

Water quality assessment of the Talar River in Mazandaran Province based on a combination of water quality indicators and multivariate modeling

Reza Khalili¹, Hossein Montaseri^{*2} , Hamed Mottaghi³, Mohammad Bagher Jalili³

¹ Former M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

² Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

³ M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

Abstract

Introduction

The pollutants have exceeded the environmental load capacity of the water resources due to the rapid development and expansion of urban areas, increased industrial production, agricultural activities, and discharging of the domestic sewage into the surface water runoff in recent years. These point and non-point source pollutions have decreased the water quality of the surface water. Water pollution has become a concerning management issue in quality control of the surface water in developing countries. Pollution of urban rivers seriously hinders sustainable economic and social development and threatens human health. Assessment of river water quality according to physical, chemical and biological parameters is the basis of health management of its ecological system. Water quality in any region is affected by two factors: natural processes and human activities such as the transfer of nutrients and heavy metals to surface waters. In this regard, freshwater pollution by heavy metals has become one of the main environmental concerns in recent decades.

Materials and Methods

This study is aimed to evaluate the water quality and the controlling mechanisms through calculation of Drinking Water Quality Index (DWQI) and four pollution indices (PIs). In this regard, the multivariate statistical analysis techniques such as partial least squares regression (PLSR), stepwise multiple linear regression (SMLR) were used, as well as the chemical type of the water has been determined using a three-line piper diagram. Therefore, 26 physicochemical parameters for eight surface water areas of the Talar River were analyzed in this research using standard analytical methods.

Results and Discussion

The results indicate that the surface water resources in this region are determined to be alkaline with Ca-Mg and Ca-Mg-Cl-SO₄. According to the results of DWQI analysis, 19% of the total samples were good water, 56% poor and very poor, and 25% were inappropriate for drinking. Also the PI results demonstrate that the surface water is highly affected by Mn and Pb and are under a slight impact of Fe and Cr. The obtained SMLR models of the DWQI and PIs which developed according to the base ions and heavy metals represented the best estimates with $R^2=1$ for QWQI and PIs. According to the Piper diagram, the surface water is affected by the interactions and weathering of rocks. According to Gibbs geochemical diagram, it was shown that surface water points are in areas with weathering and permeability. As a result, these factors have been proposed as the most important factors affecting the geochemistry of surface waters in the study area. The surface waters of the study area are polluted by heavy metals and this pollution increases from the beginning of the river to the station near the Caspian Sea.

Conclusion

The integration of DWQI and PIs is considered as a functional and distinguishing method in the assessment of the surface water quality, and the PLSR and SMLR models can be used to evaluate DWQI and PIs via chemical techniques application. Degradation and reduction of surface water quality can be attributed to the widespread use of agricultural pesticides, industrial activities and poor drainage network. The water quality amount has been severely reduced from upstream to downstream of the Talar River, due to the entry of agricultural effluent and passing through urban and industrial areas. The use of wastewater treatment methods before discharge to freshwater improves water quality and prevents its degradation.

Keywords: Mazandaran Province, Multivariate Modeling, Talar River, Water Pollution, Water Quality Indicators.

Article Type: Research Article

*Corresponding Author, E-mail: hmontaseri@yu.ac.ir

Citation: Khalili, R., Montaseri, H., Mottaghi, H., & Jalili, M.B. (2021). Water quality assessment of the Talar River in Mazandaran Province based on a combination of water quality indicators and multivariate modeling. *Water and Soil Management and Modeling*, 1(4), 30-47.

DOI: 10.22098/MMWS.2021.9322.1033

DOR: 20.1001.1.27832546.1400.1.4.3.7

Received: 02 August 2021, Accepted: 24 August 2021

Water and Soil Management and Modeling, Year 2021, Vol. 1, No. 4, pp. 30-47

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





ارزیابی کیفیت آب رودخانه تالار استان مازندران با استفاده از ترکیب شاخص های کیفیت آب و مدل سازی چندمتغیره

رضا خلیلی^۱، حسین منتصری^{۲*}، حامد متقی^۳، محمدباقر جلیلی^۳

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

^۲ استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

چکیده

امروزه به دلیل توسعه و گسترش سریع شهرها، افزایش تولید صنعتی، فعالیت های کشاورزی و تخلیه فاضلاب های خانگی در روانابها، میزان آلاینده ها از ظرفیت تحمل بار محیطی آب فراتر رفته و منجر به کاهش کیفیت آب های سطحی شده است و این مشکل در سال های اخیر در کشورهای در حال توسعه به یک امر مهم مدیریتی در کنترل کیفی آب های سطحی تبدیل شده است. هدف از این پژوهش ارزیابی کیفیت آب و بررسی مکانیسم های کنترل کننده آن با استفاده از شاخص کیفیت آشامیدنی و چهار شاخص آلودگی (PIs)، به وسیله تحلیل های آماری چندمتغیره مانند رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR)، رگرسیون گام به گام خطی چندمتغیره (SMLR) و تعیین تیپ شیمیایی آب با استفاده از نمودار سه خطی پایپر است. در این پژوهش ۲۶ پارامتر فیزیکی-شیمیایی، با استفاده از روش های تحلیلی استاندارد برای هشت منطقه آب سطحی رودخانه تالار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بر اساس نتایج مشخص شد که آب منطقه از نوع آب های قلیایی با Ca-Mg و Ca-Mg-Cl-SO₄ است. نتایج DWQI نشان داد که ۱۹ درصد نمونه ها در رده کیفی خوب، ۵۶ درصد ضعیف و خیلی ضعیف و ۲۵ درصد از نمونه ها، آب نامناسب برای آشامیدن بوده و کیفیت آب از بالادست به سمت پایین دست رودخانه کاهش یافته است. هم چنین نتایج شاخص های آلودگی نشان داد که نمونه های آب سطحی به شدت تحت تأثیر Pb و Mn و کمی تحت تأثیر Fe و Cr هستند. مدل های SMLR از DWQI و PIs که بر اساس یون های اصلی و فلزات سنگین هستند، بالاترین تخمین با ضریب تعیین (R^2) برابر با یک برای CD و کمترین R^2 برابر با ۰/۹۷ برای HPI بوده است. در نتیجه ادغام DWQI و PIs، یک روش ارزشمند و کاربردی برای ارزیابی کیفیت آب سطحی است و مدل های PLSR و SMLR می توانند از طریق کاربرد تکنیک های شیمیایی برای ارزیابی DWQI و PIs استفاده شوند.

واژه های کلیدی: آلودگی آب، استان مازندران، شاخص های کیفیت آب، رگرسیون چندمتغیره

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hmontaseri@yu.ac.ir

استناد: خلیلی، ر.، منتصری، ح.، متقی، ح.، و جلیلی، م.ب. (۱۴۰۰). ارزیابی کیفیت آب رودخانه تالار استان مازندران با استفاده از ترکیب شاخص های

کیفیت آب و مدل سازی چندمتغیره. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۱(۴)، ۳۰-۴۷.

DOI: 10.22098/MMWS.2021.9322.1033

DOR: 20.1001.1.27832546.1400.1.4.3.7

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۲

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۰، دوره ۱، شماره ۴، صفحه ۳۰ تا ۴۷

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

رودخانه‌ها یک بخش مهم از اکوسیستم و عضوی حیاتی در حمایت از توسعه‌ی مداوم و سالم اقتصاد اجتماعی و تأمین آب آشامیدنی^۱ هستند (Khalili et al., 2021). در سال‌های اخیر، توسعه و گسترش سریع شهرها، تولیدات صنعتی، فعالیت‌های کشاورزی، آبی‌پروری و تخلیه فاضلاب‌های خانگی در رواناب‌ها، موجب تخلیه مقادیر زیادی آلاینده‌های سمی در آب‌های سطحی و ایجاد آسیب ساختاری و تخریب عملکرد رودخانه‌ها شده است (Khalili et al., 2021). میزان آلاینده‌ها از ظرفیت تحمل بار محیطی آب فراتر رفته و منجر به افت کیفیت آب‌ها و کاهش تنوع زیستی آبزیان شده‌اند. آلودگی رودخانه‌های شهری به‌طور جدی مانع توسعه اقتصادی و اجتماعی پایدار می‌شود و سلامت انسان‌ها را تهدید می‌کند (Egbueri et al., 2020). بنابراین، تجزیه و تحلیل کیفیت آب رودخانه‌ها و کاوش علل وخیم شدن کیفیت آب برای بهبود محیط‌زیست امری ضروری است (Ustaoglu et al., 2020). ارزیابی کیفیت آب رودخانه‌ها با توجه به پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی اساس مدیریت بهداشت سیستم محیط زیستی آن است (Islam et al., 2020). کیفیت آب در هر منطقه‌ای تحت تأثیر دو عامل فرآیندهای طبیعی و فعالیت‌های انسانی مانند انتقال مواد مغذی و فلزات سنگین به آب‌های سطحی است (Khalili et al., 2020). در همین راستا آلودگی آب شیرین به‌وسیله فلزات سنگین در دهه‌های اخیر به یکی از اصلی‌ترین نگرانی‌های محیط زیستی تبدیل شده که از آلودگی طبیعی و عملکرد انسانی ناشی و به‌طور قابل توجهی منجر به کاهش کیفیت آب سطحی و ایجاد خطرهای جدی برای سلامتی در سطح محلی و منطقه‌ای شده است (Kang et al., 2019). در این پژوهش از شاخص DWQI استفاده شده که دارای عملکرد قدرتمندی در ایجاد ابزارهای ساده و قابل فهم است. این شاخص اثرات تجمعی پارامترهای مختلف فیزیکی و شیمیایی را نشان می‌دهد که بر اساس وزن و میزان هر پارامتر تعیین می‌شود و بیانگر کیفیت آب است (Chabuk et al., 2020).

پارامترهای فیزیکی و شیمیایی تفسیر مفیدی برای ارزیابی روندها و شناسایی موضوعات خاص محیط زیستی و جمع‌آوری اطلاعات درباره کیفیت آب و آسیب‌پذیری آن در برابر آلودگی ارائه می‌دهند (Joksimović et al., 2020). یک پارامتر به‌تنهایی برای ارزیابی کیفیت آب مناسب نیست؛ زیرا ممکن است محدودکننده باشد و عملکرد ضعیفی را ارائه دهد، بنابراین، برخی از شاخص‌های آلودگی مستند (PIs) و شاخص‌های معینی برای

مفاهیم Zn، B، Cd، Cr، Cu، F، Fe، Mn، Ni، b تعیین کرده‌اند و شامل شاخص آلودگی فلزات سنگین^۲ (HPI)، شاخص ارزیابی فلزات سنگین^۳ (HEI)، درجه آلودگی^۴ (CD)، شاخص آلودگی^۵ (PI) هستند، که می‌تواند برای درک وضعیت کنونی هیدروشیمی آب سطحی و ارزیابی مناسب بودن آب به‌منظور آشامیدن، استفاده شود (Prasanna et al., 2012; Sobhan, 2016; Ardakani et al., 2016). منابع آب سطحی نسبت به فعالیت‌های انسانی که ممکن است منجر به تخریب بالقوه اکوسیستم شوند آسیب‌پذیر هستند (Khalili, et al., 2021). بنابراین، شاخص‌های آلودگی آب شامل CD، HEI و PI روش‌های مفیدی برای ارزیابی کیفیت آب سطحی و نشان‌دهنده کیفیت همه‌جانبه آب به‌وسیله بررسی اثرات تجمعی فلزات سنگین است. شاخص‌های آلودگی آب روش‌های مقرون‌به‌صرفه‌ای برای حفظ ایمنی و سلامت با توجه به ایجاد برنامه کنترل برای توسعه، رشد و هدایت فعالیت‌های انسانی به سمت کاهش آسیب‌ها بر کیفیت منابع آب هستند (Khalili et al., 2021). بسیاری از مطالعاتی که بر آلودگی آب و پایش کیفیت آب انجام شده‌اند از شاخص‌های مستند برای فلزات سنگین مانند شاخص ارزیابی فلزات سنگین استفاده کرده‌اند (Edet & Offiong, 2002). شاخص ارزیابی فلزات سنگین یک روش مؤثر برای رتبه‌بندی اثر ترکیب‌شده از تک‌تک فلزات سنگین در کیفیت کلی آب و اطلاع از مناسب بودن آب سطحی برای استفاده انسان است (Singaraja et al., 2015). علاوه بر این، HEI اثر افزایشی احتمالی فلزات سنگین را بررسی می‌کند که امکان ارزیابی سریع کیفیت کلی آب به‌منظور شرب را فراهم می‌کند (Herojeet et al., 2015). درجه آلودگی نیز سمت نسبی یک فلز خاص را آزمایش می‌کند و اثرات تجمعی همه فلزات سنگین در آب را نشان می‌دهد و PI سطح آلودگی و ناخالصی را در آب را از جنبه فلزات سنگین به‌صورت مجزا و جدای از هم اندازه‌گیری می‌کند. بنابراین، کیفیت آب به‌وسیله اندازه‌گیری درجه در معرض قرارگرفتن فلز سنگین در ترکیب پارامترهای آلودگی از طریق اثرات تجمعی فلزات سنگین که برای مصارف انسانی خطرناک شمرده شده‌اند ارزیابی شده است (Herojeet et al., 2015). اگرچه DWQI و PIs برای ارزیابی کیفیت آب مفید هستند، آنالیزهای آماری چندمتغیره نیز برای ارزیابی کیفیت آب استفاده می‌شود. ادغام DWQI و PIs یک روش ارزشمند و کاربردی برای ارزیابی کیفیت آب سطحی از طریق فراگیری

² Heavy Metal Pollution Index (HPI)

³ Heavy Metal Evaluation Index (HEI)

⁴ Degree contamination (CD)

⁵ Pollution index (PI)

¹ Drinking Water Quality Index (DWQI)

تحلیل متغیرهای نشان داد که پارامترهای مربوطه تغییرات کیفیت آب عمدتاً مربوطه تخلیه و دما (طبیعی)، آلودگی آلی (منبع نقطه: فاضلاب خانگی) در مناطق نسبتاً کم‌تر آلوده، آلودگی آلی (منبع نقطه‌ای: فاضلاب خانگی) و مواد مغذی (منابع غیرنقطه‌ای: کشاورزی و مزارع باغ) در مناطق آلوده متوسط؛ و آلودگی‌های آلی و مواد مغذی (منابع نقطه‌ای: فاضلاب خانگی، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و صنایع) در مناطق بسیار آلوده در حوضه است. رودخانه تالار یکی از منابع بالقوه آب در منطقه بوده که در سال‌های اخیر تحت فشار مناطق کشاورزی و شهری قرار گرفته است و نیازمند بررسی‌های دقیق کیفیت آب در این رودخانه است؛ بنابراین، اهداف این پژوهش عبارت‌اند از: ۱- بررسی سطوح آب، فلزات سنگین و فرایندهای ژئوشیمیایی با استفاده از پارامترهای فیزیکی-شیمیایی، ۲- ارزیابی آب سطحی برای استفاده شرب با استفاده از شاخص DWQI، ۳- ارزیابی آسیب‌پذیری آب سطحی در برابر آلودگی با استفاده از PI مانند CD، HEI، HPI، و PI، ۴- ارزیابی کارایی مدل‌های PLSR مانند مدل‌های سریع مبتنی بر یون‌های اصلی و فلزات سنگین برای پیش‌بینی DWQI و PI، و ۵- ارزیابی آنالیزهای خطی چندمتغیره گام به گام مبتنی بر مهم‌ترین یون‌های اصلی و فلزات سنگین به منظور ارزیابی DWQI و پیش‌بینی PI است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

رودخانه تالار در استان مازندران در حد واسط ۵۲ درجه و ۳۵ دقیقه و ۲۲ ثانیه تا ۵۳ درجه و ۲۳ دقیقه و ۳۴ ثانیه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۴۴ دقیقه و ۲۳ ثانیه تا ۳۶ درجه و ۱۹ دقیقه و یک ثانیه عرض شمالی، در کشور قرار دارد. این رود از ارتفاعات سه‌هزار متری البرز در سوادکوه از کوه‌های ورسک، خطیرکوه و شلفین سرچشمه می‌گیرد و پس از پیوستن چندین شعبه به آن در سوادکوه از قسمت غربی قائم‌شهر گذشته و پس از عبور از شهرستان سیمرغ، پس از طی مسافتی ۱۸۰ کیلومتری به دریای مازندران می‌ریزد. بیش‌تر مسیر رود در مناطق کوهستانی و جنگلی شهرستان سوادکوه در محدوده شهرهای پل سفید، زیرآب و شیرگاه قرار دارد. از مهم‌ترین مشکلات این رودخانه می‌توان به معادن شن و ماسه جاده خطیرکوه اشاره کرد که باعث گل‌آلود شدن آب رودخانه در اکثر روزهای سال می‌شود و هم‌چنین در سال‌های اخیر افزایش بیش از حد گردش‌گر، ساخت و ساز و فعالیت کشاورزی و صنعتی باعث تخلیه فاضلاب به رودخانه و افزایش آلودگی این رودخانه شده است. شکل ۱ منطقه مورد مطالعه و شکل ۲ نقاط نمونه‌برداری را نشان می‌دهد.

مدل‌های ماشینی (دستگاهی) است که برای توصیف وضعیت کیفیت آب سطحی و مکانیسم‌های کنترل‌کننده آن‌ها برای سیاست‌گذاران برای انتخاب روش‌های مناسب رسیدگی و حل مسائل نگران‌کننده ضروری هستند (Chaturvedi et al., 2019).

محاسبه DWQI و PIs نیازمند مراحل محاسباتی زیادی است که نیازمند یک‌زمان و تلاش مشخصی برای تبدیل مقادیر زیادی از ویژگی‌های آب به یک ارزش واحد توصیف‌کننده سطح کیفیت آب و نمایانگر سطح کلی کیفیت آب است (Kumar et al., 2019). رگرسیون حداقل مربعات جزئی^۱ (PLSR)، رگرسیون خطی چندمتغیره گام به گام^۲ (SMLR)، می‌توانند برای غلبه بر این مشکل استفاده شوند؛ زیرا روش‌های متعارفی هستند که روابط خطی بین مجموعه متغیرهای مستقل و واکنش متغیرها را مشخص می‌کنند. از نظر دانش ما اطلاعات بسیار کمی برای ارزیابی مقایسه‌ای کارایی مدل‌های PLSR و SMLR برای پیش‌بینی DWQI و PIs وجود دارد (Sobhanardakani, 2016). مطالعات متعددی در این زمینه انجام شد که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

Elsayed et al., (2020) با استفاده از شاخص‌های کیفیت آب و روش‌های آماری چندمتغیره به ارزیابی کیفیت آب در دلتای نیل شمالی، مصر پرداختند. آن‌ها از ۱۵ ایستگاه از آب‌های سطحی محدوده مورد مطالعه در تابستان سال ۲۰۱۹ نمونه‌برداری انجام دادند و با استفاده از شاخص کیفیت آب (WQI) و تکنیک‌های مدل‌سازی چندمتغیره، مانند رگرسیون مؤلفه‌های اصلی^۳ (PCR)، الگوریتم رگرسیون بردار پشتیبان (SVRA)^۴ و رگرسیون خطی چند گام به گام^۵ (SMLR) به تجزیه و تحلیل ۲۱ پارامتر پرداختند. محاسبه مقادیر WQI نشان داد که ۸۲ درصد نمونه‌ها در رده کیفیت بالا و ۱۸ درصد باقیمانده در رده کیفیت متوسط قرار دارند.

Shrestha & Kazama (2007) به ارزیابی کیفیت آب سطحی رودخانه فوجی^۶ در ژاپن با استفاده از تکنیک‌های آماری چندمتغیره پرداختند آن‌ها در طی هشت سال (۲۰۰۲-۱۹۹۵) از ۱۳ سایت در طول رودخانه نمونه‌برداری کردند و ۱۲ پارامتر را با تکنیک‌های آماری چندمتغیره، مانند تجزیه و تحلیل خوشه‌ای^۷ (CA) و تحلیل عاملی^۸ (FA) مورد ارزیابی قرار دادند. تجزیه و

¹ Partial Least Squares Regression (PLSR)

² Stepwise Multiple Linear Regression (SMLR)

³ Water Quality Index

⁴ Principal Component Regression

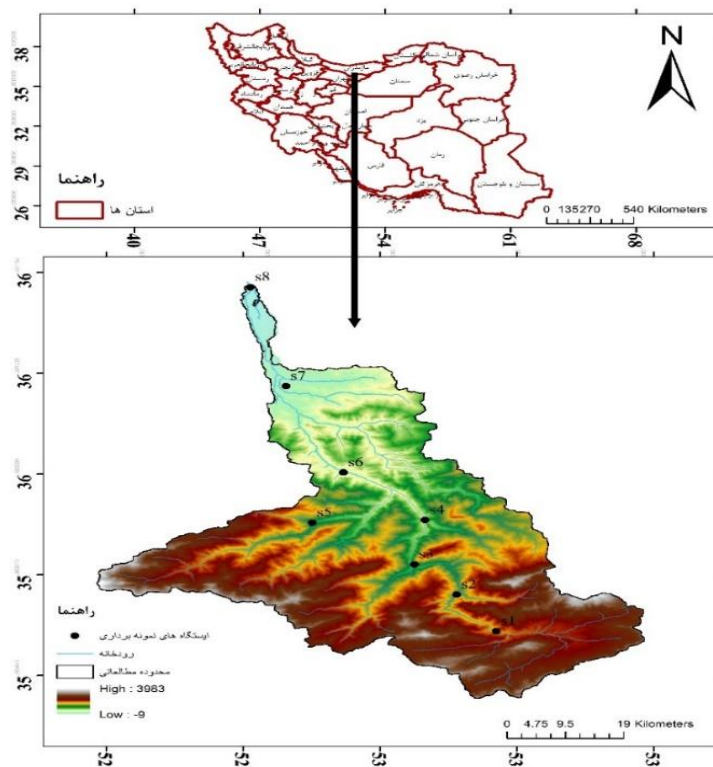
⁵ Support Vector Regression Algorithms

⁶ Multi-step Linear Regression

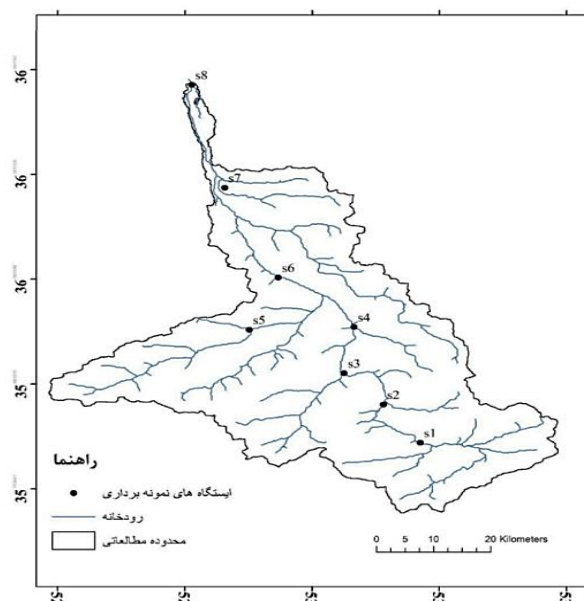
⁷ Fouji

⁸ Cluster Analysis

⁹ Factor Analysis



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه
Figure 1 – The location of the study area



شکل ۲- موقعیت ایستگاه های نمونه برداری
Figure 2- The location of sampling stations

ثبت شده است (جدول ۱). دو مجموعه آب سطحی در هر مکان در بطری های ۵۰۰ میلی لیتری جمع آوری و به وسیله کاغذ صافی نمره ۴۵ فیلتر شدند. اولین مجموعه برای تحلیل عناصر کمیاب و مجموعه دیگر برای اندازه گیری پارامترهای فیزیکی- شیمیایی استفاده شد. همه نمونه های آب در یخچال با دمای چهار درجه

۲-۲- محل نمونه گیری و روش های تجزیه و تحلیل پارامترها

نمونه ها از آب سطحی رودخانه مورد مطالعه در تابستان و زمستان سال ۱۳۹۸ جمع آوری شده اند و مختصات جغرافیایی (UTM) هر سایت با استفاده از دستگاه MAGELLAN GPS به صورت دستی

$$Q_i = \frac{C_i}{S_i} * 100 \quad (2)$$

$$W_i = \frac{\omega_i}{\sum \omega_i} \quad (3)$$

ω_i برای هر پارامتر مطابق با استانداردهای توصیه‌شده برای هر پارامتر مطابق با رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$\omega_i = \frac{K}{S_i} \quad (4)$$

K ضریب تناسب ثابت است (Jesuraja et al., 2021).

برای محاسبه DWQI تعیین وزن هر پارامتر، سطحی آب ω_i و محاسبه وزن نسبی W_i و دامنه رتبه‌بندی کیفیت (Q_i) مورد نیاز هستند. بنابراین، W_i تعیین شده برای پارامترهای TDS، pH، Fe، EC، Mg^{2+} ، Ca^{+2} ، Na^+ ، K^+ ، TH، BOD، F، Cu، Cr، Cd، B ، NO_3^- ، SO_4^{2-} ، Cl^- ، Pb، Ni، Mn، Zn و قلیائیت با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شده است. مقادیر وزنی مطابق ارزش نسبی پارامترهای آب سطحی به منظور کیفیت آب شرب و دامنه ۱ تا ۵ تعیین شده است. مقادیر محاسبه شده استانداردها، وزن‌ها (ω_i) و وزن‌های نسبی (w_i) پارامترهای آب سطحی در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

۲-۳-۲- شاخص‌های آلودگی (PIs)

شاخص‌های آلودگی شامل CD، HEI، HPI، PI برای غلظت فلزات سنگین مانند Mn، Fe، Cu، Cr، Cd، B، Fe، Ni، Pb و Zn مطابق با معادلات نشان داده شده در جدول ۴ برآورد می‌شوند.

۲-۴- تحلیل داده‌ها

در این پژوهش برای محاسبه پارامترهای آماری (به‌عنوان مثال: حداقل، حداکثر، میانگین و انحراف معیار) از پارامترهای فیزیکی-شیمیایی از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ استفاده شده است و همچنین نمودار پایپر و نمودار گیبس با استفاده از نرم‌افزار Geochemist's Workbench Student Edition نسخه ۱۲ برای شناسایی سطوح آب سطحی، فرآیندهای ژئوشیمیایی و مهم‌ترین فاکتورهای کنترل‌کننده شیمی آب استفاده شده است. تجزیه و تحلیل آماری به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی کیفیت آب مورد استفاده قرار گرفت تا با کاهش داده‌های تجزیه و تحلیل شیمیایی به الگوهای معمول، شناسایی عوامل آلاینده مؤثر در آب‌های سطحی را بهبود بخشد. روش‌های شیمیایی مانند PLSR که یکی از مهم‌ترین روش‌های مهم مدل‌سازی هستند، می‌توانند داده‌ها را با بسیاری از متغیرهای کاملاً چندخطی و دشوار تجزیه و تحلیل کنند که در این پژوهش جهت ایجاد مدل‌های پیش‌بینی DWQI مبتنی بر یون‌های اصلی و فلزات سنگین به‌عنوان داده‌های ورودی و برای PIs با توجه به فلزات سنگین، استفاده می‌شود. همچنین از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲

سانتی‌گراد نگهداری شدند. در این مطالعه، ۲۶ پارامتر فیزیکی-شیمیایی شامل دمای آب، اکسیژن محلول^۱ (DO)، pH، اکسیژن اکسیژن موردنیاز بیوشیمیایی^۲ (BOD)، کلی فرم مدفوعی، کل جامدات محلول^۳ (TDS)، هدایت الکتریکی^۴ (EC)، پتاسیم (K^+)، سدیم (Na^+)، کلسیم (Ca^+)، منیزیم (Mg^{+2})، کلر (Cl^-)، سولفات (SO_4^{2-})، قلیائیت، نترات (NO_3^-)، سرب (Pb^{2+})، کادمیم (Cd^{2+})، روی (Zn^{2+})، نیکل (Ni^{2+})، مس (Cu^{2+})، منگنز (Mn^{2+})، کروم (Cr^{2+})، بور (B^{3+})، فلوئور (F^-)، آهن (Fe^{3+}) و سختی کل آب^۵ (TH) به‌وسیله روش‌های اندازه‌گیری استاندارد آنالیز شدند که نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است. پارامترهای دمای آب، کل جامدات حل شده (TDS)، pH و هدایت الکتریکی (EC) و اکسیژن محلول در محل نمونه‌برداری به‌وسیله یک دستگاه قابل حمل و کالیبره شده اندازه‌گیری شدند. پارامتر BOD به شیوه «روش ستون جیوه‌ای» پارامترهای قلیائیت و CL^- به‌وسیله تیتراسیون حجمی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در حالی که Ca^{+2} ، Na^+ ، K^+ ، Cd، Cr، Cu، Fe، Mn، Mg^{2+} ، Ni، Pb و Zn با استفاده از روش جذب اتمی طیف‌سنج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. علاوه بر این اسپکتروفتومتر اشعه ماوراءبنفش برای تحلیل SO_4^{2-} ، NO_3^- ، B و F استفاده شده است.

۲-۳-۳- روش بررسی پارامترها

شاخص‌های کیفیت آب WQI بررسی شده در این پژوهش شامل DWQI، HPI، HEI، CD و PI هستند.

۲-۳-۱- شاخص کیفیت آب شرب DWQI

DWQI به‌وسیله روش‌های ریاضی تعیین می‌شود و به‌عنوان مفیدترین شاخص برای اندازه‌گیری کیفیت کلی آب سطحی برای استفاده شرب محسوب می‌شود. DWQI بر اساس فرمول محاسبه وزن مطابق با رابطه ۱ اندازه‌گیری می‌شود:

$$DWQI = \sum_{i=1}^n Q_i W_i \quad (1)$$

Q_i شاخص تابع کیفیت هر پارامتر و W_i واحد وزن هر پارامتر است. مقدار محاسبه شده Q_i به مقدار غلظت آب سطحی (C_i) و استاندارد (S_i) برای مقدار آب آشامیدنی هر پارامتر آب سطحی مطابق با استاندارد سازمان بهداشت جهانی^۶ (۲۰۱۱) بستگی دارد، دارد، همان‌طور که در رابطه‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است:

¹ Dissolved Oxygen

² Biochemical Oxygen Demand

³ Total Dissolved Solids

⁴ Electrical Conductivity

⁵ Total Hardness

⁶ World Health Organization

نشان می‌دهند آنالیز می‌شوند. رابطه مدل‌های رگرسیون چندخطی گام به گام به صورت رابطه ۵ نشان داده می‌شود:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_m X_m \quad (5)$$

در این معادله، Y پاسخ متغیر مانند DWQI و PIs را نشان می‌دهد، β متغیر ثابت است، β_m ضرایب کنترل متغیرهای یون‌های اصلی و فلزات سنگین، X_1 و X_m متغیرهای کنترل یون‌های اصلی و فلزات سنگین هستند.

برای ایجاد رگرسیون خطی گام به گام استفاده شد. رگرسیون خطی گام به گام یک روش رگرسیون آماری است که برای آنالیز ارتباط بین پاسخ یک متغیر (مانند متغیر وابسته) با دو یا چند متغیر (مانند متغیرهای مستقل) استفاده می‌شود. یون‌های اصلی و فلزات سنگین بیش‌تر با به کار بردن مدل SMLR برای شناسایی پارامترهای مؤثر که بیش‌ترین تغییرپذیری در DWQI و PIs را

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مطالعه شده در رودخانه تالار

Table 1- Characteristics of the studied stations in Talar river

ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)
S1	53 09 30	35 53 14	2171
S2	53 07 58	35 56 47	1770
S3	53 02 56	35 59 52	1345
S4	53 03 47	36 06 26	1270
S5	52 45 31	36 04 35	870
S6	52 57 05	36 09 36	617
S7	52 52 51	36 18 41	205
S8	52 48 39	36 30 36	13

جدول ۲- توصیف آماری پارامترهای فیزیکی-شیمیایی اندازه‌گیری شده

Table 2 - Statistical description of measured physicochemical parameters

پارامتر	واحد	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار
Cl ⁻	(mg/L)	2	75	38.8	10.2
Mg ²⁺	(mg/L)	6.2	35	20.6	6.3
Ca ⁺²	(mg/L)	12	84	48	13
K ⁺	(mg/L)	1.5	16.2	8.95	3.2
TH	(mg/L)	1.8	436	218.2	46.80
Cu	(mg/L)	0.001	0.06	0.0305	0.009
Zn	(mg/L)	0.001	0.42	0.215	0.09
T-Coliform	(Colony/100ml)	25	2852	1852	105
Na ⁺	(mg/L)	10	65	37.5	14.6
Cd	(mg/L)	0.0001	0.053	0.016	0.01
B	(mg/L)	0.01	0.55	0.22	0.021
SO ²⁻⁴	(mg/L)	26.8	204	105.1	21.1
Ni	(mg/L)	0.001	0.06	0.021	0.019
Alkalinity	(mg/L)	101	378.3	239.3	54.7
pH	-	7.2	8.7	8	0.3
EC	μ mho/cm	406	790	562	138
F	(mg/L)	0.1	0.8	0.365	0.108
Mn	(mg/L)	0.001	0.09	0.0305	0.057
Fe	(mg/L)	0.1	1.7	0.31	0.3
Cr	(mg/L)	0.003	0.84	0.163	0.05
TDS	(mg/L)	360	606	459	98
NO ₃ ⁻	(mg/L)	0.8	4.98	2.508	0.852
Temperature	(°C)	-2	17.8	9.2	2
Pb	(mg/L)	0.001	41	0.705	3.2
BOD	(mg/L)	0.8	11.2	8.5	0.95
DO	(mg/L)	1.2	9.5	5.1	1.04

جدول ۳- برآورد شاخص کیفیت آب آشامیدنی (DWQI) با توجه به وزن نسبی تعیین شده برای پارامترهای آب سطحی

Table 3- Estimation of drinking water quality index (DWQI) according to relative weight for determined surface water parameters

پارامتر	وزن (ω_i)	WHO 2011	وزن نسبی (W_i)
Cl ⁻	1	250	0.0114
Mg ²⁺	2	30	0.0227
Ca ⁺²	2	75	0.0227
K ⁺	2	10	0.0227
TH	2	300	0.0227
Cu	2	2	0.0227
Zn	2	3	0.0227
Na ⁺	3	200	0.0341
Cd	3	0.003	0.0341
B	3	0.5	0.0341
SO ²⁻⁴	3	250	0.0341
Ni	3	0.07	0.0341
Alkalinity	3	120	0.0341
T-Coliform	3	1000	0.0341
Temperature	4	12-18	0.0455
pH	4	7.5	0.0455
EC	4	2000	0.0455
F	4	1.5	0.0455
Mn	4	0.05	0.0455
Fe	4	1.5	0.0455
Cr	5	0.05	0.0568
BOD	5	20	0.0568
DO	5	4	0.0568
TDS	5	500	0.0568
NO ₃ ⁻	5	50	0.0568
Pb	5	0.01	0.0568

جدول ۴- روش رتبه‌بندی حسابی برای محاسبه شاخص آلودگی فلزات سنگین (HPI)، شاخص ارزیابی فلزات سنگین (HEI)، شاخص آلودگی (PI) و شاخص آلودگی (CD)

Table 4 - Arithmetic ranking method for calculating Heavy Metal Pollution Index (HPI), Heavy Metal Evaluation Index (HEI), Degree contamination (CD) and Pollution Index (PI)

فلزات سنگین	مقادیر استاندارد سازمان جهانی (Mg/l)	حداکثر غلظت قابل قبول	واحد وزن W_i
Pb	0.01	10	0.20224
Cd	0.003	3	0.67415
B	0.5	500	0.00404
Cu	2	2000	0.00101
F	1.5	1500	0.00135
Mn	0.05	50	0.04045
Ni	0.07	70	0.0289
Zn	3	3000	0.00067
Fe	0.3	300	0.00674
Cr	0.05	50	0.04045

W_i وزن (1 / MAC)

جدول ۵- سطح آلودگی با توجه به مقادیر PI

Table 5 - Level of contamination according to PI values

رده	دامنه	تأثیر
1	کمتر از 1	بدون تأثیر
2	1-2	مقدار کمی تحت تأثیر قرار گرفته است.
3	2-3	به‌طور متوسط تحت تأثیر قرار گرفته است.
4	3-5	به‌شدت تحت تأثیر قرار گرفته است.
5	بیشتر از 5	به‌طور جدی تحت تأثیر قرار گرفته است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- داده‌های فیزیکی-شیمیایی

پارامترهای فیزیکی-شیمیایی دارای نقش تعیین‌کننده‌ای در ارزیابی کیفیت آب هستند. توضیحات آماری پارامترهای فیزیکی-شیمیایی در شبکه آب‌های سطحی جمع‌آوری شده در جدول ۶ نشان داده شده است. پارامترهای فیزیکی-شیمیایی به دست آمده نشان می‌دهند مقدار TDS در رودخانه تالار در محدوده ۳۶۰ تا ۶۰۶ میلی‌گرم در لیتر است. بین هدایت الکتریکی (EC) و TDS ارتباط نزدیک وجود دارد. نمک محلول در آب هرچه بیشتر باشد، مقدار EC بالاتر است و همچنین شوری را نشان می‌دهد. مقادیر EC در این رودخانه بین ۴۰۶ و ۷۹۰ ($\mu\text{mho/cm}$) بود که با مقدار TDS تطابق دارند. میزان DO بسته به غلظت نمک‌های محلول در آب و اقدامات زیستی موجود در آب و دمای آب متفاوت است (Ashar et al., 2020). اکسیژن تولیدشده توسط فتوسنتز در اکوسیستم‌های آبی اشباع اکسیژن را فراهم

می‌کند (Kang et al., 2019). بر اساس جدول ۶ مقادیر DO در ماه‌های تابستان، بین ۱/۲ تا ۹/۵ میلی‌گرم در لیتر متغیر بوده است. BOD مقدار اندازه‌گیری اکسیژن مورد نیاز میکروارگانیسم‌ها برای تخریب زیستی مواد آلی در آب است (Santoso, 2018). وجود مواد آلی بیشتر در منابع آب منجر به افزایش مقدار BOD می‌شود (Irham et al., 2017). بر اساس جدول ۱ مقدار BOD در رودخانه تالار در محدوده ۰/۸ تا ۱۱/۲ میلی‌گرم در لیتر ثبت شد که تطابق خوبی با مطالعات قبلی در این حوضه داشته است. میانگین غلظت پارامترهای Ca^{2+} ، Na^{2+} ، Mg^{+2} ، K^{+} ، Cl^{-} ، SO_4^{2-} و NO_3^{-} به ترتیب ۴۸، ۳۷/۵، ۲۰/۶، ۸/۹۵، ۳۸/۸، ۱۰۵/۱ و ۲/۵۰۶ میلی‌گرم در لیتر را نشان می‌دهند. از طرف دیگر میانگین غلظت فلزات سنگین Cd، Cr، Cu، F، Fe، Mn، Ni، Pb، Zn و B به ترتیب ۰/۲۱۵، ۰/۷۰۵، ۰/۰۲۱، ۰/۰۳۰۵، ۰/۳۱، ۰/۳۶۵، ۰/۳۰۵، ۰/۱۶۳، ۰/۱۶۳، ۰/۳۰۵، ۰/۳۶۵ میلی‌گرم در لیتر را نشان داد.

جدول ۶- ارزیابی آب‌های سطحی با توجه به شاخص‌های کیفیت آب

Table 6- Evaluation of surface water according to water quality indicators

Water Quality Index's (WQIs)	دامنه نمونه				دامنه	شرایط آب	تعداد نمونه (%)
	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار			
Drinking Water Quality Index (DWQI)					0-25	عالی	-
					26-50	خوب	3 (19%)
					51-75	ضعیف	6 (37%)
					76-100	خیلی ضعیف	3 (19%)
					>100	نامناسب	4 (25%)
Heavy Metal Pollution Index (HPI)					<100	آلودگی کم	7 (44%)
					>100	آلودگی زیاد	9 (56%)
Heavy Metal evaluation Index (HEI)					<0.3	بسیار خالص	-
					0.3-1	خالص	3 (19%)
					1-2	کمی تحت تأثیر	5 (31%)
					2-3	به طور متوسط تحت تأثیر	3 (19%)
					3-6	به شدت تحت تأثیر	1 (0.06%)
					>6	به طور جدی تحت تأثیر	4 (25%)
Degree contamination (CD)					>1	کمی تحت تأثیر	4 (25%)
					1-3	متوسط	7 (44%)
					<3	بالا	5 (31%)

در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به ترکیب شیمیایی نمونه‌های آب سطحی آنالیز شده رخساره‌های Ca-HCO_3 و Ca-Mg-Cl-SO_4 فراوانی بیش‌تری داشته و غالب بودند. علاوه بر این فرآیندهای اصلی کنترل‌کننده ژئوشیمی

۳-۲- سطوح ژئوشیمیایی و مکانیسم‌های کنترل

از نمودار سه خطی پایپر جهت دسته‌بندی نمونه‌ها و تعیین تیپ شیمیایی آب استفاده می‌شود که در این پژوهش با توجه به کاتیون و آنیون‌های غالب در نمونه‌های آب سطحی ایجاد شد و

پارامترهای ($PI > 1.0$) مثل B, Cu, F, Ni و Zn بدون تأثیر بر شبکه آب سطحی بوده است.

۳-۴- روابط بین شاخص کیفیت آب آشامیدنی و شاخص‌های آلودگی

روابط بین DWQI و PI_s (به‌عنوان متغیرهای وابسته) از طریق رگرسیون ساده محاسبه شده است، نمودار DWQI در مقابل PI_s از جمله HEI, HPI و CD در شکل ۶ نشان داده شده است، همبستگی DWQI با HEI و CD ضریب تقریباً بالایی را نشان می‌دهد ($R^2 = 0.93$)، درحالی‌که این رابطه با HPI ضریب همبستگی پایین‌تر ($R^2 = 0.79$) را نشان می‌دهد.

۳-۵- تحلیل آماری چندمتغیره

۳-۵-۱- عملکرد مدل‌های رگرسیون حداقل مربعات جزئی و رگرسیون‌های چندخطی گام به گام برای پیش‌بینی شاخص کیفیت آب آشامیدنی و شاخص‌های آلودگی

شکل ۷ نمودار پراکنندگی مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده DWQI و PI را برای تجزیه و تحلیل PLSR محل‌های نمونه‌برداری آب نشان می‌دهد. مدل‌های PLSR پیش‌بینی‌های دقیقی از DWQI, HPI, HEI و CD برای اعتبارسنجی و دقت‌سنجی ارائه داده‌اند. مجموعه داده‌ها، با مقادیر R^2 حدود ۰/۸۷۲۱ تا ۱/۰۰ برای اعتبارسنجی و مقادیر R^2 حدود ۰/۸۷۲۱ تا ۰/۹۹۱ برای صحت‌سنجی نشان داده شد.

از رگرسیون خطی چندمتغیره گام‌به‌گام برای برآورد مؤثرترین پارامترها جهت تشخیص بهتر تغییرات DWQI و PI_s استفاده شد. به‌عنوان مثال، مدل SMLR با استفاده از تمام یون‌های اصلی و فلزات سنگین به‌عنوان داده ورودی، برای برآورد DWQI به‌عنوان متغیر خروجی نمونه‌های آب در جدول ۸ عملکرد بهتری دارد ($R^2 = 1$ و خطای استاندارد = ۰/۴۰۲). از آن‌جا که مدل SMLR (24) در جدول ۸ کم‌ترین خطای استاندارد و بالاترین R^2 را دارد، این مدل برای تخمین DWQI انتخاب شده است (رابطه ۶).

(۶)

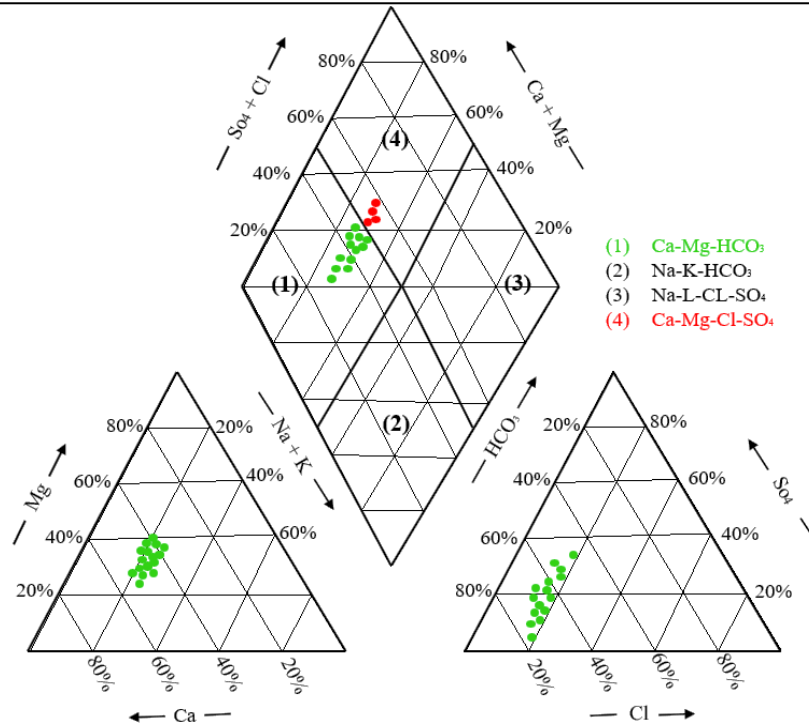
$$\begin{aligned} DWQI = & 2.613 \times 10^{-8} + 474.932 \times (Pb) + 0.042 \times (TDS) \\ & + 17.27 \times (Fe) + 99.859 \times (Cr) + 57.241 \times (Ni) + 14.375 \\ & \times (Mn) + 1429.87 \times (Cd) + 0.303 \times (K) + 0.079 \times (Mg) \\ & + 0.040 \times (\text{alkalinity}) + 3.458 \times (F) + 0.008 \times (TH) + 0.026 \\ & \times (SO_4) + 0.421 \times (pH) + 1.842 \times (B) + 0.142 \times (NO_3) \\ & + 0.042 \times (Ca) + 0.023 \times (Na) + 0.006 \times (Cl) + 1.24 \times (Cu) \\ & + 0.534 \times (Zn) + 0.870 \times (BOD) + 1.87 \times (DO) + 3.204 (EC) \end{aligned}$$

آب‌های سطحی با استفاده از نمودار Gibbs با رسم TDS در مقابل نسبت‌ها $(Na+K)/(Na+K+Ca)$ و $Cl/(Cl+HCO_3)$ شناخته شدند. با توجه به نمودار گیبس (شکل ۴) نقاط آب سطحی در مناطق دارای هوازدگی و قابل نفوذ سنگ‌ها پخش شده‌اند.

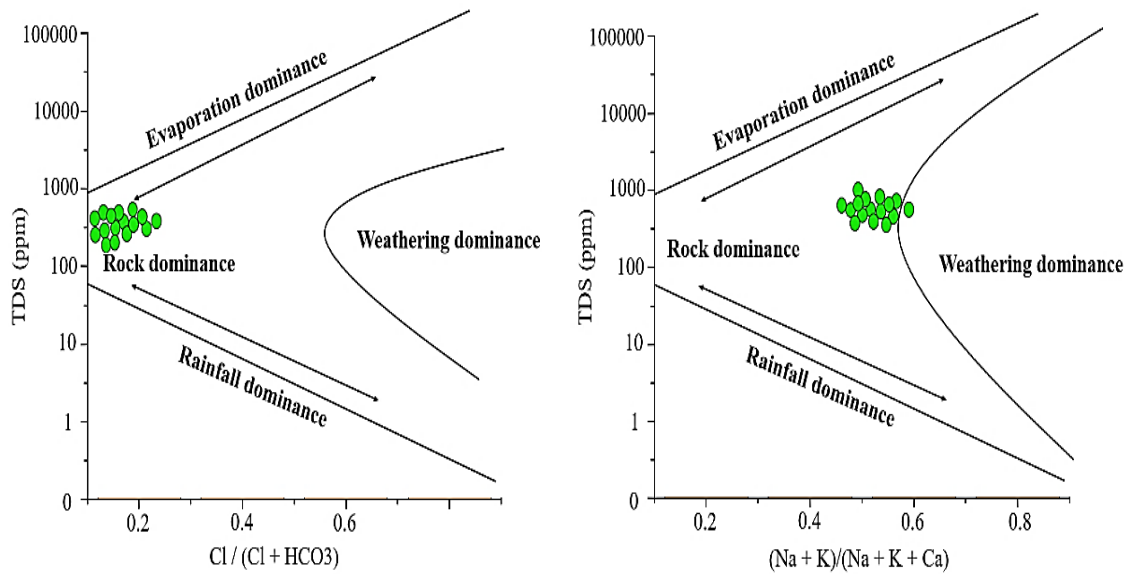
۳-۳- شاخص‌های کیفیت آب

توضیح آماری شاخص‌های کیفیت آب مانند DWQI, HEI, HPI و CD در جدول ۶ ارائه شده‌اند. مقادیر DWQI در دامنه ۲۵/۴۲ و ۱۰۶/۳۵ با میانگین ۶۵/۹۷ است و نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که تنها ۱۹ درصد نمونه‌های آب در طبقه آب‌های خوب، ۳۷ درصد در طبقه آب‌های ضعیف، ۱۹ درصد در طبقه خیلی ضعیف، ۲۵ درصد در طبقه نامناسب برای مصارف شرب قرار دارند. نقشه توزیع DWQIs در شبکه آب‌های منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که بیش‌ترین تخریب کیفیت آب سطحی در نزدیکی دریاچه خزر است (شکل ۵ الف). مقادیر HPI از ۱۸/۲۸ و ۱۴۲/۵۱ با میانگین ۷۰/۲۴ می‌باشد که مقدار ۴۴ درصد نمونه‌ها نشان‌دهنده مقادیر کم آلودگی است درحالی‌که ۵۶ درصد نمونه‌ها نشان‌دهنده آلودگی بالا به‌وسیله فلزات سنگین هستند (شکل ۵ ب). مقادیر HEI نمونه‌های آب سطحی بین ۱/۰۱ و ۱۰/۲۳ با میانگین ۶/۶۲ است. نتایج HEI نشان داد که نمونه‌های آب سطحی به‌تدریج تحت تأثیر فلزات سنگین قرار گرفته‌اند. ۱۹ درصد نمونه‌ها خالص، ۳۱ درصد نمونه‌ها تحت تأثیر کم آلودگی، ۱۹ درصد نمونه‌ها به‌طور متوسط، شش درصد به‌شدت و ۲۵ درصد نمونه‌ها تحت تأثیر جدی آلودگی قرار گرفته‌اند. با توجه به تغییرات مکانی HEI نمونه‌های آب از مناطق مرکزی تا دریای خزر بعد از عبور از مناطق شهری تحت تأثیر فلزات سنگین قرار گرفته‌اند (شکل ۵ ج). مقادیر CD برای نمونه‌های مطالعه شده نشان می‌دهد دامنه بین ۰/۷-۵ و ۵/۳۵ با میانگین ۱/۰۲ است. مقادیر CD نشان داد که ۲۵ درصد منفی ($CD < 1$) نشانگر کیفیت بهتر نسبت به آلودگی فلزات سنگین است، در حالی‌که ۷۵ درصد باقی‌مانده مقدار مثبت ($CD > 1$) که نشان‌دهنده کیفیت آب متوسط تا بسیار آلوده است (شکل ۵ د).

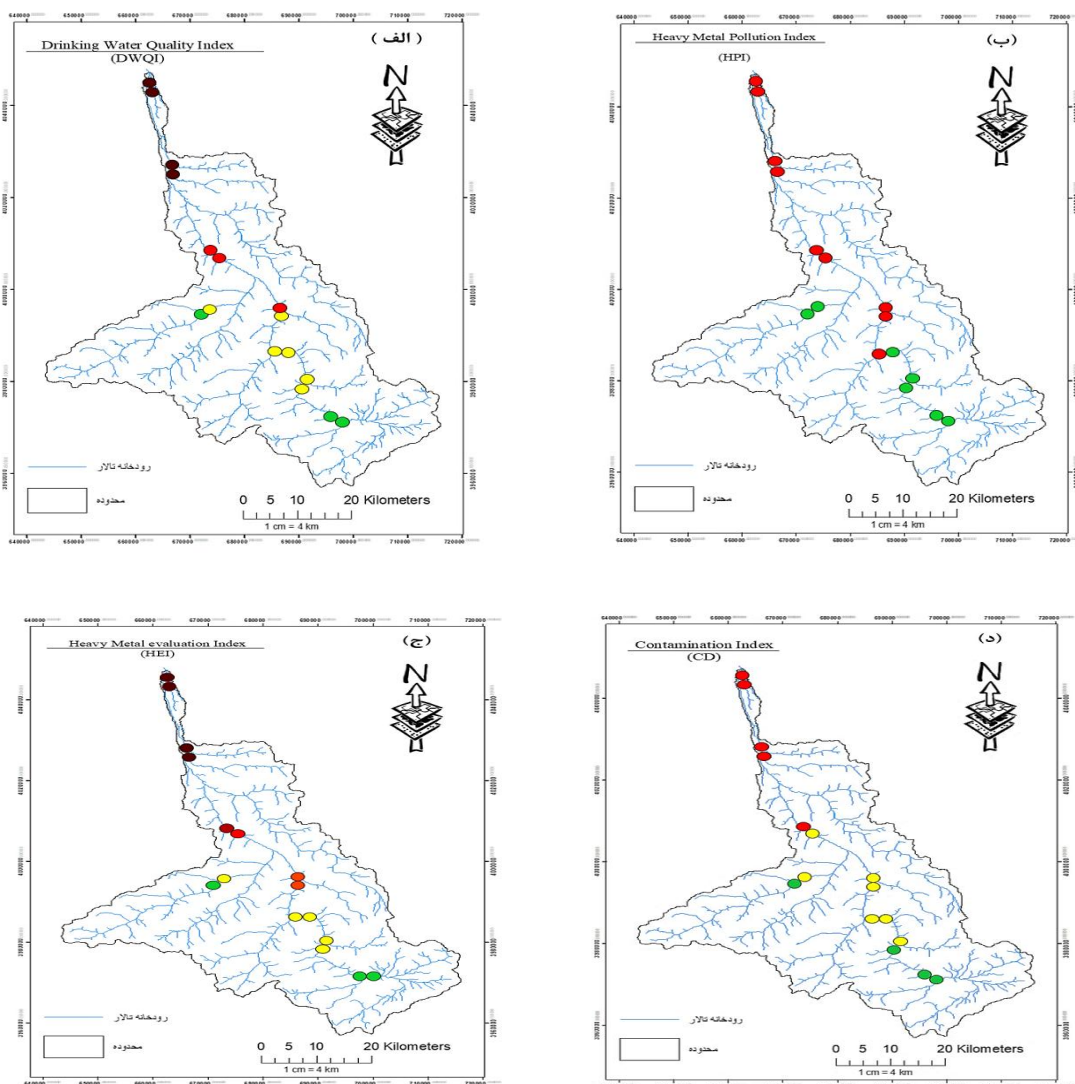
در جدول ۷ نتایج PI اثر فلزات سنگین براساس طبقه‌بندی سطوح PI را نشان می‌دهد. مقادیر PI به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که نمونه‌های آب سطحی به مقدار کم تحت تأثیر Cr ($PI = 1.18$), Fe ($PI = 1.68$) و Cd ($PI = 1.11$) قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، شبکه آب سطحی به‌طور متوسط تحت تأثیر Mn ($PI = 2.91$) و به‌شدت تحت تأثیر Pb ($PI = 3.01$) قرار گرفته، درحالی‌که



شکل ۳- گونه‌های ژئوشیمیایی و نوع آب بر اساس نمودار پایپر
Figure 3- Geochemical species and water type based on Piper diagram



شکل ۴- مکانیسم‌های کنترل ژئوشیمیایی، مطابق نمودار گیبس
Figure 4- Geochemical control mechanisms, according to the Gibbs diagram



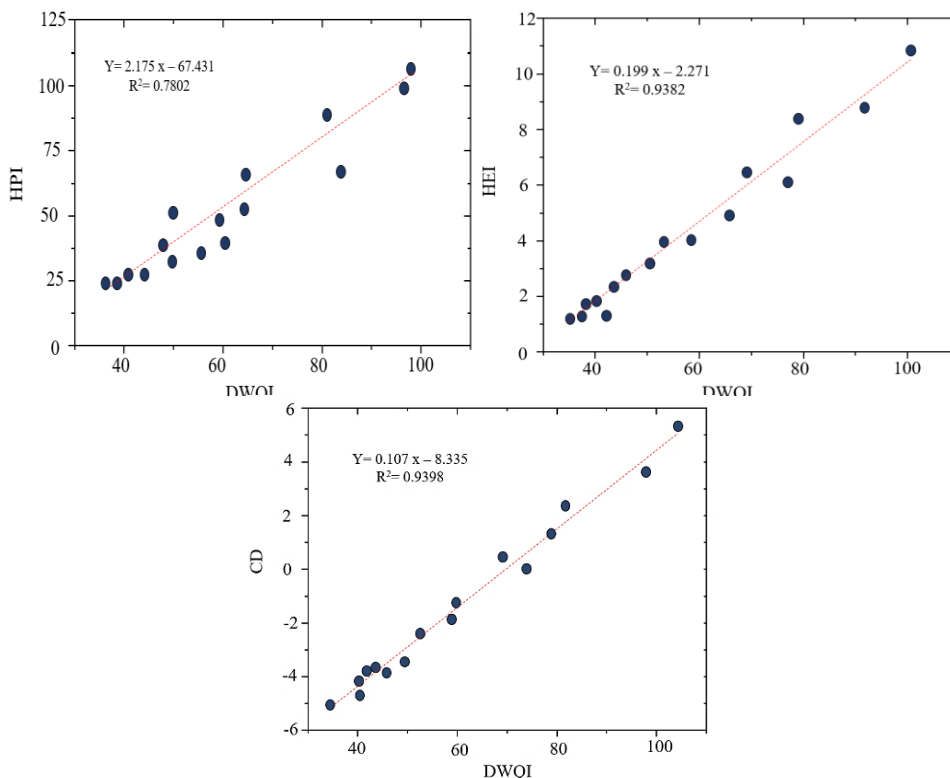
شکل ۵- نقشه های توزیع شاخص های کیفیت آب شبکه آب های سطحی: (الف) شاخص کیفیت آب آشامیدنی (DWQI)، (ب) شاخص آلودگی فلزات سنگین (HPI)، (ج) شاخص ارزیابی فلزات سنگین (HEI) و (د) شاخص آلودگی (CD)

Figure 5- Distribution maps of water quality indicators of surface water network: (a) Drinking water quality index (DWQI), (b) Heavy metal pollution index (HPI), (c) Heavy metal evaluation index (HEI), and (d) Degree contamination (CD)

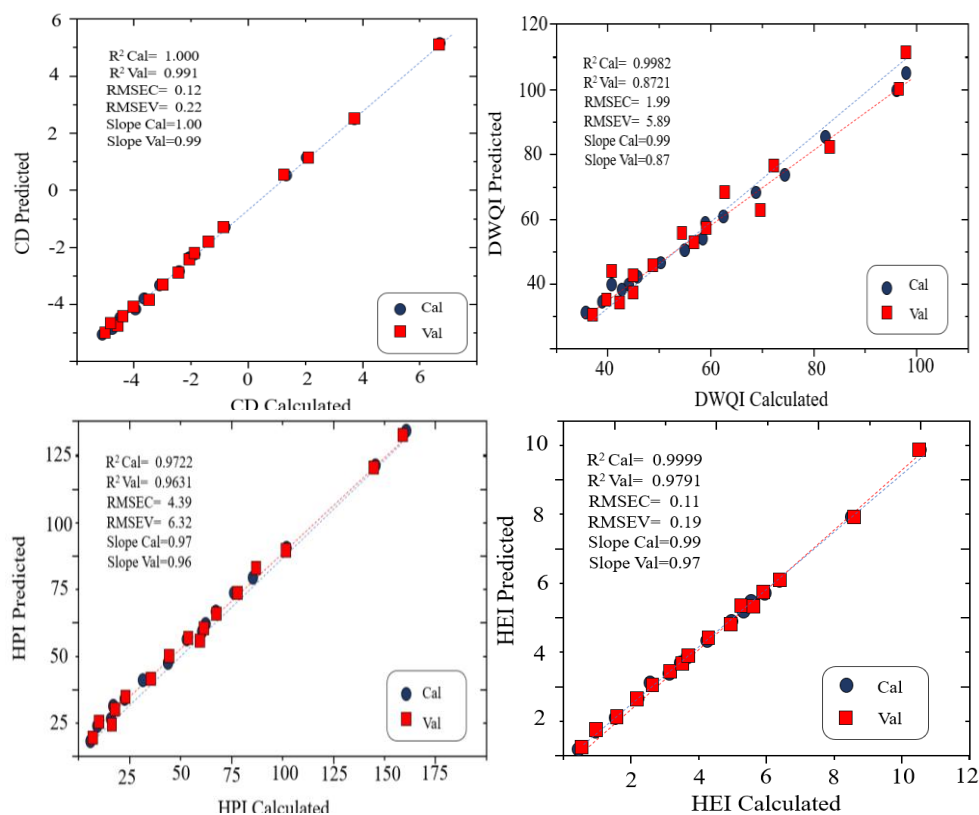
جدول ۷- ارزیابی کیفیت آب سطحی با توجه به نتایج فلزات سنگین

Table 7- Assessment of surface water quality according to the results of heavy metals

فلزات سنگین	PI	دامنه	وضعیت
Pb	3.01	4	به شدت تحت تأثیر قرار گرفته است.
Cd	1.11	2	مقدار کمی تحت تأثیر قرار گرفته است.
B	0.15	1	بدون تأثیر
Cu	0.01	1	بدون تأثیر
F	0.21	1	بدون تأثیر
Mn	2.91	3	به طور متوسط تحت تأثیر قرار گرفته است.
Ni	0.24	1	بدون تأثیر
Zn	0.01	1	بدون تأثیر
Fe	1.68	2	مقدار کمی تحت تأثیر قرار گرفته است.
Cr	1.18	2	مقدار کمی تحت تأثیر قرار گرفته است.



شکل ۶- روابط بین شاخص کیفیت آب آشامیدنی DWQI، HPI، HEI و CD با توجه به فلزات سنگین
 Figure 6 - Relationships between DWQI, HPI, HEI and CD drinking water quality index with respect to heavy metals



شکل ۷- روابط مشاهده شده و پیش بینی شده برای مجموعه داده های کالیبراسیون و اعتبارسنجی DWQI، HPI، HEI و CD با توجه به

فلزات سنگین با استفاده از مدل رگرسیون حداقل مربعات جزئی ***: $p < 0.001$

Figure 7- Observed and predicted relationships for DWQI, HPI, HEI and CD calibration and validation datasets with respect to heavy metals using partial least squares regression model ***: $p < 0.001$

جدول ۸- استخراج مهم‌ترین عناصر اصلی و فلزات سنگین با استفاده از رگرسیون خطی گام‌به‌گام برای شاخص کیفیت آب آشامیدنی و شاخص‌های آلودگی

Table 8- Extraction of the most important main elements and heavy metals using stepwise linear regression for drinking water quality index and pollution indices

شماره مدل	فلزات سنگین تاثیرگذار در DWQI	R ²	SE
1	Pb	0.789	6.66982
2	Pb, TDS	0.894	5.55858
3	Pb, TDS, Fe	0.901	2.32572
4	Pb, TDS, Fe, Cr	0.922	1.05682
5	Pb, TDS, Fe, Cr, Ni	0.923	0.95285
6	Pb, TDS, Fe, Cr, Ni, Mn	0.925	0.62354
7	Pb, TDS, Fe, Cr, Ni, Mn, Cd	0.946	0.58524
8	Pb, TDS, Fe, Cr, Ni, Mn, Cd, K	0.952	0.49664
9	Pb, TDS, Fe, Cr, Ni, Mn, Cd, K, Mg	0.961	0.48951
10	Pb, TDS, Fe, Cr, Ni, Mn, Cd, K, Mg, alkalinity	0.968	0.41256
11	Pb, TDS, Fe, Cr, Ni, Mn, Cd, K, Mg, alkalinity, F	0.971	0.31477
12	Pb, TDS, Fe, Cr, Ni, Mn, Cd, K, Mg, alkalinity, F, TH	0.981	0.12982
13	Pb, TDS, Fe, Cr, Ni, Mn, Cd, K, Mg, alkalinity, F, TH, SO ₄	0.985	0.09854
14	Pb, TDS, Fe, Cr, Ni, Mn, Cd, K, Mg, alkalinity, F, TH, SO ₄ , PH	0.990	0.07254
15	Pb, TDS, Fe, Cr, Ni, Mn, Cd, K, Mg, alkalinity, F, TH, SO ₄ , PH, B	0.991	0.05324
16	Pb, TDS, Fe, Cr, Ni, Mn, Cd, K, Mg, alkalinity, F, TH, SO ₄ , PH, B, NO ₃	0.999	0.03525
17	Pb, TDS, Fe, Cr, Ni, Mn, Cd, K, Mg, alkalinity, F, TH, SO ₄ , PH, B, NO ₃ , Ca	0.999	0.03251
18	Pb, TDS, Fe, Cr, Ni, Mn, Cd, K, Mg, alkalinity, F, TH, SO ₄ , PH, B, NO ₃ , Ca, Na	0.999	0.01101
19	Pb, TDS, Fe, Cr, Ni, Mn, Cd, K, Mg, alkalinity, F, TH, SO ₄ , PH, B, NO ₃ , Ca, Na, Cl	0.999	0.00320
20	Pb, TDS, Fe, Cr, Ni, Mn, Cd, K, Mg, alkalinity, F, TH, SO ₄ , PH, B, NO ₃ , Ca, Na, Cl, Cu	1.000	0.00062
21	Pb, TDS, Fe, Cr, Ni, Mn, Cd, K, Mg, alkalinity, F, TH, SO ₄ , PH, B, NO ₃ , Ca, Na, Cl, Cu, Zn	1.000	0.00025
22	Pb, TDS, Fe, Cr, Ni, Mn, Cd, K, Mg, alkalinity, F, TH, SO ₄ , PH, B, NO ₃ , Ca, Na, Cl, Cu, Zn, BOD	1.000	0.00004
23	Pb, TDS, Fe, Cr, Ni, Mn, Cd, K, Mg, alkalinity, F, TH, SO ₄ , PH, B, NO ₃ , Ca, Na, Cl, Cu, Zn, BOD, DO	1.000	0.00002
24	Pb, TDS, Fe, Cr, Ni, Mn, Cd, K, Mg, alkalinity, F, TH, SO ₄ , PH, B, NO ₃ , Ca, Na, Cl, Cu, Zn, BOD, DO, EC	1.000	0.00000
شماره مدل	فلزات سنگین تاثیرگذار در HPI	R ²	SE
1	Pb	0.971	4.99988
2	Pb, Cd	0.988	2.90212
3	Pb, Cd, Cr	0.995	0.85642
4	Pb, Cd, Cr, Ni	0.999	0.22354
5	Pb, Cd, Cr, Ni, Fe	0.999	0.09542
6	Pb, Cd, Cr, Ni, Fe, Mn	1.000	0.01895
7	Pb, Cd, Cr, Ni, Fe, Mn, F	1.000	0.00854
8	Pb, Cd, Cr, Ni, Fe, Mn, F, B	1.000	0.00125
9	Pb, Cd, Cr, Ni, Fe, Mn, F, B, Cu	1.000	0.00024
10	Pb, Cd, Cr, Ni, Fe, Mn, F, B, Cu, Zn	1.000	0.00000
شماره مدل	فلزات سنگین تاثیرگذار در HEI	R ²	SE
1	Pb	0.861	0.89985
2	Pb, Fe	0.923	0.52891
3	Pb, Fe, Cr	0.968	0.45285
4	Pb, Fe, Cr, Ni	0.989	0.32585
5	Pb, Fe, Cr, Ni, Mn	0.998	0.18952
6	Pb, Fe, Cr, Ni, Mn, F	0.999	0.07185
7	Pb, Fe, Cr, Ni, Mn, F, Cd	1.000	0.02541
8	Pb, Fe, Cr, Ni, Mn, F, Cd, B	1.000	0.00981
9	Pb, Fe, Cr, Ni, Mn, F, Cd, B, Cu	1.000	0.00980
10	Pb, Fe, Cr, Ni, Mn, F, Cd, B, Cu, Zn	1.000	0.00000

$$HEI = 1.891 \times 10^{-10} + 100.0 \times (Pb) + 3.333 \times (Fe) + 20.0 \times (Cr) + 14.286 \times (Ni) + 2.5 \times (Mn) + 0.667 \times (F) + 333.333 \times (Cd) + 0.417 \times (B) + 0.5 \times (Cu) + 0.2 \times (Zn)$$

(۹)

$$CD = 100 \times (Pb) + 3.333 \times (Fe) + 20 \times (Cr) + 14.286 \times (Ni) + 2.5 \times (Mn) + 0.667 \times (F) + 333.333 \times (Cd) + 0.417 \times (B) + 0.5 \times (Cu) + 0.2 \times (Zn) - 10.0$$

به‌طور کلی چهار رابطه فوق بهترین تخمین با کم‌ترین خطای استاندارد و بالاترین R² را برای HEI, HPI, DWQI و CD فراهم می‌کنند.

مدل SMLR (۱۰) از تمام فلزات سنگین به‌عنوان داده‌های ورودی برای تشخیص بهتر سه شاخص آلودگی (به‌عنوان مثال HEI, HPI, CD) به‌عنوان داده‌های خروجی در جدول ۸ استفاده می‌کند. SMLR و معادلات سه مدل به صورت رابطه‌های ۷ تا ۹ ارائه شده‌اند:

(۷)

$$HPI = 1.167 \times 10^{-8} + 2104.22 \times (Pb) + 23380.21 \times (Cd) + 84.17 \times (Cr) + 42.94 \times (Ni) + 2.34 \times (Fe) + 1.32 \times (Mn) + 0.94 \times (F) + 0.04 \times (B) + 0.05 \times (Cu) + 0.01 \times (Zn)$$

(۸)

۳-۶- بحث

۳-۶-۱- پارامترهای فیزیکی-شیمیایی

پارامترهای فیزیکی-شیمیایی به دست آمده نشان می‌دهند که مقدار PH کمی اسیدی رو به قلیایی بوده و در محدوده مورد قبول آب شرب مطابق دستورالعمل ارائه شده از طرف WHO قرار دارد و همچنین مقادیر pH وجود Ca^{2+} ، Mg^{2+} و CO_3^{2-} در نمونه‌های آب و کاهش سمیت فلزات سنگین را نشان داد. سطح TDS نمونه‌های جمع‌آوری شده حاکی از شیرین بودن آب است؛ زیرا انحلال نمک بسیار کم و تبادل یونی به صورت مداوم بین رودخانه تالار و شاخه‌های متصل به آن صورت می‌گیرد. همچنین مقدار EC کم‌تر از حد مجاز بوده و براساس دستورالعمل WHO2011 برای مصرف شرب مناسب نشان می‌دهد. غلظت کاتیون و آنیون نشان داد که کلسیم اولین، کاتیون و سدیم دومین کاتیون غالب است. علاوه بر این، قلیایی بودن اولین آنیون و سولفات دومین آنیون غالب است. همچنین مقادیر B، Zn، Pb، Ni، Mn، Fe، F، Cu، Cr و Cd به‌طور قابل‌توجهی بین نمونه‌ها متفاوت بود و بررسی دقیق نشان داد مقادیر کروم، آهن، منگنز و سرب بیش از حد مجاز ارائه شده توسط WHO 2011 است. شیمی آب سطحی متمرکز بر معیارهای هیدروشیمیایی، اطلاعات اولیه در مورد انواع آب و فرآیندهای مختلف ژئوشیمیایی را فراهم می‌کند. طبقه‌بندی پایپر نشان داد که آب سطحی تحت تأثیر فعل و انفعالات و هوازدگی سنگ‌ها قرار دارد و همچنین با توجه به نمودار ژئوشیمیایی گیبس نشان داده شد که نقاط آب سطحی در مناطق دارای هوازدگی و دارای قابلیت نفوذ قرار دارند. در نتیجه این عوامل به‌عنوان مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر بر ژئوشیمی آب‌های سطحی در منطقه مورد مطالعه مطرح شده‌اند.

۳-۶-۲- ارزیابی شاخص‌های کیفیت

WQIs به‌عنوان ابزاری برای تشخیص مناسب بودن آب شرب از جنبه فلزات سنگین در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده از WQIs نشان می‌دهند که بیش‌تر آب‌های سطحی منطقه مورد مطالعه برای استفاده شرب مناسب نیستند، به‌ویژه در قسمت شمال رودخانه در نزدیکی دریاچه خزر بیش‌ترین مقادیر آلودگی را دارا است. این ممکن است به دلیل تأثیر تخلیه فاضلاب شهر قائم‌شهر و وجود مناطق کشاورزی باشند. بر این اساس آب‌های سطحی منطقه باید قبل از استفاده به‌منظور شرب تصفیه شوند. شاخص‌های آلودگی شامل HEI، HPI و CD نشان داد که آب‌های سطحی منطقه مورد مطالعه توسط فلزات سنگین آلوده شده‌اند و این آلودگی از ابتدای رودخانه تا ایستگاه نزدیک دریای خزر افزایش می‌یابد. علاوه بر این نتایج

PI نشان داد که نمونه‌های آب سطحی به مقدار کم تحت تأثیر Cr، Fe و Cd، به‌طور متوسط تحت تأثیر Mn و به شدت تحت تأثیر Pb قرار گرفته است که می‌تواند به دلیل تردد زیاد عبور اتومبیل در اطراف رودخانه و سیستم ضعیف فاضلاب باشد. همچنین مقایسه نقشه‌های توزیع DWQI و HEI کاهش کیفیت آب سطحی را در منطقه نزدیک دریاچه خزر نشان داد. کاهش شدید کیفیت آب سطحی در منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر فلزات سنگین بر اساس ارتباط بین DWQI و PIs است (شکل ۵). بنابراین، تخریب کیفیت آب در منطقه مورد مطالعه نشان داد که شبکه آب سطحی بر اساس HPI به مقدار زیادی آلوده، بر اساس HEI به‌طور جدی تحت تأثیر فلزات سنگین قرار گرفته است، درحالی‌که بر اساس CD آلودگی کم را نشان می‌دهد. آب‌های سطحی منطقه مورد مطالعه به دلیل افزایش تخلیه فاضلاب در شبکه آب‌های سطحی در معرض کاهش کیفیت و تخریب قرار گرفته است. بنابراین، ادغام DWQI و PIs یک روش ارزشمند و کاربردی برای ارزیابی کیفیت آب سطحی به‌منظور شرب بر اساس پارامترهای فیزیکی-شیمیایی از جنبه فلزات سنگین است.

۳-۶-۳- تحلیل آماری چندمتغیره: مدل‌های رگرسیون حداقل مربعات جزئی و رگرسیون‌های خطی گام‌به‌گام برای پیش‌بینی شاخص کیفیت آب آشامیدنی و شاخص‌های آلودگی

پیش‌بینی دقیق شاخص‌های HPI، HEIT، DWQI و CD می‌تواند از روش‌های ریاضی انجام گیرد، اما این روش‌ها به معادلات ریاضی زیادی نیاز دارند و برای تبدیل مقادیر زیادی از ویژگی‌های آب به یک مقدار که سطوح کیفیت آب و کیفیت کلی آب را تشریح نماید، پیچیده هستند. از مدل PLSR برای پیش‌بینی DWQI بر اساس متغیرهای پاسخ‌دهنده چندگانه از یون‌های اصلی و فلزات سنگین و PIs براساس متغیرهای پاسخ‌دهنده چندگانه از فلزات سنگین آزمایش شد. مدل‌های ارائه شده مدل‌های قوی و دقیقی برای تعیین شاخص‌های مختلف با بالاترین R^2 و بیش‌ترین مقدار شیب نزدیک به ۱ هستند، علاوه بر این دارای کم‌ترین مقدار RMSE برای اعتبارسنجی داده‌ها هستند. به‌عنوان مثال مدل PLSR برای HEI نشان داد که مقادیر R^2 بین ۰/۹۷ تا ۰/۹۹ و مقادیر شیب بین ۰/۹۷ تا ۰/۹۹ و مقادیر RMSE بین ۰/۱۱ تا ۰/۱۹ به ترتیب برای دقت‌سنجی و اعتبارسنجی هستند. علاوه بر این رگرسیون‌های خطی چندمتغیره گام‌به‌گام برای تخمین DWQI و PIs مورد ارزیابی قرار گرفتند. مدل‌های SMLR با استفاده از یون‌های اصلی و فلزات سنگین تخمین‌های خوبی برای همه شاخص‌ها با مقدار R^2 مساوی ۰/۹۷

استفاده از روش‌های اصلاح تصفیه فاضلاب قبل از تخلیه به آب‌های شیرین، باعث بهبود کیفیت آب و جلوگیری از تخریب آن در منطقه مورد مطالعه می‌شود که با مطالعات انجام شده در رودخانه تالار (Babolhakami & Gholami Sefidkouhi, 2013; Kaveh et al., 2019) مطابقت دارد. استفاده از پارامترهای فیزیکی-شیمیایی و شاخص‌های کیفیت آب شامل DWQI, HPI, HEI, CD و PI به کمک آنالیزهای آماری چندمتغیره یک روش مؤثر و کاربردی برای دست آوردن تصویر شفاف از کیفیت آب و مکانیسم‌های کنترل آن است. مدل‌های PLSR روش سریع، آسان و قابل اطمینانی برای محاسبه شاخص‌ها هستند. این مدل‌ها برآوردهای دقیق برای شاخص‌های مختلف که با بالاترین مقادیر R^2 و بیشترین مقدار شیب نزدیک به یک و کمترین مقدار SE برای دقت‌سنجی و اعتبارسنجی داده‌ها ارائه می‌دهند. مدل‌های SMLR بهترین مدل‌ها را برای DWQI و PIs با استفاده از یون‌های اصلی و فلزات سنگین به‌عنوان داده‌های ورودی با R^2 مساوی یک تولید می‌کنند.

رسوبات رودخانه هراز، با استفاده از شاخص بار آلودگی (PLI) و شاخص تجمع جغرافیایی (Igeo). تحقیقات آب و خاک ایران، ۹۴۲-۹۳۳، (۴)۵۲.
کاو، ع. حیب‌نژاد روشن، م.، شاهدی، ک.، و قربانی، ج. (۱۳۹۲). بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب (مطالعه موردی: رود تالار، استان مازندران). ۶۲-۴۹، (۱۸)۶.

References

- Appiah-Opong, R., Ofori, A., Ofosuhen, M., Ofori-Attah, E., Nunoo, F.K.E., Tuffour, I., Gordon, C., Arhinful, D.K., Nyarko, A.K., & Fosu-Mensah, B.Y. (2021). Heavy metals concentration and pollution index (HPI) in drinking water along the southwest coast of Ghana. *Applied Water Science*, 11(3), 1-10.
- Ashar, Y.K., Susilawati, S., & Agustina, D. (2020). Analisis Kualitas (BOD, COD, DO) Air Sungai Pesangrahan Desa Rawadenok Kelurahan Rangkepan Jaya Baru Kecamatan Mas Kota Depok. Fakultas Kesehatan Masyarakat UINSU Medan.
- Babolhakami, A., & Gholami Sefidkouhi, M.A. (2019). Analyze of Talar River water quality using Multivariate Techniques. *Journal of Watershed Management Research*, 9(18), 250-259. <https://doi.org/10.29252/jwmr.9.18.250>
- Chabuk, A., Al-Madhlom, Q., Al-Maliki, A., Al-Ansari, N., Hussain, H.M., & Laue, J. (2020). Water quality assessment along Tigris River (Iraq) using water quality index (WQI) and GIS software. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(14), 1-23.
- Chaturvedi, A., Bhattacharjee, S., Mondal, G.C., Kumar, V., Singh, P.K., & Singh, A.K. (2019). Exploring new correlation between hazard index and heavy metal pollution index in groundwater. *Ecological Indicators*, 97, 239-246.
- Edet, A.E., & Offiong, O.E. (2002). Evaluation of water quality pollution indices for heavy metal contamination monitoring. A study case from Akpabuyo-Odukpani area, Lower Cross River Basin (southeastern Nigeria). *GeoJournal*, 57(4), 295-304.
- Egbueri, J.C., Ezugwu, C.K., Ameh, P.D., Unigwe, C.O., & Ayejoto, D.A. (2020). Appraising

و خطای استاندارد بسیار پایین برای DWQI تولید کردند. مدل‌های SMLR نشان دادند که خطای استاندارد در هنگام برآورد DWQI و PIs با افزایش متغیرهای ورودی برای یون‌های اصلی و فلزات سنگین کاهش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر روش‌های یکپارچه‌ای به منظور توصیف کیفیت آب شرب با توجه به ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی در رودخانه تالار استان مازندران ارائه داد. این کار به وسیله چندین آنالیز آماری از جمله PLSR و SMLR انجام شد. نتایج نشان داد که آب این رودخانه از نوع آب‌های قلیایی با Ca-Mg و Ca-Mg-Cl-SO4 است. هم‌چنین شبکه آب‌های سطحی منطقه مورد مطالعه به مقدار کم تحت تأثیر کروم، آهن و کادمیوم، به‌طور متوسط تحت تأثیر منگنز و به‌شدت تحت تأثیر سرب است. تخریب و کاهش کیفیت آب سطحی را می‌توان به استفاده گسترده از سموم کشاورزی، فعالیت‌های صنعتی و شبکه زهکشی ضعیف نسبت داد. هم‌چنین کیفیت آب از بالادست به سمت پایین‌دست رودخانه به‌علت ورود پساب کشاورزی و عبور از مناطق شهری و صنعتی به‌شدت کاهش یافته است. بنابراین،

منابع

خلیلی، ر.، پروین‌نیا، م.، و زالی، ا. (۱۳۹۹). ارزیابی کیفیت آب رودخانه گرمارود با استفاده از شاخص کیفیت آب بنیاد ملی بهداشت (NSFWQI)، شاخص آلودگی رودخانه (RPI) و شاخص کیفیت وزنی حسابی آب (WAWQI). *محیط‌زیست و مهندسی آب*، (۳)۶، ۲۷۴-۲۸۴.

خلیلی، ر.، زالی، ا.، و متقی، ح. (۱۴۰۰). ارزیابی فلزات سنگین در آب و

- drinking water quality in Ikem rural area (Nigeria) based on chemometrics and multiple indexical methods. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 1–18.
- Elsayed, S., Hussein, H., Moghanm, F.S., Khedher, K.M., Eid, E.M., & Gad, M. (2020). Application of Irrigation Water Quality Indices and Multivariate Statistical Techniques for Surface Water Quality Assessments in the Northern Nile Delta, Egypt. *Water*, 12(12), 3300.
- Herojeet, R., Rishi, M.S., & Kishore, N. (2015). Integrated approach of heavy metal pollution indices and complexity quantification using chemometric models in the Sirsa Basin, Nalagarh valley, Himachal Pradesh, India. *Chinese Journal of Geochemistry*, 34(4), 620–633.
- Irham, M., Abrar, F., & Kurnianda, V. (2017). Analisis BOD dan COD di perairan estuaria Krueng Cut, Banda Aceh. *DEPIK Jurnal Ilmu-Ilmu Perairan, Pesisir Dan Perikanan*, 6(3), 199–204.
- Islam, A.R.M.T., Al Mamun, A., Rahman, M.M., & Zahid, A. (2020). Simultaneous comparison of modified-integrated water quality and entropy weighted indices: implication for safe drinking water in the coastal region of Bangladesh. *Ecological Indicators*, 113, 106229.
- Jesuraja, K., Selvam, S., & Murugan, R. (2021). GIS-based assessment of groundwater quality index (DWQI and AWQI) in Tiruchendur Coastal City, Southern Tamil Nadu, India. *Environmental Earth Sciences*, 80(7), 1–17.
- Joksimović, D., Perošević, A., Castelli, A., Pestorić, B., Šuković, D., & Đurović, D. (2020). Assessment of heavy metal pollution in surface sediments of the Montenegrin coast: a 10-year review. *Journal of Soils and Sediments*, 20(6), 2598–2607.
- Kaveh, A., Habibnejad Roushan, M., Shahedi, K., & Ghorbani, J. (2013). Spatio-temporal variations of water quality (Case study: Talar River, the province of Mazandaran). *Water Engineering*, 6(18), 49–62 (in Persian).
- Kang, D., So, Y.H., Park, K., Kim, I., & Kim, B.W. (2019). Analyses of TOC efficiency and correlation between DO, BOD, COD and influence factors using long-term observation data in the main stream of Nakdong River. *Journal of Environmental Science International*, 28(5), 465–474.
- Khalili, R., Ghaedi, M., Parvinnia, M., & Sabzehmeidani, M.M. (2021). Simultaneous removal of binary mixture dyes using Mn - Fe layered double hydroxide coated chitosan fibers prepared by wet spinning. *Surfaces and Interfaces*, 100976.
- Khalili, R., Montaseri, H., & Motaghi, H. (2021). Evaluation of water quality in the Chalus River using the statistical analysis and water quality index (WQI). *Water and Soil Management and Modelling*, (in press).
- Khalili, R., Parvinnia, M., & Zali, A. (2020). Water quality assessment of Garmarood River using the National Sanitation Foundation Water Quality Index (NSFWQI), River Pollution Index (RPI) and Weighted Arithmetic Water Quality Index (WAWQI). *Environment and Water Engineering*, 6(3), 274–284 (in Persian).
- Khalili, R., Zali, A., & Motaghi, H. (2021). Evaluating the heavy metals in the water and sediments of haraz river, using pollution load index (PLI) and geo accumulation index (Igeo). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52 (4), 933-942 (in Persian).
- Kumar, V., Parihar, R.D., Sharma, A., Bakshi, P., Sidhu, G.P.S., Bali, A.S., Karaouzas, I., Bhardwaj, R., Thukral, A.K., & Gyasi-Agyei, Y. (2019). Global evaluation of heavy metal content in surface water bodies: A meta-analysis using heavy metal pollution indices and multivariate statistical analyses. *Chemosphere*, 236, 124364.
- Nyambura, C., Hashim, N.O., Chege, M.W., Tokonami, S., & Omonya, F.W. (2020). Cancer and non-cancer health risks from carcinogenic heavy metal exposures in underground water from Kilimambogo, Kenya. *Groundwater for Sustainable Development*, 10, 100315.
- Prasanna, M.V., Praveena, S.M., Chidambaram, S., Nagarajan, R., & Elayaraja, A. (2012). Evaluation of water quality pollution indices for heavy metal contamination monitoring: a case study from Curtin Lake, Miri City, East Malaysia. *Environmental Earth Sciences*, 67(7), 1987–2001.
- Santoso, A.D. (2018). Keragaan Nilai DO, BOD dan COD di Danau Bekas Tambang Batubara Studi Kasus pada Danau Sangatta North PT. KPC di Kalimantan Timur. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 19(1), 89–96.
- Shrestha, S., & Kazama, F. (2007). Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan. *Environmental Modelling & Software*, 22(4), 464–475.
- Singaraja, C., Chidambaram, S., Srinivasamoorthy, K., Anandhan, P., & Selvam, S. (2015). A study on assessment of credible sources of heavy metal pollution vulnerability in groundwater of Thoothukudi districts, Tamilnadu, India. *Water Quality, Exposure and Health*, 7(4), 459–467.
- Sobhan Ardakani, S., Yari, A.R., Taghavi, L., & Tayebi, L. (2016). Water quality pollution indices to assess the heavy metal contamination,

- case study: groundwater resources of Asadabad Plain in 2012. *Archives of Hygiene Sciences*, 5(4), 221–228.
- Sobhanardakani, S. (2016). Evaluation of the water quality pollution indices for groundwater resources of Ghahavand plain, Hamadan province, western Iran. *Iranian Journal of Toxicology*, 10(3), 35–40.
- Suriadikusumah, A., Mulyani, O., Sudirja, R., Sofyan, E.T., Maulana, M.H.R., & Mulyono, A. (2021). Analysis of the water quality at Cipeusing river, Indonesia using the pollution index method. *Acta Ecologica Sinica*, 41(3), 177–182.
- Ustaoglu, F., Tepe, Y., & Taş, B. (2020). Assessment of stream quality and health risk in a subtropical Turkey river system: A combined approach using statistical analysis and water quality index. *Ecological Indicators*, 113, 105815.