



نسخه از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

سال سیزدهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۰
Vol.13, No. 1, Spring 2021

۷۵-۹۲

مقاله پژوهشی

تعیین بهینه باندهای ماهواره لندست به منظور اندازه‌گیری CDOM دریاچه‌ها با استفاده از الگوریتم SVR

محمد مؤمنی اصفهانی^{۱*} و امیرشاهرخ امینی^۲

۱. کارشناس ارشد سنجش از دور، دانشگاه آزاد، واحد تهران جنوب

۲. استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه آزاد، واحد تهران جنوب

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۳۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۰۶

چکیده

ماده آلی محلول رنگی (CDOM) مقیاس مهمی در سنجش کیفیت آب است. می‌توان ادعان کرد CDOM نور موجود در لایه‌های آب را کاهش می‌دهد و فعالیت‌های بیولوژیکی فتوسنتز را مختل می‌کند و سرانجام، مانع رشد جمعیت فیتوپلانکتون‌هایی می‌شود که برای زنجیره غذای آبزیان ضروری‌اند. در بیشتر تحقیق‌هایی که تا کنون به انجام رسیده، از طول موج خاصی برای اندازه‌گیری ضریب جذب CDOM استفاده شده است اما، در این تحقیق، امکان استفاده از گستره وسیعی از باندهای طیف مرئی، برای تعیین ماده آلی محلول رنگی، در طول موج‌های ۲۵۴-۴۴۳ (۲۵۴، ۲۶۰، ۳۵۰، ۳۷۵، ۴۰۰، ۴۱۲، ۴۴۰، ۴۴۳) نانومتر در ماهواره لندست ۸ بررسی شده؛ ضمن آنکه مناسب‌ترین نسبت باند برای اندازه‌گیری ماده آلی محلول، در طول موج‌های قابل اندازه‌گیری، با استفاده از الگوریتم SVR (اجزای این پارامتر بهینه‌سازی شده است) به دست آمده است. در پژوهش حاضر، نسبت باندهای Coastal به قرمز (R_1 / R_4) ، آبی به قرمز (R_2 / R_4) و نسبت باندهای سبز به قرمز (R_3 / R_4) برای بازیابی CDOM در نظر گرفته شده است. براساس نتایج و با توجه به ضریب تعیین $(R^2 = 0.71)$ و میزان خطاها $(MSE = 1/161 m^{-1}, RMSE = 1/1077 m^{-1}$ و $MAE = 0/946 m^{-1})$ می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از نسبت باندهای سبز به قرمز در ماهواره لندست ۸ مناسب‌ترین گزینه برای تعیین ماده آلی محلول رنگی است. افزون‌براین، نتایج این تحقیق مشخص کرده‌اند که اندازه‌گیری CDOM در طول موج ۴۴۰ نانومتر می‌تواند شاخص مناسبی برای بررسی کیفیت دریاچه‌ها، براساس غلظت آنها، محسوب شود.

کلیدواژه‌ها: ماده آلی محلول رنگی، الگوریتم رگرسیون بردار پشتیبان، لندست ۸، سنجش کیفیت آب.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان کریم خان زند، خیابان ایرانشهر شمالی، شماره ۲۲۳، ساختمان مرکزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب کد پستی: ۱۵۸۴۷۱۵۴۱۴

تلفن: ۸۸۸۳۰۸۲۶

۱- مقدمه

حاصل خیزی طبقه‌ای آب، مسدود کردن نور خورشید و محدود کردن تولید در عمق آب تأثیر دارد. CDOM مقادیر متفاوت نور فرابنفش تا نور آبی را جذب می‌کند اما آب خالص فقط جذب نور قرمز است و به همین دلیل است که آب خالص به رنگ آبی دیده می‌شود؛ در صورتی که آب حاوی مقادیر متفاوت CDOM، در محدوده رنگ سبز، زرد-سبز دیده می‌شود و با افزایش غلظت CDOM، قهوه‌ای نیز به نظر می‌رسد (Nelson & Coble, 2009). بازتاب CDOM در بخش آبی تا فرسوخ نزدیک طیف الکترومغناطیسی اتفاق می‌افتد اما ویژگی‌های جذب طیفی یا بازتابی خاصی را مشخص نمی‌کند. در عوض، شیب طیفی CDOM به تدریج از آبی تا فرسوخ نزدیک کاهش می‌یابد (شکل ۱). CDOM معمولاً با استفاده از تکنیک‌های جذب یا فلورسانس محاسبه می‌شود. در روش جذب، طیف بازتاب شده اندازه‌گیری می‌شود تا بتوان مقدار نور جذب شده را در طول موجی خاص (معمولاً ۲۵۴ تا ۴۴۰ نانومتر)، در محدوده طیف الکترومغناطیسی مشخص کرد.

از سویی دیگر، بیش از ۹۰٪ کربن موجود در دریاچه‌ها به صورت محلول (DOC) است (Wetzel, 2001)؛ بنابراین، بررسی مداوم کربن آلی محلول (DOC) در دریاچه‌ها، هم از نظر مکانی و هم از لحاظ زمان، هزینه‌بر و وقت‌گیر است و علاوه بر آن، نمونه‌برداری میدانی نیز محدودیت‌هایی دارد. از این رو، تدوین روش‌های سنجش از دور برای نقشه‌برداری از میزان کربن دریاچه، در مقیاس‌های بزرگ‌تر منطقه‌ای و جهانی، الزامی است (Kutser et al., 2015a). ماده آلی محلول رنگی را از لحاظ اپتیکی، می‌توان اندازه‌گیری کرد و بنابراین، تکنیک‌های سنجش از دور می‌توانند گزینه مناسبی برای این کار باشند. گرچه محققان متعددی مسئله اندازه‌گیری CDOM از طریق ماهواره چندطیفی

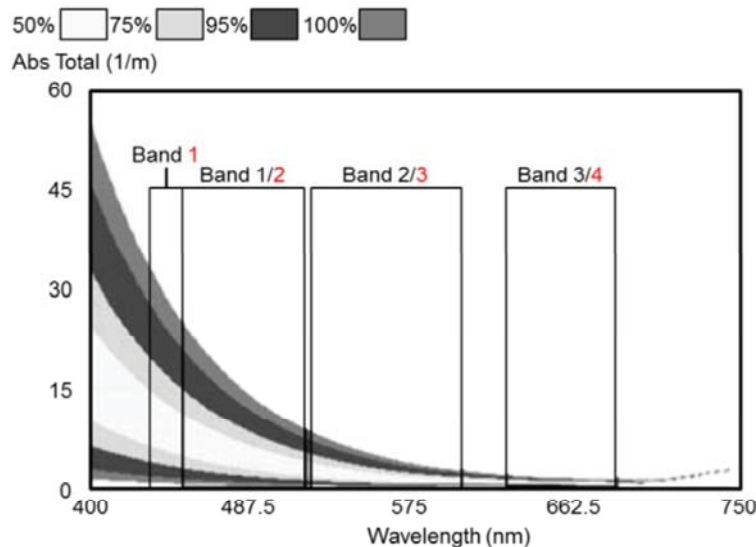
شناخت نقش واقعی دریاچه‌ها در چرخه جهانی کربن نیازمند تخمین‌های مطمئن از کربن آلی محلول^۱ و نیز توسعه روش‌های سنجش از دور، به منظور نقشه‌برداری از کربن دریاچه‌ها (در مقیاس‌های بزرگ‌تر منطقه‌ای و جهانی)، است (Toming et al., 2016). آگاهی از میزان کربن دریاچه از جنبه‌های گوناگونی مهم است. برای نمونه، افزایش میزان ماده آلی محلول در دریاچه‌هایی که برای تأمین آب شرب انسان‌ها استفاده می‌شود نه تنها هزینه تصفیه آب را بالا می‌برد (Matilainen et al., 2010)، بلکه خطر ابتلا به سرطان را نیز افزایش می‌دهد (McDonald & Komulainen, 2005). یکی از متغیرهای مهم تأثیرگذار در اکوسیستم دریاچه‌ها کربن آلی محلول است. ماده آلی محلول^۲ جزء مهمی از کل کربن حل شده در آب‌های سطحی است. در حقیقت، می‌توان از ماده آلی محلول رنگی (CDOM)^۳ به منزله شاخصی برای شناسایی این متغیر نام برد. میزان CDOM در آب از شاخص‌های سلامت آب آشامیدنی برای انسان است و پیامدهای مهمی برای کیفیت آب آشامیدنی (Evans et al., 2005; Herzsprung et al., 2012) و اکوسیستم‌های آبی (Häder et al., 2007) به همراه دارد و نقش مؤثری در حمل و جابه‌جایی کاتیون‌ها از طریق آب ایفا می‌کند (Bergamaschi et al., 2012). ماده آلی محلول رنگی فرآورده اپتیکی فعال غنی از هیومیک اسید مواد آلی محلول است که از تجزیه ذرات آلی مرده و سایر مواد آلی در آب‌های طبیعی به وجود می‌آید و به منزله ماده آلی محلول کروموفوریک، ماده زردرنگ هیومیک اسید و Gelb Stoff نیز شناخته می‌شود (Hoge et al., 1995). شناخت نحوه تغییرات مکانی و زمانی CDOM برای مطالعه کیفیت آب و تعیین کربن جهانی و بررسی تغییرات اقلیمی مهم است؛ اما رفتار CDOM پیچیده است و از طریق مسدود کردن اشعه فرابنفش در لایه‌های بالایی، در

1. Dissolved Organic Carbon (DOC)
2. Dissolved Organic Matter (DOM)
3. Colored Dissolved Organic Matter

بعد، از حسگرهای متفاوت هوایی و ماهواره‌ای در نقشه‌برداری کربن آلی محلول در آب دریاچه‌ها یا جزء رنگی آن، یعنی CDOM، استفاده شده است (Kutser et al., 2005; Kallio et al., 2008; Kutser et al., 2009; Shuchman et al., 2013; Zhu et al., 2014). تلاش‌های بسیاری برای بازیابی اطلاعات CDOM از تصاویر ماهواره‌ای در سیستم‌های دریایی و با استفاده از تکنیک‌های نیمه‌تحلیلی و ماتریس معکوس، انجام شده است (Hoge & Lyon, 1996; Carder et al., 1999; Lee et al., 2002; Brando et al., 2012). پژوهشگران نیز روش تجربی (رگرسیون) را برای بازیابی اطلاعات CDOM در آب‌های دریایی و ساحلی، و با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، به کار برده‌اند (D'Sa & Miller, 2003; Del Castillo & Miller, 2008; Mannino et al., 2008). در حقیقت، می‌توان مقاله کاتسر^۳ و همکارانش (۲۰۰۵) را شاخص‌ترین تلاش برای اندازه‌گیری CDOM برشمرد که این با استفاده از

سنجش از دور را مطرح کرده‌اند؛ به دلیل فقدان داده‌های اصلاح‌شده جوّی، هیچ روش شناخته‌شده یکسانی (Kutser et al., 2015b) وجود ندارد. طیف‌های سنجش از دور، در طول موج‌های کوتاه‌تر (کمتر از ۵۰۰ نانومتر)، به CDOM حساس‌ترند؛ از این رو، طول موج‌های آبی و فرابنفش می‌توانند، در تشخیص CDOM در آب‌های طبیعی، مفید باشند. علاوه‌براین، خطاهای بازیابی ماهواره‌ای در منطقه آبی، در مقایسه با طول موج‌های طولانی‌تر، بزرگ‌ترند (Joshi et al., 2017).

نخستین تلاش‌ها برای نقشه‌برداری از محتوای کربن دریاچه، با استفاده از سنجش از دور، در دهه ۱۹۸۰ انجام شد. ورتوچی و لایکنس^۱ (۱۹۸۹)، با استفاده از طیف‌سنج دستی از یک قایق، کربن آلی محلول (DOC) و جذب ماده آلی محلول رنگی (CDOM) در بازتاب طول موج ۳۶۰ نانومتر را در دریاچه‌های آدرنداک^۲ نیویورک، بررسی و اندازه‌گیری کردند. از آن زمان به



شکل ۱. کاهش تدریجی جذب CDOM در طیف الکترومغناطیسی و محل باند سنسورهای ماهواره‌ای مرئی چندطیفی.

اعداد تاریک نشان‌دهنده سنسورهای لندست اولیه و شماره‌های قرمز نشان‌دهنده باند لندست ۸ و بهبود باند ۱ به نسبت انرژی موجودند

منبع: Kutser et al., 2005

1. Vertucci & Likens
2. Adirondak
3. Kutser

پژوهشی، نشان دادند تفکیک رادیومتریک هشت‌بیتی لندست ۷ برای رفع مشکل CDOM در شرایط غلظت بالا مناسب نیست. همچنین، آنها اذعان کردند تفکیک رادیومتریک شانزده‌بیتی و ارتقای نسبت سیگنال به نویز حسگرهای ALI و OLI توانایی نمایش CDOM را در طیف وسیعی از شرایط کیفی آب، داراست. دومین پیشرفت مهم در حسگر OLI، در زمینه CDOM، افزودن باند جدید ۱ برای حسگر ساحلی/ هوایی بود. محدوده طیفی ۴۳۳-۴۵۳ نانومتر در نزدیکی باند جذبی ۴۴۳/۴۴۰ نانومتر قرار دارد که محققان گوناگونی برای محاسبه غلظت CDOM، در میان سایر پارامترهای کیفیت آب، از آن استفاده کرده‌اند (Lee et al., 1994; Brando & Dekker, 2003; Bowers et al., 2004; Brezonik et al., 2005; Mobley et al., 2005; Menken et al., 2006; Zhu et al., 2011). این باند توانایی نوینی برای سنجش از دور کیفیت آب دارد. ترکیبی از حسگر ارتقای دیده لندست ۸ و محصول بازتاب سطح ۱ محیط داده‌ای ایجاد می‌کند که بسیاری از محدودیت‌های قبلی را در رسیدگی به CDOM، حذف می‌کند. کاتسر و همکاران (۲۰۱۵b) امکان استفاده از روش متفاوتی را به‌منظور تصحیح جوئی و اندازه‌گیری ماده آلی محلول رنگی در دریاچه‌ها، بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از ماهواره لندست ۸، برای اندازه‌گیری CDOM در طول موج ۴۰۰ نانومتر، امکان‌پذیر است.

یکی دیگر از مهم‌ترین نکات سنجش از دور ماهواره‌های CDOM نبود داده‌های بازتابی مناسب تصحیح‌شده در اتمسفر است. گازها و ذرات سبب تغییرات معتناهایی در رادیانس و بازتاب سیگنال انرژی می‌شوند و بسیاری از تصاویری که با استفاده از ماهواره‌ها جمع‌آوری می‌شوند، به‌دنبال تأثیرات اجزای اتمسفر از طریق جذب و پراکندگی نور، آلوده می‌شوند. این در حالی است که تصاویر را می‌توان برای تفسیر ویژگی‌های

تصاویر ALI و هم‌زمان با اندازه‌گیری‌های میدانی، در جنوب فنلاند (۲۰۰۲) و جنوب سوئد (۲۰۰۳)، انجام شده است. آنها خواص بیو‌اپتیکی CDOM ۳۴ دریاچه (۳۹ ایستگاه اندازه‌گیری) را در طول موج ۴۲۰ نانومتر به‌دست آوردند و براساس این مجموعه داده‌ها، نوعی الگوریتم نسبت باند با استفاده از باندهای ۲ و ۳ ALI، برای تخمین محتوای CDOM (جذب آب فیلترشده در ۴۲۰ نانومتر) در دریاچه‌ها، ایجاد کردند. نتایج این تحقیق همبستگی بالای CDOM اندازه‌گیری‌شده و برآورد سنجش از دور CDOM را نشان داد. ($R^2 = 0.73$) (Kutser et al., 2005)، اما حسگرهای مورد استفاده در این مطالعات (ALI, Landsat, Hyperion)، به‌دلیل پوشش مکانی و زمانی پایین و یا حساسیت اندک رادیومتریک، برای نظارت عملیاتی و مطالعاتی جهانی مناسب نبودند. MERIS، با عرضه پوشش جهانی و زمانی بالا، حساسیت رادیومتریک کافی دارد و یافته‌های تحقیقات گوناگون نیز تخمین‌های مورد اعتماد CDOM در دریاچه‌های بورال را نشان می‌دهد (Zhu et al., 2014). طیف‌سنج‌های دستی و هوایی نیز، به همین صورت، ثابت کردند اندازه‌گیری بازتاب با تفکیک طیفی بالا را می‌شود در اندازه‌گیری CDOM به‌کار برد (Lee et al., 1994; Kallio, 1999; Brando & Dekker, 2003; Mobley et al., 2005; Vahtmäe et al., 2006). بیشتر ماهواره‌های سنجش از دور، مانند SeaWiFS و مادیس^۱، تفکیک مکانی لازم را برای نقشه‌برداری از دریاچه‌های کوچک ندارند و یا ممکن است دارای تفکیک‌های طیفی و رادیومتریک مناسب برای پارامترهای CDOM نباشند (Kutser et al., 2005). حسگرهای پیشین لندست، مانند Thematic Mapper در لندست ۵ و ۷، تفکیک مطلوب رادیومتریک را برای پاسخگویی به سنجش کامل CDOM نداشتند. مهم‌ترین ارتقای انجام‌شده در حسگرهای ماهواره لندست افزایش حساسیت رادیومتریک از داده‌های هشت‌بیتی به شانزده‌بیتی بود که در پی آن، کاتسر و همکارانش (۲۰۰۵)، در

1. MODIS

اورال^۷ نمونه‌برداری شده است (شکل ۲). مناطق مطالعاتی از این قرار است:

- دریای لاپتف^۸ دریایی حاشیه‌ای در اقیانوس منجمد شمالی است که در شمال سیبری، در روسیه، قرار گرفته و بین جزیره تائمیر^۹ و جزایر سورنایا زملیا^{۱۰}، در غرب، و جزایر سیبری جدید و جزیره کوتلنی، در شرق، واقع شده است. این دریا، از غرب، به دریای کارا و از سمت شرق، به دریای سیبری شرقی راه دارد. دریای لاپتف کم‌عمق و در بیشتر طول سال، یخ‌زده است. این دریا بین ۶۴۹۸۰۰ تا ۷۱۴۰۰۰ کیلومتر مربع مساحت دارد و میانگین عمق آن ۵۷۸ متر است که در عمیق‌ترین بخش، به ۲۹۸۰ متر نیز می‌رسد. رودهای متعددی به دریای لاپتف می‌پیوندند که بزرگ‌ترین آن‌ها رود لنا^{۱۱} است. خاتانگا^{۱۲} و یانا دیگر رودهای مهمی‌اند که به این دریا می‌ریزند.

- لنا شرقی‌ترین رود از سه رود بزرگ سیبری است که به اقیانوس منجمد شمالی می‌ریزد. دلتای بزرگی در انتهای رودخانه لنا قرار گرفته است که یکصد کیلومتر (۶۲ مایل) در دریای لاپتف امتداد دارد و عرض آن نیز حدود چهارصد کیلومتر (۲۵۰ مایل) است. این دلتا حدود هفت ماه از سال منجمد است اما در ماه مه، به مدت چند ماه، به تالابی سرسبز تبدیل می‌شود. بخشی از منطقه به‌منزله ذخیره حیات وحش دلتای لنا محافظت می‌شود. دلتای لنا به چندین جزیره مسطح تقسیم می‌شود.

1. Genetic Algorithm
2. Vaskiny Dachi
3. Yamal
4. Baydaratskaya
5. Ob
6. Erkuta
7. Ural
8. Laptev sea
9. Taimyr
10. Severnaya Zemlya
11. Lena River
12. Khatanga

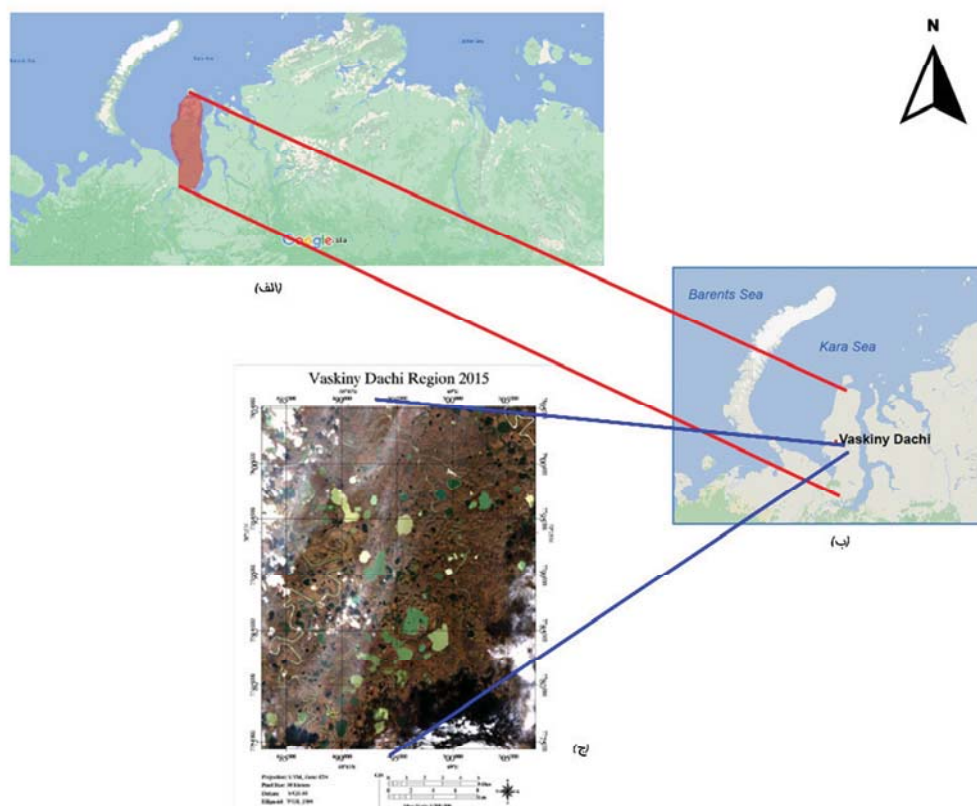
مورفولوژیکی به کار برد؛ ضمن آنکه می‌توان تداخل‌های جوی را با اصلاح هدف مشخص، نسبت‌های باندی و شاخص‌های طیفی، کاهش داد. همچنین، به نظر می‌رسد اندازه‌گیری دقیق طیفی، برای دستیابی به نتایج سازگار، نیاز به اصلاحات جوی دارد (Kutser et al., 2005).

با توجه به موارد مطرح‌شده در سطرهای پیشین، در این تحقیق، امکان استفاده از باندهای طیف مرئی برای تعیین ماده آلی محلول رنگی در طول موج‌های ۴۴۳-۲۵۴ (۲۵۴، ۲۶۰، ۳۵۰، ۳۷۵، ۴۰۰، ۴۱۲، ۴۴۰، ۴۴۳) نانومتر، در ماهواره لندست ۸، بررسی شده است؛ ضمن آنکه مناسب‌ترین نسبت باند برای اندازه‌گیری ماده آلی محلول، با استفاده از الگوریتم SVR انتخاب شده است. شایان ذکر است که پارامترهای الگوریتم یادشده، با استفاده از الگوریتم ژنتیک^۱، بهینه‌سازی شده‌اند. این مطالعه چشم‌انداز جدیدی را در مقیاس‌های متفاوت، در آبگیرشناسی پدید می‌آورد و امکان مطالعه تنوع و پویایی غلظت CDOM در دریاچه‌ها را فراهم می‌کند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

به دلیل وجود نداشتن داده‌های مناسب CDOM در منابع آبی ایران، در این تحقیق، از داده‌های مربوط به دریاچه‌های دو منطقه واسکینیا داجی^۲ و یامال^۳، واقع در بخش مرکزی شبه‌جزیره یامال (سیبری غربی، روسیه)، استفاده شده است. این دو منطقه، از نظر وضعیت جغرافیایی، نزدیک به همدیگر قرار دارند و بیشتر مشاهدات در منطقه تحقیقاتی واسکینیا داجی و حد فاصل سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ (۶۸°۵۴' N, ۷۰°۱۷' E) صورت گرفته است. شبه‌جزیره یامال در Yamalo-Nenets Autonomous Okrug در شمال غرب سیبری و در کشور روسیه واقع شده است. این شبه‌جزیره (۷۰° N, ۷۰° E) تقریباً ۷۰۰ کیلومتر طول دارد و بیشتر با دریای کارا، خلیج بایداراتسکایا^۴ در غرب و با خلیج آب^۵ در شرق هم‌مرز است. نمونه‌های میدانی دریاچه‌ها و رودخانه‌ها، در سال ۲۰۱۶، از حوضه رودخانه ارکوتا^۶ و منطقه قطبی



شکل ۲. منطقه تحقیقاتی واسکینیا داچی و شبه‌جزیره یامال: منطقه یامال (الف)؛ منطقه واسکینیا داچی (ب)؛ قسمتی از تصویر منطقه‌ای ماهواره‌ای لندست ۸ (ج)

۲-۲- مشخصات تصاویر ماهواره‌ای

در این تحقیق، تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ دریاچه‌های واقع در مناطق واسکینیا داچی (گذر ۱۶۵، ردیف ۰۱۱) و منطقه یامال (گذر ۱۶۶، ردیف ۰۱۳)، با در نظر گرفتن زمان مجاز برای برداشت داده‌های زمینی (در مورد دریاچه‌ها، ۱ تا ۲ ماه)، به کار رفته است. داده‌های زمینی در فصل تابستان برداشت شدند که پوشش ابری چشمگیری در این مناطق مشاهده می‌شود؛ هرچند، در انتخاب تصاویر ثبت‌شده، استفاده از تصاویری با پوشش ابری کمتر و پوشش مکانی بیشتر دریاچه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در برخی مقالات قبلی، بازیابی سنجش از دور CDOM بدون در نظر گرفتن تصحیح جوی تصاویر ماهواره‌ای انجام شده است (Kallio et al., 2008; Kutser, 2012). اما، در تحقیق حاضر، تصاویر فاقد

تصحیح جوی اخذ شده؛ ضمن آنکه تصحیح جوی مناسبی برای تصاویر لندست ۸ به کار رفته است. در همین زمینه، برای تصحیح اتمسفری ماهواره‌ای لندست ۸، از روش تصحیح اتمسفری FLAASH در برنامه ENVI استفاده شد. این روش از زمان تصویربرداری، مشخصات ماهواره، میانگین ارتفاع و دیگر موارد بهره می‌برد و رادینانس را به بازتاب تبدیل می‌کند و می‌توان از این بازتاب، در مراحل بعدی استفاده کرد. در این پژوهش، پارامترهای مدل، با توجه به زمان و موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی، برای توصیف فضای زمستانی عرض جغرافیایی میانی و آئروسول روستایی^۱، مورد استفاده قرار گرفته است (جدول ۱).

1. Rural Aerosol

جدول ۱. مشخصات تصاویر دریافتی

| ردیف | گذر | تاریخ دریافت | ماهواره | مشخصه تصویر |
|------|-----|--------------|---------|-----------------------|
| ۰۱۱ | ۱۶۵ | ۲۰۱۳/۷/۲۲ | لندست ۸ | LC81650112013234LGN02 |
| ۰۱۱ | ۱۶۵ | ۲۰۱۴/۸/۲۵ | لندست ۸ | LC81650112014237LGN01 |
| ۰۱۰ | ۱۶۷ | ۲۰۱۵/۹/۲۵ | لندست ۸ | LC81670102015254LGN01 |
| ۰۱۰ | ۱۶۷ | ۲۰۱۵/۸/۱۰ | لندست ۸ | LC81670102015222LGN01 |
| ۰۱۳ | ۱۶۶ | ۲۰۱۶/۷/۲۰ | لندست ۸ | LC81660132016202LGN02 |
| ۰۱۳ | ۱۶۵ | ۲۰۱۶/۸/۱۴ | لندست ۸ | LC81650132016227LGN01 |
| ۰۱۲ | ۱۶۵ | ۲۰۱۶/۸/۱۴ | لندست ۸ | LC81650122016227LGN01 |
| ۰۱۲ | ۱۶۵ | ۲۰۱۶/۷/۱۳ | لندست ۸ | LC81650122016195LGN01 |

۳-۲- مشخصات داده‌های زمینی

در این پژوهش، داده‌های میدانی منطقه واسکینیا داجی، در ماه‌های اوت و سپتامبر سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵، و منطقه یامال، در ژوئیه ۲۰۱۶، انتخاب و بهره‌برداری شده است. نمونه‌های آب در شرایط آب‌وهوایی آرام و با استفاده از بطری نمونه‌گیری، از ۳۰ سانتی‌متری بالای آب و نزدیک به ساحل، یا در مرکز دریاچه‌ها، با استفاده از قایق، جمع‌آوری شده است. لبه ساحلی چندین دریاچه در دشت‌های مرتفع تحت تأثیر فعال شدن اخیر ترموسیرک‌ها^۱ قرار دارند. نمونه‌های CDOM، پس از نمونه‌گیری میدانی، به‌طور مستقیم فیلتر شدند. فیلترهای CDOM با فیلتراسیون فیبری شیشه‌ای، با اندازه ۰.۷ میکرومتر (واتمن)، تهیه شدند و برای جلوگیری از تجزیه نوری CDOM، در شرایط سرد و تاریک نگهداری شدند.

۴-۲- روش تحقیق

این پژوهش امکان به‌کارگیری باندهای طیف مرئی را برای تعیین ماده آلی محلول رنگی در طول موج‌های ۴۴۰-۴۴۰، ۴۱۲، ۴۰۰، ۳۷۵، ۳۵۰، ۲۶۰، ۲۵۴) ۲۵۳-۴۴۰ (۴۴۳ نانومتر، در ماهواره لندست ۸ و با استفاده از الگوریتم رگرسیون بردار پشتیبان^۲، بررسی می‌کند. پارامترهای این الگوریتم با الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده است. به منظور نمایش دقیق و عینی دقت مدل، از پارامترهای آماری استفاده شده است؛ از جمله خطای

گذر میانگین مربعات^۳، خطای میانگین مربعات^۴، میانگین خطای مطلق^۵ و ضریب تعیین (R^2) داده‌های پیش‌بینی شده و تجربی. معادلات این پارامترها در ادامه آورده شده است. با توجه به اینکه بازتاب CDOM در بخش آبی تا فروسرخ نزدیک طیف الکترومغناطیسی اتفاق می‌افتد، نسبت باندهای مرئی ماهواره لندست ۸ به مقادیر میدانی ماده آلی محلول رنگی در طول موج‌های اشاره‌شده ($CDOM(\lambda)$) محاسبه شده است تا امکان استفاده از نسبت باندهای مرئی برای تعیین ضریب جذب CDOM در تصاویر ماهواره‌ای ارزیابی شود. معیار ضریب تعیین به‌منزله معیار اولیه در نظر گرفته می‌شود. همچنین، نسبت باندهای مورد مطالعه به‌صورت نسبت باند سبز به قرمز (R_3 / R_4)، Coastal به قرمز (R_1 / R_4) و آبی به قرمز (R_2 / R_4) بررسی می‌شود. دلیل استفاده از نسبت باند قرمز، در نسبت‌ها، داشتن امکان نرمالیزه کردن داده‌هاست.

رابطه (۱)

$$R^2 = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n\sum x^2 - (\sum x)^2][n\sum y^2 - (\sum y)^2]}}$$

1. Thermocirque
2. Support Vector Regression
3. RMSE
4. MSE
5. MAE

دستیابی به نتایج مطلوب، از نسبت باندهای Coastal به قرمز (R_1 / R_4)، آبی به قرمز (R_2 / R_4) و نسبت باندهای سبز به قرمز (R_3 / R_4) ۱۱۳ داده (۴۴ دریاچه) استفاده شده است و ۸۰٪ از آنها برای آموزش و ۲۰٪ برای آزمایش الگوریتم در نظر گرفته شده‌اند. برای بهینه‌سازی پارامترهای SVR، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده و میزان جمعیت ۲۰ و تعداد تکرار آن هم ۳۰ انتخاب شده است. علاوه‌براین، در تابع هزینه، محدوده‌ای برای هریک از پارامترهای الگوریتم SVR تعریف شده است؛ به‌صورتی که پارامترهای SVR به‌دست‌آمده (بین ۰ تا ۱) از الگوریتم فراابتکاری (الگوریتم ژنتیک) در عددی متناسب با خروجی‌های حاصل ضرب می‌شود تا محدوده مقادیر پارامترهای تابع هزینه به‌دست آید و مقادیر اندکی نیز، برای جلوگیری از صفرشدن تابع هزینه، به این محدوده افزوده شده است. در مسائل SVR، انتخاب تابع کرنل بسیار مهم است و انتخاب آن با توجه به نوع و ماهیت مسئله انجام می‌شود؛ بنابراین، نمی‌توان تابعی را به‌طور قطعی، تابعی مناسب برای SVR معرفی کرد و این انتخاب ممکن است، با توجه به شرایط، متغیر باشد. بنابراین، تابع گوسین برای پیش‌بینی مقادیر CDOM استفاده شده و دلیل آن استفاده موفقیت‌آمیز این تابع در موارد عملی بسیار است.

۲-۵- روش رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)

در این بخش، مفاهیم اساسی SVR به‌طور خلاصه بیان می‌شود و این مطالب در مقالات شولکف^۱ (۲۰۰۰)، کریستائینی و تیلور^۲ (۲۰۰۰) و ککمن^۳ (۲۰۰۱) نیز مطرح شده‌اند. با توجه به مجموعه آموزش ورودی $(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, m$ ، که در آن متغیر ورودی

$$\text{رابطه (۲)} \quad \text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

$$\text{رابطه (۳)} \quad \text{RMSE} = \sqrt{\text{MSE}}$$

$$\text{رابطه (۴)} \quad \text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i|$$

x و y نماینگر مقادیر روی نمودار x و y؛ \hat{Y}_i و Y_i

به‌ترتیب، مقادیر به‌دست‌آمده و مشاهداتی؛ و n تعداد داده‌هاست.

داده‌های CDOM را طی فصل‌های بهار، تابستان و پاییز به‌صورت سنجش از دور می‌توان اندازه‌گیری کرد (در این مطالعه، داده‌های میدانی در فصل تابستان برداشت شده است). تأثیرات جوّی یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در اندازه‌گیری سنجش از دور دریاچه‌ها به حساب می‌آید اما تأثیر جوّی تصاویر دریاچه‌ها همچنان مسئله‌ای حل‌ناشده است. چندین محقق، که از داده‌های تصاویر ماهواره‌های لندست پیشین (لندست ۷ و TM) استفاده کرده‌اند، دریافتند که نتایج استفاده از داده‌های غیرتصحیح جوّی بهتر از داده‌های تصاویر تصحیح‌شده است (Kallio et al., 2008; Kutser, 2012) و به‌احتمال بسیار، وجود این نتایج به‌دلیل تفکیک پایین رادیومتریکی (هشت‌بیتی) این نوع تصاویر است. حسگر OLI لندست ۸ دارای تفکیک رادیومتریکی (دوازده‌بیتی) است و در مقایسه با سری قبلی حسگرهای لندست، نسبت سیگنال به نویز بهتری دارد (Nelson & Coble, 2009). همچنین، در این تحقیق، از تصحیح جوّی FLAASH در برنامه ENVI استفاده شده است.

روش رگرسیون بردار پشتیبان برای مقایسه نسبت باندهای متفاوت و اندازه‌گیری میزان ضریب جذب ماده آلی محلول رنگی در ۴۴۰-۳۷۵ نانومتر از باندهای Coastal، آبی، قرمز، سبز ماهواره لندست ۸ به‌کار می‌رود. در پژوهش پیش رو، از داده‌های سه سال متوالی (۲۰۱۵-۲۰۱۳) دریاچه، واقع در منطقه واسکینیا داجی، و داده‌های سال ۲۰۱۶ دریاچه یامال بهره گرفته شده است. شایان توضیح است که برای

1. Scholkopf
2. Cristianini & Shawe-Taylor
3. Kecman

در معادله بالا، γ پارامتر کرنل است. برای دستیابی به عملکرد بالا و دقت بسیار زیاد SVR، باید ترکیب C و پارامتر تابع کرنل γ به درستی انتخاب شوند. از این رو، بهینه‌سازی این پارامترها با بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراابتکاری قوی (که قادرند ترکیب بهینه را به‌طور خودکار انتخاب نمایند) گزینه‌ی جاگزین مناسبی برای روش‌های سنتی و مواردی می‌باشند که با استفاده از خطای آزمایشی انجام می‌شوند. در همین حال، باید توجه داشت که یکی از مهم‌ترین مزیت‌های SVR وابسته‌نبودن پیچیدگی محاسباتی آن به ابعاد فضای ورودی است (Awad & Khanna, 2015).

۲-۶- الگوریتم GA-SVR

الگوریتم SVR با بهره‌گیری از پارامترهای متفاوتی، از جمله پارامترهای ثابت C و ϵ و کرنل، اجرا می‌شود. در این مطالعه، به منظور ارزیابی عملکرد میزان ضریب جذب ماده آلی محلول رنگی در هر نسبت از طول موج تعیین شده، پانزده نسبت در مدل GA-SVR ایجاد و از تابع کرنل گوسین استفاده شد تا، با استفاده از آنها، به انتخاب پارامترهای بهینه، که دقیق‌ترین پیش‌بینی را دارند، دست یافت. در این روش سیستم، پس از ایجاد جمعیت اولیه، با استفاده از مقادیر مشخص شده برای پارامترها، فرایند SVR معمول را اجرا می‌کند و عملکرد هر راه‌حل از طریق تابع برازش انتخاب می‌شود. اگر مقدار تابع برازش شرایط توقف را داشته باشد، الگوریتم به انتها می‌رسد و در پایان، پارامترهای بهینه انتخاب می‌شوند؛ در غیر این صورت، نسل بعدی راه‌حل‌ها از طریق عملگرهای ژنتیکی مانند جهش، تبادل ژنی و انتخاب، تا رسیدن به شرایط توقف، تهیه و ایجاد می‌شوند. می‌توان پیش‌بینی کرد که میانگین تناسب افراد در هر چرخه افزایش یافته و با تکرار این روند، نتایج مطلوبی به دست بیاید. به عبارت دیگر، نقشه جداگانه‌ای برای ژنتیک و SVR در روش GA-SVR وجود خواهد داشت. SVR با استفاده از مجموعه داده‌های آموزشی آموخته می‌شود و میزان ضریب جذب CDOM را پیش‌بینی می‌کند؛ در حالی که ژنتیک پیش‌بینی SVR را با محاسبه تابع برازش، ارزیابی می‌کند و با تنظیم پارامترهای

$x_i \in R^n$ و برداری n بعدی است و متغیر پاسخ $y_i \in R$ که مقداری پیوسته است؛ SVR عملکرد رگرسیون خطی را به شکل زیر ایجاد می‌کند:

$$f(x, w) = w^T x + b \quad \text{رابطه (۵)}$$

برای برآورد w و b ، ابتدا، مسئله رگرسیون به یک مسئله تبدیل شده است تا تابع ریسک منظم به حداقل برسد. این کار هم پیچیدگی مدل و هم خطای تجربی را تحت ϵ -ضرر غیرحساس قرار می‌دهد و می‌توان آن را چنین بیان کرد:

$$\text{minimize } \frac{1}{2} w^2 + C \sum_{i=1}^k (\zeta_i^- + \zeta_i^+) \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\text{subject } \begin{cases} t_i - (w, \varphi(x) + b) \leq \epsilon + \zeta_i^+ \\ (w, \varphi(x) + b) - t_i \leq \epsilon + \zeta_i^- \\ \zeta_i^-, \zeta_i^+ \geq 0, i = 1, 2, \dots, k \end{cases} \quad \text{رابطه (۷)}$$

در این روابط، w^2 اندازه تابع صاف و $C \sum_{i=1}^k (\zeta_i^- + \zeta_i^+)$ نشان دهنده خطای تجربی است.

ثابت $C > 0$ پارامتر جریمه است که مبادله بین خطای تجربی و پیچیدگی مدل (عامل تنظیم) را محاسبه می‌کند. ζ_i^-, ζ_i^+ متغیرهای ضعیف مثبت‌اند که به ترتیب، انحراف بیش از حد پایین و بالایی را نشان می‌دهند و ϵ تلورانس خطاست. سپس، مسئله بهینه‌سازی محدود (رابطه (۷))، پس از تبدیل آن به فضای دوگانه و با استفاده از ضرب لاگرانژ، حل می‌شود. برای اختصار، روش در این جا به صورت کامل توضیح داده نشده اما راه‌حل به دست آمده در ادامه نشان داده شده است (Shawe-Taylor & Cristianini, 2004):

$$f(x) = \sum_{i=1}^k (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x_j) + b \quad \text{رابطه (۸)}$$

α_i, α_i^* ضرایب لاگرانژ هستند و در معرض محدودیت $\alpha_i \geq 0$ و $\alpha_i^* \leq 0$ قرار دارند و اصطلاح K تابع کرنل است. از میان توابع کرنل مطرح شده در مقالات (Ibid.)، تابع RBF محبوب‌ترین است. در مقاله ما، از RBF به منزله تابع کرنل استفاده می‌شود:

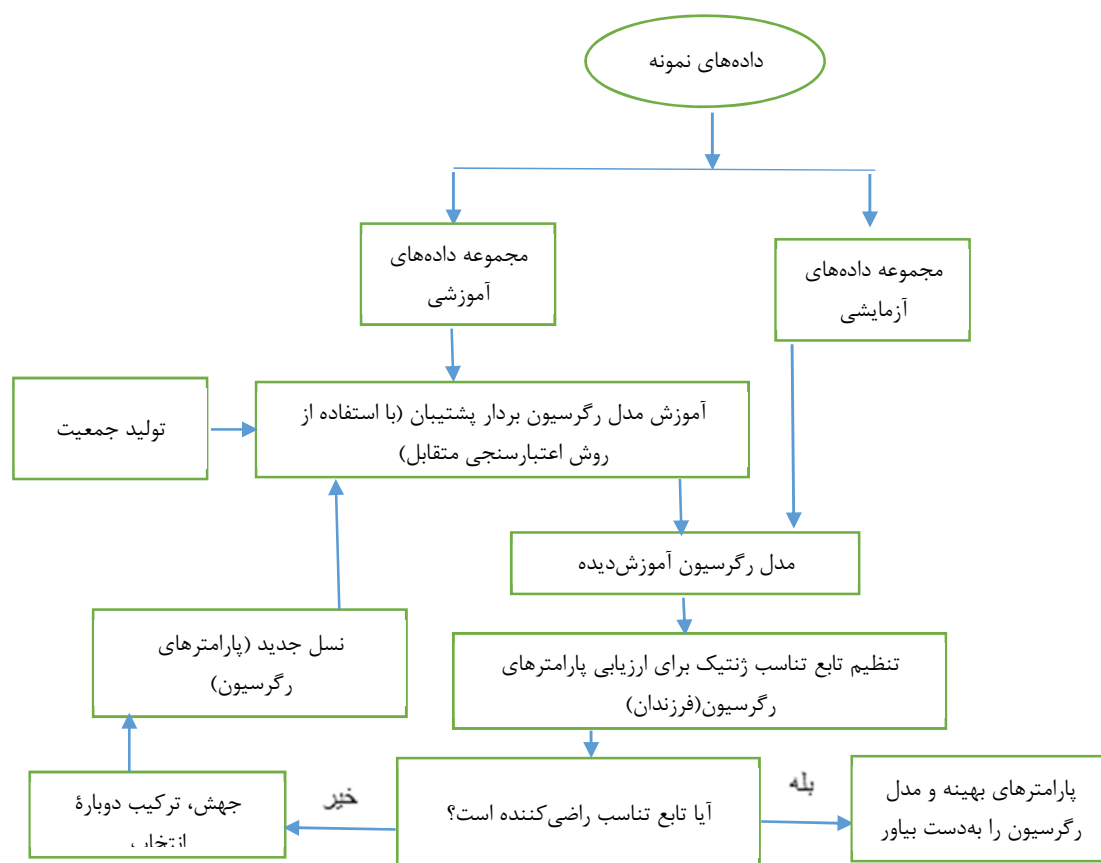
$$K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|) \quad \text{رابطه (۹)}$$

همدیگرند. مقادیر بازتابی ماده آلی محلول رنگی (CDOM) در مناطق مطالعاتی دارای طیف گسترده‌ای در هر بازه طول موج است. اختلاف مقادیر CDOM، در برخی از طول موج‌ها، در این مناطق مهم است. به‌طور کلی، میانگین مقادیر CDOM دریاچه‌های منطقه واسکینیا داچی کمتر از مقادیر منطقه یامال است. برای نمونه، میانگین بازه ۴۴۰ نانومتر در منطقه واسکینیا داچی، طی سه سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵، به ترتیب (m^{-1}) ۱.۸۸، ۳.۰۹ و ۲.۴۴ بود ولی، در منطقه یامال، میانگین همین بازه طیفی (m^{-1}) ۳.۳۵ برآورد شده است (جدول ۲).

آن و تعیین مقادیر بهینه برای آنها، پیش‌بینی SVR را بهبود می‌بخشد. در انتها، خروجی GA-SVR حاصل می‌شود که این خروجی دربرگیرنده مقادیر بهینه پارامترهای SVR و مجموعه داده‌های پیش‌بینی (حاصل از پارامترهای بهینه اختصاص یافته) است (Roushangar & Koosheh, 2015) (شکل ۳).

۳- نتایج و بحث

این تحقیق در دو منطقه یامال و واسکینیا داچی انجام شده است که از نظر موقعیت جغرافیایی، نزدیک به



شکل ۳. فلوجارت نحوه اجرای روش ژنتیک برای جست‌وجوی پارامترهای بهینه SVR

جدول ۲. مجموع میانگین مقادیر CDOM در طول موج‌های اندازه‌گیری شده، مربوط به دریاچه‌های مناطق مورد مطالعه

| منطقه | سال | ۳۷۵ نانومتر | ۴۰۰ نانومتر | ۴۱۲ نانومتر | ۴۴۰ نانومتر | ۴۴۳ نانومتر |
|---------------|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| واسکینیا داچی | ۲۰۱۳ | ۴.۸۶ | ۳.۳۲ | ۳.۸۰ | ۱.۸۸ | ۱.۷۹ |
| واسکینیا داچی | ۲۰۱۴ | ۸.۲۳ | ۵.۶۰ | ۴.۶۹ | ۳.۰۹ | ۲.۹۳ |
| واسکینیا داچی | ۲۰۱۵ | ۶.۶۹ | ۴.۵۲ | ۳.۷۸ | ۲.۴۴ | ۲.۳۱ |
| یامال | ۲۰۱۶ | ۸.۶۶ | ۵.۸۷ | ۴.۹۴ | ۳.۳۵ | ۳.۲۳ |

هرچقدر طول موج افزایش یابد، میزان جذب CDOM نیز بیشتر می‌شود و بازتاب صورت گرفته از طریق CDOM، با افزایش طول موج، به صورت بالقوه کاهش می‌یابد؛ بنابراین، اثر CDOM در سیگنال سنسجس از دور در باند آبی قوی‌تر از باند سبز است. دلایل متعددی بیان می‌کند باند سبز، در بازیابی CDOM، بهتر از باند آبی است. تصحیح جوی طول موج آبی، به ویژه در آب‌های کدر و یا با قدرت جذب بازتاب اندک، نیز با مشکلاتی همراه است. در عین حال معمولاً حساسیت حسگرهای آبی (اقیانوسی)، به دلیل تفکیک مکانی پایین، مطلوب نیست. به ویژه، تابش خورشید در طول موج‌های آبی، روی دریاچه‌های قهوه‌ای غنی از CDOM، نزدیک به صفر است. جذب ازسوی فیتوپلانکتون‌ها^۱ نیز در باند آبی بیش از باند سبز تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین، از لحاظ نظری، نسبت باند سبز/باند قرمز برای بازیابی CDOM، در مقایسه با نسبت باند آبی/باند قرمز لندست ۸، مناسب‌تر است. باند قرمز، در این مورد، با هدف نرمالیزه کردن استفاده می‌شود زیرا تأثیر CDOM در باند قرمز عملاً ناچیز است.

با توجه به اینکه مقادیر CDOM میدانی با مقادیر بازتابی سنسجس از دور حاصل از تصاویر لندست ۸، در بازه‌های ۲۵۴ و ۲۶۰ و ۳۵۰ نانومتر، همبستگی بسیار پایینی دارند؛ از تمامی هشت بازه طول موج موجود در داده‌های میدانی به دست آمده (۲۵۴، ۲۶۰، ۳۵۰، ۳۷۵، ۴۰۰، ۴۱۲، ۴۴۰، ۴۴۳ نانومتر) در الگوریتم SVR استفاده نشده است. در حالت کلی، ارتباط مستحکمی بین CDOM و DOC (کربن آلی محلول) دریاچه‌ها وجود دارد (Tranvik, 1990; Kallio 1999)؛ با این حال، داده‌های میدانی DOC در مناطق مورد مطالعه، برای محاسبه رابطه بین دو متغیر، در دسترس نبود. می‌توان اذعان کرد که در این تحقیق، هشت بازه طول موج در نظر گرفته شده است؛ سه بازه، طبق توضیحات سطرهای پیشین، حذف و مابقی مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. بنابراین، برای مقایسه و تعیین مناسب‌ترین نسبت باندها، از معیارهای RMSE، MSE، MAE و R^2 که در جدول ۳ آمده، استفاده شده است و در این الگوریتم، میزان ضریب تعیین (R^2) به منزله معیار ابتدایی در نظر گرفته شده است.

جدول ۳. مقادیر خطاهای به دست آمده برای نسبت باندهای Coastal، آبی، سبز، قرمز

| GA-SVR | نوع داده | R^2 | MSE | RMSE | MAE |
|--------|----------|-------|--------|-------|-------|
| R0-375 | آموزشی | ۰.۰۲ | ۳۶.۱۹۱ | ۶.۰۱۵ | ۴.۱۹۳ |
| | آزمایشی | ۰.۰۴ | ۳۲.۷۷۶ | ۵.۷۲۴ | ۴.۲۹۳ |
| R1-375 | آموزشی | ۰.۵ | ۱۸.۹۳۸ | ۵.۷۲۴ | ۳.۲۳۴ |
| | آزمایشی | ۰.۶۲ | ۱۱.۵۸۶ | ۳.۴۰۳ | ۲.۵۴ |
| R2-375 | آموزشی | ۰.۰۵ | ۳۲.۸۳۵ | ۵.۷۳۰ | ۴.۵۱۴ |
| | آزمایشی | ۰.۱ | ۳۹.۸۲۴ | ۶.۲۶۰ | ۵.۳۷۶ |
| R0-400 | آموزشی | ۰.۰۵ | ۱۶.۱۰۵ | ۴.۰۱۳ | ۲.۹۴۱ |
| | آزمایشی | ۰.۲۵ | ۱۳.۲۴ | ۳.۶۳۷ | ۲.۸۷۸ |
| R1-400 | آموزشی | ۰.۴ | ۱۰.۶۸۳ | ۳.۲۶۸ | ۲.۲۶۲ |
| | آزمایشی | ۰.۳ | ۷.۶۱۴ | ۲.۷۵۹ | ۱.۸۵۹ |
| R2-400 | آموزشی | -۰.۰۵ | ۱.۹۹۲ | ۱.۴۱۱ | ۱.۲۲۷ |
| | آزمایشی | -۰.۰۲ | ۱.۹۰ | ۱.۳۷۸ | ۱.۰۸ |
| R0-412 | آموزشی | ۰.۱ | ۱۱.۲۶۵ | ۳.۳۵۶ | ۲.۳۰۲ |
| | آزمایشی | -۰.۴ | ۱۲.۸۸۲ | ۳.۵۸۹ | ۲.۷۹۳ |

1. Phytoplankton

جدول ۳. مقادیر خطاهای به دست آمده برای نسبت باندهای Coastal، آبی، سبز، قرمز

| MAE | RMSE | MSE | R^2 | نوع داده | GA-SVR |
|-------|-------|--------|-------|----------|--------|
| ۱.۹۲ | ۲.۹۱ | ۸.۴۷ | ۰.۳۱ | آموزشی | R1-412 |
| ۲.۲۶ | ۳.۴۱۴ | ۱۱.۶۶۰ | ۰.۲ | آزمایشی | |
| ۰.۶۹۹ | ۰.۹۱۸ | ۰.۸۴۳ | ۰.۴۳ | آموزشی | R2-412 |
| ۰.۸۴۲ | ۱.۰۸۹ | ۱.۱۸۷ | ۰.۳۲ | آزمایشی | |
| ۱.۰۳۴ | ۱.۲۷۹ | ۱.۶۳۸ | ۰.۴۱ | آموزشی | R0-440 |
| ۲.۲۹۳ | ۲.۲۸۳ | ۸.۰۱۰ | -۰.۱۳ | آزمایشی | |
| ۱.۲۱ | ۱.۹۳۳ | ۳.۷۳۹ | ۰.۳ | آموزشی | R1-440 |
| ۱.۷۰ | ۲.۵۷۱ | ۶.۶۱۴ | ۰.۱ | آزمایشی | |
| ۰.۵۸۵ | ۰.۹۳۳ | ۰.۸۷۱ | ۰.۸۱ | آموزشی | R2-440 |
| ۰.۹۴۶ | ۱.۰۷۷ | ۱.۱۶۱ | ۰.۷۱ | آزمایشی | |
| ۱.۵۹۵ | ۲.۳۴۸ | ۵.۵۱۱ | ۰.۰۲ | آموزشی | R0-443 |
| ۱.۳۱۱ | ۱.۷۱۶ | ۲.۹۴ | -۰.۳۵ | آزمایشی | |
| ۰.۹۰۹ | ۱.۳۰۹ | ۱.۷۱ | ۰.۶۲ | آموزشی | R1-443 |
| ۱.۵۴۳ | ۲ | ۴.۰۳ | ۰.۴۳ | آزمایشی | |
| ۰.۸۲۱ | ۱.۱۶۱ | ۱.۳۴۹ | ۰.۶۱ | آموزشی | R2-443 |
| ۰.۷۵۴ | ۰.۸۲۶ | ۰.۶۸۳ | ۰.۵۱ | آزمایشی | |

قرمز ($R^2=0.61$) دارد، نسبت باندهای آبی/قرمز میزان خطاهای RSME و MSE بیشتری در مقایسه با باند سبز/قرمز نشان می‌دهد (به ترتیب، $m^{-1} 1.309$ و $1/ m^{-1} 71$) و در محاسبه خطای MAE نیز، می‌توان گفت هرچه حاصل بزرگ‌تر باشد؛ خطای بزرگ‌تری هم انتظار می‌رود. ضریب تعیین باندهای سبز به قرمز ($R^2=0.71$) در طول موج ۴۴۰ نانومتر مقادیر مطلوب‌تری را در مقایسه با مقادیر نسبی دیگر باندها، نمایش می‌دهد؛ بدین معنی که مقادیر R^2 و MAE در نسبت باندهای سبز و قرمز به ۱ نزدیک‌تر است تا باندهای دیگر (به ترتیب، ۰.۷۱ و $m^{-1} 0.946$) که این نکته بهتر بودن ضریب تعیین و نیز میانگین خطای مطلق داده‌ها را در قیاس با چهار طول موج دیگر، می‌رساند. مقادیر RSME و MSE کمتر از دو باند دیگر این طول موج است (به ترتیب، $m^{-1} 1.077$ و $m^{-1} 1.161$). این نتایج نشان‌دهنده بهبود در باند سبز/قرمز، هم برای داده‌های آموزش و هم برای داده‌های آزمایش، است. در جدول ۴، مقادیر پارامترهای بهینه‌شده الگوریتم SVR با الگوریتم ژنتیک، در مورد نسبت باندهای طول موج ۴۴۰، آورده شده است.

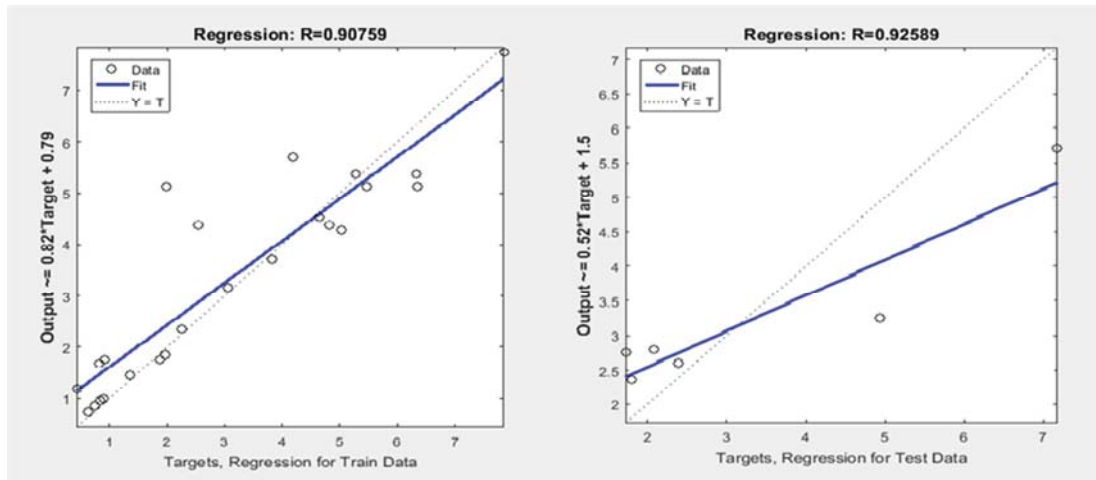
$$R0 = \frac{R1}{R4}, R1 = \frac{R2}{R4}, R2 = \frac{R3}{R4}$$

در طول موج‌های ۴۱۲، ۴۴۰ و ۴۴۳ نانومتر، در نسبت باندهای آبی/قرمز و سبز/قرمز، نتایج همبستگی مناسبی دیده می‌شود ولی در طول موج ۴۱۲ نانومتر، در نسبت باندهای آبی/قرمز و سبز/قرمز، همبستگی مثبت ضعیفی در داده‌های آموزشی (0.31 و 0.43) وجود دارد و میانگین خطای مطلق در این طول موج، در نسبت باند آبی/قرمز، بالاست ($1/m^{-1} 92$) (MAE=). در داده‌های آزمایشی نیز، نسبت‌های Coastal/قرمز در طول موج‌های ۴۴۰ و ۴۴۳ نانومتر دیده می‌شود که نشان‌دهنده رابطه منفی و معکوس است. به‌طور کلی، از جدول ۳ می‌توان نتیجه گرفت که باند Coastal برای بازیابی مقادیر CDOM مناسب نیست و با افزایش طول موج نیز، برآورد بهتری به دست می‌آید. در طول موج ۴۴۳ نانومتر، در نسبت باندهای آبی/قرمز و سبز/قرمز، همبستگی مثبت (0.61 و 0.62) و نسبتاً قوی وجود دارد و دیگر خطاهای اندازه‌گیری شده نیز نتایج خوبی نشان می‌دهد. نسبت باند سبز/قرمز ($R^2=0.62$) نتایجی بهتر از باند آبی/

تعیین بهینه باندهای ماهواره لندست به منظور اندازه‌گیری CDOM دریاچه‌ها ...

جدول ۴. پارامترهای بهینه‌شده مدل SVR برای نسبت طول موج ۴۴۰

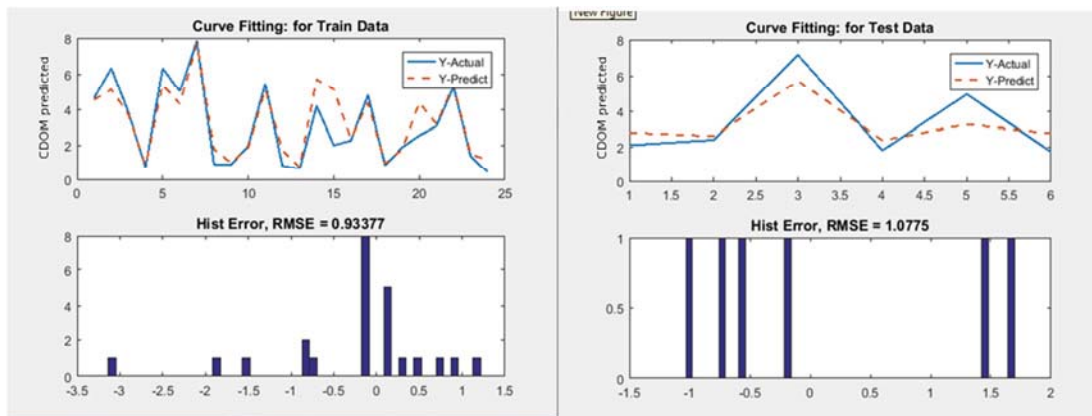
| سیگما | اپسیلون | پارامتر تنظیم | پارامتر مدل SVR |
|--------|---------|---------------|-----------------|
| ۰.۳۱۱۲ | ۱.۳۹۰۴ | ۱۰۶۶.۵ | R_1 / R_4 |
| ۰.۲۵۶۹ | ۰.۰۱۵۲ | ۲۷۹.۶۷۹۶ | R_2 / R_4 |
| ۰.۶۲۲۱ | ۰.۱۰۹۹ | ۵۲۴.۶۱۶۴ | R_3 / R_4 |



شکل ۴. مقادیر اندازه‌گیری‌شده CDOM به مقادیر تخمینی مدل SVR برای داده‌های آموزشی و آزمایشی نسبت باندهای سبز به قرمز، در طول موج ۴۴۰ نانومتر

شکل ۵ نشان‌دهنده منحنی برازش و هیستوگرام خطای داده‌های آموزشی و آزمایشی برای نسبت باندهای سبز/قرمز است. خط نقطه‌چین داده‌های پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد. تنظیم پارامترهای بهینه مدل SVR تأثیر بسیاری در تعیین این خط دارد.

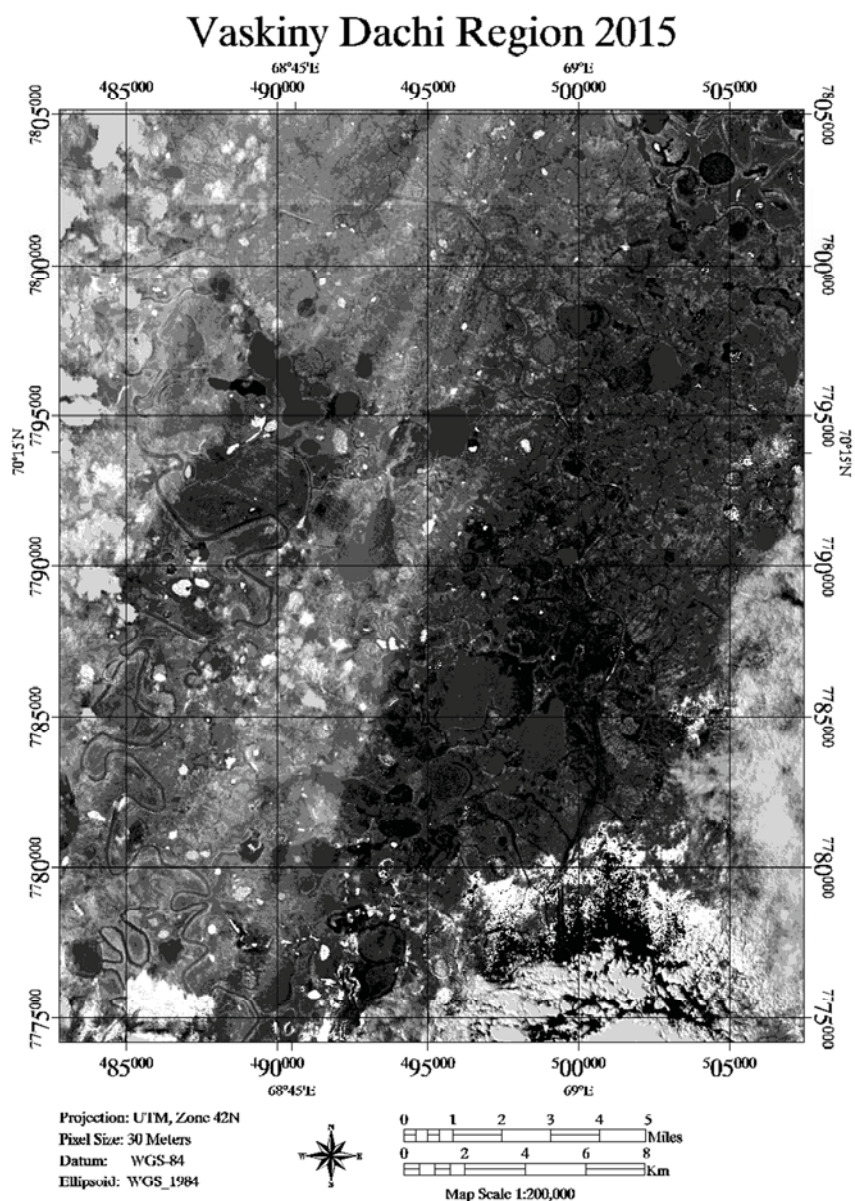
با توجه به شکل ۴، پراکندگی داده‌ها اغلب در حوالی نیم‌ساز ربع اول است. ضریب همبستگی خطی در هر دو داده‌های آموزشی (۰.۹) و آزمایشی (۰.۹۲) مناسب است که قدرت بالای همبستگی خطی را می‌رساند.



شکل ۵. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری‌شده CDOM و مقادیر پیش‌بینی‌شده از طریق تابع SVR در مورد نسبت باندهای سبز به قرمز (R_3/R_4) برای داده‌های آموزشی و آزمایشی نسبت باندهای سبز به قرمز، در طول موج ۴۴۰ نانومتر

اعتبارسنجی متقابل^۱ بررسی شده و k مساوی با ۴ در نظر گرفته شده است. نتیجه اجرای نسبت باند سبز به قرمز ماهواره لندست ۸ در شکل ۶ نشان داده شده است.

به دلیل تعیین پارامتر برهم‌ریختگی داده، در هربار اجرا و اندازه‌گیری داده‌ها، مقادیری مشخص و متفاوت به دست می‌آید که در این باره، سعی شده است بهترین پارامترها در نظر گرفته شود. عملکرد الگوریتم از طریق



شکل ۶. نتیجه اجرای نسبت باند سبز به قرمز در ماهواره لندست ۸، در منطقه واسکینیا داچی در سال ۲۰۱۵

1. K-fold cross validation

اندازه‌گیری مقادیر CDOM و همچنین، نسبت باند coastal / قرمز برای نمایش این موضوع در تصاویر ماهواره لندست ۸ مناسب نیستند. با توجه به ضریب تعیین و میزان خطاها، این نتیجه حاصل شد که برای تعیین ماده آلی محلول رنگی و طول موج ۴۴۰ نانومتر در این مطالعه و منابع آبی شمال روسیه، استفاده از نسبت باندهای سبز به قرمز در ماهواره لندست ۸ مناسب‌ترین انتخاب است.

محققان دیگری برای دستیابی به فرمولی جهان‌شمول، به منظور اندازه‌گیری ضریب جذب CDOM، تلاش‌های بسیاری کردند اما تا کنون هیچ فرمول واحدی برای این منظور حاصل نشده است (Kutser et al., 2015b; Menken et al., 2006; Del Castillo & Miller, 2008). در این مطالعه سعی شده است، با توجه به اختلاف نظر بین محققان سنجش از دور در تعیین مناسب‌ترین بازه و نسبت باندهای طیفی متفاوت و نسبت‌های طیف مرئی با هم مقایسه شوند. اما برای به‌دست‌آوردن نتیجه‌ای یکسان در مطالعه CDOM، نیازمند مشارکت محققان در این زمینه و به‌اشتراک‌گذاری داده‌های مورد مطالعه‌ایم تا معادله و راه‌حلی جامع حاصل شود.

۵- منابع

- Awad, M. & Khanna, R., 2015, **Efficient Learning Machines: Theories, Concepts, and Applications for Engineers and System Designers**, Apress.
- Bergamaschi, B.A., Krabbenhoft, D.P., Aiken, G.R., Patino, E., Rumbold, D.G. & Orem, W.H., 2012, **Tidally Driven Export of Dissolved Organic Carbon, Total Mercury, and Methylmercury from a Mangrove-Dominated Estuary**, Environmental Science & Technology, 46(3): PP. 1371-1378.
- Bowers, D., Evans, D., Thomas, D.N., Ellis, K. & Williams, P.J.le B., 2004, **Interpreting the Colour of an Estuary**, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 59(1), PP. 13-20.

با توجه به ضریب تعیین و میزان خطاها در جدول ۳، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از نسبت باندهای سبز به قرمز در ماهواره لندست ۸ مناسب‌ترین انتخاب برای تعیین ماده آلی محلول رنگی محسوب می‌شود و طول موج ۴۴۰ نانومتر نیز بهترین انتخاب در منابع آبی شمال روسیه است. شایان ذکر است که برای تعیین الگوریتم کلی با هدف به‌دست‌آوردن مقادیر CDOM در منابع آبی، به‌گردآوری داده‌های بیشتر و متنوع از سراسر دنیا و همکاری متخصصان سنجش از دور و آبگیرشناسان نیاز داریم.

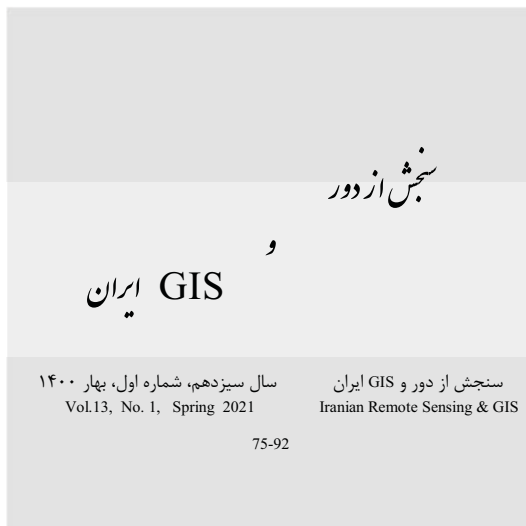
۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، بازه بهینه نسبت باندهای مناسب برای اندازه‌گیری ضریب جذب ماده آلی محلول رنگی، با استفاده از الگوریتم بهینه‌شده GA-SVR، بررسی و معرفی شده و از داده‌های ماهواره لندست ۸، مربوط به دریاچه‌های منطقه واسکینیا داچی (طی سه سال متوالی ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵) و یامال (در سال ۲۰۱۶)، استفاده شده است. از هشت بازه به‌کاررفته (۴۴۰-۲۵۳ نانومتر)، سه بازه ۲۵۴، ۲۶۰، ۳۵۰ نانومتر در الگوریتم استفاده نشد زیرا همبستگی بین مقادیر ماهواره‌ای و زمینی پایین بود. با استفاده از الگوریتم GA-SVR، پنج بازه دیگر در سه نسبت باندهای Coastal به قرمز (R_1/R_4)، آبی به قرمز (R_2/R_4) و نسبت باندهای سبز به قرمز (R_3/R_4) مطالعه شد. ضریب تعیین ($R^2=0.71$) باندهای سبز به قرمز، در طول موج ۴۴۰ نانومتر، مقادیری مطلوب‌تر از مقادیر نسبی دیگر باندها داراست. بدین معنی که مقدار R^2 و MAE در نسبت باندهای سبز/قرمز مطلوب‌تر از باندهای دیگر است (به‌ترتیب، ۰.۷۱ و $0.946 m^{-1}$). این نشان‌دهنده بهتر بودن ضریب تعیین و نیز میانگین خطای مطلق داده‌ها در مقایسه با چهار طول موج دیگر است. مقادیر RSME و MSE کمتر از دو باند دیگر این طول موج است (به‌ترتیب، $1.077 m^{-1}$ و $1/161 m^{-1}$). نتایج نشان می‌دهد که نسبت باند سبز/قرمز، برای

- Brando, V.E. & Dekker, A.G., 2003, **Satellite Hyperspectral Remote Sensing for Estimating Estuarine and Coastal Water Quality**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(6), PP. 1378-1387.
- Brando, V.E., Dekker, A.G., Park, Y.J. & Schroeder, T., 2012, **Adaptive Semianalytical Inversion of Ocean Color Radiometry in Optically Complex Waters**, Applied Optics, 51(15), PP. 2808-2833.
- Brezonik, P., Menken, K.D. & Bauer, M., 2005, **Landsat-Based Remote Sensing of Lake Water Quality Characteristics, Including Chlorophyll and Colored Dissolved Organic Matter (CDOM)**, Lake and Reservoir Management, 21(4), PP. 373-382.
- Carder, K.L., Chen, F.R., Lee, Z.P., Hawes, S.K. & Kamykowski, D., 1999, **Semianalytic Moderate-Resolution Imaging Spectrometer Algorithms for Chlorophyll a and Absorption with Bio-Optical Domains Based on Nitrate-Depletion Temperatures**, Journal of Geophysical Research: Oceans, 104(C3), PP. 5403-5421.
- Cristianini, N. & Shawe-Taylor, J., 2000, **An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-Based Learning Methods**, Cambridge University Press.
- D'Sa, E.J. & Miller, R.L., 2003, **Bio-Optical Properties in Waters Influenced by the Mississippi River During low Flow Conditions**, Remote Sensing of Environment, 84(4), PP. 538-549.
- Del Castillo, C.E. & Miller, R.L., 2008, **On the Use of Ocean Color Remote Sensing to Measure the Transport of Dissolved Organic Carbon by the Mississippi River Plume**, Remote Sensing of Environment, 112(3), PP. 836-844.
- Evans, C., Monteith, D.T. & Cooper, D.M., 2005, **Long-Term Increases in Surface Water Dissolved Organic Carbon: Observations, Possible Causes and Environmental Impacts**, Environmental Pollution, 137(1), PP. 55-71.
- Häder, D.-P., Kumar, H.D., Smith, R.C. & Worrest, R.C., 2007, **Effects of Solar UV Radiation on Aquatic Ecosystems and Interactions with Climate Change**, Photochemical & Photobiological Sciences, 6(3), PP. 267-285.
- Herzprung, P., von Tümpling, W., Hertkorn, N., Harir, M., Büttner, O., Bravidor, J., Friese, K. & Schmitt-Kopplin, P., 2012, **Variations of DOM Quality in Inflows of a Drinking Water Reservoir: Linking of van Krevelen Diagrams with EEMF Spectra by Rank Correlation**, Environmental Science & Technology, 46(10), PP. 5511-5518.
- Hoge, F.E. & Lyon, P.E., 1996, **Satellite Retrieval of Inherent Optical Properties by Linear Matrix Inversion of Oceanic Radiance Models: An Analysis of Model and Radiance Measurement Errors**, Journal of Geophysical Research: Oceans, 101(C7), PP. 16631-16648.
- Hoge, F.E., Vodacek, A., Swift, R.N., Yungel, J.K. & Blough, N.V., 1995, **Inherent Optical Properties of the Ocean: Retrieval of the Absorption Coefficient of Chromophoric Dissolved Organic Matter from Airborne Laser Spectral Fluorescence Measurements**, Applied Optics, 34(30), PP. 7032-7038.
- Joshi, I.D., D'Saa, E.J., Osburn, C.L., Bianchic, T.S., Ko, D.S., Oviedo-Vargas, D., Arellano, A.R. & Ward, N.D., 2017, **Assessing Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) Distribution, Stocks, and Fluxes in Apalachicola Bay Using Combined Field, VIIRS Ocean Color, and Model Observations**, Remote Sensing of Environment, 191, PP. 359-372.
- Kallio, K., 1999, **Absorption Properties of Dissolved Organic Matter in Finnish Lakes**, Proc. Estonian Acad. Sci. Biol. Eco, 148, PP. 75-83.
- Kallio, K., Attila, J., Härmä, P., Koponen, S., Pulliainen, J., Hyytiäinen, U-M & Pyhälähti, T., 2008, **Landsat ETM+ Images in the Estimation of Seasonal Lake Water Quality in Boreal River Basins**, Environmental Management, 42(3), PP. 511-522.
- Kecman, V., 2001, **Learning and Soft Computing: Support Vector Machines,**

- Neural Networks, and Fuzzy Logic Models**, Bradford Books.
- Kutser, T., 2012, **The Possibility of Using the Landsat Image Archive for Monitoring Long Time Trends in Coloured Dissolved Organic Matter Concentration in Lake Waters**, Remote Sensing of Environment, 123, PP. 334-338.
- Kutser, T., Alikas, K., Kothawala, D.N. & Köhler, S.J., 2015a, **Impact of Iron Associated to Organic Matter on Remote Sensing Estimates of Lake Carbon Content**, Remote Sensing of Environment, 156, PP. 109-116.
- Kutser, T., Pierson, D.C., Kallio, K.Y., Reinart, A. & Sobek, S., 2005, **Mapping Lake CDOM by Satellite Remote Sensing**, Remote Sensing of Environment, 94(4), PP. 535-540.
- Kutser, T., Tranvik, L. & Pierson, D.C., 2009, **Variations in Colored Dissolved Organic Matter between Boreal Lakes Studied by Satelliteremote Sensing**, Journal of Applied Remote Sensing, 3(1), P. 033538.
- Kutser, T., Verpoorter, C., Paavel, B. & Tranvik, L.J., 2015b, **Estimating Lake Carbon Fractions from Remote Sensing Data**, Remote Sensing of Environment, 157, PP. 138-146.
- Lee, Z., Carder, K.L. & Arnone, R.A., 2002, **Deriving Inherent Optical Properties from Water Color: A Multiband Quasi-Analytical Algorithm for Optically Deep Waters**, Applied Optics, 41(27), PP. 5755-5772.
- Lee, Z., Carder, K.L., Hawes, S.K., Steward, R.G., Peacock, T.G. & Davis, C.O., 1994, **Model for the Interpretation of Hyperspectral Remote-Sensing Reflectance**, Applied Optics, 33(24), PP. 5721-5732.
- Mannino, A., Russ, M.E. & Hooker, S.B., 2008, **Algorithm Development and Validation for Satellite-Derived Distributions of DOC and CDOM in the US Middle Atlantic Bight**, Journal of Geophysical Research: Oceans, 113(C7).
- Matilainen, A., Vepsäläinen, M. & Sillanpää, M., 2010, **Natural Organic Matter Removal by Coagulation during Drinking Water Treatment: A Review**, Advances in Colloid and Interface Science, 159(2), PP. 189-197.
- McDonald, T.A. & Komulainen, H., 2005, **Carcinogenicity of the Chlorination Disinfection by-Product MX**, Journal of Environmental Science and Health Part C, 23(2), PP. 163-214.
- Menken, K.D., Brezonik, P.L. & Bauer, M.E., 2006, **Influence of Chlorophyll and Colored Dissolved Organic Matter (CDOM) on Lake Reflectance Spectra: Implications for Measuring Lake Properties by Remote Sensing**, Lake and Reservoir Management, 22(3), PP. 179-190.
- Mobley, C.D., Sundman, L.K., Davis, C.O., Bowles, J.H., Downes, T.V., Leathers, R.A., Montes, M.J., Bissett, W.P., Kohler, D.D.R., Reid, R.P., Louchard, E.M. & Gleason, A., 2005, **Interpretation of hyperspectral remote-sensing imagery by spectrum matching and look-up tables**, Applied Optics, 44(17), PP. 3576-3592.
- Nelson, N.B. & Coble, P.G., 2009, **Optical Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter**, Practical Guidelines for the Analysis of Seawater, CRC Press, PP. 91-108.
- Roushangar, K. & Koosheh, A., 2015, **Evaluation of GA-SVR Method for Modeling Bed Load Transport in Gravel-Bed Rivers**, Journal of Hydrology, 527, PP. 1142-1152.
- Schölkopf, B., 2000, **Statistical Learning and Kernel Methods**, Microsoft Research, Cambridge, UK.
- Shawe-Taylor, J. & Cristianini, N., 2004, **Kernel Methods for Pattern Analysis**, Cambridge University Press.
- Shuchman, R.A., Leshkevich, G., Sayers, M.J., Johengen, T.H., Brooks, C.N. & Pozdnyakov, D., 2013, **An Algorithm to Retrieve Chlorophyll, Dissolved Organic Carbon, and Suspended Minerals from Great Lakes Satellite Data**, Journal of Great Lakes Research, 39(1), PP. 14-33.

- Toming, K., Toming, K., Kutser, T., Tuvikene, L., Viik, M., Nõges, T. 2016, **Dissolved Organic Carbon and Its Potential Predictors in Eutrophic Lakes**, Water Research, 102, PP. 32-40.
- Tranvik, L.J., 1990, **Bacterioplankton growth on fractions of dissolved organic carbon of different molecular weights from humic and clear waters**, Appl. Environ. Microbiol., 56(6), PP. 1672-1677.
- Vahtmäe, E., T., Kutser, G., Martin & J., Kotta, 2006, **Feasibility of Hyperspectral Remote Sensing for Mapping Benthic Macroalgal COVER in Turbid Coastal Waters—a Baltic Sea Case Study**, Remote Sensing of Environment, 101(3), PP. 342-351.
- Verma, A., Llorà, X., Goldberg, D.E. & Campbell, R.H., 2009, **Scaling Genetic Algorithms Using Mapreduce**, Ninth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, IEEE.
- Vertucci, F.A. & Likens, G.E., 1989, **Spectral Reflectance and Water Quality of Adirondack Mountain Region Lakes**, Limnology and Oceanography, 34(8), PP. 1656-1672.
- Wetzel, R.G., 2001, **Limnology: Lake and River Ecosystems**, Gulf Professional Publishing.
- Zhu, W., Yu, Q., Tian, Y.Q., Becker, B.L., Hunter, T.Z. & Carrick, J., 2014, **An Assessment of Remote Sensing Algorithms for Colored Dissolved Organic Matter in Complex Freshwater Environments**, Remote Sensing of Environment, 140, PP. 766-778.
- Zhu, W., Yu, Q., Tian, Y.Q., Chen, R.F. & Gardner, G.B., 2011, **Estimation of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Mississippi and Atchafalaya River Plume Regions Using Above-Surface Hyperspectral Remote Sensing**, Journal of Geophysical Research: Oceans, 116(C2).



Optimal Band Selection of Landsat-8 Images for Estimation of CDOM of Lakes Using Support Vector Regression

Momeni Esfahani M.^{1*} and Amini A.S.²

1. M.Sc. of RS and GIS, Islamic Azad University, South Tehran Branch
2. Associate Prof., Dep. of Surveying Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch

Abstract

Colored dissolved organic matter (CDOM) is an important measure of water quality. CDOM can reduce the amount of light in water layers, disrupt the biological activity of photosynthesis, and inhibit the growth of phytoplankton populations that are essential for the aquatic food chain. Contrary to conducted research to date, which uses a specific wavelength, in this paper, we first examined the possibility of using visible portion of the spectrum to determine CDOM at 254-443 nm (254, 260, 350, 375, 400, 412, 440, 443 nm) in Landsat 8. We then selected the most appropriate band ratios to measure CDOM at measurable wavelengths using the SVR algorithm (the parameters of which have been optimized using the genetic algorithm). It is noteworthy that in this study, the ratio of Coastal to red bands (R_1/R_4), blue to red (R_2/R_4), and the ratio of green to red bands (R_3/R_4) were considered for CDOM retrieval. Based on the results, considering the coefficient of determination ($R^2 = 0.71$) and the amount of errors ($MSE = 1.161 \text{ m}^{-1}$, $RMSE = 1.077 \text{ m}^{-1}$ and $MAE = 0.946 \text{ m}^{-1}$), it was concluded that the ratio of green to red bands in Landsat 8 is the most suitable choice for determining the colored dissolved organic matter. Moreover, according to the results from this study, the measurement of CDOM (440) is the most appropriate index for evaluating the quality of lake water resources in terms of their concentrations.

Keywords: Colored dissolved organic matter, SVR, Landsat 8, Water quality measurement.