استخراج نقشه عمق‌سنجی سواحل دریای خزر با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای

نعمت اله کریمی[۱*]، مسعود بحرینی مطلق[۲]، اشکان فرخ نیا[۳]، رضا روزبهانی[۴]، سیده معصومه بنی هاشمی[۵]

[۱] استادیار، پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب، پست الکترونیکی: n.karimi@wri.ac.ir
[۲] استادیار، پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب، پست الکترونیکی: m.bahreini@wri.ac.ir
[۳] استادیار، پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب، پست الکترونیکی: a.farokhnia@wri.ac.ir
[۴] استادیار، پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب، پست الکترونیکی: r.roozbahani@wri.ac.ir
[۵] مرکز ملی مطالعات و تحقیقات دریای خزر، مؤسسه تحقیقات آب، پست الکترونیکی: m.banihashemi@wri.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۰۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۰

کلمات کلیدی:
سنجش از دور
عمق‌سنجی
دریای خزر
ماهواره Landsat
رگرسیون

چکیده

هدف اصلی از انجام تحقیق حاضر، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به‌منظور استخراج نقشه‌های عمق‌سنجی سواحل دریاها و بخصوص دریای خزر است. بدین منظور حد فاصل بین نیروگاه نکا و بندر امیرآباد در استان مازندران به عنوان پایلوت انتخاب گردید. جهت استخراج نقشه عمق‌سنجی منطقه یاد شده، از تصویر ماهواره Landsat-OLI استفاده گردید. همزمان با گذر ماهواره از منطقه یاد شده، در حدود ۲۷۰۰ نقطه از اعماق ۲ الی ۱۱ متری دریای خزر، عمق‌سنجی صورت گرفت که ۵۰۰ نقطه به عنوان نقاط کنترلی و مابقی نیز به عنوان نمونه‌های آموزشی مورد استفاده قرار گرفت. جهت استخراج نقشه عمق‌سنجی از روش رگرسیون خطی چندجمله‌ای استفاده گردید. همچنین جهت شناسایی بهترین مدل رگرسیونی و انتخاب بهترین متغیرهای مستقل برای برآورد عمق آب، از روش رگرسیون گام به گام استفاده شد. مقایسه بین نقشه عمق آب استخراج شده از تصویر ماهواره Landsat-OLI با نقاط کنترلی نشان داد که میزان RMSE این سنجنده در برآورد عمق آب مناطق ساحلی در حدود ۰/۴ متر با میانگین خطای استاندارد ۷/۶ درصد بوده است که با توجه به میزان کدورت آب دریای خزر و مواج بودن آن دقت قابل قبولی محسوب می‌گردد.

Extraction of Caspian Sea coastline bathymetry map using satellite data

Neamat Karimi[1*], Masoud Bahreinimotlagh[2], Ashkan Farokhnia[3], Reza Roozbahani[4], Seyedeh Masoumeh Bani Hashemi[5]

[1] Assistance Professor, Department of Water Resources Study and Research, Water Research Institute, Tehran, Iran, Email: n.karimi@wri.ac.ir
[2] Assistance Professor, Department of Water Resources Study and Research, Water Research Institute, Tehran, Iran, Email: m.bahreini@wri.ac.ir
[3] Assistance Professor, Department of Water Resources Study and Research, Water Research Institute, Tehran, Iran, Email: a.farokhnia@wri.ac.ir
[4] Assistance Professor, Department of Water Resources Study and Research, Water Research Institute, Tehran, Iran, Email: r.roozbahani@wri.ac.ir
[4] National Center for Caspian Sea Studies, Water Research Institute, Email: m.banihashemi@wri.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 24 Feb. 2021
Accepted: 11 Jul. 2021

Keywords:
Remote Sensing
Bathymetry
Caspian Sea
Landsat Satellite
Regression

ABSTRACT

The main goal of the present study is to use satellite data to extract bathymetry maps of coastlines and especially the shores of the Caspian Sea. For this purpose, the area between the Neka power plant and Amirabad port in Mazandaran province was selected as a pilot. Landsat-OLI satellite image was used to extract the bathymetry map of the study area. Simultaneously with the path of the satellite, about 2700 points from the depths of 2 to 11 meters of the Caspian Sea, was measurement, of which 500 points were used as control points and the rest as training samples. The polynomial linear regression method was used to extract the bathymetry map. Also, a stepwise regression method was used to identify the best regression model and select the best independent variables to estimate the depth. Comparison between the water depth map extracted from the Landsat-OLI satellite image with the control points showed that the RMSE value of this sensor in estimating the coastal water depth was about 0.4 m with an average standard error of 7.6%. By considering the turbidity and roughness of the seawater of Caspian Sea, the obtained result is an acceptable accuracy.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.2.4]

۱ - مقدمه

به منظور مدیریت و پایش دریاچه‌ها، مخازن و بخصوص سواحل دریاها، نقشه‌های عمق‌سنجی اطلاعات بسیار ارزشمندی محسوب می‌گردند. در این بین تعیین نقشه‌های عمق‌سنجی مناطق ساحلی دریاها از اهمیت بسیار ویژه‌ای برخوردار است. مناطق ساحلی به‌عنوان قدیمی‌ترین سکونتگاه‌های انسانی، با بیشترین بهره‌برداری‌ها و فعالیت‌های بشر در ارتباط بوده‌اند. این مناطق عمدتاً از جنبه‌های زیست‌محیطی، گردشگری، اقتصادی، سیاسی و... حائز اهمیت بوده و شناسایی ویژگی‌های جغرافیایی و هندسی آن‌ها، گامی اولیه و مهم برای برنامه‌ریزی، بهره‌برداری و همچنین محافظت در راستای توسعه پایدار می‌باشد. عمق آب و ویژگی‌های فیزیکی آن در این مناطق می‌تواند برای بسیاری از کاربردها و طرح‌ها توسعه‌ای نقش حیاتی ایفا کند. به‌طورکلی فرآیند عمق‌سنجی در نواحی ساحلی برای اطلاع از پدیده‌ها و عوارض زیرآب به‌منظور انجام فعالیت‌هایی نظیر کشتیرانی، لایروبی، لوله و کابل گذاری، تعیین نقاط پرخطر ساحلی، مطالعات هیدرولوژیکی، تهیه نقشه‌های جنس بستر، اطلاع از زیستگاه‌های دریایی جهت به‌کارگیری در امور زیست‌محیطی و امور نظامی و مهندسی ضرورت دارد. این در حالی است که نقشه‌های عمق‌سنجی بسیاری از سواحل دریاهای جهان از جمله مجهولات اساسی مطالعات منابع آبی قلمداد می‌شود [۱]. بطوریکه به دلایلی همچون هزینه‌های سنگین و نبود تجهیزات لازم، صدها هزار کیلومتر از سواحل دریاهای جهان فاقد اطلاعات دقیقی از تغییرات عمق هستند [۱]. به‌کارگیری روش‌های هیدروگرافی علاوه بر هزینه و زمان زیاد، در سطوح بزرگی همچون سواحل دریاها غیرممکن است. از این‌رو روش‌های نوین مبتنی بر فن‌آوری سنجش از دور، با توجه به قابلیت تعدد زمانی، در اختیار گذاشتن اطلاعات مکانی پیوسته و در نهایت هزینه‌های مختصر و در مواردی رایگان آن‌ها، مورد توجه محققین مختلف در سال‌های اخیر جهت عمق‌سنجی قرار گرفته است [۲].

تصاویر ماهواره Landsat جزو اولین تصاویر ماهواره‌ای محسوب می‌گردند که جهت تهیه نقشه‌های عمق‌سنجی مورد استفاده قرار گرفته است. بعد از آن از تصاویر ماهواره Ikonos و در سال‌های اخیر هم از تصاویر ماهواره‌های Quickbird، spot، Worldview و اخیراً نیز تصاویر Sentinel مورد توجه محققین قرار گرفته است [۲]. در تعیین عمق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای غالباً از الگوریتم‌های مختلفی که ارتباط بین ارزش پیکسل‌های تصاویر (شامل بازتابندگی در باندهای اپتیکی و تابندگی در باندهای حرارتی) را با عمق آب در نظر می‌گیرد استفاده می‌گردد. در پژوهشی که در خلیج فوکا در منطقه ازمیر ترکیه برای مطالعات عمق‌سنجی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ASTER و تصاویر pan-sharpened شده ماهواره Quickbird انجام شد از مدل شبکه عصبی مصنوعی استفاده گردید [۳]. در این مدل به‌طور مستقیم از مقادیر بازتابندگی تصاویر در برآورد عمق بدون در نظر گرفتن عوامل محیطی استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که با توجه به اینکه در مدل شبکه عصبی مصنوعی برخلاف مدل‌های دیگر عوامل محیطی در آن دخالت نداشته و همچنین از فرآیند جداسازی بازتابندگی‌های پیچیده استفاده نمی‌گردد برآورد عمق‌سنجی از طریق این مدل دارای کارآمدی مناسبی است. در پژوهشی که در دریاچه Eutrophic واقع در جنوب آنکارا با استفاده از تصاویر ماهواره WorldView-2 برای تعیین عمق‌سنجی انجام داده بودند از مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی استفاده نمودند [۴]. نتایج حاصله از این مطالعه نشان داد که باندهای ۱ ، ۵ و ۸ از ماهواره‌ای WorldView-2 برای عمق‌سنجی مناسب است که در این میان باند ۱ (باند آبی ساحلی) بالاترین سهم را در تعیین عمق‌سنجی دارد. در پژوهشی که در شرق بندر اسکندریه واقع در کشور مصر انجام داده‌اند از مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی برای عمق‌سنجی بر روی باندهای اپتیکی تصاویر ماهواره Landsat-OLI استفاده نمودند [۵]. در این مطالعه از شبکه‌های عصبی مصنوعی بدون توجه به عوامل محیطی مانند جنس بستر و رسوبات دریا برای استخراج عمق آب بهره گرفته شده است. در این مطالعه از تک باند و همچنین از ترکیب باندها استفاده گردیده است که در نتیجه باند سبز بهترین اثر را در برآورد عمق‌سنجی از خود نشان داده و بدترین نتیجه هم مربوط به ترکیب باندهای آبی و سبز بوده است. همچنین در پژوهشی که برای محاسبه عمق بر روی سواحل کم عمق شرق قطب جنوب انجام شده است از تصاویر ماهواره WorldView-2 با وضوح بالا استفاده گردیده است [۶]. در این پژوهش از دو الگوریتم استامپ و لایزینگا استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان از همبستگی بالا در حدود (R=0.80) بین عمق واقعی و عمق به دست آمده و خطای RMSE بین ۰/۱۰ تا ۱/۳۰ متر دارد . همچنین این تحقیق نشان می‌دهد که باند آبی ساحلی در تصاویر ماهواره WorldView-2 اطلاعات عمق‌سنجی دقیق‌تری نسبت به بقیه باندها ارائه می‌کند. همچنین بر اساس عمق نیز سواحل بسیار کم‌عمق همبستگی بهتری نسبت سواحل کم‌عمق و سواحل عمیق نشان دادند. در پژوهشی که برروی دریاچه ارومیه انجام شده است، با استفاده از تصاویر ماهواره Landsat-8 و روش رگرسیون خطی چند متغیره، نقشه عمق‌سنجی دریاچه ارومیه استخراج شده است [۲]. در این تحقیق نقشه عمق‌سنجی دریاچه ارومیه با همبستگی بسیار بالا (R=0.95) و همچنین با حداقل مقدار RMSE (در حدود ۲۷ سانتی‌متر) محاسبه گردیده است. این نتایج با توجه به شوری بسیار بالای دریاچه ارومیه در مقایسه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.2.4]

با سایر پهنه‌های آبی نشان دهنده قابلیت بسیار بالای تصاویر ماهواره Landsat-8 در برآورد نقشه‌های عمق‌سنجی است.

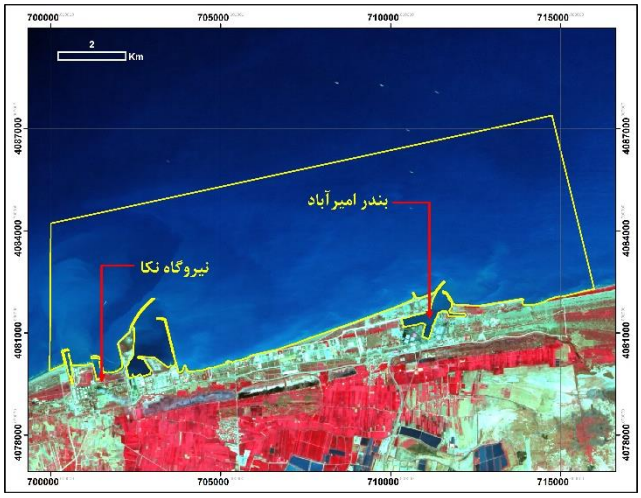
در پژوهشی که در منطقه جنوب شرقی دریای خزر انجام داده‌اند از تصاویر ماهواره Landsat-5 برای عمق‌سنجی استفاده نمودند [۷]. در این پژوهش از سه الگوریتم برای عمق‌سنجی استفاده شده است. اولین روش، الگوریتم تک بلند بود که از بلند آبی یا قرمز استفاده گردید و نتیجه آن هم در باند قرمز با (R=0.66) و در باند آبی با (R=0.49) استفاده گردید. دومین روش هم الگوریتم تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) بود که با (R=0.21) مورد استفاده قرار گرفت و سومین روش هم الگوریتم پرسپترون چند لایه (پس انتشار) شبکه عصبی مصنوعی بود که با (R=0.94) مورد استفاده قرار گرفت که بهترین نتیجه را نسبت به دو الگوریتم دیگر داشت.

همچنین در تحقیقی که برروی تالاب بین‌المللی زریوار استان کردستان با استفاده از تصاویر سنجنده OLI و مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی درباره عمق‌سنجی صورت گرفته است، تعداد ۲۰۰ عمق‌سنجی و ثبت مختصات جغرافیایی محل هم زمان با عبور ماهواره در چهار دوره زمانی شامل تابستان و پائیز سال ۱۳۹۲ و بهار و تابستان سال ۱۳۹۳ صورت گرفته است [۸]. پس از تصحیحات اتمسفری، باندهای مرئی و همچنین ترکیب‌های مختلف حاصل از ترکیب باندهای مرئی، مادون‌قرمز نزدیک و میانی این سنجنده مورد استفاده قرار گرفته است. عمق آب به وسیله مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از میزان بازتاب‌های طیفی و نتایج شاخص‌های مختلف متناظر با عمق‌های اندازه‌گیری شده در یک برآورد کلی (داده‌های فصل تابستان و پاییز سال ۱۳۹۲ و بهار سال ۱۳۹۳) و یک برآورد تک فصلی (داده‌های فصل تابستان سال۱۳۹۳) به دست آمده است. نتایج نشان داد که از بین باندهای آبی، سبز، قرمز و مادون قرمز بازتاب طیفی باند قرمز با R^2= ۰/۸۲ و RMSE= ۰/۰۲۶۹ در برآورد با استفاده از داده کلی (۳ ماهه) و R^2= ۰/۹۵ و RMSE= ۰/۰۲۳۰ در برآورد با استفاده از داده یک‌ماهه در مرحله تست بیش‌ترین همبستگی را با میزان عمق آب داشت.

لذا با عنایت به مطالب عنوان شده، اهداف اصلی پروژه حاضر را می‌توان به اختصار به شرح زیر بیان کرد: الف) استفاده از قابلیت داده‌های سنجش از دور در تهیه نقشه عمق‌سنجی سواحل دریاها، ب) شناسایی یک روش کارآمد برای استفاده از داده‌های ماهواره‌ای جهت تخمین عمق سواحل جنوبی دریای خزر با دقت مناسب، ج) ارزیابی میزان دقت تصاویر ماهواره Landsat-OLI در تخمین عمق آب سواحل با مقایسه با داده‌های میدانی، د) تهیه نقشه عمق سواحل جنوبی دریای خزر جهت استفاده در مطالعات کاربردی و برنامه‌ریزی‌های توسعه‌ای.

۲ – منطقه مورد مطالعه

داشتن اطلاعات به‌روز به‌ویژه اطلاعات آب‌نگار دریای خزر و سواحل جنوبی آن به‌واسطه هم‌جواری با سه استان شمالی کشور و اهمیت خاص منطقه‌ای آن، ارتباط با کشورهای همسایه، شناخت محیط پیرامون بندرها و تأسیسات احداث شده در سواحل و افزایش کارآیی در شیلات و گسترش گردشگری بسیار حایز اهمیت است. ازسویی دیگر برای مطالعات محیطی، اقدامات مهندسی، برنامه‌ریزی جهت بهره‌برداری و استفاده از منابع ساحلی در سواحل خزر نیاز به مشاهدات آب نگاری دوره‌ای بوده و با توجه به آنکه روش‌های مستقیم عمق‌سنجی از روش‌های زمان‌بر و هزینه‌بر است، روش عمق‌سنجی توسط داده‌های سنجش از دور می‌تواند یک روش مناسب و مکمل برای مشاهدات مستقیم هیدروگرافی در این منطقه باشد. لذا با توجه به هدف اصلی تحقیق حاضر (استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به‌منظور تهیه نقشه‌های عمق‌سنجی سواحل دریای خزر) سواحل شهرستان نکا (محدوده نشان داده شده در شکل ۱) به دلیل سهولت دسترسی از یک طرف (جهت انجام مطالعات میدانی) و همچنین اهمیت این منطقه از منظر وجود نیروگاه نگاه و بندر امیرآباد از طرف دیگر، به‌عنوان منطقه پایلوت انتخاب گردید. منطقه موردمطالعه شامل ۷۶ کیلومترمربع از سواحل شهرستان نکا به طول تقریبی ۱۵/۵ کیلومتر و عرض ۵ کیلومتر است. عمق این منطقه از حدود ۰ الی ۱۲ متر متغیر است.



شکل ۱ – منطقه مورد مطالعه (حدفاصل بین نیروگاه نکا و بندر امیرآباد)

۳ – داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده

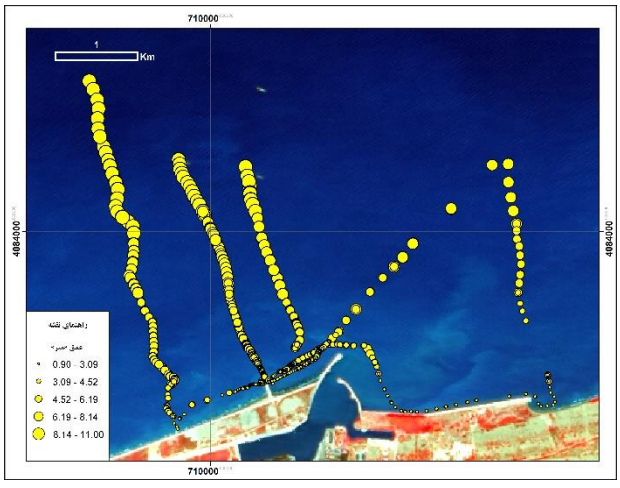
۳-۱ – اندازه‌گیری‌های میدانی

جهت تخمین عمق آب و تهیه نقشه‌های عمق‌سنجی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، لازم است عمق آب در بخش‌های مختلف ساحل مورد اندازه‌گیری مستقیم قرار گیرد. کاربرد تصاویر ماهواره‌ای در تهیه نقشه‌های عمق‌سنجی، تعیین رابطه بین مقادیر بازتابندگی در طول موج‌های مختلف طیف الکترومغناطیسی با عمق آب در زمان

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.2.4]

اخذ تصاویر ماهواره‌ای است. در واقع جهت تعیین ارتباط بین عمق آب و مقدار بازتابندگی در طول‌موج‌های مختلف طیف الکترومغناطیسی ثبت شده به توسط ماهواره‌های سنجش از دوری، لازم است در بخش‌های مختلف ساحل مقادیر عمق آب به‌صورت مستقیم اندازه‌گیری گردد. بدین منظور از تاریخ ۳۰ الی ۳۱ مرداد ماه ۱۳۹۹ عملیات میدانی برداشت عمق توسط گروه مطالعات میدانی پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب مؤسسه تحقیقات آب در سواحل مورد مطالعه انجام گردید. جهت عمق سنجی از دستگاه DESO-20 استفاده گردید. همچنین به منظور ثبت موقعیت مسطحاتی (X و Y) نقاط عمق سنجی شده، از دستگاه GPS دو فرکانسه Trimble R8 استفاده شد. بدین منظور از ایستگاه‌های موجود در شبکه شمیم (شبکه ملی یکپارچه ملک) به عنوان ایستگاه ثابت و دستگاه متحرک نیز بر روی قایق نصب گردید. در مجموع طی دو روز عملیات میدانی، حدود ۲۷۰۰ نقطه عمق‌سنجی گردید که در شکل ۲ موقعیت مکانی نقاط ثبت شده به همراه مقادیر عمق آن‌ها نشان داده شده است. بر اساس برداشت‌های انجام شده، حداقل و حداکثر عمق ثبت شده در مطالعات میدانی به ترتیب برابر با ۰/۹ و ۱۱ متر بوده است. از مجموع ۲۷۰۰ نقطه عمق‌سنجی شده، ۲۲۰۰ نقطه تحت عنوان نقاط آموزشی جهت برازش مدل‌های رگرسیونی مورد استفاده قرار گرفت و مابقی ۵۰۰ نقطه نیز که به صورت تصادفی انتخاب گردید تحت عنوان نقاط کنترلی برای ارزیابی و راستی آزمایی نقشه‌های عمق سنجی بکار گرفته شد.



شکل ۲ - موقعیت مکانی نقاط عمق‌سنجی شده در سواحل شهرستان نکا به همراه مقادیر عمق ثبت شده

۲-۳ – تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده

در تحقیق حاضر از تصاویر ماهواره Landsat-OLI جهت تخمین عمق استفاده گردید. این تصویر ماهواره‌ای از طریق درگاه https://earthexplorer.usgs.gov که جزو مهمترین و مشهورترین سرویس‌های ارائه دهنده تصاویر ماهواره‌ای است اخذ گردید. تصاویر ماهواره Landsat جزو معدود تصاویری محسوب می‌گردند که با توجه به قدرت تفکیک مکانی، زمانی، طیفی و رادیومتری مناسبی که دارند مکرراً جهت تولید نقشه‌های عمق‌سنجی مورد استفاده قرار گرفته است [۲، ۸]. این تصاویر با توجه به طول‌موج‌هایی که اقدام به تصویربرداری می‌کند و همچنین قدرت تفکیک‌های مکانی مناسبی که تصاویر بر اساس آن اخذ می‌گردند (۱۵ و ۳۰ متر) مزایای زیادی جهت تهیه نقشه‌های عمق‌سنجی دارند. در واقع با استفاده از این تصاویر می‌توان نقشه‌های با قدرت تفکیک مکانی بالا (۱۵ متر) و با دقت و صحت مناسبی بدون هیچ‌گونه هزینه اضافی برای خرید تصاویر آن تهیه کرد. در مطالعه حاضر نیز با توجه به مزایای ذکر شده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat-8 (سنجنده OLI) استفاده گردید. لازم به ذکر است که این ماهواره هر ۱۶ روز یکبار از یک منطقه مشخص عبور خواهد کرد (قدرت تفکیک زمانی ۱۶ روز) و در ۱۳ باند مختلف طیفی (از طول موج‌های مرئی تا مادون قرمز حرارتی) اقدام به تصویربرداری می‌کند.

به‌منظور تهیه نقشه عمق‌سنجی منطقه مورد مطالعه اقدام به تهیه یک تصویر از این ماهواره در روز ۱۱ آگوست ۲۰۲۰ معادل ۲۱ مرداد ماه سال ۱۳۹۹ شمسی گردید. این تصویر تنها ۵ روز پیش‌تر از مطالعات میدانی اخذ گردیده است که با توجه به اینکه در این فاصله زمانی کوتاه نمی‌توان انتظار تغییرات گسترده در عمق‌سنجی کف دریای خزر را داشت اختلاف زمانی قابل قبولی محسوب می‌گردد.

۴ – روش‌شناسی

به‌طورکلی روش‌های تهیه نقشه‌های عمق‌سنجی با به‌کارگیری اطلاعات ماهواره‌ای به دو دسته تصویری و غیر تصویری تقسیم می‌گردند. روش‌های غیر تصویری مبتنی بر به‌کارگیری LiDAR و بر اساس فاصله بین سنجنده و سطح/کف آب است. این روش‌ها علاوه بر هزینه بالا، حساسیت زیادی به کدورت، کیفیت و مواد محلول در آب داشته اما در شرایط ایده‌آل تا اعماق ۷۰ متر و با دقت ۱۵ سانتیمتر قادر به اندازه‌گیری عمق آب هستند. در مقابل، روش‌های تصویری بر اساس برآورد عمق آب به‌صورت پیکسلی و در قالب یک تصویر است که با توجه به ماهیت تابش‌های مرئی و ماکروویو، دقت و محدودیت‌های متفاوتی دارند. در صورتی که از تصاویر اپتیکی و بر اساس باندهای مرئی از روش‌های تصویری استفاده گردد، دقت این روش‌ها نسبتاً بالا و تا اعماق ۳۰ متر عمق آب قابل اندازه‌گیری است. اساس این روش بر پایه جذب و نفوذ نور در طول‌موج‌های متفاوت در آب است که در طول‌موج‌های مرئی (آبی، سبز و قرمز) با توجه به جذب اندک نور، بیشترین نفوذ و بازتاب نور در آب مشاهده می‌گردد. بر همین اساس در باندهای

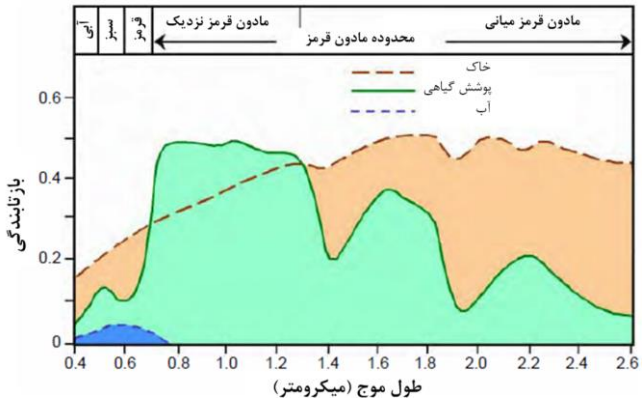
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.2.4]

مرئی با طول‌موج کوچک‌تر بیشـــترین اعماق آب قابل اندازه‌گیری است [۹].

در کنار تقسیم‌بندی یاد شده (تصویری و غیر تصویری)، از لحاظ نوع طول‌موج‌های بکارگرفته شـــده می‌توان روش‌های ســـنجش از دوری تهیه نقشـــه‌های عمق‌ســـنجی را به دو دســـته راداری (ماهواره‌های فعال ســـنجش از دوری) و اپتیکی (ماهواره‌های غیرفعال) تقســـیم‌بندی کرد. روش‌های اپتیکی (شـــامل انواع روش‌های هوابرد یا فضا برد) بر این اصل استوار هستند که مقدار انرژی الکترومغناطیسی انعکاس یافته به سطح سنجنده، متناسب با عمق آب تغییر می‌کند. به‌طوری که متناســـب با افزایش عمق آب، مقدار جذب این امواج نیز افزایش یافته و در نتیجه مقدار انرژی کمتری به ســـطح ســـنجنده خواهد رســـید. این روش مکرراً به‌توسط محققین مختلفی جهت استخراج نقشه‌های عمق‌سنجی دریاچه‌ها، رودخانه‌های بزرگ و مخازن پشت سدها مورد استفاده قرار گرفته است [۱۰،۱۱،۱۲،۱۳،۱۴،۱۵]. اگرچه در استفاده از این تصـاویر (تصـاویر اپتیکی) عواملی همانند عمق نفوذ و کدورت آب جزو عوامل محدودکننده محســـوب می‌گردند، اما در بســـیاری از موارد جزو تنها روش‌های قابل اســـتفاده جهت تهیه نقشـــه‌های عمق‌ســـنجی محســـوب می‌گردند. لذا با عنایت به این مســـئله که مقدار بازتابندگی ســـطح آب در طول‌موج‌های مرئی و مادون قرمز نزدیک وابســـتگی بســـیار زیادی به پارامترهایی همانند کیفیت آب، مقدار آشـفتگی سـطح آب و نوع مواد تشـکیل‌دهنده کف آب دارد، اسـتفاده از این روش‌ها در آب‌های بسـیار عمیق (بیشـتر از ۲۵ متر) و با آشـفتگی بسـیار زیاد به‌توسـط محققین توصـیه نمی‌گردد [۱۶، ۱۷].

به‌طورکلی تهیه نقشـه عمق‌سـنجی با اسـتفاده از تصـاویر ماهواره‌ای شـامل دو مرحله اصـلی اسـت. در مرحله اول رفتار طیفی آب در اعماق مختلف و در طول‌موج‌های گوناگون طیف الکترومغناطیسـی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در مرحله دوم نیز تحلیل‌های لازم جهت برآورد عمق با اسـتفاده از خصـوصـیات طیفی اسـتخراج شـده در مرحله اول صـورت می‌گیرد. در واقع مقدار امواج رسـیده به سـطح آب یا به‌توســـط آب جذب می‌گردد یا به‌توســـط آن بازتابانیده می‌شـود. نسـبت امواج بازتابانیده شـده یا جذب شـده ارتباط کاملاً معنی‌داری با عمق آب دارد. به‌طوری که همان‌طور که پیش‌تر نیز عنوان گردید، با افزایش عمق آب جذب امواج الکترومغناطیسی نیز افزایش یافته و در نتیجه مقدار بازتابندگی آن‌ها کاهش می‌یابد. بر این اســـاس می‌توان عنوان کرد که مقدار امواج رســـیده به ماهواره ارتباط کاملاً قوی و معکوسـی با عمق آب دارد. این اصـل تقریباً در خصـوص تمام طول‌موج‌های الکترومغناطیسـی که معمولاً ماهواره‌ها و سـنجنده‌های سـنجش از دوری فعالیت می‌کنند صـادق اسـت. در شـکل ۳ رفتار طیفی پهنه‌های آبی در مقایسـه با سـایر پوشـش‌های سـطح زمین نشـان داده شـده اسـت. همان‌طور که در این شـکل نمایان است، برخلاف پوشش‌های گیاهی و خاکی، مقدار بازتابندگی آب با افزایش طول‌موج کاهش می‌یابد و در نهایت در طول‌موج‌های مادون قرمز نزدیک مقدار بازتابندگی آن به صـفر می‌رسـد. این در حالی اســـت که برخلاف آب، مقدار بازتابندگی خاک با افزایش طول‌موج به‌تدریج افزایش می‌یابد.



شکل ۳- منحنی بازتابندگی طیفی پوشش‌های مختلف گیاهی، آبی و خاکی در طول‌موج‌های مرئی و مادون قرمز طیف الکترومغناطیسی [۲]

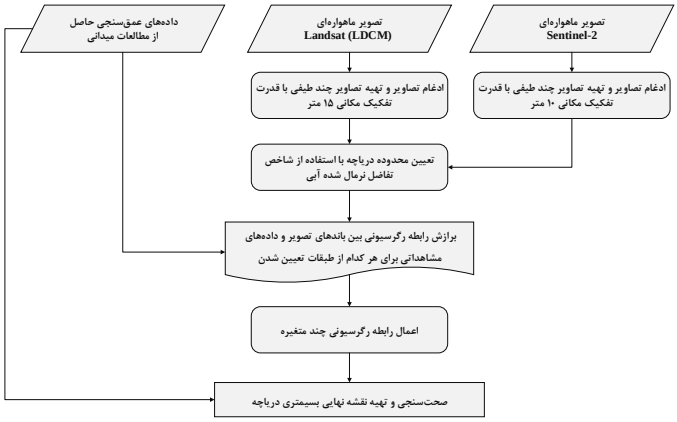
لذا بر اسـاس موارد یاد شـده، می‌توان برای اندازه‌گیری عمق آب بر اساس باندهای مختلف تصاویر ماهواره‌ای روابط مختلف رگرسیونی و ریاضـی را پیشـنهاد داد. جهت توسـعه و اسـتخراج این روابط به حداقل ۲ باند ماهواره‌ای نیاز اســـت. در رابطه ۱ نمونه‌ای از این روابط رگرسیونی چند متغیره نشان داده شده است:

$$Z = A_0 + A_1B_1 + A_2B_2 + \cdots + A_nB_n \qquad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه ۱، Z بیان‌کننده عمق آب و همچنین A نشـــان دهنده ضرایب ثابت رگرسیونی برای هرکدام از باندهای تصویر ماهواره‌ای مورد اسـتفاده اسـت. لازم به ذکر اسـت در تحقیق حاضـر علاوه بر اسـتفاده از باندهای اصـلی تصویر ماهواره‌ای مورد اسـتفاده، اطلاعات حاصـله از تحلیل مؤلفه‌های اصـلی در کنار برخی شـاخص‌های رایج سـنجش از دوری (همانند شاخص‌های NDVI، NDWI و . . .) که به نحوی بیانگر خصـوصـیات عمق آب باشـند نیز برای توسـعه روابط رگرسـیونی مورد اسـتفاده قرار گرفته اسـت. در شـکل ۴ فلوچارت کلی نحوه اسـتخراج نقشه عمق‌سـنجی با اسـتفاده از روش شرح داده شده نشان داده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

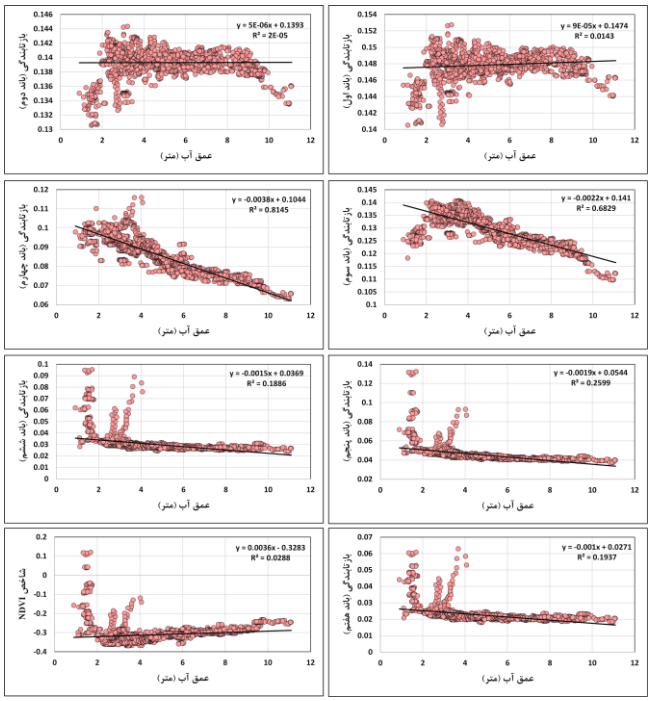
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.2.4]



شکل ۴- فلوچارت نحوه استخراج نقشه عمق‌سنجی بر اساس داده‌های ماهواره‌ای

۵ – بحث و نتایج

در شکل ۵ رابطه بین عمق آب و طول‌موج‌های مختلف سنجنده OLI در سطح منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل نمایان است، در باندهای اول و دوم که به ترتیب شامل طول‌موج‌های ماوراء بنفش نزدیک و آبی است، رابطه چندان مشخص و معناداری بین عمق آب و بازتابندگی وجود ندارد. به‌طوری که مقدار ضریب همبستگی این باندها بسیار پایین بوده و تقریباً به صفر نزدیک است. پایین بودن ضریب همبستگی در باندهای یاد شده به دلیل بازتابندگی نسبتاً بالای سطح آب در این طول‌موج‌ها است. زیرا در این طول‌موج‌ها مقدار نفوذ و جذب آب نسبت به سایر امواج الکترومغناطیسی بسیار ناچیز است. بدیهی است با توجه به مقادیر ضریب همبستگی یاد شده، نمی‌توان از این باندها برای برآورد عمق آب نوار ساحلی مورد مطالعه استفاده نمود. این در حالی است که برخلاف دو باند اول یاد شده، در طول‌موج‌های سبز و قرمز (معادل با باندهای سوم و چهارم سنجنده OLI) رابطه بین عمق آب و مقدار بازتابندگی کاملاً معنی‌دار گردیده و ضریب همبستگی آن‌ها به ترتیب برابر با ۰/۶۸ و ۰/۸۱ گردیده است. به‌طوری که با افزایش عمق از مقدار بازتابندگی در این باندها به شدت کاسته شده و رابطه معکوس معناداری بین مقادیر بازتابندگی و عمق آب مشاهده می‌گردد. مقدار ضریب همبستگی این باندها نشان‌دهنده قابلیت مناسب آن‌ها در برآورد عمق آب است.



شکل ۵- رابطه بین عمق آب و بازتابندگی‌های طیفی در باندهای مختلف سنجنده OLI

برخلاف باندهای سبز و قرمز، رابطه بین عمق آب و بازتابندگی در طول موج‌های بالاتر به شدت از بین رفته و ضرایب همبستگی مربوطه از مقدار بسیار معنی‌دار ۰/۸۱ در باند قرمز به حدود ۰/۲۵، ۰/۱۸ و ۰/۱۹ به ترتیب در باندهای مادون‌قرمز نزدیک (باند ۵)، مادون‌قرمز کوتاه (باند ۶) و باند مادون‌قرمز کوتاه (باند ۷) کاهش یافته است. این مسئله نشان‌دهنده آن است که اساساً در طول موج‌های یاد شده رابطه معنادار و منطقی بین عمق آب و مقدار بازتابندگی وجود ندارد. دلیل اصلی این مسئله نیز به بازتابندگی بسیار ناچیز آب در طول موج‌های مادون قرمز به بالاتر ارتباط دارد. زیرا اساساً آب در طول موج‌های مادون‌قرمز به بالاتر (از طول موج حدود ۰/۸ میکرومتر به بالاتر) تمامی امواج الکترومغناطیسی رسیده به خود را جذب می‌کند و تنها مقدار بسیار ناچیزی از آن را انعکاس می‌دهد. لذا بدیهی است در چنین شرایطی که بخش بسیار اعظمی از این امواج به توسط آب جذب شده است اساساً نمی‌توان نوسانات عمق آب را مورد بررسی و ارزیابی قرار داد.

در کنار باندهای اصلی مورد اشاره، در شکل ۵ رابطه بین مقادیر شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی (NDVI) با عمق آب نشان داده شده است. شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی (Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) از جمله معروفترین، ساده‌ترین و کاربردی‌ترین شاخص‌های سنجش از دوری است که مطابق با رابطه ۲ محاسبه می‌گردد. در این رابطه NIR بیان کننده باند مادون قرمز نزدیک و R نیز بیان کننده باند قرمز تصویر ماهواره‌ای است.

رابطه (۲)

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.2.4]

رابطه (۳)

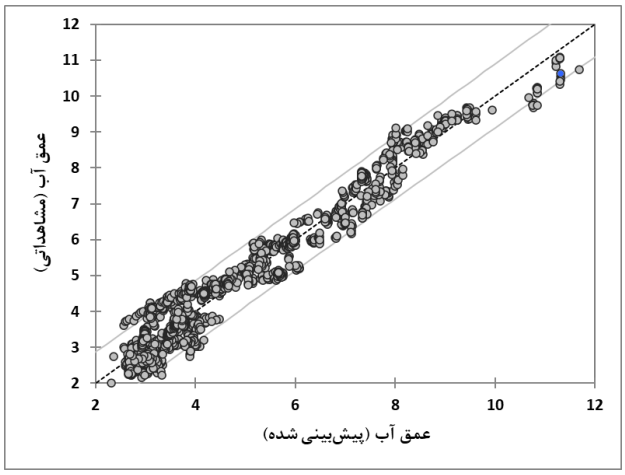
$$Depth = -12.565 + (-398.163 \times Band_3) + (143.199 \times Band_2) + (413.711 \times Band_6) + (-14.695 \times NDVI) + (-26.030 \times Band_4) + (328.964 \times Band_1) + (-271.512 \times Band_7) + (-171.398 \times Band_5)$$

بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان عنوان کرد که به دلیل جذب بسیار بالای آب در طول‌موج مادون قرمز نزدیک و عدم وابستگی این جذب به عمق آب (بخصوص از اعماق حدود ۲ متر به بالاتر)، اساساً هیچ‌گونه رابطه مشخص و معنی‌داری بین این شاخص و عمق آب وجود ندارد. در مجموع بر اساس نتایج حاصله می‌توان عنوان کرد که بهترین طول موج‌های قابل استفاده جهت برآورد عمق آب در تصاویر Landsat-OLI بر اساس ضریب همبستگی به ترتیب عبارت‌اند از باندهای قرمز و سبز و سایر طول‌موج‌ها از ضریب همبستگی نسبتاً پایینی جهت برآورد عمق آب برخوردار هستند.

لازم به ذکر است در انتخاب بهترین ترکیب‌های باندی جهت برآورد عمق نمی‌توان تنها به وجود ضرایب همبستگی بالا اعتماد و اکتفا کرد. زیرا لزوماً استفاده از باندها و مؤلفه‌های اصلی با ضریب همبستگی بالا در برآورد عمق آب نمی‌تواند به ارائه یک رابطه رگرسیونی بهینه منتج شود. رابطه رگرسیونی بهینه شامل رابطه‌ای است که ضمن دارا بودن بالاترین ضرایب همبستگی، حداقل مقدار خطای استاندارد را نیز حاصل گردد. به همین دلیل جهت یافتن بهترین ترکیب باندی و اطلاعاتی برای برآورد مناسب عمق آب، انواع ترکیبات مختلف با توجه به ضرایب همبستگی بین باندها و مقادیر عمق آب مشاهداتی، در کنار مقادیر خطای استاندارد مورد راستی آزمایی قرار گرفت. این ترکیبات و مدل‌ها با استفاده از روش رگرسیون گام به گام یا همان Regression-Stepwise انتخاب گردیده‌اند. در این روش بهترین ترکیبات ممکن جهت برآورد متغیر وابسته با توجه به ضرایب همبستگی و همچنین مقدار خطای استاندارد تعیین می‌گردد. معادله ۳ نشان دهنده بهینه‌ترین رابطه رگرسیونی جهت برآورد عمق آب با استفاده از روش شرح داده شده است.

در شکل ۶ نمودار پراکندگی بین مقادیر عمق آب برآورد شده در مقابل عمق مشاهداتی (نمونه‌های آموزشی) با استفاده از رابطه رگرسونی برازش داده شده (رابطه شماره ۳) نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، رابطه شماره ۳ برازش داده شده، در کنار ضرایب همبستگی بالایی که دارد (R^2=0.964)، مقدار RMSE آن نیز بسیار مناسب و در حدود ۰/۳۸ متر به دست آمده است. بنابراین از رابطه رگرسیونی برازش داده شده به عنوان بهترین مدل رگرسیونی جهت برآورد عمق آب استفاده گردید.

در رابطه ۳ Depth نشان دهنده عمق آب پیش‌بینی شده، $Band_1$ الی $Band_7$ نیز به ترتیب بیان کننده باندهای اول الی هفتم سنجنده OLI و همچنین NDVI نیز بیان کننده شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی است.

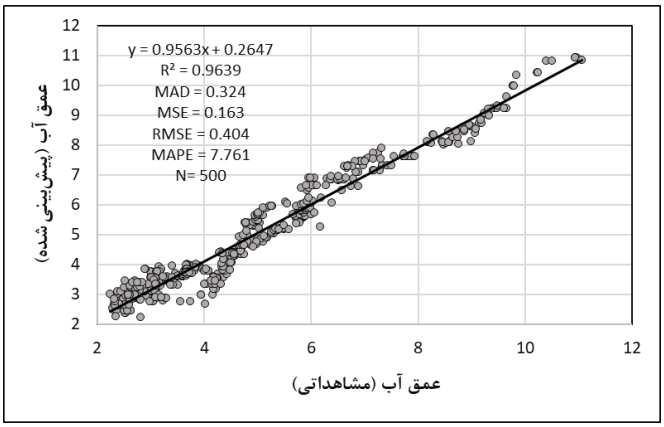


شکل ۶- نمودار پراکندگی مقادیر عمق آب مشاهداتی در مقابل عمق آب برآورد شده با استفاده از تصاویر Landsat-OLI بر اساس رابطه رگرسیونی شماره ۳

پس از اجرای مدل رگرسیونی برازش داده شده بر روی باندهای تصویر Landsat-OLI و استخراج نقشه عمق‌سنجی، مقادیر عمق به دست آمده از اجرای این رابطه رگرسیونی با نقاط کنترلی مورد مقایسه قرار گرفت. خاطرنشان می‌گردد نقاط کنترلی مورد اشاره که تعداد آن‌ها ۵۰۰ عدد است، در فرآیند برازش روابط رگرسیونی حضور نداشته و از آن‌ها تنها برای ارزیابی نقشه نهایی عمق‌سنجی استفاده شده است. بر اساس ارزیابی‌های صورت گرفته، ضریب رگرسیونی بین نقاط کنترلی و مقادیر عمق برآورد شده در حدود ۰/۹۸ برآورد گردیده است و همچنین مقدار RMSE حاصله نیز در حدود ۴۰ سانتی‌متر بوده است. این مقدار RMSE بسیار به مقدار RMSE به دست آمده در مرحله برازش رابطه رگرسیونی نزدیک بوده و تنها در حدود ۲ سانتی‌متر با آن اختلاف دارد. از طرفی دیگر مقدار شاخص میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) نیز در حدود ۷/۷ درصد به دست آمده است که نشان دهنده دقت تقریبی ۹۲ درصدی مدل برازش شده در برآورد عمق آب است. در جدول ۱ تحلیل واریانس رابطه رگرسیونی برازش داده شده نشان داده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.2.4]



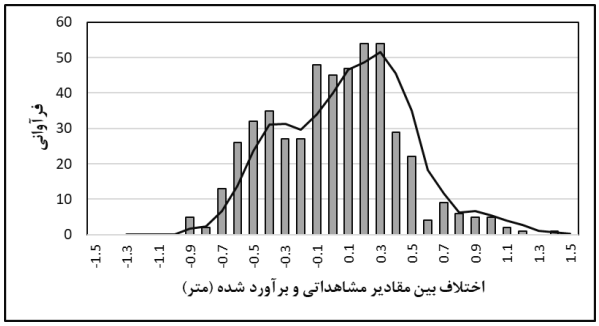
شکل ۷- نمودار پراکندگی مقادیر عمق آب مشاهداتی در محدوده نقاط کنترلی (۵۰۰ نقطه) در مقابل عمق آب برآورد شده با استفاده از تصاویر Landsat-OLI و رابطه رگرسیونی شماره ۳

جدول ۱- جدول تحلیل واریانس مربوط به رابطه رگرسیونی برازش داده شده جهت برآورد عمق آب

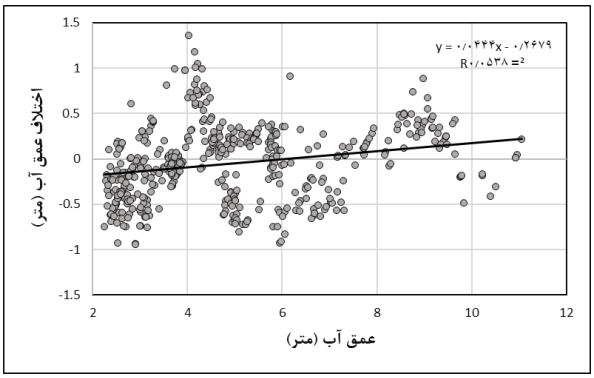
منشأ تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F-statistics	سطح معنی‌داری
رگرسیون	۹۳۵۰	۸	۱۱۶۸/۸	۹۵۶۶	۰/۰۰۰
خطا	۲۶۱	۲۱۳۷	۰/۱۲۲	---	---
کل	۹۶۱۱	۲۱۴۵	---	---	---

جهت تحلیل بهتر میزان دقت نتایج به دست آمده، هیستوگرام مربوط به اختلاف بین مقادیر عمق مشاهداتی و مقادیر برآورد شده در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل نیز نمایان است، اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و برآورد شده عمدتاً در بازه ۰/۹- الی ۱+ متر متغیر است که بیشترین فراوانی در حد فاصل بین ۰/۱- الی ۰/۳+ متر مشاهده می‌گردد. بر این اساس میانگین اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و برآورد شده در حدود صفر به دست آمده است.

همچنین جهت بررسی هرگونه خطای سیستماتیک و ارزیابی رابطه بین میزان خطا با عمق آب، در شکل ۹ رابطه بین مقدار اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و برآورد شده با خود عمق آب ترسیم گردیده است. بر اساس این نمودار می‌توان عنوان کرد که اگرچه رابطه بسیار ضعیفی بین عمق آب و مقدار خطای برآورد عمق آب مشاهده می‌گردد، اما این روند به هیچ عنوان معنادار نیست و نمی‌توان عنوان کرد که با افزایش عمق آب مقدار خطای برآورد شده نیز افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر از اعماق ۲ الی ۴ متر بیشترین مقادیر مطلق خطا در بین این داده‌ها مشاهده می‌گردد. دلیل این موضوع نیز می‌تولند کدورت بالاتر آب در این اعماق در مقایسه با اعماق بالاتر باشد. در مجموع با توجه به شرایط منطقه مورد مطالعه، همانند امواج سطح آب و بخصوص گل آلودگی و کدورت بسیار بیشتر آب دریا در مقایسه با مخازن و یا دریاچه‌های با جریانات آبی کمتر، آماره‌های به دست آمده حکایت از دقت قابل قبول مدل رگرسیونی برازش شده در برآورد عمق آب دارد. در شکل ۱۰ نقشه مکانی اختلاف مقادیر محاسباتی در نقاط کنترلی مشاهداتی نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل نمایان است، توزیع مکانی مشخص و معناداری از میزان اختلاف عمق برآورد شده در سطح منطقه مورد مطالعه مشاهده نمی‌گردد و مقادیر اختلاف عمق در بخش‌های مختلف ساحل پراکنده شده است. اگرچه در برخی مناطق تجمع مقادیر با اختلاف زیاد یا اختلاف کم مشاهده می‌گردد که دلیل این تجمع می‌تواند به کدورت نسبتاً بالاتر آب در برخی مناطق در مقایسه با سایر مناطق اطراف مربوط باشد، اما در مجموع اختلاف اعماق برآورد شده از توزیع نسبی همگنی در سطح منطقه برخوردار است و الگوی مکانی مشخصی در آن مشاهده نمی‌گردد. در شکل ۱۱ نقشه نهایی عمق آب که بر اساس مدل رگرسیونی توسعه داده شده به دست آمده است نشان داده شده است.



شکل ۸- هیستوگرام اختلاف عمق برآورد شده در محدوده نقاط کنترلی (۵۰۰ نقطه) با استفاده از تصاویر Landsat-OLI و رابطه رگرسیونی شماره ۳



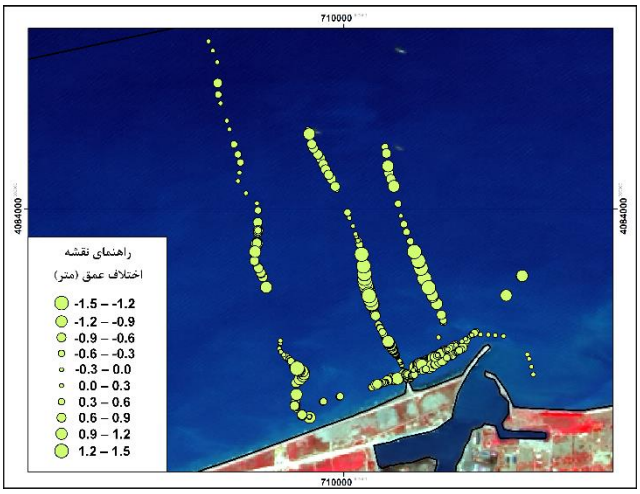
شکل ۹- نمودار پراکندگی بین اختلاف عمق برآورد شده با مقدار عمق آب مشاهداتی

خاطر نشان می‌گردد که از جمله عوامل تأثیرگزار برروی میزان دقت تصاویر ماهواره‌ای در برآورد عمق آب، نوسانات تاز آب به دلیل جزر و مد دریا است. اما دریای خزر برخلاف بسیاری از دریاها و سواحل اقیانوس‌ها از کمترین نوسانات تراز آب به دلیل جزر و مد برخوردار است. بطوریکه دامنه نوسانات تراز آن بر اثر جزر و مد از ۲ الی حداکثر ۱۲ سانتی‌متر در نواحی مختلف متغیر است. این در حالی است که به طور مثال دامنه نوسانات خلیج فارس در طول دوره‌های ۶ و ۱۲ ساعته به حدود ۲ الی ۴ متر نیز می‌رسد که با

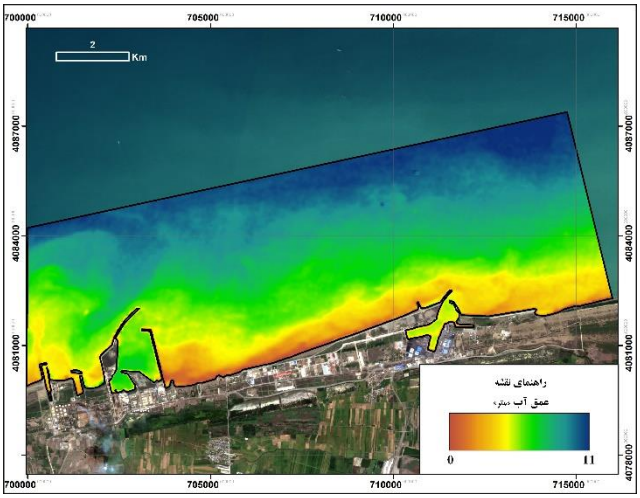
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.2.4]

مقادیر دریای خزر قابل مقایسه نیست. در واقع برخی پهنه‌های آبی همانند دریای بالتیک، دریای سیاه، دریای مدیترانه و همچنین دریای خزر دوره‌های تشدید طبیعی که سازگاری نزدیکی با نیروهای جزر و مدی، چه روزلنه و چه نیمه‌روزلنه، ندارند. از همین رو واکنش شدیدی به این نیروها نشان نمی‌دهند و در نتیجه، جزر و مد چندانی در سواحل این دریاها اتفاق نمی‌افتد و واکنش آنها به این نیروها محدود و در حد سانتی‌متری است. بنابراین با عنایت به عدم وجود نوسانات زیاد در تراز آب دریای خزر و ناچیز بودن این نوسانات، از اثرات احتمالی جز و مد برروی عمق آب برآورد شده از طریق تصاویر ماهواره‌ای در تحقیق حاضر صرف نظر گردیده است.



شکل ۱۰- نقشه پراکندگی اختلاف عمق برآورد شده با مقدار عمق آب مشاهداتی در محدوده نقاط کنترلی (۵۰۰ نقطه)



شکل ۱۱- نقشه عمق‌سنجی سواحل شهرستان نکا (مرداد ۱۳۹۹) با استفاده از تصاویر ماهواره Landsat-OLI

بر اساس نقشه عمق آب استخراج شده، حداقل و حداکثر اعماق به دست آمده به ترتیب برابر با صفر و ۱۱ متر بوده است که میانگین عمق کل منطقه مورد مطالعه برابر با ۷/۴ متر بوده است. لازم به ذکر است مقادیر برآورد شده در اعماق کمتر از ۲ متر (و بخصوص در اعماق کمتر از ۱ متر) از اعتبار چندانی برخوردار نیست. زیرا تعداد نمونه‌های آموزشی و کنترلی که از مناطق ساحلی برداشت گردیده است بسیار اندک بوده (به دلیل عدم امکان استفاده از قایق در اعماق پایین) و به هیچ عنوان نمی‌توان از آن‌ها برای برآورد مناسب عمق آب در این مناطق استفاده کرد. همچنین مطابق با انتظار، با فاصله از ساحل، به مقدار عمق آب به تدریج اضافه شده اما در پاره‌ای از موارد نوسانات جزئی در توپوگرافی بستر دریا نیز مشاهده می‌گردد. نکته قابل توجه در این خصوص، عمق نسبتاً بالای آب در داخل حوضچه‌های نیروگاه نکا و همچنین بندر امیرآباد است. به طوری که عمق آب در داخل حوضچه نیروگاه نکا در حدود ۷ متر و همچنین عمق حوضچه بندر امیرآباد در حدود ۵/۵ متر برآورد گردیده است.

۶ - نتیجه گیری

هدف از انجام تحقیق حاضر، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در برآورد نقشه‌های عمق‌سنجی سواحل دریای خزر است. بدین منظور از تصویر ماهواره Landsat-OLI که جزو رایج‌ترین تصاویر ماهواره‌ای در مطالعات مختلف سنجش از دوری محسوب می‌گردد استفاده شد. در همین راستا اقدام به تهیه مجموعاً ۲۷۰۰ نقطه عمق‌سنجی در سواحل شهرستان نکا (محدوده نیروگاه نکا تا بندر امیرآباد) گردید که حدود ۲۲۰۰ نقطه به‌عنوان نقاط آموزشی و همچنین ۵۰۰ نقطه نیز به‌عنوان نقاط کنترلی مورد استفاده قرار گرفت. جهت برآورد عمق آب با استفاده از تصویر ماهواره‌ای یاد شده، از روابط رگرسیونی خطی چند متغیره استفاده گردید. بدین منظور از باندها و شاخص‌های طیفی به عنوان متغیرهای اصلی برای برآورد عمق آب استفاده گردید و جهت تعیین بهترین مدل رگرسیونی نیز از روش رگرسیونی گام به گام استفاده شد و در نهایت نقشه استخراج شده از این روابط با داده‌های کنترلی مورد راستی آزمایی قرار گرفت.

بر اساس نتایج بدست آمده، ضریب رگرسیونی بین نقاط کنترلی و مقادیر عمق برآورد شده بر اساس رابطه رگرسیونی برازش داده شده در حدود ۰/۹۸ بدست آمده است و همچنین مقدار RMSE حاصله نیز در حدود ۴۰ سانتی‌متر بوده است. از طرفی دیگر مقدار شاخص میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) نیز در حدود ۷/۷ درصد به دست آمده است که نشان دهنده دقت تقریبی ۹۲ درصدی مدل برازش شده در برآورد عمق آب است. بنابراین نتایج حاصله نشان دهنده دقت قابل قبول روش مورد استفاده و همچنین تصویر ماهواره‌ای بکارگرفته شده در برآورد عمق آب منطقه ساحلی مورد مطالعه است.

اگرچه میزان خطای ۷/۷ درصدی در برآورد عمق آب بسیار قابل قبول می‌نماید، اما باید توجه داشت که عوامل مختلفی می‌تواند در برآورد میزان دقت نقشه‌های عمق‌سنجی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای تأثیرگذار باشد. از جمله موضوعاتی که می‌تواند تأثیر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.2.4]

قابل‌توجهی بر روی نتایج عمق‌سنجی داشته باشد تغییرات کدورت آب است. در واقع بر اساس بررسی‌های انجام شده، مشخص گردید که به دلیل جریانات دریایی که در بخش‌های مختلف دریای خزر اتفاق می‌افتد، تغییرات بسیار شدیدی در میزان کدورت آب به‌خصوص در مناطق ساحلی و کم‌عمق به‌صورت ساعتی و روزانه در جریان است. به‌طوری که همان‌طور که در شکل ۱۱ نیز نشان داده شده است، تنها در مدت ۶ روز، تغییرات بسیار زیادی از منظر میزان کدورت در بخش‌های جنوبی و جنوب شرقی دریای خزر و بخصوص سواحل استان مازندران مشاهده می‌گردد. این تغییرات کدورت کاملاً معادلات رگرسیونی که قبلاً برازش داده شده است را بی‌اعتبار می‌نماید و همین موضوع منجر به خطای بالا در مقدار عمق آب برآورد شده می‌گردد.



شکل ۱۲- تغییرات کدورت آب دریای خزر از ۱ الی ۶ سپتامبر ۲۰۲۰ (تصاویر مربوطه مربوط به سنجنده MODIS می‌باشند)

بنابراین به نظر می‌رسد یکی از مهم‌ترین فاکتورهای تعیین‌کننده در میزان دقت برآورد عمق آب ساحل دریای خزر، میزان کدورت آب در زمان انجام مطالعات میدانی و همچنین در زمان اخذ تصاویر ماهواره‌ای است. به‌طوری که اولاً فاصله بین تصویربرداری ماهواره با مطالعات میدانی باید به حداقل مقدار ممکن کاهش یابد، و از طرفی دیگر نیز اندازه‌گیری‌ها باید در زمانی انجام شود که کدورت آب در حداقل مقدار ممکن باشد. در غیر این صورت خطای بسیار زیادی در نتایج حاصله اتفاق می‌افتد. این موضوع بخصوص در مورد مناطق ساحلی و آب‌های کم‌عمق (عمدتاً پایین‌تر از ۷ متر) صادق است، و در اعماق بالاتر تغییرات کدورت تا حدودی کمتر از مناطق ساحلی است. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته از طریق تصاویر MODIS، مشخص گردید که در حدفاصل بین زمان تصویربرداری ماهواره Landsat-OLI تا زمان انجام مطالعات میدانی، تغییرات بسیار ناچیزی در میزان کدورت آب منطقه مورد مطالعه اتفاق افتاده است. در حالی که در روزهای بعد از آن میزان کدورت آب دستخوش تغییرات زیادی شده است. بنابراین جهت بهره‌برداری بهتر از تصاویر ماهواره‌ای در برآورد عمق آب لازم است تا شرایط نرمال‌تری از منظر کدورت آب و همچنین فاصله بین تصویربرداری تا برداشت مطالعات میدانی مدنظر قرار گیرد.

۵ - تشکر و قدردانی

تحقیق حاضر با حمایت مالی و معنوی مؤسسه تحقیقات آب در قالب طرح پژوهشی با کد WE-RIC6-1399-B صورت پذیرفته است که بدینوسیله از همه مدیران و عزیزانی که ما را در انجام هرچه بهتر این تحقیق یاری نمودند تشکر و قدردانی می‌گردد. همچنین از کارشناسان مرکز ملی مطالعات دریای خزر جهت فراهم نمودن امکانات لازم جهت انجام مطالعات میدانی برای برداشت نقاط عمق‌سنجی صمیمانه تشکر می‌گردد.

۶ - مراجع

1-Ashphaq, M., Srivastava, P.K. and Mitra, D., (2021). *Review of near-shore satellite derived bathymetry: classification and account of five decades of coastal bathymetry research*, Journal of Ocean Engineering and Science, In press.

2-Karimi, N., Bagheri, M.H., Hooshyaripor, F., Farokhnia, A. and Sheshangosht, S., (2016), *Deriving and Evaluating Bathymetry Maps and Stage Curves for Shallow Lakes Using Remote Sensing Data*, Water Resources Management, Vol.30, p.5003-5020

3-Ceyhun, Ö. and Yalçın, A., (2010), *Remote sensing of water depths in shallow waters via artificial neural networks*, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol.89, p.89-96

4-Yuzugullu, O. and Aksoy, A., (2013), *Generation of the bathymetry of a eutrophic shallow lake using WorldView-2 imagery*, Journal of Hydroinformatics, Vol.16, p.50-59 16

5-Makboul, O., Negm, A., Mesbah, S. and Mohasseb, M., (2017), *Performance Assessment of ANN in Estimating Remotely Sensed Extracted Bathymetry. Case Study: Eastern Harbor of Alexandria*, Procedia Engineering, Vol.181, p.912-919

6-Jawak, S. and Luis, A., (2016), *High-resolution multispectral satellite imagery for extracting bathymetric information of Antarctic shallow lakes*, Remote Sensing of the Oceans and Inland Waters: Techniques, Applications, and Challenges, Vol.9978, p.1-9

7-Gholamalifard, M., Esmaili-Sari, A., Abkar, A. and Naimi, B., (2013), *Bathymetric Modeling from Satellite Imagery via Single Band Algorithm (SBA) and Principal Components Analysis (PCA) in*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.2.4]

Southern Caspian Sea, International Journal of Environmental Research, Vol.7, p.877-886

8-Heidarian, K., Kaboodvandpour, Sh. And Amanollahi, G., (2016), *Investigation of Zarivar international wetland depth changes using remote sensing and artificial neural network model*, Journal of Geographic space, Vol.53, p.271-289 (In Persian)

9-Green, E.P., Edwards, A.J. and Mumby, P.J., (2000), *Mapping Bathymetry*. *In Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management*, ed. A. Edwards, UNESCO, Paris, France, V.15, p.219 – 235

10-Arsen, A., Crétaux, J.-F., Berge-Nguyen, M. and Del Rio, R.A., (2014), *Remote Sensing-Derived Bathymetry of Lake Poopó*, Remote Sensing, Vol.6, p.407-420

11- Ayana, E.K., Philpot, W.D., Melesse, A.M. and Steenhuis, T.S., (2014), *Bathymetry, Lake Area and Volume Mapping: A Remote-Sensing Perspective*. In A.M. Melesse, W. Abtew, & S.G. Setegn (Eds.), Nile River Basin (pp. 253-267): Springer International Publishing

12-Duguay, C.R. and Lafleur, P.M, (2003), *Determining depth and ice thickness of shallow sub-Arctic lakes using space-borne optical and SAR data*, International Journal of Remote Sensing, Vol.24, p.475-489

13-Jay, S. and Guillaume, M., (2014), *A novel maximum likelihood based method for mapping depth and water quality from hyperspectral remote-sensing data*, Remote Sensing of Environment, Vol.147, p.121-132

14-Kanno, A., Tanaka, Y., Kurosawa, A. and Sekine, M, (2013), *Generalized Lyzenga's Predictor of Shallow Water Depth for Multispectral Satellite Imagery*, Marine Geodesy, Vol.36, p.365-376

15-Majozi, N.P., Salama, M.S., Bernard, S., Harper, D.M. and Habte, M.G., (2014), *Remote sensing of euphotic depth in shallow tropical inland waters of Lake Naivasha using MERIS data*, Remote Sensing of Environment, Vol.148, p.178-189

16-Tripathi, N.K. and Rao, A.M., (2002), *Bathymetric mapping in Kakinada Bay, India, using IRS-1D LISS-III data*, International Journal of Remote Sensing, Vol.23, p.1013-1025

17-Van Hengel, W. and Spitzer, D., (1991), *Multi-temporal Water Depth Mapping by Means of Landsat TM*, International Journal of Remote Sensing, Vol.4, p.703-712

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.2.4]