

Hydraulic Behavior Analysis of Duckbill Weirs under the Influence of Sediment Accumulation during Operational Conditions

Omid Mahdavi Amraei¹, Atefeh Parvaresh Rizi^{2*}, Salah Kouchakzadeh³

1- Graduate student, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran.

2- Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran.

3- Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran.

*parvarsh@ut.ac.ir

Received: 26 December 2025

Revised: 1 May 2026

Accepted: 2 May 2026

Discussion: 23 September 2026



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Duckbill spillways are widely used in irrigation networks due to their extended effective crest length, which allows them to limit upstream water level fluctuations under varying flow rates. However, sediment deposition upstream of these structures is a critical operational challenge that can significantly affect their hydraulic performance. This study investigated how different sediment-deposition patterns affect duckbill-weir performance under various channel slopes in an adjustable rectangular flume. It also examined how two crest geometries (sharp and rounded) influence the discharge coefficient with and without sediment. Findings show that upstream sediment causes a substantial reduction of 24–28% in the discharge coefficient, leading to higher upstream water levels. Although steeper channel slopes generally increase the coefficient, the negative impact of sediment becomes more severe at higher slopes. A comparison of crest geometry revealed that the rounded crest offers a clear advantage under sediment-free conditions (about a 6.5% increase in the discharge coefficient), but this benefit sharply declines when sediment is present (only about a 2.5% increase). Overall, the results highlight that sediment accumulation is a major factor limiting the performance of duckbill weirs. Therefore, accounting for sediment effects during both design and operation is essential for maintaining effective water-level control in irrigation distribution systems.

Methodology: A laboratory flume with adjustable longitudinal slope was employed to simulate flow over duckbill spillways under two operational scenarios: initial operation without sediment and advanced operation with full sediment accumulation. Two crest geometries were tested, including a sharp-edged crest and a rounded crest commonly recommended for improving flow detachment. The sediment layer upstream of the spillway was shaped to represent a real-world deposition pattern observed after long-term network operation. Flow depth and hydraulic response were recorded for each condition, and the discharge behavior was evaluated based on changes in the discharge coefficient.

Results and Discussion: The findings revealed that sediment accumulation plays a significant role in altering the hydraulic entrance conditions of duckbill spillways. In sediment-free conditions, flow approaches the crest smoothly, preserving energy and leading to efficient discharge. However, in the presence of sediment, especially when it extends close to the spillway nose, the flow experiences partial blockage and redirection. This condition increases upstream water head and reduces flow velocity just

before passing over the crest, resulting in a noticeable decrease in discharge efficiency.

Moreover, while increasing the channel slope generally improved flow capacity by supplying additional flow energy, this benefit was partially offset by the disruptive effect of sediment. At steeper slopes, although the flow had higher energy, the interaction between flow and deposited sediment generated stronger turbulence and localized energy losses, indicating that the positive effect of slope becomes limited if sediment is not managed properly.

The comparison between crest geometries demonstrated that the rounded crest exhibited better performance under clear-water conditions by facilitating smoother flow transition and reducing flow separation. However, when sediment was present, the effective overflow edge shifted from the physical crest to the sediment surface, masking the hydraulic benefits of the rounded crest. This finding suggests that crest geometry optimization alone is insufficient in networks with persistent sedimentation and must be complemented with sediment management strategies.

Conclusion: This research highlights that upstream sediment deposition is a key parameter influencing the hydraulic performance of duckbill spillways and cannot be neglected during design and operation. The study emphasizes that channel slope and crest geometry interact with sediment conditions, and their combined effect determines the actual field performance of the structure. Therefore, for long-term efficiency, spillway design and maintenance strategies must incorporate predictive assessment of sediment behavior and targeted flushing or dredging plans. The outcomes of this study provide practical insights for irrigation authorities, offering guidance for both initial design decisions and adaptive management during operation.

Keywords: Channel slope, Crest geometry, Discharge coefficient, Duckbill weir, Sediment deposition.

Conflict of Interest: The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Funding: The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements: All information and results are presented in the text of the article. The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors' contribution:

First Author: Investigation, Formal analysis, Writing – original draft.

Second Author: Conceptualization, Methodology, Supervision, Writing – review & editing.

Third Author: Resources, Methodology, Supervision, Writing – review & editing.

ارزیابی رفتار هیدرولیکی سرریزهای نوک اردکی، تحت اثر انباشت رسوب در شرایط بهره‌برداری

امید مهدوی امرئی^۱، عاطفه پرورش‌ریزی^{۲*}، صلاح کوچک‌زاده^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۳- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

*parvarsh@ut.ac.ir

نشریه هیدرولیک

انجمن هیدرولیک ایران

وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir



دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۵

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۲

نقد و بررسی: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

چکیده: سرریزهای نوک‌اردکی به دلیل طول مؤثر بیشتر و توانایی در محدود کردن تغییرات سطح آب، کاربرد گسترده‌ای در شبکه‌های آبیاری روباز دارند. با این حال، پس از آغاز بهره‌برداری، اثر انباشت رسوب در بالادست این سازه‌ها که در اغلب موارد رخ می‌دهد، بر عملکرد هیدرولیکی سرریز مشخص نیست. این پژوهش با هدف ارزیابی اثر الگوی رسوب‌گذاری بر عملکرد سرریز نوک‌اردکی، تحت شیب‌های طولی مختلف کانال در یک فلوام مستطیلی شیب‌پذیر انجام شد. همچنین اثر دو شکل لبه سرریز (لبه تیز و لبه‌گرد) بر تغییرات ضریب جریان در شرایط با و بدون رسوب مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که وجود رسوبات در بالادست سرریز به طور میانگین موجب کاهش ۲۴ تا ۲۸ درصدی در ضریب جریان و در نتیجه افزایش محسوس ارتفاع آب در بالادست می‌شود. همچنین با افزایش شیب طولی کانال، اگرچه ضریب جریان به طور کلی افزایش می‌یابد، اما میزان کاهش ضریب جریان ناشی از حضور رسوبات، در شیب‌های تندتر تشدید می‌شود. مقایسه هندسه لبه سرریز نشان داد که برتری لبه گرد در شرایط بدون رسوب (با افزایش حدود ۶/۵ درصدی ضریب جریان) محسوس است، اما این مزیت در شرایط انباشت رسوب (با افزایش تنها حدود ۲/۵ درصدی) به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. از آنجا که انباشت رسوب در بالادست سرریز نقش کلیدی در کاهش ضریب جریان سرریزهای نوک‌اردکی دارد، توجه به این موضوع در طراحی و همچنین زمان بهره‌برداری ضرورت دارد و بر کنترل رقوم سطح آب در فرایند توزیع آب اثرگذار است.

کلیدواژگان: سرریز نوک‌اردکی، ضریب جریان، رسوب‌گذاری، شیب کانال، فرم لبه سرریز.

کنگره‌ای هستند (Davoudmaghani et al., 2017;)

Erpicum et al., 2011). مطالعات اخیر بر بهبود طراحی سرریزها برای ارتقای کارایی هیدرولیکی، کاهش هزینه‌های ساخت و تضمین ایمنی بهره‌برداری در رویارویی با تغییرات اقلیمی و شرایط رسوبی متمرکز شده‌اند (Chazarra et al., 2019; Ferc, 2017).

سرریزهای نوک‌اردکی با هدف افزایش طول مؤثر تاج و بهبود شرایط هیدرولیکی نسبت به سرریزهای خطی معرفی شده‌اند.

۱- مقدمه

سرریزها از اجزای مهم شبکه‌های آبیاری و انتقال آب به شمار می‌آیند. این سازه‌ها افزون بر اندازه‌گیری آب، وظیفه تنظیم تراز سطح آب را برای آبیاری بر عهده دارند تا برداشت آب توسط کانال‌های فرعی با بده مشخص صورت گیرد (Tajari et al., 2018; Mohammadi et al., 2017). سرریزها بر اساس چگونگی قرارگیری در کانال، دارای انواع مختلفی از جمله سرریزهای خطی، مورب، نوک‌اردکی و

بده مدل پایه (نسبت آبگذری) را نیز تا ۱۸ درصد بهبود می‌بخشند. (Tajari et al. (2020) به شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی الگوی رسوب‌گذاری در بالادست سرریزهای نوک اردکی با استفاده از صفحه‌های مستغرق و دریچه‌های جانبی پرداختند. نتایج نشان داد که صفحات مستغرق با ایجاد جریان‌های ثانویه و چرخشی، نقش مؤثری در هدایت و تخلیه رسوبات به پایین‌دست از طریق دریچه‌های جانبی دارند.

پژوهش‌های پیشین بیشتر به بررسی ضریب جریان سرریز نوک‌اردکی در شرایط مختلف پرداخته‌اند، اما عملکرد این سرریز در حالت‌های گوناگون انباشت رسوب در بالادست که شرایط بهره‌برداری متداول شبکه‌ها است، مورد توجه نبوده است. انباشت رسوب در بالادست سرریز نوک‌اردکی پس از آغاز بهره‌برداری همیشه رخ می‌دهد و می‌تواند بر ضریب جریان سرریز تأثیر مستقیم بگذارد. این در حالی است که این موضوع در فاز طراحی نادیده گرفته می‌شود. شکل ۱ نمایی از سرریز نوک‌اردکی را نشان می‌دهد که در حین بهره‌برداری، در بالادست خود با رسوب‌گذاری شدید روبرو شده است. همچنین، لبه سرریز در طول سال‌های بهره‌برداری دچار تغییر شکل شده‌اند، طوری که تشخیص مشخصه‌ی هندسی اولیه آن (پخ یا گرد بودن لبه) دشوار است. این نمونه، یکی از چند مورد رسوب‌گذاری و تغییر هندسه‌ی لبه در سرریزهای نوک‌اردکی است که به طور گسترده در شبکه‌های آبیاری و زهکشی کشور مشاهده می‌شوند.

در شبکه‌های انتقال آب سطحی، تجمع رسوب در مجاورت سرریز پدیده‌ای رایج است. چنین شرایطی می‌تواند تغییر مؤثری در هندسه مجرا ایجاد کند و در نهایت بر ضریب جریان اثر بگذارد. بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک سرریزهای نوک‌اردکی در زمان انباشت رسوب مغفول مانده، در حالی که چنین شرایطی در بیشتر شبکه‌های مجهز به سرریزهای نوک‌اردکی، حاکم است. در این پژوهش، اثر تجمع رسوب در بالادست بر عملکرد سرریز نوک‌اردکی نصب‌شده در یک فلوم شیب پذیر مطالعه شد. اثر شیب طولی کانال و هندسه سرریز نوک‌اردکی با انباشت رسوب در بالادست به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج این مطالعه می‌تواند درک دقیق‌تری از عملکرد سرریزهای نوک‌اردکی در شرایط بهره‌برداری واقعی فراهم کرده و به بهبود طراحی و برنامه‌ریزی بهره‌برداری سازه‌های آبیگر در

هرچند هندسه آن‌ها در ظاهر ساده است، طراحی دقیق این سرریزها همچنان به تعیین فراسنجه‌هایی مانند شکل پلان و انحنای تاج وابسته است که هنوز در منابع کلاسیک به روشنی تبیین نشده‌اند. افزایش طول مؤثر در این سرریزها موجب افزایش ظرفیت عبور جریان و کاهش نوسان‌های سطح آب بالادست می‌شود؛ ویژگی‌هایی که در مطالعات اولیه گسترش این سازه‌ها نیز تأکید شده است (Bazin., 1865; Scimemi., 1946).

پژوهش‌های انجام شده در زمینه ضریب جریان سرریز نوک‌اردکی در سال‌های اخیر توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. بر اساس پژوهش Nikipiek & Kashefipour (2016)، آزمایش‌ها بر روی سرریزهای نوک‌اردکی و مایل در یک فلوم آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش بده و ارتفاع آب در تاج سرریز، ضریب جریان سرریزهای نوک‌اردکی کاهش می‌یابد. پژوهش Davoudmaghami et al. (2017)، بررسی تأثیر تراز بستر در بالادست و پایین‌دست بر ضریب جریان سرریزهای نوک‌اردکی لبه‌تیز نشان داد که تغییر ارتفاع سرریز تأثیر محسوسی بر ضریب جریان ندارد. در پژوهش Emami & Parsa (2019)، مقایسه مدل‌های عددی و فیزیکی سرریزهای نوک‌اردکی و مایل نشان داد که از نظر عملکرد هیدرولیکی، در بارهای آبی کم، سرریزهای مایل ضریب جریان بیشتری داشتند، اما با افزایش ارتفاع آب، کاهش ضریب جریان در سرریزهای نوک‌اردکی شدیدتر بود.

در پژوهش Tajari et al. (2018) مدل‌های ترکیبی سرریز-دریچه نوک‌اردکی با ابعاد دریچه جانبی مختلف به منظور ارزیابی خود پالایی بررسی شد. نتایج پژوهش آنان نشان داد که وجود دریچه جانبی، ظرفیت عبور جریان را تا ۱۴ درصد افزایش داده و اثرگذاری شایان توجهی نسبت به دریچه دماغه سرریز در شست‌وشوی رسوبات دارد. (Tajari et al. (2019) با ایجاد بازشدگی‌های جانبی در بدنه سرریز و نصب صفحات مستغرق در بالادست آن، به بررسی روشی برای کاهش تجمع رسوبات در بالادست سرریزهای نوک اردکی در شبکه‌های آبیاری پرداختند. نتایج نشان داد که صفحات مستغرق با ایجاد جریان ثانویه، نه تنها باعث افزایش بازده رسوب‌شویی تا ۶۵ درصد می‌شوند، بلکه نسبت بده عبوری از سرریز اصلاح‌شده به

۲- مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۲ متر، عرض ۸۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر انجام شد. پلان، مقطع طولی از نمای کلی تجهیزات آزمایشگاهی و فراسنجه‌های طراحی در شکل ۲ ارائه شده است. از آنجا که ضوابط طراحی منتشر شده برای سرریزهای نوک‌اردکی در منابع محدود است، در این پژوهش از دستورکار ارائه شده در نشریه فائو ۲۶/۲ برای طراحی این نوع سرریز استفاده شد (FAO, 1975). ابعاد سرریز نوک‌اردکی در این تحقیق، با به‌کارگیری روش تحلیل ابعادی و بر مبنای نسبت ابعاد سرریزهای متداول در شبکه‌های آبیاری واقعی، تعیین شد. بیشینه بده ورودی فلوم، بر مبنای شرایط آزمایشگاهی، ۵۰ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد. فراسنجه‌های طراحی سرریز نوک‌اردکی شامل A و I محاسبه شدند و پس از تعیین زاویه مطلوب سرریز، ابعاد به‌دست آمده به مقیاس آزمایشگاهی تبدیل شد (قسمت بزرگ‌نمایی شده شکل ۲).

شبکه‌های انتقال آب نیز کمک کند.



Fig. 1 Duckbill Spillway located in the Bam irrigation network - Kerman Province

شکل ۱ سرریز نوک‌اردکی واقع در شبکه آبیاری بام - استان کرمان

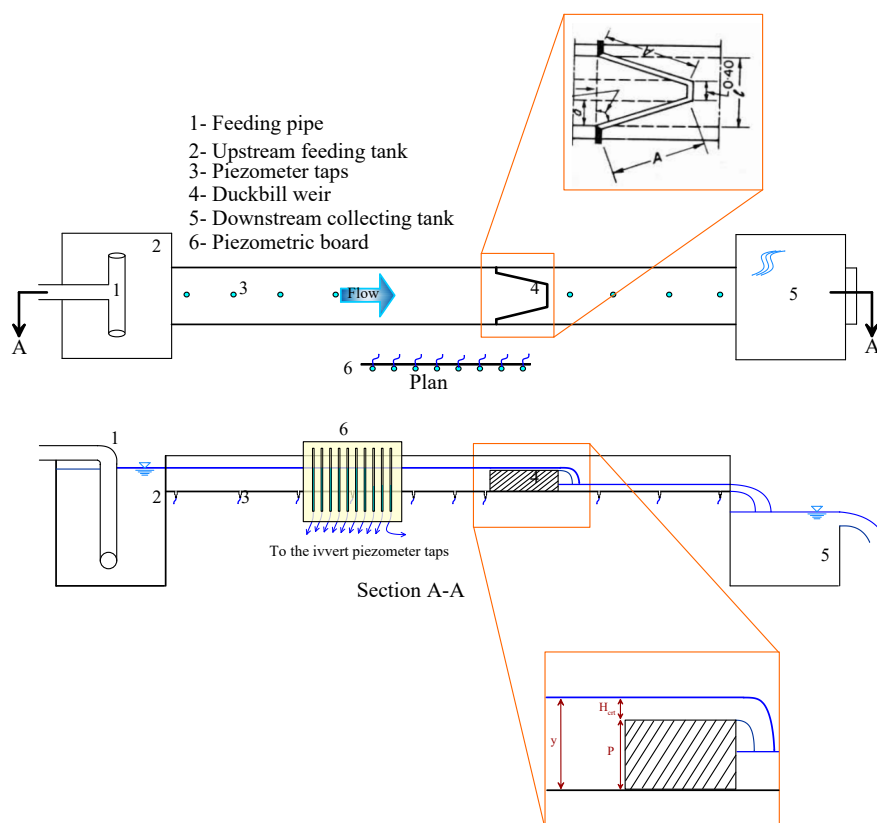


Fig. 2 Schematic diagram of the flume and laboratory equipment.

شکل ۲ طرح‌واره فلوم و تجهیزات آزمایشگاهی

نوک اردکی هم سطح بود (شکل ۴).



Fig. 4 A view of the sediment-filled state upstream of the spillway.

شکل ۴ نمایی از حالت پر از رسوب در بالادست سرریز

افزون بر این، پرشدگی کامل بالادست سرریز از رسوب نیز مورد ارزیابی قرار گرفت (وضعیت بحرانی)؛ حالتی که در بسیاری از شبکه‌های آبیاری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های بهره‌برداری رخ می‌دهد. شکل تفاوت حالت پرشدگی کامل بالادست را با حالت رسوب‌گذاری ۴۵ درجه به وضوح نمایش می‌دهد. در شکل ۶ همه الگوهای استقرار رسوب با حالت بدون رسوب مقایسه شده‌اند تا میزان کاهش ظرفیت عبور جریان و تغییرات ضریب جریان سرریز به‌صورت جامع تحلیل شود.

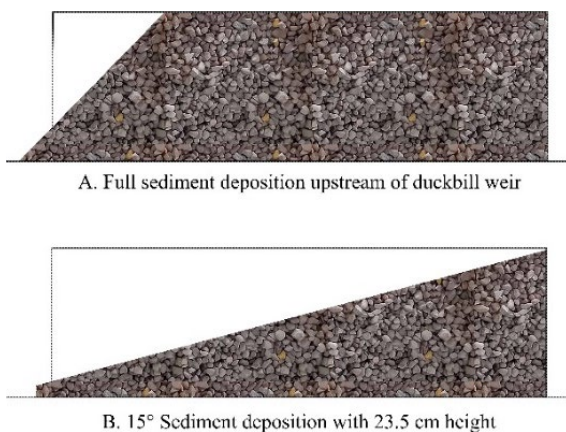


Fig. 5 A comparison between the fully silted condition and the 15-degree condition.

شکل ۵ تفاوت حالت پر رسوب‌گذاری با حالت ۱۵ درجه

سرریزهای نوک اردکی از ورق پلکسی گلاس با ضخامت هشت میلی‌متر ساخته و در فوم نصب شدند (شکل ۳). عمق آب در بالادست سرریز با یک دستگاه اندازه‌گیر نقطه‌ای^۱ و ۶۰ عدد پیژومتر^۲ که در طول کانال نصب شده‌اند، اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها در سه شیب طولی متفاوت ۰/۰۰۱۵، ۰/۰۰۰۸ و ۰/۰۰۰۲ انجام شد که دامنه شیب تند تا ملایم را نشان می‌دهد؛ شیب تندتر در بازه‌های کوتاه و دو شیب دیگر به طور معمول و در بسیاری از بازه‌ها، می‌توانند در کانال‌های آبیاری روباز به کار روند.



Fig. 3 Duckbill spillway with an 8-cm nose and an effective length of 1.8 meters.

شکل ۳ سرریز نوک اردکی با دماغه ۸ سانتی‌متر و طول موثر ۱/۸ متر

۱-۲- استقرار رسوب در بالادست سرریز

بررسی اثر رسوب بر رقوم سطح آب و عملکرد سرریز نوک اردکی با استفاده از شن بادامی و با زاویه‌های استقرار مختلف انجام شد. در مرحله نخست، به منظور تعیین اثر زاویه استقرار رسوب بر عملکرد سرریز، زاویه استقرار طبیعی شن‌های بادامی در حالت اشباع بررسی شد. سپس، چند سطح شیب‌دار رسوب با زاویه‌های ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه آزمایش شدند. این لایه‌های رسوبی در دو ارتفاع ۱۸ سانتی‌متر (پرشدگی نسبی) و ۲۳/۵ سانتی‌متر (پرشدگی کامل) از کف کانال در بالادست سرریز قرار داده شدند. در ارتفاع ۲۳/۵ سانتی‌متر، سطح رسوب با ارتفاع تاج رسوب

1. Point Gauge
2. Piezometer

اثر کشش سطحی در مقایسه با نیروهای اینرسی ناچیز است. بنابراین، عدد وبر بر پدیده‌های جدایی جریان و ناحیه انقباض مؤثر نبوده و نتایج مستقل از این عدد بی‌بعد هستند. همچنین تمامی آزمایش‌ها در محدوده جریان آشفته کامل انجام شد. در این شرایط، ضریب مقاومت جریان (مانند ضریب دارسی-وایسباخ) تنها تابعی از زبری نسبی بوده و نسبت به تغییرات عدد رینولدز حساس نیست. بنابراین، تغییرات عدد رینولدز در محدوده آزمایش‌های صورت گرفته، تأثیر شایان توجهی بر ضریب جریان سرریز ندارد. بستر و دیواره فلولم و همچنین سطح رسوبات در همه آزمایش‌ها ثابت بوده و بنابراین زبری نسبی (ϵ/R) در کل فرآیند اندازه‌گیری ثابت در نظر گرفته می‌شود.

از آنجا که عرض کانال و طول موثر سرریز در آزمایش‌ها ثابت است، اثر نسبت H_{crt}/W و H_{crt}/L_e بر ضریب جریان ناچیز تلقی شده و از تحلیل حذف شد. زاویه سرریز (α) نیز در همه آزمایش‌ها ثابت است و امکان ارزیابی اثر مستقل آن بر ضریب جریان وجود ندارد و این فراسنجه در فرم نهایی رابطه بی‌بعد وارد نشد. شایان یادآوری است که در مرحله اول تحقیق، فراسنجه θ به‌عنوان معرف حالت‌های مختلف استقرار رسوب در بالادست سرریز وارد تحلیل ابعادی شد. ولی پس از انجام آزمایش‌های مقدماتی، آرایش پر از رسوب به‌عنوان نماینده شرایط اصلی بهره‌برداری انتخاب شد و در آزمایش‌های اصلی، این آرایش ثابت نگه داشته شد. بنابراین فراسنجه θ ثابت است و در فرم نهایی رابطه بی‌بعد وارد نشد. بنابراین معادله ضریب جریان در این تحقیق تابعی از اعداد بدون بعد به صورت زیر است:

$$C_d = f\left(\frac{H_{crt}}{P}, \frac{\Delta H}{x}\right) \quad (4)$$

۳- نتایج و بحث

در تحقیق حاضر، آزمایش‌ها با هدف ارزیابی عملکرد سرریز نوک‌اردکی در شیب‌های طولی متفاوت کانال، تأثیر ساختار لبه سرریز و وجود حالت‌های مختلف رسوب انباشته شده در بالادست انجام شده است. بر این اساس، در این بخش به ارائه نتایج و تحلیل اثرات این فراسنجه‌ها بر عملکرد سرریز پرداخته می‌شود.

در آزمایش‌های مقدماتی، برای بررسی اثرگذاری نفوذ جریان به درون توده رسوب، سطح بالادست رسوبات با لایه نازکی از گچ پوشانده شد. نتایج نشان داد که تفاوت ضریب جریان بین حالت نفوذناپذیر و طبیعی کمتر از یک درصد است؛ بنابراین در همه آزمایش‌های اصلی از رسوبات در حالت طبیعی (نفوذپذیر) استفاده شد.

۲-۲- تحلیل ابعادی

نشریه FAO 26/2 (1975) در بخش مربوط به ویژگی‌های هیدرولیکی سازه‌های کنترل جریان و تنظیم‌کننده‌های عرضی، ضوابط کلی طراحی سرریزهای نوک‌اردکی را تبیین کرده است. بر مبنای این دستورکار، بده عبوری از سرریز تابعی از طول مؤثر سرریز، ارتفاع جریان روی تاج و شتاب ثقل است.

$$Q = C_d \times \sqrt{2g} \times L_e \times H_{crt}^{3/2} \quad (1)$$

با توجه به فراسنجه‌های مؤثر بر جریان روی تاج سرریز، می‌توان نشان داد که ضریب جریان تابعی از نسبت‌های عوامل زیر است:

$$C_d = f\left(\frac{H_{crt}, W, P, L_e}{\Delta H, x, g, \epsilon}, \frac{\sigma, \rho, \mu, \alpha, \theta}{\sigma, \rho, \mu, \alpha, \theta}\right) \quad (2)$$

در رابطه (۱)، H_{crt} ارتفاع آب روی تاج سرریز، P ارتفاع سرریز، W عرض کانال، L_e طول موثر سرریز، ΔH تغییرات ارتفاع کف کانال، x طول کانال، g شتاب ثقل، σ کشش سطحی، ρ چگالی سیال، μ گرانیوی دینامیکی، ϵ زبری مطلق، α زاویه سرریز و θ حالت‌های مختلف استقرار توده رسوب در سرریز نوک‌اردکی است. لذا می‌توان نشان داد که ضریب جریان تابعی از نسبت‌های بی‌بعد رابطه (۳) است:

$$C_d = f\left(\frac{H_{crt}}{P}, \frac{H_{crt}}{L_e}, \frac{H_{crt}}{W}, \frac{\Delta H}{x}, \frac{\rho v L}{\mu}, \frac{\epsilon}{R}, \frac{\rho \mathcal{V}^2 P}{\sigma}, \alpha\right) \quad (3)$$

با توجه به عمق جریان در آزمایش‌ها (بیش از ۵۰ میلی‌متر)،

موجب شکل‌گیری یک سطح دوگانه افقی-شیب‌دار می‌شود که به‌جای هدایت جریان، سبب انسداد نسبی ورودی، افزایش آشفتگی و ایجاد پس‌زدگی جریان در بالادست می‌شود. به همین دلیل، کاهش C_d در این حالت حدود ۲۴ تا ۲۷ درصد نسبت به حالت بدون رسوب بوده و نشان‌دهنده اثرگذاری شدید هندسه رسوب بر عملکرد سرریز است. هنگامی این نتایج با رفتار سرریزهای کرامپ مقایسه شود، هم شباهت‌های هندسی آشکار دیده می‌شود، و هم تفاوت‌های بنیادی در پیامد هیدرولیکی. سرریزهای کرامپ که دارای سطح بالادست مورب و به نسبت طولانی هستند، نسبت به زاویه این سطح بسیار حساس‌اند. یافته‌های تجربی (Al-Shukur et al. (2017) نشان داد که افزایش زاویه بالادست از ۱۷ به ۳۷ درجه می‌تواند ضریب جریان را ۳ تا ۷ درصد کاهش دهد و این کاهش تنها ناشی از تغییر هندسی سطح ورودی است. همچنین نتایج گزارش‌شده توسط (Al-Yousefi et al. (2024) بیان می‌کند که افزایش شیب بالادست از ۱:۳ به ۱:۲ یا ۱:۱/۵ به ترتیب حدود ۴/۱۶ تا ۵/۸۱ درصد افت C_d را به همراه دارد؛ یعنی اثر تغییر شیب در کرامپ همواره محدود و قابل پیش‌بینی است و از چند درصد فراتر نمی‌رود.

۳-۱- اثر حالت‌های مختلف انباشت رسوب در بالادست سرریز نوک‌اردکی

نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده بر روی سرریز نوک‌اردکی نشان می‌دهد که شیب لایه رسوب در بالادست (θ) و ارتفاع رسوب‌گذاری (H_s) نقشی بسیار اساسی در تعیین رفتار هیدرولیکی جریان دارد. هنگامی که رسوبات در بالادست با زوایای ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه بر سطح کانال استقرار می‌یابند، یک سطح شیب‌دار پیوسته پیش از تاج ایجاد می‌شود که جریان را با نظمی بیشتر و هدررفت انرژی کمتر به سوی لبه هدایت می‌کند. همان‌گونه که شکل در نتایج نشان می‌دهد، وجود این شیب پیوسته سبب افزایش ضریب جریان نسبت به حالت بدون رسوب می‌شود؛ امری که به‌ویژه در شیب‌های کم‌تر (۱۵ و ۲۵ درجه) محسوس‌تر است، زیرا جریان در برخورد با سطح مورب، مسیر ریزش نرم‌تری پیدا کرده و جدایش موضعی در ناحیه ورودی کاهش می‌یابد. این رفتار، درست در نقطه مقابل وضعیتی است که در حالت «پرسدگی کامل رسوب» رخ می‌دهد؛ زیرا در آن حالت، بخش شایان توجهی از رسوبات در ناحیه نزدیک به تاج تا حدودی افقی بوده و تنها نیمه انتهایی پروفیل دارای شیب ۴۵ درجه است. چنین آرایشی

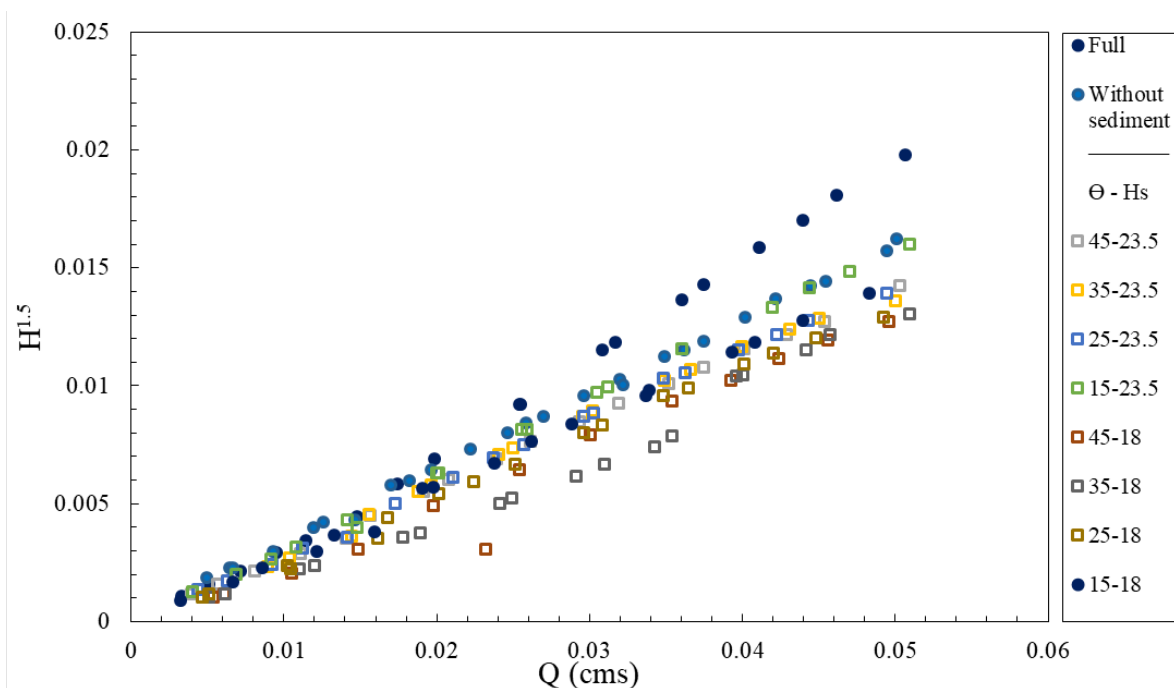


Fig 6 Results of different sediment deposition patterns upstream of the duckbill spillway.

شکل ۶ نتایج حالت‌های مختلف استقرار رسوب در بالادست سرریز نوک‌اردکی

۰/۰۰۰۸، مقدارهای کاهش برای لبه تیز و لبه گرد به ترتیب حدود ۲۵ درصد و اندکی کمتر از ۲۷ درصد، و در شیب طولی ۰/۰۰۱۵، این مقادارها به ترتیب حدود ۲۶ درصد و حدود ۲۸ درصد بوده‌اند.

از این نتایج می‌توان دریافت که در شیب طولی کمتر، اثر منفی رسوبات بر ضریب جریان هم کمتر از شیب‌های تند است. این امر را می‌توان با توجه به کاهش عمق جریان در شیب‌های تند توجیه کرد. در شیب‌های طولی تندتر و به ازای بده ثابت، عمق جریان کاهش می‌یابد. این کاهش عمق، به نوبه خود، باعث می‌شود هد $H_{crit}^{3/2}$ روی سرریز کمتر شود. از آنجا که ضریب جریان از رابطه (۴) پیروی می‌کند، کاهش این فراسنجه منجر به افزایش ضریب جریان می‌شود:

$$C_d = f(Q/H_{crit}^{3/2}) \quad (5)$$

کاهش ضریب جریان توسط رسوبات انباشته شده در بالادست را می‌توان به چند عامل هیدرولیکی مرتبط دانست که به واسطه وجود رسوب، رفتار جریان را تغییر می‌دهند. در شرایط بدون رسوب، جریان با سرعت و زاویه مناسبی به سمت سرریز هدایت می‌شود، اما وجود رسوبات، به‌ویژه اگر تا نزدیکی دماغه سرریز ادامه داشته باشند، باعث ایجاد آشفتگی، جدایش موضعی جریان در منطقه ورودی می‌شود. این تغییرات موجب اتلاف انرژی و کاهش کارایی عبور جریان از روی سرریز می‌شود (Henderson, 1966). این کاهش و اتلاف انرژی جریان، ناشی از کاهش سرعت توسط رسوبات بالادست سرریز نوکاردکی است. به طوری که رسوبات مانند سدی در مقابل جریان قرار گرفته و باعث کاهش سرعت جریان می‌شوند. با در نظر گرفتن اصل پایستگی انرژی، با کاهش سرعت جریان عمق جریان در بالادست سرریز افزایش پیدا کرده و در نتیجه ضریب جریان سرریز کاهش پیدا می‌کند.

تند شدن شیب طولی کانال، افزون بر افزایش اثر منفی رسوبات، منجر به افزایش ضریب جریان نیز خواهد شد. مقایسه ضریب جریان در سه شیب طولی نشان می‌دهد که با افزایش شیب، ضریب جریان افزایش می‌یابد (شکل ۳). به طور کلی، میانگین کاهش ضریب جریان در اثر کاهش شیب

با کنار هم قرار دادن این نتایج، می‌توان به جمع‌بندی روشنی رسید: زمانی که رسوبات با شیب پیوسته در بالادست نوکاردکی قرار می‌گیرند، این سرریز از منظر هندسی تا حدودی رفتار سرریزهای کرامپ با شیب تند را تقلید می‌کند. در مقابل، هنگامی که پروفیل رسوب از حالت یکنواخت خارج شده و بخشی از آن افقی می‌شود (حالت پرشدگی کامل)، این همانندی هندسی از بین رفته و افت C_d شدیدتر از هر مقدار گزارش شده برای سرریزهای کرامپ رخ می‌دهد. بدین ترتیب، اگرچه اثر شیب ورودی هم در کرامپ و هم در نوکاردکی تعیین‌کننده است، اما حساسیت ضریب جریان سرریز نوکاردکی به آرایش هندسی رسوبات، بسیار بیشتر از حساسیت سرریز کرامپ به تغییرات شیب خود سازه است.

۳-۲- اثر رسوب انباشته شده در بالادست و نوع

فرم لبه سرریز

ضریب جریان سرریز نوکاردکی در سه شیب طولی ۰/۰۰۱۵، ۰/۰۰۰۸ و ۰/۰۰۰۲ برآورد شد و در دو حالت پر از رسوب و بدون رسوب، و با دو ساختار لبه تیز و لبه گرد بررسی شد. در هر شیب طولی، چهار حالت مختلف سرریز آزمون شد که عبارت‌اند از لبه گرد و پر از رسوب، RE-FS^۱، لبه گرد و بدون رسوب، RE-NS^۲، لبه تیز و بدون رسوب، SE-NS^۳، و لبه تیز و پر از رسوب، SE-FS^۴.

مقدار ضریب بده در برابر هد بی‌بعد سرریز محاسبه شد و برای شیب‌های طولی آزمون شده، در شکل ترسیم شد. شکل نشان می‌دهد که انباشت رسوب در بالادست سرریز نوکاردکی موجب کاهش ضریب جریان و افزایش هم‌زمان ارتفاع آب در بالادست سرریز شده است. با این حال، میزان اختلاف بین ضریب جریان در حالت‌های بدون رسوب و پر از رسوب، به ساختار لبه سرریز و شیب طولی کانال هم وابسته است. در سرریز لبه تیز، تغییر شرایط از بدون رسوب به پر از رسوب به کاهش حدود ۲۴ درصدی ضریب جریان منجر شده است، در حالی که این کاهش برای سرریز با لبه گرد کمی بیش از ۲۷ درصد بوده است. در شیب طولی

3. Sharped edge and no sediment
4. Sharped edge and full sediment

1. Rounded edge and full sediment
2. Rounded edge and no sediment

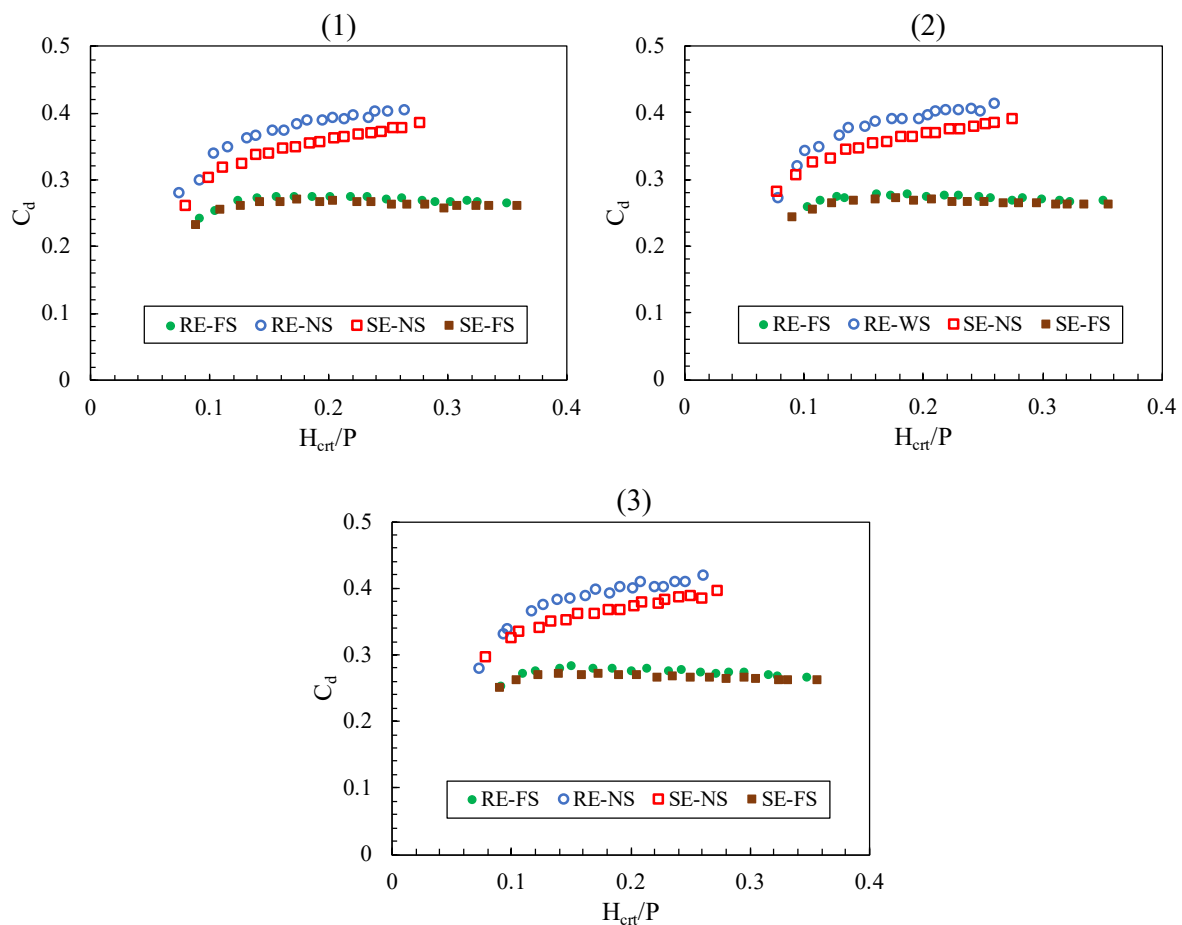


Fig. 7 Discharge coefficients at various dimensionless head ratios of the spillway, H/P , for: (1) longitudinal slope of 0.0015, (2) longitudinal slope of 0.0008, (3) longitudinal slope of 0.0002.

شکل ۷ ضریب جریان در نسبت‌های مختلف هد بی‌بعد سرریز، H/P برای (۱) شیب طولی ۰/۰۰۱۵، (۲) شیب طولی ۰/۰۰۰۸، (۳) شیب طولی ۰/۰۰۰۲

جنبشی جریان در بالادست کاهش می‌یابد، و در نتیجه جریان آرام‌تر و با پروفیل توسعه‌یافته‌تری وارد محدوده سرریز می‌شود. در چنین حالتی، فرم لبه سرریز نقش بیشتری در هدایت و کنترل جریان خواهد داشت؛ به‌ویژه لبه گرد که جریان را به‌صورت مماس هدایت کرده و آشفتگی و جدایش جریان را کاهش می‌دهد، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد (Novak, 2001). برای نمونه، ضریب جریان در حالت بدون رسوب و با تغییر فرم لبه سرریز از لبه تیز به لبه گرد به‌طور میانگین حدود ۶/۵ درصد افزایش پیدا می‌کند. اما این افزایش در حالت پر از رسوب تنها حدود ۲/۵ درصد است.

زمانی که ارتفاع رسوبات در بالادست سرریز تا سطح لبه افزایش می‌یابد (حالت پر از رسوب)، شرایط ورود و ریزش جریان به کلی متفاوت خواهد بود. در این حالت، جریان از

طولی، در حالت لبه گرد حدود ۲/۵ درصد و در حالت لبه تیز حدود ۱/۹ درصد بود. با این حال، مقایسه این تغییرات با حالت بدون رسوب (که به‌طور میانگین کاهشی حدود ۳/۱ درصد را برای لبه گرد و ۴/۱ درصد را برای لبه تیز نشان می‌داد) گویای آن است که وجود رسوبات، تاثیر شیب طولی کانال بر عملکرد سرریز نوک‌اردکی را کاهش می‌دهد. افزون بر این، نتایج نشان می‌دهند که در شرایط وجود رسوب، تفاوت بین عملکرد سرریز لبه تیز و لبه گرد نیز کم‌رنگ‌تر می‌شود.

همچنین میزان اختلاف ضریب جریان بین دو ساختار لبه سرریز (لبه تیز و لبه گرد) در حالت بدون رسوب بیشتر از حالت پر از رسوب است. در حالت بدون رسوب، جریان ورودی به سرریز تحت تاثیر مستقیم شیب طولی کانال و هندسه لبه سرریز قرار دارد. با کاهش شیب طولی، انرژی

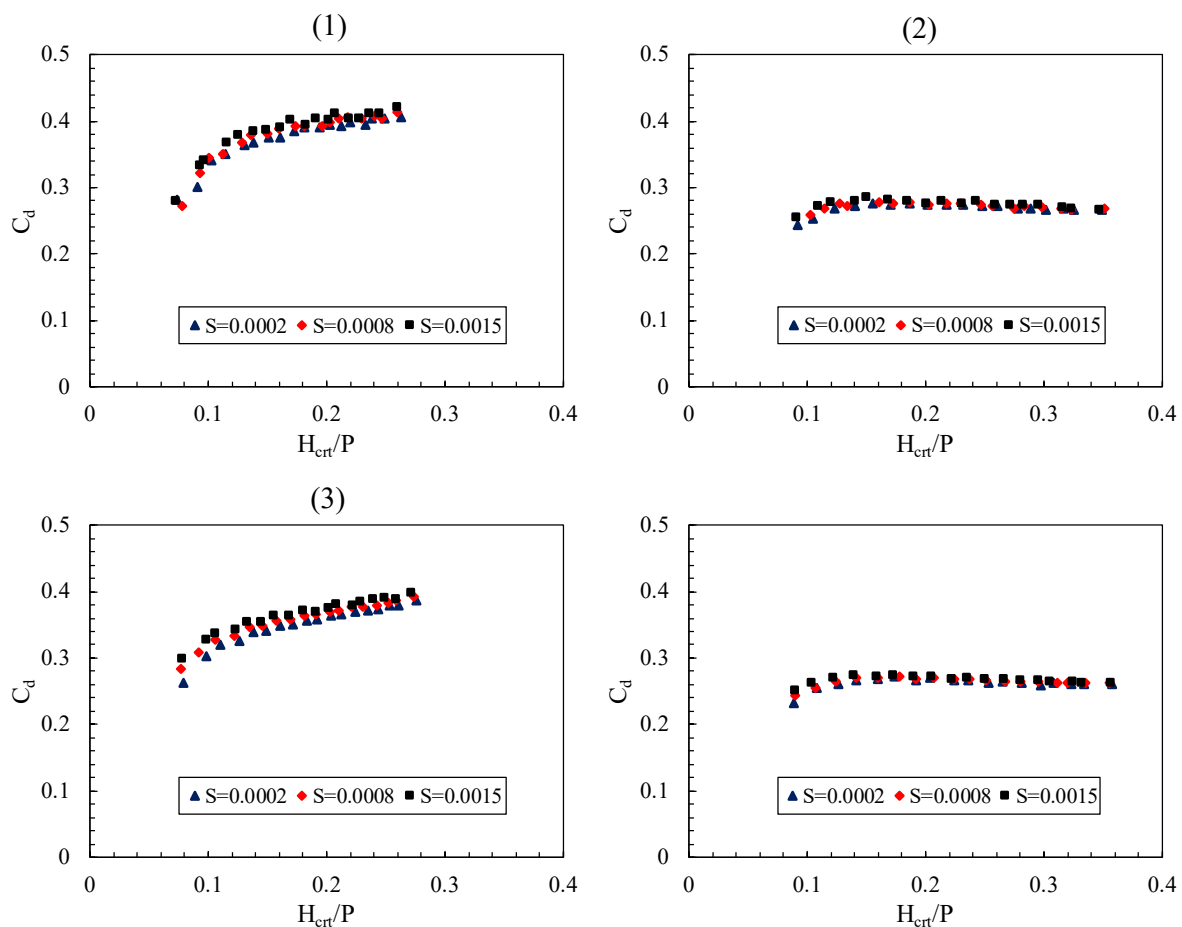


Fig. 8 Comparison of discharge coefficient variations across different longitudinal slopes. For (1) RE-NS (2) RE-FS (3) SE-NS (4) SE-FS

شکل ۸ مقایسه تغییرات ضریب جریان در شیب‌های طولی مختلف برای (۱) RE-NS، (۲) RE-FS، (۳) SE-NS و (۴) SE-FS

آن‌ها به پدیده رسوب‌گذاری دارای الگویی مشترک است. در پژوهش Abdolpour & Mohammadzadeh-Habili (2025) تمرکز بر عملکرد سرریز اوجی تحت شرایط رسوب‌گذاری بوده و نشان داده شده است که در بده طراحی، تجمع رسوبات درشت‌دانه می‌تواند موجب کاهش ۱۳/۶ درصدی ضریب جریان شود. در حالی که در پژوهش حاضر، افت ضریب جریان در اثر رسوب‌گذاری بالادست بین ۲۴ الی ۲۸ درصد برآورد شد. این نتایج نشان‌دهنده حساسیت بالای سرریزهای نوک‌اردکی به انسداد ناشی از رسوب‌گذاری بالادست و اختلال شدید در عملکرد هیدرولیکی این سازه است. بررسی تطبیقی نتایج پژوهش‌های پیشین و مطالعه حاضر در زمینه تغییرات تراز سطح آب بالادست تحت تأثیر رسوب‌گذاری، واگرایی آشکاری را در رفتار هیدرولیکی سرریزهای اوجی و نوک‌اردکی نمایان می‌سازد. در این

سطح رسوبات ریزش می‌کند نه از لبه سرریز. به این ترتیب، هندسه لبه سرریز (اعم از گرد یا تیز) دیگر تأثیر مستقیمی بر جریان ندارد، زیرا لبه تشکیل شده از رسوبات به عنوان مرز موثر ریزش جریان عمل می‌کند. همچنین، با افزایش شیب کانال (که با افزایش سرعت و انرژی جریان همراه است) این آشفتگی و هدررفت انرژی تشدید خواهد شد. لذا در شیب بیشتر، اثر تداخلی رسوب نسبت به انرژی در دسترس جریان افزایش می‌یابد، و اثر هندسی لبه بیشتر خنثی می‌شود.

نتایج این پژوهش در زمینه عملکرد سرریز نوک‌اردکی در شرایط رسوب‌گذاری بالادست، در یک چارچوب مقایسه‌ای با مطالعات انجام‌شده بر سرریز اوجی، به‌ویژه پژوهش Abdolpour & Mohammadzadeh-Habili (2025) و نیز پژوهش Sadatnezhad (2017)، نشان می‌دهد که گرچه ماهیت هندسی سرریزها متفاوت است، اما پاسخ هیدرولیکی

آشکار می‌سازد؛ چرا که عملکرد بهینه این سازه‌ها در شرایط رسوب‌گذاری، بدون مداخلات مدیریتی هدفمند، با چالش جدی روبه‌رو خواهد شد.

شکل ۹ اثرگذاری شیب بر رابطه بده - اشل را در سرریز نوک‌اردکی نشان می‌دهد. طبق این شکل، محور عمودی برابر بده عبوری و محور افقی برابر ارتفاع آب روی تاج سرریز است (به توان ۱/۵). برای مطالعه تغییرات ضریب جریان بر اثر شیب از مدل رگرسیون خطی استفاده شد. به طوری که ضریب x به عنوان ضریب جریان (C_d) در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش شیب طولی، ضریب جریان در مدل‌های رگرسیون خطی افزایش می‌یابد و این نشان‌دهنده تاثیر شیب طولی در ضریب جریان سرریز نوک‌اردکی است.

نتایج یاد شده نشان می‌دهد که در سرریزهای نوک‌اردکی اگرچه ضریب جریان تابع شیب طولی کانال است، با این حال مقدار تغییرات ضریب جریان را می‌توان ناچیز تلقی کرده و از محاسبه اثرات شیب طولی در محاسبه بده عبوری از سرریز در فاز طراحی صرف‌نظر کرد.

زمینه، Sadatnezhad (2017) گزارش کرده‌اند که حضور رسوبات با ابعاد و ارتفاع‌های مختلف تاثیر محسوس بر تراز سطح آب بالادست سرریز اوجی بر جای نمی‌گذارد. در مقابل، Abdolpour & Mohammadzadeh-Habili (2025) به نتیجه‌ای متفاوت تر دست یافته و بیان می‌دارند که در بده طراحی، رسوبات دشت دانه منجر به کاهش ۲۶/۲ درصدی بار آبی بر روی سرریز اوجی شده‌اند. این در حالی است که یافته‌های این پژوهش بر روی سرریز نوک‌اردکی، تصویر دیگری را ترسیم می‌کند؛ به‌گونه‌ای که انباشت رسوب در بالادست این سازه، افزایش محسوس تراز سطح آب را به دنبال داشته است. این تضاد رفتاری میان دو نوع سرریز، حساسیت هیدرولیکی بالای سرریز نوک‌اردکی را در رویارویی با پدیده رسوب‌گذاری آشکار می‌سازد. به بیان دیگر، در شرایطی که سرریز اوجی یا بدون تأثیرپذیری یا با کاهش بار آبی مواجه می‌شود، سرریز نوک‌اردکی با افزایش سطح آب و پیامدهای ناشی از آن روبه‌رو می‌شود. چنین یافته‌ای ضرورت توجه ویژه به برنامه‌های نگهداری و لایروبی مستمر در سرریزهای نوک‌اردکی را بیش از پیش

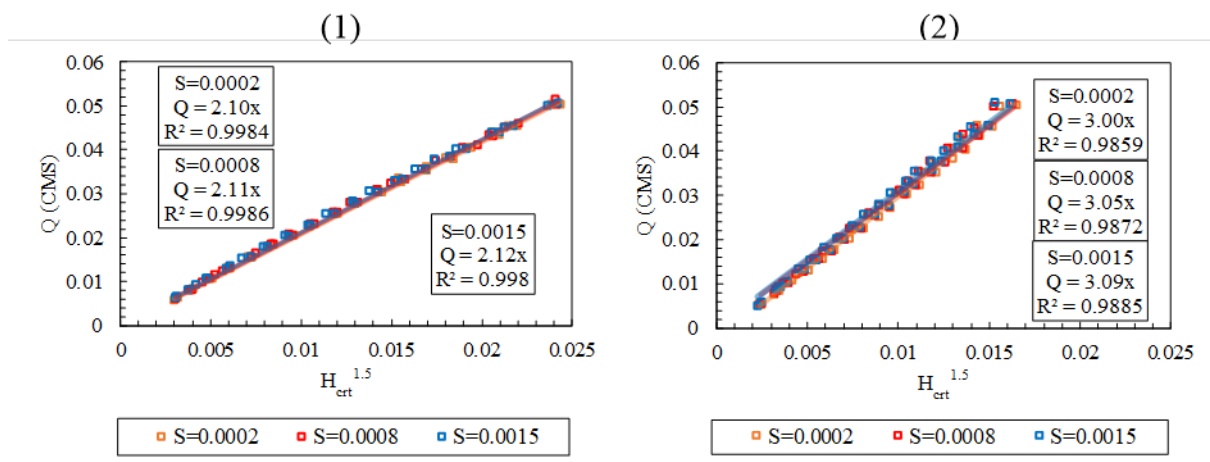


Fig 9 Comparison of the discharge coefficient at three longitudinal slopes under (1) Full sediment, (2) Without sediment conditions

شکل ۹ مقایسه ضریب جریان در سه شیب طولی در (۱) حالت پر از رسوب، (۲) حالت بدون رسوب

بررسی حالت‌های مختلف استقرار رسوب نشان داد که چگونگی توزیع و آرایش رسوبات به‌ویژه در محدوده دماغه سرریز نقش بنیادی در افت کارایی سازه دارد. هنگامی که رسوبات به‌صورت یکنواخت و با زاویه مشخص در بالادست قرار می‌گیرند، جریان تا حدی در مسیر خود هدایت شده

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که انباشت رسوب در بالادست سرریز نوک‌اردکی تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر رفتار هیدرولیکی جریان دارد و می‌تواند به‌صورت مستقیم موجب کاهش ضریب جریان و افزایش ارتفاع آب در بالادست شود.

در نسبت‌های ثابت H_{crit}/P و در شیب‌های طولی متفاوت، می‌تواند درک دقیق‌تری از رفتار سرریزهای نوک‌اردکی در اختیار قرار دهد.

۵- فهرست نشانه‌ها

Q	بده جریان (m^3s^{-1})
V	سرعت (ms^{-1})
p	محیط جریان (m)
A	مساحت جریان (m^2)
R	شعاع هیدرولیکی (m)
H_{crit}	ارتفاع آب روی تاج سرریز (m)
W	عرض فلوم آزمایشگاه (m)
L_c	طول موثر سرریز (m)
n	ضریب زبری مانینگ
ΔH	تغییرات ارتفاع کف کانال (m)
Δx	طول کانال (m)
g	شتاب ثقل (ms^{-2})
C_d	ضریب جریان
نشانه‌های یونانی:	
ρ	چگالی سیال (kgm^{-3})
μ	گرانروی دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
σ	کشش سطحی (Nm^{-1})
α	درجه ($^\circ$)
θ	هندسه استقرار توده رسوب
ε	زبری مطلق (m)

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسنده (نویسندگان) هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

و ضریب جریان کاهش کمتری را تجربه می‌کند. در مقابل، در حالت «انباشت کامل و مسطح رسوب» که همانند شرایط بهره‌برداری پس از چند سال است، مسیر جریان مسدود شده و همراه با افزایش آشفتگی ورودی، افت محسوس‌تری در ضریب جریان نیز ثبت می‌شود.

تحلیل داده‌ها در سه شیب طولی متفاوت نشان داد که با افزایش شیب طولی کانال، مقدار ضریب جریان در هر دو حالت وجود و نبود رسوب افزایش می‌یابد، اما میزان تأثیر منفی رسوبات در شیب‌های تندتر، بیشتر است. این موضوع به افزایش انرژی ویژه جریان در کانال‌های با شیب بیشتر مربوط می‌شود که در حضور رسوب بخش شایان توجهی از این انرژی صرف چیرگی بر مانع‌های رسوبی و آشفتگی‌های ایجادشده می‌شود. از این رو، می‌توان نتیجه گرفت که در کانال‌های آبیاری با شیب‌های تند، سازه سرریز باید با ملاحظات بیشتری در طراحی و بهره‌برداری (از نظر لایروبی) همراه باشد. در نهایت می‌توان گفت که عملکرد سرریز نوک‌اردکی به‌شدت به ضریب جریان و مدیریت رسوب وابسته است و این فراسنجه‌ها بر فرآیند آبیاری، و در نتیجه بر قابلیت اطمینان، کفایت و عدالت توزیع شبکه آبیاری اثر گذارند.

نتایج این تحقیق می‌تواند مبنایی برای تدوین دستورکار اجرایی لایروبی و طراحی هندسه مناسب سرریز برای شرایط واقعی بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری باشد. این یافته‌ها بر مبنای آزمایش‌های انجام شده در یک فلوم آزمایشگاهی با ابعاد محدود و با استفاده از یک نوع رسوب مشخص (شن بادامی) به‌دست آمده است. برای اطمینان از کارایی بلندمدت و تدوین راهبردهای نگهداری، لازم است که پژوهش‌های آتی بر طراحی و ارزیابی سرریزهای نوک‌اردکی با زوایای مختلف، اثر انواع مختلف رسوبات با دانه‌بندی ریزتر در کانال دوزنقه‌ای - که رایج‌ترین نوع کانال در شبکه‌های آبیاری هستند - با شیب جانبی و طولی متغیر، متمرکز باشند. همچنین ارتفاع سرریز (P) و طول موثر (L_c) از دیگر فراسنجه‌های اثرگذار بر عملکرد سرریز نوک‌اردکی است. بررسی اثرگذاری مقدارهای مختلف این دو فراسنجه بر عملکرد سرریز نوک‌اردکی در دو حالت پر و بدون رسوب، پیشنهاد می‌شود. همچنین مطالعه تغییرات ضریب جریان

Davoudmaghami, D., Moradinejad, A. & Paimozd, S. (2022). Numerical Simulation of the Effect of Weir Magnification on Hydraulic and Hydrodynamic Characteristics in Diversion Dams. *Environment and Water Engineering*, 8(2), 365-378. (In Persian)

Emami, S. & Parsa, J. (2019). Numerical Investigating of Flow and Discharge Coefficient Over the Duckbill and Oblique Weirs. *Civil Infrastructure Researches*, 5(1), 135-145. (In Persian).

Erpicum, S., Laugier, F., Boillat, J.L., Piroton, M. & Schleiss, A.J. (2011). Labyrinth and Piano Key Weir-PKW 2011. Taylor & Francis Group, London.

FAO. (1975). Small hydraulic structures, Vol. 1 and 2, by D.B. Kraatz and V.I.K. Mahajan. Irrigation and Drainage Papers 26/1 and 26/2, Rome. 407p and 293p.

Ferc (2017). Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects. Federal Energy Regulatory Commission, U.S.

Henderson F.M., (1966). Open channel flow. New York: Macmillan.

Holtz, R.D. & Kovacs, W.D. (1981). An Introduction to Geotechnical Engineering, 733 p., Eaglewood Cliff, NJ: Prentice-Hall, Inc.

Mohammadi, A., Parvaresh Rizi, A. & Abbasi, N. (2017). Evaluation of Hydraulic Performance of Regulators and Distribution Structures in Varamin Irrigation Network. *Journal of Hydraulics*, 12(3), 1-12. (In Persian)

Nabi, G., Hussain, F. & Sajjad, B. (2024). Performance evaluation of irrigation outlets with physical model study in Indus basin irrigation system of Pakistan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196, 1272. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13454-9>.

Nikpiek, P. & Kashefipour, S.M. (2016). Effect of the hydraulic conditions and structure geometry on mathematical modelling of discharge coefficient for duckbill and oblique weirs. *Irrigation Sciences and Engineering*, 39(1), 1-10. (In Persian)

Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C. & Narayanan, R. (2001). Hydraulic Structures. Spon Press.

Sadatnezhad, M. (2017). Experimental investigation of sedimentation on the coefficient of discharge of Ogee spillway. Master's Thesis. Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology. (In Persian)

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است. مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: انجام آزمایش‌ها، تحلیل داده‌ها، نگارش اولیه مقاله.

نویسنده دوم: ایده تحقیق، تنظیم روش شناسی، نظارت بر روند تحقیق، بازخوانی و نهایی کردن مقاله برای ارسال.

نویسنده سوم: آماده سازی مجموعه آزمایشگاهی، نظارت بر انجام آزمایش‌ها، تنظیم روش شناسی، بازخوانی مقاله.

۶- منابع

Abdolpour, M. & Mohammadzadeh-Habili, J. (2025). Influences of Sedimentation on Hydraulic Characteristics of Ogee Weir. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng.*, 50, 3053-3066.

Al-Shukur, A., Al-Jumaili, M.A. & Shaker, Z. (2017). Experimental Investigation of Flow Characteristics over Crump Weir with Different Conditions. *Saudi Journal of Engineering and Technology*, 2(10), 373-379.

Azarafza, M., Hajjalilue Bonab, M. & Derakhshani, R (2022). A novel empirical classification method for weak rock slope stability analysis. *Sci Rep* 12, 14744. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19246-w>

Bazin, H. (1865). Recherches Expérimentales sur l'Écoulement de l'Eau dans les Canaux Découverts ('Experimental Research on Water Flow in Open Channels.'). Mémoires présentés par divers savants à l'Académie des Sciences, Paris, France, Vol. 19, 1-494. (in French)

Chow, V.T. (1959). Open-channel hydraulics. New York: McGraw-Hill.

Chazarra, M., Silva, A. & Ramos, H.M. (2019). Hydraulic Design Optimization of Spillways under Climate Change Scenarios. *Journal of Hydraulic Research*, 57(4), 543-557.

Davoudmaghami, D., Banejad, H., Saneie, M. & Mohseni Movahhed, S.A. (2017). The effect of upstream and downstream bed level on discharge coefficient of duckbill sharp-crested weir. *Watershed Engineering and Management*, 9(4), 413-425. (In Persian)

(2020). Use of Side Slots and Submerged Vanes for Sediment Flushing in Upstream of Duckbill Weirs, *Water and Soil Science*, 30(3), 121-132. (In Persian)

Tajari, M., Dehghani, A.A., Meftah Halaghi, M. (2019). Simulation of Sedimentation Pattern in Upstream of Duckbill Weirs Using Submerged Vanes, *Ferdowsi Civil Engineering*, 32(3), 83-98. (In Persian)

Scimemi, Ettore. (1946). Sulla Forma da Assegnare Alle Dighe Sforanti (On the Shape to Be Given to Overflow Dams)., *L'Energia Elettrica*, Vol. XXIII, Fascicle VI.

Tajari, M., Dehghani, A.A. & Meftahhalaghi, M. (2018). Discharge Coefficient of Duckbill Weir by Using Side Gate Structures in Irrigation Networks, *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 12(2), 309-323. (In Persian)

Tajari, M., Dehghani, A.A., Meftahhalaghi, M.



© 2026 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.