

بررسی اثر آبشکن و سرریزهای مستغرق واقع در قوس بر الگوی جریان و رسوب با استفاده از مدل

عددی MIKE 3 FLOW MODEL FM

حمید بیگدلی تبار سهرینی^۱، محمد همتی^{۲*}، حجت احمدی^۳، وحید ندرخانلو^۴

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۶/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۱/۱۹

۱- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

۴- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس تهران

* مسؤل مکاتبات، پست الکترونیکی: m.hemmati@urmia.ac.ir

چکیده

سرریزهای مستغرق سازه‌های مهم چند منظوره در کنترل فرسایش هستند که برای کنترل فرسایش، احیاء آبراهه‌ها و بهبود زیستگاه آبزیان استفاده می‌شوند. هدف اصلی این تحقیق بررسی تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق واقع در قوس آبراهه بر الگوی جریان و کارایی آن‌ها در کنترل فرسایش و رسوب‌گذاری با استفاده از مدل MIKE 3 FLOW MODEL FM می‌باشد. متغیرهای مورد بررسی در تحقیق حاضر شامل سه دبی ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ لیتر بر ثانیه، سه نسبت ارتفاع سازه به عمق آب برابر با ۰/۳، ۰/۷ و (سرریز مستغرق) و ۱/۲ (آبشکن) بود. نسبت طول سرریزها (۳ برابر عرض سطح آب) و همین‌طور شیب تاج سرریزها (شیب تخت) و زاویه سرریزها (۶۰ درجه) در طی آزمایش‌ها ثابت بودند. مقایسه نتایج نشان داد که درصد خطای محاسبه بیشینه عمق آبشستگی در دماغه سازه‌ها بین شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی در حدود ۷/۶ درصد می‌باشد. بنابراین تطابق خوبی بین نتایج مدل و آزمایشگاهی وجود دارد. علاوه بر آن نتایج نشان داد که سرریزهای مستغرق نسبت به آبشکن تأثیر بیشتری در کاهش سرعت جریان و کاهش آبشستگی در طول قوس خارجی و کاهش رسوب‌گذاری در طول قوس داخلی دارند و این اثر با افزایش ارتفاع سرریز بهبود می‌یابد. به‌طور متوسط مقدار سرعت در قوس خارجی در سرریزهای با ارتفاع ۰/۳y، ۰/۷y و ۱/۲y به ترتیب ۸۱، ۸۵ و ۷۰ درصد کاهش یافت. به‌طور کلی نتایج تحقیق حاضر نشان داد که سرریزهای با ارتفاع ۰/۷y بیشترین تأثیر را در حفاظت قوس خارجی داشتند.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، آبشکن‌ها، سرریزهای مستغرق، کنترل فرسایش، شبیه‌سازی عددی

Numerical Investigation of the Effect of Groins and Bendway Weirs on Flow and Sediment Pattern Using Mike 3 Flow Model FM

H Bigdeli-Tabar-Sahreini¹, M Hemmati^{2*}, H Ahmadi³, V Naderkhanloo⁴

Received: 2015.09.16

Accepted: 2015.04.08

1-M.Sc. of water structures, Urmia University, Urmia, Iran

2-Assistant Prof. of water engineering, Urmia University, Urmia, Iran

3-Associate Prof. of water engineering, Urmia University, Urmia, Iran

4-M.Sc. of water structures, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

*-Corresponding Author, Email: m.hemmati@urmia.ac.ir

Abstract

Bendway weirs are important multi-purpose structures for erosion control and are implemented to control erosion, restore streams, and improve habitat. Investigation of the effect of weirs's height on flow pattern and erosion and sedimentation by application Mike 3 Flow Model FM was the aim of this research. The used variables were three flow discharge rates of 120, 150 and 180 (l/s), three weir heights of 0.5y, 0.7y (submerge weirs) and 1.2y (spur) (y is the mean water depth). The length ratio (L/B) was kept constant during experiments (equal to 3 times of water surface width) as well, weir crest slope (flat crest) and weirs angle (60 degree) were also constant. The results showed that the maximum difference between experimental and simulation data of the maximum scour depth at the tip of weirs was about 7.6 %. So a good agreement was found between the model and experimental results. Furthermore, the results revealed that the bendway weirs were more efficient than groins in reducing the velocity magnitude, decreasing the scour at the outer bank side and in decreasing the sediment deposition at the inner bank side. On average, the velocity magnitude at the outer bank side decreased by 81, 85 and 70 % in weirs with heights of 0.3y, 0.7y and 1.2y, respectively. Generally, the results of this research showed that the weirs with a height of 0.7y had the most influence on protection of outer bank.

Keywords: Bendway weirs, Groynes, Numerical simulation, Scour control, Scouring

مقدمه

سرعت آن با جریان مستقیم تفاوت دارد (سلاجقه و همکاران ۱۳۸۴). جریان ثانویه در مقطع عرضی قوس شکل می گیرد و با تلفیق با جریان طولی آبراهه به صورت جریانی مارپیچ (حلزونی شکل) در طول قوس توسعه می یابد. نیروی گریز از مرکز، گرادیان سرعت در سطح آب و کف آبراهه و اصطکاک دیواره ها و کناره ها باعث شکل گیری جریان های ثانویه می گردد

وجود جریان ثانویه و جریان حلزونی شکل در قوس ها باعث می شود که الگوهای جریان و مسیره های فرسایش و رسوب گذاری در رودخانه های پیچان رودی و مستقیم متفاوت باشد. در قوس رودخانه ها به دلیل تأثیر نیروی گریز از مرکز، تراز آب در قوس خارجی بالا آمده و در قوس داخلی پایین می افتد و لذا توزیع

نداشت اما در شرایط جریان بالا (دبی جریان بیشتر از دبی طراحی سازه‌ها) احداث سرریزها به‌طور متوسط باعث کاهش ۱۹ درصدی ارتفاع تپه رسوبی نسبت به حالت بدون سازه گردید. نتایج همتی و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد که با افزایش شیب تاج سرریز از ۰ الی ۲۰ درصد، عمق آبشستگی بیش از سه برابر کاهش یافت. مهرداد و همکاران (۱۳۹۵) با بررسی آزمایشگاهی تأثیر ارتفاع و شیب تاج سرریزهای مستغرق بر الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه گزارش دادند که بعد از احداث این سازه‌ها، سرعت متوسط در سمت قوس خارجی بیش از ۷۹ درصد کاهش و در سمت قوس داخلی بیش از ۵۹ درصد افزایش یافت.

وانگ و یافی (۲۰۰۵) گزارش دادند که الگوی جریان در خم با قرار دادن سرریز مستغرق تغییر می‌کند و با حضور این سازه‌ها، منطقه جدایی جریان و جریان چرخشی توسعه می‌یابد. مغربی و قزل سوفلو (۱۳۹۱) به شبیه‌سازی سه‌بعدی الگوی جریان و انتقال رسوبات در دو قوس متناوب ۱۸۰ درجه با استفاده از مدل عددی Mike3 پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که خصوصیات جریان حلزونی در قوس، خود باعث شکل‌گیری جریان‌های برگشتی در مقطع عرضی می‌باشد.

بررسی منابع مختلف نشان می‌دهد که مطالعات صورت گرفته در زمینه سرریزهای مستغرق در پیچ آبراهه در رودخانه‌های پیچان‌رودی اندک می‌باشد. هم‌چنین تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق بر الگوهای جریان و رسوب کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. لذا هدف تحقیق حاضر، بررسی عددی تأثیر آبشکن و سرریزهای مستغرق بر الگوی جریان و رسوب (در یک بستر زنده همراه با انتقال رسوب) در یک مدل پیچان‌رودی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مدل‌سازی ریاضی

مدل MIKE 3 Flow Model FM یکی از مجموعه مدل‌های محاسباتی هیدرولیک جریان است که به دلیل قابلیت بالا در شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان و انتقال رسوب مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل

(ابوالقاسمی ۱۳۹۱، سلاجقه و همکاران ۱۳۸۴). مطالعات زیادی در زمینه الگوی جریان در قوس‌ها و رودخانه‌های پیچان‌رودی انجام گرفته است که از جمله می‌توان به بلانکارت و گراف (۲۰۰۴)، لیاقت و همکاران (۲۰۱۴)، گو و همکاران (۲۰۱۶) و بسیاری دیگر اشاره کرد.

جابه‌جایی قوس‌ها که در نتیجه فرسایش شدید کناره‌های رودخانه‌های پیچان‌رودی بوجود می‌آید از موارد مهم در مدیریت و مهندسی رودخانه‌ها می‌باشد. یکی از سازه‌هایی که برای کاهش فرسایش و جلوگیری از توسعه آبشستگی دیواره‌های رودخانه‌ها به کار برده می‌شود، سرریزهای مستغرق واقع در قوس آبراهه می‌باشد (فیثینیچ و آلن ۲۰۰۰). سرریزهای مستغرق از نظر ظاهر شبیه آبشکن‌های سنگی هستند. با این تفاوت که در مقایسه با آبشکن‌های معمولی کم ارتفاع بوده و طول بیشتری نسبت به آن‌ها دارند و از نظر کارکرد نیز تفاوت قابل توجهی دارند (همتی ۱۳۹۱). سرریزهای مستغرق همانند آبشکن‌ها، سرعت در نزدیکی ساحل و هم‌چنین تمرکز جریان در ساحل خارجی را کاهش می‌دهند (بی‌نام ۱۹۹۷).

تحقیقات مختلفی که در زمینه فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها و سازه‌های حفاظتی از جمله سرریزهای مستغرق صورت گرفته است که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌گردد. جراح‌زاده و شفاعی بجستان (۲۰۱۱)، در مطالعه‌ای آزمایشگاهی به مقایسه پیشینه عمق آبشستگی در خط ساحل و دماغه سرریزهای مستغرق در قوس ۹۰ درجه تند پرداختند و گزارش دادند که عملکرد سازه‌هایی که فاصله آن‌ها ۳ برابر طول سازه بود از بقیه موارد بهتر می‌باشد. آچاریا و گوتام (۲۰۱۲)، در بررسی تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق و آبشکن‌ها بر روی توزیع سرعت جریان نتیجه گرفتند که سرریزهای مستغرق کارایی بهتری در کاهش سرعت نسبی در سمت قوس خارجی نسبت به آبشکن‌ها دارند. همتی و همکاران (۲۰۱۲) بیان کردند که تغییر طول و زاویه سرریزهای مستغرق تأثیر معنی‌داری در کاهش ارتفاع تپه رسوبی در قوس داخلی

نظر گرفتن همه عوامل مؤثر در یک معادله ریاضی را ناممکن می‌سازد. چنین محدودیت‌هایی تاکنون مانع از ارائه یک معادله جهانی واحد برای تعیین نرخ انتقال رسوب شده است. لذا با انجام سعی و خطا در استفاده از معادلات مختلف نظیر انگلند - هانسن^۱، ون راین^۲، میسر-پیتر^۳ و انگلند-فردسو^۴ و مقایسه نتایج مدل ریاضی با نتایج آزمایشگاهی نهایتاً از معادله انگلند - هانسن استفاده شد.

مشخصات میدان حل

جهت ایجاد هندسه کانال، سلول‌های مختلفی برای مدل‌سازی مورد بررسی قرار گرفتند که سرانجام از سلول‌های چهار وجهی منعطف با ابعاد ۱۰ سانتی-متری، پس از صرف زمان و سعی و خطاهای بسیار و حصول اطمینان از عدم وابستگی نتایج مدل به سلول (آزمون استقلال نتایج از سلول) استفاده شد. در تعیین گام زمانی نیز، با توجه به اینکه گام زمانی می‌بایست متناسب با نوع فرآیند و زمان اجرای مدل مشخص گردد آزمون استقلال نتایج از گام زمانی صورت گرفت. برای این منظور گام‌های زمانی مختلفی منظور شد و با مقایسه نتایج (مقادیر CFL، نتایج سرعت و ...) و زمان اجرای هر کدام، سرانجام گام زمانی ۲ ثانیه انتخاب گردید. هم‌چنین در تعیین تعداد لایه‌های عمقی، لایه‌های مختلف بر اساس عملکرد مورد مقایسه قرار گرفت که در نتیجه تعداد ۷ لایه از نوع سیگما^۵ به علت دقت و مدت زمان اجرا مورد استفاده و واسنجی واقع گردید.

ارزیابی مدل

به‌منظور بررسی و تحت آزمایش قرار دادن ظرفیت استفاده از مدل عددی در بررسی تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق واقع در پیچ آبراهه بر الگوی جریان و کارایی آن‌ها در کنترل فرسایش و رسوب-گذاری، نتایج شبیه‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. واسنجی و

توانایی شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان و انتقال رسوب در رودخانه‌ها را با در نظر گرفتن تری و خشکی با استفاده از مدل‌های آشفنگی مختلف دارد (ندرخلو ۱۳۹۲).

معادلات جریان

معادله پیوستگی جریان به‌طور کلی به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad [1]$$

معادله مومنتم در راستای X به صورت زیر

می‌باشد:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} = \\ f_v - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho} \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \\ \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \end{aligned} \quad [2]$$

در معادلات فوق t زمان، x, y, z مولفه‌های مختصات دکارتی، $h = \eta + d$ کل عمق آب، η ارتفاع سطح آب، d عمق ثابت آب، w, v, u سرعت جریان به-ترتیب در راستای x, y, z ، $f = 2\Omega \sin \phi$ نیروی کوریولیس که بیانگر اثر گردش زمین است. (Ω نسبت زاویه حرکت چرخشی زمین، ϕ عرض جغرافیایی منطقه)، g شتاب گرانشی زمین، ρ چگالی آب، s_{xx}, s_{xy} تانسورهای تنش انعکاسی، v_t لزجت گردابه‌ای (آشفنگی) عمودی، P_a فشار اتمسفر، ρ_0 چگالی مرجع آب، S مقدار دبی منبع نقطه‌ای، u_s سرعت جریان آب ناشی از منبع نقطه‌ای در راستای x و F_u ترم تنش افقی جریان می‌باشند.

معادلات حاکم بر انتقال رسوب

به‌دلیل تنوع روابط، تعدد عوامل و پیچیدگی حاکم بر انتقال رسوب، روابط مختلفی برای تعیین مقدار رسوب حمل شده توسط محققان ارائه شده است که در

¹ Engelund-Hansen

² Van Rijn

³ Meyer-Peter

⁴ Engelund and Fredsoe

⁵ Sigma

علاوه بر آن، مقایسه بیشینه عمق آبشستگی در دماغه سرریزها نیز در مرحله واسنجی نشان داد که اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و مدل در حدود ۷/۶ درصد می‌باشد.

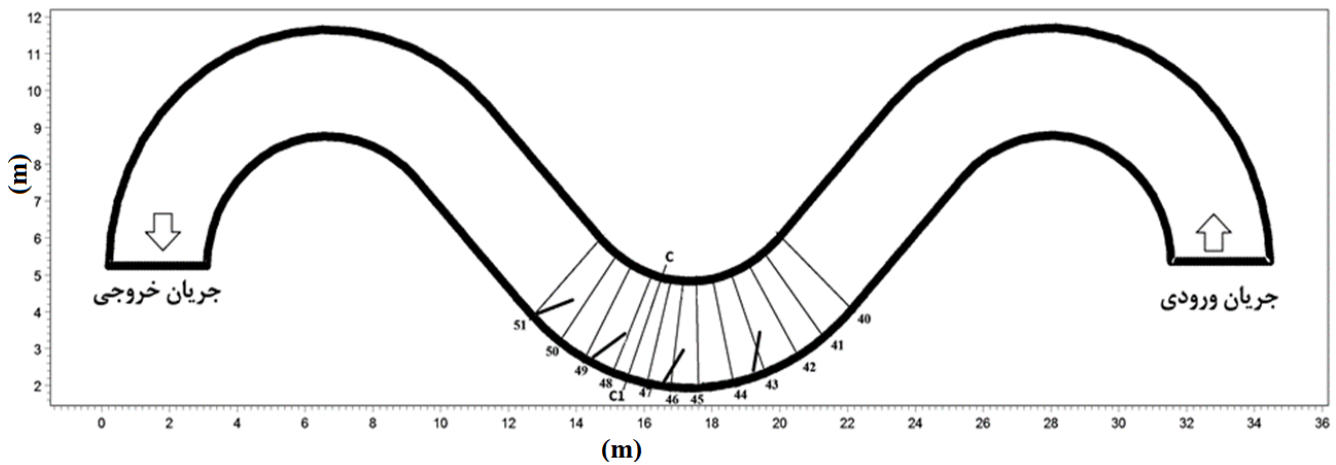
برای صحت‌سنجی مدل نیز بیشینه عمق آبشستگی در دماغه سرریزها، در دبی‌های ۱۲۰ و ۱۵۰ لیتر بر ثانیه با همان شرایط واسنجی شده (ارتفاع سرریزها ۰/۳ برابر عمق آب و فاصله سرریزها ۳ برابر طول تصویر شده تاج سرریز) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نیمرخ رسوب در مقطع ۵۰ در مرحله صحت‌سنجی برای حالت بدون سرریز (شکل ۳-الف) و با وجود سرریز (شکل ۳-ب) در دبی ۱۲۰ لیتر بر ثانیه در شکل ۳ ارائه شده است که نشان دهنده دقت قابل قبول مدل در مرحله صحت‌سنجی می‌باشد. علاوه بر آن نتایج ارائه شده در جدول ۲ نیز بیانگر دقت خوب مدل در پیش‌بینی بیشینه عمق آبشستگی می‌باشد که درصد خطای آن بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد.

صحت‌سنجی مدل عددی با استفاده از آزمایش‌های انجام شده بر روی مدل پیچان‌رودی توسط همتی (۱۳۹۱) در آزمایشگاه مهندسی رودخانه مؤسسه تحقیقات آب تهران پی‌ریزی شده است (شکل ۱). در تحقیق حاضر برای بررسی الگوی جریان و رسوب در اثر احداث سرریزهای مستغرق (با دو ارتفاع ۳۰ و ۷۰ درصد متوسط عمق جریان ورودی به قوس) و آبشکن (غیر مستغرق با ارتفاع ۱۲۰ درصد عمق آب)، از سه دبی جریان برابر با ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ لیتر بر ثانیه استفاده شد. لازم به‌ذکر می‌باشد که بر اساس تحقیقات و پیشنهادهای همتی (۱۳۹۱)، دستورالعمل Hec-23 (لاگاس و همکاران ۲۰۰۹)، دریک (۱۹۹۹)، بی‌نام (۲۰۰۱)، زاویه احداثی سرریزها (زاویه محور تاج سرریز با خط مماس بر قوس در محل احداث سازه) ثابت و برابر با ۶۰ درجه، طول نسبی سرریزها (نسبت طول تصویر شده بر عرض سطح آب) ثابت و برابر با ۰/۳، فاصله سرریزها ثابت و ۳ برابر طول تصویر شده تاج سرریز انتخاب شد. علاوه بر آن شیب تاج سرریزها نیز در تمامی آزمایش‌ها تخت بود. قطر متوسط ذرات رسوبی برابر با ۱/۶ میلی‌متر بود. مدت زمان اجرای مدل برای اطمینان از تعادل نسبی بستر مطابق با شرایط آزمایشگاهی و بر اساس ارزیابی نتایج شبیه‌سازی در مدل، برابر با ۸ ساعت انتخاب شد. شکل ۱ پلان مدل پیچان‌رودی و سرریزهای قرار گرفته در قوس مرکزی را نشان می‌دهد.

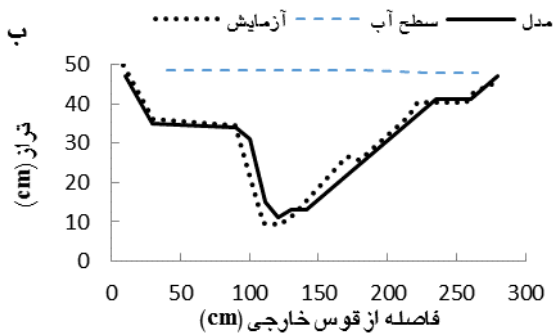
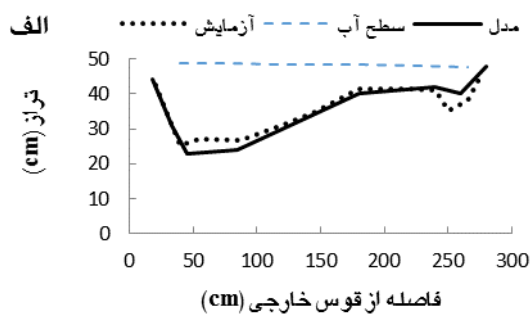
واسنجی و صحت‌سنجی مدل

در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل، ضرایب معادله $k-\varepsilon$ مطابق با جدول ۱، ارتفاع زبری بستر k_s برابر با قطر متوسط ذرات رسوبی و ضریب اسموگرونسکی^۱ برابر با ۰/۱ انتخاب گردید. در مرحله واسنجی، از دبی ۱۸۰ لیتر بر ثانیه برای سرریزهای با ارتفاع نسبی ۰/۳ و فاصله نسبی ۳ برابر طول سرریزها استفاده گردید. نتایج مربوط به نیمرخ رسوب در مقاطع ۴۳ و ۵۰ در مرحله واسنجی بیانگر انطباق خوب نتایج مدل ریاضی با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد (شکل ۲).

⁶ Smagorinsky coefficient



شکل ۱- پلان مدل پیچان رودی و موقعیت قرارگیری سرریزها و مقاطع مختلف.



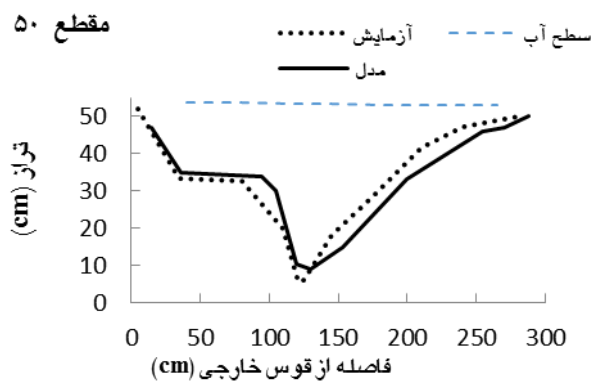
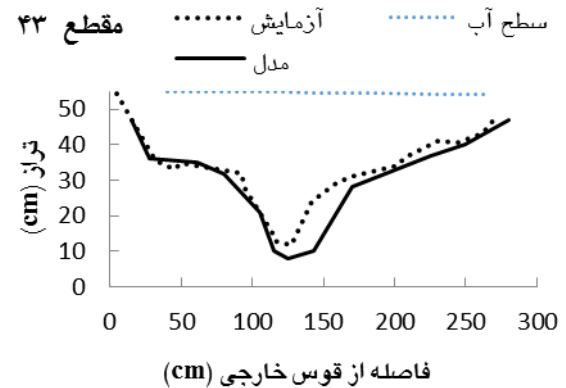
شکل ۳- نیمرخ رسوب در مقطع ۵۰ در مرحله صحت سنجی و دبی ۱۲۰ لیتر بر ثانیه برای الف) حالت بدون سازه و ب) با وجود سرریز.

جدول ۲- نتایج مربوط به صحت سنجی مدل (بیشینه عمق آبشستگی در دماغه سرریزها).

دبی (l/s)	ارتفاع سرریز (-)	فاصله سرریز (-)	پیش‌بینی مدل (cm)	نتیجه آزمایشگاهی (cm)	خطا (%)
۱۲۰	۰/۳۷	۲L	۲۴/۸	۲۳/۲	۳/۸۷
۱۵۰	۰/۳۷	۲L	۲۵/۹	۲۸	۷/۵

جدول ۱- مقادیر و ضرایب ثابت مدل $k-\epsilon$ در مرحله واسنجی و صحت سنجی.

ضرایب ثابت	σ_ϵ	σ_K	$C_{\epsilon 3}$	$C_{\epsilon 2}$	$C_{\epsilon 1}$
مقادیر	۱/۳	۱	۰	۱/۲۹	۱/۴۴



شکل ۲- نیمرخ رسوب در مقاطع ۴۳ و ۵۰ در مرحله واسنجی برای دبی ۱۸۰ لیتر بر ثانیه.

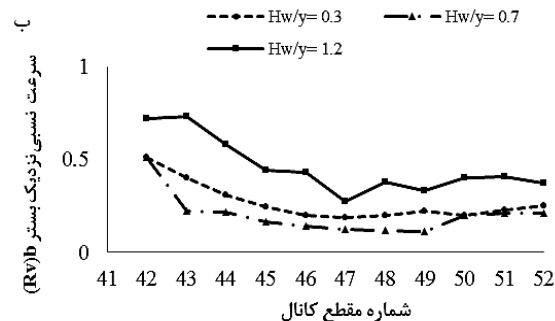
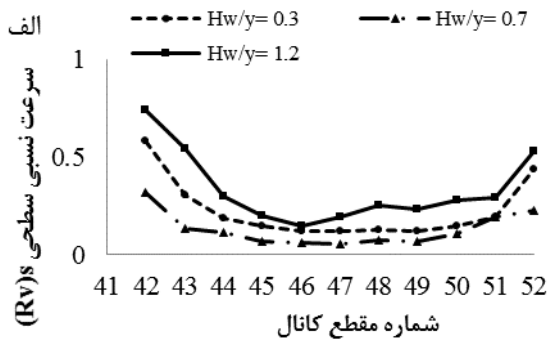
نتایج و بحث

تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق بر توزیع سرعت در مقاطع طولی و عرضی قوس

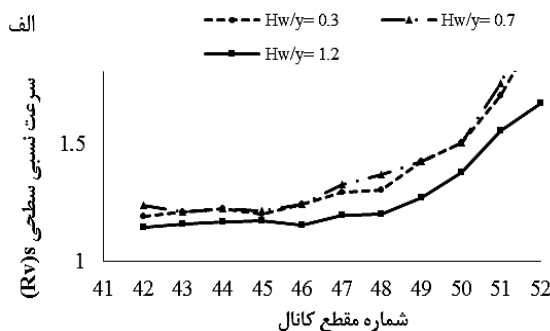
در تحقیق حاضر از دو ارتفاع برای سرریزهای مستغرق (برابر با $0.3y$ ، $0.7y$) و یک حالت آبشکن ($1.2y$) استفاده گردید تا به ارزیابی عملکرد سرریزهای مستغرق و حالت غیر مستغرق (آبشکن) در توزیع سرعت پرداخته شود. نتایج مربوط به تأثیر ارتفاع این سازه‌ها بر سرعت‌های نسبی (نسبت سرعت با وجود سرریز به حالت بدون سرریز) در نزدیک سطح آب و نزدیک بستر در مقاطع مختلف بخش قوس خارجی در شکل ۴ ارائه شده است. شکل ۴ - الف که مقادیر سرعت نسبی سطحی را در مقاطع مختلف برای ارتفاع‌های متفاوت نشان می‌دهد بیانگر تأثیر بیشتر سرریزهای مستغرق با ارتفاع $0.7y$ بر کاهش سرعت سطحی در طول قوس خارجی می‌باشد. این امر مشابه نتایج مهرداد و همکاران (۱۳۹۵) می‌باشد که در آن سرریزهای با ارتفاع $0.7y$ در کاهش سرعت سطحی در بخش بیرونی قوس ۹۰ درجه عملکرد بهتری نسبت به سرریزهای با ارتفاع $0.5y$ و $0.3y$ داشتند. تأثیر سرریزهای با ارتفاع $0.7y$ بر کاهش سرعت سطحی نسبی بیشتر از $0.3y$ و آن هم بیشتر از حالت غیرمستغرق $1.2y$ می‌باشد (شکل ۴ - الف). این روند برای سرعت نسبی در نزدیک بستر نیز مشابه سرعت نسبی سطحی می‌باشد (شکل ۴ - ب). به‌طور متوسط سرریزهای با ارتفاع $0.7y$ سرعت سطحی و سرعت نزدیک بستر را به ترتیب به میزان ۸۵ و ۷۵ درصد کاهش داده است؛ در حالی‌که این مقدار برای سرریزهای با ارتفاع $0.3y$ به ترتیب برابر با ۸۱ و ۷۰ درصد و برای آبشکن با ارتفاع $1.2y$ به ترتیب ۷۰ و ۵۰ درصد کاهش می‌باشد.

اما روند توزیع سرعت در قوس داخلی متفاوت از قوس خارجی می‌باشد؛ به‌طوری‌که اولاً در تمامی مقاطع سرعت نسبی در نزدیک بستر بیشتر از ۱ بوده که این مورد در مقاطع انتهایی قوس به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. هم‌چنین کاملاً مشهود است که تأثیر آبشکن (ارتفاع $1.2y$) در افزایش سرعت نسبی در

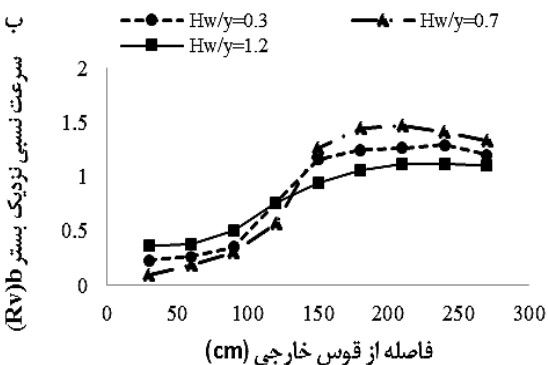
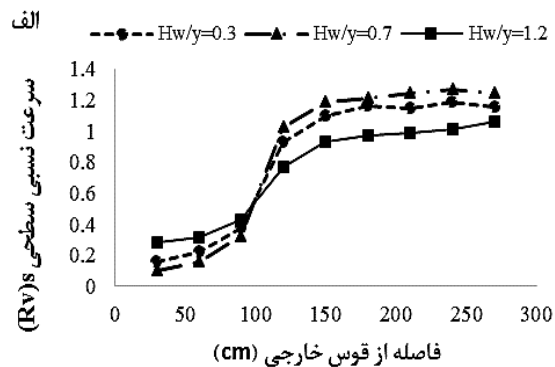
نزدیک بستر در سمت قوس داخلی کمتر از سرریزهای مستغرق می‌باشد (شکل ۵). این بدان معنا است که با احداث سرریزهای مستغرق مقدار سرعت متوسط در سمت قوس داخلی نسبت به سرعت متوسط در حالت بدون سازه افزایش یافته است. این نتایج تطابق خوبی با نتایج مهرداد و همکاران (۱۳۹۵) و همتی (۱۳۹۱) دارد. بطور متوسط در ارتفاع‌های $0.3y$ ، $0.7y$ و $1.2y$ ، سرعت نسبی نزدیک بستر به ترتیب برابر با ۳۰، ۳۰ و ۲۷ درصد و سرعت سطحی به ترتیب به میزان ۳۹ و ۳۰ درصد افزایش یافته است.



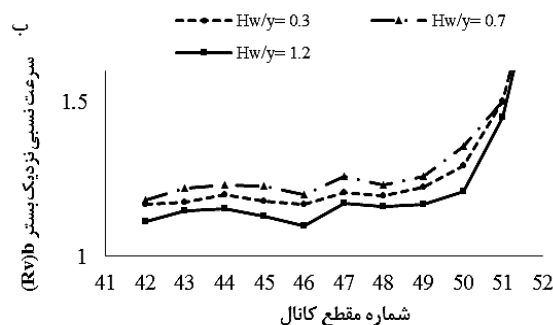
شکل ۴ - تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق و آبشکن بر سرعت نسبی در قوس خارجی: الف) نزدیک سطح آب و ب) نزدیک بستر.



قوس خارجی و افزایش آن در قوس داخلی می‌گردد. همچنین نتایج آچاریا و گوتام (۲۰۱۲)، نیز گواه بر عملکرد مناسب سرریزهای مستغرق نسبت به آبشکن‌ها می‌باشد. توزیع الگوی سرعت سطحی جریان در قوس مرکزی (قوس مورد مطالعه) برای حالت بدون سازه نشان می‌دهد که سرعت در دو ناحیه یکی در سمت قوس داخلی در ابتدای قوس مورد مطالعه و دیگری در سمت قوس خارجی بعد از رأس قوس، بیشینه مقدار را دارد و حداقل مقدار آن در سمت قوس داخلی انتهایی قوس مرکزی شکل می‌گیرد (شکل ۷- الف). اما بعد از احداث سرریزهای مستغرق، ناحیه بیشینه سرعت از قوس خارجی دور شد و به سمت مرکز کانال تغییر مسیر داد (شکل ۷- ب). به عبارت دیگر با احداث سرریزها جریان در بین سازه‌ها تسخیر و به سمت مرکز کانال تغییر جهت داده شده است. با این حال، ناحیه بیشینه سرعت در سمت قوس داخلی در قسمت ورودی قوس برای دو حالت با سازه و بدون سازه تغییری نیافته است.

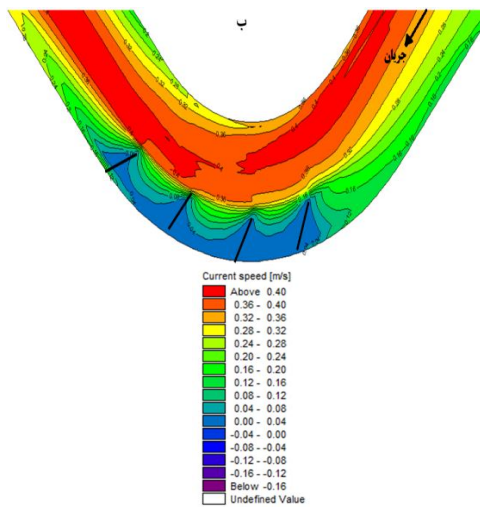


شکل ۶ - تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق بر توزیع سرعت نسبی در مقطع C-C₁: الف) سرعت سطحی و ب) سرعت نزدیک بستر.

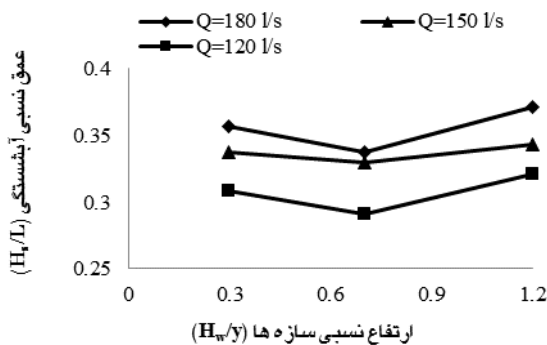


شکل ۵- تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق و آبشکن بر سرعت نسبی در قوس داخلی: الف) نزدیک سطح آب و ب) نزدیک بستر.

نسبت متوسط سرعت سطحی جریان با وجود سرریزهای مستغرق به متوسط سرعت سطحی در حالت بدون سازه $(R_v)_s$ برای ارتفاع‌های مختلف سرریز در مقطع C-C₁ (شکل ۱)، در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۶ - الف ملاحظه می‌گردد صرف‌نظر از تأثیر ارتفاع سرریزها، سرعت سطحی نسبی در سمت قوس خارجی کمتر از ۱ و در سمت قوس داخلی بیشتر از ۱ می‌باشد. این بدان معنی است که با احداث سرریزها در سمت قوس خارجی، مقدار سرعت نسبت به حالت بدون سازه در سمت قوس خارجی کاهش و در سمت قوس داخلی افزایش می‌یابد. این روند در تمام مقاطع از قوس پیچان‌رودی یکسان می‌باشد. روند تغییرات سرعت نسبی سطحی برای سرعت نسبی در نزدیک بستر نیز صادق می‌باشد؛ به طوری‌که در تمامی مقاطع سرعت نسبی نزدیک بستر نیز همانند سرعت نسبی سطحی در سمت قوس خارجی کاهش و در سمت قوس داخلی افزایش می‌یابد (شکل ۶ - ب). تأثیر سرریزهای با ارتفاع $0.7y$ در کاهش سرعت در سمت قوس خارجی و افزایش آن در قوس داخلی بیشتر از سرریزهای با ارتفاع $0.3y$ بوده و آن‌هم بیشتر از حالت غیرمستغرق $1/2y$ می‌باشد. زیرا سرریزهای با ارتفاع $0.7y$ باعث تسخیر بیشتر جریان در سمت قوس خارجی شده و در انحراف جریان تسخیر شده به سمت قوس داخلی عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهند که این امر باعث کاهش سرعت در



شکل ۷- تأثیر سرریزهای مستغرق در قوس خارجی بر الگوهای توزیع سرعت سطحی برای الف) بدون سازه و ب) با سازه.

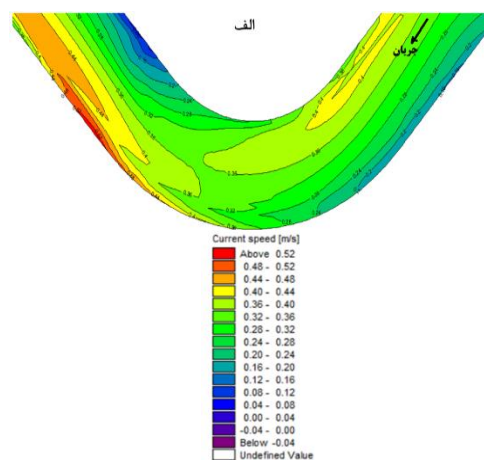


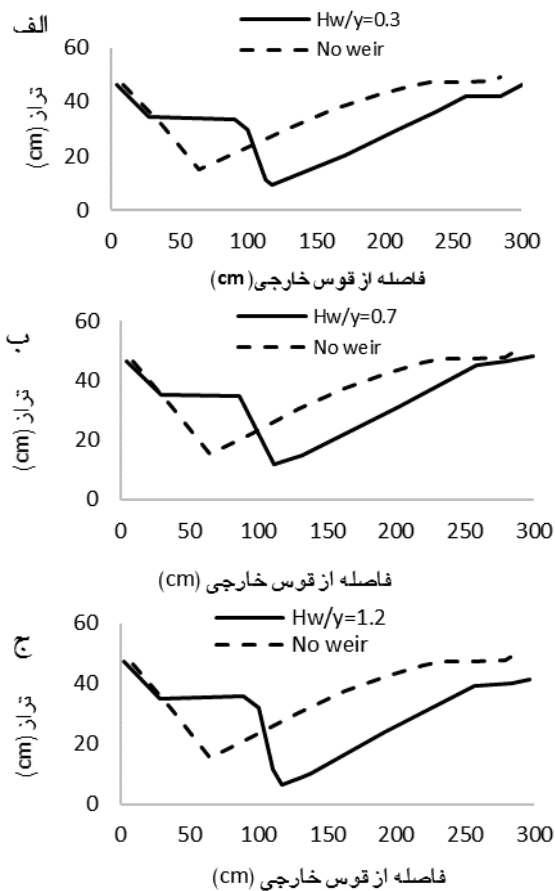
شکل ۸- تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق بر بیشینه عمق نسبی آبشستگی در دماغه سازه‌ها.

نتایج مربوط به پروفیل طولی تراز خط‌القعر در حالت با سازه و برای ارتفاع‌های مختلف در محدوده مقاطع ۴۰ تا ۵۱ در شکل ۹ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد تراز خط‌القعر در حالت آبشکن که پایین‌تر از تراز آن در سرریزهای مستغرق می‌باشد. تراز خط‌القعر برای سرریزهای با ارتفاع $0.7y$ کمتر از $0.3y$ و آن هم کمتر از حالت غیرمستغرق می‌باشد. نتایج نیم‌رخ رسوب در مقطع شماره ۴۸ برای حالت بدون سازه، سرریز مستغرق و آبشکن ارائه شده در شکل ۱۰ حاکی از عملکرد مناسب هر دو سازه (سرریزهای مستغرق و آبشکن) در حفاظت از قوس خارجی می‌باشد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه

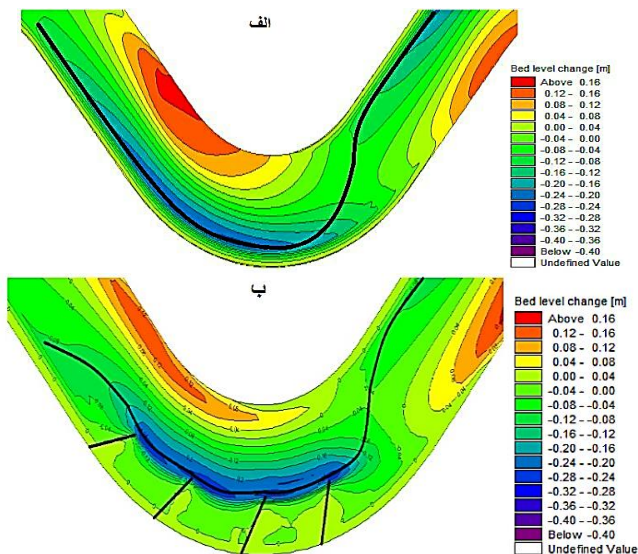
تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق بر بیشینه عمق آبشستگی و خط‌القعر

بیشینه عمق آبشستگی در دماغه سرریزها و موقعیت و تراز خط‌القعر از مهم‌ترین پارامترهایی است که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مربوط به تأثیر ارتفاع سرریزها بر بیشینه عمق نسبی آبشستگی H_s/L (نسبت بیشینه عمق آبشستگی به طول تصویر شده سازه‌ها) در شکل ۸ بیان‌گر این است که بیشینه عمق نسبی آبشستگی در دماغه سازه‌های غیر مستغرق (آبشکن) بیشتر از سرریزهای مستغرق می‌باشد. زیرا جریان از روی سرریزهای مستغرق عبور می‌کند و با توجه به ارتفاع کم این سازه‌ها، شدت گردابه‌های شکل گرفته در دماغه سرریزهای مستغرق کمتر از حالت غیر مستغرق می‌باشد که این امر باعث کاهش بیشینه عمق آبشستگی در نوک سرریزهای مستغرق می‌گردد. علاوه بر آن نتایج تحقیق حاضر نشان داد که ارتفاع نسبی سرریز برابر با $0.7y$ عملکرد بهتری در تسخیر جریان در سمت قوس خارجی داشته و باعث کاهش عمق آبشستگی در دماغه سازه‌ها می‌گردد. همچنین نتایج مهرداد و همکاران (۱۳۹۵) نشان داد که سرریزهای با ارتفاع $0.7y$ تأثیر بیشتری در تسخیر جریان و کاهش سرعت در سمت قوس خارجی داشتند که تأیید کننده نتایج تحقیق حاضر نیز می‌باشد.



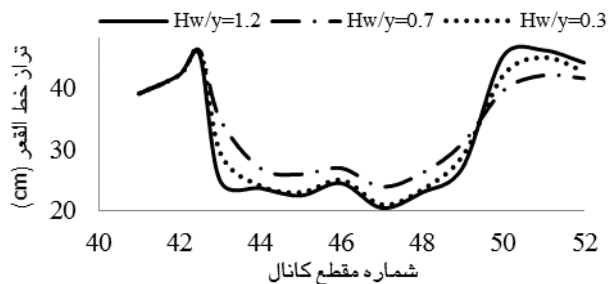


شکل ۱۰- مقایسه نیمرخ رسوب حالت بدون سازه در مقطع ۴۸ و در دبی ۱۸۰ لیتر بر ثانیه با الف) سرریز مستغرق با ارتفاع نسبی ۳۰ درصد، ب) سرریز مستغرق با ارتفاع نسبی ۷۰ درصد و ج) حالت آبشکن.



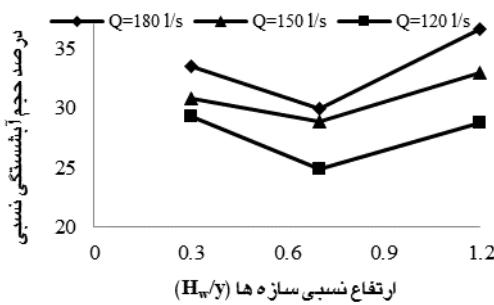
شکل ۱۱- مسیر خط‌القعر جریان در قوس مرکزی برای

می‌گردد در اثر احداث سرریزهای مستغرق (شکل ۱۰- الف و ب) و آبشکن (شکل ۱۰- ج) خط‌القعر از سمت دیواره قوس خارجی به مرکز کانال جابه‌جا شده است. این امر در شکل ۱۱ نیز بخوبی نشان داده شده است. همچنین حجمی از رسوبات که در حالت بدون سازه در سمت قوس داخلی، تپه رسوبی را تشکیل داده بودند در اثر احداث این سازه‌ها با فرسایش مواجه شده و مقطع عبوری جریان در قوس، برای هدایت جریان افزایش می‌یابد (شکل ۱۰). با توجه به شکل ۱۲ ملاحظه می‌گردد که در حالت بدون سازه (شکل ۱۲- الف) قسمت عمیق کانال و یا به عبارتی خط‌القعر کانال در سمت ساحل چپ (قوس خارجی) قرار گرفته و جریان ثانویه در جهت پاد ساعت‌گرد نیز مشاهده می‌شود. هر چند جریان ثانویه در حالت با وجود سرریز مستغرق (شکل ۱۲- ب) نیز مشاهده می‌گردد اما مکان آن به سمت مرکز کانال انتقال یافته است و ناحیه بیشینه سرعت نیز به سمت قوس داخلی جابه‌جا شده است. علاوه بر آن با توجه به شکل ۱۲ ملاحظه می‌گردد که احداث سرریزهای مستغرق باعث تغییر مسیر جریان اصلی از سمت قوس خارجی در حالت بدون سازه به سمت مرکز کانال و قوس داخلی شده است. این امر باعث فرسایش تپه رسوبی موجود در سمت قوس داخلی و رسوب‌گذاری در سمت قوس خارجی شده است. لذا ملاحظه می‌گردد که احداث چنین سازه‌هایی باعث حفاظت از قوس خارجی و جلوگیری از جابه‌جایی قوس‌ها خواهد شد.



شکل ۹- تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق بر تراز خط‌القعر کانال.

سازه‌ها و تپه رسوبی در قوس داخلی می‌باشد.



شکل ۱۳ - تأثیر ارتفاع نسبی سرریزهای مستغرق بر حجم نسبی آبشستگی (V/V_0) در محدوده احداثی سرریزها.

نتیجه‌گیری کلی

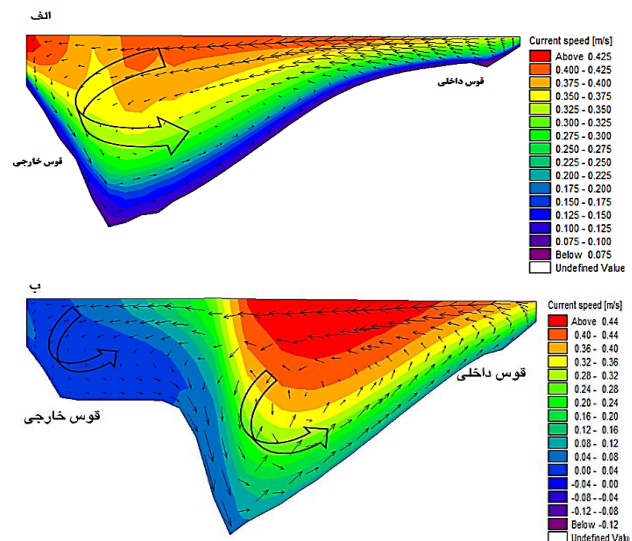
در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق بر الگوی جریان و رسوب در یک مدل پیچان‌رود با استفاده از مدل ریاضی Mike 3D Flow Model FM پرداخته شد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که:

- مدل Mike 3D Flow Model FM قابلیت شبیه‌سازی رسوب و جریان را با وجود سرریزهای مستغرق دارد.

- عملکرد سرریزهای مستغرق با ارتفاع $0.7y$ در کاهش سرعت در سمت قوس خارجی و افزایش آن در قوس داخلی نسبت به سایر ارتفاع‌های مختلف بهتر بود؛ به طوری که کاهش سرعت سطحی در قوس خارجی برای سرریزهای با ارتفاع $0.3y$ ، $0.7y$ و $1.2y$ به ترتیب برابر با ۸۱، ۸۵ و ۷۰ درصد و افزایش سرعت سطحی در قوس داخلی به ترتیب برابر با ۳۰، ۳۰ و ۲۷ درصد می‌باشد.

- کانال اصلی و ناحیه بیشینه سرعت در حالت بدون سازه در سمت قوس خارجی شکل گرفته بود که در اثر احداث این سرریزها از میزان سرعت در بخش قوس خارجی کاسته شد و ناحیه بیشینه سرعت و کانال اصلی به سمت مرکز و قوس داخلی انتقال یافت. لذا احداث این سازه‌ها باعث توزیع مناسب جریان در عرض کانال و عریض شدن کانال در بخش قوس (در

حالت: الف) بدون سازه و ب) بعد از احداث سازه ($0.3=$ $Q=180$ (l/s), H_w/y



شکل ۱۲- پروفیل عرضی الگوهای سرعت و آبشستگی در مقطع C-C1 برای: الف) حالت بدون سازه و ب) با وجود سازه.

تأثیر ارتفاع سرریزهای مستغرق بر حجم نسبی آبشستگی

برای بررسی اثر ارتفاع سرریزهای مستغرق بر حجم نسبی آبشستگی، از نسبت حجم رسوبات شسته شده در محدوده قوس مرکزی کانال (V) به حجم رسوب اولیه در آن منطقه (V_0) استفاده گردید. محدوده مورد استفاده برای محاسبه حجم آبشستگی بین مقاطع ۴۰ تا ۵۱ در شکل ۱ می‌باشد. نتایج مربوط به حجم نسبی رسوبات شسته شده در محدوده احداثی سرریزهای مستغرق در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مذکور ملاحظه می‌شود حجم نسبی آبشستگی برای سرریزهای با ارتفاع $0.7y$ کمتر از دو ارتفاع $0.3y$ و $1.2y$ می‌باشد. بطور متوسط حجم نسبی آبشستگی در تمامی حالت‌های مختلف در سرریزهای با ارتفاع $0.3y$ ، $0.7y$ و $1.2y$ به ترتیب برابر با ۳۱، ۲۷ و ۲۴ درصد می‌باشد. این امر نشان دهنده تأثیر بهتر سرریزهای با ارتفاع $0.7y$ در کنترل حجم فرسایش در محدوده احداثی سرریزها در قوس می‌باشد. لازم به ذکر می‌باشد که عمده رسوبات فرسایش یافته از قسمت‌های مرکزی کانال در امتداد دماغه

آبشستگی در سرریزهای با ارتفاع $0.3y$ ، $0.7y$ و $1.2y$ در حدود 31 ، 27 و 34 درصد حجم رسوبات اولیه در محدوده احداثی سرریزها می‌باشد.

- با احداث سرریزهای مستغرق مسیر خط‌القعر از سمت قوس خارجی به سمت مرکز کانال و در امتداد سرریزها انتقال یافت.

اثر فرسایش تپه رسوبی واقع در قوس داخلی می‌گردد.

- بیشینه عمق نسبی آبشستگی در دماغه سرریزهای با ارتفاع $0.7y$ کمتر از سایر سرریزها اتفاق افتاد.

- حجم نسبی آبشستگی در سرریزهای با ارتفاع $0.7y$ کمتر از بقیه موارد بوده؛ به‌طوری‌که حجم

منابع مورد استفاده

- Abolghasemi M, 2012. The effects of flow diversion on sediments entering the intake in 90 deg. diversion angle in sinus river. *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 44(1):43-54.
- Acharya K and Gautam M, 2012. Evaluation of bendway weir bank stabilization techniques for stream restoration. *International Journal of River Basin Management* 10(2):171-176.
- Blanckaert K and Graf W H, 2004. Momentum transport in sharp open-channel bends. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)* 130(3): 186-198.
- Derrick DL, 1999. Bendway weir history, theory and design. Available from: <http://chl.wes.army.mil/research/hydstruc/bankprotect/bendweir/work.htm>.
- FHWA, 1997. Bridge scour and stream instability countermeasures (SI). Federal Highway Administration, Hydraulic Engineering Circular Number 23, FHWA HI-97-030.
- FHWA, 2001. Bridge scour and stream instability countermeasures: experience, selection, and design guidance. 3rd ed.
- Fischenich JC and Allen HA, 2000. Stream management. ERDC/EL SR-W-00-1, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.
- Gu L, Zhang S, He L, Chen D, Blanckaert K, Ottevanger W and Zhang Y, 2016. Modeling flow pattern and evolution of meandering channels with a nonlinear model. *Water* 8(10):418.
- Hemmati M, 2012. Experimental investigation of the effect of length, height and crest slope of bendway weirs on flow and sediment patterns in meandering river. PhD thesis, water science engineering faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz.
- Hemmati M, Ghomeshi M, Kashfipour M, Shafai-Bejestan M and Lanzoni S, 2012. Experimental investigation of the effects of angle and length of bendway weirs on scouring and sedimentation in a meander river. *Journal of American Science* 8(9):912-917.
- Hemmati M, Ghomeshi M, Ahmadi H and Lanzoni S, 2015. Scour depth around flat and sloped crest bendway weirs: a laboratory study. *International Journal of River Basin Management* 14(1): 83-93.
- Jarrahzade F and Shafai-Bejestan M, 2011. Comparison of maximum scour depth in bank line and nose of submerged weirs in a sharp bend. *Scientific Research and Essays* 6(5):1071-1076.
- Lagasse PF, Clopper PE, Pagan-Ortiz JE, Zeverbergen LW, Arneson LA, Schall JD and Girard LG, 2009. Bridge scour and stream stability countermeasures. 3rd ed., vols. 1 and 2, 64 HEC-23, FHWA-NHI-09-111, Federal Highway Administration, U. S. Dept. of Transportation, Washington, D. C.
- Liaghat A, Mohammadi K, and Rahmanshahi M, 2014. 3D investigation of flow hydraulic in U shape meander bends with constant, decreasing and increasing width. *Journal of River Engineering* 2(3): 12-23.
- Maghrebi M and Ghizil Soflou A, 2013. 3D simulation of flow pattern and sediment transport in two bends with 180 degrees by Mike3. 9th International Conference of River Engineering, 22-24 Jan, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
- Mehrdar L, Hemmati M and Yasi M, 2016. Experimental investigation of the effect of height and crest slope of bendway weirs on flow pattern in a 90-degree bend. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 47(3):505-516.
- Naderkhanlou V, 2013. 3D simulation of hydrodynamic and salinity in Gotvand-Olya dam. M.Sc. thesis, faculty agriculture of Tarbiat Modares University
- Slajaghe A, Salehi-Neishabouri AA, Ahmadi H, Mahdavi M and Ghodsian M, 2005. Experimental investigation of three dimensional flow pattern in river bends. *Iranian Journal of Natural Resources* 58(1): 25-33.
- Wang SSY and Yafei J, 2005. Simulation of flows around a submerged weir in channel bendways. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 131(8): 682-693.