

## مدل‌سازی سه‌بعدی امواج داخلی غیرخطی در ناحیه فلات قاره خلیج عمان

محمد رضا خلیل آبادی<sup>۱\*</sup>، مسعود صدری‌نسب<sup>۲</sup>، وحید چگینی<sup>۳</sup>، محمد اکبری‌نسب<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری فیزیک دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، استان خوزستان، خرمشهر، پست الکترونیکی: rezakhalilabadi@gmail.com

۲- دانشیار گروه فیزیک دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، استان خوزستان، خرمشهر، پست الکترونیکی: masoud.sadri@gmail.com

۳- استادیار پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، استان تهران، تهران، پست الکترونیکی: v\_chegini@inio.ac.ir

۴- استادیار گروه فیزیک دریا، دانشگاه مازندران، استان مازندران، بابل، پست الکترونیکی: akbarinasabmohamad@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۹۴/۴/۱۴

\* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۱/۴

© نشریه علمی - پژوهشی اقیانوس‌شناسی ۱۳۹۴، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه اقیانوس‌شناسی است.

### چکیده

رخداد امواج داخلی غیرخطی در خلیج عمان بارها از طریق ثبت و پردازش اثرات سطحی این امواج توسط سنجنده‌های راداری SAR به اثبات رسیده است. اکثر بسته‌های امواج داخلی در ناحیه فلات قاره خلیج عمان و در شرق شبه جزیره مسندام مشاهده شده‌اند. در این پژوهش، با استفاده از مدل سه‌بعدی MITgcm در شرایط غیرهیدروستاتیک و کاملاً غیرخطی، شکل‌گیری این امواج داخلی به واسطه جزرومد داخلی در خلیج عمان شبیه‌سازی شده است. نتایج این مدل‌سازی، شکل‌گیری بسته‌های امواج داخلی غیرخطی را در ناحیه فلات قاره خلیج عمان نشان می‌دهد. نتایج عددی حاصل از این پژوهش در ناحیه فلات قاره، با تصاویر راداری و نتایج کارهای عددی که در گذشته در این منطقه انجام شده مقایسه شده است، که نشان می‌دهد نتایج این مدل‌سازی در مشخصه‌هایی مانند فاصله بسته‌های موج تنهای داخلی و تعداد امواج غیرخطی درون هر بسته، در مقایسه با نتایج عددی منتشر شده قبلی به مشاهدات راداری نزدیک‌تر است.

کلمات کلیدی: موج داخلی، غیرخطی، مدل MITgcm، نرخ کرنش، فشار غیرهیدروستاتیک.

### ۱. مقدمه

پس از عبور از ناحیه فلات قاره باعث ایجاد امواج داخلی غیرخطی می‌شوند که ارتفاع بیشتر و طول موج کم‌تری نسبت به امواج داخلی خطی دارند. هرچند امواج داخلی در لایه‌های زیر سطح رخ می‌دهند، اما اثر این امواج در روی سطح با استفاده از فن-آوری سنجش از دور قابل آشکارسازی است. تصاویر راداری قادرند تغییرات مداری و نصف النهاری نرخ کرنش سطحی

$$\left(\frac{\partial v}{\partial y} \text{ و } \frac{\partial u}{\partial x}\right)$$

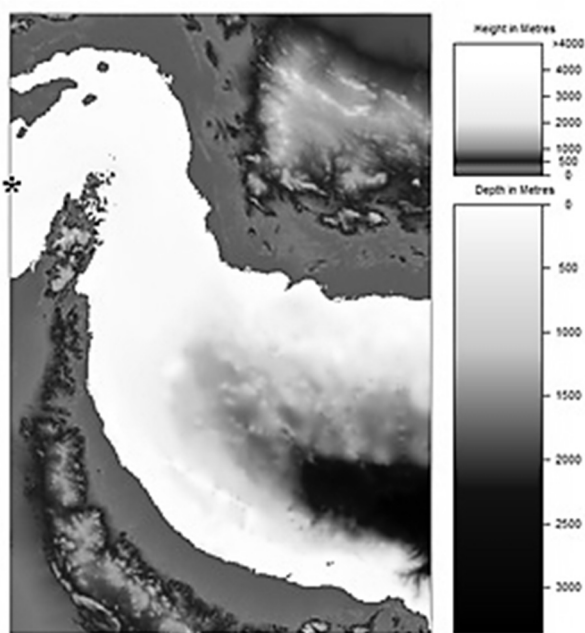
امواج داخلی در اثر اعمال آشفتگی در اقیانوس با لایه‌بندی پایدار ایجاد می‌شوند. این آشفتگی‌ها اغلب از عبور جریان از روی شیب بستر ناشی می‌شوند. برای مثال جریان‌های جزر و مدی که از آب‌های با لایه بندی پایدار عبور می‌کنند، باعث ایجاد امواج داخلی خطی می‌شوند که جزر و مد داخلی نیز نامیده می‌شوند. این امواج

راداری مقایسه شده است. در ادامه به مطالعات انجام شده در زمینه شکل‌گیری امواج داخلی در خلیج عمان اشاره خواهد شد.

#### ۱-۱. موقعیت جغرافیایی و اهمیت

منطقه جغرافیایی مورد نظر برای این مطالعه محدوده‌ای از تنگه هرمز و خلیج عمان است که بین طول‌های جغرافیایی حدود ۵۶ تا ۵۹ درجه شرقی محصور است. دلیل انتخاب این محدوده برای مطالعه شرایط خاص زیر است:

- شیب توپوگرافی نسبتاً زیاد به سمت شمال‌غرب حوزه (شکل ۱)؛
- جریان‌های جزر و مدی نسبتاً قوی به دلیل باریک شدن حوضه به سمت شمال‌غرب حوزه؛
- لایه‌بندی خاص خلیج عمان به دلیل خروجی آب چگال خلیج فارس؛



شکل ۱: توپوگرافی حوزه مورد مطالعه

لذا با توجه به این شرایط، خلیج عمان به ویژه در سمت غرب، مستعد شکل‌گیری امواج داخلی است و در اطلس جهانی امواج داخلی نیز این منطقه به عنوان یکی از نقاط مستعد شکل‌گیری امواج داخلی مشخص شده است (Apel, 2002). تصاویر راداری نیز شکل‌گیری و انتشار امواج داخلی را بارها در محدوده جغرافیایی ۵۸ تا ۵۷ درجه (شرق شبه جزیره Musandam) ثبت

حاصل از امواج داخلی غیرخطی را در سطح دریا ثبت کنند. این تغییرات به شکل خطوط موازی تیره و روشن متوالی در تصاویر راداری SAR قابل تشخیص‌اند. در این مطالعه نیز نمونه‌ای از تغییرات نرخ کرنش سطحی مداری و نصف النهاری حاصل از مدل‌سازی امواج داخلی در خلیج عمان نشان داده شده است. ویرایش دوم اطلس امواج تنهای<sup>۱</sup> داخلی شامل بیش از ۳۰۰ نمونه از حدود ۵۴ ناحیه از کره زمین می‌شود که امواج داخلی توسط تصاویر راداری ثبت شده‌اند (Apel, 2002). اکثر این نقاط از طریق اثرات سطحی یک گروه امواج تنهای داخلی<sup>۲</sup> در تصاویر سنجش از دور شناسایی شده‌اند. فقط در چند نقطه محدود، حضور این امواج از طریق مشاهدات میدانی اثبات شده است. خلیج عمان نیز یکی از نقاطی است که پتانسیل شکل‌گیری امواج داخلی غیرخطی را دارد (Apel, 2002). با وجود این که در اطلس جهانی امواج داخلی، خلیج عمان یکی از نقاط مستعد شکل‌گیری امواج داخلی و امواج تنهای داخلی معرفی شده است (Apel, 2002) و با وجود آمارهای مختلف از ثبت اثرات سطحی امواج داخلی غیرخطی توسط سنجنده‌های راداری دهانه مصنوعی SAR در این ناحیه (خلیج‌آبادی و صدوری‌نسب، ۱۳۹۲؛ Small and Martin, 2002)، در این منطقه مطالعات اندکی راجع به شکل‌گیری و انتشار امواج داخلی انجام شده است. با یک جستجوی ساده در مورد مطالعات انجام شده در نقاط مشابه نظیر تنگه جبل‌الطارق، دریای مدیترانه، دریای چین و غیره مشخص می‌شود در هر ناحیه مطالعات متعددی توسط تیم‌های تحقیقاتی مختلف به شکل‌های عددی، مشاهداتی و سنجش از دور انجام شده است. البته در خلیج عمان تنها پژوهش منتشر شده در زمینه شکل‌گیری امواج داخلی، پژوهشی است که توسط Small و Martin (۲۰۰۲) انجام شده است. به همین دلیل مطالعات Small و Martin (۲۰۰۲) به عنوان مرجع اصلی این پژوهش در نظر گرفته شده است. هرچند مطالعات Small و Martin در زمان خود قابل اهمیت بود و با گذشت بیش از یک دهه از آن نیز تاکنون هیچ مطالعه دیگری در این ناحیه انجام نشده است، اما کار آنها دارای نقایص و ساده‌سازی‌هایی بوده است که در این پژوهش سعی شده تا با استفاده از ابزارهای عددی قابل دسترس این نقایص و ساده‌سازی‌ها به حداقل ممکن برسد. در نهایت نیز نتایج این پژوهش با نتایج کار Small و Martin و همچنین با مشاهدات

<sup>1</sup> Solitary

<sup>2</sup> Internal soliton

به تصویر دیگر SAR با استفاده از پارامترهای دو لایه استخراج شده از یک نیم رخ چگالی نیروی اعمال شده آن قدر ضعیف است که قادر نیست امواج داخلی فرکانس بالا تولید نماید. اگر چه یک مطالعه دقیق‌تر که به منظور بررسی تاثیر ضخامت لایه‌ها صورت گرفته، نشان می‌دهد که یک کاهش ۱۰ متری ضخامت لایه بالا کافی است تا امواجی شبیه امواج مشاهده شده ایجاد شود. مدل امواج داخلی پیش بینی می‌کند که تورفتگی<sup>۴</sup>هایی با ارتفاع (قعر تا قله<sup>۵</sup>) بالای ۲۵ متر و جریان‌های سطحی بالای ۰/۶ متر بر ثانیه و آهنگ کرنشی<sup>۶</sup> از مرتبه  $0(10^{-3}s^{-1})$  هستند. سرعت فاز امواج داخلی که از مدل استخراج شده است (۰/۹ متر بر ثانیه)، اندکی بزرگتر از مقادیر مشاهده شده است. آنها معتقدند این اختلاف ممکن است به دلیل تقریب‌های انجام شده در عمق و پروفایل‌های چگالی استفاده شده در مدل باشد. همچنین در این مطالعه، شکل‌های کیفی امواج داخلی مشاهده شده به وسیله مدل جزر و مد داخلی باز تولید شده است. آن‌ها نتیجه گرفتند که جریان جزرومدی روی شیب فلات قاره، مکانیسم محتمل برای تولید امواج داخلی تصویربرداری شده توسط SAR است.

### ۱-۳. اهمیت مطالعه امواج داخلی و کاربردهای آن

امواج داخلی تاثیرات شناخته شده‌ای در اقیانوس دارند. شناخت و استخراج الگوی امواج داخلی از جنبه‌های گوناگون دارای اهمیت است. نکته جالب توجه این است که اکثر مطالعاتی که تاکنون درباره امواج داخلی در آب‌های مختلف کلید خورده است بیشتر با انگیزه کاربرد نظامی مورد توجه قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات (Freitas, 2008) اشاره نمود که با حمایت وزارت دفاع و نیروی دریایی ایالات متحده امریکا انجام شده است. هر یک از مواردی که در ادامه بیان می‌شود، در قالب یک پژوهش کاربردی مستقل قابل طرح است و به شکل - خروجی پژوهش حاضر به عنوان ورودی این مدل‌های عددی و تحلیلی استفاده نمود (Freitas, 2008).

کرده‌اند (شکل ۲- ب) (خلیل‌آبادی و صدری‌نسب، ۱۳۹۲؛ Small and Martin, 2002).

### ۱-۲. پیشینه تحقیق

همان‌طور که گفته شد، مطالعات Small و Martin (۲۰۰۲) تنها پژوهش منتشر شده درباره امواج داخلی در خلیج عمان است. در این پژوهش، تولید امواج غیر خطی در خلیج عمان مورد مطالعه قرار گرفته است. در پژوهش مذکور، رخداد این امواج توسط دو تصویر SAR به اثبات رسیده است. در این تصاویر، امواج داخلی بسته‌هایی را شکل می‌دهند که از سمت شرق به سمت شبه جزیره Musandam حرکت می‌کنند. شکل (۲- الف) مقطع انتخاب شده توسط Small و Martin (۲۰۰۲) را برای مدل‌سازی امواج داخلی نشان می‌دهد. این مقطع منطبق بر مسیر امواج داخلی ثبت شده توسط سنجنده- های راداری SAR است (شکل ۲- ب). آن‌ها نشان دادند امواج داخلی روی فلات قاره دارای شکل کلاسیک قطار موج غیرخطی هستند که شیب چگالی (پیکنوکلاین) را فشرده<sup>۱</sup> می‌کنند. تصاویر راداری یک مکانیسم تولید جزرومدی را پیشنهاد می‌کنند. تحت این فرضیه، سرعت فاز امواج محاسبه و تخمین زده شده است. سرعت فاز این امواج از ۰/۵ متر بر ثانیه در نزدیکی ساحل تا ۰/۷ متر ثانیه روی فلات قاره<sup>۲</sup> متغیر است. در این پژوهش، امکان تولید امواج داخلی در ناحیه شیب فلات قاره در خلیج عمان توسط مدل‌های عددی مطالعه شده است. ابتدا یک مدل جزر و مدی دو بعدی مورد استفاده قرار گرفته است تا شار جزر و مدی را در عرض شیب فلات قاره تعیین کند. اطلاعات شار جزرومدی مورد استفاده قرار گرفته است تا یک مدل جزر و مد داخلی غیرخطی دو لایه استخراج شود. این مدل، جزر و مد داخلی را در امتداد یک برش قائم عمود بر لبه فلات قاره شبیه‌سازی می‌کند. نتایج عددی برای یک شار جزر و مدی مربوط به مه کشند<sup>۳</sup> (مربوط به یکی از تصاویر SAR) تعیین می‌کند که این به قدر کافی قوی است تا امواج فرکانس بالا را برای همه لایه‌های مورد نظر تولید نماید. آنها دریافتند که برای مقادیر کوچک‌تر شار جزرومدی مربوط

<sup>4</sup> Depression

<sup>5</sup> Peak to trough

<sup>6</sup> Strain rate

<sup>1</sup> Depress

<sup>2</sup> Shelf

<sup>3</sup> Spring tide

اصلی مطالعه امواج داخلی توسط محققین فیزیک دریا در اکثر کشورها تعیین خطای سوناری حاصل از این امواج است. به عنوان مثال می‌توان به مطالعات پروفیسور مانک و همکارانش در مرکز تحقیقات دفاعی آمریکا اشاره نمود که از دهه ۷۰ میلادی شروع شد (Freitas, 2008) و توسط افراد دیگر تاکنون ادامه پیدا کرده و توسعه داده شده است و بدین منظور مدل‌های عددی مختلفی طراحی و توسعه داده شده است. با شکل‌گیری امواج داخلی در عمق‌های داخلی دریا و اقیانوس، پروفایل قائم مشخصه‌های فیزیکی ستون آب در عمقی که این امواج رخ می‌دهد دچار جابه‌جایی و اعوجاج می‌شود که یکی از نتایج بارز آن جابه‌جایی پروفایل سرعت صوت در ضخامتی از ستون آب که این امواج شکل گرفته‌اند خواهد بود. این پدیده منجر به خطای سوناری قابل توجهی خواهد شد (اکبری نسب و همکاران، ۱۳۹۳). فقط در صورتی که عمق و محل شکل‌گیری و همچنین مشخصه‌های این امواج استخراج شده باشد این خطای سوناری قابل اصلاح خواهد بود.

#### ۱-۳-۲. تاثیر بر میدان الکترومغناطیسی

امواج داخلی منجر به ایجاد طنین (نویز) مغناطیسی می‌شوند. این نویز باعث تغییر الگوی میدان مغناطیسی خواهد شد. با توجه به کاربردهای فراوانی که شناخت میدان مغناطیسی در محیط‌های دریایی دارد باید سهم نویز مغناطیسی حاصل از امواج داخلی مشخص شود و در محاسبه میدان مغناطیسی در نظر گرفته شود.

#### ۱-۳-۳. تاثیرات هیدروفیزیکی

امواج داخلی نقش مهمی در موازنه گرمایی و گردش آب بازی می‌کنند. امواج داخلی این کار را از طریق انتشار بخش اعظم انرژی جزر و مدی به درون اقیانوس انجام می‌دهند.

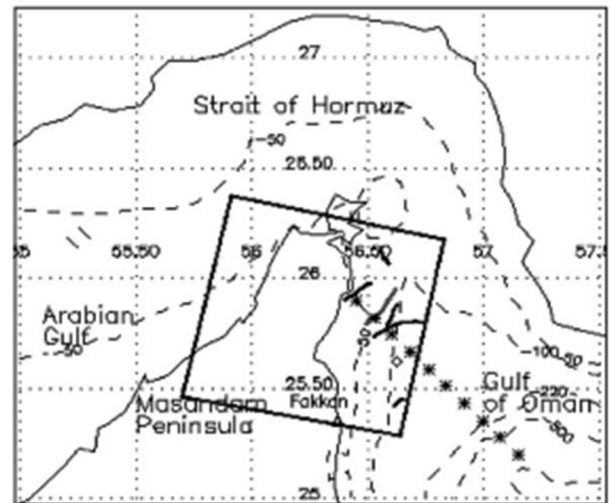
#### ۱-۳-۴. تاثیر بر توزیع مواد مغذی و آلاینده‌ها در دریا

امواج داخلی باعث تغییر مشخصه‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی ستون آب خواهند شد و توزیع این مشخصه را تغییر خواهد داد. لذا شناخت مکانیسم انتشار امواج داخلی می‌تواند به تعیین تاثیر این امواج بر توزیع مواد مغذی و آلاینده‌ها در دریا کمک کند.

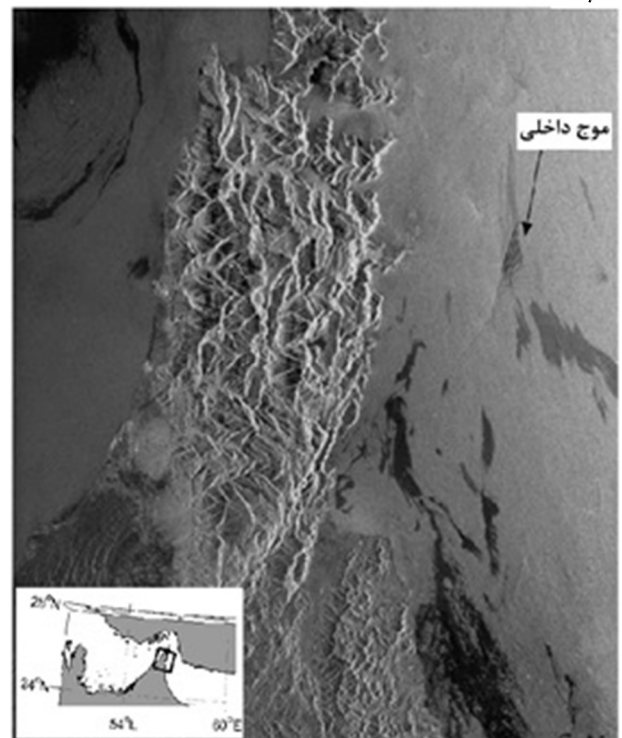
### ۲. روش تحقیق

در این مطالعه، نسخه‌های هیدروستاتیکی و غیرهیدروستاتیکی مدل عددی MITgcm برای مدل‌سازی امواج داخلی در منطقه

(الف)



(ب)



شکل ۲: الف) مقطع انتخاب شده در مدل‌سازی دو بعدی Small و Martin (۲۰۰۲). این مقطع منطبق بر مسیر ثبت امواج توسط سنجنده راداری است. ب) مشاهده‌ی اثر بسته موج داخلی در سطح دریا که در سوم اکتبر ۱۹۹۸ توسط سنجنده راداری ERS-SAR ثبت شده است (خلیج آبادی و صدری‌نسب، ۱۳۹۲؛ Small and Martin, 2002). امواج داخلی به شکل خطوط تیره و روشن موازی در تصویر SAR ظاهر می‌شوند.

#### ۱-۳-۱. تاثیرات هیدروآکوستیکی

امواج داخلی توزیع چگالی سیال و در نتیجه مسیر پرتوهای امواج صوتی را تغییر می‌دهند و منجر به خطای سوناری می‌شوند. اهمیت

ایران به دست آمده است. این داده‌ها دارای تفکیک مکانی نسبتاً خوب (۵۰۰ متر) هستند. در بستر و مرزهای جانبی نیز شرایط غیرلغزشی<sup>۳</sup> اعمال شده است. طرح واره‌ی فرارفتی انتخاب شده، یک طرح‌واره‌ی محدود شار مرتبه سوم زمانی-مکانی است که بدون قید و شرط پایدار است (Hundsdoerfer and Tromport, 1994). پیرو آزمایش‌های عددی انجام شده به وسیله Vlasenko و همکاران (۲۰۰۵) برای بررسی تکامل سه‌بعدی امواج داخلی بلند دامنه، بستر تالطمی برای پخش و ضریب لزجت قائم که توسط Pacanowski و Philander (۱۹۸۱) پیشنهاد شده بود استفاده شد:

$$\vartheta = \frac{\vartheta_0}{(1 + \alpha Ri)^n} + \vartheta_b$$

$$k = \frac{\vartheta}{(1 + \alpha Ri)} + k_b$$

که

$$Ri = \frac{N^2(z)}{(u_z^2 + v_z^2)}$$

عدد ریچاردسون،  $\vartheta_b = 1.5 \times 10^{-4} m^2 s^{-1}$  و  $\vartheta_0 = 1.5 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$  مقادیر پایه هستند و  $k_b = 1 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$  و  $\alpha = 5$ ،  $n = 1$  پارامترهای تعدیل‌پذیرند. ضریب پخش افقی  $k_h = 1 \times 10^{-2} m^2 s^{-1}$  در حالی که ضریب لزجت افقی از پارامتری کردن (پارامتریسیون) Leith (1968) پیروی می‌کند.

### ۳-۲. شرایط اولیه

شرایط اولیه دما و شوری و همچنین داده‌های ماهانه دمای سطح دریا (SST<sup>۵</sup>) و شوری سطح دریا (SSS<sup>۶</sup>) از بانک اطلاعات WOA<sup>۷</sup> استخراج شده است (WOA, 2013). این داده‌ها پس از درون‌یابی و انطباق با شبکه محاسباتی انتخاب شده برای مدل، به قالب باینری درآمده و وارد مدل شده است. داده‌های ماهانه باد و مولفه‌های بودجه گرمایی نیز از وب‌گاه WOA استخراج شده و به قالب باینری درآمده و وارد مدل شده است.

مورد مطالعه استفاده شده است. مدل مذکور تاکنون در چندین مطالعه برای مدل‌سازی امواج داخلی خطی و غیرخطی در مناطق مختلف نظیر تنگه جبل‌الطارق، دریای چین و خلیج بنگال به کار برده شده است و قابلیت آن در مدل‌سازی امواج داخلی به اثبات رسیده است.

### ۱-۲. مدل عددی MITgcm

مدل MITgcm یک مدل مختصات  $z$  است که حالت کاملاً غیرخطی و غیرهیدروستاتیکی معادلات ناویر-استوکس را تحت تقریب بوسینسک برای یک سیال تراکم‌ناپذیر با یک گسسته‌سازی حجم محدود<sup>۱</sup> مکانی روی یک گرید محاسباتی مکعبی حل می‌کند. فرمول‌بندی مدل که شامل سطح آزاد ضمنی و توپوگرافی گام جزئی می‌شود با جزئیات توسط Marshal و همکاران شرح داده شده است (Marshal et al., 1997a; 1997b). کد اصلی و مستندات آن نیز در وب‌سایت گروه MITgcm قابل دسترسی است.<sup>۲</sup>

### ۲-۲. پیکربندی مدل

محدوده مدل در محدوده ۵۶ تا حدود ۵۸/۵ درجه شرقی گسترش می‌یابد و به وسیله یک شبکه چهارگوشه مشتمل بر  $30 \times 28 \times 40$  سلول گسسته‌سازی شده است. تفکیک مکانی در امتداد محورهای  $x$  و  $y$  بین ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ متر متغیر است. تفکیک مکانی در امتداد محور قائم نیز متغیر است. برای اینکه معادلات در ناحیه شیب چگالی با دقت کافی حل شوند، مدل در راستای محور  $z$  به ۳۰ لایه تقسیم می‌شود که ضخامت این لایه‌ها در نزدیک سطح کم است و در اعماق افزایش می‌یابد. تعیین تعداد لایه‌ها در درجه اول به تغییرات چگالی در راستای قائم بستگی دارد و در درجه بعد به رایانه‌ای که مدل بر روی آن اجرا می‌شود. در این مدل‌سازی هرچند انتخاب لایه‌های کمتر نیز پاسخگوی لایه‌بندی خلیج عمان بود (مثلاً Small و Martin (۲۰۰۲) در مدل خود ۲ لایه در نظر گرفتند)، اما برای دقت بیشتر سعی شد در این پژوهش تا حدی که رایانه پاسخگو باشد تعداد لایه‌ها افزایش یابد که در نهایت ۳۰ لایه در نظر گرفته شد. گام زمانی اجرای مدل ۳۰ ثانیه است. توپوگرافی مدل از داده‌های توپوگرافی سازمان نقشه برداری

<sup>3</sup> No-slip

<sup>4</sup> Adjustable

<sup>5</sup> Sea Surface Temperature

<sup>6</sup> Sea Surface Salinity

<sup>7</sup> World Ocean Atlas

<sup>1</sup> Finite volume

<sup>2</sup> [http://mitgcm.org/sealion/online\\_documents/node2.html](http://mitgcm.org/sealion/online_documents/node2.html)

به منظور اعتبارسنجی مدل، مقایسه‌ای بین داده‌های پروفایل-های دما و شوری حاصل از مدل‌سازی حاضر با داده‌های WOD انجام شده است که تطابق خوبی را با مدل نشان می‌دهد. علاوه بر این، جدول ۱ نیز تطابق نسبتاً خوبی را بین نتایج پژوهش حاضر و مطالعات Small و Martin (۲۰۰۲) و همچنین مشاهدات راداری نشان می‌دهد (بخش ۳-۲).

### ۳. نتایج عددی

#### ۳-۱. محل شکل‌گیری امواج داخلی غیر خطی در فلات قاره خلیج عمان

شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب نرخ کرنش مداری و نصف النهاری را در لایه سطحی خلیج عمان در زمان جزر و زمان مد نشان می‌دهند. تغییرات مداری و نصف النهاری نرخ کرنش سطحی

$$\left(\frac{\partial v}{\partial y} \text{ و } \frac{\partial u}{\partial x}\right)$$

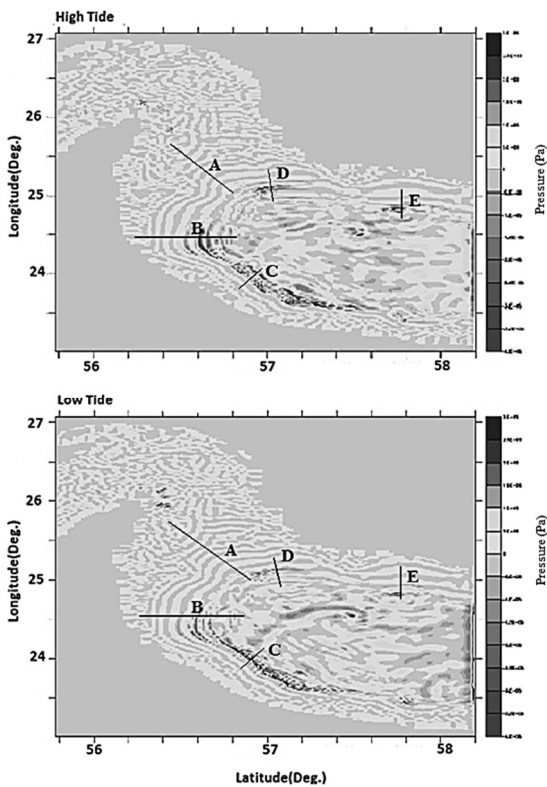
در حقیقت اثرات امواج داخلی را در سطح آب نشان می‌دهند. شکل ۳ نشان می‌دهد که جزرومد داخلی پس از عبور از شیب فلات قاره و ورود به آب‌های کم‌عمق ساحلی، تبدیل به بسته‌های موج داخلی غیرخطی می‌شود. از بین این بسته‌های موج غیرخطی، سه گروه از امواج مشهودترند که در شکل با مقاطع A و B و C نشان داده شده‌اند. گروهی از این امواج که شدت اثر سطحی بیشتری دارند به سمت غرب حرکت می‌کنند (مقطع A) و گروه دیگر نیز به سمت شمال‌غرب پیش‌روی می‌کنند (مقطع B). مقطع A تقریباً منطبق بر مسیری است که تصاویر امواج داخلی توسط سنجنده‌های راداری SAR ثبت شده‌اند و مدل‌سازی Small و Martin (۲۰۰۲) نیز در امتداد همین برش انجام شده است (شکل ۲). در شکل ۴ نیز تغییرات نرخ کرنش سطحی نصف النهاری ناشی از امواج داخلی در زمان‌های جزر کامل و مد کامل نشان داده شده است. این شکل علاوه بر این که شکل‌گیری امواج داخلی را در مجاورت مرزهای شمالی و جنوبی (مقاطع C و E) نشان می‌دهد، شکل‌گیری یک گروه از امواج داخلی را در امتداد محور شمال‌غرب و در دهانه تنگه هرمز نیز نمایش می‌دهد (مقطع D). شکل ۵ تغییرات میدان فشار غیر هیدروستاتیکی را در زمان‌های جزرومد نشان می‌دهد. این شکل مشخص می‌کند

حوزه مورد مطالعه دارای دو مرز باز است. یک مرز بازشرقی در سمت اقیانوس هند و دریای عرب و مرز باز غربی در تنگه هرمز قرار دارد. در این مطالعه، شرایط مرزی بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده انتخاب و به صورت از پیش تعریف شده به مدل اعمال شده است. تبادل متوسط در مرز غربی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده دما، شوری و جریان تنگه هرمز به صورت از پیش تعریف شده<sup>۱</sup> در شرط مرزی غربی مدل وارد شده است، تا مدل اطلاعات مرز باز غربی را از این داده‌ها بخواند. این داده‌ها که شامل دما، شوری و جریان است برای یک دوره یک‌ساله و با گام زمانی نیم ساعت و با تفکیک مکانی قائم ۱۰ متر در نقطه‌ای به مختصات ۵۶ درجه شرقی و ۲۶ درجه شمالی (که در شکل ۱ با علامت \* نشان داده شده است) برداشت شده است (Johns and Zantopp, 1999). داده‌های ارتفاع سطح آب نیز برای هر دو مرز غربی و شرقی از سازمان نقشه برداری تهیه شده است. این شرایط مرزی به صورت از پیش تعریف شده به مدل اعمال شده است. مزیت‌های شرایط مرزی انتخاب شده برای مدل آماده شده در این مطالعه را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

- برخلاف اکثر پیکربندی‌های مطالعه شده برای مدل‌های عددی که شرایط مرزی در آن به شکل تابع تعریف می‌شود، در این مطالعه از داده‌های واقعی و با تفکیک مکانی و زمانی بالا برای اعمال شرایط مرزی استفاده شده است که مدلی واقعی از تبادل آب در تنگه هرمز ارائه خواهد نمود.

- در اکثر مدل‌سازی‌های مطالعه شده نیروی جزرومدی به شکل یک سری از توابع سینوسی برای یک یا حداکثر ۴ مولفه جزرومدی غالب به مدل اعمال شده‌اند (Small and Martin, 2002; Sanchez, 2011). اما در مطالعه حاضر برای اعمال نیروی جزر و مدی به مدل، چون از داده‌های واقعی ارتفاع سطح آب در ایستگاه‌های مرزی استفاده شده است، لذا می‌توان گفت تمام مولفه‌های تاثیرگذار در طول یک سال در عمل به مدل اعمال شده است.

<sup>1</sup> prescribed



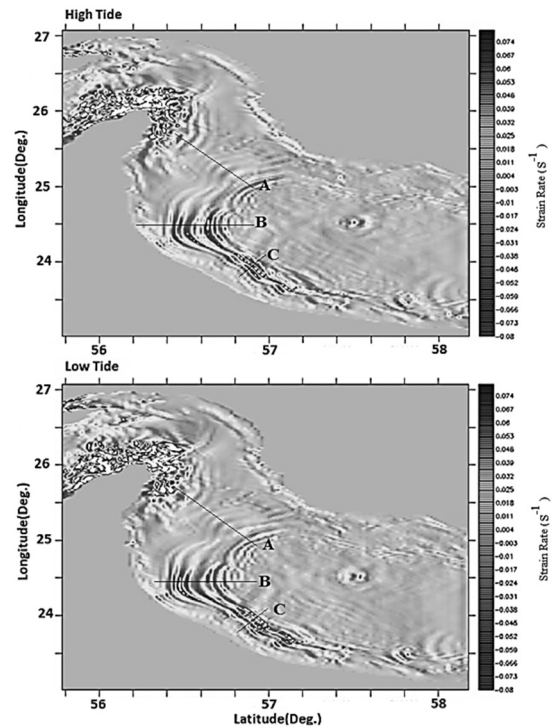
شکل ۵: تغییرات میدان فشار غیرهیدروستاتیکی در زمان‌های جزر

دلیل انتخاب مقطع A این است که منطبق بر مقطعی است که Martin و Small (۲۰۰۲) مدل‌سازی خود را روی آن انجام دادند و به‌علاوه، تصاویر راداری نیز در این محل ثبت شده‌اند.

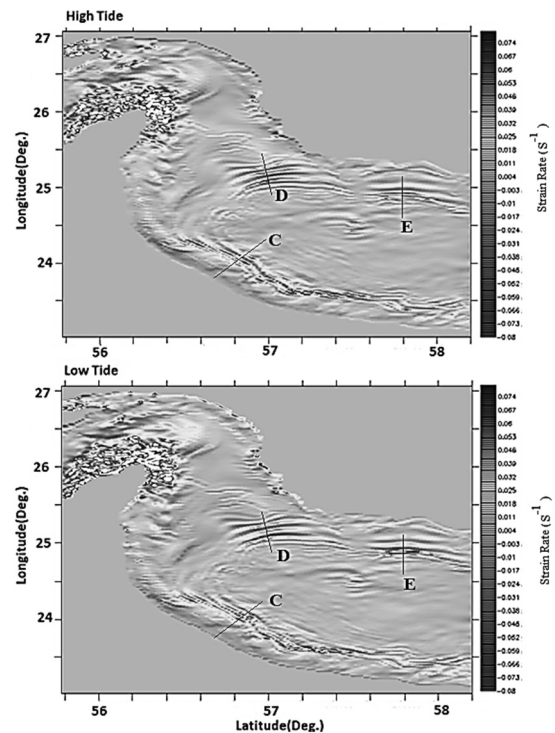
شکل ۶ نوسانات بین لایه‌ای منطبق بر مقطع A را در یک دوره جزرومدی نیمه‌روزانه نشان می‌دهد. این تصویر با خروجی مدل Martin و Small (۲۰۰۲) (شکل ۷) قابل مقایسه است که در بخش بعدی مورد بحث قرار می‌گیرد. تشابه شکل‌های ۶ و ۷ در این است که در هر دو شکل در محل ناو موج داخلی خطی، امواج داخلی غیرخطی شکل گرفته‌اند. علاوه بر این، در هر دو شکل این امواج داخلی غیرخطی به ترتیب ارتفاع مرتب شده‌اند (در سایر جاها مثل دریای مدیترانه، امواج داخلی غیرخطی به ترتیب ارتفاع پشت سر هم قرار نگرفته‌اند). شباهت دیگر این دو شکل نیز این است که فاصله امواج غیرخطی در هر دو شکل تقریباً یکسان است (حدود ۹۰۰ متر). شکل ۶، شکل‌گیری یک موج بلند داخلی خطی ناشی از جزرومد نیمه‌روزانه (یا جزرومد داخلی<sup>۱</sup>) با طول موج حدود ۲۰ کیلومتر را نشان می‌دهند که بسته-های امواج داخلی غیرخطی در قالب امواج تنهای داخلی در محل

<sup>۱</sup> Internal tide

که کنتورهای هم‌فشار بر کنتورهای نرخ کرنش (شکل‌های ۳ و ۴) منطبق است. در این بخش برای نمونه، نوسانات بین لایه‌ای در مقطع A (شکل‌های ۳، ۴ و ۵) رسم شده است.

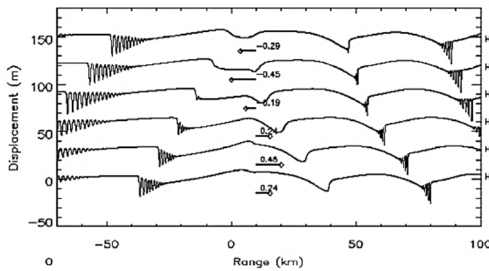


شکل ۳: نرخ کرنش سطحی مداری ناشی از امواج داخلی در زمان‌های جزر



شکل ۴: تغییرات نرخ کرنش سطحی نصف النهاری ناشی از امواج داخلی در زمان‌های جزر

است که مدل‌سازی‌های مختلف Small و Martin (۲۰۰۲) نیز شکل‌گیری حداکثر ارتفاع موج داخلی غیرخطی را در این ناحیه در عمق ۳۰ متری نشان می‌دهد (جدول ۱). همچنین فاصله بین موج پیشین هر گروه از امواج داخلی غیرخطی تا موج پیشین گروه بعدی حدود ۲۴-۲۰ کیلومتر است.

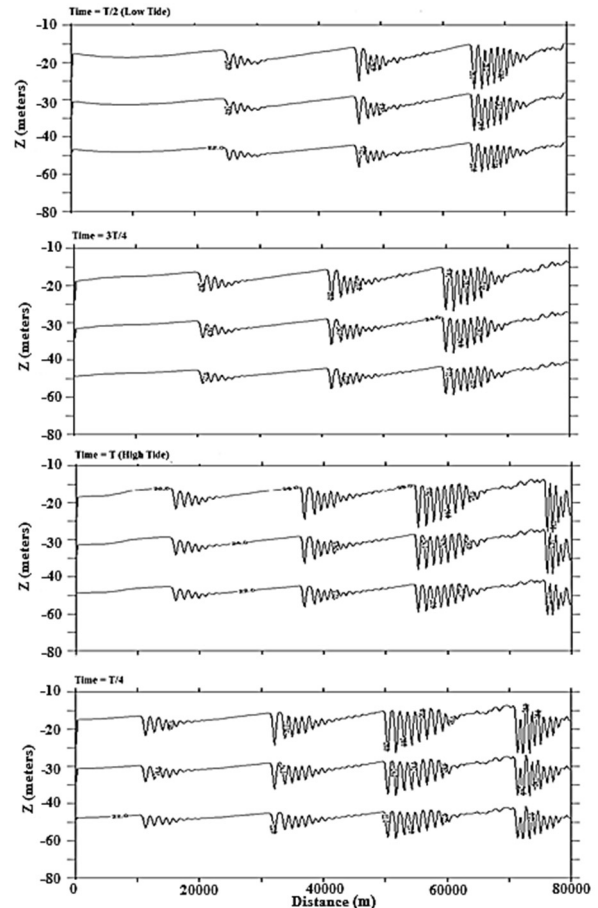


شکل ۷: شبیه‌سازی نوسانات داخلی بین لایه‌ای در یک دوره جزر و مدی نیمه‌روزانه، حاصل از مدل‌سازی امواج داخلی توسط Small و Martin (۲۰۰۲)

### ۲-۳. مقایسه نتایج با مشاهدات راداری و نتایج مدل Small و Martin

نوسانات داخلی بین لایه‌ای در یک دوره جزر و مدی نیمه-روزانه که توسط Small و Martin (۲۰۰۲) شبیه‌سازی شده، در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج حاصل از این دو مدل‌سازی به همراه مشخصه‌های مستخرج از تصاویر راداری SAR در جدول ۱ لیست شده است. مقایسه‌ها نشان می‌دهد فاصله تقریبی امواج غیرخطی شبیه‌سازی شده در این تحقیق (مدل MITgcm) با نتایج مدل‌سازی Small و Martin (۲۰۰۲) مطابقت دارد، اما هرچند فاصله بین بسته‌های موج داخلی (طول موج جزرومد داخلی) در این مطالعه حدود نصف طول موج به دست آمده توسط Small و Martin است اما این مقدار به مقادیر مشاهده شده توسط تصاویر راداری (که در جدول ۱ آورده شده است) نزدیک‌تر است. علاوه بر این تعداد امواج تنهای پیش‌بینی شده در این مطالعه نیز نسبت به نتایج پیش‌بینی شده توسط Small و Martin بیشتر است و توافق بیشتری با مشاهدات راداری SAR دارد (جدول ۱). این اختلاف احتمالا به این دلیل است که درجه غیرخطی بودن معادلات حل شده توسط مدل MITgcm بیشتر از مدل استفاده شده توسط Small و Martin است (در مدل Small و Martin تقریب هیدروستاتیکی در نظر گرفته شده است)، لذا در مدل‌سازی Small و Martin برخی مولفه‌های غیرخطی امواج داخلی ناخواسته فیلتر شده‌اند.

قعر<sup>۱</sup> امواج بلند و به شکل تورفتگی<sup>۲</sup> های پی‌درپی شکل گرفته‌اند. در این تصاویر، تعداد امواج غیر خطی که در قعر امواج جزرومد داخلی تشکیل شده‌اند، حداکثر ۸-۱۰ موج است که فاصله تقریبی آنها از یکدیگر حدود ۹۰۰ متر است.



شکل ۸: نوسانات داخلی بین لایه‌ای دمای پتانسیل در یک دوره جزر و مدی، حاصل از مدل‌سازی امواج داخلی با مدل MITgcm

نکته جالب توجه این است که در همه شکل‌ها ترتیب دسته-بندی<sup>۳</sup> امواج داخلی غیر خطی از ارتفاع بیشتر به ارتفاع کمتر است. این ترتیب دسته بندی مبین پیشروی امواج داخلی غیرخطی از آب عمیق (سمت شرق حوزه) به آب کم عمق (سمت غرب حوزه) است. بیشترین ارتفاع موج که مربوط به موج پیشین<sup>۴</sup> هر گروه از امواج داخلی غیرخطی است نیز حداکثر ۱۴ متر است و در عمق متوسط ۲۵ متری شکل می‌گیرد. قابل ذکر

<sup>1</sup> Trough  
<sup>2</sup> Depression  
<sup>3</sup> Rank Ordering  
<sup>4</sup> Leading waves



جدول ۱: مقایسه مشخصه‌های بسته‌های موج پیش‌بینی شده در مطالعه حاضر با نتایج پیش‌بینی Small و Martin (۲۰۰۲) و مشاهدات سنجنده‌های راداری در محدوده‌ی ۸۰ کیلومتری که امواج توسط SAR ثبت شده‌اند.

مورد مطالعه	تعداد امواج Solitary	فاصله‌ی تقریبی امواج غیرخطی (m)	فاصله بسته‌های موج (طول موج جزرومد داخلی) (km)	بیشینه‌ی ارتفاع موج داخلی (قعر تا تاج) (m)
مدل سازی با MITgcm (مطالعه حاضر)	۸ <	۹۰۰	۲۴	۱۴
مدل سازی Small و Martin (۲۰۰۲)	۵-۶	۹۰۰	۴۱	۲۲
	۱۱ <	حدود ۵۰۰		NA
SAR (I-II)	؟	NA	۳۳(A-B)	NA
مشاهدات سنجنده‌های راداری SAR	حدود ۷	حدود ۵۰۰	۲۲(B-C)	NA
	حدود ۹	حدود ۵۰۰		NA
	SAR ©			

سازي Small و Martin برخي مولفه‌های غیرخطی امواج داخلی، ناخواسته فیلتر شده‌اند. همچنین فاصله تقریبی امواج غیرخطی از یکدیگر حدود ۹۰۰ متر است که مطابق مدل Small و Martin (۲۰۰۲) است. نکته جالب توجه این است که در همه شکل‌ها ترتیب دسته‌بندی<sup>۳</sup> امواج داخلی غیرخطی از ارتفاع بیش‌تر به ارتفاع کم‌تر است. این ترتیب دسته‌بندی مبین پیش‌روی امواج داخلی غیرخطی از آب عمیق (سمت شرق حوزه) به آب کم‌عمق (سمت غرب حوزه) است. بیش‌ترین ارتفاع موج که مربوط به موج پیشین<sup>۴</sup> هر گروه از امواج داخلی غیرخطی است نیز حداکثر ۱۴ متر است، که نشان می‌دهد اختلاف بین پیش‌بینی‌های دو مدل‌سازی وجود دارد. تحقیق در این مورد مستلزم پردازش نرم-افزاری تصاویر راداری است که مطالعه جداگانه‌ای را در این شاخه می‌طلبد تا مشخص شود کدام یک از دامنه‌های پیش‌بینی شده به مشاهدات نزدیک‌تر است. بیشینه ارتفاع موج داخلی غیرخطی در عمق متوسط ۲۵ متری شکل می‌گیرد. قابل ذکر است که مدل‌سازی‌های مختلف Small و Martin (۲۰۰۲) نیز شکل-گیری حداکثر ارتفاع موج داخلی غیرخطی را در این ناحیه در عمق ۳۰ متری نشان می‌دهد (جدول ۱). فاصله بین موج پیشین هر گروه از امواج داخلی غیرخطی تا موج پیشین گروه بعدی حدود ۲۰-۲۴ کیلومتر است که نسبت به مدل Small و Martin (۲۰۰۲) تطابق بهتری با مشاهدات راداری دارد.

#### منابع

اکبری نسب، م؛ صدری نسب، م؛ بیدختی، ع.ع؛ چگینی، و، ۱۳۹۳. مطالعه جریان نفوذی از خلیج فارس به دریای عمان و اثر آن بر روی نحوه انتشار صوت، نشریه اقیانوس‌شناسی، شماره ۲۰، زمستان

در مورد دامنه‌ی امواج غیرخطی نیز مقداری تفاوت بین پیش‌بینی‌های دو مدل‌سازی وجود دارد که تحقیق در این مورد مستلزم پردازش نرم‌افزاری تصاویر راداری است که مطالعه جداگانه‌ای را در این زمینه می‌طلبد تا مشخص شود کدام یک از دامنه‌های پیش-بینی شده به مشاهدات نزدیک‌تر است.

#### ۴. بحث و نتیجه گیری

پژوهش حاضر نشان می‌دهد که جزرومد داخلی پس از ورود به ناحیه فلات‌قاره منجر به شکل‌گیری بسته‌های موج داخلی غیرخطی در ناحیه فلات‌قاره و آب کم‌عمق خواهد شد (مقاطع A تا E) (شکل‌های ۳، ۴ و ۵). در این مطالعه یکی از این مقاطع (مقطع A) که تصاویر راداری نیز رخداد امواج داخلی غیرخطی را در آن مقطع ثبت کرده‌اند، به عنوان نمونه مورد بحث قرار گرفته است. نوسانات داخلی بین لایه‌ای در این مقطع، شکل‌گیری یک موج بلند داخلی خطی ناشی از جزرومد نیمه‌روزانه (یا جزرومد داخلی) را با طول موج حدود ۲۴-۲۰ کیلومتر نشان می‌دهند که در ناحیه فلات‌قاره خلیج عمان به سمت شبه جزیره Musandam حرکت می‌کنند. بسته‌های امواج داخلی غیرخطی در قالب امواج تنهای داخلی در محل قعر<sup>۱</sup> امواج بلند و به شکل تورفتگی<sup>۲</sup>‌های پی‌درپی شکل گرفته‌اند. در این تصاویر، تعداد امواج غیرخطی که در قعر امواج جزرومد داخلی تشکیل شده‌اند حداکثر ۱۰-۸ موج است، که این تعداد توافق بیشتری با مشاهدات راداری SAR دارد. نزدیکی نتایج پژوهش حاضر نسبت به پژوهش Small و Martin (۲۰۰۲) احتمالاً به این دلیل است که درجه غیرخطی بودن معادلات حل شده توسط مدل MITgcm بیش‌تر از مدل استفاده شده توسط Small و Martin (۲۰۰۲) است. لذا در مدل-

<sup>3</sup> Rank Ordering

<sup>4</sup> Leading waves

<sup>1</sup> Trough

<sup>2</sup> Depression

- Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling, *Journal of Geophysics Research*, 102: 5733-5752.
- Hundsdorfer, W.; Trompert, R.A., 1994. Method of lines and direct discretization: a comparison for linear advection. *Applied Numerical Mathematics*, 13(6): 469-490.
- Pacanowski, R.C.; Philander, S.G.H., 1981. Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans. *Journal of Physical Oceanography*, 11: 1443-1451.
- Sanchez-Garrido, J.C.; Sannino, G.; Liberti, L.; Garcia Lafuente, J.; Pratt, L., 2011. Numerical modeling of three-dimensional stratified tidal flow over cammarinal sill, Strait of Gibraltar, *Journal of Geophysics Research*, 116: C12026.
- Small, J.; Martin, J., 2002. The generation of non-linear internal waves in the Gulf of Oman. *Continental Shelf Research*, 22 (8): 1153-1182.
- Sutherland, B.R., 2010. *Internal gravity waves*; Cambridge university press, ISBN 978-0-521-83915-0 Hardback.
- Vallis, G.K., 2006. *Atmospheric and oceanic fluid dynamics*. Cambridge University Press, 745 PP.
- Vlasenko, V.; Stashchuk, N.; Hutter, K.; Baroclinic, T., 2005. Cambridge University Press, 351-375 PP.
- WOD., 2013. World ocean database individual observed level quality codes. Reference: [ftp://ftp.nodc.noaa.gov/pub/WOD13/DOC/wod013\\_tutorial.pdf](ftp://ftp.nodc.noaa.gov/pub/WOD13/DOC/wod013_tutorial.pdf)
- ۱۳۹۳، صفحات ۱۱ تا ۱۷.
- خلیلالآبادی، م.ر.؛ صدری‌نسب، م.، ۱۳۹۲. کاربرد فن‌آوری سنجش از دور در استخراج مشخصه‌های امواج داخلی در خلیج عمان، دومین همایش بین‌المللی اقیانوس‌شناسی خلیج فارس و دهمین همایش علوم و فنون دریایی ایران، تهران.
- Apel, J.R., 2002. Oceanic internal waves and solitons. In: Jackson, C.R. (Ed.), *An atlas of internal solitary-like waves and their properties*. Global Ocean Associates. Prepared for Office of Naval Research – Code 322 PO, Alexandria, VA., 1–40 PP.
- Freitas, K.M., 2008. Improving accuracy of acoustic prediction in the Philippine Sea through incorporation of mesoscale Environmental Effects, Master's Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, CA 93943-5000.
- Garrett, C.J.R.; Kunze, E., 2007. Internal tide generation in the deep ocean, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 39: 57-87.
- Johns, W.; Zantopp, R., 1999. Data report for the strait of Hormuz experiment, December 1996–March 1998. RSMAS, University of Miami Technical Report 99, 1.
- Leith, C.E., 1968. Diffusion approximation for two-dimensional turbulence, *physics Fluids*, 10: 1409-1416.
- Marshall, J.; Adcroft, A.; Hill, C.; Perelman, L.; Heisey, C., 1997b. A finite-volume, incompressible Navier–Stokes model for studies of the ocean on parallel computers. *Journal of Geophysics Research*, 102: 5733-5766.
- Marshall, J.; Hill, L.; Perelman, A.; Adcroft, C., 1997a.