Long- Term Numerical Predication of Sediment in Ekbatan Reservoir Dam

Shamsai, A.(Ph.D), Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology
Cheshmekaboody, E. (MSc.), Islamic Azad University, Research and Science

Abstract

Generally recognization, analysis and predication of sediment amount and distribution in the reservoir dams with different inflows because of various parameters was selected and used. Involved is one of the major problems of sediment hydraulics.

For this purpose two-dimentional model GSTARS 2.0. The special charactristic of this model is the usage of stream tube concept in analyzing the hydraulic specifications and sediment transport. Ekbatan dam and its two rivers called the Abshineh and Abro were considered in this study.

By using model GSTARS 2.0, the volume capacity of Ekbatan dam was calculated 3.39 milion meters cubic. Therefore, from start up of operation in 1963 untill now 57.63 percent of the reservoir initial volume is filled with the sediment. For predication of the remained useful age of Ekbatan reservoir, the ARIMA statistical model was used. Firstly the discharge amount of the inflow rivers of dam determined and then amount of deposition and behaviour of sediment distribution in long time was studied. The calculation showed the time need for filling the reservoir is about 56 years.

Finally, it could be concluded the useful period of dam will be finished in 18 years time (2019).

پیش‌بینی عددی درازمدت رسوب در سد مخزنی اکباتان

(دریافت ۸۱/۱/۱٤ پذیرش ۸۱/۷/۱۸)

ابوالفضل شمسایی* اقبال چشمه کبودی**

چکیده

اگر در طراحی یک سد مسئله رسوب‌گذاری مورد توجه قرار نگیرد، ممکن است پس از مدتی سازه‌های آبگیر و تأسیسات مربوطه از رسوب پوشیده شوند. به طور کلی شناخت، تجزیه و تحلیل و پیش‌بینی میزان و توزیع رسوب در سدهای مخزنی با ورودی‌های مختلف به علت دخالت پارامترهای متعدد، از ضروری‌ترین مباحث هیدرولیک رسوب می‌باشد. در این رابطه می‌توان از مدل دو بعدی GSTARS 2.0 استفاده کرد. ویژگی خاص این مدل استفاده از مفهوم لوله جریان در محاسبه‌ی مشخصات هیدرولیکی و انتقال رسوب می‌باشد. در این مقاله برای مطالعه موردی از سد مخزنی اکباتان که دارای دو رودخانه ورودی آبشینه و ابرو می‌باشد، استفاده شده است. با کاربرد مدل GSTARS 2.0 حجم فعلی مخزن ۳/۳۹ میلیون مترمکعب محاسبه گردیده است. در این صورت از شروع بهره‌برداری در سال ۱۳٤۲ تاکنون ۵۷/٦۳ درصد از حجم اولیه مخزن توسط رسوب پر شده است. برای پیش‌بینی عمر باقیمانده مخزن اکباتان، ابتدا با استفاده از مدل آماری ARIMA میزان آبدهی رودخانه‌های ورودی به سد تعیین شد. سپس مقدار رسوبگذاری و نحوه‌ی توزیع رسوب در درازمدت توسط مدل محاسبه گردید. محاسبات نشان داد که مدت زمان لازم برای پر شدن مخزن سد از رسوب حدود ٥٦ سال است، و لذا تقریباً بعد از ۱۸ سال دیگر (یعنی در سال ۱۳۹۸) عمر مفید این سد به اتمام خواهد رسید.

کلمات کلیدی : لوله جریان، انتقال رسوب، سری‌های زمانی، توزیع رسوب، عمر مفید سد، انتقال رسوب نامتعادل.

مقدمه

اگر در طراحی سدها به مسئله رسوب‌گذاری توجه نشود، ممکن است گنجایش مفید محاسبه شده سدها درست نبوده و در نتیجه زیان‌هایی به بار آید.

از آن جمله می‌توان به بالا آمدن بستر رودخانه در قسمت ورودی رودخانه به مخزن، افزایش تبخیر از سطح دریاچه و اختلال در تخلیه کننده‌های سد اشاره کرد [۹]. بنابراین قبل از طراحی و ساخت سد ضروری است تا وضعیت رسوب در مخزن تخمین زده شود. جدیدترین مدل عددی که برای محاسبه انتقال رسوب در رودخانه‌های آبرفتی وجود دارد، مدل (GSTARS 2.0)[1] می‌باشد که در سال ۱۹۹۸ تدوین گردیده است. مدل GSTARS 2.0 ویرایش جدیدی از مدل GSTARS اصلی می‌باشد و قابلیت‌های زیادی نسبت به آن دارد. از جمله این قابلیت‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [٦، ۱۰] :

۱- افزایش تعداد معادلات انتقال رسوب

۲- قابلیت انتقال رسوبات چسبنده (رس و سیلت)

۳- انتقال نامتعادل رسوب بر مبنای فرمول هن[2]

٤- تابع انتقال برای جریان مملو از رسوب با غلظت بالایی از بار شست و شو[3] با استفاده از فرمول اصلاح شده یانگ

---

* استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

** کارشناس ارشد مهندسی عمران آب- دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران

[1] Generalized Stream Tube Model for Alluvial River Simulation

[2] Han

[3] Wash Load

۵- کنترل موازنه جرم

٦- افزایش تعداد نقاطی که برای تعریف مقطع عرضی به کار می‌روند.

۷- کنترل خطا در فایل ورودی مدل

۸- قابلیت رسم خروجی‌های مدل شامل هندسه مقاطع عرضی، پروفیل طولی کف مخزن و پروفیل سطح آب با استفاده از برنامه‌های GSPLOT و PLTGSTARS در حالت سه بعدی

مدل GSTARS 2.0 بر خلاف بسیاری از مدل‌های کامپیوتری یک بعدی رودخانه مانند HEC-6 قادر به حل مسائل پیچیده مهندسی رودخانه و محاسبه شرایط جریان در یک حالت شبه دو بعدی می‌باشد. از جمله کاربردهای این مدل می‌توان به موارد زیر اشاره نمود :

۱- محاسبه پارامترهای هیدرولیکی در کانال‌های باز با مرز ثابت و یا متحرک

۲- محاسبه پروفیل سطح آب در حالت‌های جریان فوق بحرانی، زیربحرانی و یا ترکیبی از آن دو

۳- شبیه‌سازی و پیشگویی هیدرولیک جریان و تغییرات رسوب در جهت‌های طولی و یا متقاطع

٤- شبیه‌سازی و پیشگویی تغییرات پروفیل کانال و هندسه مقاطع عرضی

این مدل اولین بار در سال ۱۹۹۸ برای سد مخزنی Elephant Butte آمریکا مورد استفاده قرار گرفته است. در این سد ارتفاع رسوب‌گذاری پس از یک دوره‌ی ۲٤٦۰ روزه برابر ٦ متر و میزان رسوب ورودی به مخزن $٤/۹۹۰۲\times۱۰^{۷}$ تن محاسبه گردیده و نتایج حاصل از مدل با مقادیر واقعی نقشه‌برداری شده بسیار شبیه بوده است.

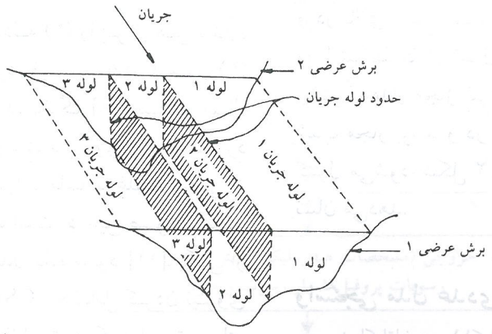
مطالعه تئوری مدل GSTARS 2.0

مدل GSTARS 2.0 به صورت عددی حرکت جریان آب و رسوب را در رودخانه‌های آبرفتی مدل‌سازی می‌نماید. در این مدل معادله پیوستگی رسوب برای هر لوله جریان[1] به کار برده می‌شود. یکی از ویژگی‌های خاص این مدل استفاده از لوله جریان برای محاسبه‌ی مشخصات هیدرولیکی و انتقال رسوب در جهات طولی و عرضی مخزن می‌باشد. این مسئله موجب حرکت واقعی‌تر جریان آب در رسوب می‌گردد. شکل۱ نمونه‌ای از آبراهه را با سه لوله جریان نشان می‌دهد.

برای انتقال رسوب در مدل‌هایی مانند HEC-6 و STARS به علت محدودیت در روابط تئوریک تنها ذرات درشت‌دانه و با قطر بزرگ‌تر از ۰/۰٦۲۵ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل به علت توان بالای آن، چنانچه اندازه ذرات رسوب وارد شده به مدل کوچک‌تر از ۰/۰٦۲۵ میلی‌متر (ذرات رس و سیلت) باشد، محاسبات انتقال رسوب چسبنده انجام می‌گیرد. پارامترهای مورد نیاز برای انتقال ذرات رس و سیلت عبارتند از :برش حداکثر برای رسوب‌گذاری ذرات رس و سیلت (STDEP) ، برش حداکثر برای فرسایش توده‌ای رس و سیلت (STMERO) ، شیب منحنی سرعت فرسایش برای فرسایش توده‌ای (ERMASS) و برش حداکثر برای درصد رس در ترکیب بستر، (ERLM) تا سرعت فرسایش شن و ماسه و سیلت محدود به سرعت فرسایش رس گردد.

---

[1] Stream Tube



شکل ۱- نحوه به کارگیری لوله‌های جریان در مدل GSTARS 2.0.

چنانچه تنش برشی بستر (t_b) کوچک‌تر از مقدار STDEP باشد، رسوب‌گذاری اتفاق می‌افتد. در این صورت معادله زیر در مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد :

$$\frac{C}{C_0} = e^{-K\Delta T} \quad ، K = \frac{W_s}{D}(1 - \frac{t_b}{t_{cd}}) \qquad (1)$$

که C غلظت در پایان مرحله زمانی، C_0 غلظت در ابتدای مرحله زمانی، Δt زمان حرکت رسوب در سیستم، W_s سرعت ته‌نشینی ذرات رسوب، t_{cd} تنش برشی بحرانی برای رسوب‌گذاری و D عمق آب می‌باشد. برای فرسایش توده‌ای و ذره‌ای معادلات دیگری نیز ارائه شده است.

با توجه به این که مراحل رسوب‌گذاری در مخازن و یا تشکیل لجن در خلیج‌های به وجود آمده در دهانه رودخانه از موارد انتقال رسوب نامتعادل هستند، برای مدل کردن این مسئله، مدل GSTARS 2.0 از روش اصلاح شده توسط هن در سال ۱۹۹۰ و چن در سال ۱۹۹۳ استفاده می‌کند [۱۲]. در این روش که براساس حل تحلیلی معادلات انتقال-انتشار می‌باشد، نرخ انتقال رسوب نامتعادل از فرمول زیر محاسبه می‌گردد :

$$c_i = c_i^* + (c_{i-1} - c_{i-1}^*)\exp(\frac{-\alpha w_s \Delta x}{q}) + (c_{i-1}^* - c_i^*)(\frac{q}{\alpha w_s \Delta x})[1 - \exp(\frac{-\alpha w_s \Delta x}{q})] \qquad (2)$$

که :

C : غلظت رسوب

Δx : طول ناحیه مورد مطالعه

c^* : ظرفیت انتقال رسوب

i : اندیس مقطع عرضی

q : دبی جریان در واحد عرض

α : پارامتر بی‌بعد

مدل GSTARS 2.0 ، معادله (۲) را برای هر اندازه گروه از رسوبات به کار می‌برد. ضریب α در فرمول (۲) یک عامل ترمیم کننده می‌باشد. یانگ [۱۰] نیز در سال ۱۹۹۶ براساس مطالعات انجام داده بر روی رودخانه زرد در چین، فرمولی برای انتقال ذرات ماسه با غلظت بالایی از بار شست و شو پیشنهاد نموده است. در این صورت باید درصد بار شست و شو به مدل داده شود [۱۱]. یکی از قابلیت‌های مدل GSTARS 2.0 ، حداقل کردن نیروی نهایی جریان می‌باشد. این قابلیت ممکن است برای مشخص کردن محدودیت‌های عرضی و عمقی از لحاظ رسوب‌گذاری یا فرسایش در هر مقطع عرضی به کار گرفته شود. اساس این روش بر مبنای تئوری نرخ توزیع انرژی حداقل که توسط سونگ و یانگ ارائه شده، استوار است [۷]. استفاده از این تئوری این اجازه را می‌دهد که عرض کانال را به صورت یک متغیر ناشناخته فرض کنیم. چنانچه در یک کانال رسوبی نرخ توزیع انرژی مربوط به انتقال آب، بسیار بزرگ‌تر از نرخ توزیع مربوط به انتقال رسوب باشد، در آن صورت می‌توان تئوری نرخ توزیع انرژی حداقل را با تئوری ساده شده توسط یانگ در سال ۱۹۹۲، جانشین نمود. در این حالت برای تطبیق رسوب‌گذاری و یا فرسایش در جهت‌های عمودی و یا افقی، رودخانه توان جریان (γQS) خود را در واحد طول کانال و با توجه به عوامل هیدرولوژی، هیدرولیک، رسوب، هندسی، زمین‌شناسی و سازه‌های ساخت بشر حداقل می‌کند. بنابراین در هر مرحله زمانی وضعیت کانال با توجه به معادله پیوستگی رسوب تغییر کرده و با معادله حداقل توان تطابق می‌یابد. توان نهایی جریان از فرمول زیر محاسبه می‌گردد :

$$\Phi_T = \sum_{i=1}^{N-1} \lambda(\frac{Q_i S_i + Q_{i+1} S_{i+1}}{2})\Delta x_i \qquad (3)$$

که :

N : تعداد مقاطع عرضی

Δx_i : فاصله مقاطع i، i+1

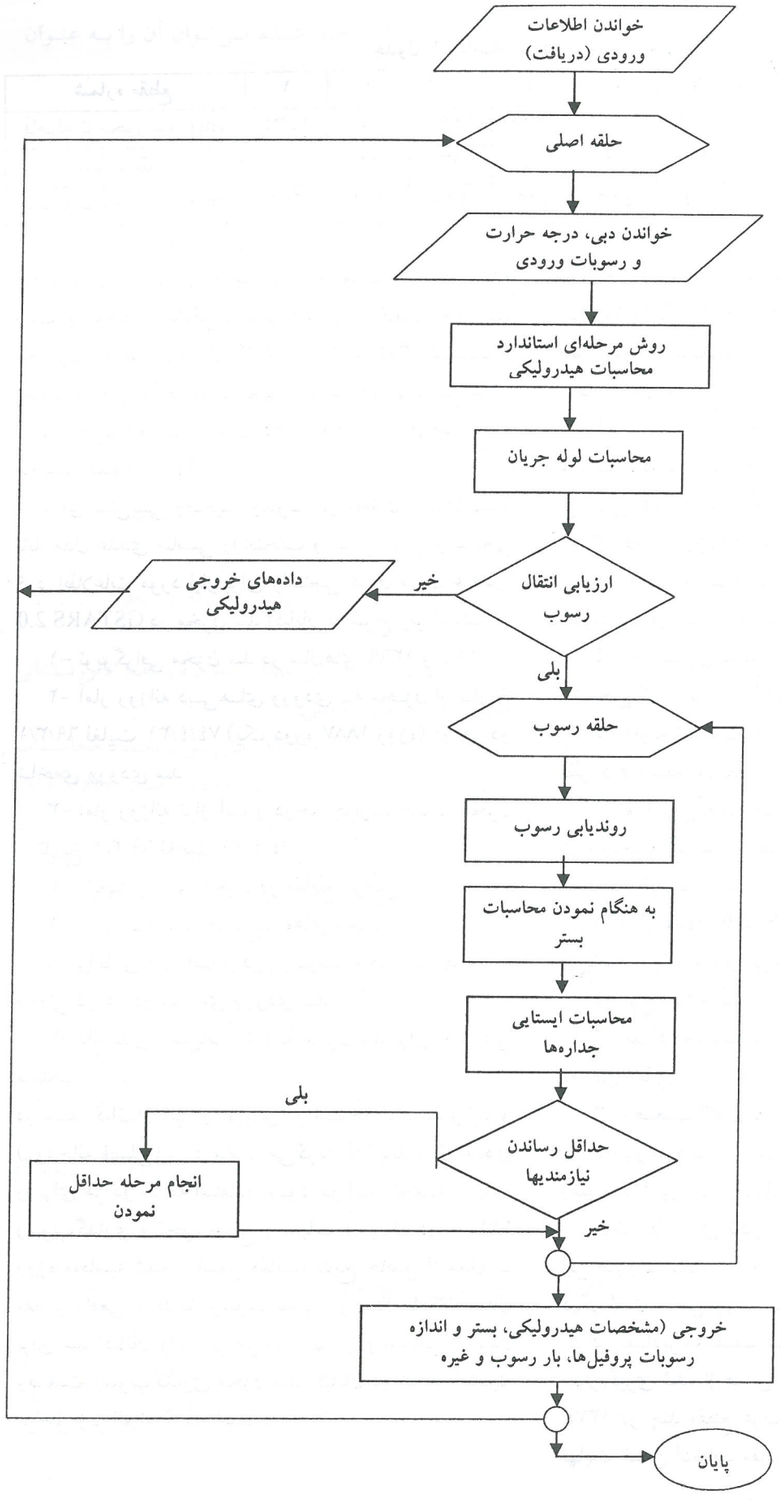
Q_i و S_i : دبی و شیب در مقطع i

Φ_T : توان نهایی جریان

در مدل عددی مذکور محاسبات پایداری بحرانی کناره‌های کانال انجام می‌گیرد. در این صورت مدل در فایل ورودی، مقدار زاویه شکست کناره کانال در زیر آب و در بالای سطح آب را دریافت نموده و در هر لحظه آن را با شرایط کانال کنترل می‌کند. چنانچه شیب کناره‌ها بیشتر ازمقدار مجاز شود، مقطع کانال تغییر می‌یابد، تا به شیب مجاز برسد و در پایان برنامه نیز پایداری عددی مدل کنترل می‌شود. شکل ۲ روند نمای مدل GSTARS 2.0 را نشان می‌دهد.

واسنجی مدل عددی در سد اکباتان

سد اکباتان در ۱۱کیلومتری شهر همدان احداث شده و شروع بهره‌برداری از آن سال ۱۳۴۲ بوده است. حجم اولیه



شکل ۲- روندنمای مدل GSTARS 2.0.

مخزن در زمان طراحی ۸ میلیون مترمکعب محاسبه شده است. با توجه به مشکل رسوب‌گذاری و کاهش حجم مخزن، در سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۶۹ و ۱۳۷٤ عملیات رسوب‌سنجی توسط مرکز تحقیقات آب انجام گرفته است. حجم باقی‌مانده سد در سال ۱۳۷٤، ٤/۰۸ میلیون مترمکعب محاسبه شده است [۲].

برای پیش‌بینی وضعیت رسوب در مخازن سدها ابتدا باید مدل عددی مناسبی را انتخاب و سپس آن را واسنجی کرد. اطلاعات مورد نیاز برای واسنجی کردن مدل عددی GSTARS 2.0 در مخزن سد اکباتان به شرح زیر است:

۱- توپوگرافی مخزن سد در سال‌های ۱۳٦۹ و ۱۳۷٤

۲- آمار روزانه دبی‌های ورودی به مخزن از تاریخ ٦۹/۳/۱ لغایت ۷٤/٤/۳۱ (یک دوره ۱۸۸۷ روزه) در هر دو شاخه‌ی ورودی سد

۳- آمار روزانه تراز آب و درجه حرارت آب در مخزن از تاریخ ٦۹/۳/۱ لغایت ۷٤/٤/۳۱

٤- دانه‌بندی بستر مخزن در مقاطع عرضی

۵- زاویه شکست خاک کناره‌های مخزن

٦- رابطه‌ی دبی آب و دبی رسوب به صورت جدول یا منحنی در هر دو شاخه‌ی ورودی سد

۷- دانه‌بندی رسوبات وارد به مخزن سد برای چند دبی مختلف

در سد اکباتان آب از طریق دو شاخه آبشینه و ابرو (رودخانه فصلی) وارد مخزن می‌گردد. لذا باید مدل عددی را برای هر دو شاخه استفاده نمود. در این تحقیق میزان رسوب‌گذاری و نحوه توزیع رسوبات در یک دوره ۱۸۸۷ روزه محاسبه شده و ضمن مقایسه نتایج حاصل از مدل با مقادیر واقعی از طریق رسوب نسبی در سال ۱۳۷٤، مدل برای سد اکباتان واسنجی می‌شود. برای واسنجی نمودن وضعیت رسوب‌گذاری مخزن سد اکباتان در شاخه آبشینه مراحل زیر انجام گرفته است :

جدول ۱- فاصله مقاطع عرضی تا محور سد.

شماره مقطع	۱	۲	۳	٤	۵	٦	۷	۸	۹	۱۰
فاصله تا محور سد (m)	۱٤۳۵	۱۳۳۰	۱۲۹۰	۱۲۵۵	۱۱٤۷	۱۱۰۱	۱۰٤۰	۸۸٤	۸۳۵	۷۳۰
شماره مقطع	۱۱	۱۲	۱۳	۱٤	۱۵	۱٦	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
فاصله تا محور سد (m)	٦۷۵	۵٦۸	٤۹۹	٤۵۳	٤۲۳	۳۷٤	۲۹٤	۱۸۱	۹٦	۰

۱- هندسه مقاطع عرضی با استفاده از نقشه توپوگرافی سال ۱۳٦۹ در ۲۰ مقطع عرضی و به فواصل مختلف از دیواره‌ی سد مشخص گردیده است. شماره مقاطع عرضی و فاصله آن‌ها از محور سد در جدول ۱ آمده است [۱].

۲- ضریب زبری کف مخزن در نقاطی که دارای جنگل و بیشه بوده برابر ۰/۰۸ و در مقاطع با بستر سیلتی، رس، لوم برابر ۰/۰۲٤ انتخاب گردیده است.

۳- دمای روزانه آب، تراز روزانه آب در مخزن و دبی ورودی روزانه آب از تاریخ ٦۹/۳/۱ لغایت ۷٤/٤/۳۱ از سازمان تحقیقات منابع آب جمع‌آوری شده است.

٤- دانه‌بندی بستر مخزن برای ۲۰ مقطع عرضی مشخص گردیده است [۲].

۵- زاویه شکست خاک کناره‌های مخزن ۹۰ درجه در نظر گرفته شده است.

٦- بر اساس اطلاعات موجود از نمونه‌برداری رسوب در رودخانه آبشینه، رابطه بین دبی آب و دبی رسوب مشخص گردیده است.

در مدل عددی GSTARS 2.0 موارد زیر قابل تغییر می‌باشند و باید مقدار بهینه آن‌ها را به دست آورد :

۱- نوع معادله انتقال رسوب

۲- تعداد محاسبات روندیابی رسوب در طول یک دوره‌ی زمانی

۳- وضعیت انتقال نامتعادل رسوب و پارامترهای آن

٤- پارامترهای انتقال رسوب چسبنده برای رسوب‌گذاری رس و سیلت

روش کار برای تأثیر موارد ذکر شده در نتایج مدل به این صورت است که یک پارامتر را تغییر داده و پارامترهای دیگر ثابت فرض شوند، سپس نتایج حاصل از مدل عددی برای مقادیر مختلف هر یک از پارامترها، با مقادیر اندازه‌گیری شده از طریق رسوب سنجی مخزن در سال ۱۳۷٤ در چند مقطع عرضی مختلف مقایسه می‌گردند. در نهایت ضمن انتخاب مقادیر بهینه پارامترها مدل برای سد

اکباتان واسنجی می‌شود. با توجه به این که بیشترین رسوب‌گذاری مخزن در مقاطع اولیه صورت می‌گیرد و هر چه به دیواره‌ی سد نزدیک‌تر شویم، از حجم و ضخامت رسوبات کاسته می‌شود، بنابراین بیشتر مقایسه‌ها در مقاطع اولیه (مقاطع عرضی ۱، ۲ و ۳) صورت می‌گیرد [۵ و٦].

الف- مقایسه نتایج حاصل از مدل معادلات مختلف انتقال رسوب

روش‌های مختلفی برای محاسبه رسوبات حمل شده در مدل عددی ارائه گردیده است. با استفاده از دستور SE در فایل ورودی می‌توان هر یک از معادلات زیر را به دلخواه انتخاب کرد [۸] :

۱- روش میر-پیتر و مولر[1]

۲- روش لارسن[2]

۳- روش توفالتی[3]

٤- روش انگلند و هنسن[4]

۵- روش ایکروویت[5]

٦- فرمول یانگ[6] برای انتقال ماسه در سال ۱۹۷۳ و انتقال شن در سال ۱۹۸٤

۷- فرمول یانگ برای انتقال ماسه در سال ۱۹۷۹ و انتقال شن در سال ۱۹۸۹

۸- روش پارکر[7]

۹- فرمول اصلاح شده یانگ در سال ۱۹۹٦

۱۰- روش ایکر و وایت با ضرایب تصحیح شده در سال ۱۹۹۰

در مخزن سد اکباتان با استفاده از معادلات لارسن، ایکروویت، یانگ و روش اصلاح شده ایکروویت نحوه‌ی توزیع رسوب محاسبه گردیده است. محاسبات نشان می‌دهند که هندسه مقاطع ورودی مخزن با استفاده از روش لارسن در مقایسه با مقاطع عرضی واقعی از طریق نقشه‌برداری مخزن دارای دقت بالایی می‌باشد و لذا برای محاسبه‌ی رسوبات حمل شده می‌توان آن را به عنوان روش بهینه انتخاب کرد (شکل ۳).

ب- مقایسه نتایج برای پارامترهای حمل نامتعادل رسوب

در مدل عددی GSTARS 2.0 ، ضریب α (عامل ترمیم کننده، در معادله‌ی انتقال رسوب نامتعادل) تأثیر به سزایی در حجم کل رسوب دارد. در مدل عددی، مقدار α بین ۰/۲۵ و ۱ می‌باشد. با افزایش α مقدار رسوب ته‌نشین شده در مخزن نیز افزایش می‌یابد. مقدار α در فایل ورودی با دستور NE مشخص می‌شود. به ازای دستور ۰/۸ و NE=۰/۳۵ در فایل ورودی، حجم رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد اکباتان به ترتیب برابر $۲/۹۸ \times ۱۰^{۵}$ و $٤/۲٤ \times ۱۰^{۵}$ مترمکعب محاسبه گردیده است. نتایج مدل عددی به ازای NE=۱ در مقاطع اولیه به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر می‌باشد. مقدار این ضریب را برای فرسایش نیز می‌توان تعیین نمود.

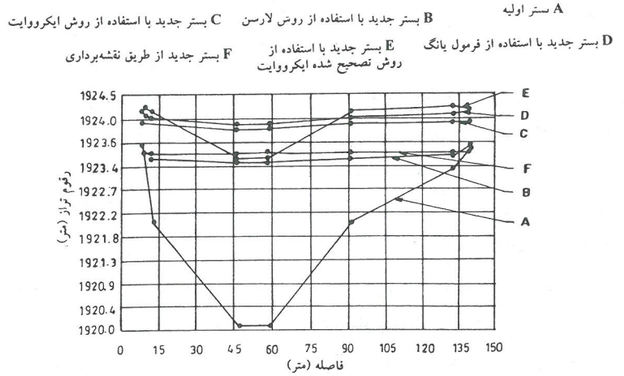
ج- مقایسه نتایج برای مقادیر مختلف تعداد روندیابی رسوب در هر دوره زمانی

در مدل GSTARS 2.0 ، می‌توان تعداد محاسبات روندیابی رسوب در طول یک دوره‌ی زمانی (NITRQS) را مشخص کرد. به عنوان مثال اگر دوره‌ی زمانی برای محاسبات آب یک روز، DTIME=۱ و NITRQS=٦ انتخاب گردد، در آن صورت دوره زمانی برای محاسبات رسوب $\frac{۱}{٦}$ روز یا به عبارتی ٤ ساعت می‌باشد. هر چه مقدار NITRQS بیشتر انتخاب شود، مقدار رسوب در مقاطع اولیه سد بیشتر و در مقاطع بعدی کمتر خواهد شد. به عبارت دیگر، با مراجعه به فایل خروجی مدل می‌توان دریافت که حجم کل رسوبات ته‌نشین شده در مخزن، تغییری نمی‌کند، اما توزیع رسوب در مخزن تغییر خواهد نمود. در سد مخزنی اکباتان مقدار NITRQS=۱ پاسخ‌های نزدیک‌تری به واقعیت دارد.

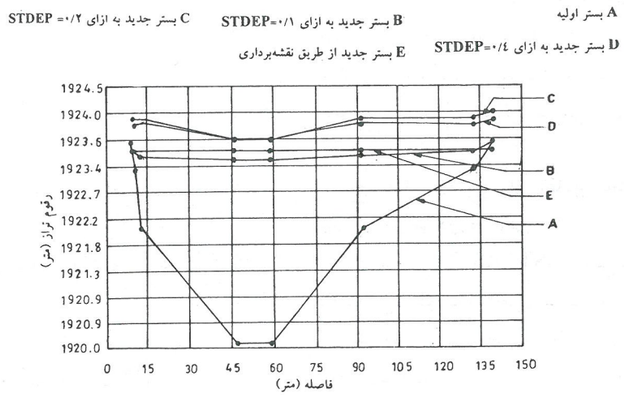
د- مقایسه نتایج برای مقادیر مختلف پارامترهای انتقال رسوب چسبنده

چنانچه در اندازه رسوبات ارائه شده به مدل عددی $d_{mean} < ۰/۰٦۲۵$ باشد، مدل به طور اتوماتیک روش انتقال رسوب چسبنده را اعمال خواهد کرد. در این صورت باید

[1] Meyer-Peter and Muller
[2] Laursen
[3] Tofaleti
[4] Engeland and Hansen
[5] Acker and White
[6] Yang
[7] Parker



شکل ۳- هندسه مقطع عرضی ۱ بر اساس معادلات مختلف انتقال رسوب.



شکل ٤- هندسه مقطع عرضی ۲ بر اساس معادلات مختلف STDEP.

پارامترهای انتقال رسوب چسبنده (برای رس و سیلت) را اعمال نمود. یکی از پارامترهای انتقال رسوب چسبنده در مدل عددی برش حداکثر برای رسوب‌گذاری رس و سیلت (STDEP) می‌باشد.

چنانچه تنش برشی بستر (t_b) کوچک‌تر از مقدار STDEP باشد، رسوب‌گذاری اتفاق می‌افتد. با توجه به این که در مخازن سدها، سرعت جریان بسیار نزدیک است، می‌توان نتیجه گرفت که تنش برشی ایجاد شده در بستر مخزن بسیار کوچک‌تر و همواره از STDEP کوچک‌تر است و لذا همیشه با رسوب‌گذاری مواجه خواهیم بود. در سد مخزنی اکباتان مقدار STDEP=۰/۱ به مقادیر اندازه‌گیری شده از طریق نقشه‌برداری نزدیک‌تر می‌باشد (شکل ٤). پس از مشخص کردن مقادیر بهینه، فایل ورودی توسط مدل عددی اجرا گردیده است. در شاخه ابرو که رودخانه فصلی بوده، به تعداد ۱۸ مقطع عرضی و به فواصل مختلف از سد انتخاب و مدل عددی نیز برای این شاخه اجرا گردیده است. در شاخه ابرو و آبشینه هندسه مقاطع عرضی آن‌ها از مقطع ٤ به بعد یکسان است، لذا از این مقطع به بعد میزان رسوبات محاسبه شده در شاخه‌های ابرو به شاخه آبشینه اضافه شده است. بنابراین هندسه مقاطع عرضی پس از پنج سال و دو ماه (یک دوره ۱۸۸۷ روزه) در هر دو شاخه مشخص و نتایج زیر حاصل گردیده است:

۱- حجم کل رسوبات ته‌نشین شده در شاخه آبشینه و ابرو به ترتیب برابر ٤٥٢٤٢٠ و ٦٨٨٤٣ مترمکعب می‌باشد، در حالی که مقدار رسوبات اندازه‌گیری شده در هر دو

شاخه مخزن بنا بر هیدروگرافی مجدد مخزن برابر ٥٣٠٠٠٠مترمکعب می‌باشد [۲]. مقایسه ارقام نشان می‌دهد که میزان برآورد رسوب توسط مدل از دقت زیادی (در حدود ۹۸/۳٥) درصد برخوردار است.

۲- بنابر نتایج حاصل از مدل عددی ارتفاع رسوبات بستر مخزن سد اکباتان در فاصله ۱۱٤۰ تا ۱٤٤۰ متری از دیواره‌ی سد حدود ۳ متر ، در فاصله ٥۰۰ تا ۱۱٤۰ متری از دیواره‌ی سد حدود ۱/۷ متر و در فاصله‌ی کمتر از ٥۰۰ متر از دیوار سد حدود ۰/۸ متر می‌باشد.

پیش‌بینی درازمدت رسوب در سد مخزنی اکباتان

پس از واسنجی مدل عددی سعی شده است تا با بررسی عوامل مؤثر در میزان رسوب، پیش‌بینی درستی از رسوبات وارده به مخزن سد در درازمدت انجام گیرد و مدت زمانی که مخزن سد از رسوب پر می‌شود، محاسبه گردد. انجام این عمل به منظور ارائه یک راه حل مناسب برای حل مشکل رسوب‌گذاری درازمدت در مخزن سد ضروری است. برای پیش‌بینی عمر مفید باقی‌مانده سد، ابتدا باید توسط آنالیز سری‌های زمانی[1] میزان آبدهی رودخانه ورودی سد اکباتان تعیین شود. برای این منظور از مدل آماری ARIMA استفاده گردیده است. لازم به توضیح است که الگوی ضربی مدل ARIMA به صورت $(p,d,q) \times (P, D, Q)_T$ می‌باشد که p مرتبه اتورگرسیون غیر فصلی، d مرتبه تفاضلی غیرفصلی مورد نیاز برای به دست آوردن سری ایستایی، q مرتبه میانگین متحرک غیر فصلی و P، D و Q مورد ذکر شده با مرتبه فصلی می‌باشند[٤]. معمولاً مدل‌هایی از این نوع ، رفتاری با دوره تناوب T دارند. با توجه به الگوی فصلی بودن دبی‌ها و مشاهده توابع خود همبستگی (A.C.F) و خودهمبستگی جزیی (P.A.C.F)، بهترین مدل برای تعیین آبدهی رودخانه‌های ورودی مخزن اکباتان در سال‌های آینده $(۰، ۱، ۳) \times (۰، ۰، ۱)_{۱۲}$ ARIMA انتخاب گردیده است [٤].

پس از تعیین میزان آبدهی رودخانه ورودی سد، با استفاده از دستور PR (کنترل خروجی برنامه) در فایل ورودی مدل عددی و پس از تعیین تعداد پله زمانی فاصله بین چاپ اطلاعات بعدی با قبلی، می‌توان در هر زمانی حجم رسوبات ته‌نشین شده، نحوه توزیع رسوبات در مقاطع عرضی، پروفیل طولی کف مخزن و پروفیل سطح آب را محاسبه نمود. طول عمر مفید سد که معمولاً معادل مدت زمانی است که حدود ۸۰ درصد حجم اولیه مخزن از رسوب پر می‌گردد، توسط مدل عددی قابل محاسبه می‌باشد . شکل ٥ میزان رسوبات ته‌نشین شده در سد مخزنی اکباتان از شروع بهره‌برداری در سال ۱۳٤۲ تا خاتمه عمر مفید سد را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل در سال ۱۳۹۸ حجم رسوبات ته‌نشین شده حدود ٦/٤میلیون مترمکعب می‌باشد، در این صورت حدود ۸۰ درصد حجم اولیه مخزن در زمان طراحی (۸میلیون مترمکعب) از رسوب پر خواهد شد.

نتایج و بحث

نتایج حاصله از مطالعه و کاربرد مدل عددی GSTARS 2.0 برای برآورد و نحوه‌ی توزیع رسوب در سد مخزنی اکباتان به شرح زیر است :

۱- با افزایش تعداد مقاطع عرضی، حجم رسوبات ته‌نشین شده و دقت نتایج حاصل از مدل، افزایش می‌یابد.

۲- براساس محاسبات انجام شده توسط مدل عددی، حجم فعلی مخزن سد اکباتان در خرداد ۱۳۸۰، معادل ۳/۳۹ میلیون مترمکعب می‌باشد. این حجم نسبت به حجم اولیه مخزن در زمان طراحی در حدود ٤/٦۱ میلیون مترمکعب اختلاف نشان می‌دهد. در این صورت از بدو بهره‌برداری در سال ۱۳٤۲ تاکنون ٤/٦۱ میلیون مترمکعب آن توسط رسوبات پر شده است. به عبارت دیگر، ٥۷/٦ درصد حجم مخزن توسط رسوبات جایگزین پر گردیده است.

۳- با توجه به نتایج حاصل از مدل عددی، به طور متوسط شیب رسوبات بستر از ابتدا تا انتهای مخزن سد اکباتان در حدود ۱/٦۳ درصد محاسبه شده است. کمترین درصد شیب بستر مخزن در فاصله ۱۱٤۰ تا ۱٤٤۰ متری از دیواره سد و حدود ۰/٥٤ درصد در شاخه آبشینه می‌باشد.

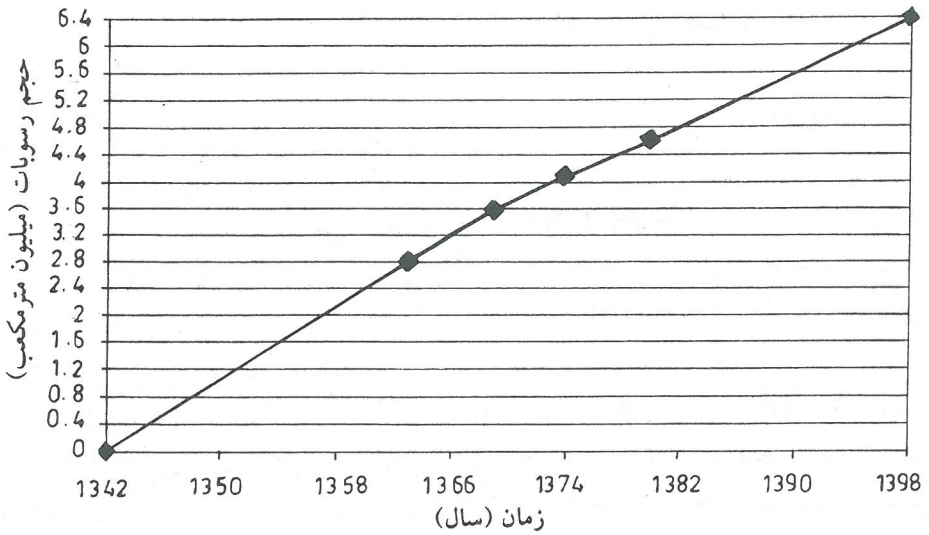
٤- بر اساس محاسبات مدل عددی، مدت زمانی که مخزن سدن از رسوب پر می‌گردد، حدود ٥٦ سال محاسبه شده است. بنابراین تقریباً بعد از ۱۸ سال دیگر یعنی در

[1] Time Series Analysis

سال ۱۳۹۸ عمر مفید به اتمام خواهد رسید. در این صورت محاسبه عمر مفید سد با پیش‌بینی‌های اولیه طراحی سازگار نیست.

۵- بنابر نتایج حاصل از مطالعه مدل عددی، این گونه استنباط می‌شود که افت سالیانه حجم مخزن سد اکباتان از شروع بهره‌برداری تا خاتمه عمر مفید سد حدود ۱/۴۲ درصد می‌باشد. در حالی که طبق نظریه‌ی کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ (ICOLD، ۱۹۸۸) متوسط افت ذخیره مخازن سدها به میزان یک درصد در سال است. مقایسه ارقام فوق نشان می‌دهد که افت سالیانه حجم مخزن سد اکباتان از مقدار معمول افت مخزن در سدها بیشتر است.

۶- برای جلوگیری از پر شدن مخزن سد اکباتان از رسوبات می‌توان خصوصیات فیزیکی حوضه و سایر پارامترهای مؤثر در رسوب خیزی حوضه آبریز را با فعالیت‌های آبخیزداری تغییر داد. با توجه به مؤثر نبودن فعالیت‌های آبخیزداری در کوتاه مدت، استفاده از نتایج مدل عددی برای شست و شوی رسوبات و لایروبی مخزن بسیار مؤثر است.



شکل ۵- پیش‌بینی میزان حجم رسوبات ته‌نشین شده در سد مخزنی اکباتان.

منابع و مراجع

۱- سازمان تحقیقات منابع آب،(۱۳۶۹). *"هیدروگرافی سد اکباتان"*، نشریه ۱۱۸. صفحات ۱۰-۹

۲- مرکز تحقیقات آب،(۱۳۷۵). *"رسوب‌سنجی و رسوب‌شناسی مخزن سد اکباتان"*، نشریه شماره ۳۰۹. صفحات ۳۹-۱۸

3- Lopez, J.L. (1978). *"Mathematical Modeling of Sediment Deposition in Reservoirs"*, Hydrology Paper, Colorado Univ.

4- Salas, J.D. and Delleur, J.W. (1980). *"Applied Modeling of Hydrologic Time Series"*, PP.200-220.

5- Molinas, A. (1983). *"Application of Stream Tube Computer Model to Lock and Dam"*, No. 26 Replacement Project, Colorado State University, Civil Engineering Department, CER 83-84.

6- Trevino, M.A. and Yang, C.T. (1998). "*Computer Program Users, Manual for GSTARS 2.0"*, U.S.Bureau of Reclamation, Denver, Co.

7- Song, C.C.S. and Yang, C.T. (1982). *"Minimum Energy and Energy Dissipation Rate"*, Journal of the Hydraulics Div., ASCE., 108, (5).

8- Sharghi, A., (1994). *"Reservoir Sedimentation"*, Katholieke University of leuven. PP. 15-100.

9- USBR (1987). *"Design of Small Dams"*, Denver, Colorado 3rd Edition.

10- Yang, C.T. *"Sediment Transport : Theory and Practice"*, Mc Graw-Hill Inc., New York, NY.

11- Yang, C.T. and Molinas, A. (1996). *"Sediment Transport in the Yellow River"*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 122, No. 5, PP. 10-25

12- Han, Q. and He, M. (1990). *"A Mathematical Model for Reservoir Sedimentation and Fluvial Processes"*, International Journal of Sediment Research, 5(2): 43-84.