

بررسی شاخص کیفیت آب (WQI) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و کاربرد مدل‌های تک‌متغیره و چندمتغیره در رودخانه سفیدرود، شمال ایران

یوسف پورحیب^۱، ابراهیم فتائی^{۲*}، فاطمه ناصحی^۳، بهنام خانی‌زاده^۴ و حسین سعادت^۳

(۱) دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی محیط زیست، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران

(۲) استاد گروه علوم و مهندسی محیط زیست، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران.

*رایانامه نویسنده مسئول مکاتبات: eb.fataei@iau.ac.ir

(۳) استادیار گروه علوم و مهندسی محیط زیست، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران.

(۴) استادیار گروه شیمی، واحد سراب، دانشگاه آزاد اسلامی، سراب، ایران

<https://doi.org/10.71916/jrn.2024.10311>

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۳

چکیده

رودخانه سفیدرود یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین منابع آب سطحی در شمال ایران است. در این پژوهش کیفیت آب رودخانه سفیدرود طی سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۱۳ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و همچنین ۱۰ پارامتر کیفی شیمیایی و فیزیکی شامل کلسیم، پتاسیم، منیزیم، کلر، سولفات، بی‌کربنات، کل مواد محلول، هدایت الکتریکی، سختی کل و اسیدیته آب در سه ایستگاه هیدرومتری مورد مطالعه قرار گرفت. شاخص کیفیت آب (WQI) شرب محاسبه گردید و ارتباط آن با باندها و نسبت‌های باندی ماهواره‌ای (۲۸ پارامتر) با استفاده از مدل‌های رگرسیونی تک‌متغیره و چندمتغیره مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج مدل رگرسیونی تک متغیره نشان داد شاخص WQI با باند ۵ و نسبت باند B4/B3 در سطح معنی‌داری ۱ درصد به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۵۱ و ۰/۵۵ دارای همبستگی خطی و توانی بود. اجرای مدل رگرسیون چندمتغیره خطی گام‌به‌گام WQI با تمامی باندها و نسبت‌های مورد مطالعه نشان داد سه متغیر باند ۵ و نسبت‌های باندی B4/B3 و B6/B5 با WQI، با R^2 حدود ۰/۸۰ در سطح معنی‌داری ۵ درصد دارای همبستگی بودند. پس از تهیه نقشه تغییرات مکانی WQI با استفاده از مدل رگرسیون خطی چندمتغیره، نتایج حاکی از آن بود کیفیت آب در سرشاخه‌های سفیدرود یعنی رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود نسبت به مناطق پایین‌دست و دریاچه سد منجیل کمتر بود. هرچند که کیفیت آب رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود ضعیف بود، ولی پس از ورد به سد سفیدرود به کلاس آب خوب تبدیل شد. اما WQI آب خروجی از سد با عبور از اراضی کشاورزی، مناطق مسکونی و صنعتی حاشیه رودخانه تا رسیدن به دریای خزر به تدریج افزایش یافت و دارای کلاس آب ضعیف شده بود. به‌طور کلی نتایج تحقیق نشان داد استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و مدل رگرسیونی چندمتغیره از توان بالایی برای پایش کیفیت آب برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: پایش آلودگی آب، سنجش از دور، شاهرود، قزل‌اوزن.

مقدمه

مخازن آبی ذخیره شده در پشت سدها می‌باشند (Vakili & Amanollahi, 2020). در نتیجه، رودخانه‌ها به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، فشارهای محیط زیستی بالایی متحمل می‌شوند، به‌طوری‌که آلودگی ناشی از سیل، آفت‌کش‌های کشاورزی و پساب‌های حاصل از فرآیندهای تولید، فاضلاب و دیگر منابع زباله شهری بر مشکلات آن افزوده

رودخانه‌ها به دلیل فراوانی و دسترسی آسان به منابع آبی آن در مقایسه با سایر منابع بیشتر مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. این موضوع منجر به رشد سریع جمعیت انسانی و توسعه در نزدیکی رودخانه‌ها شده است (Gad et al., 2022; Fataei et al., 2013). به‌طوری‌که امروزه منابع اصلی آب آشامیدنی،

است در مرحله نمونه برداری میدانی و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی ناشی شود، می تواند مشکوک باشد (McCarthy *et al.*, 2017). به همین سبب استفاده از فنون سنجش از دور^{۱۴} در بررسی کیفیت آب مرسوم شده است و در ۵۰ سال گذشته سنجش از دور از قابلیت بسیار بالایی برای پایش و ارزیابی کیفیت آب را از خود نشان داده است (Topp *et al.*, 2020). اما فنون سنجش از دور نیز دارای محدودیت هایی بوده، به طوری که علاوه بر پیچیدگی^{۱۵} پارامترهای کیفیت آب، این پارامترها به سرعت در طول زمان متغیر بوده و تکنیک RS تنها زمانی می تواند برخی از آنها را تشخیص دهد که به بازتاب تابش بر سطح آب حساس باشند. از سوی دیگر گاهی وضوح مکانی و زمانی داده های RS برای تشخیص پارامترهای کیفیت آب در مکان و زمان کافی نیست، به همین سبب به مجموعه ای از داده های اندازه گیری شده در محل نیاز است تا برای کالیبره کردن مدل و اطمینان از دقت قابل استفاده مدل ها، به کار گرفته شود (Quang *et al.*, 2023). در بسیاری از مطالعات مربوط به بررسی کیفیت آب از شاخص های تک متغیره و یا اندازه گیری غلظت پارامترهای کیفی استفاده شده است، در حالی که استفاده از یک شاخص کیفیت آب^{۱۶} با ادغام پارامترهای کیفی متعدد، طیف وسیعی از پارامترهای کیفیت آب را باید در بر گرفته و نمایانگر تصویری جامع از سطح کیفیت آب باشد (Tian *et al.*, 2019; Mackialegha *et al.*, 2022). در واقع شاخص های کیفیت آب^{۱۷} از قابلیت بالاتری برای توضیح کیفیت آب برخوردار است (Semiromi *et al.*, 2011; Vinod *et al.*, 2013). این شاخص ها با تبدیل پارامترهای کیفی مختلف آب به یک عدد واحد، کیفیت آب را به عنوان یک کل در نقاط مختلف در یک زمان معین مورد پایش قرار می دهند (Gad *et al.*, 2022).

از آنجایی که اندازه گیری های طیفی حجم زیادی از داده ها را ایجاد می کنند، استفاده از یک مدل آماری مناسب برای تجزیه و تحلیل داده های بازتاب طیفی، یک گام مهم در شناسایی بهترین ارتباط بین داده های طیفی و شاخص های مختلف کیفیت آب است (Gad *et al.*, 2022). روش رایج سنجش از دور برای پایش کیفیت آب، استخراج مرتبط ترین متغیرها از مقادیر باند طیفی و برازش یک مدل رگرسیون خطی با مقادیر اندازه گیری کیفیت آب در یک نقطه متناسب با زمان تصاویر

است (Kareem *et al.*, 2021). در این بین کاهش کیفیت آب اثرات جبران ناپذیری بر انسان و محیط زیست می گذارد و پایش آن نقش اساسی در سلامت انسان و حفظ بوم سازگان دارد (Valiallah & Moradi, 2020; Hussain *et al.*, 2021). کیفیت آب بسیاری از رودخانه ها در سراسر جهان در حال کاهش است (Kändler *et al.*, 2017; Yadav *et al.*, 2019; Cerqueira *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2021; Sadegh Ali *et al.*, 2021) و طی دهه های اخیر، منابع آب شیرین سطحی و کیفیت آن با دخالت انسانی و عوامل تنش زای محیطی به شدت در معرض خطر قرار گرفته اند و تهدیدی بالقوه نه تنها برای منابع آب (سطحی و زیرسطحی) بلکه برای کل سیستم بوم شناختی ایجاد کرده است (Mishra *et al.*, 2021; Abbasi *et al.*, 2021; Jalili, 2020). در سال های اخیر، به دلیل خشکسالی های پیاپی و همچنین افزایش جمعیت و نیاز روز افزون به آب، ایران در مرحله بحران قرار دارد و مهم ترین راه حل رفع این بحران (تنش آبی در کشور)، مدیریت مناسب منابع آب کشور است که این مهم با داشتن داده های جامع و دقیق امکان پذیر است (Talebi, 2023).

به طور کلی پارامترهای کیفی آب^۱ شامل پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی است (Shukla *et al.*, 2018; Safizadeh *et al.*, 2021). پارامترهای فیزیکی آب شامل pH، اکسیژن محلول^۲، کل جامدات معلق^۳، هدایت الکتریکی^۴، شوری یا کل جامدات محلول^۵، مواد مغذی مانند نیتروژن، فسفر و زیبایی شناسی^۶ (یعنی بو، رنگ و لکه ها) است و پارامترهای شیمیایی شامل کاتیون هایی مانند کلسیم^۷، پتاسیم^۸ و منیزیم^۹ و همچنین آنیون هایی مانند نترات^{۱۰} و سولفات^{۱۱} می باشند. پارامترهای زیستی هم شامل پارامترهایی همچون جلبک ها و باکتری ها مانند اشریشیا کلی^{۱۲} است (Adjovu *et al.*, 2023). به طور سنتی پارامترهای کیفیت آب^{۱۳} از طریق نمونه برداری درجا و کارهای آزمایشگاهی آنالیز و پایش می شوند، اما این روش های مرسوم در پایش کیفیت، نیاز به هزینه بالا و کار فشرده دارد و زمان بیشتری هم صرف آن می شود. به همین دلیل جهت تجزیه و تحلیل در مقیاس بزرگ مناسب نیستند، در نتیجه مجموعه نمونه ها در مقیاس های مکانی و زمانی محدود می شوند (Adjovu *et al.*, 2023). علاوه بر آن صحت و دقت داده های نمونه برداری شده در محل به دلیل خطاهایی که ممکن

1 Water Quality Parameters (WQPs)
2 Dissolved Oxygen (DO)
3 Total Suspended Solids (TSS)
4 Electrical Conductivity (EC)
5 Total Dissolved Solids (TDS)

6 Aesthetics
7 Ca²⁺
8 Na⁺
9 Mg²⁺
10 NO³⁻

11 SO⁴²⁻
12 Escherichia coli (E. coli)
13 WQPs
14 Remote Sensing (RS)
15 Complex

16 Water Quality Index (WQI)
17 Water Quality Indices (WQIs)

ساده و چندگانه مورد بررسی قرار گرفته و در کمتر مطالعه‌ای با در نظر گرفتن تاثیر مجموعه‌ای از پارامترهای کیفی در قالب شاخص‌های کیفیت آب به‌طور همزمان از مدل‌های رگرسیونی تک‌متغیره و چندمتغیره استفاده شده است. علاوه بر آن عمدتاً در مطالعات انجام گرفته در بررسی روابط باندهای طیفی با کیفیت آب، به استفاده از مدل‌های آماری همبستگی و روابط رگرسیونی معطوف بوده و از ارایه نقشه پهنه تغییرات پارامترهای کیفی صرف نظر شده است. از سوی دیگر بسیاری از رودخانه‌های ایران دارای عرض کمتر از ۳۰ متر بوده و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ با باندهای طیفی ۳۰*۳۰ متری، امکان تفکیک بازتاب طیفی آب فراهم نمی‌باشد. برای غلبه بر این مساله، محققان بسیاری از فرآیند ادغام تصاویر^{۱۱} استفاده کرده‌اند. در فرآیند ادغام تصاویر ماهواره‌ای، اطلاعات مکانی از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا و اطلاعات طیفی از تصاویر با قدرت تفکیک طیفی بالا استخراج و با یکپارچه کردن آنها، تصویری با دقت مکانی و طیفی بالا ایجاد می‌شود. ادغام اطلاعات موجب افزایش کاربری آن شده، به نحوی که می‌توان به تصویر جدید با اطلاعات جامع‌تر دسترسی پیدا کرد (Fensholt *et al.*, 2010). بنابراین در تحقیق حاضر، ۷ باند طیفی ۳۰*۳۰ متری با باند پانکروماتیک ۱۵*۱۵ متری لندست ۸ ادغام گردید، سپس روابط باندها و نسبت‌های باندی با شاخص کیفیت آب رودخانه سفیدرود و سد مخزنی منجیل بر روی آن در شمال ایران با مدل‌های رگرسیونی تک‌متغیره و چندمتغیره مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت با استفاده از مدل رگرسیونی مناسب، نقشه رستری WQI در طول بازه رودخانه مورد مطالعه و سد منجیل تهیه و تغییرات مکانی آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز سفیدرود یا سپیدرود یکی از بزرگ‌ترین حوضه‌های آبی ایران و زیرمجموعه‌ای از حوضه آبریز دریای خزر بوده که پهنه آن در شمال و شمال‌غرب ایران ۸ استان زنجان، کردستان، آذربایجان شرقی، قزوین، اردبیل، همدان، گیلان و البرز را در برمی‌گیرد. مساحت این حوضه ۵۹،۲۱۷ کیلومترمربع و رودخانه اصلی آن سفیدرود است (Ghaffari *et al.*, 2022). متوسط بارش این حوزه بین ۴۰۰ میلی‌متر در

ماهواره‌ای است (He *et al.*, 2021). در بسیاری از مطالعات رابطه بین باندها یا نسبت‌های باندی با کیفیت آب با مدل‌های رگرسیونی تک‌متغیره مورد بررسی قرار گرفته است (Mushtaq & Nee Lala, 2017; Barrett & Frazier, 2016; Markogianni *et al.*, 2018; Vakili & Amanollahi, 2020; Obaid *et al.*, 2021; Mishra *et al.*, 2021; Gad *et al.*, 2022). در حالی که در مطالعات دیگر، مدل‌های چندمتغیره مبتنی بر باندهای طیفی متعدد و الگوریتم‌های جدید روشی موثر برای تخمین پارامترهای مختلف کیفیت آب بوده است، به‌طوری‌که Ansari و Akhoondzadeh (۲۰۲۰) در حوضه رودخانه کارون در جنوب غرب ایران با استفاده از AAN^۱ و الگوریتم ژنتیک^۲ مقدار ضریب همبستگی هدایت الکتریکی آب با ترکیب باندهای طیفی لندست ۸ را ۰/۷۸ به‌دست آوردند.

Pizani و همکاران (۲۰۲۰) در جنوب غرب برزیل در دریاچه سد Tres Marias Reservoir با بررسی رگرسیون گام‌به‌گام^۳، پارامترهای کیفی آب و اطلاعات ماهواره‌ای لندست ۸ و سنتینل، مقادیر R^۲ بالای ۰/۶ را گزارش کردند. He و همکاران (۲۰۲۱) در رودخانه Yangtze در چین مقدار ضریب تبیین (R^۲) مدل رگرسیونی ترکیب‌های باندی لندست ۸ با کلروفیل-a^۴، نیتروژن کل^۵ و فسفر کل^۶ را به‌ترتیب ۰/۹۵، ۰/۸۰ و ۰/۸۷ به‌دست آوردند و به این نتیجه رسیدند که غلظت این پارامترهای کیفی در مناطق بالادست رودخانه نسبت به مناطق میانی و پایین‌دست کمتر است. Najafzadeh و Basirian (۲۰۲۳) با استفاده از مدل رگرسیون تطبیقی چندمتغیره^۷ در رودخانه Hudson در شرق ایالات متحده آمریکا، رابطه بین شاخص کیفیت آب با متغیرهای چندگانه طیفی را بهبود بخشیدند و به این نتیجه رسیدند مدل مذکور با استفاده از ترکیبی از تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌های هوش مصنوعی کارایی و قدرت بالایی در تخمین WQI دارد. Quang و همکاران (۲۰۲۳) در سواحل جنوبی و شرقی ویتنام با کاربرد اطلاعات ماهواره سنتینل ۲ و مدل جنگل تصادفی^۸ مقدار همبستگی^۹ بین کلروفیل و بازتاب طیفی دریا^{۱۰} را ۰/۷ به‌دست آوردند.

در اغلب مطالعات انجام گرفته، روابط باندها و نسبت‌های باندی با برخی پارامترهای کیفیت آب با استفاد از مدل خطی

1 Artificial Neural Network (AAN)

2 Genetic Algorithm (GA)

3 Stepwise

4 Chlorophyll-a (Chl-a)

5 Total Nitrogen (NT)

6 Total Phosphorus (PT)

7 Multivariate Adaptive Regression Spline (MARS)

8 Random forest (RF)

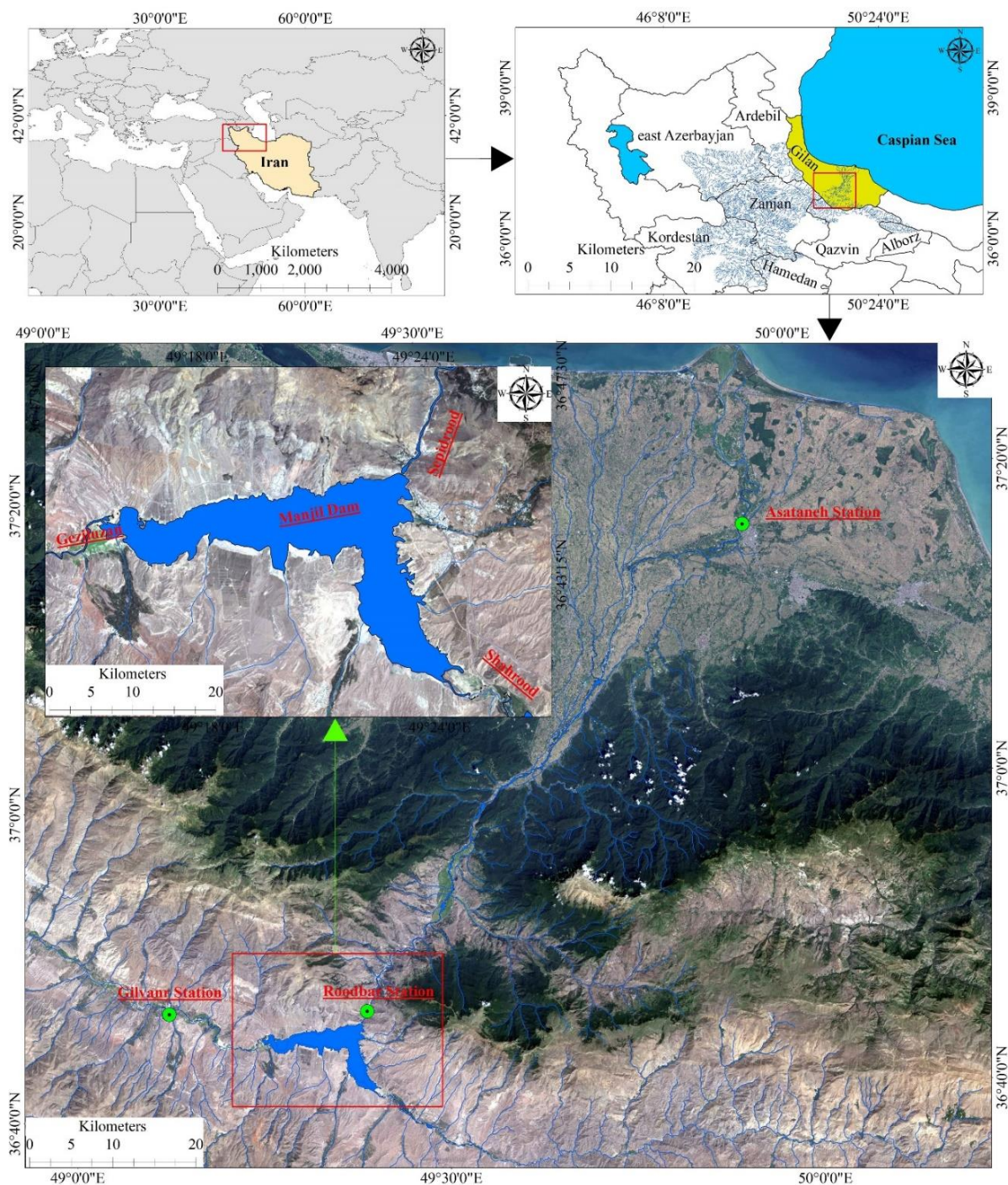
9 R2

10 Sea Surface Reflectance (SSR)

11 Fusion of Satellite Images

غرب تا ۵۰۰ میلی متر در شرق تغییر می کند (Dodangeh et al., 2014). سفیدرود با به هم پیوستن دو رود شاهرود از جنوب شرق و قزل اوزن از شمال شرق در نزدیکی شهر منجیل تشکیل شده و پس از پیمودن عرض استان گیلان در نزدیکی شهر آستانه به دریای خزر می ریزد. دبی متوسط شاهرود و قزل اوزن به ترتیب ۲۹/۷ و ۹۶/۸ مترمکعب بر ثانیه است که در سال های اخیر کمی کاهش یافته است (Hadiyan et al., 2020). بر روی سفیدرود در شهر منجیل، سد منجیل قرار گرفته که با ظرفیت ذخیره اولیه ۱/۷۶ میلیارد مترمکعبی در تراز عادی مخزن در سال ۱۳۴۱ به بهره بهره داری رسید. هدف اولیه از ساخت این سد تامین آب شهری و آبیاری استان گیلان، تولید برق آبی و کنترل سیلاب بوده است (Hadiyan et al., 2020). آبدهی سالانه سفیدرود به طور متوسط ۳،۹۹۸ میلیون مترمکعب بوده و به دلیل احداث سد منجیل و سدهای مخزنی و انحرافی دیگر بر روی آن، اراضی بسیاری را در پایین دست سیراب کرده و علاوه بر تامین انرژی برق آبی نقش بسیار مهمی در تولیدات محصولات دامی، کشاورزی و شیلات ایفا می کند (Aghajani et al., 2017; Salar-Ashayeri et al., 2020). مزارع کشاورزی، به ویژه مزارع برنج، منابع اصلی آلودگی غیرنقطه ای هستند که مقادیر زیادی آب زهکشی از آنها به بدنه رودخانه تخلیه می شود. مهمترین منابع نقطه ای آلودگی شامل پساب های صنعتی و مسکونی حاشیه رودخانه است (Ebraheim et al., 2020). در این مطالعه از اطلاعات سه ایستگاه هیدرومتری آب منطقه ای گیلان استفاده گردید. یکی از این ایستگاه ها گیلوان بود که بر روی رود قزل اوزن قرار دارد. قزل اوزن اصلی ترین سرشاخه سفیدرود است که مساحت حوضه آن بالادست ایستگاه گیلوان در حدود ۴۹،۲۳۶ کیلومتر مربع است (Dodangeh et al., 2014). سفیدرود). ایستگاه میان راه رودبار پس از سد منجیل نرسیده به شهر رودبار بر روی رود سفیدرود و ایستگاه آستانه در شهر آستانه در نزدیکی سواحل دریای خزر بر روی سفیدرود، دو ایستگاه دیگر مورد مطالعه بودند. موقعیت ایستگاه های مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است.

بررسی شاخص کیفیت آب (WQI) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و کاربرد مدل‌های تک‌متغیره و.../۷۳



شکل ۱. موقعیت رود سفیدرود و ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه

داده‌های مورد استفاده

به منظور پایش کیفیت آب رود سفیدرود، از داده‌های سال ۲۰۱۳-۲۰۱۸ سه ایستگاه هیدرومتری گیلوان، بین‌راه رودبار و آستانه آب منطقه‌ای استان گیلان استفاده گردید. در این ایستگاه‌ها از داده‌های مربوط به پارامترهای کیفی شامل کلسیم، پتاسیم، منیزیم، کلر، سولفات، بی‌کربنات^۱، کل مواد محلول، هدایت الکتریکی، سختی کل^۳ و اسیدیته آب^۴ استفاده گردید. به منظور کنترل کیفیت داده‌های پارامترهای کیفی برداشت شده

از نظر وجود داده‌های پرت و مشکوک، همگنی و تصادفی بودن مورد آزمون قرار گرفت. برای این منظور با استفاده از نرم‌افزار SPSS، آزمون همگنی و تصادفی بودن و استقلال داده‌ها به ترتیب با روش غیرنموداری ران‌تست و آزمون ناپارامتری من‌ویتنی مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت از ۱۹ نمونه برداشت شده پارامترهای کیفی در ایستگاه‌های مورد مطالعه، برای تجزیه و تحلیل استفاده گردید. در پژوهش حاضر از اطلاعات باندهای طیفی تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ سطح ۱

^۳ TH
^۴ pH

1 Cl-
2 HCO3-

استفاده شد. برای این منظور ۱۹ تصویر از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۸ سنجنده OLI^۱ با گذر ۱۶۶^۲ و ردیف ۳۴^۳ از سایت نقشه برداری زمین شناسی آمریکا^۴ دریافت گردید. تصاویر استخراج شده همزمان با برداشت نمونه های پارامترهای کیفی (در یک روز) بوده و از نظر ابرناکی و کیفیت مناسب بود.

شاخص کیفیت آب (WQI)

شاخص کیفیت آب در حدود سال ۱۹۷۰ از طرف بنیاد ملی بهداشت آمریکا توسعه یافت. این شاخص برای پایش کیفیت آب به ویژه در زمان های مختلف به کار گرفته می شود (Hassanpur Kourandeh & Fataei, 2014). در پژوهش حاضر WQI استفاده شده توسط Pesce و

Wunderlin (۲۰۰۰) به کار گرفته شد. برای محاسبه مقادیر این شاخص در هر ایستگاه هیدرومتری، از ۱۰ پارامتر کیفی شیمیایی و فیزیکی عنوان شده استفاده گردید. در گام اول هر پارامتر کیفی با توجه به مرور منابع و استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO^۵, 2011) بر اساس اهمیت نسبی وزنی به آن اختصاص داده شد (Şener et al., 2017; Wu et al., 2018; Kareem et al., 2021). سپس وزن نسبی با استفاده از رابطه (۱) مورد محاسبه قرار گرفت (جدول ۱).

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1) \text{ رابطه}$$

که در آن w_i وزن هر پارامتر و n تعداد پارامترها است.

جدول ۱. وزن نسبی پارامترهای شیمیایی و فیزیکی کیفیت آب

پارامترها	استاندارد WHO (2011)	وزن هر پارامتر (w_i)	وزن محاسبه شده در شاخص (W_i)
Ca	۷۵	۲	۰/۰۶۶۷
Mg	۵۰	۱	۰/۰۳۳۳
Na	۲۰۰	۲	۰/۰۶۶۷
Cl	۲۵۰	۳	۰/۱۰۰۰
SO ₄	۲۵۰	۴	۰/۱۳۳۳
Hco ₃	۵۰۰	۳	۰/۱۰۰۰
pH	۷/۵-۸/۵	۴	۰/۱۳۳۳
TDS	۵۰۰	۵	۰/۱۶۶۷
EC	۵۰۰	۴	۰/۱۳۳۳
TH	۵۰۰	۲	۰/۰۶۶۷
		$\sum w_i = 30$	$\sum W_i = 1$

در ادامه با تقسیم غلظت هر پارامتر در هر نمونه آب بر مقدار استاندارد آن پارامتر، مقیاس نرخ کیفیت (q_i) محاسبه گردید (رابطه ۲).

در ادامه با تقسیم غلظت هر پارامتر در هر نمونه آب بر مقدار استاندارد آن پارامتر، مقیاس نرخ کیفیت (q_i) محاسبه گردید (رابطه ۲).

WQI کمتر از ۵۰ در رده آب بسیار خوب^۷، ۵۰ تا ۱۰۰ خوب^۸، ۱۰۰ تا ۲۰۰ ضعیف^۹، ۲۰۰ تا ۳۰۰ بسیار ضعیف^{۱۰} و بالاتر از ۳۰۰ در رده آب نامناسب برای آشامیدن^{۱۱} قرار می گیرند (Şener et al., 2017).

پیش برداشتن تصاویر ماهواره ای

پس از دریافت تصاویر ماهواره ای مذکور، به منظور کنترل کیفیت داده ها، وجود خطاهای اتمسفری، هندسی و رادیومتری با برنامه ENVI 5.3 مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه غالب تصاویر دریافتی دارای سیستم مختصات بود، بنابراین نیازی به تصحیح هندسی نبود. یکی از چالش های مهم داده های سنجش از دور در بررسی پهنه های آبی تصحیح اتمسفری و وضوح تصاویر ماهواره است (Yang et al., 2022). اتمسفر زمین از ذرات مایع، جامد و گاز تشکیل شده است که بسیاری از این ذرات سبب جذب^{۱۲}، انتشار^{۱۳} و پراکندگی^{۱۴} اپتیکی

در آن C_i غلظت و S_i استاندارد هر پارامتر شیمیایی نمونه آب بر حسب میلی گرم در لیتر است.

سپس برای برآورد WQI، SI (زیرشاخصی از پارامتر nم) برای هر پارامتر شیمیایی با استفاده از رابطه (۳) و (۴) مورد محاسبه قرار گرفت.

$$q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100 \quad (2) \text{ رابطه}$$

رابطه (۳)

$$SI_i = W_i \times q_i \quad (3) \text{ رابطه}$$

$$WQI = \sum SI_i \quad (4) \text{ رابطه}$$

شاخص کیفیت آب با توجه به درجه خلوص^۶ و با استفاده از پارامترهای کیفی اندازه گیری شده آب طبقه بندی می شود (Rahmati et al., 2022; Kareem et al., 2021).

1 The Operational Land Imager

2 Path

3 Row

4 The United States Geological Survey (USGS)

5 World Health Organization

6 Purity degree

7 Excellent water

8 Good water

9 Poor water

10 Very poor water

11 Unsuitable for drinking

12 Absorption

13 Diffusion

14 Scattering

جداسازی پهنه آب

به‌منظور جداسازی پهنه آب از شاخص MNDWI استفاده شد. شاخص تفاوت نرمال شده آب (NDWI¹⁰) (Gao, 1996) برای تشخیص محتوای آب برگ‌ها طراحی شده است و برای برجسته کردن بهتر اطلاعات آب در باندهای لندست به MNDWI اصلاح شده است (Xu, 2006) که از طریق رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$MNDWI = \frac{Green+SWRI}{Green-SWIR} \text{ رابطه (۵)}$$

معادله همبستگی بازتاب طیفی و WQI

پس از انتخاب پارامترهای کیفی مناسب، رابطه تغییرات پارامترهای کیفی با تغییرات بازتاب طیفی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. به‌منظور بررسی بازتاب طیفی رواناب رودخانه سفیدرود، قزل‌اوزن و شاهرود، ابتدا پنج پیکسل ۱۵ متری ثابت در تمامی تصاویر از محل ایستگاه‌ها تا ۱۵۰ متری بالادست ایستگاه در نظر گرفته شد. سپس مقادیر متوسط بازتاب طیفی هفت باند تصاویر در این پنج پیکسل محاسبه گردید. به نظر می‌رسد متوسط بازتاب طیفی ۵ پیکسل ثابت در نزدیک‌ترین نقطه به ایستگاه‌های هیدرومتری در مقایسه با بازتاب طیفی یک پیکسل، به دلیل احتمال وجود خطاهای ناشی از ویژگی‌های هندسی و رادیومتریکی تصاویر برای بررسی کیفیت آب مناسب‌تر باشد. پس از استخراج مقادیر بازتاب طیفی باندهای تصاویر، به بررسی رابطه همبستگی میان پارامترهای کیفی و بازتاب طیفی ۷ باند و ۲۱ نسبت بانندی پرداخته شد. در بررسی‌های این چنینی، به‌طور معمول نسبت باند بزرگ‌تر به باند کوچک‌تر ملاک واقع می‌شود. به این ترتیب در مجموع از ۲۸ پارامتر طیفی شامل باندها و نسبت‌های بانندی، برای بررسی رابطه بین پارامترهای کیفی و بازتاب طیفی تصاویر به‌کار گرفته شد. به‌منظور انتخاب مناسب‌ترین معادله ساده همبستگی با کاربرد SPSS 21 از منحنی تخمین^{۱۱} از بین چهار معادله رگرسیونی نمایی^{۱۲}، خطی^{۱۳}، لگاریتمی^{۱۴} و توانی^{۱۵} معادله‌ای که دارای مقادیر همبستگی بالاتر بودند، به‌عنوان بهترین معادله انتخاب گردید. همچنین با کاربرد رگرسیون خطی چندگانه، رابطه خطی بین مجموعه متغیرهای مستقل طیفی (باند و نسبت باند) با متغیر وابسته WQI مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از رگرسیون گام‌به‌گام^{۱۶} استفاده شد.

می‌شوند. سیگنال دریافتی در ماهواره، تابش نوری^۱ از سطح زمین و اتمسفر است که به‌صورت مستقیم از طریق سنسور ثبت شده است. تابش اندازه‌گیری شده در سنسور به تابش TOA^۲ معروف است. هدف از تصحیحات اتمسفری تبدیل تابش TOA اشیا به بازتاب از سطح زمین است. بنابراین ابتدا برای تصحیح رادیومتریکی، مقادیر DN^۳ تصویر به تابش^۴ کالیبره شد (Cremon et al., 2020; Jally et al., 2021; Adjovu et al., 2023). سپس با استفاده از ماژول FLAASH^۵ تصحیح اتمسفری گردید (Ansari & Akhoondzadeh, 2020). پارامترهای مورد نیاز برای تصحیح اتمسفری از اطلاعات فایل متنی MTL و همچنین از DEM ۳۰ متری سنجه ASTER^۶ استخراج گردید.

ادغام تصاویر

در مطالعات سنجش از دور، ادغام در سطح پیکسل بیشتر مورد توجه است (Xu & Ehlers, 2017). الگوریتم‌های ادغام تصاویر ماهواره‌ای بر پایه پیکسل، جزئیات هندسی تصویر پانکروماتیک با وضوح بالا (PAN^۷) و اطلاعات طیفی از یک تصویر چند طیفی (MS^۹) با قدرت تفکیک مکانی کم را برای تولید تصویر MS با قدرت تفکیک مکانی بالا استفاده می‌کند (Pushparaj & Hegde, 2017; Xu & Ehlers, 2017). در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای ارایه الگوریتم‌های مناسب برای ادغام اطلاعات طیفی و مکانی تصاویر ماهواره‌ای صورت گرفته است (Kavzoglu & Colkesen, 2009; Kavzoglu & Ehlers, 2009, Im & Tullis, 2008; Yia et al., 2012, Liao et al., 2014). در پژوهش حاضر از الگوریتم Gram-Schmidt استفاده گردید. در الگوریتم Gram-Schmidt یک باند PAN با استفاده از باندهای طیفی تصویر MS، شبیه‌سازی می‌شود. به‌طور کلی در این الگوریتم، باند PAN شبیه‌سازی شده از طریق میانگین‌گیری از باندهای تصویر MS حاصل می‌شود و به‌عنوان باند اول در نظر گرفته می‌شود. در مرحله بعد، تبدیل Gram-Schmidt برای باند PAN شبیه‌سازی می‌شود و باندهای MS بر آن اعمال می‌شود. سپس باند PAN تصویر با وضوح بالا، با باند اول Gram-Schmidt جایگزین می‌شود (Sarp, 2014; Pushparaj & Hegde, 2017).

1 Emergent Radiation
2 Top of Atmosphere
3 Digital Numbers
4 Radiance
5 Module

6 Fast Line of sight Atmospheric Analysis of Spectral Hyper cubes
7 Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
8 High-Resolution Panchromatic
9 Multispectral
10 Normalized Difference Water Index

11 Curve Estimation
12 Exponential
13 Linear
14 Logarithmic
15 Power
16 Step Wise

نقشه تغییرات مکانی WQI

پس از انتخاب مناسب‌ترین مدل رگرسیونی، با استفاده از اطلاعات تصویر ماهواره‌ای مربوط به سال ۲۰۱۶ نقشه تغییرات مکانی شاخص WQI با استفاده از ابزار calculator raster در محیط برنامه ArcMap محاسبه و ترسیم شد. در این سال در تاریخ برداشت نمونه‌های پارامترهای کیفی (۲۰ جولای) سفیدرود در وضعیت پرابی قرار داشت، به طوری که دبی آب در حد ۲۸۹ مترمکعب بر ثانیه بود. همچنین به منظور بررسی تغییرات پارامترهای کیفی آب در محل ورود رود قزل‌اوزن و شاهرود به سد منجیل و سفیدرود پس از خروج از سد در محل

ایستگاه بین راه رودبار و ایستگاه آستانه (نزدیک دریای خزر) از تحلیل نقشه‌های تهیه شده استفاده گردید.

نتایج

در جدول (۲) مقادیر پارامترهای کیفی فیزیکوشیمیایی اندازه‌گیری شده همزمان با تصاویر ماهواره‌ای نشان داده شده است. ۹ نمونه از ایستگاه گیلوان بر روی رودخانه قزل‌اوزن، ۷ نمونه از ایستگاه بین راه رودبار در نزدیک خروجی سد منجیل و ۳ نمونه در ایستگاه آستانه در پایین دست رودخانه و پس از عبور رودخانه از اراضی کشاورزی، مسکونی و صنعتی در نزدیکی محل اتصال سفیدرود به دریای خزر برداشت شده است.

جدول ۲. مقادیر پارامترهای شیمیایی و فیزیکی کیفیت آب اندازه‌گیری شده

Ca2+	Mg2+	Na+	Cl-	SO4-2	HCO3-	PH	TDS	EC	TH	تاریخ	ایستگاه
۵/۲۷	۴/۵۳	۸/۷۰	۱۱/۷	۴/۸۱	۲/۶۱	۷/۶۰	۱۲۶۳	۲۰۰۵	۴۹۰	13-Sep-13	رودبار
۶/۷۷	۲/۸۶	۱۲/۰	۱۳/۴	۵/۰۳	۳/۱۵	۷/۷۳	۱۳۵۹	۲۱۵۷	۴۸۲	18-Nov-13	گیلوان
۷/۱۴	۳/۳۶	۱۴/۸	۱۴/۹	۷/۵۴	۲/۹۷	۷/۰۷	۱۶۱۹	۲۵۷۰	۵۲۵	16-Jun-15	گیلوان
۳/۲۷	۱/۷۳	۴/۸	۵/۰۰	۲/۰۷	۲/۸۸	۷/۹۶	۶۳۸	۱۰۱۳	۲۵۰	3-Aug-15	آستانه
۳/۳۷	۲/۲۶	۵/۳۰	۵/۶۵	۲/۶۵	۲/۸۸	۷/۱۸	۷۱۷	۱۱۳۸	۲۸۲	4-Sep-15	آستانه
۳/۷۳	۲/۳۹	۸/۷۰	۱۰/۰	۲/۵۳	۲/۷۰	۶/۹۲	۹۴۱	۱۴۹۳	۳۰۶	14-Mar-16	گیلوان
۷/۸۰	۴/۶۸	۱۸/۸	۱۸/۳	۹/۷۷	۳/۱۵	۷/۰۸	۱۹۶۶	۳۱۲۰	۶۲۴	18-Jun-16	گیلوان
۳/۸۲	۲/۷۷	۷/۴۸	۷/۸۰	۴/۲۸	۲/۴۳	۷/۰۵	۹۲۹	۱۴۷۴	۳۳۰	20-Jul-16	رودبار
۴/۰۴	۳/۱۲	۵/۳۰	۶/۰۰	۳/۱۱	۳/۶۰	۷/۳۶	۷۸۹	۱۲۵۲	۳۵۸	5-Aug-16	آستانه
۴/۷۸	۱/۸۶	۷/۲۲	۷/۶۰	۴/۴۰	۲/۱۱	۷/۵۵	۸۹۳	۱۴۱۸	۳۳۲	21-Aug-16	رودبار
۱۰/۰	۵/۸۳	۱۹/۳	۱۹/۹	۱۴/۱	۱/۸۹	۷/۶۰	۲۲۳۰	۳۵۴۰	۷۹۳	21-Aug-16	گیلوان
۴/۶۸	۳/۶۹	۸/۲۱	۹/۷۰	۴/۲۷	۲/۸۵	۸/۲۲	۱۰۶۰	۱۶۸۳	۴۱۹	18-Apr-17	رودبار
۶/۶۱	۳/۷۵	۲۲/۸	۲۴/۶	۵/۶۸	۳/۱۸	۷/۸۷	۲۱۲۸	۳۳۷۷	۵۱۸	18-Apr-17	گیلوان
۵/۴۱	۳/۷۷	۸/۲۱	۱۰/۱	۴/۶۰	۲/۸۰	۸/۱۳	۱۱۱۲	۱۷۶۵	۴۵۹	20-May-17	رودبار
۷/۲۵	۳/۹۱	۱۳/۰	۱۵/۰	۷/۳۹	۲/۳۸	۸/۱۴	۱۵۶۴	۲۴۸۲	۵۵۸	20-May-17	گیلوان
۴/۸۶	۲/۶۰	۹/۷۸	۱۰/۵	۴/۳۴	۲/۵۶	۸/۰۷	۱۱۰۹	۱۷۶۰	۳۷۳	21-Jun-17	رودبار
۶/۶۵	۵/۰۳	۲۳/۴	۲۵/۸	۷/۱۳	۲/۴۷	۷/۸۴	۲۲۲۶	۳۵۳۳	۵۸۴	21-Jun-17	گیلوان
۵/۱۳	۲/۷۹	۱۲/۳	۱۲/۰	۴/۷۶	۳/۲۴	۷/۶۲	۱۲۷۳	۲۰۲۰	۳۹۶	20-Mar-18	گیلوان
۴/۹۳	۳/۱۶	۸/۴۸	۹/۱۰	۴/۹۳	۲/۷۴	۸/۰۶	۱۰۸۴	۱۷۲۱	۴۰۵	20-Mar-18	رودبار

ایستگاه نمونه‌برداری در کلاس آب خوب و ضعیف قرار داشتند. میانگین WQI ۱۹ در حدود ۱۱۹۰ بود که با این حساب در مجموع کیفیت آب مجموعه نمونه‌های برداشت شده در کلاس ضعیف قرار می‌گیرد.

در جدول (۳)، مقادیر WQI و کلاس نوع آب هر کدام از نمونه‌های برداشت شده، ارائه شده است. بر این اساس کیفیت آب نمونه‌برداری شده در تاریخ‌های مختلف، در دو کلاس آب ضعیف و خوب قرار گرفته بود. از ۱۹ نمونه برداشت شده ۱۳ نمونه آب ضعیف و ۶ نمونه آب در کلاس خوب بود. هر سه

بررسی شاخص کیفیت آب (WQI) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و کاربرد مدل‌های تک‌متغیره و.../۷۷

جدول ۳. مقادیر WQI آب اندازه‌گیری شده و طبقات کیفیت آب

کیفیت آب	WQI	تاریخ	ایستگاه
ضعیف	۱۱۵/۸۶	13-Sep-13	رودبار
ضعیف	۱۲۳/۴۳	18-Nov-13	گیلوان
ضعیف	۱۴۳/۰۰	16-Jun-15	گیلوان
خوب	۶۵/۰۳	3-Aug-15	آستانه
خوب	۷۰/۳۱	4-Sep-15	آستانه
خوب	۸۷/۴۸	14-Mar-16	گیلوان
خوب	۱۷۱/۰۹	18-Jun-16	گیلوان
خوب	۸۷/۰۸	20-Jul-16	رودبار
خوب	۷۷/۲۳	5-Aug-16	آستانه
خوب	۸۵/۲۳	21-Aug-16	رودبار
ضعیف	۱۹۴/۷۴	21-Aug-16	گیلوان
ضعیف	۱۰۰/۳۰	18-Apr-17	رودبار
ضعیف	۱۸۳/۱۸	18-Apr-17	گیلوان
ضعیف	۱۰۴/۷۲	20-May-17	رودبار
ضعیف	۱۴۰/۹۱	20-May-17	گیلوان
ضعیف	۱۰۳/۱۷	21-Jun-17	رودبار
ضعیف	۱۹۱/۶۶	21-Jun-17	گیلوان
ضعیف	۱۱۵/۳۷	20-Mar-18	گیلوان
ضعیف	۱۰۱/۶۸	20-Mar-18	رودبار
ضعیف	۱۱۹/۰۲		میانگین

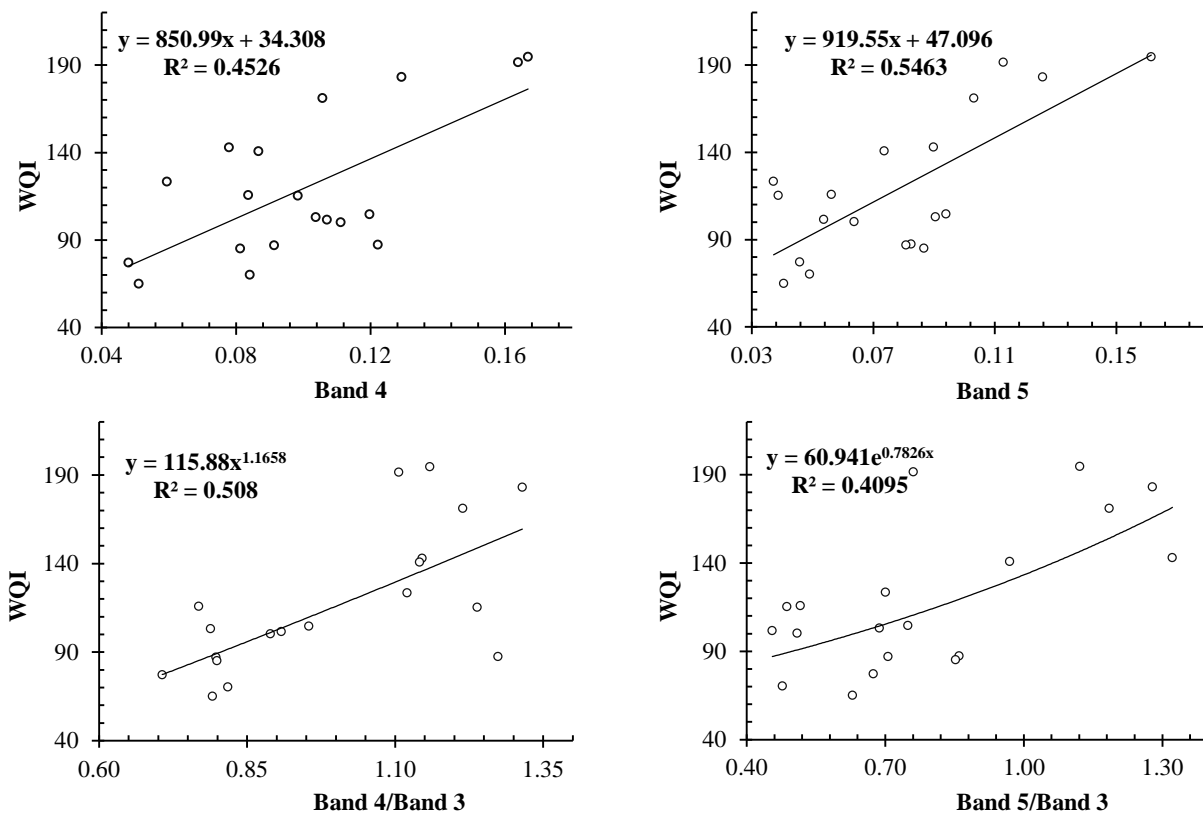
B4/B3 و B5/B3، در سطح معنی‌داری ۱ درصد دارای مقدار ضریب تبیین بالاتر از ۰/۴ است (جدول ۴ و شکل ۲). مقدار R^2 رگرسیون خطی باند ۴ و ۵ با WQI به ترتیب ۰/۴۵ و ۰/۵۵ و نسبت باندهای B4/B3 و B5/B3 با WQI به ترتیب با رابطه توانی و نمایی ۰/۵۱ و ۰/۴۴ است.

نتایج مدل‌های رگرسیونی تک‌متغیره و چندمتغیره WQI و اطلاعات طیفی ماهواره‌ای

نتایج مربوط به بررسی بالاترین همبستگی ۲۸ پارامتر طیفی (شامل ۷ باند و ۲۱ نسبت باندهای) با WQI از بین چهار مدل رگرسیونی خطی، توانی، نمایی و لگاریتمی نشان داد در بین اطلاعات طیفی، چهار پارامتر باند ۴، ۵ و نسبت‌های باندهای

جدول ۴. رگرسیونی تک‌متغیره باندها و نسبت‌های باندهای WQI با

سطح معنی‌داری	F	ضریب تبیین	R	معادله رگرسیونی	رابطه	اطلاعات طیفی	پارامتر
۰/۰۱	۱۴/۰۶	۰/۴۵	۰/۶۷	$WQI = 850/99(B4) + 34/308$	خطی	باند ۴	WQI
	۲۰/۴۷	۰/۵۵	۰/۷۴	$WQI = 919/55(B5) + 47/096$	خطی	باند ۵	
	۱۷/۵۸	۰/۵۱	۰/۷۱	$WQI = 19/78(B4/B3)1/392$	توانی	باند ۳/باند ۴	
	۱۱/۷۹	۰/۴۴	۰/۶۶	$WQI = 60/441e0/7726(B5/B3)$	نمایی	باند ۳/باند ۴	



شکل ۲. مدل رگرسیون تک متغیر WQI با اطلاعات طیفی تصاویر ماهواره‌ای

مجموع مقدار آن در سطح معنی داری ۱ درصد به حدود ۰/۷۲ رسیده است. در مدل سوم با اضافه شدن سه متغیر باند ۵ و نسبت‌های بانندی B4/B3 و B6/B5 به مدل، مقدار R² نسبت به مدل دوم با ۰/۰۸ افزایش مواجه شده و در نهایت مقدار آن در سطح معنی داری ۵ درصد به حدود ۰/۸۰ رسیده است.

خروجی مدل رگرسیون چندمتغیر خطی گام به گام دارای سه مدل رگرسیونی بود که در مدل اول، WQI با باند ۵ در سطح معنی داری ۱ درصد دارای ۰/۵۵ ضریب تبیین است (جدول ۵). در مدل دوم با اضافه شدن دو متغیر باند ۵ و نسبت بانندی B4/B3، مقدار R² نسبت به مدل اول، ۰/۱۷ افزایش یافته و در

جدول ۵. رگرسیون خطی چندمتغیر گام به گام باندها و نسبت‌های بانندی با WQI

سطح معنی داری	F	ضریب تبیین	ضریب تبیین	R	معادله	متغیر وابسته (y)	متغیر مستقل (x)	مدل
۰/۰۰۰	۲۰/۴۶۹	۰/۵۴۶	۰/۵۴۶	۰/۷۳۹	WQI = 919/538(B5) + 47/097	باند ۵	باند ۵	۱
۰/۰۰۷	۲۰/۳۳۳	۰/۱۷۱	۰/۷۴۸	۰/۸۴۷	WQI = 676/134(B5) + 92/877(B4/B3) - 26/419	باند ۵، باند ۴/باند ۳	باند ۵، باند ۴/باند ۳ و باند ۶/باند ۵	۲
۰/۰۲۲	۲۰/۳۵۲	۰/۰۸۵	۰/۸۰۳	۰/۸۹۶	WQI = 496/253(B5) + 145/826(B4/B3) + 54/896(B6/B5) - 102/835	باند ۵، باند ۴/باند ۳ و باند ۶/باند ۵	باند ۵، باند ۴/باند ۳ و باند ۶/باند ۵	۳

شاهرود (سرشاخه‌های سفیدرود) و کمترین آن در دریاچه سد منجیل به ویژه دریاچه غربی سد (سمت رودخانه شاهرود) بود. مقدار WQI در رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود در نزدیکی محل اتصال آن به دریاچه سد منجیل به ترتیب در حدود ۲۴۰ و ۲۲۰ بود. با ورود آب رودخانه‌های مذکور به سد، WQI با کاهش مواجه شده و مقدار آن در برخی نقاط دریاچه سد تا حدود ۵۴ نیز رسیده است. پس از خروج آب از سد، مقدار WQI افزایش یافته، به طوری که مقدار آن محل ایستگاه بین راه

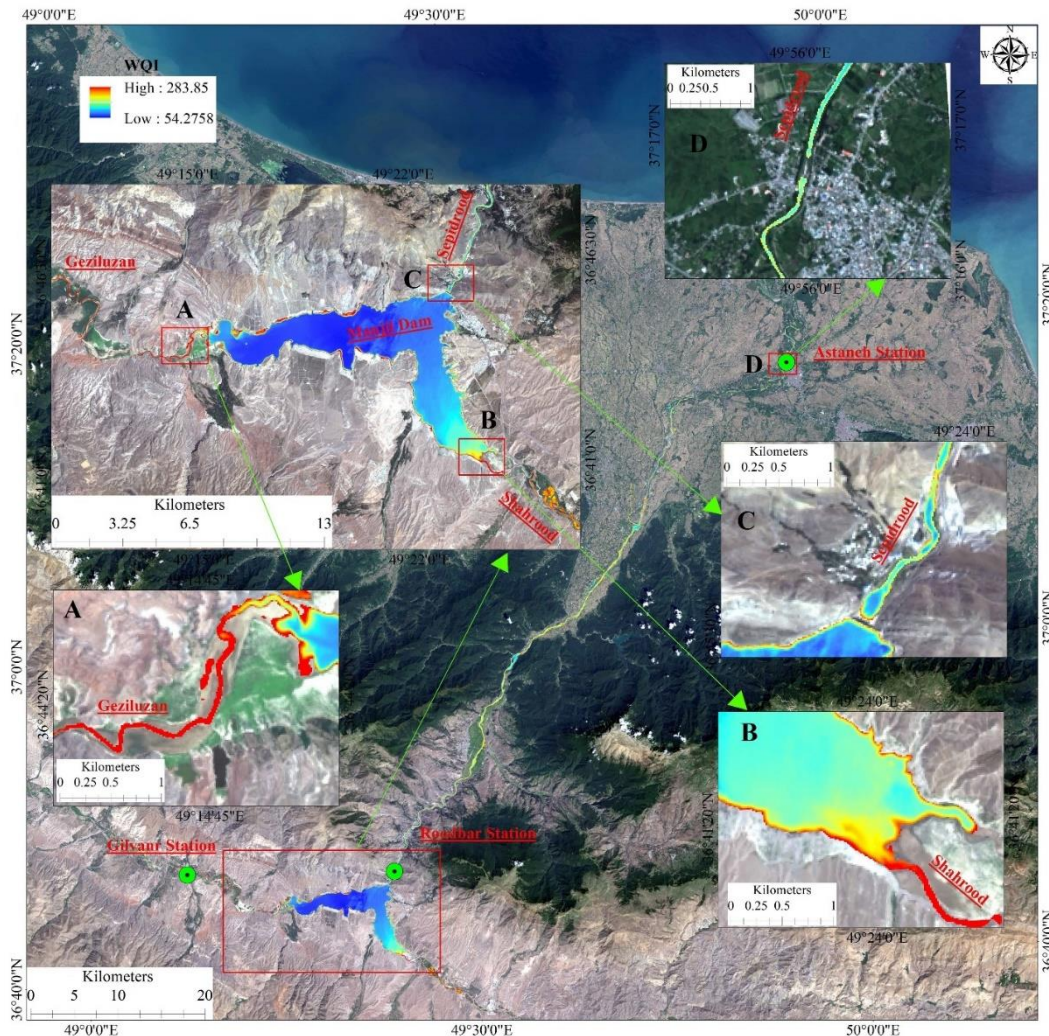
نقشه تغییرات مکانی WQI

بررسی مدل‌های رگرسیونی WQI با اطلاعات طیفی نشان داد مدل سوم رگرسیون چندمتغیر خطی WQI با باند ۵ و نسبت‌های بانندی B4/B3 و B6/B5 دارای بالاترین R² (۰/۸۰) است. بنابراین با کاربرد این مدل، نقشه تغییرات مکانی رستری WQI مربوط به سال ۲۰۱۶ در محیط برنامه ArcGIS تهیه شد (شکل ۳). نتایج حاصله نشان داد WQI بین ۵۴/۳ و ۲۸۴ تغییر می‌کند. بیشترین مقادیر آن در رودخانه‌های قزل‌اوزن و

بررسی شاخص کیفیت آب (WQI) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و کاربرد مدل‌های تک‌متغیره و/... ۷۹

تدریج بر میزان WQI افزوده شده و مقدار آن در محل ایستگاه آستانه به حدود ۱۳۰ رسیده است.

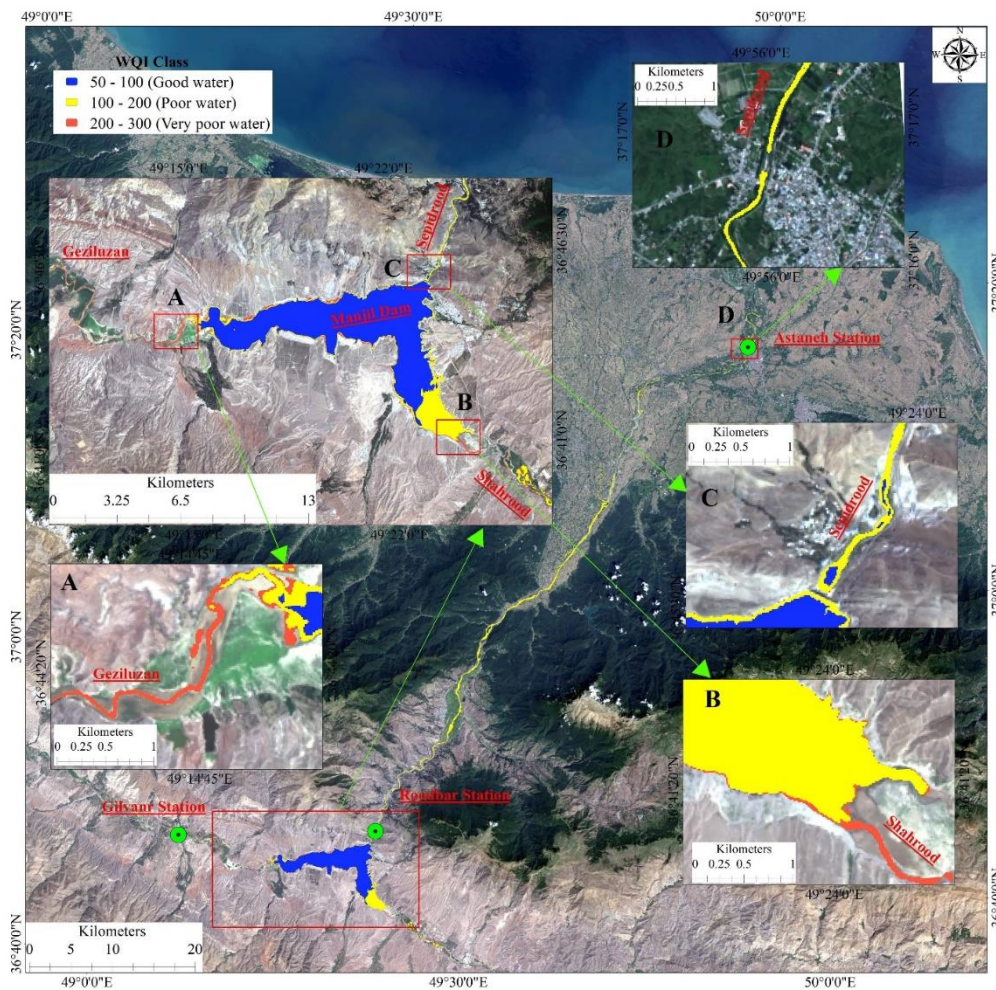
رودبار در نزدیکی سد در حدود ۱۱۰ بوده است. با ادامه مسیر رودخانه و گذر از اراضی کشاورزی، مسکونی و صنعتی به



شکل ۳. تغییرات مکانی WQI در ۲۰ جولای ۲۰۱۶ در ورودی و خروجی سد منجیل و محل ایستگاه آستانه

به شاهرود، کلاس آب از خیلی ضعیف به ضعیف تبدیل می‌شود و پس از جریان به سمت خروجی سد، در غالب پهنا دریاچه پشت سد به کلاس خوب تبدیل می‌شود. اگرچه WQI آب خروجی از سد به تدریج با جاری شدن در پایین دست و گذر از اراضی کشاورزی، مسکونی و صنعتی در نزدیکی ایستگاه آستانه کمی افزایش یافته است، اما به طور غالب تمامی آب خروجی از سد، هم نزدیک ایستگاه بین راه رودبار و هم نزدیک ایستگاه آستانه دارای کلاس WQI ضعیف بوده است.

پس از طبقه‌بندی نقشه رستری WQI به طبقات نوع آب، نقشه طبقات WQI در شکل (۴) ارائه گردید. بر اساس نتایج به دست آمده در ۲۰ جولای ۲۰۱۶، به طور همزمان سه نوع آب خیلی ضعیف، ضعیف و خوب در رودخانه سفیدرود، قزل‌اوزن و شاهرود جریان داشته است. آب ورودی رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود به دریاچه سد منجیل دارای کلاس خیلی ضعیف بود. پس از ورود آب این رودخانه‌ها به سد، در ابتدای دریاچه‌های غربی و شرقی سد، به ویژه دریاچه مربوط



شکل ۳. تغییرات مکانی طبقات WQI در ورودی و خروجی سد منجیل و محل ایستگاه آستانه

بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸، پس از پیش‌پردازش ۱۹ تصویر و استفاده از تکنیک ادغام باند پانکروماتیک ۱۵*۱۵ متری با ۷ باند طیفی ۳۰*۳۰ متری، ۷ باند طیفی با دقت ۱۵*۱۵ در رودخانه سفیدرود در شمال ایران تولید گردید. سپس با استفاده از ۱۹ نمونه همزمان با تصاویر ماهواره‌ای سه ایستگاه هیدرومتری بر روی رودخانه سفیدرود و سرشاخه‌های آن با کاربرد ۱۰ پارامتر کیفی شیمیایی و فیزیکی کلسیم، پتاسیم، منیزیم، کلر، سولفات، بی‌کربنات، کل مواد محلول، هدایت الکتریکی، سختی کل و اسیدیته آب، شاخص کیفیت آب شرب محاسبه گردید. نتایج نشان داد کیفیت آب شرب رودخانه مورد مطالعه بر اساس WQI محاسبه شده از پارامترهای نمونه‌برداری شده، اگرچه دارای دو کلاس خوب و ضعیف بود، اما عمدتاً در کلاس ضعیف قرار گرفته است. این نتیجه با یافته‌های Ebraheim و همکاران (۲۰۲۰)،

مطابقت دارد، به طوری که محققان مذکور نیز با بررسی کیفیت آب شرب رودخانه سفیدرود با دو شاخص شاخص کیفیت آب بنیاد ملی بهداشت (NSFWQI_{Im}^۱) و شاخص کیفیت آب ایران برای منابع آب سطحی - پارامترهای متعارف (IRWQI_{Sc}^۲) نشان دادند متوسط کیفیت آب شرب رودخانه مذکور بر اساس شاخص NSFWQI_{Im} (شاخص مرجع) بد و بر اساس شاخص IRWQI_{Sc} (شاخص محلی) نسبتاً خوب است. این محققان به این نتیجه رسیدند که NSFWQI_{Im} اگرچه معیارهای سخت‌گیرانه برای سلامت عمومی مد نظر قرار می‌دهد، اما برای تفسیر بهتر شرایط کیفی منابع آب سطحی در ایران، استفاده از هر دو شاخص ضروری است. بر این اساس شاخص مورد استفاده در پژوهش حاضر با نتایج شاخص مرجع NSFWQI_{Im} بیشتر مطابقت دارد، چرا که در محاسبات آن از استاندارد WHO (۲۰۱۱) استفاده شده است. بنابراین به طور کلی کیفیت آب رودخانه سفیدرود برای مصرف شرب نامناسب است.

بررسی شاخص کیفیت آب (WQI) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و کاربرد مدل‌های تک‌متغیره و/... ۸۱

نتیجه نشان می‌دهد مدل رگرسیون خطی چندمتغیره در مقایسه با مدل‌های رگرسیون تک‌متغیره از توان بالایی برای برآورد کیفیت آب از تصاویر ماهواره‌ای برخوردار هستند. در بسیاری از پژوهش‌های انجام یافته نیز مدل‌های چندمتغیره به‌عنوان مدل مناسب برای پایش کیفیت آب با استفاده از سنسور از دور به‌کار گرفته شده است. چنانکه Ansari و Akhoondzadeh (۲۰۲۰) در حوضه رودخانه کارون در جنوب غرب ایران با استفاده از مدل چندمتغیره مقدار R^2 هدایت الکتریکی با ترکیب باندهای طیفی لندست ۸ را $0/78$ به‌دست آوردند. Pizani و همکاران (۲۰۲۰) در جنوب غرب برزیل در سد Tres Marias با به‌کارگیری مدل رگرسیون گام‌به‌گام، مقادیر R^2 پارامترهای مختلف کیفی آب با اطلاعات طیفی لندست ۸ و سنتینل ۲ را بزرگ‌تر از $0/6$ گزارش کردند. He و همکاران (۲۰۲۱) در رودخانه Yangtze در چین نیز مقدار ضریب تعیین مدل رگرسیونی چندمتغیره ترکیب‌های باندهای لندست ۸ با کلروفیل-a، نیتروژن کل و فسفر کل را به ترتیب $0/95$ ، $0/80$ و $0/87$ به‌دست آوردند. Quang و همکاران (۲۰۲۳) نیز در سواحل جنوبی و شرقی ویتنام با استفاده از مدل چندمتغیره اطلاعات ماهواره سنتینل ۲ مقدار R^2 بین کلروفیل و بازتاب طیفی دریا (SSR) را $0/7$ به‌دست آوردند.

نتایج مربوط با تغییرات مکانی WQI با استفاده از مدل رگرسیون خطی چندمتغیره نشان داد کیفیت آب در سرشاخه‌های سفیدرود یعنی رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود نسبت به مناطق پایین‌دست‌تر و دریاچه سد منجیل بدتر بود. با وجود آنکه کلاس آب رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود ضعیف بود، پس از ورود به سد به کلاس آب خوب تبدیل شد. این نتیجه با یافته‌های He و همکاران (۲۰۲۱) در رودخانه یانگتس در چین همخوانی دارد، به‌طوری‌که محققان مذکور نیز عنوان کردند غلظت کلروفیل-a، نیتروژن کل و فسفر کل در مناطق بالادست رودخانه نسبت به مناطق میانی و پایین‌دست‌تر کمتر است. از سوی دیگر با ورود آب به پشت سد منجیل، کلاس کیفیت آب بهتر می‌شود. به‌طور کلی ذخیره آب در پشت سدها و دریاچه‌ها، منجر به تغییر جریان و ظرفیت خودپالایی^۳ رودخانه‌ها می‌شود (Gu et al., 2019) و در نتیجه با ته‌نشین شدن رسوبات معلق در بستر سد، کیفیت آب بهبود می‌یابد، چرا که رسوبات معلق به ویژه ذرات ریز به سبب حمل مواد

Mishra و همکاران (۲۰۲۱) نیز در رودخانه Asan در شمال شرق هند پس از بررسی ماتریس همبستگی پیرسون و متوسط بازتاب طیفی باندهای لندست ۸، به این نتیجه رسیدند که کل آب رودخانه مذکور برای آشامیدن نامناسب، اما برای مصارف آبیاری مناسب است.

بررسی نتایج مدل رگرسیونی تک‌متغیره WQI با باندهای طیفی و نسبت‌های باندهای نشان داد WQI با چهار پارامتر باند ۴، ۵ و نسبت‌های باندهای B4/B3 و B5/B3 در سطح معنی‌داری ۱ درصد دارای مقدار ضریب تبیین بزرگ‌تر از $0/4$ بود که در این بین باند ۵ و B4/B3 با WQI به ترتیب با R^2 $0/55$ و $0/51$ همبستگی خطی و توانی داشت. این نتیجه با یافته‌های بسیاری از محققان دیگر مشابهت دارد، چنان که نتایج پژوهش Mushtaq و Nee Lala (2017) در شمال غرب کشمیر نیز حاکی از آن است که غالب پارامترهای کیفی آب با اطلاعات طیفی لندست ۸ دارای همبستگی بالای $0/5$ است. Barrett و Frazier (۲۰۱۶) در جنوب مرکزی ایالات نیز به این نتیجه رسیدند که باند مادون قرمز کوتاه^۱ نسبت به سایر باندهای طیفی با کلروفیل و کدورت آب همبستگی پیرسون بالاتری دارد. Amanollahi و Vakili (۲۰۲۰) در شمال غرب ایران به وجود همبستگی بالای تک‌باند ۳ و ۴ با مقادیر نیتروژن کل و فسفر^۲ اشاره کردند. Markogianni و همکاران (۲۰۱۸) در غرب یونان نشان دادند بین اطلاعات طیفی لندست ۸ با غلظت آمونیوم، ضریب همبستگی بالای $0/7$ وجود دارد. یافته‌های Obaid و همکاران (۲۰۲۱) در سدی در شمال شرقی آفریقا نیز نشان می‌دهد نسبت باند ۴ به ۳ با مقادیر کلروفیل-a بالای $0/8$ دارای همبستگی است. Gad و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی در محل اتصال روخانه نیل به دریای مدیترانه، مقدار ضریب همبستگی رگرسیونی خطی نسبت‌های باندهای Blue/Red، Green/Red، NIR/Red لندست ۸ با شاخص کیفیت آب شرب (DWQI) را به ترتیب $0/58$ ، $0/70$ و $0/53$ درصد به‌دست آوردند.

نتایج مربوط به مدل رگرسیون چندمتغیره خطی گام‌به‌گام WQI با تمامی باندها و نسبت‌های مورد مطالعه (۲۸ پارامتر) نشان داد سه متغیره باند ۵ و نسبت‌های باندهای B4/B3 و B6/B5 با WQI، با ضریب تعیین حدود $0/8$ در سطح معنی‌داری ۵ درصد دارای همبستگی خطی چندمتغیره بود. این

1 SWR

2 PN

3 Self-purification

مربوط به کیفیت آب به سبب دسترسی آسان و رایگان به آرشو، بسیاری از اطلاعات ماهواره‌ای به ویژه سری لندست، صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌ها را بسیار کاهش می‌دهد.

با توجه به اینکه تعداد نمونه‌برداری از پارامترهای کیفی آب در ایستگاه‌های هیدرومتری شرکت‌های آب منطقه‌ای، به صورت محدود بوده و در هر سال به صورت تصادفی در ماه‌های مختلف، به‌طور متوسط در سال حدود ۱۰ الی ۱۵ نمونه برداشت می‌شود و از طرف دیگر تفکیک زمانی تصاویر ماهواره‌ای سری لندست تا سال ۱۴۰۰ به صورت ۱۶ روزه بوده و علاوه بر آن امکان ابرناکی نیز بر تعداد تصاویر مناسب جهت مطالعه تاثیرگذار است، بنابراین تعداد نمونه‌برداری‌های زمینی متناظر با زمان تصاویر ماهواره‌ای لندست محدود است (در پژوهش حاضر ۱۹ تصویر و نمونه‌برداری زمینی متناظر با زمان تصاویر ماهواره‌ای صورت پذیرفت). از آنجایی که منابع اطلاعات ماهواره‌ای متعدد و متنوع می‌باشد و روزبه‌روز پیشرفت و توسعه در این فناوری مشهود است، بنابراین به نظر می‌رسد استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای دیگر از جمله سنتینل-۲ با قدرت تفکیک مکانی بهتر (۱۰ متر) به همراه به‌کارگیری فنون ادغام تصاویر با اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای با تفکیک زمانی بهتر همچون تصاویر سنجد مودیس (تصاویر تقریباً روزانه) جهت افزایش تعداد نمونه‌برداری زمینی متناظر با زمان تصاویر ماهواره‌ای و نیل به روابط و مدل‌های آماری با دقت بهتر، مثمرتر باشد.

سپاسگزاری

این تحقیق برگرفته از رساله دکتری آقای یوسف پورحیب دانشجوی رشته علوم و مهندسی محیط زیست دانشگاه آزاد اسلامی واحد اردبیل می‌باشد. بنابراین نویسندگان از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اردبیل برای همکاری در تسهیل اجرای این تحقیق قدردانی می‌نمایند.

منابع

- Abbasi, A., Taghavi, L. and Sarai Tabrizi, M. (2021) Qualitative zoning of groundwater to assessment suitable drinking water using gis software in Mohammad Shahr, Meshkinshahr, and Mahdasht in Alborz Province. *Anthropogenic Pollution*, 5(1): 138-149. doi:10.22034/ap.2021.1907787.1076/
- Adjovu, G.E., Stephen, H., James, D. and Ahmad, S. (2023) Overview of the application of remote

شیمیایی، خود به‌عنوان آلاینده فیزیکی نیز محسوب می‌شوند (Aires et al., 2022). مقدار WQI پس از خروج آب از سد منجیل اگرچه به سمت پایین دست با کمی افزایش مواجه شده است، اما نوع آب جاری شده از سد تا پایین دست، در یک کلاس ضعیف قرار گرفت. سفیدرود پس از سد منجیل تا دریای خزر از اراضی کشاورزی، مناطق مسکونی و صنعتی حاشیه رودخانه عبور می‌کند. بنابراین تحت تاثیر کاربرهای مذکور WQI به تدریج به سمت پایین دست با کمی افزایش موج شده است. کاهش کیفیت آب رودخانه در نتیجه کشاورزی و اراضی مسکونی در بسیار از مطالعات مورد توجه قرار گرفته است، به طوری که Kändler و همکاران (۲۰۱۷) در رودخانه Nisa در آلمان و جمهوری چک و Mello و همکاران (۲۰۱۸) در رودخانه Sarapuı در جنوب برزیل به این نتیجه رسیدند که اراضی کشاورزی و مسکونی منجر به نامطلوب شدن کیفیت آب می‌شود. Xiong و همکاران (۲۰۲۲) در رودخانه Yangtze در چین و Gani و همکاران (۲۰۲۳) در رودخانه‌های Meghn, Dhaleshwari, Buriganga و Padma در بنگلادش نیز به این نتیجه رسیدند که WQI تحت تاثیر کاربری اراضی قرار می‌گیرد.

به‌طور کلی نتایج پژوهش حاضر نشان داد اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ از توان بسیار خوبی برای برآورد شاخص کیفیت آب (WQI) برخوردار است. استفاده از مدل‌های رگرسیونی چندمتغیره از اطلاعات باندهای طیفی در مقایسه با مدل‌های رگرسیونی تک‌متغیره دارای همبستگی بیشتری با WQI است. علاوه بر آن با استفاده از مدل‌های رگرسیونی و اطلاعات طیفی ماهواره‌ای، امکان تهیه نقشه تغییرات WQI در پهنه بزرگ‌تر فراهم است. درحالی‌که در روش‌های اندازه‌گیری درجا کیفیت آب، امکان دستیابی به تغییرات کیفیت آب در طول بازه رودخانه یا پهنه آبی دشوار بوده و با چالش همراه است. بنابراین با کاربرد تصاویر ماهواره‌ای، تغییرات کیفیت آب و تفاوت آن در طول بازه‌ها و پهنه‌های آبی گسترده‌تر به راحتی فراهم است. این امر به محققان و تصمیم‌گیران در شناسایی منشا آلودگی و مناطق بحرانی کیفیت آب و عوامل موثر بر آن کمک می‌کند تا ضمن تسهیل در زمینه‌های تحقیقاتی و اجرایی، بررسی‌ها و عملیات مدیریتی از دقت بالایی نیز برخوردار باشند. علاوه بر آن استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در بررسی‌های

- spectral signature and multivariate modeling. *Water*, 14(7): 1131-1131.
- Gani, M.A., Sajib, A.M., Siddik, M.A. and Moniruzzaman, M. (2023) Assessing the impact of land use and land cover on river water quality using water quality index and remote sensing techniques. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(4): 449-449.
- Gao, B.C. (1996) NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3): 257-266.
- Ghaffari, A., Nasser, M. and Pasebani Someeh, A. (2022) Assessing the economic effects of drought using Positive Mathematical Planning model under climate change scenarios. *Heliyon*, 8(12): e11941.
- Gu, Q., Hu, H., Ma, L., Sheng, L., Yang, S., Zhang, X. and Chen, L. (2019) Characterizing the spatial variations of the relationship between land use and surface water quality using self-organizing map approach. *Ecological Indicators*, 102(1): 633-643.
- Hadiyan, P.P., Moeini, R. and Ehsanzadeh, E. (2020) Application of static and dynamic artificial neural networks for forecasting inflow discharges, case study: Sefidroud Dam reservoir. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 27(2): 100401.
- Hassanpur Kourandeh, H. and Fataei E. (2014) Investigation and qualitative classification of heroriver water by Canadian Water Quality Index (CWQI). *Advances in Environmental Biology*, 8(5): 1442-1449.
- He, Y., Jin, S. and Shang, W. (2021) Water quality variability and related factors along the Yangtze River using Landsat-8. *Remote Sensing*, 13(12): 2241.
- Hussain, S., Aslam, M., Javed, M., Zahra, M., Ejaz, H., Kubra, K. and Mushtaq, I. (2021) Impact of climatic changes and global warming on water availability. *Anthropogenic Pollution*, 5(2): 57-66. doi:10.22034/ap.2021.1926893.1100/
- Im, J., Jensen, J.R. and Tullis J.A. (2008) Object-based change detection using correlation image analysis and image segmentation. *International Journal of Remote Sensing*, 29(2): 399-423, DOI: 10.1080/01431160601075582/
- Jalili, S. (2020) Water quality assessment based on HFB I& BMWP Index in Karoon River, Khuzestan Province, (Northwest of Persian Gulf). *Anthropogenic Pollution*, 4(1): 36-49. doi:10.22034/ap.2020.1877482.1047/
- Jally, S.K., Mishra, A.K. and Balabantaray, S. (2021) Retrieval of suspended sediment concentration of the Chilika Lake, India using sensing in effective monitoring of water quality parameters. *Remote Sensing*, 15(7): 1938.
- Aghajani, M., Mostafazadeh- Fard, B. and Navabian, M. (2017) Assessing criteria affecting performance of the sefidroud irrigation and drainage network using topsis-entropy theory. *Irrigation and Drainage*, 66(4): pp.626-635.
- Aires, U.R.V., da Silva, D.D., Fernandes Filho, E.I., Rodrigues, L.N., Uliana, E.M., Amorim, R.S.S., de Melo Ribeiro, C.B. and Campos, J.A. (2022) Modeling of surface sediment concentration in the Doce River basin using satellite remote sensing. *Journal of Environmental Management*, 323(1): 116207.
- Ansari, M. and Akhoondzadeh, M. (2020) Mapping water salinity using Landsat-8 OLI satellite images (Case study: Karun basin located in Iran). *Advances in Space Research*, 65(5): 1490-1502.
- Barrett, D.C. and Frazier A.E. (2016) Automated method for monitoring water quality using Landsat imagery. *Water*, 8(6): 257-269.
- Cerqueira, T.C., Mendonça, R.L., Gomes, R.L., de Jesus, R.M. and da Silva, D.M.L. (2020) Effects of urbanization on water quality in a watershed in northeastern Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(1): 65-65.
- Cremon, É.H., da Silva, A.M.S. and Montanher, O.C. (2020) Estimating the suspended sediment concentration from TM/Landsat-5 images for the Araguaia River-Brazil. *Remote Sensing Letters*, 11(1): 47-56.
- Dodangeh, E., Soltani, S., Sarhadi, A. and Shiau, J.T. (2014) Application of L- moments and Bayesian inference for low- flow regionalization in Sefidroud basin, Iran. *Hydrological Processes*, 28(4): 1663-1676.
- Ebraheim, G., Zonoozi, M.H. and Saedi, M. (2020) A comparative study on the performance of NSFQI m and IRWQI sc in water quality assessment of Sefidroud River in northern Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(11): 1-13.
- Fataei, E., Seyyedsharifi, A., Seiiedsafaviyan, T. and Nasrollahzadeh, S. (2013) Water quality assessment based on WQI and CWQI Indexes in Balikhlou River, Iran. *Journal of Basic Applied Sciences Research*, 3(3): 263-269
- Fensholt, R., Sandholt, I and Pround, S.R. (2010) Assessment of MODIS sun-sensor geometry variations effect on observed NDVI using MSG SEVIRI geostationary data. *International Journal of Remote Sensing*, 31(23): 6163-6187.
- Gad, M., Saleh, A.H., Hussein, H., Farouk, M. and Elsayed, S. (2022) Appraisal of surface water quality of Nile river using water quality indices,

- Mishra, A.P., Khali, H., Singh, S., Pande, C.B., Singh, R. and Chaurasia, S.K. (2021) An assessment of in-situ water quality parameters and its variation with Landsat 8 level 1 surface reflectance datasets. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 103(18): 1-23.
- Mushtaq, F., and Nee Lala, M.G. (2017) Remote estimation of water quality parameters of Himalayan Lake (Kashmir) using Landsat 8 OLI imagery. *Geocarto International*, 32(3): 274-285.
- Najafzadeh, M. and Basirian, S. (2023) Evaluation of river water quality index using remote sensing and artificial intelligence models. *Remote Sensing*, 15(9): 2359. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs15092359/>
- Obaid, A.A., Ali, K.A., Abiye, T.A. and Adam, E.M. (2021) Assessing the utility of using current generation high-resolution satellites (Sentinel 2 and Landsat 8) to monitor large water supply dam in South Africa. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22(1): 100521.
- Pesce, S.F. and Wunderlin, D.A. (2000) Use of water quality indices to verify the impact of Córdoba City (Argentina) on Suquia River. *Water Research*, 34(11): -2926.
- Pizani, F., Maillard, P., Ferreira, A. and Amorim, C. (2020) Estimation of water quality in a reservoir from Sentinel-2 MSI and Landsat-8 OLI sensors. *3(2)*: 401-408.
- Pushparaj, J. and Hegde, A.V. (2017) Evaluation of pan-sharpening methods for spatial and spectral quality. *Applied Geomatics*, 9(1): 1-12.
- Quang, N.H., Dinh, N.T., Dien, N.T. and Son, L.T. (2023) Calibration of sentinel-2 surface reflectance for water quality modelling in Binh Dinh's coastal zone of Vietnam. *Sustainability*, 15(1410): 2-20.
- Rahmati, H., farshchi, P. and Pournoori, M. (2022) Zoning of the southern coastal region of the IRAN based on Pollution of water resources (Case study: Minoo Island). *Anthropogenic Pollution*, 6(1): 100-108. doi:10.22034/ap.2022.1951890.1128/
- Sadegh Ali, M.R., Zare, A. and Pournouri, M. (2021) Investigating and identifying the effects of rural wastewater in Dena protected area and presenting an environmental management pattern. *Anthropogenic Pollution*, 5(1): 49-61. doi:10.22034/ap.2021.1914771.1084/
- Safizadeh, E., Karimi, D., Gahfarzadeh, H.R. and Pourhashemi, S.A. (2021) Investigation of physicochemical properties of water in downstream areas of selected dams in Aras catchment and water quality assessment (Case Landsat-8 OLI satellite data. *Environmental Earth Sciences*, 80(8): 1-18.
- Kändler, M., Blechinger, K., Seidler, C., Pavlů, V., Šanda, M., Dostál, T. and Štich, M. (2017) Impact of land use on water quality in the upper Nisa catchment in the Czech Republic and in Germany. *Science of the Total Environment*, 586(4): 1316-1325.
- Kareem, S.L., Jaber, W.S., Al-Maliki, L.A., Al-husseiny, R.A., Al-Mamoori, S.K. and Alansari, N. (2021) Water quality assessment and phosphorus effect using water quality indices: Euphrates River-Iraq as a case study. *Groundwater for Sustainable Development*, 14(2): 100630.
- Kavzoglu, T. and Colkesen, I. (2009) A Kernel function analysis for support vector machines for land cover classification. *International Journal of Applied earth observation and Geoinformation* 11(5): 352-359.
- Klonus, S. and Ehlers, M. (2009) Performance of evaluation methods in image fusion. In *Performance of evaluation methods in image fusion. 2009 12th International Conference on Information Fusion*, pp. 1409-1416.
- Liao, K., Xu S., Wu J., Zhu Q. and An L. (2014) Using support vector machines to predict cation exchange capacity of different soil horizons in Qingdao City, China. *Journal of Plant Nutrition Soil Science*, 177(5): 775-782.
- Mackialegha, M., Salarian, M.B. and Behbahaninia, A. (2022) The use of multivariate statistical methods for the classification of groundwater quality: A case study of aqueducts in the east of Tehran, Iran. *Anthropogenic Pollution*, 6(2): 1-9. doi:10.22034/ap.2022.1965587.1134/
- Markogianni, V., Kalivas, D., Petropoulos, G.P. and Dimitriou, E. (2018) An Appraisal of the potential of Landsat 8 in estimating chlorophyll-a, ammonium concentrations and other water quality indicators. *Remote Sens*, 10(7): 1-22.
- McCarthy, M.J., Colna, K.E., El-Mezayen, M.M., Laureano-Rosario, A.E., Méndez-Lázaro, P., Otis, D.B., Toro-Farmer, G., Vega-Rodriguez, M. and Muller-Karger, F.E. (2017) Satellite remote sensing for coastal management: A review of successful applications. *Environmental Management*, 60(2): 323-339.
- Mello, K.D., Valente, R.A., Randhir, T.O., dos Santos, A.C.A. and Vettorazzi, C.A. (2018) Effects of land use and land cover on water quality of low-order streams in Southeastern Brazil: Watershed versus riparian zone. *CATENA*, 167(1): 130-138.

- contamination at the Kamfiroz District, Shiraz, Iran. *Anthropogenic Pollution*, 4(1): 24-35. doi:10.22034/ap.2020.1882082.1055/
- Vinod, J., Satish, D. and Sapana, G. (2013) Assessment of water quality index of industrial area surface water samples. *International Journal of Chem Tech Research*, 2013(5): 278-283.
- WHO. (2011) Guidelines for drinking-water quality, World Health Organization, Geneva 2011, p. 303-304.
- Wu, Z., Wang, X., Chen, Y., Cai, Y. and Deng, J. (2018) Assessing River water quality using water quality index in Lake Taihu Basin, China. *Science of the Total Environment*, 612(5): 914-922.
- Xiong, F., Chen, Y., Zhang, S., Xu, Y., Lu, Y., Qu, X., Gao, W., Wu, X., Xin, W., Gang, D.D. and Lin, L.S. (2022) Land use, hydrology, and climate influence water quality of China's largest river. *Journal of Environmental Management*, 318(3): 115581.
- Xu, H. (2006) Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14): 3025-3033.
- Xu, S. and Ehlers, M. (2017) Hyperspectral image sharpening based on Ehlers fusion. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W7: 941-947.
- Yadav, S., Babel, M.S., Shrestha, S. and Deb, P. (2019) Land use impact on the water quality of large tropical river: Mun River Basin, Thailand. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(10): 614-614.
- Yang, H., Kong, J., Hu, H., Du, Y., Gao, M. and Chen, F. (2022) A review of remote sensing for water quality retrieval: Progress and challenges. *Remote Sensing*, 14(8): 1770.
- Yia, L., Binga, L., Qian-lia, P., Chenc, P. and Yuana, L. (2012) A change detection method for remote sensing image based on multi-feature differencing Kernel Svm. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1(3): 227-235.
- Zhang, Z., Zhang, F., Du, J., Chen, D. and Zhang, W. (2021) Impacts of land use at multiple buffer scales on seasonal water quality in a reticular river network area. *PloS one*, 16(1): e0244606.
- study: Aras catchment in the border area of Iran and Armenia). *Anthropogenic Pollution*, 5(1): 41-48. doi:10.22034/ap.2021.1912491.1082/
- Salar-Ashayeri, M., Khaledian, M., Kavooosi-Kalashami, M. and Rezaei, M. (2020) Simulation of water allocation in Sefidroud irrigation and drainage network for sustainability of rice production. *Paddy and Water Environment*, 18(3): 607-621.
- Sarp, G. (2014) Spectral and spatial quality analysis of pan-sharpening algorithms: A case study in Istanbul. *European Journal of Remote Sensing*, 47(1): 19-28.
- Semiromi, F.B., Hassani, A., Torabian, A., Karbassi, A. and Lotfi, F.H. (2011) Water quality index development using fuzzy logic: A case study of the Karoon River of Iran. *African Journal of Biotechnology*, 50(10): 10125-10133.
- Şener, Ş., Şener, E. and Davraz, A. (2017) Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey). *Science of the Total Environment*, 584(5):131-144.
- Shukla, A.K., Ojha, C.S.P., Mijic, A., Buytaert, W., Pathak, S., Garg, R.D. and Shukla, S. (2018) Population growth, land use and land cover transformations, and water quality nexus in the Upper Ganga River basin, *Hydrol. Hydrology and Earth System Sciences*, 22(4): 4745-4770.
- Talebi, M. (2023) Water crisis in iran and its security consequences. *Journal of Hydraulic Structures*, 8(4): 17-28.
- Tian, Y., Jiang, Y., Liu, Q., Dong, M., Xu, D., Liu, Y. and Xu, X. (2019) Using a water quality index to assess the water quality of the upper and middle streams of the Luanhe River, northern China. *Science of The Total Environment*, 667(1): 142-151.
- Topp, S.N., Pavelsky, T.M., Jensen, D., Simard, M. and Ross, M.R. (2020) Research trends in the use of remote sensing for inland water quality science: Moving towards multidisciplinary applications. *Water*, 12(1): 169-169.
- Vakili, T. and Amanollahi, J. (2020) Determination of optically inactive water quality variables using Landsat 8 data: A case study in Geshlagh reservoir affected by agricultural land use. *Journal of Cleaner Production*, 247(2): 119134.
- Valiollahi, J. and Moradi, S. (2020) Evaluating the effects of agricultural activities on nitrate

Investigating the water quality index (WQI) using Landsat 8 satellite images and the application of univariate and multivariate models in Sefidroud river in northern Iran

Yosef pourhabib¹, Ebrahim Fataei^{2*}, Fatemeh Nasehi³, Behnam Khanizadeh⁴ and Hossein Saadati³

1) Ph.D. Student, Department of Environmental Sciences and Engineering, Ardabil Branch, Islamic Azad University, Ardabil, Iran.

2) Professor, Department of Environmental Sciences and Engineering, Ardabil Branch, Islamic Azad University, Ardabil, Iran.

*Corresponding Author Email Address: eafataei@gmail.com

3) Assistant Professor, Department of Environmental Sciences and Engineering, Ardabil Branch, Islamic Azad University, Ardabil, Iran.

4) Assistant Professor, Department of Chemistry, Sarab Branch, Islamic Azad University, Sarab, Iran.

Date of Submission: 2023/12/04

Date of Acceptance: 2024/03/13

Abstract

Sefidroud river is one of the largest and most important sources of surface water in northern Iran. In this research, the water quality of Sefidroud river during the years 2013-2018 using Landsat 8 satellite images as well as 10 qualitative chemical and physical parameters including calcium (Ca²⁺), potassium (Na⁺), magnesium (Mg²⁺), chlorine (Cl⁻), sulfate (SO₄²⁻), bicarbonate (HCO₃⁻), total dissolved substances (TDS), electrical conductivity (EC), total hardness (TH) and water acidity (pH) were studied in three hydrometric stations. Drinking water quality index (WQI) was calculated and its relationship with satellite bands and band ratios (28 parameters) was analyzed using univariate and multivariate regression models. The results of the univariate regression model showed that the WQI index with band 5 and the ratio of band B4/B3 had a linear and power correlation at a significance level of 1% with coefficient of determination (R²) of 0.55 and 0.51, respectively. The implementation of the stepwise linear multivariate regression model of WQI with all the studied bands and ratios showed that the three band 5 variables and band ratios B4/B3 and B6/B5 were correlated with WQI, with an R² of about 0.80 at a 5% significance level. After preparing the spatial changes map of WQI using multivariate linear regression model, the results indicated that the water quality in the head branches of Sefidroud, that is, the Qezaluzen and Shahroud rivers, was lower compared to the lower areas and Manjil dam lake, although the water quality of the Qezaluzen and Shahroud rivers was lower. Shahroud was weak, but after entering Manjil dam, it became a good water class. However, the WQI of the water coming out of the dam had gradually increased by passing through the agricultural lands, residential and industrial areas along the river until it reached the Caspian Sea, and it had weakened water class. In general, the results of the research showed that the use of Landsat 8 satellite images and multivariable regression model has a high power for water quality monitoring.

Keywords: Qezaluzen, Remote sensing, Shahroud, Water pollution monitoring.