



# سنجش از دور , GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران سال ششم، شماره یکم، بهار ۱۳۹۳  
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.6, No.1, Spring 2014

۴۸-۳۵

## استفاده از الگوریتم سه‌باندی برای تخمین میزان کلروفیل a و فسفر کل در تالاب انزلی

محمد رضا گیلی<sup>۱</sup>، علی اکبر متکان<sup>۲</sup>، آزاده کاظمی<sup>۳\*</sup>

۱. مربی گروه محیط‌زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ملایر
۲. دانشیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
۳. استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اراک

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۲/۳۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۹

### چکیده

بازتاب طیفی آب‌های داخل خشکی‌ها از جمله تالاب‌ها در هر طول موج می‌تواند ناشی از مقادیر مختلف کلروفیل a باشد. عمل ریاضی ساده نسبت‌گیری بازتاب‌های طیفی پدیده‌ها در طول موج‌های مختلف که در سنجش از دور به شاخص طیفی معروف است می‌تواند موجب تشدید اختلاف‌هایی نظیر بازتاب پدیده‌ها و کاهش اثر عوامل منفی - به‌ویژه عوامل محیطی - شود. از جمله شاخص‌های طیفی که در مطالعات آب‌ها به‌خصوص تخمین میزان کلروفیل a به‌کار گرفته می‌شود، می‌توان به نتیجه حاصل از شاخص سه‌باندی اشاره کرد. در این پژوهش از نمونه‌های آب تالاب انزلی با میزان کلروفیل a بین ۲/۰۷ تا ۲۳/۹ میلی‌گرم در لیتر استفاده شده است. بررسی رابطه مقدار کلروفیل a با شاخص سه‌باندی، رابطه‌ای قوی را بین مقدار این شاخص با مقدار کلروفیل a در دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری نشان داد. البته این رابطه در عمق ۱۵ سانتی‌متری آشکارا قوی‌تر است. در این تحقیق حداکثر حساسیت به جذب ذرات کلروفیل a در طول موج ۶۸۰ نانومتر و حداقل حساسیت به انعکاس کلروفیل a در طول ۷۰۰ نانومتر است. برای محاسبه شاخص سه‌باندی از باند جذبی آب در محدوده طول موج مادون‌قرمز نزدیک به‌منظور نرمال کردن استفاده شد - در اینجا  $\lambda_p$  برابر با ۷۵۷ نانومتر در نظر گرفته شده است. در این مطالعه رابطه بین فسفر کل با میزان شاخص سه‌باندی نیز به‌دلیل رابطه مستقیم میزان کلروفیل a با فسفر کل بررسی شد، که همانند میزان کلروفیل a در عمق ۱۵ سانتی‌متری رابطه قوی‌تری را در مقایسه با عمق ۳۰ سانتی‌متری نشان می‌دهد.

**کلیدواژه‌ها:** شاخص سه‌باندی، طیف‌سنجی، کلروفیل a، فسفر کل، بازتاب طیفی، آب‌های داخل خشکی‌ها.

\* نویسنده مکاتبه‌کننده: خیابان امام خمینی، خیابان شهید حسینی، کوچه میراشرافی، کدپستی: ۳۸۱۶۱۵۴۵۱۴

## ۱- مقدمه

بیانگر وضعیت غذای آن است و در برآورد میزان مواد آلی موجود در محیط‌های آبی اهمیت ویژه‌ای دارد (Jerlov, 1976). رفتار طیفی آب اقیانوس‌ها طی چندین دهه در مناطق مختلف مطالعه شده است. قدیم‌ترین این مطالعات را جرلاو (۱۹۷۶) انجام داده که در آن رفتار طیفی آب اقیانوس‌ها با مقادیر متفاوت کلروفیل a را بررسی کرده است. پس از این مطالعات، رفتار طیفی آب‌های نوع دوم بررسی شد؛ که منظور آب‌های داخل خشکی‌هاست که گل‌آلود بودند و از نظر میزان کلروفیل a با آب‌های دریاها و اقیانوس‌ها که قبلاً ارزیابی شده بودند فرق داشتند (Priour and Morel, 1977).

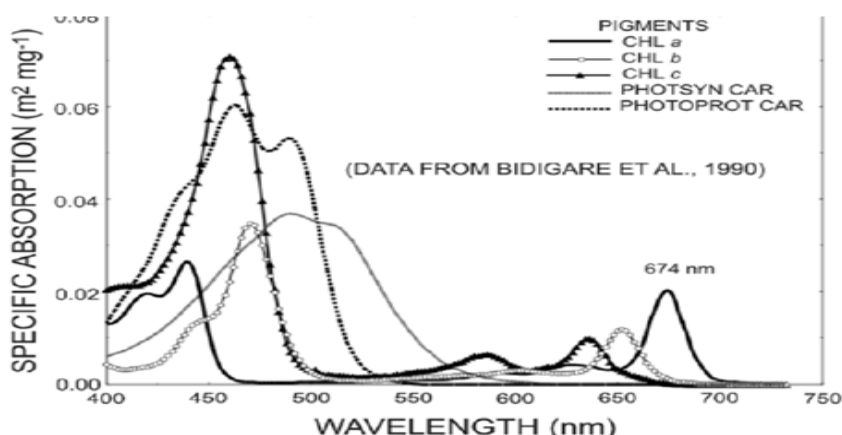
اگرچه این مطالعات را افراد مختلف در مناطق گوناگون جهان انجام داده‌اند، ولی در همه آنها این نتیجه مشترک است که درحالی‌که مواد معلق به‌طور عمومی نور را در محدوده وسیعی از باندها در محدوده‌های مرئی و مادون قرمز نزدیک بازتاب می‌کنند، کلروفیل دارای باند جذبی در ناحیه طیفی کمتر از ۰/۵ میکرومتر و نیز بین ۰/۶۴ تا ۰/۶۹ میکرومتر نشان می‌دهد. در مطالعه‌ای که شالز و همکاران (۱۹۸۸) انجام دادند، دریافتند که به‌دلیل ماهیت کلروفیل a از نظر ساختار سلولی - یعنی نوع دیواره سلولی و کلروپلاست و سیتوپلاسم آن - میزان جذب و پخش کلروفیل a از سایر انواع ذرات فتوپلانکتون اصلی شامل کلروفیل a، c و کاروتنوئید تفکیک‌شدنی است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، تمام ذرات بین محدوده ۴۶۰ تا ۵۷۰ نانومتر حداکثر جذب را دارند و به همین ترتیب کلروفیل a نیز در ۴۴۰ نانومتر بیشترین مقدار جذب را دارد ولی بین ذرات تنها کلروفیل a است که در محدوده ۶۵۰ تا ۷۰۰ نانومتر دارای حداکثر جذب است.

پایش دائمی وضعیت سلامت آب‌های داخل خشکی‌ها از جمله تالاب‌ها به‌منظور کنترل آلودگی‌ها و مدیریت محیط‌زیست آبی، اهمیت بالایی دارد. نقش اکوسیستم‌های آبی به‌ویژه تالاب‌ها در طبیعت و زندگی بشری بر کسی پوشیده نیست. پیمایش زمینی این اکوسیستم‌های حیاتی به‌منظور آگاهی از وضعیت سلامت‌شان بسیار مشکل، زمان‌بر و پرهزینه است. سنجش از دور، درواقع علم شناسایی عوارض زمینی بدون تماس فیزیکی با آنهاست. این شناسایی از طریق پاسخ‌های طیفی عوارض حاصل می‌شود. سنجنده‌های مطالعه منابع زمینی مانند SPOT، ASTER و Land Sat از سنجنده‌های چندطیفی<sup>۱</sup> هستند که کمتر از ۲۰ باند دارند. سنجنده‌های AVIRIS، Hyperion، CASI و HYMAP جزو سنجنده‌های فراطیفی<sup>۲</sup> هستند، که به‌ترتیب در ۲۲۴، ۳۰۰، ۱۲۶ و ۵۵ باند طیفی تصویربرداری می‌کنند. با اتکا به اطلاعات برداشت‌شده به‌وسیله سنجنده‌های فراطیفی بر مبنای داده‌های اسپکترورادئومتری، این داده‌ها قادرند سلامت اکوسیستم‌ها را تا حد زیادی به‌خوبی نشان دهند؛ درحالی‌که تصاویر چندطیفی به‌دلیل کم‌بودن تعداد باندها، قابلیت نمایش میزان کیفیت آب‌های مختلف را در یک زمان ندارند. سنجنده‌های فراطیفی می‌توانند اطلاعات مناسبی از پارامترهای مختلف مربوط به کیفیت آب تولید کنند و در حفظ سلامت اکوسیستم‌های آبی مخصوصاً تالاب‌ها مؤثر باشند. امروزه کارایی این داده‌ها چنان پیشرفته شده است که داده‌های سنجش از دور یکی از دقیق‌ترین مدل‌ها در بررسی پارامترهای کیفیت آب و درجه فراغنی‌شدن<sup>۳</sup> تالاب‌ها به شمار می‌آید (Dekker et al., 1996).

میزان یوتریفیکاسیون تالاب‌ها در قالب تغییرات در پارامترهای بیوشیمیایی کیفیت آب شامل کلروفیل a، نیتروژن کل و فسفر کل ظاهر می‌شود. پارامترهای مذکور می‌توانند منشأ خارجی یا داخلی داشته باشند (Darvishsefat et al., 1999). وجود کلروفیل در آب

1. Multispectral  
2. Hyper spectral  
3. Eutrophication

استفاده از الگوریتم سه‌باندی برای تخمین میزان کلروفیل a و فسفر کل در تالاب انزلی



شکل ۱. مقایسه منحنی جذب طیفی انواع ذرات فیتوپلانکتون اصلی شامل کلروفیل a، b، c و کاروتنوئید منبع: Neville and Gower, 1977

## ۲- مواد و روش

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

تالاب انزلی در استان گیلان و کنار دریای خزر در امتداد شمال غربی و جنوب شرقی قرار دارد که مختصات آن در گوشه شمال غرب با سیستم UTM،  $X=348000$  و  $Y=4171000$  و برای گوشه جنوب غرب  $X=372000$  و  $Y=4126000$  است. این تالاب مهم‌ترین و اصلی‌ترین جاذبه طبیعت‌گردی شهرستان بندرانزلی به شمار می‌آید. مساحت تالاب طی سالیانتمادی تغییرات زیادی کرده، به طوری که در سال ۱۳۴۵ مساحت آن ۲۱۸ کیلومتر مربع بوده (Kimball and Kimball, 1974) و در سال ۱۳۶۸ به ۶۰ کیلومتر مربع رسیده است.

تالاب انزلی از طریق یک دهانه از جانب شمال به دریای خزر راه دارد و از شرق به منطقه پیربازار و از غرب به کپرچال و آبکار و از طرف جنوب به صومعه سرا و قسمتی از رشت محدود می‌شود. محدوده آبی این تالاب دارای چهار بخش یا حوضچه اصلی بدین شرح است: تالاب ماهروزه که در گذشته خلیج کپرچال نامیده می‌شد. این بخش عمیق‌ترین و پرآب‌ترین

در این طول موج در مقایسه با سایر طول موج‌ها کلروفیل a منحصر به فرد عمل می‌کند، بنابراین در محاسبه حداکثر جذب برای کلروفیل a این محدوده را در نظر می‌گیرند (شکل ۱). این ناحیه از طیف الکترومغناطیس متعلق به نور قرمز است که نخستین بار نویل و گوور (۱۹۷۷) آن را مطرح کردند. در همان سال و سال‌های بعد پریور و مورل (۱۹۷۷)، گوردون (۱۹۷۹)، کاردر و استوارد (۱۹۸۵) و دیگران نیز مطالعاتی انجام دادند که مؤید مطالب فوق است (Gitelson, 1992). لازم به ذکر است که کلیه نمودارها با نرم‌افزار ENVI 4.5 ترسیم و با یکدیگر مقایسه شدند. بر اساس شکل ۴ فقط در دامنه طول موج‌های جذب آب، میزان انحراف معیار بازتاب‌ها بسیار زیاد بوده که بیانگر خطای شدید است. از میان تالاب‌های ایران که ۷۵ تالاب دارای اهمیت بسیار است، ۱۳ تالاب اول بر حسب منزلت مورد ارزیابی و ارزش‌گذاری قرار گرفتند که از میان‌شان تالاب انزلی پنجمین تالاب دارای ارزش وافر از جنبه‌های گوناگون اکولوژیکی، اقتصادی، گردشگری و مانند اینهاست (Kiabi et al., 2004). این تالاب از نظر معیار ماهی و میزان آلودگی فاضلاب صنعتی و کشاورزی در رتبه یکم تالاب‌های ایران قرار دارد (Ibid). لذا یوتریفیکاسیون در این تالاب اثرگذارتر از بقیه تالاب‌های ایران است و تبعات آن در کاهش تنوع آبزیان و ماهی‌ها در معیار ماهی مشاهده می‌شود.

1. Universal Transfer Mercator

نمونه برداری، افزون بر نمونه یک لیتری، هم زمان ۴۰ لیتر نمونه از عمق ۳۰ سانتی متری برداشته شد. در شبکه‌ای که در مرحله اول نمونه برداری کمترین مقدار کلروفیل a را نشان داده بود نیز از عمق ۱۵ سانتی متری ۴۰ لیتر آب جمع‌آوری گردید.

#### ۲-۲-۲- نمونه برداری طیفی

در پژوهش حاضر از یک دستگاه طیف‌سنج زمینی به نام ASD FieldSpec با دامنه طول موج طیفی کامل ۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر استفاده شد. مجموعه این دستگاه به وزن ۱۰ کیلوگرم شامل بخش‌های زیر است:

- طیف‌سنج به ابعاد  $۱۳ \times ۲۹ \times ۳۵$  سانتی متر که شامل سه ثابت در طول موج‌های ۱۰۰۰-۳۵۰، ۱۸۰۰-۱۰۰۰ و ۲۵۰۰-۱۸۰۱ نانومتر با درجه حساسیت‌های متفاوت نسبت به تغییرات دما و رطوبت است. اندازه تفکیک طیفی دستگاه در محدوده ۱۰۰۰-۳۵۰ نانومتر ۳ نانومتر، در محدوده ۱۸۰۰-۱۰۰۰ نانومتر ۶ نانومتر و در محدوده ۲۵۰۰-۱۰۰۰ نانومتر ۱۰ نانومتر است. سرعت برداشت هر منحنی طیفی ۰/۱ ثانیه است.
- حسگر فیبر نوری<sup>۱</sup> با میدان دید ۲۵ درجه که با قرار گرفتن در موقعیت عمودی<sup>۲</sup> در ارتفاع ۴۰ سانتی متر از نمونه، دایره‌ای به قطر ۱۸ سانتی متر را اندازه‌گیری می‌کند. این حسگر از طریق کابلی به طول ۱/۲ متر، بازتاب نوری را به طیف‌سنج منتقل می‌کند. به منظور نشانه‌گیری بهتر، حسگر فیبر نوری در بخشی شبیه تفنگ<sup>۳</sup> قرار می‌گیرد.
- یک نوت‌بوک برای نمایش دادن و ذخیره کردن داده‌های طیفی با استفاده از نرم‌افزار مخصوص داده‌های طیف‌سنجی (RS<sup>3</sup>).

قسمت تالاب و در نقاط مرکزی خود فاقد پوشش گیاهی است. عمق آب در این ناحیه به ۳ متر نیز می‌رسد. تالاب سیاه‌کشیم در جنوب غربی، که عمق متوسط آن حدود یک متر است و نزدیک به ۲۰ درصد بار رسوبی و ۵۰ درصد بار آلودگی را در خود می‌پذیرد. تالاب شیجان در شرق کم عمق‌ترین قسمت تالاب قرار دارد و عمق آن بین ۰/۸ تا ۱/۵ متر متغیر است. پساب‌های کشاورزی، صنعتی و شهری در این بخش در مقایسه با سایر بخش‌ها سهم زیادی (بیش از ۷۰ درصد) در ایجاد آلودگی تالاب دارند. در بخش مرکزی که محل الحاق آب قسمت‌های مختلف تالاب و هدایت آن به سمت دریای خزر است، حدود ۱۵ درصد بار آلودگی و ۲۵ درصد بار رسوبی تالاب به بخش مرکزی منتقل می‌شود (Kiabi et al., 2004).

#### ۲-۲-۲- نمونه برداری

##### ۲-۲-۱- نمونه برداری زمینی

شرایط محیط‌های آبی به گونه‌ای است که تا چندین متر تغییرات میزان مواد موجود در آب از جمله میزان کلروفیل a در آنها ثابت است و تغییر نمی‌کند (Abd-Elrahman et al., 2011)؛ بنابراین افزایش تعداد نمونه‌ها در فواصل کم درون یک محدوده آبی مقادیر مشابهی را از نظر کلروفیل a نشان می‌دهد. ابتدا نقشه منطقه در حال مطالعه شبکه‌بندی شد، به طوری که ابعاد هر شبکه ۱۵۰۰ در ۱۵۰۰ متر است. در نمونه برداری کوشش شد از داخل هر شبکه یک نمونه به شکل تصادفی جمع‌آوری شود. تعداد ۳۹ نمونه از کل محدوده آبی تالاب و دهانه رودخانه پیربازار - که بیشترین آلودگی را وارد بخش مرکزی تالاب انزلی می‌کند - جمع‌آوری گردید. مختصات این نقاط با GPS اندازه‌گیری و میزان عمق نیز در محل جمع‌آوری نمونه‌ها مشخص شد.

از شبکه‌ای که نخستین بار نمونه برداری بیشترین مقدار کلروفیل a را نشان داده بود، در مرحله دوم

1. Fiber optic sensor  
2. Nadir  
3. Pistol grip



شکل ۲. مکعب ساخته‌شده برای نمونه‌برداری طیفی

به هم زده شد تا میزان کلروفیل آب یکسان شود. سپس مانند نمونه اول در دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری منحنی بازتاب طیفی ثبت گردید و نمونه‌برداری آب آن به همان صورت نمونه اول انجام گرفت و در جایی خنک برای انتقال به آزمایشگاه نگهداری شد. تا پایان یافتن ۴۰ لیتر آب تالاب که حاوی بیشترین مقدار کلروفیل a بود این کار ادامه داشت و ۸۰ نمونه طیفی به صورت ۴۰ نمونه در عمق ۱۵ سانتی‌متری و ۴۰ نمونه در عمق ۳۰ سانتی‌متری جمع‌آوری گردید. با توجه به آنچه ذکر شد، مقدار کلروفیل برای هر نمونه آزمایشگاهی در دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری ثابت و یکسان است؛ در نتیجه تعداد ۴۰ نمونه آزمایشگاهی جمع‌آوری شد.

### ۲-۳- شاخص طیفی سه‌باندی

به‌تازگی مدل مفهومی وابسته به بازتاب سنجش از دوری و میزان ذرات کلروفیل a در برگ‌های گیاهان به کار گرفته شد (Gitelson et al., 2003). مبنای مدل مذکور چنین است که برای محدوده وسیعی از میزان بازتاب (۰/۵-۰/۱۰)، عکس بازتاب  $R_{(\lambda)}^{-1}$  برگ‌ها با میزان تابع Kubella-Murk وابسته و برابر با  $\frac{a_{\lambda}}{a_{\lambda}}$  است؛  $a_{\lambda}$  ضریب جذب و  $b_{\lambda}$  ضریب پخش‌اند (Gitelson et al., 2003). در این مدل برای پیدا کردن ضریب جذب

این نمونه‌برداری طیفی در سازمان فضایی ایران واقع در مردآباد کرج انجام شده است. برای نمونه‌برداری طیفی از ظرفی با حجم ۴۰ لیتر استفاده شد، که دیواره‌های آن به رنگ سیاه و کف آن به رنگ سفید بود؛ به دلیل اینکه صفحه سفید سبب افزایش میزان بازتاب و صفحه سیاه سبب کاهش میزان بازتاب می‌شود (شکل ۲) (Rundquist et al., 1995).

برای نمونه‌برداری طیفی ابتدا ۴۰ لیتر از آب تالاب که دارای کمترین مقدار کلروفیل a است (و در قسمت مربوط به نمونه‌برداری زمینی به نحوه جمع‌آوری آن اشاره شد) داخل ظرف خالی ریخته شد و برای اندازه‌گیری در عمق ۳۰ سانتی‌متری با دستگاه طیف‌سنج منحنی طیفی آن ثبت گردید. سپس با یک صفحه سفیدرنگ که داخل ظرف و در عمق ۱۵ سانتی‌متری قرار داده شد، منحنی بازتاب طیفی دیگری ثبت گردید. این دو منحنی به نمونه اول اختصاص یافتند و با یک ظرف یک لیتری مقدار یک لیتر از آب تالاب برداشته شد و روی آن برچسب ۱ زده شد. سپس برای نمونه دوم از ظرفی حاوی ۴۰ لیتر آب تالاب که دارای کمترین مقدار کلروفیل a است (و در بخش نمونه‌برداری به نحوه جمع‌آوری آن اشاره شد) یک لیتر آب به داخل ظرف ساخته‌شده ریخته شد و در واقع ۴۰ لیتر آب درون ظرف ثابت ماند و فقط مقدار کلروفیل a آن افزایش یافت. پس از افزودن آب، محتویات ظرف

در خصوص کلروفیل  $a$ ، ارتباط خطی و غیرخطی مقدار شاخص‌های طیفی محاسبه شده با میزان کلروفیل  $a$  مطالعه شد و معنادار بودن ضریب همبستگی به دست آمده بررسی گردید. در پژوهش حاضر برای آزمون معنادار بودن از محاسبه  $t$  استیودنت استفاده شد و با کمک رابطه (۲) مقدار  $X$  محاسبه شد و سپس با  $t$  جدول براساس درجه آزادی  $n-2$  و سطح خطای  $0.05$  و  $0.01$  مقایسه گردید.

$$X = r\sqrt{(n-2)/(1-r^2)} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$X$ : متغیر تصادفی

$r$ : ضریب همبستگی

$n$ : تعداد نمونه‌ها

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- مشخصه طیفی نمونه‌های آب تالاب انزلی با مقادیر مختلف کلروفیل $a$

نمونه‌ای از منحنی‌های طیفی حاصل از میانگین صد اسکن مربوط به هر تکرار از عملیات طیف‌سنجی و خروجی دستگاه طیف‌سنج در شکل ۳ نشان داده شده است. منحنی‌های بازتاب طیفی در طول موج حدود  $1400$ ،  $1900$  و  $2500$  نانومتر ناشی از حساسیت این طول موج‌ها به بخار آب است (Richardson and Ledrew, 2006). شکل ۴ میزان انحراف معیار بازتاب‌های اندازه‌گیری شده در طول موج‌های مختلف مربوط به عمق ۱۵ سانتی‌متری تمامی نمونه‌های اندازه‌گیری شده را به صورت نمونه نشان می‌دهد. همه نمودارها در منحنی‌ها با نرم‌افزار ENVI 4.5 ترسیم و با یکدیگر مقایسه شدند. براساس این شکل، فقط در دامنه طول موج‌های جذب آب میزان انحراف معیار بازتاب‌ها بسیار زیاد بوده که بیانگر خطای شدید است. در محیط‌های آبی چنین خطایی به دلیل جذب آب صورت می‌گیرد که ناشی از خصوصیات محیط آبی است و در منحنی بازتاب طیفی‌شان همواره خطا وجود دارد (Ibid). خطای احتمالی ناشی از کالیبراسیون

ذرات مورد نظر از منحنی بازتاب طیفی آنها استفاده شده است (رابطه ۱).

$$\frac{R(\lambda_s)}{R(\lambda_1) - R(\lambda_p)} \propto A \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن،  $\lambda_1$  ناحیه‌ای از منحنی بازتاب طیفی است که  $R(\lambda_1)$  حداکثر حساسیت را به جذب ذرات کلروفیل  $a$  نشان می‌دهد. بنابراین  $R(\lambda_1)$  تحت تأثیر جذب و پخش ترکیبات دیگر نیز قرار دارد.

$\lambda_p$  ناحیه‌ای از طیف است که  $R(\lambda_p)$  حداقل حساسیت را به جذب ذرات کلروفیل  $a$  نشان می‌دهد. بنابراین اختلاف  $(R(\lambda_1) - R(\lambda_p))$  به میزان ذرات کلروفیل  $a$  بستگی دارد (Gitelson et al., 2003).  $\lambda_p$  ناحیه‌ای از منحنی بازتاب طیفی در محدوده مادون قرمز حرارتی است، که کمترین میزان بازتابی طیفی را در این محدوده دارد و ناحیه جذبی آب به همراه کلیه مواد موجود در آن بین  $700$  تا  $800$  نانومتر است.  $A$  نیز در رابطه (۱) نشان‌دهنده مقدار کلروفیل  $a$  است.

#### ۲-۴- اندازه‌گیری کلروفیل $a$ و فسفر کل

در این پژوهش بین انواع روش‌هایی که برای اندازه‌گیری کلروفیل  $a$  وجود دارد از روش استاندارد اندازه‌گیری کلروفیل  $a$  و روش استاندارد اندازه‌گیری فسفر کل (Parson et al., 1992) استفاده شده است.

#### الف) تحلیل‌های آماری

به منظور بررسی تفاوت طیفی گونه‌ها براساس شاخص‌های طیفی مطالعه شده، لازم است که آزمون نرمال بودن روی مقدار آنها انجام شود. نتیجه آزمون نرمال بودن به روش Kolmogorov-Smirnov موجود در بسته نرم‌افزاری SPSS نشان داد که پراکنش داده‌ها نرمال است. بنابراین از آمار پارامتری و آماره میانگین برای تحلیل‌های آماری استفاده شد.

#### ب) آنالیز رگرسیون

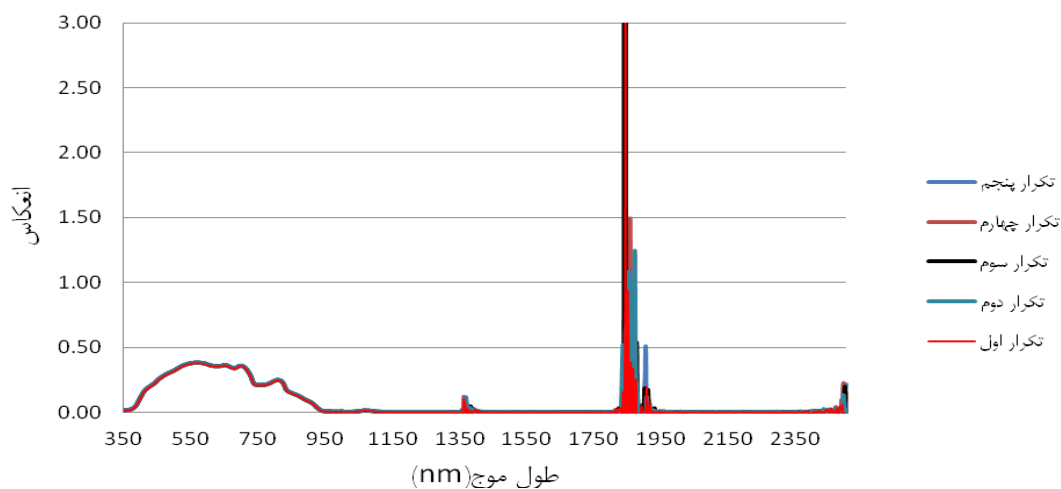
در بررسی حساسیت شاخص‌های طیفی این مطالعه

## استفاده از الگوریتم سه‌باندی برای تخمین میزان کلروفیل a و فسفر کل در تالاب انزلی

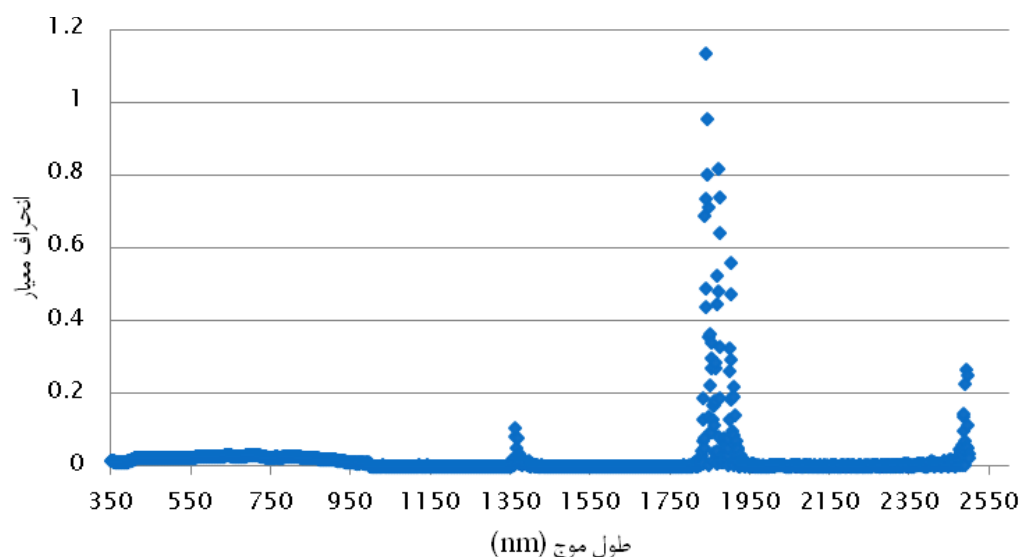
از حذف بازتاب‌های دارای خطا را نشان می‌دهد. بدین ترتیب در منحنی‌های نهایی بازتاب طیفی نمونه‌های آب تالاب با مقادیر مختلف کلروفیل a در دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری پس از پیش‌پردازش و حذف خطا، از ۵ تکرار آنها میانگین‌گیری شد.

دستگاه که معمولاً در طول موج ۱۰۰۰ نانومتر رخ می‌دهد (Ibid) دیده نمی‌شود. دامنه‌های طول موج‌هایی که داده‌هایشان به دلیل خطای شان حذف شدند در تمامی گونه‌ها یکسان بوده است (۱۳۴۰ تا ۱۸۰۰، ۱۴۵۰ تا ۲۰۲۰ و ۲۳۸۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر). شکل ۵ منحنی بازتاب طیفی یک نمونه آب تالاب پس

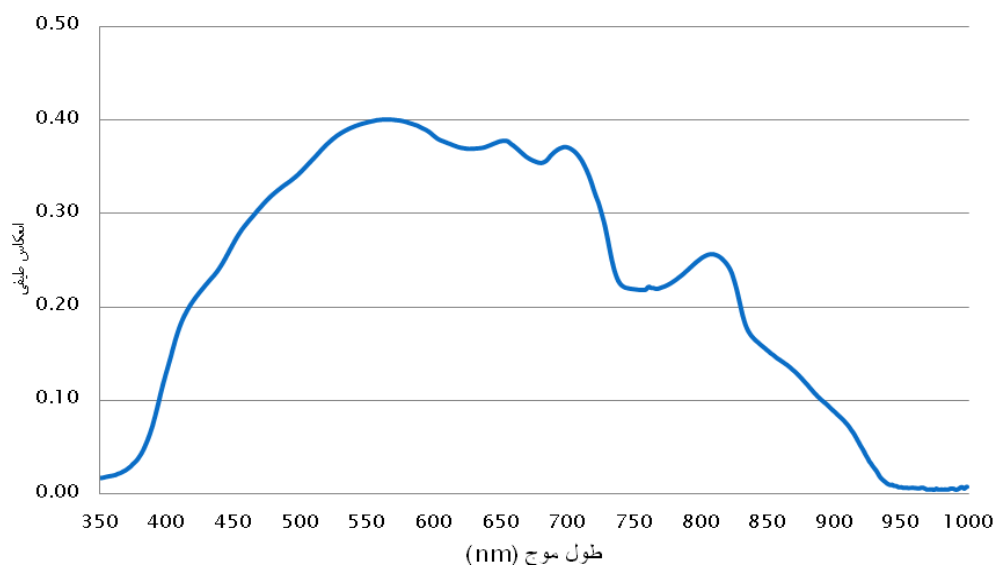
منحنی‌های بازتاب طیفی نمونه شماره ۵ عمق ۱۵ سانتی‌متری



شکل ۳. پنج منحنی انعکاس طیفی مربوط به پنج تکرار طیف‌سنجی از یک نمونه آب تالاب انزلی



شکل ۴. انحراف معیار انعکاس‌های طیفی اندازه‌گیری‌شده برای تمامی طول موج‌ها



شکل ۵. منحنی بازتاب طیفی یک نمونه پس از حذف بازتاب‌های دارای خطا

بازتاب طیفی در نمونه‌ای که بیشترین مقدار کلروفیل a را دارد در مقایسه با نمونه‌ای که کمترین مقدار کلروفیل a را دارد افزایش ۱۰/۴۵ درصد را نشان می‌دهد. در نمونه آب دارای کمترین مقدار کلروفیل a در هر دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی متری حداکثر بازتاب طیفی مربوط به طول موج نور سبز ۰/۵ تا ۰/۶ نانومتر، و برای نمونه آب با بیشترین مقدار کلروفیل a در طول موج ۷۰۰ نانومتر است.

### ۳-۲- میزان کلروفیل a و فسفر کل نمونه‌های آب تالاب

مقایسه نمونه‌های سطح تالاب با نمونه‌های طیف‌سنجی شده در جدول ۱ آمده است.

پس از تهیه منحنی بازتاب طیفی نمونه‌های مطالعه شده در دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی متری، میزان تفاوت منحنی‌های هر نمونه در دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی متری - با ثابت بودن مقدار کلروفیل a در هر دو عمق - در طول منحنی طیفی از ۴۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر محاسبه شده است. در بقیه منحنی، آب حاوی کلروفیل a دارای بازتاب نیست و اگر بازتابی دارد به دلیل خطاست، از این رو حذف شده است.

در عمق ۳۰ سانتی متری در مقایسه با عمق ۱۵ سانتی متری میزان میانگین انعکاس طیفی آب در نمونه آب تالاب - که دارای بیشترین مقدار کلروفیل a است - کاهش ۲۰/۵۶ درصدی دارد و در نمونه آب تالاب که دارای کمترین مقدار کلروفیل a است، ۱۰/۱۲ درصد کاهش را نشان می‌دهد. با توجه به این اعداد، میانگین

جدول ۱. مقایسه مقادیر کلروفیل a با فسفر کل در نمونه‌های سطح تالاب و نمونه‌های طیف‌سنجی

فسفر کل (میلی گرم در لیتر)			کلروفیل a (میلی گرم در لیتر)			تعداد نمونه	نمونه‌ها
حداکثر	حداقل	میانگین	حداکثر	حداقل	میانگین		
۰/۲۷	۰/۰۷	۰/۱۸	۴۶/۷۶	۳/۱۱	۲۶/۳۱	۳۹	نمونه‌های سطح تالاب
۰/۱۴	۰/۰۶	۰/۱۰	۲۳/۹	۲/۰۷	۱۱/۹۵	۴۰	نمونه‌های طیف‌سنجی



### ۳-۳- رابطه بین شاخص طیفی سه‌باندی با میزان کلروفیل a

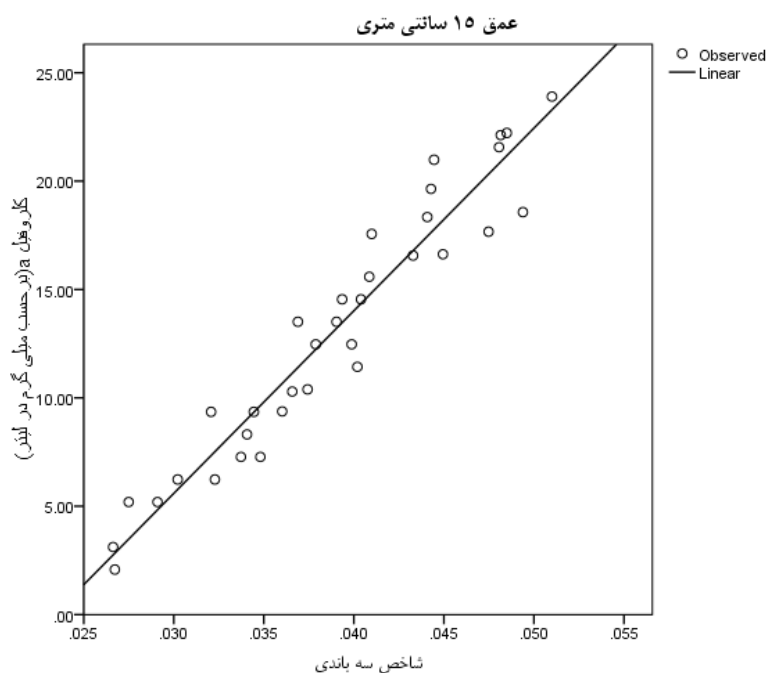
نتایج به‌دست‌آمده از بررسی رابطه شاخص سه‌باندی با میزان کلروفیل a اندازه‌گیری شده برای عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری جداگانه بررسی شدند. ضریب همبستگی به‌دست‌آمده از میزان کلروفیل a در عمق ۱۵ سانتی‌متری با شاخص طیفی سه‌باندی بهترین

برازش‌های مدل را با استفاده از رگرسیون خطی نشان می‌دهد (شکل ۶). بین میزان کلروفیل a و این شاخص طیفی، همبستگی خطی مثبت ۰/۹۶۳ وجود دارد. با توجه به نرمال‌بودن داده‌ها، در این عمق سطح معناداری حاصل از آزمون نشان داده می‌شود. در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنادار است (جدول ۲).

جدول ۲. جدول تجزیه رگرسیون عمق ۱۵ سانتی‌متری شاخص سه‌باندی با میزان کلروفیل a

عمق	نوع رگرسیون	رابطه رگرسیون	R Square	F	سطح معناداری
۱۵ سانتی‌متر	خطی	$Y = -19685 + 842.63 X$	۰/۹۲	۴۱۰/۴۳	<۰/۰۰۱*

\* معنادار در سطح ۱ درصد



شکل ۶. رگرسیون عمق ۱۵ سانتی‌متری شاخص سه‌باندی با میزان کلروفیل a

کلروفیل a مقدار ۰/۷۸۴ را نشان می‌دهد که در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنادار است (جدول ۳).

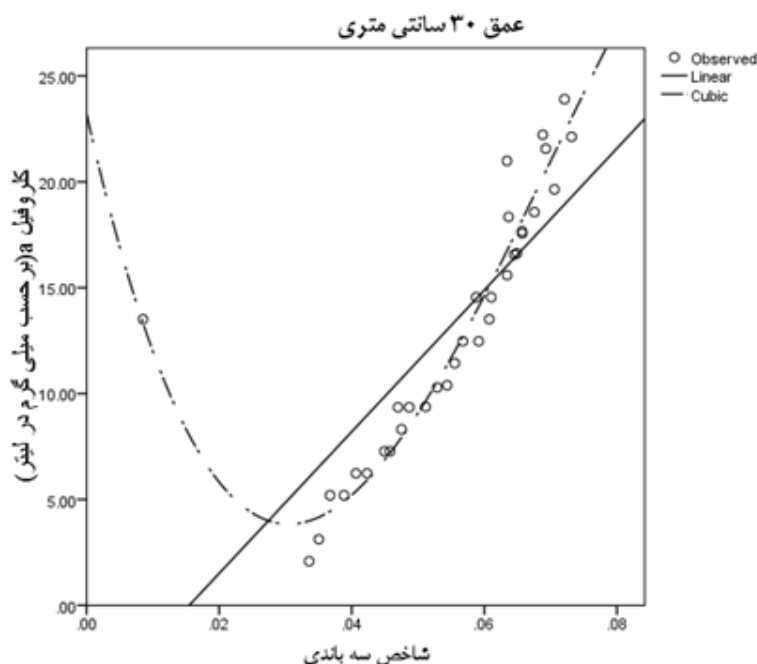
بررسی رگرسیون رابطه این شاخص با میزان کلروفیل a در عمق ۳۰ سانتی‌متری، برازش مدل رگرسیون مرتبه سوم<sup>۱</sup> را بیش از مدل رگرسیون خطی نشان می‌دهد (شکل ۷). با توجه به توزیع نرمال داده‌ها، ضریب همبستگی<sup>۲</sup> رابطه این شاخص طیفی با میزان

1. Cubic
2. Correlation Coefficient

جدول ۳. جدول تجزیه رگرسیون عمق ۳۰ سانتی متری شاخص سه بانندی با میزان کلروفیل a

عمق	نوع رگرسیون	رابطه رگرسیون	R <sup>2</sup>	F	سطح معناداری
۳۰ سانتی متر	خطی	$Y = -5.18 + 334.48 X$	۰/۶۱	۵۰/۹۳	<۰/۰۰۱*
	مرتبه سوم	$Y = 23.20 - 1401.46X + 29418.33 X^2 - 140754X^3$	۰/۹۵	۲۱۰/۱۰	<۰/۰۰۱*

\* معنادار در سطح ۱ درصد



شکل ۷. رگرسیون عمق ۳۰ سانتی متری شاخص سه بانندی با میزان کلروفیل a

رگرسیون مرتبه سوم نشان می‌دهند (شکل ۸). بین میزان فسفر کل و این شاخص طیفی همبستگی مثبت ۰/۹۴ وجود دارد. با توجه به نرمال بودن داده‌ها، در این عمق سطح معناداری حاصل از آزمون t نشان داده می‌شود و مدل فوق در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنادار است (جدول ۴).

### ۳-۴- رابطه رگرسیون شاخص طیفی سه بانندی با میزان فسفر کل

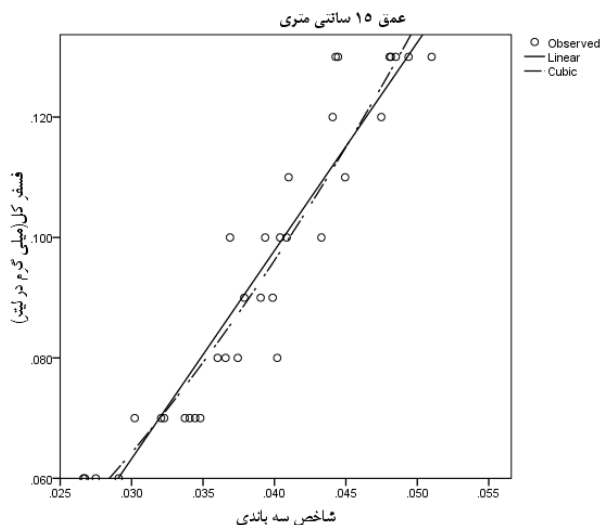
نتایج به دست آمده از بررسی رابطه شاخص دو بانندی با میزان فسفر کل اندازه گیری شده برای عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی متری جداگانه بررسی شدند. ضریب همبستگی فسفر کل عمق ۱۵ سانتی متری با شاخص طیفی دو بانندی، بهترین برازش‌های مدل را با استفاده از

جدول ۴. جدول تجزیه رگرسیون عمق ۱۵ سانتی متری شاخص سه بانندی با فسفر کل

عمق	نوع رگرسیون	رابطه رگرسیون	R <sup>2</sup>	F	سطح معناداری
۱۵ سانتی متر	خطی	$Y = -0.40 + 3.45 X$	۰/۸۹	۲۷۷/۹۴	<۰/۰۰۱*
	مرتبه سوم	$Y = 0.02 X + 52.23X^2 - 125.02X^3$	۰/۹۰	۱۴۷/۰۶	<۰/۰۰۱*

\* معنادار در سطح ۱ درصد

استفاده از الگوریتم سه‌باندی برای تخمین میزان کلروفیل a و فسفر کل در تالاب انزلی



شکل ۸. رگرسیون عمق ۱۵ سانتی‌متری شاخص سه‌باندی با فسفر کل

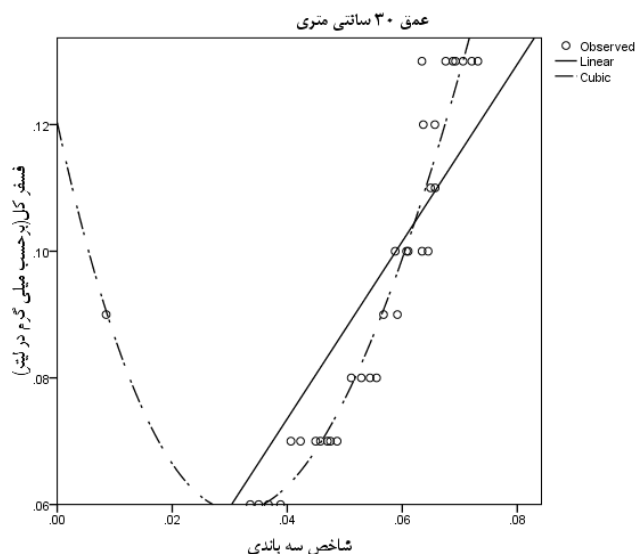
ضریب همبستگی رابطه این شاخص طیفی با میزان فسفر کل، مقدار ۰/۷۸ را نشان می‌دهد و این رابطه در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنادار است (جدول ۵).

بررسی رگرسیون رابطه این شاخص با میزان فسفر کل در عمق ۳۰ سانتی‌متری، برازش مدل رگرسیون مرتبه سوم را بیش از مدل رگرسیون خطی نشان می‌دهد (شکل ۹). با توجه به توزیع نرمال داده‌ها،

جدول ۵. جدول تجزیه رگرسیون عمق ۳۰ سانتی‌متری شاخص سه‌باندی با فسفر کل

عمق	نوع رگرسیون	رابطه رگرسیون	R <sup>2</sup>	F	سطح معناداری
۳۰ سانتی‌متر	خطی	$Y=0.01+1.39 X$	۰/۶۱	۵۱/۵۹	<۰/۰۰۱*
	مرتبه سوم	$Y=0.12-4.13X+76.54 X^2-227.11X^3$	۰/۹۳	۱۴۱/۳۵	<۰/۰۰۱*

\* معنادار در سطح ۱ درصد



شکل ۹. رگرسیون عمق ۳۰ سانتی‌متری شاخص سه‌باندی با فسفر کل

#### ۴- بحث و نتیجه گیری

نتایج داده‌های آزمایشگاهی حاصل از اندازه‌گیری میزان کلروفیل a برای نمونه‌هایی که در سطح تالاب جمع‌آوری شده است، دامنه تغییرات کلروفیل a را بین ۳/۱۱ تا ۴۶/۷۶ میلی‌گرم در لیتر نشان می‌دهد. نمونه‌هایی که حین عمل طیف‌سنجی جمع‌آوری شدند نیز دامنه تغییرات کلروفیل a را بین ۲/۰۷ تا ۲۳/۹ میلی‌گرم در لیتر نشان دادند. با توجه به اینکه دو نمونه بیشینه و کمینه میزان کلروفیل a از یک نقطه تالاب و در فاصله زمانی اندک جمع‌آوری شده‌اند، می‌توان دلیل کم شدن میزان کلروفیل a را در نمونه‌های طیف‌سنجی در مقایسه با نمونه‌های آزمایشگاهی، فاصله زمانی تا هنگام انجام نمونه‌برداری طیفی و تابش نور در زمان نمونه‌برداری طیفی دانست. با این حال، میزان کلروفیل a با استاندارد OECD (OECE, 1982) که در جدول ۶ مشخص شده است، نشان می‌دهد که تالاب در محدوده مزوتروف و یوتروف قرار دارد.

جدول ۶. میزان کلروفیل a با استاندارد OECD

متغیر	اولیگوتروفیک	مزوتروفیک	یوتروفیک
کلروفیل a (Mg/L)	۱/۷	۴/۷	۱۴

منبع: OECE, 1982

در این تحقیق مشاهده می‌شود که منحنی انعکاس طیفی آب کمترین میزان بازتاب طیفی را در محدوده مادون قرمز نزدیک نشان می‌دهد، که بیانگر حداکثر جذب آب در این محدوده است و در آب‌های نوع دوم - یعنی آب‌های گل‌آلود داخل خشکی‌ها - این محدوده بین ۷۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر قرار دارد. وجود کلروفیل در آب اهمیت زیادی دارد و از میان اجزای موجود در آب فقط کلروفیل a در محدوده ۶۵۰ تا ۷۰۰ نانومتر دارای حداکثر جذب است.

در این بررسی تفاوت‌های طیفی مشاهده شده بین نمونه‌های عمق ۱۵ سانتی‌متری با ۳۰ سانتی‌متری در محدوده ۴۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر، بیان‌گر تفاوت‌های ناشی

از تأثیر عمق بر بازتاب طیفی نمونه‌ها هستند. نتایج به دست آمده مبنی بر وجود تفاوت معنادار بین مقادیر مختلف کلروفیل a اندازه‌گیری شده و بازتاب طیفی آنهاست، به طوری که با افزایش میزان کلروفیل a تفاوت‌های بازتاب طیفی در دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری به شدت تغییر می‌کند.

نتیجه پژوهش عبدالرحمن و دیگران (۲۰۱۱) نشان داد که رابطه میزان کلروفیل a با شاخص سه‌باندی در عمق ۱۰ سانتی‌متری بیش از عمق ۳۰ سانتی‌متری است. در این تحقیق نیز این رابطه برای عمق ۱۵ سانتی‌متری قوی‌تر از عمق ۳۰ سانتی‌متری است. در این مطالعه، حداکثر حساسیت به جذب ذرات کلروفیل a در طول موج ۶۸۰ نانومتر و حداقل حساسیت به انعکاس کلروفیل a در طول ۷۰۰ نانومتر است. برای محاسبه شاخص سه‌باندی از باند جذبی آب در محدوده طول موج مادون قرمز نزدیک به منظور نرمال کردن استفاده شد و  $\lambda_p$  برابر با ۷۵۷ نانومتر در نظر گرفته شد.

همچنین نتایج بیان می‌کنند که رابطه میزان کلروفیل a با شاخص سه‌باندی در عمق ۱۵ سانتی‌متری از نوع خطی بود و برای هر نقطه تالاب با داشتن میزان شاخص سه‌باندی می‌توان در عمق ۱۵ سانتی‌متری به میزان کلروفیل a در آن نقطه دست یافت. در عمق ۳۰ سانتی‌متری نیز این رابطه خطی وجود دارد ولی برازش مدل رگرسیون مرتبه سوم بیش از مدل خطی است و می‌توان به مقدار کلروفیل a دست یافت و میزان یوتریفیکاسیون تالاب را تعیین کرد. با توجه به نتایج پژوهش حاضر، میزان فسفر کل با مقدار حاصل از شاخص سه‌باندی رابطه دارد و مقدار آن در عمق ۱۵ سانتی‌متری قوی‌تر از عمق ۳۰ سانتی‌متری است. در عمق ۱۵ سانتی‌متری از میان برازش مدل‌های مختلف، مدل مرتبه سوم بهترین برازش را داشت و می‌تواند میزان فسفر کل را برآورد کند. این بررسی نشان می‌دهد که در عمق ۳۰ سانتی‌متری نیز همانند عمق ۱۵ سانتی‌متری برازش مدل از نوع مرتبه سوم بیش از سایر مدل‌هاست و فسفر کل را تخمین می‌زند.

۵- منابع

- Abd- Elrahman, A., Croxton, M., Pande- Chettri, R., Toor, G.S., Smith, S., Hill, J., 2011, **In Situ Estimation of Water Quality Parameters in Freshwater Aquaculture Ponds Using Hyper Spectral Imaging System**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66, PP. 463- 472.
- Carder, K.L., Steward, R.G., 1985, **A Remote-Sensing Reflectance Model of a Red-Tide Dinoflagellate of West Florida**, Limnology and Oceanography, 30, PP. 286-298
- Darvishsefat, A.A., Jamalzadeh, F., Nezami Baluchi, Sh., 1999, **Investigation of Trophic State of Anzali Lagoon Using GIS**, Environmental Study Journal, 23, PP. 1-10.
- Dekker, A.G., Zamurovic-Nead, Z., Hoogenboom, H.J., Peters, S.W.M., 1996, **Remote Sensing, Ecological Water Quality Modeling and In Situ Measurements: A Case Study in Shallow Lakes**, Hydrological Sciences, 41(4), PP. 531-547.
- Gitelson, A., 1992, **The Peak near 700 nm on Radiance Spectra of Algae and Water: Relationships of Its Magnitude and Position with Chlorophyll Concentration**, International Journal of Remote Sensing, 13, PP. 3367-3373.
- Gitelson, A.A., Gritz, U., Merzlyak, M.N., 2003, **Relationships between Leaf Chlorophyll Content and Spectral Reflectance and Algorithms for non-Destructive Chlorophyll Assessment in Higher Plant Leaves**, Plant Physiology Journal, 160, PP. 271-282.
- Gordon, H.R., 1979, **Atmospheric Correction of Ocean Color Imagery in the Earth Observing System Area**, Journal of Geophysical Research, 102, PP. 17-81.
- Jerlov, N.G., 1976, **Marine Optics**, 2nd Edition: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Kiabi, H.B., Majnoonian H., Gashtasb M.H., Mansoori, G., 2004, **Suggested Standards for Evaluate the Protection State of Iran Wetlands**, Environmental Study Journal, 33, PP. 74-89
- Kimball, K.D., Kimball, S.F., 1974, **The Limnology of Anzali Wetland, Iran; A Study of Eutrophication Problems**, Iranian Department of the Environment, Human Environment Division, Technical Report, Bander Anzali, Iran, 43p.
- Prieur, L., Morel, A., 1977, **Analysis of Variations in Ocean Color**, Limnology and Oceanography, 22, PP. 709-722.
- Neville, R.A., Gower, J.F.R., 1977, **Passive Remote Sensing of Phytoplankton via Chlorophyll-Fluorescence**, Journal of Geophysical Research, 82, PP. 3487-3493.
- OECE., 1982, **Eutrophication of Water Monitoring and Assessment**.
- Parson, T.R., Maita, Y., Lalli, C.M., 1992, **A Manual of Chemical and Biological Methods for Sea Water**, Pergman Press.

Richardson, L.L., Ledrew, E. F., 2006, **Remote Sensing of Aquatic Coastal Ecosystem Processes**, Springer-Verlag.

Rundquist, D.C., Schalles, J.F., Peake, J.S., 1995, **The Response of Volume Reflectance to Manipulated Algal Concentrations Above Bright and Dark Bottoms at Various Depths in an Experimental Pool**, Geocarto International, 10, PP. 5-14.

Schalles, J.F., Gitelson., A.A., Yacobi, Y.Z., Kroenke, A.E., 1998, **Estimation of Chlorophyll a from Time Series Measurements of High Spectral Resolution Reflectance in an Eutrophic Lake**, Journal of Phycology, 34, PP. 383-390.

[www.asdi.com](http://www.asdi.com)