

شبیه‌سازی عددی امواج بادپناه در تنگه هرمز با استفاده از مدل Delft3D

۱- حامد دلدار پژوهشگر پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی.

h.deldar@inio.ac.ir

چکیده

امواج درونی نقش اساسی در وضعیت هیدرولوژیکی و انرژی اقیانوس‌ها دارد یکی از انواع امواج درونی امواج بادپناه است که در اثر عبور جریان‌های زیرسطحی یا جزرومدی بر روی توپوگرافی بستر دریا به وجود می‌آیند و یکی از عوامل جابجایی لایه‌های همچگالی در زیر آب است. این موضوع باعث تغییر میزان مواد مغذی دریا و چگالی دریا خواهد شد. به همین دلیل شناخت امواج بادپناه در صنایع ماهی‌گیری و نظامی از اهمیت بالایی برخوردار است.

در این مقاله با استفاده از ماژول جریان مدل سه بعدی Delft3D به صورت هیدرواستاتیک و غیرهیدرواستاتیک در تنگه هرمز که به دلیل داشتن کم‌عمقی‌های فراوان مستعد تشکیل موج بادپناه می‌باشد شبیه‌سازی امواج بادپناه انجام شده است و با استفاده از تصویر ماهواره‌ای SAR، داده میدانی و مطالعات پیشین اعتبارسنجی صورت گرفت. نتایج وجود امواج بادپناه در تنگه هرمز را نشان می‌دهند. هر دو مدل هیدرواستاتیک و غیرهیدرواستاتیک توانسته‌اند جهت انتشار و تولید امواج درونی را با تقریب مکانی قابل قبول شبیه‌سازی کنند، با این تفاوت که مدل غیرهیدرواستاتیک دارای مقادیر سرعت جریان بزرگتری می‌باشد، هرچند که نتایج هر دو مدل در رنج $0.4- تا 0.4+$ می‌باشد. با این حال می‌توان گفت حالت هیدرواستاتیک تلاطم‌های بیشتری را نشان می‌دهد و به دلیل استفاده از مختصات عمودی سیگما، لایه ترموکلاین را با دقت بالاتری شبیه‌سازی می‌کند.

کلیدواژه‌ها: امواج بادپناه، تنگه هرمز، Delft3D، هیدرواستاتیک، غیرهیدرواستاتیک

۱. مقدمه

محیط‌های دریایی دارای چینه‌بندی چگالی هستند، به این صورت که لایه‌های هم‌چگالی بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند و هر عاملی که باعث برهم خوردن وضعیت تعادل این لایه‌ها شود، باعث ایجاد امواج درونی می‌شود. امواج درونی نقش اساسی در وضعیت هیدرولوژیکی و انرژی اقیانوس‌ها دارد (گرت و مانک، ۱۹۷۹؛ ماسل، ۲۰۱۵). امواج درونی اقیانوسی توسط مکانیسم‌های مختلفی تولید می‌شوند که مهم‌ترین آن‌ها جزرومد، جریان‌های اقیانوسی و گردابه‌ها بر روی توپوگرافی بستر است (مک کینون و همکاران، ۲۰۱۷). امواج درونی با توجه به چینه‌بندی سیال، مکانیسم تولید، دامنه و تاثیر نیروهای خارجی به امواج بین سطحی درونی (گرت و مانک، ۱۹۷۹)، امواج انفرادی درونی یا سالیتون درونی (آپل، ۲۰۰۲)، امواج بادپناه (فلود، ۱۹۸۸)، جزرومد درونی (وونش، ۱۹۷۵) و امواج لخت درونی (آلفورد و همکاران، ۲۰۱۶) دسته‌بندی و نامگذاری می‌شوند. ارتفاع امواج درونی ممکن است تا ۳۰ متر و حتی بیشتر برسد. (مک لاکلان و دیفو، ۲۰۱۸). همچنین دوره تناوب این امواج با بازه چندین دقیقه تا چندین ساعت می‌باشد و طول موج آن‌ها در بازه چندصد متر تا ده‌ها کیلومتری قرار می‌گیرد (کناری، ۱۹۷۵؛ لای و همکاران، ۲۰۱۰؛ نجکو، ۲۰۱۴). می‌توان گفت که امواج بادپناه همان امواج درونی هستند که توسط عبور جریان بر روی توپوگرافی بستر ایجاد می‌شوند.

به دلیل هزینه‌های بالای اندازه‌گیری به صورت میدانی، شبیه‌سازی‌های عددی روش مناسبی برای دستیابی به داده‌های امواج درونی هستند. معادلات ناویر استوکس می‌توانند امواج درونی را بازتولید کنند و از آنجایی که مدل Delft3D نیز معادلات ناویر استوکس را

برای یک سیال تراکم ناپذیر در زیر آب با مفروضات بوسینسک حل می‌کند، از این مدل به دو صورت هیدرواستاتیک و غیرهیدرواستاتیک (به منظور در نظر گرفتن شتاب‌های عمودی جریان)، برای شبیه‌سازی عددی موج بادپناه می‌توان استفاده کرد. مجموعه برنامه Delft3D یک مدل متن باز یکپارچه از موسسه Deltares می‌باشد که از مجموعه‌ای از ماژول‌ها از جمله جریان، امواج و کیفیت آب و غیره تشکیل شده است و هر ماژول می‌تواند به صورت مستقل یا در ترکیب با ماژول‌های دیگر اجرا شود. به منظور ثبت پدیده‌های جریان غیرهیدرواستاتیک، نسخه هیدرواستاتیک (مدل Z) که بخشی از مجموعه مدل Delft3D است، با یک ماژول غیرهیدرواستاتیک توسعه یافته است (دلنارس، ۲۰۱۸ الف). همچنین معادله خطی امواج بادپناه به صورت رابطه ۱ می‌باشد (لگ، ۲۰۲۱):

$$U_0^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \nabla^2 \omega + f^2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} + N^2 \nabla_H^2 \omega = 0 \quad (1)$$

در گذشته، از Delft3D بارها در مسائل مختلف از جمله شبیه‌سازی جریان‌های دوبعدی و سه‌بعدی، امواج سطحی و انتقال رسوب دریاها و خورهای مختلف در دو حالت هیدرواستاتیک و غیرهیدرواستاتیک در بازه‌های زمانی چند دقیقه تا دو هزار سال استفاده شده است (دستغیب و همکاران، ۲۰۰۸؛ لویی چندیچنک، ۲۰۰۱؛ پارساپور و همکاران، ۲۰۱۷؛ پرسیل و همکاران، ۲۰۲۲)، اما کمتر از این مدل برای بررسی امواج بادپناه استفاده شده است.

چپمن و هایدوگل (۱۹۹۳) شبیه‌سازی تولید امواج بادپناه به وسیله یک جریان ثابت با سرعت جریان‌های تحمیلی کم و زیاد را با استفاده از یک مدل عددی هیدرواستاتیک انجام دادند. امواج درونی تنگه Messina در ایتالیا با یک مدل عددی یک بعدی و دو لایه شبیه‌سازی شد (برانت و همکاران، ۱۹۹۶). همچنین می‌توان به شبیه‌سازی امواج درونی بخشی از خلیج ماساچوست با استفاده از مدل سه‌بعدی غیرهیدرواستاتیک FVCOM آمریکا اشاره کرد (لای و همکاران، ۲۰۱۰). جزرومد و امواج درونی در دریای چین جنوبی با استفاده از مدل سه‌بعدی غیرهیدرواستاتیکی SUNTANS شبیه‌سازی شده است (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۱). با استفاده از مدل سه‌بعدی هیدرواستاتیک MITgcm و شبیه‌سازی اثر جزرومد، وجود امواج بادپناه در آب‌های عمیق تایید شده است (آلفورد و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین امواج انفرادی داخلی در شرق فلات Mascarene در اقیانوس هند با استفاده از مدل غیرهیدرواستاتیکی MITgcm با اعمال جریان‌های ثابت و جزرومدی شبیه‌سازی شده است (داسیلوا و همکاران، ۲۰۱۵).

خلیل آبادی و همکاران، ۲۰۱۵ با استفاده از مدل عددی GOTM و با شبیه‌سازی تولید امواج درونی در خلیج عمان و خروجی خلیج فارس، یک موج درونی را طول فصول بهار و تابستان مشاهده کرده اند که این موج در پاییز ضعیف شده و در زمستان از بین می‌رود. هورلی، ۲۰۱۷ با استفاده از ماژول جریان Delft3D امواج درونی در دریاچه Base Mine آمریکا را به مدت چهار روز شبیه‌سازی کرد. نتایج نشان داد مدل Delft3D به خوبی توانسته است امواج درونی را بازتولید کند. دیسانایاک، ۲۰۱۹ مهارت‌های دو مدل سه‌بعدی Delft3D و ELCOM را در شبیه‌سازی امواج درونی در دریاچه کنستانس آلمان را ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که هر دو مدل به طور قابل توجهی در شبیه‌سازی حرکات امواج درونی مهارت دارند. ژی و همکاران با استفاده از مدل هیدرواستاتیک سه‌بعدی ROMS، شبیه‌سازی عوامل تولید امواج بادپناه مقابل مصب کانال خلیج چساییک در آمریکا را انجام دادند (ژی و لی، ۲۰۱۹). همچنین در مطالعه دیگری با استفاده از مدل CROCO نشان داده شد که توپوگرافی بستر تاثیر به‌سزایی در تشکیل امواج بادپناه دارد (مارز و همکاران، ۲۰۲۰). اندی و همکاران ۲۰۲۰، با استفاده از اندازه‌گیری میدانی و سنجش از راه دور بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵، امواج درونی را در خلیج فارس شناسایی کردند. تراکم امواج درونی از تنگه هرمز در شرق خلیج فارس تا خور موسی در غرب، کاهش می‌یابد. همچنین امواج درونی عمدتاً در فصول گرم یعنی از اوایل مارس تا سپتامبر رخ می‌دهد و در فصول سرد سال ضعیف یا ناپدید می‌شود. علی و همکاران ۲۰۲۰، دریای سولو در جنوب غربی کشور فیلیپین را برای آزمایش توانایی مدل سه‌بعدی

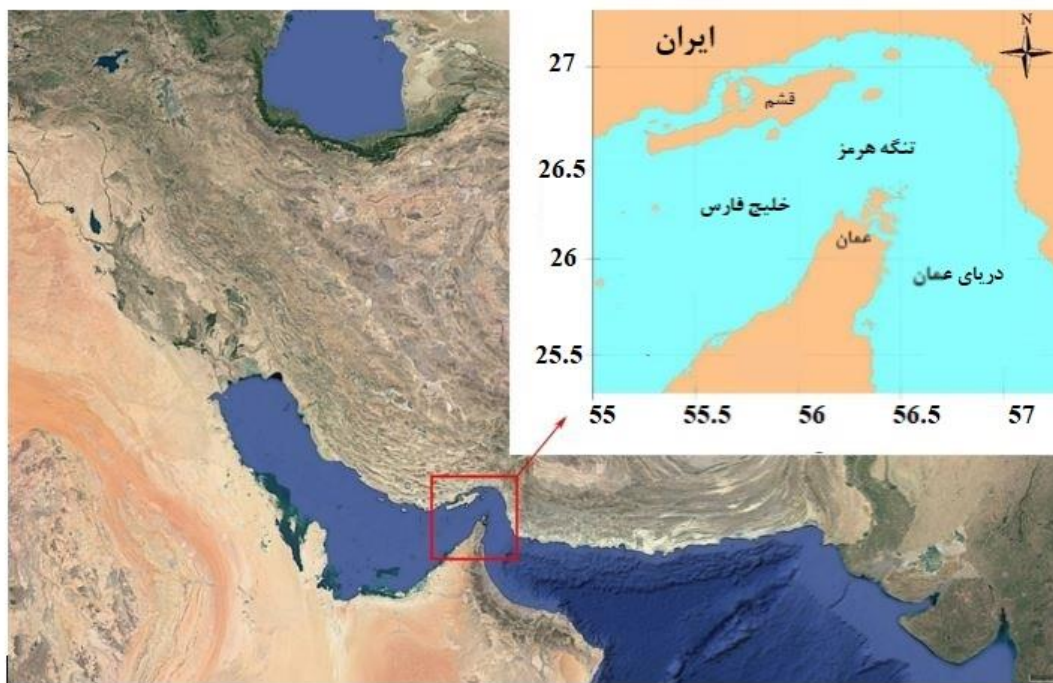
غیرهیدرواستاتیک Delft3D در شبیه‌سازی امواج درونی انتخاب و شبیه‌سازی انجام دادند که نتایج نشان از عملکرد قابل قبول مدل غیرهیدرواستاتیک Delft3D داشت. در مدل RANS NHWAVE ساده‌سازی معادلات غیرهیدرواستاتیک برای بررسی امواج درونی پیاده‌سازی شده است.

هدف از این مطالعه مدل سازی امواج بادپناه در تنگه هرمز با استفاده از مدل عددی Delft3D در دو حالت هیدرواستاتیک و هیدرودینامیک (غیر هیدرواستاتیک) و اعتبار سنجی با استفاده از داده‌های میدانی و تصاویر ماهواره ای است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش محدوده تنگه هرمز به عنوان مورد مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفته است. تنگه هرمز، آبراهی بین استان هرمزگان در ایران و استان مسندم در عمان است که خلیج عمان را به خلیج فارس پیوند می‌دهد. این گذرگاه یکی از راهبردی‌ترین مسیرهای بین‌المللی کشتیرانی در جهان به شمار می‌آید. بستر دریا در تنگه هرمز شیب نسبتاً تندی در جهت شمالی - جنوبی دارد. عمق بیش‌کرانه‌های شمالی بیشتر از چند متر نیست اما در نزدیکی کرانه‌های مسندم در جنوب بیشتر از ۹۰ متر است که عمیق‌ترین نقطه خلیج فارس به شمار می‌آید. نیمه شرقی تنگه هرمز، به ویژه در نزدیکی دریای عرب، دارای عمق بیشتری است. تنگه هرمز به دلیل وجود کم عمقی‌های متعدد و دارا بودن چندین جزیره مستعد تشکیل امواج بادپناه می‌باشد.

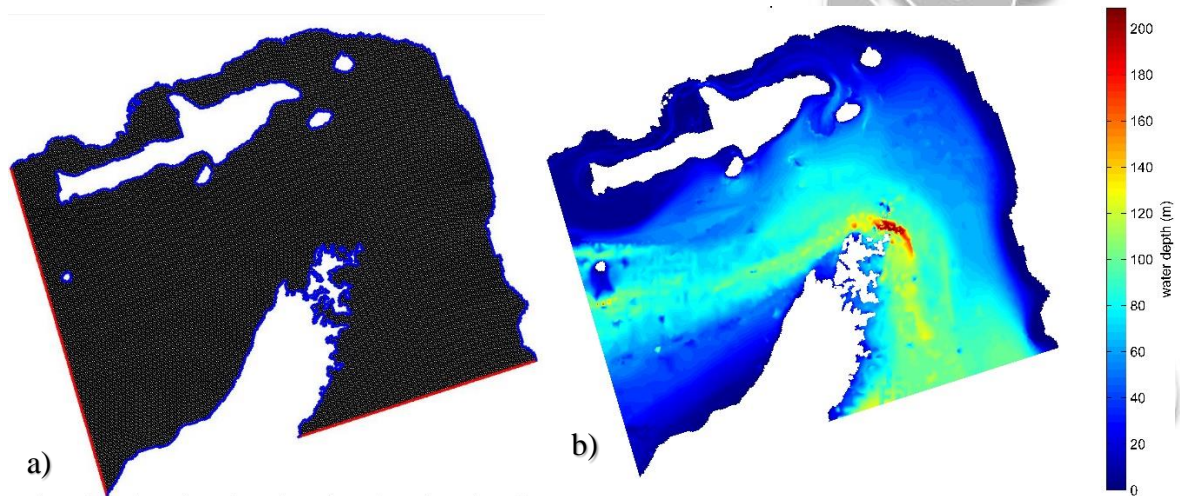


شکل ۱- موقعیت مکانی تنگه هرمز

۲-۲. شبکه‌بندی و ژرفاسنجی

در مدل Delft3D می‌توان انواع شبکه‌های منظم و نامنظم با ساختار و بدون ساختار را برای ماژول‌های جریان و موج ایجاد کرد (دلنارس، ۲۰۱۸، گریستن و همکاران، ۲۰۰۷). در این مطالعه از شبکه شبکه منظم خمیده استفاده شده است. شبکه ایجاد شده برای تنگه

هرمز بیش از ۲۱۲ هزار المان دارد و ابعاد سلول‌های آن به طور متوسط ۲۰۰ متر می‌باشد. شبکه به قدری ریز شده است تا بتواند فرآیندهای امواج درونی را به خوبی مشاهده کند. اعمال شبکه با اندازه سلول یکسان در کل محدوده مطالعاتی به دلیل اهمیت شناخت امواج درونی در تمام منطقه برای مطالعه حاضر می‌باشد. محدوده انتخاب شده، اطراف تنگه هرمز شامل قسمت‌هایی از غرب خلیج عمان و شرق خلیج فارس می‌شود. این مدل دارای دو مرز باز در قسمت خلیج فارس و خلیج عمان می‌باشد. در مورد جزئیات مرزهای باز مدل در قسمت بعدی بحث شده است. همچنین برای اعمال ژرفاسنجی از ترکیب داده‌های عمق‌سنجی اندازه‌گیری شده و داده‌های GEBCO (آی او سی، ۲۰۰۳) با رزولوشن ۸ ثانیه استفاده شده است. ژرفاسنجی مدل حاضر از عمق بیش از ۲۰۰ متری در دریا تا خشکی را شامل شده است. شبکه ایجاد شده و ژرفاسنجی اعمال شده به همراه مرزهای باز (خطوط قرمز) و مرزهای بسته (خطوط آبی) در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- الف) شبکه ایجاد شده به همراه مرزهای باز (خطوط قرمز) و بسته (خطوط آبی). ب) ژرفاسنجی اعمال شده

۳-۲. شرایط مرزی

دو مرز باز برای اعمال شرایط مرزی وجود دارد که یکی در سمت خلیج عمان و دیگری در سمت خلیج فارس قرار دارد. هر کدام از این مرزها برای دقت بیشتر در شبیه‌سازی به ۴ مرز کوچکتر تقسیم شدند. در سایر مرزها، شبکه به ساحل رسیده است و مرز بسته محسوب می‌شود. در لایه سطحی مرزهای باز، تراز آب، دمای آب و شوری و در لایه‌های عمودی مرزهای باز، دمای آب و شوری اعمال شده است. برای تراز آب از داده‌های TPX09 که دارای وضوح مکانی ۱/۳ درجه و وضوح زمانی یک ساعت می‌باشد، استفاده شده است. برای شوری و دمای آب از داده‌های مدل HYCOM که این داده‌ها را در ۴۰ لایه (در صورت عمیق بودن منطقه تا ۵۰۰۰ متری) با وضوح مکانی ۰/۸ درجه و وضوح زمانی سه ساعته در اختیار کاربران قرار می‌دهد، استفاده گردیده است (چاسینگت، همکاران، ۲۰۰۷). در مدل سه‌بعدی حاضر از ۲۰ لایه استفاده شده است که عمق لایه‌ها در نزدیکی سطح آب و تاج موانع حدود ۴ متر و در لایه‌های میانی تا ۲۵ متر متفاوت است.

۲-۴. مدل‌سازی عددی

شبیه‌سازی برای مدت زمان ۲۵ ساعت از تاریخ ۵ آوریل ۲۰۲۲ ساعت ۲۳:۰۰ تا ۷ آوریل ساعت ۰۰:۰۰ با شبکه‌بندی و

ژرفاسنجی شکل ۲ و با اعمال شرایط مرزی که در قسمت قبل گفته شد و همچنین اعمال شرایط اولیه شوری و دمای آب در تمام محدوده، انجام پذیرفت. هدف از شبیه‌سازی، شناسایی امواج درونی در تاریخ ۶ آوریل است که با تصاویر ماهواره‌ای و داده اندازه‌گیری شده موجود مقایسه شود. نتایج یک ساعت اول شبیه‌سازی به دلیل مدت زمان لازم برای به پایداری رسیدن مدل نادیده گرفته می‌شود. گام زمانی حل مدل با توجه به ریز بودن سلول‌های شبکه، جلوگیری از ناپایداری مدل و همچنین برآورده کردن شرایط عدد کورانت، ۶ ثانیه انتخاب شده است. برای درک بهتر نتایج، خروجی‌های مدل به صورت ۵ دقیقه‌ای گرفته شده است. با توجه به اهمیت تلاطم‌های عمودی در تشکیل امواج درونی، مدل تلاطم $k - \epsilon$ اعمال شده است. از آنجایی که نیروی باد تاثیر چندانی بر تشکیل امواج درونی خصوصا در لایه‌های عمودی ندارد، از اعمال نیروی باد صرف نظر شده است. اعمال شبیه‌سازی با پارامترهای ویسکوزیتی و دیفیوژنی پیش فرض موجب عدم انتشار موج در راستای افقی و عدم تغییر پارامترهای چگالی در عمق آب می‌شد. برای رفع این مشکل پارامترهای پخش و لزجت به مقادیر مندرج در جدول ۱ تغییر یافتند. مدل‌سازی عددی موج بادپناه به صورت هیدرواستاتیک با استفاده از روش موازی آنلاین و مدل‌سازی غیرهیدرواستاتیک از روش آنلاین انجام پذیرفت.

جدول ۱- پارامترهای اساسی شبیه‌سازی امواج بادپناه در تنگه هرمز

پارامتر	مقدار	واحد
زبری	۰/۰۲	$m^{-1/3}s$
پخش گردابی افقی	10^{-8}	m^2/s
لزجت گردابی افقی	۱	m^2/s
پخش گردابی عمودی	10^{-8}	m^2/s
لزجت گردابی عمودی	10^{-8}	m^2/s

۲-۵. تصویر ماهواره‌ای

در بخش نتایج از تصویر ماهواره‌ای ماهواره سنتینل-۱ یا SAR برای صحت‌سنجی نتایج استفاده شده است. این تصاویر از پایگاه داده کوپرنیکوس به آدرس <https://scihub.copernicus.eu> می‌باشد. پس از دریافت تصاویر، اصلاحات رادیومتری و هندسی اعمال شد. سپس قطبش VV انتخاب شد زیرا اجزا و ویژگی‌های سطح را با دقت بالاتری تشخیص می‌دهد. در قطبش مقاطع VH، امواج رادار نفوذ کمتری نسبت به امواج با همان قطبش VV دارند. بنابراین، قطبش VV برای نمایش انتخاب می‌شود. برای اعمال تصحیحات رادیومتری، ابتدا تصویر کالیبره شده و سپس با فیلتر لی و اندازه مانسک 3×3 فیلتر شده و سپس تصویر به صورت جغرافیایی ارجاع داده شد. پس از انجام این مراحل با تنظیم روشنایی در تصویر، جزئیاتی مانند امواج روی سطح آب قابل مشاهده بود.

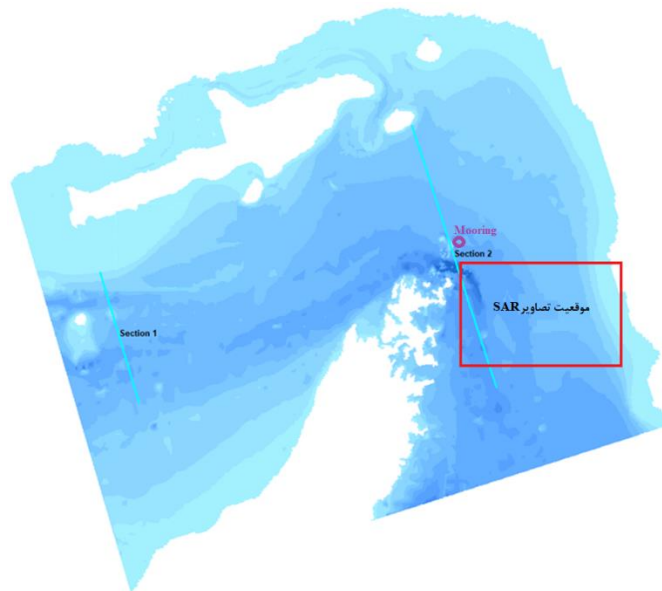
۲-۶. داده‌های میدانی

در بخش نتایج به منظور اعتبارسنجی بیشتر، از داده‌های اندازه‌گیری شده دمای آب در عمق بیست متری استفاده شده است. این داده‌ها به روش مورینگ در جنوب تنگه هرمز به مختصات 56° درجه شرقی و 26° درجه شمالی بین فواصل زمانی ۵ فوریه ۲۰۲۲ تا ۷ می ۲۰۲۲ به صورت سری زمانی ۳۰ ثانیه‌ای جمع‌آوری گشته است. در مجموع سه آرایه در عمق‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متری مشغول جمع‌آوری داده‌های دمای آب بودند که تنها داده‌های عمق ۲۰ متری در دسترس قرار داشت.

۳. نتایج

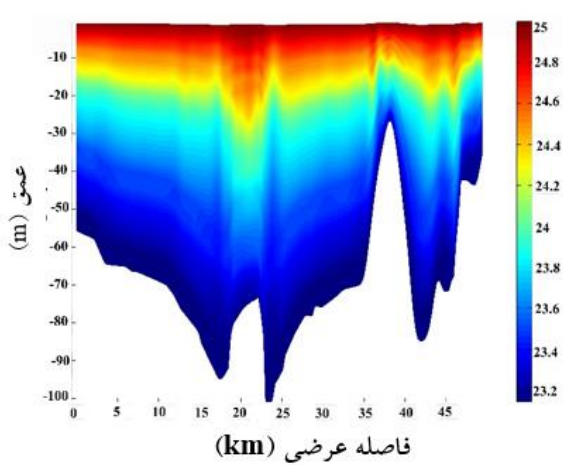
۳-۱. نتایج عددی

نتایج مدل در سه منطقه مختلف بررسی شدند که در شکل ۳ مشخص شده است. ابتدا در محلی که موج درونی در تصویر SAR رویت شد بررسی می‌گردد. سپس برش ۱ و ۲ مورد بررسی قرار گرفته است. این دو برش در محل‌هایی اطراف تنگه هرمز انتخاب شده است که کم‌عمقی‌های قابل توجهی وجود دارد. در ادامه به بررسی نتایج پرداخته می‌شود.

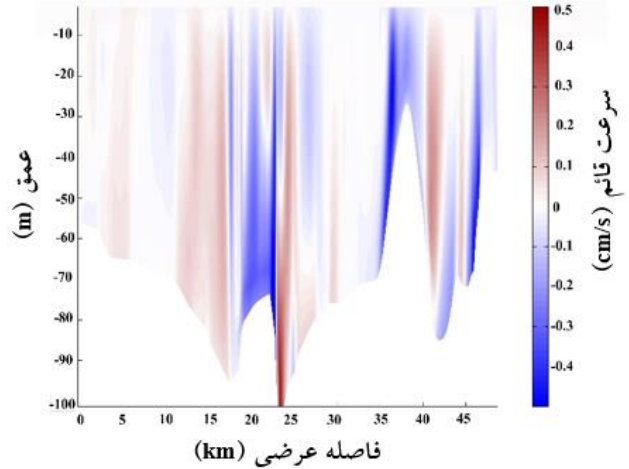


شکل ۳- محل برش‌ها، تصویر ماهواره‌ای و مورینگ

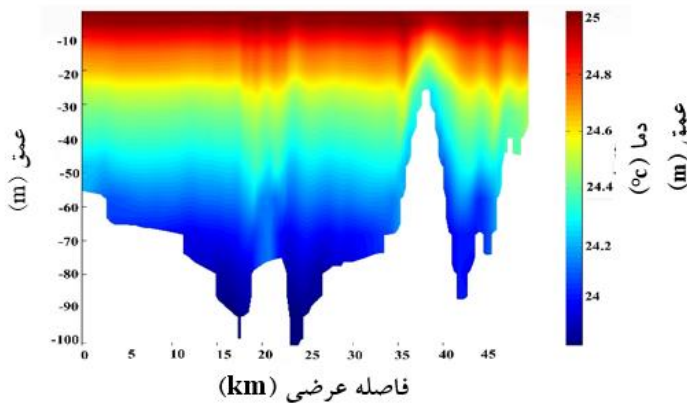
در ابتدا نتایج دو برش رسم شده در شکل ۳ بررسی می‌شود. همانطور که مشخص است، در هر دو شبیه‌سازی هیدرواستاتیک و غیرهیدرواستاتیک موج بادپناه پس از برخورد به مانع تشکیل شده است. طول موج تشکیل شده در شبیه‌سازی هیدرواستاتیک بین ۱/۵ تا ۲/۸ کیلومتر و برای غیرهیدرواستاتیک بین ۱/۷ تا ۵ کیلومتر می‌باشد.



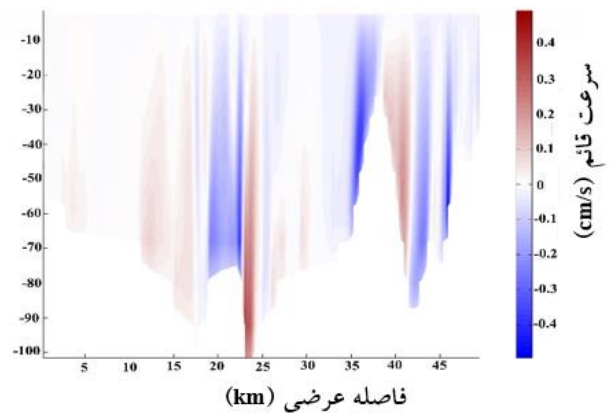
ب



الف



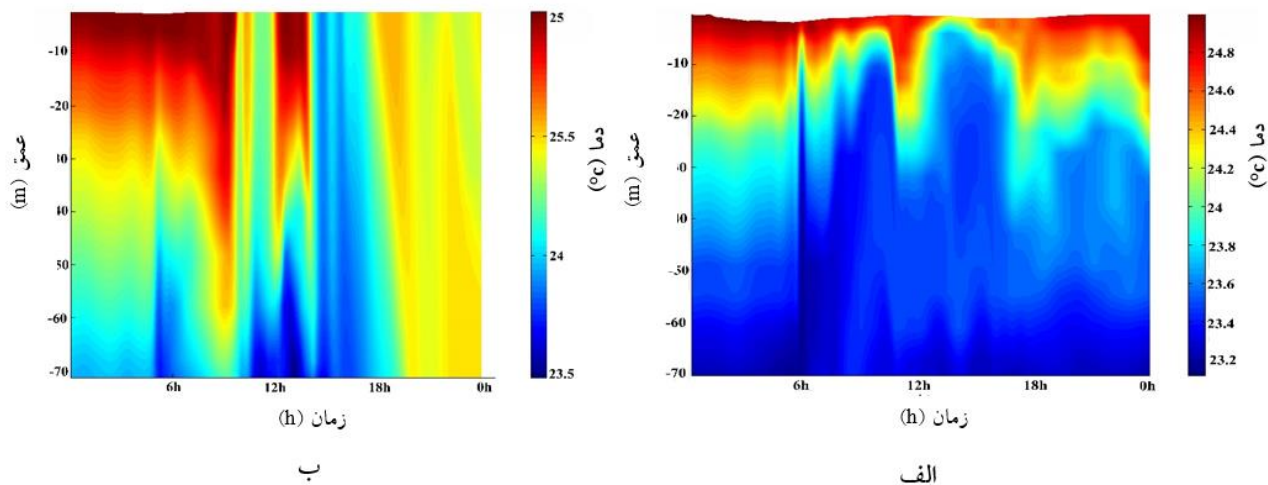
د



ج

شکل ۴- نتایج برش ۱. الف) سرعت قائم هیدرواستاتیک (ب) دمای آب هیدرواستاتیک (ج) سرعت قائم غیرهیدرواستاتیک
دمای آب غیرهیدرواستاتیک (د) سرعت قائم غیرهیدرواستاتیک

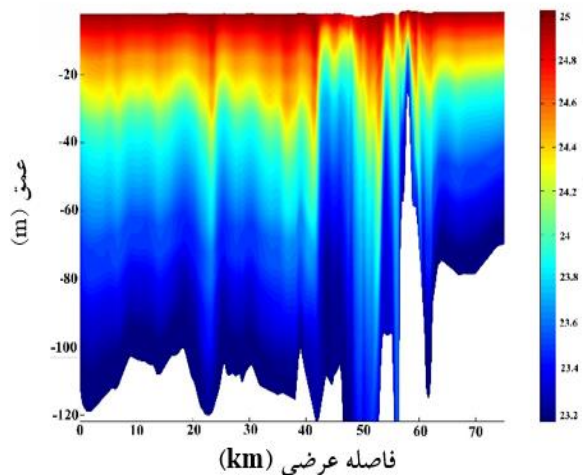
دوره زمانی موج بادپناه تشکیل شده در دو حالت هیدرواستاتیک و غیرهیدرواستاتیک برای برش ۱ در شکل ۵ مقایسه شده است. در مدل هیدرواستاتیک دوره زمانی موج بین ۴۰ دقیقه تا ۳ ساعت بوده و در حالت غیرهیدرواستاتیک بین ۲ ساعت تا ۳ ساعت و ۳۰ دقیقه می‌باشد.



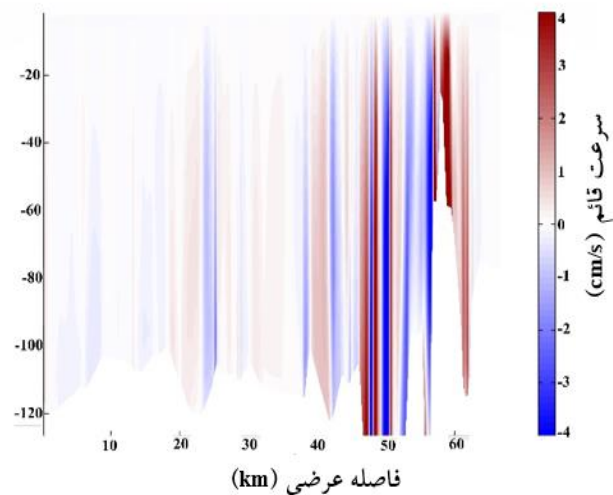
شکل ۵- سری زمانی دمای آب در عمق ۲۰ متری برای برش ۱. الف) غیرهیدرواستاتیک ب) هیدرواستاتیک

نتایج دمای آب و سرعت قائم جریان برش ۲ در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است در هر دو مدل، موج بادپناه شکل گرفته است با این تفاوت که طول موج در مدل هیدرواستاتیک بین ۷۰۰ متر تا ۳ کیلومتر و طول موج غیرهیدرواستاتیک بین ۳ تا ۶ کیلومتر می باشد.

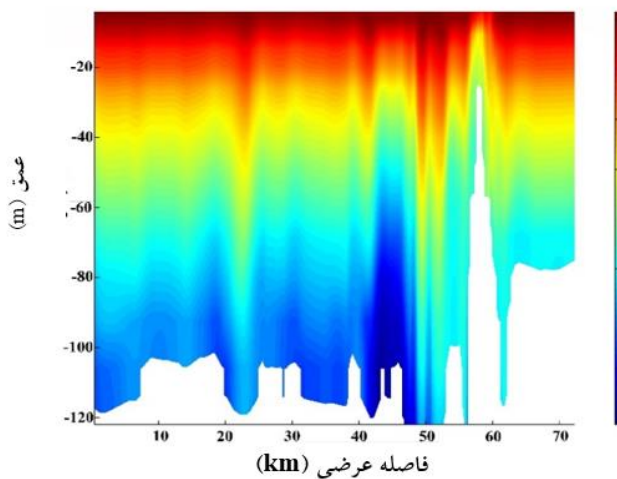
موسسه تحقیقات
آب و خاک
استاد نشسته



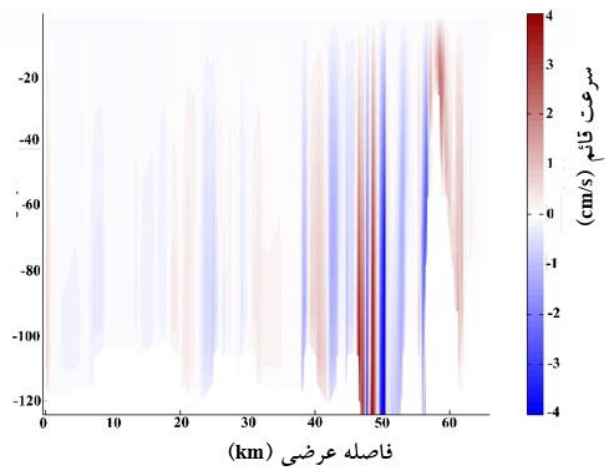
ب



الف



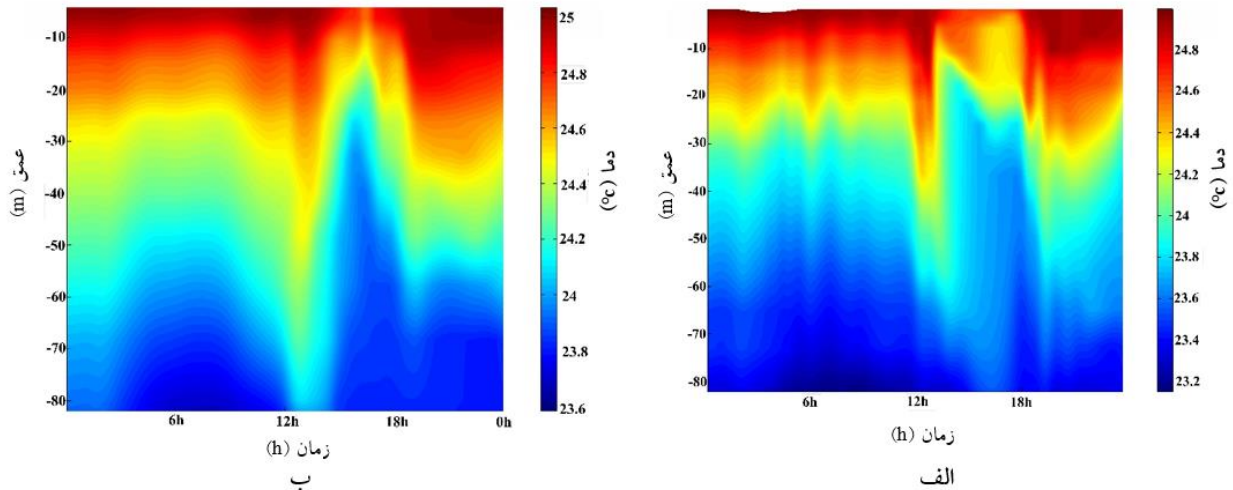
د



ج

شکل ۶- نتایج برش ۲. الف) سرعت قائم هیدرواستاتیک ب) دمای آب هیدرواستاتیک ج) سرعت قائم غیرهیدرواستاتیک د) دمای آب غیرهیدرواستاتیک

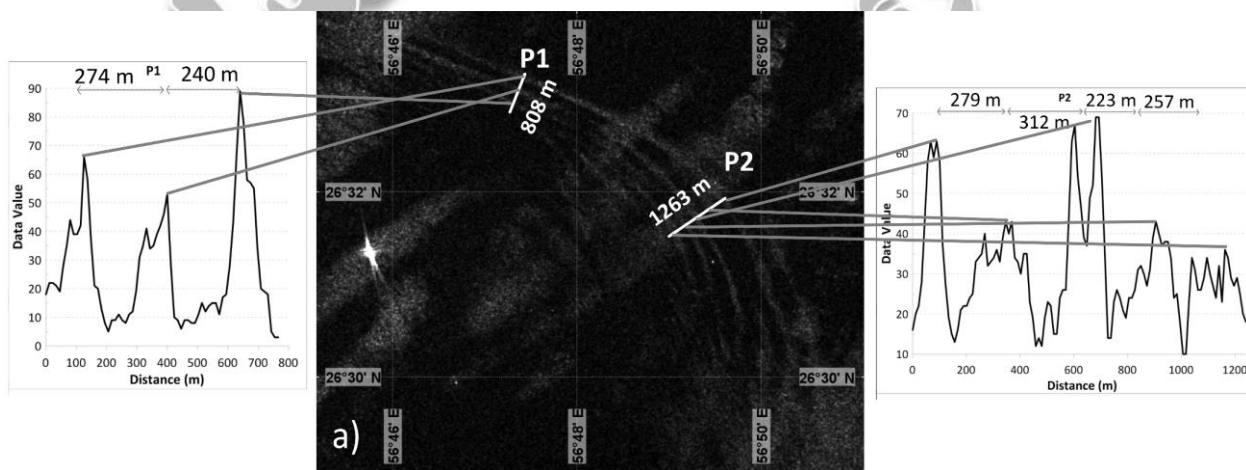
سری زمانی دمای آب یک نقطه از برش ۲ در شکل ۷ تایید می کند که هر دو مدل توانسته اند موج بادپناه را بازتولید کنند اما مدل هیدرواستاتیک دارای دوره زمانی موج ۳۵ دقیقه تا ۲ ساعته بوده درحالیکه مدل غیرهیدرواستاتیک دارای دوره زمانی موج ۱ ساعته تا ۳ ساعت و ۴۵ دقیقه می باشد. با توجه به نتایج به دست آمده می توان گفت مد اول امواج درونی (ناکومارا و همکاران، ۲۰۰۰) در تنگه هرمز غالب است.



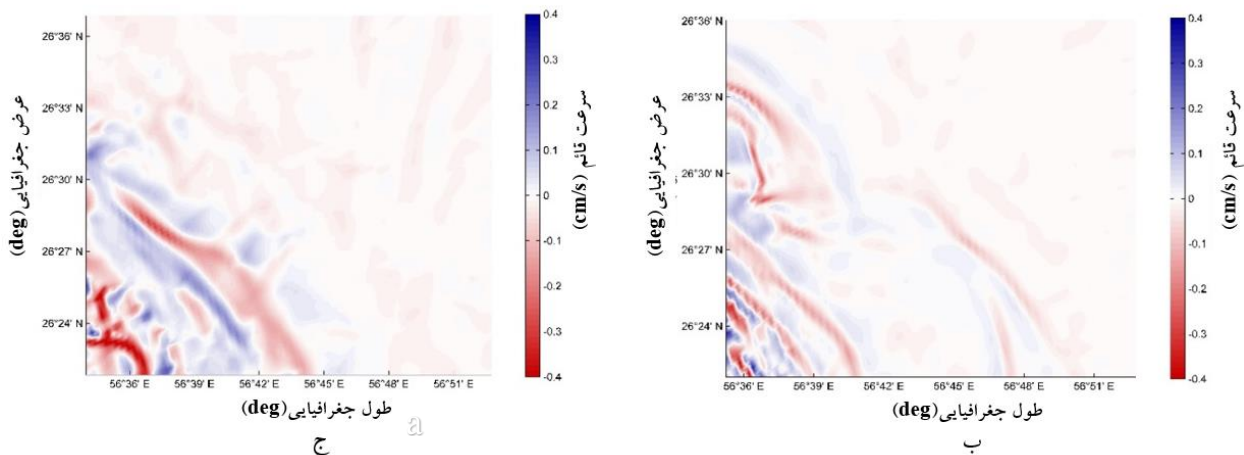
شکل ۷- سری زمانی دمای آب در عمق ۲۰ متری برای برش ۲. الف) غیرهیدرواستاتیک ب) هیدرواستاتیک.

نتایج تصاویر ماهواره ای:

در ادامه تصویر ماهواره ای SAR و مقایسه آن با نتایج مدل بررسی می گردد. بسته موج درونی در تصویر SAR در قسمت شرقی آب های تنگه ی هرمز در منطقه ای مختصات منطقه ای به طول جغرافیایی ۵۵,۴۴ تا ۵۵,۵۱ درجه و عرض جغرافیایی ۲۶,۲۹ تا ۲۶,۳۴ درجه، مشاهده گردید جهت این بسته ها به سمت شمال شرقی می باشد (شکل ۸-الف). با در نظر گرفتن نقاط تاریک و روشن به عنوان قعر و قله موج درونی بر روی سطح آب طول موج درونی ایجاد شده محاسبه گردید (جکسون و همکاران، ۲۰۱۳، رودناس و گارلو، ۱۹۹۸) همچنین سرعت و ارتفاع موج درونی ایجاد شده با استفاده از روش های موجود (وانگ و همکاران، ۲۰۲۳) تخمین زده شد که در جدول ۲ آورده شده است.



الف



شکل ۸- الف) تصویر ماهواره‌ای SAR از بسته موج درونی. ب) سرعت قائم غیر هیدرواستاتیک

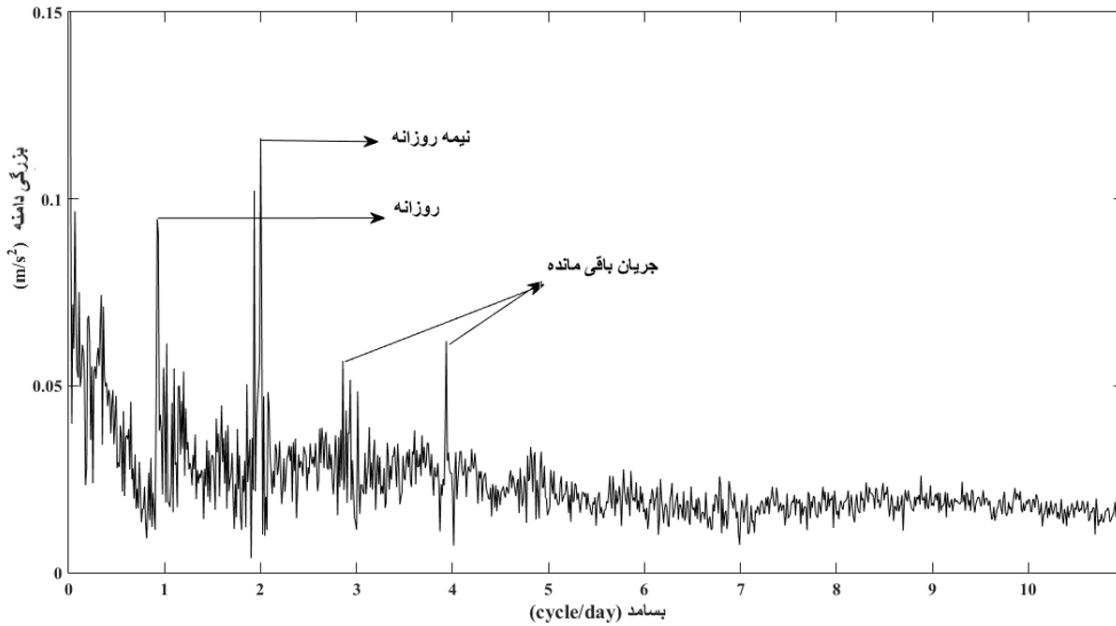
ج) سرعت قائم هیدرواستاتیک

جدول ۲- پارامترهای امواج درونی استخراج شده از تصاویر ماهواره ای

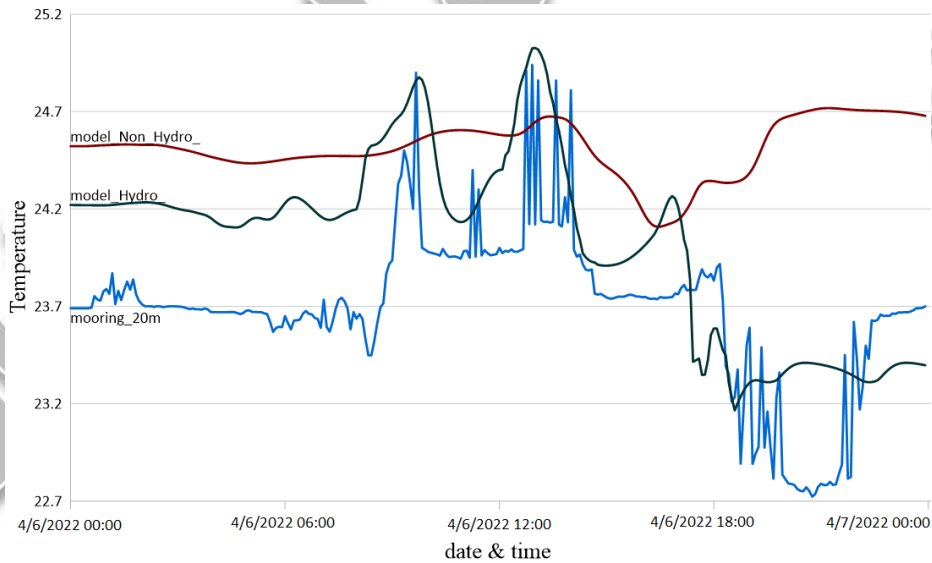
ویژگی ها	سرعت انتشار (m/s)	ارتفاع موج (m)	طول موج (m)
میانگین مقادیر استخراج شده	۰/۲۸	۱/۳۶	۲۷۰

نتایج اندازه گیری میدانی:

پس از استخراج داده های مورینگ و اعمال تبدیل فوریه بر روی سری زمانی داده ها مطابق شکل ۹ مشخص شد که داده ها تحت تاثیر دو بسامد ۲۴ و ۱۲ ساعته هستند که می تواند اثر مولفه های روزانه و نیم روزانه باشد همچنین یک مولفه ۶ ساعته نیز وجود دارد که می تواند ناشی از جریانات باقی مانده باشد (قاضی و همکاران، ۲۰۲۱).



شکل ۹- سری فوریه داده های برداشت شده توسط مورینگ
 به منظور اعتبارسنجی بیشتر مدل، از داده های دمای آب در عمق بیست متری نقطه اندازه گیری شده توسط مورینگ برای مقایسه با نتایج شبیه سازی در همان نقطه استفاده شده است که در شکل ۱۰ آورده شده است.



شکل ۱۰- مقایسه نتایج مدل هیدرواستاتیک و غیرهیدرواستاتیک با داده اندازه گیری

۴. بحث و نتیجه گیری

تنگه هرمز به دلیل داشتن کم عمقی های فراوان مستعد تشکیل موج لی می باشد. برای شبیه سازی این امواج از مدل سه بعدی هیدرواستاتیک و غیرهیدرواستاتیک ماژول جریان Delft3D استفاده گردید. در این مطالعه از اثر باد و شارهای حرارتی چشم پوشی گردید و تنها اثر جزرومد به همراه دما و شوری به مدل اعمال شد. از بررسی طول موج های تشکیل شده در شکل های ۴ و ۶ می توان

دریافت که مدل هیدرواستاتیک تلاطم‌های بیشتری را نشان داده است. همچنین مدل هیدرواستاتیک چینه‌بندی ترموکلاین را با دقت بیشتری نشان داده است به طوریکه پس از مقایسه با تحقیقات پیشین این قضیه به خوبی استنباط می‌گردد (علی و همکاران، ۲۰۲۰، عزیزپور و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین از بررسی دوره زمانی امواج بادپناه تشکیل شده در شکل‌های ۵ و ۷ می‌توان دریافت که باز هم مدل هیدرواستاتیک تلاطم بیشتری را نشان می‌دهد.

از بررسی تصاویر ماهواره‌ای با سرعت عمودی تشکیل شده در شبیه‌سازی، می‌توان دریافت که هر دو مدل هیدرواستاتیک و غیرهیدرواستاتیک توانسته‌اند جهت انتشار و تولید امواج درونی را با تقریب مکانی قابل قبول شبیه‌سازی کنند، با این تفاوت که مدل غیرهیدرواستاتیک دارای مقادیر سرعت جریان بزرگتری می‌باشد، هرچند که نتایج هر دو مدل در رنج $0/4-$ تا $0/4+$ می‌باشد. مقایسه داده اندازه‌گیری در عمق ۲۰ متری با نتایج مدل نشان داد که مدل هیدرواستاتیک نزدیکی بیشتری به داده‌های مورینگ دارد و توانسته است امواج بادپناه تشکیل شده را بازسازی کند.

به طور کلی می‌توان گفت که هر دو مدل هیدرواستاتیک و غیرهیدرواستاتیک Delft3D توانایی بازتولید امواج بادپناه را در آب کم عمق و شرایط توپوگرافی پیچیده دارند، با این تفاوت که مدل هیدرواستاتیک تلاطم‌های بیشتری را نشان می‌دهد و از دقت بالاتری نسبت به مدل غیرهیدرواستاتیک برخوردار است.

این مطالعه می‌تواند به عنوان مبنایی برای تحقیقات بیشتر در زمینه درک دقیق تر و شبیه سازی بهتر امواج بادپناه در مناطق کم عمق با توپوگرافی پیچیده و در اقیانوس‌ها و دریاها باشد. برای پژوهش‌های بعدی پیشنهاد می‌گردد این پژوهش با دیگر مدل‌ها همانند ROMS، FVCOM یا MITgcm انجام شود و برای دقت بالاتر مدل نیز می‌توان اثر باد و شارهای حرارتی را بر روی امواج بادپناه بررسی کرد.

منابع:

Ali ,L., Y. Bai, and Y. Xu, A methodology to derive design metocean internal wave current criteria for submarine structures. Ships and Offshore Structures, 2020.

Alford, M.H., MacKinnon, J.A., Simmons, H.L. and Nash, J.D., Near-Inertial Internal Gravity Waves in the Ocean. Annual Review of Marine Science, 2016. 8: p. 95-123.

Alford, M.H., J.M. Klymak ,and G.S. Carter, Breaking internal lee waves at Kaena Ridge, Hawaii. Geophysical Research Letters, 2013.

Andi, S., A.R.E. Hesari, and E. Hesari, Detection of internal waves in the Persian Gulf. Remote Sensing Letters, 2020.

Apel, J.R., Oceanic Internal Waves and Solitons. An Atlas of Oceanic Internal Solitary Waves, 2002. 1: p. 1-40.

Azizpour, J., Chegini, V., Khosravi, M. and Einali, A., Study of the Physical Oceanographic Properties of the Persian Gulf, Strait of Hormuz and Gulf of Oman Based on PG-GOOS CTD Measurements. Journal of the Persian Gulf (Marine Science), 2014. 5(18): p. 37-48.

Brandt, P., A. Rubino, and W. Alpers, Internal waves in the Strait of Messina observed by the ERS 1/2 synthetic aperture radar. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1996. 3: p. 1487-1489.

- Chapman, D.C. and D.B. Haidvogel, Generation of internal lee waves trapped over a tall isolated seamount. *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, 1993.
- Chassignet, E.P., Hurlburt, H.E., Smedstad, O.M., Halliwell, G.R., Hogan, P.J., Wallcraft, A.J., Baraille, R. and Bleck, R., The HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) data assimilative system. *Journal of Marine Systems*, 2007. 65: p. 60-83.
- Dissanayake, P., H. Hofmann, and F. Peeters, Comparison of results from two 3D hydrodynamic models with field data: internal seiches and horizontal currents. *Inland Waters*, 2019. 9: p. 239-260.
- Dastgheib, A., J.A. Roelvink, and Z.B. Wang, Long-term process-based morphological modelling of the Marsdiep Tidal Basin. *Marine Geology*, 2008. 256(1-4): p. 90-100.
- Deltares, Delft3D-FLOW User Manual: 3D/2D modelling suite for integral water solutions. 2018, Netherlands: Deltares. 672.
- Flood, R.D., A lee wave model for deep-sea mudwave activity. *Deep-Sea Research*, 1988. 35: p. 973-983.
- Garrett, C. and W. Munk, Internal Waves in the Ocean. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1979. 11: p. 339-369.
- Ghazi, E., Aliakbari Bidokhti, A., Ezam, M., Zoljoodi, M., & Torabi Azad, M. (2021). Study of Tidal and Residual Current in the Persian Gulf. *Hydrophysics*, 6(2), 41-51.
- Gerritsen, H., De Goede, E.D., Platzek, F.W., Genseberger, M., Van Kester, J.A.T.M. and Uittenbogaard, R.E., Validation Document Delft3D-Flow; a software system for 3D flow simulations. 2007, WL - Delft Hydraulics.
- Hurley, D.L., Wind Waves and Internal Waves in Base Mine Lake, in *Civil Engineering*. 2017, The Univwesity of British Columbia: Vancouver.
- IOC, IHO, and BODC, Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas, Published on CD-ROM on behalf of the Intergovernmental Oceanographic Commission and the International Hydrographic Organisation as part of the General Bathymetric Chart of the Ocean. 2003, British Oceanographic data center, Liverpool.
- Jackson, C. R., da Silva, J. C., Jeans, G., Alpers, W., & Caruso, M. J. (2013). Nonlinear internal waves in synthetic aperture radar imagery. *Oceanography*, 26(2), 68-79.
- Kanari, S., The long-period internal waves in Lake Biwa. *Limnology and Oceanography*, 1975. 20(4): p. 544-553.
- Khalilabadi, M.R., Sadrinassab, M., Chegini, V. and Akbarinassab, M., Internal Wave Generation in the Gulf of Oman (Outflow of Persian Gulf). *Indian Journal of Geo-Marine Science*, 2015. 44: p. 371-375.
- Lai, Z., et al., A nonhydrostatic version of FVCOM 2. Mechanistic study of tidally generated nonlinear internal waves in Massachusetts Bay. *Journal of Geophysical Research*, 2010. 115, C12049.
- Legg, S., Mixing by Oceanic Lee Waves. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2021. 53: p. 173-201.
- Luijendijk, A., Validation, calibration and evaluation of a Delft3D-Flow model with a ferry measurements. 2001, TU Delft.
- MacKinnon, J.A., Zhao, Z., Whalen, C.B., Waterhouse, A.F., Trossman, D.S., Sun, O.M., Laurent, L.C.S., Simmons, H.L., Polzin, K., Pinkel, R. and Pickering, A., Climate Process Team On Internal Wave-Driven Ocean Mixing. *American Meteorological Society*, 2017: p. 2429-2454.

Marez, C.d., N.J. Lahaye, and J. Gula ,interaction of the Gulf Stream with small scale topography: a focus on lee waves. Scientific Reports Nature Research, 2020.

Massel, S.R., Internal Gravity Waves in the Shallow Seas. GeoPlanet_ Earth and Planetary Sciences. 2015: Springer International Publishing.

McLachlan, A. and O. Defeo, The Ecology of Sandy Shores. Third English Edition ed. 2018: Elsevier. 556.

Nakamura, T., Awaji, T., Hatayama, T., Akitomo, K., Takizawa, T., Kono, T., Kawasaki, Y., & Fukasawa, M. (2000). The generation of large-amplitude unsteady lee waves by subinertial K1 tidal flow: A possible vertical mixing mechanism in the Kuril Straits. *Journal of Physical Oceanography*, 30(7), 1601-1621.

Njoku, E.G., Encyclopedia of Remote Sensing. 2014, NewYork: Springer Reference.

Parsapour-Moghaddam, P. and C.D. Rennie, Hydrostatic versus nonhydrostatic hydrodynamic modelling of secondary flow in a tortuously meandering river: Application of Delft3D. *River Reaserch* 2017: p. 1-11.

Porcile, G., Enrile, F., Besio, G. and Pittaluga, M.B., Hydrostatic vs. nonhydrostatic modelling of ensity currents developing two dimensionally on steep and mild slopes. *Applied Ocean Reasearch*, 2022. 121.

Ródenas, J. A., & Garello, R. (1998). Internal wave detection and location in SAR images using wavelet transform. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 36(5), 1494-1507. <https://doi.org/10.1109/36.718853>

Wang, C.-A., Zhang, H., & Zhu, H.-L. (2023). Numerical predictions of internal waves and surface thermal signatures by underwater vehicles in density-stratified water using OpenFOAM. *Ocean Engineering*, 272, 113847.

Wunsch, C., Internal Tides in the Ocean. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1975. 13(1): p. 167-182.

Xie, X. and M. Li, Generation of Internal Lee Waves by Lateral Circulation in a Coastal Plain Estuary. *Oceanography*, 2019.

Zhang, Z ,O.B. Fringer, and S.R. Ramp, Three-dimensional, nonhydrostatic numerical simulation of nonlinear internal wave generation and propagation in the South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011. 116: p. 1-26.

Numerical simulation of lee waves in the Strait of Hormuz using Delft3D model

Internal waves play an essential role in the hydrological state and energy of the oceans. One of the types of internal waves is lee waves, which are created by the passage of subsurface or tidal currents on the topography of the seabed, and are one of the factors of displacement of density layers. It is under water. This will change the amount of nutrients in the sea and the density of the sea. For this reason, the knowledge of lee waves is of great importance in the fishing and military industries. In this article, by using Delft3D three-dimensional model flow module hydrostatically and non-hydrostatically in the Strait of Hormuz, which is prone to the formation of lee waves due to its many shallows, the simulation of lee waves has been carried out and by using satellite images SAR, field data and previous studies were validated.

Two general open borders were applied to apply border conditions, one on the side of the Gulf of Oman and the other on the side of the Persian Gulf. Each of these boundaries was divided into 4 smaller boundaries for more accuracy in the simulation. In the surface layer of open boundaries, water level, water temperature and salinity have been applied, and in the vertical layers of open boundaries, water temperature and salinity have been applied. For water level, TPX09 data, which has a spatial resolution of 1.3 degrees and a time resolution of one hour, has been used. For salinity and water temperature, data from the HYCOM model has been used, which has these data in 40 layers with resolution. A location of 0.08 degrees and a time resolution of three hours have been used. In the current 3D model, 20 layers have been used, the depth of the layers near the water surface and the crest of the obstacles is about 4 meters and in the middle layers up to 25 meters.

In the results section, the satellite image of Sentinel-1 satellites or SAR was used to verify the results. After receiving the images, radiometric and geometric corrections were applied. Then VV polarization was selected. In the results section, for further validation, the measured data of water temperature at a depth of twenty meters has been used. These data were collected by mooring method in the south of the Strait of Hormuz at coordinates 56 between February 5, 2022 and May 7, 2022 in the form of a 30-second time series.

From the examination of the wavelengths formed, it can be seen that the hydrostatic model has shown more turbulence. Also, the hydrostatic model has shown the stratification of the thermocline more accurately, so that after comparing with previous researches, this issue is well deduced.

From the examination of satellite images with vertical velocity formed in the simulation, it can be seen that both hydrostatic and non-hydrostatic models have been able to simulate the direction of propagation and generation of internal waves with an acceptable spatial approximation, with this difference that the non-hydrostatic model has larger flow velocity values, although the results of both models are in the range of -0.4 to +0.4.

Comparing the measurement data at a depth of 20 meters with the model results showed that the hydrostatic model is closer to the mooring data and was able to reconstruct the formed lee waves.

Keywords: Lee waves, Striate of Hormoz, Delf 3D, Hydrostatic, Nonhydrostatic