

# Investigating the hydraulic parameters of an earthen dam using modeling in experimental dimensions

Javad Vejihat<sup>1\*</sup>, Shadi Sarraf<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Master of Water Structure, university of Tehran, Karaj, Iran

<sup>2</sup>Master of Water Structure, Sari Agricultural and Natural Resources University, Sari, Iran

Corresponding Author's E-mail: [J.vejihat@ut.ac.ir](mailto:J.vejihat@ut.ac.ir)

Received: 18 Apr. 2025  
Revised: 20 July 2025

Accepted: 02 Aug. 2025  
Published: 09 Oct. 2025



Homepage: [ijwer.uoz.ac.ir](http://ijwer.uoz.ac.ir)

**Abstract:** Dam construction is one of the structures that costs a lot of money to build and may cause irreparable damage in various ways in the event of an accident, so it is necessary to build a model in laboratory dimensions before constructing the main model. In this study, the Palang Darreh Dam model is examined in dimensions of 1:20 compared to the main model. The results showed that at discharges less than 280 cubic meters per second, the thin blade of flow after hitting the bottom of the first step is separated from the step surface and, passing over several other steps without engaging them, hits the rapid surface again. Also, the energy dissipation efficiency of the stepped rapid was calculated and based on this, the efficiency values for discharges of 1000 to 4000 cubic meters per second were obtained from about 72 to 40 percent. From the results obtained from the model, it was determined that from low flow rates to a flow rate of about 3000 cubic meters per second, the hydraulic jump is completely formed inside the stilling basin and the basin has good efficiency in dissipating flow energy.

**Keywords:** Palang darreh, Piezometer, Velocity, Flow Rate

**Introduction:** Considerable accuracy in studies, correct location, correct assessment of water needs that will be met by building a dam, building a dam according to the materials available in the region, etc. are among the most important things considered in order to increase the advantages and make dams more practical. Given the nature of dams, which are artificial walls placed against the flow, challenges arise during floods with different return periods, which, if not predicted correctly, can lead to irreparable accidents. For this purpose, modeling with an appropriate scale in a laboratory environment has always been considered with the aim of evaluating the hydraulic behavior of different parts of the dam. This, in addition to the design engineers' knowledge of the dam's performance, will also reduce economic costs. Therefore, the present study was conducted with the aim of examining the results of the 1:20 scale hydraulic model of the Dasht-e Palang Dam and evaluating the performance of the stilling basin and spillway.

**Methodology:** The construction site of Dasht-e Palang Dam is located in Bushehr Province, Dashti County, and Shanbeh and Tasuj Districts from the perspective of geographical divisions. The study area includes the Dasht-e Palang River watershed with a geographical range of 51 degrees and 28 minutes to 52 degrees and 5 minutes east longitude and 28 degrees and 31 minutes to 29 degrees and 13 minutes north latitude. Construction of the hydraulic model of Dasht-e Palang Dam is the refinement of the spillway design in order to ensure proper and safe flood discharge under different operating conditions. Considering the dimensions of the steps, the spillway length and other hydraulic characteristics and considering the limitations in the laboratory environment, a scale of 1:20 was determined for the construction of the model. The stepped rapids of Palang Darreh Dam consist of 37 steps, the height and length of each step are 1.2 and 0.84 meters respectively; therefore, the assumed angle of inclination of the rapids with the horizon is about 55 degrees. The geometric characteristics of the stepped rapids are presented in [Fig. 1](#).

**Results and Discussion:** The highest and lowest energy dissipation efficiency of the rapid is about 72 and 40 percent, which correspond to the flow rates of 1000 and 4000 cubic meters per second, respectively. By evaluating

the energy dissipation efficiency values, it is clear that with increasing flow rate, the energy dissipation efficiency has decreased. With increasing flow rate, the water depth on the rapid increases and the ratio of step height to water depth at each section decreases, and therefore the effect of the step's interference with the flow on energy dissipation decreases. In order to examine the flow pattern at the end of the rapid, inside the calm and backwater basins, important information is obtained in terms of the location and formation of the hydraulic jump. At a flow rate of 1000 cubic meters per second, a submerged hydraulic jump is formed in the basin. At a flow rate of 3000 cubic meters per second, a strong hydraulic jump is formed in the basin. The position of the jump formation is at the beginning of the pond, and the subsurface currents near the bottom of the pond move at high speed and, upon impacting the bottom water, upstream and eddies are formed in this area. At this discharge, the hydraulic jump is also formed completely inside the pond, and the flow in the downstream is uniform with short waves. At a discharge of 3300 cubic meters per second (as the design discharge of the stilling pond), the flow conditions are largely similar to the flow conditions at a discharge of 3000 cubic meters per second, but the position of the hydraulic jump formation and also the flow fluctuations are slightly different. At the design discharge, the pond has a hydraulic jump formed at a distance of 3 to 4 meters from the beginning of the pond and continues to the end of the pond. In order to observe the trend of velocity changes along the spillway, the average velocity values at different sections of the spillway using measured data are shown in [Fig. 4](#).

**Conclusion:** In evaluating the performance of the stepped rapid at low flow rates, it was found that at flow rates less than about 280 m<sup>3</sup>/s, the thin blade of the flow separates from the rapid surface after hitting the bottom of the first step and, passing over several other steps without engaging with them, hits the rapid surface again. Moreover, efficiency values for flow rates of 1000 to 4000 m<sup>3</sup>/s were obtained from about 40 to 72%. From the model results, it was found that from low flow rates to a flow rate of about 3000 m<sup>3</sup>/s, the hydraulic jump is completely formed inside the stilling basin and the basin has good efficiency in flow energy dissipation.

© 2023 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/>)

# بررسی پارامترهای هیدرولیکی سد خاکی با استفاده از مدل‌سازی در ابعاد آزمایشگاهی

جواد وجاهت<sup>۱\*</sup>، شادی صراف<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران، کرج، ایران  
<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: [j.vejahat@ut.ac.ir](mailto:j.vejahat@ut.ac.ir)

وبگاه نشریه: [ijwer.uoz.ac.ir](http://ijwer.uoz.ac.ir)



تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱  
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۹ تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۷/۱۷

**چکیده:** ساخت سد به عنوان یکی از سازه‌هایی که هزینه زیادی صرف ساخت آن می‌شود و همچنین در صورت بروز حادثه ممکن است از جهات مختلف آسیب‌های جبران‌ناپذیری را به بار آورد، لذا ضروری است قبل از احداث نمونه اصلی، در ابعاد آزمایشگاهی مدل آن ساخته شود. در این پژوهش بررسی مدل سد پلنگ‌دره در ابعاد ۱:۲۰ نسبت به نمونه اصلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج مشخص نمود که در دبی‌های کمتر از حدود ۲۸۰ مترمکعب در ثانیه، تیغه نازک جریان پس از برخورد با کف پله یکم از سطح پله جدا شده و با عبور از روی چند پله دیگر و بدون درگیر شده به آن‌ها دوباره به سطح تندآب برخورد می‌نماید. همچنین راندمان استهلاک انرژی تندآب پلکانی محاسبه و بر این اساس مقادیر راندمان به ازای دبی‌های ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ مترمکعب در ثانیه از حدود ۷۲ تا ۴۰ درصد به دست آمد. از بررسی نتایج به دست آمده مدل مشخص شد که از دبی‌های کم تا دبی حدود ۳۰۰۰ مترمکعب در ثانیه، پرش هیدرولیکی به طور کامل در داخل حوضچه آرامش تشکیل شده و حوضچه کارایی مناسبی در استهلاک انرژی جریان دارد.

**کلیدواژه‌ها:** پلنگ‌دره، پیژومتر، سرعت، دبی جریان

## ۱- مقدمه

احداث سد، همواره تلاش بر رفع مشکلات موجود بوده است. دقت قابل‌توجه در مطالعات، مکان‌یابی صحیح، ارزیابی درست از نیازهای آبی که با ایجاد سد رفع می‌شوند، ساخت سد با توجه به مصالح موجود در منطقه و ... از جمله مهم‌ترین موارد در راستای افزایش مزیت‌ها و کاربردی‌تر شدن سدها در نظر گرفته می‌شوند (Salamati et al., 2025).

با توجه به ماهیت سدها که به صورت دیواره‌ای ساختگی در

کمبود منابع آبی از یک سو و افزایش جمعیت به دلیل بالا بودن شاخص‌های مطلوب زندگی منجر گردیده تا سدسازی علی‌رغم انتقاداتی که در برخی محافل علمی در این خصوص بیان می‌شود، به عنوان بهترین روش در ذخیره آب در نظر گرفته شود. هزینه‌های زیاد مطالعات، ساخت و نگهداری سد نیز بعضاً عاملی محدودکننده در ایجاد آن محسوب می‌شود، ولی با توجه به مزایای قابل‌توجه در

مطالعه آزمایشگاهی تاثیر تابع هدایت هیدرولیکی بر مدل‌سازی نشت از بدنه سدهای خاکی را نشان داد با به‌کارگیری تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع در مقایسه با حالت به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی اشباع نتایج مدل با داده‌های مشاهداتی تطابق بهتری دارد. مقایسه نتایج مدل ریاضی و داده‌های اندازه‌گیری شده نشان داد اختلاف بین نتایج مدل و داده‌های واقعی با نزدیک شدن به محدوده خط فریاتیکی بیشتر می‌شود (Ahmadi et al., 2014).

ارزیابی آزمایشگاهی و عددی تاثیر شکست آبی و تدریجی سد بر تغییرات بستر رسوبی نمایان کرد که میزان انتقال رسوبات بستر در شکست تدریجی سد دارای مقادیر بیشتری نسبت به شکست آبی تحت شرایط مدل‌سازی یکسان بوده است (Maldar et al., 2024). مقایسه تحلیل عددی و آزمایشگاهی رفتار بدنه سد خاکی در شرایط افت ناگهانی تراز آب مخزن نشان داد که مدل عددی تفاوت معناداری با مدل آزمایشگاهی ندارد. علاوه بر این، شبیه‌سازی‌های اشباع و غیراشباع نشان داد که مدل غیراشباع مطابقت زیادی با مدل آزمایشگاهی دارد (Pakmanesh et al., 2021).

بررسی‌های قائم و افقی سد خاکی ایوشان با استفاده از ابزار دقیق و تحلیل عددی آشکار ساخت که نشست در هسته سد روند افزایشی دارد و بعد از گذشت مدتی از پایان ساخت سد تقریباً به مقدار ثابتی می‌رسد. حداکثر نشست هسته سد در پایان مرحله ساخت به میزان ۸۰۹ میلی‌متر و معادل ۱/۲ درصد ارتفاع سد در تراز میانی رخ داده است. جابجایی‌های افقی در جهت طولی بالادست سد کاملاً تحت تاثیر تراز آب مخزن و نیروهای هیدرواستاتیکی است. بیشینه جابجایی افقی در پوسته بالادست سد ایوشان ۷۵/۶ میلی‌متر می‌باشد. پس از آبیگری سد، مقدار نشست از ترازهای پایین به طرف ترازهای بالا (تاج سد) روند افزایشی داشته است. به منظور تطبیق داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده از رگرسیون چند متغیره و از معیار ضریب تعیین استفاده شد که نتایج همخوانی حدود ۸۵ درصدی بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده را نشان می‌دهد و بیانگر این است که مقادیر نشست حداکثر و محل وقوع آنها با مشخصات فنی موجود مطابقت خوبی دارد و نشان‌دهنده عملکرد مناسب سد از لحاظ نشست می‌باشد (Komasi and

مقابل جریان قرار می‌گیرند، چالش‌هایی در هنگام وقوع سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف ایجاد می‌گردند که در صورت عدم پیش‌بینی صحیح، امکان بروز حوادث جبران‌ناپذیری رخ می‌دهد. بدین منظور مدل‌سازی با مقیاس مناسب در محیط آزمایشگاه با هدف ارزیابی رفتار هیدرولیکی بخش‌های مختلف سد همواره مورد توجه بوده است. این امر علاوه بر اشراف مهندسیین طراح بر عملکرد سد، کاهش هزینه‌های اقتصادی را نیز در پی خواهد داشت.

از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی نتایج حاصل از مدل هیدرولیکی سد دشت‌پلنگ با مقیاس ۱:۲۰ و ارزیابی عملکرد حوضچه آرامش و سرریز صورت گرفته است. به منظور ارزیابی پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه موضوع مورد مطالعه، به برخی از آخرین یافته‌ها پرداخته می‌شود.

با شبیه‌سازی هیدرولیکی شکست سدهای خاکی با هدف تحلیل ریسک و شناسایی نقاط آسیب‌پذیر را مشخص گردید که، ریسک سد تبارآباد نسبت به سد چه‌چهه درجه بالاتری داشته و در صورت بروز حادثه، روستاهای مجاور سد و همچنین شهر قوچان دچار آسیب‌های جدی خواهد شد. با این حال عملکرد صحیح سرریز سد چه‌چهه می‌تواند در پایداری و جلوگیری از وقوع بحران نقش بسزایی ایفا کند (Kavusizadeh et al., 2025).

بررسی آزمایشگاهی خصوصیات هیدرولیکی جریان روی سرریز سد وشمگیر با دریچه لاستیکی و مقایسه آن با سرریز لبه‌تیز، لبه‌پهن و استوانه‌ای را روشن کرد که، مدل فیزیکی-لاستیکی انور می‌تواند هندسه سدهای لاستیکی را به خوبی مدل‌سازی نماید. هندسه دریچه لاستیکی تابعی از فشار درونی آن است و با تغییر هندسه میزان دبی عبوری تغییر می‌کند. همچنین میزان دبی، ارتفاع دریچه لاستیکی و فشار درونی آن، ارتفاع جریان نسبت به تاج سد و ارتفاع آب بالادست از جمله عوامل موثر بر هیدرولیک جریان از جمله ضریب دبی می‌باشند (Salamati et al., 2025).

مدل‌سازی پدیده شکست سد و مقایسه نتایج مدل‌های مختلف آشفتگی در محیط فلوئنت نشان داد که مدل نرم‌افزاری دقت قابل‌توجهی در مدل‌سازی جریان ناشی از شکست سد را دارا می‌باشد (Abghari and farhadi, 2013).

جدول ۱ مشخصات سد مورد مطالعه

Description	Amount	Unit
Dam type	Earth dam with clay core	---
Crest Elevation	432	Msl
Height of the dam from the river bed	55	M
Overflow type	Free ogee	---
The flood return period of the plan	10000	Yr
Stilling basin length	47	M
Stilling basin width	160	M

(Beiranvand, 2020)

## ۲- روش شناسی

ساختگاه سد دشت پلنگ از دیدگاه تقسیمات جغرافیایی در استان بوشهر، شهرستان دشتی و بخش شنبه و طسوج واقع گردیده است. محدوده مورد مطالعه شامل حوضه آبریز رودخانه دشت پلنگ با محدوده جغرافیایی طول شرقی ۵۱ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۵ دقیقه و عرض شمالی ۲۸ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۲۹ درجه و ۱۳ دقیقه می‌باشد.

با توجه به شرایط توپوگرافی، زمین‌شناسی مهندسی و اقتصادی طرح، گزینه سد خاکی با هسته رسی برای این سد در نظر گرفته شده است. در [جدول ۱](#) برخی از مشخصات کلی سد ارائه شده است.

هدف از طراحی و ساخت مدل هیدرولیکی سد دشت پلنگ، تدقیق طراحی سرریز به منظور اطمینان از تخلیه مناسب و ایمن سیلاب در شرایط مختلف بهره‌برداری می‌باشد. با توجه به ابعاد پله‌ها، طول سرریز و سایر مشخصه‌های هیدرولیکی و با توجه به محدودیت‌های موجود در محیط آزمایشگاهی (موسسه تحقیقات آب)، مقیاس ۱:۲۰ جهت ساخت مدل تعیین گردید. طراحی اوجی سرریز بر مبنای هد متناظر با سیلاب ۱۰۰۰۰ ساله و برابر با ۴/۴۵ متر در نظر گرفته شده است. هندسه سرریز بر اساس جداول و مشخصات قیدشده در استاندارد USBR صورت گرفته است. تنداب پلکانی شامل ۳۷ پله بوده و دارای زاویه با افق حدود ۵۵ درجه‌ای است. پس از ساخت سرریز سد مورد نظر، آزمایش‌های متنوعی مورد ارزیابی قرار گرفت که از جمله مهم‌ترین آن‌ها مطالعه و بررسی شرایط و الگوی جریان ورودی به سرریز، روی اوجی و تنداب پلکانی، اندازه‌گیری آبگذری سرریز از کمترین تا بیشترین دبی، اندازه‌گیری فشارهای پیژومتریک در طول سرریز و تنداب، اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی جریان مانند سرعت جریان و پروفیل سطح آب در سرریز و بهینه‌سازی لازم در صورت نیاز برای رسیدن به بهترین شرایط هیدرولیکی بر روی سازه‌ها بوده است.

در این پژوهش به ارائه نتایج برخی از یافته‌ها در حوزه‌های

فوق‌الذکر پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است به منظور حفظ انسجام مطالب، توضیحات لازم در خصوص فرآیند مدل‌سازی در هر بخش ارائه خواهد گردید.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- ارزیابی عملکرد سرریز و تنداب پلکانی

تنداب پلکانی سد پلنگ دره شامل ۳۷ پله، ارتفاع و طول هر پله به ترتیب برابر با ۱/۲ و ۰/۸۴ متر، است؛ بنابراین، زاویه شیب فرضی تنداب با افق حدود ۵۵ درجه به دست می‌آید. مشخصات هندسی تنداب پلکانی در [شکل ۱](#) ارائه شده است.

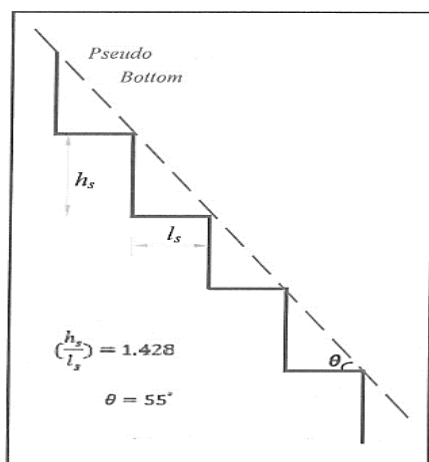


Fig. 1 Geometric characteristics of the stepped rapids of the studied dam

شکل ۱ مشخصات هندسی تنداب پلکانی سد مورد مطالعه

جریان یکنواخت تر و پایدارتر می شود و شرایط نامتعرفی به وجود نمی آید.

### ۳-۲- ارزیابی پارامترهای هیدرولیکی

در مدل هیدرولیکی سد دشت پلنگ، اندازه گیری پارامترهای هیدرولیکی برای دبی های ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰ مترمکعب در ثانیه در نظر گرفته شد. اندازه گیری عمق آب در ۱۵ مقطع روی آستانه سرریز، تندآب و حوضچه آرامش و برای هر مقطع در سه راستای چپ، میانی و راست انجام شده و سپس تراز سطح آب در مقاطع اندازه گیری محاسبه گردید. مطابق با نتایج به دست آمده، به ازای دبی های ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ مترمکعب در ثانیه، عمق آب در مقاطع مختلف سرریز در سه راستای اندازه گیری شده نزدیک به هم می باشد. این نتایج نشان می دهند که عمق آب در عرض سرریز برای هر مقطع یکسان بوده و تغییرات سطح آب در کناره ها و یا در راستای میانی سرریز بسیار اندک است. در دبی های ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰ مترمکعب در ثانیه نتایج نشان می دهد که پروفیل های سطح آب در راستای میانی تا حدی بالاتر از پروفیل های سطح آب در راستای چپ و راست می باشند. در شکل ۲ مقایسه ای از پروفیل سطح آب در طول سرریز، تندآب و حوضچه آرامش به ازای دبی های مختلف ارائه شده است.

در مدل هیدرولیکی سرریز سد مورد مطالعه، ضمن مشاهده الگوی جریان روی تندآب پلکانی مشخص شد که در دبی های بیشتر از ۵۰۰ مترمکعب در ثانیه، رژیم جریان تشکیل شده روی تندآب از نوع رویه ای بوده و در دبی های کمتر از ۵۰۰ مترمکعب در ثانیه، رژیم جریان از نوع تبدیلی است. رژیم جریان ریزشی تنها در دبی های خیلی کمتر از حدود ۱۰۰ مترمکعب در ثانیه تشکیل می شود که از دید استهلاک انرژی قابل توجه نمی باشد. در سرریز سد دشت پلنگ با وجود دبی در واحد عرض نسبتاً کوچک، به دلیل کوچک تر بودن طول پله نسبت به ارتفاع آن، شیب تندآب بسیار زیاد، شرایط تشکیل رژیم جریان ریزشی بر روی تندآب بسیار کم می باشد.

بر اساس آزمایش های انجام شده، مشخص گردید که در بازه ای از دبی های کمتر از ۲۸۰ مترمکعب در ثانیه (هد آب روی سرریز حدود ۰/۸ تا ۰/۹ متر)، سرعت جریان عبوری از روی سرریز به تدریج افزایش یافته و در آغاز پله یکم به حدود ۱۲ متر بر ثانیه می رسد. در دبی های بیشتر از ۲۸۰ مترمکعب در ثانیه و کمتر از ۵۰۰ مترمکعب در ثانیه، جداشدگی جریان از سطح پله ها مشاهده نمی شود. به نحوی که یک رژیم جریان تبدیلی بر روی تندآب تشکیل شده و هرچه مقدار دبی جریان افزایش می یابد، الگوی

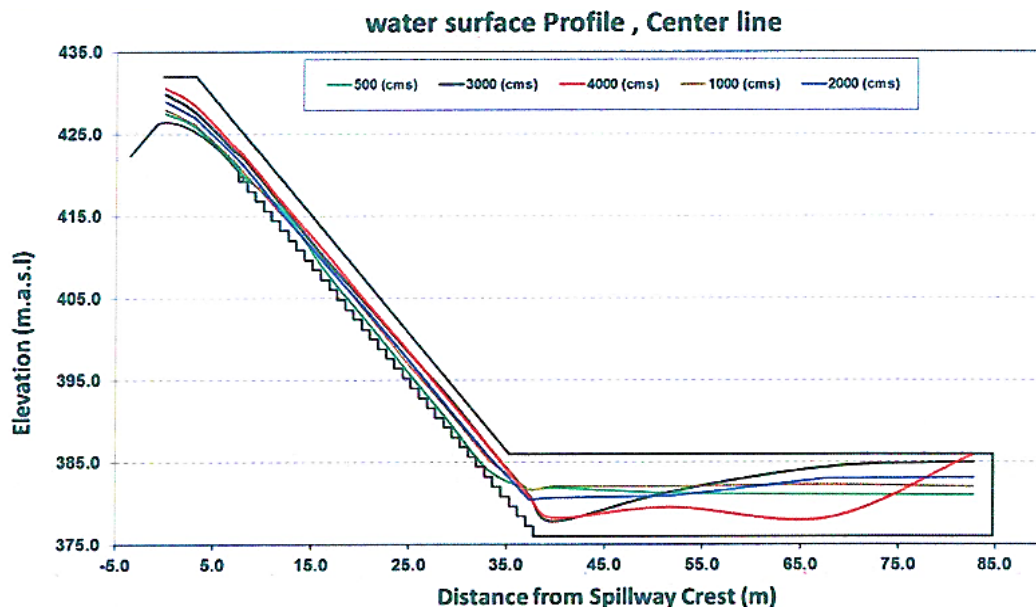
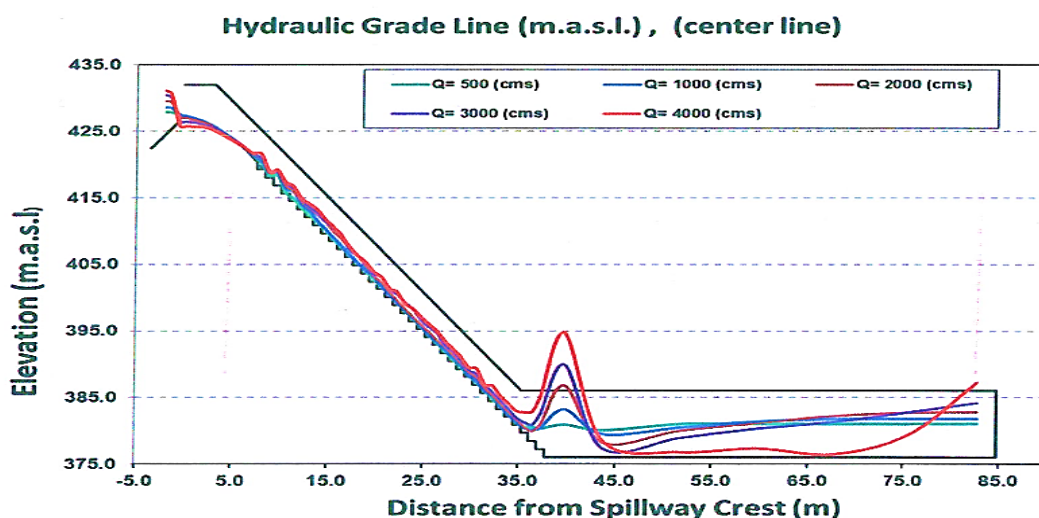


Fig. 2 Water level profile along the spillway, rapids, and stilling pond for different discharges  
شکل ۲ پروفیل سطح آب در طول سرریز، تندآب و حوضچه آرامش به ازای دبی های مختلف

ناگهانی جریان و اثرات شتاب موضعی، توزیع فشار از هیدرواستاتیک خارج شده و فشار در کف حوضچه به طور موضعی افزایش می‌یابد. در **شکل ۳** مقایسه تغییرات خط گرادیان هیدرولیکی روی سرریز و حوضچه آرامش به ازای دبی‌های آزمایش‌شده در راستای محور میانی سرریز ارائه شده است.

به منظور آگاهی از مقادیر متوسط سرعت جریان در مقاطع مختلف سرریز و نحوه تغییرات آن و همچنین به منظور ارزیابی میزان استهلاک انرژی در طول تندآب و تدقیق طرح حوضچه آرامش، اندازه‌گیری مقادیر سرعت جریان به‌ویژه در دبی‌های بالا در مدل هیدرولیکی انجام می‌شود. با توجه به آشفتگی زیاد جریان و اختلاط آب و هوا بر روی تندآب پلکانی، استفاده از لوله پیتو به دلیل ورود هوا به داخل آن و افزایش خطاهای اندازه‌گیری مناسب نیست. بنابراین مقادیر متوسط سرعت جریان در راستای میانی سرریز در ۱۱ مقطع و با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج مغناطیسی مدل ۸۰۱ شرکت Valeport صورت گرفته است. موقعیت مقاطع اندازه‌گیری سرعت نیز از روی تاج سرریز تا انتهای تندآب پلکانی به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده است که بتوان تغییرات سرعت جریان را در طول کل سرریز ارزیابی نمود.

به منظور اندازه‌گیری فشار، پیزومترها در ۵۴ مقطع از سرریز نصب گردید. در این مقاطع مقادیر فشارهای پیزومتریک در یک راستای چپ، میانی و راست با استفاده از شلنگ‌های پیزومتر، اندازه‌گیری و سپس گرادیان هیدرولیکی محاسبه شده است. همان‌گونه که از نتایج مشخص است، در دبی‌های ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ مترمکعب در ثانیه، فشار منفی بر روی تاج سرریز و اوجی اندازه‌گیری نشده است و کلیه فشارها مثبت می‌باشند. در دبی ۳۰۰۰ مترمکعب در ثانیه، فشار روی تاج سرریز در محل پیزومتر شماره ۴ به صفر می‌رسد و مقادیر کوچکی از فشارهای منفی بر روی تاج سرریز و همچنین پروفیل اوجی پایین‌دست تاج رخ داده است. بیشترین فشارهای منفی در این دبی روی تاج سرریز اندازه‌گیری شده است که مقادیر آن در راستای میانی سرریز حدود ۰/۷ متر و در راستای چپ و راست به ترتیب ۱/۸ و ۱/۲ متر می‌باشند. همچنین نتایج نشان می‌دهند که در هیچ‌یک از دبی‌های موردآزمایش، بر روی تندآب و در داخل حوضچه آرامش فشار منفی اندازه‌گیری نشده است. ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده بیانگر آن است که در محل ورودی حوضچه آرامش تغییر ناگهانی در مقادیر فشارهای پیزومتریک مشاهده می‌شود. در حوضچه‌های آرامش پس از اینکه جریان از انتهای تندآب عبور می‌کند به دلیل تغییر مسیر



**Fig. 3** Comparison of hydraulic gradient line changes on the spillway and the stilling basin for tested discharges along the middle axis of the spillway

**شکل ۳** مقایسه تغییرات خط گرادیان هیدرولیکی روی سرریز و حوضچه آرامش به ازای دبی‌های آزمایش‌شده در راستای محور میانی سرریز

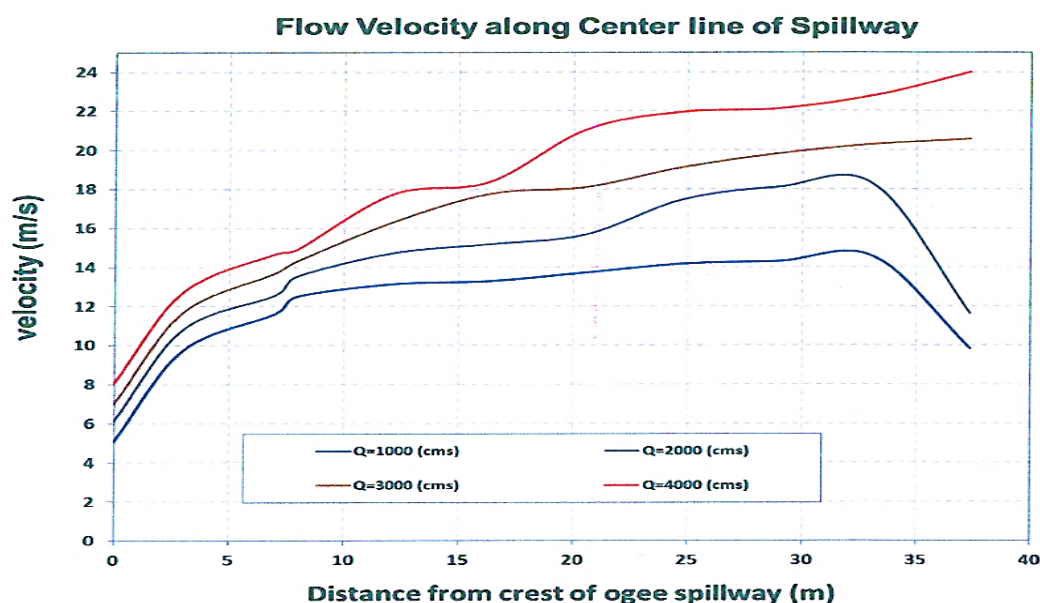
با توجه به داده‌های ارائه شده در [جدول ۲](#) و همچنین منحنی تغییرات سرعت جریان، روند تغییرات سرعت از تاج سرریز به سمت پایین دست افزایشی بوده که در ابتدا شیب منحنی‌ها زیاد بوده ولی به تدریج از شیب منحنی‌ها کاسته شده ولی همچنان روند افزایشی دارد. شیب تند قسمت ابتدایی منحنی‌های سرعت به این دلیل است که جریان از روی آستانه سرریز عبور نموده که سطحی صاف دارد و بنابراین جریان با کمترین افت به پایین دست منتقل می‌شود. در پایین دست آستانه سرریز که تندآب پلکانی قرار دارد، پله‌ها نقش زبری‌هایی که روی تندآب داشته که سبب کاهش انرژی می‌شوند.

این اندازه‌گیری‌ها به ازای دبی‌های ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰ مترمکعب در ثانیه انجام شد. لازم به ذکر است در دبی ۵۰۰ مترمکعب در ثانیه به دلیل ناکافی بودن عمق آب برای دستگاه اندازه‌گیری و افزایش خطاها، اندازه‌گیری سرعت انجام نشده است. نتایج به دست آمده برای مقادیر سرعت در هر مقطع از سرریز در [جدول ۲](#) مشخص شده است. همچنین به منظور مشاهده روند تغییرات سرعت در طول سرریز، مقادیر سرعت میانگین در مقاطع مختلف سرریز با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در [شکل ۴](#) نشان داده شده است.

**جدول ۲** مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت جریان در دبی‌های مختلف (مقادیر دبی برحسب  $m^3/s$ )

**Table 2** Measured flow velocity values at different flow rates (flow rates in  $m^3/s$ )

Piz No.	Station specifications		Q = 1000	Q = 2000	Q = 3000	Q = 4000
	Q (m/s)	El (m)				
4	0	426.5	5.11	6.12	7	8.05
7	3	425.35	9.75	10.8	11.68	12.72
11	7	421.2	11.63	12.56	13.68	14.67
12	7.96	419.25	12.52	13.52	14.31	14.91
17	12.16	413.25	13.15	14.71	16.31	17.75
22	16.36	407.25	13.3	15.16	17.75	18.38
27	20.56	401.25	13.73	15.66	18.1	21.06
32	24.76	395.25	14.18	17.44	19.11	21.96
37	28.96	389.25	14.31	18.1	19.82	22.14
42	33.16	383.25	14.53	18.22	20.3	22.81
47	37.36	377.25	9.84	11.63	20.57	24.02



**Fig. 4** Changes in average flow velocity along the middle of the spillway and for the tested discharges

**شکل ۴** تغییرات سرعت میانگین جریان در راستای میانی سرریز و به ازای دبی‌های آزمایش شده

خیلی کم، سطح آب در طول حوضچه تقریباً یکسان بوده و جریان در انتهای حوضچه و پایاب نیز آرام و بدون آشفتگی اضافی می‌باشد.

در دبی ۲۰۰۰ مترمکعب در ثانیه، یک پرش هیدرولیکی تا حدی مستغرق در محل پله شماره ۳۶ در حوضچه تشکیل می‌شود. جریان از انتهای تندآب و تقریباً از محل پله شماره ۳۴ به داخل آب نفوذ کرده و پرش رخ می‌دهد. آشفتگی جریان در داخل حوضچه نسبت به دبی ۱۰۰۰ مترمکعب در ثانیه افزایش یافته و تراز سطح آب در طول حوضچه همراه با آشفتگی‌های سطحی تغییر می‌کند. در این دبی نیز پرش هیدرولیکی به طور کامل در داخل حوضچه تشکیل و مستهلک می‌شود و جریان در پایاب آرام و یکنواخت می‌باشد.

در دبی ۳۰۰۰ مترمکعب در ثانیه، یک پرش هیدرولیکی قوی در حوضچه تشکیل می‌شود. موقعیت تشکیل پرش در ابتدای حوضچه بوده و جریان‌های زیرسطحی و نزدیک به کف حوضچه با سرعت زیاد حرکت نموده و با برخورد به آب‌پایه انتهایی به سمت بالادست آمده و گردابه‌هایی در این ناحیه تشکیل می‌شود. در این دبی نیز پرش هیدرولیکی به طور کامل در داخل حوضچه تشکیل می‌شود و جریان در پایاب یکنواخت همراه با موج‌های کوتاه می‌باشد. در دبی ۳۳۰۰ مترمکعب در ثانیه (به عنوان دبی طراحی حوضچه آرامش)، شرایط جریان تا حد زیادی مشابه شرایط جریان در دبی ۳۰۰۰ مترمکعب در ثانیه می‌باشد، ولی موقعیت تشکیل پرش هیدرولیکی و همچنین نوسان‌های جریان اندکی متفاوت است. در دبی طراحی، حوضچه یک پرش هیدرولیکی در فاصله ۳ تا ۴ متری از ابتدای حوضچه تشکیل شده و تا انتهای حوضچه ادامه می‌یابد. آشفتگی و نوسان سطح آب در داخل حوضچه نسبت به دبی ۳۰۰۰

به منظور محاسبه راندمان استهلاک انرژی تندآب پلکانی، سرعت میانگین و عمق جریان در انتهای پلکانی اندازه‌گیری شده و مبنای محاسبه هد انرژی در رابطه انرژی قرار گرفته است. با اندازه‌گیری تراز سطح آب مخزن و پارامترهای عمق آب و سرعت جریان در انتهای تندآب، راندمان استهلاک انرژی روی تندآب پلکانی به‌ازای دبی‌های آزمایش محاسبه گردید. در **جدول ۳** نتایج این محاسبات ارائه شده که در آن،  $V_{D/S}$  و  $d_{D/S}$  به ترتیب عمق آب و سرعت جریان در انتهای تندآب،  $H_{Res}$  انرژی جریان در انتهای تندآب و  $\eta$  راندمان استهلاک انرژی تندآب پلکانی است.

همان‌طور که از نتایج **جدول ۳** نیز برمی‌آید، بیشترین و کمترین راندمان استهلاک انرژی تندآب حدود ۷۲ و ۴۰ درصد بوده که به ترتیب متناظر با دبی‌های ۱۰۰۰ و ۴۰۰۰ مترمکعب در ثانیه می‌باشند. با ارزیابی مقادیر راندمان استهلاک انرژی مشخص است که با افزایش دبی جریان راندمان استهلاک انرژی کاهش یافته است. با افزایش دبی جریان عمق آب روی تندآب افزایش یافته و نسبت ارتفاع پله به عمق آب در هر مقطع کاهش می‌یابد و بنابراین تاثیر درگیری پله با جریان در استهلاک انرژی کاهش می‌یابد.

به‌منظور بررسی الگوی جریان در انتهای تندآب، داخل حوضچه آرامش و پایاب اطلاعات مهمی از دید موقعیت و نحوه تشکیل پرش هیدرولیکی به دست می‌آید. به این‌منظور الگوهای جریان شکل گرفته در حوضچه آرامش و پیرامون آن به‌ازای دبی‌های ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۳۳۰۰ و ۴۰۰۰ مترمکعب در ثانیه موردمشاهده و بررسی قرار گرفته است. در دبی ۱۰۰۰ مترمکعب در ثانیه، یک پرش هیدرولیکی مستغرق در حوضچه تشکیل می‌شود. جریان از انتهای تندآب و تقریباً از محل پله شماره ۳۴ به داخل آب نفوذ کرده و پرش رخ می‌دهد. آشفتگی در داخل حوضچه

**جدول ۳** راندمان استهلاک انرژی بر روی تندآب پلکانی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده

**Table 3** Energy dissipation efficiency on stepped rapids using measured data

Q (m <sup>3</sup> /s)	q (m <sup>3</sup> /s)	RWL (m)	d D/S (m)	V <sub>D/S</sub> (m/s)	H <sub>Res</sub> (m)	H <sub>max</sub> (m)	ΔH (m)	η (%)
1000	6.25	428.7	2	14.53	12.76	45.43	32.67	71.91
2000	12.5	429.93	2.5	18.22	19.42	46.66	27.24	58.38
3000	18.75	431	3.6	20.57	25.17	53.75	28.58	53.18
4000	25	431.96	3.7	24.02	33.11	54.71	21.6	39.49



Fig. 5 Flowing over the stepped rapids and the stilling basin

شکل ۵ جریان روی تندآب پلکانی و حوضچه آرامش



Fig. 6 Flow pattern on the spillway sill, stepped rapids and the stilling basin

شکل ۶ الگوی جریان روی آستانه سرریز، تندآب پلکانی و حوضچه آرامش

آمد. از بررسی نتایج به دست آمده مدل مشخص شد که از دبی‌های کم تا دبی حدود ۳۰۰۰ مترمکعب در ثانیه، پرش هیدرولیکی به طور کامل در داخل حوضچه آرامش تشکیل می‌شود و حوضچه کارایی مناسبی در استهلاک انرژی جریان دارد.

مترمکعب در ثانیه افزایش یافته و جریان‌های زیرسطحی و نزدیک به کف حوضچه با سرعت بیشتری به آب‌پایه انتهایی برخورد نموده و تلاطم گردابه‌ها در این ناحیه افزایش می‌یابد. اگرچه پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه تشکیل می‌شود، ولی به نظر می‌رسد که انرژی جریان به اندازه کافی در داخل حوضچه مستهلک نمی‌شود و گردابه‌های ناشی از پرش حتی در انتهای حوضچه نیز دیده می‌شوند.

در دبی طراحی حوضچه، جریان در پایاب تا حدی یکنواخت و موج می‌باشد. در دبی ۴۰۰۰ مترمکعب در ثانیه، پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه تشکیل نمی‌شود. جریان با سرعت زیاد از انتهای تندآب وارد حوضچه شده و بدون تشکیل پرش، طول حوضچه را طی نموده و با برخورد به آب‌پایه انتهایی، جهت جریان تغییر نموده و جریان دچار آشفتگی شدید می‌شود و سپس به انتهای شیب معکوس برخورد می‌نماید. پس از برخورد جریان به پایاب، آشفتگی جریان در طول کوتاهی کاهش یافته و جریان نسبتاً یکنواختی وارد پایاب می‌شود. در شکل‌های ۵ و ۶ عملکرد مدل سد ارائه شده است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در ارزیابی عملکرد تندآب پلکانی در دبی‌های کم مشخص شد که در دبی‌های کمتر از حدود ۲۸۰ مترمکعب در ثانیه، تیغه نازک جریان پس از برخورد با کف پله یکم از سطح پله جدا شده و با عبور از روی چند پله دیگر و بدون درگیر شدن به آن‌ها دوباره به سطح تندآب برخورد می‌نماید.

بر این اساس مقادیر راندمان به ازای دبی‌های ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ مترمکعب در ثانیه از حدود ۷۲-۴۰ درصد به دست

#### Acknowledgments

We would like to express our deepest gratitude and appreciation for the cooperation of the Boushehr Regional Water.

#### Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, J.V.; methodology, Sh.S., and J.V.; software, Sh.S.; data analysis, Sh.S.; writing – original draft preparation, J.V.; writing—review and editing, J.V. and Sh.S.; supervision, Sh.S.; All

#### 5- List of symbols

$V$ (m/s)	Speed
$\eta$	Efficiency
$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	Discharge
$q$ (m/s)	Specific discharge
$H$ (m)	Energy of flow

authors have read and agreed to the published version of the manuscript

### Funding

No financial support was received from any organization for this research.

### Data Availability Statement

The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors upon request

### Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

### References

- Abghari, H. Farhadi, A.R. (2013). Investigation of dam break modeling using fluent and comparison of models in the different turbulence condition, third national water resource management conference, sari (In Persian)
- Ahmadi, H. Rezaei, H. Zeinalzadeh, K. (2014). Laboratory investigation function hydraulic conductivity in earth dam crest seepage modeling, *Water and soil research*, 45 (3), 299 – 307 (In Persian)
- Kavoszadeh, A. Barati, R. Foroudi, A. Saboorkazeran, H. (2025). Hydraulic simulation of the failure of the embankment dams: part 2: risk analysis and identifying of vulnerable points. *Irrigation and water eng.* 57 (1), 1-20 (In Persian)
- Salamati, S. Masoudian, M. Meftah, M. Bakhshaki, M. (2025). Laboratory investigation of the hydraulic characteristic 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, *water and soil conservation*, 31 (2), 159 – 175 (In Persian)
- Maldar, A. Hoseini, A. Fazli, B. Fazeli, M. (2024). Laboratory and numerical investigation to rapid and gradual dam break to change of bed sediment, *Water research*, 17 (3), 31 – 46 (In Persian)
- Pakmanesh, M. Musavi, H. Khosrojerdi, A. Hasanpour, H. Babazadeh, H. (2021). Analysis of earth dam body behavior under rapid drawdown conditions in reservoir water level by laboratory and numerical methods, *Water and soil science*, 25 (3), 305 – 318 (In Persian)
- Komasi, M., & Beiranvand, B. (2020). Study of vertical and horizontal displacements of eyvashan earth dam using instrumentation and numerical analysis. *Iranian journal of soil and water research*, 51(1), 245-256.