



تخمین غلظت کلروفیل-آ با استفاده از داده‌های میدانی و پردازش تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ و لندست-۸ (مطالعه موردی: خور تیاب)

مصطفی مهدوی فرد^۱، خلیل ولیزاده کامران^{۲*}، احسان عطا زاده^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، ایران

۲. دانشیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، ایران

۳. استادیار گروه زیست شناسی گیاهی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، ایران

مشخصات مقاله

پیشینه مقاله:

دریافت: ۱ بهمن ۱۳۹۸

پذیرش: ۲۷ اسفند ۱۳۹۸

دسترسی اینترنتی: ۲۸ فروردین ۱۳۹۹

واژه‌های کلیدی:

کلروفیل-آ

سنتینل-۲

لندست-۸

سنجش از دور

خور تیاب

چکیده

خورها یکی از مهمترین منابع طبیعی ساحلی محسوب می‌شوند. نظارت بر کلروفیل-آ (Chl-a) که رنگدانه فیتوپلانکتون آب‌های اقیانوسی و ساحلی است می‌تواند با استفاده از فناوری نوین سنجش از دور اندازه‌گیری و ارزیابی شود. وجود طول موج‌های آبی، سبز و قرمز در ماهواره‌های مشاهدات اقیانوسی همواره راه را برای نظارت بر رنگ اقیانوس‌ها هموار نموده است. هدف از این پژوهش استفاده از الگوریتم‌های بیو اپتیکی OC2 و OC3 و از داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-2 Multi-Spectral Instrument و Landsat-8 OLI در فروردین سال ۱۳۹۸ به منظور تخمین غلظت کلروفیل-آ در منطقه خور تیاب است. جهت ایجاد همبستگی و ارزیابی نتایج از داده‌های میدانی نمونه‌برداری استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد که الگوریتم OC2 در ماهواره‌های لندست-۸ و سنتینل-۲ به ترتیب دارای بیشترین مقدار ضریب تعیین (R^2) معادل با ۰/۹۱ و ۰/۶۴ بود و همچنین مقدار خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) به ترتیب در تصاویر ماهواره‌ای معادل با ۰/۱۳ و ۰/۳۳ بود. این نتایج بیانگر دقت بالای الگوریتم OC2 در تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده است و به‌عنوان مناسب‌ترین الگوریتم برای تهیه نقشه غلظت کلروفیل-آ منطقه مورد مطالعه انتخاب شد.

* پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: valizadeh@tabrizu.ac.ir

مقدمه

در جهانی که مناطق ساحلی تقریباً یک سوم جمعیت جهان را در خود جای داده است، نظارت برای کشف اینکه آیا تغییرات مهمی در این محیط‌های طبیعی اتفاق می‌افتد امری ضروری است. آب‌های ساحلی زیستگاه مهم بسیاری از گونه‌های دریایی به‌شمار می‌آیند و پایه و اساس بسیاری از نگرانی‌های اقتصادی مهم برای جامعه و اقتصادهای محلی از جمله شیلات، تفریحی ساحلی و فعالیت‌های گردشگری است (۱۲). بررسی کیفیت آب‌های ساحلی مانند خورها از نظر زیست‌محیطی و کاربردی، اهمیت ویژه‌ای دارد. امروزه کیفیت آب یکی از مسائل موردعلاقه سازمان‌های زیست‌محیطی، صنایع شیمیایی، شیلات و سایر سازمان‌های مرتبط است. این توجه همه‌جانبه به دلیل ارتباط تنگاتنگ کیفیت آب با سلامت محیط و کیفیت زندگی همراه است (۴). خورها محیط‌های پویایی هستند که عموماً به‌عنوان پهنه آب‌های ساحلی نیمه محصور تعریف می‌شوند (۲۱). از آن‌جا که آب دریا به آب خور وارد می‌شود، خورها تحت تأثیر آلاینده‌ای دریایی همانند لکه‌های نفتی بجا مانده از نفت‌کش‌ها می‌شود بدین منظور نقشه‌برداری و درک صحیح از رنگ آب‌های ساحلی و آزاد می‌تواند در نظارت بر کیفیت آب و شناسایی آلودگی‌های طبیعی و انسانی آب (لکه‌های نفتی و شکوفه جلبک‌ها) که برای مزارع ماهی، سایر صنایع آبی‌پروری و حتی برای انسان‌ها و پرندگان خطرناک است و همچنین به مدیریت ذخایر ماهی و سایر آبی‌های دریایی کمک کند (۱۰). به‌عنوان مثال در طول سال مقادیر قابل توجهی مواد آلی و عناصر معدنی از نواحی مجاور وارد خور شده و باعث تقویت تولید اولیه در آن‌ها می‌شود (۶). فیتوپلانکتون‌های دریایی اساس اکوسیستم‌های اقیانوس هستند، به‌طوری‌که حدود نیمی از فعالیت فتوسنتز در سطح کره زمین و تولید بیش از ۹۰ درصد ماده آلی محلول در آب به فعالیت این موجودات وابسته است (۱۳). در سطح جهان فیتوپلانکتون‌ها حداقل دو نقش اساسی را ایفا می‌کنند، اولی فیتوپلانکتون‌ها پایه و اساس شبکه غذایی دریایی محسوب می‌شوند و دوم اینکه فیتوپلانکتون‌ها در

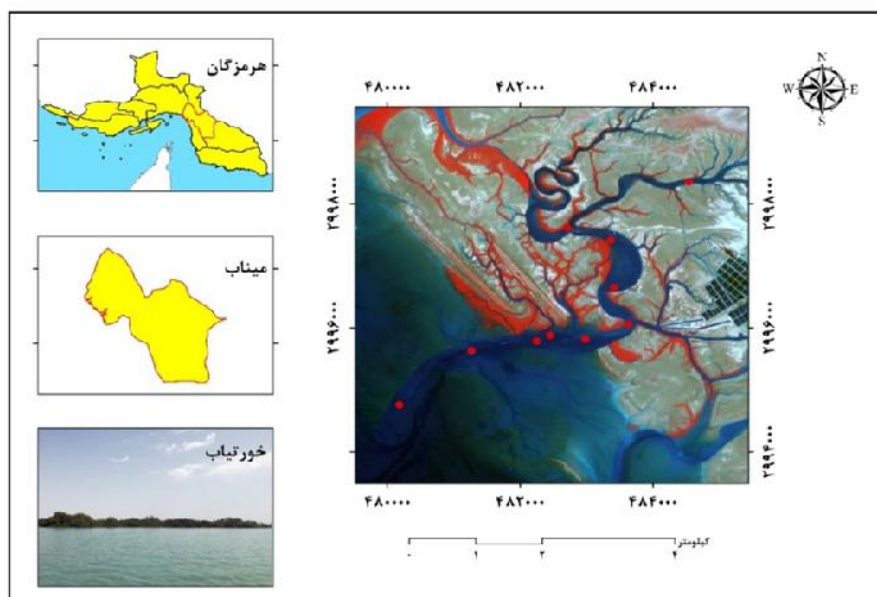
چرخه جهانی کربن نقش دارند (۱۴). کلروفیل-آ به‌عنوان شاخص فراوانی فیتوپلانکتون و زیست‌توده آب در نظر گرفته می‌شود (۲۵). یکی از دلایل مهم سنجش میزان کلروفیل-آ تخمین شدت تولید اولیه خورها و دریا‌های باز است. در سطح جهان غلظت کلروفیل-آ نقش مهمی را به‌عنوان شاخص کیفی پهنه‌های آبی ایفا می‌کند و از آن‌ها به‌عنوان نماینده‌ای برای شناسایی شکوفه‌های مضر جلبک (۱۱) و همچنین به‌عنوان نماینده‌ای از فیتوپلانکتون برای بررسی شرایط کیفی آب و وضعیت زیست‌شیمیایی استفاده می‌شود (۲۲). غلظت کلروفیل-آ اندازه‌گیری مؤثر از وضعیت آب دریا و دریاچه‌ها است، زیرا به‌شدت با فراوانی فیتوپلانکتون آبی و زیست‌توده مرتبط است. اندازه‌گیری‌های متداول پارامترهای کیفی آب همچون تخمین میزان کلروفیل-آ و مواد محلول در آب نیازمند نمونه‌برداری‌های میدانی، تجزیه و تحلیل و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی است. این تکنیک‌ها بسیار هزینه‌بر و زمان‌بر هستند (۲). تکنیک‌های سنجش‌از‌دور یک مشاهده کلی هم‌دید از مناطق بزرگ را در زمان واقعی ارائه می‌دهند (۱۵). الگوریتم‌های سنجش‌از‌دور که بیشتر به تشخیص ویژگی‌های طیفی خاص با استفاده از محدوده آبی، سبز، زرد، قرمز یا مادون‌قرمز نزدیک تکیه می‌کنند، به‌خوبی برای تمیز شکوفه‌های جلبک از دیگر پدیده‌های طبیعی اتفاق می‌افتند (۲۷). برخلاف اهمیت بسیار زیاد اکوسیستم‌های آبی منطقه خلیج فارس تاکنون مطالعاتی کمی در خصوص تخمین میزان کلروفیل-آ در این مناطق صورت گرفته است. این پژوهش جزء اولین مطالعه در کشور محسوب خواهد شد که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ی سنتینل-۲، لندست-۸ و داده‌های میدانی به تخمین میزان کلروفیل-آ خواهد پرداخت. مرادی (۷) غلظت کلروفیل-آ در خلیج فارس را با تصاویر لندست-۸ و مودیس مورد ارزیابی قرارداد و به این نتیجه دست‌یافت که میزان کلروفیل-آ در این منطقه ۰/۳-۰ میلی‌گرم بر مترمکعب است. موسوی ده‌موردی و بنایی (۹) میزان کلروفیل-آ در منطقه بندر دیلم را با استفاده از داده‌های میدانی و تصاویر لندست-۸ مورد بررسی قرار دادند، نتایج این پژوهش نشان داد

و سنتینل-۲ برای تخمین کلروفیل-آ استفاده نشده است. در این پژوهش از داده‌های با توان تفکیک مکانی بالا و نسبت سیگنال به نویز بهبود یافته‌ی لندست-۸ و سنتینل-۲ برای تخمین غلظت کلروفیل-آ در مناطق ساحلی استفاده شد و نتایج با داده‌های میدانی اندازه‌گیری شده مقایسه شد.

منطقه مورد مطالعه

خور تیاب در استان هرمزگان یکی از خورهای حوزه سیریک و کلاهی است که در دهستان تیاب ۳۰ کیلومتری شهرستان میناب و در حدفاصل عرض‌های $27^{\circ}02'$ تا $27^{\circ}08'$ شمالی و طول‌های $56^{\circ}44'$ تا $56^{\circ}57'$ شرقی واقع شده است (شکل ۱). این خور از نظر وجود درختان مانگرو از نوع حرا و فعالیت‌های صیادی اهمیت دارد. وسعت خور تیاب در حدود ۳۰۰ هکتار است. شاخه اصلی این خور از شمال شرقی در کنار دهستان تیاب شروع می‌شود که انشعاب‌های آن در زمین‌های اطراف کشیده شده است (۳). خور تیاب در طول مسیر خود به سمت دریا به دو شاخه اصلی منشعب شده است که یکی از آن به سمت شمال رفته و پس از چندین پیچ و تاب مستقیماً به دریا وارد می‌شود.

که غلظت کلروفیل - آ در ماه آبان در منطقه مورد مطالعه به میزان $1-4/9$ میلی گرم بر مترمکعب است. تامینگ و همکاران (۲۴) برای نخستین بار از تصاویر ماهواره سنتینل-۲ برای نقشه برداری پارامترهای کیفی آب استفاده کردند، نتایج این تحقیق نشان داد که داده‌های میدانی با تصاویر سنتینل-۲ همبستگی خوبی دارد. تپانساین و همکاران (۲۳) با استفاده از داده‌های تصحیح اتمسفری شده لندست-۸ متغیرهای زمانی و مکانی فیتوپلانکتون در دریاچه سیوان را ارزیابی کردند، نتایج این پژوهش نشان داد که ماه اوت و می دارای بیشترین مقدار فیتوپلانکتون در حد ۵-۱ گرم بر مترمربع است. واتانابه و همکاران (۲۶) عملکرد الگوریتم‌های باندی در برآورد غلظت کلروفیل - آ با استفاده از داده‌های لندست-۸ و سنتینل-۲ را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که به جز الگوریتم سه باندی، الگوریتم‌های طیفی کمی تحت تأثیر تغییر سنجنده قرار دارند. پوودار و همکاران (۲۰) عملکرد الگوریتم OC2 و OC3 در خلیج بنگال را با استفاده از داده‌های مودیس، لندست-۸ و سنتینل-۲ بررسی کردند، نتایج نشان داد که در فصل قبل از موسمی و پس از موسمی غلظت کلروفیل بازیابی شده از سنتینل-۲ بیش از لندست-۸ بوده است. با توجه به پیشینه یاد شده تاکنون در آب‌های ساحلی ایران از داده‌های لندست-۸



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه برداشت نمونه و منطقه مورد مطالعه

داده‌های مورد استفاده

برای تخمین غلظت کلروفیل - آ از تصاویر ماهواره‌های چندطیفی لندست-۸ و سنتینل-۲ استفاده شد. تصاویر چندطیفی لندست-۸ (Landsat-8) دارای توان تفکیک مکانی ۳۰ متر و توان تفکیک زمانی ۱۶ روزه است. ماهواره سنتینل-۲ (Sentinel-2) با توجه به توان تفکیک مناسب آن، استفاده از آن در نقشه برداری پوشش زمین همانند نظارت و پایش بر پوشش زمین شامل پوشش گیاهی، آب، خاک و همچنین راه‌های آبی و مناطق ساحلی مرسوم شده است (۱). ماهواره سنتینل-۲ دارای

دو ماهواره سنتینل 2A و 2B است. تصاویر چندطیفی سنتینل-۲ دارای توان تفکیک مکانی ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر و با وجود دوقلو بودن دارای توان تفکیک زمانی ۵ روزه است. در این پژوهش، به ترتیب داده‌های Level 1C سنتینل-۲ که از نوع داده‌های بازتاب بالای جو (TOA) هستند و Level-1 لندست-۸ از منطقه مورد مطالعه مربوط به تاریخ ۴ و ۷ آوریل ۲۰۱۹ از سایت سازمان فضایی اروپا و سازمان زمین‌شناسی آمریکا تهیه گردید. مشخصات داده‌های مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده

ماهواره	نوع داده	باند‌های مورد استفاده	توان تفکیک مکانی (متر)	دوره بازبینی مجدد (روز)	تاریخ (میلادی)
Landsat-8	Level-1	۱-۲-۳	۳۰	۱۶	۷ آوریل ۲۰۱۹
Sentinel-2A	Level-1C	۱-۲-۳	۱۰ و ۶۰	۵	۴ آوریل ۲۰۱۹

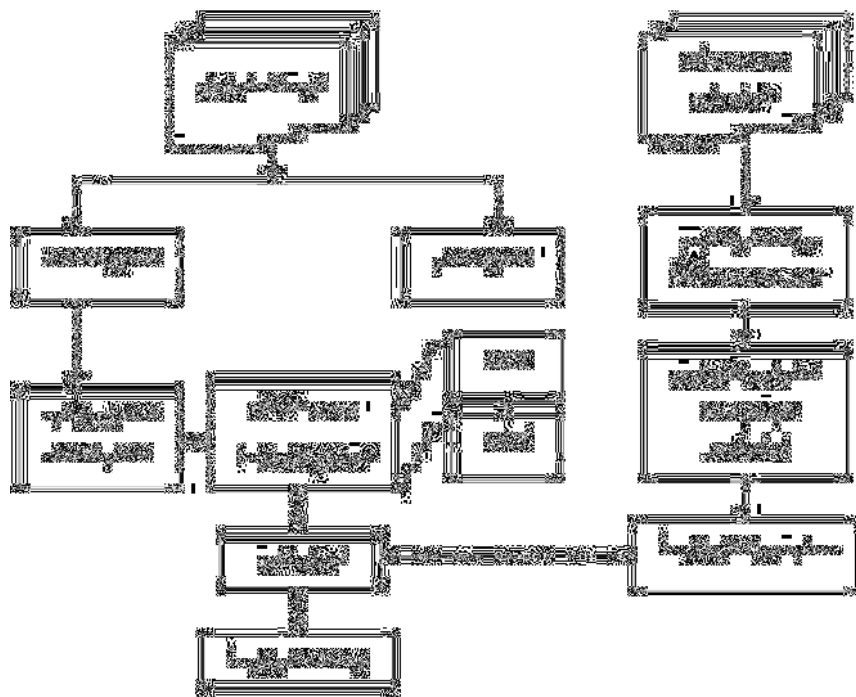
$$\text{Chla}(\text{mg}/\text{m}^3) = \frac{26.7 \times (664_b - 665_a) \times V_{\text{ext}}}{V_{\text{sam}} \times L} \quad [1]$$

در این رابطه؛ منظور از ۶۶۵_a و ۶۶۴_b به ترتیب قبل و بعد از اسیدی شدن نمونه‌ها در محدوده طیفی ذکر شده است، V_{ext} مقدار استخراج به واحد لیتر، V_{sam} مقدار نمونه به واحد مترمکعب، L مسیر نور لوله نمونه به واحد سانتی‌متر و Chla غلظت کلروفیل به واحد میلی‌گرم بر مترمکعب است.

روش تحقیق

به منظور تهیه و آماده‌سازی تصاویر شامل تصحیح هندسی (نمونه برداری مجدد) و تصحیح رادیومتریک از نرم‌افزار ENVI استفاده شد. سپس جهت کدنویسی، پردازش تصاویر و ارزیابی نتایج از نرم‌افزار MATLAB استفاده شد و در نهایت با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS نسبت به تهیه نقشه غلظت کلروفیل-آ منطقه مورد مطالعه اقدام شد. فرایند کلی انجام پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است.

مطالعات میدانی و نمونه برداری از آب هم‌زمان با عبور ماهواره سنتینل-۲ از منطقه در تاریخ ۴ آوریل ۲۰۱۹ (۱۵ فروردین ۱۳۹۸) انجام شد. بدین منظور با استفاده از دستگاه GPS نسبت به تعیین موقعیت ایستگاه‌های برداشت نمونه به صورت تصادفی اقدام شد. به منظور تعیین غلظت کلروفیل - آ در ستون آب نمونه‌هایی از ۱۰ ایستگاه (شکل ۱) در خور تیاب برداشت شد. مطابق مطالعه نوش (۱۷) نمونه‌های آب به لوله‌های حاوی ۱۰ میلی‌لیتر اتانول ۹۵٪ منتقل شدند. نمونه‌ها در یک فریزر به مدت یک شبانه‌روز نگهداری شدند. سپس نمونه‌ها در دمای محیط آزمایشگاه به مدت ۵ دقیقه با دور ۲۵۰۰ دقیقه سانتریفیوژ گردیدند. و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در محدوده جذبی طول‌موج‌های ۶۶۴ و ۶۶۵ نانومتر مورد سنجش قرار گرفتند و با استفاده از رابطه ۱ غلظت کلروفیل میدانی برای ایستگاه‌های مختلف مورد اندازه‌گیری قرار گرفته شد (۱۹).



شکل ۲. نمودار فرایند انجام پژوهش

پیش‌پردازش تصویر

تصحیح اتمسفری در مواردی که شدت سیگنال ارسالی از طرف پدیده‌ها مانند اقیانوس از اثرات اتمسفری کمتر باشد نیز ضروری است. آب جذب‌کننده امواج الکترومغناطیس خصوصاً در باندهای طول‌موج بلند مانند قرمز و مادون‌قرمز نزدیک است و بنابراین مقدار انرژی بازتابی از سطح پهنه‌های آبی به مراتب کمتر است و بیشتر اثرات اتمسفری توسط سنجنده ماهواره دریافت و ثبت می‌شود (۵). در این پژوهش از الگوریتم FLAASH در نرم‌افزار ENVI به منظور تصحیح باندهای چند طیفی لندست-۸ استفاده شد. این الگوریتم تابش الکترومغناطیس را به بازتاب سطحی زمین تبدیل می‌کند. برای تصحیح باندهای مرئی سنتینل-۲، از پردازشگر Sen2Cor نرم‌افزار Snap به علت اینکه این پردازشگر مخصوص تصحیح پوشش‌های زمینی بدون پهنه‌های آبی است، استفاده نشد و به منظور تصحیح باندهای مرئی سنتینل-۲ از الگوریتم QUAC در نرم‌افزار ENVI استفاده شد. ورودی الگوریتم QUAC می‌تواند هم از نوع Radiance و هم از نوع بازتاب TOA باشد و به علت اینکه داده‌های مورد استفاده سنتینل در این پژوهش

از نوع داده‌های بازتاب بالای جو (TOA) بودند، الگوریتم QUAC مورد استفاده قرار گرفته شد. خروجی این الگوریتم تصویری با مقادیر بیکسل بازتاب سطحی زمین (Surface Reflectance) است. همچنین تصحیح هندسی از نوع نمونه‌برداری مجدد بروی باند هواویز ساحلی تصویر سنتینل-۲ انجام شد.

پردازش تصویر

به منظور استخراج غلظت کلروفیل - آ از الگوریتم‌های بیوپاتیکی مبتنی بر باندهای آبی و سبز (OC2 و OC3) در نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. به دلیل فقدان داده میدانی کافی، از ۱۰ داده میدانی کلروفیل برداشت شده در منطقه خور تیاب، ۷ نمونه به صورت تصادفی برای کالیبره استفاده شد و ۳ نمونه به صورت تصادفی برای اعتبارسنجی کلروفیل مشتق شده از داده لندست-۸ و سنتینل-۲ استفاده شد.

مدل‌های بیوپاتیکی اندازه‌گیری‌های نوری بازتاب یا تابش را با پارامترهای بیولوژیکی مانند غلظت کلروفیل، کیفیت آب و سایر موارد بهم پیوند می‌دهند. مورل و پریور (۱۶)

محدوده طیفی ساحلی، آبی و سبز است. R نسبت بانندی و C غلظت کلروفیل- آ به واحد میلی گرم بر مترمکعب است.

معیار ارزیابی الگوریتم‌ها

به منظور ارزیابی نتایج الگوریتم‌های مبتنی بر باندهای آبی و سبز (OC2) و الگوریتم مبتنی بر باندهای ساحلی، آبی و سبز (OC3) در سنجنده‌های MSI و OLI با داده‌های اندازه‌گیری شده میدانی از مقادیر پارامترهای آماری ضریب تعیین (R^2) و خطای میانگین ریشه مربعات (RMSE) استفاده شد (۸). مقادیر پارامترهای R^2 و RMSE از رابطه‌های ۴ و ۵ محاسبه گردید.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad [4]$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)(O_i - \bar{O}_i)^2)}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad [5]$$

در این رابطه؛ مقادیر P_i و مقادیر O_i به ترتیب مقادیر غلظت کلروفیل-آ برآورد شده با الگوریتم OC2 در داده‌های لندست-۸ و سنتینل-۲ و مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی غلظت کلروفیل-آ و n تعداد نمونه‌ها است.

نتایج

پس از آماده‌سازی و پردازش داده‌های میدانی و داده‌های ماهواره‌ای نتایج حاصل شد. نتایج اندازه‌گیری میدانی کلروفیل-آ در منطقه مورد مطالعه نشان داد که کمترین میزان غلظت کلروفیل-آ در ایستگاه شماره ۹ با مقدار کلروفیل ۰/۱۱ میلی گرم بر مترمکعب و بیشترین میزان غلظت کلروفیل-آ در ایستگاه شماره ۶ با ۶/۶۸ میلی گرم بر مترمکعب (به دلیل وجود جلبک شدید) است (شکل ۳). در جدول ۲ محاسبات آماری میزان اندازه‌گیری میدانی آورده شده است.

مدل‌های نوری ساده‌ای را برای آب‌هایی که فقط حاوی فیتوپلانکتون (مورد ۱) و آب‌های نوری پیچیده (مورد ۲) است، ارائه دادند. در این مطالعه از بین الگوریتم‌های بیو اپتیکال از الگوریتم OC2 و OC3 به منظور تخمین غلظت کلروفیل-آ در آب‌های مورد دوم (آب‌های ساحلی) استفاده شد.

الگوریتم رنگ اقیانوسی ۲ (OC2) الگوریتم بیو اپتیک

OC2 یک الگوریتم چندجمله‌ای مکعب اصلاح شده است که در ابتدا برای داده‌های SeaWiFS توسعه داده شد و به داده‌های SeaBAM تنظیم شده است (۱۸). این الگوریتم مبتنی بر روابط غیرخطی بین بازتاب سنجش‌ازدور اقیانوس و داده‌های میدانی است و از محدوده طیفی آبی و سبز به منظور تخمین غلظت کلروفیل-آ بهره می‌گیرد و از رابطه ۲ محاسبه می‌گردد.

$$C = 10^{(a_0 + a_1 * R + a_2 * R^2 + a_3 * R^3)} \quad [2]$$

$$R = \log(Rrs\ 490 / Rrs\ 555)$$

در این رابطه؛ a ضریب ثابتی است که برای هر ماهواره تخمین و مدل‌سازی می‌شود. Rrs بازتاب سنجش‌ازدور در محدوده طیفی آبی و سبز است. R نسبت بانندی و C غلظت کلروفیل-آ به واحد میلی گرم بر مترمکعب است.

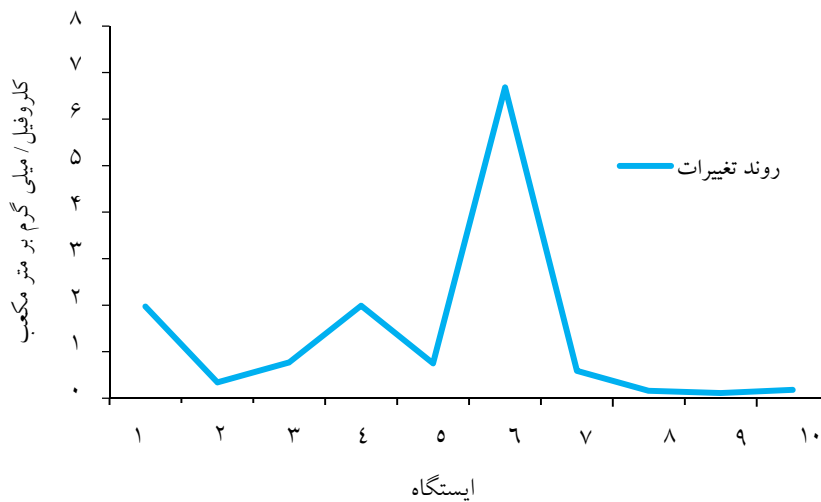
الگوریتم رنگ اقیانوسی ۳ (OC3) مطابق مطالعه مارتین

(۱۴)، الگوریتم OC3 یک رابطه تجربی بین نسبت حداکثر بازتاب سنجش‌ازدور اندازه‌گیری شده در باندهای محدوده آبی (۴۴۳ و ۴۹۰ نانومتر) به سبز (۵۶۳ نانومتر) و کلروفیل اندازه‌گیری شده (میلی گرم بر مترمکعب) در میدان است که از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$C = 10^{(a_0 + a_1 * R + a_2 * R^2 + a_3 * R^3 + a_4 * R^4)} \quad [3]$$

$$R = \log(Rrs\ 443 > Rrs\ 490 / Rrs\ 555)$$

در این رابطه؛ a ضریب ثابتی است که برای هر ماهواره تخمین و مدل‌سازی می‌شود. Rrs بازتاب سنجش‌ازدور در



شکل ۳. نمودار روند تغییرات غلظت کلروفیل - آ در ایستگاه‌ها

جدول ۲. پارامترهای آماری داده میدانی

واحد	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار
میلی گرم بر متر مکعب	۰/۱۱	۶/۶۸	۱/۳۵	۱/۸۹

میدانی همبستگی قابل قبولی نداشت در صورتی که این الگوریتم در لندست-۸ با داده‌های میدانی نتایج خوبی ارائه داد. با این وجود به دلیل کسب نتایج مناسب از الگوریتم OC2 در هر دو ماهواره لندست-۸ و سنتینل-۲ این الگوریتم به‌عنوان مناسب‌ترین الگوریتم برای منطقه مورد مطالعه انتخاب شد.

نتایج پارامترهای آماری و ضرایب برآورد شده برای الگوریتم‌های مورداستفاده در جدول‌های ۳ و ۴ آورده شده است. طبق یافته‌های کسب شده الگوریتم OC2 در لندست-۸ و سنتینل-۲ نتایج قابل قبولی با مقادیر پارامتری آماری ارائه دادند و از این جهت مناسب‌ترین الگوریتم برای این ماهواره‌ها شناخته شدند. نتایج الگوریتم بیوپتیک OC3 در سنتینل-۲ با داده‌های

جدول ۳. مقادیر پارامترهای آماری RMSE و R² الگوریتم‌های مورداستفاده در هر سنجنده با داده میدانی

ماهواره	الگوریتم	R ²	RMSE
لندست-۸	OC2	۰/۹۱	۰/۱۳
	OC3	۰/۸۸	۰/۱۶
سنتینل-۲	OC2	۰/۶۴	۰/۳۳
	OC3	۰/۱۴	۰/۵۱

جدول ۴. مقادیر ضریب a مدل سازی و تخمین زده شده

ماهواره	الگوریتم	a0	a2	a3	a4	a5
لندست-۸	OC2	-۰/۲۰۰۹۴	-۱/۳۰۱۸	۰/۵۲۶۳۱	۱/۴۲۳۵	-
	OC3	-۰/۲۲۳۱۴	-۱/۳۱۱۶	۰/۷۰۰۰۲	۱/۴۳۲۹	-۰/۱۶۵۴۵
سنتینل-۲	OC2	-۰/۲۹۴۲	۰/۱۳۳۳۸	۰/۲۰۲۳۴	۰/۵۳۷۵۱	-
	OC3	۰/۳۳۹۶۵	۰/۳۳۱۷۵	-۲/۶۶۱	۰/۱۶۷۶۵	۲/۳۸۸۶

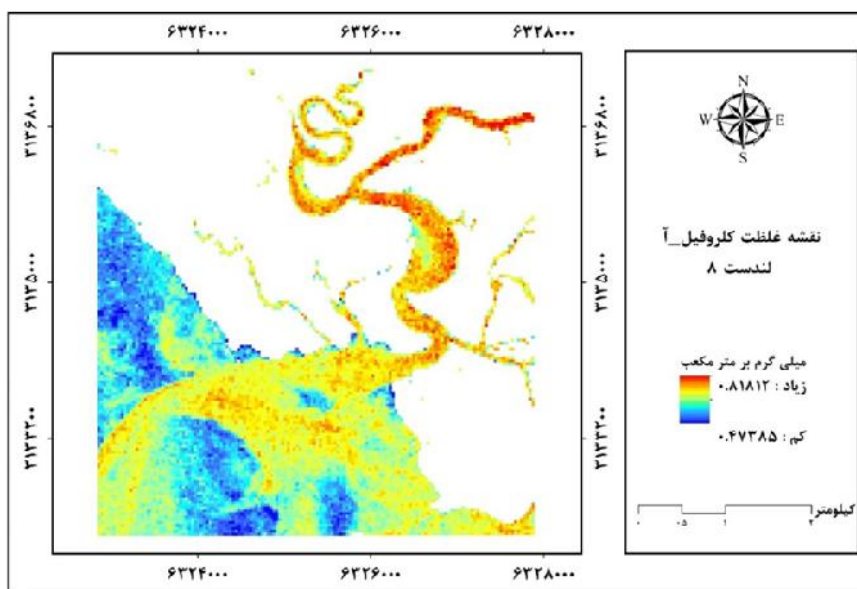
ستینل-۲ در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

$$C = 10(a_0+a_1*R+a_2*R^2+a_3*R^3) \quad [6]$$

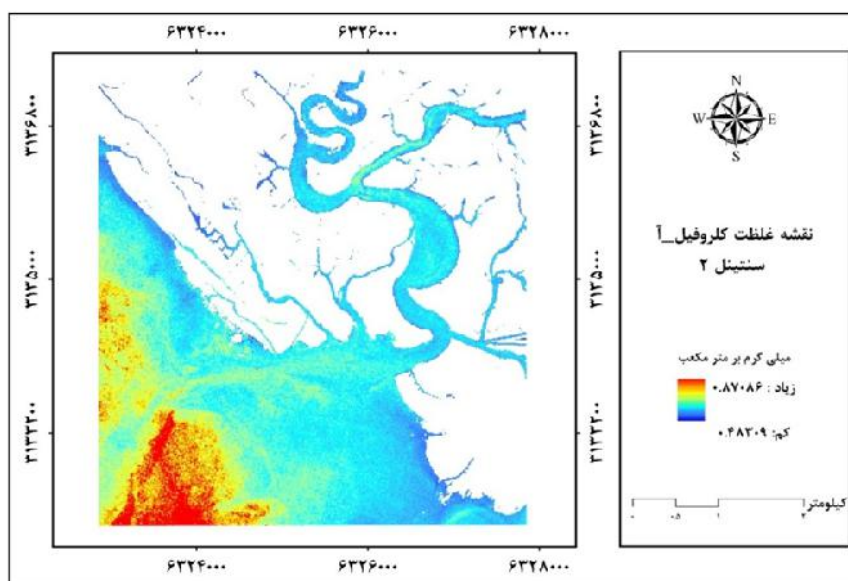
$$R = \log(Rrs\ 490/Rrs\ 555)$$

ضرایب a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 به ترتیب برای الگوریتم OC2 لندست $0.20094, -1.3018, 0.52631$ و $1/4235$ تعیین شد. ضرایب a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 به ترتیب برای الگوریتم OC2 ستینل $0.2942, 0.13338, 0.20234$ و 0.53751 تعیین شد.

همان‌طور که در جدول ۳ نتایج ارزیابی الگوریتم‌ها را نشان می‌دهد الگوریتم OC2 در لندست-۸ با مقادیر R^2 ($0/91$) و خطای RMSE ($0/13$) و الگوریتم OC2 در ستینل-۲ با مقادیر R^2 ($0/64$) و خطای RMSE ($0/33$) مناسب‌ترین الگوریتم به‌منظور تخمین میزان غلظت کلروفیل-آ در منطقه مورد مطالعه شناخته شدند. در نهایت با استفاده از رابطه ۶ و ضرایب جدید تعیین شده برای این الگوریتم نقشه غلظت کلروفیل-آ منطقه مورد مطالعه برای ماهواره لندست-۸ و ستینل-۲ در نرم‌افزار ArcGIS تهیه گردید. نقشه غلظت کلروفیل-آ با استفاده از الگوریتم OC2 در لندست-۸ و



شکل ۴. نقشه غلظت کلروفیل - آ تهیه شده از الگوریتم OC2 لندست-۸



شکل ۵. نقشه غلظت کلروفیل - آ تهیه شده از الگوریتم OC2 سنسیتل ۲-

بحث و نتیجه گیری

هدف از این تحقیق تعیین مناسب‌ترین الگوریتم برای سنجنده‌های OLI و MSI به منظور تخمین غلظت کلروفیل - آ در آب‌های ساحلی (خور تیاب) است. مطالعه مرادی (۷) در خلیج فارس با استفاده از اعمال الگوریتم‌های مختلف بر روی لندست ۸- نشان می‌دهد که الگوریتم تجربی OC3 مناسب‌تر از دیگر الگوریتم‌های مورد استفاده است. در مطالعه‌ای دیگر در آب‌های ساحلی خلیج فارس (بندر دیلم) موسوی ده موردی و همکاران (۹) به این نتیجه رسیدند که از بین آزمون الگوریتم‌های جهانی در منطقه مورد مطالعه، الگوریتم POLDER با داشتن مقدار $R^2 = 0/52$ و $RMSE = 0/58$ دارای بیشترین انطباق و همبستگی بین تعداد ۱۲ داده میدانی برداشت شده از منطقه مورد مطالعه هستند این در حالی است که نتیجه دو الگوریتم مبتنی بر باندهای آبی - سبز و مبتنی بر باندهای ساحلی - آبی - سبز با داده‌های میدانی در پژوهش حاضر مقایسه شد و الگوریتم مبتنی بر باند آبی - سبز (OC2) در منطقه خور تیاب در خلیج فارس با داده‌های لندست ۸- و سنسیتل ۲- همبستگی مناسب و قابل قبولی داشت. پوودار و همکاران (۲۰) از دو الگوریتم OC2 و OC3 به منظور تخمین کلروفیل - آ خلیج بنگال استفاده کردند، نتایج این پژوهش

نشان داد که الگوریتم OC2 در لندست ۸- به منظور تخمین غلظت کلروفیل - آ در مناطق ساحلی شمالی مناسب‌تر از سنسیتل ۲- است. همان‌طور که در جدول ۳ و خروجی نقشه‌های حاصل شده نشان داده شد نتیجه به دست آمده از الگوریتم OC2 در لندست ۸- با توان تفکیک مکانی ۳۰ متر نسبت به سنسیتل ۲- با توان تفکیک مکانی ۱۰ متر مناسب‌تر است که این عملکرد می‌تواند به علت این باشد که ابعاد پیکسل‌های داده‌های سنسیتل ۲- حدود 10×10 متر است و این ابعاد باعث افزایش تعداد پیکسل در تصویر سنسیتل ۲- می‌گردد، که در نتیجه داده‌های میدانی کم نمی‌تواند به خوبی در تمامی پیکسل‌های تصویر سنسیتل ۲- برازش و تعمیم داده شوند اما درست بالعکس این نظریه، داده‌های لندست ۸- به علت اینکه دارای ابعاد پیکسلی حدود 30×30 متر هستند باعث کاهش پیکسل در این تصویر ماهواره‌ای می‌شوند و در نتیجه تعداد ۱۰ داده میدانی به خوبی می‌تواند بین پیکسل‌های تصویر لندست ۸- برازش و تعمیم داده شود و به نتیجه نسبتاً قابل قبولی دست یافت. این نکته را هم باید در نظر داشت که در اوایل این الگوریتم‌ها برای ماهواره‌های ابرطیفی و مشاهدات اقیانوسی با توان تفکیک طیفی بالا و بالعکس با توان تفکیک مکانی بسیار پایین مانند سنجنده مریس و مودیس توسعه داده شده‌اند. نتایج

تصاویر سنتینل-۲ با نقشه تهیه شده از تصویر لندست-۸ مطابقت ندارد و به عبارتی نتیجه بالعکس دارد که این به علت فقدان داده میدانی کافی برای کالیبره با تصویر سنتینل-۲ است. در آخر توصیه می شود به منظور مدل سازی و استفاده از الگوریتم های مبتنی بر باند آبی-سبز در سنتینل-۲ حتماً بایست بیش از ۱۰ نمونه میدانی کالیبره شود، تا نتایج مناسبی حاصل گردد.

منابع مورد استفاده

- اسکندری، س. ۱۳۹۸. مقایسه الگوریتم های مختلف تهیه پوشش زمین در رویشگاه های حساس زاگرس با استفاده از تصویر ماهواره ای سنتینل-۲ (مطالعه مورد: بخشی از استان ایلام). سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۰(۱): ۷۲-۸۷.
- بیات، ف.، ن. مرادی و م. حسنلو. ۱۳۹۵. بررسی و مقایسه دمای سطح و کلروفیل آب ها با استفاده از تصاویر لندست-۸ (مطالعه موردی: خلیج فارس). دومین کنفرانس مهندسی فناوری اطلاعات مکانی: ۱-۹.
- راه بانی، م.، م. رنجبری و د. قادری. ۱۳۹۵. بررسی میدانی پراکندگی رسوبات معلق و دانه بندی رسوبات بستر خور تیب برای یک دوره جزر و مدی. دو فصلنامه علمی پژوهشی هیدروفیزیک، ۲(۲): ۷۹-۸۹.
- عقیقی، ح.، ع. علیمحمدی، م. ر. سراجیان و د. عاشورلو. ۱۳۸۸. برآورد مقدار کدورت آب خلیج گرگان با استفاده از تصاویر LISS-III ماهواره IRS. فصلنامه مدرس علوم انسانی، ۱۳(۲): ۵۵-۷۲.
- فاطمی، ب و ی. رضایی. ۱۳۸۹. مبانی سنجش از دور. چاپ دوم، انتشارات آزاده، ۲۵۷ صفحه.
- فاطمی، م. ر. ۱۳۷۵. خورهای آب های جنوبی ایران. ماهنامه آبریان، ۷(۱۲): ۱۲-۱۵.
- مرادی، ن. ۱۳۹۵. بررسی و مدل سازی رنگ اقیانوس با استفاده از تصاویر ماهواره ای با توان تفکیک مکانی بالا. پایان نامه کارشناسی ارشد ژئودزی- هیدروگرافی. دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی. دانشگاه تهران. ۱۳۸ صفحه.
- مقبلی دامنه، م و س. ح. ثنائی نژاد. ۱۳۹۷. برآورد تبخیر-

مقایسه الگوریتم های OC2 و OC3 در سنجنده های OLI و MSI نشان می دهد که تصاویر ماهواره لندست-۸ به دلیل برخورداری از باندهای آبی و سبز مناسب مناطق آب های ساحلی با غلظت کلروفیل پایین و مواد معلق در آب های ساحلی (خورها و تالاب هایی که به دریای باز و اقیانوس ها راه می یابند) است و همچنین به دلیل برخورداری باندهای سنجنده MSI و OLI از توان تفکیک مکانی مشابه، الگوریتم OC2 متناسب با این ماهواره ها است. این در حالی است که مقایسه نتایج الگوریتم OC3 در سنتینل-۲ و لندست-۸ نشان می دهد، با توجه به پایین بودن توان تفکیک مکانی باند ساحلی (۶۰ متر) سنجنده MSI ماهواره سنتینل-۲ و با وجود ارتقاء و نمونه برداری مجدد آن به توان تفکیک مکانی ۱۰ متر به دلیل از دست رفتن اطلاعات بانندی، این الگوریتم مناسب ماهواره سنتینل-۲ نیست در صورتی که این الگوریتم مناسب ماهواره لندست-۸ است و دلیل آن این است که باندهای مورد استفاده در الگوریتم OC3 در لندست-۸ دارای توان تفکیک مکانی ۳۰ متر و مشابه هستند و نیاز به ارتقا یا نمونه برداری مجدد از پیکسل ها نیست. به هر حال با توجه به یافته های پژوهش پیشنهاد می شود از این الگوریتم به منظور تخمین غلظت کلروفیل-آ با استفاده از داده های سنتینل-۲ استفاده نشود و تا حد امکان از داده های ماهواره ای که باندهای ساحلی، آبی و سبزشان دارای توان تفکیک مکانی مشابهی است، استفاده شود. نظر به شکل های ۴ و ۵، نقشه تهیه شده توسط تصویر لندست-۸ کاملاً خروجی منطقی را نشان می دهد چراکه غلظت کلروفیل-آ در مسیر پیچ راه خور و کرانه ساحلی دارای غلظت نسبتاً بالایی است که این به دلیل شرایط بسته بودن محیط پیچ راه خور و همچنین جاری نشدن سریع آب پیچ راه خور به سمت خروجی خور است در حقیقت هر چه از کرانه ساحلی و مسیر پیچ راه دورتر می شویم به دلیل جاری شدن سریع آب خور به سمت دریای باز (اقیانوس) غلظت کلروفیل-آ به مراتب کاهش می یابد. پس نقشه تهیه شده توسط تصویر لندست-۸ و داده میدانی کاملاً با شرایط طبیعی و نظریه های یاد شده توسط متخصصین مطابقت دارد. اما نقشه تهیه شده از

- waste motor oil by *Nostoc hatei* strain TISTR 8405 in water containing heavy metals and nutrients as co-contaminants. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 28: 117-123. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.02.006>.
20. Poddar S, Chacko N, Swain D. 2019. Estimation of Chlorophyll-a in Northern Coastal Bay of Bengal Using Landsat-8 OLI and Sentinel-2 MSI Sensors. *Frontiers in Marine Science*, 6(598). doi:<https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00598>.
 21. Pritchard DW. 1967. What is an estuary: physical viewpoint. In. *American Association for the Advancement of Science*, <http://hdl.handle.net/1969.3/24383>.
 22. Sun D, Hu C, Qiu Z, Cannizzaro JP, Barnes BB. 2014. Influence of a red band-based water classification approach on chlorophyll algorithms for optically complex estuaries. *Remote Sensing of Environment*, 155: 289-302. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.08.035>.
 23. Tepanosyan G, Muradyan V, Hovsepyan A, Minasyan L, Asmaryan S. 2017. A Landsat 8 OLI satellite data-based assessment of spatio-temporal variations of lake sevan phytoplankton biomass. *Annals of Valahia University of Targoviste, Geographical Series*, 17(1): 83-89. doi:<https://doi.org/10.1515/avutgs-2017-0008>.
 24. Toming K, Kutser T, Laas A, Sepp M, Paavel B, Nõges T. 2016. First experiences in mapping lake water quality parameters with Sentinel-2 MSI imagery. *Remote Sensing*, 8(8): 640. doi:<https://doi.org/10.3390/rs8080640>.
 25. Vinh PQ, Ha NTT, Binh NT, Thang NN, Thao NTP. 2019. Developing algorithm for estimating chlorophyll-a concentration in the Thac Ba Reservoir surface water using Landsat 8 Imagery. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 41(1): 10-20. doi:<https://doi.org/10.15625/0866-7187/41/1/13542>.
 26. Watanabe F, Alcantara E, Rodrigues T, Rotta L, Bernardo N, Imai N. 2018. Remote sensing of the chlorophyll-a based on OLI/Landsat-8 and MSI/Sentinel-2A (Barra Bonita reservoir, Brazil). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 90(2): 1987-2000. doi:<https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170125>
 27. Yadav S, Yamashiki Y, Susaki J, Yamashita Y, Ishikawa K. 2019. Chlorophyll estimation of lake water and coastal water using Landsat-8 and Sentinel-2A satellite. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-3/W7, 2019. TC III WG III/2,10 Joint Workshop "Multidisciplinary Remote Sensing for Environmental Monitoring", 12-14 March 2019, Kyoto, Japan, 77-82.
- تعلق پتانسیل در منطقه فریمان با استفاده از روش پریستلی- تیلور و تکنیک سنجش‌ازدور. سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۹(۳): ۷۲-۸۴.
۹. موسوی ده موردی، ل. و م. بنایی. ۱۳۹۷. تخمین و مدل‌سازی کلروفیل - آ با استفاده از ماهواره لندست ۸ در آب‌های ساحلی دیلم. *مجله علمی پژوهشی زیست‌شناسی دریا دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز*، ۱۰(۳۸): ۲۹-۲۱.
 ۱۰. ولیزاده کامران، خ و م. مهدوی‌فرد. ۱۳۹۸. مبانی سنجش‌ازدور کاربردی. چاپ اول، انتشارات ماهواره، ۲۷۰ صفحه.
11. Acheampong C. 2018. Deriving Algal concentration from Sentinel-2 through a downscaling technique: a case near the intake of a desalination plant. Thesis submitted to the Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science in Geo-information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands, 65 pp.
 12. Arabi B. 2019. Optical Remote Sensing of Water Quality in the Wadden Sea. Doctor of Philosophy, Enschede: University of Twente, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC). 206 pp.
 13. Dacey JW, Wakeham SG. 1986. Oceanic dimethylsulfide: production during zooplankton grazing on phytoplankton. *Science*, 233(4770): 1314-1316. doi:<https://doi.org/10.1126/science.233.4770.1314>.
 14. Martin S. 2014. An introduction to ocean remote sensing. Cambridge University Press, 496 pp.
 15. Mascarenhas V, Keck T. 2018. Marine optics and ocean color remote sensing. In, Cham, YOUMARES 8 – Oceans Across Boundaries: Learning from each other. Springer International Publishing, pp 41-54. https://doi.org/10.1007/1978-1003-1319-93284-93282_93284.
 16. Morel A, Prieur L. 1977. Analysis of variations in ocean color 1. *Limnology and Oceanography*, 22(4): 709-722. doi:<https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.4.0709>.
 17. Nusch E. 1980. Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination. *Arch Hydrobiol Beih Ergeb Limnol*, 14: 14-36.
 18. O'Reilly JE, Maritorena S, Mitchell BG, Siegel DA, Carder KL, Garver SA, Kahru M, McClain C. 1998. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C11): 24937-24953. doi:<https://doi.org/10.1029/98JC02160>.
 19. Pimda W, Bunnag S. 2015. Biodegradation of



Estimation of chlorophyll-a concentration using ground data and Sentinel-2 and Landsat-8 Satellite images processing (Case study: Tiab Estuary)

M. MahdaviFard ^{1*}, K. Valizadeh Kamran ², E. Atazadeh ³

1. MSc. Student of Remote Sensing and Geographical Information System, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Iran

2. Assoc. Prof. Department of Remote Sensing and Geographical Information System, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Iran

3. Assist. Prof. Department of Plant Biology, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 January 2020

Accepted 17 March 2020

Available online 16 April 2020

Keywords:

Chlorophyll-a

Sentinel-2

Landsat-8

Remote sensing

Tiab Estuary

ABSTRACT

The estuaries are one of the most important coastal natural resources. Chlorophyll-a (Chl-a) monitoring, which is the pigment of oceanic and coastal phytoplankton, can be measured and evaluated using new remote sensing technology. The presence of blue, green and red wavelengths in oceanic observation satellites has always paved the way for monitoring the color of the oceans. The aim of this study is used OC2 and OC3 bio-optical algorithms and Sentinel-2 MSI and Landsat-8 OLI satellite data in April 2019 to estimate chlorophyll-a concentration in the estuary Tiap area. Ground sampling data were carried out to correlate and evaluate the results. The results showed that the OC2 algorithm in Landsat-8 and Sentinel-2 satellites had the highest R Squared coefficient (R^2) 0.91 and 0.64, respectively, and the Root mean square error (RMSe) of the satellite images were 0.13 and 0.33, respectively. These results indicate the high accuracy of the OC2 algorithm in the satellite images used and were selected as the most suitable algorithm for mapping chlorophyll-a concentration in the study area.

* Corresponding author e-mail address: valizadeh@tabrizu.ac.ir