

توسعه مدل عددی سه بعدی به منظور شبیه سازی جریان سیال و انتقال رسوب در حوضچه های ترسیب

سید حسین قریشی نجف آبادی*

دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۶/۵ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۱۱/۲۸)

چکیده - هنگامی که رودخانه مقادیر قابل توجهی از ذرات رسوب را حمل می کند، طرح یک حوضچه ترسیب در ابتدای آبریز ضروری است. در تحقیق حاضر یک مدل عددی سه بعدی به منظور شبیه سازی فرایند رسوب گذاری در حوضچه های ترسیب توسعه داده شده است. معادلات متوسط گیری شده زمانی ناویراستوکس (معادلات رینولدز) به عنوان معادلات حاکم جریان، معادله انتقال-پخش غلظت رسوبات برای شبیه سازی بارمعلق و معادله وان راین به عنوان بار بستر در تمام سلول های بستر به عنوان شرایط مرزی کف استفاده شده است. روش مورد استفاده برای حل عددی مجموعه معادلات جریان، روش حجم محدود در مکان و روش اختلاف محدود در زمان است. برای فرایند جداسازی فشار، از الگوریتم MAC بهره گرفته شد. برای گسسته سازی معادله انتقال-پخش رسوب نیز روش حجم محدود مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصله با مدل های فیزیکی مختلف، مورد مقایسه و صحت سنجی قرار گرفت که نتایج بسیار خوبی حاصل گردید. سپس مدل عددی در حوضچه ترسیب نکوآباد به عنوان مطالعه موردی با موفقیت به کار گرفته شد.

واژگان کلیدی: شبیه سازی عددی، رسوب گذاری، حوضچه های ترسیب.

Development of Three-Dimensional Numerical Model to Simulate Fluid Flow and Sediment Transport in the settling Basins

S. H. Ghoreishi Najafabadi*

College of Technology & Engineering of Shahid Abbaspour, Shahid Beheshti University

Abstract: When high concentration of sediment is carried by the river, a settling basin design is required at the intake. In the present research, a three-dimensional numerical model was developed to simulate settling basin sedimentation. For the simulation, time averaged Navier-Stokes equations (RANS) as flow governing equations, convection-diffusion equation for suspended sediment concentration, and Van-Rijn bed load equation for boundary condition in the bed were used. Numerical solutions of the flow governing equations were suggested to be finite volume spatially and finite difference temporally. Decoupling procedure of the pressure was derived from MAC. Finite volume method was applied to discretise the convection-diffusion equation for the suspended sediment equation. The predicted results proved comparable with the observed experimental data. Thereafter, the model was successfully applied to a real case study in Nekoabad settling basin.

Keywords: Numerical simulation, sedimentation, settling basins.

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ghoreishi@pwut.ac.ir

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، با توجه به محدودیت منابع آب تجدید شونده، افزایش تقاضای آب باعث کاهش سرانه این منابع در نقاط مختلف جهان شده است. از این رو بهره‌برداری از این منابع به‌روش مطلوب، مؤثر و کارا برای تضمین توسعه پایدار، به‌عنوان یکی از مهمترین موضوعات مطرح در جوامع بشری می‌باشد.

یکی از اصلی‌ترین و مهم‌ترین مسائل در بخش آب، تأمین آب مورد نیاز و انتقال آن است. از عوامل کاهش‌دهنده راندمان انتقال، رسوبگذاری در کانال‌های انتقال آب و در تأسیسات آبیاری است. از آنجا که خسارات وارده توسط رسوبات رودخانه‌ای به طبیعت، کشاورزی و سازه‌های آبی ساخته شده در رودخانه‌ها بسیار گسترده، وسیع و زیان‌آور است، علم شناخت رسوبات و کنترل آن‌ها برای متخصصان مهندسی آب امری ضروری است.

برای جلوگیری یا به حداقل رساندن خسارات وارده باید سه فرایند فرسایش، انتقال و نهشته شدن مواد رسوبی را مورد مطالعه قرار داد. به دلیل زیاد بودن عوامل مؤثر در ایجاد این فرایندها، پیچیدگی‌های خاصی در آنها وجود دارد.

هنگامی که رودخانه مقادیر قابل توجهی از ذرات رسوب را حمل می‌کند، طرح یک حوضچه ترسیب در ابتدای آبگیر ضروری است به گونه‌ای که سرعت پایین جریان در حوضچه و نیروی ثقل، موجب ته‌نشینی ذرات شده و غلظت رسوبات در جریان خروجی حوضچه کاهش یابد.

روش‌های مختلفی برای طراحی حوضچه‌های ترسیب ارائه شده‌اند. در روش کلاسیک اگر فرض شود که ذره رسوبی در ابتدای حوضچه در سطح آب قرار داشته باشد در آن صورت طول حوضچه باید آنچنان انتخاب شود که این ذره در این فاصله ته‌نشین گردد. در نتیجه طول حوضچه برابر است با:

$$L = \alpha V H / \omega \quad (1)$$

در رابطه مزبور H و V به ترتیب عبارتند از سرعت جریان در حوضچه و عمق حوضچه و ω سرعت سقوط ذرات است.

α نیز ضریبی است که معمولاً برابر $1/2$ اختیار می‌شود [۱]. مطابق رابطه فوق برای افزایش راندمان ترسیب، طول حوضچه باید طولانی‌تر باشد اما تجربه محققین نشان داده‌است که افزایش طول حوضچه نه تنها راندمان را از حدی بالاتر نمی‌برد بلکه باعث افزایش هزینه‌های سازه نیز می‌شود. از این رو لازم است تا برای طراحی از روش‌های نوین بهره گرفت [۲]. مشکل زمانی شدیدتر می‌شود که در مطالعات، پیش از طراحی یا حتی هنگام بهره‌برداری تصویری نادرست از میزان آورد رسوبات به حوضچه ترسیب یا رفتار و حرکت رسوبات درون حوضچه، پیش‌بینی شود. براین اساس ضرورت انجام مطالعات صحیح و مدون در برآورد واقعی‌تر میزان رسوبات وارد شده به حوضچه و چگونگی رفتار و حرکت این رسوبات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود. این مطالعات می‌تواند از طریق مدل‌های فیزیکی، روش‌های تجربی و نیمه تجربی و یا مدل‌های عددی انجام گیرد. مدل‌های فیزیکی که منطبق بر شرایط خاص هر پروژه ساخته می‌شوند، وقت‌گیر و پرهزینه بوده و نتایج آن‌ها نیز به‌سادگی برای سایر پروژه‌ها قابل تعمیم نمی‌باشد. از دیگر چالش‌های پیش‌رو در استفاده از روش‌های تجربی و نیمه تجربی آن است که تعداد بسیاری از این روش‌ها با توجه به شرایط اقلیمی و جغرافیایی نقاط مختلف دنیا به‌دست آمده و کالیبره شده‌اند. بنابراین به مقایسه نتایج حاصل از این روش‌ها با داده‌های واقعی که حاصل عملیات هیدروگرافی حوضچه است نیاز است. [۳].

مدل‌های عددی کم هزینه‌تر بوده و در حالت سه‌بعدی به دلیل شبیه‌سازی منطبق بر واقعیت، دقیق‌تر از روش‌های مذکور است و کاربرد آن‌ها نیز بخصوص با توسعه کامپیوترهای پیشرفته سریع‌تر در حال گسترش است.

در تحقیق حاضر یک مدل عددی سه‌بعدی برای جریان سیال و انتقال رسوب توسعه داده شده است و با به‌کارگرفتن آن در حوضچه‌های ترسیب و سپس مقایسه آن با مقادیر واقعی، صحت نتایج این مدل مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که مدل مورد بحث توسط جمعی از اساتید و پژوهشگران

دانشگاه لیل فرانسه و پردیس شهید عباسپور دانشگاه شهید بهشتی تهیه و کماکان در حال توسعه است.

۲- معادلات حاکم جریان سیال

معادلات حاکم جریان سیال در حالت کلی عبارتند از معادلات بقای جرم، بقای ممنتوم و بقای انرژی، اما با توجه به مسأله و فرضیات مورد نظر، هر مدل با شکل‌های مختلفی دیده می‌شود. در این تحقیق از معادلات متوسط‌گیری شده زمانی ناوراستوکس معروف به معادلات رینولدز^۱ استفاده شده است. برای حل مستقیم معادلات ناوراستوکس بدون متوسط‌گیری زمانی، به رایانه‌هایی با سرعتی بسیار زیادتر از رایانه‌های امروزی نیاز می‌باشد. متوسط‌گیری زمانی باعث اضافه شدن ترم‌های جدید به معادلات ناوراستوکس که بیانگر آشفتگی جریان هستند، شده است [۴]، لذا برای به‌دست آوردن ترم‌های آشفتگی در معادلات ناوراستوکس مدل‌های آشفتگی توسعه پیدا نموده‌اند. فرم کلی معادلات رینولدز به شرح ذیل می‌باشد:

معادله بقای جرم:

$$\frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

معادلات ممنتوم در سه جهت:

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{U}_i \bar{U}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \right) + f_{B_i} \quad (3)$$

در این معادلات $\bar{U}_i$ سرعت متوسط جریان، $\bar{P}$ فشار متوسط، ν و ρ به ترتیب ویسکوزیته سینماتیکی و چگالی سیال است. $\bar{u}_i \bar{u}_j$ تنش‌های رینولدز است که با استفاده از مدل‌های آشفتگی حل می‌شوند و تابعی از مکان، زمان، سرعت‌های متوسط جریان، انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ استهلاك انرژی جنبشی آشفتگی (ε) است. عبارت آخر در سمت راست معادله (۳)، نیروهای حجمی شامل نیروهای وزن، کریولیس، گریز از مرکز و الکترومگنتیک است. در این تحقیق فقط نیروی وزن در نظر گرفته شده و از بقیه صرف‌نظر گردیده است. نیروی وزن نیز

با توجه به درجه شیب بستر (α) به صورت زیر تعریف گردیده است:

$$\begin{aligned} f_B &= g \sin \alpha & \text{if } i &= 1 \\ f_B &= 0 & \text{if } i &= 2 \\ f_B &= -g \cos \alpha & \text{if } i &= 3 \end{aligned} \quad (4)$$

در معادلات ذکر شده در این بخش، اندیس‌های i و j که می‌توانند ۱، ۲ یا ۳ باشند، به ترتیب نشان‌دهنده راستای x ، y و z هستند.

برای محاسبه تنش‌های رینولدز در معادلات مومتوم از رابطه بوزینسک به شرح زیر استفاده می‌شود:

$$-\bar{u}_i \bar{u}_j = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (5)$$

در آن δ_{ij} به دلتای کرانکر معروف است و به صورت $\delta_{ij} = 1$ if $i = j$ و $\delta_{ij} = 0$ if $i \neq j$ می‌گردد.

برای محاسبه لزجت آشفتگی (ν_t) در معادله (۵)، از مدل‌های آشفتگی باید بهره گرفت. در این تحقیق مدل استاندارد $k-\varepsilon$ مورد استفاده قرار گرفته است. مقدار ν_t از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

که در آن C_μ یک ضریب تجربی است و معمولاً برابر ۰/۰۹ در نظر گرفته می‌شود. انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ استهلاك انرژی جنبشی آشفتگی (ε) نیز از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \bar{u}_i \bar{u}_j \bar{D}_{ij} - \varepsilon \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \\ &C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (-\bar{u}_i \bar{u}_j \bar{D}_{ij}) - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (8)$$

که در آن $\bar{D}_{ij}$ به عنوان نرخ متوسط تانسور کرنش، از رابطه $\bar{D}_{ij} = (\partial \bar{U}_i / \partial x_j + \partial \bar{U}_j / \partial x_i) / 2$ بدست می‌آید. ضرایب تجربی $C_{\varepsilon 1}$ ، $C_{\varepsilon 2}$ ، σ_k و σ_ε نیز به صورت معمول به ترتیب برابر ۱/۹۲، ۱/۴۴، ۱/۳۰ و ۱ در نظر گرفته می‌شوند.

۳- معادلات حاکم رسوب

در تحقیق حاضر از معادله انتقال-پخش^۲ غلظت رسوبات برای شبیه سازی بار معلق و از معادله وان رین به عنوان بار بستر برای تمامی سلول های بستر در کف مدل به صورت شرایط مرزی استفاده شده است. همچنین تغییرات ارتفاع رسوبات بستر با استفاده از قانون بقای جرم محاسبه شد. معادله انتقال-پخش رسوبات به شکل زیر تعریف می شود:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} + \omega \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_3} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \right) \quad (j=1,2,3) \quad (9)$$

در معادله فوق ضریب پخشیدگی رسوب (Γ) به صورت معادله ذیل با ادی ویسکوزیته (ν_t) مرتبط می شود:

$$\sigma_s = \frac{\nu_t}{\Gamma} \quad (10)$$

که در آن σ_s عدد پراوتل - اشمیت آشفستگی است و در بسیاری از جریان ها برابر مقدار ثابتی تخمین زده شده است. در تحقیق حاضر نیز همانند اغلب تحقیق ها، این عدد برابر ۱ در نظر گرفته شده است [۵ و ۶]. اندیس ۳ در ترم سوم سمت چپ معادله (۹) نشان دهنده جهت عمودی و ω بیانگر سرعت سقوط ذرات رسوب است. در تحقیق حاضر برای محاسبه سرعت سقوط از روش روبی [۷] استفاده شده است.

با حل معادله انتقال-پخش، غلظت رسوبات برای تک تک سلول های شبکه محاسباتی به جز سلول های کف تخمین زده می شود. در این مقاله برای محاسبه بار بستر که به عنوان شرایط مرزی سلول های کف شبکه مدنظر است، از معادله وان رین [۸] به شرح ذیل استفاده شده است:

$$\bar{C}_a = 0.015 \frac{d_{50}}{a} \frac{T^{1.5}}{D_*^{0.3}} \quad (11)$$

در معادله فوق a به عنوان ارتفاع مبنا در بالای بستر شناخته می شود، d_{50} قطر متوسط ذرات رسوب و T پارامتر تنش برشی بستر است که با توجه به فرمول $T = (\tau - \tau_c) / \tau_c$ قابل محاسبه است. در آن فرمول نیز τ تنش برشی بستر و τ_c تنش برشی بحرانی بستر است که در آن تنش، ذرات بستر در آستانه حرکت قرار می گیرند و جهت محاسبه آن از روش اصلاح شده

شیلدز [۹] بهره گرفته شده است. همچنین در معادله (۱۱)، D_* پارامتر ذرات است که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$D_* = d_{50} \left[(G_s - 1) g / \nu^2 \right]^{1/3} \quad (12)$$

در معادله مذکور G_s چگالی مخصوص ذرات رسوب است که به طور معمول برابر ۲/۶۵ در نظر گرفته می شود.

در نهایت یادآور می شود که برای تخمین تغییرات ارتفاع رسوبات ته نشین شده در حوضچه، از اصل بقای جرم به شکل زیر بهره گرفته شده است [۵]:

$$(1 - p_s) \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (q_{b,x} + q_{s,x}) + \frac{\partial}{\partial y} (q_{b,y} + q_{s,y}) = 0 \quad (13)$$

که در آن Z_b ارتفاع رسوبات در کف، ρ_s چگالی رسوبات، $q_{b,x}$ و $q_{b,y}$ بار بستر (حجمی) به ترتیب در راستای x و y که از معادله بار بستر وان رین قابل محاسبه است. $q_{s,x}$ و $q_{s,y}$ بار معلق (حجمی) می باشند که با استفاده از پیشنهاد وان رین [۵] به شکل زیر قابل محاسبه است:

$$q_{s,x} = \int_a^h (\bar{U} \bar{C} - \Gamma \frac{\partial \bar{C}}{\partial x}) dz \quad (14)$$

$$q_{s,y} = \int_a^h (\bar{V} \bar{C} - \Gamma \frac{\partial \bar{C}}{\partial y}) dz$$

در معادلات فوق a ارتفاع مبنای بالای بستر، h عمق آب و $\bar{C}$ غلظت متوسط رسوبات معلق در هر سلول از شبکه محاسباتی است و از معادله انتقال-پخش رسوبات (معادله ۹) محاسبه می شود.

۴- شیوه عددی و گسسته سازی معادلات حاکم

به طور کلی مدل عددی توسعه یافته در مرحله اول به دریافت و تحلیل داده های موجود می پردازد. در طی مرحله دوم مدل جریان به کار گرفته می شود تا شرایط هیدرولیکی حاصل گردد. نتایج هیدرولیکی جریان به عنوان داده های ورودی برای مدل مورفولوژیک مورد استفاده قرار می گیرند. در نهایت مدل دینامیکی مذکور نرخ انتقال رسوب و تغییرات بستر را محاسبه و پیش بینی می کند.

MAC^۵ [۱۲]، بهره گرفته شد. در این روش فشار در هر بازه زمانی توسط معادله پواسون حل می‌شود و سپس سرعت‌ها از معادله مومنتم به دست می‌آیند، و فرایند چولسکی به کار گرفته می‌شود تا دستگاه معادلات خطی شده حل گردد.

پایداری محاسبات همیشه یکی از ملزومات روش‌های عددی است. در مدل حاضر برای برقراری پایداری از شرط CFL^۶ بهره گرفته شده است. این وضعیت پایداری، محدودیت حدی زیر را برای گام زمانی انتقال (Δt_c) ایجاد می‌کند:

$$\Delta t_c = \frac{1}{\max \left[\frac{|\bar{U}|}{\Delta x} + \frac{|\bar{V}|}{\Delta y} + \frac{|\bar{W}|}{\Delta z} \right]} \quad (۱۹)$$

برای گام زمانی پخشیدگی (Δt_d)، محدودیت حدی زیر باید مدنظر قرار گیرد [۱۰]:

$$\Delta t_d = \frac{1}{3v \max \left[\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right]} \quad (۲۰)$$

سرانجام شرط زیر برای ارزیابی گام زمانی کلی مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$\Delta t \leq \frac{1}{\frac{1}{\Delta t_c} + \frac{1}{\Delta t_d}} \quad (۲۱)$$

برای گسسته سازی معادلات انتقال-پخش رسوب نیز روش حجم محدود مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور روش‌های اختلاف هیبرید^۷ و کاملاً ضمنی در مختصه مکانی و زمانی [۱۳] به کار گرفته شد.

در تحقیق حاضر شرایط مرزی و اولیه بدین ترتیب مدنظر قرار گرفت که در مبدأ زمان و در محل ورودی حوضچه، مقادیر سرعت طولی، غلظت رسوب و فاکتورهای تولید و اضمحلال انرژی معلوم و ثابت فرض شد (شرایط مرزی ورودی درپشله). سرعت‌های عرضی و عمقی اولیه در دامنه حل صفر در نظر گرفته شد. مقادیر k و ε در ورودی با استفاده از شدت آشفته‌گی T_i و یک مشخصه طول L با

روش مورد استفاده برای حل عددی مجموعه معادلات جریان سیال، روش حجم محدود در مکان و روش تفاضل محدود در زمان است [۱۰]. بدین منظور الگوریتم Time-Marching براساس روش صریح مرتبه اول اویلر برای حل معادله مومنتم وابسته به زمان استفاده شده است. در این روش معادله بقای جرم، گرادیان فشار در معادله مومنتم و شرایط مرزی، در سطح زمانی جدید ($n+1$) و سایر عبارت‌های معادله مومنتم در سطح زمانی قدیم (n) به کار گرفته می‌شوند. عبارت‌های تولید و اضمحلال انرژی نیز در معادلات انتقال-پخش توسط روش صریح اویلر حل می‌شوند. معادلات جریان گسسته شده زمانی به شکل زیر خلاصه می‌شوند:

$$\frac{\partial \bar{U}_j^{(n+1)}}{\partial x_j} = 0 \quad (۱۵)$$

$$\frac{\bar{U}_i^{(n+1)} - \bar{U}_i^{(n)}}{\Delta t} + \left[\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{U}_i \bar{U}_j) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \right) - f_{B_i} \right]^{(n)} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}^{(n+1)}}{\partial x_i} = 0 \quad (۱۶)$$

$$k^{(n+1)} = k^{(n)} + \Delta t \left[-\bar{U}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \bar{u}_i \bar{u}_j \bar{D}_{ij} - \varepsilon \right]^{(n)} \quad (۱۷)$$

$$\varepsilon^{(n+1)} = \varepsilon^{(n)} + \Delta t \left[-\bar{U}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (-\bar{u}_i \bar{u}_j \bar{D}_{ij}) - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \right]^{(n)} \quad (۱۸)$$

سپس از معادلات مزبور در یک حجم کنترل انتگرال گیری شده و با استفاده از قضیه دیورژنس گوس به انتگرال سطح تبدیل می‌شود.

برای شبکه بندی هندسه حوضچه، شبکه بندی با سازمان مکعبی با شیوه شبکه جابه جا شده^۳ مورد استفاده واقع شده است. طرح درونیایی بالادست مرتبه دوم سرعت جابجائی (QUICK)^۴ [۱۱]، به منظور محاسبه ترم انتقال در معادله مومنتم به کار گرفته شد. برای گسسته سازی عبارت پخشیدگی معادلات مومنتم، روش تفاضل مرکزی مرتبه دوم استفاده شد. برای فرایند جداسازی فشار، از الگوریتم

استفاده از معادلات زیر فرض شد [۱۴]:

$$k = T_i \bar{U}^2, \quad \varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{0.07L} \quad (22)$$

در خروجی برای تمامی متغیرهای جریان گرادیان صفر مدنظر قرار گرفت (شرایط مرزی خروجی نیومن) به جز برای فشار که مقدار معلوم صفر به مانند خروجی آزاد درنظر گرفته شد. نتایج حاصل از پارامترهای مذکور در گام زمانی اول به عنوان داده های ورودی برای گام زمانی دوم مورد استفاده قرار گرفته و همین روند برای گام های زمانی بعدی تا همگرایی کامل ادامه پیدا کرد. با استفاده از تابع دیوار شرایط مرزی متغیرها در اولین سلول مجاور دیواره با این واقعیت که در زیرلایه آرام واقع گردد، مورد محاسبه قرار گرفت. موقعیت فرضی اولین گره با اجرای اولیه مدل کنترل می گردد تا از قرارگرفتن آن در زیرلایه آرام اطمینان حاصل شود و در غیر این صورت لازم است فاصله اولین گره تا دیواره کمتر شود. همچنین به علت استفاده از شبکه جابجا شده مقادیر k و ε بر روی دیواره تعریف نشده است. در مجاورت دیواره شرایط مرزی برای پارامترهای ذکر شده براساس نظریه پاتل و همکاران [۱۵] به صورت زیر تعریف شده است:

$$\frac{\partial k}{\partial y} = 0 \quad \text{or} \quad \frac{\partial k}{\partial z} = 0 \quad (23)$$

$$\varepsilon = \nu \frac{\partial^2 k}{\partial y^2} \quad \text{or} \quad \varepsilon = \nu \frac{\partial^2 k}{\partial z^2}$$

شرایط مرزی نیومن، برای همه متغیرها در طول دیواره به کار گرفته شد [۱۶].

معادله وان رین (معادله ۱۱) به عنوان بار بستر برای تمام سلول های بستر در کف مدل به صورت شرایط مرزی برای غلظت رسوب کف استفاده شده است و شرایط مرزی غلظت رسوب در سطح آب به صورت زیر تعریف شد [۵]:

$$\omega c + \Gamma \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad (24)$$

در حوضچه های ترسیب به طور معمول ارتفاع سطح آب توسط

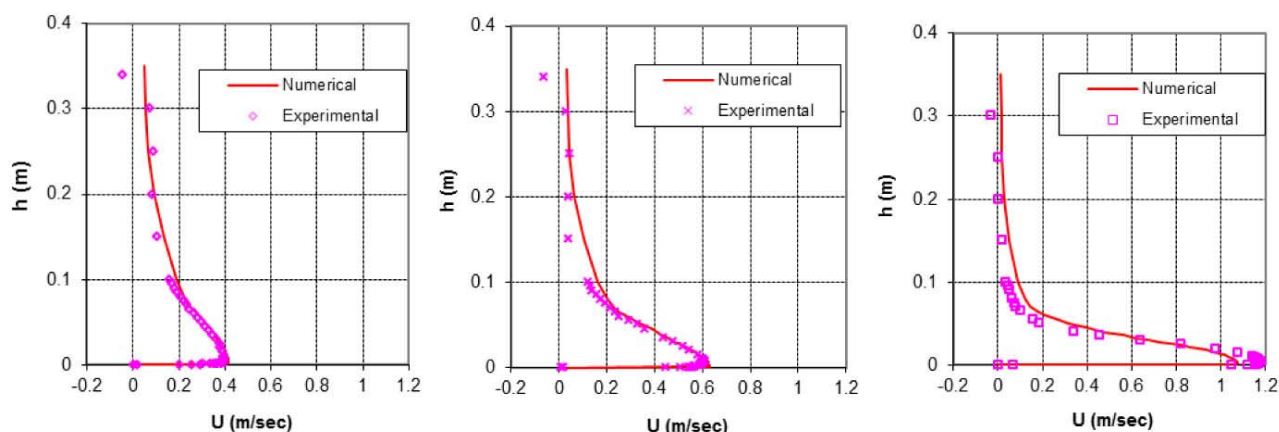
دریچه های خروجی حوضچه تنظیم می شود، لذا در مدل مورد مطالعه ارتفاع سطح آب در خروجی به عنوان شرط مرزی معلوم، مدنظر قرارگرفت و با توجه به اینکه تغییرات پروفیل طولی و عرضی سطح آب در حوضچه ناچیز می باشد لذا به منظور کاهش هزینه مدل، سطح آب به صورت سطح صلب فرض شد و تغییرات عمق آب در طول حوضچه مدل نگردید.

۵- صحت سنجی و حساسیت سنجی مدل عددی

به منظور صحت سنجی بخش هیدرودینامیک مدل توسعه داده شده، مقایسه نتایج حاصل از آن با نتایج حاصل از اندازه گیری یک مدل آزمایشگاهی مدنظر قرار گرفت. این مدل آزمایشگاهی که اندازه گیری دقیق سرعت جریان در آن با استفاده از دستگاه لیزر داپلر انجام گردید، مدل جریان یک فلوم آزمایشگاهی به عنوان مخزن یک سد است که نتایج تحقیق سیدسراجی در سال ۲۰۰۲ در دانشگاه کان فرانسه بوده است [۱۷]. در آن تحقیق فلوم آزمایشگاهی با ابعاد ۱۶/۵ متر طول، ۰/۵ متر عرض و ۰/۷ متر عمق بوده و یک صفحه مستطیلی شکل در پایین دست فلوم، نقش بدنه سد را بازی می کرد.

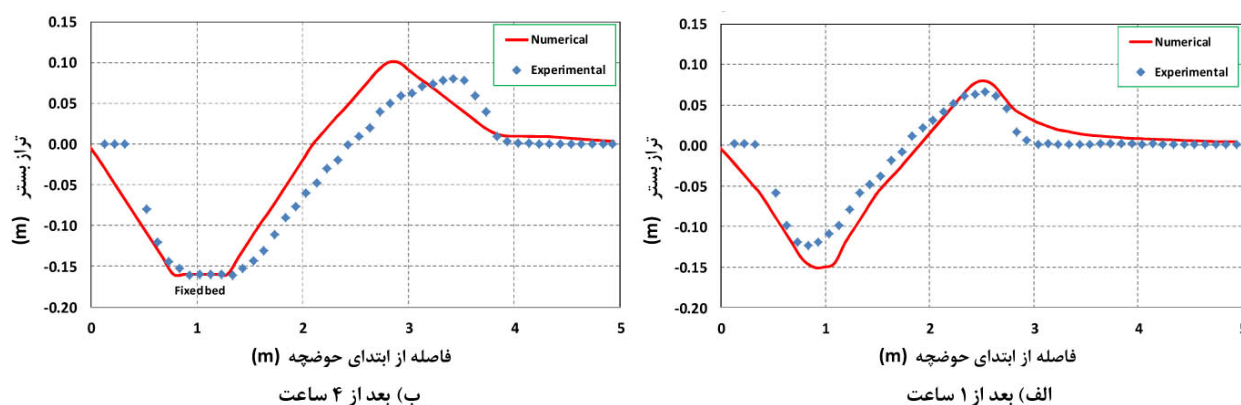
برای مقایسه دو مدل، نتایج حاصل از جریانی با شدت ۲۵ لیتر در هر ثانیه و عمق آب ۳۵ سانتی متر در بالادست سد با بازشدگی سرتاسری از زیر صفحه به ارتفاع ۳ سانتی متر مورد استفاده قرار گرفت و سرعت های اندازه گیری شده در مدل آزمایشگاهی و محاسبه شده در مدل عددی در راستای عمودی از کف تا سطح آب و در فواصل مختلف ۲، ۳، ۴، ۵، ۸ و ۱۱ سانتی متر از بدنه سد در بالادست آن در مقابل یکدیگر ترسیم شدند. تعدادی از این مقایسه به عنوان نمونه در شکل (۱) نشان داده شده است.

همانگونه که از این اشکال بر می آید نتایج دو مدل تطابق خوبی را نشان می دهند. بیشترین اختلاف در سرعت های نزدیک سطح آزاد آب است که علت آن شرایط مرزی در نظر گرفته



الف) ۲ سانتی متر بالادست ب) ۵ سانتی متر بالادست ج) ۸ سانتی متر بالادست

شکل ۱- مقایسه سرعت‌های متوسط جریان بین مدل عددی و مدل فیزیکی سیدسراجی [۱۷]



الف) بعد از ۱ ساعت ب) بعد از ۴ ساعت

شکل ۲- مقایسه پروفیل کف در راستای خط مرکزی حوضچه بین مدل عددی و مدل فیزیکی تاک [۱۸]

۱۶ سانتی متر پوشانده شده است. خروجی فلوم با ۱/۲ متر عرض و ۱ متر طول، جریان را به بیرون هدایت می‌کند. برای مقایسه نتایج مورفولوژیکی، در مدل عددی با ابعاد و مشخصات مذکور جریانی با عمق ۰/۱۵ متر و دبی ثابت ۱۸ لیتر در هر ثانیه، مشابه مدل آزمایشگاهی برقرار شد. نتایج شبیه سازی تغییرات ارتفاع بستر در راستای خط مرکزی حوضچه پس از ۱ و ۴ ساعت با مقادیر اندازه‌گیری شده مدل آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت که آن را می‌توان در شکل (۲) ملاحظه نمود. همان‌طور که از شکل (۲) برمی‌آید نتایج مدل عددی تطابق نسبتاً خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد.

در مدل‌های عددی مزبور، حساسیت ابعاد شبکه در سه راستای طولی، عرضی و عمودی مورد بررسی قرار گرفت. این

شده (نیومن) برای سطح آزاد آب در مدل عددی است، و البته این اختلاف جزئی در نتیجه حاصل از انتقال رسوب در حوضچه بی‌تأثیر است [۱۶].

در دومین مرحله صحت‌سنجی برای بخش مورفولوژی مدل توسعه داده شده، مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج حاصل از اندازه‌گیری مدل آزمایشگاهی تاک [۱۸] مدنظر قرار گرفت. مدل مزبور تشکیل شده است از یک فلوم مستطیلی آزمایشگاهی مستقر در آزمایشگاه مهندسی منابع آب دانشگاه صنعتی بانکوک. فلوم مورد نظر دارای یک ورودی با بستر فرسایش ناپذیر با طول ۲ متر و عرض ۲۰ سانتی متر است که متصل است به یک حوضچه با عرض ۴ متر و طول ۵ متر و کف آن با ذرات ریز رسوب با قطر متوسط ۰/۶ میلی‌متر با ضخامت



شکل ۳- پلان موقعیت حوضچه‌های ترسیب نکوآباد

است. در ورودی حوضچه، ۸ پایه پل ۵/۰ متری و در خروجی ۲۰ پایه پل با عرض‌های ۵/۰، ۱ و ۵/۱ متر باعث تنگ شدن ورودی و خروجی شده‌اند. در سال ۱۳۸۶ تعدادی اندازه‌گیری دبی و غلظت رسوب ورودی و خروجی در حوضچه مورد بحث انجام پذیرفته که به اضافه راندمان تله‌اندازی محاسبه شده حوضچه، در جدول ۱ درج شده است.

۷- نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در حوضچه ترسیب نکوآباد

برای شبیه‌سازی حوضچه ترسیب نکوآباد از شبکه‌بندی با ساختار مکعبی با ابعاد $12 \times 48 \times 58$ به ترتیب در راستای طول، عرض و ارتفاع استفاده شد (شکل ۴). لازم به توضیح است که حوضچه در راستای عرضی تقارن دارد؛ لذا شبکه‌بندی با ابعاد ذکر شده و همچنین شبیه‌سازی جریان و رسوب برای نیمه حوضچه انجام شد. بدین منظور شرط مرزی تقارن برای خط میانی که در شکل ۴ به صورت پررنگ‌تر نمایش داده شده است، مدنظر قرار گرفت. دبی‌های ورودی ۱۳ و ۲۴ متر مکعب در ثانیه که در محدوده زمانی برداشت شده مطابق جدول ۱ است با میانگین غلظت رسوب ورودی مشخص، آنچنان که در جدول شماره ۲ درج شده است، با اندازه متوسط ذرات رسوب ورودی برابر 0.065 میلی‌متر به‌عنوان شرایط

بررسی نشان داد ابعاد شبکه در راستای عمودی بیشترین حساسیت را نشان می‌دهد. لذا نتایج فوق برای حالت بهینه ابعاد شبکه یعنی ریزترین ابعادی که از آن ریزتر تغییرات قابل ملاحظه‌ای در نتایج حاصل نمی‌شود، انجام پذیرفت. تعداد گره‌های اختیار شده برای شبیه‌سازی عددی مدل سیدسراجی در راستای x ، y و z به ترتیب ۳۱، ۲۰ و ۳۵ و برای مدل تاک ۸۰، ۳۳ و ۱۲ می‌باشد. در هر دو مدل بخاطر حساسیت بیشتر مدل به ابعاد شبکه در نزدیکی بستر، ابعاد در راستای عمودی یکنواخت گرفته نشد و نزدیک بستر فاصله گره‌ها بسیار کم است و به سمت سطح آب این فاصله به مرور افزایش می‌یابد. در مدل‌سازی تاک علاوه بر غیر یکنواخت بودن ابعاد شبکه در راستای عمودی، ابعاد شبکه در راستای عرضی نیز یکنواخت نمی‌باشد. در نزدیکی خط مرکزی این ابعاد کوچکتر و به سمت دیواره‌ها به مرور ابعاد شبکه بزرگتر می‌شود.

۶- حوضچه ترسیب نکوآباد اصفهان (مطالعه موردی)

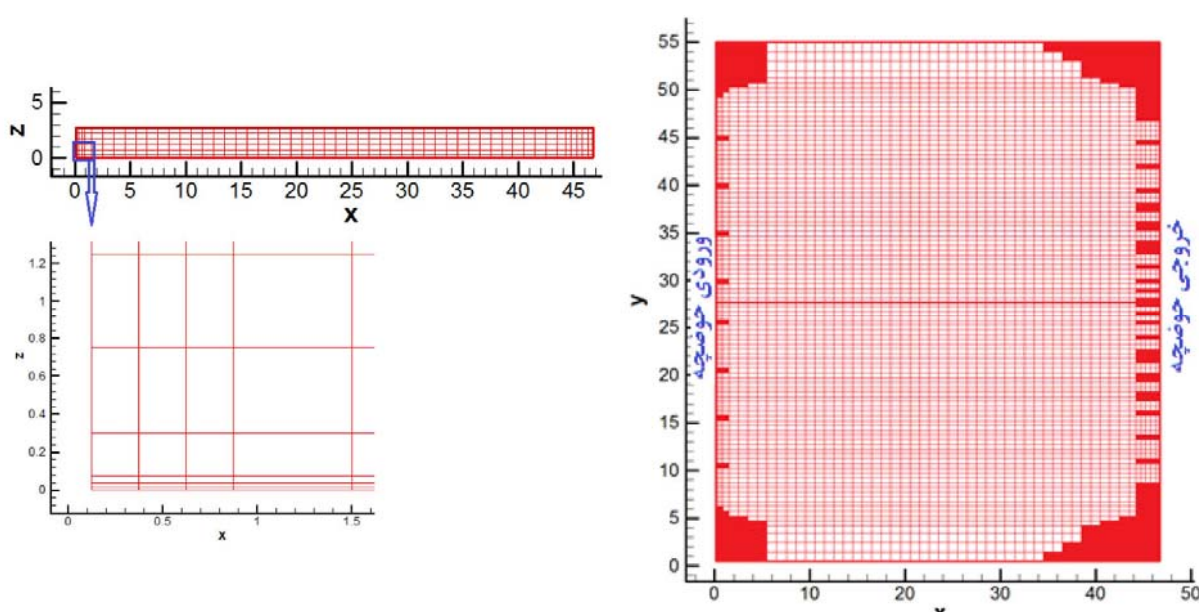
رودخانه زاینده‌رود از زمان‌های قدیم تنها منبع تأمین آب سطحی در منطقه اصفهان بوده است و سد نکوآباد در ۴۵ کیلومتری جنوب غربی شهر اصفهان، اولین سد انحرافی است که جهت کنترل سطح آب زاینده‌رود و انتقال آب، در مجاورت روستای نکوآباد احداث گردیده است. در طرفین سد نکوآباد، دو کانال اصلی جهت برداشت به ترتیب حداکثر ۱۵ و ۵۰ مترمکعب در ثانیه آب به‌منظور آبیاری زمین‌هایی به‌وسعت ۱۳ هزار و ۴۸ هزار هکتار ساخته شده است. طول کانال اصلی سمت راست سد نکوآباد، ۳۵/۲۲ کیلومتر و طول کانال اصلی سمت چپ، ۵۹/۳۵ کیلومتر می‌باشد. به‌منظور کاهش بار رسوبی، در ابتدای هر دو کانال از حوضچه ترسیب استفاده شده است (شکل ۳). حوضچه سمت چپ دارای عرض ۵۵ متر، طول ۴۷ متر و عمق ۳ متر می‌باشد. این ابعاد برای دبی طرح ۵۰ مترمکعب در ثانیه طراحی شده است و در تحقیق حاضر به بررسی روند رسوب‌گذاری در این حوضچه پرداخته شده

جدول ۱- مشخصات هیدرومتری اندازه‌گیری شده در حوضچه ترسیب (سمت چپ) نکوآباد [۱۹]

تاریخ	۸۶/۴/۲۷	۸۶/۵/۱۳	۸۶/۵/۳۰	۸۶/۶/۳۰	۸۶/۷/۱۵	۸۶/۷/۳۰
دبی (m^3/s)	۲۴	۱۲/۵	۱۳/۵	۲۴/۵	۲۵	۲۳/۵
غلظت رسوب ورودی (c_{in} : mg/lit)	۴/۴	۴/۴	۳/۱	۳/۵	۴	۴/۱
غلظت رسوب خروجی (c_{out} : mg/lit)	۲/۳	۳/۲	۲	۱/۶	۲/۳	۲/۵
درصد راندمان تله‌اندازی ($(c_{in}-c_{out}) \times 100 / c_{in}$)	۴۷/۷	۲۷/۳	۳۵/۴	۵۴/۳	۴۲/۵	۳۹

جدول ۲- نتایج شبیه سازی عددی حوضچه ترسیب نکوآباد

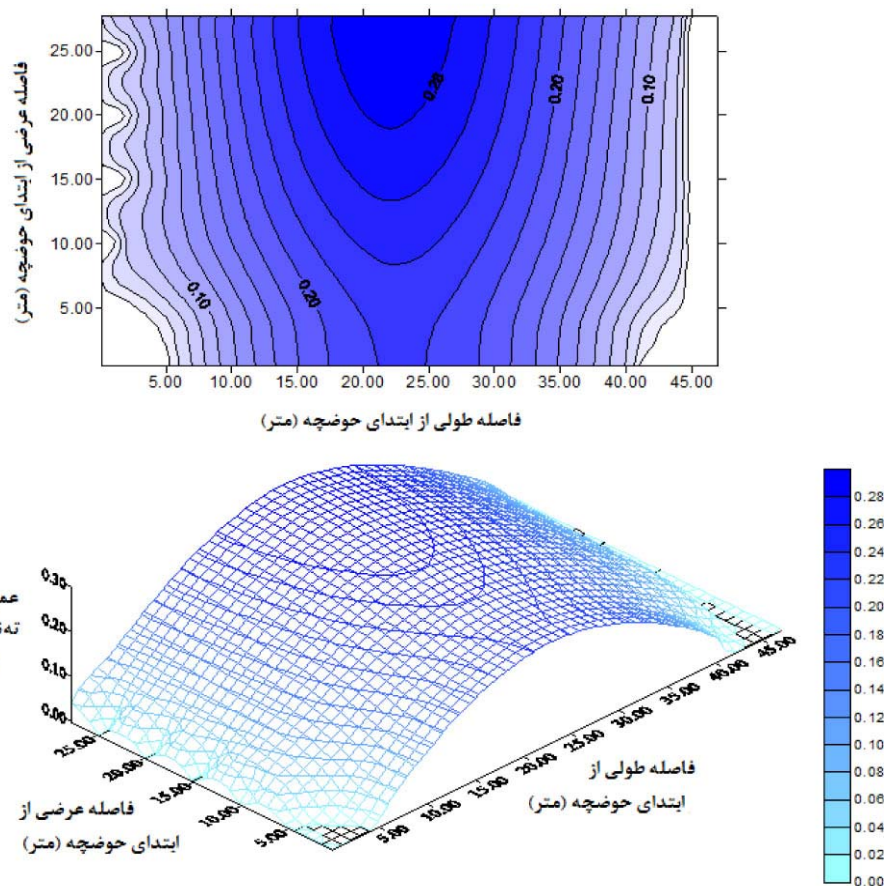
دبی (m^3/s)	۲۴	۱۳
غلظت رسوب ورودی (c_{in} : mg/lit)	۴	۳/۷
غلظت رسوب خروجی (c_{out} : mg/lit)	۱/۷	۲/۲
درصد راندمان تله‌اندازی ($(c_{in}-c_{out}) \times 100 / c_{in}$)	۵۶	۴۰



شکل ۴- شبکه بندی حوضچه ترسیب نکوآباد (X: راستای طولی، Y: راستای عرضی، Z: راستای عمودی و فواصل بر حسب متر)

رسوب ورودی، راندمان تله‌اندازی حوضچه نیز محاسبه شد. نتایج مذکور در جدول ۲ نشان داده شده است. لازم به توضیح است مطابق مقادیر اندازه‌گیری شده

مرزی ورودی مورد استفاده قرار گرفت و پس از شبیه‌سازی، نتایج غلظت رسوبات خروجی از حوضچه حاصل شد. با کسر غلظت رسوب ورودی از خروجی و نسبت آن به غلظت



شکل ۵- تغییرات پروفیل بستر در نیمه عرضی متقارن حوضچه ترسیب نکوآباد با دبی ۲۴ مترمکعب در ثانیه در مدت ۶ ماه

مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است و در شکل (۵) نیز نتایج براین اساس نشان داده شده است. آنچنان که از شکل مزبور برمی‌آید در این مدت رسوبات به عمق حداکثر ۳۰ سانتی‌متر در حوالی میانه حوضچه ته‌نشین شده‌اند و به سمت ورودی و خروجی حوضچه، رسوبات ته‌نشین شده تقریباً به صفر می‌رسد. با توجه به سرعت جریان نسبتاً بالاتر در ورودی و خروجی حوضچه به دلیل کوچکتر بودن مقاطع عرضی و نیز کاهش سرعت جریان در میانه حوضچه به دلیل حداکثر بودن مقطع عرضی، پروفیل کف حاصل از ته‌نشینی رسوبات منطقی به نظر می‌رسد.

۸- نتیجه گیری

در این تحقیق ابتدا مدل سه‌بعدی توسعه داده شده برای شرایطی مشابه با دو مدل آزمایشگاهی هیدرولیکی و

جدول ۱ برای دبی‌های حدود ۲۴ و ۱۳ متر مکعب در ثانیه به‌طور متوسط راندمان تله‌اندازی به‌ترتیب برابر ۴۵/۸۷ و ۳۱/۳۵ درصد مشاهده شده است که با نتایج شبیه‌سازی عددی مندرج در جدول ۲ قابل قیاس هستند. البته در این مرحله هدف مقایسه نتایج نیست و منظور نشان دادن توانایی مدل توسعه داده شده در شرایط واقعی است که مدل به‌خوبی از این مهم برآمده است. در ادامه برای تشریح بیشتر نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در حوضچه ترسیب مورد مطالعه، تغییرات پروفیل کف به‌ازای دبی متوسط ۲۴ مترمکعب در ثانیه و با غلظت رسوب ورودی ۴ میلی‌گرم در لیتر در بازه زمانی دو فصل سال، ترسیم شد که در شکل (۵) به‌صورت ترسیم خطوط هم‌تراز و ترسیم سه‌بعدی پروفیل بستر نشان داده شده است. لازم به یادآوری است که در مدل به‌دلیل تقارن عرضی حوضچه و به‌منظور کاهش زمان اجرا، نیمه‌ی عرضی متقارن

مورفولوژیکی، مورد شبیه‌سازی قرار گرفت که مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی و مقادیر اندازه‌گیری شده مدل‌های آزمایشگاهی، تطابق بسیار خوبی را نشان دادند. حساسیت سنجی مدل برای ابعاد شبکه نشان داد که بیشترین حساسیت در راستای عمودی است و در آن نیز ابعاد شبکه در نزدیکی بستر خود از حساسیت بالاتری برخوردار است. پس از صحت‌سنجی مدل، مطالعه موردی بر روی حوضچه ترسیب نکوآباد انجام شد. پس از شبکه‌بندی در حالت سه بعدی، شبیه‌سازی هیدرولیکی و مورفولوژیکی برای دبی‌ها و غلظت‌های رسوب

واژه‌نامه

1. Reynolds average Navier-Stokes (RANS)
2. convection-diffusion equation
3. staggered mesh
4. quadratic upwind interpolation for convective kinetics (QUICK)
5. mark and cell (MAC)
6. courant Friedrich-Lewy (CFL)
7. hybrid differencing scheme

مراجع

۱. بیرامی، م.، "سازه‌های انتقال آب"، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۷۴.
۲. آبشوری، ع.، قمشی، م.، ناصری، ع.، و شفاعی بجستان، م.، "برآورد راندمان حوضچه ترسیب واحد کشت و صنعت امام خمینی با نرم‌افزار شارک"، هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۳۸۵.
۳. اکبرزاده، ن.، "شبیه‌سازی یک‌بعدی الگوی رسوب‌گذاری در مخازن سدها"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، ۱۳۸۹.
4. Lane, S. N., and Richards, K. S., "High Resolution, Two-dimensional. Spatial Modeling of Flow Processes in a Multi-Thread Channel", *Hydrological Processes*, Vol. 8, pp. 1279-1298, 1998.
5. Van Rijn, L. C., "Principles of Sediment Transport in River", *Estuaries and Coastal Seas*, Aqua Publication- I11, 1993.
6. Olsen, N. R. B., "Hydro Informatics, Fluvial Hydraulics and Limnology", Department of Hydraulic and Environmental Engineering, The Norwegian University of Science and Technology, 2004.
7. Rubey, W. W., "Setting Velocities of Gravel, Sand and Silt Particles", *American Journal of Science*, Vol. 25, pp. 326-338, 1993.
8. Van Rijn, L. C., "Mathematical Modeling of Morphological Processes in the Case of Suspended Sediment Transport", Delft Technology University, Netherlands, 1987.
9. Miller, M. C., McCave, I. N., and Komar, P. D., "Threshold of Sediment Motion under Unidirectional", *Current Sedimentology*, Vol. 24, pp. 507-527, 1977.
10. Mompean, G., and Deville, M., "Unsteady Finite Volume Simulation of Oldroyd-B Fluid Through a Three-Dimensional Planar Contraction", *Journal Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 72, pp. 253-279, 1997.
11. Leonard, B. P., "A Stable Accurate Convective Modeling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 19, pp. 59-88, 1979.
12. Harlow, F. H., and Welch, J. E., "Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow or Fluid with Free Surface", *Physics of Fluids*, Vol. 8, pp. 2182-2189, 1965.
13. Spalding, D. B., "A Novel Finite-Difference Formulation for Differential Expressions Involving Both First and Second Derivatives", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 4, pp. 551-561, 1972.

14. Mompean, G., "Numerical Simulation of a Turbulent Flow Near a Right-Angled Corner using the Speziale Non-Linear Model with RNG K- ε Equations", *Computer and Fluids*, Vol. 7, pp. 847-859, 1998.
15. Patel, C. V., Rodi, W. and Scheuerer, G., "Turbulence Models for Near-Wall and Low Reynolds Number Flows", *AIAA Journal*, Vol. 23, pp. 1308-1319, 1984.
16. Ghoreishi, S. H., "Three-Dimensional Numerical Simulation of Sediment Flushing from Reservoirs", Doctoral Dissertation, University of Science and Technology of Lille, France, 2006.
17. SeyedSeraji, M. H., "*Etude Du Transport Sédimentaire Associé au Phénomène De Chasse D'un Barrage*, Thèse de Doctorat", Université de Caen, France, 2002.
- Thuc, T., "Two-Dimensional Morphological Computations near Hydraulic Structures, Doctoral Dissertation", Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1991.
۱۹. بیهقی، ا.، "شبیه‌سازی یک بعدی الگوی رسوب‌گذاری در حوضچه رسوب‌گیر توسط نرم‌افزار HEC-RAS"، پایان‌نامه دوره کارشناسی مهندسی عمران، دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور، ۱۳۹۰.