شبیه سازی رسوبگذاری در مخازن سدهای ذخیره‌ای با استفاده از مدل لوله جریان "مطالعه موردی مخزن سد کارده"

محمد تقی اعلمی — مربی و دانشجوی دورهٔ دکتری، گروه عمران، دانشکدهٔ فنی، دانشگاه تبریز
یوسف حسن زاده — استاد گروه عمران، دانشکدهٔ فنی، دانشگاه تبریز
احمد فاخری فرد — استادیار گروه آبیاری، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه تبریز

چکیده

در این مطالعه مدل لولهٔ جریان برای شبیه‌سازی رودخانه‌های آبرفتی بمنظور بررسی رسوبگذاری مخازن سدهای ذخیره‌ای بهکار گرفته شده و مطالعه موردی روی مخزن سد کارده انجام یافته است. نتایج حاصل از اجرای این مدل با هیدروگرافی انجام یافته در سال ۱۳۷۵ روی مخزن سد مزبور و مدل Hec-6 مقایسه گردیده و نشان داده شده است که این مدل ضمن دارا بودن خصوصیات و کارآئی مدلهای ریاضی یک بعدی به دلیل در نظرگرفتن شرائط جریان بهصورت نیمه دو بعدی از دقت بالائی برخوردار می‌باشد. همچنین در کاربرد این مدل برای مخازن سدها بهدلیل اهمیت تأخیر مکانی و زمانی، انتقال نامتعادل رسوبات مورد استفاده قرار گرفته و حساسیت بسیار شدید آن به ضریب بازیافت فرسایش و رسوبگذاری نشان داده شده است. کالیبراسیون مدل با هیدروگرافی انجام یافته در مخزن سد نشان می‌دهد که اگر روند رسوبگذاری بههمین منوال ادامه یابد طی سی سال از بهره‌برداری سد حدود ۷۰٪ حجم مخزن سد از رسوبات پر شده و عمر مفید آن عملاً به پایان خواهد رسید.

کلمات کلیدی: رسوبگذاری در مخازن، لوله جریان، انتقال نامتعادل رسوب، سد کارده.

Simulation of Reservoir Sedimentation Using Stream Tube Model "Case study: Kardeh Dam"

M.T. Aalami and Y. Hassanzadeh
Dept. of Civil Eng., Faculty of Eng., Tabriz University, Tabriz, Iran
A. Fakheri Fard — Dept. of Irrigation & Hydraulic Eng., Faculty of Agr., Tabriz University, Tabriz, Iran

Abstract

In the present study, stream tube model for alluvial river simulation has been applied for reservoir sedimentation of storage dams and a case study has been performed on kardeh dam reservoir. The obtained results have been compared with the hydrography survey held in 1995 on the site of this dam reservoir and also compared with results obtained by the Hec-6 model. The comparsion has shown that the model has efficiency and characteristics of a one dimensional mathematical models and it is more accurate because of considering semi two dimensional conditions of the flow. Also in the application of this model for reservoirs the nonequilibrium sediment transport has been used because of the importance of spatial – delay and/or time-delay. The high sensivity of this model has been shown for recovery factor of deposition and entrainment. The calibration of the model with the performed hydrography in the reservoir of kardeh dam has been shown. If the sedimentation process continues in this manner during the next 30 years period, 70 percent of the reservoir capacity will be filled with sediment.

Key words: Reservoir sedimentation, Stream tube, Nonequlibrium sediment transport, Kardeh dam.

۱- مقدمه

توانائی پیشبینی دقیق شدت رسوبگذاری مخازن سدهای ذخیرهای در برنامهریزی ظرفیت موردنیاز و تعبیه محل مناسب دریچههای برداشت آب طی مراحل طراحی و بهرهبرداری از اهمیت ویژهای برخوردار میباشد. عمر مفید این سدها برمبنای جریان متوسط رسوبات ورودی و ضریب گیرش(۱) مخازن آنها تعیین میشود. همچنین تغییرات رقوم بستر و رسوبات آن در مدت بهرهبرداری بهطور متناوب از طریق هیدروگرافی اندازهگیری میشود. امروزه استفاده از مدلهای ریاضی جهت شبیهسازی فرآیند رسوبگذاری مخازن با دقت قابل قبول و با صرف وقت و هزینه کمتر، مورد توجه بیشتری قرار گرفته است.

علیرغم اهمیت مدلهای ریاضی دو و سه بعدی در بسیاری از کارهای مهندسی، مدلهای یک بعدی از جایگاه ویژهای برخوردار میباشند. این مدلها برای طول قابل توجهی از مسیر رودخانهها و مخازن، فعل و انفعالات بستر را تحت تأثیر عوامل هندسی، هیدرولوژیکی و هیدرولیکی شبیهسازی نموده و پیشبینیهای لازم را ارائه مینمایند. از مدلهای یک بعدی متداول در این زمینه میتوان به مدلهای HEC-6 [۱]، MIKE-11 [۲] و FLUVIAL-12 [۳] اشاره نمود. از دیگر کارهای انجام یافته در این ارتباط تحلیل یک بعدی پدیده رسوبگذاری در یک مدل هیدرولیکی میباشد [۱۲].

در موارد زیادی با استفاده از تئوری جت و چند لوله جریان دقت مدلهای یک بعدی بهحالت دو بعدی افزایش مییابد [۴ و ۵].

در این تحقیق مدل لوله جریان برای شبیهسازی رودخانههای آبرفتی(۲) با تکیه بر انتقال نامتعادل رسوب(۳) بهمنظور بررسی روند رسوبگذاری مخازن سدهای ذخیرهای بهکار گرفته شده است [۶ و ۷] مطالعه موردی در مخزن سد کارده مشهد انجام شده و نتایج حاصل از مدل با هیدروگرافی انجام یافته پس از گذشت نه سال از آبگیری مخزن سد و مدل ریاضی Hec-6 مقایسه گردیده است.

1- Trap Efficiency
2- Generalized Stream Tube model for Alluvial River Simulation (GSTARS)
3- Nonequilibrium Sediment Transport

۲- مدل ریاضی هیدرو دینامیک و انتقال رسوب

در مدلهای ریاضی انتقال رسوب، اساس کار تعیین هیدرودینامیک جریان و بهدنبال آن تحلیل وضعیت رسوب میباشد. این مدلها شامل دو بخش هیدرودینامیک جریان و تحلیل رسوب هستند. در بخش هیدرودینامیک معادلات حاکم حل شده و براساس دقت مورد نیاز و ابعاد مسئله وضعیت جریان مشخص میگردد. در قسمت تحلیل رسوب با معلوم بودن وضعیت جریان معادلات حاکم بر حمل رسوب مورد استفاده قرار گرفته و پروفیل بستر، غلظت رسوب، بار معلق و بار کل در هر نقطه تعیین میگرد [۸].

معادلات دیفرانسیل با مشتقات نسبی یک بعدی جریان متغیر تدریجی غیر دائمی در آبراهههای طبیعی آبرفتی عبارتند از:

الف) معادلهٔ حرکت برای جریان مخلوط آب - رسوب

ب) معادلهٔ پیوستگی جریان آب

ج) معادلهٔ پیوستگی رسوب

دستگاه معادلات برای جریان غیر دائمی با در نظر گرفتن اصل بقای جرم برای آب و رسوب و اصل بقای اندازه حرکت در طول بینهایت کوچک بین دو مقطع از آبراهه نوشته میشود.

$$\frac{\partial(\rho Q)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho Q v)}{\partial x}+g A\frac{\partial(\rho y)}{\partial x} = \rho g A(S_o - S_f + D_L) \quad (۱)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{\partial A}{\partial t}-q_w=0 \quad (۲)$$

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x}+(1-\lambda)\frac{\partial A_d}{\partial t}+\frac{\partial A_s}{\partial t}-q_s=0 \quad (۳)$$

که در آن A مقطع نهائی جریان، A_d حجم رسوبات انباشته شده روی بستر در واحد طول کانال، A_s حجم رسوبات معلق در واحد طول کانال، g شتاب ثقل، D_L افت اندازه حرکت ناشی از شاخهٔ جانبی، λ تخلخل رسوبات بستر، Q دبی آب، Q_s دبی رسوب، q_s جریان جانبی رسوب در واحد طول کانال،

ورودی (+)، خروجی (-)، q_w جریان جانبی آب در واحد طول کانال، ورودی (+)، خروجی (-)، S_f شیب اصطکاک، S_o شیب بستر، t زمان، x طول افقی، v سرعت جریان، y عمق جریان و ρ جرم مخصوص آب می‌باشد.

کاربردهای عملی مدلهای ریاضی بسترهای فرسایشپذیر مبتنی بر روش تفاضلات محدود بوده و عبارت از جایگزین نمودن دستگاه معادلات (۱) الی (۳) توسط یک سیستم از معادلات جبری می‌باشد. این روش بهدو صورت ممکن است عملی شود، روش مزدوج[1] که سه معادله فوق را با هم و به‌طور همزمان حل می‌نماید و روش غیر مزدوج[2] که معادلات (۱) و (۲) مربوط به فاز مایع را جدا از معادلة (۳) مربوط به فاز حمل رسوب تحلیل می‌نماید [۸].

۳- مدل لوله جریان برای شبیه سازی رودخانههای آبرفتی

در این مدل هدف شبیهسازی شرائط جریان بهصورت نیمه دو بعدی و تغییرات هندسی ایجاد شده در بستر آبراههها بهصورت نیمه سه بعدی می‌باشد. در این مدل مفهوم لوله جریان بمنظور تقریب نیمه دو بعدی از ناحیة جریان بهکار می‌رود از اینرو علاوه بر تغییرات در طول جریان، تغییرات عرضی هیدرولیک جریان و رسوب در مقطع نیز در نظر گرفته می‌شود. ابتدا نیمرخ سطح آب با استفاده از معادلات انرژی یا ممنتم برای جریان شبه دائمی محاسبه می‌شود. در جریان شبه دائمی، هایدروگراف جریان با قطعات تقریبی با دبی ثابت جایگزین شده و در طی هر دبی ثابت معادلات جریان دائمی برای محاسبات نیمرخ سطح آب بهکار رفته و معادلات انرژی براساس روش گام به گام استاندارد حل می‌شوند و در صورتی که تغییر رژیم جریان از زیر بحرانی به فوق بحرانی و برعکس وجود داشته باشد معادلة ممنتم بهکار می‌رود. سپس کانال به تعدادی لوله جریان با مشخصات زیر تقسیم می‌شود [۶].

الف) دبی کل جریان بهطور مساوی در داخل لولهها جریان می‌یابد.

ب) لولههای جریان با دیوارههای قائم فرضی محصور می‌شوند.

ج) دبی جریان در طول هر لوله ثابت می‌باشد.

د) تبادل جریان رسوب و آب بین لولههای جریان وجود ندارد.

1- Coupled Solution
2-Uncoupled Solution

با اعمال فرضیات ساده کنندة زیر محاسبات روندیابی رسوب با استفاده از معادلة پیوستگی رسوب، معادلة (۳)، انجام می‌پذیرد:

الف - تغییر غلظت رسوبات معلق در مقطع نسبت به تغییرات در بستر رودخانه بسیار کوچک می‌باشد، یعنی:

$$\frac{\partial A_S}{\partial t} << (1-\lambda)\frac{\partial A_d}{\partial t} \qquad (۴)$$

ب - در طول هر مرحلة زمانی، پارامترهای تابع حمل رسوب برای مقطع ثابت فرض می‌شود:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial t} = 0 \quad \text{یا} \quad \frac{\partial Q_s}{\partial x} = \frac{d\,Q_s}{d\,x} \qquad (۵)$$

گفتنی است که فرضیات فوق هنگامی قابل اعمال است که تغییرات جزئی در هندسه مقطع وجود داشته باشد یعنی فرسایش و رسوبگذاری قابل توجهی در هر مرحلة زمانی اتفاق نیفتد که این فرض امکان مجزا نمودن محاسبات روند جریان آب و رسوب را فراهم می‌آورد. در عمل این شرط را فقط می‌توان با انتخاب مرحلة زمانی به اندازة کافی کوچکتر، ایجاد نمود.

با استفاده از فرضیات فوق و صرفنظر نمودن از جریان جانبی، معادله (۳) بهصورت زیر در می‌آید:

$$(1-\lambda)\frac{\partial A_d}{\partial t} + \frac{d\,Q_s}{d\,x} = 0 \qquad (۶)$$

این معادله برای هر لوله جریان بهطور مجزا حل میشود.

برای حل عددی معادلة (۶) باید آنرا گسسته نمود. ابتدا تغییر در حجم رسوبات بستر ناشی از فرسایش و رسوبگذاری، ΔA_d، بهصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\Delta A_d = (a P_{i-1} + b P_i + c P_{i+1})\Delta Z_i \qquad (۷)$$

که P محیطتر شده، ΔZ تغییر رقوم بستر (مثبت برای رسوبگذاری و منفی برای فرسایش) i نمایة مقطع و a، b و c ثابتهای اختیاری هستند که شرط ذیل را باید ارضاء کنند:

$$a + b + c = 1 \qquad (۸)$$

حالتهای مختلفی برای انتخاب a، b و c وجود دارد بهعنوان مثال $a = c = 0$ و $b = 1$ نشان می‌دهد که محیطتر شده مقطع i بیانگر محیطتر شده کل طول مطالعاتی می‌باشد و $b = c = 0.5$ و $a = 0$ نقطة انتهائی پائین دست طول مطالعاتی را نشان می‌دهد.

در عمل مشاهده شده است که اگر $b=c=0.5$ و $a=0$ باشد بیانگر اهمیت دادن به انتهای پائین دست طول مطالعاتی می‌باشد. گفتنی است که اهمیت دادن به انتهای پائین دست پایداری محاسبات را اصلاح می‌کند.

در این مدل $a=c=0.25$ و $b=0.5$ در نظر گرفته شده است ولیکن می‌توان آنرا با اعمال شرط معادله (۸) تغییر داد.

با استفاده از معادلهٔ (۷) ترمهای مشتق جزئی بهصورت زیر تقریب می‌یابند:

$$\frac{\partial A_d}{\partial t} = \frac{\Delta A_d}{\Delta t} = \frac{(a\,P_{i-1} + b\,P_i + c\,P_{i-1})\,\Delta z_i}{\Delta t} \qquad (۹)$$

$$\frac{d\,Q_s}{d\,x} = \frac{Q_{s_i} - Q_{s_{i-1}}}{\frac{1}{2}(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})} \qquad (۱۰)$$

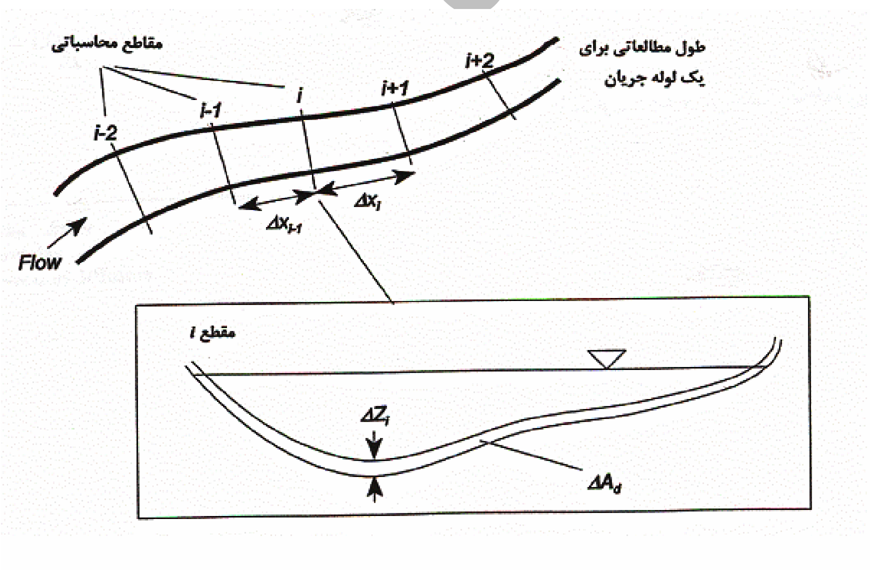
و از آنجا خواهیم داشت:

$$\Delta z_{i,k} = \frac{2\,\Delta t\,(Q_{s_{i-1,k}} - Q_{s_{i,k}})}{\eta_i\,(a\,P_{i-1} + b\,P_i + c\,P_{i+1})\,(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})} \qquad (۱۱)$$

که در آن k شاخص اندازهٔ هر بخش، η_i حجم رسوبات در واحد لایهٔ بستر در مقطع i و $Q_{s_{i,k}}$ دبی حجمی رسوب محاسبه شده برای اندازهٔ k در مقطع i می‌باشد. رقوم کل تغییر بستر برای لوله جریان در مقطع i، Δz_i، با توجه بهشکل (۱) بهصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta Z_i = \sum_{k=1}^{nsize} \Delta Z_{i,k} \qquad (۱۲)$$

که در آن $nsize$ تعداد کل بخشهای دانهبندی در مقطع i می‌باشد. سطح مقطع جدید جریان در مقطع i که باید در تکرار بعدی مورد استفاده قرار گیرد از مجموع تغییر رقوم بستر با رقوم قبلی تعیین می‌شود.



شکل ۱- نمایش متغیرهای معادلات روندیابی رسوب برای لوله جریان منفرد

۴- انتقال نامتعادل رسوب

در رودخانهها و آبراههها غالباً فرض برابری بار مواد بستر با ظرفیت حمل رسوب قابل قبول می‌باشد که از این حالت تحت عنوان انتقال بار مواد بستر در حالت تعادل نام برده می‌شود. اما تحولاتی وجود دارند که در آنها تأخیر مکانی[1] و یا تأخیر زمانی[2] حائز اهمیت می‌باشند. رسوبگذاری مخازن و تهنشینی

1- Spatial - Delay
2- Time-Delay

رسوبات در مصب رودخانهها تحولات نامتعادل میباشند. مطالعات آزمایشگاهی نشان میدهند که پس از طی مسافت قابل توجهی، جریان آب زلال ورودی بهقطعه مورد مطالعه از لحاظ غلظت رسوبات به حالت اشباع میرسد [۹].

برای مدل نمودن این پدیده از معادلهٔ انتقال - انتشار[۳] استفاده میشود. این معادله بهصورت زیر نوشته میشود:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+w\frac{\partial C}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}[D\ \frac{\partial C}{\partial x}] \qquad (۱۳)$$

که در آن C غلظت رسوبات معلق، w سرعت سقوط ذرات و D ضریب انتشار میباشد. این معادله در حالت دائمی (متوسط زمانی) بهصورت زیر خواهد بود:

$$-wC=D\frac{dC}{dx} \qquad (۱۴)$$

از حل این معادله نتیجه زیر حاصل میشود:

$$\frac{C}{C_{x_\circ}}=exp[-w\int_{x_\circ}^{x}\frac{dx}{D}] \qquad (۱۵)$$

C_{x_0} غلظت رسوبات در طول مبنای x_0 را نشان میدهد.

با فرض اینکه C^* ظرفیت حمل رسوب باشد توزیع غلظت در هر مقطع $C-C^*$ خواهد بود. اگر با استفاده از معادلهٔ (۱۵) توزیع غلظت را در طول جریان برای دو مقطع متوالی i و $i-1$ به فاصلهٔ Δx ($x_\circ=0$ در ابتدای قطعه) در نظر بگیریم خواهیم داشت.

$$(C_i-C_i^*)=(C_{i-1}-C_{i-1}^*)\exp[-w\int_{o}^{\Delta x}\frac{dx}{D}] \qquad (۱۶)$$

و یا

$$(C_i-C_i^*)=(C_{i-1}-C_{i-1}^*)\exp[\frac{-w\,\Delta x}{D}] \qquad (۱۷)$$

برای یافتن مقدار غلظت در مقطع i یعنی C_i لازم است بهمقدار حاصل از رابطهٔ فوق، مقدار بار معلق انتقال یافته در اثر توان جابجائی سیال نیز اضافه شود، برای این منظور خواهیم داشت [۱۰]:

3- Convection-Diffusion

$$C_i=C_i^*+(C_{i-1}-C_{i-1}^*)\exp[\frac{-\alpha\,w\,\Delta x}{q}]+$$
$$(C_{i-1}^*-C_i^*)(\frac{q}{\alpha\,w\,\Delta x})[1-\exp(-\frac{\alpha\ w\,\Delta x}{q})] \qquad (۱۸)$$

در معادله اخیر q دبی در واحد عرض کانال و α پارامتر بدون بعد بوده که نقش مبدل دبی به ضریب انتشار را بازی میکند. این معادله در مدل برای هر بخش از اندازهٔ ذرات رسوبی به کار برده شده است. پارامتر α ضریب بازیافت[۱] بوده و مقدار آن برای رسوبگذاری 0.25 و برای فرسایش 1.0 توصیه شده است [۱۰].

۵- شبیهسازی مخزن سد کارده

سد کارده در ۴۰ کیلومتری شمال مشهد بر روی رودخانه کارده در حوضه آبریز فرعی کشف رود - هریرود از حوضه اصلی قراقوم ساخته شده است. کار ساخت سد از سال ۱۳۶۱ آغاز و در سال ۱۳۶۶ خاتمه یافته است. این سد از نوع بتنی دو قوسی با طول تاج ۱۴۴ متر، ارتفاع از پی ۶۷ متر و گنجایش مفید مخزن ۳۵ میلیون متر مکعب میباشد.

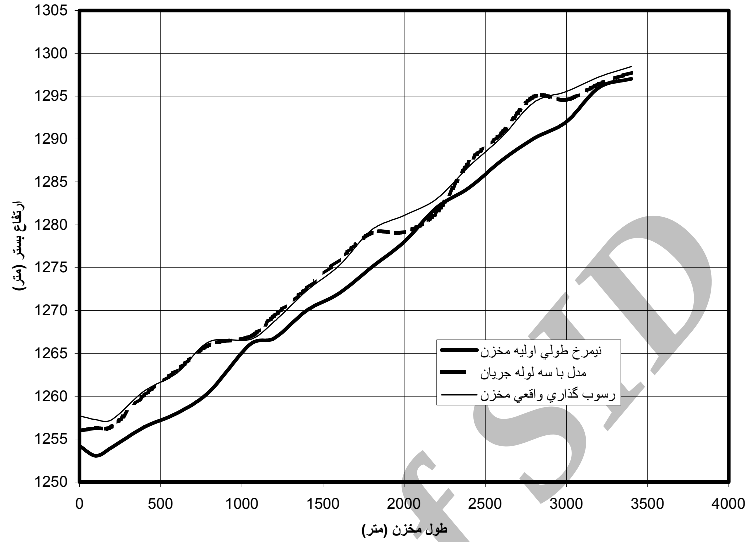
در سال ۱۳۷۵ عملیات هیدروگرافی مخزن انجام یافته و نقشه توپوگرافی مخزن رسوبگذاری شده با دقت قابل قبولی تهیه گردیده است [۱۳]. اطلاعات مورد نیاز مدل در یک فایل ورودی در سه بخش ژئومتری، هیدرولوژی و رسوب تنظیم شده است. ژئومتری مخزن از طریق نوزده مقطع عرضی به فواصل تقریبی ۲۰۰ متر از روی نقشه توپوگرافی اولیه آن با مقیاس ۱:۲۰۰۰ برداشت شده است. نیمرخ عرضی هر مقطع بر حسب فاصله از نقطهٔ مبنا در ساحل سمت چپ در جهت جریان و کد ارتفاعی بستر و موقعیت آن برحسب فاصله از سد مشخص گردیده است. دبی جریان با استفاده از دادههای ایستگاه کارده بالادست سد بهصورت ماهانه و در مواردیکه نوسانات دبی شدید بوده بهصورت روزانه در مدل وارد شده است. منحنی دبی - اشل اولین مقطع در ورودی مخزن بهعنوان شرط مرزی مدل برای محاسبات پروفیل سطح آب در نظر گرفته شده است. دبی رسوب بهازای دبی جریان از طریق بار معلق اندازهگیری شده در ایستگاه فوق تنظیم شده و محاسبات بار بستر نیز براساس معادلهٔ یانگ [۱۱] انجام شده است. دانهبندی مواد متشکله بستر در مقاطع مختلف

1- Recovery Factor

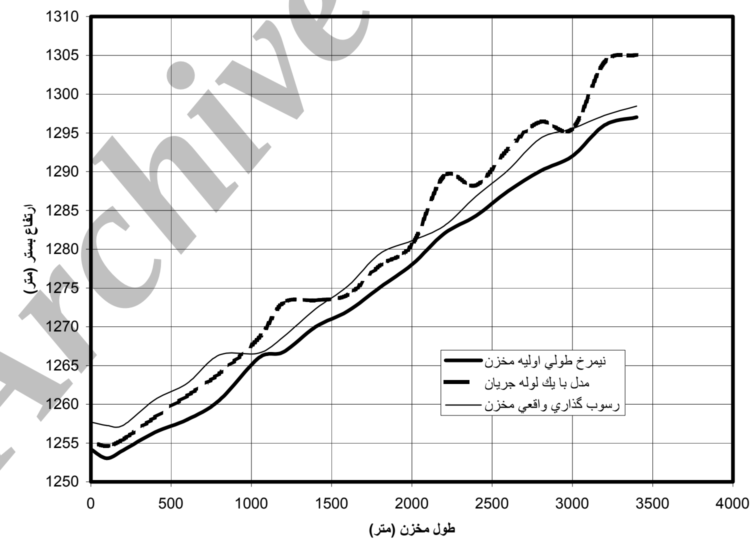
و مواد معلق بهازای دبیهای متفاوت، درجهٔ حرارت متوسط ماهانه آب رودخانه، ضریب زبری بستر و تغییرات تراز آب در مخزن از دیگر اطلاعات بهکار رفته در مدل میباشند.

۶- تحلیل و بررسی نتایج حاصل از اجرای مدل

نتایج محاسبات نیمرخ طولی بستر مخزن سد کارده در شکلهای (۲) و (۳) پس از ۹ سال نشان داده شده است.



شکل ۲- مقایسهٔ رسوبگذاری واقعی مخزن سد کارده پس از ۹ سال با نتایج حاصل از مدل با سه لوله جریان



شکل ۳- مقایسهٔ رسوبگذاری واقعی مخزن سد کارده پس از ۹ سال با نتایج حاصل از مدل با یک لوله جریان

همانطور که مشاهده میشود مدل با سه لوله جریان تطابق خوبی را بین دادههای مشاهداتی و محاسباتی نشان میدهد و مقایسه آن با نتیجه حاصل از اجرای مدل با یک لولهٔ جریان بیانگر افزایش دقت مدل در اثر افزایش تعداد لولههای جریان میباشد.

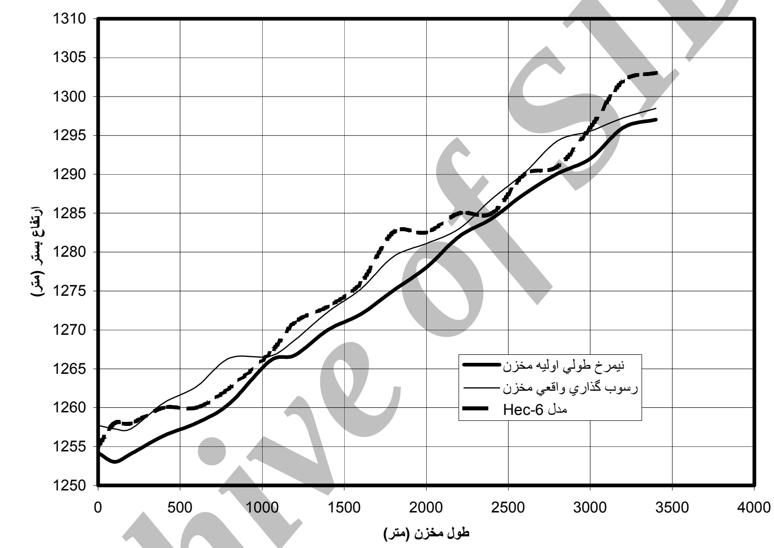
چون در این حالت تغییرات عرضی سرعت جریان نیز در نظر گرفته میشود. همچنین بررسی نتایج مدل با سه لوله جریان

نشانگر آن است که در قسمت پائین دست دلتای حاصل از رسوبات در ورودی مخزن اختلاف جـزئی بـا رسوبگـذاری واقعـی مخزن وجود دارد و مدل، فرسایش نسبتاً کمی را نشان می‌دهد که این اختلاف ناشی از زیاد بودن شیب دلتا می‌باشد.

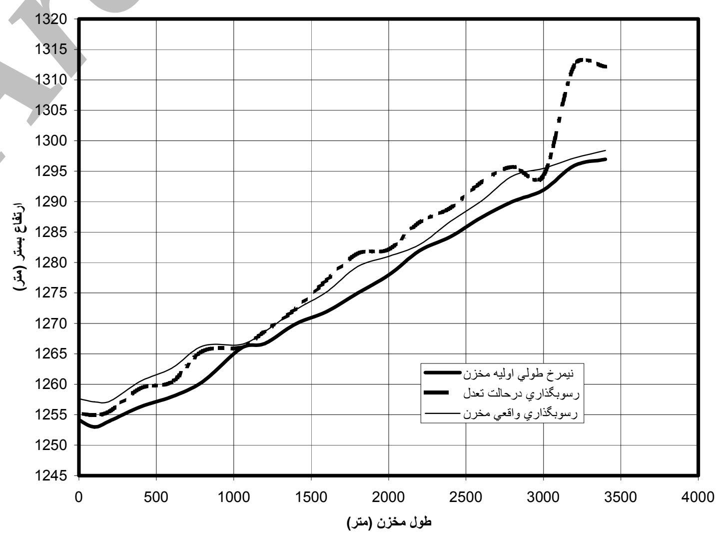
در فاصلهٔ ۱۰۰۰ متری از سد نیز عمق رسوبات بهمیزان قابل توجهی در مدل مطابق با رسوبگذاری واقعی کاهش نشان می‌دهد که دلیل آن، کاهش مقطع جریان به علت تنگ شدگی شدید مخزن می‌باشد.

در شـکل (۴) نیمرخ رسوبـگذاری واقعـی مخزن پس از ۹ سال، با نتایج حاصل از اجرای مدل Hec-6 [۱۴] مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته که انطباق چندان رضایت بخشی را نشان نمی‌دهد.

بررسی نتایج حاصل از اجرای مدل در حالت انتقال متعادل رسوبات نشان داده شده در شکل (۵) بیانگر آن است که فرایند رسوبگذاری مخزن ترجیحاً باید در حالت نامتعادل مورد مطالعه قرار گیرد.



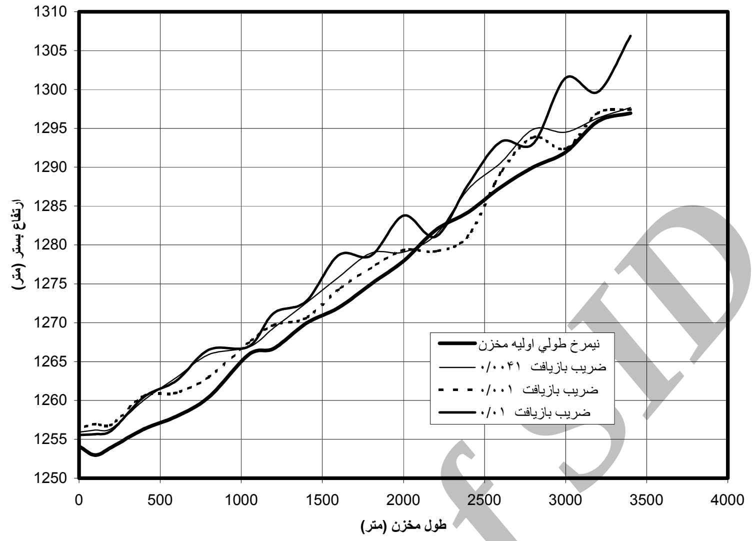
شکل ۴- مقایسهٔ رسوبگذاری واقعی مخزن سد کارده پس از ۹ سال با نتایج حاصل از مدل Hec-6



شکل ۵- مقایسهٔ رسوبگذاری واقعی مخزن سد کارده پس از ۹ سال با نتایج حاصل از مدل با سه لوله جریان و انتقال متعادل رسوبات

همچنین حساسیت شدید تغییر ضریب بازیافت رسوبگذاری برای انتقال نامتعادل رسوبات در شکل (۶) نشان داده شده که مقدار آن برررسی این مخزن حدود ۰/۰۰۴۱ برآورد گردیده است.

در جدول (۱)، روند رسوبگذاری در مخزن سد کارده و ضریب گیرش مخزن بر اساس نتایج حاصل از اجرای مدل در پایان هر سال آبی در فواصل زمانی ۶ ساله نشان داده شده است.



شکل ۶- بررسی حساسیت مدل لولة جریان به ضریب بازیافت انتقال نامتعادل رسوبات

جدول ۱- روند رسوبگذاری و کاهش حجم مخزن سد کارده در فواصل زمانی ۶ ساله

سال آبی	۱۳۷۳-۷۴	۱۳۷۹-۸۰	۱۳۸۵-۸۶	۱۳۹۱-۹۲	۱۳۹۷-۹۸	۱۴۰۳-۴	۱۴۰۹-۱۰
وزن رسوبات ورودی (میلیون تن)	۵/۱۲	۹/۲۰	۱۳/۳۳	۱۷/۲۳	۲۱/۰۵	۲۴/۵۳	۲۸/۱
حجم رسوبات ورودی (میلیون متر مکعب)	۶/۰۲	۱۰/۸۲	۱۵/۶۸	۲۰/۲۷	۲۴/۷۶	۲۸/۸۵	۳۳/۰۶
وزن رسوبات خروجی (میلیون تن)	۰/۸۲	۱/۵۶	۲/۲۷	۳/۰۳	۳/۸۵	۴/۷۸	۵/۶۳
ضریب گیرش مخزن (درصد)	۸۸	۸۷/۴	۸۷/۳	۸۶/۹	۸۶/۵	۸۵/۸	۸۵/۴
حجمباقیمانده مخزن (میلیون متر مکعب)	۳۱/۹۸	۲۷/۱۸	۲۲/۳۲	۱۷/۷۳	۱۳/۲۴	۹/۱۵	۴/۹۴
حجمباقیمانده مخزن (درصد)	۸۴/۱۵	۷۱/۵۳	۵۸/۷۳	۴۶/۶۶	۳۴/۸۴	۲۴/۰۷	۱۳

که در این مورد از دبی متوسط دراز مدت رودخانه استفاده شده است. با مراجعه به جدول یاد شده ملاحظه می‌شود که اگر رسوبگذاری در این مخزن مطابق نتایج حاصل از مدل، براساس وضعیت جریان و رسوبگذاری پیشبینی شده مبتنی بر دادههای

سالهای گذشته ادامه یابد، پس از گذشت حدود سي سال از آغاز بهرهبرداري، تقریباً ۷۰% حجم مخزن از رسوبات پر شده و سد مزبور عملاً به پایان عمر مفید خود خواهد رسید. در اینمورد لازم است تمهیدات لازم برای اجرای عملیات آبخیزداری و کنترل فرسایش در حوضه آبخیز این سد در نظر گرفته شود.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله مدل لوله جریان برای شبیهسازی رودخانههای آبرفتی جهت بررسی روند رسوبگذاری در مخزن سد کارده مشهد بهکار گرفته شده است.

مقایسه نتایج این مدل با رسوبگذاری واقعی مخزن حاصل از عملیات هیدروگرافی سال ۱۳۷۵ نشان میدهد که این مدل را میتوان با بهکارگیری انتقال نامتعادل رسوبات، در مورد مخازن سدها نیز بهکار برد و دقت این روش در صورت استفاده از لولههای جریان بیشتر، بهدلیل در نظر گرفتن تغییرات عرضی سرعت، از مدلهای یک بعدی بیشتر است. همچنین نشان داده شده است که در انتخاب ضرایب بازیافت انتقال نامتعادل رسوب، بهعلت حساسیت زیاد مدل باید دقت کافی مبذول نمود.

مراجع

[1] HEC-6, (1993). Scour and Deposition in Rivers and Reservoirs. User's Manual, U.S. Crops of Engineers.

[2] MIKE-11, (1992). River Training Morphology, A Computer Based Modelling System for Rivers & Channels. D.H.I.

[3] Chang, H.A., FLUVIAL-12, (1996) Generalized Computer Program, Mathematical Model for Erodible Channels. User's Manual, U.S.A.

[4] Morris,G.L. and J. Fan. (1997). Reservoir Sedimentation Handbook, Mc Graw-Hill.

[5] Sharghi. A. (1999). Mathematical Model for Reservoir Sedimentation, Case Study: Sefid-Rud Reservoir, IRAN. Proceedings of 4th Workshop on Sediment Problem In Large Dams, Held by Ircold.

[6] Molinas, A. and C.T. Yang. (1998). User's Manual for GSTARS 2.0 (Generalized Stream Tube Model for Alluvial River Simulation. Version 2.0) . USBR.

[7] Molinas, A. and C.T. Yang. (2002). User's Manual for GSTARS 2.1 (Generalized Stream Tube model for Alluvial River Simulation Version 2.1).USBR.

[8] U.S. Army Crops of Engineers. (1995). Engineering and Design Sedimentation Investigation of Rivers and Reservoirs. EM 1110-24000.

[9] Chen, Y.H. (1993). Overview of Modeling Sediment in Reservoirs. Notes on Sediment Management in Reservoirs, Federal Energy Regulatory Comission.

[10] Han, Q. and M .He. (1990). A Mathematical Model for Reservoir Sedimentation and Fluvial Processes. International Journal of Sediment Research, 5(2), IRTCES.

[11] Yang, C. T. (1996). Sediment Transport: Theory and Practice, McGraw-Hill Company, Inc., New York, NY.

[۱۲] حسن زاده، یوسف، اعلمی، محمد تقی، (۱۳۷۸)، مدل ریاضی رسوبگذاری در مخازن، مجلة دانشکدة فنی دانشگاه تبریز، شمارة ۲۳.

[۱۳] مرکز تحقیقات آب، (۱۳۷۵)، مطالعات رسوب سنجی و رسوب شناسی سدهای مخزنی کشور، رسوب سنجی و رسوب شناسی مخزن سد کارده.

[۱۴] مطهری، عبدالرضا، (۱۳۷۹)، شبیهسازی رسوبگذاری در مخازن سدها با استفاده از مدلهای یک بعدی و دو بعدی، پایاننامة کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی، دانشگاه علم و صنعت ایران.