

## Feasibility Study of Anzali Wetland Quality Monitoring Using Remote Sensing

MARYAM NAVABIAN<sup>1\*</sup>, MAJID VAZIFEHDOST<sup>2</sup>, MEHDI ESMAEILI VARAKI<sup>2</sup>

1. Associated Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

2. Assistant Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

3. Assistant Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

(Received: Apr. 11, 2018- Revised: Feb. 15, 2019- Accepted: Feb. 19, 2019)

### ABSTRACT

The need for good quality water resources, in line with population growth and the diversity and multiplicity of pollutants and contaminants dictate the quantitative and qualitative management of water resources. In this regard, water resources monitoring and the real time availability of spatial and temporal information can play an important role in water resources management. Real time remote sensing technology using satellite images with proper accuracy is able to determine some of the qualitative parameters of water affecting the temperature or spectrum of light from the surface of the water. The aim of this study was to investigate the accuracy of water quality monitoring of Anzali wetland using remote sensing. For this purpose, after field study of Anzali wetland and rivers leading to it, suitable sites for sampling were selected. After selection of suitable points for sampling, in order to increase the accuracy of the regression models, satellite images were used in different seasons of the year (November, 2002, February, 2002, May 2003 and August 2003). During the satellite (landsat 7 and 8) passing above the area, samplings were done and the quality parameters including nitrate, ammonium, soluble phosphorus, total dissolved solids, suspended solids, conductivity and acidity were measured. After extracting satellite images and their reflections, the effective bands on water quality values were determined and regression models of the images were obtained. The results showed that the use of remote sensing technique in Anzali wetland could be able to estimate the acidity, total suspended solids and temperature well (with root mean percentage of normalized error less than 10%). Other qualitative parameters including nitrate, salinity, total soluble solids and ammonium (with root mean of normalized error less than 30%) and orthophosphate (with root mean percentage of normalized error greater than 30%) were estimated fairly and poorly, respectively. Therefore, the remote sensing technique is able to estimate most of the qualitative parameters with acceptable accuracy. Surely increasing the number of sampling points and frequencies, the accuracy of regression models and consequently the accuracy of estimation of qualitative parameters will increase.

**Key words:** Acidity, Total suspended solids, Salinity, Water depth, Nitrate, Phosphorus

## امکان‌سنجی پایش کیفی تالاب انزلی با استفاده از سنجش از دور

مریم نوابیان<sup>۱\*</sup>، مجید وظیفه‌دوست<sup>۲</sup>، مهدی اسمعیلی ورکی<sup>۳</sup>

۱. دانشیار گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان و عضو وابسته پژوهشی پژوهشکده حوضه آبی

دریای خزر دانشگاه گیلان رشت، ایران

۲. استادیار گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۳. استادیار گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان، رشت، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱/۲۲ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۱/۲۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۱۱/۳۰)

### چکیده

نیاز به منابع آب با کیفیت خوب هم‌گام با افزایش جمعیت و تنوع و تعدد آلاینده‌های آب، مدیریت کمی و کیفی آب را بیش از پیش ضروری می‌سازد. در این راستا پایش منابع آب و در اختیار داشتن اطلاعات مکانی و زمانی به روز می‌تواند نقش مهمی را در مدیریت کیفی منابع آب ایفا نماید. فناوری سنجش از دور با استفاده از تصاویر ماهواره‌های تخصصی و به‌روز، با دقت مناسبی پتانسیل تعیین برخی از پارامترهای کیفی آب که بر دما یا طیف نوری از سطح آب تأثیرگذار هستند را در مقیاس‌های متوسط تا بزرگ، دارا می‌باشد. هدف از این پژوهش ارزیابی دقت پایش کیفیت آب تالاب انزلی با استفاده از سنجش از دور است. بدین منظور پس از بررسی میدانی از تالاب انزلی و رودخانه‌های منتهی به آن، نقاط مناسب برای نمونه‌برداری انتخاب شدند. پس از انتخاب نقاط مناسب برای نمونه‌برداری، در راستای افزایش دقت مدل‌های رگرسیونی از تصاویر ماهواره‌ای در فصول مختلف سال (ماه‌های آبان ۱۳۹۱، بهمن ۱۳۹۱، اردیبهشت ۱۳۹۲ و مرداد ۱۳۹۲) استفاده شد. در هنگام عبور ماهواره لندست ۷ و ۸ از منطقه، نمونه‌برداری انجام و مقادیر پارامترهای کیفی نمونه‌ها شامل: مقادیر نیترات، آمونیوم، فسفر محلول، جامدات محلول، جامدات معلق، هدایت الکتریکی و اسیدیته اندازه‌گیری شدند. پس از استخراج تصاویر ماهواره‌ای و بازتابش آن‌ها، باندهای مؤثر بر مقادیر کیفی آب مشخص و مدل‌های رگرسیونی تصاویر به دست آمدند. نتایج نشان داد استفاده از سنجش از دور در تالاب انزلی قادر به برآورد اسیدیته، کل جامدات معلق و دما به خوبی می‌باشد (درصد ریشه میانگین خطای نرمال شده کمتر از ده درصد). سایر پارامترهای کیفی شامل نیترات، شوری، کل جامدات محلول و آمونیوم با درجه دقت کمتر (درصد ریشه میانگین خطای نرمال شده کمتر از سی درصد) و ارتوفسفات با درجه دقت ضعیف (درصد ریشه میانگین خطای نرمال شده بیشتر از سی درصد) با استفاده از فن سنجش از دور قابل برآورد هستند. بنابراین، سنجنده مورد استفاده قادر است غالب پارامترهای کیفی را با دقت قابل قبولی برآورد نماید. آنچه مسلم است با افزایش تعداد نقاط نمونه‌برداری و برداشت نمونه‌های با تواتر کمتر مدل‌های رگرسیونی با دقت بیشتری استخراج و در نتیجه دقت برآورد پارامترهای کیفی افزایش خواهد یافت.

**واژه‌های کلیدی:** اسیدیته، جامدات معلق، شوری، عمق آب، نیترات، فسفر

### مقدمه

متکی بر انرژی بازتابی از آن‌ها است. فن سنجش از دور بر پردازش، بارز سازی و تجزیه و تحلیل داده‌های ماهواره‌ای استوار است. فن سنجش از دور با استفاده از تصاویر ماهواره‌های تخصصی و به‌روز با دقت مناسبی پتانسیل تعیین برخی از پارامترهای کیفی آب که بر دما یا طیف نوری از سطح آب تأثیرگذار هستند را دارا می‌باشد. فن سنجش از دور با توان تفکیک‌پذیری مناسب مکانی و زمانی پارامترهای کیفی آب در مسیر یا طول منبع آب سطحی، امکان بررسی روند تغییرات پارامترها، دستیابی به نقاط آلوده و در نتیجه تعیین منبع آلودگی را فراهم می‌آورد. از میان پارامترهای کیفی آب، پارامترهای رسوبات معلق، دما، ذرات جامد

شناخت شاخصه‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب به منظور پایش و در نتیجه مدیریت کیفی منابع آب با توجه به روند رو به رشد جمعیت و نیاز روزافزون به منابع آب با کیفیت مطلوب، تنوع و تعدد آلاینده‌های آب بی‌تردید از اهمیت بسزایی برخوردار است. هزینه بالا، نیاز به نیروی کاری و زمان‌بر بودن عملیات صحرایی از عوامل محدودکننده پایش کیفی آب در سطح جغرافیایی وسیع به شمار می‌آیند. امروزه استفاده از فناوری سنجش از دور برای مطالعه علوم محیطی رو به گسترش می‌باشد. سنجش از دور علم کسب اطلاعات فیزیکی بدون تماس نزدیک با عارضه‌هاست که

لیتر باشد فقط تابش‌های بازگشتی با طول موج‌های بلندتر (۸۰۰-۷۰۰ نانومتر) مناسب هستند.

در پژوهشی با استفاده از داده‌های TM ماهواره لندست شش پارامتر نظیر کدورت، نیتروژن کل، نیتروژن آمونیوم، نترات، فسفر کل و فسفر محلول مورد بررسی قرار گرفت (Wei qi et al., 2008). آن‌ها کدورت و نترات را با ۱۰ درصد خطای نسبی، نیتروژن کل و فسفر محلول را با ۲۰ درصد خطای نسبی و نیتروژن آمونیوم و فسفر کل را با ۳۰ درصد خطای نسبی تعیین نمودند. از باندهای ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۷ ماهواره لندست برای برآورد پارامترهای کلر، پتاسیم، سدیم، فسفر محلول، اکسیژن محلول، نترات، آمونیوم، شوری، عمق آب و اسیدیته استفاده شد (Dewidar and Khedr, 2005). نتایج نشان داد که باندهای مرئی رابطه بسیار خوبی با کدورت و مواد آلی موجود در آب دارند و همچنین نسبت‌های TM7/TM5، TM4/TM2 و TM4/TM3 برای تخمین شوری مناسب هستند.

در پژوهشی با استفاده از باند آبی با طول موج ۰/۴ تا ۰/۵ میکرومتر، باند سبز با طول موج ۰/۵ تا ۰/۶ میکرومتر، باند قرمز با طول موج ۰/۶ تا ۰/۷ میکرومتر، باند مادون قرمز نزدیک با طول موج ۰/۷ تا ۰/۹ میکرومتر و باند مادون قرمز حرارتی با طول موج ۸ تا ۱۴ میکرومتر ماهواره لندست، پارامترهای فسفر کل (آلی، غیر آلی و محلول)، کدورت و دما مورد بررسی قرار گرفت (Akbar et al., 2008). نتایج نشان داد که مجموع باند سبز ۵۴۵ تا ۵۶۵ نانومتر و باند قرمز ۶۲۰ تا ۶۷۰ نانومتر برای سنجش فسفر کل، باند سبز و قرمز، باند سبز و نسبت باند آبی به قرمز برای سنجش کدورت و همچنین باند مادون قرمز حرارتی ۸ تا ۱۴ میکرومتر برای سنجش دما مناسب می‌باشند. در مطالعه‌ای یک مدل تجربی سنجش از دور با استفاده از داده‌های سنجنده TM ماهواره لندست برای تعیین فسفر کل به دست آمد (Wu et al., 2009). نتایج نشان داد که فسفر کل با ضریب تبیین ۰/۷۷ با بازتاب باند ۱، نسبت باند ۳ به باند ۲ و نسبت باند ۱ به باند ۳ مرتبط است. برای تعیین کدورت از فنون سنجش از دور و عمق دیسک سکچی به عنوان داده زمینی استفاده شد (Hassan et al., 2008). این پارامتر برای تعیین شفافیت آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. آن‌ها بیان نمودند که نسبت باندهای آبی و سبز، سبز و قرمز و همین‌طور تک باند قرمز سنجنده TM ماهواره لندست ۵ برای تعیین این پارامتر مناسب هستند.

در پژوهشی مواد معلق موجود در آب با استفاده از داده‌های TM ماهواره لندست مورد بررسی قرار گرفت (ضریب تبیین و ریشه میانگین خطا ۰/۵ و ۰/۱۴۵ میلی گرم بر لیتر) (Olet, 2000).

معلق، کدورت، عمق سکچی (خصوصیات فیزیکی آب)، نیتروژن کل، نیتروژن آمونیومی، نیتروژن نترات، فسفر کل، فسفر محلول، اسیدیته، شوری، کلر، پتاسیم، سدیم، ماده آلی محلول (خصوصیات شیمیایی آب)، کلروفیل و اکسیژن محلول (خصوصیات بیولوژیکی آب) قابل سنجش توسط سنجش از دور می‌باشند. انتخاب سنجنده با قابلیت تفکیک مکانی مناسب، شاخص‌های طیفی مرتبط با پارامتر کیفی مورد بررسی، تعیین نقاط نمونه برداری، نحوه نمونه برداری، واسنجی و اعتبارسنجی تصاویر و روابط میان شاخص‌های طیفی و پارامترهای کیفیت آب از نکات کلیدی و قابل تأمل در پایش کیفی و کمی منابع آب سطحی با استفاده از سنجش از دور می‌باشد. در پژوهشی از داده سنجنده MSS ماهواره لندست برای بررسی کیفیت آب استفاده و معادلاتی برای تعیین پارامترهای کیفی آب ارائه شد (Khorram and Cheshier, 1985). بدین منظور پارامترهای کیفیت آب ۵۰ منطقه در خلیج سان فرانسیسکو تعیین و سپس مدل رگرسیونی بین پارامترهای شوری، کدورت، مواد معلق و کلروفیل بر اساس میانگین شاخص‌های انعکاسی باندهای مختلف لندست توسعه داده شد. آن‌ها بیان نمودند که یک همبستگی قوی بین شوری و کدورت آب وجود دارد. همچنین، برای تعیین کلروفیل شاخص‌های طیفی نسبی، نسبت باند آبی- قرمز (۵۲۰-۴۵۰ نانومتر) به مادون قرمز نزدیک (۱۰۵۰-۹۱۰ نانومتر) را برای غلظت کم کلروفیل و نسبت بین دو باند قرمز (۶۹۰-۶۳۰ نانومتر) به مادون قرمز نزدیک (۶۹۰-۷۵۰ نانومتر) را برای غلظت زیاد کلروفیل پیشنهاد دادند.

تأثیر توأم شوری و رسوبات جامد معلق بر میزان انعکاس طیفی آب در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفت و بیان شد که میزان انعکاس با غلظت مواد معلق رابطه مستقیم و با سطح شوری رابطه عکس دارد (Bhargava and Mariam, 1992). بدین ترتیب که با افزایش شوری و کاهش مواد معلق، انعکاس طیفی کاهش یافته و با کاهش شوری و افزایش مواد معلق، انعکاس طیفی افزایش پیدا می‌کند. از داده سنجنده TM ماهواره لندست چهار پارامتر کیفی آب مانند مواد جامد معلق، شوری، فسفر کل و دما مورد مطالعه قرار گرفت و با استفاده از داده‌های میدانی رابطه بین باندهای سنجنده TM و پارامترهای کیفی آب مدل‌سازی شد (Baban, 1993). تأثیر مواد معلق بر میزان انعکاس طیفی آب با استفاده از روش TMDLs<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار گرفت (Ritchie and Cooper, 2000). آن‌ها دریافتند که اگر مقدار رسوبات بین صفر تا ۵۰ میلی گرم بر لیتر باشد می‌توان از هر طول موجی استفاده نمود، اما اگر مقدار مواد معلق بیشتر از ۲۰۰ میلی گرم بر

استفاده از سنجش از دور ماهواره‌ای و بیان دقت این روش در برآورد پارامترهای کیفی تالاب، به عنوان هدف این پژوهش در نظر گرفته شد.

#### مواد و روش‌ها

تالاب انزلی با مساحت تقریبی ۲۰۰ کیلومتر مربع در حاشیه جنوبی دریای خزر و در محدوده ۳۷ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۴۰ دقیقه طول شرقی واقع شده است. تعداد زیادی زهکش و حدود ۲۰ رودخانه قبل از ورود به دریای خزر به تالاب منتهی می‌شوند که در این میان، ۱۱ رودخانه اهمیت بیشتری دارند. برای استخراج مدل‌های رگرسیونی میان بازتاب باندهای ماهواره و پارامترهای کیفی تالاب انزلی، از تالاب انزلی نمونه‌برداری و پارامترهای کیفی آب اندازه‌گیری شدند. نقاط نمونه‌برداری بر اساس نتایج نمونه‌برداری اولیه و نزدیکی به رودخانه‌های آلوده به گونه‌ای انتخاب شد تا شامل مناطق با کیفیت خوب، متوسط و بد باشد. شکل (۱) نقشه موقعیت تالاب انزلی و نقاط نمونه‌برداری را نشان می‌دهند. جدول (۱) مختصات جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری را نشان می‌دهد. برای بررسی اثر عمق آب بر دقت مدل‌های رگرسیونی تخمین پارامترهای کیفی، نمونه‌برداری در دو عمق صفر و پنجاه سانتی‌متری از سطح آب انجام شد و مطابق استاندارد (در ظرف حاوی یخ و در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد) به آزمایشگاه منتقل شدند. پارامترهای کیفی نترات، آمونیوم، کل جامدات معلق، شوری، اسیدیته، فسفر کل و ارتوفسفات در آزمایشگاه اندازه‌گیری شدند. پارامترهای نترات، فسفر کل و ارتوفسفات با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر، آمونیوم به روش تیتراسیون، شوری توسط دستگاه شوری‌سنج، اسیدیته توسط اسیدیته‌سنج و کل جامدات معلق به روش فیلتر کردن نمونه و خشک نمودن آن در آن تعیین شدند (Standard methods for the examination of water and wastewater, 2016).

در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌های لندست ۷ (سنجنده ETM) و ۸ (سنجنده‌های OLI و TIRS) بهره گرفته شد. تاریخ دقیق عبور ماهواره لندست ۷ و ۸ و زمان تصویربرداری از تالاب انزلی از جدول تقویم برنامه عبور لندست ۷ و ۸ مشخص گردید و پس از دریافت پیش‌بینی‌های هواشناسی از ۱۲۰ ساعت جلوتر، هماهنگی‌های لازم برای انجام عملیات نمونه‌برداری صورت پذیرفت. از آن‌جا که لایه ابر باعث خطا در قرائت‌های باند حرارتی می‌شود، در صورت ابرناکی هوا، نمونه‌برداری صورت نگرفت. از این رو با توجه به درصد ابرناکی تصاویر و به دلیل این‌که نمونه‌برداری به صورت فصلی مد نظر بود تا تأثیر شاخصه‌های آب و هوا بر

همچنین در پژوهش دیگری برای تعیین کیفیت آب از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده شد (Hereher et al., 2011). آن‌ها بیان نمودند برای تعیین نیتروژن آمونیومی از باندهای ۲ و ۳ و نسبت باند ۲ به ۳ و برای تعیین فسفر از نسبت باند ۳ به باند ۲ و همین‌طور باند ۷ به باند ۵ می‌توان استفاده کرد. آن‌ها همچنین برای کدورت نسبت باند ۴ به باند ۳ را پیشنهاد دادند و در آخر برای تعیین TDS نسبت باند ۲ به باند ۳ را بهترین نسبت ذکر کردند. Karakaya et al. (2011) از سنجنده ETM+ ماهواره لندست ۷ برای تعیین کدورت و SDD استفاده کردند. آن‌ها برای تخمین کدورت استفاده از باند ۱، ۲، ۳ و ۴ و برای SDD باندهای ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ سنجنده را توصیه نمودند. همچنین از سنجش از دور برای ارزیابی پارامترهای کیفی هشت دریاچه بزرگ و کوچک در استونی استفاده شد و نتایج نشان داد سنجش از دور می‌تواند کلروفیل نوع a، ماده آلی محلول و رنگ آب را به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۸۳، ۰/۹۲ و ۰/۵۲ برآورد نماید (Toming et al., 2016).

روند تغییرات سطح تالاب بین‌المللی شادگان طی یک دوره زمانی ۲۰ ساله (۲۰۱۱-۱۹۹۰) با استفاده از تصاویر ماهواره لندست مورد بررسی قرار گرفت (Rahimi Balochi et al., 2013). نتایج، کاهش شش درصدی مساحت تالاب شادگان طی این سال‌ها و کاهش مساحت بخش‌های آبی و خاکی (اراضی بایر و گل و لای) تالاب به میزان ۲۵/۷۱ درصد و افزایش مساحت پوشش گیاهی تالاب به میزان نه درصد را نشان داد. آن‌ها بیان کردند که پوشش گیاهی در تالاب به سرعت رو به افزایش بوده که نشان از آلودگی آب، افزایش پدیده تغذیه‌گرایی و از بین رفتن زود هنگام این تالاب بین‌المللی می‌باشد.

تالاب انزلی جزء ۲۲ تالاب بین‌المللی ایران است که تحت کنوانسیون رامسر قرار دارد. این تالاب دارای چهار بخش (شرقی، غربی، سیاه‌کشیم و مرکزی) و به لحاظ ارزش‌های زیستگاهی و هیدرولوژیکی نقش مهمی در منطقه ایفا می‌کند. رودخانه‌های منتهی به تالاب، مقادیر زیادی از مواد معلق، پساب کشاورزی، فاضلاب صنعتی و شهری را وارد تالاب می‌کنند که پیامدهایی از قبیل تنزل کیفیت آب، آسیب زیستگاه‌های جانوری و گیاهی، پدیده تغذیه‌گرایی و در نهایت مرگ تالاب را به همراه خواهد داشت. مدیریت کیفی تالاب به‌منظور جلوگیری، کنترل و کاهش معضلات کیفی نیازمند شناخت میزان و نوع آلاینده‌ها (پایه کیفی) و همچنین بررسی روند تغییرات تالاب است. با توجه به اهمیت زیستی تالاب انزلی و دقت قابل‌قبول و کاهش محدودیت‌های پایه کیفی منابع آب با استفاده از سنجش از دور بر اساس مطالعات پیشین، امکان‌سنجی پایه کیفی تالاب انزلی با

در بالای اتمسفر برای هر باند  $(W/m^2/\mu m)$ ،  $\theta$  زاویه تابش خورشیدی و  $d_r$  عکس مجذور فاصله نسبی زمین تا خورشید است و محدوده آن بین  $0/97$  تا  $1/03$  ( $1/strad^2$ ) و بدون بعد می باشد.  $ESUN_\lambda$  از جدول (۲) و  $d_r$  از رابطه Duffie and Beckman (1980) استخراج شد. زاویه ارتفاعی خورشید، زاویه بین محور هندسی مرکز سطح آشکار خورشید و خط افق می باشد و از رابطه (۲) به دست می آید.

$$\sin \theta = \cos h \cos \lambda \cos \varphi + \sin \varphi \sin \lambda$$

که در آن:  $\theta$  زاویه ارتفاعی خورشید،  $h$  زاویه ساعتی در زمان محلی خورشیدی،  $\lambda$  محور اصلی خورشید (زاویه میل خورشید) و  $\varphi$  عرض جغرافیایی منطقه می باشند. زاویه خورشیدی در خط استوا در ساعت ۱۲ خورشیدی برابر ۹۰ درجه، در زمان طلوع و غروب خورشید برابر صفر و در بقیه مدت زمان شبانه روز بین صفر و ۹۰ درجه است.

استخراج مدل رگرسیونی لحاظ شود، نمونه برداری در آبان ۱۳۹۱، بهمن ۱۳۹۱، اردیبهشت ۱۳۹۲ و مرداد ماه ۱۳۹۲ انجام شد. پس از دریافت تصاویر لندست از سایت GLOVIS برای ردیف ۳۴ و گذر ۱۶۶، با ترکیب باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک، تصاویر رنگی مرکب در محیط نرم افزار IMAGING ERDAS ایجاد شد. پس از برش محدوده مطالعاتی از تصویر، اعداد رقومی تصویر به تشعشع تابشی (Radiance) و بازتابش (Reflectance) تبدیل گردید تا شرایط برای استخراج مدل رگرسیونی پارامترهای کیفی در تالاب انزلی فراهم شود. برای تبدیل اعداد رقومی به تشعشع تابشی از نرم افزار ERDAS استفاده شد. پس از تبدیل مقادیر عددی تصویر به تشعشع تابشی، مقدار بازتابش برای هر باند ( $\rho_\lambda$ ) از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$\rho_\lambda = \frac{\pi L_\lambda}{ESUN_\lambda \cdot \cos \theta \cdot d_r}$$

که در رابطه فوق،  $ESUN_\lambda$  میانگین تابش فرودی خورشید



شکل ۱- نقشه تالاب انزلی و رودخانه های منتهی به تالاب (Google Map)

جدول ۱- مختصات نقاط نمونه برداری در مقطع عرضی ورودی سه رودخانه منتهی به تالاب انزلی

شماره نقطه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
۱	۳۷/۰	۲۶/۰
۲	۳۷/۰	۲۵/۰
۳	۳۷/۰	۲۴/۰

جدول ۲- مقادیر میانگین تابش فرودی خورشید در بالای اتمسفر برای هر باند ESUN<sub>i</sub> برای لندست ۷ (Markham et al., 1996)

باند ۱	باند ۲	باند ۳	باند ۴	باند ۵	باند ۶	باند ۷
۱۹۵۷	۱۸۲۹	۱۵۵۷	۱۰۴۷	۲۱۹/۳	-	۷۴/۵۲

شماره باندهای یک، دو، سه، چهار، پنج، هفت و LST می‌باشند. همچنین پارامترهای rain1، rain2 و rain3 و T به ترتیب مقدار بارش یک، دو و سه روز قبل از نمونه‌برداری (میلی‌متر) و دمای هوا در روز نمونه‌برداری (درجه سانتی‌گراد) هستند.

از ۷۰ درصد داده‌ها به منظور استخراج مدل‌ها و از ۳۰ درصد مابقی داده‌ها به منظور سنجش اعتبار مدل‌های پیشنهادی استفاده شد. ارزیابی مدل‌های پیشنهادی با شاخص‌های آماری از جمله ضریب تبیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ریشه نرمال میانگین مربعات خطا (nRMSE) صورت گرفت. ارزیابی مدل براساس مقادیر nRMSE به ترتیب برای کمتر از ۱۰ درصد، ۱۰-۲۰، ۲۰-۳۰ و بیشتر از ۳۰ درصد عالی، خوب، نسبتاً خوب و ضعیف دسته‌بندی می‌شوند (Jamieson et al., 1991). ضریب تبیین و ریشه میانگین مربعات خطا و ریشه نرمال میانگین مربعات خطا به ترتیب از معادله‌های (۶) تا (۸) به دست آمدند.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

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

$$nRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \times \frac{100}{O}$$

که در آن،  $P_i$  مقادیر پیش‌بینی شده،  $O_i$  مقادیر مشاهده‌ای،  $n$  تعداد مشاهدات و  $\bar{O}$  میانگین مقادیر مشاهده‌ای می‌باشند.

### نتایج و بحث

در استخراج مدل‌های رگرسیونی هر یک از پارامترهای کیفی، با استفاده از روش حساسیت پارامترهای هم‌راستا یا کم تأثیر حذف شدند و در نهایت ضرایب مدل‌ها به دست آمدند. بر اساس آزمون F تمام مدل‌های رگرسیونی ایجاد شده در سطح اطمینان پنج و یک درصد معنی‌دار هستند. جداول (۳) و (۴) به ترتیب ضرایب مدل‌های استخراج شده برای پارامترهای کیفی مورد بررسی در دو عمق صفر و ۵۰ سانتی‌متری از سطح آب را نشان می‌دهند. میزان

در محیط نرم‌افزار ERDAS داده‌های یادشده توسط مدل F02\_reflectivity فراخوانده شده و پس از انجام محاسبات، خروجی این مدل تصویری از تالاب بود که مقادیر بازتابش را در هر نقطه از تالاب نشان داد. با در دست داشتن مختصات جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری، مقادیر بازتابش هر باند در نقاط نمونه‌برداری به دست آمد.

برای استخراج مدل رگرسیونی برآورد پارامترهای کیفی از داده‌های سنجش از دور، در ابتدا بازتابش باندهای مرتبط و تأثیرگذار بر پارامترهای کیفی آب بر اساس سابقه مطالعاتی از تصاویر ماهواره‌ای برداشت شده در زمان عبور ماهواره از تالاب انزلی استخراج شد. این بازتابش‌ها شامل باندهای ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۷ و LST<sup>۱</sup> بود. همچنین، به دلیل تأثیرپذیری برخی پارامترهای کیفی مانند کل جامدات محلول، کل جامدات معلق، ارتوفسفات، آمونیوم از وضعیت آب و هوایی و به خصوص بارش (لحاظ نمودن تفاوت فصل‌ها بر پارامترهای کیفی تالاب و تصاویر ماهواره‌ای)، مقادیر بارش سه روز قبل از نمونه‌برداری و دمای روز نمونه‌برداری به عنوان سایر پارامترهای ورودی در مدل‌ها به کار گرفته شدند. به دلیل پیچیدگی پارامترهای تأثیرگذار بر عوامل کیفی آب، برای استخراج مدل‌ها از فرم غیرخطی معادلات رگرسیونی استفاده شد. بدین منظور، پس از اعمال آزمون نرمال بودن و نرمال نمودن (با استفاده از نرم‌افزار MiniTab) پارامترهای غیر نرمال با استفاده از تبدیل‌های متعارف ریاضی، با به کارگیری نرم‌افزار SAS و رویه NLIN معادلات غیرخطی ارتباط‌دهنده بازتابش‌های تصاویر ماهواره‌ای و مقادیر بارش و دما با پارامترهای کیفی آب مشخص شدند. فرم عمومی مدل‌ها در روابط ۳ تا ۵ آمده است.

(رابطه ۳)

$$Y = a \times (band_1)^b \times (band_2)^c \times (band_3)^d \times (band_4)^e \times (band_5)^f \times (band_7)^g \times (band_{LST})^h \times (rain1 + rain2 + rain3 + T)^i$$

(رابطه ۴)

$$TP = 10^{a \times (band_1)^b \times (band_2)^c \times (band_3)^d \times (band_4)^e \times (band_5)^f \times (band_7)^g \times (0.001 \times band_{LST})^h \times (rain1 + rain2 + rain3 + T)^i}$$

(رابطه ۵)

$$TP = 10^{a \times (band_1)^b \times (band_2)^c \times (band_3)^d \times (band_4)^e \times (band_5)^f \times (band_7)^g \times (0.001 \times band_{LST})^h \times (rain1 + rain2 + rain3 + T)^i}$$

که در آن‌ها Y پارامتر کیفی، TSS کل جامدات معلق، TP غلظت فسفر کل، a تا i ضرایب معادله، band<sub>1</sub>، band<sub>2</sub>، band<sub>3</sub>، band<sub>4</sub>، band<sub>5</sub>، band<sub>7</sub> و band<sub>LST</sub> به ترتیب مقادیر بازتابش‌ها در



کیفی مذکور نسبت عکس داشت که این مسئله با ماهیت آنچه در سنجش از دور روی می‌دهد و ارتباط آن با پارامترهای کیفی مذکور تطابق دارد. در تمام پارامترهای کیفی مورد بررسی، پارامترهای بارش تا سه روز قبل از نمونه‌برداری و دمای هوا در روز نمونه‌برداری تأثیرگذار بود به طوری که این تأثیرگذاری در پارامترهای آمونیوم، نیترات و ارتوفسفات بیش‌ترین مقدار را داشت.

معنی‌داری ضرایب مدل‌های استخراج شده در دو عمق صفر و ۵۰ سانتی‌متری از سطح آب در سطح اطمینان پنج درصد در جداول (۵) و (۶) آمده است. همان‌طور که در جداول مشخص است تمام ضرایب در سطح پنج درصد معنی‌دار بوده و در نتیجه در مدل تأثیرگذار هستند. بر اساس جداول (۳) و (۴) پارامترهای کل جامدات معلق، فسفر کل، ارتوفسفات و آمونیوم که تحت تأثیر وجود ذرات فرسایش یافته خاک در آب هستند به بازتابش باند LST حساس بوده و بازتابش در باند LST با مقادیر پارامترهای

جدول ۳- ضرایب معادلات استخراجی برای پارامترهای کیفی در عمق صفر از سطح آب در تالاب آنزلی

پارامتر	i	h	g	f	e	d	c	b	a
هدایت الکتریکی $\mu$ (mhos/cm)	۰/۵۵	۰/۰۰۰۰	۰/۱۸۱۸	-۰/۳۸۸۳	۰/۳۰۷۹	۰/۰۷۲۴	-۰/۲۹۰۰۰	۲/۷۵۴۶	۶۹/۱۹۰۰
کل جامدات محلول (mg/l)	-۰/۰۱۹	۰/۰۰۰۰	۰/۱۶۱۳	-۰/۳۸۹۳	۰/۳۲۷۲	۰/۷۵۶۵	-۰/۶۲۷۰	۲/۳۷۱۷	۱۱۱/۵۰۰۰
ب هاش	۰/۰۸۰۶	۰/۰۰۰۰	-۰/۰۱۵	-۰/۰۳۲۲	۰/۰۵۶۸	۰/۱۹۵۲	-۰/۴۳۴۰	۰/۲۴۹۲	۵/۷۷۷۹
دما (°C)	۰/۹۸۳۷	۰/۰۰۰۰	-۰/۰۳۷۴	-۰/۰۰۸۳	۰/۰۴۳۶	۰/۱۹۱۸	-۰/۵۸۵۰	۰/۷۹۸۲	۱/۸۶۶۹
نیترات (mg/l)	۰/۱۸۷۳	۰/۰۰۰۰	-۰/۱۲۰۰	۰/۶۲۳۵	-۰/۶۷۱۵	-۰/۳۱۹۰۰	۶/۴۹۷۴	-۲/۶۰۸۰	۲۶/۰۲۰۷
کل جامدات معلق (mg/l)	-۰/۴۴۹	۱/۹۴۹۸	۰/۱۴۰۷	-۰/۲۰۳۱	۰/۱۱۱۷	-۰/۰۸۳۴	-۰/۴۳۷۱	۰/۸۸۰۸	۲۳۷/۵۰۰۰
ارتوفسفات بر حسب فسفر (mg/l)	-۴/۰۸۵۵	-۸/۶۷۶۸	۰/۸۵۸۱	-۰/۳۸۱۰	۰/۷۳۲۸	۵/۹۰۷۷	-۶/۶۰۷۰	-۱/۶۴۴۰	۰/۴۶۵۰
فسفر کل (mg/l)	-۱/۴۶۹۹	-۵/۴۷۳۳	۰/۲۰۳۷	-۰/۲۰۸۴	-۰/۰۰۱۵۶	۱/۵۹۲۴	-۲/۸۶۰۲	۰/۱۶۷۷	۰/۰۱۴۱
آمونیم (mg/l)	-۹/۴۵۷۴	-۲۰/۷۳۳۷	۰/۵۵۳۷	-۰/۵۶۱۴	۰/۵۰۸۰	۰/۱۸۲۸	۰/۷۸۴۲	-۵/۲۳۸۵	۰/۰۳۵۷

جدول ۴- ضرایب معادلات استخراجی برای پارامترهای کیفی در عمق ۵۰ سانتی‌متری در تالاب آنزلی

پارامتر	i	h	g	f	e	d	c	b	a
هدایت الکتریکی $\mu$ (mhos/cm)	-۰/۰۳۸۴	۰/۰۰۰۰	۰/۱۴۳۹	-۰/۳۶۳۰	۰/۳۰۷۴	۰/۷۷۹۷	-۰/۱۷۱۷۹	۲/۴۳۴۸	۱۷۶/۳۰۰۰
کل جامدات محلول (mg/l)	-۰/۰۳۸۴	۰/۰۰۰۰	۰/۱۴۳۹	-۰/۳۶۳۰	۰/۳۰۷۴	۰/۷۷۹۷	-۰/۱۷۱۷۹	۲/۴۳۴۸	۱۱۲/۸۰۰۰
ب هاش	۰/۰۹۱۱	۰/۰۰۰۰	-۰/۰۰۸۵۴	-۰/۰۴۳۳	۰/۰۶۴۸	۰/۱۷۳۸	-۰/۴۰۴۳	۰/۲۲۵۱	۵/۴۴۵۳
دما (°C)	۰/۹۸۹۷	۰/۰۰۰۰	-۰/۰۶۱۶	-۰/۰۴۱۶	۰/۱۲۹۲	۰/۲۹۵۴	-۰/۵۸۳۷	۰/۶۱۴۷	۱/۵۹۶۹
نیترات (mg/l)	۰/۴۶۳۱	۰/۰۰۰۰	-۰/۰۶۹۹	۰/۵۴۰۶	-۰/۵۴۷۲	-۰/۱۷۶۰	۶/۴۶۵۱	-۲/۷۰۵۷	۱۰/۳۳۹۰
کل جامدات معلق (mg/l)	-۰/۶۵۲۲	۱/۱۲۹۶	-۰/۱۷۰۰	۰/۱۵۶۹	-۰/۰۸۹۷	-۰/۰۴۵۱	-۰/۴۸۲۸	۰/۹۵۳۶	۱۱۴/۵۰۰۰
ارتوفسفات بر حسب فسفر (mg/l)	-۱/۷۱۸۶	-۹/۹۸۲۲	۰/۱۰۰۰	۰/۹۰۰۰	۰/۷۰۰۰	۳/۸۸۶۱	-۱/۹۲۸۸	-۴/۰۹۷۱	۰/۰۰۲۳۵
فسفر کل (mg/l)	-۲/۱۱۵۲	-۶/۰۶۷۷	-۰/۱۵۸۱	۰/۱۲۲۳	-۰/۱۳۰۱	۲/۳۳۰۱	-۳/۲۱۵۶	-۰/۳۴۴۰	۰/۰۲۵۲
آمونیم (mg/l)	-۹/۷۷۹۹	-۲۳/۵۴۵۷	۰/۳۴۱۶	-۰/۱۸۷۵	۰/۲۵۴۸	-۰/۰۱۹۵	۱/۸۴۲۷	-۶/۵۸۱۴	۰/۰۰۸۹۹

جدول ۵- معنی‌داری ضرایب معادلات استخراجی برای پارامترهای کیفی در عمق صفر از سطح آب در تالاب آنزلی بر اساس آزمون T

پارامتر	i	h	g	f	e	d	c	b	a
هدایت الکتریکی	۰/۰۴۵	-	۰/۰۴۸	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۱۴	.	.	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۲۴
کل جامدات محلول	۰/۰۰۰۰۳	-	۰/۰۴۴	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۳۴	.	.	۰/۰۰۰۰۵۲	۰/۰۲۷
ب هاش	۰/۰۳۲	-	۰/۰۲۵	۰/۰۳۴	۰/۰۳۷	۰/۰۳۹	۰/۰۴۸	۰/۰۴۷	۰/۰۳۵
دما	۰/۰۳۱	-	۰/۰۴۵	۰/۰۴۴	۰/۰۴۷	۰/۰۴۹	۰/۰۰۰۴۳	۰/۰۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۰۴۶
نیترات	۰/۰۴۳	-	۰/۰۴۲	۰/۰۲۷	۰/۰۲۴	۰/۰۴۷	۰/۰۳۵	۰/۰۴۱	۰/۰۴۴
کل جامدات معلق	.	۰/۰۰۰۰۱۶	.	.	.	.	.	.	.
ارتوفسفات بر حسب فسفر	۰/۰۰۰۵۷	۰/۰۰۰۵۹	۰/۰۳۸	۰/۰۴۲	۰/۰۴۱	۰/۰۰۰۱۸	۰/۰۰۰۴۶	۰/۰۴۷	۰/۰۴۸
فسفر کل	۰/۰۴۴	۰/۰۳۸	۰/۰۴۸	۰/۰۴۷	۰/۰۴۴	۰/۰۴۷	۰/۰۴۵	۰/۰۴۲	۰/۰۳۴
آمونیم	۰/۰۰۰۸۸	۰/۰۰۰۱۸	۰/۰۳۲	۰/۰۳۷	۰/۰۳۴	۰/۰۴۲	۰/۰۴۵	۰/۰۴۷	۰/۰۲۴

جدول ۶- معنی داری معادلات استخراجی برای پارامترهای کیفی در عمق ۵۰ سانتی متری در تالاب انزلی بر اساس آزمون T

پارامتر	i	h	g	f	e	d	c	b	a
هدایت الکتریکی	۰/۰۴۱	-	۰/۰۴۸	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۰۱۸	.	.	۰/۰۰۰۰۰۷	۰/۰۳۴
کل جامدات محلول	۰/۰۰۰۰۵	-	۰/۰۴۲	۰/۰۰۱۸	۰/۰۴۴	.	.	۰/۰۰۰۰۷۲	۰/۰۲۹
پ هاش	۰/۰۳۷	-	۰/۰۲۷	۰/۰۳۶	۰/۰۳۹	۰/۰۴۰	۰/۰۴۸	۰/۰۴۸	۰/۰۳۷
دما	۰/۰۳۳	-	۰/۰۴۷	۰/۰۴۵	۰/۰۴۶	۰/۰۴۷	۰/۰۰۰۰۴۴	۰/۰۰۰۰۱۹	۰/۰۰۰۰۴۸
نیترات	۰/۰۴۵	-	۰/۰۴۴	۰/۰۲۸	۰/۰۲۷	۰/۰۴۸	۰/۰۳۶	۰/۰۴۲	۰/۰۴۵
کل جامدات معلق	.	۰/۰۰۰۰۱۹	.	.	.	.	.	.	.
ارتوفسفات بر حسب فسفر	۰/۰۰۰۵۹	۰/۰۰۰۷۹	۰/۰۳۹	۰/۰۴۳	۰/۰۴۶	۰/۰۰۰۱۹	۰/۰۰۰۵۶	۰/۰۴۶	۰/۰۴۶
فسفر کل	۰/۰۴۵	۰/۰۴۸	۰/۰۴۹	۰/۰۴۷	۰/۰۴۵	۰/۰۴۸	۰/۰۴۴	۰/۰۴۷	۰/۰۳۶
آمونیم	۰/۰۰۰۹۸	۰/۰۰۰۱۹	۰/۰۳۹	۰/۰۳۵	۰/۰۳۸	۰/۰۴۴	۰/۰۴۵	۰/۰۴۸	۰/۰۲۴

نشان داد که باند ۱ نقش کلیدی تری در برآورد پارامترهای کیفی ایفا می‌نماید. بررسی معادله برآورد آمونیم نشان داد که این پارامتر به باندهای ۱ و LST و داده‌های بارش و دما وابستگی زیادی دارد که این مسئله با ماهیت آمونیم که با ذرات فرسایش یافته خاک منتقل می‌شود و تغییر فرم آن به سایر شکل‌های نیتروژن به شدت تحت تأثیر عوامل محیطی است، مطابقت دارد. نکته قابل توجه، تأثیرگذار بودن باندهای ۱ تا ۷ در پارامترهای کیفی محلول در آب (هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول، اسیدیته، نیترات، ارتوفسفات) است. در حالی که پارامترهای تحت تأثیر ذرات فرسایش یافته خاک بیشتر تحت تأثیر باند LST و مقادیر بارش و دمای هوا قرار گرفتند. در مقایسه با آمونیم، فسفر کل به دلیل شامل بودن فرم جذب سطحی به ذرات خاک و بخش محلول فسفر، بیشتر تحت تأثیر مقادیر بارش و دمای هوای برداشت شده از ایستگاه هواشناسی و باند LST قرار گرفتند.

به منظور ارزیابی دقت معادلات استخراجی برآورد پارامترهای کیفی تالاب انزلی، مقادیر شاخص‌های آماری به دست آمده از داده‌های حاصل از چهار مرحله نمونه‌برداری در جداول (۷ و ۸) آمده است. از آنجا که شاخص nRMSE شاخص مناسب تری برای ارزیابی دقت برآوردی معادلات استخراجی است، از این شاخص به منظور بیان دقت معادلات استفاده شد. مطابق نتایج با شاخص nRMSE، دقت استخراج معادلات برآورد پارامترهای اسیدیته و دما در عمق صفر و ۵۰ سانتی متری از سطح آب دارای دقت عالی هستند. دقت معادلات پارامترهای کل جامدات معلق و فسفر کل در رده خوب قرار گرفت هرچند دقت معادله برآورد کل جامدات معلق در عمق ۵۰ سانتی متری بیش تر از عمق صفر سانتی متری بود اما دقت برآوردی فسفر کل در سطح بهتر از عمق آب به دست آمد (بر اساس طبقه‌بندی Jamieson et al., 1991). پارامترهای هدایت الکتریکی و کل جامدات محلول از دقت در رده نسبتاً خوب برخوردار شدند که این دقت در هر دو عمق مورد بررسی نسبتاً یکسان بود. دقت برآورد پارامترهای ارتوفسفات بر

در برآورد پارامتر هدایت الکتریکی و کل جامدات محلول، باند ۳ بیشترین و باند ۱ کمترین تأثیر را داشتند. همچنین باند حرارتی (LST) بر این پارامترها تأثیرگذار نبود و توان منفی برای شاخص مقدار باران نشان داد که مطابق انتظار با افزایش باران مقادیر هدایت الکتریکی و کل جامدات محلول کاهش می‌یابد.

باندهای ۱ و ۵ به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را در تخمین اسیدیته و مقادیر بازتابش در باندهای ۲، ۵ و ۷ با مقدار اسیدیته نسبت عکس داشتند. در برآورد دما، کمترین و بیشترین تأثیرگذاری مربوط به باندهای ۱ و ۳ بود. همچنین، باند حرارتی (LST) بر این پارامترها تأثیرگذار نبود و توان منفی برای مقادیر بازتابش در باندهای ۲، ۵ و ۷ نشان از اثرگذاری معکوس آن‌ها بر میزان دمای آب دارد. در پارامتر نیترات باندهای ۱ و ۶ بیشترین و کمترین اثر را به خود اختصاص دادند. باندهای ۱ و ۲ به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را در تخمین کل جامدات معلق و آمونیم داشتند. تفاوت باندهای تأثیرگذار و مثبت و منفی بودن توان این باندها در پارامترهای نیترات و آمونیم نشان می‌دهد که اگرچه این دو عنصر هر دو، فرم‌های مختلف نیتروژن هستند اما به دلیل ماهیت مختلف آن‌ها (آمونیم در شرایط کدورت و وجود جامدات معلق بیشتر است)، می‌بایست از باندهای مختلفی برای تخمین آن‌ها بهره برد. ضرایب در خصوص برآورد ارتوفسفات و فسفر کل هم یکسان عمل نکردند به طوری که در ارتوفسفات باندهای ۳ و ۱ بیشترین و کمترین باند مؤثر بودند در حالی که در فسفر کل باندهای LST و ۱ به ترتیب بیشترین و کمترین نقش را به خود اختصاص دادند. در خصوص پارامترهای کل جامدات معلق، ارتوفسفات، فسفر کل و آمونیم، توان مربوط به باند LST می‌تواند مرتبط با بارش باران و فرسایش خاک ناشی از آن و در نتیجه اثر بر کل جامدات معلق و به دنبال آن افزایش ارتوفسفات، فسفر کل و آمونیم باشد که با حرکت ذرات فرسایش یافته به منابع آب سطحی منتقل می‌شوند. بررسی باندهای اثرگذار در خصوص پارامترهای کیفی مورد بررسی تالاب انزلی



عمق ۵۰ سانتی متری داشت. به نظر می‌رسد ذرات کلونیدی و آلی معلق در آب که در سطح آب قابل تشخیص توسط باندهای مورد استفاده هستند، عامل مؤثر در این امر باشند.

مقایسه نتایج این پژوهش با نتایج سایر محققین نشان می‌دهد که سنجش از دور توانسته است در پایش پارامترهای دما، کل جامدات معلق، نیترات و فسفر کل تالاب انزلی مشابه سایر مناطق عمل نماید (Olet, 2010; Weiqi et al., 2008). شکل‌های (۲) و (۳) مقادیر اندازه‌گیری و تخمینی پارامترهای کیفی مورد بررسی در دو عمق صفر و ۵۰ سانتی متری از سطح آب را نشان می‌دهند. پراکندگی کم‌تر نقاط از خط ۴۵ درجه رسم شده در نمودارها در پارامترهای دما، کل جامدات معلق نشان از دقت بیش‌تر مدل‌های استخراجی آن‌ها دارد.

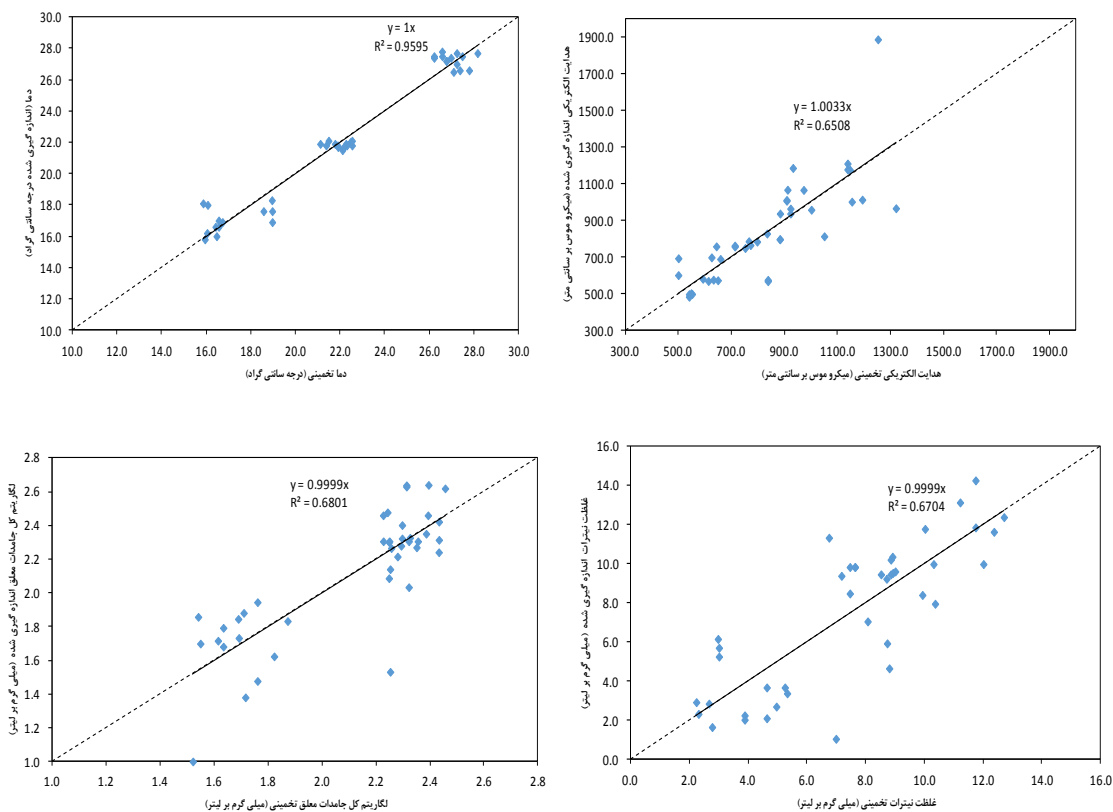
حسب فسفر، نیترات و آمونیوم در هر دو عمق در رده ضعیف قرار گرفت، هر چند نیترات در عمق ۵۰ سانتی متری از سطح آب دارای nRMSE برابر ۲۸/۴۹ (کمتر از ۳۰) بود که می‌تواند در رده دقتی نسبتاً خوب قرار گیرد. دقت برآورد نیترات در عمق بیش‌تر از سطح آب بود. به‌طور کلی و بر اساس مقادیر RMSE معادله هدایت الکتریکی در سطح دقت برآورد بهتری نسبت به عمق ۵۰ سانتی متر داشت که می‌تواند ناشی از اثرپذیری این پارامتر از دما باشد که نزدیک بودن دمای سطح آب به دمای هوا باعث افزایش دقت معادله شد در حالی که در عمق ۵۰ سانتی متری رابطه بین دمای هوا و هدایت الکتریکی معکوس به دست آمد. نتایج نشان داد که دمای آب تالاب در اعماق مختلف می‌تواند نسبت به دمای هوا در زمان‌های مختلف تفاوت محسوس داشته باشد. برخلاف نیترات، معادله برآورد آمونیوم در سطح آب دقت بهتری نسبت به

جدول ۷- شاخص‌های آماری مدل‌های استخراج‌شده برای پارامترهای کیفی تالاب انزلی با استفاده از سنجش از دور در عمق سطحی

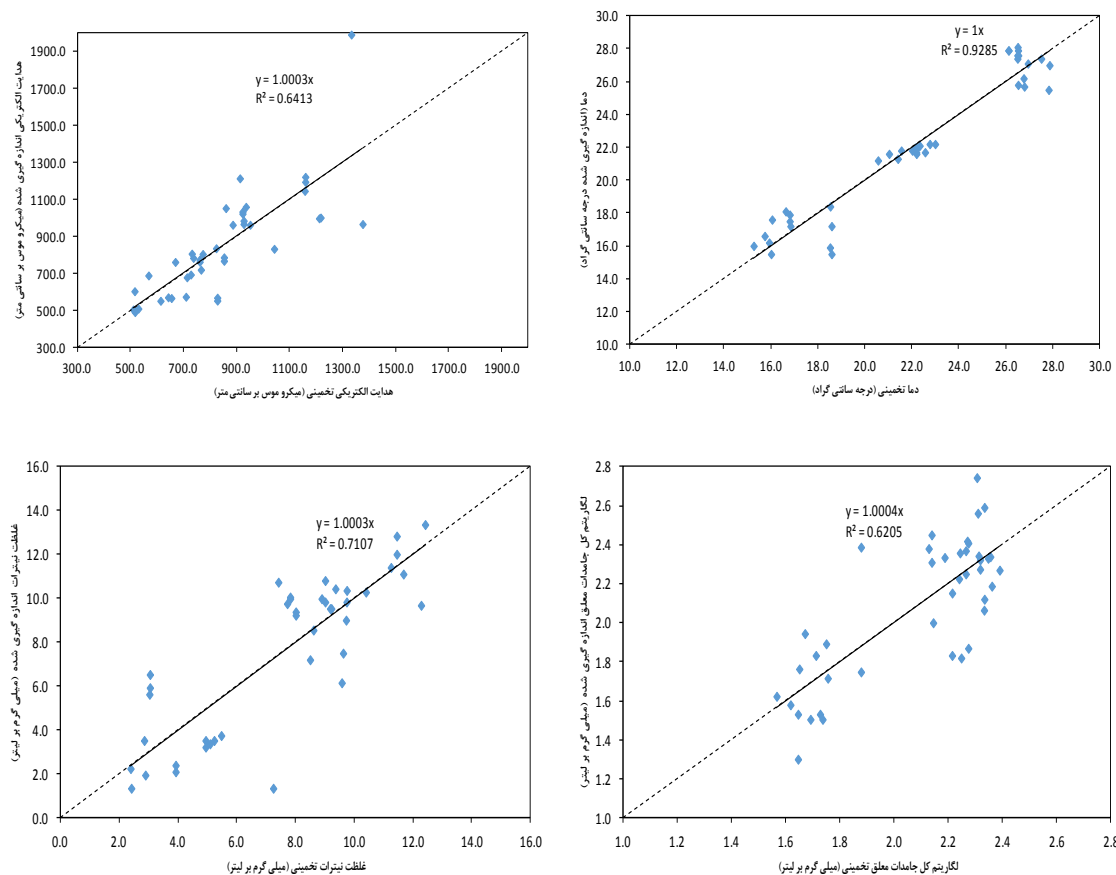
پارامتر کیفی	ضریب تبیین ( $R^2$ )	ریشه میانگین خطا (RMSE)	درصد ریشه میانگین نرمال شده (nRMSE)
هدایت الکتریکی	۰/۶۵	۱۵۷/۹۵ (میکروموس بر سانتی متر)	۱۸/۸۷
کل جامدات محلول	۰/۶۷	۹۸/۷۱ (میلی گرم بر لیتر)	۱۸/۴۳
کل جامدات معلق	۰/۶۸	۰/۲۱ (لگاریتم میلی گرم بر لیتر)	۹/۶۲
اسیدیته	۰/۵۵	۰/۳۳	۴/۲۷
دما	۰/۹۶	۰/۸۴ (درجه سانتی گراد)	۳/۷۹
ارتوفسفات بر حسب فسفر	۰/۲۵	۱/۶۷ (میلی گرم بر لیتر)	۷۱/۷۱
فسفر کل	۰/۴۵	۰/۱۷ (لگاریتم میلی گرم بر لیتر)	۱۳/۷۸
نیترات	۰/۶۷	۲/۱۲ (میلی گرم بر لیتر)	۲۸/۷۰
آمونیم	۰/۹۷	۰/۲۷ (میلی گرم بر لیتر)	۲۲/۹۷

جدول ۸- شاخص‌های آماری مدل‌های استخراج‌شده برای پارامترهای کیفی تالاب انزلی با استفاده از سنجش از دور در عمق ۵۰ سانتی متری

پارامتر کیفی	ضریب تبیین ( $R^2$ )	ریشه میانگین خطا (RMSE)	درصد ریشه میانگین نرمال شده (nRMSE)
هدایت الکتریکی	۰/۶۴	۱۶۷/۶۹ (میکروموس بر سانتی متر)	۱۹/۹۱
کل جامدات محلول	۰/۶۴	۱۰۷/۳۵ (میلی گرم بر لیتر)	۱۹/۹۱
کل جامدات معلق	۰/۶۶	۰/۲۱ (میلی گرم بر لیتر)	۹/۸۸
اسیدیته	۰/۵۴	۰/۳۴	۴/۳۳
دما	۰/۹۳	۱/۱۲ (درجه سانتی گراد)	۵/۰۹
ارتوفسفات بر حسب فسفر	۰/۱۷	۱/۷۴ (میلی گرم بر لیتر)	۷۶/۹۸
فسفر کل	۰/۲۳	۰/۲۱ (میلی گرم بر لیتر)	۱۶/۸۳
نیترات	۰/۷۱	۱/۸۹ (میلی گرم بر لیتر)	۲۵/۱۶
آمونیم	۰/۹۵	۰/۳۳ (میلی گرم بر لیتر)	۲۸/۳۵



شکل ۲- مقایسه مقادیر پارامترهای کیفی تخمینی و اندازه گیری شده در سطح آب



شکل ۳- مقایسه مقادیر پارامترهای کیفی تخمینی و اندازه گیری شده در عمق ۵۰ سانتی متری از سطح آب

دور در برآورد هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول و فسفر کل تالاب انزلی خوب و در خصوص پارامترهای نیترا و آمونیوم قابل قبول بود. نکته قابل توجه عدم تأثیرگذاری عمق نمونه برداری بر دقت مدل‌های رگرسیونی استخراجی در روش سنجش از دور بود. بنابراین، مطابق با نتایج رنگ زمینه‌ای تالاب انزلی تا عمق ۵۰ سانتی متری بر دقت مقادیر برآوردی ناشی از روش سنجش از دور تأثیرگذار نیستند. با توجه به نتایج قابل قبول دقت سنجش از دور در تالاب انزلی توصیه می‌شود دقت آن در برآورد پارامترهای کیفی سایر منابع آب نیز مورد بررسی قرار گیرد تا در صورت تأیید هزینه‌های پایش کیفی میدانی منابع آبی کاهش یابد.

### سیاسگذاری

این مقاله مستخرج از طرح با کد ۸۹۰۰۲۹۴۸ تحت حمایت صندوق پژوهشگران ریاست جمهوری است و محققین از حمایت آن صندوق محترم کمال تشکر را دارند. امید آن که دستاوردهای این پژوهش مورد استفاده سازمان‌ها و متولیان امور آب قرار گیرد.

### REFERENCES

- Akbar, T., Hassanb, Q. and Acharia, G. (2008). A remote sensing based framework for predicting water quality of different source waters. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34, Part 1-4.
- Baban, S. M. (1993). The evaluation of different algorithms for bathymetric charting of lakes using landsat imagery. *International journal of remote sensing*, 14(12), 110-124.
- Bhargava, D. S. and Mariam, D. W. (1992). Cumulative effects of salinity and sediments concentration of reflectance measurements. *International journal of remote sensing*, 13(11), 2151-2159.
- Dewidar, Kh. and Khedr, A. (2005). Remote sensing of water quality for Burullus lake, Egypt. *Environmental science*, 20(3), 1-7.
- Duffie, J.A., and Beckman, W.A. (1980). Solar Engineering of Thermal Processes. *John Wiley and Sons*, New York, 1-109.
- Hassan, M. A., Church, M., Xu, J. and Yan, Y. (2008). Spatial and temporal variation of sediment yield in the landscape: Example of Huanghe (Yellow River), *Geophysics Research, Lett.*, 35, L06401, doi:10.1029/2008GL033428.
- Hereher, M., Salem, M. and Darwish, D. (2011). Mapping water quality of Burullus Lagoon using remote sensing and geographic information system. *Journal of American Science*, 7 (1): 138-143.
- Jamieson, P. D., Porter, J. R. and Wilson, D. R. (1991). A test of the computer simulation model ARC-WHEAT1 on wheat crops grown in New Zeland. *Field Crops Research*, 27(4), 337-350.
- Karakaya, N., Evrendilek, F. and Aslan, G. (2011). Monitoring of lake water quality along with tropic gradient using landsat data. *International Journal of Environmental Science Technology*, 8(4), 817-822.
- Khorram, s. and Cheshier, H. (1985). Remote sensing of water quality in the Neuse River. *American Society of Photogrammetry*, 51(3), 329-341.
- Markham, B. L., Barker, J. L., Bonczyk, W. C., Kaita, E. and Helder, D. L. (1996). Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus in-flight radiometric calibration. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2, 1270-1272 (Lincoln, NE).
- Olet, E. (2010). Water quality monitoring of roxo reservoir using landsat image and in-situ measurement. Master of Science in Geoinformation Science and Earth Observation, Specialisation: Environmental Hydrology, Netherlands, 1-69.
- Rahimi Blouch, L., Zarkar, A. and Malekmohammadi, B. (2013). Detecting environmental change of Shadegan international wetland using remote sensing and WRASTIC index (Case study: Shadegan international wetland). *Journal of Applied RS & GIS Techniques in Natural Resource Science*, 3(4), 43-55. (In Farsi)
- Ritchie, J. and Cooper, Ch. (2000). Remote sensing techniques for determining water quality. USDA agriculture research servis. *Hydrology and Remote Sensing Laboratory and National Sedimentation Laboratory, Beltsville, MD 20705 and Oxford, MS 38655*, 1-8.
- Toming, K., Kutser, T., Laas, A., Sepp, M., Paavel, B., and Nõges, T. (2016). First Experiences in

### نتیجه‌گیری

نتیجه این پژوهش نشان داد بازتابش باندهای مختلف تصاویر ماهواره‌ای، اثرات متفاوتی در برآورد پارامترهای کیفی آب تالاب انزلی دارد. بنابراین، انجام تحلیل حساسیت و پتانسیل‌سنجی میزان تأثیر باندها بر پارامترهای مختلف می‌بایست مورد توجه بیشتری قرار گیرد. در این پژوهش، بازتابش مربوط به باند ۱ بیشترین تأثیر را در برآورد پارامترهای کیفی تالاب داشت. در خصوص پارامترهای ارتوفسفات، فسفر کل، کل جامدات معلق و آمونیوم باند LST تأثیرگذار به‌شمار آمد. همچنین، توان منفی در بازتابش باندهای مختلف نشان از اثر معکوس برخی از بازتابش‌های باندها در برآورد پارامترهای کیفی تالاب داشت. مقایسه شاخص‌های آماری مدل‌های تخمین پارامترهای کیفی نشان داد که سنجش از دور در تالاب انزلی در برآورد پارامترهای دما، اسیدیته و کل جامدات معلق به ترتیب بیشترین دقت و در خصوص ارتوفسفات کمترین دقت را داشته است. دقت سنجش از

Mapping Lake Water Quality Parameters with Sentinel- 2 MSI Imagery. *Remote Sensing*, doi:10.3390/rs8080640.

Weiqi, H., Shan, C., Xuehua, L. and Jining, C. (2008). Water quality monitoring in slightly-polluted inland water body through remote sensing, a case study in Guanting Reservoir, Beijing China,

*Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 1-11.

Wu, M., Zhang, W., Wang, X., and Luo, D. (2009). Application of MODIS satellite data in monitoring water quality parameters of Chaohu Lake in China. *Environmental Monitoring and Assessment*. 148(1-4): 255-264.