

# پایش کیفیت پهنه‌های آبی با استفاده از تصاویر سنجش از دور هوایی و ماهواره‌ای (مفاهیم، روش‌ها و راهکارهای نوین)

پهنه‌های آبی بدون شک از مهم‌ترین اکوسیستم‌های طبیعی کره زمین است. لذا پایش و نظارت بر سلامت آن‌ها، یکی از اولویت‌های اصلی مدیران ارشد منابع طبیعی هر کشوری محسوب می‌شود. پایش مستمر پهنه‌های آبی با روش‌های متداول و سنتی، امری دشوار و هزینه‌بر است؛ از طرفی به‌کارگیری فناوری‌های نوین مانند تصاویر ماهواره‌ای و سنجش از دور در بسیاری از کاربردها مفید، سریع و کم‌هزینه ظاهر شده است. یکی از مهم‌ترین کاربردهای تصاویر سنجش از دور، پایش کمی و کیفی پهنه‌های آبی است. از این رو در این تحقیق به بیان مفاهیم، مزایا، روش‌ها، محدودیت‌ها و قابلیت‌های علم و فناوری سنجش از دور در پایش پهنه‌های آبی پرداخته شده است. براساس نتایج حاصل از تحقیق حاضر، استفاده از روش‌های تجربی، تحلیلی و نیمه-تجربی/ نیمه‌تحلیلی در استخراج متغیرهای کیفیت پهنه‌های آبی می‌تواند مفید واقع شود. در این راستا، معادلات رگرسیون خطی بیش از سایر معادلات موردتوجه محققان قرار گرفته است. علاوه بر این، منافع و مزیت‌های کاربرد فناوری‌های فضایی در رفع چالش‌های پایش پهنه‌های آبی کشور، مورد تأیید قرار می‌گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** سنجش از دور، کیفیت آب، پهنه‌های آبی، تصاویر فضایی، تصاویر هوایی.

## Monitoring the Quality of Water Bodies Using Satellite and Aerial satellite imagery Remote Sensing Imagery (Concepts, Methods and New Approaches)

Undoubtedly water bodies are one of the important ecosystems in the world. Therefore, monitoring and protection of their health is one of the main priorities of the top natural resource managers of each country. The protection of the water bodies using conventional and traditional methods is a difficult and costly task. On the other hand, new technologies and sciences such as satellite or aerial remote sensing can be suitable and cost-effective for many environmental applications. Monitoring the quality of water bodies is one of the applications of remote sensing. Consequently, concepts, advantages, methods, and limitations of remote sensing in monitoring water bodies are presented in this study. Based on results, empirical, analytical, and semi-empirical/ semi-analytical approaches can be effectively used to extract water quality parameters from captured images in remote sensing.

**Keywords:** Remote Sensing, Water quality, Water bodies, Regression approaches

**میلاد جانعلی پور<sup>۱</sup>**، استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
**حدیثه بابایی<sup>۲</sup>**، کارشناس، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
**مریم صلواتی فر<sup>۳</sup>**، استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
**نادیا عباس‌زاده طهرانی<sup>۴\*</sup>**، استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

\* تهران، کدپستی: 1465774111

Tehrani@ari.ac.ir

**M. Janalipour<sup>1</sup>**, Assistant Professor, Department of Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology

**H. Babaei<sup>2</sup>**, Masters, Department of Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology

**M. Salavati far<sup>3</sup>**, Assistant Professor, Department of Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology

**N. Abbaszade Tehrani<sup>4\*</sup>**, Assistant Professor, Department of Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology

\*Corresponding Author, Postal Code: 1465774111, Tehran, IRAN

Tehrani@ari.ac.ir

## مقدمه

این سؤال که منابع کره زمین قادر به تأمین چه تعداد از جمعیت انسانی می‌باشند، همواره موضوع مورد بحث اغلب متخصصین بوده است. امروزه آشکار شده که یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید مواد غذایی، کمبود منابع آب است [۱]. بر اساس برآوردها، جمعیت جهان در سال ۲۰۵۰ بالغ بر ۹/۱ میلیارد نفر خواهد بود که از این مقدار حدود ۶۹٪ شهرنشین هستند. با افزایش جمعیت شهری و تسری الگوهای مصرف ناپایدار، منابع محدود کره زمین بیش از پیش تحت فشار قرار خواهند گرفت. از سوی دیگر، در بسیاری از مناطق جهان، آلودگی‌ها به سرعت در حال از بین بردن منابع آب در دسترس است. هر لیتر از فاضلاب آلوده، می‌تواند حجم زیادی از پهنه‌های آبی پذیرنده آن را آلوده سازد [۲]. علاوه بر تغییر الگوی مصرف و افزایش هدر رفت منابع آبی، تغییرات اقلیمی نیز اثرات مستقیم و غیرمستقیم بر روی کل چرخه هیدرولوژیکی خواهد داشت. از آن جمله می‌توان به تغییر توزیع مکانی و زمانی منابع آب در کشورها، کاهش دسترسی آن‌ها به منابع آب، کاهش تغذیه آبخوان‌ها و کاهش کیفیت منابع آب اشاره کرد [۳]. با توجه به قرار گرفتن کشور ایران در کمربند خشک و نیمه‌خشک کره زمین، تنزل کمیت و کیفیت منابع آب در دسترس موجب ایجاد مشکلات اقتصادی، اجتماعی، محیط‌زیستی و حتی سیاسی خواهد شد. بطور کلی مناطق خاورمیانه و آفریقای شمالی به اثرات تغییرات اقلیم بر روی منابع آبی حساس است. تغییرات اقلیم به همراه رشد جمعیت، اثرات منفی بسیاری بر روی منابع آب مناطق مذکور دارد [۴].

کشور ایران دارای پهنه‌های آبی متعدد و متنوع شامل دریا، دریاچه، رودخانه، تالاب و غیره است که به پهنه‌های داخلی، شمالی و جنوبی تقسیم می‌شود. متأسفانه بخش عمده پهنه‌های آبی کشور ایران در طول دهه‌های اخیر در معرض آسیب و تخریب جدی قرار گرفته است. مطالعات نشان می‌دهد که روند افت کیفیت منابع آب در کشور ایران طی دهه ۱۳۹۲-۱۳۸۳ تشدید یافته است. علاوه بر رشد جمعیت، مهاجرت و شهرنشینی، افزایش پساب‌ها، وجود خشکسالی و تغییر اقلیم، کاهش رواناب‌ها، تأثیر شدیدی بر کاهش کیفیت منابع آب داشته‌اند. افزایش بدون برنامه‌ریزی سطح زیر کشت محصولات کشاورزی و عدم توجه به مدیریت زهاب‌ها، موجب آلوده شدن سالانه منابع آب کشور با در حدود ۲۷ میلیارد زهاب کشاورزی شده است. امروزه، کشورهای پیشرفته با استفاده از ابزارهای موجود خود سعی بر حفظ و نگهداری پهنه‌های آبی ارزشمند خود دارند. در کشور ما، به دلیل عدم توجه مسئولین و عامه

مردم، این اکوسیستم‌های ارزشمند دچار آسیب‌های فراوان و بعضاً غیرقابل جبران شده‌اند (از جمله نابودی تدریجی دریاچه ارومیه). از این رو پایش و مدیریت بهینه پهنه‌های آبی کشور امری ضروری و مهم است. پایش مستمر منابع آبی توسط روش‌های متداول و بازدید زمینی و میدانی امری زمان‌بر، پرهزینه و عملاً غیرممکن است. از این رو ضروری است از منابع جدید و کارآمد برای این منظور استفاده شود. علم سنجش از دور که به استخراج و تفسیر اطلاعات از تصاویر ماهواره‌ای و هوایی می‌پردازد، یکی از منابع جدید برای پایش مناطق آبی است. به علت پوشش وسیع از مناطق مختلف، فرمت رقومی تصاویر، تنوع توان تفکیک مکانی، زمانی، رادیومتریکی و طیفی یکی از منابع کارآمد برای پایش منابع آبی کشور محسوب می‌شود. استخراج اطلاعات از تصاویر سنجش از دوری به روش‌های کارآمد و نوین نیازمند است. علاوه بر این، به دلیل وجود انواع پهنه‌های آبی نظیر رودخانه، دریا، دریاچه، تالاب و غیره، استخراج اطلاعات از تصاویر سنجش از دور برای هر یک نیازمند روند خاص و منحصر است.

پیشرفت‌های اخیر در دانش و فناوری سنجش از دور موجب بکارگیری گسترده آن در پایش و مدیریت پهنه‌های آبی شده است. در نتیجه، خواص هیدرولوژیکی با مقیاس‌های مکانی و زمانی مناسب قابل استخراج می‌باشد که موجب بهبود روش‌های مدل‌سازی پایش کیفیت آب در پهنه‌های مختلف آب‌های داخلی و خارجی شده است [۵]. این امر در نهایت موجب ردیابی سریع و به‌هنگام مخاطرات محیط زیستی حاصل از افزایش بار مواد مغذی، آلاینده‌های سمی، فلزات سنگین، شکوفندگی مضر جلبکی، تغییرات میزان کلروفیل و همچنین میزان شوری و درجه حرارت و غیره، توسط فرصت‌های فراهم شده با سنجش از دور می‌شود.

در این مقاله، نحوه بکارگیری دانش و فناوری سنجش از دور در پایش و مدیریت پهنه‌های آبی مورد بررسی قرار می‌گیرد. ضمن بررسی انواع آلاینده‌های پهنه‌های آبی، سکوها و سنجنده‌ها و همچنین روش‌ها و الگوریتم‌های سنجش از دوری مناسب برای پایش پهنه‌های آبی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. انواع آلاینده‌های آب و استانداردهای موجود هر ماده خارجی که به آب اضافه شده و کیفیت فیزیکی، شیمیایی، یا بیولوژیکی آن را به نحوی تغییر دهد که برای مصرف انسان، سایر موجودات و کشاورزی مضر باشد و حتی با تصفیه عادی نیز نتوان آن را برای آشامیدن مناسب ساخت، جزء آلوده‌کننده‌های آب در نظر گرفته می‌شود [۳، ۶، ۷]. براساس دستورالعمل کیفیت آب آشامیدنی سازمان بهداشت جهانی در سال ۲۰۱۱ [۷]، انواع آلوده‌کننده‌های آب شامل پس‌مانده‌های

پارامتر	گروه ۱ (ماهیان گرم آبی)	گروه ۲ (ماهیان سردآبی)	حداقل نمونه‌برداری و تناوب اندازه‌گیری	توضیحات
جامدات معلق (میلی‌گرم بر لیتر)	کمتر از ۲۵	کمتر از ۲۵	ماهانه	مقادیر میانگین حسابی غلظت هستند و برای جامدات معلق همراه با مواد شیمیایی مضر کاربرد ندارند.
BOD5 (میلی‌گرم بر لیتر)	کمتر از سه	کمتر از شش	ماهانه	
فسفرکل (میلی‌گرم بر لیتر)	کمتر از ۰/۰۶۵	کمتر از ۰/۱۳	ماهانه	برای دریاچه‌ها و تالاب‌ها بر اساس غلظت در لایه سطحی است.
نیتريت (میلی‌گرم بر لیتر)	کمتر از ۰/۰۱	کمتر از ۰/۰۳	ماهانه	
ترکیبات فنلی (میلی‌گرم بر لیتر)	۰/۰۴	۰/۰۴	ماهانه	آزمایش طعم تنها در محلی که احتمال وجود ترکیبات فنلی است، باید انجام شود.
هیدروکربن‌های نفتی (میلی‌گرم بر لیتر)	۰/۰۱	۰/۰۱	ماهانه	آزمایش بصری باید به‌طور منظم یک نوبت در ماه و ترجیحاً همراه با آزمایش مزه در محلی که احتمال وجود هیدروکربن‌ها است، انجام شود.
آمونیاک (یونیزه نشده) (میلی‌گرم بر لیتر)	کمتر مساوی ۰/۰۲۵	کمتر مساوی ۰/۰۲۵	یا ماهانه	ممکن است غلظت آمونیاک یونیزه نشده افزایش جزئی در طول روز داشته باشد (برای محاسبه غلظت آمونیاک یونیزه نشده لازم است درجه حرارت و PH آب در محل اندازه‌گیری شوند).
آمونیاک کل (میلی‌گرم بر لیتر)	کمتر مساوی ۰/۰۰۵	کمتر مساوی ۰/۰۰۵	یا ماهانه	غلظت بالاتر کلرین باقی‌مانده کل (میلی‌گرم بر لیتر) HOCI
PH	۶-۹	۶-۹	ماهانه	غلظت بالاتر کلرین‌های بالاتر از شش قابل قبول است.

اکسیژن خواه، عوامل بیماری‌زا، کودهای شیمیایی، ترکیبات آلی سنتزی (مصنوعی)، ترکیبات نفتی، ۶) ترکیبات آلی طبیعی، مواد شیمیایی معدنی و کانی، عناصر نادر، شوری، مواد رادیو اکتیویته و ۱۱) گرماس.

هدف از بررسی کیفیت آب با استفاده از سنجنش از دور، شناسایی آن دسته از متغیرهای کیفی آب است که بر روی جانداران تأثیرگذار بوده و به نحوی حیات آن‌ها را به خط می‌اندازد. از آنجا که روش‌های سنجنش از دوری این متغیرها را به‌صورت کمی بررسی می‌نماید، اطلاع از حدود آستانه خطر این متغیرها در استانداردهای کیفیت آب بسیار ضروری است. تاکنون دستورالعمل‌های مختلفی برای تبیین متغیرهای کیفیت آب در جهان تهیه و تنظیم شده است [۸، ۹]. جدول ۱ استاندارد کیفیت آب برای ماهیان گرم آبی و سرد آبی را که توسط سازمان محیط‌زیست ایران تهیه و تنظیم شده است نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر متغیر کیفی آب دارای محدوده استاندارد مختص به خود است که این مقادیر ممکن است در استانداردهای کشورهای دیگر کمی متفاوت باشد. به‌منظور استفاده از تصاویر سنجنش از دور برای پایش کیفیت آب بهتر است متخصصان این استانداردها را در نظر داشته باشند.

جدول ۱- استاندارد کیفیت آب برای حفاظت محیط‌زیست (اکوسیستم‌های آبی) سازمان محیط‌زیست (مطابق جدول دستورالعمل سازمان محیط‌زیست) [۱۰، ۱۱].

پارامتر	گروه ۱ (ماهیان گرم آبی)	گروه ۲ (ماهیان سردآبی)	حداقل نمونه‌برداری و تناوب اندازه‌گیری	توضیحات
درجه حرارت (درجه سلسیوس)	۱/۵	۳	اختلاف درجه حرارت در پایین‌دست نقطه تخلیه آلودگی حرارتی (در مرز ناحیه اختلاط) با بالادست آن نباید بیش از مقادیر زیر باشد:	درجه حرارت در پایین‌دست نقطه تخلیه آلودگی حرارتی در بالادست و ناگهانی درجه حرارت تخلیه آلودگی حرارتی باید از تغییر درجه حرارت سلسیوس
اکسیژن محلول (میلی‌گرم بر لیتر)	حداقل در ۵۰ درصد مواقع ۹ میلی‌گرم بر لیتر یا ۹۰ درصد اشباع	حداقل در ۵۰ درصد مواقع ۸ میلی‌گرم بر لیتر یا ۸۰ درصد اشباع و بیش‌تر و در ۱۰۰ درصد مواقع ۷ میلی‌گرم بر لیتر یا ۷۰ درصد اشباع و بیش‌تر	ماهانه، حداقل یک نوبت نمونه‌برداری در شرایط اکسیژن محلول پایین بیش‌تر و در ۱۰۰ درصد مواقع ۵ میلی‌گرم بر لیتر یا ۵۰ درصد اشباع و بیش‌تر	اکسیژن محلول (میلی‌گرم بر لیتر)
PH	۶-۹	۶-۹	ماهانه	

## کاربرد انواع سکوها و سنجنده‌های سنجش از دور در پایش آلودگی منابع آب

استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور غیرفعال برای پایش پهنه‌های آبی از دهه ۱۹۷۰، آغاز شد. به عنوان نمونه ماهواره لندست<sup>۱</sup> به منظور پایش عوارض محیطی مورد استفاده قرار گرفت. این ماهواره دارای باندهای قرمز، آبی و سبز با توان تفکیک مکانی ۱۸۵ متر بود. پس از آن، ماهواره‌های لندست ۲ و ۳ نمونه‌های موفق دیگر سکوها مناسب برای پایش محیطی و به طور خاص، منابع آب بودند. با ارسال لندست ۴ در سال ۱۹۸۲ سنجنده‌ها از نظر توان تفکیک طیفی و مکانی بهبود قابل ملاحظه‌ای یافتند. امروزه با پیشرفت سنجنده‌های ماهواره‌ای و هوایی، استفاده از آن‌ها در پایش منابع آب بیش از پیش شده است. به‌طور کلی سنجنده‌های مورد استفاده برای پایش منابع آب در بازه‌های مختلف طول موج تعریف شده‌اند که عبارتند از:

(۱) رادار (۱-۳۰ سانتی‌متر)،

(۲) مایکروویوهای غیرفعال (۲-۸ میلی‌متر)،

(۳) باند حرارتی (۸-۱۴ میکرومتر)،

(۴) مادون قرمز میانی (۳-۵ میکرومتر)،

(۵) مادون قرمز نزدیک (۱-۳ میکرومتر)،

(۶) مرئی (۳۵۰-۷۵۰ نانومتر) و

(۷) فرابنفش (۲۵۰-۳۵۰ نانومتر) [۱۲].

بر اساس تحقیق انجام شده توسط چانگ و همکاران، سنجنده‌های فضایی زیادی برای پایش پارامترهای کیفیت آب استفاده شده‌اند که به‌طور خاص می‌توان به استر<sup>۲</sup>، ترا<sup>۳</sup>، مدیس<sup>۴</sup>، ای وی اچ آر<sup>۵</sup>، اسپات<sup>۶</sup>، لندست تی ام، آیکنوس<sup>۷</sup>، ای آر اس<sup>۸</sup>، سی‌ویفر<sup>۹</sup>، کوئیک‌برد<sup>۱۰</sup>، مریس<sup>۱۱</sup> و غیره اشاره کرد [۱۲]. سنجنده‌های مختلف توانایی استخراج پارامترهای کیفیت آب از قبیل کلروفیل نوع a<sup>۱۲</sup>، نیترات<sup>۱۳</sup>، دما، ذرات معلق کل<sup>۱۴</sup>، کربن آلی کل<sup>۱۵</sup> و مواد شیمیایی<sup>۱۶</sup> را دارد. همچنین، سنجش از دور هوایی در مطالعات ارزیابی کیفیت آب به‌خصوص در پهنه‌های کوچک‌تر نیازمند تصاویر با توان تفکیک

مکانی پایین‌تر، کاربرد زیادی دارد. حاجی قلی‌زاده و همکاران، از مهم‌ترین سنجنده‌های هوایی مورد استفاده در ارزیابی کیفیت آب در مطالعات مختلف به HYDICE، AVIRIS، های‌مپ<sup>۱۷</sup>، ای‌پکس<sup>۱۸</sup>، کَسی<sup>۱۹</sup>، EPS-H، DAIS، آیس<sup>۲۰</sup> و HySpex از سنجنده‌های فراطیفی و نیز MIVIS و Daedalus از سنجنده‌های چندطیفی اشاره کردند [۱۳]. براساس تحقیقات انجام شده توسط نویسندگان مقاله، تفاوت چندانی در ایجاد ارتباط میان مشاهدات سنجش از دور و متغیرهای کیفیت آب میان سنجنده‌های هوایی و فضایی مشاهده نمی‌شود. از این رو، در بخش بعد انواع روش‌های سنجش از دور برای پایش آلودگی منابع آب بدون تفکیک سکوها هوایی و فضایی ارائه خواهد شد.

در تحقیقات پیشین از انواع سکوها اعم از هوایی و فضایی برای حمل سنجنده‌ها برای پایش آلودگی آب استفاده شده‌است. تفاوت میان سنجنده‌های هوایی و فضایی از زاویه دیدهای مختلف در جدول ۲ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عوامل زیادی از قبیل ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه برای انتخاب سنجنده هوایی یا فضایی اهمیت دارد.

بررسی منابع مطالعاتی نشان داد که سنجنده TM بیش از دیگر سنجنده‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. برای رودخانه‌ها و سایر مناطق مورد مطالعه که به توان تفکیک طیفی و مکانی بالاتری احتیاج دارد، آلوس/ای‌وی‌ان‌آی‌آر<sup>۲۱</sup>، آیکنوس<sup>۲۲</sup> از سنجنده‌های فضایی و تصاویر فراطیفی کَسی<sup>۲۳</sup> و آیس از سنجنده‌های هوایی برای تعیین کدورت و مواد معلق استفاده شده است. روش تفسیر تصاویر و ارزیابی کدورت نیز از رگرسیون خطی ساده تا رگرسیون چندگانه غیرخطی، تحلیل اجزای اصلی<sup>۲۴</sup> و شبکه‌های عصبی بهبود یافته است.

جدول ۲- تفاوت سنجنده‌های قابل نصب بر روی سکوها فضایی و هوایی [۱۲].

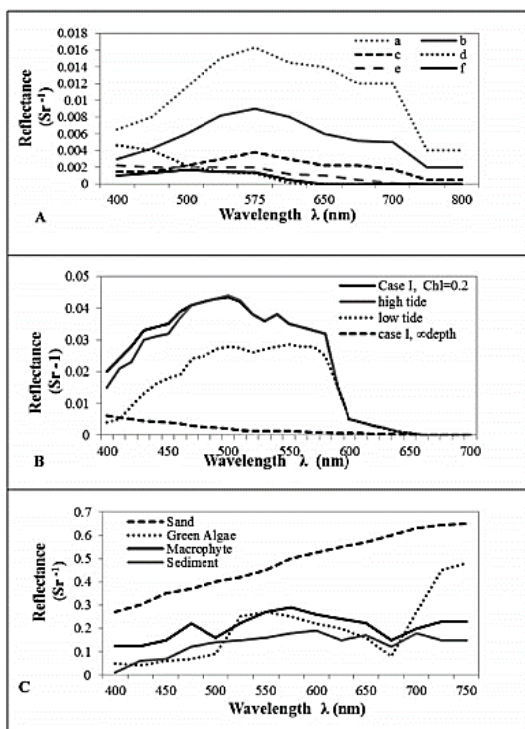
متغیر	فضایی	هوایی
توان تفکیک مکانی	از نیم متر تا چند کیلومتر	کمتر از ۵ متر
توان تفکیک طیفی	پانکروماتیک-ابرطیفی	پانکروماتیک-ابرطیفی
توان تفکیک زمانی (دوره بازدید)	چند روز	بسته به زمان پرواز (چند روز تا چندسال)
کالیبراسیون	قبل پرتاب-سالانه	قبل هر پرواز
هزینه	برای غیرتجاری رایگان- برای سنجنده های تجاری بیش از ۵۰ دلار در کیلومتر مربع	میانگین ۳۵۰ دلار در مایل

17. HyMap
18. APEX
19. CASI-1500
20. AISA
21. ALOS/AVNIR-2
22. IKONOS
23. CASI
24. Principal Component Analysis

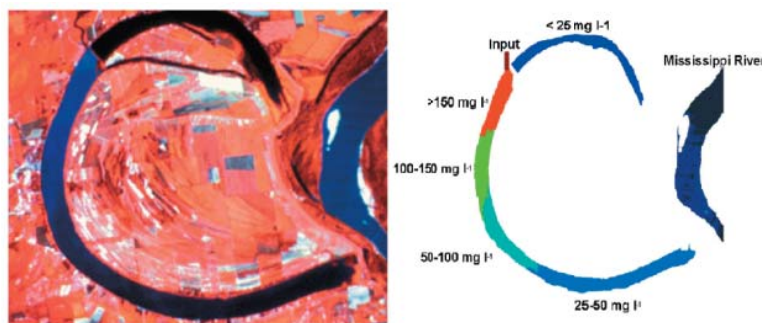
1. Landsat
2. ASTER
3. Terra
4. MODIS
5. AVHRR
6. SPOT
7. IKONOS
8. ERS-2
9. SeaWiFs
10. Quickbird
11. MERIS
12. Chlorophyll-a
13. Nutrient
14. Total Suspended Sediment
15. Total organic carbon
16. Microcystin

پایش کیفیت پهنه‌های آبی با استفاده از تصاویر سنجنش از دور هوایی و ماهواره‌ای

گیاهان آوندی آبی، پاتوزن‌ها و روغن‌ها، همه این آلودگی‌ها، به غیر از مواد شیمیایی و پاتوزن‌ها، انرژی خورشیدی منعکس شده و یا تابش حرارتی از آب‌های سطحی را تغییر می‌دهد که با روش‌های سنجنش از دوری قابل اندازه‌گیری می‌باشند. اکثر مواد شیمیایی و پاتوزن‌ها مستقیماً ویژگی‌های طیفی یا حرارتی آب‌های سطحی را تغییر نمی‌دهد. بنابراین، آن‌ها را تنها می‌توان به صورت غیرمستقیم از اندازه‌گیری‌های سایر پارامترهای کیفیت آب تأثیرپذیر به وسیله این مواد شیمیایی استنتاج نمود. به عنوان نمونه شکل ۲، نقشه رسوبات بدست آمده از تصاویر لندست بر دریاچه چیکات را نشان می‌دهد. همانطور که در تصویر مشاهده می‌شود، غلظت‌های مختلف (میلی گرم بر لیتر) رسوبات معلق در این دریاچه با استفاده از سنجنش از دور قابل تشخیص بوده و می‌توان نقشه طبقه‌بندی غلظت و توزیع مکانی این رسوبات را استخراج کرد. این نقشه‌ها کاربرد بسیار زیادی در مدیریت پهنه‌های آبی، پیش‌بینی و پایش آلودگی آن‌ها خواهد داشت.



شکل ۱- امضای طیفی انواع آب‌ها با میزان مختلف ذرات معلق [۱۲].



شکل ۲- تصویر سنجنده TM ماهواره لندست از دریاچه چیکات، آرکانزاس (چپ) و تصویر به دست آمده (راست) نشان دهنده نقشه طبقه‌بندی شده رسوبات معلق بر اساس رادیانس در تصویر سنجنده TM [۱۴].

متغیر	فضایی	هوایی
ثبات	بالا	پایین
عرض قابل پوشش روی زمین	زیاد	کم
پوشش سطح	محلی - منطقه‌ای - جهانی	محلی - منطقه‌ای
اثر اتمسفر	++++	++

## انواع روش‌های سنجنش از دور برای پایش آلودگی منابع آب

مواد موجود در آب‌های سطحی می‌تواند به‌طور قابل توجهی ویژگی‌های بازتابش آن‌ها را تغییر دهد [۳۸، ۳۹]. روش‌های سنجنش از دوری بسته به توانایی‌شان این تغییرات را اندازه‌گیری نموده و با استفاده از مدل‌های تجربی یا تحلیلی مدل‌سازی می‌کند. طول موج پهنه مورد استفاده برای اندازه‌گیری یک پارامتر کیفیت آب وابسته به ماده مورد اندازه‌گیری، غلظت آن و خصوصیات سنجنده است. شکل ۱ بازتابندگی آب‌های مختلف با شرایط مختلف را نشان می‌دهد. در قسمت (A) بازتابندگی انواع مختلف آب در مقایسه با هم نشان داده شده است. نوع a آب‌هایی با غلظت رسوب و مواد آلی محلول رنگی بسیار بالا، نوع b آب‌هایی با غلظت رسوب و مواد آلی محلول رنگی بالا، نوع c آب‌هایی با غلظت رسوب و مواد آلی محلول رنگی متوسط، نوع d آب‌های شفاف، نوع e آب‌های با غلظت رسوب و کلروفیل متوسط و نوع f آب‌هایی با غلظت کلروفیل نوع a متوسط هستند. در قسمت (B) بازتابندگی انواع آب در جزر و مد بالا و پایین نشان داده شده است. قسمت (C) بازتابندگی چهار جزء مختلف آب را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ذرات معلق و مواد آلی محلول سبب تغییر امضای طیفی آب خواهد شد که در صورت استفاده از سنجنده مناسب (با باند‌های طیفی مناسب برای تفکیک آب شفاف از آلوده) امکان شناسایی و استخراج آن متغیرها امکان‌پذیر است.

در حالت کلی می‌توان گفت فاکتورهای اصلی تأثیرگذار بر کیفیت آب در پیکره‌های آبی عبارت‌اند از: رسوبات معلق (گل آلودی)، جلبک (کلروفیل‌ها، کاروتنوئیدها)، مواد شیمیایی (مواد مغذی، آفت‌کش‌ها، فلزات)، مواد آلی حل‌شده، انتشار حرارتی،

ریچی و همکاران با استفاده از مطالعات در محل نتیجه گرفتند که طول موج‌های بین ۷۰۰ و ۸۰۰ نانومتر برای تعیین رسوبات معلق در آب‌های سطحی بسیار مناسب هستند [۱۵]. افزایش در غلظت CDOM، به‌طور عمده روی مقادیر بازتابی در ناحیه آبی و سبز طیف (به‌ویژه زیر ۵۰۰ نانومتر) تأثیر می‌گذارد و جذب آن با کاهش طول موج به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. مدل‌های نیمه‌تحلیلی برای سنجنده‌های SeaWiFS و مدیس که در آن‌ها ضرایب جذب CDOM به‌طور مستقیم و مستقل متفاوت از بازتاب‌های سنجنش از دوری هستند، توسعه داده و بکار گرفته شده‌اند. این مدل‌های نیمه‌تحلیلی بر پایه معادلات انتقال تابش و همچنین ساده‌سازی تابش و میدان نوری زیر آب است.

اوج بازتاب نزدیک ۷۰۰ نانومتر و نسبت آن به بازتاب در ۶۷۰ نانومتر برای توسعه الگوریتم‌های گوناگون برای بازیابی کلروفیل نوع a در آب‌های گل‌آلود مورد استفاده قرار گرفته است [۱۶]. گیتلسون رفتار اوج بازتاب در نزدیکی ۷۰۰ نانومتر را مطالعه نمود و نتیجه گرفت که اوج بازتاب در این طول موج برای دورسنجی آب‌های داخلی و ساحلی به ویژه برای اندازه‌گیری غلظت کلروفیل مهم است [۱۶]. هان و جردن به این نکته رسیدند که محدوده‌های طیفی در ۶۳۰-۶۴۵ نانومتر، ۶۶۰-۶۷۰ نانومتر، ۶۸۰-۶۸۷ نانومتر، و ۷۰۰ تا ۷۳۵ نانومتر مناطق بالقوه‌ای هستند که در آن‌ها می‌توان از مشتقات اول برای برآورد غلظت کلروفیل استفاده نمود [۱۷]. دکر و همکاران (متذکر شده‌اند که ویژگی‌های پراکنش و جذب کلروفیل نوع a را می‌توان زمانی که بیش از یک باند استفاده می‌شود، مورد مطالعه قرار داد [۱۸].

هدف اصلی در پایش کیفیت منابع آب سطحی با استفاده از سنجنش از دور ایجاد ارتباط میان پارامترهای کیفیت آب و مشاهدات سنجنش از دور است. به‌طور کلی برای ایجاد این ارتباط سه دسته روش کلی وجود دارد:

- ۱) روش‌های تجربی<sup>۲۵</sup>،
- ۲) روش‌های تحلیلی<sup>۲۶</sup> و

۳) روش‌های نیمه تجربی/نیمه تحلیلی (تلفیقی).

در ادامه توضیحات مربوط به هر یک از این روش‌ها ارائه خواهد شد. چالش اصلی در روش‌های تجربی، ایجاد ارتباط میان مشاهدات سنجنده‌های ماهواره‌ای و متغیرهای کیفیت آب است. برای ایجاد این ارتباط از رگرسیون‌های خطی و چندمتغیره به همراه مشاهدات زمینی استفاده می‌شود. در رگرسیون‌های خطی چندمتغیره یا غیرخطی، مشاهدات زمینی به‌عنوان متغیرهای وابسته و مشاهدات سنجنده‌های سنجنش از دور به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته می‌شوند. اخیراً روش‌های نوینی

نظیر شبکه‌های عصبی، الگوریتم ژنتیک و سیستم‌های فازی برای پایش پارامترهای کیفیت آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. روش‌های تجربی وابسته به مشاهدات زمینی هستند و تنها در مناطق با وسعت اندک جوابگوی نیازها خواهند بود. از این رو محققان به دنبال توسعه روش‌های قابل انتقال به مناطق دیگر هستند.

برخلاف روش‌ها تجربی، در روش‌های تحلیلی از مشخصات اپتیکی آب استفاده می‌شود. در این دسته از روش‌ها مشخصات فیزیکی آب و نحوه رفتار آب با املاح مختلف به‌عنوان ورودی روش، مورد استفاده قرار می‌گیرند. این موضوع سبب می‌شود که روش‌ها قابلیت انتقال از یک مکان به مکان دیگر را داشته باشند.

برخی دیگر از روش‌های استخراج پارامترهای کیفیت آب (نیمه تجربی/نیمه تحلیلی) بر اساس ترکیب روش‌های تجربی و تحلیلی استوار هستند. به عبارت بهتر این دسته روش‌ها هم از مشاهدات زمینی و هم از مشخصات اپتیکی استفاده می‌کنند. جدول ۳ متغیرهای کیفی آب که توسط روش‌های تجربی، تحلیلی و نیمه تجربی/نیمه تحلیلی قابل اندازه‌گیری هستند را نمایش می‌دهد.

جدول ۳- متغیرهای قابل اندازه‌گیری از روش‌های تجربی، تحلیلی و نیمه تجربی/نیمه‌تحلیلی [۱۲].

روش‌های تجربی	روش‌های تحلیلی	روش‌های نیمه-تجربی/نیمه‌تحلیلی
کلروفیل نوع A، رنگدانه، ذرات معلق کل، گل آلودگی، اکسیژن محلول، فسفر نیتروژن	کلروفیل نوع A، فیتوپلانکتون‌ها، ذرات معلق کل، گل آلودگی، اکسیژن محلول	کلروفیل نوع A، فیتوپلانکتون‌ها، ذرات معلق کل، گل آلودگی، اکسیژن محلول
روش‌های استفاده شده	روش تحلیلی خالص [۲۳]	روش نیمه تجربی [۲۵] روش نیمه تحلیلی [۲۶]
رگرسیون آماری [۱۹]، شبکه‌های عصبی [۲۰]، الگوریتم ژنتیک [۲۱]، روش‌های فازی [۲۲]	مدل مستقیم و معکوس بیواپتیکال [۲۴]	

به‌طور کلی افزایش یا کاهش متغیرهای کیفیت آب بر روی رفتار باندهای طیفی اثر گذار است. به عنوان مثال آب به طور کلی در محدوده‌های مرئی و مادون قرمز نزدیک جذب بالایی دارد، اما افزایش رسوبات معلق در آب سبب افزایش بازتابندگی در این محدوده‌های طیفی خواهد شد. رفتار هر یک از متغیرها بر روی باندهای طیفی و همچنین باندهای مناسب برای پایش آن‌ها در جدول ۴ آورده شده است.

همان‌طور که اشاره شد، روش‌های مختلفی برای استخراج متغیرهای کیفیت آب از تصاویر ماهواره‌ای وجود دارد. یکی از متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده، روش‌های تجربی هستند. در این روش‌ها با استفاده از معادلات رگرسیون، میان مشاهدات

25. Empirical  
26. Analytical

جدول ۵- روابط تجربی مورد استفاده برای پایش متغیرهای کیفیت آب.

مرجع	رابطه استفاده شده
[۳۶]	$T = a \times T4 + b \times (T4 - T5) + c \times (T4 - T5) \times \sec\theta - d$
[۳۷]	$chl A = 11.18 \times \rho_{TM1} - 8.96\rho_{TM2} - 3.28 mg/m^3$
[۳۷]	$SD = 8.01 \frac{\rho_{TM1}}{\rho_{TM2}} - 8.27$
[۳۸]	$T = Coef.A \pm (Coef.B \times R)$
[۳۹]	$Ch \left(\frac{\mu g}{l}\right) = m \left(\frac{R_{700}}{R_{670}}\right)^2 + n \left(\frac{R_{700}}{R_{670}}\right) + l$
[۳۹]	$TSM \left(\frac{mg}{l}\right) = m \left(\frac{R_{850}}{R_{550}}\right)^2 + n \left(\frac{R_{850}}{R_{550}}\right) + l$
[۳۹]	$CDOM (m^{-1}) = m \left(\frac{R_{440}}{R_{575}}\right)^2 + n \left(\frac{R_{440}}{R_{575}}\right) + l$
[۳۹]	$Salinity (ppt) = a \ln(CDOM) + b$
[۳۹]	$Turbidity (NTU) = m \left(\frac{R_{750}}{R_{700}}\right)^2 + n \left(\frac{R_{750}}{R_{700}}\right) + l$
[۴۰]	$WQP = a + b \times b_2 + c \times b_3 + d \times b_4 + e \times b_5$
[۳۵]	$Ln(Chl) = 0.195 \times B_{16} + 0.667$
[۳۵]	$Ln(SD) = -1.559 \times Ln\left(\frac{B_4}{B_1}\right) - 0.332$
[۳۵]	$Ln(TN) = 1.046 \times Ln(B_{16}) - 1.619$
[۳۵]	$Ln(TP) = 0.068 \times Ln(B_4) - 5.274$
[۳۵]	$Ln(Chl) = 1.515 \times Ln(B_2) + 2.357 \times Ln(B_9) - 0.286 \times \frac{Ln(B_3 - B_1)}{B_2} - 8.415$
[۳۵]	$Ln(SD) = -2.236 \times Ln\left(\frac{B_4}{B_{10}}\right) + 1.917 \times \frac{(B_1 + B_2)}{B_3} + B_4 - 1.400$
[۳۵]	$Ln(TN) = 0.821 \times Ln(B_2) + 1.927 \times Ln(B_9) - 0.458 \times \frac{Ln(B_3 - B_1)}{B_2} - 6.734$
[۳۵]	$Ln(TP) = 0.075 \times Ln(B_4) + 0.022 \times \frac{B_3 - B_1}{B_2} - 5.065$

که متغیرهای این روابط به شرح ذیل تعریف می‌شوند:

مواد معلق بر روی آب	ضریب رگرسیون		
ماده رنگی محلول در آب	ضریب رگرسیون		
نمک	ضریب رگرسیون		
تیرگی	کلروفیل نوع A	T	
باند طیفی با مرکز ۶۷۰ نانومتر	باند طیفی با مرکز ۷۰۰ نانومتر		

ماهواره‌ای و شاخص‌های اندازه‌گیری شده ارتباط برقرار می‌شود. نمونه‌ای از معادلات مورد استفاده در منابع مختلف در جدول ۵ نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود از معادلات مختلف و متنوعی برای ایجاد ارتباط میان متغیرها و باندهای طیفی استفاده شده است. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت انتخاب نوع رابطه ریاضی مورد استفاده برای استخراج اطلاعات دقیق است.

جدول ۴- تفاوت متغیرهای کیفیت آب و نحوه اثر بر روی باندهای طیفی و باندهای مناسب برای شناسایی.

متغیرهای کیفیت آب	نحوه اثر بر روی باندهای طیفی	باندهای طیفی مناسب برای شناسایی
رسوبات معلق [۲۷، ۱۵]، [۲۸]	افزایش بازتابندگی در اثر افزایش رسوبات معلق مرئی و مادون قرمز نزدیک	طول موج‌های بین ۷۰۰ و ۸۰۰ نانومتر و باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک
چلیک [۲۹]	افزایش بازتاب در برخی باندها و کاهش در برخی دیگر	در اکثر طول موج‌ها با افزایش غلظت کلروفیل و کاهش بازتاب در مناطق جذب طیفی کلروفیل (۶۷۵ تا ۶۸۰ نانومتر)
گیاهان آوندی آبی [۳۰]	افزایش بازتاب نسبت به آب/افزایش و کاهش بازتاب نسبت به گیاهان	مادون قرمز نزدیک
کلروفیل نوع a [۳۱] [۳۲]	جذب/بازتاب	جذب قوی بین ۴۵۰ تا ۴۷۵ نانومتر (آبی) و در ۶۷۰ نانومتر (قرمز)، و حداکثر بازتاب در ۵۵۰ نانومتر (سبز) و نزدیک ۷۰۰ نانومتر (مادون قرمز نزدیک)
مواد آلی محلول رنگی [۳۳]	جذب	ناحیه آبی و سبز
عمق دیسک سچی <sup>۳</sup> [۳۴]	بازتاب	سبز-مادون قرمز نزدیک
فسفر [۳۵]	افزایش کلروفیل نوع a	باند آبی (۰/۴۵-۰/۵۱ متر)، باند سبز (۰/۵-۰/۶ متر) و ترکیب نسبت باندی قرمز (۰/۶-۰/۷ متر) و سبز (۰/۵-۰/۶ متر)

۳. عمق دیسک‌سچی یکی از روش‌های اندازه‌گیری کدورت آب است که با استفاده از یک دیسک استاندارد با علامت خاص، عمقی را که این دیسک در آب دیگر قابل مشاهده نباشد اندازه‌گیری می‌کنند.

دریاچه‌های آزاد، دریای داخلی، رودخانه‌ها، تالاب‌ها و دریاچه‌ها می‌شوند. مهم‌ترین پهنه‌های آبی موجود در کشور و عوامل تهدیدکننده سلامت و پایداری آن‌ها در جدول ۶ نمایش داده شده‌اند. بر اساس این جدول و تحقیقات انجام‌شده در زمینه سنجش از دور، تصاویر هوایی و ماهواره‌ای توانایی پایش آلودگی نفتی، نوسانات سطح آب، آلودگی‌های میکروبی، تغییر خط ساحلی، تغییرات اقلیمی، پایش خشکسالی، افزایش شوری، تغییر مساحت پهنه، تغییرات کاربری‌ها، صدمه به سواحل مرجانی، رشد جلبکی، کلروفیل، فسفر، گیاهان آوندی، جلبک، مواد آلی، کدورت و غیره را دارند. بنابراین استفاده از سنجش از دور برای پایش آلاینده‌های پهنه‌های آبی کشور مفید خواهد بود.

بیشتر مطالعات کلروفیل موجود در آب براساس روابط تجربی میان تابش/ بازتاب در باندهای باریک و یا نسبت‌های باندی و کلروفیل می‌باشند. بنابراین، داده‌های میدانی به‌منظور کالیبراسیون این روابط آماری و یا اعتبارسنجی مدل‌های توسعه‌یافته جمع‌آوری می‌شوند. اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در محل [۲۹] افزایش بازتاب در اکثر طول‌موج‌ها را با افزایش غلظت کلروفیل و کاهش بازتاب در مناطق جذب طیفی کلروفیل (۶۷۵ تا ۶۸۰ نانومتر) نشان می‌دهند. ژانگ و هان دریافتند که باندهای ۱ تا ۴ سنجنده OLI و ترکیبات آن‌ها همبستگی خوبی با غلظت کلروفیل نوع a دارند [۴۱]. کیم و همکاران (با استفاده از سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ و بکارگیری باند ۲، باند ۵ و یک نسبت باند ۲ به باند ۴ غلظت کلروفیل نوع a را اندازه‌گیری نمودند [۴۲]. با وجود اینکه برآورد کلروفیل با استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدور امکان‌پذیر است، اما مطالعات نشان داده‌اند که داده‌های طیفی گسترده موجود در ماهواره‌های رایج (مانند LANDSAT و SPOT) اجازه تشخیص کلروفیل در آب‌های دارای میزان بالای رسوبات معلق را به دلیل غلبه سیگنال‌های طیفی ناشی از این رسوبات نمی‌دهد.

جدول ۶- عوامل تهدیدکننده سلامت انواع پهنه‌های آبی کشور

پهنه آبی	عامل تهدیدکننده	قابل پایش با سنجش از دور
دریا و خلیج	آلودگی نفتی	
	تجاوز جانوران غیربومی	
	صید غیرمجاز	
	نوسانات سطح آب	
	مهار آب رودخانه‌ها	
	آلودگی‌های مختلف (پساب‌های صنعتی، شهری و کشاورزی، آلودگی حرارتی و غیره)	
	آلودگی میکروبی	
	تجمع رسوبات	
	تجمع فلزات سنگین (کادمیوم، جیوه، نیکل)	
	شکوفندگی جلبکی، پلانکتونی و عروس‌های دریایی	

باند طیفی با مرکز ۸۵۰ نانومتر	باند طیفی با مرکز ۵۵۰ نانومتر	
باند طیفی با مرکز ۴۴۰ نانومتر	باند طیفی با مرکز ۵۷۵ نانومتر	
دمای درخشندگی باند ۴ (۱۰/۳-۱۱/۳ میکرومتر)	بازتاب باند ۱ سنجنده TM	
دما	بازتاب باند ۲ سنجنده TM	
ضریب رگرسیون	غلظت کلروفیل نوع a	a
ضریب رگرسیون		a
بازتابندگی	a, b, c, d	ضرایب رگرسیون
باند آم مادیس	زاویه زینت ماهواره	
کلروفیل نوع A	دمای درخشندگی باند ۵ (۱۱/۵-۱۲/۵ میکرومتر)	
عمق دیسک سچی	مجموع فسفر	
مجموع نیتروژن		

## محدودیت‌های سنجش از دور در پایش منابع آب

به‌طور کلی می‌توان گفت سنجش از دور روش مناسبی برای مطالعه تغییرات مکانی و زمانی متغیرهای کیفیت آب است. با این حال، محدودیت‌هایی وجود دارد که لازم است قبل از بکارگیری این روش مورد توجه قرار گیرد. این محدودیت‌ها عبارت‌اند از:

- نیاز به مشاهدات زمینی
- وجود ابر و عدم مشاهده سطح زمین
- عدم امکان پایش برخی متغیرهای کیفیت آب
- اثر اتمسفر بر روی نتایج
- هزینه بالای اخذ داده‌های ابرطیفی
- ویژگی‌های اپتیکی ضعیف برخی متغیرهای کیفیت آب مانند PH، نیتروژن کل، نیتروژن آمونیاک (NH<sub>3</sub>-N)، نیتروژن نترات (NO<sub>3</sub>-N) و فسفر محلول (DP)

## بررسی آلاینده‌های پهنه‌های آبی ایران

پهنه‌های آبی ایران وسیع و متنوع هستند. از آنجا که آلاینده‌های هر پهنه‌ای خاص آن است، باید در هر پهنه جداگانه مورد بررسی قرار گیرد. روش پردازش تصاویر هوایی و فضایی برای استخراج هر نوع آلاینده ممکن است متفاوت باشد. از این‌رو، بررسی پهنه‌های آبی کشور و عوامل تأثیرگذار بر آن‌ها اهمیت دارد. پهنه‌های آبی در کشور ایران با توجه به خصوصیات سرزمین شامل خلیج‌ها و



پهنه آبی	عامل تهدیدکننده	قابل پایش با سنجنش از دور
	خشک شدن تالاب	
	کم شدن وسعت تالاب	
	کاهش فتوسنتز گیاهان آبی در نتیجه افزایش رسوب‌گذاری و کدورت آب	
	صدمه به سواحل مرجانی و زیستگاه لاک‌پشت‌ها (تالاب‌های ساحلی)	

اعتبارسنجی روش‌های سنجنش از دور در اندازه‌گیری کیفیت آب یکی از مهم‌ترین مباحث در زمینه پایش کیفیت منابع آب در سنجنش از دور، سنجنش اعتبار و صحت نتایج است. اعتبار و صحت نتایج در برخی تحقیقات به صورت مطلق اندازه‌گیری شده است. به‌عنوان مثال در [۴۳] به صورت مطلق اختلاف میان مقدار کلروفیل اندازه‌گیری شده از تصاویر ماهواره‌ای و مشاهدات زمینی برابر  $0.3$  میلی‌گرم بر مترمکعب است. علاوه بر این، در برخی از تحقیقات، همبستگی میان باندهای طیفی یا ویژگی‌های طیفی با شاخص کیفیت آب ملاک ارزیابی دقت است. بر اساس نتایج سایر تحقیقات، همبستگی میان مشاهدات ماهواره‌ای و زمینی بین  $0.6$  تا  $0.9$  است.

جدول ۷- صحت و دقت منابع مختلف در اندازه‌گیری متغیرهای کیفیت آب.

منبع	روش مورد استفاده	شاخص‌های اندازه‌گیری شده	اعتبار نتایج
[۴۳]	روش فیزیکی	کلروفیل مواد ارگانیک محلول	صحت: $30/0$ میلی‌گرم بر مترمکعب صحت: $17/0$ گرم بر مترمکعب
[۴۴]	روش تجربی (رگرسیون)	عمق دیسک سچی کلروفیل	همبستگی باند قرمز سنجنده TM: $0.85$ همبستگی باند سبز تا قرمز سنجنده TM: $0.78$
[۴۵]	روش تجربی (رگرسیون)	عمق دیسک سچی	همبستگی شاخص با مشاهدات زمینی: $79/0$ تا $60/0$
[۴۶]	روش تجربی (رگرسیون)	عمق دیسک سچی	همبستگی شاخص با مشاهدات زمینی: $77/0$ تا $80/0$
[۴۰]	روش تجربی (رگرسیون)	ذرات معلق کلروفیل	همبستگی شاخص با مشاهدات زمینی: $74/0$ همبستگی شاخص با مشاهدات زمینی: $71/0$
[۴۷]	روش تجربی (رگرسیون)	کلروفیل	همبستگی شاخص با مشاهدات زمینی: $954/0$
[۱۷]	روش تجربی (رگرسیون)	کلروفیل	همبستگی شاخص با مشاهدات زمینی: $67/0$
[۴۸]	نیمه‌تحلیلی / نیمه‌تجربی	مواد آلی محلول	ضریب تعیین ( $R^2$ ) برای آب شفاف: $0.70$ ضریب تعیین ( $R^2$ ) برای

پهنه آبی	عامل تهدیدکننده	قابل پایش با سنجنش از دور
دریاچه	افزایش PH و COD	
	تغییرات خط ساحلی	
	سدسازی بی‌رویه بر روی رودهای تغذیه‌کننده	
	برداشت بیش از حد از منابع پروژه‌های عمرانی	
	انتقال پساب‌های صنعتی و کشاورزی	
	تغییرات اقلیمی و استمرار خشک‌سالی	
	تغییر کاربری زراعی به دیگر کاربری‌ها	
	تخلیه فاضلاب و مواد زائد از سکونتگاه‌های اطراف به درون دریاچه	
	شکار غیرقانونی پرندگان و پستانداران	
	پرورش ماهی‌های غیربومی به صورت غیراصولی	
	افزایش جمعیت و گسترش شهرنشینی	
	فعالیت‌های غیراصولی تفریحی مانند شکار، صید و غیره	
رودخانه	ورود کودهای شیمیایی به دریاچه	
	ورود رسوبات زیاد و در نتیجه کاهش روزافزون عمق دریاچه	
	برداشت آب از سرچشمه‌ها	
	ورود فاضلاب انسانی، پساب‌های صنعتی، زهاب‌های کشاورزی و بیمارستانی، پساب‌های شیلات و پرورش ماهی و در نتیجه افزایش آلاینده‌هایی نظیر ازت و فسفر	
	رشد بی‌رویه گیاهان آبی مانند جلبک و در نتیجه کاهش کیفیت آب به علت ورود نیترات	
	کاهش دبی رودخانه و افزایش جزایر رسوبی به علت احداث سد‌ها	
	رشد روزافزون گیاهان پیشرو	
	کاهش تولید آبزیان و تلفات به علت افزایش غلظت آلودگی	
	افزایش جمعیت	
	رشد زیاد کشاورزی	
	افزایش شوری	
	کاهش ذخیره تنوع زیستی	
تالاب	اختلال در کارکرد به‌عنوان پناهگاه پرندگان مهاجر	
	قطعه قطعه شدن زیستگاه	
	پرغذایی (بیوتریفیکاسیون) تالاب‌ها	
	کاهش جریان آب ورودی از طریق برداشت و خشکسالی	
	افزایش آسیب‌پذیری تالاب‌ها به‌واسطه تغییر کاربری سازگار اراضی اطراف آن‌ها	
	ایجاد اختلال و آشفتنگی در هیدرودینامیک تالاب	
	وارد شدن صدمه به گونه‌های بومی و طبیعی گیاهی و جانوری از طریق معرفی گونه‌های بیگانه	
	کاهش اندازه و ذخیره ماهی‌ها در اثر ماهیگیری بیش‌ازحد	
	مرگ سالانه تعداد زیادی ماهی و پرندگان آبی در اثر علل ناشناخته	
	برهم خوردن منظر تالاب	

- [8] Flanagan, P.J., *Parameters of Water Quality: Interpretation and Standards*, vol. 6: An Foras Forbartha. Information and Training Centre, 1986.
- [9] Estandard 822-F-18-001, *2018 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories*, Office of Water U.S. Environmental Protection Agency Washington, DC, March 2018.
- [۱۰] مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، *آب آشامیدنی - استاندارد ملی شماره ۱۰۵۳*، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، ۱۳۸۹.
- [۱۱] سازمان حفاظت محیط زیست، معاونت محیط زیست انسانی، *استاندارد کیفیت آب‌های ایران*، ۱۳۹۵.

منبع	روش مورد استفاده	شاخص‌های اندازه‌گیری شده	اعتبار نتایج
			آب کدر: ۰/۷۳
[۴۹]	روش تجربی (رگرسیون)	ذرات معلق	ضریب تعیین ( $R^2$ ): ۰/۹۴
[۵۰]	روش تجربی (شبه عصبی)	کلروفیل	خطای مجنور کمترین مربعات (RMSE): ۹/۸٪

## نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی کاربردها، چالش‌ها و مزایای استفاده از تصاویر هوایی و فضایی سنجش از دور در پایش متغیرهای کیفیت آب و چالش‌های پهنه‌های آبی کشور پرداخته شد. نتایج نشان می‌دهند انتخاب سکو و سنجنده به منظور اخذ اطلاعات از پهنه‌های آبی، وابسته به نوع آن است. علاوه بر این، استفاده از روش‌های تجربی، تحلیلی و نیمه تجربی/ نیمه تحلیلی برای شناسایی متغیرهای کیفیت آب بسیار مورد توجه بوده است. مشاهدات نشان می‌دهند که معادلات رگرسیون خطی به دلیل سادگی و کارایی مناسب بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند. اگرچه سنجش از دور محدودیت‌هایی برای پایش متغیرهای کیفی آب دارد، اما نتایج تحقیقات پیشین نشان می‌دهند که همبستگی بالایی میان آن متغیرها و مشاهدات سنجش از دور مشاهده می‌شوند. در نهایت، استفاده از دستورالعمل‌های تعیین کیفیت آب نظیر دستورالعمل سازمان محیط‌زیست در مطالعات آبی سنجش از دور می‌تواند در دسته‌بندی کیفیت انواع آب‌ها نظیر آشامیدنی، کشاورزی، صنعتی و تفریحی مفید واقع شود.

## مراجع

- [12] Chang, N.-B., Imen, S. and Vannah, B., "Remote Sensing for Monitoring Surface Water Quality Status and Ecosystem State in Relation to The Nutrient Cycle: A 40-Year Perspective," *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 45, 2015, pp. 101-166.
- [13] Gholizadeh, M., Melesse, A. and Reddi, L. "A Comprehensive Review on Water Quality Parameters Estimation using Remote Sensing Techniques," *Sensors*, vol. 16, 2016, p. 1298.
- [14] J. C. Ritchie, P. V. Zimba, and J. H. Everitt, "Remote Sensing Techniques to Assess Water Quality," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 69, pp. 695-704, 2003.
- [15] M. Oxford, "Remote Sensing of Suspended Sediments in Surface Waters," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 42, pp. 1539-1545, 1976.
- [16] 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*, vol. 13, 1992, pp. 3367-3373.
- [17] Han, L. and Jordan, K.J., "Estimating and Mapping Chlorophyll-a Concentration in Pensacola Bay, Florida using Landsat ETM+ Data," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 26, 2005, pp. 5245-5254.
- [18] Dekker, A.G., Malthus, T.J. and Seyhan, E., "Quantitative Modeling of Inland Water Quality for High-Resolution MSS Systems," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 29, 1991, pp. 89-95.
- [19] Kishino, M., Ishimaru, T., Furuya, K., Oishi, T. and Kawasaki, K., "In-water Algorithms for ADEOS/OCTS," *Journal of Oceanography*, vol. 54, 1998, pp. 431-436.
- [20] Keiner, L.E. and Yan, X.-H., "A Neural Network Model for Estimating Sea Surface Chlorophyll and Sediments from Thematic Mapper Imagery," *Remote Sensing of Environment*, vol. 66, 1998, pp. 153-165.
- [21] Chang, N.-B., Daranpob, A., Yang, Y. J. and Jin, K.-R., "Comparative Data Mining Analysis for Information Retrieval of MODIS Images: Monitoring Lake Turbidity Changes At Lake Okechobee, Florida," *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 3, 2009, p. 033549.
- [22] Wang, H., Fan, T., Shi, A., Huang, F. and Wang, H., "Fuzzy Integral Based Information Fusion for Water Quality Monitoring Using Remote Sensing Data," *International Journal of Communications, Network and System Sciences*, vol. 3, 2010, p. 737.
- [1] Rosegrant, M. W. Cai, X. and S. A. Cline, *World water and food to 2025: dealing with scarcity*: Intl Food Policy Res Inst, 2002.
- [2] Postel, S., *The Last Oasis: Facing Water Scarcity*: Routledge, 2014.
- [3] Viessman, W., Hammer, M. J.E. M. Perez, and P. A. Chadik, "Water Supply and Pollution Control," 1998.
- [4] Sowers, J., Vengosh, A. and Weinthal, E. "Climate Change, Water Resources, and the Politics of Adaptation in the Middle East and North Africa," *Climatic Change*, vol. 104, 2011, pp. 599-627.
- [5] Glasgow, H.B., Burkholder, J.M., Reed, R.E., Lewitus, A.J. and Kleinman, J.E., "Real-Time Remote Monitoring of Water Quality: A Review of Current Applications, and Advancements in Sensor, Telemetry, and Computing Technologies," *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, vol. 300, 2004, pp. 409-448.
- [6] Goel, P. *Water pollution: causes, effects and control*: New Age International, 2006.
- [7] Gorchev, H.G., Ozolins, G., "Who Guidelines for Drinking-Water Quality," *WHO Chronicle*, vol. 38, No. 3, 2011, pp. 104-108.

- Pollution Monitoring in Cauvery River,” *Remote Sensing in Water Resources; Rawat Publications: New Delhi, India*, 2005.
- [39] Bhattf, A.M., Rundquist, D.,Schalles, J. andRamirez, L., “Application of Hyperspectral Remotely Sensed Data for Water Quality Monitoring: Accuracy and Limitation,” *9<sup>th</sup> International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*, Accuracy 2010, 2010.
- [40] Lim, J. and Choi, M., “Assessment of Water Quality Based on Landsat 8 Operational Land Imager Associated with Human Activities in Korea,” *Environmental monitoring and assessment*, vol. 187, 2015, p. 384.
- [41] Zhang, C. and Han, M., “Mapping Chlorophyll-A Concentration in Laizhou Bay using Landsat 8 Oli Data,” *Proceedings of the 36<sup>th</sup> IAHR World Congress, Netherland*, 2015.
- [42] Kim, S.-i., Kim, H.-c. and Hyun, C.-U., “High Resolution Ocean Color Products Estimation in Fjord of Svalbard, Arctic Sea Using Landsat-8 Oli,” *Korean Journal of Remote Sensing*, vol. 30, 2014, pp. 809-816.
- [43] Giardino, C., Bresciani, M., Cazzaniga, I., Schenk, K., Rieger, P., Braga, F., Matta, E. and Brando, V. E., “Evaluation of Multi-Resolution Satellite Sensors for Assessing Water Quality and Bottom Depth of Lake Garda,” *Sensors*, vol. 14, 2014, pp. 24116-24131.
- [44] Hellweger, F., Schlosser, P., Lall, U. and Weissel, J., “Use of Satellite Imagery for Water Quality Studies in New York Harbor,” *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 61, 2004, pp. 437-448.
- [45] Kloiber, S.M., Brezonik, P.L. and Bauer, M.E., “Application of Landsat Imagery to Regional-Scale Assessments of Lake Clarity,” *Water Research*, vol. 36, 2002, pp. 4330-4340.
- [46] Olmanson, L.G., Bauer, M.E. and Brezonik, P.L., “A 2--year Landsat Water Clarity Census of Minnesota’s 10,000 Lakes,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 112, 2008, pp. 4086-4097.
- [47] Allan, M.G.,Hamilton, D.P.,Hicks, B.J. and Brabyn, L., “Landsat remote sensing of chlorophyll a Concentrations in Central North Island Lakes of New Zealand,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 32, 2011, pp. 2037-2055.
- [48] J. Xu, C. Fang, D. Gao, H. Zhang, C. Gao, Z. Xu, and Y. Wang, “Optical Models For Remote Sensing of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) absorption in Poyang Lake,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 142, 2018, pp. 124-136.
- [49] F. L. Lobo, M. p. Costa, and E. M. Novo, “Time-Series Analysis of Landsat-MSS/TM/OLI Images Over Amazonian Waters Impacted by Goldmining Activities,” *Environ*, vol. 157, 2015, pp. 170-184.
- [50] Matthews, M.W., Bernard, S. and Winter, K., “Remote Sensing of Cyanobacteriadominant Algal Blooms and Water Quality Parameters in Zeekoevlei, a Small Hypertrophic Lake, using MERIS,” *Remote Sens. Environ*, vol. 114, 2010, pp. 2070-2087.
- [23] Ahn,Y.-H., “Development of an Inverse Model from Ocean Reflectance,” *Marine Technology Society Journal*, vol. 33, 1999, pp. 69-80.
- [24] Dekker, A.,Vos, R. and Peters, S., “Comparison of Remote Sensing Data, Model Results and in Situ Data for Total Suspended Matter (TSM) in the Southern Frisian Lakes,” *Science of the Total Environment*, vol. 268, 2001, pp. 197-214.
- [25] Dekker, A.,Zamurović-Nenad, Ž.,Hoogenboom, H. and Peters, S., “Remote Sensing, Ecological Water Quality Modelling and in Situ Measurements: a Case Study in Shallow Lakes,” *Hydrological sciences journal*, vol. 41, 1996, pp. 531-547.
- [26] Ciotti, Á.M., Cullen, J.J. and Lewis, M.R., “A Semi-Analytical Model of the Influence of Phytoplankton Community Structure on the Relationship between Light Attenuation and Ocean Color,” *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 104, 1999, pp. 1559-1578.
- [27] Lal, R., *Soil Erosion Research Methods*: CRC Press, 1994.
- [28] Robinson, A., “Sediment, our greatest pollutant?,” *Focus on Environmental Geology. R. Tank, ed*, 1976.
- [29] Schalles, J.F., Schiebe, F.R. and Starks, P.J., “Estimation of Algal and Suspended Sediment Loads (Singly and Combined) Using Hyperspectral Sensors and Integrated Mesocosm Experiments,” Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI (United States)1997.
- [30] Everitt, J.,Yang, C., Escobar, D.,Webster, C.,Lonard, R. and Davis, M., “Using Remote Sensing and Spatial Information Technologies to Detect and Map Two Aquatic Macrophytes,” *Journal of Aquatic Plant Management*, vol. 37, 1999, pp. 71-80.
- [31] Harrington, J. and Repic, R., “Hyperspectral and Video Remote Sensing of Oklahoma Lakes,” *Papers and Proceedings of Applied Geography Conferences*, 1995, pp. 79-86.
- [32] Dekker, A. and Peters, S., “The use of the Thematic Mapper for the Analysis of Eutrophic Lakes: a Case Study in the Netherlands,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 14, 1993, pp. 799-821.
- [33] Aiken, G.R., “Humic Substances in Soil, Sediment, and Water: Geochemistry, Isolation, and Characterization,” 1985.
- [34] Mobley, C.D., *Light and water: radiative transfer in natural waters*: Academic press, 1994.
- [35] Wu, M.,Zhang, W.,Wang, X. and Luo, D., “Application of MODIS Satellite Data in Monitoring Water Quality Parameters of Chaohu Lake in China,” *Environmental monitoring and assessment*, vol. 148, 2009, pp. 255-264.
- [36] Ahn, Y.-H., Shanmugam, P., Lee, J.-H., and Kang, Y.Q., “Application of Satellite Infrared Data for Mapping of Thermal Plume Contamination in Coastal Ecosystem of Korea,” *Marine environmental research*, vol. 61, 2006, pp. 186-201.
- [37] Giardino, C., Pepe, M., Brivio, P.A.,Ghezzi, P. and Zilioli, E., “Detecting Chlorophyll, Secchi Disk Depth and Surface Temperature in a Sub-Alpine Lake using Landsat Imagery,” *Science of the Total Environment*, vol. 268, 2001, pp. 19-29.
- [38] Ramasamy, S.,Venkatasubramanian, V., Sam, K. and Chandrasekhar, G., “Remote Sensing in