

Study on the Impact of Input Flow Rate on Suspended Sediments in Lakes Using Satellite Imagery: A Case Study

Ashkan Noori¹, Seyed Hossein Mohajeri^{2*}

1- Graduated Master student, Department of Civil Engineering, Technical and Engineering Faculty, Kharazmi University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Technical and Engineering Faculty, Kharazmi University, Tehran, Iran.

* hossein.mohajeri@khu.ac.ir

Received: 6 June 2023, Accepted: 1 July 2023  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: The main objective of this research is to prepare a temporal and spatial classification of suspended sediment values using Sentinel-2 satellite imagery and physical methods on the Chah-Nimeh reservoirs in Sistan and Baluchestan province. Specifically, this study aims to produce an accurate classification of suspended sediment values in space and time using satellite data and physical methods. Furthermore, by comparing the suspended sediment values with the input flow rate of the Chah-Nimeh reservoirs, more information about the suspended sediment values was obtained. Finally, a regression-based model was presented to estimate the suspended sediment values based on the input flow rate. By analyzing this information, it is possible to gain a better understanding of the behavior of suspended sediments and the factors affecting them over time. Overall, this research can contribute to a better understanding of the behavior of suspended sediments and the factors affecting them.

Methodology: The aim of this study is to accurately classify suspended sediment values in space and time using Sentinel-2 satellite imagery and physical methods on Chah-Nimeh reservoirs in the Sistan and Baluchestan province. To achieve this goal, the researchers utilized the C2RCC processor for spectral calculations and modeling, which is based on deep learning approaches and simulated water reflectance outputs for high-altitude correction algorithms. The processor allows for the calculation of water reflectance in different spectral bands and the estimation of three main water quality parameters, including the concentration of total suspended solids, chlorophyll-a, and colored dissolved organic matter, using various relationships. After retrieving the maps of the concentration classification of suspended sediment parameters in the reservoirs, the researchers aim to examine the monthly input flow rates to the Chah-Nimeh reservoirs with the estimated concentration of suspended sediments. By comparing the input flow rate values with the concentration of suspended sediments in Chah-Nimeh 1, the researchers can gain more information about the behavior of suspended sediments and the factors affecting them over time. Finally, a regression model will be developed using the corresponding input flow rate and suspended sediment concentration values, with the monthly input flow rate considered as input and the mean concentration of suspended sediments considered as output. It should be noted that various regression methods, including linear, exponential, GPR, and SVR, have been used to model the relationship between input flow rate and suspended sediment. Each of these

methods have unique features and advantages and has been selected based on the type of data and the problem at hand. By combining these methods, a comprehensive and accurate model for predicting the concentration of suspended sediments based on the input flow rate between Chah-Nimeh reservoirs has been developed, which can contribute to a better understanding of the behavior of suspended sediments and the factors affecting them.

Results and discussion: As the results indicate, the concentration of suspended sediments is low during wet years and increases with the increase in input flow rates into the reservoirs. Eventually, the phenomenon of 120-day winds in early May stabilizes the concentration of suspended sediments. This is due to the fact that the input flow rate from Chah-Nimeh 1 is higher than other points, resulting in a higher concentration of suspended sediments in this Chah-Nimeh reservoirs. This is because the input flow rate directly affects the production and movement of suspended sediments in the lake. With an increase in the input flow rate, the two main factors affecting the production of suspended sediments, namely the water current velocity and the energy of sinusoidal waves, also increase. This increase in water current velocity and energy of sinusoidal waves improves the conditions for the production and accumulation of suspended sediments in this point. Therefore, the concentration of suspended sediments in Chah-Nimeh 1 is generally higher than other points in the lake. This figure shows that the retrieval values of suspended sediments using the physical method based on Sentinel-2 satellite imagery are accurate and reliable. This finding indicates that water turbidity data can be used to validate the retrieval values of suspended sediments from other methods. To investigate the effect of input flow rate on suspended sediments in more detail, a time profile of monthly volume input flow rates in millions of cubic meters versus the average concentration of suspended sediments in Chah-Nimeh 1 in milligrams per cubic meter has been studied. With these figures, it can be observed that the concentration of suspended sediments in the lakes is highly influenced by the input flow rate, and it increases with an increase in input flow rate. Additionally, in other months of the year, the amount of suspended sediments has been somewhat constant and accompanied by slight changes. It can be concluded that the amount of suspended sediments in the lakes is strongly influenced by the input flow rate, and it increases with an increase in input flow rate. We developed a model for establishing the relationship between input flow rate and the average concentration of suspended sediments using regression methods and monthly input flow rate and average concentration of suspended sediments in Chah-Nimeh 1 data. The GPR model has achieved acceptable results and has been used as the optimal model.

Conclusion: This study used satellite images to analyze suspended sediment parameters in lakes and reservoirs. The mean concentration of suspended sediments and input flow rate were highly correlated, with a correlation coefficient of 0.9 for Chah-Nimeh 1. The developed model had an 85.0% detection coefficient, 4.30 g/m³ root mean square error, and 3.27 absolute mean error. With an increase in input flow rate of about 10.0% of the reservoir volume, the concentration of suspended sediments in Chah-Nimeh 1 increased by about 74%. Optimizing the input flow rate can reduce the concentration of suspended sediments in reservoirs and the model can be used for effective water resource management and reducing surface water pollution.

Keywords: Input flow rate, suspended sediments, Sentinel-2 satellite imagery, Chah-Nimeh reservoirs.



© 2023 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.

This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

بررسی و ارزیابی تأثیر دبی ورودی بر رسوب‌های معلق در دریاچه‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای: مطالعه موردی

اشکان نوری^۱، سیدحسین مهاجری^{۲*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

* hossein.mohajeri@khu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۴، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۶، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: در این پژوهش، تأثیر دبی آب ورودی ماهانه بر غلظت رسوب‌های معلق در مخازن چاه نیمه استان سیستان و بلوچستان بررسی شده است. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲، نقشه‌های پارامتر رسوب‌های معلق برآورد شده و با استفاده از الگوریتم‌های مبتنی بر رگرسیون، مدلی برای برآورد غلظت رسوب‌های معلق توسعه داده شده است. نتایج پژوهش نشان داد که مقادیر دبی آب ورودی و میانگین غلظت رسوب‌های معلق در مخزن‌های چاه نیمه با همبستگی بالایی در ارتباط هستند، به ویژه در چاه نیمه شماره یک که منبع اصلی ورودی آب به چاه نیمه‌ها است. همچنین، نتایج نشان داد که ضریب همبستگی میان پارامترهای میانگین غلظت رسوب‌های معلق در چاه-نیمه یک با دبی ورودی مخزن معادل ۰/۹ می‌باشد. این میزان برای چاه‌نیمه‌های دو، سه و چهار معادل ۰/۴۲، ۰/۴۵ و ۰/۴۴ می‌باشد. براساس همبستگی بالای رسوب‌های معلق در مخازن چاه‌نیمه، مدل‌های مبتنی بر رگرسیون توسعه داده شده‌اند که با داشتن داده‌های دبی ورودی مخازن، میانگین کلی از غلظت رسوب‌های معلق دریاچه‌ها را به دست می‌آورند. نتایج نشان داد که مدل چاه‌نیمه یک با توجه به همبستگی بالاتری که میان پارامترها وجود داشت، عملکرد مناسب‌تری را به همراه داشت به گونه‌ای که مقدار ریشه میانگین مربعات خطا در حالت بهینه معادل ۴/۳۰ گرم بر مترمکعب و میزان خطا میانگین مطلق معادل ۳/۲۷ بود. در کل، این پژوهش با استفاده از نقشه‌های پهنه‌بندی پارامتر رسوب‌های معلق، بررسی همبستگی بین دبی ورودی و غلظت رسوب‌های معلق، و توسعه یک مدل مبتنی بر رگرسیون، به بهبود مدیریت منابع آبی و پهنه‌های آبی در منطقه کمک می‌کند.

کلیدواژگان: دبی ورودی، رسوب‌های معلق، تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲، مخازن چاه‌نیمه

۱- مقدمه

فرآیند پایش کیفیت آب، شامل سه مرحله مهم جمع‌آوری، نگهداری و تجزیه و تحلیل نمونه‌های آب است که با هدف شناسایی و بررسی ویژگی‌های کیفی آب انجام می‌شود. به عبارت دیگر، پایش کیفی آب به منظور نظارت کیفی منابع آب و اطمینان از سلامت و استفاده بهینه از آنها صورت می‌گیرد (Ji et al., 2022). این نوع پایش، افزون بر گردآوری، نگهداری و تجزیه و تحلیل نمونه‌های آب، مسائل مختلفی مانند عامل‌های مورد سنجش، مکان اندازه‌گیری، دوره زمانی و تواتر اندازه‌گیری، چگونگی روش

انجام اندازه‌گیری، روش ثبت و نگهداری داده‌ها و اطلاعات را نیز در بر می‌گیرد. پارامتر رسوب‌های معلق^۱، شامل مواد معدنی، مواد آلی، ذرات زنده و غیر زنده و آلاینده‌های محیطی جامد در ستون آب است (Du et al., 2020). رسوب‌های معلق آب، از جمله، اجزای مهم آب از نظر ویژگی‌های کیفی و همچنین منبع اصلی رسوب‌های، در تعیین کیفیت آب و ارزیابی تأثیرات آلاینده‌های محیطی بر محیط زیست و بوم‌سامانه‌ها نقش مهمی دارد (Balasubramanian et al., 2020). به طور خاص،

1 Suspended Sediment

پارامترهای کیفیت آب، به‌ویژه در دریاچه‌هایی که تغییرات قابل‌توجهی در زمان و مکان دارند، منطقی نیست (Noori et al., 2023). فناوری سنجش از دور، به عنوان یک روش جایگزین، می‌تواند طیف قابل‌قبولی از ویژگی‌های کیفیت آب را نشان دهد. با استفاده از حسگرها و دستگاه‌های ماهواره‌ای، می‌توان پارامترهایی مانند رسوب‌های معلق، دما، میزان اکسیژن محلول و دیگر ویژگی‌های کیفیت آب را از دور اندازه‌گیری کرد (Padilla-Mendoza et al., 2023). این روش برتری و سودمندی‌های فراوانی دارد، از جمله کاهش هزینه‌ها و زمان مورد نیاز برای گردآوری نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها، بهبود دقت و درستی داده‌ها و ارائه اطلاعات بیشتر درباره توزیع زمانی و مکانی پارامترهای کیفیت آب. به همین دلیل، فناوری سنجش از دور به عنوان یک روش جایگزین و کارآمد در ارزیابی کیفیت آب استفاده می‌شود.

روش‌های بازبایی بر مبنای ویژگی‌های طیفی ذرات به سه رویکرد اصلی تقسیم می‌شوند: تجربی، نیمه تجربی و مبتنی بر فیزیک (Gao et al., 2021). در رویکرد تجربی، یک مدل رگرسیون بین ویژگی‌های مشتق شده از تصویر و مشاهده‌های درجا آموزش و واسنجی می‌شود (Larson et al., 2021). در رویکرد نیمه تجربی، مدل رگرسیون بین طیف گسترده‌ای از مشاهده‌های درجا و ویژگی‌های مشتق شده از تصاویر ایجاد می‌شود. در رویکرد مبتنی بر فیزیک، از مدل‌های انتقال تابشی برای بازبایی پارامترهای مورد نظر استفاده می‌شود (Brockmann et al., 2016).

تاکنون، پژوهش‌های مختلفی در زمینه پایش وضعیت کیفی و سنجش غلظت رسوب‌های معلق در منابع آب سطحی با استفاده از سنجش از دور انجام شده‌اند. این پژوهش‌ها از سنجنده‌های متنوعی مانند رادار و سنجش طیفی استفاده کرده‌اند و از مدل‌های مختلفی مانند رگرسیونی و هوش محاسباتی برای برآورد پارامترهای کیفیت آب و مدیریت رسوب استفاده کرده‌اند. افزون بر این، برخی از بررسی‌ها سعی کردند با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و برخی عامل‌هایی محیطی مانند باد و دبی ورودی، وضعیت رسوب مخازن و دریاچه‌ها را ارزیابی کنند. در پژوهشی که توسط (Gallay et al., 2019) انجام شد؛ با

رسوب‌های معلق به عنوان یکی از شاخص‌های مهم کیفیت آب، در بررسی تأثیرات فعالیت‌های انسانی در منابع آب و حفاظت از منابع آب و بوم‌سامانه‌ها استفاده می‌شود. در این رابطه، پارامتر دبی ورودی به مخازن و دریاچه‌ها از جمله پارامترهای مهم در بررسی میزان رسوب‌های معلق است (Long and Pavelsky, 2013). افزایش دبی ورودی به مخازن و دریاچه‌ها می‌تواند به افزایش حمل و نقل رسوب‌های معلق در آب، افزایش کدورت و کاهش شفافیت آب منجر شود (Long and Pavelsky, 2013). از این رو، بررسی تأثیر دبی ورودی بر رسوب‌های معلق، به منظور حفظ کیفیت آب و حفاظت از منابع آب و بوم‌سامانه‌ها، بسیار مهم است (Gallay et al., 2019).

افزون بر این، مسئله‌های محیطی دیگری نیز می‌توانند بر تأثیر رسوب‌های معلق در آب اثرگذار باشند. به‌عنوان مثال، باد (Soria et al., 2021) و جهت حرکت آب می‌تواند به‌عنوان عامل‌هایی موثر در حرکت رسوب‌های معلق و افزایش رسوب معلق آب در دریاچه‌ها باشند. همچنین، میزان دبی ورودی (Gallay et al., 2019)، به پهنه‌های آبی می‌تواند به‌عنوان یک عامل مهم در تأثیر رسوب‌های معلق بر کیفیت آب تلقی شود. از سوی دیگر، رسوب‌های معلق همچنین می‌توانند ریزآلاینده‌های محیطی و فلزهای سنگین را به‌صورت تجمعی در برداشته و به‌طور مستقیم و نامستقیم بر کیفیت آب و محیط‌های آبی تأثیر بگذارند. بررسی تأثیر این مسئله‌ها در کنار بررسی تأثیر دبی ورودی بر رسوب‌های معلق، می‌تواند به کسب دانش دقیق‌تر در این زمینه و درک بهتر از محیط‌های آبی به‌ویژه دریاچه‌ها و مخازن منجر شود. در نتیجه، بررسی و ارزیابی بیشتر در این زمینه می‌تواند به بهبود مدیریت کیفیت آب و محیط‌های آبی کمک کند.

به‌طور سنتی، برای ارزیابی پارامترهای کیفیت آب مانند رسوب‌های معلق آب، نمونه‌هایی از آب در محل گرفته شده و در آزمایشگاه تجزیه و تحلیل می‌شوند (Li et al., 2021). این رویکرد افزون بر هزینه بر بودن، زمانبر نیز است. همچنین، استفاده از شمار محدودی از این داده‌ها در محل برای نشان دادن توزیع کلی زمانی و مکانی

پیشروی رودخانه به سمت دلتا، به تدریج کاهش می‌یابد. همچنین، اوج میزان رسوب‌های معلق در منطقه باکل^۱ با آغاز بارش‌ها رخ داده و پس از آن، اوج دبی با دو ماه تأخیر رخ می‌دهد. تأخیر زمانی بین اوج میزان رسوب‌های معلق و دبی در رودخانه‌های فرعی نیز مشاهده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که دبی و بارش می‌توانند به عنوان عامل‌های تأثیرگذار بر میزان رسوب‌های معلق در رودخانه سنگال به‌شمار آیند. در واقع، بسیاری از ارزیابی‌ها بر روی تأثیر عامل‌های محیطی مختلف بر میزان رسوب‌های معلق کار شده‌اند. به عنوان مثال، در پژوهش (Soria et al, 2021) که در خلیج والنسیا انجام شده است، اثر باد بر رسوب‌های معلق با استفاده از داده‌های سنتینل-۲ بررسی شده است. نتایج این بررسی گویا آن است که با افزایش سرعت باد، میزان رسوب‌های معلق نیز افزایش پیدا می‌کند. به همین ترتیب، بررسی عامل‌های مختلف محیطی مانند دبی ورودی مخازن و دریاچه‌ها می‌تواند به درک بهتر عملکرد بوم‌سامانه‌های آبی و مدیریت منابع آب کمک کند.

هدف اصلی این تحقیق، تهیه پهنه‌بندی زمانی و مکانی میزان رسوب‌های معلق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ و روش‌های فیزیکی بر روی چاه‌نیمه‌های استان سیستان و بلوچستان است. به‌طور خاص، در این تحقیق با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و روش‌های فیزیکی، تلاش برای تهیه پهنه‌بندی دقیقی از میزان رسوب‌های معلق در فضا و زمان صورت گرفته است. در ادامه، با مقایسه میزان رسوب‌های معلق با میزان دبی ورودی چاه نیمه‌ها، اطلاعات بیشتری در مورد مقدار رسوب‌های معلق به دست آمده است. در نهایت، با استفاده از روش‌های رگرسیونی، یک مدل برای برآورد میزان رسوب معلق به واسطه دبی ورودی ارائه شده است. با تحلیل این اطلاعات، امکان به‌دست آوردن دانش بیشتری از تأثیر عامل‌های مختلف محیطی بر رفتار رسوب‌های معلق در طول زمان وجود دارد. به‌طور کلی، این تحقیق می‌تواند به بهبود درک رفتار رسوب‌های معلق و عامل‌های مؤثر بر آن‌ها کمک کند.

استفاده از داده‌های سنجنش از دور، غلظت رسوب‌های معلق سطحی و آبشار رودخانه اورینوکو در دوره ۲۰۰۰ الی ۲۰۱۶ بررسی شد. استفاده از حسگرهای سنجنش از دور، به واسطه مقایسه‌ی نتایج با داده‌های میدانی، موثر بوده و می‌تواند در پایش غلظت رسوب‌های معلق در ایستگاه‌های مجازی در میانه و پایین دست رودخانه اورینوکو استفاده شود. بیشترین غلظت رسوب‌های معلق پس از رودخانه‌های متا و آپوره بود که بیشترین ورود رسوب را به جریان اصلی اورینوکو فراهم می‌کردند، در حالی که کمترین غلظت رسوب‌های معلق در بالادست رودخانه متا مشاهده شد. نتایج نشان داد که استفاده از داده‌های سنجنش از دور در برآورد آبشار رسوب‌های رودخانه اورینوکو با دقت بسیار خوبی صورت می‌گیرد.

در پژوهشی دیگر، اثرگذاری‌های جذب آب و پایش رسوب‌های معلق در دلتای آتاباسکا در کانادا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ارزیابی شده است. برای تشخیص مدل مناسب برای رابطه بین غلظت رسوب‌های معلق و بازتابندگی، ۳۱ معادله مورد استفاده و با نتایج مشاهده‌های میدانی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های غیرخطی با ترکیبی از باندهای نزدیک فرورسرخ و دست‌کم یک باند قابل مشاهده اعتماد، بر مبنای غلظت رسوب‌های معلق همانند در محل جدید، توان بالقوه قابلیت انتقال مکانی دارند. در این پژوهش، یک دوره زمانی دوازده ساله از غلظت رسوب‌های معلق در دریاچه آتاباسکا توسعه داده شده است و زمان و منابع فراوانی رسوب‌های مشاهده شده است. افزون بر این، ورود آب رودخانه آتاباسکا به دریاچه‌های سیلابی بررسی شده و در سه دریاچه، آستانه تخلیه مورد نیاز برای جذب آب شناسایی شده و فراوانی تجاوز آستانه در دهه‌های اخیر کاهش یافته است (Long and Pavelsky, 2013).

در پژوهش دیگری، تغییرپذیری‌های مکانی-زمانی میزان رسوب‌های معلق کل در رودخانه سنگال با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای بررسی شد. برای برآورد مقدار رسوب معلق، از رابطه‌ای بین داده‌های مستقیم رسوب‌های معلق و بازتابندگی ماهواره‌ای استفاده شد. نتایج نشان داد که میزان رسوب‌های معلق در ابتدای رودخانه بیشتر بوده و با

1 Bakel

چاه‌نیمه‌ها منبع آب شیرین برای شهرستان‌های زابل، زهک، زاهدان و سایر نواحی مسکونی سیستان و همچنین آب آبیاری حدود ۸۰۰۰۰ هکتار اراضی کشاورزی این منطقه هستند. این چاه‌نیمه‌ها از نوع سدهای برون مسیر و گودال‌های طبیعی هستند که همانند ظرف‌های مرتبطه عمل کرده و آب‌های مازاد مصرف رودخانه هیرمند در فصل‌های پر آب زمستان و بهار را گرد آوری و در فصول کم آب و پر مصرف برای کاربردهای کشاورزی و آشامیدن در دسترس قرار می‌دهند (Akbari et al., 2022).

۲- روش تحقیق و داده‌های مورد بررسی

۲-۱- منطقه مورد بررسی

منطقه چاه‌نیمه‌ها شامل چهار گودال طبیعی سازماندهی شده است که در بخش شمالی دلتای رود هیرمند در منطقه سیستان ایران واقع شده‌اند. موقعیت جغرافیایی این منطقه در محدوده جغرافیایی ۳۰ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۵۰ دقیقه عرض شمالی و ۶۱ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۴۵ دقیقه طول شرقی و ارتفاع متوسط آن ۵۰۰ متر از سطح دریا است (Noori et al., 2023).

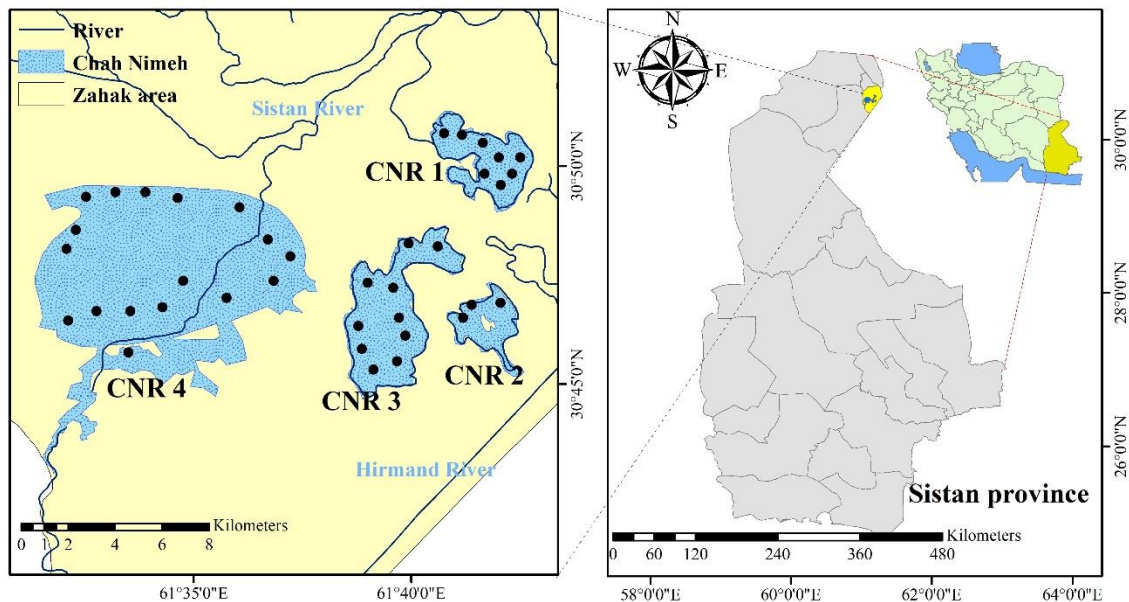


Fig. 1 Comprehensive overview of the study site

شکل ۱ نمای کلی کلی منطقه مورد بررسی

مساحت ۴۷ کیلومتر مربع و مخزن شماره چهار به مساحت ۹۴ کیلومتر مربع در سال ۱۳۸۷ به بهره‌برداری رسیده است. مجموعه این مخزن‌ها چاه‌نیمه سالانه می‌توانند حدود یک هفتم دریاچه هامون آب را در خود ذخیره کنند و در فصل‌های خشک بخشی از آن را مورد استفاده قرار دهند. در شکل ۱ می‌توان نمونه‌های زمینی پارامتر کدورت را در منطقه مورد بررسی مشاهده کرد.

۲-۲- داده‌های پژوهش

به منظور پیشبرد این پژوهش، نیاز به داده‌های زمینی دبی ورودی برای بررسی تأثیر حجم دبی ورودی بر رسوب‌های معلق و همچنین توسعه مدل میان پارامتر دبی ورودی و

مخزن‌های چاه‌نیمه شامل چهار مخزن است که به ترتیب شماره یک تا چهار نامیده می‌شوند. مخزن شماره یک از مرز ایران و افغانستان آغاز شده و تا حدود ۶ کیلومتری روستای زهک ادامه دارد. گودال شماره دو از مرز افغانستان شروع شده و تا اواسط چاه‌نیمه شماره یک در جنوب آن ادامه می‌یابد. چاه‌نیمه شماره سه در غرب چاه‌نیمه شماره دو و مخزن شماره چهار در غرب چاه‌نیمه شماره سه قرار دارد و بزرگترین مخزن در بین مخزن‌های چاه‌نیمه می‌باشد. بیشینه ارتفاع این مخزن‌ها از سطح دریا تا ۴۹۲ متر نیز برآورد شده است و به وسیله آبراهه‌های شماره یک، دو و سه به هم متصل می‌شوند. مساحت مخزن‌های یک، دو و سه در سال ۱۳۵۲ به مجموعه‌ای به

تصحیحات اتمسفری روی آن‌ها اعمال شود تا به صورت پرتوهای بازتابش زمینی تغییر حالت داده شوند. لازم به یادآوری است که در مرحله نخست، تصاویر ماهواره باید به منظور یکسان‌سازی باندها، بازنمونه‌برداری مکانی شوند. در این پژوهش، تصاویر به پیکسل‌های ۲۰ متری بازنمونه‌برداری مکانی شده‌اند. این بازنمونه‌برداری مکانی، مبنی بر نتایج پژوهش‌ها و ارزیابی‌های پیشین، در جهت امور پارامترهای کیفی آب مورد تایید است (Noori et al., 2023; Li et al., 2021).

جدول ۱ ویژگی‌های باندهای طیفی سنجنده سنتینل-۲ شامل مرکز طول موج باندها و توان تفکیک مکانی هر باند را نشان می‌دهد. میزان آماری داده‌های اندازه‌گیری شده کدورت آب در محل نیز در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱ ویژگی‌های باندهای طیفی برای سنجنده سنتینل-۲

Table 1 Characteristics of spectral bands for Sentinel-2 sensors

Description	Central Wavelength	Resolution	Band
Ultra Blue (Coastal and Aerosol)	443 nm	60 m	B1
Blue	490 nm	10 m	B2
Green	560 nm	10 m	B3
Red	665 nm	10 m	B4
Visible and Near Infrared (VNIR)	705 nm	20 m	B5
Visible and Near Infrared (VNIR)	740 nm	20 m	B6
Visible and Near Infrared (VNIR)	783 nm	20 m	B7
Visible and Near Infrared (VNIR)	842 nm	10 m	B8
Visible and Near Infrared (VNIR)	865 nm	20 m	B8a
Short Wave Infrared (SWIR)	940 nm	60 m	B9
Short Wave Infrared (SWIR)	1375 nm	60 m	B10
Short Wave Infrared (SWIR)	1610 nm	20 m	B11
Short Wave Infrared (SWIR)	2190 nm	20 m	B12

جدول ۲ اطلاعات پارامتر اندازه‌گیری شده زمینی

Table 2 Information on Ground Measured Parameter

Parameter	Units	Min	Max	Mean	N
Turbidity	NTU	0.000	37.40	14.27	76

غلظت رسوب مخزن داریم. همچنین، نیاز به داده‌های زمینی رسوب‌های معلق برای اعتبارسنجی داده‌های رسوب برآورد شده از تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد. با توجه به دردسترس نبودن داده‌های زمینی غلظت رسوب معلق، در این پژوهش از داده‌های زمینی پارامتر کدورت استفاده شده است، که نقطه‌های اندازه‌گیری شده زمینی با دایره‌های سیاه رنگ در شکل ۱ نشان داده شده است. لازم به یادآوری است که همبستگی بالا این دو پارامتر یعنی رسوب‌های معلق و کدورت در پژوهش‌ها و ارزیابی‌های پیشین (He et al., 2013; Sirdaş and Şen, 2007) به خوبی نشان داده شده است. با توجه به پژوهش انجام شده توسط Sirdaş و Şen در سال ۲۰۰۷، یک ارتباط بالایی بین پارامتر رسوب‌های معلق و کدورت آب با ضریب همبستگی ۰/۸۹ مشاهده شد. با توجه به این پژوهش و بررسی‌های همانند، به این موضوع پی برده شد که رسوب‌های معلق می‌توانند بر کیفیت آب و کدورت آن تأثیر بسزایی بگذارند. در پژوهشی مشابه که توسط He و همکارانش در سال ۲۰۱۳ انجام شده، ارتباط معنایی قابل توجهی بین کدورت و رسوب‌های معلق آب به دلیل ضریب همبستگی نزدیک به ۰/۹ مشاهده شد. این موضوع نشان‌دهنده این است که با افزایش غلظت رسوب‌های معلق، کدورت آب نیز افزایش می‌یابد.

همچنین، در نتایج پژوهش‌های دیگری نیز از جمله (Li et al., 2021) به ارتباط میان غلظت رسوب‌های معلق و کدورت اشاره شده است. بنابراین، به طور کلی، پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که رسوب‌های معلق می‌توانند بر کیفیت آب و کدورت آن تأثیر بگذارند و این ارتباط میان غلظت رسوب‌های معلق و کدورت آب بررسی شده است.

در این پژوهش، تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ استفاده شده‌اند که در حدفصل سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰، با توجه به داده‌های زمینی متناظر به پارامتر کیفی غلظت رسوب‌های معلق و همچنین داده‌های دبی ورودی مخزن‌های برداشت شده‌اند. تصاویر دریافت شده در حالت $L1C^1$ بوده و نیازی به تصحیح هندسی ندارند، اما به علت اینکه بازتابش آن‌ها در حالت بالای اتمسفر است، باید

1 Level 1-C

۲-۳- روش پژوهش

از جمله اهداف اصلی این پژوهش، برآورد پارامتر کدورت آب با استفاده از داده‌های طیفی تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ است. برای دستیابی به این هدف، از پردازشگر C2RCC¹ برای محاسبه داده‌های طیفی و ادامه مدل‌سازی استفاده شده است (Brockmann et al., 2016). پردازشگر C2RCC بر مبنای رویکردهای یادگیری عمیق طراحی شده و بر پایه بازتابش‌های خروجی آب شبیه‌سازی شده برای ارتفاع بالا از الگوریتم‌های اصلاح جوی استوار است. با استفاده از پردازشگر C2RCC، می‌توان بازتابش‌های آب را در باندهای طیفی مختلف محاسبه کرده و با استفاده از رابطه‌های مختلف، سه پارامتر کیفیت آب اصلی را شامل غلظت کل رسوب‌های معلق، کلروفیل-آ و مواد محلول آلی رنگی محاسبه کرد. در کل، پردازشگر C2RCC بر مبنای رویکردهای شبکه‌های عصبی مصنوعی طراحی شده است و شامل دو بخش مستقل است: بخش جوی و بخش عناصر آب. نقش بخش جوی در این رویکرد، انعکاس تابش بالای جو به سطح آبی را ایفا می‌کند و نقش بخش عنصرهای آب، انعکاس این تابش است این عناصر شامل چند ویژگی هستند که شامل جذب رنگ دانه، جذب مواد آلی محلول رنگی، جذب ریزه، پراکندگی ذرات سفید و پراکندگی رسوب‌های معمولی هستند (Hanintyo et al., 2021). رابطه ۱؛ برآورد غلظت رسوب‌های معلق را با استفاده از پردازنده C2RCC را نشان می‌دهد. در این رابطه b_{part} نشان دهنده رسوب‌های معلق پراکنده و b_{wit} نیز بیانگر رسوب‌های آهکی سفید می‌باشد. ضریب‌های $f_{b(Part)}$ و $f_{b(Wit)}$ به ترتیب ضرایب عامل‌های بازتابش رسوب‌های معمولی و بازتابش مواد سفید هستند. این مقادیر به ترتیب معادل ۱/۰۶ و ۰/۹۴۲ هستند.

(1)

$$\text{Suspended Sediment} = b_{part} \times f_{b_{part}} + b_{wit} \times f_{b_{wit}}$$

در مرحله بعد، پس از بازیابی نقشه‌های پهنه‌بندی پارامتر غلظت رسوب‌های معلق در مخزن‌ها، قصد داریم مقادیر

دبی ورودی ماهانه به چاه‌های نیمه‌ها را با غلظت رسوب‌های معلق برآورد شده را بررسی کنیم. با توجه به اینکه میزان ورودی بیشتر از سمت چاه نیمه ۱ می‌باشد، برای بررسی میزان‌های دبی ورودی، مقدار غلظت رسوب‌های معلق در چاه نیمه ۱ با آن مقایسه می‌شود. در نهایت، با استفاده از مقادیر دبی ورودی و غلظت رسوب‌های معلق متناظر در چاه نیمه شماره ۱ به عنوان منبع ورودی اصلی چاه‌نیمه‌ها، یک مدل رگرسیونی را توسعه داده؛ که بر مبنای آن دبی، ورودی و غلظت رسوب‌های معلق به عنوان خروجی لحاظ می‌شود. در این مدل، دبی ورودی ماهانه به عنوان ورودی و میانگین غلظت رسوب‌های معلق به عنوان خروجی در نظر گرفته خواهد شد.

در اینجا لازم به یادآوری است که روش‌های رگرسیونی مورد استفاده در این پژوهش شامل روش‌های خطی، نمایی، GPR^2 و SVR^3 هستند. این روش‌ها برای مدل‌سازی میان دبی ورودی و رسوب‌های معلق استفاده شده‌اند. هر یک از این روش‌ها دارای ویژگی‌ها و برتری‌های منحصر به فردی هستند و بر اساس نوع داده‌ها و مسئله مورد نظر، انتخاب شده‌اند. به عنوان مثال، روش خطی برای مسئله‌هایی که در آن‌ها رابطه خطی بین داده‌ها وجود دارد، مناسب است. در حالی که روش‌های GPR و SVR برای مسئله‌هایی که رابطه بین داده‌ها غیرخطی است، مناسب هستند. به این صورت، با استفاده از ترکیب این روش‌ها، مدلی کامل و دقیق برای پیش‌بینی غلظت رسوب‌های معلق بر مبنای دبی ورودی میان دو چاه نیمه توسعه شده است.

در اینجا لازم به یادآوری است که پارامترهای آماری به منظور اعتبارسنجی مدل‌ها بهینه شده از این بررسی و ارزیابی‌ها شامل سه پارامتر ضریب تشخیص، ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق هستند. ضریب تشخیص یک معیار آماری مهم است که در یک مدل رگرسیونی نشان‌دهنده نسبت اختلاف یا واریانس در شرایط آماری برای یک متغیر وابسته است که می‌تواند

2 Gaussian Process Regression
3 Support Vector Regression

در این مطالعه، در ابتدا با استفاده از روش‌های فیزیکی، به عبارتی روش C2RCC نقشه پهنه بندی رسوب‌های معلق مخازن چاه نیمه را برآورد می‌شود. شکل ۲ و ۳، نقشه‌های پهنه بندی غلظت رسوب‌های مخازن چاه نیمه را برای سال‌های آبی ۲۰۱۸-۲۰۱۹ و ۲۰۱۹-۲۰۲۰ به ترتیب نشان می‌دهند.

همان‌طور که از نتایج مشخص است، در آغاز، در سال‌های آبی، غلظت رسوب‌های معلق پایین است و با افزایش میزان دبی ورودی در مخزن‌ها، مقادیر رسوب‌های معلق دریاچه نیز افزایش می‌یابد. در نهایت، با آغاز رخداد بادهای ۱۲۰ روزه در خرداد ماه، مقادیر غلظت رسوب‌های معلق به یک ثبات نسبی می‌رسند، البته لازم به یادآوری است گاهی نیز به دلیل افزایش سرعت باد در این بازه زمانی و به دنبال آن افزایش ریزگردها در هوا، در نهایت منجر به افزایش رسوب‌های معلق در مخازن چاه نیمه نیز می‌شود. در تصویر شماره ۴، میانگین غلظت رسوب‌های معلق مخازن چاه نیمه در دو سال آبی ۲۰۱۸-۲۰۱۹ و ۲۰۱۹-۲۰۲۰ نشان داده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در دوره رخداد بادهای ۱۲۰ روزه به طور میانگین میزان غلظت رسوب‌های معلق برای کل مخزن‌های چاه نیمه افزایش پیدا کرده‌است؛ که این موضوع نیز می‌تواند بیانگر این نکته باشد که عامل بر پارامترهایی همچون دبی ورودی مخازن، فاکتورهای دیگری نیز مانند سرعت باد در میزان غلظت رسوب‌های معلق موثر است.

از سوی دیگر به دلیل اینکه دبی ورودی بیشتر از سمت چاه نیمه ۱ صورت می‌گیرد و همچنین سرعت باد غالب که در جهت شمال غربی به جنوب شرقی است، غلظت رسوب‌های معلق در چاه نیمه شماره ۱ نیز به‌طور معمول بیشتر از دیگر نقطه‌ها است. این موضوع به دلیل تاثیر مستقیم دبی ورودی در تولید و جابجایی رسوب‌های معلق دریاچه است. با افزایش دبی ورودی، دو عامل اصلی تاثیرگذار بر تولید رسوب‌های معلق، یعنی سرعت جاری آب و میزان انرژی سینوسی امواج، نیز افزایش می‌یابند. این افزایش در سرعت جاری آب و انرژی سینوسی امواج، باعث بهبود شرایط برای تولید رسوب‌های معلق و تجمع آن‌ها در این نقطه می‌شود. بنابراین، در نتیجه، غلظت

توسط یک متغیر مستقل شرح داده شود. ریشه میانگین مربعات خطا معیاری است که اغلب تفاوت بین میزان پیش‌بینی شده توسط یک مدل و میزان واقعی مشاهده شده از محیطی که در حال مدل‌سازی است را نشان می‌دهد. میانگین خطای مطلق دقت را برای متغیرهای پیوسته اندازه‌گیری می‌کند. قدر مطلق تفاوت بین مقدار پیش‌بینی شده و مقدار واقعی است. با استفاده از این پارامترها، می‌توان بهترین مدل را برای پیش‌بینی غلظت رسوب‌های معلق بر اساس دبی ورودی انتخاب کرد. معادله‌های ۲ الی ۴ نشان‌دهنده این پارامترهای آماری هستند.

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (4)$$

در این پژوهش، برای اعتبارسنجی مدل‌ها؛ از روش اعتبارسنجی متقابل، روش K-Fold استفاده شده است. در این روش، در صورتی که داده‌های آموزش در یک مسئله یادگیری ماشین به نسبت کم باشد و یا نتیجه مربوط به داده‌های آزمایش خیلی دقیق نباشد، از روش اعتبارسنجی متقابل استفاده می‌شود. در این شرایط، روش اعتبارسنجی متقابل Cross Validation به روش K-Fold به ما کمک می‌کند که داده‌ها را به K قسمت تقسیم کنیم. سپس طی K مرحله مختلف، هر بار یکی از K قسمت را به عنوان داده تست و K-1 قسمت دیگر را به عنوان داده‌های آموزشی در نظر گرفته می‌شود. در نهایت، با هر بار اعمال مدل توسعه‌یافته بر روی داده‌های تست و طبقه‌بندی آن‌ها، داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل‌های توسعه یافته مرحله‌های اعتبارسنجی متقابل را با داده‌های مشاهداتی واقعی از نظر پارامترهای آماری ارزیابی می‌شود. در این پژوهش، میزان K برابر با ۵ در نظر گرفته شده است (Li et al., 2021).

۳- نتایج و بحث

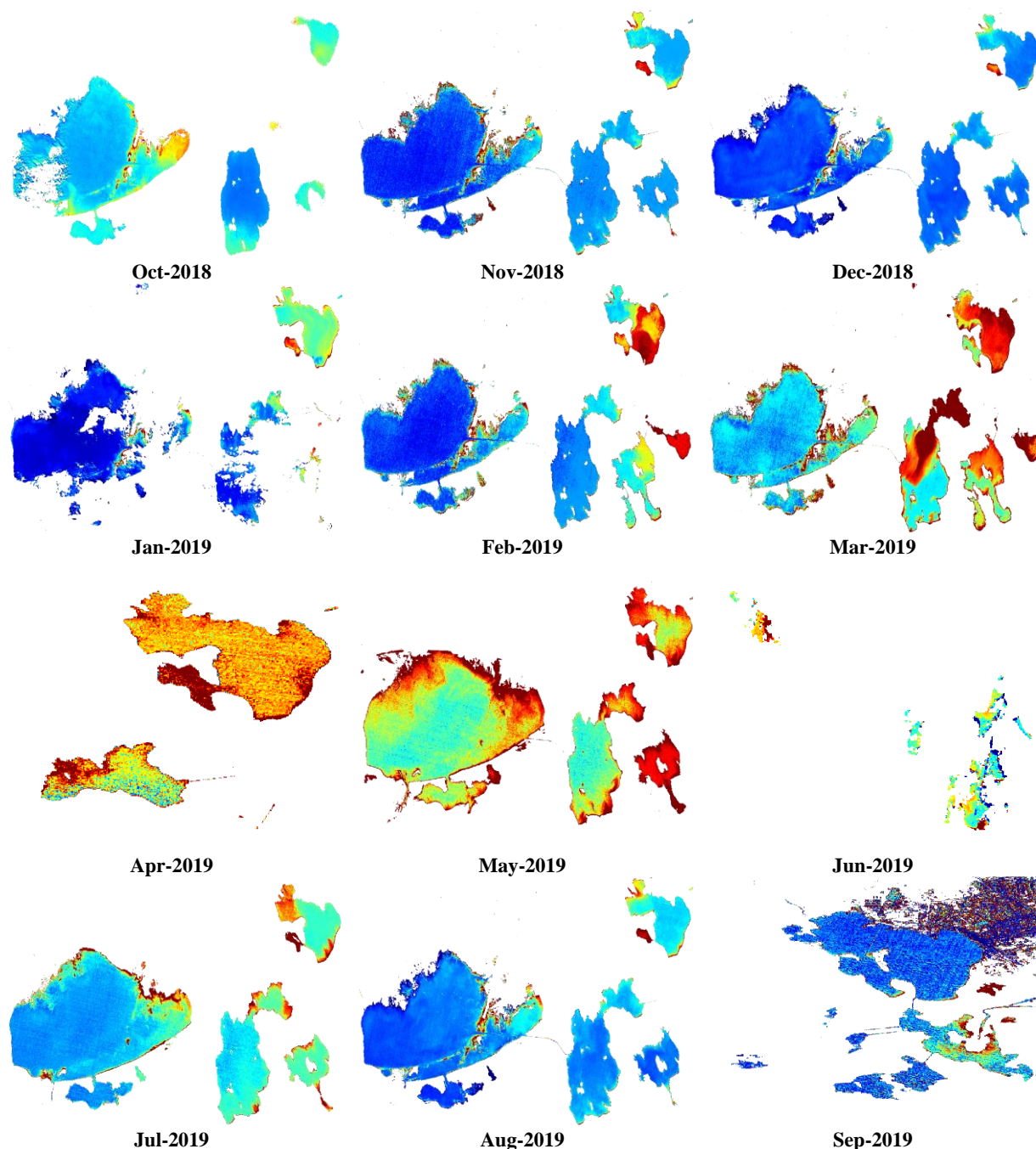


Fig. 2 The classification map of suspended sediment parameters in reservoirs during the 2018-2019 hydrological year.

شکل ۲ نقشه پهنه بندی پارامتر رسوب‌های معلق مخزن‌ها در سال آبی ۲۰۱۸-۲۰۱۹

شکل شماره ۳ مخزن‌ها به خوبی نمایش داده نشده است. دلیل اصلی این امر، وجود ابر در تصاویر است. به دلیل وجود ابرها، نور خورشید نمی‌تواند به صورت مستقیم بر روی مخازن تابیده و تصویر مخزن‌ها را به خوبی نشان دهد. بنابراین، در این تصاویر، نقشه پهنه بندی رسوب‌های معلق مخزن‌ها با دقت کافی نشان داده نشده است.

رسوب‌های معلق در چاه نیمه یک، به جهت منبع اصلی ورودی آب به مخازن چاه‌نیمه و همچنین اثر باد غالب منطقه که در جهت چاه‌نیمه ۱ می‌باشد، به‌طور معمول بیشتر از دیگر نقطه‌های دریاچه است. یک نکته مهم در رابطه با شکل‌های ۲ و ۳ این است که علاوه بر مواردی که بیان شده، در برخی تصاویر، از جمله تصویر ماه Jun-2019 در شکل شماره ۲ و Oct-2019 در

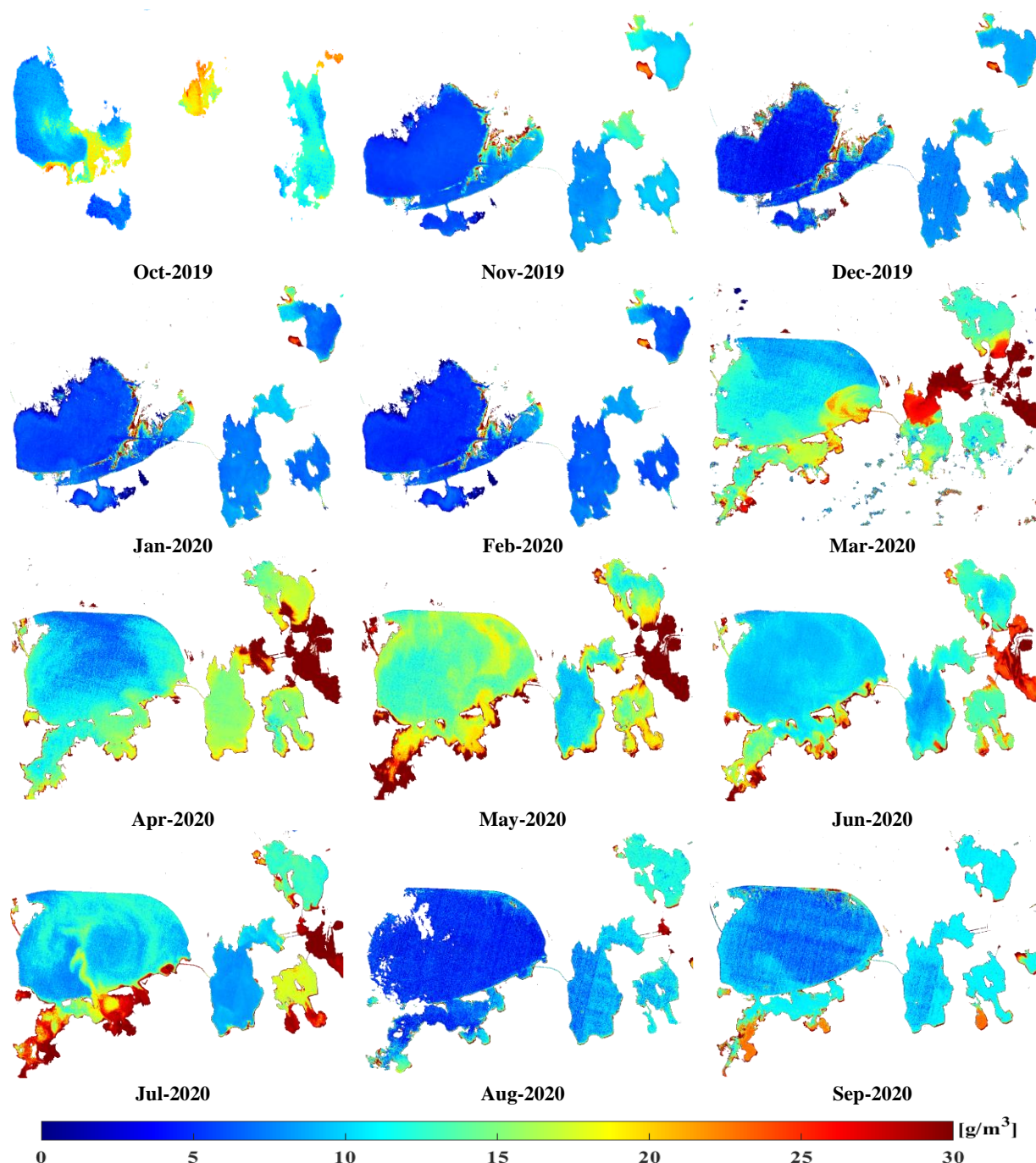


Fig. 3 The classification map of suspended sediment parameters in reservoirs during the 2019-2020 hydrological year.

شکل ۳ نقشه پهنه بندی پارامتر رسوب‌های معلق مخزن‌ها در سال آبی ۲۰۲۰-۲۰۱۹

آب را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که مقادیر بازبایی رسوب‌های معلق از روش فیزیکی مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ درست و دقیق هستند. این یافته نشان می‌دهد که با استفاده از داده‌های کدورت آب می‌توان اعتبارسنجی مقادیر بازبایی رسوب‌های معلق از روش‌های دیگر را انجام داد.

یکی از موارد مهم در زمینه بازبایی غلظت رسوب‌های دریاچه‌ها و دیگر پارامترهای کیفی، اعتبارسنجی مقادیر بازبایی شده است. در این پژوهش، به دلیل نداشتن دسترسی به داده‌های غلظت رسوب‌های معلق، از داده‌های کدورت آب استفاده شده است. شکل ۵، ارتباط و همبستگی بالای مقادیر غلظت رسوب‌های معلق و کدورت

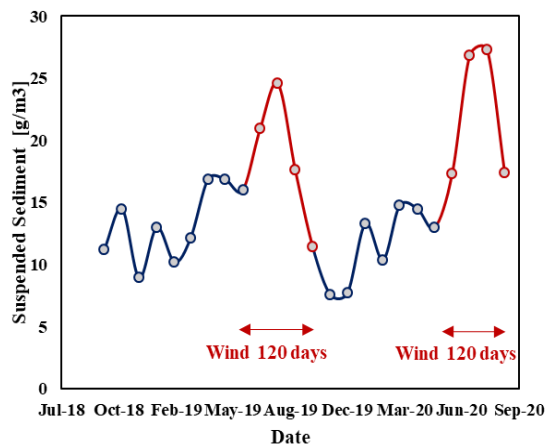


Fig. 4 The average concentration of suspended sediments in Chah Nimeh Reservoirs in the two water years 2019-2018 and 2020-2019

شکل ۴ میانگین غلظت رسوب‌های معلق در مخزن‌های چاه نیمه در دو سال آبی ۲۰۱۸-۲۰۱۹ و ۲۰۱۹-۲۰۲۰

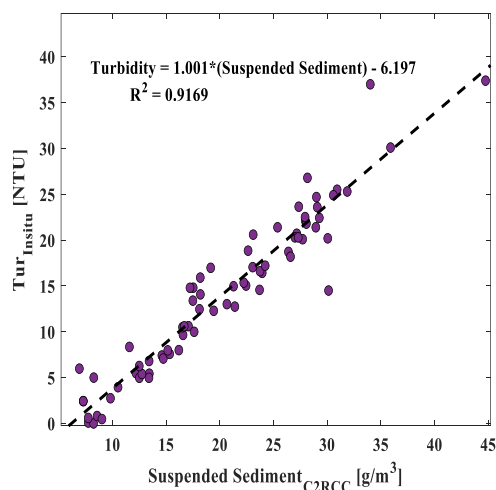


Fig. 5 Validation of the retrieved suspended sediment concentration data from satellite images and ground-based measurements

شکل ۵ اعتبارسنجی داده‌های غلظت رسوب‌های معلق بازتابی شده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های زمینی

ماه‌های سال، به عبارتی فصول گرم سال میزان رسوب‌های معلق در این چاه‌نیمه تا حدودی ثابت بوده و پارامتر مورد پژوهش بیشتر متأثر از عامل‌های دیگری همچون باد، آبگیرها و شرایط جوی می‌باشد. که این موضوعات نیز در بررسی و ارزیابی‌های آتی می‌تواند به طور دقیق‌تر بررسی شود که سهم هر کدام از پارامترها و عامل‌های تأثیرگذار بر روی غلظت رسوب‌های معلق به چه اندازه است.

به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که میزان رسوب‌های معلق در چاه‌نیمه یک تحت تأثیر دبی ورودی قرار دارد و با افزایش دبی، میزان آن افزایش می‌یابد. همچنین، تغییرپذیری‌های ماهانه در مقدار رسوب‌های معلق نسبتاً

برای بررسی دقیق‌تر تأثیر نسبت دبی ورودی به چاه نیمه‌ها و رسوب‌های معلق، یک پروفایل زمانی از مقادیر نسبت حجم ماهانه دبی بر حجم کل مخازن در مقابل میانگین غلظت رسوب‌های معلق چاه نیمه یک بر حسب میلی‌گرم بر متر مکعب بررسی شده است.

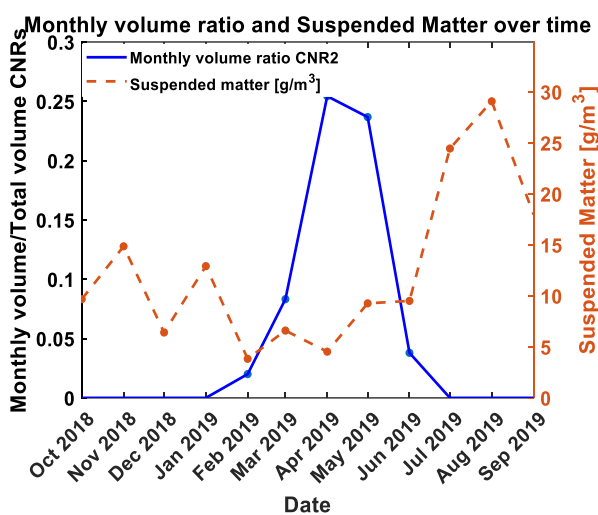
شکل‌های ۶ و ۷ نشان‌دهنده تغییرپذیری‌های میانگین میزان رسوب‌های معلق در مخزن‌های چاه‌نیمه برای دو سال آبی متوالی، یعنی سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۱۹ و ۲۰۱۹-۲۰۲۰ هستند. با توجه شکل ۶(a)، مشاهده می‌شود که با افزایش دبی ورودی، میزان رسوب‌های معلق نیز در چاه‌نیمه شماره ۱ افزایش پیدا کرده‌است. همچنین، در دیگر

(c) و (c) ۶، برابر با ۰/۴۵ و برای چاه نیمه چهارم (شکل (d) ۶ و (d) ۷)، برابر با ۰/۴۴ است. همانطور که مشخص است، ضریب همبستگی برای چاه نیمه‌های ۲، ۳ و ۴ کمتر از ۰/۵ است که گویای ارتباط کمتر این دو پارامتر است. البته لازم به یادآوری است که تصاویر ماهواره‌ای متناسب با دبی ورودی چاه نیمه ۱ برداشت شده‌اند و این احتمال وجود دارد که پس از چند روز و آبیگری دیگر چاه نیمه‌ها، این مقادیر تا حدودی بهبود یابند.

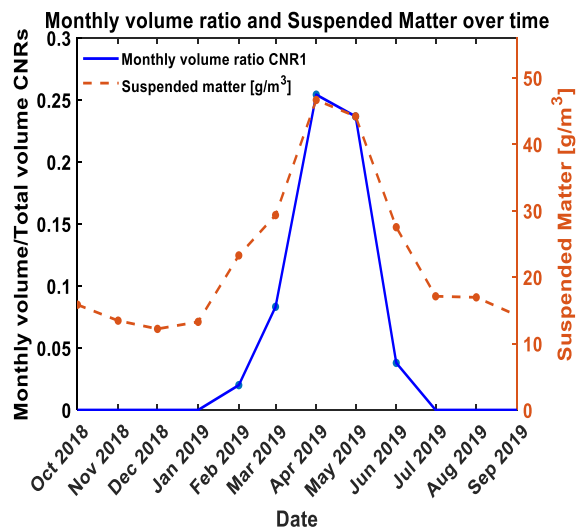
در جهت بررسی اثر دبی ورودی مبتنی بر فصل‌های گرم و سرد سال آبی ۲۰۱۸-۲۰۱۹، نتایج حاکی از این است که

کم بوده و این نشان می‌دهد که فرایند رسوب‌گذاری در دریاچه‌ها به طور کلی به صورت پایدار رخ می‌دهد. با توجه به این مطالب، می‌توان به اهمیت مهار دبی ورودی به دریاچه‌ها و نظارت دقیق بر میزان رسوب‌های معلق در آن‌ها تأکید کرد.

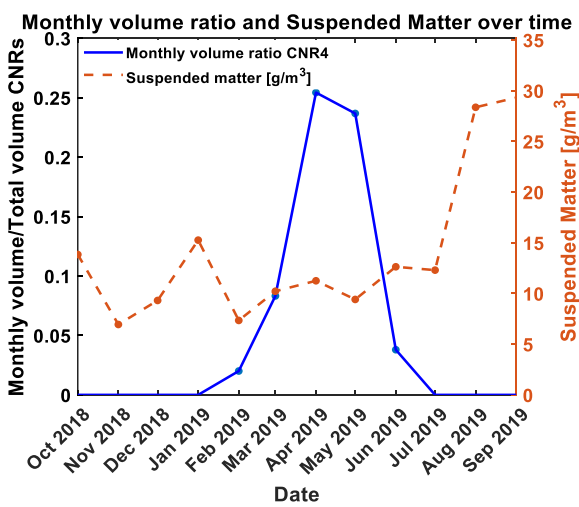
از سوی دیگر، با توجه به پروفایل‌های زمانی شکل‌های ۶ و ۷ و همچنین بررسی ضریب همبستگی پارامترهای دبی ورودی و غلظت رسوب‌های معلق، مشخص می‌شود که ضریب همبستگی برای چاه نیمه ۱ (شکل (a) ۶ و (a) ۷) برابر با ۰/۹ است و این میزان برای چاه نیمه دو (شکل (b) ۶ و (b) ۷)، برابر با ۰/۴۲ و برای چاه نیمه سوم (شکل



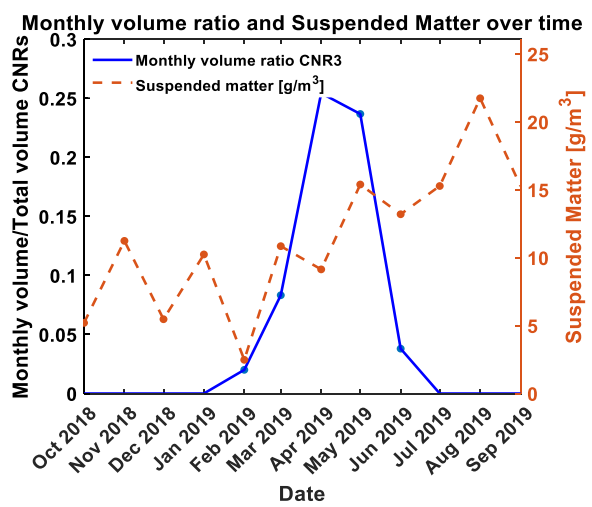
(b)



(a)



(d)



(c)

Fig. 6 Monthly water volume and suspended sediment profile for water year 2018-2019 for (a) Chah Nimeh Reservoir (CNR) 1, (b) CNR 2, (c) CNR 3 and (d) CNR 4

شکل ۶ پروفایل زمانی حجم ماهانه آب و رسوب‌های معلق برای سال آبی ۲۰۱۸-۲۰۱۹ برای (a) چاه نیمه ۱، (b) چاه نیمه ۲، (c) چاه نیمه ۳ و (d) چاه نیمه ۴

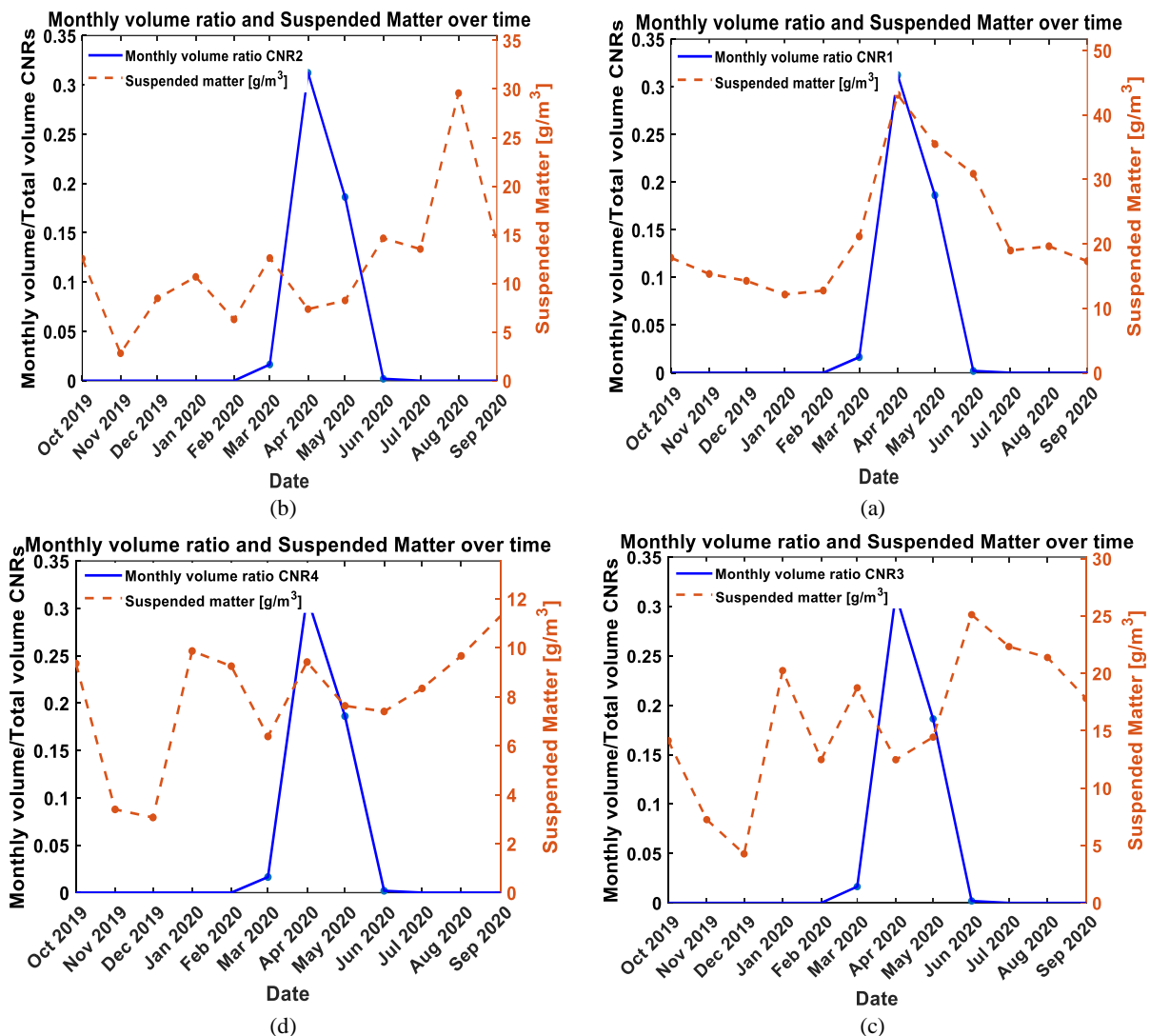


Fig. 7 Monthly water volume and suspended sediment profile for water year 2019-2020 for (a) Chah Nimeh Reservoir (CNR) 1, (b) CNR 2, (c) CNR 3 and (d) CNR 4

شکل ۷ پروفایل زمانی حجم ماهانه آب و رسوب‌های معلق برای سال آبی ۲۰۱۹-۲۰۱۸ برای (a) چاه نیمه ۱، (b) چاه نیمه ۲، (c) چاه نیمه ۳ و (d) چاه نیمه ۴

ورودی ماهانه و میانگین غلظت رسوب‌های معلق در مخزن‌های چاه نیمه، به توسعه یک مدل برای برقراری ارتباط بین دبی ورودی و میانگین رسوب‌های معلق پرداخته شد. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، مدل GPR نتایج قابل قبولی را در این زمینه برای چاه نیمه شماره یک نشان داده است و به عنوان مدل بهینه این مخزن استفاده شده است. البته باید به یاد داشت که برای ساخت این مدل، از ۲۴ داده استفاده شده است که به دلیل محدودیت در دسترسی به داده‌های زمینی و تصاویر ماهواره‌ای، تعداد داده‌ها محدود شده است. با افزایش شمار داده‌های ورودی، می‌توان مدل‌های با دقت بالاتر و بهتر

در فصل گرم، به عبارتی ماه‌های اکتبر ۲۰۱۸ الی دسامبر ۲۰۱۸ و ژوئن ۲۰۱۹ الی سپتامبر ۲۰۱۹، میزان دبی ورودی به طور میانگین از فصل خشک به فصل تر، حدود ۰/۱۱ حجم مخزن‌ها افزایش داشته است. در ارتباط با غلظت رسوب‌های معلق مخزن چاه نیمه ۱، این پارامتر در فصل تر نسبت به فصل خشک حدود ۸۷ درصد افزایش داشته است. به طور مشابه، در سال آبی ۲۰۱۹-۲۰۲۰، با افزایش دبی ورودی به طور میانگین حدود ۰/۱۰ حجم مخزن‌ها، غلظت رسوب‌های معلق مخزن چاه نیمه ۱ حدود ۷۴ درصد افزایش یافته است. در ادامه با استفاده از روش‌های رگرسیونی و داده‌های دبی

دبی ورودی چاه نیمه ۱ در این بررسی و ارزیابی می‌باشد که ممکن است پس از برداشت تصاویر ماهواره‌ای متناسب با دیگر مخزن‌ها پس از آگیری، دقت مدل‌ها افزایش یابد. با این حال، همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، مدل مخزن چاه نیمه یک دارای بیشترین همبستگی میان دبی ورودی و غلظت رسوب‌های معلق است.

ساخت. در شکل ۸، نتایج برای دیگر مخزن‌ها نیز نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دقت مدل مبتنی بر دبی ورودی و غلظت رسوب‌های معلق در مخزن چاه نیمه ۱، بیشتر از دیگر مخزن‌ها است. به احتمال یکی از علت‌های این امر، برداشت تصاویر ماهواره‌ای متناسب با

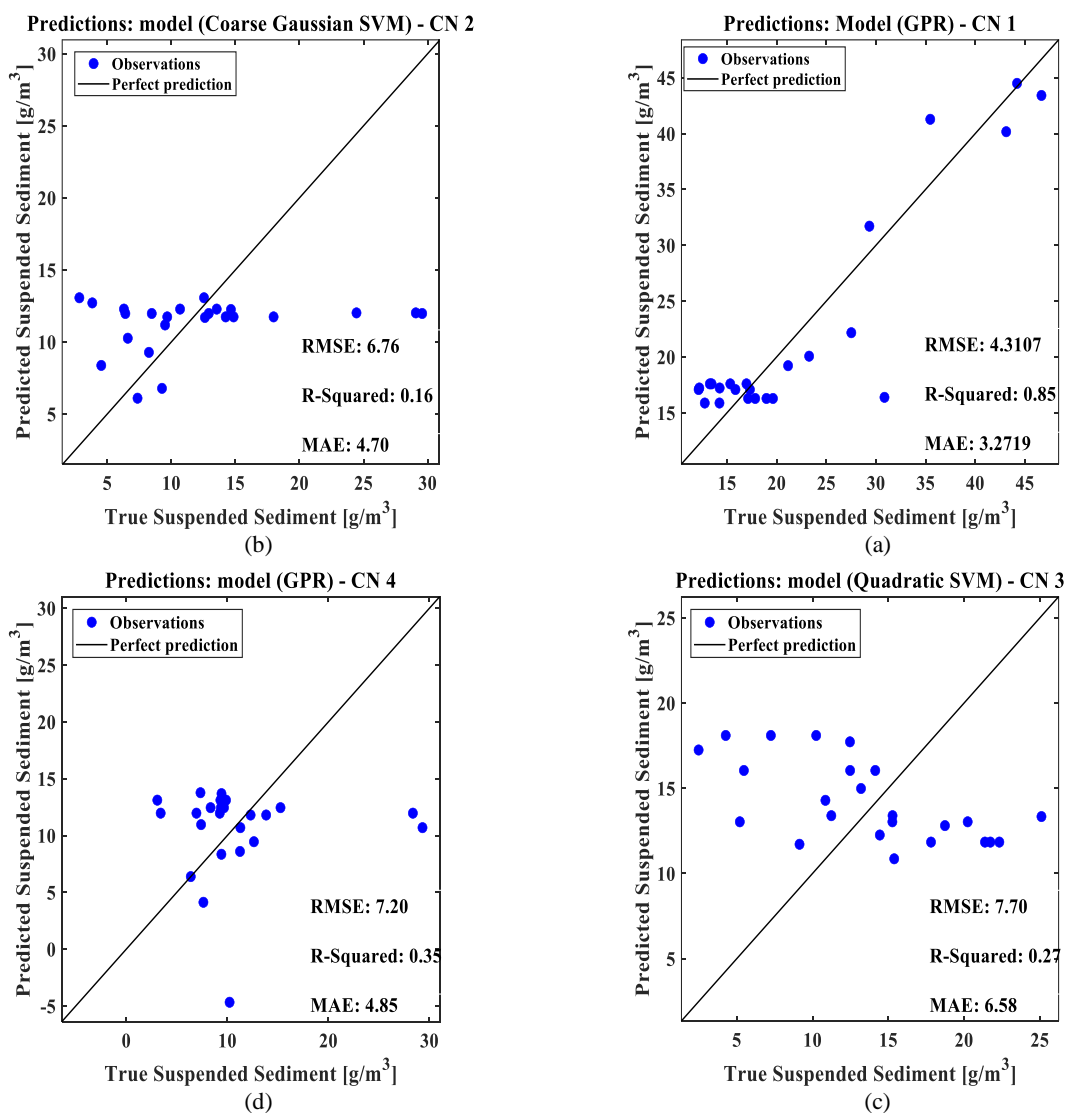


Fig. 8 Average suspended sediment data of reservoirs estimated from satellite images and model predictions for (a) Chah Nimeh (CN) 1, (b) CN 2, (c) CN 3 and (d) CN 4

شکل ۸ میانگین رسوب‌های معلق مخزن‌های برآورده شده از تصاویر ماهواره‌ای و پیش‌بینی مدل برای (a) چاه نیمه ۱، (b) چاه نیمه ۲، (c) چاه نیمه ۳ و (d) چاه نیمه ۴

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از تصاویر در دسترس ماهواره‌ای سنتینل ۲، پارامترهای رسوب‌های معلق در دریاچه‌ها و مخزن‌های آبی را بررسی و تحلیل شد. در آغاز نیز، با

جدول شماره ۳ و ۴ نیز به ترتیب نتایج کامل مدل‌سازی مربوطه را میان پارامتر میانگین غلظت رسوب‌های معلق و دبی ورودی در دو مرحله آموزش و اعتبارسنجی نشان می‌دهد.

پس از بررسی پروفایل‌های زمانی سال‌های آبی، مدلی برای پیش‌بینی میانگین غلظت رسوب‌های معلق دریاچه‌ها توسعه داده شد. با در نظر گرفتن همبستگی میان دبی و میانگین غلظت رسوب‌های معلق در مخزن‌های آبی، مدل پیش‌بینی برآورد شد. برای این منظور، با استفاده از روش‌های یادگیری عمیق، پارامترهای مختلفی از جمله دبی ورودی، میانگین غلظت رسوب‌های معلق، فصل سال و دیگر پارامترهای هواشناسی استفاده شدند. نتایج نشان داد که مدل پیش‌بینی با دقت بالایی (ضریب تشخیص ۰/۸۵، ریشه میانگین مربعات خطا ۴/۳۰ گرم بر مترمکعب و میزان خطای میانگین مطلق معادل ۳/۲۷)، قادر به پیش‌بینی میانگین غلظت رسوب‌های معلق دریاچه‌ها در فصل‌های سال است. در نهایت، با توجه به نتایج به دست آمده، پیشنهاد و تأکید می‌شود که برای کاهش غلظت رسوب‌های معلق در مخازن آبی، بهینه‌سازی دبی ورودی در نظر گرفته شود. همچنین، استفاده از مدل پیش‌بینی توسعه یافته در این پژوهش، می‌تواند به عنوان یک ابزار موثر برای مدیریت منابع آبی و کاهش آلودگی آب‌های سطحی استفاده شود.

در نهایت لازم به یادآوری است که با توجه به حساسیت داده‌های رودخانه‌های مرزی؛ داده‌های دبی‌های ورودی حذف شده‌است و ارزیابی بر مبنای نسبت حجم ورودی ماهانه بر حجم مخزن‌ها صورت گرفته‌است؛ این داده‌ها در اختیار مجله بوده و بر اساس درخواست کتبی می‌تواند در اختیار پژوهشگران علاقه‌مند قرار خواهد گرفت.

۴- منابع‌ها

Akbari, M., Mirchi, A., Roozbahani, A., Gafurov, A., Kløve, B. & Haghghi, A.T. (2022). Desiccation of the transboundary Hamun Lakes between Iran and Afghanistan in response to hydro-climatic droughts and anthropogenic activities. *Journal of Great Lakes Research*, 48(4), 876-889.

Balasubramanian, S.V., Pahlevan, N., Smith, B., Binding, C., Schalles, J., Loisel, H., Gurlin, D., Greb, S., Alikas, K., Randra, M., Bunkeik, M., Mosesl, W., Nguyẽnm, H., Lehmannn, M.K., O'Donnello, D., Ondrusekp, M., Hanq, T.-H., Fichotr, C.G., Moores, T. & Boss, E. (2020). Robust algorithm for estimating total suspended

جدول ۳ نتایج مرحله آموزش مدل‌سازی میان پارامترهای

غلظت رسوب‌های معلق و دبی ورودی

Table 3 The results of the training phase of modeling between suspended sediments and inflow

CN	Type of Model	Training Result		
		RMSE	R ²	MAE
CN1	GPR	4.30	0.85	3.27
CN2	SVM	6.76	0.16	4.70
CN3	SVM	7.70	0.27	6.58
CN4	GPR	7.20	0.35	4.85

جدول ۴ نتایج مرحله اعتبارسنجی مدل‌سازی میان پارامترهای

غلظت رسوب‌های معلق و دبی ورودی

Table 4 The results of the validation phase of modeling between suspended sediments and inflow

CN	Type of Model	Validation Result		
		RMSE	R ²	MAE
CN1	GPR	4.76	0.81	3.57
CN2	SVM	6.85	0.13	4.86
CN3	SVM	7.40	0.18	6.15
CN4	GPR	7.12	0.32	5.16

استفاده از روش فیزیکی C2RCC، نقشه‌های پهنه‌بندی رسوب‌های معلق برآورد شد. آنگاه پس از اعتبارسنجی داده‌های مکانی و زمانی برآورد شده، میانگین غلظت رسوب‌های معلق و دبی ورودی بررسی و تحلیل شدند. نتایج نشان داد که میزان‌های دبی ورودی و میانگین غلظت رسوب‌های معلق در مخزن‌های چاه نیمه با هم ارتباط و همبستگی بالایی دارند، به ویژه در چاه نیمه شماره یک که منبع اصلی ورودی آب به چاه نیمه‌ها است. همچنین، ضریب همبستگی میان پارامترهای میانگین غلظت رسوب‌های معلق در چاه نیمه یک با دبی ورودی مخزن ۰/۹ معادل است. این میزان برای چاه نیمه‌های دو، سه و چهار به ترتیب ۰/۴۲، ۰/۴۵ و ۰/۴۴ می‌باشد.

در این پژوهش، اثرگذاری دبی ورودی بر مبنای فصل‌های گرم و سرد سال آبی ۲۰۱۸-۲۰۱۹ بررسی شد. نتایج نشان داد که، از فصل خشک به فصل تر، دبی ورودی حدود ۰/۱۱ حجم مخزن‌ها افزایش داشته است. همچنین، غلظت رسوب‌های معلق در مخزن چاه نیمه یک در فصل تر نسبت به فصل خشک نزدیک به ۸۷ درصد افزایش داشت. به طور مشابه، در سال آبی ۲۰۱۹-۲۰۲۰، با افزایش دبی ورودی (حدود ۰/۱۰ حجم مخازن)، غلظت رسوب‌های معلق در مخزن چاه نیمه یک حدود ۷۴ درصد افزایش یافت.

- and ensemble algorithms for grassland in the Shengjin Lake Wetland, China. *Remote Sensing*, 13(8), 1595, <https://doi.org/10.3390/rs13081595>.
- Long, C.M. & Pavelsky, T.M. (2013). Remote sensing of suspended sediment concentration and hydrologic connectivity in a complex wetland environment. *Remote Sensing of Environment*, 129, 197-209.
- Noori, A., Mohajeri, S. H., Mehraein, M. & Samadi, A. (2023). Comparison of the Optimal Band Combinations to Estimate the Water Turbidity Parameter in Lakes Using Sentinel-2 and Landsat-8 Satellite Images (Case Study: Chah Nimeh Reservoirs). *Iran-Water Resources Research*, 18(4), 105-117. (in Persian)
- Padilla-Mendoza, C., Torres-Bejarano, F., Campo-Daza, G. & González-Márquez, L.C. (2023). Potential of Sentinel Images to Evaluate Physicochemical Parameters Concentrations in Water Bodies—Application in a Wetlands System in Northern Colombia. *Water*, 15(4), 789, <https://doi.org/10.3390/w15040789>.
- Sirdaş, S. & Şen, Z. (2007). Determination of Flash Floods in Western Arabian Peninsula. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(6), 676-681.
- Soria, J., Jover, M. & Domínguez-Gómez, J. A. (2021). Influence of Wind on Suspended Matter in the Water of the Albufera of Valencia (Spain). *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(3), 343, <https://doi.org/10.3390/jmse9030343>.
- solids (TSS) in inland and nearshore coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 246, 111768, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111768>.
- Brockmann, C., Doerffer, R., Peters, M., Kerstin, S., Embacher, S. & Ruescas, A. (2016). Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters. *Living Planet Symposium*, Proceedings of the conference held 9-13 May 2016 in Prague, Czech Republic. Edited by L. Ouwehand. ESA-SP Volume 740, ISBN: 978-92-9221-305-3, p.54.
- Du, Y., Song, K., Liu, G., Wen, Z., Fang, C., Shang, Y., Zhao, F., Wang, Q., Du, J. & Zhang, B. (2020). Quantifying total suspended matter (TSM) in waters using Landsat images during 1984–2018 across the Songnen Plain, Northeast China. *Journal of Environmental Management*, 262, 110334, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110334.
- Gallay, M., Martinez, J.-M., Mora, A., Castellano, B., Yépez, S., Cochonneau, G., Alfonso, J.A., Carrera, J.M., López, J.L. & Laraque, A. (2019). Assessing Orinoco River sediment discharge trend using MODIS satellite images. *Journal of South American Earth Sciences*, 91, 320-331.
- Gao, Z., Shen, Q., Wang, X., Peng, H., Yao, Y., Wang, M., Wang, L., Wang, R., Shi, J. & Shi, D. (2021). Spatiotemporal Distribution of Total Suspended Matter Concentration in Changdang Lake Based on In Situ Hyperspectral Data and Sentinel-2 Images. *Remote Sensing*, 13(21), 4230, <https://doi.org/10.3390/rs13214230>.
- He, X., Bai, Y., Pan, D., Huang, N., Dong, X., Chen, J., Chen, C.-T.A. & Cui, Q. (2013). Using geostationary satellite ocean color data to map the diurnal dynamics of suspended particulate matter in coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 133, 225-239.
- Ji, N., Liu, Y., Wang, S., Wu, Z. & Li, H. (2022). Buffering effect of suspended particulate matter on phosphorus cycling during transport from rivers to lakes. *Water Research*, 216, 118350, doi: 10.1016/j.watres.2022.118350.
- Larson, M.D., Simic Milas, A., Vincent, R.K. & Evans, J.E. (2021). Landsat 8 monitoring of multi-depth suspended sediment concentrations in Lake Erie's Maumee River using machine learning. *International Journal of Remote Sensing*, 42(11), 4064-4086.
- Li, C., Zhou, L. & Xu, W. (2021). Estimating aboveground biomass using Sentinel-2 MSI data

