

## بررسی تغییرات عرضی و طولی بستر در پایین دست سد مخزنی کرخه با استفاده از مدل ریاضی GSTARS3

ثریا بخشعلی پور<sup>۱\*</sup>، مهدی قمشی<sup>۲</sup> و نوال آزم<sup>۳</sup>

\* نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز، bakhshalipour.s@yahoo.com  
 ۲- استاد دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز  
 ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۹۱/۴/۳

تاریخ دریافت: ۹۰/۷/۵

### چکیده

احداث سدها در مسیر رودخانه‌ها باعث تجمع رسوبات در پشت سد و به جریان انداختن آب زلال به سمت پایین دست و ایجاد تغییراتی در رسوب و مورفولوژی پایین دست رودخانه خواهد گردید. آگاهی از چگونگی روند تغییرات در طرح‌های ساماندهی و همچنین اجرایی اهمیت خواهد داشت. در این مقاله بررسی‌ها در پایین دست سد مخزنی کرخه در حد فاصل ایستگاه پای پل تا سد انحرافی حمیدیه و با طول بازه‌ی مطالعاتی در حدود ۲۰۰ کیلومتر با استفاده از مدل ریاضی GSTARS3 صورت گرفته است. مدل کامپیوتری GSTARS3، مدل تعمیم یافته لوله جریان برای شبیه‌سازی رودخانه‌های ابرفتی است که توسط گروه هیدرولیک رودخانه و رسوب-گذاری مرکز خدمات فنی USBR، تهیه شده و توانایی شبیه‌سازی شرایط جریان به روش شبه‌دو بعدی و شبیه‌سازی تغییر هندسی کانال به روش شبه سه بعدی را دارد. از اطلاعات هیدرولیکی موجود در سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۸ (بازه‌ی زمانی ۱۲ ساله) و از مقاطع عرضی در سال ۱۳۸۴ استفاده شده است. در نهایت بعد از واسنجی با استفاده از دو رابطه رسوبی ایکرز-وایت و لارسن و ماندن که بیشترین همخوانی را با بازه مورد مطالعه داشتند، تغییرات الگوی رسوب و مورفولوژی پایین دست سد مخزنی کرخه از جمله تغییرات عرضی و طولی، تغییرات شیب بستر آبراهه در دوره‌ی زمانی ۱۰ ساله توسط مدل اجرا گردید. در این بازه‌ی زمانی بیشترین تغییرات شیب در زیر حوضه کرخه علیا مشاهده شده است.

کلید واژه‌ها: رودخانه کرخه، مدل GSTARS3، تغییرات مورفولوژی، الگوی رسوب، پایین دست سد.

### Investigation of the River Bed Changes along the Downstream of Karkheh Reservoir Using Mathematical Model GSTARS3

S. Bakhshalipour<sup>1</sup>, M. Ghomeshi<sup>2</sup> and N. Azam<sup>3</sup>

1- M.Sc Student, Department of Water Structures, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahwaz. [bakhshalipour@gmail.com](mailto:bakhshalipour@gmail.com)

2- Professor, Department of Water Structures, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahwaz.

3- M.Sc Student, Department of Water Structures, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahwaz.

Received: 27.Sept.2011

Accepted: 23June.2012

### Abstract

Construction of dams in rivers is cause of sediment accumulation behind the dams and therefore clear water flowing downstream. Flowing of water with high capacity of sediment and low in sediment load will affect downstream morphological parameters of the river. In the present study, morphological changes of Karkh river in the segment located downstream of the Karkheh reservoir is analyzed with the aids of a mathematical model. The length of the river reach was about 200 km located between Paaipol station and Hamidieh station.

GSTARS3 model is developed version of the stream tube model for simulating the alluvial rivers presented by the river hydraulics and sedimentation branch of USBR. The hydraulic data of the river between 1998 and 2009 (12 years period) and measured cross sections in 2005 are used. Calibration of the model showed that the Ackers-White and Laursen-Madden are suitable sediment transport equation for this river. By using these equations for a period of 10 years, the changes of the sediment and morphological parameters such as the variations of the cross sectional and longitudinal profiles, bed slope of the river were analyzed and discussed. In this period the greatest change in slope at the interval of the Upper Karkheh Basin has been observed.

**Keywords:** Karkheh river; GSTARS3 model, Morphological changes Sediment transport, Downstream of dam.

## مقدمه

مخزن سد تنظیمی پایین دست مورد بررسی قرار گرفت (۲). اعلی و همکاران با استفاده از مدل GSTARS3 به بررسی تأثیر احداث سد و نیار بر مورفولوژی رودخانه پایاب سد و نیار در بازه‌ای از محل سد و نیار تا بند انحرافی شهید کسائی پرداختند، این تحقیق در دو مرحله شرایط طبیعی رودخانه و بدون وجود سد که دارای حالت رژیم می‌باشد و شرایط مربوط به بعد از احداث سد صورت گرفت، نتایج نشان داد که احداث سد بر روی رودخانه سبب ایجاد فرسایش در بستر رودخانه پایین دست سد می‌گردد (۱). جانسون و همکاران<sup>۱</sup> به پیش‌بینی انتقال رسوب و تراز بستر در رودخانه‌های دارای دشت‌های سیلابی با استفاده از مدل ریاضی GSTARS2.1 در بازه‌ای به طول ۸۶ کیلومتر در رودخانه ریوگراندا<sup>۲</sup> در حد فاصل سال‌های ۱۹۷۲ تا ۱۹۹۲ پرداختند، انتقال رسوب در دشت‌های سیلابی متفاوت با کانال اصلی می‌باشد زیرا به علت زبری بیشتر بستر و سرعت کمتر دشت‌های سیلابی معمولاً ظرفیت انتقال رسوب کم‌تری را نسبت به آبراهه اصلی داشته و رسوب‌گذاری صورت می‌گیرد، در این مطالعه از انتقال رسوب در شرایط غیرتداولی استفاده شد و با مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده و پروفیل بستر حاصل از اجرای مدل به نتایج رضایت‌بخشی رسیده‌اند (۷).

## معرفی مدل ریاضی GSTARS3

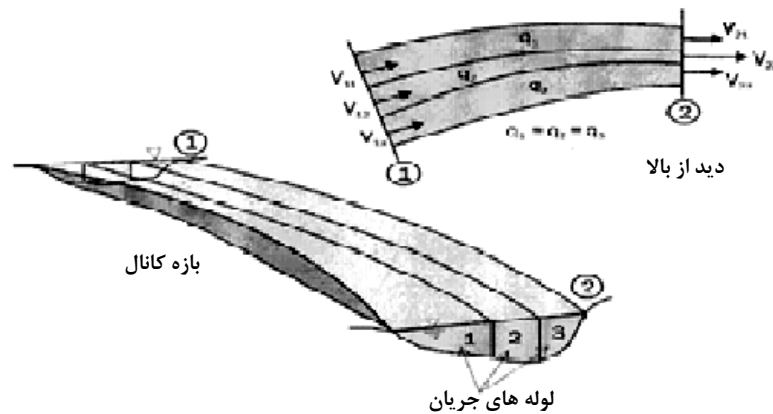
GSTARS3 (مدل تعمیم یافته انتقال رسوب برای شبیه‌سازی رودخانه‌های آبرفتی، نسخه سه، آخرین نسخه از سری‌های مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی جریان آب و انتقال رسوب که توسط گروه هیدرولیک رودخانه و رسوب‌گذاری مرکز خدمات فنی عمران آمریکا<sup>۳</sup> تهیه و تدوین شده است. سری برنامه‌های GSTARS برای حل مسائل پیچیده مهندسی رودخانه در جایی که محدودیت‌های اطلاعات و منابع وجود دارد مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مدل برای شبیه سازی رفتار رودخانه از مفهوم لوله‌های جریان استفاده می‌شود، بدین صورت که مطابق شکل (۱) کل مقطع عرضی به چندین لوله تقسیم شده و سپس محاسبات هیدرولیک جریان و انتقال رسوب در

شناسایی، رفتارسنجی و تحلیل جریان در رودخانه‌ها در برآورده ساختن اهداف در مهندسی منابع آب کمک شایانی را خواهد داشت. از جمله اهداف مهم در منابع آب، کم کردن خسارت‌های ناشی از جریان در رودخانه‌ها است. کنترل و به حداقل رساندن خسارت‌های وارده ناشی از سیلاب، رسوب‌گذاری و فرسایش به آبراهه‌ها، اراضی کشاورزی، تأسیسات و ابنیه‌های آبی است. دستیابی به چنین اهدافی مستلزم این است که فرآیند حرکت جریان، فرسایش بستر، انتقال مواد جامد و ته‌نشینی مواد رسوبی مورد مطالعه کامل قرار گیرد. احداث سد در مسیر رودخانه باعث رسوب‌گذاری در مخزن و کاهش عمر مفید سد و تأثیر بر الگوی رسوب و مورفولوژی آبراهه و سازه‌های موجود در پایین دست سدها می‌شود. زیرا رودخانه‌ها پس از طی مدت زمانی به یک پایداری نسبی می‌رسند که هر گونه تغییرات در شرایط موجود، می‌تواند این پایداری را دستخوش تغییرات وسیع سازد. جریان آبی که به پایین دست رها می‌شود نسبتاً آب زلال بوده، از آن‌جایی که قدرت حمل آب زلال بالا می‌باشد لذا ظرفیت حمل خود را از مواد بستر پایین دست تأمین می‌نماید و موجب فرسایش بستر در آبراهه پایین دست در جهات طولی و عرضی می‌گردد. از جمله مطالعاتی که در گذشته در ارتباط با شبیه‌سازی روند رسوب‌گذاری در مخازن و روند فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها انجام شده، می‌توان به بررسی وضعیت رسوب‌گذاری در مخزن سد وشمگیر با استفاده از مدل GSTARS3 توسط سیدیان اشاره کرد، در این تحقیق با توجه به آمار و اطلاعات مربوط به ژئومتری مخزن سد، هواشناسی، نحوه بهره‌برداری از مخزن و اطلاعات مربوط به رسوبات وارد شده به مخزن، در سال‌های ۱۳۵۰ تا ۱۳۷۴ کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل انجام شد و پیش‌بینی گردید که در سال ۱۳۹۲ حدود ۸۰ درصد از حجم مخزن از رسوب پر می‌شود (۳). اویسی با استفاده از مدل HEC-6 به صورت یک بعدی به بررسی تأثیر سد مخزنی کرخه بر فرآیند کف‌کنی در بستر پایین دست با فرض آبیگری کامل با الگوی بهره‌برداری طراحی شده و ذخیره حجمی معادل هفت میلیارد متر مکعب آب پرداخت، در این تحقیق با به‌کارگیری توابع مختلف انتقال رسوب در دوره‌های زمانی مختلف، میزان کف‌کنی بستر و تغییرات به‌وجود آمده در سطح آب پایاب سد، تغییرات ایجاد شده در دانه‌بندی مواد بستر، حجم رسوبات منتقل شده بر اثر پدیده کف‌کنی به

1- Jianchun et al

2- Rio grande

3- USBR



شکل ۱- توضیح شماتیک تیوب‌های جریان

جدول ۱- معادله‌های انتقال رسوب به کار گرفته شده در GSTARS3 (۸).

| معادله رسوب                        | معادله رسوب                             |
|------------------------------------|---|
| پارکر (۱۹۹۰)                       | ۱ میر-پیتر و مولر (۱۹۸۴)                |
| آشیدا و میچو (۱۹۷۲)                | ۲ لارسن (۱۹۸۵)                          |
| اصلاح شده ایگرز-وایت (۱۹۹۰)        | ۳ توفالتی (۱۹۶۹)                        |
| دوبوی (۱۸۷۹)                       | ۴ انگلوند و هانسن (۱۹۷۲)                |
| اصلاح شده لارسن (۱۹۹۳)             | ۵ ایگرز-وایت (۱۹۷۳)                     |
| اصلاح شده یانگ برای انتقال ذرات شن | ۶ انتقال ذرات ماسه (۱۹۷۳) + انتقال ذرات |
| با غلظت بالای بار شسته (۱۹۹۶)      | ۷ شن یانگ (۱۹۸۴)                        |
| معادله دانشگاه تسینگ هوآ برای رسوب | ۸ انتقال ذرات ماسه (۱۹۷۹) + انتقال ذرات |
| شویی مخزن (۱۹۸۵)                   | ۹ شن یانگ (۱۹۸۴)                        |

شوند در حالی که برای دیگر ذرات ممکن است رسوبگذاری رخ دهد و یا ذرات بی‌حرکت باشند، بنابراین چندین فرآیند مختلف ممکن است رخ دهد (۸). در تئوری بنت و نردین (۱۹۷۷) بستر به‌وسیله‌ی استفاده از دو یا سه لایه فرضی (سه لایه برای رسوبگذاری، دو لایه برای آب‌شستگی) شبیه‌سازی می‌شود، در این فرآیند بستر شامل سه لایه فعال، غیرفعال و لایه دست نخورده است. فرسایش یک کلاس دانه‌بندی از مواد بستر توسط مقدار رسوباتی که از این کلاس دانه‌بندی در لایه فعال قرار دارد محدود می‌شود. اگر ظرفیت انتقال جریان برای یک کلاس دانه‌بندی بیش‌تر از آن مقداری باشد که برای انتقال در لایه فعال وجود دارد، ترم محدودیت دسترسی مورد استفاده قرار می‌گیرد (۸). از طرف دیگر اگر مواد بیش‌تری از مقدار مورد نیاز محاسبه شده توسط معادله انتقال رسوب وجود داشته باشد بخش محدودیت ظرفیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. لایه غیرفعال نیز وقتی که رسوبگذاری رخ می‌دهد مورد استفاده قرار می‌گیرد. GSTARS3 دارای ۱۴ تابع انتقال رسوب برای مواد غیرچسبنده می‌باشد. بیشتر فرمول‌های انتقال رسوب برای محاسبه کل بار مواد

هر یک از لوله‌ها به صورت مجزا صورت می‌گیرد (۶). مدل GSTARS3 دارای چهار بخش اصلی است که بخش اول کاربرد معادله‌های انرژی و مومنتم و استفاده از روش گام به گام استاندارد برای محاسبات پروفیل سطح آب است. در این مدل می‌توان از معادله‌های مانینگ، شزی و دارسی ویسباخ برای محاسبه شیب خط انرژی استفاده نمود. مدل قادر به برآورد پارامترهای ثابت و متحرک و محاسبه پروفیل سطح آب در رژیم‌های مختلف جریان می‌باشد. در بخش دوم بر اساس روابط متعدد رسوبی و مفهوم لوله‌های جریان، روندیابی رسوب صورت می‌گیرد. بخش سوم کاربرد تئوری حداقل انرژی مصرفی جریان برای پیش‌بینی تغییرات عرضی مجرا می‌باشد. در بخش چهارم پایداری دیواره مجرا بر اساس زاویه ایستایی مواد دیواره مورد بررسی قرار می‌گیرد (۴). GSTARS3 انتقال رسوب را برای هر کلاس دانه‌بندی انجام می‌دهد. در نتیجه ذرات با اندازه متفاوت با نرخ متفاوتی منتقل می‌شوند. با توجه به پارامترهای هیدرولیکی، توزیع رسوب ورودی به بازه و ترکیب مواد بستر، بعضی از ذرات ممکن است دچار فرسایش

جدول ۲- ایستگاه‌های هیدرومتری و موقعیت آن‌ها

| ایستگاه | سال تأسیس | مساحت حوضه<br>(کیلومتر مربع) | ارتفاع<br>(متر) | مشخصات جغرافیایی |         |
|---------|-----------|------------------------------|-----------------|------------------|---------|
|         |           |                              |                 | عرض              | عرض     |
| پای پل  | ۱۳۳۳      | ۴۲۶۰۰                        | ۱۹۰             | ۳۲°-۳۲'          | ۳۲°-۳۲' |
| عبدلخان | ۱۳۴۵      | ۴۵۲۰۵                        | ۳۹              | ۳۱°-۵۰'          | ۳۱°-۵۰' |
| حمیدیه  | ۱۳۲۹      | ۴۵۸۸۲                        | ۳۰              | ۳۱°-۲۸'          | ۳۱°-۲۸' |

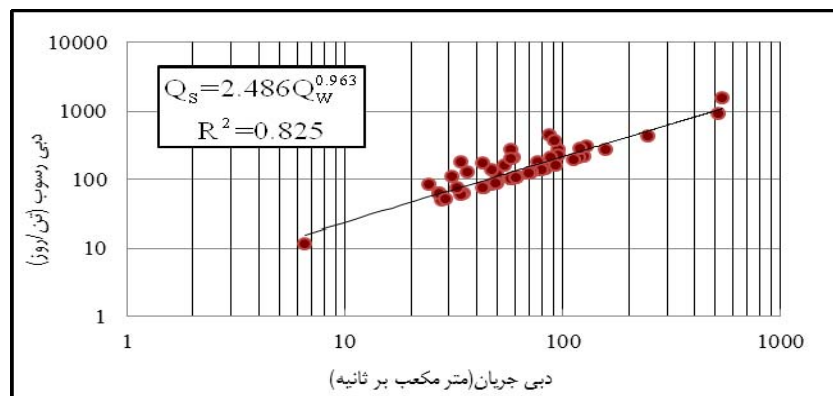
### داده‌های مورد نیاز مدل

به منظور اجرا و شبیه‌سازی جریان و رسوب در مدل GSTARS3 نیاز به داشتن اطلاعات متنوع و کاملی در زمینه‌های داده‌های هندسی، داده‌های هیدرولیکی و داده‌های رسوب می‌باشد. داده‌های هندسی با استفاده از مقاطع عرضی، فاصله مقاطع، ضرایب زبری مانینگ، داده‌های ضرایب افت انرژی ناشی از پیچ‌ها یا سازه‌های موجود در مسیر مشخص می‌شود. برداشت مقاطع عرضی بازه‌ی پای‌پل تا حمیدیه در سال ۱۳۸۴ صورت گرفته است. در این تحقیق از اطلاعات هیدرولیکی در محدوده‌ی مطالعاتی در سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۸ (بازه‌ی زمانی ۱۲ ساله) استفاده شده است. داده‌های هیدرولیکی شامل هیدروگراف روزانه دبی جریان در ایستگاه بالادست (ایستگاه پای‌پل) و منحنی دبی اشل در ایستگاه پایین دست (ایستگاه حمیدیه) می‌باشد. در قسمت اطلاعات رسوب، منحنی سنج رسوب معلق ایستگاه پای‌پل، شکل (۲) به کار گرفته شده است. از داده‌های مورد نیاز دیگر منحنی دانه‌بندی ورودی می‌باشد. از آنجایی که نوع دانه‌بندی بستر در دو محدوده‌ی پای‌پل تا عبدلخان درشت‌دانه و عبدلخان تا حمیدیه ریزدانه می‌باشد، از منحنی‌های دانه‌بندی در هر دو ایستگاه پای‌پل و عبدلخان استفاده شده است. در شکل (۳) منحنی مربوط به دانه‌بندی در ایستگاه پای‌پل و منحنی دانه‌بندی مربوط به ایستگاه عبدلخان در شکل (۴) آورده شده‌اند.

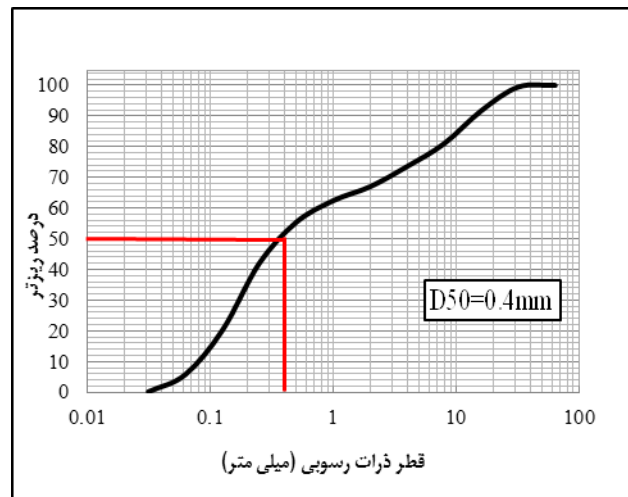
بستر توسعه داده شده‌اند بدون این که مقدار انتقال برای هر اندازه ذره مشخص باشد. جدول (۱) معادلات رسوبی مختلف بکار گرفته شده در مدل را ارائه می‌کند (۸).

### معرفی منطقه مورد مطالعه

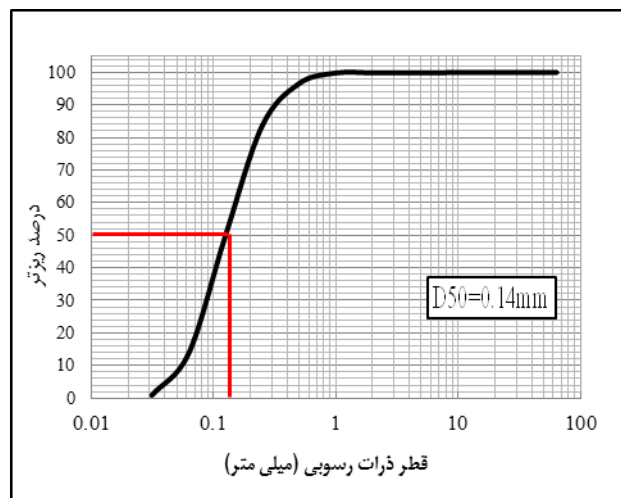
رودخانه کرخه پس از رودخانه‌های کارون و دز سومین رودخانه پر آب کشور به حساب می‌آید. این رودخانه با طولی حدود ۹۰۰ کیلومتر دارای بزرگ‌ترین حوضه‌ی آبریز با وسعت حدود ۵۰۰۰۰ کیلومتر مربع در میان رودخانه‌های ایران می‌باشد و دارای دو شاخه‌ی گاماسیاب و قره‌سو می‌باشد. این رودخانه به صورت نسبتاً کشیده و در جهت شمالی- جنوبی است و از نظر موقعیت جغرافیایی بین طول‌ها ۱۰/۴۶ تا ۷/۴۹ و عرض‌های ۱۰/۳۱ تا ۰/۳۵ محدود شده است. سرچشمه رودخانه کرخه از کوه‌های الوند در سلسله جبال زاگرس آغاز می‌شود. مطالعات در بازه‌ی از رودخانه کرخه که شامل سه ایستگاه هیدرومتری پای‌پل، عبدلخان و حمیدیه بود، صورت گرفته است. طول بازه‌ی مورد مطالعه در حدود ۲۰۰ کیلومتر می‌باشد و از تعداد ۲۲۴ مقطع عرضی استفاده شده است. در جدول (۲) ایستگاه‌های هیدرومتری در بازه‌ی مطالعاتی و موقعیت هر یک از آن‌ها آورده شده است (۵).



شکل ۲- منحنی سنج رسوب معلق رودخانه کرخه در ایستگاه پای پل



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی مصالح بستر در ایستگاه پای پل



شکل ۴- منحنی دانه‌بندی مصالح بستر در ایستگاه عبدالخان

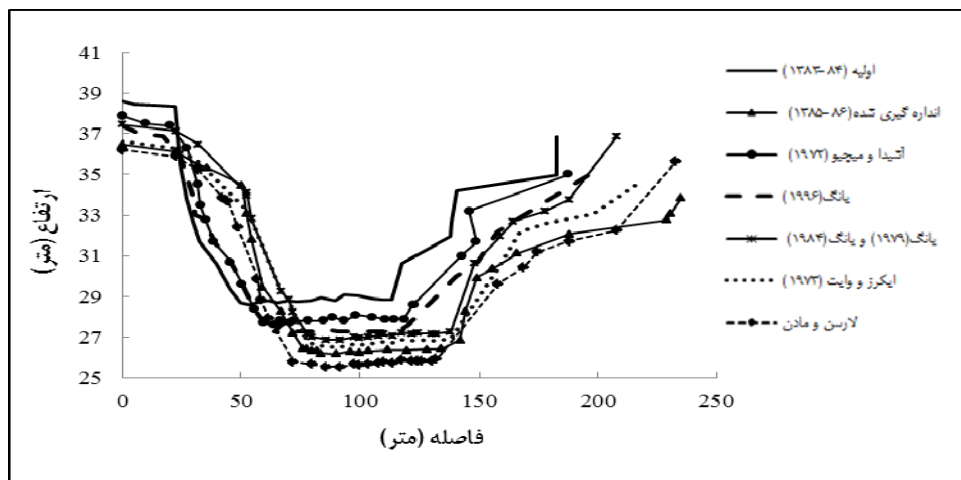
HEC-RAC انجام شده بود، مقدار ضریب زبری مانینگ در محدوده پای پل تا عبدالخان ۰/۰۲۵۲ و در بازه‌ی ایستگاه عبدالخان تا حمیدیه ۰/۰۲۴۶ حاصل گردید، که در این تحقیق از آن استفاده گردید.

#### تعیین بهترین معادله رسوب

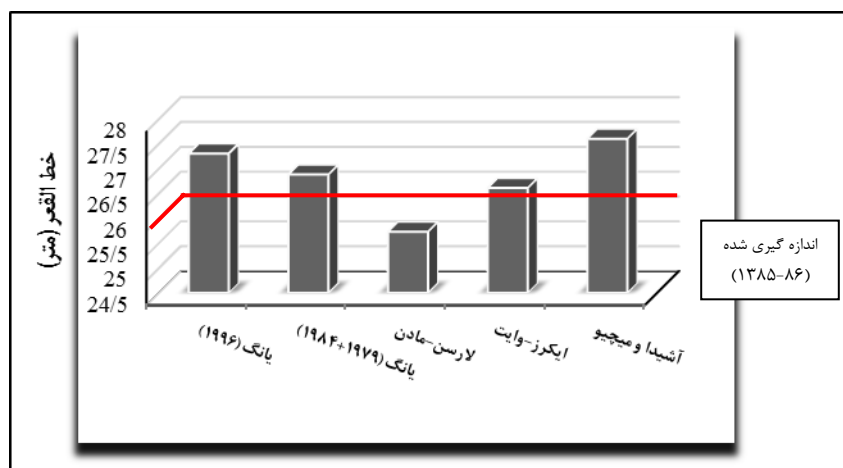
در بخش شبیه‌سازی رسوب ابتدا به تعیین بهترین معادله رسوب پرداخته شد. به منظور دستیابی به این امر باید در مقطع یا مقاطعی از رودخانه طی بازه‌ی زمانی مشخص برداشت مقطع صورت گرفته باشد تا بتوان نتایج حاصل از اجرای مدل در این بازه‌ی زمانی مشخص را با مقطع اندازه‌گیری شده مقایسه نمود. برای واسنجی رسوب مدل و دستیابی به بهترین معادله رسوب، از مقاطع برداشت شده در ایستگاه عبدالخان استفاده گردیده است. علت انتخاب مقطع عبدالخان به این

#### کالیبراسیون بخش هیدرودینامیک جریان

این قسمت شامل کالیبراسیون ضریب زبری می‌باشد. به علت متفاوت بودن بار بستر در طول بازه‌ی رودخانه کرخه، کالیبراسیون هیدرودینامیک در دو بازه‌ی پای پل تا عبدالخان و بازه‌ی عبدالخان تا حمیدیه صورت گرفت. در این تحقیق برای کالیبراسیون مدل از اطلاعات اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در بازه‌ی مورد مطالعه در سال ۱۳۸۳ استفاده شده است. پس از اجرای مدل به ازای مقادیر مختلف زبری، تفاوتی در نتایج سطح آب محاسباتی ایستگاه بالادست مشاهده نگردید، علت این امر ناشی از عمق زیاد آب در آبراهه می‌باشد. به همین دلیل برای این که از محدوده زبری مناسب برای مدل GSTARS3 استفاده شود، تصمیم گرفته شد از نتایج کالیبراسیون سایر مدل‌ها استفاده گردد. در تحقیقی که توسط فقیهی محمدی (۵) در بازه‌ی مطالعاتی مورد نظر با استفاده از مدل



شکل ۵- واسنجی روابط رسوبی مختلف برای مقطع عرضی عبدالخان در سال‌های ۸۶-۱۳۸۳



شکل ۶- تغییرات پیش‌بینی شده خط القعر پس از سه سال با استفاده از روش‌های مختلف در مقایسه با مقدار اندازه‌گیری شده

اندازه‌گیری شده می‌باشد، در طول بازه‌ی زمانی سه ساله در این ایستگاه، فرسایش کف آبراهه صورت گرفته و همچنین دیده می‌شود که دیواره‌های جانبی آبراهه دچار تغییر شده است. ساحل سمت چپ همراه با رسوب‌گذاری و ساحل سمت راست دچار فرسایش شده است و به نوعی جابجایی در عرض مقطع به وجود آمده است. پس از اجرای مدل با استفاده از روش‌های مختلف رسوبی، علاوه بر ترسیم نتایج مقطع عرضی عبدالخان با هر یک از روش‌ها، خط القعر آن‌ها نیز تعیین گردید. همان‌طوری که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، معادله‌های ایکرز - وایت<sup>۴</sup> و لارسن - مادن<sup>۵</sup> در مقایسه با روش‌های دیگر رضایت‌بخش‌تر می‌باشد. دیدگاه دیگر مقایسه خط القعر در این

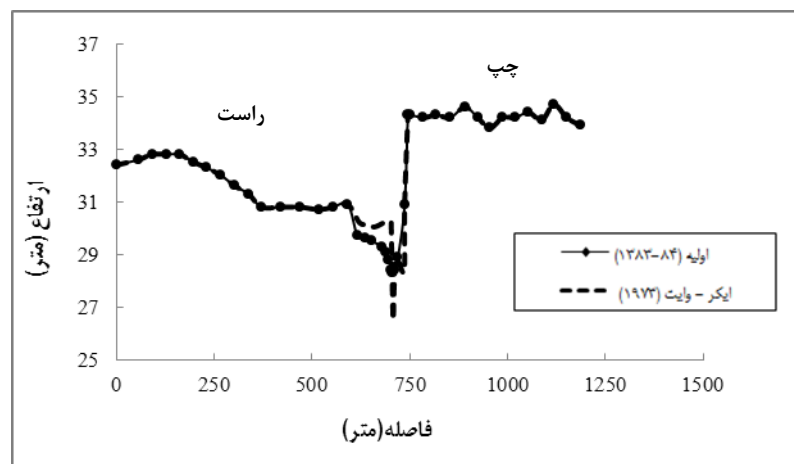
دلیل است که ایستگاه هیدرومتری در حد فاصل ایستگاه‌های بالادست (ایستگاه هیدرومتری پای‌پل) و پایین دست (ایستگاه هیدرومتری حمیدیه) قرار دارد و اطلاعات مربوط به برداشت مقاطع در سال‌های متوالی در این مقطع موجود می‌باشد. برای این منظور از داده‌های برداشتی مقطع عرضی در ایستگاه مذکور برای سال‌های ۸۴-۱۳۸۳ و ۸۶-۱۳۸۵ (بازه‌ی زمانی سه ساله) استفاده شده است. همچنین از تعدادی از روابط انتقال رسوب که با اطلاعات به دست آمده از منحنی دانه‌بندی و شرایط هیدرولیکی مطابقت بیشتری داشتند، برای اجرای مدل استفاده و نتایج حاصله از هر یک از روابط با مقطع عرضی اندازه‌گیری شده در سال ۸۶-۱۳۸۵ در ایستگاه عبدالخان مقایسه گردید. شکل (۵) نشان دهنده مقطع عرضی در دو زمان یاد شده فوق و تمامی روابط اجرا شده توسط مدل با مقادیر

1- Ackers and White

2- Laursen and Madden

جدول ۳ - مقادیر خط القعر رودخانه کرخه در ایستگاه عبدالخان

| خط القعر (متر) | روش اندازه گیری           |
|----------------|---------------------------|
| ۲۸/۶۱          | ابتدایی (۸۴-۱۳۸۳)         |
| ۲۶/۱۸          | اندازه گیری شده (۸۶-۱۳۸۵) |
| ۲۷/۳۰۱         | یانگ (۱۹۹۶)               |
| ۲۶/۸۸          | یانگ (۸۴-۱۹۷۹)            |
| ۲۵/۷۳          | لارسن-مادن                |
| ۲۶/۶۱          | ایکرز-وایت                |
| ۲۷/۶۰۱         | آشیدا و میچیو             |



شکل ۷- مقطع عرضی محاسباتی حاصل از اجرای ۱۰ ساله با استفاده از معادله رسوب ایکرز-وایت با فاصله ۸۵ کیلومتر از مقطع کنترل پایین دست

شده در مسیر رودخانه کرخه در سال ۸۴-۱۳۸۳ به عنوان مقاطع اولیه استفاده شد.

#### بررسی تغییرات طولی و عرضی در طول آبراهه

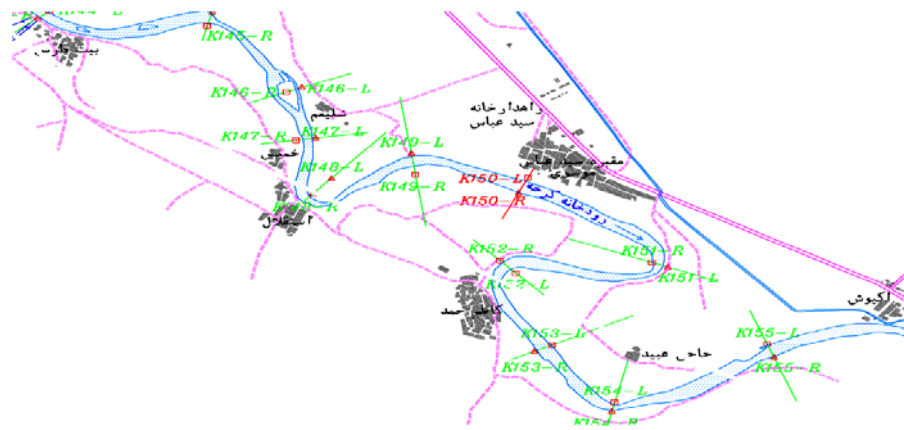
مدل GSTARS3 برای بررسی تغییرات آبراهه با استفاده از معادله‌های ایکرز-وایت در بازه‌ی زمانی ۱۰ ساله اجرا گردید. در ادامه به بررسی نتایج اجرای مدل در طول مسیر رودخانه و مقایسه آن‌ها با حالت اولیه پرداخته می‌شود. شکل (۷) نتیجه خروجی مقطع عرضی با فاصله ۸۵ کیلومتر که در محدوده‌ی بین ایستگاه‌های پای پل تا عبدالخان قرار دارد، می‌باشند. این مقطع نمونه‌ای از نتایجی می‌باشد که در مسیر مستقیم رودخانه واقع شده است. با توجه به خروجی مدل تغییرات اصلی در این مقطع در کانال اصلی صورت گرفته است، زیرا موقعیت این مقطع در مسیر مستقیم از رودخانه قرار دارد. شکل (۸) موقعیت این مقطع (K150) را در پلان رودخانه نشان می‌دهد. در

ایستگاه می‌باشد. خط القعر رودخانه کرخه در ایستگاه عبدالخان ابتدا و انتهای بازه‌ی زمانی سه ساله به ترتیب ۲۸/۶۱ و ۲۶/۱۸ متر اندازه‌گیری شده است.

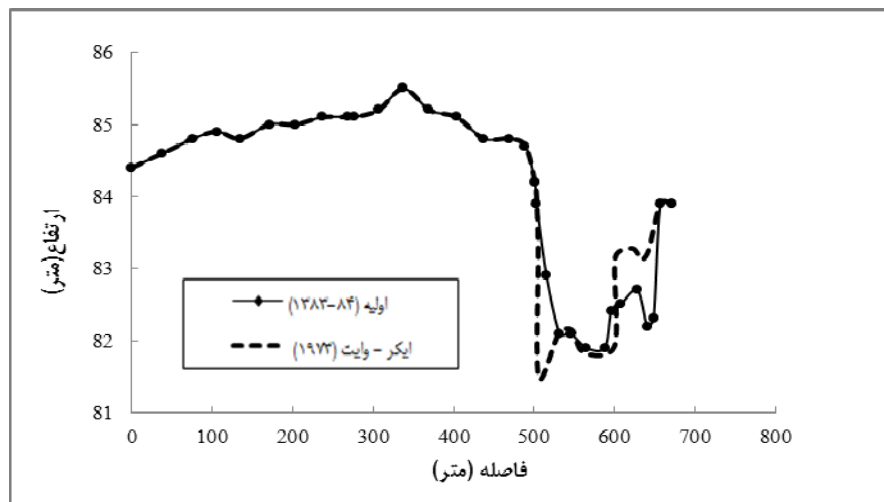
مقادیر خط القعر پس از اجرای سه ساله نیز در جدول (۳) آورده شده است. همچنین این مقادیر برای مقایسه با مقدار اندازه‌گیری شده در سال ۸۶-۱۳۸۵ به صورت نمودار در شکل (۶) نمایش داده شده است. که از میان نتایج حاصله مقادیر خط القعر روش‌های ایکرز-وایت ولارسن-مادن جواب‌های نزدیک‌تری را با مقدار اندازه‌گیری شده (۲۶/۱۸ متر) دارند.

#### بررسی و تحلیل نتایج

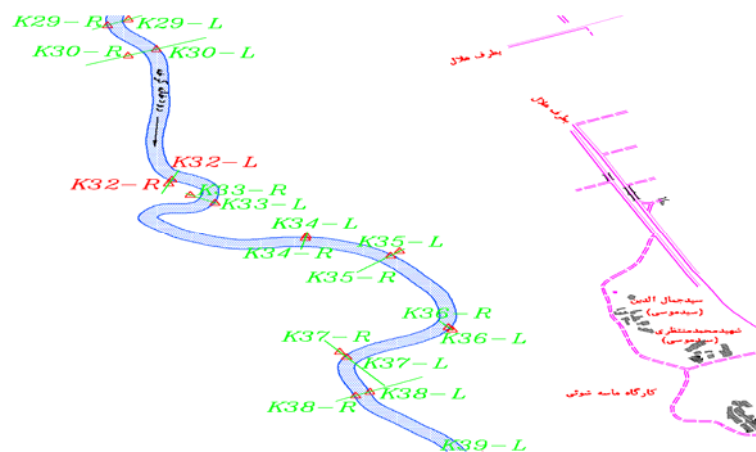
در این تحقیق داده‌های هیدرولیکی حد فاصل سال‌های آبی ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۸ مورد استفاده قرار گرفت. همچنین از مقاطع برداشت-



شکل ۸- مقطع شماره ۱۵۰ با فاصله ۸۵ کیلومتر نسبت به شرط مرزی پایین دست



شکل ۹- مقطع عرضی محاسباتی حاصل از اجرای ۱۰ ساله با استفاده از معادله رسوب ایگز-وایت با فاصله ۱۸۰ کیلومتر از مقطع کنترل پایین دست

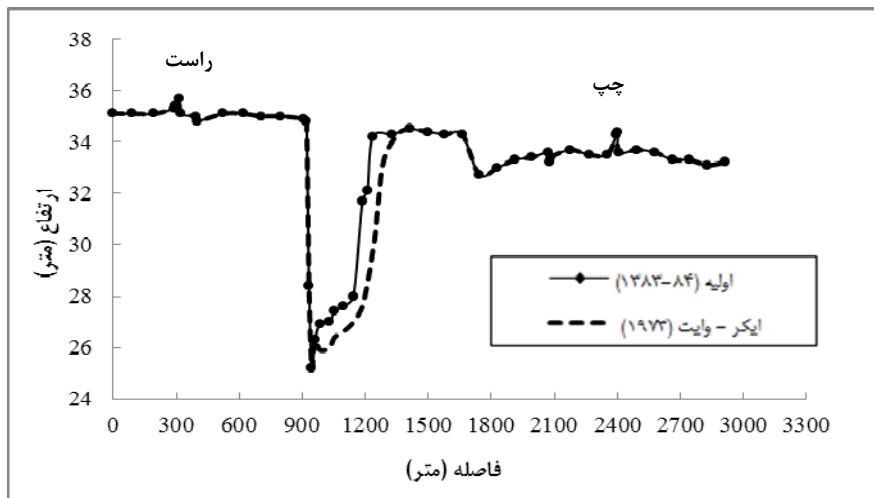


شکل ۱۰- مقطع شماره ۳۲ با فاصله ۱۸۰ کیلومتر نسبت به شرط مرزی پایین دست

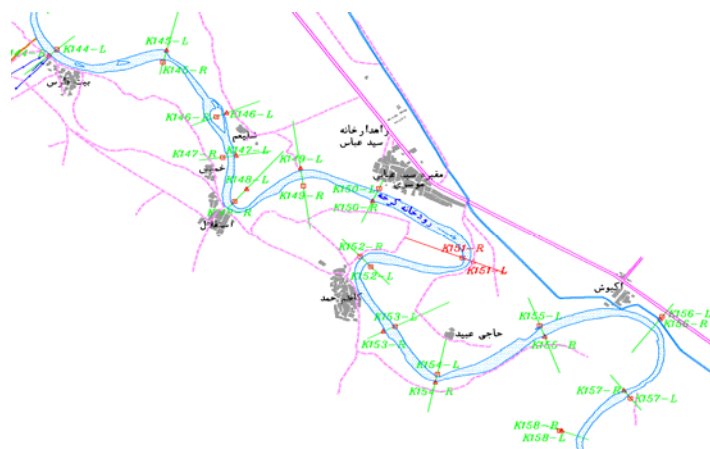


همان‌گونه که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود این مقطع (K۲۳) روی قوس رودخانه واقع شده است، به‌طوری‌که ساحل سمت چپ در قوس داخلی و ساحل سمت راست در قوس خارجی قرار دارند. در قوس داخلی رودخانه به دلیل کاهش سرعت پدیده رسوب‌گذاری و در قوس خارجی رودخانه که با افزایش سرعت مواجه می‌باشد، انتظار فرسایش می‌باشد که همین وضعیت از نتایج حاصله به‌دست آمده است.

شکل (۹) نتایجی که از اجرای برنامه با استفاده از معادله ایکرز-وایت برای مقطع عرضی که در فاصله ۱۸۰ کیلومتر از مقطع کنترل پایین‌دست قرار دارد، را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این مقطع علاوه بر فرسایش کناری در ساحل راست مقطع عرضی آبراهه، در ساحل چپ پدیده رسوب‌گذاری صورت گرفته است.



شکل ۱۱ - مقطع عرضی محاسباتی حاصل از اجرای ۱۰ ساله با استفاده از معادله رسوب ایکرز-وایت با فاصله ۸۶/۴ کیلومتر از مقطع کنترل پایین‌دست

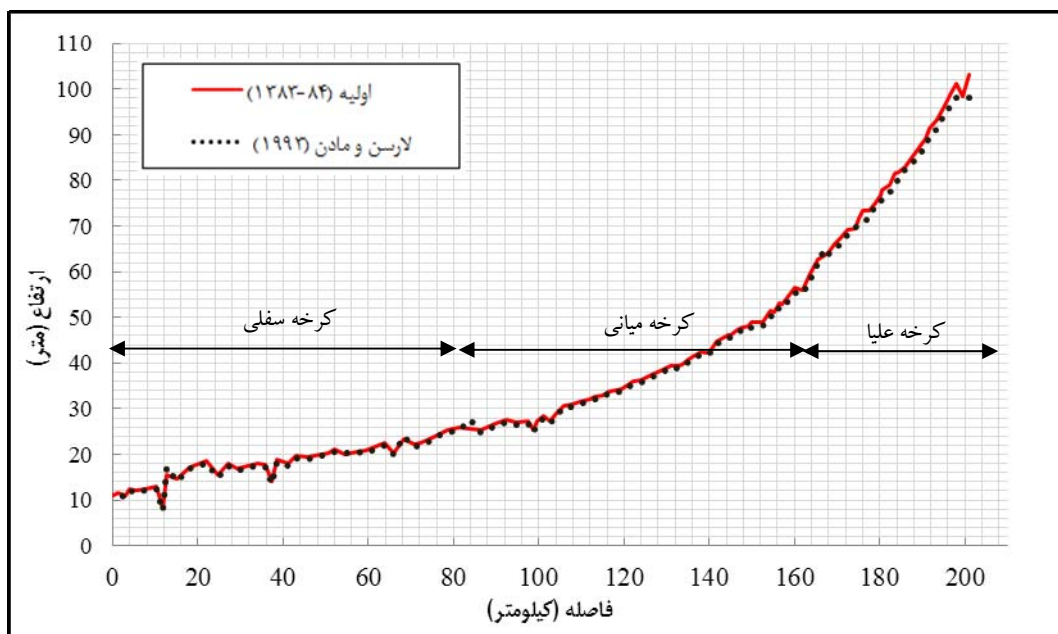


شکل ۱۲ - مقطع شماره ۱۵۱ با فاصله ۸۶/۴ کیلومتر نسبت به شرط مرزی پایین‌دست

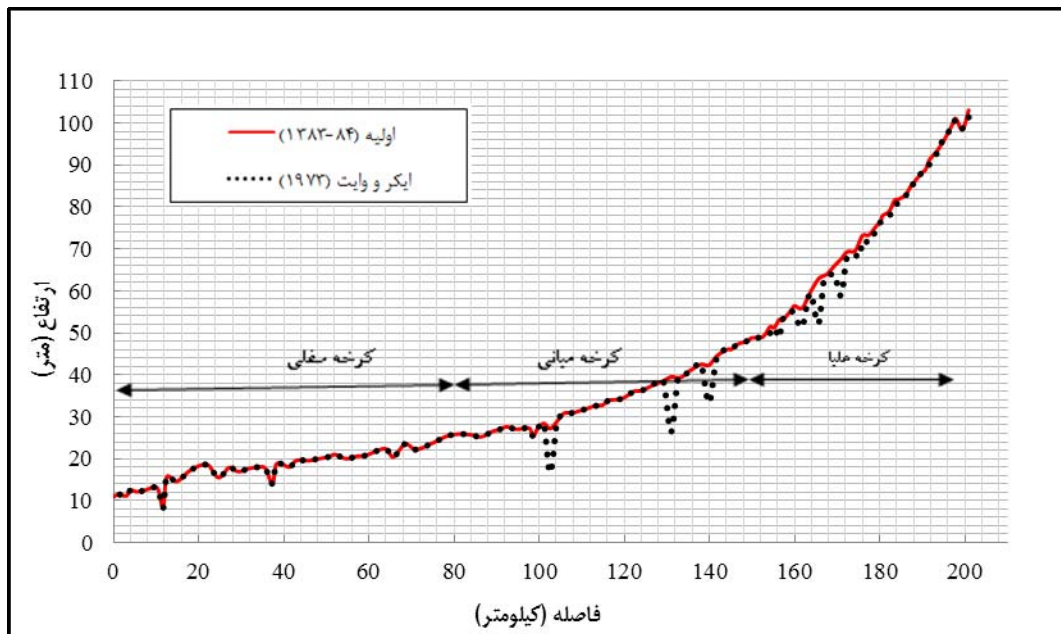
در حالت کلی کرخه به سه منطقه علیا، میانی و سفلی با مساحت‌های مختلف تقسیم‌بندی می‌شود شیب این سه زیر حوضه کرخه با هم متفاوت می‌باشد. برای مشاهده بهتر نتایج در طول مسیر آبراهه با استفاده از روابط رسوبی فوق‌الذکر خط‌القدر رودخانه کرخه به صورت پروفیل طولی در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نمایش داده شده است. رابطه‌ی ایکرز-وایت فرسایش بیش‌تری را در کرخه علیا نشان می‌دهد و در کرخه میانی از میزان فرسایش کاسته شده است و به‌تدریج به رسوب‌گذاری افزوده شده است و در نهایت در کرخه سفلی به خط‌القدر مقاطع افزوده شده یا بدون تغییر باقی مانده‌اند. بررسی و تحلیل تغییرات مقاطع در سال‌های آینده از این جنبه اهمیت دارد که در سواحل رودخانه اراضی کشاورزی، بناهای آبی و تأسیسات از قبیل ایستگاه پمپاژ وجود دارد و یا ممکن است طرح‌هایی در سال‌های آتی در این مناطق اجرا و بهره‌برداری گردند. هر گونه تغییری در ساحل رودخانه به‌ویژه فرآیند فرسایش، می‌تواند خسارت‌های بسیار شدیدی را به زمین‌های کشاورزی و تأسیسات وارد نماید. با کمک مدل ریاضی GSTARS3 می‌توان مقاطعی در طول مسیر رودخانه که ساحل آن‌ها به مرور زمان دچار فرسایش می‌شود، شناسایی نمود و از بروز خسارت جدی جلوگیری به عمل آورد و تمهیدات لازم را اندیشید و چنین فرآیندهایی را به عنوان هشدار مهم در برنامه‌ریزی‌های آینده قرار داد.

از دیگر نمونه‌های قوس در مسیر رودخانه، مقطع شماره ۱۵۱ با فاصله ۸۶/۴ کیلومتر نسبت به شرط مرزی پایین‌دست حمیدیه می‌باشد. شکل (۱۱) مقطع اولیه در سال ۸۴-۱۳۸۳ و مقطع اجرا شده توسط مدل را پس از ۱۰ سال نشان می‌دهد. موقعیت مقطع شماره ۱۵۱ در شکل (۱۲) قابل مشاهده است. ساحل سمت چپ رودخانه که در قوس خارجی قرار گرفته پس از اجرای ۱۰ ساله دچار فرسایش شده است.

پس از اجرای ۱۰ ساله مدل و مقایسه مقاطع عرضی در طول آبراهه با مقادیر برداشتی اولیه در سال ۱۳۸۳، مشاهده گردید که در بازه مستقیم رودخانه تنها کف کانال اصلی رودخانه دستخوش تغییرات می‌شود. این تغییرات شامل هر دو فرآیند رسوب‌گذاری و فرسایش می‌باشد و در این‌گونه از مسیرها تغییری در دشت‌های سیلابی حاصل نشده است. یکی از ویژگی‌های رودخانه کرخه در بازه‌ی مورد مطالعه مماندری بودن آن در بسیاری از مسیرها می‌باشد. نتایج حاصل از اجرای مدل در مسیرهای قوس‌دار رودخانه نشان داد که علاوه بر کانال اصلی، دیواره‌های کناری مقاطع نیز دستخوش تغییر شده‌اند. با توجه به این‌که سرعت در قوس خارجی رودخانه‌ها افزایش می‌یابد، سواحلی از رودخانه که در قوس‌های خارجی قرار گرفته‌اند دچار فرسایش شدند. هم‌چنین به دلیل کاهش سرعت در قوس‌های داخلی پدیده رسوب‌گذاری در قوس داخلی رخ داده است.



شکل ۱۳- پروفیل طولی حاصل از اجرای ۱۰ ساله رودخانه کرخه در بازه ی پای پل تا حمیدیه با استفاده معادله رسوب لارسن-ماندن



شکل ۱۴- پروفیل طولی حاصل از اجرای ۱۰ ساله رودخانه کرخه در بازه ی پای پل تا حمیدیه با استفاده از معادله رسوب ایکرز-وایت

جدول ۴- شیب بستر آبراهه در محدوده مطالعاتی

| منطقه مورد مطالعه | رابطه رسوب ایکرز-وایت | رابطه رسوب لارسن-مادن |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| علیا              | ۱۵/۲                  | ۱۳/۵                  |
| میانی             | ۸/۶                   | ۴/۵                   |
| سفلی              | ۱                     | ۳/۸                   |

جدول ۵- میانگین سالانه کاهش بستر در زیر حوضه های کرخه پس از اجرای مدل

| منطقه مورد مطالعه | ابتدای بازه زمانی ۱۰ ساله | اجرای ۱۰ ساله مدل با روش ایکرز-وایت | اجرای ۱۰ ساله مدل با روش لارسن-مادن | درصد تغییرات با اجرای مدل به روش ایکرز-وایت | درصد تغییرات با اجرای مدل به روش لارسن-مادن |
|-------------------|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|---|
| علیا              | ۱/۰۹۱                     | ۱/۱۲۹                               | ۱/۰۴۹                               | ۳/۵   | -۳/۸  |
| میانی             | ۰/۳۵۳                     | ۰/۳۳۸                               | ۰/۳۴۷                               | -۴/۲  | -۱/۷  |
| سفلی              | ۰/۱۶۳                     | ۰/۱۶۳                               | ۰/۱۶۳                               | .   | .   |

#### بررسی تغییرات شیب در طول آبراهه

حوضه رودخانه کرخه به سه زیر حوضه با مساحت های مختلف تقسیم بندی می شوند که عبارتند از: کرخه علیا، کرخه میانی و کرخه سفلی. پس از اجرای مدل مشاهده گردید که شیب نیز در بعضی از قسمت ها تغییر یافته است، اما در حالت کلی این تغییرات چشمگیر نمی باشد. رودخانه کرخه در محدوده ی زیر حوضه کرخه علیا بیشترین شیب و در محدوده ی کرخه سفلی کمترین شیب را دارد (جدول ۴). از طرف دیگر با توجه به این که جریان آب رهاسازی شده

از دریچه های خروجی سد به سمت پایین دست رودخانه زلال بوده و ویژگی برجسته چنین آبی قدرت فرساینده ی بالای آن می باشد، تمایل دارد که ظرفیت حمل رسوب خود را از بستر آبراهه تأمین نماید، بنابراین مجموع دو عامل شیب و قدرت فرسایشی آب زلال باعث ایجاد پدیده کف کنی در بسیاری از مقاطع در مسیر رودخانه خواهند شد. پروفیل طولی رودخانه که پس از اجرا با معادله های رسوبی حاصل شده به وضوح مسئله فرسایش در بسیاری از نقاط را نشان می دهند. از بین دو رابطه ی رسوبی اجرا شده توسط مدل،

بودن آب) در طول مسیر به شیب و دانه بندی کف بستر نیز بستگی دارد.

کرخه علیا که در منطقه بالادست حوضه رودخانه کرخه واقع شده است در معرض آب زلال رها شده از سد قرار دارد و همچنین شیب در این محدوده نسبتاً تند است. مجموع این دو عامل (زالال بودن آب و شیب تند) باعث شده تا در این منطقه فرسایش بیشتری رخ دهد. در مناطق میانی و سفلی حوضه ی آبریز کرخه از مقدار شیب کف بستر کمتری (به ترتیب ۰/۳۵۳ و ۰/۱۶۳) برخوردار است. از طرفی هنگامی که جریان آب پس از عبور از کرخه علیا مسافت بسیار زیادی را طی کرده است و ظرفیت حمل رسوب خود را از مناطق بالادست تأمین نموده است. بنابراین شیب کم تر و گل آلودی آب موجب می شوند که فرسایش کمتری رخ دهد (جدول ۵).

تغییرات عرضی رودخانه در مقطعی که در مسیر مستقیم قرار دارند تنها در کانال اصلی رخ داده است، زیرا در این نقاط جریان آب عمدتاً در کانال اصلی برقرار است و تغییرات در این قسمت آبراهه رخ می دهد (شکل ۷).

با توجه به این که روندیابی هیدرولیکی و رسوب در هر لوله جریان مستقل می باشد، نرخ سرعت در هر یک از لوله های جریان نیز مختلف می باشد، بنابراین قوس های خارجی سواحل رودخانه به علت سرعت بیشتر جریان دچار فرسایش گشته اند و در قوس های داخلی که سرعت کمتری دارند اغلب رسوب گذاری صورت گرفته است. با اجرای مدل حداکثر میزان فرسایش در قوس خارجی پنج درصد و حداکثر میزان رسوب گذاری در قوس داخلی هشت درصد نسبت به مقدار اولیه به دست آمد (شکل های ۸ و ۹).

معادله رسوب ایکرز-وایت فرساینده گی بیش تری را در حد فاصل کرخه علیا نشان داده است، به طوری که میانگین سالانه کاهش بستر در این محدوده ۱۵/۲ سانتی متر می باشد. قدرت فرسایشی آب زلال باعث کف کنی و حمل رسوبات می شود و همچنان این عامل در این محدوده ی نیز در بعضی از نقاط باعث ایجاد فرسایش شده است. اما از آن جایی که در منطقه ی علیا بازه ای در حدود ۵۰ کیلومتر وجود دارد و تقریباً مسیر طولانی بوده و جریان آب تا حدی توانسته ظرفیت حمل رسوب خود را از بستر آبراهه تأمین کند، بنابراین با حرکت به سمت پایین دست بازه از قدرت فرساینده گی جریان کاسته خواهد شد. میانگین سالانه کاهش بستر در مناطق کرخه میانی و سفلی با استفاده از رابطه ی رسوب ایکرز-وایت به ترتیب ۸/۶ و ۱ سانتی متر محاسبه شده است. تعدادی از مقاطع بدون تغییرات یا به عبارت دیگر دارای تغییرات جزئی می باشند و پاره ای از مقاطع که شرایط برای ته نشینی رسوبات مهیا می باشد، نیز فرآیند رسوب گذاری اتفاق افتاده است (با استناد به شکل های ۱۳ و ۱۴). در زیر حوضه ی کرخه سفلی تغییرات چشمگیری در شیب بستر رخ نداده است. در جدول (۵) میانگین سالانه کاهش بستر با استفاده از دو رابطه ی رسوبی نشان داده شده است.

### نتیجه گیری

تغییرات عرضی در طول مسیر رودخانه کرخه یکسان نمی باشد و این امر ناشی از عوامل مختلفی می باشد که بر رودخانه در طول مسیر حاکم است. این عوامل علاوه بر نوع جریان آب (زالال یا گل آلود

### منابع

- ۱- اعلمی، م، جدی، ا و م. احمدیان. ۱۳۸۸. بررسی تاثیر احداث سد و نیار بر مورفولوژی رودخانه پایاب سد با استفاده از نرم افزار GSTARS3. دومین همایش ملی سدسازی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان.
- ۲- اویسی، ا. ۱۳۷۸. بررسی تأثیر سد مخزنی کرخه بر بستر پایین دست. پایان نامه کارشناسی ارشد رشته سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۳- سیدیان، م. ۱۳۸۵. بررسی وضعیت رسوب گذاری در مخزن سد وشمگیر با استفاده از مدل GSTARS3. پایان نامه کارشناسی ارشد رشته سازه های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۴- شاهی نژاد، ب، ظهیری، ع و س. رستمی. ۱۳۸۷. پیش بینی فرسایش و رسوب گذاری در محدوده شهری اهواز با استفاده از مدل ریاضی GSTARS، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
- ۵- فقیهی محمدی، ع. ۱۳۸۸. بررسی اثرات برداشت شن و ماسه بر مورفولوژی و هیدرولیک رودخانه کرخه با توجه به بهره برداری از سد مخزنی کرخه. پایان نامه کارشناسی ارشد رشته سازه های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

- 6- Chih Ted Yang. 2008. GSTARS Computer models and sedimentation control in surface water systems. International Conference on Water Resources and Arid Environments, King Saud University.
- 7- Jianchun Huang, Blair Greimann and Chih Ted Yang. 2003. Numerical simulation of sediment transport in alluvial river with floodplains. International Journal of Sediment Research. 18(1). 50-59
- 8- Yang, C. T. and F. J. M Simoes. 2002. User's manual for GSTARS3. Generalized sediment transport model for alluvial river simulation .Version 3.0, U. S. Bureau of Reclamation Technical Service Center, Denver, Colorado, USA.