



تخمین غلظت رسوبات معلق با استفاده از ترکیب تکنیک سنجش از دور و مدل درختی M5

جواد ظهیری^۱، زینب مولایی^۲

تاریخ ارسال: ۱۳۹۸/۱۱/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۱

مقاله علمی-پژوهشی

چکیده

برآورد غلظت رسوب معلق یکی از مهمترین مباحث مهندسی رودخانه است که می تواند به عنوان شاخص تغییر کاربری اراضی، مطالعات کیفیت آب و کلیه پروژه های مرتبط با سازه های رودخانه ای مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق از تصاویر سنجنده مادیس (MODIS) و اطلاعات هیدرولوژیکی به همراه مدل درختی M5 جهت برآورد غلظت رسوب معلق در ایستگاه اهواز در رودخانه کارون استفاده شده است. در این مطالعه، ۱۱۰ تصویر از سنسور مادیس در ماهواره Terra برای روزهای مربوط به اندازه گیری های میدانی بار معلق رسوب برای سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ استفاده گردید. پارامترهای ورودی مدل درختی در این مطالعه، دبی جریان و باندهای قرمز (R)، مادون قرمز (NIR) و نسبت باندهای NIR/R استخراج شده از تصاویر مادیس بوده است. سه معادله رگرسیونی توسط مدل M5 برای تخمین غلظت رسوب در ایستگاه اهواز ارائه شده است که می تواند در شرایط مختلف دبی جریان و نسبت NIR/R به کار رود. نتایج تجزیه و تحلیل آماری نشان می دهد که مدل M5 از روش منحنی سنجه رسوب که از رایج ترین روش های تخمین بار رسوب معلق است، عملکرد بهتری داشته است. شاخص کارایی ناش-ساتکلیف برای مدل M5 ۰/۵۸ بدست آمد، این در حالی است که مقدار این ضریب برای روش منحنی سنجه رسوب برابر با ۰/۲۴ محاسبه گردید. نتایج نسبت اختلاف نشان می دهد که در دبی های بالا، کارایی روش منحنی سنجه رسوب به شدت کاهش می یابد، در حالیکه مدل درختی نتایج قابل قبولی را ارائه می دهد. تجزیه و تحلیل حساسیت عام در مدل M5 نشان می دهد که ۹۳٪ از واریانس خروجی تابع تأثیرات اصلی پارامترهای ورودی و کمتر از ۷٪ متعلق به اثرات متقابل است. در میان تأثیرات اصلی، دو پارامتر دبی جریان و نسبت باندهای به ترتیب با ۷۳٪ و ۱۲٪ بیشترین تأثیر را بر روی واریانس خروجی داشته اند.

واژه های کلیدی: غلظت رسوبات معلق، مدل درختی M5، سنجنده مادیس، حساسیت عام

^۱دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ایران، ۰۹۱۶۶۵۳۱۸۹۶، Email: j.zahiri@asnruk.ac.ir (نویسنده مسئول)

^۲دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه های آبی، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ایران، Email: mollaei.z139@gmail.com، ۰۹۳۹۸۹۲۸۰۱۷

مقدمه

غلظت رسوب معلق یکی از مهمترین پارامترهای کیفیت در آب‌های ساحلی، رودخانه‌ای و خلیج‌ها است که توسط محققان مهندسی رودخانه و محیط زیست به دلیل نقش مهمی که در ژئومورفولوژی کانال‌ها، دشت‌های سیلابی و چرخه‌های بیوشیمیایی دارد مورد توجه قرار گرفته است (Park and Latrubesse, 2014, Li and Li, 2016). غلظت بالای رسوب معلق بر انتقال موجودات آبری و باروری فیتوپلانکتونها و کل سیستم آبریان تأثیرگذار است (Min et al., 2012). برای بررسی تغییرات محیطی رسوبات مانند تغییرات مورفولوژیکی رودخانه و کیفیت آب و تأثیرات منفی بر روی اکوسیستم-های آبی، لازم است انتقال رسوبات در رودخانه‌ها به دقت بررسی شود (Wang and Lu, 2010). بسیاری از فرمول-های انتقال رسوب بر این فرض استوار هستند که میزان انتقال رسوب را می‌توان تنها با در نظر گرفتن پارامترهای جریان تعیین کرد. صحت روابط ارائه شده در این زمینه در اغلب موارد بر اساس داده‌های محدود جمع‌آوری شده در شرایط آزمایشگاهی صورت گرفته است. به دلیل عدم امکان تعمیم فرضیات، کاربرد چنین معادلاتی برای شرایط متفاوت دیگر اغلب با کاهش کارایی این روابط همراه است. این محدودیت منجر به تفاوت قابل توجه در نتایج معادلات مختلف انتقال رسوب با یکدیگر و با مقادیر مشاهداتی شده است (Yang, 1996). سنجش از دور علم و هنر کسب اطلاعات از پدیده‌ها و اجسام، بدون تماس با آنها است. به عبارت دیگر با عکس‌العمل پدیده‌ها به نور، به چپستی آنها پی برده می‌شود. استفاده از سنجش از دور برای ارزیابی پارامترهای کیفی آب به وضوح توانایی اندازه‌گیری‌های سینوپتیک، مکرر و ارزان توسط هواپیماها و فضاپیماها را نشان می‌دهد. در نتیجه بازتاب طیفی سنجش از راه دور اندازه‌گیری شده توسط سنسورهای ماهواره‌ای می‌تواند یک جایگزین سریع و یک رویکرد اقتصادی برای ارزیابی غلظت رسوب معلق در اقیانوس‌ها، دریاها، رودخانه‌ها و آب‌های ساحلی باشد (Moridnejad

et al., 2015). از جمله عواملی که در میزان بازتاب طیفی آب نقش دارند، میزان غلظت و اندازه ذرات رسوبی معلق در آب و همچنین حضور و تمرکز مواد آلی و غیر آلی معلق و عمق آب می‌باشد. به منظور تعیین غلظت رسوب معلق از تابش خروجی از سطح آب و بازتاب شده به سنجنده، در ابتدا باید رابطه انتقال تابش بین ویژگی‌های اپتیکی آب و تابش‌های اندازه‌گیری شده توسط سنجنده به صورت تئوری مورد استفاده قرار گیرد. به طور تجربی، رابطه انتقال از طریق مقایسه میدانی با داده‌های هم‌زمان ماهواره‌ای بعد از حذف تأثیر اتمسفر مدل می‌شود. تحلیل رگرسیونی یک روش تجربی مرسوم برای مدل‌سازی تابع انتقال است. با این حال تحلیل رگرسیونی در مدل‌سازی توابع غیرخطی محدودیت‌هایی دارد (طباطبایی و همکاران، ۱۳۹۱). این مسئله به این خاطر است که تغییرات میزان غلظت رسوب در آب بسیار پیچیده بوده و ممکن است در یک کلاس غلظت به‌عنوان مثال (۲۰ تا ۴۰۰ میلی‌گرم) از رابطه خطی و از ۴۰۰ میلی‌گرم به بالا از رابطه غیرخطی پیروی کند (شفاعی بجستان، ۱۳۸۷). در زمینه برآورد رسوب معلق با استفاده از عکس‌های ماهواره‌ای تحقیقات متعددی صورت گرفته که از آن جمله می‌توان به Cai et al. (2015) اشاره کرد. آنها با استفاده از داده‌های سنجنده TM لندست OIL و اندازه‌گیری در محل به بررسی تغییرات مکانی غلظت رسوب معلق ناشی از پل خلیج Hang Zhao در آب‌های ساحلی شرق دریای چین پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در دو طرف پل تفاوت قابل توجهی در میزان غلظت رسوب معلق در آب است. (Moridnejad et al. (2015) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و تصاویر سنجنده مادیس و داده‌های میدانی غلظت رسوب معلق در سواحل جنوبی دریای خزر، به تخمین غلظت رسوب معلق پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و تصاویر سنجنده مادیس جهت نظارت بر رسوب معلق در سواحل دریای خزر مناسب می‌باشد. Robert et al. (2016) میزان کدورت و غلظت رسوب معلق در مخزن سد Bagre در بورکینافاسو را با استفاده از محصولات MYD09Q1، MOD09Q1، MODIS و داده‌های باند

¹ Suspended Sediment Concentration

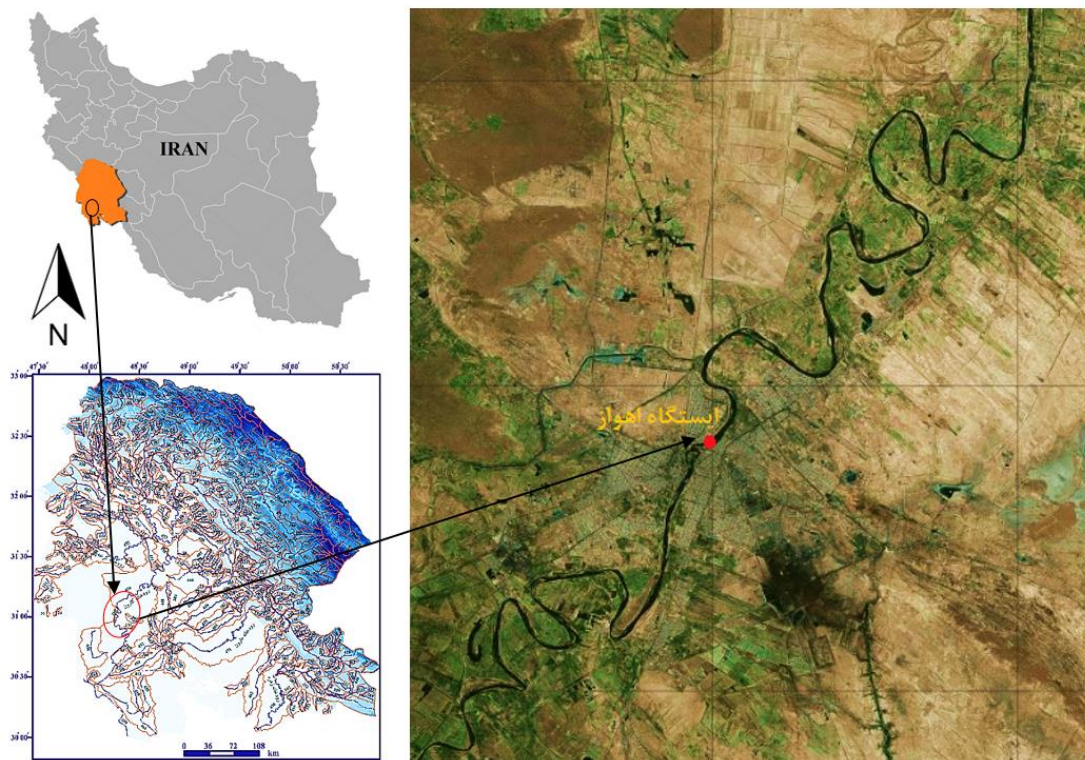
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه رودخانه کارون در محل ایستگاه اهواز واقع در مختصات ۴۵ درجه و ۳۵ دقیقه و ۲۳ ثانیه طول جغرافیایی شرقی و ۳۱ درجه و ۲۰ دقیقه و ۹ ثانیه عرض جغرافیایی شمالی می‌باشد. رودخانه کارون با طول ۹۵۰ کیلومتر، پرآب‌ترین و بزرگ‌ترین رودخانه ایران است و تنها رودی است که بخشی از آن قابل کشتی‌رانی است. مساحت حوضه آبخیز این رودخانه ۶۶۳۵۲ کیلومترمربع، متوسط ارتفاع آن ۱۵۳۷ متر و شیب متوسط آن ۲۴ درصد می‌باشد. پهنای این رودخانه در قسمت‌های کوهستانی بین ۲۵ تا ۴۰ متر و در دشت بالادست اهواز ۲۵۰ الی ۴۰۰ متر بوده و ژرفای آن در حوالی اهواز به ۵ الی ۷ متر می‌رسد. نمایی از موقعیت قرارگیری رودخانه کارون و ایستگاه هیدرومتری اهواز در شکل (۱) ارائه شده است

قرمز و مادون قرمز تخمین زدند. آنها دریافتند که نسبت باند مادون قرمز به باند قرمز، مناسب‌ترین ترکیب برای ارزیابی غلظت رسوب معلق و کدورت برای هر دو طیف سنجی و تابش‌های سنجنده MODIS است.

در این مطالعه از تصاویر مادیس و داده‌های هیدرولوژیکی به همراه مدل M5 برای تخمین غلظت رسوب معلق رودخانه کارون استفاده شده است. با توجه به اینکه غلظت رسوب در رنج‌های مختلف رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهد، در این تحقیق از مدل M5 برای تقسیم فضای مساله و ارائه معادله رگرسیونی برای هر زیر دامنه استفاده شده است. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل حساسیت عام برای شناسایی اثر هر پارامتر ورودی و اثر متقابل پارامترهای مختلف بر غلظت رسوب انجام گردید.



شکل (۱): موقعیت قرارگیری رودخانه کارون و ایستگاه هیدرومتری اهواز

اطلاعات مورد استفاده

در این تحقیق از داده‌های دبی جریان روزانه و غلظت رسوب معلق مربوط به ایستگاه آب‌سنجی اهواز (یکی از ایستگاه‌های آب‌سنجی رودخانه کارون) و تصاویر سنجنده مادیس استفاده گردید. داده‌های غلظت رسوب و دبی جریان مربوط به سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۴ بوده که به‌منظور مطابقت با دوره زمانی داده‌های سنجنده مادیس، از اطلاعات مربوط به سال (۲۰۱۵-۲۰۰۰) میلادی استفاده گردید. داده‌های دبی جریان و غلظت رسوب از سازمان آب و برق خوزستان جمع‌آوری شده است.

سنجنده مادیس بر روی ماهواره‌های ترا و آکوا نصب شده است. این سنجنده با دارا بودن ۳۶ باند قادر است اطلاعات دریافتی از سطح زمین را در محدوده طیفی ۰/۴ تا ۱۴/۴ میکرومتر و با عرض پوشش ۲۳۴۰ کیلومتر ثبت نماید. قدرت تفکیک مکانی باندهای مذکور از ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ متر متغیر می‌باشد (امیدوار و نوری، ۱۳۹۳). در این مطالعه از تصاویر سنجنده مادیس بر روی ماهواره ترا استفاده گردید که به‌صورت روزانه و متشکل از داده‌های بازتاب سطحی در دو باند قرمز (۶۲۰ تا ۶۷۰ نانومتر) و مادون قرمز نزدیک (۸۴۱ تا ۸۷۶ نانومتر) با قدرت تفکیک‌پذیری مکانی ۲۵۰ متر در دسترس می‌باشند. بر روی این تصاویر پیش‌پردازش‌های مقدماتی مانند تصحیحات هندسی، رادیومتری و اتمسفری انجام شده است. روش معمول تخمین غلظت رسوب معلق از طریق سنجش از دور ایجاد ارتباط میان بازتابش سنجش از دور اندازه‌گیری شده توسط سنجنده و غلظت رسوب معلق سطحی ستون آب می‌باشد. برای استخراج بازتاب مربوط به هر باند از نرم افزار ENVI5.1 استفاده شد. در این پژوهش علاوه بر باندهای قرمز و مادون قرمز، از نسبت-گیری طیفی بین بازتاب باندهای قرمز و مادون قرمز نیز برای تخمین غلظت رسوب معلق استفاده شد. در نسبت-گیری باندی مقادیر درجه روشنایی یک باند طیفی به باند طیفی قابل انطباق دیگر تقسیم می‌شود که با هدف متمایز ساختن تفاوت‌هایی که توسط تغییرات روشنایی در تک باندها ممکن نیست به کار می‌رود (دستورانی و همکاران، ۱۳۹۱). در این تحقیق بعد از حذف تصاویر دارای شرایط

ابری و داده‌های پرت غلظت رسوب معلق، تعداد ۱۱۰ تصویر باقی ماند و مورد بررسی قرار گرفت.

در این تحقیق ابتدا تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از نرم‌افزارهای ENVI5.1 و ARCGIS10.1 مورد بازبینی قرار گرفته و در صورت وجود شرایط ابری و سایر اشکالات رادیومتریکی از محاسبات حذف شدند. سپس پیکسل موردنظر انتخاب و مقادیر بازتاب سطحی رودخانه از آن پیکسل استخراج شد و مورد استفاده قرار گرفت. برای انتخاب پیکسل مناسب مواردی نظیر عرض رودخانه، قدرت تفکیک مکانی سنجنده و مختصات جغرافیایی ایستگاه مورد توجه قرار گرفت. همچنین داده‌های غلظت رسوب معلق نیز با استفاده از نرم‌افزار SPSS مورد بازبینی قرار گرفته و داده‌های پرت و مشکوک از محاسبات کنار گذاشته شدند. پس از آن نرمال بودن داده‌ها، با استفاده از آزمون آماری SPIRO-WILK مورد ارزیابی قرار گرفته و با توجه به عدم نرمال بودن داده‌ها به مبنای لگاریتم طبیعی تبدیل شدند.

مدل درختی M5

الگوریتم درختی مورد استفاده در این تحقیق، الگوریتم M5 بوده که اولین بار توسط (Quinlan 1992) ابداع شد و پس از آن توسط (Wang and Witten 1996) توسعه و بهبود یافت. روش M5 شاخه‌های خود را به صورت دوتایی و تنها براساس یک متغیر ایجاد می‌کند، بدین گونه که بر اساس شرطی که در هر گره تعریف می‌شود، اطلاعات در آن گره به دو قسمت تقسیم می‌شود. در روش M5 فضای مساله به زیر دامنه‌هایی تقسیم شده و برای هر زیر دامنه یک مدل رگرسیون خطی چند متغیره برآزش داده می‌شود. این مدل تنها قادر به شبیه‌سازی مدل‌های خطی بوده که این امر با اساس معادلات متداول در زمینه غلظت رسوب معلق در تناقض است. بر همین اساس کلیه داده‌ها به صورت لگاریتم طبیعی به مدل معرفی شدند تا پس از خارج کردن روابط از حالت لگاریتمی به صورت روابط توانی تبدیل شوند. در طی ساخت مدل درختی توسط الگوریتم M5 فرآیند جداسازی در گره‌های تقسیم ممکن است بارها تکرار شده و در

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} DR^2} \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum(SSC_{me} - SSC_{es})^2}{\sum(SSC_{me} - \overline{SSC_{me}})^2} \quad (4)$$

در روابط بالا N تعداد مشاهدات، SSC_{me} غلظت رسوب مشاهداتی و SSC_{pr} غلظت رسوب برآورد شده می-باشد. ضریب تبیین نشان‌دهنده تطابق مقادیر محاسباتی و مشاهداتی می‌باشد. هرچه R^2 به یک نزدیک‌تر باشد نشان-دهنده عملکرد بهتر مدل می‌باشد. در این پژوهش دقت عملکرد مدل‌ها به صورت درصد مقادیر DR که بین ۰/۳- و ۰/۳+ می‌باشد، تعریف شده است. ضریب ناش-ساتکلیف از دیگر معیارهای قدرتمند آماری بوده که چنانچه مقدار آن بیشتر از ۰/۷ باشد، نتایج خوب و در صورتیکه بین ۰/۴ و ۰/۷ باشد، نتایج رضایت بخش و در غیراینصورت، نتایج غیرقابل قبول خواهند بود (Wu et al., 2017).

تحلیل حساسیت عام

در این تحقیق از روش مونت کارلو برای محاسبه شاخص‌های مرتبه اول و کل اثرات پارامترها با توجه به روش ارائه شده توسط Saltelli et al. (2008) استفاده شده است. تحلیل حساسیت عام یکی از بهترین روشها برای برآورد شاخص‌های حساسیت براساس مقادیر برآورد شده توسط مدل است. در این روش، اثر اصلی عامل X بر خروجی با شاخص حساسیت مرتبه اول نشان داده می‌شود که مقداری بین ۰ تا ۱ می‌تواند داشته باشد. کل اثرات یک متغیر شامل اثر اصلی متغیر و نیز تاثیرات متقابل آن متغیر بر روی خروجی را شامل می‌شود (Saltelli et al., 2008). در این مطالعه، شاخص‌های حساسیت برای چهار پارامتر ورودی مستقل شامل دبی جریان، باندهای قرمز و مادون قرمز و نیز نسبت باندهای محاسبه گردید. بر این اساس دو ماتریس A و B که شامل اعداد شبه تصادفی است، ایجاد گردید. تعداد اعداد تصادفی در این مطالعه برابر با ۱۰۰۰۰ در نظر گرفته شد. در این روش برای هر پارامتر ورودی (V_i)، ماتریس دیگری در نظر گرفته می‌شود که شامل همه ستون‌های ماتریس

نتیجه درخت بسیار بزرگی ایجاد شود. در این حالت مدل دچار بیش برازش^۱ شده که از طریق هرس کردن^۲ می‌توان این مشکل را رفع کرد. عمل هرس کردن باعث کاهش خطای مورد انتظار جهت داده‌های غیر آموزشی می‌شود (ظهیری، ۱۳۹۴). پس از هرس کردن، مدل‌های خطی مورد استفاده در برگ‌های مجاور درخت هرس شده به شدت دچار ناپیوستگی می‌گردند که این امر سبب از بین رفتن پیوستگی سیستم می‌گردد. بر همین اساس می-بایستی از مکانیزم هموارسازی^۳ جهت رفع ناپیوستگی ایجاد شده در مدل‌های خطی استفاده نمود. در این فرآیند مقدار تخمین زده شده در هر برگ تصحیح می‌شود. چنانچه نمونه مورد نظر در شاخه Si از زیر درخت S باشد، n_i تعداد نمونه‌های آموزشی در Si، $PV(Si)$ مقدار محاسبه شده در Si و $M(S)$ مقدار محاسبه شده توسط مدل در S باشد، آنگاه مقدار اصلاح شده ($PV(Si)$) از رابطه زیر محاسبه خواهد شد.

$$PV = \frac{ni \times pv(si) + k \times M(s)}{ni + k}$$

در رابطه فوق k ثابت هموارسازی بوده که به صورت پیش‌فرض برابر ۱۵ در نظر گرفته می‌شود. هموارسازی به ویژه در مواقعی که مدل‌های خطی در برگ‌های مجاور، مقادیر کاملاً متفاوتی ارائه می‌دهند و یا مدل‌هایی که بر اساس داده‌های آموزشی محدود ساخته می‌شوند، می‌تواند به میزان زیادی مؤثر باشد (Wang and Witten, 1996).

برای ارزیابی عملکرد مدل درختی به‌دست‌آمده در مرحله آموزش و صحت‌سنجی و مقایسه آن با نتایج به‌دست‌آمده از منحنی سنجه رسوب از پارامترهای ضریب تبیین (R^2)، نسبت اختلاف (DR) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب ناش-ساتکلیف (NSE) استفاده شد. این پارامترها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(SSC_{me} - \overline{SSC_{es}})^2}{\sum(SSC_{me} - \overline{SSC_{me}})^2} \quad (1)$$

$$DR = \log \frac{SSC_{es}}{SSC_{me}} \quad (2)$$

¹ Overfitting

² Pruning

³ Smoothing process

نتایج و بحث

نتایج مدل درختی M5 در برآورد غلظت رسوب

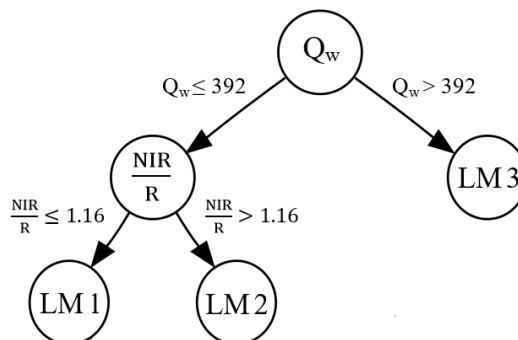
در این تحقیق مقادیر دبی جریان، باند قرمز (R)، مادون قرمز (NIR) و نسبت باندی (NIR/R) به عنوان متغیرهای ورودی و غلظت رسوب معلق (SSC) به عنوان متغیر خروجی در نظر گرفته شد. از آنجا که مدل درختی تنها معادلات خطی ارائه می‌دهد و با توجه به اینکه معادلات رسوب غالباً به صورت توانی هستند، از لگاریتم طبیعی جهت معرفی متغیرها به مدل درختی استفاده گردید. بعد از خارج کردن مقادیر از حالت لگاریتم، ساختار درختی M5 به صورت شکل (۲) ارائه گردید. همچنین معادلات رگرسیونی ارائه شده توسط مدل به صورت معادلات (۷) تا (۹) خواهند بود

B بوده به جز ستون i ام که از ماتریس A گرفته شده است. جهت محاسبه اثرات اصلی و متقابل مربوط به هر کدام از پارامترها از معادلات زیر استفاده گردید:

$$S_i = \frac{V[E(Y|X_i)]}{V(Y)} = \frac{y_A \cdot y_{C_i} - f_0^2}{y_A \cdot y_A - f_0^2} = \frac{(1/N) \sum_{j=1}^N y_A^{(j)} \cdot y_{C_i}^{(j)} - f_0^2}{(1/N) \sum_{j=1}^N (y_A^{(j)})^2 - f_0^2} \quad (5)$$

$$S_{T_i} = 1 - \frac{V[E(Y|X_{-i})]}{V(Y)} = 1 - \frac{y_B \cdot y_{C_i} - f_0^2}{y_A \cdot y_A - f_0^2} \quad (6)$$

در روابط فوق $f_0^2 = \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_A^{(j)}\right)^2$ و y_C و y_B بردار خروجی مدل برای داده‌های ورودی ماتریس‌های A، B و C_i می‌باشند.



شکل (۲): ساختار درختی M5 جهت برآورد غلظت بار معلق رسوب

$$LM\ 1: SSC = 84.82 R^{0.37} \left(\frac{NIR}{R}\right)^{-0.45} Q_w^{0.08} \quad (7)$$

$$LM\ 2: SSC = 78.41 R^{0.43} \left(\frac{NIR}{R}\right)^{-0.53} Q_w^{0.08} \quad (8)$$

$$LM\ 3: SSC = 8.87 R^{1.84} NIR^{-1.33} \left(\frac{NIR}{R}\right)^{-0.52} Q_w^{0.54} \quad (9)$$

دو پارامتر در تخمین غلظت رسوب معلق می‌باشد. در دبی‌های پایین ($Q_w \leq 392$ m³/s)، پارامترهای دبی جریان، باند R و نسبت باندی در معادلات رگرسیونی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (معادلات (۷) و (۸)). توان دبی جریان در دو معادله مذکور برابر با ۰/۰۸ است که نسبت به معادله (۹) که برای دبی‌های بالا ارائه شده است، بسیار پایین می‌باشد. در دبی‌های سیلابی، تاثیر باند مادون قرمز افزایش یافته که با نتایج تحقیقات Gordon and Morel

در روابط فوق Q_w دبی جریان بر حسب m³/s و SSC غلظت رسوب معلق بر حسب mg/l می‌باشد. R و NIR به ترتیب نشان‌دهنده باندهای قرمز و مادون قرمز می‌باشند. براساس ساختار درختی ارائه شده توسط مدل M5، دبی جریان و نسبت باندی (NIR/R) به عنوان تقسیم‌کننده فضای مساله به کار رفته‌اند که نشان‌دهنده تاثیر بالای این

در رابطه فوق، Q_s دبی رسوب معلق بر حسب تن در روز بوده و ضرایب a و b ضرایب ثابت روش SRC بوده که برای هر رودخانه‌ای می‌بایستی از طریق رگرسیون محاسبه شوند. براساس اطلاعات مورد استفاده در مدل درختی M5، معادله نهایی زیر جهت روش SRC به دست آمد.

$$Q_s = 0.26Q_w^{1.58} \quad (11)$$

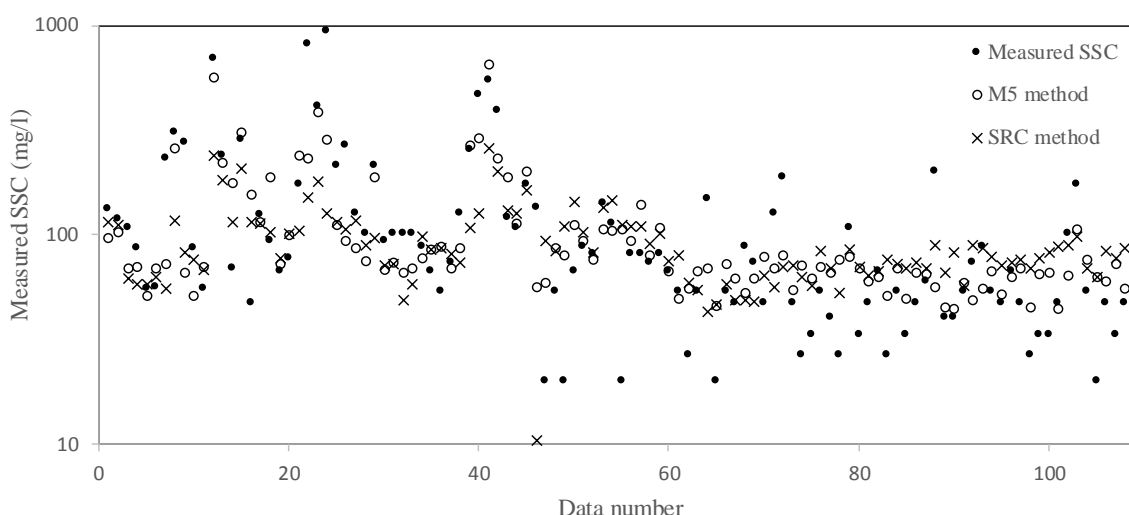
جهت مقایسه نتایج روش SRC و مدل درختی M5، مقادیر دبی رسوب به دست آمده از معادله (۱۱) به غلظت رسوب تبدیل شدند.

نتایج غلظت رسوب معلق برآورد شده توسط مدل درختی و روش SRC در شکل (۳) ارائه شده است

(1983) که نشان دادند که با افزایش غلظت، تاثیر باندهای با طول موج بالاتر افزایش می‌یابد، همخوانی دارد. بر اساس معادلات ارائه شده توسط مدل M5، داده‌های مادیس بر روی غلظت‌های پایین‌تر تاثیر بیشتری نسبت به غلظت‌های بالاتر دارند.

در این مطالعه جهت بررسی کارایی مدل درختی از روش منحنی سنج رسوب (SRC) استفاده گردید. اساس روش SRC، ایجاد یک رابطه خطی میان لگاریتم دبی رسوب و دبی جریان می‌باشد که از فرم کلی زیر تبعیت می‌کند.

$$Q_s = aQ_w^b \quad (10)$$



شکل (۳): مقادیر غلظت رسوب معلق برآورد شده توسط دو مدل درختی M5 و روش منحنی سنج رسوب

نقاط ضعف روش منحنی سنج رسوب به حساب بیاید. جهت تحلیل بهتر کارایی دو روش مورد استفاده از تحلیل‌های آماری متنوعی استفاده گردید که نتایج تحلیل‌های صورت گرفته در جدول (۱) ارائه شده است

در شکل (۳) جهت مقایسه بهتر کارایی دو روش مورد استفاده از مقیاس لگاریتمی جهت نشان دادن غلظت رسوب معلق استفاده شده است. با توجه به شکل ارائه شده، دقت مدل M5 به‌ویژه در غلظت‌های بالا، بیشتر از روش SRC است. این مورد می‌تواند یکی از مهمترین

جدول (۱): تحلیل آماری صورت گرفته بر روی دو روش محاسبه غلظت رسوب معلق

کل داده‌ها			مرحله صحت‌سنجی			مرحله آموزش			روش محاسبه SSC
RMSE	R^2	NSE	RMSE	R^2	NSE	RMSE	R^2	NSE	
۰/۳۱	۰/۴۱	۰/۲۴	۰/۲۰	۰/۴۱	۰/۳۴	۰/۴۲	۰/۴۰	۰/۲۰	منحنی سنج رسوب
۰/۱۴	۰/۶۴	۰/۵۸	۰/۰۲	۰/۷۹	۰/۵۸	۰/۲۵	۰/۵۸	۰/۵۷	M5

پارامتر، این مقدار در بازه رضایت‌بخش قرار می‌گیرد. این در حالی است که مقدار این ضریب برای روش SRC مقادیر بسیار پایینی را نشان می‌دهد که در بازه غیرقابل قبول قرار می‌گیرد. علاوه بر معیارهای فوق، جهت بررسی توزیع فراوانی نتایج به‌دست آمده از دو روش مورد استفاده از نسبت اختلاف استفاده گردید. تحلیل‌های صورت گرفته در این زمینه در جدول (۲) ارائه شده است.

با توجه به جدول (۱)، ضریب تبیین در مدل درختی مقادیر نزدیک‌تری به یک را در مقایسه با مدل SRC نشان می‌دهد. علاوه بر این مقدار RMSE در مدل M5 در هر دو مرحله آموزش و صحت‌سنجی کمتر از روش SRC می‌باشد. ضریب ناش-ساتکلیف که یکی از معیارهای قدرتمند در مقایسه روش‌های مختلف به حساب می‌آید، در مدل درختی در هر دو مرحله آموزش و صحت‌سنجی مقادیر نزدیک به ۰/۵۸ داشته است که بنابر تعریف این

جدول (۲): توزیع فراوانی نتایج دو مدل M5 و SRC بر اساس نسبت اختلاف

روش	$DR < -0.3$	$-0.3 < DR < 0$	$0 < DR < 0.3$	$DR > 0.3$	دقت	σ_{DR}	\overline{DR}_{max}	SK_{DR}
SRC	۱۷	۲۴	۴۴	۱۶	۶۸	۰/۳۱	۰/۷۳۶	-۰/۶۳
M5	۸	۲۸	۵۰	۱۵	۷۸	۰/۲۴	۰/۶۵۶	-۰/۰۳

مقادیر مثبت و منفی دارند ($SK_{DR} = -0.031$)، این در حالی است که مقادیر DR در مدل SRC بین ۱/۱- و ۰/۷۵ متغیر است که نشان‌دهنده چولگی این روش به سمت مقادیر منفی است ($SK_{DR} = -0.634$). مدل درختی دارای مقادیر σ_{DR} و \overline{DR}_{max} کمتری نسبت به مدل SRC می‌باشد که نشان‌دهنده برآورد مناسب‌تر مدل M5 در تخمین غلظت رسوب معلق است.

نتایج تحلیل حساسیت عام

در این تحقیق جهت بررسی تاثیرات مستقیم و متقابل پارامترهای مختلف بر روی غلظت رسوبات معلق از حساسیت عام استفاده گردید. نتایج آنالیز حساسیت عام در جدول (۳) ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست

با توجه به جدول (۲)، مدل M5 از دقت بالاتری (۷۸٪) در مقایسه با روش SRC با دقت ۶۸٪ برخوردار است. براساس مطالب گفته شده، مقادیر $DR > 0$ نشان‌دهنده بیش‌برآورد بودن مدل و مقادیر $DR < 0$ نشان‌دهنده کم‌برآورد بودن مدل در برآورد غلظت رسوب معلق می‌باشد. مقادیر $DR = 0$ نیز نشان‌دهنده مطابق بودن مقادیر مشاهداتی و محاسباتی می‌باشد. با توجه به جدول (۲)، ۱۷٪ از کل نمونه‌ها در روش SRC دارای $DR < -0.3$ (مقدار برآورد شده کمتر از نصف مقدار مشاهداتی) بوده که این مقدار برای مدل M5، ۸٪ محاسبه شده است. این مورد می‌تواند یکی از نقاط ضعف روش SRC جهت برآورد غلظت رسوب معلق به حساب بیاید. مقادیر DR در روش درختی بین ۰/۷۵- و ۰/۷۵ تغییر می‌کند که نشان می‌دهد در مدل M5، مقادیر DR چولگی پایینی نسبت به



رسوب داشته‌اند. با در نظر گرفتن باندهای قرمز و مادون قرمز، داده‌های سنجنده مادیس نزدیک به ۲۰٪ از واریانس خروجی را تحت تاثیر قرار داده‌اند که نزدیک به ۳۰٪ تاثیر دبی جریان بر روی غلظت رسوب را شامل می‌شوند.

آمده، ۹۳٪ از واریانس خروجی تحت تاثیر اثرات مستقیم پارامترهای ورودی بوده و تنها ۷٪ متاثر از اثرات متقابل می‌باشد. در بین پارامترهای مختلف، دبی جریان و نسبت باندی به ترتیب با ۷۳٪ و ۱۲٪ تاثیر مستقیم بر روی واریانس خروجی، بیشترین نقش را در برآورد غلظت

جدول (۳): تحلیل حساسیت عام برای مدل M5

ΣS	پارامتر			پارامتر حساسیت	
	NIR/R	NIR	R	Q _w	
۰/۹۳	۰/۱۲	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۷۳	S _i
۱/۶۸	۰/۲۷	۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۹۸	S _T

تحلیل‌های آماری نشان می‌دهد که ضریب ناش-ساتکلیف برای مدل M5 در هر دو مرحله آموزش و صحت سنجی نزدیک به ۰/۵۸ بوده که در محدوده رضایت بخش قرار می‌گیرد، این در حالی است که مقدار این ضریب برای روش منحنی سنجه کمتر از ۰/۴ بوده و نشان‌دهنده ضعیف بودن این روش در برآورد غلظت رسوب معلق می‌باشد. آنالیز حساسیت عام صورت گرفته بر روی پارامترهای ورودی نشان می‌دهد که ۷۳٪ واریانس خروجی تحت تاثیر دبی جریان بوده و ۲۰٪ واریانس خروجی مربوط به داده‌های سنجنده مادیس می‌باشد. بین پارامترهای مادیس، نسبت باندی بیشترین تاثیر را بر روی غلظت رسوب معلق داشته است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق از اطلاعات هیدرولوژیکی و داده‌های سنجنده مادیس با استفاده از مدل درختی M5 جهت برآورد غلظت رسوب معلق در ایستگاه هیدرومتری اهواز استفاده گردید. مدل درختی M5 بر اساس داده‌های آموزش، سه رابطه رگرسیونی را جهت برآورد غلظت رسوب ارائه داد که توان دبی جریان به ازای دبی‌های سیلابی به مراتب بیشتر از دبی‌های پایین بود که نشان‌دهنده تاثیر پایین داده‌های مادیس در برآورد غلظت رسوب در دبی‌های سیلابی دارد. نتایج روش منحنی سنجه رسوب نشان می‌دهد که این روش معمولاً غلظت رسوب را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند که این امر بویژه در غلظت‌های بالا بیشتر مشاهده می‌شود. نتایج

منابع

- امیدوار، ج. و س. نوری. ۱۳۹۳. راهنمای کاربردی نرم‌افزارهای سنجنش از دور. انتشارات صحرا، ص ۲۷۵.
- دستورانی، م.، خ. عظیمی فشی، ع. طالبی و م. اختصاصی. ۱۳۹۱. برآورد رسوب معلق با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز جامیشان استان کرمانشاه). پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، شماره ۶، ص ۶۱-۷۴.
- شفاعی بجستانی، م. ۱۳۸۷. هیدرولیک رسوب. انتشارات دانشگاه چمران، ص ۲۰۱.
- ظهیری، ج. ۱۳۹۴. کاربرد مدل‌های ناپارامتریک CART و M5 در محاسبه عمق آبستگي اطراف پایه‌های پل. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، شماره ۲۰، ص ۳۵-۵۰.

Cai, L., D. Tang and C. Li. 2015. An investigation of spatial variation of suspended sediment concentration induced by a bay bridge based on Landsat TM and OLI data. *Advances in Space Research*, 56: 293-303.

Gordon, H.R. and A.Y. Morel. 1983. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery: a review. Springer, New York.

Li, Y. and X. Li. 2016. Remote sensing observations and numerical studies of a super typhoon-induced suspended sediment concentration variation in the East China Sea. *Ocean Modelling*, 104: 187-202.

Min, J.E., J.H. Ryu, S. Lee and S. Son. 2012. Monitoring of suspended sediment variation using Landsat and MODIS in the Saemangeum coastal area of Korea. *Marine Pollution Bulletin*, 64: 382-390.

Moridnejad, A., H. Abdollahi, S.K. Alavipanah, J.M.V. Samani, O. Moridnejad and N. Karimi. 2015. Applying artificial neural networks to estimate suspended sediment concentrations along the southern coast of the Caspian Sea using MODIS images. *Arabian Journal of Geosciences*, 8: 891-901.

Park, E. and E.M. Latrubesse. 2014. Modeling suspended sediment distribution patterns of the Amazon River using MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 147: 232-242.

Quinlan, J.R. 1992. Learning with continuous classes. 5th Australian joint conference on artificial intelligence, 92: 343-348.

Robert, E., M. Grippa, L. Kergoat, S. Pinet, L. Gal, G. Cochonneau and J.M. Martinez. 2016. Monitoring water turbidity and surface suspended sediment concentration of the Bagre Reservoir (Burkina Faso) using MODIS and field reflectance data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52: 243-251.

Saltelli, A., M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana and S. Tarantola. 2008. *Global sensitivity analysis: the primer*. John Wiley & Sons, USA.

Wang, J.J. and X.X. Lu. 2010. Estimation of suspended sediment concentrations using Terra MODIS: An example from the Lower Yangtze River, China. *Science of the Total Environment*, 408: 1131-1138.

Wang, Y. and I.H. Witten. 1996. Induction of model trees for predicting continuous classes.

Wu, B., Z. Wang, Q. Zhang, N. Shen and J. Liu. 2017. Modelling sheet erosion on steep slopes in the loess region of China. *Journal of Hydrology*, 553: 549-558.

Yang, C. T. 1996. *Sediment transport: theory and practice*. McGraw-Hill, New York.



Estimation of Suspended Sediment Concentration Using Remote Sensing Technique and M5 Model Tree

Javad Zahiri^{*1}, Zeynab Mollaei²

Abstract

Estimation of suspended sediment concentration (SSC) is one of the most important issues of river engineering, which can be used as an indicator of land use change, water quality studies and all projects related to constructions in the rivers. In this research, M5 model tree and the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data have been used to estimate the SSC at Ahvaz station on the Karun River. In this study, 135 cloud free images of the MODIS sensor on the Terra satellite were obtained for days corresponding to field measurements of SSC for the years 2000 to 2015. Input parameters of the model tree in this study were flow discharge derived from hydrological data and red (R), near infrared (NIR) bands and NIR/R ratio extracted from MODIS imagery. Three regression equations have been developed by M5 model tree to estimate SSC at Ahvaz station, which can be employed in different conditions of discharge and NIR/R ratio. The results of statistical analysis illustrates that the M5 model outperforms the sediment rating curve (SRC) method, which is the most common method of estimating suspended sediment load. Nash-Sutcliffe efficiency index for the M5 model tree of 0.58 has been achieved which was much better than that of SRC method (0.24). At high fluxes, the efficiency of the SRC method is significantly reduced, while the model tree provides acceptable results. Global sensitivity analysis on M5 model showed that, 93% of output variance just determined by the main effects of input parameters and less than 7% belong to the interaction effects. 73% and 12% of output variance specified by the main effects of flow discharge and NIR/R ratio, respectively.

Keywords: Suspended sediment concentration. M5 model tree. MODIS. Global sensitivity

¹ Associate Professor, Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran, j.zahiri@asnrkh.ac.ir (corresponding author)

² Graduate of Water Structures, Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran, mollaei.z139@gmail.com



Estimation of Suspended Sediment Concentration Using Remote Sensing Technique and M5 Model Tree

Javad Zahiri^{*1}, Zeynab Mollaei²

Extended abstract

Introduction: Remote sensing technology consists of analyzing and describing the measurements obtained from the amount of electromagnetic radiation emitted from a target or reflected by a viewer or a device without contacting the target from a suitable vision point viewing or recording. The use of satellite imagery for assessing water quality parameters shows the ability of synoptic, frequent, and inexpensive measurements by planes and spacecraft. As a result, satellite remote sensing can be a quick alternative and an economic approach to assess the suspended sediment concentration in the oceans, seas, rivers, and coastal waters (Moridnejad et al. 2015). To estimate the sediment concentration by the output emission from the surface of the water and reflected the sensor, the relationship of the radiation transmission between the optical properties of the water and the radiation measured by the sensor must first consider theoretically. The transmission relation is modeled by the statistical relationships between radiometric data and field measurements after atmospheric effects eliminated. In this study, MODIS and hydrological field data along with the M5 model tree used to estimate suspended sediment concentration (SSC) of Karun River. The M5 model is one of the new data-driven models that present comprehensible formulas, which describe the physics of the phenomenon more clearly. Based on the behavior of sediment concentration and sediment transport, the M5 model tree was used in this study to divide the problem space and provide a regression equation for each subdomain. The novelty of this study lies in building a tree model based on MODIS and hydrological data and presenting regression equations for SSC prediction. Besides, global sensitivity analysis performed to identify the effect of each input parameter and the interaction effects of different parameters on sediment concentration.

Methodology: Flow discharge and suspended sediment concentration of Ahwaz hydrometric station on Karun River, provided by Khuzestan Water and Power Authority, used as hydrological data in this study. These data include 110 samples of flow discharge and sediment concentration within the wet and dry seasons on Ahwaz station during the years 2000 to 2015, corresponding to MODIS images. The M5 model tree was first proposed by Quinlan (1992), divide the problem space to subdomains and proposed a multivariate linear model for each subdomain. The building, pruning, and smoothing the tree are three steps used by the M5 algorithm (Zahiri, 2015). In this study, the test-and-train technique was performed to develop the tree model based on hydrological and MODIS Data. This is a common technique to learn algorithms with a data set. In this research, the sediment rating curve method was used to determine the efficiency of the model tree in estimating sediment concentration. To evaluate the performance of the M5 model tree in the training and verification steps and compare it with the result obtained from the sediment rating curve (SRC) method, the coefficients of determination, root mean squared error, discrepancy ratio and Nash-Sutcliffe Efficiency were used. Monte-Carlo based numerical procedure has been used in this study to compute the first order and total-effect indices based on Saltelli et al. (2008). Global sensitivity analysis is one of the best methods to estimate sensitivity indices based on model estimation. In this method, the main effect of factor on output is

¹ Associate Professor, Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran, j.zahiri@asnrkh.ac.ir (corresponding author)

² Graduate of Water Structures, Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran, mollaei.z139@gmail.com



indicated by the first-order sensitivity index, which is scaled between 0 and 1. The total effect index indicates a total contribution of factor to the output variation and contains the first order effect plus all higher-order effects by interactions (Saltelli et al. 2008).

Discussion and Conclusion: According to the structure of the M5 tree, flow discharge and NIR/R ratio were used to divide the problem space of the M5 model tree, have the main effects in estimating the SSC. In these equations, in addition to the flow discharge, MODIS bands were also used as input parameters. For lower discharges ($QW \leq 392$ m³/s), QW, R, and NIR/R ratio were used in regression equations. The effect of the near-infrared band on the SSC has been increased for high discharges, in agreement with the results of Gordon and Morel (1983), state that spectral sensitive range moves toward the longer wavelength with increasing the SSC. Based on the input parameters values, the M5 equations showed that the effect of MODIS spectral bands has more impact on the SSC values related to lower discharges compared with higher ones. The M5 model divides the input space into three sub-domains due to flow discharge and bands ratio, and provides a regression equation for each sub-domain, while the SRC model provides only one equation for the input space. A comparison of the results of the M5 model besides the SRC method showed that the traditional method, in most cases, estimated the SSC less than the measured values, which is one of the main weaknesses of this method. NSE was estimated 0.58 and 0.26 for the M5, and the SRC methods, respectively, showed the superiority of the M5 model. Results of global sensitivity on the M5 model illustrated that 20% of output variance just determined by the main effects of MODIS parameters, which NIR/R ratio has more prominent effects on the SSC estimation comparing to R and NIR bands.

The most important references

- Gordon, H.R. and A.Y. Morel. 1983. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery: a review. Springer, New York.
- Moridnejad, A., H. Abdollahi, S.K. Alavipanah, J.M.V. Samani, O. Moridnejad and N. Karimi. 2015. Applying artificial neural networks to estimate suspended sediment concentrations along the southern coast of the Caspian Sea using MODIS images. *Arabian Journal of Geosciences*, 8: 891-901.
- Quinlan, J.R. 1992. Learning with continuous classes. 5th Australian joint conference on artificial intelligence, 92: 343-348.
- Saltelli, A., M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana and S. Tarantola. 2008. *Global sensitivity analysis: the primer*. John Wiley & Sons, USA.
- Zahiri, J. 2015. Nonparametric CART and M5' methods application on bridge piers scour depth computation. *Irrigation and Water Engineering*, 5(4): 35-50.