

## تأثیر تصحیح ستون آب در عمق‌سنجی با استفاده از تصویر لندست-۸ (مطالعه موردی: جنوب شرقی دریای خزر)

لیلا امینی<sup>۱</sup>، عطاءاله عبداللهی کاکرودی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده جغرافیا، سنجش از دور و GIS، پست الکترونیکی: [L.amini@ut.ac.ir](mailto:L.amini@ut.ac.ir)

۲- استادیار دانشگاه تهران، دانشکده جغرافیا، گروه سنجش از دور و GIS، پست الکترونیکی: [a.a.kakroodi@ut.ac.ir](mailto:a.a.kakroodi@ut.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۰/۱۷

\* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۷/۵/۷

### چکیده

از جمله پیش‌پردازش‌های ضروری در مطالعات آبی، تصحیح ستون آب است. هدف از این پژوهش بررسی لزوم تصحیح ستون آب در عمق‌سنجی از بخش جنوب‌شرقی دریای خزر می‌باشد. به منظور استخراج عمق، از تصویر لندست-۸ و داده‌های هیدروگرافی که به روش اکوساندر جمع‌آوری شده، استفاده شده است. در این پژوهش با استفاده از روش رگرسیون خطی، عمق از جفت باندهای مرئی پیش‌پردازش و داده‌های زمینی بدست آمد؛ نقشه عمق یک بار در حالتی که تصحیح ستون آب انجام شده و در حالت دیگر در غیاب تصحیح ستون آب نقشه عمق بدست آمد. در صورت عدم انجام این تصحیح، ضریب تعیین و میانگین مربعات خطا به ترتیب برای باندهای آبی ساحلی-سبز برابر با ۰/۹۱، ۰/۳۲، برای باندهای آبی و سبز ۰/۸۹، ۰/۳۵ و برای باندهای آبی ساحلی-سبز و آبی-سبز ۰/۹۱، ۰/۳۲ است، در صورتی که نتایج در حالتی که تصحیح ستون آب انجام شده، برای باندهای آبی ساحلی-سبز برابر با ۰/۸۴، ۰/۴۲ و برای باندهای آبی-سبز ۰/۸۱، ۰/۴۵ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که در عمق‌سنجی به روش تجربی، تصحیح ستون آب در منطقه مورد مطالعه، چندان مؤثر نبوده است ولی اگر قرار شود این تصحیح انجام شود بهتر است از جفت باندهای آبی ساحلی و سبز و جفت باندهای آبی و سبز توأمان استفاده شود (با ضریب تبیین ۰/۹۴ و خطای میانگین مربعات ۰/۳۴).

کلمات کلیدی: عمق‌سنجی، تصحیح ستون آب، نقشه عمق، جنوب شرقی دریای خزر.

### ۱. مقدمه

زمینه‌های نامبرده حائز اهمیت است و هر گونه تحسینی که بتواند در دقت عمق تخمین زده شده اثر گذار باشد بایستی مورد توجه قرار گیرد. انتظار می‌رود که اعمال تصحیح ستون آب در بهبود عملیات عمق‌سنجی نقش داشته باشد، بنابراین جهت بررسی ضرورت این تصحیح، فرایند عمق‌سنجی یک بار با اجرای این تصحیح و بار دیگر در غیاب تصحیح ستون آب انجام می‌شود و نتایج آن دو مورد مقایسه قرار می‌گیرد. اخیراً تخمین عمق از طریق تصاویر اپتیک ماهواره‌ای بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Benny, 1983). تصاویر ماهواره‌ای به این دلیل

با افزایش جمعیت در مناطق ساحلی، آگاهی از تغییرات شدید تراز دریای خزر گامی اساسی برای برنامه‌ریزی و حفاظت از مناطق ساحلی است. این موجب شده، تصمیم‌گیران مدیریت مناطق ساحلی این مسئله را مورد توجه قرار دهند. عمق‌سنجی از مناطق ساحلی در زمینه‌های مختلف همچون علوم دریایی، کاربردهای هیدرولوژی، حمل و نقل و اهداف نظامی حائز اهمیت است (Baban, 1993). از این رو، برآورد دقیق عمق در

کارآمد و اقتصادی هستند که می‌توانند محدوده وسیعی را با یک یا چند تصویر پوشش دهند. همچنین به علت قدرت نفوذ نور مرئی در آب که تقریباً به ۳۰ متر می‌رسد این تصاویر برای مناطق ساحلی بسیار مناسب می‌باشند. در این میان، تصاویر لندست می‌تواند جهت تخمین عمق به کار رود، باند آبی، باند سبز به ترتیب توانایی نفوذ تا ۲۵ متر و ۱۵ متر را دارد همچنین باند قرمز تا ۵ متر می‌تواند به درون آب نفوذ کند در حالیکه باند مادون قرمز تنها قادر به نفوذ آب تا ۰/۵ متر را دارد (Jupp, 1988). بیشینه عمقی که بوسیله تصاویر ماهواره‌ای قابل شناسایی است تابعی از طول موج و روشنایی آب است. در شرایطی که آب شفاف است محدوده طیفی ۴۹۰ نانومتر می‌تواند تا ۳۰ متر را شناسایی کند، در حالی که، باندهای با محدوده طیف‌های ۴۳۰ تا ۵۸۰ نانومتر و ۴۰۰ تا ۶۱۰ نانومتر به ترتیب قادر به شناسایی محدوده عمق‌های ۲۰ متر و ۱۰ متر هستند. این اختلاف طیف‌ها در عمق اساس سنجش‌ازدور در شناسایی پدیده‌های بستر آب و عمق سنجی است (IOCCG<sup>1</sup>, 2000, in Vincent, 2010). در حوزه سنجش‌ازدور اپتیک الگوریتم‌های متعددی جهت تخمین عمق پیشنهاد شده است که مبتنی بر روش‌های تجربی یا تحلیلی است. روش‌های تحلیلی که از سوی چند تن از محققان پیشنهاد شده است، بر اساس ویژگی‌های اپتیکی آب مانند میرایی، انکسار و پراکنش که با پخش نور در ستون آب شناخته می‌شود (Benny and Dawson, 1983; Philpot, 1989). در روش‌های تجربی یک رابطه ریاضیاتی بین درجات روشنایی رادیانس<sup>۲</sup> یا بازتاب<sup>۳</sup> از پهنه آبی با چند موقعیت عمق نمونه‌برداری شده (داده عمق میدانی) ایجاد می‌شود. روش‌های تجربی متعددی از سوی محققان پیشنهاد شده است که شامل رابطه خطی (Lyzenga, 1978)، مدل‌های نسبت باندی (Stumpf et al., 2003) و مدل غیر خطی (Su et al., 2008) می‌شود. روش پیشنهادی Lyzenga (۱۹۸۱)؛ (۱۹۸۵) براساس روش تجربی است که در این روش فرض می‌شود سیگنال بازتاب یافته از بستر رابطه خطی با بازتاب از بستر و رابطه نمایی با عمق آب دارد. با پیشرفت تکنیک‌های سنجش‌ازدوری این روش‌ها بر روی تصاویر با توان تفکیک مکانی بالا همچون IKONOS, Quickbird, and Worldview-2 قابل اجراست (Su, Liu, and Heyman 2008; Lyons, Phinn, )

کارآمد و اقتصادی هستند که می‌توانند محدوده وسیعی را با یک یا چند تصویر پوشش دهند. همچنین به علت قدرت نفوذ نور مرئی در آب که تقریباً به ۳۰ متر می‌رسد این تصاویر برای مناطق ساحلی بسیار مناسب می‌باشند. در این میان، تصاویر لندست می‌تواند جهت تخمین عمق به کار رود، باند آبی، باند سبز به ترتیب توانایی نفوذ تا ۲۵ متر و ۱۵ متر را دارد همچنین باند قرمز تا ۵ متر می‌تواند به درون آب نفوذ کند در حالیکه باند مادون قرمز تنها قادر به نفوذ آب تا ۰/۵ متر را دارد (Jupp, 1988). بیشینه عمقی که بوسیله تصاویر ماهواره‌ای قابل شناسایی است تابعی از طول موج و روشنایی آب است. در شرایطی که آب شفاف است محدوده طیفی ۴۹۰ نانومتر می‌تواند تا ۳۰ متر را شناسایی کند، در حالی که، باندهای با محدوده طیف‌های ۴۳۰ تا ۵۸۰ نانومتر و ۴۰۰ تا ۶۱۰ نانومتر به ترتیب قادر به شناسایی محدوده عمق‌های ۲۰ متر و ۱۰ متر هستند. این اختلاف طیف‌ها در عمق اساس سنجش‌ازدور در شناسایی پدیده‌های بستر آب و عمق سنجی است (IOCCG<sup>1</sup>, 2000, in Vincent, 2010). در حوزه سنجش‌ازدور اپتیک الگوریتم‌های متعددی جهت تخمین عمق پیشنهاد شده است که مبتنی بر روش‌های تجربی یا تحلیلی است. روش‌های تحلیلی که از سوی چند تن از محققان پیشنهاد شده است، بر اساس ویژگی‌های اپتیکی آب مانند میرایی، انکسار و پراکنش که با پخش نور در ستون آب شناخته می‌شود (Benny and Dawson, 1983; Philpot, 1989). در روش‌های تجربی یک رابطه ریاضیاتی بین درجات روشنایی رادیانس<sup>۲</sup> یا بازتاب<sup>۳</sup> از پهنه آبی با چند موقعیت عمق نمونه‌برداری شده (داده عمق میدانی) ایجاد می‌شود. روش‌های تجربی متعددی از سوی محققان پیشنهاد شده است که شامل رابطه خطی (Lyzenga, 1978)، مدل‌های نسبت باندی (Stumpf et al., 2003) و مدل غیر خطی (Su et al., 2008) می‌شود. روش پیشنهادی Lyzenga (۱۹۸۱)؛ (۱۹۸۵) براساس روش تجربی است که در این روش فرض می‌شود سیگنال بازتاب یافته از بستر رابطه خطی با بازتاب از بستر و رابطه نمایی با عمق آب دارد. با پیشرفت تکنیک‌های سنجش‌ازدوری این روش‌ها بر روی تصاویر با توان تفکیک مکانی بالا همچون IKONOS, Quickbird, and Worldview-2 قابل اجراست (Su, Liu, and Heyman 2008; Lyons, Phinn, )

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱ داده‌ها

به منظور برآورد عمق، تصویر لندست-۸ با شناسه (Path/Row=163/34S,CENEID=LC81630342016101LGN00) که از سایت زمین شناسی ایالات متحده دانلود شده است<sup>۴</sup>. همچنین از داده‌های میدانی که به روش اکوساندر تهیه شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. ارتفاع داده‌های هیدروگرافی نسبت به میانگین سطح آب روزهای هیدروگرافی ۲۶/۵- متر نسبت به MSL<sup>۵</sup> بود. ۷۰ درصد از داده‌ها به عنوان داده آموزشی و ۳۰ درصد به عنوان داده آزمون در نظر گرفته شد. هیستوگرام داده‌های آموزشی و داده‌های آزمون در شکل ۱ نشان داده شده است، مطابق با شکل ۱، بیشترین و کمترین عمق ثبت شده به ترتیب برابر ۶/۶۶ و ۰/۶۳ متر می‌باشد.

منطقه مورد مطالعه در بخش جنوب شرقی دریای خزر است. عمق دریای خزر از شمال به جنوب افزایش می‌یابد. عمق متوسط دریا ۱۸۱/۷ متر می‌باشد، حداقل آن در شمال ۶/۲ متر و حداکثر در جنوب و حدود ۱۰۰۰ متر است (احمدیان شالچی، ۱۳۸۷، ۶۲).

<sup>4</sup> Machine Learning

<sup>5</sup> <https://earthexplorer.usgs.gov/>

<sup>6</sup> Mean Sea Level

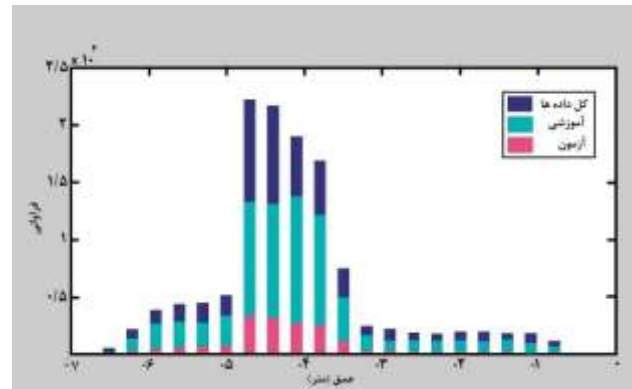
<sup>1</sup> International Ocean Color Coordinating Group

<sup>2</sup> Radiance

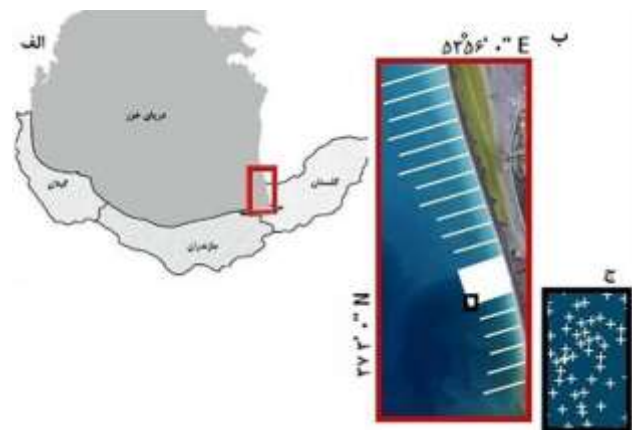
<sup>3</sup> Reflectance

اتمسفری<sup>۱</sup> DOS مبتنی بر تصویر است و نتایج بررسی‌های اخیر دقت تصحیح اتمسفری DOS بر روی تصاویر لندست-۸ در مناطق ساحلی را تأیید کرده است (Nazeer et al., 2014). در این تصحیح اتمسفری فرض می‌شود که عارضه‌هایی که در زمان اخذ تصویر کاملاً در سایه قرار دارد، یا آب‌های عمیق مقدار بازتاب آن‌ها صفر است. به این دلیل که آب جذب کننده انرژی الکترومغناطیس مخصوصاً در طول موج‌های بلند است و مقدار انرژی ساطع شده از سطح آب ناچیز و اثر اتمسفر قابل توجه است (فاطمی و رضایی، ۱۳۹۱). جذب و پراکنش اتمسفری موجب می‌شود که سنجنده مقدار درجه روشنایی (DN) غیر از صفر را ثبت کند. این مقدار درجه روشنایی غیرصفر ثابت از کل باندها کم می‌شود. در مرحله بعد، با استفاده از اطلاعات موجود در فایل متادیتا تصویر، مقادیر درجه روشنایی به بازتاب تبدیل شد. بازتاب آینه‌ای تابش خورشید از سطح صاف آب اقیانوس‌ها و دریاها به عنوان درخشندگی خورشید<sup>۲</sup> شناخته شده است. در محیط‌های آبی کم عمق، تابش پرتو درخشان نور خورشید بر سطوح صاف آب مشکل جدی را بر روی تصاویر ماهواره‌ای بوجود می‌آورد که بایستی از تصویر حذف شود. برای تصحیح درخشندگی خورشید روش هدلی به کار گرفته شد (Hedley, 2005). پس از اعمال تصحیحات اتمسفری، درخشندگی خورشید لازم است تصحیح ستون آب بر روی تصویر اجرا شود. در تهیه نقشه (مانند نقشه عمق و نقشه طبقه‌بندی گیاهان آبی یا مرجان‌ها) یا بررسی اطلاعات کمی از پهنه‌های آبی، اثر تغییر عمق می‌تواند به طور چشمگیری بر اندازه‌گیری‌های سنجش‌ازدوری تأثیرگذار باشد. به طوری که عدم اعمال این تصحیح ممکن است موجب شود که طیف ماسه به جای طیف گیاه آبی اشتباه گرفته شود (Green et al., 2000). یکی از تکنیک‌هایی که برای تصحیح ستون آب استفاده می‌شود بر اساس مدل لیزنگا در سال ۱۹۷۸ و ۱۹۸۱ است که بعدها توسط Mumby و همکاران توسعه داده شد. در این روش برای تصحیح ستون آب، باید جفت باندهایی را که قدرت نفوذ خوبی در آب دارند (مثلاً، طول موج‌های محدوده مرئی) انتخاب شوند. و مجموعه پیکسل‌هایی (در حدود ۱۰۰ پیکسل) از تصویر که دارای بستر همگن هستند و در عمق‌های مختلف قرار دارند انتخاب می‌شوند. بسترهای پوشیده از ماسه، بهترین مکان برای انتخاب

محدوده جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۱: هیستوگرام داده‌های آموزشی و داده‌های آزمون هیدروگرافی



شکل ۲: الف) موقعیت دریای خزر و کادر قرمز منطقه مورد مطالعه؛ ب) کادر قرمز: مسیر داده‌های هیدروگرافی برداشت شده؛ ج) کادر مشکی: نقاط عمق برداشت شده که با علامت + مشخص شده است.

## ۲-۲ پیش‌پردازش‌ها

جهت استخراج دقیق‌تر اطلاعات عمق ضرورت دارد پیش‌پردازش‌هایی بر روی داده هیدروگرافی و تصاویر ماهواره‌ای اعمال شود. سیستم مختصات داده‌های اکوساندر بایستی با سیستم مختصات تصویر هماهنگ باشد. بنابراین داده‌های میدانی به سیستم مختصات تصویر WGS84 UTM 39N تبدیل شد. تابش خورشیدی با گذر از اتمسفر، از بخار آب و اثرات اتمسفری موجود در جو تأثیر می‌پذیرد، از این رو تصحیح اثرات اتمسفری بویژه در مناطق آبی و در مطالعات اقیانوس‌شناسی به دلیل مترکم بودن بخار آب اهمیت دارد. از میان روش‌های مختلف تصحیح اتمسفری، روش DOS بر تصویر اعمال می‌شود. تصحیح

<sup>1</sup> Dark Object Subtract

<sup>2</sup> Sun Glint

$\bar{X}_i$  و  $\bar{X}_j$ ، به ترتیب میانگین باندهای  $i$  و  $j$  و  $\bar{X}_i \bar{X}_j$  میانگین حاصلضرب باندهای  $i$  و  $j$  می‌باشد. قبل از اجرای این مرحله، باید مناطق غیر از آب (خشکی و ابر) از تصویر ماسک شود. حال شاخص  $\text{depth-invariant}$  بر باندهای  $i$  و  $j$  در حالی که فاقد تأثیرات اتمسفری است از رابطه (۴) قابل محاسبه است:

$$\text{depth-invariant index}_{ij} = \ln(L_i) - \left[ \left( \frac{K_i}{K_j} \right) \cdot \ln(L_j) \right] \quad (4)$$

به علت قدرت نفوذ بیشتر، باندهای آبی ساحلی، آبی و سبز انتخاب شد. جفت باندها شامل جفت باند آبی ساحلی- سبز، جفت باند آبی- سبز و همچنین جفت باندهای آبی ساحلی- سبز و آبی- سبز می‌باشد. سپس از رابطه (۴) شاخص  $\text{depth-invariant}$  برای هر جفت باند بدست می‌آید. پس از اجرای پیش‌پردازش‌ها، به منظور کالیبراسیون عمق تعیین شده، از داده‌های میدانی استفاده می‌شود و از طریق روش رگرسیون خطی عمق برآورده می‌شود. در این روش که برگرفته از روش لیزنگا (Lyzenga, 1985) می‌باشد که عمق از رابطه (۵) تعیین می‌شود.

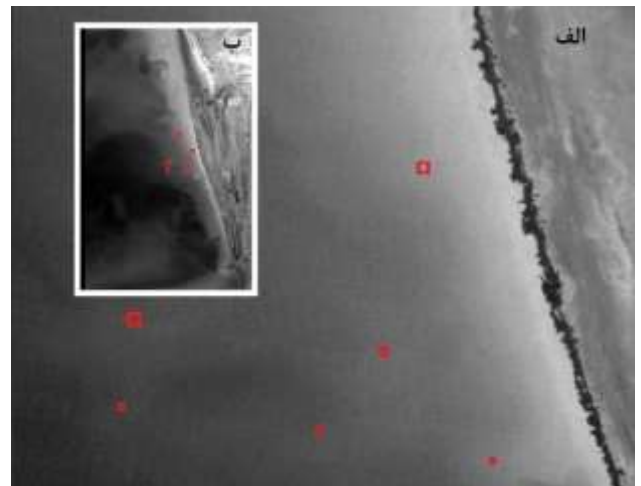
$$Z = a_0 + a_1 X_1 + \dots + a_n X_m \quad (5)$$

در رابطه (۵)، مقدار  $X_1$  تا  $X_m$  معادل است با مقدار بازتاب باندهای مرئی و ضرایب  $a_0$  تا  $a_n$ ، از طریق رگرسیون چند متغیره میان مقادیر تبدیل شده بازتاب‌ها در باندهای مرئی (آبی ساحلی، ساحلی و سبز) و همچنین جفت باندها با مناظر داده‌های میدانی بدست می‌آید. در شکل (۴) مراحل تعیین عمق نشان داده شده است.



شکل ۴: مراحل تعیین عمق و ارزیابی نتایج حاصل از عمق برآورد شده با تصحیح و بدون تصحیح ستون آب.

چنین پیکسل‌هایی هستند چرا که بدلیل ظاهر روشن در تصویر حتی بودن داشتن شناخت از منطقه، این نواحی به راحتی قابل شناسایی هستند. این پیکسل‌ها نباید از مناطق خیلی کم‌عمق و خیلی عمیق انتخاب شوند (Green et al., 2000). در شکل (۳)، نمونه‌هایی که پوشیده از ماسه است از منطقه مورد مطالعه مشخص گردید.



شکل ۳: الف) نمونه‌های تعیین شده از قسمت‌های پوشیده از ماسه؛ ب) باند سبز تصویر لندست از منطقه مورد مطالعه.

پس از انتخاب نمونه‌ها، مقدار عددی بازتاب این پیکسل‌ها به لگاریتم طبیعی تبدیل می‌شود. با پلات کردن مقادیر پیکسل‌های تبدیل شده در هر جفت باند، پیکسل‌هایی که بصورت خط افقی یا عمودی ظاهر شدند حذف می‌گردند چرا که این پیکسل‌ها معرف نواحی اشباع هستند. برای هر جفت باند نسبت ضریب میرایی  $(K_i/K_j)$  از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد:

$$\frac{K_i}{K_j} = a + \sqrt{a^2 + 1} \quad (1)$$

مقدار  $a$  در رابطه (۱)، از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$a = \frac{\sigma_{ii} - \sigma_{jj}}{2\sigma_{ij}} \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $\sigma_{ii}$  و  $\sigma_{jj}$  به ترتیب رادینانس باند  $i$  ام و باند  $j$  ام هستند و  $\sigma_{ij}$  کواریانس باندهای  $i$  و  $j$  می‌باشد که از رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$\sigma_{ij} = \bar{X}_i \bar{X}_j - (\bar{X}_i \times \bar{X}_j) \quad (3)$$

### ۳. نتایج و بحث

پس از مراحل عمق‌سنجی، به منظور درک بصری بهتر، نقشه هر یک از حالت‌های مورد بررسی، تهیه شد و جهت ارزیابی دقیق‌تر نقشه اختلاف عمق (متر) که از قدرمطلق تفاضل نقشه مرجع و نقشه مدلسازی است بدست می‌آید در کنار نقشه‌های مرجع و مدلسازی آورده شده است. با توجه به جدول (۱)، جهت ارزیابی تأثیر تصحیح ستون آب در برآورد دقت عمق، ۶ حالت مختلف بررسی شد. نقشه عمق بدون تصحیح ستون آب به همراه نقشه مرجع و نقشه اختلاف عمق در شکل‌های (۵) تا (۷) و نقشه عمق با تصحیح ستون آب در شکل‌های (۸) تا (۱۰) نشان داده شده است.

با توجه به نقشه اختلاف عمق بدست آمده، هیستوگرام خطای هر روش در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در این شکل، محور Xها، محور اختلاف عمق (متر) و محور Yها فراوانی اختلاف عمق می‌باشد. در هر یک از حالت‌های روش عمق‌سنجی بدون تصحیح ستون آب و با تصحیح ستون آب، به ترتیب بیشترین فراوانی به محدوده ۰-۰/۲۰ متر و کمترین فراوانی به محدوده‌های ۱-۱/۵ و ۱/۷-۲ متر اختصاص دارد.

### ۴. نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، ضمن تعیین عمق به روش رگرسیون خطی، تأثیر تصحیح ستون آب، یک بار بدون تصحیح ستون آب و بار دیگر با تصحیح ستون آب مورد ارزیابی قرار گرفت. از نتایج ارائه شده در جدول ۱ مشخص می‌شود، در حالتی که عمق بدون تصحیح ستون آب بدست آمده مقدار RMSE و NRMSE نسبت به حالتی که تصحیح ستون آب انجام شده پایین‌تر و مقدار  $R^2$  بالاتر است. اما نتایج در حالتی که عمق با تصحیح ستون آب و از جفت باندهای مختلف آبی ساحلی-سبز، جفت باند آبی-سبز و جفت باندهای آبی ساحلی-سبز و آبی-سبز بدست می‌آید متفاوت است. جفت باندهای آبی ساحلی-سبز و آبی-سبز بیشترین دقت (با مقدار  $R^2$  بالاتر و مقدار RMSE و NRMSE پایین‌تری) را داشته است. با توجه به هیستوگرام هر یک از حالت‌های مورد بررسی، مشاهده می‌شود که آن‌ها از وضعیت مشابه‌ای برخوردارند و مناطقی از نقشه که اختلاف عمق آن بین صفر تا ۰/۲۵ متر قرار دارد بیشترین فراوانی و نواحی که اختلاف عمق برآورد شده بین ۱ تا ۱/۵ متر می‌رسد کمترین فراوانی را دارد.

نتایج عمق در هر دو حالت (بدون تصحیح ستون آب و با تصحیح ستون آب) مورد بررسی قرار گرفت. به منظور اعتبارسنجی و محاسبه خطای تخمین عمق از مقدار واقعی آن، از  $RMSE^1$  (خطای میانگین جذر مربعات) و  $NRMSE^2$  (خطای نرمال شده میانگین جذر مربعات) استفاده شده است. که مقادیر این دو به صورت جداگانه برای داده‌های آموزشی و داده‌های مورد آزمون برای هر یک از حالت‌های مورد بررسی، آورده شده است (جدول ۱).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Z-Z')^2}{N}} \quad (6)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{x_{max}-x_{min}} \quad (7)$$

در رابطه (۶)،  $Z$  و  $Z'$  به ترتیب عمق واقعی و عمق تخمین زده شده است و  $N$  برابر تعداد داده‌هاست. در رابطه (۷)،  $x_{max}$  و  $x_{min}$  به ترتیب بیانگر کمترین و بیشترین مقدار عمق واقعی می‌باشد.

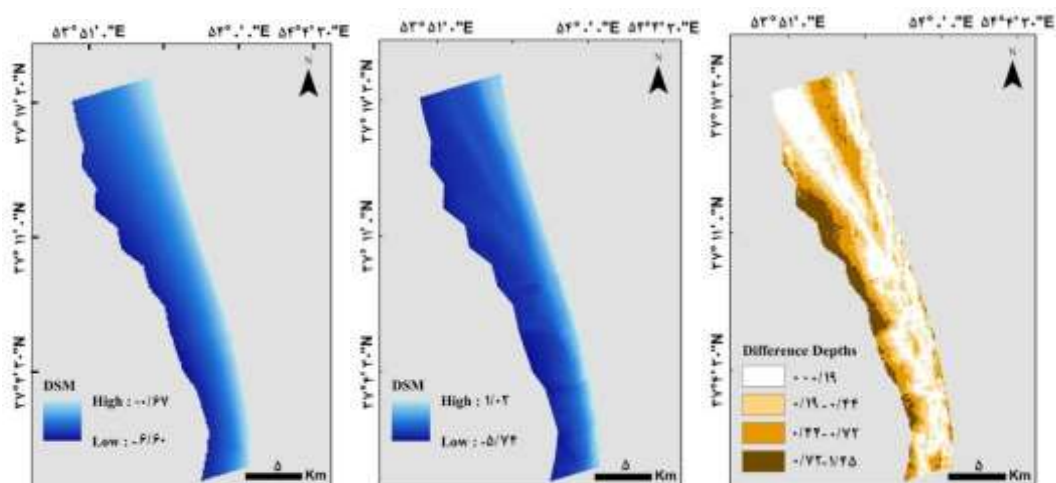
و شاخص‌های آماری ضریب تبیین ( $R^2$ ) و خطاهای میانگین جذر مربعات (RMSE) و نرمال شده میانگین جذر مربعات (NRMSE) برای داده‌های آموزشی و داده‌های آزمون بدست آمد و نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: نتایج آماری عمق‌سنجی در حالت اعمال تصحیح ستون آب و بدون تصحیح ستون آب

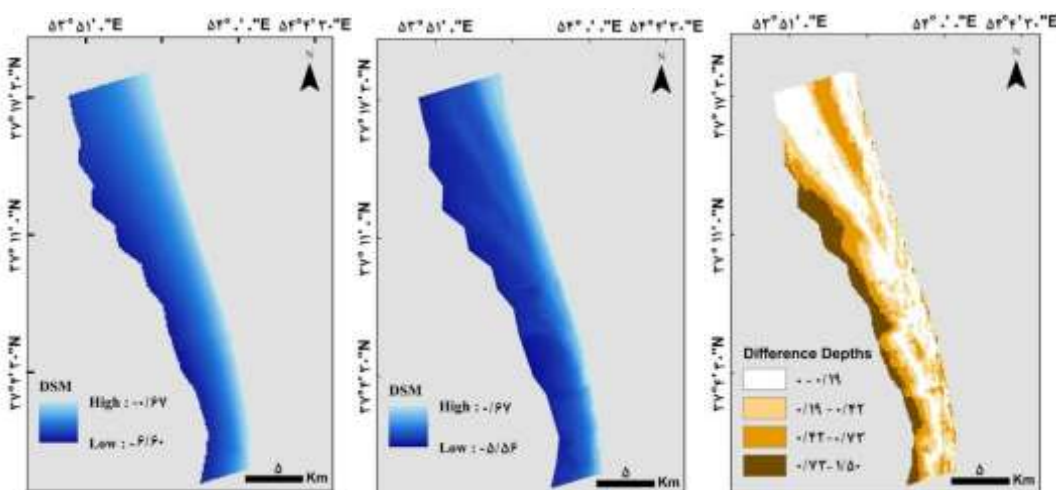
روش عمق‌یابی	باند	داده‌ها	NRMSE	RMSE (m)	$R^2$
عمق‌سنجی بدون تصحیح ستون آب	آبی ساحلی و سبز	داده آموزش	۰/۰۵	۰/۳۳	۰/۹۰
	آبی و سبز	داده آزمون	۰/۰۵	۰/۳۲	۰/۹۱
عمق‌سنجی با تصحیح ستون آب	آبی و سبز	داده آموزش	۰/۰۶	۰/۳۶	۰/۸۹
	آبی ساحلی، آبی و سبز	داده آزمون	۰/۰۶	۰/۳۵	۰/۸۹
عمق‌سنجی با تصحیح ستون آب و جفت باند آبی-سبز	آبی ساحلی-سبز	داده آموزش	۰/۰۵	۰/۳۲	۰/۹۱
	آبی-سبز	داده آزمون	۰/۰۵	۰/۳۲	۰/۹۱
عمق‌سنجی با تصحیح ستون آب و جفت باند آبی-سبز	آبی ساحلی-سبز	داده آموزش	۰/۰۷	۰/۴۲	۰/۸۵
	آبی-سبز	داده آزمون	۰/۰۷	۰/۴۲	۰/۸۴
عمق‌سنجی با تصحیح ستون آب و جفت باند آبی-سبز	آبی-سبز	داده آموزش	۰/۰۸	۰/۴۵	۰/۸۲
	آبی ساحلی-سبز	داده آزمون	۰/۰۸	۰/۴۵	۰/۸۱
عمق‌سنجی با تصحیح ستون آب و جفت باند آبی-سبز	آبی ساحلی-سبز و آبی-سبز	داده آموزش	۰/۰۶	۰/۳۴	۰/۹۰
	آبی-سبز	داده آزمون	۰/۰۶	۰/۳۴	۰/۹۰

<sup>1</sup> Root-Mean-Square Error

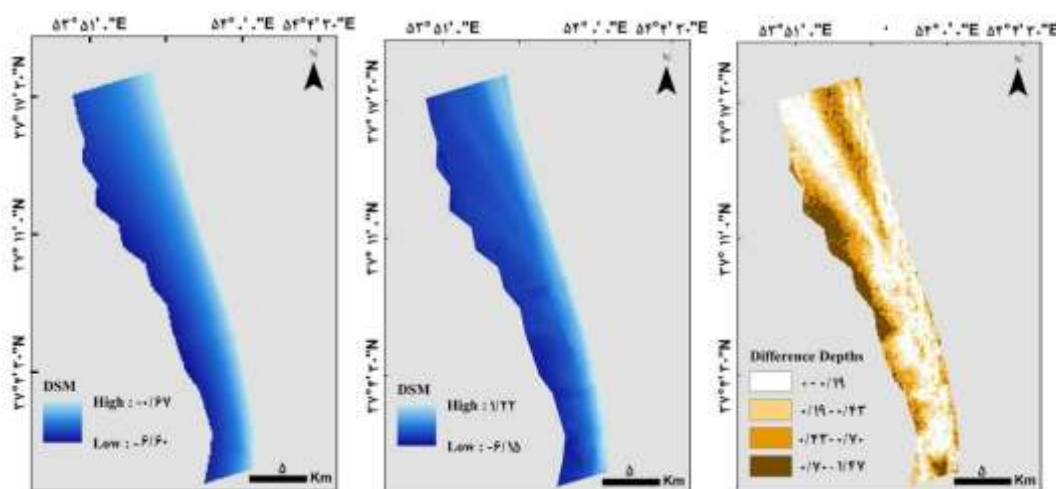
<sup>2</sup> Normalized Root-Mean-Square Error



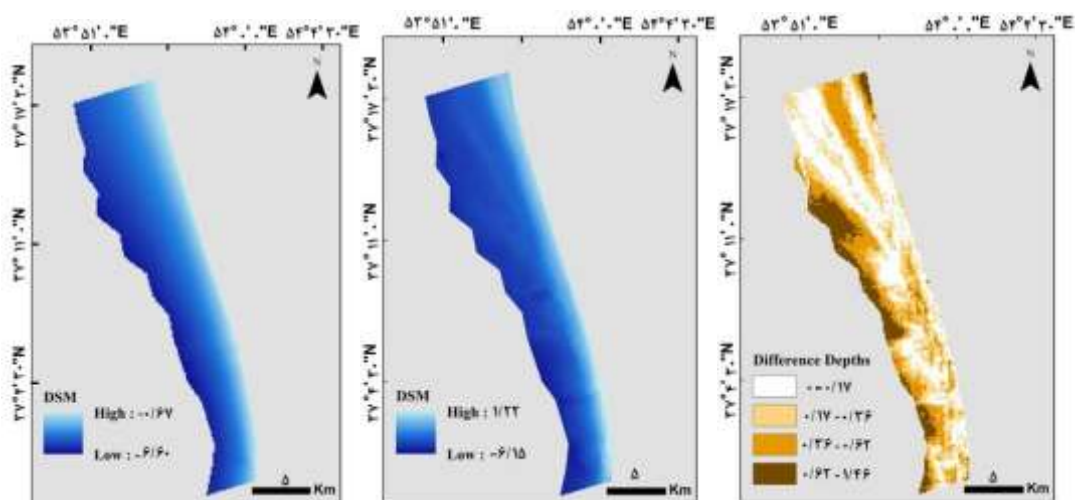
شکل ۵: نقشه‌های عمق (متر) حاصل از داده‌های میدانی؛ بدون تصحیح ستون آب (باندهای آبی ساحلی و سبز) و قدرمطلق اختلاف عمق‌ها (از راست به چپ).



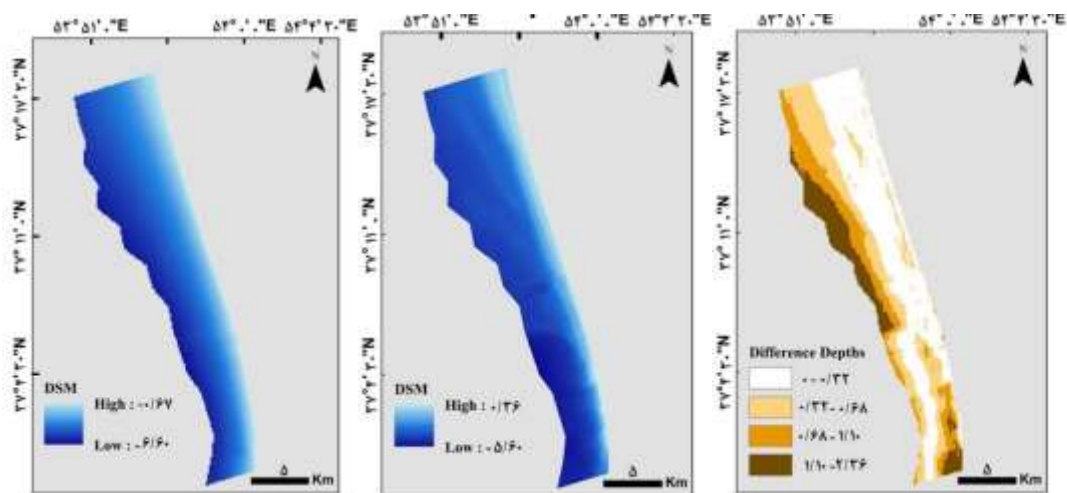
شکل ۶: نقشه‌های عمق (متر) حاصل از داده‌های میدانی؛ بدون تصحیح ستون آب (باندهای آبی ساحلی و سبز) و قدرمطلق اختلاف عمق‌ها (از راست به چپ).



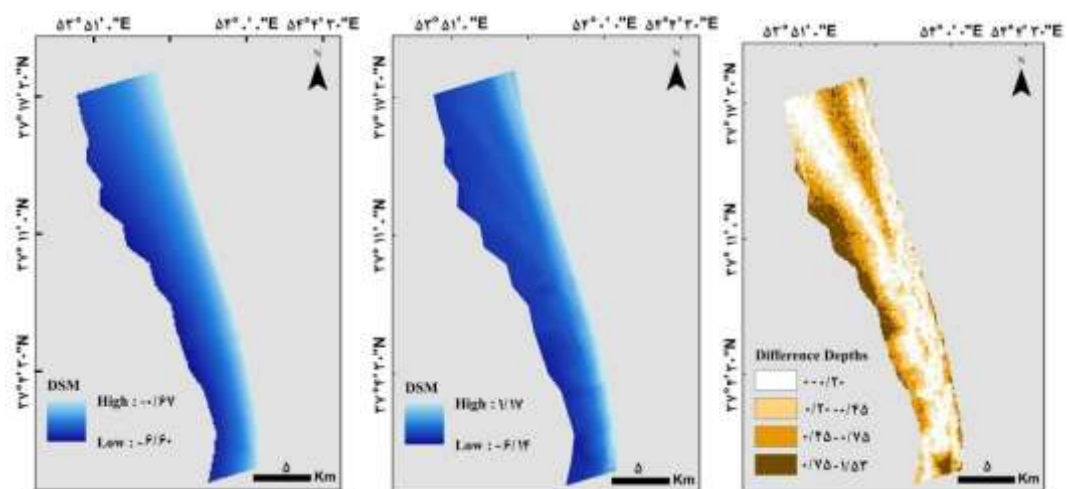
شکل ۷: نقشه‌های عمق (متر) حاصل از داده‌های میدانی؛ بدون تصحیح ستون آب (باندهای آبی ساحلی، آبی و سبز) و قدرمطلق اختلاف عمق‌ها (از راست به چپ).



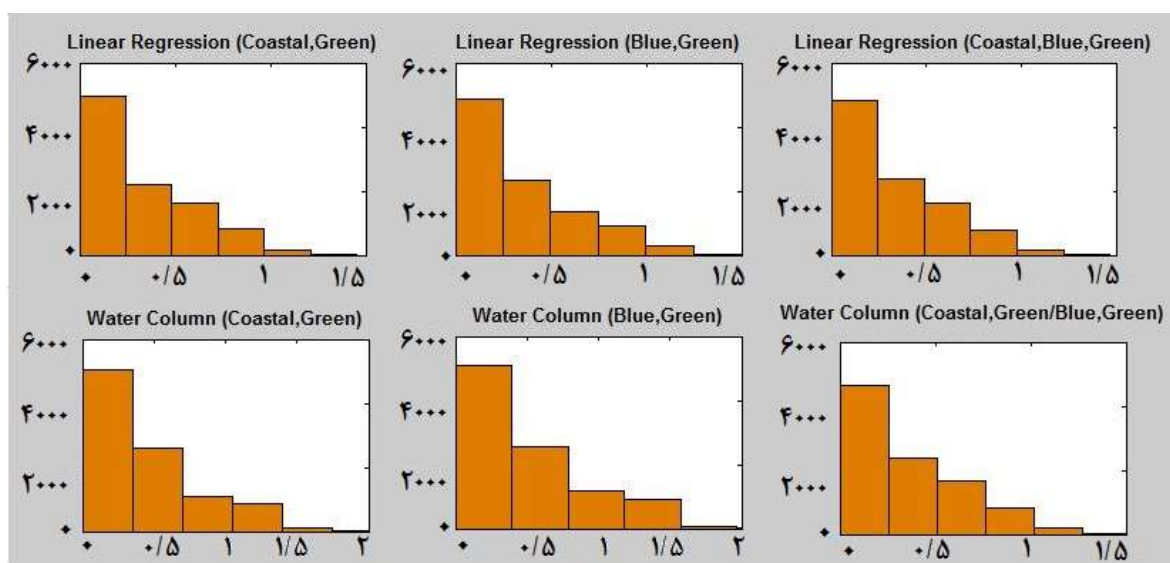
شکل ۸: نقشه‌های عمق (متر) حاصل از داده‌های میدانی؛ با تصحیح ستون آب (جفت باند آبی ساحلی و سبز) و قدرمطلق اختلاف عمق‌ها (از راست به چپ).



شکل ۹: نقشه‌های عمق (متر) حاصل از داده‌های میدانی؛ با تصحیح ستون آب (جفت باند آبی و سبز) و قدرمطلق اختلاف عمق‌ها (از راست به چپ).



شکل ۱۰: نقشه‌های عمق (متر) حاصل از داده‌های میدانی؛ با تصحیح ستون آب (جفت باندهای آبی ساحلی، سبز و آبی و سبز) و قدرمطلق اختلاف عمق‌ها (از راست به چپ).



شکل ۱۱: هیستوگرام قدر مطلق اختلاف عمق‌ها (خطا) برای نقشه عمق بدون تصحیح ستون آب (ردیف اول) و نقشه عمق با تصحیح ستون آب (ردیف دوم)، محور x ها، محدوده اختلاف عمق (متر) و محور y ها، فراوانی است.

Benny, A.H.; Dawson, G.J.; (1983). Satellite imagery as an aid to bathymetry charting in the Red Sea. The Cartographic Journal, 20, pp. 5-16.

<https://doi.org/10.1179/caj.1983.20.1.5>

Bramante, J. F.; Raju, D. K.; Min, S. T.; 2011. "Derivation of Bathymetry from Multispectral derivation of bathymetry in Singapore's shallow, turbid waters. International Journal of Remote Sensing 34(6):2070-2088. doi:10.1080/01431161.2012.734934.

<https://doi.org/10.1080/01431161.2012.734934>

Hedley, J. D.; Harborne, A. R.; Mumby, P. J.; 2005. Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. International Journal of Remote Sensing.

<https://doi.org/10.1080/01431160500034086>

Jupp, DLB.; 1988. Background and Extensions to Depth of Penetration (DOP) Mapping in Shallow Coastal Waters. Proceedings of the Symposium on Remote Sensing of the Coastal Zone. Gold Coast. Queensland. IV.2.1 - IV.2.19.

Legleiter, C. J.; Roberts, D. A.; 2005. "Effects of Channel Morphology and Sensor Spatial Resolution on Image-

همچنین، باید اشاره کرد که با توجه به نقشه اختلاف عمق در هر یک از حالت‌های مورد بررسی، نواحی که بیشترین اختلاف عمق را داشته از یک توزیع مکانی خاص پیروی می‌کند و با دور شدن از ساحل و افزایش عمق خطا (اختلاف عمق بدست آمده) افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که در برآورد عمق به روش تجربی، تصحیح ستون آب تأثیری در دقت عمق برآورد شده ندارد ولی عمق تخمین شده با تصحیح ستون آب و از جفت باندهای آبی ساحلی- سبز و آبی- سبز نتایج بهتری را در مقایسه با جفت باند آبی ساحلی-سبز و جفت باند آبی- سبز نشان می‌دهد.

## منابع

احمدیان شالچی، ن.، ۱۳۸۹. چشم‌اندازهای جغرافیایی ایران (دریاها)، مشهد: بنیاد پژوهش‌های اسلامی، جلد اول، صفحه ۶۲.  
فاطمی، ب و رضایی، ی.، ۱۳۹۱. مبانی سنجش‌ازدور، تهران: آزاده، صفحه ۱۱۳.

Baban, S.M.J.; 1993. The evaluation of different algorithms for bathymetry charting of lakes using Landsat imagery. International Journal of Remote Sensing, 14, pp. 2263-2273.

<https://doi.org/10.1080/01431169308954035>



- Nazeer, M.; Nichols, J.E.; Yung, Y.; 2014. Evaluation of atmospheric correction models and Landsat surface reflectance product in an urban coastal environment. *International Journal of Remote Sensing*, 35(16), 6271–6291.  
<https://doi.org/10.1080/01431161.2014.951742>
- Philpot, W. D.; 1989. “Bathymetric Mapping with Passive Multispectral Imagery.” *Applied Optics* 28 (8): 1569–1578. doi:10.1364/AO.28.001569.  
<https://doi.org/10.1364/AO.28.001569>
- Stumpf, R.; Holderied, K.; Sinclair, M.; 2003. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography* 48:547–556.  
[https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.1\\_part\\_2.0547](https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547)
- Stumpf, R.P.; Holderied, K.; Sinclair, M.; 2003. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnol. Oceanogr.* 2003, 48, 547–556.  
[https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.1\\_part\\_2.0547](https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547)
- Su, H.; Liu, H.; Heyman, W.D.; 2009. Automated derivation of bathymetric information from multispectral satellite imagery using a non-linear inversion model. *Mar. Geod.* 2008, 31, 281–298. vol. 34, no. 8, pp. 1039–1059, Jun. 2009.  
<https://doi.org/10.1080/01490410802466652>
- derived Depth Estimates,” *Remote Sensing of Environment*, 95:231–247.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.12.013>
- Liu, S., Gao, Y.; Zheng, W.; Li. X.; 2015. “Performance of Two Neural Network Models in Bathymetry.” *Remote Sensing Letters* 6 (4): 321–330.  
<https://doi.org/10.1080/2150704X.2015.1034885>
- Lyons, M.; Phinn, S.; Roelfsema, C.; 2011. Integrating QuickBird multispectral satellite and field data: mapping bathymetry, seagrass cover, seagrass species and change in Moreton Bay, Australia in 2004 and 2007. *Remote Sens* 3(12):42–64.  
<https://doi.org/10.3390/rs3010042>
- Lyzenga, D.R., 1978. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Applied Optics*. 1978, 17, 379–383.  
<https://doi.org/10.1364/AO.17.000379>
- Lyzenga, DR.; 1985. Shallow-water bathymetry using combined Lidar and passive multispectral scanner data *International Journal of Remote Sensing* 6(1):115–125.  
<https://doi.org/10.1080/01431168508948428>
- Mumby, P.J., Clark, C.D., Green, E.P., and Edwards, A.J., 1998, Benefits of water column correction and contextual editing for mapping coral reefs. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 203–210.  
<https://doi.org/10.1080/014311698216521>