

# عمق سنجی سواحل بندر جاسک با استفاده از تصاویر راداری مأموریت SENTINEL-1

امیر حسین پورمینا<sup>۱\*</sup>، علیرضا آزموده اردلان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد هیدروگرافی - دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی -

دانشگاه تهران  
pourmina@ut.ac.ir

<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران  
ardalan@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت تیر ۱۳۹۹، تاریخ تصویب شهریور ۱۴۰۰)

## چکیده

برآورد عمق آب‌های ساحلی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجش از دور نقش مهمی در مدیریت و بهره‌برداری بهینه از منابع طبیعی دریایی داشته و گام اولیه برای برنامه‌ریزی و همچنین محافظت از آنهاست. در دهه‌های گذشته، به لطف داده‌های تصویری با ویژگی‌های طیفی، مکانی و زمانی مناسب، استفاده از روش‌های عمق‌سنجی ماهواره‌ای در مناطق کم‌عمق افزایش یافته است. اندازه‌گیری‌های مستقیم عمق و پارامترهای فیزیکی آب به کمک روش‌های مستقیم در مناطق ساحلی بسیار پرهزینه بوده و به زمان نسبتاً زیادی نیاز دارد. بنابراین، سنجش از دور با توجه به توانایی بالا در جمع‌آوری اطلاعات در زمان کوتاه و در گستره جغرافیایی وسیع راهکار بسیار مناسبی برای بسیاری از طرح‌های مطالعاتی و مهندسی در مناطق ساحلی خواهد بود. این موضوع در کشوری مانند ایران که دارای گستره وسیع آبی است از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مطالعه سعی شد تا با اجرای الگوریتم تحلیل الگوی طیفی امواج دورا بر روی تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۱، نقشه عمق‌سنجی نواحی ساحلی سواحل دریای عمان منطقه بندر جاسک تهیه شود. برای استخراج دوره تناوب امواج دورا دو روش استفاده شد. در روش اول با استفاده از مدل جهانی امواج ERA-5 طول موج و جهت انتشار آن در لحظه اخذ تصویر بدست آمد و برای عمق‌سنجی استفاده شد که بعد از مقایسه آماری نتایج با داده‌های میدانی عمق‌سنجی مقدار RMSE ۱/۳۶ متر و همبستگی ۷۹/۹٪ را نتیجه داد. در روش دوم استخراج دوره تناوب با استفاده از آنالیز طیفی امواج دورا محدوده آب عمیق انجام شد. بعد از مقایسه آماری نتایج با داده‌های میدانی عمق‌سنجی مقدار RMSE ۱/۱۲ متر و همبستگی ۸۵/۳٪ را نتیجه داد که نشان دهنده مناسب بودن این روش در برآورد عمق آب‌های ساحلی است.

**واژگان کلیدی:** عمق‌سنجی، بندر جاسک، تصاویر راداری Sentinel-1، تجزیه و تحلیل طیفی، امواج دورا

\* نویسنده رابط

## ۱- مقدمه

منابع آبی همواره به عنوان یکی از مسائل حیاتی زندگی بشر مطرح بوده و هست. در این میان، مناطق ساحلی دریاها و دریاچه‌ها همواره از مهم‌ترین منابع آب به منظور نیازهای گوناگون به حساب آمده‌اند. این مناطق در تماس بیشتر با عوامل انسانی هستند و بیشتر بهره‌برداري و کاربردهای بشر مربوط به این مناطق است. همچنین شرایط این منابع عمدتاً بر روی مناطق اطراف از جنبه‌های زیست محیطی، گردشگری، اقتصادی، سیاسی و غیره بسیار دارای اهمیت است. شناسایی ویژگی‌های جغرافیایی و هندسی مناطق ساحلی، گام اولیه و مهمی برای برنامه‌ریزی، بهره‌برداری و همچنین محافظت از این منابع طبیعی است. عمق آب و ویژگی‌های فیزیکی آن در این مناطق می‌تواند برای بسیاری از کاربردها و طرح‌ها نقش حیاتی ایفا نماید.

برآورد عمق آب‌های ساحلی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنش‌ازدور نقش مهمی در مدیریت و بهره‌برداری بهینه از منابع طبیعی دریایی و گام اولیه برای برنامه‌ریزی و همچنین محافظت از آنهاست. در دهه‌های گذشته، به لطف داده‌های تصویری با ویژگی‌های طیفی، مکانی و زمانی مناسب، استفاده از روش‌های عمق‌سنجی ماهواره‌ای در مناطق کم‌عمق افزایش یافته است. اندازه‌گیری‌های مستقیم عمق و پارامترهای فیزیکی آب به کمک روش‌های مستقیم در مناطق ساحلی بسیار پرهزینه بوده و به زمان نسبتاً زیادی نیاز دارد. بنابراین، سنجنش از دور با توجه به توانایی بالا در جمع‌آوری اطلاعات در زمان کوتاه و در گستره جغرافیایی وسیع راهکار بسیار مناسبی برای بسیاری از طرح‌های مطالعاتی و مهندسی در مناطق ساحلی خواهد بود. این موضوع در کشوری مانند ایران که دارای گستره وسیع آبی است از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

تاریخچه تصاویر رادار با روزه مصنوعی<sup>۱</sup> (SAR) به سال ۱۹۵۰ میلادی برمی‌گردد زمانی که وایلی ایده استفاده از آنتنی کوچک را به جای آنتنی بزرگ مطرح کرد [۱]. رادارهای SAR نقش مهمی در گردآوری اطلاعات ایفا می‌کنند. دید رادارهای SAR در شب اغلب به خوبی دید آن‌ها در روز است و نسبت به شرایط آب و هوایی، مستقل

هستند. این ویژگی‌ها، به همراه توان تفکیک بالا سبب می‌شود تا این رادارها در مشاهدات جهانی، زیست محیطی، نظامی و موارد امنیتی مورد توجه قرار گیرند. رادار با روزه مصنوعی (SAR) یک سیستم تصویربرداری با استفاده از امواج مایکروویو است که توانایی ایجاد تصویری با قابلیت تفکیک بالا را با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده توسط آنتنی کوچک داراست [۲].

مطالعات مختلفی برای بدست آوردن عمق آب با استفاده از تصاویر SAR انجام شده است. پلسکاجوسکی<sup>۲</sup> و همکاران [۲] با استفاده هم‌زمان از تصاویر راداری TerraSAR-X و تصاویر ماهواره QuickBird عمق‌یابی انجام داده‌اند. به این صورت که برای عمق‌های بین ۱۰ تا ۱۰۰ متر از تصاویر SAR و برای عمق‌های کمتر از ۲۰ متر از تصاویر QuickBird و بین ۱۰ تا ۲۰ متر از هر دو استفاده کرده‌اند. برای عمق‌های بین ۲۰ تا ۶۰ متر RMSE نسبی ۱۵٪ محاسبه شده است. سانسیوس<sup>۳</sup> و همکاران [۴] با استفاده از تصاویر باند L، ALOS PALSAR در سواحل خلیج ناپل ایتالیا عمق‌یابی انجام داده‌اند که عمق‌های محاسبه شده آن‌ها با چارت‌های رسمی دریایی ایتالیا هم‌خوانی داشته است. رنگا و همکاران [۵] با استفاده از تصاویر COSMO-SkyMed در سواحل خلیج ناپل عمق‌یابی انجام داده‌اند. در این مطالعه در عمق بین ۵ تا ۵۰ متر به دقت ۳/۱ متر رسیده شده است. بیان و همکاران [۶] عمق‌یابی آب‌های کم عمق ساحلی با عمق کمتر از ۱۰ متر را با استفاده از تصاویر SAR باند S سنجنده HJ-1C انجام داده‌اند و با استفاده از رابطه پراکنش خطی عمق آب را بدست آورده‌اند. متوسط خطای مطلق عمق استخراج شده ۰/۸۶ متر و RMSE نسبی ۱۱/۰۵٪ محاسبه شده است و منطقه مورد مطالعه استان‌های Fujian و Xiapu از چین است. بروش<sup>۴</sup> و همکاران [۷] با استفاده از تصاویر TerraSAR-X و رابطه پراکنش خطی و تکنیک دنبال کردن موج از قسمت عمیق تا ساحل، سواحل بندر فیلیپ را عمق‌یابی کرده‌اند که برای ۷۲/۲٪ موارد به خطای کمتر از ۵ متر و برای ۸۹/۲٪ موارد به خطای کمتر از ۷ متر رسیده‌اند.

<sup>۲</sup> Pleskachevsky

<sup>۳</sup> Canisius

<sup>۴</sup> Brusch

<sup>۱</sup> Synthetic Aperture Radar

## ۱-۱- تولید و نمو امواج

از میان عوامل خارجی که باعث ایجاد موج در سطح دریا می‌شوند می‌توان به باد، جاذبه اجرام سماوی (جزر و مد)، حرکت شناورهای سطحی و زیر سطحی، زمین‌لرزه-های دریایی اشاره کرد، که از این میان عامل عمده و اصلی در تشکیل اکثر امواج دریایی جریان باد یا اصطلاحاً امواج باد<sup>۵</sup> بوده که می‌توانند در سطح اقیانوس‌ها، دریاها، دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و یا حتی پهنه‌های آبی کوچک ایجاد شوند. جریان‌های بادی می‌توانند به وجود آورنده امواج بسیار کوچک تا امواج بسیار بلندی باشند [۸].

بر این اساس باد به وجود آورنده، امواجی است که اندازه و اشکال آن‌ها متناسب با عواملی هم‌چون سرعت باد<sup>۶</sup> مدت زمان وزش باد، طول سطح آزاد آب که باد در طول آن می‌وزد<sup>۷</sup>، عرضی از سطح آب که باد آن را احاطه کرده و عمق آب می‌تواند متفاوت باشد. معمولاً اگر دوره تناوب موج بین یک تا پنج ثانیه باشد، هر دو عامل کشش سطحی و جاذبه در تعیین مشخصات موج تأثیرگذار هستند. در دوره تناوب‌های پایین‌تر از محدوده فوق امواج تنها با اتکا بر موئینگی<sup>۸</sup> تشکیل شده و عامل جاذبه در آن قابل صرف نظر کردن است. در دوره تناوب‌های بالاتر از محدوده فوق امواجی تشکیل خواهد شد که اثر کشش سطحی در آن قابل صرف نظر کردن بوده و تنها جاذبه در تعیین مشخصات موج موثر است. این امواج به "امواج ثقلی" خوانده شده و همواره در سطح آب‌های آزاد تشکیل می‌شوند. از این رو به آن‌ها "امواج ثقلی سطحی" می‌گویند [۸].

ساده‌ترین و اغلب مفیدترین تئوری در برگیرنده خصوصیات کینماتیکی و دینامیکی امواج ثقلی سطحی عبارت است از تئوری موج دو بعدی دامنه کوتاه یا رابطه پراکندگی خطی که اولین بار توسط ایری<sup>۹</sup> ارائه شد [۸].

## ۱-۲- امواج دورا

امواج دورا نوعی از امواج ثقلی سطحی محسوب می‌شوند که در اثر نیروی باد در موقعیت‌های بسیار دورتر از منطقه مورد مطالعه تشکیل شده و پیش از نزدیک شدن به

پروژه‌های عمقیابی میدانی بسیار پرهزینه هستند زیرا نیازمند افراد متخصص و کشتی و تجهیزاتی مانند اکوساندر تک‌بیم یا مالتی‌بیم، ساید اسکن سونار، گیرنده سیستم تعیین موقعیت جهانی تفاضلی<sup>۱</sup> و حسگر حرکتی هستند. همچنین پدیده‌های آب و هوایی مثل طوفان و پدیده‌های انسانی مثل لایروبی سبب ضرورت به‌روزرسانی چارت‌های دریایی و عملیات هیدروگرافی می‌شوند. خروجی این مطالعه عمق‌سنجی آب‌های نواحی ساحلی است که برای مطالعات کم‌هزینه و البته مناطق کم‌عمق قابل استفاده است که تمرکز اصلی در اینگونه تحقیقات بررسی ساختار ژئومورفولوژی بستر آب و نحوه تغییرات آن و یا ارائه یک منطقه‌بندی کلی از تغییرات عمق آب به جهت مدیریت و بهره‌برداری بهینه از منابع طبیعی دریایی و گام اولیه برای برنامه‌ریزی و همچنین محافظت از آن‌ها است.

در این مطالعه نقشه عمق‌سنجی نواحی ساحلی با استفاده از تصاویر راداری مأموریت سنتینل-۱<sup>۲</sup> برای سواحل دریای عمان منطقه بندر جاسک تهیه شده است. عمق‌یابی با استفاده از تصاویر رادار با روزه مصنوعی (SAR) بر اساس شکست امواج ثقلی سطحی<sup>۳</sup> هنگام انتشار به سمت ساحل است. به این صورت که می‌توان یک رابطه مستقیم بین الگوی انتشار امواج دورا<sup>۴</sup> و عمق آب برقرار کرد؛ در نتیجه بر خلاف روش جریان جزر و مدی می‌توان عمق آب را به طور مطلق محاسبه کرد. در این روش می‌توان از هر تصویر به شرط وجود امواج دورا در زمان اخذ تصویر برای عمق‌یابی استفاده کرد که در این مطالعه این روش برای عمق‌یابی استفاده کرد. تنها محدودیت ذاتی این روش عدم امکان رسیدن به توان تفکیک مکانی بالا با قابلیت جایگزین کامل عملیات هیدروگرافی معمول است. با این حال این روش می‌تواند به عنوان یک ابزار قوی برای ارزیابی به‌روزرسانی چارت‌های دریایی مدنظر قرار گیرد. به علاوه با وجود هزاران کیلومتر خطوط ساحلی کشور، تکنیکی که بتواند اولویت مناطق نیازمند به‌روزرسانی چارت‌های دریایی را مشخص سازد می‌تواند باعث صرفه‌جویی بسیار در هزینه و زمان گردد. از دید نظامی این تکنیک می‌تواند اطلاع اولیه‌ای از عمق برای مانورهای دریایی در مناطق استراتژیک و حساسی که دسترسی به اطلاعات عمق وجود ندارد فراهم آورد.

<sup>۵</sup> Wind Waves  
<sup>۶</sup> Wind Speed  
<sup>۷</sup> Fetch  
<sup>۸</sup> Capillary Waves  
<sup>۹</sup> Airy

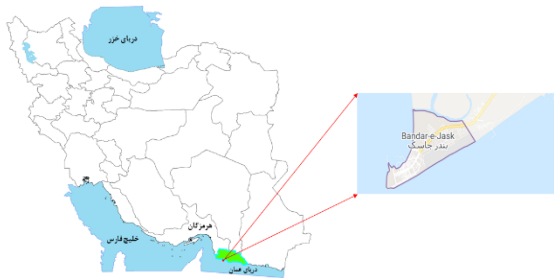
<sup>۱</sup> DGPS  
<sup>۲</sup> Sentinel-1  
<sup>۳</sup> Surface Gravity Wave  
<sup>۴</sup> Swell Wave

محدوده ساحلی مسافت زیادی را در آب عمیق می‌پیمایند. جهت انتشار این امواج لزوماً مشابه جهت باد محلی نیست. این سری از امواج ثقلی سطح برخلاف امواج ناشی از باد که از باد محلی ایجاد می‌شوند، از سیستم‌های آب‌وهوایی دور دست به وجود می‌آیند جایی که باد در طول زمان به مساحت وسیعی از سطح آب می‌وزد که این مهم‌ترین تفاوت بین امواج دورا و امواج باد محلی است چون درحالی که امواج دورا از سیستم آب و هوایی به وجود آورنده خود دور می‌شوند، امواج باد محلی هم‌چنان تحت تأثیر میدان باد سازنده خود قرار دارند. تفاوت دیگر این دو موج در طول موج آن‌هاست. امواج دورا امواجی با طول موج بلند هستند درحالی که امواج باد طول موجی کوتاه دارند. امواج دورا محدوده فرکانسی و جهت باریکتری نسبت به امواج باد محلی دارند زیرا این امواج مسافتی طولانی را طی کرده و جهت و شکل یکسانی پیدا کرده‌اند. در نتیجه امواج دورا برای عمق‌یابی مناسب هستند و ما باید در عمق‌یابی بین این دو دسته امواج تفاوت قائل شویم [۹].

## ۲- منطقه مورد مطالعه

دریای عمان به علت ورود امواج دورا از سمت اقیانوس هند به عنوان یک منطقه مناسب برای عمق‌سنجی با استفاده از الگوی طیفی امواج دورا است. به همین علت منطقه مورد مطالعه را در نزدیکی بندر جاسک انتخاب کردیم. بندر جاسک از شهرهای استان هرمزگان است که سه طرف آن را آب‌های ساحلی احاطه کرده و آن را به صورت یک شبه‌جزیره درآورده است. شهر از دو سوی شرقی و غربی به خلیج جاسک می‌پیوندد و از سوی شمال شرقی، به مناطق نظامی متصل است. شکل ظاهری این شهر به صورت طولی بوده و عرض آن بسیار کم است. طول سواحل استان هرمزگان ۲۲۳۸ کیلومتر بوده که سبب شده تا این استان طولانی‌ترین مرز آبی در کشور را داشته و شهرستان جاسک به عنوان پهناورترین شهرستان استان، دارای ۳۲۰ کیلومتر خط ساحلی است. شهرستان جاسک در نزدیکی دریای عمان و ۳۲۰ کیلومتری شرق بندرعباس، مرکز استان هرمزگان، واقع است. سواحل مکران و جاسک به آب‌های آزاد و اقیانوس هند مشرف بوده و این فضا در توسعه ملی، تعاملات اقتصادی فراملی و منطقه‌ای تاکنون نقش کم‌رنگی داشته است. برخی از طرح‌ها و پروژه‌هایی که در

راستای توسعه جاسک و سواحل مکران به تصویب رسیده است ایجاد منطقه انرژی جاسک و تبدیل آن به قطب انرژی خاورمیانه، پروژه انتقال گاز طبیعی از طریق خط لوله به عمان، احداث مخازن ذخیره نفت خام و گاز، احداث پالایشگاه، احداث مجتمع پتروشیمی، احداث نیروگاه برق، احداث فرودگاه جاسک، توسعه حمل و نقل جاده‌ای و ریلی در امتداد ساحل (بندرعباس- جاسک- چابهار)، ایجاد شهرک صنعتی ایران و چین در جاسک و ایجاد منطقه آزاد جاسک است. همچنین جاسک با توجه به برنامه‌های توسعه‌ای سواحل مکران بالاخص بندر جاسک و افزایش تردد انواع شناورها در منطقه، مهم‌ترین و پرترددترین منطقه صیادی کشور است. لذا، داشتن اطلاعات قابل اطمینان و به‌روز از عمق سواحل بندر جاسک از اهمیت بالایی برخوردار است. شکل (۱) موقعیت این بندر را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

## ۳- داده‌های مورد استفاده

### ۳-۱- تصاویر سنجش‌ازدور

مأموریت سنتینل-۱ اولین مأموریت از پنج مأموریتی است که آژانس فضایی اروپا<sup>۱</sup> (ESA) تحت برنامه کپرنیکوس طراحی کرده است. ماهواره سنتینل-۱A در آوریل ۲۰۱۴ و ماهواره سنتینل-۱B در آوریل ۲۰۱۶ با اختلاف فاز مداری ۱۸۰ درجه در مدار قرار گرفت. این مأموریت‌ها با بهره‌گیری از یک سیستم رادار با روزنه مصنوعی (SAR) در باند C، عملکردی مستقل از شرایط آب و هوایی و شبانه‌روزی دارند، که مزیت این تصاویر بر تصاویر نوری<sup>۲</sup> به شمار می‌آید [۲ و ۱۰].

این مأموریت در چهار حالت منحصربه‌فرد با حداقل توان تفکیک ۵ متر و حداکثر عرض برداشت<sup>۳</sup> ۴۰۰

<sup>۱</sup> European Space Agency

<sup>۲</sup> Optic

<sup>۳</sup> Wide Swath

انتخاب شد. شکل (۲)، پوشش مکانی تصویر مأموریت سنتینل-۱ از بندر جاسک را نشان می‌دهد.



شکل ۲- تصویر مأموریت سنتینل-۱ اخذ شده در تاریخ ۲۶ مرداد سال ۱۳۹۴ و پوشش مکانی آن از بندر جاسک

### ۳-۳- داده‌های هیدروگرافی

در این مطالعه برای اعتبارسنجی و ارزیابی دقت عمق-های برآورد شده، نقشه عمق آب ساحلی بندر جاسک در مقیاس  $\frac{1}{5000}$  از سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح کشور (<http://www.ngo-iran.ir>) دریافت و مورد استفاده قرار گرفت. عمق‌های اندازه‌گیری شده نسبت به چارت دیتوم بوده و در نتیجه باید تصحیح تراز سطح آب بر روی عمق-ها اعمال شود. بر این اساس از داده‌های جمع‌آوری شده توسط یک نوسان نگار<sup>۷</sup> مستقر در بندر جاسک (عرض جغرافیایی  $25^{\circ}39'$  و طول جغرافیایی  $57^{\circ}39'$ ) برای بررسی تغییرات تراز سطح آب و محاسبه مقدار تراز سطح آب در زمان تصویربرداری استفاده شد. در نهایت یک شبکه ۳۰ در ۶۸ از نقاط عمق‌سنجی با فاصله ۸۰ متر از یکدیگر انتخاب شد که از عمق ۱۰ متری تا ۲۵ متری ساحل جاسک را پوشش می‌داد.

### ۴- روش تجزیه و تحلیل طیفی امواج دورا

زمانی که توده‌های آب در جهت قائم توسط نیروئی مانند باد، عبور یک شناور، جابه‌جایی بستر دریا در نواحی کم‌عمق در اثر زلزله و یا جاذبه ثقیلی خورشید و ماه دچار اغتشاش می‌شود، نیروی ثقل در راستای حفظ تعادل سطح عمل می‌کند. برگشت سطح به حالت اولیه همراه با اینرسی همراه بوده و باعث نوسانات سطح حول وضعیت تعادل شده و یک موج روی سطح آب تولید خواهد شد. این

کیلومتر عمل می‌کند. حالت برداشت IW با یک توان تفکیک هندسی مناسب به طور پیش فرض برای حصول داده از نواحی خشکی طراحی شده است. حالت برداشت EW با توان تفکیک هندسی پایین و عرض برداشت بزرگ، برای پایش نواحی ساحلی و پوشیده از یخ قطبی که نیازمند پوشش وسیع و زمان عبور مجدد<sup>۱</sup> کوتاه هستند، مناسب است. حالت برداشت WV با توان تفکیک هندسی بالا و عرض برداشت پایین به صورت یک‌درمیان با دو زاویه فرود<sup>۲</sup> متفاوت با فاصله ۱۰۰ کیلومتر برداشت می‌کند. این حالت در پایش امواج اقیانوسی کاربرد دارد [۲ و ۱۰].

داده‌های این مأموریت در سطوح صفر (Level-0)، یک (Level-1)، و دو (Level-2) پردازش شده‌اند. داده‌های سطح صفر داده‌های خامی هستند که مبنای پردازش‌های سطح بالاتر قرار می‌گیرند. داده‌های سطح یک به دو فرمت ارائه می‌شوند. فرمت SLC<sup>۳</sup> شامل داده‌های ژئورفرنس شده و تک منظر در هندسه مایل است [۲].

فرمت GRD<sup>۴</sup> شامل داده‌های SAR با پردازش چندمنظری و تبدیل شده از هندسه مایل به هندسه زمینی با استفاده از یک مدل بیضوی زمین مبنا است. در این نوع داده‌ها علاوه بر کاهش نویز لکه‌ای و توان تفکیک مکانی، اطلاعات فاز وجود نداشته و فقط حاوی اطلاعات دامنه هستند. داده‌های سطح دو شامل مؤلفه‌هایی برای مطالعه وزش باد و وضعیت امواج در سطح اقیانوس هستند [۲ و ۱۰].

امواج دورا بر روی دامنه تصویر SAR مدولاسیون می‌شوند [۱۵] در نتیجه تصویر دامنه برای عمق‌سنجی بر مبنای الگوی طیفی امواج دورا کافی است. به این دلیل برای عمق‌سنجی از تصاویر GRD مأموریت سنتینل-۱ در (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)

در پلاریزاسیون<sup>۵</sup> VV استفاده شد. برای انتخاب تصویر مناسب برای عمق‌سنجی باید به وضعیت امواج دورا و باد در لحظه تصویربرداری توجه داشت. قله امواج دورا در دریای عمان در فصل تابستان و در ماه‌های آگوست و ژوئیه<sup>۶</sup> به اوج می‌رسد [۱۱ و ۱۲]. در نتیجه تصویر انتخابی در تاریخ ۱۷ آگوست ۲۰۱۵ معادل ۲۶ مرداد ۱۳۹۴

<sup>۱</sup> Revisit Time  
<sup>۲</sup> Incidence Angle  
<sup>۳</sup> Single Look Complex  
<sup>۴</sup> Ground Range Detected  
<sup>۵</sup> Polarization  
<sup>۶</sup> July

<sup>۷</sup> Tide Gauge

نوسان، سطح آب نقاط مجاور خود را مغشوش کرده و انرژی حاصل از این نیروها، به نوبه خود به صورت موج منتقل شده و باعث انتشار موج به طرف جلو خواهد شد تا به موانعی نظیر ابنیه یا خط ساحلی رسیده و منعکس و یا مستهلک شود [۸].

با ورود یک رشته امواج به آب‌های کم‌عمق، تغییرات بسیاری بر امواج سطح آب ایجاد می‌شود. اگر تلفات یا افزایش انرژی قابل صرف نظر کردن باشد، از مشاهدات در خواهیم یافت که امواج در ناحیه شکست در ساحل از امواج فراساحلی مرتفع‌تر است. تغییرات دیگری نیز از جمله کاهش در طول موج و تغییر در جهت امواج در نقاط کم-عمق‌تر اتفاق می‌افتند که هر دو به واسطه تغییر در توپوگرافی و شکل بستر بوده که البته این تغییرات به آسانی از ساحل قابل مشاهده نیستند، اما در تصاویر هوایی به طور واضح قابل تشخیص اند [۸].

#### ۴-۱- رابطه پراکندگی خطی

یکی از ساده‌ترین و اغلب مفیدترین تئوری‌های مطرح شده در مکانیک امواج آب تئوری موج دوبعدی دامنه کوتاه یا تئوری موج خطی است که اولین بار توسط ایری بیان شد. این تئوری، معادلات لازم برای تعریف اکثر خصوصیات سینماتیکی و دینامیکی امواج ثقلی سطح را ارائه می‌دهد. در این نظریه با توجه به این مسئله که در آب‌های کم‌عمق به دلیل برهم‌کنش امواج با بستر، بخشی از انرژی امواج هدر رفته و امواج انتقالی در این آب‌ها توان کمتری از آب‌های عمیق خواهند داشت مطرح می‌شود. در این میان زمانی که امواج به سمت نواحی کم‌عمق ساحلی سرازیر می‌شوند، طول موج با ارتفاع امواج مطابقت نداشته و امواج دچار شکست می‌شوند. این شکست امواج، افزایش ناگهانی مشخصات امواج و ایجاد ناهمواری‌های سطحی آب را در پی خواهد داشت. بر طبق قانون بقای انرژی و به وسیله تئوری موج خطی ایری می‌توان رابطه‌ای کمی بین امواج سطحی و عمق آب برقرار کرد. تئوری امواج خطی ایری فرض می‌کند؛ که نوسانات دارای تغییرات جزئی در دامنه هستند. به این معنا که ارتفاع امواج نسبت به عمق آب و طول موج بسیار کوچک‌تری دارند [۱۳].

رابطه (۱)، نشان‌دهنده معادله اساسی تئوری موج خطی<sup>۱</sup> بوده که به رابطه پراکندگی خطی نیز معروف است:

$$\omega^2 = g k \tanh(kh) \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (2)$$

$k$  عدد موج است که برابر است با:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3)$$

همچنین  $g$  شتاب گرانش،  $h$  عمق آب،  $T$  دوره تناوب موج،  $\lambda$  طول موج است [۱۳].

رابطه پراکندگی خطی فقط در آب‌های با عمق متوسط

یعنی  $\frac{L}{20} < h < \frac{L}{2}$  (طول موج) برقرار است. طول موج

امواج دورا در قسمت عمیق ثابت است و هنگامی که این امواج از آب عمیق وارد آب با عمق متوسط می‌شوند فرکانس زاویه‌ای موج ثابت مانده و ارتفاع موج افزایش و حداکثر طول موج شروع به کاهش و حداکثر جهت جریان به سمت گردایان عمق منحرف می‌شود.

می‌توان رابطه پراکندگی خطی را در آب با عمق متوسط برای کاربرد عمق‌یابی به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$h = \frac{L}{2\pi} a \tanh\left(\frac{2\pi L}{T^2 g}\right) \quad (4)$$

با توجه به رابطه (۴) در می‌یابیم که با توجه به اینکه عبارت داخل  $a \tanh$  باید کوچک‌تر از یک باشد در نتیجه  $\left|\frac{2\pi L}{T^2 g}\right| < 1$ . از این نکته در می‌یابیم که برای هر موج دورا یک حد پایین از دوره تناوب وجود دارد که از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$T_{min} = \sqrt{\frac{2\pi L}{g}} \quad (5)$$

شکل (۳ و ۴) رابطه بین طول موج دورا، دوره تناوب موج دورا و عمق آب را برای طول موج‌های مختلف

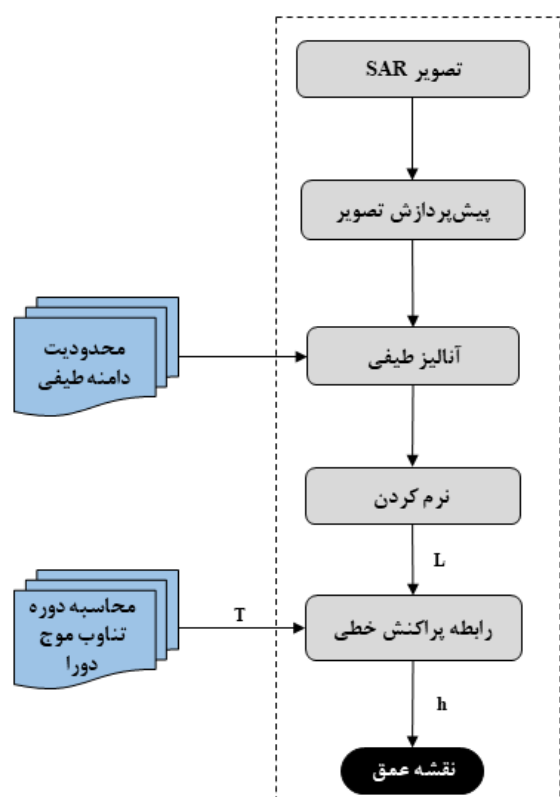
<sup>۱</sup> Linear Wave Theory

## ۲-۴- روش عمق‌سنجی بر مبنای الگوی طیفی امواج دورا

در تعیین مجهولات در تمامی مسائلی که با استفاده از مدل‌سازی ریاضی قابل حل هستند نیازمند برخی مفروضات است: فرض اساسی این روش آن است که فرکانس امواج انتشاریافته از آب‌های عمیق به سمت آب‌های کم‌عمق ساحلی ثابت مانده و تغییری نمی‌کند. لذا تخمین صحیح فرکانس، یکی از مسایل کلیدی این روش است.

فرض دیگر آن است که امواج غالب انتشاریافته از آب‌های عمیق به سمت آب‌های کم‌عمق، دارای عددهای موج متناوب هستند. بر همین اساس روش تخمین عمق آب‌های کم‌عمق ساحلی با استفاده از تحلیل طیفی تصاویر راداری، به سه مرحله تفکیک شده است. اولین مرحله تجزیه و تحلیل طیفی امواج و استخراج فرکانس غالب و دومین مرحله تعیین مقدار طول موج یا عدد موج برای نقاط مختلف در یک تصویر است.

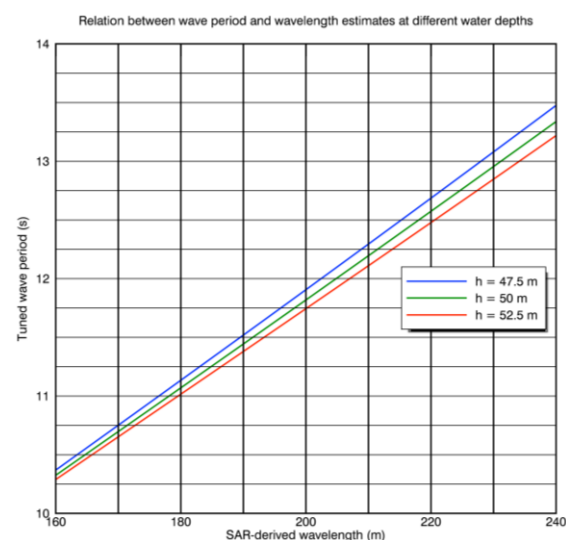
مراحل عمق‌سنجی بر مبنای الگوی طیفی امواج دورا را می‌توان در شکل (۵) مشاهده کرد:



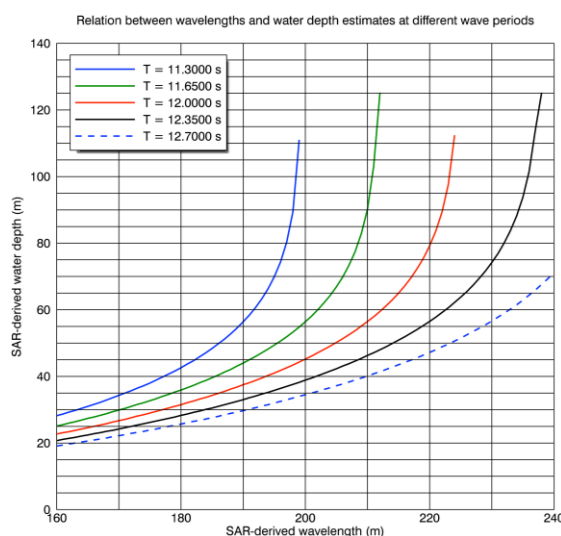
شکل ۵- فلوجارت الگوریتم عمق‌سنجی بر مبنای الگوی طیفی امواج دورا

موج دورا و دوره تناوب‌های مختلف موج دورا نشان می‌دهد. شکل (۳) نشان می‌دهد که تغییرات ۱۰ متری در طول موج منجر به تغییر ۰٫۳۵ ثانیه‌ای در دوره تناوب موج می‌شود.

شکل (۴) بلندترین میزان ممکن برای طول موج موج دورا اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد که بستگی به دوره تناوب موج دورا دارد. هرچه دوره تناوب موج دورا کم‌تر باشد بلندترین میزان ممکن برای طول موج دورا کوتاه‌تر است. مقدار مطلق شیب در طول موج دورای بلند افزایش می‌یابد که منجر به خطای زیادی در برآورد عمق در دوره تناوب موج دورا شده به عبارتی دیگر خطای کوچک در طول موج دورا منجر به خطای زیادی در برآورد عمق می‌شود.



شکل ۳- منحنی‌هایی که تغییرات دوره تناوب موج را به عنوان تابعی از طول موج مشتق شده از عمق آب نشان می‌دهند [۱۲]



شکل ۴- منحنی‌هایی که تغییرات برآورد عمق آب را به عنوان تابعی از طول موج و دوره تناوب موج نشان می‌دهند [۱۲]

### ۳-۴- انتخاب مکان مناسب برای عمق‌سنجی بر مبنای الگوی طیفی امواج دورا

در انتخاب مکان مناسب برای عمق‌یابی بر مبنای الگوی طیفی امواج دورا باید به این نکته توجه کرد که این رابطه فقط در قسمت آب با عمق متوسط یعنی  $\frac{L}{20} < h < \frac{L}{2}$  برقرار است. در نتیجه عمق‌یابی با استفاده از الگوی امواج دورا فقط در ناحیه آب با عمق متوسط انجام می‌شود. در نتیجه با داشتن اطلاع اولیه از طول موج امواج دورا از طریق بویه‌های نوسان نگار یا مدل‌های جهانی امواج، منطقه‌ای که عمق آن در بازه مناسب عمق‌سنجی با این روش است را می‌توان انتخاب کرد.

### ۴-۴- انتخاب تصویر SAR مناسب برای عمق-سنجی بر مبنای الگوی طیفی امواج دورا

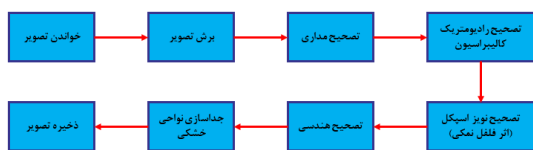
انتخاب تصویر مناسب برای عمق‌یابی اولین گام برای عمق‌سنجی بر مبنای الگوی طیفی امواج دورا است. برای انتخاب تصویر مناسب باید موارد زیر در نظر گرفته شود:

۱- سرعت باد در لحظه اخذ تصویر: در تکنیک عمق-سنجی بر مبنای الگوی طیفی امواج دورا باید الگوی امواج دورا به شکل واضح بر روی تصویر مشخص بوده و امکان تشخیص امواج ناشی از باد محلی و امواج دورا ممکن باشد. در نتیجه باید سرعت باد محلی در منطقه عمق‌یابی کمتر از ۶ متر بر ثانیه باشد تا بتوان امواج دورا را از امواج باد محلی تشخیص داد. برای استخراج سرعت باد محلی می‌توان از اطلاعات بویه در محل عمق‌یابی یا از مدل‌های جهانی باد تهیه شده از تصاویر ماهواره‌ای استفاده کرد [۱۴].

۲- وضعیت امواج دورا در لحظه اخذ تصویر: برای عمق‌سنجی بر مبنای الگوی طیفی امواج دورا این امواج باید به شکل واضح بر روی تصویر مدوله شوند. در نتیجه در لحظه اخذ تصویر باید امواج دورا قوی و غالب بر امواج ناشی از باد باشند. برای این منظور باید تصویر در ماه‌های اوج امواج دورا اخذ شده باشد که معمولاً در فصل تابستان قوی‌ترین امواج دورا شکل می‌گیرد و ارتفاع آن‌ها به بیش از ۰/۵ متر می‌رسد که در نتیجه به شکل واضحی بر روی تصویر مدوله خواهند شد [۱۴].

### ۴-۵- پیش‌پردازش تصویر

از نرم افزار SNAP<sup>۱</sup> ارائه شده توسط آژانس فضایی اروپا (ESA) برای پیش‌پردازش تصویر سنتینل-۱ استفاده شد. پیش‌پردازش تصویر شامل ۶ مرحله به شرح زیر است: (۱) پس از خواندن دامنه تصویر اخذ شده در نرم افزار، مناطقی که امواج دورا به شکل واضح مشخص هستند به منظور کاهش حجم تصویر و تسریع در پردازش با یک پنجره مستطیلی برش داده می‌شوند. (۲) سپس، تصحیح مداری تصویر سنتینل-۱ با استفاده از فایل‌های مداری آن‌ها انجام می‌شود. (۳) باندهای  $\sigma_0$  تصویر سنتینل-۱ از طریق اعمال تصحیح رادیومتریک کالیبراسیون ایجاد می‌شود. (۴) از فیلتر میانه<sup>۲</sup> با اندازه پنجره ۵×۵ برای حذف نویزهای اسپکل موجود در تصویر (اثر فلغل نمکی) استفاده می‌شود. (۵) تصحیح هندسی با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی<sup>۳</sup> SRTM 3Sec انجام شده و (۶) در نهایت، برای اجرای درست الگوریتم، مناطق خشکی از تصویر تفکیک می‌شوند. مراحل پیش‌پردازش در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶- مراحل پیش‌پردازش تصویر.

### ۴-۶- آنالیز طیفی امواج دورا با استفاده از تبدیل فوریه

تبدیل فوریه روی بخش کوچکی از تصویر پیرامون یک نقطه اعمال می‌شود و سپس طول موج و جهت انتشار حداکثر فضای طیفی که موج دورای غالب را نشان می‌دهد از روابط (۶ و ۷) زیر بدست می‌آید [۷]:

$$L = \frac{2\pi}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \quad (۶)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{k_y}{k_x} \right) \quad (۷)$$

<sup>۱</sup> Sentinels Application Platform

<sup>۲</sup> Median Filter

<sup>۳</sup> Digital Elevation Model



## ۵- شاخص‌های ارزیابی نتایج

در پژوهش حاضر به منظور ارزیابی نتایج، از شاخص‌های متوسط خطای مطلق<sup>۱</sup> (MAE) (رابطه (۱۰))، متوسط ریشه میانگین مربعات<sup>۲</sup> (RMSE) (رابطه (۱۱)) به عنوان شاخص معرفی کننده دقت نتایج و همچنین ضریب همبستگی<sup>۳</sup> (R) (روابط (۱۲ و ۱۳)) به عنوان شاخص معرف میزان ارتباط مستقیم (خطی) نتایج و داده‌های مرجع ارزیابی، استفاده شد. معادلات ریاضی این سه شاخص به صورت زیر است:

$$MAE_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n} \quad (10)$$

$$RMSE_{x,y} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (11)$$

$$Cov(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n} \quad (12)$$

$$R = \frac{Cov(x,y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (13)$$

در روابط فوق:  $x_i$  نتایج حاصل و  $\bar{x}$  میانگین آن،  $y_i$  داده‌های مرجع و  $\bar{y}$  میانگین آن،  $n$  تعداد داده‌ها،  $\sigma_x$  انحراف معیار نتایج،  $\sigma_y$  انحراف معیار داده‌های مرجع و  $Cov(x,y)$  کوواریانس دو سری داده است. ضریب همبستگی مقادیری بین -۱ تا +۱ را اختیار می‌کند که هرچه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد، همبستگی مستقیم بیشتری میان دو سری داده را معرفی خواهد کرد. از طرفی علامت این پارامتر، میزان ارتباط (مستقیم یا معکوس) را نشان می‌دهد. همچنین از پارامتر RMSE نسبی<sup>۴</sup> (نسبت مقدار RMSE به میانگین داده‌های میدانی) نیز برای ارزیابی و مقایسه نتایج استفاده شد که مقدار آن هرچه کوچک‌تر باشد، بهتر است.

در روابط بالا،  $L$  طول موج،  $\phi$  جهت انتشار موج،  $k_x$  و  $k_y$  مختصات موج غالب در فضای فرکانس هستند. در نتیجه برای هر نقطه می‌توان با داشتن  $L$  و  $T$  با استفاده از رابطه پراکندگی خطی عمقیابی کرد.

برای تشخیص حداکثر موج غالب در فضای فرکانس می‌توان با اعمال فیلتر نرم‌کننده در فضای طیفی قبل از استخراج طول موج و جهت انتشار آن دقت محاسبه آن‌ها را بهبود بخشید. اما معمولاً بعد از اعمال فوریه چند مقدار حداکثر بر روی فضای طیفی وجود دارد. این امر به دلیل وجود تلاطم‌های ناشی از جریان باد محلی و جریان‌های گردابی است، در نتیجه باید فیلترهایی را در فضای فرکانس برای استخراج طول موج و جهت انتشار اعمال کرد. بر همین اساس دو شرط زیر (روابط (۸) و (۹)) را در فضای فرکانس اعمال می‌کنیم تا با محدود کردن فضای جستجو بتوانیم حداکثر مطلوب را شناسایی کنیم [۴]:

$$L_{min} \leq \frac{1}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \leq L_{max} \quad (8)$$

$$\phi_{min} \leq \phi \leq \phi_{max} \quad (9)$$

که  $L_{max}$  و  $L_{min}$  حداقل و حداکثر طول موج امواج دورا در منطقه عمقیابی است که می‌توان با استفاده از اطلاع از مقدار اولیه عمق و دوره تناوب در منطقه عمق-یابی برآورد کرد.

## ۴-۷- نرم کردن داده‌ها

بعد از محاسبه طول موج و جهت انتشار امواج دورا به صورت یک شبکه منظم برای از بین بردن خطاهای ناشی از نویز تصویر که در بعضی از نقاط شبکه ظاهر می‌شود می‌توان قبل از استفاده از طول موج و جهت انتشار امواج دورا برای عمقیابی، ابتدا با فیلترهای نرم‌کننده، خطا در این نقاط را کاهش داد. برای این منظور از یک فیلتر میانه بر روی ماتریس طول موج و زاویه انتشار موج اعمال می‌شود سپس یک فیلتر میانگین‌گیر در هر سطر ماتریس‌ها اعمال می‌شود. به این صورت، ثبات عمقیابی این روش افزایش می‌یابد.

<sup>۱</sup> Mean Absolute Error

<sup>۲</sup> Root Mean Square Error

<sup>۳</sup> Correlation Coefficient

<sup>۴</sup> Relative RMSE

## ۶- عمق‌سنجی با استفاده از رابطه پراکنش خطی

برای عمق‌سنجی با استفاده از رابطه پراکنش خطی نیاز به اطلاع از دوره تناوب امواج دورا در منطقه عمق-سنجی در لحظه اخذ تصویر داریم. در این پژوهش، از دو روش برای استخراج دوره تناوب امواج دورا استفاده کرده و این دو روش را از نظر دقت عمق‌سنجی مقایسه می‌کنیم.

### ۶-۱- استخراج دوره تناوب با استفاده از مدل جهانی امواج ERA-5

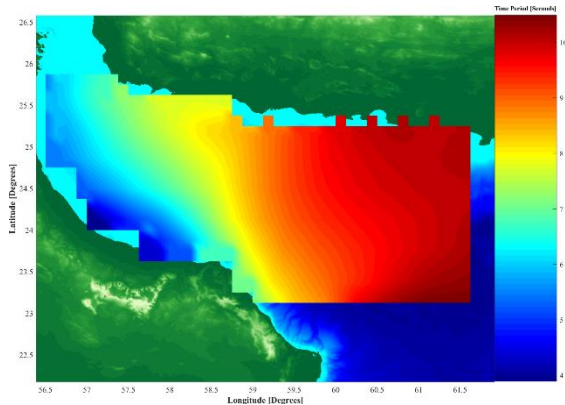
مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت جوئی<sup>۱</sup> (ECMWF) (<https://www.ecmwf.int/>) منابعی از داده‌های تقریباً روزآمد هواشناسی را در اختیار پژوهشگران قرار داده است که میزان خطای آن در مقایسه با داده‌های ایستگاه‌های زمینی در بسیاری از نقاط جهان اندک و قابل چشم‌پوشی است و به همین علت می‌توان از این داده‌ها در کنار داده‌های زمینی و یا حتی در حکم جایگزینی برای داده‌های مشاهده‌ای در مناطق بدون ایستگاه استفاده کرد. کیفیت و اعتبار این داده‌ها برای نقاط گوناگون جهان با روش‌های متنوعی مانند هماهنگی با نتایج مدل‌های پیچیده جوئی کنترل شده است.

جدیدترین مدل باز تحلیل شده مرکز اروپایی پیش-بینی‌های میان‌مدت جوئی ERA-5 است که جایگزین مدل EAR-Interm شده است. این مدل پارامترهای جوی و امواج را به صورت یک ساعته در اختیار قرار می‌دهد.

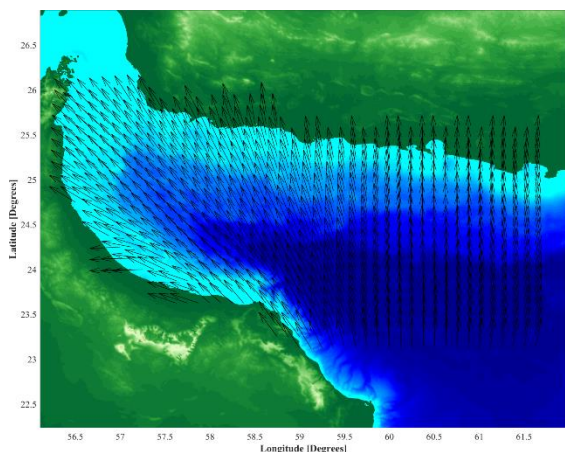
در این مطالعه، با استخراج دوره تناوب و جهت انتشار امواج دورا در منطقه جاسک از مدل ERA-5 این مقادیر را برای جایگذاری در رابطه پراکنش خطی برای عمق‌سنجی استفاده کرده‌ایم. شکل (۷)، مقادیر دوره تناوب امواج دورا در منطقه جاسک در لحظه اخذ تصویر از مدل ERA-5 و شکل (۸)، جهت انتشار امواج دورا در منطقه جاسک در لحظه اخذ تصویر از مدل ERA-5 را نشان می‌دهد.

با توجه به مدل ERA-5 دوره تناوب امواج دورا در منطقه عمق‌سنجی ۷/۱ ثانیه و جهت انتشار آن ۱۳۷ درجه است. با توجه به این پارامترها عمق‌سنجی در این

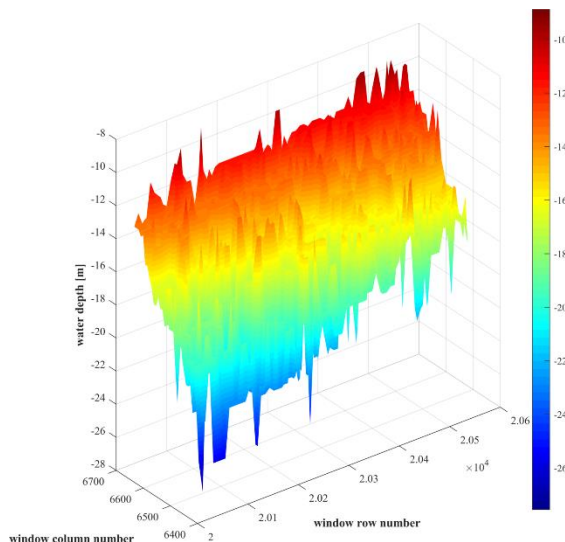
منطقه انجام شد که شکل (۹)، نقشه عمق‌سنجی حاصل از روش تحلیل طیفی امواج دورا با استفاده از مدل ERA-5 و شکل (۱۰)، نقشه عمق‌سنجی حاصل از داده‌های میدانی را نشان می‌دهد.



شکل ۷- مقادیر دوره تناوب امواج دورا در منطقه جاسک در لحظه اخذ تصویر از مدل ERA-5



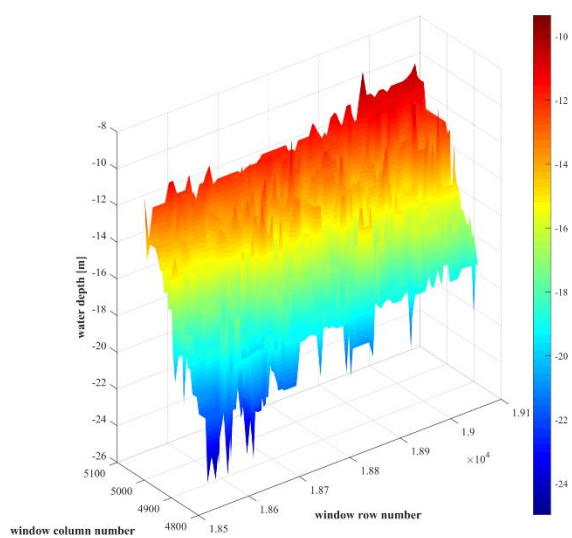
شکل ۸- جهت انتشار امواج دورا در منطقه جاسک در لحظه اخذ تصویر از مدل ERA-5



شکل ۹- نقشه عمق‌سنجی حاصل از روش تحلیل طیفی امواج دورا با استفاده از مدل ERA-5

<sup>۱</sup> European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

سایر نقاط استفاده می‌کنیم. با استفاده از این روش، دوره تناوب امواج دورا ۷,۲۳۲ ثانیه و جهت انتشار امواج دورا ۱۴۰ درجه محاسبه شد. با توجه به این پارامترها عمق-سنجی در این منطقه انجام شد که شکل (۱۱) نقشه عمق‌سنجی حاصل از روش تحلیل طیفی امواج دورا با استفاده از آنالیز طیفی امواج دورا محدوده آب عمیق را نشان می‌دهد.



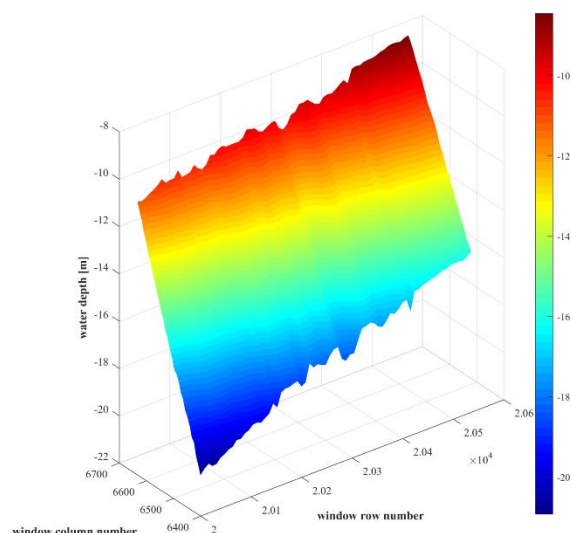
شکل ۱۱- نقشه عمق‌سنجی حاصل از روش تحلیل طیفی امواج دورا با استفاده از آنالیز طیفی امواج دورا محدوده آب عمیق

پس از عمق‌سنجی به روش تحلیل طیفی امواج دورا با استفاده از آنالیز طیفی امواج دورا محدوده آب عمیق تحلیل آماری نتایج حاصل از عمق‌سنجی نسبت به داده‌های میدانی انجام شد که در جدول (۲) بیان شده است.

جدول ۲- ارزیابی آماری نتایج عمق‌سنجی با استفاده از آنالیز طیفی امواج دورا محدوده آب عمیق

پارامترهای آماری	محدوده‌های عمق‌سنجی			
	۱۰ تا ۱۵ متر	۱۵ تا ۲۰ متر	۲۰ تا ۲۵ متر	۲۵ تا ۳۰ متر
متوسط خطای مطلق	۰,۵۹	۰,۹۳	۱,۱۳	۰,۸۱
نسبی RMSE	٪۴,۴۳	٪۵,۴۸	٪۵,۴	٪۵,۰۵
RMSE	۰,۸۲	۱,۲۷	۱,۴۴	۱,۱۲

پس از مقایسه نتایج، همبستگی بین عمق نقاط عمق-سنجی صورت گرفته با استفاده از آنالیز طیفی امواج دورا محدوده آب عمیق و عمق‌سنجی میدانی مقدار ۸۵,۳٪ را نتیجه داد.



شکل ۱۰- نقشه عمق‌سنجی حاصل از داده‌های میدانی

پس از عمق‌سنجی به روش تحلیل طیفی امواج دورا با استفاده از مدل ERA-5 تحلیل آماری نتایج حاصل از عمق‌سنجی نسبت به داده‌های میدانی انجام شد که در جدول (۱)، بیان شده است.

جدول ۱- ارزیابی آماری نتایج عمق‌سنجی با استفاده از مدل ERA-5 با داده‌های میدانی عمق‌سنجی

پارامترهای آماری	محدوده‌های عمق‌سنجی			
	۱۰ تا ۱۵ متر	۱۵ تا ۲۰ متر	۲۰ تا ۲۵ متر	۲۵ تا ۳۰ متر
متوسط خطای مطلق	۰,۶۹	۱,۱۲	۱,۷۲	۰,۹۹
نسبی RMSE	٪۵,۲۱	٪۶,۴۰	٪۸,۲۱	٪۶,۰۵
RMSE	۰,۹۲	۱,۵۲	۲,۰۵	۱,۳۶

همچنین، همبستگی بین عمق نقاط عمق‌سنجی صورت گرفته با استفاده از مدل جهانی امواج ERA-5 و عمق‌سنجی میدانی مقدار ۷۹,۹٪ را نتیجه داد.

## ۲-۶- استخراج دوره تناوب با استفاده از آنالیز طیفی امواج دورا محدوده آب عمیق

در محدوده آب عمیق می‌توان با محاسبه طول موج و با استفاده از رابطه (۵)، حداقل دوره تناوب امواج دورا را محاسبه کرد. سپس در یک نقطه با عمق معلوم با استفاده از دوره تناوب بدست آمده عمق‌یابی کرده و با افزایش مقدار دوره تناوب، خطای عمق‌یابی در آن نقطه را کاهش داده تا به حداقل برسد. به این ترتیب به مقدار دقیق دوره تناوب خواهیم رسید و از این دوره تناوب برای عمق‌یابی

## ۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

### ۷-۱- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پس از بیان چالش‌ها و اهداف و مروری بر پیشینه مطالعاتی صورت گرفته بر روی روش‌های استخراج عمق با استفاده از تصاویر SAR، نحوه عمق‌سنجی نواحی ساحلی با استفاده از تجزیه و تحلیل الگوی انتشاری امواج دورا در تصاویر راداری مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در ادامه سعی شد تا با اجرای الگوریتم تحلیل الگوی طیفی امواج دورا بر روی تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۱ در سواحل دریای عمان منطقه بندر جاسک، نقشه عمق-سنجی نواحی ساحلی تهیه شود. این روش بر اساس شکست و تغییرات طول موج امواج دورا در آب‌های ساحلی انجام می‌شود و توانایی عمق‌سنجی در آب‌های عمق متوسط را داراست. رابطه‌ی پراکندگی خطی در آب-های با عمق متوسط رابطه‌ای بین عمق، طول موج و دوره تناوب امواج دورا برقرار می‌کند. برای محاسبه طول موج امواج دورا از آنالیز فوریه دو بعدی استفاده شد و با اعمال فیلتر فرکانسی دقت محاسبه قله موج افزایش یافت. برای استخراج دوره تناوب امواج دورا از دو روش استفاده شد. در روش اول با استفاده از مدل جهانی امواج ERA-5 طول موج و جهت انتشار آن در لحظه اخذ تصویر بدست آمد و برای عمق‌سنجی استفاده شد که بعد از مقایسه آماری نتایج با داده‌های میدانی عمق‌سنجی مقدار  $RMSE$  ۱/۳۶ متر و همبستگی آن ۷۹٪/۹ بدست آمد. روش دوم استخراج دوره تناوب با استفاده از آنالیز طیفی امواج دورا محدود به عمق انجام شد. بعد از مقایسه آماری نتایج با داده‌های میدانی عمق‌سنجی مقدار  $RMSE$  ۱/۱۲ متر و همبستگی آن ۸۵٪/۳ بدست آمد. استفاده از روش تحلیل طیفی امواج دورا با استفاده از آنالیز طیفی امواج دورا

محدوده آب عمیق باعث بهبود ۱۷ درصدی دقت عمق-سنجی نسبت به مدل جهانی امواج ERA-5 در محدوده عمق ۰ تا ۲۵ متر و بهبود ۳۰ درصدی در محدوده ۲۰ تا ۲۵ متر شده است. علت بهبود بیشتر در ناحیه عمیق حساسیت بیشتر رابطه پراکنش خطی نسبت به طول موج و دوره تناوب در عمق‌های بیشتر است که شکل (۳) این امر را نشان می‌دهد. در نتیجه، تصاویر SAR مأموریت سنتینل-۱ با توان تفکیک مکانی ۱۰ متر، قادر به شناسایی کاهش طول موج و شکست امواج دورا و عمق-یابی در عمق ۱۰ تا ۲۵ متر در نواحی ساحلی هستند.

### ۷-۲- پیشنهادات

- ۱- استفاده از تصاویر راداری با توان تفکیک مکانی بالاتر می‌تواند به افزایش دقت در محاسبه طول موج و دقت عمق‌سنجی منجر شود در نتیجه پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی از تصاویر با توان تفکیک مکانی بهتر از ۱۰ متر استفاده شود.
- ۲- پیشنهاد می‌شود در منطقه عمق‌سنجی با استفاده از بویه موج نگار، دوره تناوب امواج محاسبه شود زیرا وجود بویه موج نگار در منطقه برای اندازه‌گیری دوره تناوب موج دورا می‌تواند سبب بهبود در دقت عمق‌سنجی شود.
- ۳- پیشنهاد می‌شود تا با مدل‌سازی امواج در منطقه عمق‌سنجی با استفاده از مدل‌های هیدرودینامیکی مقایسه‌ای بر بهبود استفاده از مدل‌های محلی نسبت به مدل‌های جهانی انجام شود.
- ۴- در تحقیقات آتی می‌توان با مقایسه تکنیک عمق-سنجی بر مبنای جریان‌ات جزر و مدی با استفاده از تصاویر SAR نسبت به استفاده از الگوی امواج دورا به ارزیابی مزایا و معایب این دو روش در سواحل ایران پرداخت.

## مراجع

- [1] "In Memory of Carl A. Wiley", A. W. Love, IEEE Antennas and Propagation Society Newsletter, pp 17–18, June 1985.
- [2] Tayfehrostami A, Azmoudeh Ardalan A R, Roohi S, Pourmina A H. Dams Surface Area Monitoring from VV and VH Polarization of Sentinel-1 Mission SAR Images (Case study: Doroudzan Dam, Shiraz, Iran). JGST. 2021; 10 (4) :103-116 URL: <http://jgst.issge.ir/article-1-988-fa.html>
- [3] A. Pleskachevsky and Lehner, "Estimation of underwater topography using satellite high resolution synthetic aperture radar data," n Proceedings of the 4th TerraSAR-X Science Team Meeting, pp. 1–19, 2011.
- [4] F. Canisius and R. Fernandes, "ALOS PALSAR L-band polarimetric SAR data and in situ measurements for leaf area index assessment," Remote Sensing Letters, vol. 3, no. 3, pp. 221–229, May 2012.

- [5] A. Renga et al., "SAR Bathymetry in the Tyrrhenian Sea by COSMO-SkyMed Data: A Novel Approach," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 7, no. 7, pp. 2834–2847, Jul. 2014.
- [6] X. Bian, Y. Shao, W. Tian, and C. Zhang, "Estimation of Shallow Water Depth Using HJ-1C S-band SAR Data," *The Journal of Navigation*, vol. 69, no. 1, pp. 113–126, Jan. 2016.
- [7] S. Brusch, P. Held, S. Lehner, W. Rosenthal, and A. Pleskachevsky, "Underwater bottom topography in coastal areas from TerraSAR-X data," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 32, no. 16, pp. 4527–4543, Aug. 2011.
- [8] D. R. Basco, "Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists," *Eos, Transactions American Geophysical Union*, vol. 66, no. 24, pp. 490–491, Jun. 2011.
- [9] I. R. Young, *Wind Generated Ocean Waves*. Elsevier, 1999.
- [10] ESA, *ESA's radar observatory mission for GMES operational services*, vol. 1, no. sp-1322/1. 2012.
- [11] V. Sanil Kumar, J. Singh, P. Pednekar, and R. Gowthaman, "Waves in the nearshore waters of northern Arabian Sea during the summer monsoon," *Ocean Engineering*, vol. 38, no. 2, pp. 382–388, Feb. 2011.
- [12] A. Saket and A. Etemad-Shahidi, "Wave energy potential along the northern coasts of the Gulf of Oman, Iran," *Renewable Energy*, vol. 40, no. 1, pp. 90–97, Apr. 2012.
- [13] Fernando José M. Monteiro, "Advanced Bathymetry Retrieval from Swell Patterns in High-Resolution SAR Images", Master Thesis, University of Miami, 2013.
- [14] J. Sun and H. Kawamura, "Retrieval of surface wave parameters from sar images and their validation in the coastal seas around Japan," *J Oceanogr*, vol. 65, no. 4, p. 567, Aug. 2009.
- [15] Alpers, W. Theory of radar imaging of internal waves. *Nature* 314, 245–247 (1985). <https://doi.org/10.1038/314245a0>