Advanced Technologies in Water Efficiency
homepage:https://atwe.razi.ac.ir
Online ISSN:2783-4964
Razi University

One-dimensional discharge-stage theory relationship modifying in non-core rock fill dams using laboratory model

Majid Heydari [1]✉, **Zahra Khoda karamian** [2]

[1] Corresponding author, Assistant Professor, Department of Water Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. Email: mheydari@basu.ac.ir
[2] M. Sc graduated of Water structures, Department of Water Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. Email: zahra.khodakaram77i@gmail.com

ABSTRACT

Introduction

Rock fill dams allow flow to pass through gravels or in some cases, through the porous part. The main purpose of building these dams is to reduce the peak flood discharge, which can reduce the damage to the downstream (Hansen and Garga, 1995). These dams have large pores, so the flow will be turbulent and the Darcy law will not be valid, in other words, the relationship between velocity (V) and hydraulic gradient (i) is nonlinear.

Research Methods

In this research, 21 series of experiments were planned on 2 trapezoidal and rectangular sections of rock fill dams in a laboratory flume equipped with an ultrasonic velocity meter with a length of 11 meters, a width and height of 0.5 meters and a fixed slope of 0.003 was done with glass walls and a galvanized bed covered with fiberglass boards. To provide the discharge, a pump was used that supplied the system flow up to 80 liters per second. To measure the depth of flow upstream and downstream of the dam, a depth gauge with an accuracy of one millimeter was used. Three samples of aggregates with medium diameters (D50) of 3, 5 and 7 cm were used for construction of laboratory rock fill dam by sieving method. In order to obtain the correction coefficient of one-dimensional equation b_0 and parameters (b1, b2, b3, b4), multivariate nonlinear regression method and SPSS 23 software were used to fit the equations on the data.

Conclusion

Based on the observational results of the experiments, using SPSS 23 statistical software, multivariate nonlinear regression experimental data were fitted and then the parameters of one-dimensional equations were modified. By examining the statistical indicators, the validity of the equations was examined and acceptable results were obtained.

The degree of scatter between computational and observational discharges in the equation resulting from dimensional analysis, due to its proximity to the bisector line of the first quarter and the high value of the R^2 index, is more accurate than the one-dimensional and one-dimensional theory equations, in such a way that its error rate for 30% of the data is equal to 0.107 percent and therefore can be used as a reliable equation. Also, the one-dimensional and modified two-dimensional theory equations were compared with the modified two-dimensional and two-dimensional theory equations.

Finally, the results showed that the two-dimensional equations have high accuracy. This study discusses the importance and need for an equation that can easily estimate discharge with high accuracy, and the proposed correction equations also emphasize this issue. On the other hand, extracting a simple and understandable rating curve relationship also doubles the efficiency, operation and management of rock fill dams.

Keywords: Rockfill Dam, One-Dimensional Equation, Laboratory Model, Multivariate nonlinear regression.

Article Type: Research Article
Article history: Received: 22 December 2021 **Revised:** 25 January 2022 **Accepted:** 01 February 2022 **ePublished:** 20 February 2022

Cite this article: Heydari, M., & Khodakaramian, Z. (2022). One-dimensional discharge-stage theory relationship modifying in non-core rockfill dams using laboratory model., *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 1(1), 108-120 DOI: 10.22126/ATWE.2022.7438.1012

Publisher: Razi University
© The Author(s).

فناوری های پیشرفته در بهره وری آب
وبگاه نشریه: https://atwe.razi.ac.ir شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۹۶۴

اصلاح رابطه تئوری یک‌بعدی دبی– اشل در سدهای پاره‌سنگی فاقد هسته با استفاده از مدل آزمایشگاهی

مجید حیدری [۱]✉ ، زهرا خداکرمیان [۲]

[۱] نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. ایمیل: mheydari@basu.ac.ir
[۲] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. ایمیل: zahra.khodakaram77i@gmail.com

چکیده

از راهکارهای سازه‌ای که می‌توان جهت کنترل سیلاب به آن اشاره کرد، سدهای پاره‌سنگی بدون هسته می‌باشد. در این سدها دبی پیک سیلاب کاهش و زمان رسیدن به آن افزایش می‌یابد. جریان عبوری از این سدها آشفته بوده و قانون دارسی معتبر نمی‌باشد لذا از معادلات مربوط به جریان متلاطم، شامل روابط بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک استفاده می شود. ازآنجایی‌که روابط حاکم بر هیدرولیک این سدها غیرخطی است، استخراج یک رابطه دبی–اشل ساده و دقیق می‌تواند مدیریت و بهره‌برداری این سدها را دوچندان کند. به‌منظور اصلاح معادله تئوری یک‌بعدی دبی–اشل در سدهای پاره‌سنگی، آزمایش‌هایی در یک فلوم آزمایشگاهی انجام شد و از طریق آنالیز ابعادی، کمیت‌های بی‌بعد در مسئله عبور جریان از یک سد پاره‌سنگی استخراج شد. با انتخاب مقاطع مستطیلی و ذوزنقه‌ای با سنگ‌دانه‌هایی به قطر ۳، ۵ و۷ سانتی‌متر و طول‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متری ۲۱ سری آزمایش، انجام و با اعمال رگرسیون غیرخطی چندمتغیره بر بخش عمده‌ای از نتایج آزمایشگاهی(۷۰٪)، ۲ معادله اصلاحی ارائه شد. بر اساس شاخص‌های آماری حاصل از ۳۰٪ داده‌ها، صحت سنجی معادلات موردبرسی قرار گرفت که نتایج قابل قبولی برای معادلات اصلاحی به دست آمد. نتایج و شاخص‌های آماری بیانگر آن است که معادله به‌دست‌آمده از آنالیز ابعادی، هم‌خوانی بیشتری نسبت به معادلات تئوری یک‌بعدی و یک‌بعدی اصلاح‌شده دارد و درصد خطای آن برای ۳۰٪ از داده‌ها برابر ۰/۱۰۷ در صد است بنابراین می‌تواند به‌عنوان معادله‌ای مناسب مورد استفاده قرار گیرد. معادلات تئوری یک‌بعدی و یک‌بعدی اصلاح‌شده نیز با معادلات تئوری دوبعدی و دوبعدی اصلاح‌شده مقایسه شد و نتایج نشان داد که معادلات دوبعدی از دقت بالایی برخوردارند.

واژه‌های کلیدی: سد پاره‌سنگی، معادله یک‌بعدی، مدل آزمایشگاهی، رگرسیون غیرخطی چندمتغیره

نوع مقاله: مقاله پژوهشی
سابقه مقاله: دریافت: ۰۱ دی ۱۴۰۰ **اصلاح:** ۰۵ بهمن ۱۴۰۰ **پذیرش:** ۱۲ بهمن ۱۴۰۰ **چاپ الکترونیکی:** ۰۱ اسفند ۱۴۰۰

استناد: حیدری. م.، و خداکرمیان، ز. (۱۴۰۰). اصلاح رابطه تئوری یک‌بعدی دبی– اشل در سدهای پاره‌سنگی فاقد هسته با استفاده از مدل آزمایشگاهی. *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۱(۱)،۱۲۰ –۱۰۸ ، شناسه دیجیتال:10.22126/ATWE.2022.7438.1012

ناشر: دانشگاه رازی

©نویسندگان.

مقدمه

در اغلب موارد، احداث سازه‌های کنترل سیلاب علاوه بر اینکه به تخصص بالایی نیاز دارند، هزینه‌های بالایی را هم در برمی‌گیرند، به همین دلیل مهندسین سعی در توسعه راهکارهایی دارند که استفاده از مصالح ارزان‌قیمت در این روش‌ها موجب کاهش هزینه‌های احداث می‌شود (رجبی، ۱۳۹۰). با توجه به ساختار ساده سدهای پاره‌سنگی، خصوصیات مصالح سنگی، وفور سنگ در هر ناحیه، سهولت استفاده و ارزان بودن آن و همچنین راندمان خوب این سدها در کاهش پیک سیلاب و به تعویق انداختن آن، احداث این سدها به‌عنوان یک روش مناسب در بین روش‌های کنترل و مهار سیلاب معرفی‌شده است (حسین زاده طلایی و همکاران، ۱۳۹۰). سدهای پاره‌سنگی تأخیری به جریان اجازه می‌دهد تا از میان سنگریزه‌ها و یا حتی در بعضی‌اوقات از روی قسمت متخلخل عبور کند. هدف اصلی از ساخت این سدها کاهش دبی پیک سیلاب است که می‌تواند موجب کاهش خسارت وارده به پایین‌دست شود (هانسن و گارگا[1] ۱۹۹۵). این سدها دارای خلل‌وفرج درشت می‌باشند بنابراین در آن‌ها جریان متلاطم خواهد بود و قانون دارسی معتبر نمی‌باشد، به‌عبارت‌دیگر رابطه‌ی بین سرعت (V) و گرادیان هیدرولیکی (i) غیرخطی است (استاد علی عسکری و شایان نژاد، ۲۰۱۵).

روابطی که هیدرولیک جریان متلاطم عبوری در محیط متخلخل درشت‌دانه را تبیین می‌کنند به دودسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند.
دسته اول، معادلات ارتباط بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان($i-V$) و دسته دوم، معادلات ارتباط بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک(R_e-f) می‌باشند.

پرونی (۱۸۰۴) و فرشیمر (۱۹۰۱) روابط غیرخطی بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان را به‌صورت زیر درنظر گرفتند:

$$i=AV^B \quad (۱)$$

$$i=A'V+B'V^2 \quad (۲)$$

که در آن i، گرادیان هیدرولیکی، V، سرعت جریان و $A.B.A'B'$ ضرایبی هستند که بستگی به خصوصیات فیزیکی سیال و محیط متخلخل دارند (لی و همکاران، ۱۹۹۸).

ویلکینز(۱۹۵۶)، پارکین (۱۹۶۳)، مارتینز (۱۹۹۱)، جانسون (۱۹۶۹) و لپس (۱۹۷۳)در تحقیقات خود از رابطه‌ی (۱) استفاده کردند. همچنین محققین زیادی ضمن پذیرش رابطه‌ی (۲) برای افت بار در محیط‌های متخلخل درشت‌دانه، آن را موردبررسی قراردادند که از آن جمله می‌توان به وارد (۱۹۶۴)، آدرین(۱۹۶۵) و احمد و سونادا(۱۹۶۹) اشاره کرد (زاهد و زمردیان، ۱۳۸۹).

محققان دیگر، برای بیان هیدرولیک جریان درون‌گذر در محیط متخلخل درشت‌دانه، روابط بین عدد رینولدز (R_e) و ضریب اصطکاک دارسی–ویسباخ (f) را به فرم‌های زیر پیشنهاد کردند:

$$f=a'R_e^{b'} \quad (۳)$$

$$f=\frac{a}{R_e}+b \quad (۴)$$

که در آن f، ضریب اصطکاک دارسی–ویسباخ، R_e، عدد رینولدز و $a.b.a'b'$ ضرایبی هستند که بستگی به خصوصیات فیزیکی سیال و محیط متخلخل دارند (استاد علی عسکری و شایان نژاد، ۲۰۱۵).

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مطالعات متعددی درزمینه‌ی هیدرولیک جریان در محیط‌های سنگ‌دانه‌ای با استفاده از معادله‌ی یک‌بعدی دبی–اشل سدهای پاره‌سنگی توسط محققین انجام‌شده است که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود:

[1] Hansen & Garga

میچیپکو و همکاران[1](۲۰۰۵) به‌منظور کنترل جریان در رودخانه‌ها احداث سرریزهای پاره‌سنگی نفوذپذیر را پیشنهاد کردند و با در نظر گرفتن جریان یک‌بعدی، دبی عبوری از سرریز پاره‌سنگی به‌صورت تابعی از پارامترهای مؤثر در هیدرولیک جریان فرموله شد که با نتایج آزمایشگاهی همخوانی مناسبی را نشان داد.

سامانی و همکاران (۱۳۸۰-۱۳۸۱) در تحقیقی ضرایب معادله فرم نمایی ارتباط بین ضریب اصطکاک و عدد رینولدز($f\text{-}R_e$) را در دو حالت یک‌بعدی و دوبعدی برای سنگ‌دانه‌های با قطر متوسط ۱۰-۱ سانتی‌متر به‌صورت ذیل به‌دست‌آمده آوردند.

$f=54R_e^{-0.077}$ برای حالت یک‌بعدی (۵)

$f=80R_e^{-0.034}$ برای حالت دوبعدی (۶)

سامانی و حیدری (۱۳۸۵) در تحقیقی مدل روند یابی سیل در سدهای پاره‌سنگی متوالی و تأثیرات متقابل این سدها را بر هم بررسی نمودند. نتایج حاصل از مدل، تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد. همچنین نتایج نشان داد که کاهش دبی حداکثر هیدرو گراف خروجی به تعداد سدهای پاره‌سنگی متوالی، فاصله آن‌ها، اندازه متوسط مصالح سنگی به کار گرفته‌شده و ابعاد سدها بستگی دارد.

شایان نژاد و اشجازاده (۲۰۱۴) با استفاده از مدل آزمایشگاهی و به‌کارگیری رابطه کسری بین ضریب اصطکاک و عدد رینولدز ($f\text{-}R_e$) و معادله‌ی یک‌بعدی دبی- اشل سدهای پاره‌سنگی، به بررسی هیدرولیک جریان درون‌گذر سد پاره‌سنگی دولایه پرداختند. در این تحقیق اثر لایه‌ها به‌صورت ضخامت آن‌ها و نیز قطر مصالح بکار رفته موردنظر قرارگرفته است . نتایج این تحقیق حاکی از آن است که لایه‌بندی اثرات مطلوب‌تری در کاهش تراوش دارد.

استاد علی عسکری و شایان نژاد(۲۰۱۵) در تحقیقی کاربرد سد پاره‌سنگی در نرم‌افزار HEC-RAS به‌منظور کنترل سیل را موردبررسی قراردادند. در این نرم‌افزار از نتایج رابطه‌ی یک‌بعدی دبی-اشل در سدهای پاره‌سنگی، استفاده‌شده است.مشخص گردید که حضور سد پاره‌سنگی را می‌توان مشابه حضور سازه‌ای مانند یک‌بند در نظر گرفت که در کنترل سیلاب مؤثر است.

حیدری (۱۳۷۹) در تحقیقی مدل ریاضی یک‌بعدی، جهت روند یابی سیل در مخازن چندگانه سد تأخیری پاره‌سنگی را ارائه نمود که از نتایج آن می‌توان به افزایش راندمان کاربرد این سدها، با استفاده از سنگ‌دانه‌های کوچک‌تر اشاره کرد. همچنین با به‌کارگیری مدل پیشنهادی توانست منحنی‌های دبی-اشل سدهای متوالی پاره‌سنگی را برای شرایط ماندگار به‌دست آورد.

سامانی و شایان نژاد (۱۳۸۰) معادله دبی-اشل سدهای پاره‌سنگی را به‌منظور تأخیر در سیلاب ارائه نمودند که با ترکیب معادله دارسی- ویسباخ و پیوستگی و با استفاده از رابطه کسری بین ضریب اصطکاک و عدد رینولدز ($f\text{-}R_e$)، معادله‌ی یک‌بعدی دبی-اشل برای سدهای پاره‌سنگی به‌دست‌آمده آوردند که ضرایب آن با روش بهینه‌سازی غیرخطی تعیین‌شده است.

سامانی و حیدری (۱۳۸۷) در تحقیقی تحت عنوان " توسعه و کاربرد مدل ریاضی دوبعدی روند یابی سیل در مخازن سدهای پاره‌سنگی متوالی در حالت درون‌گذر- روگذر" با به‌کارگیری معادلات دبی-اشل دوبعدی جریان درون‌گذر- روگذر به مقایسه‌ی نتایج حاصله با مشاهدات آزمایشگاهی پرداختند که دقت بسیار خوب مدل را در شبیه‌سازی روندیابی سیل در سیستم سدهای پاره‌سنگی نفوذپذیر متوالی نشان داد. در این تحقیق نشان داده شد که مدل دوبعدی دارای دقت بالاتری نسبت به مدل یک‌بعدی است به‌نحوی‌که در شرایط آزمایشگاهی دقت آن ۲۵ درصد بیشتر است.

سامانی و همکاران (۱۳۸۷) در طی تحقیقی با عنوان تعیین دبی جریان درون و روگذر غیرمستغرق در سدهای تأخیری پاره‌سنگی با استفاده از آنالیز ابعادی، رابطه‌ای برای برآورد شدت‌جریان هم‌زمان درون و روگذر غیرمستغرق در سدهای تأخیری پاره‌سنگی به‌صورت تابعی از پارامترهای بدون بعد موردبررسی را با دقت مطلوبی پیشنهاد کردند.

زاهد و زمردیان (۱۳۸۹) نیز با استفاده از معادله‌ی یک‌بعدی دبی-اشل سدهای پاره‌سنگی برای فرم کسری ارتباط بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک ($f\text{-}R_e$)، به بررسی آزمایشگاهی هیدرو گراف خروجی از سد پاره‌سنگی با مقطع مستطیلی پرداختند. آنچه مشخص است تاکنون تحقیقات متعددی جهت اصلاح ضرایب a'وb' در رابطه نمایی بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک دارسی-ویسباخ ($f\text{-}R_e$)، صورت گرفته که این ضرایب (a', b') در معادله‌ی یک‌بعدی دبی-اشل در سدهای پاره‌سنگی مورداستفاده قرارگرفته‌اند.

[1] Michipku et al

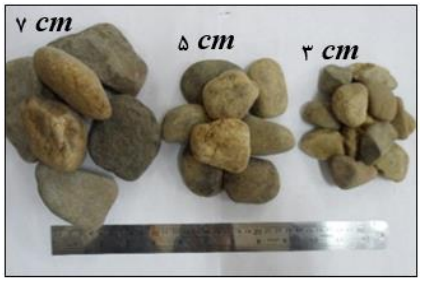
روش پژوهش

✓ داده‌های آزمایشگاهی

در این تحقیق، ۲۱ سری آزمایش برنامه‌ریزی شد که بر روی ۲ مقطع ذوزنقه‌ای و مستطیلی از سدهای پاره‌سنگی در یک فلوم آزمایشگاهی مجهز به سرعت‌سنج اولتراسونیک به طول ۱۱ متر، عرض و ارتفاع ۰/۵ متر و شیب ثابت ۰/۰۰۳ با دیواره‌های شیشه‌ای و بستری از جنس گالوانیزه که با تخته‌های فایبرگلاس پوشیده شده، انجام شد. جهت تأمین دبی جریان از پمپی که دبی سیستم را تا ۸۰ لیتر بر ثانیه تأمین می‌کرد، استفاده شد. جهت اندازه‌گیری عمق جریان در بالادست و پایین‌دست سد از عمق‌سنج با دقت یک میلی‌متر استفاده گردید. مشخصات هندسی سدهای پاره‌سنگی در جدول(۱) آورده شده است. سه نمونه سنگدانه با قطرهای متوسط(D_{50}) ۳، ۵ و ۷ سانتی‌متر جهت ساخت سد پاره‌سنگی آزمایشگاهی، توسط روش الک کردن مورداستفاده قرار گرفت. جهت نگهداری سنگ‌دانه‌ها در هر یک از مقاطع ذوزنقه‌ای و مستطیلی، از سبدهای تور–سیمی زوایای ۴۵، ۶۰ و۹۰ درجه به طول‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ سانتی‌متری استفاده شد. قالب‌ها پس از قرارگیری در داخل کانال توسط سنگ‌دانه‌های مذکور جهت انجام آزمایشات پر شد، شکل (۱) و شکل (۲) بیانگر این موضوع هستند.

جدول۱. مشخصات هندسی سدهای پاره‌سنگی مورداستفاده در آزمایشات

مقطع	$L(cm)$	$H_{dam}(cm)$	θ°	$W(cm)$
مستطیلی	۵۰, ۱۰۰, ۱۵۰	۴۲	۹۰	**۵۰**
ذوزنقه‌ای	۱۰۰, ۱۵۰	۴۲	۴۵, ۶۰	**۵۰**



شکل۱. سنگ‌دانه‌های مصرفی در آزمایشات

شکل۲. نمایی از جریان درون‌گذر در سد پاره‌سنگی ذوزنقه‌ای با مشخصات

$$(\theta = ٦٠^{\circ}\ \ D_{50} = ٣\text{cm}\ L = ١/٥\ \text{m})$$

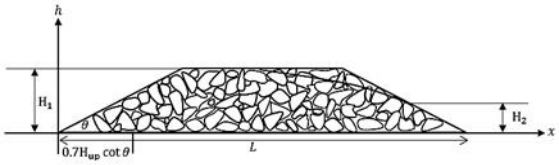
مدل ریاضی

معادله (۷)، معادله تئوری یک‌بعدی دبی–اشل در سد پاره‌سنگی برای فرم نمایی ارتباط بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک می‌باشد. لازم به‌ذکر است طول ($0.7H_1\,cot\,\theta$) در سدهای خاکی به‌صورت تجربی مورداستفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق سعی در اصلاح رابطه‌ی یک‌بعدی خواهد شد (حیدری، ۱۳۸۵).

$$Q=\alpha'' W\left(\frac{1}{b'+3}\right)^{\frac{1}{b'+2}}\left(\frac{H_1^{b'+3}-H_2^{b'+3}}{L-0.7H_1\cot\theta}\right)^{\frac{1}{b'+2}} \quad (۷)$$

$$\alpha''=\left(\frac{2v^{b'}g}{a'D_{50}^{b'-1}}\right)$$

که در آن $H_1.H_2$ = تراز سطح آب در بالادست و پایین‌دست سازهٔ سد (L)، L = طول سد در امتداد جریان (L)، W = عرض سد در راستای عمود برجهت جریان (L)، θ = زاویه شیروانی سازه نسبت به افق(بی‌بعد)، d_{50} = قطر متوسط سنگ‌دانه‌های مصرفی در ساخت سازه (L)، v = لزوجت سینماتیک سیال (آب) (L^2T^{-1})، g = شتاب ثقل (LT^{-2})، $a'.b'$ = ضرایب معادله نمایی ارتباط بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک(بی‌بعد)، می‌باشد، شکل (۳).



شکل۳. نمایی از یک سد پاره‌سنگی در محور مختصات (حیدری، ۱۳۸۵)

همان‌طوری که در مخرج معادله (۷) مشاهده می‌شود، عبارت $0.7H_1\cot\theta$ یک مقدار تجربی است که در سدهای خاکی محاسبه‌شده است. با توجه به ماهیت هیدرولیکی متفاوت سدهای خاکی و سدهای پاره‌سنگی ضروری به نظر می‌رسد که این معادله اصلاح شوکه تاکنون تحقیقی صورت نگرفته است.

با توجه به آنکه قطر متوسط سنگ‌دانه‌های استفاده‌شده در آزمایشات در محدوده‌ی قطر سنگ‌دانه‌های مورداستفاده در آزمایشات t سامانی و همکاران (۱۳۸۰–۱۳۸۱) بود لذا برای انتخاب ضرائب $a'.b'$ در معادله(۷) از ضرایب معادله(۵) استفاده شد که نهایتاً به معادله(۸) منتج می‌شود. جهت اصلاح عبارت طولی ($0.7H_1\,cot\,\theta$) در معادله(۸)، ضریب b_0 را در آن اعمال کرده که به‌صورت معادله(۹) در نظر گرفته می‌شود.

$$Q=\alpha'' W(0.342)^{0.52}\left(\frac{H_1^{2.923}-H_2^{2.923}}{L-0.7H_1\cot\theta}\right)^{0.52} \quad (۸)$$

$$Q=\alpha'' W(0.342)^{0.52}\left(\frac{H_1^{2.923}-H_2^{2.923}}{L-b_0H_1\cot\theta}\right)^{0.52} \quad (۹)$$

تحلیل ابعادی

به‌منظور تبیین رابطه بین پارامترهای مؤثر در معادله یک‌بعدی دبی–اشل سدهای پاره‌سنگی، از تئوری آنالیز ابعادی باکینگهام استفاده گردید و پارامترهای مؤثر به نسبت‌های بدون بعد تبدیل می‌گردد. بر این اساس متغیرهای دخیل در مسئله $Q.H_1.H_2.L.D_{50}.g.\theta$ در نظر گرفته شد:

$$f(Q.\ H_1.\ H_2.L.\ D_{50}.\ g.\ \theta)=0 \qquad (۱۰)$$

در این رابطه، $Q=$ دبی جریان، $H_1.H_2=$ تراز سطح آب در بالادست و پایین‌دست سازهٔ سد، $L=$ عرض پی در امتداد جریان، $d_{50}=$ قطر متوسط مصالح بدنه سد، $g=$ شتاب ثقل، $\theta=$ زاویه شیروانی سازه نسبت به افق. با در نظر گرفتن H_1 و g به‌عنوان پارامترهای اصلی، رابطه(۱۰) را می‌توان به‌صورت رابطه بی‌بعد (۱۱) نوشت.

$$f\left(\theta.\frac{H_1}{D_{50}}.\frac{H_1}{L}.\frac{H_1}{H_2}.\frac{Q^2}{gH_1^5}\right)=0 \qquad (۱۱)$$

با استفاده از روش رالیق[1] رابطه فوق به فرم معادله(۱۲) به دست می‌آید:

$$\frac{Q^2}{gH_1^5}=\theta^{b_1}\left(\frac{H_1}{D_{50}}\right)^{b_2}\left(\frac{H_1}{L}\right)^{b_3}\left(\frac{H_1}{H_2}\right)^{b_4}$$

$$Q=H_1^{2.5}\ g^{0.5}\ \theta^{\frac{b_1}{2}}\left(\frac{H_1}{D_{50}}\right)^{\frac{b_2}{2}}\left(\frac{H_1}{L}\right)^{\frac{b_3}{2}}\left(\frac{H_1}{H_2}\right)^{\frac{b_4}{2}} \qquad (۱۲)$$

به‌منظور به دست آوردن ضریب اصلاحی معادله‌ی یک‌بعدی b_0 در معادله(۹) و پارامترهای($b_1.b_2.b_3.b_4$) در معادله(۱۲)، از روش رگرسیون غیرخطی چندمتغیره و نرم‌افزار SPSS 23 جهت برازش معادلات بر روی‌داده‌ها، استفاده‌شده است

یافته‌ها

به‌منظور تعیین پارامترهای روابط (۹) و (۱۲) و اصلاح نمودن معادله یک‌بعدی دبی–اشل در سدهای پاره‌سنگی، از ۷۰٪ داده‌های آزمایشگاهی جهت برازش رگرسیون غیرخطی چندمتغیره و از ۳۰٪ مابقی جهت صحت‌سنجی معادلات اصلاحی استفاده شد که مقادیر پارامترها در جدول(۲) ارائه‌شده است.

جدول۲. تخمین پارامترهای معادلات بر اساس ۷۰٪ داده‌ها

معادله (۱۲)	معادله (۹)	
ـــــ	-۱/۳۵۴	b_0
۰/۱۶۶		b_1
-۱/۰۴۱	ـــــ	b_2
۰/۴۲۶		b_3
-۲/۱۶۸		b_4

[1] Raleigh's method

با در نظر گرفتن ضرایب جدول(۲) معادلات(۹) و (۱۲) به فرم ذیل درخواهند آمد:

$$Q=\alpha''W(0.342)^{0.52}\left(\frac{H_1^{2.923}-H_2^{2.923}}{L-(-1.354)H_1\cot\theta}\right)^{0.52} \quad (۱۳)$$

$$\alpha''=\left(\frac{2v^{-0.077}n^{0.923}g}{(54)D^{-1.077}}\right)^{0.52}$$

$$Q=H_1^{2.5}\ g^{0.5}\ \theta^{0.083}\left(\frac{H_1}{D_{50}}\right)^{-0.5205}\left(\frac{H_1}{L}\right)^{0.213}\left(\frac{H_1}{H_2}\right)^{-1.084} \quad (۱۴)$$

با داشتن H_1، H_2، L، D_{50}و θ می‌توان دبی عبوری از سدهای پاره‌سنگی را تعیین کرد.

در این تحقیق برای صحت‌سنجی معادلات(۱۳) و (۱۴) از ضریب تبیین(R^2)، میانگین قدر مطلق درصد خطا ($MAPE$)، استفاده گردید که نتایج حاصله در جدول (۳) آمده است.

$$R^2=\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{i_{obs}}-\overline{Q}_{i_{obs}}\right)\left(Q_{i_{cal}}-\overline{Q}_{i_{cal}}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{i_{obs}}-\overline{Q}_{i_{obs}}\right)^2\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{i_{cal}}-\overline{Q}_{i_{cal}}\right)^2}}\right]^2 \quad (۱۵)$$

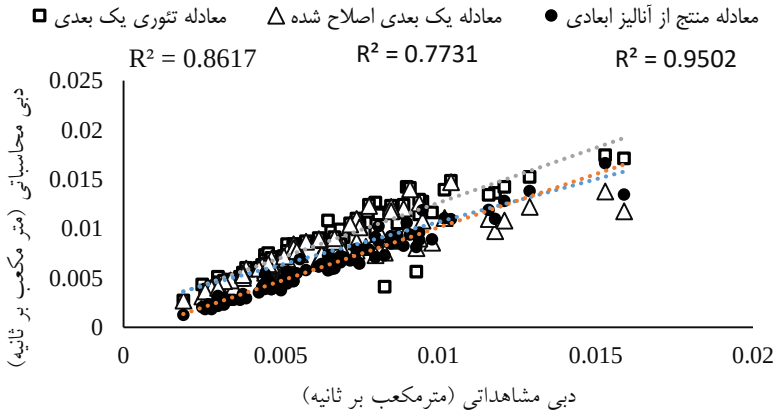
$$MAPE=\frac{1}{n}\times\frac{\sum_{i=1}^{n}\left|Q_{i_{obs}}-Q_{i_{cal}}\right|}{\sum_{i=1}^{n}Q_{i_{obs}}}\times100\% \quad (۱۶)$$

در روابط فوق، Q_{iobs}و Q_{ical}به ترتیب دبی مشاهداتی و محاسباتی، $\overline{Q}_{iobs}$و $\overline{Q}_{ical}$ به ترتیب مقادیر میانگین دبی مشاهداتی و محاسباتی و n تعداد داده‌ها می‌باشد.

با مقایسه شاخص‌های آماری حاصل از ۳۰٪ داده‌ها در جدول (۳)، برای معادلات یک‌بعدی اصلاح‌شده و منتج از آنالیز ابعادی، صحت‌سنجی معادلات موردبررسی قرار گرفت و نهایتاً نتایج قابل قبولی برای این معادلات به دست آمد. مطابق با شکل(۴)، با مقایسه نمودارهای حاصله از معادلات که دبی مشاهداتی نسبت به دبی محاسباتی ترسیم‌شده می‌توان نتیجه گرفت که همبستگی بین دبی‌های محاسباتی و مشاهداتی در معادله منتج از آنالیز ابعادی نسبت به معادله یک‌بعدی اصلاح‌شده بیشتر است که به دلیل ماهیت روش تحلیل ابعادی به‌درستی نتیجه می‌توان پی برد. با توجه به پایین بودن مقدار ضریب همبستگی معادله یک‌بعدی اصلاح‌شده نسبت به معادله تئوری یک‌بعدی می‌توان نتیجه گرفت که بین دبی‌های محاسباتی حاصل از معادله یک‌بعدی اصلاح‌شده و دبی‌های مشاهداتی همبستگی کمتری نسبت به معادله تئوری یک‌بعدی مشاهده می‌شود . بر اساس جدول(۳)، اگرچه معادله یک‌بعدی اصلاح‌شده ضریب همبستگی کمتری نسبت به معادله تئوری یک‌بعدی دارد اما درصد خطای آن کمتر است که این کاهش خطابه دلیل اعمال ضریب اصلاحی به‌دست‌آمده می‌باشد. معادله منتج از آنالیز ابعادی در مقایسه با معادله یک‌بعدی اصلاح‌شده، بهترین معادله بوده و همچنین نسبت به معادله تئوری یک‌بعدی با شاخص‌های آمار(R^2=0.8617 و MAPE=0.398) دارای عملکرد بهتری است.

جدول۳. صحت‌سنجی معادلات یک‌بعدی و منتج از آنالیز ابعادی(۳۰٪ داده‌ها)

	$MAPE$ (%)	R^2
معادله تئوری یک‌بعدی	۰/۳۹۸	۰/۸۶۱۷
معادله یک‌بعدی اصلاح‌شده	۰/۲۵۱	۰/۷۷۳۱
معادله منتج از آنالیز ابعادی	۰/۱۰۷	۰/۹۵۰۲



شکل٤. دبی محاسباتی برحسب دبی مشاهداتی برای معادلات یک‌بعدی و منتج از آنالیز ابعادی

با به‌کارگیری ضرایب معادله(۶) در معادله(۷) معادله تئوری دوبعدی دبی- اشل در سد پاره‌سنگی حاصل می‌شود که به فرم ذیل است:

$$Q=\alpha''W(0.337)^{0.51}\left(\frac{H_1^{2.966}-H_2^{2.966}}{L-0.7H_1\cot\theta}\right)^{0.51} \quad (۱۷)$$

جهت اصلاح معادله تئوری دوبعدی ضریب b_0' را در معادله فوق اعمال کرده که به‌صورت معادله (۱۸) در نظر گرفته می‌شود:

$$Q=\alpha''W(0.337)^{0.51}\left(\frac{H_1^{2.966}-H_2^{2.966}}{L-b_0'H_1\cot\theta}\right)^{0.51} \quad (۱۸)$$

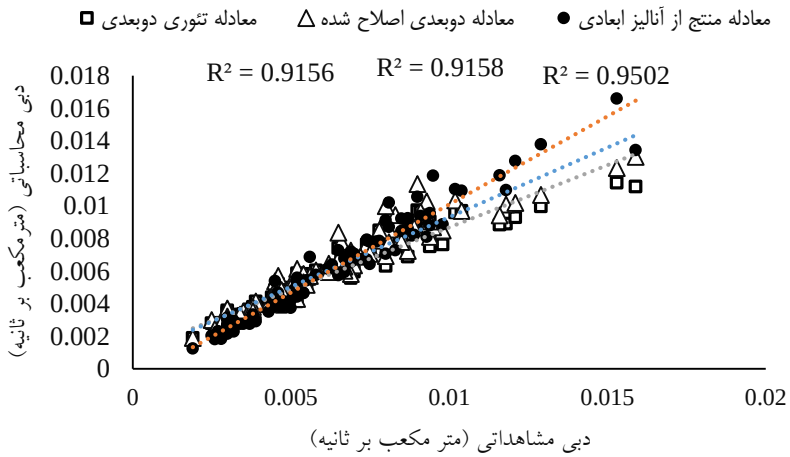
مطابق با اعمال انجام‌شده بر روی معادله(۹) برای معادله (۱۸) انجام‌شده و ضریب b_0' توسط نرم‌افزار SPSS تخمین زده و مقدار آن ۱/۲۱۹ شد. با در نظر گرفتن این ضریب، معادله(۱۸) به فرم ذیل درخواهد آمد:

برای معادلات تئوری دوبعدی و دوبعدی اصلاح‌شده صحت‌سنجی انجام شد که نتایج در جدول(۴) آمده است.

$$Q=\alpha''W(0.337)^{0.51}\left(\frac{H_1^{2.966}-H_2^{2.966}}{L-(1.219)H_1\cot\theta}\right)^{0.51} \quad (۱۹)$$

جدول٤. صحت‌سنجی معادلات دوبعدی(۳۰٪ داده‌ها)

	MAPE (%)	R^2
معادله تئوری دوبعدی	۰/۱۰۲	۰/۹۱۵۶
معادله دوبعدی اصلاح‌شده	۰/۰۹۵	۰/۹۱۵۸



شکل۵. دبی محاسباتی برحسب دبی مشاهداتی برای معادلات دوبعدی و منتج از آنالیز ابعادی

با مقایسه جداول(۳) و (۴) مشاهده می‌شود که معادلات تئوری دوبعدی و دوبعدی اصلاح‌شده نسبت به معادلات تئوری یک‌بعدی و یک‌بعدی اصلاح‌شده ضریب همبستگی بیشتری دارند. همچنین درصد خطای حاصله از معادلات دوبعدی کمتر از معادلات یک‌بعدی می‌باشد. با توجه به شکل(۵)، می‌توان نتیجه گرفت که میزان همبستگی بین دبی‌های محاسباتی و مشاهداتی برای معادله منتج از آنالیز ابعادی نسبت به معادلات تئوری دوبعدی و دوبعدی اصلاح‌شده از پراکندگی کمتری برخوردار می‌باشد و نشان‌دهنده‌ی این است که معادله منتج از آنالیز ابعادی با دقت خوبی می‌تواند دبی متناظر با اشل خود را برآورد نماید. با استناد به نتایج محققینی که در زمینه معادلات یک‌بعدی و دوبعدی دبی- اشل سدهای پاره‌سنگی کارکرده‌اند، می‌توان دریافت که همواره مدل دوبعدی از دقت بیشتری نسبت به مدل یک‌بعدی برخوردار است.

بحث

بر اساس نتایج مشاهداتی حاصل از آزمایشات، با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS 23، بر روی‌داده‌های آزمایشگاهی رگرسیون غیرخطی چندمتغیره برازش داده شد و سپس پارامترهای معادلات یک‌بعدی اصلاح‌شده و منتج از آنالیز ابعادی از جداول خروجی نرم‌افزار به‌دست‌آمده آمد. با بررسی شاخص‌های آماری، صحت‌سنجی معادلات موردبررسی قرار گرفت و نهایتاً نتایج قابل قبولی به‌دست‌آمده آمد. میزان پراکندگی بین دبی‌های محاسباتی و مشاهداتی در معادله منتج از آنالیز ابعادی با توجه به نزدیک بودن به خط نیمساز ربع اول و بالا بودن مقدار شاخص R^2، دارای درستی بیشتری نسبت به معادلات تئوری یک‌بعدی و یک‌بعدی اصلاح‌شده می‌باشد به‌طوری‌که درصد خطای آن برای۳۰٪ از داده‌ها برابر ۰/۱۰۷ درصد است و درنتیجه می‌تواند به‌عنوان معادله‌ای قابل‌اطمینان مورداستفاده قرار گیرد. همچنین معادلات تئوری یک‌بعدی اصلاح‌شده با معادلات تئوری دوبعدی و دوبعدی اصلاح‌شده مقایسه شد

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که معادلات دوبعدی از دقت بالایی برخوردارند. در این تحقیق در مورد اهمیت و نیاز به معادله‌ای که بتواند به‌راحتی دبی را با دقت بالایی تخمین بزند بحث شد و همچنین معادلات اصلاحی ارائه‌شده مؤکد این موضوع است. از طرفی استخراج یک رابطه دبی- اشل ساده و قابل‌فهم سبب دوچندان شدن کارایی، بهره‌برداری و مدیریت سدهای پاره‌سنگی نیز می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که معادلات تئوری دوبعدی و دوبعدی اصلاح‌شده نسبت به معادلات تئوری یک‌بعدی و یک‌بعدی اصلاح‌شده ضریب همبستگی بیشتری دارند. همچنین درصد خطای حاصله از معادلات دوبعدی کمتر از معادلات یک‌بعدی می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که میزان همبستگی بین دبی‌های محاسباتی و مشاهداتی برای معادله منتج از آنالیز ابعادی نسبت به معادلات تئوری دوبعدی و دوبعدی اصلاح‌شده از پراکندگی کمتری برخوردار می‌باشد و نشان‌دهنده‌ی این است که معادله منتج از آنالیز ابعادی با دقت خوبی می‌تواند دبی متناظر با اشل خود را برآورد نماید.

تشکر و قدردانی

تمامی آزمایشات در آزمایشگاه سازه‌های آبی گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا همدان انجام‌شده است لذا نگارندگان مراتب تقدیر و تشکر خود را از مسئولین محترم دانشگاه اعلام می‌دارند.

منابع

حیدری، مجید. (۱۳۸۶). مدل دوبعدی جریان از میان و روی سدهای سنگریزه‌ای و کاربرد آن در کنترل سیل. رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

حیدری، مجید. (۱۳۷۹). مدل ریاضی تک‌بعدی مسیریابی سیلاب در مخازن متعدد سدهای سنگریزه‌ای محبوس. پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

خادمی، فائزه السادات.، و اکبری، محمود. (۱۳۹۳). روش های کنترل سیل؛ اقدامات سازه‌ای. دومین کنفرانس ملی مدیریت و مهندسی سیلاب با رویکرد سیلابهای شهری،تهران. https://civilica.com/doc/384410

رجبی، مسعود. (۱۳۹۱). پیش‌بینی توزیع فشار در جریان عبوری سدهای سنگریزه ای با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

زاهد، مجتبی.، و زمردیان، سید محمد. (۱۳۹۰). بررسی آزمایشگاهی هیدروگراف خروجی از سد پاره‌سنگی با مقطع مستطیلی. مجله پژوهش آب ایران، ۵(۸)، ۸۸- ۸۱. https://journal.sku.ac.ir/IWRJ/Fa/Paper/1282

سامانی، جمال محمد ولی.، حیدری، مجید.، و مکنتیان، مهرخ. (۱۳۸۸). توسعه و کاربرد مدل ریاضی دو بعدی روندیابی سیل در مخازن سدهای پاره سنگی متوالی در حالت درون-گذر- روگذر،هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، شیراز. https://civilica.com/doc/62514

سامانی، جمال محمد ولی .، و شایان نژاد، محمد. (۱۳۸۲). ارائه معادله دبی–اشل سدهای پاره سنگی به منظور تاخیر در سیال. ششمین سمینار بین المللی مهندسی روستایی، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران.

سامانی، جمال محمد ولی .، ریاحی مدوار، حسین.، و ایوب زاده، سیدعلی. (۱۳۸۸). تعیین دبی جریان همزمان درون و روگذر غیرمستغرق در سدهای تاخیری پاره سنگی. مجله تحقیقات منابع آب ایران. ۵(۱)، ۶۸–۵۸. http://www.iwrr.ir/article_15734

References

Hansen, D., Garga, V.K., & Townsend, D.R. (1995). Selection and application of a one-dimensional non-darcy flow equation for two dimensional flow through rockfill embankments, Canadian Geotech Journal, 32, 223-232. https://doi.org/10.1139/t95-025

Heydari, M. (2000). One-dimensional mathematical model of flood routing in multiple reservoirs of detention rockfill dams. Ms. C. Thesis, University of Bu-Ali Sina, Hamedan. [In Persian]

Heydari, M. (2007). Two-dimensional model of flow through and over the rockfill dams and it's application in flood control. Ph.D. Thesis, University of Tarbiat modarres, Tehran. [In Persian]

Hosseinzadehtalaei, P., Heydari, M., Fathi, P., Marofi, S., & Tabari, H. (2012). Numerical Model and Computational Intelligence Approaches for Estimating Flow through Rockfill Dam. Journal of Hydrologic Engineering, 17(4). http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000446

Khademi, F., & Akbari, M. (2014). Flood control methods; structural operations, the 2nd national Conference on Flood Managment and Engineering with Urban Flood Approach, Tehran, Iran. https://civilica.com/doc/384410 [In Persian]

Li, B., Garga, V.K., & Davies, M.H. (1998). Relationship for non-Darcy flow in rockfill. Journal of Hydraulics Division. *ASCE*. 124(2). 206-212. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:2(206)

Michipku, k., Maeno, S., Furusawa, T., & Haneda, M. (2005). Discharge through a permeable rubble maund weir. Journal of Hydraulic Engineering, 131(1). https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9429%282005%29131%3A1%281%29

OstadAliAskari, K., & Shayannejad, M. (2015). Usage of RockfillDams in the HEC-RAS Software for the Porpose of Controlling Floods. American Journal of Fluid Dynamics, 5(1), 23-29. http://dx.doi.org/10.5923/j.ajfd.20150501.03

Rajabi, M. (2012). Prediction of perssure distribution in passing flow of rockfill dams using artificial neural network. Ms. C. dissertation, University of Bu-Ali Sina, Hamedan. [In Persian]

Samani, H., Samani, J., & Shayannejad, M. (2003). Reservoir routing using steady and unsteady flow through rockfill dams. Journal of Hydraulic Engineering, 129(6), 448-454. https://doi.org/ 10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:6(448)

Samani, J. M. V. and Shayannezhad, M. (2003). Presentation of discharge-stage equation for rockfill dams in order to delay the flood. In: Proceedings of 6th International River Engineering Seminar, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. [In Persian]

Samani, J.M.V., & Heydari, M. (2007). Reservoir Routing through successive Rockfill detention dams. Journal of agricultural science and Technology, 9(4), 317-326. http://dorl.net/dor/20.1001.1.16807073.2007.9.4.4.5

Samani, J.M.V., Heydari, M., & Mecnatian, M. (2009). Development annd application of two-dimensional mathematical model for flood routing in continuous rockfill dams reservoirs in through and over flows. Proceedings of 8th International Congress on Civil Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran. https://civilica.com/doc/62514 [In Persian]

Samani, J.M.V., Riahi Madvar, H., & Ayyoubzadeh, S.A. (2009). Experimental Investigation of Erosion and Sedimentation at Unequal Bed Level River Confluence. Iran-Water Resources Research, 5(1), 58-68. http://www.iwrr.ir/article_15734 [In Persian]

Samani, J.M.V., Samani, H.M.V & Shayannejad, M. (2004). Reservoir routing with outflow through rockfill dams. Journal of Hydraulics Research, 42(4), 435-439. https://doi.org/10.1080/00221686.2004.9728409

Shayannejad, M., & ashjazadeh, S. (2014). A Hydraulic Investigation of Flow through a Two-Layered Rockfill dam Using an Experimental Model. International Bulletin of Water Resources & Development, 11(3).

Zahed, M., & Zomorodian, S.M.A. (2011). Laboratory study of the output hydrograph from rockfill dam with rectangular section. Journal of Iranian Water Research, 5(8), 81-88. https://journal.sku.ac.ir/IWRJ/Fa/Paper/1282 [In Persian]

Zeng, Z., & Grigg, R. (2006). A criterion for non-Darcy flow in porous media. Transport in porous media, 63,57-69. https://doi.org/10.1007/s11242-005-2720-3