Journal of Iranian Water Engineering Research

Research Article, P. 37-48
https://doi.org/10.22034/IJWER.2023.399018.1036

Investigation of the difference of sediment transporting inflows between one and two sides intakes of a diversion dam in a channel bend

Mehran Ashnavar[1], Mehdi Yasi[2*]

1- Former M.Sc. Student of Hydraulic Structures, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2- Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Corresponding author: m.yasi@ut.ac.ir

Received: **25 May 2023**
Accepted: **28 Aug. 2023**

Homepage: **ijwer.uoz.ac.ir**

Abstract: The main purpose of this study was to investigate the uniformity of sediment transporting flows into bilateral intakes on both sides of a spillway and compare it with a single intake either in the outer or inner bend. The results indicated that most of the sediment deposition is towards the inner-bend intake. In the case of a single intake structure, the comparative results with the bilateral intakes indicated that both the water inflow rate and sediment entrainment increase in the case of a single intake located on the outer bend. In the case of a single intake on the inner bend, the water inflow rate decreases, but the inward-sediment load increases. It is necessary to use both the intake sill and sluice ways to control the sediments entering the intakes, especially for the inner-bend intake.

Keywords: Diversion Dam, FLOW-3D model, River bend, sediment transporting flow, Water intake

Introduction: Diversion of sediment transporting flows is one of the challenges in river hydraulics and engineering works. There is several evidence for the construction of weirs and diversion dams in river bends, and sometimes locating water intakes on one or two sides of the river bend is needed. However, this encounters problems regarding the asymmetry of flow distribution into the inner- and outer-bend intake structures. Most of the previous studies have been conducted under 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 and compare it with a single intake either in outer or inner bends.

Methodology: In this study, the FLOW-3D numerical model was used to simulate sediment transport flow into bilateral intakes on one and both sides of a diversion dam in a channel bend. The geometric conditions of modeling were considered based on the laboratory study of Farhadi-Bansuleh and Yasi (2019). The laboratory channel was a rectangular channel with a 90° bend. The experiments were carried out under clear water flow conditions. The numerical model was first calibrated and validated for the physical model conditions and then adjusted for sediment transporting flows. In the lack of physical data for sediment transporting flows into the bend intakes, the modeling results were evaluated based on hydraulic engineering judgments.

Results and Discussion: The results of the simulation for taking water from both sides of the weir with an angle of 90 degrees show that with the presence of the sill and the sluiceway, the mean inflow rate to intakes in the outer and inner intake was 0.021 and 0.016 m^3/s, respectively. The mean sediment load into the outer and inner intakes was calculated to be 0.0012 and 0.007 kg/s, respectively. The corresponding total sediment load was 0.01 and 0.55 kg, respectively. The ratios of the water inflow, the mean sediment load, and the total sediment load in the outer

intake compared to the inner intake were 1.31, 0.17, and 0.018, respectively. Also, the flow patterns upstream of the weir showed that the creation of secondary and spiral currents in the inner channel bend causes sedimentation in this part and eliminates the flows into the inner intake. A comparison of the simulation results of water intake from both sides and one side of the diversion dam in the outer intake showed that the flow rate increased by 0.002 m^3/s (equivalent to 9.5%), while this value decreased up to 0.001 m^3/s (equivalent to 6.3%)in the inner intake. In the outer intake, the mean sediment load and the total sediment volume entering to intakes increased by 0.0008 kg/s (i.e. 66%) and 0.002 kg (i.e., 20%), respectively. The increase for the inner intake was 0.0015 kg/s (i.e., 22%) and 0.06 kg (i.e., 11%), respectively.

Conclusion: The results indicated that the weir position at an angle of 60 degrees from the bend inlet and 90-degree intakes are more efficient due to less sediment entry and uniform inflow distribution to both bilateral intakes. The model was run for three scenarios (i.e., with bilateral intakes and with a single intake in the outer or inner bend). The results indicated that most of the sediment deposition is towards the inner-bend intake. In the case of a single intake structure, the comparative results with the bilateral intakes indicated that both the water inflow rate and sediment entrainment increase in the case of a single intake located on the outer bend. In the case of a single intake on the inner bend, the water inflow rate decreases, but the inward-sediment load increases. It is necessary to use both the intake sill and sluice ways to control the sediments entering the intakes, especially for the inner-bend intake.

© 2022 University of Zabol, Zabol, Iran.

This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

نشریه علمی
پژوهش‌های مهندسی آب ایران

مقاله پژوهشی، ص ۴۸-۳۷
https://doi.org/10.22034/IJWER.2023.399018.1036

بررسی تفاوت جریان ورودی آب با انتقال رسوب به آبگیرهای سد انحرافی در یک و دو طرف پیچ یک آبراهه

مهران آشناور[۱]، مهدی یاسی[۲*]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

نگارنده مسئول: m.yasi@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۰۶
وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir

چکیده

احداث سرریزها در محدوده پیچ رودخانه، مشکلاتی را از نظر توزیع غیریکنواخت جریان به‌سوی آبگیرهای دو طرف پیچ پدید می‌آورد. هدف اصلی در این تحقیق، مقایسه بده جریان و بار رسوب ورودی به آبگیرهای سرریز در دو طرف و در یک طرف پیچ یک آبراهه، در شرایط جریان آب با انتقال رسوب است. برای این منظور از مدل عددی FLOW-3D، در مطالعات پیشین واسنجی و تائید شده است، استفاده گردید. نتایج نشان داد که بهترین موقعیت ساخت سرریز در مقطع ۶۰ درجه از ابتدای پیچ ۹۰ درجه است. همچنین، سازه آبگیر با زاویه ۹۰ درجه به دلیل ورود کمتر رسوبات و یکنواختی توزیع بده جریان، کارایی بهتری دارد. مدل برای سه سناریو (آبگیری از دو طرف سرریز و از یک طرف در پیچ خارجی و در پیچ داخلی) اجرا گردید. نتایج نشان داد که بیشترین رسوب‌گذاری همواره به سمت آبگیر پیچ داخلی است. در آبگیری از یک طرف در پیچ خارجی، بده جریان و بار رسوبی ورودی به آبگیر بیشتر از شرایط آبگیری دوطرفه است. در آبگیری یک‌طرفه از پیچ داخلی، بده جریان کاهش، ولی بار رسوب ورودی افزایش می‌یابد. استفاده از آستانه و مجرای تخلیه رسوب برای کنترل رسوبات ورودی به آبگیرها، به‌ویژه در آبگیری از پیچ داخلی ضرورت دارد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی آبگیری از دو طرف و یک طرف سرریز در آبگیر خارجی نشان می‌دهد که بده جریان مقدار ۹/۵ درصد افزایش یافته است که این مقدار در آبگیر داخلی ۶/۳ درصد کاهش داشته است. میانگین بار رسوبی و حجم کل رسوبات ورودی به آبگیر خارجی به ترتیب ۶۶ و ۲۰ درصد و به آبگیر داخلی ۲۲ و ۱۱ درصد افزایش یافته است.

کلیدواژگان: آبگیر، پیچ آبراهه، جریان آب با انتقال رسوب، سد انحرافی، مدل FLOW-3D

۱- مقدمه

آبگیری از رودخانه‌ها و انشعاب و انحراف جریان از چالش‌های مهندسی هیدرولیک رودخانه است. جریان در یک انشعاب آبگیری به طور 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، تنظیمی و ساماندهی و مدیریت رودخانه ضروری است؛ و در حکم نقشه راه آن به شمار می‌رود. آبراهه‌های طبیعی به ندرت مسیر مستقیم دارند و عموماً پیچان‌رود (دارای پیچ‌های معکوس و متوالی که توسط یک بازه نسبتاً مستقیم و کوتاه به یکدیگر وصل می‌گردند) هستند (Yasi, 1989). بهترین موقعیت برای احداث سازه‌های آبی (نظیر سرریز یا بند انحرافی، پل- بند، کف بند)، بازه مستقیم رودخانه (بازه مستقیم حدفاصل دو پیچ معکوس در رودخانه‌های پیچان‌رودی) است. براساس نتایج تجربی، پیچ بر خصوصیات جریان بالادست و پائین‌دست (تا حداقل به فاصله ۲ برابر عرض رودخانه: 2B) تأثیر دارد (WGWM, 1991)؛ بنابراین، احداث سازه‌های عرضی در فاصله بیش از 2B از بالا یا پائین پیچ مناسب‌تر است. بی‌توجهی به ساخت‌گاه سرریز و سدهای انحرافی در پیچ رودخانه‌ها مشکلاتی را ازنظر توزیع جریان در آبگیرهای دو طرف رودخانه و مدیریت نگهداری و بهره‌برداری پدید می‌آورد (Valimohammadi & Yasi, 2016). پژوهش‌های زیادی در زمینه روش‌های کنترل جریان و رسوب در آبگیرهای ساخته‌شده در پیچ آبراهه‌ها انجام‌شده و توصیه‌های طراحی مختلفی نیز ارائه‌گردیده است، اما پیچیدگی انتقال جریان و رسوب در محدوده دهانه آبگیر، تأثیر رسوبات ورودی بر روی شرایط جریان در دهانه آبگیر و تغییر در ریختارشناسی بستر در آبراهه اصلی و کانال آبگیر در پی رسوب‌گذاری سبب گشته است که تحقیق در این زمینه همچنان ادامه یابد. به‌طور نمونه: (Dehghani, 2006) به بررسی آزمایشگاهی تغییرات بستر در پیچ ۱۸۰ درجه، همراه با آبگیر پرداختند. آن‌ها نواحی موردبررسی را به سه قسمت نواحی قبل از آبگیر، دهانه آبگیر و بعد از آبگیر تقسیم نمودند و به این نتیجه رسیدند که به علت 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. جریان متلاطم سه‌بعدی و فرسایش در پیچ ۹۰ درجه را به‌صورت تجربی موردبررسی قرار گرفته است (Barbhuiya and Talukdar, 2010). برای بستر از مواد غیر چسبنده، غیریکنواخت و با قطر متوسط ۰/۳ میلی‌متر استفاده کردند. مولفه‌های سرعت متوسط زمانی، شدت تلاطم و تنش‌های رینولدز بر روی یک بستر فرسایش یافته 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 به‌دست‌آمده است و بیشترین مقدار رسوب‌گذاری حدود مقطع ۳۰ درجه نزدیک دیواره داخلی اتفاق می‌افتد و بیشترین مقدار آن ۰/۰۷ عرض فلوم است. مطالعات اخیر بر الگوی جریان و انتقال رسوب به آبگیرهای جانبی نیز قابل‌توجه است (Heidarirad,et al. 2020).

پارامترهای مؤثر در طراحی مجرای تخلیه رسوب سدهای انحرافی، در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۲ متر و عرض ۷۵ سانتیمتر و عمق ۸۰ سانتیمتر، شیب کف صفر بررسی گردید (Gholami Alam, 1998). در این مطالعه از ذرات یکنواخت با قطر متوسط یک میلی‌متر استفاده‌شد؛ و روند آبشویی بستر در ناحیه بالادست مجرای تخلیه رسوب، در شرایط بدون آبگیر و با جریان آب صاف بررسی گردید. نتایج نشان داد که برای مقدار نسبت بازشدگی دریچه به عرض دریچه کمتر از ۰/۶، راندمان تخلیه رسوب افزایش می‌یابد.

قابلیت رسوب‌زدایی از مخزن سد میل و مغان با استفاده از مدل‌سازی عددی و فیزیکی بررسی شده است (Safarzade et al., 2019). پژوهش‌گران ساماندهی ناحیه بالادست سد را به‌منظور 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 تعیین مناسب حالت رسوب‌شویی هیدرولیکی بین دیواره‌های هادی سد موردتوجه قرار دادند. آن‌ها با مقایسه دو مدل iRIC-Nays2DH و FLOW-3D، مدل iRIC-

Nays2DH را به‌عنوان مدل منتخب برگزیدند. شبیه‌سازی در یک بازه مئاندری و درنظر گرفتن فرسایش و رسوب همراه با جریان انجام شد. نتایج حاصل از مدل iRIC-Nays2DH نشان داد که مدل عددی به‌درستی انتخاب‌شده است و در کنار دقت بسیار مناسب، ازنظر زمان شبیه‌سازی نیز نسبت به مدل‌های سه‌بعدی بسیار توجیه‌پذیر است.

در سال ۲۰۱۹ کارکرد سرریزهای لبه پهن با تاج افقی و شیب‌دار در پیچ آبراهه، باهدف یکنواختی بده جریان ورودی به آبگیرهای ساحل چپ و راست، در شرایط جریان آب صاف (بستر پایدار و بدون انتقال رسوب) مطالعه گردید (Farhadi-Bansuleh and Yasi, 2019). مقایسه شرایط جریان ورودی به آبگیرهای طرفین با استفاده از مدل آزمایشگاهی و مدل ریاضی FLOW-3D نشان داد که مدل FLOW-3D قابلیت خوبی در شبیه‌سازی جریان در پیچ آبراهه همراه با سرریز را دارد؛ بهترین شرایط استقرار سرریز در موقعیت ۶۰ درجه در میانه پیچ با نسبت ۱:۱۰ (عرض آبگیر به عرض آبراهه) همراه با آب‌پایه و با زاویه آبگیری صفر درجه است؛ و برای جریان آب صاف، بده ورودی به آبگیرهای پیچ داخلی و خارجی تفاوت فراوانی ندارند. کمترین نسبت یکنواختی بده (نسبت بده آبگیر داخلی به خارجی) در سرریز با تاج افقی ۰/۹۲ رخ داد.

بررسی 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 ۲)، در شرایط جریان آب صاف با مدل آزمایشگاهی، نشان داد که با بودن سرریز، بده بیشتری نسبت به حالت بدون سرریز وارد دو آبگیر می‌شود (Mehrdar et al., 2021)؛ سرریز شیب‌دار در یکنواختی توزیع بده عرضی جریان در بالادست سرریز اثر قابل‌توجهی ندارد، ولی در افزایش یکنواختی بده ورودی به دو آبگیر مؤثر است؛ و متوسط نسبت بده آبگیر در دیواره خارجی به دیواره داخلی در سه حالت بدون سرریز، با سرریز افقی و با سرریز شیب‌دار به‌ترتیب ۴/۳، ۲/۱ و ۱/۱ 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. برای تکمیل مطالعات توسط مهردار و همکاران (۲۰۱۹)، در سال ۲۰۲۲ اثر سه انحنای پیچ‌های ملایم، متوسط و تند (با شعاع انحناهای 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 به‌صورت تجربی بررسی گردید (Mehrdar et al., 2022). سرریز لبه پهن با تاج افقی و شیب‌دار، در موقعیت ۶۰ درجه از ابتدای پیچ درنظر گرفته شد. نتایج تحقیق نشان داد که استقرار سرریز در پیچ ملایم عملکرد بهتری ازنظر یکنواختی آبگیری دارد؛ به‌طور متوسط بده ورودی به آبگیرهای دو طرف سرریز، در سه پیچ با سرریز شیب‌دار به‌ترتیب ۸، ۵، و ۹ درصد نسبت به سرریز با تاج افقی افزایش می‌یابد؛ و نسبت بده آبگیر خارجی به داخلی در سرریز با تاج شیب‌دار، در سه پیچ ملایم، متوسط و تند به‌ترتیب برابر ۱/۰، ۱/۱ و ۱/۱۲ است.

بررسی پیشینه مطالعات نشان می‌دهد که در زمینه شبیه‌سازی جریان آب با انتقال رسوب در محدوده اثر ساخت سدهای انحرافی در پیچ آبراهه‌ها بررسی قابل‌توجهی انجام نشده است. ازاین‌رو، در این تحقیق، یکنواختی توزیع جریان آب با انتقال رسوب ورودی به دهانه‌های آبگیر در دو طرف یک سد انحرافی در پیچ یک آبراهه و مقایسه آن با شرایط آبگیری یک‌طرفه (از سمت پیچ داخلی یا خارجی)، با استفاده از مدل عددی ارزیابی می‌گردد.

۲- روش‌شناسی

برای شبیه‌سازی جریان آب با انتقال رسوب در پیچ یک آبراهه از مدل عددی FLOW-3D استفاده گردید. این مدل توسط شرکت Flow Science در سال ۱۹۹۸ توسعه پیداکرده است. برای مدل کردن هندسه مرزهای جامد جریان از روش سطح‌بندی FAVOR؛ و برای شبیه‌سازی جریان با سطح آزاد از روش حجم سیال VOF استفاده می‌گردد. این مدل به‌صورت هم‌زمان، معادلات سه‌بعدی پیوستگی و ناویر استوکس (رابطه‌های ۱ و ۲) را حل می‌کند.

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

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

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

۲-۱- مدل جریان آب صاف

برای اطمینان از ساخت و تنظیم مدل عددی، ابتدا مدل‌سازی در شرایط جریان آب صاف (بدون انتقال رسوبات قابل ته‌نشست) انجام یافت. شرایط هندسی مدل‌سازی براساس مطالعه آزمایشگاهی (Farhadi-Bansuleh and Yasi, 2019) درنظر گرفته‌شده است. کانال آزمایشگاهی، یک کانال مستطیلی با پیچ ۹۰ درجه است. این کانال از یک بازه مستقیم به طول ۹ متر در بالادست و یک بازه مستقیم در پایین‌دست به طول ۶ متر تشکیل‌شده است که این دو بازه مستقیم توسط یک پیچ ۹۰ درجه با شعاع انحنای مرکزی ۳ متر به هم متصل شده‌اند (شکل ۱).

در ابتدا هندسه آبراهه در محیط AutoCAD طراحی و برای فراخوانی به مدل FLOW-3D تهیه گردید. سپس برای صحت سنجی مدل FLOW-3D ابتدا شبیه‌سازی جریان آب صاف در پیچ آبراهه و آبگیری با زاویه صفر درجه و وجود سرریز در موقعیت ۶۰ درجه از ابتدای پیچ انجام پذیرفت. در این اجرا، مقادیر شبکه‌بندی برای بالادست پیچ، پیچ و پایین‌دست پیچ به‌ترتیب 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 درنظر گرفته شدند. در مدلFLOW-3D پنج مدل تلاطم ارائه‌شده است: ۱) طول اختلاط پرانتل؛ ۲) مدل یک معادله‌ای؛ ۳) مدل دو معادله-ای k-ε؛ ۴) مدل RNG؛ و مدل شبیه‌سازی گردابه‌ای بزرگ (LES) از میان این مدل‌ها، مدل RNG توسط (Brethour and Burnham, 2010) به‌عنوان بهترین مدل تلاطمی در شبیه‌سازی جریان در پیچ آبراهه گزارش‌شده است. نتایج مدل‌سازی جریان از روی سرریزها در بازه پیچ ۹۰ درجه با مدل FLOW-3D توسط (Yasi and Salamatravandi, 2022) نیز نشان داد که هر دو مدل تلاطمی RNG و k-ε نتایج تقریباً همسانی داشته‌اند. ازآنجاکه تحقیق حاضر در دنباله مدل‌سازی پیشین، ولی

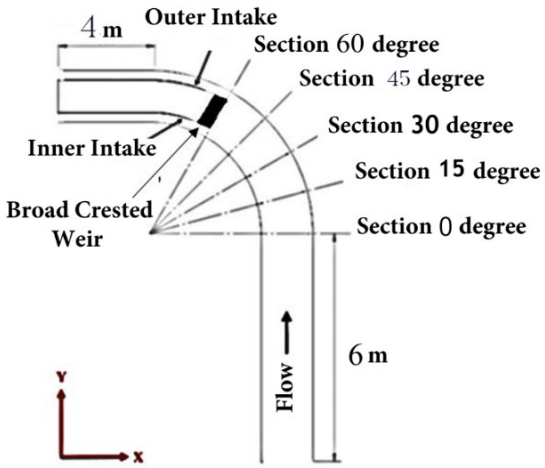

Fig. 1 Experimental arrangement of the curved flume with a broad-crested weir and intakes, and measuring cross sections (Farhadi-Bansuleh and Yasi, 2019)

شکل ۱ چیدمان آزمایش فلوم منحنی با سرریز و ورودی‌های تاج پهن، و اندازه گیری مقاطع (Farhadi-Bansuleh and Yasi, 2019)

برای شرایط جریان آب با انتقال رسوب بوده است، از مدل تلاطم RNG استفاده گردید. پلان مقاطع شاهد کانال آزمایشگاهی در شکل (۱) نمایش داده‌شده است. نتایج تراز سطح آب در مقاطع شاهد، برای آبگیر با زاویه صفر درجه در مدل عددی برداشت و با نتایج آزمایشگاهی (Farhadi-Bansuleh and Yasi, 2019) مقایسه و ارزیابی شد.

نتایج مقایسه در جدول ۱ ارائه‌شده است. بعد از محاسبه خطا، از قدر مطلق مقادیر آن متوسط گرفته‌شده 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 (R^2) آورده شده است.

مقیاس شبکه‌بندی از طریق واسنجی مدل عددی و مقایسه نتایج با مدل آزمایشگاهی در شرایط جریان آب صاف تعیین گردید. سعی شد از مقیاس بهینه‌ای برای شبکه‌بندی استفاده شود که هم میزان خطای واسنجی پایینی داشته باشد و هم‌زمان اجرای مدل عددی را طولانی نکند. از طرفی برای شبیه‌سازی جریان در پیچ آبراهه باید از شبکه با مقیاس کوچک‌تر استفاده شود. ازاین‌رو، در بازه پیچ آبراهه از شبکه با ابعاد ۲ سانتی‌متر؛ و در بازه مستقیم بالادست و پایین‌دست پیچ از شبکه با ابعاد ۳ سانتی‌متر استفاده‌شده

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، مقدار خطای برآورد قابل‌قبول بوده و R^2 به یک نزدیک،RMSE و MAE به صفر نزدیک است.

۲-۲- مدل جریان آب با انتقال رسوب

بخش انتقال رسوب (یا مدول آب‌شستگی) در مدل عددی 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. رسوبات معلق یا در جریان ورودی به‌صورت ذرات معلق انتقال می‌یابند، و یا در اثر فرسایش بستر معلق می‌گردند. برخاست و جابجایی رسوبات معلق در اثر شیب تغییرات فشار موضعی ارزیابی می‌گردد. به‌طورکلی، مدل آب‌شستگی در نرم‌افزار FLOW-3D از یک رویکرد مستقیم و آسان برای مدل‌سازی فرسایش و رسوب‌گذاری در جریان‌های سه‌بعدی استفاده می‌کند. شبیه‌سازی‌ها توسط محققان مختلف نشان می‌دهد که عمق حفره آب‌شستگی محاسبه‌شده در حالت تعادلی با نتایج تجربی مطابقت خوبی داشته است(Brethour and Burnham, 2010) .

در بخش انتقال رسوب مدل، ضریب ته‌نشینی ذرات براساس سرعت برخاست ذرات محاسبه می‌شود. تنش برشی بحرانی برای آستانه حرکت مواد رسوبی بستر استفاده می‌گردد.

در این تحقیق، با کمک روش آزمون‌وخطا برای تأمین شرایط آستانه حرکت مواد رسوبی در هندسه فلوم- سرریز- سازه‌های وابسته آن، مواد بستری از نوع ماسه با اندازه متوسط ۱ میلی‌متر، و با چگالی نسبی ۲/۶۵ انتخاب گردید، و به مدل عددی معرفی شد. ازآنجاکه تخلخل بستر ماسه‌ای به‌طور متوسط ۲۵ درصد است، مقدار تراکم بستر رسوب در مدل معادل ۰/۷۵ درنظر گرفته شد.

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 مولکولی و ضریب انتشار تلاطم به‌ترتیب ۱، ۰ و ۰ درنظر گرفته شدند. در بخش محاسبات انتقال رسوب مدل، با توجه به نوع، اندازه و دانه‌بندی مواد بستر ماسه‌ای، از معادلات ون راین استفاده شد. پس از مشخص نمودن اطلاعات ورودی مدل عددی و صحت سنجی کارکرد مدل در شبیه‌سازی جریان آب صاف، سه سناریو برای شرایط جریان با انتقال رسوب مورد آزمون قرار می‌گیرند. در نبود اطلاعات تجربی از جریان آب با انتقال رسوب در محدوده اثر سرریز با سازه‌های وابسته آن، برای اطمینان از کارآیی مدل عددی، ابتدا مدل‌سازی برای بازه مستقیم آبراهه انجام یافت. شرایط هندسی مدل‌سازی براساس مدل آزمایشگاهی (Farhadi-Bansuleh and Yasi, 2019)، ولی با فرض راستای مستقیم فلوم درنظر گرفته شد. از دانش هیدرولیکی برای اعتبارسنجی مدل استفاده گردید، به‌طوری‌که شرایط مورد انتظار زیر توسط مدل عددی برآورده شود.

۱. در شرایط مرزی بالا و پائین‌دست: بده رسوب ورودی برابر با بده رسوب خروجی باشد

جدول ۱ مقادیر خطای تخمین عمق آب مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی (Farhadi-Bansuleh and Yasi, 2019)

Table 1 Error values of numerical model water depth estimation with laboratory results (Farhadi-Bansuleh and Yasi, 2019)

Specifications	Mesh grid (m)			Discharge (m^3/s)	Section at bend (o)	Correlation (R2)	Error Index (MAE)	Error Index (RMSE)	Range of error (%)
	Before bend	In bend	After bend						
Weir at 60 degrees from the bend entrance	0.03	0.02	0.02	0.075	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. تقارن الگوی جریان در عرض مقطع کنترل بالادست سرریز رخ دهد
۳. تقارن رسوب‌گذاری در عرض مقطع کنترل بالادست سرریز رخ دهد
٤. توسعه ته‌نشست رسوبات تا تاج سرریز (سرریز به‌صورت آبشار عمل کند)

همچنین در مدل‌سازی جریان آب با انتقال رسوب در مسیر مستقیم، تأثیر مدل‌های تلاطمی نیز موردبررسی قرار گرفت، و درنهایت مدل تلاطمی RNG برای شبیه‌سازی انتخاب شد.

پیرو اعتبارسنجی و تنظیم مدل عددی برای شرایط جریان آب با انتقال رسوب، در ساخت‌گاه سرریز در بازه مستقیم آبراهه، تعداد سه سناریو جهت مدل‌سازی عددی جریان آب با انتقال رسوب در پیچ آبراهه موردنظر قرار گرفت (جدول ۲). در این سناریوها، سرریز در موقعیت ۶۰ درجه از پیچ آبراهه با خم ۹۰ درجه قرار داشته، و زاویه آبگیری ۹۰ درجه است. در سناریو اول آبگیری از دو طرف سرریز، و در سناریو دوم و سوم آبگیری فقط از یک طرف سرریز (به‌ترتیب از پیچ خارجی و از پیچ داخلی) صورت می‌گیرد.
در سناریوهای نشان داده‌شده در جدول ۲ برای جریان با انتقال رسوب، هم‌زمان تأثیر آستانه و مجرای تخلیه رسوب نیز درنظر گرفته‌شده است. برای تأمین شرایط پایداری حل و انتخاب زمان اجرای مدل اطمینان، با بررسی نمودارهای متوسط انرژی جنبشی نسبت به زمان در آزمون‌های متعدد، زمان مناسب برای اجرای مدل ۱۶۰۰ ثانیه انتخاب گردید.

۳- نتایج و بحث

در برخی از شرایط، انحراف جریان از سدهای انحرافی محدود به آبگیری فقط از یک سمت است بنابراین به مقایسه مدل‌سازی آبگیر در یک طرف با دو طرف سرریز پرداخته شد. مطابق جدول ۳، مدل‌سازی جریان آب با انتقال رسوب برای سه سناریو (شامل آبگیرهای یک طرف در پیچ خارجی یا داخلی، و دو طرف سرریز با زاویه آبگیری ۹۰ درجه، با آستانه آبگیر و مجرای تخلیه رسوب) اجرا گردید. نتایج شبیه‌سازی سه سناریو برای توزیع بده جریان آب و بار رسوبی در آبگیرها در جدول ۳ ارائه‌شده است. الگوی جریان و رسوب‌گذاری نیز به‌صورت شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده‌شده است. در شکل ۲ نتایج ترسیمی مربوط به آبگیری از دو طرف سرریز، و در شکل ۳ آبگیری از یک طرف (پیچ خارجی و پیچ داخلی) ارائه گردیده است.

شکل ۲ برای آبگیری از دو طرف سرریز با زاویه ۹۰ درجه نشان می‌دهد که باوجود آستانه آبگیر و مجرای تخلیه رسوب، میانگین بده جریان آبگیرها در پیچ خارجی و داخلی به‌ترتیب ۰/۰۲۱ و ۰/۰۱۶ مترمکعب بر ثانیه بوده است.

جدول ۲ سناریوهای مدل‌سازی جریان برای کانال با خم‌های ۹۰ درجه

Table 2 Flow modeling scenarios for the channel with 90° bends

Scenarios	Numerical grid (m)			Intakes		Angle of intakes (°)	Discharge (Q: m3/s)	Sediment concentration (ρ_s: Kg/m^3)	Intake sill	Sluice way
	Before bend	In bend	After bend	Outer bend	Inner bend					
First	0.03	0.02	0.02	❋	❋	90	0.250	100	❋	❋
Second	0.03	0.02	0.02	❋	-	90	0.250	100	❋	❋
Third	0.03	0.02	0.02	-	❋	90	0.250	100	❋	❋

جدول ۳ مقایسه نتایج شبیه سازی جریان های انتقال رسوب در آبگیرهای ۹۰ درجه

Table 3 Comparison of the simulation results of sediment transporting flows in 90 degree intakes

Scenarios	Discharge (Q: m^3/s)	Sediment concentration (ρ_s: Kg/m^3)	Mean inflow rate to intakes (Q: m^3/s)		Mean sediment load to intakes (Q_s:Kg/s)		Sediment to intakes (V_s:Kg)	
			Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer
First (Bi-lateral intakes)	0.250	100	0.016	0.021	0.007	0.0012	0.55	0.01
Second (A single-outer intake)	0.250	100	-	0.023	-	0.002	-	0.012
Third (A single-inner intake)	0.250	100	0.015	-	0.0085	-	0.61	-

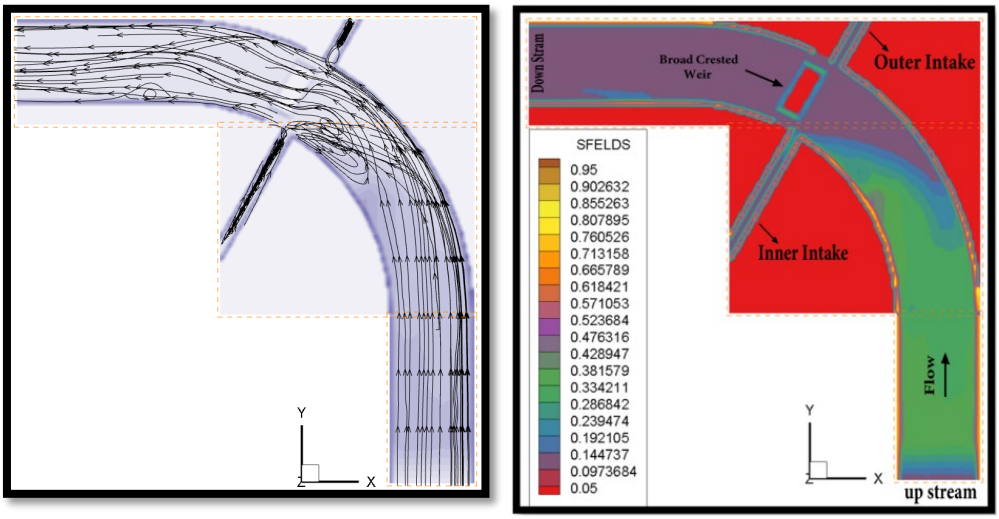

Fig. 2 Plan view of modeling and simulation results for the first scenario (A) Deposition pattern and (B) Flow pattern

شکل ۲ نمای پلان نتایج مدل‌سازی و شبیه‌سازی برای سناریوی اول (الف) الگوی رسوب و (ب) الگوی جریان

همچنین مقدار میانگین رسوب ورودی به آبگیرهای خارجی و داخلی به‌ترتیب ۰/۰۰۱۲ و ۰/۰۰۷ کیلوگرم بر ثانیه و مقدار کل رسوب ورودی به‌ترتیب ۰/۰۱ و ۰/۵۵ کیلوگرم محاسبه‌شده است. درنهایت نسبت بده جریان، نسبت میانگین رسوب ورودی و نسبت کل مقدار رسوب ورودی در آبگیر خارجی نسبت به داخلی به‌ترتیب ۱/۳۱، ۰/۱۷ و ۰/۰۱۸ است. همچنین نتایج ترسیمی خطوط جریان در بالادست سرریز نشان می‌دهند که ایجاد جریان‌های ثانویه و حلزونی در قسمت پیچ داخلی آبراهه، سبب رسوب‌گذاری در این قسمت شده و ورود ذرات رسوب به آبگیر را تشدید می‌کنند.

مقایسه نتایج شبیه‌سازی آبگیری از دو طرف و یک طرف سرریز در آبگیر خارجی نشان می‌دهد که بده جریان ۹/۵ درصد و به مقدار ۰/۰۰۲ مترمکعب بر ثانیه افزایش‌یافته است و در آبگیر داخلی ۶/۳ درصد و به مقدار ۰/۰۰۱ مترمکعب بر ثانیه دچار کاهش شده است. مقادیر میانگین بار رسوب ورودی به آبگیر و مقدار کل رسوبات ورودی در آبگیر خارجی به‌ترتیب ۰/۰۰۰۸ کیلوگرم بر ثانیه و ۰/۰۰۲ کیلوگرم افزایش‌یافته است. این مقدار افزایش برای آبگیر داخلی برابر با ۰/۰۰۱۵ کیلوگرم بر ثانیه و ۰/۰۶ کیلوگرم بوده است.

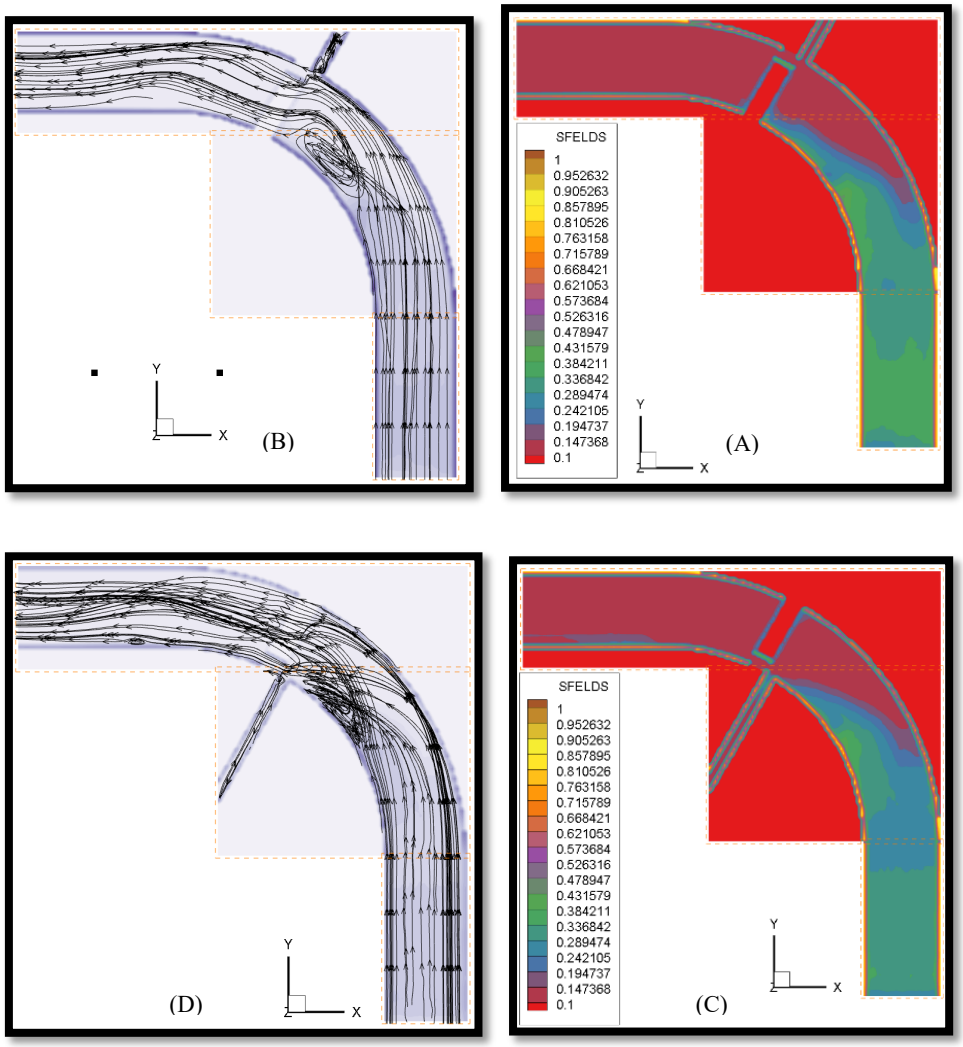

Fig. 3 Plan view of modeling and simulation results (A) Deposition pattern for the second scenario, (B) Flow pattern for the second scenario, (C) Deposition pattern for the third scenario, (D) Flow pattern for the third scenario

شکل ۳ نمای پلان نتایج مدل‌سازی و شبیه‌سازی (الف) الگوی رسوب برای سناریوی دوم، (ب) الگوی جریان برای سناریوی دوم، (ج) الگوی رسوب‌گذاری برای سناریوی سوم، (د) الگوی جریان برای سناریوی سوم

٤- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، از مدل عددی FLOW-3D برای شبیه‌سازی 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 واسنجی و تائید؛ و برای جریان آب با انتقال رسوب اعتبارسنجی و تنظیم شد. سه سناریو برای آزمون آبگیری با زاویه ۹۰ درجه از دو طرف و یک طرف (از پیچ داخلی یا خارجی) سرریز همراه با 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 می‌دهد که مدل عددی FLOW-3D قابلیت خوبی در شبیه‌سازی جریان آب با انتقال رسوب در پیچ آبراهه همراه با سرریز، سازه‌های وابسته آن را دارد.

نتایج مدل‌سازی تجربی و عددی برای شرایط جریان آب صاف نشان می‌دهد که توزیع بده جریان آب به دو آبگیر

واقع در پیچ خارجی و داخلی نسبتاً یکنواخت است، که با شواهد میدانی تائید نمی‌شود. ازاین‌رو، اگر ساخت‌گاه سرریز و سدهای انحرافی در پیچ رودخانه‌ها اجتناب‌ناپذیر باشد، مدل‌سازی 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 بهره‌برداری را پیش‌بینی نمود. به‌هرحال باید توجه داشت که رایانه‌ای با پردازنده قوی لازم است، زیرا زمان اجرای مدل FLOW-3D برای سناریوهای جریان آب با انتقال رسوب جند روزه بوده، و تقریباً ۳۰ برابر طولانی‌تر از شبیه‌سازی‌های مربوط به جریان آب صاف است.

در برخی شرایط، انحراف جریان برای آبگیری از سدهای انحرافی محدود به آبگیری فقط از یک سمت سد است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی آبگیری از دو طرف و یک طرف سرریز در آبگیرهای با زاویه ۹۰ درجه با آستانه و مجرای تخلیه رسوب، نشان‌دهنده افزایش بده جریان و رسوب ورودی در آبگیر یک طرف (پیچ خارجی) نسبت به آبگیری از دو طرف می‌باشند و در آبگیری از یک طرف (پیچ داخلی) بده جریان کاهش ولی مقادیر رسوب ورودی افزایش‌یافته است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی آبگیری از دو طرف و یک طرف سرریز در آبگیر خارجی نشان می‌دهد که بده جریان مقدار ۹/۵ درصد افزایش‌یافته است که این مقدار در آبگیر داخلی ۶/۳ درصد کاهش داشته است. میانگین بار رسوبی و حجم کل رسوبات ورودی به آبگیر خارجی به‌ترتیب ۶۶ و ۲۰ درصد، و به آبگیر داخلی ۲۲ و ۱۱ درصد افزایش‌یافته است. آستانه برای جلوگیری از ورود رسوبات به آبگیر ساخته می‌شود، اما باگذشت زمان و حرکت رسوبات در پشت سرریز و در صورت تخلیه نشدن رسوبات، انتقال رسوبات به سمت آبگیرها می‌رود. بنابراین برای علاج بخشی و بهبود عملکرد آبگیرها هم در توزیع بده جریان و هم در جلوگیری از ورود رسوبات به آبگیرها، احداث مجرای تخلیه رسوب خصوصاً در آبگیرهای واقع در پیچ داخلی به‌دلیل مکانیسم جریان و رسوب‌گذاری در این ناحیه، توصیه می‌گردد.

ساخت مدل تجربی و کاربرد دیگر مدل‌های عددی برای شرایط جریان آب با انتقال رسوب، در پیچ‌های با زاویه و انحنای نسبی متفاوت؛ برای بده، نوع رسوبات بستری و غلظت رسوب متفاوت؛ و بررسی اثرات شیب و زبری بستر، هندسه آبراهه و سرریز و آبگیرهای دو طرف برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌گردد. //////

۵- فهرست علائم

فشار (N/m^2)	p
سرعت جریان در جهت‌های مختصات کارتزین x، y و z (ms^{-1})	ui
کسری از سطح برای جریان در جهت‌های x،y و z	Ai, j
شتاب حجمی	Gi
ترم‌های لزجت	fi
بده جریان (m^3/s)	Q
چگالی رسوب (Kg/m^3)	ρ_s
بار رسوب (Kg/s)	Qs
مقدار رسوب (Kg)	Vs
چگالی (kgm^{-3})	ρ
لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)	μ

منبع‌ها References

Barbhuiya, A.K. and 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.

Brethour, J. and J. Burnham (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”. Ph.D. Thesis, 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), p. 1294-1306. (in Persian)

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)

Heidarirad, P. Kamanbedast, A. A. Heidarnezhad, M. Masjedi, A. R. & Hasoonizadeh, H. (2020). The Effect of Convergence and Divergence on Flow Pattern and Sediment Transport in Lateral Intakes. *JWSS*, 24 (1), 69-82.

Mehrdar, L., Hemmati, M,. & Yasi, M. (2021). Experimental Investigation of the Effect of Sloping-Broad Crested Weirat Bilateral Water Intakes in 90º Sharp Bend. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research.* Vol.22. No.85. P: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)

Salamatravandi, N. (2012). *Simulation of the flow over weirs in a channel bend using FLOW-3D*. M.Sc. Thesis. Urmia University. Urmia. Iran. (in Persian)

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)

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, 301 p.

Yasi, M. & Salamatravandi, 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)

Yasi, M. 1989. Training and bank protection of alluvial rivers by Bio-technical means. M.Sc. Thesis. Shiraz University. Shiraz. Iran. (in Persian).