

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

Deldar, H.¹ 

1. Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: h.deldar@inio.ac.ir

(Received: 14 Aug 2023, Revised: 27 Sep 2023, Accepted: 9 Jan 2024, Published online: 6 July 2024)

Summary

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 isodensity surfaces under water. This can change the amount of nutrients in the sea and the density of the sea. For this reason, the knowledge of lee waves has 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 shallow channels, 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 the 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 were applied, and in the vertical layers of open boundaries, water temperature and salinity were applied. For water level, TPX09 data, which has spatial resolution of 1.3 degrees and a time resolution of one hour, were used. For salinity and water temperature, data from the HYCOM model has been used, which these data has 40 layers resolution. A grid space of 0.08 degrees and 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.

The satellite image of Sentinel-1 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 was 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 time series.

From the examination of the wavelengths formed, it can be seen that the hydrostatic model shows more disturbance. Also, the hydrostatic model shows 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 are able to simulate the direction of propagation and generation of internal waves with an acceptable spatial approximation, with a 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 cm/s.

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.

شبیه‌سازی عددی امواج بادپناه در تنگه‌هرمز با استفاده از مدل Delft3D

حامد دلدار^۱ ✉

۱. پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: h.deldar@inio.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۲/۵/۲۳، بازنگری: ۱۴۰۲/۷/۵، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۱۰/۱۹، انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۴/۱۶)

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 جابه‌جایی 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 سه‌بعدی Delft3D به‌صورت هیدرواستاتیک و غیرهیدرواستاتیک در تنگه‌هرمز 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 تنگه‌هرمز را نشان می‌دهند. هر دو مدل هیدرواستاتیک و غیرهیدرواستاتیک توانسته‌اند جهت انتشار و تولید امواج درونی را با تقریب مکانی قابل‌قبول شبیه‌سازی کنند، با این تفاوت که مدل غیرهیدرواستاتیک دارای مقادیر سرعت جریان بزرگ‌تری می‌باشد، هرچند که نتایج هر دو مدل در دامنه -0.4 تا $+0.4$ cm/s می‌باشد. با این حال می‌توان گفت حالت هیدرواستاتیک اغتشاش‌های بیشتری را نشان می‌دهد و به دلیل استفاده از مختصات قائم سیگما، لایه ترموکلاین را با دقت بالاتری شبیه‌سازی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: امواج بادپناه، تنگه‌هرمز، Delft3D، هیدرواستاتیک، غیرهیدرواستاتیک.

۱. مقدمه

انفرادی درونی یا سالتون 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 به‌صورت میدانی،

محیط‌های دریایی دارای چینه‌بندی چگالی هستند، به این‌صورت 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 تأثیر نیروهای خارجی به امواج بین سطحی درونی (گرت و مانک، ۱۹۷۹)، امواج

همکاران، ۱۹۹۶). همچنین می‌توان به شبه‌سازی امواج درونی بخشی از خلیج ماساچوست با استفاده از مدل سه‌بعدی غیرهیدرواستاتیکی FVCOM آمریکا اشاره کرد (لای و همکاران، ۲۰۱۰). جزرومد و امواج درونی در دریای چین جنوبی با استفاده از مدل سه‌بعدی غیرهیدرواستاتیکی SUNTANS شبه‌سازی شده است (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۱). با استفاده از مدل سه‌بعدی هیدرواستاتیکی MITgcm و شبه‌سازی اثر جزرومد، وجود امواج بادپناه در آب‌های عمیق تأیید شده است (آلفورد و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین امواج انفرادی داخلی در شرق فلات Mascarene در اقیانوس هند با استفاده از مدل غیرهیدرواستاتیکی MITgcm با اعمال جریان‌های ثابت و جزرومدی شبه‌سازی شده است (داسیلوا و همکاران، ۲۰۱۵).

خلیل‌آبادی و همکاران، ۲۰۱۵ با استفاده از مدل عددی GOTM و با شبه‌سازی تولید امواج درونی در خلیج عمان و خروجی خلیج فارس، یک موج درونی را طول فصول بهار و تابستان مشاهده کرده‌اند 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 شبه‌سازی کرد. نتایج نشان داد مدل Delft3D به‌خوبی توانسته است امواج درونی را بازتولید کند. دیسانایاک و همکاران (۲۰۱۹) مهارت‌های دو مدل سه‌بعدی Delft3D و ELCOM را در شبه‌سازی امواج درونی در دریاچه کنستانس آلمان را ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که هر دو مدل به‌طور قابل‌توجهی در شبه‌سازی حرکات امواج درونی مهارت دارند. ژری و لی (۲۰۱۹) با استفاده از مدل هیدرواستاتیکی سه‌بعدی ROMS، شبه‌سازی عوامل تولید امواج بادپناه مقابل مصب کانال خلیج چساییک در آمریکا را انجام دادند (ژری و لی، ۲۰۱۹). همچنین در مطالعه دیگری با استفاده از مدل CROCO نشان داده شد که توپوگرافی بستر تأثیر 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

شبه‌سازی‌های 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 تراکم‌ناپذیر در زیر آب با مفروضات بوسینسک حل می‌کند، از این مدل به دو صورت هیدرواستاتیکی و غیرهیدرواستاتیکی (به‌منظور در نظر گرفتن شتاب‌های عمودی جریان)، برای شبه‌سازی عددی موج بادپناه می‌توان استفاده کرد. مجموعه برنامه Delft3D یک مدل متن‌باز یکپارچه از مؤسسه Deltares می‌باشد که از مجموعه‌ای از ماژول‌ها از جمله جریان، امواج و کیفیت آب و غیره تشکیل شده است و هر ماژول می‌تواند به‌صورت مستقل یا در ترکیب با ماژول‌های دیگر اجرا شود. به‌منظور ثبت پدیده‌های جریان غیرهیدرواستاتیکی، نسخه هیدرواستاتیکی (مدل Z) که بخشی از مجموعه مدل Delft3D است، با یک ماژول غیرهیدرواستاتیکی توسعه یافته است (دلنارس، ۲۰۱۸-الف). همچنین معادله خطی امواج بادپناه به‌صورت رابطه ۱ می‌باشد (لگک، 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 شبه‌سازی جریان‌های دو‌بعدی و سه‌بعدی، امواج سطحی و انتقال رسوب دریاها و خورهای مختلف در دو حالت هیدرواستاتیکی و غیرهیدرواستاتیکی در بازه‌های زمانی چند دقیقه تا دو هزار سال استفاده شده است (دستغیب و همکاران، ۲۰۰۸؛ لویی جندیچنک، 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) شبه‌سازی تولید امواج بادپناه به‌وسیله یک جریان ثابت با سرعت جریان‌های تحمیلی کم و زیاد را با استفاده از یک مدل عددی هیدرواستاتیکی انجام دادند. امواج درونی تنگه Messina در ایتالیا با یک مدل عددی یک‌بعدی و دو‌لایه شبه‌سازی شد (برانت و

ماهواره‌ای است.

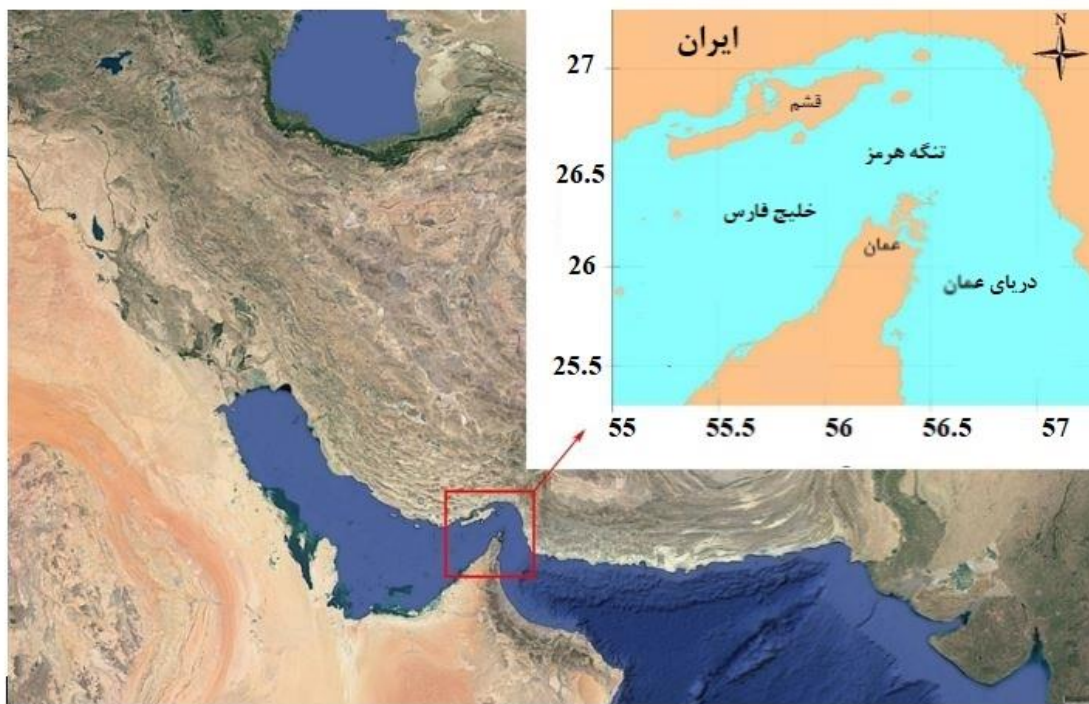
۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش محدوده تنگه هرمز به‌عنوان 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 به‌شمار می‌آید. بستر دریا در تنگه هرمز شیب نسبتاً تندی در جهت شمالی-جنوبی دارد. عمق پیش‌کرانه‌های شمالی بیشتر از چند متر نیست اما در نزدیکی کرانه‌های مسندم در جنوب بیشتر از ۹۰ متر است که عمیق‌ترین نقطه خلیج فارس به‌شمار می‌آید. نیمه شرقی تنگه هرمز، به‌ویژه در نزدیکی دریای عرب، دارای عمق بیشتری است. تنگه هرمز به‌دلیل وجود کم‌عمقی‌های متعدد و دارا بودن چندین جزیره مستعد تشکیل امواج بادپناه می‌باشد.

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 قابل‌قبول مدل غیرهیدرواستاتیک Delft3D داشت. در مدل RANS NHWAVE ساده‌سازی معادلات غیرهیدرواستاتیک برای بررسی امواج درونی پیاده‌سازی شده است.

هدف از این مطالعه مدل‌سازی امواج بادپناه در تنگه هرمز با استفاده از مدل عددی Delft3D در دو حالت هیدرواستاتیک و هیدرودینامیک (غیر هیدرواستاتیک) و اعتبارسنجی با استفاده از داده‌های میدانی و تصاویر



شکل ۱. موقعیت مکانی تنگه هرمز.

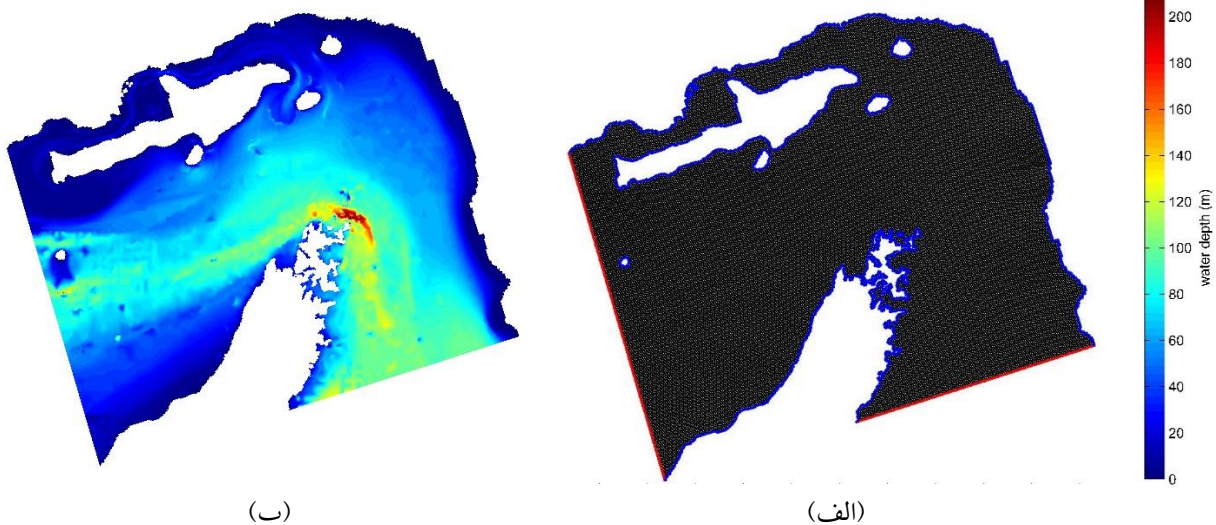
۲-۲. شبکه‌بندی و ژرفاسنجی

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 منظم خمیده استفاده شده است. شبکه ایجاد شده برای تنگه‌هرمز بیش از ۲۱۲ هزار المان دارد و ابعاد سلول‌های آن به‌طور متوسط ۲۰۰ متر می‌باشد. شبکه به‌قدری ریز شده است تا بتواند فرایندهای امواج درونی را به‌خوبی مشاهده کند. اعمال شبکه با اندازه سلول یکسان در کل محدوده مطالعاتی به‌دلیل اهمیت شناخت امواج درونی در تمام منطقه برای مطالعه حاضر می‌باشد. محدوده انتخاب شده، اطراف تنگه‌هرمز 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 به‌همراه مرزهای باز (خطوط قرمز) و مرزهای بسته (خطوط آبی) در شکل ۲ نشان داده شده است.

۲-۳. 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 یک‌ساعته می‌باشد، استفاده شده است. برای شوری و دمای آب از داده‌های مدل HYCOM که این داده‌ها را در ۴۰ لایه (در صورت عمیق‌بودن منطقه تا ۵۰۰۰ متری) با وضوح مکانی ۰/۰۸ درجه و وضوح زمانی سه‌ساعته در اختیار کاربران قرار می‌دهد، استفاده شده است (چاسیگنت و 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.



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

۲-۴. مدل سازی عددی

شبهه سازی برای مدت زمان ۲۵ ساعت از تاریخ ۵ آوریل ۲۰۲۲ ساعت ۲۳:۰۰ تا ۷ آوریل ساعت ۰۰:۰۰ با شبکه بندی 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 شبهه سازی، شناسایی امواج درونی در تاریخ ۶ آوریل است که با تصاویر ماهواره ای و داده اندازه گیری شده موجود مقایسه شود. نتایج یک ساعت اول شبهه سازی به دلیل مدت زمان لازم برای به پایداری رسیدن مدل نادیده گرفته می شود. گام زمانی حل مدل با توجه به ریزبودن سلول های شبکه، جلوگیری از ناپایداری مدل و همچنین برآورده کردن شرایط عدد کورانت، ۶ ثانیه انتخاب شده است. برای درک بهتر نتایج، خروجی های مدل به صورت ۵ دقیقه ای گرفته شده است. با توجه به اهمیت تلاطم های عمودی در تشکیل امواج درونی، مدل تلاطم $k-\epsilon$ اعمال شده است. از آنجایی که نیروی باد تأثیر چندانی بر تشکیل امواج درونی خصوصاً در لایه های عمودی ندارد، از اعمال نیروی باد صرف نظر شده است. اعمال شبهه سازی با پارامترهای ویسکوزیتی و دیفیوژنیته پیش فرض موجب عدم انتشار موج در راستای افقی و عدم تغییر پارامترهای چگالی در عمق آب می شد. برای رفع این مشکل پارامترهای پخش و لزجت به مقادیر مندرج در جدول ۱ تغییر یافتند. مدل سازی عددی موج بادپناه به صورت هیدرواستاتیک با استفاده از روش موازی آنالین و مدل سازی غیرهیدرواستاتیک از روش آنالین انجام پذیرفت.

۲-۵. تصویر ماهواره ای

در بخش نتایج از تصویر ماهواره ای ماهواره سنتینل-۱ یا SAR برای صحت سنجی نتایج استفاده شده است. این تصاویر از پایگاه داده کوپرنیکوس به آدرس <https://scihub.copernicus.eu> می باشد. پس از دریافت تصاویر، اصلاحات رادیومتری و هندسی اعمال شد. سپس قطبش VV انتخاب شد زیرا اجزا و ویژگی های سطح را با دقت بالاتری تشخیص می دهد. در قطبش مقاطع VH، امواج رادار نفوذ کمتری نسبت به امواج با همان قطبش VV دارند. بنابراین، قطبش VV برای نمایش انتخاب می شود. برای اعمال تصحیحات رادیومتری، ابتدا تصویر کالیبره شده و سپس با فیلتر لی و اندازه ماسک 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. داده های میدانی

در بخش نتایج به منظور اعتبارسنجی بیشتر، از داده های اندازه گیری شده دمای آب در عمق بیست متری استفاده شده است. این داده ها به روش مورینگ در جنوب تنگه هرمز به مختصات ۵۶ درجه شرقی و ۲۶ درجه شمالی بین فواصل زمانی ۵ فوریه ۲۰۲۲ تا ۷ می ۲۰۲۲ به صورت سری زمانی ۳۰ ثانیه ای جمع آوری گشته است. در مجموع سه آرایه در عمق های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متری مشغول جمع آوری داده های دمای آب بودند که تنها داده های عمق ۲۰ متری در دسترس قرار داشت.

جدول ۱. پارامترهای اساسی شبهه سازی امواج بادپناه در تنگه هرمز.

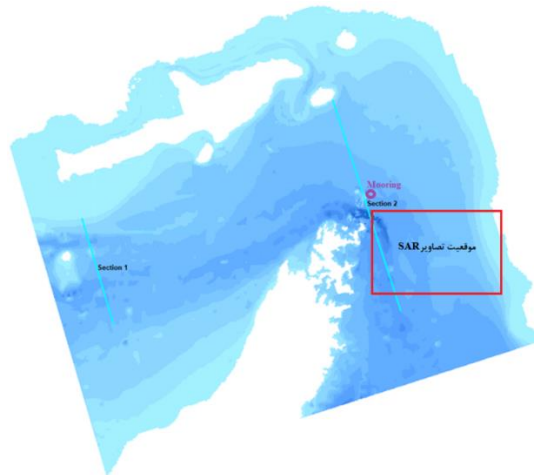
پارامتر	مقدار	واحد
زبری	۰/۰۲	$m^{-1/3}s$
پخش پیچکی افقی	10^{-8}	m^2/s
وشکسانی پیچکی افقی	۱	m^2/s
پخش پیچکی قائم	10^{-8}	m^2/s
وشکسانی پیچکی قائم	10^{-8}	m^2/s

۳. نتایج

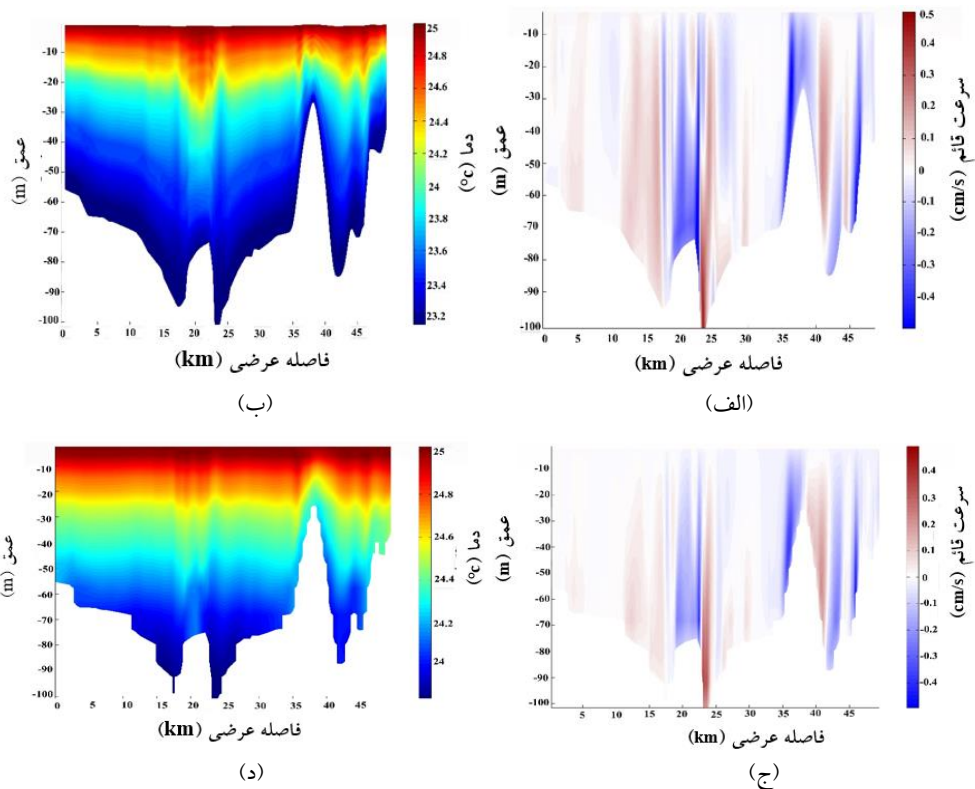
۳-۱. نتایج عددی

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

می‌شود. 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.



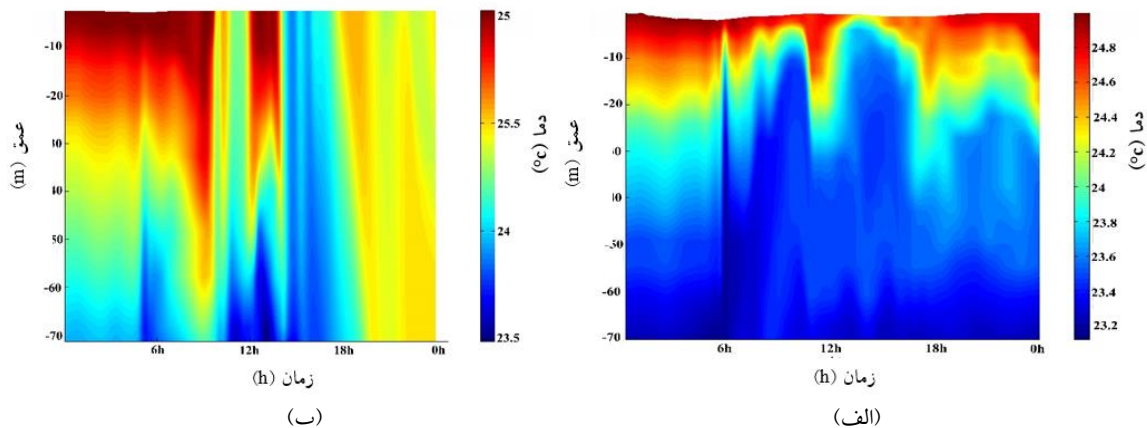
شکل ۳. محل برش‌ها، تصویر ماهواره‌ای و مورینگ.



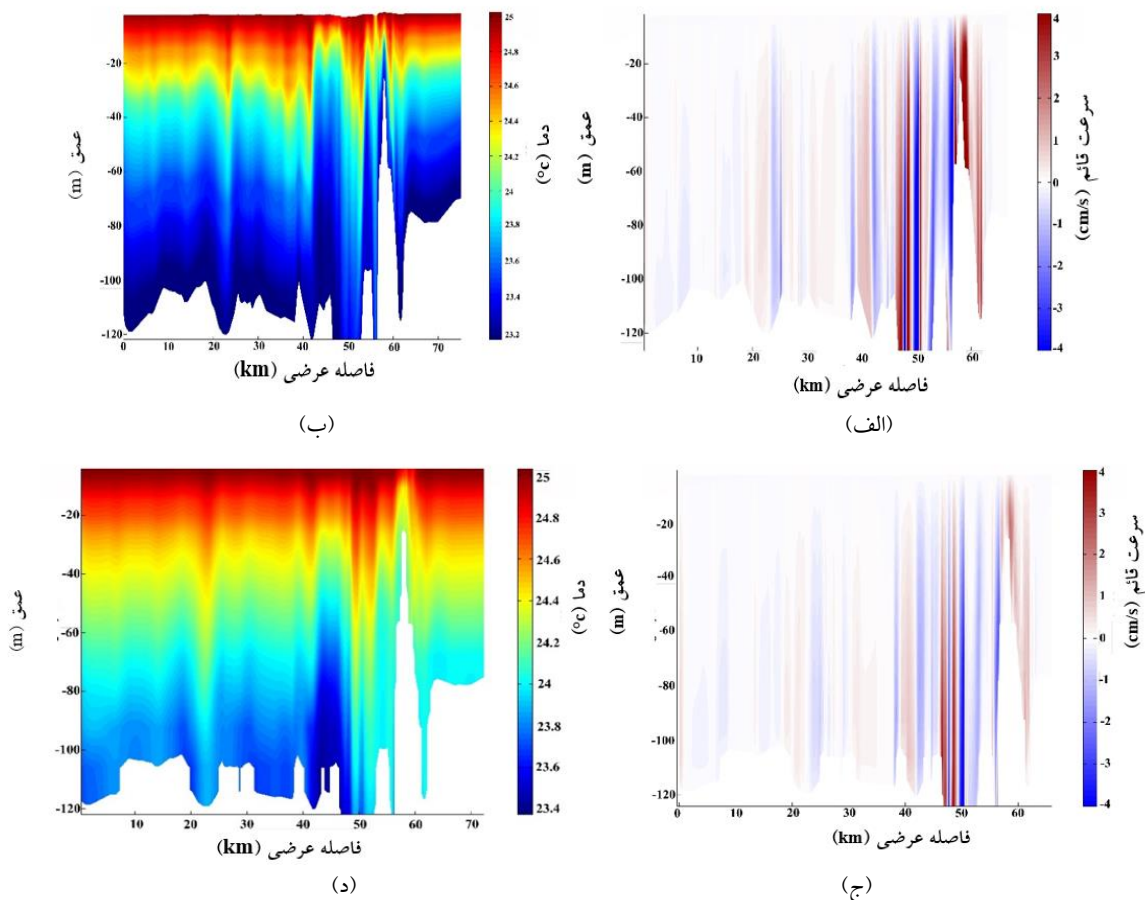
شکل ۴. نتایج برش ۱. (الف) سرعت قائم در شبیه‌سازی هیدرواستاتیک (ب) دمای آب در شبیه‌سازی هیدرواستاتیک (ج) سرعت قائم در شبیه‌سازی غیرهیدرواستاتیک (د) دمای آب در شبیه‌سازی غیرهیدرواستاتیک.

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 می‌باشد.

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.



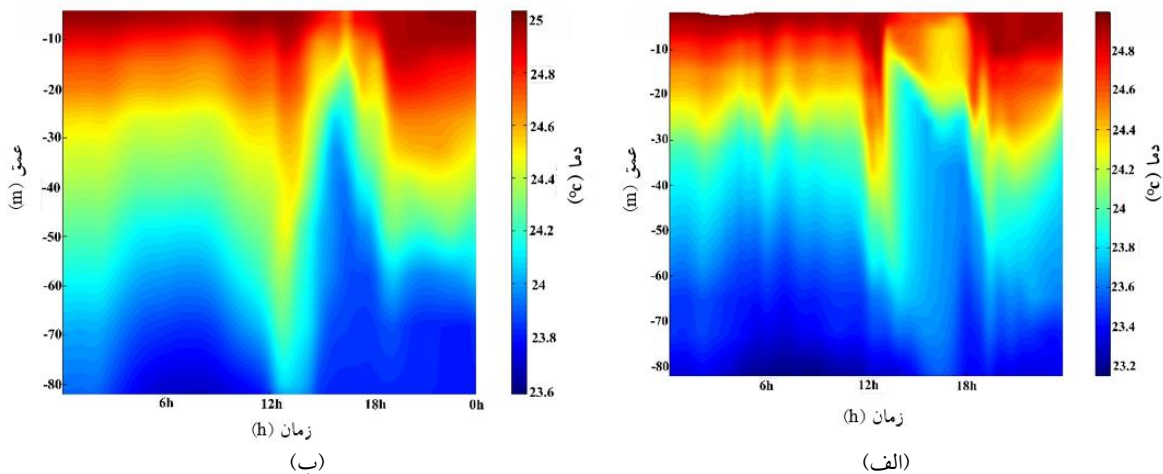
شکل ۶. نتایج شبیه‌سازی عددی، برش ۲. الف) سرعت قائم هیدرواستاتیک. ب) دمای آب هیدرواستاتیک. ج) سرعت قائم غیرهیدرواستاتیک. د) دمای آب غیرهیدرواستاتیک.

بررسی می‌شود. بسته موج درونی در تصویر SAR در قسمت شرقی آب‌های تنگه‌ی هرمز در منطقه‌ای مختصات منطقه‌ای به طول جغرافیایی ۵۵.۴۴ تا ۵۵.۵۱ درجه و عرض جغرافیایی ۲۶.۲۹ تا ۲۶.۳۴ درجه، مشاهده شد جهت این بسته‌ها به سمت شمال شرقی می‌باشد (شکل ۸- الف). با در نظر گرفتن نقاط تاریک و روشن به‌عنوان قعر و قله موج درونی بر روی سطح آب طول موج درونی ایجاد شده محاسبه شد (جکسون و همکاران، ۲۰۱۳؛ رودناس و گارلو، ۱۹۹۸) همچنین سرعت و ارتفاع موج درونی ایجاد شده با استفاده از روش‌های موجود (وانگ و همکاران، ۲۰۲۳) تخمین زده شد که در جدول ۲ آورده شده است.

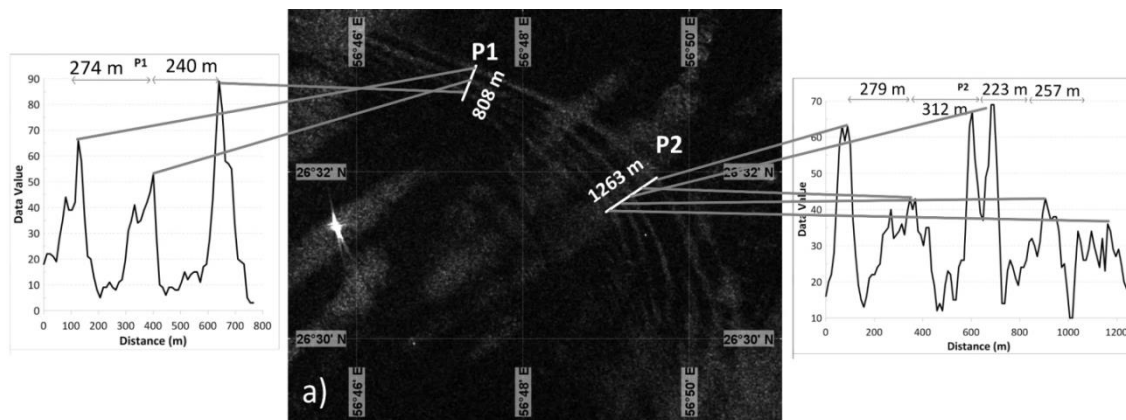
سری‌زمانی دمای آب یک نقطه از برش ۲ در شکل ۷ تأیید می‌کند که هر دو مدل توانسته‌اند موج بادپناه را بازتولید کنند اما مدل هیدرواستاتیک دارای دوره زمانی موج ۳۵ دقیقه تا ۲ ساعته بوده درحالی‌که مدل غیرهیدرواستاتیک دارای دوره زمانی موج ۱ساعته تا ۳ ساعت و ۴۵ دقیقه‌ای می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت مد اول امواج درونی (ناکومارا و همکاران، ۲۰۰۰) در تنگه‌هرمز غالب است.

۳-۲. نتایج تصاویر ماهواره‌ای

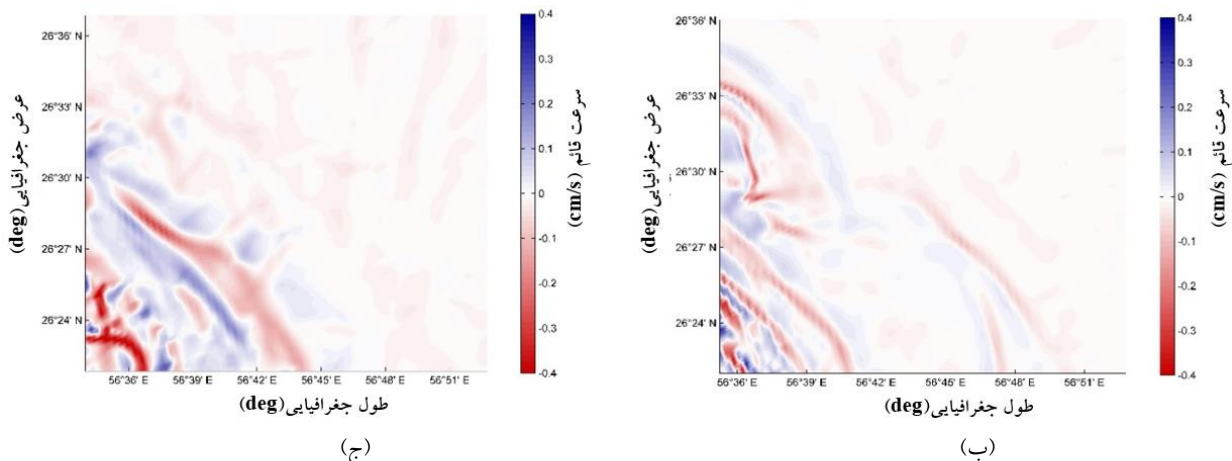
در ادامه تصویر ماهواره‌ای SAR و مقایسه آن با نتایج مدل



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



الف)



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

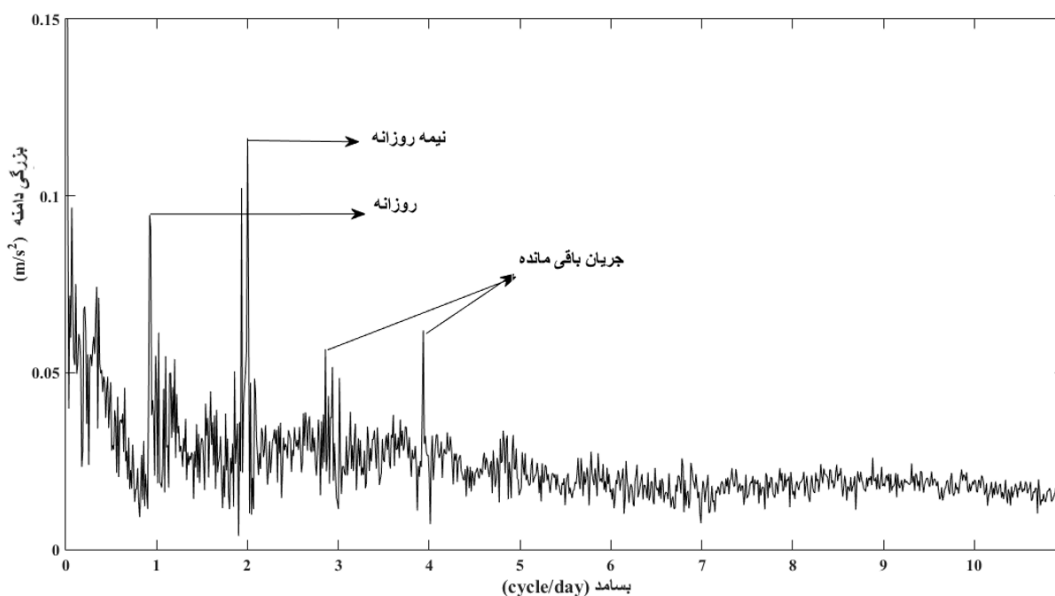
جدول ۲. پارامترهای امواج درونی استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای.

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

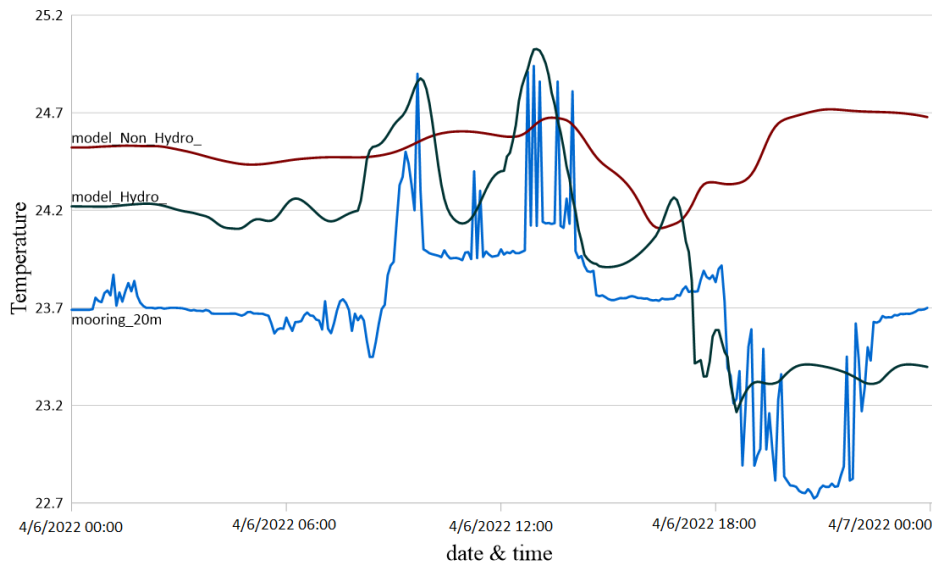
۳-۳. نتایج اندازه‌گیری میدانی

پس از استخراج داده‌های مورینگ و اعمال تبدیل فوریه بر روی سری‌زمانی داده‌ها مطابق شکل ۹ مشخص شد که داده‌ها تحت تأثیر دو بسامد ۱۲ و ۲۴ ساعته هستند که می‌تواند اثر مؤلفه‌های روزانه و نیم‌روزانه باشد همچنین یک مؤلفه ۶ ساعته نیز وجود

دارد که می‌تواند ناشی از جریانات باقی‌مانده باشد (قاضی و همکاران، ۲۰۲۱). به منظور اعتبارسنجی بیشتر مدل، از داده‌های دمای آب در عمق بیست متری نقطه اندازه‌گیری شده توسط مورینگ برای مقایسه با نتایج شبیه‌سازی در همان نقطه استفاده شده است که در شکل ۱۰ آورده شده است.



شکل ۹. طیف سری فوریه داده‌های برداشت شده توسط مورینگ.



شکل ۱۰. مقایسه نتایج مدل هیدرواستاتیک و غیرهیدرواستاتیک با داده اندازه‌گیری.

دارای مقادیر سرعت جریان بزرگ‌تری می‌باشد، هرچند که نتایج هر دو مدل در رنج $-۰/۴$ تا $+۰/۴$ cm/s 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.

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

این مطالعه می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای تحقیقات بیشتر در زمینه درک دقیق‌تر و شبیه‌سازی بهتر امواج بادپناه در مناطق کم‌عمق با توپوگرافی پیچیده و در اقیانوس‌ها و دریاها باشد. برای پژوهش‌های بعدی پیشنهاد می‌شود این پژوهش با دیگر مدل‌ها همانند FVCOM، ROMS یا MITgcm انجام شود و برای دقت بالاتر مدل نیز می‌توان اثر باد و شارهای حرارتی را بر روی امواج بادپناه بررسی کرد.

مراجع

۴. بحث و نتیجه‌گیری

تنگه‌هرمز به دلیل داشتن کم‌عمقی‌های فراوان مستعد تشکیل موج لی می‌باشد. برای شبیه‌سازی این امواج از مدل سه‌بعدی هیدرواستاتیک و غیرهیدرواستاتیک ماژول جریان Delft3D استفاده شد. در این مطالعه از اثر باد و شارهای گرمایی چشم‌پوشی شد و تنها اثر جزرومد به همراه دما و شوری به مدل اعمال شد. از بررسی طول موج‌های تشکیل‌شده در شکل ۴ و ۶ می‌توان دریافت که مدل هیدرواستاتیک اغتشاش‌های بیشتری را نشان داده است. همچنین مدل هیدرواستاتیک چینه‌بندی ترموکلاین را با دقت بیشتری نشان داده است به طوری که پس از مقایسه با تحقیقات پیشین این قضیه به‌خوبی استنباط می‌شود (علی و همکاران، ۲۰۲۰؛ عزیزپور و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین از بررسی دوره زمانی امواج بادپناه تشکیل‌شده در شکل‌های ۵ و ۷ می‌توان دریافت که باز هم مدل هیدرواستاتیک اغتشاش بیشتری را نشان می‌دهد.

از بررسی تصاویر ماهواره‌ای با سرعت قائم تشکیل شده در شبیه‌سازی، می‌توان دریافت که هر دو مدل هیدرواستاتیک و غیرهیدرواستاتیک توانسته‌اند جهت انتشار و تولید امواج درونی را با تقریب مکانی قابل‌قبول شبیه‌سازی کنند، با این تفاوت که مدل غیرهیدرواستاتیک

- Ali, L., Bai, Y., & Xu, Y. (2022). A methodology to derive design metocean internal wave current criteria for submarine structures. *Ships and Offshore Structures*, 17(2), 388-397.
- Alford, M. H., MacKinnon, J. A., Simmons, H. L., & Nash, J. D. (2016). Near-inertial internal gravity waves in the ocean. *Annual review of marine science*, 8, 95-123.
- Alford, M. H., Klymak, J. M., & Carter, G. S. (2014). Breaking internal lee waves at Kaena Ridge, Hawaii. *Geophysical Research Letters*, 41(3), 906-912.
- Andi, S., Rashidi Ebrahim Hesari, A., & Farjami, H. (2021). Detection of internal waves in the Persian Gulf. *Remote Sensing Letters*, 12(2), 190-198.
- Apel, J. R. (2002). Oceanic Internal Waves and Solitons, An Atlas of Oceanic Internal Solitary Waves, 189–206. Arlington, VA: Global Ocean Associates.
- Azizpour, J., Chegini, V., Khosravi, M., & Einali, A. (2014). 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*, 5(18), 37-48.
- Brandt, P., Rubino, A., & Alpers, W. (1996). May). Internal waves in the Strait of Messina observed by the ERS 1/2 synthetic aperture radar. In *IGARSS'96. 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 3, 1487-1489. IEEE.
- Chapman, D. C., & Haidvogel, D. B. (1993). Generation of internal lee waves trapped over a tall isolated seamount. *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, 69(1-4), 33-54.
- Chassignet, E.P., Hurlburt, H.E., Smedstad, O.M., Halliwell, G.R., Hogan, P.J., Wallcraft, A.J., Baraille, R., & Bleck, R. (2007). The HYCOM (hybrid coordinate ocean model) data assimilative system. *Journal of Marine Systems*, 65(1-4), 60-83.
- Dissanayake, P., Hofmann, H., & Peeters, F. (2019). Comparison of results from two 3D hydrodynamic models with field data: Internal seiches and horizontal currents. *Inland waters*, 9(2), 239-260.
- Da Silva, J. C. B., Buijsman, M. C., & Magalhaes, J. M. (2015). Internal waves on the upstream side of a large sill of the Mascarene Ridge: A comprehensive view of their generation mechanisms and evolution. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 99, 87-104.
- Dastgheib, A., Roelvink, J. A., & Wang, Z. B. (2008). Long-term process-based morphological modeling of the Marsdiep Tidal Basin. *Marine Geology*, 256(1-4), 90-100.
- Deltares, Delft3D-FLOW User Manual: 3D/2D modelling suite for integral water solutions. 2018, Netherlands: Deltares. 672.
- Flood, R. D. (1988). A lee wave model for deep-sea mudwave activity. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 35(6), 973-983.
- Garrett, C., & Munk, W. (1979). Internal waves in the ocean. *Annual review of fluid mechanics*, 11(1), 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., Platzeck, F. W., Genseberger, M., Van Kester, J. A. T. M., & Uittenbogaard, R. E. (2007). Validation Document Delft3D-FLOW; a software system for 3D flow simulations. *The Netherlands: Delft Hydraulics, Report X*, 356, M3470.
- Hurley, D. L. (2017). Wind waves and internal waves in base mine lake (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
- Ioc, I. H. O. (2003). Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas, published on CD-ROM on behalf of the Intergovernmental Oceanographic Commission and the International Hydrographic Organization as part of the General Bathymetric Chart of the Oceans. (*No Title*).
- 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. I. (1975). The long-period internal waves in Lake Biwa. *Limnology and Oceanography*, 20(4), 544-553.
- Khalilabadi, M. R., Sadrinassab, M., Chegini, V., & Akbarinassab, M. (2015). Internal wave generation in the Gulf of Oman (outflow of Persian Gulf). *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 44(3), 374-375.
- Lai, Z., Chen, C., Cowles, G. W., & Beardsley, R. C. (2010). A nonhydrostatic version of FVCOM: 2. Mechanistic study of tidally generated nonlinear internal waves in Massachusetts Bay. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C12).
- Legg, S. (2021). Mixing by oceanic lee waves. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 53, 173-201.
- Luijendijk, A. P. (2001). Validation, calibration and evaluation of Delft3D-FLOW model with ferry measurements. *Delft, The Netherlands: Technical University of Delft, Master's thesis*, 92p.
- 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., & Pickering, A. (2017). Climate process team on internal wave-driven ocean

- mixing. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(11), 2429-2454.
- Marez, C., Lahaye, N. J., & Gula, J. (2020). Interaction of the Gulf Stream with small scale topography: A focus on lee waves. *Scientific Reports*, 10(1), 2332.
- Massel, S. R. (2015). Internal gravity waves in the shallow seas. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer International Publishing.
- McLachlan, A. & Defeo, O. (2018). The Ecology of Sandy Shores. Third English Edition. 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. (Ed.). (2014). Encyclopedia of remote sensing (pp. 344-348). Springer New York.
- Parsapour-Moghaddam, P., & Rennie, C. D. (2017). Hydrostatic versus nonhydrostatic hydrodynamic modelling of secondary flow in a tortuously meandering river: Application of Delft3D. *River research and applications*, 33(9), 1400-1410.
- Porcile, G., Enrile, F., Besio, G., & Pittaluga, M. B. (2022). Hydrostatic vs. non-hydrostatic modelling of density currents developing two dimensionally on steep and mild slopes. *Applied Ocean Research*, 121, 103085.
- 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. (1975). Internal tides in the ocean. *Reviews of Geophysics*, 13(1), 167-182.
- Xie, X., & Li, M. (2019). Generation of internal lee waves by lateral circulation in a coastal plain estuary. *Journal of Physical Oceanography*, 49(7), 1687-1697.
- Zhang, Z., Fringer, O. B., & Ramp, S. R. (2011). Three-dimensional, nonhydrostatic numerical simulation of nonlinear internal wave generation and propagation in the South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C5).