Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Water and Soil Conservation

Print ISSN: 2322-2069
Online ISSN: 2322-2794

Laboratory investigation of the hydraulic characteristics of the flow on the spillway of Voshmgir dam with a rubber valve and its comparison with the sharp-crested, broad-crested and cylindrical weir

Samira Salamati[1], Mohsen Masoudian[*2], Mehdi Meftah Halaghi[3], Mohammad Ebrahim Yakhkeshi[4]

1. Ph.D. Student in Water Structures, Dept. of Water Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Mazandaran, Iran. E-mail: s.salamati68@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Mazandaran, Iran. E-mail: masoudian@sanrru.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Golestan, Iran. E-mail: meftah@gau.ac.ir
4. Senior Expert in Water Resource Management, Dept. of Resource Water Management, Tehran, Iran. E-mail: yakhkeshie@yahoo.com

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 11.04.2023
Revised: 01.11.2024
Accepted: 01.16.2024

Keywords:
Dam heightening,
Discharge coefficient,
Rubber dam,
Voshmgir dam

ABSTRACT

Background and Objectives: The Voshmgir dam with a height of 21 meters, is one of the oldest dams in the country and is located in Golestan Province. The Voshmgir Dam is built with one main reservoir and three sub-reservoirs with a total initial volume of 96 MCM. However, in the current situation, given the end of the useful life of the dam and the filling of the dam reservoir due to the influx of sediments from numerous floods, it has decreased to 45 MCM. The available topographic maps show that it is not possible to increase the height of the main body of the dam and its side walls, and all the potential of the area has been used for the construction of the dam. Therefore, the only available solution to increase the volume is to increase the overflow's height. To increase the dam height, according to the calculations, a one-meter increase in the height of the dam's spillway, dam has been done. The purpose of this research is to investigate the hydraulics of the flow on the Voshmgir dam spillway with a rubber valve and compare it with sharp-edged, wide-edged, and cylindrical spillways using physical modeling.

Materials and Methods: In this research, Anwar's mathematical model, which is the modeling of the upstream part of rubber dams, was tested on a flexible object. Then, the rubber dam with 4 different internal pressures (the ratio of internal pressure to the height of the rubber dam) was made with a rigid body and installed on the main spillway model of the dam. Experiments were conducted in 7 different flow rates between 12.69 and 30.45 liters per second in a concrete channel with a width of one meter and a length of 6 meters in non-submerged and clear water conditions in the water and sediment laboratory of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Finally, to take advantage of these studies in the design of rubber dams, various linear and non-linear equations were extracted and presented to estimate the discharge coefficient using SPSS software.

Results: The results showed that the hydraulic behavior of the rubber dam is more similar to the broad-crested weir than to the sharp-crested and

cylindrical weirs. In all models, the flow coefficient increases with the increase of the hs/P ratio. Additionally, when the internal pressure of the dam increases from 0.5 to 1.3 at a constant hs/p, the discharge coefficient shows an average increase of 19%. Moreover, it has been observed that at a constant Froud number, the discharge coefficient experiences a 13.7% increase as the ratio of internal pressure to the height of the rubber valve increases.

Conclusion: Based on the obtained results, Anwar's mathematical model can model the geometry of rubber dams well. The geometry of the rubber valve is a function of its internal pressure and the flow rate changes with the change of the geometry. It can also be concluded that the flow rate, the height of the rubber valve and its internal pressure, the height of the flow relative to the crest of the dam and the height of the upstream water are among the factors affecting the flow hydraulics, including the flow coefficient.

Cite this article: Salamati, Samira, Masoudian, Mohsen, Meftah Halaghi, Mehdi, Yakhkeshi, Mohammad Ebrahim. 2024. Laboratory investigation of the hydraulic characteristics of the flow on the spillway of Voshmgir dam with a rubber valve and its comparison with the sharp-crested, broad-crested and cylindrical weir. *Journal of Water and Soil Conservation*, 31 (2), 159-175.



© The Author(s).
DOI: 10.22069/jwsc.2024.21886.3691
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۶۹
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۹۴

بررسی آزمایشگاهی خصوصیات هیدرولیکی جریان روی سرریز سد وشمگیر با دریچه لاستیکی و مقایسه آن با سرریز لبه‌تیز، لبه‌پهن و استوانه‌ای

سمیرا سلامتی[۱]، محسن مسعودیان*[۲]، مهدی مفتاح هلقی[۳]، محمدابراهیم یخکشی[۴]

۱. دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران. رایانامه: s.salamati68@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران. رایانامه: masoudian@sanrru.ac.ir

۳. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گلستان، ایران. رایانامه: meftah@gau.ac.ir

۴. کارشناس‌ارشد مدیریت منابع آب ایران. رایانامه: yakhkeshie@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۰۲/۰۸/۱۳
تاریخ ویرایش: ۰۲/۱۰/۲۱
تاریخ پذیرش: ۰۲/۱۰/۲۶

واژه‌های کلیدی:
افزایش ارتفاع سد،
سد لاستیکی،
سد وشمگیر،
ضریب دبی

چکیده

سابقه و هدف: سد وشمگیر با ارتفاع ۲۱ متر یکی از سدهای قدیمی کشور است که در استان گلستان واقع شده است. سد وشمگیر با یک مخزن اصلی و سه مخزن فرعی مجموعاً با حجم اولیه ۹۶ میلیون مترمکعب احداث شده است. اما در شرایط فعلی با پایان یافتن عمر مفید سد و پر شدن مخزن سد در اثر ورود رسوبات سیل‌های متعدد، به ۴۵ میلیون مترمکعب تنزل یافته است. نقشه‌های توپوگرافی موجود نشان می‌دهد که امکان افزایش ارتفاع بدنه اصلی سد و دیواره‌های جانبی آن وجود ندارد و از تمامی پتانسیل منطقه برای احداث سد استفاده‌شده است. بنابراین تنها راه‌حل موجود برای افزایش ظرفیت مخزن، افزایش ارتفاع سرریز است. در همین راستا با توجه به محاسبات انجام‌شده افزایش یک متری ارتفاع سرریز مناسب بوده است. هدف از انجام این پژوهش، بررسی هیدرولیک جریان بر روی سرریز سد وشمگیر با دریچه لاستیکی و مقایسه آن با سرریز لبه‌تیز، لبه‌پهن و استوانه‌ای با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، ابتدا مدل ریاضی انور که مدل‌سازی قسمت بالادست سدهای لاستیکی است، بر روی جسم انعطاف‌پذیر آزمایش شد. سپس سد لاستیکی با ۴ فشار درونی مختلف که نسبت‌های فشار داخلی به ارتفاع سد لاستیکی (α) ۰/۵، ۰/۷، ۱ و ۱/۳ است با جسم صلب ساخته و بر روی مدل سرریز اصلی سد نصب گردید. آزمایش‌ها در ۷ دبی مختلف بین بازه ۱۲/۶۹ تا ۳۰/۴۵ لیتر بر ثانیه در یک کانال بتنی به عرض یک متر و طول ۶ متر در شرایط غیرمستغرق و آب زلال در آزمایشگاه آب و رسوب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان صورت گرفت. درنهایت جهت بهره‌گیری از این مطالعات در طراحی سدهای

لاستیکی معادلات خطی و غیرخطی مختلفی جهت تخمین ضریب دبی با استفاده از نرم‌افزار SPSS استخراج و ارائه گردید.

یافته‌ها: نتایج نشان داد رفتار هیدرولیکی سد لاستیکی به سرریز لبه‌پهن نسبت به سرریزهای لبه‌تیز و استوانه‌ای شباهت بیش‌تری دارد. در تمامی مدل‌ها با افزایش نسبت hs/P، ضریب دبی افزایش می‌یابد. هم‌چنین در یک hs/p ثابت، با افزایش فشار درونی سد از ۰/۵ به ۱/۳، ضریب دبی به‌طور متوسط ۱۹ درصد افزایش می‌یابد. هم‌چنین محقق گردید در یک فرود ثابت با افزایش نسبت فشار داخلی به ارتفاع دریچه لاستیکی، ضریب دبی نیز با افزایش ۱۳/۷ درصدی تغییر می‌یابد.

نتیجه‌گیری: براساس نتایج به‌دست‌آمده، مدل ریاضی انور، می‌تواند هندسه سدهای لاستیکی را به‌خوبی مدل‌سازی نماید. هندسه دریچه لاستیکی تابعی از فشار درونی آن بوده و با تغییر هندسه میزان دبی عبوری تغییر می‌کند. هم‌چنین می‌توان نتیجه گرفت میزان دبی، ارتفاع دریچه لاستیکی و فشار درونی آن، ارتفاع جریان نسبت به تاج سد و ارتفاع آب بالادست ازجمله عوامل مؤثر بر هیدرولیک جریان ازجمله ضریب دبی می‌باشند.

استناد: سلامتی، سمیرا، مسعودیان، محسن، مفتاح هلقی، مهدی، یخکشی، محمدابراهیم (۱۴۰۳). بررسی آزمایشگاهی خصوصیات هیدرولیکی جریان روی سرریز سد وشمگیر با دریچه لاستیکی و مقایسه آن با سرریز لبه‌تیز، لبه‌پهن و استوانه‌ای. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳۱ (۲)، ۱۷۵-۱۵۹.

DOI: 10.22069/jwsc.2024.21886.3691

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان © نویسندگان.

مقدمه

در چند دهه اخیر هرچند سدسازی ازنظر کمی روند افزایشی داشته، ولی معضل رسوب‌گذاری همواره به‌عنوان مهم‌ترین عامل در کوتاه کردن عمر مفید سدها مطرح بوده است و سدهای مخزنی زیادی به‌دلیل پر شدن از رسوب متروکه شده‌اند. چالش اساسی که امروز صنعت سدسازی با آن مواجه است، بحث حفظ و نگهداری و ارتقاء وضعیت سدهای موجود و سدهای قدیمی است که نقش حیاتی در تأمین نیازهای آبی ایفا می‌کنند. مشکلات سازه‌ای و عملکردی متعدد، بهره‌برداری مناسب را از سدهای قدیمی ناممکن کرده است. ازاین‌رو باید با نگهداری، ترمیم و توسعه مجدد، از مرگ تدریجی آن‌ها جلوگیری شود. مهم‌ترین فرایند در پروسه ترمیم و توسعه سدهای قدیمی افزایش ارتفاع می‌باشد (۱).

با توجه به محدودیت محل احداث سدها و براساس فنّاوری موجود بررسی امکان افزایش ارتفاع سدها و یا رسوب‌زدایی مخزن اولین انتخاب به نظر می‌رسد البته این افزایش ارتفاع محدود است. این موضوع زمانی اهمیت پیدا می‌کند که در انجام مطالعات احداث سد در یک منطقه، بهترین موقعیت مکانی سدهای موجود استفاده گردیده باشد اما به‌طورکلی لزوم بازنگری در ظرفیت ذخیره سدهای موجود به‌عنوان یکی از منابع آبی در دست مطالعه برای تأمین نیازهای آبی یک منطقه را می‌توان به موارد اقتصادی، فنی، زیست‌محیطی، سیاسی، اجتماعی، بهداشتی و سایر موارد مرتبط دانست (۲).

ازنظر سازه‌ای برای سدهایی که درگذشته ساخته شده‌اند، امکان اضافه نمودن ارتفاع با تأمین تمامی شرایط آئین‌نامه‌ای و استاندارد سدسازی وجود دارد که منجر به افزایش حجم سدهای موجود می‌شود. در این شرایط انتخاب این گزینه، راه‌کاری ارزان‌تر برای تأمین آب موردنیاز است. اصلاح سازه فعلی به‌منظور رسیدن به سازه بلندتر که قادر به تحمل بارهای احتمالی وارده باشد، همان افزایش ارتفاع سد است. از فواید این روش می‌توان به این نکات اشاره نمود که هزینه عملیات افزایش ارتفاع سد به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کم‌تر از هزینه ساخت یک سد جدید برای ذخیره همان حجم است و دیگر آن‌که در طول پروژه افزایش ارتفاع سد دسترسی به زیربنای مخزن، کانال سرریز و جاده دسترسی به سد امکان‌پذیر است (۳).

سد گلپایگان اولین سد مدرن خاکی کشور است. این سد با هسته رسی و به‌صورت مایل به شیوه قدیمی ساخت سدهای خاکی بر روی پی‌سنگی ساخته شده است. هدف از احداث این سد جلوگیری از خسارات ناشی از سیل و تأمین آب کشاورزی شش هزار هکتار از اراضی کشاورزی منطقه بوده است. سد گلپایگان به ارتفاع ۵۶ متر جزء معدود یا حتی می‌توان گفت تنها سدی از ایران است که در مطالعات ICOLD موردتوجه قرار گرفته و با ۸ متر ترفیع به ارتفاع ۶۴ متر رسیده است. ساخت سد در سال ۱۹۵۰ و افزایش ارتفاع آن در سال ۱۹۸۴ انجام شده است (۱). در این راستا پژوهش‌های متعددی انجام شده است که می‌توان به چگونگی افزایش ارتفاع سد زرینه‌رود که توسط سرحدی (۲۰۰۷) انجام شده است اشاره نمود. درواقع افزایش ارتفاع سرریز با نصب ۱۰ دستگاه دریچه قطاعی با ارتفاع ۵ متر و طول کل ۱۱۰ متر انجام شد. با افزایش ارتفاع ۵ متری سد، افزایش حجمی معادل ۲۳۰ میلیون مترمکعب فراهم آمده است (۲). هم‌چنین امینی و همکاران (۲۰۱۲) با بازنگری و طراحی هیدرولیکی سرریز سد دز در شرایط افزایش ارتفاع سد، به بیان راهکار عملی امکان افزایش تراز مخزن هم‌زمان با بهره‌برداری از مخزن پرداختند. هم‌چنین براساس شرایط بارگذاری زمان ساخت سد، شرایط بارگذاری و ظرفیت تخلیه سرریز تعریف‌شده و مطابق آن طرح جدید سرریزها و درنهایت محاسبات هیدرولیکی برای سرریزهای طرح جدید ارائه شد (۴). به‌منظور افزایش ارتفاع سد kamuzu، زیکو و

همکاران (۱۹۹۹)، راه‌حل نصب ۱۳ فیوز گیت بتنی از نوع لابیرنت و یک فیوزگیت مستقیم در سمت راست سرریز را به‌کار گرفتند. این کار همه خطرات فرورفتگی در زیر سطح آب در حین فازهای کاری از بین می‌برد. با بالا بردن بیش از پنج‌متر سطح آب، ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن از ۸/۹ میلیون مترمکعب به ۱۹/۸ میلیون مترمکعب، افزایش یافت (۵). باباتبار و همکاران (۲۰۱۲) نیز به بررسی بازگرداندن ظرفیت اولیه مخزن سد وشمگیر با نصب سد لاستیکی بر روی پلت‌فرم خرپا پرداختند. در این پژوهش، برای احیای حجم اولیه سد، طراحی و نصب شش بند لاستیکی روی سکو با سازه خرپایی که متصل به سرریز اصلی می‌باشد، در نظر گرفته شد. ایشان به این نتیجه رسیدند که این روش جدید، کاربرد وسیعی برای افزایش ظرفیت مخازن موجود دارد (۶). هم‌چنین شهرامی‌نیا و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی استفاده از دریچه لاستیکی در افزایش ارتفاع سرریزهای بتنی در سد وشمگیر پرداختند. ایشان با توجه به سیل‌خیز بودن منطقه موردمطالعه، قابلیت پر و خالی شدن مطمئن سد لاستیکی در مقایسه با دریچه‌های هیدرومکانیکال و هم‌چنین با توجه به شرایط خاص سرریز سد وشمگیر، گزینه نصب سد لاستیکی را بررسی و پیشنهاد کردند (۷).

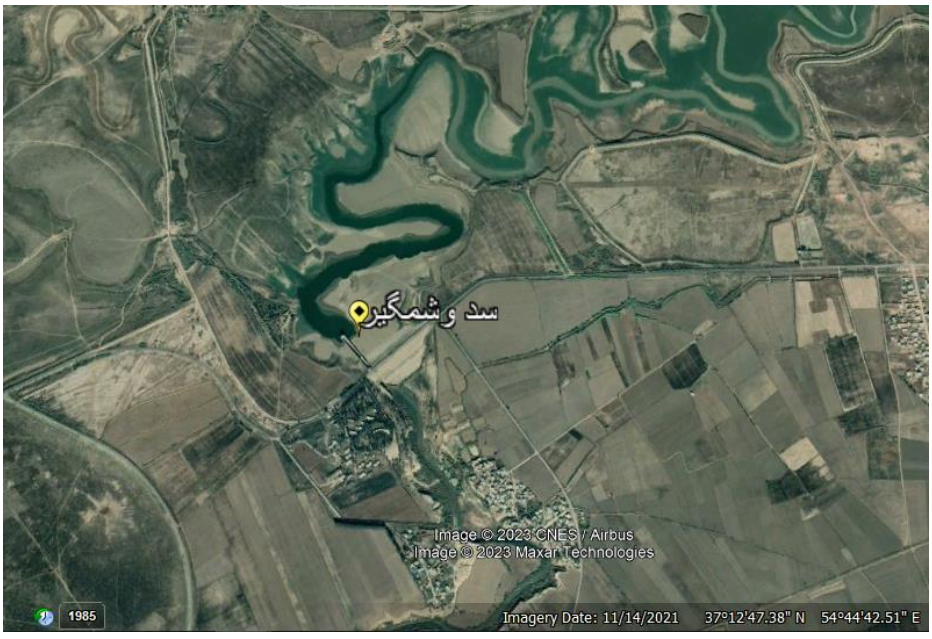
در زمینه هیدرولیک جریان از روی سدهای لاستیکی به‌ویژه نصب آن به‌منظور افزایش ارتفاع سد، پژوهش‌های بسیار اندکی صورت پذیرفته است. در این زمینه، دیاز و گندالز (۲۰۱۵) تأثیر هیدرولیک یک سرریز لاستیکی بادی واقع شده بر یک سرریز WES به روش تجربی و استفاده از مدل CFD را بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تغییرات مهمی بر اساس فشار بالادست و پایین‌دست سرریز لاستیکی بادی واقع بر پروفیل سرریز اتفاق می‌افتد و اهمیت هوادهی را به‌وضوح نشان می‌دهد. تغییرات توزیع فشار منجر به کاهش جریان تخلیه‌شده از سرریز به‌عنوان تابعی از ارتفاع آب می‌شود. هم‌چنین با افزایش ارتفاع سرریز لاستیکی، ضرایب دبی جریان کاهش می‌یابد و این به این دلیل است که با کاهش سطح تورم، شکل تعادلی سد لاستیکی سازگاری بهتری با شرایط جریان دارد (۸). در راستای هیدرولیک جریان از روی سدهای لاستیکی، چانسون (۱۹۸۹، ۱۹۹۶ و ۱۹۹۸) پژوهش‌هایی روی هیدرولیک جریان سد لاستیکی با استفاده از روش طراحی ساده انجام داد. درمجموع نتایج یک روش جدید برای پیش‌بینی ویژگی‌های جریان سرریز را ارائه و دستورالعمل‌های طراحی جدید برای مکان بهینه انحراف استخراج شد (۹، ۱۰ و ۱۱). الهمتی و همکاران (۲۰۰۵) در مقالاتی به تعیین ضریب دبی در سدهای لاستیکی بادی و هم‌چنین رفتار سد لاستیکی تحت شرایط هیدرواستاتیکی پرداختند (۱۲ و ۱۳). جمالی و صالح (۲۰۰۵) رفتار سد لاستیکی در موقعیت‌های مختلف همراه با هد بالادست و پایین‌دست را بر روی مدل آزمایشگاهی موردبررسی قرار دادند و نشان دادند تطابق خوبی بین نتایج تئوری و آزمایشگاهی وجود دارد. ایشان دریافتند تنش و ارتفاع سد پرشده از آب در شرایط یکسان (فشار درونی و هد بالادست و پایین‌دست)، بیش‌تر است (۱۴). هم‌چنین چراغی شیرازی و همکاران (۲۰۱۴)، با در نظر گرفتن مقادیر مختلف فشار درون تیوپ و عمق آب بالادست و پایین‌دست، به مدل‌سازی سد لاستیکی پرداختند. ایشان دریافتند عواملی چون مدول الاستیسیته، فشار هوای درونی سد، عرض مقطع و ضخامت سد بر ارتفاع سد لاستیکی تأثیرگذار هستند (۱۵). فرزین و همکاران (۲۰۱۶) نیز جریان عبوری از سد لاستیکی را با به‌کارگیری هیدرودینامیک محاسباتی بررسی کردند. ایشان به این نتیجه رسیدند که افزایش ۱۰۰ درصدی فشار هوای درون تیوپ، موجب رشد ۵ درصدی ضریب دبی می‌شود. درحالی‌که همین مقدار رشد در مقدار دبی، منجر به

افزایش بیش از ۲۵ درصدی ضریب دبی می‌شود. پارامتر H/D_h (نسبت عمق آب بالادست به قطر سد لاستیکی) نیز به‌عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار بر ضریب دبی شناخته شد و نتایج مدل‌سازی نشان داد رشد ۳۱ درصدی این پارامتر، حدود ۷۰ درصد بر مقدار ضریب دبی می‌افزاید (۱۵). چو و همکاران (۲۰۲۱)، جریان‌های سطح آزاد بر روی سدهای لاستیکی را به روش عددی بررسی نمودند. طبق نتایج ایشان، عمق و فشار آب شبیه‌سازی‌شده روی سطح سد با نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی تأیید می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که میانگین زمانی ضریب درگ در جهت افق با افزایش عمق آب پایین‌دست کاهش می‌یابد، درحالی‌که تأثیر عمق آب پایین‌دست بر این ضریب در جهت عمود کم‌تر است. هم‌چنین ایشان دریافتند که ضریب دبی سدهای بیضی‌شکل کمی بزرگ‌تر از سدهای دایره‌ای است (۱۶). سروی‌نژاد و همکاران (۲۰۲۲)، هیدرولیک سرریزهای لاستیکی بادی را موردبررسی قرار دادند. ایشان پس از تعیین محدوده ضریب دبی، به این نتیجه رسیدند که اثر پرتاب‌کننده بر روی ضریب دبی به‌دلیل قرار گرفتن در قسمت فوق بحرانی سرریز ناچیز است. هم‌چنین بررسی نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که پرتاب‌کننده اثر قابل‌توجهی بر اتلاف انرژی دارد (۱۷).

بنابراین براساس مرور منابع خلأ پژوهش جامع روی دریچه لاستیکی در افزایش ارتفاع سد کاملاً مشهود است. در این پژوهش به بررسی هیدرولیک جریان بر روی سرریز سد وشمگیر با دریچه لاستیکی به‌منظور افزایش ارتفاع آن پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

سد وشمگیر یکی از سدهای قدیمی کشور در شمال شرق ایران و در دامنه شمالی البرز و جنوب شرقی دریای خزر واقع در استان گلستان در طول جغرافیایی ۴۶-۵۴ شرقی و در عرض ۱۳-۳۷ شمالی بر روی رودخانه گرگان‌رود و در محلی بنام سنگر سوار احداث‌شده است. فاصله سد تا شهر گرگان از طریق جاده ۶۲ کیلومتر، فاصله سد تا خط مرزی ۲۴ کیلومتر و تا ساحل خزر حدود ۷۰ کیلومتر است. شکل ۱ موقعیت این سد را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت سد وشمگیر.

Figures 1. Location of Voshmgir dam.

مطالعات اولیه سد از سال ۱۳۴۳ و اجرای آن در آذرماه سال ۱۳۴۵ آغاز گردید. خاک‌ریزی سد اصلی شانزدهم آبان ماه ۱۳۴۹ به پایان رسید. آبگیری مخزن در تاریخ ۲۳ دی‌ماه ۱۳۴۹ بوده است. مشخصات عمومی سد به‌اختصار در زیر بیان می‌شود:

جدول ۱- مشخصات فنی سد وشمگیر.

Table 1. Technical specifications of Voshmgir dam.

نوع سد Dam type	خاکی، همگن با شیب ملایم Earth, homogeneous with gentle slope
ارتفاع سد Dam height	۲۱ متر 21 m
طول تاج Crest length	۴۳۰ متر 430 m
عرض تاج Crest wide	۱۲ متر 12 m
تراز تاج سرریز Crest of spillway level	۱۲۶ متر از سطح دریا 126 m above sea level
ارتفاع آزاد Free board	۱/۱ متر 1.1 m

به‌منظور تخلیه سیلاب‌ها در سد گرگان از یک سرریز دوطرفه وانی شکل که در بین جناح راست و چپ سد واقع می‌باشد، بهره گرفته شده است. سرریز فوق به شکل کانال مستطیل است که امکان ورود جریان از دو طرف دیواره‌های آن میسر است. طول مؤثر سرریز در هر سمت کانال برابر ۱۶۰ متر (جمعاً ۳۲۰ متر) می‌باشد (۳).

بهره‌برداری از این سد با طراحی عمر مفید ۳۰ سال در سال ۱۳۴۹ آغاز گردید. در طول سالیان بهره‌برداری به‌دلیل انباشت رسوبات در مخازن اصلی و فرعی از حجم مفید آن به میزان قابل‌ملاحظه‌ای کاسته و به کم‌تر از ۵۰ درصد تقلیل یافته است. هم‌چنین ایستگاه‌های پمپاژ و سایر تاسیسات وابسته نیز اکثراً مستهلک و فاقد کارایی و راندمان اولیه می‌باشد. با توجه به این‌که تأمین نیاز آب کشاورزی روستاهای موجود در اطراف سد که پس از احداث آن بنا و گسترش یافته، هم‌چنین اراضی مزرعه نمونه ارتش که نقش مهمی در اقتصاد منطقه دارد وابسته به استفاده حداکثر از ظرفیت این سد می‌باشد، ضرورت تداوم بهره‌برداری از این سد قدیمی جهت اجتناب از مشکلات اجتماعی و اقتصادی در این پژوهش به آن پرداخته می‌شود.

هیدرولیک جریان: بوس (۱۹۷۶) در مطالعه‌ای که در مورد سرریزها انجام داد به این نتیجه رسید که فرمول دبی در سرریزهای لوله‌ای و لبه‌پهن مطابق رابطه ۱ می‌باشد.

$$Q = C_d L \frac{2}{3}\sqrt{\frac{2}{3}g}h_s^{1.5} \qquad (۱)$$

و نیز معادله سرریز لبه‌تیز به‌صورت رابطه ۲ می‌باشد.

$$Q = C_d L \frac{2}{3}\sqrt{2g}h_s^{1.5} \qquad (۲)$$

در این مرحله پارامترهای مؤثر در هیدرولیک جریان از روی سد لاستیکی را شناسایی و با استفاده از آنالیز ابعادی، پارامترهای بی‌بعد استخراج می‌شود. پارامترهای مؤثر در شرایط جریان آزاد از روی سد لاستیکی عبارتند از:

پارامترهای هندسی، شامل ارتفاع سد P (m)، طول سد لاستیکی L (m)، شیب کف کانال s_0 (بی‌بعد)، ضریب فشار درونی α (بی‌بعد)، ارتفاع جریان نسبت به تاج سد h_s (m)، ارتفاع آب بالادست جریان y_0 (m) ارتفاع جریان بر روی محور تاج y_b (m) و عمق بحرانی y_c (m)، پارامترهای سینماتیکی شامل، شدت جریان یا دبی Q (m^3/s) و پارامترهای دینامیکی که شامل شتاب ثقل g (m/s)، لزجت μ ($N.s/m^2$)، ضریب مدول الاستیسیته ε (بی‌بعد)، کشش سطحی σ (N/m) و جرم مخصوص ρ (N/m^3) می‌باشند. با توجه به این پارامترها تابع عمومی جریان آزاد بر روی سد لاستیکی به صورت رابطه ۳ خواهد بود:

$$f(P,L,S_0,\alpha,h_s,y_0,y_c,y_b,Q,g,\mu,\varepsilon,\rho,\sigma)=0 \qquad (۳)$$

با توجه به وجود جریان غیرقابل تراکم بنابراین از تأثیر مدول الاستیسیته و جرم مخصوص می‌توان صرف‌نظر کرد. با توجه به عمق جریان از تأثیر نیروی کشش سطحی و با توجه به تلاطم موجود در جریان آزاد از تأثیر نیروی لزجت نیز می‌توان صرف‌نظر نمود. با حذف پارامترهای غیرضروری از تابع فوق تابع عمومی جریان به صورت رابطه ۴ ارائه می‌گردد.

$$f(P,L,\alpha,h_s,y_0,y_c,y_b,Q,g)=0 \qquad (۴)$$

با استفاده از آنالیز ابعادی پی-باکینگهام و در نظر گرفتن پارامترهای Q و h_s به‌عنوان متغیرهای تکراری، اعداد بدون بعد زیر (رابطه ۵) به‌دست می‌آید.

$$C_d=f\left(Fr^*,\alpha,\frac{h_s}{P},\frac{y_b}{y_c},Fr\right)=0 \qquad (۵)$$

که در این رابطه، $Fr=\frac{Q}{Ly_0\sqrt{gy_0}}$ و $Fr^*=\frac{Q}{Ly_0\sqrt{gh_s}}$ می‌باشند.

برای تعیین، نحوه ساخت مدل‌های فیزیکی و شبیه‌سازی آن‌ها، انور در سال ۱۹۶۷ با ساخت یک مدل فیزیکی لاستیکی در مؤسسه تحقیقات هیدرولیک والینگ فورد در انگلستان توانست هیدرولیک جریان را از روی سدهای لاستیکی مورد بررسی قرار دهد. ایشان با ساخت مدل فیزیکی سد با لاستیک واقعی نتایجی را در رابطه با شکل‌پذیری مقطع سد لاستیکی به‌دست آورد. براین اساس با در نظر گرفتن همه نیروها شکل مقطع سد لاستیکی در پایین‌دست (از محور تاج به طرف پایاب) به‌صورت نیم دایره و شکل مقطع بالادست (از محور تاج به طرف سراب) را به‌صورت رابطه ۶ بیان نمود.

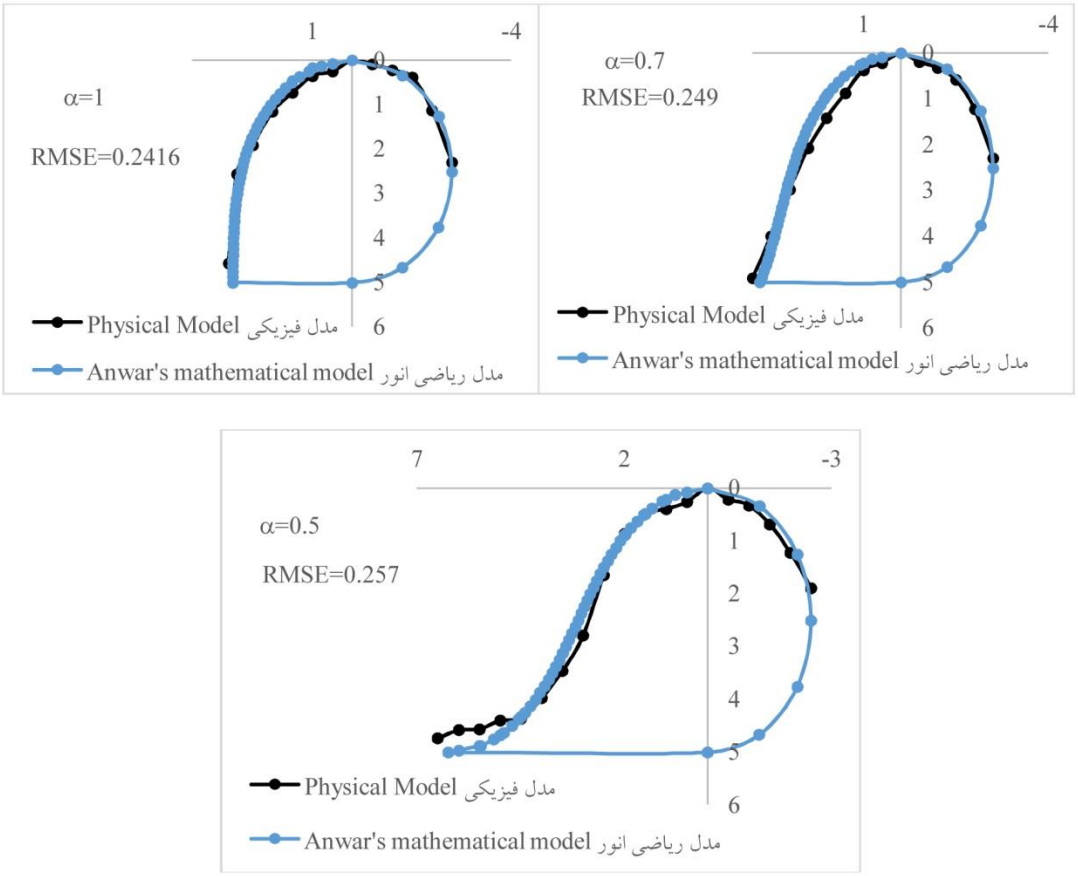
$$\xi=\sqrt{\frac{\alpha}{2}}\int_{\arccos(\frac{\eta}{\alpha}-1)}^{\pi}\left[\frac{1-\alpha(sin\phi)^2}{\sqrt{1-\frac{\alpha}{2}(sin\phi)^2}}\right]d\phi \qquad (۶)$$

که در آن، $\xi=\frac{X}{P}$، نسبت بدون بعد طول از مبدأ مختصات (X) به ارتفاع سد (P)، $\eta=\frac{Y}{P}$، نسبت بدون بعد عرض از مبدا مختصات (Y) به ارتفاع سد (P)، $\alpha=\frac{P_i}{P}$، نسبت بدون بعد ارتفاع معادل با فشار درونی سد (P_i) به ارتفاع سد (P)، φ، یک پارامتر بدون بعد جهت تعریف شکل تابع سد لاستیکی می‌باشد.

مطابق رابطه ۶، شکل سد در بالادست فقط تابع پارامتر α می‌باشد. بر همین اساس می‌توان اشکال مختلفی از مقطع سد را به عنوان تابعی (α) متصور شد (۱۸).

با این‌حال، در این مرحله، برای استخراج شکل هندسی لاستیک (شکل مقطع بالادست)، ابتدا یک

مدل لاستیکی انعطاف‌پذیر ساخته و به‌عنوان پیش آزمایش، آزمایش‌هایی با فشار درونی مختلف سد لاستیکی بر روی آن در کانال آزمایشگاهی به عرض ۴۰ سانتی‌متر انجام پذیرفت. به این صورت که جسم لاستیکی انعطاف‌پذیر بر روی یک سرریز اوجی قرار گرفت و فشار داخل تیوپ با فشارسنج تعیین گردید. سپس با عبور دبی مشخص از کانال، پروفیل سطح حالت‌های مختلف مدل، با ترازسنج دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. هم‌چنین این آزمایش‌ها با مدل ریاضی انور نیز شبیه‌سازی گردید که در نهایت نتایج حاصل از این دو با هم مقایسه شدند. شکل‌های ۲ تا ۴ مقایسه مدل‌سازی با جسم انعطاف‌پذیر و مدل انور را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است و با توجه به جذر میانگین مربعات خطا می‌توان از فرمول انور برای مدل‌سازی‌ها استفاده نمود.

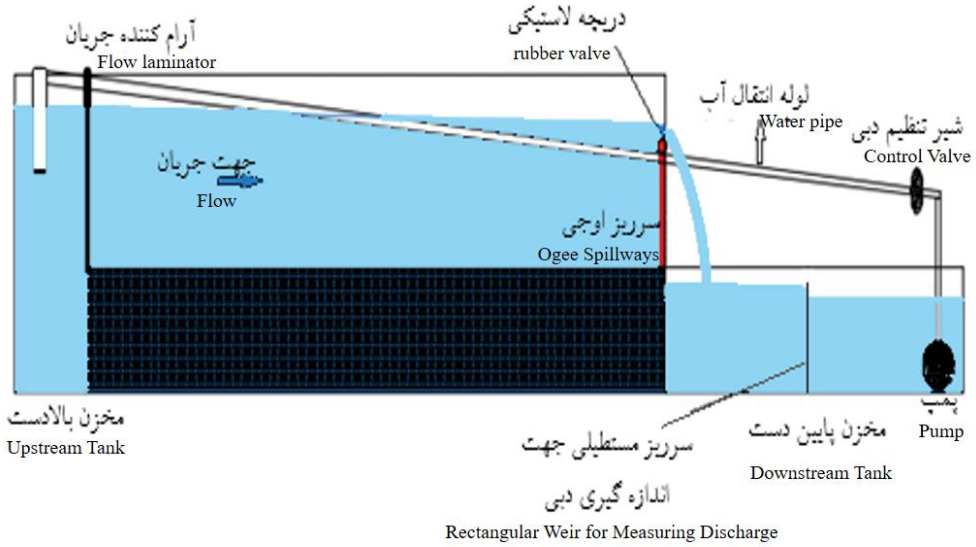


شکل‌های ۲ تا ۴- نمودارهای مقایسه مدلسازی با جسم انعطاف‌پذیر و مدل ریاضی انور.

Figures 2 to 4. Comparison diagrams of flexible body modeling and Anwar's mathematical model.

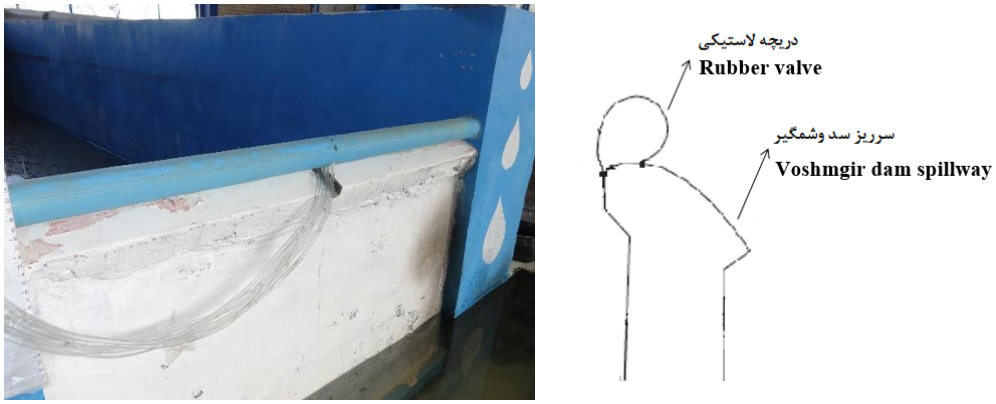
در سدهای لاستیکی، نیروهایی که به لاستیک وارد می‌شود شامل فشار هوای درونی که در همه جهات به صورت یکسان است و دیگری نیروی فشار بیرونی (آب) است که نیروی فشاری از بالادست خیلی بیش‌تر از نیروی پایین‌دست است، بنابراین شکل به‌سمت پایین‌دست کشیده شده و همان‌طور که در شکل ۴ به وضوح دیده می‌شود شکل گلابی به آن می‌دهد.

پس از اثبات مدل ریاضی انور، اشکال مختلف سد لاستیکی، به‌صورت جسم صلب با چوب ساخته شدند. سپس سازه‌ها، توسط دو لایه چسب ضد آب و دو لایه رنگ اپوکسی به وسیله دستگاه پیستوله ضدآب شدند. پس از ساخت مدل‌ها، آزمایش‌ها بر روی آن صورت پذیرفت. آزمایش‌ها در یک کانال بتنی به عرض ۱ متر و طول ۶ متر که در انتهای آن قسمتی از سرریز اوجی شکل سد وشمگیر مدلسازی شده بود انجام پذیرفت. به منظور آب مورد نیاز کانال، مخزنی در بالادست و مخزنی در پایین‌دست ساخته شد که در مخزن پایین‌دست سرریز مستطیلی برای اندازه‌گیری دبی تعبیه گردید. پروفیل سطح آب، تغییرات فشار و سرعت جریان به ترتیب با ترازسنج دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر، پیزومتر و لوله پیتو اندازه‌گیری شد. شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب شماتیک کانال مورد آزمایش و سرریز سد وشمگیر و سد لاستیکی را نشان می‌دهد.



شکل ۵- شماتیک کانال آزمایش.

Figure 5. Flume schematic.

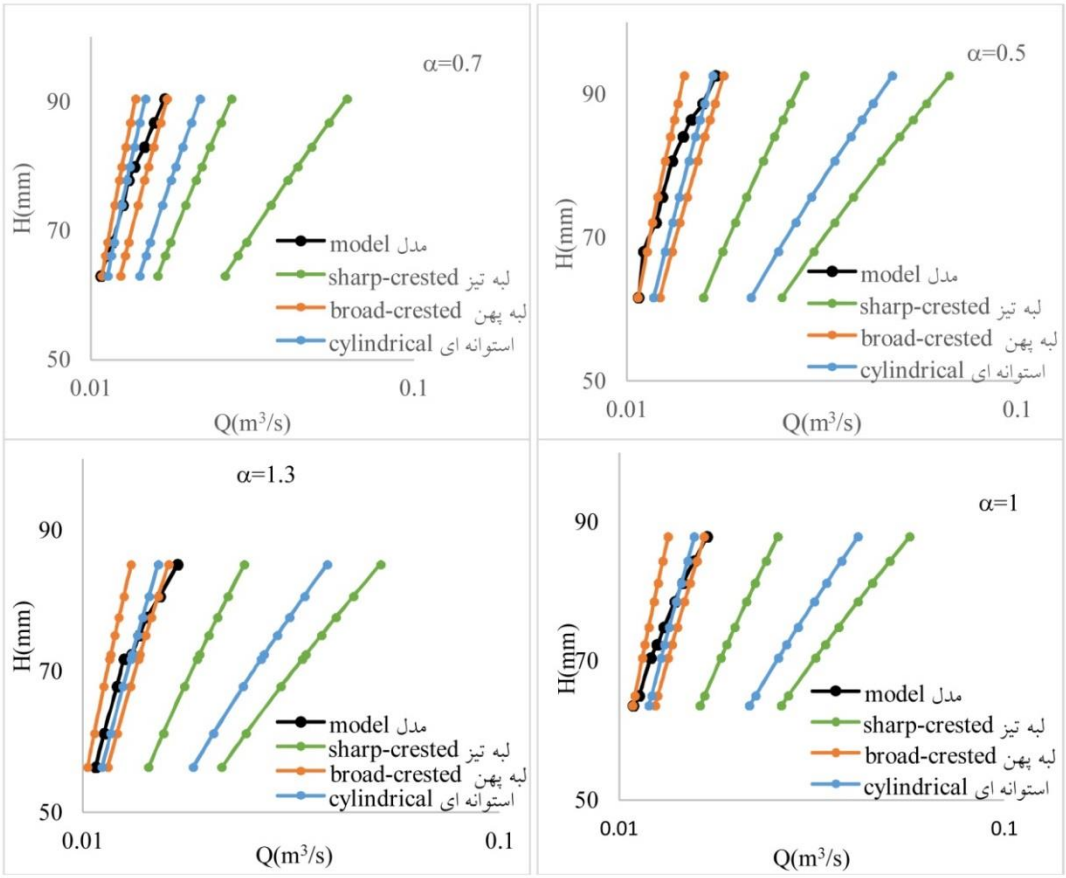


شکل ۶- سرریز سد وشمگیر و دریچه لاستیکی (سمت راست شماتیک و سمت چپ مدل آزمایشگاهی).

Figure 6. Voshmgir dam spillway and rubber valve (the right side of the schematic and the left side of the laboratory model).

آزمایش‌ها در محدوده نسبت فشار داخلی به ارتفاع سد لاستیکی (α) بین ۱/۳–۰/۵ و ترکیبات مختلف دبی (۳۰/۴۵–۱۲/۶۹ لیتر بر ثانیه) و عمق جریان بالادست، برای جریان آزاد انجام شده است. در هر مدل، اندازه‌گیری دبی در شرایط ماندگار و ثابت شدن ارتفاع سطح آب صورت گرفت. لازم به ذکر است که در همه آزمایش‌ها عرض فلوم آزمایشگاهی و عرض سرریز یکسان بوده و تاج سرریزهای به کار رفته افقی و جهت آن عمود بر جهت اصلی جریان قرار گرفته است. هم‌چنین دبی ورودی توسط سرریز مستطیلی لبه‌تیز که کالیبره شده است، اندازه‌گیری گردید.

با توجه به تجزیه و تحلیل آزمایش‌های انجام شده، دبی محاسباتی با فرمول‌های سرریز لبه‌تیز، لبه‌پهن و استوانه‌ای محاسبه گردید. در این محاسبات محدوده ضریب دبی برای سرریز لبه‌تیز (۱/۰۱۱–۰/۶۱۱)، سرریز لبه‌پهن (۰/۶۷۲–۰/۴۸۲) و سرریز استوانه‌ای (۱/۴۵–۰/۶۲) با توجه به پژوهش‌های انجام شده (۱۴ و ۱۵) در نظر گرفته شد.

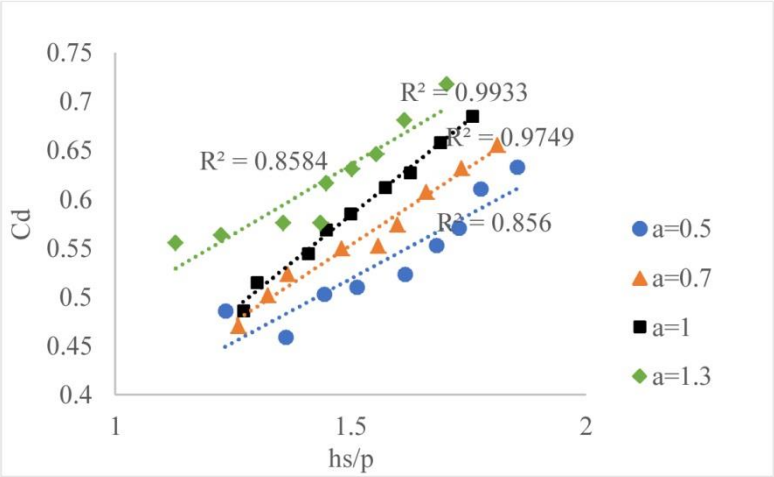


شکل‌های ۷ تا ۱۰- مقایسه دبی محاسباتی با فرمول‌های سرریز لبه‌تیز، لبه‌پهن و استوانه‌ای.

Figures 7 to 10. Comparison of calculated discharge with the sharp-crested, Broad-crested and cylindrical weir formulas.

نتایج حاصل از این محاسبات و مقایسه آن با دبی عبوری از سازه، در نمودارهای ۷ تا ۱۰ ارائه گردید که طبق این نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که سازه مذکور رفتاری مشابه با سرریز لبه‌پهن دارد. نتایج

آزمایش‌ها پس از بررسی صحت و پالایش داده‌ها تحلیل گردید و با توجه به روابط فوق‌الذکر ضریب دبی محاسبه شد. شکل ۱۱ تغییرات ضریب دبی در برابر hs/P را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشخص است در تمامی مدل‌ها با افزایش نسبت hs/P، ضریب دبی افزایش می‌یابد.

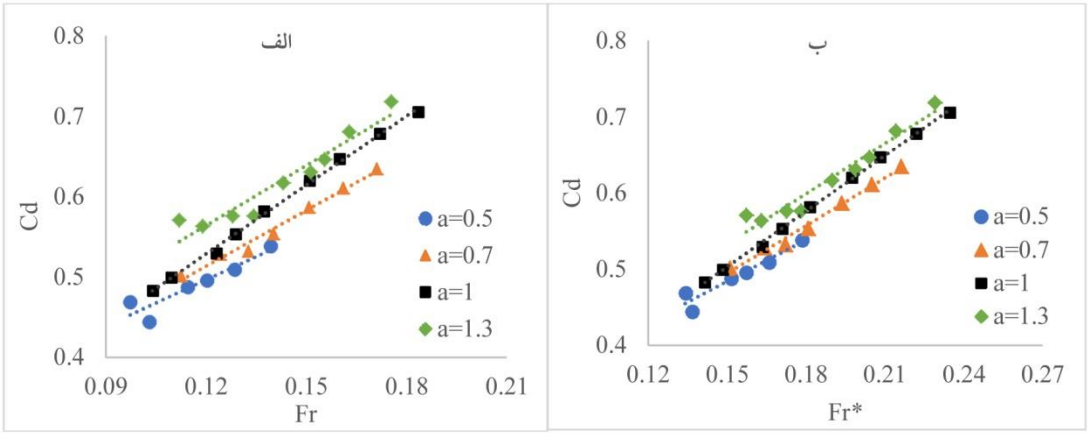


شکل ۱۱- تغییرات ضریب دبی در برابر hs/P.

Figure 11. Variations of discharge coefficient against hs/P.

با توجه به شکل ۱۱، در یک hs/p ثابت، با افزایش فشار درونی سد از ۰/۵ به ۱/۳، ضریب دبی نیز به‌طور میانگین ۱۹ درصد افزایش می‌یابد، زیرا افزایش فشار درونی سد منجر به افزایش ارتفاع سازه لاستیکی می‌گردد که باعث افزایش انحنای خطوط جریان عبوری می‌شود که در نتیجه میزان افت ورودی کاهش یافته، که باعث افزایش ضریب دبی می‌گردد. این بدین معنی است که در شرایط ثابت، هرچه سد لاستیکی خوابیده‌تر باشد ضریب دبی کم‌تری خواهیم داشت که رفتاری مشابه با سرریز لبه‌پهن دارد، به‌عبارتی هرچه سرریز لبه‌پهن عریض‌تر باشد دبی کم‌تری از خود عبور می‌دهد. به بیان دیگر، با توجه به این‌که در سرریزهای لبه‌پهن خطوط جریان به سرریز می‌چسبد و در این سازه نیز خط جریان به لاستیک بسیار نزدیک می‌باشد، به همین دلیل می‌توان نتیجه گرفت رفتار این سازه لاستیکی به سرریز لبه‌پهن شباهت دارد.

شکل ۱۲ الف و ب به ترتیب تغییرات ضریب دبی در برابر عدد فرود و عدد فرود مرکب را نشان می‌دهد. با توجه به نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش عدد فرود و عدد فرود مرکب، ضریب دبی افزایش می‌یابد. هم‌چنین در یک فرود ثابت، با افزایش ضریب فشار درونی ضریب دبی به طور متوسط ۱۳/۷ درصد افزایش می‌یابد؛ به‌عبارتی در یک فرود ثابت هرچه لاستیک خوابیده‌تر باشد، دبی کم‌تری را از خود عبور می‌دهد. این نتیجه برای عدد فرود مرکب نیز صادق است.



شکل ۱۲- الف- تغییرات ضریب دبی در برابر عدد فرود و ب- تغییرات ضریب دبی در برابر عدد فرود مرکب.

Figure 12. A- Variations of discharge coefficient against the Froude number and B- Variations of the discharge coefficient against the compound Froude number.

در نهایت با آنالیز داده‌ها و با استفاده از نرم‌افزار SPSS، تجزیه و تحلیل آماری روی پارامترها صورت گرفت که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد.

در این تجزیه و تحلیل حساسیت پارامتر ضریب دبی (Cd)، به عنوان یک متغیر وابسته در مقایسه با دیگر پارامترهای بدون بعد موردنظر برای همه داده‌های برداشتی بررسی گردید. این پارامترها شامل عدد فرود مرکب (Fr*)، عدد فرود بالادست (Fr)، نسبت ارتفاع جریان نسبت به تاج سد به ارتفاع سد (hs/P)، نسبت ارتفاع جریان بر روی محور تاج به عمق بحرانی (yb/yc) و ضریب فشار درونی (α) می‌باشد. مطابق جدول ۲، میزان هم‌بستگی بین پارامتر Cd با هر یک از پارامترهای فوق مشخص شده است. در این جدول تنها پارامترهایی که بیش‌ترین همبستگی را در مقایسه دبا Cd داشتند، گنجانده شده است. با توجه به جدول ۲ مشخص است به ازای در نظر گرفتن یک پارامتر به عنوان متغیر مستقل، Fr* با ۹۸/۱ درصد بیش‌ترین ضریب هم‌بستگی را در مقایسه با دیگر پارامترهای موجود دارد. در حالت بعد، ضریب هم‌بستگی به‌ازای در نظر گرفتن دو پارامتر به‌عنوان متغیر مستقل محاسبه شده است. مطابق جدول ۲ مشاهده می‌گردد که ضریب هم‌بستگی نسبت به حالت قبل افزایش اندکی داشته است. ترکیب پارامترهای Fr* و α با ضریب هم‌بستگی ۹۸/۲ درصد بیش‌ترین ضریب هم‌بستگی را نسبت به ترکیب دو به دوی پارامترهای دیگر دارد. در حالت سه پارامتری ترکیب سه پارامتری (Fr*، α و hs/p) با ضریب هم‌بستگی ۹۸/۷ درصد بالاترین هم‌بستگی را دارد و می‌تواند رابطه خوبی جهت پیش‌بینی مقدار Cd را ارائه کند. ردیف چهارم و پنجم جدول ۲ ضرایب هم‌بستگی با در نظر گرفتن به‌ترتیب چهار و پنج پارامتر نشان می‌دهد. در این حالات افزایش ضریب هم‌بستگی نسبت به حالت سه پارامتری ناچیز می‌باشد. در نهایت با بررسی جدول ۲ می‌توان نتیجه گرفت که معادله خطی سه پارامتری با هم‌بستگی قوی می‌تواند جهت تخمین ضریب دبی استفاده کرد و افزایش یک یا دو پارامتر دیگر تأثیر محسوسی در افزایش ضریب هم‌بستگی نخواهد داشت.

معادلات به‌دست آمده که دارای ضرایب هم‌بستگی بالایی هستند در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲- میزان هم‌بستگی Cd با دیگر پارامترها.

Table 2. The correlation of Cd with other parameters.

R^2	fr	α	Yb/yc	Hs/p	Fr*	تعداد پارامترها Number of parameters
98.1					*	1
98.2				*	*	1
98.7		*		*	*	3
98.7		*	*	*	*	4
98.8	*	*	*	*	*	5

جدول ۳- مقایسه معادلات به‌دست آمده جهت تخمین ضریب دبی در این پژوهش با پژوهشی دیگر.

Table 3. Comparison the equations obtained to estimate the discharge coefficient at this research with other research.

$C_d = 0.225 + 2.41Fr^* - 0.44\frac{hs}{P} - 0.03 \propto$	R^2=98.7	تحقیق حاضر Present study	خطی Linear
$C_d = 0.468 + 0.655Fr^* + 0.045\frac{hs}{P}$	R^2=92.5	بینا و احمدی (۱۳۸۵) Bina and Ahmadi (2016)	
$C_d = 0.368 + 3.459Fr^{*1.317} - 0.109\frac{hs}{P}^{0.827} - 0.014 \propto^{4.048}$	R^2=99	تحقیق حاضر Present study	غیرخطی Nonlinear
$C_d = -2.981 + 2.334Fr^{*0.403} + 2.240\frac{hs}{P}^{-0.105}$	R^2=97.5	بینا و احمدی (۱۳۸۵) Bina and Ahmadi (2016)	

نتیجه‌گیری کلی

نتایج پژوهش‌های آزمایشگاهی حاضر نشان می‌دهد که:

- در مدل‌سازی سدهای لاستیکی می‌توان از فرمول انور برای طراحی آن استفاده نمود.
- رفتار هیدرولیکی سرریز لاستیکی به سرریز لبه‌پهن نسبت به سرریز لبه‌تیز و سرریز استوانه‌ای نزدیک‌تر است.
- پارامترهای هندسی مدل ازجمله ارتفاع مانند فشار درونی و پارامترهای هیدرولیکی ازجمله عمق جریان و عمق آب بالای سرریز، در ضریب دبی نقش اساسی دارند.
- هندسه سرریز لاستیکی تابعی از فشار درونی آن بوده و با تغییر هندسه ضریب دبی عبوری تغییر می‌کند. به‌عبارت‌دیگر می‌توان گفت که با افزایش فشار درون لاستیک، قطر سد لاستیکی بیش‌تر شده و همین امر باعث افزایش عمق آب عبوری در کانال می‌شود، درنتیجه ضریب دبی افزایش می‌یابد.
- با افزایش نسبت بی‌بعد hs/P ضریب دبی افزایش می‌یابد.
- پیشنهاد می‌گردد که در پژوهش‌های آتی محل‌های نصب سرریز لاستیکی بر روی سرریز اوجی تغییر و بهترین مکان نصب ارائه گردد. هم‌چنین می‌توان شرایط هیدرولیکی و هیدرودینامیکی نصب لاستیک روی یک سازه خرپایی متصل شده به دیواره سرریز بتنی را نسبت به شرایط انجام‌شده بررسی کرد.
- پیشنهاد می‌گردد که مدل آزمایشگاهی با استفاده از مدل‌های عددی مانند fluent نیز توسعه داده شود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان که موجبات تسهیل انجام این پژوهش را فراهم نموده‌اند تشکر می‌نمایند.

داده‌ها، اطلاعات و دسترسی

داده‌های این مقاله، از طریق آزمایش بر روی مدل آزمایشگاهی که در آزمایشگاه آب‌وخاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در سال ۱۳۹۷ انجام گرفته بود، استفاده شده است. داده‌های این پژوهش مربوط به رساله دکتری نویسنده اول است که با مکاتبه با نویسنده مسئول قابل‌دسترسی می‌باشند.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافعی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: آماده‌سازی داده‌ها، انجام محاسبات، تهیه پیش‌نویس مقاله، نویسنده دوم: طرح تحقیق و روش‌شناسی، اصلاح و نهایی‌سازی مقاله، مشارکت در آنالیزها، نظارت تحقیق، نویسنده سوم: مشارکت در طرح و روش تحقیق، نظارت تحقیق، بازبینی مقاله. نویسنده چهارم: مشارکت در طرح و روش تحقیق، بازبینی مقاله.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها می‌باشد.

حمایت مالی

حمایت مالی از این پژوهش در قالب گرنت دانشجویی نویسنده اول این مطالعه بوده است.

منابع

1. Shahraminia, N., Masoudian, M., & Golmaei, S. H. (2012). Voshmgir dam's Spillway Heightening of Investigation of Hydraulic, Master's thesis. 72p. [In Persian]
2. Sarhadi, B. (2007). Investigating the factors affecting the implementation of dams heightening projects and strategies to reduce negative effects, case study: the plan of Zarineh Rood Dam heightening. 2nd Iranian National Conference on Construction Experiences of Irrigation and Drainage Networks. Pp. 11-20. [In Persian]
3. Khazar Ab Consulting Company. (2011). Technical report of Voshmgir dam treatment. [In Persian]
4. Amini, R., Karimi, Gh., Mohammadvali Samani, H., & Kheirollahi, Sh. (2012). Revision and hydraulic design of Dez dam Spillway in the condition of dam heightening, The First International Conference on Dams and Hydropower. Pp. 1-11. [In Persian]
5. Yziquei, A, Plonclar, J., Sogreah, M., & France, Chirwa, M. (1999). Heightening of Malawi's Kamuzu II", *journal of hudro power & Dams*, Issue 6.
6. Babatabar, M. R., Derafshi, M. R., Alizade M. T., Tahmasebipoor, A., & Ghoreishi Tayyebi, E. (2012). Restore the Initial Storage Capacity of Voshmgir Dam's Reservoir with Install Rubber Dam on the Truss Platform, International symposium on dams for a changing word, Japan. Pp. 1-6.
7. Shahraminia, N., Masoudian, M., & Golmaei, S. H. (2012). Use of rubber dam in the heightening of concrete spillway (Case study: Voshmgir Dam). 3th National Conference on Comprehensive Management of Water Resources. Pp. 1-7. [In Persian]
8. Diaz, S., & Gonzalez, J. (2015). Hydraulic effects of an inflatable rubber

weir located over a WES original spillway profile: Experimental and CFD approaches. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress 28 June – 3 July, The Hague, the Netherlands. Pp. 1-10.
9. Chanson, H. (1989). A Review of overflow of Inflatable Flexible Membrane Dam. Dept. of Civil Engineering University of Queensland, Australia. Pp. 107-116.
10. Chanson, H. (1996). Some Hydraulic Aspects during Overflow above Inflatable Flexible Membrane Dam. Report CH47/96. Dept. of Civil Engineering University of Queensland, Australia, May, 60 p.
11. Chanson, H. (1998). Hydraulic of rubber dam overflow: A simple design approach. 13th Australasian Fluid Mechanics Conference Monash University, Melbourne, Australia 13-18 December. Pp. 255-258.
12. Alhamati, A., et al. (2005). Determination of coefficient of discharge for air-inflated dam using physical model. *Suranaree J. Sci. Technol*. 12 (1), 19-27.
13. Alhamati, A., et al. (2005). Behavior of inflatable dams under hydrostatic condition. *Suranaree J. Sci. Technol*. 12 (1), 1-18.
14. Jumaily, K. K., & Salih, A. A. (2005). Analysis of inflatable dams under hydrostatic conditions. *Journal of Engineering and Sustainable Development (JEASD)*. 9 (3), 69-92.
15. Cheraghi-Shirazi, N., Kabiri-Samani, A. R., & Boroomand, B. (2014). Numerical analysis of rubber dams using fluid-structure interaction. Flow Measurement and Instrumentation. 40, 91-98.
16. Chu, Ch., Tran, T., & Wu, T. (2021). Numerical Analysis of Free-Surface Flows over Rubber Dams, *water journal*, 13 (1271), 1-18.
17. Sarvarinezhad, B., Bina, M., Afaridegan, E., Parsaie, A., & Avazpour, F. (2022). The hydraulic investigation of inflatable weirs, *Journal of Water Supply*. 22 (4), 4639-4655.
18. Anwar, H. O. (1967). Inflatable dam. *J. Hydraul. Div. ASCE*. 93 (3), 99-119.