



استخراج ویژگی های امواج درونی تنگه هرمز با استفاده از تصاویر ماهواره ای

مقاله پژوهشی

SAR

حامد دلدار^{۱*}، محمد ملکی^۲، حسن یوسفی معصوم^۳ آباد

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۷ / پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۷ / دسترسی اینترنتی: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹

چکیده

امواج درونی یکی از پدیده های مهم در اقیانوس ها هستند و معمولاً به وسیله جریان های جزر و مدی ایجاد می شوند و در ستون آبی منتشر می شوند. سنجش از راه دور و اندازه گیری های میدانی دو روش برای اندازه گیری امواج درونی هستند. در این مطالعه به بررسی امواج درونی در تنگه هرمز با استفاده از تصاویر بانند C از سنجنده سار (SAR) ماهواره سنتینل ۱ پرداخته شده است. پارامترهای استخراج شده از این تصاویر برای سال های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ عبارت اند: طول موج، سرعت انتشار، جهت انتشار و دامنه امواج. برای اعتبارسنجی، یک آرایه مهار-شده با سه حسگر دمایی واکنش سریع در منطقه تنگه هرمز از اوایل مارس ۲۰۲۲ تا پایان ژوئن ۲۰۲۲ نصب شد که داده ها را هر ۳۰ ثانیه ضبط می کرد. در نهایت، پس از استخراج پارامترهای یاد شده از

تصاویر ماهواره ای و داده های اندازه گیری میدانی، این نتایج حاصل گردید که اختلاف مقدار دامنه و سرعت امواج در پارامترهای اندازه گیری شده نسبت به داده های میدانی به ترتیب حدود ۲۸٪ و ۷،۱٪ می باشد. این اختلاف می تواند ناشی از خطای تشخیص پیکسل های تاریک و روشن در الگوهای لبه یابی باشد. در نهایت پیشنهاد می گردد با استفاده از تصاویر سایر سنجنده ها و به کارگیری سایر الگوهای لبه یابی خطای پارامترهای اندازه گیری کاهش بیابد.

طرح مسئله: امواج درونی یکی از پدیده های حیاتی در اقیانوس ها هستند و معمولاً توسط جریان های جزر و مدی ایجاد می شوند. اهمیت بالای این امواج در زمینه های صوتی، مهندسی سواحل و دیگر حوزه های اقیانوس شناسی باعث شده که توجه زیادی از سوی پژوهشگران به آن ها جلب شود (۲ و ۳ و ۴ و ۵ و ۶ و ۷ و ۸ و ۹). امواج درونی به صورت جبهه های موازی روی سطح دریا ظاهر می شوند. تغییرات در زبری سطح دریا باعث تغییرات در شدت نسبی پیکسل های تصویر ماهواره ای می شود که می تواند توسط سنجنده سار (SAR) و حسگرهای نوری ماهواره تشخیص داده شود (۲۸). **هدف:** هدف این مطالعه اندازه گیری ویژگی های امواج درونی با استفاده از تصاویر سار (SAR) در تنگه هرمز و کالبره کردن نتایج حاصل از تصاویر ماهواره ای با اندازه گیری های میدانی می باشد. با بررسی پیشینه تحقیق در این زمینه این نتیجه حاصل گردید که مطالعه ای در این مورد انجام نشده که این خود دلیلی بر نوآوری بودن این تحقیق دارد.

حامد دلدار^۱ (✉)، محمد ملکی^۲، حسن یوسفی معصوم^۳ آباد

۱. استاد یار گروه فیزیک دریا، پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی، تهران، ایران

۲. فارغ التحصیل گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

۳. فارغ التحصیل گروه محیط زیست، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

Doi: 10.82447/girs.2025.1119972

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: h.deldar@inio.ac.ir

روش تحقیق: منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، تنگه هرمز می باشد. که تفاوت عمق بسیار بالا این منطقه را مناسب برای ایجاد امواج درونی کرده است. براساس داده‌های GEBCO، جهت ثبت داده‌های دمایی از تاریخ ۱ مارس ۲۰۲۲ تا ۱ ژوئن ۲۰۲۲، یک دستگاه آرایه مهارشده در مختصات $26^{\circ} 30'$ درجه شرقی و $56^{\circ} 42'$ درجه شمالی در عمق ۶۰ متر نصب گردید. این آرایه مهارشده متشکل از سه حسگر در عمق‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متر بوده و گام زمانی داده‌برداری این آرایه مهارشده ۳۰ ثانیه می‌باشد. تغییرات دمایی داده‌های آرایه مهار شده در طول زمان بیانگر این است که موج‌های درونی در این منطقه تشکیل و انتشار یافته است. در این مطالعه از پایگاه داده‌های Coperni cus تصاویر سنجنده SAR باند C از ۱ Sent i nel به منظور مشاهده امواج درونی و همچنین استخراج برخی از ویژگی‌های این امواج استفاده شده است (۳۵). از میان تصاویر دریافتی برای سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ و بررسی آنها، تنها دو تصویر که مطابق با تاریخ اندازه‌گیری میدانی و همچنین منطقه مورد مطالعه بوده را به منظور بررسی دقیق‌تر انتخاب گردید (۲۵).

نتایج و بحث: داده‌های استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای در این مطالعه شامل **طول موج و ارتفاع موج:** فاصله بین نقاط روشن و تاریک در تصاویر به ترتیب قله و دره موج را نمایان می‌کنند (۳۹).

جهت انتشار

ابتدا و انتها بزرگترین قوس با یک خط به همدیگر وصل و زاویه خط عمود بر این خط نسبت به شمال، زاویه و جهت انتشار موج را نشان می‌دهد (۴۰).

سرعت انتشار: با توجه به اینکه یکی از عوامل تشکیل امواج درونی، جریان‌های جزر و مدی می‌باشد، بدین ترتیب می‌توان با در نظر گرفتن دو جبهه موج متوالی سرعت افقی امواج را از روی تصاویر استخراج کرد (۴۰).

دامنه موج: در این مطالعه از روش استفاده شده در مطالعه وانگ و همکاران (۴۱) به منظور تخمین و استخراج ویژگی‌های امواج درونی از تصاویر ماهواره‌ای استفاده گردیده است.

نتایج: داده‌های میدانی پس از بررسی داده‌های آرایه مهارشده، مشخص گردید که حسگر شماره ۳ داده‌ای ثبت نکرده است؛ بنابراین، سری زمانی دو حسگر باقی‌مانده ترسیم و با اعمال تبدیل فوریه بر روی داده‌ها مشخص شد که فرکانس‌های اصلی در محیط ناشی از جزر و مدهای روزانه و نیمه‌روزانه هستند.

کشف امواج درونی: در تاریخ ۰۶-۰۴-۲۰۲۲ و ساعت ۱۷:۱۵:۱۴ به وقت جهانی جبهه امواج درونی در فاصله ۱۲/۷ کیلومتری نسبت به موقعیت مکانی آرایه مهارشده رخ داده است.

طول موج و ارتفاع موج: دو نمایه عمود بر جهت انتشار رسم و مقدار شدت پیکسل‌های نمایه اول ۸۰۸ متر و نمایه دوم ۱۲۶۳ متر می‌باشد. با توجه به فواصل بین قله‌ها در نقاط تاریک و روشن، میانگین طول امواج حدود ۲۶۵ متر بدست آمده است. بر اساس مطالعه اندی و همکاران (۳۶) در منطقه‌ای نزدیک تنگه هرمز، میانگین طول موج حدود ۳۰۰ متر تخمین زده شده که بسیار نزدیک به مقادیر این مطالعه می‌باشد.

جهت انتشار: با اتصال دو سر کمان و خط عمود بر آن، جهت انتشار بسته موج به سمت شمال شرق و با زاویه تقریبی ۴۶ درجه قرار دارد. بررسی سایر تصاویر در این منطقه نیز بیانگر این است که عمده جهت انتشار جبهه‌های امواج درونی به سمت شمال شرقی می‌باشد.

تخمین دامنه امواج: با محاسبه انحراف استاندارد داده‌های ثبت شده در حسگرها، می‌توان ارتفاع موج درونی را تخمین زد (۲). بر این اساس داده‌های آرایه مهارشده برای یک دوره زمانی یک ماه و یک روز در تاریخ ۰۴-۰۴-۲۰۲۲ ترسیم و اطلاعات مربوط به انحراف استاندارد این داده‌ها استخراج گردید.

همچنین عزیرپور و همکاران (۴۳) با اندازه‌گیری داده‌های دما و شوری در خلیج فارس و تنگه هرمز، عمق لایه آمیخته یا لایه اول تقریباً ۲۰ متر و لایه دوم حدود ۸۰ متر تخمین زده شد. حال با داشتن مقادیر h_1 برابر با ۲۰ متر، h_2 برابر با ۸۰ متر و D برابر با ۲۷۰ متر و با استفاده از فرمول ۲ مقدار ارتفاع موج حدود ۱/۳۶ متر می‌باشد.

سرعت انتشار: محاسبه سرعت موج در این مطالعه بر اساس دو روش انجام شد. در روش اول بر اساس مشاهدات بسته‌های موج در تاریخ‌های مختلف منطقه، که فاصله بین هر دو بسته موج، در چهار حالت به ترتیب برابر است با $L_1=11420$ متر، $L_2=12110$ متر، $L_3=13280$ متر و $L_4=14730$ متر. در روش دوم، با بررسی تصاویر و همچنین داده‌های اندازه‌گیری که در فاصله ۱۲،۷ متری از یکدیگر با دوره تناوب (T) (ثانیه) ۱۲،۵ ساخته بودند، مقدار سرعت موج درونی ۰،۲۸ متر بر ثانیه تخمین زده شد که بسیار نزدیک به مقدار ۰،۳۱ متر بر ثانیه به دست آمده توسط اندی و همکاران (۳۶) می‌باشد.

ناشی از تشخیص پیکسل‌های روشن و تاریک جهت مشخص نمودن لبه‌های امواج درونی باشد که با اصلاح این روش می‌توان به دقت‌های بالاتری دست پیدا کرد. با توجه به مقایسه روش‌های استفاده شده در مطالعات مشابه، به نتیجه می‌رسیم که نتایج به دست آمده دارای دقت قابل قبولی هستند. این مطالعات برای مدل‌سازی امواج صوتی و بررسی امواج دریایی کاربرد دارند. همچنین، با توجه به هزینه‌های بالای مطالعات میدانی و دشواری دسترسی به مناطق دوردست، روش‌های سنجش از دور با وجود خطاهای محاسباتی، همچنان می‌توانند گزینه‌ی مناسبی برای محققان به منظور کشف امواج درونی به ویژه در مدت طولانی‌تری در یک منطقه خاص باشد.

یکی از محدودیت‌های این مطالعه استفاده از یک سنجنده بوده که امکان دسترسی به تمامی تصاویر در دوره‌های گذشته ممکن است وجود نداشته باشد و بعضاً به دلیل شرایط جوی قابل استفاده نباشد. با این حال پیشنهاد می‌گردد علاقه‌مندان به این حوزه سایر سنجنده‌های نوری و حرارتی را با استفاده از روش‌های دیگر پردازش تصویر با بکارگیری هوش مصنوعی و یادگیری ماشین مورد مطالعه قرار دهند و نتایج آن را با نتایج به دست آمده در این حوزه مقایسه نمایند.

واژه‌های کلیدی: آرایه مهارشده، الگوهای لبه‌یابی، اندازه‌گیری میدانی، باند C، حسگرهای دمایی واکنش سریع، ماهواره سنتینل ۱.

نتیجه‌گیری: در این مطالعه، تصاویر سنجنده SAR در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۱ در تنگه هرمز جمع‌آوری شدند. با اعمال اصلاحات لازم، امواج داخلی شناسایی و جهت‌کالبره کردن تصاویر دریافتی، یک آرایه مهارشده با سه حسگر در منطقه مورد مطالعه به منظور اندازه‌گیری داده‌های میدانی قرار گرفت. با بررسی تصاویر وقوع امواج داخلی در یکی از تصاویر مشاهده گردید و با توجه به اینکه تصویر مورد نظر در محدوده اندازه‌گیری آرایه مهارشده قرار داشته بدین منظور پارامترهای ارتفاع، سرعت و جهت انتشار امواج داخلی از تصویر مورد نظر استخراج و با داده‌های اندازه‌گیری مقایسه گردید. محاسبه سرعت موج در این مطالعه بر اساس دو روش انجام شد. در روش اول با مشاهدات بسته‌های موج، فاصله بین هر دو بسته موج محاسبه و با توجه به دوره تناوب (T) (ثانیه) این امواج، سرعت امواج به دست آمد.

در روش دوم با بررسی تصاویر و همچنین داده‌های اندازه‌گیری مقدار سرعت تخمین زده شد. نتایج حاصله از این مطالعه بیانگر این است که خطاهای اندازه‌گیری برای ارتفاع موج داخلی حدود ۲۸٪ و برای سرعت انتشار حدود ۷/۱٪ است. در مطالعه رودناس و گاریلو (۴۴)، خطای $\pm 6\%$ برای طول موج، در تحقیقات لی و همکاران (۴۵)، خطای $\pm 16\%$ برای سرعت، در تحقیقات فان و همکاران (۴۶)، خطای $\pm 7\%$ برای سرعت فاز و عمق لایه گرادیان چگالی (پیکنوکلاين)، در تحقیقات ژائو و همکاران (۴۷)، خطای $\pm 23\%$ برای سرعت فاز، و در تحقیقات دوکن و همکاران (۴۸)، خطای $\pm 20\%$ برای طول موج به دست آمده است. خطاهای حاصله می‌تواند

مقدمه

امواج سطحی همان‌طور که در سطح آب شکل می‌گیرند، امواجی در زیرسطح و در ستون آب به وجود می‌آیند که به آن‌ها امواج درونی می‌گویند. ارتفاع این امواج می‌تواند به ده‌ها متر برسد و در فواصل کیلومتری و به مدت چندین ساعت در محیط انتشار پیدا می‌کنند (۱). امواج درونی یکی از پدیده‌های حیاتی در اقیانوس‌ها هستند و معمولاً توسط جریان‌های جزر و مدی ایجاد می‌شوند. اهمیت بالای این امواج در زمینه‌های صوتی، مهندسی سواحل و دیگر حوزه‌های اقیانوس‌شناسی باعث شده که توجه زیادی از سوی پژوهشگران به آن‌ها جلب شود (۲ و ۳ و ۴ و ۵ و ۶ و ۷ و ۸ و ۹).

امواج درونی علاوه بر اینکه باعث جابجایی لایه‌های هم‌چگالی در ستون آب می‌شوند، باعث ایجاد موجک‌های کوچک و همچنین ناهنجاری‌های دمایی بر روی سطح آب می‌شوند. از این‌رو جهت مطالعه امواج درونی علاوه بر اندازه‌گیری‌های میدانی (۱۰ و ۱۱ و ۱۲ و ۱۳) که بسیار گران و زمان‌بر و در عین حال دقیق هستند، می‌توان از روش سنجش از دور (۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷). با هزینه کمتر، سرعت بیشتر و البته دقت پایین‌تر استفاده نمود.

در اندازه‌گیری‌های میدانی جهت مطالعه امواج درونی معمولاً از داده‌های برداشت شده توسط آرایه‌های مهار شده توسط لنگر متشکل از چند حسگر دما و شوری (۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱) و یا آرایه‌های یدک‌شونده توسط شناورها (۲۲ و ۲۳) استفاده می‌شود. در روش‌های سنجش از دور با مطالعه ناهنجاری‌های دمایی ایجادشده در سطح آب (۲۴ و ۲۵) و یا موجک‌های کوچک ایجادشده (۲۶ و ۲۷) ویژگی‌های امواج درونی مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

امواج درونی به صورت جبهه‌های موازی روی سطح دریا ظاهر می‌شوند. تغییرات در زبری سطح دریا باعث تغییرات در شدت نسبی پیکسل‌های تصویر ماهواره‌ای می‌شود که می‌تواند توسط سنجنده سار (SAR) و حسگرهای نوری ماهواره تشخیص داده شود (۲۸). به دلیل رزولوشن بالای داده‌ها و تصویربرداری مکرر یک منطقه، حسگرهای سنجنده سار (SAR)، با ترکیب داده‌های باند SAR-C سنتینل-۱ و ماهواره لندست، اقیانوس‌شناسان می‌توانند به داده‌های فیزیکی حیاتی همچون عمق لایه اختلاط دست یابند (۲۹). با استفاده از روش‌های مختلف می‌توان ویژگی‌های امواج درونی مانند جهت، طول‌موج، دامنه، سرعت و عمق را از تصاویر سار (SAR) استخراج کرد (۳۰).

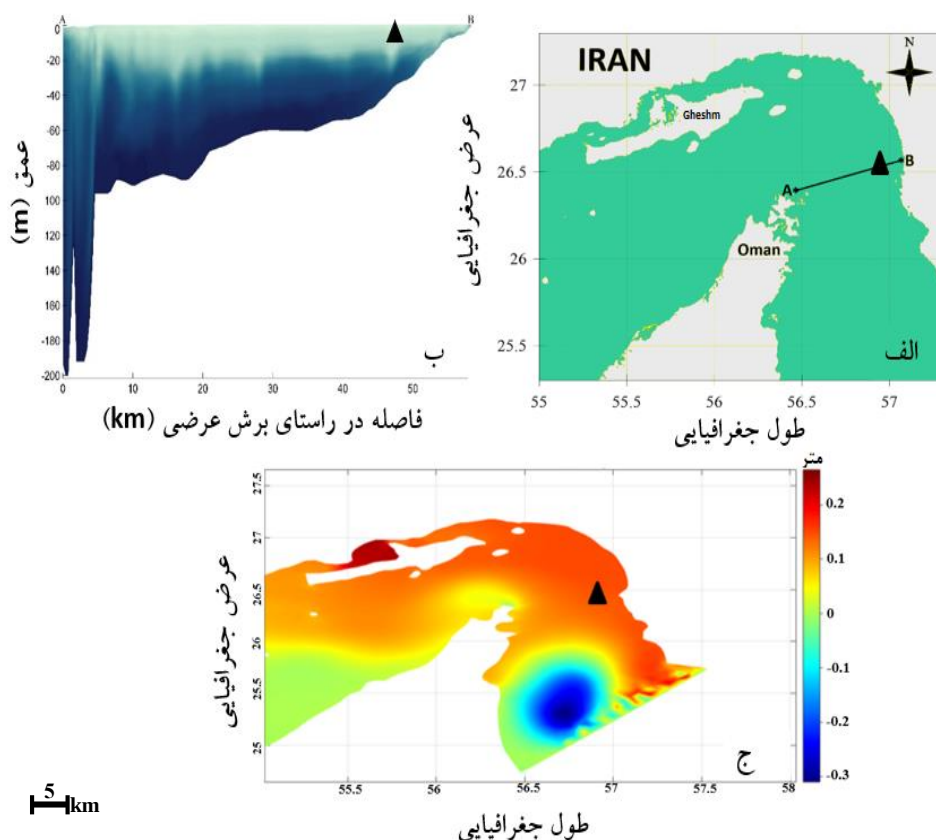
اگرچه استفاده از روش سنجش از دور محدودیت‌های از حیث در دسترس نبودن همه تصاویر، تأثیر پارامترهای جوی بر روی کیفیت تصاویر و همچنین تأثیر بازتاب‌های سطحی بر روی تصاویر را دارد (۳۱ و ۳۲) با این حال می‌تواند روش مناسبی جهت مطالعه امواج درونی باشد، به شرط آن‌که سنجنده‌ای مناسب برای این هدف انتخاب شود و با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده میدانی بهترین روش جهت پردازش تصاویر سنجنده‌ها به دست آید. در نتیجه هدف این مطالعه اندازه‌گیری ویژگی‌های امواج درونی با استفاده از تصاویر سار (SAR) در تنگه هرمز و کالیبره کردن نتایج حاصل از تصاویر ماهواره‌ای با اندازه‌گیری‌های میدانی است. با بررسی پیشینه تحقیق در این زمینه این نتیجه حاصل گردید که مطالعه‌ای در این مورد انجام نشده که این خود دلیلی بر نوآوری بودن این تحقیق دارد.

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، تنگه هرمز واقع در جنوب ایران با طول جغرافیایی $30^{\circ} 55'$ تا $30^{\circ} 56'$ درجه شرقی

در این منطقه دو نوع جریان وجود دارد یکی جریان شور و سرد که از لایه پایین از خلیج فارس خارج می‌شود و دیگری جریان آب گرم با شوری کمتر که در لایه بالایی وارد خلیج فارس می‌شود (۳۳).

و عرض جغرافیایی $25^{\circ} 30''$ تا $27^{\circ} 30''$ درجه شمالی می‌باشد. تنگه هرمز دارای عرضی تقریباً ۶۰ کیلومتر و عمق آن بین ۶۰ متر سمت خلیج فارس تا ۲۰۰ متر سمت دریای عمان است که این تفاوت عمق بسیار بالا، منطقه را مناسب برای ایجاد امواج درونی کرده است. علاوه بر جریانات جزرومدی



شکل ۱. (الف) موقعیت جغرافیایی تنگه هرمز، (ب) تغییرات عمق، (ج) تراز سطح آب و موقعیت قرارگیری آرایه مهارشده بر روی نقشه.

ناشی از جزر و مد در منطقه موردنظر از خروجی مدل جهانی پیش‌بینی جزر و مدی TMD استفاده گردید (۳۴). براساس داده‌های GEBCO، جهت ثبت داده‌های دمایی از تاریخ ۱ مارس ۲۰۲۲ تا ۱ ژوئن ۲۰۲۲، یک دستگاه آرایه مهارشده در مختصات $26^{\circ} 30''$ درجه شرقی و $56^{\circ} 42''$ درجه شمالی در عمق ۶۰ متر نصب گردید. این آرایه با استفاده از لنگر مهارشده و متشکل از سه حسگر در عمق‌های ۲۰، ۳۰

با توجه به اینکه یکی از عوامل اصلی ایجاد امواج درونی برخورد جریانات حاصل از جزرومد با ناهواری‌های بستر می‌باشد، بدین منظور در این مطالعه جهت شناخت وضعیت عمق‌نگاری منطقه تنگه هرمز، داده‌های عمق با تفکیک مکانی ۱۵ ثانیه از پایگاه داده‌های GEBCO دریافت و مورد استفاده قرار گرفت. همچنین جهت بررسی ویژگی‌های تراز سطح آب

و ۴۰ متر بوده و گام زمانی داده‌برداری این آرایه مهارشده ۳۰ ثانیه می‌باشد. تغییرات دمایی داده‌های آرایه مهارشده در طول زمان بیانگر این است که موج‌های درونی در این منطقه تشکیل و انتشار یافته است.

در این مطالعه از پایگاه داده‌های Copernicus تصاویر سنجنده SAR باند C از Sentinel 1 به منظور مشاهده امواج درونی و همچنین استخراج برخی از ویژگی‌های این امواج استفاده شده است (۳۵).

با توجه به اینکه داده‌برداری میدانی در بازه زمانی مذکور بوده در نتیجه تصاویر برای سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ دریافت و پس از بررسی آنها، تنها دو تصویر که مطابق با تاریخ اندازه‌گیری میدانی و همچنین منطقه مورد مطالعه بوده را به منظور بررسی دقیق‌تر انتخاب گردید.

پس از بازیابی تصاویر، قطبش VV در بخش باندها انتخاب شد زیرا اجزا و جزئیات تصاویر را با دقت بیشتری نمایش می‌دهد. موج‌های رادار با همان قطبش VV نسبت به موج‌های با همان قطبش VH، نفوذ بیشتری دارند (۳۶).

به همین ترتیب، تصاویر قبل از اعمال فیلتر speckle با استفاده از فیلتر Lee (۲۹) و اندازه ماسک ۳×۳ کالیبره و سپس با اعمال تنظیمات مربوط به زمین‌نگاری (ژئورفرنس کردن) و در برخی موارد الگوریتم تشخیص لبه‌یابی Canny و فیلتر گوسی با فرکانس بالا جهت تأثیر امواج بر سطح دریا استفاده شده است (۳۷).

مقادیر پیکسل‌های انتخاب شده (مقدار داده) برای هر پیکسل تا پیکسل نهایی بعد از تولید پروفایل، رسم شده که در تصاویری به صورت نوارهای سیاه و سفید نمایش و دارای مقادیری از ۰ تا ۲۵۵ می‌باشند. سفیدترین و درخشان‌ترین نقطه ۲۵۵ است، در حالی که صفر نقطه سیاه‌ترین و تاریک‌ترین

است. معمولاً نقاط قعر موج و نقاط روشن قله موج را نشان می‌دهند (۳۸).

داده‌های استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای

طول موج و ارتفاع موج

جهت استخراج طول موج از تصاویر ماهواره‌ای ابتدا باید یک خط موازی در جهت بسته موج رسم تا نمودار شدت پیکسل از پیکسل‌های انتخاب شده در امتداد خط ایجاد شود. این نمودار فاصله بین نقاط روشن و تاریک که به ترتیب قله و دره موج هستند را نمایان می‌کنند. این تکنیک در مطالعات دیگر نیز به کار رفته است (۳۹).

جهت انتشار

به منظور بدست آوردن جهت انتشار ابتدا و انتها بزرگترین قوس را با یک خط به همدیگر وصل و زاویه خط عمود بر این خط نسبت به شمال، زاویه و جهت انتشار موج را نشان می‌دهد (۴۰).

سرعت انتشار

با توجه به اینکه یکی از عوامل تشکیل امواج درونی، جریان‌های جزر و مدی می‌باشد، بدین ترتیب می‌توان با در نظر گرفتن دو جبهه موج متوالی سرعت افقی امواج را از روی تصاویر استخراج کرد. در این مطالعه، سرعت موج برابر است با نسبت فاصله بین دو بسته موج یا طول موج (λ) (متر) به دوره تناوب (T) (ثانیه) که با استفاده از معادله ۱ قابل محاسبه می‌باشد. از جمله مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به تحقیقات پورتر و کارانگ اشاره کرد (۴۰).

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad [1]$$

دامنه موج

در این مطالعه از روش استفاده شده در مطالعه وانگ و همکاران (۴۱) به منظور تخمین و استخراج ویژگی‌های امواج درونی از

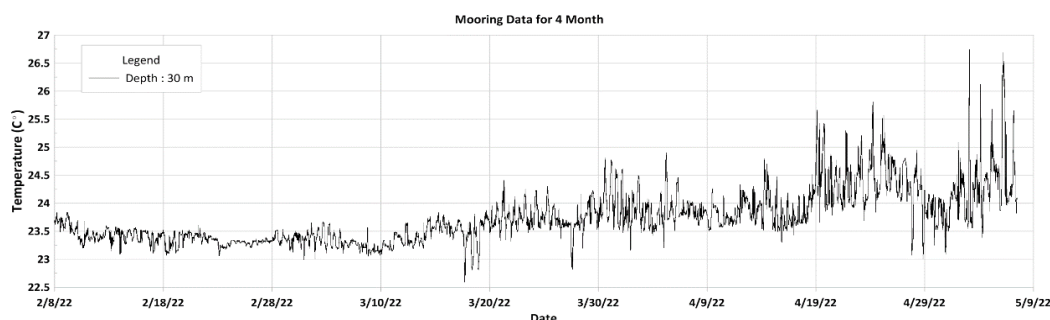
نتایج

داده‌های میدانی

پس از بررسی داده‌های آرایه مهارشده، مشخص گردید که حسگر شماره ۳ داده‌ای ثبت نکرده است؛ بنابراین، سری زمانی دو حسگر باقی‌مانده در شکل ۲ نشان داده شده است.

تصاویر ماهواره‌ای استفاده گردیده است. همانطور که در معادله ۲ نشان داده شده است، η_0 نشان دهنده دامنه امواج و h_1 و h_2 عمق لایه‌های اول و دوم، l نصف عرض امواج (متر) و D فاصله (متر) بین روشن‌ترین و تاریک‌ترین پیکسل‌ها در نمودار است.

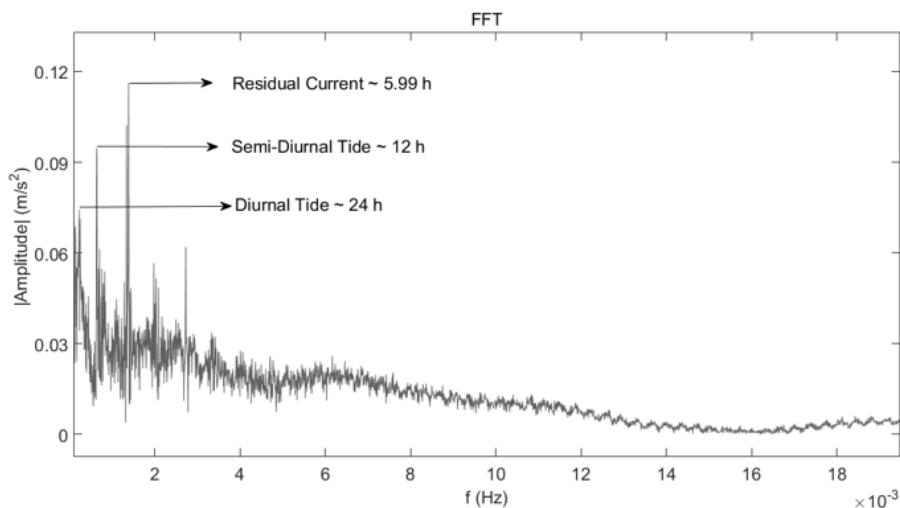
$$l = \frac{D}{1.32} \quad \eta_0 = \frac{4h_1^2 h_2^2}{l^2 3|h_1 - h_2|} \quad [2]$$



شکل ۲. سری زمانی داده‌های اندازه‌گیری آرایه مهارشده.

مشخص شد که فرکانس‌های اصلی در محیط ناشی از جزر و مدهای روزانه و نیمه‌روزانه هستند.

با اعمال تبدیل فوریه بر روی سری زمانی اندازه‌گیری شده (شکل ۳)،



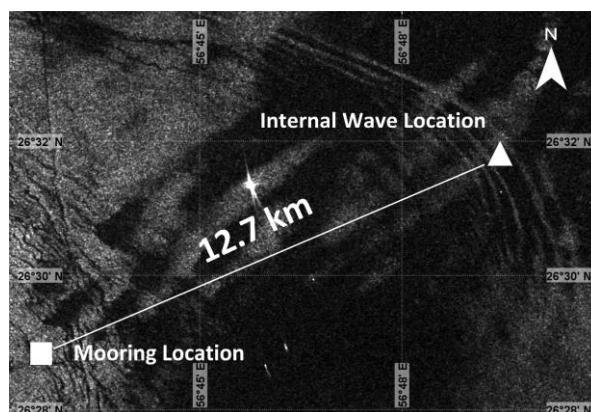
شکل ۳. تبدیل سری فوریه از داده‌های اندازه‌گیری آرایه مهارشده.

و تاثیر جریان‌های باقی‌مانده را (سومین اوج نمودار) مشاهده کرد (۴۲)

کشف امواج درونی.

در تاریخ ۰۶-۰۴-۲۰۲۲ و ساعت ۱۴:۱۷:۱۵ به وقت جهانی جبهه امواج درونی مطابق شکل ۴ در فاصله ۱۲/۷ کیلومتری نسبت به موقعیت مکانی آرایه مهارشده رخ داده است.

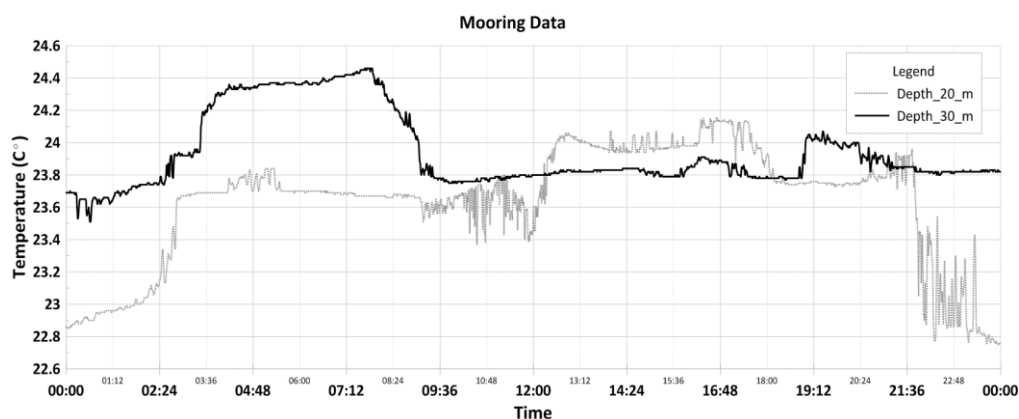
با مطالعه‌ای که قاضی و همکاران در سال ۲۰۲۱ انجام دادند: این نتیجه حاصل گردید که عمده جریان‌های موجود در خلیج فارس جریان‌های ناشی از جزر و مد روزانه و نیمه‌روزانه می‌باشد. لذا در این مطالعه می‌توان به تغییرات تراز سطح ناشی از جریان‌های جزر و مدی نیم‌روزانه اشاره کرد ولی نمی‌توان اثر جریان‌های باقی‌مانده^۱ (جریان‌ات ناشی از بازگشت جریان‌ات جزرومدی) را ناچیز در نظر گرفت، بنابراین با توجه به شکل ۳ می‌توان بزرگی



شکل ۴. شناسایی امواج درونی از روی تصاویر ماهواره‌ای در تاریخ ۰۶-۰۴-۲۰۲۲ و ساعت ۱۴:۱۷:۱۵.

۲۰۲۲ این نتیجه حاصل می‌گردد که یک جبهه موج امواج درونی

با بررسی و تحلیل داده‌های آرایه مهارشده در تاریخ ۰۶-۰۴-



شکل ۵. داده‌های اندازه‌گیری شده توسط آرایه مهارشده در نزدیکی محل امواج درونی مشاهده شده در عمق‌های ۲۰ و ۳۰ متری در تاریخ ۰۵-۰۴-۲۰۲۲

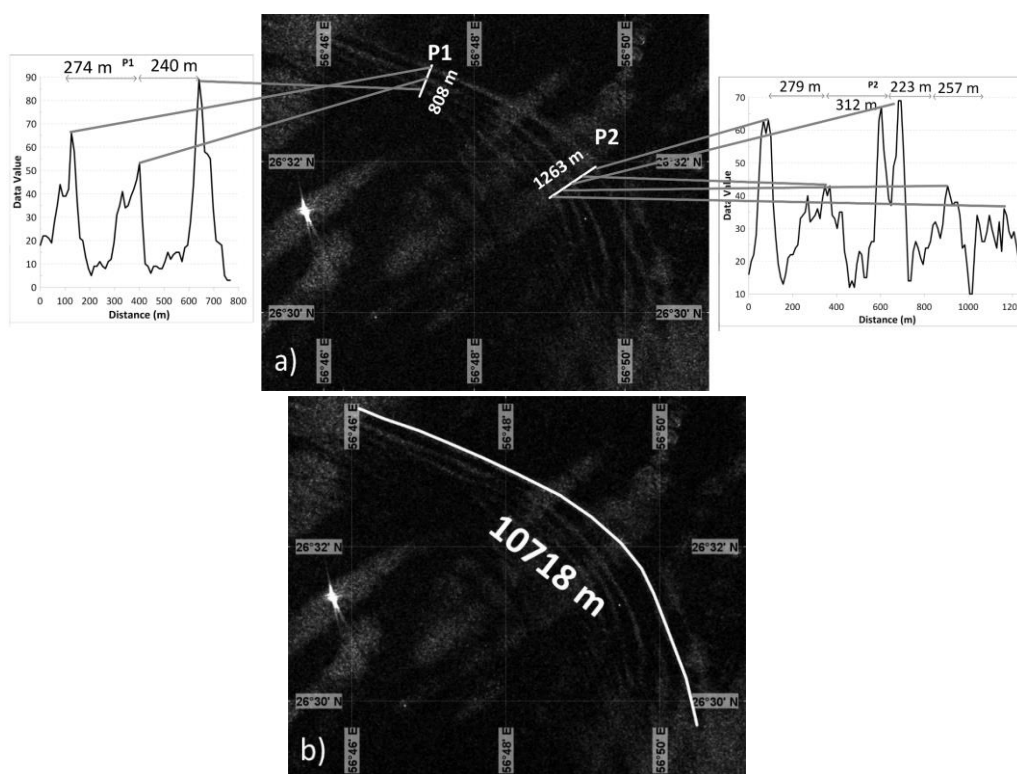
¹residual currents

در نقاط تاریک و روشن، میانگین طول امواج حدود ۲۶۵ متر بدست آمده است. بر اساس مطالعه اندی و همکاران (۳۶) در منطقه‌ای نزدیک تنگه هرمز، میانگین طول موج حدود ۳۰۰ متر تخمین زده شده که بسیار نزدیک به مقادیر این مطالعه می‌باشد.

در ساعت حدود ۲:۳۰ از موقعیت مکانی آرایه‌های مهارشده عبور کرده است.

طول موج و ارتفاع موج

دو نمایه عمود بر جهت انتشار مطابق شکل ۶ رسم شده است. مقدار شدت پیکسل‌های نمایه اول ۸۰۸ متر و نمایه دوم ۱۲۶۳ متر می‌باشد. با توجه به شکل ۵ و بر اساس فواصل بین قله‌ها

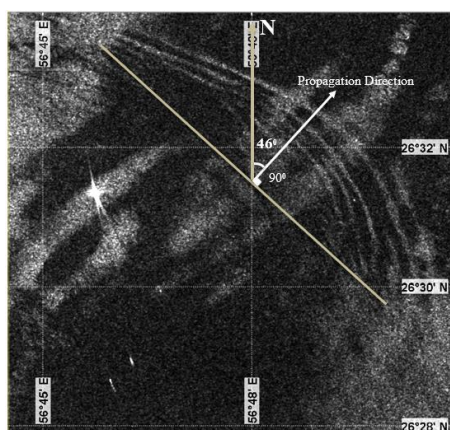


شکل ۶. نمودار شدت پیکسل و طول ضخامت بسته امواج P1 و P2 در تاریخ ۰۴-۰۴-۲۰۲۲ در ساعت ۱۴:۱۷:۱۵ و محاسبه فاصله اوج‌ها جهت بدست آوردن طول موج (a)، اندازه طول قوس (b).

جهت انتشار

بررسی سایر تصاویر در این منطقه نیز بیانگر این است که عمده جهت انتشار جبهه‌های امواج درونی به سمت شمال شرقی می‌باشد.

با اتصال دو سر کمان و خط عمود بر آن، جهت انتشار بسته موج به سمت شمال شرق و با زاویه تقریبی ۴۶ درجه قرار دارد.



شکل ۷. جهت و زاویه امواج درونی منتشر شده در تاریخ ۰۴-۰۴-۲۰۲۲ و ساعت ۱۴:۱۷:۱۵.

تخمین دامنه امواج

داده‌های آرایه مهارشده برای دو دوره زمانی یک ماهه (۱۵-

۲۰۲۲-۰۳ تا ۲۰۲۲-۰۴-۱۵) و یک روزه در تاریخ ۰۴-۰۴-

۲۰۲۲ مطابق شکل ۸ ترسیم و اطلاعات مربوط به انحراف

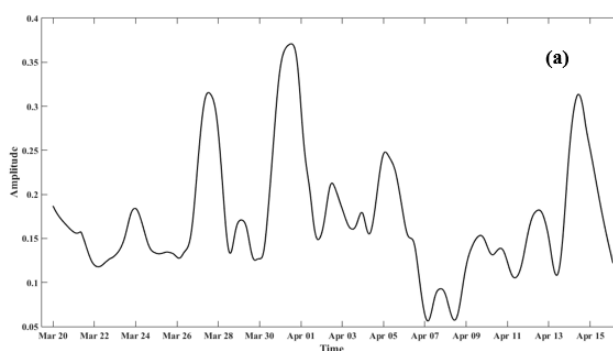
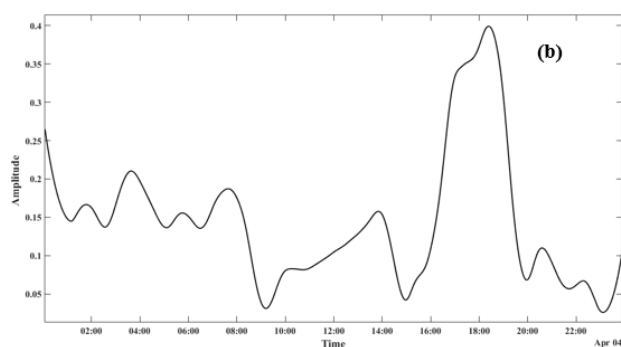
استاندارد این داده‌ها مطابق جدول ۱ می‌باشد.

با محاسبه انحراف استاندارد داده‌های ثبت شده در حسگرها،

می‌توان ارتفاع موج درونی را تخمین زد (۲). بر این اساس

جدول ۱. دامنه امواج داده‌های آرایه مهارشده.

	میانگین ماهانه	میانگین روزانه
کمینه	0.05 (m)	0.02(m)
پیشینه	0.37 (m)	0.39(m)
میانگین	0.17(m)	0.14(m)

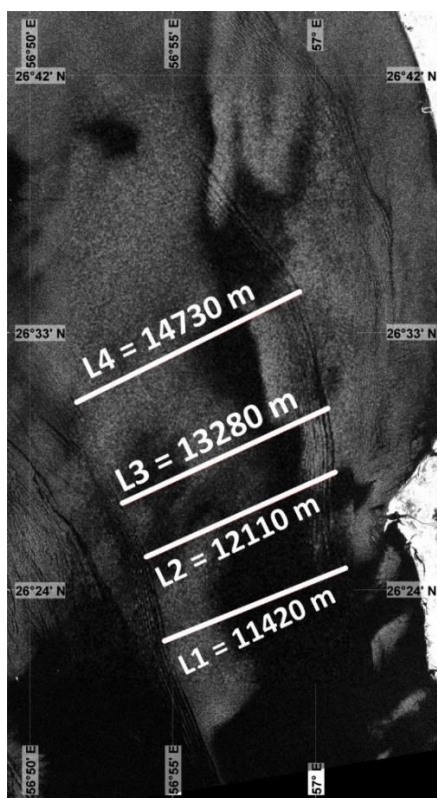


شکل ۸. دامنه امواج اندازه‌گیری شده توسط آرایه مهارشده. داده‌های یک ماهه (a)، داده‌های روزانه (b) در تاریخ ۰۴-۰۴-۲۰۲۲.

سرعت انتشار

محاسبه سرعت موج در این مطالعه بر اساس دو روش انجام شد. در روش اول بر اساس مشاهدات بسته‌های موج در تاریخ‌های مختلف منطقه، که فاصله بین هر دو بسته موج مطابق شکل ۹، در چهار حالت به ترتیب برابر است با $L1=11420$ متر، $L2=12110$ متر، $L3=13280$ متر و $L4=14730$ متر.

همچنین عزیزپور و همکاران (۴۳) با اندازه‌گیری داده‌های دما و شوری در خلیج فارس و تنگه هرمز، عمق لایه آمیخته یا لایه اول تقریباً ۲۰ متر و لایه دوم حدود ۸۰ متر تخمین زده شد. حال با داشتن مقادیر $h1$ برابر با ۲۰ متر، $h2$ برابر با ۸۰ متر و D برابر با ۲۷۰ متر و با استفاده از رابطه ۲ مقدار ارتفاع موج حدود ۰/۵ متر می‌باشد.



شکل ۹. مشاهده امواج درونی و محاسبه طول موج آنها در یک منطقه و برای دو سال متوالی در تاریخ ۰۴-۰۴-۲۰۲۲ در ساعت ۱۵:۱۷:۱۴.

داده‌های اندازه‌گیری که در فاصله ۱۲,۷ متری از یکدیگر با دوره تناوب (T) (ثانیه) ۱۲,۵ ساخته بودند، مقدار سرعت موج درونی ۰,۲۸ متر بر ثانیه تخمین زده شد که بسیار نزدیک به مقدار ۰,۳۱ متر بر ثانیه به دست آمده توسط اندی و همکاران (۳۶) می‌باشد. در نتیجه، مقادیر پارامترهای استخراج شده از تصاویر و داده‌های اندازه‌گیری شده توسط آرایه مهار شده در منطقه تنگه هرمز با یکدیگر مقایسه گردید. در جدول ۲، آنالیز

در این تحقیق، فرض بر این است که عامل اصلی ایجاد موج‌های درونی در منطقه خلیج فارس و تنگه هرمز جریان‌های جزر و مدی است. با محاسبه دوره تناوب (T) (ثانیه) این امواج، مقدار آن ۱۲:۴۲ ساعت تعیین شد که بیانگر جزر و مد نیمه‌روزانه می‌باشد. همچنین، بر اساس معادله ۱، میانگین سرعت بسته موج در این مکان برابر با ۰,۲۸۱ متر بر ثانیه محاسبه گردید. در روش دوم، با بررسی تصاویر و همچنین

آماري بين پارامترهاي استخراج شده از تصوير و مقادير اندازه‌گيري‌هاي ميداني نشان داده مي‌شود (۳۶).

جدول ۲. مقايسه پارامترهاي استخراج شده از تصاوير ماهواره‌اي و اندازه‌گيري ميداني و مقدار خطا.

پارامتر	SAR	داده‌هاي ميداني	درصد خطا	ضريب همبستگي	RMSE
سرعت انتشار	0.28 (m/s)	0.30 (m/s)	7.1 %		
دامنه امواج	0.5 (m)	0.39 (m)	28 %	0.89	0.2

بحث و نتيجه‌گيري

در اين مطالعه، تصاوير سنجده SAR در بازه زماني ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۱ در تنگه هرمز جمع‌آوري شدند. با اعمال اصلاحات لازم، امواج داخلي شناسايي و جهت‌كالبيره كردن تصاوير دريافتي، يك آرايه مهار شده با سه حسگر در منطقه مورد مطالعه به منظور اندازه‌گيري داده‌هاي ميداني قرار گرفت. با بررسي تصاوير وقوع امواج داخلي در يكي از تصاوير مشاهده گرديد و با توجه به اينكه تصوير مورد نظر در محدوده اندازه‌گيري آرايه مهار شده قرار داشته بدین منظور پارامترهاي ارتفاع، سرعت و جهت انتشار امواج داخلي از تصوير مورد نظر استخراج و با داده‌هاي اندازه‌گيري مقايسه گرديد. محاسبه سرعت موج در اين مطالعه بر اساس دو روش انجام شد. در روش اول با مشاهدات بسته‌هاي موج، فاصله بين هر دو بسته موج محاسبه و با توجه به دوره تناوب (T) (ثانيه) اين امواج، سرعت امواج به دست آمد.

در روش دوم با بررسي تصاوير و همچنين داده‌هاي اندازه‌گيري مقدار سرعت تخمين زده شد. نتايج حاصله از اين مطالعه بيانگر اين است كه خطاهاي اندازه‌گيري براي ارتفاع موج داخلي حدود ۲۸٪ و براي سرعت انتشار حدود ۷/۱٪ است. در مطالعه رودناس و گاريلو (۴۴)، خطاي $\pm 6\%$ براي طول موج، در تحقيقات لي و همكاران (۴۵)، خطاي $\pm 16\%$ براي سرعت، در تحقيقات فان و همكاران (۴۶)، خطاي $\pm 7\%$ براي سرعت

فاز و عمق لايه گرايان چگالي (پيكنوكلاين)، در تحقيقات ژائو و همكاران (۴۷)، خطاي $\pm 23\%$ براي سرعت فاز، و در تحقيقات دوكن و همكاران (۴۸)، خطاي $\pm 20\%$ براي طول موج به دست آمده است. خطاهاي حاصله مي‌تواند ناشي از تشخيص پيكنسل‌هاي روشن و تاريك جهت مشخص نمودن لبه‌هاي امواج دروني باشد كه با اصلاح اين روش مي‌توان به دقت‌هاي بالاتري دست پيدا كرد. با توجه به مقايسه روش‌هاي استفاده شده در مطالعات مشابه، به نتيجه مي‌رسيم كه نتايج به دست آمده داراي دقت قابل قبولي هستند. اين مطالعات براي مدل سازي امواج صوتي و بررسي امواج دريائي کاربرد دارند. همچنين، با توجه به هزينه‌هاي بالاي مطالعات ميداني و دشواري دسترسي به مناطق مورد ست، روش‌هاي سنجش از دور با وجود خطاهاي محاسباتي، همچنان مي‌توانند گزينه‌ي مناسبی براي محققان به منظور كشف امواج دروني به ويژه در مدت طولاني‌تري در يك منطقه خاص باشد.

يكي از محدوديت‌هاي اين مطالعه استفاده از يك سنجنده بوده كه امكان دسترسي به تمامي تصاوير در دوره‌هاي گذشته ممكن است وجود نداشته باشد و بعوضا به دليل شرايط جوي قابل استفاده نباشد. با اين حال پيشنهاده مي‌گردد علاقه‌مندان به اين حوزه ساير سنجنده‌هاي نوري و حرارتي را با استفاده از روش‌هاي ديگر پردازش تصوير با بكارگيري هوش مصنوعي و

یادگیری ماشین مورد مطالعه قرار دهند و نتایج آن را با نتایج به دست آمده در این حوزه مقایسه نمایند.

منابع مورد استفاده

- Anderson, W.W. and Gehringer, J.W., 1959. Physic Oceanographic, Biological, and Chemical Data, South Atlant Coast of the United States: M/V Theodore N. Gill Cruise 7 - 27 US Department of the Interior, Fish and Wildlife Service.
- Deldar, H. and Bidokhti, A.A.A.A., 2020. Visualizations of density fluctuations before and after the passage of bluff body objects in a laboratory stratified tank. *Ocean Engineering*, 209, p.107277.
- Garrett, C. and Munk, W., 1979. Internal waves in the ocean. *Annual review of fluid mechanics*, 11(1), p.339-369.
- Gerkema, T. and Zimmerman, J.T.F., 2008. An introduction to internal waves. *Lecture Notes*, Royal NIOZ, Texel, 20 p.207.
- Jackson, C.R., Da Silva, J.C. and Jeans, G., 2012. The generation of nonlinear internal waves. *Oceanography*, 25(2), pp.108-123.
- Deldar, H., Bidokhti, A.A. and Chegini, V., 2018. A Investigation of the Effects of Internal Waves on Sound Propagation in a Stratified Medium with a Sloping Bottom. *Acoustical Physics*, 64, pp.58-63.
- Zhao, B., Zhang, T., Wang, Z., Hayatdavoodi, M., Gou, Y., Ertekin, R.C. and Duan, W., 2024. High-level Green-Naghdi model for large-amplitude internal waves in deep water. *Journal of Fluid Mechanics*, 988, p.A32.
- Sun, J., Tang, X. and Chen, Y., 2024. Exploring two-dimensional internal waves: A new three-coupled Davey-Stewartson system and physics-informed neural network with weight assignment methods. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 459, p.134021.
- Skitka, J., Arbic, B.K., Thakur, R., Menemenlis, D., Peltie, W.R., Pan, Y., Momeni, K. and Ma, Y., 2024. Probing the nonlinear interactions of supertidal internal waves using high-resolution regional ocean model. *Journal of Physical Oceanography*, 54(2), pp.399-425.
- Rovira-Navarro, M., Matsuyama, I. and Hay, H.C.C., 2021. Thin-shell tidal dynamics of ocean worlds. *The Planetary Science Journal*, 4(2), p.23.
- Pacary, C., Dauxois, T., Ermanyuk, E., Metz, P., Moulin, M. and Joubaud, S., 2023. Observation of inertia-gravity wave attractors in an axisymmetric enclosed basin. *Physical Review Fluids*, 8(10), p.104802.
- Tian, Z., Jia, L., Xiang, J., Yuan, G., Yang, K., Wei, J., Zhang, M., Shen, H. and Yue, J., 2023. Excess pore water pressure and seepage in slopes induced by breaking internal solitary waves. *Ocean Engineering*, 267, p.113281.
- Cyriac, A., Meyer, A., Phillips, H.E. and Bindoff, N.L., 2023. Observations of internal wave interactions in a Southern Ocean standing meander. *Journal of Physical Oceanography*, 53(8), pp.1997-2011.
- Siyanbola, O.Q., Buijsman, M.C., Delpech, A., Renault, L., Barkan, R., Shriver, J.F., Arbic, B.K. and McWilliams, J.C., 2023. Remote internal wave forcing of regional ocean simulations near the US West Coast. *Ocean Modelling*, 181, p.102154.
- Zhang, Y., Hong, M., Zhang, Y., Zhang, X., Cai, J., Xu, T. and Guo, Z., 2023. Characteristics of internal solitary waves in the Timor Sea observed by SAR satellite. *Remote Sensing*, 15(11), p.2878.
- Morrow, R., Fu, L.L., Rio, M.H., Ray, R., Prandi, P., Le Traon, P.Y. and Benveniste, J., 2023. Ocean circulation from space. *Surveys in Geophysics*, 44(5), pp.1243-1286.
- Zhang, S., Li, X. and Zhang, X., 2023. Internal wave signature extraction from SAR and optical satellite imagery based on deep learning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61, pp.1-16.
- Morozov, E.G. and Pisarev, S.V., 2023. Internal Waves in the Region of the Akselsundet Strait of Western Spitsbergen Island. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 59(4), pp.432-442.
- Gong, Y., Li, L., Pawlowicz, R. and Cai, S., 2023. Numerical investigation on the generation and evolution of nonlinear internal waves in the southern Strait of Georgia. *Progress in Oceanography*, 215, p.103053.
- Whitwell, C.A., Jones, N.L., Ivey, G.N., Rosevear, M.G. and Rayson, M.D., 2024. Ocean mixing in a shelf sea driven

- by energetic internal waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 129(2), p.e2023JC019704.
21. Zhen, X., Lv, Y., Duan, Q. and Huang, C., 202. Experimental investigation on the nonlinear dynamical responses of the coupled floating submerged artificial seabed-mooring system in internal solitary waves. *Ocean Engineering*, 288, p.116092.
 22. Williams, E.F., Ugalde, A., Martins, H.F., Becerra, C.E., Callies, J., Claret, M., Fernandez-Ruiz, M.F., Gonzalez-Herraez, M., Martin-Lopez, S., Pelegri, J.L. and Winters, K.B., 2023. Fiber-optic observations of internal waves and tides. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 128(9), p.e2023JC019980.
 23. Pinkel, R., Nguyen, S., Smith, J., Lucas, A., Reinmar, B. and Waterhouse, A., 2023. Vertical momentum transport by internal gravity waves above the equatorial undercurrent at 140 W. *Geophysical Research Letters* 50(14), p.e2022GL101630.
 24. Vasavi, S., Pravallika, M.S., Varun, B.N. and Sarm, A.S., 2023. Residual network-based ocean wave modelling from satellite images using ensemble Kalman filter. *The Visual Computer*, pp.1-10.
 25. Santos-Ferreira, A.M., Silva, J.D., St-Denis, E., Bourgault, D. and Maas, L.R.M., 2023. Internal solitary waves within the cold tongue of the equatorial Pacific generated by buoyant gravity currents. *Journal of Physical Oceanography*, 53(10), pp.2419-2434.
 26. Jia, Y., Gong, Y., Zhang, Z., Yuan, C. and Zheng, F., 2024. Three-dimensional numerical simulations of oblique internal solitary wave-wave interactions in the South China Sea. *Frontiers in Marine Science*, 11, p.1292078.
 27. Gong, Q., Chen, L., Diao, Y., Xiong, X., Sun, J. and Li, X., 2023. On the identification of internal solitary waves from moored observations in the northern South China Sea. *Scientific Reports*, 13(1), p.3133.
 28. Alpers, W.R., Ross, D.B. and Rufenach, C.L., 1981. Can the detectability of ocean surface waves by real and synthetic aperture radar. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 86(C7), pp.6481-6498.
 29. Chen, Z., Zeng, H., Yang, W. and Chen, J., 2022 November. Texture Enhancement Method of Ocean Internal Waves in SAR Images Based on Non-local Mean Filtering and Multi-scale Retinex. In 2022 3rd China International SAR Symposium (CISS) (pp. 1-5). IEEE.
 30. Dessert, M., Honnorat, M., Le Caillec, J.M., Messenger, C. and Carton, X., 2022. Estimating the pycnocline depth from the SAR signature of internal waves in the Alboran Sea. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, pp.9048-9061.
 31. Magalhaes, J.M., Pires, A.C., da Silva, J.C.B., Buijsman, M.C. and Oliveira, P.B., 2021. Using SAR imagery to survey internal solitary wave interactions: A case study off the Western Iberian shelf. *Continental Shelf Research*, 220, p.104396.
 32. Guo, C., Vlasenko, V., Alpers, W., Stashchuk, N. and Chen, X., 2012. Evidence of short internal waves trailing strong internal solitary waves in the northern South China Sea from synthetic aperture radar observations. *Remote sensing of environment*, 124, pp.542-550.
 33. Pous, S., Lazare, P. and Carton, X., 2015. A model of the general circulation in the Persian Gulf and in the Strait of Hormuz: Intraseasonal to interannual variability. *Continental Shelf Research*, 94, pp.55-70.
 34. Padman, L. and Erofeeva, S., 2005. Tide model driver (TMD) manual. Earth and Space research.
 35. Liu, B., Li, X. and Zheng, G., 2019. Coastal inundation mapping from bitemporal and dual-polarization SAR imagery based on deep convolutional neural networks. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(12), pp.9101-9113.
 36. Andi, S., Rashidi Ebrahim Hesari, A. and Farjami, H., 2021. Detection of internal waves in the Persian Gulf. *Remote Sensing Letters*, 12(2), pp.190-198.
 37. Meester, M.J. and Baslamisli, A.S., 2022. SAR image edge detection: review and benchmark experiments. *International Journal of Remote Sensing*, 43(14), pp.5372-5438.
 38. Jackson, C.R., da Silva, J.C., Jeans, G., Alpers, W. and Caruso, M.J., 2013. Nonlinear internal waves in synthetic aperture radar imagery. *Oceanography*, 26(2), pp.68-79.

39. Svergun, E.I., Sofina, E.V., Zimin, A.V. and Kruglov K.A., 2023. Seasonal variability of characteristics of nonlinear internal waves in the Kuril-Kamchatka region by Sentinel 1 data. *Continental Shelf Research*, 25 p.104986.
40. Porter, D.L. and Thompson, D.R., 1999. Continental shelf parameters inferred from SAR internal wave observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16(4), pp.475-487.
41. Xiang, D., Ban, Y., Wang, W., Tang, T. and Su, Y. 2016. Edge detector for polarimetric SAR images using SIRV model and gauss-shaped filter. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 13(11), pp.1661-1665.
42. Ghazi, E., Aliakbari Bidokhti, A., Ezam, M., Zoljooei M. and Torabi Azad, M., 2021. Study of Tidal and Residual Current in the Persian Gulf. *Hydrophysics* 6(2), pp.41-51.
43. Azizpour, J., Chegini, V., Khosravi, M. and 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. *ریه علمی پژوهشی (۱۸) خلیج فارس*, ۵, pp.37-48.
44. Rodenas, J.A. and Garello, R., 1997. Wavelet analysis in SAR ocean image profiles for internal wave detection and wavelength estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(4), pp.933-945.
45. Li, X., Morrison, J., Pietrafesa, L. and Ochadlick, A., 1999. Analysis of oceanic internal waves from airborne SAR images. *Journal of Coastal Research*, pp.884-891.
46. Fan, K., Fu, B., Gu, Y., Yu, X., Liu, T., Shi, A., Xu, K. and Gan, X., 2015. Internal wave parameters retrieval from space-borne SAR image. *Frontiers of Earth Science*, 9, pp.700-708.
47. Zhao, Z., Klemas, V., Zheng, Q., Li, X. and Yan, X.H., 2004. Estimating parameters of a two-layer stratified ocean from polarity conversion of internal solitary waves observed in satellite SAR images. *Remote Sensing of Environment*, 92(2), pp.276-287.
48. Dokken, S.T., Olsen, R., Wahl, T. and Tørring, M.V., 2001. Identification and characterization of internal waves in SAR images along the coast of Norway. *Geophysical Research Letters*, 28(14), pp.2803-2806.



Extraction of internal waves features in the Strait of Hormuz using SAR satellite images.

Hamed Deldar ^{1*}, Mohamad Maleki², Hasan Yousefi³

Received: 2024-05-16 / Accepted: 2024-10-08 / Published: 2025-10-11

Abstract

Internal waves are one of the important phenomena in oceans and are usually generated by tidal currents and are propagated in the water column. Remote sensing and field measurements are two methods for measuring internal waves. This study investigates the internal waves in the Strait of Hormuz using C-band images from the Sentinel-1 satellite Synthetic Aperture Radar (SAR). The extracted parameters from these images for the years 2021 and 2022 include: wavelength, propagation speed, direction of propagation, and wave amplitude. For validation, a moored array with three fast-response temperature sensors was deployed in the area from early March 2022 to the end of June 2022, recording data every 30 seconds. Ultimately, after extracting the mentioned parameters from satellite images and field measurements, the results indicate that the difference in the magnitude of wave amplitude and speed between the measured parameters and field data is approximately 28% and 7.1%, respectively. This difference may be due to errors in detecting dark and bright pixels in edge detection patterns. It is suggested that using images from other sensors and employing other edge detection patterns can reduce the error in the measured parameters.

Hamed Deldar ¹ (✉), **Mohamad Maleki** ², **Hasan Yousefi** ³
1*. Assistant Professor, Department of Physical Oceanography, INIOAS, Iran

2. MSc. Student, Department of Physical Oceanography, Faculty of marine Sciences, University of Tarbiat Modares, Iran

3. MSc. Student of Environmental Sciences, Faculty of marine Sciences, University of Tarbiat Modares, Iran

DOI: 10.82447/girs.2025.1119972

e-mail: arekhi1348@yahoo.com

Extended Abstract

Statement of the Problem:

Internal Waves are one of the vital phenomena in the oceans and are usually generated by tidal currents. The high importance of these waves in the fields of acoustics, coastal engineering, and other oceanographic domains has led researchers to pay significant attention to them (2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9).

Internal waves appear as parallel fronts on the sea surface. Changes in the sea surface roughness cause variations in the relative intensity of the satellite image pixels, which can be detected by SAR(Synthetic Aperture Radar) and optical satellite sensors

Purpose: The aim of this study is to measure the characteristics of internal waves using SAR imagery in the Strait of Hormuz, from March 1, 2022, to June 1, 2022 and to calibrate the results obtained from satellite images with field measurements. By reviewing the research background in this area, it was found that no study has been conducted on this, which itself is a reason for the novelty of this research.

Methodology: The study area in this research is the Strait of Hormuz. The significant depth difference in this region makes it suitable for the formation of internal waves. Based on GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) data, to record temperature data from

March 1, 2022, to June 1, 2022, a moored array was installed at the coordinates "26°30' East and "56°42' North at a depth of 60 meters. This moored array consisted of three sensors at depths of 20, 30, and 40 meters, and the data sampling interval of this moored array was 30 seconds. The temperature variations of the moored array data over time indicate that internal waves were formed and propagated in this region.

In this study, Copernicus database C-band SAR images from Sentinel 1 were used to observe internal waves and also extract some characteristics of these waves (35).

From the received images for 2021 and 2022 and their examination, only two images that matched the field measurement date and the study area were selected for more detailed analysis

Results and Discussion:

The data extracted from satellite images in this study include

Wavelength and Crest Length

The distance between the bright and dark spots in the images reveals the crest and trough of the waves, respectively (39).

Propagation Direction

First and last points of the largest arc are connected with a line, and the angle of the line perpendicular to this line relative to north indicates the angle and direction of wave propagation (40).

Propagation Speed

Given that one of the factors in the formation of internal waves is tidal currents, it is possible to extract the horizontal speed of the waves from the images by considering two successive wave fronts (40).

Wave Amplitude

In this study, the method used in the study by Wang et al. (41) was employed to estimate and extract the characteristics of internal waves from satellite images.

Results

Field Data

After examining the calibrated array data, it was found that sensor 3 did not record any data. Therefore, the time series of the two remaining sensors was plotted, and upon applying a Fourier transform to the data, it was determined that the main frequencies in the environment are due to the daily and semi-daily tides.

Internal Waves Detection

On 2022-04-06 at 14:17:15 UTC, the internal wave front occurred at a distance of 7.12 kilometers from the location of the calibrated array.

Wavelength and Crest Length

Two profiles perpendicular to the propagation direction were plotted, and the pixel intensity values of the first profile were 808 (m), and the second profile were 1263 (m). Based on the distances between the dark and light peaks, the average wave length was found to be approximately 265 (m). According to the study by Andy et al. (36) in the vicinity of the Hormuz Strait, the average wave length was estimated to be around 300 (m), which is very close to the values obtained in this study.

Propagation Direction

By connecting the two ends of the arc and the perpendicular line, the propagation direction of the wave packet is towards the northeast at an approximate angle of 46 degrees. Examination of other images in this area also indicates that the predominant direction of internal wave front propagation is towards the northeast.

Wave Amplitude Estimation

By calculating the standard deviation of the data recorded by the sensors, the height of the internal waves can be estimated (2). Accordingly, the data from the calibrated array for a time period of one month and one day on 2022-04-04 were plotted, and the information related to the standard deviation of this data was extracted.

Additionally, Azirpour et al. (43), by measuring temperature and salinity data in the Persian Gulf and the Strait of Hormuz, estimated the depth of the mixed layer or the first layer to be approximately 20 (m), and the second layer to be around 80 (m). Now, with the values of h_1 equal to 20 (m), h_2 equal to 80(m), and D equal to 270(m), and using formula 2, the wave height is approximately 1.36 (m).

Propagation Speed

The wave speed calculation in this study was performed using two methods. In the first method, based on observations of wave packets on different dates in the region, the distance between each pair of wave packets was $L_1=11420$ (m), $L_2=12110$ (m), $L_3=13280$ (m), and $L_4=14730$ (m), respectively. In the second method, by examining the images and the measurement data taken at a distance of 12.7 (m) apart with a 12.5-hour period, the internal wave speed was estimated to be 0.28 (m) per second, which is very close to the value of 0.31 (m) per second obtained by Andy et al, 2021(36).

Conclusion:

In this study, SAR sensor images were collected in the Strait of Hormuz during the period of 2020 to 2021. After applying the necessary corrections, the internal waves were identified, and a calibrated array with three sensors was placed in the study area to measure the field

data. By examining the images, the occurrence of internal waves was observed in one of the images, and since the image was within the measurement range of the calibrated array, the parameters of height, speed, and direction of propagation of the internal waves were extracted from the image and compared with the measurement data. The wave speed calculation in this study was performed using two methods. In the first method, the distance between each pair of wave packets was calculated based on the observed wave packets, and the wave speed was obtained considering the period (T) (second) of these waves.

In the second method, the speed value was estimated by examining the images and the measurement data. The results of this study indicate that the measurement errors for the internal wave height are about %28 and for the propagation speed are about %1.7. In the study by Ruddick and Gargett (44), $6\pm\%$ error for wavelength was obtained, in the research by Li et al. (45), $\pm\%16$ error for speed, in the research by van et al. (46), $\pm\%7$ error for phase speed and density gradient layer (pycnocline) depth, in the research by Zhao et al. (47), $\pm\%23$ error for phase speed, and in the research by Dugan et al. (48), $\pm\%20$ error for wavelength.

These errors can be due to the identification of bright and dark pixels to determine the edges of the internal waves, and by improving this method, higher accuracies can be achieved. Considering the comparison of the methods used in similar studies, we conclude that the obtained results have acceptable accuracy. These studies are applicable for modeling acoustic waves and investigating sea waves. Additionally, due to the high costs of field studies and the difficulty of accessing remote areas, remote sensing methods, despite computational errors, can still be a suitable option for researchers to discover internal waves, especially over a longer period in a specific region.

One of the limitations of this study was the use of a single sensor, which may not have access

to all images from past periods and may sometimes be unusable due to weather conditions. However, it is recommended that interested parties in this field study other optical and thermal sensors using different image processing methods with the use of artificial

intelligence and machine learning, and compare the results with those obtained in this field.

Keywords: Fast-response temperature sensors, moored array, Sentinel-1 satellite, C-band, edge detection patterns, field measurements.

Please cite this article as: Deldar, Hamed, Maleki, Mohamad, Yousefi, Hasan. (2025) . Extraction of internal waves features in the Strait of Hormuz using SAR satellite images. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 16(3): 41-59.