

شبیه‌سازی یک بعدی آبشویی رسوب در مخازن سدها

جمال محمدولی سامانی، سیدعلی ایوب‌زاده و روزبه آقامجیدی*

* به ترتیب دانشیار دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، نشانی: تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ص. پ. ۳۳۶-۱۴۱۱۵، تلفن:

۴-۴۴۱۹۴۹۱۱ (۰۲۱)، پیام‌نگار: samani_j@modares.ac.ir؛ استادیار دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس؛ و دانشجوی کارشناسی

ارشد دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت مقاله: ۸۴/۱۰/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۸۵/۱۲/۵

چکیده

کنترل رسوبات در مخزن سدها یکی از موضوعات مهم در مدیریت این مخازن است که موجب افزایش عمر مفید آنها می‌شود. مخازن سد به عنوان یک مانع باعث تله‌اندازی رسوب می‌شود و از انتقال رسوب به رودخانه پایین دست جلوگیری می‌کند. افزایش مقدار رسوبات در مخزن، باعث کاهش عمر مفید سد و کاهش استفاده از آن می‌شود. روش‌های مختلفی برای تخلیه قسمتی از رسوبات مخزن مورد مطالعه قرار گرفته است. آبشویی رسوب در مخزن سد به دلیل استفاده از انرژی جریان آب و بی‌نیاز بودن به منبع انرژی اضافی، (مانند لایروبی) در مخازن مختلف در سراسر دنیا به کار گرفته شده است و از اولین گزینه‌ها در مدیریت رسوب در مخازن است. در این مقاله یک مدل ریاضی یک‌بعدی با جریان یکنواخت در مورد آبشویی رسوب در مخزن سد بررسی شده است. این مدل با فرض داشتن پروفیل اولیه رسوب و حل معادله پیوستگی رسوب بر اساس روش تفاضل‌های محدود تهیه شده است و توانایی محاسبه پروفیل رسوب با زمان را دارد. همچنین، مقدار حجم رسوبات شسته شده و حجم آب مخزن با گام‌های زمانی متفاوت در این مدل محاسبه می‌شود. این مدل برای داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های واقعی ارزیابی شد؛ نتایج حاصل از مدل، در مقایسه با مقادیر واقعی، رضایت‌بخش بود. مقایسه نتایج این مدل با مدل HEC-6، مزیت این مدل و ضعف مدل HEC-6 را در پیش‌بینی پروفیل بستر فرسایش یافته نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

آبشویی رسوب، سد، مخزن، مدل عددی، مدل HEC-6

مقدمه

است و روز به روز بر اهمیت آن افزوده می‌شود. محققان به این نتیجه رسیده‌اند که ساخت سدهای جدید به دلیل نبودن ساختگاه مناسب، مشکل‌تر از رسوبدایی از سدهای فعلی است (Lai, 1994).

سالیانه در حدود ۱ درصد از حجم مخزن سدها در اثر رسوبگذاری کاسته می‌شود (Hsieh & Shen, 1999) به همین دلیل بررسی روش‌های مناسب برای تخلیه رسوب از مخزن سدها مورد توجه محققان در سراسر دنیا قرار گرفته

در دهه‌های اخیر ساخت سد، مخصوصاً در مناطق با اقلیم خشک و نیمه‌خشک که مقدار رسوب در آنها بیشتر است، افزایش یافته است (Atkinson, 1996). در سال ۱۹۰۰، در جهان نزدیک به ۴۲ سد بزرگ (بلندتر از ۵۰ متر) وجود داشت؛ این رقم تا سال ۱۹۸۶ به بیش از ۳۹۰۰۰ رسید (Guan et al., 1991). حفظ و احیای سدها در این زمان بیش از هر موضوع دیگر اهمیت یافته

تکمیل شدن است (Olsen, 1996; Stroesser, 1999). اولسن از این مدل برای بررسی سه‌بعدی جریان رسوب در هنگام اجرای عملیات آبشویی رسوب استفاده کرده است (Olsen, 2003).

در زمینه آبشویی رسوبات مطالعات گسترده‌ای در ایران نیز انجام گرفته است که از آن جمله می‌توان به مطالعات زاور اشاره کرد که مدلی برای شبیه‌سازی میزان رسوبات خارج شده بر اثر آبشویی ارائه داده است (Zavar, 2002). همچنین جعفری و نقشینه در زمینه آبشویی رسوبات در مخزن سد با مدل‌های آزمایشگاهی مطالعاتی انجام داده‌اند (Jafari, 2001; Naghshineh, 2003).

در زمینه مدل‌های عددی آبشویی رسوب در مخازن، کوكوبو و همکاران برای مخزن سد دشدایرا در ژاپن مدل عددی یک‌بعدی ارائه دادند که میزان خروج رسوبات را در اثر آبشویی نشان می‌دهد (Kokobo et al., 1997).

در این تحقیق، مدلی یک‌بعدی ارائه شده است که معادله پیوستگی رسوب را با استفاده از تفاضل‌های محدود حل می‌کند. نتایج حاصل از مدل، تغییرات رقوم بستر مخزن در اثر آبشویی رسوبات را در زمان‌های مختلف و حجم تجمعی رسوبات خروجی از مخزن را ارائه می‌دهد.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم

در هنگام آبشویی رسوبات مخزن لازم است سرعت جریان بالا باشد و سطح آب مخزن پایین آورده شود. بنابراین می‌توان به عنوان تقریب جریان را در هر گام زمانی دائمی و یکنواخت فرض کرد. بر پایه همین فرض در هر گام زمانی محاسباتی، عمق میانگین برای جریان در نظر گرفته شده است که بر اساس رابطه شزی محاسبه

است. بر این اساس، روش‌هایی متفاوت پیشنهاد شده است که یکی از آنها آبشویی رسوبات است (Cheng, 1992).

در این زمینه مدل‌های ریاضی و فیزیکی مختلفی از دهه ۱۹۶۰ به کار گرفته شده است که از اولین آنها می‌توان به مدل آزمایشگاهی برداشت رسوبات توسط سچرلین اشاره کرد (Scherlin, 1987)، همچنین وایت و بتس (White & Betts, 1984) مدل‌های عددی رسوبگذاری و آبشویی را توسعه دادند و تأثیر آبشویی را برای مخازن کوچک در زیمباوه مطالعه کردند، پنگ و نیو (Peng & Niu, 1987) و جو (Ju, 1990) یک مدل پخشیدگی یک‌بعدی در شبیه‌سازی حجم رسوب و تغییرات پروفیل بستر و عرض کانال هنگام آبشویی ارائه دادند. گووان و همکاران نیز فرض کردند که فرسایش، بیشتر و فقط در کانال آبشویی روی می‌دهد و روشی برای بهینه‌کردن مدل خویش بر اساس اطلاعات مخزن فنی را ارائه دادند (Guan et al., 1991).

لای و همکاران مدل عددی و آزمایشگاهی در زمینه آبشویی با افت رقوم آب به صورت مدلی ساده‌شده ارائه کردند (Lai et al., 1996). مدل‌های دیگر، دوبعدی و سه‌بعدی نیز مورد توجه قرار گرفته است (Oslen, 1991). لای جهت شبیه‌سازی چگونگی شکل‌گیری کانال آبشویی هنگام اجرای عملیات یک مدل حجم محدود دوبعدی غیر ماندگار و مدل انتقال رسوب را توسعه داد (Lai, 1994). مدل‌های سه‌بعدی متعددی وجود دارد که از حل معادلات ناویراستوکس در سه‌بعد و مدل‌های جریان متلاطم استفاده می‌کنند. این مدل‌ها پیچیده‌اند و نیاز به اطلاعات و زمان بیشتری دارند.

از مدل‌های سه‌بعدی می‌توان به مدل سه‌بعدی سیالات محاسباتی PHONICS و نیز مدل SSIIM اشاره کرد که اولسن در سال ۱۹۹۶ تهیه کرد و تا امروز در حال

شبهه‌سازی یک بعدی آبشویی رسوب در ...

می‌شود. معادله اصلی مدل، معادله پیوستگی رسوب است که به صورت رابطه ۱ بیان می‌شود:

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

$$q_s = q \times C_s \quad (5)$$

که در آن،

که در آن،

q_s = دبی حجمی رسوب در واحد عرض؛ و q = دبی در واحد عرض

x = فاصله طولی از دریچه؛ z = رقوم بستر؛ P = تخلخل مواد رسوبی (درصد)؛ و q_s = دبی حجمی رسوب در واحد عرض است.

از جایگزینی رابطه ۴ در رابطه ۵ فرمول ۶ به دست خواهد آمد:

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

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

به جای رابطه $\frac{\gamma}{\gamma_s - 1}$ می‌توان از رابطه $\left(\frac{1}{s_g - 1}\right)$ استفاده کرد که در آن، s_g = چگالی نسبی است.

که در آن،

$$s_g = \frac{\gamma_s}{\gamma} \quad (1-5)$$

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

و در نتیجه رابطه ۵ به صورت زیر درمی‌آید.

$$q_s = u h k_0 \frac{1}{s_{g-1}} \left(\frac{u^3}{g \omega h} \right)^m \quad (6)$$

با آنالیز ابعادی غلظت حجمی جریان خروجی C_s را می‌توان به صورت تابعی از پارامترهای بی‌بعد به صورت زیر نشان داد:

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

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

برای محاسبه سرعت از رابطه شزی استفاده می‌شود:

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

$$C_s = k_0 \left(\frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \left(\frac{u^3}{g \omega h} \right)^m \right) \quad (4)$$

که در آن،

که در رابطه ۴،

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

که در آن، β = پارامتری است که جایگزین سایر متغیرها شده است و به نام ضریب فرسایش پذیری در معادلات استفاده می شود (Scherlin, 1987). این رابطه در معادلات دیگر آبخوبی رسوب در مخزن نیز استفاده شده است (Hsieh & 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، به صورت تابعی از عدد رینولدز محاسبه می شود.

حل عددی

معادله ۱۴ به دلیل غیرخطی بودن حل تحلیلی ندارد. بنابراین، معادله مذکور را با یکی از روش های عددی مانند تفاضل های محدود یا المان های محدود می توان حل کرد. در این تحقیق برای حل این معادله از روش های تفاضل های محدود استفاده شده است. برای حل این دستگاه شمای انقطاع به کار رفته بر اساس روش کرانک- نیلکسن است. ماتریس به دست آمده از انقطاع معادله دیفرانسیل حاکم در نقاط مختلف به وسیله الگوریتم توماس حل می شود که قالب ماتریس های سه قطری است. استفاده از این شمای انقطاع به صورت (شمای کرانک- نیلکسن) بدون شرط پایدار است (Lai et al., 1996). نحوه تبدیل معادله ۱۴ به دستگاه معادلات به شرح زیر است:

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

R = شعاع هیدرولیکی؛ C = ضریب زبری سزی؛ 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 سزی در رابطه ۷ خواهیم داشت:

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

از رابطه ۹ با فرض جریان یکنواخت، نسبت به x مشتق گرفته می شود و نتیجه به صورت رابطه ۱۰ در خواهد آمد:

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

همچنین از رابطه سزی خواهیم داشت:

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

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

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

و شیب بستر بر حسب Z به صورت زیر به دست می آید:

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

با مشتق گیری از رابطه فوق حاصل می شود:

شبیه‌سازی یک بعدی آبشویی رسوب در ...

با جایگزینی h از رابطه ۱۱ در رابطه ۱۰ می‌توان رابطه زیر را برای شرایط مرزی بالادست 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 تفاضل‌های محدود روی گره‌های مرزی بالادست، معادله ۲۴ به صورت زیر درخواهد آمد:

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

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

$$A_1 = 0 \quad B_1 = 1 \quad C_1 = -1$$

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

پایین‌دست

شرایط مرزی پایین‌دست رقوم معلوم کف دریچه آبشویی است.

$$z = z(0, T) \quad (27)$$

بنابراین، ضرایب معادله ۱۸ به صورت زیر خواهد بود:

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

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

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

که در آن، θ = ضریبی است موسوم به ضریب کرانک-نیکلسن. حال 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.

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

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

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

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

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

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

شرایط مرزی

بالادست

در اینجا شرایط نیومن مورد استفاده قرار گرفته است.

که در آن، $\bar{\eta} =$ متوسط اختلاف بین مقادیر به دست آمده از مدل با مقادیر مینا؛ $x_c =$ مقدار به دست آمده از مدل؛ و $x_0 =$ مقادیر میناست.

نتایج و بحث

به منظور واسنجی مدل و کاربردی کردن ضرائب m و k_0 ، از یک گروه داده‌های آزمایشگاهی حاصل از تحقیقات پنگ و نیو و برای ارزیابی دقت نتایج از یک سری داده آزمایشگاهی دیگری که از تحقیقات لای و همکاران به دست آمده است استفاده شد (Lai et al., 1996; Peng & Niu, 1987). جدول ۱ و جدول ۲ خلاصه‌ای از مشخصات دو سری آزمایش را نشان می‌دهد. آزمایش‌های گروه اول در یک فلوم به عرض ۰/۵ متر و طول ۴۰ متر اجرا شد که با ذرات ماسه با قطر متوسط $d_o = ۰/۴۵$ میلی‌متر پوشش شده بود. آزمایش‌های گروه دوم در یک فلوم به عرض ۲/۴۴ و ارتفاع ۱/۵۲ متر اجرا شده است. در آزمایش‌های سری دوم، در انتهای فلوم دیواری تعبیه شده که در آن یک روزنه جهت شبیه‌سازی تونل تخلیه تحتانی قرار داشت. در این آزمایش‌ها حجم تجمعی رسوبات ته‌نشین شده با زمان تغییر کرده و پروفیل بستر در طول فلوم در زمان‌های مشخصی ثبت شده است. پروفیل سطح آب در طول اجرای آزمایش نسبت به مکان ثابت بوده است.

اعمال معادله ۱۸ بر کلیه گره‌های داخلی و استفاده از شرایط مرزی برای گره‌های بالادست و پایین دست دستگاه معادلات با ماتریس سه قطری حاصل که با الگوریتم توماس حل می‌شود.

تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت، بررسی تاثیر متغیرهای کنترل کننده بر نتایج مدل است. به منظور مشخص شدن اهمیت نسبی تک تک متغیرها و ضرائب و نمادهای تجربی در مدل، معمولاً تحلیل حساسیت انجام می‌گیرد. هدف از تحلیل حساسیت تعیین حساسیت نتایج مدل نسبت به تغییر متغیرهای کنترل کننده در مدل عددی است. برای بررسی و مقایسه مدل ریاضی تهیه شده و مدل HEC-6، بر اساس فرمول زیر تحلیل حساسیت انجام شد که نتایج آن در جداول ۳ و ۴ آورده شده است.

$$\chi = \frac{\Delta \bar{x}}{\Delta \bar{x}_0} \quad (29)$$

که در آن، $\Delta \bar{x} =$ میانگین تغییرات مقادیر به دست آمده از مدل نسبت به مقادیر مینا؛ $\Delta \bar{x}_0 =$ میانگین مقادیر مینا؛ و $\chi =$ حساسیت است.

برای بررسی اثر تغییر پارامترها بر پروفیل طولی رسوبات از کمیت زیر استفاده می‌شود:

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

شبیه‌سازی یک بعدی آبشویی رسوب در ...

جدول ۱- مجموعه داده‌های سری اول (Lai et al., 1996)

شماره اجرا	دبی (مترمکعب بر ثانیه)	عمق اولیه رسوبات در سد (متر)	میزان رسوب ورودی (تن بر متر در ثانیه)	طول بستر رسوبی (متر)	شیب بستر اولیه (درصد)	زمان اجرا (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 (Peng & Niu, 1987)

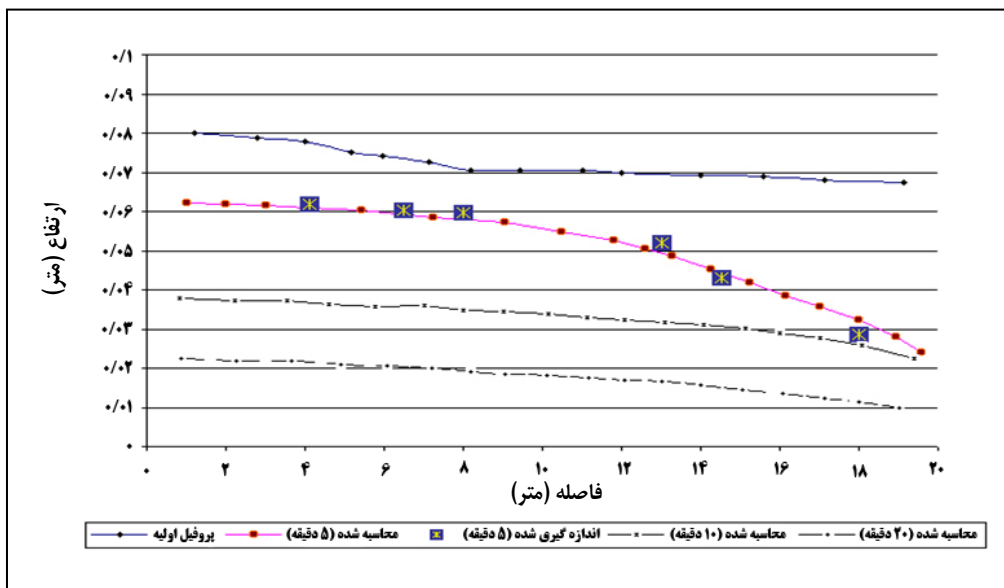
شماره اجرا	دبی جریان ورودی (مترمکعب بر ثانیه)	تراز اولیه آب در سد (متر)	عمق اولیه رسوب (متر)	طول بستر رسوبی (متر)	شیب اولیه (درصد)	زمان اجرا (دقیقه)
۱	۰/۰۰۰۵۶	۰/۱۶۹	۰/۱	۹	۰	۳۰
۲	۰/۰۰۰۸۴	۰/۱۷۱	۰/۱	۹	۰/۰۰۰۱	۳۰
۳	۰/۰۰۱۵۶	۰/۱۷۱	۰/۱	۹	۰/۰۰۰۱	۲۹

آزمایشگاهی و شکل ۲ نتایج ارزیابی دقت نتایج مدل را با داده‌های سری دوم ارائه می‌دهد.

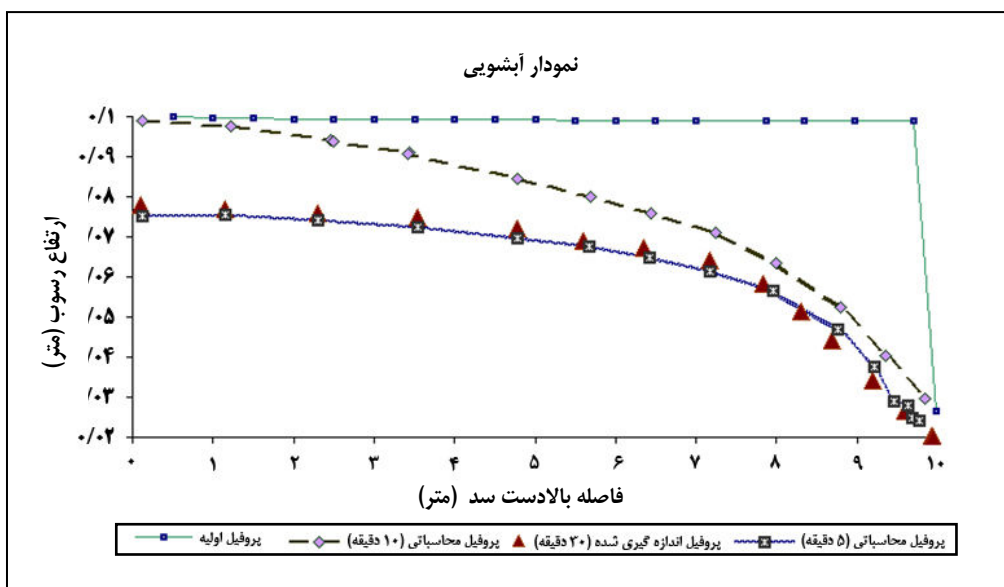
$$m = 1$$

$$K_0 = 1.56789 \times 10^{-6}$$

در فرایند واسنجی با استفاده از آزمایش‌های سری اول، ضرایب به صورتی تعیین می‌شود که نتایج خروجی مدل با مقادیر آزمایشگاهی بهترین تطابق را داشته باشد. نتیجه واسنجی برای ضرایب مذکور به صورت زیر به دست آمد. شکل ۱ نتایج واسنجی را در مقایسه با داده‌های



شکل ۱- نتایج اندازه گیری شده و شبیه سازی شده داده های آزمایشگاهی سری اول (واسنجی مدل)



شکل ۲- نتایج شبیه سازی شده با داده های آزمایشگاهی سری دوم (ارزیابی مدل)

شبیه‌سازی یک بعدی آبشویی رسوب در ...

که در آن،

n = ضریب زبری مانینگ؛ R = شعاع هیدرولیکی؛ C = ضریب زبری شزی است.

پس از انجام واسنجی مدل HEC-6 و بررسی پروفیل بستر حاصل در شکل ۳، ملاحظه می‌شود که مدل ریاضی HEC-6 نمی‌تواند به خوبی پروفیل بستر رسوبی بعد از آبشویی را پیش‌بینی نماید و با فاصله گرفتن از دریچه تحتانی این اختلاف بیشتر می‌گردد.

تحلیل حساسیت

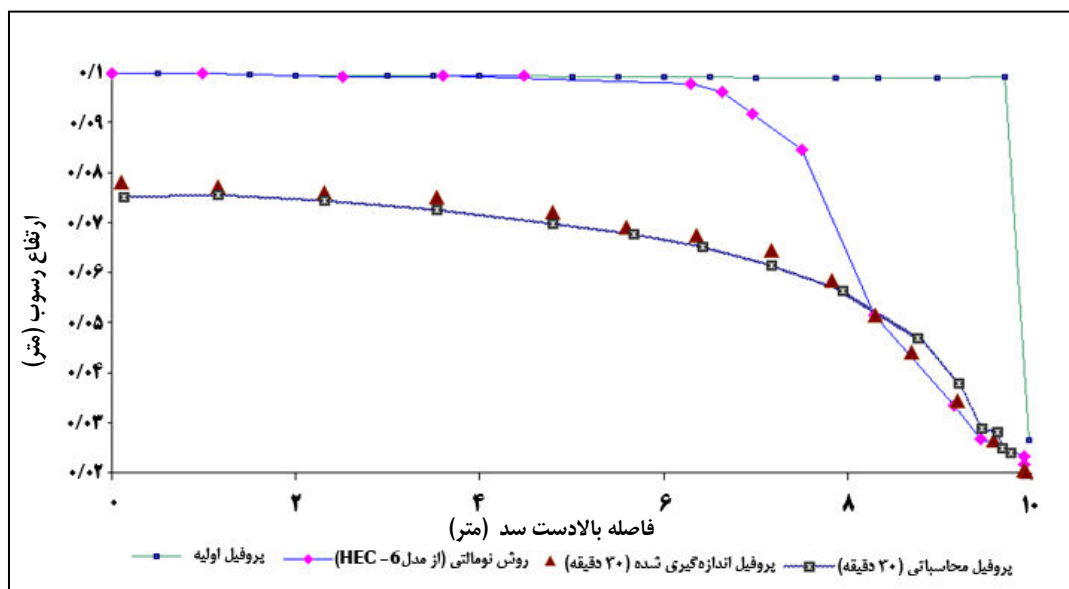
نتایج حاصل از تحلیل حساسیت روی مدل‌های HEC-6 و مدل عددی تهیه‌شده به صورت جداول ۳ و ۴

است:

مقایسه مدل پیشنهادی و مدل HEC-6

برای مقایسه مدل حاضر و مدل HEC-6، داده‌های آزمایشگاهی را که برای ارزیابی مدل استفاده شد در مدل HEC-6 وارد و نتایج حاصل از آن بررسی شد. پس از واسنجی مدل ریاضی HEC-6، بهترین پروفیل بستر رسوبی برای این مدل برای ضریب زبری مانینگ برابر با $0/016$ به دست آمد. ضریب زبری به کار رفته در مدل ریاضی HEC-6 با ضریب به کار رفته در مدل ریاضی تهیه شده همخوانی دارد و این ضریب با استفاده از معادله زیر ضریب مانینگ برابر با $0/0156$ تبدیل می‌شود. شکل ۳ نتایج حاصل از مدل HEC-6 را نشان می‌دهد.

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



شکل ۳- نتایج شبیه‌سازی مدل HEC-6 و مقایسه آن با مقادیر اندازه‌گیری شده

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

ردیف	حساسیت پروفیل نسبت به تغییر پارامتر (درصد)	حساسیت (درصد)	متوسط اختلاف بین مقادیر به دست آمده از مدل با مقادیر مبنا $(\bar{\eta}_1)$
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 (درصد)	متوسط اختلاف بین مقادیر به دست آمده از مدل با مقادیر مبنا $(\bar{\eta}_1)$
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 داده های واقعی

$Ds = 0.3$ (بر حسب میلی متر)

$\rho = .04$

$\gamma_s = 2640$ (بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب)

$C = 57.21$

$Q = 50$ (بر حسب متر مکعب بر ثانیه)

$Z(0, T) = 298$ (بر حسب متر)

$\Delta T = 600$ (بر حسب ثانیه)

$\Delta X = 100$ (بر حسب متر)

مخزن سد تا فاصله ۲۸۰۰ متری از تخلیه کننده های

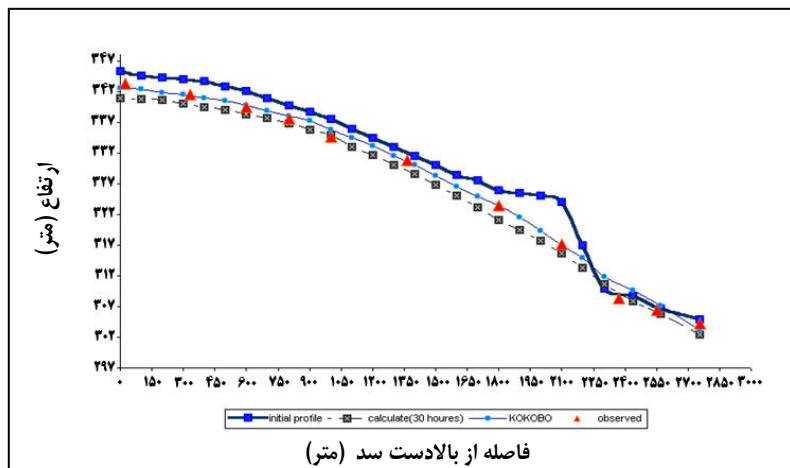
تحتانی مدل شده و عرض مؤثر جریان برابر با ۱۳۶ متر و

در این قسمت، نتایج حاصل از اجرای مدل برای سد دشیدایرا در ژاپن آورده شده است. سد دشیدایرا، برقابی و از نوع بتنی با ارتفاع ۷۶/۶ متر است که در سال ۱۹۸۵ در ۲۶ کیلومتری بالادست رودخانه کورب ساخته شد. مساحت حوضه آبریز کورب ۶۶۰ کیلومتر مربع، طول رودخانه آن ۸۶ کیلومتر، و بارش میانگین سالانه حوضه به طور متوسط ۳۸۰۰ میلی متر است. شیب حوضه به شدت تند است. بنابراین پتانسیل تولید رسوب به شدت زیاد و مقدار جریان رسوب خروجی در حوضه آبریز در شمار یکی از بالاترین هاست. اطلاعات ورودی مورد استفاده برای مخزن، به این شرح است:

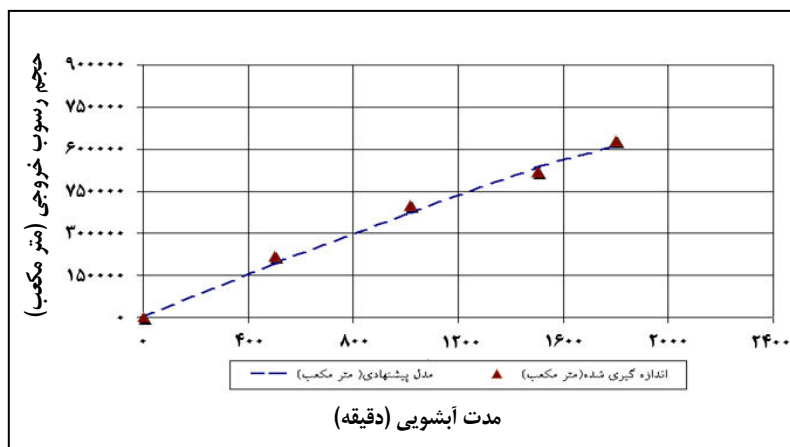
شبه‌سازی یک بعدی آبشویی رسوب در ...

مدل در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است. نتایج مدل تهیه‌شده کوکوبو و همکاران نیز در شکل ۴ نشان داده شده است (Kokobo et al., 1997).

کل زمان آبشویی رسوبات مخزن ۳۰ ساعت منظور شده است. تعداد تخلیه‌کننده تحتانی دو عدد و مقطع آنها مربعی با طول ضلع ۵ متر است. نتایج حاصل از اجرای



شکل ۴- نتایج حاصل از اجرای مدل برای سد دشییدايرا



شکل ۵- حجم خروجی رسوب از مخزن سد دشییدايرا (خروجی مدل)

مخزن شسته و از تونل‌های تخلیه تحتانی از سد خارج می‌شود. مدل‌های ریاضی یک‌بعدی، به دلیل سادگی و اینکه به اطلاعات ورودی زیاد نیازی ندارند به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند.

نتیجه‌گیری

آبشویی رسوبات یکی از مهم‌ترین روش‌های رسوبزادای مخازن سدهاست که بدون نیاز به صرف انرژی اضافی و فقط با استفاده از انرژی جریان آب رسوبات درون

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. می توان اذعان کرد که مدل ریاضی تهیه شده در مقایسه با مدلی که کوکوبو و همکاران ارائه داده اند دقت کمتری دارد که دلیل آن نداشتن دسترسی کامل به اطلاعات مخزن است. همچنین، براساس نتایج می توان گفت که مدل های یک بعدی می توانند جریان تخلیه رسوب در اثر فلاشینگ در مخزن سدها را (که دارای عرض تقریباً یکنواخت هستند و مقدار کاهش ارتفاع آب در سطح مخزن به صورت یکنواخت قابل فرض است) نیز به خوبی شبیه سازی کند.

مدل ریاضی پیشنهاد شده در این تحقیق مبتنی است بر حل معادله دیفرانسیلی پیوستگی رسوب با روش تفاضل های محدود. ضرایب آن با استفاده از یک سری داده های آزمایشگاهی کالیبره می شود و نتایج حاصل از آن در مقایسه با داده های واقعی اندازه گیری شده نتایج مناسبی ارائه می دهد. مدل پیشنهادی با مدل HEC-6 مقایسه شده است. نتایج حاصل از مدل HEC-6 در مقایسه با نتایج مدل پیشنهادی تفاوت زیادی دارد و این گونه 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

مراجع

- 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.
- 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 J. Res. IRTECH. 36(4).
- Hsieh, W. and Shen, H. 1999. Flushing sediment through reservoirs. J. Hydraulic Eng. Vol. 37.
- Jafari, M. 2001. Experimental and numerical study on sediment flushing in dam reservoirs. M.Sc. Thesis. Faculty of Agriculture. Shahid Bahonar University. Kerman. Iran. (in Farsi)
- Ju, J. 1990. Computational methods of head water erosion and its application. J. Sediments Res. Vol. 1. 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, Jul. 26-30. Florence. San Francisco. California.
- Lai, D., Hseh, W. and Shen, H. 1996. Flushing sediment through reservoirs. J. Hydraulic Res. 34(2): 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.
- Naghshineh, A. 2003. Experimental study on sediment flushing in dam reservoirs. M.Sc. Thesis. College of Civil Engineering. Shiraz University. Shiraz. Iran. (in Farsi)
- Olsen, N. B. 1996. Two-dimensional numerical modeling of flushing. Processes in Water Research. 37(1).
- Olsen, N. B. 2003. Three-dimensional numerical modelling of flushing. Processes in Water Research. 32(2).
- Olsen, N. 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.
- Peng, R. and Niu, J. 1987. Numerical model for head ward erosion on bed load. J. Sediment Res. Vol. 3. Proceeding Conference IAHR. Graz. Austria.
- Scherlin, H. 1987. Sediment sluicing in the mountain reservoirs. Proc. IAHR of the Int. Work Shop on Fluvial Hydraulics of Mountain Regions. Oct.3-6. Trend. Italy.
- Stoesser, T. 1999. On the use of A3D CFD model to simulate reservoir sedimentation process. Proceeding Conference. IAHR. 14.
- 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. IAHR. Pubi. No144.
- Zavar, A. 2002. Mathematical study on sediment releasing from bottom outlet. M.Sc. Thesis. College of Civil Engineering. Shahid Chamran University. Ahvaz. Iran. (in Farsi)



One Dimensional Simulation of Flushing Sediment through Reservoirs

J. M. V. Samani^{*}, S. A. Ayyoubzadeh and R. Aghamajidi

^{*} Corresponding Author: Assistant Professor, Water Structure Engineering. Department, Tarbiat Modares University, P. O. Box: 14115-336, Tehran, Iran. E-mail: samani_j@modares.ac.ir

Control of sedimentation in dam reservoirs is considered to be one of the most important issues in exploitation of dams and increasing the their useful life. Reservoirs act as traps for sediments and prevent transport of sediment to the river. The deposited sediment decreases the capacity of reservoirs so that they can not be in use any more. Various methods dealing with removing part of the deposited sediments are discussed in this study. Regarding fact that flow energy is utilized and no need to employ any external source of energy, flushing method has been used extensively in many projects all over the world. In this study, one-dimensional model in which the continuity equation of sediment solved by the finite difference method using the Cranck-Nickolson scheme has been developed. The developed model was capable to compute the variation of the reservoir bed with time. Also, the accumulated flushed sediment volume and reservoir water volume were calculated at different time steps. The Fortran language used for programming the model based on the results obtained from physical models employed by several investigators. Also a comparison with HEC-6 model was conducted. The verification was verified by using data from the natural reservoir of Dashidaira dam in Japan. The results of the proposed model and the HEC-6 ones were compared with practical measurements data and reliable good agreement was noticeable for the model where it wasn't with HEC-6 ones.

Key words: Dam, HEC-6 Model, Numerical Model, Reservoir and Sediment, Sediment Flushing