



Journal of Environmental Studies

Vol. 46, No. 2, Summer 2020

Journal Homepage: www.Jes.ut.ac.ir

Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

Water Quality Parameters of Tajan River Presenting a Proposed Method Based on Blind Kriging and Linear Regression

Document Type
Research Paper

Rana Kasem, Babak Omidvar*, Abdolreza Karbassi, Amin Sarang

Received
December 6, 2019

Department of Environmental Engineering, School of Environment, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Accepted
March 26, 2020

DOI: [10.22059/JES.2020.294959.1007960](https://doi.org/10.22059/JES.2020.294959.1007960)

Abstract

The ordinary kriging method has been widely used for interpolation and prediction of water quality parameters. One of its major weaknesses is that it assumes the mean of modelled variables to be constant. In this study, a modified kriging method is proposed, which has an unknown mean function based on blind kriging. It uses linear regression instead of Bayesian technique. The proposed method and ordinary kriging were used to model the spatial variability of heavy metals and water quality index and their results were compared. 21 water quality parameters were measured at ten stations on Tajan River, North Iran. It can be noticed that the water quality index had low values near Sari city and its value was increased by moving away from the city showing an improvement in the quality of water. The results showed that the proposed method was the most accurate model for estimating most of the parameters. Its improvement was between 8% and 169%. For Iron concentration that was highly correlated with the spatial structure, the ordinary kriging performed better.

Keywords: Geostatistics, Ordinary kriging, Tajan river, Universal kriging, Water quality index

* Corresponding author

Email: bomidvar@ut.ac.ir

Expanded Abstract

Introduction

The application of kriging in the field of environment is focused on four main sections; mapping of precipitation, quantitative and qualitative status of groundwater, quantitative and qualitative evaluation of surface water and spatial forecasting of air quality.

Different types of kriging have been developed, but the most popular is ordinary kriging (OK). The most important disadvantages of OK is that it assumes the mean of modelled variables to be constant and the prediction is only based on the spatial structure of the studied points. In addition, the effect of important parameters does not take into account the estimation result, and in some cases the predicted values by OK may be out of the studied range. To overcome these problems, the universal kriging and blind kriging have been developed. Blind kriging (BK) is a more complete version of universal kriging and is based on Bayesian variable selection technique which is complicated and taken a lot of time to identify the unknown mean function.

In this research, due to the complexity of the Bayesian computation, we will combine the regression technique with blind kriging as the unknown mean function is defined by variable selection techniques being used in linear regression analysis such as forward selection, backward elimination, and step-wise regression. The residuals at the known points are calculated from the difference of the observed values and the values of the selected function. Then, the residual mean at the unknown point is solved by OK method.

Tajan River is one of the most important rivers in Mazandaran province. This permanent river is about 140 km long and originates from the mountainous area on the northern slopes of Alborz Range. Tajan River runs to the plains carrying the water from various tributaries in the mountains and then drains into the Caspian Sea. Dodangeh, Lajim, Chahardangeh and Zarem rivers are the most important branches of it. The area of Tajan River watershed in the Aldehil region (before entering the Caspian Sea) is 4700 km². There are different land uses including agriculture, aquaculture, dam construction and industrial activities around the river. The necessity to perform a systematic study of the river water quality is, therefore, a need and of prime importance.

The objective of this study is to evaluate water quality parameters in different sites on Tajan River. This study also attempts to propose a modified kriging method, in which the unknown mean function is defined by using linear regression in order to simplify the computations of blind kriging. The proposed method and ordinary kriging were used to model the spatial variability of heavy metals and water quality index and their results were compared. This case study may be counted as an initial effort to study the spatial variability of water quality parameters, which may have many practical implications.

Material and Methods

The water sampling took place in spring of 2018. Sampling sites were selected based on natural conditions and accessibility to Tajan River by taking into account natural and human impacts, including river sub-branches, changes in the polluting sources such as agricultural lands, residential centers, existing industries, etc. Sampling sites were named 1 to 10 from downstream (near the Caspian Sea) to upstream (the Shahidrajae Dam). Water samples were collected by Nansen bottles and transferred into 1-liter bottles previously cleaned by nitric acid (0.1 N). The temperature, pH, electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), dissolved oxygen (DO), redox potential (Eh), and turbidity (Turb) of each water sample were directly measured at the sampling points. The biochemical oxygen demand (BOD₅) was determined by the Winkler Azide method and chemical oxygen demand

(COD) by the dichromate reflux method. Phosphate (PO₄-P) and Nitrate nitrogen (NO₃-N) were analyzed by spectrophotometric method, and fecal coliform (Fcoli) were measured by multiple tube method.

For measuring metals, each water sample was filtered through Whatman filter (0.45 μm) and about 5 mL of HNO₃ (0.1 N) was added to the samples (until pH<2). Then, the samples were stored in the refrigerator at a temperature below 2°C until being transferred to the laboratory. The measured elements included Arsenic (As), Barium (Ba), Calcium (Ca), Cobalt (Co), Chromium (Cr), Copper (Cu), Iron (Fe), Nickel (Ni), Lead (Pb) and Thorium (Th). Metal measurements were done by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). Analysis of the samples was done based on the instructions recommended by (APHA, 2005).

All mathematical and statistical computations were made using Excel 2016, SPSS 22 and ArcGIS 4.10.1.

IRWQI is formed by nine selected water quality parameters namely as DO, BOD, COD, EC, PO₄-P, NO₃-N, Turb, Fcoli and pH. Its values range from 0 to 100 and are calculated as following:

$$IRWQI = \left(\prod_{i=1}^n I_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum w_i}} \tag{1}$$

where *n* is the number of parameters, *I_i* the index value for the *i*th parameter (obtained from special curves) and *w_i* is the weight of the *i*th parameter. IRWQI was calculated in all the sampling sites.

The ordinary kriging method (OK) is a linear unbiased geostatistical estimator and based on spatial correlation between sites. To indicate spatial correlation between the sampling sites, the empirical semivariogram is used as a function of distance between sampling sites. There are various models of the theoretical semivariogram in GIS system and one of these semivariograms must be selected based on the calculated errors. The prediction equation is a linear weighted combination of the form:

$$Z_{x_0} = \sum_{i=1}^n Z_{x_i} * W_i \tag{2}$$

where *Z_{x₀}*

 is the estimated value at the point *x₀*, *Z_{x_i}* and *W_i* represent the observed values and calculated weight at point *x_i*, and *n* is the number of observed values. Numerous studies have reported that conventional kriging is not suitable for phenomena that are highly nonlinear in nature. So, universal kriging and blind kriging have been suggested in other research. In universal kriging, a known mean function with unknown parameters is assumed. But blind kriging has an unknown mean function which is identified from experimental data using a Bayesian variable selection technique. One of its disadvantages is the timeliness and complexity of the Bayesian technique in comparison with simple kriging techniques.

In this research, due to the complexity of the Bayesian computation, we will combine the regression technique with blind kriging as the unknown mean function is defined by variable selection techniques being used in linear regression analysis. The residuals at the known points are calculated from the difference of the observed values and the values of the selected function. Then the residual mean at the unknown point is solved by ordinary. The regression equation combining with kriging blind is written as follows:

$$\hat{y}(x) = \underbrace{\mu_0 + \mu_1 v_1 + \mu_2 v_2 + \dots + \mu_m v_m}_{\text{the mean function (regression)}} + \underbrace{\omega(x) \varphi^{-1} (y - V_m \hat{\mu}_m)}_{\text{the residual function (ordinary kriging)}} \tag{3}$$

Where *μ₀*, *μ₁*, ... , *μ_m* are regression coefficients, *v₁*, *v₂*, ... , *v_m* are predictor parameters in regression, *V_m* is (n×n) matrix, *n* is the number of samples, *m* is the number of predictor parameters, *μ̂_m* is (m+1) regression coefficients vector. *V_m μ̂_m* is target value in *n* samples.

The proposed method and ordinary kriging method were applied to interpolate and predict IRWQI, Fe, Ni, Co, Th, Ba, As, Pb and Cr and their results were compared.

Results and Discussions

IRWQI had low values in midstream (sites 5, 6 and 7) near Sari City and its value increases by moving away from the city to show an improvement in the water quality status. This is due to the effect of anthropogenic pollutants in Sari city which are negatively associated with the water quality index. The average range of pH was from 7.6 to 8.11. pH values of water samples indicated that it was slightly alkaline. The relatively higher pH in water are probably due to the presence of pollution and eutrophication status. The mean values for Eh ranged from 142 mV to 201 mV. The water of Tajan River (excepting in site 1 near the sea) is non-saline.

The mean function for each variable (IRWQI, Fe, Ni, Co, Th, Ba, As, Pb and Cr) was created by multiple linear regression. The coefficient of determination (R^2) and adjusted R^2 were used to check regression model adequacy. t-Test and residual analysis were used in testing the regression coefficients verifying of the applicability of the regression model. The coefficient of determination (R^2), Coefficient of Variance (C.V.) and Root Mean Square Error (RMSE) were used to evaluate the results of the ordinary kriging and proposed method. The proposed method showed 8.8% improvement for Cr, 34 for Co, 56 for Pb, 62 for As, 44 for Ba and 169 for IRWQI. In addition, both methods for prediction of thorium and nickel were almost identical. While ordinary kriging performance was good in predicting iron and better than the proposed kriging, because for parameters whose correlation is strong with distance and spatial distribution, ordinary kriging method can work well in modeling them. The mean concentration of elements in the water followed the following pattern: Ca > Fe > Ba > Ni > As > Cr > Cu > Th > Co > pb. The mean concentration of elements (Co, Cr, Ni, Cu, pb and Th) demonstrate a similar pattern with a decreasing trend from the upstream to the downstream. This will strongly show a similar process and origin, while the mean concentration of Ba and As was increased at various sites from the upstream to the downstream.

Conclusions

This study was carried out to determine the water quality of Tajan River and appropriate method of estimation and interpolation of its qualitative parameters based on the combination of linear regression and blind kriging. Twenty one water quality parameters were measured at ten stations on Tajan River, an inflow to the Caspian Sea in Northern Iran.

Tajan water quality is in the middle and relatively poor class based on IRWQI. The parameters of dissolved oxygen, barium, biochemical oxygen demand and fecal coliform exceeded the guidelines of Iranian water quality standards for protection of aquatic ecosystems. Combining blind kriging and linear regression methods can be useful to improve the ordinary kriging model by reducing the error of prediction. The ordinary kriging is a powerful method for estimating parameters that are highly correlated with distance and spatial structure. One of the limitations of the proposed method is that the analyst must perform different steps in different software environments, both statistical software and GIS, and it requires an additional cost of measuring the parameters used to create the deterministic mean function (regression). Therefore, this limitation should be considered in future studies. The results of this study can be useful in formulating water quality monitoring program of Tajan river water.

مطالعه پارامترهای کیفی آب رودخانه تجن با ارائه یک روش پیشنهادی بر مبنای ترکیب کریجینگ کور و رگرسیون خطی

رنا قاسم، بابک امیدوار*، عبدالرضا کرباسی، امین سارنگ

گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، پردیس دانشکده‌گان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۱۷

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۱۵

چکیده

روش کریجینگ معمولی برای درون‌یابی و پیش‌بینی پارامترهای کیفی آب‌های سطحی به‌طور گسترده‌ای استفاده شده است. از مهم‌ترین نقاط ضعف آن، فرض ثابت بودن میانگین متغیرها است. در این تحقیق روشی بر مبنای کریجینگ کور پیشنهاد شده است. به‌طوری‌که از رگرسیون خطی به جای استنباط بیزی برای تعیین پارامترهای اثرگذار در مدل استفاده شد. عملکرد روش کریجینگ پیشنهادی و روش کریجینگ معمولی در تخمین عناصر آهن، نیکل، کبالت، کرم، توریم، باریم، آرسنیک، سرب و شاخص کیفیت آب مقایسه و ارزیابی شد. تعداد ۲۱ پارامتر کیفی در ده ایستگاه روی رودخانه تجن آنالیز شد. نتایج نشان داد که مقدار شاخص کیفیت آب در قسمت میان‌دست کم‌تر از ۴۰ بود. دقت روش کریجینگ پیشنهادی نسبت به کریجینگ معمولی برای تخمین اغلب پارامترها بیشتر بود. درصد بهبود نتایج آن به ۱۶۹ درصد برای تخمین شاخص کیفیت آب، ۶۲ درصد برای تخمین آرسنیک، ۵۶ درصد برای تخمین سرب، ۴۴ درصد برای تخمین باریم و ۸/۸ درصد برای تخمین کرم رسیده است. نتایج این تحقیق می‌تواند در تدوین برنامه پایش کیفیت آب رودخانه تجن مفید باشد.

کلیدواژه‌ها: رودخانه تجن، زمین‌آمار، شاخص کیفیت آب، کریجینگ جهانی، کریجینگ معمولی

سراغاز

دائمی است و کیفیت آن برای فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی مناسب است (سعیدی و همکاران، ۱۳۸۵). انواع فعالیت‌های کشاورزی تقریباً در تمامی سطوح حوضه هر جا که شرایط طبیعی شیب و خاک اجازه داده باشد، وجود دارد. مراکز جمعیتی و به‌ویژه شهر ساری و روستاهای پایین‌تر در مجاورت رودخانه قرار دارد. انواع فعالیت‌های صنعتی و کارخانه‌های مختلف و سایر صنایع خدماتی در حوضه رودخانه تجن وجود دارند. با توجه به اهمیت رودخانه تجن در تأمین آب شرب و کشاورزی

رودخانه تجن از مهم‌ترین رودخانه‌های استان مازندران است. این رود به طول حدود ۱۴۰ کیلومتر از ناحیه کوهستانی هزار جریب در دامنه‌های شمالی رشته کوه البرز سرچشمه می‌گیرد و با گذشتن از شرق شهر ساری، در نزدیک آبادی خزرآباد (در حدود ۲۶ کیلومتری شمال ساری) در ۲۵ متری پایین‌تر از سطح آب‌های آزاد به دریای خزر می‌ریزد. مساحت حوضه آبریز این رودخانه حدود ۴۷۰۰ کیلومترمربع است. این رودخانه دارای آب

Email: bomidvar@ut.ac.ir

* نویسنده مسئول:

DOI: [10.22059/JES.2020.294959.1007960](https://doi.org/10.22059/JES.2020.294959.1007960)

DOR: [20.1001.1.10258620.1399.46.2.7.8](https://doi.org/20.1001.1.10258620.1399.46.2.7.8)

روش کوکریجینگ برای تخمین و تهیه نقشه پراکنش پارامترهای مذکور استفاده شد.

ناس^۳ از روش کریجینگ برای ارائه خلاصه‌ای از کیفیت آب‌های زیرزمینی و بررسی توزیع مکانی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی در منطقه Konya در ترکیه استفاده کرد (Nas, 2009). چن و همکاران (۲۰۱۶) روش کریجینگ را در محیط نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای بهینه‌سازی موقعیت ایستگاه‌های پایش موجود در خلیج کوآنژو^۱ در چین به کار برده‌اند. باقری و همکاران (۱۳۹۶) نقشه‌های پراکنندگی پارامترهای کیفی آب سطحی در دشت نیشابور را با استفاده از روش کریجینگ ترسیم کردند. شارما^۲ و همکاران (۲۰۱۷) تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای رودخانه یامونا^۴ در هندوستان را توسط شاخص کیفیت آب و روش کریجینگ بررسی کردند.

انواع مختلفی از کریجینگ توسعه شده است ولی معروف‌ترین آن‌ها، کریجینگ معمولی^۵ (OK) است. فرض ثابت بودن میانگین متغیرها و پیش‌بینی بر اساس ساختار فضایی نقاط مورد مطالعه مهم‌ترین نقطه ضعف OK است. علاوه بر آن، تأثیر پارامترهای مهم اثرگذار بر نتیجه تخمین را در نظر نمی‌گیرد و در بعضی حالات ممکن است مقادیر پیش‌بینی شده توسط کریجینگ معمولی خارج از دامنه باشند به طوری که مقادیر پیش‌بینی شده منفی به دست می‌آید (Mukhopadhyay et al., 2017; Montero and Mateu, 2015). برای غلبه بر این مشکلات، کریجینگ جهانی^۶ و کریجینگ کور^۷ توسعه داده شده‌اند. کریجینگ جهانی مبتنی بر ایجاد روند داده‌ها به منظور رسیدن به بیشترین دقت تخمین است به طوری که میانگین به صورت تابع چند جمله‌ای در نظر گرفته می‌شود. ولی شاید پارامترهای مشمول در تابع میانگین اثرگذار نباشند و این یکی از مهم‌ترین نقاط ضعف کریجینگ جهانی محسوب می‌شود. در کریجینگ

ساکنین اطراف آن و همچنین تخلیه آلاینده‌های متعدد به آن، ارزیابی کیفی آب این رودخانه و مشخص کردن منابع آلاینده آن مورد توجه محققان بود. زاده ساروی و واردی (۱۳۸۱) کیفیت آب تجن را بر اساس شاخص کیفیت آب بنیاد ملی بهداشت آمریکا در چهار ایستگاه بررسی کردند. سعیدی و همکاران (۱۳۸۵) غلظت فلزات سنگین در فصول مختلف را در آب تجن اندازه‌گیری کردند. آبکنار و همکاران (۱۳۹۳) غلظت بقایای سموم کشاورزی ارگانوکلره را در سه ایستگاه اندازه‌گیری کردند. یوسفی و همکاران (۱۳۹۴) کیفیت آب برای مصرف کشاورزی در ایستگاه کردخیل را بررسی کردند.

بررسی تغییرات مکانی پارامترهای کیفی آب یکی از موضوعات مهم برای استفاده بهینه از منابع آب است. روش‌های مختلفی برای برآورد و تخمین متغیرها و ایجاد توزیع مکانی آن وجود دارد. در سالیان اخیر تحقیقات زیادی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار انجام شده است. برتری روش‌های زمین‌آمار نسبت به آمار کلاسیک این است که ساختار فضایی بین داده‌ها در آن در نظر گرفته می‌شود. کریجینگ از معروف‌ترین و پرکاربردترین این روش‌هاست که امروزه کاربرد آن در زمینه‌های گوناگون اثبات شده است (Oliver and Webster, 2015; Yang et al., 2018). کاربرد کریجینگ در حوزه محیط‌زیست به چهار بخش عمده تهیه نقشه بارش، وضعیت کمی و کیفی آب زیرزمینی، ارزیابی کمی و کیفی آب‌های سطحی و پیش‌بینی مکانی کیفیت هوا معطوف شده است. در یک مطالعه در ترکیه از روش کریجینگ معمولی به منظور ترسیم منحنی‌های هم‌غلظت ذرات معلق هوا در شهر ارزروم بر اساس اطلاعات موجود در شش ایستگاه کیفیت هوا استفاده شده است (Hanefi Bayraktar, 2005). مطالعه احمدالی و همکاران (۱۳۸۷) با هدف بررسی و تعیین پراکنش مکانی شوری و اسیدیته در عمق‌های مختلف خاک سطحی در منطقه بوکان انجام گرفت. برای این منظور

دست (در نزدیکی دریای مازندران) تا ۱۰ در بالادست (سد شهید رجایی) نام‌گذاری شده‌اند. موقعیت نقاط نمونه‌برداری در شکل (۱) نشان داده شده است. نمونه‌برداری در بهار سال ۱۳۹۶ انجام شد. ایستگاه‌های ۱، ۲ و ۳ در انتهای حوضه رودخانه تجن قرار داشته و با توجه به تعدد منابع آلاینده بالادست آن، این محل از رودخانه نیازمند پایش است. در بالا دست، ایستگاه ۴ منابع آلاینده متعددی از قبیل نقاط جمعیتی و کارخانه آنتی‌بیوتیک وجود دارد. موقعیت ایستگاه ۵ بعد از تصفیه خانه فاضلاب شهری و کارخانه فرآورده‌های لبنی پایین دست شهر ساری است. ایستگاه ۶ تقریباً در خروجی رودخانه از شهر ساری است و نزدیک آن مکان‌های گاوداری وجود دارد. ایستگاه ۷ زیر پل تجن در وسط شهر ساری است. ایستگاه ۸ در موقعیت اختلاط دو شاخه بسیار مهم از رودخانه تجن (زارم رود و شاخه اصلی تجن) و در محل وجود صنایع کاغذ و چوب و کارگاه‌های سنگ و شن قرار دارد. پایش این نقطه از رودخانه از اهمیت بالایی برخوردار است. ایستگاه ۹ بعد از ورود دو شاخه مهم (چهار دانگه و لاجیم) به شاخه اصلی رودخانه تجن است. ایستگاه ۱۰ بعد از مجتمع تفریحی سد شهید رجایی قرار دارد.

نمونه‌برداری و آنالیز برای ۲۱ پارامتر فیزیکی و شیمیایی شامل دما، pH، هدایت الکتریکی (EC)، اکسیژن محلول (DO)، کل جامدات محلول (TDS)، پتانسیل ردکس (Eh) و کدورت (Tur)، اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی ۵ روزه (BOD₅)، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD)، فسفات (PO₄)، نیترات (N-NO₃)، کلیفرم مدفوعی (F.coli)، آرسنیک (As)، کلسیم (Ca)، کبالت (Co)، کروم (Cr)، مس (Cu)، آهن (Fe)، نیکل (Ni)، سرب (Pb) و توریم (Th) در ایستگاه‌های مطالعاتی انجام شد.

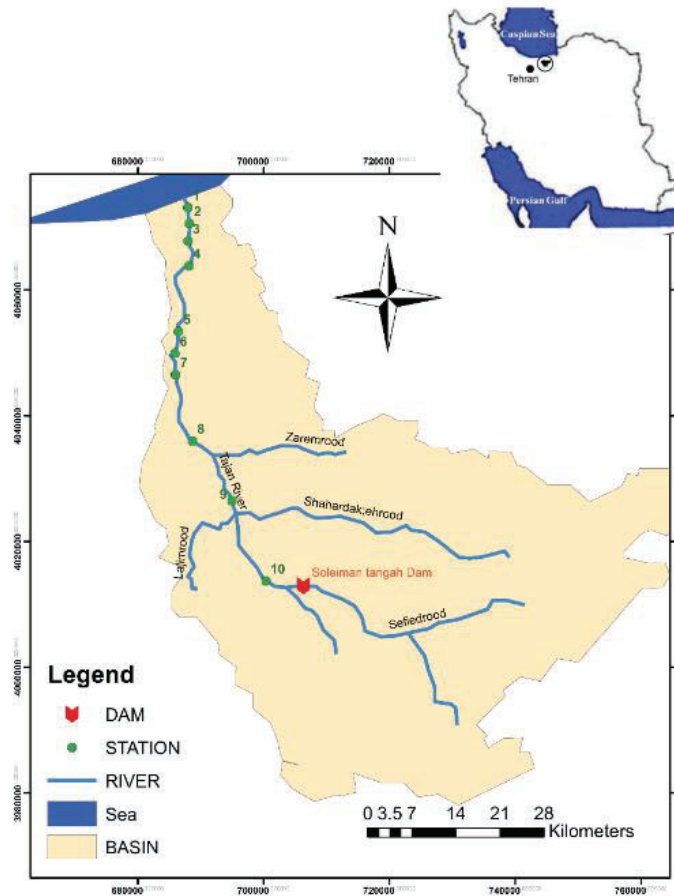
پس از تعیین محل ایستگاه‌های نمونه‌برداری در امتداد رودخانه، نمونه‌های آب با بطری‌های نارسن جمع‌آوری شد و به بطری‌های یک لیتری که با اسید نیتریک (۰/۱ نرمال) و بعد با آب مقطر شستشو داده شده بودند، انتقال یافت.

کور از روش استنباط بیزی برای انتخاب پارامترهای اثرگذار در تابع میانگین استفاده می‌شود. روش استنباط بیزی زمان بر است و محاسبات را پیچیده‌تر می‌کند. ترکیب رگرسیون کریجینگ در علوم آب و خاک، مطالعه‌های جنگلداری و هواشناسی برای ترسیم نقشه‌های توزیع مکانی و پیش‌بینی پارامترها استفاده شده است و نتایج خوبی داده است (واعظی و همکاران، ۱۳۹۶؛ تقی‌زاده مهرجردی و همکاران، ۱۳۹۴؛ احدی و همکاران، ۱۳۹۴)

با توجه به اهمیت رودخانه تجن و با استفاده از مزایای روش کریجینگ کور، اهداف این تحقیق شامل ارزیابی کیفیت آب رودخانه بر اساس شاخص کیفیت آب سطحی ایران است. به این منظور روشی ترکیبی از کریجینگ کور و رگرسیون خطی به منظور بررسی توزیع مکانی و تخمین پارامترهای کیفی رودخانه تجن پیشنهاد شده است. در ادامه نتایج تخمین پارامترهای کیفی توسط روش کریجینگ معمولی و روش کریجینگ پیشنهادی مقایسه و بررسی شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق از ایستگاه سد سلیمان تنگه در بالا دست تا پایین دست رودخانه اصلی تجن است که به دریای مازندران می‌ریزد. برای انجام نمونه‌برداری نخست نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، هیدرولوژی، و کاربری اراضی منطقه و راه‌های دسترسی محدوده مورد مطالعه تهیه و بررسی شد. سپس بازدید میدانی از رودخانه تجن در بهار سال ۱۳۹۶ انجام شد. با توجه به شرایط طبیعی و امکان دسترسی به رودخانه و در نظر داشتن عوارض طبیعی و انسانی، از جمله شاخه‌های فرعی رودخانه، تغییر ساختارهای زمین‌شناسی و منابع آلاینده شامل اراضی کشاورزی، استقرار مراکز مسکونی و مراکز صنعتی نقاط نمونه‌برداری انتخاب شد. موقعیت و مختصات این نقاط از طریق موقعیت‌یاب جهانی GPS روی نقشه مشخص شد. نقاط نمونه‌برداری از ۱ در پایین



شکل ۱. موقعیت نقاط نمونه برداری - رودخانه تجن

مورد استفاده برای آنالیز نمونه‌ها در جدول (۲) آمده است. در مرحله بعد، کیفیت آب رودخانه تجن از طریق محاسبه شاخص پارامترهای متداول کیفیت منابع آب سطحی ایران (IRWQI) ارزیابی شده است. این شاخص با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$IRWQI = \left(\prod_{i=1}^n I_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum w_i}} \quad (1)$$

که در آن n تعداد پارامترها، I_i مقدار شاخص برای پارامتر i ام از منحنی رتبه‌بندی، w_i وزن پارامتر i ام است. برای تعیین معادل توصیفی شاخص، از جدول زیر استفاده شود.

دما، pH، هدایت الکتریکی (EC)، اکسیژن محلول (DO)، کل جامدات محلول (TDS)، پتانسیل ردکس (Eh) و کدورت (NTU) از هر نمونه آب در ایستگاه‌های نمونه‌گیری توسط دستگاه پرتابل ملتی پارامتر اندازه‌گیری شد. بقیه پارامترها قبل از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، آماده‌سازی آن با مواد شیمیایی مورد نیاز انجام شد. سپس در شرایط مناسب دما و در حداقل زمان ممکن به آزمایشگاه منتقل شد. روش آماده‌سازی نمونه‌ها و اندازه‌گیری آن بر اساس دستورالعمل ذکر شده در استاندارد متد (APHA, 2005) انجام شد. روش‌ها و دستگاه‌های

جدول ۱. معادل توصیفی شاخص پارامترهای متداول کیفیت منابع آب سطحی ایران (IRWQI)

| معادل توصیفی | خیلی بد | بد | نسبتاً بد | متوسط | نسبتاً خوب | خوب | بسیار خوب |
|--------------|------------|-----------|-----------|---------|------------|-----------|-------------|
| مقدار شاخص | کمتر از ۱۵ | ۱۵ - ۲۹/۹ | ۳۰ - ۴۴/۹ | ۴۵ - ۵۵ | ۵۵/۱ - ۷۰ | ۷۰/۱ - ۸۵ | بیشتر از ۸۵ |

جدول ۲. پارامترهای اندازه‌گیری شده در رودخانه تجن، واحدها و تکنیک‌های آنالیز

| پارامتر | اختصار | واحد اندازه‌گیری | روش / دستگاه اندازه‌گیری |
|------------------------------------|--------|------------------|----------------------------|
| پتانسیل اکسید | Eh | mV | |
| پ‌هاش | pH | واحد استاندارد | |
| اکسیژن محلول | DO | mg/L | دستگاه پرتابل ملتی پارامتر |
| هدایت الکتریکی | EC | µs/cm | |
| مواد جامد محلول | TDS | mg/L | |
| فسفات | TP | mg/L | اسپکتروفتومتر |
| نیتрат | TN | mg/L | |
| اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی ۵ روزه | BOD5 | mg/L | Winkler azide method |
| اکسیژن مورد نیاز شیمیایی | COD | mg/L | Dichromate reflex method |
| کلیفرم مدفوعی | F.coli | MPN/100ml | تکنیک لوله چندگانه |
| کرم | Cr | µg/L | |
| کبالت | Co | µg/L | |
| آهن | Fe | µg/L | |
| نیکل | Ni | µg/L | |
| آرسنیک | As | µg/L | طیف‌سنجی پلاسمای جفت شده |
| توریم | Th | µg/L | القایی (ICP-OES) |
| باریم | Ba | µg/L | |
| مس | Cu | µg/L | |
| سرب | Pb | µg/L | |
| کلسیم | Ca | mg/l | Flame AAS |

است. که به‌عنوان روش درون‌یابی در زمینه‌های مختلف معرفی شده است (Krige, 1951). و سپس توسعه داده شده است (Matheron, 1963; Cressie, 1990). این روش برای پیش‌بینی مقدار مجهول متغیر Z در نقطه X_0 بر اساس مقدار معلوم متغیر در n نقطه و ایجاد بهترین تخمین‌گر ناریب (LUP) توسعه داده شده است (Montero and Mateu, 2015; Stein, 2012).

امکان محاسبه واریانس خطا و ترسیم نقشه خطاها یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد درون‌یابی کریجینگ معمولی است. ساختار فضایی و همبستگی مکانی اطلاعات، توسط نیمه پراش‌نگار توصیف می‌شود، وزن‌های کریجینگ بر اساس رفتار تابع نیمه پراش‌نگار محاسبه می‌شوند و در نتیجه این روش قابل اعتمادتر و انعطاف‌پذیرتر نسبت به بقیه روش‌های درون‌یابی است (Oliver and Webster, 2015).

سپس، به‌منظور تعیین توزیع مکانی و انجام مکان‌یابی، یک روش بر مبنای ترکیب رگرسیون خطی با کریجینگ کور پیشنهاد شده است. توابع رگرسیونی که به دست آمده برای پارامترهای مورد مطالعه از لحاظ فرضیه‌های رگرسیون خطی (توزیع نرمال باقیمانده‌ها، تصادفی بودن باقیمانده‌ها و ثابت بودن واریانس) و معنادار مدل‌ها چک شد. مقایسه نتایج این روش با کریجینگ معمولی توسط معیارهای آماری مختلف انجام شد و بهترین مدل برای درون‌یابی پارامترهای کیفی آب رودخانه تجن تعیین شد. تمام محاسبات در این تحقیق در محیط نرم‌افزارهای Excel 2016، SPSS 22 و GIS 10.4.1 انجام شده است.

روش کریجینگ معمولی (OK) ۵ و کریجینگ کور (BK) ۶

روش کریجینگ معمولی، روش برآورد زمین آماری

φ^{-1} ماتریس با بعد $(n \times n)$ شامل عناصر $\omega(x_i - x_j)$ و $\hat{\mu}_0 = \mathbf{1} \varphi^{-1} y /$ هستند (Joseph et al., 2008).

تخمین کریجینگ معمولی در رابطه (۶) ساده است ولی در حالی که پدیده مورد مطالعه دارای روندهای قوی و زیاد باشند، نتایج آن ضعیف است و توانایی تفسیر عوامل اثرگذار را ندارد. لذا روش کریجینگ کور توسط Joseph و همکاران (۲۰۰۸) توسعه داده شده است.

کریجینگ کور یک نسخه کامل‌تر از کریجینگ جهانی است که در آن علاوه بر مؤلفه همبستگی مکانی بین نقاط، از تابع تخمین بیرونی (معمولاً چند جمله‌ای) به عنوان تابع قطعی و تابع تصادفی با میانگین معلوم و ثابت ترکیب می‌شود. ایده اصلی این نوع از کریجینگ این است که تابع قطعی استفاده شده بیشترین واریانس (روند کلی) داده‌های ورودی را توصیف می‌کند، سپس باقیمانده‌ها توسط فرآیند گوسی درونیابی می‌شود.

تفاوت کریجینگ کور با کریجینگ جهانی در تابع روند است. در رابطه‌های (۳) و (۴) توابع روند $v_i(x)$ معلوم هستند ولی در کریجینگ کور مجهول‌اند و از اینجا اسم روش کور اقتباس شده است. رابطه کریجینگ کور به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$Y(x) = v(x) \mu_m + Z(x) \quad (۸)$$

که در آن $v(x) = (1, v_1, \dots, v_m)$ و $\mu_m = (\mu_0, \mu_1, \dots, \mu_m)'$ نامعلوم هستند. قسمت تابع تصادفی $Z(x)$ در کریجینگ جهانی توصیف شده است.

کریجینگ پیشنهادی

در کریجینگ کور (BK)، تعیین $v(x) \mu_m$ مورد نظر است. تکنیک‌های مختلفی مانند روش استنباط بیزی برای نیل به این هدف وجود دارد. تحقیقات قبلی نشان داده است که استفاده از روش بیزی در BK نتایج رضایت‌بخش می‌دهد. یکی از معایب آن زمان‌بر بودن استنباط بیزی علاوه بر پیچیدگی مراحل انجام محاسبات آماری نسبت به تکنیک‌های ساده کریجینگ است. لذا

$$Z_{x_0} = \sum_{i=1}^n Z_{x_i} * W_i \quad (۲)$$

که در آن Z_{x_i} و W_i به ترتیب مقدار مشاهده شده و وزن محاسبه شده متغیر مورد مطالعه Z در نقطه x_i است.

در تحقیقات متعدد گزارش شده است که برای پدیده‌هایی که در طبیعت بسیار غیر خطی هستند، روش کریجینگ معمولی مناسب نیستند. لذا به منظور رسیدگی به این موضوع، کریجینگ جهانی و کریجینگ کور در تحقیقات دیگری پیشنهاد شده است. (Tonkin and Larson, 2002; Matias and Gonzalez-Manteiga, 2006; Couckuyt et al., 2012; Mukhopadhyay et al., 2017 کریجینگ جهانی به وسیله رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$Y(x) = \mu(x) + Z(x) \quad (۳)$$

$\mu(x)$ یک تابع قطعی است به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\mu(x) = \sum_{i=1}^m \mu_i v_i(x) \quad (۴)$$

که در آن v_i ها توابع معلوم روند (معمولاً $v_0 = 1$) و μ_i ها پارامترهای نامعلوم هستند. $Z(x)$ تابع تصادفی با میانگین ثابت و کوواریانس $\sigma^2 \omega$ است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$cov\{Y(x+h), Y(x)\} = \sigma^2 \omega(h) \quad (۵)$$

که در آن $\omega(h)$ تابع همبستگی است که در تعریف آن $\omega(0) = 1, \omega(-h) = \omega(h)$ فاصله است.

با توجه به اینکه در واقعیت روندها به ندرت معلوم هستند، از حالت خاص زیر که به کریجینگ معمولی (OK) معروف است، استفاده می‌شود.

$$Y(x) = \mu_0 + Z(x) \quad (۶)$$

که در آن μ_0 میانگین ثابت است. با جایگزینی مقدار تابع تصادفی $Z(x)$ در رابطه (۳) و با فرض n نقطه دارای مقدار تابع $\{x_1, \dots, x_n\}$

$$y = (y_1, \dots, y_n)$$

رابطه تخمین $\hat{y}(x)$ توسط

$$\hat{y}(x) = \hat{\mu}_0 + \omega(x) \varphi^{-1} (y - \hat{\mu}_0 \mathbf{1}) \quad (۷)$$

که در آن $\mathbf{1}$ یک بردار واحد با طول n است $\omega(x) =$

آب از لحاظ pH برای فعالیت‌های تفریحی و شیلات مناسب است. دامنه تغییرات پتانسیل رد اکس بین ۱۴۲ و ۲۰۱ میلی ولت بود. بازه تغییرات هدایت الکتریکی EC بین ۵۸۲ تا ۱۸۳۸۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر است که با ورود رودخانه به جلگه‌ها در پایین دست (ایستگاه‌های ۳، ۲ و ۱) افزایش یافته است. تغییرات مقادیر کل جامدات محلول TDS با تغییرات هدایت الکتریکی مشابه است. در مقایسه با دستورالعمل‌های سازمان حفاظت از محیط‌زیست ایران، مشاهده شد که آب رودخانه تجن متعلق به کلاس خیلی خوب در نقاط بالادست و کلاس خوب در نقاط پایین دست است. تأثیر دریا در محل نقطه ۱ مشخص است زیرا مقدار TDS بسیار بالا (۹۱۸۵ میلی گرم در لیتر) بود و آب این منطقه در کلاس فقیر قرار گرفت. پارامترهای اکسیژن محلول کمتر از حد مجاز و پارامترهای اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی و کلیفرم مدفوعی بیشتر از حد مجاز در استاندارد کیفیت آب ایران برای حفاظت اکوسیستم‌های آبی بودند.

همان‌طور که در جدول (۳) بیان شده است، غلظت فلزات سنگین در آب رودخانه تجن اندازه‌گیری شده در این تحقیق از الگوی زیر پیروی می‌کند:

$$Ca > Fe > Ba > Ni > As > Cr > Cu > Th > Co > Pb$$

. میانگین غلظت باریم از حد مجاز استانداردهای ایران برای آب آشامیدنی و آبیاری، به‌ویژه در نقاط بالادست (۸، ۹ و ۱۰) تجاوز کرده است در حالیکه غلظت بقیه عناصر مورد مطالعه در حد مجاز بودند.

نتایج پهنه‌بندی کیفیت آب رودخانه تجن بر اساس شاخص کیفیت آب سطحی ایران در شکل (۲) نشان می‌دهد که بدترین وضعیت کیفیت آب در قسمت میان‌دست رودخانه است. این به علت عبور رودخانه تجن از شهر ساری و ورود فاضلاب‌های مختلف به آب رودخانه است. نتایج این تحقیق با تحقیقات قبلی مشابه بوده است. در تحقیق Azami و همکاران (۲۰۱۵) گزارش شده است که شش شاخص عمومی و بیولوژیکی برای بررسی کیفیت آب تجن نشان دادند که کیفیت آب از بالا دست به پایین دست کاهش می‌یابد و بدترین وضعیت در

به دلیل پیچیدگی محاسبات روش بیزی، در مقاله حاضر پارامترهای مؤثر در کریجینگ کور توسط روش ساده‌تری ایجاد می‌شود. در این تحقیق، ایجاد تابع میانگین قطعی در رابطه کریجینگ کور توسط تکنیک‌های مختلف رگرسیون مانند روش انتخاب پارامترها گام به گام و پیش‌رو پیشنهاد می‌شود. در روش رگرسیون، پیش‌بینی‌ها بر اساس مدل کردن رابطه بین پارامتر وابسته و پارامترهای کمکی مستقل در نقاط مشاهده، انجام می‌شوند. باقیمانده‌ها در نقاط معلوم از تفاوت مقدار مشاهده شده در نقاط معلوم و مقدار تابع روند انتخاب شده محاسبه می‌شوند. سپس میانگین باقیمانده در نقطه مجهول با استفاده از روش کریجینگ معمولی با میانگین معلوم و ثابت حل می‌شوند.

معادله ترکیب رگرسیون با کریجینگ کور به شکل زیر نوشته می‌شود.

$$\hat{y}(x) = \underbrace{\mu_0 + \mu_1 \mu_0 + \mu_2 v_2 + \dots + \mu_m v_m}_{\text{قسمت کریجینگ معمولی تابع، تصادفی}} + \underbrace{\omega(x) \varphi^{-1}(y - V_m \hat{\mu}_m)}_{\text{قسمت تابع میانگین قطعی (رگرسیون)}}$$

که در آن $\mu_0, \mu_1, \dots, \mu_m$ ضرایب رگرسیون، v_1, v_2, \dots, v_m مقادیر پارامترهای کمکی رگرسیون، V_m ماتریسی با بعد $n \times (m+1)$ که در آن n تعداد نمونه‌ها و m تعداد متغیرهای کمکی و $\hat{\mu}_m$ بردار ضرایب رگرسیون با بعد $(m+1)$ می‌باشد. $V_m \hat{\mu}_m$ مقدار رگرسیون پارامتر مورد تخمین در n نمونه را به دست می‌آورد.

نتایج

پهنه‌بندی کیفیت آب رودخانه تجن بر اساس شاخص کیفیت آب سطحی ایران

مقادیر مشاهده شده پارامترهای مورد مطالعه در این تحقیق در جدول‌های (۳) الف و (۳) ب ارائه شده است. مقدار pH نمونه‌های آب از ۷/۶۷ تا ۸/۱۱ تغییر کرد و این نشانه قلیایی بودن آب رودخانه و ظرفیت بالای بافر آن است. مقادیر بالای آن بعلا و ورود فاضلاب شهری و کشاورزی است. کیفیت

قسمت عبور شهر ساری ثبت شده است.

به منظور مقایسه عملکرد مدل کریجینگ معمولی و کریجینگ پیشنهادی، پارامترهای (Ba, As, Pb, Th, Fe, Cr, Ni, Co) اندازه‌گیری شده در تجن و شاخص کیفیت آب محاسبه شده برای تجن با این دو روش کریجینگ تخمین زده شد. برای اعمال کریجینگ معمولی یک نکته خیلی مهم وجود دارد که انتخاب نوع نیمه پراش‌نگار یا واریوگرام^۲ برای محاسبه وزن‌ها در کریجینگ مؤثر است. واریوگرام بر اساس مدل‌های مختلف در محیط نرم‌افزار GIS مورد آزمون قرار گرفت و ملاحظه شد که بهترین مدل برای برازش و تخمین متغیرهای مورد مطالعه مدل



شکل ۲ تغییرات شاخص IRWQIsc در طول رودخانه تجن

نتایج کریجینگ معمولی و کریجینگ پیشنهادی و مقایسه بین آن‌ها

جدول ۳ الف. مقادیر مشاهدات پارامترهای شاخص کیفی آب سطحی ایران در ده ایستگاه روی رودخانه تجن

| Station | استاندارد pH | EC (µs/cm) | Turb (NTU) | N-NO3 (mg/l) | PO4 (mg/l) | BOD ₅ (mg/l) | COD (mg/l) | DO (mg/l) | F-Coli (MPN/100 ml) |
|---------|--------------|------------|------------|--------------|------------|-------------------------|------------|-----------|---------------------|
| ۱ | 7.67 | 2190 | 10 | 0.140 | 0.12 | 8 | 21 | 5.30 | 2400 |
| ۲ | 8.01 | 2160 | 26 | 0.200 | 0.15 | 3 | 8 | 6.70 | 2400 |
| ۳ | 7.87 | 606 | 291 | 0.501 | 0.24 | 14 | 37 | 5.09 | 1675 |
| ۴ | 8.11 | 687 | 43 | 0.110 | 0.60 | 14 | 35 | 5.30 | 2400 |
| ۵ | 8.04 | 599 | 18 | 0.315 | 0.13 | 21 | 46 | 5.2 | 2400 |
| ۶ | 8.11 | 582 | 56 | 0.027 | 0.235 | 26 | 57 | 4.9 | 1100 |
| ۷ | 8.1 | 656 | 44 | 0.215 | 0.46 | 17 | 44 | 4.5 | 1100 |
| ۸ | 8.1 | 550 | 130 | 0.325 | 0.150 | 13 | 40 | 5.3 | 75 |
| ۹ | 8.09 | 532 | 89 | 0.005 | 0.005 | 10 | 24 | 5.9 | 1100 |
| ۱۰ | 7.98 | 510 | 167 | 0.068 | 0.14 | 8 | 22 | 6.30 | 1089 |
| وزن | 0.051 | 0.096 | 0.062 | 0.108 | 0.087 | 0.117 | 0.093 | 0.097 | 0.140 |
| حداکثر | 8.11 | 2190 | 291 | 0.501 | 0.60 | 26 | 57 | 6.70 | 2400 |
| حداقل | 7.67 | 510 | 10 | 0.005 | 0.01 | 3 | 8 | 4.50 | 75 |
| میانگین | 8.008 | 907.2 | 95 | 0.191 | 0.22 | 13 | 33 | 5.45 | 1574 |

صورت گام به گام و پیش‌رو تعیین شد. سپس قسمت تابع تصادفی با روش کریجینگ معمولی حل شده است. معادلات کریجینگ پیشنهادی برای پارامترهای مختلف مورد مطالعه در جدول (۴) ارائه شده است. مقایسه نتایج کریجینگ پیشنهادی و کریجینگ معمولی بر اساس جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب واریانس (C.V.)

گوسی بود. سپس بر اساس آن، نتایج مدل کریجینگ معمولی به دست آمده است.

برای اعمال روش کریجینگ پیشنهادی، پارامترهای تابع میانگین قطعی (تأثیرگذار بر نتیجه تخمین) توسط رگرسیون خطی انتخاب می‌شوند. لذا، نخست مدل‌های مختلف توسط رگرسیون خطی با استفاده از روش انتخاب پارامترها به

مؤثر بر عناصر فلزات است به طوری که با استفاده از آنها می‌تواند تابع میانگین قطعی را برای (Cr و Ba, Pb) تخمین زد. ملاحظه می‌شود که تابع میانگین قطعی برای آهن به فاصله بستگی زیادی دارد

و ضریب تعیین (R^2) انجام گرفت. مقادیر این معیارها در جدول (۵) و شکل (۳) آمده است. با توجه به جدول (۳) مشخص است که پتانسیل رداکس و هدایت الکتریکی در رودخانه تجن از پارامترهای

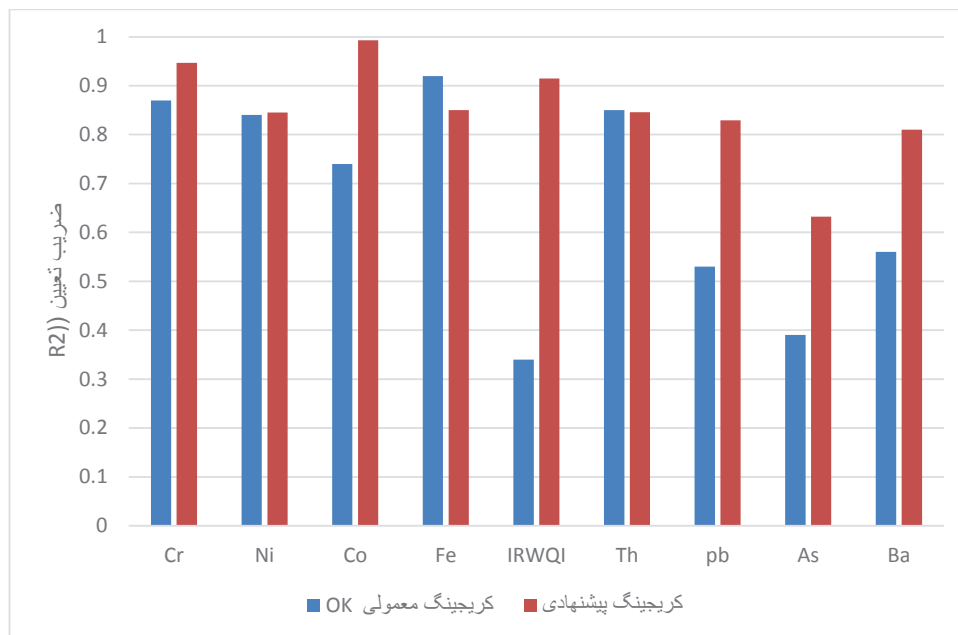
جدول ۳. ب. مقادیر مشاهدات پارامترهای کیفی آب در ده ایستگاه روی رودخانه تجن

| Station | AS μg/l | Co μg/l | Cr μg/l | Ni μg/l | Pb μg/l | Ba μg/l | Ca mg/l | Fe μg/l | TDS mg/l | Th μg/l | Cu μg/l | Eh (mv) |
|---------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|------------|------------|---------|
| ۱ | 6.01 | 1.05 | 1.15 | 3.06 | 0.21 | 510 | 152 | 550 | 1101 | 0.79 | 1 | 142 |
| ۲ | 5.83 | 1.12 | 1 | 4.06 | 0.44 | 490 | 154 | 660 | 1078 | 0.83 | 1 | 151 |
| ۳ | 4.76 | 1 | 1 | 3.11 | 0.1 | 270 | 149 | 340 | 390 | 0.7 | 1 | 152 |
| ۴ | 4.76 | 1 | 1 | 3.11 | 0.1 | 70 | 97.26 | 1150 | 346 | 0.38 | 1 | 158 |
| ۵ | 0.99 | 1.33 | 1.15 | 5.42 | 0.1 | 130 | 96.08 | 1380 | 280 | 0.38 | 1 | 173 |
| ۶ | 3.1 | 2.03 | 3.15 | 10.5 | 0.7 | 142 | 96.7 | 2010 | 275 | 4.03 | 1.13 | 183 |
| ۷ | 2.9 | 1.9 | 2.61 | 18.5 | 0.5 | 138 | 95.2 | 1960 | 332 | 3.3 | 2.5 | 188 |
| ۸ | 3.03 | 2.81 | 4.68 | 22.1 | 0.31 | 171 | 97.1 | 2953 | 276 | 5.01 | 6.3 | 163 |
| ۹ | 3.27 | 4.97 | 8.26 | 21.18 | 1.34 | 0.12 | 108 | 3530 | 264 | 6.49 | 7.44 | 198 |
| ۱۰ | 3.37 | 4.76 | 8.04 | 21.6 | 1.35 | 0.11 | 114 | 3170 | 259 | 8.53 | 8.17 | 201 |
| حداکثر | 6.01 | 4.97 | 8.26 | 22.1 | 1.35 | 510 | 154 | 3530 | 1101 | 8.53 | 8.17 | 201 |
| حداقل | 0.99 | 1 | 1 | 3.06 | 0.1 | 0.11 | 95.2 | 340 | 276 | 0.38 | 1 | 142 |
| میانگین | 8.80 | 2.19 | 3.20 | 11.26 | 0.515 | 192.1 | 115.934 | 1770 | 460.1 | 3.04 | 3.05 | 170.9 |

جدول ۴. معادلات کریجینگ پیشنهادی برای پیش‌بینی پارامترهای کیفی رودخانه تجن

| معادله کریجینگ پیشنهادی | ردیف |
|---|------|
| $\widehat{Cr}(x) = -5.786 + 0.732 * Cu + 0.04 * Eh + \omega(x) \varphi^{-1} (Cr - V_2 \hat{\mu}_2)$ | ۱ |
| $\widehat{Ni}(x) = -1.123 + 0.007Fe + \omega(x) \varphi^{-1} (Ni - V_1 \hat{\mu}_1)$ | ۲ |
| $\widehat{Co}(x) = 0.507 + 0.527Cr + \omega(x) \varphi^{-1} (Co - V_1 \hat{\mu}_1)$ | ۳ |
| $\widehat{Fe}(x) = 246.999 + 50.591dis.Accum + \omega(x) \varphi^{-1} (Fe - V_1 \hat{\mu}_1)$ | ۴ |
| $\widehat{IRWQI}(x) = 54.017 - 12.157NO3 - 14.271PO4 - 1.366BOD5 + 0.332COD + \omega(x) \varphi^{-1} (IRWQI - V_4 \hat{\mu}_4)$ | ۵ |
| $\widehat{Ba}(x) = -29.79 + 0.245 * Ec + \omega(x) \varphi^{-1} (Ba - V_1 \hat{\mu}_1)$ | ۶ |
| $\widehat{As}(x) = -1.753 + 0.048 * Ca + \omega(x) \varphi^{-1} (As - V_1 \hat{\mu}_1)$ | ۷ |
| $\widehat{Pb}(x) = -2.715 + 0.019 * Eh + \omega(x) \varphi^{-1} (Pb - V_1 \hat{\mu}_1)$ | ۸ |
| $\widehat{Th}(x) = 0.314 + 0.894 * Cu + \omega(x) \varphi^{-1} (Th - V_1 \hat{\mu}_1)$ | ۹ |

در جدول (۴) متغیر $dis.Accum$ نشان‌دهنده فاصله نقطه از مصب رودخانه در دریای مازندران می‌باشد.



شکل ۳. دقت مدل‌های کریجینگ معمولی و کریجینگ پیشنهادی در تخمین پارامترهای کیفی رودخانه تجن

جدول ۵. مقایسه نتایج دو روش کریجینگ معمولی و کریجینگ پیشنهادی برای پیش‌بینی پارامترهای کیفی آب رودخانه تجن

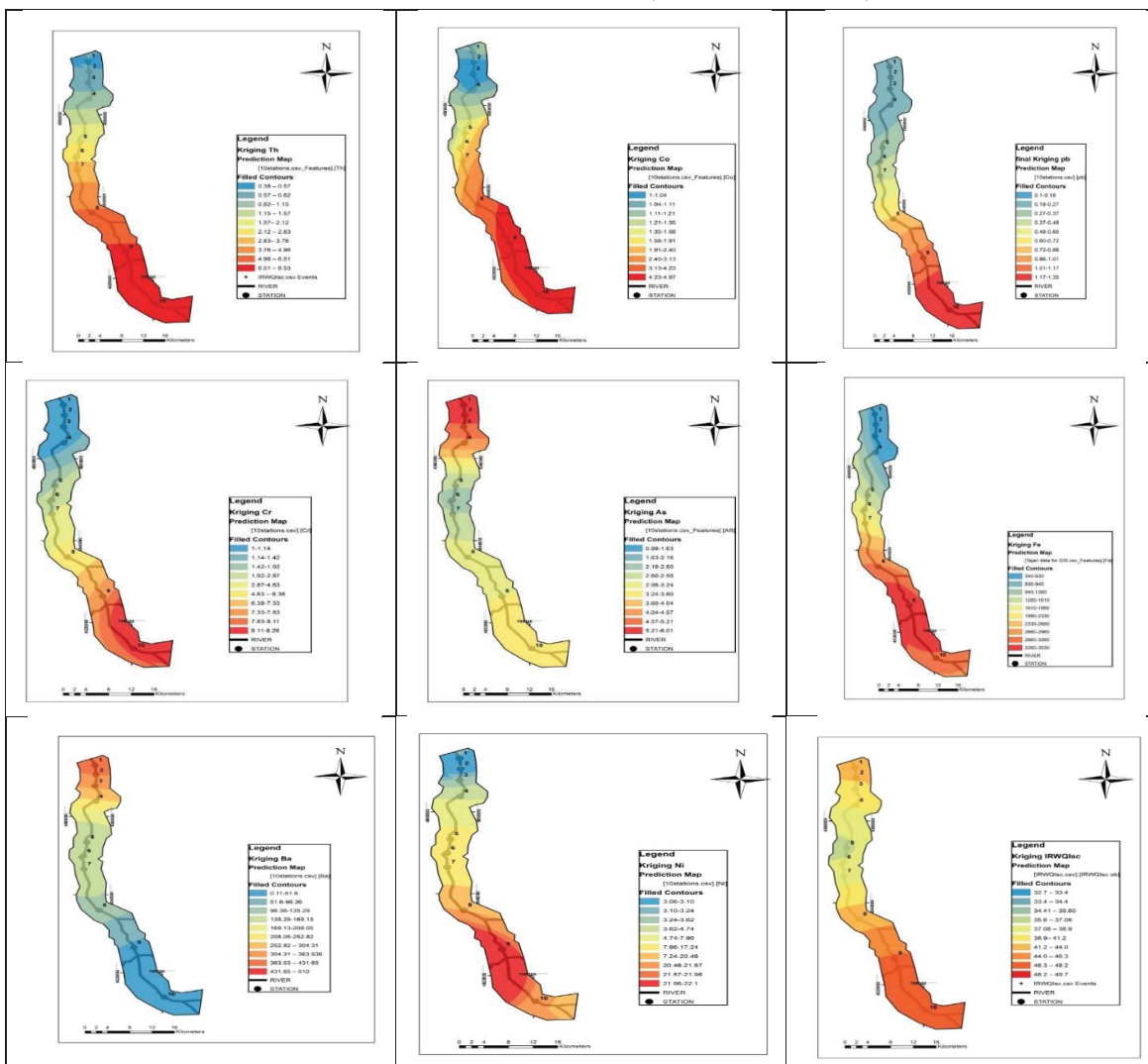
| بهبود عملکرد کریجینگ پیشنهادی نسبت به (% OK) | کریجینگ معمولی (OK) | | | کریجینگ اصلاح شده (روش پیشنهادی) | | | پارامتر | |
|--|---------------------|-------|-------|--|----------------|-------|---------|-------|
| | R ² | C.V. | RMSE | پارامترهای رگرسیون انتخاب شده | R ² | C.V. | | RMSE |
| 8.8 | 0.947 | 0.197 | 0.63 | Cu, Eh | 0.87 | 0.34 | 1.2 | Cr |
| 0.59 | 0.845 | 0.28 | 3.21 | Fe | 0.84 | 0.28 | 3.17 | Ni |
| 34 | 0.993 | 0.05 | 0.12 | Cr | 0.74 | 0.41 | 0.996 | Co |
| -7.6 | 0.85 | 0.25 | 0.443 | dis. Accum | 0.92 | 0.18 | 0.321 | Fe |
| 169 | 0.915 | 0.013 | 0.54 | NO ₃ , PO ₄ , COD BOD ₅ , | 0.34 | 0.12 | 4.96 | IRWQI |
| -0.4 | 0.846 | 0.11 | 0.34 | Cu | 0.85 | 0.356 | 1.085 | Th |
| 56 | 0.829 | 0.39 | 0.2 | Eh | 0.53 | 0.61 | 0.31 | Pb |
| 62 | 0.632 | 0.07 | 0.28 | Ca | 0.39 | 0.25 | 0.94 | As |
| 44 | 0.81 | 0.39 | 76.2 | EC | 0.56 | 0.6 | 116.1 | Ba |

پارامترها (به جز آهن) بهتر از OK است. علاوه بر آن، دقت هر دو روش برای پیش‌بینی توریم و نیکل تقریباً یکسان بود. عملکرد OK در پیش‌بینی آهن خوب و بهتر از کریجینگ پیشنهادی بود. این امر شاید به خاطر این است که برای پارامترهایی که همبستگی آن‌ها با فاصله قوی است، قدرت کریجینگ معمولی برای پیش‌بینی آن بیشتر از پارامترهایی است که همبستگی آن‌ها با فاصله ضعیف است. قسمت تابع

کریجینگ پیشنهادی که ترکیبی از رگرسیون خطی و کریجینگ کور است، نتایج خیلی خوبی داد. درصد بهبود نتایج آن به ۱۶۹ درصد برای تخمین شاخص کیفیت آب، ۶۲ درصد برای تخمین آرسنیک، ۵۶ درصد برای تخمین سرب، ۴۴ درصد برای تخمین باریم، و ۸/۸ درصد برای تخمین کرم رسیده است. در جدول (۵) ملاحظه می‌شود که عملکرد روش کریجینگ پیشنهادی برای پیش‌بینی اغلب

قسمت بالا دست وجود دارد و به سمت پایین دست کاهش می‌یابد. این به علت فرسایش شدید خاک در قسمت جنوبی حوضه تجن و وجود کارگاه سنگ و شن در بالا دست رودخانه است. افزایش غلظت آرسنیک به سمت پایین دست حاکی از ورود رواناب‌های کشاورزی و به‌ویژه از مزارع شالیزاری در اطراف رودخانه است. توزیع مکانی شاخص کیفیت آب رودخانه تجن نشان می‌دهد که بهترین وضعیت آن در بالا دست است و با عبور رودخانه از شهر ساری و روستاهای موجود مقدار شاخص به بدترین وضعیت تبدیل می‌شود.

قطعی میانگین آهن، تابعی از فاصله با ضریب تعیین $R^2 = 0.889$ بود و به این دلیل نتایج کریجینگ معمولی بهتر بوده است. در شکل (۴) توزیع مکانی پارامترهای مورد بررسی بر اساس روش کریجینگ ترسیم شده است. از شکل (۴) مشخص می‌شود که میانگین غلظت عناصر (Co، Fe، Cr، Ni، Cu، pb و Th) از بالادست به پایین‌دست در امتداد رودخانه کاهش یافته، در حالیکه میانگین غلظت عناصر آرسنیک و باریم در نقاط مختلف از بالادست به سمت پایین‌دست افزایش می‌یابد. می‌توان نتیجه گرفت که منبع این فلزات یکسان است. بیشترین غلظت فلزات آهن، سرب، کرم، کبالت، نیکل و توریم در



شکل ۴ توزیع مکانی پارامترهای کیفی آب رودخانه تجن برآورد شده با روش کریجینگ پیشنهادی

بحث و نتیجه‌گیری

این تحقیق به منظور تعیین کیفیت آب رودخانه تجن و ارائه روش مناسب تخمین و درون‌یابی پارامترهای کیفی آن بر مبنای ترکیب رگرسیون خطی و کریجینگ کور انجام شد. برای نیل به این هدف، ۲۱ پارامتر کیفی در ده ایستگاه مختلف روی رودخانه تجن اندازه‌گیری و بررسی شده است.

از مهم‌ترین معایب کریجینگ معمولی این است که پیش‌بینی مقادیر پارامترها تنها بر اساس همبستگی مکانی بین نقاط است. علاوه بر آن، میانگین متغیرها ثابت فرض می‌شود و این فرض برای پدیده‌هایی که در طبیعت بسیار غیر خطی هستند، مناسب نیست و در نتیجه نتایج روش کریجینگ معمولی ضعیف است و قادر به تفسیر عوامل اثرگذار نیستند.

برای رفع این معایب، یک روش مناسب برای تخمین پارامترهای کیفی ارائه شد. مبنای این روش کریجینگ کور است به طوری که به جای روش استنباط بیزی برای تعیین پارامترهای تابع میانگین قطعی از روش ساده‌تر و با محاسبات کم‌تر (رگرسیون خطی) استفاده شد. در نتیجه رگرسیون خطی با کریجینگ کور ترکیب شد. ایده اصلی این ترکیب این است که تابع میانگین قطعی استفاده شده بیشترین واریانس (روند کلی) داده‌های ورودی را توصیف می‌کند، سپس باقیمانده‌ها با میانگین ثابت به عنوان تابع تصادفی توسط کریجینگ معمولی حل می‌شوند رابطه پیشنهادی نشان می‌دهد که مقادیر پیش‌بینی شده نه فقط به ساختار مکانی نقاط بستگی دارد، بلکه تأثیر مقادیر واقعی داده‌ها و توزیع مکانی آن‌ها در منطقه مورد مطالعه نیز در نظر گرفته می‌شوند. عملکرد روش‌های کریجینگ معمولی و روش پیشنهادی توسط سه معیار آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب واریانس (C.V.) و ضریب تعیین (R^2) ارزیابی شد.

نتایج این تحقیق نشان داد کیفیت آب تجن بر اساس شاخص کیفیت آب سطحی ایران در طبقه‌بندی متوسط و نسبتاً بد قرار گرفته است. پارامترهای اکسیژن محلول،

باریم، اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی و کلیفرم مدفوعی با استاندارد کیفیت آب‌های ایران برای حفاظت اکوسیستم‌های آبی مطابق نبودند. علاوه بر آن مشاهده شد که دقت روش کریجینگ اصلاح شده نسبت به روش OK در مطالعه انجام شده بهتر بود و درصد بهبود نتایج آن به ۱۶۹ درصد (برای شاخص کیفیت آب) رسیده است. در مورد پارامتر Fe که توزیع آن به فاصله بستگی زیادی دارد، کریجینگ معمولی نتیجه بهتر داده است. این نتیجه تأکید می‌کند که برای پارامترهایی که با ساختار فضایی ارتباط دارند، روش کریجینگ معمولی می‌تواند نتیجه خوبی در مدل کردن آنها داشته باشد.

پیشنهادات

یکی از محدودیت‌های روش کریجینگ پیشنهادی این است که تحلیلگر باید مراحل مختلف را در محیط نرم‌افزارهای مختلف، هر دو آماری و GIS انجام دهد و به هزینه بیشتری ناشی از اندازه‌گیری پارامترهای مورد استفاده در ایجاد تابع میانگین قطعی (رگرسیون) نیاز دارد. لذا لازم است که در مطالعات بعدی به این محدودیت توجه شود. عدم قطعیت در تمام موضوعات مرتبط با علوم مهندسی و به ویژه در مدل‌های تجربی مانند مدل رگرسیون خطی وجود دارد که ناشی از عدم وجود مشاهدات کافی و همچنین پیچیدگی مسئله است. برای بررسی عدم قطعیت در روش کریجینگ پیشنهاد شده (در قسمت رگرسیون و هم در قسمت تقریب واریوگرام توزیع مکانی پارامترهای مختلف) در این تحقیق نیازمند تولید و استفاده از اطلاعات بلند مدت است. لذا انجام پایش کیفی میان مدت و بلند مدت و کنترل حوضه آبریز برای ادامه تحقیق توسط دیگر پژوهشگران توصیه می‌شود. نتایج این تحقیق می‌تواند در تدوین برنامه پایش کیفیت آب رودخانه تجن مفید باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از دانشگاه تهران به خاطر در اختیار دادن

2. Sharma
3. Nas
4. Yamuna
5. Ordinary Kriging
6. Blind Kriging
7. Semivariogram

امکانات آزمایشگاهی قدردانی می‌کنند. همچنین، نویسنده اول از وزارت آموزش عالی در سوریه قدردانی می‌کند.

یادداشت‌ها

1. Quanzhou

منابع

آبکنار، د.، حسینی، س.، قلزوم، ح. ا.، خدابخشی، ق.، و مهرداد، ن. (۱۳۹۳). اندازه‌گیری بقایای سموم کشاورزی ارگانوکلر در رودخانه‌های استان مازندران از طریق دستگاه GC-ECD پس از پیش تغلیظ به روش استخراج فاز جامد، *مجله محیط شناسی*، سال چهارم، شماره ۳ صص ۷۶۵-۷۷۳.

احدی، ه.، علوی، س.ج.، و حیدری، م.ج. (۱۳۹۴). بررسی استفاده از تکنیک رگرسیون کریجینگ در تهیه نقشه توان تولید رویشگاه‌های جنگلی، دومین همایش ملی افق‌های نوین در توانمند سازی و توسعه پایدار معماری عمران، گردشگری انرژی و محیط‌زیست شهری و روستایی، شهر همدان - دانشکده شهید مفتاح

احمدالی، خ.، نیکمهر، س.، و لیاقت، ع. (۱۳۸۷). ارزیابی روشهای کریجینگ و کوکریجینگ در تخمین شوری و اسیدیته عمقی خاک (منطقه موردی مطالعه: اراضی بوکان)، *مجله پژوهش آب ایران*، سال دوم، شماره ۳ صص ۶۴-۵۵.

باقری، س.، علی‌پور، ع.، علی‌پوری، ا.، شیروانی سارویی، ا. (۱۳۹۶). تحلیل روند پهنه‌بندی پارامترهای کیفی منابع آب سطحی دشت نیشابور، یازدهمین کنگره ملی پیشگامان پیشرفت، مرکز الگوی اسلامی ایرانی پیشرفت، تهران.

تقی‌زاده مهرجردی، ر.، قرائی منش، س.، و فتح‌زاده، ع. (۱۳۹۴). پیش‌بینی توزیع مکانی عمق برف با استفاده از روش رگرسیون کریجینگ و عوارض زمین در منطقه سخوید یزد، *مجله علوم و مهندسی آبخیزداران ایران*، جلد ۹، شماره ۲۸، صص ۴۸-۴۱.

سعیدی، م.، کرباسی، ع. ا.، نبی بیدهندی، غ.، مهرداد، ن. (۱۳۸۵). اثر فعالیت‌های انسانی بر تجمع فلزات سنگین در آب رودخانه تجن در استان مازندران، *مجله محیط شناسی*، سال سی و دوم، شماره ۴۰، صص ۵۰-۴۱.

واعظی، ع.، بابائی، ف.، طاهری، ه.، و عباسی، م. (۱۳۹۶). تغییرپذیری مکانی عملکرد دانه گندم و ویژگیهای خاک در کشتزارهای دیم منطقه نیمه خشک در جنوب استان زنجان، *نشریه دانش آب و خاک*، جلد ۲۷، شماره ۳، صص ۷۸-۶۵.

یوسفی، م.، امامقلی‌زاده، ص.، و قربانی، ه. (۱۳۹۴). بررسی کیفی آب رودخانه تجن مازندران تر جنبه مصرف کشاورزی، اولین همایش ملی کیفیت منابع آب و توسعه پایدار، دانشگاه اراک

Aazami, J., Esmaili-Sari, A., Abdoli, A., Sohrabi, H., and Van den Brink, P. J. (2015). Monitoring and assessment of water health quality in the Tajan River, Iran using physicochemical, fish and macroinvertebrates indices. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 13(1): pp. 29.

American Public Health Association (APHA). (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21st Edn. American Public Health Association: Washington DC.

Bayraktar, H., and Turalioglu, F. S. (2005). A Kriging-based approach for locating a sampling site—in the assessment of air quality. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19(4): pp. 301-305.

Chen, K., Ni, M., Cai, M., Wang, J., Huang, D., Chen, H., Wang, X. and Liu, M. (2016). Optimization of a

- Coastal Environmental Monitoring Network Based on the Kriging Method: A Case Study of Quanzhou Bay, China. *BioMed research international*.
- Couckuyt, I., Forrester, A., Gorissen, D., De Turek, F., and Dhaene, T. (2012). Blind Kriging: Implementation and performance analysis. *Advances in Engineering Software*. 49:pp.1-13.
- Cressie, N. (1990). The origins of kriging. *Mathematical geology*, 22(3): pp. 239-252
- Joseph, V. R., Hung, Y., and Sudjianto, A. 2008. Blind kriging: A new method for developing metamodels. *Journal of mechanical design*. 130(3): 031102.
- Krige, D. G. (1951). A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 52(6):pp. 119-139.
- Matheron, G. (1963). Principles of geostatistics. *Economic geology*, 58(8):pp. 1246-1266.
- Matias, J. M., and Gonzalez-Manteiga, W. (2006). Regularized kriging as a generalization of simple, universal, and bayesian kriging. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 20(4): pp. 243-258.
- Montero, J.M. and Mateu, J.(2015). Spatial and spatio-temporal geostatistical modeling and kriging (Vol. 998). *John Wiley & Sons*.
- Mukhopadhyay, T., Chakraborty, S., Dey, S., Adhikari, S. and Chowdhury, R. (2017). A critical assessment of Kriging model variants for high-fidelity uncertainty quantification in dynamics of composite shells. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 24(3): pp.495-518.
- Nas, B. (2009). Geostatistical Approach to Assessment of Spatial Distribution of Groundwater Quality. *Polish Journal of Environmental Studies*, 18(6).
- Oliver, M.A. and Webster, R., (2015). *Basic steps in geostatistics: the variogram and kriging* (Vol. 106). New York: Springer.
- Sharma, S., Jha, P.K., Ranjan, M.R., Singh, U.K. and Jindal, T. (2017). Water quality monitoring of Yamuna River by using GIS based water quality index in Delhi, India. *International journal of current microbiology and applied sciences*. 6(2): pp.1249-1263.
- Stein, M. L. (2012). Interpolation of spatial data: some theory for kriging. *Springer Science & Business Media*.
- Tonkin, M. J., and Larson, S. P. (2002). Kriging water levels with a regional-linear and point-logarithmic drift. *Groundwater*. 40(2): pp. 185-193.
- Yang, K., Yu, Z., Luo, Y., Yang, Y., Zhao, L. and Zhou, X. (2018). Spatial and temporal variations in the relationship between lake water surface temperatures and water quality-A case study of Dianchi Lake. *Science of the total environment*. 624: pp.859-871.