



دانشگاه گیلان

مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک  
جلد شانزدهم، شماره چهارم، ۱۳۸۸  
[www.gau.ac.ir/journals](http://www.gau.ac.ir/journals)

## شبیه‌سازی وضعیت رسوب‌گذاری رودخانه کارون با استفاده از مدل ریاضی GSTARS 2.0 (حدفاصل ایستگاه‌های هیدرومتری اهواز تا فارسیات)

\* عبدالرضا ظهیری<sup>۱</sup>، بابک شاهی‌نژاد<sup>۲</sup> و سعید رستمی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، <sup>۲</sup> دانشجوی دوره دکتری گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، <sup>۳</sup> کارشناس ارشد گروه سازه‌های آبی، سازمان آب منطقه‌ای لرستان  
تاریخ دریافت: ۸۷/۹/۹؛ تاریخ پذیرش: ۸۸/۲/۱۸

### چکیده

رودخانه کارون در استان خوزستان دارای مسایل پیچیده‌ای در ارتباط با رسوبات شامل تشکیل و توسعه جزایر رسوبی، فرسایش سواحل، رسوب‌گذاری شدید و نیز کاهش سرعت و ظرفیت آب‌گذری رودخانه است. برای سامان‌دهی این رودخانه، طرح‌ها و اقدامات مهندسی شامل احداث دایک کنترل سیل و لایروبی رودخانه پیشنهاد شده است. برای بررسی کارایی و تأثیر متقابل این اقدامات، باید وضعیت رسوب‌گذاری رودخانه در هر یک از این گزینه‌ها به‌طور مناسبی شبیه‌سازی شود. در این مقاله، فرآیند رسوب‌گذاری و فرسایش رودخانه کارون در محدوده ایستگاه هیدرومتری اهواز تا فارسیات به طول حدود ۵۰ کیلومتر با استفاده از مدل ریاضی GSTARS ۲/۰ شبیه‌سازی شده است. این مدل با استفاده از مفهوم تیوب‌ها یا لوله‌های جریان، قابلیت شبیه‌سازی توزیع رسوب‌گذاری را به‌صورت شبه دویعدی (طولی و عرضی) در رودخانه‌ها دارد. برای واسنجی هیدرولیکی و رسوبی این مدل به‌ترتیب از تغییرات رقم سطح آب در سیلاب ۱۳۸۴ و تغییرات هندسی مقاطع عرضی رودخانه در به‌مدت ۷ سال (از ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۴) استفاده شده است. نتایج این واسنجی نشان می‌دهد که روابط رسوبی اکرز- وایت (۱۹۷۴) و توفالنی (۱۹۶۹) مطابقت بهتری با شرایط موجود رودخانه دارند. همچنین نتایج این مدل ریاضی بیانگر رسوب‌گذاری شدید مواد معلق (حدود ۲/۵ میلیون تن در سال) در این بازه مطالعاتی است.

**واژه‌های کلیدی:** رودخانه کارون، مدل ریاضی GSTARS، واسنجی، معادلات انتقال رسوب

\* مسئول مکاتبه: [zahiri@gau.ac.ir](mailto:zahiri@gau.ac.ir)

مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک جلد (۱۶)، شماره (۴) ۱۳۸۸

#### مقدمه

به دلیل اهمیت زیادی که تغییرات مورفولوژی رودخانه در طرح‌های سامان‌دهی، کنترل سیلاب و طراحی سازه‌های هیدرولیکی دارد بیشتر لازم است که رفتار رودخانه‌ها در حالت طبیعی و همچنین در عکس‌العمل به اصلاحات و اقدامات مهندسی مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد. این مطالعات می‌تواند از طریق مدل فیزیکی، ریاضی و یا هر دو انجام گیرد. در مطالعات مهندسی رودخانه، به دلیل وقت‌گیر و پرهزینه‌تر بودن مدل‌های فیزیکی، مدل‌های ریاضی عمومی‌تر بوده و کاربرد آنها نیز در حال گسترش می‌باشد. در حال حاضر مدل‌های یک‌بعدی، دو‌بعدی و سه‌بعدی برای کاربرد در مسایل مهندسی رودخانه وجود دارد. مدل‌های یک‌بعدی گرچه دارای فرضیات ساده‌کننده بیشتری بوده و معادلات آنها برای تعریف فرآیندها و مکانیزم‌های پیچیده موجود در رودخانه‌ها کافی نیست ولی در صورت واسنجی مناسب، در صورت سادگی می‌توانند نتایج مفید زیادی را در اختیار قرار دهند (یانگ و همکاران، ۱۹۹۸).

رودخانه کارون از جمله رودخانه‌هایی است که بیش‌ترین طرح‌ها و پروژه‌های سامان‌دهی رودخانه از قبیل احداث پل، کنترل سیلاب، کشتیرانی، بهینه‌سازی مدیریت منابع آب، بیابان رسوب و... در آن در حال انجام است. در سال‌های اخیر به دلیل اجرای طرح‌های توسعه در زمینه‌های مختلف صنعت، شرب و کشاورزی، رودخانه کارون دست‌خوش تغییرات زیادی گردیده و با مشکلات زیادی به‌خصوص در مناطق پایین‌دست مواجه شده است. برخی از این مشکلات عبارتند از:

**الف- کاهش ظرفیت آب‌گذری به دلیل رسوب‌گذاری:** ظرفیت آب‌گذری رودخانه به‌خصوص در مناطق شهری به شدت کاهش یافته که این امر مشکلات سیلابی شدن اراضی و آب‌گرفتگی شهرها را در پی داشته است. اطلاعات ثبت شده توسط سازمان آب و برق خوزستان نشان می‌دهد که رودخانه کارون در سال ۱۳۷۲، سیلابی در حدود ۵۲۵۰ مترمکعب بر ثانیه را از مقطع شهر اهواز عبور داده است در حالی که در سال ۱۳۸۳، سیلاب ۳۶۸۰ مترمکعب بر ثانیه و در سال ۱۳۸۴، سیلاب ۳۰۸۰ مترمکعب بر ثانیه، کل مقطع رودخانه در شهر اهواز را پر نموده و آب در آستانه ورود به شهر قرار گرفته است (حمادی و ظهراپی، ۲۰۰۵).

**ب- تأثیر پل‌ها بر نرخ رسوب‌گذاری:** احداث پل‌های متعدد با پایه‌های بسیار زیاد و توسعه جزایر بزرگ و پوشیده از گیاه در طول رودخانه کارون و به‌ویژه در محدوده شهر اهواز باعث رسوب‌گذاری

## عبدالرضا ظهیری و همکاران

شدید در مقطع اصلی رودخانه شده است. پل‌های موجود به دلیل پایه‌های متعدد، مشابه یک سد یا بند عمل کرده و سبب پس‌زدگی آب شده و باعث رسوب‌گذاری در بالادست شده‌اند. تقریباً بالادست و پایین‌دست تمامی پل‌های موجود، جزایر رسوبی رشد و توسعه یافته‌اند. این جزایر باعث افزایش رقوم بستر رودخانه شده و ظرفیت آب‌گذری مقطع رودخانه را به شدت کاهش داده‌اند. در شکل ۱ مسیر عبور رودخانه کارون از میان جزایر رسوبی در محدوده شهر اهواز و پل‌های موجود بر روی این رودخانه نشان داده شده است.



ب

الف

شکل ۱- رسوب‌گذاری در بستر رودخانه کارون و تشکیل جزایر رسوبی در محدوده شهر اهواز.

عبور رودخانه بزرگ کارون از شهر اهواز و انتقال حجم عمده‌ای از رسوبات، محققان مختلفی را جذب مطالعه شیوه انتقال رسوب و میزان رسوب‌گذاری در این محدوده نموده است. متأسفانه تاکنون بیشتر مطالعات توسط مهندسان مشاور صورت گرفته و بررسی‌های علمی در این زمینه بسیار کم بوده است. مهم‌ترین دلیل این موضوع، نبود امکان مدل‌سازی فیزیکی محدوده موردنظر با توجه به شرایط خاص رودخانه از قبیل طول و عرض قابل توجه، پیچان‌رودی بودن رودخانه، عبور دبی جریان و رسوب فراوان به‌ویژه در شرایط سیلاب، وجود جزایر رسوبی و وجود سازه‌های طولی و عرضی بسیار بزرگ شامل پل‌ها و ایستگاه‌های پمپاژ است. از طرف دیگر، استفاده از مدل‌های ریاضی، مستلزم آمار بسیار زیاد از شرایط هندسی، هیدرولیکی و رسوبی رودخانه است. برای مثال برای این کار حداقل به دو سری مقطع عرضی در طول رودخانه و برداشت پروفیل سطح آب به‌خصوص در شرایط سیلاب نیاز است. طبق بررسی منابع موجود، اولین مطالعه مدون در زمینه وضعیت رسوب‌گذاری این رودخانه

در محدوده موردنظر، در سال ۱۹۹۱ و به منظور سامان‌دهی رودخانه برای عبور سیلاب با حداقل رسوب‌گذاری انجام شده است (الخیرالله، ۱۹۹۲). در این مطالعه از مدل ریاضی HEC-۶ با ۷ مقطع عرضی در طول حدود ۱۰ کیلومتر استفاده شده است. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که نرخ رسوب‌گذاری به طور متوسط ۵/۳ سانتی‌متر در سال خواهد بود. نکته مهم‌تر این است که توزیع رسوب‌گذاری طولی بسیار غیریکنواخت بوده و بیش‌ترین رسوب‌گذاری در ابتدای بازه اتفاق افتاده است. استفاده از مقاطع عرضی محدود و نبود واسنجی مناسب مدل ریاضی، منجر به این نتایج غیرقابل اطمینان شده است. واقعیت مسأله این است که بیشتر رسوبات معلق رودخانه کارون در این محدوده، ریزدانه و چسبنده (رسوبات حوضه) بوده و نرخ ته‌نشست آنها بسیار کم است. در این شرایط، استفاده از مدل‌های ریاضی نظیر HEC-۶ که قابلیت شبیه‌سازی رسوبات چسبنده را ندارد منطقی نیست.

سازمان آب و برق خوزستان (۲۰۰۲) در طرح جامع سامان‌دهی رودخانه‌های کارون و دز، وضعیت رسوب این دو رودخانه را از گتوند تا خلیج فارس به طول حدود ۴۰۰ کیلومتر با استفاده از مدل ریاضی HEC-۶ مورد بررسی قرار داد.

عباسی (۲۰۰۷)، با استفاده از مدل شبکه عصبی QNET-۲۰۰۰ نتیجه گرفتند که با توجه به ظرفیت رسوب معلق عبوری از ایستگاه‌های اهواز و فارسیات، این بازه از رودخانه کارون دارای وضعیت رسوب‌گذار می‌باشد.

در طرح بیلان رسوب رودخانه‌های کارون و دز (سازمان آب و برق خوزستان، ۲۰۰۸)، وضعیت این رودخانه‌ها از نظر رسوب‌گذاری و فرسایش مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این طرح نشان می‌دهد که بازه حدفاصل ایستگاه اهواز تا ایستگاه فارسیات، رسوب‌گذار بوده و میزان رسوب‌گذاری سالانه حدود ۲ میلیون تن می‌باشد. این نتیجه با استفاده از منحنی‌های رگرسیونی سنج رسوب معلق و بار بستر به دست آمده است و بنابراین هیچ‌گونه اطلاعاتی از نحوه رسوب‌گذاری و نیز توزیع عرضی رسوب‌گذاری در طول و عرض رودخانه ارایه نمی‌نماید.

برای سامان‌دهی رودخانه کارون در محدوده شهری اهواز، اقدامات متعددی از قبیل لای‌روبی رودخانه، انحراف سیلاب به مسیل طبیعی بحره در جنوب اهواز و احداث دایک کنترل سیلاب دز از شمال تا جنوب اهواز در حال انجام است. برای ارزیابی این طرح‌ها، باید اثرات متقابل آنها بر سیستم رودخانه به دقت مورد بررسی قرار گیرد. علاوه بر این با توجه به روند رسوب‌گذاری رودخانه کارون

و مشکلات پیش آمده در این رابطه، نیاز به شناخت تغییرات مورفولوژی این رودخانه به ویژه در محدوده شهری اهواز به شدت احساس می‌گردد. با توجه به پیچیدگی مسأله و طولانی بودن بازه مورد مطالعه، کاربرد مدل‌های ریاضی مناسب، یکی از بهترین راه‌حل‌ها در این ارتباط است. در مطالعات قبلی، روند منطقی از وضعیت رسوب‌گذاری در این محدوده از رودخانه کارون پیش‌بینی نشده است. تمرکز طرح‌های مهندسی با اعتبار ده‌ها میلیارد تومان در این محدوده، مطالعه و تحقیق بسیار جدی را طلب می‌کند (سازمان آب و برق خوزستان، ۲۰۰۶). به همین دلیل باید سعی شود که با استفاده از آمار کافی و با دقت مناسب همراه با واسنجی و صحت‌سنجی یک مدل ریاضی مناسب و کارا در شرایط خاص رودخانه کارون، امکان شبیه‌سازی تغییرات مورفولوژی گذشته رودخانه فراهم شده و پیش‌بینی روند تغییرات آینده آن در شرایط عادی و نیز در اثر انجام طرح‌های سامان‌دهی رودخانه امکان‌پذیر گردد. در این مقاله، روند رسوب‌گذاری رودخانه کارون در محدوده شهر اهواز حداثی ایستگاه‌های هیدرومتری اهواز و فارسیات به طول حدود ۵۰ کیلومتر در طول یک دوره زمانی ۷ سال (۱۳۸۴-۱۳۷۷) با استفاده از مدل ریاضی GSTARS ۲/۰<sup>۱</sup> شبیه‌سازی شده است. سپس برای اطمینان از دقت مدل ریاضی، در دو مرحله اقدام به صحت‌سنجی شده است.

### مواد و روش‌ها

**الف- مدل ریاضی GSTARS:** مدل ریاضی GSTARS مدل ریاضی یک‌بعدی می‌باشد که با کمک گرفتن از مفهوم لوله‌های جریان می‌تواند به صورت شبه دو‌بعدی تغییرات تراز بستر رودخانه را در دو جهت طولی و عرضی شبیه‌سازی نماید. این مدل قابلیت شبیه‌سازی جریان و رسوب را در رودخانه‌های آبرفتی دارد. این مدل توسط مولیناس و یانگ (۱۹۸۶) برای موسسه USBR<sup>۲</sup> برای حل مسایل پیچیده مهندسی رودخانه تهیه گردید. این مدل توسط محققان مختلف برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات مورفولوژی رودخانه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. با بررسی نتایج این مطالعات، نسخه اصلاح شده و کامل‌تر آن با نام GSTARS ۲/۰<sup>۳</sup> ارایه شد (یانگ و سیموئز، ۱۹۹۸). نسخه‌های بعدی این مدل شامل GSTARS ۳/۰<sup>۴</sup>، GSTARS-1D و GSTARS-W به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ ارایه شده‌اند (یانگ و همکاران، ۲۰۰۵).

1- Generalized Stream Tube Model for Alluvial River Simulation

2- United State Bureau of Reclamation

مدل ریاضی ۲/۰ GSTARS دارای قابلیت‌های زیادی است که عبارتند از محاسبه مشخصات هیدرولیکی مقاطع روباز در شرایط بستر صلب و فرسایشی، محاسبه پروفیل سطح آب در شرایط جریان زیربحرانی، فوق‌بحرانی و ترکیبی، حل معادله‌های جریان در حالت جزیره‌ای شدن رودخانه، شبیه‌سازی تغییرات پارامترهای هیدرولیکی و رسوبی در دو جهت طولی و عرضی با استفاده از مفهوم تیوب‌های جریان<sup>۱</sup>، قابلیت کاربرد در سواحل پایدار و فرسایشی، قابلیت استفاده از ۱۳ معادله تجربی انتقال رسوب، قابلیت شبیه‌سازی رسوبات چسبنده، در نظر گرفتن دانه‌بندی غیریکنواخت رسوب و در نظر گرفتن رسوبات ریزدانه حوضه‌ای یا بار شسته همراه با سیلاب (یانگ و سیموئز، ۱۹۹۸). این مدل قابلیت شبیه‌سازی جریان ثانویه، فرم بستر، تقاطع رودخانه‌ها و نیز تشکیل پیچان‌رودی یا مناندر را ندارد (یانگ و سیموئز، ۲۰۰۰).

قابلیت‌های بالا برای رودخانه‌ای مثل کارون لازم و ضروری است. این رودخانه به دلیل عرض زیاد و سیلاب‌های با غلظت رسوب بالا، دارای رسوب‌گذاری غیریکنواخت در عرض می‌باشد که توسط مدل‌های ریاضی معمول از قبیل HEC-۶ و MIKE-۱۱ قابل شبیه‌سازی نیست. از طرف دیگر به علت چسبنده بودن رسوبات معلق این رودخانه در محدوده مورد مطالعه و نیز درصد بسیار بالای رسوبات حوضه‌ای (حدود ۸۰ درصد) به‌ویژه در مواقع سیلاب، استفاده از مدل‌های ریاضی معمول منطقی نیست. از مدل ریاضی ۲/۰ GSTARS در مطالعات رسوب‌گذاری رودخانه‌ها و کانال‌های آزمایشگاهی استفاده شده است. یانگ و سیموئز (۱۹۹۸) با استفاده از این مدل، وضعیت توسعه کف‌کنی یک کانال آزمایشگاهی با بستر ماسه‌ای را شبیه‌سازی نمودند. نتایج محاسباتی مطابقت خوبی با مشاهده‌های آزمایشگاهی به‌ویژه در مراحل اولیه کف‌کنی نشان می‌دهد. همچنین این مدل قابلیت خوبی در پیش‌بینی تغییرات دانه‌بندی مصالح بستر در پایین‌دست یک سد ناشی از پدیده آرمورینگ را نشان داده است. این محققان با کاربرد این مدل در یک رودخانه، وضعیت رسوب‌گذاری در مقاطع عرضی بالادست یک سد مخزنی را محاسبه نمودند. این نتایج با مشاهدات صحرائی تطابق خوبی دارد اگرچه محاسبات مدل، رسوب‌گذاری بیشتری را در مخزن سد پیش‌بینی نموده است.

زراتی و اطاعت (۲۰۰۱)، با مقایسه قابلیت‌های این مدل با مدل ریاضی FLUVIAL۱۲ نتیجه گرفتند که دقت نتایج مدل ۲/۰ GSTARS در رودخانه‌های در حالت رژیم با بستر ریزدانه و درشت‌دانه، بسیار بهتر از مدل FLUVIAL۱۲ است. همچنین این مدل، پیش‌بینی بسیار بهتری از میزان آب‌شستگی در اطراف آب‌شکن‌های سری دارد.

اعلمی (۲۰۰۴) با استفاده از این مدل، وضعیت رسوب‌گذاری در مخزن سد کارده را شبیه‌سازی نموده است. نتایج این مدل در مقایسه با محاسبات مدل HEC-۶، تطابق بهتری با نتایج هیدروگرافی مخزن سد دارد.

عموپور (۲۰۰۶) با استفاده از مدل ریاضی GSTARS ۲/۰، الگوی رسوب‌گذاری در مخزن سد در دست‌آورد زولاچای سلماس و عمر مفید آن را برآورد نموده است. به دلیل نبود امکان واسنجی این مدل، نتایج این مدل با نتایج روش تجربی کاهش سطح مقایسه شده است. طبق این نتایج، سالانه ۰/۳۳ درصد از حجم مخزن در اثر رسوب‌گذاری از دست می‌رود.

### ب- معادلات حاکم

**هیدرولیک جریان:** مدل ریاضی GSTARS ۲/۰ از روش گام استاندارد و معادلات انرژی و مومنتم برای حل پروفیل سطح آب استفاده می‌کند. به این ترتیب، شرایط جریان زیربحرانی، فوق بحرانی و ترکیبی (جهش هیدرولیکی) قابل حل است. در این مرحله، با استفاده از لوله‌های جریان، تغییرات سرعت در عرض رودخانه را به صورت شبه دوبعدی برآورد می‌کند. سپس مقطع عرضی به چند لوله جریان با ظرفیت انتقال یکسان (دبی‌های یکسان با مساحت و سرعت متفاوت) تقسیم می‌شود. **محاسبات تغییرات تراز بستر:** بعد از محاسبات پروفیل سطح آب، محاسبات رسوب به طور مجزا در هر لوله جریان انجام می‌شود. این محاسبات با فرض عدم تبادل جرم بین لوله‌های جریان انجام می‌شود. اساس این محاسبات، رابطه پیوستگی رسوب است:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + \eta \frac{\partial A_d}{\partial t} + \frac{\partial A_s}{\partial t} - q_s = 0 \quad (1)$$

که  $\eta$  حجم رسوب در 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 است. در این مدل فرض می‌شود که میزان تغییر در رسوب معلق در یک مقطع عرضی نسبت به تغییر در بستر رودخانه قابل صرف‌نظر کردن است. همچنین از اثر دبی رسوب ورودی جانبی صرف‌نظر شده است. بنابراین جملات سوم و چهارم معادله بالا حذف می‌شوند. فرض مهم دیگر این است که در طی یک گام زمانی، پارامترهای رسوبی در یک مقطع عرضی به صورت ثابت فرض می‌شوند (یانگ و سیمونز، ۱۹۹۸). بنابراین باید گام زمانی در محاسبات کوچک فرض شود اگرچه در بیشتر شرایط رودخانه‌ای، بدیهی است تغییرات پارامترهای هیدرولیک جریان بسیار سریع‌تر از پارامترهای رسوبی است. به همین دلیل، محاسبات هیدرولیک جریان و

رسوب به‌طور مجزا انجام می‌شود. معادله دیفرانسیلی ساده شده بالا در هر لوله جریان و برای هر گروه از دانه‌بندی مصالح بستر به کمک روش تفاضل‌های محدود و الگوی صریح حل می‌گردد. با حل این معادله، تغییر تراز بستر رودخانه در هر مقطع عرضی محاسبه می‌گردد.

**محاسبات ظرفیت انتقال رسوب:** ظرفیت انتقال رسوب هر مقطع از رودخانه در یک گام زمانی از رابطه زیر محاسبه می‌شود (یانگ و سیموئز، ۱۹۹۸):

$$C_t = \sum_{k=1}^N p_k C_k \quad (2)$$

که  $C_t$  ظرفیت کل انتقال رسوب،  $p_k$  درصد مصالح موجود از گروه دانه‌بندی  $k$  در مصالح بستر،  $C_k$  ظرفیت انتقال رسوب از هر گروه دانه‌بندی و  $N$  تعداد گروه‌های دانه‌بندی است.  $C_k$  براساس یکی از ۱۳ رابطه تجربی انتقال رسوب موجود در مدل ریاضی GSTARS ۲/۰ محاسبه می‌شود. برای رسوبات غیرچسبنده روابط رسوبی میر-پیتر و مولر (۱۹۴۸)، لارسن (۱۹۵۸)، توفالتی (۱۹۶۹)، انگلوند-هانسن (۱۹۷۲)، اکرز- وایت (۱۹۷۳)، اکرز- وایت اصلاح شده توسط والینگفورد (۱۹۹۰)، (یانگ، ۱۹۷۳؛ یانگ، ۱۹۷۹؛ یانگ، ۱۹۸۴)، پارکر (۱۹۹۰) و یانگ (۱۹۹۶) برای رسوبات ماسه‌ای همراه با بار شسته در این مدل قابل استفاده هستند. برای رسوبات چسبنده سیلت و رس، رابطه کرون (۱۹۶۲) برای شرایط رسوب‌گذاری و رابطه آریاتوری و کرون (۱۹۷۶) برای حالت فرسایشی مورد استفاده قرار می‌گیرند. رسوبات با قطر ریزتر از  $0/004$  میلی‌متر به‌عنوان رس و رسوبات با قطر بین  $0/004$  تا  $0/0625$  میلی‌متر به‌عنوان سیلت در نظر گرفته می‌شوند (یانگ و همکاران، ۱۹۹۸).

**حداقل‌سازی توان کل رودخانه:** در مدل ریاضی GSTARS ۲/۰ علاوه‌بر تغییرات تراز بستر رودخانه، تغییرات عرض رودخانه نیز قابل شبیه‌سازی است. مبنای تعیین تغییرات عمق و عرض رودخانه، تئوری‌های کم‌ترین نرخ انرژی مصرفی و کم‌ترین توان رودخانه است. طبق این تئوری، وقتی یک سیستم پویا به حالت تعادلی برسد آنگاه نرخ 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 به گونه‌ای تنظیم می‌نمایند که نرخ انرژی مصرفی براساس دبی جریان و رسوب بالادست به کم‌ترین برسد (یانگ و سیموئز، ۱۹۹۸).



ج- منطقه مورد مطالعه: رودخانه کارون به طول بیش از ۱۰۰۰ کیلومتر و آب‌دهی حدود ۲۵ میلیارد مترمکعب در سال، بزرگ‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه کشور می‌باشد. این رودخانه منبع اصلی تامین آب شرب و کشاورزی ۱۶ شهر، صدها روستا و هزاران هکتار از اراضی کشاورزی استان خوزستان بوده و تامین انرژی برق قسمت‌های عمده فلات مرکزی ایران و دشت خوزستان را نیز به عهده دارد. شهر اهواز با سابقه مهم تاریخی، مهم‌ترین شهر در مسیر این رودخانه است. زیبایی‌های و جذابیت‌های طبیعی رودخانه کارون در شهر اهواز، لزوم حفظ و احیای این رودخانه را آشکار می‌کند. در شکل ۲ پلان رودخانه کارون در حدفاصل ایستگاه‌های هیدرومتری اهواز و فارسیات نشان داده شده است. رودخانه در این بازه دارای وضعیت مائندری شدید است.

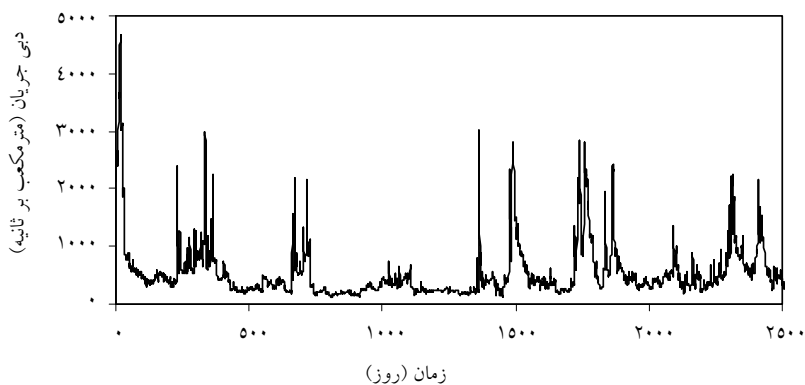


شکل ۲- پلان رودخانه کارون حدفاصل ایستگاه‌های هیدرومتری اهواز تا فارسیات.

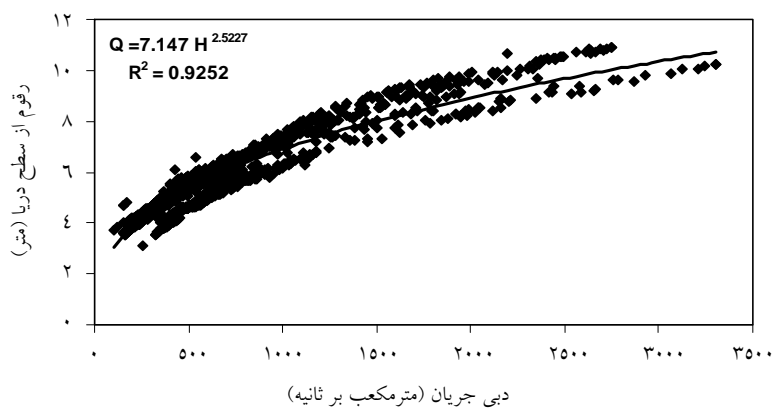
د- داده‌های ورودی مدل ریاضی: بانک اطلاعاتی رودخانه کارون در محدوده شهری اهواز یکی از بهترین بانک‌های اطلاعاتی هیدرولیک جریان و رسوب در کشور است. در این بانک اطلاعاتی، داده‌های بسیار مهمی نظیر پروفیل سطح آب در شرایط سیلابی، مقاطع عرضی به فاصله کم و دانه‌بندی رسوب معلق و بستر وجود دارد. در این مقاله، از داده‌های متنوعی برای واسنجی و صحت‌سنجی هیدرولیک جریان و رسوب مدل ریاضی ۲/۰ GSTARS استفاده شده است. به‌منظور استفاده از این مدل ریاضی، داده‌های ورودی مورد نیاز عبارت‌اند از داده‌های هندسی، داده‌های هیدرولیکی و داده‌های رسوبی.

در بخش هندسی، پلان عمومی رودخانه همراه با مقاطع عرضی آن به مدل معرفی می‌گردد. در این تحقیق، از تعداد ۴۱ مقطع عرضی که در سال ۱۳۷۷ برداشت شده‌اند برای واسنجی مدل ریاضی و از ۳۰ مقطع عرضی که در ابتدای سال ۱۳۸۴ برداشت شده‌اند برای صحت‌سنجی مدل ریاضی استفاده شده است.

از هیدروگراف روزانه دبی جریان (از سال ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۳) در ایستگاه بالادست (اهواز) و منحنی دبی-اشل در ایستگاه پایین‌دست (فارسیات) به‌عنوان اطلاعات هیدرولیکی مورد نیاز مدل استفاده گردیده است. این اطلاعات به‌ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده‌اند.

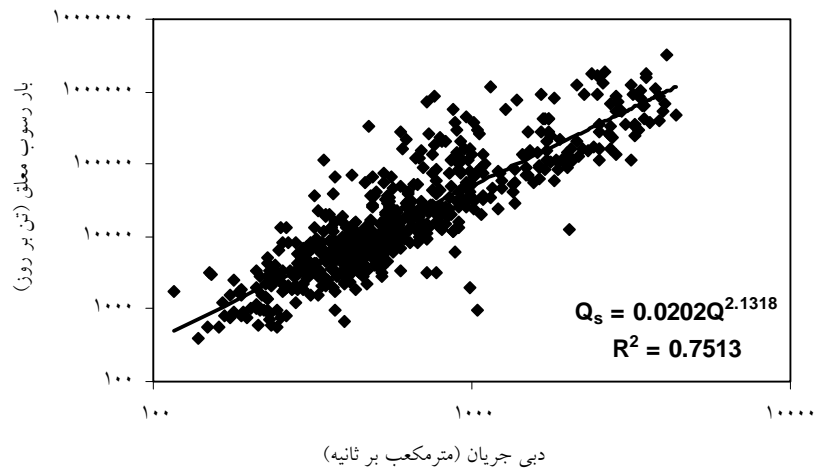


شکل ۳- هیدروگراف دبی جریان روزانه رودخانه کارون در ایستگاه اهواز (شرط مرزی بالادست).



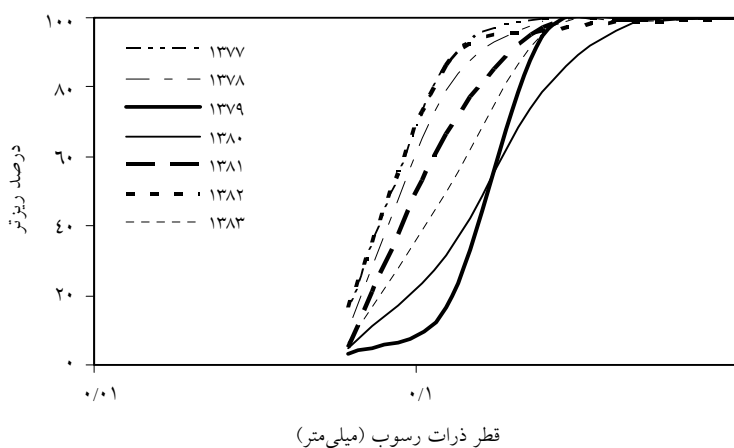
شکل ۴- منحنی دبی-اشل رودخانه کارون در ایستگاه فارسیات (شرط مرزی پایین‌دست).

در بخش اطلاعات رسوبی، منحنی سنج رسوب معلق ایستگاه اهواز به عنوان شرط مرزی ورودی به کار گرفته شد. این منحنی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- منحنی سنج رسوب معلق رودخانه کارون در ایستگاه اهواز.

با توجه به این که اطلاعات منحنی دانه بندی مصالح بستر نقش مهمی در شبیه سازی جریان و رسوب دارد به همین علت تغییرات منحنی های دانه بندی رسوب مصالح بستر رودخانه کارون در ایستگاه اهواز در چند سال گذشته مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و در نهایت از متوسط آنها در مدل ریاضی استفاده شد. بستر رودخانه کارون در محدوده مورد مطالعه، بیشتر از جنس ماسه می باشد. در شکل ۶ این منحنی برای سال های مختلف ارائه شده است. براساس مطالعات طرح بیلان رسوب رودخانه های دز و کارون (سازمان آب و برق خوزستان، ۲۰۰۸)، قطر متوسط رسوبات معلق عبوری از ایستگاه های اهواز و فارسیات به ترتیب ۰/۰۱۸ و ۰/۰۱۴ میلی متر برآورد شده است که در گروه رسوبات چسبنده (سیلت) قرار می گیرند.

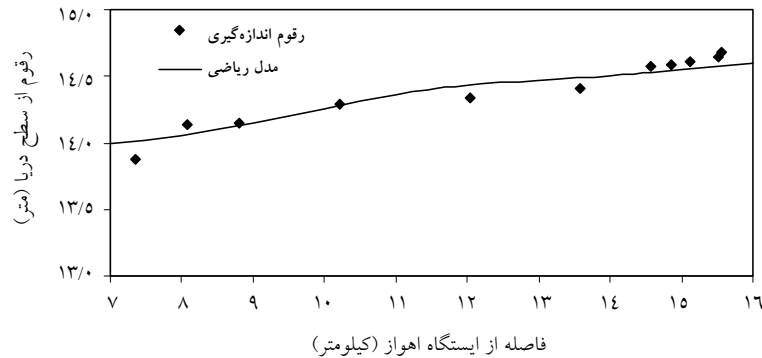


شکل ۶- منحنی‌های دانه‌بندی مصالح بستر رودخانه کارون در ایستگاه اهواز.

## نتایج

### الف- واسنجی مدل ریاضی

واسنجی هیدرولیک جریان: با توجه به این‌که پارامترهای به‌دست آمده از هیدرودینامیک جریان مبنای محاسبات رسوبی قرار می‌گیرند، بنابراین لازم است که ابتدا از واسنجی مدل ریاضی در بخش هیدرولیک جریان اطمینان حاصل گردد. به این منظور، مدل ریاضی GSTARS به‌ازای دبی سیلابی ۳۰۸۰ مترمکعب بر ثانیه و با مقادیر مختلف ضریب زبری مانینگ اجرا شده و نتایج پروفیل سطح آب محاسباتی با مقادیر واقعی رقوم سطح آب اندازه‌گیری شده در سیلاب فروردین ۱۳۸۴ (با دبی ۳۰۸۰ مترمکعب بر ثانیه) در محدوده شهر اهواز مقایسه گردید. نتایج این مقایسه بیانگر مطابقت رقوم سطح آب محاسباتی و مشاهداتی به‌ازای ضریب زبری مانینگ ۰/۰۳۷ است. شکل ۷ این مطابقت را نشان می‌دهد.



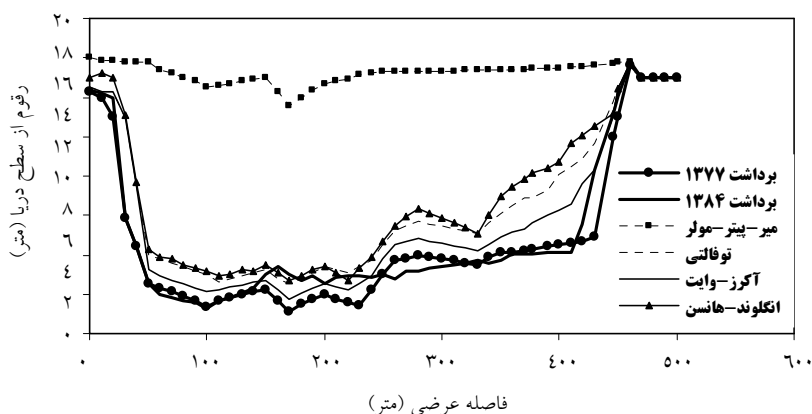
شکل ۷- واسنجی هیدرولیکی مدل ریاضی GSTARS در دبی جریان ۳۰۸۰ مترمکعب بر ثانیه.

واسنجی هیدرولیک رسوب: بعد از اطمینان از واسنجی مدل برای شبیه‌سازی هیدرولیکی، باید مدل ریاضی برای شبیه‌سازی رسوب نیز واسنجی گردد. به این منظور، تغییرات مقطع عرضی رودخانه کارون در محل ایستگاه هیدرومتری اهواز به‌ازای روابط تجربی مختلف موجود در مدل ریاضی GSTARS شبیه‌سازی شده و با مقطع عرضی این ایستگاه در فروردین ۱۳۸۴ مقایسه گردید. نتایج این مقایسه در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که روابط رسوبی اکرز- وایت (۱۹۷۳) و توفالتی (۱۹۶۸) مطابقت بهتری نسبت به مشاهدات دارند. از میان بقیه روابط رسوبی، رابطه انگلوند- هانسن (۱۹۷۲) کمترین خطا و رابطه میر- پیترو و مولر (۱۹۴۸) بیشترین خطا را دارند. نتایج این دو رابطه نیز در شکل ۸ ارایه شده است. طبق مطالعات یانگ (۱۹۹۶) و مولیناس و وو (۲۰۰۱)، در رودخانه‌های بزرگ آبرفتی با بستر ماسه‌ای، رابطه رسوبی توفالتی مطابقت بهتری با واقعیت دارد که در این پژوهش نیز تا حدودی همین نتیجه به‌دست آمده است.

با بررسی تغییرات بستر رودخانه کارون در محل ایستگاه اهواز، مشخص شد که در مدت زمان ۷ سال، رسوب‌گذاری فرآیند غالب در این ایستگاه است. کلیه روابط رسوبی مورد استفاده در این پژوهش نیز همین فرآیند را پیش‌بینی نموده‌اند.

محاسبه‌های مدل ریاضی نشان می‌دهد که میزان رسوب خروجی از ایستگاه فارسیات با استفاده از روابط رسوبی توفالتی و اکرز- وایت به‌ترتیب حدود ۱۹/۸ و ۲۰/۶ میلیون تن در سال است. با استفاده از رابطه رگرسوونی دبی سنج رسوب معلق ایستگاه اهواز و با احتساب حدود ۳ درصد از رسوب معلق به‌عنوان بار بستر (سازمان آب و برق خوزستان، ۲۰۰۸)، حجم رسوب ورودی از ایستگاه هیدرومتری

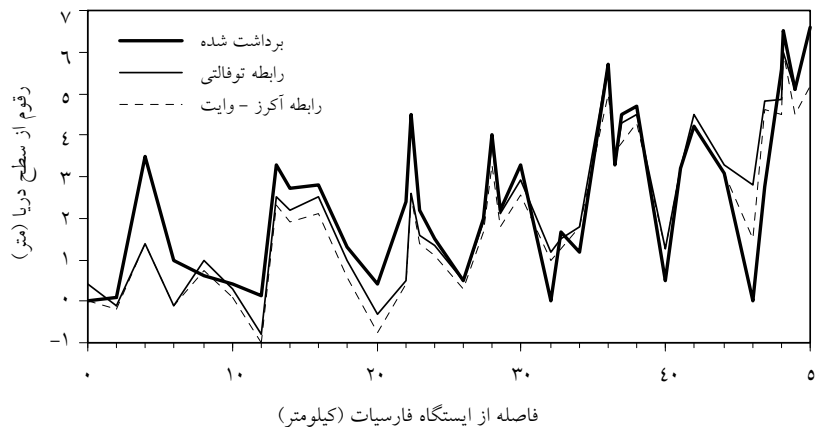
اهواز به محدوده مورد مطالعه حدود ۲۱/۷ میلیون تن در سال برآورد شده است. بنابراین، حجم رسوب‌گذاری در این محدوده از دو رابطه رسوبی توفالتی و آکرز- وایت به ترتیب ۱/۹ و ۱/۱ میلیون تن در سال به دست می‌آید. این نتایج در مقایسه با نتایج مطالعات سازمان آب و برق خوزستان (۲۰۰۸) مبنی بر رسوب‌گذاری حدود ۲ میلیون تن در بازه اهواز- فارسیات مطابقت خوبی دارد. نتایج این تحقیق، علاوه بر پیش‌بینی نرخ رسوب‌گذاری، توزیع طولی و عرضی رسوب‌گذاری را نیز ارائه نموده است که در طرح‌های سامان‌دهی رودخانه و مدیریت سیلاب کاربرد زیادی دارد. با توجه به این‌که بخش اعظم (حدود ۸۰ درصد) رسوب معلق رودخانه کارون در محدوده مورد مطالعه از جنس رسوبات شسته است که تقریباً قابلیت ته‌نشست را ندارد (سازمان آب و برق خوزستان، ۲۰۰۸)، بنابراین فقط بخش کمی از رسوبات معلق و بخش زیادی از رسوبات بستر در این محدوده ته‌نشین شده‌اند.



شکل ۸- واسنجی روابط رسوبی مختلف برای مقطع عرضی ایستگاه اهواز.

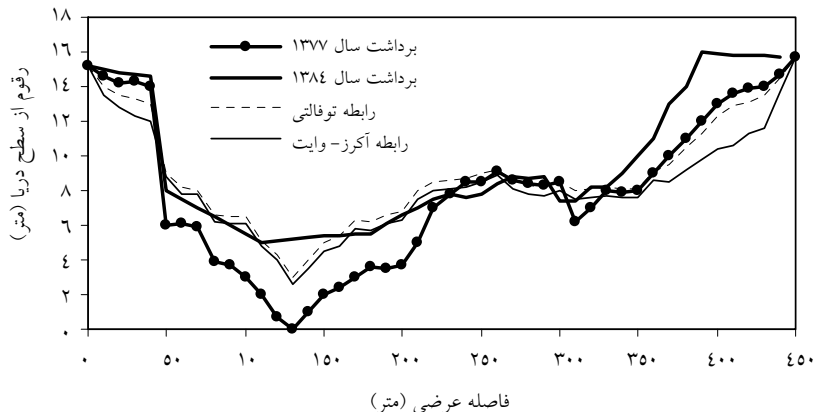
ب- **صحت‌سنجی مدل ریاضی:** در بخش صحت‌سنجی مدل، از دو رابطه رسوبی تأیید شده در بخش واسنجی مدل ریاضی (روابط آکرز- وایت و توفالتی) استفاده شده است. به این منظور، تغییرات طولی خط‌القعر رودخانه کارون در بازه مورد مطالعه (فاصله از ایستگاه فارسیات) با خط‌القعر محاسباتی مدل مقایسه شده است. این مقایسه در شکل ۹ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که نتایج محاسباتی مدل مطابقت خوبی با مشاهدات به‌ویژه در ابتدای بازه مورد مطالعه (فاصله کیلومتر ۳۶ تا ۴۴ از ایستگاه فارسیات) دارد. در این محدوده، شهر اهواز قرار دارد که به دلیل تراکم جمعیت و نیز تمرکز

طرح‌های مهم ساماندهی رودخانه کارون، دارای اهمیت خیلی زیادی است. نتایج مدل ریاضی در این محدوده مهم، مطابقت خوبی با مشاهدات دارد.



شکل ۹- صحت‌سنجی مدل ریاضی با توجه به پروفیل طولی (خط‌القرمز) رودخانه کارون در بازه مورد مطالعه.

در مرحله صحت‌سنجی، علاوه بر مقایسه تغییرات طولی خط‌القرمز رودخانه، از مقایسه تغییرات تراز بستر یک مقطع عرضی واقع در حدفاصل پل معلق تا پل چهارم (نادری) نیز استفاده شده است. نتایج این مقایسه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نتایج محاسباتی مدل ریاضی به‌زای هر دو رابطه رسوبی آکرز- وایت و توفالتي مطابقت به‌نسبت خوبی با مقطع عرضی برداشت شده در سال ۱۳۸۴ به‌ویژه در مجرای اصلی رودخانه دارند. در این بخش از رودخانه، میزان متوسط رسوب‌گذاری در طول ۷ سال، با استفاده از مشاهده‌های صحرائی حدود  $26/4$  سانتی‌متر و با استفاده از روابط رسوبی توفالتي و آکرز- وایت به‌ترتیب حدود ۲۹ و  $24/6$  سانتی‌متر به‌دست آمده است. محدوده ساحل راست رودخانه به‌دلیل انجام طرح‌های مهندسی رودخانه از قبیل تثبیت ساحل، اختلاف زیادی با نتایج مدل ریاضی دارد.



شکل ۱۰- مقایسه تغییرات محاسباتی و مشاهداتی تراز بستر یکی از مقاطع عرضی رودخانه کارون در محدوده شهر اهواز.

### نتیجه‌گیری

۱- واسنجی هیدرولیک جریان مدل ریاضی GSTARS ۲/۰ نشان می‌دهد به‌ازای ضریب زبری مانینگ ۰/۰۳۷ بهترین تطابق بین پروفیل سطح آب محاسباتی با مقادیر واقعی رقوم سطح آب رودخانه کارون در محدوده شهر اهواز به‌ازای دبی جریان ۳۰۸۰ مترمکعب بر ثانیه (دبی مقطع لبریز ایستگاه اهواز) ایجاد می‌شود.

۲- نتایج واسنجی مدل ریاضی GSTARS ۲/۰ در رودخانه کارون در محل ایستگاه هیدرومتری اهواز نشان می‌دهد که تغییرات تراز بستر به‌دست آمده از روابط رسوبی آکرز- وایت (۱۹۷۳) و توفالته (۱۹۶۸) تطابق نسبتاً مناسبی را با تغییرات واقعی بستر این ایستگاه دارند. این نتیجه با نتایج محققان مختلف مبنی بر کارایی رابطه رسوبی توفالته در رودخانه‌های بزرگ با بستر ماسه‌ای مطابقت دارد. رابطه رسوبی میر- پیتر و مولر از بین روابط رسوبی مورد بررسی، بیشترین خطا را داشته است.

۳- برای صحت‌سنجی مدل ریاضی، از پروفیل طولی خط‌القعر رودخانه در بازه مورد بررسی استفاده شده است. همچنین یک مقطع عرضی در این بازه انتخاب شده و تغییرات تراز بستر محاسبه شده در طی یک دوره زمانی ۷ ساله با تغییرات واقعی مقایسه گردیده است. نتایج صحت‌سنجی مدل ریاضی در هر دو حالت فوق، قابلیت و کارایی مناسب مدل ریاضی GSTARS ۲/۰ را در پیش‌بینی تغییرات طولی و عرضی تراز بستر رودخانه کارون نشان می‌دهد.



## منابع

1. Abbasi, Sh. 2007. Prediction of suspended sediment of Karun river using artificial neural network, M.Sc. Thesis in Water Engineering, Shahid Chamran University, (In Persian)
2. Alami, M.T. 2004. Investigation of reservoir mathematical sedimentation models and comparison with artificial neural network. Ph.D. Thesis in Water Engineering, Tabriz University, 197p. (In Persian)
3. Alkhairolah, L. 1992. Investigation on impacts of Karun river training works on sedimentation rate of river in vicinity of Ahwaz, 2<sup>nd</sup> River Engineering conference, Ahwaz, Pp: 6-13. (In Persian)
4. Amoopour, M. 2006. Prediction of sedimentation pattern in Salmas Zoolachai reservoir dam and its useful time using GSTARS 2.0 mathematical model, M.Sc. Thesis in Civil Engineering, Tabriz University, 126p. (In Persian)
5. Hemadi, K., and Zohrabi, N. 2005. Study of river bed variation of Karun river in Ahwaz hydrometric station. KWPA, 14p. (In Persian)
6. Khozestan Water and Power Authority (KWPA). 2002. Karun river training project, Erosion and Sedimentation Report, DezAb Consulting, 230p. (In Persian)
7. Khozestan Water and Power Authority (KWPA). 2006. Karun river training project, Summary report for phase 1, 30p. (In Persian)
8. Khozestan Water and Power Authority (KWPA). 2008. Sediment budget of Karun and Dez Rivers downstream of Dez reservoir dam, Final report of suspended sediment equations, Sazepardazi Iran Consulting, 60p. (In Persian)
9. Molinas, A., and 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.
10. Molinas, A., and Wu, B. 2001. Transport of sediment in large sand-bed rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 39: 2. 135-146.
11. Yang, C.T. 1996. *Sediment transport: theory and practice*. McGraw-Hill Companies, Inc., New York, NY.
12. Yang, C.T., and Simões, J.M. 1998. Simulation and prediction of for river morphologic changes. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Hydro-Science and Engineering, Cottbus, Germany, Pp: 1-8.
13. Yang, C.T., and Simões, F.J.M. 2000. User's manual for GSTARS 2.1, U.S. Bureau of Reclamation technical service center, Denver, Colorado.
14. Yang, C.T., Huang, J., and Greimann, B. 2005. GSTARS-1D, A one dimensional hydraulic and sediment transport model. 6<sup>th</sup> Int. Conf. on Hydro-Science and Engineering, Australia
15. Yang, C.T., Treviño, M.A., and Simões, F.J.M. 1998. User's Manual for GSTARS 2.0 (Generalized Stream Tube model for Alluvial River Simulation version 2.0), US Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Denver.
16. Zarrati, A., and Etaat, A. 2001. Comparison of Fluvial 12 and GSTARS 2.0 mathematical models in morphological simulations of rivers, 3<sup>rd</sup> Iranian Hydraulics Conference, Tehran, (In Persian).



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 16(4), 2009*  
[www.gau.ac.ir/journals](http://www.gau.ac.ir/journals)

## **Simulation of Karun River Sedimentation using GSTARS 2.0 (A reach between Ahwaz and Farsiat hydrometric stations)**

**\*A.R. Zahiri<sup>1</sup>, B. Shahinejad<sup>2</sup> and S. Rostami<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, <sup>2</sup>Ph.D. Student, Dept. of Water Engineering, Shahid Chamran University, Ahwaz, <sup>3</sup>Project Manager, Lorestan State Regional Water, Iran

### **Abstract**

The Karun River has very complex problems related to sediments such as formation of big islands, banks failure, huge sediment deposition and reduction of flow velocity and hydraulic capacity. For Karun River training and restoration, many projects and engineering works have been considered to be designed and constructed including levee construction and river dredging. For evaluating of these complex schemes and their interactions, sedimentation studies have to be carried out in this river reach. Mathematical modeling of erosion and deposition of sediments in Karun River from Ahwaz hydraulic station to Farsiat station, a distance of approximately 50 km, has been studied using GSTARS 2.0 model. GSTARS mathematical model using stream tubes concept, has an ability to account for the longitudinal and lateral distribution of sediment deposition in the rivers. For hydraulic and sediment calibration of this mathematical model, historical water surface elevation of flood in 2005 and cross section topography between 1998 and 2005, have been used, respectively. Calibration results showed that Ackers-White (1974) and Toffaleti (1969) sediment transport equations had good agreement with field data.

**Keywords:** Karun River, GSTARS mathematical model, Calibration, Sediment transport equations

---

\* Corresponding Author; Email: [zahiri@gau.ac.ir](mailto:zahiri@gau.ac.ir)