

Evaluation of Sentinel-2 and Landsat-8 Satellite Images Capability and Evaluation of Image Fusion Capability in Seasonal Zoning of NSFQI and IRWQIsc Qualitative Indices in Surface Water (Case Study: Karoun River)

Kazem Rangzan^{1*}, Mostafa Kabolizadeh², Danya Karimi³

1-Associate Professor of Department of Remote Sensing and GIS, Earth Sciences Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran (*Corresponding Author Email: kazemrangzan@scu.ac.ir)

2- Assistant Professor of Department of Remote Sensing and GIS, Earth Sciences Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

3- PhD Candidate of Remote Sensing and GIS, Earth Sciences Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Extended Abstract

Introduction

Given the importance of surface water for drinking, agriculture, and industry, the protection of these resources against pollution is of great importance for national and regional health.

The integration of satellite imagery to produce data with a higher information level is called image fusion. Fusion methods are generally divided into three categories: pixel-based methods, feature-based methods, and decision-based methods.

The main objective of this research is to optimize seasonal zoning of the water quality indices of Karoun River based on two indices of NSFQI (National Health Foundation Water Quality Index) and IRWQIsc (Iran Surface Water Quality Index for Conventional Pollutants) and therefore, the fusion of Sentinel-2 and Landsat 8 images will be evaluated. It is noteworthy that based on our knowledge the evaluation of image fusion methods in the field of qualitative indices zoning has not been conducted yet.

Materials and Methods

Measured Quality Parameters

Seven sampling stations were selected for seasonal measurement of water quality parameters along a part of the Karoun River in 2018. The measured qualitative parameters included chemical oxygen demand, biological oxygen demand, dissolved oxygen, electrical conductivity, fecal coliform, PH, nitrate, phosphate, total hardness, and turbidity.

NSFWQI

NSFWQI was introduced by the US National Health Organization in 1970. In this index, several questionnaires were filled out by experts in the United States, which are the basis for adjusting this index. Based on the answers, a curve was plotted for each parameter to determine the sub-indices of each parameter.

IRWQIsc

To evaluate the quality of rivers and compare their pollution rates in Iran concerning natural conditions and water resources problems, an index (IRWQIsc) was introduced to provide a good perspective about the quality status of water resources in Iran.

Utilized satellite imageries

Four pairs of geometrically and atmospherically corrected Sentinel-2 and Landsat-8 images were used to seasonally map the water quality indices in the Karoun River.



جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی

سال ۳۱، پیاپی ۷۷، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹

وصول: ۱۳۹۹/۳/۶ پذیرش: ۱۳۹۹/۵/۲۷

صص ۷۳-۱۰۲

ارزیابی قابلیت تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ و لندست ۸ و تلفیق تصاویر در پهنه‌بندی فصلی شاخص‌های کیفی NSFQI و IRWQIsc در آب‌های سطحی نمونه پژوهش: رودخانه کارون

کازم رنگزن*، دانشیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

kazemrangzan@scu.ac.ir

مصطفی کابلی‌زاده، استادیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

m.kabolizade@scu.ac.ir

دانا کریمی، دانشجوی دکتری رشته سنجش از دور و GIS دانشگاه شهید چمران اهواز

danyakarimi@yahoo.com

چکیده

در این پژوهش قابلیت دو نوع تصویر ماهواره‌ای اپتیکی سنتینل-۲ (S2B) و لندست ۸ (L8) و همچنین قابلیت تلفیق این تصاویر در پهنه‌بندی فصلی شاخص‌های کیفی آب رودخانه کارون ارزیابی شده است. برای هر فصل، ۱۸ باند حاصل از تصاویر اولیه و تصاویر تلفیق شده به چهار روش شدت-رنگ-اشباع (IHS)، گرام-اشمیدت (GST)، تبدیل براووی (BT) و تبدیل موجک (WT) به منظور یافتن بیشترین ضریب همبستگی با شاخص‌های کیفی NSFQI و IRWQIsc و در نتیجه محاسبه مدل‌های رگرسیون پهنه به کار رفته است. دو ایده ارزیابی تأثیر مقدار تک‌پیکسل (IP) یا در نظر گرفتن میانگین یک پنجره ۳*۳ (9P) تصاویر ورودی در بهبود ضریب همبستگی بین تصاویر و داده‌های میدانی نیز بررسی شده است.

نتایج نشان داد بهترین نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص NSFQI در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب براساس به‌کارگیری باند ۲ تصویر مبتنی بر BT (حالت 9P)، باند ۲ تصویر مبتنی بر IHS (حالت 1P)، باند ۲ تصویر L8 (حالت 1P) و باند ۴ تصویر L8 (حالت 1P) هستند. بهترین نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص IRWQIsc در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب براساس به‌کارگیری باند ۱ تصویر L8 (حالت 1P)، باند ۲ تصویر S2B (حالت 1P)، باند ۲ تصویر L8 (حالت 1P) و باند ۲ تصویر BT (حالت 1P) به دست آمده‌اند؛ همچنین بر مبنای نتایج، روند تغییرات هر دو شاخص در نقشه‌های پهنه‌بندی کیفی از شمال به جنوب منطقه پژوهش در هر فصل بسیار مشابه است. نتایج ارزیابی فصلی هر دو شاخص حاکی از وضعیت نامناسب آب رودخانه در بیشتر روزهای سال است.

واژه‌های کلیدی: تلفیق تصاویر، رودخانه کارون، تصویر سنتینل-۲، IRWQIsc، NSFQI

*نویسنده مسئول:

Copyright©2017, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they can't change it in any way or use it commercially.

http://gep.ui.ac.ir/article_25095.html

مقدمه

با توجه به کاربرد آب‌های سطحی در حیطه‌هایی همچون شرب، کشاورزی و صنعت، محافظت از این منابع در برابر آلودگی اهمیت فراوانی دارد؛ به همین دلیل بررسی کیفیت آب‌های سطحی به‌طور روزافزون در کانون توجه قرار گرفته است. محدودیت کمی و کیفی این منابع و خطر آلودگی آنها بر اثر منابع مختلف، استفاده بهینه از این منابع و ارزیابی و حفاظت کیفی آنها را ضروری می‌سازد. به‌طور کلی منابع آب سطحی به‌ویژه رودخانه‌ها، پتانسیل زیادی در آلوده‌شدن با انواع آلاینده‌های شهری و صنعتی دارند. توسعه جوامع شهری و در پی آن، افزایش به‌کارگیری منابع آب سطحی، بررسی مداوم پارامترها و شاخص‌های کیفی آب را ضروری کرده است. هر ماده و جسمی که مانع استفاده طبیعی از آب شود، به‌مثابه آلوده‌کننده آب نام‌گذاری می‌شود. براساس برآورد انجمن محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا، حدود یک‌سوم جریان آب جهان آلوده است و اصل حفظ کیفیت آب به هم خورده است (مارامایی، ۱۳۹۶: ۲۰).

پیشینه پژوهش

پژوهش‌های زیادی در زمینه بررسی کیفیت آب انجام شده است؛ جداری عیوضی و همکاران (۱۳۸۸) تأثیر پارامترهای مؤثر بر کیفیت شیمیایی آب رودخانه کر واقع در بالادست سد درودزن و دریاچه آن را بررسی کردند؛ همچنین آنها نقش رشد جمعیت و افزایش فاضلاب‌های حاصل از فعالیت‌های کشاورزی، شهری و روستایی را در کیفیت آب دریاچه مدنظر قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد با توجه به استاندارد مجاز کیفیت آب، غلظت یون‌های موجود در آب دریاچه یادشده در حد استاندارد است.

فتاحی مقدم نوقابی (۱۳۹۰) در پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود، تصاویر ابرطیفی هایپریون را در برآورد و تهیه نقشه پارامترهای کلروفیل-a، کدورت، رسوب معلق و عمق دیسک سکی^۱ به‌مثابه پارامترهای کیفیت آب در رودخانه کارون ارزیابی کرد. نتایج قابلیت زیاد داده‌های این سنجنده را در پهنه‌بندی کیفی آب نشان داد.

فضیلت پور (۱۳۹۰) به‌منظور تعیین مناطق مستعد صید ماهی در خلیج فارس، پس از تهیه لایه‌های دمای سطح آب، ارتفاع سطح دریا، غلظت کلروفیل-a و شیب حرارتی سطح آب، نقشه مکان‌های مستعد صید را با استفاده از تصاویر مادیس و روش‌های فازی براساس پارامترهای کیفی یادشده تهیه کرد. نتایج مکان‌های مستعد صید ماهی را در ماه‌های مختلف سال تعیین کرد.

نوحه‌گر (۱۳۹۰) وضعیت کیفی آب رودخانه میناب را بررسی کرد. براساس روابط آماری به‌دست‌آمده، هدایت الکتریکی با باقی‌مانده خشک و یون‌های کلرید، سدیم و منیزیم رابطه بسیار خوبی داشت، اما با یون بی‌کربنات رابطه مناسبی نداشت. براساس این پژوهش، گسترش وسیع کشاورزی و در نتیجه دفع سموم و آفت‌کش‌ها موجب کاهش دبی و افزایش غلظت آلاینده‌ها در رودخانه شده است.

رنگزن و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از تصاویر هایپریون و داده‌های میدانی حاصل از ۱۳ ایستگاه، اقدام به مطالعه کیفی

^۱. Secchi disk

رودخانه کارون مبتنی بر دو پارامتر کدورت و عمق دیسک سکی کردند. نتایج داده‌های زمینی و سنجش از دور فراطیفی ارتباط زیادی را براساس دو پارامتر همبستگی^۱ (R^2) و خطای ریشه حداقل مربعات خطا (RMSE^۲) $R^2 = ۰/۸۴$ و $R^2 = ۰/۰۳$ ، $RMSE = ۱/۰۳$ ؛ $R^2 = ۰/۸۶$ ؛ $RMSE =$ به ترتیب برای عمق دیسک سکی و کدورت نشان داد.

مآرامایی (۱۳۹۶) در پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود، دو شاخص کیفی شاخص کیفیت آب بنیاد ملی بهداشت (NSFWQI^۳) و شاخص کیفیت منابع آب سطحی ایران برای آلاینده‌های متعارف (IRWQIsc^۴) را به منظور ارزیابی کیفی رودخانه زیارت واقع در بالادست شهر گرگان بررسی کرد. نتایج نشان داد براساس NSFWQI، کیفیت آب رودخانه از بالادست به پایین دست در فصل زمستان از وضعیت متوسط به بد تغییر داشته و در فصل تابستان در تمامی ایستگاهها بد بوده است؛ همچنین براساس پارامتر IRWQIsc نیز، کیفیت آب رودخانه از بالادست به پایین دست در فصل زمستان از وضعیت متوسط به نسبتاً بد و در فصل تابستان از نسبتاً بد به بد تغییر داشته است.

پورحقی (۱۳۹۷) در تز دکتری خود، دو پارامتر کیفی هدایت الکتریکی و مواد جامد معلق کل در رودخانه کارون را در محدوده بند قیر تا ملاثانی با استفاده از تصویر لندست ۸ مبتنی بر روش رگرسیون گیری، انفیس و تبدیل موجک بررسی کرد. در این پژوهش، تبدیل موجک به بهبود ضریب همبستگی از ۶۶٪ به ۸۵٪ منجر شد.

هدف پژوهش تامینگ و همکاران^۵ (۲۰۱۶)، سنجش قابلیت داده‌های سنتینل-۲ به منظور نقشه برداری پارامترهای مختلف کیفیت آب دریاچه برای نخستین بار بود. پارامترهای کیفی شامل کلروفیل a، رنگ آب، ماده آلی محلول رنگی و کربن آلی محلول از نه دریاچه کوچک و دو دریاچه بزرگ با داده‌های تصویر سنتینل-۲ مقایسه شد. به طور کلی نتایج این پژوهشگران نشان داد بین الگوریتم‌های نسبت بانندی محاسبه شده و پارامترهای آب دریاچه مانند کلروفیل a ($R^2 = ۰/۸۳$)، ماده آلی محلول رنگی ($R^2 = ۰/۷۲$) و غلظت کربن آلی محلول ($R^2 = ۰/۹۲$) همبستگی خوبی وجود دارد. این نتایج ثابت کرد تصویر سنتینل-۲، ابزاری ارزشمند برای نظارت بر دریاچه است.

پوتس و همکاران^۶ (۲۰۱۸) پس از نمونه برداری میدانی از چندین نقطه مخزن آبی به وسعت ۲۵۰ Km² در جنوب شرق پرتغال، پارامترهای کیفی شامل کدورت، کلروفیل a و سیانوباکتری را با استفاده از تصاویر سنتینل-۲ بررسی کردند. مقایسه نتایج آنها با داده‌های میدانی، قابلیت زیاد این تصاویر را در بررسی کیفی آب نشان می‌دهد.

الحاگ و همکاران^۷ (۲۰۱۹) با به کارگیری تصویر سنتینل-۲ پارامترهای کیفی آب را در دریاچه وادی بایش در عربستان سعودی بررسی کردند. نتایج این بررسی نشان داد تجمع کلروفیل a همبستگی زیادی با شاخص کلروفیل بیشینه، تجمع نترات همبستگی زیادی با شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده سبز و کدورت آب همبستگی زیادی با شاخص اختلاف کدورت نرمال شده دارد. به طور کلی نتایج این پژوهش، کارآمد بودن تصویر سنتینل-۲ را در برآورد پارامترهای کیفی آب در مناطق خشک تأیید کرد.

1. Correlation

2. Root Mean Square Error

3. National Sanitation Foundation Water Quality Index

4. Iran Surface Water Resources Quality Index for Conventional Pollutants

5. Toming et al.

6. Potes et al.

7. Elhag et al.

جهین و همکاران^۱ (۲۰۲۰) شاخص کیفی NSFQI را در آب‌های سطحی منطقه‌ای در مصر محاسبه کردند. داده‌های ورودی براساس سنجش همبستگی، آنالیز مؤلفه‌های اصلی و آنالیز فاکتور ارزیابی شد. به‌طور کلی روند تغییرات شاخص بررسی شده در این منطقه از حالت ضعیف به حالت خوب تغییر کرده است؛ همچنین نتایج نشان می‌دهد در حالت به‌کارگیری آنالیز مؤلفه‌های اصلی، دقت نتایج بهتر خواهد بود.

گرادایلا هرناوندز و همکاران^۲ (۲۰۲۰) شاخص جدیدی را به نام شاخص کیفیت آب اکوسیستم ویژه^۳ (ES-WQI) به‌منظور برآورد کیفیت آب دریاچه‌ای در مکزیک پیشنهاد دادند. این شاخص براساس روش‌های آماری چندمتغیره و توزیع‌های قدیمی داده‌هاست. شاخص پیشنهادی این پژوهشگران تغییرات کیفیت را در طول سال توصیف می‌کند و با توانایی دریاچه برای حمایت از زندگی آبزیان ارتباط دارد؛ زیرا کمترین ارزش تخمین زده‌شده همزمان با بزرگ‌ترین وقایع مرگ‌ومیر ماهیان در دریاچه است؛ علاوه بر این ES-WQI به‌وضوح بین رفتارهای معمولی چرخه‌ای و روند رو به وخامت تمایز قائل می‌شود و تغییرات افزایشی را ردیابی می‌کند.

ادغام تصاویر ماهواره‌ای به‌منظور تولید داده‌ای با سطح اطلاعات بالاتر از تصاویر اولیه را «تلفیق تصویر»^۴ می‌نامند (Rangzan et al., 2019: 481; Bioresita et al., 2019: 1; Suwarsono et al., 2018: 157) به‌طور کلی روش‌های تلفیق به سه دسته تقسیم می‌شوند؛ روش‌های مبتنی بر پیکسل که تلفیق در سطح ویژگی‌های فیزیکی داده و به بیانی در پایین‌ترین سطح پردازش است؛ تلفیق مبتنی بر ویژگی، تلفیق در سطح ویژگی‌های استخراج‌شده از داده‌هاست و تلفیق در سطح تصمیم، بالاترین سطح تلفیق و براساس تصمیمات گیرندگان یا تصمیمات حاصل از منابع مختلف است (Rangzan et al., 2020: 1382; Rangzan et al., 2019: 481; Karimi et al., 2016: 768; Karimi et al., 2017: 013017). در این پژوهش، تصاویر اپتیکی سنتینل-۲ و لندست ۸ براساس تلفیق مبتنی بر پیکسل با یکدیگر ادغام شدند.

هدف اصلی این پژوهش، پهنه‌بندی بهینه شاخص‌های کیفی آب رودخانه کارون مبتنی بر شاخص کیفیت آب بنیاد ملی بهداشت (NSFWQI) و شاخص کیفیت منابع آب سطحی ایران برای آلاینده‌های متعارف (IRWQIsc) به‌صورت فصلی است. در این زمینه قابلیت روش‌های تلفیق تصاویر سنتینل-۲ و لندست ۸ ارزیابی خواهد شد.

از آنجا که از رودخانه کارون در مصارف شرب، صنعت و کشاورزی استفاده می‌شود، نظارت بر کیفیت آن اهمیت بسزایی دارد؛ به همین دلیل این رودخانه به‌منزله منطقه پژوهش برگزیده شد. در نخستین مرحله، پهنه‌بندی فصلی شاخص‌های کیفی آب با به‌کارگیری جداگانه تصاویر سنتینل-۲ و لندست ۸ انجام می‌شود. در مرحله بعدی، پس از اجرای چهار روش تلفیق پرکاربرد، پهنه‌بندی فصلی شاخص‌های کیفی روی داده‌های تلفیق‌شده اجرا خواهد شد. درنهایت با مقایسه خروجی‌ها، بهترین روش پهنه‌بندی شاخص‌های کیفی آب برای هر فصل انتخاب خواهد شد. گفتنی است براساس دانش نویسندگان پژوهش تا به حال ارزیابی روش‌های تلفیق تصویر در زمینه پهنه‌بندی شاخص‌های کیفی انجام نشده است.

¹ . Jahin et al.

² . Gradilla-Hernández et al.

³ . Ecosystem Specific Water Quality Index

⁴ . Image Fusion

روش‌شناسی پژوهش

پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده

هفت ایستگاه نمونه‌برداری برای اندازه‌گیری فصلی پارامترهای کیفی آب در طول بخشی از رودخانه کارون در سال ۱۳۹۷ انتخاب شد (شکل ۱). پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده شامل اکسیژن‌خواهی شیمیایی (CO_2^1)، اکسیژن‌خواهی زیستی (BOD^2)، اکسیژن محلول (DO^3)، هدایت الکتریکی (EC^4)، کلیفرم مدفوعی (FC^5)، هیدروژن پتانسیل (PH^6)، نیترات $NO_3^-^7$ ، فسفات $PO_4^{2-}^8$ ، سختی کل و کدورت است. جدول ۱ مختصات ایستگاههای نمونه‌برداری، جدول ۲ تاریخ نمونه‌برداری میدانی و جدول ۳ پارامترهای کیفی برداشت شده در محل هر ایستگاه را نمایش می‌دهد.

جدول ۱. مختصات ایستگاههای نمونه‌برداری

| ایستگاه ۱ | ایستگاه ۲ | ایستگاه ۳ | ایستگاه ۴ | ایستگاه ۵ | ایستگاه ۶ | ایستگاه ۷ | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|
| ۲۹۸۸۲۳ | ۲۹۸۲۷۵ | ۲۸۹۳۱۴ | ۲۸۱۵۷۵ | ۲۷۹۸۷۵ | ۲۷۲۲۵۴ | ۲۷۱۸۴۵ | X |
| ۳۴۹۶۱۹۵ | ۳۴۸۸۶۵۵ | ۳۴۷۸۸۴۴ | ۳۴۷۱۲۹۵ | ۳۴۶۸۸۷۵ | ۳۴۶۱۷۴۴ | ۳۴۵۷۸۲۵ | Y |

جدول ۲. تاریخ نمونه‌برداری میدانی فصلی

| تاریخ | بهار | تابستان | پاییز | زمستان |
|-----------------|------------|-----------------|------------|-------------------------|
| ۲۰۱۸-۰۴-۱۵ و ۱۶ | ۲۰۱۸-۰۷-۱۴ | ۲۰۱۸-۱۰-۲۰ و ۲۱ | ۲۰۱۹-۰۱-۰۱ | ۲۰۱۸-۱۲-۲۹ و ۲۰۱۹-۰۱-۰۱ |

جدول ۳. پارامترهای کیفی میدانی استفاده شده

| پارامترهای کیفی آب | | | | | | | | | | | | ایستگاه های نمونه برداری |
|--------------------------------|-------|---------|------|------------|-------|---------|------|------------|-------|---------|------|--------------------------|
| EC ($\mu s / cm$ at 25 °C) | | | | (Mg/L) COD | | | | (Mg/L) BOD | | | | |
| زمستان | پاییز | تابستان | بهار | زمستان | پاییز | تابستان | بهار | زمستان | پاییز | تابستان | بهار | |
| ۲۱۰۰ | ۳۲۴۰ | ۱۵۵۸ | ۳۰۶۰ | ۲۴/۴ | ۲۴/۸ | ۲۵/۲ | ۲۴/۸ | ۳/۶ | ۲/۵ | ۲/۸۸ | ۲/۳۳ | ایستگاه ۱ |
| ۱۹۵۳ | ۳۲۰۰ | ۱۶۱۳ | ۳۲۹۰ | ۲۵/۶ | ۲۳/۶ | ۲۴/۴ | ۲۶/۴ | ۳/۱۶ | ۲/۲۴ | ۳/۰۶ | ۲/۸۷ | ایستگاه ۲ |
| ۱۸۳۴ | ۳۳۵۰ | ۱۷۰۹ | ۲۲۱۰ | ۲۶/۴ | ۲۴/۴ | ۲۴ | ۲۶/۸ | ۳/۴ | ۱/۹۲ | ۳/۰۲ | ۲/۴ | ایستگاه ۳ |
| ۱۷۵۴ | ۳۳۹۰ | ۱۹۵۶ | ۲۴۹۰ | ۲۳/۶ | ۲۵/۶ | ۲۴/۸ | ۲۴ | ۳/۲۴ | ۱/۸۲ | ۳/۱۶ | ۲/۸۲ | ایستگاه ۴ |
| ۱۸۱۳ | ۳۳۳۰ | ۱۸۶۲ | ۲۱۴۰ | ۲۳/۲ | ۲۵/۶ | ۲۴ | ۲۷/۶ | ۳/۳ | ۲/۲۲ | ۳/۵ | ۱/۷۵ | ایستگاه ۵ |
| ۱۱۹۲ | ۳۲۴۰ | ۲۰۳۰ | ۲۱۹۰ | ۲۳/۲ | ۲۴ | ۲۳/۲ | ۲۵/۲ | ۳ | ۲/۸۸ | ۳/۳ | ۲/۸۴ | ایستگاه ۶ |
| ۱۲۷۶ | ۳۲۸۰ | ۲۲۶۰ | ۲۳۳۰ | ۲۳/۶ | ۲۵/۲ | ۲۳/۶ | ۲۳/۶ | ۳/۱ | ۳/۰۸ | ۳ | ۲/۱۸ | ایستگاه ۷ |

1. Chemical Oxygen Demand
2. Biological Oxygen Demand
3. Dissolved Oxygen
4. Electrical Conductivity
5. Fecal Coliform
6. Potential Hydrogen
7. Nitrate ion
8. Phosphate ion

| پارامترهای کیفی آب | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|-------|---------|------|--------------|-------|---------|-------|-------------------------|-------|---------|-------|-----------|
| دما | | | | (Mg/L) DO | | | | PH | | | | |
| زمستان | پاییز | تابستان | بهار | زمستان | پاییز | تابستان | بهار | زمستان | پاییز | تابستان | بهار | |
| ۱۶/۲ | ۲۵ | ۲۷ | ۲۳/۳ | ۹/۴ | ۶/۱ | ۶/۰۸ | ۴/۰۹ | ۷/۸ | ۷/۹ | ۸ | ۷/۷ | ایستگاه ۱ |
| ۱۵/۳ | ۲۵ | ۲۸ | ۲۳/۳ | ۹/۳۶ | ۷/۲۴ | ۶/۲۶ | ۵/۳۸ | ۷/۹ | ۷/۸ | ۸ | ۷/۸ | ایستگاه ۲ |
| ۱۶ | ۲۴/۴ | ۲۸ | ۲۳/۴ | ۹/۶ | ۶/۷۲ | ۷/۶۲ | ۷ | ۷/۹ | ۷/۹ | ۷/۹ | ۷/۸ | ایستگاه ۳ |
| ۱۶/۵ | ۲۴/۸ | ۲۸ | ۲۵ | ۸/۹۴ | ۶/۰۲ | ۵/۷۶ | ۶/۰۲ | ۷/۸ | ۷/۹ | ۸ | ۷/۸ | ایستگاه ۴ |
| ۱۶/۳ | ۲۵/۲ | ۲۸ | ۲۳ | ۹ | ۶/۶۲ | ۶/۳ | ۶/۰۴ | ۷/۷ | ۷/۹ | ۸ | ۷/۷ | ایستگاه ۵ |
| ۱۴/۵ | ۲۶ | ۲۹ | ۲۲/۴ | ۸/۵ | ۶/۸۶ | ۵/۵ | ۶/۵۴ | ۷/۶ | ۷/۹ | ۸/۱ | ۷/۷ | ایستگاه ۶ |
| ۱۴/۵ | ۲۵/۳ | ۲۸ | ۲۲/۷ | ۸/۵ | ۶/۳۸ | ۵/۴ | ۵/۹۸ | ۷/۵ | ۸ | ۸ | ۷/۷ | ایستگاه ۷ |
| پارامترهای کیفی آب | | | | | | | | | | | | |
| کدورت | | | | سختی کل | | | | کلیرم مدفوعی (NO/100ml) | | | | |
| زمستان | پاییز | تابستان | بهار | زمستان | پاییز | تابستان | بهار | زمستان | پاییز | تابستان | بهار | |
| ۷۸ | ۳۲ | ۳۷ | ۵۷۱۴ | - | ۸۰۹/۵ | ۴۲۲/۵ | ۸۶۹ | ۱۱۰۰۰ | ۴۶۰۰۰ | ۹۳۰۰ | ۲۱۰۰۰ | ایستگاه ۱ |
| ۷۳ | ۳۲ | ۱۲۸ | ۲۱۹ | - | ۷۷۷ | ۴۷۱/۵ | ۷۹۳/۵ | - | ۱۶۰۰۰ | ۹۳۰۰ | ۹۳۰۰ | ایستگاه ۲ |
| ۸۲ | ۴۰ | ۱۷۴ | ۱۱۸ | - | ۹۲۶ | ۴۹۱ | ۵۶۲ | ۴۶۰۰۰ | ۲۴۰۰۰ | ۱۵۰۰ | ۹۳۰۰ | ایستگاه ۳ |
| ۳۹ | ۴۴ | ۳۰ | ۱۲۲ | - | ۸۵۷/۵ | ۵۰۰ | ۵/۶۱۱ | ۹۳۰۰ | ۲۴۰۰۰ | ۲۳۰۰ | ۷۵۰۰ | ایستگاه ۴ |
| ۴۹ | ۴۱ | ۱۹۹ | ۷۰ | - | ۸۹۹/۵ | ۵۰۷/۵ | ۵۵۲ | ۱۵۰۰۰ | ۲۹۰۰ | ۹۳۰۰ | ۲۱۰۰۰ | ایستگاه ۵ |
| ۲۶۶۰ | ۲۸ | ۲۳۱ | ۷۸ | - | ۸۱۳/۵ | ۵۶۷/۵ | ۵۵۹ | ۴۶۰۰۰ | ۲۳۰۰ | ۹۳۰۰ | ۲۴۰۰۰ | ایستگاه ۶ |
| ۲۰۴۰ | ۴۳ | ۱۲۹ | ۱۶۶ | - | ۷۸۸/۵ | ۵۷۵/۵ | ۵۷۷/۲ | ۱۱۰۰۰۰ | ۴۶۰۰۰ | ۹۳۰۰ | ۲۴۰۰۰ | ایستگاه ۷ |
| پارامترهای کیفی آب | | | | | | | | | | | | |
| | | | | نیترات (PPM) | | | | فسفات (PPM) | | | | |
| زمستان | پاییز | تابستان | بهار | زمستان | پاییز | تابستان | بهار | زمستان | پاییز | تابستان | بهار | |
| - | ۷/۷۱ | ۶/۸۳ | ۷/۷ | - | ۰/۰۹۱ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۶۳ | - | ۰/۰۴۸ | ۰/۰۷ | ۰/۰۹۸ | ایستگاه ۱ |
| - | ۷/۵۷ | ۷/۰۴ | ۷/۴۱ | - | ۰/۰۴۸ | ۰/۰۷ | ۰/۰۹۸ | - | ۰/۰۴۸ | ۰/۰۷ | ۰/۰۹۸ | ایستگاه ۲ |
| - | ۶/۹۱ | ۶/۵۹ | ۷/۰۴ | - | ۰/۱۰۶ | ۰/۰۶۶ | ۰/۰۷۹ | - | ۰/۱۰۶ | ۰/۰۶۶ | ۰/۰۷۹ | ایستگاه ۳ |
| - | ۷/۴۸ | ۶/۷۷ | ۷/۲۷ | - | ۰/۱۲۱ | ۰/۰۳۵ | ۰/۰۴۵ | - | ۰/۱۲۱ | ۰/۰۳۵ | ۰/۰۴۵ | ایستگاه ۴ |
| - | ۷/۲۸ | ۶/۶۵ | ۶/۹۲ | - | ۰/۱۱۴ | ۰/۰۳۲ | ۰/۰۵۵ | - | ۰/۱۱۴ | ۰/۰۳۲ | ۰/۰۵۵ | ایستگاه ۵ |
| - | ۷/۲۵ | ۷ | ۶/۵۴ | - | ۰/۱۳ | ۰/۰۷۲ | ۰/۰۵۲ | - | ۰/۱۳ | ۰/۰۷۲ | ۰/۰۵۲ | ایستگاه ۶ |
| - | ۷/۳۹ | ۷/۱۷ | ۷/۴۳ | - | ۰/۱۱ | ۰/۰۴۷ | ۰/۰۵۹ | - | ۰/۱۱ | ۰/۰۴۷ | ۰/۰۵۹ | ایستگاه ۷ |

شاخص کیفی آب سازمان بهداشت ملی امریکا (NSFWQI)

این شاخص زیر نظر سازمان بهداشت ملی امریکا در سال ۱۹۷۰ معرفی شد. در این روش، افراد متخصص و کارشناس در امریکا تعدادی پرسش‌نامه را پر کردند که مبنای تنظیم این شاخص هستند. براساس پاسخ‌ها، برای هر یک از پارامترها، یک منحنی ترسیم شد که به کمک آن زیرشاخص‌های هر پارامتر تعیین می‌شود. این شاخص برای طبقه‌بندی کیفی آب‌های سطحی از لحاظ آشامیدن، شاخصی کامل و بسیار متداول است. این شاخص دید مناسبی درباره کیفیت آب رودخانه به دست می‌دهد. پارامترهای ورودی در برآورد شاخص یادشده نقش یکسانی ندارند و ضریب وزنی متفاوتی دارند. برای محاسبه این شاخص از رابطه زیر استفاده می‌شود (مارامایی، ۱۳۹۶: ۳۰).

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

W_i زیرشاخص هر پارامتر، Q_i فاکتور وزنی هر پارامتر و n تعداد پارامتر موجود در سیستم محاسبه شاخص است. برای محاسبه زیرشاخص‌ها از منحنی‌های استاندارد استفاده می‌شود و فاکتورهای وزنی با توجه به تعداد پارامترهای شرکت‌کننده در محاسبه شاخص به دست می‌آیند. فاکتور وزنی نهایی استفاده‌شده در جدول ۴ ارائه شده است. براساس معادله ۱، مجموع حاصل ضرب مقدار هر پارامتر در وزن آن، مقدار شاخص را به دست می‌دهد؛ بدین ترتیب حتی اگر یکی از زیرشاخص‌ها در شرایط ضعیف واقع شود، شاخص کلی نیز این شرایط ضعیف را بازتاب می‌دهد. این شاخص مقداری بین صفر تا صد دارد و با استفاده از جدول ۵ درجه‌بندی می‌شود (مارامایی، ۱۳۹۶: ۶۲).

جدول ۴. پارامترهای ورودی شاخص NSFWQI

| وزن | توضیحات | پارامتر ورودی |
|------|-------------------------------|--------------------|
| ۰/۱۱ | میلی‌گرم در لیتر یا BOD, PPM | اکسیژن‌خواهی زیستی |
| ۰/۰۸ | Turbidity, NTU یا JTU | کدورت |
| ۰/۱۷ | % اشباع DO, | اکسیژن محلول |
| ۰/۱۰ | درجه سانتی‌گراد | دما |
| ۰/۱۶ | تعداد در ۱۰۰ میلی‌لیتر، FC | کلیرم مدفوعی |
| ۰/۱۰ | میلی‌گرم در لیتر، NO_3^- | نیترات |
| ۰/۱۰ | میلی‌گرم در لیتر، PO_4^{3-} | فسفات |
| ۰/۱۱ | واحد استاندارد | PH |
| ۰/۰۷ | TS, PPM | کل مواد جامد |

جدول ۵. دسته‌بندی مقدار شاخص NSFWQI

| مقدار شاخص | ۰-۲۵ | ۲۵-۵۰ | ۵۰-۷۰ | ۷۰-۹۰ | ۹۰-۱۰۰ |
|--------------|---------|-------|-------|-------|--------|
| معادل توصیفی | خیلی بد | بد | متوسط | خوب | عالی |

شاخص کیفی منابع آب ایران (IRWQIsc)

به منظور ارزیابی شرایط کیفیت رودخانه‌ها و مقایسه میزان آلودگی آنها در کشور با توجه به شرایط طبیعی و مسائل و مشکلات منابع آب در ایران، شاخصی با عنوان IRWQIsc معرفی شد که دید مناسبی از وضعیت کیفی منابع آب در ایران ارائه می‌دهد (مارامایی، ۱۳۹۶: ۳۰). در این شاخص نیز، تعدادی منحنی استاندارد به کار می‌رود. جدول ۶، وزن هر پارامتر کیفی مؤثر بر محاسبه این شاخص را نمایش می‌دهد. همانند شاخص NSFQI، این شاخص نیز به صورت مجموع حاصل ضرب هر پارامتر در وزن آن محاسبه می‌شود. برای تعیین معادل توصیفی شاخص محاسبه شده از جدول ۷ به مثابه راهنما استفاده می‌شود (مارامایی، ۱۳۹۶: ۶۷).

جدول ۶. پارامترهای شاخص IRWQISC و وزن‌های آنها

| وزن | توضیحات | پارامتر |
|-------|--|----------------------|
| ۰/۱۱۷ | BOD، میلی گرم در لیتر | اکسیژن خواهی زیستی |
| ۰/۰۹۳ | COD، میلی گرم در لیتر | اکسیژن خواهی شیمیایی |
| ۰/۰۹۷ | DO، اشباع % | اکسیژن محلول |
| ۰/۰۹۶ | میکروزیمنس بر سانتی متر | هدایت الکتریکی |
| ۰/۱۴ | تعداد در ۱۰۰ میلی لیتر | کلیرم مدفوعی |
| ۰/۰۹ | NH ⁴⁺ ، میلی گرم در لیتر | آمونیم |
| ۰/۱۰۸ | NO ³⁻ ، میلی گرم در لیتر | نترات |
| ۰/۰۸۷ | PO ₄ ³⁻ ، میلی گرم در لیتر | فسفات |
| ۰/۰۵۹ | Total Hardness، میلی گرم کربنات در لیتر | سختی کل |
| ۰/۰۶۲ | Turbidity, NTU | کدورت |
| ۰/۰۵۱ | واحد استاندارد | PH |

جدول ۷. راهنمای توصیفی شاخص IRWQIsc

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

تلفیق تصاویر

توسعه سریع علم سنجش از دور در سال‌های اخیر و گسترش کاربردهای تصاویر چندسنجنده‌ای موجب اهمیت روزافزون تلفیق تصاویر به منظور دستیابی به داده‌هایی با اطلاعات طیفی و مکانی بیشتر شده است. هدف از تلفیق داده‌های سنجنده‌های مختلف به معنی ترکیب اطلاعات تصاویر حاصل از دو یا تعداد بیشتری سنجنده، ترکیب اطلاعات مکمل آنها برای به دست آوردن تصویر یا داده‌ای است که نسبت به تصاویر اولیه، اطلاعات مفید بیشتری دارد (Karimi et al., 2016: 768).

در این پژوهش از روش‌های مبتنی بر پیکسل به منظور تلفیق تصاویر استفاده می‌شود که شامل روش شدت-رنگ-اشباع یا IHS^۱ (Pohl and Van Genderen, 2016: 101; Liu and Xiao, 2018: 46751) تبدیل گرام-اشمیدت یا GST^۲ (SV and Srivatsa, 2018: 77; Pohl and Van Genderen, 2016: 109; Rangzan et al., 2019: 481)، تبدیل براووی یا BT^۳ (Pohl and Van Genderen, 2016: 115; Shahdoosti, 2018: 1807) و تبدیل موجک یا WT^۴ (Fukuda and Hirosawa, 1999: 2282) هستند.

تصاویر ماهواره‌ای استفاده‌شده

به منظور پهنه‌بندی فصلی شاخص‌های کیفی آب در رودخانه کارون از ۴ جفت تصویر سنتینل-۲ و لندست ۸ استفاده شد. تصاویر سنتینل-۲ به صورت تصحیح هندسی شده از سایت سازمان فضایی اروپا یا ESA (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>) دانلود شدند. سطح پردازشی این تصاویر، L1C و پلتفرم مدنظر S2B بود. از ۱۳ باندهای تصویر، باندهای ۴، ۳ و ۲ معادل باندهای قرمز، سبز و آبی به کار رفتند. باند مادون قرمز نزدیک نیز به منظور حذف پیکسل‌های خشکی به کار رفت. تصحیح اتمسفری این تصاویر با به‌کارگیری ماژول SEN2COR انجام شد. تصاویر لندست ۸ نیز به صورت تصحیح هندسی و تصحیح اتمسفری شده از سایت USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) با سطح پردازشی L1TP دانلود شدند. باندهای به کار گرفته‌شده از هر تصویر لندست ۸ معادل باندهای به کار گرفته‌شده در تصاویر سنتینل-۲ است. جدول زیر مشخصات تصاویر استفاده‌شده در این پژوهش را نمایش می‌دهد.

جدول ۸. مشخصات تصاویر ماهواره‌ای استفاده‌شده

| فصل | تصویر | سطح پردازشی | پلتفرم | تاریخ تصویربرداری | تعداد باندها | قدرت تفکیک مکانی (متر) |
|---------|----------|-------------|--------|-------------------|--------------|------------------------|
| بهار | سنتینل-۲ | L1C | S2B | ۱۳-۰۴-۲۰۱۸ | ۱۳ | ۱۰ |
| | لندست ۸ | L1TP | | ۱۴-۰۴-۲۰۱۸ | ۱۱ | ۳۰ و ۱۵ |
| تابستان | سنتینل-۲ | L1C | S2B | ۱۰-۰۷-۲۰۱۸ | ۱۳ | ۱۰ |
| | لندست ۸ | L1TP | | ۱۰-۰۷-۲۰۱۸ | ۱۱ | ۳۰ و ۱۵ |
| پاییز | سنتینل-۲ | L1C | S2B | ۲۰-۱۰-۲۰۱۸ | ۱۳ | ۱۰ |
| | لندست ۸ | L1TP | | ۲۳-۱۰-۲۰۱۸ | ۱۱ | ۳۰ و ۱۵ |
| زمستان | سنتینل-۲ | L1C | S2B | ۲۹-۱۲-۲۰۱۸ | ۱۳ | ۱۰ |
| | لندست ۸ | L1TP | | ۲۹-۱۲-۲۰۱۸ | ۱۱ | ۳۰ و ۱۵ |

^۱. Intensity- Hue- Saturation

^۲. Gram Schmidt Transformation

^۳. Brovey Transformation

^۴. Wavelet Transformation

روش پیشنهادی به منظور پهنه‌بندی شاخص‌های کیفی رودخانه کارون

بر اساس دانش نویسندگان پژوهش، تا به حال تأثیر فرایند تلفیق تصاویر بر فرایند پهنه‌بندی کیفی آب‌ها به‌ویژه پهنه‌بندی شاخص‌های کیفی بررسی نشده است؛ بنابراین در این پژوهش علاوه بر بررسی و مقایسه قابلیت دو نوع تصویر سنتینل-۲ و لندست ۸ در پهنه‌بندی فصلی شاخص‌های کیفی آب، قابلیت تلفیق این دو نوع تصویر در بهبود نتایج پهنه‌بندی فصلی شاخص‌های کیفی آب ارزیابی می‌شود. چهار روش تلفیق مبتنی بر پیکسل BT, GST, JHS و WT در این پژوهش به کار رفت. انتخاب بهترین تصویر ورودی به منظور تولید مدل رگرسیون بر اساس پارامتر آماری ضریب همبستگی یا CR^1 (معادله ۲) صورت می‌گیرد؛ بدین ترتیب که همبستگی بین عدد رقومی پیکسل (DN^2) در محل ایستگاه نمونه‌برداری با مقدار شاخص کیفی بررسی شده محاسبه خواهد شد. تصاویر ورودی در روند محاسبه CR ، هم شامل تصاویر اولیه سنتینل-۲ و لندست ۸ و هم شامل تصاویر حاصل از تلفیق این دو تصویر به چهار روش تلفیق یادشده‌اند. گفتنی است DN تصاویر ورودی به دو صورت در نظر گرفته خواهد شد؛ در حالت اول، میانگین یک پنجره 3×3 تصویر با مرکزیت ایستگاه نمونه‌برداری ($9P$) و در حالت دوم، مقدار تک‌پیکسل در محل ایستگاه نمونه‌برداری ($1P$) برای محاسبه CR در نظر گرفته می‌شود. تصاویری که بیشترین مقدار CR را با شاخص کیفی دارند، در مرحله بعد یعنی محاسبه مدل‌های آماری استفاده شده در پهنه‌بندی کیفی منطقه به کار می‌روند. ارزیابی و صحت‌سنجی نتایج پهنه‌بندی هر شاخص بر اساس پارامترهای آماری ریشه حدافل مربعات خطا یا $RMSE$ (معادله ۳) و متوسط خطای مطلق یا MAE^3 (معادله ۴) انجام می‌شود.

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

n تعداد جفت داده‌ها، $\sum xy$ مجموع محصولات داده‌های زوج، $\sum x$ مجموع داده‌های x ، $\sum y$ مجموع داده‌های y ، $\sum x^2$ مجموع مربع داده‌های x و $\sum y^2$ مجموع مربع داده‌های y است (Elhag et al., 2019: 556).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X_p - X_o)^2}{N}} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{\sum |X_o - X_p|}{N} \quad (4)$$

X_p متغیر پیش‌بینی شده، X_o متغیر مشاهده شده و N تعداد متغیرهای مشاهده شده است (همان).

در نهایت روی بهترین نقشه تولیدشده برای هر فصل نیز، اعتبارسنجی متقابل^۴ (CV) مبتنی بر K-Fold انجام خواهد شد. گفتنی است این روش به‌ویژه در صورت کم بودن داده‌های ورودی، روشی مناسب به منظور اعتبارسنجی نتایج است. ماسک کردن پیکسل‌های زمین با به‌کارگیری شاخص تفاضلی آب نرمال شده ($NDWI$) با استفاده از معادله زیر انجام شد:

¹. Correlation Coefficient

². Digital Number

³. Mean Absolute Error

⁴. Cross Validation

$$NDWI = \frac{G - NIR}{G + NIR} \quad (5)$$

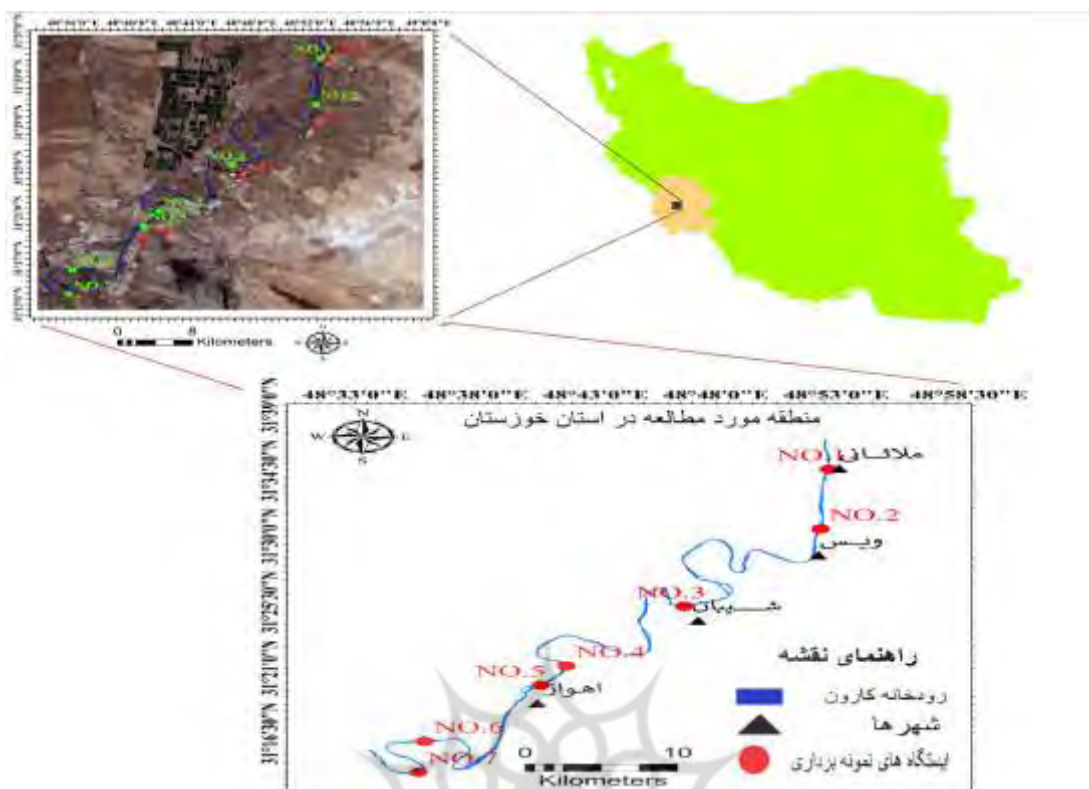
G ، باند سبز و NIR ، باند مادون قرمز نزدیک مربوط به تصویر ورودی است. جدول زیر، تعریف اسامی مخفف مربوط به تصاویر ورودی به کاررفته در این پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۹. تعریف اسامی مخفف مربوط به تصاویر ورودی

| # | مخفف | تعریف | # | مخفف | تعریف |
|---|--------|---|----|--------|--|
| ۱ | L8_B2 | باند ۲ تصویر لندست ۸ | ۱۰ | GST_B1 | باند ۱ تلفیق گرام-اشمیدت تصاویر لندست ۸ و سنتینل-۲ |
| ۲ | L8_B3 | باند ۳ تصویر لندست ۸ | ۱۱ | GST_B2 | باند ۲ تلفیق گرام-اشمیدت تصاویر لندست ۸ و سنتینل-۲ |
| ۳ | L8_B4 | باند ۴ تصویر لندست ۸ | ۱۲ | GST_B3 | باند ۳ تلفیق گرام-اشمیدت تصاویر لندست ۸ و سنتینل-۲ |
| ۴ | S2B_B2 | باند ۲ تصویر سنتینل-۲ | ۱۳ | IHS_B1 | باند ۱ تلفیق IHS تصاویر لندست ۸ و سنتینل-۲ |
| ۵ | S2B_B3 | باند ۳ تصویر سنتینل-۲ | ۱۴ | IHS_B2 | باند ۲ تلفیق IHS تصاویر لندست ۸ و سنتینل-۲ |
| ۶ | S2B_B4 | باند ۴ تصویر سنتینل-۲ | ۱۵ | IHS_B3 | باند ۳ تلفیق IHS تصاویر لندست ۸ و سنتینل-۲ |
| ۷ | BT_B1 | باند ۱ تلفیق براووی تصاویر لندست ۸ و سنتینل-۲ | ۱۶ | WT_B1 | باند ۱ تلفیق موجک تصاویر لندست ۸ و سنتینل-۲ |
| ۸ | BT_B2 | باند ۲ تلفیق براووی تصاویر لندست ۸ و سنتینل-۲ | ۱۷ | WT_B2 | باند ۲ تلفیق موجک تصاویر لندست ۸ و سنتینل-۲ |
| ۹ | BT_B3 | باند ۳ تلفیق براووی تصاویر لندست ۸ و سنتینل-۲ | ۱۸ | WT_B3 | باند ۳ تلفیق موجک تصاویر لندست ۸ و سنتینل-۲ |

منطقه پژوهش

منطقه پژوهش، بخشی از رودخانه کارون در استان خوزستان، جنوب غرب ایران بین عرض جغرافیایی شمالی از $31^{\circ} 20'$ تا $31^{\circ} 30'$ و طول‌های شرقی $48^{\circ} 35' 00''$ تا $48^{\circ} 59' 00''$ است (شکل ۱). رودخانه کارون در جنوب غربی کشور واقع شده و از چندین شهر عبور می‌کند که مهم‌ترین آن اهواز، مرکز استان خوزستان است. کیفیت آب در رودخانه کارون به دلیل افزایش برداشت آب و تخلیه فاضلاب در معرض خطر است؛ به‌علاوه رعایت استانداردهای کیفیت آب شرب و کیفیت محیط‌زیست منابع آب تا حد زیادی مختل شده است؛ بنابراین نظارت مداوم و دقیق بر کیفیت آب منطقه پژوهش اهمیت زیادی دارد.



شکل ۱. منطقه بررسی شده. قسمت بالا، موقعیت منطقه؛

قسمت پایین، موقعیت ایستگاههای نمونه برداری و شهرهای پیرامون منطقه

یافته‌های پژوهش

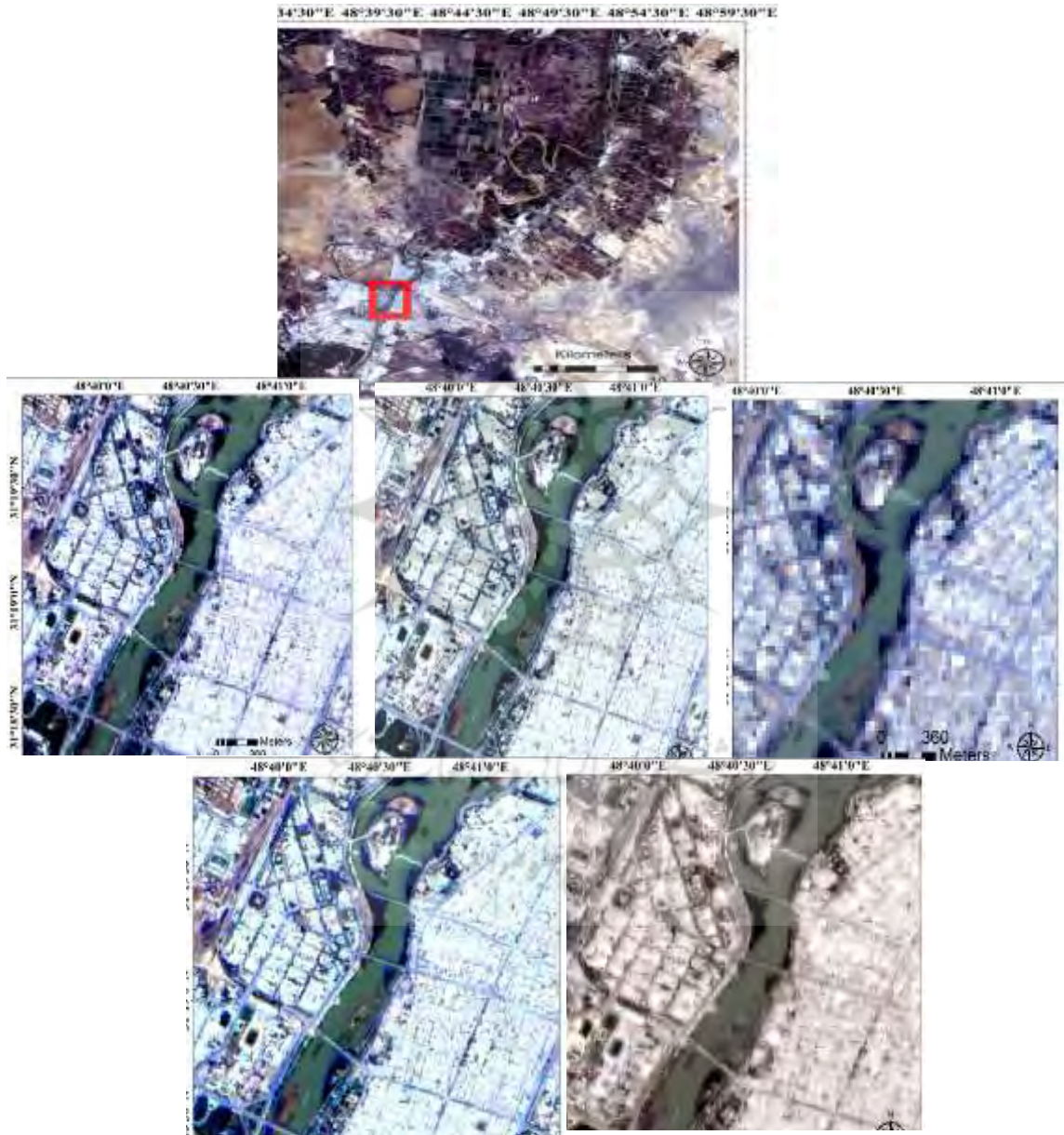
به منظور محاسبه مدل‌های رگرسیون پهنه‌بندی شاخص‌های کیفی، همبستگی بین مقدار شاخص‌های کیفی و عدد رقمی هر پیکسل یا DN تصاویر ورودی محاسبه شد. همان‌گونه که پیش از این نیز بیان شد، DN تصاویر ورودی به دو صورت در نظر گرفته شد؛ در حالت اول، براساس پیشنهاد دویدار و خدر^۱ (۲۰۰۵)، میانگین یک پنجره ۳*۳ دو تصویر (9P) با مرکزیت ایستگاه نمونه برداری به منظور حذف خطای مربوط به ثبت دقیق محل ایستگاه نمونه برداری محاسبه و در نظر گرفته شد. در این حالت، ایستگاه نمونه برداری در مرکز پنجره قرار دارد؛ در حالت دوم، مقدار تک پیکسل (1P) در محل ایستگاه نمونه برداری برای محاسبه CR در نظر گرفته شد. در این حالت، DN یک پیکسل تصویر شامل ایستگاه نمونه برداری در نظر گرفته می‌شود. در نهایت نتایج این دو حالت مقایسه شد.

تلفیق مبتنی بر پیکسل تصاویر سنتینل-۲ و لندست ۸

همان‌طور که پیش از این اشاره شد، تلفیق تصاویر موجب ادغام اطلاعات مفید دو یا چند تصویر و تولید داده‌ای با سطح اطلاعات مفید بیشتر می‌شود؛ همچنین با توجه به اینکه بیشتر پژوهش‌های مربوط به کیفیت آب‌ها بر به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای به صورت منفرد مبتنی است و تا به حال تأثیر فرایند تلفیق تصاویر بر نتایج پهنه‌بندی

¹. Dewidar and Khedr

شاخص‌های کیفی آب بررسی نشده است، در این پژوهش به منظور پهنه‌بندی شاخص‌های کیفی رودخانه کارون، چهار روش پرکاربرد تلفیق تصاویر به نام‌های *IHS*، *GST*، *BT* و *WT* برای تلفیق تصاویر اپتیک سنتینل-۲ و لندست ۸ به کار گرفته شد. در روند انجام تلفیق، ترکیب رنگی طبیعی ۲-۳-۴ تصویر لندست ۸ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر به مثابه تصویر چندطیفی یا مولتی اسپکترال و باند آبی تصویر سنتینل-۲ با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر به مثابه تصویر پانکروماتیک در نظر گرفته شد. شکل زیر، خروجی روش‌های تلفیق را نمایش می‌دهد.



شکل ۲. الف. تصویر لندست ۸ منطقه بررسی شده؛ ب. بخش بزرگنمایی شده تصویر لندست ۸ و

تصاویر تلفیق شده به روش پ. *GST*؛ ت. *IHS*؛ ث. *WT* و ج. *BT*

به منظور ارزیابی نتایج تلفیق تصاویر، دو پارامتر نسبت سیگنال به نویز^۱ (SNR) و CR بین تصویر لندست ۸ و هریک از تصاویر حاصل از تلفیق محاسبه شد (جدول ۱۰). با توجه به این جدول، روش تلفیق GST، بیشترین مقدار همبستگی و بیشترین مقدار سیگنال به نویز را دارد. روی هم رفته مقادیر همبستگی خروجی تمامی روش‌های تلفیق با تصویر لندست ۸، مقادیر زیادی است که موفق بودن روش‌های تلفیق را در حفظ اطلاعات تصویر نشان می‌دهد.

جدول ۱۰. مقایسه آماری تصاویر تلفیق شده با تصویر لندست ۸

| WT | IHS | GST | BT | |
|--------|--------|--------|--------|-----|
| ۰/۸۸۹۳ | ۰/۹۱۴۴ | ۰/۹۲۰۱ | ۰/۸۹۱۱ | CR |
| ۱۶/۸۸ | ۱۶/۶۱ | ۱۸/۸۵ | ۱۷/۶۲ | SNR |

محاسبه شاخص کیفی NSFQI براساس داده‌های میدانی

با در نظر گرفتن پارامترهای کیفی میدانی اندازه‌گیری شده (جدول ۳) و معادله $NSFWQI = \sum_{i=1}^n W_i Q_i$ ، مقدار پارامتر NSFQI به صورت زیر محاسبه شد (جدول ۱۱).

جدول ۱۱. مقدار شاخص NSFQI در ایستگاههای منطقه بررسی شده در سال ۱۳۹۷

| ایستگاهها | بهار | تابستان | پاییز | زمستان |
|-----------|------|---------|-------|--------|
| ۱ | ۴۸ | ۵۸ | ۵۸ | ۵۰ |
| ۲ | ۵۲ | ۵۵ | ۵۹ | ۶۴ |
| ۳ | ۵۶ | ۶۰ | ۶۱ | ۵۲ |
| ۴ | ۵۴ | ۵۹ | ۵۹ | ۵۷ |
| ۵ | ۵۸ | ۵۵ | ۶۱ | ۵۶ |
| ۶ | ۵۷ | ۵۲ | ۶۲ | ۵۳ |
| ۷ | ۵۴ | ۵۲ | ۵۷ | ۵۲ |

همان‌طور که در جدول بالا دیده می‌شود، مقدار NSFQI در محل ایستگاههای نمونه برداری در تمامی فصول و تمامی ایستگاهها (جز ایستگاه ۱ در فصل بهار)، در کلاس ۵۰ تا ۷۰ یعنی در وضعیت متوسط قرار دارد. در مرحله بعد، برای محاسبه مدل‌های رگرسیون بهینه به منظور پهنه‌بندی کل منطقه، مقدار پارامتر آماری CR بین شاخص کیفی بررسی شده با هریک از باندهای تصاویر اولیه و باندهای تصاویر تلفیق شده محاسبه شد (جداول ۱۲ و ۱۳). همان‌گونه که پیش از این بیان شد، دو سناریو به منظور محاسبه CR به کار رفت که شامل حالت 9P و حالت IP است.

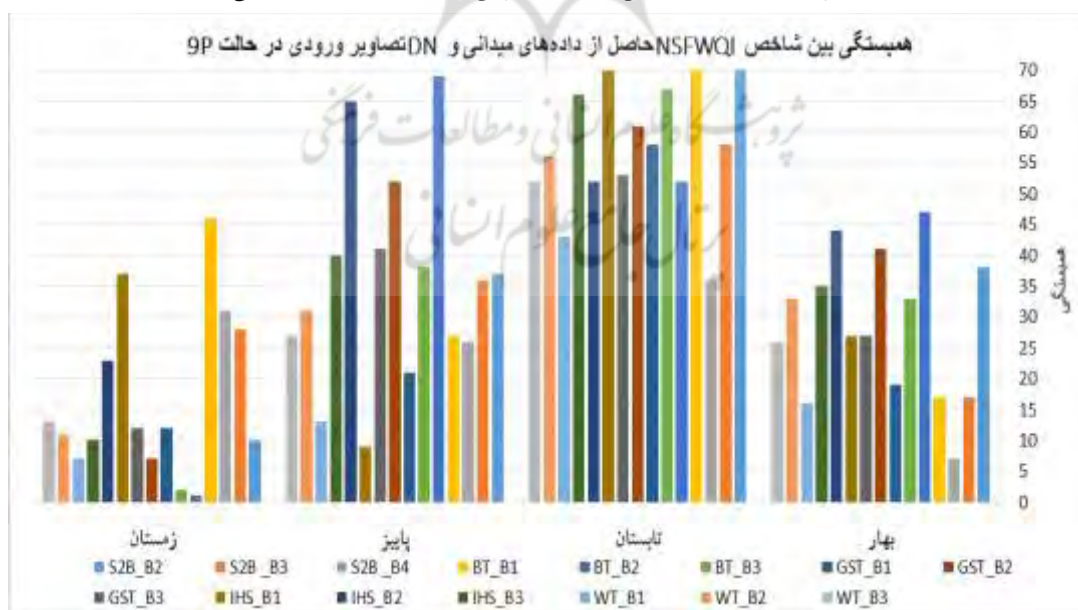
^۱. Signal to Noise Ratio

جدول ۱۲. همبستگی بین شاخص NSFQI حاصل از داده‌های میدانی و DN تصاویر ورودی در حالت 9P

| تصاویر ورودی | | | | | | | | | فصول |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| GST_B3 | GST_B2 | GST_B1 | BT_B3 | BT_B2 | BT_B1 | S2B_B4 | S2B_B3 | S2B_B2 | سال |
| ۰/۲۷ | ۰/۴۱ | ۰/۱۹ | ۰/۳۳ | ۰/۴۷ | ۰/۱۷ | ۰/۰۷ | ۰/۱۷ | ۰/۳۸ | بهار |
| -۰/۵۳ | -۰/۶۱ | -۰/۵۸ | -۰/۶۷ | -۰/۵۲ | -۰/۷۷ | -۰/۳۶ | -۰/۵۸ | -۰/۷۷ | تابستان |
| ۰/۴۱ | ۰/۵۲ | -۰/۲۱ | ۰/۳۸ | ۰/۶۹ | -۰/۲۷ | ۰/۲۶ | ۰/۳۶ | ۰/۳۷ | پاییز |
| -۰/۱۲ | -۰/۰۷ | -۰/۱۲ | -۰/۰۲ | -۰/۰۱ | -۰/۴۶ | ۰/۳۱ | ۰/۲۸ | -۰/۱ | زمستان |
| تصاویر ورودی | | | | | | | | | |
| WT_B3 | WT_B2 | WT_B1 | IHS_B3 | IHS_B2 | IHS_B1 | | | | |
| ۰/۲۶ | ۰/۳۳ | ۰/۱۶ | ۰/۳۵ | ۰/۴۴ | ۰/۲۷ | | | | بهار |
| -۰/۵۲ | -۰/۵۶ | -۰/۴۳ | -۰/۶۶ | -۰/۵۲ | -۰/۷ | | | | تابستان |
| -۰/۲۷ | -۰/۳۱ | -۰/۱۳ | ۰/۴ | ۰/۶۵ | -۰/۰۹ | | | | پاییز |
| -۰/۱۳ | -۰/۱۱ | -۰/۰۷ | -۰/۱ | -۰/۲۳ | -۰/۳۷ | | | | زمستان |

اعداد قرمز رنگ موجود در جدول، بیشترین مقادیر همبستگی را نشان می‌دهند.

شکل زیر، نمودار مقادیر همبستگی بین شاخص NSFQI و تصاویر ورودی در ۴ فصل سال را در حالت 9P نمایش می‌دهد که هر ستون این شکل به یک تصویر ورودی مربوط است. همان‌طور که در جدول ۱۲ و شکل ۳ دیده می‌شود، در حالت 9P به منظور محاسبه CR با شاخص کیفی NSFQI، بیشترین مقدار CR در فصل بهار با تصویر BT_B2 به میزان ۰/۴۷، بیشترین مقدار CR در فصل تابستان با تصویر BT_B1 به میزان ۰/۷۷، بیشترین مقدار CR در فصل پاییز با تصویر BT_B2 به میزان ۰/۶۹ و بیشترین مقدار CR در فصل زمستان با تصویر BT_B1 به میزان ۰/۴۶ است. در حالت 9P، تصویر تلفیق‌شده به روش BT، بیشترین مقدار CR را در تمامی فصول سال داشته است.



شکل ۳. نمودار مقادیر همبستگی بین شاخص NSFQI و تصاویر ورودی در حالت 9P

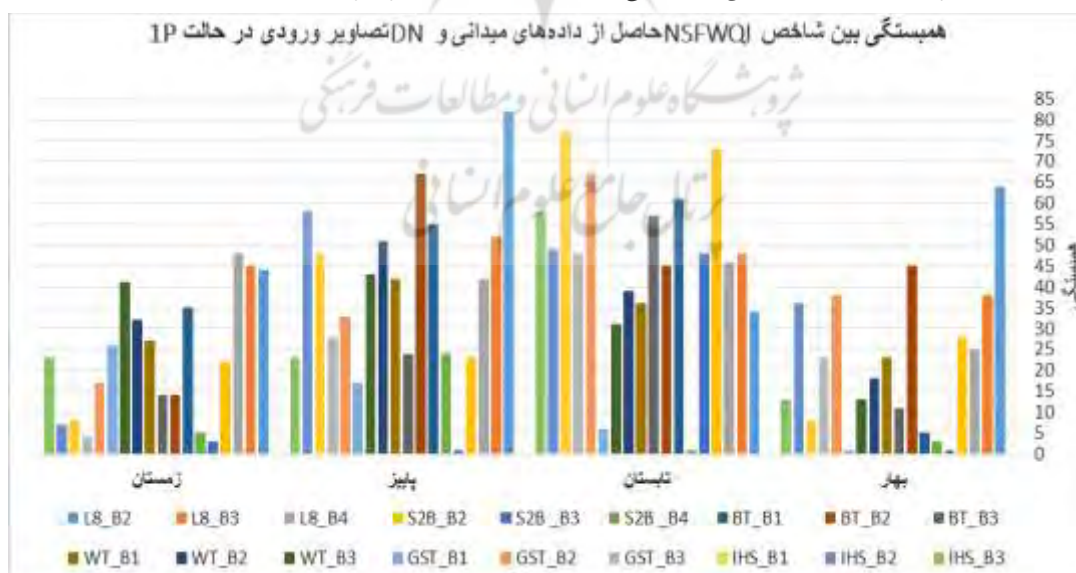
(هر ستون به یک تصویر ورودی مربوط است)

جدول ۱۳. همبستگی بین شاخص NSFQI حاصل از داده‌های میدانی و DN تصاویر ورودی در حالت IP

| تصاویر ورودی | | | | | | | | | فصول |
|--------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| BT_B3 | BT_B2 | BT_B1 | S2B_B4 | S2B_B3 | S2B_B2 | L8_B4 | L8_B3 | L8_B2 | سال |
| ۰/۱۱ | ۰/۴۵ | ۰/۰۵ | ۰/۰۳ | ۰/۱ | ۰/۲۸ | ۰/۲۵ | ۰/۳۸ | ۰/۶۴ | بهار |
| -۰/۵۷ | -۰/۴۵ | -۰/۶۱ | -۰/۱ | -۰/۴۸ | -۰/۷۳ | -۰/۴۶ | -۰/۴۸ | -۰/۳۴ | تابستان |
| ۰/۲۴ | ۰/۶۷ | -۰/۵۵ | -۰/۲۴ | -۰/۰۰۹ | ۰/۲۳ | ۰/۴۲ | ۰/۵۲ | ۰/۸۲ | پاییز |
| -۰/۱۴ | -۰/۱۴ | -۰/۳۵ | ۰/۵ | -۰/۰۳ | -۰/۲۲ | ۰/۴۸ | ۰/۴۵ | ۰/۴۴ | زمستان |
| تصاویر ورودی | | | | | | | | | |
| WT_B3 | WT_B2 | WT_B1 | IHS_B3 | IHS_B2 | IHS_B1 | GST_B3 | GST_B2 | GST_B1 | |
| ۰/۱۳ | ۰/۱۸ | ۰/۲۳ | ۰/۱۳ | ۰/۳۶ | ۰/۰۸ | ۰/۲۳ | ۰/۳۸ | ۰/۰۰۱ | بهار |
| -۰/۳۱ | -۰/۳۹ | -۰/۳۶ | -۰/۵۸ | -۰/۴۹ | -۰/۷۷ | -۰/۴۸ | -۰/۶۷ | -۰/۶ | تابستان |
| -۰/۴۳ | -۰/۵۱ | -۰/۴۲ | ۰/۲۳ | ۰/۵۸ | -۰/۴۸ | ۰/۲۸ | -۰/۳۳ | -۰/۱۷ | پاییز |
| -۰/۴۱ | -۰/۳۲ | -۰/۲۷ | -۰/۲۳ | ۰/۰۷ | -۰/۰۸ | -۰/۴ | -۰/۱۷ | ۰/۲۶ | زمستان |

اعداد قرمز رنگ موجود در جدول، بیشترین مقادیر همبستگی را نشان می‌دهند.

شکل زیر، نمودار مقادیر همبستگی را بین شاخص NSFQI و تصاویر ورودی در ۴ فصل سال در حالت IP نمایش می‌دهد که هر ستون این شکل به یک تصویر ورودی مربوط است. همان‌طور که در جدول ۱۳ و شکل ۴ دیده می‌شود، در حالت IP، مقدار بیشینه CR در فصل بهار مربوط به تصویر L8_B2 و معادل با ۰/۶۴، مقدار بیشینه CR در فصل تابستان مربوط به تصویر IHS_B1 و معادل با ۰/۷۷، مقدار بیشینه CR در فصل پاییز مربوط به تصویر L8_B2 و معادل با ۰/۸۲ و مقدار بیشینه CR در فصل زمستان مربوط به تصویر L8_B4 و معادل با ۰/۴۸ است. در حالت IP تصویر لندست ۸ و تصویر تلفیق‌شده به روش IHS بیشترین CR را داشته‌اند. گفتنی است به دلیل اندازه پیکسل ۳۰ متری، برای محاسبه مقدار CR بین باندهای تصویر لندست ۸ و شاخص‌های کیفی، فقط حالت IP در نظر گرفته شد.



شکل ۴. نمودار مقادیر همبستگی بین شاخص NSFQI و تصاویر ورودی در حالت IP

(هر ستون به یک تصویر ورودی مربوط است)

محاسبه مدل‌های رگرسیون و پهنه‌بندی فصلی شاخص NSFQI

در کنار ۶ باند مربوط به دو تصویر اولیه سنتینل-۲ و لندست ۸، تعداد ۱۲ باند تصویری جدید براساس اجرای چهار روش تلفیق تصویر به دست آمد. همان‌گونه که در جداول ۱۲ و ۱۳ دیده می‌شود، روش‌های تلفیق موجب تولید داده‌های ورودی با مقدار CR جالب توجه با شاخص NSFQI شد؛ در واقع تصاویر مناسب برای استخراج مدل‌های رگرسیون بهینه براساس بیشترین مقدار CR، مقدار زیاد F-Ratio و مقدار کم خطای استاندارد بین هر تصویر ورودی و شاخص NSFQI انتخاب شد (جدول ۱۴).

جدول ۱۴. پارامترهای آماری مربوط به رابطه بین شاخص NSFQI و تصاویر ورودی در بهترین حالت CR

| NSFWQI2_ زمستان | NSFWQI1_ زمستان | NSFWQI21_ پاییز | NSFWQI1_ پاییز | NSFWQI2_ تابستان | NSFWQI1_ تابستان | NSFWQI2_ بهار | NSFWQI1_ بهار | پارامترهای آماری |
|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|---------------|---------------|------------------|
| -۰/۴۶ | ۰/۴۸ | ۰/۶۹ | ۰/۸۲ | -۰/۷۷ | -۰/۷۷ | ۰/۴۷ | ۰/۶۴ | CR |
| ۴/۵۷ | ۴/۵۳ | ۱/۴۵ | ۱/۱۳ | ۲/۲۴ | ۲/۲۵ | ۳/۲۷ | ۲/۸۴ | خطای استاندارد |
| ۱/۳۶ | ۱/۴۸ | ۴/۴۱ | ۱۰/۴ | ۷/۴۹ | ۷/۳۸ | ۱/۴۳ | ۳/۵۳ | F-Ratio |

معادلات زیر، مدل‌های رگرسیون به‌منظور پهنه‌بندی شاخص کیفی NSFQI برای هر فصل سال مبتنی بر CR بیشینه در دو حالت 1P و 9P (جداول ۱۲ و ۱۳) هستند:

$$NSFWQI1_spring = 0.105625 * X_1 + 38.91775 \quad (6)$$

$$NSFWQI2_spring = 0.0883 * X_2 + 43.20632 \quad (7)$$

X_1 نشان‌دهنده L8_B2 در حالت 1P و X_2 نشان‌دهنده BT_B2 در حالت 9P است. $NSFWQI1_spring$ و $NSFWQI2_spring$ به ترتیب نشان‌دهنده دو نقشه پهنه‌بندی شاخص NSFQI فصل بهار در بهترین مقدار CR (جداول ۱۲ و ۱۳) هستند.

$$NSFWQI1_summer = -0.22193 * X_3 + 82.7424 \quad (8)$$

$$NSFWQI2_summer = -0.15392 * X_4 + 75.58028 \quad (9)$$

X_3 نشان‌دهنده BT_B1 در حالت 9P و X_4 نشان‌دهنده IHS_B1 در حالت به‌کارگیری 1P است. $NSFWQI1_summer$ و $NSFWQI2_summer$ به ترتیب نشان‌دهنده دو نقشه پهنه‌بندی شاخص NSFQI فصل تابستان در بهترین مقدار CR (جداول ۱۲ و ۱۳) هستند.

$$NSFWQI1_autumn = 0.072187 * X_5 + 49.16613 \quad (10)$$

$$NSFWQI2_autumn = 0.068629 * X_6 + 51.07125 \quad (11)$$

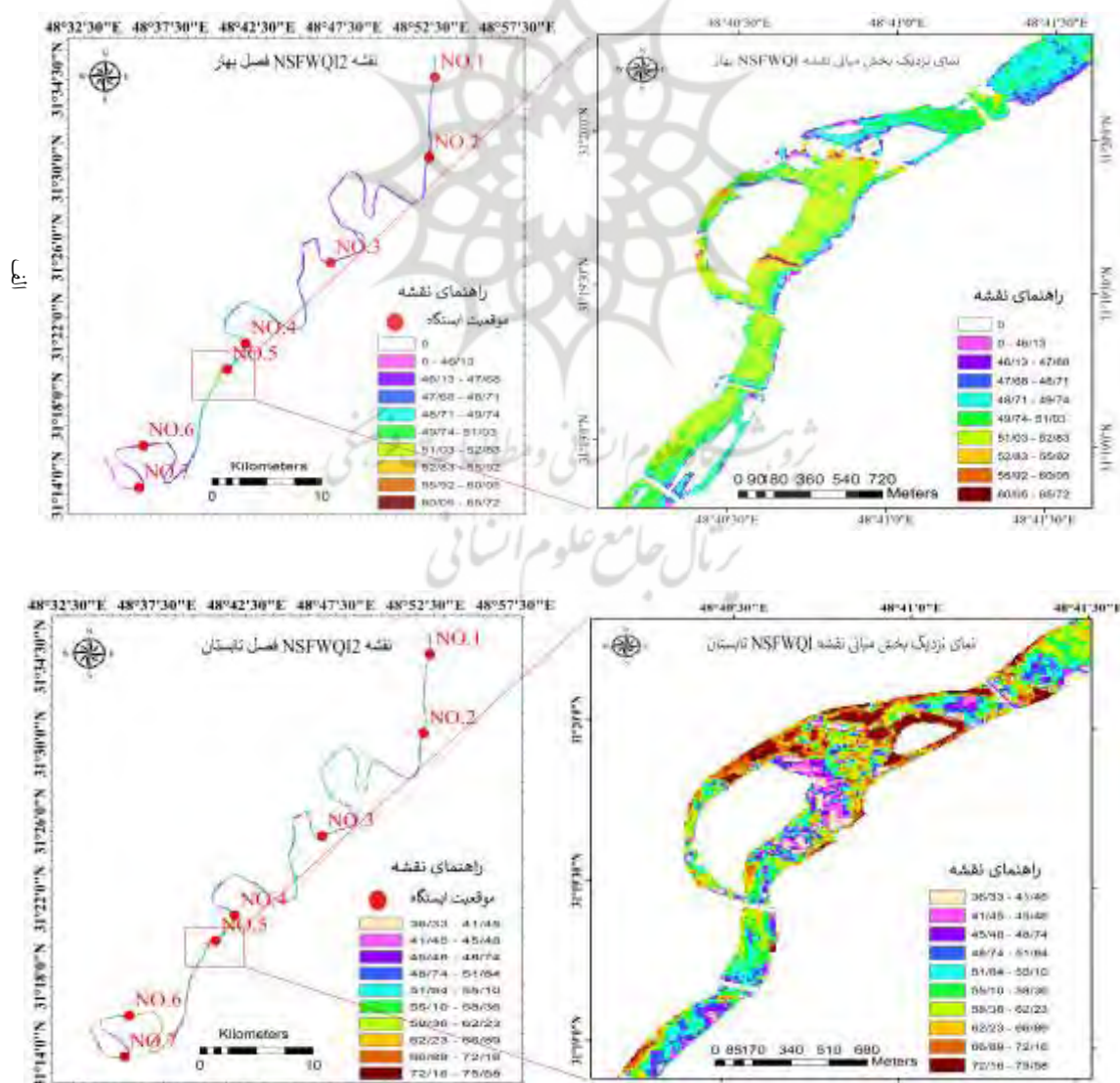
X_5 نشان‌دهنده L8_B2 در حالت 1P و X_6 نشان‌دهنده BT_B2 در حالت 9P است. *NSFWQI1_ autumn* و *NSFWQI2_ autumn* به ترتیب نشان‌دهنده دو نقشه پهنه‌بندی شاخص *NSFWQI* فصل پاییز در بهترین مقدار CR (جداول ۱۲ و ۱۳) هستند.

$$NSFWQI1_{winter} = 0.045164 * X_7 + 46.66963 \quad (12)$$

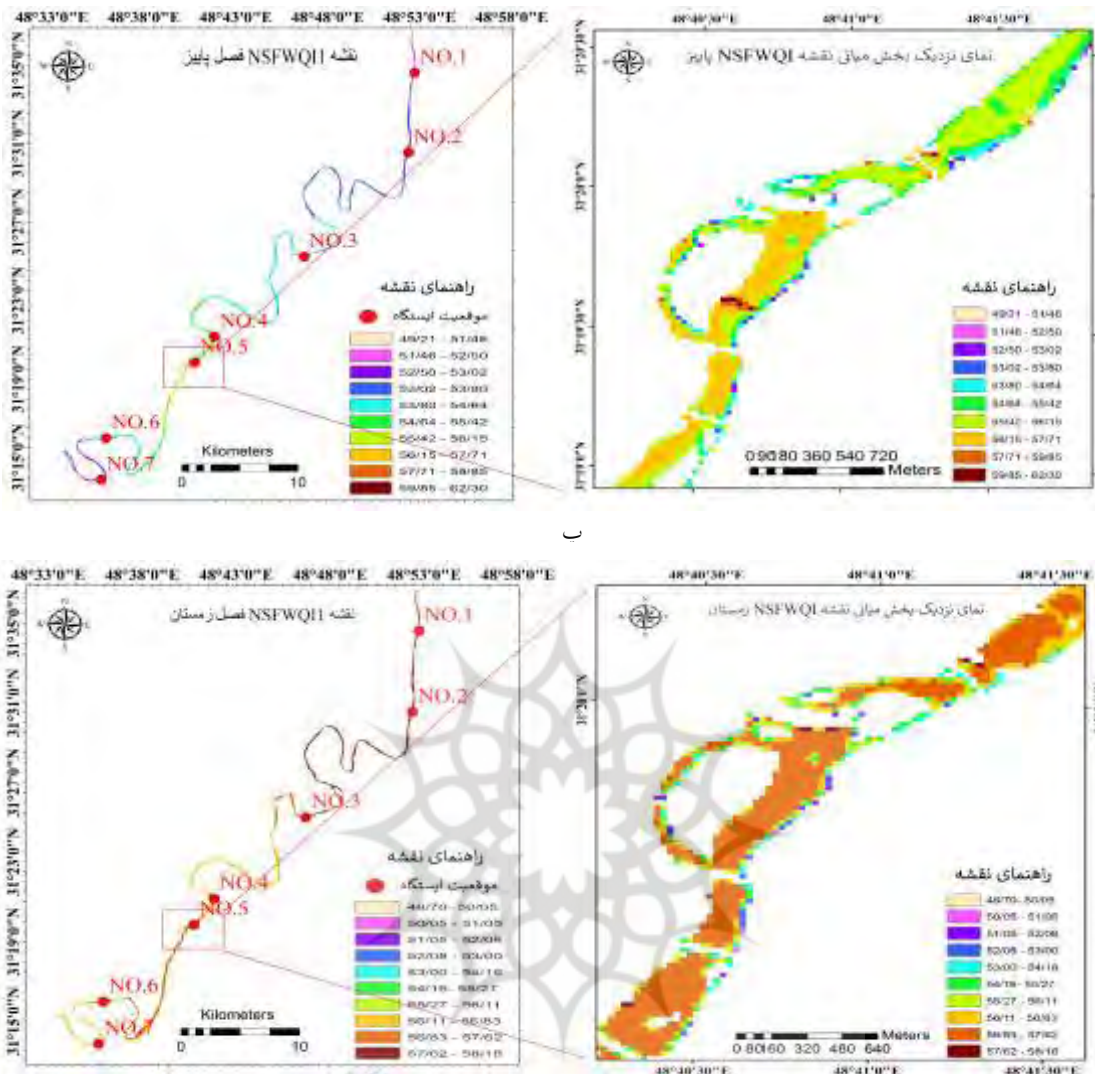
$$NSFWQI2_{winter} = -0.19302 * X_8 + 78.23958 \quad (13)$$

X_6 نشان‌دهنده L8_B4 در حالت 1P و X_7 نشان‌دهنده BT_B1 در حالت 9P است. *NSFWQI1_ winter* و *NSFWQI2_ winter* به ترتیب نشان‌دهنده دو نقشه پهنه‌بندی شاخص *NSFWQI* فصل زمستان در بهترین مقدار CR (جداول ۱۲ و ۱۳) هستند.

در مرحله بعد، نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص کیفی *NSFWQI* با استفاده از مدل‌های رگرسیون بهینه تهیه شدند که بعضی از آنها در ادامه نشان داده شده‌اند (شکل ۵).



۵.



شکل ۵. نقشه‌های پهنه‌بندی فصلی شاخص NSFWQI (نقشه سمت راست، بخش بزرگنمایی شده نقشه سمت چپ است). الف. نقشه فصل بهار براساس مدل NSFWQI2_spring؛ ب. نقشه فصل تابستان براساس مدل NSFWQI2_spring؛ پ. نقشه فصل پاییز براساس مدل NSFWQI1_autumn؛ ت. نقشه فصل زمستان براساس مدل NSFWQI1_winter

جدول ۱۵، نتایج صحت‌سنجی نقشه‌های بالا را نمایش می‌دهد. منظور از صحت‌سنجی، مقایسه داده‌های مشاهده‌ای یا واقعی با داده‌های پیش‌بینی شده در محل ایستگاه نمونه‌برداری است. همان‌طور که در بخش روش پیشنهادی شرح داده شد، در این پژوهش از دو پارامتر آماری RMSE و MAE به منظور صحت‌سنجی استفاده می‌شود که فرمول‌بندی این دو پارامتر پیش از این بیان شده است. این دو پارامتر سنجش دقیقی از صحت را به دست می‌دهند که در پژوهش‌های مختلف به فراوانی به کار گرفته می‌شوند.

گفتنی است داده‌های مشاهده‌ای، داده‌های حاصل از پارامترهای میدانی و داده‌های پیش‌بینی شده، داده‌های حاصل از مدل‌های پیشنهادی است. در نهایت بهترین نقشه هر فصل نیز، اعتبارسنجی متقابل خواهد شد.

جدول ۱۵. نتایج صحت‌سنجی نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص NSFQI

| نقشه‌های فصلی شاخص NSFQI | | | | | | | |
|--------------------------|-----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|---------------|---------------|
| NSFWQI2_ زمستان | NSFWQI1_ زمستان | NSFWQI2_ پاییز | NSFWQI1_ پاییز | NSFWQI2_ تابستان | NSFWQI1_ تابستان | NSFWQI2_ بهار | NSFWQI1_ بهار |
| ۴/۵ | ۴/۱۵ | ۶/۵۹ | ۵/۷ | ۸/۱۹ | ۱۵/۴۹ | ۷/۲۱ | ۸/۶ |
| ۳/۸۶ | ۳/۷ | ۶/۴۲ | ۵/۴۸ | ۷/۰۷ | ۱۳/۹۲ | ۶/۵۴ | ۷/۸۲ |
| | | | | | | | RMSE |
| | | | | | | | MAE |

مقادیر پرنرنگ و قرمز رنگ موجود در جدول، بهترین دقت را نشان می‌دهند.

همان‌طور که در جدول بالا دیده می‌شود، در فصل بهار نقشه NSFQI2 مبتنی بر BT_B2 (در حالت 9P)، در فصل تابستان نقشه NSFQI2 مبتنی بر IHS_B1 (در حالت 1P)، در فصل پاییز نقشه NSFQI1 مبتنی بر L8_B2 (در حالت 1P) و در فصل زمستان نقشه NSFQI1 مبتنی بر L8_B4 (در حالت 1P)، بهترین دقت را داشتند. مقدار RMSE نقشه‌های بهینه پهنه‌بندی شاخص NSFQI در فصول بهار تا زمستان به ترتیب معادل با ۷/۲۱، ۸/۱۹، ۵/۷ و ۴/۱۵ است. این نتایج نشان می‌دهد بهترین دقت به نقشه فصل زمستان مربوط است. مشاهده می‌شود که برای دو فصل بهار و تابستان، نقشه‌های بهینه پهنه‌بندی شاخص NSFQI در حالت به‌کارگیری تصاویر تلفیق‌شده به روش BT و IHS به دست آمده است که این نکته اهمیت و کارآمد بودن تلفیق تصاویر را در بهبود نتایج پهنه‌بندی در این دو فصل نشان می‌دهد. نتایج اعتبارسنجی متقابل (CV) مبتنی بر کلاس‌های تشخیص داده‌شده در حالت بهترین نقشه‌های شاخص NSFQI در فصول بهار تا زمستان به ترتیب ۴۳٪، ۵۷٪، ۹۷٪ و ۹۸٪ است.

محاسبه شاخص IRWQIsc

همان‌گونه که پیش از این گفته شد، براساس پارامترهای کیفی میدانی اندازه‌گیری شده (جدول ۳)، مقدار شاخص IRWQIsc همانند شاخص NSFQI به صورت مجموع حاصل ضرب هر پارامتر در وزن آن محاسبه و مقادیر آن در جدول ۱۶ نمایش داده شد.

جدول ۱۶. مقدار شاخص IRWQIsc در منطقه بررسی شده در سال ۱۳۹۷

| ایستگاه‌ها | بهار | تابستان | پاییز | زمستان |
|------------|------|---------|-------|--------|
| ۱ | ۲۶/۷ | ۴۲/۵ | ۳۴/۲ | ۳۷/۲ |
| ۲ | ۳۳/۶ | ۴۰/۲ | ۳۸ | ۵۸/۴ |
| ۳ | ۳۹/۷ | ۴۴/۲ | ۳۶/۱ | ۴۰/۳ |
| ۴ | ۳۸/۴ | ۴۳/۵ | ۳۴/۸ | ۴۷/۵ |
| ۵ | ۳۷/۲ | ۳۹/۳ | ۳۹/۵ | ۴۴/۳ |
| ۶ | ۳۷/۶ | ۳۶/۹ | ۴۰/۱ | ۳۲/۶ |
| ۷ | ۳۵/۵ | ۳۸/۴ | ۳۴/۵ | ۳۰/۱ |

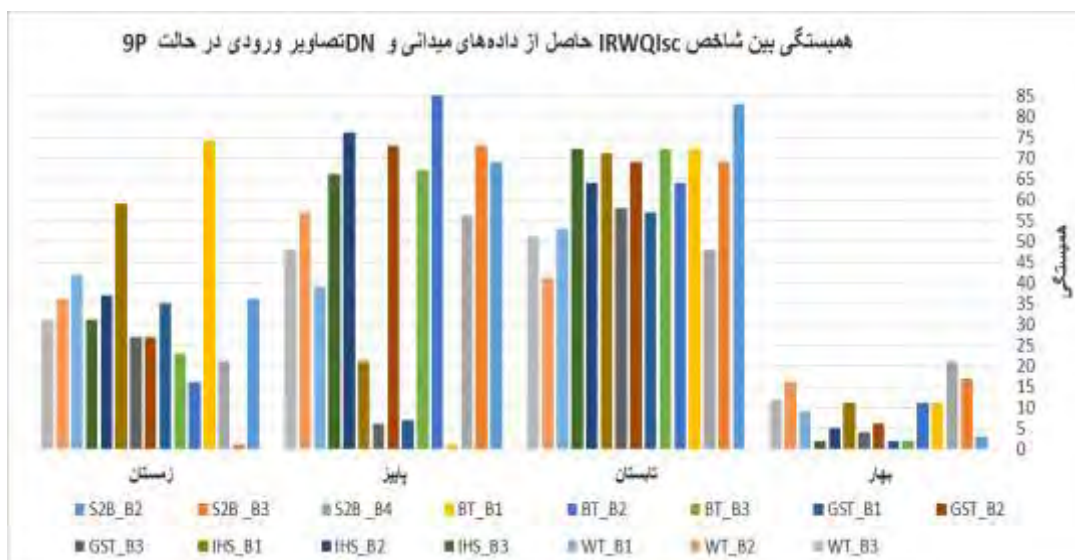
همان گونه که در جدول بالا دیده می‌شود، بیشتر ایستگاههای بررسی شده در بیشتر فصول سال از نظر شاخص IRWQIsc وضعیت نسبتاً بد دارند. ایستگاه ۱ در فصل بهار وضعیت بد، ایستگاه ۲ در فصل زمستان وضعیت نسبتاً خوب و ایستگاه ۴ در فصل زمستان وضعیت متوسط دارند. همانند شاخص NSFQI، برای شاخص IRWQIsc نیز همبستگی با تصاویر ورودی در دو حالت محاسبه می‌شود؛ در حالت 9P (جدول ۱۷) و در حالت IP (جدول ۱۸).

جدول ۱۷. همبستگی بین شاخص IRWQIsc حاصل از داده‌های میدانی و DN تصاویر ورودی در حالت 9P

| تصاویر ورودی | | | | | | | | | فصول سال |
|--------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|----------|
| GST_B3 | GST_B2 | GST_B1 | BT_B3 | BT_B2 | BT_B1 | S2B_B4 | S2B_B3 | S2B_B2 | |
| -۰/۰۴ | ۰/۰۶ | -۰/۰۲ | -۰/۰۲ | ۰/۱۱ | -۰/۱۱ | -۰/۲۱ | -۰/۱۷ | -۰/۰۳ | بهار |
| -۰/۵۸ | -۰/۶۹ | -۰/۵۷ | -۰/۷۲ | -۰/۶۴ | -۰/۷۲ | -۰/۴۸ | -۰/۶۹ | -۰/۸۳ | تابستان |
| ۰/۶ | ۰/۷۳ | ۰/۰۷ | ۰/۶۷ | ۰/۸۵ | ۰/۰۱ | ۰/۵۶ | ۰/۷۳ | ۰/۶۹ | پاییز |
| -۰/۲۷ | -۰/۲۷ | -۰/۳۵ | -۰/۲۳ | -۰/۱۶ | -۰/۷۴ | ۰/۲۱ | ۰/۱ | -۰/۳۶ | زمستان |
| | | | WT_B3 | WT_B2 | WT_B1 | IHS_B3 | IHS_B2 | IHS_B1 | |
| | | | -۰/۱۲ | -۰/۱۶ | -۰/۰۹ | -۰/۰۲ | ۰/۰۵ | -۰/۱۱ | بهار |
| | | | -۰/۵۱ | -۰/۴۱ | -۰/۵۳ | -۰/۷۲ | -۰/۶۴ | -۰/۷۱ | تابستان |
| | | | ۰/۴۸ | ۰/۵۷ | ۰/۳۹ | ۰/۶۶ | ۰/۷۶ | ۰/۲۱ | پاییز |
| | | | -۰/۳۱ | -۰/۳۶ | -۰/۴۲ | -۰/۳۱ | -۰/۳۷ | -۰/۵۹ | زمستان |

اعداد قرمز رنگ موجود در جدول، بیشترین مقادیر همبستگی را نشان می‌دهند.

شکل زیر، نمودار مقادیر همبستگی را بین شاخص IRWQIsc و تصاویر ورودی در ۴ فصل سال در حالت 9P نمایش می‌دهد که هر ستون این شکل به یک تصویر ورودی مربوط است. همان‌طور که در جدول ۱۷ و شکل ۶ دیده می‌شود، در حالت 9P، بیشترین مقدار CR در فصل بهار مبتنی بر تصویر S2B_B4 و معادل با $-۰/۲۱$ ، بیشترین مقدار CR در فصل تابستان مبتنی بر تصویر S2B_B2 و معادل با $-۰/۸۳$ ، بیشترین مقدار CR در فصل پاییز مبتنی بر تصویر BT_B2 و معادل با $۰/۸۵$ و بیشترین مقدار CR در فصل زمستان مبتنی بر تصویر BT_B1 و معادل با $-۰/۷۴$ است. در حالت 9P، تصویر تلفیق شده به روش BT، بیشترین مقدار CR را در فصول پاییز و زمستان داشته است.



شکل ۶. نمودار مقادیر همبستگی بین شاخص IRWQIsc و تصاویر ورودی در حالت 9P

(هر ستون به یک تصویر ورودی مربوط است)

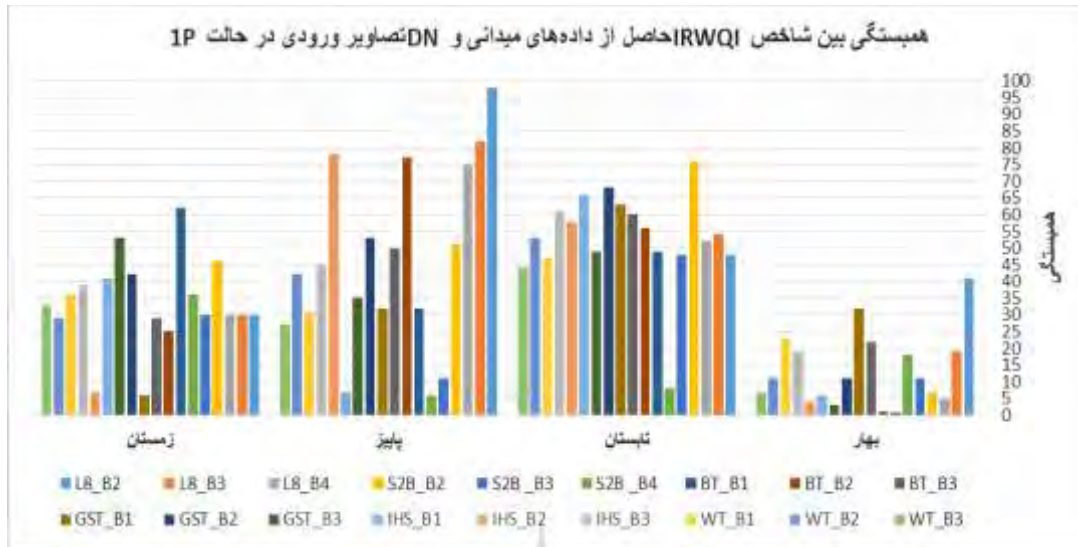
جدول ۱۸. همبستگی بین شاخص IRWQIsc حاصل از داده‌های میدانی و DN تصاویر ورودی در حالت 1P

| تصاویر ورودی | | | | | | | | | فصول |
|--------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| BT_B3 | BT_B2 | BT_B1 | S2B_B4 | S2B_B3 | S2B_B2 | L8_B4 | L8_B3 | L8_B2 | سال |
| -۰/۲۲ | ۰/۱ | -۰/۰۰۸ | ۰/۱۸ | ۰/۱۱ | -۰/۰۷ | ۰/۰۵ | ۰/۱۹ | ۰/۴۱ | بهار |
| -۰/۶ | -۰/۵۶ | -۰/۴۹ | -۰/۰۸ | -۰/۴۸ | -۰/۷۶ | -۰/۵۲ | -۰/۵۴ | -۰/۴۸ | تابستان |
| ۰/۵ | ۰/۷۷ | -۰/۳۲ | -۰/۰۶ | ۰/۱۱ | ۰/۵۱ | ۰/۷۵ | ۰/۸۲ | ۰/۹۸ | پاییز |
| -۰/۲۹ | -۰/۲۵ | -۰/۶۲ | ۰/۳۶ | -۰/۳ | -۰/۴۶ | ۰/۳ | ۰/۳ | ۰/۳ | زمستان |
| تصاویر ورودی | | | | | | | | | فصول |
| WT_B3 | WT_B2 | WT_B1 | IHS_B3 | IHS_B2 | IHS_B1 | GST_B3 | GST_B2 | GST_B1 | سال |
| ۰/۰۷ | ۰/۱۱ | -۰/۲۳ | -۰/۱۹ | ۰/۰۴ | -۰/۰۶ | -۰/۰۳ | ۰/۱۱ | -۰/۳۲ | بهار |
| -۰/۴۴ | -۰/۵۳ | -۰/۴۷ | -۰/۶۱ | -۰/۵۸ | -۰/۶۶ | -۰/۴۹ | -۰/۶۸ | -۰/۶۳ | تابستان |
| -۰/۲۷ | ۰/۴۲ | -۰/۳۱ | ۰/۴۵ | ۰/۷۸ | -۰/۰۷ | ۰/۳۵ | ۰/۵۳ | ۰/۳۲ | پاییز |
| -۰/۳۳ | -۰/۲۹ | -۰/۳۶ | -۰/۳۹ | ۰/۰۷ | -۰/۴۱ | -۰/۵۳ | -۰/۴۲ | ۰/۰۶ | زمستان |

اعداد قرمز رنگ موجود در جدول، بیشترین مقادیر همبستگی را نشان می‌دهند.

شکل زیر، نمودار مقادیر همبستگی را بین شاخص IRWQIsc و تصاویر ورودی در ۴ فصل سال در حالت 1P نمایش می‌دهد که هر ستون این شکل به یک تصویر ورودی مربوط است. همان‌طور که در جدول ۱۸ و شکل ۷ دیده می‌شود، در حالت 1P، بیشترین مقدار CR در فصل بهار مبتنی بر تصویر L8_B2 و معادل با ۰/۴۱، بیشترین مقدار CR در فصل تابستان مبتنی بر تصویر S2B_B2 و معادل با -۰/۷۶، بیشترین مقدار CR در فصل پاییز مبتنی بر تصویر

L8_B2 و معادل با ۰/۹۸ و بیشترین مقدار CR در فصل زمستان مبتنی بر تصویر BT_B1 و معادل با ۰/۶۲- است. در نتیجه در حالت 1P، تصویر تلفیق شده به روش BT، بیشترین مقدار CR را فقط در فصل زمستان نشان داد.



شکل ۷. نمودار مقادیر همبستگی بین شاخص IRWQIsc و تصاویر ورودی در حالت 1P

(هر ستون به یک تصویر ورودی مربوط است)

پهنه‌بندی فصلی شاخص کیفی IRWQIsc

با توجه به داده‌های جداول ۱۷ و ۱۸، برای ۴ فصل سال، تصاویر تلفیق شده نیز جزو تصاویری بودند که همبستگی جالب توجهی را با شاخص IRWQIsc داشتند. در این مرحله مدل‌های بهینه رگرسیون مبتنی بر بیشترین مقادیر CR (جداول ۱۷ و ۱۸) به منظور پهنه‌بندی فصلی شاخص کیفی IRWQIsc در دو حالت 1P و 9P محاسبه شدند. مدل‌های به دست آمده در ادامه نشان داده شده‌اند:

$$IRWQI1_spring = 0.085904 * X_1 + 23.14618 \quad (14)$$

$$IRWQI2_spring = -0.09543 * X_2 + 48.3707 \quad (15)$$

X_1 نشان دهنده L8_B2 در حالت 1P و X_2 نشان دهنده GST_B1 در حالت 1P است. $IRWQI1_spring$ و $IRWQI2_spring$ نقشه‌های شاخص IRWQI فصل بهار هستند که به ترتیب براساس معادلات ۱۴ و ۱۵ به دست آمده‌اند. همان گونه که پیش از این بیان شد، این معادلات براساس بیشترین مقدار CR بیان شده در جداول ۱۷ و ۱۸ محاسبه شده‌اند.

$$IRWQI1_summer = -0.13976 * X_3 + 59.96095 \quad (16)$$

$$IRWQI2_summer = -0.12912 * X_4 + 59.15975 \quad (17)$$

X_3 و X_4 نشان دهنده S2B_B2 به ترتیب در حالت 9P و 1P هستند. $IRWQI1_summer$ و $IRWQI2_summer$ نقشه‌های شاخص IRWQI فصل تابستان هستند که به ترتیب براساس معادلات ۱۶ و ۱۷ به دست آمده‌اند.

$$IRWQI1_autumn = 0.11678 * X_5 + 19.9098 \quad (18)$$

$$IRWQI2_autumn = 0.11589 * X_6 + 22.38911 \quad (19)$$

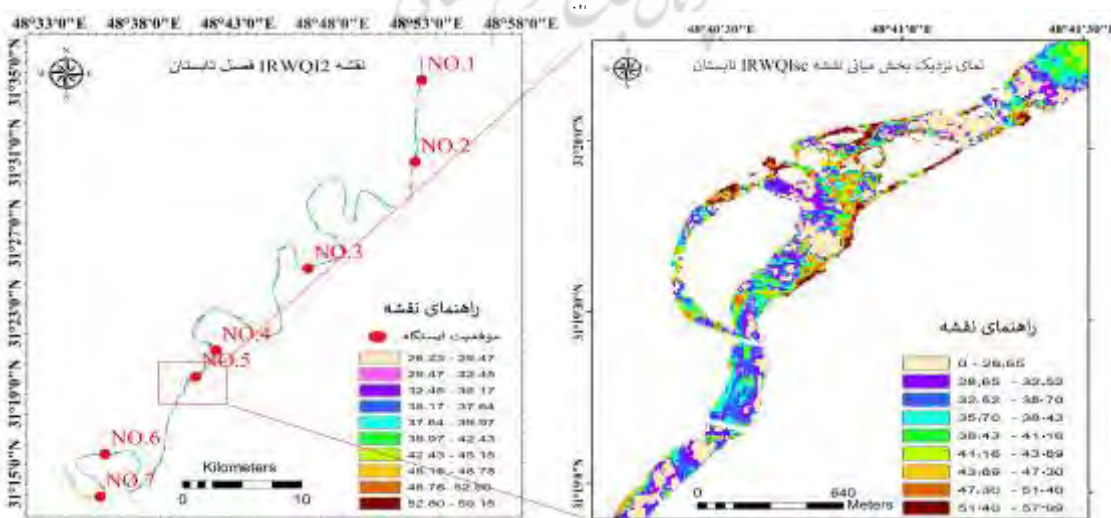
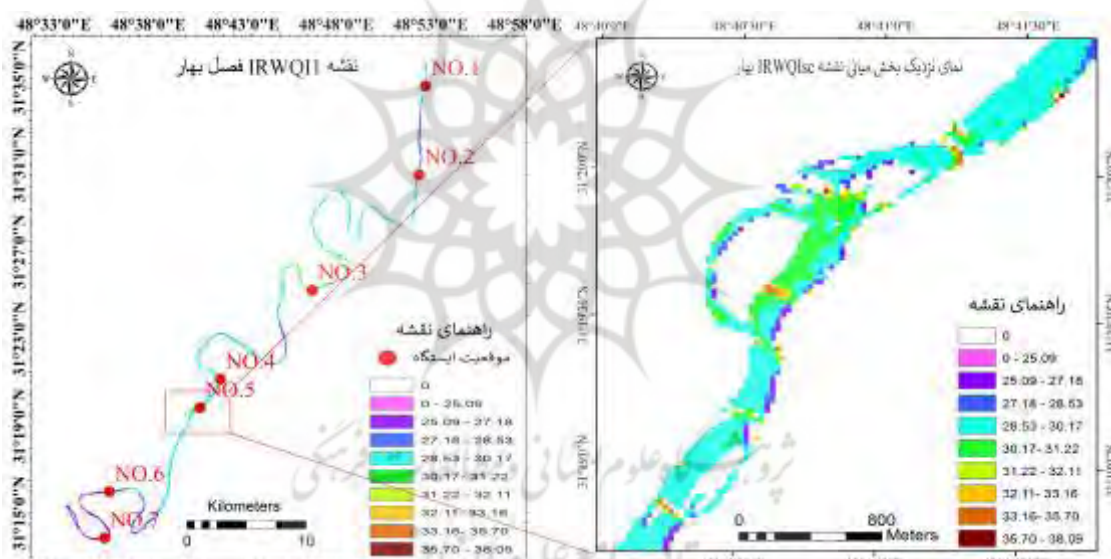
X_5 نشان‌دهنده L8_B2 در حالت 1P و X_6 نشان‌دهنده BT_B2 در حالت 9P است. $IRWQI1_autumn$ و $IRWQI2_autumn$ نقشه‌های شاخص $IRWQI$ فصل پاییز هستند که به ترتیب براساس معادلات ۱۸ و ۱۹ به دست آمده‌اند.

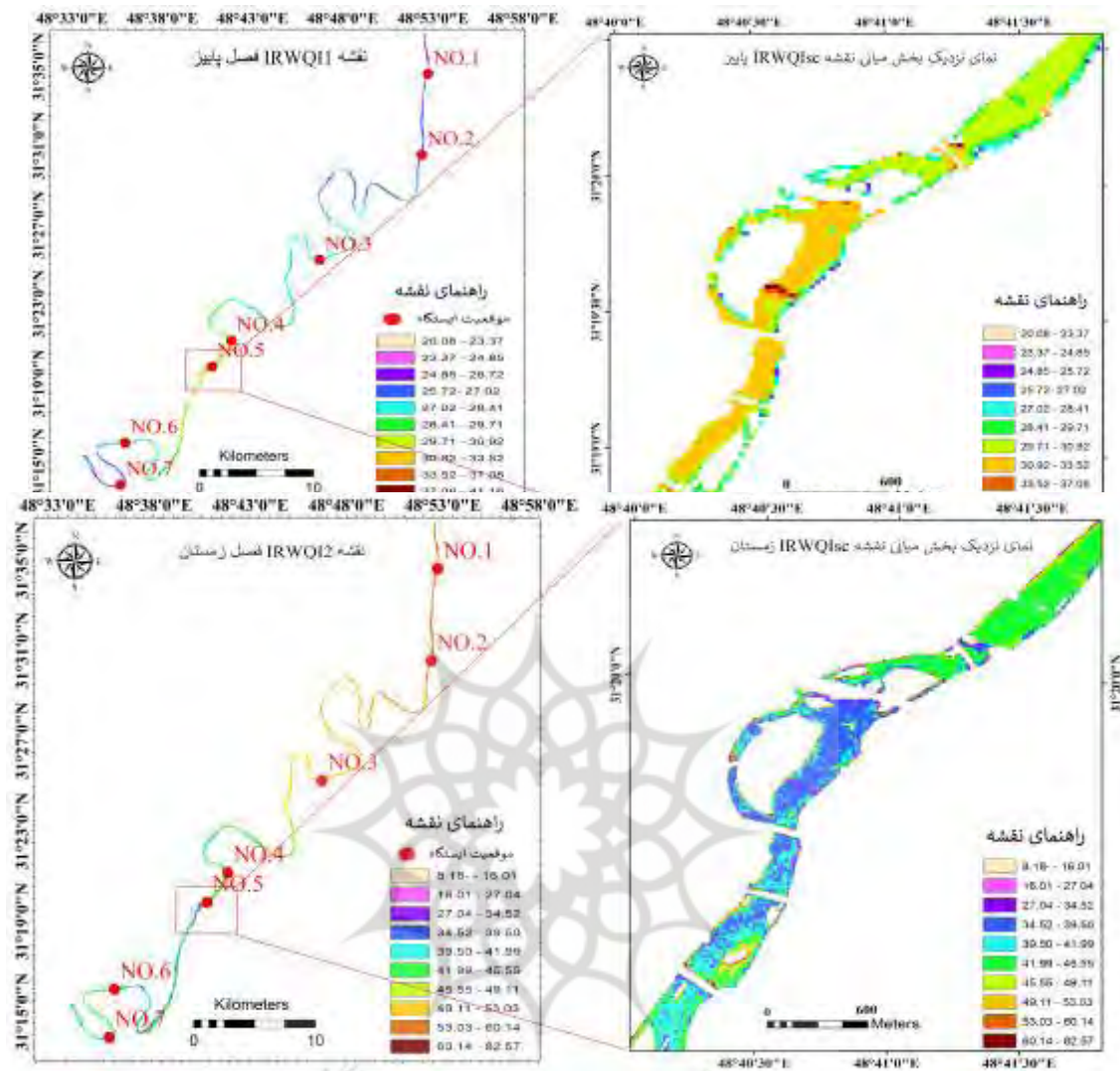
$$IRWQI1_winter = -0.63663 * X_7 + 118.6091 \quad (20)$$

$$IRWQI2_winter = -0.39291 * X_8 + 92.00235 \quad (21)$$

X_7 و X_8 نشان‌دهنده BT_B1 در حالت 9P و 1P هستند. نقشه‌های $IRWQI1_winter$ و $IRWQI2_winter$ نقشه‌های شاخص $IRWQI$ فصل زمستان هستند که به ترتیب براساس معادلات ۲۰ و ۲۱ به دست آمده‌اند.

نقشه‌های زیر، بعضی از نقشه‌های پهنه‌بندی فصلی شاخص $IRWQIsc$ هستند که براساس مدل‌های رگرسیون بهینه بالا تهیه شده‌اند.





شکل ۸. نقشه‌های پهنه‌بندی فصلی شاخص IRWQIsc (نقشه سمت راست، بخش زوم‌شده نقشه سمت چپ است). الف. نقشه فصل بهار براساس مدل IRWQIsc1_spring؛ ب. نقشه فصل تابستان براساس مدل IRWQIsc2_spring؛ پ. نقشه فصل پاییز براساس مدل IRWQIsc1_autumn؛ ت. نقشه فصل زمستان براساس مدل IRWQIsc2_winter. جدول ۱۹، صحت‌سنجی نقشه‌های فصلی شاخص IRWQIsc را نمایش می‌دهد.

جدول ۱۹. نتایج صحت‌سنجی نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص IRWQIsc

| نقشه‌های فصلی شاخص IRWQI | | | | | | | | |
|--------------------------|----------------|----------------|---------------|-----------------|-----------------|--------------|--------------|------|
| IRWQI2_ زمستان | IRWQI1_ زمستان | IRWQI21_ پاییز | IRWQI1_ پاییز | IRWQI2_ تابستان | IRWQI1_ تابستان | IRWQI2_ بهار | IRWQI1_ بهار | |
| ۷/۰۱ | ۹/۱۳ | ۱۱ | ۹/۱۶ | ۶/۹۳ | ۸/۰۳ | ۸/۹۲ | ۷/۴۲ | RMSE |
| ۵/۹۸ | ۷/۸۲ | ۱۰/۸۴ | ۸/۸۱ | ۵/۶۶ | ۶/۵۵ | ۸/۰۳ | ۶/۸۹ | MAE |

مقادیر پرنرنگ و قرمزرنگ در جدول، بهترین دقت را نشان می‌دهند.

براساس جدول بالا، در فصل بهار نقشه IRWQI1 مبتنی بر L8_B2 (در حالت 1P)، در فصل تابستان نقشه IRWQI2 مبتنی بر S2B_B2 (در حالت 1P)، در فصل پاییز نقشه IRWQI1 مبتنی بر L8_B2 (در حالت 1P) و در فصل زمستان نقشه IRWQI2 مبتنی بر BT_B1 (در حالت 1P)، بهترین دقت را داشتند. مقدار RMSE نقشه‌های بهینه پهنه‌بندی شاخص IRWQIsc در فصول بهار تا زمستان به ترتیب معادل با ۷/۴۲، ۶/۹۳، ۹/۱۶ و ۷/۰۱ است. این نتایج نشان می‌دهد بهترین دقت به نقشه فصل تابستان مربوط است. مشاهده می‌شود نقشه بهینه پهنه‌بندی شاخص IRWQI در فصل زمستان در حالت به‌کارگیری تصویر تلفیق‌شده به روش BT به دست آمده است که این نکته اهمیت و کارآمد بودن تلفیق تصاویر را در بهبود نتایج این فصل نشان می‌دهد. نتایج اعتبارسنجی متقابل (CV) مبتنی بر کلاس‌های تشخیص داده‌شده در حالت بهترین نقشه‌های شاخص IRWQIsc در فصول بهار تا زمستان به ترتیب ۵۷٪، ۸۶٪، ۱۴٪ و ۴۳٪ است.

مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی فصلی شاخص IRWQIsc و NSFQI

درباره پهنه‌بندی شاخص NSFQI می‌توان نتیجه‌گیری کرد در نقشه NSFQI2 مربوط به فصل بهار، وضعیت کیفی منطقه پژوهش از شمال به جنوب از حالت بد به متوسط و در نهایت دوباره به وضعیت بد تغییر می‌کند. در نقشه NSFQI2 فصل تابستان، وضعیت کیفی رودخانه کارون از شمال به جنوب از حالت بد به متوسط و خوب تغییر کرده است. در فصل پاییز براساس نقشه NSFQI1، وضعیت کیفی از شمال به جنوب از وضعیت بد به متوسط و دوباره به وضعیت بد تغییر می‌کند. وضعیت کیفی رودخانه از شمال به جنوب منطقه در فصل زمستان، وضعیت متوسط را نشان می‌دهد.

بررسی وضعیت کیفی منطقه پژوهش براساس شاخص IRWQIsc نیز نشان می‌دهد در فصل بهار از شمال به جنوب، تغییر وضعیت از حالت بد به نسبتاً بد و دوباره به حالت بد بوده است. تغییر وضعیت کیفی منطقه در فصل تابستان براساس نقشه IRWQI2 از حالت بد و نسبتاً بد به حالت نسبتاً خوب و در انتها به حالت نسبتاً بد از شمال به جنوب بوده است. در فصل پاییز، نقشه IRWQI1 از شمال به جنوب منطقه، تغییر وضعیت را از بد به نسبتاً بد و دوباره به وضعیت بد نمایش می‌دهد. در انتها در فصل زمستان، براساس نقشه IRWQI2، وضعیت کیفی رودخانه کارون از شمال به جنوب از حالت نسبتاً خوب به نسبتاً بد تغییر می‌کند.

همان‌طور که در نقشه‌های پهنه‌بندی دو شاخص به‌ویژه شاخص IRWQIsc دیده می‌شود، آب رودخانه کارون در منطقه مدنظر در بیشتر فصول سال و بیشتر نقاط، وضعیت نسبتاً نامناسبی از لحاظ شرب و بهداشت دارد و بهتر است استفاده از آن با تصفیه آب همراه باشد. جدول ۲۰ مقایسه دو شاخص مدل‌سازی‌شده NSFQI و IRWQIsc را از شمال تا جنوب منطقه و در سه بخش شمالی (شامل ایستگاههای نمونه‌برداری ۱ و ۲)، میانی (شامل ایستگاههای نمونه‌برداری ۳، ۴ و ۵) و جنوبی (شامل ایستگاههای نمونه‌برداری ۶ و ۷) نمایش می‌دهد. گفتنی است در جدول ۲۰ در ستون مربوط به وضعیت تغییرات شاخص IRWQIsc، حالت معادل با شاخص NSFQI (براساس جداول ۵ و ۷) بیان شده است. با

توجه به جدول ۲۰، روند کلی تغییرات دو شاخص کیفی از شمال تا جنوب منطقه در بیشتر حالات به‌ویژه در بخش شمالی مشابه است؛ همچنین باید توجه داشت به دلیل کیفی بودن این دو شاخص، تفاوت در تعداد پارامترهای ورودی هر شاخص و تفاوت دامنه توصیفی آنها (جدول ۵ و ۷)، مقایسه آنها به‌صورت کمی امکان‌پذیر نیست.

جدول ۲۰. مقایسه وضعیت دو شاخص مدل‌سازی شده NSFWQI و IRWQIsc در سراسر منطقه بررسی شده

| منطقه بررسی شده | فصول سال | NSFWQI | IRWQIsc |
|--------------------------------------|----------|--------|---|
| بخش شمالی (شامل ایستگاههای ۱ و ۲) | بهار | بد | بد (معادل با حالت بد در شاخص NSFWQI) |
| | تابستان | بد | نسبتاً بد (معادل با حالت بد در شاخص NSFWQI) |
| | پاییز | بد | بد (معادل با حالت بد در شاخص NSFWQI) |
| | زمستان | متوسط | نسبتاً خوب (معادل با حالت متوسط در شاخص NSFWQI) |
| بخش میانی (شامل ایستگاههای ۳، ۴ و ۵) | بهار | متوسط | نسبتاً بد (معادل با حالت بد در شاخص NSFWQI) |
| | تابستان | متوسط | نسبتاً خوب (معادل با حالت متوسط در شاخص NSFWQI) |
| | پاییز | متوسط | نسبتاً بد (معادل با حالت بد در شاخص NSFWQI) |
| | زمستان | متوسط | نسبتاً خوب (معادل با حالت متوسط در شاخص NSFWQI) |
| بخش جنوبی (شامل ایستگاههای ۶ و ۷) | بهار | بد | بد (معادل با حالت بد در شاخص NSFWQI) |
| | تابستان | بد | نسبتاً بد (معادل با حالت بد در شاخص NSFWQI) |
| | پاییز | بد | بد (معادل با حالت بد در شاخص NSFWQI) |
| | زمستان | متوسط | نسبتاً بد (معادل با حالت بد در شاخص NSFWQI) |

نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش، پهنه‌بندی فصلی بهینه شاخص‌های کیفی NSFWQI و IRWQIsc در رودخانه کارون است. به همین منظور قابلیت دو تصویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ و لندست-۸ و همچنین قابلیت تلفیق این تصاویر در نتایج پهنه‌بندی ارزیابی شد.

برای محاسبه CR به منظور تولید مدل‌های مناسب با هدف پهنه‌بندی شاخص‌های کیفی، دو سناریو در نظر گرفته شد؛ در نظر گرفتن مقدار تک‌پیکسل (1P) و در نظر گرفتن میانگین یک پنجره ۳*۳ تصاویر ورودی (9P). نتایج نشان داد در فصل بهار نقشه NSFQI2 مبتنی بر BT_B2 (در حالت 9P)، در فصل تابستان نقشه NSFQI2 مبتنی بر IHS_B1 (در حالت 1P)، در فصل پاییز نقشه NSFQI1 مبتنی بر L8_B2 (در حالت 1P) و در فصل زمستان نقشه NSFQI1 مبتنی بر L8_B4 (در حالت 1P)، بهترین دقت را داشتند. مقدار RMSE نقشه‌های بهینه پهنه‌بندی شاخص NSFQI در فصول بهار تا زمستان به ترتیب معادل با ۷/۲۱، ۸/۱۹، ۵/۷ و ۴/۱۵ است. این نتایج نشان می‌دهد بهترین دقت به نقشه فصل زمستان مربوط است. همچنین نتایج نشان می‌دهد برای دو فصل بهار و تابستان، نقشه‌های بهینه پهنه‌بندی شاخص NSFQI در حالت به‌کارگیری تصاویر تلفیق‌شده به روش BT و IHS به دست آمده است که این نکته اهمیت و کارآمد بودن تلفیق تصاویر را در بهبود نتایج پهنه‌بندی در این دو فصل نشان می‌دهد. بهترین نتیجه اعتبارسنجی متقابل نقشه‌های این شاخص برای فصول پاییز و زمستان به دست آمد.

بر اساس شاخص IRWQIsc نتایج نشان می‌دهد در فصل بهار نقشه IRWQI1 مبتنی بر L8_B2 (در حالت 1P)، در فصل تابستان نقشه IRWQI2 مبتنی بر S2B_B2 (در حالت 1P)، در فصل پاییز نقشه IRWQI1 مبتنی بر L8_B2 (در حالت 1P) و در فصل زمستان نقشه IRWQI2 مبتنی بر BT_B1 (در حالت 1P)، بهترین دقت را داشتند. مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی شده شاخص‌های کیفی NSFQI و IRWQIsc نشان می‌دهد وضعیت کیفی رودخانه کارون در بیشتر روزهای سال و بیشتر مناطق نسبتاً نامناسب بوده و بهتر است استفاده از آن با تصفیه آب همراه باشد. مقدار RMSE نقشه‌های بهینه پهنه‌بندی شاخص IRWQIsc در فصول بهار تا زمستان به ترتیب معادل با ۷/۴۲، ۶/۹۳، ۹/۱۶ و ۷/۰۱ است. این نتایج نشان می‌دهد بهترین دقت به نقشه فصل تابستان مربوط است. همچنین نتایج نشان می‌دهد نقشه بهینه پهنه‌بندی شاخص IRWQI در فصل زمستان در حالت به‌کارگیری تصویر تلفیق‌شده به روش BT به دست آمده است که این نکته اهمیت و کارآمد بودن تلفیق تصاویر را در بهبود نتایج این فصل نشان می‌دهد. بهترین نتیجه اعتبارسنجی متقابل نقشه‌های این شاخص برای فصل تابستان به دست آمد.

بر اساس شاخص NSFQI در نقشه NSFQI2 مربوط به فصل بهار، وضعیت کیفی منطقه بررسی شده از شمال به جنوب از حالت بد به متوسط و در نهایت دوباره به وضعیت بد تغییر می‌کند. در نقشه NSFQI2 فصل تابستان، وضعیت کیفی رودخانه کارون از شمال به جنوب از حالت بد به متوسط و خوب تغییر کرده است. در فصل پاییز بر اساس نقشه NSFQI1، وضعیت کیفی از شمال به جنوب از وضعیت بد به متوسط و دوباره به وضعیت بد تغییر می‌کند. وضعیت کیفی رودخانه از شمال به جنوب منطقه در فصل زمستان متوسط بوده است. بررسی وضعیت کیفی منطقه بررسی شده بر اساس شاخص IRWQIsc نیز نشان می‌دهد در فصل بهار از شمال به جنوب، تغییر وضعیت از حالت بد به نسبتاً بد و دوباره به حالت بد بوده است. تغییر وضعیت کیفی منطقه در فصل تابستان بر اساس نقشه IRWQI2 از حالت بد و نسبتاً بد به حالت نسبتاً خوب و در انتها به حالت نسبتاً بد از شمال به جنوب بوده است. در فصل پاییز، نقشه IRWQI1 از شمال به جنوب منطقه، تغییر وضعیت را از بد به نسبتاً بد و دوباره به بد نمایش می‌دهد. در فصل زمستان، بر اساس نقشه IRWQI2، وضعیت کیفی رودخانه کارون از شمال به جنوب از حالت نسبتاً خوب به نسبتاً بد تغییر می‌کند.

مقایسه دو شاخص مدل‌سازی شده NSFQI و IRWQIsc از شمال تا جنوب منطقه در سه بخش شمالی (شامل ایستگاههای نمونه‌برداری ۱ و ۲)، میانی (شامل ایستگاههای نمونه‌برداری ۳، ۴ و ۵) و جنوبی (شامل ایستگاههای نمونه‌برداری ۶ و ۷) نشان داد روند کلی تغییرات دو شاخص کیفی از شمال تا جنوب منطقه در بیشتر حالات به‌ویژه در بخش شمالی مشابه است. در نهایت نتایج نشان داد تصویر سنتینل-۲ و تصاویر تلفیق‌شده، تغییرات کیفی آب رودخانه را با موفقیت بیشتری نمایش می‌دهند.

منابع

- پورحقی، امیر، (۱۳۹۷). **پایش و پردازش اطلاعات کیفی رودخانه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای؛ مطالعه موردی: رودخانه کارون، حدفاصل بند قیر تا ملائانی**، پایان‌نامه دکتری، استاد راهنما: آخوندعلی، علی محمد، دانشگاه شهید چمران اهواز، گروه مهندسی علوم آب.
- جداری عیوضی، جمشید، مقیمی، ابراهیم، یمانی، مجتبی، محمدی، حسین، عیسایی، احمدرضا، (۱۳۸۸). **تأثیر عوامل اکوژئومورفولوژیک بر کیفیت شیمیایی آب؛ مطالعه موردی: رودخانه کر و دریاچه سد درودزن**، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دوره ۲۱، شماره ۲۱، ۱۷-۳۲.
- رنگزن، کاظم، فتاحی مقدم، مهدی، صابری، عظیم، حسینی زارع، نادر، موبد، پریش، (۱۳۹۱). **برآورد کیفیت آب رودخانه کارون محدوده اهواز توسط داده‌های زمینی، طیف‌سنج فیلداسپک ۳ و داده‌های فراتیفی سنجنده هایپریون**، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دوره ۲، شماره ۲، ۹۸-۱۰۸.
- فتاحی مقدم نوقابی، مهدی، (۱۳۹۰). **ارزیابی قابلیت سنجنده هایپریون، فیلداسپک ۳ و داده‌های زمینی برای برآورد پارامترهای کیفیت آب در رودخانه کارون مقطع شهر اهواز**، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: رنگزن، کاظم، دانشگاه شهید چمران اهواز، گروه سنجش از دور و GIS.
- فضیلت‌پور، زهرا، (۱۳۹۰). **استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در مطالعه منابع آبی خلیج فارس**، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: رنگزن، کاظم، دانشگاه شهید چمران اهواز، گروه سنجش از دور و GIS.
- مارامایی، احمد، (۱۳۹۶). **بررسی کیفیت آب رودخانه زیارت با شاخص‌های کیفیت آب IRWQIsc و NSFQI**، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: دهقانی، امیراحمد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گروه مهندسی منابع آب.
- نوحه‌گر، احمد، (۱۳۹۰). **بررسی کیفیت فیزیکی و شیمیایی آب‌های سطحی در رودخانه میناب**، پژوهش‌های دانش زمین، دوره ۲، شماره ۷، ۱-۱۶.
- Bioresita, F., Puissant, A., Stumpf, A., Malet, J.P., (2019). **Fusion of Sentinel-1 and Sentinel-2 image time series for permanent and temporary surface water mapping**, International Journal of Remote Sensing, 40 (23): 9026- 9049.
- Dewidar, K., Khedr, A.A., (2005). **Remote sensing of water quality for Burullus Lake**,

- Egypt, Geocarto International, 20: 43- 49.
- Elhag, M., Gitas, I., Othman, A., Bahrawi, J., Gikas, P., (2019). **Assessment of Water Quality Parameters Using Temporal Remote Sensing Spectral Reflectance in Arid Environments**, Saudi Arabia, Water, 11: 556.
- Fukuda, S., Hirose, H., (1999). **A wavelet-based texture feature set applied to classification of multifrequency polarimetric SAR images**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 37: 2282- 2286.
- Gradilla-Hernández, M.S., de Anda, J., Garcia-Gonzalez, A., Montes, C.Y., Barrios-Piña, H., Ruiz-Palomino, P., Díaz-Vázquez, D., (2020). **Assessment of the water quality of a subtropical lake using the NSF-WQI and a newly proposed ecosystem specific water quality index**, Environmental Monitoring and Assessment, 192: 1- 19.
<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (20-02-1398).
<https://earthexplorer.usgs.gov/> (20-02-1398).
- Jahin, H.S., Abuzaid, A.S., Abdellatif, A.D., (2020). **Using multivariate analysis to develop irrigation water quality index for surface water in Kafr El-Sheikh Governorate, Egypt**, Environmental Technology and Innovation, 17: 100532.
- Karimi, D., Akbarizadeh, G., Rangzan, K., Kabolizadeh, M., (2016). **Effective supervised multiple-feature learning for fused radar and optical data classification**, IET Radar, Sonar and Navigation, 11 (5): 768- 777.
- Karimi, D., Rangzan, K., Akbarizadeh, G., Kabolizadeh, M., (2017). **Combined algorithm for improvement of fused radar and optical data classification accuracy**, Journal of Electronic Imaging, 26 (1): 013017.
- Liu, P., Xiao, L., (2018). **A Novel Generalized Intensity-Hue-Saturation (GIHS) Based Pan-Sharpener Method With Variational Hessian Transferring**, IEEE Access, 6: 46751-46761.
- Potes, M., Rodrigues, G., Penha, A.M., Novais, M.H., Costa, M.J., Salgado, R., Morais, M.M., (2018). **Use of Sentinel 2-MSI for water quality monitoring at Alqueva reservoir, Portugal**, Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 380: 73.
- Pohl, C., Van Genderen, J.L., (2016). **Remote sensing image fusion, a practical guide**, Crc. Press, 276 p.
- Rangzan, K., Kabolizadeh, M., Karimi, D., (2020). **Improved water quality mapping based on cross-fusion of Sentinel-2 and Landsat-8 imageries**, IET Image Processing, 14 (7): 1382- 1392.
- Rangzan, K., Kabolizadeh, M., Karimi, D., Zareie, S., (2019). **Supervised cross-fusion method, a new triplet approach to fuse thermal, radar and optical satellite data for land use classification**, Environmental monitoring and assessment, 191 (8): 481.
- Suwarsono, N., Prasasti, I., Nugroho, J.T., Sitorus, J., Triyono, D., (2018). **Detecting the lava flow deposits from 2018 anak Krakatau eruption using data fusion landsat-8 optic and sentinel-1 sar**, International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences (IJReSES), 15 (2): 157- 166.
- SV, A.K., Srivatsa, S.K., (2018). **An image fusion technique based on sparse wavelet transform and non-singleton type-2 FNN techniques**, AGA J, 14: 76- 86.
- Shahdoosti, H.R., (2018). **Improved Adaptive Brovey as a New Method for Image Fusion**, arXiv preprint arXiv, 1807.09610.
- Toming, K., Kutser, T., Laas, A., Sepp, M., Paavel, B., Nõges, T., (2016). **First experiences in mapping lake water quality parameters with Sentinel-2 MSI imagery**, Remote Sensing, 8 (8): 640.