

Estimating the suspended sediment load in the Bahmanshir River using remote sensing

Niousha Mohmedi ¹, Morteza Bakhtiari ², and Javad Zahiri ³

1. Department of marine structures, Faculty of Marine Engineering, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Khuzestan, Iran. E-mail: n.mohmadi95@gmail.com
2. Corresponding author, Department of marine structures, Faculty of Marine Engineering, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Khuzestan, Iran. E-mail: bakhtiari@kmsu.ac.ir
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Civil Engineering, Khuzestan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Khuzestan, Iran. E-mail: zahiri983@gmail.com

Article Info.

Article type:

Research Article

Article history:

Received 25 July 2025

Received in revised form 26
October 2025

Accepted 03 January 2026

Available online 23 september
2026

Keywords:

Bahmanshir River,
suspended sediment load,
remote sensing method,
Modis satellite,
dam and lock navigation.

ABSTRACT

Objective: Considering to the Bahmanshir River is one of the most important exploitable rivers in the country, and currently various projects, including the construction of upstream and downstream Bahmanshir dams and navigation locks, the Torah Bakhakh pumping station, are being studied and implemented on this river, the aim of the present study was to estimate the rate of suspended sediment load that could affect the aforementioned projects.

Method: There are various methods for estimating the rate of suspended sediments and they have always been used by water science engineers. Today, with the advancement of technology and new technologies, new methods have been developed. In the present study, MODIS satellite data was used in remote sensing to study the estimation of suspended sediment load.

Results: The results of the research show that the most optimal parameter for estimating suspended sediment concentration is the red and infrared bands. Also, the significance level in both tests at the Torah Bakhakh station (annual data) and stations 3 and 5 (daily, one-year data) is greater than 0.05, and at the Torah Bakhakh station (daily, ten-year data) and stations 1, 2, and 4 (daily, one-year data) is less than 0.05.

Conclusions: The results indicate that MODIS satellite data can be effectively used to estimate suspended sediment concentration in the Bahmanshir River. The red and infrared bands were identified as the most suitable parameters for sediment estimation. Statistical results showed significant relationships at some stations and time scales, while others were not statistically significant. Overall, remote sensing provides a useful tool for monitoring suspended sediment and supporting the planning and management of hydraulic projects along the Bahmanshir River.

Cite this article: Mohmedi, N., Bakhtiari, M., & Zahiri, J. (2026). Estimating the suspended sediment load in the Bahmanshir River using remote sensing. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 6(3), 100-116. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12463.1177>



© The Author(s)

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12463.1177>

Publisher: Razi University.

Introduction

The Karun River is one of the most water-rich rivers in Iran, covering a very large area of the Zagros Heights in its watershed, and it changes direction multiple times along its course. The Bahmanshir River is one of the most important navigable rivers in the country. Currently, various projects, including the construction of dams and navigational locks both upstream and downstream of the Bahmanshir River, are being studied and implemented. The aim of the present study is to estimate the amount of suspended sediment in this river, which can impact the performance of the ongoing projects during the operational period. Today, with advancements in technology and modern methods, new techniques have been developed for estimating suspended sediments, one of which is remote sensing. Reviewing the results of past research indicates the high efficiency of remote sensing methods in estimating the amount of suspended sediment load in non-tidal river conditions. However, studies show that there has not been a comprehensive investigation regarding the efficiency of using remote sensing methods for tidal rivers. Therefore, this current study focuses on estimating the amount of suspended sediment load using remote sensing in the Bahmanshir River, which is influenced by tidal effects.

Method

In the present study, remote sensing was used to estimate the amount of suspended sediment, and the efficiency of this method was examined and evaluated in comparison with the field-measured data. "In this study, to estimate the suspended sediment load, MODIS satellite data from the years 2009 to 2020 were used, covering the area from the construction site of the Bahmanshir dam and navigational lock downstream to the beginning of the river, along a length of 90 kilometers. The information collected and obtained for the current research includes data on suspended sediment concentration and satellite images from the MODIS sensor, as well as suspended sediment concentration data related to three time periods: fourteen years (annual average), ten years (daily), and one year (daily). This data has been provided by the Khuzestan Water and Power Organization, collected in the field for use in studies related to the construction of the Bahmanshir dam and navigation lock downstream. The necessary satellite images were obtained from Google Earth Engine and processed through coding in the Python environment. The study area is first defined in Google Earth software and saved in KML format. Then, using ArcGIS software, the saved KML file is imported and converted into a shapefile. In the next step, the shapefile of the study area is brought into the coding environment, and further coding is carried out. Subsequently, based on the coding time, images with a spatial resolution of 250 meters are downloaded. It is worth mentioning that in this method, initial processes including geometric corrections, atmospheric corrections, and georeferencing of the images are performed in ENVI software. To examine the correlation of the data and its significance, Pearson correlation test was used between water reflectance (independent variable) and suspended sediment concentration (dependent variable). Additionally, besides the reflectance values of the red and near-infrared bands, the band ratio ($b1/b2$) was also used as an independent variable, and the correlation values obtained for each case were analyzed. In the present study, to create an appropriate regression model and establish a relationship between the two variables, the normality of the suspended sediment concentration data (dependent variable) was first examined using SPSS

software. Subsequently, outlier data were identified and removed from the calculations, and the Shapiro-Wilk statistical test was used to assess the normality of the data

Results

As mentioned, in the present study, remote sensing methods were used to estimate the amount of suspended sediment load, and the effectiveness of this method was examined and evaluated in comparison with field-measured data. The results of the study indicate that the significance level in both the Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilk tests at the Tarrah Bakhakh station (annual data) and at stations 3 and 5 (daily, one-year data) is greater than 0.05, while at the Tarrah Bakhakh station (daily, ten-year data) and at stations 1, 2, and 4 (daily, one-year data) it is less than 0.05. This demonstrates the efficiency of the remote sensing method at the Tarrah Bakhakh station (daily, ten-year data) and at stations 1, 2, and 4 (daily, one-year data). Also The results obtained from this research indicate that satellite images from the MODIS sensor, due to their high temporal resolution (daily imaging), can play an important role in estimating suspended sediment in riverine environments and the final result show that For estimating the concentration of suspended sediments, the optimal parameters are the red and infrared bands.

Conclusions

As previously mentioned, the aim of this study was to estimate the concentration of suspended sediments in the Behmanshir River using remote sensing methods. The results obtained in this research are consistent with those of Tabatabaei and Sulaimani (2014) and Kazemzadeh et al. (2013), which showed that the wet season could be considered a suitable statistical period. Additionally, the results of Paulista et al. (2023) indicated that the red band is the best band for estimating suspended sediment concentration, which aligns with the findings of this study. Furthermore, the study by Kazemzadeh et al. (2013) demonstrated that using artificial neural networks and MODIS sensor images for monitoring suspended sediments is appropriate, which also agrees with the results of this research. The main findings of this study can be summarized as follows: The significance level in both tests at Tareh Bakh II station (annual data) and stations 3 and 5 (daily, annual data) is greater than 0.05, while at Tareh Bakh II station (daily, decadal data) and stations 1, 2, and 4 (daily, annual data), it is less than 0.05. The optimal parameters for estimating suspended sediment concentration are the red and near-infrared bands. Remote sensing is faster and more accurate compared to traditional methods. The results indicate that MODIS sensor satellite images, due to their high temporal resolution (daily imaging), can play an important role in estimating river sediment. There is no significant correlation between the data across all seasons, but limiting them to a wet period results in a higher correlation.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors of the paper sincerely appreciate the University of Marine Sciences and Naval Technology of Khorramshahr and the Khuzestan Water and Power Organization for their assistance in creating the conditions necessary for this research.

Ethical Considerations

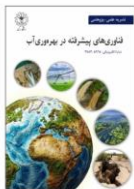
The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

Not applicable.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



تخمین میزان بار رسوبات معلق در رودخانه بهمنشیر با استفاده از سنجش‌ازدور

نیوشا مهمدی^۱، مرتضی بختیاری^۲، و جواد ظهیری^۳

۱. گروه سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران. رایانامه: n.mohmadi95@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران. رایانامه: bakhtiari@kmsu.ac.ir
۳. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، ایران. رایانامه: zahiri1983@gmail.com

درباره مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۳ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱ کلیدواژه‌ها: رودخانه بهمنشیر، بار رسوبات معلق، روش سنجش‌ازدور، ماهواره مادیس، سد و قفل کشتیرانی.	هدف: هدف این پژوهش، تخمین میزان بار معلق رسوبات رودخانه بهمنشیر و بررسی تأثیر احتمالی آن بر عملکرد طرح‌های هیدرولیکی و کشتیرانی موجود و در حال اجرا در این رودخانه بود. روش پژوهش: در این پژوهش از روش سنجش‌ازدور و داده‌های ماهواره مادیس در بازه زمانی سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۹ در محدوده‌ای به طول ۹۰ کیلومتر از رودخانه بهمنشیر استفاده شد. همچنین، آزمون‌های آماری و شبکه عصبی پیشخور برای بررسی روابط بین داده‌ها و ارزیابی عملکرد مدل به کار گرفته شدند. یافته‌ها: نتایج نشان داد روش سنجش‌ازدور در ایستگاه طره‌بخاخ با داده‌های روزانه ده‌ساله و ایستگاه‌های ۱، ۲ و ۴ با داده‌های روزانه یک‌ساله کارایی مناسبی دارد. همچنین، در دوره‌های مرطوب همبستگی بهتری میان داده‌ها مشاهده شد. نتایج شبکه عصبی پیشخور نیز نشان‌دهنده کارایی بالایی این شبکه و امکان تعیین آرایش بهینه آن از طریق اجرای سناریوهای مختلف بود. نتیجه‌گیری: به کارگیری روش سنجش‌ازدور و شبکه عصبی پیشخور می‌تواند رویکردی مناسب برای تخمین و پایش بار معلق رسوبات رودخانه بهمنشیر و پشتیبانی از مدیریت طرح‌های هیدرولیکی و کشتیرانی این رودخانه باشد.

استناد: مهمدی، نیوشا؛ بختیاری، مرتضی؛ و ظهیری، جواد. (۱۴۰۵). تخمین میزان بار رسوبات معلق در رودخانه بهمنشیر با استفاده از سنجش‌ازدور. فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۶ (۳)، ۱۱۶-۱۰۰.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12463.1177>

© نویسندگان

شر: دانشگاه رازی.



مقدمه

رودخانه‌ها منبع ارزشمندی برای تأمین آب موردنیاز برای مصارف صنعتی، کشاورزی و زیست‌محیطی هستند، بنابراین می‌توان گفت تأمین آب سطحی مهم‌ترین نقش اقتصادی یک رودخانه است (احدیان^۱ و همکاران، ۲۰۲۴). رودخانه کارون یکی از پرآب‌ترین رودخانه‌های ایران است و سطح بسیار وسیعی از ارتفاعات زاگرس را در حوضه آبریز خود دارد و در طول مسیر خود بارها تغییر جهت می‌دهد. این رودخانه در نزدیکی پل خرمشهر به دوشاخه تقسیم می‌شود. یکی از شاخه‌های این رودخانه در مسیری موسوم به کانال حفار امتداد یافته و بعد از گذشتن از میان شهر خرمشهر به اروندرود پیوسته به همراه رودخانه‌های دجله و فرات به سمت خلیج فارس جریان می‌یابد. مسیر دوم، اتصال رودخانه کارون به رودخانه بهمنشیر است که مستقیماً وارد خلیج فارس می‌شود. به طور معمول رواناب رودخانه کارون در مسیر عبور کانال حفار جریان داشته و دبی از رودخانه بهمنشیر چندان قابل توجه نبوده و بیشتر باهدف آبیاری مزارع منطقه به این مسیر منحرف می‌شود. شایان ذکر است که در زمان‌های سیلابی و افزایش قابل توجه آبدهی رودخانه کارون، بخشی از رواناب رودخانه از مسیر اصلی منحرف شده و به تالاب شادگان وارد می‌شود. با وارد شدن رواناب اضافی کارون به تالاب شادگان، دبی سیلاب رودخانه کارون در پایین‌دست اهواز کاهش یافته و مقادیر حداکثر یا لحظه‌ای دبی سیلاب در محدوده کانال مارد، آبادان و خرمشهر به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد این روند سبب کاهش خطر سیلاب و سیلگیری شهرهای آبادان و خرمشهر می‌شود. کانال حفار مصنوعی بوده و برای رفت و آمد کشتی‌ها تعریض و لایروبی گردیده و در نتیجه سهم بالایی از آب کارون در این کانال جریان می‌یابد. رود بهمنشیر در منطقه از اهمیت اقتصادی و نظامی ویژه‌ای برخوردار است. یکی از موضوعات مهم در خصوص بهره‌برداری از طرح‌های واقع شده بر روی رودخانه بهمنشیر رسوبات معلق است که می‌تواند عملکرد این طرح‌ها را در دوره بهره‌برداری تحت‌تأثیر خود قرار دهد. آبستگی یک فرآیند فرسایشی است که توسط حرکت آب بر روی بستر رسوبی هدایت می‌شود. آبستگی می‌تواند منجر به خطرات ایمنی سازه‌های ساخته شده و ناپایداری و فروپاشی سواحل رودخانه شود. به طور خاص، آبستگی در پیچ رودخانه‌ها یک پدیده شناخته شده است که توسط جریان‌های جریان ثانویه ایجاد می‌شود (مالکی^۲ و همکاران، ۲۰۲۵). به طور کلی روش‌های مختلفی برای محاسبه میزان بار رسوبات معلق وجود دارد که متداول‌ترین روش اندازه‌گیری غلظت رسوبات معلق بسیار معتبر بوده؛ اما این روش اغلب پرهزینه و زمان‌بر است (طباطبایی و همکاران، ۱۳۹۳). امروزه با پیشرفت تکنولوژی و ظهور فناوری‌های نوین استفاده از روش‌های جدید در محاسبه میزان بار رسوبات معلق توصیه شده است سنجش‌ازدور یکی از این روش‌هاست که می‌توان گفت سنجش‌ازدور باتوجه به ماهیت چند طیفی، پوشش دادن منطقه گسترده، داشتن روند زمانی منظم و همچنین به دلیل قابلیت تکرارپذیری تصویربرداری ماهواره‌ای روش مناسبی جهت محاسبه رسوبات معلق در آب‌های سطحی است. تا کنون محققین مختلفی از این روش استفاده کرده‌اند و نتایج تحقیقات ایشان نشان داده است که رابطه‌ای تجربی میان بازتابدگی و میزان رسوبات معلق وجود دارد. با بیان موارد فوق می‌توان گفت باتوجه به اهمیت رودخانه بهمنشیر لزوم داشتن اطلاعات صحیح و کافی جهت بهره‌برداری مناسب از این رودخانه بسیار حائز اهمیت می‌باشد بر این اساس و باتوجه به بررسی‌های صورت گرفته می‌توان گفت.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

حرکت ذرات معلق موجود در آب، هر زمانی که میزان سرعت برشی بستر از سرعت سقوط این ذرات بیشتر گردد، این ذرات می‌توانند به لایه‌ای بالاتر حرکت کنند و لذا نیروی بالابرنده متلاطم تا حدودی بیشتر از نیروی وزن آنهاست و در نتیجه ذرات به حالت معلق در می‌آیند. جابه‌جایی ذرات در شرایط اول و دوم را انتقال بار بستر و به حالت سوم انتقال بار معلق اطلاق می‌گردد. بر اساس تعریف آژانس حفاظت محیطی آمریکا^۳ (۲۰۰۳)، به طور کلی به ذرات ریز ارگانیک یا غیر ارگانیک که در آب معلق بوده و

^۱ Ahadiyan^۲ Maleki^۳ U.S. Environmental Protection Agency

به وسیله آن حمل می شوند رسوبات معلق گفته می شود. تحقیق در خصوص انتقال رسوبات همواره مورد توجه محققین مختلف بوده است که این تحقیقات را عمدتاً می توان در قالب تحقیقات میدانی، آزمایشگاهی و همچنین استفاده از مدل های عددی و روش های محاسباتی نرم دسته بندی نمود که در این بخش به تعدادی از آنها در دو طبقه بندی مطالعات داخل و خارج از کشور اشاره می شود.

۱. مطالعات داخل کشور

حیات زاده و همکاران (۱۳۹۴)، در تحقیق خود به مقایسه میان استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و روش های رگرسیونی سنج رسوب در پیش بینی میزان بار معلق پرداختند. ایشان در مطالعه خود از تعداد ۱۳۶ داده برداشت شده دبی جریان و رسوب متناظر و همچنین پارامترهای مورفولوژیکی در حوزه باغ عباس استفاده نمودند. نتایج تحقیق ایشان نشان می دهد که روش شبکه عصبی مصنوعی به مراتب دقت بیشتری نسبت به روش منحنی سنج دارد.

صدری نسب و همکاران (۱۳۹۸) در تحقیقی به تأثیر پیمان رودها بر میزان غلظت بار معلق و مقدار تغییرات سطح آب در رودخانه اروند با استفاده از مدل مایک ۲۱ پرداختند. در این تحقیق به منظور صحت سنجی و واسنجی مدل از اندازه گیری های میدانی، نوسان سطح آب، سرعت جریان، و غلظت بار معلق در طول رودخانه استفاده شده است. نتایج حاصل از تحقیق نشان می دهد در بازه مستقیم رودخانه به فاصله ۱۷ کیلومتر بین آبادان تا خسروآباد ارتفاع نوسان سطح آب ۱۸٪ و غلظت بار معلق رودخانه ۳/۸٪ افزایش داشته و در فاصله های غیرمستقیم کوتاه تر، با دو مئاندر، ارتفاع تغییرات سطح آب ۲۲٪ و غلظت بار معلق رودخانه ۱۵٪ افزایش یافته است.

میرزاخانی و همکاران (۱۴۰۰)، در یک تحقیق آزمایشگاهی به مطالعه تأثیر پوشش گیاهی صلب بر نرخ انتقال رسوب در سواحل پرداختند. ایشان به منظور بررسی اثر مدل ساحل و پوشش گیاهی از یک فلوم لبه چاقویی مجهز به سیستم نیروسنج و دستگاه سرعت سنج صوتی داپلر استفاده نمودند. آزمایش های این تحقیق در دو چیدمان مثلی و مستطیلی که شامل تراکم ۱۲ تا ۲۷۳ ساقه در واحد سطح بوده انجام شده است. نتایج حاصل از تحقیق نشان می دهد با افزایش تراکم پوشش و تعداد ردیف های پوشش، نرخ انتقال رسوب کاهش یافته به نحوی که در بیشترین تراکم نرخ انتقال رسوب تا ۸۰ درصد افزایش و در کمترین تراکم این میزان به مقدار ۲۰ درصد رسیده است. با گسترش استفاده از کامپیوتر استفاده از مدل های عددی و روش های محاسباتی نرم؛ مانند شبکه های عصبی مصنوعی، الگوریتم ژنتیک و توسعه بسیاری یافته است. به منظور شبیه سازی برآورد رسوبات رودخانه ها از تکنیک های شبکه عصبی مصنوعی، سیستم استنتاجی فازی-عصبی تطبیقی و درخت تصمیم استفاده نمودند. نتایج تحقیق ایشان نشان دهنده دقت بالای روش های مبتنی بر یادگیری ماشینی به ویژه مدل شبکه های عصبی کارایی بسیار خوبی برای مدل سازی و پیش بینی رسوب در مقیاس روزانه است.

۲. مطالعات خارج از کشور

رانگوت و همکاران^۱ (۲۰۱۵)، از جمله محققینی هستند که به مطالعه مد سریع در منطقه استواری رودخانه گارنون در طول دوره جزرومد بهار و اثر آن بر میزان غلظت رسوبات معلق پرداختند. نتایج به دست آمده در تحقیق آنها نشان می دهد میزان غلظت رسوب معلق دارای روند افزایش تدریجی قبل از جزرومد سریع از بیست و نه آگوست تا یکم سپتامبر ۲۰۱۵ میلادی و افزایش بسیار زیاد غلظت رسوبات در حین جریان سریع کشندی بوده است همچنین نتایج نشان می دهد جریان رسوب، در ساعت اول سیل، به طور متوسط حدود ۵۰۰ تن رسوبات را در ثانیه، در کانال عرضی ۷۰ متری حمل نموده است. مطالعه در خصوص جنبه های مختلف تأثیر پوشش های گیاهی بر روی مکانیزم های انتقال رسوب موضوع تحقیق محققین مختلف بوده است.

بررسی های واستیلا و همکاران^۲ (۲۰۱۶) بر روی جریان های فصلی و سطح آب نشان می دهد پوشش گیاهی می تواند باعث بهبود فرایند فرسایش و انتقال رسوبات در سواحل گردد و این پوشش گیاهی که در سواحل به اشکال مختلف وجود دارد می تواند

¹ Reungoat et al

² Vastila et al

تأثیر قابل توجهی در پویایی جریان، انتقال رسوب و فرایندهای بیولوژیکی و طبیعی داشته باشد. همچنین بررسی تأثیر پوشش گیاهی سخت (انعطاف‌ناپذیر) و انعطاف‌پذیر بر میزان انتقال رسوب در مجاری روباز نشان می‌دهد نقش پوشش گیاهی انعطاف‌پذیر در این زمینه چشمگیرتر بوده است. به‌طوری که نرخ انتقال رسوب را حدود 70 درصد کاهش داده است و همچنین در حضور پوشش گیاهی سرعت جریان و غلظت رسوب به‌شدت دستخوش تغییر شده که نشان‌دهنده اهمیت پوشش گیاهی در پایداری بستر و سواحل است (پرناک و همکاران،^۱ ۲۰۱۸؛ ژانگ و همکاران،^۲ ۲۰۲۰).

احدیان و همکاران (۲۰۱۸) در تحقیقی نتایج یک مطالعه عددی با استفاده از کد CCHE2D را برای بررسی تأثیر زاویه اتصال و نسبت دبی بر الگوهای جریان و فرسایش را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه پارامترهای هیدرولیکی و هندسی که بر حداکثر عمق نسبی آبشستگی تأثیر می‌گذارند، تجزیه و تحلیل شدند نتایج به طور کلی با داده‌های تجربی مطابقت دارند و نشان می‌دهند که فرآیند آبشستگی به همه این پارامترها بستگی دارد. نتایج عددی نشان می‌دهند که کاهش نسبت عرض شاخه فرعی به عرض کانال اصلی منجر به افزایش اندازه ناحیه جدایی می‌شود. علاوه بر این، افزایش نسبت عرض منجر به کاهش حداکثر عمق فرسایش بستر می‌شود. در نهایت، حداکثر عمق فرسایش بستر در محل تلاقی با افزایش زاویه اتصال افزایش می‌یابد.

چلوتی و همکاران^۳ (۲۰۱۹)، با استفاده از تصاویر سنجنده مادیس و لندست-۸ در مخزن دسکوبرتو ایالت گویاس به این نتیجه رسیدند محدوده قرمز طیف الکترومغناطیسی برای شناسایی تخمین غلظت رسوب معلق بسیار مناسب است. در تحقیقی با استفاده از بررسی خصوصیات طیفی ماهواره‌های لندست-۸ و سنتینل-۲ در تخمین میزان رسوبات و مواد معدنی معلق در دریاچه‌های آمازون دریافتند که تصاویر ماهواره‌ای در مورد بررسی میزان غلظت رسوبات کارساز است (ماسل و همکاران،^۴ ۲۰۱۹).

گوپتا و همکاران^۵ (۲۰۲۱)، در تحقیق خود برای محاسبه بار رسوب معلق از مدل‌های تخمین بار رسوب معلق مبتنی بر هوش مصنوعی استفاده کردند و نتایج تحقیق ایشان نشان می‌دهد استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی و هیبرید موجکی می‌تواند در پیش‌بینی بار معلق دقت بالایی داشته باشد. بررسی‌های به‌عمل‌آمده نشان می‌دهد هر کدام از انواع تحقیقات یاد شده در خصوص انتقال رسوب دارای معایب خاص خود بوده که از جمله آنها به صرف هزینه و زمان بسیار برای دستیابی نتایج مدنظر می‌توان اشاره نمود به‌منظور جبران این کاستی‌ها امروزه استفاده از روش‌های بر مبنای سنجش‌ازدور و داده‌های ماهواره‌ای متداول شده است که در این بخش به تعدادی از این تحقیقات اشاره می‌شود.

کانگ و همکاران^۶ (۲۰۲۲)، در تحقیق خود از رابطه میان کدورت و غلظت رسوبات معلق در پیش‌بینی تغییرات غلظت رسوبات و کدورت با بررسی تغییر رنگ در تصاویر زیر آب استفاده نمودند.

در تحقیق دیگری پالیستا و همکاران^۷ (۲۰۲۳) به مطالعه غلظت رسوب معلق با استفاده از سنجش‌ازدور برای رودخانه تلس پیرس برزیل پرداختند و دریافتند باندهای جدا شده در مقایسه با شاخص‌های رادیومتریک همبستگی قوی‌تری را نشان می‌دهند و باند قرمز بهترین باند برای تخمین غلظت رسوبات معلق است. بررسی نتایج تحقیقات گذشته نشان‌دهنده کارایی بالای روش سنجش‌ازدور در تخمین میزان بار رسوبات معلق در شرایط رودخانه‌های غیر جزرومدی بوده است؛ ولی بررسی‌ها نشان می‌دهد تا کنون در خصوص کارایی استفاده از روش سنجش‌ازدور تحقیق بر روی رودخانه‌های جزرومدی تحقیق جامعی صورت نگرفته است؛ لذا در این تحقیق حاضر به مطالعه تخمین میزان بار رسوبات معلق با استفاده از سنجش‌ازدور در رودخانه بهمنشیر که تحت تأثیر جزرومد قرار دارد، پرداخته شده است.

¹ Parnak et al

² Zhang et al

³ Chelotti et al

⁴ Maciel et al

⁵ Gupta et al

⁶ Kang et al

⁷ Paulista et al

روش پژوهش

در تحقیق حاضر به منظور تخمین میزان بار معلق رسوبات از روش سنجش‌ازدور استفاده شده است و کارایی این روش در مقایسه با داده‌های میدانی اندازه‌گیری شده مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

۱. سنجش از راه دور

سنجش‌ازدور علم به‌کارگیری عکس‌های هوایی، عکس‌های فضایی و تصاویر تهیه شده از اطلاعات ماهواره‌ای جهت تفسیر، شناسایی و اخذ اطلاعات مختلف از پدیده‌های متنوع است. به عبارت دیگر می‌توان گفت با استفاده از روش سنجش‌ازدور، داده‌های به‌دست‌آمده از ماهواره‌ها به عکس تبدیل شده و یا به طور مستقیم به کمک رایانه‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد (زبیری و مجد، ۱۳۹۲). همچنین در برخی منابع بیان شده است که سنجش‌ازدور از جمله ابزارهای مناسب مدیریتی منابع زمینی است که داده‌های به‌روز را توسط سنجنده‌های مختلف در زمینه‌های متفاوت منابع زمینی ثبت می‌نماید. لازم به ذکر است که داده‌های ماهواره‌ای، منطقه وسیعی را نسبت به سایر ابزارها مانند عکس‌های هوایی و نقشه برداری زمینی پوشش داده و امکان ثبت انعکاسات انرژی الکترومغناطیس علاوه بر طیف مرئی در طول موج‌های خارج از طیف مرئی وجود دارد. وجود پوشش‌های تکراری داده‌های ماهواره‌ای، برای هر منطقه در فواصل زمانی یکسان، امکان مطالعه و نمایش تغییرات فرآیندهای دینامیک را در آن منطقه امکان‌پذیر می‌نماید. (علوی پناه، ۱۳۹۵). با استفاده از قابلیت بازتابش طیفی سنجش از راه دور اندازه‌گیری شده به وسیله گیرنده‌های ماهواره‌ای این راه می‌تواند یک جایگزین سریع و مقرون به صرفه برای تخمین غلظت رسوبات معلق در اقیانوس‌ها، دریاها، رودخانه‌ها و آب‌های ساحلی باشد.

۲. معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در تحقیق حاضر رودخانه بهمنشیر بوده که یکی از شاخه‌های منشعب شده از رودخانه کارون است. رودخانه کارون پس از رسیدن به شهر خرمشهر به دوشاخه تقسیم شده، شاخه نخست که از خرمشهر گذشته و به سمت اروندرود در مرز ایران و عراق رفته و شاخه دوم بهمنشیر است که با گذر از کنار آبادان مستقیم به خلیج فارس می‌ریزد. طول رودخانه بهمنشیر حدود ۹۰ کیلومتر، عرض آن ۶۰۰ متر و عمق آن حدود ۴ متر است. مختصات جغرافیایی آن ۴۸ درجه و ۱۴ دقیقه الی ۴۸ درجه و ۴۰ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۲۴ دقیقه الی ۳۰ درجه و ۲۰ دقیقه عرض شمالی است در شکل (۱) محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است.



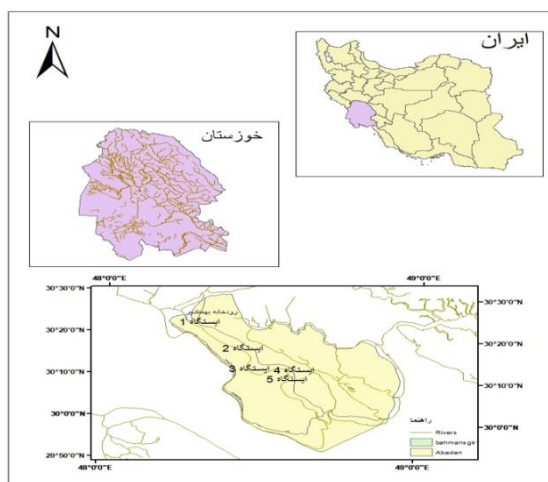
شکل ۱. نمایی از منطقه مورد مطالعه

۳. روش انجام تحقیق

در تحقیق حاضر از داده‌های میدانی ۵ ایستگاه واقع بر روی رودخانه بهمنشیر و سپس تخمین میزان بار معلق رسوبات در این ایستگاه‌ها استفاده شده است در شکل (۲) و جدول (۱) مشخصات ایستگاه‌ها آورده شده است.

جدول ۱. موقعیت ایستگاه‌های واقع در طول رودخانه

ردیف	ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
۱	ایستگاه ۱ (ابتدای رودخانه بهمنشیر)	۳۰.۲۴۰۶/۸۳	۴۸.۱۴۵۳/۳۶
۲	ایستگاه ۲ (ایستگاه هیدرومتری طره بخاخ)	۳۰.۱۵۵۹/۵۹	۴۸.۲۶۵۹/۵۹
۳	ایستگاه ۳ (ایستگاه پمپاژ طره بخاخ)	۳۰.۱۱۳۳/۸۲	۴۸.۳۷۵۷/۲۷
۴	ایستگاه ۴ (انتهای رودخانه بهمنشیر قبل از پل چوئیده)	۳۰.۱۲۲۹/۲۳	۴۸.۳۴۰۱/۱۶
۵	ایستگاه ۵ (پل چوئیده)	۳۰.۱۰۱۷/۹۷	۴۸.۳۵۲۵/۲۶



شکل ۲. نمایی از ایستگاه‌های واقع در طول رودخانه مورد مطالعه

۴. نحوه جمع‌آوری داده‌ها

در اطلاعات جمع‌آوری و اخذ شده مورد نیاز در تحقیق حاضر شامل داده‌های غلظت رسوب معلق و تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مادیس که دارای تصاویر بادقت کافی در بازه زمانی و مکانی محدوده مطالعه بوده و همچنین داده‌های غلظت رسوب معلق مربوط به سه بازه زمانی چهارده ساله (میانگین سالانه)، ده ساله (روزانه) و یک ساله (روزانه) بوده (که هم از نظر رژیم آبدی و هم از جنبه جامعیت مناسب بوده) از اطلاعات از سازمان آب و برق خوزستان تهیه شده که به صورت میدانی جهت استفاده در مطالعات طرح احداث سد و قفل کشتیرانی بهمنشیر پایین دست داده برداری شده است و برای اخذ تصاویر ماهواره‌ای مورد نیاز از گوگل ارث انجین و بر اساس کدنویسی و محیط پایتون انجام شده است. محدوده مورد مطالعه ابتدا در نرم افزار گوگل ارث مشخص و با فرمت KML ذخیره می‌گردد سپس با استفاده از نرم افزار ArcGIS فرمت KML ذخیره شده، فراخوانی شده و تبدیل به شیپ فایل شده است در مرحله بعد شیپ فایل محدوده مورد مطالعه وارد محیط کدنویسی شده و در ادامه کدنویسی انجام می‌گردد. پس از آن باتوجه به زمان کدنویسی شده تصویرهای مدنظر در تفکیک مکانی ۲۵۰ متر، برای بارگیری اقدام نمود. لازم به ذکر است در این روش پردازش‌های اولیه شامل تصحیحات هندسی و اتمسفری و ژئو رفرنس نمودن بر روی تصاویر در نرم افزار انوی انجام می‌گردد. در تحقیق حاضر تصاویر روزانه مربوط به ایستگاه هیدرومتری طره بخاخ در بازه زمانی سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۸ به مدت ده سال (تعداد ۱۲۹ تصویر) مطابق با تاریخ نمونه برداری زمینی سازمان آب و برق خوزستان اخذ گردید. همچنین تصاویر طبقه بندی شده

سالانه (تعداد ۱۴ تصویر) ایستگاه هیدرومتری طره بخاخ از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۹ به مدت چهارده سال است که با میانگین سالانه داده های غلظت رسوب معلق سازمان آب و برق خوزستان مورد بررسی و مطابقت قرار گرفته است. تصاویر روزانه شامل ایستگاه های ۱ تا ۵ هرکدام به تعداد ۱۲ تصویر، مربوط به سال های ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۷ به مدت یک سال منطبق با نمونه برداری زمینی صورت گرفته از طرف شرکت مشاور زیر نظر سازمان آب و برق خوزستان است. پس از حذف تصاویر دارای ابر و سایر اشکالات رادیومتریک و داده های پرت غلظت رسوب معلق، تعداد ۷۲ تصویر روزانه (ده ساله) برای ایستگاه هیدرومتری طره بخاخ و ۶ تصویر روزانه (یک ساله) برای ایستگاه ۵ و ۷ تصویر روزانه (یک ساله) برای ایستگاه های ۱ تا ۴ باقی ماند. از ۷۰ درصد اطلاعات جهت ساخت و آموزش مدل شبکه عصبی، مدل رگرسیون استفاده گردید و ۳۰ درصد باقی مانده نیز جهت آزمون و صحت سنجی این مدل ها مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق باتوجه به اینکه باند مادون قرمز نزدیک بیش از باند قرمز توسط آب جذب می گردد؛ لذا آب در این تصویر تیره تر از سایر باندهای مرئی بوده است که این موضوع موجب تشخیص و تفکیک آب از اراضی اطراف آن می گردد. در پژوهش حاضر از باند مادون قرمز نزدیک جهت بررسی انعکاس طیفی آب در موقعیت های نمونه برداری استفاده شده است. تصاویر استفاده شده دارای فرمت Geo TIFF هستند که تصحیحات هندسی و اتمسفری روی آن ها از قبل اعمال شده است؛ بنابراین، نیازی به پیش پردازش اولیه ندارند. در این تحقیق، علاوه بر استخراج بازتاب باندها به تنهایی از نسبت گیری طیفی (b1/b2) نیز برای تخمین غلظت رسوب معلق استفاده شده است. در نسبت گیری طیفی مقادیر درجه روشنایی یک باند طیفی به باند طیفی قابل انطباق دیگر تقسیم می شود که باهدف متمایز ساختن تفاوت هایی که توسط تغییرات روشنایی در تک باندها ممکن نیست، به کار می رود

۵. مدل رگرسیونی

در تحقیق حاضر به منظور ایجاد مدل رگرسیونی مناسب و ارتباط بین دو متغیر، ابتدا موضوع نرمال بودن داده های غلظت رسوب معلق (متغیر وابسته) در نرم افزار SPSS مورد بررسی قرار گرفت. سپس، داده های پرت شناسایی و از محاسبات حذف گردید و به جهت بررسی نرمال بودن داده ها از آزمون آماری شاپیرو-ویلک استفاده شده است. پس از بررسی نرمال بودن داده ها، با استفاده از آزمون همبستگی پیرسون، همبستگی بین انعکاس آب (متغیر مستقل) و غلظت رسوب معلق (متغیر وابسته) در طول دوره آماری تحقیق بررسی و معنی دار بودن آن مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور، در این پژوهش هم از مقادیر انعکاس باندها به تنهایی و هم مقادیر نسبت گیری طیفی به عنوان متغیر مستقل استفاده شد.

پس از آن که همبستگی معناداری بین متغیر وابسته با متغیر مستقل نشان داده شد، به جهت بیان نوع ارتباط بین متغیرها از معادله رگرسیونی ساده و چندمتغیره استفاده گردید. در برخی موارد همبستگی میان چند متغیر مستقل با متغیر وابسته برقرار بود که از رگرسیون چندمتغیره استفاده شده است. در مرحله بعد، برای داده هایی که همبستگی میان یک متغیر مستقل با متغیر وابسته برقرار بود، از رگرسیون ساده استفاده گردیده است. از این رو، برای تعیین نوع مدل رگرسیون (خطی یا غیرخطی بودن) و تعیین معنی داری ضرایب به کاررفته در آن، از دستور Curve Estimation در نرم افزار SPSS استفاده شده است. در این رابطه با بررسی و مقایسه پارامترهای آماری نظیر ضریب تعیین (R^2)، آماره فیشر (F)، سطح معنی داری (Sig.) و غیره، بهترین الگوی رگرسیونی انتخاب شده است.

یافته های پژوهش

۱. بررسی نرمال بودن داده های غلظت رسوب معلق

باتوجه به اینکه در کلیه آزمون های آماری فرض نرمال بودن داده ها لازم است؛ لذا در تحقیق حاضر به منظور بررسی این موضوع از آزمون های کولموگروف-اسمیرنوف و شاپیرو-ویلک استفاده شده است. در جدول (۲) نتایج حاصل از بررسی نرمال بودن داده های غلظت رسوب معلق روزانه در ایستگاه هیدرومتری طره بخاخ در بازه ده ساله و داده های غلظت رسوب معلق سالانه ایستگاه

هیدرومتری طره بخاخ به مدت چهارده سال و داده‌های غلظت رسوب معلق روزانه یک‌ساله (۹۶-۹۷) ایستگاه‌های یک تا پنج آورده شده است.

جدول ۲. نتایج بررسی نرمال بودن داده‌های مختلف غلظت بار معلق

	کولموگروف - اسمیرنوف			شاپیرو-ویلک		
	آماره	تعداد نمونه	معناداری	آماره	تعداد نمونه	معناداری
روزانه - ده‌ساله ایستگاه طره بخاخ	۰/۱۶۴	۷۲	۰/۰۰۰۵	۰/۸۷۷	۷۲	۰/۰۰۰۵
سالانه - چهارده ایستگاه طره بخاخ	۰/۱۹۹	۱۴	۰/۱۳۷	۰/۸۹۲	۱۴	۰/۰۸۷
روزانه - یک‌ساله ایستگاه ۱	۰/۳۷۰	۱۲	۰/۰۰۰۵	۰/۴۹۴	۱۲	۰/۰۰۰۵
روزانه - یک‌ساله ایستگاه ۲	۰/۳۷۱	۱۲	۰/۰۰۰۵	۰/۷۲۲	۱۲	۰/۰۰۱
روزانه - یک‌ساله ایستگاه ۳	۰/۳۴۰	۱۲	۰/۰۵۵	۰/۸۶۹	۱۲	۰/۰۶۶
روزانه - یک‌ساله ایستگاه ۴	۰/۳۱۷	۱۲	۰/۰۰۲	۰/۶۰۵	۱۲	۰/۰۰۰۵
روزانه - یک‌ساله ایستگاه ۵	۰/۲۲۶	۱۱	۰/۱۲۲	۰/۸۸۵	۱۱	۰/۱۲۰

باتوجه به اینکه در آزمون شاپیرو-ویلک نرمال‌سازی داده‌ها در سطح معناداری ۵ درصد قابل قبول است؛ لذا با بررسی نتایج به‌دست‌آمده می‌توان بیان نمود در ایستگاه طره بخاخ (داده‌های روزانه، ده‌ساله) و ایستگاه‌های ۱ و ۲ و ۴ (داده‌های روزانه، یک‌ساله) نرمال نبوده و لذا نرمال‌سازی در مورد آنها با استفاده از روش تبدیل لگاریتمی انجام شده است در جدول (۳) نتایج نرمال‌سازی داده‌ها آورده شده است.

جدول ۳. نتایج نرمال نمودن داده‌های مختلف غلظت بار معلق

	کولموگروف - اسمیرنوف			شاپیرو-ویلک		
	آماره	تعداد نمونه	معناداری	آماره	تعداد نمونه	معناداری
روزانه - ده‌ساله ایستگاه طره بخاخ	۰/۰۸۲	۷۲	۰/۲۰۰	۰/۹۶۷	۷۲	۰/۰۵۵
روزانه - یک‌ساله ایستگاه ۱	۰/۲۴۵	۱۲	۰/۰۵۱	۰/۸۳۱	۱۲	۰/۱۲۱
روزانه - یک‌ساله ایستگاه ۲	۰/۲۳۷	۱۲	۰/۰۶۲	۰/۹۱۷	۱۲	۰/۲۶۰
روزانه - یک‌ساله ایستگاه ۴	۰/۱۴۱	۱۲	۰/۲۰۰	۰/۹۶۵	۱۲	۰/۸۵۵

نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۳) نشان می‌دهد بر اساس شاخص پیشین بیان شده (سطح معنی‌داری ۵ درصد) داده‌ها نرمال شده اند.

۲. بررسی همبستگی بین داده‌ها

به‌منظور بررسی همبستگی داده‌ها و معنادار بودن آن‌ها، میان انعکاس آب (متغیر مستقل) و غلظت رسوب معلق (متغیر وابسته) از آزمون همبستگی پیرسون استفاده شده است همچنین علاوه بر مقادیر بازتاب باند قرمز و مادون قرمز نزدیک از نسبت باندی (b1/b2) نیز به‌عنوان متغیر مستقل استفاده و برای هر مورد میزان همبستگی رابطه به‌دست‌آمده مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول (۴) نتایج حاصل از بررسی همبستگی میان داده‌ها بر اساس روش پیرسون آورده شده است.

جدول ۴. تجزیه و تحلیل همبستگی پیرسون برای داده های دوره های مختلف آماری

b1/b2	b2	b1	SSC		
-۰/۱۱۰	۰/۳۳۳*	۰/۲۹۷*	۱	ضریب همبستگی پیرسون	کل دوره آماری
۰/۳۵۸	۰/۰۰۴	۰/۰۱۱		ضریب معناداری (دو دنباله)	ده ساله - ایستگاه
۷۲	۷۲	۷۲	۷۲	تعداد نمونه	طره بخاخ
۰/۸۳۴**	۰/۷۴۸**	۰/۸۷۷**	۱	ضریب همبستگی پیرسون	داده های سالانه
۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۵		ضریب معناداری (دو دنباله)	چهارده ساله -
۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	تعداد نمونه	ایستگاه طره بخاخ
-۰/۵۰۵	۰/۱۵۹	-۰/۱۹۳	۱	ضریب همبستگی پیرسون	کل دوره آماری
۰/۰۹۴	۰/۶۲۱	۰/۵۴۹		ضریب معناداری (دو دنباله)	یک ساله -
۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	تعداد نمونه	ایستگاه ۱
۰/۴۸۰	-۰/۰۱۶	۰/۳۵۶	۱	ضریب همبستگی پیرسون	کل دوره آماری
۰/۱۱۴	۰/۹۶۱	۰/۲۵۷		ضریب معناداری (دو دنباله)	یک ساله -
۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	تعداد نمونه	ایستگاه ۲
-۰/۶۶۸*	۰/۴۲۱	۰/۰۷۴	۱	ضریب همبستگی پیرسون	کل دوره آماری
۰/۰۹۴	۰/۶۲۱	۰/۵۴۹		ضریب معناداری (دو دنباله)	یک ساله -
۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	تعداد نمونه	ایستگاه ۳
۰/۰۹۵	۰/۰۰۶	۰/۰۴۲	۱	ضریب همبستگی پیرسون	کل دوره آماری
۰/۷۶۸	۰/۹۸۶	۰/۸۹۸		ضریب معناداری (دو دنباله)	یک ساله -
۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	تعداد نمونه	ایستگاه ۴
-۰/۵۶۲	۰/۵۲۰	۰/۱۶۷	۱	ضریب همبستگی پیرسون	کل دوره آماری
۰/۰۷۲	۰/۱۰۱	۰/۶۲۳		ضریب معناداری (دو دنباله)	یک ساله -
۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	تعداد نمونه	ایستگاه ۵

بررسی نتایج به دست آمده نشان می دهد همبستگی پائینی بین غلظت رسوب معلق و بازتاب باند یک و دو و نسبت بازتاب در سطح معناداری یک درصد برای ایستگاه طره بخاخ وجود دارد این در حالی است که بررسی های به عمل آمده برای داده های سالانه - چهارده ساله ایستگاه طره بخاخ همبستگی نسبتاً بالایی بین غلظت رسوب معلق و باند یک در سطح معنی داری یک درصد را نشان می دهد. در این ارتباط غلظت رسوبات معلق از مقدار حدوداً ۳۰۰ میلی گرم در لیتر تا حدود ۱۳۰۰ میلی گرم در لیتر متغیر بوده و ضریب همبستگی آن بالغ بر ۸۷ درصد است. برای باند دو و نسبت باندی به ترتیب ۷۴ و ۸۳ درصد نشان داده شده است که در سطح معنی داری یک درصد ضریب همبستگی نسبتاً خوبی است. در همین راستا، باتوجه به بررسی های صورت گرفته محققین نشان دادند با افزایش SSC از ۱۶ تا ۱۳۳۸ میلی گرم بر لیتر بازتاب در باند قرمز افزایش می یابد، می توان گفت همبستگی بیشتر تحت تأثیر غلظت بالای رسوب است. باتوجه به نتایج به دست آمده و با توجه مشاهده عدم همبستگی داده بین تصاویر روزانه و داده های روزانه غلظت رسوب معلق مربوط به کل دوره آماری سال (۹۶-۹۷) ایستگاه های ۱ تا ۵، باتوجه به برخی مطالعات قبلی مانند طباطبایی و سلیمانی (۱۳۹۳) و کاظمزاده و همکاران^۱ (۲۰۱۳) که فصل مرطوب را به عنوان دوره آماری مناسب برای تحقیق خود انتخاب کردند، در این تحقیق هفت ماه سال (مهر، آبان، آذر، دی، بهمن، اسفند، فروردین) به عنوان دوره مرطوب و پنج ماه سال (اردیبهشت، خرداد، تیر، مرداد، شهریور) به عنوان دوره خشک در نظر گرفته شد. در جدول (۵) نتایج حاصل از در نظر گرفتن داده های فصل مرطوب و سپس تجزیه و تحلیل های مربوطه آورده شده است.

^۱ Kazemzadeh et al

جدول ۵. تجزیه و تحلیل همبستگی پیرسون برای دوره مرطوب

b1/b2	b2	b1	SSC		
-۰/۱۴۶	۰/۶۹۲**	۰/۷۲۴**	۱	ضریب همبستگی پیرسون	دوره مرطوب
۰/۳۷۴	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵		ضریب معناداری (دو دنباله)	ده ساله - ایستگاه
۳۹	۳۹	۳۹	۳۹	تعداد نمونه	طره بخاخ
-۰/۵۶۲	۰/۳۹۱	-۰/۰۹۰	۱	ضریب همبستگی پیرسون	دوره مرطوب
۰/۱۸۹	۰/۳۸۶	۰/۸۴۸		ضریب معناداری (دو دنباله)	یک ساله - ایستگاه ۱
۷	۷	۷	۷	تعداد نمونه	
۰/۸۴۸*	-۰/۱۱۳	۰/۶۳۸	۱	ضریب همبستگی پیرسون	دوره مرطوب
۰/۰۱۶	۰/۸۰۹	۰/۱۲۳		ضریب معناداری (دو دنباله)	یک ساله - ایستگاه ۲
۷	۷	۷	۷	تعداد نمونه	
-۰/۵۲۳	۰/۴۳۳	۰/۲۶۱	۱	ضریب همبستگی پیرسون	دوره مرطوب
۰/۲۲۸	۰/۳۳۲	۰/۵۷۳		ضریب معناداری (دو دنباله)	یک ساله - ایستگاه ۳
۷	۷	۷	۷	تعداد نمونه	
-۰/۰۹۳	۰/۳۱۵	۰/۳۴۷	۱	ضریب همبستگی پیرسون	دوره مرطوب
۰/۸۴۲	۰/۴۹۱	۰/۴۴۶		ضریب معناداری (دو دنباله)	یک ساله - ایستگاه ۴
۷	۷	۷	۷	تعداد نمونه	
-۰/۶۹۲	۰/۹۳۴**	۰/۷۲۷	۱	ضریب همبستگی پیرسون	دوره مرطوب
۰/۱۲۸	۰/۰۰۶	۰/۱۰۲		ضریب معناداری (دو دنباله)	یک ساله - ایستگاه ۵
۶	۶	۶	۶	تعداد نمونه	

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول (۵)، در ایستگاه طره بخاخ برای دوره مرطوب (ده ساله) میان غلظت رسوب معلق با باند یک و دو همبستگی نسبتاً خوبی در سطح معنی داری یک درصد برقرار است. که ضریب همبستگی باند یک ۷۲ درصد و باند دو ۶۹ درصد است، همچنین برای دوره مرطوب (یک ساله) در ایستگاه‌های ۱، ۳ و ۴ همبستگی پایینی میان غلظت رسوب معلق و باند یک و دو و نسبت باندی نشان داده شده است که علت آن را می توان جزرومدی بودن رودخانه دانست. در این مورد می توان به دو نکته اشاره کرد. اول آن که، چنانچه عرض رودخانه کوچک تر از اندازه پیکسل تصویر موردنظر باشد انعکاس پیکسل تصویر، مخلوطی از انعکاس آب و اراضی حاشیه رودخانه بوده. بنابراین، نمیتواند انعکاس خالص آب باشد. دوم آنکه، عمق رودخانه در محل نمونه برداری از تصویر بایستی به قدر کافی عمیق باشد تا انعکاس کف رودخانه به حداقل برسد (طباطبایی و سلیمانی، ۱۳۹۳). نتایج به دست آمده برای دوره مرطوب (یک ساله) ایستگاه ۲، همبستگی نسبتاً بالایی میان غلظت رسوب معلق با نسبت بازتاب در سطح معنی داری پنج درصد نشان می دهد همچنین برای دوره مرطوب (یک ساله) ایستگاه ۵، میان غلظت رسوب معلق و باند دو همبستگی بالایی در سطح معنی داری یک درصد برقرار است. در نهایت برای تحلیل مناسب تر داده ها برای مواردی که همبستگی معناداری پیدا نشد این موارد از محاسبات کنار گذاشته شدند.

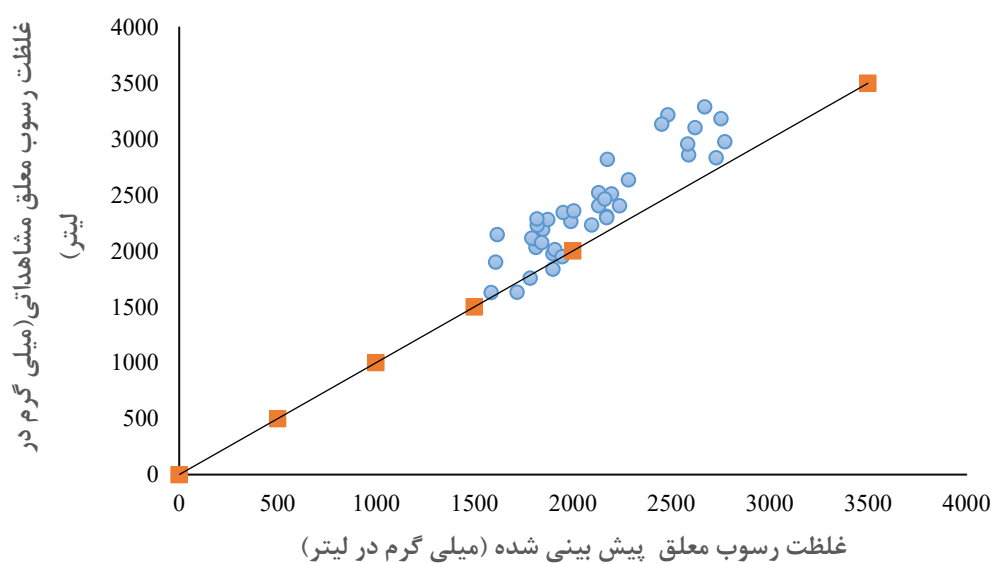
۳. تعیین مدل رگرسیونی

در این بخش به توسعه الگوریتمی پرداخته می شود که میزان غلظت رسوب معلق با استفاده از بازتاب طیفی آب را پیش بینی کند. به همین منظور، از تجزیه و تحلیل رگرسیون استفاده می شود، برای ایستگاه هیدرومتری طره بخاخ در بازه ده ساله (دوره مرطوب) غلظت رسوب معلق به عنوان متغیر وابسته و باند یک و دو به عنوان متغیر مستقل، در بازه زمانی چهارده ساله (طبقه بندی شده)، غلظت رسوب معلق به عنوان متغیر وابسته و باند یک، دو و نسبت بازتاب به عنوان متغیر مستقل، از آزمون تحلیل واریانس (ANOVA) به عنوان آماره ای جهت تعیین معنادار بودن روابط رگرسیونی استفاده شد. همچنین برای دو ایستگاه ۲ و ۵ به دلیل آن که تنها یک متغیر مستقل (بازتاب طیفی) با متغیر وابسته (غلظت رسوب معلق) همبستگی داشت از رگرسیون ساده

(تک متغیره) در نظر گرفته شد. در جدول های (۶)، (۷)، (۸) و (۹) تجزیه واریانس رگرسیون ایستگاه های مختلف و همچنین نمودارهای (۳)، (۴)، (۵) و (۶) نمودار پراکنش مقادیر مشاهداتی و اندازه گیری شده غلظت رسوبات معلق برای ایستگاه های مورد نظر ارائه شده است.

جدول ۶. تجزیه واریانس رگرسیون برای دوره مرطوب طره بخاخ (ده ساله- دوره مرطوب)

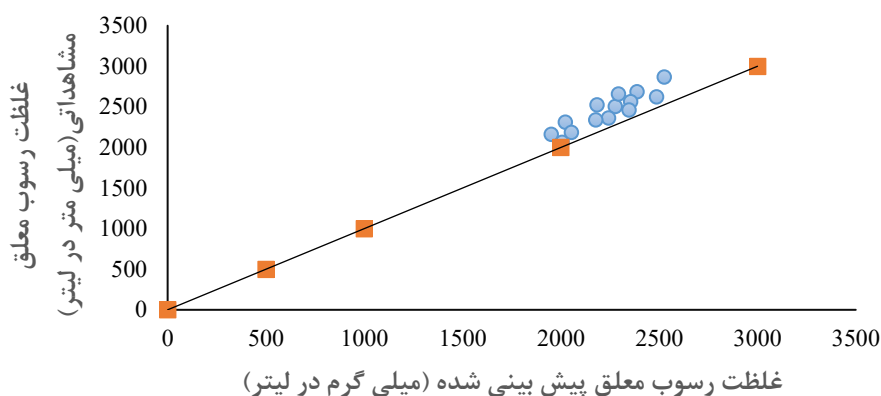
مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات	آماره F	ضریب معناداری	R ²	RMSE	MAPE
رگرسیون	۱۶۴۳۱۴۲	۱	۱۶۴۳۱۴۲	۱۰/۳۱	۰/۰۰۵	۰/۸۲	۳۵۱/۳۹	۱۱/۹۶
باقیمانده	۱۲۲۲۸۹۹۱	۷۶	۱۶۰۹۰۷/۸					
کل	۱۳۸۷۲۱۳۳	۷۷						



شکل ۳. نمودار پراکنش مشاهدات و نمودار رگرسیون های مورد نظر ایستگاه طره بخاخ (ده ساله- دوره مرطوب)

جدول ۷. تجزیه واریانس رگرسیون برای دوره مرطوب ایستگاه طره بخاخ (چهارده ساله طبقه بندی شده)

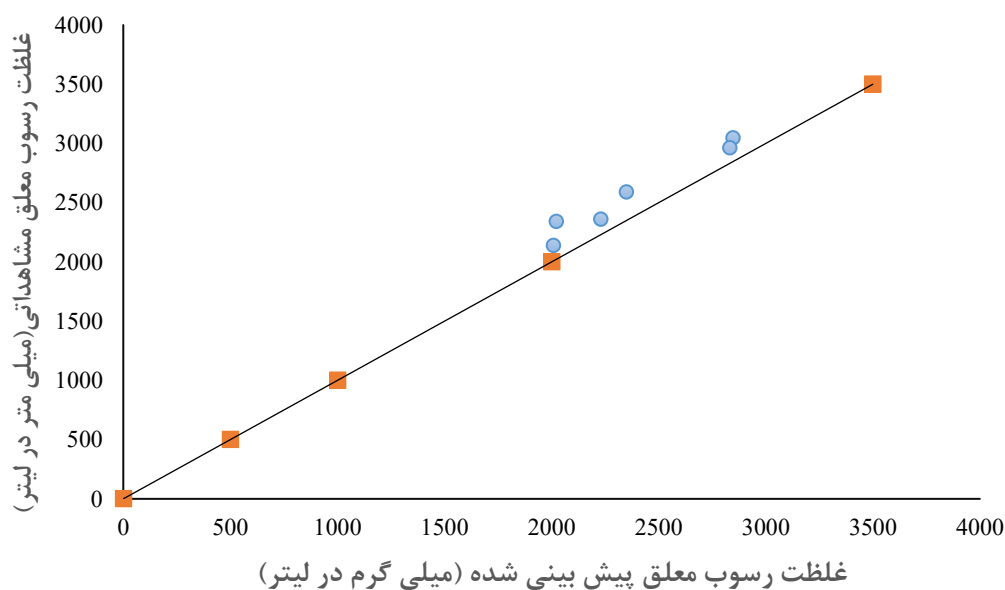
مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات	آماره F	ضریب معناداری	R ²	RMSE	MAPE
رگرسیون	۶۳۰۰۰۰	۱	۶۳۰۰۰۰	۱۹/۵۳	۰/۰۰۵	۰/۸۲	۲۳۶/۴۰	۸/۶۷
باقیمانده	۸۳۸۶۰۵/۳	۲۶	۳۲۲۵۴/۰۵					
کل	۱۴۶۸۶۰۵	۲۷						



شکل ۴. نمودار پراکنش مشاهدات و نمودار رگرسیون های موردنظر ایستگاه طره بخاخ (چهارده ساله طبقه بندی شده)

جدول ۸. تجزیه واریانس رگرسیون برای دوره مرطوب ایستگاه ۲

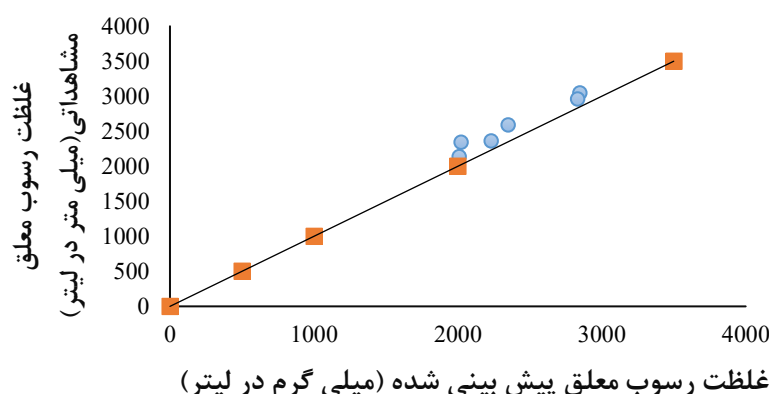
مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات	آماره F	ضریب معناداری	R^2	RMSE	MAPE
رگرسیون	۶۵۹۹۲۵۹	۱	۶۵۹۹۲۵۹	۵۱/۱۶	۰/۰۰۵	۰/۶۴	۱۰۹۴/۰۵	۴۱/۰۳
باقیمانده	۲۸۳۷۵۰۲	۲۲	۱۲۸۹۷۷۱۳					
کل	۹۴۳۶۷۶۱۲۳	۲۳						



شکل ۵. نمودار پراکنش مشاهدات و نمودار رگرسیون های موردنظر ایستگاه ۲

جدول ۹. تجزیه واریانس رگرسیون برای دوره مرطوب ایستگاه ۵

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات	آماره F	ضریب معناداری	R^2	RMSE	MAPE
رگرسیون	۲۶۷۵۲۱/۶	۱	۲۶۷۵۲۱/۶	۲/۱۶	۰/۰۰۵	۰/۸	۳۱۰/۴۸	۹/۶۶
باقیمانده	۳۴۷۹۲۱۷	۲۰	۱۷۳۹۶۰/۸					
کل	۲۷۴۶۷۳۸	۲۱						



شکل ۶. نمودار پراکنش مشاهدات و نمودار رگرسیون های موردنظر ایستگاه ۵

بحث

همانگونه که پیش از این بیان گردید در تحقیق حاضر هدف تخمین میزان غلظت رسوبات معلق رودخانه بهمنشیر با استفاده از روش سنجش ازدور بوده است. نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج طباطبایی و سلیمانی (۱۳۹۳) و کاظم زاده و همکاران (۲۰۱۳) که نشان دادند فصل مرطوب را می توان به عنوان دوره آماری مناسبی در نظر گرفت، مطابقت دارد. همینطور نتایج پائولستا و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد باند قرمز بهترین باند برای تخمین غلظت رسوبات معلق است که با نتایج بدست آمده در این مطالعه یکسان است. از طرف دیگر، نتایج مطالعه کاظم زاده و همکاران (۲۰۱۳) نشان داد استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و تصاویر سنجنده مادیس جهت نظارت بر رسوب معلق مناسب است که با نتایج بدست آمده در این مطالعه مطابقت دارد.

نتیجه گیری

نتایج حاصل از تحقیق حاضر را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- ✓ مقدار سطح معنی داری در هر دو آزمون در ایستگاه طره بخاخ (داده های سالانه) و ایستگاه های ۳ و ۵ (داده های روزانه، یک ساله) بیشتر از ۰/۰۵ و در ایستگاه طره بخاخ (داده های روزانه، ده ساله) و ایستگاه های ۱ و ۲ و ۴ (داده های روزانه، یک ساله) کمتر از ۰/۰۵ است.
- ✓ جهت تخمین غلظت رسوبات معلق بهینه ترین پارامتر باند قرمز و مادون قرمز است.
- ✓ سنجش ازدور نسبت به روش های سنتی از سرعت عمل و دقت بالاتری برخوردار است.
- ✓ نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان می دهد که تصاویر ماهواره ای سنجنده مادیس به دلیل توان تفکیک زمانی بالا (تصویربرداری روزانه) می تواند نقش مهمی در برآورد رسوب معلق رودخانه ای ایفا نماید.
- همبستگی معنی داری میان داده ها، برای تمامی فصول سال وجود نداشته ولی با محدود کردن آن ها به یک دوره مرطوب همبستگی بالاتری میان داده ها وجود خواهد داشت.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر و سازمان آب و برق خوزستان به جهت ایجاد شرایط تحقیق حاضر کمال قدردانی را دارند.

منابع

- حیات زاده، مهدی، چزگی، جواد، دستورانی، محمدتقی. (۱۳۹۴). ارزیابی برآورد رسوب با استفاده از روش های منحنی سنج و شبکه عصبی با تلفیق پارامترهای مورفولوژیکی حوزه (مطالعه موردی حوزه باغ عباس). نشریه علوم آب و خاک، ۱۹(۷۲)، ۲۱۷-۲۲۸. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3076-fa.html>
- زبیری، محمود، و مجد، علیرضا. (۱۳۹۲). آشنایی با فن سنجش از دور و کاربرد در منابع طبیعی. مؤسسه چاپ و انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ایران. <https://www.gisoom.com/book/1969329>
- صدری نسب، مسعود، فیاض محمدی، محمد، چگینی، وحید، و اشتیری لرکی، امیر. (۱۳۹۸). تأثیر پیچان رودها بر غلظت بار معلق و دامنه نوسانات سطح آب-مطالعه موردی رودخانه اروند. مجله علوم و فنون دریایی، ۱۸(۲)، ۷۶-۸۹. <https://doi.org/10.22113/jmst.2017.45982>
- طباطبایی، محمودرضا، سلیمانی، کریم، حبیب نژاد روشن، محمود، کاویان، عطاله. (۱۳۹۳). برآورد غلظت رسوب معلق روزانه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و خوشه بندی داده ها به روش نگاشت خود سازمان ده (مطالعه موردی: ایستگاه هیدرومتری سیرا - رودخانه کرج). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۵(۱۰)، ۹۸-۱۱۶. <https://jwmr.anru.ac.ir/article-1-416-fa.html>
- علوی پناه، سید کاظم. (۱۳۹۵). کاربرد سنجش از دور در علوم زمین (علوم خاک). مؤسسه چاپ و انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ایران. <https://www.gisoom.com/book/11279221>
- میرزاخانی، گلناز، قنبری عدیوی، الهام، و فتاحی، روح اله. (۱۴۰۰). تأثیر پوشش گیاهی صلب بر نرخ انتقال رسوب در سواحل. نشریه تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۲(۸)، ۲۱۵۵-۲۱۶۸. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.325233.668994>

References

- Ahadiyan, J., Abbasi Chenari, S., Azizi Nadian, H., Katopodis, C., Valipour, M., Sajjadi, S. M., & Omidvarinia, M. (2024). Sustainable systems engineering by CFD modeling of lateral intake flow with flexible gate operations to improve efficient water supply. *International Journal of Sediment Research*, 39(4), 629-642. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.05.003>
- Ahadiyan, J., Adeli, A., Bahmanpouri, F., & Gualtieri, C. (2018). Numerical Simulation of Flow and Scour in a Laboratory Junction. *Journal of Geosciences*, 8(5), 162. <https://doi.org/10.3390/geosciences8050162>
- Alavipanah, Seyed Kazem. (2016). Application of remote sensing in earth sciences (soil science). *University of Tehran Press*, Tehran, Iran. <https://www.gisoom.com/book/11279221/> [In Persian]
- Chelotti, G. B., Martinez, J. M., Roig, H. L., & Olivietti, D. (2019). Space-Temporal Analysis of Suspended Sediment in Low Concentration Reservoir by Remote Sensing. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 24. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180061>
- Ghafari, H., & Amerikhah, H. (2023). Simulation of daily suspended sediment of Roud-Zard River using different machine learning techniques. *Agricultural Engineering*, 46(1), 101-119. <https://doi.org/10.22055/AGEN.2023.44206.1677>
- Gupta, D., Hazarika, B. B., Berlin, M., Sharma, U.M. & Mishra, K. (2021). Artificial intelligence for suspended sediment load prediction: a review. *Environmental earth sciences*, 80(9), 346. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09625-3>
- Hayatzadeh, M., Chezgi, J., & Dastorani, M. (2015). Evaluation of Sediments Using Rating Curve and Artificial Neural Network Methods by Combining Morphological Parameters of Basin (Case Study: Bagh Abbas Basin). *J Water Soil Sci*. 19 (72), 217-228 <https://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3076-fa.html> [In Persian]
- Kang, W., Lee, K., & Kim, J. (2022). Prediction of Suspended Sediment Concentration Based on the Turbidity– Concentration Relationship Determined via Underwater Image Analysis. *Applied Sciences*, 12(12), 6125. <https://doi.org/10.3390/app12126125>
- Kazemzadeh, M. B., Ayyoubzadeh, S. A., & Moridnezhad, A. (2013). Remote sensing of temporal and spatial variations of suspended sediment concentration in Bahmanshir Estuary, Iran. *Indian J. Sci. Technol*, 6(8), 1-10. <https://dx.doi.org/10.17485/ijst/2013/v6i8.10>
- Maciel, D., Novo, E., Sander, De Carvalho, L., Barbosa, C., Flores Júnior, R., & de Lucia Lobo F. (2019). Retrieving total and inorganic suspended sediments in Amazon floodplain lakes: A multisensor approach. *Remote Sensing*, 11(15), 1744 . <https://doi.org/10.3390/rs11151744>
- Maleki, P., Ahadiyan, J., Aleixo, R., Azizi Nadian, H., Tamoradi, Z., Kashefipour, S. M., Schleiss, A. J., & Fathi Moghadam, M. (2025). Scour Control in a 90° Bend by Means of an Air Bubble Screen. *Water*, 17(18), 2693. <https://doi.org/10.3390/w17182693>
- Mirzakhani, G., Ghanbariadi, E., & Fattahinafchi, R. (2021). The Effect of Rigid Vegetation on the Sediment Transport Rate on the Coast. *Iranian Journal of Soil and water Research*. 52(8), 2155-2168. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.325233.668994> [In Persian]
- Parnak, F., Rahimpour, M & Qaderi, K. (2018). Experimental Investigation of the Effect of Rigid and Flexible Vegetation on Sediment Transport in Open Channels. *Journal of Water and Soil*, 32(2), 239-252. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.08.031>
- Paulista, R.S.D., De Almeida, F.T., De Souza, A.P., Hoshide, A.K., De Abreu, D.C., Da Silva Araujo, J.W., & Martim, C.C. (2023). Estimating Suspended Sediment Concentration Using Remote Sensing for the Teles Pires River, Brazil. *Sustainability*. 15(9), 7049. <https://doi.org/10.3390/su15097049>

- Reungoat, D., Leng, X., & Chanson, H. (2016). Hydrodynamic and sedimentary processes of tidal bores: Arcins Channel, Garonne River in August-September-October 2015. Hydraulic Model Report CH102/16, School of Civil Engineering, *The University of Queensland*, Brisbane, Australia. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:133414358>
- Sadrinasab, M., Fayaz Mohammadi, M., Chegini, V., & Ashtari larki, A. (2019). The impact of river meandering on water level fluctuation and suspended sediment concentration-Arvanrood case study. *Journal of Marine Science and Technology*, 18(2), 76-89. <https://doi.org/10.22113/jmst.2017.45982> [In Persian]
- Tabatabaei, M.R., Soleimani, K., Habibnejad Roshan, M., & Kavian, A. (2014). Estimation of daily suspended sediment concentration using artificial neural networks and data clustering by self-organizing map (case study: Sira hydrometric station—Karaj River). *Watershed Management Research*, 5(10), 98–116. <https://jwmr.sanru.ac.ir/article-1-416-fa.html> [In Persian]
- U.S. Environmental Protection Agency. (2003). *Developing water quality criteria for suspended and bedded sediments (SABS): Potential approaches*. Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, DC, United States. <https://coast.noaa.gov/data/czm/pollutioncontrol/media/Guidance/B5%20-%20EPA%202003%20Developing%20water%20quality%20criteria.pdf?>
- Vastila, K., Jarvela, J., & Koivusalo, H. (2016). Flow vegetation sediment interaction in a cohesive compound channel. *Journal Hydraul Engineering*, 142(1), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001058](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001058)
- Zhang, Y., Laib, X., Zhanga, L., Songc, K., Yaoa, X., Gub, L., & Pangd, C. (2020). The influence of aquatic vegetation on flow structure and sediment deposition: A field study in Dongting Lake, China. *Journal of Hydrology*, 584. 124644. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124644>
- Zobeiri, M., & Majd, A. (2013). Introduction to remote sensing techniques and applications in natural resources. *University of Tehran Press*, Tehran, Iran. <https://www.gisoom.com/book/1969329/> [In Persian]