



Simulation of Sediment Transporting Flow at River Intakes of a Diversion Dam in a Channel Bend

Mehran Ashnavar¹ | Mehdi Yasi²

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: ashna.mehran@gmail.com
2. Corresponding author, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: m.yasi@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 5 October 2022
Received in revised form
23 January 2023
Accepted 25 March 2023
Published online 12 October 2023

ABSTRACT

Introduction: There is a number of evidence for the construction of weirs and diversion dams in river bends, and sometimes building water intakes on both sides of the river bend are needed. However, this encounters problems in terms of asymmetry of flow distribution into the intake structures. Most recent studies have been conducted for clear water flow conditions. The main purpose of this study was to investigate the uniformity of sediment transporting flows into bilateral intakes on both sides of a spillway in a channel bend. FLOW-3D numerical model was used to test the effects of intake angle, intake sill and sluice way on the uniformity of flow and sediment load entering the intakes and the distribution of sediment deposits in the intake area. The numerical model was calibrated and confirmed based on the information of the physical model for clear water flow conditions. Then the numerical model for sediment transport flow was validated and adjusted and it was implemented for seven scenarios of the arrangement of the weir and its related structures in the channel bend. The results showed that the most of the sediment deposition is towards the inner-bend intake. Without the intake sill and sluiceway, the ratio of outer to inner intake for five intake angles of zero, 30, 50, 60 and 90 degrees is about 2.1, 3.8, 5.0, 4.17 and 2.4, respectively. Using a 90-degree intake is more efficient due to less sediment entry and uniform inflow distribution to both bilateral intakes. Inclusion of sill and sluiceway in the intake system results in the reduction of the ratio of outer to inner intake to be reduced to 1.1 and 1.3 for the two intake angles of zero and 90 degrees, respectively. The results show that it is necessary to use the intake sill and the sluice way to control the sediments entering to the intakes, especially in inner intake.

Methodology: In this study, FLOW-3D numerical model was used to simulate sediment transport flow into bilateral intakes on both sides of a diversion dam in a channel bend. The geometric conditions of modeling are considered based on the laboratory study (Farhadi-Bansuleh and Yasi, 2019). The laboratory channel is a rectangular channel with a 90° bend. Numerical model based on physical model information (Farhadi-Bansuleh and Yasi, 2019) for clear water flow conditions, calibration and validation; and validated and adjusted for sediment transport flow. In reality, dewatering from diversion dams takes place at different angles, therefore, in this research, an attempt has been made to investigate the effect of different intake angles on the uniformity of water distribution and the entry of sediments into intakes, so there are seven scenarios to test the effects of intake angles, intake sill, and sluice way, in checking the flow pattern and deposition of sediments in the area of intakes, and the distribution of flow and sediment load to outer and inner intakes.

Results and Discussion: In the modeling of sediment transport flow, the results show that the uniformity of water distribution is better in intakes with a zero degree angle. So that the rate of sediment into the outer and inner intakes is 9 and 14 times higher than the 90° intakes, respectively. The rate of sediment into 90° intakes is 6, 4.4 and 3 times lower for the outer intake, and 18, 17 and 15 times lower for the inner intake than at 30, 50 and 60 degrees. Inclusion of sill and sluice way in the intake system results, the uniformity of water distribution in intakes with zero and 90 degrees angle is improved by 47 and 45 percent, respectively. In the zero-degree intakes, the sediment load into the outer intake does not change significantly compared to the condition without an intake sill and sluice way; but this amount decreases by about 65 percent in the inner intake. These results are also true for the 90 degree intakes, so that the sediments load into the outer intake does not change, but in the inner intake it decreases by about 71 percent compared to the condition without intake sill and sluice way.

Conclusion: The results showed that the most of the sediment deposition is towards the inner-bend intake. Without the intake sill and sluiceway, the ratio of outer to inner intake for five intake angles of zero, 30, 50, 60 and 90 degrees is about 2.1, 3.8, 5.0, 4.17 and 2.4, respectively. Using a 90-degree intake is more efficient due to less sediment entry and uniform inflow distribution to both bilateral intakes. Inclusion of sill and sluiceway in the intake system results in the reduction of the ratio of outer to inner intake to be reduced to 1.1 and 1.3 for the two intake angles of zero and 90 degrees, respectively.

Keywords:
Channel bend
FLOW-3D model
Intake
Sediment transport
Sluice way

Cite this article: Ashnavar, M., & Yasi, M. (2023). Simulation of Sediment Transporting Flow at River Intakes of a Diversion Dam in a Channel Bend. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13 (3), 611-628.
DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.349517.1022>





شبیه‌سازی جریان آب با انتقال رسوب در آبگیرهای سد انحرافی در پیچ یک آبراهه

مهران آشناور^۱ | مهدی یاسی^۲

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: ashna.mehran@gmail.com
 ۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: m.yasi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۰۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۲۰

شواهد زیادی از ساخت سرریز و سد انحرافی در محدوده پیچ رودخانه وجود دارد. گاهی نیز ساخت سامانه آبگیر در دو طرف پیچ آبراهه ضروری است. به هرحال، احداث سرریزها در محدوده پیچ رودخانه و رسوب‌گذاری در بالادست آن‌ها، مشکلاتی را در غیریکنواختی توزیع جریان و انحراف آب به آبگیرهای طرفین رودخانه پدید می‌آورد. بیش‌تر مطالعات اخیر برای شرایط جریان آب صاف انجام شده است. هدف اصلی در این پژوهش، بررسی توزیع بده جریان ورودی به آبگیرهای دو طرف سرریز در شرایط جریان آب با انتقال رسوب در پیچ یک آبراهه بوده است. از مدل عددی FLOW-3D برای آزمون اثرات زاویه آبگیری، آستانه آبگیر و مجرای تخلیه رسوب بر یکنواختی بده جریان و بار رسوبی ورودی به آبگیرها و توزیع نهستگی رسوبات در ناحیه آبگیرها استفاده گردید. مدل عددی براساس اطلاعات مدل فیزیکی برای شرایط جریان آب صاف واسنجی و تأیید گردید. سپس مدل عددی برای جریان آب با انتقال رسوب اعتبارسنجی و تنظیم شد، و برای هفت سناریو از چیدمان سرریز و سازه‌های وابسته آن در پیچ آبراهه اجرا گردید. نتایج نشان داد که بیش‌ترین رسوب‌گذاری به سمت آبگیر پیچ داخلی است. در شرایط آبگیر بدون آستانه و بدون مجرای تخلیه رسوب، نسبت بده آبگیر خارجی به داخلی برای پنج زاویه آبگیر صفر، ۳۰، ۵۰، ۶۰ و ۹۰ درجه به‌ترتیب برابر ۲/۱، ۳/۸، ۵/۰، ۴/۲ و ۲/۴ است. استفاده از آبگیر با زاویه ۹۰ درجه به‌دلیل ورود کم‌تر رسوبات و یکنواختی توزیع بده جریان به آبگیرهای دو طرف، کارایی بهتری دارد. در شرایط با آستانه و مجرای تخلیه رسوب، نسبت بده آبگیر خارجی به داخلی برای دو زاویه آبگیر صفر و ۹۰ درجه به‌ترتیب به ۱/۱ و ۱/۳ کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از آستانه و مجرای تخلیه رسوب برای کنترل رسوبات ورودی به آبگیرها، به‌ویژه در آبگیری از پیچ داخلی ضرورت دارد.

کلیدواژه‌ها:

آبگیر

انتقال رسوب

پیچ آبراهه

مجرای تخلیه رسوب

مدل FLOW-3

استناد: آشناور، مهران؛ و یاسی، مهدی (۱۴۰۲). شبیه‌سازی جریان آب با انتقال رسوب در آبگیرهای سد انحرافی در پیچ یک آبراهه. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۳ (۳)، ۶۱۱-۶۲۸. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.349517.1022>



۱- مقدمه

رودخانه‌ها برای استفاده‌های متفاوت دارای اهمیت است. با توجه به اهمیت رودخانه‌ها به‌عنوان یکی از منابع مهم تأمین آب، آبگیری از رودخانه و انشعاب و انحراف جریان از چالش‌های مهندسی هیدرولیک رودخانه است. جریان در یک انشعاب آبگیری به‌طور ذاتی یک جریان سه‌بعدی است و از پیچیدگی‌های خاص خود برخوردار است. تحلیل جریان آب و انتقال رسوب در رودخانه‌ها در طرح‌های ساخت سازه‌های آبگیر، سدهای انحرافی و تنظیمی و ساماندهی و مدیریت رودخانه ضروری است. آبراهه‌های طبیعی به‌ندرت مسیر مستقیم داشته و عموماً پیچانرود (با پیچ‌های معکوس و متوالی که توسط یک بازه نسبتاً مستقیم و کوتاه بیکدیگر وصل می‌گردند) هستند (Yasi, 1989). بهترین موقعیت برای احداث سازه‌های آبی (نظیر سرریز یا بند انحرافی، پل- بند، کف بند)، بازه مستقیم رودخانه (یا بازه مستقیم حد فاصل دو پیچ معکوس در رودخانه‌های پیچانرودی) است. براساس نتایج تجربی، پیچ بر خصوصیات جریان بالادست و پایین‌دست‌پایین دست (تا حداقل به فاصله دو برابر عرض رودخانه: 2B) تأثیر دارد. بنابراین، احداث سازه‌های عرضی در فاصله بیش از 2B از بالا یا پایین پیچ مناسب تر است (WGWM, 1991). Valimohammadi and Yasi (2016)، به این نتیجه رسیدند که بهترین موقعیت سرریز در مقطع زاویه‌ای ۳۰ درجه و پس از آن به‌ترتیب در مقاطع زاویه‌ای ۶۰ و ۴۵ درجه از ابتدای پیچ است. گاهی پایداری بستر و تکیه‌گاه‌ها و نیز موقعیت منحصر به فرد آبگیری به دو سمت رودخانه، عامل اصلی در جانمایی سد انحرافی در محدوده پیچ رودخانه بوده است. در محدوده پیچ، حمله جریان و فرسایش در سمت پیچ خارجی و رسوب‌گذاری به سمت پیچ داخلی است. براساس دانش کنونی، نیروی گریز از مرکز سبب هدایت خطوط جریان اولیه به سوی پیچ خارجی گردیده و باعث افزایش تراز سطح آب در نوار پیچ خارجی می‌شود. از این‌رو، اختلاف فشار بین پیچ خارجی و داخلی افزایش یافته و جریان از سمت پیچ خارجی به سمت پیچ داخلی حرکت نموده و جریان‌های ثانویه و گردابه‌ای را ایجاد می‌نماید. بازگشت جریان با سرعت کم‌تر از بستر پیچ داخلی به سوی پیچ خارجی، سبب ته‌نشست رسوبات در ناحیه پیچ داخلی آبراهه می‌گردد (Henderson, 1996). پژوهش‌های زیادی در زمینه روش‌های کنترل جریان و رسوب در آبگیرهای ساخته شده در پیچ آبراهه‌ها انجام شده و توصیه‌های طراحی مختلفی نیز ارائه گردیده است، اما پیچیدگی انتقال جریان و رسوب در محدوده دهانه آبگیر، تأثیر رسوبات ورودی بر روی شرایط جریان در دهانه آبگیر و تغییر در ریخت‌شناسی بستر در آبراهه اصلی و کانال آبگیر در پی رسوب‌گذاری سبب گشته است که پژوهش در این زمینه همچنان ادامه یابد. به‌طور نمونه Barbhuiya and Talukdar (2010) جریان متلاطم سه‌بعدی و فرسایش در پیچ ۹۰ درجه را به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. برای بستر از مواد غیرچسبنده، غیریکنواخت و با قطر متوسط ۰/۳ میلی‌متر استفاده کردند. مؤلفه‌های سرعت متوسط زمانی، شدت تلاطم و تنش‌های رینولدز بر روی یک بستر فرسایش‌یافته را با استفاده از ADV در مقاطع مختلف اندازه‌گیری کردند و به این نتایج رسیدند که حداکثر فرسایش در پیچ ۹۰ درجه در مقطع ۳۰ درجه، نزدیک دیوار خارجی است و مقدار حداکثر عمق فرسایش تقریباً ۰/۱۷ عرض فلوم به‌دست آمده است و بیش‌ترین مقدار رسوب‌گذاری حدود مقطع ۳۰ درجه نزدیک دیواره داخلی اتفاق می‌افتد و بیش‌ترین مقدار آن ۰/۰۷ عرض فلوم است. Dehghani (2006) به بررسی آزمایشگاهی تغییرات بستر در پیچ ۱۸۰ درجه، همراه با آبگیر پرداختند. آن‌ها نواحی مورد بررسی را به سه قسمت نواحی قبل از آبگیر، دهانه آبگیر و بعد از آبگیر تقسیم نمودند و به این نتیجه رسیدند که به‌علت وجود جریان ثانویه و انتقال رسوبات از ساحل خارجی به ساحل داخلی، سواحل خارجی پیچ رودخانه‌ها مناطق مناسبی برای آبگیری می‌باشند. پشته رسوبی و چاله فرسایشی در نیمه اول در حالتی که آبگیری از پیچ خارجی وجود داشته

باشد، تشکیل می‌شود. مطالعات تکمیلی با استفاده از مدل‌های ریاضی توسط Brethour and Burnham (2010) با مدل FLOW-3D، Behbahani (2013) با مدل FLUENT و Asiae and Montaseri (2014) با مدل SSIM2 گزارش شده است.

در منابع موجود، پیشینه مطالعات جریان در ساختگاه سرریزهای سد انحرافی یا تنظیمی در محدوده پیچ آبراهه‌ها بسیار اندک است. مطالعات تجربی در زمینه ارزیابی توزیع عرضی جریان آب صاف در پیچ آبراهه و بالادست سرریز لبه تیز توسط Abdollahpour *et al.* (2013)، برای سرریز لبه پهن توسط Valimohammadi and Yasi (2016)، برای سرریز کرامپ توسط Hosseini mobarra and Yasi (2016) صورت گرفته است. Gholami Alam (1988) پارامترهای مؤثر در طراحی مجرای تخلیه رسوب سدهای انحرافی را در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۲ متر و عرض ۷۵ سانتی‌متر و عمق ۸۰ سانتی‌متر، شیب کف صفر موردبررسی قرار داد. در این مطالعه از ذرات یکنواخت با قطر متوسط یک میلی‌متر استفاده شده بود. در این مطالعه روند آب‌شویی بستر در ناحیه بالادست مجرای تخلیه رسوب را در شرایط بدون آبگیر و با جریان آب صاف بررسی گردید. نتایج نشان داد که برای مقادیر نسبت بازشدگی درپچه به عرض درپچه کم‌تر از $0/6$ ، راندمان تخلیه رسوب افزایش می‌یابد. Safarzade *et al.* (2019) به مدل‌سازی عددی و فیزیکی رسوب‌زدایی از مخزن سد میل و مغان پرداختند. هدف از این پژوهش ساماندهی ناحیه بالادست سد به منظور اصلاح الگوی جریان و هدایت مناسب جریان بین دیواره‌های هادی برای حذف نواحی نامطلوب نظیر ناحیه چرخشی و جلوگیری از حمله جریان به ساحل مقابل و همچنین بررسی و تعیین مناسب حالت رسوب‌شویی هیدرولیکی بین دیواره‌های هادی سد بود. در این پژوهش از دو مدل iRIC-Nays2DH و FLOW-3D استفاده کردند و در نهایت با بررسی نتایج حاصل از دو مدل عددی، مدل iRIC-Nays2DH را به عنوان مدل منتخب برگزیدند.

Sisinggih *et al.* (2021) برای تکمیل مطالعه آزمایشگاهی خود به شبیه‌سازی جریان با انتقال رسوب در یک پیچ تند رودخانه با استفاده از مدل عددی سه‌بعدی NaysCUBE پرداختند. آن‌ها در مطالعه آزمایشگاهی خود فقط شرایط هیدرولیکی جریان را موردبررسی قرار دادند و برای بررسی جریان با انتقال رسوب از مدل عددی استفاده کردند. ایشان نتیجه گرفتند که با وجود محدودیت‌های مدل RANS، مدل عددی NaysCUBE به‌خوبی الگوی جریان و پدیده تلاطم را در یک کانال بستر متحرک با انحنای شدید شبیه‌سازی می‌کند. آن‌ها نتایج خود را در مقایسه با یک آزمایش فیزیکی قبلی مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که تنظیم داده‌های ریخت‌شناسی رودخانه برای رابطه MPM به‌عنوان معادله انتقال رسوب کافی نیست بنابراین پیشنهاد آن‌ها استفاده از روابط دیگر انتقال رسوب و کالیبراسیون مجدد مدل برای شبیه‌سازی جریان با انتقال رسوب بود.

Farhadi-Bansuleh and Yasi (2019) به بررسی کارکرد سرریزهای لبه پهن با تاج افقی و شیب‌دار در پیچ آبراهه، با هدف یکنواختی بده جریان ورودی به آبگیرهای ساحل چپ و راست، در شرایط جریان آب صاف (بستر پایدار و بدون انتقال رسوب) پرداختند. شرایط جریان ورودی به آبگیرهای طرفین با استفاده از مدل آزمایشگاهی و مدل ریاضی FLOW-3D بررسی و مقایسه گردیده است. نتایج نشان داد که بهترین شرایط، استقرار سرریز در موقعیت 60° درجه در میانه پیچ با نسبت $1:10$ عرض آبگیر به عرض آبراهه، همراه با آبپایه و با زاویه آبگیری صفر درجه می‌باشد. نتایج همچنین نشان داد که برای جریان آب صاف، بده ورودی به آبگیرهای پیچ داخلی و خارجی تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای ندارند. کم‌ترین نسبت یکنواختی بده آبگیر داخلی به خارجی در سرریز با تاج افقی $0/92$ بوده است. مقایسه نتایج نشان داد که مدل FLOW-3D قابلیت خوبی در شبیه‌سازی جریان در پیچ آبراهه همراه با سرریز را دارد.

در مطالعات تجربی *Mehrdar et al.* (2021) اثربخشی شیب تاج سرریز بر یکنواختی توزیع بده جریان در آبگیرهای طرفین یک سرریز لبه پهن در یک پیچ ۹۰ درجه (با شعاع انحنای نسبی دو)، در شرایط جریان آب صاف با مدل آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار داد. سرریز در موقعیت ۶۰ درجه از ابتدای پیچ و دو آبگیر در بدنه سرریز و در کناره پیچ داخلی و خارجی جانمایی گردید. نتایج نشان داد که با بودن سرریز، بده بیش‌تری نسبت به حالت بدون سرریز وارد دو آبگیر می‌شود. سرریز شیب‌دار در یکنواختی توزیع بده عرضی جریان در بالادست سرریز اثر قابل‌توجهی نداشت، ولی در افزایش یکنواختی بده ورودی به دو آبگیر مؤثر بوده است. متوسط نسبت بده آبگیر در دیواره خارجی به دیواره داخلی در سه حالت بدون سرریز، با سرریز افقی و با سرریز شیب‌دار به ترتیب ۴/۳، ۲/۱ و ۱/۱ بوده است. متوسط این نسبت در سرریز شیب‌دار به سرریز افقی برابر ۱/۴ بوده، که نشانگر ۴۰ درصد افزایش یکنواختی با شیب‌دار کردن تاج سرریز است. در تکمیل مطالعات، *Mehrdar et al.* (2021) اثر سه انحنای پیچ‌های ملایم، متوسط و تند (با شعاع انحنای نسبی ۳/۳، ۲/۰۵ و ۰/۸۴) بر نسبت بده ورودی به آبگیرهای دو طرف سرریز در پیچ یک آبراهه، در شرایط جریان آب صاف به صورت تجربی بررسی گردید. سرریز لبه پهن با تاج افقی و شیب‌دار، در موقعیت ۶۰ درجه از ابتدای پیچ در نظر گرفته شد. نتایج پژوهش نشان داد که استقرار سرریز در پیچ ملایم عملکرد بهتری از نظر یکنواختی آبگیری داشته است. به طور متوسط بده ورودی به آبگیرهای دو طرف سرریز، در سه پیچ با سرریز شیب‌دار به ترتیب هشت، پنج و نه درصد نسبت به سرریز با تاج افقی افزایش یافته است. نسبت بده آبگیر خارجی به داخلی در سرریز با تاج شیب‌دار، در سه پیچ ملایم، متوسط و تند به ترتیب ۱/۰، ۱/۱ و ۱/۱۲ بوده است.

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که در زمینه مدل‌سازی فیزیکی و شبیه‌سازی جریان آب با انتقال رسوب در محدوده اثر ساخت سدهای انحرافی در پیچ آبراهه‌ها دستاورد قابل‌توجهی گزارش نشده است. در این مطالعات، مجموعه سد انحرافی همراه با سازه‌های وابسته آن (آبگیرها با زوایای مختلف، آستانه آبگیر و مجرای تخلیه رسوب) در جریان با انتقال رسوب دیده نشده است. از این رو، هدف اصلی در این پژوهش، ارزیابی یکنواختی توزیع جریان آب با انتقال رسوب ورودی به دهانه‌های آبگیر در دو طرف یک سد انحرافی در پیچ یک آبراهه و اثر بخشی زاویه آبگیرها، آستانه آبگیر و مجرای تخلیه رسوب با استفاده از مدل عددی بوده است.

۲- مواد و روش‌ها

برای شبیه‌سازی جریان آب با انتقال رسوب در پیچ یک آبراهه از مدل عددی FLOW-3D استفاده شد. این مدل توسط شرکت Flow Science در سال ۱۹۹۸ توسعه پیدا کرده است. برای مدل‌کردن هندسه مرزهای جامد جریان از روش سطح‌بندی FAVOR و برای شبیه‌سازی جریان با سطح آزاد از روش حجم سیال VOF استفاده می‌گردد. این مدل به صورت هم‌زمان، معادلات سه‌بعدی پیوستگی و ناویر استوکس را (به صورت روابط (۱) و (۲)) حل می‌کند. همچنین روندنمای گام به گام این پژوهش در شکل (۱) نشان داده شده است.

$$\frac{\partial}{\partial x} (u_i A_i) = 0 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + G_i + f_i \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن، u_i سرعت جریان در جهت‌های مختصات کارتزین x, y, z و $A_{i,j}$ کسری از سطح برای جریان که در جهت‌های x, y, z باز هستند؛ P فشار؛ G_i شتاب حجمی؛ f_i ترم‌های لزجت و V_f نسبت کسر حجمی فضای باز به جریان است.

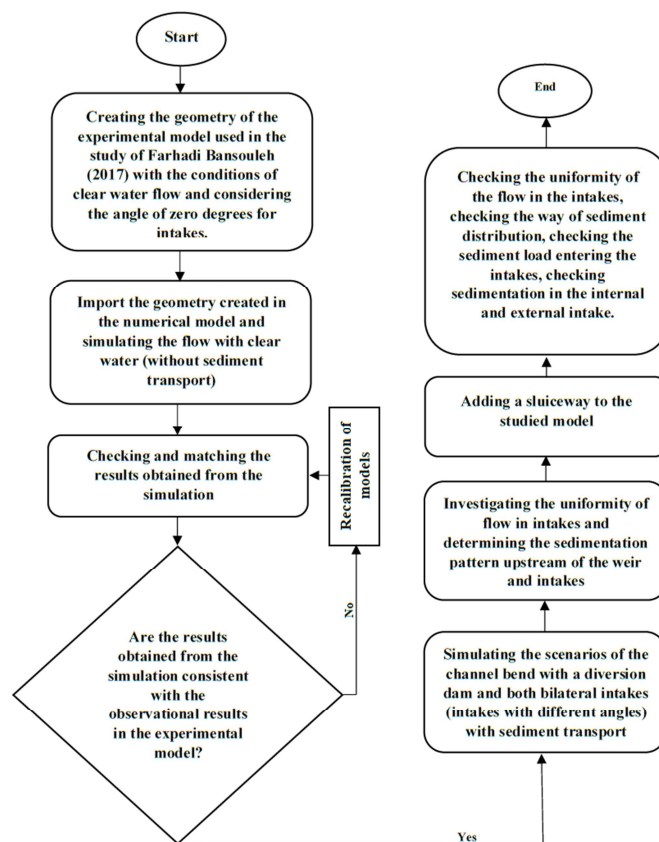


Figure 1. Step-by-step flowchart of the research

۲-۱- مدل جریان آب صاف

برای اطمینان از ساخت و تنظیم مدل عددی، ابتدا مدل‌سازی در شرایط جریان آب صاف انجام یافت. شرایط هندسی مدل‌سازی براساس مطالعه آزمایشگاهی Farhadi-Bansuleh and Yasi (2019) در نظر گرفته شده است. کانال آزمایشگاهی، یک کانال مستطیلی با پیچ ۹۰ درجه می‌باشد. این کانال از یک بازه مستقیم به طول نه متر در بالادست و یک بازه مستقیم در پایین دست به طول شش متر تشکیل شده است که این دو بازه مستقیم توسط یک پیچ ۹۰ درجه با شعاع انحنای مرکزی سه متر به هم متصل شده‌اند (شکل ۲). در ابتدا هنده آبراهه در محیط AutoCAD طراحی و برای فراخوانی به مدل FLOW-3D تهیه گردید.

برای صحت‌سنجی مدل عددی، ابتدا شبیه‌سازی جریان آب صاف در پیچ آبراهه و آبیگری با زاویه صفر درجه و با جانمایی سرریز در موقعیت ۶۰ درجه از ابتدای پیچ (همسان با شرایط مدل فیزیکی) انجام پذیرفت.

در روند بهینه‌سازی مدل، مقادیر شبکه‌بندی مختلفی مورد آزمون قرار گرفت که در نهایت برای بالادست پیچ، پیچ و پایین دست پیچ به ترتیب مقادیر ۰/۰۳، ۰/۰۲ و ۰/۰۲ متر و برای شرط مرزی ورودی، بده ثابت برای شرط مرزی خروجی، فشار ثابت و برای بقیه مرزها، شرط تقارن در نظر گرفته شدند. در مدل FLOW-3D پنج مدل تلاطم ارائه شده است؛ ۱- طول اختلاط پراتنل، ۲- مدل یک معادله‌ای، ۳- مدل دو معادله‌ای k-ε، ۴- مدل RNG و ۵- مدل شبیه‌سازی گردابه‌ای بزرگ (LES). از میان این مدل‌ها، مدل RNG توسط Brethour and Burnham (2010) به عنوان بهترین مدل تلاطمی در شبیه‌سازی جریان در پیچ آبراهه گزارش شده است. مدل k-ε برای شبیه‌سازی جریان در پیچ با مدل FLUENT توسط

Ayase (2011) بهتر بوده است. نتایج مدل‌سازی Salamat Ravandi (2012) نشان داد که در شبیه‌سازی جریان از روی سرریزها در بازه پیچ ۹۰ درجه با مدل FLOW-3D، هر دو مدل تلاطمی RNG و $k-\varepsilon$ نتایج تقریباً همسانی داشته‌اند. از آنجا که پژوهش حاضر در دنباله مدل‌سازی Salamat Ravandi (2012) و Yasi and Salamat Ravandi (2022)، اما برای شرایط جریان آب با انتقال رسوب بوده است، هم‌چنان از مدل تلاطم RNG استفاده گردید.

پلان و مقاطع شاهد کانال آزمایشگاهی Farhadi-Bansuleh and Yasi (2019) در شکل (۲) نمایش داده شده است. نتایج تراز سطح آب در مقاطع شاهد، برای آبگیر با زاویه صفر درجه در مدل عددی برداشت و با نتایج آزمایشگاهی ایشان مقایسه و ارزیابی شد. نتایج مقایسه در جدول (۱) ارائه شده است. بعد از محاسبه خطا، از قدرمطلق مقادیر آن متوسط گرفته شده و نتایج مربوط به متوسط مقادیر خطا در هر مقطع عرضی و هم‌چنین جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطا مطلق (MAE) و ضریب تعیین (R2) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل عددی توانایی خوبی در شبیه‌سازی جریان در پیچ همراه با آبگیر در بالادست سرریز را داشته است. مطابق جدول (۱)، ضریب همبستگی R2 در دامنه (۰/۸۹-۰/۹۳) و دو شاخص RMSE و MAE نزدیک به صفر است، از اینرو خطای برآورد مدل کم و قابل قبول بوده است.

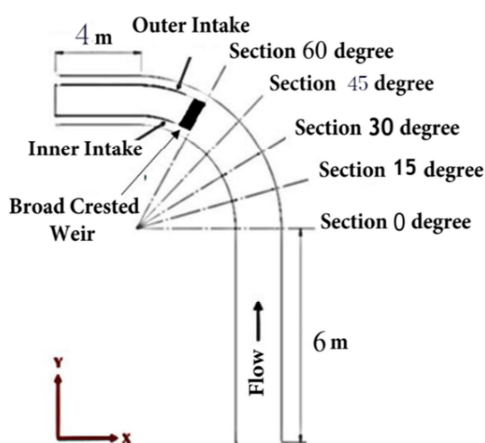


Figure 2. Experimental arrangement of the curved flume with a broad-crested weir and intakes, and measuring cross sections (Farhadi-Bansuleh and Yasi, 2019)

Table 1. Error values of water depth estimation from the FLOW-3D model (Farhadi-Bansuleh and Yasi, 2019)

Weir location	Mesh grid (m)			Discharge (l/s)	Section at bend (°)	Correlation (R ²)	Error Index (MAE)	Error Index (RMSE)	Range of error (%)
	Before bend	In bend	After bend						
60 degrees from the beginning of the channel bend	0.03	0.02	0.02	75	0	0.89	0.004	0.004	1.7
					15	0.93	0.002	0.002	1
					30	0.92	0.003	0.003	1.3
					45	0.92	0.002	0.002	1.1

۲-۲- مدل جریان آب با انتقال رسوب

بخش انتقال رسوب (یا مدول آب‌شستگی) در مدل FLOW-3D به برآورد مقادیر فرسایش، ته‌نشینی و پخش رسوبات اختصاص دارد. مدل آب‌شستگی از دو نوع غلظت بار رسوبی (۱- رسوبات معلق، ۲- رسوبات بستر) استفاده می‌کند. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده توسط Brethour and Burnham (2010) نشان می‌دهد که عمق حفره آب‌شستگی محاسبه شده در حالت تعادلی با نتایج تجربی مطابقت خوبی داشته است.

در این پژوهش، با کمک روش آزمون و خطا برای تأمین شرایط آستانه حرکت مواد رسوبی در هندسه فلوم- سرریز- سازه‌های وابسته آن مواد بستری از نوع ماسه با دانه‌بندی یکنواخت با اندازه متوسط یک میلی‌متر و با چگالی جرمی ۲/۶۵ انتخاب گردید و به مدل عددی معرفی شد. از آنجا که تخلخل بستر ماسه‌ای به‌طور متوسط ۲۵ درصد است، مقدار تراکم بستر رسوب در مدل معادل ۰/۷۵ در نظر گرفته شد (Flow Science, 2008). همچنین، نوع مواد رسوبی ورودی در بالادست (بار بستری) از جنس و اندازه مواد بستری انتخاب گردیده است. بخش شبیه‌ساز ته‌نشینی مدل، ذرات رسوب را به‌صورت کروی و سرعت آن‌ها را کم فرض می‌کند. براساس پیش‌فرض و توصیه بخش راهنمای مدل، مقادیر مربوط به ضریب ریچاردسون- زکی، ضریب انتشار ملکولی و ضریب انتشار تلاطم به‌ترتیب یک، صفر و صفر در نظر گرفته شدند (Flow Science, 2008).

در بخش محاسبات انتقال رسوب مدل، با توجه به نوع، اندازه و دانه‌بندی مواد بستر ماسه‌ای، از معادلات Van Rijn (1993) استفاده شد که به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

$$q_b = 0.005 \rho_s \bar{u}_v D \left[\frac{\bar{u}_v - \bar{u}_{vc}}{(S_g - 1)g d^{0.5}} \right]^{2.4} \left(\frac{d}{D} \right)^{1.2} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$\bar{u}_{vc} = \begin{cases} 0.19 d^{0.1} \log \left(\frac{12D}{3d_{90}} \right) & 0.0001 \text{ m} \leq d \leq 0.0005 \text{ m} \\ 8.50 d^{0.6} \log \left(\frac{12D}{3d_{90}} \right) & 0.0005 \text{ m} \leq d \leq 0.002 \text{ m} \end{cases} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$\tau_{*c} = \begin{cases} 0.24 d_{gr}^{-1} & d_{gr} \leq 4 \\ 0.14 d_{gr}^{-0.64} & 4 < d_{gr} \leq 10 \\ 0.04 d_{gr}^{-0.1} & 10 < d_{gr} \leq 20 \\ 0.013 d_{gr}^{0.29} & 20 < d_{gr} \leq 150 \end{cases} \quad \text{رابطه ۵}$$

در روابط بالا، \bar{u}_v متوسط عمقی سرعت، \bar{u}_{vc} متوسط عمقی سرعت بحرانی براساس منحنی شیلدز، q_b دبی جرمی رسوب در واحد عرض و ρ_s چگالی رسوب است. عدد شیلدز بحرانی (τ_{*c}) با استفاده از مجموعه روابط (۵) برابر با مقدار ۰/۰۳۴ محاسبه گردید و به مدل عددی معرفی شد. با توجه به محاسبات، جریان در ناحیه انتقالی نمودار شیلدز قرار دارد. در بخش انتقال رسوب مدل، ضریب ته‌نشینی ذرات توسط رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$D_f = \frac{SCRDIA^2 \cdot RHOF}{18\mu} \quad \text{رابطه ۶}$$

در رابطه بالا، SCRDI A میانگین قطر ذرات؛ RHOF چگالی جرمی سیال و μ گرانیوی دینامیکی سیال است. سرعت برخاست ذرات، بر پایه مدل‌های انتقال بار بستر از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Lift velocity} = SCRALP \sqrt{\frac{\tau - \tau_c}{P}} \quad \text{رابطه ۷}$$

در این معادله، τ مقدار تنش برشی در سطح مشترک؛ ρ چگالی جرمی ماکروسکوپی سیال؛ SCRALP پارامتر تجربی برای تنظیم شدت فرسایش در هر کاربرد خاص است. τ_c تنش برشی بحرانی است. وقتی که تنش برشی بیش‌تر از این مقدار است، نیروهایی که موجب فرسایش ذرات می‌شوند از مقدار نیروهایی که مانع بلندشدن ذرات می‌شود، بزرگ‌تر می‌شود، بنابراین فرسایش اتفاق می‌افتد. تنش برشی بحرانی با استفاده از پارامتر شیلدز بحرانی (SCR CRT) محاسبه می‌شود.

$$\tau_c = SCR CRT \cdot SCR DI A \cdot g \cdot (SCR RH O - RHOF) \quad \text{رابطه ۸}$$

در رابطه بالا، SCR CRT عدد شیلدز بحرانی؛ SCR RH O چگالی جرمی ذرات رسوب و g شتاب گرانشی است. در نبود اطلاعات تجربی از جریان آب با انتقال رسوب در محدوده اثر سرریز با سازه‌های وابسته آن، برای اطمینان از

کارایی مدل عددی، ابتدا مدل‌سازی برای بازه مستقیم آبراهه انجام یافت. شرایط هندسی مدل‌سازی براساس مدل آزمایشگاهی (Farhadi-Bansuleh and Yasi, 2019)، اما با راستای مستقیم فلوم در نظر گرفته شد. از دانش هیدرولیکی برای اعتبارسنجی مدل استفاده گردید، تا شرایط موردانتظار زیر توسط مدل عددی برآورده شود:

۱- در شرایط مرزی بالا و پایین‌دستپایین‌دست: بده جریان ورودی برابر با بده جریان خروجی باشد؛

۲- در شرایط مرزی بالا و پایین‌دستپایین‌دست: بده رسوب ورودی برابر با بده رسوب خروجی باشد؛

۳- تقارن الگوی جریان در عرض مقطع کنترل بالادست سرریز رخ دهد؛

۴- تقارن رسوب‌گذاری در عرض مقطع کنترل بالادست سرریز رخ دهد؛

۵- توسعه ته‌نشست رسوبات تا تاج سرریز (سرریز به‌صورت آبشار عمل کند)؛

۶- تعادل دینامیک بستر بالادست سرریز برقرار گردد.

در مدل‌سازی جریان آب با انتقال رسوب، تعداد نه سناریو برای شبیه‌سازی جریان با انتقال رسوب در آبراهه مستقیم موردآزمون و بررسی قرار گرفت تا بهترین مدل تلاطمی برای جریان با انتقال رسوب تعیین گردد و در نهایت مدل تلاطمی RNG برای شبیه‌سازی انتخاب گردد. از مدل عددی اعتبارسنجی‌شده در ساختگاه سرریز در بازه مستقیم، برای شبیه‌سازی شرایط جریان آب با انتقال رسوب در پیچ آبراهه استفاده گردید.

شواهد نشان می‌دهند که با وجود توصیه‌های طراحی، آبنگیری از سدهای انحرافی با زوایای مختلفی صورت می‌پذیرد. همچنین، توصیه‌ها در خصوص ساخت سدهای انحرافی در پیچ آبراهه و تفاوت میان پیچ داخلی و خارجی، هنوز قطعی نیست. از این‌رو، در این پژوهش سعی شد که اثر زوایای مختلف آبنگیری در یکنواختی توزیع آب و ورود رسوبات به آبنگیرها در دو پیچ داخلی و پیچ خارجی بررسی گردد. بنابراین برای مدل‌سازی در پیچ آبراهه، سناریوهای مختلفی بر حسب جانمایی و هندسه آبنگیرها و شرایط جریان و انتقال رسوب موردآزمون قرار گرفت. شکل (۴)، سیمای ساختار هندسی پیچ آبراهه و سرریز و جانمایی آبنگیرها با زاویه‌های مختلف در دو طرف پیچ را نشان می‌دهد. سرریز در موقعیت مناسب ۶۰ درجه (از ابتدای پیچ) جانمایی گردید و آبنگیری از دو طرف سرریز صورت می‌پذیرد. عرض آبنگیرها ۰/۱ متر، و ارتفاع آستانه در ورودی آبنگیرها ۰/۰۵ متر تعیین گردید. با توجه به توصیه‌های کاربردی Farhadi-Bansuleh and Yasi (2019)، آب‌پایه با کمینه ارتفاع (h_s) برابر با $h_s = 1/3d_s$ اختلاف بین حداکثر تراز سطح سیلاب و تراز بستر رودخانه) باید باشد. در مدل عددی پژوهش حاضر، ارتفاع آستانه از رابطه فوق و معادل ۰/۰۵ متر محاسبه گردید.

با آزمون و خطا، بده جریان و غلظت رسوب به‌ترتیب ۲۵۰ لیتر بر ثانیه و ۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد. با توجه به بده جریان و غلظت رسوب، عرض و ارتفاع دهانه مجرای تخلیه رسوب در طرفین سرریز به‌ترتیب ۰/۱۵ و ۰/۱ متر تعیین گردید. براساس تحلیل هم‌زمان نتایج مدل‌سازی، تعداد هفت سناریو جهت مدل‌سازی عددی جریان آب با انتقال رسوب در پیچ آبراهه موردنظر قرار گرفت، که در جدول (۲) ارائه شده‌اند. برای درستی آزمائی نتایج خروجی مدل عددی، باید از تأمین شرایط پایداری حل و انتخاب زمان اجرای مدل اطمینان حاصل نمود. بررسی نمودارهای متوسط انرژی جنبشی نسبت به زمان در شکل (۳) نشان می‌دهد که در آزمون‌های متعدد زمان مناسب برای اجرای مدل ۱۶۰۰ ثانیه انتخاب گردید.

زمان اجرای مدل FLOW-3D برای سناریوهای جدول (۲)، با رایانه‌ای با پردازنده ۱۲ هسته Core i7 نسل ۹ و حافظه ۲۴ گیگابایت برای جریان آب صاف در حدود پنج ساعت و برای جریان آب با انتقال رسوب در حدود شش روز به طول انجامید. زمان اجرا در شبیه‌سازی مربوط به جریان آب با انتقال رسوب به‌دلیل گستردگی و پیچیدگی حل معادلات رسوب تقریباً ۳۰ برابر طولانی‌تر از جریان آب صاف است.

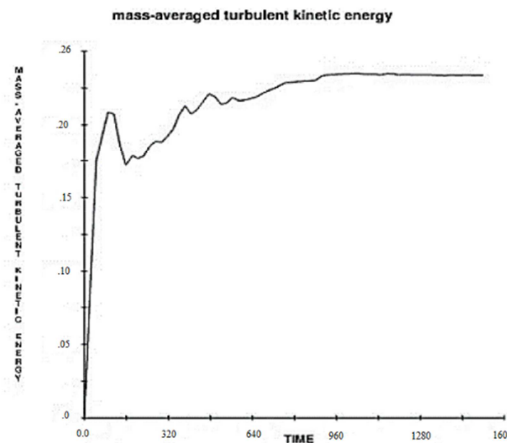


Figure 3. Graph of average kinetic energy versus time Table 2. Modeling scenarios for sediment transporting flows into bi-lateral intakes in the 90° channel bend

Table 2. ?????

Scenarios	Mesh grid (m)			Angle of intakes (°)	Intake Sill	Sluice way
	Before bend	In bend	After bend			
1	0.03	0.02	0.02	0	-	-
2	0.03	0.02	0.02	30	-	-
3	0.03	0.02	0.02	50	-	-
4	0.03	0.02	0.02	60	-	-
5	0.03	0.02	0.02	90	-	-
6	0.03	0.02	0.02	0	*	*
7	0.03	0.02	0.02	90	*	*

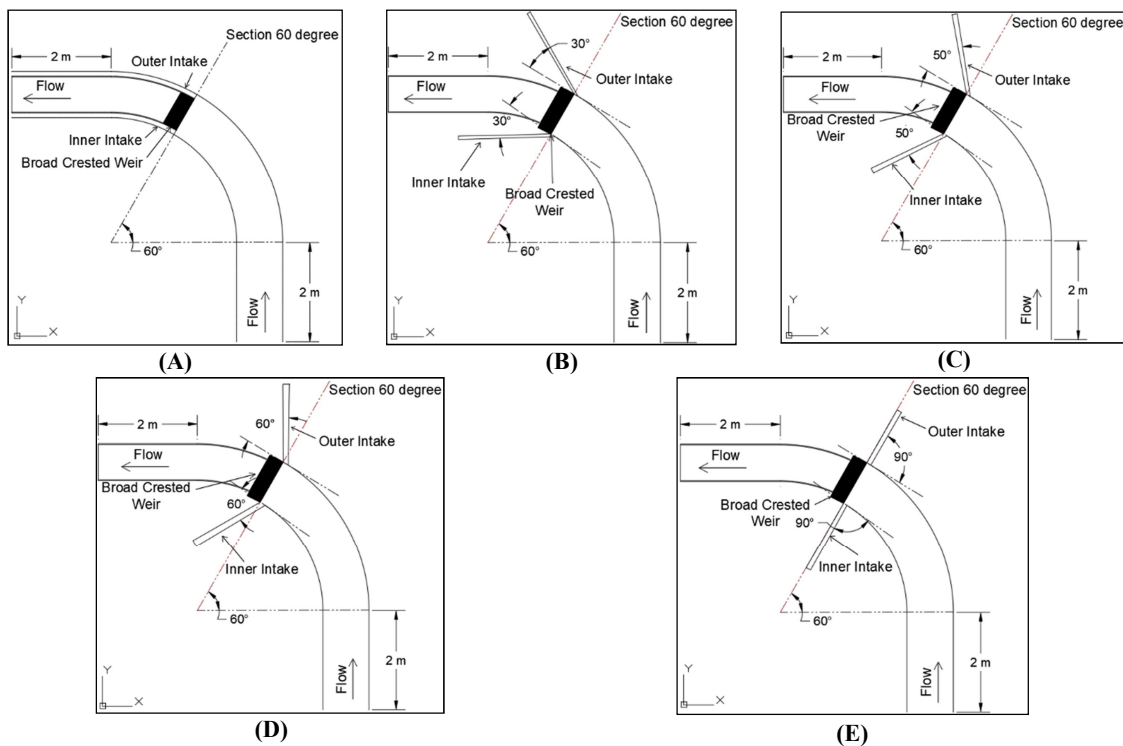


Figure 4. Plan view of the 90° channel bend with a broad-crested weir and bi-lateral intakes with different angle of intakes: (A) 0°, (B) 30°, (C) 50°, (D) 60°, and (E) 90°

۳- نتایج و بحث

مطابق جدول (۲)، مدل‌سازی جریان آب با انتقال رسوب برای پنج سناریوی اول (شامل آبگیرهای دو طرف سرریز با زاویه آبگیری صفر، ۳۰، ۵۰، ۶۰ و ۹۰ درجه، بدون آستانه آبگیر و مجرای تخلیه رسوب) اجرا گردید. براساس نتایج این پنج آزمون، دو زاویه آبگیر صفر و ۹۰ درجه به ترتیب شرایط بهتری از نظر ورود رسوبات کم‌تر و یکنواختی توزیع آب ورودی به آبگیرها را داشتند. از این‌رو، در تکمیل نتایج تنها دو سناریو برای آبگیرهای دو طرف سرریز با دو زاویه صفر و ۹۰ درجه همراه با آستانه و مجرای تخلیه رسوب در نظر گرفته شد (جدول ۲). نتایج شبیه‌سازی هفت سناریو برای توزیع بده جریان آب و بار رسوبی در آبگیرهای دو طرف سرریز (در پیچ خارجی و در پیچ داخلی) در جدول (۳) ارائه شده است. نتایج مربوط به الگوی جریان و رسوب‌گذاری در پنج سناریو اول (آبگیرها در زوایای مختلف، بدون آستانه آبگیر و مجرای تخلیه رسوب) به صورت شکل‌های (۵) تا (۹) نشان داده شده است. شکل (۵) نشان می‌دهد که در آبگیر با زاویه صفر درجه رسوبات به سمت پیچ داخلی و در نتیجه به سمت آبگیر داخلی حرکت کرده و رسوب‌گذاری در این ناحیه رخ داده است. به طوری که میانگین رسوب ورودی به آبگیر داخلی معادل ۰/۳۵ کیلوگرم بر ثانیه محاسبه شد و نرخ رسوبات ورودی به آبگیر داخلی معادل ۲۶/۵ کیلوگرم برآورد گردید. نرخ رسوب ورودی به آبگیر خارجی مقدار ۰/۰۰۱ کیلوگرم بر ثانیه و مقدار کل رسوب ورودی به این آبگیر ۰/۰۹ کیلوگرم محاسبه شد که این مقدار در مقایسه با نرخ رسوب ورودی به آبگیر داخلی مقدار بسیار ناچیزی است و نسبت کل رسوب ورودی به آبگیر خارجی نسبت به داخلی ۰/۰۰۳۴ است. همچنین نسبت بده جریان در آبگیر خارجی نسبت به داخلی مقدار ۲/۱ محاسبه شده است. این مقدار در جریان آب صاف (بدون انتقال رسوب) برابر یک (یکنواختی توزیع آب بین آبگیرها) بوده است.

Table 3. The results of the distribution of flow and sediment load in the bi-lateral intakes in different scenarios

Scenarios	Mean inflow rate to intakes (Q: m ³ /s)		Mean sediment load to intakes (Q _s :Kg/s)		Sediment to intakes (V _s :Kg)		Outer to Inner intake flow (q _{out} /q _{in})	Outer to Inner intake sediment load	
	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer		Mean	Total
1	0.010	0.021	0.350	0.001	26.5	0.090	2.10	0.002	0.003
2	0.0052	0.020	0.510	0.009	35.2	0.0612	3.85	0.017	0.001
3	0.010	0.050	0.470	0.006	33.47	0.044	5.00	0.012	0.001
4	0.0120	0.050	0.340	0.003	28.47	0.040	4.17	0.008	0.001
5	0.010	0.024	0.026	0.0014	1.90	0.010	2.40	0.005	0.005
6	0.018	0.020	0.130	0.001	9.16	0.080	1.11	0.007	0.008
7	0.016	0.021	0.007	0.0012	0.550	0.010	1.31	0.171	0.018

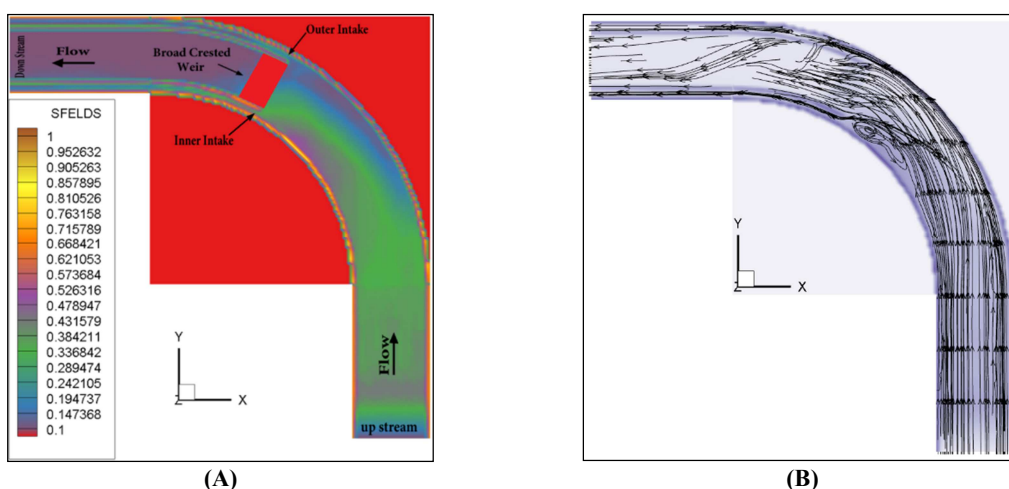


Figure 5. Plan view of modeling and simulation results for Run (1): (A) Deposition pattern and (B) Flow pattern

شکل (۶) نشان می‌دهد که در آبنگیرها با زاویه ۳۰ درجه، نسبت میانگین رسوبات در آبنگیر خارجی به داخلی ۰/۰۱۷۶، نسبت مقدار کل رسوب ورودی به آبنگیر خارجی نسبت به داخلی ۰/۰۰۱۷۴ محاسبه شده و همچنین نسبت بده جریان در آبنگیر خارجی نسبت به آبنگیر داخلی ۳/۸۵ است. در شکل (۷)، در آبنگیرها با زاویه ۵۰ درجه، نسبت میانگین رسوبات در آبنگیر خارجی به داخلی ۰/۰۱۲۷، نسبت مقدار کل رسوب ورودی به آبنگیر خارجی نسبت به داخلی ۰/۰۰۱۳۱ محاسبه شده است. همچنین نسبت بده جریان در آبنگیر خارجی نسبت به آبنگیر داخلی پنج برآورد شده است. براساس شکل (۸)، در آبنگیرها با زاویه ۶۰ درجه نسبت میانگین رسوبات در آبنگیر خارجی به داخلی ۰/۰۰۸۸، نسبت مقدار کل رسوب ورودی به آبنگیر خارجی نسبت به داخلی ۰/۰۰۱۴ محاسبه شده و نسبت بده جریان در آبنگیر خارجی نسبت به آبنگیر داخلی ۴/۱۷ می‌باشد. در شکل (۹)، در آبنگیرها با زاویه ۹۰ درجه همچنان ته‌نشست رسوبات و الگوی رسوب‌گذاری در پیچ داخلی رخ داده است، با این تفاوت که در این شبیه‌سازی تفاوت زاویه آبنگیری در نرخ رسوبات ورودی به دهانه آبنگیر مشخص است به طوری که میانگین رسوبات ورودی به دهانه آبنگیر در قسمت داخلی پیچ ۰/۰۲۶ کیلوگرم بر ثانیه محاسبه شد که این مقدار نسبت به آبنگیر داخلی با زاویه صفر درجه ۱/۵ برابر کم‌تر است و این مقدار در قسمت خارجی پیچ ۰/۰۱۴ کیلوگرم بر ثانیه محاسبه شده است و مقدار کل رسوب ورودی به آبنگیرهای داخلی و خارجی به ترتیب ۱/۹ و ۰/۰۱ کیلوگرم برآورد شده است. همچنین نتایج ترسیمی خطوط جریان در بالادست سرریز در شکل‌های (۵) تا (۹) نشان می‌دهند که در تمام سناریوها ایجاد جریان‌های ثانویه و حلزونی در قسمت پیچ داخلی آبراهه سبب رسوب‌گذاری در این قسمت شده و ورود ذرات رسوب به آبنگیر را تشدید می‌کنند.

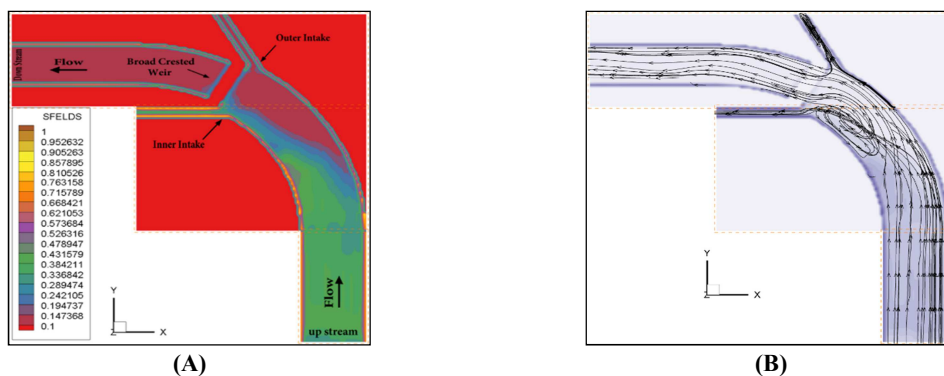


Figure 6. Plan view of modeling and simulation results for Run (2): (A) Deposition pattern and (B) Flow pattern

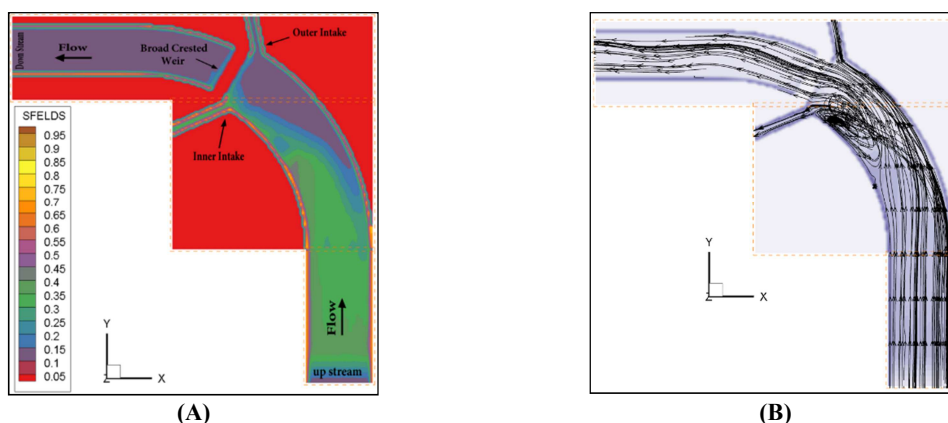


Figure 7. Plan view of modeling and simulation results for Run (3): (A) Deposition pattern and (B) Flow pattern

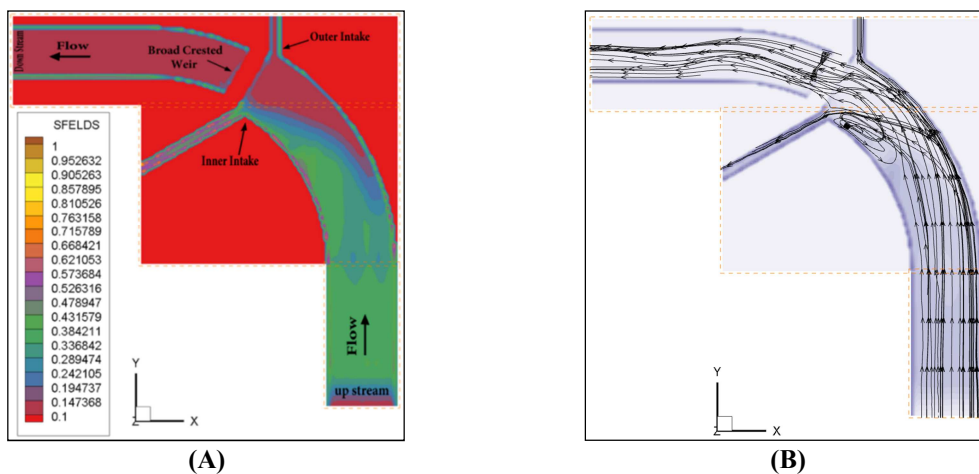


Figure 8. Plan view of modeling and simulation results Run (4): (A) Deposition pattern and (B) Flow pattern

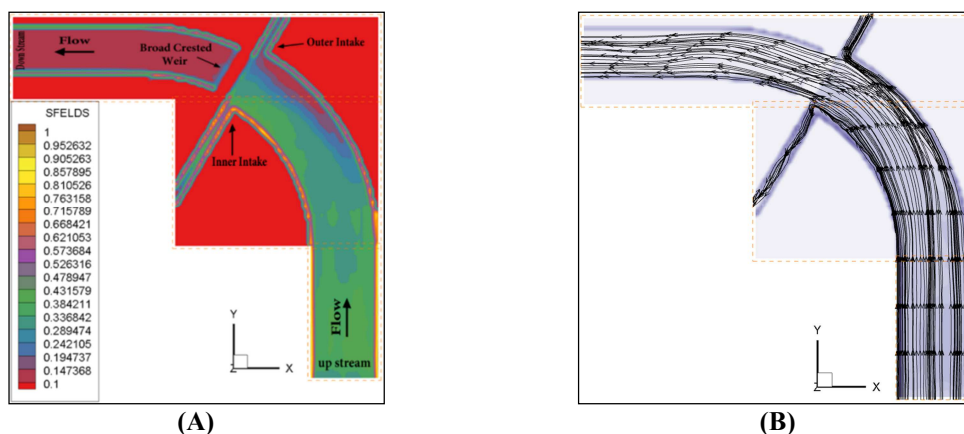


Figure 9. Plan view of modeling and simulation results for Run (5): (A) Deposition pattern and (B) Flow pattern

اثر بخشی آستانه آبگیر و مجرای تخلیه رسوب بر روی الگوی جریان و رسوب‌گذاری در دو سناریو آخر جدول (۳) مربوط به دو زاویه آبگیری صفر و ۹۰ درجه، به صورت شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. در شکل (۱۰)، برای آبگیری با زاویه صفر درجه با وجود آستانه آبگیر و مجرای تخلیه رسوب میانگین بده جریان آبگیرها در پیچ خارجی و داخلی را به ترتیب ۰/۰۲ و ۰/۰۱۸ مترمکعب بر ثانیه بوده است. همچنین مقدار میانگین رسوب ورودی به آبگیرهای خارجی و داخلی به ترتیب ۰/۰۰۱ و ۰/۱۳ کیلوگرم بر ثانیه و مقدار کل رسوب ورودی به ترتیب ۰/۰۸ و ۹/۱۶ کیلوگرم محاسبه شده است. در نهایت نسبت بده جریان، نسبت میانگین رسوب ورودی و نسبت کل مقدار رسوب ورودی در آبگیر خارجی نسبت به داخلی به ترتیب ۱/۱۱، ۰/۰۷۶۹ و ۰/۰۸۷۳ محاسبه شده است. از مقایسه دو شرایط با و بدون آستانه آبگیر و مجرای تخلیه رسوب (شرایط شکل ۵ و شکل ۸)، نتیجه می‌شود که بده جریان در آبگیر خارجی تغییر محسوسی نداشته، اما در آبگیر داخلی مقدار ۰/۰۰۸ مترمکعب بر ثانیه افزایش یافته است. یکنواختی توزیع آب در آبگیرها با در نظر گرفتن مجرای تخلیه رسوب و آستانه ۱/۹ برابر بهبود یافته است. همچنین مقدار میانگین رسوبات ورودی و مقدار کل رسوبات ورودی به آبگیرها در آبگیر خارجی تغییرات محسوسی نداشته اما این مقادیر در آبگیر داخلی به ترتیب ۰/۲۲ کیلوگرم بر ثانیه و ۱۷/۳۴ کیلوگرم کاهش یافته است. در واقع نیروی گریز از مرکز سبب هدایت خطوط جریان اولیه به سوی پیچ خارجی گردیده و باعث افزایش تراز سطح آب در نوار پیچ خارجی می‌شود. از این رو، اختلاف فشار بین پیچ خارجی و داخلی افزایش یافته و جریان از سمت پیچ خارجی به سمت پیچ داخلی

حرکت نموده و جریان‌های ثانویه و گردابه‌ای را ایجاد می‌نماید. بازگشت جریان با سرعت کمتر از بستر پیچ داخلی به سوی پیچ خارجی، سبب ته‌نشست رسوبات در ناحیه پیچ داخلی آبراهه می‌گردد.

شکل (۱۱) برای آبیگری با زاویه ۹۰ درجه نشان می‌دهد که با وجود آستانه آبیگر و مجرای تخلیه رسوب، میانگین بده جریان آبیگرها در پیچ خارجی و داخلی را به ترتیب ۰/۰۲۱ و ۰/۰۱۶ مترمکعب بر ثانیه بوده است. همچنین مقدار میانگین رسوب ورودی به آبیگرهای خارجی و داخلی به ترتیب ۰/۰۰۱۲ و ۰/۰۰۷ کیلوگرم بر ثانیه و مقدار کل رسوب ورودی به ترتیب ۰/۰۱ و ۰/۵۵ کیلوگرم محاسبه شده است. در نهایت نسبت بده جریان، نسبت میانگین رسوب ورودی و نسبت کل مقدار رسوب ورودی در آبیگر خارجی نسبت به داخلی به ترتیب ۱/۳۱، ۰/۱۷ و ۰/۰۱۸ است. از مقایسه دو شرایط با و بدون آستانه آبیگر و مجرای تخلیه رسوب (شرایط شکل ۹ و شکل ۱۱)، نتیجه می‌شود که بده جریان در آبیگر خارجی و داخلی به ترتیب ۰/۰۰۳ مترمکعب بر ثانیه کاهش و ۰/۰۰۶ مترمکعب بر ثانیه افزایش یافته است. بنابراین یکنواختی توزیع آب در آبیگرها ۱/۸۳ برابر بهبود یافته است. همچنین مقدار میانگین رسوبات ورودی به آبیگرها در آبیگر خارجی و داخلی به ترتیب مقدار ۰/۰۰۰۲ و ۰/۲۵ کیلوگرم بر ثانیه کاهش یافته است و مقدار کل رسوبات ورودی به آبیگرها در آبیگر خارجی تغییراتی نداشته اما این مقدار در آبیگر داخلی ۱/۳۵ کیلوگرم کاهش یافته است.

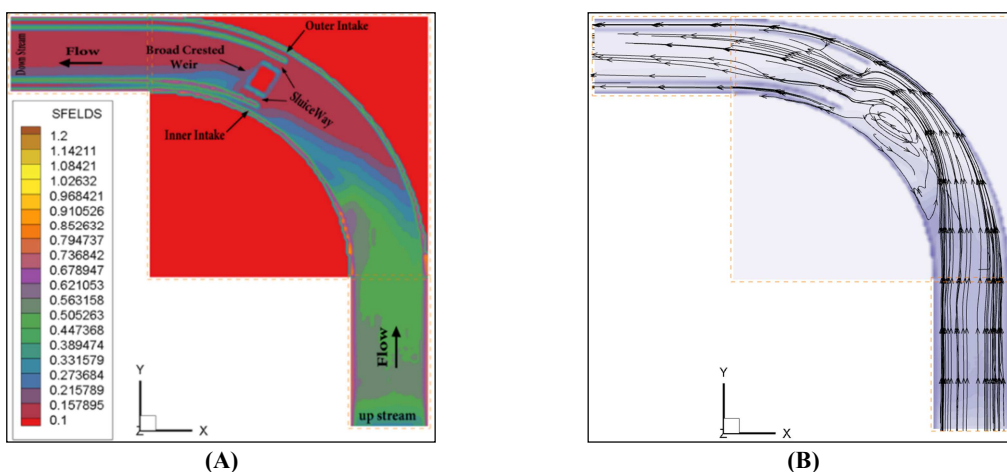


Figure 10. Plan view of modeling and simulation results for Run (6): (A) Deposition pattern and (B) Flow pattern

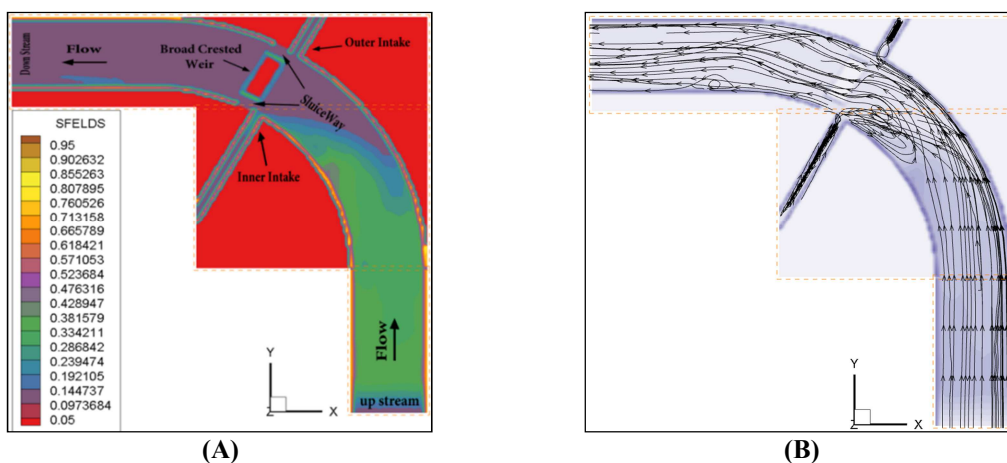


Figure 11. Plan view of modeling and simulation results for Run (7): (A) Deposition pattern and (B) Flow pattern

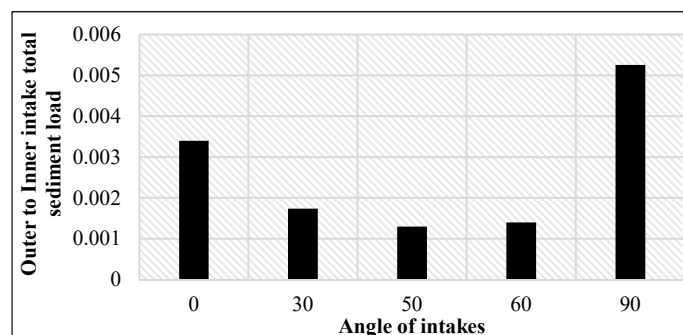


Figure 12. Comparison of the uniformity of sediment transport distribution in two outer intake and inner intake, with different intake angles (without intake sill and sluice way)

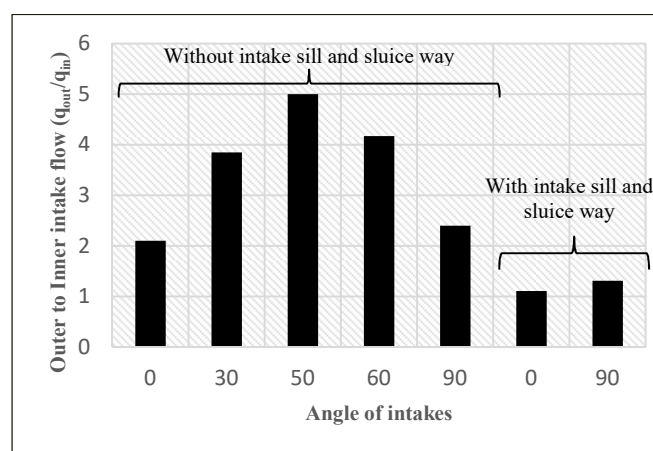


Figure 13. Comparison of the uniformity of flow distribution in outer intake and inner intake, with different intake angles (with intake sill and sluice way and without intake sill and sluice way)

یکنواختی توزیع رسوب ورودی به آبیگرها در آبیگری با زوایه‌های مختلف صفر، ۳۰، ۵۰، ۶۰ و ۹۰ درجه (بدون آستانه آبیگر و مجرای تخلیه رسوب) در شکل (۱۲) و یکنواختی توزیع بده جریان آب به دو آبیگر در شرایط با و بدون آستانه آبیگر و مجرای تخلیه رسوب در شکل (۱۳) مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که یکنواختی توزیع بده آب به ترتیب برای زاویه صفر، ۹۰، ۳۰، ۶۰ و ۵۰ درجه بیشتر بوده و رسوب‌گذاری در بالادست سرریز و آبیگرها بر سهم توزیع جریان آب به آبیگرها اثر دارد. با توجه به نرخ رسوب ورودی به آبیگرهای خارجی و داخلی مقدار رسوب ورودی به آبیگر خارجی نسبت به آبیگر داخلی رابطه‌ای مستقیم با جریان ورودی به آبیگرها دارد. هرچه مقدار رسوب ورودی به آبیگر خارجی کم‌تر باشد، اختلاف بده جریان بین دو آبیگر بیشتر می‌شود. در آبیگرهای با زاویه ۳۰ درجه، هرچند بده ورودی به آبیگر خارجی و داخلی به‌علت ورود رسوب بیشتر، کم‌تر از آبیگرهای با زاویه ۵۰ و ۶۰ درجه می‌باشد، اما مقدار رسوب ورودی به آبیگر خارجی نسبت به داخلی آن بیشتر بوده و یکنواختی توزیع آب در آبیگر ۳۰ درجه بیشتر می‌باشد. نتایج جدول (۳) و شکل (۱۱) نشان می‌دهد که وجود آستانه آبیگر و مجرای تخلیه رسوب باعث افزایش مقدار نسبت رسوب ورودی آبیگر خارجی به داخلی است، که در نتیجه آن توزیع یکنواختی بده جریان بین دو آبیگر خارجی و داخلی افزایش یافته (به عدد یک نزدیک‌تر شده) و مناسب‌تر می‌شود. در واقع با توجه به مکانیزم جریان در پیچ آبراهه و هدایت رسوبات به سمت پیچ داخلی، تأثیر آستانه آبیگر و مجرای تخلیه رسوب در قسمت پیچ داخلی چشم‌گیر خواهد بود. به طوری که نرخ رسوبات ورودی به آبیگر داخلی برای آبیگر با زاویه صفر و ۹۰

درجه را به ترتیب ۶۵ و ۷۱ درصد کاهش داده و سبب یکنواختی توزیع انتقال رسوب در آبگیرها و در نتیجه یکنواختی توزیع بده جریان در دو آبگیر خارجی و داخلی می گردد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، از مدل عددی FLOW-3D برای شبیه سازی جریان آب با انتقال رسوب در ورودی آبگیرهای دو طرف یک سد انحرافی در پیچ یک آبراهه استفاده گردید. مدل عددی براساس اطلاعات مدل فیزیکی Farhadi-Bansuleh and Yasi (2019) برای شرایط جریان آب صاف و استرجی و تأیید و برای جریان آب با انتقال رسوب اعتبارسنجی و تنظیم شد. هفت سناریو برای آزمون اثرات زاویه آبگیری آستانه آبگیر و مجرای تخلیه رسوب در بررسی الگوی جریان و نهشتگی رسوبات در ناحیه آبگیرها و توزیع بده جریان و بار رسوبی به آبگیرهای پیچ خارجی و داخلی اجرا گردید. نتایج نشان می دهد که مدل عددی FLOW-3D قابلیت خوبی در شبیه سازی جریان آب با انتقال رسوب در پیچ آبراهه همراه با سرریز سازه های وابسته آن را دارد. نتایج مدل سازی تجربی و عددی برای شرایط جریان آب صاف نشان می دهد که توزیع بده جریان آب به دو آبگیر واقع در پیچ خارجی و داخلی نسبتاً یکنواخت است که با شواهد میدانی تأیید نمی شود. از این رو، اگر ساختگاه سرریز و سدهای انحرافی در پیچ رودخانه ها اجتناب ناپذیر باشد، مدل سازی برای شرایط جریان آب با انتقال رسوب ضرورت دارد تا بتوان سهم بده جریان و بار رسوبی ورودی به آبگیرهای دو طرف پیچ رودخانه را تعیین نمود و مشکلات مدیریت نگهداری و بهره برداری را پیش بینی نمود. به هر حال، باید توجه داشت که رایانه ای با پردازنده قوی لازم است، زیرا زمان اجرای مدل FLOW-3D برای سناریوهای جریان آب با انتقال رسوب چند روزه بوده و تقریباً ۳۰ برابر طولانی تر از شبیه سازی های مربوط به جریان آب صاف است.

در مدل سازی جریان آب با انتقال رسوب، نتایج همزمان توزیع بده جریان و بار رسوبی ورودی به دو آبگیر پیچ خارجی و داخلی نشان می دهد که، با این که یکنواختی توزیع آب در آبگیرهای با زاویه صفر درجه بهتر بوده اما به دلیل هم راستا بودن با جهت جریان، رسوبات بیش تری وارد آبگیرها می شود. به طوری که نرخ رسوب ورودی به آبگیرهای خارجی و داخلی نسبت به آبگیری با زاویه ۹۰ درجه به ترتیب ۱۴ و ۱۴ برابر بیشتر است. نرخ رسوب ورودی به آبگیرهای با زاویه ۹۰ درجه نسبت به ۳۰، ۵۰ و ۶۰ درجه نیز برای آبگیر خارجی به ترتیب مقدار ۴/۴، ۳ و ۳ برابر و برای آبگیر داخلی ۱۸، ۱۷ و ۱۵ برابر کمتر است. بنابراین در حالت بدون آستانه آبگیر و مجرای تخلیه رسوب احداث آبگیرهای با زاویه ۹۰ درجه در شرایط جریان آب با انتقال رسوب در پیچ آبراهه توصیه می شود.

با وجود همزمان آستانه آبگیر و مجرای تخلیه رسوب یکنواختی توزیع آب در آبگیرهای با زاویه صفر و ۹۰ درجه به ترتیب ۴۷ و ۴۵ درصد بهبود می یابد. در آبگیر صفر درجه نرخ رسوبات ورودی در آبگیر خارجی نسبت به حالت بدون آستانه و مجرای تخلیه رسوب تغییر محسوسی ندارد، اما این مقدار در آبگیر داخلی حدود ۶۵ درصد کاهش می یابد. این نتایج برای آبگیر ۹۰ درجه نیز صادق است، به طوری که نرخ رسوبات ورودی در آبگیر خارجی تغییری نمی کند اما در آبگیر داخلی نسبت به حالت بدون آستانه و مجرای تخلیه رسوب حدود ۷۱ درصد کاهش می یابد. از این رو، احداث آستانه آبگیر، به ویژه برای سمت پیچ داخلی ضرورت اساسی دارد. اگرچه آستانه برای جلوگیری از ورود رسوبات بستر به آبگیر اثربخش است، اما احداث و کارکرد همزمان مجرای تخلیه رسوب نیز برای آیشویی محدوده کف بستر و اثربخشی آستانه دهانه آبگیر به ویژه در آبگیرهای واقع در پیچ داخلی ضروری خواهد بود.

مطالعات تکمیلی برای بررسی شرایط جریان آب با انتقال رسوب در آبگیرهای دو طرف سرریز در پیچ آبراهه جهت اعتبارسنجی و تنظیم مدل عددی برای آزمون سناریوهای مختلف پیشنهاد می گردد.

۵- فهرست علائم

ui	سرعت جریان در جهت‌های مختصات کارتزین x, y و z (ms^{-1})
Ai,j	کسری از سطح برای جریان در جهت‌های x, y و z
Gi	شتاب حجمی
fi	ترم‌های لزجت
Vf	نسبت کسر حجمی فضای باز به جریان
\bar{u}_V	متوسط عمقی سرعت (ms^{-1})
\bar{u}_{Vc}	متوسط عمقی سرعت بحرانی براساس منحنی شیلدز (ms^{-1})
q_b	دبی جرمی رسوب در واحد عرض (m^2/s)
ρ_s	چگالی رسوب (Kg/m^3)
D	قطر ذره رسوب (m)
d	عمق جریان (m)
SCRDIA	میانگین قطر ذرات (m)
RHOF	چگالی جرمی سیال (Kg/m^3)
μ	گرانروی دینامیکی سیال ($\text{Kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)
τ	تنش برشی (N/m^2)
ρ	چگالی جرمی ماکروسکوپی سیال (Kg/m^3)
SCRALP	پارامتر تجربی برای تنظیم شدت فرسایش
P	فشار (N/m^2)
τ_c	تنش برشی بحرانی (N/m^2)
RMSE	شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطا
R^2	شاخص آماری ضریب تبیین
MAE	شاخص آماری میانگین خطا مطلق
SCR CRT	عدد شیلدز بحرانی
SCR RHO	چگالی جرمی ذرات رسوب (Kg/m^3)
g	شتاب گرانش (m/s^2)
d_{gr}	اندازه بدون بعد ذرات رسوب

۶- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷- منابع

- Abdollahpour, M., Yasi, M., Behmanesh, J., & Vaghefi, M. (2013). Experimental investigation of sloping sharp crested weir in a channel bend. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 7(22), 79-82. (In Persian).
- Asiae, H., & Montaseri, H. (2014). Evaluation of the accuracy of SSIIM2 3D model in simulating the flow in a U-shaped bend channel with a intake. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 21(21), 29-53. (In Persian).

- Barbhuiya, A. K., & Talukdar, S. (2010). Scour and three dimensional turbulent flow fields measured by ADV at a 90, horizontal forced bend in a rectangular channel. *Flow Measurement and Instrumentation*.
- Behbahani, R. (2013). The effect of intake angle on discharge and sediment transport in the intake in the trapezoidal channel. M.Sc. Thesis. Zabol University. Zabol. Iran. (In Persian).
- Brethour, J., & Burnham, J. (2010). Modeling sediment erosion and deposition with the FLOW-3D sedimentation & scour model. *Flow Science Technical Note, FSI-10-TN85: 1-22*.
- Dehghani, A. (2006). Laboratory study of sediment control entering the side intake in 180 degree arc. Doctoral dissertation, Civil engineering, hydraulic orientation. Tarbiat Modares University. (In Persian).
- Farhadi-Bansuleh, A., & Yasi, M. (2019). Study of Uniformity of Flow Rate at Bilateral Water intakes of a Broad-Crested Weir in a Channel Bend. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 5(13), 1294-1306*. (In Persian).
- Flow Science. (2008). *Flow-3D user's manuals. Version 9.3*, Flow Science, Inc., SantaFe, N.M.
- Gholami Alam, I. (1998). Study on effective parameters on design of sluice way for diversion dams and review of design criteria. M.Sc. Thesis. Tarbiat Modares University. Tehran. Iran. (In Persian).
- Henderson, F. M. (1966). *Open channel flow*. Macmillan Co. Pub. New York. USA.
- Hosseini mobara, E., & Yasi, M. (2016). Performance of Crump Weirs in a Channel Bend. *Iranian Water Researches Journal, 10(1), 59-67*. (In Persian).
- Ayase, A. (2011). Simulation of the flow over the weir at the channel bend. M.Sc. Thesis. Urmia University. Urmia. Iran. (In Persian).
- Mehrdar, L., Hemmati, M., & Yasi, M. (2021). Experimental Investigation of the Effect of Sloping-Broad Crested Weir at Bilateral Water Intakes in 90° Sharp Bend. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research, 22(85), 75-90*. (In Persian).
- Mehrdar, L., Hemmati, M., & Yasi, M. (2022). Experimental Investigating the Effect of Relative Curvature of a Channel Bend on the Inlet Flows in Bilateral Water Intakes of Weirs with Horizontal and Sloping Crests. *Iranian Journal of Soil and Water Research, 53(1), 69-57*.
- Safarzade, A., Zarati, A. R., & Sadathalbar, M. (2019). Numerical and physical modeling of sediment flushing from Mil and Moghan dam reservoir. Research project report. Ardabil Regional Water Company. Ardabil. Iran. (In Persian).
- Salamat Ravandi, N. (2012). Simulation of the flow over weirs in a channel bend using FLOW-3D. M.Sc. Thesis. Urmia University. Urmia. Iran. (In Persian).
- Sisinggih, D., Wahyuni, S., & Rasyid, A. (2021). Flow and sediment transport in a sharp river bend using a 3DRANS model. *Earth and Environmental Science, 930, 012033*.
- Valimohammadi, A., & Yasi, M. (2016). Hydraulic Evaluation of Horizontal and Sloping Broad-Crested Weirs in a Channel Bend. *Journal of Applied Research in Irrigation and Drainage Structures Engineering, 16(65), 55-70*. (In Persian).
- Van Rijn, L. C. (1993). *Principles of Sediment Transport in River, Estuaries and Coastal Seas*. Aqua Publications, Amsterdam.
- WGWM. (1991). *Guidelines for stabilizing waterways*. Working Group on Waterway Management (WGWM), Standing Committee on Rivers and Catchments, Rural Water Commission of Victoria, Victoria, Australia, 301p.
- Yasi, M. (1989). Training and bank protection of alluvial rivers by Bio-technical means. M.Sc. Thesis. Shiraz University. Shiraz. Iran. (In Persian).
- Yasi, M., & Salamat Ravandi, N. (2022). Numerical Simulation of Flow over Sharp- and Broad-Crested Weirs with Horizontal and Sloping Crests in a Channel Bend. *Journal of Iranian Water Engineering Research, 2(1), 51-65*. (In Persian).