



Assessment of Suspended Sediment Concentration on the Dam Reservoir Water Surface Using Reflectance in Different Bands With Application to Satellite Images (Case study: Ardak Dam in Mashhad)

M. Hadian¹, B. Ghahraman^{2*}, and K. Esmaili³

Abstract

Assessment of suspended sediment concentration in running waters is important in different applications such as monitoring the performance of hydraulic structures, environmental problems, and utilization of agricultural lands. The main goal of this research is the use of remote sensing technology to assess the concentration of suspended sediments on water surface of inflow to the dam reservoirs and also estimating of sediment load brought to the reservoir in flood events during the dam's lifetime as well as annually. For this purpose, the laboratory experimental results and images of Landsat satellite have been used. The study area in this research was Ardak Dam in North West of Mashhad. In the laboratory work, the condition of the river was simulated. By using an ASD spectroradiometer, the water reflectance values for different amounts of suspended sediment concentrations in the range of 400 to 2500 nm were measured. Then, these reflectance values were resampled for OLI Bands of Landsat 8 using their spectral response functions. The correlation between reflectance from bands 2 and 5 and the amount of suspended sediment concentration, were of the order of 0.91. In this research, a range of different sediment concentrations of 0.16 gr/lit to 100.05 gr/lit in 90 samples was used. In the modeling stage one from each three samples was kept for model evaluation. In the study procedure, the reflectance in band 5 of Landsat centered at 865 nm R_{865} and the reflectance in band 2 of Landsat centered at 482/4 $R_{482.5}$ showed the maximum and minimum sensitivity to the amount of sediment, respectively. As a result, an exponential relationship between sediment concentration and $R_{865} - R_{482.5}$ was found appropriate. In the evaluation process the RMSE was 1.57 (gr/lit) and R^2 was 0.91. The evaluation of the results of this study showed that the model presented for estimation of suspended sediment concentration in water was appropriate and showed good performance.

Keywords: Suspended Sediment Concentration, Spectral Behavior, Dam Reservoir, Landsat Images, Remote Sensing.

Received: July 1, 2018

Accepted: January 16, 2019

برآورد غلظت رسوبات معلق در سطح آب مخزن سد با استفاده از بازتابندگی در باندهای مختلف با هدف کاربرد در تصاویر ماهواره‌ای (نمونه مورد مطالعه: سد ارداک شهر مشهد)

محمد هادیان^۱، بیژن قهرمان^{۲*} و کاظم اسماعیلی^۳

چکیده

برآورد رسوبات معلق در آب‌های روان از جنبه‌های مختلفی نظیر برآورد عملکرد سازه‌های هیدرولیکی، مشکلات زیست‌محیطی و بهره‌برداری از زمین‌های کشاورزی، دارای اهمیت می‌باشد. هدف اصلی از این تحقیق استفاده از فناوری سنجش از دور به منظور برآورد غلظت مواد معلق در سطح آب ورودی به مخازن سدها و به تبع آن امکان برآورد میزان رسوب حمل شده به مخزن توسط سیلاب در طول عمر سد و همچنین برآورد سالانه آن می‌باشد. برای این منظور از نتایج آزمایشگاهی و داده‌های بازتابندگی سنجنده ماهواره Landsat 8 رسوبات معلق در غلظت‌های مختلف استفاده شده است. در کار آزمایشگاهی، شرایط رودخانه شبیه‌سازی گردید. با استفاده از یک دستگاه اسپکترورادیمتر ASD، بازتابندگی آب محتوی مقادیر مختلف رسوبات معلق در محدوده طیفی ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. سپس این مقادیر بازتابندگی برای باندهای سنجنده OLI ماهواره Landsat 8 با استفاده از توابع پاسخ طیفی باندهای آن، بازنمونه‌برداری شد. در بررسی همبستگی بین بازتابندگی باندها و میزان رسوبات معلق، باند ۲ (آبی) و باند ۵ (مادون قرمز نزدیک) مناسبترین تشخیص داده شدند. در این تحقیق، گستره‌ای از مقادیر مختلف رسوب در ۹۰ نمونه از غلظت 0.16 gr/lit تا 100.05 gr/lit استفاده گردید. در مرحله مدل‌سازی از هر سه برداشت، یکی برای ارزیابی مدل کنار گذاشته شد. در بررسی‌های انجام شده بازتابندگی باند ۵ Landsat با مرکزیت ۸۶۵ نانومتر (R_{865}) و باند ۲ با مرکزیت ۴۸۲/۵ نانومتر ($R_{482.5}$) به عنوان باندهایی که به ترتیب بیشترین و کمترین حساسیت را به مقدار رسوبات از خود نشان داده‌اند، تشخیص داده شدند. به این ترتیب بین تفاضل بازتابندگی در این دو باند ($R_{865} - R_{482.5}$) و غلظت رسوبات معلق رابطه‌ای نمایی با همبستگی مناسبی تشخیص داده شد. در این رابطه پارامتر RMSE آن برای حداکثر غلظت محتمل رسوب برابر ۱/۵۷ و پارامتر R^2 برابر با ۰/۹۱ بدست آمد. ارزیابی نتایج این تحقیق نشان داد که مدل ارائه شده جهت برآورد رسوبات معلق در آب، عملکرد خوبی از خود نشان می‌دهد. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق سد ارداک در شمال غرب شهر مشهد می‌باشد.

کلمات کلیدی: رسوبات معلق، مخزن سد، تصاویر Landsat، سنجش از دور-شاخص طیفی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۴/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۱۰/۲۶

1- Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad.

2- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad. Email: bijangh@um.ac.ir

3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad.

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- استاد، گروه علوم مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد.

۳- دانشیار گروه علوم مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پائیز ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

۱- مقدمه

تحقیقات زیادی درخصوص تعیین میزان غلظت ذرات معلق توسط سنجش‌ازدور چاپ و ارائه شده ولی اکثر آن‌ها به اقیانوس‌ها و آب‌ها واقع در دریاهای با عمق زیاد و یا برآورد کلروفیل معلق در سطح آبگیرها مربوط می‌باشد (Gordon and The-, 1973; Babin et al., 2003; Binding and Bowers, 2005; Giardino et al., 2007). محققین فوق پژوهش‌های خود را با استفاده از تصاویر سنجنده‌هایی که دارای قدرت تفکیک مکانی کم ولی دارای پربندهای تصویربرداری با دوره زمانی کوتاه می‌باشند، انجام دادند. سنجنده‌های با قدرت تفکیک مکانی کم برای جمع‌آوری اطلاعات در رودخانه‌ها، محل آبگیر و مدخل سدها، به‌علت کوچکی ابعاد مناسب نمی‌باشند، درنهایت اغلب تحقیقات انجام شده که حاصل دستاوردهای تجربی و با توجه به روابط جبری جهت برآورد غلظت گل آلودگی می‌باشند نتایج قابل اعتمادی که بطور عام برای کلیه مناطق قابل استفاده باشند، ارائه نمی‌نمایند (Ostlund et al., 2001; Zhang et al., 2002; Chen and Zhang, 2007).

دستاوردهای تحقیق این محققان قابلیت ارائه روابطی در خصوص غلظت مواد معلق در آب با مشاهدات سنجش‌ازدوری را تأیید می‌نماید که برای بعضی از مکان‌ها نتایج قابل قبولی را ارائه می‌نماید. با این حال بطور خاص به خصوص در آبگیرها و مدخل سدها اغلب ابعاد موردنظر کوچکتر از یک پیکسل ماهواره‌هایی نظیر Modis دارند و برای برآورد مواد معلق در آن‌ها از تصاویر با رزولوشن بالا و یا روش unmixing استفاده می‌گردد. بنابراین در صورت کاربرد در مکان‌های دیگر یا تغییر سنجنده یا تغییر قدرت تفکیک مکانی، واسنجی جدیدی در خصوص مطالعات انجام شده مورد نیاز می‌باشد.

یک دستاورد عمومی باید بر پایه یک مدل تئوریک بر مبنای تابش نور انتقال یافته از سطح آب‌های گل آلود با مقادیر متفاوت گل آلودگی با در نظر گرفتن خواص فیزیکی مربوطه نظیر رسوبات رسی، ماسه‌های خیلی ریزدانه، جلبکها و از این قبیل همانند مطالعات انجام گرفته توسط (Dekker et al., 2001; Giardino et al., 2007;) (Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015) باشد.

یکی دیگر از کارهای انجام شده براساس روابط تئوریک و فیزیکی رسوبات، استفاده از مدل ساده تابش انتقال یافته و استفاده از سنجش‌ازدور در آب‌های گل آلود در آبگیر Venice می‌باشد (Volpe et al., 2011). این محققین بیان نمودند که انرژی بازتابی از یک پیکسل آب در تصاویر سنجش از دور تابعی از عمق آب، خصوصیات مواد معلق و بازتاب نور بستر می‌باشد. از این تصاویر به منظور دستیابی به تعیین غلظت مواد معلق در آب می‌توان استفاده

میزان رسوبات و مواد معلق همراه با آبهای روان یکی از دغدغه‌های مهم در طراحی سازه‌های هیدرولیکی نظیر کانال‌ها، دریچه‌ها، توربین‌های سدها می‌باشد (Walling and Coolins, 2000). این موضوع از جنبه‌های دیگری نظیر حفظ کیفیت خاک در زمین‌های کشاورزی، مسائل زیست محیطی و بهره‌برداری از منابع آبی برای شرب و صنعت بسیار مهم می‌باشد (Shafaei, 2010).

با توجه به مواردی که در بالا اشاره گردید، وجود رسوبات و مواد معلق در آب یکی از مشکلاتی می‌باشد که با پیش و برآورد دقیق میزان رسوبات معلق می‌توان محل فرونشست آن‌ها را در مخزن پشت سد پیش‌بینی و اثرات مخرب آنها را کاهش داد.

جهت تخمین مواد معلق در آب‌های روان، می‌توان از روش‌های سنتی بهره گرفت؛ اما این روش‌ها مبتنی بر اندازه‌گیری میدانی و برداشت نمونه به دفعات در طول سال بوده و بسیار وقت‌گیر و پرهزینه است. از طرف دیگر می‌توان از روش‌های پیشرفته‌ای نظیر استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و دانش سنجش از دور بهره جست. در روش‌های مبتنی بر داده‌های سنجش از دور با توجه به وسعت منطقه و دقت مورد نیاز در برآورد میزان رسوبات همراه با آب، سنجنده‌ای که بیشترین تطابق را با خواسته و امکانات موجود داشته باشد، انتخاب می‌گردد. در گام بعدی تصاویر مربوط به گذشته و حال تهیه و توسط یک تیم تحقیقاتی کار در دو جبهه میدانی و نرم‌افزاری تا حصول به نتیجه پیگیری می‌گردد (Mobasheri, 2010).

از مزایای روش‌های مبتنی بر داده‌های سنجش از دور می‌توان به این نکته اشاره نمود که پس از تهیه و ارائه مدل، دیگر نیازی به حضور مداوم و میدانی نمی‌باشد و اطلاعات با هر بار گذر ماهواره از مکان موردنظر از تصاویر استخراج و مورد استفاده قرار می‌گیرد. از دیگر مزایای این روش‌ها می‌توان به این نکته اشاره نمود که با استفاده از تصاویر موجود در آرشیو می‌توان تخمینی از میزان مواد معلق و رسوبات سطح آب در ادوار گذشته را نیز محاسبه نمود.

حصول اطلاعات درخصوص غلظت ذرات معلق در آبگیرها و ورودی مخازن سدها با استفاده از سیگنال‌های حاصل از سنجش از دور به علت تنوع اندازه مواد معلق غیر محلول و همچنین پتانسیل بالای ناشی از برهم‌کنش رسوبات با پوشش بستر دقت زیادی را می‌طلبد (Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015)؛ زیرا این برهم‌کنش دقت اندازه‌گیری و تشخیص سیگنال‌های رسیده از سطح آب را با سختی مواجه می‌نماید.

ماهواره MODIS که دارای توان تفکیک زمانی مناسب به نسبت ماهواره‌های دیگر نظیر Landsat می‌باشد، استفاده شده است.

Espinoza Villar et al. (2013) تحقیقی جهت برآورد رسوب رودخانه Madeira در برزیل با استفاده از تصاویر ماهواره MODIS انجام دادند. در این تحقیق علاوه بر استفاده از نتایج تصاویر ماهواره‌ای، از مطالعات میدانی جهت کالیبره کردن نتایج نیز استفاده شد و اصلاحات جوی نیز اعمال و نتایج قابل قبول استخراج گردید. این محققین از باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک (NIR) تصاویر سنجنده MODIS استفاده نمودند و جهت کالیبره کردن نتایج میدانی از دستگاه اسپکترورادیومتر به طور همزمان با گذر ماهواره بهره جستند. اما از آنجایی که این دستگاه به منظور اندازه‌گیری میدانی باید بر روی یک قایق قرار گیرد، وجود لرزش در قایق بر اثر حرکت آب رودخانه و همچنین در اثر شکست نور حاصل از بدنه قایق و تجهیزات موجود در سطح رودخانه، خطاهای ناخواسته‌ای به نتایج تحقیق وارد نموده است.

لذا با جمع‌بندی و مقایسه تحقیقات انجام‌شده مشخص می‌گردد که هر یک از محققین بر یک جنبه از کار تأکید داشته‌اند. برخی از آن‌ها تمام مراحل کار را در شرایط آزمایشگاهی انجام داده و برخی دیگر مراحل تحقیق را به صورت میدانی و با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در آب‌های عمیق و رودخانه‌های عریض انجام داده‌اند، لذا فقدان مطالعاتی در خصوص یک تحقیق جامع در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی و با تجهیزات پیشرفته با استفاده از پاسخ طیفی سنجنده Landsat و تطابق نتایج به صورت میدانی همزمان با گذر ماهواره و تدقیق و حذف نویزهای احتمالی، پس از انجام تصحیحات طیفی، رادیومتریکی بر روی تصاویر ماهواره‌ای در شرایط آب و هوایی ایران احساس می‌گردد. لازم به ذکر است که رودخانه‌های ایران عموماً فصلی و کم‌عرض و کم عمق می‌باشند که به ندرت به طول یک بعد پیکسل ماهواره MODIS می‌رسد، لذا نیاز است که از تصاویر سنجنده‌هایی نظیر Landsat که هر پیکسل آن دارای ابعاد کوچکتری می‌باشد با در نظر گرفتن ملاحظات استفاده نمود.

همچنین با توجه به موارد مطروحه در فوق، نیاز به تحقیقی جامع و خاص با توجه به محدودیت امکانات در کشورمان و همچنین ساختار اکثر رودخانه‌های ایران در خصوص برآورد میزان رسوبات معلق در سطح آب‌های روان که میزان آن‌ها بستگی به پوشش گیاهی، زمین‌های کشاورزی بالادست، عوامل انسانی و غیره به علت فرسایش شدید خاک از متوسط جهانی بالاتر است، احساس می‌گردد.

نمود. در این تحقیق از اطلاعات سنجنده‌های Aster، Landsat TM5، ETM7 و Alos Anviro استفاده شده است. جهت دید سنجنده در راستای حوضی میدان دید باریک ($FOV = 5^\circ$) برای Aster و Alos و $FOV = 15^\circ$ برای Landsat) می‌باشد. همچنین در این تحقیق شبکه‌ای از پروب‌های چند-پارامتری به منظور پایش اطلاعات میدانی در داخل مخزنی نصب گردیده بود.

از آنجا که در تحقیق ایشان امکان استفاده از دستگاه طیف‌سنجی به منظور صحت‌سنجی تصاویر موجود نبوده سعی شده تصاویری انتخاب گردد که حالت ابرناکی و غبار در آنها حداقل باشد. همچنین با توجه به استفاده از تصاویر سنجنده‌های مختلف با دقت مکانی مختلف به منظور حذف خطاهای ذکر شده، مشکلاتی در تطبیق موقعیت پیکسل‌ها با محل نصب و قرارگیری پروب‌ها وجود داشته که این امر می‌توانسته منجر به تولید خطاهای محاسباتی گردد.

Adam et al. (2011) یک کار آزمایشگاهی جهت مدل کردن اثرات خواص رسوب‌های مختلف بر روی نور بازتابی از رسوبات در شرایط آزمایشگاهی انجام دادند، روش کار ایشان شامل موارد ذیل بوده است:

- ۱- اندازه‌گیری طیف رسوب‌های مختلف با خواص فیزیکی و بیولوژیکی متفاوت در شرایط آزمایشگاهی،
- ۲- تعیین خصوصیات جذبی ویژه،
- ۳- ایجاد رابطه رگرسیونی بین خواص جذبی و پارامترهای فیزیکی مواد معلق در آب

Adam et al. (2011) کلیه مراحل تحقیق خود را در آزمایشگاه با دستگاه طیف‌سنجی با درصدهای متفاوت رسوب معلق در آب، بدون استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به انجام رساندند و در پایان آرشیوی در قالب منحنی‌های طول موج-بازتابندگی برای مواد رسوبی مختلف (رس، ذرات ریز ماسه و مواد جلبکی) ارائه و خصوصیات رفتاری آنها در طول موج‌های مختلف را بررسی نمودند. کارهای این محققین به تصاویر ماهواره‌ای با لحاظ شرایط محیطی و نویزهایی که بر اثر شرایط جوی ایجاد می‌گردد، تعمیم داده نشده است.

Vang & Lu (2010) با استفاده از تصاویر ماهواره TERRA MODIS نسبت به تعیین غلظت رسوبات معلق در رودخانه Yangtze در چین اقدام نمودند. در نهایت با مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده در محل و نتایج حاصل از مطالعات آنها، نتایج به میزان زیادی نزدیک به هم بودند. تفاوت کار این دو محقق با کارهای محققان دیگر این بود که اندازه‌گیری در حالت جریان پر تلاطم صورت می‌گرفت و از تصاویر



Fig. 1- Location of the study area

شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

لازم به ذکر است علت انتخاب سد مذکور نزدیکی و در دسترس بودن اطلاعات پایه و سوابق مطالعاتی و کم هزینه بودن نمونه برداری و همکاری مسئولین آب منطقه‌ای خراسان رضوی می‌باشد و همچنین اهمیت سد مذکور به علت تامین بخشی از آب شرب شهر مشهد می‌باشد.

۳- روش تحقیق

روش انجام این پژوهش در روند نمای زیر نشان داده شده است (شکل ۲) که در ادامه مراحل آن بطور مشروح ارائه می‌گردد.

۳-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها و تجهیز آزمایشگاه

نمونه‌های موردنیاز از بستر و ورودی سد ارداک برداشت شد. همچنین، بستر رودخانه در محیط آزمایشگاه شبیه‌سازی گردید. ابتدا رسوبات زیر نور آفتاب کاملاً خشک گردید و از الک شماره ۴۰ عبور داده شده و در بسته‌های ۶۰ گرم، ۱۲۰ گرم و ۱۰۰۰ گرم با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم بسته‌بندی و شماره‌گذاری گردید. همچنین، دانه‌های شن و ماسه قبل از قرار گرفتن در مخزن کاملاً تمیز و خشک گردید. به منظور انجام تحقیق در محیط آزمایشگاه از تجهیزات ذیل بهره گرفته شده‌است:

مخزن آب به ظرفیت حدود ۵۰۰ لیتر، موتور آب، لوله و شیر فلکه، دستگاه اسپکترو رادیومتر، صفحه اسپکترون^۱ جهت کالیبره نمودن دستگاه ASD، پروژکتور، رایانه، دوربین عکاسی پیشرفته، ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم، شن و سنگ جهت پوشش کف مخزن و نمونه‌های رسوب از داخل مخزن.

در مجموع هدف از این تحقیق، در اولین گام تولید شاخص طیفی از باندهای تصاویر ماهواره Landsat به منظور برآورد غلظت رسوبات معلق در مدخل سد ارداک شهر مشهد به منظور ایجاد یک رابطه رگرسیونی می‌باشد.

۲- داده‌ها و منطقه مورد مطالعه

جهت انجام این تحقیق، نیاز به اطلاعات و پیش‌فرض‌هایی می‌باشد. جهت جمع‌آوری اطلاعات نسبت به بازدهی‌های میدانی و همچنین جمع‌آوری سوابق آورد و غلظت رسوبات در سیلاب‌ها از شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان اقدام گردید. از آنجایی که آرشیو مربوط به برداشت‌های میدانی بسیار محدود (حدود ۲ یا ۳ قرائت در طول سال) بود، چندان منشأ تصمیم‌گیری قرار نگرفته‌است. لذا روند کار بر مبنای مراحل زیر برنامه‌ریزی گردید:

۱- تهیه مواد، رسوبات و آب‌های گل‌آلود از مدخل سد جهت انجام تحقیق در محیط آزمایشگاه.

۲- نمونه‌برداری از آب‌های گل‌آلود و تعیین دقیق مکان آن توسط دستگاه GPS همزمان یا گذر ماهواره،

۳- دانلود تصاویر ماهواره‌ای از سنجنده Landsat از سایت usug.com. توان تفکیک مکانی مناسب برای آبیگرهای نه چندان وسیع دلیل اصلی انتخاب این سنجنده چندطیفی بوده است. به همین دلیل تصاویر ماهواره Modis به علت توان تفکیک مکانی ضعیف آن (۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر) برای منطقه مورد مطالعه ما مناسب نبود. البته تصاویر ماهواره‌هایی همچون Geoeye، IKONOS، Worldview دارای دقت مکانی بهتر از Landsat بودند ولی این تصاویر سفارشی (بنا به سفارش برداشت می‌شوند) و بسیار گران قیمت بوده و توان تفکیک طیفی ضعیفتری در مقایسه با Landsat داشتند. همچنین آرشیوی هم از این تصاویر وجود نداشت. ماهواره Sentinel هم با توان تفکیک ۲۰ متر بنظر مناسب می‌آمد ولی آرشیو آن ضعیف بود بگونه‌ای که نتایج این تحقیق را بیش از چند سال گذشته نمی‌توان بر روی تصاویر اعمال و چگونگی رفتار رسوبات معلق را مشاهده نمود. این مشکل برای تصاویر Landsat با بیش از ۵۰ سال آرشیو، وجود نداشت. در نتیجه با توجه به این موارد، در این تحقیق از سنجنده Landsat استفاده شده‌است. از طرف دیگر تعداد نمونه‌ها بر اساس مقادیر واقعی رسوبات معلق در رودخانه‌های خروشان تا آبهای آرام پشت سد تعیین شده است. تعداد و مقادیر رسوبات معلق در نمونه‌ها می‌تواند کلیه شرایط واقعی را شبیه‌سازی کند. اطلاعات مشابه در رابطه با میزان رسوبات معلق از ایستگاههای رسوب سنج وزارت نیرو قابل مشاهده است. منطقه مورد مطالعه مخزن سد ارداک در ۶۰ کیلومتری شمال شهر مشهد در استان خراسان رضوی می‌باشد (شکل ۱).

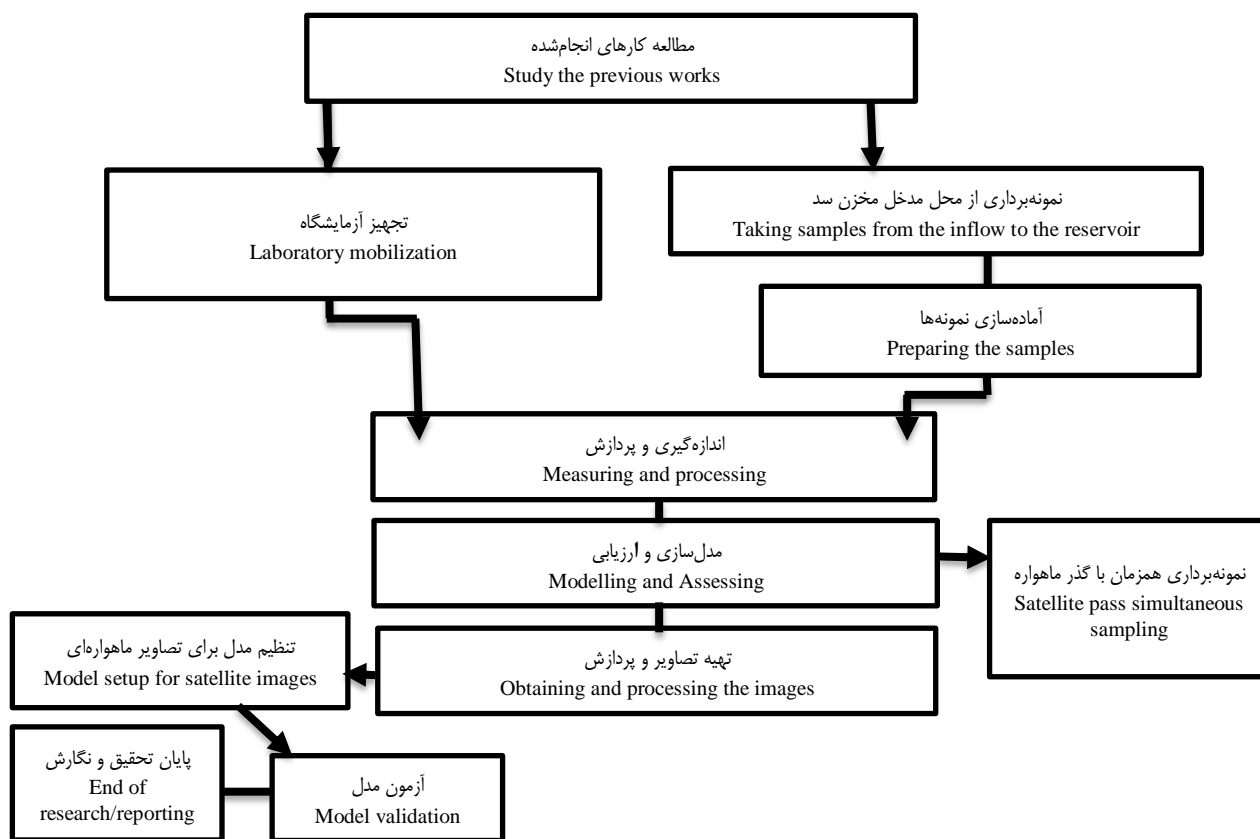


Fig. 2- Work process flowchart

شکل ۲- روند نمای مراحل کار

نمودن دستگاه از صفحه سفید اسپکترون استفاده گردید، سپس اولین قرائت پس از روشن شدن پمپ و متلاطم شدن سطح آب با استفاده از دستگاه اسپکترورادیومتر مدل ASD (Field spec) قرائت گردید. با توجه به تلاطم سطح آب و ایجاد خطا به علت شکست نور، دستگاه قرائت گر به گونه ای تنظیم گردید که در هر مرحله پنج قرائت از سطح آب انجام گردد. هم زمان با هر مرحله یک تصویر هم توسط دوربین از سطح برداشت گردید.

اولین نمونه رسوب، یک نمونه با ۶۰ گرم از رسوبات رودخانه ای سد ارداک بود که ابتدا توسط همزن برقی با مقدار کمی از آب مخزن مخلوط گردید و سپس به آب داخل مخزن اضافه گردید. آنگاه پس از مخلوط شدن کامل، قرائت توسط دستگاه انجام و یک تصویر نیز برداشت گردید. این عمل در ۹۰ مرحله با اضافه نمودن ۲۰ بسته رسوب ۶۰ گرمی و ۴۰ بسته رسوب ۱۲۰ گرمی و ۳۰ بسته رسوب ۱۰۰۰ گرمی به مخزن ادامه یافت و اطلاعات برداشت و ثبت گردید. در انتها دو برداشت هم از نمونه رسوب کاملاً خشک و نمونه گل کاملاً اشباع با ۵۰٪ وزن آب به منظور انجام کنترل های احتمالی انجام گردید.

۲-۳- روش آماده کردن مجموعه آزمایشگاهی

ابتدا مخزن از داخل با برچسب غیرشفاف پوشانده شد. کف مخزن از شن و ماسه رودخانه ارداک به طور کامل پوشش داده شد. موتوری نصب گردید و یک لوله به قطر ۶ سانتی متر که بر روی آن سوراخهایی در فواصل حدوداً ۱۰ سانتی متر تعبیه گردیده بود در کف مخزن نصب گردید. قدرت دبی موتور از طریق شیر اهرمی که در مسیر آن قرار دارد به گونه ای تنظیم گردید که کل حجم آب تحت تأثیر قرار گرفته ولی شن های درشت کف مخزن جابجا نشود. روی لوله هم از پوشش هماهنگ با مصالح کف مخزن پوشش داده شد. از آنجایی که مصالح رودخانه ای در چند مرحله شسته شده بودند آب داخل مخزن در شروع کار کاملاً زلال و شفاف بود. به میزان ۳۶۰ لیتر آب زلال داخل مخزن ریخته شد، سپس یک دستگاه دوربین حرفه ای در ارتفاعی ثابت بالای مخزن به گونه ای که قابلیت زوم بر روی مخزن داشته باشد نصب گردید. محیط آزمایشگاه از کلیه نورها ایزوله گردید و پنجره ها با پارچه سیاه پوشیده شد. پروژکتور به همراه پروب قرائت گر در فاصله ۴۰ سانتی متری بالای سطح آب ثابت گردید، در ابتدای کار جهت کالیبره

۳-۳- پردازش و آماده‌سازی داده‌ها

بودن حداکثر بازتابندگی در منحنی طیفی تشخیص داده شد. با بررسی بیشتر منحنی‌های طیفی، مشاهده گردید که مقادیر بازتابندگی R_{500} (در محدوده طیفی سبز) نسبت به R_{815} محدوده (NIR) در غلظت‌های کم رسوب بیشتر می‌باشد، این روند تقریباً تا غلظت $1/83 \text{ gr/lit}$ مشاهده می‌گردد و از آن به بعد مقادیر بازتابندگی در R_{815} از R_{500} پیشی می‌گیرد.

همچنین در بررسی منحنی‌های طیفی مشاهده می‌گردد که مقدار R_{815} از غلظت $19/44 \text{ gr/lit}$ رشد ملموسی ندارد. به بیان دیگر افزایش رسوب پیش از مقدار فوق تأثیر چندانی در میزان بازتابندگی ندارد. از آنجایی که این مقدار میزان رسوب نسبتاً بزرگی است و در عمل با توجه به سطح حوزه سد ارداک و پوشش گیاهی و صخره‌ای آن (همچنین برداشتهای میدانی) احتمال افزایش رسوب از این مقدار غیر محتمل می‌باشد، می‌توان مقادیر بیشتر از آن را در مدل جداگانه‌ای بررسی نمود. اما از آنجایی که لازم است مدل جامع بوده و کلیه حالات ممکن، حتی با درصدهای فراوانی کم را نیز پوشش دهد، مدل‌های غیرخطی نیز بررسی گردید. در نهایت مدلی "نمایی" که بهترین سازگاری را با داده‌ها نشان داد، بدست آمد که $WSSSC^2$ نامگذاری شد.

$$WSSSC = 2.6044e^{23.105(R_{815} - R_{500})} \quad (1)$$

$$R^2 = 0.9876$$

که با بررسی منحنی برازش داده شده و شکل عملکرد مناسب منحنی نمایی به خوبی مشخص می‌گردد.

ابتدا از هر ۵ برداشت، میانگین‌گیری انجام و نمودارهای بازتابندگی بر حسب طول موج تهیه گردید. درگام بعدی محدوده طیفی از ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ و ۱۰۰۱ تا ۱۸۳۰ و ۱۸۳۱ تا ۲۵۰۰ (nm) انتخاب گردید و منحنی‌های بازتابندگی مربوطه به تفکیک رسم گردید (شکل ۳). دلیل این بخش‌بندی، وجود سه سنجنده طیف‌سنج در دستگاه ASD برای اندازه‌گیری در همین نواحی طیفی است.

در این تحقیق با توجه به نوع پدیده مورد نظر (رسوب) بر روی محدوده ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ که جزء محدوده مرئی تا مادون قرمز نزدیک می‌باشد تمرکز شده و منحنی‌های طیفی مورد بررسی قرار گرفته‌است. در بررسی منحنی‌های طیفی دو منطقه با حداکثر بازتابندگی، یکی از محدوده ۵۹۰ nm تا ۷۱۰ nm بصورت پیوسته و دیگری به صورت موضعی در محدوده ۸۱۵ nm به صورت یک نقطه اوج منحنی قابل مشاهده است. در مقابل در محدوده ۵۵۰ nm تقریباً در همه منحنی‌های طیفی بازتابندگی ثابت و حدود ۰/۱۲ می‌باشد.

جهت دستیابی به نتیجه، نیاز به انتخاب مقادیری از بازتابندگی است که بتوان یک رابطه منطقی بین میزان رسوب و مقادیر بازتابندگی برقرار نمود. در بررسی منحنی‌های طیفی از آب با کم‌ترین غلظت رسوب تا مقادیر حداکثر مشاهده می‌گردد که مقدار بازتابندگی در ۵۰۰ نانومتر (R_{500}) تقریباً عددی ثابت می‌باشد. لذا یک نقطه انتخابی بازتابندگی در ۵۰۰ nm می‌باشد. محدوده دیگر R_{815} به علت دارا

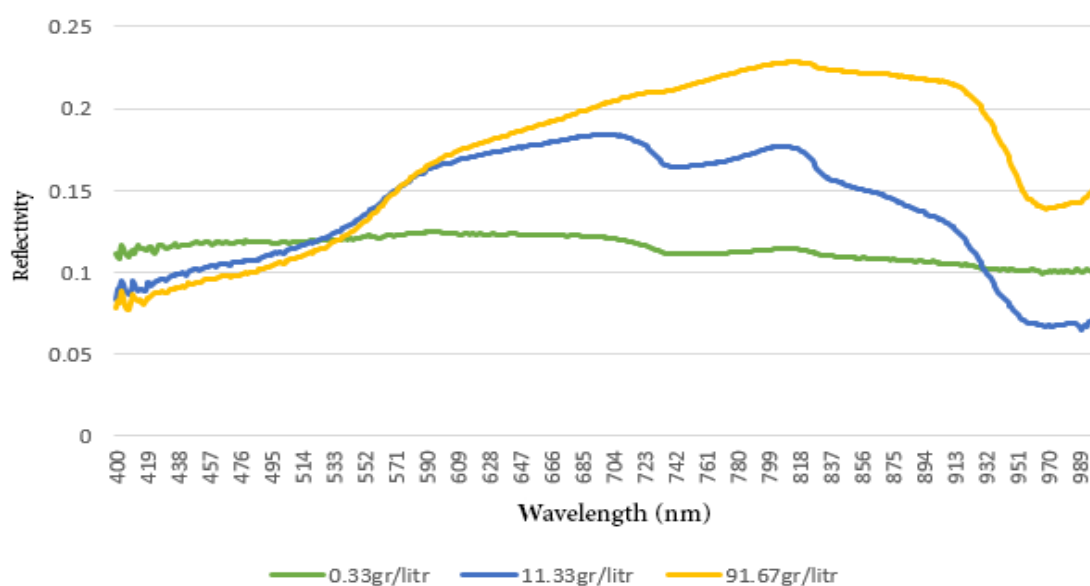


Fig. 3- Comparison of reflection values at different concentrations of sediment

شکل ۳- مقایسه مقادیر بازتابندگی در غلظت‌های مختلف رسوب

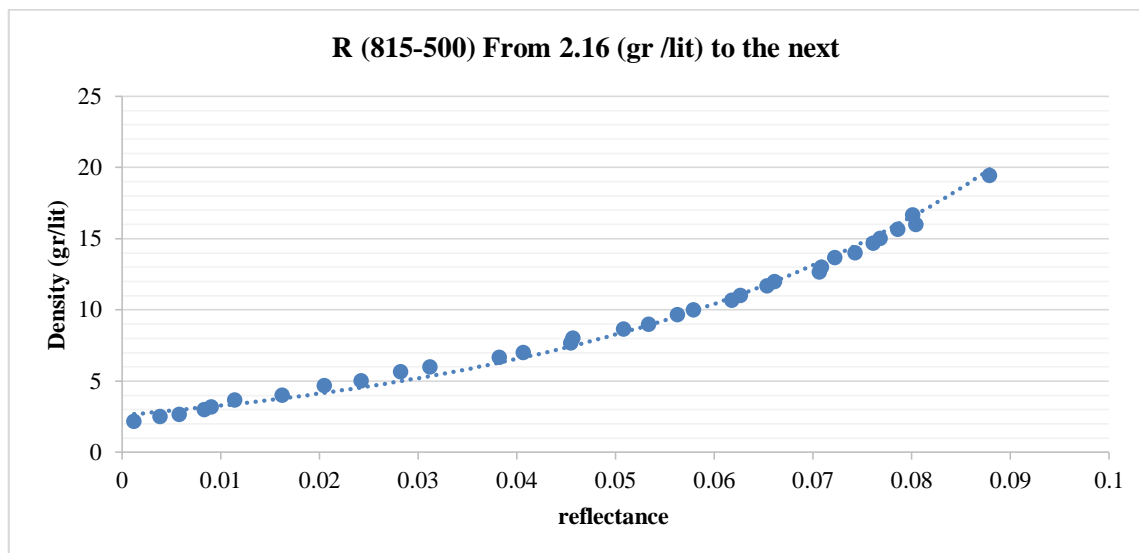


Fig. 4- Relationship between suspended material concentration and reflection values on the bases of laboratory works

شکل ۴- رابطه بین غلظت مواد معلق و مقادیر بازتابندگی بر اساس برداشت‌های آزمایشگاهی

مناسب‌ترین سازگاری را با تحلیل‌های قبلی نشان می‌دهند. لذا آن‌ها را انتخاب و مجدداً روند بررسی و تحلیل نتایج انجام گردید.

۴- ساخت مدل WSSC

در مرحله مدل‌سازی از هر سه برداشت یکی برای ارزیابی مدل کنار گذاشته شد. در بررسی منحنی‌های بازتابندگی باندهای سنجنده OLI Landsat، بازتابندگی باند ۵ با مرکزیت ۸۶۵ نانومتر (R_{865}) و باند ۲ با مرکزیت ۴۸۲/۵ نانومتر ($R_{482.5}$) به عنوان باندهایی که بیشترین و کمترین حساسیت را به مقدار رسوبات معلق از خود نشان داده‌اند، انتخاب گردیدند. این ارتباط در شکل ۵ برای تمامی نمونه‌ها نشان داده شده است.

در پروسه بررسی ارتباط ترکیبات مختلف بازتابندگی باندها، همبستگی بالای تفاضل ($R_{865} - R_{482.5}$) با مقادیر رسوبات معلق مشاهده گردید (شکل ۶). این همبستگی غیرخطی و بصورت نمایی بود که شکل معادله مشابه معادله (۱) برای حالت ابرطیفی بود.

$$WSSC = 4.4437e^{22.767\Delta R_{5-2}} \quad (2)$$

$$R^2 = 0.9915$$

پس از رسم منحنی همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود، برای مقادیر کم رسوبات معلق و تا مقدار ۴ gr/lit، ΔR_{5-2} منفی است. همچنین در محدوده ۴ تا ۲۰ gr/lit، تغییرات ΔR_{5-2} با غلظت رسوبات معلق رفتاری خطی دارد. در نهایت رفتار مقادیر ΔR_{5-2} با میزان رسوبات معلق در بالاتر از ۲۰ gr/lit کاملاً غیرخطی و با دقت زیادی نمایی است.

۴-۳- تنظیم مدل برای داده‌های Landsat

از آنجاییکه برداشت‌هایی که توسط ماهواره‌ها انجام می‌گیرد به صورت چندطیفی می‌باشد و فقط در باندهای خاصی در اختیار قرار می‌گیرد. لازم است نتایج حاصل از قرائت‌های ابرطیفی انجام شده توسط دستگاه اسپکترورادیومتر به باندهای ماهواره Landsat ۸ باز نمونه‌برداری شوند. این ماهواره در ۸ باند به شرح ذیل اطلاعات را برداشت می‌کند:

Table 1- Landsat 8 Bands
جدول ۱- باندهای ماهواره Landsat ۸

Band Number	Band Range	Band Center
1	433-453nm	443 nm
2	450-515nm	482.5nm
3	525-600nm	562.5 nm
4	630-680 nm	655 nm
5	845-885 nm	865nm
6	1560-1660nm	1610 nm
7	2100-2300 nm	2200nm

از آنجائیکه باند ۸ باند پانکروماتیک می‌باشد، در این تحقیق مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. حال با استفاده از قرائت‌های اسپکترورادیومتر فاز نمونه‌برداری و مجدداً منحنی‌های مربوطه رسم گردید. با بررسی منحنی‌های بازتابی که بر اساس تجمیع باندی در هر باند Landsat رسم گردیده است، دو باند ۲ (آبی) و ۵ (مادون قرمز نزدیک NIR)،

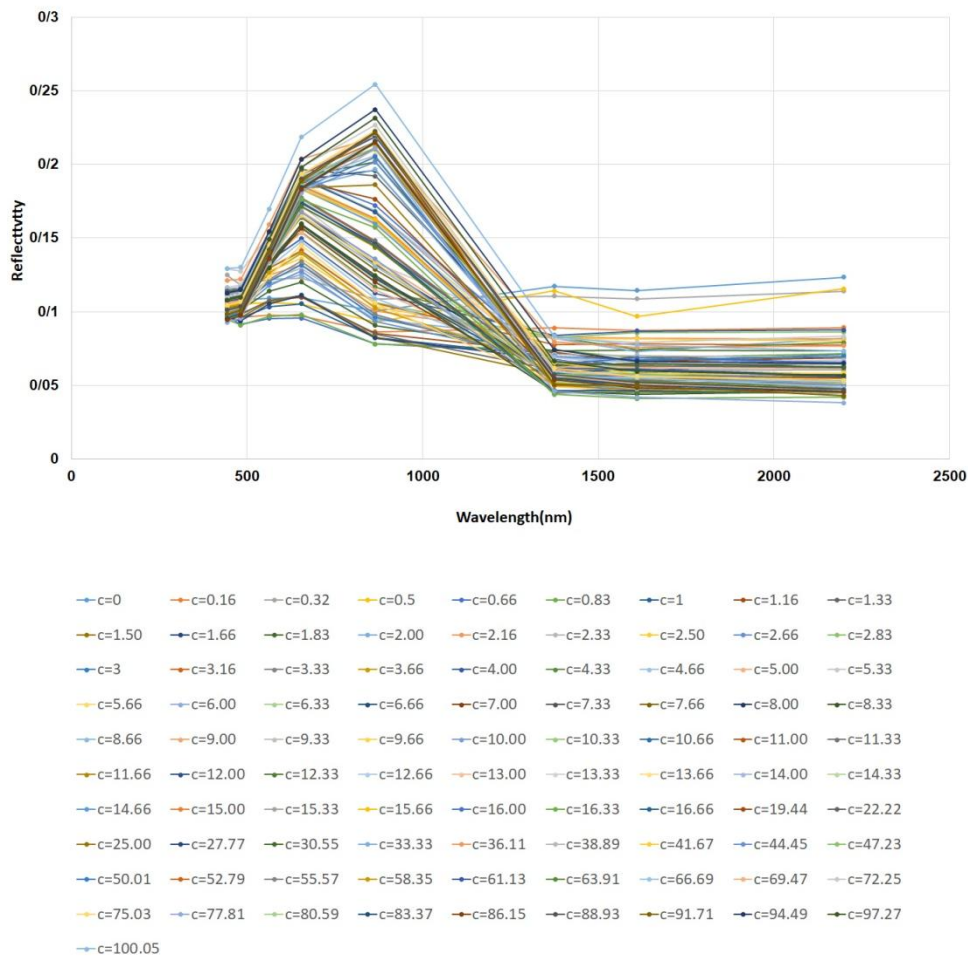


Fig. 5- Reflection curve of samples according to one band gathering in Landsat
 شکل ۵- منحنی بازتابندگی نمونه‌ها براساس تجمیع باندهای در Landsat

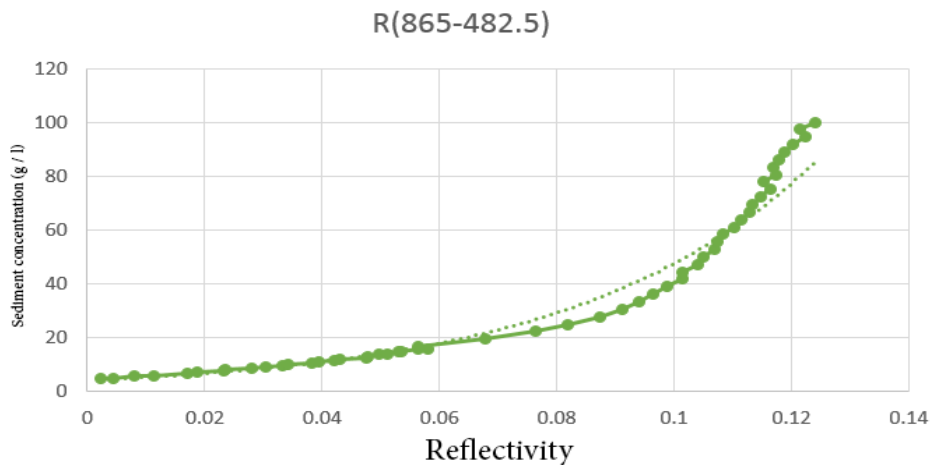


Fig. 6- Relationship between suspended sediments concentration (R) and $(\Delta R_{5-2} = R_{865} - R_{482.5})$ in Landsat bands

شکل ۶- رابطه بین غلظت رسوبات معلق و $(\Delta R_{5-2} = R_{865} - R_{482.5})$ در باندهای Landsat

رسوب معلق در سطح آب با مقادیر مختلف گردید. برای این منظور، ابتدا داده‌های آزمایشگاهی مربوط به بازتابندگی رسوبات معلق در سطح آب مخزن سد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. سپس با استفاده از تابع پاسخ طیفی سنجنده Landsat نتایج برای این سنجنده شبیه‌سازی گردید. سپس مدل‌های مختلفی بررسی و در نهایت مدل "نمایی" مربوط به مقادیر تفاضل بازتابندگی ($R_{865} - R_{482.5}$) که همبستگی بیشتری با کلیه مقادیر رسوبات این آزمایش داشت، انتخاب گردید. در مدل پیشنهادی $R^2 = 0.9915$ حاصل گردید که بیان‌کننده دقت مدل پیشنهادی می‌باشد. جهت ارزیابی از داده‌هایی که در تهیه مدل به کار گرفته نشده بود، استفاده گردید. همچنین به منظور بررسی میزان دقت و کارایی مدل از پارامتر RMSE بین مقادیر واقعی و محاسباتی استفاده گردید که مقدار آن برای حداکثر غلظت محتمل رسوب معلق در رودخانه محل انجام پروژه برابر $1/57$ و برای غلظت رسوب تا $22/2$ گرم در لیتر که حدود ۹۸ درصد رسوبات معلق سیلابهای این رودخانه را شامل می‌شود برابر $0/24$ می‌باشد، که مجدداً صحت نتایج این تحقیق را برای آب‌های کم عمق اثبات می‌نماید.

همانطور که در مقدمه ذکر گردید، مطالعات انجام شده توسط محققینی نظیر Ferraro و Gioradino و غیره در آب‌های عمیق اقیانوس‌ها انجام گرفته و ضرورت بازنگری آن‌ها برای آب‌های کم عمق ضروری می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که این مدل عملکرد خوبی از خود نشان می‌دهد. این نویسندگان معتقدند که مدل ارائه شده ابزار مناسبی جهت تخمین میزان رسوبات معلق در سطح آب‌های روان و بخصوص مخازن سدها می‌باشد.

براین اساس، بهترین برازش برای مقادیر کم رسوبات معلق و تا gr/lit ۲۰ بصورت خطی و بالاتر از آن بصورت نمایی بدست می‌آید. از طرفی چون این مدل در برآورد میزان رسوبات معلق از تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد و در این موارد هیچ‌گونه اطلاع قبلی از حدود مقادیر رسوبات معلق در دست نیست، بنظر لازم است از این ناحیه‌بندی صرفنظر کرده و یک مدل جامع برای همه مقادیر در نظر گرفت. بر این اساس به کلیه داده‌ها مدل معادله (۲) برازش داده شد.

۵- ارزیابی مدل WSSSC

به منظور ارزیابی مدل WSSSC، این مدل بر روی داده‌های ارزیابی که در مدل‌سازی شرکت داده نشده‌اند، اعمال و خروجی مدل با برداشت‌های آزمایشگاهی مقایسه شدند (شکل ۷).

همانگونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، نقاط در اطراف خط نیمساز ۱:۱ توزیع شده‌اند که نشان از توانایی مدل WSSSC دارد. برای ارزیابی این توانایی از پارامتر آماری RMSE با معادله زیر استفاده گردید:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (WSSSC_{model} - WSSSC_{meas})^2}{N-1}} \quad (3)$$

در این معادله مقادیر $WSSSC_{model}$ و $WSSSC_{meas}$ به ترتیب مقادیر غلظت رسوبات معلق برآورد شده از مدل WSSSC و مقادیر برداشت آزمایشگاهی و N تعداد نمونه می‌باشند.

۶- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از نتایج داده‌های آزمایشگاهی و استفاده از تابع پاسخ طیفی باندهای سنجنده Landsat ۸ اقدام به برآورد غلظت

Comparison of computational Sediment with actual

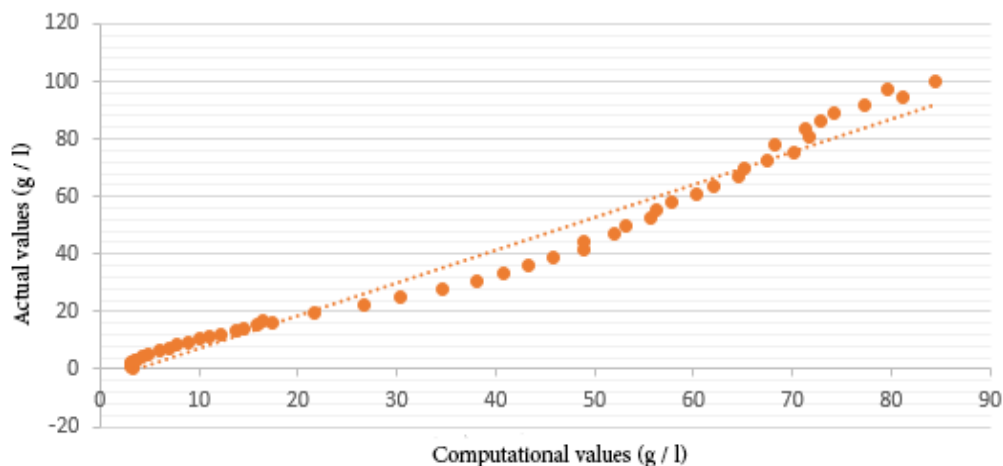


Fig. 7- Comparison between measured sediment concentration and WSSSC model output

شکل ۷- مقایسه بین غلظت اندازه‌گیری شده رسوبات و خروجی مدل WSSSC

Espinoza Villar R, Martinez JM, Texier ML, Guyot JL, Fraizy P, Meneses PR, and de Oliveira E (2013) A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images. *Journal of South American Earth Sciences* 44:45-54

Giardino C, Brando VE, Dekker AG, Strömbeck N and Candiani G (2007) Assessment of water quality in Lake Garda (Italy) using Hyperion. *Remote Sensing of Environment* 109:183-195

Gordon HR and The- JRVZ (1973) On the accuracy of determining light absorption by “ yellow substance ” through measurements of induced fluorescence. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 120(2):875-892

Ostlund C, Flink P, Strombeck N and Pierson D (2001) Mapping of the water quality of Lake Erken, Sweden, from Imaging Spectrometry and Landsat Thematic Mapper. *Science of the Total Environment* 268(1-3):139-154

Volpe V, Silvestri S and Marani M (2011) Remote sensing of environment remote sensing retrieval of suspended sediment concentration in shallow waters. *Remote Sensing of Environment* 115(1):44-54, Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.013>

Zhang Y, Pulliainen J, Koponen S and Hallikainen M (2002) Application of an empirical neural network to surface water quality estimation in the Gulf of Finland using combined optical data and microwave data. *Remote Sensing of Environment* 81:327-336

Shafaei Bejestani M, Hassanzadeh H, Nasr Esfahani M (2010) Study of sedimentology and estimated annual precipitation of Karkheh River. *Khuzestan Water and Power Organization, Dam and Power Research Council (In Persian)*

پی‌نوشت‌ها

- 1- Spectralon
- 2- Water Surface Suspended Sediment Concentration (WSSSSC)

۷- مراجع

Adam S, Backer A De, Wever A De, Sabbe K, Toorman EA, Vincx M and Monbaliu J (2011) Bio-physical characterization of sediment stability in mudflats using remote sensing: A laboratory experiment. *Continental Shelf Research*. Elsevier 31(10):S26-S35, Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2009.12.008>

Babin M, Stramski D, Ferrari GM, Claustre H, Bricaud A, Obolensky G and Hoepffner N (2003) Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 108:C(7)

Binding CE and Bowers DG (2005) Estimating suspended sediment concentrations from ocean colour measurements in moderately turbid waters; the impact of variable particle scattering properties. *Remote Sensing of Environment* 94(3):373-383

Chen Q and Zhang Y (2007) Water quality monitoring using remote sensing in support of the EU water framework directive (WFD): A case study in the Gulf of Finland. *Environmental Monitoring and Assessment* 124(1-3):157-166

Dekker AG, Vos RJ and Peters SWM (2001) Comparison of remote sensing data , model results and in situ data for total suspended matter τ TSM / in the southern Frisian lakes. *Sci Total Environ* 268(1-3):197-214