کمینه‌سازی رسوب‌گذاری در مخازن سدها با بهره‌برداری بهینه از تخلیه کننده‌های تحتانی

ابراهیم ولیزادگان[1*]، محمود شفاعی بجستان[2] و حسین محمد ولی سامانی[2]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۷/۱۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۸/۱۰)

چکیده

رسوب‌گذاری در مخازن سدها امری اجتناب ناپذیر است. این پدیده آثار نامطلوب زیادی در مخازن دارد، مانند کاهش حجم مفید مخزن، کاهش پایداری سد، عملکرد نامناسب دریچه‌های بهره‌برداری و پنستاک‌ها و کاهش حجم کنترل سیلاب. کمینه‌سازی رسوب‌گذاری در مخازن یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی مقید است. قیدهای این مسئله شامل محدودیت‌های دبی خروجی از تخلیه کننده‌های تحتانی، محدودیت‌های سطح آب در مخزن در هر دوره زمانی و محدودیت سطح آب در انتهای دوره بهره‌برداری است. در این تحقیق پس از واسنجی نرم‌افزار GSTARS3 (یکی از جدیدترین مدل‌های ریاضی پیش‌بینی رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها و مخازن که توسط USBR توسعه داده شده) برای منطقه سد وشمگیر، نتایج حاصل از اجرای این نرم‌افزار به عنوان بخشی از داده‌های ورودی توسط یک برنامه کامپیوتری واسط به برنامه بهینه‌سازی منتقل شد. پس از اجرای برنامه بهینه‌سازی نتایج به دست آمده توسط یک برنامه کامپیوتری واسط دیگر به عنوان بخشی از فایل ورودی وارد نرم‌افزار GSTARS3 می‌شود. سپس این نرم‌افزار مجدداً اجرا شده و نتایج به برنامه بهینه‌سازی منتقل می‌شود. این فرایند، زمانی خاتمه می‌یابد که دقت مورد نظر به دست آید. به عبارت دیگر شرایط بهینه زمانی به‌دست می‌آید که اجرای این حلقه بسته خاتمه یابد. مسئله بهینه‌سازی مقید با استفاده از روش تابع جریمه به حالت نامقید تبدیل و برای حل مسئله بهینه‌سازی نامقید به‌دست آمده، روش پاول که یکی از روش‌های جستجوی مستقیم می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفته است. قابلیت‌های مدل حاصله با اجرای آن برای مخزن سد وشمگیر گرگان به اثبات رسیده و سیاست بهره‌برداری بهینه با هدف کمینه‌سازی رسوب‌گذاری در مخزن سد برای یک دوره ۱۲ ماهه به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: رسوب‌گذاری، کمینه‌سازی، بهینه‌سازی، بهره‌برداری بهینه، سد وشمگیر، GSTARS3

۱. استادیار سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوی
۲. استادان سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز
* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: evalizadegan@yahoo.com

Archive of SID
www.SID.ir

مقدمه

رسوب‌گذاری در مخازن نتیجه انتقال مواد فرسایش یافته خاک‌های حوضه آبریز بالادست مخزن است. زمانی که سرعت جریان آب و در نتیجه تنش برشی حاصله در کف و سواحل رودخانه‌ها و آبراهه‌ها از یک حد آستانه‌ای فراتر رود فرسایش و آبشستگی اتفاق می‌افتد. بخشی از ذرات فرسایش یافته قبل از رسیدن به مخزن ممکن است در قسمت‌های مختلف رودخانه ته‌نشین شود، اما بخش عمده‌ای از آن در مخازن ساخته شده در مسیر رودخانه ته‌نشین می‌شوند. ته‌نشینی رسوبات در مخازن آثار بسیار نامطلوبی را مانند کم شدن حجم مفید مخزن، کاهش پایداری سد، اختلال در عملکرد دریچه‌های تحتانی، عملکرد نامناسب آبگیرها و دریچه‌های پنستاک‌ها، سرریز شدن آب مخزن بدنه (Over topping) و کاهش کیفیت آب مصرفی به‌وجود می‌آورد.

نحوه توزیع رسوب در مخازن سدها موضوعی است که از دیرباز مورد توجه محققان در نقاط مختلف جهان قرار گرفته است. در این راستا محققان سعی کرده‌اند تا با ارائه روش‌های گوناگون، رسوب‌گذاری در مخازن سدها را برای دوره‌های معینی پیش‌بینی کنند که این تحقیقات به ارائه روش‌های تجربی و مدل‌های ریاضی و کامپیوتری مختلف منجر شده است. روش‌ها و مدل‌های ریاضی و کامپیوتری زیادی در این مورد طراحی و ابداع شده است، از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود. روش‌های افزایش سطح، کاهش سطح، روش *کیان* (Qian)، *گارد* و همکاران (۹) و *بورلند*(Borland)، مدل‌های ریاضی مانند مدل HEC-6 توسط اداره مهندسی ارتش آمریکا (۱۹)، مدل HRS توسط *بتس* و *وایت* (۶)، مدل Fluvial توسط *چانگ*(Chang)، مدل Mobed توسط *اسپاسجویک* و *هالی* (۱۶)، مدلFCM توسط *کوریا* و همکاران (۸)، مدل DEPO توسط قمشی(۱۰) و مدل BRI-STARS توسط *مولیناس* (Molinas). هر کدام از این روش‌ها برای شرایط هیدرولیکی و رسوبی خاصی تدوین و طراحی شده‌اند.

غیائی و عبدی (۵) با استفاده از مدل CECAD-FSF رسوب‌گذاری در سدهای مخزنی را بررسی کرده و این مدل را توسعه داده‌اند. *بارانی و کعبی*(۱) ضمن ارزیابی شدت تغییرات پروفیل بستر دریاچه سدجیرفت با استفاده از روش تفاضل‌های محدود، محل بیشترین تجمع رسوبات را نسبت به بدنه سد به‌دست آورده‌اند. *شمسایی و امامی* (۴) توزیع رسوب در مخازن سدها را با استفاده از روش حداقل توان واحد جریان ارزیابی و نتایج به‌دست آمده را با نتایج حاصل از اجرای مدل GSTARS2 و نتایج حاصل از هیدروگرافی مخزن سد مقایسه کرده‌اند. آنان مطالعه خود را در مورد سد اکباتان انجام داده و مزایا و معایب هر کدام از روش‌های به کار گرفته شده را اعلام کرده‌اند. *سیدیان و شفاعی بجستان* نحوه رسوب‌گذاری در مخزن سد وشمگیر گرگان را با استفاده از مدل GSTARS3 بررسی کرده و توانسته‌اند برای یک دوره دراز مدت رسوب‌گذاری در مخزن این سد را پیش‌بینی کنند (۲).

تحقیقات محدودی در مورد جلوگیری و کنترل رسوب‌گذاری در مخازن با کاهش میزان رسوبات با استفاده از سیاست بهره‌برداری بهینه صورت گرفته است.

محققان مختلف در دهه‌های اخیر روی مطالعات مدیریت مخزن و سیاست‌های بهره‌برداری از آن متمرکز شده‌اند. این مطالعات و مدل‌های منتجه را می‌توان در تحقیقات انجام گرفته توسط یه (۲۲) و وربز (۲۰) یافت. چون اصلی‌ترین عامل تغییرات هندسه مقاطع عرضی در مخازن و رودخانه‌ها دبی جریان است، بهره‌برداری صحیح از تخلیه کننده‌های تحتانی یکی از روش‌های مطمئن کنترل رسوب‌گذاری در مخازن می‌باشد. بنابراین لازم است یک مدل کمینه‌سازی رسوب‌گذاری در مخازن با بهره‌برداری بهینه از تخلیه‌کننده‌های تحتانی طراحی و تدوین شود. به عبارت دیگر لازم است تا ابزاری برای افزایش قدرت تصمیم‌گیری و مدیریت مخزن برای کنترل و کاهش آثار مخرب رسوب‌گذاری را فراهم کرد. تدوین برنامه بهینه‌سازی و برقراری ارتباط آن با برنامه شبیه‌سازی رسوب‌گذاری در مخازن یکی از ابزارهای مناسب است. اگر چه

Archive of SID
www.SID.ir

کاربرد الگوریتم‌های کنترل تئوریک در مراجع و نشریات مربوط به منابع آب یافت می‌شود اما تحقیقاتی که به کاربرد این الگوریتم‌ها در مسئله رسوب‌گذاری در مخازن اشاره کرده باشد تقریباً وجود ندارد. *کاریاگا* و میز (۷) اولین کسانی هستند که با ارتباط دادن بین روش برنامه‌ریزی دینامیک دیفرانسیلی (DDP) و نرم افزار شبیه‌ساز رسوب HEC-6 مسئله رسوب‌گذاری در سیستم رودخانه و مخزن را بررسی کرده‌اند. اما مدل ارائه شده توسط آنها رسوب‌گذاری در مخازن را در نظر نگرفته بلکه فقط روی رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها متمرکز شده است. نیکلوف (۱۲) با روشی مشابه بین نرم‌افزار شبیه‌ساز رسوب HEC-6 و روش بهینه‌سازی موسوم به SALQR ارتباط برقرار کرده و مسئله رسوب‌گذاری در مخازن را بررسی کرده است. تحقیقات این محقق روی سیستم رودخانه- مخزن متمرکز شده و سعی کرده است تا بهره‌برداری از مخازن را طوری به‌دست آورد که در سیستم نه فرسایش اتفاق بیفتد و نه رسوب‌گذاری. تابع هدف مورد استفاده توسط وی کمینه‌سازی تغییرات ارتفاع بستر دریاچه مخازن سدها در مقاطع عرضی در داخل مخزن است.

در این مقاله با برقراری ارتباط بین روش بهینه‌سازی موسوم به روش پاول(Powell method) و نرم‌افزار GSTARS3، مسئله کنترل رسوب‌گذاری در مخازن بررسی شده است. روش *پاول* یکی از روش‌های جستجوی مستقیم می‌باشد. بعد از تدوین و صحت‌سنجی مدل به‌دست آمده، مطالعه موردی روی مخزن سد وشمگیر در گرگان انجام گرفت و قابلیت‌های مدل به اثبات رسید.

مواد و روش‌ها

بیان مسئله بهینه‌سازی

در این تحقیق که برای مدل‌سازی بهره‌برداری بهینه از مخزن به منظور کمینه‌سازی رسوب‌گذاری انجام شده، متغیرهای تصمیم مقادیر دبی خروجی از تخلیه‌کننده‌های تحتانی در هر گام زمانی می‌باشند. تابع هدف، کمینه‌سازی حجم رسوبات ته‌نشین شده در مخزن در کل دوره بهره‌برداری است و قیدهای مسئله عبارت‌اند از محدودیت‌های مربوط به دبی‌های خروجی از تخلیه‌کننده‌های تحتانی و محدودیت‌های مربوط به سطح آب در مخزن در هر گام زمانی هستند. بنابراین بیان ریاضی مدل مدیریت مخزن با هدف کمینه‌سازی رسوب‌گذاری به صورت زیر است:

تابع هدف:

$$\min f(R_t) = \sum_{t=1}^{N} VS_t \qquad [1]$$

قیود:

$$Vs_{t+1} = T_V\left(Vs_t, R_t, WS_t, t\right) \qquad 1 \le t \le N \qquad [2]$$

$$WS_{t+1} = T_{WS}\left(Vs_t, R_t, WS_t, t\right) \qquad [3]$$

$$\underline{R}_t \le R_t \le \overline{R}_t \qquad [4]$$

$$\underline{WS}_t \le WS_t \le \overline{WS}_t \qquad [5]$$

$$WS_T = WS_{t\,\mathrm{arg}\,et} \qquad [6]$$

در این روابط :

Vs_t : حجم رسوبات ته‌نشین شده درمخزن در دوره زمانی t

N : تعداد گام‌های زمانی

R_t : میزان دبی خروجی از تخلیه‌کننده‌های تحتانی در گام زمانی t : که به عنوان متغیر تصمیم‌گیری مسئله است.

$\underline{R}_t$: حدپایین دبی خروجی از تخلیه‌کننده‌های تحتانی در گام زمانی t

$\overline{R}_t$: حدبالای دبی خروجی از تخلیه‌کننده‌های تحتانی در گام زمانی t

WS_t : رقوم سطح آب مخزن در گام زمانی t

$\underline{WS}_t$: حد پایین رقوم سطح آب در گام زمانی t

$\overline{WS}_t$:حدبالای رقوم سطح آب در گام زمانی t

WS_T : رقوم سطح آب در انتهای دوره بهره‌برداری(در انتهای گام زمانی آخر)

WS_{target} : رقومی که پس از دوره بهره‌برداری باید سطح آب در آن رقوم باشد.

عبارت‌های T_v و T_{ws} در توابع [۲] و [۳] به این مورد اشاره دارند که این توابع به عنوان قیود انتقالی

Archive of SID

www.SID.ir

(Transition constraints) بوده و بیان کنندهٔ عکس‌العمل مرحله‌ای برنامه‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی به سیاست‌های از پیش تعیین شده بهره‌برداری از مخزن هستند. به عبارت دیگر حجم رسوبات انباشته شده (V_s) و سطح آب در مخزن (WS) در هر مرحله از مراحل بهره‌برداری، تابعی از حجم رسوبات ته‌نشین شده در مخزن، طول دوره بهره‌برداری، سطح آب در مخزن و میزان دبی خروجی از مخزن در مرحله قبل است.

معادله [۱] که تابع هدف مسئله می‌باشد، بیان کننده حداقل سازی میزان حجم رسوبات ته‌نشین شده در مخزن در کل دوره بهره‌برداری است. این تابع به صورت ضمنی تابعی از سیاست بهره‌برداری از مخزن می‌باشد. لازم به ذکر است رابطه ۱ تنها رابطه ممکن برای بیان مسئله حداقل‌سازی رسوب‌گذاری است که می‌تواند با توابع دیگر بهره‌برداری از مخزن تلفیق شود. معادلات ۲ و ۳ که قیود انتقالی هستند شامل روابط هیدرولیکی جریان و رسوب مانند روابط پیوستگی وانتقال رسوب هستند، که این روابط در قسمت بعدی ارائه شده‌اند.

معادلات ۴ تا ۶ محدودهٔ مجاز را برای دبی‌های خروجی از تخلیه کننده‌های تحتانی و سطوح آب در هر گام زمانی بیان می‌کنند.

تحلیل هیدرولیک جریان و انتقال رسوب

در این مسئله معادلات ۲ و ۳ با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز رسوب به نام GSTARS3 حل می‌شوند. این نرم‌افزار توسط گروه هیدرولیک و مهندسی رودخانه USBR توسعه داده شده و یکی از جدیدترین و کامل‌ترین نسخه‌ها از سری GSTARS است (۲۱). در این نرم افزار از معادلات انتقال رسوب متعددی برای بررسی وضعیت رسوب‌گذاری در مخازن استفاده می‌شود که انتخاب هر کدام از آنها بستگی به شرایط منطقه مورد بررسی دارد. این مدل، در هر گام زمانی ابتدا پروفیل سطح آب را در مخزن محاسبه می‌کند سپس مقاطع عرضی مورد بررسی به چندین لوله جریان (Stream tube) تقسیم بندی شده و محاسبات روندیابی رسوب با استفاده از همین لوله‌های جریان صورت می‌گیرد. در GSTARS3 برای روندیابی رسوب اطلاعات مربوط به رسوبات ورودی به مخزن از رودخانه و رسوبات موجود در بستر جریان (رسوبات موجود در کف و کناره‌های بستر) به طور هم‌زمان استفاده می‌شوند. اعتبار و قابلیت‌های این نرم افزار با کاربرد آن در مورد تعدادی از رودخانه‌های بزرگ جهان به اثبات رسیده است.

معادله پیوستگی رسوب به کار رفته در این نرم‌افزار به فرم زیر است:

$$(1-n)\frac{\partial A_d}{\partial t}+\frac{dQ_s}{dx}=q_{lat} \qquad [۷]$$

که در آن :

$\frac{\partial A_d}{\partial t}$: تغییرات حجم رسوبات در واحد طول بستر جریان نسبت به زمان

$\frac{dQ_s}{dx}$: تغییرات دبی حجمی رسوبات در مقاطع عرضی

q_{lat} : دبی رسوب ورودی جانبی در واحد عرض مجرا

n : تخلخل مواد رسوبی

نرم افزار GSTARS3 با در نظر گرفتن تغییرات طولی و جانبی ترکیب مواد بستر در هر گام زمانی اقدام به محاسبه دبی حجمی رسوبات (Q_s) و q_{lat} می‌کند.

$$Q_s = q_t \cos d \times \Delta y \qquad [۸]$$

$$q_{lat} = q_t \sin d \qquad [۹]$$

که در آنها :

q_t : نرخ انتقال رسوب در واحد عرض که توسط یکی از توابع انتقال رسوب محاسبه می‌شود

d : شیب عرضی کف مقطع عرضی

بنابراین معادله ۷ با معلوم بودن Δy که عرض لوله جریان می‌باشد قابل محاسبه است. به همین منظور باید عبارت‌های موجود در معادله (۷) جداسازی شوند. برای انجام جداسازی(Discretization)، تغییرات حجم رسوبات بستر طی فرایندهای رسوب‌گذاری و یا فرسایش به صورت زیر جداسازی می‌شوند.

Archive of SID

www.SID.ir

$$\frac{\partial A_d}{\partial t} = \frac{(aT_{i-1} + bT_i + cT_{i+1})\Delta z}{\Delta t} \quad [10]$$

$$\frac{dQ_s}{dx} = \frac{Q_{s,i} - Q_{s,i-1}}{\frac{1}{2}(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})} \quad [11]$$

که در آن:

T : عرض بالای مجرا

Δz : تغییر در ارتفاع بستر (مثبت برای بالاآمدگی و منفی برای فرسایش)

i : اندیس مقطع عرضی

Δx : فاصله بین مقطع عرضی i و i+1

Δt : طول گام زمانی و

$Q_{s,i}$: نرخ انتقال رسوب در مقطع i ام.

c,b,a ضرایب ثابت که باید داشته باشیم:

$$a + b + c = 1 \quad [12]$$

در GSTARS3 مقادیر استاندارد a=c=۰/۲۵ و b=۰/۵ به عنوان پیش فرض در نظر گرفته شده است. کاربر می‌تواند بسته به اهمیت و فیزیک مسئله ترکیب دیگری را بر اساس تجربه خود انتخاب کند. با جاگذاری روابط ۱۰ و ۱۱ در معادله ۷ خواهیم داشت:

$$\Delta z_{i,k} = \frac{\Delta t}{h_i} \cdot \frac{q_{lat}(\Delta x_i + \Delta x_{i-1}) + 2(Q_{s,i-1,k} - Q_{s,i,k})}{(aT_{i-1} + bT_i + cT_{i+1})(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})} \quad [13]$$

که در آن k اندیس اندازه رسوب است. بنابراین کل تغییرات در رقوم بستر جریان در مقطع عرضی i ام یعنی Δz_i از رابطه زیر به‌دست خواهد آمد.

$$\Delta z_i = \sum_{k=1}^{N} \Delta z_{i,k} \quad [14]$$

که در آن N تعداد کلاس‌های اندازه رسوبات موجود در مقطع عرضی i ام می‌باشد.

محاسبات هیدرولیکی بر اساس روابط حاکم بر جریان متغیر تدریجی استوار است و رژیم جریان‌های مرکب مانند پرش هیدرولیکی نیز با انتخاب هم‌زمان معادلات مومنتم و انرژی محاسبه می‌شوند. در این نرم افزار معادله انرژی با روش گام به گام استاندارد و روندیابی مخزن با روش گام به گام استاندارد اصلاح شده حل می‌شود.

روش حل

مسئله کمینه‌سازی رسوب‌گذاری در مخازن یکی از مسائل بهینه‌سازی مقید می‌باشد.برای حل این مسئله، با استفاده از روش تابع جریمه (penalty function) مسئله بهینه‌سازی مقید به مسئله بهینه‌سازی نامقید تبدیل شد. در این روش قیدهای مسئله بهینه‌سازی یعنی معادلات ۴ تا ۶ به طریقی خاص وارد تابع هدف مسئله (معادله ۱) می‌شوند تا چنانچه در حین حل مسئله قیدی نقض شود، مقدار عددی قید نقض شده به عنوان جریمه به تابع هدف اضافه شود. پس در این شرایط تابع هدف از حالت بهینه دور خواهد شد. در این تحقیق از یک تابع جریمه ساده به نام تابع جریمه *براکت*(Bracket penalty function) استفاده شده است (۱۵).

با کاربرد روش تابع جریمه مسئله بهینه‌سازی به فرم نامقید زیر در می‌آید.

$$\min F = f(R_t) + r_k \sum_{j=1}^{m} G_j \quad [15]$$

که در آن r_t ضریب تابع جریمه و G_j عبارت جریمه می‌باشد و از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$G_j = \max\{0, g_j(R_t)\}^2 \quad [16]$$

که $g_j(R_t)$ قید j ام بوده و تابعی از میزان دبی خروجی از تخلیه‌کننده‌های تحتانی در هر گام زمانی مشخص(R_t) می‌باشد. تابع جریمه فوق به‌طور گسترده و موفقیت آمیزی در بررسی رفتار سفره‌های آب زیر زمینی توسط *تانگ* و میز (۱۷)، در مدیریت رفتار جریان در محل اتصال رودخانه به دریا توسط *لی* و میز (۱۱) و *تانکوک* (۱۸) و برای کمینه‌سازی شدت تغییرات پروفیل بستر جریان در سیستم رودخانه و مخزن توسط *نیکلوف* و میز (۱۴) استفاده شده است.

بدین ترتیب مسئله مقید کمینه‌سازی رسوب‌گذاری در مخازن سدها به فرم زیر به یک مسئله نامقید تبدیل می‌شود.

Archive of SID

www.SID.ir

$$\min \quad F = \sum_{t=1}^{N} Vs_t + r_k \left[\sum_{t=1}^{N} \left(\max\left(0, \underline{R}_t - R_t\right)\right)^2 + \sum_{t=1}^{N} \left(\max\left(0, R_t - \overline{R}_t\right)\right)^2 + \sum_{t=1}^{N} \left(\max\left(0, \underline{WS}_t - WS_t\right)\right)^2 \right] + r_k \left[\sum_{t=1}^{N} \left(\max\left(0, WS_t - \overline{WS}_t\right)\right)^2 + \max\left(0, WS_T - WS_{t\,\arg et}\right)^2 \right]$$

[۱۷]

مسئله کنترل رسوب‌گذاری در مخازن که توسط معادلات ۱ تا ۶ و معادله ۱۷ بیان شد با برقراری ارتباط بین نرم‌افزار شبیه‌ساز رسوب GSTARS3 و برنامه بهینه‌سازی با استفاده از دو برنامه کامپیوتری واسط حل شد. این برنامه‌های واسط داده‌ها را به صورت قابل فهم از GSTARS3 به برنامه بهینه‌سازی و بر عکس منتقل می‌کند. مراحل حل مسئله در فلوچارت شکل ۱ ارائه شده است.

در فرایند بهینه‌سازی(شکل ۱) از روش جستجوی مستقیم استفاده شده است. مراحل این روش در شکل ۲ ارائه شده است. طبق رابطه ۱۸ می‌توان نقاط بعدی برای حل مسئله را به‌دست آورد.

$$X_{i+1} = X_i + l_i S_i \qquad [۱۸]$$

که در آن S_i جهت جستجو و l_i طول گام جستجو می‌باشد.

در فرایند بهینه‌سازی (شکل۲) برای تولید نقاط بعدی(X_{i+1}) هم باید جهت جستجو(S_i) و هم طول گام جستجو (li) تعیین شود. در این تحقیق برای یافتن جهت جستجو(S_i) از روش جهات مزدوج (Conjugate directions) که به آن روش پاول (Powell method) نیز گفته می‌شود استفاده شده است. هم‌چنین طول گام جستجو (li) با استفاده از روش درون‌یابی درجه دوم به‌دست آمده است. روش درون‌یابی درجه دوم جزو روش‌های عددی کمینه‌سازی یک بعدی می‌باشد. در این روش نیازی به مشتق‌گیری از تابع هدف و قیدها نیست.

مطالعه موردی

این مدل روی مخزن سد وشمگیر که دارای اطلاعات کافی است به کار گرفته شد. سد وشمگیر با مختصات جغرافیایی ′۴۴_°۵۴ طول شمالی و ′۱۳_°۳۷ عرض شرقی روی رودخانه گرگانرود احداث شده است. گرگانرود به‌طور متوسط ده ماه از سال دارای آب جاریست. گرگانرود در تابستان غالباً کم‌آب و یا فاقد آب است و ندرتاً در این فصل با بارندگی‌های احتمالی، جریان‌های سیلابی در آن شکل می‌گیرد.

جدول ۱ داده‌های هیدرولوژیک و برخی از خصوصیات مخزن سد وشمگیر را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

به منظور حداقل‌سازی رسوب‌گذاری در مخازن سدها یک مدل کامپیوتری طراحی و تدوین گردید. این مدل با برقراری ارتباط بین روش بهینه‌سازی (در این تحقیق، روش جستجوی مستقیم) و برنامه شبیه ساز رسوب‌گذاری یعنی GSTARS3، یک برنامه که می‌تواند هم رسوب‌گذاری را مدل نماید و هم آن را کمینه‌سازی کند به‌دست آمد. قابلیت های مدل طرح شده با کاربرد آن روی مخزن سد وشمگیر به اثبات رسیده است.

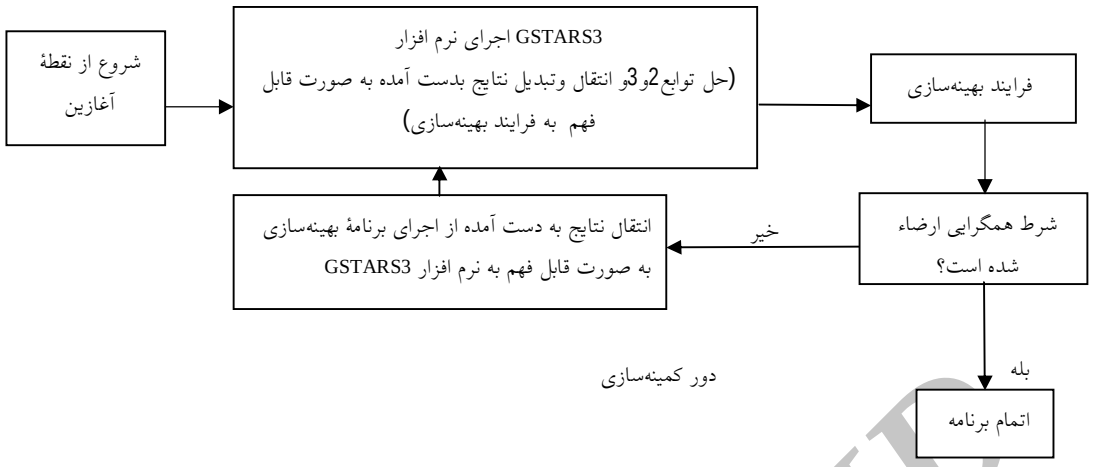
شرح مراحل واسنجی مدل

جهت اجرای یک مدل ریاضی برای یک شرایط مشخص و منحصر به‌فرد محلی، بایستی آن مدل را برای منطقه مورد نظر کالیبره و ضرایب منطقه‌ای را به‌درستی برآورد نمود.

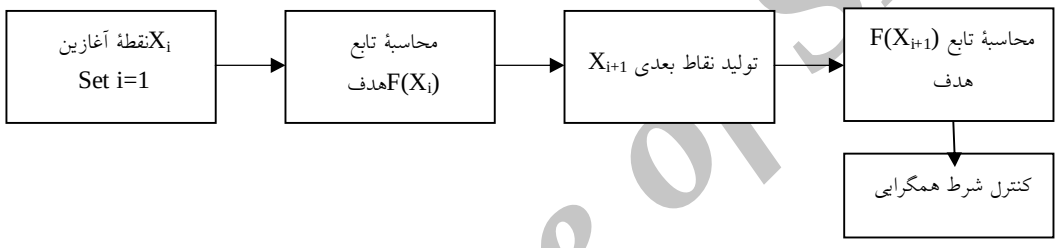
سیدیان و شفاعی‌بجستان (۲) عملیات کالیبراسیون را برای ضرایبی از مدل که دارای مقدار پیش فرض نیز هستند برای شرایط سد وشمگیرانجام دادند. آنها در به‌دست آوردن مقادیر مناسب برای کلیه ضرایب، میزان خطا را از تابع RMSE به دست آوردند.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل۱. مراحل حل مسئله بهینه‌سازی رسوب‌گذاری در مخازن سدها



شکل۲. مراحل مختلف فرایند بهینه‌سازی

جدول ۱. داده‌های هیدرولوژیک و خصوصیات مخزن

داده های هیدرولوژی	گام‌های زمانی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
	طول هر گام زمانی (روز)	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰
	دبی(m^3/s)	۵/۹	۷/۸	۱۰/۳	۱۲/۳	۱۵/۷	۳۰/۱	۴۶/۳	۳۳/۲	۱۴/۴	۳/۷	۱/۹	۳/۳
وضعیت مخزن	حدبالای رقوم سطح آب در مخزن نسبت به یک سطح مقایسه(m)												۱۲۶/۶
	حدپایین رقوم سطح آب در مخزن نسبت به یک سطح مقایسه(m)												۱۲۰
	حداکثر دبی خروجی از تخلیه کنندهای تحتانی(m^3/s)												۵۰
	حداقل دبی خروجی از تخلیه کنندهای تحتانی(m^3/s)												۱۰
	رقوم سطح آب در آغاز دورهٔ بهره‌برداری(m)												۱۲۳

Archive of SID
www.SID.ir

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - y_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad [۲۶]$$

x : مقدار مشاهداتی x

y : مقدار محاسباتی y

n: تعداد داده‌ها n

آنها جهت کالیبراسیون نرم‌افزار GSTARS3 از داده‌ها و نتایج دو بار هیدروگرافی مخزن سد (از زمان احداث سد تا حالا) استفاده کرده‌اند. با توجه به کمتر بودن اطلاعات از هیدروگرافی انجام گرفته در سال ۱۳۷۴، هم برای کالیبراسیون و هم برای صحت‌سنجی استفاده شده است. روش کار بدین صورت انجام گرفته که طول مخزن به پنج قسمت مساوی تقسیم و از هر قسمت به طور تصادفی یک مقطع انتخاب شد. هنگام واسنجی این پنج مقطع مورد استفاده قرار نگرفتند. بعد از کالیبراسیون مدل و تعیین پارامترهای مورد نیاز، با استفاده از پنج مقطع مذکور و مطابقت آنها با داده‌های خروجی مدل عملیات صحت‌سنجی صورت گرفت.

برای اجرای مدل پس از انجام عملیات واسنجی مناسب‌ترین معادله انتقال رسوب معادله *ایکرز- وایت* انتخاب شد. بر اساس این معادله و با اجرای مدل طراحی شده، سیاست بهره‌برداری بهینه از مخزن با هدف به حداقل رساندن رسوب‌گذاری در ۱۹ مقطع عرضی در مخزن سد در جدول ۲ ارائه شده است.

تغییرات تابع هدف مسئله نسبت به دورهای کمینه‌سازی نیز در شکل ۳ ارائه گردیده است.

مشخص است که با افزایش دورهای کمینه‌سازی مقدار تابع هدف (F) رفته رفته کم می‌شود تا این‌که به حداقل ممکن یعنی ۵۹۸۸۶۰ متر مکعب میرسد.با افزایش بعدی دورهای کمینه‌سازی دیگر کاهشی در مقدار F مشاهده نشد.

بدون در نظر گرفتن قیدهای مربوط به سطح آب مخزن انتظار میرود حداکثر رسوب‌گذاری زمانی اتفاق بیافتد که دبی خروجی از تخلیه کننده‌های تحتانی حداقل باشد و حداقل رسوب‌گذاری زمانی اتفاق بیافتد که دبی خروجی حداکثر باشد. برای بررسی صحت و درستی مدل، همین موضوع اجرا و نتایج به‌دست آمده صحت و درستی مدل را اثبات کرد.

نیکلوف و میز (۱۴) نیز رسوب‌گذاری در مخازن را با بهره‌برداری بهینه از تخلیه‌کننده‌های تحتانی بررسی کرده‌اند. آنها جهت شبیه‌سازی رسوب‌گذاری در مخزن از نرم‌افزار HEC-6 و برای بهینه‌سازی از روشی به نام Successive SALQR) (Approximation Linear Quadratic Regulation استفاده نموده و برای بررسی تغییرات بستر مخزن رابطه Exner را به‌طور جداگانه مورد استفاده قرار داده‌اند. آنها مجموع میزان تغییرات ارتفاع بستر مخزن را در تمامی مقاطع عرضی بررسی کرده‌اند.

این محققین مدل را به ازای نقاط آغازین مختلف اجرا کرده‌اند و متغیرهای تصمیم متفاوتی را در هر بار اجرا به دست آوردند (همین‌طور تابع هدف را متغیر به دست آوردند) یعنی با شروع از نقاط آغازین مختلف جواب‌های بهینه مختلفی برای متغیرهای تصمیم به دست آورده‌اند. نتایج اجرای مدل برای یک دورهٔ ۶ روزه در جدول ۳ برای مناسب‌ترین نقطه آغازین ارائه شده است.

روش پاول که یکی از روش‌های جستجوی مستقیم در بهینه‌سازی غیر خطی است، برای حداقل سازی رسوب‌گذاری از کارایی خوبی برخودار بوده و این روش به طور موفقیت آمیزی استفاده شد. هم‌چنین استفاده از روش تابع جریمه برای تبدیل مسئله از حالت مقید به حالت نامقید روشی کاملاً مناسب تشخیص داده شد.

مدل ارائه شده نمی‌تواند عدم قطعیت‌ها را در نظر بگیرد. در این مسئله شرایط هیدرولوژیکی رودخانه و مخزن و خصوصیات رسوبات ورودی به مخزن جزو عدم قطعیت‌ها محسوب می‌شوند.

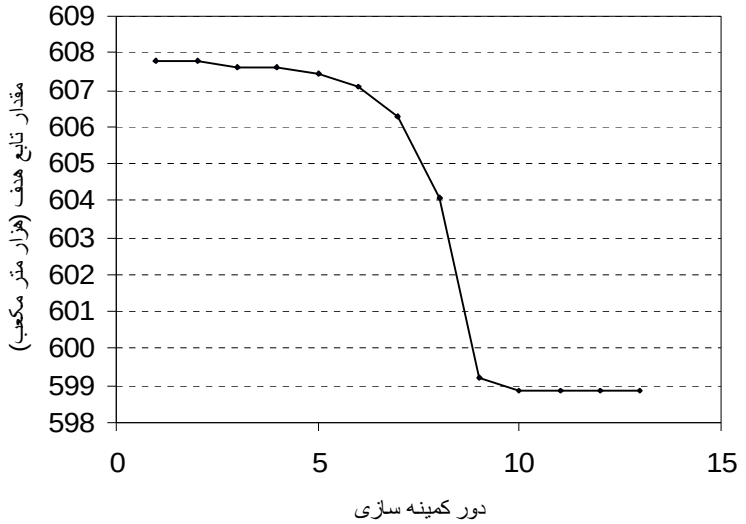
Archive of SID

www.SID.ir

جدول۲. مقادیر بهینه متغیر تصمیم(دبی خروجی از تخلیه کننده‌های تحتانی در هر گام زمانی)

گام زمانی (ماه)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
مقدار دبی خروجی بهینه (متر مکعب بر ثانیه)	۳۴	۱۰	۳۴	۳۴	۳۴	۳۴	۲۲	۱۶	۱۰	۱۰	۱۰	۳۳

توضیح اینکه گام‌های زمانی از مهر ماه آغاز می‌گردند.



شکل۳. تغییرات تابع هدف مسئله بهینه‌سازی نامقید نسبت به دورهای کمینه‌سازی

جدول ۳. سیاست بهره‌برداری بهینه بر اساس تحقیقات نیکلوف و میز

گام زمانی (روز)	۱	۲	۳	۴	۵	۶
سیاست بهربرداری بهینه (m^3/s)	۲۲۰/۷	۲۳۶/۷	۲۹۲/۵	۳۶۷/۹	۳۲۴/۵	۲۹۳/۵

بنابراین با برقراری ارتباط بین یک شبیه ساز رسوب‌گذاری که توسط سازمان‌ها و کاربران مختلف تایید شده است و یک روش بهینه‌سازی می‌توان شکاف بین مدیریت مخزن و تئوری بهینه‌سازی رسوب‌گذاری را از بین برد.

منابع مورد استفاده

۱. بارانی، غ. و و. کعبی. ۱۳۸۰. محاسبه شدت تغییرات پروفیل بستر دریاچه پشت سد جیرفت با استفاده از روش تفاضل‌های محدود. کنفرانس بین المللی سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

۲. سیدیان، م. و م. شفاعی بجستان. ۱۳۸۶. بررسی وضعیت رسوب‌گذاری سد وشمگیر با استفاده از مدل GSTARS3. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳. شرکت مهندسی آب نگار. ۱۳۷۴. گزارش فنی عملیات نقشه برداری و هیدروگرافی سد وشمگیر. گزارش مرحله اول، سازمان آب

www.SID.ir

منطقه‌ای مازندران.

۴. شمسایی، ا. و س. ا. امامی. ۱۳۸۱. بررسی روش مینیمم توان واحد جریان در پیش بینی توزیع رسوب مخازن سدها. ششمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۵. غیاثی، ر. و ن. عبدی. ۱۳۸۰. مدل کامپیوتری دو بعدی تخمین رفتار رسوب‌گذاری در سدهای انحرافی. کنفرانس بین المللی سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

6. Bettess, R. and W.R. White. 1981. Mathematical sedimentation of sediment movement in streams. Proc. Institution of Civil Eng. 2(7): 879-982.
7. Carriaga, C. and L. Mays.1995. Optimization modeling for sedimentation in alluvial rivers. J. Water Resour. Plan. and Manag. ASCE, 121(3): 251-259.
8. Correia, L.R.P. and B.G. Krishnappan and W.H. Graf. 1992. Fully coupled unsteady mobile boundary flow model (FCM). ASCE. J. Hydraul. Eng. 118(3): 476-494.
9. Garde, R.J. and K.G. Ranga Raju. 1978. Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems. Wiley Eastern Limited, India.
10. Ghomeshi, M. and M. Sivakumar. 1995. A New Model for Reservoir Sedimentation: DEPO. 6th Int. Symp. On river sedimentation. New Delhi, India.
11. Li, G. and L. Mays. 1995. Successive Approximation Linear Quadratic Regulator for Estuarine Management Problem. Water Resources. European, Water Resources Association, Kluwer Academic Pub., USA.
12. Nicklow, J. W. 2000. Discrete-Time optimal control for water resource association. J. Hydraul. Eng. 25(1): 89-95.
13. Nicklow, J. W. and L. Mays. 2000. Optimization of multiple reservoir networks for sedimentation control. J. Hydraul. Eng. 126(4): 232-242.
14. Nicklow, J. W. and L. Mays. 2001. Optimal control of reservoir releases to minimize sedimentation in river and reservoirs. J. Amer. Water Resour. Assoc. 37 (1): 197-211.
15. Reklaitis,G. V., A. Ravindran and K. M. Ragsdell. 1983. Engineering Optimization: Method and Applications. Wiley Interscience Pub., New York.
16. Spasojevic, M. and F.M. Holly. 1994. Three Dimensional Numerical Simulation of Mobile Bed Hydrodynamics. CR HL-94-2. USAE Waterways Experiment Station. Vicksburg. MS.
17. Tang, A. and L. Mays. 1998. Genetic Algorithms for Optimal Operation of Soil Aquifer Treatment Systems. Water Resources Management. Kluwer Aca. Pub., Dordrecht, The Netherlands. 12: 375-396.
18. Tuncok, T.K. 1999. Feedback Method of Control for Estuary Management. Water Resources Management, Kluwer Academic Pub., Dordrecht, The Netherlands. 13: 315-334.
19. U.S. Army Corps of Engineering. 1993. The Hydraulic Engineering Center, HEC-6 Scour Deposition in Rivers and reservoir, User's manual.
20. Wurbs, R. 1993. Reservoir-System Simulation and Optimization Models. J. Water Resour. Plan. and Manag. ASCE, 119(4):455-472.
21. Yang, C.T. and F.J.M. Simoes.2002. User's manual for GSTARS 3.0 (Generalized Sediment Transport model for Alluvial River Simulation version 3.0). U.S. Bureau of Reclamation. Technical Service Center. Denver. Colorado. USA.
22. Yeh, 1985. Reservoir management and operations: A state of the art review. Water Resourc. Plan. and Manag. 125: 25-33

Archive of SID

www.SID.ir