

# بررسی وضعیت رسوبگذاری در مخزن سد کرخه با استفاده از نرم افزار GSTARS-3

محمد هوشمندزاده - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد شوشتر  
محمد محمودیان شوشتری - استاد دانشکده مهندسی و عضو هیات علمی دانشگاه شهید چمران اهواز  
محمود کاشفی پور - دانشیار دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

پست الکترونیک : hooshmandzadeh\_civil@yahoo.com

## چکیده

پس از احداث سد در یک منطقه رسوبات از طریق جریان های سطحی وارد مخزن شده، پس از مدتی حجم مخزن از رسوبات پر شده و عمر مفید آن به اتمام می رسد. با توجه به ماهیت پیچیده انتقال رسوبات، معادلات ریاضی فراوانی بوجود آمده اند که از آن جمله می توان به معادلات بانک اشاره نمود. همزمان با توسعه رایانه، نرم افزارهایی برای محاسبات انتقال رسوب از سوی مراکز مختلف از جمله USBR تدوین شده است که مدل GSTARS-3 از جمله آنها است. در این مقاله تلاش شده است تا با استفاده از این نرم افزار، رسوبگذاری در مخزن سد کرخه شبیه سازی شود. نتایج تحلیل های آماری، خوشه ای و رگرسیونی بیانگر برتری معادله بانک (۱۹۹۶) در مخزن سد کرخه است. زیرا بار شسته را در محاسبات در نظر می گیرد.

**کلید واژه ها:** کرخه، جلوگیری، بانک، رسوبگذاری، واسنجی، GSTARS-3

## ۱- مقدمه

ملی است. مطالعه رسوب در سطح حوزه آبریز در شرایطی اهمیت پیدا می کند که احداث مخازن سطحی برای ذخیره آب جهت مصارف مختلف مورد توجه واقع شود. مدل های ریاضی کامپیوتری همزمان با توسعه رایانه ها، تعمیم یافته اند. از جمله این مدل ها که جهت پیش بینی فرسایش و رسوبگذاری ارائه شده اند می توان به مدل های HEC-6 و FLUVIAL-12 و GSTARS-3 اشاره نمود.

## ۲- مواد و روش ها

در این مقاله کوشش شده است تا با اجرای نرم افزار GSTARS-3 بهترین معادله برای محاسبه بار کل رسوب در

انتقال و انباشت رسوبات در سدهای مخزنی باعث تقلیل حجم و عمر مفید مخازن ذخیره آب می شود. با توجه به اهمیت موضوع کمبود آب در کشور و معضلات جدی در تامین نیازهای آبی به ویژه از لحاظ توزیع زمانی و مکانی، حفظ و حراست از منابع آب موجود یک مساله حیاتی به حساب می آید. با ورود رسوبات به مخزن سد، پس از مدتی حجم مخزن از رسوبات پر شده، عمر مفید سد به اتمام رسیده و سد کارایی خود را از دست می دهد. معضلاتی که پر شدن یک سد از رسوب ایجاد می نماید بسته به وضع منطقه، اهمیت آب و نوع هدف از ایجاد سد متفاوت است و حداقل خطر آن از میان رفتن سرمایه های

مخزن سد کرخه انتخاب گردد. پیشینه کاربرد نرم افزار GSTARS-3 در مخازن سدهای ایران بطور خلاصه در جدول (۱) آمده است.

ردیف	محققین	محل مورد مطالعه	سال	بهترین معادله
۱	اعلمی و همکاران	سد کارده در ۴۰ کیلومتری شمال مشهد	۱۳۸۶	یانگ (۱۹۷۹)
۲	شاکری و نجمایی	سد میناب در استان هرمزگان	۱۳۸۳	یانگ
۳	عسکری و اعلمی	رودخانه پایین دست سد گتوند علیا	۱۳۸۴	یانگ

جدول ۱ - سابقه مطالعات رسوب سدهای مخزنی ایران با استفاده از نرم افزار GSTARS-3

## ۱-۲ - معرفی منطقه مورد مطالعه

بهمن ماه سال ۱۳۷۸ آبیگری سد شروع شد و بدین ترتیب سد کرخه در زمینه کنترل سیلاب و تنظیم آب پائین دست به بهره برداری نائل گردیده است. آمار و اطلاعات از ایستگاه آبنسجی جلوگیری که بالادست سد مخزنی کرخه قرار دارد، اخذ شده است. در تصویر (۱) موقعیت جغرافیایی سد کرخه و در تصویر (۲) شمایی از دیواره و مخزن سد قابل مشاهده است.

سد کرخه از جمله سدهای بزرگ جهان و بزرگترین سد ایران از لحاظ حجم دریاچه و طول تاج سد می باشد. مکان احداث این سد مخزنی در فاصله ۲۰ کیلومتری شمال غربی اندیمشک و بر روی رودخانه کرخه می باشد. عملیات اجرایی بدنه و سرریز نیز در نیمه سال ۱۳۷۳ آغاز گردید. در

## ۲-۲ - آشنایی با نرم افزار GSTARS-3

GSTARS-3 نسخه جدید مدل GSTARS بوده که برای شبیه سازی رودخانه های رسوبی که توسط گروه هیدرولیک رودخانه و رسوبگذاری مرکز خدمات فنی USBR تهیه و تدوین شده است. این مدل به دلیل نیاز به یک مدل رایانه ای تعمیم یافته روندیابی آب و رسوب که قادر باشد در حل مساله پیچیده مهندسی رودخانه استفاده شود، تهیه گردیده است. نسخه های قبلی مدل (2/1 و GSTARS 2) برای شبیه سازی رودخانه های رسوبی وسیع (عریض) به وجود آمده بودند اما نسخه جدید آن (GSTARS-3) علاوه بر توانایی شبیه سازی شرایط جریان به روش نیمه دو بعدی و شبیه سازی تغییرات هندسی کانال به روش نیمه سه بعدی، قابلیت مدلسازی رسوب گذاری در مخازن را دارد. GSTARS-3 مدلی است که در شرایط شبه یکنواخت بر اساس یک الگوریتم فرا آب یک بعدی بنا شده است و می تواند انتقال جریان را (حتی پرش هیدرولیکی) محاسبه کند و در رژیم های جریان (زیر بحرانی، فوق بحرانی یا تلفیق این دو) مختلف محاسبات خود را انجام دهد. در این نسخه نیز رسوب با استفاده از مفهوم استوانه جریان مسیریابی می شود. تغییرات بستر به طور مستقل برای هر استوانه جریان محاسبه می شود. امکانات انتقال رسوب GSTARS-3 یک محدوده وسیع از شرایط مثل انتقال ذره ای، سورتینگ و آرمورینگ بستر را با بیشتر از ۱۶ تابع انتقال رسوب برای



تصویر ۱ - موقعیت جغرافیایی مخزن سد کرخه



تصویر ۲ - دیواره و مخزن سد کرخه

محدوده های مختلف از رس تا شن و همچنین انتقال رسوب غیرمتعادل پوشش می دهد. توانایی خاص دیگر این نسخه از مدل شرایط پایدار و محاسبه تغییرات عرض کانال می باشد که بر اساس نظریه کمینه توان جریان کل بنا شده است. اصلاح و بازیابی های انجام شده در GSTARS-3 علاوه بر اینکه قابلیت های نسخه های قبلی را در بر می گیرد، دارای توانایی های جدید زیر نیز می باشد: ۱- زیاد کردن تعداد توابع انتقال رسوب انتخاب شده توسط استفاده کننده. ۲- توانایی ها در بخش انتقال رسوب چسبنده افزایش یافته است شامل لخته شدن (جمع شدن) و مانع شدن از ته نشینی. ۳- مسیریابی مخزن. ۴- لایه های بستر متعدد با توزیع اندازه های مختلف رسوب. ۵- روش هایی برای محاسبه انتقال رسوب جانبی (عرضی)، برای محاسبه تغییرات شرایط مرزی رسوب گذرنده از استوانه جریان. ۶- ادغام رسوب در مخزن ها. ۷- رسوب انتقال یافته از مقطع و میزان ورود رسوب بر پایه اصل تعادل

محاسبات هیدرولیکی برای تعیین نیمرخ سطح آب در این نرم افزار بر اساس مدل جریان متغیر تدریجی بوده و از روش مرحله ای استاندارد برای محاسبات فراآب استفاده می کند. از معادله انرژی وقتی هیچ تغییری در رژیم های جریان وجود ندارد استفاده می کند و از معادله اندازه حرکت وقتی که یک تغییر از جریان زیر بحرانی به فوق بحرانی یا بالعکس وجود دارد، استفاده می کند. محاسبات فراآب در جهت بالادست برای جریان زیر بحرانی و در جهت پایین دست برای جریان فوق بحرانی دنبال می شود. استفاده اختصاصی از دو معادله، اجازه استفاده از محاسبات فراآب برای شرایط زیربحرانی، فوق بحرانی یا تلفیق این دو را می دهد؛ حتی وقتی شامل پرش هیدرولیکی می شوند. در جریان شبه دائمی، هیدروگراف جریان با قطعاتی تقریبی با دبی ثابت جایگزین گردیده و در طی هد ثابت، معادلات جریان دائمی برای محاسبات نیمرخ سطح آب مورد استفاده قرار می گیرد.

### ۳- اجرای مدل

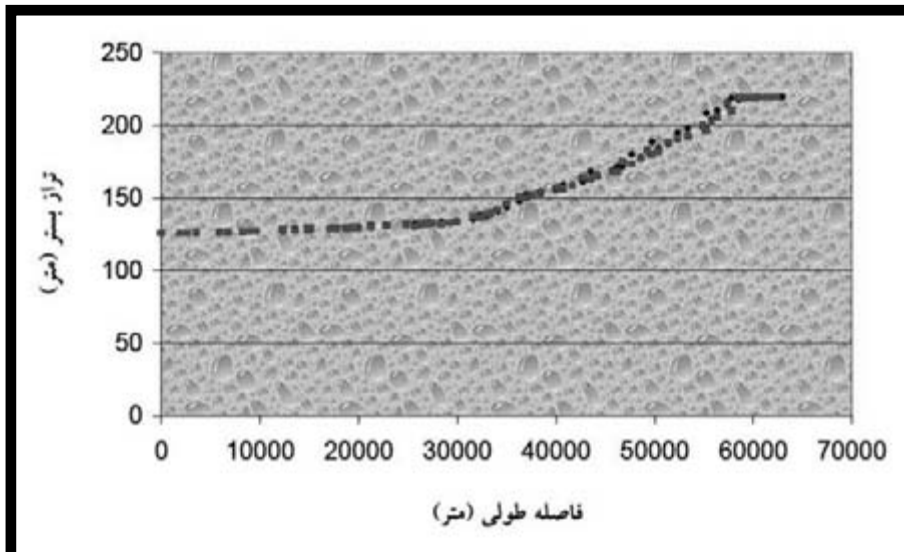
هر دو نرم افزار جهت مدلسازی نیاز به اطلاعات پایه از قبیل مقاطع عرضی، ضریب زبری، دانه بندی رسوبات، مشخصات ذرات ریزدانه، رژیم آبدهی و... دارد. داده های ورودی مورد نیاز به سه دسته داده های هندسی، رسوب و هیدرولوژی دسته بندی می شوند. اطلاعات هندسی شامل مقاطع عرضی، فاصله طولی و مقادیر  $\Pi$  می باشد. به اضافه

اینکه قسمت متحرک بستر هر مقطع و عمق ماده رسوبی در آن مورد نیاز است. برای ساخت مدل هندسی مخزن اولین گام تعیین اطلاعات مربوط به هندسه مقاطع می باشد که برای تهیه آن از نقشه های توپوگرافی ۱:۱۰۰۰۰ مخزن استفاده شده است. مقاطع مورد استفاده، در واقع همان مقاطعی هستند که توسط مشاور طرح مورد استفاده قرار گرفته اند. به دلیل اینکه زمان اجرای مدل بستگی به تعداد کل مقاطع دارد. لذا بایستی تعداد مقاطع عرضی تا آنجا که امکان دارد، کاهش یابد. در نهایت بهترین مقاطع که شامل ۷۰ مقطع می باشند مورد استفاده قرار گرفت. مسئله مهم دیگری که می بایست بدان اشاره کنیم، پایداری مدل های ریاضی انتقال رسوبی که به روش تفاوت محدود صریح کار می کنند. پایداری این مدل ها تحت تأثیر عوامل عمده ای است که شاید مهمترین عامل فاصله مقاطع هندسی از یکدیگر باشد. به طور کلی ظرفیت حمل رسوب به شدت تحت تأثیر هیدرولیک جریان می باشد. لذا کالیبره کردن نیمرخ سطح آب بسیار مهم است. برای تعیین ضرایب مانینگ در مدل ریاضی مخزن سد کرخه از نشریه راهنمای مؤسسه USBR استفاده شده است که به صورت مصور برای حالت های مختلف مقادیر ضرایب مانینگ را ارائه کرده است. البته لازم به ذکر است که استفاده از این راهنما در شرایطی که اطلاعات لازم برای کالیبره کردن مدل وجود نداشته باشد امکان پذیر است. به همین دلیل برای تدقیق مقادیر ارائه شده برای ضرایب مانینگ از کالیبراسیون پروفیل سطح آب در حالت بستر ثابت استفاده شده است. با توجه به طبیعت رسوبی حوضه کرخه که دارای آورد رسوب بالایی می باشد و علاوه بر آن به دلیل مدلسازی رسوبگذاری مخزن و اینکه در هنگام رسوبگذاری در مخزن عدم تعادل رسوب وجود دارد در حال حاضر بهترین فرمولی که بتواند غلظت بالای رسوب و عدم تعادل را در مدلسازی مد نظر قرار دهد فرمول یانگ ۱۹۹۶ می باشد. اطلاعات رسوب شامل دانه بندی بار کل رسوبی، طبقه بندی انواع رسوبات وارد شده بر حسب دبی آب و... می باشد.

### ۴- تجزیه و تحلیل نتایج

معمولاً پنج نیمرخ طولی سطح آب مورد نیاز است که بطور خلاصه عبارتند از:

الف- حداقل سه نیمرخ طولی معادل با جریان حداقل، لبریز و ماکزیمم برای کالیبره کردن مورد استفاده قرار می گیرد.



نمودار ۲- نتیجه واسنجی مدل GSTARS-3 با استفاده از تابع یانگ (۱۹۹۶) و داده های مشاهداتی از عملیات هیدروگرافی سال ۱۳۸۴

نخست داده های هندسی کنترل شده و رفع ناهنجاری در فاکتورهای زیرین صورت می گیرد:

حدود رودخانه اصلی، سطح جریان موثر و.....

۴- رفع ناهنجاری های ضریب زبری محاسباتی  $n$  به دلیل کمبود داده های مشاهداتی نیمرخ های سطح آب، مقدار  $n$  مقطع عرضی برای رودخانه اصلی و سطح سیلابی به ترتیب برای دبی های مختلف انتخاب می گردد. این ضریب زبری محاسباتی بوده و با ضریب زبری هیدرولیکی متفاوت است. در نمودار (۲) واسنجی نتیجه اجرای نرم افزار با استفاده از تابع یانگ (۱۹۹۶) نشان داده شده است.

با استفاده از نرم افزار EXCEL روابط ریاضی برای هر یک از نیمرخ های مشاهداتی و محاسباتی بدست آمد که نتایج در جدول (۵) ارائه شده است.

ب- حتی الامکان، دو نیمرخ دیگر برای کالیبره کردن تهیه می شود.

جزئیات روش کالیبره کردن بصورت زیر می باشد:

۱- انتخاب دبی برای کالیبره کردن

برای این کار حداقل سه دبی مورد نیاز است. دبی بیشینه یعنی ۳۰۰۰ متر مکعب در ثانیه، دبی میانگین در فصل سیلابی یعنی ۴۸۵/۱ متر مکعب در ثانیه

۲- فاصله طولی برای کالیبره کردن

چون تراز سطح آب در محل سد بین ۳۱۰ تا ۳۵۰ متر متغیر است، برگشت آب تا حدود فاصله ۵۰ کیلومتری بالادست سد امتداد می یابد. این فاصله به عنوان فاصله طولی رودخانه برای کالیبره کردن در نظر گرفته می شود.

۳- رفع ناهنجاری های داده های هندسی

نوع نیمرخ	رابطه ریاضی	ضریب همبستگی
مشاهداتی	$y = 2 \times 10^{-13} x^3 + 2 \times 10^{-8} x^2 - 0.0005x + 127.75$	۰/۹۹۲۹
محاسباتی	$y = 1 \times 10^{-14} x^3 + 4 \times 10^{-8} x^2 - 0.0009x + 130.14$	۰/۹۸۹۲

جدول ۵ - روابط ریاضی نیمرخ های محاسباتی و مشاهداتی

RRMS	RAE	RMSE	SSE	%e	R
۰/۰۰۳۷۲	۰/۰۰۳۷۲	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۰۰۱۳۶۹	۰/۳۷۲	۰/۹۹۶۲

جدول ۶ - نتایج مقایسه آماری میان ضرایب همبستگی نیمرخ های محاسباتی و مشاهداتی



کامل دارد و نیمرخ حاصل از بقیه توابع هیچگونه تطابقی ندارند. بنابراین با استفاده از روش مشاهداتی، تابع انتقال رسوب یانگ (۱۹۹۶) بهترین فرمول تشخیص داده می‌شود. نتایج واسنجی مدل با استفاده از فرمول‌های مختلف در جدول (۷) ارائه گردیده است.

نتایج تحلیل خوشه‌ای توابع انتقال رسوب بر حسب حجم تجمعی رسوب در جدول (۹) آمده‌اند.

از دیگر پارامترهای روش‌های آماری معمولی، انحراف از معیار داده‌ها می‌باشد که نتایج حاصل از آن در جدول (۱۰) ارائه شده است. به دلیل یکسان بودن مقدار انحراف از معیار سایر فرمول‌ها، فقط مقدار آنها تحت عنوان "سایر فرمول‌ها" در جدول آمده است.

در روش تحلیل رگرسیونی مقادیر تراز بستر مشاهداتی که از عملیات هیدروگرافی بدست آمده‌اند را همراه با مقادیر بدست آمده از مدل GSTARS-3 با کمک نرم افزار Excel در یک نمودار ترسیم کرده و خط مستقیم از میان آنها برازش می‌دهیم. پارامترهای تحلیل رگرسیونی را در دو حالت زیر مورد بررسی قرار می‌دهیم:

#### ۱- عرض از مبدا نمودار مخالف صفر

در این حالت مقادیر تراز بستر محاسباتی و مشاهداتی را در یک دستگاه مختصات ترسیم نموده و بهترین خط را از میان این نقاط برازش می‌دهیم. در جدول (۱۱) پارامترهای خطوط بدست آمده برای توابع مختلف آمده است.

به دلیل اینکه هر قدر عرض از مبدا نمودار نزدیک به صفر باشد مدل از دقت بهتری برخوردار است لذا در حالت "عرض از مبدا برابر صفر" معادله خط را بدست می‌آوریم. نتایج حاصل از معادلات مختلف انتقال رسوب در جدول (۱۲) آمده است.

در جداول (۸) الی (۱۲) به دلیل تشابه بسیار زیاد نتایج، از ارائه نتایج همه فرمول‌ها خودداری شده و نتایج همه آنها تحت عنوان "سایر فرمول‌ها" آمده است. نتایج اجرای نرم افزار GSTARS-3 با استفاده از تابع یانگ (۱۹۷۳) در تمامی مقاطع مخزن سد کرخه مقادیر محاسباتی ۳/۵۳٪ بیشتر از مقادیر مشاهداتی می‌باشد.

#### ۵- نتیجه گیری

با واسنجی نتایج نرم افزار GSTARS-3 مشخص شد که تابع انتقال رسوب یانگ (۱۹۹۶) بهترین تابع برای محاسبه بار رسوب در مخزن سد کرخه می‌باشد. به دلیل اینکه بار شسته را در محاسبات در نظر می‌گیرد. در حالی که سایر توابع یانگ نیز اینگونه نیستند. نتایج اجرای نرم افزار

GSTARS-3 در تمامی مقاطع مخزن سد کرخه ۳/۵۳٪ بیشتر از مقادیر مشاهداتی می‌باشد.

#### منابع و مراجع

- ۱- شاکری داریان، ع؛ نجمایی، م، ۱۳۸۴، نحوه برآورد رسوبگذاری مخازن با استفاده از مدل ریاضی GSTARS۲، ۱ و نرم افزار ILWIS. مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان
- ۲- امامی، ا؛ بطنی، ا؛ کلمایی، ح؛ ضیا نبار احمدی، م، ۱۳۸۷، بررسی مدل کامپیوتری GSTARS-۳ به منظور توزیع رسوب در مخازن سدها و مقایسه نتایج با روش‌های تجربی، دومین کنفرانس ملی نیروگاه‌های برقایی، وزارت نیرو
- ۳- فرشاد فر، ع، ۱۳۸۰، اصول و روش‌های آماری چند متغیره، انتشارات طاق بستان، چاپ اول
- ۴- آریا نژاد، ب؛ ذهبیون، م، ۱۳۸۱، مقدمه‌ای بر احتمالات و آمار کاربردی، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران
- ۵- وزارت نیرو، سازمان مدیریت منابع آب، ۱۳۶۲، رسوب گذاری در مخازن سدها، کتاب شماره یک
- ۶- علمی، م؛ مرسولی، ر؛ اسدیانی یکتا، ا، ۱۳۸۷، کاربرد و ارزیابی مدل GSTARS-۳ در شبیه سازی نحوه رسوبگذاری در مخازن - مطالعه موردی مخزن سد کارده، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه تهران
- 7-Garde, R.J. and Ranga Raju ,K.G, 1985, Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems" John Wiley and Sons Publisher, India
- 8-Dan G.Batucu, Jan M.Jordan, 2000, Silting and Desilting of Reservoir, Published by A.A.Balkem
- 9-Leo C.Van Rijn, 1993 " Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas, CopyRight by Aqua Publisher
- 10-Yang ,C.T. , and Simones ,F.J.M, 2002, GSTARS: A Numerical Model for Reservoir Sedimentation
- 11-Yang ,C.T. and Simones ,F.J.M, 2002, User Manual for GSTARS 3-Generalized Sediment Transport Model for Alluvial River Simulation Version 3, U.S.Bureau of Reclamation Technical Service Center , Denver ,Colorado, USA
- 12-Chih Ted Yang<sup>1</sup> and Francisco J. M. Simões, 2002, GSTARS 3.0: A Numerical Model for Reservoir Sedimentation,
- 13-Yang, C.T., Francisco J. M. Simões, Jianchun Huang, and Greimann, B., 2006, GENERALIZED SEDIMENT TRANSPORT MODELS FOR ALLUVIAL RIVERS AND RESERVOIRS, US-CHINA WORKSHOP ON ADVANCED COMPUTATIONAL MODELLING IN HYDROSCIENCE & ENGINEERING, Oxford, Mississippi, USA
- 14-Yang, C.T., 1996. "Sediment Transport, Theory and Practice", Mc Graw-Hill, 396P