

مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی عددی توپوگرافی بستر و میدان جریان در اطراف مانع توری سنگی T شکل در کانال

مستقیم با نرم‌افزار Flow-3D

سعید هدایتی آرام^{۱*}، مجید فضلی^۲

۱-دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

۲-استادیار، گروه مهندسی عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: saeedhedayataram@gmail.com

چکیده

از جمله مسائل مهم در طراحی موانع، پدیده آبشستگی موضعی در دماغه آن است که در اثر تغییر در الگوی جریان و وجود گردابه‌های قوی پدیدار می‌شود. در این تحقیق، آبشستگی و الگوی جریان سه‌بعدی در اطراف مانع توری سنگی T شکل با استفاده از مدل عددی *Flow-3D* و مدل آشفتگی $(k - \omega)$ شبیه‌سازی شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. نتایج نشان داد که مدل $(k - \omega)$ ، در پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی و الگوی جریان در اطراف مانع توری سنگی T شکل، انطباق بهتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. به طوری که محل وقوع آبشستگی و حداکثر عمق آبشستگی به دست آمده از شبیه‌سازی عددی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک می‌باشد. همچنین افزایش نفوذپذیری جان تاثیر به‌سزائی در کاهش آشفتگی جریان، جریان‌های گردابه‌ای و سرعت عرضی دارد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، آبشکن T شکل، الگوی جریان، مانع توری سنگی، *Flow-3D*.

Numerical Simulation of Bed Topography and Flow Field Around a Gabion T-shaped Groyne in a Straight Channel with Flow-3D Software

S Hedayati Aram^{1*}, M Fazli²

1-M.Sc. Graduated of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Engineering, Bu Ali Sina University

2-Assist. Prof. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu Ali Sina University

*Corresponding Author, Email: saeedhedayataram@gmail.com

Abstract

One of the important issues in the design of groynes is the local scour phenomenon in the nose due to changes in flow pattern and presence of strong vortices. In this study, the scour and 3D flow pattern around the T-shaped gabion groyne were simulated using Flow-3D numerical model and turbulence model of $(k-\omega)$ and compared with the experimental results. The results showed that the model of $(k-\omega)$ has better agreement with the experimental results in predicting the maximum scour depth and flow pattern around the T-shaped gabion groyne. Therefore, the location of scour and the maximum depth of scour obtained from numerical simulation are close to the experimental results. Increasing the body permeability also has a significant effect on reducing turbulence, eddy and transverse velocity.

Keywords: Flow pattern, Flow-3D, Gabion groyne, Scouring, T-shaped groyne.

مقدمه

محققان مختلف نشان داده است که روش‌های عددی می‌توانند به عنوان روشی مناسب و قابل اطمینان برای مطالعه پدیده‌های اطراف آبشکن مدنظر قرار گیرند. علاوه بر این، شبیه‌سازی جریان و انتقال رسوب حول آبشکن‌ها، دست کم به یک مدل دوبعدی نیاز دارد شارما و موهاپاترا (۲۰۱۲). مدل‌های سه‌بعدی اگرچه می‌توانند این پدیده را به صورت دقیق‌تر مدل کنند اما اجرای یک مدل سه‌بعدی در طبیعت و برای دوره‌های زمانی طولانی، وقت‌گیر بوده و مقرون به صرفه نمی‌باشد.

از زمانی که مساله آبشستگی به عنوان یک مساله مهم در مهندسی رودخانه مطرح شده، مطالعات چندی به وسیله محققین انجام شده است که در ادامه به آن‌ها در دو دهه اخیر اشاره می‌شود. نیر و همکاران (۲۰۱۹) تاثیر جریان پیرامون سری آبشکن‌های T شکل سرکج و مستقیم را با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D به صورت عددی بررسی نمودند. آنان دریافتند که بهترین ترکیب سری (LTT) می‌باشد و گردابه‌های افقی تشکیل شده در بالادست آبشکن‌های T شکل می‌تواند ناحیه عریضی را تحت تاثیر فرسایش و آبشستگی ایجاد نماید. همچنین

بهره‌برداری انسان از رودخانه‌های طبیعی و ضرورت حفاظت پایدار از این سامانه‌های حیاتی برای استفاده نسل‌های آینده، باعث شده تا مساله جلوگیری از فرسایش بستر و دیواره رودخانه‌ها و تعیین حدود و حریم آن، همواره مورد توجه باشد. یکی از این روش‌های سامان‌دهی، احداث آبشکن‌های رودخانه‌ای می‌باشد نیر و همکاران (۲۰۱۹). آبشکن‌ها انواع مختلفی دارند که یکی از آن‌ها آبشکن T شکل می‌باشد. این آبشکن دارای یک بال است که باعث پیچیدگی شرایط هیدرولیکی اطراف آن می‌گردد. تعیین عمق آبشستگی به علت این که معرف میزان پتانسیل تخریب جریان در اطراف سازه بوده و همچنین پارامتری مهم در طراحی ابعاد فونداسیون سازه‌های در مسیر جریان می‌باشد، حائز اهمیت ویژه‌ای است نبی‌بخش و همکاران (۲۰۱۰). همواره مشخصات جریان و انتقال رسوب از داده‌های آزمایشگاهی استخراج شده است. تبدیل این شرایط به شرایط موجود در طبیعت با خطای زیادی همراه خواهد بود و این مساله همواره به عنوان یک نقطه ضعف بزرگ در استفاده از این روابط مطرح بوده است. یافته‌های

مستقیم ارجحیت دارد. واقفی و همکاران (۲۰۰۹) به مطالعه آزمایشگاهی اطراف آبشکن T شکل در قوس ۹۰ درجه پرداختند و بیان کردند افزایش طول آبشکن، کاهش طول بال آبشکن، افزایش عدد فرود و تغییر موقعیت آبشکن به سمت پایین دست قوس، باعث افزایش ابعاد چاله آبشستگی می‌گردد. علی‌رغم مطالعات زیادی که در خصوص شناخت پدیده های ناشی از حضور آبشکن در رودخانه صورت گرفته شارما و موهاپاترا (۲۰۱۲)، هیروشی و همکاران (۲۰۰۸)، ژانگ و همکاران (۲۰۱۲)، نوین (۲۰۱۲) ولی تاکنون تاثیرات هیدرولیکی و مورفولوژیکی آبشکن‌ها بر آبراه‌ها در شرایط مختلف، به‌طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته است. علاوه بر این، اغلب مطالعاتی که توسط محققان در این زمینه صورت گرفته، در زمینه مطالعه پدیده‌های جریان و رسوب حول آبشکن‌های صلب بوده و تحقیقات اندکی بر روی آبشکن متخلخل به‌ویژه آبشکن گابیونی صورت گرفته است. بنابراین در این تحقیق، بررسی میدان جریان در اطراف آبشکن نفوذپذیر گابیونی با استفاده از مدل عددی انجام شده است. این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار *Flow-3D* به‌منظور شبیه‌سازی میدان جریان و با در نظر گرفتن ویژگی‌های ذاتی تخلخل مصالح سازنده آبشکن جهت مدل‌سازی نفوذپذیری استفاده شده است.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + G_i + f_i - K u_i \quad [2]$$

که u_i سرعت متوسط، P فشار، A_i کسر مساحت باز برای جریان در جهت i ، V_f کسر حجم باز برای جریان، G_i شتاب ناشی از نیروهای وزنی، f_i شتاب ناشی از نیروهای ویسکوز، K ترم درگ بین ذرات رسوب است. برای لزجت دینامیک متغیر μ ، شتاب‌های لزجت f_i برابر است با:

$$\rho V_f f_i = w s_i - \left[\frac{\partial}{\partial x_j} (A_j S_{ij}) \right] \quad [3]$$

مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی نشان داد که نرم‌افزار *Flow-3D* دقت معقولی در شبیه‌سازی میدان جریان پیرامون آبشکن‌ها دارد. مهرآیین و همکاران (۲۰۱۵) آبشستگی اطراف آبشکن T شکل را در شرایط مستغرق و غیرمستغرق مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که نسبت طول آبشکن به متوسط اندازه رسوبات، بر ابعاد حفره آبشستگی اثر ثانویه دارد. دانشفراز و همکاران (۲۰۱۵) مطالعات عددی الگوی جریان پیرامون آبشکن‌های T شکل، با نرم‌افزارهای *Flow-3D* و *Fluent* را بررسی نمودند. نتایج آنان نشان داد که هرچه میزان دبی افزایش یابد، عمق آبشستگی و تپه رسوبی افزایش می‌یابد. همچنین آبشکن، ماکزیمم سرعت را به میانه کانال متمایل می‌گرداند؛ در نتیجه آبشستگی پایین دست آبشکن، کاهش می‌یابد.

تحقیقات عباسی و همکاران (۲۰۱۳) حاکی از آن است که با توجه به پارامترهای سرعت جریان و حداکثر عمق آبشستگی، نسبت فاصله به طول آبشکن در مسیر مستقیم برای آبشکن‌های مستقیم برابر سه و برای آبشکن‌های T شکل، برابر چهار پیشنهاد می‌شود. همچنین استفاده از آبشکن T شکل به لحاظ داشتن عمق آبشستگی کمتر دماغه و پایداری سازه بر آبشکن

مواد و روش‌ها

مدل عددی *Flow-3D*

نرم‌افزار *Flow-3D* معادلات سه‌بعدی ناویراستوکس را روی شبکه محاسباتی منتظم و غیریکنواخت حل می‌کند و توانایی مدل کردن مسائل جریان‌های سطح آزاد و نمایش نتایج با قدرت گرافیکی بالا را دارد. معادلات حاکم بر جریان تراکم ناپذیر سیال، قانون بقای جرم رابطه ۱ و معادله مومنوم متوسط‌گیری شده زمانی (رینولدز) رابطه ۲ است.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} u_i A_i = 0 \quad [1]$$

در اینجا $u_{microscopic}$ سرعت جریان میکروسکوپی بوده که توسط پردازنده محاسبه می‌شود. ضریب درگ F_d برای هر سلول محاسباتی در هر گام زمانی محاسبه شده و همراه Δt (اندازه گام زمانی) به عنوان خروجی در کمیت بدون بعد DRG تبدیل شده است.

$$DRG = \frac{1}{1 + F_d \Delta t} \quad [۷]$$

Δt گام زمانی برای سیکل‌های محاسباتی بوده و مقدار آن همیشه بین صفر (درگ نامحدود - بدون جریان سیال) و یک (درگ صفر - نفوذپذیری بی‌نهایت) می‌باشد. سرعت میکروسکوپی معمولاً در آزمایشگاه به علت مشکلات اندازه‌گیری جریان بین ذرات بدون تداخل محیط و جریان عبوری به صورت مستقیم اندازه‌گیری نشده است. در عوض، سرعت ماکروسکوپی (حجمی) به صورت زمان گذرا در میان محیط واحد یا نرخ جریان در میان و خارج محیط اندازه‌گیری می‌شود. سرعت‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی اشباع به صورت تئوری توسط معادله موثر تخلخل محیط مرتبط می‌باشند.

$$u_{microscopic} = \frac{u_{bulk}}{\phi} \quad [۸]$$

مدل‌های درگ برای جریان اشباع به صورت زیر تعریف می‌شوند که ρ ویسکوزیته سیال (کیلوگرم بر متر مکعب)، d_{pore} متوسط قطر حفره در داخل تخلخل مصالح (متر) و ϕ تخلخل موثر محیط است که با میزان تخلخل ورودی به نرم‌افزار برابر است.

$$Re_p = \frac{\rho |u_{microscopic}| d_{pore}}{\mu} \approx \frac{\rho |u_{bulk}| d_{pore}}{\phi \mu} \quad [۹]$$

مشخصات مدل فیزیکی

آزمایش‌های مورد نظر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه بوعلی سینا توسط رضایی و فضلای (۲۰۱۸) انجام شده است. کانال آزمایشگاهی، یک فلوم به طول

$$S_{ii} = -2\mu_{tot} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right]$$

$$S_{ij} = -2\mu_{tot} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right]$$

که در آن S_{ij} تانسور شدت تنش، ws_i تنش برشی دیوار، ρ دانسیته آب و μ_{tot} مجموع ویسکوزیته دینامیکی سیال که شامل اثرات آشفتگی جریان نیز است.

معادلات حاکم در محیط‌های متخلخل

با ساخت یک مدل پیوسته از محیط متخلخل و متوسط‌گیری در هر حجم کنترل، معادلات پیوستگی معمول به دست می‌آیند. پیوستگی جرم توسط معادله زیر بیان می‌شود.

$$v_f \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f u) = 0 \quad [۴]$$

معادله مومنتوم نیز به صورت رابطه زیر بیان می‌شود.

$$U = \frac{-K \partial P}{\mu \partial x} \quad [۵]$$

که در این معادله U سرعت ماکروسکوپی (متر بر ثانیه) و K نفوذپذیری ذاتی مواد می‌باشد. در Flow-3D، شش مدل متفاوت درگ به نام‌های مدل درگ اشباع شده داریسی^۱، مدل درگ اشباع شده فورچی‌مایر^۲، مدل درگ اشباع شده نفوذپذیری مستقل^۳، مدل درگ غیراشباع قانون توان^۴، مدل درگ غیر اشباع موالم برای نفوذپذیری نسبی^۵ و مدل درگ غیر اشباع نمایی^۶ برای محیط‌های متخلخل وجود دارد (Flow Science, 2017). مقاومت در برابر جریان در محیط‌های متخلخل در معادلات ناویر-استوکس به صورت ترم درگ متناسب با سرعت بیان می‌شود:

$$b = F_d u_{microscopic} \quad [۶]$$

^۵Mualem's Unsaturated Drag Model for Relative Permeability

^۶Exponential Unsaturated Drag Model

^۷Bulk

^۱Darcian Saturated Drag Model

^۲Forchheimer Saturated Drag Model

^۳Permeability Dependent Saturated Drag

^۴Power Law Unsaturated Drag Model

۱۰ سانتی متر با استفاده از سرعت سنج سه بعدی *ADV* صورت گرفته است. در این پژوهش از آبشکن های T شکل به طول ۱۲ سانتی متر، ضخامت ۲ سانتی متر و ارتفاع ۶۰ سانتی متر و درصد تخلخل های متفاوت ۰، ۳۰ و ۵۰ درصد برای جان و بال آبشکن از جنس مصالح سنگی با وزن مخصوص مشخص که با توری های فلزی (با درصد بازشدگی و سوراخ های متناسب با درصد تخلخل) پوشیده شده اند استفاده شده است. همچنین در این آزمایش آبشکن با درصد تخلخل صفر برای بال و جان به طول ۱۲ سانتی متر و ارتفاع ۶۰ سانتی متر از جنس شیشه پلکسی گلاس ساخته شد.

می نماید طباطبایی و همکاران (۲۰۱۷) ابعاد مش در مش - بلاک اول در جهت طولی فلوم (X) به فواصل یک سانتی متری، در جهت عرض (Y) و ارتفاع (Z)، سه سانتی متر مش زده شده است. در مش بلاک دوم که نتایج در این محدوده روئیت می شود؛ در تمام جهت ها از مش بندی یک سانتی متر مربعی استفاده شده؛ به استثنای مرز مابین رسوب و سیال که جهت بهتر دیده شدن این قسمت در راستای Z به وسیله نرم افزار از مش بندی پنج میلی متری استفاده شده است. در مش بلاک اول از شرط مرزی فشار ثابت^۱ با عمق جریان ۱۴/۶ سانتی متر در ورودی، در مرز خروجی از شرط مرزی خروجی، در بستر کانال و دیواره ها از شرط مرزی دیوار^۲ و در سطح آزاد سیال از شرط مرزی متقارن^۳ استفاده شده است. در مش بلاک دوم برای ورودی و خروجی از شرط مرزی پوشش شبکه ای^۴، برای کف بستر و دیواره ها از شرط مرزی دیوار و برای سطح آزاد سیال از شرط مرزی متقارن استفاده شد. شکل ۱ شرایط مرزی بر روی مش بلاک دوم را نمایش می دهد.

۱۵ متر، ارتفاع و عرض ۰/۶ متر و شیب کف ۰/۰۱ و دیواره های شفاف از جنس شیشه ۱۰ میلی متری است. جهت بررسی پارامترهای مورد نظر، بستری از جنس ماسه با دانه بندی مشخص به طول ۲ متر و ارتفاع ۰/۲۶ متر به گونه ای تعبیه شد که جریان در رسیدن به ناحیه مورد نظر توسعه یافته باشد. آزمایش ها در دبی ۲۸ لیتر بر ثانیه و عمق جریان ۱۴/۶ سانتی متر انجام شد. شبکه بندی در نظر گرفته شده به صورتی بود که با نزدیک شدن به آبشکن از شبکه های ریزتری استفاده گردید و با دور شدن از آبشکن ابعاد شبکه ها افزایش یافته است. برداشت ها در ۴ سطح ارتفاعی در عمق های ۰/۵ سانتی - متر از کف، ۰/۵ سانتی متر از سطح آب و عمق های ۵ و

مش بندی

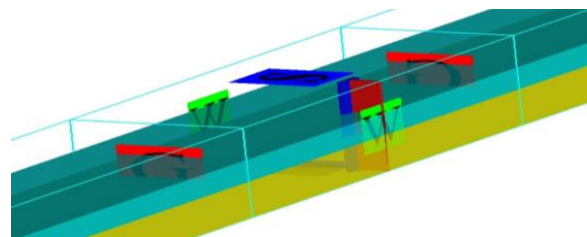
برای مدل نمودن آبشکن توری سنگی T شکل از مش بندی تودرتو استفاده شده است، به این صورت که از یک مش بلاک گسترده در کل محدوده کانال به طول ۱۴ متر، عرض و ارتفاع ۶۰ سانتی متر استفاده شد و مش بلاک دیگری در داخل مش بلاک اول به طول دو متر و در وسط آبشکن قرار داده شد. به صورتی که یک متر به سمت بالادست و پایین دست آبشکن ادامه داده شده است. یکی از مزیت های مش بلاک تودرتو کاهش تعداد کل سلول های محاسباتی است؛ چراکه اندازه مش پلان - های ناحیه مورد مطالعه را ریز نموده و در دیگر نواحی که روئیت نتایج برای ما از اهمیت چندانی برخوردار نیست می توان از ابعاد بزرگتری استفاده نمود. با استفاده از مش بلاک تودرتو، تعداد مش به ۸۵۰۰۰۰ برای کل فلوم آزمایشگاهی کاهش یافت. در صورتی که اگر از یک مش بلاک استفاده به عمل می آمد، تعداد سلول های محاسباتی به ۲۴۰۰۰۰۰ می رسید؛ این تعداد سلول محاسباتی شدیداً زمان اجرای نرم افزار را طولانی

³ Symmetry

⁴ Meshing Coverage

¹ Constant Pressure

² Wall



شکل ۱- شرایط مرزی مش‌بلاک دوم پیرامون آبشکن توری سنگی T شکل.

جهت بررسی زمان همگرایی مدل، ابتدا نرم‌افزار به مدت ۴۰۰ ثانیه با استفاده از مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای $(k - \epsilon)$ ، مدل (RNG) ، مدل گردابه‌های بزرگ و مدل دو معادله‌ای $(k - \omega)$ برای به‌دست آوردن حداکثر

عمق آبشستگی آبشکن T شکل (۰-۰) اجرا شد تا مشاهده گردد که مدل در چه زمانی همگرا می‌گردد. در نهایت مشاهده شد که مدل در زمان ۳۰۰ ثانیه همگرا می‌گردد. مقایسه درصد خطای نتایج حاصل از مدل‌های آشفتگی در جدول ۱ نمایش داده شده است. از جدول ۱، می‌توان به این نتیجه رسید که مدل $(k - \omega)$ ، گردابه‌های بزرگ و (RNG) تطابق خوبی با نتیجه آزمایشگاهی دارند، اما مدل آشفتگی $(k - \epsilon)$ در برآورد حداکثر عمق آبشستگی نسبت به نتایج آزمایشگاهی بسیار ضعیف عمل نموده است.

جدول ۱- مقایسه حداکثر عمق آبشستگی مدل آزمایشگاهی و مدل‌های عددی.

خطا (%)	حداکثر عمق آبشستگی	مدل آشفتگی	حداکثر عمق آبشستگی	آبشکن
۰/۶	۱۶/۸	$(k - \omega)$		
۳	۱۶/۴	LES	۱۶/۹	(۰-۰)
۸	۱۵/۶	RNG		
۴۰	۱۲	$(k - \epsilon)$		

با تخلخل‌های مختلف جان و بال بررسی شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است.

بررسی الگوی جریان در راستای طولی، قائم و عرضی در اطراف آبشکن

آبشکن‌ها با کاهش مقطع رودخانه، الگوی جریان را به‌طور محسوسی تحت تاثیر قرار می‌دهند. به دلیل حضور آبشکن در مسیر جریان ناحیه جریان چرخشی در اطراف آن توسعه می‌یابد. این ناحیه در اطراف آبشکن

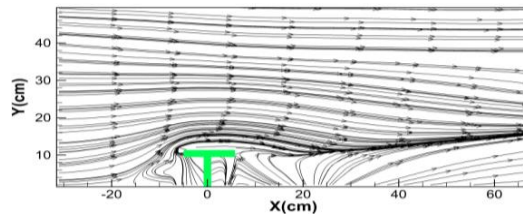
بنابراین در این تحقیق از مدل آشفتگی $(k - \omega)$ برای شبیه‌سازی عددی آبشستگی و توزیع سرعت در اطراف آبشکن‌های توری سنگی T شکل استفاده شده است. در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی ارائه می‌گردد.

نتایج و بحث

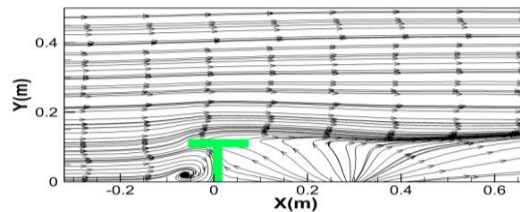
در این قسمت ابتدا نتایج الگوی جریان و در ادامه توپوگرافی بستر در اطراف آبشکن توری سنگی T شکل

برداشت‌های اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی برای نتایج عددی و آزمایشگاهی در اطراف آبشکن T شکل با تخلخل‌های صفر درصد جان و بال (۰-۰)، صفر درصد جان و ۵۰ درصد بال (۰-۵۰) و ۳۰ درصد جان و صفر درصد بال (۳۰-۰) به عنوان نمونه در فاصله ۱۴/۱ سانتی‌متری از سطح رسوب یا کف، نشان داده شده است.

با مرزی از جریان اصلی جدا می‌گردد که خط جدایی جریان نامیده می‌شود. خطوط جریان با نزدیک شدن به سازه آبشکن آرایش خود را تغییر داده و به تبعیت از ساختار هندسی و نوع سازه، الگوهای متفاوتی از جریان پدیدار می‌گردد. ایجاد فرسایش در دماغه آبشکن و همچنین رسوب‌گذاری در پایین‌دست آبشکن از نوع و الگوی جریان پیروی می‌کنند. در شکل‌های ۲ تا ۴ خطوط جریان حاصل از مولفه‌های طولی سرعت در محدوده

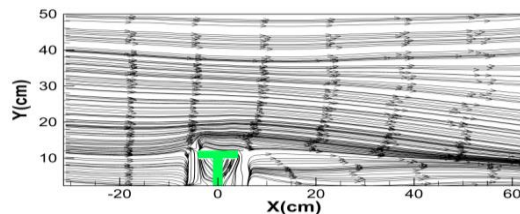


الف) نتایج آزمایشگاهی

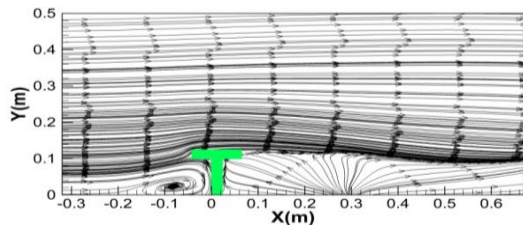


ب) نتایج عددی

شکل ۲- الگوی خطوط جریان برای آبشکن T شکل با درصد تخلخل (۰-۰) در فاصله ۱۴/۱ سانتی‌متری از سطح رسوب.

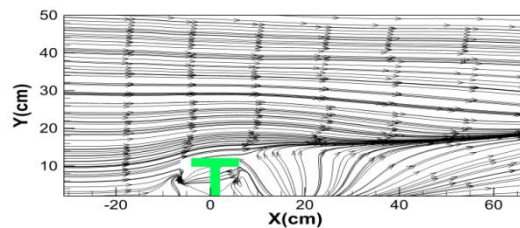


الف) نتایج آزمایشگاهی

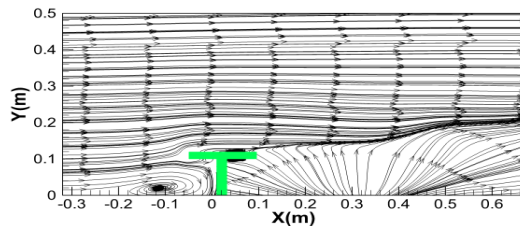


ب) نتایج عددی

شکل ۳- الگوی خطوط جریان برای آبشکن T شکل با درصد تخلخل (۳۰-۰) در فاصله ۱۴/۱ سانتی‌متری از سطح رسوب.



الف) نتایج آزمایشگاهی



ب) نتایج عددی

شکل ۴- الگوی خطوط جریان برای آبشکن T شکل با درصد تخلخل (۵۰-۰) در فاصله ۱۴/۱ سانتی متری از سطح رسوب.

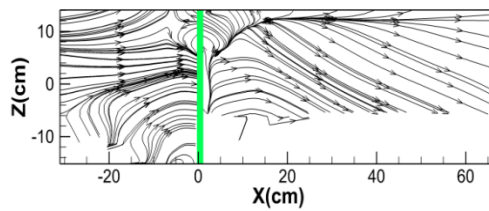
در نتایج عددی با مقداری خطا پیرامون آبشکن مشهود می‌باشد. به طور کلی با بررسی نتایج عددی و آزمایشگاهی ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت که به ازای بازشدگی صفر درصد جان، هر چه بازشدگی بال آبشکن بیش‌تر گردد، جریان‌های چرخشی بیش‌تری در بالادست و پایین‌دست آبشکن ایجاد می‌گردد. این نتایج در شکل-۱ های مربوط به نتایج عددی نیز مشهود می‌باشند. همچنین تخلخل جان تاثیر به‌سزایی در کاهش جریان برگشتی و سرعت طولی نسبت به بال آبشکن دارد.

در ادامه الگوی خطوط جریان در مقاطع قائم اطراف آبشکن که از نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی به دست آمده است ارائه شده است. به طور کلی، وقتی بازه‌ای از بستر جریان در اثر احداث سازه‌هایی نظیر دیواره‌های ساحلی، آبشکن و یا احداث پایه‌های پل محدود و تنگ می‌شود، این عمل باعث تغییرات سرعت جریان در این محدوده شده که عامل ایجاد گردابه و جریان‌های عرضی می‌باشد؛ بنابراین ظرفیت حمل رسوب افزایش یافته و باعث فرسایش بستر در این محل می‌گردد. در شکل‌های ۵ تا ۷ خطوط جریان حاصل از مولفه‌های قائم سرعت در فاصله هشت سانتی متری از دیواره نصب آبشکن برای نتایج عددی و آزمایشگاهی

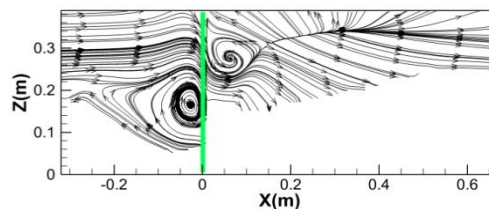
همان‌گونه که انتظار می‌رود؛ در مقطع بالادست آبشکن به واسطه تاثیر آبشکن بر ناحیه بالادست، کاهش سرعت جریان در امتداد دیواره مجاور آبشکن رخ می‌دهد و سرعت در امتداد مجرای اصلی کانال به سمت دیواره مقابل، افزایش می‌یابد. با گذر از آبشکن و در پایین‌دست آن، سرعت طولی در دیواره مجاور آبشکن کاهش می‌یابد و در محدوده وسط کانال تا دیواره مقابل، سرعت طولی افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل‌های ۲ تا ۴ مشاهده می‌شود؛ در بالادست آبشکن، خطوط جریان موازی دیواره‌های کانال است و در نزدیکی آبشکن دچار انحراف شده‌اند. نتایج عددی نیز تطابق قابل قبولی را با نتایج آزمایشگاهی ارائه می‌نماید. در تصاویر (۲-ب) تا (۴-ب) جریان‌های پیچشی پایین‌دست و بالادست آبشکن به وضوح مشهود می‌باشند. اگر چه در شکل (۴-الف) به علت بازشدگی جان در نتایج آزمایشگاهی، کاهش جریان‌های برگشتی و یکنواختی سرعت طولی در پایین‌دست آبشکن مشاهده می‌شود، اما خطوط جریان به دست آمده از نتایج عددی شکل ۴ انطباق کمتری با نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۳ مشاهده می‌شود، جریان‌های چرخشی کمتری نسبت به حالت عدم تخلخل جان تشکیل شده است که این تغییرات

درصد بال، سرعت قائم کاهش یافته است. همچنین به ازای تخلخل ثابت صفر درصد بال، هرچه تخلخل جان افزایش یابد، جریان مقدار بسیار زیادی از انرژی خود را در اثر عبور از جان آبشکن از دست می دهد و این امر باعث می شود که سرعت های قائم کمتری در بالادست و پایین دست آبشکن تشکیل گردند.

برای آبشکن T شکل با درصد تخلخل های (۰-۰)، (۰-۳۰) و (۰-۵۰) نشان داده شده است. مطابق با این اشکال می توان دریافت که با نزدیک شدن به آبشکن به تدریج جریان پایین رونده ایجاد شده و با عبور از آبشکن جریان بالارونده ای در نزدیکی بستر به وجود می آید. همچنین می توان تاثیر بازشدگی بال به ازای بازشدگی ثابت صفر درصد جان را چنین بیان نمود که به ازای بازشدگی ۳۰

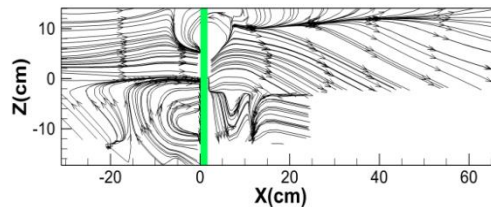


الف) نتایج آزمایشگاهی

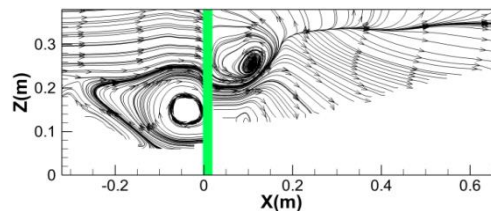


ب) نتایج عددی

شکل ۵- الگوی خطوط جریان در راستای قائم در فاصله ۸ سانتی متر از دیواره نصب آبشکن T شکل با تخلخل (۰-۰).

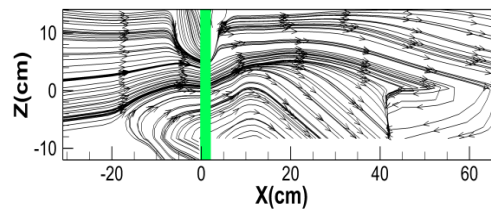


الف) نتایج آزمایشگاهی

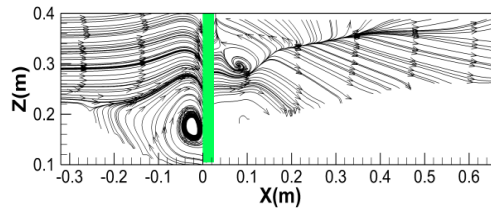


ب) نتایج عددی

شکل ۶- الگوی خطوط جریان در راستای قائم در فاصله ۸ سانتی متر از دیواره نصب آبشکن T شکل با تخلخل (۰-۳۰).



الف) نتایج آزمایشگاهی



ب) نتایج عددی

شکل ۷- الگوی خطوط جریان در راستای قائم در فاصله ۸ سانتی‌متر از دیواره نصب آبشکن T شکل با تخلخل (۰-۵۰).

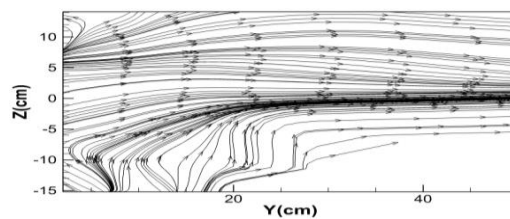
آزمایشگاهی در هر دو مقطع ۱۰ سانتی‌متری قبل و بعد از آبشکن چنین برداشت می‌شود؛ هنگامی که جریان به آبشکن برخورد می‌نماید دچار انحراف به سمت مرکز کانال و تشکیل جریان‌های ثانویه می‌شود. دلیل این امر را می‌توان چنین بیان نمود که در این مقطع، چاله آبشستگی تشکیل شده نزدیک دیواره و آبشکن، موجب کاهش گرادیان فشار در نزدیکی بستر و همچنین وجود ناحیه انرژی جنبشی بیشینه در نزدیکی دیواره مقابل آبشکن می‌گردد، لذا جریان عرضی بیشتری به سمت میانه کانال متمایل می‌شود.

همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، نتایج آزمایشگاهی نشان‌دهنده جریان‌های برگشتی در مقطع بعد از آبشکن هستند که اندرکنش آن با جریان نزدیک‌شونده موجب تشکیل ناحیه جدایی جریان می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نیز به‌خوبی این جریان‌های برگشتی را مدل نموده‌اند. هر چند در شکل ۱۰ و ۱۲ به علت بازشدگی جان، کاهش جریان‌های برگشتی در پایین‌دست آبشکن در نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود ولی خطوط جریان به‌دست آمده از نتایج عددی شکل‌های ۱۱ و ۱۳ انطباق کمتری با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند. تاثیرات تخلخل را می‌توان چنین بیان نمود که به ازای تخلخل ثابت صفر درصد بال، هرچه

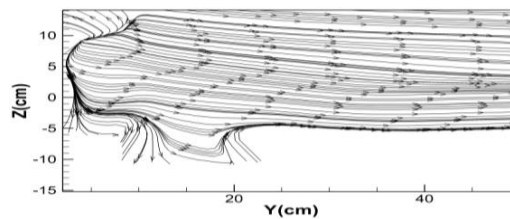
همان‌گونه که در شکل‌های ۵-الف تا ۷-الف مشاهده می‌گردد در بالادست، انحراف جریان در نزدیکی آبشکن به سمت بستر بوده و بعد از آبشکن در لایه‌های میانی، جریان به‌صورت بالارونده تشکیل شده است. همچنین خطوط جریان در نزدیکی محل نصب آبشکن به سمت بستر هدایت شده است. در شکل‌های مربوط به نتایج عددی نیز مشاهده می‌گردد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی به خوبی جریان‌های پایین‌رونده در بالادست و جریان‌های بالارونده نزدیکی سطح جریان در پایین‌دست آبشکن را با اندکی خطا مدل نموده است. از آن‌جا که به دلیل حضور هر مانعی در مسیر جریان الگوی جریان دستخوش تغییرات قابل توجهی می‌گردد؛ در نتیجه جریان‌های ثانویه‌ای شکل می‌گیرد که این جریان‌ها در مقاطع عرضی مشاهده می‌شوند. بنابراین در این قسمت برای مقایسه تغییرات خطوط جریان ناشی از حضور هر یک از آبشکن‌ها در مسیر جریان، الگوی خطوط جریان ناشی از توزیع سرعت عرضی در مقطع ۱۰ سانتی‌متری قبل و بعد از آبشکن ارائه می‌گردد. در شکل‌های ۸ تا ۱۳ خطوط جریان حاصل از مولفه عرضی سرعت در مقطع ۱۰ سانتی‌متری قبل و بعد از آبشکن برای درصد تخلخل‌های (۰-۵۰)، (۰-۱۰۰)، و (۳۰-۱۰۰) نشان داده شده است. از شکل‌های ۸، ۱۰ و ۱۲ برای نتایج

بیش‌تری از جان آبشکن عبور نماید، باعث یکنواخت‌تر شدن جریان در پایین‌دست و کاهش جریان‌های ثانویه می‌گردد. به‌طور کلی نتایج به‌دست آمده حاصل از مقایسه‌های عددی و آزمایشگاهی، بیان‌گر تطابق مناسب بین شبیه‌سازی عددی و داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد و این به معنای توانایی بالای مدل عددی *Flow-3D* در شبیه‌سازی الگوی جریان پیرامون سازه‌های آبی مستقر در رودخانه نظیر آبشکن است.

تخلخل جان بیش‌تر شود، سرعت عرضی نه تنها در بالادست آبشکن، بلکه در پایین‌دست آبشکن نیز کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان چنین بیان نمود که هرچه بازشدگی جان بیش‌تر شود، جریان‌های گردابه‌ای کمتر، حفره آبشستگی کمتر و همچنین کاهش گرادیان فشار کمتر به وجود می‌آید؛ لذا جریان کمتری به سمت میانه کانال منحرف می‌گردد و سرعت عرضی در بالادست کاهش می‌یابد. برای پایین‌دست آبشکن نیز، هرچه جریان

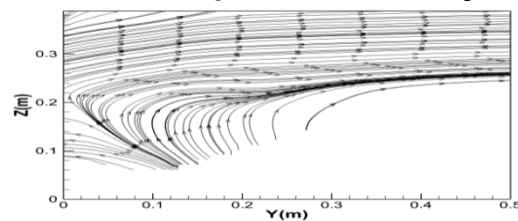


الف) مقطع ۱۰ سانتی‌متری قبل از آبشکن

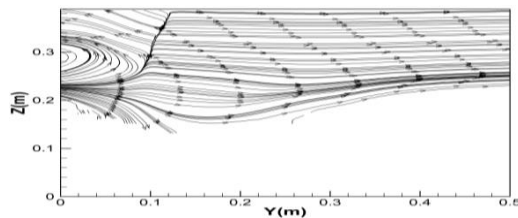


ب) مقطع ۱۰ سانتی‌متری بعد از آبشکن

شکل ۸- الگوی خطوط جریان در مقاطع عرضی حاصله از نتایج آزمایشگاهی آبشکن T شکل با درصد تخلخل (۰-۰).

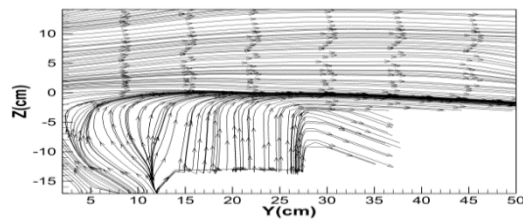


الف) مقطع ۱۰ سانتی‌متری قبل از آبشکن

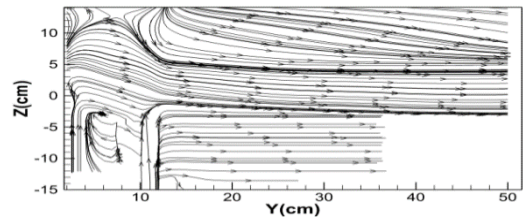


ب) مقطع ۱۰ سانتی‌متری بعد از آبشکن

شکل ۹- الگوی خطوط جریان در مقاطع عرضی حاصله از نتایج شبیه‌سازی عددی آبشکن T شکل با تخلخل (۰-۰)

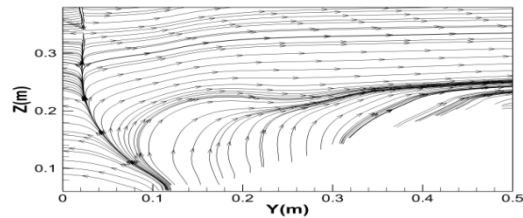


الف) مقطع ۱۰ سانتی متری قبل از آبشکن

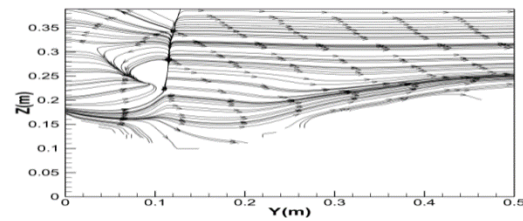


ب) مقطع ۱۰ سانتی متری بعد از آبشکن

شکل ۱۰- الگوی خطوط جریان در مقاطع عرضی حاصله از نتایج آزمایشگاهی آبشکن T شکل با تخلخل (۰-۵۰).

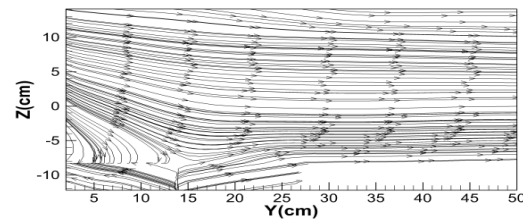


الف) مقطع ۱۰ سانتی متری قبل از آبشکن

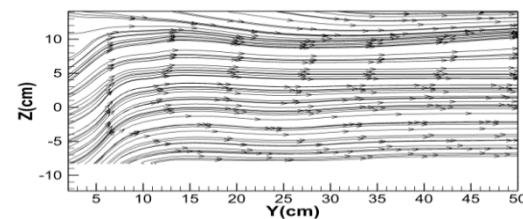


ب) مقطع ۱۰ سانتی متری بعد از آبشکن

شکل ۱۱- الگوی خطوط جریان در مقاطع عرضی حاصله از نتایج شبیه‌سازی عددی آبشکن T شکل با تخلخل (۰-۵۰).

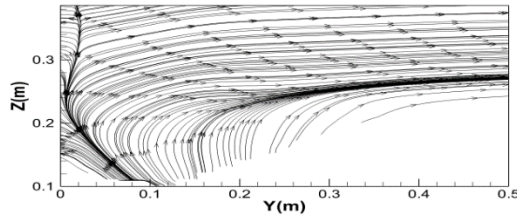


الف) مقطع ۱۰ سانتی متری قبل از آبشکن

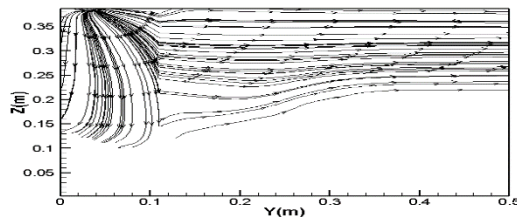


(ب) مقطع ۱۰ سانتی متری بعد از آبشکن

شکل ۱۲- الگوی خطوط جریان در مقاطع عرضی حاصله از نتایج آزمایشگاهی آبشکن T شکل با تخلخل (۰-۳۰).



(الف) مقطع ۱۰ سانتی متری قبل از آبشکن



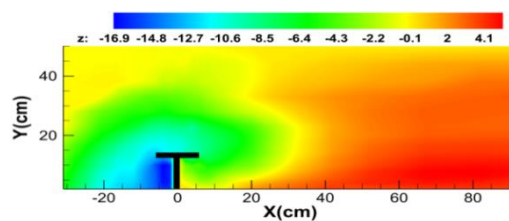
(ب) مقطع ۱۰ سانتی متری بعد از آبشکن

شکل ۱۳- الگوی خطوط جریان در مقاطع عرضی حاصله از نتایج شبیه سازی عددی آبشکن T شکل با تخلخل (۰-۳۰).

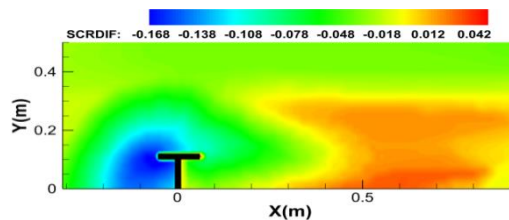
بررسی تغییرات توپوگرافی بستر در اطراف آبشکن های T شکل

آبشکن T شکل با درصدهای تخلخل صفر جان و بال (۰-۰)، ۳۰ جان و صفر بال (۰-۳۰) و صفر جان و ۵۰ بال (۰-۵۰) را نشان می دهند. لازم به ذکر است کلیه نتایج آزمایشگاهی بر حسب سانتی متر و نتایج عددی بر حسب متر می باشند.

در این قسمت نتایج عددی مربوط به آبشستگی آبشکن توری سنگی T شکل با درصدهای مختلف تخلخل جان و بال با مدل آشفتگی $k-\omega$ با نتایج حاصله از اندازه گیری های آزمایشگاهی مقایسه می گردد. شکل های ۱۴ تا ۱۶ به ترتیب تغییرات توپوگرافی بستر پیرامون

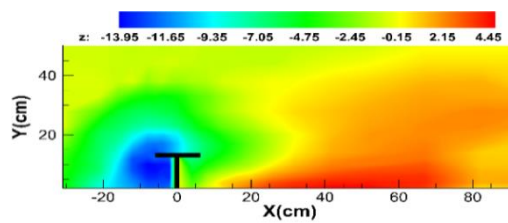


(الف) نتایج آزمایشگاهی

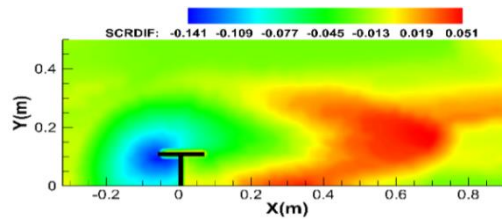


(ب) نتایج عددی

شکل ۱۴- تغییرات توپوگرافی بستر در اطراف آبشکن T شکل با درصد تخلخل جان صفر و بال صفر (۰-۰).

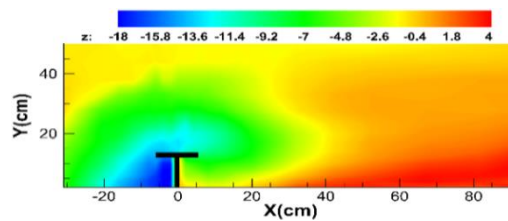


الف) نتایج آزمایشگاهی

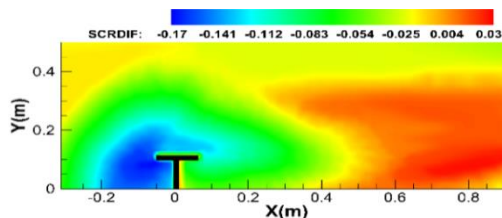


ب) نتایج عددی

شکل ۱۵- تغییرات توپوگرافی بستر در اطراف آبشکن T شکل با درصد تخلخل جان ۳۰ و بال صفر (۰-۳۰).



الف) نتایج آزمایشگاهی



ب) نتایج عددی

شکل ۱۶- تغییرات توپوگرافی بستر در اطراف آبشکن T شکل با درصد تخلخل جان صفر و بال ۵۰ (۰-۵۰).

گزارش شده است. مطابق با این اشکال می‌توان نتیجه گرفت در حالتی که جان آبشکن بدون بازشدگی باشد، به‌ازای درصد بازشدگی ۵۰ درصد بال، عمق چاله آبشستگی بیشتر می‌گردد. همچنین به ازای درصد بازشدگی ثابت بال، هر چه درصد بازشدگی جان افزایش یابد عمق چاله آبشستگی کاهش می‌یابد. لذا تخلخل جان آبشکن نسبت به بال، تاثیر به‌سزایی در کاهش آبشستگی

همان‌گونه که در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ مشهود می‌باشد، حداکثر عمق آبشستگی برای آبشکن‌های T شکل با درصد تخلخل (۰-۰)، (۳۰-۰)، و (۵۰-۰) به ترتیب برابر با ۱۶/۹، ۱۳/۹۵ و ۱۸ سانتی‌متر و برای نتایج حاصل از شبیه‌سازی برابر با ۱۶/۸، ۱۴/۱ و ۱۷ سانتی‌متر می‌باشد. همچنین ارتفاع پشته رسوبی در نتایج آزمایشگاهی به ترتیب ۴/۱، ۴/۴۵ و ۴ سانتی‌متر و برای نتایج حاصل از شبیه‌سازی ۴/۲، ۵/۱ و ۳/۳ سانتی‌متر

شده است. با توجه به جدول ۲ مشهود است که درصد خطای نتایج حاصل از شبيه‌سازى با نتایج آزمایشگاهی زیر ۱۰ درصد می‌باشند و مدل *Flow-3D* به‌خوبی توانسته است تغییرات توپوگرافى بستر پيرامون این درصد بازشدگی‌ها را مدل نماید.

در بالادست آبشکن دارد. نتایج حاصل از شبيه‌سازى در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ نیز گویای همین نتایج می‌باشند.

در جدول ۲ مقایسه حداکثر عمق آبشستگی نتایج عددی و آزمایشگاهی برای مدل آشفتگی $k-\omega$ ارائه

جدول ۲- مقایسه حداکثر عمق آبشستگی آزمایشگاهی

و عددی برای آبشکن تورى سنگى T شکل با

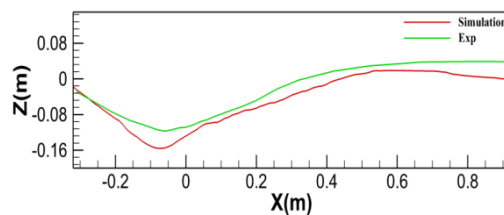
تخلخل‌های مختلف.

تخلخل (%)	حداکثر عمق آبشستگی عددی (cm)	حداکثر عمق آبشستگی آزمایشگاهی (cm)	خطا (%)
(۰-۰)	۱۶/۸	۱۶/۹	۰/۶
(۳۰-۰)	۱۴/۱	۱۳/۹	۱
(۵۰-۰)	۱۷	۱۸	۶

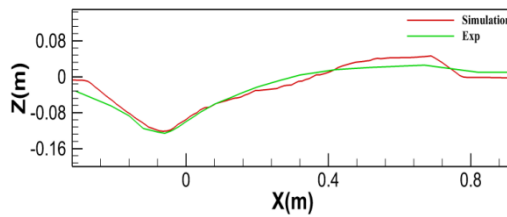
پروفیل‌های طولی بستر

که پروفیل طولی بستر در دماغه آبشکن به ازای بازشدگی ثابت صفر درصد جان، هرچه بازشدگی بال آبشکن بیشتر شود، عمق آبشستگی در دماغه آبشکن نیز بیش‌تر شده است؛ دلیل این امر را می‌توان جريان عبوری از بال و جريان‌های عرضی تشکیل شده در دماغه آبشکن بیان نمود. همچنین به ازای درصد بازشدگی ثابت بال، هر چه درصد بازشدگی جان افزایش یابد عمق چاله آبشستگی کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از شبيه‌سازى عددی نیز این نتیجه‌گیری را تصدیق می‌نمایند.

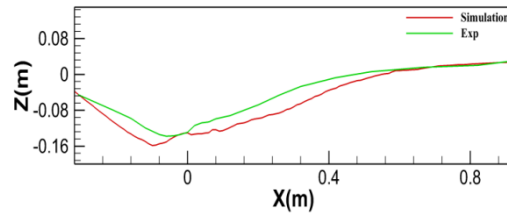
در این قسمت، نمودارهای تغییرات پروفیل طولی بستر ناشی از نتایج عددی و آزمایشگاهی برای آبشکن‌های تورى سنگى T شکل با درصد بازشدگی‌های مختلف در دماغه آبشکن ارائه شده است. لازم به توضیح است که در تمامی شکل‌ها X طول کانال، Y عرض کانال و Z ارتفاع رسوبات بستر بر حسب متر می‌باشند. شکل‌های ۱۷ الف تا ج به‌ترتیب پروفیل طولی بستر برای آبشکن T شکل با درصد تخلخل (۰-۰)، (۳۰-۰) و (۵۰-۰) را نشان می‌دهند. با مشاهده نتایج آزمایشگاهی شکل ۱۷ می‌توان دریافت



الف) تخلخل (۰-۰)



(ب) تخلخل (۳۰-۰)



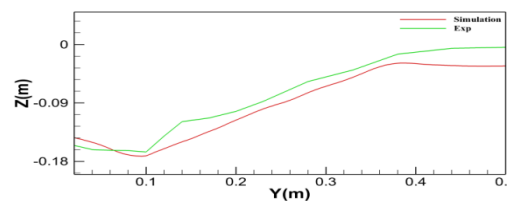
(ج) تخلخل (۵۰-۰)

شکل ۱۷- پروفیل طولی بستر برای آبشکن توری سنگی T شکل.

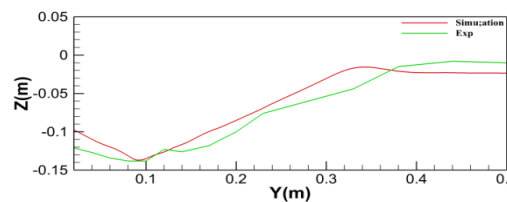
پروفیل‌های عرضی بستر

در این قسمت جهت بررسی تغییرات پروفیل عرضی بستر، نتایج عددی و آزمایشگاهی در مقطع شش سانتی‌متری قبل از آبشکن که حداکثر عمق آبشستگی برای نتایج عددی و آزمایشگاهی در این مقطع ظاهر شده، ارائه می‌شود. شکل‌های ۱۸ الف تا ج نتایج آزمایشگاهی و عددی پروفیل عرضی بستر آبشکن T شکل با درصد تخلخل جان و بال به ترتیب (۰-۰)، (۳۰-۰)

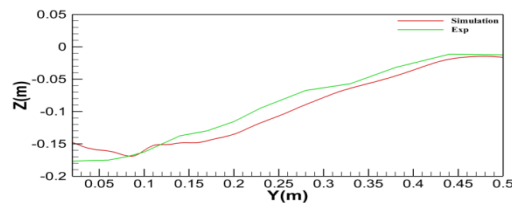
در این قسمت جهت بررسی تغییرات پروفیل عرضی بستر، نتایج عددی و آزمایشگاهی در مقطع شش سانتی‌متری قبل از آبشکن که حداکثر عمق آبشستگی برای نتایج عددی و آزمایشگاهی در این مقطع ظاهر شده، ارائه می‌شود. شکل‌های ۱۸ الف تا ج نتایج آزمایشگاهی و عددی پروفیل عرضی بستر آبشکن T شکل با درصد تخلخل جان و بال به ترتیب (۰-۰)، (۳۰-۰)



(الف) تخلخل (۰-۰)



(ب) تخلخل (۳۰-۰)



(ج) تخلخل (۵۰-۰)

شکل ۱۸- پروفیل عرضی بستر برای آبشکن توری سنگی T شکل.

نتیجه گیری کلی

مقدار حداکثر عمق آبشستگی به صورت قابل قبولی توانمند عمل می نماید؛ به طوری که با خطایی کمتر از ۱۰ درصد قادر به پیش بینی حداکثر عمق آبشستگی در اطراف موانع توری سنگی می باشد. نرم افزار *Flow-3D* در شبیه سازی الگوی جریان در سه راستای متعامد طولی، عرضی و عمقی در اطراف آبشکن به خوبی عمل می نماید. همچنین افزایش نفوذپذیری جان تاثیر به سزائی در کاهش آشفته گی جریان، جریان های گردابه ای و سرعت عرضی دارد. نفوذپذیری بال تا ۵۰ درصد بازشدگی، سرعت عرضی در ابتدای آبشکن را افزایش داده و موجب آبشستگی بیش تر ابتدای آبشکن می گردد.

در این تحقیق، شبیه سازی عددی توپوگرافی بستر و الگوی جریان پیرامون آبشکن توری سنگی T شکل با درصد تخلخل متفاوت جان و بال، با نرم افزار *Flow-3D* بررسی شد و نتایج شبیه سازی مدل های عددی با نتایج آزمایشگاهی مربوطه مقایسه شده است. نتایج حاصل نشان داد که در بین مدل های آشفته گی مختلف موجود در نرم افزار *Flow-3D*، مدل آشفته گی دو معادله ای ($k - \omega$) بهترین تطابق را با نتایج آزمایشگاهی به لحاظ برآورد حداکثر عمق آبشستگی و تعیین محل آبشستگی ماکزیمم ارائه می کند که منطبق با نتایج به دست آمده از تحقیق رضایی (۲۰۱۷) می باشد. این مدل عددی در برآورد

منابع مورد استفاده

- Abbasi A and Malek Nezhad Yazdi M, 2013. Experimental study of the effect of geometric characteristics of direct permeable and T-shaped gutters on the scour around them. *Journal of Irrigation and Water Engineering* 2(8): 95-107 (In Persian with English abstract).
- Daneshfaraz R, Bagheri Y, Ghaderi A and Ghahremanzadeh A, 2015. An analysis of flowing pattern around T-shaped spur sike at 90° arc, based on fluent and *Flow-3D* models. *International Bulletin of Water Resources & Development* 3(3): 1-9.
- Hiroshi T, Nakagawa H, Kawaike K and Zhang H, 2008. Flow and sediment transport around impermeable or permeable groins. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 52 26(3): 175-180.
- Mehraeen M, Noorbakhsh M and Ghodsian M, 2015. Investigation of turbulent flow field around submerged T-shaped breakwater. *Civil Scientific-Research Journal* 15(3): 171-178 (In Persian with English abstract).
- Nayyer S, Farzin S, Karami H and Rostami M, 2019. A numerical and experimental investigation of the effects of combination of spur dikes in series on a flow field. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 41(256): 1-11.
- Neveen BA, 2011. The effect of inclined groins on the flow. *Water Resources and Environmental Engineering* 3(8): 167-175.
- Nabi Bakhsh S, Dehghani A, Zahiri A and Hesam M, 2010. Numerical simulation of the scour around the tilted head groyne. In *Proceedings of the 6th National Conference on Watershed Management Science and Engineering and 4th National Conference on Erosion and Sedimentology*, 28 April Mazandaran, Noor, Iran (In Persian with English abstract).

- Rezaei A and Fazli M, 2018. Experimental study of flow pattern and scouring around the gabion T-shaped groyne with different porosity percentage of wing and body. Master Thesis in Civil Engineering in Hydraulic Structures, Faculty of Engineering, Bu Ali University (In Persian with English abstract).
- Sharma K and Mohapatra KP 2012. Separation zone in flow past a spur dyke on rigid bed meandering channel. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 138(10): 897-901.
- Vaghefi M, Ghodsian M and Salehi Neyshabouri SAA, 2009. Experimental study on scouring around single T-Shape spur dike on a 90 degree Bend. *Journal of Iran-Water Resources Research* 4(3): 57-69. (In Persian with English abstract).
- Zange H, Nakagawa H and Mizutani H, 2012. Bed morphology and grain size characteristics around a spur dyke. *International Journal of Sediment Research* 27: 141-157.