

# مقایسه مدل کامپیوتری GSTARS-3 ، روش های تجربی افزایش ، کاهش سطح و کمینه قدرت یکه جریان در برآورد توزیع رسوب در مخزن سد کرخه

محمد هوشمندزاده ، محمد محمودیان شوستری ، محمود کاشفی پور  
کارشناس مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز و عضو باشگاه پژوهشگران جوان  
استاد دانشکده مهندسی و عضو هیات علمی دانشگاه شهید چمران اهواز  
دانشیار دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز  
hooshmandzadeh\_civil@yahoo.com

## چکیده

امروزه رسوبگذاری در مخازن سدها به عنوان یکی از معضلات و تهدیدات جدی علیه بشر محسوب می شود به خاطر اینکه تبعات سیاسی ، اجتماعی ، اقتصادی و زیست محیطی زیادی به دنبال خواهد داشت. لذا بشر همواره به دنبال راههایی برای کاهش آثار آن بوده است. یکی از این راهها محاسبه میزان رسوبات ته نشین شده در مخازن سدها می باشد. برای این کار تاکنون مدل های تجربی و ریاضی مختلفی ارائه شده است که از آن جمله می توان به مدل های GSTARS-3 و روش های تجربی افزایش سطح ، کاهش سطح و کمینه قدرت یکه جریان اشاره نمود. در این مقاله کوشش شده است تا مدل های مذکور در مخزن سد کرخه با هم مقایسه شوند. نتایج حاکی از آن است که بر اساس حجم تجمعی رسوب ، نرم افزار GSTARS-3 بهترین پاسخ ها را ارائه کرده است. همچنین روش افزایش سطح جوابهای مطلوبی برای محاسبه ارتفاع رسوبات در پای دیواره سد و توزیع رسوب در مقاطع مختلف مخزن نیز روش کاهش سطح برلند- میلر برترین مدل برای محاسبه کاهش حجم مخزن می باشد.

**کلیدواژه ها:** مودی ، برلند ، GSTARS-3. کمینه قدرت یکه جریان ، افزایش سطح

## ۱- مقدمه

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 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 HE6 ، FLUVIAL-12 و GSTARS-3 اشاره نمود. در مطالعات برنامه ریزی منابع آب ، محاسبه حجم رسوب در مخازن سدها از اهمیت زیادی برخوردار است ولی مهم تر از آن نحوه توزیع رسوب می باشد. برای این کار تاکنون روش های تجربی مختلفی بوجود آمده اند که از جمله مهمترین و پرکاربردترین آنها روش های افزایش سطح و کاهش سطح بوده که در مخازن سدهای ایران نیز جوابهای مناسب و قابل قبولی ارائه نموده اند.

## ۲- مواد و روش ها

### ۱-۲ روش تحقیق

در این تحقیق ، ابتدا مدل GSTARS-3 اجرا شده و با استفاده از اطلاعات هیدروگرافی سال ۱۳۸۴ واسنجی می شود . محاسبات روش های تجربی افزایش و کاهش سطح با کمک داده های ارتفاع- سطح-حجم قبل از رسوبگذاری ، تهیه شده توسط شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس و اطلاعات ارتفاع- سطح-حجم بعد از رسوبگذاری که بوسیله شرکت مهندسی مشاور دریا ترسیم (۱۳۸۴) تهیه شده بود انجام شده و نتایج بدست آمده از نرم افزار و روش های تجربی با استفاده از معیارهای حجم تجمعی رسوب ، ارتفاع رسوبات پای دیواره سد ، کاهش حجم مخزن و تحلیل رگرسیونی منحنی های ارتفاع- حجم مقایسه شده و در نهایت بهترین مدل انتخاب خواهد شد.

### ۲-۲ معرفی منطقه مورد مطالعه

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 سریز نیز در نیمه سال ۱۳۷۳ آغاز گردید . در بهمن ماه سال ۱۳۷۸ آبیگیری 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 آبنجی جلوگیری که بالادست سد مخزنی کرخه قرار دارد اخذ شده است.

### ۲-۳ روش های مورد استفاده

### ۲-۳-۱- روش افزایش سطح

روش تجربی افزایش سطح توسط کریستوفانو<sup>۱</sup> ارائه گردیده است. این روش مبتنی بر اصول زیر است:  
 ۱- رسوبات در حجم مرده مخزن ته نشین می شوند. ۲- حجم رسوبات ته نشین شده و کاهش سطح مخزن در هر تراز با استفاده از ضریب تصحیح سطح محاسبه می شود.

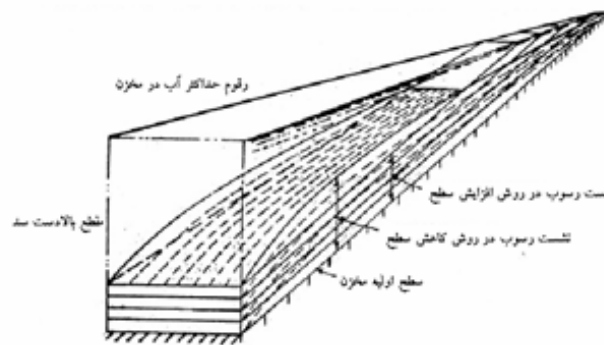
رابطه اصلی مورد استفاده در این روش عبارت است از :

$$V_s = A_0(H - h_0) + V_0 \quad (1)$$

که در آن  $V_s$  حجم کل رسوبات جمع شده در پشت سد بر حسب هکتار-متر ،  $A_0$  ضریب اصلاح مساحت بر حسب هکتار که معادل مساحت سطح مخزن در رقوم صفر جدید ،  $V_0$  حجم رسوبات در زیر رقوم صفر جدید (هکتار-متر) ،  $H$  ارتفاع مخزن از کف رودخانه تا حداکثر رقوم نرمال (متر) و  $h_0$  ارتفاعی از مخزن است که توسط رسوب در رقوم صفر جدید پر شده است. این رابطه بیان ریاضی مجموع رسوبات انباشته شده ای است که به شکل یکنواخت و عمودی بر روی رقوم  $(H - h_0)$  ، یعنی رقوم بالاتر از صفر جدید تا بیشینه رقوم نرمال مخزن ، ته نشست شده و شامل رسوبات انباشته شده در زیر رقوم صفر جدید است.

### ۲-۳-۲- روش کاهش سطح

توزیع رسوب در قسمتهای مرتفع مخزن ، یعنی خارج از حجم مرده آن پدیده پیچیده ای است. هرچند روابط تحلیلی فراوانی در این مورد بوسیله محققان مختلف در دهه های اخیر برای مدلهای ساده ارائه شده است ولی هنوز از روابط تجربی استفاده می شود. بولند و میلر (۱۹۵۸) با تحلیل الگوی توزیع رسوب در ۳۰ مخزن در آمریکا ، شش روش برای پیش بینی نحوه توزیع رسوب در مخازن ارائه داده اند. از بین این روش ها ، روش تجربی کاهش سطح منطقی تر به نظر می رسد. روش تجربی کاهش سطح توسط لارا (۱۹۶۲) تجدید نظر و سپس پمبرتون (۱۹۷۸) در آن تغییراتی ایجاد کرد. این روش ، بر تنظیم سطح اولیه برای مشخص کردن مقدار کاهش سطح در اثر رسوبگذاری استوار است. در تصویر (۱) مراحل توزیع رسوب در مخزن به روش های افزایش و کاهش سطح های افزایش و کاهش سطح نمایش داده شده است.



تصویر (۱) - مراحل توزیع رسوب در مخزن به روش های افزایش و کاهش سطح

### ۲-۳-۳- روش کمینه قدرت یکه جریان

نظریه کمینه قدرت یکه جریان برای ریخت شناسی رودخانه ، اولین بار بوسیله یانگ (۱۹۷۱) از قوانین ترمودینامیک استخراج گردید. بر اساس این نظریه ، در یک سیستم که در آن موازنه دینامیکی وجود دارد رابطه زیر برقرار می باشد:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{dx}{dt} \frac{dy}{dx} = VS_{\min} \quad (2)$$

که در آن  $y$  انرژی پتانسیل در واحد وزن آب ،  $x$  فاصله ،  $t$  زمان و  $VS$  قدرت یکه جریان می باشد. مقدار کمینه در معادله (۲) به فشار وارد شده به سیستم وابسته می باشد. یانگ و مولیناس (۱۹۸۲) بیان کردند که قدرت یکه جریان را می توان با انتگرال گیری از حاصل ضرب تنش برشی  $\tau$  و

گرادیان سرعت  $\frac{du}{dy}$  بدست آورد که در آن  $u$  متوسط سرعت موضعی جریان در یک آبراهه روباز می باشد. بنابراین کمینه  $VS$  با به حداقل رساندن

هم ارز است. آناندال<sup>۲</sup> (۱۹۸۷-۱۹۸۴) عبارت  $\frac{\tau du}{dy}$  را قدرت یکه جریان کاربردی<sup>۱</sup> (توان جریان واحد) نامید. او خاطر نشان ساخت که زمانی قدرت

یکه جریان کاربردی کمینه می شود ، سرعت برشی در طول مسیر به کمترین مقدار خود می رسد و این مقدار کمینه در کل مسیر آبراهه ثابت می ماند.

<sup>۱</sup>-Christofano

<sup>۲</sup>-Annandale

$$(g.D.S)^{0.5} = cons \quad (3)$$

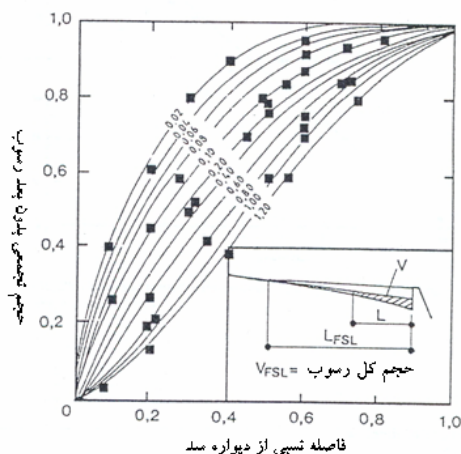
معادله (۳) را می توان برای بدست آوردن نیمرخ طولی بستر یک مخزن در شرایط پایدار یا تقریباً پایدار بکار برد. همانگونه که در تصویر (۲) نشان داده شده است ، صحت فرمول (۳) بوسیله آناندال (۱۹۸۷) با کمک اطلاعات مربوط به مخزن دارلینگتون<sup>۲</sup> در کشور آفریقای جنوبی به اثبات رسیده است. نمودار (۱) نشان می دهد که مقدار ثابت  $(gDS)^{0.5} = 0.006$  را می توان برای مخزن دارلینگتون مورد استفاده قرار داد. برای استفاده از رابطه (۳) جهت تعیین نیمرخ طولی بستر یک مخزن ، فرض می کنیم که سرعت برشی رودخانه در ورودی مخزن ، در طول مخزن ثابت باقی بماند. سپس با فرض دو سطح آزاد به نام سطح آب و سطح بستر ، محاسبه اصلاحی نیمرخ سطح برگشت آب در مخزن را انجام می دهیم. در این محاسبه سطح بستر را به گونه ای اصلاح می کنیم که رابطه (۳) صادق باشد. حالت کلی تری از نظریه کمینه قدرت یک جریان را می توان برای اکثر مخازن طبیعی و رودخانه ها مورد استفاده قرار داد این است که  $QS$  را برابر یک مقدار ثابت یا یک مقدار کمینه در نظر گرفت. که در آن  $Q$  دبی جریان آب و  $QS$  قدرت آبراهه می باشد. مقدار حداقل موجود در رابطه فوق به محدودیت های اعمال شده بر سیستم بستگی دارد. چانگ<sup>۳</sup> (۱۹۸۲) و آناندال (۱۹۸۴) دریافتند ، زمانی که قدرت جریان در بازه نسبتاً کوتاهی از مسیر آبراهه به مقدار حداقل خود می رسد:

$$\frac{dQ}{dx} \rightarrow 0 \quad (4)$$

رابطه میان محیط خیس شده  $P$  و مساحت مقطع عرضی آبراهه عبارت است از:

$$\frac{dA}{dx} = \frac{A}{Q} \frac{dQ}{dx} + \frac{A}{3P} \frac{dP}{dx} = \frac{A}{3P} \frac{dP}{dx} \quad (5)$$

نمودار (۲) نمودارهای تهیه شده توسط آناندال (۱۹۸۷) بر اساس اطلاعات بدست آمده از ۱۱ مخزن در آفریقای جنوبی که در آنها رسوبات در پایین تراز بیشینه یا پایین تاج سرریز مخزن ته نشین شده اند را نمایش می دهد. از محاسن این روش می توان به موارد زیر اشاره کرد: ۱- سهولت کاربرد ۲- دقت مناسب در تعیین ارتفاع رسوبات انباشته شده در پای دیواره سد ، استفاده از این روش را در مخازن کوچک (حدوداً کمتر از ۱۰ میلیون متر مکعب) میسر می سازد. ۳- توزیع رسوب محاسبه شده از این روش در قسمتهای انتهایی دریاچه سد (نزدیکی محور) بسیار نزدیک به واقعیت است و در قیاس با نرم افزارهای رایانه ای از دقت بهتری برخوردار می باشد. با وجود محاسن فوق ، این روش دارای معایبی به شرح زیر است: ۱- قادر به پیش بینی صحیح تغییرات بستر در ابتدای دریاچه سد که مکان تجمع رسوبات دلتایی است ، نمی باشد. بنابراین روش مذکور فقط در مخازن کوچکی که در آنها بار رسوبی ورودی به دریاچه عمدتاً ریز دانه بوده و تشکیل دلتا در ابتدای دریاچه آنها ناچیز است ، محدود می شود. ۲- روش مذکور یک بعدی بوده و صرفاً ارتفاع انباشت رسوبات را در خط القعر رودخانه محاسبه نموده و ارزیابی تغییر شکل کلی مقطع عرضی با این روش دشوار است. ۳- در این روش توزیع رسوبات مخزن ، فقط به شکل و توپوگرافی مخزن وابسته بوده و بر مبنای منحنی های تجربی که در سدهای آفریقای جنوبی بدست آمده محاسبه می شود. علیرغم نزدیک بودن نتایج حاصل از این روش در سایر مخازن ، نایبستی از تاثیر سایر عوامل موثر در تعیین توزیع رسوبات صرف نظر نمود.



نمودار (۱) - منحنی های توزیع جرم تجمعی رسوب

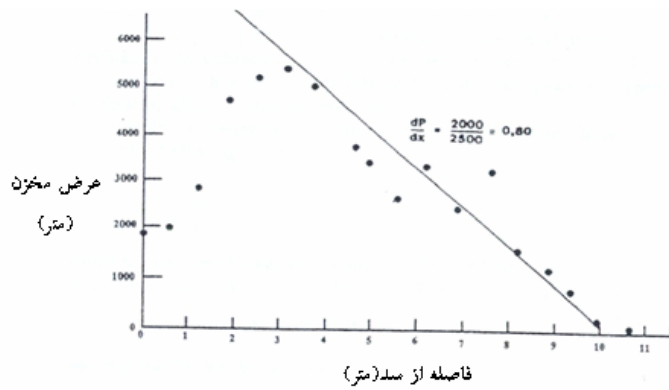


تصویر (۲) - مخزن دارلینگتون در آفریقای جنوبی

<sup>1</sup>-Applied Unit Stream Power

<sup>2</sup>-Darlington

<sup>3</sup>-Chang



نمودار (۲) - رابطه سرعت برشی و فاصله برای مخزن دارلینگتون

### ۳-۳-۲- 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 (۲,۱ و ۲,۰) GSTARS برای شبیه سازی رودخانه های رسوبی وسیع (عریض) به وجود آمده بودند اما نسخه جدید آن (GSTARS ۳,۰) علاوه بر توانایی شبیه سازی شرایط جریان به روش نیمه دو بعدی و شبیه سازی تغییرات هندسی کانال به روش نیمه سه بعدی، قابلیت مدل سازی رسوب گذاری در مخزن را دارد. GSTARS ۰ 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 هادر 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

### ۳- تجزیه و تحلیل نتایج

جهت تجزیه و تحلیل نتایج از پارامترهای آماری مانند نسبت اختلاف ( $R$ )، درصد خطای میانگین ( $e$ )، ضریب همبستگی ( $R^2$ )، مجموع مربعات خطا ( $SSE$ )، ریشه مجموع مربعات خطا ( $RMSE$ )، متوسط خطای نسبی ( $RAE$ ) و حداقل متوسط خطای نسبی ( $RMSE$ ) استفاده گردید. ۱-۳- واسنجی نتایج نرم افزار GSTARS-3

پس از ورود اطلاعات، معادله یانگ (۱۹۹۶) انتخاب شده و مدل اجرا گردید. نتایج واسنجی مدل در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱) - واسنجی نتایج توابع مختلف انتقال رسوب مدل GSTARS-3 با استفاده از نیمرخ های طولی

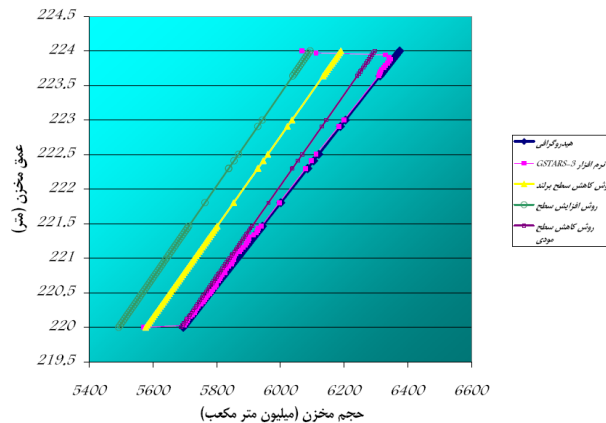
روش آماری							
$R^2$	$RRMS$	$RAE$	$RMSE$	$SSE$	$\%e$	$R$	نام فرمول
۰/۹۵۷۹	۰/۲۶۸۱	-۰/۰۳۵۳	۷/۵۹۱۰۹۸	۴۰۳۴/۳۱۸	۳۵/۳۱	۱/۰۳۵	یانگ (۱۹۷۳)
۰/۹۵۷۰۵۶	۰/۲۶۸۰۸	-۰/۰۳۵۳	۷/۵۹۰۴۹۷	۴۰۳۳/۶۷	۳۵/۳۱	۱/۰۳۵۳	یانگ (۱۹۷۹)
۰/۹۹۹۷	۰/۰۶۴۶	-۰/۰۱۲۳	۲/۱۲۷	۷۱۸/۹	۱۲/۳۱	۱/۰۱۲	یانگ (۱۹۹۶)
۰/۹۵۷۵۸۵	۰/۲۶۸۱۲۴	-۰/۰۳۵۳۲	۷/۵۹۱۲۰۱	۴۰۳۴/۴۲۷	۳۵/۳۱۵۲۶	۱/۰۳۵۳۱۵	مییر
۰/۹۵۸۱۵۳	۰/۲۶۸۱۴	-۰/۰۳۵۳۲	۷/۵۹۱۶۲۵	۴۰۳۴/۸۶۶	۳۵/۳۱۵۲۶	۱/۰۳۵۳۱۵	پارکر
۰/۹۵۸۱	۰/۲۶۸	-۰/۰۳۵۳۲	۷/۵۹۰۸۳۵	۴۰۳۴/۰۳۴	۳۵/۳۱۵۲۶	۱/۰۳۵۳۱۵	ایکرز-وایت

با توجه به جدول فوق، بهترین تابع برای محاسبه بار کل رسوب در مخزن سد کرخه، معادله یانگ (۱۹۹۶) می باشد. جهت مقایسه میان روش های تجربی و نتایج بدست آمده توسط مدل کامپیوتری، از دو معیار زیر استفاده شده است:

#### ۱- منحنی ارتفاع-حجم

به منظور مقایسه دقیق تر نتایج حاصل از مدل کامپیوتری GSTARS-3 و روش های تجربی بکار رفته، با کمک نیمرخ رسوبگذاری بدست آمده از مدل کامپیوتری، توزیع حجم رسوبات بدست آمده و منحنی حجم - تراز حاصل از روش مذکور ترسیم شده و با منحنی حاصل از روش ها تجربی مقایسه گردید، نمودار (۱). همانطور که مشاهده می شود، نمودار بدست آمده از مدل کامپیوتری GSTARS-3 تطابق بیشتری با هیدروگرافی دارد. البته شیب خطوط تقریباً با هم برابر بوده که نشان از رضایت بخش بودن نتایج کلیه روش های مورد استفاده دارد. بدین منظور در بخش های بعدی می

بایست تحلیل های دقیق تری صورت گیرد تا بهترین روش از میان مدل کامپیوتری GSTARS-3 و روش های تجربی (افزایش سطح، کاهش سطح برلند- میلر و کاهش سطح مودی) انتخاب شود.



نمودار (۱)- مقایسه میان نتایج مدل کامپیوتری GSTARS-3 و روش های تجربی در برآورد حجم مخزن کرخه

برای تحلیل رگرسیونی نتایج با استفاده از نمودار (۱) بهترین خطوط به ازای نتایج روش های مختلف برازش داده شده و معادله آنها با استفاده از نرم افزار Microsoft Excel بدست آمده اند که می توان ضرایب خطوط مربوط به هر روش را در جدول (۲) مشاهده نمود.

جدول (۲)- پارامترهای تحلیل رگرسیونی نتایج روش های مختلف برای محاسبه حجم مخزن

روش مورد استفاده	$\alpha$	$\beta$	$R^2$
هیدروگرافی	۰/۰۰۵۹	۱۸۶/۴۶	۱
نرم افزار GSTARS-3	۰/۰۰۶	۱۸۵/۶۱	۰/۹۵۱۹
کاهش سطح مودی	۰/۰۰۶۶	۱۸۶/۵۲	۱
کاهش سطح برلند	۰/۰۰۶۵	۱۸۳/۵۷	۱
افزایش سطح	۰/۰۰۶۷	۱۸۳/۴۵	۱

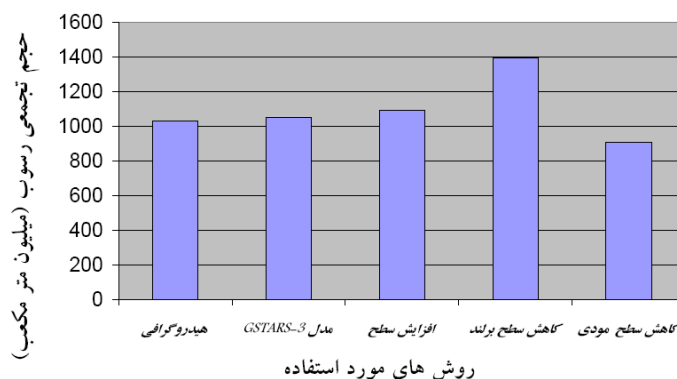
## ۲- حجم تجمعی رسوب

برای این کار حجم تجمعی رسوب بدست آمده از روش های مختلف تجربی و مدل کامپیوتری GSTARS-3 را با حجم تجمعی رسوب بدست آمده از عملیات هیدروگرافی مقایسه نموده و با استفاده از تحلیل های آماری، روشی را که نتایج آن دارای کمترین خطا باشد انتخاب می نمایم. در جدول (۳) مقادیر حجم تجمعی رسوب آمده است.

جدول (۳)- مقادیر حجم تجمعی رسوب روش های مختلف

هیدروگرافی	نرم افزار GSTARS-3	افزایش سطح	کاهش سطح برلند- میلر	کاهش سطح مودی
۱۰۲۹/۸۴۴	۱۰۵۰/۰۳۳	۱۰۹۴/۴۱۷	۱۳۹۳/۲۱۵	۹۰۸/۶۶۷

در نمودار (۲) حجم تجمعی رسوب روش های مختلف با حجم تجمعی رسوب مشاهداتی که با استفاده از عملیات هیدروگرافی بدست آمده، مقایسه شده اند.



نمودار (۲)- مقایسه حجم تجمعی رسوب از روش های مختلف با هیدروگرافی

همانگونه که از نمودار فوق ملاحظه می شود برآورد مدل GSTARS-3 و روش های تجربی افزایش سطح و کاهش سطح برلند- میلر بیشتر از مقدار واقعی ولی حجم تجمعی حاصل شده از روش کاهش سطح مودی کمتر از حجم تجمعی مشاهداتی است. برای انتخاب بهترین روش اقدام به تحلیل احجام تجمعی گردیده شده ، که نتایج در جدول (۳) آمده است.

جدول (۳) - تحلیل آماری نتایج حجم تجمعی رسوب

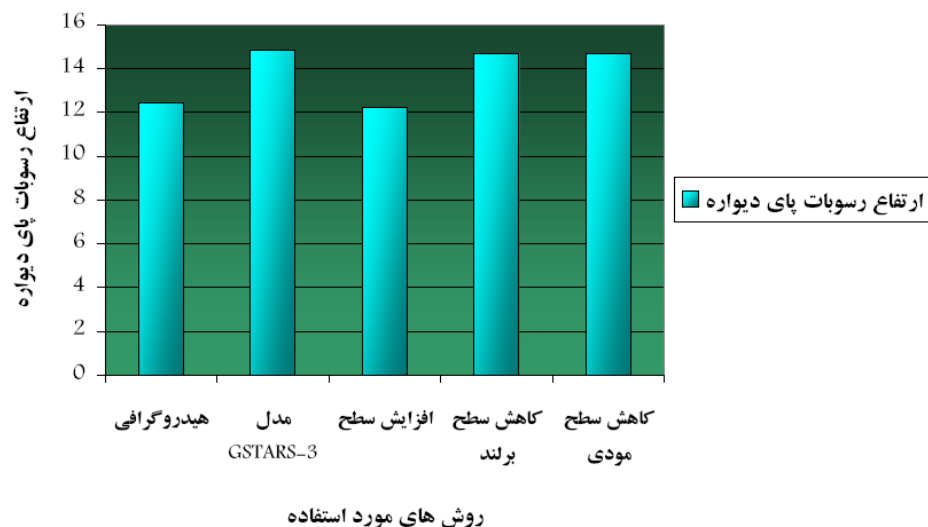
روش آماری						روش محاسبه حجم تجمعی رسوب
<i>RRMS</i>	<i>RMSE</i>	<i>SSE</i>	$\bar{e}$	<i>RAE</i>	<i>R</i>	
۰/۰۱۹۶	۲۰/۱۸۸	۴۰۷/۵۹۵	۱/۹۶	-۰/۰۱۹۶	۱/۰۱۹	نرم افزار GSTARS-3
۰/۰۶۲۷	۶۴/۵۷۲	۴۱۶۹/۶۷۲	۶/۲۷	-۰/۰۶۲۷	۱/۰۶۲	افزایش سطح
۰/۳۵۲	۳۶۳/۳۷	۱۳۲۰۳۸/۴۸۳	۳۵/۲	-۰/۳۵۲	۱/۳۵۲	کاهش سطح برلند
۰/۱۱۷	۱۲۱/۱۷۶	۱۴۶۸۳/۸۶۵	۱۱/۷	-۰/۱۱۷	۰/۸۸۲	کاهش سطح مودی

۳- ارتفاع رسوبات پای دیواره سد  
 ارتفاع رسوبات در پای دیواره سد با استفاده از مدل GSTARS-3 و روش های تجربی افزایش سطح و کاهش سطح برلند- میلر و مودی بدست آمد که نتایج جهت مقایسه با هیدروگرافی در جدول (۴) آمده است.

جدول (۴) - مشخصات ارتفاع رسوبات پای دیواره مخزن سد کرخه با استفاده از روش های ریاضی و تجربی

ردیف	روش مورد استفاده	ارتفاع(متر)	اختلاف ارتفاع با هیدروگرافی
۱	هیدروگرافی	۱۲/۴۵	----
۲	نرم افزار GSTARS-3	۱۴/۸۴	۲/۳۹
۳	افزایش سطح	۱۲/۲	-۰/۲۵
۴	کاهش سطح برلند- میلر	۱۴/۷	۲/۲۵
۵	کاهش سطح مودی	۱۴/۷	۲/۲۵

در نمودار (۳) - ارتفاع رسوبات پای دیواره سد با استفاده از روش های مختلف جهت مقایسه با هیدروگرافی آمده اند.  
 نمودار (۳) - مقایسه میان ارتفاع رسوبات پای مخزن سد کرخه با روش های مختلف



ملاحظه می شود که روش افزایش سطح در مقایسه با مدل کامپیوتری GSTARS-3 و سایر روش های تجربی ارتفاع رسوب را به مراتب با دقت بهتری محاسبه می نماید.

۴- توزیع رسوب در مقاطع مخزن

یکی از اشکالات فرمولاسیون مدل های ریاضی مانند نرم افزار GSTARS-3 آن است که هنگام توزیع رسوب در مخزن ، قسمت عمده آن را در مقاطع اول توزیع نموده و بنابراین سهم باقی مقاطع کاهش می یابد . روش کمینه قدرت یک جریانی نیز دارای چنین اشکالی است. در جدول (۵) توزیع رسوب در مقاطع ۱ و ۲ و ۳ مخزن سد کرخه به عنوان نمونه با استفاده از روش های مختلف برای مقایسه و نیز مناسب نبودن روش کمینه قدرت یک جریانی ارائه شده است. اعداد جدول بر حسب میلیون متر مکعب هستند.

جدول (۵) - توزیع رسوب در مقاطع مخزن کرخه با روش های مختلف

روش					مقطع
کمینه قدرت یک جریانی	کاهش سطح مودی	کاهش سطح برلند	افزایش سطح	نرم افزار GSTARS-3	هیدروگرافی
۱۰۲۹/۸۴۴	۷۸/۱۲	۱۷۳/۹۹۸	۲۶۹/۹۲	۳۰۶/۳۰۲	۲۷۷/۷۶
۰	۷۷/۶۳۷	۱۷۴/۰۱۳	۲۶۹/۱۵	۲۵۸/۲۹۹	۲۷۷/۵۶
۰	۷۷/۱	۱۷۴/۰۲۸	۲۶۹/۷۸	۳۵/۹۰۶	۲۷۷/۳۴

۵- کاهش حجم مخزن

در جداول (۶) و (۷) بترتیب مقدار درصد کاهش حجم مخزن با استفاده از مدل کامپیوتری GSTARS-3 و روش های تجربی و تحلیل آماری برای انتخاب بهترین روش آمده است.

جدول (۶) - درصد کاهش حجم مخزن سد کرخه با استفاده از روش های ریاضی و تجربی

درصد کاهش حجم مخزن (%)	روش مورد استفاده	ردیف
۴/۳۹	هیدروگرافی	۱
۲/۴۶	نرم افزار GSTARS-3	۲
۶/۶۹	افزایش سطح	۳
۳/۱۷	کاهش سطح برلند- میلر	۴
۱/۰۶	کاهش سطح مودی	۵

جدول (۷) - تحلیل آماری نتایج درصد کاهش حجم مخزن با استفاده از مدل کامپیوتری GSTARS-3 و روش های تجربی

پارامتر آماری					روش
<i>RMSE</i>	<i>SSE</i>	<i>-.e</i>	<i>RAE</i>	<i>R</i>	
۱/۹۳	۳/۷۲۴۹	۴۳/۹	۰/۴۳۹	۰/۵۶	نرم افزار GSTARS-3
۲/۳	۵/۲۹	۵۲/۳	-۰/۵۲۳	۱/۵۲	افزایش سطح
۱/۲۲	۱/۴۸۸۴	۲۷/۷	۰/۲۷۷	۰/۷۲۲	کاهش سطح برلند
۳/۳۲۹	۱۱/۰۸۸	۷۵/۸	۰/۷۵۸	۰/۲۴۱	کاهش سطح مودی

لذا بهترین روش برای محاسبه کاهش حجم مخزن ، روش کاهش سطح برلند- میلر می باشد.

۴- نتیجه گیری

بهترین تابع محاسبه بار کل رسوب در مخزن سد کرخه ، معادله یانگ (۱۹۹۶) می باشد که بار شسته را در محاسبات در نظر می گیرد. روش کاهش سطح برلند- میلر نسبت به بقیه روش ها کاهش حجم مخزن را بهتر محاسبه می نماید. روش افزایش سطح دقیق ترین روش برای محاسبه ارتفاع

رسوبات در پای دیواره سد و همچنین توزیع رسوب در مقاطع مختلف مخزن بوده و استفاده از روش کمینه قدرت یک جریان به هیچ وجه توصیه نمی شود.

## منابع و مراجع

- ۱- موسوی ، ف؛ حیدرپور، م؛ شعبانلو ، س، ۱۳۸۵، بررسی رسوب در مخزن سد زاینده رود با استفاده از مدل های تجربی افزایش و کاهش سطح ، مجله علمی- پژوهشی آب و فاضلاب ، شماره ۵۷
  - ۲- شعبانلو ، س ، موسوی ، ف ، حیدرپور ، م ، ۱۳۸۱ ، بررسی میزان رسوب ورودی به مخزن دز و نحوه توزیع آن تاکنون و برآورد وضعیت مخزن در آینده ، مجموعه مقالات ششمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه ، دانشگاه شهید چمران
  - ۳- شاکری داریان ، ع ؛ نجمایی ، م ، ۱۳۸۴ ، نحوه برآورد رسوبگذاری مخازن با استفاده از مدل ریاضی GSTARS2.1 و نرم افزار ILWIS ، مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران ، دانشگاه شهید باهنر کرمان
  - ۴- سیدیان ، م ، ۱۳۸۵ ، بررسی وضعیت رسوبگذاری در مخزن سد وشمگیر با استفاده از مدل ریاضی GSTARS-3 ، پایان نامه کارشناسی ارشد ، دانشکده مهندسی و علوم آب دانشگاه شهید چمران
  - ۵- کمیته رسوب طرح استانداردهای صنعت آب ، ۱۳۶۸ ، محاسبه میزان رسوبات و چگونگی تجمع آنها در مخازن سدها ، مجموعه مقالات اولین کنفرانس هیدرولوژی ایران ، دانشکده فنی دانشگاه تهران
  - ۶- حیدرنازاد ، م ؛ گلمایی ، ح ؛ مساعدی ، ا ؛ ضیا تبار احمدی ، م ، ۱۳۸۴ ، برآورد حجم رسوب در مخزن سد کرج به روش هیدرومتری و مقایسه آن با هیدروگرافی ، مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران ، دانشگاه شهید باهنر کرمان
  - ۷- شعبانلو ، س ؛ موسوی ، ف ؛ حیدرپور ، م ، ۱۳۸۳ ، ارزیابی کارایی مدل های کاهش و افزایش سطح در توزیع رسوب در مخازن نسبت به گذشت زمان ، مجموعه مقالات ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران ، دانشگاه صنعتی اصفهان
  - ۸- وزارت نیرو ، سازمان مدیریت منابع آب ، دفتر استاندارد مهندسی آب ، ۱۳۸۰ ، تعیین حجم رسوبات و توزیع آن در مخازن سدها ، نشریه شماره ۲۲۱
  - ۹- شمسایی ، ا ؛ امامی ، ا ، ۱۳۸۱ ، بررسی روش مینیمم توان واحد جریان در پیش بینی توزیع رسوب مخازن سدها ، مجموعه مقالات ششمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه ، دانشگاه شهید چمران
  - ۱۰- حیدرپور ، م ؛ موسوی ، ف ؛ شعبانلو ، س ؛ محمد زاده ، ج ، ۱۳۸۵ ، پیش بینی ارتفاع رسوب در پشت بدنه سد زاینده رود با استفاده از مدل کاهش سطح ، اولین همایش منطقه ای بهره برداری بهینه از منابع آب حوضه های کارون و زاینده رود ، دانشگاه شهرکرد
  - ۱۱- امامی ، ا ؛ بطنی ، ا ؛ گلمایی ، ح ؛ ضیا تبار احمدی ، م ، ۱۳۸۷ ، بررسی مدل کامپیوتری GSTARS-3 به منظور توزیع رسوب در مخازن سدها و مقایسه نتایج با روش های تجربی ، دومین کنفرانس ملی نیروگاه های برقایی ، وزارت نیرو
  - ۱۲- آریا نژاد ، ب ؛ ذهبیون ، م ، ۱۳۸۱ ، مقدمه ای بر احتمالات و آمار کاربردی ، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران
  - ۱۳- شرکت مهندسی مشاور دریا ترسیم ، ۱۳۸۴ ، گزارش فنی عملیات هیدروگرافی و نقشه برداری سد کرخه
  - ۱۴- فرشاد فر ، ع ، ۱۳۸۰ ، اصول و روش های آماری چند متغیره ، انتشارات طاق بستان ، چاپ اول
  - ۱۵- اعلمی ، م ؛ مرسولی ، ر ؛ اسدیانی یکتا ، ا ، ۱۳۸۷ ، کاربرد و ارزیابی مدل GSTARS-3 در شبیه سازی نحوه رسوبگذاری در مخازن - مطالعه موردی مخزن سد کارده ، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران ، دانشکده فنی دانشگاه تهران
- 16-Yang ,C.T. , and Simones ,F.J.M.,2002, GSTARS:A Numerical Model for Reservoir Sedimentation
- 17-Dan G.Batuca ,Jan M.Jordan,2000, Silting and Desilting of Reservoir, Published by A.A.Balkem
- 18-Leo C.Van Rijn,1993 " Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas, CopyRight by Aqua Publisher
- 19-Garde, R.J. and Ranga Raju ,K.G,1985,Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems"John Wiley and Sons Publisher,India
- 20-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
- 21-Chih Ted Yang1 and Francisco J. M. Simões,2002, GSTARS 3.0: A Numerical Model for Reservoir Sedimentation,
- 22-Yang,C.T.,1996."Sediment Transport,Theory and Practice",Mc Graw-Hill,396P
- 23-CIGB ICOLD ,2007, BULLETIN MATHEMATICAL MODELLING OF SEDIMENT TRANSPORT AND DEPOSITION IN RESERVOIRS-Guidelines and case studies
- 24-RANGARAJU K.G., KOTHYARI ,U.C,2004, SEDIMENT MANAGEMENT IN HYDROELECTRIC PROJECTS, International Symposium on River Sedimentation
- 25-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 COMPUTATIONALMODELLINGINHYDROSCIENCE&ENGINEERING, Oxford, Mississippi, USA