



Modeling of seepage in rockfill dams using a physical model

Mahnaz Eskandari¹ , Javad Zahiri² , Amir Naserin³ , Ali Roshanfekr⁴

¹ M.Sc. Graduated of Water structures, Khuzestan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Khuzestan, Iran. E-mail: mahnazeskandari484@gmail.com

² Corresponding Author, Associate Professor of Water Engineering Department, Khuzestan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Khuzestan, Iran. E-mail: j.zahiri@asnrukh.ac.ir

³ Assistant Professor of Water Engineering Department, Khuzestan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Khuzestan, Iran. E-mail: amir8480@gmail.com

⁴ Ph. D Graduated of Civil Engineering, Studies expert of Cascade Civil Services LLC, Texas, America. Email: Ali.roshanfekr@gmail.com

ABSTRACT

Introduction

The measurement of the permeable water pressure, the flow rate of leakage and drainage from the beginning of the construction of the rockfill dam are the most important characteristics needed in analysis these dams.

Failure to control the above parameters can cause the waste of water stored in the reservoir, threaten the safety of the dam, and also reduce the stability of the dam through piping or liquefaction. Rockfill dams are used to prevent seepage, store water, control floods and delay floods.

The problem of leakage should be controlled and limited in such a way as to prevent the creation of adverse effects such as: loss of water stored behind the earthen structure, creation of pore pressure in the porous medium, reduction of the effective stress between soil particles and, as a result, reduction prevent its shear resistance.

In many cases, rockfill dam meets the needs of the project, because gravel is far more stable than soil and its ability to be washed is less. The slopes of the gravel dam body are steeper than many other soils, which saves money.

Methodology

This research was conducted in the hydraulic laboratory of the Faculty of Agricultural Engineering and Rural Civil Engineering, in Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan. In this research, a physical model was used to model seepage from gravel dams.

On this basis, a flume with dimensions of 7.5 meters in length, 60 cm in depth and 50 cm in width and a pump with a maximum flow rate of 42 liters per second were used. In the present research, gravel materials were first prepared from the river mines of Khuzestan province to conduct experiments. These materials were used in three sizes with an average diameter of 10, 20 and 30 mm respectively to make the model.

In this research, it was tried to study the leakage parameters in the gravel dam by building a physical model. A physical model of a gravel dam was built in a laboratory flume with three gravel samples and three slopes with the aim of investigating and determining the amount of leakage from the dam body. Pore pressure was measured with piezometers installed in the flume body.

The outlet flow depth can be used as the starting point of the seepage level in the downstream direction and the phreatic level in the upstream direction. Also, no deviation occurs above this depth. Below this depth, the settlement surface forms the downstream boundary conditions that are considered in the field of pore pressure modeling. The outlet flow depth in gravel dams can be determined using the concept of the unsteady flow field angle, which is in agreement with a one-dimensional non-Darcy flow equation.

Results and discussion

Comparing the effect of gravel with different diameters on the angle of the unsteady flow field shows that the dimensions of the gravels did not have a noticeable effect on the angle of the unsteady flow field. However, for a constant flow rate, with increasing particle diameter, the downstream outlet depth decreases, which is consistent with the results of Ansari et al. (2015).

Investigating the effect of different downstream slopes on the outlet depth shows that at a constant flow rate, with the decrease of the slope of the downstream wall, the angle of the unstable flow field and the depth of the outlet flow have decreased. Based on the investigations, it can be concluded that decreasing the slope along with the increase in the diameter of the gravels causes the depth of the outlet flow and the angle of the field to decrease compared to the previous slope.

In the ratio of $B_c/H = 2$, with the increase of particle diameter for a fixed flow rate, the depth of the outlet flow decreases, and with the increase of the flow rate, the effect of particle size has increased to some extent, which is in agreement with the results of Chabakpour et al. (2015). In the ratio of $B_c/H=2$, with the increase of the width of the model, the depth of the outflow has decreased compared to $B_c/H=1$.

The results of the research showed that in a constant slope, the flow-field angle increases as the flow depth increases. Also, with the increase of the flow rate and the increase of the diameter of the particles, the depth of the outlet flow is reduced and these changes are not clear at low flow rates, but are clearly visible at high flow rates.

In constant diameter and flow rate, with the increase of the slope of the model, the depth of the outlet flow decreases, and in the constant flow rate, with the increase of the ratio (B_c/H), the value of the outlet height of the flow decreases.

Conclusions

Based on the experiments, the following results are presented. In the ratio of $B_c/H = 1$, with the increase of upstream depth, the depth of outflow has increased.

Considering that the depth of the outlet flow downstream can be determined using the concept of the flow-field angle, it can be said that the depth of the outlet flow increases with the increase of the flow-field angle. In the ratio $B_c/H=2$, with the increase in the width of the model, the depth of the outlet flow has decreased compared to $B_c/H=1$. In addition, it can be concluded that in a constant slope, with the increase in flow depth, flow-field angle increases. Also, with the increase in the diameter of the particles, the depth of the outflow decreases. These changes are not clear at low flow rates but are clearly visible at high flow rates.

Keywords: Rockfill dam, piping, pore water pressure, leakage flow rate, piezometer

Article Type: Research Article

Article history: **Received:** 16 March 2023 **Revised:** 26 May 2023 **Accepted:** 14 June 2023 **ePublished:** 27 June 2023

Cite this article: Eskandari, M., Zahiri, J., Naserin, A., & Roshanfeker, A. (2023). Modeling of seepage in rockfill dams using a physical model, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(1), 61-78. DOI: 10.22126/ATWE.2023.9135.1053

Publisher: Razi University

© The Author(s).





بررسی نشت در سدهای سنگریزه‌ای با استفاده از مدل فیزیکی

مهناز اسکندری^۱، جواد ظهیری^۲، امیر ناصرین^۳، علی روشنفکر^۴

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، خوزستان، ایران. رایانامه: mahnazeskandari484@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، خوزستان، ایران. رایانامه: j.zahiri@asnrukh.ac.ir

^۳ استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، خوزستان، ایران. رایانامه: amir8480@gmail.com

^۴ دانش‌آموخته دکتری مهندسی عمران، کارشناس مطالعات Cascade Civil Services LLC، تگزاس، آمریکا. رایانامه: Ali.roshanfekr@gmail.com

چکیده

از مهم‌ترین ویژگی‌های موردنیاز در بررسی و تحلیل سدهای سنگریزه‌ای، اندازه‌گیری فشار آب منفذی، میزان نشت و زهاب خروجی از بدنه و پی آن است که اندازه‌گیری این کمیت‌ها از همان شروع ساخت سد آغاز می‌گردد. عدم کنترل پارامترهای فوق می‌تواند سبب هدر رفت آب ذخیره‌شده در مخزن، تهدید ایمنی سد و همچنین از طریق پایداری یا روانگرایی سبب کاهش پایداری سد شوند. در تحقیق حاضر برای انجام آزمایش‌ها ابتدا مصالح سنگریزه از معادن رودخانه‌ای استان خوزستان تهیه شد. در این تحقیق سعی شد تا با ساخت مدل فیزیکی پارامترهای نشت در سد سنگریزه‌ای مورد مطالعه قرار گیرد. مدل فیزیکی سد سنگریزه‌ای در فلوم آزمایشگاهی با سه نمونه سنگریزه و سه شیب با هدف بررسی و تعیین میزان نشت از بدنه سد ساخته شد. مصالح مورد استفاده در سه اندازه قطر متوسط ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر جهت ساخت مدل استفاده شدند. میزان فشار منفذی با پیژومترهای نصب‌شده در بدنه‌ی فلوم اندازه‌گیری گردید. در این تحقیق جهت بررسی نشت از مفهوم زاویه‌ی میدان جریان ناپایدار نیز استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان داد که در شیب ثابت، با افزایش عمق جریان، زاویه میدان افزایش می‌یابد. مقایسه تأثیر سنگریزه‌های با قطرهای مختلف بر زاویه میدان جریان ناپایدار نشان می‌دهد که ابعاد سنگریزه‌ها، تأثیر محسوسی بر زاویه میدان جریان ناپایدار نداشته است. با این حال برای یک دبی ثابت با افزایش قطر ذرات، عمق خروجی در پایین‌دست کاهش می‌یابد که این تغییرات در دبی‌های کم مشخص نیست اما در دبی‌های بالا به‌وضوح قابل مشاهده است. در قطر و دبی ثابت با افزایش شیب مدل، عمق جریان خروجی کاهش یافته و در دبی ثابت با افزایش نسبت (Bc/H) ، مقدار ارتفاع خروجی جریان کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: سد سنگریزه‌ای، پایداری، فشار آب منفذی، دبی نشت، پیژومتر

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۲۶ اسفند ۱۴۰۱ اصلاح: ۰۵ خرداد ۱۴۰۲ پذیرش: ۲۴ خرداد ۱۴۰۲ چاپ الکترونیکی: ۲۴ خرداد ۱۴۰۲

استناد: اسکندری، م، ظهیری، ج، ناصرین، ا، و روشنفکر، ع. (۱۴۰۲). بررسی نشت در سدهای سنگریزه‌ای با استفاده از مدل فیزیکی، فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۳(۱)، ۶۱-۷۸. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2023.9135.1053



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

از آنجاکه تأمین آب همواره نیاز اساسی بشر برای استفاده در بخش‌های گوناگون از جمله کشاورزی، صنعتی و آب شرب است، مهار آب‌های سطحی، جاری و سیلاب از طریق سد، از پروژه‌های اساسی و زیر بنایی یک کشور محسوب می‌شود (چهرآزاد، ۱۳۹۳). در مرحله مطالعات پروژه‌های احداث سد بر مسیر رودخانه، تعیین موقعیت مناسب ساختگاه سد و انتخاب گزینه مناسب برای نوع سد، از نظر فنی و اقتصادی دارای اهمیت ویژه‌ای است. قبل از آن که یک سد ساخته شود باید بررسی‌های جامعی صورت گیرد. این بررسی‌ها در انتخاب نوع سد، محل سد و اهداف پروژه می‌تواند تأثیر بسیار زیادی داشته باشد. نوع سد در یک محل، بستگی به عواملی مثل توپوگرافی، ژئوتکنیک، هیدرولوژی، مصالح موجود، لرزه‌خیزی، عمق آبرفت، وضعیت پی و ... دارد که باید همگی آن‌ها مدنظر قرارگیرد (صادق‌پور و همکاران، ۱۳۸۷). سد سنگریزه‌ای سدی است که مقطع آن دارای یک المان مجزای ناتراوایی شناخته‌شده از خاکریز متراکم یا غشایی با ضخامت کم از آسفالت است که بیش از ۵۰٪ از مصالح به‌کاررفته در آن سنگریزه هستند (سرور، ۱۳۹۵). از سدهای سنگریزه‌ای به‌منظور کاهش تراوش، ذخیره آب، کنترل سیلاب و تأخیر در سیل استفاده می‌شود (قادری، ۱۳۸۴). نشت به معنای تراویدن، تراوش، ترشح، چکه و درز کردن است. به عبارت دیگر نشت، نفوذ آب و حرکت آرام آن در خاک است. مسئله نشت باید به گونه‌ای کنترل و محدود شود تا از ایجاد اثرات نامطلوب حاصل از آن مانند: تلف شدن آب ذخیره‌شده در پشت سازه‌ی خاکی، ایجاد فشار منفذی در محیط متخلخل، کاهش تنش مؤثر بین ذرات خاک و در نتیجه کاهش مقاومت برشی آن، اعمال فشار بالا بر سازه‌های غیرقابل نفوذ (مانند سازه‌های بتنی، فولادی و...) در محیط، آب‌شستگی، کاهش ایمنی، بروز فشارهای حفره‌ای، کاهش مقاومت برشی، بالا رفتن نیروی تراوشی و امکان فرسایش ذرات ریزدانه هسته، جلوگیری شود (چهرآزاد، ۱۳۹۳). سد سنگریزه‌ای در بسیاری از موارد پاسخگوی نیازهای طرح است. چراکه سنگریزه، به‌مراتب از خاک پایدارتر و قابلیت شسته شدن آن کمتر است. شیب‌های بدنه سد سنگریزه‌ای از بسیاری خاک‌های دیگر تندتر بوده که باعث صرفه‌جویی در هزینه می‌شود (ولی‌پور گودرزی، ۱۳۷۳). دارسی^۱ (۱۸۵۶)، اولین کسی بود که حرکت آب در منافذ خاک را بررسی کرد و با انجام آزمایش‌هایی که در لایه‌ای از شن انجام داد، به این نتیجه رسید که دبی نشت یافته از درون شن و ماسه به ارتفاع آب و ضخامت لایه‌های شن و ماسه وابسته است که نتیجه تحقیقات وی منجر به ارائه رابطه $i = \left(\frac{1}{K}\right) V$ شد. این رابطه زمانی درست خواهد بود که عدد رینولدز بزرگ‌تر از یک نشود. بنابراین برای محیط‌های متخلخل درشت‌دانه مثل خاک‌ریزها و سدهای سنگریزه‌ای بایستی از روابط غیر دارسی جهت بررسی شرایط جریان استفاده کرد (بایوردی، ۱۳۷۲). هانسن و همکاران^۲ (۱۹۹۵)، اظهار داشتند که در محیط‌های متخلخل که از ذرات درشت‌دانه مثل شن و قلوه‌سنگ استفاده شده است، چون سرعت جریان افزایش می‌یابد و جریان آرام نیست نمی‌توان از روابط دارسی استفاده کرد. آن‌ها برای تحلیل جریان در این گونه محیط‌ها با حل معادله دیفرانسیلی، که از ترکیب روابط غیرخطی و معادله پیوستگی بود استفاده کردند. استیفنس^۳ (۱۹۷۹)، با استفاده از انتگرال‌گیری تحلیلی از معادله دیفرانسیل معمولی مربوط به جریان متغیر تدریجی ماندگار در کانال‌های مستطیلی، به یک جواب از معادله رسید و با مقایسه نتایج آن با مشاهدات مربوط به فلوم آزمایشگاهی، همبستگی خوبی را گزارش کرد. معادله تحلیلی وی فقط برای حالتی که جریان آشفته کاملاً توسعه‌یافته باشد قابل کاربرد است. وی فرض کرد که در محل عمق بحرانی سطح نشت ظاهر می‌شود. نتایج تحقیق نشان داد که شیب اصطکاکی در مباحث هیدرولیک کانال‌های باز معمولاً از روابط شزی یا مانینگ به دست می‌آید، درحالی‌که در محیط‌های متخلخل برای ارزیابی شیب اصطکاکی از یک معادله توانی سرعت-گرادیان استفاده می‌شود، که این رابطه را به صورت $S_f = i = a V_V^N$ بیان کرد که در آن V_V سرعت منفذی یا سرعت نشت، i گرادیان هیدرولیکی (بدون بعد)، a ضریبی است که به روش تجربی تعیین می‌شود و N توانی است که به صورت تجربی تعیین می‌شود و معمولاً مقدار آن تا ۲ برای جریان آشفته کاملاً توسعه‌یافته تغییر می‌کند. درحالی‌که ویلکینس (۱۹۵۶)، در به‌کارگیری تئوری جریان متغیر تدریجی ماندگار در سدهای سنگریز از معادله توانی $i = a V_V^N$ به جای رابطه مانینگ برای محاسبه شیب اصطکاکی استفاده کرد. وی معتقد بود اگرچه محاسبات مربوط به

¹ Darcy² Hansen et al³ Stephenson

جریان های متغیر تدریجی عمدتاً به مسائل کانال های روباز منتهی می شود، اما اولین مطالعه جدی و مستند خود را در مورد کاربرد این گونه جریان ها به عنوان یک ابزار مدل سازی پروفیل خط نشت در سدهای سنگریزه ای، انجام داد. از این روش برای تعیین موقعیت خط نشت در سدهای سنگ ریز در سال ۱۹۶۳ توسط پارکین مورد استفاده قرار گرفت. پارکین تئوری جریان متغیر تدریجی را در سدهای سنگ ریز به کاربرد و همبستگی خوبی را بین پروفیل خط نشت محاسباتی و اندازه گیری شده مشاهده کرد (هانسن، ۲۰۰۵). هدف از اجرای تحقیق حاضر، ساخت مدل فیزیکی با مدل سازی پارامترهای نشت در سد سنگریزه ای و بررسی تأثیر ابعاد سنگریزه ها و شیب و طول سازه سر بر سایر پارامترهای نشت است.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

روشنفر و همکاران (۱۳۸۹)، روابطی برای محاسبه ضرایب غیر داری در محیط های سنگریزه ای ارائه کردند. معادلات جریان غیر داری به دو صورت $i = \alpha V^N$ و $i = rV + sV^2$ نشان داده می شوند. آن ها با به کار بردن بعضی روابط غیر داری از جمله معادله آرگون و استفاده از تحلیل های ریاضی معادلاتی را برای محاسبه مقدار N ، α ارائه کردند. آن ها برای ضرایب هدایت هیدرولیکی در محیط متخلخل هم روابطی را ارائه کردند. مقدار N را با استفاده از رگرسیون غیرخطی محاسبه کردند و با N محاسباتی مقایسه کردند. نتیجه به دست آمده نشان داد که در مجاورت مرزها مقدار N محاسبه شده، از دقت بالایی برخوردار بوده است و با فاصله گرفتن از مرزها از دقت نتایج کاسته می شد. گرد نوشهری و همکاران (۱۳۹۶)، با استفاده از تئوری باکینگهام و تحلیل رگرسیون، رابطه ای برای نیمرخ طولی سطح آب در محیط های متخلخل سنگریزه ای ارائه نموده و همچنین با استفاده از معادله اولر و با در نظر گرفتن اثرات شیب زیاد و انحنای عمودی خطوط جریان، رابطه توزیع فشار غیر هیدرواستاتیک در محیط های متخلخل سنگریزه ای را ارائه نمودند. نتایج آزمایشگاهی نیمرخ طولی سطح آب و نیمرخ طولی فشار وارد بر کف در محیط متخلخل سنگریزه ای با قطر متوسط ذرات $1/68$ سانتی متر و دو طول $0/5$ و 1 متری تطابق خوبی با روابط ارائه شده نشان می دهند، به طوری که متوسط قدر مطلق خطای نسبی مقادیر محاسباتی این دو نیمرخ به ترتیب برابر با $1/31$ و $1/71$ درصد است. بازگان و شعاعی (۱۳۸۹)، با انجام آزمایش های گسترده بر روی انواع مختلف مصالح سنگریزه ای، به بررسی درستی فرضیه های مورد استفاده در تئوری جریان های متغیر تدریجی پرداختند و تأثیر خصوصیات فیزیکی محیط متخلخل مثل دانه بندی، تخلخل، ضریب یکنواختی و خاصیت گرانروی سیال، که روی ویژگی های مختلف جریان مانند سرعت و گرادیان هیدرولیکی اثر می گذارند را مورد بررسی قرار دادند. این محققین طی این آزمایش ها روابط جدیدی برای گرادیان هیدرولیکی پیشنهاد نمودند. صالحی و همکاران (۱۳۹۵)، تأثیر زاویه و ابعاد زهکش پنجه ای بر خط نشت آزاد آب در بدنه سدهای خاکی همگن با استفاده از مدل آزمایشگاهی ارائه نمودند. آزمایش ها با ارتفاع های مختلف آب در پشت دیواره سد خاکی همگن انجام شد و با استفاده از داده های پیزومتریک، وضعیت خط نشت آزاد آب در حالت های مختلف زهکش پنجه ای مقایسه شد. در پنجه سد سه نوع زهکش با زاویه های 45° ، 60° و 90° در ارتفاعات مختلف ساخته شدند و روند خط نشت در بدنه سد خاکی در حالت های مختلف آزمایش و در حداکثر ارتفاع آب سد خاکی با استفاده از هفت چاهک مشاهداتی در بدنه سد و 30 پیزومتر در دیواره فلوم برداشت شد. منحنی های برداشت شده در نقاط انتهایی خط نشت از روند خطی تبعیت می کردند که این امر موجب شد معادلات ریاضی خط نشت در انتهای بدنه سد و ابتدای ورود به زهکش ترسیم گردد. محل برخورد خط با بدنه زهکش از حل عددی معادلات ریاضی خط نشت و خط ریاضی در یک دستگاه حل معادلات برداشت شد. با مقایسه این افت ها بهترین زهکش که زهکش 45° درجه است، معرفی شد.

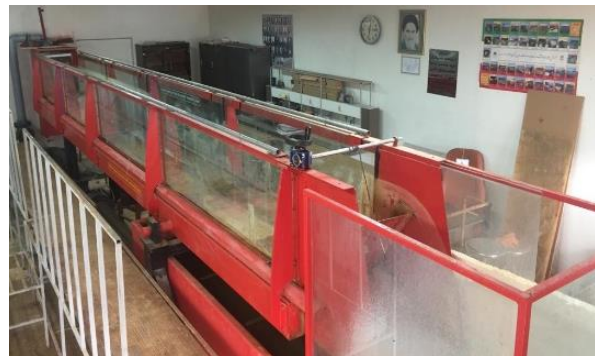
روش پژوهش

این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان انجام شد. در این پژوهش، جهت مدل سازی تراوش از سدهای سنگریزه ای، از مدل فیزیکی استفاده شده است. بر همین اساس از فلومی با

ابعادی به طول ۷/۵ متر، عمق ۶۰ و عرض ۵۰ سانتی‌متر و پمپی با دبی حداکثر ۴۲ لیتر بر ثانیه استفاده شد. شکل (۱) نمایی از فلوم مورد استفاده در تحقیق و نحوه قرارگیری پیزومترها را نشان می‌دهد.



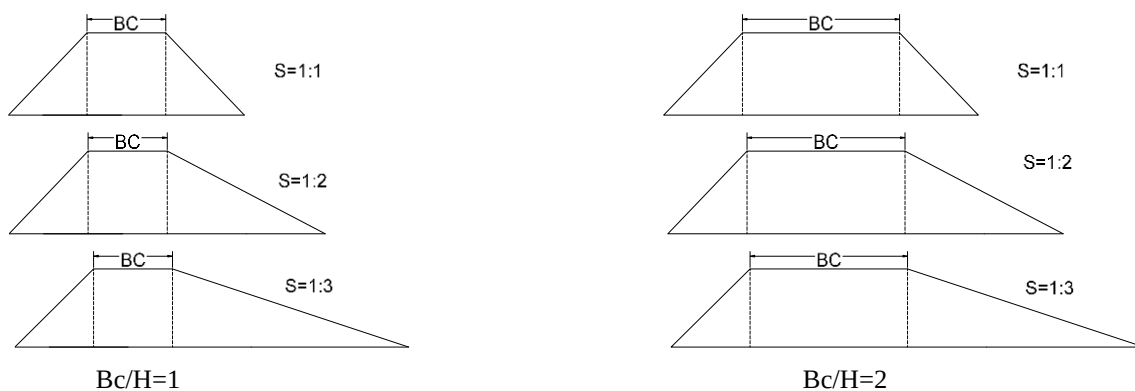
(ب)



(الف)

شکل ۱. الف) نمایی از فلوم مورد استفاده در تحقیق حاضر و ب) نحوه قرارگیری پیزومترها بر روی بدنه فلوم

برای ساخت مدل سد، از مصالح سنگریزه‌ای استفاده شده است. این مصالح در سه قطر متوسط ۱۰ میلی‌متر، ۲۰ میلی‌متر و ۳۰ میلی‌متر انتخاب شدند. در این پژوهش ۱۸ سد شامل ۶ سد، با دو نسبت $B_c/H = 1$ و $B_c/H = 2$ و با سه شیب ۱:۱، ۲:۱ و ۳:۱ ساخته شد. برای اندازه‌گیری فشار منفذی در داخل بدنه سد از ۹۶ پیزومتر به صورت شبکه‌بندی شده در فواصل منظم روی دیواره پلکسی گلاس فلوم در وسط فلوم تعبیه و آب‌بندی شده بود، استفاده شد. در ابتدا مدل‌های فیزیکی جهت مشاهده شرایط مرزی و ارزیابی هیدرولیک مربوط به ناحیه‌ی پایین‌دست ایجاد شدند و در درون فلوم شیشه‌ای قرار گرفتند. مواد دانه‌ای استفاده‌شده در خاک‌ریزهای مدل، به منظور جلوگیری از هرگونه حرکتی در باکس‌های سیمی، محدود شدند. این باکس‌ها دارای مش ۰/۵ سانتی‌متر بوده و با سنگریزه‌های الک شده پر شدند. مشخصات مدل‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر به صورت شماتیک در شکل (۲) ارائه شده است.

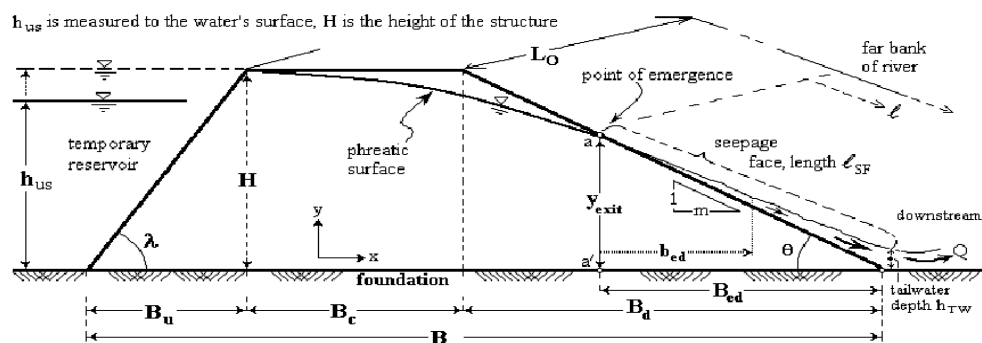


شکل ۲. شماتیک سدهای سنگریزه‌ای مورد استفاده در تحقیق

بعد از ساخت و آماده سازی مدل سدهای سنگریزه ای، جریان آب برای سه عمق ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی متر تنظیم گردید. بعد از تثبیت جریان آب در فلوم، دبی از روی دستگاه دبی سنج خوانده و با توجه به اینکه کانال مستطیلی است میزان سرعت جریان ورودی از طریق رابطه پیوستگی به دست آمد:

$$Q = A \times V \quad (۱)$$

در معادله بالا V سرعت جریان و Q دبی خروجی از سد سنگریزه ای است. پارامترهای مختلف سطح نشت در سدهای سنگریزه ای در شکل (۳) نشان داده شده است. ارتفاع نقطه ای اولین ناپایداری جریان بر روی کناره ی پایین دست (y_{exit}) یک کمیت پایه ای مهم به حساب می آید.



شکل ۳. پارامترهای نشت از سدهای سنگریزه ای (روشنفر، ۲۰۱۳)

عمق جریان خروجی می تواند به عنوان نقطه ای شروع سطح نشت در جهت پایین دست و برای محاسبه سطح فریاتیکی در جهت بالادست، استفاده شود. علاوه بر این، هیچ انحرافی در بالای این عمق اتفاق نمی افتد. در زیر این ارتفاع، سطح نشست شرایط حدی پایین دست را تشکیل می دهد که در زمینه مدل سازی فشار منفذ مورد توجه قرار می گیرد (هانسن و روشنفر، ۲۰۱۲). y_{exit} در سدهای سنگریزه ای می تواند با استفاده از مفهوم زاویه ی میدان جریان ناپایدار (θ) تعیین شود (هانسن و همکاران، ۲۰۰۵)، که در هماهنگی با یک معادله جریان غیر داری تک بعدی است (هانسن و همکاران، ۱۹۹۵).

$$V = n \sqrt{\frac{gd}{K_s}} \times i \quad (۲)$$

$$K_s = \frac{800}{Re} + K_{ang} \quad (۳)$$

$$i = \frac{K_s}{gdn^2} \times V^2 \quad (۴)$$

$$y_{exit} = \frac{q}{V} \quad (۵)$$

در معادلات بالا n تخلخل ماتریکس سنگفرش، g شتاب گرانشی، d قطر ذره نماینده، i شیب هیدرولیکی، K_{ang} ضریب زاویه ای که مقدار آن برای کوه های صاف ۱ و برای سنگ های زاویه ای ۴ است. q دبی در واحد عرض، K_s ضریب استفسون، Re عدد رینولدز جریان و y_{exit} عمق جریان خروجی است. در گزارش لپس (۱۹۷۳)، در رابطه با روش های مختلف طراحی ژئوهیدرولیک برای این رده از سازه ها، یک تقریب تخصصی از شیب هیدرولیکی در پنجه به سادگی برابر $i_{exit} = \tan \theta$ در نظر گرفته شده است. با این حال انتظار می رود که زاویه واقعی که نشانگر میدان نشت ناپایدار است کمتر از θ باشد. زاویه ی میدان جریان مؤثر (θ_{ff}) با عمق نسبی خروجی تغییر می کند به این صورت که با افزایش عمق نسبی خروجی، این زاویه به θ نزدیک می شود. هانسن و همکاران (۲۰۰۵) رابطه زیر را جهت محاسبه زاویه میدان جریان ناپایدار ارائه نمودند:

$$\frac{\theta_{ff}}{\theta} = 1/41 \frac{y_{exit}}{H} + 0/17 \quad (۶)$$

که در آن θ_{ff} زاویه میدان جریان ناپایدار، θ زاویه پنجه پایین دست، H ارتفاع خاکریز است.

یافته‌ها

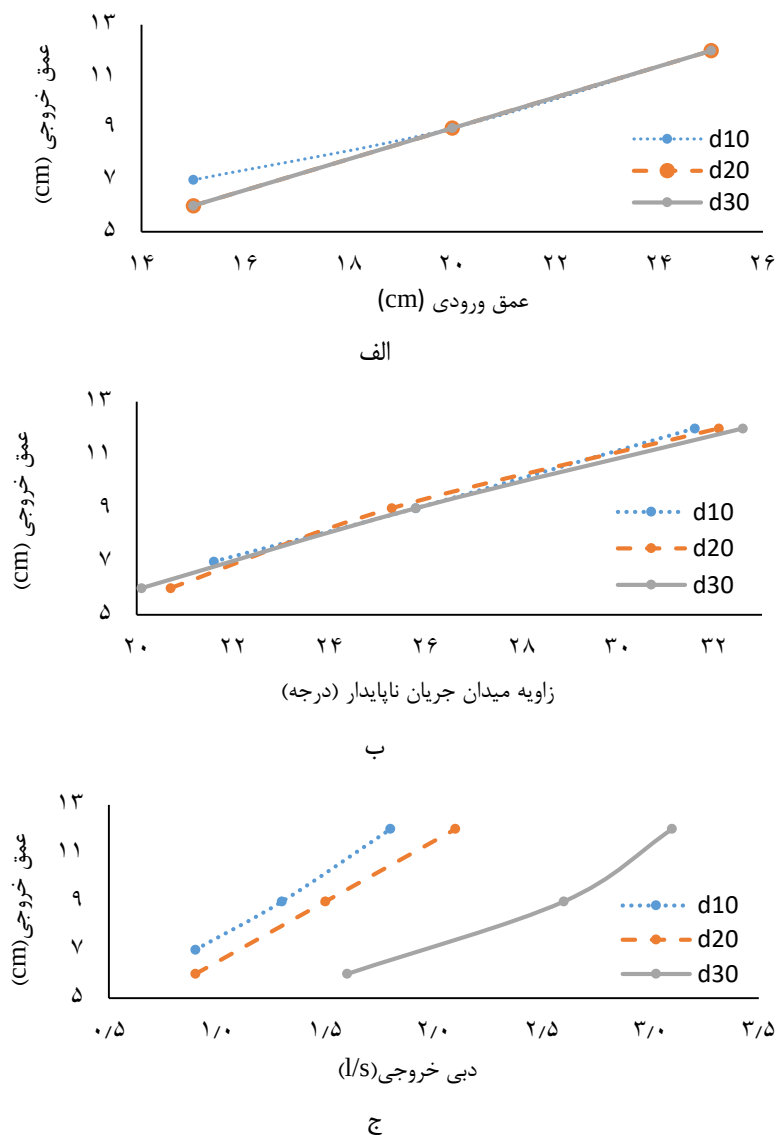
مرحله اول آزمایش‌ها

در این مرحله برای انجام آزمایش، بعد از برقراری جریان در کانال، دبی متغیر برای هر عمق (۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر)، به کار گرفته شد و فشار داخل لوله‌های پیرومتری قرائت شد و با کمک معادلات موجود پارامترهای موردنظر برای هر سه قطر سنگریزه محاسبه شد. مدل اول با عرض و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و با شیب پایین دست ثابت، ساخته شد و برای انجام هر آزمایش، در هر عمق با سه قطر سنگریزه پر شد. بعد از برقراری و تثبیت جریان در کانال، پارامترهای مرتبط با جریان اندازه‌گیری شدند. این پارامترها شامل: دبی، عمق جریان بالادست و فشار لوله پیرومتری بودند. این اندازه‌گیری‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. برای ارائه بهتر نتایج، آزمایش‌ها کدگذاری شدند. برای این منظور S به عنوان نماد شیب پنجه، L طول سازه سد و D اندازه میانگین قطر ذرات مورداستفاده در سد، انتخاب شدند. برای درک بهتر نام‌گذاری مدل‌ها، جدول (۱) ارائه شده است.

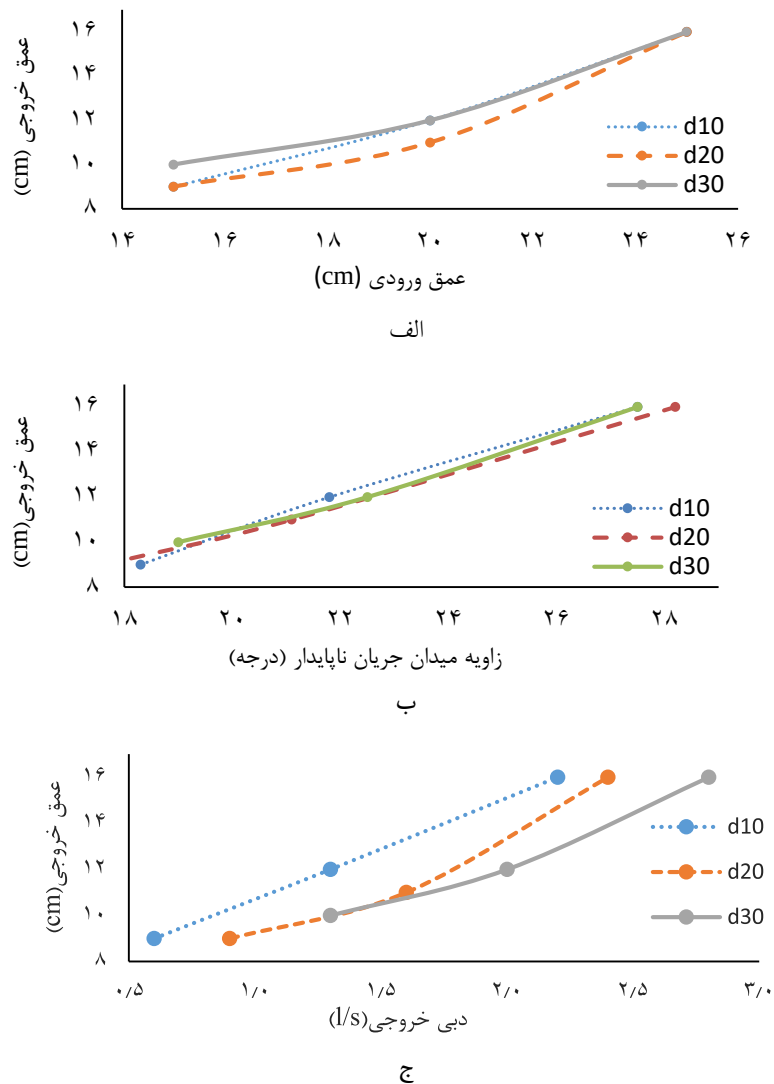
جدول ۱. مشخصات مدل‌های فیزیکی مورداستفاده

شیب پنجه	طول نمونه (cm)	اندازه قطر ذرات (mm)	مدل
۱:۱	۳۰	۳۰، ۲۰، ۱۰	S1L1
۲:۱	۳۰	۳۰، ۲۰، ۱۰	S2L1
۳:۱	۳۰	۳۰، ۲۰، ۱۰	S3L1
۱:۱	۶۰	۳۰، ۲۰، ۱۰	S1L2
۲:۱	۶۰	۳۰، ۲۰، ۱۰	S2L2
۳:۱	۶۰	۳۰، ۲۰، ۱۰	S3L2

در حالت $Bc/H=1$ ، طبق شکل (۴) الف، با افزایش عمق ورودی در بالادست، عمق جریان خروجی در پایین دست، افزایش می‌یابد به طوری که اندازه قطر ذرات، تأثیر به خصوصی بر روی عمق خروجی نداشته است. شکل (۴) ب، نشان می‌دهد که با افزایش عمق جریان خروجی، زاویه میدان جریان ناپایدار روند افزایشی داشته که اندازه قطر ذرات تأثیری بر زاویه میدان نداشته است. در شکل (۴) ج، برای یک دبی ثابت با افزایش قطر ذرات، عمق خروجی در پایین دست کاهش می‌یابد که با نتایج انصاری و همکاران (۱۳۹۵) مطابقت دارد. در مرحله بعد (مدل S2L1)، شیب مدل کاهش یافته و از هر سه اندازه سنگریزه جهت پر کردن مدل استفاده شد. بعد از ساخت مدل و پر شدن با اندازه سنگریزه‌های مختلف، پارامترهای موردنظر اندازه‌گیری شدند.



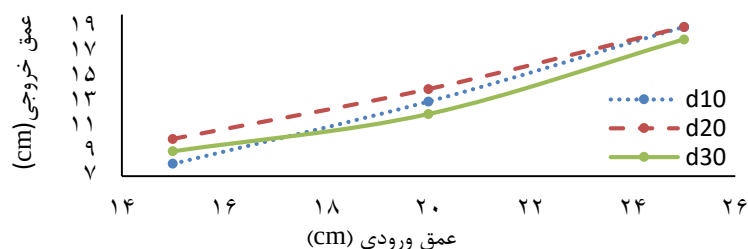
طبق نتایج ارائه شده در شکل (۵) الف مشاهده می شود که برای یک عمق ثابت در بالادست، اندازه ذره تأثیر زیادی بر عمق جریان خروجی ندارد اما می توان گفت کاهش شیب به ۲:۱ سبب کاهش عمق جریان خروجی در پایین دست شده است. در شکل (۵) ب، با افزایش قطر ذرات، زاویه میدان جریان ناپایدار افزایش یافته ولی با کاهش شیب، زاویه میدان روند کاهشی داشته است. در شکل (۵) ج، مشاهده می شود که با افزایش قطر ذرات به ازای دبی جریان ثابت، عمق جریان خروجی کاهش می یابد. می توان نتیجه گرفت کاهش شیب به همراه افزایش قطر سنگریزه ها سبب کاهش هر چه بیشتر عمق جریان خروجی و زاویه میدان نسبت به شیب قبلی می شود که نتایج به دست آمده با نتایج صدقی اصل (۱۳۸۹) همخوانی دارد. در مرحله بعد با همان عرض ۳۰ سانتی متر، شیب پایین دست سه برابر کاهش یافته و با هر سه قطر سنگریزه ها، آزمایش ها در همان شرایط آزمایش های قبلی انجام شد.



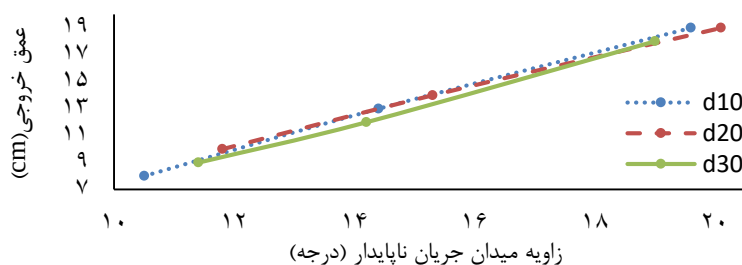
شکل ۵. تأثیر قطر ذرات بر پارامترهای مختلف جریان در مدل S2L1

در شکل (۶) الف مشاهده می‌شود که در تمامی سنگریزه‌های استفاده‌شده، با افزایش عمق جریان ورودی، عمق جریان خروجی افزایش می‌یابد که در این میان اندازه ذرات بر روی این تغییرات تأثیر چندانی نداشته است. نتایج شکل (۶) ب، نشان می‌دهد با افزایش زاویه میدان جریان، عمق خروجی روند افزایشی داشته ولی اندازه ذرات تأثیری بر این روند نداشته است. در شکل (۶) ج، در یک دبی خروجی ثابت، افزایش قطر ذرات باعث کاهش عمق جریان خروجی شده است که با کاهش شیب، میزان عمق خروجی جریان و زاویه میدان کاهش بسیاری داشته است. در مجموع در نسبت $Bc/H=1$ ، در یک شیب ثابت، با افزایش عمق و دبی جریان، زاویه میدان جریان و عمق جریان خروجی افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش قطر ذرات، عمق جریان خروجی کاهش می‌یابد. این تغییرات در دبی‌های اندک قابل ملاحظه نیست اما در دبی‌های بالا به وضوح قابل مشاهده

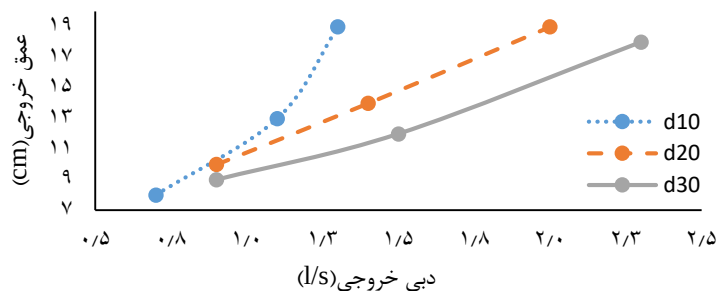
است. با کاهش شیب مدل، عمق جریان خروجی و زاویه میدان روند کاهشی داشته است، زیرا جریان طول مسیر بیشتری را طی می کند که از لحاظ ضریب امنیت قابل قبول تر و امن تر است و با نتایج هانسن (۱۹۹۲)، مطابقت دارد.



الف



ب



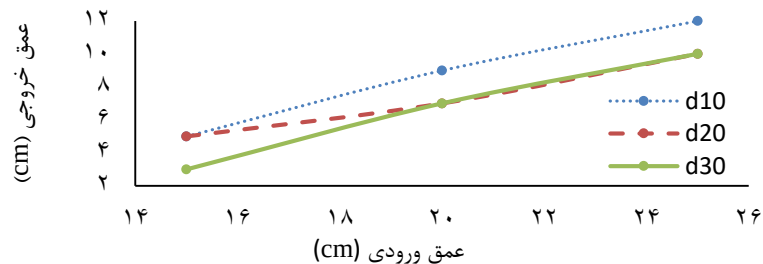
ج

شکل ۶. تأثیر قطر ذرات بر پارامترهای مختلف جریان در مدل S3L1

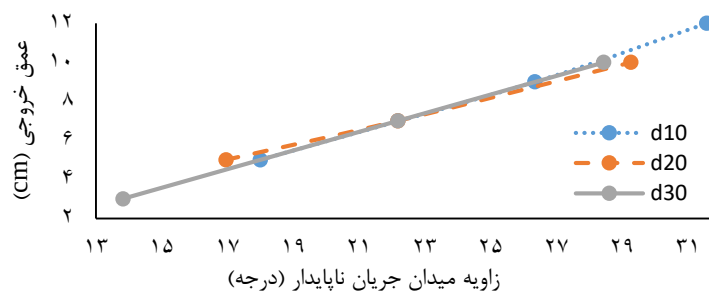
مرحله دوم آزمایش ها

در مرحله دوم از آزمایش ها، عرض تاج دو برابر شد و از عرض ۳۰ سانتی متر به عرض ۶۰ سانتی متر رسید. ارتفاع مدل ۳۰ سانتی متر در نظر گرفته شد. در قسمت اول از آزمایش، شیب پایین دست ۱:۱ در نظر گرفته شده است. در نسبت $Bc/H=2$ ، با افزایش عرض سد، اختلاف عمق بالادست و پایین دست بسیار زیاد گردید. شکل (۷) الف، نشان می دهد که با افزایش قطر ذرات، عمق جریان خروجی در حال کاهش است. در شکل (۷) ب، با افزایش عمق خروجی زاویه میدان جریان افزایش یافته است ولی اندازه ذرات تأثیر به خصوصی بر این روند نداشته است. بر اساس

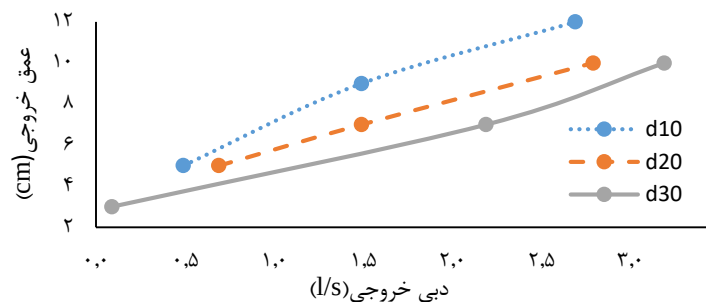
شکل (۷) ج، با افزایش قطر ذرات به ازای یک دبی ثابت، عمق جریان خروجی کاهش می‌یابد که با افزایش دبی جریان، تأثیر اندازه ذرات تا حدودی بیشتر شده است که این نتیجه با نتایج چاپک‌پور و همکاران (۱۳۹۵)، مطابقت دارد. در مرحله بعد با توجه به ثابت بودن شرایط آزمایش، فقط شیب پایین‌دست به ۲:۱ کاهش داده شد و پس از اندازه‌گیری پارامترها، نتایج بررسی شدند.



الف



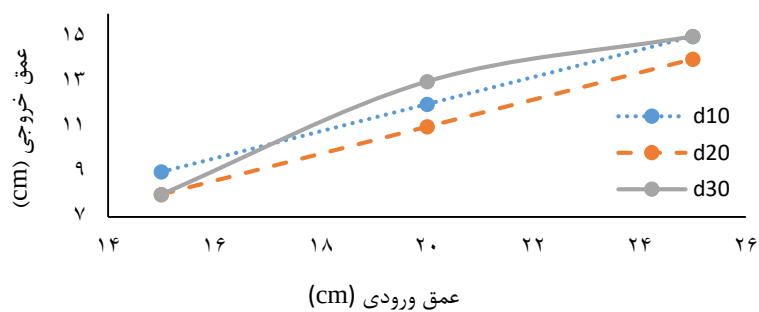
ب



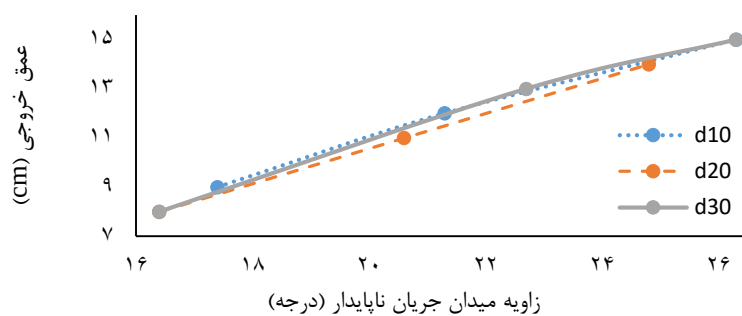
ج

شکل ۷. تأثیر قطر ذرات بر پارامترهای مختلف جریان در مدل S1L2

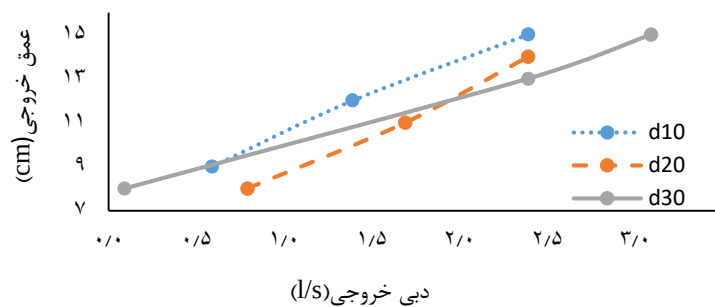
در شکل (۸) الف، به ازای تمامی قطر سنگریزه‌ها، با افزایش عمق جریان ورودی عمق خروجی هم افزایش یافته است. در شکل ۸ ب، با افزایش زاویه میدان جریان، عمق خروجی افزایش یافته است ولی اندازه ذرات تأثیری بر این روند نداشته است. در شکل (۸) ج، با افزایش دبی، عمق جریان خروجی افزایش یافته است ولی افزایش قطر ذرات تأثیر واضحی بر عمق جریان خروجی نداشته است. در مرحله آخر در نسبت $B/C/H = 2$ ، از شیب ۳:۱ جهت انجام آزمایش‌ها استفاده شد.



الف



ب

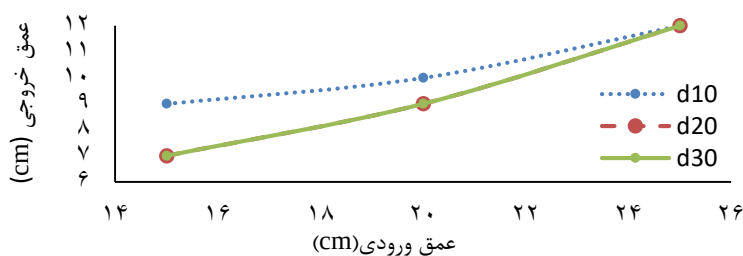


ج

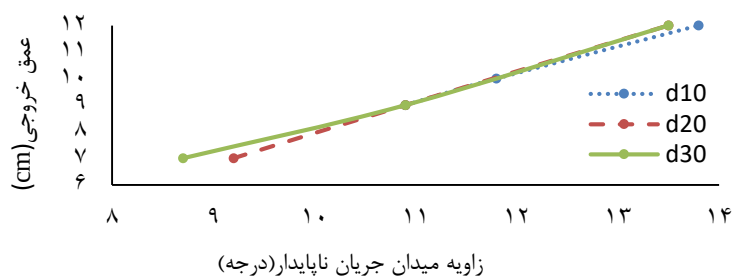
شکل ۸ تأثیر قطر ذرات بر پارامترهای مختلف جریان در مدل S2L2

شکل (۹) الف نشان می‌دهد در اعماق ورودی پایین، ذره با قطر ۱۰ میلی‌متر نسبت به دیگر ذرات تأثیر بیشتری بر عمق جریان خروجی داشته ولی با افزایش عمق ورودی تأثیر اندازه ذرات بر میزان عمق خروجی کاهش یافته است. در شکل (۹) ب، به ازای مقادیر مختلف زاویه جریان، اندازه ذرات تأثیر چندانی بر عمق خروجی نداشته ولی با افزایش زاویه میدان جریان میزان عمق خروجی هم افزایش یافته است. در شکل (۹) ج،

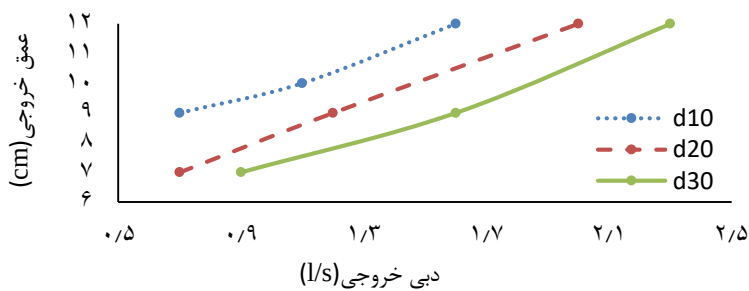
به ازای یک دبی جریان ثابت، با افزایش قطر ذرات عمق جریان خروجی روند کاهشی داشته است که با نتایج هانسن روشنفکر (۲۰۱۲)، مطابقت دارد.



الف



ب



ج

شکل ۹. تأثیر قطر ذرات بر پارامترهای مختلف جریان در مدل S3L2

بحث

در این تحقیق سعی شد تا با ساخت مدل فیزیکی پارامترهای نشت در سد سنگریزه‌ای مورد مطالعه قرار گیرد. در این پژوهش ۱۸ سد به ارتفاع ۳۰ سانتی متر ساخته شد. شیب بالادست ثابت اما قطر ذرات، عمق سطح آب بالادست، دبی و شیب پایین دست متغیر در نظر گرفته شده است.

این مدل‌ها با دو نسبت $Bc/H=1$ و $Bc/H=2$ ساخته شدند. نتایج آزمایش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که با افزایش طول سازه، عمق جریان خروجی کاهش می‌یابد که این میزان کاهش عمق جریان خروجی به ازای مقادیر عمق جریان ورودی کمتر، محسوس‌تر بوده و با افزایش عمق جریان ورودی، تأثیر طول سازه بر عمق جریان خروجی کاهش می‌یابد. همین مسئله در مورد زاویه میدان جریان نیز مشاهده می‌شود. بدین ترتیب که با افزایش طول سازه به ازای یک شیب ثابت، زاویه میدان جریان کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت که در نسبت $Bc/H=1$ ، با افزایش عمق بالادست، عمق جریان خروجی افزایش یافته است. با توجه به اینکه عمق جریان خروجی در پایین‌دست می‌تواند با استفاده از مفهوم زاویه میدان جریان ناپایدار تعیین شود، می‌توان گفت با افزایش زاویه میدان جریان ناپایدار عمق جریان خروجی هم افزایش می‌یابد. مقایسه تأثیر سنگریزه‌های با قطرهای مختلف بر زاویه میدان جریان ناپایدار نشان می‌دهد که ابعاد سنگریزه‌ها، تأثیر محسوسی بر زاویه میدان جریان ناپایدار نداشته است. باین‌حال برای یک دبی ثابت با افزایش قطر ذرات، عمق خروجی در پایین‌دست کاهش می‌یابد که با نتایج انصاری و همکاران (۱۳۹۵) مطابقت دارد. بررسی تأثیر شیب‌های مختلف پایین‌دست بر شرایط جریان خروجی از سد نشان می‌دهد که در یک دبی ثابت، با کاهش شیب دیواره پایین‌دست، زاویه میدان جریان ناپایدار و عمق خروجی جریان کاهش بسیاری داشته است. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته می‌توان نتیجه گرفت کاهش شیب به همراه افزایش قطر سنگریزه‌ها سبب کاهش هر چه بیشتر عمق جریان خروجی و زاویه میدان نسبت به شیب قبلی می‌شود که نتایج به‌دست‌آمده با نتایج صدقی اصل (۱۳۸۹) همخوانی دارد. در نسبت $Bc/H=2$ ، با افزایش قطر ذرات به ازای یک دبی ثابت، عمق جریان خروجی کاهش می‌یابد که با افزایش دبی جریان، تأثیر اندازه ذرات تا حدودی بیشتر شده است که این نتیجه با نتایج چاپک‌پور و همکاران (۱۳۹۵)، مطابقت دارد. در نسبت $Bc/H=2$ ، با افزایش عرض مدل عمق جریان خروجی نسبت به $Bc/H=1$ کاهش یافته است. علاوه بر این بر اساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان به این نتیجه رسید که در یک شیب ثابت، با افزایش عمق جریان، زاویه میدان افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش قطر ذرات، عمق جریان خروجی کاهش می‌یابد. این تغییرات در دبی‌های کم مشخص نیست اما در دبی‌های بالا به‌وضوح قابل مشاهده است.

منابع

- انصاری، اسحاق، صدقی اصل، محمد. و پرویزی، منصور. (۱۳۹۵). ارزیابی دقت کد کامپیوتری SEEP/W در برآورد دبی و نیمرخ سطح آب جریان درون محیط‌های متخلخل درشت دانه طویل. نشریه تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۷(۲)، ۳۶۲-۳۵۵.
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2016.58340>
- بازرگان، جلال، و شعاعی، سید محمد. (۱۳۸۹). تحلیل جریان‌های غیرداری در مصالح سنگریزه‌ای با استفاده از تئوری جریان‌های متغیر تدریجی. نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری - دانشکده فنی، ۴۴(۲)، ۱۳۹-۱۳۱.
https://journals.ut.ac.ir/article_20773.html
- بای‌پوردی، محمد. (۱۳۷۲). فیزیک خاک. چاپ پنجم، انتشارات دانشگاه تهران. <https://www.gisoom.com/book/1645119/>
- چاپک‌پور، جعفر، امیری تکدانی، ابراهیم، و صدقی اصل، محمد. (۱۳۹۵). برآورد ضرایب انتشار طولی رسوبات معلق درون محیط‌های متخلخل درشت دانه. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک - دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۲۳(۶)، ۳۳۲-۳۱۷.
<https://doi.org/10.22069/jwfst.2017.9347.2337>
- چهرآزاد، محمد رضا. (۱۳۹۳). راهکارهای کاهش میزان نشست در سدهای خاکی و تأثیر آن بر افزایش ایمنی سد سیرجان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه زابل، ایران.
- روشنفکر، علی، ظهیری، جواد، و کاشفی‌پور، سید محمود. (۱۳۸۹). ارائه روابطی جهت محاسبه ضرایب جریان غیرداری در محیط‌های سنگریزه‌ای. نشریه آب و خاک، ۲(۵)، ۸۶۳-۸۵۵.
<https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.5277>

- سرور، سالار. (۱۳۹۵). مدل سازی عددی نشست از زیر سد بتنی با استفاده از روش المان محدود. پایان نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه آموزش عالی غیاثالدین جمشید کاشانی، قزوین، ایران.
- صادق پور، امیرحسین، معجزی، محسن، و فدایی، میثم. (۱۳۸۷). بررسی و مقایسه گزینه‌های سدسنگریزه‌ای با هسته رسی و رویه بتنی (مطالعه موردی سد بازفت). دومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برقابی. دانشگاه کاشان، ایران. <https://civilica.com/doc/39112>
- صالحی، سعید، شایان نژاد، محمد، اخروی، سید سعید، و نجف پور، نوید. (۱۳۹۵). تعیین ابعاد بهینه زهکش پنجه ای برا اساس بهترین خط نشست در سدهای خاکی همگن با استفاده از مدل آزمایشگاهی. مجله پژوهش آب ایران ۱۰(۱)، ۱-۱۰. https://iwrj.sku.ac.ir/article_10452.html
- صدقی اصل، محمد، رحیمی، حسن، فرهودی، جواد، و محمدولی سامانی، جمال محمد. (۱۳۸۹). تجزیه و تحلیل پروفیل‌های جریان درون محیط‌های متخلخل درشت دانه. مجله پژوهش آب ایران، ۴(۲)، ۸۸-۸۱. https://iwrj.sku.ac.ir/article_11127.html
- قادری، کوروش، سامانی، جمال محمدولی، و عمادی، علیرضا. (۱۳۸۴). بررسی روابط مختلف تراوش غیر داری و مدل ریاضی محاسبه جریان در محیط‌های متخلخل مستغرق. پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران. <https://civilica.com/doc/3614/>
- گرد نوشهری، امیر، امیری تکلدانی، ابراهیم، و صدقی اصل، محمد. (۱۳۹۶). مطالعه توزیع فشار غیر هیدرواستاتیک جریان با سطح آزاد در یک محیط متخلخل سنگریزه‌ای. نشریه تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۸(۴)، ۹۲۸-۹۱۷. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2017.222788.667593>
- ولی پور گودرزی، فرزاد. (۱۳۷۳). کاربرد سنگریز در سازه‌های هیدرولیکی. چاپ اول، انتشارات امیرکبیر. <https://www.gisoom.com/book/172627>

References

- Ansari, E., Sedghi Asl, M., & Parvizi, M. (2016). Accuracy of SEEP/W model in predicting seepage line and flow rate through lengthy coarse porous medium. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(2), 355-362. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2016.58340>
- Baybordi, M. (1372). *Soil physics*. Fifth edition, Tehran University Press. <https://www.gisoom.com/book/1645119> [In Persian]
- Bazargan, J., & Shoaee, S.M. (2010). Analysis of Non-Darcy Flow in Rock Fill Materials Using Gradually Varied Flow Method. *Journal of Civil Engineering and Mapping*, 44(2), 131-139. https://journals.ut.ac.ir/article_20773.html [In Persian]
- Chabokpour, J., Amiri Tokaldany, E., & Sedghi Asl, M. (2017). Estimation of longitudinal dispersion coefficient of suspended sediments through the large porous Medias. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(6), 317-332. <https://doi.org/10.22069/jwfst.2017.9347.2337> [In Persian]
- Cheharazad, M.R. (2013). Solutions to reduce the amount of leakage in earthen dams and its effect on increasing the safety of Sirjan Dam. Master's thesis. University of Zabol, Iran. [In Persian]
- Gord-Noshahri, A., Amiri Tokaldany, E., & Sedghi-Asl, M. (2017). Study of non-hydrostatic pressure distribution of free surface flow in a rockfill porous media. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(4), 917-928. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2017.222788.667593> [In Persian]
- Hansen, D. (1992). *The behaviour of flow through rockfill dams*, University of Ottawa (Canada). <http://dx.doi.org/10.20381/ruor-15444>
- Hansen, D., & Roshanfekr, A. (2012). Assessment of potential for seepage-induced unraveling failure of flow-through rockfill dams. *ASCE International Journal of Geomechanics*, 12(5), 573-560. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000145](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000145)

- Hansen, D., Garga, V. K., & Townsend, D. R. (1995). Selection and application for a 1-dimensional non-Darcy flow equation for 2-dimensional flow through rockfill embankments. *Geotech. J*, 32, 223–232. <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/t95-025>
- Hansen, D., Zhong, W. Z., & Yoon Han, S.Y. (2005). Hydraulic performance and stability of coarse rockfill deposits. *Proceedings of The Institution of Civil Engineers-water Management*, 158, 163–175. <http://dx.doi.org/10.1680/wama.2005.158.4.163>
- Qaderi, K., Samani, J. M. A., & Emadi, A. (1384). Investigating different relations of non-Darcy seepage and mathematical model for calculation of flow in submerged porous media. The fifth hydraulic conference of Iran. Shahid Bahonar University, Kerman, Iran. <https://civilica.com/doc/3614/> [In Persian]
- Roshanfekar, A. (2013). Contributions to the hydraulics of flow-through rockfill structures. Ph.D. thesis, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia. https://central.bac-lac.gc.ca/.item?id=TC-NSHD-37567&op=pdf&app=Library&oclc_number=1032915066
- Roshanfekar, A., Zahiri, J., & Kashefipoor, M. (2010). Presenting Some Equations for Calculating the Non-Darcy Flow Coefficients in Rockfills. *Water and Soil*, 24(5), 855-863. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.5277> [In Persian]
- Sadeghpour, A., Mojezi, M., & Fadaei, M. (2008). Investigating and comparing gravel dam options with clay core and concrete top (case study of Bazfat Dam). The second national conference on dams and electric power plants. Kashan University, Iran. <https://civilica.com/doc/39112> [In Persian]
- Salehi, S., Shayannejad, M., Okhravi, S. S., & Najafpour, N. (2016). Determination of the optimum size of a toe drain based on the best phreatic line in homogeneous earth dams by using vitro model. *Iranian Water Researches Journal*, 10(1), 1-10. https://iwrj.sku.ac.ir/article_10452.html [In Persian]
- Sarvar, S. (2015). Numerical modeling of leakage from under concrete dam using finite element method. Master's thesis, Ghiyasuddin Jamshid Kashani Institute of Higher Education, Qazvin, Iran. [In Persian]
- Sedghi-Asl, M., Rahimi, H., Farhoudi, J., & samani, J. M. V. (2010). Analysis of the Water Surface Profiles through Coarse Porous Medium. *Iranian Water Researches Journal*, 4(2), 81-88. https://iwrj.sku.ac.ir/article_11127.html [In Persian]
- Stephenson, D. (1979). *Rockfill in Hydraulic Engineering*. Elsevier Scientific, Amsterdam. <https://shop.elsevier.com/books/rockfill-in-hydraulic-engineering/stephenson/978-0-444-41828-9>
- Valipour Guderzi, F. (1994). Application of gravel in hydraulic devices. First edition, Amir Kabir Publications. <https://www.gisoom.com/book/172627> [In Persian]