



Estimation of Discharge for Unsubmerged Detention Rockfill Dams With Simultaneous Through and Over Flows

J. M. V. Samani^{1*}, H. Riahi Madvar²
and S. A. Ayyoubzadeh³

Abstract

Rockfill dams can be applied as suitable tools for flood control purposes. The appropriate understanding of their hydraulic principles is though inevitable. Through flow in rockfill dams has been investigated by many researches. Flood discharge greater than design discharge however might cause simultaneous through and over flows in such dams which have not yet been studied. In this paper unsubmerged simultaneous through and over flow in flood control rockfill dams has been investigated experimentally. The upstream and downstream side slopes, the material size, the upstream and downstream depth, and the length of the dam have been considered as effective parameters. A flume 10m long, 45cm high, and 30cm wide is used for this experiment. Two hundred and forty physical models have been studied for four lengths (i.e. 50, 70, 90, and 110 cm), two side slopes (i.e. 45 and 90 degrees), three material sizes (i.e. 1.45, 2.1, and 3.05 cm), and ten flow rates (ranging from 4 to 16 L.s⁻¹). Based on the experimental results, a non-linear regressive equation for discharge estimation with a correlation coefficient of 0.936 and root-mean-square-errors of 0.001 has been proposed. Results also showed that flow rate has been directly affected by the ratio of dam height to upstream head, the ratio of material size to dam height and submerged ratio was inversely affected by the ratio of dam length to dam height and the upstream and downstream side slopes.

Keywords: Stage-discharge relationship, Simultaneous through- and over-flow, Rockfill dam, Flood control, Experimental study.

تعیین دبی جریان همزمان درون و روگذر غیرمستغرق در سدهای تاخیری پاره‌سنگی

جمال محمد ولی سامانی^{۱*}، حسین ریاحی مدوار^۲
و سید علی ایوب زاده^۳

چکیده

کنترل سیل با استفاده از سدهای تاخیری پاره‌سنگی نیازمند طراحی صحیح هیدرولیکی آنها با توجه به رفتار جریان در مواجهه با سازه‌های مذکور است. روابطی که در این مورد ارائه شده است فقط برای جریان درون‌گذر در سدهای تاخیری پاره‌سنگی قابل استفاده است چرا که هیچ‌کدام اثر جریان روگذر را لحاظ نمی‌نماید. از طرفی در برخی از جریانهای سیلابی و در صورتی که جریان بیش از سیل طراحی باشد بخشی از جریان از رو و بخشی از درون سد پاره‌سنگی عبور می‌کند که بسته به شرایط پایین دست، ممکن است مستغرق یا غیرمستغرق باشد. در این تحقیق دبی جریان همزمان درون و روگذر غیرمستغرق در سدهای تاخیری پاره‌سنگی که نسبت به جریان درون‌گذر از پیچیدگی بیشتری برخوردار است، بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. شیب وجوه سراب و پایاب سد، اندازه مصالح بدنه، بار آبی بالادست، عمق جریان پائین دست و طول سد بعنوان عوامل موثر بر فرآیند مورد توجه قرار گرفته و به منظور بررسی اثر هر کدام از این عوامل بر دبی از مدل فیزیکی با ارتفاع ۲۵ و عرض ۳۰ سانتیمتر در چهار طول ۵۰، ۷۰، ۹۰ و ۱۱۰ سانتیمتر، زاویه شیب وجوه سراب و پایاب ۹۰ و ۴۵ درجه و مصالح با قطر متوسط ۱/۴۵، ۲/۱ و ۳/۰۵ سانتیمتر استفاده شده است. در مجموع ۲۴۰ آزمایش در فلوم شیب پذیر بطول ۱۰ متر و در شیب ثابت ۰/۰۲ و دبی ۱۶-۴ لیتر در ثانیه انجام شده و در نهایت با استفاده از آنالیز ابعادی، رابطه‌ای برای برآورد شدت جریان همزمان درون و روگذر غیرمستغرق در سدهای تاخیری پاره‌سنگی بعنوان تابعی از پارامترهای بدون بعد مورد بررسی، با دقت مطلوب پیشنهاد گردید. رابطه پیشنهادی می‌تواند مبنای تعیین دبی جریان در شرایط واقعی قرار گیرد.

کلمات کلیدی: رابطه دبی- اشل، جریان همزمان درون و روگذر، سدهای پاره‌سنگی، کنترل سیل، بررسی آزمایشگاهی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۲ آذر ۱۳۸۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۲۱ اسفند ۱۳۸۷

1- Associate Professor, Department of Water Structures, Tarbiat Modares University, Email: j_samani2003@yahoo.com
2- Ph.D. Candidate, Department of Water Structures, Tarbiat Modares University, Email: hossien.riahi@gmail.com
3- Assistant Professor, Department of Water Structures, Tarbiat Modares University, Email: ayyoub@modares.ac.ir
*- Corresponding Author

۱- دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس
۲- دانشجوی دوره دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس
۳- استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس
*- نویسنده مسئول

۱- مقدمه

می‌یابد. شناخت این پدیده نسبتاً پیچیده و استنتاج اصول هیدرولیکی حاکم بر آن نیازمند انجام آزمایش بر روی مدل فیزیکی می‌باشد.

نگاهی به مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که در هیچکدام از این تحقیقات ترکیب جریان همزمان درون و روگذر هرگز بررسی نشده است. با توجه به توضیحات فوق و واقعیت‌های موجود در جریانهای سیلابی، ارائه رابطه دبی جریان همزمان درون و روگذر غیرمستغرق در سدهای پاره‌سنگی با مشخصات هندسی سد، مشخصات دانه‌بندی مصالح و شرایط هیدرولیکی که قادر باشد دبی جریان همزمان را برآورد نماید از اهمیت خاصی برخوردار است. لذا لزوم انجام تحقیقی با تاکید بر جنبه کاربردی بودن آن جهت طراحی سدهای پاره‌سنگی احساس می‌شود. به همین دلیل در این تحقیق با انجام آزمایش بر روی مدل فیزیکی، و با استفاده از تئوری آنالیز ابعادی، پارامترهای بدون بعد حاکم بر پدیده بدست آمده و برای اولین بار رابطه‌ای برای دبی جریان همزمان از درون و روی سدهای پاره‌سنگی در حالت غیرمستغرق با پارامترهای بدون بعد موثر بر آن ارائه گردیده است.

۲- مواد و روشها

استنتاج اصول هیدرولیکی جریان همزمان غیرمستغرق در سدهای پاره‌سنگی با استفاده از آنالیز ابعادی نیازمند شناخت پارامترهای موثر بر جریان در سدهای پاره‌سنگی و تعیین عوامل موثر بر پدیده است. با شناخت پارامترهای موثر بر پدیده می‌توان برنامه انجام آزمایشها به منظور حصول نتایج مورد نظر را تنظیم نمود. در ادامه ابتدا انواع جریان در سدهای پاره‌سنگی بصورت خلاصه بررسی شده و سپس سیستم آزمایشگاهی و روند انجام آزمایشها معرفی شده است.

۲-۱- انواع جریان در سدهای پاره‌سنگی

وقوع سیل و ذخیره آن در مخزن سد پاره‌سنگی سبب بالا آمدن تراز آب درون مخزن می‌شود. در این شرایط به توجه به اختلاف رقوم سطح آب در مخزن سد و رقوم تاج سد سه حالت زیر رخ خواهد داد:

۲-۱-۱- جریان درون‌گذر

در این حالت مطابق شکل ۱ حداکثر تراز سطح آب درون مخزن پائینتر از رقوم تاج سد می‌باشد و تنها جریان از درون بدنه سازه وجود داشته و دبی عبوری تابعی از اختلاف رقوم سطح آب سراب و پایاب و مشخصات مصالح و سد می‌باشد. در این مورد با استفاده از معادلات جریان غیرداری درون محیط متخلخل که در جدول ۱ ارائه شده‌اند، به سادگی می‌توان پروفیل سطح آب و دبی جریان را تعیین نمود. در این زمینه مشخصاً محققین مختلفی همچون

بر اثر ریزشهای جوی با توزیع زمانی و مکانی نامناسب و نیز مدیریت ناکارآمد حوضه‌های آبخیز، وقوع جریانهای موقت سیلابی پدیده‌ای مداوم و معمول در ایران محسوب می‌شود (شایان نژاد، ۱۳۷۹). و از طرفی اثرات مخرب سیلاب لزوم کنترل آنرا مشهود می‌سازد. جهت کنترل و کاهش دبی حداکثر لحظه‌ای سیلاب روشهای مختلفی وجود دارد. در بین روشهای متعدد کنترل سیل، استفاده از سدهای تاخیری پاره‌سنگی که منجر به افزایش زمان عبور سیلاب و کاهش دبی حداکثر لحظه‌ای آن می‌شوند، بعلاوه ارزان بودن مصالح، طراحی ساده و ساخت سریع، یکی از مناسبترین گزینه‌ها می‌باشد (Michioku et al., 2005). با استفاده از اینگونه سدها دبی حداکثر لحظه‌ای سیلاب کاهش یافته و بخشی از حجم سیلاب درون مخزن سد ذخیره شده و با گذشت زمان بتدریج و با دبی کمتری تخلیه می‌شود.

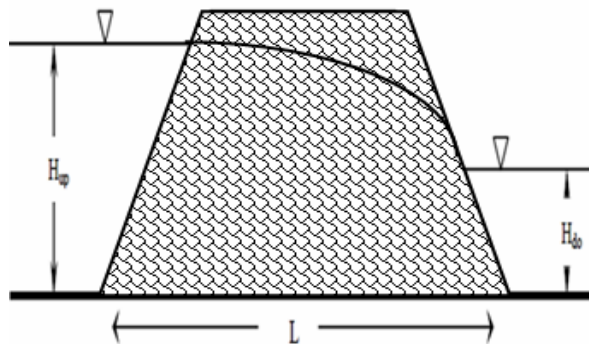
کنترل سیلاب با استفاده از این گونه سدها مستلزم طراحی صحیح هیدرولیکی آنهاست و خود این طراحی هم نیازمند شناخت اصول حاکم بر جریان درون محیط درشت دانه این سدها است. جریان آب درون محیط درشت دانه سدهای پاره‌سنگی در مقایسه با جریان درون خاک، بعلاوه سرعت بالای جریان آشفته بوده و از قانون داری عدول نموده و از رابطه غیرخطی پیروی می‌نماید (Legrand, 2002). در این حالت برای تعیین دبی نشست، نیروی نشست و شبکه جریان درون محیط متخلخل درشت دانه ملزم به استفاده از رابطه غیرخطی گرادیان هیدرولیکی با سرعت جریان می‌باشیم (Qian et al., 2005). روابط مورد استفاده برای جریان تراوای غیر داری از درون محیط متخلخل درشت دانه عموماً به دو صورت بیان می‌شوند: ۱) رابطه عدد رینولدز با ضریب اصطکاک (۲) رابطه گرادیان هیدرولیکی با سرعت (Michiuka et al., 2005). در این زمینه محققین مختلف با بررسی آزمایشگاهی جریان درون محیط متخلخل درشت‌دانه، ضرائب این روابط را بدست آورده‌اند. خلاصه‌ای از مهمترین این روابط در جدول ۱ آمده است. در این روابط v : سرعت جریان، i : گرادیان هیدرولیکی، d : اندازه مصالح بدنه سد، n : تخلخل محیط متخلخل و L : لزجت سینماتیکی آب است. قابل ذکر است که تمامی این روابط برای جریان درون محیط متخلخل درشت دانه ارائه شده است و هیچکدام اثر جریان روگذر را لحاظ نمی‌نماید. از طرفی بعلاوه اینکه در جریانهای سیلابی برخی مواقع جریانی بیشتر از سیل طراحی رخ می‌دهد که باعث سرریزی آن از روی سد می‌شود. با ترکیب جریان درون و روگذر و اثر متقابل دو بخش جریان برهمدیگر، درجه پیچیدگی این پدیده بشدت افزایش

(2003) Bari and Hansen با استفاده از تئوری جریان متغیر تدریجی، پروفیل سطح آب درون بدنه سدهای سنگریزه‌ای را محاسبه نموده‌اند. (2003) Samani et al. و Samani and Shaiannejad (2004) و با ترکیب معادله غیرخطی جریان در محیط سنگدانه‌ای با معادله پیوستگی مدل‌های یک و دوبعدی برای محاسبه پروفیل سطح آب و تعیین دبی جریان عبوری از درون سدهای سنگریزه‌ای ارائه داده‌اند. علاوه بر این در تحقیقی Michioku et al. (2005) با ترکیب معادله غیرخطی جریان در محیط سنگدانه‌ای با معادله انرژی، مدلی تحلیلی برای محاسبه پروفیل سطح آب درون بدنه توده‌های سنگریزه‌ای ارائه داده‌اند.

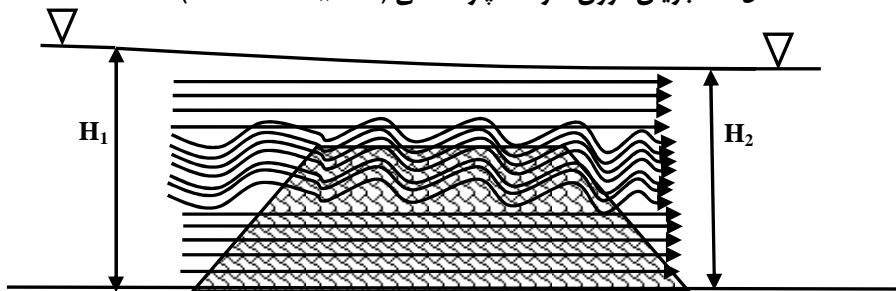
۲-۱-۲- جریان همزمان درون و روگذر مستغرق در حالت قبلی فرض بر این بود که جریان عبوری از درون بدنه سد پاره‌سنگی آزاد می‌باشد. در حالت دوم کل سازه در اثر شرایط پائین دست و یا موانع و سدهای دیگر زیرآب رفته و جریان مستغرق از درون و روی سد وجود دارد. در این حالت بعلت استغراق کامل سازه دو نوع جریان وجود دارد یکی جریان غیرداری درون محیط سنگدانه و دیگری جریان روی سد که از نوع جریان درون کانال‌های روباز است (شکل ۲).

جدول ۱- خلاصه‌ای از روابط پیشنهادی برای جریان غیرداری درون محیط متخلخل درشت دانه

منبع	توضیحات	رابطه	محقق	ردیف
Li et al.(1998)	-----	$i = \frac{150(1-n)^2 v}{n^3 g d^2} V + \frac{1.75(1-n)^{**}}{n^3 g d} V^2$	Ergun(1952)	(۱)
Li et al.(1998)	$R = \frac{d}{10}$	$i = \frac{0.0465V^{1.85}}{R^{0.925} n^{1.85}}$	Wilkins(1956)	(۲)
Martins(1990)	سنگریزه یکنواخت	$i = \frac{(1-n)}{0.56^2 n^3} 2gd V^2$	Martins(1990)	(۳)
Gent(1991)	-----	$i = 1207.06 \frac{(1-n)^2 v}{g d^2 n^3} V + 1.209 \frac{(1-n)}{g d n^3} V^2$	Gent(1991)	(۴)
Stephenson(1979)	برای K_t سنگدانه‌های شکسته: ۴، نیمه گرد: ۲، کاملاً گرد: ۱	$i = \frac{K_t}{0n^2 g d} V^2$	Stephenson(1979)	(۵)
Joy (1991)	-----	$i = \frac{11.0d_{10}^{-1.12}}{n} V + \frac{256d_{10}^{-1.34}}{n^2} V^2$	Joy (1991)	(۶)
Abt (1990)	-----	$i = \frac{160(1-n)^2 v}{gn^3 d_{15}^2} V + \frac{2.2}{gn^2 d_{15}} V^2$	Abt (1990)	(۷)
Li et al.(1998)	k نفوذپذیری ذاتی (m^2)	$i = \frac{v}{g\kappa} V + \frac{0.55}{g\sqrt{\kappa}V^2}$	Ward(1954)	(۸)
Li et al.(1998)	-----	$f = 8.75 Re^{-0.17}$	Li et al.(1998)	(۹)
Herrera and Felton (1991)	-----	$f = \frac{3858}{Re} + 17.6$	Herrera and Felton (1991)	(۱۰)
Samani and Shaiannejad (2004)	دو بعدی	$f = 54 Re^{-0.077}$	Samani and Shaiannejad (2004)	(۱۱)
Samani et al.(2003)	یک بعدی	$f = 80 Re^{-0.034}$	Samani et al.(2003)	(۱۲)



شکل ۱- جریان درون گذر سد پاره‌سنگی (Samani et al., 2004)



شکل ۲- جریان همزمان درون و روگذر مستغرق (Li and Graga, 1998)

از جریان درون کانال روباز و جریان درون محیط متخلخل وجود دارد و تعیین شدت جریان عبوری با توجه پیچیدگی‌های حاکم بر آن نیازمند استفاده از تکنیک آنالیز ابعادی و انجام آزمایش روی مدل فیزیکی است، علیرغم اینکه در مورد جریان از درون توده‌های سنگریزه‌ای و نیز جریان در سدهای پاره‌سنگی مستغرق تحقیقات متعددی انجام شده است اما جریان همزمان در سدهای پاره‌سنگی تاکنون کمتر بررسی شده است و بهمین دلیل در مقاله حاضر دبی جریان عبوری از سازه در این حالت بررسی شده و رابطه آن با عوامل موثر ارائه شده است. در ادامه این مقاله از عبارت جریان همزمان برای توصیف این نوع جریانها استفاده شده است.

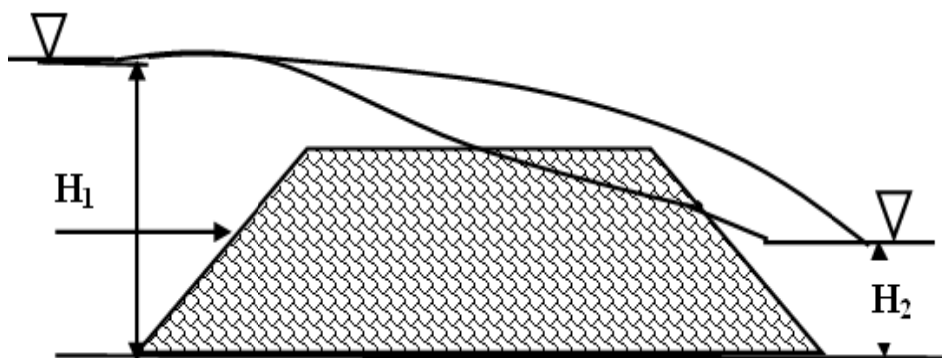
در این حالت پروفیل سرعت جریان عبوری از درون و روی مصالح سنگریزه‌ای در حالت استغرق کامل را با ترکیب معادلات مقاومت جریان غیرداری و توزیع لگاریتمی سرعت درون کانالهای باز می‌توان بدست آورد. Li and Graga, (1998) و قادری (۱۳۸۲) پروفیل سرعت جریان از درون و روی سدهای پاره‌سنگی در حالت استغرق کامل را با استفاده از معادله مقاومت ایزپاش برای جریان درون گذر و توزیع لگاریتمی سرعت برای جریان روگذر، محاسبه شده و سپس با انتگرال‌گیری در عمق دبی عبوری از سازه را محاسبه نموده‌اند.

۳-۱-۲- جریان همزمان درون و روگذر غیرمستغرق

در حالت سوم شدت جریان خروجی از درون بدنه سد نسبت به هیدروگراف ورودی کم بوده و سازه قابلیت عبور اختلاف جریان ورودی و حجم مخزن از درون بدنه را نداشته و بالاجبار سرریزی جریان از روی سازه تعادل هیدروگراف ورودی با خروجی و ذخیره مخزن را تامین می‌نماید (شکل ۳). در این مورد طبق شکل ۳ دو حالت وجود خواهد داشت. در حالت اول جریان سرریزی از روی بند به انتهای تاج سد نمی‌رسد و در طول تاج سد قبل از رسیدن به انتهای تاج به درون بدنه تخلیه شده و از آنجا به پائین دست می‌رود. در حالت دوم مقدار جریان روگذر زیاد بوده و در عرض تاج سد تماماً به درون بدنه تخلیه نمی‌شود و مقداری نیز به صورت جریان آزاد از لبه پائین دست تاج سرریز می‌نماید. در هر دوی این حالات ترکیبی

۲-۲- آنالیز ابعادی جریان همزمان در سدهای پاره‌سنگی

در این تحقیق جهت بررسی عوامل موثر بر دبی جریان همزمان در سدهای پاره‌سنگی، با مطالعه شرایط جریان درون محیطهای سنگریزه‌ای، بررسی نتایج تحقیقات قبلی و فیزیک حاکم بر جریان درون سدهای پاره‌سنگی، مهمترین پارامترهای موثر بر دبی جریان همزمان، شناسائی گردید و در ادامه با استفاده از تئوری آنالیز ابعادی، پارامترهای موثر به نسبتهای بدون بعد تبدیل گردیده و رابطه دبی عبور از سازه با آنها بدست آمد. با توجه به اینکه پارامترهای موثر در این تحقیق توسط محققین استخراج شده‌اند، در ادامه جزئیات آنالیز ابعادی آمده است. معادله پارامترهای مشخصه در جریان همزمان در سدپاره‌سنگی به صورت زیر است:



شکل ۳- جریان همزمان درون و روگذر غیرمستغرق در سدهای پاره‌سنگی

برابر ۱۷-۳-۲۰ است) و در نهایت معادله کلی و بدون بعد حاکم بر جریان همزمان در سدهای پاره‌سنگی به صورت زیر خواهد بود:

$$f_2\left(\frac{Q}{H_d^{2.5} g^{0.5}}, \frac{H_d}{B}, \frac{H_d}{P}, \frac{H_d}{L}, S, \frac{H_d}{d}, \frac{H_d}{a}, \frac{H_d}{b}, \frac{H_d}{c}, \frac{\rho_s - \rho}{\rho}, \frac{\mu}{\rho g^{0.5} H_d^{1.5}}, \frac{\sigma}{\rho g H_d^2}, n_{max}, Z_{fl}, S_0, \frac{\sigma_g}{H_d}, \frac{DH}{H_d}\right) = 0 \quad (14)$$

در این تحقیق پارامترهای S_0 ، Z_{fl} و n_{max} ثابت می‌باشند و از رابطه حذف می‌شوند، در این صورت:

(۱۵)

$$f_3\left(\frac{Q}{H_d^{2.5} g^{0.5}}, \frac{H_d}{B}, \frac{H_d}{P}, \frac{H_d}{L}, S, \frac{H_d}{d}, \frac{H_d}{a}, \frac{H_d}{b}, \frac{H_d}{c}, \frac{\rho_s - \rho}{\rho}, \frac{\mu}{\rho g^{0.5} H_d^{1.5}}, \frac{\sigma}{\rho g H_d^2}, \frac{\sigma_g}{H_d}, \frac{DH}{H_d}\right) = 0$$

با ضرب پارامترهای دوم، چهارم و ششم در معکوس پارامتر سوم و ترکیب پارامترهای ۷ و ۸ و ۹ و ضرب پارامتر ۱۱ در توان ۱/۵ و پارامتر ۱۲ در توان ۲ پارامتر سوم رابطه زیر حاصل می‌شود:

(۱۶)

$$f_4\left(\frac{Q}{H_d^{2.5} g^{0.5}}, \frac{P}{B}, \frac{H_d}{P}, \frac{P}{L}, \sin \beta, \frac{P}{d}, \frac{b}{\sqrt{ac}}, \frac{\rho_s - \rho}{\rho}, \frac{\mu}{\rho g^{0.5} P^{1.5}}, \frac{\sigma}{\rho g P^2}, \frac{\sigma_g}{P}, \frac{DH}{H_d}\right) = 0$$

در این تحقیق به منظور بررسی جریان همزمان در سدهای پاره‌سنگی با تغییر دادن Q و H_d و L و S و d به بررسی جریان درون سدهای پاره‌سنگی پرداخته و بقیه ثابت خواهند بود، بنابراین در رابطه (۱۶) از پارامترهای ۲ و ۱۱ به علت ثابت بودن آنها در طول آزمایشها و پارامترهای ۷ و ۸ و ۹ و ۱۰ به علت تغییرات بسیار اندک آنها در طول آزمایشهای صرفنظر می‌شود، رابطه نهائی به صورت زیر خواهد بود:

$$f(Q, B, P, L, S, d, H_d, a, b, c, \rho_s, \rho, g, \mu, \sigma, n_{max}, Z_{fl}, S_0, \sigma_g, DH) = 0 \quad (13)$$

در این رابطه، Q : دبی جریان، B : عرض فلوم، P : ارتفاع سد، L : طول سد در جهت جریان، S : شیب وجوه سراب و پایاب سد ($S = \sin(a) = \sin(b)$)، d : اندازه مصالح بدنه سد، H_d : عمق آب در مخزن بالادست سد نسبت به تاج، DH : اختلاف عمق آب در بالادست و پائین دست سد، a, b, c : اندازه‌های سه محوری مصالح بدنه سد، ρ_s, ρ : به ترتیب جرم مخصوص سیال و مصالح بدنه سد، g : شتاب ثقل، μ : لزجت دینامیک سیال، σ : کشش سطحی سیال، n_{max} : زبری فلوم، Z_{fl} : شیب جداره فلوم، S_0 : شیب کف فلوم، σ_g : انحراف معیار دانه‌بندی مصالح بدنه فلوم می‌باشند. با توجه به رابطه فوق مشخص است که بررسی رفتار جریان با تغییر هر کدام از عوامل موثر نیازمند تعداد آزمایش‌های زیاد بوده که زمان بسیاری می‌طلبد. بنابراین باید به گونه‌ای این عوامل را کاهش داد که رفتار پدیده با انجام تعداد آزمایش کمتری به خوبی شبیه‌سازی شده و بتوان نتایج آزمایش‌ها را به صورت کمی و کیفی تحلیل نمود، این کار از یک طرف با حذف عوامل کم اهمیت و یا وابسته به هم و از طرف دیگر با استفاده از تکنیک آنالیز ابعادی انجام می‌شود. در تکنیک آنالیز ابعادی متغیرهای مستقل و موثر بر پدیده به صورت نسبت‌های بدون بعد بیان شده و تعداد پارامترهای موثر نیز کاهش می‌یابد. طبق معادله پارامترهای مشخصه جریان همزمان در سدهای پاره‌سنگی (رابطه ۱۳)، چنانچه g بعنوان کمیت سینماتیکی، ρ کمیت دینامیکی و H_d به ترتیب بعنوان کمیت هندسی، کمیت بیان کننده ویژگیهای سیال و کمیت جریان باشند، آنگاه می‌توان از این پارامترها بعنوان کمیت‌های تکرار شونده استفاده نمود و با استفاده از تئوری باکینگهام، کمیت‌های بدون بعد را با استفاده از متغیرهای تکراری انتخاب شده می‌توان تشکیل داد (تعداد پارامترهای بدون بعد

$$f_5\left(\frac{Q}{BH_d^{1.5}g^{0.5}}, \frac{H_d}{P}, \frac{L}{P}, S, \frac{d}{P}, \frac{DH}{H_d}\right) = 0 \quad (17)$$

با جایگذاری دبی واحد عرض (q) به جای (Q/B) در رابطه فوق می‌توان نوشت:

$$\frac{q}{H_d^{1.5}g^{0.5}} = f_6\left(\frac{H_d}{P}, \frac{L}{P}, S, \frac{d}{P}, \frac{DH}{H_d}\right) \quad (18)$$

و یا

$$q = H_d^{1.5}g^{0.5} f_6\left(\frac{H_d}{P}, \frac{L}{P}, S, \frac{d}{P}, \frac{DH}{H_d}\right) = c_d H_d^{1.5}g^{0.5} \quad (19)$$

در این رابطه: C_d ضریب دبی می‌باشد و هدف اصلی در این تحقیق تعیین رابطه آن با عوامل موثر است. در ادامه این تحقیق بعثت مشابهت با پارامترهای موثر در طراحی سرریزهای سدها از معکوس دو پارامتر اول استفاده شده است، به عبارت دیگر در این تحقیق هدف اصلی تعیین رابطه زیر از نتایج آزمایشگاهی است:

$$C_d = f\left(\frac{d}{P}, \frac{L}{P}, \frac{P}{H_d}, \frac{DH}{H_d}, S\right) \quad (20)$$

در این رابطه d : اندازه مصالح بدنه سد، H_d : عمق آب در مخزن بالادست نسبت به تاج سد، DH : اختلاف عمق آب پائین دست سد با عمق آب در بالادست آن، P : ارتفاع سد، L : طول سد در جهت جریان، $S = \sin\beta$: شیب وجوه سراب و پایاب سد، β : زاویه وجوه شیبدار سد و f : نماد تابع است. در این تحقیق با تغییر دادن هر کدام از پارامترهای بدون بعد رابطه فوق، اثر آنها بر ضریب دبی را به صورت منفرد و جداگانه تعیین نموده و در نهایت اثرات ترکیبی آنها را بررسی نموده و رابطه پارامترهای بدون بعد با ضریب دبی ارائه شده است.

۲-۳- آزمایش‌ها

این تحقیق روی فلوم مستطیلی شیب‌پذیر آزمایشگاه هیدرولیک گروه سازه‌های آبی دانشگاه تربیت مدرس با عرض ۳۰، ارتفاع ۴۵ سانتی‌متر و طول ۱۰ متر و با ظرفیت ۲۰ لیتر در ثانیه انجام گرفته است. دیواره‌های فلوم از شیشه و کف آن از فلز ساخته شده است. اندازه‌گیری دبی توسط جریان‌سنج مغناطیسی با دقت ۰/۰۰۱ لیتر در ثانیه که به روش حجمی کالیبره شده است انجام گردیده است. اندازه‌گیری عمق توسط عمق‌سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر انجام گردیده است. سیستم آزمایشگاهی از یک سری مخزن بعنوان منبع تامین دبی که در زیر فلوم واقع شده‌اند تشکیل شده است. کنترل دبی ورودی به فلوم توسط یک شیر تنظیمی قبل از پمپ انجام شده و از دریچه انتهایی فلوم نیز برای کنترل سطح آب پایاب استفاده می‌شود. دبی ورودی به فلوم پس از جریان یافتن در فلوم و خروج از آن وارد مخزن زمینی شده و دوباره توسط پمپ به فلوم فرستاده می‌شود.

پارامترهای ثابت در این تحقیق عبارتند از: شیب فلوم (۰/۰۰۲)، عرض و ارتفاع فلوم (۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر)، ارتفاع سد پاره‌سنگی (۲۵ سانتی‌متر) و پارامترهای متغیر عبارتند از: طول سد پاره‌سنگی در جهت جریان (۵۰، ۷۰، ۹۰ و ۱۱۰ سانتی‌متر)، قطر مصالح (۱/۴۵، ۲/۱ و ۳/۰۵ سانتی‌متر)، زوایای شیب وجوه سراب و پایاب سد (۹۰ و ۴۵ درجه) و شدت جریان عبوری فلوم که در محدوده ۴ تا ۱۶ لیتر بر ثانیه در ۱۰ دبی مختلف بوده است. در مجموع ۲۴۰ آزمایش انجام گردید. روند انجام آزمایش‌ها بصورت زیر بوده است:

- ۱- پر نمودن مخازن تامین دبی قبل از شروع آزمایشها،
- ۲- انتخاب اندازه مصالح بدنه سد پاره‌سنگی،
- ۳- ساخت مدل فیزیکی سد پاره‌سنگی برای طول و زاویه وجوه شیبدار: برای ساخت مدل فیزیکی سدها از توری فلزی برای جلوگیری از تخریب آنها استفاده شده است. ابعاد توریها متناسب با قطر مصالح بکار رفته انتخاب شده است، بدین صورت که برای مصالح ریزتر از شبکه ریزتر و برای مصالح درشت‌تر شبکه بزرگتر استفاده شده است. تنها برای وجوه سراب و پایاب سد از توری فلزی استفاده شده و در جداره‌ها، کف و روی سدها هیچگونه توری بکار نرفته است. توسط دو صفحه فلزی و با توجه به طول مورد نظر، زوایای وجوه شیبدار سراب و پایاب در فاصله موردنظر از همدیگر تنظیم و ساخته می‌شوند. سپس دو صفحه توری یکی در وجه بالادست و دیگری در وجه پائین دست قرار می‌گیرد که توسط دو رشته سیم فلزی در کف به همدیگر متصل می‌شوند و سپس مصالح بین آنها ریخته و متراکم شده است. پس از پر شدن مدل از مصالح مجدداً با استفاده از سیم فلزی و این بار از روی تاج سد توریها به همدیگر متصل شده و محکم می‌شوند. در انتها صفحات فلزی از دو انتهای مدل بر داشته می‌شوند.

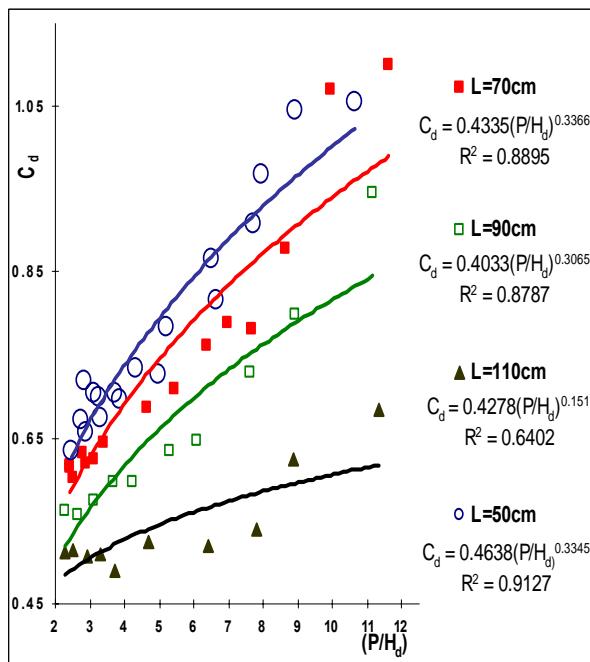
۴- وارد نمودن اولین دبی به فلوم به صورتی که جریان همزمان از درون و روی سد ایجاد شود. پس از متعادل شدن سیستم، اعماق جریان در سراب و پایاب سد و پروفیل جریان عبوری از روی تاج سد اندازه‌گیری شده و دبی جریان نیز از دبی‌سنج قرائت می‌گردد.

۵- در هر مدل فیزیکی، دبی جریان افزایش یافته و اندازه‌گیری‌های مرحله ۴ برای ۱۰ دبی انجام شده است.

۶- بازگشت به گام ۳ و ساخت مدل فیزیکی با طول و زاویه شیب جدید و تکرار گامهای ۳ تا ۵ برای مدل جدید. این عمل برای تمامی زوایا و طولهای سد پاره‌سنگی انجام می‌شود.

۷- بازگشت به گام ۲ و انتخاب اندازه مصالح جدید و تکرار مراحل ۳-۶ برای اندازه مصالح جدید.

در این تحقیق برای اندازه‌گیری دبی از دبی‌سنج مغناطیسی با دقت ۰/۰۰۱ لیتر در ثانیه استفاده شده است این وسیله مستقیماً شدت جریان موجود را برحسب لیتر در ثانیه نمایش می‌دهد و برای کالیبره



شکل ۴ - تغییرات ضریب دبی با بارآبی سراب و $d=1.45$ cm و زاویه 90° درجه

۳-۲- تاثیر طول سد پاره‌سنگی بر ضریب دبی

با افزایش طول سد پاره‌سنگی بعلت افزایش مقاومت در مقابل جریان و افزایش افت‌های منتجه از آن ضریب دبی جریان همزمان آزاد بصورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. اثر تغییر طول بر ضریب دبی در بار نسبی کم نسبت به بار نسبی بالا، کمتر است و هر چه نسبت ارتفاع سد به بار آبی بالادست سد افزایش یابد در طول ثابت ضریب دبی افزایش می‌یابد و همچنین اثر طول بر ضریب دبی نیز بیشتر می‌گردد. همچنین با افزایش نسبت ارتفاع سد به عمق آب بالادست سد ضریب دبی افزایش می‌یابد، که این دقیقاً مشابه روندی است که در سرریزهای لبه آبریز و دیگر سازه‌های هیدرولیکی مشاهده گردیده است. نتیجه دیگر این است که در بار آبی نسبی کمتر از ۵، وابستگی ضریب دبی به بار آبی نسبی و طول سد پاره‌سنگی ناچیز بوده و ضریب دبی به سمت یک مقدار خاص و ثابت (مستقل از طول سد و بار آبی نسبی) میل می‌نماید (شکل ۴).

۳-۳- تاثیر زاویه وجوه شیب‌دار سد بر ضریب دبی

در تمامی آزمایش‌های انجام شده در یک بار آبی نسبی ثابت، ضریب دبی در حالتی که زاویه وجوه شیب‌دار سد 45° درجه است و شیب ملایمی در هر دو طرف وجود دارد بیشتر از حالتی است که همین زاویه 90° درجه است. اصلی‌ترین دلیل این مسئله مربوط به کاهش طول محیط سنگدانه‌ای موجود در مسیر جریان عبوری برای زاویه 45°

نمودن آن از روش حجمی استفاده شده است. اندازه‌گیری عمق جریان در فلوم با استفاده از عمق سنج مدرج با دقت 0.1 میلی‌متر در چند تکرار صورت می‌گیرد. از آنجا که در این تحقیق عمق جریان پارامتر موثری است اندازه‌گیری عمق با دقت و حساسیت بیشتری انجام شده است.

۳- نتایج و بحث

با توجه به اینکه تعداد آزمایش‌های انجام شده و داده‌های برداشت شده در این تحقیق زیاد می‌باشد تنها به نتایج نهائی حاصله از تحقیق اشاره می‌شود. در جدول ۲ رابطه ضریب دبی با نسبت ارتفاع سد به بار آبی بالادست آن برای تمامی مدل‌های فیزیکی ساخته شده آمده است. ستون‌های این جدول از چپ به راست به ترتیب عبارتند از: اندازه مصالح بدنه سد به سانتی‌متر، طول سد در جهت جریان به سانتی‌متر، زاویه وجوه شیب‌دار سد، ضریب ثابت رابطه توانی ضریب دبی با نسبت ارتفاع سد به بار آبی سراب، توان رابطه مذکور، ضریب همبستگی، مجذور متوسط مربعات خطا و سطح معنی داری ضریب همبستگی. با استفاده از روابط این جدول به سهولت می‌توان تاثیر هر کدام از عوامل بدون بعد رابطه (۲۰) بر ضریب دبی را بررسی نمود. شکل روابط ارائه شده در جدول ۲ بدین صورت می‌باشد:

$$C_d = A \left(\frac{P}{H_d} \right)^B \quad (21)$$

در این رابطه A و B : ضرائب ثابت است و بقیه پارامترها قبلاً معرفی شده است.

۳-۱- تاثیر بارآبی سراب بر ضریب دبی

طبق نتایج آزمایش‌ها در طول ثابت با افزایش عمق جریان در بالادست سد دبی جریان نیز افزایش می‌یابد. در دبی‌های کم که قسمت عمده جریان درون‌گذر بوده و تنها درصد کمی از دبی کل وارده به فلوم بصورت روگذر عمل می‌کند، شدت تغییرات عمق بالادست در اثر تغییر دبی زیاد است ولی با افزایش دبی، شدت تغییر عمق کاهش می‌یابد. مهمترین دلیل این امر مربوط به نوع جریان غالب و حاکم در هر مورد است چرا که در دبی‌های کم، بیشتر دبی از درون بدنه سد عبور می‌کند و سد مشابه یک سازه زیرگذر همچون دریچه عمل می‌کند که در این حالت میزان حساسیت دبی عبوری از زیر سازه در اثر تغییر عمق سراب کم است (شکل ۴).

از روی سازه نیازمند ایجاد انحنای شدیدتری در خطوط جریان است که ضریب دبی را کاهش می‌دهد (شکل ۵).

۳-۴- تاثیر اندازه مصالح بر ضریب دبی

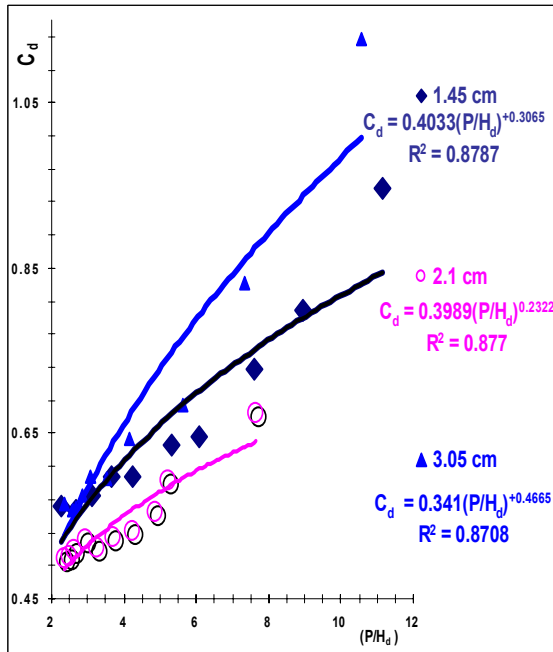
با افزایش اندازه مصالح ضریب دبی افزایش می‌یابد، برای اندازه مصالح ۳/۰۵ سانتیمتر بیشترین و برای ۲/۱ سانتیمتر کمترین ضریب دبی بدست آمده است.

نسبت به ۹۰ درجه است که باعث کاهش مقاومت محیط متخلخل در مقابل عبور جریان و افزایش ضریب دبی می‌شود. از طرفی در زوایای ۴۵ درجه، وجه بالادست سد بصورت یک برآمدگی ملایم و تدریجی در مقابل جریان ظاهر شده و عبور جریان از درون و روی آن را با سهولت بیشتری فراهم می‌آورد و خطوط جریان ضمن انحنای ملایم از روی سازه عبور می‌نمایند ولی در حالت ۹۰ درجه سد همچون یک مانع قائم در مقابل جریان ظاهر می‌شود و باعث ایجاد توده‌ای از جریان ساکن پشت سد می‌شود و جریان برای عبور

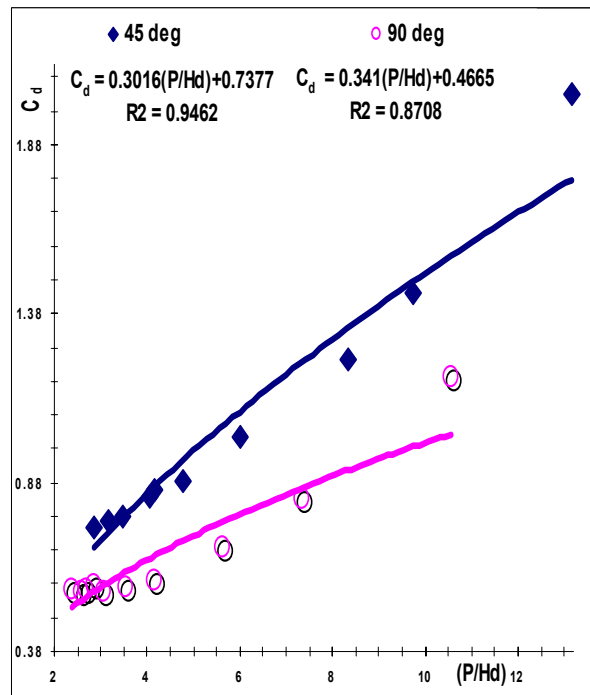
جدول ۲- خلاصه‌ای از نتایج آزمایشهای انجام شده

d	L	β	A	B	R^2	RMSE	α %
۱/۴۵	۵۰	۹۰	۰/۴۶۷۹	+۰/۳۲۷۴	۰/۹۱۵۹	۰/۰۳۴۵۱	۰/۹۹
۱/۴۵	۷۰	۹۰	۰/۴۲۰۸	+۰/۳۵۹۳	۰/۸۷۸۹	۰/۰۶۹۶	۰/۹۹
۱/۴۵	۹۰	۹۰	۰/۴۰۳۳	+۰/۳۰۶۵	۰/۸۷۸۷	۰/۰۴۲۸	۰/۹۹
۱/۴۵	۱۱۰	۹۰	۰/۴۱۴۶	+۰/۱۸۰۴	۰/۶۵۱۷	۰/۰۳۳۸	۰/۹۵
۱/۴۵	۷۰	۴۵	۰/۳۶۳۷	+۰/۶۴۵	۰/۹۵۰۸	۰/۱۷۹	۰/۹۹
۱/۴۵	۹۰	۴۵	۰/۳۳۵۴	+۰/۶۰۳۷	۰/۹۳۴۱	۰/۱۶۹	۰/۹۹
۱/۴۵	۱۱۰	۴۵	۰/۴۱۰۸	+۰/۳۶۳۸	۰/۹۰۳۲	۰/۱۴۵	۰/۹۹
۲/۱	۵۰	۹۰	۰/۳۵۷۹	+۰/۵۱۱۵	۰/۸۷۲۸	۰/۰۸۳۶	۰/۹۹
۲/۱	۷۰	۹۰	۰/۳۵۹۸	+۰/۴۰۹۸	۰/۸۳۴۷	۰/۰۶۰۶	۰/۹۹
۲/۱	۹۰	۹۰	۰/۳۹۵۲	+۰/۲۲۹۷	۰/۶۳۴۱	۰/۰۳۷۴	۰/۹۵
۲/۱	۱۱۰	۹۰	۰/۴۲۶۵	+۰/۱۱۲۲	۰/۶۲۹۱	۰/۰۱۴	۰/۹۵
۲/۱	۷۰	۴۵	۰/۳۳۷۴	+۰/۶۲۴۹	۰/۹۴۵۶	۰/۱۱۲۱	۰/۹۹
۲/۱	۹۰	۴۵	۰/۲۸۸۸	+۰/۶۶۶۵	۰/۹۲۳	۰/۱۷۶۳	۰/۹۹
۲/۱	۱۱۰	۴۵	۰/۴۳۵۸	+۰/۱۶۸۱	۰/۶۵۱۳	۰/۰۱	۰/۹۵
۳/۰۵	۵۰	۹۰	۰/۳۰۰۳	+۰/۷۶۰۱	۰/۹۵۹	۰/۱۱۴۲	۰/۹۹
۳/۰۵	۷۰	۹۰	۰/۳۵۳۹	+۰/۴۴۵۵	۰/۷۸۷۷	۰/۰۶۷	۰/۹۹
۳/۰۵	۹۰	۹۰	۰/۳۴۱	+۰/۴۶۶۵	۰/۸۷۰۸	۰/۰۶۹	۰/۹۹
۳/۰۵	۱۱۰	۹۰	۰/۳۵۱۷	+۰/۳۹۱۸	۰/۸۰۳۲	۰/۰۶۱	۰/۹۹
۳/۰۵	۷۰	۴۵	۰/۳۰۱۶	+۰/۷۳۷۷	۰/۹۴۶۲	۰/۰۷۴	۰/۹۹
۳/۰۵	۹۰	۴۵	۰/۳۵۹۴	+۰/۶۵۴۷	۰/۹۶۹۶	۰/۲۶۸	۰/۹۹
۳/۰۵	۱۱۰	۴۵	۰/۲۶۷۸	+۰/۶۵۶۶	۰/۸۱۲۸	۰/۳۳۵	۰/۹۹

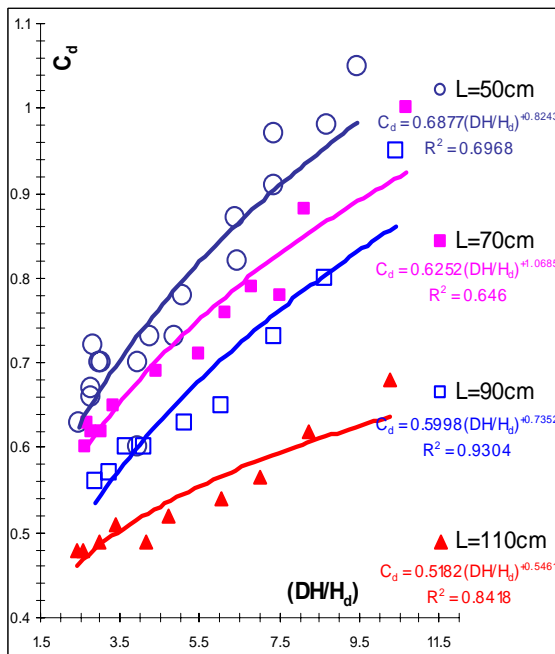
نوع غیرخطی و نمائی است (ضریب رگرسیون بالا و خطای کم و سطح معنی‌داری بالای ۹۵ درصد). غیرخطی بودن رابطه ضریب دبی با پارامترهای موثر نشان‌دهنده این است که جریان همزمان در سدهای تاخیری پاره‌سنگی از نوع جریان غیرداری و غیرخطی است.



شکل ۵ - تغییرات ضریب دبی با زوایای مختلف و $d=3.05$ cm و $L=90$ cm و زاویه ۹۰ درجه



شکل ۶ - تغییرات ضریب دبی با اندازه مصالح و $L=90$ cm و زاویه ۹۰ درجه



شکل ۷ - تغییرات ضریب دبی با استغراق پایاب و $d=1.45$ cm و زاویه ۹۰ درجه

بیشتر بودن ضریب دبی در قطر ۳/۰۵ سانتی‌متر مربوط به بزرگ بودن اندازه حفرات بین این سنگدانه‌ها است که خود باعث کاهش مقاومت محیط سنگدانه‌ای در مقابل جریان و در نتیجه کم بودن افت جریان در عبور از درون محیط متخلخل سنگدانه‌ای می‌شود. در مصالح با قطر ۲/۱ سانتی‌متر جریان غالب از نوع درون‌گذر است ولی چون اندازه مصالح کوچکتر از قطر ۳/۰۵ سانتی‌متر است افت جریان نیز بیشتر بوده و ضریب دبی کاهش می‌یابد در حالیکه در مصالح با قطر ۱/۴۵ بعلت کوچک بودن اندازه مصالح جریان غالب از نوع روگذر بوده و افت جریان درون‌گذر بر ضریب دبی تاثیر ناچیزی داشته و باعث بزرگتر بودن ضریب دبی مصالح با قطر ۱/۴۵ از مصالح با قطر ۲/۱ سانتی‌متر می‌شود (شکل ۶). با این حال برای درک بهتر رابطه ضریب دبی با اندازه مصالح، باید اندازه‌های بیشتر و وسیع‌تری استفاده شود که بعنوان پیشنهادی برای تحقیقات بیشتر در این زمینه قابل توصیه است.

۳-۵- تاثیر استغراق نسبی پایاب بر ضریب دبی

با افزایش نسبت اختلاف اعماق پائین دست و بالادست به بار آبی بالادست سد، بعلت افزایش گرایان هیدرولیکی موثر، ضریب دبی جریان همزمان و نتیجتاً شدت جریان عبوری از سازه افزایش می‌یابد (شکل ۷). شایان ذکر است که رابطه ضریب دبی با پارامترهای بدون‌بعد مورد بررسی مطابق شکل‌های (۴ تا ۷) و نیز طبق جدول ۲ از

۳-۶- رابطه ضریب دبی با عوامل موثر

ترکیبات مختلفی از پارامترهای رابطه (۲۰) برای بدست آوردن رابطه ضریب دبی (C_d)، بررسی و آنالیز خطی و غیرخطی شده و با در نظر گرفتن ضرائب همبستگی حاصل از روابط و مدل‌های مختلف، در نهایت رابطه زیر بعنوان رابطه بهینه ضریب دبی جریان همزمان درون و روگذر غیرمستغرق در سدهای پاره‌سنگی بدست آمد:

$$C_d = 0.298 \left[\frac{P}{H_d} \right]^{0.036 \left(\frac{P}{H_d} \right)} \left[\frac{DH}{H_d} \right]^{-0.012 \left(\frac{DH}{H_d} \right)} \quad (22)$$

$$\left[\frac{L}{P} \right]^{-0.097 \left(\frac{L}{P} \right)} \left[\frac{d}{P} \right]^{-1.383 \left(\frac{d}{P} \right)} [\sin(\beta)]^{-6.83(\sin(\beta))}$$

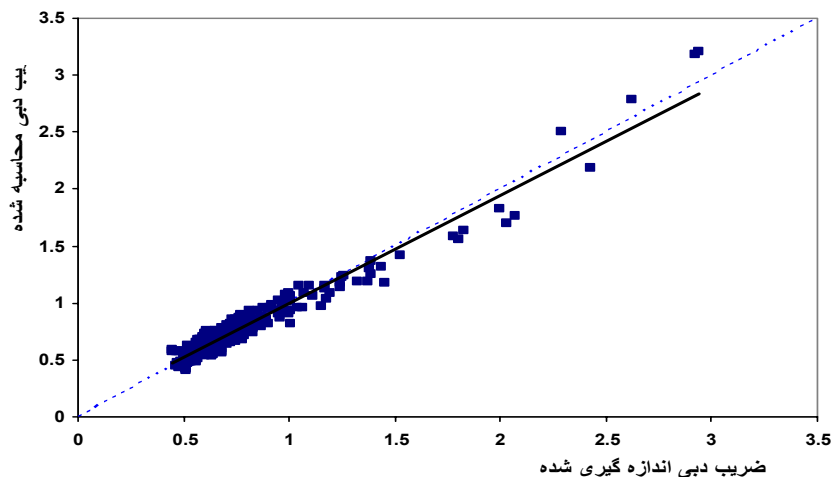
ضریب همبستگی و نمایه سازگاری رابطه فوق به ترتیب برابر ۰/۹۳۶ و ۰/۹۸۵ و متوسط مربعات خطای آن ۰/۰۰۱ و سطح معنی‌داری ضریب همبستگی ۰/۹۹ است. در شکل ۹ مقادیر ضریب شدت جریان محاسبه‌ای و ضریب شدت جریان بدست آمده از رابطه (۲۲) ترسیم شده است. با توجه به معیارهای آماری و شکل ذیل مشخص است که این رابطه ضریب دبی را به خوبی برآورد می‌نماید.

با ترکیب رابطه (۲۲) با رابطه (۱۹) می‌توان دبی عبوری از سدهای پاره‌سنگی را تعیین نمود. شایان ذکر است که این رابطه تنها در محدوده مقادیر متغیرهای آزمایش شده در این تحقیق معتبر است و برای محدوده خارج از آن لازم است که آزمایش‌های بیشتر و وسیع‌تری صورت گیرد. در جدول ۳ محدوده پارامترهای بدون‌بعد متغیر در این تحقیق همان پارامترهای بدون بعد رابطه (۲۲) که

نشان‌دهنده محدوده اعتبار رابطه (۲۲) می‌باشند آمده است. علاوه بر این در قسمت ۲-۳ محدوده پارامترهای بعددار آمده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای اولین بار جریان همزمان درون و روگذر غیرمستغرق در سدهای تاخیری پاره‌سنگی بررسی شده و رابطه‌ای برای تخمین دبی جریان همزمان ارائه شده است. طبق نتایج آزمایش‌های انجام گرفته ضریب دبی (شدت جریان همزمان بدون بعد) با طول سد پاره‌سنگی، شیب و جوه سراب و پایاب آن رابطه معکوس و با نسبت ارتفاع به بار آبی بالادست سد، نسبت استغراق پائین دست و اندازه مصالح بدنه سد رابطه مستقیم دارد. همچنین طبق نتایج آزمایش‌ها مهمترین پارامترهای موثر بر ضریب دبی جریان به ترتیب عبارتند از نسبت ارتفاع سد به عمق آب در بالادست سد تا تاج، شیب و جوه سراب و پایاب سد، نسبت طول سد به ارتفاع، نسبت استغراق پائین دست و نسبت اندازه مصالح بدنه سد به ارتفاع آن. با استفاده از آنالیز ابعادی رابطه‌ای با ضریب همبستگی ۰/۹۳۶ و متوسط مربعات خطای ۰/۰۰۱ برای ضریب دبی جریان همزمان درون و روگذر غیرمستغرق در سدهای پاره‌سنگی ارائه شده است که از آن برای طراحی سدهای تاخیری پاره‌سنگی به منظور کنترل سیل می‌توان استفاده نمود و همچنین با ترکیب آن با مدل‌های ریاضی روندیابی سیل و یا در پروتوتایپ، می‌توان عبور سیل از درون و روی سدهای پاره‌سنگی در حالت غیرمستغرق را با دقت مطلوب شبیه‌سازی نمود.



شکل ۹- مقایسه ضریب شدت جریان اندازه‌گیری شده و محاسبه شده با رابطه (۲۲)

جدول ۳- محدوده تغییر پارامترهای بدون‌بعد در طول آزمایش‌های تحقیق (محدوده اعتبار رابطه ۲۲)

پارامتر	$\beta(\text{deg})$	d/p	L/p	DH/H_d	P/H_d
دامنه تغییرات	۴۵ و ۹۰	۰/۰۵۸-۰/۱۲۲	۲-۴/۴	۰/۲-۱۵	۲-۱۲

۵- مراجع

- Hydraulic Engineering, ASCE*, 128(11), pp.1027-1034.
- Li, B. and Garga, V.K. (1998), "Theoretical solution for seepage flow in submerged overtopped Rockfill," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 124(2), pp.213-217.
- Li, B. Garga, V.K. and Davies, M. H. (1998), "Relationships for non-Darcy flow in Rockfill," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 124(2), pp.206-212.
- Martins, R. (1990), "Turbulent seepage flow through rockfill structures," *Water Power and Dam Construction*, 40(3), pp.41-45
- Michioku, K., Furusawa, T. and Haneda, M. (2005), "Discharge through a permeable Rubble Mound Weir," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 134(1), pp.1-10.
- Qian, J., Zhan, H., Zhao, W. and Sun, F. (2005), "Experimental study of turbulent unconfined groundwater flow in a single fracture," *Journal of Hydrology*, 311, pp.134-142.
- Samani, H. M. V., Samani, J. M. V. and Shaiannejad, M. (2003), "Reservoir routing using steady and unsteady flow through rockfill dams," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 129(6), pp.448-454.
- Samani, J. M. V. and Shaiannejad, M. (2004), "Discharge through Rockfill dams," *Journal of Hydraulic Research*, 53(6), pp.448-454.
- Stephanson, D. (1979), "Rockfill in hydraulic engineering" Elsevier science publishers BV (North-Holland). Amsterdam, The Netherlands. 450p.
- Ward, J.C. (1964), "Turbulent flows in porous media". *J.Hydr. Eng. ASCE*. Vol.90. HY5. pp.1-12
- Wilkins, D.E. (1956), "The flow of water through rockfill and its application to the design of dams". Proc. 2nd Australia-New Zealand Conf. on Soil Mech. And Found. Engrg., Christchurch, New Zealand , pp.141-148.
- ریاحی مدوار، ح. (۱۳۸۵)، تعیین دبی جریان همزمان درون و روگذر در سدهای تاخیری پاره‌سنگی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس. ۱۶۳ص.
- شایان نژاد، م. (۱۳۷۹)، بررسی و مدل‌سازی جریان در سدهای پاره سنگی و کاربرد آن در کنترل سیلاب، پایان‌نامه دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، ۲۳۸ص.
- قادری، ک. (۱۳۷۹)، مدل ریاضی محاسبه دبی جریان از درون و روی سدهای تاخیری پاره‌سنگی مستغرق، پایان‌نامه کارشناسی ارشد تاسیسات آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۴۵ص.
- Abt, S. R. (1990), "Estimating flow through riprap," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 117(5), pp.670-675.
- Bari, R. and Hansen, D.(2003), "Application of gradually-varied flow to simulate buried streams". *Journal of Hydraulic Research*, 40(6), pp.673-683.
- Ergun, S. (1952), "Fluid flow through packed columns". *Chemical Engineering Progress*, 48(2), pp.89-93.
- Gent, M.R.A. (1991), "Formulae to describe porous flow," *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering*, ISSN 0169-6548 NO.92-2, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.
- Herrera, N. M., and Felton, G.K. (1991), "Hydraulic of flow through a rockfill dam using sediment-free water," *Trans. of ASCE*, 34,3, pp. 871-875.
- Joy, D.M. (1991), "Non-Linear flow in coarse porous media," Annual Conference of CSCE, Vancouver, British, Colombia, Canada, pp.106-115.
- Legrand, J. (2002), "Revisited analysis of pressure drop in flow through crushed rocks," *Journal of*