مقاله پژوهشی

هیدروژئومورفولوژی، شماره‌ی ۳۱، سال نهم، تابستان ۱۴۰۱، صص ۵۰-۲۵

Hydrogeomorphology, Vol. 9, No. 31, Summer 2022, pp (25-50)

شبیه‌سازی و ضعیت رسوبگذاری رودخانه‌ی ابرو سد اکباتان همدان با مدل ریاضی GSTARS 2.1

علیرضا ایلدرمی*

* دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۵

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌های ریاضی به عنوان ابزاری مهم برای پیش‌بینی مقدار رسوب‌گذاری در بستر رودخانه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. هدف از این پژوهش، شبیه‌سازی و ضعیت رسوبگذاری رودخانه‌ی ابرو سد اکباتان همدان با استفاده از مدل ریاضی GSTARS 2.1 می‌باشد. بدین منظور جهت کالیبراسیون و واسنجی بخش هیدرودینامیک و رسوب جریان، از اطلاعات هیدرومتری ایستگاه اندازه‌گیری ابرو، داده‌های تغییرات رقوم سطح آب درسال ۱۳۸۴، داده‌های هندسی مقطع عرضی برداشت شده در سال‌های ۱۳۸۴و ۱۳۹۷ و معادلات انتقال رسوب در یک دوره‌ی آماری ۱۳ ساله استفاده شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقطع عرضی رودخانه از سال ۸۴ تا ۹۷ از حالت V شکل به U شکل در حال تغییر است. فرسایش بیشتر در ساحل چپ نسبت به ساحل راست رودخانه ابرو موجب افزایش عدم تقارن و کج‌شدگی بستر رودخانه شده است. افزایش ضریب مانینگ و ته‌نشینی رسوبات در قسمت‌های پر پیچ و خم مسیر رودخانه نیز منجر به توسعه پیچ‌وخم‌ها و مئاندری شدن رودخانه ابرو شده است. بررسی میزان رسوبگذاری در طول ۱۳سال (۸۴ تا ۹۷) نشان می‌دهد که تراز مقطع عرضی رودخانه حدود ۲۴/۶سانتی‌متر و با استفاده از روابط رسوبی توفالتی و یانگ به ترتیب ۲۲/۸ و۲۰/۲ سانتی‌متر تغییر یافته که بیانگر تطابق خوب مدل در ارزیابی و شبیه‌سازی تغییر مقطع عرضی در اثر فرسایش و رسوبگذاری می‌باشد. به دلیل اینکه مقادیر شیب و سرعت در میانه‌ی محدوده‌ی مورد بررسی کمتر از ابتدا و بیشتر از انتها است، لذا میزان رسوبگذاری در میانه نسبت به ابتدا بیشتر و نسبت به پایین دست منطقه کمتر می‌باشد. پیشنهاد می‌شود از روش‌های FLUVIAL 12, HEC-RAS استفاده تا کاربردی‌ترین روش انتخاب و بکار گرفته شود.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی عددی، معادله یانگ، ضریب مانینگ، سداکباتان.

* (نویسنده‌ی مسئول)

E-mail:Ildoromi@gmail.com

۱- مقدمه

رودخانه‌ها تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند ویژگی‌های زمین‌شناسی، هیدروژئومورفولوژیکی، و نحوه بهره‌برداری از آن‌ها در معرض تغییر و تحول هستند که به صورت فرسایش یا رسوب‌گذاری در بستر، تخریب دیواره‌ها، تغییر راستای جریان، تغییر و جابه‌جایی مئاندرها و تغییر در فرم رودخانه نمودار می‌شوند (ایلدرمی و همکاران[1]، ۲۰۱۶: ۱۴۶). برای شناخت پدیده فرسایش یا رسوب‌گذاری و تغییر و جابجایی بستر رودخانه‌ها روابط ریاضی و مدل‌های فیزیکی مختلفی از جمله HEC-6، HEC-RAS، SSIM، MIKE21، GSTAR، FLUVIAL ارائه شده که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرند. از طرف دیگر با توجه به اهمیت این پدیده و به دلیل اینکه استفاده از مدل‌های فیزیکی نیازمند فضای وسیع، هزینه زیاد و زمان طولانی جهت انجام آزمایشات می‌باشند و اغلب هم توصیه نمی‌شوند، به همین دلیل بسیاری از مسائل مهندسی رودخانه با مدل‌های ریاضی بررسی می‌شوند (عزیزی و همکاران[2]،۲۰۲۰: ۲۰۹). امروزه مدل‌های ریاضی شبه دوبعدی به عنوان یک راه‌حل بهینه و کارآمد، کاربرد گسترده‌ای در مباحث هیدرولیک جریان و رسوب رودخانه‌ها یافته‌اند. در این مدل‌ها، تغییرات سرعت در عرض رودخانه‌ها به کمک حل عددی معادلات دیفرانسیل ناویر-استوکس و در شرایط جریان ماندگار و یکنواخت شبیه‌سازی می‌شود (ظهیری و همکاران[3]، ۲۰۱۸: ۸۳). در این رابطه کاربرد مدل‌های ریاضی مناسب از جمله مدل GSTARS جهت بررسی هیدرولیک جریان‌های سیلابی ضروری و بسیار مورد توجه قرار گرفته است. چرا که می‌تواند بین متغیرهای هندسی و هیدرولیکی رودخانه همبستگی معنی‌داری برقرار نموده و جهت بررسی تغییرات مورفولوژی رودخانه توانایی مناسبی دارد (بایزیدی[4]، ۲۰۱۷: ۶۶).

سری برنامه‌های GSTARS برای حل مسائل پیچیده مهندسی رودخانه در حوضه‌هایی که محدودیت‌های اطلاعات و منابع وجود دارد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مدل برای شبیه‌سازی رفتار رودخانه از مفهوم لوله‌های جریان استفاده می‌شود، به این صورت که کل مقطع عرضی رودخانه به چندین لوله تقسیم شده و سپس محاسبات هیدرولیک جریان و انتقال رسوب در هریک از لوله به صورت مجزا انجام می‌گیرد (یانگ[5]، ۲۰۰۰). بررسی انتقال رسوب و تغییرات بستر رودخانه با استفاده از مدل GSTARS 3 و تابع انتقال رسوب یانگ و تحلیل حساسیت مدل نسبت به تغییر پارامترهای مؤثر بر انتقال رسوب نشان می‌دهد که مدل قابلیت شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات بستر رودخانه در هردو جهت طولی و عرضی را دارد و تابع انتقال یانگ بهترین معادله برای شبیه‌سازی انتقال رسوب می‌باشد. بطنی و همکاران[6] (۲۰۱۵: ۱۹۱) در پیش‌بینی روند رسوبگذاری رودخانه با استفاده از مدل GSTARS 3 و معادلات حاکم بر پدیده های موثر در انتقال، توزیع، انباشت و

1-Ildoromi et al.
2-Azizi et al.
3-Zahiri et al.
4-Bayazidi
5-Yang
6-Batni et al.

آبشستگی رسوب نشان داده شد که مدل یانگ از عملکرد بهتری در پیش‌بینی تغییر پروفیل‌های طولی و عرضی برخوردار است و مدل تطابق خوبی بین پروفیل طولی بستر اولیه با پروفیل طولی محاسبه شده، برای بررسی روند رسوبگذاری در رودخانه‌ها ارائه داده است. بایزیدی و همکاران (۲۰۱۷) در محاسبه توزیع عرضی رسوب رودها با استفاده از مدل ریاضی شبه دوبعدی GSTARS 2.1 و حل عددی معادلات دیفرانسیل ناویر استوکس ثابت شده که عملکرد مدل دو بعدی در برآورد توزیع عرضی سرعت جریان مناسب می‌باشد و رابطه یانگ در شبیه‌سازی رسوب بیشترین دقت را دارد (ظهیری و همکاران، ۲۰۱۸). در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌های عددی جهت بررسی انتقال رسوب و تغییر مورفولوژی رودخانه‌ها در ایران و خارج از کشور بسیار مورد توجه قرار گرفته است، که از آن جمله می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

شرفی و همکاران[1] (۲۰۲۰) در بررسی تغییرات مکانی- زمانی مورفولوژی رودخانه‌ی سیلاخور در استان لرستان به این نتیجه رسیدند که با توجه به ماهیت مئاندری بودن رودخانه سیلاخور، عمده تغییرات در بازه‌ی ۲ و ۳ رودخانه بوده و تغییرات نشان می‌دهد که در بازه‌های اول، دوم و سوم در ۳ دوره‌ی زمانی مورد مطالعه، ساحل راست رودخانه عمدتاً فرسایشی و ساحل چپ در حال افزایش رسوبگذاری بوده است. عزیزی و همکاران (۲۰۲۰)، در بررسی تأثیر تغییر مقاطع عرضی بر طغیان و ظرفیت انتقال رودخانه‌ی آبشینه همدان با استفاده از مدل HEC-RAS و نرم‌افزار SMADA نشان دادند که مقاطع عرضی و تغییر مورفولوژی بستر به دلیل فرسایش و رسوب‌گذاری موجب تغییر مقدار ظرفیت انتقال رسوب و سرعت جریان شده است.کرمی و همکاران (۲۰۱۹) در مدل‌سازی فرسایش خاک و اولویت‌بندی تولید رسوب در حوضه سد ستارخان اهر با استفاده از مدل‌های MUSLE[2] وSWAT[3]، نشان دادند که مناطق بحرانی با مقادیر تولید رسوب زیاد و خیلی زیاد در بالادست حوضه و در بخش‌های شمالی، شمال شرقی، غرب و جنوب غربی قرار دارند. ریبریو[4] (۲۰۱۱) به بررسی آزمایشگاهی تغییرات مورفولوژی بستر رودخانه‌ی اصلی در نتیجه تلاقی یک آبراهه فرعی با زاویه ۹۰ درجه پرداخته و نشان داد که تغییر مورفولوژی رودخانه در محل تلاقی رودخانه فرعی به اصلی در دبی‌های مختلف بسیار متفاوت است. کلون و همکاران[5] (۲۰۱۹) در پژوهشی به ارزیابی پایداری ساحل رودخانه و فرسایش کناره‌ای پرداخته و نشان داد که پسروی ساحل رودخانه توسط جریان فرسایشی، وضعیت ژئوتکنینی رودخانه، و جنس بستر کنترل می‌شود. اودا[6] (۲۰۱۹) در مدل‌سازی و بررسی چند فازی انتقال رسوب و فرسایش بستر و تغییرات مورفودینامیک ساحلی رودخانه با استفاده از مدل‌سازی عددی نشان داد که مدل عددی چند فازی عملکرد مطلوبی را در بیشتر موارد شبیه‌سازی انتقال رسوب و فرسایش نشان می‌دهد و می‌توان از این مدل محدودیت‌های داده‌های تجربی

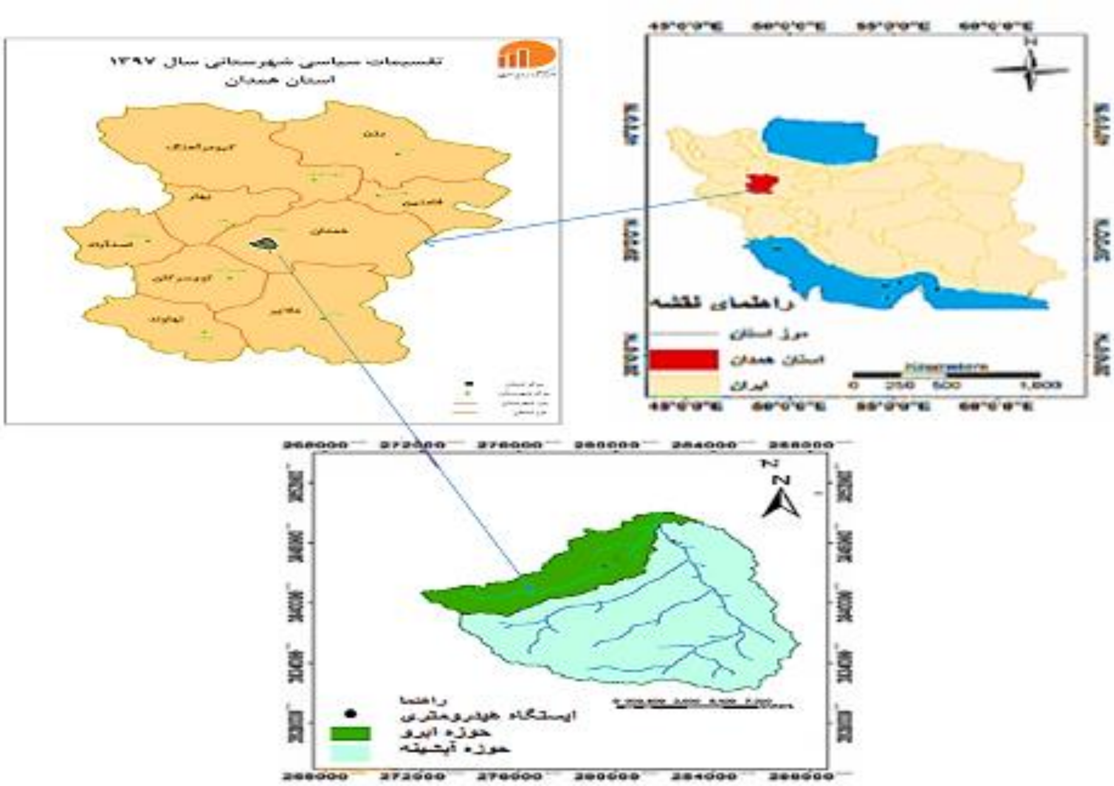
1-Sharafi et al.
2-Modified Universal Soil Loss Equation
3-Soil and Water Assessment Tool
4-Ribeiro
5-Klavon et al.
6-Ouda

را برطرف نمود. لای و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی ظرفیت انتقال جریان و رسوب با مدل سه بعدی برای کانال‌های رو باز سطح آزاد با استفاده از معادلات حاکم بر جریان و رسوب معلق، نشان دادند که مدل تطابق خوبی بین جریان و رسوب با داده‌های تجربی ارائه داده است. ایکبال و همکاران[۱] (۲۰۱۹) برای شبیه‌سازی شستشوی رسوب مخزن سد از دومدل، 2D و نوع متوسط گودونف[۲] استفاده و با مطالعه‌ی مدل فیزیکی و یک فلوم آزمایشگاهی نشان دادند که فرسایش جانبی و تغییرات بستر بر اساس مقدار دبی و ویژگی‌های مورفولوژیکی کانال متغیر و با نتایج آزمایشگاهی نیز مطابقت خوبی دارد. بعلاوه تا کنون تحقیقات زیادی در رابطه با شبیه‌سازی و ضعیت رسوبگذاری رودخانه صورت گرفته که می‌توان به دهقانزاده و همکاران[۳] (۲۰۱۶)، یاسی و همکاران[۴] (۲۰۱۸)، فرجزاده و همکاران[۵] (۲۰۱۷)، نورانی و همکاران[۶] (۲۰۱۷)، اسدی و همکاران[۷] (۲۰۱۷) ، روتریگرز بلالنکو و همکاران[۸] (۲۰۱۰) ، هو و همکاران[۹] (۲۰۱۱)، کین و همکاران[۱۰] (۲۰۱۷) اشاره نمود. بررسی و مرور منابع نشان می‌دهد که تحلیل ریاضی و عددی ظرفیت انتقال رسوب و تغییرات بستر به دلیل کاربرد دقیق و مطابق با واقعیت در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. لذا هدف این پژوهش، شبیه‌سازی وضعیت رسوبگذاری و تغییرات پروفیل طولی و مقاطع عرضی رودخانه‌ی ابرو سد اکباتان همدان با استفاده از مدل ریاضی GSTARS 2.1 می‌باشد، تا بتوان از نتایج این تحقیق علاوه بر پیش‌بینی نرخ انتقال رسوب و تغییرات طولی و عرضی رسوبگذاری، در طرح‌های ساماندهی رودخانه حوضه به ویژه طراحی و اجرای صحیح پروژه‌های مهندسی رودخانه بهره برد.

۲-مواد و روش

رودخانه‌ی ابرو در حوضه‌ی آبریز سد اکباتان در جنوب شرقی شهرستان همدان بین °۳۴، ′۳۴ و °۳۴،′۴۵ عرض شمالی و °۴۸، ′۴۲ و °۴۸ ، ′۲۸ طول شرقی قرار دارد (شکل ۱). رژیم رودخانه تحت اقلیم نیمه مرطوب سرد کوهستانی برفی-بارانی و دائمی بوده و پیش از ورود به سد اکباتان دارای ایستگاه هیدرومتری می‌باشد. متوسط بارندگی سالیانه حوضه ۳۱۲/۹ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالیانه آن ۱۱/۳ درجه سانتی‌گراد است. حداکثر و حداقل ارتفاع حوضه به ترتیب ۳۵۸۰ مربوط به قله الوند و ۲۱۰۰ متر مربوط به خروجی ایستگاه سد اکباتان می‌باشد. از نظر زمین‌شناسی و لیتولوژی به علت قرار گرفتن در مجاورت توده‌ی نفوذی الوند دارای سنگ‌های دگرگونی و نفوذی از نوع گرانیت، شیست، هورنفلس و به شکل محدود دارای تشکیلات آهکی می‌باشد.

1-Iqbal et al.
2-Godunov
3-Dehghanzadeh et al.
4-Yassi et al.
5-Faragzadeh et al.
6-Noorani et al.
7-Asadi et al.
8-Rodriguez-Belanco et al.
9-Hu et al,
10-Keane et al,



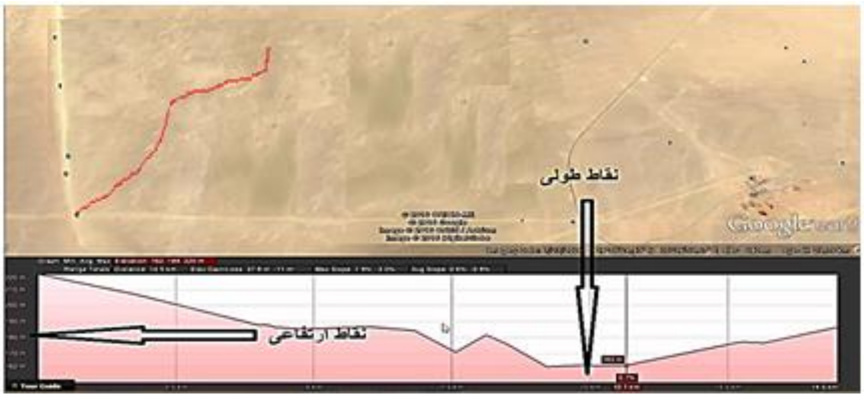
شکل (۱): موقعیت رودخانه‌ی ابرو سد اکباتان در استان و ایران
Fig (1): Location of Ebro River of Ekbatan Dam in the province and Iran

این مطالعه با هدف بررسی ظرفیت انتقال رسوب، میزان فرسایش و رسوبگذاری در بستر رودخانه و نقش آن در تغییرات پروفیل طولی و عرضی رودخانه‌ی ابرو واقع در محدوده‌ی حوضه‌ی سد اکباتان با استفاده از مدل ریاضی Gstars 2/1 انجام شده است. در این پژوهش ابتدا ۱۲ کیلومتر از طول اصلی رودخانه‌ی ابرو از سرشاخه تا ایستگاه هیدرومتری بر اساس خصوصیات هیدرولوژیکی یکسان از نظر عمق، شیب و زبری انتخاب شد، تا تمام بررسی‌ها در یک بازه‌ی نسبتاً ثابت به ویژه، تأثیر جریان (دبی) و ظرفیت انتقال رسوب (فرسایش و رسوبگذاری) بر روی مقاطع عرضی و پروفیل طولی به خوبی تحلیل شود. ابتدا با استفاده از نقشه‌ی توپوگرافی: ۲۵۰۰۰ خط مرکزی جریان، خطوط کناره‌ها، مئاندر و تغییر مقاطع عرضی همراه با بازدیدهای میدانی و داده‌های مشاهداتی در مسیر اصلی رودخانه ابرو، در بازه‌ای به طول ۱۲کیلومتر بررسی شد. سپس با استفاده از تکنیک سونار و با استفاده از Show Elevation Profile اقدام به برداشت طول مسیر ۱۲ کیلومتری از رودخانه ابرو بر

روی تصویر Google Earth گردید و پروفیل طولی و ارتفاع آن از ابتدا تا انتها مشخص و در مرحله‌ی بعد جهت استخراج هزاران نقطه ارتفاعی و طولی فایل بدست آمده از Google Earth در نرم‌افزار اتوکد فراخوانی شد. نقاط برداشت شده شامل بیش از ۲۰ هزار نقطه در فایل اکسل ذخیره و نقشه‌ی توپوگرافی با فاصله ارتفاعی ۵ متر و مقیاس ۱:۲۰۰۰ تهیه شد (شکل ۲).

شکل (۲): استخراج مسیر ۱۲ کیلومتری رودخانه از طریق Google Earth
Fig (2): Extraction of the 12 km route of the river through Google Earth

سپس با استفاده از تکنیک Show Elevation ProfilE اقدام به برداشت طول خط منطقه قرمز رنگ به شکل زیر گردید. فلش عمودی به سمت پایین پروفیل طولی از ابتدا تا انتها و فلش افقی ارتفاع پرفیل طولی رودخانه ابرو را نشان می‌دهد (شکل ۳).



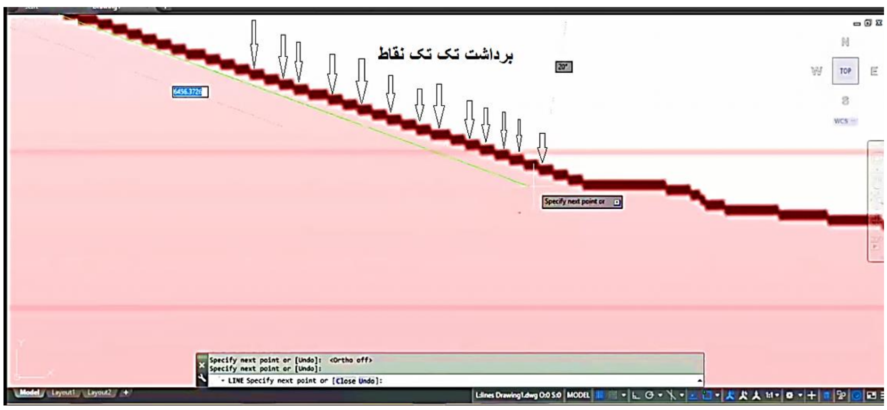
شکل (۳): استفاده از تکنیک Show Elevation Profile جهت برداشت طول خط مسیر رودخانه‌ی ابرو
Fig (3): Using the show elevation profile technique to cut the length of Ebro River line

همان‌طور که در شکل بالا مشخص است، نقاط ابتدا و انتهای بازه‌ی مورد مطالعه از نقطه نظر نقاط طولی و نقاط ارتفاعی اولیه استخراج شده شامل فقط چند نقطه می‌باشد که برای ساختن هندسه واقعی رودخانه در مدل بسیار کم می‌باشد. بنابراین در مرحله بعد جهت استخراج هزاران نقطه ارتفاعی و طولی از نرم‌افزار اتوکد استفاده و بدین ترتیب فایل بدست آمده از Google Earth در نرم‌افزار اتوکد به شکل زیر فراخوانی شد (شکل ۴).

شکل (۴) : نحوه‌ی استخراج هزاران نقطه ارتفاعی و طولی از Google Earth در نرم‌افزار اتوکد

Fig (4): How to extract thousands of height and longitude points from Google earth in AutoCAD software

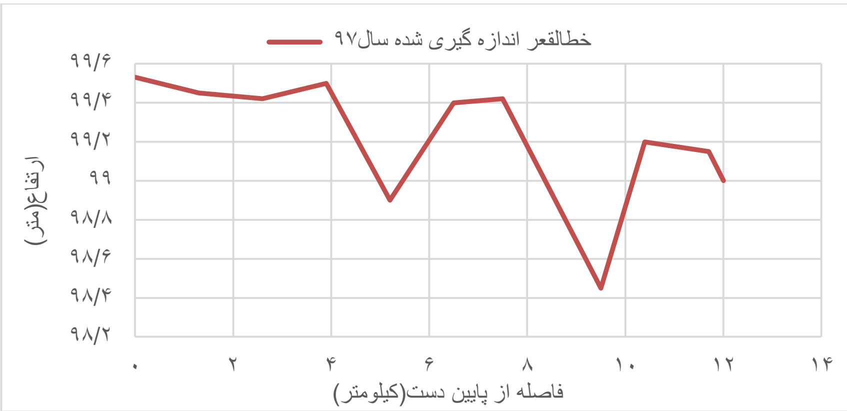
سپس در نرم‌افزار اتوکد از طریق تکنیک Point به شکل زیر اقدام به برداشت نقاط طولی گردید (شکل ۵).



شکل(۵): برداشت نقاط طولی در نرم افزار اتوکد از طریق تکنیک Point

Fig (5): Longitudinal points in AutoCAD software using point technique

به منظور شبیه‌سازی میزان انتقال رسوبات از داده‌های مقاطع عرضی سال ۱۳۸۴ و ۱۳۹۷، اطلاعات دبی و رسوب مربوط به سال‌های ۸۴-۹۷ ایستگاه ابرو، داده‌های رقوم سطح آب محاسبه شده و خطالقعر رودخانه‌ی ابرو و نقشه‌ی DEM نیز استفاده شده است. بعلاوه از نرم‌افزار TH[1] جهت کنترل و صحت داده‌ها و از آزمون اسمیرنوف-کلوموگروف در سطح p کمتر از ۵ درصد جهت بررسی همگنی داده‌های دبی جریان و رسوب ایستگاه ابرو سد اکباتان استفاده و پس از آنکه از کافی بودن تعداد داده‌ها و همگن بودن آنها اطمینان حاصل شد، ابتدا با روش‌های آماری، رسوب معلق ارزیابی و میزان کارایی و دقت در ایستگاه ابرو مشخص ودر نهایت به مدلسازی داده‌های آنالیز شده توسط مدل عددی Gstars 2/1 و معادلات انتقال رسوب پرداخته شد. بعد از کالیبره کردن مدل به کمک داده‌های هیدروگرافی رودخانه، نحوه‌ی رسوبگذاری در پـروفیل طولی و مقاطع عرضی برای حالت‌های بستراولیه، هیدروگرافی شده، با نرم‌افزار GSTARS 2.1 برای یک دوره‌ی ۱۳ ساله (۱۳۸۴ تا ۱۳۹۷) شبیه‌سازی شد. در نهایت نتایج شبیه‌سازی با مقادیر مشاهداتی ایستگاه ابرو توسط معیارهای (ARE)[2] و (RRMS)[3] مقایسه و ارزیابی گردید (شکل ۶).



شکل(۶): نمودار پروفیل طولی رودخانه‌ی ابرو در بازه‌ی مورد مطالعه (۱۳۹۷)

Fig (6): Diagram of Longitudinal Profile of Ebro River in the Studied Period (2018)

مدل ریاضی GSTARS 2.1

مدل GSTARS 2.1[4] جدیدترین نوع از مدل ریاضی برای شبیه‌سازی جریان آب و انتقال رسوب بر اساس فرضیه‌ی تیوب جریان، در رودخانه‌های آبرفتی می‌باشد که می‌تواند جهت حل مسائل پیچیده مهندسی رودخانه با توجه به منابع و اطلاعات محدود مورد استفاده قرار گیرد (مولیناس و همکاران، ۱۹۸۶). این مدل می‌تواند

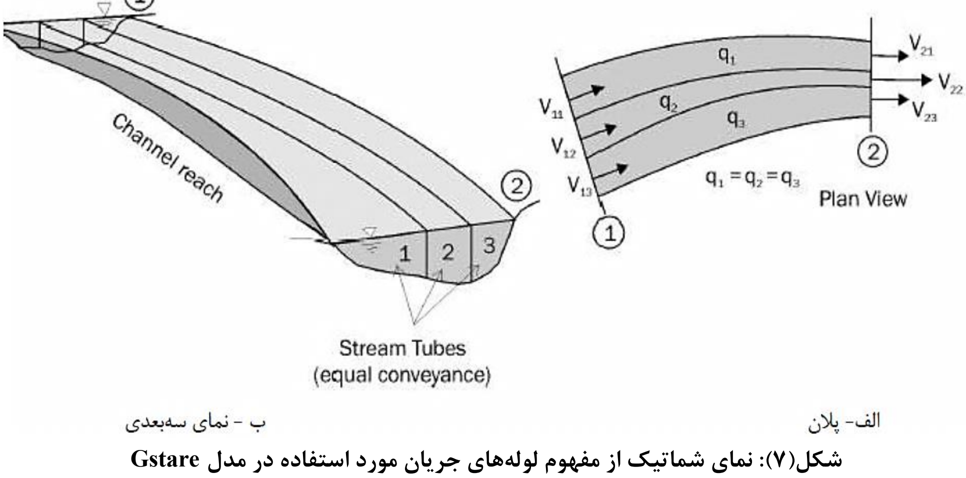
1-Technical Hydrolog
2- Relative Error2 Absolute
3-Root Relative Mean Square Error
4-Generalized Stream Tube for Alluvial River Simulation

تغییرات طولی و عرضی جریان و رسوبگذاری را به صورت رفتار شبه دو بعدی محاسبه و شبیه‌سازی نماید (یانگ و همکاران، ۲۰۰۰). همچنین دارای قابلیت‌های زیادی جهت محاسبه‌ی مشخصات هیدرولیکی مقاطع روباز، محاسبه پروفیل سطح آب در شرایط جریان زیربحرانی، فوق بحرانی و ترکیبی را دارد و به خوبی می‌تواند شبیه‌سازی تغییرات پارامترهای هیدرولیکی و رسوبی را در دو جهت طولی و عرضی با استفاده از مفهوم تیوب‌های جریان و ۱۳ معادله‌ی تجربی انتقال رسوب انجام دهد (یانگ و همکاران، ۱۹۹۸).

معادلات حاکم در مدل ریاضی GSTARS 2.1

هیدرولیک جریان

در این مدل با استفاده از تیوب‌های جریان، تغییرات سرعت در عرض رودخانه به صورت شبه دو بعدی برآورد و سپس مقطع عرضی به چند تیوب جریان با ظرفیت انتقال یکسان (دبی‌های یکسان با مساحت و سرعت متفاوت) تقسیم می‌شود. تا تیوب‌های جریان، مانند کانال‌های یک بعدی معمولی با مشخصات هیدرولیکی معین روندیابی رسوب را درون هر تیوب جریان، تقریباً مثل کانال‌های مستقل از هم تحلیل نماید. ضمن اینکه حداکثر تعداد تیوب‌های جریان در مدل GSTARS 2.1 پنج عدد در نظر گرفته شده است که در رودخانه‌های با دبی کم حداکثر به دو و نهایتاً ۳ تیوب جریان تقسیم می‌شود. در این مرحله با استفاده از تیوب‌های جریان، تغییرات سرعت در عرض رودخانه ابرو به صورت شبه دو بعدی برآورد شده و سپس مقطع عرضی به چند تیوب جریان با ظرفیت انتقال یکسان (دبی‌های یکسان با مساحت و سرعت متفاوت) تقسیم شد (شکل ۷).



شکل(۷): نمای شماتیک از مفهوم لوله‌های جریان مورد استفاده در مدل Gstare

الف) پلان ب) نمای سه بعدی (مولیناس و همکاران ۱۹۸۶)

Fig (7): Schematic of the Concept of Flow Tubes Used in the Gstare Model
A) Plan b) Three-Dimensional View (Molinas et al. 1986)

معادله‌ی انرژی و مومنتوم

جهت محاسبه‌ی رسوبگذاری جریان، ابتدا باید پروفیل سطح آب محاسبه شود که مدل GSTARS 2.1 از روش گام استاندارد و معادلات انرژی و مومنتوم جهت محاسبه پروفیل سطح آب استفاده می‌کند.

$$Z+Y+\propto \frac{V2}{2g} = H \tag{1}$$

که در آن: Z ارتفاع کف، Y عمق آب، v *سرعت* جریان، ∝ ضریب توزیع سرعت، H ارتفاع خط انرژی از مبنا و g شتاب جاذبه می‌باشد. به این ترتیب شرایط جریان زیربحرانی، فوق بحرانی و ترکیبی (پرش هیدرولیکی) با استفاده از رابطه‌ی ۲ قابل حل است (ظهیری و همکاران، ۲۰۱۸: ۸۳).

$$\frac{Q\gamma}{g}\,(\beta2V2 - \beta1V1) = P1 - P2 + wgsin\theta - Ff \tag{2}$$

که در آن γ وزن واحد آب، β ضریب مومنتوم، P فشار در مقطع عرضی داده شده، w_g وزن آب محدود به *مقطع ۱ و ۲*، θ شیب کف بستر، F_f مجموع اصطکاک خارجی در طول مرز آبراهه.

محاسبه‌ی تغییرات تراز بستر

بعد از ارزیابی و محاسبه پروفیل سطح آب، محاسبات رسوب به طور مجزا در هر تیوب جریان انجام شد. این محاسبات با فرض عدم تبادل جرم بین تیوب‌های جریان انجام شده است. جهت محاسبه‌ی رسوبگذاری جریان، محاسبات بر اساس بقای جرم رسوب با استفاده از رابطه‌ی پیوستگی رسوب رابطه‌ی ۳ انجام شده است.

$$\frac{\partial Qs}{\partial x} + n\,\frac{\partial Ad}{\partial t} + \frac{\partial As}{\partial t} - qs = 0 \tag{3}$$

که در آن n حجم رسوب در واحد حجم مصالح بستر رودخانه، A_d حجم رسوب بستر در واحد طول رودخانه، A_s حجم رسوب معلق در واحد طول رودخانه، Q_s دبی حجمی رسوب، q_s دبی رسوب ورودی جانبی، x فاصله طولی و t زمان می‌باشد (یانگ[1] و همکاران، ۲۰۰۰). در این مدل فرض بر این است که میزان تغییر در رسوب معلق در یک مقطع عرضی نسبت به تغییر در بستر رودخانه قابل صرف نظر کردن است. همچنین از اثر دبی رسوب ورودی جانبی نیز صرف‌نظر شده است. بنابراین با این رویکرد جملات سوم و چهارم بالا حذف شده و فرض براین است که طی گام زمانی، پارامترهای رسوبی در یک مقطع عرضی به صورت ثابت فرض می‌شوند. بنابراین در این بررسی گام‌های زمانی در محاسبات کوچک فرض شده است. هر چند که در رودخانه ابرو با توجه به مقدار دبی و شرایط رودخانه‌ای آن بدیهی است تغییرات پارامترهای هیدرولیکی جریان بسیار سریع‌تر از پارامترهای رسوبی باشد. به همین علت، محاسبات هیدرولیک جریان و رسوب به طور مجزا انجام شده است.

1-Yang

در این رابطه از یک معادله‌ی دیفرانسیلی ساده شده بالا در هر تیوب جریان و برای هر گروه دانه‌بندی مصالح بستر به کمک روش تفاضل‌های محدود و الگوی صریح حل شده است بنابراین بر اساس دانه‌بندی ذرات (شن ریز، سیلت و رس) تغییر تراز بستر رودخانه در هر مقطع عرضی در رودخانه ابرو با حل این معادله محاسبه شده است.

لازم به ذکر است فرضیات فوق زمانی قابل اعمال است که تغییرات جزی در هندسه مقطع عرضی وجود داشته باشد، یعنی فرسایش و رسوبگذاری قابل توجهی در هر گام زمانی رخ ندهد، که این فرض امکان مجزا نمودن محاسبات روندیابی جریان آب و رسوب را فراهم می‌آورد. در عمل این شرایط را فقط می‌توان با انتخاب گام‌های زمانی به اندازه کافی کوچک ایجاد نمود، در مدل Gstare ابتدا نیمرخ‌های سطح آب محاسبه و سپس مقطع عرضی به چند مقطع با دبی مساوی مطابق شکل ۳ تقسیم می‌گردد که این مقاطع دارای دبی‌های مساوی به عنوان لوله‌های جریان فرض می‌گردند.

محاسبه‌ی ظرفیت انتقال رسوب

ظرفیت انتقال رسوب هر مقطع از رودخانه در یک گام زمانی از رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود (یانگ و همکاران، ۱۹۹۸). مدل ریاضی GSTARS 2/1 با استفاده از معادله‌ی انرژی و مومنتوم به تحلیل هیدرودینامیک جریان می‌پردازد و برای تحلیل بخش رسوب جریان، قادر به استفاده از ۱۳ معادله‌ی حاکم در زمینه‌ی برآورد رسوب در محدوده‌ی شن، ماسه رس و لای می‌باشد.

$$Ct = \sum_{k=1}^{n} pkCk \qquad (۴)$$

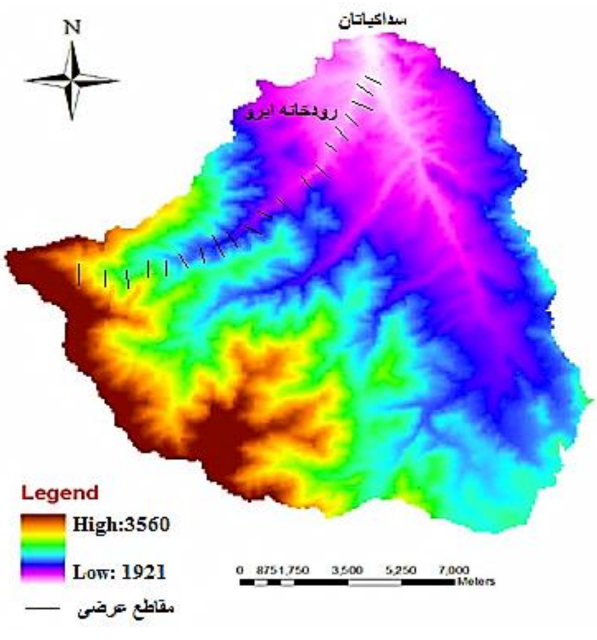
که $\underline{C_t}$ ظرفیت کل انتقال رسوب، P_k درصد مصالح موجود از گروه دانه‌بندی k در مصالح بستر، ظرفیت انتقال رسوب از هر گروه دانه‌بندی و N تعداد گروه‌های دانه‌بندی است. C_k بر اساس یکی از ۱۳ رابطه‌ی تجربی، انتقال رسوب موجود در مدل GSTARS 2.1 محاسبه می‌شود (یانگ و همکاران، ۱۹۹۸). در این بررسی ضمن استفاده از معادلات یانگ، میر- پیتر- مولر، توفالتی، اکرز- وایت، انگلوند- هانسن از داده‌های موجود و برداشت‌های سال ۱۳۸۴و ۱۳۹۷ جهت ارزیابی رسوب و مقایسه استفاده شده است. دلیل استفاده از مدل‌های مختلف این است که هر کدام از این مدل‌ها برای رسوبات با قطر بین ۰/۰۰۴ تا ۰/۰۶۲۵ میلی‌متر یعنی رس و سیلت بیشتر و شن ریز کمتر به کار گرفته شده است.

حداقل‌سازی توان کل رودخانه

در این مدل علاوه بر تغییرات تراز بستر رودخانه، تغییرات عرضی رودخانه نیز قابل شبیه‌سازی است. مبنای تغییرات عمق و عرض رودخانه، تئوری‌های کم ترین نرخ انرژی مصرفی و کم‌ترین توان رودخانه است. طبق این تئوری وقتی یک سیستم پویا به حالت تعادلی برسد آنگاه مصرف انرژی در کم‌ترین مقدار است. با توجه به تغییرات مداوم دبی جریان و رسوب، احتمال اینکه یک رودخانه طبیعی به حالت تعادلی برسد بسیار کم است. اما رودخانه‌ها پارامترهای خود از قبیل هندسه مقطع، شیب طولی، زبری و ... را به‌گونه‌ای تنظیم می‌نمایند که نرخ انرژی مصرفی بر اساس دبی جریان و رسوب بالادست به‌کم‌ترین مقدار برسد (یانگ و همکاران، ۱۹۹۸).

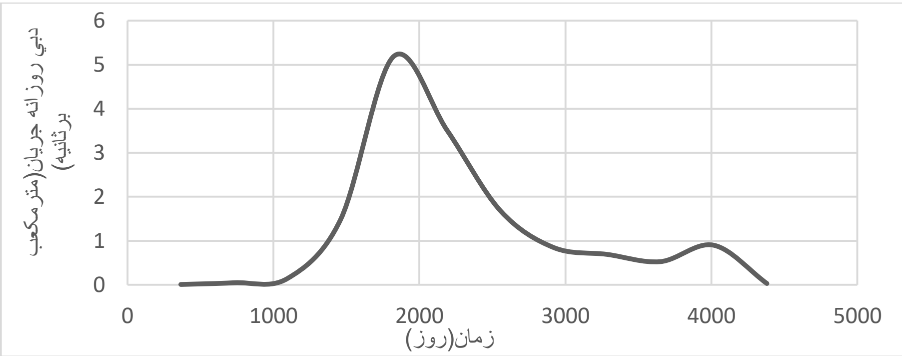
داده‌های مورد نیاز مدل‌سازی در مدل Gstars 2.1

در این مدل ابتدا محاسبات پروفیل سطح آب انجام و سپس محاسبات مربوط به روندیابی رسوب آنالیز شده است. اطلاعات رسوبات مقاطع مورد نظر و سایر داده‌های ورودی مدل در سه بخش، هندسی، هیدرولیکی و رسوبی آماده‌سازی و وارد مدل ریاضی GSTARS 2.1 گردید.در بخش هندسی، پلان عمومی همراه با مقاطع عرضی رودخانه به مدل معرفی شد. در این تحقیق بازه‌ای به طول ۱۲ کیلومتر مشتمل بر۲۰ مقطع عرضی استفاده شده است (شکل ۸).



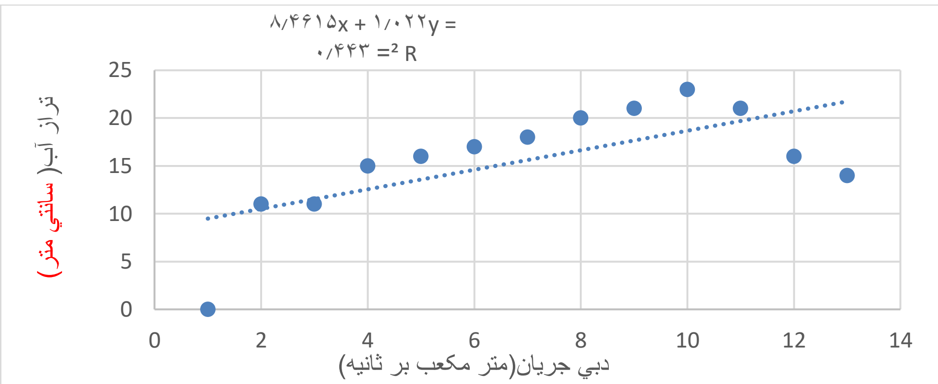
شکل (۸): موقعیت مقاطع عرضی بر روی رودخانه‌ی ابرو و نقشه‌ی مدل ارتفاعی رقومی
Fig (8): Location of Cross Sections on Ebro River and Digital Elevation Model Map

در بخش هیدرولیکی جریان از داده‌های هیدرولیکی شامل اطلاعات ژئومتری، ضرایب زبری، ضرایب افت و داده‌های دبی–اشل و هیدروگراف روزانه دبی جریان برای تعیین شرایط مرزی بالادست و پایین دست برای هر گام زمانی، به مدل معرفی شده است. به منظور واسنجی هیدرولیکی مدل از هیدروگراف روزانه دبی جریان (از سال ۱۳۸۴تا سال ۱۳۹۷) در ایستگاه بالادست (ابرو) و منحنی دبی - اشل به عنوان اطلاعات هیدرولیکی مورد نیاز مدل استفاده شد با توجه به شکل ۹ میانگین داده‌های ورودی در طول دوره‌ی آبی ۹ ساله مربوط به دبی آب ۱/۲۲ متر مکعب بر ثانیه، مقـدار ماکزیمم دبی آب ۵/۱۹ و مقدار مینیمم آن ۰/۰۰۶۴ متر مکعب بر ثانیه و دمای آب که در میزان رسوب اثرگذار و یکـی از داده‌های لازم برای تحلیل رسوب می‌باشد در این بررسی به طور میانگین ۱۲/۲درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است (اشکال ۹ و ۱۰).



شکل (۹): نمودار هیدروگراف دبی جریان روزانه رودخانه‌ی ابرو در ایستگاه ابرو (شرط مرزی بالادست)

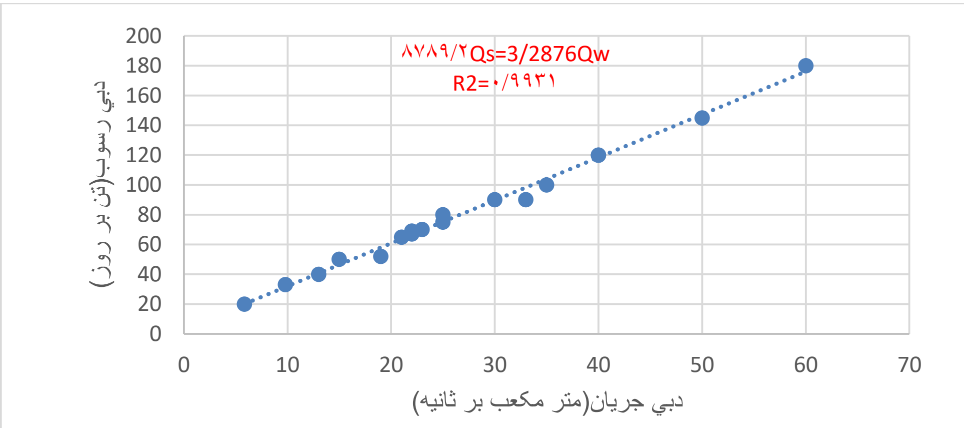
Fig (9): Hydrograph flow discharge rate the day Ebro River station (Upstream Border Condition)



شکل (۱۰): نمودارمنحنی دبی – اشل رودخانه ابرو (شرط مرزی پایین‌دست)

Fig (10): Discharge –(Eshel) rating curve of the Ebro River (Downstream Boundary Condition)

در بخش اطلاعات رسوبی منحنی سنجه رسوب معلق ایستگاه ابرو سد اکباتان به عنوان شرط مرزی ورودی به کار گرفته شد (شکل ۱۱). بعلاوه دبی رسوبات معلق که بصورت تابعی از دبی جریان می‌باشد و با توجه به آمار موجود و منحنی سنجه که در شکل ۱۱ ارائه شده و به صورت رابطه‌ی $Q_s=$ ۳/۲۸۷۶ $Q_w^{۸۷۸۹/۲}$ می‌باشد، جهت واسنجی به مدل معرفی گردید. داده‌های مربوط به این بخش شامل رسوب ورودی، دما، درجه‌بندی رسوب و پارامترهای مربوط به انتقال رسوب چسبنده می‌باشند. در شکل ۱۱ رابطه دبی جریان و دبی رسوب برای یک روز به صورت نمونه ارائه داده شده که همبستگی و دقت داده‌های مورد استفاده از لحاظ آماری را نشان می‌دهد. بعلاوه چون منطقه‌ی مورد مطالعه به واسطه‌ی وجود سد مخزنی اکباتان و پایین‌دست آن سد آبشینه که هر دو از حساسیت بالای از لحاظ طغیان‌های فصلی و بار رسوبی معلق برخوردار است، دارای دو ایستگاه هیدرومتری و رسوب‌سنجی به نام ایستگاه یلفان و ایستگاه ابرو با طول دوره‌ی آماری ۴۰ ساله می‌باشد و داده‌های آن بصورت ۲۴ ساعته ثبت و نگهداری می‌شود. بنابراین با دسترسی به داده‌های ایستگاه هیرومتری و رسوب‌سنجی ایستگاه ابرو قبل ازورودی به مخزن سد اکباتان بررسی دقیقی از لحاظ میزان رسوب وارده به مخزن سد انجام شده، است.



شکل (۱۱): نمودار منحنی سنجه رسوب معلق ایستگاه ابرو
Fig (11): Suspended sediment rating curve of the Ebro River station

 بررسی آمار موجود نشان می‌دهد که بستر رودخانه ابرو در محدوده‌ی مورد مطالعه، بیشتر از جنس رس وسیلت (دانه‌ریز) و مقدار کمی شن ریز می‌باشد. قطر متوسط رسوبات عبوری از ایستگاه‌های هیدرومتری به ترتیب ۰/۰۱۷و ۰/۰۱۴ می‌باشد و بیانگر قرار گرفتن ذرات خاک در گروه ذرات ریزدانه و چسبنده (رس و سیلت) می‌باشد. لذا قطر متوسط رسوبات معلق عبوری به طور میانگین برابر ۰/۰۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است (شکل۱۲).

شکل(۱۲): نمودار منحنی دانه‌بندی ذرات رودخانه ابرو
Fig (12): Particle size distribution curve of the Ebro River

واسنجی مدل ریاضی Gstars 2/1

جهت کالیبراسیون و واسنجی بخش هیدرودینامیک و رسوبی جریان، از اطلاعات هیدرولیکی و هیدرومتری ایستگاه اندازه‌گیری رودخانه ابرو، داده‌های تغییرات رقوم سطح آب در سال ۱۳۸۴، داده‌های هندسی مقطع عرضی برداشت شده در سال‌های ۱۳۸۴و ۱۳۹۷ و معادلات انتقال رسوب در یک دوره‌ی آماری ۱۳ ساله استفاده شده است. سپس با اجرای مدل، نتایج حاصل از مدل ریاضی Gstars 2/1، با مقادیر مشاهداتی ایستگاه ابرو در حوضه‌ی سد اکباتان مقایسه شد. به منظور تأیید صحت نتایج از معیارهای (ARE)[۱] و (RRMS)[۲] استفاده گردید:

$$\text{RRMS}= \left[\frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(pi-Qi)2}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(pi-Qi)} \right]^{0/5} \qquad (۵)$$

$$\text{ARE} = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}[pi-Qi]}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}Qi} \qquad (۶)$$

در این روابط n تعداد مقاطع عرضی، p_i عمق خط‌القعر مقاطع عرضی شبیه‌سازی شده توسط مدل و Q_i عمق خط‌القعر مقاطع عرضی به دست آمده در عملیات میدانی می‌باشد.

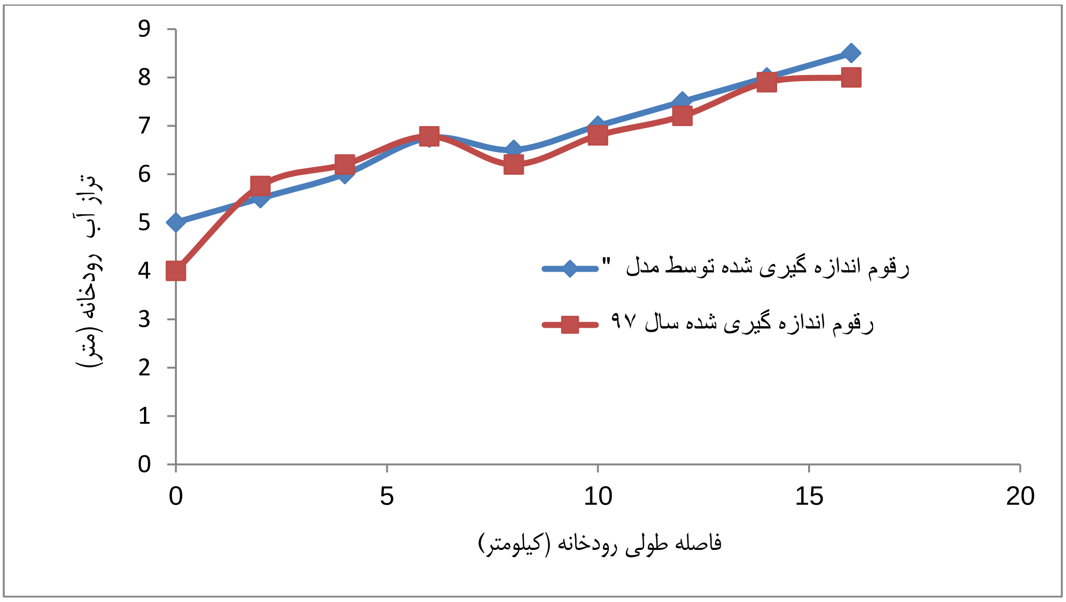
1- Relative Error Absolute
2- Root Relative Mean Square Error

۳-یافته‌ها و بحث

الف – واسنجی مدل ریاضی

واسنجی هیدرولیک جریان

در بخش هیدرولیکی جریان از هیدروگراف روزانه دبی جریان (از سال ۱۳۸۴تا سال ۱۳۹۷)، منحنی دبی – اشل، داده‌های مربوط به دبی در طول دوره‌ی آبی ۹ ساله شامل دبی‌میانگین آب ۱/۲۲، دبی ماکزیمم ۵/۱۹ و دبی مینیمم آن ۰/۰۰۶۴ متر مکعب بر ثانیه مربوط به ایستگاه ابرو، و برای تحلیل رسوب دمای آب به طور میانگین ۱۲/۲درجه سانتی‌گراد در مدل استفاده شده است. به این منظور مدل ریاضی GSTARS 2/1 به ازای دبی ۵/۱۹ متر مکعب بر ثانیه بر اساس داده ایستگاه هیدرومتری رودخانه ابرو و مقدار ضریب زبری مانینگ برابر ۰/۰۳ اجرا و نتایج پروفیل سـطح آب محاسباتی با مقادیر واقعی رقوم سطح آب اندازه‌گیری شده در سال ۱۳۹۷ مقایسه گردید. نتایج این مقایسه بیانگر مطابقت قابل قبول رقوم سطح آب محاسباتی و مشاهداتی میباشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش مقدار این ضریب در مقاطع انتهایی رودخانه و نزدیک سد میزان رسوب-گذاری به دلیل کاهش سرعت جریان افزایش پیدا می‌کند. ولی چون شیب و سرعت هر دو در میانه محدوده مورد بررسی کمتر از ابتدای منطقه و بیشتر از انتها بوده، لذا میزان رسوبگذاری در میانه نسبت به ابتدا بیشتر و نسبت به پایین دست منطقه‌ی مورد مطالعه کمتر می‌باشد. به عبارتی افزایش ضریب مانینگ منجر به ته‌نشینی رسوبات در قسمت‌های پر پیچ و خم مسیر رودخانه گردیده است. که تداوم چنین وضعیتی منجر به توسعه‌ی پیچ‌وخم‌های رودخانه و مئاندری شدن آن می‌گردد. شکل ۱۳ واسنجی هیدرولیکی مدل ریاضی GSTARS 2/1 به ازای دبی جریان ۵/۱۹ مترمکعب بر ثانیه را نشان می‌دهد. با اجرای مدل توسط معادله انتقال رسوب توفالیتی مشخص شد که پروفیل سطح آب مشاهداتی و پروفیل سطح آب محاسبه شده توسط مدل مطابقت خوبی باهم داشته و روند کلی تغییرات هر دو نمودار به موازات یکدیگر می‌باشد که بیانگر دقت قابل قبول رابطه توفالیتی برای مدلسازی انتقال جریان می‌باشد. بررسی شکل ۱۳ نشان می‌دهد که تراز آب رودخانه از ابتدای بازه‌ی (۱۲–۸ کیلومتری از پایین دست) تا میانه محدوده مورد مطالعه اندکی افزایش و به طرف پایین‌دست بازه (۴ کیلومتری تا آخر بازه) روند کاهشی داشته است. بنابراین مشاهده می‌شود مدل توفالیتی این روند را به طور دقیق شبیه‌سازی کرده است. بررسی مقادیر تراز آب اندازه‌گیری شده بر حسب متر در سال ۱۳۹۷ و تراز آب محاسبه شده توسط مدل نشان می‌دهد که همبستگی ۰/۹۷۸ درصد بین داده‌های محاسباتی مدل و مشاهداتی ارتفاع آب وجود دارد.



شکل (۱۳): نمودار واسنجی هیدرولیکی مدل ریاضی GSTARS 2/1 به ازای دبی جریان ۵/۱۹ مترمکعب بر ثانیه رودخانه ابرو

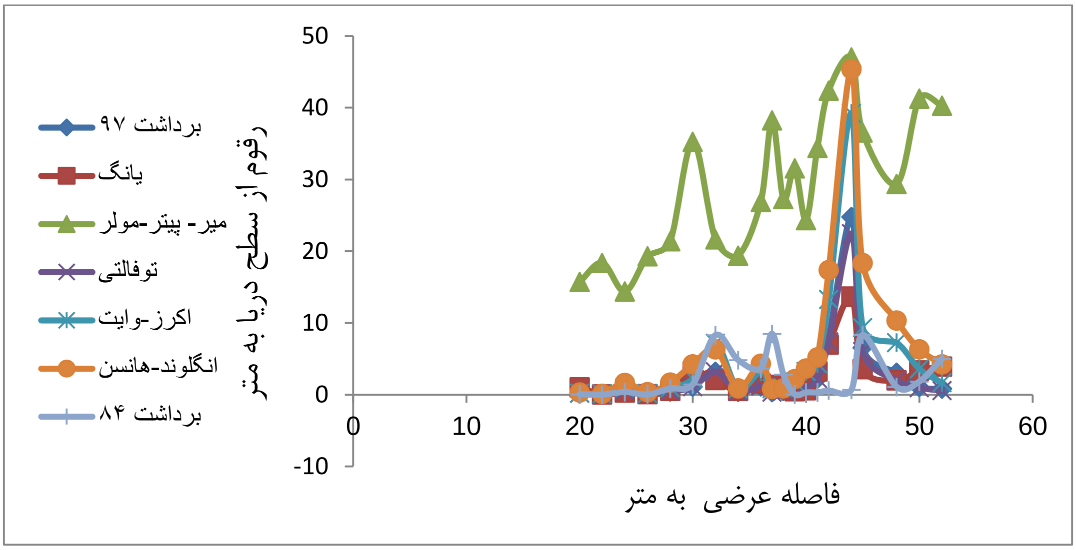
Fig (13): Hydraulic calibration diagram of the GSTARS 1.2 Mathematical model Per flow rate of 5.19 m^3/sec Ebro River

واسنجی هیدرولیک رسوب

نتایج مقایسه‌ی معادلات انتقال رسوب نشان می‌دهد که روابط یانگ و همکاران (۱۹۹۶) مطابقت بهتری نسبت به داده‌های مشاهداتی داشته و بقیه‌ی روابط رسوبی، شامل روابط میر[۱]، پیتر[۲]، مولر[۳] بیشترین خطا را دارند. طبق مطالعات یانگ (۱۹۹۶) و مولیناس و همکاران (۱۹۸۶) در رودخانه‌های آبرفتی رابطه رسوبی توفالتی مطابقت بهتری با واقعیت دارد که در این پژوهش نیز تا حدودی همین نتایج بدست آمده است. بررسی بستر رودخانه بر اساس بازدیدهای میدانی و نتایج حاصل از دانه‌بندی بستر نشان می‌دهد که بازه‌ی مورد مطالعه دارای بستری آبرفتی می‌باشد. بنابراین رابطه‌ی توفالیتی بیشترین تطابق با رودخانه در مدل GSTARS 2/1 را دارد. بررسی شکل (۱۴) همچنین نشان می‌دهد که مقطع عرضی رودخانه از سال ۸۴ تا ۹۷ دارا ی تغییرات مورفولوژیکی قابل ملاحظه‌ای می‌باشد. به طوری که بستر از حالت V شکل به U شکل در حال تغییر است که این موضوع به فرایند فرسایش و رسوبگذاری در رودخانه‌ی ابرو سد اکباتان و سیلاب‌های کوچک اما با تکرار و فراوانی زیاد مربوط می‌باشد که موجب کف‌کنی و فرسایش حاشیه رودخانه شده است. بررسی مقطع عرضی

1-Meyer
2-Peter
3-Muller

رودخانه نشان می‌دهد که فرسایش در ساحل چپ نسبت به ساحل راست بیشتر می‌باشد و بیانگر این است که عدم تقارن آبراهه از سال ۱۳۸۴ نسبت به سال ۱۳۹۷ بیشتر و کج‌شدگی در بستر رودخانه رخ داده است. بررسی‌های میدانی نشان داد که ساحل راست رودخانه به دلیل انجام طرح‌های مهندسی رودخانه از قبیل تثبیت ساحل، اختلاف زیادی با نتایج مدل ریاضی دارد. با بررسی تغییرات بستر در محل ایستگاه رودخانه‌ی ابرو در سد اکباتان مشخص شد که طی ۱۳ از سال ۸۴ تا ۹۷ رسوبگذاری فرایند غالب در این ایستگاه می‌باشد و کلیه روابط رسوبی مورد استفاده نیز در این پژوهش همین فرآیند را پیش‌بینی و تأیید نموده‌اند.



شکل (۱۴): واسنجی روابط رسوبی برای مقطع عرضی (سال ۸۴ –۹۷) با معادلات برآورد رسوب در مدل GSTARS 2/1

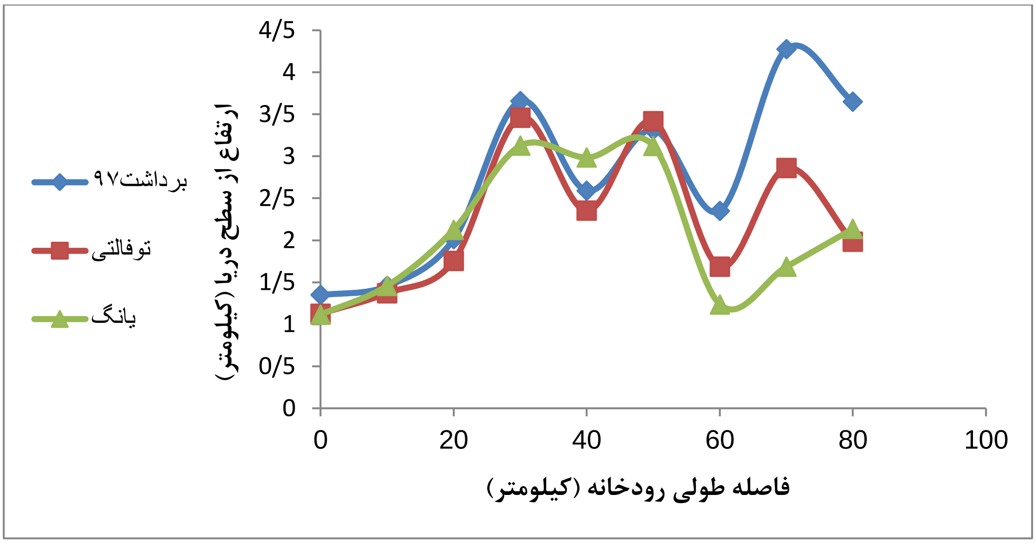
Fig (14): Calibration of sediment relations for cross section (year 2005-2019) with dediment Estimation equations in GSTARS model 1.2

بررسی آمار رسوب سنجی در ایستگاه ابرو سد اکباتان نشان می دهد که میزان رسوبات حمل شده از رودخانه ابرو به پایین دست پس از ۱۳سال با استفاده از معادله توفالیتی در مدل Gstars 2/1، برابر ۱/۳۶ میلیون متر مکعب و مقدار اندازه‌گیری شده برابر ۱/۴۲ میلیون متر مکعب به ازای هر سال است. بنابراین با استفاده از منحنی سنجه – رسوب معلق ایستگاه ابرو و با در نظر گرفتن حداقل ۳ درصد از رسوب معلق به عنوان بار بستر بر اساس محاسبات و داده‌های سد اکباتان موجود در امور آب استان همدان، حجم رسوب ورودی از ایستگاه هیدرومتری ابرو با استفاده از معادله‌ی توفالیتی در مدل Gstars 2/1 حدود ۱/۴ میلیون متر مکعب در سال برآورد شده است. نزدیکی مقدار رسوب محاسباتی معادله‌ی توفالیتی با مقدار مشاهداتی ایستگاه ابرو نشان می‌دهد که مدل به خوبی توانسته میزان حجم رسوبات حمل شده در این سال‌های آماری را شبیه‌سازی کند.

بنابراین از نتایج پیش‌بینی نرخ رسوب‌گذاری، توزیع طولی و عرضی رسوبگذاری به خوبی می‌توان در طرح‌های ساماندهی رودخانه و مدیریت سیلاب استفاده نمود با توجه به اینکه بخش عظیمی از رسوبات رودخانه به شکل سیلت و رس معلق و از جنس رسوبات شسته شده می باشدنتایج نشان داد که بخش زیادی از رسوبات در بازه مورد مطالعه ته‌نشین شده است، که این محاسبات با نتایج مطالعات ظهیری و همکاران (۲۰۱۸)، دهقانزاده و همکاران (۲۰۱۶)، بایزیدی و همکاران (۲۰۱۷) مطابقت دارد.

ب-صحت‌سنجی مدل ریاضی

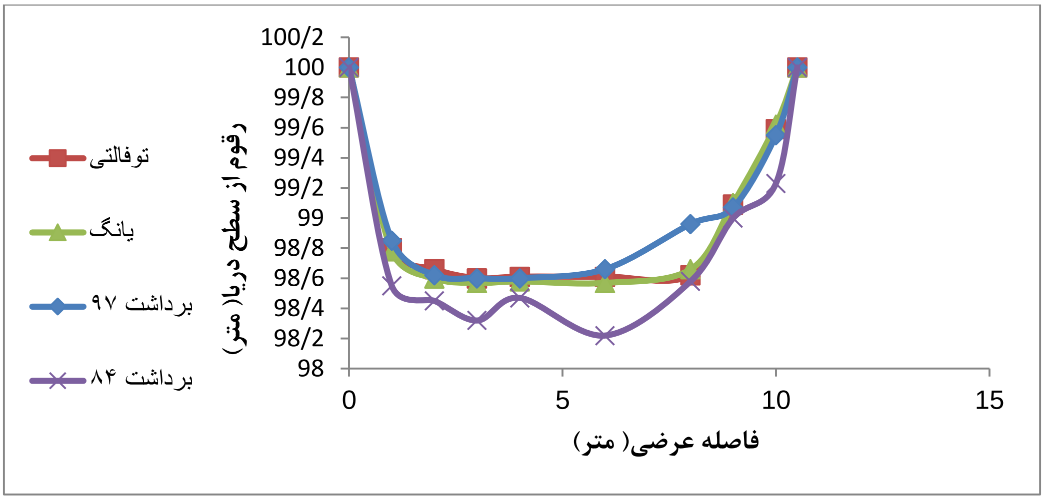
به منظور صحت‌سنجی مدل و بررسی تغییرات رسوبگذاری و فرسایش در راستای پروفیل طولی رودخانه (تالوگ) و میزان نهشته شدن رسوبات، از خط‌القعر اولیه سال ۹۷ و خط‌القعر اندازه‌گیری شده مربوط به معادلات توفالیتی و یانگ مدل استفاده شد بررسی و مقایسه تغییرات طولی رودخانه در بازه‌ی مورد مطالعه به طول ۱۲ کیلومتر در سال ۹۷ (مشاهداتی) با خط‌القعر محاسباتی مدل (محاسباتی) شکل ۱۵ نشان می‌دهد که خط‌القعر اولیه مطابقت خوبی به ویژه با معادله‌ی توفالیتی به خصوص در ابتدای بازه‌ی مورد مطالعه دارد. این امر نیز به دلیل‌اجرای طرح های مهم ساماندهی رودخانه از جمله احداث سازه‌های آبخیزداری در این بازه می‌باشد، که موجب افزایش رقوم بستر رودخانه شده است. به طوری که با افزایش تراز آب میزان رسوبگذاری در پایین دست نیز افزایش یافته است.



شکل (۱۵): صحت‌سنجی مدل ریاضی با توجه به تغییرات پروفیل طولی (خط‌القعر) رودخانه ابرو سد اکباتان

Fig (15): Validation of the Mathematical model according to the changes in the longitudinal profile (Bottom Line) of the Ebro River of Ekbatan Dam

در مرحله‌ی صحت‌سنجی، علاوه بر مقایسه‌ی تغییرات طولی خطالقعر رودخانه از مقایسه‌ی تغییرات تراز یک مقطع عرضی استفاده شده که نتایج آن در شکل ۱۶ ارائه شده است. بررسی‌ها بیانگر این است که نتایج محاسباتی مدل ریاضی به ازای هر دو رابطه رسوبی توفالتی ویانگ مطابقت خوبی با مقطع عرضی برداشت شده در سال ۹۷ دارد. در این بخش از رودخانه بررسی میزان رسوبگذاری در طول ۱۳سال (۸۴تا۹۷) با استفاده از مشاهدات صحرایی و نقشه‌برداری انجام شده در طی سال‌های آماری مورد مطالعه نشان می‌دهد که تراز مقطع عرضی رودخانه حدود ۲۴/۶سانتی متر و با استفاده از روابط رسوبی توفالتی ویانگ به ترتیب ۲۲/۸ و ۲۰/۲ سانتی‌متر تغییر یافته که بیانگر تطابق خوب مدل در ارزیابی و شبیه‌سازی تغییر مقطع عرضی می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقطع عرضی مورد مطالعه در سال ۸۴ نسبت به سال ۹۷ در اثر رسوبگذاری دارای تغییرات محسوسی می‌باشد. که این موضوع در معادلات توفالیتی و یانگ به خوبی مشخص شده است و نشان می‌دهد که حجم دبی رسوبی در مقطع عرضی مورد مطالعه افزایش داشته و فرایند غالب در پایین‌دست رسوبگذاری است و بیانگر میزان فرسایش و کف کنی در مسیر رودخانه به ویژه در بالا دست می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که اندازه‌گیری فرسایش و رسوبگذاری در مقاطع عرضی مختلف به ازای معادله انتقال رسوب یانگ متفاوت است و نشان می‌دهد که در ساحل سمت چپ و کف بستر متمایل به ساحل سمت راست مقدار فرسایش کم و در کف بستر به دلیل افزایش میزان سرعت جریان و شیب بازه مقدار فرسایش بر میزان رسوبگذاری غالب است. شکل (۱۶) که با نتایج دهقانزاده و همکاران (۲۰۱۶)، یاسی و همکاران (۲۰۱۸)، فرجزاده و همکاران (۲۰۱۷)، نورانی و همکاران (۲۰۱۷)، اسدی و همکاران (۲۰۱۷) مطابقت دارد.



شکل (۱۶): مقایسه‌ی تغییرات محاسباتی و مشاهداتی تراز بستر مقطع عرضی رودخانه ابرو با مدل ریاضی GSTARS 2/1

Fig (16): Comparison of computational and observational changes of the cross section of the Ebro River with the mathematical GSTARS Model 1.2

نتایج حاصل از کالیبراسیون مدل در بخش مقاطع عرضی و واسنجی و صحت‌سنجی طولی در مدل، با توجه به مقادیر محاسباتی RRMS و ARE نشان می‌دهد که مقدار RRMS از ۵ کمتر و ARE نیز کمتر از یک می‌باشد بنابراین می‌توان بیان نمود که مدل توانایی قابل قبولی در شبیه‌سازی رسوبات ریزدانه را به ویژه در نزدیکی بدنه سد داشته است. جداول (۱، ۲ و ۳) میزان خطای مدل در هر یک از مقاطع عرضی و پروفیل طولی محاسبه شده را نشان می‌دهد.

جدول (۱): برآورد خطای آماری (RRMS و ARE) نتایج حاصل از واسنجی پروفیل طولی رودخانه
Table (1): Statistical error estimation (RRMS and ARE) of the results of calibration of longitudinal River profiles

RRMS	ARE	ارتفاع خطالقعر با داده‌های اندازه‌گیری شده سال ۹۷	ارتفاع خطالقعر سال ۹۷ با استفاده از مدل یانگ	ارتفاع خطالقعر سال ۹۷ با استفاده از مدل توفالیتی
۱/۱۵	۰/۰۰۱۲۱	۹۸/۳	۹۸/۰۷	۹۸/۲

جدول(۲): برآورد خطای آماری (RRMS و ARE) نتایج حاصل از صحت‌سنجی پروفیل طولی رودخانه
Tabel (2): Statistical drror estimation (RRMS and ARE) of the results of River longitudinal profile validation

RRMS	ARE	ارتفاع خطالقعر با داده‌های اندازه‌گیری شده	ارتفاع خطالقعر سال با استفاده از مدل یانگ	ارتفاع خطالقعر سال با استفاده از مدل توفالیتی
۰/۸۴	۰/۰۰۰۶۵	۹۸/۹	۹۸/۴۵	۹۸/۷

جدول (۳): برآورد خطای آماری (RRMS و ARE) نتایج حاصل از کالیبراسیون مدل در بخش مقاطع عرضی
Tabel (3): Estimation of statistical error (RRMS and ARE) results of model calibration in Cross-sections

RRMS	ARE	تراز بستر بعد از ۱۳ سال با داده‌های هیدروگرافی	تراز بستر بعد از ۱۳سال با استفاده از مدل Gstars 2/1	فاصله مقطع از سد (متر)	شماره مقطع
۱/۸۴۹۳	۰/۰۰۱۵۴	۹۹/۵۴	۹۹/۳	۱۲۰۰۰	۱
۲/۱۳۵۴	۰/۰۰۰۲۳۶	۹۹/۳۵	۹۹/۳۷	۱۰۰۰	۲
۰/۸۲	۰/۰۰۰۳۷۳	۹۸/۶	۹۸/۵	۸۰۰۰	۳
۱/۳	۰/۰۰۰۷۶۷	۹۹/۱۳	۹۹	۶۰۰۰	۴
۰/۸۸	۰/۰۰۰۳۵۸	۹۹/۱۳	۹۹/۱	۴۰۰۰	۵
۲/۱۶۷۰	۰/۰۰۰۲۴	۹۹/۳۹	۹۹/۵	۰	۶

ج-بررسی حساسیت مدل نسبت به تغییر معادله‌ی انتقال رسوب

جهت بررسی حساسیت‌سنجی مدل تغییرات حاصله در هر مقطع از رودخانه از توابع انتقال رسوب یانگ نسبت به تابع انتقال رسوب توفالیتی استفاده شد. لذا با ثابت در نظر گرفتن سایر شرایط و پارامترهای مدل این بار به ازای رابطه‌ای یانگ مدلسازی انجام گردید. نتایج مدل یانگ نشان داد که حجم رسوبات حمل شده نسبت به نتایج حاصل از رابطه‌ی توفالیتی دارای اختلاف زیادی است. به طوریکه میزان خطای مدل یانگ به ۲۷/۹۴در صد و مقادیر پارامترهای حساسیت‌سنجی ($\bar{n}_2$ و $\bar{n}_1$) که می‌بایست کمتر از ۰/۱ باشد به ترتیب برابر ۰/۱۳ و ۰/۱۲۵ برآورد شده است. بنابراین نتایج اجرای مدل یانگ قابل قبول واقع نشد. جدول ۴ نتایج حاصله از تحلیل حساسیت‌سنجی مدل یانگ نسبت به تغییر تابع انتقال رسوب را نشان می‌دهد، که با نتایج ظهیری و همکاران (۲۰۱۸)، بایزیدی (۲۰۱۷)، نورانی و همکاران (۲۰۱۷)، کلون و همکاران[1] (۲۰۱۷) مطابقت دارد.

جدول (۴): نتایج حاصل از تحلیل حساسیت‌سنجی مدل نسبت به تغییر تابع انتقال رسوب

Tabel (4): Results of the model's sensitivity analysis to change the sediment transport function

تابع انتقال رسوب	مقدار حجم برآورد شده توسط مدل (میلیون متر مکعب)	X (درصد)	$\bar{n}_1$	$\bar{n}_2$
یانگ	۰/۹۸	۲۷/۹۴	۰/۱۳	۰/۱۲۵

۴-نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌های ریاضی به عنوان یکی از ابزارهای مهم برای پیش‌بینی مقدار رسوب‌گذاری در بستر رودخانه‌ها و مخازن سدها بسیار مورد توجه قرار گرفته است، که بر معادلات حاکم بر پدیده‌های مؤثر در انتقال، توزیع، انباشت و آب‌شستگی رسوب مبتنی می‌باشند. این مطالعه با هدف بررسی میزان فرسایش و رسوبگذاری در بستر رودخانه و نقش آن در تغییرات پروفیل طولی و عرضی رودخانه ابرو سد اکباتان همدان با استفاده از مدل ریاضی Gstars 2/1 انجام شده است. با بررسی نتایج نشان دادکه مدل Gstars 2/1 به خوبی تغییرات پروفیل طولی و عرضی رودخانه را شبیه‌سازی کرده به طوری که در بازه‌ی مطالعاتی نتایج شبیه‌سازی و محاسبه وضعیت فرسایش و رسوبگذاری به‌وسیله مدل Gstars 2/1 در حد قابل قبولی می‌باشد. نتایج اجرای مدل ریاضی Gstars 2/1 و تحلیل حساسیت مدل نسبت به تغییر پارامترهای هیدرولیکی و رسوب نشان داد که طبق روابط تحلیل حساسیت، مدل نسبت به تابع انتقال رسوب دارای بالاترین میزان حساسیت می‌باشد و انتخاب صحیح تابع انتقال رسوب مهم‌ترین تأثیر را در برآورد صحیح حجم رسوب و شبیه‌سازی دارد. نتایج بررسی تغییرات بستر رودخانه در محل ایستگاه رودخانه ابرو سد اکباتان نشان داد که در مدت طی ۱۳ سال از ۸۴ تا ۹۷ رسوبگذاری فرایند غالب در این ایستگاه می‌باشد و کلیه‌ی روابط رسوبی مورد استفاده نیز در این پژوهش

1-Klavon et al.

همین فرآیند را تأیید و پیش‌بینی نموده‌اند و بیانگر این است که مدل به خوبی توانسته تغییرات رسوبگذاری را بررسی و شبیه‌سازی نماید. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقطع عرضی رودخانه از سال ۸۴ تا ۹۷ از حالت V شکل به U شکل در حال تغییر است و فرسایش بیشتر در ساحل چپ نسبت به ساحل راست رودخانه ابرو موجب عدم تقارن بیشتر و کج‌شدگی بستر رودخانه شده و افزایش ضریب مانینگ منجر به ته‌نشینی رسوبات در قسمت‌های پر پیچ و خم مسیر رودخانه گردیده است که تداوم چنین وضعیتی منجر به توسعه‌ی پیچ و خم‌های رودخانه‌ی ابرو و مئاندری شدن آن شده است. بررسی نتایج قابل قبول روند رسوبگذاری در رودخانه با تابع توفالیتی نشان می‌دهدکه از این مدل می‌توان برای مطالعه مکانیسم رسوبگذاری در سایر رودخانه‌های مشابه کشور نیز استفاده کرد. با اینحال پیشنهاد می‌شود در صورت امکان از دیگر روش‌ها مانند FLUVIAL 12,HEC-RAS و FLOW TD نیز اسفاده شود تا مدلی دقیق و کاربردی در ساماندهی رودخانه به صورت یکپارچه بکار گرفته شود.

۵-منابع

Asadi, M., Fathzadeh, A., & Taghizadeh Mehrjerdi, R. (2017). Investigation of the effect of time scale (daily, monthly and annual) on the prediction of suspended sediment load, *Journal of Hydrogeomorphology*, 3(10), 121-143.

Azizi, S., Ildoromi, A., Nouri, H. (2020), The effect of cross-sectional change on the overflow and transfer capacity of the Hamadan Abshineh River, *Quantitative Geomorphological Research,* 8(2), 209-189.

Bayazidi, M., & Karami, N. (2017). Prediction of sedimentation trend in Qarasu River using GSTARS 3 model*, Journal of Environment and Water Engineering*, 3(1), 66-80.

Batni, A., Golmaei, S.H., & Zia Tabar Ahmadi, M. (2015). Investigation of sediment transfer and river bed changes using mathematical model.3 GSTARS (Case study: Gavroud River), *Journal of Soil and Water Conservation Research*, 22(1), 191-210.

Dehghanzadeh, B., & Zahiri, A. (2016). Estimation of river sediment transport capacity using quasi-two-dimensional mathematical model, *Journal of Soil and Water Conservation Research*, 22(2), 47-53.

Farajzadeh, M., Heidary, A.A., Mollashahi, M., & Rajabi Rostamabadi, N. (2017). Analysis and comparisonof suspended sediment in the Caspia and Central Iran watersheds, *Journal of Hydrogeomorphology*, 3(11), 59-82.

Hu, B., Wang, T.H., Yang, Z., & Sun, X. (.2011). Temporal and Spatial variations of sediment rating curves in the Changjiang yangtze River) basin and their implications. *Quaternary International*, 230, 34-43.

Ildoromi, A., & Sheykhipour, A. (2016). Investigation of river morphological changes and its role in erosion and sedimentation using HEC-RAS model (Case study: Khorramabad-Doab-e-Visan river), *Quantitative Geomorphological Research*, 5(3), 146- 163.

Iqbal, M., Ghumman, A.R., Haider, S., Hashmi, H.N., & Khan, M.A. (2019). Application of Godunov type 2D model for simulating sediment flushing in a reservoir, *Arabian Journal for Science and Engineering***,** 44(5), 4289-4307.

Karami, F., & Bayati Khatibi, M. (2019). Modeling soil erosion and prioritizing sediment production in Sattarkhan Ahar dam basin using MUSLE and SWAT models, *Journal of Hydrogeomorphology*, 18, (23), 119-141.

Keane, T.D., & Sass, C.K. (2017). Channel Evolution Models as Predictors of Sediment Yield*, Journal of the American Water Resources Association,* 53(6), 1513-1529.

Klavon, K. Fox, G., Guertault, L., Langendoen, E., Enlow, H., Miller, R., & Khanal, A. (2017). Evaluating a process-based model for use in streambank stabilization: insights on the Bank

Stability and Toe Erosion Model (BSTEM), *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(1), 191-213.

Lai, Y. G., & Wu, K. (2019). A Three-Dimensional Flow and Sediment Transport Model for Free-Surface Open Channel Flows on Unstructured Flexible Meshes. *Fluids*, *4*(1), 18-27.

Molinas, A., & Yang, C.T. (1986). Computer Program User's Manual for GSTARS (Generalized Stream Tube model for Alluvial River Simulation), U .S. Bureau of Reclamation*, Denver, Colorado*.

Noorani, V., & Mohsenzadeh, S. (2017). Estimation of Monthly Sediment Load of Aji Chai Basin Stations Using MPSIAC Model and Waterfall Microscale, Artery, *Journal of Hydrogeomorphology*, 3(11), 83-103.

Ouda, M. (2019). Multiphase Modelling of Sediment Transport and Bed Erosion for the Study of Coastal Morphodynamics, *(KU Leuven, Technology Campus Brugge, Belgium).*

Ribeiro, M. (2011). Influence of tributary widening on confluence morphodynamics**.** *Ph.D. thisesQing.*

Yuan, Y., W. Xian-Ye, L. Wei-Zhen, & Xie-Kang, W. (2009). Experimental study on characteristics of separation zone in confluence zones in rivers. *Journal of Hydrologic Engineering,* 14, 166-171.

Rodriguez-Belanco, M.L., Taboada-Castro, M.M., Palleiro, L., & Taboada-Castro, M.T. (2010). Temporal changes in suspended sediment transport in an Atlantic catchment, NW Spain. *Geomorphology*, 123(1-2), 181-188.

Sharafi, S., Skond, H., & Kamali, Z. (2020). Study of spatio-temporal changes in the morphology of Silakhor River in Lorestan province, *Journal of Quantitative Geomorphological Research,* 8(3), 31, 115-131.

Yang, C.T. (2008). GSTARS Computer models and sedimentation control in surface water systems*, International Conference on Water Resources and Arid Environments, King Saud University.*

Yang, C.T., & Simões, F.J.M. (2000). User's manual for GSTARS 2.1, U.S .Bureau of Reclamation technical service center, *Denver, Colorado*.

Yang, C.T. & Simoes, F.J.M. (1998). Simulation and prediction of river morphologic changes using Gstars 2.0. US- China Workshop on Advanced Computational Modeling in Hydroscience & Engineering, September, 19- 21, *Oxford, Mississippi, USA.*

Yang, C.T. (1996). Sediment transport: theory and practice. McGraw-Hill Companies, *Inc., New York, NY.*

Yasi, M., Nasiri, L, & Ahmadi, S. (2018). Simulation and evaluation of rivers with constant flow with two models HEC-RAS and RubarBE, *Journal of Soil and Water Knowledge,* 27(2), 225-236.

Zahiriy, A. R., Qoli Nejad, J., & Dehghani, A. (2018). Calculation of transverse distribution of River sediments using a quasi-two-dimensional mathematical model (Case study: Qarasu River), *Journal of Water Resources Engineering*, 11(38), 83-93.