دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی علمی فضای جغرافیایی

سال بیست‌ودوم، شماره‌ی ۷۹
پاییز ۱۴۰۱، صفحات ۸۶-۶۷

DOI:10.52547/GeoSpa.22.3.67

*کاظم رنگزن[۱]
مصطفی کابلی زاده[۲]
دانیا کریمی[۳]

عمق سنجی مناطق ساحلی مبتنی بر روش‌های هیبرید نوین و مبتنی بر روش‌های تلفیق تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ و لندست ۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۸

چکیده

هدف این تحقیق بهره‌گیری از روش‌های نوین به‌منظور ارتقاء دقت عمق سنجی ابتدا با به‌کارگیری روش‌های پیشنهادی مبتنی بر تلفیق تصاویر سنتینل-۲ و لندست ۸ و سپس مبتنی بر روش‌های هیبرید تلفیق است. بدین ترتیب، عمق سنجی در دو منطقه موردمطالعه یعنی خلیج چابهار و خور موسی مبتنی بر سناریوهای مختلف انجام شد. این سناریوها شامل روش سنتی نسبتی، روش‌های پیشنهادی مبتنی بر تلفیق تصاویر به سه روش تلفیق شدت- رنگ- اشباع، تبدیل گرام- اشمیدت و تبدیل براووی و روش‌های پیشنهادی مبتنی بر تلفیق هیبرید تصاویر می‌باشند. به‌منظور اجرای عمق سنجی مبتنی بر تلفیق هیبرید پیشنهادی، خروجی تبدیل تصویر بر اساس روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی با تصویر ورودی مربوط به بهترین نقشه عمق سنجیِ مبتنی بر تلفیق تصاویر در سطح دیگری از تلفیق با یکدیگر ادغام شدند. نتایج عمق سنجی خلیج چابهار نشان داد که در مقایسه با مدل سنتی نسبتی، مدل‌های پیشنهادی مبتنی بر تلفیق تصاویر به دو روش براووی و گرام- اشمیدت و مبتنی بر روش هیبرید حاصل از ادغام آنالیز مؤلفه‌های اصلی و روش تلفیق گرام- اشمیدت بهترین نتایج عمق سنجی را به‌دست داده‌اند. در خصوص عمق سنجی خور موسی نیز روش عمق سنجی پیشنهادی مبتنی بر تلفیق هیبرید آنالیز مؤلفه‌های اصلی و روش شدت-

*۱- گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهیدچمران اهواز، اهواز، ایران. (نویسنده مسئول). E-mail: kazemrangzan@scu.ac.ir
۲- گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهیدچمران اهواز، اهواز، ایران.
۳- گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهیدچمران اهواز، اهواز، ایران.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

رنگ- اشباع در مقایسه با مدل سنتی نسبتی بهترین نتیجه را به وجود آورده است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که مناسب بودن تعداد و توزیع نقاط میدانی عمق با توپوگرافی منطقه تأثیر زیادی در دقت عمق سنجی دارد.

کلید واژه‌ها: عمق سنجی، روش سنتی نسبتی، تلفیق تصاویر، سنتینل-۲، لندست ۸، خلیج چابهار، خور موسی.

مقدمه

عمق سنجی اندازه‌گیری عمق زیر آب (Renga et al., 2014) و به‌عبارت‌دیگر اندازه‌گیری عمق برای مطالعه توپوگرافی بستر پهنه‌های آبی ازجمله اقیانوس‌ها، دریاها، رودخانه‌ها و دریاچه‌ها است (Jawak and Luis, 2015). ویژگی‌های زیر آب و عمق سنجی یکی از اطلاعات ضروری برای مهندسی و مدیریت ساحلی و همچنین برای بهره‌برداری و حفاظت از سواحل است. به‌عنوان‌مثال، داشتن اطلاعات دقیق در مورد عمق آب برای حمل‌ونقل ایمن، ماهیگیری ساحلی و آبزی‌پروری، تحقیقات جزر و مد و تنوع زیستی، برنامه‌ریزی اسکله و سایر فعالیت‌های انسانی که در مناطقی با عمق آب کم‌تر از ۱۰۰ متر انجام می‌شود بسیار مفید و ضروری است. همچنین سازه‌های زیر آب ساخته‌شده توسط انسان مانند خطوط لوله، کابل‌های مسیریابی و نیروگاه‌ها نیاز به اطلاعات دقیق عمق آب دارند (Boccia et al., 2015). معمولاً اندازه‌گیری‌های سنتی عمق آب توسط سیستم‌های سونار تک پرتو یا چند پرتو حمل شده توسط کشتی‌ها انجام می‌شود که می‌توانند داده‌هایی با دقت بالا تهیه کنند، اما نه‌تنها پرهزینه و وقت‌گیر بلکه در مناطق کم‌عمق و مکان‌های خاص مثل مرزهای سیاسی، نقشه‌برداری منظم عمق امکان‌پذیر نیست (Zhang et al., 2017). سیستم‌های مختلف مشاهداتی برای عمق سنجی شامل موارد زیر است: ۱) سیستم‌های فعال (سونار[4] تک پرتو یا چند پرتو و سیستم تشخیص و مسافت یابی نوری[5] یا لیدار و همچنین سیستم‌های راداری فعال (رادار روزنه واقعی[6] یا RAR و رادار روزنه مصنوعی[7] یا SAR) که اجرای روش‌های قوی برای تهیه داده‌های باکیفیت بالا را امکان‌پذیر می‌کنند و ۲) سیستم‌های غیرفعال (سنسورهای چندطیفی و ابرطیفی) بر اساس سکوی هوایی یا ماهواره‌ای که به‌کارگیری داده‌های سنجش از دور باقابلیت پوشش مناطق بزرگ با هزینه کم را برای اندازه‌گیری عمق فراهم می‌کنند. الگوریتم‌های عمق سنجی بر اساس پس‌زمینه آن‌ها شامل دو دسته است: ۱) الگوریتم‌های مبتنی بر بازتاب نور خورشید و خصوصیات شیمیایی و فیزیکی آب و ۲) الگوریتم‌های مبتنی بر فرآیندهای هیدرودینامیکی. گروه اول شامل سه دسته است: الف) الگوریتم‌های مبتنی بر معادله انتقال تابش الکترومغناطیسی در آب، ب) مدل‌های تجربی که بر اساس رابطه آماری بین مقادیر پیکسل و داده‌های میدانی عمق آب استند و ج) مدل‌های حاصل از ادغام هر دو مدل نظری و آماری قبل. طبق تحقیق Jawak and Luis (2015)، گروه شماره ۱ که از تصاویر

4- Sound Navigation and Ranging (SONAR)
5- Light Detection and Ranging (LiDAR)
6- Real Aperture Radar
7- Synthetic Aperture Radar

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

سنجش از راه دور اپتیکی برای عمق سنجی استفاده می‌کند، از دودسته مدل‌های تحلیلی و تجربی تشکیل شده است. متداول‌ترین روش در گروه الگوریتم‌های تجربی، مدل نسبتی پیشنهادی توسط Stumpf et al (2003) و روش خطی ارائه شده توسط Lyzenga et al (2006), lyzenga and Bennett (1988) است. سایر روش‌های تجربی توسط Cogner et al (2006)، Jupp (1988) و غیره ارائه شده است. مدل نسبتی پیشنهادی توسط Stumpf et al (2003) قادر است عمق آب بیش از ۲۵ متر را در شرایط آب شفاف تخمین بزند (Misra et al., 2018). مدل تجربی نسبتی Stumpf et al (2003) نسبت به مدل‌های تحلیلی به داده‌های میدانی کم‌تری احتیاج دارد و استفاده از آن ساده‌تر و در مناطق بزرگ جغرافیایی و محیطی ناهمگن پایدارتر است. سنجش از دور و به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای کاربرد زیادی بویژه در مطالعات زیست محیطی و پهنه‌های آبی دارد (Rangzan et al., 2022 a, b; Rangzan et al., 2020 a; Rangzan et al., 2019 a; Sadeghian et al., 2022). مطالعات عمق‌سنجی زیادی با به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای اپتیکی انجام شده است (Caballero and Stumpf, 2019; Heydarian et al., 2016; Li et al., 2019; Sagawa et al., 2019; Casal et al., 2019; Wang et al., 2019; Traganos et al., 2018; Kabiri, 2017). Wang et al (2019) یک سیستم بردار پشتیبان توزیع مکانی (SVM)[8] برای ارزیابی عمق آب کم‌عمق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نوری ارائه دادند. برخلاف مدل‌های سنتی که از یک مدل جهانی ترکیبی برای پیش‌بینی عمق کل منطقه موردمطالعه استفاده می‌کنند، مدل آن‌ها از SVM های آموزش‌دیده محلی و انتخابات وزن‌دار مکانی استفاده می‌کند تا با استفاده از تصویر چند طیفی آیکونوس-۲[9] و تصویر LiDAR مقدار عمق را پیش‌بینی کنند. این سیستم SVM با توزیع مکانی انحراف پیش‌بینی منطقه‌ای نداشته و مقدار باقیمانده پیش‌بینی آن نیز یک الگوی تصادفی را نشان می‌دهد. مدل آن‌ها در حالت تراکم بسیار کم نمونه میدانی نیز خوب عمل می‌کند. Casal et al (2019) رابطه بین باند تصویر سنتینل-۲ و داده‌های عمق چند پرتو را با استفاده از روش کریجینگ تجزیه‌وتحلیل کردند. نتایج آن‌ها بهبود دقت پیش‌بینی را نشان می‌دهد که پیش‌بینی عملی و مؤثر در اعماق تا ٦ متر رخ داد. Li et al (2019) الگوریتم عمق سنجی جدیدی برای ماهواره پلنت داف[10] و ماهواره‌های مشابه معرفی کردند که برآوردگر عمق را مطابق با شرایط میرایی در ستون آب تنظیم می‌کند. بهترین نتایج این الگوریتم در عمق ٤ تا ۱۰ متر بوده و می‌توان از آن برای تهیه نقشه‌های با وضوح‌بالا استفاده کرد. Traganos et al (2018) از الگوریتم‌های متداول برای عمق سنجی استفاده کردند. این محققان در تحقیق خود از اصلاحات درخشش خورشیدی، ابری و جوی، ترکیب تصویر و نرمال‌سازی رادیومتری برای پرداختن به تداخلات درون تصویری و بین تصویری قبل از آموزش و اعتبارسنجی چهار الگوریتم عمق سنجی مبتنی بر تصاویر ماهواره در سه منطقه در دریای اژه در مدیترانه شرقی استفاده کردند. نتایج آن‌ها اهمیت نرمال شدن رادیومتری را در عمق سنجی مناطق مورد مطالعه تأیید نمود. هدف از این تحقیق بهبود دقت مدل نسبتی سنتی ارائه‌شده توسط Stumpf et al (2003) است. این مدل از مقدار لگاریتم پیکسل تصحیح‌شده جوی برای دو باند، یک ثابت قابل تنظیم برای مقیاس شدن نسبت به عمق، یک ثابت نامتغیر و مقدار جبرانی یا آفست برای زمانی

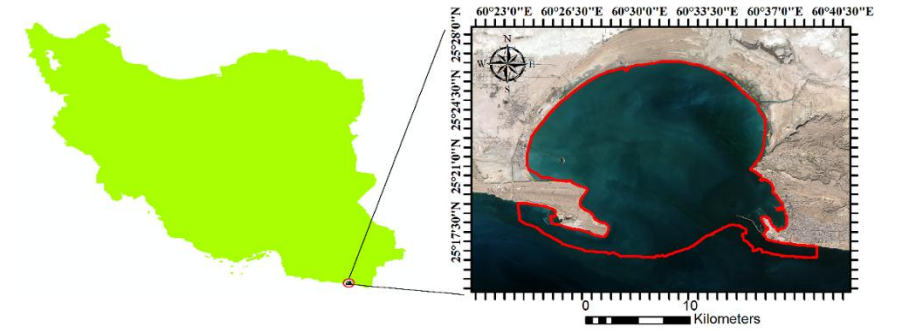
8- Support Vector Machine
9- IKONOS-2
10- Planet Dove

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

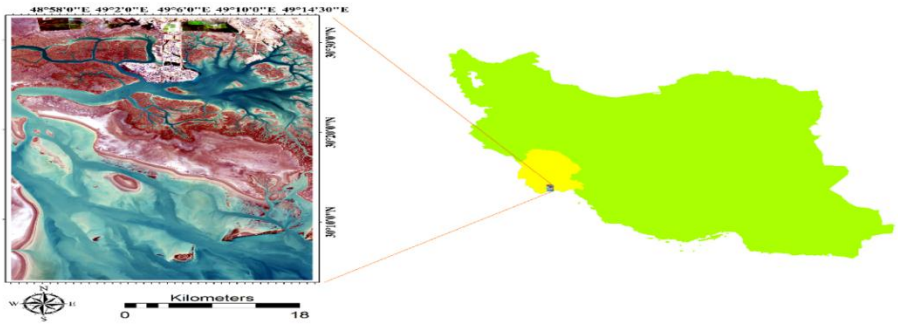
که عمق معادل صفر برای تخمین عمق استفاده می‌کند. در این مدل فقط دو پارامتر قابل تخمین وجود دارد. به منظور بهبود دقت مدل، روش‌های عمق سنجی نوینی مبتنی بر تلفیق تصاویر و مبتنی بر ادغام پروسه تبدیل و پروسه تلفیق تصاویر سنتینل-۲ و لندست ۸ برای سنجش عمق در دو منطقه در سواحل جنوب ایران معرفی می‌شود. پس از اجرای سناریوهای مختلف، بهترین روش عمق سنجی هر منطقه شناسایی خواهد شد. لازم به ذکر است که بر اساس پیشینه‌ی تحقیق مؤلفان، روش‌های عمق سنجی پیشنهادی در این مطالعه تابه‌حال برای عمق سنجی استفاده نشده‌اند.

منطقه مورد مطالعه

اولین منطقه مورد مطالعه خلیج چابهار واقع در جنوب شرقی ایران (شمال خلیج عمان) که بین عرض جغرافیایی ۲۵° ۱۷′ تا ۲۵° ۲۶′ شمالی و طول جغرافیایی ۶۰° ۲۴′ تا ۶۰° ۳۷′ شرقی قرار دارد (شکل ۱- الف).



(الف)



(ب)

شکل ۱: مناطق موردمطالعه: الف) خلیج چابهار، ب) خور موسی

Figure 1: study areas: a) Chabahar Bay, and b) Mousa Estuary

مساحت این خلیج مدور حدوداً ۲۹۰ کیلومترمربع و محیط آن حدوداً ۶۸ کیلومترمربع است. مناطقی با عمق بیش‌تر در قسمت‌های جنوبی خلیج یافت می‌شود، در حالی که قسمت‌های مرکزی دارای عمق حدوداً ۱۰ متر هستند. آب‌وهوای این منطقه گرم و مرطوب بوده، دمای هوا و رطوبت هوا در زمستان بین ۷ درجه سانتی‌گراد و ۵۵ درصد و ۴۷ درجه سانتی‌گراد و ۷۵ درصد در تابستان تغییر می‌کند (Kabiri, 2017). دومین منطقه مورد مطالعه خور موسی

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

در جنوب استان خوزستان و جنوب غرب ایران، بین طول جغرافیایی شرقی "۳۰ '۵۶ °۴۸ تا "۳۰ '۱۴ °۴۹ و عرض جغرافیایی شمالی '۱۰ °۳۰ تا '۳۰ °۳۰ قرار دارد (شکل ۱- ب). خور موسی یک دالان طبیعی دریایی است که در شمال‌غرب خلیج‌فارس واقع شده است. ازلحاظ موقعیت، دهانه خور موسی در ۳۷ کیلومتری شرق رودخانه بهمن‌شیر آبادان قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های عمق میدانی

به‌منظور عمق سنجی خلیج چابهار، تصویر سنتینل-۲A به تاریخ ۲۰۱۵-۱۱-۱۵ با سطح پردازشی MSIL1C به‌صورت تصحیح هندسی شده از سایت سازمان فضایی اروپا یا ESA (https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home) دانلود شد. تصحیح اتمسفری این تصویر با استفاده از ماژول SEN2COR انجام شد. دومین تصویر به کار گرفته شده، تصویر لندست ۸ به تاریخ به تاریخ ۲۰۱۵-۱۱-۲۴ با سطح پردازشی LITP و به‌صورت تصحیح هندسی و اتمسفری شده از سایت سازمان زمین شناسی آمریکا یا USGS (https://earthexplorer.usgs.gov/) دانلود شد. به‌منظور عمق سنجی خور موسی تصویر سنتینل-۲A به تاریخ ۲۰۱۶-۰۳-۱۹ با سطح پردازشی MSIL1C به‌صورت تصحیح هندسی شده از سایت ESA دانلود شد. تصحیح اتمسفری این تصویر نیز با استفاده از ماژول SEN2COR انجام شد. دومین تصویر به کار گرفته شده، تصویر لندست ۸ به تاریخ به تاریخ ۲۰۱۶-۰۳-۲۳ با سطح پردازشی LITP و به‌صورت تصحیح هندسی شده از سایت USGS دانلود شد. تصحیح اتمسفری این تصویر با استفاده از نرم‌افزار ENVI ۴.۸ صورت گرفت. به‌منظور تهیه نمودار دریایی خلیج چابهار بررسی میدانی هیدروگرافی چابهار توسط مرکز ملی نقشه‌برداری ایران (NCC) انجام شد که داده‌های عمق توسط یک اکوساندر تک پرتو با یک سیستم موقعیت‌یاب دیفرانسیل جهانی (DGPS) جمع‌آوری شد که این داده‌ها در دامنه‌ی ۱/۴ تا ۱۵- متر قرار داشتند. صحت و دقت این داده‌ها برای تولید نقشه‌های عمق سنجی با مقیاس ۱:۲۰۰۰ یا کوچک‌تر مناسب است. فاصله بین نقاط مورد بررسی در مناطق مختلف متفاوت بود، به‌طوری که هرچه توپوگرافی خشن‌تر باشد، فاصله بین نقاط کم‌تر است. مقادیر عمق بر اساس اطلاعات جزر و مدی حاصل از منطقه موردمطالعه (به‌دست‌آمده از NCC، گروه هیدرو گرافی) برای تاریخ و زمان عبور ماهواره تنظیم شد (Kabiri, 2017). عمق سنجی میدانی خور موسی در اسفندماه ۱۳۹۴ در محدوده‌ی خور موسی توسط دستگاه عمق‌یاب اکوساندر هوندکس انجام شد. دامنه عمق میدانی اندازه‌گیری شده بین ۱ تا ۶۲/۳ متر است. نکته بسیار مهم در مورد داده‌های میدانی عمق خور موسی تعداد بسیار کم و توزیع نامناسب نقاط برداشت در مقایسه با منطقه چابهار است. خلیج چابهار با مساحتی کم‌تر از خور موسی دارای ۱۰۲۹۹۸ داده میدانی عمق با فواصل کم و بسیار منظم است درصورتی‌که خور موسی تنها دارای ۱۹۳ نقطه میدانی عمق با فواصل زیاد و توزیع نامناسب است. بدون شک هر چه تعداد داده‌های میدانی عمق بیش‌تر، منظم‌تر و دارای فواصل برداشت متناسب با تغییرات توپوگرافی منطقه باشد عمق سنجی دقیق‌تر انجام خواهد شد. جدول زیر مشخصات تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های میدانی را نشان می‌دهد.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

جدول ۱- مشخصات تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های میدانی مورد استفاده

Table 1- The characteristics of utilized satellite imageries and field depth data

تصاویر ماهواره‌ای خلیج چابهار					
تصویر	سطح پردازشی	پلتفرم	تاریخ تصویربرداری	تعداد باند	قدرت تفکیک مکانی (متر)
سنتینل-۲	L1C	S2A	۱۵-۱۱-۲۰۱۵	۱۳	۱۰
لندست ۸	L1TP		۲٤-۱۱-۲۰۱۵	۱۱	۱۵ و ۳۰
تصاویر ماهواره‌ای خور موسی					
تصویر	سطح پردازشی	پلتفرم	تاریخ تصویربرداری	تعداد باند	قدرت تفکیک مکانی (متر)
سنتینل-۲	L1C	S2A	۱۹-۰۳-۲۰۱٦	۱۳	۱۰
لندست ۸	L1TP		۲۳-۰۳-۲۰۱٦	۱۱	۱۵ و ۳۰
داده عمق میدانی خلیج چابهار			داده عمق میدانی خور موسی		
دستگاه سنجش عمق		دامنه تغییرات عمق	دستگاه سنجش عمق		دامنه تغییرات عمق
اکوساندر تک پرتو با یک سیستم موقعیت‌یاب دیفرانسیل جهانی		۱/٤ تا ۱۵- متر	دستگاه عمق‌یاب اکوساندر هوندکس		۱ تا ٦۲/۳ متر

تلفیق تصاویر

توسعه‌ی سریع علم سنجش‌ازدور در سال‌های اخیر و گسترش کاربردهای تصاویر چند سنجنده‌ای، باعث اهمیت روزافزون تلفیق تصاویر[11] به‌منظور دستیابی به داده‌هایی با اطلاعات طیفی و مکانی بالا شده است. هدف از تلفیق داده‌های سنجنده‌های مختلف که به معنی ترکیب اطلاعات تصاویر حاصل از دو یا تعداد بیش‌تری سنجنده است، ترکیب اطلاعات مکمل آن‌ها برای به‌دست آوردن تصویر یا داده‌ای است که نسبت به تصاویر اولیه دارای اطلاعات مفید بیش‌تری است (Karimi et al., 2016 and 2017). در این پژوهش از روش‌های مبتنی بر پیکسل به‌منظور تلفیق تصاویر استفاده می‌شود که شامل روش شدت-رنگ-اشباع[12] یا IHS (Pohl and Van Genderen, 2016; Liu and Xiao, 2018)، تبدیل گرام-اشمیدت[13] یا GST (Pohl and Van Genderen, 2016a؛ Rangzan et al., 2019 b and 2020 b;) و تبدیل براووی[14] یا BT (Pohl and Van Genderen, 2016) می‌باشند.

آنالیز مؤلفه اصلی[15] (PCA)

PCA به‌منظور استخراج امضاهای طیفی ترجیحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. PCA به‌طور گسترده در بسیاری از زمینه‌های تحقیقاتی مورد استفاده قرارگرفته است تا ابعاد فضای سنسور اصلی را کاهش داده و تحلیل‌های بعدی را

11- Image Fusion
12- Intensity- Hue- Saturation (HIS)
13- Gram- Schmidt Transform (GST)
14- Brovey Transform (BT)
15- Principal Component Analysis (PCA)

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

ساده کند. PCA به‌صورت خطی مجموعه‌ای از باندهای داده ورودی را به تعداد مساوی از متغیرهای خطی غیر همبسته (مؤلفه‌های اصلی، رایانه‌های شخصی) تبدیل می‌کند که هر یک به‌ترتیب بزرگ‌ترین بخش ممکن از واریانس داده‌های باقی‌مانده را شامل می‌شود (Kambhatla and Leen, 1997).

روش سنتی نسبتی عمق سنجی

Stumpf et al (2003) به‌منظور برآورد عمق آب مدل نسبتی [16] را به‌صورت زیر پیشنهاد دادند:

رابطه (۱)
$$Z = m_1 \frac{\ln(nR_w(\lambda_i))}{\ln(nR_w(\lambda_j))} - m_0$$

که Rw(λi) و Rw(λj) مقدار پیکسل تصحیح‌شده جوی برای باندهای i و j، m1 یک ثابت قابل تنظیم برای مقیاس شدن نسبت به عمق، n یک ثابت نامتغیر، عمدتاً برای اطمینان از مقدار مثبت پس از تبدیل لگاریتمی و پاسخ خطی بین نسبت و عمق، m0 مقدار جبرانی یا آفست برای زمانی که Z= ۰ است. در این مدل نسبتی و غیرخطی، فقط دو پارامتر (m0 و m1) باید تخمین زده شوند (Deng et al., 2008). درواقع Stumpf et al (2003) یک مدل جایگزین برای تعیین عمق سنجی ارائه دادند که به شکل بهتری کدورت آب را در نظر می‌گیرد. از مزایای این مدل این است که به‌جای چندین باند طیفی فقط دو باند طیفی استفاده می‌شود و می‌توان آن را به ویژگی‌های با آلبدوی کم نیز اعمال کرد (Jawak and Luis, 2015). در واقع Stumpf et al (2003) یک مدل تبدیل غیرخطی نوین ارائه دادند که در مقایسه با مدل‌های لگاریتمی–خطی (که به‌طور گسترده به‌کار می‌روند) این مدل نوین پیش‌بینی دقیق‌تری برای زیستگاه‌های آبی عمیق و زیستگاه‌های کم‌عمق با بازتاب کم (مانند جلبک‌های بسیار متراکم یا علف دریایی متراکم) به‌دست می‌آورد.

روش عمق سنجی پیشنهادی

در این تحقیق روش‌های نوینی ابتدا مبتنی بر تلفیق تصاویر و سپس مبتنی بر ادغام PCA و تلفیق تصاویر به‌منظور بهبود نتایج حاصل از مدل نسبتی سنتی عمق سنجی ارائه شده است. در مرحله اول، PCA برای تبدیل تصاویر اعمال می‌شود. در مرحله دوم تلفیق تصاویر سنتینل–۲ و لندست ۸ بر اساس روش‌های تلفیق تصویر (ImF) شامل مدل‌های تلفیقی IHS، BT و GST اجرا می‌گردد. مرحله سوم تلفیق خروجی PCA با بهترین خروجی تصاویر تلفیق‌شده به روش ترکیبی است که به‌عنوان روش PCAImF نام‌گذاری شد. ارزیابی و صحت‌سنجی نتایج بر اساس پارامتر آماری ریشه حداقل مربعات خطا[17] یا RMSE (معادله ۱) انجام می‌شود.

رابطه (۲)
$$RMSE = \sqrt{\frac{\Sigma(X_p - X_o)^2}{N}}$$

16- Ratio model
17- Root Mean Square Error (RMSE)

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

که در آن XP متغیر پیش‌بینی‌شده است، XO متغیر مشاهده‌شده و N تعداد متغیرهای مشاهده شده است (Elhag et al., ۲۰۱۹). ماسک کردن پیکسل‌های خشکی با به‌کارگیری شاخص تفاضلی آب نرمال شده[۱۸] (NDWI) با استفاده از معادله زیر انجام شد.

رابطه (۳)

$$NDWI = \frac{G - NIR}{G + NIR}$$

که G باند سبز و NIR باند مادون‌قرمز نزدیک مربوط به تصویر ورودی است. جدول (۲) تعریف اسامی مخفف به کار رفته در این پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۲- تعریف اسامی مخفف مربوط به تصاویر ورودی

Table 2- Definition of abbreviation names related to input images

#	مخفف	تعریف	#	مخفف	تعریف
۱	L8	لندست ۸	۱۱	IHS_ratio model	مدل نسبتی مبتنی بر تصویر تلفیق‌شده بروش IHS
۲	S2A	سنتینل-۲A	۱۲	PCAImF methods	تلفیق خروجی روش PCA و خروجی تلفیق تصاویر
۳	PCA	تبدیل مؤلفه‌های اصلی	۱۳	PCAImF_ratio models	مدل نسبتی مبتنی بر تلفیق خروجی روش PCA و خروجی تلفیق تصاویر
٤	GST	روش تلفیق گرام-اشمیدت	١٤	PCAGST_ratio model based on GST	مدل نسبتی مبتنی بر تلفیق خروجی روش PCA و خروجی تلفیق GST بروش GST
٥	IHS	روش تلفیق شدت رنگ اشباع	١٥	PCAGST_ratio model based on IHS	مدل نسبتی مبتنی بر تلفیق خروجی روش PCA و خروجی تلفیق GST بروش IHS
٦	BT	روش تلفیق براووی	١٦	PCAGST_ratio model based on BT	مدل نسبتی مبتنی بر تلفیق خروجی روش PCA و خروجی تلفیق GST بروش BT
٧	ImF	تلفیق تصاویر	١٧	PCABT_ratio model based on GST	مدل نسبتی مبتنی بر تلفیق خروجی روش PCA و خروجی تلفیق BT بروش GST
٨	ImF_ratio model	مدل نسبتی مبتنی بر تصویر تلفیق‌شده	١٨	PCABT_ratio model based on BT	مدل نسبتی مبتنی بر تلفیق خروجی روش PCA و خروجی تلفیق BT بروش BT
٩	BT_ratio model	مدل نسبتی مبتنی بر تصویر تلفیق‌شده بروش BT	١٩	PCABT_ratio model based on IHS	مدل نسبتی مبتنی بر تلفیق خروجی روش PCA و خروجی تلفیق BT بروش IHS
١٠	GST_ratio model	مدل نسبتی مبتنی بر تصویر تلفیق‌شده بروش GST			

18- Normalize Difference Water Index (NDWI)

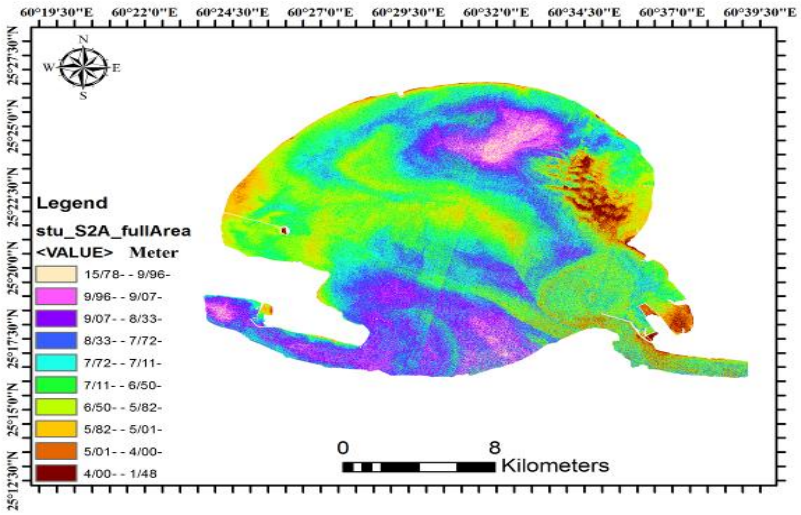
[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

یافته‌ها و بحث

به‌منظور تولید مدل‌های عمق سنجی، منطقه مورد مطالعه به دو بخش آموزش و تست تقسیم و مدل‌ها با در نظر گرفتن داده‌های آموزش تولید و در انتها، با در نظر گرفتن داده‌های تست، صحت سنجی مدل‌ها در کلاس‌های مختلف عمق صورت می‌گیرد. هدف این بخش ارزیابی قابلیت مدل‌های عمق سنجی پیشنهادی در بهبود نتایج عمق سنجی است. قابل ذکر است که عمق سنجی خلیج چابهار بر اساس ۱۰ سناریو و عمق سنجی خور موسی بر اساس ۷ سناریو انجام خواهد شد. همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد، به‌منظور ایجاد داده‌های ورودی مفیدتر، از روش‌های PCA، ImF و PCAImF استفاده شد و در کنار تصاویر اولیه، ۲۷ ورودی جدید برای عمق سنجی خلیج چابهار و ۱۸ ورودی جدید برای عمق سنجی خور موسی به‌دست آمد.

عمق سنجی خلیج چابهار مبتنی بر مدل سنتی نسبتی

پس از ماسک کردن پیکسل‌های خشکی و همچنین پیکسل‌های مربوط به قایق و کشتی‌های موجود در سطح آب، نقشه عمق سنجی به‌دست آمده بروش نسبتی سنتی مبتنی بر به‌کارگیری تصویر S2A به‌صورت زیر به‌دست آمد (شکل ۲).



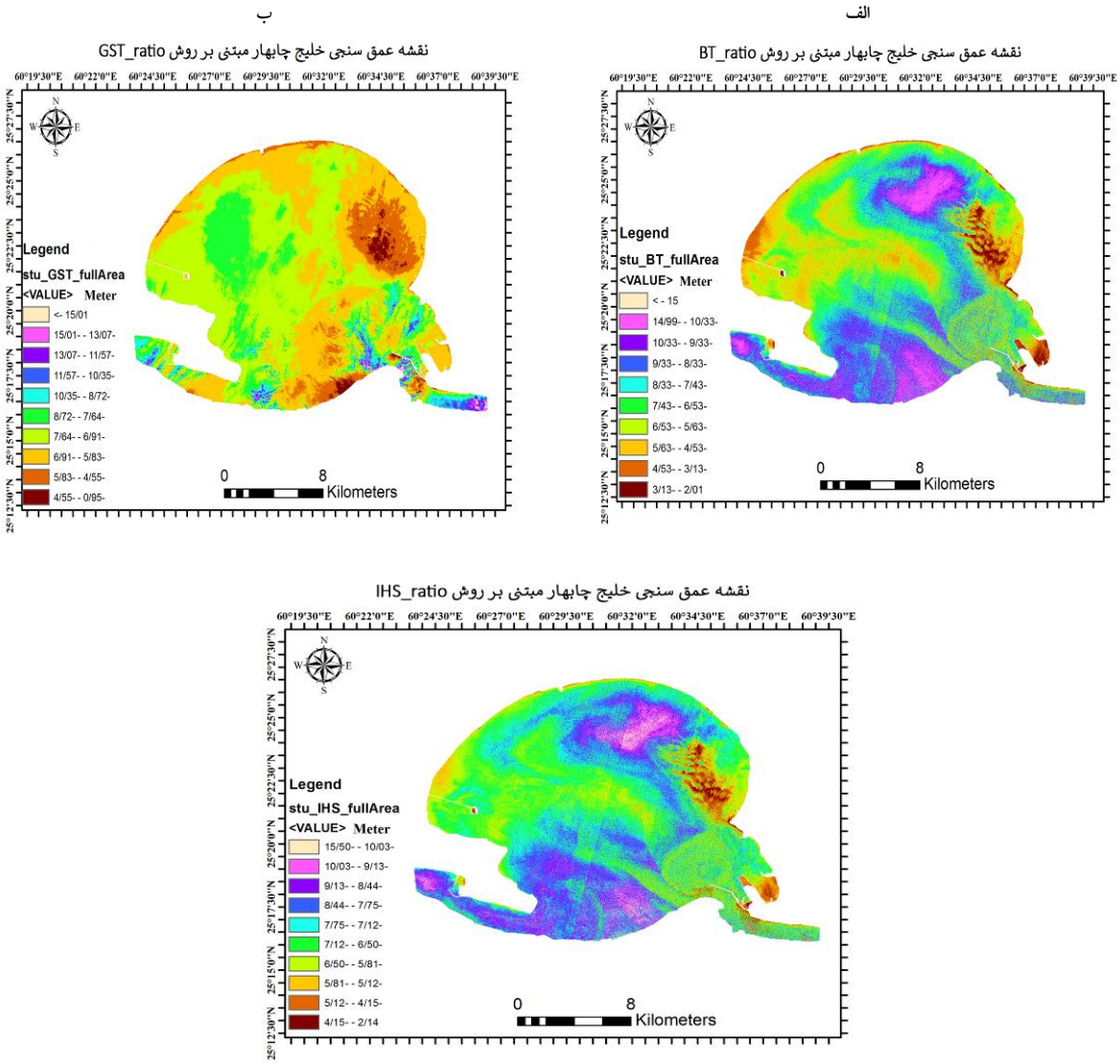
شکل ۲: نقشه عمق سنجی خلیج چابهار بروش سنتی نسبتی مبتنی بر به‌کارگیری تصویر S2A

Figure 2: Bathymetry map of Chabahar Bay of traditional ratio based on S2A image

عمق سنجی خلیج چابهار مبتنی بر مدل پیشنهادی ImF_ratio

در این مرحله سه روش تلفیق BT، IHS و GST به‌منظور تلفیق دو تصویر S2A و L8 اجرا شد و سپس مدل نسبتی جدید عمق سنجی ImF_ratio مبتنی بر خروجی روش‌های تلفیق اجرا گردید. شکل زیر سه نقشه عمق سنجی به‌دست آمده بر اساس مدل‌های ImF_ratio را نمایش می‌دهد.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]



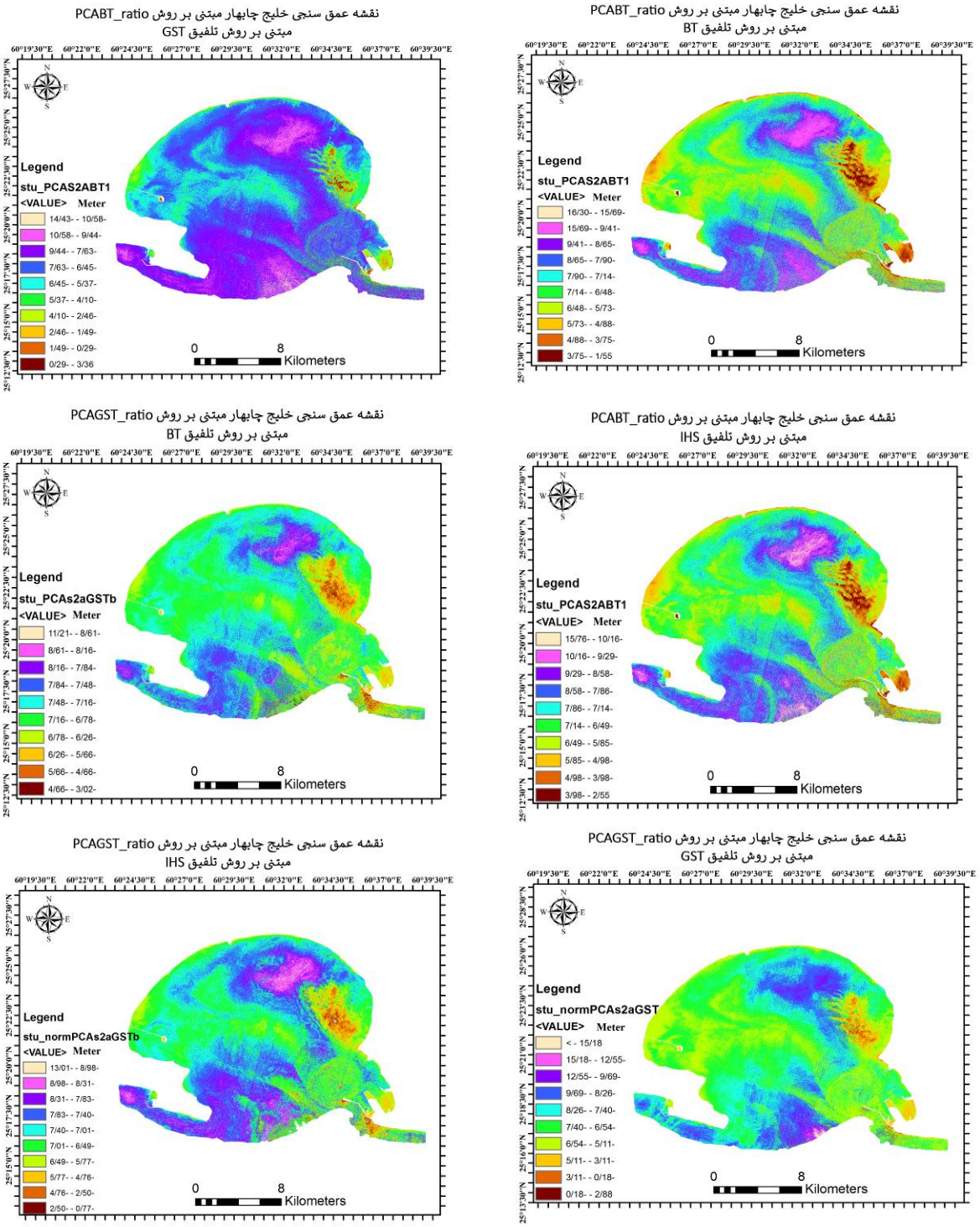
شکل ٤: نقشه عمق سنجی خلیج چابهار بروش ImF_ratio: الف) مبتنی بر روش BT_ratio، ب) مبتنی بر روش GST_ratio و پ) مبتنی بر روش IHS_ratio.

Figure 4: ImF_ratio bathymetry map of Chabahar Bay: a) based on BT_ratio method, b) based on GST_ratio method and c) based on IHS_ratio method.

عمق سنجی خلیج چابهار مبتنی بر روش هیبرید پیشنهادی

به‌منظور اجرای مدل هیبرید پیشنهادی، نقشه مبتنی بر روش PCA_ratio و بهترین نقشه عمق سنجی مبتنی بر روش ImF_ratio برای اجرای مدل پیشنهادی مدنظر قرار گرفتند. بدین ترتیب، تصویر PCA حاصل از تصویر S2A و تصویر ورودی به‌منظور تولید بهترین نقشه مبتنی بر مدل ImF_ratio که به‌ترتیب شامل BT_ratio و GST_ratio می‌باشند (جدول ۲) با یکدیگر تلفیق شده و ورودی پروسه عمق سنجی مبتنی بر روش هیبرید پیشنهادی تولید گردید. شکل (۵) نقشه عمق سنجی به‌دست آمده بر اساس مدل‌های هیبرید پیشنهادی را نمایش می‌دهد.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]



شکل ۵: نقشه عمق سنجی خلیج چابهار: الف) مبتنی بر روش PCABT_ratio بر اساس روش تلفیق BT، ب) مبتنی بر روش PCABT_ratio بر اساس روش تلفیق GST، پ) مبتنی بر روش PCABT_ratio بر اساس روش تلفیق IHS، ت) مبتنی بر روش PCABT_ratio بر اساس روش تلفیق BT، ث) مبتنی بر روش PCAGST_ratio بر اساس روش تلفیق GST، ج) مبتنی بر روش PCAGST_ratio بر اساس روش تلفیق IHS

Figure 5: Bathymetry map of Chabahar Bay: a) based on PCABT_ratio method based on BT integration method, b) based on PCABT_ratio method based on GST integration method, c) based on PCABT_ratio method based on IHS integration method, d) based on method PCABT_ratio based on BT consolidation method, c) based on PCAGST_ratio method based on GST consolidation method, c) based on PCAGST_ratio method based on IHS consolidation method

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

صحت سنجی نقشه‌های عمق سنجی خلیج چابهار

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، به‌منظور تولید مدل‌های عمق سنجی، منطقه موردمطالعه به دو بخش آموزش و تست تقسیم و مدل‌های عمق سنجی با در نظر گرفتن داده‌های آموزش تولید شد. در این مرحله، با در نظر گرفتن داده‌های تست، صحت سنجی مدل‌ها صورت می‌گیرد. به‌منظور صحت سنجی دقیق نتایج، تقسیم عمق منطقه به ۱۱ کلاس صورت گرفت و دقت هر کلاس عمق محاسبه گردید (جدول ۳).

جدول ۳- صحت سنجی نقشه‌های عمق سنجی خلیج چابهار بر اساس کلاس‌های مختلف عمق در بخش تست و بر اساس پارامتر RMSE

Table 3- Validation of bathymetry maps of Chabahar Bay based on different depth classes in the test section and based on the RMSE parameter

	مدل نسبتی (S2A)	GST_ ratio	BT_ ratio	IHS_ ratio	PCA GST_ratio (BT)	PCA GST_ratio (GST)
عمق> ۱-	۵/۷۱	۵/۹٤	٤/۹۸	۵/۹	٦/٤	۵/۹٤
۱- تا ۲-	۵/۰۸	۵/۱۵	٤/۵۵	۵/۲۳	۵/۵۸	۵/۲٦
۲- تا ۳-	٤/۲۹	٤/۱٤	٤	٤/۳۹	٤/۵۹	٤/٤۱
۳- تا ٤-	۳/۳	۳/۳۲	۳/۱۵	۳/۳۹	۳/۵۱	۳/۳۸
٤- تا ۵-	۲/٦٦	۲/۵٦	۲/٦٦	۲/۷۱	۲/٦٤	۲/٦۷
۵- تا ٦-	۲/۱۳	۱/۹۵	۲/۳۵	۲/۱٤	۱/۸۸	۲/۱
٦- تا ۷-	۱/۵٦	۱/۲۲	۲	۱/۵	۱/۰۲	۱/۵٦
۷- تا ۸-	۱/۳٦	۱/۰۵	۱/۸۷	۱/۲۲	۰/٦۸	۱/۲۲
۸- تا ۹-	۱/۷	۱/٤۲	۲/۰۳	۱/۵۹	۱/۳۲	۱/۵۸
۹- تا ۱۰-	۲/٦۷	۲/۲٤	۲/۸۸	۲/۵۷	۲/٤٤	۲/٦۲
عمق <=۱۰-	٤/۹۲	۵/۰۳	٤/۵۲	٤/۹	۵/۰۸	٤/۸۷
صحت کل	۳/۸۱	۳/۸۱	۳/۵۹	۳/۸۳	۳/۹۵	۳/۸۳

	PCA GST_ratio (IHS)	PCA BT_ratio (BT)	PCA BT_ratio (GST)	PCA BT_ratio (IHS)
عمق> ۱-	٦/۲٦	۵/۵۸	۵/۳۲	۵/۷۸
۱- تا ۲-	۵/٤۷	٤/۹۸	٤/۸۲	۵/۱۱
۲- تا ۳-	٤/۵	٤/۲۳	٤/۲۲	٤/۳۲
۳- تا ٤-	۳/٤۵	۳/۲۷	۳/۳۸	۳/۳۲
٤- تا ۵-	۲/٦٤	۲/٦۵	۲/۷۳	۲/٦۳
۵- تا ٦-	۱/۹۸	۲/۱٦	۲/۲۵	۲/۱
٦- تا ۷-	۱/۲۲	۱/٦۳	۱/۷۳	۱/۵۳
۷- تا ۸-	۰/۸۸	۱/٤٦	۱/٤۹	۱/۳۳
۸- تا ۹-	۱/۳۹	۱/۷۷	۱/۷۸	۱/٦٦
۹- تا ۱۰-	۲/٤۸	۲/۷۲	۲/۷۵	۲/٦۲
عمق <=۱۰-	۵/۰۲	٤/۸۷	٤/۷۱	٤/۸۷
صحت کل	۳/۹۱	۳/۷۷	۳/۷	۳/۷۹

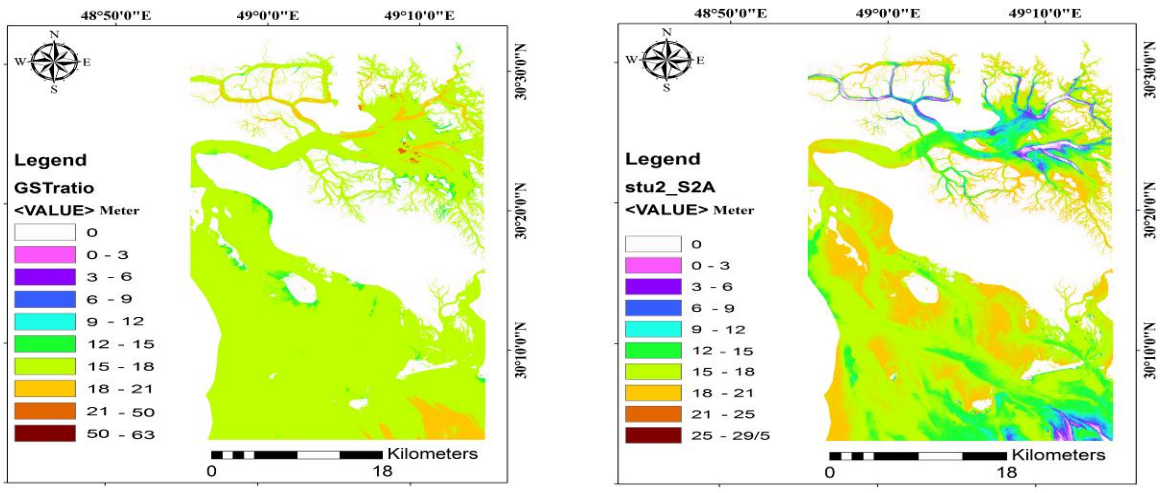
همان‌طور که در جدول فوق دیده می‌شود، بهترین دقت برای عمق سنجی مناطق کم‌عمق‌تر از ۱- متر، ۱- تا ۲- متر، ۲- تا ۳- متر ۳- تا ٤- متر بر اساس مدل BT_ratio و به‌ترتیب معادل با ٤/۹۸، ٤/۵۵، ٤ و ۳/۱۵ است. بهترین دقت

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

برای عمق سنجی مناطق با عمق بین ٤- تا ٥- متر بر اساس مدل GST_ratio و معادل با ۲/٥٦، بهترین دقت برای عمق سنجی مناطق با عمق بین ٥- تا ٦- متر، ٦- تا ۷-، ۷- تا ۸- و ۸- تا ۹- بر اساس مدل PCAGST_ratio مبتنی بر روش تلفیق BT و به‌ترتیب معادل با ۱/۸۸، ۱/۰۲، ۰/٦۸ و ۱/۳۲، بهترین دقت برای عمق سنجی مناطق با عمق ۹- تا ۱۰- متر بر اساس مدل GST_ratio و معادل با ۲/٤٤، بهترین دقت برای عمق سنجی مناطق با عمق بیش از ۱۰- متر بر اساس مدل BT_ratio و معادل با ٤/٥۲ و بهترین صحت کل بر اساس روش BT_ratio و معادل با ۳/٥۹ به‌دست آمد. با توجه به این نتایج به‌راحتی می‌توان دید که در مقایسه با مدل سنتی نسبتی، مدل‌های پیشنهادی مبتنی بر تلفیق تصاویر و مبتنی بر روش هیبرید بهترین نتایج عمق سنجی منطقه مورد مطالعه را به‌دست داده‌اند.

عمق سنجی خور موسی

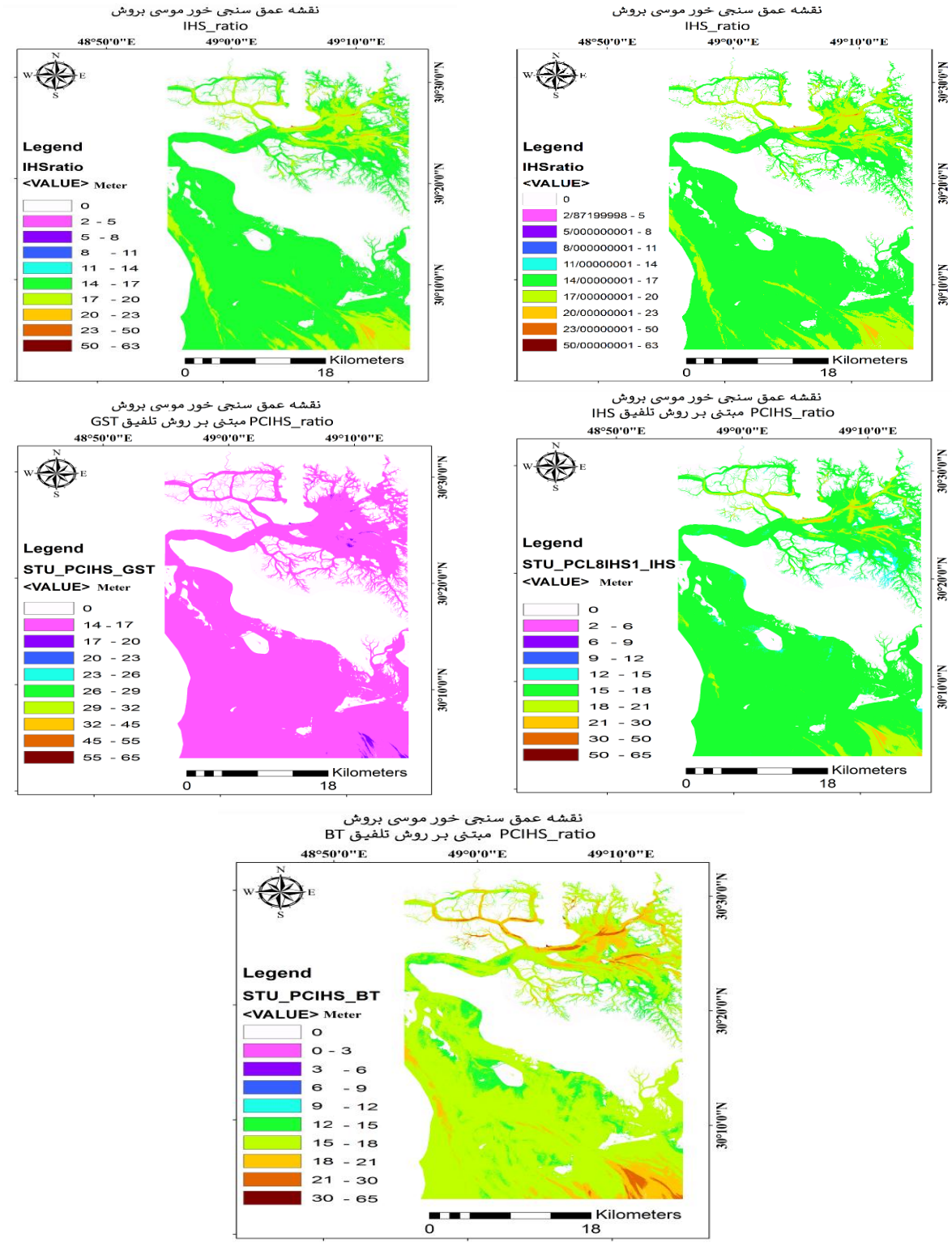
در این بخش عمق سنجی خور موسی بروش سنتی نسبتی، روش‌های پیشنهادی مبتنی بر تلفیق تصاویر و روش‌های هیبرید پیشنهادی انجام می‌شود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، برخلاف خلیج چابهار، تعداد داده‌های عمق میدانی برداشت شده درخور موسی کم بوده و توزیع مناسبی ندارند. این مورد باعث دقت پایین در عمق سنجی منطقه خواهد شد. هدف این بخش ارزیابی قابلیت مدل‌های عمق سنجی پیشنهادی در بهبود دقت عمق سنجی این منطقه است. قابل‌ذکر است که به‌منظور اجرای مدل هیبرید عمق سنجی، با توجه به بالاتر بودن دقت نقشه عمق سنجی مبتنی بر روش تلفیق IHS درخور موسی، تصویر حاصل از اجرای PCA بر روی تصویر S2A و تصویر ورودی به‌منظور تولید بهترین نقشه مبتنی بر مدل ImF_ratio که شامل IHS_ratio است (جدول ۳) با یکدیگر تلفیق شده و ورودی پروسه عمق سنجی مبتنی بر روش هیبرید پیشنهادی تولید گردید. شکل (٦) نقشه‌های عمق سنجی به‌دست آمده را نمایش می‌دهد.



شکل ٦: نقشه عمق سنجی خور موسی: الف) مبتنی بر مدل سنتی نسبتی با به‌کارگیری تصویر S2A، ب) مبتنی بر روش GST_ratio

Figure 6: Mousa estuary bathymetry map: a) based on traditional ratio model using S2A image, b) based on GST_ratio method

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]



ادامه شکل ٦: پ) مبتنی بر روش IHS_ratio و ت) مبتنی بر روش BT_ratio، ث) بروش PCAIHS_ratio مبتنی بر روش تلفیق IHS، ج) به روش PCAIHS_ratio مبتنی بر روش تلفیق GST و چ) بروش PCAIHS_ratio مبتنی بر روش تلفیق BT.

Continue of the Figure 6: c) based on IHS_ratio method and d) based on BT_ratio method, e) PCAIHS_ratio based on IHS fusion method, c) PCAIHS_ratio based on GST fusion method and c) PCAIHS_ratio based on BT fusion method.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

صحت سنجی نقشه‌های عمق سنجی خور موسی

همانند عمق سنجی در خلیج چابهار، درخور موسی نیز به‌منظور تولید مدل‌های عمق سنجی، منطقه مورد مطالعه به دو بخش آموزش و تست تقسیم و مدل‌های عمق سنجی با در نظر گرفتن داده‌های آموزش تولید شد. در این مرحله، با در نظر گرفتن داده‌های تست، صحت سنجی مدل‌ها صورت می‌گیرد. به‌منظور صحت سنجی دقیق نتایج، تقسیم عمق منطقه به ٦ کلاس صورت گرفت و دقت هر کلاس عمق محاسبه گردید (جدول ٤).

جدول ٤- صحت سنجی نقشه‌های عمق سنجی خور موسی بر اساس کلاس‌های مختلف عمق در بخش تست و بر اساس پارامتر RMSE

Table 4- Validation of Mousa estuary bathymetric maps based on different depth classes in the test data and based on the RMSE parameter

	مدل نسبتی (S2A)	GST_ ratio	BT_ ratio	IHS_ ratio	PCA IHS_ratio (BT)	PCA IHS_ratio (GST)	PCA IHS_ratio (IHS)
عمق< ۵	۱٤/۱۱	۱۳/۳۷	۱۳/۳۲	۱۳/۳۱	۱۳/۲۱	۱۳/٤۱	۱۳/۲۸
۵ تا ۱۰	۷/۸٤	۸/۵۷	۸/۵۳	۸/۵۲	۸/٤۵	۸/٦۱	۸/۵٦
۱۰ تا ۱۵	٤/۳۳	٤/۱۸	٤/۱٦	٤/۱٦	٤/۱۳	٤/۱۷	٤/۱۵
۱۵ تا ۲۰	۲/۸٦	۲/۲۹	۲/۲۸	۲/۳	۲/۳۸	۲/۲۷	۲/۲۸
۲۰ تا ۳۰	۹/٤٦	۸/۳۷	۸/۲۲	۸/۱٦	۷/۹٦	۸/٦۹	۸/۱۲
عمق> ۳۰	۲۲/۰۸	۲۱/۳	۲۱/۲٦	۲۱/۳	۲۱/۲۱	۲۱/٤۱	۲۱/۲۸
صحت کل	۱۱/۷۲	۱۱/۲٤	۱۱/۱۹	۱۱/۱۹	۱۱/۱۱	۱۱/۳۲	۱۱/۱۸

همان‌گونه که در جدول فوق قابل‌مشاهده است، بهترین نتیجه برای عمق سنجی مناطق با عمق زیر ۵ متر بر اساس روش PCAIHS_ratio مبتنی بر روش تلفیق BT (RMSE=۱۳/۲۱)، بهترین نتیجه برای عمق سنجی مناطق با عمق بین ۵ تا ۱۰ متر بر اساس مدل نسبتی مبتنی بر به‌کارگیری تصویر S2A (RMSE=۷/۸٤)، بهترین نتیجه برای عمق سنجی مناطق با عمق بین ۱۰ تا ۱۵ متر بر اساس روش PCAIHS_ratio مبتنی بر روش تلفیق BT (RMSE=٤/۱۳)، بهترین نتیجه برای عمق سنجی مناطق با عمق بین ۱۵ تا ۲۰ متر بر اساس روش PCAIHS_ratio مبتنی بر روش تلفیق GST (RMSE=۲/۲۷)، بهترین نتیجه برای عمق سنجی مناطق با عمق بین ۲۰ تا ۳۰ متر بر اساس روش PCAIHS_ratio مبتنی بر روش تلفیق BT (RMSE=۷/۹٦)، بهترین نتیجه برای عمق سنجی مناطق با عمق بیش از ۳۰ متر بر اساس روش PCAIHS_ratio مبتنی بر روش تلفیق BT (RMSE=۲۱/۲۱) و بهترین نتیجه عمق سنجی کل منطقه مورد مطالعه با در نظر گرفتن تمامی داده‌های تست نیز بر اساس روش PCAIHS_ratio مبتنی بر روش تلفیق BT (RMSE=۱۱/۱۱) است. با توجه به این نتایج دیده می‌شود که متد پیشنهادی PCAIHS_ratio مبتنی بر روش تلفیق BT در مقایسه با روش‌های سنتی عمق سنجی، بهترین متد به‌منظور عمق سنجی منطقه موردمطالعه است. بر اساس نتایج فوق به‌راحتی می‌توان دید که در مقایسه با روش سنتی نسبتی، روش هیبرید پیشنهادی در ۵ کلاس از ٦ کلاس موردمطالعه و همچنین در صحت کل، نتایج بهتری به‌دست داده است. مجدداً تکرار می‌شود که دقت کم‌عمق سنجی خور موسی به دلیل تعداد و توزیع نامناسب نقاط میدانی عمق و همچنین کدورت بالای آب در

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

این منطقه است. این مورد همچنین اثبات کننده‌ی تاثیر بالای متناسب بودن تعداد و توزیع داده‌های عمق با توپوگرافی منطقه مورد مطالعه در نتایج عمق سنجی می‌باشد. همان‌طور که قبلاً گفته شد، نقاط میدانی عمق در خلیج چابهار به‌صورت متناسب با توپوگرافی منطقه برداشت شده بودند و بهمین دلیل، دقت عمق سنجی آن منطقه بسیار بالاتر از خور موسی به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به دنبال بهره‌گیری از روش‌های نوین به‌منظور ارتقاء دقت عمق سنجی ابتدا با به‌کارگیری روش‌های پیشنهادی مبتنی بر تلفیق تصاویر سنتینل-۲ و لندست ۸ و سپس با به‌کارگیری روش‌های مبتنی بر تلفیق هیبرید تصاویر است. بدین ترتیب، عمق‌سنجی در دو منطقه مورد مطالعه یعنی خلیج چابهار و خور موسی مبتنی بر سناریوهای مختلف انجام شد تا با مقایسه نتایج به‌دست آمده، بهترین سناریوی عمق سنجی هر منطقه مشخص گردد. این سناریوها شامل روش سنتی نسبتی، روش‌های عمق سنجی پیشنهادی مبتنی بر تلفیق تصاویر سنتینل-۲ و لندست ۸ به سه روش تلفیق IHS، GST و BT و روش‌های عمق سنجی پیشنهادی مبتنی بر تلفیق هیبرید تصاویر می‌باشند. به‌منظور اجرای عمق سنجی مبتنی بر تلفیق هیبرید پیشنهادی، خروجی تبدیل تصویر بر اساس روش PCA با تصویر ورودی مربوط به بهترین نقشه عمق سنجی مبتنی بر تلفیق تصاویر، در سطح دیگری از تلفیق با یکدیگر ادغام شدند. نتایج نشان داد که بهترین دقت برای عمق سنجی در خلیج چابهار در مناطق کم‌عمق‌تر از ۱- متر، ۱- تا ۲- متر، ۲- تا ۳- متر ۳- تا ٤- متر بر اساس مدل BT_ratio است. بهترین دقت برای عمق سنجی مناطق با عمق بین ٤- تا ۵- متر بر اساس مدل GST_ratio، بهترین دقت برای عمق سنجی مناطق با عمق بین ۵- تا ٦- متر، ٦- تا ۷-، ۷- تا ۸- و ۸- تا ۹- بر اساس مدل PCAGST_ratio مبتنی بر روش تلفیق BT، بهترین دقت برای عمق سنجی مناطق با عمق ۹- تا ۱۰- متر بر اساس مدل GST_ratio، بهترین دقت برای عمق سنجی مناطق با عمق بیش از ۱۰- متر بر اساس مدل BT_ratio و بهترین صحت کل بر اساس روش BT_ratio به‌دست آمد. می‌توان دید که در مقایسه با مدل سنتی نسبتی، مدل‌های پیشنهادی مبتنی بر تلفیق تصاویر و مبتنی بر روش هیبرید بهترین نتایج عمق سنجی خلیج چابهار را به دست داده‌اند. در عمق سنجی خور موسی بهترین نتیجه برای عمق سنجی مناطق با عمق زیر ۵ متر بر اساس روش PCAIHS_ratio مبتنی بر روش تلفیق BT، بهترین نتیجه برای عمق سنجی مناطق با عمق بین ۵ تا ۱۰ متر بر اساس مدل نسبتی مبتنی بر به‌کارگیری تصویر S2A، بهترین نتیجه برای عمق سنجی مناطق با عمق بین ۱۰ تا ۱۵ متر بر اساس روش PCAIHS_ratio مبتنی بر روش تلفیق BT، بهترین نتیجه برای عمق سنجی مناطق با عمق بین ۱۵ تا ۲۰ متر بر اساس روش PCAIHS_ratio مبتنی بر روش تلفیق GST، بهترین نتیجه برای عمق سنجی مناطق با عمق بین ۲۰ تا ۳۰ متر بر اساس روش PCAIHS_ratio مبتنی بر روش تلفیق BT، بهترین نتیجه برای عمق سنجی مناطق با عمق بیش از ۳۰ متر بر اساس روش PCAIHS_ratio مبتنی بر روش تلفیق BT و بهترین نتیجه عمق سنجی کل منطقه مورد مطالعه با در نظر گرفتن تمامی داده‌های تست نیز بر اساس روش

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

PCAIHS_ratio مبتنی بر روش تلفیق BT است. با توجه به این نتایج دیده می‌شود که روش پیشنهادی PCAIHS_ratio مبتنی بر روش تلفیق BT در مقایسه با روش سنتی عمق سنجی، بهترین روش به‌منظور عمق سنجی منطقه مورد مطالعه است. این نتایج همچنین تأثیر بالای متناسب بودن تعداد و توزیع داده‌های عمق با توپوگرافی منطقه مورد مطالعه در نتایج عمق سنجی را نشان می‌دهد. نقاط میدانی عمق در خلیج چابهار به صورت متناسب با توپوگرافی منطقه برداشت شده بودند و بهمین دلیل، دقت عمق سنجی آن منطقه بسیار بالاتر از خور موسی است.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

References

- Boccia, V., Renga, A., Rufino, G., D'Errico, M., Moccia, A., Aragno, C., Zoffoli, S., (2015), "Linear dispersion relation and depth sensitivity to swell parameters: Application to synthetic aperture radar imaging and bathymetry", ***The Scientific World Journal***, 3: 1-10.
- Caballero, I., Stumpf, R. P., (2019), "Retrieval of nearshore bathymetry from Sentinel-2A and 2B satellites in South Florida coastal waters, Estuarine", ***Coastal and Shelf Science***, 226: 106-117.
- Casal, G., Harris, P., Monteys, X., Hedley, J., Cahalane, C., McCarthy, T., (2019), "Understanding satellite-derived bathymetry using Sentinel 2 imagery and spatial prediction models", ***GIScience & Remote Sensing***, 57 (3): 271-286.
- Cogner, C. L., Hochberg, E. J., Fletcher, C. H., Atkinson, M. J., (2006), "Decorrelating remote sensing color bands from bathymetry in optically shallow waters", ***IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing***, 44 (6): 1655-1660.
- Deng, Z., Ji M., Zhang, Z., (2008), "Mapping bathymetry from multi-source remote sensing images: a case study in the Beilun estuary, Guangxi, China", ***The Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences***, 37: 3-11.
- Elhag, M., Gitas, I., Othman, A., Bahrawi, J., Gikas P., (2019), "Assessment of water quality parameters using temporal remote sensing spectral reflectance in arid environments, Saudi Arabia", ***Water***, 11 (3): 556-566.
- Heydarian, K., Kabudondpour, S., Amanollahi, J., (2016), "Investigating changes in the depth of Zarivar international wetland using remote sensing and artificial neural network model", ***Geographical Space***, 53: 271-289. [In Persian].
- Jawak, S. D., Luis, A. J., (2015), "Spectral information analysis for the semiautomatic derivation of shallow lake bathymetry using high-resolution multispectral imagery: A case study of Antarctic coastal oasis", ***Aquatic Procedia***, 4: 1331-1338.
- Jupp, D. L. B., (1988), "Background and extension to depth of penetration (DOP) mapping in shallow coastal waters", Proceedings of the Symposium on Remote Sensing of the coastal Zone. Gold Coast: Queensland, Australia, 11-19pp.
- Kambhatla, N., Leen, T. K., (1997), "Dimension reduction by local principal component analysis", ***Neural Computation***, 9: 1493-1516.
- Karimi, D., Akbarizadeh, G., Rangzan, K., Kabolizadeh, M., (2016), "Effective supervised multiple-feature learning for fused radar and optical data classification", ***IET Radar, Sonar & Navigation***, 11 (5): 768-777.
- Karimi, D., Rangzan, K., Kabolizadeh, M., (2017), "Combined algorithm for improvement of fused radar and optical data classification accuracy", ***Journal of Electronic Imaging***, 26 (1): 121-132.
- Kabiri, K., (2017), "Accuracy assessment of near-shore bathymetry information retrieved from Landsat-8 imagery", ***Earth Science Informatics***, 10 (2): 235-245.
- Li, J., Knapp, D. E., Schill, S. R., Roelfsema, C., Phinn, S., Silman, M., Asner, G. P., (2019), "Adaptive bathymetry estimation for shallow coastal waters using Planet Dove satellites", ***Remote Sensing of Environment***, 232: 11-23.
- Liu, P., Xiao, L., (2018), "A novel generalized intensity-hue-saturation (GIHS) Based pan-sharpening method with variational hessian transferring", ***IEEE Access***, 6: 46751-46761.
- Lyzenga, D. R., (1981), "Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data", ***International Journal of Remote Sensing***, 2 (1): 71-82.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

- Lyzenga, D. R., Bennett, J. R., (1988), "Full-spectrum modeling of synthetic aperture radar internal wave signatures", ***Journal of Geophysical Research: Oceans***, 93 (C10): 12345-12354.
- Lyzenga, D. R., Malinas, N. P., Tanis, F. J., (2006), "Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm", ***IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing***, 44 (8): 2251-2259.
- Misra, A., Vojinovic, Z., Ramakrishnan, B., Luijendijk, A., Ranasinghe, R., (2018), "Shallow water bathymetry mapping using support vector machine (SVM) technique and multispectral imagery", ***International Journal of Remote Sensing***, 39 (13): 4431-4450.
- Pohl, C., Van Genderen, J. L., (2016), "Review article multi-sensor image fusion in remote sensing: concepts, methods, and applications", ***International Journal of Remote Sensing***, 19 (5): 823-854.
- Renga, A., Rufino, G., D'Errico, M., Moccia, A., Boccia, V., Graziano, M. D., Aragno, C. Zoffoli, S., (2014), "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***, 7 (7): 2834-2847.
- Rangzan, K., Kabolizadeh, M., Zareie, S. Saki, A., Karimi, D., (2022a), "The capability of Sentinel-2 image and FieldSpec3 for detecting lithium-containing minerals in central Iran", ***Front. Earth Sci***, 52: 1-18.
- Rangzan, K., Kabolizadeh, M., Karimi, D., (2022b), "Optimized water depth retrieval using satellite imageries based on novel algorithms", ***Earth Sci Inform***, 15: 37-55.
- Rangzan, K., Kabolizadeh, M., Karimi, D., (2020a), "Evaluation of Sentinel-2 and Landsat-8 satellite images capability and evaluation of image fusion capability in seasonal zoning of NSFWQI and IRWQIsc qualitative indices in surface water (case study: Karoun river)", ***Geography and Environmental Planning***, 31 (1): 73-102. [In Persian].
- Rangzan, K., Kabolizadeh, M., Karimi D., (2020b), "Improved water quality mapping based on cross-Fusion of Sentinel-2 and Landsat 8 imageries", ***IET Image Processing***, 14 (7): 1382-1392.
- Rangzan, K., Kabolizadeh, M., Karimi, D., Saberi, A., (2019a), "***Applied Mineral Spectroscopy***", Ahvaz: Shahid Chamran university of Ahvaz. [In Persian].
- Rangzan, K., Kabolizadeh, M., Karimi, D., Zareie, S., (2019b), "Supervised cross-fusion method: A new triplet approach to fuse thermal, radar, and optical satellite data for land use classification", ***Environmental Monitoring and Assessment***, 191 (8): 1-12.
- Sadeghian, S., Asnaashari, F., Rajabi, A., (2022), "Evaluation of the preparation of large scale agricultural cadastre maps with use UAV images without using GCPS", ***Geographical Space***, 78: 95- 115. [In Persian].
- Sagawa, T., Yamashita, Y., Okumura, T., Yamanokuchi, T., (2019), "Satellite derived bathymetry using machine learning and multi-temporal satellite images", ***Remote Sensing***, 11 (10): 1155-1167.
- Stumpf, R. P., Holderied, K., Sinclair, M., (2003), "Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types", ***Limnology and Oceanography***, 48 (1-2): 547-556.
- Traganos, D., Poursanidis, D., Aggarwal, B., Chrysoulakis, N., Reinartz, P., (2018), "Estimating satellite-derived bathymetry (SDB) with the google earth engine and sentinel-2", ***Remote Sensing***, 10 (6): 859-872.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

- Wang, L., Liu, H., Su, H., Wang, J., (2019), "Bathymetry retrieval from optical images with spatially distributed support vector machines", ***GIS CIence & Remote Sensing***, 56 (3): 323-337.
- Zhang, S., Xu, Q., Zheng, Q., Li, X., (2017), "Mechanisms of SAR imaging of shallow water topography of the Subei Bank", ***Remote Sensing***, 11 (9): 1203-1214.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]