



استفاده از داده‌های طیف‌نگاری زمینی جهت تخمین میزان یوتروفیکاسیون

آب‌های داخل خشکی‌ها (مطالعه موردی: تالاب آنزلی)

آزاده کاظمی^{۱*}، حمید رضا جعفری^۲، علی ترابیان^۲ و علی اکبر متکان^۳

^۱ استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اراک

^۲ استاد گروه مدیریت و برنامه‌ریزی، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران

^۳ دانشیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ پذیرش: ۹۳/۶/۵

تاریخ دریافت: ۹۲/۳/۲۰

Estimating Eutrophication of Inland Waters Using Field Spectrometry Data (Case Study: Anzali Wetland)

Azadeh kazemi,^{1*} Hamid Reza Jafari,² Ali Torabian² & Ali Akbar Matkan³

¹Assistant Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Arak

²Professor, Department of Environmental Management, Faculty of Environment, University of Tehran

³Associate Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Earth Science, University of Shahid Beheshti

Abstract

Remote sensing system, especially hyperspectral remote sensing require fundamental knowledge of spectral reflectance of chlorophyll a (chl a) for recognizing eutrophication of inland waters. The first objective of this study was to prepare and investigate the significant differences between the spectral signature of water samples with different amount of chlorophyll a (chl a) of Anzali wetland in 15 cm depth. This was carried out using a full range spectrometer during the spring 2013. The second objective of this study was to discriminate the spectral signature of water samples with different amount of chlorophyll a (chl a) of Anzali wetland in 30 cm depth. A total of 500 water sample spectral curves of illuminated and shaded samples were acquired of 80 water samples with different amount of chlorophyll between 2.07 and 23.9 mg/l. Following the measurements, chlorophyll and total phosphorus of the samples were extracted in laboratory. One important index related to chlorophyll a of water was calculated and statistically analyzed. We conclude that band ratio model in 15 cm depth of water samples has the most relation with chlorophyll a content in comparison with the other indices. This result has been proved by statistical results obtained by chlorophyll and total phosphorus data in lab.

Keywords: Band ratio index, chlorophyll a (chl a), Inland water, Total phosphorus, reflectance.

چکیده

داده‌های طیفی یک دانش بنیادین جهت مطالعه میزان کلروفیل a برای تشخیص میزان یوتروفیکاسیون آب‌های داخل خشکی‌ها از قبیل رودخانه‌ها، تالاب‌ها، دریاچه‌ها و غیره محسوب می‌شود. مهم‌ترین مزیت استفاده از داده‌های طیفی تشخیص بهترین شاخص‌های طیفی جهت مطالعه می‌باشد. شاخص طیفی با استفاده از بازتابندگی طیفی آب‌های داخل خشکی‌ها نظیر آب تالاب‌ها در طول موج متأثر از میزان کلروفیل a جهت تخمین میزان یوتروفیکاسیون آب‌های داخل خشکی‌ها به کار برده می‌شوند. از این‌رو استفاده از شاخص‌های طیفی می‌تواند در بیان علت تفاوت طیفی نمونه‌ها با توجه به ارتباط قوی شاخص طیفی با متغیر مورد نظر، نقش مؤثری داشته باشد. از جمله شاخص‌های طیفی که در مطالعات آب‌ها به خصوص تخمین میزان کلروفیل a مورد استفاده قرار گرفته است می‌توان به الگوریتم دو باندی (نسبت باندی) اشاره نمود. بر اساس نتایج به دست آمده در بررسی رابطه مقدار کلروفیل a با شاخص نسبت باندی رابطه قوی بین مقدار این شاخص با مقدار کلروفیل a در دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی متری مشاهده گردید. البته این رابطه در عمق ۱۵ سانتی متری به شکل قوی‌تری می‌باشد. در این تحقیق از دو طول موج ۷۰۰ و ۶۸۰ نانومتر جهت محاسبه شاخص نسبت باندی استفاده شده است با توجه به مطالعه منحنی بازتابندگی طیفی نمونه‌های آب حداکثر حساسیت به جذب ذرات کلروفیل a در طول موج ۶۸۰ نانومتر وجود دارد و حداقل حساسیت به بازتابندگی کلروفیل a در طول ۷۰۰ نانومتر می‌باشد. در این تحقیق رابطه بین فسفر کل با میزان شاخص دوباندی نیز بررسی گردید که همانند میزان کلروفیل a در عمق ۱۵ سانتی متری رابطه قوی‌تری نسبت به عمق ۳۰ سانتی متری نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: الگوریتم نسبت باندی، طیف سنجی، کلروفیل a، فسفر کل، بازتابندگی طیفی، آب‌های داخل خشکی‌ها.

* Corresponding author. E-mail Address: a_kazemi@ut.ac.ir

۱- مقدمه

فرآیند تجربی و آزمایشگاهی و نسبی است. یکی دیگر از روش‌ها مدل‌سازی ریاضی پارامترهای کیفیت آب است که نیازمند فرضیات مدل و داده‌های ورودی معنی داری است که امکان تخمین را در مقیاس‌های کوچک و محلی فراهم می‌کند درحالی‌که در مدل‌سازی به کمک تکنیک‌سنجش از دور از خصوصیات نوری آب استفاده می‌شود [۵]. مطالعات زیادی جهت توسعه مدل‌سازی خصوصیات نوری آب‌های طبیعی صورت گرفته است و بطور کلی ویژگی‌های نوری آنها طبقه‌بندی شده است به: (۱) خصوصیات نوری آب‌های آزاد اقیانوس‌ها و (۲) خصوصیات نوری آب‌های داخل خشکیها شامل رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و تالاب‌ها و غیره [۶، ۷، ۸]. تاکنون دانشمندان در چندین محیط خاص موفق به استخراج اطلاعات مربوط به رابطه میزان کلروفیل a و بازتابندگی طیفی $R(\lambda)$ شده‌اند [۹].

این ارتباط در مورد گیاهان وابسته به مقدار نسبت باندی مادون قرمز نزدیک به قرمز می‌باشد. دلیل این امر خاصیت جذب انرژی نور قرمز توسط رنگدانه‌های موجود در کلروفیل، که باعث می‌گردد گیاهان انعکاس کمتری در این باند داشته باشند و انعکاس شدید گیاهان در بخش مادون قرمز طیف الکترومغناطیس است. به دلیل جذب انرژی نور آبی در فیتوپلانکتون‌ها و بازتاب آن‌ها در محدوده نور سبز در آب‌های نوع اول یعنی اقیانوس‌ها و آب‌های دریا‌های آزاد از نسبت سبز به آبی برای مطالعه آنها استفاده می‌شده است [۱۰، ۱۱]. به دلیل خصوصیات فیتوپلانکتون‌ها و نیز شرایط خاص آب‌های نوع دوم از نظر عمق و میزان گل‌آلودگی، منحنی بازتاب طیفی آن‌ها با آب‌های نوع اول همانند نیست در نتیجه از این نسبت باندی در این نوع آب‌ها نمی‌توان استفاده کرد بنابراین Gitelson و Kondrtyor [۱۲] طی مطالعه‌ای نسبت باندی مادون قرمز نزدیک به قرمز را از سایر نسبت‌ها مناسب‌تر دیدند. دلیل این امر این است که کلروفیل a در این طول موج‌ها به ترتیب دارای حداکثر انعکاس و جذب است. در نتیجه این نسبت باندی در آب‌های تغذیه‌گرا مورد استفاده قرار گرفت.

گونز [۱۳] برای آبی با میزان کلروفیل a بین ۳ تا ۱۸۵ میلی‌گرم در لیتر از نسبت باندی ۷۰۴ به ۶۷۲ نانومتر را استفاده نمود. تایمن و کافمن [۱۴] از باند ۶۷۸ نانومتر به عنوان حداکثر جذب و باند ۷۰۵ نانومتر معرف بیش‌ترین میزان بازتابندگی جهت تخمین میزان کلروفیل a

در بین اکوسیستم‌های آبی موجود در کره زمین آب‌های داخل خشکی‌ها به خصوص تالاب‌ها دارای ارزش و اهمیت ویژه‌ای می‌باشند. عوامل مختلفی همچون استفاده بی‌رویه از آب آن‌ها، زه‌کشی و خشک کردن تالاب‌ها و تبدیل آن‌ها به اراضی کشاورزی و آلوده نمودن آب‌های داخل خشکی‌ها مخصوصاً تالاب‌ها از موارد قابل توجه و مخاطره‌آمیزی است که در سال‌های اخیر به تالاب‌ها آسیب جدی وارد نموده است. در بین عوامل تهدیدکننده حیات تالاب‌ها یکی از مهم‌ترین عوامل، پدیده یوتریفیکاسیون یا غنی شدن محیط تالاب‌ها از مواد مغذی و در نتیجه افزایش تولید گیاهی می‌باشد. گستردگی حوزه آبخیز و تنوع کاربری در حوزه موجب وارد شدن بارهای آلی و غیر آلی زیادی به این محیط‌ها شده و تشدید فرایند یوتریفیکاسیون و بروز مشکلات جدی در آنها را سبب می‌شود. در حال حاضر منابع آلوده‌کننده متعددی در بخش‌های صنعتی، کشاورزی و فاضلاب شهری وجود دارند که این اکوسیستم‌ها را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند. توسعه جوامع بشری افزایش ورود مواد آلی کربنی، نیتروژن و فسفر را به این اکوسیستم‌ها دربرداشته که روند یوتریفیکاسیون را تسریع کرده است. معیارهای طبقه‌بندی تروفیکی پیکره‌های آبی بسیار متنوع بوده و عوامل اکسیژن محلول، فسفر و نیتروژن، تعداد پلانکتون‌ها و شاخه‌های پلانکتونی، کلروفیل a و شفافیت، اصلی‌ترین آنها به‌شمار می‌روند. در بین معیارهای فوق پارامترهای اصلی کیفیت آب کلروفیل نوع a ، نیتروژن کل و فسفر کل می‌باشد. این پارامترها به طور گسترده‌ای جهت تخمین اثرات انسانی بر روی کیفیت آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. کلروفیل a شاخصی است برای بیومس جلبکی محیط‌های آبی که به مقدار فسفر و نیتروژن موجود در آب بستگی دارد [۱]. رابطه داخلی کلروفیل a و فسفر و نیتروژن طی چندین دهه گذشته مورد مطالعه قرار گرفته است [۲]. این روابط پیشنهاد می‌کند که پتانسیل مورد نیاز کلروفیل a توسط نیتروژن و فسفر برآورد می‌گردد. سه روش متداول برای برآورد کلروفیل a وجود دارد: نمونه‌برداری، مدل‌سازی ریاضی و سنجش از دور [۴]. در نمونه‌برداری که یکی از روش‌های بسیار متداول برای جمع‌آوری داده برای برآورد سلامت پیکره‌های آبی کوچک می‌باشد، جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل نمونه‌های آب یک

ورود رسوب به داخل تالاب و وجود پایه های راه ارتباطی که قرار بود از تالاب عبور کند و فعلاً جلوی آن گرفته شده است از دیگر عوامل تخریب این تالاب می باشد لذا در این تحقیق این تالاب به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب گردیده است.

۲- مواد روش ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

تالاب انزلی در استان گیلان و در کنار دریای خزر در امتداد شمال غربی و جنوب شرقی قرار دارد که مختصات در گوشه شمال غرب آن در سیستم UTM، $X=348000$ و $Y=4171000$ و برای گوشه جنوب غرب $X=372000$ و $Y=4126000$ این تالاب مهم ترین و اصلی ترین جاذبه طبیعت گردی شهرستان بندر انزلی محسوب می شود. مساحت تالاب طی سالیان متمادی تغییرات زیادی کرده است و به طوری که در سال ۱۳۴۵ مساحت آن ۲۱۸ کیلومتر مربع [۱۸] و در سال ۱۳۶۸ مساحت تالاب ۶۰ کیلومتر مربع بوده است.

تالاب انزلی از جانب شمال به دریای خزر از طریق یک دهانه ارتباط دارد. از شرق به منطقه پیربازار از غرب به کپرچال و آبکنار، از طرف جنوب به صومعه سرا و قسمتی از رشت محدود می گردد. محدوده آبی این تالاب دارای چهار بخش یا حوضچه اصلی به شرح زیر است: تالاب ماهروزه که سابقاً به نام خلیج کپورچال نامیده می شد. این بخش عمیق ترین و پرآب ترین قسمت تالاب را تشکیل می دهد به طوری که در نقاط مرکزی خود فاقد پوشش گیاهی است و عمق آب در این ناحیه به ۳ متر نیز می رسد. تالاب سیاه کشیم در جنوب غربی، عمق متوسط آن حدود یک متر بوده و این بخش تالاب حدود ۲۰ درصد بار رسوبی و ۵۰ درصد بار آلودگی را در خود می پذیرد. تالاب شیجان در شرق کم عمق ترین قسمت تالاب است عمق آن بین ۰/۸ تا ۱/۵ متر متغیر است. پس آب های کشاورزی، صنعتی و شهری در این بخش نسبت به سایر بخش ها سهم زیادی (بیش از ۷۰ درصد) را در ایجاد آلودگی تالاب دارند و در نهایت بخش مرکزی که محل الحاق آب قسمت های مختلف تالاب و هدایت آن به سمت دریای خزر است. حدود ۱۵ درصد بار آلودگی و ۲۵ درصد بار رسوبی تالاب به بخش مرکزی حمل می گردد [۱۸].

به کار بردند. رودیک و همکاران [۱۵] نسبت باندی ۷۰۴ به ۶۷۲ نانومتر را استفاده نمودند. زیمبا و گیتلسون [۱۶] نسبت باندی نسبت باند ۷۱۴ به ۶۵۰ نانومتر را در عمق ثابت ۲/۵ متر و با میزان کلروفیل a بین ۱۰۷ تا ۳۰۰۰ میلی گرم در لیتر استفاده نمودند. گیتلسون و همکاران [۱۷] از نسبت باند ۷۲۹ به ۶۷۰ نانومتر جهت مطالعه خود استفاده نمودند.

در بین تالاب های ایران تالاب انزلی پنجمین تالابی است که دارای ارزش وافری از جنبه های مختلف اکولوژیکی، اقتصادی، توریسم و غیره می باشد. این تالاب از نظر معیار ماهی و نیز میزان آلودگی فاضلاب صنعتی و کشاورزی در رتبه اول تالاب های ایران قرار دارد لذا یوتریفیکاسیون در این تالاب بیش از تمام تالاب های ایران اثرگذار می باشد و تبعات خود را در کاهش تنوع آبزیان و ماهی ها در معیار ماهی به خوبی نشان داده است. در خصوص آلودگی تالاب انزلی با یک نظر اجمالی می توان دریافت که این تالاب به لحاظ قرار گرفتن در یک منطقه پر جمعیت، انواع گوناگون مواد آلی از طریق رودخانه های منتهی به تالاب دریافت می کند. شهرهای رشت و انزلی به ترتیب اولین و دومین شهر بزرگ استان از لحاظ جمعیت محسوب می شوند. رشد فزاینده جمعیت این دو شهرستان که تقریباً نیمی از جمعیت شهری استان را در خود جای داده اند بر اکوسیستم تالاب اثر سوء داشته است. به علت بالا بودن سطح آب های زیرزمینی شهر رشت فاضلاب های خانگی و شهری مستقیماً به رودخانه های زرجوب و گوهر رود و در بندر انزلی به تالاب تخلیه می شود روزانه بیش از ۴۰۰ تن زباله مربوط به شهرستان های رشت، خممام و کوچصفهان به رودخانه سیاهرود وارد می شود و استقرار کارخانه های مختلف در حومه شهر رشت و انزلی و سرآزیر شدن فاضلاب آن ها به داخل رودخانه ها، در نهایت باعث آلودگی آب تالاب می شود تالاب انزلی در نتیجه ریزش فاضلاب های صنعتی و شهری و تخلیه آب آلوده مزارع در معرض خطر نابودی قرار گرفته است. از جمله آلوده ترین رودخانه های حوزه آبریز تالاب، رودخانه های سیاهرود و گوهر رود می باشند که از قسمت جنوب شهرستان رشت واقع در استان گیلان سرچشمه گرفته و پس از عبور از سطح رشت در روستای پیربازار به بخش جنوب شرقی تالاب می ریزند. ورود رو به افزایش فاضلاب های صنعتی و کشاورزی به تالاب، تخریب جنگل های بالادست و افزایش

۲-۲- نمونه‌برداری زمینی

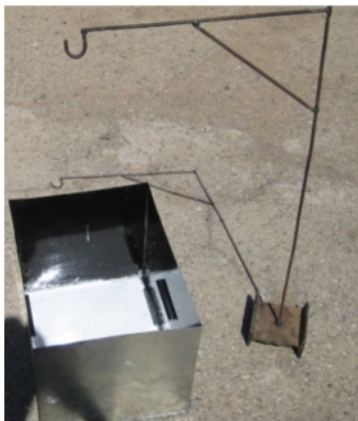
شرایط محیط‌های آبی به‌گونه‌ای است که تا چندین متر تغییرات میزان مواد موجود در آب از جمله میزان کلروفیل a ثابت بوده و تغییر نمی‌کند بنابراین افزایش تعداد نمونه مقادیر مشابهی از نظر کلروفیل a را نشان می‌دهد. در این تحقیق ابتدا مرز تالاب در محدوده خشک و باتلاقی و در بخش دیگر، محدوده آبی آن از روی تصویر ماهواره Spot (۲۰۰۹) مشخص گردید. سپس نقشه تهیه شده شبکه‌بندی شد به طوری که ابعاد هر سلول شبکه ۱۵۰۰ در ۱۵۰۰ متر می‌باشد. با توجه به این که امکان دسترسی به نقاط نمونه‌برداری به دلیل شرایط باتلاقی در حاشیه تالاب و جایی که عمق تالاب کم است وجود ندارد بنابراین امکان نمونه‌برداری از مرکز تمام شبکه‌ها وجود نداشت لذا سعی شد از داخل هر شبکه یک نمونه جمع‌آوری شود (لازم به ذکر است تعداد بیشتری نمونه از داخل محدوده‌ای که میزان کلروفیل a بیشتر به نظر می‌آمد جمع‌آوری شد بنابراین تعداد نمونه‌ها در این محل‌ها افزایش یافته است). از آن جایی که برای نمونه‌برداری طیفی نیاز به دانستن نقاطی داشتیم که بیش‌ترین مقدار و کم‌ترین مقدار کلروفیل a را داشتند نخست تعداد ۳۹ نمونه از کل محدوده آبی تالاب و دهانه رودخانه پیر بازار 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 (شکل ۱).

از شبکه‌ای که بار نخست نمونه‌برداری بیش‌ترین مقدار کلروفیل a را نشان داده بود، در مرحله دوم نمونه‌برداری علاوه بر نمونه یک لیتری، هم‌زمان ۴۰ لیتر نمونه از عمق ۳۰ سانتی‌متری برداشته شد. همین‌طور در شبکه‌ای که در مرحله اول نمونه‌برداری کم‌ترین مقدار کلروفیل a را نشان داده بود از عمق ۱۵ سانتی‌متری ۴۰ لیتر آب جمع‌آوری گردید.

بیش‌ترین میزان کلروفیل a در فصل پاییز و بهار می‌باشد، بنابراین زمان نمونه‌برداری بهار انتخاب گردید و در اواخر اردیبهشت ماه ۱۳۹۱ نمونه‌برداری صورت گرفت.

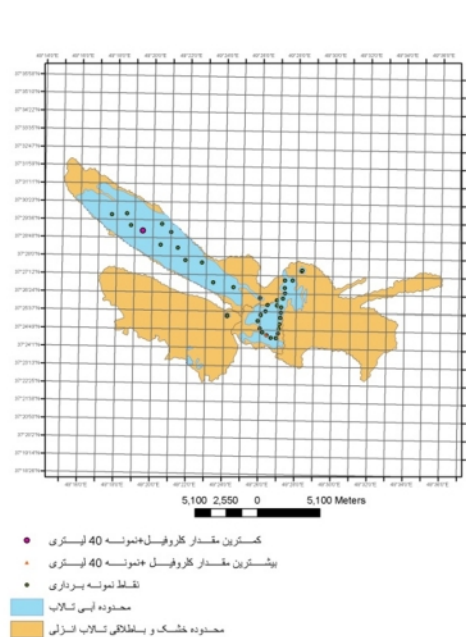
۲-۳- نمونه‌برداری طیفی

برای نمونه‌برداری طیفی از ظرفی با حجم ۴۰ لیتر، که دیواره‌های آن به رنگ سیاه و کف آن به رنگ سفید بود (شکل ۲) استفاده گردید.



شکل ۲- مکعب ساخته شده جهت نمونه‌برداری طیفی

جهت نمونه‌برداری طیفی ابتدا ۴۰ لیتر از آب تالاب که کم‌ترین مقدار کلروفیل a را نشان داده بود در داخل ظرف ساخته شده ریخته و در عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری با دستگاه طیف‌سنج منحنی طیفی آن‌ها برای نمونه اول ثبت گردید. سپس از آب داخل ظرف ساخته شده برای نمونه‌برداری طیفی یک لیتر آب با کم‌ترین مقدار کلروفیل a در بطری کدر یک لیتری جمع‌آوری و بلافاصله در جای خنک قرار داده شد. سپس برای نمونه دوم از ظرفی که حاوی ۴۰ لیتر آب تالاب با بیش‌ترین مقدار کلروفیل a بود، یک لیتر آب به داخل ظرف ساخته شده برای نمونه‌برداری طیفی ریخته شد و در واقع ۴۰ لیتر آب در این قسمت ثابت مانده و تنها مقدار کلروفیل a آن افزایش یافته است.



شکل ۱- محل جمع‌آوری نمونه‌ها

۲-۵- اندازه‌گیری کلروفیل a و فسفر کل

در بین انواع روش‌هایی که برای اندازه‌گیری کلروفیل a وجود دارد ما از روش استاندارد اندازه‌گیری کلروفیل a [۲۱] استفاده می‌کنیم.

۲-۶- تحلیل‌های آماری: آنالیز رگرسیون

در بررسی حساسیت شاخص‌های طیفی مورد مطالعه در رابطه با کلروفیل a، ارتباط خطی و غیرخطی مقدار شاخص‌های طیفی محاسبه شده با میزان کلروفیل a ورد مطالعه قرار گرفت. در بررسی این رابطه می‌بایست معنی‌دار بودن ضریب همبستگی بدست آمده بررسی گردد. در این تحقیق برای آزمون معنادار بودن از محاسبه t استیودنت استفاده شده است. از این رو با استفاده از رابطه زیر t محاسبه شده و سپس با t جدول براساس درجه آزادی n-2 و سطح خطای ۰/۰۱ و ۰/۰۵ مقایسه می‌شود.

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad (۳)$$

t: ضریب همبستگی n: تعداد نمونه‌ها

۳- نتایج و بحث

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

شکل ۳ نمونه‌ای از منحنی‌های طیفی حاصل از میانگین صد اسکن مربوط به هر تکرار از عملیات طیف‌سنجی و خروجی دستگاه طیف‌سنج را نشان می‌دهد. کیفیت خوب دستگاه مورد استفاده و پایداری نسبی شرایط محیطی موجب ایجاد منحنی‌های بدون خطا و قابل قبول شده است. منحنی‌های بازتابندگی طیفی در طول موج حدود ۱۴۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۵۰۰ نانومتر متأثر از حساسیت شناخته شده این طول موج‌ها به بخار آب می‌باشد. شکل ۴ میزان انحراف معیار بازتابندگی‌های اندازه‌گیری شده در طول موج‌های مختلف مربوط به عمق ۱۵ سانتی‌متری کلیه نمونه‌های اندازه‌گیری شده را به صورت یک نمونه نشان می‌دهد. بر اساس این شکل تنها در دامنه طول موج‌های جذب آب میزان انحراف معیار بازتابندگی‌ها بسیار زیاد بوده که بیان‌گر خطای شدید است. همچنین خطای احتمالی ناشی از کالیبراسیون دستگاه که معمولاً در طول موج ۱۰۰۰ نانومتر رخ می‌دهد، دیده نمی‌شود. دامنه‌های طول موج‌هایی که داده‌های آن‌ها به دلیل خطای شان حذف شدند در تمامی گونه‌ها یک‌سان

پس از اندازه‌گیری بازتابندگی طیفی و ثبت آن توسط دستگاه طیف‌سنج در دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری جهت اندازه‌گیری آزمایشگاهی نمونه آب یک لیتری از ظرف ساخته شده برای نمونه‌برداری طیفی برداشته شد و در جای خنک جهت انتقال به آزمایشگاه نگهداری گردید. به این ترتیب تا اتمام مقدار آب ۴۰ لیتری تالاب که حاوی بیش‌ترین مقدار کلروفیل a بود این کار ادامه داشت به این ترتیب تعداد ۸۰ نمونه طیفی (۴۰ نمونه در عمق ۱۵ سانتی‌متری و ۴۰ نمونه در عمق ۳۰ سانتی‌متری) و ۴۰ نمونه آزمایشگاهی جمع‌آوری گردید.

۲-۴- شاخص طیفی نسبت بانندی (دوباندی)

ذرات فتوسنتز کننده کلروفیل a شاخصی از بیومس و تولید اکوسیستم‌های آبی و خاکی هستند. سنجش از دور کلروفیل a امکان بررسی مستمر اکوسیستم‌ها را در یک سطح وسیع ولی با هزینه‌ای کم فراهم می‌کند. سنجنده‌های فضایی و هوایی می‌توانند بازتابندگی نور خورشید را برای هر محیطی اعم از پیکره‌های آبی یا گیاهان روی زمین آشکار سازند. به صورتی که این بازتابندگی به صورت $R(\lambda)$ بیان می‌شود و λ طول موج مورد نظر می‌باشد [۱۹]. رابطه بین $R(\lambda)$ و میزان ترکیبات موجود در محیط‌های مختلف آبی و خاکی به وسیله خصوصیات نوری، ضریب جذب a_λ و ضریب پخش b_λ تمام ترکیبات با نور در آن محیط‌ها بیان می‌شود [۲۰].

$$R(\lambda) = f \frac{b(\lambda)}{a(\lambda)} \quad (۱)$$

در مورد استفاده از این شاخص برای محیط‌های آبی جهت تخمین میزان کلروفیل a این نسبت بانندی به صورت زیر تعریف و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\text{نسبت بانندی} = \frac{R(\lambda_2)}{R(\lambda_1)} \quad (۲)$$

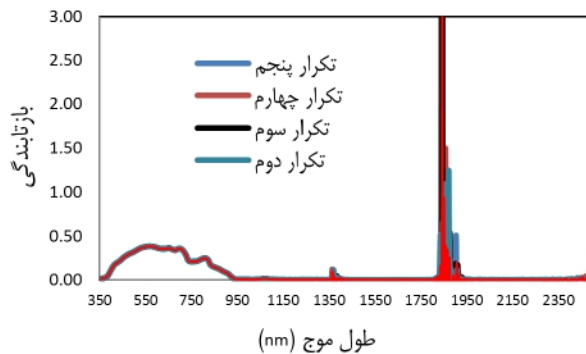
λ_1 : ناحیه‌ای از منحنی بازتابندگی طیفی می‌باشد که $R(\lambda_1)$ حداکثر حساسیت را به جذب انرژی توسط ذرات کلروفیل a وجود دارد (بین ۶۵۰ تا ۷۰۰ نانومتر).

λ_2 : ناحیه‌ای از طیف می‌باشد که $R(\lambda_2)$ حداقل حساسیت را به بازتابندگی کلروفیل a دارد (بین ۷۰۰ تا ۷۵۰ نانومتر).

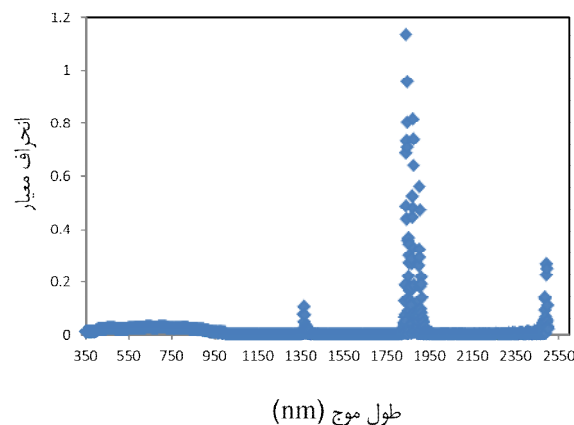
در مطالعات مختلف میزان λ_1 و λ_2 متفاوت می‌باشد. بسته به میزان کلروفیل a در آب‌های مختلف این مقادیر طول موج‌ها تغییر می‌کند.

گردید. این چنین منحنی‌های طیفی که معرف رفتار طیفی هستند به‌عنوان اثر انگشت طیفی^۲ شناخته می‌شوند و به‌عنوان کتابخانه طیفی آب با مقادیر مختلف کلروفیل a به بخش کتابخانه طیفی نرم افزار تحلیل داده‌های ابر طیفی ENVI انتقال داده شد. از داده‌های این منحنی‌های طیفی برای انجام تجزیه و تحلیل‌های آماری و بررسی معنی‌دار بودن تفاوت طیفی نمونه‌های آب تالاب استفاده گردید.

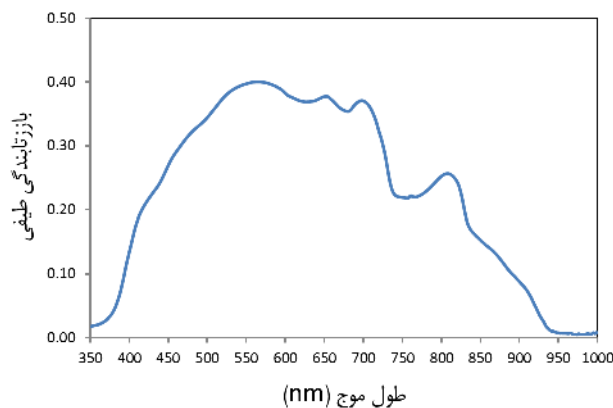
بوده است (۱۳۴۰ تا ۱۴۵۰، ۱۸۰۰ تا ۲۰۲۰ و ۲۳۸۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر). شکل ۵ نشان‌دهنده منحنی بازتابندگی طیفی یک نمونه آب تالاب پس از حذف بازتابندگی‌های دارای خطا می‌باشد. بدین ترتیب منحنی‌های نهایی بازتابندگی طیفی نمونه‌های آب تالاب با مقادیر مختلف کلروفیل a در دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری پس از پیش پردازش و حذف خطا، از ۵ تکرار آن‌ها میانگین‌گیری



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



شکل ۴- انحراف معیار انعکاس‌های طیفی اندازه‌گیری شده برای تمامی طول موج‌ها



شکل ۵- منحنی بازتابندگی طیفی یک نمونه پس از حذف بازتابندگی‌های دارای خطا

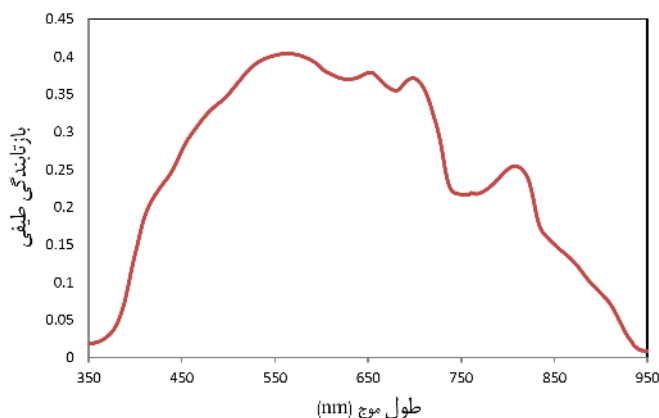
طیفی در نمونه‌ای که بیش‌ترین مقدار کلروفیل a را دارد نسبت به نمونه‌ای که کم‌ترین مقدار کلروفیل a را دارد افزایش ۱۰/۴۵ درصد را نشان می‌دهد. همچنین در نمونه آب دارای کم‌ترین مقدار کلروفیل a در هر دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری حداکثر بازتابندگی طیفی مربوط به طول موج نور سبز ۰/۵ تا ۰/۶ نانومتر و برای نمونه آب با بیش‌ترین مقدار کلروفیل a در طول موج ۷۰۰ نانومتر می‌باشد (شکل ۶ و ۷).

۳-۲- رابطه رگرسیون شاخص طیفی نسبت بانندی (دو بانندی) با میزان کلروفیل a

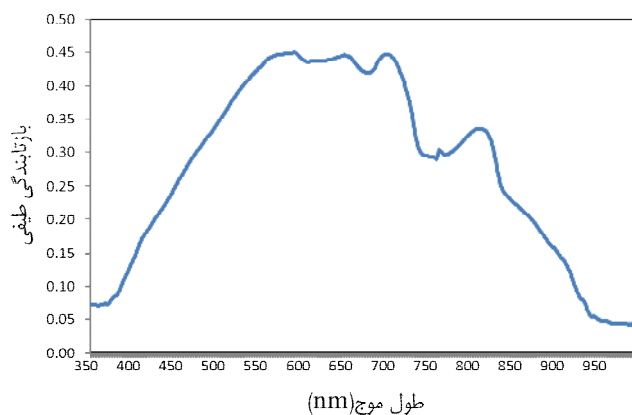
براساس نتایج به‌دست آمده از رابطه شاخص دو بانندی با میزان کلروفیل a اندازه‌گیری شده برای عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری به‌طور جداگانه بررسی شد. ضریب همبستگی به‌دست آمده در رابطه با کلروفیل a عمق ۱۵ سانتی‌متری با

پس از تهیه منحنی بازتابندگی طیفی نمونه‌های مورد مطالعه در دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری میزان تفاوت منحنی‌های هر نمونه در دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری در حالی که مقدار کلروفیل a در هر دو عمق ثابت می‌باشد، در طول منحنی طیفی از ۴۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر، محاسبه شده است. زیرا در بقیه منحنی آب حاوی کلروفیل a دارای بازتابندگی نمی‌باشد و اگر بازتابندگی دارد به‌دلیل خطا می‌باشد که حذف شده است.

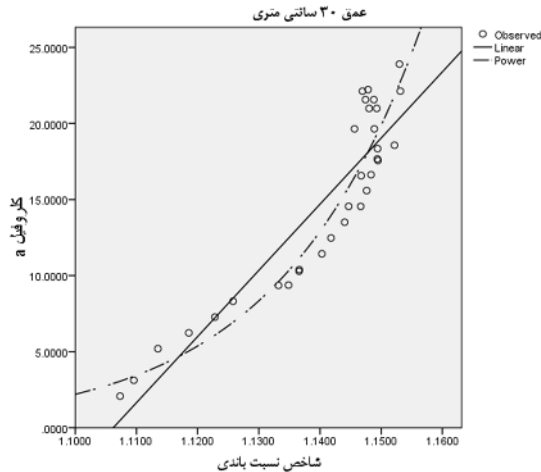
در عمق ۳۰ سانتی‌متری نسبت به عمق ۱۵ سانتی‌متری میزان میانگین بازتابندگی طیفی آب در نمونه آب تالاب که دارای بیش‌ترین مقدار کلروفیل a می‌باشد کاهش ۲۰/۵۶ درصدی و در نمونه آب تالاب که دارای کم‌ترین مقدار کلروفیل a می‌باشد ۱۰/۱۲ درصد کاهش را نشان می‌دهد. با توجه به این اعداد میانگین بازتابندگی



شکل ۶- منحنی‌های بازتابندگی طیفی نمونه‌های با کم‌ترین مقدار کلروفیل a



شکل ۷- منحنی‌های بازتابندگی طیفی نمونه‌های با بیش‌ترین مقدار کلروفیل a



شکل ۹- رگرسیون عمق ۳۰ سانتی متری شاخص دو بانندی با میزان کلروفیل a

۳-۳- رابطه رگرسیون شاخص طیفی نسبت بانندی (دو بانندی) با میزان فسفر کل

نتایج به دست آمده از بررسی رابطه شاخص دو بانندی با فسفر کل اندازه‌گیری شده برای عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی متری به‌طور جداگانه بررسی گردید. ضریب همبستگی به دست آمده در رابطه با فسفر کل عمق ۱۵ سانتی متری با شاخص طیفی دو بانندی بهترین برازش‌های مدل را با استفاده از رگرسیون توانی نشان می‌دهد (شکل ۱۰). بین میزان فسفر کل و این شاخص طیفی همبستگی خطی مثبت $0/893$ وجود دارد. با توجه به نرمال بودن داده‌ها، در این عمق سطح معنی‌داری حاصله از آزمون نشان می‌دهد که مدل فوق در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار است (جدول ۳). در بررسی رگرسیون رابطه این شاخص با میزان فسفر کل در عمق ۳۰ سانتی متری برازش مدل رگرسیون Cubic را بیش از مدل رگرسیون خطی نشان می‌دهد (شکل ۱۱). با توجه به توزیع نرمال داده‌ها ضریب همبستگی رابطه این شاخص طیفی با میزان فسفر کل مقدار $0/766$ را نشان می‌دهد و این رابطه در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار است (جدول ۴).

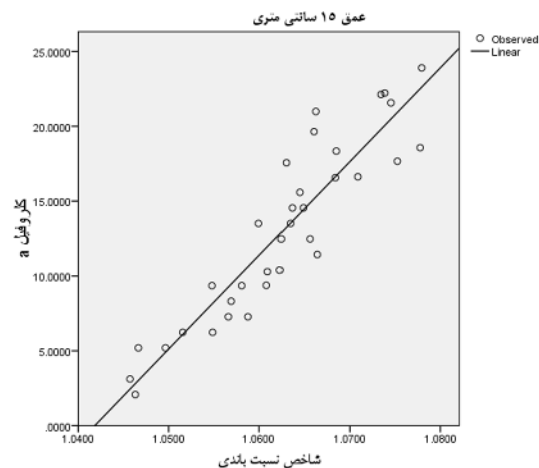
جدول ۳- جدول تجزیه رگرسیون عمق ۱۵ سانتی متری شاخص دو بانندی با فسفر کل

عمق	نوع رگرسیون	رابطه رگرسیون	R Square
۱۵	خطی	$Y = -2/61 + 2/54 X$	$0/798$
سانتیمتر	توانی	$Y = 0/15 \cdot X^{29/75}$	$0/830$

شاخص طیفی دو بانندی بهترین برازش‌های مدل را با استفاده از رگرسیون خطی نشان می‌دهد (شکل ۸). بین میزان کلروفیل a و این شاخص طیفی همبستگی مثبت $0/917$ وجود دارد. با توجه به نرمال بودن داده‌ها، در این عمق سطح معنی‌داری حاصله از آزمون t نشان می‌دهد که مدل فوق در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار است (جدول ۱). در بررسی رگرسیون رابطه این شاخص با میزان کلروفیل a در عمق ۳۰ سانتی متری برازش مدل رگرسیون توانی 3 بیش از مدل رگرسیون خطی می‌باشد (شکل ۹). با توجه به توزیع نرمال داده‌ها ضریب همبستگی رابطه این شاخص طیفی با میزان کلروفیل a مقدار $0/914$ را نشان می‌دهد و این رابطه در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار است (جدول ۲).

جدول ۱- جدول تجزیه رگرسیون عمق ۱۵ سانتی متری شاخص دو بانندی با میزان کلروفیل a

عمق	نوع رگرسیون	رابطه رگرسیون	R Square
۱۵	خطی	$Y = -625/49 + 626/29 X$	$0/84$
سانتیمتر			



شکل ۸- رگرسیون عمق ۱۵ سانتی متری شاخص دو بانندی با میزان کلروفیل a

جدول ۲- جدول تجزیه رگرسیون عمق ۳۰ سانتی متری شاخص دو بانندی با میزان کلروفیل a

عمق	نوع رگرسیون	رابطه رگرسیون	R Square
۳۰	خطی	$Y = -481/08 + 434/89 X$	$0/83$
سانتیمتر	توانی	$Y = 0/20 X^{49/50}$	$0/93$

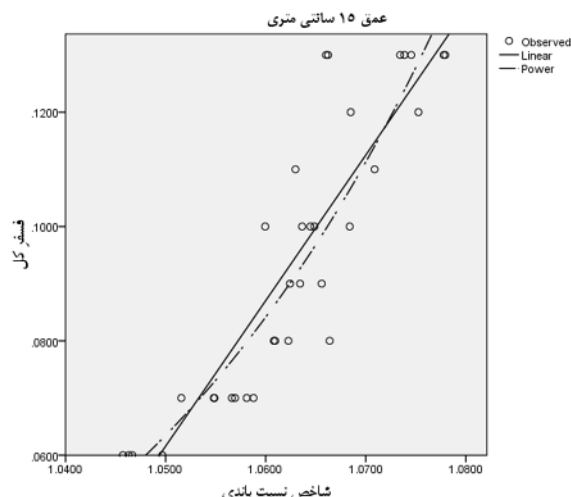
بین ۷۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر قرار دارد. وجود کلروفیل در آب بیانگر وضعیت غذایی آن بوده و در برآورد میزان مواد آلی موجود در محیط‌های آبی از اهمیت خاصی برخوردار است و تنها کلروفیل a در میان سایر اجزای موجود در آب می‌باشد که در محدوده ۶۵۰ تا ۷۰۰ نانومتر دارای حداکثر جذب می‌باشد [۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵].

تفاوت‌های طیفی مشاهده شده بین نمونه‌های عمق ۱۵ سانتی‌متری با ۳۰ سانتی‌متری در محدوده ۴۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر بیانگر تفاوت‌های ناشی از تاثیر عمق بر بازتابندگی طیفی نمونه‌ها می‌باشد. نتایج به‌دست آمده مبنی بر وجود تفاوت معنی دار بین مقادیر مختلف کلروفیل a اندازه‌گیری شده و بازتابندگی طیفی آن‌ها می‌باشد. به طوری که با افزایش میزان کلروفیل a تفاوت‌های بازتابندگی طیفی در دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری به شدت تغییر می‌کند.

بر اساس نتایج به‌دست آمده در بررسی رابطه مقدار کلروفیل a با شاخص نسبت باندی رابطه قوی بین مقدار این شاخص با مقدار کلروفیل a در دو عمق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری مشاهده گردید. البته این رابطه در عمق ۱۵ سانتی‌متری به شکل قوی‌تری می‌باشد. نتیجه تحقیقات کلروفیل a با شاخص نسبت باندی در عمق ۱۰ سانتی‌متری بیش از عمق ۳۰ سانتی‌متری می‌باشد.

در این تحقیق از دو طول موج ۷۰۰ و ۶۸۰ نانومتر جهت محاسبه شاخص نسبت باندی استفاده شده است با توجه به مطالعه منحنی بازتابندگی طیفی نمونه‌های آب حداکثر حساسیت به جذب توسط ذرات کلروفیل a در طول موج ۶۸۰ نانومتر وجود دارد و حداقل حساسیت به بازتابندگی کلروفیل a در طول ۷۰۰ نانومتر می‌باشد. این مقادیر در مطالعات مختلف با توجه به میزان تغذیه گرایبی آب‌ها متفاوت می‌باشد که در همه مطالعات بین محدوده ۶۵۰ تا ۷۰۰ نانومتر برای محاسبه $R(\lambda_1)$ و بین ۷۰۰ تا ۷۵۰ برای محاسبه $R(\lambda_2)$ می‌باشد.

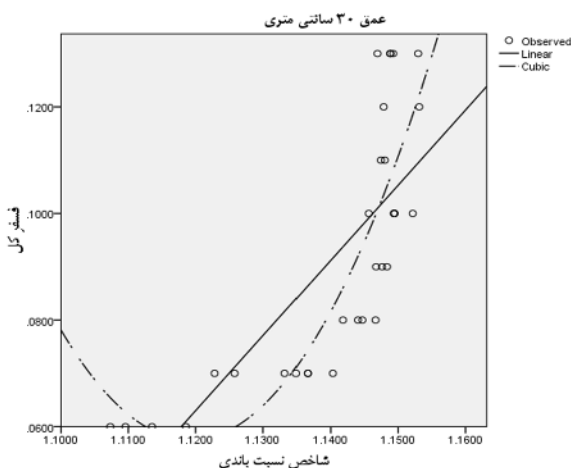
در این تحقیق رابطه بین فسفر کل با میزان شاخص دوباندی نیز بررسی گردید که همانند میزان کلروفیل a در عمق ۱۵ سانتی‌متری رابطه قویتری نسبت به عمق ۳۰ سانتی‌متری نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- رگرسیون عمق ۱۵ سانتی‌متری شاخص دو باندی با فسفر کل

جدول ۴- جدول تجزیه رگرسیون عمق ۳۰ سانتی‌متری شاخص دو باندی با فسفر کل

عمق	نوع رگرسیون	رابطه رگرسیون	R Square
۳۰	خطی	$Y = -1/51 + 1/40X$	۰/۵۸
سانتیمتر	Cubic	$Y = 46/71 - 62/52X + 16/63X^3$	۰/۷۱



شکل ۱۱- رگرسیون عمق ۳۰ سانتی‌متری شاخص دو باندی با فسفر کل

۴- نتیجه‌گیری

نتایج تحقیقات زیادی نشان می‌دهند که منحنی انعکاس طیفی آب تحت تاثیر حضور و تمرکز مواد آلی و غیر آلی معلق یا محلول در آن و نیز عمق آب متفاوت است. کم‌ترین میزان بازتابندگی طیفی در محدوده مادون قرمز نزدیک بیانگر حداکثر جذب آب در این محدوده می‌باشد که در آب‌های نوع دوم (آب‌های گل آلود داخل خشکی‌ها)

پی‌نوشت‌ها

1. Universal Transfer Mercator
2. Spectral fingerprint
3. Power

منابع

- Administration, Washington, D.C. Rep. Nos. E74-10027 and NASA-TM-X-69450; 1973; p-309-317.
- [10] Gordon, H.R., and A.Y. Morel. Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery. A Review. Springer-Verlag, New York; 1983; p.114.
- [11] O'Reilly, J.E., S. Maritorena, B.G. Mitchell, D.A. Siegel, K.L. Carder, S.A. Garver, M. Kahru, and C., McClain. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research*; 1998; 103:937-953.
- [12] Gitelson, A.A. and K.Y., Kondratyev. Optical models of mesotrophic and eutrophic water bodies. *International Journal of Remote Sensing*; 1991; 12: 373-385.
- [13] Gons, H.J. Optical teledetection of chlorophyll a in turbid inland waters. *Environmental Science and Technology*; 1999; 33:1127-1132.
- [14] Thiemann, S., and H., Kaufmann. Lake water quality monitoring using hyperspectral airborne data – a multitemporal approach. *Proceedings of the Sixth International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*; 2000; 2:157-164.
- [15] Ruddick, K.G., Gons, H.J., Rijkeboer, M., and G., Tilstone. Optical remote sensing of chlorophyll a in case 2 waters by use of an adaptive two-band algorithm with optimal error properties. *Applied Optics*; 2001; 40:3575-3585.
- [16] Zimba, P.V. and A.A., Gitelson. Remote estimation of chlorophyll concentration in hyper-eutrophic aquatic systems: Model tuning and accuracy optimization. *Aquaculture*; 2006; 256: 272-286.
- [17] Gitelson, A. 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*; 1992; 13:3367-3373.
- [18] Kiabi, H.B., Majnoonian H., Gashtasb M.H. and G. Mansoori. Suggested standards for evaluate the protection state of Iran wetlands. *Environmental Stuy Journal*; 2004; 33: 74-89.
- [19] Neville, R. A., and J.F.R., Gower, 1977. Passive remote sensing of phytoplankton via chlorophyll-a fluorescence. *Journal of Geophysical Research*;
- [1] Carder, K.L., and R.G., Steward. A remote-sensing reflectance model of a red-tide dinoflagellate off west Florida. *Limnology and Oceanography*; 1985; 30:286-298.
- [2] Brown, C.D., Hoyer, M.V., Bachmann, R.W. and E., Canfield. Nutrient- chlorophyll relationships: An evaluation of empirical nutrient- chlorophyll models using Florida and north- temperate Lake data, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*; 2000; 57 (8): 1574-1583.
- [3] Kamarainen, A.M., Penczykowski, R.M., Van de Bogert, M.C., Hanson, P.C. and S.R., Carpenter. Phosphorus sources and demand during summer in a eutrophic lake, *Aquatic Sciences Research across Boundaries* ; 2009; 71 (2): 214-227.
- [4] Carson, R. and J., Simpson. *A Coordinator's Guide to Volunteer Lake Monitoring Methods*, North American Lake Management Society; 1996; p. 96.
- [5] Abd- Elrahman, A., Croxton, M., Pande-Chettri, R., Toor, G.S., Smith, S. and J., Hill In situ estimation of water quality parameters in freshwater aquaculture ponds using hyper spectral imaging system, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*; 2011;66: 463- 472.
- [6] Lee, Z.P. and C., Hu. Global distribution of Case-1 waters: An analysis from SeaWiFS measurements, *Remote Sensing of Environment*; 2006; 101(2): 5755-5772.
- [7] Mobley, C.D. *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*. Academic Press; 1994.
- [8] Morel, A., and L., Prieur. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*; 1976; 22:709-722.
- [9] Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., and D.W., Deering. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) Symposium*, Washington, D.C., 10-14 December 1973. National Aeronautics and Space

1977; 82: 3487-3493.

- [20] Gordon, H. R., Brown, O. B., Evans, R. H., Brown, J.W., Smith, R.C., Baker, K.S., and D.K., Clark. A semi analytic radiance model of ocean color. *Journal of Geophysical Research*; 1988; 93: 10909–10924.
- [21] Pierson, D. and N., Strömbäck. A modeling approach to evaluate preliminary remote sensing algorithms: Use of water quality data from Swedish; 2000.
- [22] Dekker, A.G., Zamurovic-Nead, Z, Hoogenboom, H.J. and S.W.M., Peters. Remote sensing, ecological water quality modeling and in situ measurements: a case study in shallow lakes, *Hydrological Sciences*; 2009; 41(4): 531-547.
- [23] Hoge, E. F., Wright, C.W. and R. N., Swift. Radiance ratio algorithm wavelengths for remote oceanic chlorophyll determination. *Applied Optics*; 1987; 26:2082–2094
- [24] Kortum, G. *Reflectance Spectroscopy, Principles, Methods, Applications*. Springer-Verlag New York Inc; 1969.
- [25] Schalles, J.F., A.A. Gitelson, Y.Z. Yacobi, and A.E., Kroenke. Estimation of chlorophyll a from time series measurements of high spectral resolution reflectance in an eutrophic lake. *Journal of Phycology*; 1998b; 34:383-390b.



