شبیه‌سازی عددی الگوی جریان متلاطم و آبشستگی موضعی بستر در اطراف آبشکن قائم و زاویه دار با مدل عددی FLOW-3D

مجتبی اسدی[1] و سید محمدعلی زمردیان[2*]

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی بخش مهندسی آب،دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز.

۲*-نویسنده مسئول، دانشیار بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و عضو هئیت علمی دانشگاه شیراز .

تاریخ دریافت: ۹۳/۳/۱۷ تاریخ پذیرش: ۹۴/۷/۱۳

چکیده

بررسی خصوصیات و رفتار جریان در رودخانه ها وسازه های مرتبط با آن از پدیده های پیچیده است که استفاده از نرم افزار را امری اجتناب ناپذیر می نماید. در ابتدا از نتایج مدل آزمایشگاهی ارائه شده توسط دوان و همکاران (۲۰۰۹) در آزمایشگاه مینیسوتا آمریکا برای صحت سنجی نرم افزار FLOW-3D نسخه ۹,۳ و مقایسه نتایج عددی شبیه سازی شده استفاده شده، در ادامه آبشکن مایل با زوایای ٦۰ و ۳۰ درجه نسبت به جهت جریان مورد بررسی قرار گرفت. شبیه سازی ها با نرم افزار FLOW-3D، به مدت ٦۵۰ ثانیه و با استفاده از مدل های آشفتگی دو معادله ای استاندارد،گروه نرمال شده و شبیه سازی گردابه های بزرگ انجام شد. با مقایسه مدل‌های مختلف آشفتگی و نتایج آزمایشگاهی، حداکثر عمق آبشستگی در نوک آبشکن با زاویه ۹۰ درجه در شرایط آزمایشگاه ۸/۸۲ سانتی متر و با استفاده از نرم افزارFLOW-3D ، حداکثر عمق آبشستگی در مدل های آشفتگی دو معادله ای استاندارد،گروه نرمال شده و شبیه سازی گردابه های بزرگ به ترتیب ۹/۱ ، ۸/۹ و ۹/۱ سانتی متر حاصل گردید که مدل آشفتگی دومعادله ای گروه نرمال شده تقریبا با ۹ درصد خطا، نسبت به دو مدل آشفتگی دو معادله ای استاندارد و شبیه سازی گردابه های بزرگ مطابقت بهتری را نشان داد. همچنین در شبیه سازی مربوط به آبشکن ٦۰ و ۳۰ درجه حداکثر عمق آبشستگی در نوک آبشکن ها به ترتیب ۸/۷۵ و ٦/۵ سانتی متر بود.

کلید واژه‌ها:آبشکن،آبشستگی،مدل آشفتگی، FLOW-3D.

Numerical Simulation of Turbulent Flow and Local Scouring Around of Spur Dike Straight and Angles by FLOW-3D

M. Asadi[1] and M. A. Zomorodian[2*]

1- M. Sc. Student Hydraulic Structure, Water Engineering Department, Shiraz University.
2*- Associate Professor of Water Engineering, Shiraz University.

Received:7 June 2014 Accepted: 5 October 2015

Abstract

Examining the properties and behavior of the flow in the rivers and its associated structures is one of complex phenomena that make the use of software inevitable. First, the results of laboratory test carried out by Duan et al. (2009) in Minnesota university, are used verification and comparison of numerical simulations of FLOW-3D(version 9.3). The vertical spur dike was first simulated to verify the model results and the inclined spur dike with 60° and 30° to the flow direction was then considered. The simulation performed with FLOW-3D, for 650 seconds using turbulence models (k-ε, RNG, LES). By comparing different turbulence models with experimental results, the maximum scour depth at the tip of the spur dike was 8.82 cm. Then the maximum scour depth calculated by FLOW-3D in the turbulence models of (k-ε, RNG, LES) was 9.1, 8.9, 9.1 cm. So the error in RNG turbulence model is about ۹%, compare to the turbulence model k-ε, and of LES shows more agreement. In the simulation, the maximum scour depth at the tip of the spur dike 60° and 30° was 8.75 and 6.5 cm respectively.

Keywords: Spur Dike, Scouring, Turbulence model, FLOW-3D.

مقدمه

از جمله روش های متداول در مهندسی رودخانه استفاده از آبشکن ها می باشد. آبشکن ها در بسیاری از موارد با تغییری که در الگوی جریان به وجود می آورند، باعث تعدیل در شرایط هیدرولیکی رودخانه شده و توان حمل رسوب را کاهش داده و زمینه مساعدی برای رسوب گذاری در پایین دست را فراهم می کنند. آبشکن ها برحسب مورد و شرایط رودخانه ای و اهداف مورد نظر در شکل ها و انواع مختلف طراحی و احداث می گردند. سازه های آبشکن هرچند با اهداف رسوب گذاری و جلوگیری از فرسایش کناره ها و حواشی رودخانه و تثبیت موقعیت رودخانه احداث می گردند، در عین حال خود تحت تأثیر پدیده فرسایش ناشی از تمرکز جریان به خصوص در قسمت دماغه می باشند. در قسمت دماغه، افزایش موضعی سرعت جریان ناشی از تنگ شدگی مقطع و وقوع جریان چرخشی پایین رونده منجر به تشکیل حفره نعل اسبی شکل شده که پیشرفت آن استحکام سازه را به مخاطره می اندازد.

احداث سازه هایی نظیر آبشکن در مسیر جریان، باعث ایجاد جریان آشفته چرخشی و گردابی در اطراف آن خواهد شد. این جریان های گردابی به همراه تمرکز شدید سرعت ها و آشفتگی در دماغه بالادست، فرآیند اصلی آبشستگی موضعی به حساب می آیند. ترکیب این عوامل منجر به برداشته شدن مواد بستر از حوالی تکیه گاه و توسعه یک حفره آبکند شده که در دراز مدت باعث ایجاد حفره های بزرگ در محل نوک آبشکن شده و احتمال شکست سازه را به دنبال خواهد داشت.

در شکل(۱) الگوی جریان و حفره آبشستگی موضعی اطراف آبشکن نشان داده شده است (آزین فر و کلز[1] ۲۰۰۸ و آزین فر ۲۰۱۰)، جیا و وانگ[2] (۲۰۰۰)).

پیش بینی دقیق آبشستگی بستر وابسته به حل معادله های سه بعدی جریان و انتقال رسوب در حین گسترش حفره آبشستگی اطراف سازه می‌باشد(مندوزا کابرالز[3] ۱۹۹۳).

تحلیل های دینامیک محاسباتی به عنوان یک ابزار طراحی قوی هیدرولیکی پدیدار شده است و مدل‌ها و نرم افزارهای دینامیک محاسباتی هم چون فلوئنت، انسیس[4] و FLOW-3D، به منظور تحلیل میدان های جریان‌های سیالات و بررسی تنش ها و نیروهای موجود ارائه شده است. نرم افزار هیدرودینامیکی سه بعدی FLOW-3D می‌تواند به طور موثر و مکمل در کنار مطالعات آزمایشگاهی میدان های پیچیده و مرکب جریان را مدل کند و مراحل آبشستگی بستر و انتقال رسوب در اطراف سازه‌های دریایی و رودخانه ای همچون پایه پل، آبشکن و ... را بررسی نماید.

کونل و همکاران[5](۲۰۰۲و۲۰۰۸) به مطالعه آزمایشگاهی و عددی توزیع سرعت در نزدیکی آبشکن‌های مستغرق در مقطع ذوزنقه‌ای شکل با مدل CCHE3D[6] پرداختند. آزین فر (۲۰۱۰) به بررسی الگوی جریان متلاطم اطراف آبشکن منفرد مستغرق با استفاده از مدل عددی فلوئنت پرداخت. ژانگ و همکاران[7] (۲۰۰۹) الگوی جریان متلاطم و آبشستگی موضعی در اطراف آبشکن تخت نفوذناپذیر با استفاده از روش آزمایشگاهی و روش عددی را در شرایط آب زلال بررسی نمودند. یزدی (۲۰۱۰) الگوی جریان اطراف آبشکن منفرد با سطح آزاد را با مدل عددی فلوئنت مورد بررسی قرار داد. اکثر محققین به بررسی الگوی جریان در اطراف آبشکن‌ها پرداخته‌اند یا اینکه آبشستگی را در اطراف آبشکن ها بررسی نموده‌اند ولی در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D نسخه ۹,۳میدان جریان سه بعدی متلاطم و آبشستگی موضعی بستر در اطراف آبشکن با زوایای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

مقایسه حداکثر عمق آبشستگی در اطراف آبشکن در زوایای مختلف این پژوهش با مطالعات پیشین

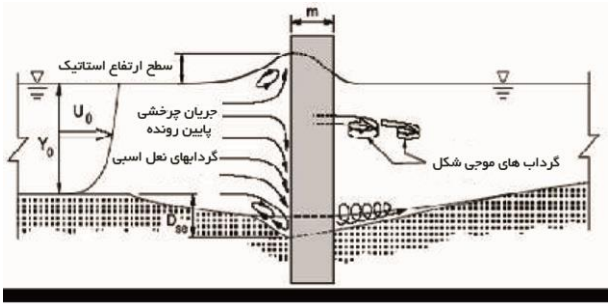
عباس چناری و ملکی (۱۳۹۰) نیز به بررسی اثر قرارگیری آبشکن های L شکل بر الگوی جریان و فرسایش آبی در قوس با استفاده از مدل عددی پرداختند و نتیجه گرفتند:

با تغییر موقعیت آبشکن در جهت جریان از زاویه ۳۰ درجه به سمت ۷۵ درجه، جریان گردابه ای، سرعت جریان و محدوده سرعت های حداکثر در دماغه آبشکن افزایش می‌یابد.

با تغییر موقعیت آبشکن در جهت جریان از زاویه ۳۰ درجه به سمت ۷۵ درجه میزان آبشستگی بستر نسبت به عمق در دماغه آبشکن افزایش می‌یابد.

کشاورز و حکیم زاده (۱۳۸۷) با بررسی شبیه سازی عددی الگوی جریان اطراف آبشکن های عمود بر ساحل و مایل نتیجه گرفتند که تشکیل گردابه در آبشکن مایل به صورت ملایم تری نسبت به آبشکن عمود بر ساحل صورت می‌گیرد که این امر می‌تواند سبب آبشستگی کمتری در بالادست این نوع آبشکن ها گردد. همچنین دیده می‌شود که تنش برشی در بستر نسبت به آبشکن عمود بر ساحل حداقل ۱۲ درصد کاهش یافته است و دامنه احاطه آن بسیار کمتر شده است. بنابراین می‌توان دریافت که آبشکن های مایل در مقایسه با آبشکن‌های عمود بر ساحل دارای طول عمر بیشتری خواهند بود و به حفاظت کمتری نیاز خواهند داشت.

1- Kells.
2-Jia and wang.
3- Mendoza-Cabrales.
4- ANSYS.
5- Kuhnle *et al.*
6- Center For computational Hydroscience And Engineering
7- Zhang *et al.*



شکل ۱- نمای شماتیک الگوی جریان و حفره آبشستگی موضعی اطراف یک آبشکن (عباس چناری و ملکی ۱۳۹۱).

معرفی مدل و معادله های حاکم

نرم افزارFLOW-3D نسخه ۹,۳، معادله های سه بعدی ناویر استوکس را روی شبکه محاسباتی منظم و غیر یکنواخت حل می نماید و توانایی مدل کردن مسائل جریان های سطح آزاد و نمایش نتایج با قدرت گرافیکی بالا را دارا می باشد. معادله های حاکم بر جریان تراکم ناپذیر سیال، قانون بقای جرم رابطه (۱) و معادله مومنتم متوسط گیری شده زمانی (رینولدز) رابطه (۲) می باشد:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} u_i A_i = 0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{vf}(u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + G_i + f_i - K u_i \qquad (۲)$$

$$\rho v f_i = ws_i - \left[\frac{\partial}{\partial x_j}(A_j S_{ij})\right], S_{ii} = -2\mu_{tot}\left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right], \quad S_{ij} = -2\mu_{tot}\left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right] \qquad (۳)$$

u_i: سرعت متوسط، P: فشار، A_i: کسر مساحت باز برای جریان در جهت i، Vf: کسر حجم باز برای جریان، G_i: شتاب ناشی از نیروهای وزنی بزرگ، f_i: شتاب ناشی از نیروهای لزجت، K: نیروی کشش بین ذرات رسوب، S_ij: افزایش شدت تنش، ws_i: تنش برشی دیوار، ρ:چگالی آب و μtot: مجموع لزجت دینامیکی سیال که شامل آشفتگی جریان نیز می باشد. نرم افزار FLOW-3D، با استفاده از روش حجم سیال هندسه سطح مشترک سیال و هوا در سطح آزاد و با استفاده از روش کسر مساحت – حجم مانع، سطوح و حجم موانع جامد و مرزهای هندسی صلب را شبیه سازی می نماید. با این روش شبکه محاسباتی مستطیلی بدون انحراف می تواند برای بررسی مشخصات جریان با حضور مانع استفاده شود و حجم و مساحت باز درون هر سلول محاسباتی را که با مانع پر شده است تعیین نماید. نرم افزارFLOW-3D، مدل غیر هیدرواستاتیک است و می تواند ابعاد منطقه جدایی جریان و موج های ایجاد شده پشت موانع را مدل نماید. در مدل های غیر هیدرواستاتیک که فرضیه های ساده کننده در معادله مومنتم اعمال نمی شود این معادله با روش تکرار حل می شود. این نرم افزار با مقادیر فشار و سرعت جریان در مرحله زمانی قبل، مقادیر متوسط را به دست می آورد که با استفاده از رابطه پواسون و با روش پی در پی نقطه به نقطه، مقادیر جدید سرعت متوسط با تغییرات فشار در بازه زمانی برآورد می شود و صحت آن با استفاده از رابطه بقای جرم بررسی می گردد(اسمیت و همکاران[1] (۲۰۰۴). این نرم افزار شامل چندین مدل برآورد آشفتگی جریان می باشد که در این تحقیق از مدل های آشفتگی دو معادله ای استاندارد ،و گروه نرمال شده آن و شبیه سازی گردابه های بزرگ استفاده شده است . لزجت گردابه ای (با اغتشاش)،(μ_1) با انرژی سینماتیک تلاطم (k) و شدت استهلاک انرژی (ε) مرتبط است.

$$\mu_1 = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \qquad (۴)$$

در مدل آشفتگی دو معادله ای استاندارد ، معادله انرژی سینماتیک تلاطم (k) و شدت استهلاک انرژی (ε) به شکل زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \qquad (۵)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \qquad (۶)$$

مقادیر پیش فرض ثابت های مدل عبارتند از $C_{1\varepsilon}=1.44, C_{2\varepsilon}=1.92, C_\mu=0.09, \sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.3$ مدل

1- Smith *et al.*

آشفتگی گروه نرمال شده مشابه مدل آشفتگی (k-ε) با ضرایب ثابت اصلاح شده $C_\mu = 0.085$ و $C_{1\varepsilon} = 1.42$، $\sigma_k = 0.7194, \sigma_\varepsilon = 0.7194$ $c_{2\varepsilon} = (\upsilon_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ می باشد.

آبشستگی نرم افزارFLOW-3D با استفاده از تقریب حجمی بقای جرم و معادله انتقال رسوب پخش (انتشار)- انتقال میزان آبشستگی بستر و انتقال رسوبات را برآورد می کند و با استفاده از روش حجم سیال ارتفاع سطح بستر در هر سلول محاسباتی را پیش بینی می کند. چگالی سیال در هر سلول محاسباتی به شکل معادله (۷) محاسبه می شود. در این معادله f_s ، کسر رسوبات جامد در هر سلول محاسباتی، ρ_s چگالی رسوبات و ρ چگالی سیال است. مجموع کسر جامد رسوب و کسر مربوط به قسمت سیال (f)، برابر یک می باشد.

$$\bar{\rho} = \rho + f_s(\rho_s - \rho) \qquad (۷)$$

$$f + f_s = 1 \qquad (۸)$$

مدل آبشستگی این نرم افزار شامل رسوبات بستر و رسوبات معلق می باشد. رسوبات بستر که توسط ذرات مجاور محصور شده اند به راحتی نمی توانند جابجا شوند و در صورتی که فرسایش یابند و در سطح مشترک سیال و رسوب به صورت معلق درآیند می توانند حرکت کنند. همچنین اگر سرعت ته نشینی ذرات معلق بیشتر از سرعت فرسایش بستر باشند ذرات رسوب دوباره به بستر باز می گردند. با فرض جریان دوفازی ذرات رسوب در سیال و برقراری رابطه مومنتم در فاز پیوسته سیال، معادله (۹) و فاز ناپیوسته ذرات رسوبی، معادله (۱۰) و تفاضل معادله (۹) از معادله (۱۰) رابطه (۱۱) حاصل می شود (بی نام، ۲۰۰۸).

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u}.\nabla \bar{u} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \nabla P + F \qquad (۹)$$

$$\frac{\partial u_s}{\partial t} + \bar{u}.\nabla u_s = -\frac{1}{\rho_s} \nabla P + F - \frac{K}{f_s \rho_s} u_r \qquad (۱۰)$$

$$\frac{\partial u_{drift}}{\partial t} + \bar{u}.\nabla u_{drift} = \left(\frac{1}{\bar{\rho}} - \frac{1}{\rho_s} \right) \nabla p - \frac{K}{f_s \rho_s} u_r \qquad (۱۱)$$

در این روابط، u_s: سرعت ذرات رسوب، $\bar{u} = (1 - f_s)u + f_s u_s$: سرعت متوسط حجمی سیال، F: نیروهای وزنی، K: ضریب کششی بین ذرات رسوب و سیال، P: نیروی فشار، $u_r = u_s - u$: سرعت نسبی ذرات رسوب و سیال و $u_{drift} = u_s - \bar{u}$: سرعت شناوری ذرات رسوب می باشد. رابطه بقای جرم برای جریان با سرعت متوسط حجمی سیال $\nabla.\bar{u} = 0$ بایستی برقرار باشد. چنانچه حرکت ذرات رسوب در مقیاس زمان محاسباتی ماندگار باشد و ضریب سرعت انتقال ذرات رسوب خیلی کوچک باشد، سرعت ذرات رسوب نسبت به سیال u_r از رابطه (۱۲) حاصل می شود:

$$u_r = \frac{\nabla P f_s}{\bar{\rho} K_t} (\rho_s - \rho) \qquad (۱۲)$$

K_t: ضریب کششی ذره رسوب و عکس ضریب شناوری (D_f)می باشد که با فرض کروی بودن ذرات رسوبی و سرعت ناچیز آنها در اطراف هر ذره رسوب، تاثیر لزجت بیشتر مورد توجه می باشد و ضریب شناوری $D_f = \frac{\rho d_s^2}{18\mu}$ در نظر گرفته می‌شود و مقدار سرعت شناوری از رابطه (۱۳) حاصل می‌شود:

$$u_{drift} = f \times u_r = f D_f \frac{\nabla p}{\bar{\rho}} (\rho_s - \rho) \qquad (۱۳)$$

d_s: قطر متوسط ذرات رسوب و μ: لزجت دینامیکی جریان است. در مناطقی از جریان که کسر حجمی سیال (f) صفر و المان حجمی پر از رسوب می‌باشد، سرعت شناوری صفر است. تنش برشی سبب فرسایش و جابجاشدن رسوبات در سطح بستر می‌گردد. این فرسایش تابعی از تنش برشی بحرانی (τ_{crit})و چگالی سیال و رسوب است. پارامتر شیلدز بحرانی (θ_{crit})حداقل تنش برشی برای بلند کردن ذرات رسوب از سطح مشترک سیال و بستر فعال را نشان می‌دهد.

برای محاسبه عدد شیلدز بحرانی، ابتدا عدد رینولدز بی‌بعد شده را از رابطه (۱۴) به دست آورده و سپس از فرمول (۱۵) پارامتر شیلدز بحرانی به‌دست می‌آید:

$$R_i^* = d_{si} \frac{\sqrt{0.1(\rho_{si} - \rho f)\rho f}\,|g| d_{si}}{\mu_f} \qquad (۱۴)$$

$$\theta cr_i = \frac{0.1}{R_i^{\frac{2}{3}}} + 0.054 \left[1 - \exp\left(\frac{-R_i^{0.52}}{10} \right) \right] \qquad (۱۵)$$

$$\theta_{crit} = \frac{\tau_{crit}}{g(\rho_s - \rho) d_s} \qquad (۱۶)$$

$$u_{Lift} = \alpha n_s \sqrt{\frac{\tau - \tau_{crit}}{\bar{\rho}}} \qquad (۱۷)$$

سرعت بلند شدن و کنده شدن رسوبات از سطح بستر، که از سرعت برشی بحرانی بستر بیشتر است از رابطه (۱۷) حاصل می شود. در این رابطه α: پارامتر بی بعد احتمال بلند شدن ذرات رسوب از سطح رسوبات ته نشین یافته و n_s : بردار نرمال بر سطح بستر رسوبات است. زاویه استقرار طبیعی رسوبات در این مدل از رابطه (۱۸)حاصل می شود که در آن $ninterface$: بردار نرمال سطح و g: بردار شتاب جاذبه است برتور[1] (۲۰۰۱)

$$\phi = \frac{ninterface\, g}{|g|} \qquad (۱۸)$$

تنش بحرانی سطح شیبدار موثر در آبشستگی بستر در نرم افزار FLOW-3D با تاثیر زاویه گسیختگی یا زاویه اصطکاک داخلی رسوبات(ζ)که جز پارامترهای ورودی مدل می باشد با رابطه (۱۹) برآورد می گردد:

$$\tau_{crit} = \tau^0_{cri} \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \phi}{\sin^2 \zeta}} \qquad (۱۹)$$

چنان چه زاویه شیب طبیعی رسوبات با زاویه اصطکاک داخلی آنها برابر باشد($\phi = \zeta$) تنش برشی بحرانی برابر صفر خواهد بود و سطح بستر در اثر هم نوع تنش برشی وارده دچار فرسایش می گردد. همچنین زمانی که ($\emptyset < \zeta$ مقدار تنش برشی بحرانی منفی خواهد بود و در نتیجه رسوبات بدون وجود تنش برشی دچار فرسایش می شوند(بغدادی و همکاران ۱۳۹۰).

انتقال رسوبات فرسایش یافته و معلق با معادله پخش (انتشار) – انتقالAdvection –Diffusion با در نظر گرفتن سرعت شناوری(u_{drift}) و سرعت بلند شدگی(u_{lift}) مدل می‌شود. D: ضریب پخشودگی مولکولی و Cs: غلظت ذرات رسوب است:

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} + u.\nabla C_s = D\nabla^2 C_s - u_{lift}.\nabla C_s - u_{drift}.\nabla C_s \qquad (۲۰)$$

مدل آبشستگی پیوسته با افزایش مقدار لزجت جریان سیال به همراه رسوبات معلق رابطه (۲۱) و ضریب کششی K رابطه (۲۲)، بازگشت به حل معادله های جریان سیال را به منظور تعیین بستر متراکم شده تامین می‌کند(اسمیت و همکاران۲۰۰۴).

1- Brethour.

$$\mu^* = \mu (1 - \frac{\min(f_s - f_{s,co})}{f_{s,cr}})^{-1.55} \qquad (۲۱)$$

μ: لزجت سیال، fs,co: کسر جامد چسبنده،

fs,cr: کسر جامد بحرانی که مقدار پیش فرض آن ۰/۶۷ است،

μ^*: لزجت افزایش یافته به واسطه رسوبات معلق در سیال که حداکثر آن به ازای fs,cr = ۰/۶۷ ، μ:۱۸ می باشد. اگر کسر حجمی رسوب در هر حجم کنترل(fs) بیشتر یا مساوی(fs,cr) باشد چگالی رسوب متراکم شده برابر با fs,cr× ps می‌باشد که جز شرایط اولیه به مدل وارد می‌شود. بنابراین اگر غلظت رسوب بیشتر یا مساوی این مقدار باشد جریان سیال برقرار نبوده که نشانگر حضور بستر متراکم شده و اثر نیروی کشش بی نهایت است. لذا ضریب کشش در آن صفر در نظر گرفته می‌شود. زمانی که fs بیشتر از، fs,co و کمتر از fs,cr باشد مدل کششی فعال است و k از رابطه (۲۲) حاصل می‌شود. همچنین زمانی که fs کمتر از fs,co باشد مدل درگ غیر فعال است و لزجت سیال از رابطه (۲۲) به دست می‌آید(اسمیت و همکاران۲۰۰۴)و بی نام،۲۰۰۸).

$$K = \begin{cases} 0 & if \quad f_{s,co} < f_s < f_{s,cr} \\ \left[\frac{f_s - f_{s,cr}}{f_{s,co} - f_{s,cr}}\right]^2 \left[1 - \frac{f_s - f_{s,cr}}{f_{s,co} - f_{s,cr}}\right]^{-3} & if \quad f_{s,co} < f_s < f_{s,cr} \\ \infty & if \quad f_{s,cr} < f_s \end{cases} \qquad (۲۲)$$

معرفی مدل آزمایشگاهی

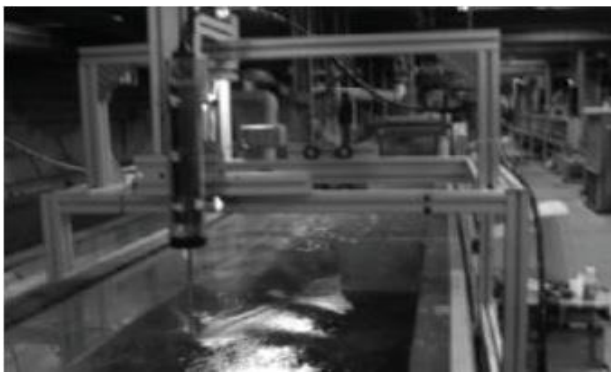
در ابتدا از نتایج مدل آزمایشگاهی ارائه شده توسط دوان و همکاران[2] (۲۰۰۹) در آزمایشگاه مینیسوتا آمریکا برای صحت سنجی نرم افزار FLOW-3D و مقایسه نتایج عددی شبیه سازی شده در این تحقیق استفاده شد .این مدل از یک فلوم مستطیلی به طول ۱۲/۸ متر، عرض ۶۰/۸ سانتی متر، ارتفاع ۰/۶متر با دیواره های شیشه ای و بستر ماسه ای با ارتفاع زبری ۰/۴ میلی متر تشکیل شده است. یک آبشکن به ارتفاع ۴۰ سانتی متر و ضخامت چهار میلی متر در ۶ متری ابتدای کانال در دیواره سمت راست نصب شده و رسوبات ماسه ای با قطر متوسط ۱/۵۹ میلی متر در کف آن قرار گرفته است. جریانی با دبی ۰/۰۵۸ متر مکعب بر ثانیه و با سرعت ۵۹/۴۳ سانتی متر بر ثانیه به مدت دو روز در این کانال برقرار بوده که منجر به آبشستگی موضعی در اطراف آبشکن شده است (شکل های۲و۳).

2- Duan *et al.*

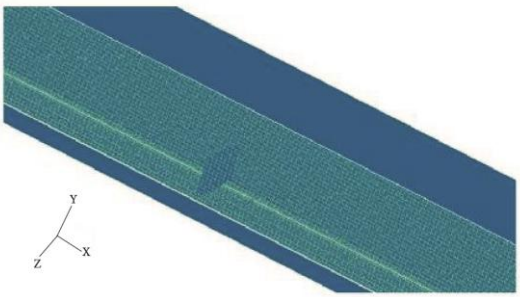
همان طور که در شکل(۲) مشاهده می شود آبشکن به صورت قائم در کانال قرار گرفته است ولی در شبیه سازی ها از آبشکن هایی با زوایای۶۰ و ۳۰ درجه نیز انجام شده است.



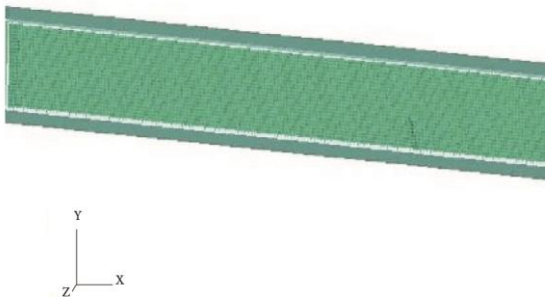
شکل ۲- مدل فلوم آزمایشگاهی و اندازه گیری سرعت در طول و عرض کانال با استفاده ازسرعت سنج سه بعدی (ADV). (دوان و همکاران،۲۰۰۹)



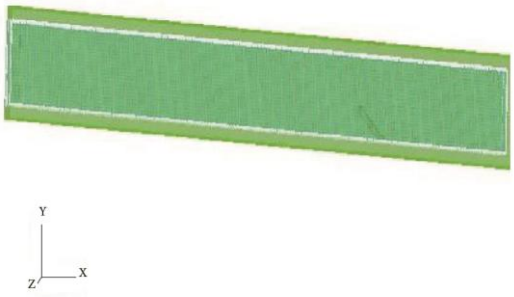
شکل ۳- مدل فلوم آزمایشگاهی و اندازه گیری سرعت در طول و عرض کانال با استفاده ازدستگاه سرعت سنج سه بعدی (ADV) (دوان و همکاران،۲۰۰۹).



شکل٤- شبیه سازی فلوم آزمایشگاهی و آبشکن با زاویه ۹۰ به وسیله نرم افزار FLOW-3D با شبکه بندی



شکل ٥- شبیه سازی فلوم آزمایشگاهی و آبشکن با زاویه ٦٠ به وسیله نرم افزار FLOW-3D با شبکه بندی



شکل ٦- شبیه سازی فلوم آزمایشگاهی و آبشکن با زاویه ۳۰ به وسیله نرم افزار FLOW-3D با مش بندی

شبکه بندی مدل

فلوم آزمایشگاهی ارائه شده توسط دوان و همکاران(۲۰۰۹) با ابعاد ذکر شده به وسیله یک بلوک در نرم افزار FLOW-3D شبیه سازی شد و سیال آب و رسوب با چگالی ۲/۶۵ انتخاب گردید. از شبکه بندی غیر یکنواخت و منظم مستطیلی به منظور مدل کردن جریان سیال درون فلوم استفاده شد. ابتدا برای آبشکن ها در اولین سعی اندازه ابعاد شبکه ها به گونه ای انتخاب شد که در جهت X از ۴/۸۵ سانتی متر، در جهت Y، ۲/۴ سانتی متر و در جهت Z ، برای افزایش دقت در تحلیل عمق آبشستگی بستر ابعاد متغیر از حداقل۱ سانتی متر تا حداکثر ۲/۵ سانتی متر است. در شکل‌های(۴) ،(۵)و(۶)شبکه بندی کانال به ترتیب مربوط به آبشکن با زاویه های ۹۰، ۶۰ و ۳۰ درجه آورده شده است.

شرایط مرزی اعمال شده

شرایط مرزی مدل، در آبشکن در کف و دیواره ها از نوع دیوار[1] و در سطح جریان از نوع فشار[2] است. شرط مرزی ورودی جریان از نوع شدت جریان[3] با مقدار ۰/۰۵۸متر مکعب بر ثانیه و عمق جریان ۰/۱۶ متر و در خروجی جریان از نوع جریان خروجی[4] است. شرط اولیه ورودی مدل شامل سرعت اولیه جریان ۵۹/۴۳ سانتی متر بر ثانیه مقدار عدد شیلدز بحرانی که از محاسبات انجام شده ۰/۰۳۹ (از رابطه ۱۴ و۱۵) برآورد شده است. همچنین جرم مخصوص رسوبات متراکم شده ۱۷۷۳کیلوگرم بر مترمکعب است که از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$G_{S_{S,I}} = (fs_{cr} * g_s)$$

$fs_{cr} = 0.67$ و زاویه اصطکاک داخلی آنها ۳۰ درجه می باشد.

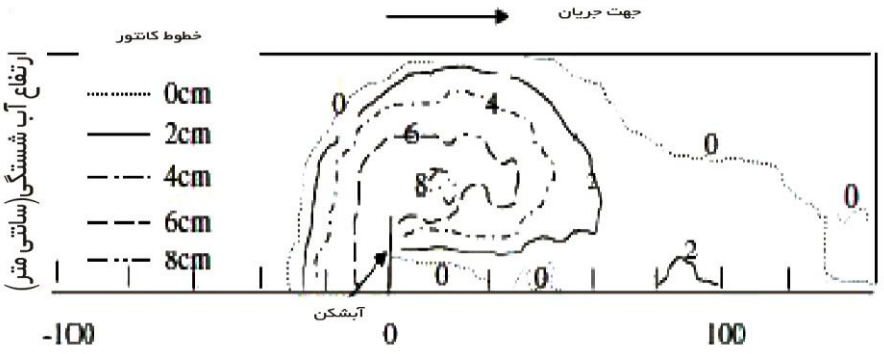
صحت سنجی مدل با نتایج آزمایشگاهی

شبیه سازی ها با نرم افزار FLOW-3D، به مدت۶۵۰ ثانیه و با استفاده از مدل های آشفتگی دو معادله ای استاندارد و گروه نرمال شده و شبیه سازی گردابه های بزرگ انجام شد. منحنی های هم ارتفاع بستر شسته شده اطراف آبشکن در شرایط آزمایشگاهی در شکل(۷) و در شبیه سازی های عددی با نرم افزار FLOW-3D و با استفاده از مدل های آشفتگی دو معادله ای استاندارد و گروه نرمال شده و شبیه سازی گردابه های بزرگ مربوط به آبشکن با زاویه ۹۰ درجه در شکل(۸)و آبشکن با زاویه ۶۰ و ۳۰ با مدل آشفتگی دو معادله ای گروه نرمال شده به ترتیب در شکل های (۹)و (۱۰) نشان داده شده است. حداکثر عمق آبشستگی در آزمایشگاه ۸/۸۲ سانتی متر بعد از دو روز در ۱۵/۴ سانتی متری پایین دست آبشکن و درفاصله پنج سانتی متری نوک آبشکن واقع شده است.

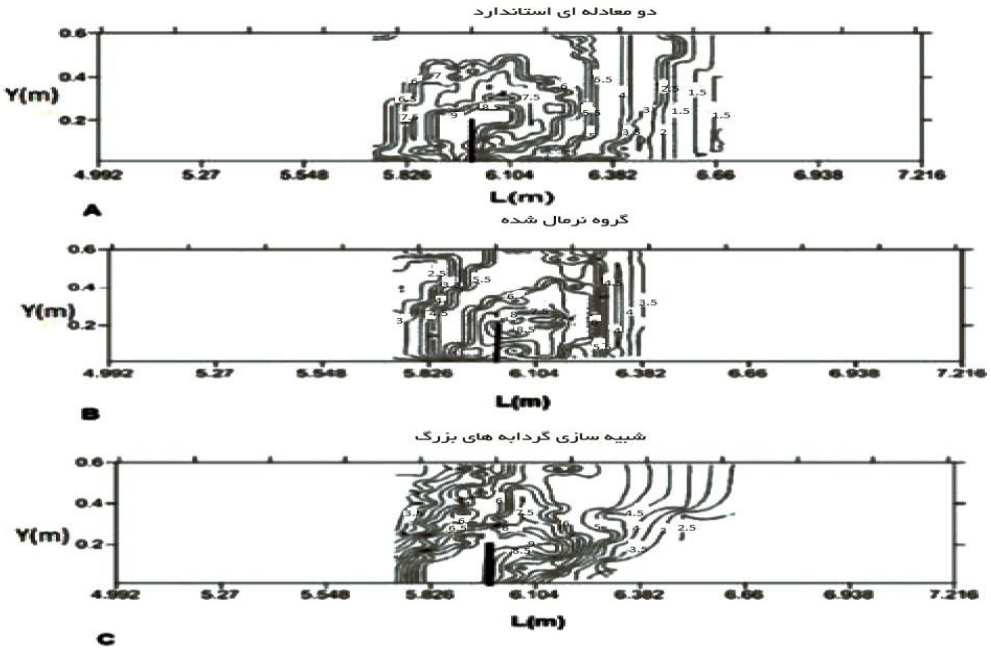
1- Wall
2- Specified Pressure
3- Volume Flow Rate
4- Outflow

با مشاهده شکل(۸)حداکثر عمق آبشستگی حاصل از ضریب fs,co=۰/۵ پس از مدت ۶۵۰ ثانیه در نوک آبشکن تقریبا بین ۸/۹ تا ۹/۱ سانتی متر برآورد گردید. با مقایسه نتایج آزمایشگاهی (شکل ۷)، که حداکثر عمق آبشستگی در نوک آبشکن ۸/۸۲ سانتی متر است و نتایج حاصل از شبیه عددی نتیجه گیری می‌شود که دارای خطای حدود نه درصد می‌باشد بنابراین بین نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی تطابق نزدیکی وجود دارد. همچنین محدوده آبشستگی اطراف آبشکن نیز مشابه مدل آزمایشگاهی است.

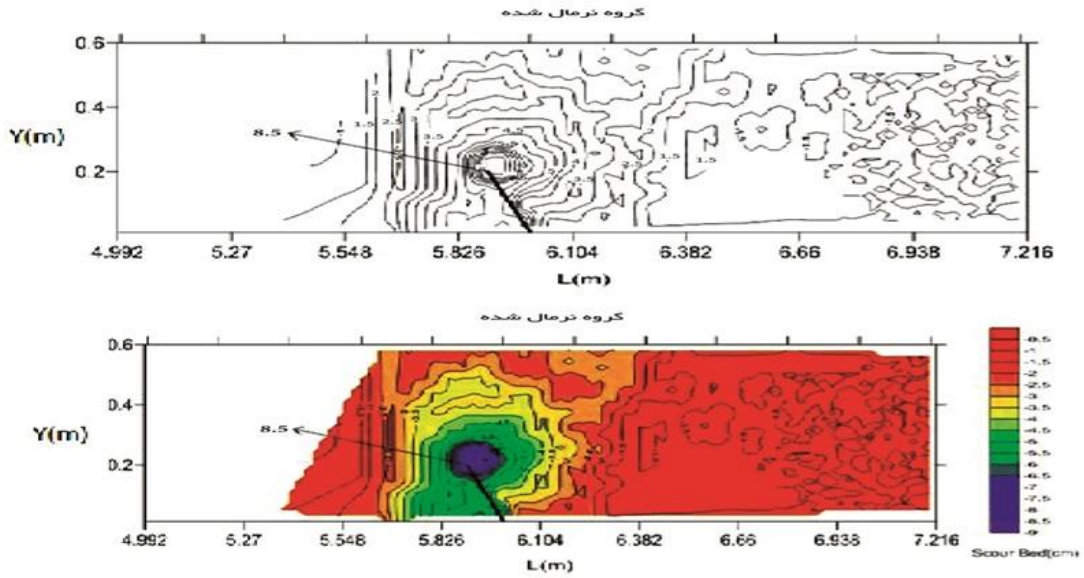
همچنین با مشاهده شکل های(۹)و(۱۰)حداکثر عمق آبشستگی در نوک آبشکن ها به ترتیب ۸/۵ و ۶/۴ سانتی متر است که با مقایسه نتایج مربوط به آبشکن با زاویه ۹۰ درجه مشخص می شود که هر چه زاویه آبشکن نسبت به جریان کوچکتر گردد به تناسب عمق آبشستگی کاسته شده و همچنین محدوده آبشستگی نیز در اطراف آبشکن نیز کوچک تر می شود.



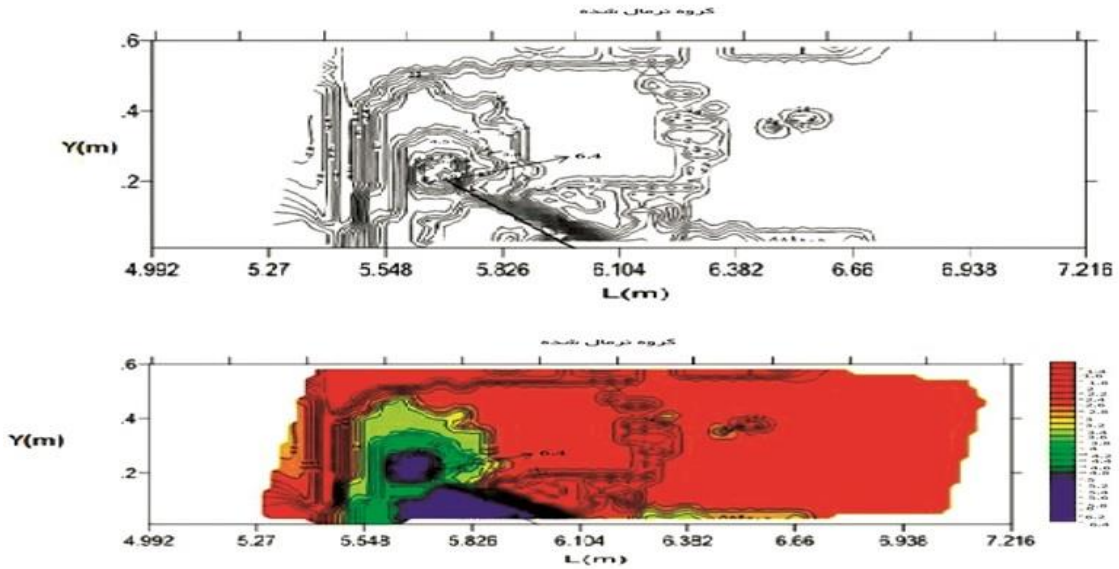
شکل ۷- منحنی های هم ارتفاع بستر شسته شده اطراف آبشکن در شرایط آزمایشگاهی در مدت زمان ٤٨ ساعت(دوان و همکاران،۲۰۰۹).



شکل ۸- منحنی های هم ارتفاع بستر شسته شده اطراف آبشکن ۹۰درجه حاصل از شبیه سازی عددی بر حسب سانتی متر با مدل آشفتگی(a): دو معادله ای استاندارد ،(b):گروه نرمال شده ومدل (c) شبیه سازی گردابه های بزرگ در مدت زمان ٦٥٠ ثانیه

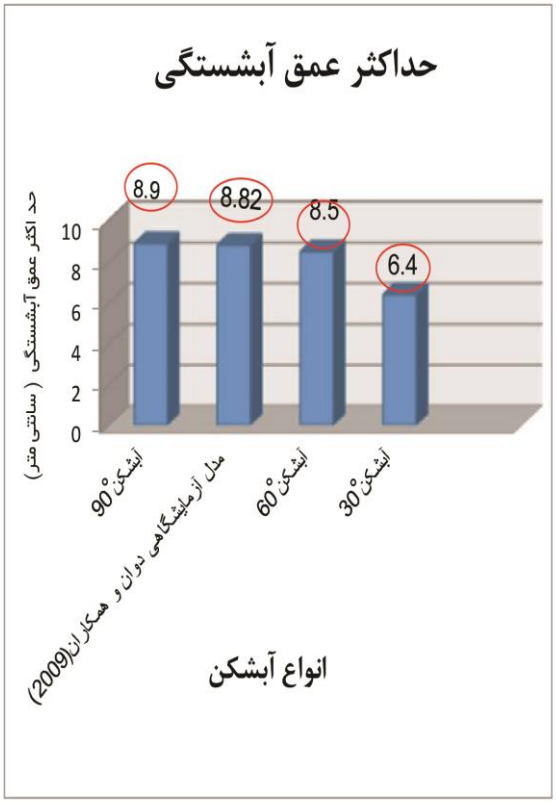


شکل ۹- منحنی های هم ارتفاع بستر شسته شده اطراف آبشکن ۶۰درجه حاصل از شبیه‌سازی عددی بر حسب سانتی متر با مدل آشفتگی گروه نرمال شده در مدت زمان۶۵۰ ثانیه



شکل ۱۰- منحنی های هم ارتفاع بستر شسته شده اطراف آبشکن ۳۰ درجه حاصل از شبیه‌سازی عددی بر حسب سانتی متر با مدل آشفتگی گروه نرمال شده در مدت زمان۶۵۰ ثانیه

در شکل(۱۱) نیز نتایج حاصل از شبیه سازی آبشکن ها با زوایای ۹۰ ،۶۰،۳۰درجه با نتایج آزمایشگاهی دوان و همکاران (۲۰۰۹) آورده شده است. حداکثر عمق آبشستگی در نوک آبشکن مربوط به آبشکن ۹۰ درجه و کمترین مربوط به آبشکن ۳۰ درجه می باشد.

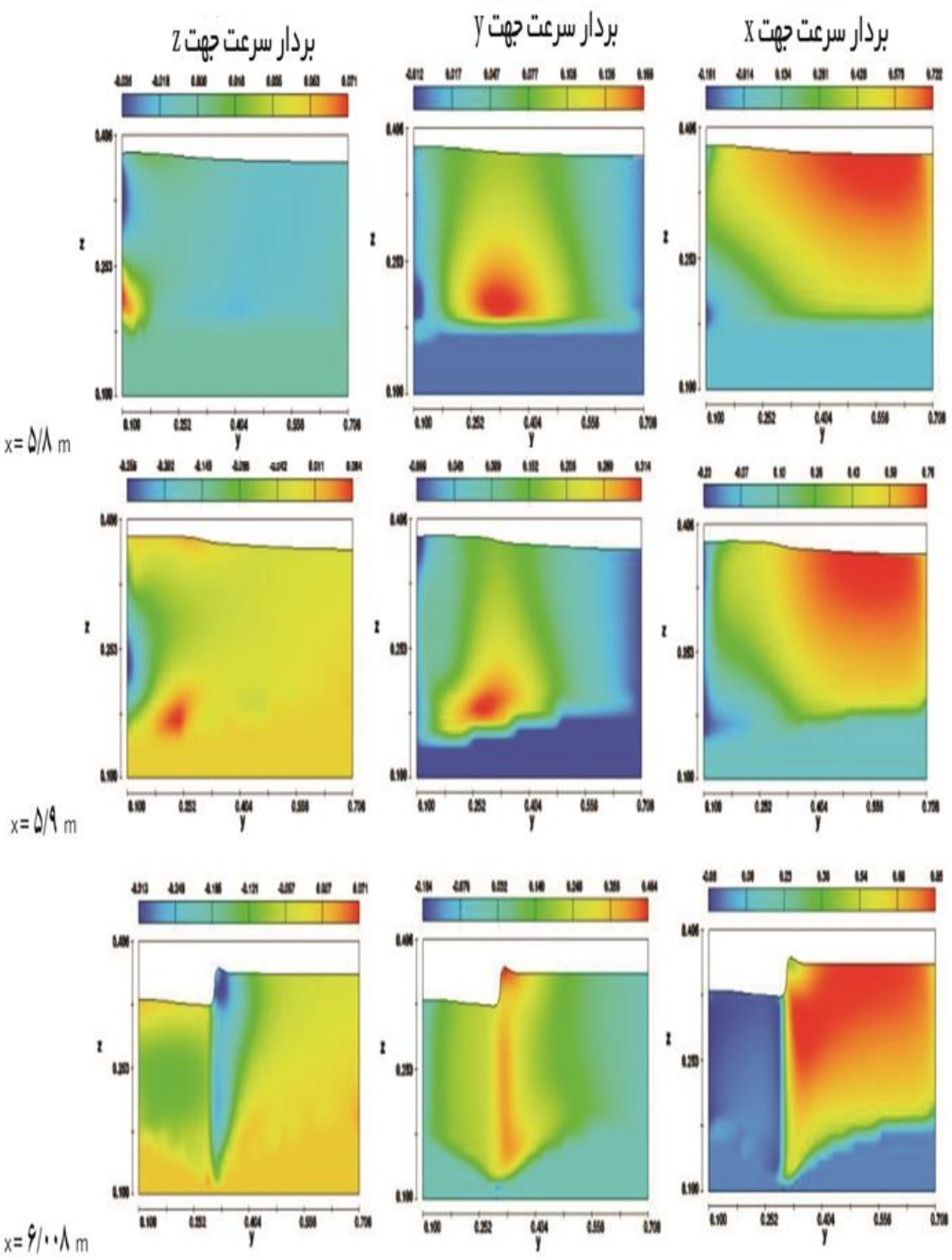


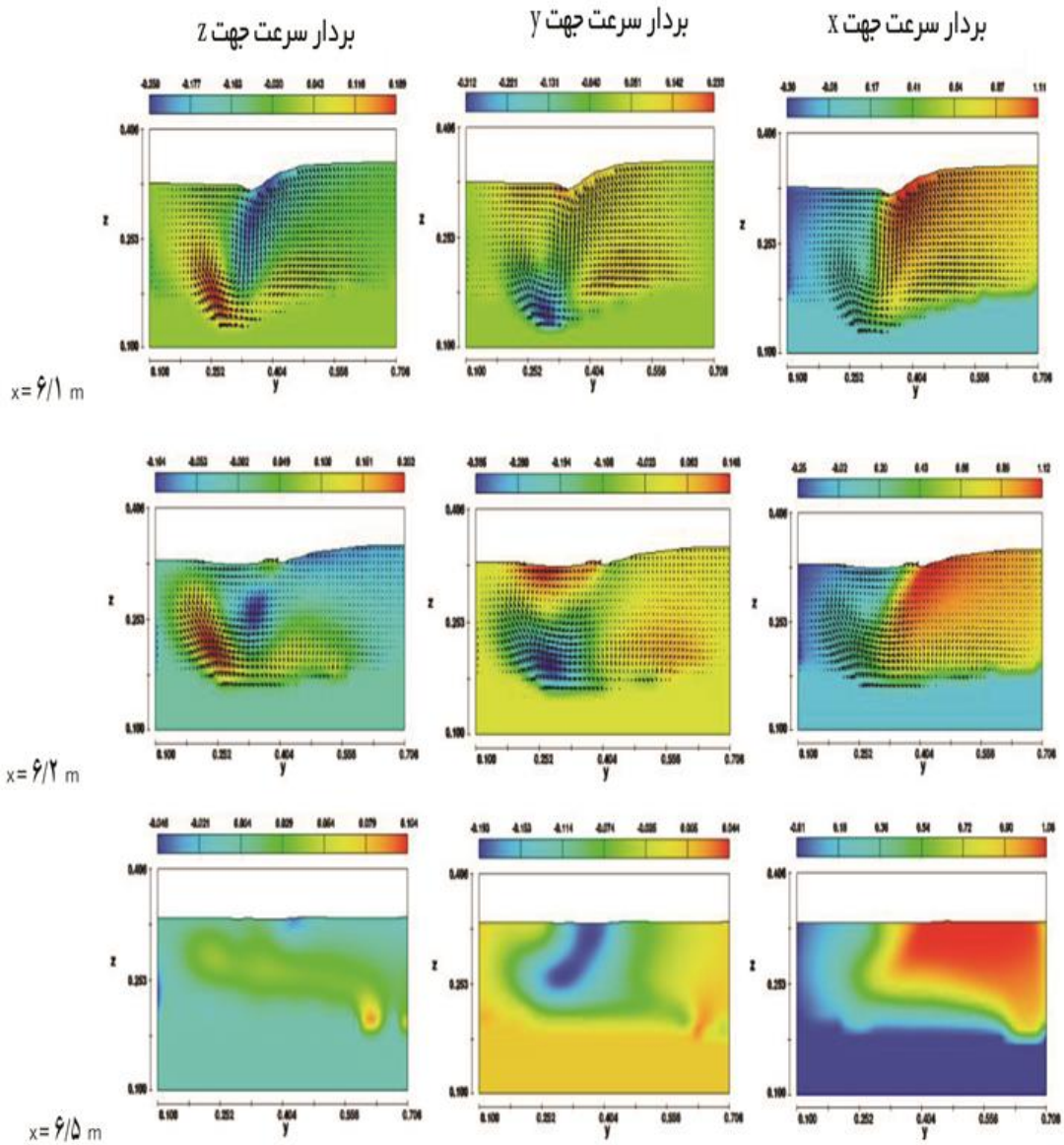
شکل ۱۱- حداکثر عمق آبشستگی اطراف آبشکن ۶۰،۳۰،۹۰ درجه حاصل از شبیه‌سازی عددی با نرم افزار FLOW-3D و مقایسه آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی دوان و همکاران (۲۰۰۹)

بررسی تغییرات سرعت طولی ، عرضی و عمودی شامل حداقل و حداکثر سرعت

در شکل(۱۲)توزیع سرعت برآورد شده بر حسب متر بر ثانیه پس از ایجاد عمق آبشستگی تعادلی ۸/۸۲ سانتی متر با ضریب۰,۵= fs,co و مدل آشفتگی گروه نرمال شده، در سه جهت z،y،x در فواصل ۵/۷ ، ۵/۵،۹/۸ ،۶، ۶/۱ ، ۶/۲متر از ابتدای فلوم مربوط به آبشکن قائم نشان داده شده است.

در شکل(۱۲)مشاهده می‌شود که جریان در حین عبور از آبشکن منقبض می‌شود و سرعت جریان در جهت X ، (u) در حین عبور از اطراف نوک آبشکن افزایش می‌یابد که با رنگ قرمز در شکل های (۱۲) مشخص شده است. در ۶/۲و ۶/۱ متری بردارهای سرعت در هر سه جهت ترسیم شده است که وجود دو جریان چرخشی ثانویه در جهت عقربه‌های ساعت، در مقطع جریان را نشان می‌دهند که یکی به سمت دیواره راست و دیگری به سمت دیواره چپ فلوم می‌باشد. جریان چرخشی در بالادست آبشکن در خلاف عقربه ساعت است. مولفه سرعت در جهت y ، (v) در مقطع آبشکن به حداکثر مقدار خود رسیده است. وجود جریان چرخشی در پروفیل های سرعت(v)نیز در شکل کاملا مشخص می‌باشد. سرعت جریان در جهت z ، (w) به طور تقریبی در بالادست آبشکن صفر هست. اما در نزدیکی آبشکن مقدار آن منفی است و نشانگر حضور جریان قوی به سمت پایین می‌باشد که منجر به ایجاد جریان حلزونی(ثانویه) در بالادست آبشکن می‌شود. در پایین دست آبشکن جریان حلزونی(ثانویه) امتداد می‌یابد و حداکثر سرعت قائم در اواسط عمق جریان در پایین دست آبشکن تشکیل می‌شود.


بردار سرعت جهت Z
بردار سرعت جهت Y
بردار سرعت جهت X
x= ۵/۸ m
x= ۵/۹ m
x= ۶/۰۰۸ m



شکل ۱۲- توزیع سرعت برآورد شده بر حسب متر بر ثانیه پس از ایجاد عمق آبشستگی تعادلی ۸/۸۲ سانتی متر با ضریب fs,co=۰,۵ و مدل آشفتگی دو معادله ای استاندارد، در سه جهت z،y،x در فواصل ۵/۷ ، ۵/۵،۹/۸، ٦،٦/١ ، ٦/٢متر از ابتدای فلوم

نتیجه گیری

با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده مربوط به مدل آزمایشگاهی آبشکن توسط دوان و همکاران(۲۰۰۹) با زاویه ۹۰ درجه و همچنین مدل آبشکن با زاویه ۶۰ و ۳۰ درجه، نتایج آن ها با هم مقایسه گردید. نتایج نشان داد هر چه زاویه آبشکن در جهت جریان(از حالت ۹۰ درجه به ۳۰درجه) کمتر گردد عمق آبشستگی نیز در نوک آبشکن کمتر شده و همچنین محدوده آبشستگی اطراف آبشکن نیز کوچک تر می گردد. بنابراین نتایج نشان می دهد که تاثیر به کار بردن آبشکن با زاویه ۳۰ درجه نسبت به حالت ۹۰ درجه بهترین و همچنین کمترین عمق آبشستگی را دارد. در ضمن طول مؤثر آبشکن ها یکی بوده است.

با مقایسه نتایج آزمایشگاهی مدل آبشکن قائم و همچنین نتایج مدل عددی با مدل های مختلف آشفتگی گروه نرمال شده ، دو معادله ای استاندارد و شبیه سازی گردابه های بزرگ ، مشخص شد که مدل آشفتگی گروه نرمال شده نسبت به دو مدل آشفتگی دو معادله ای استاندارد و شبیه سازی گردابه های بزرگ هم از نظر حداکثر عمق آبشستگی و همچنین محدوده آبشستگی در اطراف آبشکن مطابقت بهتری را نشان می دهد.

منابع

۱-بغدادی، ح، ارشادی، س. و م، رستمی. ۱۳۹۰، بررسی عددی آبشستگی موضعی ناشی از جت های افقی مستغرق با مدل عددی FLOW-3D دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران، آبان ماه،۸-۱.

۲- عباس چناری،س. و ح. ملکی ۱۳۹۱ شبیه سازی سه بعدی الگوی جریان و گردابه‌ها اطراف آبشکن‌هایL شکل نفوذناپذیر در پنج زاویه مختلف از نیمه اول قوس نیم دایره. یازدهیمن کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه اورمیه.

۳- کشاورز و حکیم زاده ۱۳۸۷ شبیه سازی عددی سه بعدی الگوی جریان اطراف آبشکن‌های عمود بر ساحل و مایل با در نظر گرفتن شرایط مرزی مختلف. نشریه مهندسی دریا،سال ۴،(۸)،پاییز و زمستان۸۷.

4- Anonymous.2008. Flow-3D User's Manual. Flow Science, Inc., 9.3 editions.

5-Azinfar, H. and J.A, Kells,., 2008 Backwater prediction due to the blockage caused by a single submerged spur dike in an open channel, Journal Hydraulic Engineering, 134(8) :1153–۱۱۵۷.

6-Azinfar, H, 2010, Rflow resistance and associated backwater effect due to spur dikes in open channel, Ph.D, Thesis, Department of Civil and Geological Engineering University of Saskatchewan,Winter.

7-Brethour, J.M 2001, Transient 3-d model for lifting, transporting and depositing solid material, International Symposium on Environmental University Hydraulics, Tempe, Arizona

8-Duan, J. He, L, Wang, G. and X, Fu,. 2009, Mean flow and turbulence around experimental spur dike, Journal Advances in Water Resources 32: 1717–1725.

9- Jia, Y. and S.S.Y Wang, 2000, Numerical study of turbulent flow around submerged spur dikes, 4th International conference on hydro-science and engineering, korea water resources association, seoul, south korea, 7 p.

10-Kuhnle, R, Jia, Y. and C Alonso, 2002 3-Dimensional measured and simulated flow for scour near spur dikes. Proc. of the first international conference on scour of foundations, ICSF-1, Texas A&M University, TX, USA: 349-363.

11-Kuhnle, R., Jia, Y. and C Alonso, 2008. Measured and simulated flow near a submerged spur dike. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 134(7): 916-924.

12-Mendoza-Cabrales, C, 1993, Computation of flow past a cylinder mounted on a flat plate, Journal Proc., Hydraulic Engineering, ASCE: 899-904.

13-Smith H.A. Sotiropoulos, F. and T.W Sturm 2004 Modeling the flow and scour around an immovable cylinder B.S. the Degree Master of Science in the Graduate School of The Ohio State University, The Ohio State University.

14-Yazdi, 2010, 3D simulation of flow around a single spur dike with free-surface flow

15-Zhang, H. Nakagawa, H. Kawaike, K. and Y Baba, 2009 Experiment and simulation of turbulent flow in local scour around a spur dyke, International Journal of Sediment Research, 24: 33-45.