

شبیه سازی ایجاد امواج باد تحت تاثیر استهلاک ناشی از بستر ریزدانه در خلیج

دیلیم

فاطمه عامری^۱، سید عباس حق شناس^۲ و سرمد قادر^{۳*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

^۲ استادیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

^۳ دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۰۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۵)

چکیده

تأثیر لایه گلی نرم بر روند تشکیل امواج ناشی از باد در آب‌هایی که عمق کم و میانی دارند، در خلیج دیلیم به کمک مدل عددی-طیفی SWAN بررسی شده است. بندر دیلیم در شمال غربی خلیج فارس واقع شده است و به شدت تحت تأثیر انباشته‌های ریزدانه و گل سیالی است که بیشتر برخاسته از اروندرود است. نتیجه عبور امواج سطحی از روی بستر تشکیل یافته از ریزدانه‌های چسبنده، کاهش ارتفاع موج در امتداد خط انتشار موج است. صحت‌سنجی با کمک داده‌های اندازه‌گیری میدانی موجود در خلیج دیلیم برای فوریه و مارس سال ۲۰۰۷ انجام گرفته است. شبیه‌سازی اولیه با مدل SWAN بدون اعمال اثر لایه گل سیال، تمایل فراتخمین برای ارتفاع موج مشخصه را نشان می‌دهد. افزایش زبری بستر برای بهبود نتایج شبیه‌سازی موج، استهلاک بیشتر برای ارتفاع موج مشخصه با فرکانس‌های پایین‌تر از ۰/۲۵ را نشان می‌دهد و روی امواج با فرکانس بالاتر تأثیر زیادی دیده نمی‌شود. در مطالعات میدانی، استهلاک امواج برای امواج با فرکانس‌های بالاتر مشاهده شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، دقت مناسب شبیه‌سازی با استفاده از پارامترهای مختلف مدل و استفاده از فرایند کالیبراسیون محقق نشد؛ لذا پس از اعمال اثر لایه گل سیال در مدل نسل سوم ایجاد و انتشار امواج SWAN، نتایج شبیه‌سازی‌های نهایی با اعمال اثر اندرکنش امواج با لایه گل سیال، بهبود درخور توجهی را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی بر کارآمد بودن این روش در شبیه‌سازی ایجاد و انتشار امواج روی سواحل ریزدانه گلی دلالت دارد.

واژه‌های کلیدی: امواج ناشی از باد، شبیه‌سازی امواج، مدل SWAN، سواحل ریزدانه گلی، اندرکنش موج و لایه گل سیال، استهلاک امواج

۱ مقدمه

تفاوتی که شبیه‌سازی امواج در نواحی عمیق (دریای آزاد) با نواحی کم‌عمق دارد، در اختلاف اثر ناشی از عمق است. در نواحی عمیق، انرژی بین باد و موج، اندرکنش چهارگانه موج-موج و اتلاف انرژی مهم‌ترین منابع تأثیرگذار در معادلات ایجاد موج هستند (کومن و همکاران، ۱۹۹۴). در انتقال موج به نواحی کم‌عمق و بینایی، سازوکارهای آب کم‌عمق همانند زبری بستر، شکست، انتشار و استهلاک انرژی و نیز اندرکنش‌های غیرخطی اهمیت می‌یابند. تأثیر عمق بر امواج ناشی از باد شامل استهلاک در اثر شیب یا کم‌عمق‌شدگی، اندرکنش‌های غیرخطی موج-موج سه‌گانه یا اندرکنش‌های موج-موج غیرخطی چهارگانه خواهد بود. به‌طور کلی، پیچیدگی ناحیه‌ای که رشد امواج در آن شبیه‌سازی می‌شود، می‌تواند بر نحوه شکل‌گیری امواج مؤثر باشد. در آب‌های کم‌عمق، پیچیدگی‌های ناشی از عمق‌سنجی می‌تواند به دلیل بستر نرمی باشد که اقلیم موج را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در مناطقی که بستر نرم دارند، امواج بزرگ، موجب تشکیل گل سیال در لایه فوقانی بستر می‌شوند و انتقال جرم در گل سیال تحت تأثیر مداوم موج و نیروی گرانش صورت می‌گیرد. در این حالت اثر رسوخ اوربیتال‌های موج به درون لایه گل سیال و انتقال انرژی به درون این لایه پس از تشکیل آن، موجب استهلاک انرژی و افت ارتفاع موج می‌شود. این اندرکنش باعث انتقال جرم در لایه رسوبی نیز می‌شود.

مثال‌های متعددی از سواحل ریزدانه در سراسر دنیا یافت می‌شود که اغلب در نزدیکی رودهای بزرگ واقع شده‌اند و از جمله آنها می‌توان به خلیج سانفرانسیسکو، بخش‌هایی از خلیج چاسپیک و سواحل غربی لوئیزیانا در ایالات متحده آمریکا، سواحل غربی شبه‌جزیره مالزی، سواحل سورینام، سواحل کازینو در جنوب شرق برزیل، سواحل شمال شرق چین و خلیج‌های توکیو و آریکیا در

ژاپن اشاره کرد. رسوبات ریزدانه و سواحل پوشیده از این رسوبات در مناطق متعددی از سواحل ایران نیز یافت می‌شوند. در ایران مهم‌ترین بخشی که تحت تأثیر رسوبات چسبنده قرار دارد، سواحل جنوب غربی در حاشیه خلیج فارس است. به‌طور کلی، بخش شمال غربی خلیج فارس به‌شدت تحت تأثیر رسوبات ریزدانه برخاسته از اروندرود قرار دارد و بندرهایی چون هندیجان، ماهشهر و بندر امام روی چنین بستری واقع شده‌اند. در سواحل هندیجان و بندر دیلم، ضخامت لایه گل سیال تا ۲۰ متر نیز دیده شده است که اثر این رسوبات باید در بررسی اقلیم امواج لحاظ شود.

استهلاک زیاد موج از مهم‌ترین شاخص‌های سواحل ریزدانه است که هیدرودینامیک آن را از سواحل غیر ریزدانه متمایز می‌سازد. اغلب در اثر این استهلاک انرژی، امواج در چنین سواحلی بدون شکست به ساحل می‌رسند. این پدیده، اقلیم موج را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین باید توجه داشت که برای تخمین شرایط واقعی دریا، استهلاک انرژی ناشی از اندرکنش با بستر نرم در شبیه‌سازی عددی ایجاد امواج اهمیتی دوچندان می‌یابد. تغییرات مورفودینامیکی سواحل ریزدانه نیز که از اهمیت بسزایی برخوردار است، متأثر از این پدیده و ماهیت پیچیده اندرکنش موج و رسوبات ریزدانه است.

با عبور امواج سطحی از روی بستر تشکیل‌یافته از ریزدانه‌های چسبنده، دو پدیده کاهش انرژی موج در امتداد خط انتشار موج و انتقال جرم در لایه گل سیال اتفاق می‌افتد. درباره اندرکنش موج و بستر نرم، مطالعات متعددی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به مطالعات گید (۱۹۵۸)، دارلیمپر و لیو (۱۹۷۸)، شرم و استون (۲۰۰۳)، الگار و رابنهایمر (۲۰۰۸)، سافاک و همکاران (۲۰۱۳)، بیرام‌زاده و سیادت موسوی (۲۰۱۸) و شمس‌نیا و همکاران (۲۰۱۹) اشاره کرد. این مطالعات اغلب به بررسی تحلیلی این فرایند پرداخته‌اند. بررسی‌های

میدانی نیز نقش مهمی در شناسایی فرایندهای درگیر در انتشار امواج در محیط‌های ساحلی ریزدانه واقعی ایفا می‌کنند. از مهم‌ترین گزارش‌ها می‌توان به نتایج پژوهش‌های تویمان و سوهایدا (۱۹۷۸)، ولز و کمپ (۱۹۸۶)، الگار و رابنهایمر (۲۰۰۸)، راجرز و هلند (۲۰۰۹)، حق‌شناس و سلطانپور (۲۰۰۹)، شرم و همکاران (۲۰۱۱)، ویتروپ و همکاران (۲۰۱۲)، تریکوسکی و همکاران (۲۰۱۵)، ساهین و همکاران (۲۰۱۳)، سفاک (۲۰۱۶) و سلطانپور و همکاران (۲۰۲۰) اشاره کرد. نتایج مطالعات میدانی از دو جنبه عمومی و خاص منطقه موردنظر حائز اهمیت است؛ به این معنی که داده‌های حاصل برای شناخت کلیات انتشار امواج قابل استفاده هستند، هرچند به دلیل تفاوت در خصوصیات بستر و اقلیم امواج، شناخت فرایندهای درگیر در هر محل به اندازه‌گیری‌های مخصوص در آن منطقه نیازمند است.

تعیین عمق لایه گل سیال نیز که برای تحلیل شرایط واقعی ضروری است، به مشخصات موج و خصوصیات بستر ریزدانه بستگی دارد. خصوصیات رسوبات ریزدانه بیشتر با اندازه، ترکیبات و خواص خمیری آنها تعیین می‌شود. ترکیبات بستر ریزدانه اغلب در سواحل و مصب‌ها شامل ترکیبی از مواد معدنی و بیوشیمیایی است. مواد معدنی خود شامل ترکیباتی از انواع کانی‌های رسی و غیررسی (کوارتز و کربنات) است. نسبت ترکیبات آلی و غیرآلی برای رسوبات ساحلی با توجه به شرایط مکانی و فصلی متغیر است. پارامترهای دخیل در خصوصیات بستر ریزدانه، یکی اندازه ذرات است که برای بسترهای گلی کمتر از ۲۰ میکرومتر است و دیگری اندازه نیروهای الکتروشیمیایی بین ذرات است که خود، تابعی از بافت کانی‌شناسی و خصوصیات آب دریا است. از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در رفتار رئومتر رسوبات، درجه حرارت، میزان شوری، میزان PH، درصد رطوبت، غلظت و چگالی و نیز میزان رسوبات آلی و کربناتی است. با تمام

این تفاسیل، ضخامت لایه گل سیال نمی‌تواند مستقل از شرایط محلی فرض شود. علاوه‌براین، ضخامت لایه گل سیال حتی در یک محدوده هم، یکنواخت نیست. در بیشتر پژوهش‌ها، ضخامت لایه گل سیال را پارامتری معلوم و از پیش مفروض درنظر می‌گیرند؛ حال‌آنکه در فرایند اندرکنش موج با بستر ریزدانه، آگاهی از ضخامت واقعی لایه گل سیال اهمیت فراوان دارد. یکی از روش‌های تخمین پارامترهای لایه رسوب چسبیده (مانند ضخامت لایه رسوب و لزجت آن)، استفاده از ویژگی‌های موج مستهلک‌شده می‌باشد که با کمک مدل‌های معکوس انجام می‌گیرد. در این زمینه می‌توان به مطالعات تحویل‌داری و کیهاتو (۲۰۱۱) و هسو و همکاران (۲۰۱۳) اشاره کرد. از مهم‌ترین مطالعات انجام‌شده در جهت شبه‌سازی فرایند سیال شدن بستر و تعیین ضخامت آن می‌توان به مطالعات یاماموتو و همکاران (۱۹۷۸)، مهتا و همکاران (۱۹۹۵)، ون کسل و کرانبرگ (۱۹۹۸)، فودا و همکاران (۱۹۹۳)، چو (۱۹۸۹)، شاینو و همکاران (۲۰۱۷)، سامیکشا و همکاران (۲۰۱۷) و شاکیل و همکاران (۲۰۱۹) اشاره کرد. کارنیل و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهش خود با استفاده از جفت کردن مدل موج و رسوب سعی در تخمین این فرایند داشتند.

اولین بار گید (۱۹۵۸) مطالعاتی را درباره شبه‌سازی ارتفاع امواج روی بستر چسبیده نرم انجام داد. این مطالعات که منحصر به آب‌های کم‌عمق بود، سامانه‌ای دولایه را فرض می‌کرد که لایه بالایی، آب غیرگرانروی و لایه پایینی، گل سیال‌شده گرانروی (رسوبات ریزدانه) بود. بسیاری از نویسندگان مدل گید را ناکامل خوانده‌اند؛ چون اثر گرانروی را در لایه بالا و خاصیت ارتجاعی، تداخل و انعطاف‌پذیری را در لایه پایین درنظر نمی‌گیرد. پس از آن، مدل‌های دیگری مانند دارلیمپر و لیو (۱۹۷۸)، دی ویت (۱۹۹۵) و ان جی (۲۰۰۰) ارائه شدند که در آنها مدل گید با لحاظ کردن گرانروی در لایه بالا و درنظرگرفتن اثر

هیدرواستاتیکی در هر دو لایه توسعه یافت. همچنین برای بررسی واقع‌بینانه اثر ناشی از سیال‌های غیرنیوتنی گرانرو، نظریه‌های زیادی برای استهلاك ناشی از گل سیال ارائه شده است که از جمله آنها می‌توان به نظریه مک پرسون (۱۹۸۰) با فرض لایه ویسکوالاستیک، نظریه می و لیو (۱۹۸۷) با فرض لایه بینگهام-پلاستیک و نظریه یاماموتو و همکاران (۱۹۷۸) با فرض لایه پروالاستیک اشاره کرد. در سال‌های اخیر، برخی مطالعات به گنجاندن مؤلفه اتلاف ناشی از لایه گل سیال در معادلات انتشار امواج برای حل فازی (حل در حوزه زمان) و میانگین فازی (حل در حوزه طیف) پرداخته‌اند که از میان آنها می‌توان به پژوهش کیهاتو و همکاران (۲۰۰۷)، وینترورپ و همکاران (۲۰۰۷)، راجرز و هلند (۲۰۰۹)، کرانبرگ و همکاران (۲۰۱۱) و شرمث و همکاران (۲۰۱۱) اشاره کرد. در مطالعه راجرز و هلند (۲۰۰۹)، از مدل موج SWAN (بویج و همکاران، ۱۹۹۹) برای انتشار امواج در منطقه کازینو برزیل با در نظر گرفتن اتلاف در اثر گل سیال (کرانبرگ و همکاران، ۲۰۱۱) استفاده شده است. اگر از استهلاك ناشی از بستر ریزدانه چشم‌پوشی شود، نتایج مطالعات انجام‌شده گرایش به فراتخمین ارتفاع امواج دارند. در جهت رفع این نقیصه، از نتایج تحقیق کرانبرگ و همکاران (۲۰۱۱) در ایجاد مدلی استفاده شده است که استهلاك ناشی از اندرکنش امواج با لایه بستر نرم را در معادلات امواج لحاظ می‌کند (SWAN-mud). در اصل، توسعه مذکور بر مبنای مدل نسل سومی تولید امواج SWAN شکل گرفته است و استهلاك امواج در اثر اندرکنش با رسوبات ریزدانه به کمک یک مدل دولایه آب (غیرگرانرو و هیدرواستاتیک) و رسوبات ریزدانه (گرانرو و هیدرواستاتیک) شبیه‌سازی می‌شود. مدلهایی که اثر اندرکنش سیال گرانرو با امواج را بررسی می‌کنند، اغلب به صورت یک سامانه دولایه فرض می‌شوند که شامل لایه پایین (گل سیال) با گرانروی زیاد و چگال و

لایه بالا (آب) با گرانروی کمتر است که میزان تراکم لایه گل سیال در آن کمتر است. برای حل معادله تکانه (مومنتوم) حاکم بر هرکدام از لایه‌های این سامانه، یک سری فرضیات با هدف ساده‌سازی حل در نظر گرفته می‌شود. روش گید (۱۹۵۸) اولین مطالعه‌ای است که با فرض هیدرواستاتیک بودن فشار، رابطه انتشار را برای آب کم‌عمق به روش صریح حل می‌کند. در مدل گرانرو ان جی (۲۰۰۰)، لایه رسوب چسبنده به صورت لایه‌ای نازک هم‌رتبه با ضخامت لایه مرزی رسوب فرض می‌شود. در این مدل استهلاك موج که در مدل موج SWAN اعمال شده، از جمله شتاب قائم و انتقال غیرخطی در معادله تکانه صرف‌نظر شده است و با در نظر گرفتن شرایط هیدرواستاتیک فشار، رابطه انتشار به روش صریح حل می‌شود. حل صریح یکی از برتری‌های این روش است. در روش کرانبرگ و همکاران (۲۰۱۱) نیز که ادامه مدل ان جی (۲۰۰۰) است، از جملات انتقال غیرخطی و تنش برشی در معادله تکانه افقی و قائم برای لایه آب و رسوب صرف‌نظر شده است و با در نظر گرفتن شرایط هیدرواستاتیک فشار، معادله انتشار به روش ضمنی حل می‌شود. رابطه کرانبرگ و همکاران (۲۰۱۱) در عین سادگی، از لحاظ محاسباتی پرهزینه است. سیادت موسوی و همکاران (۲۰۱۲) نیز یک رابطه انتشار ضمنی و هیدرواستاتیک را نیز برای مدل SWAN ارائه کرده‌اند که اصلاحاتی است بر روابط کرانبرگ و همکاران (۲۰۱۱). باوجود این، اثرهای پیچیده ناشی از اندرکنش امواج با بستر ریزدانه در مدل‌های ایجاد امواج کمتر بررسی شده است؛ از این رو، در تحقیق حاضر سعی شده است تا به شبیه‌سازی ایجاد امواج در حالت وجود استهلاك ناشی از اندرکنش با بستر گلی پرداخته شود. در این راه به کارگیری مدل عددی-طیفی موج SWAN، شبیه‌سازی ایجاد امواج در سواحل ریزدانه خلیج دلم، واقع در بخش شمال غرب خلیج فارس انجام شده است و بررسی اثر

هواشناسی میان‌مقیاس WRF در منطقه خلیج دیلم و اعمال اثر لایه گل سیال بررسی شده است. سعی شده است نتایج اولیه شبیه‌سازی‌های امواج را که بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش لایه گل سیال در شکل‌گیری موج اجرا شده بود، با فعال کردن اثر ناشی از بستر گلی نرم تعبیه‌شده در مدل صحت‌سنجی شود؛ از این‌رو، نخست مدل موج در شرایط متفاوت در محدوده خلیج فارس اجرا و سپس برای پارامترهای اندازه تفکیک مکانی شبکه محاسباتی، ضریب زبری بستر و ضرایب سفیدک موج واسنجی شد و سعی شد تا کار با نهایت دقت انجام شود. در گام بعد، شرایط بهینه برای اجرای مدل در منطقه مورد مطالعه فراهم و آنگاه مدل در این شرایط اجرا شد. سپس نتایج شبیه‌سازی برای ارتفاع موج شاخص در ایستگاه‌های موجود، صحت‌سنجی و در نهایت، به کمک سنج‌های آماری، نتایج شبیه‌سازی با نتایج مشاهداتی مقایسه شد.

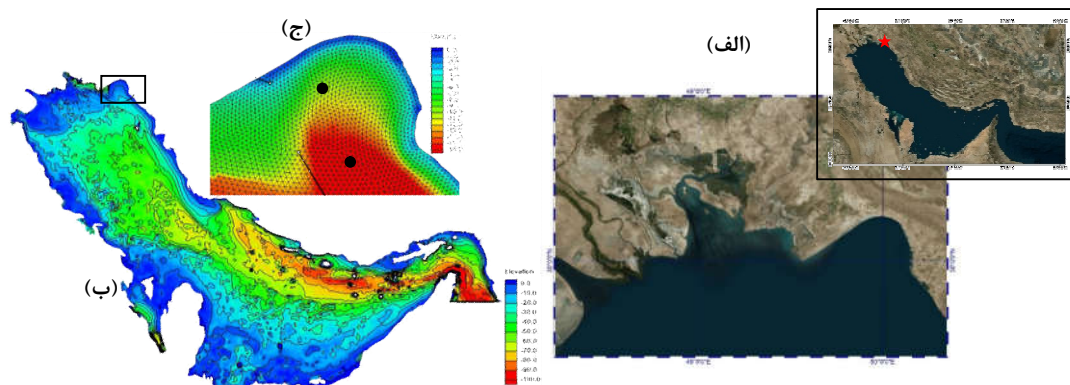
۳ معرفی منطقه مورد مطالعه

رسوبات ریزدانه در نواحی شمال غرب خلیج فارس به‌وفور یافت می‌شوند. چنانچه از عکس ماهواره‌ای شکل ۱-الف برمی‌آید، ناحیه وسیعی در این منطقه تحت

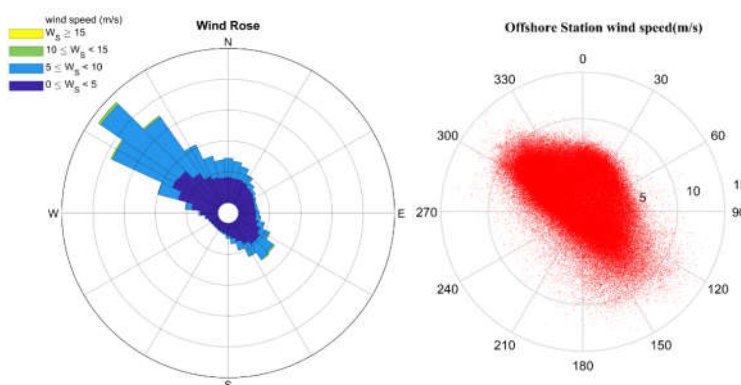
ناشی از بستر نرم گلی نیز با فعال‌سازی ساختار تعبیه‌شده در مدل، مدنظر قرار گرفته است. ارزیابی‌ها در محدوده آب کم‌عمق صورت پذیرفته و بهبود نتایج شبیه‌سازی‌های اولیه، که بدون اعمال اثر لایه گل سیال انجام شده بود، ضمن اعمال این اثر در مدل ایجاد امواج ارزیابی شده است. صحت‌سنجی شبیه‌سازی‌ها به کمک داده‌های حاصل از مطالعات میدانی برای یک بازه زمانی ۳۷ روزه در فوریه و مارس ۲۰۰۷ (حق‌شناس و سلطان‌پور، ۲۰۱۱) انجام شده است.

۲ روش‌شناسی مطالعه حاضر

مطالعه حاضر، شبیه‌سازی طیفی تولید امواج ناشی از باد را در حالت وجود بستر ریزدانه گلی به کمک مدل عددی-طیفی موج SWAN بررسی می‌کند. بهره‌گیری از شبکه محاسباتی نامنظم، اعمال واداشت باد و همچنین اعمال اثر ناشی از بستر نرم گلی از مهم‌ترین مشخصات این مطالعه است. این شبیه‌سازی به‌صورت بررسی موردی تولید امواج ناشی از باد در خلیج دیلم انجام شده است. در گام اول برای راه‌اندازی مدل، از داده‌های باد بازتحلیل ERA5 مرکز ECMWF استفاده و برای تدقیق مدل در گام بعدی، بهبود نتایج با کمک داده‌های میدان باد حاصل از مدل



شکل ۱. (الف) منطقه مورد مطالعه واقع در شمال غربی خلیج فارس که بیشتر تحت تأثیر رسوبات آبرودرود است. (ب) محدوده محاسباتی و پرندهای عمق‌سنجی منطقه مورد مطالعه. عمق‌سنجی برحسب متر است. (ج) قسمتی از شبکه بی‌ساختار برای منطقه مورد مطالعه. کمترین فاصله شبکه‌ای در مناطق کم‌عمق ۴۰۰ متر و در قسمت‌های عمیق میانه خلیج فارس ۹ کیلومتر است.



شکل ۲. گل‌باد برای بازه ۳۷ ساله (۱۹۸۳-۲۰۲۰). داده‌های باد ۱۰ متری ERA5 از مرکز اروپایی ECMW برای نقطه‌ای با مختصات ۳۰ و ۴۹/۷۵ درجه و با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه است.

و مقطع قائم جریان در دو ایستگاه، یکی نزدیک ساحل به عمق ۲/۵ متر و دیگری دور از ساحل به عمق ۱۰ متر، هر دو نسبت به CD، ثبت شده است. نمونه‌برداری از رسوبات بستر در ۲۸ نقطه و در امتداد سه خط پایش انجام پذیرفته است (حق‌شناس و سلطان‌پور، ۲۰۱۱). محل ایستگاه‌های اندازه‌گیری در شکل ۱-ج نشان داده شده است.

اطلاعات میدان باد شامل سرعت و جهت آن در طول دوره اجرای مدل برای حوزه خلیج فارس اعمال شده است. داده‌های باد مورد استفاده جهت شبیه‌سازی‌های اولیه با کمک داده‌های ERA5 بازتحلیل از مرکز ECMWF به‌دست آمده است. برای شبیه‌سازی‌های نهایی در این پژوهش جهت واداشت باد، از داده‌های باد نتایج شبیه‌سازی به‌دست آمده از مدل WRF، متشکل از شبکه افقی با تفکیک مکانی ۰/۰۳ درجه و با تعداد نقاط ۴۰۲×۲۴۹ در جهت افقی استفاده شده است. برای اطلاعات بیشتر به پژوهش قادر و همکاران (۱۳۹۵) و (۲۰۱۶) مراجعه شود.

برای حصول درک بهتر از اقلیم امواج و میدان باد حاکم بر منطقه مورد مطالعه، گل‌باد و گل‌موج برای بازه ۳۷ ساله از ۱۹۸۳ تا ۲۰۲۰ رسم شده است (شکل‌های ۲ و ۳). در این شکل‌ها از داده‌های میدان باد و موج بازتحلیل

تأثیر رسوباتی قرار دارد که رودخانه‌ها، به‌ویژه اروندرود (واقع در مرز ایران و عراق) به دریا حمل می‌کنند. انباشته‌های ریزدانه که به‌صورت کلی از رس نرم تا بسیار نرم تشکیل یافته، خلیج دیلم با مشخصات جغرافیایی ۳۰/۷۰ عرض شمالی و ۴۹/۴۶۰ طول شرقی را فرا گرفته است. علی‌رغم شرایط ساحلی دشوار حاکم بر منطقه، این ناحیه ساحلی به علت وجود منابع گران‌بهای شیلاتی از یک سو و هم‌جواری با میدان نفتی بهرگان‌سر از سوی دیگر، از اهمیت زیادی برخوردار است. در این منطقه، استهلاک درخور توجه امواج در اثر اندرکنش با بستر سست ریزدانه و چسبنده شکل می‌گیرد و در نتیجه، در بیشتر اوقات، شکست موج در منطقه مشاهده نمی‌شود و امواج قبل از رسیدن به ساحل مستهلک می‌شوند.

۴ اطلاعات مورد نیاز جهت شبیه‌سازی

جهت صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی، از داده‌های اندازه‌گیری موجود برای دو ایستگاه در محدوده خلیج دیلم استفاده شده است (شکل ۱). عملیات اندازه‌گیری میدانی در محدوده ساحلی بندر هندیجان در بازه ۲۰ فوریه تا ۲۸ مارس ۲۰۰۷ برابر با اسفندماه ۱۳۸۵ تا فروردین‌ماه ۱۳۸۶ به انجام رسیده است. با به‌کارگیری دو دستگاه موج‌نگار Sontek ADP، طیف جهت‌مند امواج

جنوب شرقی (ناشی از باد قوس) باشد و امواج شمال غربی نسبت به امواج جنوب شرقی فرصت رشد نیابند. داده‌های عمق‌سنجی عمومی در محدوده خلیج فارس برای نواحی ساحلی از داده‌های سازمان نقشه‌برداری کشور (NCC) تهیه شده است و در مواردی که داده‌های اندازه‌گیری عمق‌سنجی از مرجع نخست (NCC) موجود نبوده، از داده‌های ETOPO1 برای نواحی عمیق استفاده شده است. در شکل ۱ عمق‌سنجی منطقه دیده می‌شود.

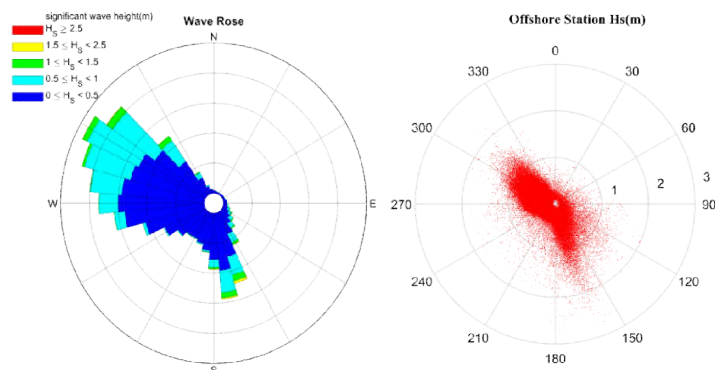
۵ شبیه‌سازی عددی

۵-۱ مدل موج

مدل SWAN (بویج و همکاران، ۱۹۹۹)، مدل موج نسل سومی برای دستیابی به برآوردهای واقع‌گرایانه پارامترهای موج در نواحی فراساحلی، ساحلی، دریاچه‌ها و دهانه‌های رودخانه‌های بزرگ است. گفتنی است نتایج شبیه‌سازی‌ها به میدان باد ورودی، شرایط بستر و جریان پس‌زمینه وابسته است. مدل SWAN را می‌توان در هر مقیاس و برای امواج گرانشی سطحی ناشی از باد استفاده کرد. این مدل بر مبنای معادله تعادلی کنش موج با در نظر گرفتن اثر چشمه‌ها (منابع افزاینده انرژی موج) و چاه‌ها (منابع کاهنده انرژی موج) توسعه یافته است. از نسخه ۴۱/۳۱ مدل

ERA5 از مرکز ECMWF استفاده شده است. تفکیک مکانی برای داده‌های باد ۰/۲۵ و برای امواج ۰/۵ درجه است. بر همین اساس و با توجه به تفکیک داده‌ها، سعی شد تا از نزدیک‌ترین نقطه به ایستگاه اندازه‌گیری برای رسم گل‌موج و گل‌باد استفاده شود. به‌طور کلی بادهایی که بیشتر منطقه خلیج فارس را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند عبارت‌اند از: باد شمال؛ باد قوس؛ باد سهیلی و باد نعشی. در این بین، باد شمال و باد قوس در منطقه مورد بررسی بیشتر می‌وزند. بادهای دریایی خلیج فارس را که اغلب در تمام مدت سال از سوی شمال غرب می‌وزند، باد شمال و بادهایی را که از جهت جنوب-جنوب شرق می‌وزند باد قوس می‌نامند. همان‌طور که در گل‌باد شکل ۲ مشاهده می‌شود، باد غالب حاکم بر منطقه، بیشتر باد شمال و باد قوس است.

در بررسی گل‌موج رسم‌شده برای همان بازه (شکل ۳)، انتظار می‌رود جهت موج غالب، در جهت شمال غرب و جنوب-جنوب شرق (در راستای بادگیر) باشد؛ اما چنانچه مشاهده می‌شود، راستای موج حدی با راستای بیشینه سرعت باد یکی نیست و این از آن‌روست که در سایه بودن و ابعاد محدود موجگاه خلیج دیلم برای رشد امواج ناشی از باد شمال، باعث شده است موج غالب در منطقه، موج



شکل ۳. گل‌موج برای بازه ۳۷ ساله (۲۰۲۰-۱۹۸۳). داده‌های موج ERA5 از مرکز اروپایی ECMWF با مختصات ۳۰ و ۵۰ و با تفکیک افقی ۰/۵ درجه است.

SWAN جهت شبیه‌سازی طیفی امواج در محدوده خلیج دیلم استفاده شده است. شبیه‌سازی دوبعدی نامانا در مختصات کروی و حالت نسل سوم اجرا شده است. زمان محاسبه یا گام زمانی، دو دقیقه انتخاب شده و محدوده طیفی در قطعاتی ۱۰ درجه است.

شبکه محاسباتی استفاده‌شده، شبکه نامنظم با مشخصه‌های تعداد گره ۲۰۹۴۳، تعداد سلول ۴۰۴۴۲ و کمترین فاصله سلولی ۰/۰۰۳۷۱ (برحسب درجه) و بیشترین فاصله شبکه‌ای ۰/۰۸۸۱۷ (برحسب درجه) است. کمترین و بیشترین زاویه سلول‌ها برابر ۴۰ و ۱۳۵ درجه فرض شده است. شایان ذکر است بیشترین تعداد سلول‌های متصل به یک گره زیر ۸ عدد تنظیم شده است. نحوه تنظیم ابعاد شبکه و دسته‌بندی ابعاد مختلف با پیروی از روش هیگن و همکاران (۲۰۰۶) انجام شده است. در این روش برای ناحیه عمیق، اندازه مبنا انتخاب شده است و نواحی کم‌عمق و ساحلی طی دو مرحله ریز شده‌اند. از مزایای استفاده از شبکه‌های بی‌ساختار برای حوزه‌ای با پیچیدگی‌های عمق‌سنجی و جزیره‌های موجود و سواحل پیچیده، نمایش بهتر جزئیات منطقه است.

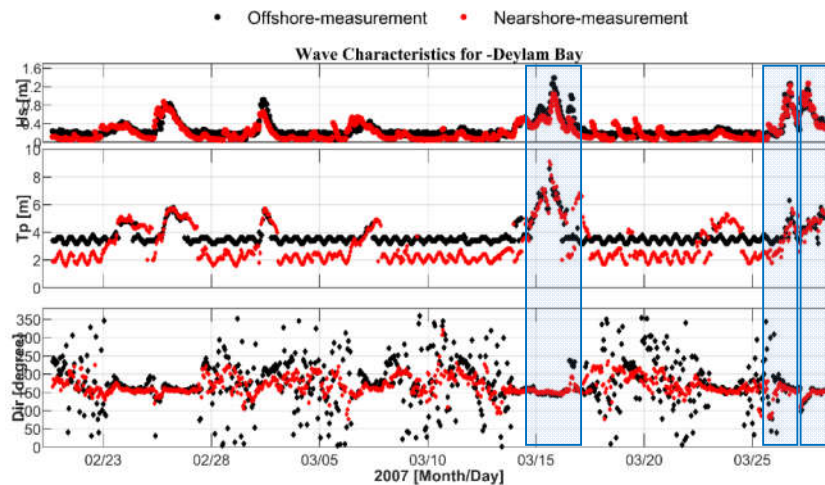
شبیه‌سازی برای بازه ۳۷ روزه اشاره‌شده در بخش ۴ انجام شده است. این شبیه‌سازی، جهت اندازه‌گیری‌های موج و جریان برای دو نقطه واقع در عمق ۲/۵ متری با مختصات عرض شرقی ۴۹/۷۸۳۰۶۸ درجه و طول شمالی ۳۰/۰۹۶ درجه و عمق ۱۰ متری با موقعیت مختصاتی عرض شرقی ۴۹/۸۴ و طول شمالی ۲۹/۹۲ درجه صورت گرفته است. واسنجی با مقایسه نمودار سری زمانی ارتفاع موج شاخص در این ایستگاه‌ها با داده‌های اندازه‌گیری انجام شده است. واسنجی مدل برای پارامترهای تفکیک مکانی شبکه محاسباتی و پارامترهایی از قبیل اصطکاک بستر، شکست موج ناشی از کاهش عمق و نرخ استهلاك انرژی در اثر سفیدک موج انجام گرفته است. با توجه به موقعیت قرارگیری دستگاه‌های اندازه‌گیری، استهلاك

ناشی از اصطکاک بستر یا اندرکنش با بستر ریزدانه و شکست موج ناشی از سفیدک موج اثر بیشتری بر نتایج داشته‌اند.

استهلاك ناشی از اندرکنش با بستر ریزدانه با استفاده از توانایی به‌نسبت جدید مدل استفاده‌شده در شبیه‌سازی‌ها مد نظر قرار گرفته است. این توانایی پیرو نتایج تحقیق کرانبرگ و همکاران (۲۰۱۱) در ایجاد مدلی که استهلاك ناشی از اندرکنش امواج با لایه بستر نرم را در معادلات امواج لحاظ کند، به مدل SWAN افزوده شده است (SWAN-mud). در این مدل، استهلاك انرژی ناشی از اندرکنش موج و بستر نرم به تبعیت از روش حل مدل دولایه ان‌جی (۲۰۰۰) محاسبه و مقدار بیشینه استهلاك مذکور و استهلاك ناشی از زبری بستر، در سمت راست معادله کنش موج لحاظ می‌شود و مابقی محاسبات به‌صورت معمول انجام می‌پذیرد. جزئیات بیشتر این روش در مقاله کرانبرگ و همکاران (۲۰۱۱) ارائه شده است.

۵-۲ واسنجی مدل

هدف از واسنجی یک مدل عددی، تعیین شرایطی است که به کمک آن مدل مدنظر در آن شرایط، به شکل بهتری پدیده فیزیکی موردنظر را شبیه‌سازی کند. پس از واسنجی، درستی عملکرد آن با کمک داده‌های اندازه‌گیری موجود ارزیابی می‌شود. در پژوهش حاضر، مبنای انتخاب دوره واسنجی، داشتن اطلاعات اندازه‌گیری هم‌زمان در منطقه مورد مطالعه (ر.ک. بخش ۴) برای دوره موردنظر است. در شکل ۴ به بررسی داده‌های اندازه‌گیری پرداخته شده است. در این بازه، سه طوفان مهم با ارتفاع موج بالغ بر یک متر در ایستگاه فراساحلی در طی دوره ۳۷ روزه اندازه‌گیری شناسایی (کادر رنگی عمودی در شکل ۴) و برای فرایند مذکور استفاده شده است. بزرگ‌تر بودن دوره تناوب امواج، اندرکنش بیشتر



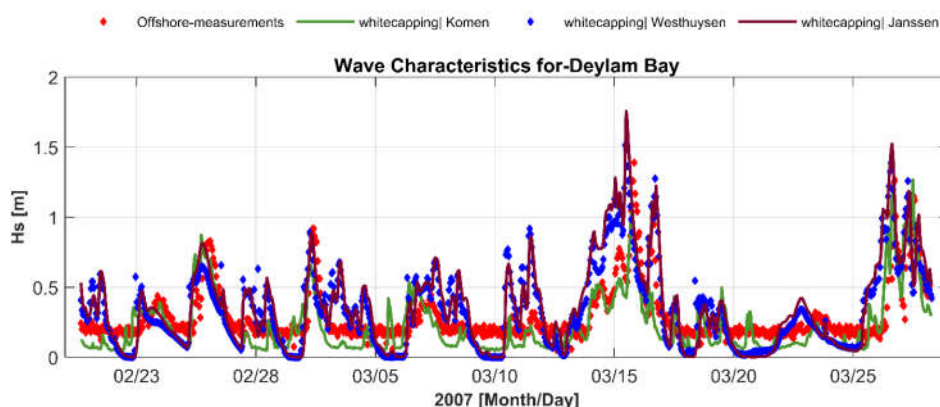
شکل ۴. نمودار مقایسه‌ای برای مقادیر اندازه‌گیری در ایستگاه دور از ساحل در عمق ۱۰ متری و ایستگاه نزدیک ساحل در عمق ۲/۵ متری برای ارتفاع موج مشخصه، دوره تناوب و جهت موج اندازه‌گیری. سه کادر مشخص‌شده در شکل، رخداد های طوفان با ارتفاع موج مشخصه بیش از یک متر را نشان می‌دهند.

داده شود. همچنین در شکل ۴ مشاهده می‌شود که در هر دو ایستگاه، طی بازه اندازه‌گیری، امواج جنوب شرق غالب بوده‌اند. این نکته در نمودار گل موج بازه ۳۷ ساله در شکل ۳ نیز دیده می‌شود. شایان ذکر است که بادهای غالب شمال و غرب اصولاً امواج متناظری در بخش شمال غربی خلیج فارس ایجاد نمی‌کنند. در ضمن، همان‌گونه که در شکل ۱ دیده می‌شود، خلیج دیلم به‌صورت خاص در برابر امواج شمال غرب در سایه واقع شده است.

۳-۵ اجرای مدل

در شبیه‌سازی‌های اولیه با مدل SWAN، تنظیمات پیش‌فرض در حالت نسل سوم و رشد غیرخطی امواج برای رابطه‌های کومن (Komen)، جانسن (Janssen) و وستایسن (Westhuysen) در اجراهای جداگانه فعال شده است. نتایج شبیه‌سازی ایجاد موج برای ارتفاع موج مشخصه با داده‌های اندازه‌گیری برای ایستگاه ۱۰ متری مقایسه شده‌اند. با توجه به حاکم بودن شرایط آب با عمق میانی (intermediate water depth) در منطقه مورد بررسی، پدیده رشد، انتشار و انتقال امواج به‌صورت توأمان

با بستر را نتیجه می‌دهد. تفاوت زیاد ارتفاع امواج و استهلاک بالای انرژی موج طی رویدادهای حدی دیده می‌شود. تفاوت چشمگیر دوره تناوب امواج، مربوط به ضعف تجهیزات اندازه‌گیری مستقر در ایستگاه فراساحلی در مقایسه با ایستگاه ساحلی است، اما این تفاوت در عمل و طی رویدادهای طوفانی ناچیز است. گفتنی است تجهیزات مستقر در ایستگاه فراساحلی، برای ثبت کردن دوره تناوب کوتاه‌تر امواج در اعماق بالاتر است. بزرگ‌ترین رویداد طوفانی طی روزهای ۱۵ و ۱۶ مارس ۲۰۰۷ ثبت شده است و ارتفاع موج شاخص ثبت‌شده در ایستگاه‌های فراساحلی و نزدیک ساحل به‌ترتیب ۱/۳۹ و ۱/۰۴ متر بوده است که این خود دلالت بر استهلاک ۴۴٪ انرژی امواج در بین این دو ایستگاه دارد. بررسی تغییرات جهت موج طی بازه اندازه‌گیری برای هر دو ایستگاه فراساحلی و نزدیک ساحلی در شکل ۴ مشاهده می‌شود. جهت امواج در ایستگاه فراساحل در بازه گسترده‌ای پخش شده است در حالی که در ایستگاه نزدیک ساحل، جهت‌های متعدد دیده نمی‌شود و داده‌های امواج در بازه باریک‌تری پخش شده‌اند. این موضوع می‌تواند به پدیده شکست امواج آب عمیق نسبت

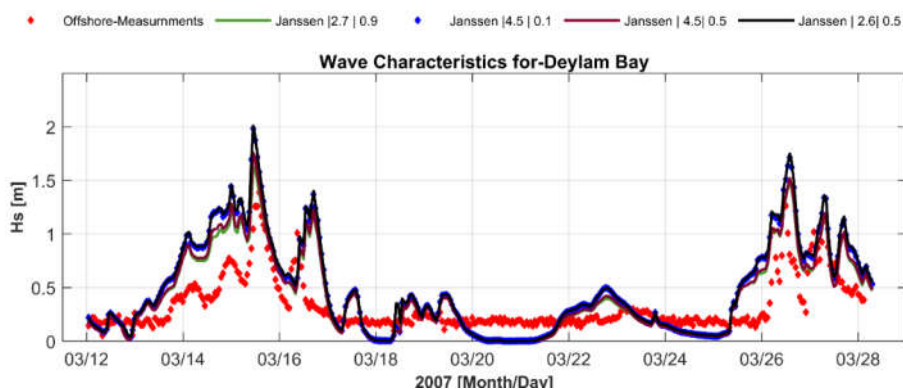


شکل ۵. نمودار مقایسه‌ای ارتفاع موج مشخصه جهت واسنجی و حساسیت‌سنجی مدل به ضریب سفیدک رأس موج. مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی، استفاده از روابط کومن، وستایسن و جانسن را نشان می‌دهد.

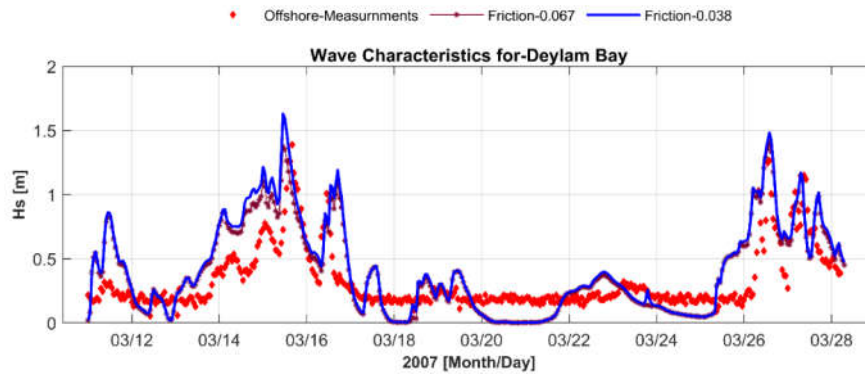
تخمین زده‌اند. در مجموع می‌توان گفت که هیچ‌کدام از این رابطه‌ها به‌تنهایی برای کل بازه اندازه‌گیری موجود، نتایج پذیرفتنی ارائه نداده‌اند و از فرایند واسنجی در این بخش، نتیجه مطلوبی جهت دستیابی به تخمین‌های نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری حاصل نشده است.

در ادامه، بر اساس نتایج بررسی ضریب سفیدک موج در بخش قبل، برای نرخ استهلاک انرژی در اثر سفیدک موج از تنظیمات جانسن استفاده شد و عملکرد مدل با ضرایب متفاوت جانسن برای دستیابی به نتایج بهینه کنترل شد (شکل ۶). در تنظیمات ضریب سفیدک موج رابطه جانسن، دو ضریب دخیل هستند. ضریب اول معرف نرخ

در تعیین پارامترهای امواج دخیل خواهند بود و در نتیجه، رشد امواج و انتقال آنها بررسی شده است. نتایج این شبیه‌سازی‌ها در شکل ۵ ارائه شده است. در بررسی نتایج شبیه‌سازی‌ها فرض شده است که محدوده امواج کوتاه‌تر از نیم متر به شرایط دریای آرام تعلق دارد؛ بنابراین حالت‌های موجناک برای امواج با ارتفاع بالای نیم متر در نظر گرفته شده است. با این توصیف، در بررسی نتایج مشاهده می‌شود رابطه جانسن برای کل محدوده اندازه‌گیری رخداد حدی بیشتری را نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری تخمین زده است. با این حال، دو رابطه دیگر، برخی رخداد‌های حدی را نسبت به رابطه جانسن بهتر



شکل ۶. نمودار مقایسه‌ای ارتفاع موج مشخصه برای شبیه‌سازی با ضریب سفیدک موج رابطه جانسن. ضریب اول، معرف نرخ استهلاک در اثر سفیدک موج و ضریب دوم ضریب همبستگی به عدد موج را نشان می‌دهد.



شکل ۷. نمودار مقایسه‌ای ارتفاع موج مشخصه برای ضریب زبری بستر، رابطه پیش‌فرض جان‌سواپ و افزایش ضریب پیش‌فرض.

مقادیر زبری بستر انجام می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۷ نیز مشاهده می‌شود، زبری بستر تنها بر امواج با فرکانس پایین مؤثر است و بر امواج با فرکانس بالا اثر زیادی ندارد. ضریب اول مفروض، ضریب پیش‌فرض مدل برای رابطه جان‌سواپ (JONSWAP) است که رابطه نیمه-تجربی مشتق‌شده از طیف جان‌سواپ است. افزایش این ضریب با به‌کارگیری ضریب بووس و کومن (۱۹۸۳) برای امواج ناشی از باد کاملاً توسعه‌یافته برای آب‌هایی با عمق محدود، معادل ۰/۰۶۷ فرض شده است. برای رخداد حدی روزهای ۱۴ تا ۱۶ مارس، با تغییر این ضریب، تخمین حاصل بهبود یافته است. البته برای دو رخداد دیگر، همچنان تخمین‌ها دقت مناسبی ندارند. همچنین، همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد، افزایش این ضریب تأثیر چشمداشتی را برای تمام دوره فرکانسی ندارد.

۶ ایجاد و انتشار امواج در حالت وجود استهلاک

ناشی از اندرکنش موج با لایه گل سیال

شبیه‌سازی‌های اولیه شکل‌گیری موج در بخش پیشین، بدون در نظر گرفتن اثر گل سیال، نشان‌دهنده فراتخمین بودن ارتفاع موج مشخصه بود. در این بخش، به‌منظور بهبود نتایج شبیه‌سازی برای اندرکنش امواج و لایه گل سیال فعال‌شده، از تنظیمات پایه مدل SWAN کرانبرگ و همکاران (۲۰۱۱) استفاده می‌شود. در این مدل،

استهلاک در اثر سفیدک موج (cds_1) و ضریب دوم (cds_2) معرف همبستگی ضریب سفیدک موج به عدد موج است. ثابت بودن ضریب cds_1 و افزایش ضریب cds_2 کاهش استهلاک ارتفاع موج را به دنبال دارد و افزایش ضریب cds_1 و ثابت بودن ضریب cds_2 به افزایش استهلاک موج منجر شده است. بررسی برای دو رخداد طوفان که ارتفاع موج مشخصه در آن بالای یک متر بوده است، در انتهای بازه اندازه‌گیری انجام گرفته است. در شکل ۶ چند نمونه منتخب از این مقایسه‌ها را می‌توان مشاهده کرد. در جدول ۱ نیز جزئیات اجراها ارائه شده است.

از نتایج شبیه‌سازی‌ها با مقادیر مختلف ضریب سفیدک موج برای رابطه جانسن، ضرایب $cds_1 = 2/6$ و $cds_2 = 0/9$ به نسبت سازگاری بهتری را با نتایج مشاهداتی نشان داده‌اند که در ادامه به‌عنوان مشخصات برگزیده مدل مد نظر قرار گرفته است. به‌طور کلی، حساسیت سنجی نسبت به این ضرایب، تغییر چشمگیری را نشان نداده است. همچنان نتیجه نهایی حاصل از این بخش، تمایل به فراتخمین برای ارتفاع موج مشخصه را نشان می‌دهد.

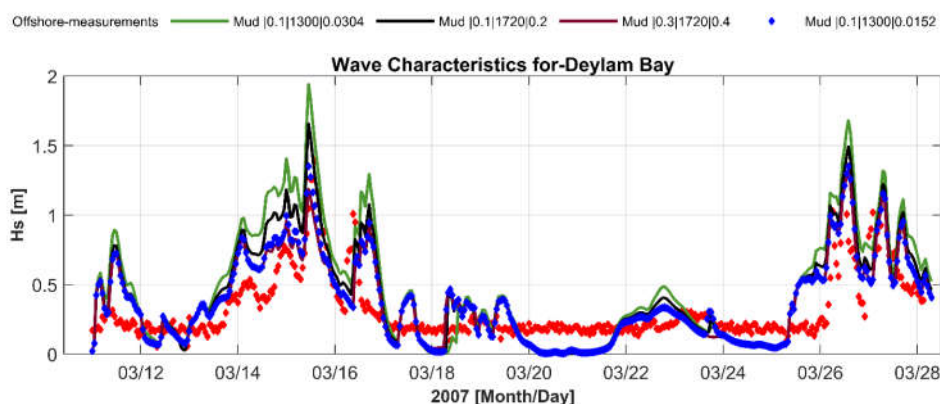
در گام بعد، سعی شده است به کمک اعمال اثر ضریب استهلاک زبری بستر، نتایج تا دستیابی به نتیجه مطلوب بهبود یابند. در بسیاری از پژوهش‌ها، شبیه‌سازی اثر استهلاک امواج در اثر اندرکنش با لایه گل سیال، با تغییر

جدول ۱. مشخصات تعدادی از تنظیمات به کاررفته در اجراهای منتخب.

شماره	اصطکاک	گل		Physics/GEN3		شماره
		viscm(m ² /s)	rhom(kg/m ³)	لایه (m)	delta/stpm	Cds./cds _r
۱	۰/۰۶۷	خاموش	۱۳۰۰	۰/۱	۳/۰۲E-۳	۲/۳۶E-۵
۲	۰/۰۳۸	خاموش	۱۳۰۰	۰/۱	۳/۰۲E-۳	۲/۳۶E-۵
۳	۰/۰۳۸	خاموش	۱۳۰۰	۰/۱	۳/۰۲E-۳	۲/۳۶E-۵
۴	۰/۰۳۸	خاموش	۱۳۰۰	۰/۱	۳/۰۲E-۳	۲/۳۶E-۵
۵	۰/۰۳۸	خاموش	۱۳۰۰	۰/۱	۳/۰۲E-۳	۲/۳۶E-۵
۶	۰/۰۳۸	خاموش	۱۳۰۰	۰/۱	۳/۰۲E-۳	۲/۳۶E-۵
۷	۰/۰۳۸	خاموش	۱۳۰۰	۰/۱	۳/۰۲E-۳	۲/۳۶E-۵
۸	۰/۰۳۸	خاموش	۱۳۰۰	۰/۱	۳/۰۲E-۳	۲/۳۶E-۵
۹	۰/۰۳۸	خاموش	۱۳۰۰	۰/۱	۳/۰۲E-۳	۲/۳۶E-۵
۱۰	۰/۰۳۸	خاموش	۱۳۰۰	۰/۱	۳/۰۲E-۳	۲/۳۶E-۵
۱۱	۰/۰۳۸	خاموش	۱۳۰۰	۰/۱	۳/۰۲E-۳	۲/۳۶E-۵
۱۲	۰/۰۳۸	خاموش	۱۳۰۰	۰/۱	۳/۰۲E-۳	۲/۳۶E-۵

پارامترهای تأثیرگذار در اندرکنش شکل‌گیری موج و لایه گل سیال، چگالی لایه سیال (ρ_{mud}) برحسب kg/m^3 ، ضخامت لایه گل سیال برحسب متر و گرانیوی جنبشی (v_{mud}) برحسب m^2/s هستند. این پارامترها در قالب یک شبکه بی‌ساختار به مدل معرفی شده‌اند. در خصوص ضخامت لایه گل سیال، مدل برای محدوده ۰/۱ تا ۰/۵ متر واسنجی شده است. مقادیر پارامترهای مذکور

بر اساس نتایج مطالعات میدانی حق‌شناس و سلطان‌پور (۲۰۱۱) در مدل لحاظ شده‌اند. نتایج ارزیابی ارتفاع موج شاخص برای تعدادی از شبیه‌سازی‌های منتخب و مقادیر اندازه‌گیری‌شده در شکل ۸ نشان داده شده است. با اعمال اثر لایه گل سیال در مدل، نتایج شبیه‌سازی‌های نهایی از همخوانی مطلوبی با مشاهدات میدانی برخوردارند. در جدول ۱ جزئیات اجراهای منتخب ارائه شده است.



شکل ۸. نمودار مقایسه‌ای ارتفاع موج مشخصه برای تنظیمات، ضریب زیری بستر پیش‌فرض جان‌سواپ، تنظیمات ضرایب سفیدک موج برای رابطه جانسن و اعمال اندرکنش لایه گل سیال. اعداد نشان داده شده در عنوان به ترتیب ضخامت لایه گل سیال برحسب متر، چگالی لایه گل سیال و گرانیوی هستند. بهترین نتیجه برای شبیه‌سازی نمایش داده شده با مربع آبی توپر نشان داده شده است.

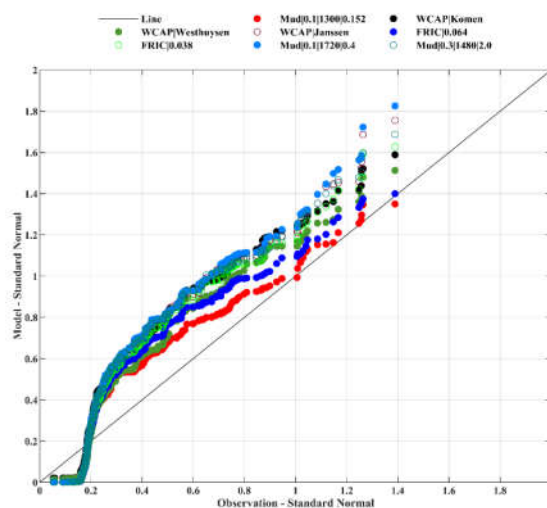
جدول ۲. سنجه‌های آماری مربوط به نمودار تیلور (شکل ۱۰) برای ارزیابی نتایج صحت‌سنجی اجراهای منتخب برای ارتفاع موج مشخصه.

پارامترها	پیکربندی	H	G	F	E	D	C	B	A
جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)		۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۲۵	۰/۲۲	۰/۲۶	۰/۲۲	۰/۲۵	۰/۲
ضریب همبستگی (CC)		۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۸۰	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۷۹
اریبی (Bias)		-۰/۱۰	-۰/۱۱	-۰/۰۹	-۰/۰۶	-۰/۱۰	-۰/۰۶	-۰/۱۲	-۰/۰۴
ضریب پراکندگی (SI)		۰/۷۸	۰/۸۰	۰/۷۳	۰/۶۵	۰/۷۷	۰/۶۵	۰/۷۶	۰/۵۸

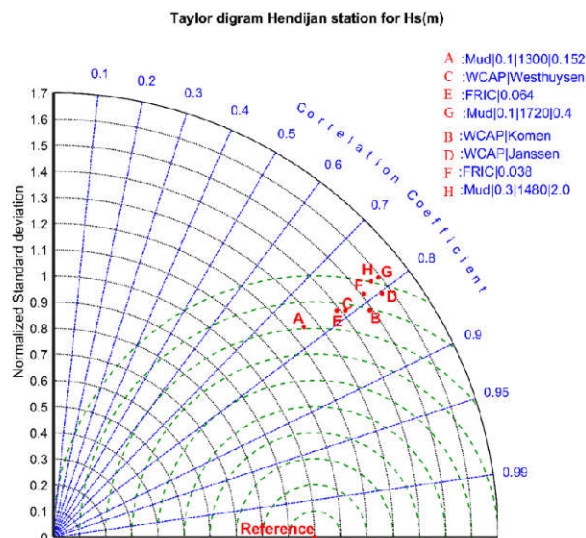
شکل ۹ نمودار مقایسه‌ای Q-Q ارتفاع موج مشخصه شبه‌سازی و مقادیر اندازه‌گیری را ارائه می‌کند. گفتنی است در اندازه‌گیری‌های انجام‌شده برای موج با دستگاه Sontek ADP برای ایستگاه فراساحلی، امواج با فرکانس‌های کمتر از ۰/۲۵ هرتز ثبت شده‌اند. این واقعیت به کاهش دقت در تحلیل داده‌ها، به‌ویژه در شرایط دریای آرام منجر شده است. فعال‌سازی اثر لایه گل سیال، بهبود نتایج و نزدیک شدن آن به خط مرجع نمودار را نشان می‌دهد. همچنین در محاسبه مقدار ضریب پراکندگی در جدول ۲، کمترین پراکندگی مربوط به نتایجی است که اندرکنش موج با لایه گل سیال در مدل

لحاظ شده است.

شکل ۱۰ نمودار تیلور مربوط به ارزیابی ارتفاع موج مشخصه حاصل از شبه‌سازی‌ها و مقادیر اندازه‌گیری را برای ایستگاه فراساحلی و در محدوده زمانی ۱۱ مارس تا ۲۸ آوریل نشان می‌دهد. جهت ارزیابی، نتایج تعدادی از شبه‌سازی‌های منتخب از هر بخش بررسی شده است. در شکل دیده می‌شود که شبه‌سازی بدون اعمال لایه گل سیال، فراتخمین شدن نتایج ارتفاع موج مشخصه را به دنبال دارد. نتایج شبه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که بدون فعال‌سازی اثر لایه گل سیال در مدل SWAN، ضریب همبستگی در محدوده بین ۰/۷۸ تا ۰/۸۱ است و برای



شکل ۹. نمودار Q-Q مقایسه ارتفاع موج مشخصه شبه‌سازی‌شده برای تنظیمات منتخب و مشاهدات در ایستگاه فراساحلی. دایره‌های قرمز توپر معرف نتایج شبه‌سازی با اعمال لایه گل سیال است که همخوانی مناسبی در آن حاصل شده است.



شکل ۱۰. نمودار مقایسه‌ای تیلور ارتفاع موج مشخصه برای شبیه‌سازی و مقادیر اندازه‌گیری در ایستگاه دور از ساحل.

لایه فوقانی بستر می‌شوند و انتقال جرم در گل سیال تحت تأثیر مداوم موج و نیروی گرانث صورت می‌گیرد. در این حالت اثر رسوخ اوربیتال‌های موج به درون لایه گل سیال و انتقال انرژی به درون این لایه پس از تشکیل آن، موجب استهلاك انرژی و افت ارتفاع موج می‌شود. جهت دستیابی به نتایج نزدیک به واقعیت، لحاظ کردن این اثرگذاری‌ها اجتناب‌ناپذیر است. در این مطالعه، شبیه‌سازی ایجاد امواج در حالت وجود استهلاك ناشی از اندرکنش با بستر گلی در خلیج دیلم بررسی و نتایج زیر حاصل شد:

- روند کلی ارتفاع موج شاخص با مشاهدات همخوانی دارد. در شبیه‌سازی‌های اولیه بدون اعمال اثر لایه گل سیال، نتایج شبیه‌سازی برای ارتفاع موج مشخصه فراتخمین است؛
- در واسنجی مقدار زبری بستر، افزایش ضریب زبری بستر، استهلاك بیشتر امواج برای فرکانس‌های پایین (دوره تناوب‌های بزرگ‌تر) طیف را در نتایج شبیه‌سازی به همراه دارد. تغییرات حاصل از حساسیت‌سنجی نسبت به ضریب بستر بسیار ناچیز و در محدوده رخداد طوفان و

اجرای نهایی (A در شکل ۱۰) تمایل و نزدیکی بیشتر به دایره مرجع مشاهده می‌شود. مقادیر سنجه‌های آماری مربوط به نمودار تیلور و اربیی در جدول ۲ نشان داده شده است. کمترین پراکندگی و اربیی مربوط به اجرای نهایی است.

۷ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

پیچیدگی ناحیه‌ای که رشد امواج در آن شبیه‌سازی می‌شود، می‌تواند بر نحوه شکل‌گیری امواج مؤثر باشد. در انتقال موج به نواحی کم‌عمق و بینابینی، سازوکارهای آب کم‌عمق، همانند زبری بستر، شکست، انتشار و استهلاك انرژی و نیز اندرکنش‌های غیرخطی اهمیت پیدا می‌کنند. تأثیر عمق بر امواج ناشی از باد به سه شکل استهلاك در اثر شیب یا کم‌عمق‌شدگی، اندرکنش‌های غیرخطی موج-موج سه‌گانه یا اندرکنش‌های موج-موج غیرخطی چهارگانه خواهد بود. در آبهای کم‌عمق، پیچیدگی‌های ناشی از عمق‌سنجی می‌تواند به دلیل وجود بستر نرمی باشد که اقلیم موج را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در مناطقی که بستر نرم دارند، امواج بزرگ موجب تشکیل گل سیال در

- Carniel, S., Benetazzo, A., Bonaldo, D., Falcieri, F. M., Miglietta, M. M., Ricchi, A., and Sclavo, M., 2016, Scratching beneath the surface while coupling atmosphere, ocean and waves: analysis of a dense water formation event: *Ocean Modelling*, **101**, 101–112, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.03.007>.
- Chou, H. T., 1989, Rheological response of cohesive sediments to water waves: Ph.D. thesis, University of California, Berkeley.
- Copernicus Climate Change Service, CDS, C3S, 2017, ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), date of access. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>.
- Dalrymple, R. A., and Liu, P. L. -F., 1978, Waves over soft muds, a two-layer fluid model: *Journal of Physical Oceanography*, **8**(6), 1121–1131.
- De Wit, P. J., 1995, Liquefaction of cohesive sediment by waves: Ph.D. thesis, Delft University of Technology, The Netherlands.
- Elgar, S., and Raubenheimer, B., 2008, Wave dissipation by muddy seafloors: *Geophysical Research Letters*, **35**, L07611 <https://doi.org/10.1029/2008GL033245>.
- Foda, A. M., Hunt, J. R., and Chou, H. T., 1993, A nonlinear model for the fluidization of marine mud by waves: *Journal of Geophysical Research*, **98**, 7039–7047.
- Gade, H. G., 1958, Effects of a non-rigid, impermeable bottom on plane surface waves in shallow water: *Journal of Marine Research*, **156**(2), 61–82.
- Ghader, S., Yazgi, D., Soltanpour, M., and Nemati, M. H., 2016, On the use of an ensemble forecasting for prediction of surface wind over the Persian Gulf: *Proceedings of the 12th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures (ICOPMAS 2016)*.
- Hagen, S. C., Zundel, A. K., and Kojima, S., 2006, Automatic, unstructured mesh generation for tidal calculations in a large domain: *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, **20**(8), 593–608.
- Haghshenas, S. A., and Soltanpour, M., 2011, An analysis of wave dissipation at the Hendijan mud coast, the Persian Gulf: *Ocean Dynamics*, **61**(2-3), 217–232.
- Hsu, W. Y., Hwung, H. H., Hsu, T. J., Torres-Freyermuth, A., and Yang, R. Y.,

فرکانس‌های پایین است و در مابقی محدوده تغییر زیادی مشاهده نشده است؛

- در بررسی تأثیر نرخ استهلاک انرژی در اثر سفیدک موج و ضرایب آن، تنظیمات بهینه برای رابطه جانسن برای منطقه مورد مطالعه به دست آمده است؛
- فعال‌سازی تنظیمات MUD اعمال شده در مدل SWAN، که کرانبرگ و همکاران (۲۰۱۱) ارائه کردند، بهبود چشمگیری را در نتایج شبیه‌سازی نشان داده است.

سیاسگزاری

نویسندگان برآنند تا در خصوص تأمین و تحلیل داده‌های اندازه‌گیری، از سازمان شیلالت ایران و شرکت دریانگار پارس و در خصوص مشاوره علمی، از جناب آقای دکتر سید هادی شمس‌نیا سیاسگزاری کنند. همچنین از دانشگاه تهران جهت حمایت از این کار پژوهشی سیاسگزاری می‌شود.

منابع

- قادر، س.، یازجی، د.، سلطان‌پور، م.، نعمتی، م. ح.، ۱۳۹۵، به‌کارگیری یک سامانه همدادی توسعه داده شده برای مدل WRF جهت پیش‌بینی میدان باد سطحی در محدوده خلیج فارس: *مجله هیدروفریزیک*، **۱**، ۴۱–۵۴.
- Beyramzade, M., and Siadatmousavi, S. M., 2018, Implementation of viscoelastic mud-induced energy attenuation in the third-generation wave model, *SWAN: Ocean Dynamics*, **68**, 47–63, <https://doi.org/10.1007/s10236-017-1118-4>.
- Booij, N., Ris, R. C., and Holthuijsen, L. H., 1999, A third generation wave model for coastal regions, part I, model description and validation: *Journal of Geophysical Research*, **104**(C4), 7649–7666.
- Bouws, E., and Komen, G. J., 1983, On the balance between growth and dissipation in an extreme, depth-limited wind-sea in the southern North Sea: *Journal of Physical Oceanography*, **13**(9), 1653–1658.

- 2013, An experimental and numerical investigation on wave-mud interactions: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **118**(3), 1126-1141.
- Kaihatu, J. M., Sheremet, A., Holland, K. T., 2007, A model for the propagation of nonlinear surface waves over viscous muds: *Coastal Engineering*, **54**(10), 752-764.
- Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., and Janssen, P.A.E.M., 1994, *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*: Cambridge University Press, Cambridge.
- Kranenburg, W., Winterwerp, J., de Boer, G., Cornelisse, J., and Zijlema, M., 2011, SWAN-mud: engineering model for mud-induced wave damping: *Journal of Hydraulic Engineering*, **137**(9), 959-975.
- MacPherson, H., 1980, The attenuation of water waves over a non-rigid bed: *Journal of Fluid Mechanics*, **97**, 721-742.
- Mehta, A. J., Williams, D. J. A., Williams, P. R., and Feng, J., 1995, Tracking dynamic changes in mud bed due to waves: *Journal of Hydraulic Engineering*, **121**(6), 504-506.
- Mei, C., and Liu, P., 1987, A Bingham-plastic model for a muddy seabed under long waves: *Journal of Geophysical Research*, **92**, 14581-14594.
- Ng, C. N., 2000, Water waves over a muddy bed: a two-layer Stokes' boundary layer model: *Coastal Engineering*, **40**, 221-242.
- Rogers, W. E., and Holland, K. T., 2009, A study of dissipation of wind-waves by mud at Cassino beach, Brazil, prediction and inversion: *Continental Shelf Research*, **29**(3), 676-690.
- Safak, I., Sahin, C., Kaihatu, J. M., and Sheremet, A., 2013, Modeling wave-mud interaction on the central Chenier-plain coast, western Louisiana Shelf: USA. *Ocean Modelling*, **70**, 75-84, <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.11.006>.
- Safak, I., 2016, Variability of bed drag on cohesive beds under wave action: *Water*, **8**(4), 131, <https://doi.org/10.3390/w8040131>.
- Sahin, C., Safak, I., Hsu, T.-J., and Sheremet, A., 2013, Observations of suspended sediment stratification from acoustic backscatter in muddy environments: *Marine Geology*, **336**, 24-32.
- Samiksha, S. V., Vethamony, P., Rogers, W. E., Pednekar, P. S., and Babu, M. T., 2017, Wave energy dissipation due to mudbanks formed off southwest coast of India: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **196**, 387-398.
- Shakeel, A., Kirichek, A., and Chassagne, C., 2019, Rheological analysis of mud from Port of Hamburg, Germany: *Journal of Soils and Sediments*, 1-10.
- Shamsnia, S. H., Soltanpour, M., Bavandpour, M., and Gualtieri, C., 2019, A study of wave dissipation rate and particles velocity in muddy beds: *Geosciences*, **9**(5), 212.
- Sheremet, A., Jaramillo, S., Su, S.-F., Allison, M. A., and Holland, K. T., 2011, Wave-mud interaction over the muddy Atchafalaya subaqueous clinoform, Louisiana, United States: wave processes: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **116**(C6).
- Sheremet, A., and Stone, G. W., 2003, Observations of nearshore wave dissipation over mud sea beds: *Journal of Geophysical Research*, **108**(11), 3357, doi:10.1029/2003JC00188.
- Shynu, R., Rao, V. P., Samiksha, S. V., Kessarkar, P. M., Vethamony, P., Naqvi, S. W. A., Babu, M. T., and Dineshkumar, P. K., 2017, Suspended matter and fluid mud off Alleppey, southwest coast of India: *Estuarine, Coastal Shelf Science*, **185**, 31-43.
- Siadatmousavi, S. M., Allahdadi, M. N., Chen, Q., Jose, F., and Roberts, H. H., 2012, Simulation of wave damping during a cold front over the muddy Atchafalaya shelf: *Continental Shelf Research*, **47**, 165-177.
- Soltanpour, M., Shamsnia, S. H., Shibayama, T., and Nakamura, R., 2020, Experimental and analytical investigation of the response of a mud layer to solitary waves: *Ocean Dynamics*, **70**(2), 165-186.
- Tahvildari, N., and Kaihatu, J. M., 2011, Optimized determination of viscous mud properties using a nonlinear wave-mud interaction model: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **28**(11), 1486-1503.
- Traykovski, P., Trowbridge, J., and Kineke, G., 2015, Mechanisms of surface wave energy dissipation over a high-concentration sediment suspension: *Journal of Geophysical Research*, **120**(3), <https://doi.org/10.1002/2014JC010245>.
- Tubman, M. W., and Suhayda, J. N., 1976, Wave action and bottom movements in fine sediments: *ASCE, Proc. 15th ICCE* (69), 1168-1183.
- Van Kessel, T., and Kranenburg, C., 1998, Wave-induced liquefaction and flow of subaqueous

- mud layers: Coastal Engineering, **34**, 109–127.
- Wells, J. T., and Kemp, G. P., 1986, Interaction of surface waves and cohesive sediments: field observations and geologic significance, in Mehta, A. J. (Ed.), Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies, **14**, Estuarine Cohesive Sediment Dynamics, 43–65.
- Winterwerp, J. C., Boer, G. J. D., Greeuw, G., Greeuw, G., and Maren, D. S. V., 2012, Mud-induced wave damping and wave-induced liquefaction: Coastal Engineering, **64**, 102–112.
- Winterwerp, J. C., de Graaff, R., Groeneweg, J., and Luijendijk, A., 2007, Modelling of wave damping at Guyana mud coast: Coastal Engineering, **54**(3), 249–261.
- Yamamoto, T., Koning, H., Sellmeijer, H., and van Hijum, E., 1978, On the response of a poro-elastic bed to water waves: Journal of Fluid Mechanics, **87**, 193–206.

Wind-wave generation, affected by mud-induced wave dissipation in Deylam Bay

Fatemeh Ameri¹, Seyed Abbas Haghshenas² and Sarmad Ghader^{3*}

¹M.Sc. Student, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

² Assistant Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

³ Associate Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 23 May 2020, Accepted: 05 September 2020)

Summary

Considerable decay of wave energy along the wave trajectory over muddy beds makes a different wave generation/transformation in comparison with sandy/rocky environments. The role of soft mud to dissipate waves has been recently implemented to SWAN wave model. A new dispersion relation obtained from a two-layer viscous model is implemented in the wave-simulation model, SWAN-mud, to consider wave decay in coastal areas due to the presence of fluid mud deposits. Significant wave heights over gentle muddy slopes are usually overestimated using default SWAN model setup, while it is expected that using SWAN-mud setup, improves the correlation between model simulations and real field measurements. However, considering the viscous assumption of mud behavior in developing new dispersion relation, the model results are highly dependent on the assumed mud rheology and mud behavior in reality.

The north-western part of the Persian Gulf is covered by mud deposits originated mainly from the Arvand River catchment area. Mud deposits up to 20 meters thickness are observed at the very shallow coast of Deylam Bay, which implies high rates of wave dissipation in the area; something which should be taken in to consideration for wave climate estimations. A set of 37-days field measurements in 2007 is available for model performance validation. This research aims to adopt various facilities implemented in SWAN wave model to regenerate the wave measurements at a mid-depth station in Deylam Bay, over the muddy bed of Northern Persian Gulf with acceptable accuracy. A number of about 30 model configurations are considered for wave generation over the mud coast of Deylam Bay. Input wind data are adopted from ERA5 product of ECMWF global model. WRF model is adopted to improve input wind data accuracy as well.

The focus of this study is to develop a proper hindcast and forecast system for predicting wave characteristics in the north-western of Persian Gulf, including the mud induced wave dissipation in the areas covered with soft muddy deposits. The developed model considering mud-induced wave dissipation is validated against available field data. Based on the achieved results, the ordinary SWAN model setup is not capable to well estimate all the storm events in the period of measurements. However, considering the mud-induced dissipation, implemented in SWAN-mud model, the developed model is capable to capture all the events with different combinations of wave properties in the study area. The final model predictions favorably agree with the field survey data in the study area.

Keywords: Wind wave generation, wave-mud interaction, SWAN wave model, muddy bed, wave damping

*Corresponding author:

sghader@ut.ac.ir