

بررسی عددی الگوی جریان، فرسایش و رسوب گذاری در اطراف آبشکن‌های با طول نامساوی تحت شرایط هیدرولیکی و هندسی متفاوت

سعید عباسی^{1*}، حنیف پورشهباز² و پوریا تقوایی³

1- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان

2- کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان

3- دانشجوی دکتری مهندسی آب، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

* abbasi.saeed@znu.ac.ir

(دریافت مقاله: 96/7/29؛ پذیرش مقاله: 96/12/21)

چکیده - آبشکن‌ها به عنوان یکی از مرسوم‌ترین سازه‌های هیدرولیکی که در جهت کاهش فرسایش سواحل و کرانه‌های رودخانه‌ها استفاده می‌شوند، شناخته شده‌اند. این سازه‌ها با تغییر الگوی جریان و الگوی انتقال رسوبات می‌توانند شرایط هیدرولیکی را کنترل کرده و از فرسایش سواحل جلوگیری و باعث رسوب گذاری در آن‌ها شوند. در این مقاله، اثرات تغییرات زاویه، چینش‌های متفاوت آبشکن‌ها (بزرگ به کوچک و یا برعکس) بر روی الگوی جریان، فرسایش و رسوب گذاری بستر تحت سری آبشکن‌های موازی، غیرمتخلخل و غیر مستغرق با طول نامساوی به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. اعتبارسنجی نتایج مدل عددی ساخته شده در نرم افزار FLOW-3D با نتایج مدل آزمایشگاهی، نشان‌دهنده دقت بالای مدل می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در چینش آبشکن‌ها از بزرگ به کوچک، عمق آبستتگی در زاویه 45 درجه، 55 درصد و در چینش کوچک به بزرگ با زاویه 135 درجه، این عمق 72 درصد نسبت به آبشکن با طول مساوی و در حالت عمود بر ساحل کاهش دارد.

کلیدواژگان: سری آبشکن‌ها با طول نامساوی، مدل سازی عددی، فرسایش، رسوب گذاری، الگوی جریان.

1- مقدمه

آبستتگی در محدوده‌ی سازه‌های هیدرولیکی همواره یکی از مشکلات اساسی در طراحی آن‌ها بوده است. پیش‌بینی و کاهش میزان آبستتگی در نواحی نزدیک به این سازه‌ها در کانال‌های روباز یکی از چالش‌های پیش روی مهندسیین در دهه‌ی اخیر بوده است. در برخی از مسایل‌ها به دلایل مختلفی از جمله اهمیت دیواره‌های کناری و یا شدت جریان بسیار زیاد، از آبشکن‌ها برای تغییر رژیم جریان استفاده می‌شود.

محققان زیادی از جمله: گاردی و همکاران (Garde et al.,

1961)، مل ویل (Melville, 1992)، کوهنل و همکاران (Kuhnle et al., 1999)، صانعی (Saneie, 2006)، ژانگ و ناکاگوا (Zhang & Nakagawa, 2009)، قدسیان و همکاران (Ghodsian et al., 2009)، عثمان و سعید (Osman & Saeed, 2012)، الخطاب و همکاران (Al-Radan & Khateeb et al., 2016)، رادان و واقفی (Radan & Vaghefi, 2016)، به بررسی الگوی فرسایش و رسوب گذاری، عمق چاله فرسایش و تغییرات تنش بستر در اطراف آبشکن‌ها تحت شرایط متفاوت پرداخته‌اند. با توجه به شرایط متفاوت و برای کارایی بیشتر، چند آبشکن (گروه

جریان و قدرت جریان ثانویه حول آبشکن های T شکل در خم 90 درجه پرداختند. آنان با به کارگیری یک آبشکن فرعی، باعث کاهش قدرت جریان ثانویه تا 50 درصد و تغییر الگوی جریان شدند که می تواند باعث کاهش آبشستگی آبشکن اصلی T شکل را شود. همچنین خطای 7 درصدی مدل آنان نشان از قدرت بالای نرم افزار در مدل سازی دارد. عبدالعزیز و همکاران (Abdelaziz et al., 2014)، به بررسی عددی گسترش آبشستگی بر اثر یک جت مستغرق در نرم افزار FLOW-3D پرداختند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که مدل عددی به خوبی بیشترین عمق و پروفیل آبشستگی را نشان می دهد. همچنین مدل عددی شیب پایین دست تپه رسوب گذاری را بیشتر از مقدار اندازه گیری شده در آزمایشگاه نشان می دهد. اپلی چاوین و همکاران (Epey-Chauvin et al., 2014)، به بررسی عددی سیر تکاملی چاله فرسایشی در خاک های غیرچسبنده بر اثر جت آب وسط FLOW-3D پرداختند. ایشان پارامتر آماری R^2 را برای بیشترین عمق آبشستگی بی بعد و ارتفاع رسوب گذاری بی بعد به ترتیب برابر 0/932 و 0/898 محاسبه کردند که نشان از دقت بالای برنامه در شبیه سازی فرسایش و رسوب گذاری دارد. مهنی فرد و همکاران (Mehnfard et al., 2015)، نیز به بررسی آبشستگی موضعی ایجاد شده توسط جت افقی مستغرق پرداختند. آنان با بهره گیری از نرم افزار FLOW-3D به این نتیجه رسیدند که مدل عددی ساخته شده می تواند فرسایش موضعی را با تنها 11 درصد خطا پیش بینی کند. گیگلو و همکاران (Giglou et al., 2017)، با استفاده از مدل سازی عددی به بررسی زاویه، طول ها و فاصله های متفاوت سری آبشکن های موازی با طول مساوی بر روی الگوی جریان، فرسایش و رسوب گذاری پرداختند و با خطای 6 درصد مدل خود را صحت سنجی نمودند. در تحقیق حاضر به بررسی توأمان اثرات تغییر طول و تغییر زاویه، در سری آبشکن های موازی با طول نامساوی (سه آبشکن موازی) پرداخته شده است. برای مدل سازی آبشستگی از مدل FLOW-3D استفاده شده و اعتبارسنجی مدل عددی توسط مقایسه نتایج با نتایج آزمایشگاهی صورت پذیرفته است.

آبشکن ها) به جای آبشکن منفرد استفاده می گردد. فاصله و طول، زاویه عمودی و افقی آبشکن ها تأثیرات مختلفی بر جریان در کنار این سازه ها خواهند داشت. متعاقباً این جریان ها تنش برشی بستر را تحت تأثیر خود قرار داده و در مورفولوژی بستر تغییر ایجاد خواهند کرد. کرمی و همکاران (Karami et al., 2014)، آچاریا و دوان (Acharya & Duan, 2011)، کوکن و گوگاس (Koken & Gogus, 2015)، از جمله محققینی هستند که به بررسی خصوصیات جریان و چالای فرسایش در این گروه از آبشکن ها پرداخته اند.

کاربرد روش های عددی و اهمیت آن ها در علوم و مهندسی، روز به روز بیشتر می شود. به علت محدودیت های حاکم بر شرایط فیزیکی، از جمله مقیاس مدل و مشکلات ناشی از عدم تشابه کامل با میدان واقعی، نیاز به استفاده از شبیه سازی عددی را بیشتر نمایان می کند. نرم افزارهای مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی¹ (CFD) به منظور تحلیل میدان جریان و بررسی تنش ها و نیروهای موجود ارائه شده اند. از جمله این نرم افزارها می توان به FLOW-3D اشاره کرد. این مدل سه بعدی در پژوهش های فرسایش و رسوب گذاری محققینی از جمله محققان زیر بکار گرفته شده است:

آچاریا و دوان (Acharya & Duan, 2011)، به بررسی جریان متلاطم اطراف سری آبشکن های موازی در شرایط بستر صلب و فرسایش پذیر پرداختند. ایشان همچنین به بررسی الگوی فرسایش و رسوب گذاری در اطراف آبشکن های یاد شده پرداختند. ایشان در نتایج کار خود تصریح کردند که نتایج شبیه سازی میدان جریان تطابق خوبی با داده های آزمایشگاهی دارد. لی و همکاران (Li et al., 2013)، به بررسی تأثیرات زمان در مدل های آشفستگی برای مدل سازی عددی عمق آبشستگی در اطراف یک آبشکن منفرد توسط FLOW-3D پرداختند. متین فرد و همکاران (Matinfard et al., 2013)، تأثیر شرایط هیدرولیکی و توزیع سرعت در اطراف سری آبشکن L شکل در قوس رودخانه را با استفاده از مدلی عددی بررسی کردند. واقفی و همکاران (Vaghefi et al., 2014)، به بررسی عددی الگوی

¹ Computational Fluid Dynamics

2- معادلات حاکم

معادلات حرکت سیال شامل معادلات پیوستگی و مومنتم است که نرم افزار FLOW-3D نیز مانند دیگر برنامه ها از حل آنها برای محاسبات هیدرولیکی جریان استفاده می کند. رابطه ی (1)، معادله ی پیوستگی و رابطه ی (2) معادله ی حجم جریان را نشان می دهند. روابط (3) تا (5) نیز معادلات مومنتم در مختصات کارتزین را نشان می دهند. نرم افزار با حل عددی معادلات دیفرانسیل با روش حجم محدود این معادلات را حل می کند.

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = R_{SOR} \quad (1)$$

$$V_F \frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (AUF) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + G_x + f_x \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \xi \frac{A_y u v}{x V_F} = -\frac{R}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + G_y + f_y \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + G_z + f_z - b_z \quad (5)$$

که در این معادلات V_F مقدار نسبت حجم باز به جریان، ρ دانسیته سیال، (u, v, w) سرعت در راستای (x, y, z) ، و R_{SOR} تابع چشمه می باشند. (A_x, A_y, A_z) مقادیر نسبت مساحت، (G_x, G_y, G_z) شتاب ثقل و (f_x, f_y, f_z) شتاب های لزجت، (b_x, b_y, b_z) افت های جریان در محیط متخلخل، به ترتیب در جهات (x, y, z) می باشند. در رابطه ی (2)، A متوسط مساحت جریان، U متوسط سرعت جریان در جهات (x, y, z) و F تابع حجم سیال می باشد. بخش آخر از معادلات (3) تا (5) مقدار پاشش جرم در سرعت صفر را نشان می دهد. در نرم افزار FLOW-3D از دو روش عددی برای شبیه سازی استفاده

می شود که عبارتند از روش حجم سیال¹ VOF که برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می گیرد و روش کسر مساحت - حجم مانع یا FAVOR² که برنامه از این روش برای مدل سازی سطوح و احجام صلب مانند مرزهای هندسی استفاده می کند.

برای محاسبات بخش رسوبی، بار معلق و بار بستر به طور جداگانه محاسبه می شود. بار رسوبی معلق توسط حل معادله ی انتقال-انتشار مطابق رابطه ی (6) به دست می آید.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_i \frac{\partial c}{\partial x_i} + W \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

که در آن U_i میانگین سرعت رینولدز جریان، W سرعت سقوط ذرات رسوبی، x بعد فضای عمومی، z اندازه در جهت عمودی و Γ ضریب اغتشاش می باشد. ضریب اغتشاش برابر با ویسکوزیته ی جریان گردابی است که از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ محاسبه می گردد. به منظور محاسبه ی بار بستر، FLOW-3D دو مدل جدید مبتنی بر "رابطه نیلسن³" و "رابطه فن راین⁴" را به مدل قبلی خود که "رابطه مایر پتر و مولر⁵" بود، اضافه کرده است. در این مقاله از مدل فن راین (Van Rijn) استفاده شده و بار بستر توسط معادله ی فن راین (Van Rijn, 1987)، طبق رابطه ی (7) محاسبه می شود.

$$\frac{q_b}{d^{1.5} \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} g}} = \frac{0.053 \left(\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right)^{1.5}}{d^{0.3} \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} g \right)^{0.1}} \quad (7)$$

که در آن d قطر ذرات رسوبی، τ تنش برشی بستر، τ_c تنش برشی بحرانی برای حرکت ذرات رسوبی بر اساس دیباگرام شیلدز، ρ_s و ρ_w به ترتیب، چگالی آب و چگالی ذرات رسوبی، v ویسکوزیته ی سینماتیکی آب و g شتاب گرانش می باشند. و q_b نشان دهنده ی بار بستر ذرات رسوبی می باشد.

3- مدل عددی و اعتبارسنجی

کرمی و همکاران (Karami et al., 2014)، در آزمایشگاه دانشگاه امیرکبیر، کانالی مستطیلی به طول 14 متر، عرض

¹ Volume of Fluid

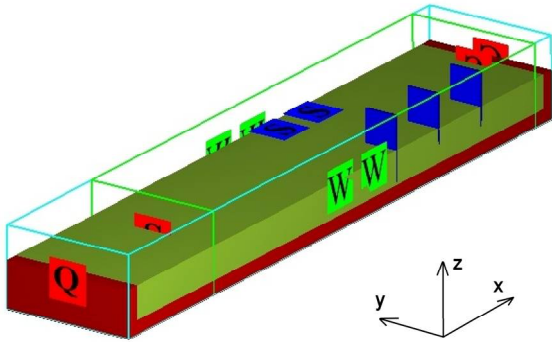
² Fractional Area-Volume Obstacle Representation

³ Nielsen Equation

⁴ Van Rijn Equation

⁵ Meyer-Peter & Muller equation

از شرط دبی ثابت 0/035 و 0/046 متر مکعب بر ثانیه و شرط ارتفاع آب در ورودی برابر 0/5 متر استفاده شد که مبنای این ارتفاع از کف فلوم می‌باشد. در طرفین (دیوارها) و کف کانال از شرایط مرزی دیوار استفاده گردید. در مرز فوقانی و مرزهای داخلی فلوم شرط تقارن و در مرز خروجی شرایط تداوم¹ در نظر گرفته شده است (شکل 1).



شکل 1 شرایط مرزی مورد استفاده در مدل سازی عددی

مدل‌ها با چند طول مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به بررسی‌های انجام شده، طول کانال مورد بررسی برابر 5 متر انتخاب شد. یعنی فاصله‌ی 3 تا 8 متری فلوم آزمایشگاهی در نرم‌افزار مدل‌سازی شد. از فاصله‌ی 3 تا 6/16 متری که اولین آبشکن قرار دارد، پروفیل جریان توسعه یافته‌ی آب شکل گرفته و از فاصله‌ی 7/18 تا 8 متری نیز گرادبه‌های آبشکن آخر به صورت کامل تشکیل می‌شوند که می‌توان بر اساس آن پروفیل رسوب گذاری و فرسایش در آبشکن آخر را نیز محاسبه و ترسیم کرد.

با توجه آنالیز حساسیت مش انجام شده، و مقایسه‌ی نتایج آبشستگی پای آبشکن اول با نتایج آزمایشگاهی، تصمیم بر آن شد که از دو مش با ابعاد مختلف استفاده شود به صورتی که در فاصله‌های نزدیکتر به آبشکن‌ها، مش‌ها ریزتر بوده و هرچقدر از آبشکن‌ها دور شویم مش‌ها بزرگتر شوند. این مش‌ها به روش تو در تو در هم قرار داده شده‌اند و به عنوان مناسب‌ترین مدل مش برای مدل‌سازی انتخاب شده‌اند. ابعاد مش بزرگتر که کل کانال را در بر گرفته است، در همه‌ی جهات 2/5 سانتی متر بوده و تعداد این مش‌ها 192000 می‌باشد.

1 متر و عمق 1 متر را از جنس پلکسی‌گلاس که به وسیله فریم فلزی پایدار شده ساختند. ایشان در کانال سه آبشکن غیر مستغرق و غیر قابل نفوذ، هر یک به طول 25 سانتی‌متر و عمود بر جریان نصب کردند. اولین آبشکن را در فاصله 6/16 متری از ابتدای کانال نصب کردند و فاصله‌ی بین آنها را دو برابر طول آبشکن انتخاب نمودند. عمق جریان ورودی را نیز در 15 سانتی‌متر ثابت نگه داشتند. آن‌ها فلوم را به وسیله رسوبات یکسان ($\sigma_g < 1.4$) با ضخامت 0/35 متر و با میانگین قطر دانه‌ی (d_{50})، 0/91 میلیمتر و با چگالی نسبی (S_s) 2/65 و انحراف استاندارد هندسی (σ_g) 1/38 پوشاندند. پروفیل سرعت و تغییرات پروفیل بستر در اطراف آبشکن‌ها، به ترتیب با دستگاه ADV و LBP اندازه‌گیری شد.

در جدول 1 جزئیات و نتایج برخی آزمایشات آن‌ها، (بخشی که برای سنجش مدل عددی مورد استفاده واقع شد) بیان گشته است؛ که در آن Q، دبی آزمایش بر حسب متر مکعب بر ثانیه، Y عمق جریان بر حسب متر، U، سرعت جریان بر حسب متر بر ثانیه، U/U_{cr} ، نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی آستانه حرکت ذرات، Fr، عدد فرود، d_{s1} و d_{s2} و d_{s3} به ترتیب عمق آبشستگی در پای آبشکن‌های اول، دوم و سوم بر حسب متر و V حجم رسوبات فرسایش یافته بر حسب مترمکعب می‌باشد. مدل آزمایشگاهی مذکور، در نرم‌افزار FLOW-3D به صورتی که در ادامه شرح داده خواهد شد، مدل‌سازی شد. واحدها به صورت SI، دما بر حسب درجه سلسیوس و آب به عنوان سیال غیر قابل تراکم در نظر گرفته شد. شتاب گرانش برابر 9/807 متر بر مجذور ثانیه، چگالی ذرات بستر برابر 2650 کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب و عدد شیلدز بحرانی با توجه قطر 0/91 میلی‌متری محاسبه و منظور شد. این عدد با در نظر گرفتن روابط ارائه شده توسط شیلدز (Shields, 1936) برابر 0/033 محاسبه شد. در این مدل‌سازی از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ با توسعه‌ی Renormalized group (RNG) model استفاده شده است. مدل RNG از بسط و توسعه‌ی مدل استاندارد مبتنی بر روش تجدید نرمال سازی گروهی (RNG) بدست آمده است. برای حل معادلات ناویر استوکس، نیاز به شرایط اولیه و مرزی خواهد بود. در مرز ورودی فلوم از شرط مرزی دبی ثابت استفاده شده است. در اینجا با توجه به شرایط آزمایشگاهی،

¹ Continuative

جدول 1 مشخصات و نتایج مدل کرمی و همکاران (Karami et al., 2014)

Test No.	Q (m ³ /s)	Y (m)	U (m/s)	U/U_{cr}	Fr	d_{s1} (m)	d_{s2} (m)	d_{s3} (m)	V (m ³)
E1	0/035	0/15	0/233	0/65	0/19	0/156	0	0/026	0/0165

ترتیب در روابط (8)، (9) و (10) بیان گشته‌اند، استفاده گردید.

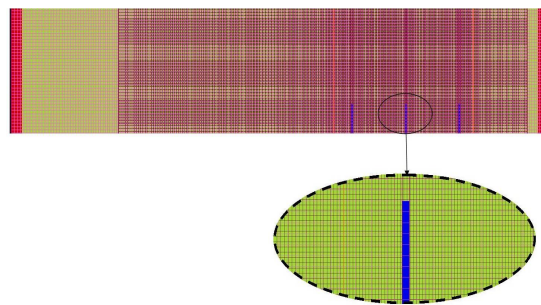
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - N_i)^2}{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E}_i)^2} \quad (8)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_i - N_i| \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - N_i)^2} \quad (10)$$

که در آن‌ها E_i داده‌های آزمایشگاهی و N_i داده‌های حاصل از نتایج مدل‌های عددی و n تعداد داده‌ها می‌باشد. سرعت جریان در 50 نقطه در تراز $Z=2\text{cm}$ بالای بستر و در فواصل 6/66، 6/41، 6/16، 5/95، 5/65 متر از ابتدای کانال اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ با توسعه RNG بیشترین تطابق را با نتایج آزمایشگاهی دارد. مقایسه میان سرعت مطلق شبیه‌سازی شده در مقاطع افقی در تراز $z=2\text{cm}$ در فواصل $x=6.16$ ، $x=6.41$ متر در شکل 3 نشان داده شده است. با توجه به شکل 3، می‌توان استدلال کرد که دقت مدل‌سازی عددی قابل قبول می‌باشد. به منظور اطمینان از همگرایی توپوگرافی بستر و حصول تعادل بستر از حیث فرسایش و رسوبگذاری در انتهای شبیه‌سازی نمودار بی بعد فرسایش زمان مدل عددی با مدل آزمایشگاهی کرمی و همکاران مورد مقایسه قرار گرفت (شکل 4). مقایسه دو نمودار نشان می‌دهد که نرم‌افزار دقت خوبی در شبیه‌سازی دارد و همچنین نسبتاً افقی بودن شکل نمودار در انتهای شبیه‌سازی عددی، حاکی از همگرایی فرسایش و رسوبگذاری در بستر است. سپس، نتایج تغییرات بستر، نتایج آزمایشگاهی و نرم‌افزاری در مقاطع عرضی و طولی مقایسه شد. پس از به تعادل رسیدن مدل عددی ساخته شده در FLOW-3D، نتایج آن مانند شکل 5 استخراج شد. آبشستگی حداکثر در این مدل، 0/133 متر می‌باشد.

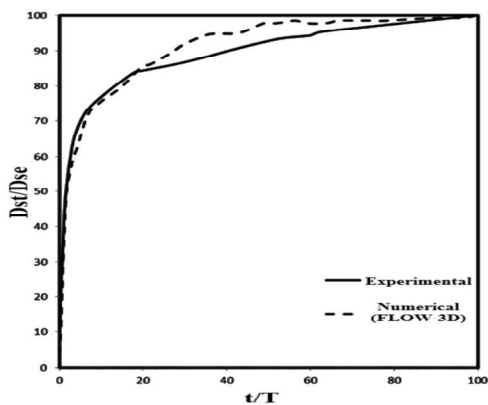
نسبت ابعاد مش در جهات گوناگون (x, y, z) در بیش‌ترین حالت 1/25 و در بقیه‌ی حالات 1 می‌باشد. هرچه این نسبت‌ها به عدد 1 نزدیکتر باشند، مدل دارای خطای کمتری خواهد بود. مش کوچکتر در همه ابعاد دارای ابعاد 1/2 سانتی متر است و تعداد این مش‌ها نیز 1315550 می‌باشد. این بخش از مش از فاصله‌ی 4 تا 7/8 متری کانال در نظر گرفته شده است و عملاً قسمت اعظم کانال به ویژه آبشکن‌ها و پیرامون آن‌ها را در بر می‌گیرد. نسبت ابعاد این مش‌بندی در جهات گوناگون (x, y, z) در بیش‌ترین حالت 1/7 است. ایجاد این نسبت ابعاد مش به چند دلیل اجتناب ناپذیر است: یکی به دلیل وجود مش پلان‌ها¹ که برای شناسایی آبشکن‌ها استفاده شده‌اند و دیگری به دلیل ریز کردن مش در اطراف آبشکن‌ها. به این منظور و برای تشکیل کامل گرادبه‌ها و نیز افزایش دقت در تخمین چاله‌ی فرسایش و ابعاد چاله، فاصله‌ی 6 تا 7/3 متری به 150 قسمت تقسیم شد و یک مش با ابعاد تقریباً 0/86 سانتی‌متر در جهت X قرار داده شد. به طور کلی از 1507550 مش برای مدل‌سازی این فلوم استفاده شد که در شکل 2 قابل مشاهده است.



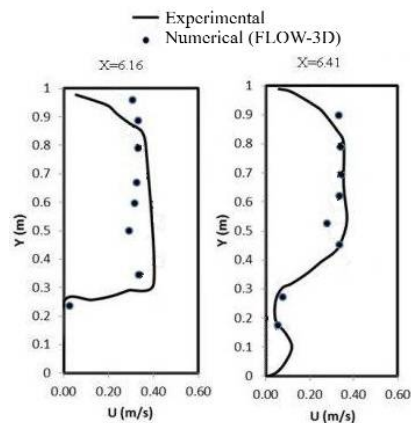
شکل 2 نمایی از مش بندی مدل

با هدف مقایسه کمی نتایج بدست آمده در مدل FLOW-3D با نتایج آزمایشگاهی کرمی و همکاران (Karami et al., 2014) از سه پارامتر آماری R^2 ، MAE و RMSE که به

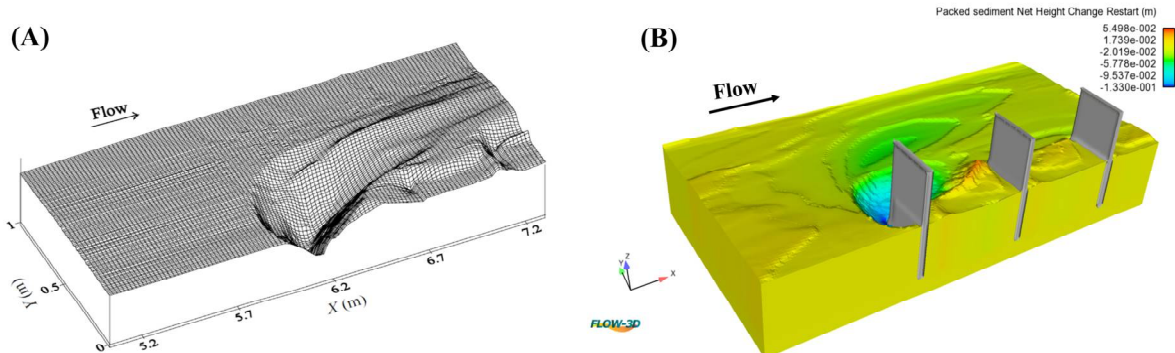
¹ Mesh plane



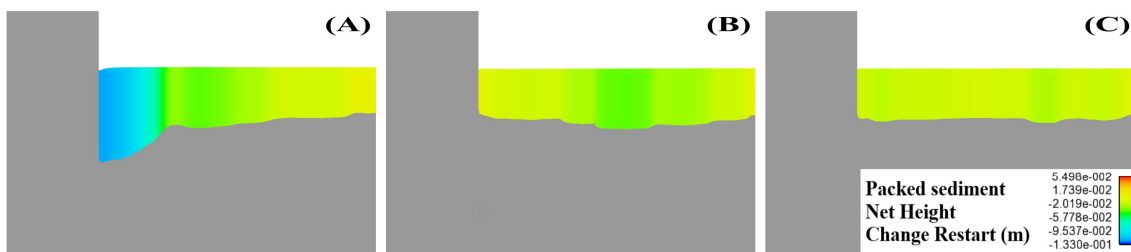
شکل 4 نمودار بی بعد فرسایش-زمان مدل واسنجی



شکل 3 سرعت در مقاطع افقی در تراز $z=2\text{cm}$ در فواصل $x=6.16$ و $x=6.41$ متر



شکل 5 نتایج تغییرات بستر در (A) مدل آزمایشگاهی و (B) مدل عددی FLOW-3D



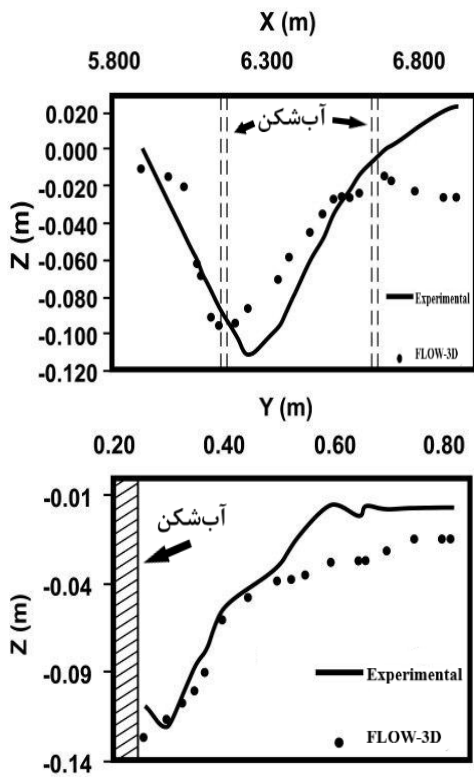
شکل 6 آبهستگی پای آبهکن‌ها (a) آبهکن اول (b) آبهکن دوم (c) آبهکن سوم

جدول 2 میزان آبهستگی پای سه آبهکن، مقایسه‌ی نتایج مدل FLOW-3D با پژوهش کرمی و همکاران (Karami et al., 2014)

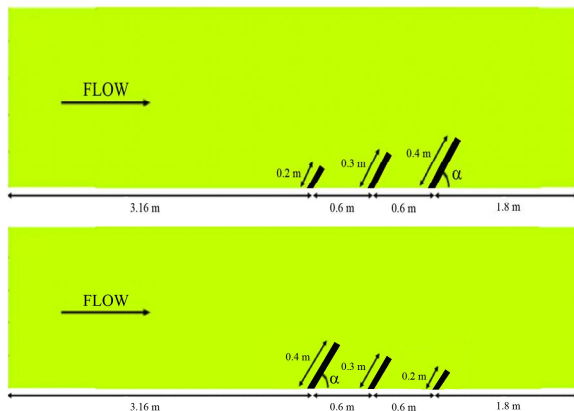
	$ds_1(\text{m})$	$ds_2(\text{m})$	$ds_3(\text{m})$
آزمایشگاهی (کرمی و همکاران 2014)	0/156	0	0/026
FLOW-3D	0/123	0/005	0/023

همان‌طور که در شکل 6 و جدول 2 مشاهده می‌شود، آبهستگی پای آبهکن اول تا سوم به ترتیب 0/005، 0/123 و 0/023 متر می‌باشد. سپس، چهار مقطع عرضی و چهار مقطع طولی در قسمت‌های پس از تنگ‌شدگی انتخاب شد و

مدل‌سازی این فلوم استفاده شده است. زمان شبیه‌سازی عددی با توجه به مدل واسنجی شده و نیز مقایسه نتایج در انتهای زمان شبیه‌سازی برابر 1350 ثانیه منظور گردید. برای اجرای مدل‌ها از یک سیستم Core i7:5820K با حافظه‌ی شناور 32 گیگابایت استفاده شد.



شکل 7 پروفیل‌های آبشستگی؛ نتایج عددی و آزمایشگاهی، بالا (مقطع عرضی $X = 6.16$ m، پایین (مقطع طولی $Y = 0.35$ m)



شکل 8 پلان عمومی مدل‌های ساخته شده، بالا: ردیف 2 تا 8، پایین: ردیف 9 تا 16

در مجموع، عمق آبشستگی در 160 نقطه، مورد بررسی قرار گرفت. در شکل 7 میزان آبشستگی در یک مقطع عرضی و یک مقطع طولی در اطراف آبشکن به ترتیب در نرم‌افزار و نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده است (در هر یک از مقاطع نشان داده شده در شکل 7 حدود 20 نقطه از 160 نقطه آورده شده است). در مقایسه‌ی نتایج آبشستگی در کل 160 نقطه‌ی مدل عددی با نتایج متناظر در مدل آزمایشگاهی، پارامترهای آماری R^2 و MAE و RMSE به ترتیب، 0/91، 0/0162 و 0/0214 محاسبه شد که نشانگر دقت قابل قبول مدل عددی ساخته شده در FLOW-3D است.

با هدف بررسی تأثیر زاویه و روند تغییرات طول بر میزان آبشستگی و تغییرات بستر، از 15 مدل مطابق جدول 3 و شکل 8 استفاده شد که در هر کدام از این مدل‌ها، سه آبشکن موازی با فواصل 60 سانتی‌متر و ضخامت 3 سانتی‌متر به صورت غیر متخلخل و غیر مستغرق قرار دارند. همان‌طور که در جدول ملاحظه می‌گردد، در مدل اول، تمامی آبشکن‌ها به یک اندازه (30 سانتی‌متر) هستند و با زاویه 90 درجه در مسیر جریان قرار می‌گیرند. این مدل به عنوان مبنای مقایسه‌ی مدل‌ها در نظر گرفته شده است. تمامی زوایا نسبت به پایین‌دست جریان می‌باشند و برای این که میزان تنگ شدگی از حدود 25 درصد کمتر نگردد، از 45 تا 135 درجه تغییر می‌یابند. در مدل‌های 2 تا 8 آبشکن اول 20 سانتی‌متر، آبشکن دوم 30 سانتی‌متر و آبشکن آخر 40 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. این آبشکن‌ها تحت زاویه‌های بیان شده با اختلاف 15 درجه قرار داده شده‌اند. با هدف بررسی تأثیر نحوه‌ی چیدمان آبشکن‌ها بر آبشستگی (صعودی و یا نزولی بودن)، در مدل‌های 9 تا 15 آبشکن اول 40 سانتی‌متر، آبشکن دوم 30 سانتی‌متر و آبشکن آخر 20 سانتی‌متر منظور شده است. حالات فوق نیز همانند مدل‌های 2 تا 8 تحت زاویه‌های بیان شده مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

پلان عمومی مدل‌های ساخته شده در شکل 8 و جزئیات مدل‌های عددی یاد شده در جدول 3 آورده شده‌اند. در تمام مدل‌ها، شرایط مدل‌سازی مانند شرایط بیان شده در اعتبارسنجی در نظر گرفته شده است. به طور تقریبی با توجه به شرایط بیان شده در بخش قبل، در هر کدام از مدل‌ها از یک مش با قریب به یک و نیم میلیون المان برای

4- ارائه نتایج

در حالت تعادل نشان داده شده است. مطابق جدول 4، عمق آبشستگی حداکثر با افزایش زوایا تا 90 درجه افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد.

در جدول 4 نتایج و میزان فرسایش در پای آبشکن‌های اول تا سوم و همچنین میزان رسوبگذاری در مدل‌های مختلف،

جدول 3 جزئیات مدل‌های عددی

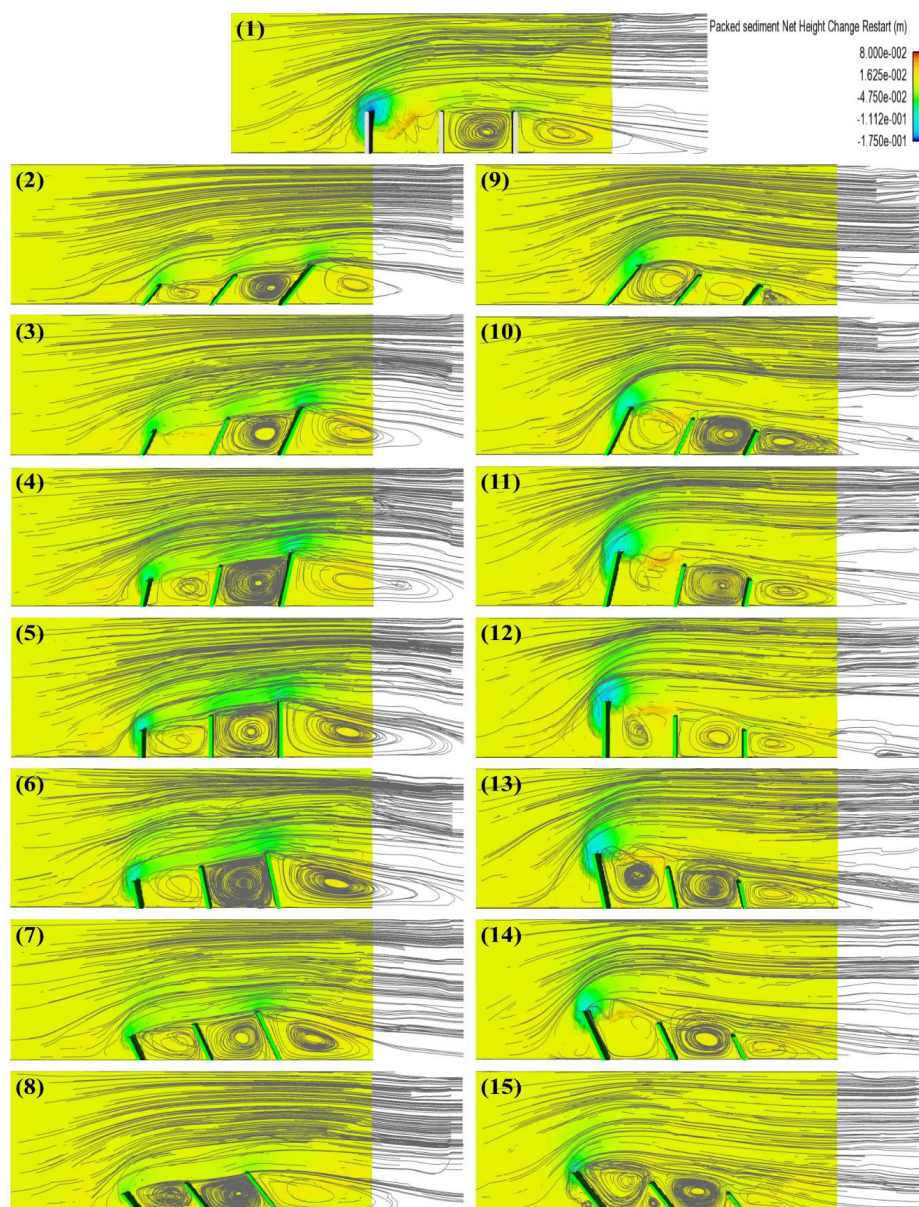
شماره مدل	نام مدل	زاویه α آبشکن‌ها	طول آبشکن اول (cm)	طول آبشکن دوم (cm)	طول آبشکن سوم (cm)	میزان تنگ شدگی (%)
1	90D.30.30.30	90	30	30	30	30
2	45D.20.30.40	45	20	30	40	28
3	60D.20.30.40	60	20	30	40	35
4	75D.20.30.40	75	20	30	40	37
5	90D.20.30.40	90	20	30	40	40
6	105D.20.30.40	105	20	30	40	37
7	120D.20.30.40	120	20	30	40	35
8	135D.20.30.40	135	20	30	40	28
9	45D.40.30.20	45	40	30	20	28
10	60D.40.30.20	60	40	30	20	35
11	75D.40.30.20	75	40	30	20	37
12	90D.40.30.20	90	40	30	20	40
13	105D.40.30.20	105	40	30	20	37
14	120D.40.30.20	120	40	30	20	35
15	135D.40.30.20	135	40	30	20	28

جدول 4 نتایج آبشستگی بستر در مدل‌های مختلف

شماره مدل	نام مدل	آبشستگی پای آبشکن اول (cm)	آبشستگی پای آبشکن دوم (cm)	آبشستگی پای آبشکن سوم (cm)	حداکثر عمق آبشستگی نسبت به مدل مبنا	حداکثر رسوبگذاری نسبت به مدل مبنا
1	مدل مبنا 90D.30.30.30	17/2	2/78	4/61	17/2cm (100%)	5/8cm (100%)
2	چپش صعودی آبشکن‌ها	5/96	4/27	5/42	34/65	37/75
3		7	4/77	6/96	40/69	43/27
4		8/2	4/48	7/51	47/67	38/27
5		10/9	4/77	6/15	63/37	51/72
6		9/7	3/79	6/82	56/39	33/62
7		7/3	2/68	5/96	42/44	51/03
8		4/77	2/08	3/66	27/73	28/79
9		7/7	2/41	2/5	44/76	50/51
10	چپش نزولی آبشکن‌ها	10/2	2/12	2/51	59/30	64/31
11		12/4	0/35	2/37	72/09	92/93
12		15/3	0/1	1/9	88/95	78/10
13		12/8	-0/1	2/56	74/41	72/93
14		11/2	0	1/72	65/11	79/13
15		9/2	0/65	1/8	53/48	38/96

2 سانتی‌متر هستند. با افزایش زاویه از 45 درجه به 90 درجه یک خط رسوبی در میان آبشکن‌ها پدیدار می‌شود که در زاویه 90 درجه این خط کاملاً مشخص است و با افزایش زاویه و تا رسیدن به زاویه 135 درجه این خط رسوبی در حال از بین رفتن و محو شدن می‌باشد. همان‌طور که در شکل 9 دیده می‌شود، در مدل‌های 2 تا 8، گردابه‌ی اول با بیشتر شدن زاویه از 45 تا 135 شدت بیشتری پیدا می‌کند.

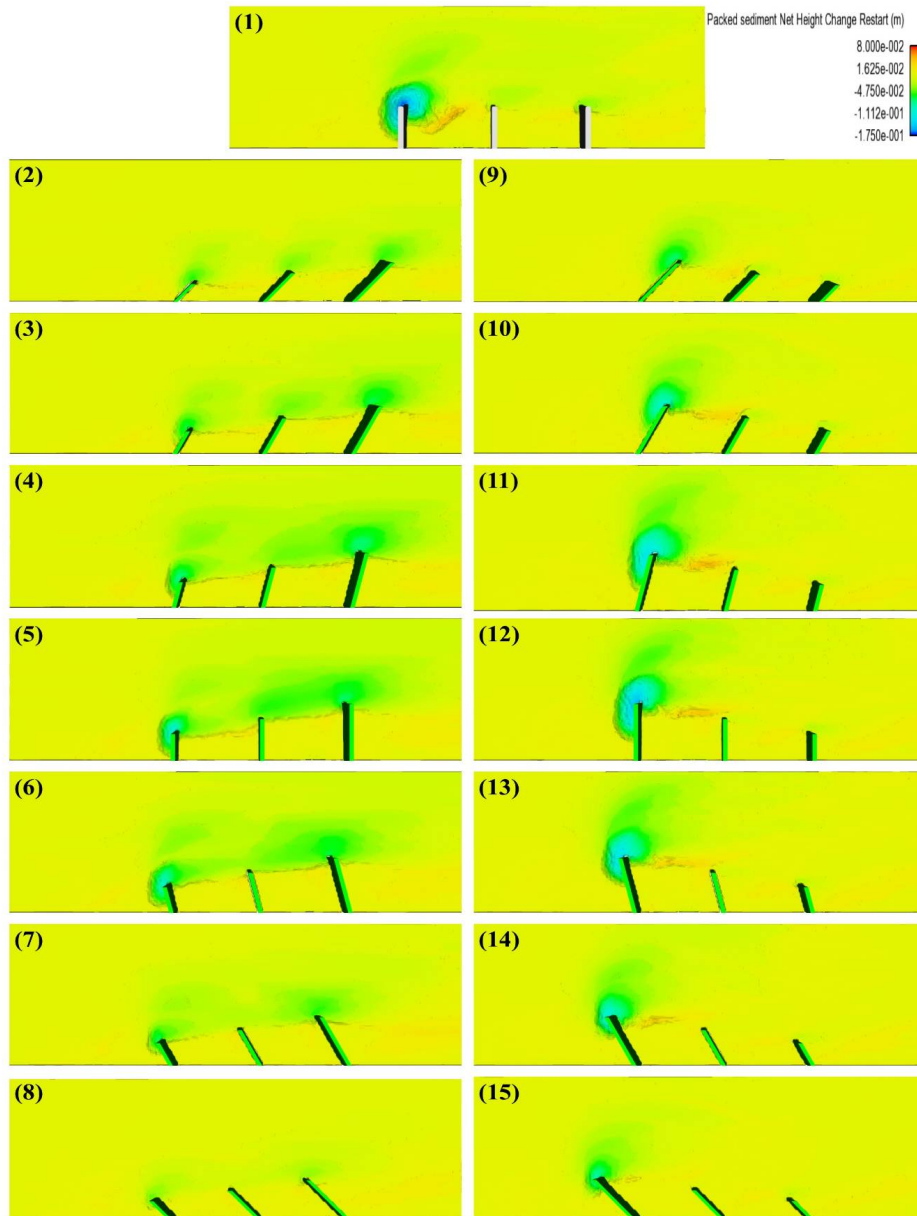
از سویی دیگر عمق آبشستگی حداکثر در حالتی که تغییرات طول آبشکن‌ها صعودی می‌باشد، کمتر از این عمق در حالت مشابه نزولیست. از سویی دیگر همان‌طور که انتظار می‌رود در مدل‌های 9 تا 15، عمق آبشستگی حداکثر در نزدیکی آبشکن اول رخ می‌دهد. علت این پدیده در تشکیل گردابه‌های پیرامون آبشکن‌ها توجیه می‌شود. مطابق جدول 4 در مدل‌های 2 تا 8، ارتفاع حداکثر رسوب‌گذاری برای همه زوایا تقریباً با یکدیگر یکسان و برابر



شکل 9 گردابه‌های تشکیل شده در پیرامون آبشکن‌ها در مدل‌های 1 تا 15

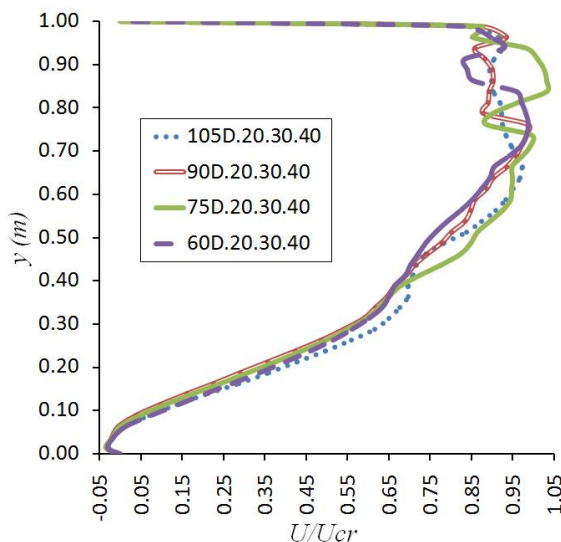
سوم از حالت قبلی بسیار کوتاه‌تر است و شدت کمتری نسبت به حالت قبلی دارد و در تمام حالات نسبت به حالت مشابه با زاویه مشابه دارای شدت کمتری هستند. در زاویه 75 و 120 درجه می‌توان مشاهده کرد که گردابه‌ی اول به صورت کامل تشکیل نمی‌شود. همچنین در این سری از مدل‌ها، گردابه‌های کوچک و ثانویه در مدل با زاویه 135 درجه تشکیل می‌شوند. در شکل 10 محو شدن این خط رسوبی دیده می‌شود.

ناحیه تأثیر جریان‌های بازگشتی (طول گردابه‌ی سوم) کاهش پیدا می‌کند، به دلیل قرار گرفتن موقعیت‌های متفاوت در آبشکن‌ها دیده می‌شود که با افزایش زاویه تا 90 درجه به شدت این گردابه‌ها افزوده می‌شود. در حالی که بعد از زاویه 90 تا 135 درجه مشاهده می‌شود که شدت این گردابه کاهش پیدا می‌کند. در مجموع مشاهده می‌شود که هرچند آبشکن با زاویه 120 درجه شدت گردابه کمتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد، اما در مدل‌های 9 تا 15 گردابه



شکل 10 نتایج آبشستگی بستر در پیرامون آبشکن‌ها در مدل‌های 1 تا 15

جهت جریان، چینش‌های متفاوت آبشکن‌ها و عدد فرود بر الگوی جریان، فرسایش و رسوب‌گذاری در اطراف سری آبشکن‌های موازی با طول نامساوی پرداخته شد.



شکل 11 پروفیل سرعت بدون بعد برای چهار مدل 3 تا 6

به این منظور، پس از کالیبراسیون مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی، 7 مدل با زاویه‌های 45، 60، 75، 90، 105، 120 و 135 درجه جهت بررسی اثر زاویه و تحت همین زوایا 2 چینش مختلف (از بزرگ به کوچک و از کوچک به بزرگ) برای بررسی چینش‌های متفاوت ساخته شد. پس از بررسی نتایج و شرایط مورفولوژیکی بستر، نتایج زیر حاصل شد:

- مدل‌های دارای چینش صعودی آبشکن‌ها، نسبت به مدل‌های دارای چینش نزولی، دارای گردابه بزرگتری پس از آبشکن سوم هستند.

- در سری آبشکن‌های با زاویه 135 درجه و چینش نزولی (40 سانتی‌متر در ابتدا، 30 سانتی‌متر در میانه و 20 سانتی‌متر در انتها) گردابه‌های کوچکی در نزدیکی آبشکن‌ها ایجاد می‌شود که نیازمند مطالعه بیشتر است.

- بیش‌ترین ارتفاع رسوب‌گذاری در چینش‌های صعودی و تحت زاویه‌های مختلف تقریباً در محدوده‌ی 3-1/67 سانتی‌متر تغییر می‌کند. میانگین مقادیر حداکثر رسوب گذاری 2/35 سانتی و انحراف از معیار داده‌ها برابر 0/46 می‌باشد. در حالی که در چینش نزولی و تحت زاویه‌های قبلی این عدد تقریباً 75 درصد بیش‌تر بوده و با میانگین

هرچند تقریباً در همه‌ی حالات، رسوب‌گذاری در بین آبشکن‌ها دیده می‌شود، اما در پای آبشکن‌ها نیز فرسایش وجود دارد. با افزایش زاویه از 45 به 90 اندازه‌ی چاله‌ی آبشستگی افزایش پیدا می‌کند و این پدیده تا جایی پیش می‌رود که چاله‌ی آبشستگی در پای هر سه آبشکن به هم متصل می‌شود. در زاویه 135 درجه همان‌طور که مشاهده می‌شود، این چاله‌ها کاملاً از هم جدا شده‌اند و خط رسوبی مذکور تقریباً از بین رفته است. در مدل‌های 9 تا 15 نیز همانند گذشته بیش‌ترین ارتفاع رسوب گذاری مطابق جدول 4 تقریباً یکسان و برابر 3/95 سانتی‌متر می‌باشد و در کل ارتفاع رسوب گذاری در همه مدل‌های 9 تا 15 از شرایط مدل‌های مشابه 2 تا 8 بیشتر است. با افزایش زاویه از 45 به 90 درجه ابتدا چاله‌ی آبشستگی بزرگتر شده ولی در زوایای بیش‌تر از 90 درجه دوباره این حجم چاله کاهش می‌یابد. بیش‌ترین عمق فرسایش نیز با افزایش زاویه تا 90 درجه افزایش می‌یابد و بعد از آن دوباره شروع به کاهش یافتن می‌کند. کمربند رسوبی همانند حالت گذشته با افزایش زاویه تا 90 درجه مشخص‌تر می‌شود و سپس با افزایش زاویه تا 135 درجه این کمربند رسوبی محوتر می‌گردد. برخلاف حالت گذشته این کمربند بیش‌تر در بین آبشکن اول و دوم خود را نشان می‌دهد.

شکل 11 پروفیل سرعت بدون بعد (U/U_{cr}): سرعت به سرعت آستانه‌ی حرکت ذرات) برای چهار مدل 3 تا 6 که با توجه به شکل 5 دارای بیش‌ترین گسترش گردابه‌ها در پایین دست آبشکن‌ها هستند، را نشان می‌دهد. سرعت یاد شده در تراز 2 سانتی‌متری از کف رسوبات برآورد شده است. مشاهده می‌گردد که فقط در حالتی که آبشکن به صورت صعودی و با زاویه 75 درجه قرار گرفته است، سرعت جریان از سرعت آستانه‌ی حرکت ذرات تجاوز نموده است. با توجه به این که سرعت در تراز بالاتر از کف رسوبات برآورد شده است و همچنین محل اتفاق افتادن این امر در طرف مقابل استقرار آبشکن‌ها و در فاصله‌ی 180 سانتی‌متری پایین دست آنها قرار دارد (انتهای کانال) با تقریب خوب می‌توان از اثرات فرسایشی آن صرف‌نظر نمود.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تاثیر اثر زاویه‌های مختلف آبشکن‌ها با

7- منابع

- Abdelaziz, S., Bui, M.D. and Rutschmann, P. (2014). Numerical simulation of scour development due to submerged horizontal jet. *River Flow 2010*, pp. 1597-1604.
- Acharya, A. and Duan, J.G. (2011). Three dimensional simulation of flow field around series of spur dikes. In *World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability* (pp. 2085-2094).
- Al-Khateeb, H.M.M., AL-Thamiry, H.A.K. and Hassan, H.H. (2016). Evaluation of local scour development around curved non-submerged impermeable Groynes, *International Journal of Scientific & Technology Research*, 5(1), pp. 83-89
- Garde, R., Subramanya, K.S. and Nambudripad, K.D. (1961). Study of scour around spur-dikes, *Journal of the Hydraulics Division*, 87(6), pp. 23-37.
- Epely-Chauvin, G., De Cesare, G. and Schwindt, S. (2014). Numerical modelling of plunge pool scour evolution in non-cohesive sediments. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 8(4), pp. 477-487.
- Ghodsian, M. and Vaghefi, M. (2009). Experimental study on scour and flow field in a scour hole around a T-shape spur dike in a 90 bend, *International Journal of Sediment Research*, 24(2), pp. 145-158
- Giglou, A.N., Mccorquodale, J.A. and Solari, L. (2017). Numerical study on the effect of the spur dikes on sedimentation pattern. *Ain Shams Engineering Journal*. (In Press) <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.02.007>
- Karami, H., Basser, H., Ardeshir, A. and Hosseini, S.H. (2014). Verification of numerical study of scour around spur dikes using experimental data, *Water and environment journal*, 28(1), pp. 124-134.
- Koken, M. and Gogus, M. (2015). Effect of spur dike length on the horseshoe vortex system and the bed shear stress distribution, *Journal of Hydraulic Research*, 53(2), pp. 196-206.
- Kuhnle, R.A., Alonso, C.V. and Shields, F.D. (1999). Geometry of scour holes associated with 90 spur dikes, *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(9), pp. 972-978.
- Li, G., Lang, L. and Ning, J. (2013). 3D Numerical Simulation of Flow and Local Scour around a Spur Dike, In *IAHR World Congress* (pp. 1-9)
- Matinfard, A., Heidarnejad, M. and Ahadian, J. (2013), Effect of Changes in the Hydraulic Conditions on the Velocity Distribution around a L-Shaped Spur

- 3/95 و انحراف از معیار 0/98 در محدوده.ی 2/26 تا 5/39 تغییر می نماید.
- در مدل های با چینش صعودی آبشکن ها، یک خط رسوب گذاری در بین آبشکن ها دیده می شود که با نزدیک شدن به زاویه 90 درجه این خط پدیدارتر می شود ولی با افزایش به 135 این خط محوتر می شود. لیکن در سری آبشکن ها با چینش نزولی این خط دیده نمی شود.
- در مقایسه با بیشترین عمق آبشستگی در اطراف سه آبشکن قائم با طول های مساوی، چینش نزولی آبشکن ها می تواند تا 55 درصد و چینش صعودی آن ها می تواند تا 72 درصد بیشینه عمق آبشستگی را به نسبت سه آبشکن قائم کاهش دهد.
- استفاده از طولهای نامساوی برای آبشکن های سه گانه، بهبود رفتار و عملکرد آبشکن ها را به دنبال داشته که نتیجتاً می تواند منجر به صرفه فنی و اقتصادی گردد.

6- فهرست علائم

A	متوسط مساحت جریان
(A_x, A_y, A_z)	مقادیر نسبت مساحت
(b_x, b_y, b_z)	افت های جریان در محیط متخلخل
F	تابع حجم سیال
Fr	عدد فرود جریان
(f_x, f_y, f_z)	شتاب های لزجت
(G_x, G_y, G_z)	شتاب ثقل
g	شتاب گرانش
R_{SOR}	تابع چشمه
s	چگالی نسبی رسوبات
U	متوسط سرعت جریان در (x, y, z)
U_i	میانگین سرعت رینولدز جریان
V_F	نسبت حجم باز به جریان
W	سرعت سقوط ذرات رسوبی
(u, v, w)	سرعت در راستای (x, y, z)
ρ	چگالی آب
ρ_s	سرعت سقوط ذرات رسوبی
Γ	سرعت در راستای (x, y, z)

- minor spur dike to reduce main spur dike scouring, *Watershed Engineering and Management*, 2(1), pp. 91-99.
- Shields, A. (1936). Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. PhD Thesis Technical University Berlin
- Vaghefi, M., Ahmadi, A., Faraji, B., Javan, M. and Eghbalzadeh, A. (2014). Numerical Study of Flow Patterns around T shape spur dike And Support Structure, *Journal of River Engineering*, 2(5).
- Van Rijn, L.C. (1987). Mathematical modeling of morphological processes in the case of suspended sediment transport, PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands
- Zhang, H. and Nakagawa, H. (2009). Characteristics of local flow and bed deformation at impermeable and permeable spur dykes, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, 53, pp. 145-150.
- Dike at the River Bend Using Flow-3D model, *Technical Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3(16), pp. 1862-1868.
- Mehdifard, M., Dalfardi, S., Baghdadi, H. and Seirfar, Z. (2015). Simulation of local scour caused by submerged horizontal jets with Flow-3D numerical model. *Desert*, 20(1), pp. 47-55.
- Melville, B.W. (1992). Local scour at bridge abutments, *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(4), pp. 615-631
- Osman, M.A. and Saeed, H.N. (2012). Local Scour Depth at the Nose of Permeable and Impermeable Spur Dike, *University Of Khartoum Engineering Journal*, 2(1).
- Radan, P. and Vaghefi, M. (2016). Flow and scour pattern around submerged and non-submerged T-shaped spur dikes in a 90° bend using the SSIIM model, *International Journal of River Basin Management*, 14(2), pp. 219-232.
- Saneie, M. (2006). Experimental study on effect of