



## مدل سازی و پهنه بندی پارامترهای کیفیت آب با استفاده از تصاویر ماهواره ای سنتینل-۲ و هوش محاسباتی (مطالعه موردی: رودخانه کارون)

کاظم رنگرن<sup>۱\*</sup>، مصطفی کابلی زاده<sup>۲</sup>، محسن رشیدیان<sup>۳</sup>، حسین دلفان<sup>۴</sup>

۱. دانشیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۲. استادیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۳. مربی گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، اهواز، ایران
۴. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

### مشخصات مقاله

پیشینه مقاله:

دریافت: ۱۲ خرداد ۱۳۹۷

پذیرش: ۱۳ آبان ۱۳۹۸

دسترسی اینترنتی: ۲۵ دی ۱۳۹۸

واژه های کلیدی:

پایش

تصاویر سنتینل-۲

شبکه عصبی مصنوعی

سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیق یافته

رودخانه کارون

### چکیده

با توجه به پیشرفت های صورت گرفته در فناوری سنجش از دور، جمع آوری اطلاعات از وضعیت کیفی منابع آب سطحی به وسیله این فناوری ضمن کاهش هزینه و زمان نمونه برداری های سنتی، می تواند تمامی پهنه های آب سطحی را مورد پایش قرار دهد. در این مطالعه قابلیت تصاویر ماهواره سنتینل-۲ جهت برآورد غلظت پارامترهای اسیدیته، بیکربنات و سولفات مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا تصاویر ماهواره سنتینل-۲ پیش پردازش شد و سپس باندها و شاخص های طیفی مناسبی جهت شناسایی ارتباط معنی دار میان مقادیر هر پارامتر کیفیت آب و تصاویر با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره تعیین گردید. در مرحله بعد با به کارگیری دو مدل شبکه عصبی مصنوعی ANN و مدل سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیق یافته ANFIS، ارتباط میان تصاویر ماهواره سنتینل-۲ و پارامترهای کیفیت آب به تفکیک مدل سازی شده و سپس دقت آن ها به ازای مقادیر واقعی محاسبه گردید. نتایج نشان داد که در مدل سازی پارامتر سولفات با استفاده از ماهواره سنتینل-۲، مدل ANFIS به ترتیب با خطای نسبی و جذر میانگین مربعات خطا RMSE برابر ۰/۰۷۷۳ و ۰/۸۰۱۴ نسبت به مدل شبکه عصبی مصنوعی با خطای نسبی و RMSE برابر ۰/۱۵۸۱ و ۱/۲۴۷۷ دقت بالاتری دارد؛ در حالی که در مدل سازی پارامترهای اسیدیته و بیکربنات، نتایج حاصل از مدل شبکه عصبی مصنوعی با خطای نسبی به ترتیب برابر با ۰/۰۰۶۴ و ۰/۰۵۵۶ و RMSE برابر با ۰/۰۷۰۲ و ۰/۲۶۹۱ برای هر دو پارامتر بهتر از مدل سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیق یافته با خطای نسبی به ترتیب برابر با ۰/۰۱۶۵ و ۰/۰۷۲۲ و RMSE برابر با ۰/۱۹۷۵ و ۰/۳۳۰۷ است. در نهایت با اعمال مدل های تهیه شده بر روی تصاویر ماهواره ای، نقشه وضعیت کیفی هر پارامتر در طول قسمتی از رودخانه کارون تهیه گردید.

\*kazemrangzan@scu.ac.ir پست الکترونیکی مسئول مکاتبات

## مقدمه

جهت مدیریت پایدار پهنه‌های آبی، پایش به هنگام وضعیت کیفی آن‌ها ضروری است (۲۵). روش‌های سنتی پایش کیفیت آب سطحی شامل جمع‌آوری دستی نمونه‌ها و انجام آزمایش‌های لازم بر روی آن‌ها در محیط آزمایشگاه است که باید مستقیماً انجام شود (۲۸). این روش‌های نمونه‌برداری با وجود دارا بودن دقت بالا، نیازمند صرف نیروی انسانی، وقت و هزینه زیاد است و نمی‌تواند خصوصیات دینامیکی کیفیت آب را که دارای تغییرات زمانی و مکانی زیاد است، به‌درستی نشان دهد (۲۰ و ۲۴).

برخلاف این نوع روش‌های نمونه‌برداری، فناوری سنجش‌از‌دور به دلیل قابلیت‌هایی که دارد می‌تواند با هزینه اندک و زمانی کمتر طیف وسیعی از پروژه‌ها را در مقیاس‌های محلی تا جهانی انجام دهد (۳۱). وجود قدرت تفکیک مکانی، طیفی، رادیومتریک و زمانی مناسب برای سنجنده‌های سنجش‌از‌دور باعث شده است که این سیستم‌ها به‌عنوان ابزاری قوی جهت برآورد تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای کیفی آب مورد استفاده قرار گیرند (۲۴).

از مطالعات مشابه صورت گرفته با موضوع تحقیق می‌توان به مطالعات ژیانو و همکاران (۳۰) اشاره کرد که در رودخانه Han از نمونه‌برداری‌های زمینی هم‌زمان با برداشت تصاویر ماهواره‌ای ZY3 و HJ1A استفاده کرده و با به‌کارگیری شبکه عصبی، مدل بازایی شاخص کیفیت آبی را برای منطقه مورد مطالعه استخراج کردند. نتایج مطالعه ایشان نشان داد که مدل تهیه‌شده دارای دقت بالایی است؛ به‌طوری‌که می‌توان با قابلیت اجرای زیاد تغییرات کیفیت آب را در سطح منطقه برآورد نمود.

کلای بارت و فرازیر (۲۱) تصاویر ماهواره‌ای سری لندست ۵ و ۸ را برای بررسی وضعیت کلروفیل و تیرگی در سطح دریاچه شرق اوکلاهاما بکار گرفتند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که میزان همبستگی رفلکتانس باند SWIR و دو پارامتر کیفیت آب کلروفیل و تیرگی نسبت به دیگر باندهای تصویربرداری قوی‌تر است. لیو و همکاران (۲۵)

چهار باند تصویربرداری ماهواره آی‌کونوس را جهت محاسبه میزان نیتروژن کل و فسفر کل رودخانه ورت WRT در شهر ونژوو Wenzhou و دریاچه کیو Cihu در شهر هوانگشی Huangshi را بکار گرفته و با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره و شبکه عصبی، ارتباط میان باندهای تصویربرداری و پارامترهای کیفیت آب ذکر شده را مدل‌سازی نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد که با وجود دقت بالای همبستگی ۰/۸۵ نتایج هر دو مدل، توانایی شبکه عصبی جهت مدل‌سازی بالاتر است.

سو و چاو (۲۸) برای نقشه کردن غلظت تروفیک Trophic مخزن آب تین-پو Tain-Pu در تایلند، از تصاویر هواپیما بدون سرنشین UAV استفاده نموده و جهت به دست آوردن بهترین مدل رگرسیونی برای نقشه کردن وضعیت تروفیک، از دو روش MPP و میانگین‌گیری استفاده نمودند. نتایج نشان داد که روش MPP بهتر از روش میانگین‌گیری عمل می‌کند. تامینگ و همکاران (۲۹) در مطالعه‌ای بر روی کیفیت آب دریاچه‌های کشور استونی، توانستند همبستگی خوبی بین نسبت‌های باندی ماهواره Sentinel-2 و پارامترهای زمینی مانند Chl-a با نسبت همبستگی ۰/۸۳ و CDOM با نسبت همبستگی ۰/۷۲ و DOC با نسبت همبستگی ۰/۹۲ به دست بیاورند و آن‌ها نتیجه گرفتند که ماهواره Sentinel-2 مناسب پایش کیفیت آب است.

کابلی زاده و همکاران (۱۴) در مطالعه با عنوان تلفیق تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ و سنتینل-۲ به‌منظور پایش محیطی انجام دادند. این محققان ذکر کرده‌اند که استفاده از روش‌های تلفیق تصاویر می‌تواند سبب افزایش قدرت تفکیک عوارض شد. میرعلیزاده فرد و منصوری (۱۷) تحقیقی باهدف مطالعات کمی و کیفی آب‌های سطحی با تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ در استان خوزستان انجام دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که شاخص‌های اتوماتیک استخراج پهنه‌های آبی در مناطق سایه‌دار و شهری کارایی بیشتری نسبت به سایر شاخص‌های دیگر به دلیل در نظر گرفتن طول‌موج‌های مادون‌قرمز کوتاه در شناسایی آب دارند.

رودخانه‌های کارون و دز که از مهم‌ترین رودخانه‌های ایران هستند، هر دو از زاگرس مرکزی سرچشمه می‌گیرند و بعد از اتصال به یکدیگر در محل بند قیر در ۴۰ کیلومتری شمال اهواز، کارون بزرگ را تشکیل می‌دهند (۱۶). با وجود آنکه از آب این رودخانه‌ها استفاده‌های زیادی در کشاورزی، صنعت، شرب می‌شود، به دلیل تغییرات آب و هوایی، احداث سد‌های متعدد، عبور این رودخانه‌ها از سازندهای شور و تبخیری (۱۳) و در نهایت ورود کنترل نشده فاضلاب‌های شهری و کشاورزی، عمق و کیفیت آب رودخانه کارون به‌طور چشمگیری کاهش یافته است (۱۹).

### داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق مقادیر مربوط به پارامترهای کیفیت آب شامل اسیدیته، بیکربنات و سولفات از داده‌های که توسط سازمان آب و برق استان خوزستان در تعدادی از ایستگاه‌های نمونه‌برداری کیفیت آب واقع بر رودخانه کارون به‌صورت ماهیانه اندازه‌گیری می‌شود، استفاده شد. از بین این ایستگاه‌ها، ۱۰ ایستگاه در نظر گرفته شد و از داده‌های اندازه‌گیری شده در آن‌ها در این مطالعه استفاده گردید (شکل ۱). این داده‌ها در ۱۰ زمان متفاوت برداشت شده‌اند و تاریخ برداشت آن‌ها با داده‌های تصاویر ماهواره سنتینل-۲ مطابقت دارد (جدول ۱).

مومی پور (۱۶) با انجام پژوهشی تحت عنوان مطالعه کیفیت آب‌های ساحلی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای فراترینی در منطقه ساحل اروندکنار، به این نتیجه رسید که افزایش میزان کلروفیل a در آب، سبب کاهش انعکاس در طول موج آبی و افزایش انعکاس در طول موج سبز می‌شود. هدف از انجام این تحقیق، بررسی ارتباط بهینه میان پارامترهای کیفیت آب شامل اسیدیته (pH)، سولفات (SO<sub>4</sub>) و بیکربنات (HCO<sub>3</sub>) با تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 با استفاده از یک مدل مناسب است. جهت این کار پس از دریافت و پردازش اولیه تصاویر ماهواره‌ای و مقادیر پارامترهای کیفیت آب سطحی با استفاده از مدل‌های مناسب، ارتباط میان پارامترهای کیفیت آب و تصاویر سنجش‌ازدور مدل‌سازی شده و در نهایت با استفاده از مناسب‌ترین مدل از نظر دقت، وضعیت پارامترهای کیفیت آب برای منطقه مورد مطالعه به‌صورت نقشه تهیه گردید.

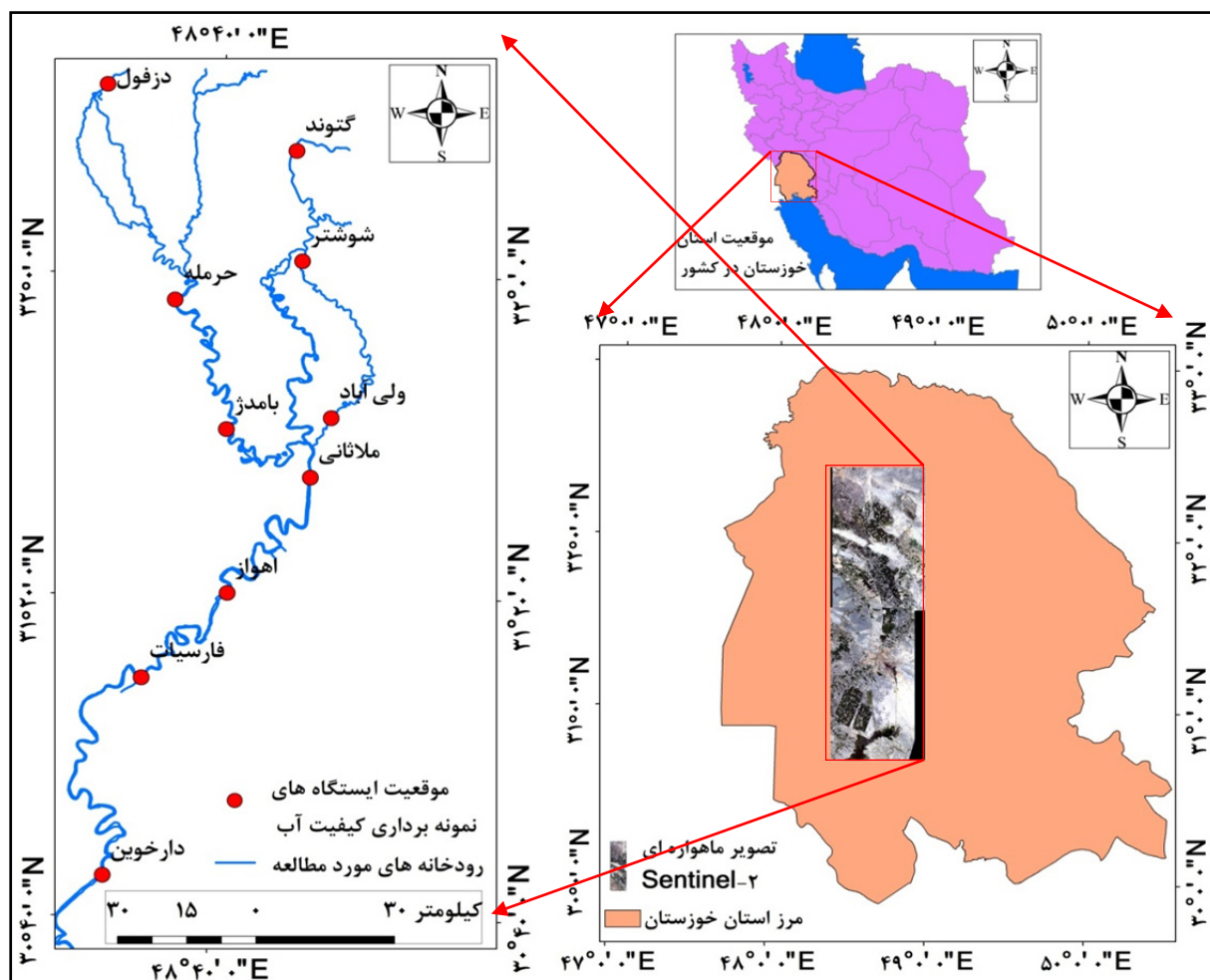
### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه

بخشی از رودخانه‌های کارون و دز است که در طول جغرافیایی "۰۰' ۲۲' ۴۸" تا "۴۰' ۵۵' ۴۸" و عرض جغرافیایی "۲۰' ۴۴' ۳۰" تا "۲۴' ۲۴' ۳۲" واقع شده است (شکل ۱).

جدول ۱. زمان داده‌های پارامترهای کیفیت آب و تصاویر ماهواره سنتینل-۲

سال	ماه	روز	سال	ماه	روز
۱۳۹۴	۱۲	۱۹	۱۳۹۵	۷	۲۴
۱۳۹۴	۱۲	۲۹	۱۳۹۵	۸	۱۴
۱۳۹۵	۵	۶	۱۳۹۵	۸	۲۷
۱۳۹۵	۵	۲۶	۱۳۹۵	۹	۱۷
۱۳۹۵	۷	۴	۱۳۹۵	۹	۲۷



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه و ایستگاه های نمونه برداری کیفیت آب استفاده شده در مطالعه

رسوبی وارد آب می شود و باعث سختی موقت آب می گردد (۱۵). این نوع سختی باعث رسوب در سیستم ها می شود و با حرارت دادن آب، اثر آن برطرف می شود (۵). سولفات نیز در اثر انحلال آب های نفوذی یا جاری به آب های زیرزمینی و سطحی به وجود می آید و باعث سختی دائمی آب می گردد و در صورتی که غلظت آن در آب بالا باشد، باعث تغییر طعم آب شده و کیفیت آن را تا حدود زیادی کاهش می دهد (۱۵). مقادیر حداکثر، حداقل و میانگین سه پارامتر کیفی آب سطحی مورد مطالعه در این تحقیق در جدول ۲ ارائه شده است.

اسیدپته یکی از مهم ترین خواص فیزیکوشیمیایی آب است؛ به طوری که بیشتر روش های تصفیه آب به آن بستگی دارد (۵). اندازه گیری اسیدپته از این نظر اهمیت دارد که قدرت حلالیت آب با تغییر اسیدپته، تغییر می کند (۳). اسیدپته آب در واقع نشان دهنده غلظت یون هیدروژن است؛ این یون در آب مشخص می کند که آب به صورت یک محلول بازی عمل کند و یا یک اسید ضعیف (۳). بیکربنات و سولفات از دیگر پارامترهای کیفی آب هستند که در صورت وجود غلظت بالای آنها، سختی آب را به دنبال خواهند داشت. بیکربنات در اثر ورود سنگ های آهکی و سایر مواد آهکی موجود در سنگ های

جدول ۲. آمار توصیفی پارامترهای کیفیت آب رودخانه کارون در نقاط نمونه برداری شده

نوع پارامتر	واحد	حداکثر	حداقل	میانگین	ضریب تغییرات
سولفات	میلی گرم در لیتر	۱۴/۲۷	۰/۶۳	۷/۰۳	۰/۴۴
بیکربنات	میلی گرم در لیتر	۴/۴۳	۲/۵۸	۳/۳۴	۰/۱۴
اسیدیته	-	۸/۳	۷/۱	۷/۵۵	۰/۰۴

## ماهواره سنتینل-۲

## شبکه عصبی مصنوعی

ماهواره سنتینل-۲ (Sentinel-2) که بخشی از برنامه کوپرنیک (Copernicus) است، جهت فراهم آوردن تصاویر اپتیک با قدرت تفکیک مکانی بالا برای پایش زمین، مدیریت بحران و سیستم‌های هشداردهنده، تهیه نقشه‌های پوششی و کمک‌های بشردوستانه و غیره در سال ۲۰۱۵ توسط سازمان فضای اروپا به فضا پرتاب شده است (۹). سنتینل-۲ شامل دو ماهواره دوقلو بانام‌های Sentinel-2A و Sentinel-2B بوده و می‌تواند در طول ۵ روز یک پوشش کامل از سطح زمین تهیه کند (۲۶). سنجنده تصویربردار نصب شده بر روی این ماهواره-ها در محدوده طیفی مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز میانی فعالیت می‌کند و دارای ۱۳ باند تصویربرداری با قدرت تفکیک مکانی متغیر ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر و عرض تصویربرداری ۲۸۵ کیلومتر است (۱۹). در این تحقیق به دلیل فواصل طولانی بین ایستگاه‌های نمونه برداری و همچنین عدم هم‌زمانی در بیشتر تاریخ‌های اندازه‌گیری نمونه‌های زمینی و برداشت تصاویر ماهواره‌ای از زمان شروع به کار ماهواره Sentinel-2A (۱۳۹۴/۰۳/۱۳) از ۱۰ تصویر ماهواره‌ای استفاده گردید، که تاریخ برداشت آن‌ها در جدول ۲ آمده است. تصاویر مذکور به صورت ژئورفرنس شده ارائه می‌شوند و فاقد خطای هندسی هستند؛ اما جهت استفاده ابتدا در محیط نرم‌افزار SNAP (Sentinel Application Platform) که نرم‌افزار تخصصی برای کار با تصاویر ماهواره مذکور است (۲۷)، تصحیح‌کننده اتمسفری روی آن‌ها اعمال گردید و از حالت رفلکتانس بالای اتمسفر به رفلکتانس زیر اتمسفر تبدیل شدند (۲۲).

شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، یک سیستم پردازش است که در انجام وظایف خود مانند شبکه عصبی بدن عمل می‌کند و توانایی زیادی در انجام فرآیندهای یادگیری، آموزش و سازگار کردن ورودی و خروجی‌های مطلوب دارد (۱۲). شبکه عصبی بر مبنای تطابق و هم‌سنجی بین ورودی و هدف سازگار می‌شود تا اینکه خروجی شبکه و خروجی موردنظر (هدف) بر هم منطبق گردند؛ به طوری که پس از تنظیم یا همان آموزش شبکه عصبی، اعمال یک ورودی خاص به آن منجر به دریافت پاسخ خاصی خواهد شد (۲).

به طور کلی شبکه‌های عصبی دارای دو مرحله کاری تحت عنوان آموزش (Train) و آزمون (Test) ارزیابی (Validation) می‌گردند که در مرحله آموزش تعدادی داده نمونه به عنوان مجموعه آموزشی یا الگوی آموزشی به شبکه اعمال می‌شود و در مرحله آزمون و ارزیابی یک الگوی ورودی به شبکه اعمال می‌شود و شبکه، خروجی متناظر با آن را محاسبه کرده و ارائه می‌نماید (۷). معمول‌ترین انواع شبکه‌های عصبی، پرسپترون چندلایه است؛ این نوع شبکه‌ها معمولاً از یک لایه ورودی و یک یا چند لایه پنهان و یک لایه خروجی تشکیل شده که هر لایه به ترتیب اطلاعات را دریافت، پردازش و نمایش می‌دهد (۱۱). در این تحقیق جهت مدل‌سازی نیز از شبکه عصبی نوع پرسپترون چندلایه استفاده گردید. بدین صورت که مقادیر حاصل از شاخص‌های طیفی به عنوان ورودی مدل و مقادیر متناظر زمینی مربوط به هر پارامتر کیفی به عنوان خروجی مدل معرفی گشت. سایر مشخصات شبکه عصبی استفاده شده شامل؛ تعداد نرون ۲۰، تعداد لایه پنهان دو لایه، نوع شبکه Free-forward backprop، تابع انتقال LOGSIG، تابع آموزش TRAINML، تابع عملکرد MSE، تابع آموزش انطباق

LEARNGD و تعداد تکرار: ۱۰۰۰ است.

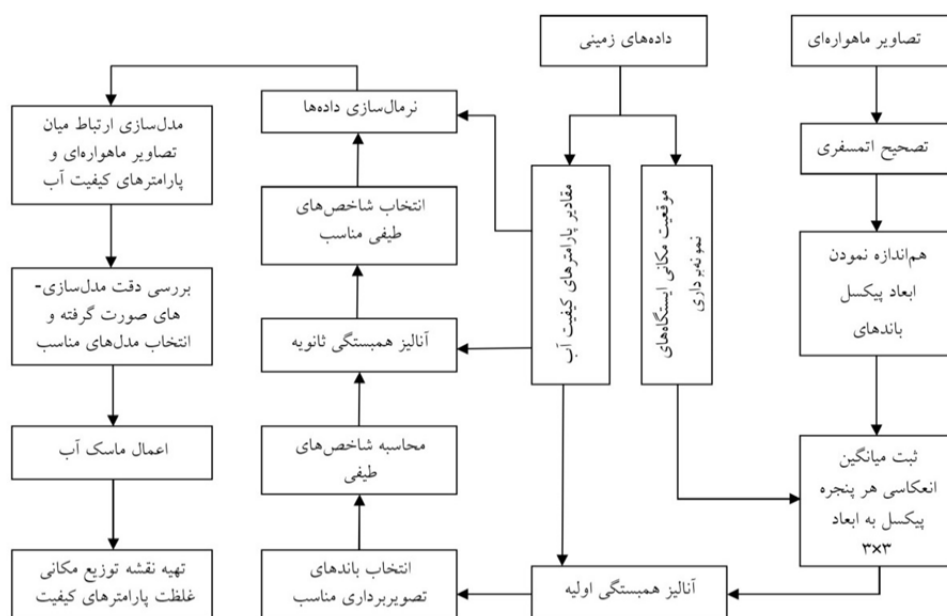
### سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیق یافته

سیستم ANFIS با بهره‌گیری از قدرت آموزش شبکه‌های عصبی و مزیت زبانی سیستم‌های فازی توانسته است از مزایای این دو مدل در جهت تحلیل فرآیندهای پیچیده بسیار قدرتمند عمل نماید و به یکی از روش‌های کارآمد در زمینه پیش‌بینی و مدل‌سازی تبدیل شود (۱). معمول‌ترین نوع سیستم استنتاج فازی که قابلیت فرارگیری در یک شبکه تطبیقی را دارا است و در این تحقیق نیز از آن استفاده می‌شود، سیستم فازی تاکاگی-سوگنو است که خروجی آن یک رابطه خطی بوده و پارامترهای آن را می‌توان با ترکیب روش‌های حداقل مربعات خطا و انتشار خطابه عقب بر اساس کاهش گرادینان برآورد نمود (۶). در این سیستم‌ها ابتدا ساختار مدل با ویژگی‌های مشخص که متناسب با ورودی‌ها، درجه عضویت و قوانین و توابع درجه عضویت خروجی است، انتخاب می‌شود و بعد از آن بخشی از داده‌های موجود به‌عنوان ورودی-خروجی انتخاب می‌شود که قابل‌استفاده برای آموزش این سیستم باشد. در

مرحله آموزش با اصلاح مشخصه‌های درجه عضویت بر اساس میزان خطای قابل‌قبول، مشخصه‌های مدل به مقادیر واقعی نزدیک می‌شوند (۸). مشخصات مدل ANFIS استفاده‌شده شامل؛ نوع سیستم استفاده‌شده Sugeno، تعداد ورودی مدل ۲۰ (مقادیر حاصل از شاخص‌های طیفی)، تعداد خروجی مدل ۱ (مقادیر زمینی مربوط به پارامترهای کیفیت آب)، روش ایجاد مدل Sub clustering، روش بهینه‌سازی الگوریتم Back Propagation، تابع اثر Product و تعداد تکرار ۵۰۰ است.

### روش تحقیق

قبل از اقدام به پیاده‌سازی تحقیق، ابتدا باید روزهایی که نمونه‌برداری میدانی و برداشت تصویر ماهواره‌ای در یک روز انجام‌گرفته است، مشخص گردد. سپس تصاویر ماهواره‌ای و نمونه‌های زمینی همان روز دریافت گردد. در این تحقیق تصاویر ماهواره‌ای برداشت‌شده و اطلاعات کیفیت اندازه‌گیری شده که تاریخ آن‌ها در جدول ۱ آمده است، استفاده گردید. سایر مراحل پیاده‌سازی تحقیق مطابق شکل ۲ صورت پذیرفت.



شکل ۲. فلوچارت پیاده‌سازی تحقیق

نتایج مرحله اول آنالیز همبستگی را مطابق رابطه‌های ۱، ۲ و ۳ محاسبه و سپس همبستگی این شاخص‌ها با پارامترهای کیفیت آب در نظر گرفته شده در تحقیق بررسی می‌گردد. شاخص‌های طیفی در واقع حاصل یک محاسبه ریاضیاتی بین دو یا چند باند طیفی است که به واسطه آن، پدیده هدف شناسایی و بارز می‌شود. در تصویر حاصل از شاخص طیفی اطلاعات جدیدی تولید می‌شود؛ به طوری که در تصاویر تک باندهای این اطلاعات وجود ندارد (۱۳).

با استفاده از عملیات آنالیز همبستگی، باندها و شاخص‌های طیفی که ارتباط قوی‌تری با پارامترهای اسیدیته، بیکربنات و سولفات رادارند، شناسایی شده و باندهای با ارتباط ضعیف‌تر حذف می‌شوند و در نتیجه حجم اطلاعات غیرمفید کاهش می‌یابد (۸). رابطه ۱ نسبت باندهای اول، رابطه ۲ نسبت باندهای دوم و رابطه ۳ نیز ترکیب باند B را نمایش می‌دهد.

$$B_{\min}/B_{\max} \quad [1]$$

$$B_{\max}/B_{\min} \quad [2]$$

$$(B_{\max}-B_{\min})/(B_{\max}+B_{\min}) \quad [3]$$

در این رابطه‌ها؛  $B_{\max}$  نشان‌دهنده انعکاس طیفی باند با طول موج بزرگ‌تر و  $B_{\min}$  نشان‌دهنده انعکاس طیفی باند با طول موج کوچک‌تر است.

نرمال‌سازی داده‌ها در این مرحله حدود مقادیر پارامترهای کیفیت آب زمینی و شاخص‌های طیفی که بیشترین همبستگی را با هر پارامتر کیفیت آب داشته را بر اساس رابطه ۴ نرمال نموده تا حدود داده‌هایی که در یک دامنه نیستند، در دامنه مشابه (۰ و ۱) قرار گیرند (۱۰).

$$N=(X_i-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min}) \quad [4]$$

در این رابطه؛  $N$ ،  $X_{\max}$  و  $X_{\min}$  به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر نرمال، حداکثر و حداقل داده‌ها بوده و  $X_i$  نیز نشان‌دهنده مقادیر خام داده‌ها است.

مدل‌سازی ارتباط میان تصاویر ماهواره‌ای و پارامترهای

آماده‌سازی اولیه داده‌های زمینی و تصاویر ماهواره‌ای الف- داده‌های ایستگاه‌های اندازه‌گیری زمینی، در این قسمت ابتدا اطلاعات مربوط به مقادیر پارامترهای کیفیت آب شامل اسیدیته، بیکربنات و سولفات جمع‌آوری شده و سپس شیپ‌فایلی از موقعیت مکانی ایستگاه‌های نمونه‌برداری واقع بر رودخانه کارون بزرگ تهیه می‌گردد. ب- داده‌های سنجش‌ازدور، جهت کار با تصاویر ماهواره سنتینل-۲ بدین صورت عمل می‌گردد که بعد از دریافت تصاویر آن و خارج نمودن آن‌ها از حالت فشرده، باندهای آن به نرم‌افزار SNAP فراخوانی می‌شوند. در مرحله بعد از طریق ابزار Sen2Cor که یک اکستنشن الحاقی است و قابلیت نصب بر روی نرم‌افزار SNAP را دارد، تصاویر تصحیح اتمسفری می‌شوند (۲۷)، و سپس از آن‌ها به فرمت tif خروجی گرفته و به نرم‌افزار ENVI فراخوانی می‌گردند. در این نرم‌افزار جهت تسهیل در عملیات مدل‌سازی و محاسبه شاخص‌های طیفی که در مراحل بعدی تحقیق صورت می‌گیرد، اندازه پیکسل باندهای با قدرت تفکیک مکانی ۲۰ متر به ۱۰ متر تغییر داده می‌شوند.

ثبت انعکاس باندهای تصویربرداری در محل ایستگاه‌های اندازه‌گیری زمینی در این گام بر روی هر باند تصویربرداری میانگین انعکاسی هر پنجره به اندازه (۳×۳) پیکسل در محل ایستگاه‌های نمونه‌برداری زمینی (جهت کم کردن اثر خطاهای احتمالی ظاهر شده بر روی باندهای تصویر) محاسبه و سپس به ترتیب شماره باند تصویر و شماره ایستگاه ذخیره می‌گردد (۲۸).

بررسی همبستگی میان باندهای تصویربرداری و پارامترهای کیفیت آب در این مرحله از تحقیق، در دو مرحله همبستگی باندهای مختلف تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ با مقادیر پارامترهای کیفیت آب سطحی بررسی می‌گردد. بدین منظور در مرحله اول با به‌کارگیری مدل رگرسیونی چند متغیره همبستگی تک‌تک باندهای تصویربرداری ماهواره با پارامترهای کیفیت آب به صورت جداگانه بررسی می‌شود. در مرحله دوم، ابتدا شاخص‌های طیفی نسبت باندهای و ترکیب باندهای بر اساس

داده می‌شود) و به دیگر قسمت‌ها که فاقد آب می‌باشند، مقداری بین ۰ تا ۱- اختصاص می‌دهد (۲۰).

$$MNDWI = \frac{B3-B11}{B3+B11} \quad [۸]$$

در این رابطه؛ B3 و B11 به ترتیب نشان‌دهنده انعکاس طیفی باند شماره ۳ (طول موج سبز) و باند شماره ۱۱ (طول موج مادون قرمز میانی) ماهواره سنتینل-۲ است.

تهیه نقشه پراکندگی پارامترهای کیفیت آب در این مرحله که آخرین قسمت از مراحل پیاده‌سازی تحقیق است، در صورتی که مدل‌سازی‌ها با دقت کافی انجام شوند، با به‌کارگیری تصاویر تصحیح‌شده از نظر خطای اتمسفری و اعمال ماسک آب بر آن‌ها، بر اساس عملکرد و نتیجه بهترین مدل‌ها، نقشه پراکنش هرکدام پارامترهای بیکربنات، اسیدیته و سولفات در طول رودخانه کارون تهیه می‌گردد.

## نتایج

در این مطالعه پس از پردازش تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲، با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره همبستگی این تصاویر طی دو مرحله با پارامترهای کیفیت آب بررسی گردید. در مرحله اول، همبستگی هرکدام از باندهای تصویربرداری با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ و ۲۰ متر با پارامترهای کیفیت آب شامل سولفات، اسیدیته و بیکربنات بررسی گردید. باندهای B1، B9 و B10 به دلیل عدم داشتن قدرت تفکیک مکانی مناسب (۶۰ متر) بکار گرفته نشدند. نتایج آنالیز همبستگی باندهای تصویر سنتینل-۲ و پارامترهای کیفیت آب نشان داد که باندهای B6، B7، B8a، B11 و B12 با پارامتر سولفات، باندهای B2، B5، B6، B8 و B11 با پارامتر اسیدیته و همچنین باندهای B2، B5، B6، B7 و B12 با پارامتر بیکربنات بیشترین همبستگی را دارند. به همین دلیل شاخص‌های طیفی نسبت بانندی و ترکیب بانندی بر اساس این باندها محاسبه گردید (جدول ۳).

کیفیت آب زمینی در این مرحله با توجه به نتایج گام‌های قبلی، ارتباط میان هر پارامتر کیفیت آب و تصاویر ماهواره‌ای به تفکیک مدل‌سازی می‌گردد. مدل‌های در نظر گرفته‌شده در این تحقیق، ANN و ANFIS است که جهت پیاده‌سازی آن‌ها از نرم‌افزار MATLAB استفاده گردید. در هر دو مدل شاخص‌های طیفی به‌عنوان ورودی و مقادیر پارامترهای کیفیت آب به‌عنوان خروجی مدل‌ها معرفی شده و با تقسیم‌بندی مجموع داده‌ها به داده‌های آموزش (۷۰ درصد از مجموع داده‌ها) و داده‌های آزمون و صحت‌سنجی (۳۰ درصد از مجموع داده‌ها)، مدل‌سازی صورت می‌گیرد (۱۸ و ۲۳). بعد از مدل‌سازی ارتباط میان پارامترهای کیفیت آب و تصاویر ماهواره‌ای، دقت مدل‌سازی‌ها بررسی شده ابتدا مقدار خطا با استفاده از رابطه ۵ به دست آمد سپس با استفاده از سایر شاخص‌ها خطای نسبی (Relative Error) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSe) حاصل از مقادیر واقعی و مقادیر برآورد شده بر اساس رابطه‌های ۶ و ۷ محاسبه گردید (۴).

$$\text{Error} = \text{abs}(d - p) \quad [۵]$$

$$ER = \frac{\text{Error}}{p} \quad [۶]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - p_i)^2} \quad [۷]$$

در رابطه‌ها؛ p و d به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر واقعی داده‌ها و مقادیر محاسبه‌شده توسط مدل بوده و n نیز تعداد کل داده‌ها است.

جداسازی آب از دیگر قسمت‌های تصاویر ماهواره‌ای به دلیل اینکه در این تحقیق هدف بررسی ارتباط میان تصاویر ماهواره‌ای و پارامترهای زمینی کیفیت آب است، باید پهنه آبی رودخانه کارون از دیگر قسمت‌های فاقد آب موجود بر روی تصاویر سنتینل-۲ جدا گردد.

جهت این کار از ماسک آب که یک نوع شاخص طیفی است، استفاده‌شده است (رابطه ۸). این شاخص طیفی به قسمت‌های از تصاویر که دارای آب هستند، مقداری بین ۰ تا ۱+ (مقدار ۱+ به قسمتی که حاوی آب خالص است اختصاص



جدول ۳. نتایج آنالیز همبستگی باندهای تصویر سنتینل-۲ و پارامترهای کیفیت آب

شماره باند	بیکرینات	اسیدیته	سولفات
B2	۰/۴۹۳	۰/۳۸۴	۰/۲۱۹
B3	۰/۲۳۸	۰/۳۰۷	۰/۲۳۹
B4	۰/۲۶۰	۰/۲۷۸	۰/۲۳۲
B5	۰/۳۱۵	۰/۴۲۸	۰/۲۱۴
B6	۰/۶۴	۰/۳۲۲	۰/۲۷۸
B7	۰/۲۷۳	۰/۲۹۹	۰/۲۸۱
B8	۰/۱۹۸	۰/۳۴۶	۰/۲۴۵
B8a	۰/۲۴۱	۰/۳۰۹	۰/۲۷۵
B11	۰/۲۳۸	۰/۳۲۵	۰/۲۷۳
B12	۰/۲۸۲	۰/۳۱۰	۰/۲۹۳

باندی  $\left(\frac{B_{min}}{B_{max}}\right)$  و نسبت باندی  $\left(\frac{B_{max}-B_{min}}{B_{max}+B_{min}}\right)$  با پارامترهای اسیدیته و بیکرینات بیشترین همبستگی را دارا بوده و در این مطالعه نیز از آنها جهت مدل‌سازی استفاده گردید (جدول ۴).

نتایج آنالیز همبستگی شاخص‌های طیفی و پارامترهای کیفیت آب نشان داد که شاخص‌های نسبت باندی  $\left(\frac{B_{min}}{B_{max}}\right)$  و نسبت باندی  $\left(\frac{B_{max}}{B_{min}}\right)$  با پارامتر سولفات و شاخص‌های نسبت

جدول ۴. نتایج آنالیز همبستگی شاخص‌های طیفی و پارامترهای کیفیت آب

نوع شاخص	بیکرینات	اسیدیته	سولفات
انعکاس تک باند	۰/۲۶۰	۰/۴۰۷	۰/۵۳۴
نسبت باندی $\frac{B_{min}}{B_{max}}$	۰/۶۸۱	۰/۶۳۳	۰/۵۶۲
نسبت باندی $\frac{B_{max}}{B_{min}}$	۰/۵۰۱	۰/۵۱۶	۰/۵۹۹
نسبت باندی $\frac{B_{max}-B_{min}}{B_{max}+B_{min}}$	۰/۵۸۱	۰/۷۲۰	۰/۵۲۷

شد و با به‌کارگیری این روش برای هرکدام از دو مدل استفاده شده و در نهایت بهترین حالت انتخاب گردید. در مرحله بعد جهت بررسی دقت عملکرد مدل‌سازی‌های صورت گرفته توسط هر مدل، دقت آنها به ازای مقادیر واقعی از هر پارامتر محاسبه گردید. در جدول ۵ مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده برای هر پارامتر کیفیت آب با استفاده از ANN و ANFIS آمده است.

در مرحله بعد تمامی مقادیر حاصل از شاخص‌های طیفی مناسب برای هر باند و مقادیر هر پارامتر کیفیت آب به صورت جداگانه نرمال نموده و بعد از آن به محیط نرم‌افزار MATLAB فراخوانی شدند. سپس با تعریف شاخص‌های طیفی به‌عنوان ورودی مدل شبکه عصبی مصنوعی ANN و مدل سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیق یافته ANFIS، عملیات مدل‌سازی صورت گرفت. به‌منظور انتخاب بهترین ساختار در هر دو مدل ANN و ANFIS، در این تحقیق از روش آزمون و خطا استفاده

جدول ۵. مقادیر پارامترهای کیفیت آب زمینی و مقادیر محاسبه شده توسط مدل شبکه عصبی مصنوعی ANN و مدل سیستم استنتاج

فازی-عصبی تطبیق یافته ANFIS

بیکربنات			اسیدیته			سولفات		
مقدار واقعی	ANN	ANFIS	مقدار واقعی	ANN	ANFIS	مقدار واقعی	ANN	ANFIS
۴	۳/۴۷۲	۳/۶۹۳	۷/۶	۷/۶۵۷	۷/۷۳۲	۰/۶۳	۰/۷۴۱	۰/۶۳
۴/۴۳	۴/۱۸۱	۳/۹۱۳	۷/۴	۷/۳۹۵	۷/۴	۸/۳۴	۷/۹۵۱	۸/۳۴
۳/۶۳	۳/۵۷۰	۳/۶۳۰	۷/۵	۷/۴۶۴	۷/۵۰۸	۷/۶۳	۸/۲۵۰	۷/۴۵
۲/۶۵	۲/۵۹۱	۳/۱۵۹	۷/۵	۷/۵۰۹	۷/۵	۹/۴۳	۹/۵۹۶	۹/۲۹
۳/۳	۳/۳۰۰	۳/۳۰۰	۷/۶	۷/۵	۷/۲۰۰	۳/۷۱	۳/۶۴۷	۲/۶۸
۲/۷۷	۲/۷۲۵	۳/۲۳۴	۷/۶	۷/۶۴۲	۷/۸۱۳	۲/۶۸	۱/۱۱۵	۲/۶۸
۲/۹۳	۲/۹۴۴	۲/۹۳۰	۷/۹	۷/۸۸۰	۷/۹۰۰	۹/۵۱	۹/۰۷۲	۱۱/۵
۲/۸۹	۳/۲۰۱۰	۳/۲۲۷	۷/۴	۷/۳۰۲	۷/۳۸۳	۴/۸۳	۶/۰۸۶	۶/۱۲۶
۳/۳۲	۳/۲۶۴	۳/۳۲۰	۷/۶	۷/۵۷۷	۷/۵۰۲	۶/۰۲	۷/۲۶۴	۶/۰۲
۳/۲۵	۳/۵۰۸	۳/۶۹۳	۷/۳	۷/۳۰۹	۷/۳۰۰	۷/۴۶	۸/۷۹۸	۸/۳۳۹
۳/۴۲	۲/۹۶۰	۳/۲۹۰	۷/۳	۷/۳۸۲	۷/۷۱۹	۵/۷۸	۹/۶۲۲	۵/۷۸
۳/۷۸	۳/۶۳۰	۳/۷۷۵	۷/۵	۷/۵۰۷	۷/۴۹۶	۹/۴۳	۹/۳۸۶	۱۰/۷۶۳
۳/۷۷	۳/۴۲۳	۳/۱۰۸	۷/۶	۷/۶۳۲	۷/۳۰۴	۸/۶۶	۸/۶۱۵	۸/۳۴
۳/۱۶	۲/۶۱۸	۳/۱۶۰	۷/۴	۷/۴۱۶	۷/۳۹۸	۵/۶۴	۵/۷۶۶	۵/۶۴
۳/۱۹	۳/۱۰۶	۲/۹۹۱	۸	۸/۱۹۷	۸/۳	۶/۱۴	۶/۲۶۱	۵/۶۴

تصاویر ماهواره‌ای و پارامتر سولفات دارای دقت بالاتری است؛ درحالی‌که مدل ANN برای مدل‌سازی ارتباط میان تصاویر ماهواره‌ای و پارامترهای اسیدیته و بیکربنات بهتر از مدل ANFIS عمل می‌کند.

خطای نسبی و RMSe حاصل از مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده به وسیله مدل‌های ANN و ANFIS برای هر پارامتر کیفیت آب آمده در جدول ۶ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل ANFIS برای مدل‌سازی ارتباط میان

جدول ۶. خطای نسبی و RMSe محاسبه شده مدل ANN و ANFIS

نوع پارامتر	ANN		ANFIS	
	RMSe	خطای نسبی	RMSe	خطای نسبی
سولفات	۱/۲۴۷۷	۰/۱۵۸۱	۰/۸۰۱۴	۰/۰۷۷۳
اسیدیته	۰/۰۷۰۲	۰/۰۰۶۴	۰/۱۹۷۵	۰/۰۱۶۵
بیکربنات	۰/۲۶۹۱	۰/۰۵۶۶	۰/۳۳۰۷	۰/۰۷۲۲

نیز مطابق تهیه نقشه توزیع مکانی هر پارامتر کیفیت آب در طول رودخانه کارون اقدام به دریافت یک تصویر برداشت شده در تاریخ ۱۳۹۵/۱۲/۱۴ از سطح رودخانه کارون گردید. تصویر دریافت شده مطابق مراحل تجزیه و تحلیل تحقیق از نظر خطای اتمسفری تصحیح شده و سپس ابعاد پیکسل باندهای با قدرت تفکیک مکانی ۲۰ متر تغییر داده شد و به ۱۰ متر گردید. به دلیل وسیع بودن طول رودخانه کارون، قسمتی از آن یعنی بازه ملاثانی تا فارسیات در جنوب کلان شهر اهواز در نظر گرفته شد و سپس تمامی باندهای آماده شده در مراحل قبل بر اساس این منطقه برش داده شدند.

در گام بعد از مراحل تهیه نقشه از همان باندهایی که به منظور مدل سازی ارتباط میان تصاویر ماهواره ای سنتینل-۲ و هر پارامتر کیفیت آب بکار گرفته شد، استفاده نموده و این باندها به محیط نرم افزار MATLAB فراخوانی گردید. در این نرم افزار با انجام برنامه نویسی، باندهای فراخوانی شده به ماتریس تبدیل شدند و با اعمال ماسک آب بر روی آنها، قسمت های فاقد آب از آنها جدا گردید. در گام بعد از مدل سازی حاصل از ارتباط میان تصاویر ماهواره سنتینل-۲ و پارامتر سولفات به وسیله مدل ANFIS و همچنین شاخص های طیفی ماسک شده استفاده نموده و نقشه غلظت پارامتر سولفات تهیه گردید.

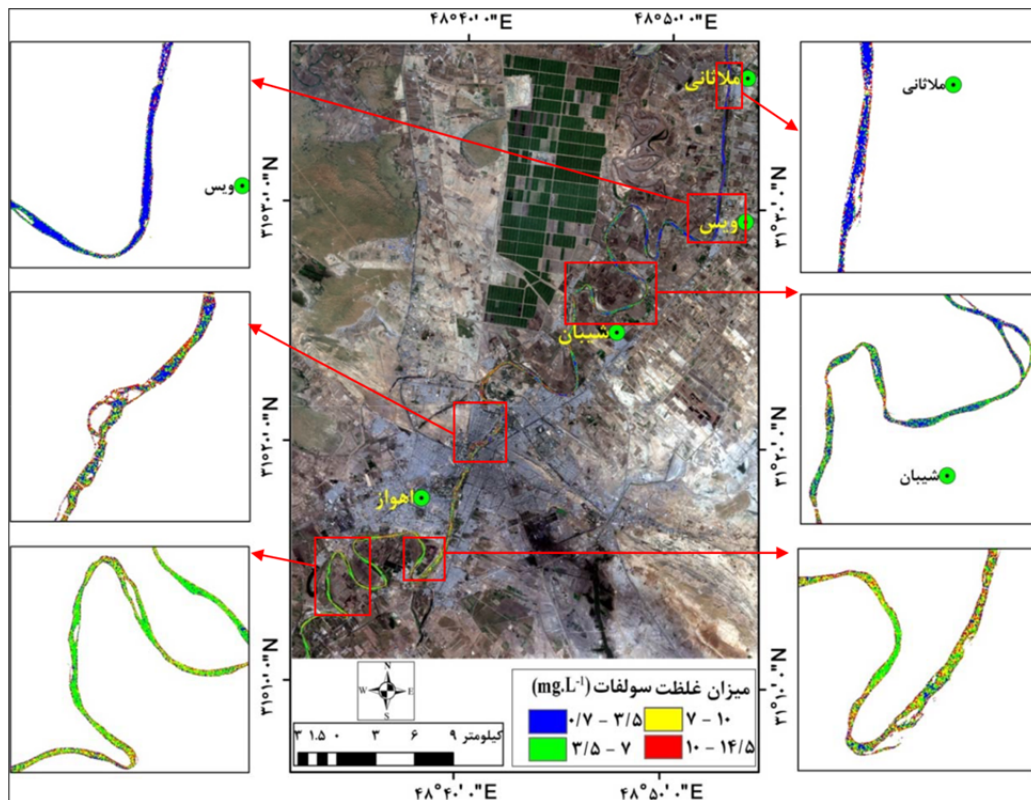
جهت تهیه نقشه غلظت پارامترهای اسیدیته و بیکربنات نیز مطابق تهیه نقشه برای پارامتر سولفات عمل گردید و به دلیل خطای پایین تر از نظر مدل سازی فقط از مدل ANN بهره گرفته شد. خروجی حاصل از عملیات ذکر شده در واقع یک ماتریس بوده و با تغییر حالت آن از ماتریس به تصویر، نقشه هر کدام از پارامترهای کیفیت آب در نظر گرفته شده برآورد گردید. در گام بعدی از تحقیق، نقشه های تهیه شده به محیط نرم افزار ArcGIS فراخوانی شده و سپس اقدام به ژئورفرنس کردن آنها شد و در نهایت به صورت شکل های ۳، ۴ و ۵ خروجی های مناسبی از وضعیت توزیع مکانی غلظت هر پارامتر تهیه گردید. از بین سه پارامتر کیفیت آب مطالعه شده در محدوده در نظر گرفته شده از رودخانه کارون، پارامتر سولفات نسبت به پارامترهای اسیدیته و بیکربنات دارای تغییرات بیشتری است؛ توزیع مکانی غلظت این پارامتر به صورت است که مقدار آن از ملاثانی به اهواز روند صعودی دارد و بیشترین میزان آن نیز در محدوده شهری اهواز مشاهده می گردد (شکل ۳).

میزان پارامتر اسیدیته دارای تغییرات کمتری نسبت به سولفات بوده و بیشترین مقدار آن در محدوده ملاثانی تا جنوب ویس برآورد گردیده است (شکل ۴). میزان بیکربنات در تمامی طول محدوده در نظر گرفته شده از رودخانه کارون دارای مقدار تقریباً یکسانی بوده و فقط در محدوده شمال اهواز مقدار آن نسبت به سایر قسمت ها بیشتر است (شکل ۵).

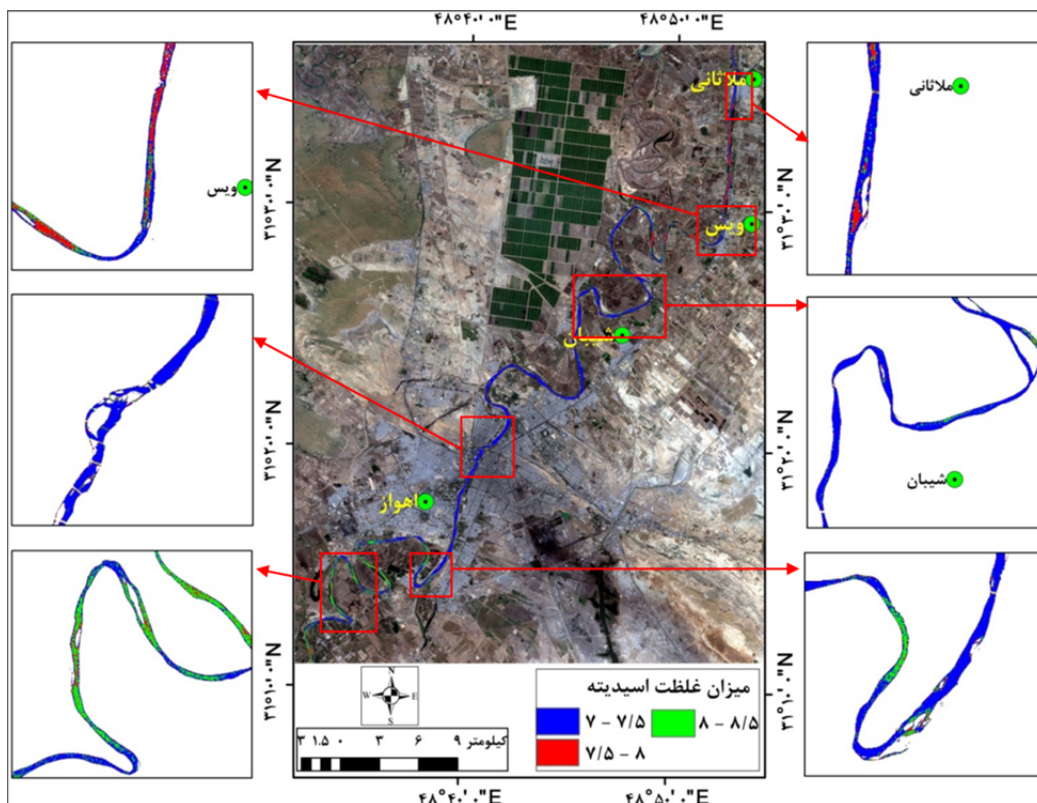
جهت تهیه نقشه توزیع مکانی هر پارامتر کیفیت آب در طول رودخانه کارون اقدام به دریافت یک تصویر برداشت شده در تاریخ ۱۳۹۵/۱۲/۱۴ از سطح رودخانه کارون گردید. تصویر دریافت شده مطابق مراحل تجزیه و تحلیل تحقیق از نظر خطای اتمسفری تصحیح شده و سپس ابعاد پیکسل باندهای با قدرت تفکیک مکانی ۲۰ متر تغییر داده شد و به ۱۰ متر گردید. به دلیل وسیع بودن طول رودخانه کارون، قسمتی از آن یعنی بازه ملاثانی تا فارسیات در جنوب کلان شهر اهواز در نظر گرفته شد و سپس تمامی باندهای آماده شده در مراحل قبل بر اساس این منطقه برش داده شدند.

در گام بعد از مراحل تهیه نقشه از همان باندهایی که به منظور مدل سازی ارتباط میان تصاویر ماهواره ای سنتینل-۲ و هر پارامتر کیفیت آب بکار گرفته شد، استفاده نموده و این باندها به محیط نرم افزار MATLAB فراخوانی گردید. در این نرم افزار با انجام برنامه نویسی، باندهای فراخوانی شده به ماتریس تبدیل شدند و با اعمال ماسک آب بر روی آنها، قسمت های فاقد آب از آنها جدا گردید. در گام بعد از مدل سازی حاصل از ارتباط میان تصاویر ماهواره سنتینل-۲ و پارامتر سولفات به وسیله مدل ANFIS و همچنین شاخص های طیفی ماسک شده استفاده نموده و نقشه غلظت پارامتر سولفات تهیه گردید.

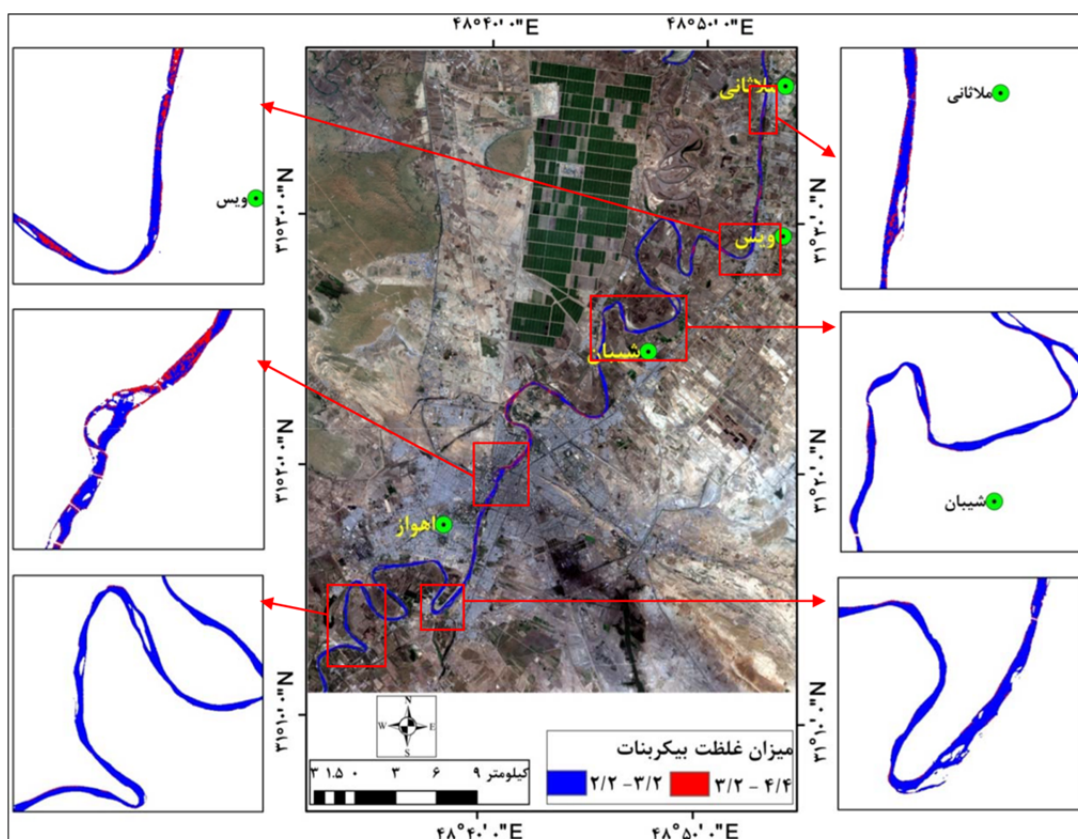
جهت تهیه نقشه غلظت پارامترهای اسیدیته و بیکربنات



شکل ۳. وضعیت پارامتر سولفات در طول رودخانه کارون



شکل ۴. وضعیت پارامتر اسیدیته در طول رودخانه کارون



شکل ۵. وضعیت پارامتر بیکربنات در طول رودخانه کارون

## بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه سعی بر آن شد که توانایی تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ (Sentinel-2) جهت برآورد غلظت پارامترهای کیفیت آب شامل سولفات، اسیدیته و بیکربنات رودخانه کارون در استان خوزستان بررسی گردد. بدین منظور از تصاویر برداشت شده از سطح رودخانه کارون بزرگ استفاده نموده و با جمع‌آوری مقادیر زمینی از پارامترهای مذکور و به‌کارگیری دو مدل شبکه عصبی مصنوعی ANN و مدل سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیق یافته ANFIS، بهترین مدل‌سازی‌های ممکن از ارتباط میان تصاویر ماهواره‌ای و پارامترهای کیفیت آب در نظر گرفته شده تهیه گردید. جهت برآورد دقت مدل‌سازی‌های صورت گرفته، خطای نسبی و RMSE میان مقادیر واقعی و مقادیر حاصل از مدل‌ها محاسبه گردید. نتایج نشان داد که جهت پیدا کردن ارتباط میان تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ و پارامترهای کیفیت آب اسیدیته و

بیکربنات مدل ANN و جهت مدل‌سازی ارتباط میان تصاویر ماهواره مذکور و پارامتر کیفیت آب سولفات مدل ANFIS دارای توانایی بالاتری است. نتایج به‌دست‌آمده مؤید نتایج تحقیقات مشابه از جمله لیو و همکاران (۲۴) است؛ با این تفاوت که در تحقیق حاضر به‌صورت دقیق‌تر مدل‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته و بهترین مدل جهت مدل‌سازی پارامتر موردنظر انتخاب شده است. در نهایت با به‌کارگیری مدل ANN برای پارامترهای اسیدیته و بیکربنات و مدل ANFIS برای پارامتر سولفات، نقشه غلظت هرکدام از آن‌ها در طول قسمتی از رودخانه کارون بزرگ تهیه گردید. نقشه‌های تهیه شده از وضعیت پارامترهای در نظر گرفته شده نشان‌دهنده تغییرات زیاد پارامتر سولفات در طول محدوده در نظر گرفته شده و به‌خصوص محدوده شهر اهواز است؛ درحالی‌که دو پارامتر کیفیت آب دیگر تغییرات چشمگیری در محدوده موردنظر ندارند. با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق و همچنین

- مدل‌ها و تصاویر مورد استفاده نسبت به تحقیقات پیشین می‌توان بدین صورت بیان نمود که ماهواره سنتینل-۲ به دلیل دارا بودن قدرت تفکیک مکانی و طیفی مناسب‌تر از دیگر ماهواره‌های سنجش‌ازدور مانند مودیس MODIS، می‌تواند به‌طور وسیعی در پایش پیوسته وضعیت کیفی منابع آب سطحی کوچک‌مقیاس مانند رودخانه‌ها و مخازن مورد استفاده قرار گیرد. از طرف دیگر این ماهواره به دلیل برخورداری از قدرت تفکیک زمانی بالاتر نسبت به دیگر ماهواره‌های سنجش‌ازدور مانند اسپات SPOT و لندست LANDSAT می‌تواند در فاصله‌های زمانی کوتاه‌مدت غلظت پارامترهای مختلف کیفیت آب را برآورد نماید و زمان نمونه‌برداری‌های میدانی را تا حدود زیادی کاهش دهد. همچنین شایان ذکر است که سنتینل-۲ برخلاف اندازه‌گیری‌های میدان که هزینه مالی بالایی دارند، پایش کیفیت آب را به دلیل رایگان بودن تصاویر آن، می‌تواند با هزینه بسیار پایین‌تری انجام دهد. از آنجایی که مطالعه حاضر برای رودخانه کارون انجام گرفته، لذا به‌منظور بررسی جامعیت و کارایی شاخص‌های استفاده‌شده پیشنهاد می‌شود که این ارزیابی روی سایر رودخانه‌های کشور انجام شود تا دقت الگوریتم‌ها و تصاویر مورد استفاده برای نواحی مختلف بررسی گردد.
- منابع مورد استفاده**
- اسفندیاری درآباد، ف.، زمحمدی سلطان‌آباد و ا. گل دوست. ۱۳۹۳. اعتبارسنجی سیستم استنتاج تطبیقی عصبی-فازی (ANFIS) در برآورد فرسایش و رسوب (مطالعه موردی: حوزه نوران). اولین کنفرانس ملی جغرافیا، گردشگری، منابع طبیعی و توسعه پایدار. موسسه ایرانیان، قطب علمی برنامه ریزی و توسعه پایدار گردشگری دانشگاه تهران، پژوهشکده گردشگری و انجمن گردشگری، تهران، ۳۰ بهمن ماه، ۱-۱۲.
  - اسماعیلی، م.، م. پسندی و م. هاشمی اصفهانیان. ۱۳۹۵. تخمین مدل الاستیسیته سنگ بکر با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون غیرخطی. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۶(۳): ۱۰-۲۸.
  - آقابرایان خ. ۱۳۸۵. بررسی هیدروشمایی و احتمال آلودگی منابع آب دشت میداود-سرله. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده علوم زمین، گروه زمین‌شناسی. ۱۴۷ صفحه.
  - بهاروند، س. و س. سوری. ۱۳۹۴. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: حوزه سپیددشت، لرستان). نشریه سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (کاربرد سنجش‌ازدور و GIS در منابع طبیعی)، ۶(۴): ۱۵-۳۱.
  - چالکش امیری، م. ۱۳۹۲. اصول تصفیه آب. چاپ دهم، اصفهان، انتشارات ارکان دانش، ۴۵۲ صفحه.
  - حسین‌پورنیکنام، ح.، م. اژدری مقدم و م. خسروی. ۱۳۹۱. پیش‌بینی خشک‌سالی یک‌ساله با استفاده از مدل فازی-عصبی، سری‌های زمانی خشک‌سالی و شاخص‌های اقلیمی (مطالعه موردی: زاهدان). مجله آب و فاضلاب، ۲(۲): ۴۲-۵۱.
  - شکاری، م. ح.، س. ج. ساداتی نژاد، ع. ولی، ه. قاسمیه و ر. قضاوی. ۱۳۹۲. کاربرد دو روش شبکه عصبی مصنوعی MLP، RBF در برآورد رسوبات بادی (مطالعه موردی: دشت کرسیا داراب). فصلنامه علمی-پژوهشی پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۳(۱۲): ۱-۱۶.
  - عبدالله‌پور آزاد، م. ر. و م. ت. ستاری. ۱۳۹۴. پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه اهرچای با استفاده از روش‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و مقایسه آن با سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS). نشریه پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک، ۲۲(۱): ۲۸۷-۲۹۸.
  - عزت‌آبادی‌پور، ح. ۱۳۹۵. معرفی تصاویر ماهواره سنتینل-۲. سومین کنفرانس بین‌المللی نوآوری‌های اخیر در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی، ۱۸ تا ۱۹ شهریور، تهران، موسسه آموزش عالی نیکان، ۱-۸ صفحه.
  - عظیمی نجارکلایی، ا.، ع. ا. جمالی و ز. حسینی. ۱۳۹۶. طبقه‌بندی سری زمانی تصاویر لندست در پایش تغییرات کاربری اراضی. نشریه سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (کاربرد سنجش‌ازدور و GIS در منابع طبیعی)، ۸(۲): ۳۳-۴۷.
  - عظیمی، ع.، ک. رنگزن، م. کابلی‌زاده و م. خرمیان. ۱۳۹۴. برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از سنجش‌ازدور، شبکه‌های عصبی مصنوعی و مقایسه آن با روش پنمن-مانتیت-فائو در

19. Bagherian-Marzouani M, Akhoundali AM, Moazed H, Jaafarzadeh N, Ahadian J, Hasoonizadeh H. 2014. Evaluation of Karun river water quality scenarios using simulation model results. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 2(2): 339-358.
20. Chen Q, Wu W, Blanckaert K, Ma J, Huang G. 2012. Optimization of water quality monitoring network in a large river by combining measurements, a numerical model and matter-element analyses. *Journal of Environmental Management*, 110: 116-124.
21. Clay Barrett D, Frazier A. 2016. Automated method for monitoring water quality using Landsat imagery. *Water*, 8(6): 257-269.
22. Du Y, Zhang Y, Ling F, Wang Q, Li W, Li X. 2016. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. *Remote Sensing*, 8(4): 354-372.
23. Lailia NL, Arafah F, Jaelani A, Pamungkas AD. 2015. Development of water quality parameter retrieval algorithms for estimating total suspended solids and chlorophyll-A concentration using Landsat-8 imagery at Poteran island water. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-2/W2*, 2015. Joint International Geoinformation Conference 2015, 28-30 October 2015, Kuala Lumpur, Malaysia, Vol. 2, 55-62.
24. Liu H, Li Q, Shi T, Hu S, Wu G, Zhou Q. 2017. Application of sentinel 2 MSI images to retrieve suspended particulate matter concentrations in Poyang Lake. *Remote Sensing*, 9(7): 761-783.
25. Liu J, Zhang Y, Yuan D, Song X. 2015. Empirical estimation of total nitrogen and total phosphorus concentration of urban water bodies in china using high resolution ikonos multispectral imagery. *Water*, 7(11): 6551-6573.
26. Main-Knorn M, Pflug B, Debaecker V, Louis J. 2015. Calibration and validation plan for the I2a processor and products of the Sentinel-2 mission. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-7/W3*, 2015. 36th International Symposium on Remote Sensing of Environment, 11-15 May 2015, Berlin, Germany. 1249-1255.
27. Navarro G, Caballero I, Silva G, Parra P-C, Vázquez Á, Caldeira R. 2017. Evaluation of forest fire on Madeira Island using Sentinel-2A MSI imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 58(2): 97-106.
28. Su T-C, Chou H-T. 2015. Application of multispectral sensors carried on unmanned aerial vehicle (UAV) to trophic state mapping of small  
باغات مرکبات شمال خوزستان. نشریه سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (کاربرد سنجش‌ازدور و GIS در منابع طبیعی)، ۶(۴): ۶۱-۷۵.
۱۲. علیزاده، ب.، خ. معروفی و م. ح. حیدری فرد. ۱۳۹۲. ارزیابی میزان ماده حاصل از شبکه عصبی مصنوعی در چهارچوب چینه‌نگاری سکانشی: مطالعه موردی از سازند پابده در میدان نفتی مارون. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۳(۱): ۲۱-۳۰.
۱۳. فتاحی مقدم، م. ۱۳۹۰. ارزیابی قابلیت سنجنده هایپریون، فیلداسپیک ۳ و داده‌های زمینی برای برآورد پارامترهای کیفیت آب در رودخانه کارون مقطع شهر اهواز. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده علوم زمین، گرایش سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی. ۱۳۵ صفحه.
۱۴. کابلی زاده، م.، ک. رنگزن. و ش. محمدی. ۱۳۹۷. کاربرد تلفیق تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ و سنتینل-۲ در پایش محیطی. نشریه سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (کاربرد سنجش‌ازدور و GIS در منابع طبیعی)، ۹(۳): ۵۳-۷۱.
۱۵. معصومی، ب. و ر. محمدی. ۱۳۹۱. اصول تصفیه آب. چاپ اول، تبریز، انتشارات فروزش، ۲۸۸ صفحه.
۱۶. مومی پور، م. ۱۳۹۵. مطالعه کیفیت آب‌های ساحلی با تصاویر ماهواره‌ای فراترینی - Hyperion (مطالعه موردی: ساحل اروندکنار). مجله علوم و فنون دریایی، ۱۵(۱): ۱۱۱-۱۲۰.
۱۷. میر علیزاده فر، س.ر. و ش. منصوری. ۱۳۹۸. ارزیابی شاخص‌های سنجش‌ازدور در مطالعات کمی و کیفی آب‌های سطحی با تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ (مطالعه موردی: جنوب استان خوزستان). نشریه سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (کاربرد سنجش‌ازدور و GIS در منابع طبیعی)، ۱۰(۲): ۶۳-۸۴.
۱۸. یعقوبی، ث.، م. فرامرزی، ح. کریمی و ج. سروریان. ۱۳۹۵. ارزیابی کارایی شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی روند بیابان‌زایی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS (مطالعه موردی: دشت دهلران، ایلام). نشریه سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (کاربرد سنجش‌ازدور و GIS در منابع طبیعی)، ۷(۳): ۶۱-۷۷.

- reservoirs: a case study of Tain-Pu reservoir in Kinmen, Taiwan. *Remote Sensing*, 7(8): 10078-10097.
29. 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): 640-658.
30. Xiao X, Jian X, Xiongfei W, Chengfang H, Xuejun C, Zhaohui W, Dengzhong Z. 2015. Evaluation Method of Water Quality for River Based on Multi-Spectral Remote Sensing Data. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-7/W3, 2015. 36th International Symposium on Remote Sensing of Environment, 11–15 May 2015, Berlin, Germany. 1517-1523.
31. Zheng G, DiGiacomo PM. 2017. Uncertainties and applications of satellite-derived coastal water quality products. *Progress in Oceanography*, 159: 45-72.





## Modeling and zoning water quality parameters using Sentinel-2 satellite images and computational intelligence (Case study: Karun river)

K. Rangzan <sup>1\*</sup>, M. Kabolizade <sup>2</sup>, M. Rahshidian <sup>3</sup>, H. Delfan <sup>4</sup>

1. Assoc. Prof. Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

2. Assist. Prof. Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

3. Lecturer, Department of Surveying Engineering, Faculty of Civil Engineering, Jundi Shapur University of Technology, Dezfoul, Iran

4. MSc. Student, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 2 June 2018

Accepted 4 November 2019

Available online 15 January 2020

#### Keywords:

Monitoring

Sentinel-2 images

Artificial neural network (ANN)

Adaptive Neuro fuzzy inference system (ANFIS)

Karun river

### ABSTRACT

Considering the progress made in remote sensing technology, collecting information on the quality of surface water resources by this technology, while reducing the cost and time of traditional sampling, can monitor all surface water zones. In this study, the Sentinel-2 satellite images were used to estimate the concentration of acidity, bicarbonate and sulfate parameters. Initially, Sentinel-2 satellite images were pre-processing and then bands and spectral indexes were determined to identify the significant relationship between the parameter values of water quality and images using the multivariate regression method. In the next stage, using Artificial neural network (ANN) and Adaptive Neuro fuzzy inference system (ANFIS) models, the relationship between Sentinel-2 satellite images and water quality parameters were modeled and then their accuracy was calculated for real values. The results showed that in the modeling of sulfate parameter using Sentinel-2 satellite, ANFIS model with relative error equal to 0.0773 and RMSe equal to 0.8014 has a higher accuracy compared to ANN models with relative error equal to 0.1581 and RMSe equal to 1.2477. While, the relative error of the results of the ANN model are obtained 0.0064 and 0.0556 for acidity and bicarbonate parameter, respectively, and RMSe is equal to 0.0702 and 0.2691, respectively. The ANFIS model has a relative error of 0.0165 and 0.0722, and RMSe is 0.1975 and 0.3037 for acidity and bicarbonate parameter, respectively. Finally, using satellite images, the mentioned models were applied to prepare a qualitative map of each parameter along the part of the Karun river.

\* Corresponding author e-mail address: [kazemrangzan@scu.ac.ir](mailto:kazemrangzan@scu.ac.ir)