشاهدات، از رگرسیون جنگل تصادفی استفاده شد. در این روش، مجموعه‌ای از درخت‌های تصمیم روی ویژگی‌های مختلف (مانند U_{ERA5} ، V_{ERA5} ، S_{ERA5} ، θ_{ERA5}) آموزش داده شد و خروجی مدل به صورت میانگین پیش‌بینی درخت‌ها محاسبه شد.

$$\hat{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i(X) \quad (15)$$

که T_i پیش‌بینی i ام و X بردار ویژگی‌هاست. این روش توانایی اصلاح روابط غیرخطی و پیچیده را دارد. در نهایت، برای بهره‌گیری هم‌زمان از مزایای روش‌های مختلف، ترکیب وزنی آن‌ها به کار گرفته شد. وزن هر روش متناسب با دقت آن محاسبه شد.

$$w_i = \frac{1/RMSE}{\sum_j 1/RMSE_j} \quad (16)$$

و داده‌های اصلاح شده به صورت میانگین وزنی به دست می‌آید. این روش امکان تلفیق مزایای روش‌های آماری و یادگیری ماشین را فراهم می‌کند. در نهایت روش جنگل تصادفی بهترین عملکرد را نشان داد، در واقع ترکیب وزنی به عنوان یک رویکرد مکمل به کار گرفته شد تا ضمن کاهش عدم قطعیت، پایداری نتایج تضمین شود. همچنین استفاده از ترکیب وزنی امکان مقایسه عادلانه میان روش‌ها و تأیید برتری جنگل تصادفی را فراهم ساخت. در شکل ۴ نتایج این روش‌ها با داده‌های مشاهداتی کرنل مقایسه شد.

چندین روش اصلاحی برای کاهش Bias و بهبود دقت داده‌ها با اعمال گردید.

۱. رگرسیون خطی^۳: برای کاهش Bias در مؤلفه‌های باد ERA5 و داده‌های مشاهداتی استفاده شد. در این روش، مؤلفه‌های شرقی-غربی (U) و شمالی-جنوبی (V) به صورت جداگانه برازش داده شدند:

$$U_{corr} = a_u \cdot U_{ERA5} + b_u \quad (10)$$

$$V_{corr} = a_v \cdot V_{ERA5} + b_v \quad (11)$$

که ضرایب a و b از برازش کمترین مربعات به دست می‌آیند. ۲. اصلاح بر اساس سرعت و جهت: در این روش ابتدا داده‌ها به مؤلفه‌های سرعت و جهت تبدیل شدند. سپس سرعت با یک رابطه خطی اصلاح شد.

$$S_{corr} = a_s \cdot S_{ERA5} + b_s \quad (12)$$

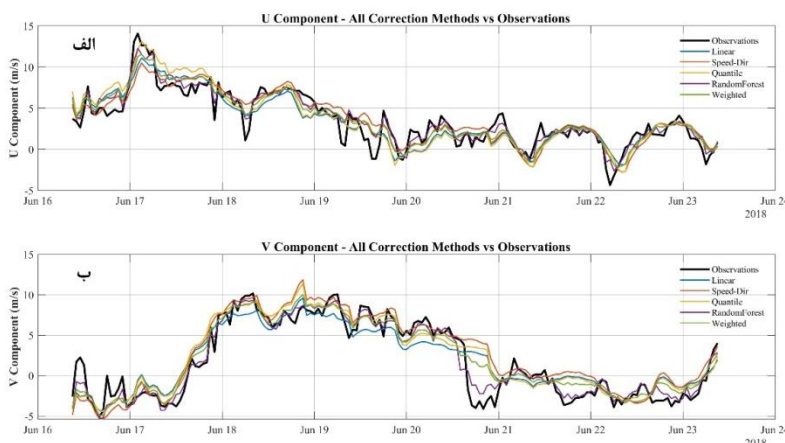
در حالی که جهت با Bias میانگین تصحیح شد:

$$\theta_{corr} = \theta_{ERA5} + (\theta_{obs} - \theta_{ERA5}) \quad (13)$$

در نهایت مقادیر اصلاح شده به مؤلفه‌های شرقی-غربی (U) و شمالی-جنوبی (V) بازگردانده شد.

۳. نگاشت کمی^۴: یکی از روش‌های پرکاربرد در اصلاح Bias آماری است که توزیع داده‌های مدل را به توزیع داده‌های مشاهداتی تطبیق می‌دهد. در این روش، برای هر مقدار مدل ابتدا موقعیت آن را در توزیع مدل (صدک متناظر) مشخص می‌شود، سپس مقدار معادل همان صدک از توزیع مشاهداتی استخراج می‌گردد.

$$X_{corr} = F_{obs}^{-1}(F_{ERA5}(X_{ERA5})) \quad (14)$$



شکل ۴. الف) و ب) مقایسه سری زمانی مؤلفه u و v ایستگاه هواشناسی کرنل با میدان باد ERA5 بعد از اصلاح

به منظور ارزیابی جامع عملکرد روش‌های مختلف اصلاح داده‌های ERA5، شاخص‌های خطا شامل Bias، RMSE و Index Scatter محاسبه و مقایسه شدند تا بهترین روش از نظر دقت و کاهش خطا به عنوان روش بهینه اصلاح باد انتخاب شود.

در روش رگرسیون خطی Bias میانگین تا حدودی کاهش یافت (جدول ۱)، اما در بازه‌های سرعت بالا همچنان کم‌برآوردی قابل توجه مشاهده شد. رویکرد اصلاح سرعت-جهت موجب بهبود در زاویه باد و کاهش Bias جهت شد، با این حال خطا در سرعت‌های بالا همچنان

مشاهده شد. نداشت کمی در کاهش خطاهای آماری غیرخطی مؤثر بود و توزیع داده‌ها را به داده‌های مشاهداتی نزدیک‌تر کرد. الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی با در نظر گرفتن روابط غیرخطی بین داده‌های ERA5 و مشاهدات، بهترین تطابق را ایجاد کرد. به‌ویژه مقدار RMSE به‌طور محسوسی کاهش یافت و مقادیر Bias و Id نیز حداقل شدند. ترکیب وزنی نتایج روش‌ها دقت کلی را بهبود بخشید، اما در مقایسه با جنگل تصادفی همچنان خطای بیشتری نشان داد.

جدول ۱. مقایسه خطاها برای مولفه‌های u و v

RMSE		Bias		Correlation		Slope		Id		روش
u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	مولفه‌های سرعت
۱/۹۳	۲/۰۱	۰/۰۴	۰/۶۱	۰/۸۵	۰/۷۳	۱/۰۸	۰/۶۸	۰/۹۱	۰/۸۴	داده‌های اصلی
۱/۹۲	۱/۷۶	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/۸۵	۰/۷۳	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۲	۰/۸۳	رگرسیون خطی
۱/۹۰	۱/۹۲	-۰/۰۶	۰/۱۳	۰/۸۵	۰/۷۵	۱/۰۱	۰/۶۹	۰/۹۲	۰/۸۶	سرعت/جهت
۱/۹۸	۱/۸۷	~۰	~۰	۰/۸۵	۰/۷۴	۰/۸۵	۰/۷۴	۰/۹۲	۰/۸۶	نگاشت کمی
۱/۰۴	۰/۸۸	~۰	۰/۰۱	۰/۹۶	۰/۹۴	۱/۰۵	۱/۰۹	۰/۹۸	۰/۹۷	جنگل تصادفی
۱/۵۲	۱/۳۴	-۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۹۱	۰/۸۵	۱/۰۳	۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۹۲	میانگین وزنی

در مجموع، مقایسه مقادیر خطا نشان داد که روش جنگل تصادفی بهترین عملکرد را در تصحیح باد ERA5 داشته و بیشترین همخوانی را با داده‌های مشاهداتی ایستگاه کرنل ایجاد کرده است. بنابراین، داده‌های اصلاح‌شده توسط این روش به عنوان ورودی نهایی مدل SWAN استفاده شدند.

۳-۲. حساسیت سنجی مدل

به منظور تعیین مناسب‌ترین پارامترسازی فیزیکی برای شبیه‌سازی میدان موج در محیط نیمه‌محصور خلیج بوتانی، مجموعه‌ای از آزمایش‌های حساسیت‌سنجی طراحی و اجرا شد. هدف اصلی این مرحله، ارزیابی تأثیر ترکیب‌های مختلف جملات منبع-چاهک، شامل ورودی باد، اتلاف انرژی ناشی از سفیدک، اصطکاک بستر و شکست ناشی از کم‌عمقی، بر دقت بازتولید ارتفاع شاخص موج بود. در این راستا، سه بسته فیزیکی KOMEN، WST و ST6 در مدل

SWAN مورد استفاده قرار گرفتند که انتخاب آن‌ها بر اساس تفاوت‌های بنیادین در فرمول‌بندی ورودی باد و مکانیزم‌های اتلاف سفیدک انجام شد. بسته KOMEN به عنوان پارامتردهی کلاسیک و پیش‌فرض SWAN، مبنای مناسبی برای مقایسه سایر بسته‌ها فراهم می‌کند و همچنان در مطالعات ساحلی کاربرد گسترده‌ای دارد [۱۲]. با این حال، حساسیت بالای آن به ضرایب اتلاف سفیدک می‌تواند در محیط‌های کم‌عمق منجر به بیش‌برآورد یا کم‌برآورد انرژی موج شود. بسته WST مبتنی بر رویکرد اشباع غیرخطی طیف و وابستگی اتلاف سفیدک به شیب موج توسعه یافته و در مطالعات اخیر به عنوان گزینه‌ای کارآمد برای شبیه‌سازی هم‌زمان موج بادی و دورآ، به‌ویژه در نواحی ساحلی کم‌عمق، معرفی شده است [۸]. بسته ST6 نیز به عنوان نسل جدیدتری از پارامتردهی ورودی باد و سفیدک، بر اساس توسعه‌های روگرس و همکاران ارائه شده است [۳۴]، هرچند عملکرد آن در

محیط‌های نیمه‌محصور و کم‌عمق به‌شدت به انتخاب ضرایب کالیبراسیون، فرمول‌بندی درگ باد و مقیاس‌بندی سرعت باد وابسته است.

فرآیند حساسیت‌سنجی به‌صورت مرحله‌ای انجام شد. ابتدا ضرایب ائتلاف انرژی سفیدک در هر بسته تغییر داده شد، زیرا این فرآیند نقش غالبی در کنترل تراز انرژی موج دارد. سپس، مدل‌های مختلف اصطکاک بستر به‌منظور ارزیابی ائتلاف انرژی در نواحی کم‌عمق بررسی شدند. در گام نهایی، فرمول‌بندی‌های مختلف شکست ناشی از کم‌عمقی ارزیابی

شد تا نقش آن‌ها در بهبود بازتولید تغییرات زمانی ارتفاع موج، به‌ویژه در شرایط پرنرژی، مشخص شود. این رویکرد گام‌به‌گام امکان تفکیک نقش نسبی فرآیندهای فیزیکی را فراهم کرد و مبنایی برای مقایسه عملکرد بسته‌های KOMEN، WST و ST6 در شرایط خاص خلیج بوتانی فراهم ساخت. بر این اساس، تنها پیکربندی‌هایی که تطابق بهتری با داده‌های میدانی نشان دادند، به‌عنوان پارامتردهی نهایی انتخاب و در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۲. تنظیمات فیزیکی مدل (علامت * یعنی برای آن بسته فعال نیست)

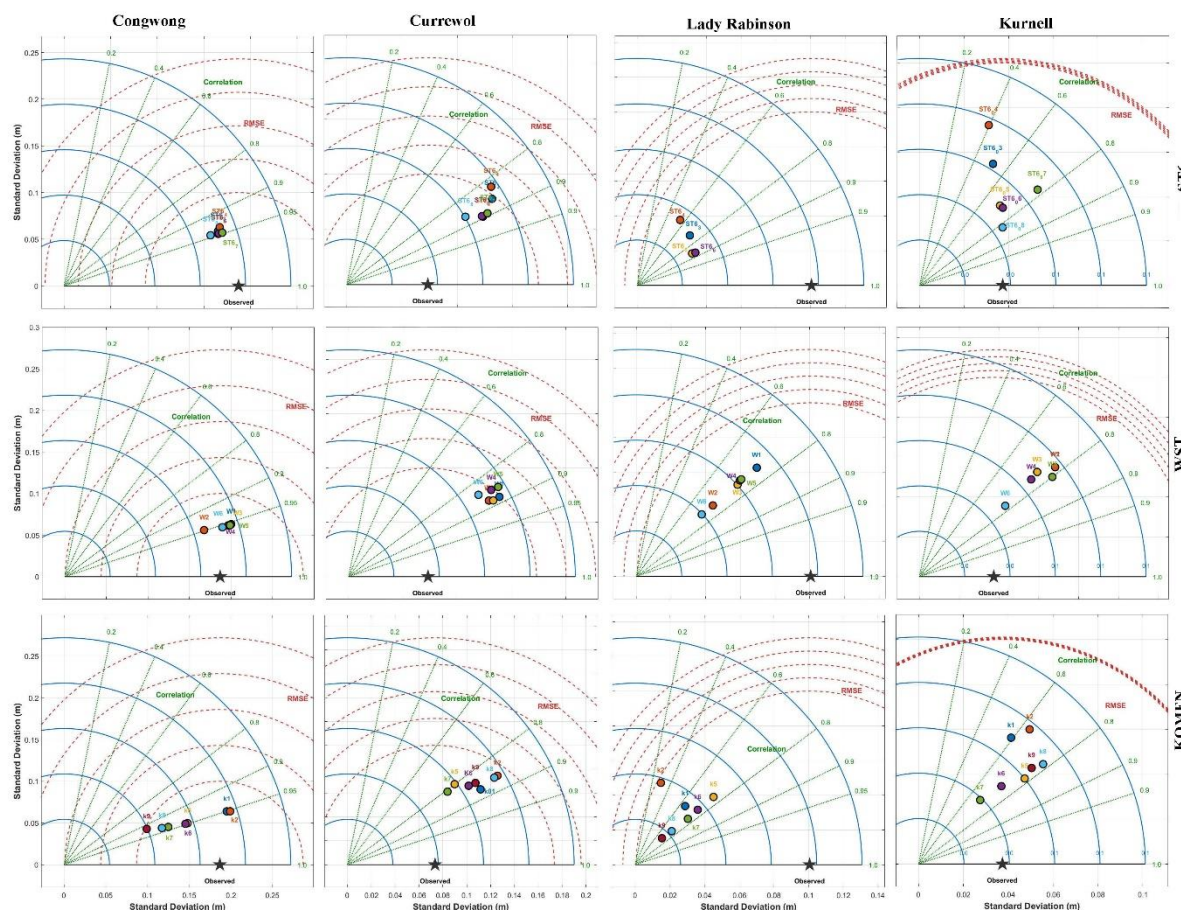
		Wind input	Withcapping				Bottem friction		Wave breaking		SSwell
			Cds	stpm	a_1	a_2	Jonswap	Madsen	constant	BKD	cdsv
KOMEN	K1	KOMEN	۲/۳۶e-۵	۳/۰۲e-۳	*	*		۰/۰۵	*	۰/۵۴	*
	K2		۴/۵e-۵	۴/۰e-۳	*	*	*	۰/۰۵	*	۰/۳۵	*
	K5		۲/۳۶e-۴	۳/۰۲e-۳	*	*	*	۰/۰۵	*	۰/۵۴	*
	K6		۵/۵e-۲	۴/۰e-۳	*	*	*	۰/۰۷	*	۰/۴۸	*
	K7		۹/۵e-۲	۳/۰۲e-۳	*	*	*	۰/۰۹	*	۰/۲۸	*
	K8		۴/۵e-۳	۴/۰e-۳	*	*	۰/۰۷	*	۰/۳۵	*	*
	K9		۳/۵e-۲	۴/۰e-۳	*	*	۰/۰۷	*	۰/۳۵	*	*
WST	W1	YAN	*	*	*	*	۰/۰۴	*	۰/۷۳	*	*
	W2		*	*	*	*	*	۰/۰۵	*	۰/۵۴	*
	W3		*	*	*	*	۰/۰۶	*	۰/۶	*	*
	W4		*	*	*	*	۰/۰۶	*	۰/۵۵	*	*
	W5		*	*	*	*	۰/۰۶	*	۰/۷۳	*	*
	W6		*	*	*	*	*	۰/۰۷	*	۰/۳۵	*
ST6	ST6/3	HWANG	*	*	۶/۵e-۶	۸/۵e-۵	*	۰/۰۵	*	۰/۵۴	۱/۲
	ST6/4		*	*	۴/۷e-۷	۶/۶e-۷	*	۰/۰۶	*	۰/۵۴	۳
	ST6/5		*	*	۴/۷e-۳	۶/۶e-۷	*	۰/۰۶	*	۰/۳۴	۳
	ST6/6		*	*	۴/۷e-۳	۶/۶e-۳	*	۰/۰۶	*	۰/۳۴	۳
	ST6/7		*	*	۴/۷e-۳	۶/۶e-۳	۰/۰۶	*	۰/۳۴	*	۵
	ST6/8		*	*	۸/۷e-۲	۶/۶e-۳	۰/۰۷	*	۰/۲۴	*	۵

۳-۳. تحلیل شاخص‌های آماری در عملکرد مدل

به منظور ارزیابی جامع عملکرد پیکربندی‌های مختلف مدل SWAN و مقایسه آن‌ها با داده‌های میدانی، از نمودار تیلور، دیاگرام چگالی احتمال^۶ (PDF) و نمودار کوانتیل^۷ (Q-Q) استفاده شد تا توانایی مدل در بازتولید هم‌زمان تغییرات زمانی، توزیع آماری و دامنه نوسانات ارتفاع موج بررسی شود. در ادامه نتایج ارائه شده است.

۳-۳-۱. تحلیل بر اساس نمودار تیلور

نمودار تیلور با نمایش هم‌زمان ضریب همبستگی، انحراف معیار نرمال‌شده و خطای RMSE امکان ارزیابی یکپارچه و مقایسه سریع عملکرد پیکربندی‌های مختلف مدل در بازتولید تغییرات زمانی ارتفاع موج را فراهم می‌کند (شکل ۵). در این چارچوب، نزدیکی هر پیکربندی به نقطه مرجع داده‌های مشاهده‌ای بیانگر عملکرد مطلوب‌تر آن است [۳۴، ۳۵، ۳۶].



شکل ۵. ارزیابی عملکرد سه پیکربندی ST6، WST، Komen با استفاده از دیاگرام تیلور برای ایستگاه کنگونگ، کروول، لیدی رابینسون و کرنل

همبستگی قابل قبولی نشان می‌دهند. در ایستگاه کروول، واقع در شرایط ساحلی محافظت‌شده، تمامی بسته‌ها فاصله محسوسی از نقطه مرجع دارند. با وجود همبستگی نسبتاً بالا در برخی نسخه‌های WST و ST6، مقادیر بزرگ‌تر انحراف معیار و RMSE حاکی از ناتوانی مدل‌ها در بازتولید مقادیر مطلق ارتفاع موج است. در این ایستگاه، نسخه‌های k6 و k7 از بسته KOMEN نسبت به سایر نسخه‌ها عملکرد بهتری دارند، هرچند فاصله آن‌ها از نقطه مرجع همچنان قابل توجه است. در ایستگاه لیدی رابینسون، بسته WST، به‌ویژه

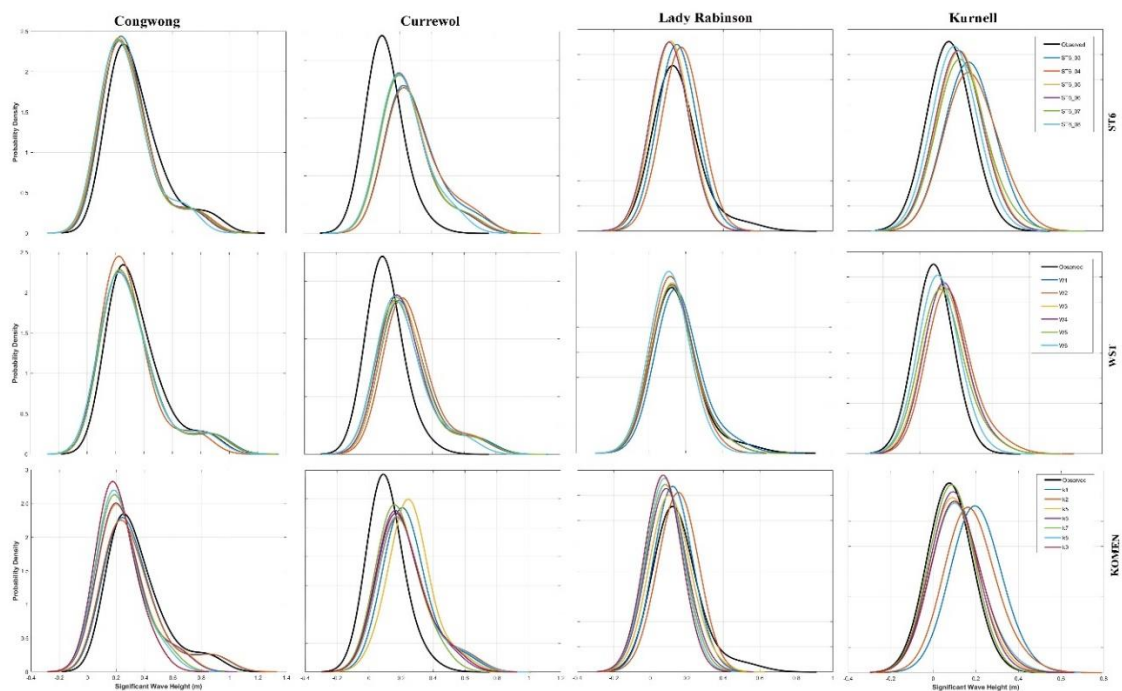
بررسی نتایج نشان می‌دهد که در ایستگاه کنگونگ، بسته WST، به‌ویژه نسخه‌های W1 و W5، با همبستگی بالا (۰/۹۵) و مقادیر کمتر انحراف معیار و RMSE، بهترین عملکرد را نسبت به سایر پیکربندی‌ها دارد. نسخه‌های اولیه بسته KOMEN (k1 و k2) نیز عملکرد قابل قبولی نشان می‌دهند، اما در نسخه‌های انتهایی این بسته (k7 تا k9) به دلیل افزایش بیش‌ازحد پارامترهای اتلاف انرژی (جدول ۲)، فاصله از نقطه مرجع افزایش یافته است. بسته ST6 عموماً عملکرد ضعیف‌تری دارد و تنها برخی نسخه‌های میانی آن

اگرچه بیش‌برآورد ارتفاع موج در این ایستگاه همچنان مشهود است.

۳-۲. تحلیل بر اساس نمودار توزیع چگالی احتمال

نمودار PDF امکان مقایسه توزیع آماری ارتفاع موج شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای را فراهم می‌کند و نشان می‌دهد که کدام پیکربندی قادر است شکل کلی توزیع، میزان پراکندگی و فراوانی رخداد امواج با ارتفاع‌های مختلف را بهتر بازتولید کند (شکل ۶). نزدیکی منحنی‌های مدل و داده میدانی در این نمودار بیانگر بازنمایی مناسب رژیم انرژی موج است [۳۵، ۳۸].

نسخه W3، نسبت به سایر بسته‌ها عملکرد مناسب‌تری دارد و با همبستگی متوسط (۰/۷۵) و انحراف معیار نزدیک‌تر به داده‌های میدانی، به نقطه مرجع نزدیک‌تر است. بسته KOMEN در این ایستگاه پراکندگی بیشتری نشان می‌دهد و نسخه‌های انتهایی آن فاصله زیادی از نقطه مرجع دارند. در بسته ST6، با وجود همبستگی نسبتاً بالا، مقادیر RMSE مانع از بهبود موقعیت نسخه‌ها در نمودار تیلور شده است. در ایستگاه کرنل، که مشخصه آن شرایط موجی کم‌انرژی است، اغلب پیکربندی‌ها فاصله قابل توجهی از نقطه مرجع دارند. با این حال، نسخه‌هایی مانند k7 از بسته KOMEN و ST6/8 نسبت به سایر پیکربندی‌ها عملکرد بهتری نشان می‌دهند و همبستگی بالاتری با داده‌های میدانی دارند،



شکل ۶. عملکرد سه پیکربندی ST6، WST، KOMEN با استفاده از دیاگرام چگالی توزیع احتمال برای ایستگاه کنگونگ، کروول، لیدی‌رابینسون و کرنل

نمودارهای PDF نشان می‌دهند که اغلب بسته‌ها ارتفاع موج را بیش از مقدار واقعی شبیه‌سازی کرده‌اند و اختلاف قابل توجهی در توزیع امواج پرانرژی مشاهده می‌شود. این الگو با شرایط ساحلی محافظت‌شده و کاهش انرژی موج ورودی سازگار است و بیانگر محدودیت مدل‌ها در بازتولید صحیح رژیم انرژی موج در این ایستگاه است. در ایستگاه لیدی رابینسون، توزیع‌های PDF نشان می‌دهد که بسته WST، به‌ویژه نسخه W3، شکل کلی توزیع ارتفاع موج را به‌طور

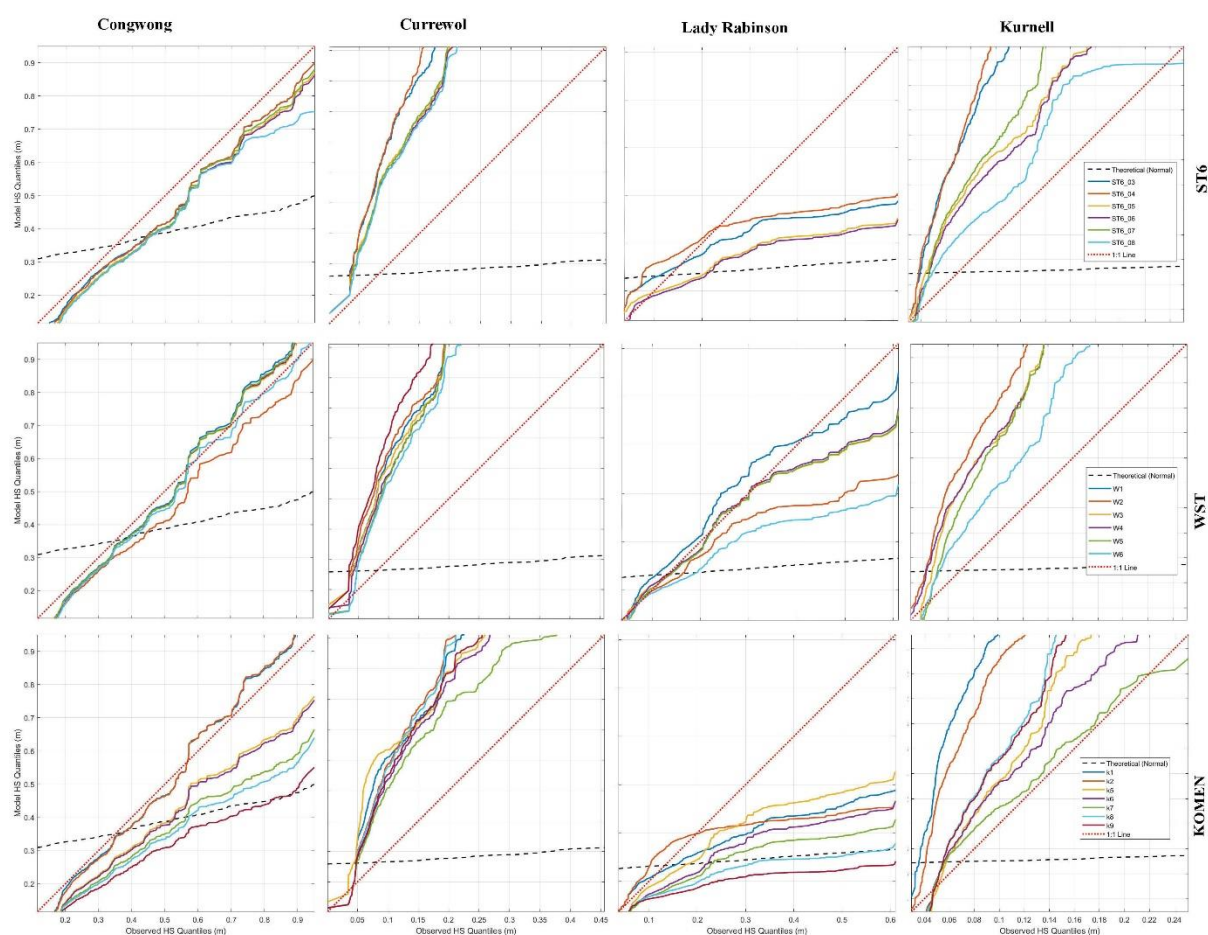
در ایستگاه کنگونگ، منحنی‌های PDF مربوط به بسته WST بیشترین تطابق را با داده‌های میدانی دارند و به‌ویژه در توزیع موج‌های پرانرژی مرتبط با امواج دور آ را به‌خوبی بازتولید می‌کنند. در مقابل، بسته KOMEN در نسخه‌های اولیه (k1 و k2) تطابق مناسبی دارد، اما در نسخه‌های انتهایی (k5 تا k9) توزیع انرژی موج تضعیف شده که بیانگر اتلاف بیش از حد انرژی موج است. بسته ST6 نیز پراکندگی کمتری نسبت به داده‌های میدانی نشان می‌دهد. در ایستگاه کروول،

به خط ۱:۱ بیانگر توان مدل در بازسازی دامنه کامل نوسانات ارتفاع موج است [۳۸]. در ایستگاه کنگونگ، نسخه‌های WST بیشترین تطابق را با خط ۱:۱ در کل دامنه صدک‌ها نشان می‌دهند (شکل ۷)، در حالی که Komen و ST6 به‌ویژه در صدک‌های بالاتر دچار انحراف هستند. در ایستگاه کروول، تمامی بسته‌ها انحراف قابل توجهی از خط ۱:۱ نشان می‌دهند که بیانگر بیش‌برآورد موج‌های بزرگ‌تر است. در ایستگاه لیدی رابینسون، نسخه W3 از بسته WST تطابق بهتری در صدک‌های میانی دارد، اما در صدک‌های بالا اندکی کم‌برآورد مشاهده می‌شود. در ایستگاه کرنل نیز، اگرچه روند کلی صدک‌ها بازتولید شده است، اما در بخش بالایی توزیع بیش‌برآورد ارتفاع موج همچنان وجود دارد.

مناسبی بازتولید می‌کند، اگرچه دامنه تغییرات نسبت به ایستگاه کنگونگ کاهش یافته است. در مقابل، بسته Komen پراکندگی بیشتری دارد و نسخه‌های انتهایی آن بازنمایی ضعیفی از توزیع ارتفاع موج نشان می‌دهند. بسته ST6 نیز گرچه شکل کلی توزیع را بازتولید کرده، اما دامنه موج‌ها اندکی کم‌برآورد شده است. در ایستگاه کرنل، نمودارهای PDF نشان می‌دهد که مدل‌ها روند کلی تغییرات ارتفاع موج را بازتولید کرده‌اند، اما همچنان بیش‌برآورد هستند. نسخه‌هایی مانند k7 و ST6/8 توزیع نزدیک‌تری به داده‌های میدانی نشان می‌دهند.

۳-۳-۳. تحلیل بر اساس نمودار Q-Q

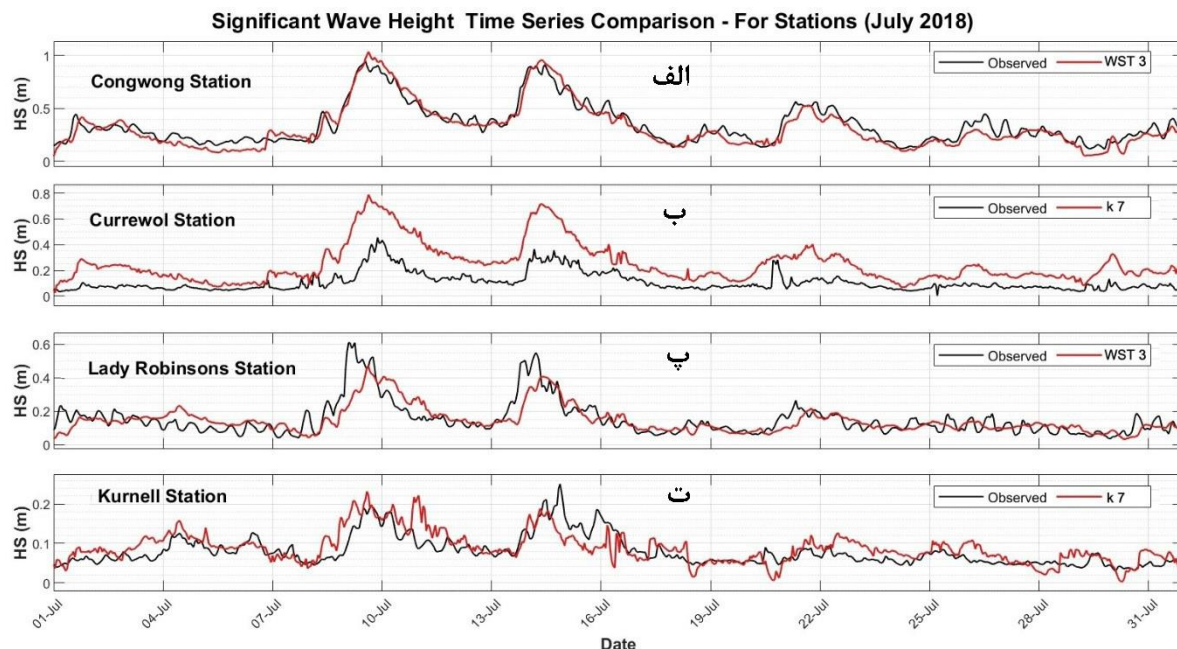
نمودارهای Q-Q برای بررسی تطابق کمی بین صدک‌های توزیع مدل و مشاهدات به کار رفتند (شکل ۸). نزدیکی نقاط



شکل ۷. عملکرد سه پیکربندی ST6، WST، Komen با استفاده از دیاگرام Q-Q برای ایستگاه کنگونگ، کروول، لیدی رابینسون و کرنل

اگرچه روند زمانی شبیه‌سازی شده خوب بود، مقادیر مطلق ارتفاع موج بیش از واقعیت پیش‌بینی شده‌است. به عنوان یک نمونه از ارزیابی‌های انجام شده در این تحقیق، نمودارهای ارتفاع موج شبیه‌سازی شده برای مدل‌های بهینه هر ایستگاه در مقایسه با داده‌های میدانی در شکل (۸) نشان داده شده‌است.

نمودارها و شاخص‌های آماری نشان دادند که مدل SWAN با پیکربندی‌های متفاوت توانست است، روند زمانی تغییرات موج را به‌خوبی بازتولید کند. به‌طوریکه در ایستگاه‌های کنگونگ و لیدی رابینسون دقت مقادیر ارتفاع موج نسبتاً بالا بود، اما در ایستگاه‌های محافظت‌شده کروول و کرنل،



شکل ۸. مقایسه ارتفاع موج شبیه‌سازی شده توسط SWAN (خط قرمز) با داده‌های مشاهداتی (خط مشکی) در هر چهار ایستگاه

مدل‌ها با کاهش همبستگی و افزایش خطا، به‌ویژه در رویدادهای پرانرژی، همراه بود. هرچند بسته‌های WST و ST6 روند زمانی موج را بازتولید کردند، اما در برآورد مقدار مطلق ارتفاع موج دچار کم‌برآوردی انرژی شدند. در ایستگاه کرنل، با انرژی موج ورودی بسیار پایین، مدل‌ها نتوانستند روند زمانی موج را به‌خوبی شبیه‌سازی کنند، اما بیش‌برآورد سیستماتیک ارتفاع موج مشاهده شد؛ به‌طوری که نسخه k7 بهترین عملکرد را از نظر RMSE و ST6/8 بیشترین همبستگی را با داده‌های میدانی نشان داد. به‌طور کلی، مدل SWAN در بازنمایی روند زمانی موج در تمامی ایستگاه‌ها، به‌ویژه در شرایط کم‌انرژی و سواحل محافظت‌شده، عملکرد قابل قبولی دارد، اما دقت آن در برآورد مقادیر مطلق ارتفاع موج، به‌خصوص در امواج بزرگ، محدود بوده و اغلب با بیش‌برآورد انرژی همراه است. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد مدل تنها به نوع بسته فیزیکی وابسته نیست، بلکه عوامل مورفودینامیکی، عمق آب، فاصله از دهانه خلیج و

۴. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، کارایی مدل SWAN در چهار ایستگاه ساحلی خلیج بوتانی بررسی شد و نتایج نشان داد که دقت شبیه‌سازی به‌شدت به موقعیت ایستگاه‌ها و میزان بازبودن یا محافظت‌شدگی سواحل وابسته است. در ایستگاه باز کنگونگ، بسته WST بهترین عملکرد را در بازتولید روند زمانی و دامنه ارتفاع موج ارائه داد، در حالیکه برخی نسخه‌های KOMEN (k1 و k2) نیز عملکرد قابل قبولی داشتند، و بسته ST6 دقت پایین‌تری نشان داد. در ساحل محافظت‌شده کروول، اگرچه روند زمانی تغییرات موج به‌خوبی بازتولید شد، ارتفاع موج‌ها عموماً بیش‌برآورد گردید؛ در این ایستگاه نسخه‌های KOMEN، به‌ویژه k6 و k7، کمترین RMSE را ثبت کردند، اما بازتولید دقیق دامنه موج همچنان با محدودیت همراه بود. در ایستگاه لیدی رابینسون، واقع در دورترین فاصله از دهانه خلیج، عملکرد

- [6] Cavaleri L, Barbariol F, Benetazzo A. Wind-wave modeling: Where we are, where to go. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020 Apr 7;8(4):260.
- [7] Shao Z, Liang B, Sun W, Mao R, Lee D. Whitecapping term analysis of extreme wind wave modelling considering spectral characteristics and water depth. *Continental Shelf Research*. 2023 Feb 1;254:104909...
- [8] Beyramzade M, Abolfathi S, Lin B. Assessment of ERA5 wind field for coastal wave modelling in semi-enclosed basins. *Ocean Engineering*. 2019 ; 188, 106282. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106282>
- [9] Cavaleri L, Barbariol F, Benetazzo A, Waseda T. Ocean wave physics and modeling: The message from the 2019 wise meeting. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2019 Dec;100(12):ES297-300.
- [10] Rogers WE, Kaihatu JM, Petit HA, Booij N, Holthuijsen LH. Diffusion reduction in an arbitrary scale third generation wind wave model. *Ocean Engineering*. 2002 Sep 1;29(11):1357-90.
- [11] Roland A, Ardhuin F. On the developments of spectral wave models: numerics and parameterizations for the coastal ocean. *Ocean Dynamics*. 2014 Jun;64(6):833-46.
- [12] Komen GJ, Hasselmann S, Hasselmann K. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *Journal of physical oceanography*. 1984 Aug 1;14:1271-85.
- [13] Alves JH, Banner ML. Performance of a saturation-based dissipation-rate source term in modeling the fetch-limited evolution of wind waves. *Journal of Physical Oceanography*. 2003 Jun;33(6):1274-98.
- [14] van der Westhuysen AJ, Zijlema M, Battjes JA. Nonlinear saturation-based whitecapping dissipation in SWAN for deep and shallow water. *Coastal Engineering*. 2007 Feb 1;54(2):151-70.
- [15] The SWAN team. SWAN: User Manual (SWAN Cycle III version 41.31AB) Delft Univ. Technol. 2021a, Available at: <https://swanmodel.sourceforge.io/>.
- [16] Sun W, Liang B, Shao Z, Wang Z. Analysis of Komen scheme in the SWAN model for the whitecapping dissipation during the tropical cyclone. *Ocean Engineering*. 2022 Dec 15;266:113060.
- [17] Appendini CM, Torres-Freyermuth A, Oropeza F, Salles P, López J, Mendoza ET. Wave modeling performance in the Gulf of Mexico and Western Caribbean: Wind reanalyses

میزان نفوذ امواج دورا نقش تعیین کننده ای دارند. در سواحل بازتر خلیج، مانند کنگونگ و تا حدی لیدی رابینسون، حفظ انرژی موج دورا و بازتولید واقع بینانه تر آن مشاهده شد، در حالی که در سواحل محافظت شده کروول و کرنل، انتقال بیش از حد انرژی موج دورا به داخل خلیج موجب بیش برآورد ارتفاع موج و کاهش دقت شبیه سازی گردید. این بیش برآورد سیستماتیک در سواحل محافظت شده را می توان تا حد زیادی به ماهیت فاز-میانگین مدل SWAN نسبت داد؛ به گونه ای که علی رغم فعال سازی جمله های اتلاف امواج دورا و آزمون فرمول بندی های مختلف ضریب درگ، مدل قادر به اتلاف کافی انرژی موج دورا در محیط های کم عمق و محافظت شده نبوده است. در مقابل، در سواحل بازتر خلیج، که نقش فرآیندهای فازی موضعی، بازتاب و تداخل موج کمتر است، SWAN توانسته است ارتفاع موج را با دقت بالاتری شبیه سازی کند.

سپاسگزاری

بدین وسیله از دانشگاه سیدنی بابت حمایت در تأمین اطلاعات و داده های میدانی این مطالعه قدردانی می شود.

مراجع

- [1] Nordstrom KF. Estuarine beaches: an introduction to the physical and human factors affecting use and management of beaches in estuaries, lagoons, bays and fjords. Springer Science & Business Media; 1992 May 31
- [2] Bird ECF. Coastal geomorphology: an introduction. Chichester (UK): John Wiley; 2000. p. 295–330
- [3] Vila-Concejo A, Gallop SL, Largier JL. Sandy beaches in estuaries and bays. In: *Sandy beach morphodynamics 2020* Jan 1 (pp. 343-362). Elsevier.
- [4] Booij NR, Ris RC, Holthuijsen LH. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of geophysical research: Oceans*. 1999 Apr 15;104(C4):7649-66.
- [5] Lei Z, Wu W, Gu Y, Zhai F, Li P. A general method to determine the optimal whitecapping dissipation coefficient in the SWAN model. *Frontiers in Marine Science*. 2023 Nov 30;10:1298727.

- <https://data.nsw.gov.au/data/dataset/nsw-bathymetry-sourced-from->
- [29] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. *ERA5 reanalysis dataset* [Internet]. 2026 [cited 2026 Jan 5]. Available from: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/era5>
- [30] de León SP, Bettencourt JH. Composite analysis of North Atlantic extra-tropical cyclone waves from satellite altimetry observations. *Advances in Space Research*. 2021 Jul 15;68(2):762-72.
- [31] Semedo A, Vettor R, Breivik Ø, Sterl A, Reistad M, Soares CG, Lima D. The wind sea and swell waves climate in the Nordic seas. *Ocean dynamics*. 2015 Feb;65(2):223-40.
- [32] Wu W, Liu Z, Zhai F, Li P, Gu Y, Wu K. A quantitative method to calibrate the SWAN wave model based on the whitecapping dissipation term. *Applied Ocean Research*. 2021 Sep 1;114:102785.
- [33] Rogers WE, Babanin AV, Wang DW. Observation-consistent input and whitecapping dissipation in a model for wind-generated surface waves: Description and simple calculations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2012 Sep;29(9):1329-46.
- [34] Siah Sarani A, Azadi M, Layeghi B, Babazadeh D. The Sensitivity Analysis of Whitecapping Dissipation Term for Calibration of SWAN Model Forced with ERA5 Winds in the Gulf of Oman. *Nivar*. 2023 Mar 21;47(120-121):15-36.
- [35] Taylor KE. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of geophysical research: atmospheres*. 2001 Apr 16;106(D7):7183-92.
- [36] Ferrarin C, Roland A, Bajo M, Umgiesser G, Cucco A, Davolio S, Buzzi A, Malguzzi P, Drofa O. Tide-surge-wave modelling and forecasting in the Mediterranean Sea with focus on the Italian coast. *Ocean Modelling*. 2013 Jan 1;61:38-48.
- [37] Ricker M, Kousal J, Günther H, Behrens A, Staneva J. The Introduction of Observation-Based Wave Physics into the Wind-Wave Model WAM: Wave Assessments for a Semi-Enclosed Basin. *Ocean Modelling*. 2025 May 22:102564.
- assessment. *Applied Ocean Research*. 2013 Jan 1;39:20-30.
- [18] Lv X, Yuan D, Ma X, Tao J. Wave characteristics analysis in Bohai Sea based on ECMWF wind field. *Ocean Engineering*. 2014 Nov 15;91:159-71.
- [19] Amarouche K, Akpınar A, Bachari NE, Çakmak RE, Houma F. Evaluation of a high-resolution wave hindcast model SWAN for the West Mediterranean basin. *Applied Ocean Research*. 2019 Mar 1;84:225-41.
- [20] Elkut AE, Taha MT, Zed AB, Eid FM, Abdallah AM. Wind-wave hindcast using modified ECMWF ERA-Interim wind field in the Mediterranean Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2021 May 5;252:107267.
- [21] Umesh PA, Behera MR. On the improvements in nearshore wave height predictions using nested SWAN-SWASH modelling in the eastern coastal waters of India. *Ocean Engineering*. 2021 Sep 15;236:109550.
- [22] Rahbani, M., Vila-Concejo, A., Fellowes, T.E., Gallop, S.L., Winkler-Prins, L. and Largier, J.L., 2022. Spatial patterns in wave signatures on beaches in estuaries and bays. *Geomorphology*, 398, p.108070.
- [23] The SWAN team. SWAN: Scientific and technical documentation (SWAN Cycle III version 41.31AB). . 2021b Delft Univ. Technol. Available at: <https://swanmodel.sourceforge.io>
- [24] Janssen PA. Consequences of the effect of surface gravity waves on the mean air flow. In: *Breaking Waves: IUTAM Symposium Sydney, Australia 1991 1992* (pp. 193-198). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [25] Günther H, Hasselmann S, Janssen PA. The WAM model Cycle 4 (revised version).
- [26] Pierson Jr WJ, Moskowitz L. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of SA Kitaigorodskii. *Journal of geophysical research*. 1964 Dec 15;69(24):5181-90.
- [27] Liu Q, Rogers WE, Babanin AV, Young IR, Romero L, Zieger S, Qiao F, Guan C. Observation-based source terms in the third-generation wave model WAVEWATCH III: Updates and verification. *Journal of Physical Oceanography*. 2019 Feb;49(2):489-517.
- [28] NSW Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water. NSW bathymetry sourced from multibeam and marine lidar surveys [Internet]. Published 27 Oct 2023; Updated 23 Oct 2025. Dataset. Creative Commons Attribution; [cited 2026 Feb 3]. Available from:

پی‌نوشت‌ها

1. Simulating WAVes Nearshore
2. Westhuysen
3. Linear Regression
4. Quantile Mapping
5. Random Forest Machine Learning
6. Probability Density Function
7. Quntile_Quntile plot