

شبیه سازی یک بعدی آبشویی رسوب در مخازن سدها

روزبه آقا مجیدی*

دانشجوی دکتری، گروه سازه های آبی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات خوزستان.

* نویسنده مسئول مکاتبات: Roozbeh1381@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۰/۰۶/۱۲

تاریخ پذیرش: ۹۰/۰۸/۱۷

چکیده

کنترل رسوبات در مخازن سدها، یکی از موضوعات مهم در مدیریت مخازن سدها بوده و موجب افزایش تأثیر در جهت افزایش عمر مفید آنها می گردد. مخازن سدها به عنوان یک مانع، باعث تله اندازی رسوب، با راندمان بالا شده واز انتقال رسوب به رودخانه پایین دست، جلوگیری می کند. افزایش مقدار رسوبات در مخزن، باعث کاهش عمر مفید سدها و نیز کاهش استفاده از آنها می گردد. برای تخلیه قسمتی از رسوبات مخزن، روش های مختلفی مورد مطالعه قرار می گیرد. آبشویی رسوب در مخزن سد، به علت استفاده از انرژی جریان آب و نیز عدم نیاز به منبع انرژی اضافی، (مانند لایروبی) در مخازن مختلف سراسر دنیا مورد استفاده قرار گرفته است و از اولین گزینه ها در مدیریت و بهره برداری از سدها و مخازن می باشد. در این مقاله یک مدل ریاضی یک بعدی با جریان یکنواخت، در مورد آبشویی رسوب در مخزن سد، مورد مطالعه قرار گرفته است. این مدل با فرض داشتن پروفیل اولیه رسوب و نیز حل معادله پیوستگی رسوب و بر اساس روش تفاضل های محدود تهیه شده است و توانایی محاسبه پروفیل رسوب با زمان را دارد. هم چنین مقدار حجم رسوبات شسته شده و نیز حجم آب مخزن با گام های زمانی متفاوت در این مدل، محاسبه می گردد. این مدل برای داده های آزمایشگاهی و داده های واقعی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل در مقایسه با مقادیر واقعی، در حد رضایت بخشی بود. لازم به ذکر است که هم گرایی حاصل از تکرار در مدل پس از ۴۰ بار تکرار با خطای کمتر ۰.۰۰۰۰۱ روی داد. مقایسه نتایج این مدل با نتایج مدل HEC-6، مزیت این مدل وضعف مدل HEC-6، را در پیش بینی پروفیل بستر فرسایش یافته در اثر آبشویی هیدرولیکی نشان می دهد. مدل HEC-6، معمولاً جهت بررسی حرکت یک بعدی جریان رسوبات در مخازن و رودخانه ها، استفاده می گردد.

واژه های کلیدی: مدل عددی، آبشویی رسوب، مخزن، سد، مدل HEC-6.

مقدمه

در دهه‌های اخیر ساخت سدها افزایش یافته است، مخصوصاً در مناطق با اقلیم خشک و نیمه خشک که مقدار نرخ رسوب در آنها بیشتر می‌باشد (*Atkinson, 1996*). در سال ۱۹۰۰ تنها حدود ۴۲ سد بزرگ (بلندتر از ۵۰ متر) در دنیا وجود داشت. در حالی که تا سال ۱۹۸۶ بیش از ۳۹۰۰۰ سد بلند در اقصی نقاط دنیا شمارش شد (*Guan et al., 1991*). حفظ و نگهداری و نیز احیای سدها بیش از هر چیز دیگر، یک امر مهم تلقی شده و روز به روز بر اهمیت آن افزوده می‌گردد (*Stoesser, 1999*). دانشمندان و محققان به این نتیجه رسیده‌اند که ساخت سدهای جدید به علت نبود ساختگاه مناسب، مشکل‌تر از رسوب زدایی سدهای فعلی است (*Lai, 1994*).

سالیانه در حدود ۱٪ از کل حجم مخازن سدها در اثر رسوب گذاری کاسته می‌گردد (*Hsieh et al., 1999*). به همین دلیل بررسی روش‌های مناسب جهت تخلیه رسوب از مخازن سدها، مورد توجه محققین در سراسر دنیا قرار گرفته است. بر این اساس روش‌های متفاوتی پیشنهاد شده که یکی از آنها، آبشویی رسوبات است (*Cheng, 1992*).

در این زمینه از دهه ۶۰ میلادی، مدل‌های ریاضی و فیزیکی مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است (*Fan and Jiang, 1980*). از اولین آن‌ها می‌توان به مدل آزمایشگاهی برداشت رسوبات توسط *Scherlin* در سال ۱۹۸۷ اشاره نمود (*Kokobo et al., 1997*). مدل‌های عددی رسوب گذاری و آبشویی را توسعه داده و تأثیر عمل آبشویی برای مخازن کوچک در زیمباوه را مطالعه کردند (*White, and Betts, 1984*). *Peng and Niu* در سال ۱۹۸۷ و *Ju* در سال ۱۹۹۰، مدل پخشیدگی یک بعدی را در شبیه‌سازی حجم رسوب و تغییرات پروفیل بستر و عرض کانال، هنگام آبشویی ارائه دادند (*Guan (Scherlin, 1984)*). همکاران در سال ۱۹۹۱ نیز فرض کردند که فرسایش، بیشتر در کانال آبشویی روی می‌دهد و به همین جهت، روشی جهت بهینه کردن مدل خویش و بر اساس اطلاعات مخزن فنی‌ای ارائه نمودند (*Guan et al., 1991*).

مدل عددی و آزمایشگاهی در زمینه آبشویی با افت رقوم آب را بصورت مدلی ساده شده ارائه کردند (*Lai et al., 1996*). مدل‌های، دو بعدی و سه بعدی نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند (*Olsen, 1991*). لای در سال ۱۹۹۴ یک مدل حجم محدود دو بعدی غیر ماندگار و نیز مدل انتقال رسوب جهت شبیه‌سازی چگونگی شکل‌گیری کانال آبشویی، هنگام انجام عملیات را توسعه داد (*Lai et al., 1996*). مدل‌های سه بعدی متعددی در این زمینه وجود دارد که از حل معادلات ناوراستوکس در سه بعد و مدل‌های جریان متلاطم، استفاده می‌کنند (*Stoesser, 1999*). این مدل‌ها پیچیده بوده و نیاز به اطلاعات و زمان بیشتری دارند (*Atkinson, 1996*).

در خصوص مدل‌های سه بعدی، می‌توان به مدل سه بعدی سیالات محاسباتی *PHONICS* و نیز مدل *SSIIM* که توسط اولسن در سال ۱۹۹۶ تهیه و تا زمان حاضر نیز در حال تکمیل شدن است، اشاره نمود (*White and Betts, 1984*)، (*Olsen, 1996*). در سال ۲۰۰۳ از این مدل جهت بررسی سه بعدی جریان رسوب به هنگام انجام عملیات آبشویی رسوب، استفاده کرده است (*Peng and Niu, 1987; Olsen, 1991*).

در خصوص کنترل رسوبات قبل از ورود به مخزن، مطالعات مختلفی انجام پذیرفته است. به عنوان مثال، رویکرد نحوه مدیریت رسوب در ژاپن، کاملاً تغییر یافته است (*Williams and Wolman, 2007*). در خصوص نحوه تأثیر گذاری رسوبات رهاسازی شده بعد از عملیات فلاشینگ و نیز تغییرات کیفی، از سال ۲۰۰۶ میلادی، سیاست اروپائیان تغییر نموده است (*Tetsuro and Koichi, 2008*).

در زمینه آبشویی رسوبات، در ایران نیز مطالعات گسترده ای انجام گرفته است که از آن جمله می توان به: مطالعات زاور (۱۳۸۱) اشاره نمود که مدلی برای شبیه سازی میزان رسوبات خارج شده در اثر آبشویی ارائه داده است زاور (۱۳۸۱). هم چنین آقایان جعفری (۱۳۸۰) و نقشینه (۱۳۸۲) در زمینه آبشویی رسوبات موجود در مخزن سد، به وسیله مدل های آزمایشگاهی، مطالعاتی انجام داده اند جعفری (۱۳۸۰) و نقشینه (۱۳۸۲).

در زمینه مدل های عددی آبشویی رسوب در مخازن، کوكوبو و همکاران (۱۹۹۷). برای مخزن سد دشیدایرا در ژاپن، مدل عددی یک بعدی را ارائه دادند که میزان خروج رسوبات در اثر آبشویی را نشان می دهد (Peng and Niu, 1987).

در این تحقیق، مدلی یک بعدی، به زبان فرترن ارائه شده که معادله پیوستگی رسوب را با استفاده از تفاضل های محدود، حل می کند. نتایج حاصل از مدل، تغییرات رقوم بستر مخزن، در اثر آبشویی رسوبات در زمان های مختلف و نیز حجم تجمعی رسوبات خروجی از مخزن را ارائه می دهد.

مواد و روش ها

جهت تهیه مدل ریاضی، از زبان برنامه نویسی فرترن، استفاده شده است. معادلات حاکم در ارتباط با آبشویی رسوب به شرح ذیل است :

معادلات حاکم

در هنگام آبشویی رسوبات مخزن، لازم است که سرعت جریان، بالا باشد و به همین دلیل، سطح آب مخزن، پایین آورده می شود. بنابراین به عنوان تقریب جریان، جهت ساده سازی معادلات را، در هر گام زمانی، می توان دائمی و یکنواخت فرض نمود. برپایه همین فرض، در هر گام زمانی محاسباتی، برای جریان، عمق میانگین در نظر گرفته شده که بر اساس رابطه شزی محاسبه می شود (Ju, 1990). معادله اصلی مدل، معادله پیوستگی رسوب است که به صورت زیر بیان می شود:

$$(1-p) \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

که در آن:

x : فاصله طولی از دریچه

z : رقوم بستر

P : تداخل مواد رسوبی (درصد)

q_s : دبی حجمی رسوب در واحد عرض

در زمان انجام عملیات آبشویی، با افت رقوم آب، می توان غلظت حجمی رسوب جریان خروجی را به صورت تابعی از متغیرهای زیر بیان کرد (Lai et al., 1996).

$$C_s = F(u, h, g, \gamma, \gamma_s, \omega) \quad (2)$$

که در آن:

u : سرعت متوسط جریان

h : عمق آب

g : شتاب ثقل

γ_s : وزن مخصوص رسوب

ω : سرعت متوسط سقوط ذرات رسوب

γ : وزن مخصوص آب. رسوب

به وسیله آنالیز ابعادی، می توان غلظت حجمی جریان خروجی C_s را به صورت تابعی از پارامترهای بی بعد و به صورت زیر نشان داد.

$$C_s = f_2 \left(\frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma}, \frac{u^3}{g \cdot \omega \cdot h} \right) \quad (۳)$$

$$C_s = k_0 \left(\frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \cdot \left(\frac{u^3}{g \cdot \omega \cdot h} \right)^m \right) \quad (۴)$$

لازم به ذکر است در آنالیز ابعادی انجام پذیرفته شده، عدد رینولدز به علت عدم کم تاثیر بودن نیروهای حاکم، حذف گردیده است. m, k_0 ضرایبی هستند که بعداً با استفاده از واسنجی و مدل و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بدست آمدند. دبی رسوب خروجی برابر است با:

$$q_s = q \cdot C_s$$

که در آن:

q_s : دبی حجمی رسوب در واحد عرض

q : دبی در واحد عرض

از جایگزینی رابطه (۴) در (۵) فرمول شماره ۶ بدست خواهد آمد:

به جای رابطه $\frac{\gamma}{\gamma_s - 1}$ می توان از رابطه $\left(\frac{1}{s_g - 1} \right)$ که در آن s_g چگالی نسبی می باشد استفاده نمود.

$$s_g = \frac{\gamma_s}{\gamma} \quad (۵)$$

و در نتیجه رابطه (۵) به صورت ذیل در می آید.

$$q_s = u \cdot h \cdot k_0 \cdot \frac{1}{s_{g-1}} \cdot \left(\frac{u^3}{g \cdot \omega \cdot h} \right)^m \quad (۶)$$

$$q_s = \frac{K_0 u^{3m+1} h^{1-m}}{(s_g - 1) g^m \cdot \omega^m} \quad (7)$$

برای محاسبه سرعت، از رابطه شزی استفاده می‌شود:

$$u = C.R^{\frac{1}{2}}.S^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

که در آن:

R : شعاع هیدرولیکی، C ضریب زبری شزی و S : شیب است.

از آنجایی که دبی حجمی رسوب، با توجه به متغیر بودن غلظت حجمی رسوب به بعد مکان خود، نیز متغیر است، با فرض عریض بودن کانال ($R \cong h$) پس از جایگزینی u از رابطه شزی در رابطه ۷ خواهیم داشت:

$$q_s = \frac{K_0 C^{3m+1} S^{\frac{3m+1}{2}} h^{\frac{3+m}{2}}}{(s_g - 1) g^m \omega^m} \quad (9)$$

از رابطه (۹)، با فرض جریان یکنواخت، نسبت به x مشتق گرفته می‌شود. در نتیجه رابطه به صورت ذیل در خواهد آمد:

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} = \frac{K_0 \cdot C^{3m+1} \cdot h^{\frac{3+m}{2}}}{(s_g - 1) \cdot g^m \cdot \omega^m} \left(\frac{3m+1}{2} \right) S^{\frac{3m-1}{2}} \frac{\partial S}{\partial x} \quad (10)$$

از رابطه شزی:

$$h = \left(\frac{q}{CS^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (11)$$

با جایگزینی h از رابطه (۱۱) در رابطه (۱۰) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} = \frac{K_0 \cdot q^{\frac{m}{3}+1} \cdot C^{\frac{8}{3}m} (3m+1)}{(s_g - 1) \cdot g^m \cdot \omega^m \cdot 2} \cdot S^{\frac{4}{3}m-1} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \quad (12)$$

و شیب بستر بر حسب Z به صورت زیر بدست می‌آید.

$$S = - \left| \frac{\partial z}{\partial x} \right| \quad (13)$$

با مشتق گیری، رابطه فوق حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial z}{\partial t} - \beta \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 0 \quad (14)$$

که در آن β پارامتری است که جایگزین سایر متغیرها شده و بنام ضریب فرسایش پذیری، در معادلات استفاده می‌شود

(Kokobo et al., 1997). این رابطه در معادلات دیگر آبشویی رسوب در مخزن نیز استفاده شده است. (Hsieh and Shen, 1999)

$$\beta = \frac{K_0 q^{m/3+1} C^{8/3^m} (3m+1)}{2(1-p)(s_g-1)g^m \omega^m} S^{4/3^{m-1}} \quad (15)$$

ω ، به عنوان سرعت سقوط ذرات و به صورت تابعی از عدد رینولدز، محاسبه می‌شود.

حل عددی

معادله (۱۴) به علت غیر خطی بودن، حل تحلیلی ندارد. بنابراین معادله مذکور را با استفاده از یکی از روش‌های عددی، مانند: تفاضل‌های محدود یا المان‌های محدود، می‌توان حل نمود. در این تحقیق جهت حل معادله از روش‌های تفاضل‌های محدود، استفاده شده است. برای حل این دستگاه، شمای انقطاع بکار رفته، براساس روش کرانک- نیلکسن می‌باشد. ماتریس به دست‌آمده از انقطاع، معادله دیفرانسیل حاکم در نقاط مختلف، بوسیله الگوریتم توماس که قالب ماتریس‌های سه‌قطری می‌باشد، حل می‌شود. لازم به ذکر است استفاده از این شمای انقطاع، به صورت (شمای کرانک- نیلکسون) بدون شرط پایدار است (Lai et al., 1996).

نحوه تبدیل معادله (۱۴) به دستگاه معادلات، به شرح ذیل می‌باشد:

$$\frac{\partial z}{\partial t} - \beta \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = - \left| \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right| = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \quad (16)$$

$$\frac{z_{i-1}^{n+1} - z_i^n}{\Delta t} = (1-\theta) \left[\frac{\beta_i}{\Delta x^2} (z_{i-1}^n - 2z_i^n + z_{i+1}^n) \right] + \theta \left[\frac{\beta_i}{\Delta x^2} (z_{i-1}^{n+1} - 2z_i^{n+1} + z_{i+1}^{n+1}) \right] \quad (17)$$

که در آن θ ضریبی موسوم به ضریب کرانک - نیلکسن می‌باشد. چنانچه رابطه در معادله فوق ($\frac{\Delta t}{\Delta x^2} = \alpha$) در نظر گرفته شود، با

جایگزینی α در رابطه (۱۷) و با مرتب کردن جملات بر حسب Z حاصل خواهد شد.

$$A_i Z_{i-1}^{n+1} + \beta_i Z_i^{n+1} + C Z_{i+1}^{n+1} = D_i \quad (18)$$

$$A_i = (\alpha \cdot \theta \cdot \beta_i) \quad (19)$$

$$B_i = (-2\alpha \cdot \theta \cdot \beta_i - 1) \quad (20)$$

$$C_i = (\alpha \cdot \theta \cdot \beta_i) \quad (21)$$

$$D_i = -\alpha(1-\theta) \cdot \beta_i \cdot [z_{i-1}^n - 2z_i^n + z_{i+1}^n] - Z_i^n \quad (22)$$

$$\beta_i = \frac{K_0 \cdot g^{m/3+1} \cdot C^{8/3^m} (3m+1)}{2(1-p)(Sg-1) \cdot g^m \cdot \omega^m} \left(\frac{Z_i^n - Z_{i-1}^n}{\Delta x} \right)^{4/3^{m-1}} \quad (23)$$

شرایط مرزی

بالا دست

در اینجا شرایط نیومن مورد استفاده قرار گرفته است.

با جایگزینی h از رابطه (۱۱) در رابطه (۱۰) می توان شرایط مرزی بالا دست به دست آورد.

$$\frac{Z_2 - Z_1}{\Delta X} = - \left(\frac{q_s (s_g - 1) g^m \omega^m}{K_0 C^{\frac{8}{3}m} q^{1+\frac{m}{3}}} \right)^{\frac{0.75}{m}} \quad (24)$$

با اعمال روش تفاضل های محدود، بروی گره های مرزی بالا دست، معادله (۲۴) به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\frac{z_2 - z_1}{\Delta x} = - \left[\frac{q_s (s_g - 1) g^m \omega^m}{k_0 c^{\frac{8m}{3}} q^{1+\frac{m}{3}}} \right]^{\frac{0.75}{m}} \quad (25)$$

و بر این اساس ضرایب معادله (۱۸) به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$C_1 = -1 \quad D_1 = \left(\frac{q_s (s_g - 1) g^m \omega^m}{K_0 C^{\frac{8}{3}m} q^{1+\frac{m}{3}}} \right)^{\frac{0.75}{m}} \Delta x \quad B_1 = 1 \quad A_1 = 0 \quad (26)$$

پایین دست

شرایط مرزی پایین دست رقوم معلوم کف دریچه آبشویی می باشد.

$$z = z_{(0,T)} \quad (27)$$

بنابراین ضرایب معادله (۱۸) به صورت زیر خواهد بود.

$$D_n = z(0,t) \quad B_n = 1, A_n = 0, C_n = 0 \quad (28)$$

اعمال معادله (۱۸) بر کلیه گره های داخلی و استفاده از شرایط مرزی برای گره های بالادست و پایین دست، دستگاه معادلات با ماتریس سه

قطری حاصل می شود که با الگوریتم توماس حل می شود.

مدل ریاضی Hec-6

از آنجا که یکی از اهداف این تحقیق، مقایسه نتایج با خروجی نرم افزار Hec-6 می باشد، لازم است در این ارتباط توضیحاتی ارائه گردد.

این مدل یک مدل یک بعدی، جهت بررسی حرکات و تبادل رسوبات در مخزن و رودخانه می باشد. در این مدل، تغییرات پروفیل بستر، همگام با محاسبات پروفیل سطح آب، با استفاده از ۱۱ معادله معروف رسوب، انجام می پذیرد. معادلات حاکم بر این مدل، معادلات انرژی،

پیوستگی و پیوستگی رسوب می باشد.

تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت، در حقیقت بررسی تاثیر متغیرهای کنترل کننده، بر نتایج مدل می باشد. به منظور مشخص شدن اهمیت نسبی تک تک متغیرها و ضرائب و نمادهای تجربی در مدل، معمولا تحلیل حساسیت، انجام می گیرد. هدف از تحلیل حساسیت، تعیین حساسیت نتایج مدل، نسبت به تغییر متغیرهای کنترل کننده در مدل عددی می باشد که روند واسنجی مدل با داده‌های واقعی، دارای تاثیرات بسیاری است. برای بررسی و مقایسه مدل ریاضی تهیه شده با مدل *HEC-6*، براساس فرمول‌های زیر تحلیل حساسیت انجام شد، که نتایج آن در جداول (۳) و (۴) آورده شده است.

$$\chi = \frac{\overline{\Delta x}}{\overline{\Delta x_0}} \quad (29)$$

که در آن: $\overline{\Delta x}$: میانگین تغییرات مقادیر بدست آمده از مدل، نسبت به مقادیر مبنا، $\overline{\Delta x_0}$: میانگین مقادیر مبنا،

χ : حساسیت

برای بررسی اثر تغییر پارامترها، بر روی پروفیل طولی رسوبات، از کمیت زیر استفاده می شود:

$$\bar{\eta} = \frac{1}{n} \sum \frac{x_c}{x_0} \quad (30)$$

که در آن: $\bar{\eta}$: متوسط اختلاف به دست آمده، بین مقادیر مدل با مقادیر مبنا است

x_c : مقدار به دست آمده از مدل

x_0 : مقادیر مبنا

نتایج و بحث

به منظور واسنجی مدل، و کاربردی کردن ضرائب k_0, m ، از یک گروه داده‌های آزمایشگاهی که توسط محققین (پنگ و نیو) انجام شده و برای ارزیابی دقت نتایج از یک سری داده آزمایشگاهی دیگری که توسط (لای و همکاران) انجام گرفته، استفاده شده است. جدول (۱) و جدول (۲) خلاصه‌ای از مشخصات دوسری آزمایش را نشان می دهد. آزمایش‌های گروه اول در یک فلوم به عرض ۰/۵ متر و طول ۴۰ متر انجام گرفت که به وسیله ذرات ماسه با قطر متوسط $d_0 = 0/45$ میلی متر پوشش شده بود. آزمایش‌های گروه دوم در یک فلوم، بعرض ۲/۴۴ و ارتفاع ۱/۵۲ انجام شده است. در آزمایش‌های (سری دوم)، در انتهای فلوم، دیواری تعبیه شده است که در آن یک روزنه، جهت شبیه سازی تونل تخلیه تحتانی قرار داشت. در این آزمایش‌ها، حجم تجمعی رسوبات ته نشین شده، با زمان تغییر کرده و پروفیل بستر در طول فلوم در زمان‌های مشخصی ثبت گردیده است. پروفیل سطح آب در طول انجام آزمایش، نسبت به مکان، ثابت بوده است.

جدول ۱: مجموعه داده‌های سری اول

شماره اجراء	دبی (مترمکعب بر ثانیه)	عمق اولیه رسوبات در سد (متر)	نرخ رسوب ورودی (تن بر متر در ثانیه)	طول بستر رسوبی (متر)	شیب بستر اولیه (درصد)	زمان اجراء (دقیقه)
۱	۰/۰۱	۰/۰۷۱	۰/۰۰۰۰۰۳	۸/۶	۰/۱	۵۱
۲	۰/۰۲	۰/۰۷۱	۰/۰۰۰۰۰۲۱۶	۸/۶	۰/۱	۳۸
۳	۰/۰۲	۰/۰۶۴	۰/۰۰۰۰۰۲۱۶	۸/۶	۰/۱۸	۴۰

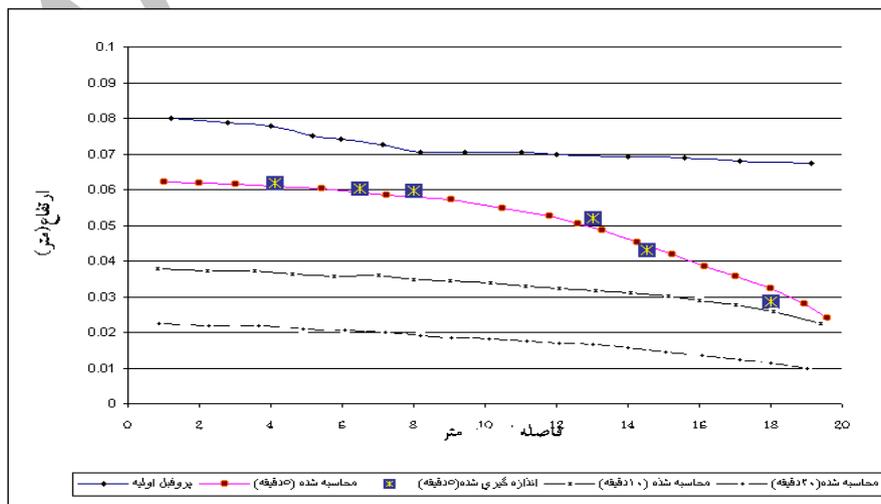
جدول ۲: مجموعه داده‌های سری دوم

شماره اجراء	دبی جریان ورودی (مترمکعب بر ثانیه)	تراز اولیه آب در سد (متر)	عمق اولیه رسوب (متر)	طول بستر رسوبی (متر)	شیب اولیه (%)	زمان اجراء (دقیقه)
۱	۰/۰۰۰۵۶	۰/۱۶۹	۰/۱	۹	۰	۳۰
۲	۰/۰۰۰۸۴	۰/۱۷۱	۰/۱	۹	۰/۰۰۰۱	۳۰
۳	۰/۰۰۱۵۶	۰/۱۷۱	۰/۱	۹	۰/۰۰۰۱	۲۹

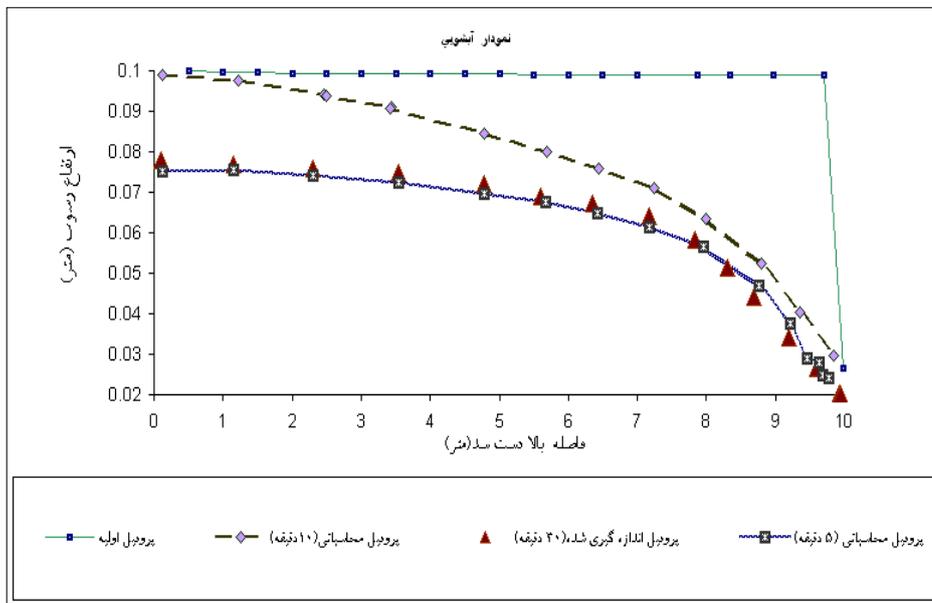
در فرآیند واسنجی که با استفاده از آزمایشات سری اول به دست آمده، ضرائب به صورتی تعیین می‌شود که نتایج خروجی مدل، با مقادیر آزمایشگاهی، بهترین تطابق را داشته باشند. نتیجه واسنجی برای قرائب مذکور، به صورت زیر به دست آمد. شکل (۱) نتایج واسنجی در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی و شکل (۲) نتایج ارزیابی دقت نتایج مدل با داده‌های سری دوم را ارائه می‌دهند.

$$m = 1$$

$$K_0 = 1.56789 * 10^{-6}$$



شکل ۱: نتایج اندازه‌گیری شده و شبیه سازی شده داده‌های آزمایشگاهی سری اول (واسنجی مدل)



شکل ۲: نتایج شبیه سازی شده با داده‌های آزمایشگاهی سری دوم (ارزیابی مدل)

پس از واسنجی، داده‌های سری دوم آزمایشات، مورد استفاده قرار گرفت که نتایج حاصل به صورت شکل (۲) به دست آمد.

مقایسه بین مدل پیشنهادی و مدل HEC-6

برای انجام مقایسه بین مدل حاضر با مدل HEC-6، داده‌های آزمایشگاهی را که برای ارزیابی مدل استفاده شد، در مدل HEC-6 وارد نموده و نتایج حاصل از آن، مورد بررسی قرار گرفت. پس از واسنجی مدل ریاضی HEC-6، بهترین پروفیل بستر رسوبی برای این مدل برای ضریب زبری مانینگ، برابر با ۰/۰۱۶ به دست آمد (بر اساس نتایج جدول ۳، ضریب مانینگ، به عنوان پارامتر متغیر استفاده گردید). مقدار ضریب زبری به کار رفته در مدل ریاضی HEC-6، با ضریب بکار رفته در مدل ریاضی تهیه شده، هم خوانی دارد و این ضریب با استفاده از معادله زیر، به ضریب مانینگ برابر با ۰/۰۱۵۶ تبدیل می‌شود. شکل (۳) نتایج حاصل از مدل HEC-6 را نشان می‌دهد.

$$c = \frac{\frac{1}{R^6}}{n} \quad (31)$$

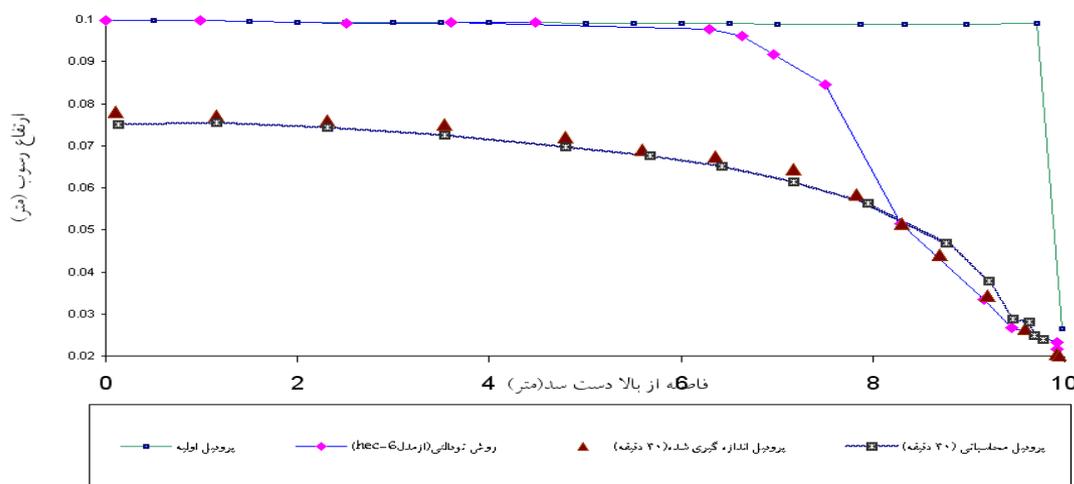
که در آن:

n ضریب زبری مانینگ، R شعاع هیدرولیکی، C ضریب زبری سزی است

پس از انجام واسنجی مدل HEC-6 و بررسی پروفیل بستر حاصل در شکل (۳)، ملاحظه می‌شود که مدل ریاضی HEC-6 نمی‌تواند بخوبی پروفیل، بستر رسوبی بعد از آبشویی را پیش‌بینی نماید. علت آن نیز عدم امکان تعریف کامل شرایط مرزی پایین دست در این مدل است. با فاصله گرفتن از دریچه تحتانی، این اختلاف بیشتر می‌گردد.

تحلیل حساسیت

نتایج حاصل از تحلیل حساسیت بر روی مدل های HEC-6 و مدل عددی تهیه شده، به صورت جداول ذیل می باشد:



شکل ۳: نتایج شبیه سازی مدل HEC-6 و مقایسه آن با مقادیر اندازه گیری شده

جدول ۳: حساسیت مدل HEC-6 نسبت به تغییر پارامتر به ترتیب حداکثر حساسیت

ردیف	حساسیت پروفیل نسبت به تغییر پارامتر (درصد)	حساسیت (%)	متوسط اختلاف بین مقادیر بدست آمده از مدل با مقادیر مبنا $(\overline{ \eta_1 })$
۱	رابطه دبی رسوب	۹۱/۵۴	۲/۱۷
۲	چگالی نسبی ذرات رسوب	۵۲/۰۲	۱/۳۷
۳	ضریب مانینگ	۴۸/۶۳	۱/۵۴
۴	دانه بندی مواد بستر (d_{50})	(۳۹/۰۱)	۱/۲۳۶

جدول ۴: حساسیت مدل تهیه شده نسبت به تغییر پارامتر به ترتیب حداکثر حساسیت

ردیف	حساسیت پروفیل نسبت به تغییر پارامتر (درصد)	حساسیت (%)	متوسط اختلاف بین مقادیر بدست آمده از مدل با مقادیر مبنا $(\overline{ \eta_1 })$
۱	رابطه دبی رسوب	(۳۶/۳۲)	۱/۴۰۱
۲	چگالی نسبی ذرات رسوب	(۳۲/۰۲)	۰/۸۲۱
۳	ضریب زبری	(۱۲/۳۱)	۰/۹۳
۴	دانه بندی مواد بستر (d_{50})	۱۱/۰۵	۰/۹۰۱۲

مقایسه با داده‌های واقعی

در این قسمت نتایج حاصل از اجرای مدل تهیه شده به زبان فرترن، برای سد دشیدایرا در ژاپن آورده شده است. سد دشیدایرا یک سد از نوع بتنی و ارتفاع ۷۶/۶ متر است که به منظور تولید برق آبی در سال ۱۹۸۵ در ۲۶ کیلومتری بالادست رودخانه کورب، ساخته شده است. مساحت حوزه آبریز کورب، ۶۶۰ کیلو متر مربع و طول رودخانه آن، ۸۶ کیلومتر است. بارش میانگین سالیانه حوضه به طور متوسط ۳۸۰۰ میلی متری باشد. شیب حوضه نیز به شدت تند است. بنابراین پتانسیل تولید رسوب، به شدت، زیاد بوده و مقدار جریان رسوب خروجی در حوضه آبریز، در شمار یکی از بالاترین‌ها می‌باشد. اطلاعات ورودی مورد استفاده برای مخزن، به شرح زیر است:

$$Ds = 0.3mm$$

$$\rho = .04$$

$$\gamma_s = 2640. \frac{kg}{m^3}$$

$$C = 57.21$$

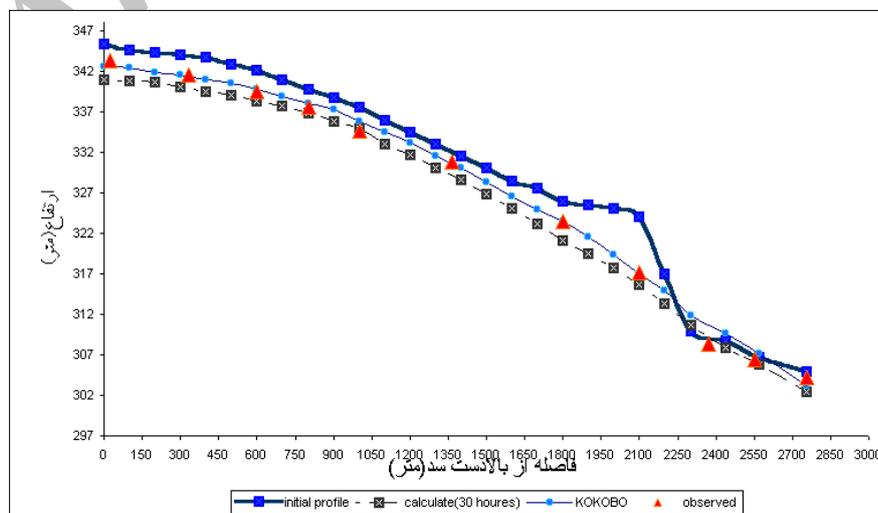
$$Q = 50. \frac{m^3}{s}$$

$$Z(0, T) = 298m$$

$$\Delta T = 600Sec$$

$$\Delta X = 100m$$

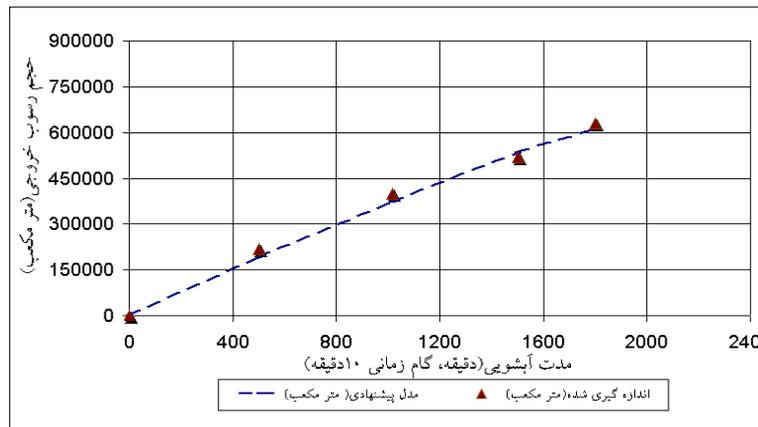
مخزن سد تا فاصله ۲۸۰۰ متری از تخلیه کننده‌های تحتانی مدل شده و عرض مؤثر جریان برابر با ۱۳۶ متر در نظر گرفته شده است. کل زمان آیشویی رسوبات مخزن، ۳۰ ساعت منظور شده است (Stoesser, 1999). تعداد تخلیه کننده تحتانی، دو عدد بوده که مقطع آنها مربعی با طول ضلع ۵ متر می‌باشد. نتایج حاصل از اجرای مدل در شکل (۴) و (۵) نشان داده شده است. ضمناً نتایج مدل تهیه شده نیز در شکل شماره ۴ نشان داده شده است (Kokobo et al., 1997).



شکل ۴: نتایج حاصل از اجرای مدل برای سد دشیدایرا

نتیجه گیری

آبشویی رسوبات، یکی از مهم ترین روشهای رسوب زدایی مخازن سدها می باشد که بدون نیاز به صرف انرژی اضافی و آن ها با استفاده از انرژی جریان آب، رسوبات درون مخزن شسته شده و از طریق تونل های تخلیه تحتانی، از سد خارج می شوند. مدل های ریاضی یک بعدی به علت سادگی و عدم نیاز به اطلاعات ورودی زیاد، به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرند.



شکل ۵: حجم خروجی رسوب از مخزن سد دشیدایرا (خروجی مدل)

مدل ریاضی پیشنهاد شده در این تحقیق، مبتنی بر حل معادله دیفرانسیلی پیوستگی رسوب با روش تفاضل های محدود می باشد. ضرایب آن، با استفاده از یک سری داده آزمایشگاهی، کالیبره شده و نتایج حاصل از آن در مقایسه با داده های واقعی اندازه گیری شده، نتایج مناسبی را ارائه می دهد. مدل پیشنهادی، با مدل *HEC-6* مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاصل از مدل *HEC-6* در مقایسه با نتایج مدل پیشنهادی، تفاوت زیادی را نشان می دهد. و می توان نتیجه گرفت که مدل *HEC-6* به خوبی نمی تواند در شبیه سازی آبشویی مخازن سدها به کار رود. همچنین بر اساس نتایج حاصل از تحلیل حساسیت، می توان نتیجه گرفت که مدل ریاضی تهیه شده به رابطه دبی رسوب و چگالی ذرات، حساسیت بیشتر و به تغییر ضریب زبری و دانه بندی مواد بستر، حساسیت کمتری نشان می دهد. در مقام مقایسه، می توان ادعا داشت که مدل ریاضی تهیه شده، با مدل ارائه شده توسط *Kokobo* و همکاران در سال ۱۹۹۷ دارای دقت کمتری می باشد. علت آن نیز عدم دسترسی کامل به اطلاعات مخزن می باشد. هم چنین براساس نتایج، می توان بیان داشت که مدل های یک بعدی، بخوبی می توانند جریان تخلیه رسوب در اثر فلاشینگ در مخازن سدها (که دارای عرض تقریباً یکنواخت هستند و مقدار کاهش ارتفاع آب در سطح مخزن بصورت یکنواخت قابل فرض است) را نیز شبیه سازی کنند. البته این مهم با فراهم آمدن کلیه اطلاعات لازم امکان پذیر است.

منابع

- جعفری، م. (۱۳۸۰). بررسی آزمایشگاهی و عددی آبشویی رسوبات در مخازن سدها. پایانامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهیدباهنر کرمان، ۱۴۶ص.
- زاور، ع. (۱۳۸۱). بررسی ریاضی تخلیه رسوبات از دریچه تحتانی سد پایانامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۲۰ص.
- نقشینه، ا. (۱۳۸۲). بررسی آزمایشگاهی تخلیه رسوبات در مخازن سدها و مقایسه آن با مدل های آزمایشگاهی. پایانامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، ۱۸۷ص.

- Atkinson, E. (1996).** Flushing sediment from Reservoir: REFLUSH User Manual: HR walling ford, UK Report OD ITM 54, March.
- Cheng, X.M. (1992).** Reservoir sedimentation in Chinese Hydro scheme:. Int. water Power, & Dam construction, pp. 44-47.
- Fan, J and Jiang Rujin, N. (1980).** On methods of desolation of Reservoir. Int Seminar of experts on Reservoir Desalting, Tunis.
- Guan, Y., Rong, F and Wang, H. (1991).** A Numerical Model for Sedimentation in Fenhe Reservoir and adjoining Research. International Journal Research IRTECH, Vol.36, No.4, April.
- **Hsieh, w and Shen, H. (1999)** Flushing Sediment through Reservoirs. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 37.
- **Ju, J.(1990).** Computational methods of Head water erosion and its Application. Journal of sediments Research, Vol.1, pp.33-39.
- **Kokobo, T., Ltakura, M and Harada, M. (1997).** Predicting Methods and Actual Results on Flushing of Accumulate Deposits from Dashidaira Reservoirs, 18th ICOLD, Q75, R, Florence, Conference, San Francisco, California, July26-30.
- **Lai, D. and Hseh, W and Shen, H. (1996).** Flushing Sediment through Reservoirs. Journal of Hydraulic Research, Vol 34 No. 2, PP. 243-256.
- Lai, J.s. (1994).** Hydraulic Flushing for Reservoir Desolation., Dissertation Presented to the University of California at Berkeley, in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.
- Olsen, n.r. b. (1991).** A three dimensional numerical model for simulation of sediment Movement in the water intake. Dr.eng. Degree, The Norwegian Institute of Technology, Division of Hydraulic Engineering, University of Trondheim.
- **Olsen, N.B. (1996).** Two –Dimensional Numerical Modeling of Flushing. Processes in Water Research., Vol 37 No.1.
- **Olsen, N.B. (2003).** Three –Dimentional Numerical Modelling of Flushing. Processes in Water Research., Vol 32 No.2.
- **Peng, R and Niu, J. (1987).** Numerical Model for head ward Erosion on Bed Load. Journal of Sediment Research, Vol, 3, Proceeding Conference IAHR, in Grazz, Austria.
- **Scherlin, H. (1987).** Sediment Sluicing in the Mountain Reservoirs. Proc. IAHR of the Int.Work Shop on Fluvial Hydraulics of Mountain Regions, Trend, Italy, Oct.3-6, pp.B77-B88.
- **Stoesser, T. (1999).** On the Use of A3D CFD Model to Simulate Reservoir Sedimentation Process. Proceeding Conference, IAHR. 14.
- **Tetsuro Tsujimoto, Koichi Fujita. (2008).** On Scenario-Driven Research and Development toward the Integrated Management of the River-Basin-Scale Sediment Transport System, Kasen Gijutsu Ronbunshu, Vol.10, June.
- **White, W.R and Betts, R. (1984).** The feasibility of flushing sediment through Reservoir of the Harare Symposium. Challenges in Africa Hydrology and Water resource: July 1984.IAHR .Pubi.No144.
- **Williams, G.P and Wolman, M.G. (2007).** Downstream effects of dams on Alluvial Rivers. US Geological Survey Professional Paper 1286.