

عمقیابی در سواحل با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ (بندر صلاله عمان)

حکمت‌اله محمدخانلو^۱

مهدی مدیری^۲

الهه خصالی^۳

حمید عنایتی^۴

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۱۰/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۲/۲۴

چکیده

هیدروگرافی علمی است که با پایش منظم پارامترهایی نظیر عمق آب، زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، جزر و مد، جریان آب، امواج و سایر ویژگی‌های فیزیکی آب دریا، امکان تهیه نقشه‌های مورد استفاده در عملیات دریانوردی را فراهم و سهم بسزایی در زیر ساخت‌های داخلی کشورهای ساحلی ایفا می‌نماید. ارائه مناسب خدمات هیدروگرافی متضمن دریانوردی ایمن و مؤثر می‌باشد. به طوری که توسعه خدمات هیدروگرافی در سطح ملی می‌تواند ضمن ارتقاء ایمنی دریانوردان، حفاظت از جان انسان‌ها و متعلقاتشان در دریا، تسهیلاتی را به منظور حفاظت از محیط زیست دریایی ایجاد نماید. در این راستا با پیشرفت تکنولوژی‌های فضایی در سال‌های اخیر با هدف سرعت بخشیدن به تولید اطلاعات مکانی و پایش دریاها در بازه زمانی قابل قبول، محدودیت نقشه‌برداری دریایی در زمان‌های بحران همچون جنگ و ناامنی از بین رفته و بستر مناسب جهت عمقیابی در سواحل دور و غیر قابل دسترس و همچنین پایش پهنه‌های وسیع آبی و استراتژیک، با بکارگیری فناوری سنجنش‌ازدور در حوزه علوم دریایی و با استفاده از آنالیز طیفی داده‌های ماهواره‌ای و بکارگیری مدل‌های مختلف، عمق بستر دریا در محدوده‌های کم عمق ایجاد شده است. بدین منظور در پژوهش حاضر، از تصاویر ماهواره Sentinel2 و مدل‌های عمق سنجنی رگرسیون خطی چند باندی^۵ (LMR) و استامپ به منظور تعیین عمق آب استفاده شده است. سپس با استفاده از چارت دریایی Admiralty ۱:۲۵,۰۰۰ ارزیابی دقت انجام شد. پس از پیاده سازی، مدل بهینه رگرسیون خطی چند باندی، مقدار میانگین مربع خطاها (RMSE)^۶ ۲/۱۵ متر و ضریب همبستگی^۷ (CC) آن ۰/۹۲۵% در فواصل عمقی صفر تا ۲۰ متر محاسبه و با استخراج پارامترهای مورد نیاز مدل، بر روی مقادیر پیکسلی ۴ باند ۱۰متری تصویر Sentinel2 اعمال شده و مدل رقومی ارتفاعی بستر محاسبه و پیاده‌سازی گردیده است.

واژه‌های کلیدی: هیدروگرافی، چارت دیتوم، تصاویر ماهواره‌ای، Sentinel 2، سنجنش از دور

۱- کارشناس ارشد ژئودزی دانشگاه علوم و تحقیقات شاهرود h.m.khanlu@gmail.com

۲- دانشیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر (نویسنده مسئول) mmodiri@ut.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری گروه فتوگرامتری و سنجنش از دور دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی elahe.khesali@mail.kntu.ac.ir

۴- کارشناس ارشد فتوگرامتری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی en.hamid22@gmail.com

5- Linear Multiple Regration

6- Root Mean Square Error

7- Correlation Coefficient

۱- مقدمه

خلیج‌ها وجود دارد (Benny, and Dawson, 1983) همچنین عدم وجود اطلاعات مناسب از جنس بستر که به طور مستقیم بر روی درجات روشنایی تصویر تأثیر می‌گذارد باعث بروز خطا در تخمین عمق آب می‌شود. در این تحقیق از تصاویر ماهواره‌ای اپتیکی به منظور استخراج عمق استفاده شده است، لذا در ادامه به بررسی اجمالی مدل‌های تعیین عمق با تصاویر ماهواره‌ای پرداخته می‌شود.

در سال ۱۹۷۸ میلادی لایزنگا^۳ و همکاران از یک ترکیب خطی لگاریتم مقادیر رادیانس تصحیح شده، جهت عمق‌سنجی استفاده کردند. این روش براساس ساده‌سازی مدل فیزیکی بیر^۴ بدست آمده است که در آن برای دو باند یک معادله خطی پنج مجهوله حاصل می‌شود. این محقق مدل خود را بهبود بخشید و در سال ۲۰۰۶ مدل جدید و بهبود یافته از مدل قبلی خود را ارائه کرد. تحقیقات انجام شده توسط این محقق بر روی مردابی مرجانی با شفافیت آب مناسب در شمال غربی جزایر هاوایی، خطای RMSE هنجاریافته^۵ که برابر مقدار خطای RMSE به عمق واقعی برای عمق‌های پایین‌تر از ۱۵ متر، کمتر از ۴۰ درصد بدست آمد (Stumpf, Holderied, & Sinclair, 2003). در سال ۱۹۸۸ جاپ و همکاران روش مبتنی بر حداکثر عمق نفوذ آب را ارائه کردند که این مدل از یک رگرسیون جهت یافتن پارامترهای مجهول استفاده نمی‌کند و دارای فرض‌هایی مبنی بر ثابت بودن کیفیت و رنگ و جنس بستر در کل تصویر و دارای دو مرحله تقسیم‌بندی تصویر براساس حداکثر عمق نفوذ هر باند و تعیین زون‌ها و درونیایی عمق در هر زون است. نتایج این روش بر روی داده‌های عمق‌سنجی شده منطقه Turks&caicos که در آن تغییرات عمق بین ۲۵-۳۵ تا ۰/۶۶ متر بوده است. تصویر مورد استفاده مربوط به سنجنده لندست ۵ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر با مقادیر متناظر طیفی در چهار باند (آبی، سبز، قرمز و مادون قرمز نزدیک) می‌باشد. در آزمون‌های انجام شده، وابستگی حدود ۸۲ درصدی بین

هیدروگرافی کشورهای ساحلی سهم بسزایی را در زیر ساخت داخلی آن کشورها ایفاء می‌نماید. ارائه مناسب خدمات هیدروگرافی متضمن دریانوردی ایمن و مؤثر می‌باشد. به طوری که پرورش و توسعه خدمات هیدروگرافی در سطح ملی می‌تواند ضمن ارتقا ایمنی دریانوردان، حفاظت از جان انسان‌ها و متعلقاتشان در دریا، تسهیلاتی را به منظور حفاظت از محیط زیست دریایی نیز ایجاد نماید (Martin, 2014). در این راستا نیاز به دانستن جریان‌های آبی و جزرومد، جهت توسعه خدمات ملی هیدروگرافی از جمله حمل و نقل دریایی، مدیریت بر نواحی ساحلی، اکتشاف و استخراج منابع دریایی و حفاظت محیط دریا ضروری می‌باشد. برای مشخص نمودن مرزهای دریایی (آب‌های سرزمینی، فلات قاره و منطقه اقتصادی انحصاری یک کشور ساحلی)، نقشه برداری‌های اقیانوسی، جزرومدی و نقشه‌برداری عمق الزامی است. خط پست‌ترین جزر بعنوان خط مبدا و شاخص اساسی برای تعریف دریای سرزمینی در تعیین مرزهای دریایی محسوب و با آنالیز مشاهدات جزر و مدی تعیین می‌شود. دستیابی به مشاهدات جزرومدی نیازمند برداشت‌های میدانی عمق سنجی توسط شناورهای هیدروگرافی می‌باشد که علاوه بر محدودیت‌های موجود در مناطق کم عمق، مستلزم زمان و هزینه‌های بالایی است. با رشد و پیشرفت تکنولوژی‌های فضایی در سال‌های اخیر و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، همچون داده‌های لیدار (LiDAR)^۱، تصاویر طیفی و داده‌های راداری (RADAR)^۲ در زمینه استخراج خطوط ساحلی مطالعات گسترده‌ای صورت گرفته است که استخراج خط پست‌ترین جزر بعنوان یک سطح تراز در رسیدن به هدف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Gao, 2009).

به طور کلی روش‌های عمق‌سنجی سنجش‌ازدوری در نواحی که آب نسبتاً شفاف و با عمق حداکثر ۲۰ متر می‌باشد، قابل بکارگیری است، که این شرایط معمولاً در دریاچه‌ها و

3- Lyzenga

4- Beer

5- Normalization

1- Light Detection and Ranging

2- RADAR Detection And Ranging

وزمان پردازش روش مناسبی باشد (Safari, Homayouni, & Khazaei, 2014)

در سال ۲۰۰۸ سو و همکاران روشی اتوماتیک جهت کالیبره کرن پارامترهای مدل معکوس غیرخطی برای عمق‌سنجی ارائه کردند. این روش روی تصاویر آیکونوس پیاده‌سازی گردید. نتایج حاصل از این مدل با عمق‌های استخراج شده از مدل معکوس خطی لگاریتمی مقایسه شدند و بخصوص در مناطق عمیق‌تر دقت بهتر و پایداری بیشتری را نشان دادند.

در سال ۲۰۰۵ میسرا و همکاران مدلی را برای عمق‌یابی ارائه کردند که بجای بکارگیری از یک باند در تخمین عمق، از آنالیز جز اصلی (PCA)^۳ که شامل تغییرات تمامی باندهای سنجنده است استفاده شده است. این روش بر روی تصاویر آیکونوس در قسمت غربی دریای کارایب بکارگیری شده است. در این روش بجای استفاده از مقادیر بازتابش مستقیماً از مقادیر روشنایی استفاده شده و بعد از طبقه‌بندی جنس بستر با استفاده از اطلاعات بدست آمده از فیلمبرداری از کف دریا ضرایب معادله رگرسیون بر اساس جنس بستر مناسب بدست آمده و در مقایسه با مقادیر عمق‌یابی شده مستقیم، میزان خطای استاندارد حدود ۰/۶ متر برای عمق آب ۱-۱۲ متر برآورد شده است.

شرکت TCarta یک تأمین کننده جهانی محصولات مکانی می‌باشد. این شرکت اخیراً مجموعه داده عمق‌سنجی ماهواره‌ای را با استخراج دقیق عمق آب از تصاویر چندطیفی اخذ شده از ماهواره سنتینل-۲ تولید نموده است. داده‌های مذکور با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متری برای اندازه‌گیری عمق ۱۵ متری بکارگیری شده‌اند. داده‌های ارائه شده ناحیه‌ای ۳۰ کیلومتری در اطراف جزیره پریپریس^۴ در خلیج بنگال را پوشش می‌دهد. این داده‌ها به دلیل مقرون به صرفه بودن و سرعت تهیه آن به سرعت در حال محبوب شدن بین شرکت‌های کشف و تولید انرژی و سازمان‌های محیط‌زیستی و شرکت‌های توسعه زیرساخت هستند (www.tcarta.com)

عمق اندازه‌گیری شده و درجات روشنایی طیف‌ها بدست آمده است. همچنین خطای متوسط استاندارد عمق محاسبه شده حدود ۰/۸ متر در آب کم عمق (کمتر از ۲/۵ متر) تا حدود ۲/۸ متر در آب های عمیق‌تر (۲۰-۲۵ متر) بوده است (Jupp, 1988). در سال ۲۰۰۳ استامپ و همکاران با استفاده از نسبت انعکاس دو باند توانستند نه تنها تعداد مجهولات روش لایزنگا را کاهش دهند، بلکه حساسیت عمق‌سنجی به بسترهای آب متفاوت را کمتر نمایند. در این روش از تفاوت خصوصیات جذب در باندهای سبز و آبی استفاده شده است. نتایج این روش با روش لایزنگا روی داده‌های روش لایزنگا مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. در بررسی روش استامپ داده‌های عمق‌سنجی مستقیم چند ناحیه از این منطقه با داده‌های بدست آمده از تصاویر آیکونوس^۱ با توجه به شفافیت، گل‌آلودی و ساختار هندسی بستر مقایسه شده و عدم تأثیر این عوامل بر روی نتایج، مورد تأیید قرار گرفته است. این نتایج نشان می‌دهند که این روش تا عمق بالای ۱۰-۱۵ متر به خوبی کار می‌کند و صحت آن برای ناحیه‌ای که ضرایب از آن بدست آمده بهتر است. خطای RMSE برای عمق‌های پایین‌تر از ۲۵ متر کمتر از ۰/۳ متر بدست آمده است. اما روش استامپ با توجه به نسبی بودنش از روش خطی لایزنگا نوین‌تر بوده که با افزایش عمق میزان نویز افزایش می‌یابد (Stumpf et al., 2003). صفری و همکاران در سال ۱۳۹۳ طی انجام یک پژوهش با کمک تصاویر فراطیفی سنجنده هایپریون از ماهواره EO1^۲ به عمق‌یابی در سواحل جزیره قشم پرداختند که تا آن زمان این تصاویر در عمق‌سنجی بصورت جدی مورد استفاده قرار نگرفته بود. نتایج ارزیابی پژوهش آنها نشان می‌دهد که میزان همبستگی تصویری که پس از انجام پیش پردازش‌ها، بر روی آن الگوریتم استامپ استفاده شده با عمق ۸۹/۳ درصد و مقدار انحراف معیار مقادیر عمق بدست آمده با عمق واقعی ۱/۳۸ متر بدست آمد، می‌تواند برای کاربردهای ویژه در مناطق ساحلی، با توجه به هزینه

3- Principal Component Analysis

4- Preparis

1- Ikonos

2- Earth Observing One



نگاره ۱: تصویر سنتینل ۲ مربوط به تاریخ ۱۵ دسامبر ۲۰۱۸

تصویربرداری این ماهواره ۵ روز است. منطقه تحت پوشش این ماهواره از عرض ۸۴ درجه شمالی تا ۵۶ درجه جنوبی می‌باشد. عمر مفید در نظر گرفته شده برای این ماهواره ۷ سال می‌باشد. تصاویر سنجنده سنتینل ۲ دارای ۱۳ باند می‌باشند. این تصاویر در باندهای ۲، ۳، ۴ و ۸ که به ترتیب دارای طول موج‌های ۴۹۰ (آبی)، ۵۶۰ (سبز)، ۶۶۵ (قرمز) و ۸۴۲ (مادون قرمز) نانومتر هستند، دارای قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متری بوده و با توجه به میرایی بسیار زیاد موج الکترومغناطیس در آب برای طول موج‌های بلندتر از مادون قرمز نزدیک، با در نظر گرفتن اینکه عمق نفوذ در باند آبی در حدود ۲۵ متر، در باند سبز در حدود ۱۵ متر، در باند قرمز فقط ۵ متر و در حیطه مادون قرمز نزدیک در حدود ۰/۵ متر بوده و در بقیه محدوده مادون قرمز تقریباً نفوذپذیری صفر می‌باشد، لذا فقط از ۴ باند ۱۰ متری جهت اجرای پروژه استفاده گردیده است.

۲-۲- منطقه مورد مطالعه

در راستای گسترش عمقیابی دریایی از آب‌های سرزمینی به سواحل دور و دسترسی به چارت‌های دریایی مناسب با مقیاس ۱:۲۵,۰۰۰ جهت ارزیابی دقت، منطقه پیاده‌سازی

با توجه به توانایی بالای سنجنش‌ازدور در جمع‌آوری اطلاعات در زمان کوتاه و درگسترده‌گی جغرافیایی وسیع، هدف از انجام پژوهش حاضر، استفاده از علم سنجنش‌ازدور به عنوان راهکاری مناسب جهت عمقیابی می‌باشد.

۲- تصاویر و داده‌های مورد استفاده

در این مقاله ابتدا از آنالیزطیفی ۴ باند ۱۰ متری ۷ دوره از تصاویر سنجنده سنتینل-۲ مربوط به آژانس فضایی اروپا جهت عمقیابی در لحظه تصویربرداری و سپس از چارت دریایی Admiralty ۱:۲۵,۰۰۰ جهت ارزیابی دقت استفاده شده است. با توجه به ارزیابی تصویر از لحاظ شفافیت آب، نهایتاً تصویر مربوط به تاریخ ۱۵ دسامبر ۲۰۱۸ بعنوان تصویر مناسب جهت عمقیابی بکارگیری شده است.

۲-۱- تصاویر سنتینل-۲

ماهواره سنتینل ۲ به عنوان سری دوم ماهواره‌های سنتینل آژانس فضایی اروپا، ۲۳ ژوئیه ۲۰۱۵ از پایگاه فضایی آژانس فضایی اروپا در گویان فرانسه توسط موشک وگا پرتاب شد و مدار این ماهواره خورشید آهنگ و قطبی و در ارتفاع ۷۸۶ کیلومتر می‌باشد. مدت زمان تکرار

استفاده شود. این روش بر این فرضیه استوار است که روش LMR می‌تواند ضرایب یک مدل خطی را که مستقل از بازتاب کف دریا (جنس بستر) باشد ارایه دهد. این مدل شامل مقادیر طیفی باندهای مرئی می‌باشد که مقدار عمق را با رابطه (۱) به بازتاب باندها ارتباط می‌دهد. برای حل این مدل حتماً به نقاط عمقیابی زمینی نیازمند هستیم.

$$Z = m_1 \ln(B_1) + m_2 \ln(B_2) + m_3 \ln(B_3) + \dots + C \quad (1)$$

در معادله (۱) پارامترهای B_1 ، B_2 و B_3 مقدار باندهای طیفی پس از تصحیح اتمسفری و اثر درخشندگی خورشید و ضرایب m_1 ، m_2 ، m_3 و ضرایب C ضرایب مدل هستند که توسط نقاط عمقیابی زمینی بدست می‌آیند.

۳-۲- روش انعکاس دو باند (Stumpf)

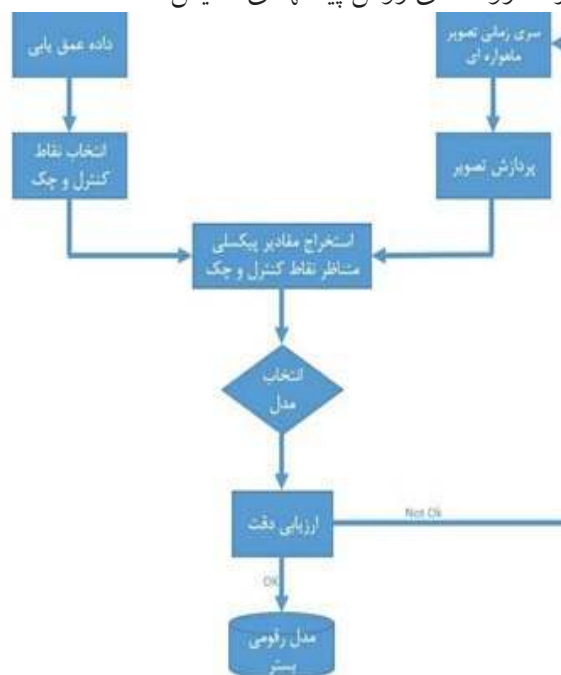
این روش توسط استامپ در سال ۲۰۰۳ ارائه شده است و هدف از آن تهیه راه حلی برای یافتن عمق با تعداد کمتری پارامتر و حساسیت کمتر نسبت به بسترهای آب متفاوت است. در این روش از تفاوت خصوصیت جذب در باندهای سبز و آبی استفاده شده است و از آنجایی که با افزایش عمق در آب شفاف انعکاس باند سبز بیشتر از باند آبی تضعیف می‌شود، لگاریتم این مقدار نیز چنین کاهش خواهد داشت. به عبارت دیگر با افزایش عمق، انعکاس هر دو باند کاهش می‌یابد و $\ln(R_w)$ (لگاریتم طبیعی انعکاس سیگنال خروجی از آب) باند با جذب بیشتر (سبز) نسبت به $\ln(R_w)$ باند با جذب کمتر (آبی) بیشتر کاهش می‌یابد که در نتیجه نسبت لگاریتم‌های انعکاس باند آبی به سبز افزایش می‌یابد. از آنجاکه تغییر در بازتاب بستر روی هر دو باند بطور مشابه تأثیر می‌گذارد، بسترهای متفاوت با عمق یکسان یک مقدار نسبت را خواهند داشت. بنابراین در این روش، تعیین عمق مستقل از جنس بستر است و تنها نیاز به مقیاس‌دهی به مقدار عمق واقعی دارد:

$$Z = m_1 \frac{\ln(nR_w(\lambda_1))}{\ln(nR_w(\lambda_2))} - m_0 \quad (2)$$

شده به طول حدود ۱۳۰ کیلومتر مربوط به سواحل بندر صلاله عمان در موقعیت جغرافیایی ۵۴ درجه و ۱۸ ثانیه شرقی و ۱۶ درجه و ۵۶ دقیقه و ۳۰ ثانیه شمالی می‌باشد.

۳- روش پیشنهادی

در روش پیشنهادی جهت ارزیابی کیفی و میزان روشنایی آب در لحظه تصویربرداری ابتدا تعدادی نقاط کنترل و چک از داده‌های واقعی استخراج و مقادیر پیکسلی متناظر آن‌ها پس از تصحیحات مورد نیاز از تصاویر ماهواره‌ای استخراج شده و پس از ارزیابی دقت پارامترهای مورد نیاز مدل‌ها محاسبه گردیده و با اعمال پارامترها به تصویر انتخاب شده، مقادیر پیکسلی به عمق در لحظه تصویربرداری تبدیل می‌شود، در نگاره ۲ روندنمای روش پیشنهادی نمایش داده شده است.



نگاره ۲: روندنمای روش پیشنهادی

۳-۱- مدل رگرسیون خطی چند باندهای (LMR)

این مدل حاصل تحقیقات کلارک و همکارانش در سال ۱۹۸۷ می‌باشد. آنها نشان داده‌اند که مدل رگرسیون خطی چندباندی می‌تواند برای تخمین عمقیابی

بودنش نويز دارتر است و اين تغيير نويز با افزايش عمق افزايش مي يابد، در حالي كه روش خطي پنج مجهوله تا عمق ۱۵ متر خطايي مشابه با روش نسبت انعكاس دو باند دارد و در عمق هاي بالا ۱۵ متر بندرت عمق هاي معني دار مي دهد و با توجه به پنج پارامتره بودنش نياز به اطلاعات عمق يابي بيشتري نسبت به روش Stumpf داشته و قادر به تهيه داده هاي عمق در مناطق كم عمق با روشنايي كمتر از ناحيه آب عميق (نواحی تيره كم عمق با كف جلبكي و خزه اي) نيست.

۴- پياده سازي

۴-۱- جداسازي خشكي از آب

پياده سازي مدل، نيازمند جداسازي نواحی خشكي از نواحی دارای آب می باشد که برای این منظور می توان از شاخص های $NDVI^1$ ، $NDWI^2$ ، $MNDVI^3$ و $AWEI^4$ استفاده کرد. در این پروژه از شاخص $NDVI$ استفاده شده است. کاربرد اصلي شاخص $NDVI$ برای برآورد میزان پوشش گیاهی در منطقه می باشد اما مقادير این شاخص در مناطقی که دارای پوشش آب می باشد منفي است و از این ویژگی برای تهيه ماسک جداساز مناطق خشكي از آب استفاده شده است. جهت عملکرد صحيح مدل هاي عمق يابي نياز به حذف مناطق خشكي می باشد که با ايجاد ماسک جدا ساز آب از خشكي مقدار عددي پيكسل ها در خشكي حذف گردیده است.

۴-۲- انتخاب نقاط كنترل و چك

در این مرحله تعداد ۶۸ نقطه كنترل و ۶۸ نقطه چك از نقشه Admiralty موجود انتخاب شده و مقدار عددي پيكسل هاي متناظر نقاط انتخاب شده از ۴ باند ۱۰متری تصوير سنتينل ۲ استخراج گردید.

در رابطه (۲) m_1 ثابتی جهت مقیاس دهی، n ثابتی برای تمام ناحیه و جهت جلوگیری از منفي شدن لگاریتم مقادير كوچك و m_0 نیز مقداری برای عمق صفر است. ضرایب m_0 ، m_1 در این روش به كمك چند نقطه كنترل كه مقادير عمق شان از روش دیگری مثل روش زمینی تهيه شده است بدست می آیند.

روش نسبت لگاریتمی انعكاس باندها در آب شفاف قادر به دستیابی به عمق هاي بيشتري از ۲۵ متر می باشد و پایداری زیادی در محیط هاي متفاوت دارد اما این روش به میزان شفافیت و غلظت كلروفیل در آب حساس است زیرا وقتی كلروفیل در آب افزايش يابد میزان انعكاس باند آبی از سبز کاهش بيشتري خواهد يافت. همچنين این روش نويز بالایی دارد و این بدان دلیل است كه يك رابطه كسری بطور ذاتی اختلاف هاي كوچك را شدت می بخشد و این خطا با افزايش عمق بيشتري می شود. این روش با توجه به كم بودن تعداد پارامترها، استحكام زیادی نیز نسبت به تغيير بستر دارد و بر خلاف اكثر روش ها احتیاج به دانستن میزان انعكاس آب عميق نيست.

نتایج این روش روی داده هاي بدست آمده از عمق يابی بر روی مردابی مرجانی با شفافیت آب نسبتاً خوب در شمال غربی جزایر هاوایی مورد ارزیابی قرار گرفته است در این بررسی داده هاي عمق يابی چند ناحیه از این منطقه كه بوسیله اكوساندر بدست آمدند با داده هاي بدست آمده از تصاویر آيكونوس با توجه به شفافیت، گل آلودی و ساختار (شيب و ...) بستر مقایسه شده و عدم یا تأثیر كم این عوامل بر روی نتایج مورد تأیید قرار گرفته است. نتایج فوق نشان می دهند كه این روش تا عمق بالای ۱۰-۱۵ متر به خوبی كار می كند و صحت آن برای ناحیه ای كه ضرایب از آن بدست آمده بهتر است. خطای $RMSE$ هنجاریافته یعنی نسبت مقدار خطای $RMSE$ به عمق واقعی برای عمق كمتر از ۲۵ متر كمتر از ۳۰% بدست آمده است و در مقایسه با روش خطی پنج مجهوله لایزنگا، این روش اطلاعات عمق را در اعماق ۵ - ۱۰ متر بيشتري می دهد اما با توجه به نسبی

1- Normalized Difference Vegetation Index

2- Normalized Difference Water Index

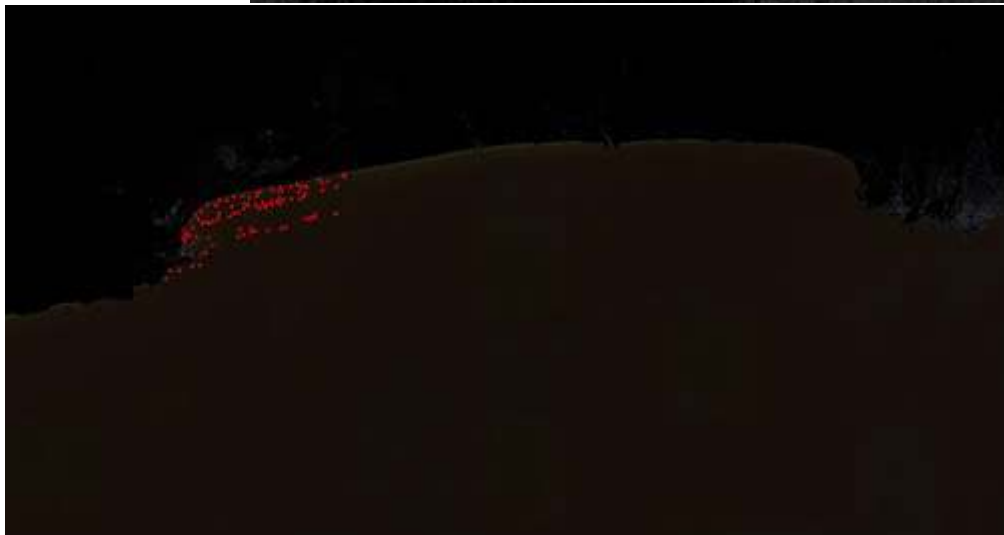
3- Modified Normalised Difference Water Index

4- Automated Water Extraction Index

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)
 عمقیابی در سواحل با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل... / ۳۱



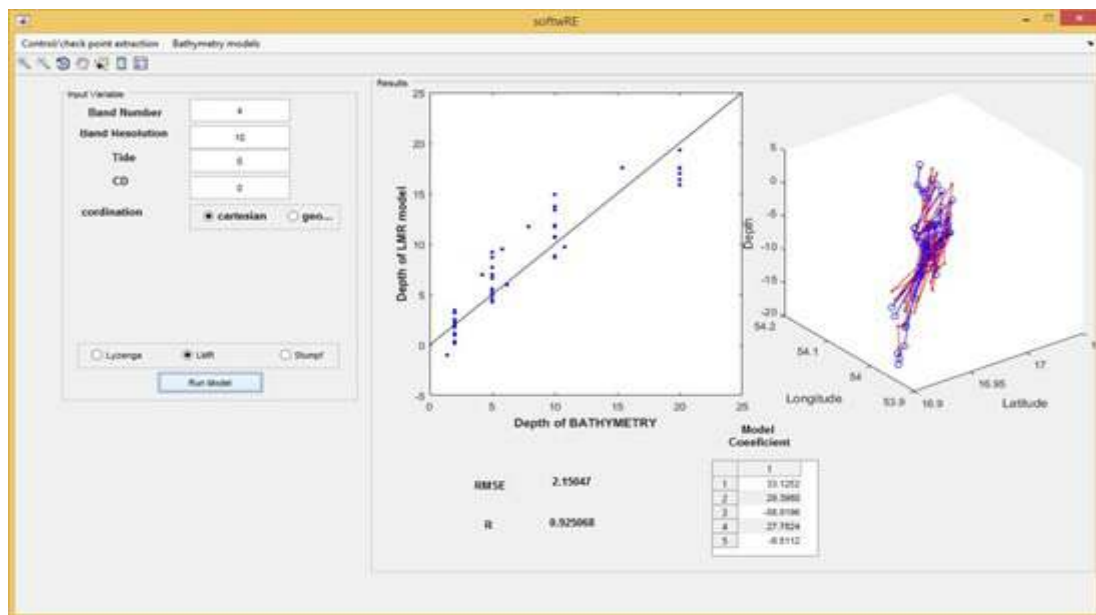
نگاره ۳: جداسازی آب از خشکی
 در تصویر سنتینل ۲ مربوط به تاریخ
 ۱۵ دسامبر ۲۰۱۸



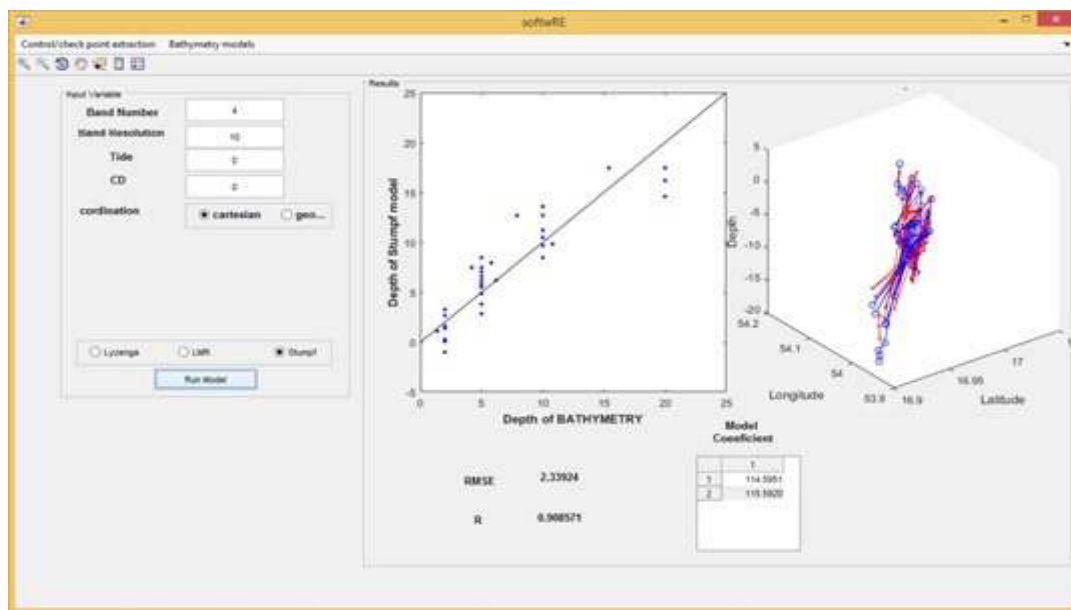
نگاره ۴: نقاط کنترل (سبز) و چک (قرمز) و پیاده‌سازی آن بر روی تصویر سنتینل ۲ مربوط به تاریخ ۱۵ دسامبر ۲۰۱۸ جهت استخراج مقدار عددی پیکسل‌های متناظر

control point				check point				DN of control point				DN of check point					
	1	2	3		1	2	3		4	5	6		4	5	6		
1	837360	1883100	2	1	836960	1883000	2	1	837360	1883100	17.0074	A	1	836960	1883000	17.0085	A
2	837110	1882800	5	2	837070	1882800	5	2	837110	1882800	17.0047		2	837070	1882800	17.0047	
3	834180	1882600	2	3	834200	1882500	5	3	834180	1882600	17.0031		3	835200	1882500	17.0023	
4	834370	1882300	5	4	834330	1882300	5	4	834370	1882300	17.0006		4	834530	1882300	17.0008	
5	832130	1882100	2	5	832140	1882100	2	5	832130	1882100	16.9991		5	831840	1882100	16.9991	
6	831170	1881800	2	6	832990	1881800	5	6	831160	1881800	16.9967		6	832380	1881800	16.9973	
7	838180	1881500	10	7	832380	1881800	5	7	831170	1881800	16.9974		7	832990	1881800	16.9972	
8	832640	1881800	8.3000	8	830000	1881800	2	8	832640	1881800	16.9960		8	830000	1881800	16.9967	
9	839150	1881800	2	9	834700	1881800	10	9	829150	1881800	16.9930		9	834700	1881800	16.9942	
10	830270	1881500	5	10	834700	1881500	10	10	830270	1881500	16.9926		10	834960	1881500	16.9913	

نگاره ۵: نمایی از استخراج نقاط کنترل و چک و مقدار عددی پیکسل‌های متناظر آنها از تصویر سنتینل ۲ توسط نرم‌افزار عمقی‌یابی



نگاره ۶: ارزیابی دقت عمقیابی و محاسبه پارامترهای مورد نیاز جهت عمقیابی تصویر انتخاب شده به روش LMR



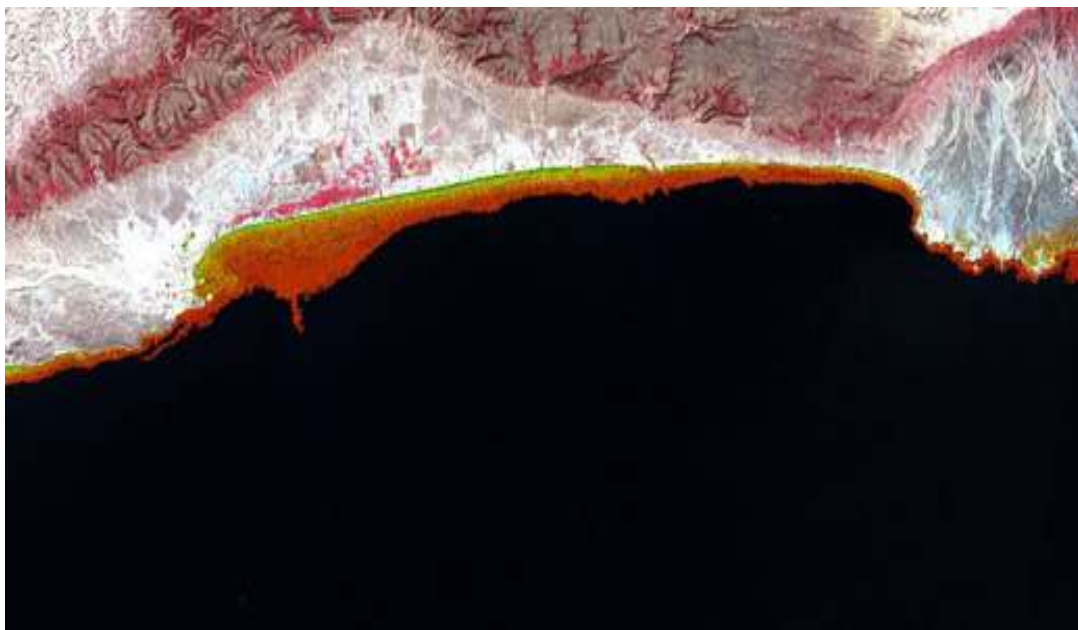
نگاره ۷: ارزیابی دقت عمقیابی و محاسبه پارامترهای مورد نیاز جهت عمقیابی تصویر انتخاب شده به روش Stumpf

۴-۳- ارزیابی نتایج

۶ و ۷ نشان داده شده است. پارامترهای ارزیابی دو روش نشان دهنده دقت بهتر و همبستگی بالاتر نتایج روش LMR می باشد. بنابراین در ادامه از این روش جهت عمقیابی تصویر در فواصل عمقی صفر تا ۲۰ متر استفاده شده است. با توجه به نگاره ۶ پارامترهای c, m4, m3, m2, m1 به

ابتدا نقاط کنترل و چک و مقدار عددی پیکسل های متناظر آنها در ۴ فایل مجزا استخراج شدند، سپس این ۴ فایل وارد نرم افزار عمقیابی شده و پارامترهای دوروش LMR و Stumpf محاسبه شدند. نتایج حاصل در نگاره های

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سیر)
عمق‌یابی در سواحل با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل... / ۳۳



نگاره ۸: مدل رقومی بستر سواحل بندر صلاله بطول ۱۳۰ کیلومتر



نگاره ۹: مدل رقومی بستر در فواصل ۱ کیلومتری تا ۷ کیلومتری از ساحل

ترتیب با مقادیر عددی ۳۳/۱۲ و ۲۸/۴۰ و ۵۶/۸۲- و ۲۷/۷۸ افزار عمق‌یابی بعنوان ۵ پارامتر ورودی، که چهار پارامتر و ۶/۵۱- بعنوان ضرایب عددی مدل استخراج شده از نرم اول ضرایب لگاریتمی مقدار پیکسلی ۴ باند ۱۰ متری

تصویر در پیکسل متناظر نقطه کنترل به رادیانس، اطلاعات مربوط به هندسه تصویر و مقدار رادیانس مربوط به هر باند استخراج گردید.

با توجه به اینکه داده‌های هیدروگرافی حاوی اطلاعات مکانی (X,Y,Z) بوده هدف از این تحقیق بدست آوردن Z متناظر از آنالیز طیفی داده‌های فضایی بود که مقادیر X,Y از پردازش‌های هندسی و طیفی حاصل گردیده ولی برای عمق (Z) مقدار عددی پیکسل‌ها (DN) در باندهای مختلف بکار گرفته می‌شود که در این پژوهش با استفاده از مدل عمقیابی LMR و STUMPF به دست آمده است. نتایج پیاده‌سازی‌ها در نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. نتایج حاصل از ارزیابی نشان دهنده اینست که مدل LMR با مقدار میانگین مربع خطاها (RMSE) ۲/۱۵ متر و ضریب همبستگی (CC) ۰/۹۲۵٪ دارای دقت و همبستگی بهتری نسبت به مدل STUMPF می‌باشد.

در انتها موارد ذیل بعنوان پیشنهادات ادامه کار مطرح می‌گردد:

اختلاف ناشی از فصول و تغییرات ناشی جریان‌های دریایی، رشد و تکثیر آبزیان از جمله رشد فیتوپلانکتون‌ها در سطح گسترده و در مناطق عمقی مختلف مقدار رادیانس ورودی به سنجنده را تحت‌الشعاع قرار داده که تحقیقات در این مورد پیشنهاد می‌گردد.

بدست آوردن اختلاف ارتفاع لحظه تصویربرداری با چارت دیتوم نیاز به دانستن اطلاعات تأیید می‌باشد. لذا مطالعه در مورد سطح دریا و بدست آوردن تغییرات سطح توپوگرافی آب حاصل از ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی، ما را از بکاربردن عمق‌سنج در مناطقی که امکان نسب دستگاه جذرومدسنج^۲ وجود ندارد، بی‌نیاز می‌کند.

داشتن اطلاعات جامع از جنس بستر و مدل‌سازی کردن بستر در آنالیز طیفی داده‌های فضایی، نتایج حاصل از عمق یابی را بهبود خواهد بخشید.

تصویر سنتینل ۲ مربوط به تاریخ ۱۵ دسامبر ۲۰۱۸ و با اعمال انتقال پارامتر پنجم در مدل رگرسیون خطی چندباندی مقدار میانگین مربع خطاها (RMSE) ۲/۱۵ متر و ضریب همبستگی (CC) آن ۰/۹۲۵٪ در فواصل عمقی صفر تا ۲۰ متر محاسبه و مدل رقومی ارتفاعی بستر در سواحل بندر صلاله عمان پیاده‌سازی گردیده است.

در مدل استامپ توجه به نگاره ۷ پارامترهای m2,m1 به ترتیب با مقادیر عددی ۱۱۴/۵۹ و ۱۱۵/۵۹ ضرایب عددی مدل استخراج شده از نرم افزار عمقیابی بعنوان دو پارامتر ورودی مورد نیاز مربوط به باندهای سبز و آبی ۱۰ متری تصویر سنتینل ۲ مربوط به تاریخ ۱۵-۱۲-۲۰۱۸ محاسبه و مقدار میانگین مربع خطاها (RMSE) ۲/۳۴ متر و ضریب همبستگی (CC) آن ۰/۹۱٪ در فواصل عمقی صفر تا ۲۰ متر می‌باشد که نسبت به نتایج مدل رگرسیون خطی چندباندی از دقت کمتری برخوردار می‌باشد.

مدل رقومی حاصل در مناطق کم عمق صفر تا ۲۰ متر با شیب‌های متفاوت در فاصله ۱ کیلومتر تا ۷ کیلومتر از ساحل به سمت دریا را عمقیابی نموده است.

۵- جمع‌بندی

در این پژوهش از تصاویر ماهواره سنتینل ۲ استفاده گردید. این تصویر از بندر صلاله عمان در تاریخ ۱۵ دسامبر ۲۰۱۸ اخذ شده است. برای انجام پیاده‌سازی‌ها در این پژوهش از چارت دریایی Admiralty ۱:۲۵,۰۰۰ استفاده نمودیم. در این تحقیق برای پیاده‌سازی از کل نقاط استفاده نشده و متناسب با قدرت تفکیک مکانی تصاویر، و در محدوده عمقی ۰ تا ۲۰ متر، تعداد ۶۸ نقطه کنترل و ۶۸ نقطه چک از نقشه Admiralty موجود استخراج شده و دقت هر مدل بیان شده است.

پس از انتخاب نقاط کنترل نیاز به انتخاب پیکسل‌های متناظر آن از تصاویر ماهواره‌ای بود که ضمن انجام پیش پردازش‌های لازم نیاز به تبدیل عددی پیکسل‌ها (DN)^۱

environmental change. Trends in ecology & evolution, 20(9), 503-510.

12- Safari, R., Homayouni, S., & Khazaei, S. (2014). Estimation of coastal waters depth using hyperspectral images. Surveying Engineering and spatial data Journal, 6.

13- 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(1part2), 547-556

14- Su H., Liu H. and W. Heyman, 2008. Automated derivation for bathymetric information from multispectral satellite imagery using a non-linear inversion model. Marine Geodesy, 31, pp. 281-298.

15- www.tcarta.com

۶- منابع و مآخذ

1- Benny, A.H., and G.J. Dawson. (1983). Satellite imagery as an aid to bathymetric charting of the Red Sea. The Cartographic Journal. 20 (1): 5-16.

2- Clark, R. K., Fay, T. H., & Walker, C. L. (1987). Bathymetry calculations with Landsat 4 TM imagery under a generalized ratio assumption. Applied optics, 26(19), 4036_4031-4038.

3- Gao, J. (2009). Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations. Progress in Physical Geography, 33(1), 103-116.

4- Green, E. P., Mumby, P. J., Edwards, A. J., & Clark, C. D. (2005). Remote sensing handbook for tropical coastal management.

5- Jupp, D. (1988). Background and extensions to depth of penetration (DOP) mapping in shallow coastal waters. Paper presented at the Proceedings of the Symposium on Remote Sensing of the Coastal Zone.

6- Lyzenga, D. R. (1978), Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features, Applied Optics, 17(3), 379, doi:10.1364/AO.17.000379.

7- 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.

8- Lyzenga, D. R. (1985). Shallow-water bathymetry using combined lidar and passive multispectral scanner data. International journal of remote sensing, 6(1), 115-125.

9- Martin, S. (2014). An introduction to ocean remote sensing: Cambridge University Press.

10- Mishra, D.R., Narumalani, S., Rundquist, D., and M. Lawson. 2005. Characterizing the vertical diffuse attenuation coefficient for downwelling irradiance in coastal waters: Implications for water penetration by high resolution satellite data. Photogrammetry and Remote Sensing. 60: 48-64.

11- Pettorelli, N., Vik, J. O., Myserud, A., Gaillard, J.-M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to

