

مقایسه الگوریتم‌های بازتاب سطحی و بازتاب بالای جو در تصاویر چندسبجندهای برای تهیه نقشه‌ی سری زمانی غلظت کلروفیل - آ در تالاب دهستان تیاب

مصطفی مهدوی فرد^۱

خلیل ولیزاده کامران^۲

احسان عطاءزاده^۳

نسرین مرادی^۴

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۰۵

چکیده

تالاب‌ها جزء اکوسیستم‌های مابین خشکی و دریایی به‌شمار می‌آیند. شناسایی و نظارت بر آلودگی‌های ساحلی و دریایی برای به حداقل رساندن اثرات مخرب آن‌ها برای جامعه‌ی ساحلی امری ضروری و حیاتی است. پایش کلروفیل - آ که رنگدانه‌ی اصلی فیتوپلانکتون‌های آب‌های ساحلی است با استفاده از عملیات میدانی زمان‌بر و هزینه‌بر است اما فناوری نوین سنجش‌ازدور با بهره‌گیری از سبجندهای دارای توان تفکیک مکانی و طیفی بالا امکان پایش در مقیاس کلان را میسر ساخته است. در این پژوهش از داده‌های بازتاب سطحی و داده‌های بازتاب بالای جو ماهواره‌های سنتینل ۲ و لندست ۸ و الگوریتم OC2 به‌منظور تخمین سری زمانی غلظت کلروفیل - آ در تالاب دهستان تیاب استفاده شد. هدف از پژوهش حاضر مقایسه داده‌های ورودی به الگوریتم OC2، ارزیابی آن با داده‌های میدانی و در نهایت تخمین غلظت سری زمانی کلروفیل - آ در منطقه مطالعاتی است. نتایج پژوهش نشان داد که الگوریتم OC2 با داده‌های بازتاب سطحی زمین دارای همبستگی به‌مراتب بالاتری در ماهواره‌های لندست ۸ و سنتینل ۲ است که به‌موجب آن مقدار R^2 به‌ترتیب در داده‌های بازتاب سطحی زمین ماهواره‌ی لندست ۸ و سنتینل ۲ برابر با ۰/۹۱ و ۰/۶۴ برآورد گردید. این درحالی است که مقدار R^2 به‌ترتیب در داده‌های بازتاب بالای جو برابر با ۰/۱۲ و ۰/۵۴ است. نتایج پژوهش بیانگر این است که ورودی الگوریتم OC2 حتماً باید از نوع داده‌ی بازتاب سطحی زمین و تصحیح اتمسفری شده باشد.

واژه‌های کلیدی: کلروفیل - آ، لندست ۸، سنتینل ۲، بازتاب سطحی، بازتاب بالای جو، سنجش‌ازدور

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران mostafamahdavi842@gmail.com

۲- دانشیار گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران (نویسنده مسئول) valizadeh@tabrizu.ac.ir

۳- استادیار گروه زیست شناسی گیاهی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران atazadeh@tabrizu.ac.ir

۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد هیدروگرافی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران moradi.n@ut.ac.ir

۱- مقدمه

به طور کلی آب های جهانی به دو نوع آب مورد اول و مورد دوم طبقه بندی می شوند. در آب های نوع اول همانند آب های اقیانوس باز، فیتوپلانکتون بر خصوصیات نوری ذاتی آب غالب است. در حالی که آب های نوع دوم همانند آب های ساحلی، آب های پیچیده ای هستند که تحت تأثیر انواع ترکیب نوری فعال مانند فیتوپلانکتون، ماده آلی محلول رنگی، ذرات معدنی و سایر مواد معلق قرار دارند (Mobley & *et al*, 2012: 74; Matsushita & *et al*, 2004: 60). تالاب های ساحلی جزء آب های نوع دوم به شمار می آیند. این نوع مناطق محیط های پویایی هستند که به دلیل موقعیت حد فاصل شان با خشکی، در معرض ورود آب های روان زمین های اطراف خود هستند. به عنوان مثال در طول سال مقادیر قابل توجهی مواد آلی و عناصر معدنی از نواحی مجاور وارد خور می شود و باعث تقویت تولید اولیه در آن ها می شود. با گذر از حسن موقعیت تالاب ها با خشکی، این محیط ها در معرض تهدید ورود آلاینده ها قرار دارند و اغلب تالاب ها به علت اینکه محیطی آرام و به دور از امواج دریای باز دارند، بنا به سکون آب، در معرض انباشت بار آلودگی های طبیعی و انسانی هستند (فاطمی، ۱۳۷۵: ۱۲). در نتیجه، شناسایی و نظارت بر آلودگی های ساحلی و دریایی برای به حداقل رساندن اثرات مخرب آن ها بر سلامت انسان و محیط زیست و زیان های اقتصادی به جوامع ساحلی امری ضروری است (Schofield *et al*, 1999: 1477). اجتماع فیتوپلانکتون ها بر اکوسیستم های دریایی که ۷۰ درصد از مساحت جهان را دربر می گیرند، حاکم هستند. این ارگانیسم ها در تمامی آب های ساحلی نوع دوم یافت می شوند و در تولید اولیه نقش بسزایی دارند (Han & Jordan, 2005: 5245). کلروفیل - آ شاخص فراوانی فیتوپلانکتون و زیست توده در آب های اقیانوسی، ساحلی و دریاچه ای به حساب می آید و از آن می توان برای تعیین کیفیت آب، وضعیت بیوفیزیکی و میزان فرسایش پهنه های آبی استفاده کرد. در حقیقت کلروفیل - آ اندازه گیری زیست توده، تولید اولیه و اندازه گیری رشد

فیتوپلانکتون است (Ha *et al*, 2017: 290). روش های میدانی و آزمایشگاهی دشوار و زمان بر بوده و برای مشاهدات فضایی و زمانی ضعیف است. بنابراین، روش های جایگزین اجازه شناسایی سریع و وسیع را فراهم می آورند. براساس این واقعیت که بسیاری از آلودگی ها از جمله فیتوپلانکتون ها به شدت تحت تأثیر خواص نوری آب های طبیعی هستند و زمانی که به غلظت بالایی می رسند تغییر رنگ خود را نشان می دهند که منجر به شناسایی با روش های زیست نوری می شود (McLeroy & Roesler, 1998: 109). در مقابل ضعف روش های میدانی، روش های سنجش از دوری می توانند دیدگاه مکانی لازم برای جمع آوری اطلاعات در مورد سطح آب های اقیانوسی و ساحلی در مقیاس منطقه ای و جهانی را فراهم کنند. سنجنده های پیشرفته با استفاده از الگوریتم های پیشرفته داده های مربوط به تغییرات تولید اولیه و کلروفیل - آ را در کانال ها و باندهای طیفی فراهم می کنند (ولیزاده کامران و مهدوی فرد، ۱۳۹۸: ۲۷۰). تعداد زیادی از الگوریتم ها، براساس بازتاب سنجش از دوری در اندازه گیری های میدانی و تصاویر برای تخمین غلظت کلروفیل در آب های ساحلی و داخلی تهیه شده اند. در بین الگوریتم های متعدد برای بازبایی غلظت کلروفیل - آ الگوریتم های تجربی بر مبنای رگرسیون آماری جزء رایج ترین مدل ها برای تخمین غلظت کلروفیل - آ آب های ساحلی و اقیانوسی به شمار می آیند (Miller & *et al*, 2005). برخلاف اهمیت فراوان آب های خلیج فارس برای ساکنین این مناطق تاکنون مطالعات کمی در خصوص رنگدانه ی فیتوپلانکتون ها (کلروفیل - آ) انجام شده است که به مرور به آن ها اشاره می شود.

مرادی (۱۳۹۵)، از داده های بازتاب سطحی لندست-۸ برای تخمین غلظت کلروفیل - آ در خلیج فارس استفاده کرده و به این نتیجه دست یافته که از بین الگوریتم های مورد استفاده، الگوریتم $OC3^1$ با داده های مرجع (داده مودیس) دارای بیشترین مقدار R^2 (۰/۷۱) و کمترین مقدار RMSE (۰/۰۷۷) است.

میدانی استفاده کردند. پژوهشگران عقیده داشتند که همیشه ماهواره سنتینل ۲ نسبت به سنتینل ۳ با مقدار R^2 بین ۰/۸۴ و ۰/۹۷ برای تخمین محصولات کیفی آب دارای برتری خاصی است. همانگونه که از پیشینه داخلی نمایان است تاکنون از داده‌های سنتینل ۲، لندست ۸ و داده‌های زمینی به‌طور همزمان برای تخمین غلظت کلروفیل-آ در منطقه موردنظر از خلیج فارس استفاده نشده است و این پژوهش اولین مطالعه کشور محسوب خواهد شد. هدف از این پژوهش مقایسه و ارزیابی روش‌های تصحیح اتمسفری تابش بالای جو و بازتاب بالای جو بر روی الگوریتم تخمین غلظت کلروفیل-آ مبتنی بر باندهای آبی و سبز ($OC2$)^۳ در داده‌های لندست-۸ و سنتینل-۲، ارزیابی نتایج با استفاده از داده‌های میدانی و درنهایت تهیه نقشه سری زمانی غلظت کلروفیل-آ می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

تالاب تیاب در جنوب شرق استان هرمزگان و در شهرستان میناب واقع شده است. این تالاب با وسعتی حدود ۳۰۰ هکتار در حدفاصل عرض‌های $27^{\circ}02'$ تا $27^{\circ}08'$ شمالی و طول‌های $44^{\circ}56'$ تا $57^{\circ}05'$ شرقی قرار گرفته است (نگاره ۱). در بخش‌های جنوب شرقی و غربی این تالاب جنگل‌های مانگرو از نوع حرا و هالوفیت وجود دارند که دارای تنوع زیستی مهمی برای این منطقه است و همچنین در بخش شمالی تالاب تیاب پرورشگاه‌های میگو و ماهی بنا شده است که منبع تأمین آب این پرورشگاه‌ها آب این تالاب می‌باشد.

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

در پژوهش حاضر از ۲ گروه داده استفاده شد:

۲-۲-۱- داده‌های میدانی

به‌منظور جمع‌آوری داده میدانی از منطقه مطالعاتی، اندازه‌گیری‌های میدانی در ۴ آپریل ۲۰۱۹ (۱۵ فروردین

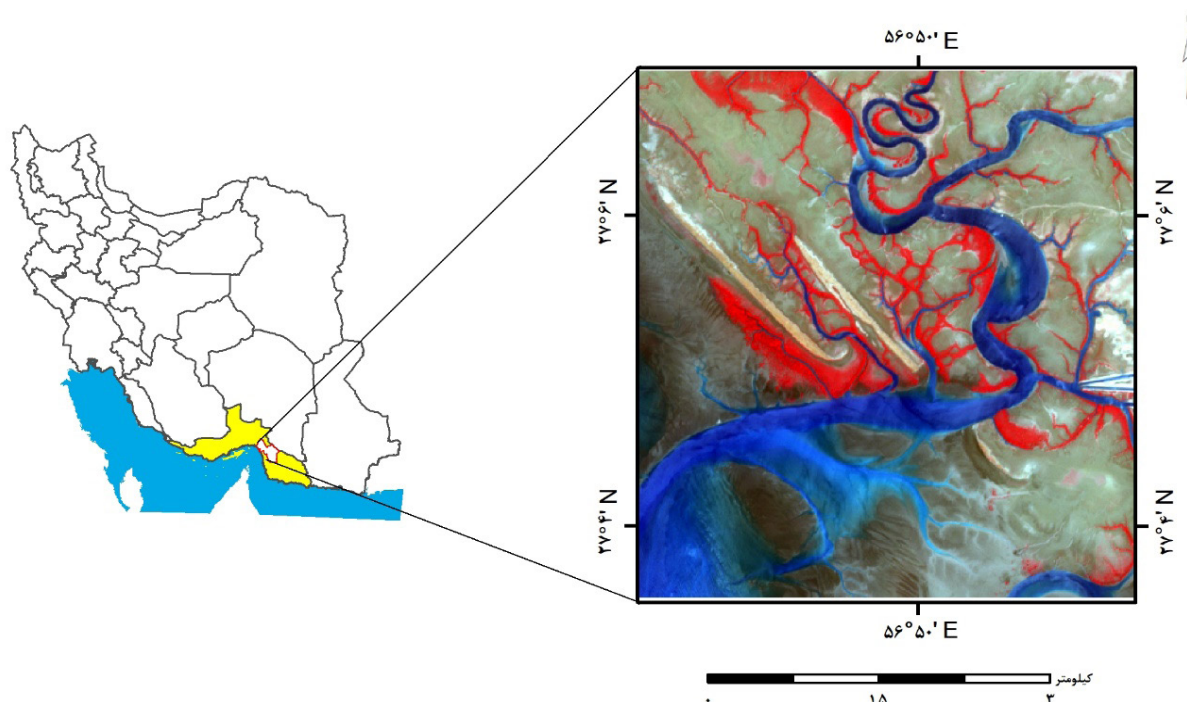
موسوی ده‌موردی و بنایی (۱۳۹۷)، به‌منظور تخمین و مدل‌سازی کلروفیل-آ در ساحل بندر دیلم از داده‌های بازتاب سطحی لندست ۸ بهره گرفتند. نتایج این پژوهش بیان‌گر آن بود که داده‌های بازتاب سطحی لندست ۸ به‌عنوان ورودی در الگوریتم POLDER با داده‌های میدانی دارای بیشترین مقدار R^2 (۰/۵۲) و کمترین مقدار RMSE (۰/۸۵) است.

مهدوی‌فرد (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای، برای تخمین غلظت کلروفیل-آ در تالاب تیاب از داده‌های بازتاب سطحی و بازتاب بالای جو ماهواره‌های سنتینل ۲ و لندست ۸ استفاده و نتایج آن را با استفاده از داده‌های زمینی ارزیابی کرد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که داده‌های بازتاب سطحی زمین در ماهواره‌های مورد استفاده با داده‌های زمینی دارای همبستگی بالایی هستند. یاتی (۲۰۱۶) در پژوهشی برای ارزیابی غلظت کلروفیل-آ و رسوبات معلق در منطقه مطالعاتی خود از داده‌های لندست ۸ و داده‌های میدانی استفاده کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که مقدار غلظت کلروفیل-آ در منطقه بین ۰/۲۵ تا ۹/۸۵ میکروگرم بر لیتر است و همچنین مقدار رسوبات معلق بین ۲۲/۴۵ تا ۲۸۰/۵۲ میلی‌گرم بر لیتر است.

مولایی (۲۰۱۸) به‌منظور تخمین غلظت کلروفیل-آ در حوضه دریاچه‌ای اری از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ و سنتینل ۳ استفاده کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که داده‌های تصحیح اتمسفری شده سنتینل ۲ به روش تابش بالای جو^۱ نسبت به بازتاب بالای جو^۲ نتایج بهتری با داده‌های میدانی ارائه می‌دهد. پوودار و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای به تخمین غلظت کلروفیل-آ با استفاده از تصاویر لندست ۸ و سنتینل ۲ پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که سنتینل ۲ در فصل موسمی و غیرموسمی میزان کلروفیل-آ را بیش از لندست ۸ تخمین زده است. سومتس و همکاران (۲۰۲۰) برای مقایسه و ارزیابی محصولات کیفی آب در دریاچه بالتیک از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل ۲ و ۳ و داده‌های

1- TOA Radiance

2- TOA Reflectance



نگاره ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه تالاب تیاب، ایران

$$Chla_{(mg/m^3)} = \frac{26.7 \times (664_b - 665_a) \times V_{ext}}{V_{sam} \times L}$$

رابطه (۱)

جدول ۱: مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های نمونه‌برداری شده

ایستگاه	مختصات	
	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
۱	۲۷° ۰۵' ۵۶"	۵۶° ۴۹' ۵۵"
۲	۲۷° ۰۵' ۳۱"	۵۶° ۴۹' ۵۷"
۳	۲۷° ۰۵' ۱۲"	۵۶° ۵۰' ۰۶"
۴	۲۷° ۰۵' ۰۴"	۵۶° ۴۹' ۴۲"
۵	۲۷° ۰۵' ۰۳"	۵۶° ۴۹' ۱۵"
۶	۲۷° ۰۴' ۵۸"	۵۶° ۴۸' ۳۹"
۷	۲۷° ۰۴' ۲۹"	۵۶° ۴۸' ۰۰"
۸	۲۷° ۰۵' ۰۶"	۵۶° ۴۹' ۲۲"
۹	۲۷° ۰۶' ۰۲"	۵۶° ۴۹' ۳۲"
۱۰	۲۷° ۰۶' ۲۶"	۵۶° ۵۰' ۳۸"

۱۳۹۸) اواسط فصل بهار و همزمان با عبور ماهواره سنتینل-۲ از منطقه مورد مطالعه انجام شد. بدین منظور با استفاده از دستگاه GPS برای تعیین موقعیت برداشت نمونه آب در ۱۰ ایستگاه (جدول ۱) اقدام شد.

سپس برای به‌دست آوردن مقادیر حقیقی غلظت کلروفیل مطابق پژوهش نوش (Nusch, 1980: 14) مقدار ۵ میلی‌لیتر از نمونه‌های میدانی برای هر ایستگاه به لوله‌های حاوی ۱۰ میلی‌لیتر اتانول به مدت ۲۴ ساعت منتقل شدند و پس از این مدت اجازه‌ی بازگشت نمونه‌ها به دمای معمولی آزمایشگاه داده شد. سپس محتوای لوله‌ها در دمای محیط آزمایشگاه به مدت ۵ دقیقه و با دور ۲۴۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ گردیدند.

در پایان محلول رویی درون لوله‌ها با استفاده از دستگاه طیف‌سنج مورد سنجش قرار گرفت. در این روش نمونه‌ها پیش و پس از افزودن دو قطره اسید، به‌وسیله دستگاه طیف‌سنج در محدوده ۶۶۵ و ۶۶۴ نانومتر، با استفاده از رابطه (۱) غلظت کلروفیل میدانی در هر ایستگاه برآورد گردید. نگاره ۲ بخشی از عملیات میدانی را نشان می‌دهد.



نگاره ۲: عملیات میدانی در منطقه مطالعاتی (راست) و قراردعی محلول در طیف‌سنج (چپ)

مدت را میسر نمی‌کند. ماهواره سنتینل ۲ دارای ۱۳ باند طیفی در محدوده مرئی، مادون قرمز نزدیک، مادون قرمز میانی با توان تفکیک‌های مکانی متفاوت ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر می‌باشد. با وجود دوقلو بودن این ماهواره توان تفکیک زمانی آن نسبت به ماهواره‌ی لندست ۸ به ۵ روز کاهش یافته که در نوع خود کم نظیر است. بنابراین استفاده از داده‌های لندست ۸ و سنتینل ۲ با خصوصیات طیفی، مکانی و زمانی متفاوت امکان پایش کلروفیل - آ در ابعاد مختلف را میسر ساخته است.

۳-۲- روش تحقیق

در پژوهش حاضر به منظور بررسی روش‌های تصحیح رادیومتریکی و اتمسفری بر روی پهنه‌ی آبی مورد نظر در داده‌های لندست ۸ و سنتینل ۲ از دو الگوریتم محاسباتی

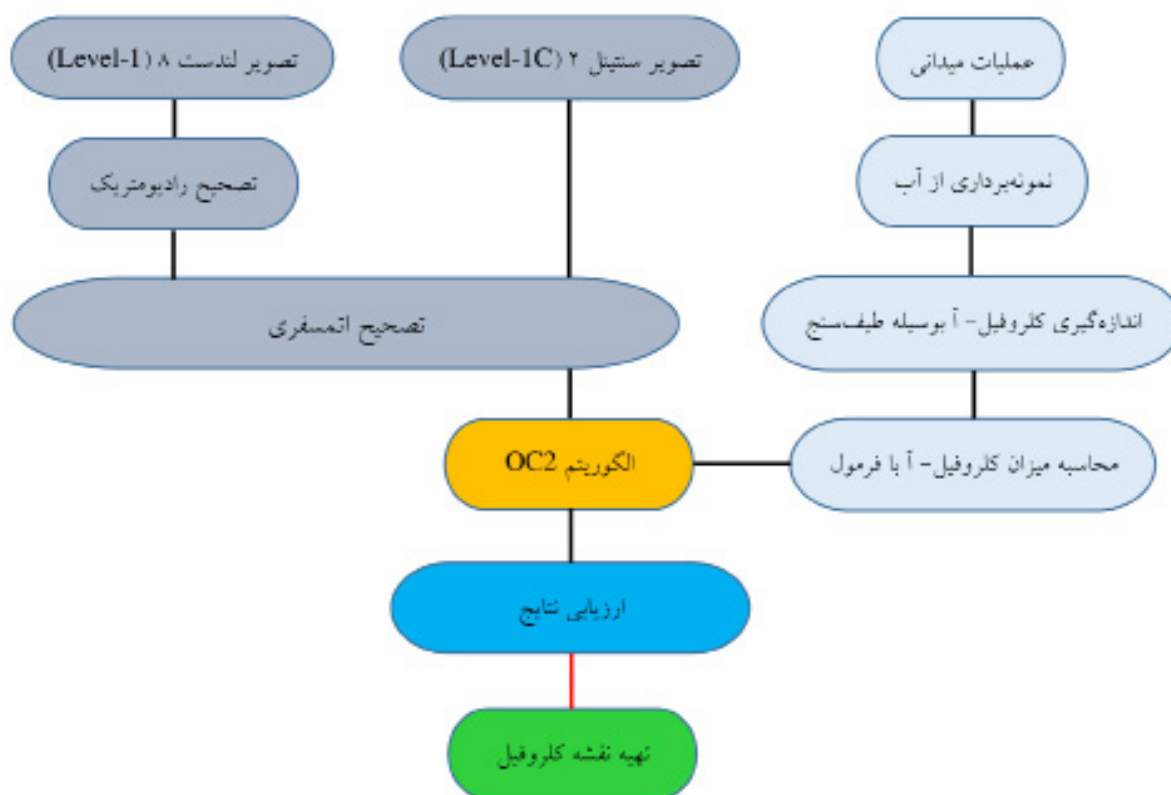
در این رابطه منظور از a₆₆₀ و b₆₆₀ به ترتیب قبل و بعد از اسیدی شدن نمونه‌ها در محدوده طیفی ذکر شده است، V_{ext} مقدار استخراج به واحد لیتر، V_{sam} مقدار نمونه به واحد متر مکعب، L مسیر نور لوله نمونه به واحد سانتی متر و Chla غلظت کلروفیل به واحد میلی گرم بر متر مکعب است.

۲-۲-۲- تصاویر ماهواره‌ای

داده‌های سنجش از دوری مورد استفاده در پژوهش حاضر شامل داده‌های لندست ۸ و سنتینل ۲ طبق مشخصات جدول ۲ می‌باشد. ماهواره لندست ۸ دارای توان تفکیک مکانی بسیار مناسبی است. به طوری که باندهای حرارتی، چندطیفی و پانکروماتیک آن به ترتیب ۱۰۰، ۳۰ و ۱۵ متر توان تفکیک مکانی دارند. این ماهواره به علت ضعف در توان تفکیک زمانی (۱۶ روز) امکان پایش پدیده‌های کوتاه

جدول ۲: مشخصات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده

ماهواره	نوع داده	باندهای مورد استفاده	توان تفکیک مکانی (متر)	دوره بازبینی مجدد (روز)	تاریخ تصویربرداری
Landsat- 8	Level-1	۲ و ۳	۳۰	۱۶	۲۰۱۹/۴/۷
					۲۰۱۹/۷/۲۸
					۲۰۱۹/۱۱/۱۷
Sentinel-2	Level-1C	۲ و ۳	۱۰	۵	۲۰۱۹/۴/۴
					۲۰۱۹/۷/۲۸
					۲۰۱۹/۱۱/۱۵



نگاره ۳: نمودار فرآیند پژوهش

پژوهش حاضر روش‌های تصحیح رادیومتریکی بازتاب بالای جو و تصحیح اتمسفری بازتاب سطحی نسبت به یکدیگر مقایسه شدند. به منظور تصحیح رادیومتریک و اتمسفری داده‌های چندطیفی لنداست ۸ در این تحقیق به ترتیب از ابزارهای رادیومتر کالبریتد^۳ و الگوریتم فلش^۴ در نرم‌افزار ENVI 5.3.1 استفاده شد. از رابطه (۲) برای تبدیل مقادیر پیکسل‌ها به بازتاب واقعی استفاده می‌شود (Kaufman, 1997: 1286).

$$L = \left(\frac{A\rho}{1 - \rho e^s} \right) + \left(\frac{B\rho_e}{1 - \rho e^s} \right) + L_a \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه p بازتاب سطحی در هر پیکسل، ρ_e میانگین بازتاب سطحی برای پیکسل، S مقدار آبدوی لایه جو، L_a تابش پراکنده شده در جو، A و B ضرایب وابسته به شرایط جوی و هندسی اما نه بر روی سطح، هستند.

در ادامه‌ی فرآیند پیش‌پردازش، به دلیل اینکه داده‌های

مقادیر بازتاب بالای جو^۱ و مقادیر بازتاب سطحی^۲ یا زیر سطحی در نرم‌افزار ENVI 5.3.1 استفاده شد و به منظور پردازش تصویر برای تخمین غلظت کلروفیل - آ از نرم‌افزار Matlab 2018a بهره گرفته شد. روند کلی پژوهش در نگاره ۳ نمایش داده شده است.

۲-۳-۱- تصحیح رادیومتریک و اتمسفری

مؤلفه‌های اتمسفری موجود در سیگنال‌هایی که توسط سنجنده ثبت شده است باید محاسبه و حذف شود. این مسئله در کارهای اقیانوس‌شناسی مورد توجه است، زیرا تابش بازتاب شده از پهنه‌های آبی که اطلاعاتی در مورد زیست‌شناسی و مواد معلق در لایه بالایی اقیانوس را حمل می‌کند، در مقایسه با سهم اثرات اتمسفری کمتر است. بنابراین تصحیح رادیومتریکی و اتمسفری تابش‌های رسیده به سنجنده حتماً باید انجام شود (Mather & Koch, 2011).

3- Radiometer Calibrated

4- FLAASH

1- Top of Atmosphere Reflectance

2- Surface Reflectance

جمله‌ای تولید می‌کند (Sun et al., 2014: 289). این الگوریتم یک ارتباط غیرخطی بین داده‌های سنجنش‌ازدوری و داده‌های میدانی ایجاد می‌کند (O'Reilly, 1998: 24937) و از رابطه (۴) به‌دست می‌آید.

$$C = 10 \sum_{i=1}^n O_i \times X, X = \frac{Rrs(\lambda_{Blue})}{Rrs(\lambda_{Green})} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این رابطه، C غلظت کلروفیل به واحد میلی‌گرم بر متر مکعب، a ضرایبی که مدل‌سازی و برآورد می‌شوند، x نسبت باندی، Rrs بازتابش سنجنش‌ازدوری در طول موج مورد نظر یعنی λ است.

۲-۳-۳- معیار ارزیابی نتایج

در ادامه پس از اعمال الگوریتم OC2 بر رویدادهای رادیومتریک و اتمسفری لندست-۸ و سنتینل-۲ برای ارزیابی نتایج با استفاده از داده‌های میدانی از مقادیر پارامترهای آماری شامل ضریب تعیین (R^2) و خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) استفاده شد. مقادیر پارامترهای مذکور از طریق روابط (۵) و (۶) محاسبه می‌شود.

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}}{n} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)(O_i - \bar{O}_i)^2)}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad \text{رابطه (۶)}$$

در روابط (۵) و (۶)، مقادیر P_i و مقادیر O_i به‌ترتیب مقادیر غلظت کلروفیل-آ برآورد شده با الگوریتم OC2 در داده‌های تصحیح رادیومتریک و اتمسفری شده لندست-۸ و سنتینل-۲ و مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی غلظت کلروفیل-آ و n تعداد نمونه‌ها هستند.

۳- نتایج

پس از آماده‌سازی داده‌های سنجنش‌ازدوری و داده‌های میدانی نتایج اندازه‌گیری کمی مطالعات میدانی به‌دست آمد. همانطور که در نگاره ۴ نشان داده شده است کمترین میزان

مورد استفاده سنتینل-۲ در پژوهش کنونی از نوع داده‌های تصحیح رادیومتریک شده‌ی بازتاب بالای جو بودند نیاز به تصحیح رادیومتریک این نوع داده‌ها نبود. بنابراین برای تصحیح اتمسفری داده‌های رادیومتریک بازتاب بالای جو سنتینل-۲ از الگوریتم کوئیک اتمسفریک^۱ در نرم‌افزار ENVI 5.3.1 استفاده شد. این الگوریتم برای داده‌های چندطیفی و ابرطیفی در محدوده طیفی مرئی و مادون‌قرمز بازتابی توسط برنشتاین و آدلر گلدن توسعه داده شده است (Bernstein & et al, 2005: 668)

الگوریتم QUAC قابلیت تصحیح اتمسفری داده‌های بازتاب بالای جو را دارد و به همین دلیل از بین سایر روش‌های تصحیح اتمسفری انتخاب شد. این الگوریتم از رابطه ۳ حاصل می‌شود.

$$L_{obs} = (A + Cp_{ave}) + Bp_{sur} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه L_{obs} بازتاب سطحی در هر پیکسل، Bp_{sur} مجموع سه مسیر هدایت فتون‌های خورشیدی به اهداف سنجنش‌ازدوری، $(A + Cp_{ave})$ رابطه خطی بازتاب سطح است.

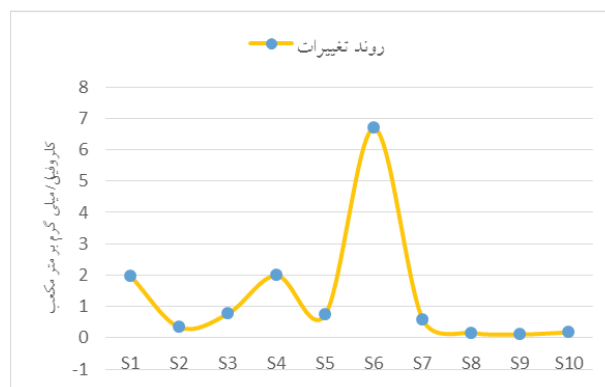
۲-۳-۲- پیاده‌سازی الگوریتم

برای تخمین غلظت کلروفیل-آ از الگوریتم مبتنی بر باند آبی و سبز (OC2) که مختص آب‌های ساحلی است، استفاده شد. به دلیل هزینه‌بر بودن و زمان‌بر بودن برداشت میدانی همزمان با عبور ماهواره از منطقه مورد مطالعه از تعداد نمونه‌های میدانی برداشت شده، ۷۰٪ به‌صورت تصادفی به‌منظور آموزش استفاده شد و ۳۰٪ نمونه به‌صورت تصادفی برای اعتبارسنجی کلروفیل دریافتی از داده‌های لندست-۸ و سنتینل-۲ استفاده شد. مدل OC2، در واقع جزئی از الگوریتم‌های بیوپاتیکی است که از یک نسبت باند آبی به سبز استفاده می‌کنند. باند آبی می‌تواند در محدوده طیفی ۴۴۳ یا ۴۹۰ نانومتر باشد و باند سبز می‌تواند در محدوده طیفی ۵۶۰ نانومتر باشد. نسبت‌های آبی به سبز با Chl-a دارای همبستگی است و یک مدل مناسب چند

منحنی رفتار طیفی در داده‌های بازتاب سطحی و بازتاب بالای جو لندست و سنتینل را نشان می‌دهد. نتایج ارزیابی و ضرایب مدل‌سازی شده برای داده‌های بازتاب بالای جو و بازتاب سطحی زمین (لندست و سنتینل) در الگوریتم بیو اپتیک OC2 با داده‌های میدانی در جدول ۳ ارائه شده است که بیانگر همبستگی بالای داده‌های بازتاب سطحی زمین مورد استفاده در الگوریتم OC2 با داده‌های میدانی است. نتایج پارامتر آماری داده‌های بازتاب بالای جو (لندست و سنتینل) استفاده شده در الگوریتم OC2 با داده‌های میدانی همبستگی قابل قبولی ارائه نداد. به دلیل کسب نتایج مناسب از داده‌های بازتاب سطحی زمین (لندست و سنتینل) در ورودی الگوریتم OC2، این نوع داده‌ها به عنوان مناسب‌ترین داده برای ورود به الگوریتم‌های بیو اپتیک استفاده شدند.

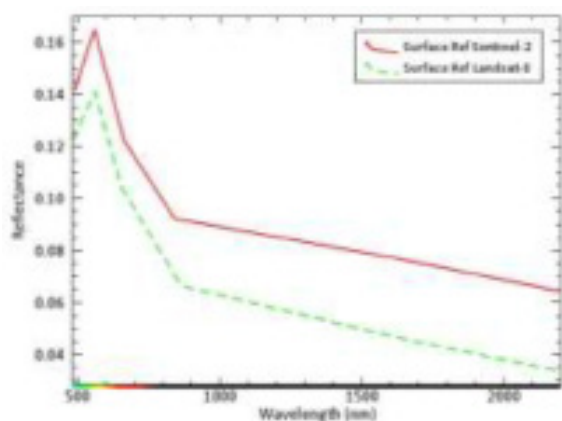
همانگونه که در جدول ۳ نتایج پارامترهای ارزیابی نشان داده است، داده بازتاب سطحی زمین در لندست با دارا بودن مقادیر پارامتر آماری R^2 (۰/۹۱) و RMSe (۰/۱۳) و داده بازتاب سطحی زمین در سنتینل با داشتن مقادیر پارامتر آماری R^2 (۰/۶۴) و RMSe (۰/۳۳) مناسب‌ترین نوع داده برای ورود به الگوریتم OC2 شناخته شدند. سرانجام از طریق رابطه ۵ و ضرایب برآورد شده برای این الگوریتم

غلظت کلروفیل در منطقه مربوط به ایستگاه ۹ با مقدار ۰/۱۱ میلی گرم بر متر مکعب و بیشترین میزان غلظت کلروفیل مربوط به ایستگاه ۶ با مقدار ۶/۶۸ میلی گرم بر متر مکعب به دلیل وجود جلبک شدید در منطقه مورد نظر بود و در سایر ایستگاه‌ها میزان غلظت کلروفیل زیر ۱ میلی گرم بر متر مکعب بود.

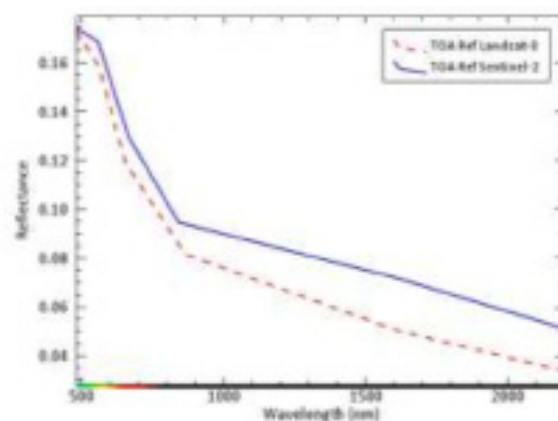


نگاره ۴: روند تغییرات کلروفیل - آ میدانی

پدیده‌ی آب در داده‌های بازتاب بالای جو سنتینل و لندست دارای رفتار یکسانی است و همچنین رفتار طیفی آب در داده‌های بازتاب سطحی زمین در سنتینل و لندست دارای رفتار طیفی نسبتاً مشابه و یکسانی است. نگاره ۵



(ب)



(الف)

نگاره ۵: نمودار رفتار طیفی آب. الف: بازتاب بالای جو در لندست ۸ و سنتینل ۲

ب: بازتاب سطحی زمین در لندست ۸ و سنتینل ۲

جدول ۳: ارزیابی و ضرایب الگوریتم OC2 در داده‌های بازتاب سطحی و بازتاب بالای جو (لندست ۸ و سنتینل ۲)

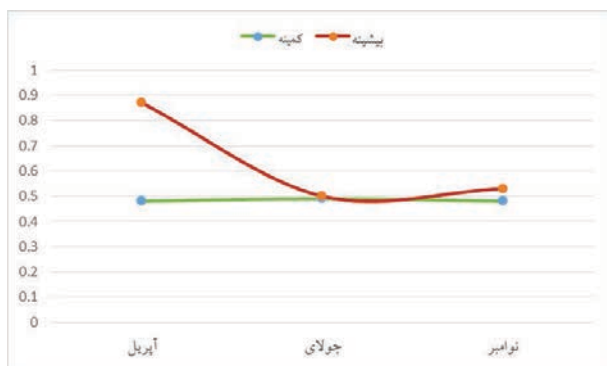
ماهواره	روش تصحیح اتمسفری	R ²	RMSE	ضرایب مدل‌سازی شده (a)			
				A ₀	A ₁	A ₂	A ₃
سنتینل ۲	بازتاب سطحی	۰/۶۴	۰/۳۳	- ۰/۲۹۴۲	۰/۱۳۳۳	۰/۲۰۲۳	۰/۵۳۷۵۱
	بازتاب بالای جو	۰/۵۳	۰/۵۱	- ۰/۲۹۵۰	۰/۰۶۴۸	۰/۱۴۷۹	- ۱۳۶۴
لندست ۸	بازتاب سطحی	۰/۹۱	۰/۱۳	- ۰/۲۰۰۹۴	- ۱/۳۰۱۸	۰/۵۲۶۳	۱/۴۲۳۵
	بازتاب بالای جو	۰/۱۲	۰/۴۵	- ۰/۸۰۲۹۶	- ۰/۳۹۵۴	۰/۰۶۷۹	۰/۰۶۶۸

میزان همبستگی (R^2) و همچنین خطای آماری (RMSE) آن‌ها با داده‌های زمینی مورد ارزیابی قرار گیرند. نتایج این پژوهش با نتایج سایر پژوهش‌های داخلی و خارجی مقایسه شد به‌طوری‌که مطالعه مرادی (۱۳۹۵) با پژوهش کنونی تا حد زیادی مطابقت داشت. این پژوهشگر از داده‌های بازتاب سطحی زمین لندست ۸ به‌منظور کالیبراسیون با داده‌های سنجنده مودیس برای تخمین غلظت کلروفیل-آ استفاده کرد. نتایج تحقیق این پژوهشگر نشان داد که از بین الگوریتم‌های بیوپتیک مورد استفاده، الگوریتم OC3 با داده‌های تصحیح اتمسفری شده به روش بازتاب سطحی، با داشتن بیشترین مقدار R^2 (۰/۷۱) و کمترین مقدار RMSE (۰/۰۷۴) همبستگی دارد و از این الگوریتم و این نوع داده‌ی ماهواره‌ای برای تخمین غلظت کلروفیل - آ منطقه خلیج فارس استفاده شد. همانطور که از یافته‌های این پژوهش

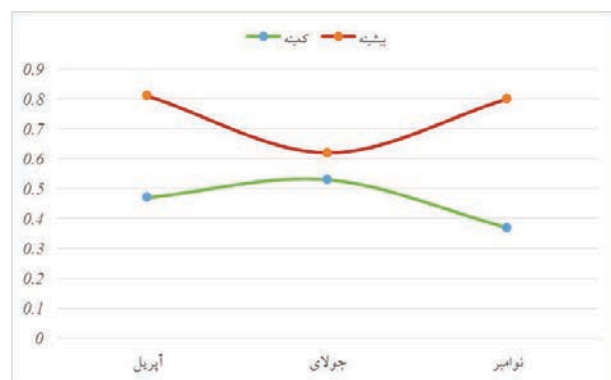
نقشه سری زمانی غلظت کلروفیل- آ منطقه مورد مطالعه با استفاده از تصاویر لندست و سنتینل تهیه شد. نگاره ۶، ۷ و ۸ به‌ترتیب روند سری زمانی کمینه و بیشینه کلروفیل- آ و نقشه سری زمانی غلظت کلروفیل- آ در داده‌های بازتاب سطحی لندست ۸ و سنتینل ۲ را نشان می‌دهد.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

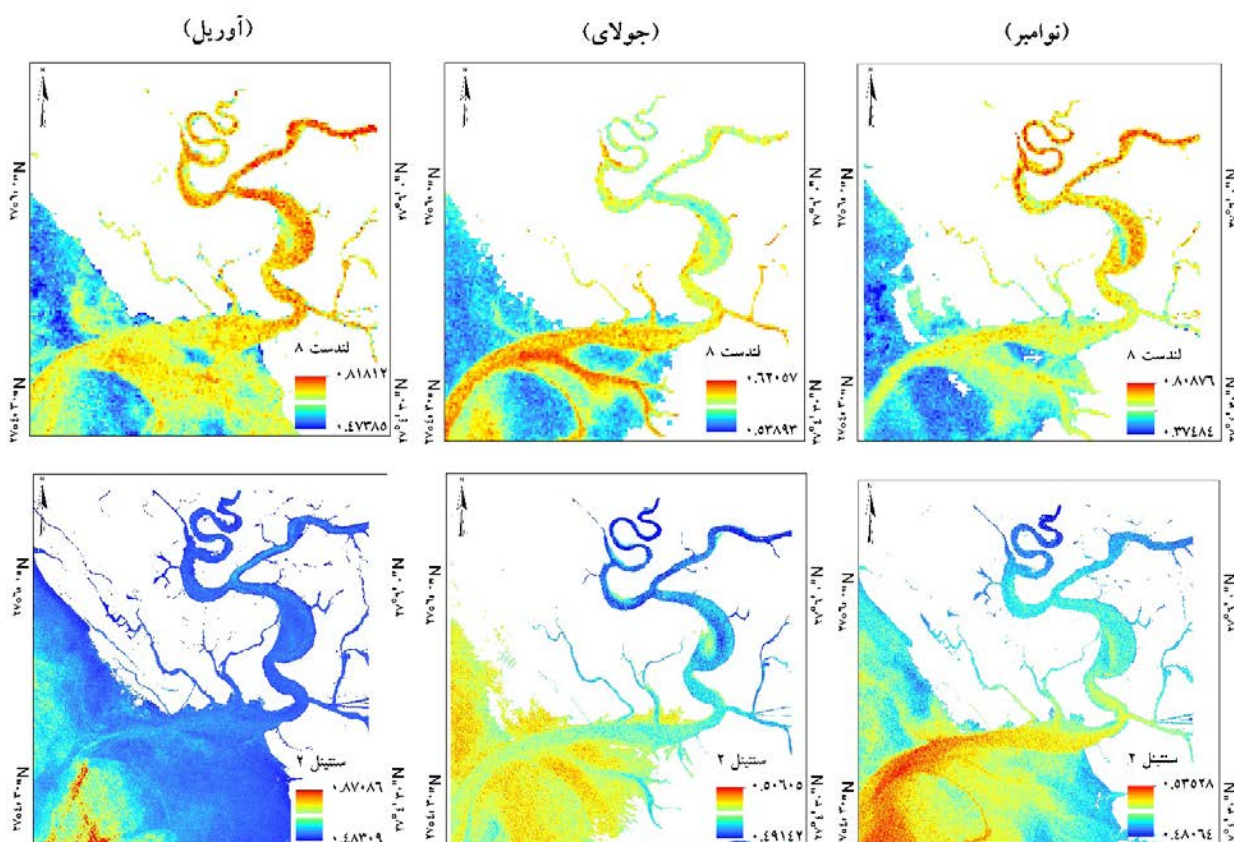
هدف از این پژوهش مقایسه و ارزیابی داده‌های بازتاب سطحی و بازتاب بالای جو (لندست ۸ و سنتینل ۲) در الگوریتم OC2 با داده‌های زمینی و درنهایت تهیه نقشه سری زمانی غلظت کلروفیل - آ در منطقه تالاب تیاب است. در این راستا ابتدا داده‌های بازتاب سطحی و بازتاب بالای جو ماهواره‌های مورد استفاده در این پژوهش یکی پس از دیگری در ورودی الگوریتم OC2 قرار گرفتند تا



نگاره ۷: سری زمانی کمینه و بیشینه غلظت کلروفیل- آ در سنتینل ۲



نگاره ۸: سری زمانی کمینه و بیشینه غلظت کلروفیل- آ در لندست ۸



نگاره ۸: نقشه سری زمانی غلظت کلروفیل - آ تهیه شده از الگوریتم OC2 (لندست ۸ و سنتینل ۲)

از تصحیح اتمسفری و تبدیل این نوع داده به داده بازتاب سطحی زمین از طریق الگوریتم QUAC نتایج و همبستگی مطلوبی را با داده‌های میدانی نشان داد. با مقایسه نتایج داده‌های بازتاب بالای جو و بازتاب سطحی می‌توان به این نتیجه دست یافت که با توجه به اینکه داده‌های بازتاب سطحی داده‌هایی هستند که در مرحله تصحیح رادیومتریکی ابتدا تابش رسیده از سطح زمین توسط سنجنده محاسبه شده و سپس در فرآیند تصحیح اتمسفری قرار گرفته‌اند بازتابی نتیجه می‌شود که صرفاً از نوع بازتاب واقعی از سطحی زمین است. اما داده‌های بازتاب بالای جو داده‌هایی هستند که صرفاً تصحیح رادیومتریکی شده‌اند و علاوه بر محاسبه تابش سطحی زمین، بازتاب‌های تحت‌تأثیر عوامل اتمسفری در لایه جو توسط سنجنده محاسبه شده و این امر باعث می‌شود که علاوه بر ثبت بازتاب سطحی (سیگنال)،

نمایان است الگوریتم OC2 پیاده شده بر روی داده‌های بازتاب سطحی لندست ۸، همبستگی بالایی با داده‌های میدانی دارد. در مطالعه‌ای نسبتاً مشابه مولایی (۲۰۱۸) از دئوئو داده‌ی بازتاب سطحی و بازتاب بالای جو در سنتینل ۲ برای تخمین غلظت کلروفیل - آ در پهنه‌ی دریاچه‌ای در آمریکا استفاده کرد که نتیجه تحقیق این پژوهشگر با نتیجه پژوهش کنونی مطابقت و همخوانی دارد. به‌طوری‌که داده‌های بازتاب بالای جو تصحیح اتمسفری شده (Level-1C) با داده‌های میدانی موجود دارای همبستگی بالایی بود. درحالی‌که داده‌های بازتاب بالای جو و تصحیح اتمسفری نشده (Level-1C) با داده‌های میدانی و الگوریتم مورد استفاده تطابق و همبستگی مناسبی را نشان نداد. در پژوهش کنونی داده‌های بازتاب بالای جو (Level-1C) ورودی الگوریتم OC2 با داده‌های میدانی همبستگی مناسب و مطلوبی را نشان نداد اما پس

به‌طوری‌که با کاهش دما غلظت کلروفیل افزایش پیدا می‌کند که نتیجه کاملاً منطقی بوده و از طبیعت پیروی می‌کند. در ماه جولای که تقریباً اواسط فصل تابستان است آب دریا نسبتاً گرم و در حقیقت این امر باعث کاهش غلظت کلروفیل - آ می‌شود که از نتیجه‌ی نقشه‌ها نمایان است و همین‌طور در ماه نوامبر که مصادف با فصل پاییز و زمستان است با کاهش دما غلظت کلروفیل افزایش پیدا می‌کند و این نقشه هم از قانون طبیعی و فصل بودن تبعیت می‌کند. اما نظر به نقشه‌های تهیه شده با استفاده از سنتینل ۲ متوجه خواهید شد که این ماهواره در ماه‌های آوریل، جولای و نوامبر غلظت نسبتاً یکسان و مشابهی را بدون در نظرگیری شرایط فصول سال تخمین زده است که دلیل این امر هم این است که تعداد ۱۰ داده‌ی میدانی در یک منطقه نسبتاً وسیع در تصویر با ابعاد پیکسل 10^*10 سنتینل ۲ توانسته برآزش داده شود و در نتیجه نقشه سری زمانی مناسبی با این ماهواره تهیه نشده است و پیشنهاد می‌شود که برای تخمین غلظت کلروفیل - آ با استفاده از سنتینل ۲ حتماً بیش از ۱۰ داده‌ی میدانی برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی استفاده شود.

منابع و مأخذ

- ۱- فاطمی، محمدرضا، ۱۳۷۵؛ خورهای آب‌های جنوبی ایران. آبزیان، دوره ۷، شماره ۱۲، صفحات ۱۵-۱۲.
- ۲- مرادی، نسرين (۱۳۹۵)، بررسی و مدل‌سازی رنگ اقیانوس با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک مکانی بالا، حسنلو، مهدی، دانشگاه تهران، گروه مهندسی و نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی.
- ۳- موسوی ده‌موردی، بنایی؛ لاله، مهدی؛ 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، دوره ۱۰، شماره ۳۸، صفحات ۲۹-۲۱.
- ۴- مهدوی‌فرد، مصطفی (۱۳۹۹)، تخمین غلظت کلروفیل - آ با استفاده از روش‌های میدانی و پردازش تصاویر ماهواره‌ای

عوامل تأثیرگذار بر امواج الکترومغناطیس در لایه جو (نویز) همانند بخار آب، نیتروژن و دی‌اکسید کربن را هم ثبت کند و این یک مبنای خطا در داده‌های بازتاب بالای جوی است که در حقیقت مقدار ارزش واقعی پیکسل را نشان نمی‌دهد و باتوجه به نتایج این نوع داده‌ها در جدول ۳، داده‌های بازتاب بالای جو لندست ۸ و سنتینل ۲ نمی‌توانند همبستگی مناسبی با الگوریتم‌های بیوپاتیکی داشته باشند. نظر به نگاره ۵ می‌توان متوجه این عملکرد نامناسب شد که داده‌های بازتاب سطحی سنتینل ۲ نسبت به کمبود داده واکنش منفی نشان داده است اما این درحالی است که لندست ۸ نسبت به تعداد ۱۰ داده میدانی واکنش مثبتی نشان داده است. دلیل این عملکرد مناسب و نامناسب بر فرض توان تفکیک مکانی ماهواره‌های مورد استفاده استوار است. ابعاد پیکسل‌های باندهای آبی و سبز سنتینل ۲ دارای اندازه حدود 10^*10 متر هستند. در حقیقت این سیستم پیکسلی باعث افزایش پیکسل در یک تصویر ماهواره‌ی سنتینل ۲ می‌شود که در نتیجه تعداد ۱۰ داده‌ی میدانی بدون پراکنش مناسب نمی‌تواند به‌خوبی به تمامی پیکسل‌های تصویر سنتینل ۲ برآزش و تعمیم داده شود. اما این درحالی است که باندهای آبی و سبز در لندست ۸ دارای ابعاد پیکسلی 30^*30 متر هستند که در واقع باعث کاهش پیکسل در یک تصویر لندست ۸ می‌شود و در نهایت به‌خوبی تعداد ۱۰ داده‌ی میدانی با پراکنش مناسب می‌تواند به سایر پیکسل‌های همجوار خود تعمیم و برآزش داده شود و همچنین نتیجه مناسبی حاصل گردد. همانگونه که از نقشه خروجی سری زمانی غلظت کلروفیل - آ در لندست ۸ نمایان است، این ماهواره به‌خوبی توانست نقشه غلظت کلروفیل منطقه را تخمین و ارزیابی کند به‌طوری‌که تصاویر ماهواره‌ای در فصول مختلف سال هم از قانون طبیعت پیروی می‌کنند. در ماه آوریل که مصادف با فصل بهار در ایران است آب دریا نسبتاً خنک است که این امر باعث کاهش دمای سطح دریا در این فصل می‌شود. در حقیقت یک رابطه‌ی معکوسی بین دمای سطح دریا و غلظت کلروفیل - آ وجود دارد

- 14- Miller, R. L., Del Castillo, C. E., & McKee, B. A. (Eds.). (2005). Remote sensing of coastal aquatic environments (Vol. 511). Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- 15- Mobley, C. D., Stramski, D., Paul Bissett, W., & Boss, E. (2004). Optical modeling of ocean waters: Is the case 1-case 2 classification still useful?. *Oceanography*, 17(SPL. ISS. 2), 60.
- 16- Mollaei, S. (2018). Estimation of phytoplankton chlorophyll-a concentration in the western basin of Lake Erie using Sentinel-2 and Sentinel-3 data (Master's thesis, University of Waterloo).
- 17- Nusch, E. A. (1980). Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination. *Arch HydrobiolBeihErgebLimnol*, 14, 14-36.
- 18- O'Reilly, J. E., Maritorena, S., Mitchell, B. G., Siegel, D. A., Carder, K. L., Garver, S. A., ... & McClain, C. (1998). Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C11), 24937-24953.
- 19- 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.
- 20- Schofield, O., Grzymiski, J., Bissett, W. P., Kirkpatrick, G. J., Millie, D. F., Moline, M., & Roesler, C. S. (1999). Optical monitoring and forecasting systems for harmful algal blooms: possibility or pipe dream?. *Journal of Phycology*, 35(6), 1477-1496.
- 21- Soomets, T., Uudeberg, K., Jakovels, D., Brauns, A., Zagars, M., & Kutser, T. (2020). Validation and Comparison of Water Quality Products in Baltic Lakes Using Sentinel-2 MSI and Sentinel-3 OLCI Data. *Sensors*, 20(3), 742.
- 22- Sun, D., Hu, C., Qiu, Z., Cannizzaro, J. P., & Barnes, B. B. (2014). Influence of a red bandbased water classification approach on chlorophyll algorithms for optically complex estuaries. *Remote sensing of environment*, 155, 289-302.
- 23- Yati, E. (2016). Retrieval of Chlorophyll-a and Suspended Sediment Concentration Using Landsat 8 OLI In Lampung Bay, Indonesia (Master's thesis, University of India).
- (مطالعه موردی: خورتیاب)، ولیزاده کامران، خلیل، دانشگاه تبریز، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی.
- ۵- ولیزاده کامران، مهدوی فرد؛ خلیل، مصطفی، ۱۳۹۸؛ مبانی سنجش از دور کاربردی. انتشارات ماهواره، چاپ اول، تهران، ۲۷۰ صفحه.
- 6- Bernstein, L. S., S. M. Adler-Golden, R. L. Sundberg, et al, 2005. Validation of the QuickAtmospheric Correction (QUAC) algorithm for VNIR-SWIR multi- and hyperspectral imagery. *SPIE Proceedings, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XI*. Vol. 5806, pp. 668-678.
- 7- Flaash, U. S. G. (2009). Atmospheric Correction Module: QUAC and Flaash User Guide v. 4.7. ITT Visual Information Solutions Inc.: Boulder, CO, USA.
- 8- Ha, N. T. T., Thao, N. T. P., Koike, K., & Nhuan, M. T. (2017). Selecting the best band ratio to estimate chlorophyll-a concentration in a tropical freshwater lake using sentinel 2a images from a case study of lake ba be (northern vietnam). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(9), 290.
- 9- Han, L., & Jordan, K. J. (2005). Estimating and mapping chlorophyll-a concentration in Pensacola Bay, Florida using Landsat ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(23), 5245-5254
- 10- Kaufman, Y. J., Wald, A. E., Remer, L. A., Gao, B. C., Li, R. R., & Flynn, L. (1997). The MODIS 2.1 μm channel-correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol, *IEEE T. Geosci. Remote.*, 35, 1286-1298.
- 11- Mather, P. M., & Koch, M. (2011). Computer processing of remotely-sensed images: an introduction. John Wiley & Sons.
- 12- Matsushita, B., Yang, W., Chang, P., Yang, F., & Fukushima, T. (2012). A simple method for distinguishing global Case-1 and Case-2 waters using SeaWiFS measurements. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 69, 74-87.
- 13- McLeroy-Etheridge, S. L., & Roesler, C. S. (1998). Are the inherent optical properties of phytoplankton responsible for the distinct ocean colors observed during harmful algal blooms. *Ocean Opt*, 14, 109-116.