

## مطالعه تجربی ضریب دبی شیبار بالادست سد سنگریزه‌ای با رویه بتنی (با استفاده از مدل‌های هیدرولیکی)

زهرا رحیمی نژاد<sup>۱</sup>، سید حبیب موسوی جهرمی<sup>۲\*</sup>، امیر خسرو جردی<sup>۳</sup>، حسین حسن پور درویشی<sup>۴</sup>، سید جمال محمودلی سامانی<sup>۵</sup>

۱) دانشجوی دکتری، گروه مهندسی سیستم‌های کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲\*) استاد بازنشسته گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران

\* نویسنده مسئول مکاتبات: [h-mousavi@srbiau.ac.ir](mailto:h-mousavi@srbiau.ac.ir)

۳) استادیار گروه مهندسی سیستم‌های کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۴) دانشیار، گروه مهندسی و مدیریت منابع آب؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ واحد شهر قدس؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ تهران؛ ایران

۵) استاد؛ گروه علوم و مهندسی آب - سازه‌های آبی؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ دانشکده کشاورزی؛ تهران؛ ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۶

### چکیده:

با در نظر گرفتن نقشی که سدهای ناهمگن می‌توانند در مهار سیلاب و همچنین ذخیره آب داشته باشند توجه به هیدرولیک جریان در آنها از اهمیت زیادی برخوردار است و از طرفی طراحی صحیح سدهای سنگریزه‌ای مستلزم بررسی دقیق رفتار جریان در این سدها می‌باشد. در این راستا در تحقیق حاضر با مطالعه بر روی سدهای سنگریزه‌ای با رویه بتنی (CFRD)، از طریق ایجاد شکافهای مختلف بر روی رویه بتنی سد در مدل آزمایشگاهی، رفتار نفوذ آب درون بدنه سد بررسی شد. ترکهای عرضی دال بتنی روی سدهای سنگریزه‌ای با رویه بتنی (CFRD) و جریان آب و نحوه کنترل آن در سدهای سنگریزه‌ای یکی از مهمترین مسائلی است که در طراحی سدها مورد توجه متخصصین قرار می‌گیرد. تعیین ضریب دبی عبوری از شیبار جهت تخمین دبی عبوری امری مهم و اجتناب ناپذیر می‌باشد. هدف از این تحقیق محاسبه ضریب دبی شیبار مستطیلی واقع در رویه بتنی بالادست سد سنگریزه‌ای با رویه بتنی (CFRD) در هر دو حالت شرایط مستغرق و آزاد می‌باشد. پارامترهای هندسی متغیر در این مطالعه شامل ارتفاع شیبار از بستر، زاویه شیبار واقع شده در رویه بالادست نسبت به افق و پارامترهای هیدرولیکی متغیر شامل ارتفاع هد آب بالادست سد سنگریزه‌ای می‌باشند. در کل ۵۰ آزمایش مختلف انجام و وارد محاسبات گردید. در پایان با استفاده از آنالیز ابعادی و آنالیز معادلات غیرخطی دو معادله برای پیش بینی ضریب دبی عبوری از شیبار بالادست سد سنگریزه‌ای با رویه بتنی در دو حالت آزاد و مستغرق توسعه داده شد. معادلات توسعه داده شده تطابق خوبی (ضریب همبستگی ۰/۹۸۸ (جریان آزاد) و ۰/۹۸۴ (جریان مستغرق)) با نتایج آزمایشگاهی دارند. همچنین تطابق خوبی بین دبی مشاهداتی و محاسباتی با استفاده از معادله پیش بینی شده (۰/۹۹۲ برای جریان آزاد و ۰/۹۸۹ برای جریان مستغرق) وجود دارد.

**کلید واژه‌ها:** سد سنگریزه‌ای با رویه بتنی (CFRD)؛ شیبار مستطیلی؛ ضریب دبی روزنه؛ ضریب دبی شیبار

### مقدمه

اجرا می‌شود، مانع از نفوذ جریان آب به داخل بدنه سد می‌شود. حتی اگر آب در اثر آسیب دیدگی دال رویه به درون سد نفوذ کند، بدلیل اینکه آب را آزادانه زهکشی

سد سنگریزه‌ای با رویه بتنی (CFRD) سد پرکاربردی است که از طریق دال رویه بتنی، که روی شیب بالادست

نشت نشان داد. او میزان نشت مربوط به ترک‌های به عرض ۱، ۱۰ و ۱۰۰ میلی‌متر را محاسبه نمود و نتایج نشان داد که عرض ترک تاثیر کمی روی نشت کلی دارد و میزان نشت کلی متاثر از نفوذپذیری ناحیه انتقالی می‌باشد.

از آنجا که رفتار نفوذ و جریان آب در بدنه سد سنگریزه‌ای با بدنه ناهمگن مورد مطالعه قرار نگرفته است لذا این تحقیق موردی با هدف بررسی رفتار نفوذ و نشت به صورت ترکیبی از لنز بتنی و سنگریزه با استفاده از مدل آزمایشگاهی انجام شده است. برای تعیین دبی عبوری از شیارهای واقع بر روی دال بتنی بالادست سد سنگریزه‌ای نیازمند تعیین ضریب دبی عبوری از شیار می‌باشیم.

بازشدگی در یک صفحه یا تیغه که قسمت بالای آن در زیر سطح آب بالادست قرار گرفته باشد را شبه روزنه می‌نامند. و لذا بررسی هیدرولیک روزنه قابل تعمیم برای شیارها مورد توجه این تحقیق می‌باشد. اگر جریان روزنه بطور آزادانه در هوا تخلیه شود، روزنه آزاد و در صورتی که در زیر آب تخلیه شود روزنه مستغرق می‌نامند. روزنه از جمله وسایلی است که برای اندازه‌گیری جریان در لوله‌ها و کانال‌های آبیاری و زهکشی از آن استفاده می‌شود و می‌تواند دارای اشکال مختلف دایره‌ای، راست گوشه و غیره باشد (Bos, 1989).

تعداد زیادی از محققین مطالعات گسترده‌ای بر روی روزنه‌های آزاد و مستغرق انجام داده‌اند و روابط زیادی نیز جهت تعیین ضریب دبی عبوری از روزنه‌ها ارائه گردیده است. از جمله Swamee و همکاران (۱۹۹۸) با این استدلال که جریان عبوری از سرریز و جریان عبوری از زیر دریچه کشویی نوعی خاص از روزنه می‌باشد معادله‌ای را برای دبی عبوری از روزنه‌های بزرگ مستطیلی را ارائه داده‌اند. Wu و همکاران (۲۰۰۲) نشان دادند که ضریب دبی روزنه‌ای تابعی از عدد رینولدز می‌باشد. Prohaska و همکاران (۲۰۱۰) جریان عبوری از روزنه لوله‌های رایزر را بررسی نمودند و نشان دادند که

می‌کنند، پایداری سد سنگریزه‌ای حفظ می‌شود. در نتیجه، این مکانیزم کنترل نفوذ اجازه افزایش تدریجی فشار آب حفره‌ای در بدنه سد را نمی‌دهد. سدهای سنگریزه‌ای رویه بتنی مزایای متعدد دیگری نیز دارند که از آن جمله می‌توان به امکان استفاده از مصالح بومی، مقرون به صرفه بودن، سازگاری زیاد، طراحی و ساخت ساده‌تر، مدت ساخت کوتاه‌تر و پایداری بیشتر در مواقع وقوع زلزله اشاره کرد (Xing et al., 2006). CFRD ها همچنین بدلیل مزایایی از قبیل سازگاری مناسب با توپوگرافی، ژئولوژی، آب و هوا، امکان استفاده از مصالح بومی، مقرون به صرفه بودن، سازگاری زیاد، طراحی و ساخت ساده‌تر، مدت ساخت کوتاه‌تر و پایداری بیشتر در هنگام وقوع زلزله، طی دهه‌های اخیر پیشرفت سریعی داشته‌اند.

Xing et al., 2006; choo et al., 2013; Gudarzi and Mahinroosta, 2012; szostak\_Chrganowski et al., 2008)

بدین ترتیب اهمیت نفوذ و کنترل آن در سدهای سنگریزه‌ای با رویه بتنی مطرح می‌شود که در این زمینه مطالعات زیادی صورت گرفته است.

Seo et al. (2009) رفتار سدهای سنگریزه‌ای با رویه

بتنی را در مرحله اولین آبگیری مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که تغییر شکل رویه سد بیش از آنکه تحت تاثیر سختی رویه سد باشد، تحت تاثیر سختی ناحیه انتقالی می‌باشد.

Choo et al (2013) رفتار نفوذپذیری ناحیه زهکش

در سد شنی رویه بتنی را مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد ناحیه زهکش سد شنی رویه بتنی آب نفوذی را در مدت زمان کوتاهی به خارج از بدنه سد تخلیه می‌کند.

Gudarzi و Mahinroosta (2012) تاثیر ارتفاع ترک

در رویه بتنی را روی توزیع فشار آب در بدنه سدهای سنگریزه‌ای را با استفاده از مدل عددی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که خط سطح آب زیر رویه بتنی از نقطه‌ای بالاتر از سطح ترک آغاز می‌شود.

Sherard (1985) تاثیر نفوذپذیری ناحیه انتقالی را بر

معادلات رگرسیونی خطی و توانی برای محاسبه ضریب دبی عبوری ارائه دادند.

Abdelhaleem (2017) جریان مستغرق زیر دریچه قطاعی با و بدون آستانه را مورد بررسی قرار داد. تحلیل نتایج نشان داد ضریب دبی با افزایش ارتفاع آستانه به میزان کمی افزایش می‌یابد. افزایش ارتفاع آستانه، کوچک ترین عمق برگشت آب (back water depth) و طول پرش مستغرق و بزرگ‌ترین افت انرژی را ایجاد می‌کند.

Salmasi و همکاران (۲۰۱۹) اثر آستانه را بر ضریب دبی دریچه‌های شعاعی (قطاعی) در شرایط جریان آزاد را مورد مطالعه قرار دادند. از اشکال مختلف آستانه شامل دایره‌ای، نیم‌دایره‌ای، مستطیلی و ذوزنقه‌ای استفاده شد و پارامترهای متغیر هندسی آستانه‌ها شامل طول، شیب بالادست و پایین‌دست و ارتفاع آستانه بود. آنها با استفاده از دو مدل تاثیر محل آستانه را بر روی ضریب دبی عبوری (CD) بررسی نمودند. در مدل اول دریچه باز و آستانه در بالادست دریچه قرار داشت. در مدل دوم آستانه زیر دریچه قرار گرفت. نتایج نشان داد در حالت اول وقتیکه دریچه قطاعی باز است و آستانه در بالادست قرار دارد، آستانه به عنوان مانع عمل می‌کند و CD را کاهش می‌دهد. اما در مدل دوم محل آستانه تاثیر مثبتی بر روی CD دارد. در حالت دوم آستانه نیم‌دایره‌ای عملکرد بهتری دارد و CD را در مقایسه با حالت بدون آستانه، ۳۰٪ افزایش می‌دهد. همچنین آستانه‌های مستطیلی و ذوزنقه‌ای همیشه CD را افزایش می‌دهند. در این آستانه‌ها، افزایش CD به نسبت طول آستانه به ارتفاع آن بستگی دارد (L/Z). و مقدار اندک L/Z ضریب دبی را ۱۳٪ افزایش می‌دهد. و در آخر برای تخمین ضریب دبی آستانه دایره‌ای و نیم‌دایره‌ای دو معادله ارائه نمودند.

ترک‌های عرضی که در عرض سدهای سنگریزه‌ای با دال بتنی اتفاق می‌افتند موجب جریان آب به درون محیط متخلخل سد می‌گردند. تعیین دبی عبوری از شیار جهت درک میزان نفوذ آب به درون سد، نیازمند برآورد ضریب

ضریب دبی عبوری از روزنه تابعی از هد روی روزنه و ارتفاع روزنه از کف مخزن می‌باشد که با نسبت قطر روزنه به قطر لوله ریزر تناسب دارد و با افزایش نسبت قطر روزنه به قطر لوله ریزر، ضریب دبی عبوری از روزنه کاهش می‌یابد. Nicholas و Bobai (2018) ضریب دبی عبوری از روزنه‌های دایره‌ای و مستطیلی را تخمین زدند و نشان دادند در شرایط یکسان ضریب دبی عبوری از روزنه مستطیلی بیشتر از ضریب دبی روزنه دایره‌ای می‌باشد. تعداد زیادی از محققین مطالعات گسترده‌ای بر روی دبی عبوری از روزنه‌های مختلف انجام داده‌اند.

همچنین در زمینه‌ای مشابه مطالعاتی تحقیقات زیادی روی دریچه‌های با آستانه انجام شده است و روابطی جهت تعیین ضریب دبی عبوری از روزنه ارائه نموده‌اند. Alhamid (1998) آستانه‌های واقع شده در زیر دریچه‌ها عمدتاً برای کاهش ارتفاع دریچه و در نتیجه وزن آن استفاده می‌شوند. آستانه زیر دریچه‌ها، ضریب دبی عبوری را افزایش می‌دهند که این افزایش بستگی به ابعاد آستانه دارد. همچنین Alhamid (1998) رابطه رگرسیونی جهت تعیین ضریب دبی عبوری از زیر دریچه‌های کشویی با آستانه در حالت جریان آزاد را ارائه نمودند.

Sarhan (2013) دبی عبوری از زیر دریچه کشویی با آستانه منشوری را مورد بررسی قرار داد و نتایج نشان داد که پارامترهای بی بعد زیادی بر روی ضریب دبی تاثیر دارند و با افزایش ارتفاع آستانه‌های منشوری ضریب دبی عبوری افزایش و با کاهش بازشدگی دریچه، ضریب دبی عبوری کاهش می‌یابد. در آخر رابطه ضریب دبی عبوری برای دریچه کشویی با آستانه منشوری را با ضریب همبستگی ۰/۹۹۳ ارائه نمود.

Shaker (2014) تحلیل جریان مستغرق زیر دریچه عمودی با آستانه پله‌ای را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌ها را با تغییر ارتفاع پله آستانه‌ها و بازشدگی‌های مختلف دریچه انجام دادند و اثر مثبت آستانه‌های پله‌ای روی عملکرد دریچه کشویی عمودی دیده شد. و در آخر

پارامترهای بی‌بعد قابل تعمیم برای سدهای کوچک و بزرگ می‌باشند. در اکثر تحقیقات نشان داده شده است که ضریب دبی عبوری از روزنه در شرایط آزاد و مستغرق تابعی از ویژگی‌های جریان و مشخصات هندسی روزنه می‌باشد. ویژگی‌های جریان شامل عمق آب بالادست و پایین‌دست و شرایط پایین‌دست جریان می‌باشد. و مشخصات هندسی شامل ارتفاع شیار از کف بستر کانال، ارتفاع بازشدگی شیار، عرض شیار و شکل مقطع شیار می‌باشد. در این تحقیق تاثیر زاویه شیار نسبت به افق هم بدلیل روان‌ترکردن جریان با توجه به شرایط پایین‌دست نیز به عنوان جزئی از متغیرهای هندسی روزنه مورد بررسی قرار گرفت. و از آنجایی که شرایط پایین‌دست شیار نیز بر روی ضریب دبی عبوری از شیار تاثیر می‌گذارند و با توجه به اینکه در این تحقیق شرایط پایین‌دست، محیط متخلخل می‌باشد نسبت D50 متوسط معادل دانه‌بندی مصالح پایین‌دست نیز در محاسبات در نظر گرفته شد. و تاثیر شرایط پایین‌دست با و بدون محیط متخلخل نیز بررسی گردید. همچنین تحقیقات Samani و همکاران (۲۰۰۳) و Samani و همکاران (۲۰۰۴) نشان داد که هیدرولیک جریان آب در محیط متخلخل درشت دانه پاره سنگی با قطر دانه‌بندی مصالح در محدوده ۲ سانتیمتر به بالا، مشابه همدیگر عمل نموده و لذا سایز دانه‌بندی تاثیری بر پدیده هیدرولیکی ندارد و پدیده‌های هیدرولیکی در این رنج دانه‌بندی، قابلیت تعمیم‌دادن به دانه‌بندی‌های بزرگتر و پاره‌سنگ‌ها و همچنین سدهای بزرگ را دارا می‌باشند. بنابراین نتایج این تحقیق قابل تعمیم به سایزهای واقعی و شرایط واقعی سدهای CFRD می‌باشند.

سد سنگریزه ای با رویه بتنی نماشیر در استان کرمان و در ۸۰ کیلومتری جنوب شهرستان بم در نزدیکی روستای انجیرک در منطقه‌ای بین طول جغرافیایی ۵۷ درجه و ۵۸ دقیقه و عرض جغرافیایی ۲۸ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۲۸ درجه و ۳۹ دقیقه واقع گردیده است. هدف از اجرای این طرح تامین آب مورد نیاز ۷۰۰۰ هکتار از

دبی عبوری از شیار می‌باشد. هدف از این تحقیق محاسبه ضریب دبی شیار مستطیلی واقع در رویه بتنی بالادست سد سنگریزه‌ای (CFRD) در هر دو حالت شرایط مستغرق و آزاد می‌باشد، که تاکنون محاسبه ضریب دبی عبوری از شیار با شرایط پایین‌دست محیط متخلخل صورت نگرفته است. برای اولین بار در این مطالعه تعیین ضریب دبی عبوری از شیار با شرایط پایین‌دست محیط متخلخل ناهمگن مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور یک مدل آزمایشگاهی سد سنگریزه‌ای با رویه بتنی با دو ناحیه ناهمگن ساخته شد و یک رویه بتنی در بالادست سد با شیارهای مختلف، جهت تعیین ضریب دبی عبوری از شیار تعبیه شد. پارامترهای هندسی متغیر در این مطالعه شامل ارتفاع محل شیار از بستر و زاویه شیار واقع شده در رویه بالادست نسبت به افق و پارامترهای هیدرولیکی متغیر شامل ارتفاع هد آب بالادست سد سنگریزه‌ای می‌باشند. در کل ۵۰ آزمایش مختلف انجام و وارد محاسبات گردید. همچنین تاثیر تغییر زاویه شیار و وجود و عدم وجود محیط متخلخل در پایین دست نیز مقایسه شد. سرانجام با استفاده از آنالیز ابعادی و آنالیز معادلات غیرخطی دو فرمول برای پیش بینی ضریب دبی عبوری از شیار بالادست سد سنگریزه‌ای با رویه بتنی در دو حالت جریان آزاد و مستغرق ارائه خواهد شد.

### مواد و روش‌ها

به شرح آنالیز ابعادی ضریب دبی عبوری از شیار بالادست سد سنگریزه‌ای، مدل آزمایشگاهی، مصالح مورد استفاده و دانه‌بندی آن، توضیح اجزاء مدل فیزیکی و روش انجام آزمایش‌ها پرداخته می‌شود.

- آنالیز ابعادی CD شیار در بالادست سد سنگریزه‌ای: جریان از یک شیار مانند یک مجرای مستطیلی شکل و شبیه روزنه عمل می‌کند و اندازه شیار و کوچک و بزرگ بودنش اهمیتی در هیدرولیک پدیده ندارد. و

عرض شیار ثابت در نظر گرفته شدند. شکل ۱ طرح شماتیک شیار تعبیه شده در رویه بالادست سد CFRD استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. همچنین پارامترهای موثر مورد استفاده در جدول شماره ۱ نشان داده شده‌اند.

برای تعیین ضریب دبی عبوری از شیار، تئوری  $\Pi$  باکینگهام بکار گرفته شد. رابطه بین پارامترهای موثر را می‌توان با رابطه ۱ نوشت:

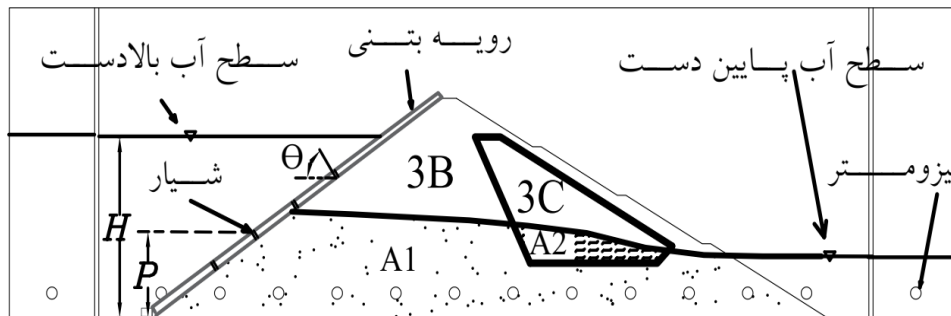
$$CD = f(\nu, H, \rho, \Delta h, \mu, b, d, P, A_1, A_2, D50_1, D50_2, \tan \theta) \quad (1)$$

که  $\nu$  سرعت متوسط عبوری آب از شیار؛  $H$  عمق آب بالادست؛  $\rho$  چگالی آب؛  $\Delta h$  اختلاف سطح آب دو طرف شیار (در حالت مستغرق؛ اختلاف سطح آب دو طرف شیار، در حالت آزاد؛ اختلاف سطح آب بالادست و مرکز شیار)؛  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی آب؛  $b$  عرض روزنه؛  $d$  ارتفاع بازشدگی روزنه؛  $P$  ارتفاع روزنه از کف بستر کانال؛  $A_1$  سطح خیس شده مصالح  $3B$ ؛  $A_2$  سطح خیس

اراضی پایین دست سد، تغذیه قنوات، تولید برق و کنترل سیلاب می‌باشد. ارتفاع از پی سد ۱۱۰ متر و طول و عرض تاج سد به ترتیب ۳۹۰ و ۱۰ متر می‌باشند.

برای ارتفاع بازشدگی شیار با توجه به ارتفاع سد ۳۶ سانتیمتری مورد استفاده در این تحقیق، ارتفاع بازشدگی شیار به نسبت ۵ هزارم معادل ۲ میلی‌متر انتخاب گردید (برای صرف نظر کردن از اثر مقیاسی) که با توجه به ارتفاع سد واقعی ۱۱۰ متر، چیزی حدود نیم متر در واقعیت می‌باشد که این ارتفاع ترک به واقعیت نزدیک می‌باشد. (بدلیل رینولدزهای بالا و متلاطم بودن جریان، کشش سطحی تاثیرگذار نیست. (Knauss و Alpaos (1989) and Ghetti (1984)

در نتیجه پارامترهای ارتفاع شیار از کف بستر کانال، ارتفاع بازشدگی شیار و عرض شیار، زاویه شیار نسبت به افق و  $D50$  متوسط معادل دانه بندی مصالح پایین دست (تخلخل محیط) به عنوان پارامترهای تاثیر گذار بر روی ضریب دبی عبوری از شیار در نظر گرفته شد و بدلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی ارتفاع بازشدگی شیار و

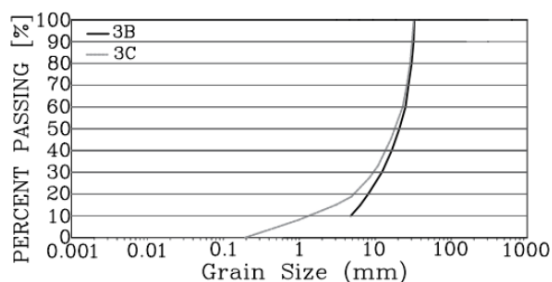


شکل ۱. طرح شماتیک شیار تعبیه شده در رویه بالادست سد CFRD

جدول ۱. لیست پارامترهای مورد استفاده

سمبل	پارامتر	سمبل	پارامتر
d	ارتفاع بازشدگی شیار	H	عمق آب بالادست
P	ارتفاع روزنه از کف بستر کانال	$\nu$	سرعت متوسط عبوری آب از شیار
$A_1$	سطح خیس شده مصالح 3B	$\Delta h$	اختلاف سطح آب بالادست و پایین دست شیار
$A_2$	سطح خیس شده مصالح 3C	b	عرض شیار
$D50_2$	قطر متوسط دانه بندی مصالح 3C	$D50_1$	قطر متوسط دانه بندی مصالح 3B
Q	دبی عبوری از سد	$\theta$	زاویه شیار نسبت به افق

مصالح مورد استفاده برای ساخت مدل آزمایشگاهی مشابه سدهای سنگریزه‌ای با رویه بتنی انتخاب شد، که در ادامه مراحل ساخت با جزئیات بیان می‌شود. در شکل ۲ دانه بندی مقطع سد ساخته شده در آزمایشگاه جهت انجام آزمایش‌ها نشان داده شده است.



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مصالح سنگریزه بدنه سد و مصالح درشت‌دانه در سد در مدل آزمایشگاهی

**منابع قرضه مورد استفاده در تحقیق:**

در این تحقیق برای ساخت مدل آزمایشگاهی ابتدا به جمع‌آوری دانه‌بندی مورد نظر پرداخته شد. مدل سد سنگریزه‌ای از دو منطقه، 3B خاگریز اصلی و 3C خاگریز فرعی تشکیل می‌شود. ابتدا با استفاده از الک‌های استاندارد مصالح مورد نظر تهیه شد. شکل ۳ مصالح دو مقطع تهیه شده (الف. 3B و ب. 3C) را نشان می‌دهد. ضرایب تخلخل نمونه‌های 3B و 3C برابر با ۰/۷۴ و ۰/۷۲ درصد می‌باشد.



الف. مصالح 3B



ب. مصالح 3C

شکل ۳. مصالح سنگریزه بدنه سد (الف. 3B) و مصالح درشت دانه در سد (ب. 3C)

شده مصالح 3C؛ D50<sub>1</sub> قطر متوسط دانه‌بندی مصالح 3B؛ D50<sub>2</sub> قطر متوسط دانه‌بندی مصالح 3C؛  $\tan \theta$  شیب زاویه روزنه نسبت به افق و با در نظر گرفتن رابطه زیر جهت ( $\overline{D50}$ ) (قطر متوسط معادل دانه‌بندی مصالح):

$$\overline{D50} = \frac{A1 \times D50_1 + A2 \times D50_2}{A1 + A2} \quad (2)$$

طبق تئوری باکینگهام و ملاحظه  $V, H, \rho$  به عنوان متغیرهای تکراری، پارامتر بی‌بعد زیر بدست می‌آید و به منظور بی‌بعدسازی ( $\overline{D50}/b$ ) را می‌توان بصورت رابطه ۳ نوشت:

$$CD = f_2 (v / (V \cdot H), d/H, \Delta h/H, P/H, b/H, (\overline{D50}/b), \tan \theta) \quad (3)$$

که  $v$  لزجت سینماتیکی می‌باشد و یک فرم کاهش یافته از رابطه ۳ را می‌توان بصورت رابطه ۴ نوشت:

$$CD = f_3 (Re, \Delta h/H, P/H, b/H, (\overline{D50}/b), \tan \theta) \quad (4)$$

و با توجه به ثابت بودن مقدار  $b$  در کل آزمایش‌ها، در نتیجه پارامتر  $b/H$  نیز حذف می‌گردد و همچنین با توجه به اینکه در تمامی آزمایش‌ها آب با دمای ۲۰ درجه استفاده شده است و دما و لزجت ثابت است و اثرات ویسکوزیته قابل صرفنظر کردن است، پارامتر  $Re$  نیز بدلیل آشفته بودن جریان و همچنین مقادیر  $\Delta h$  و  $h_1$  (اختلاف سطح آب بالادست و مرکز شیار) بزرگتر از ۵ سانتیمتر، قابل صرفنظر کردن می‌باشد (De Martino and Ragone (1984)، در نتیجه این پارامتر حذف و رابطه ۴ را می‌توان به فرم زیر نوشت:

$$CD = f_4 (\Delta h/H, P/H, (\overline{D50}/b), \tan \theta) \quad (5)$$

**مدل آزمایشگاهی:**

در این تحقیق یک مدل آزمایشگاهی سد سنگریزه‌ای با رویه بتنی مشابه سد نرماشیر بم در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران (مجمع آزمایشگاهی شیخ بهایی) ساخته شد و آزمایش‌های مختلفی جهت تعیین ضریب دبی عبوری از شیار بالادست سد سنگریزه‌ای با رویه بتنی انجام گردید.

**- مخزن زهکش:**

به منظور انجام آزمایش‌ها از یک تانک زهکش استفاده شد. یک مدل آزمایشگاهی مشابه سد مذکور در مخزن زهکشی به عرض ۲۰ سانتی‌متر، طول ۱۴۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر ساخته شد.

این مخزن از ۱۴ پیژومتر که ۲ تا در مخازن چپ و راست و ۱۲ عدد در بین آنهاست تشکیل شده است. و دو صفحه مشبک (فیلتر) نیز برای جلوگیری از ورود مواد درشت دانه بین مخازن و تانک در آن تعبیه شده است. یک صفحه پیژومتری نیز در آن برای مشاهده فشار در فواصل مختلف قرار گرفته است. از مخزن زهکش برای بررسی تراوش در محیط متخلخل استفاده می‌شود. شکل ۱ محل قرار گرفتن پیژومترها و مقطع سد را نشان می‌دهد. ابعاد کلی مخزن زهکش (۱۷۸×۲۰×۷۰ سانتی-متر مکعب) می‌باشند با در نظر گرفتن طول مخازن چپ و راست (هر کدام ۱۷ سانتی‌متر)، طول مخزن زهکش مورد استفاده جهت مدلسازی ۱۴۴ سانتی‌متر است. با توجه به ایجاد تشکیل رواناب، دو طرف سد به میزان ۱۰ سانتی‌متر به عنوان فضای آزاد اعمال شد و مابقی برای مدلسازی استفاده شد. که با آزاد گذاشتن ۲۰ سانتی‌متر برای دو طرف ۱۲۴ سانتی‌متر طول برای مدلسازی سد مورد نظر مورد استفاده قرار گرفت. شیب بالادست و پایین دست آن به ترتیب  $V:1.7 H:1$  و  $V:1.8 H:1$  می‌باشد.



شکل ۴. الف



شکل ۴. ب



شکل ۴. ج



شکل ۴. د

شکل ۴. مراحل ساخت مدل آزمایشگاهی. (۴.الف. ترسیم مقطع مورد نظر ۴.ب. ریختن لایه به لایه، دانه بندی مورد نظر ۴.ج. اعمال لنز بتنی سد سنگریزه‌ای از ورق پلکسی و ایجاد شکاف و ۴.د. تست آب بندی صفحه پلکسی).

**- مراحل ساخت مدل آزمایشگاهی:**

ابتدا مقطع مورد نظر ترسیم گردید. (۴. الف) و سپس لایه به لایه، دانه‌بندی مورد نظر با توجه به مقطع سد ریخته شد. (۴. ب) و هر لایه تقریباً به اندازه ۴ - ۵ سانتی‌متر ریخته شد و با چکش پلاستیکی کوبیدگی انجام گردید ارتفاع سد ۳۶ سانتی‌متر می‌باشد. (۴. ج) سپس برای اعمال لنز بتنی سد سنگریزه‌ای از ورق پلکسی با قطر ۰/۵ سانتی‌متر استفاده شد. و برای نفوذ آب و اندازه‌گیری خط فریاتیکی، روی صفحه پلکسی ۴ شکاف تصادفی ایجاد شد. بعد از گذاشتن صفحه پلکسی از

**- آزمایش‌ها:**

پس از گذاشتن صفحه پلکسی بالادست و آزمودن آب‌بندی دستگاه آزمایش‌ها انجام شد. برای شبیه‌سازی جریان و نفوذ آب در درون سد، شیارهایی روی دال رویه مدل در محل‌های از پیش تعیین شده، ایجاد شد. شیارهای تعبیه شده بر روی صفحه بالادست با چسب آکوارיום مسدود شد و برای هر آزمایش شیار مورد نظر باز گردید. آب بوسیله پمپ و شیرآب کمکی، در سمت بالادست سد که به دیواره مخزن متصل شده بود، وارد بالادست شد. برای هر آزمایش ابتدا سطح آب بالادست در یک تراز ثابت نگه‌داشته شد بعد از گذشت زمان سی دقیقه، سپس بالاترین خط نشت به وسیله ۱۲ پیژومتر که در تانک زهکش نصب شده بودند، اندازه‌گیری شد. دو پیژومتر در وسط مخازن و بقیه در تانک زهکش با فواصل ۱۱ سانتیمتری یکدیگر نصب شده‌اند همچنین فاصله پیژومترهای ابتدایی که در تانک نصب شده است از صفحه مشبک ۱۱/۵ سانتی‌متر بوده است. در ضمن در هر آزمایش اندازه‌گیری دبی توسط دبی‌سنج مغناطیسی با دقت ۰/۵ درصد انجام گردیده است. شکل ۵ مدل آزمایشگاهی ساخته شده جهت آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۵. مدل آزمایشگاهی ساخته شده

قرارگیری شیار (با تراز ارتفاعی ۸،۵، ۱۳/۵، ۱۸/۵، ۲۳/۵ سانتی‌متر) و ۹ ارتفاع آب بالادست سد و با زاویه ثابت شیار نسبت به افق (۶۰ درجه) و میزان گشودگی ثابت شیار (۲ میلی‌متر) انجام شد جزئیات بیشتر در جدول شماره ۲ ارائه شده است. سپس برای مطالعه اثر زاویه شیار نسبت به افق، در دو محل مختلف قرارگیری شیار نسبت به کف (۱۳/۵ cm و ۲۳/۵ cm) با زاویه متفاوت شیار نسبت به افق (۰/۵ درجه) آزمایش‌ها تکرار شد و نتایج در ادامه آورده شده است. و در نهایت ۴ آزمایش در حالت آزاد که مربوط به جریان ریزشی بودند و مقادیر  $h_1$  (اختلاف سطح آب بالادست و مرکز شیار) و یا  $\Delta h$  اندازه‌گیری شده کمتر از ۵/۵ سانتی‌متر بوده‌اند بنا به توصیه مراجع مختلف (Knauss and Alpaos 1989) و (Ghetti 1984) به دلیل پرهیز از اثرات کشش سطحی و لزجت حذف گردید و در تجزیه و تحلیل داده‌ها منظور نشده‌اند، مابقی اطلاعات (۵۰ آزمایش) جمع‌آوری شد. در جدول شماره ۲ محدوده تغییرات پارامترهای مورد بررسی در تحقیق نشان داده شده است.

جدول ۲. محدوده تغییرات پارامترهای مورد بررسی در تحقیق

پارامترها	محدوده تغییرات
عمق آب بالادست (H)	۲۵۷-۳۵۷ (میلی‌متر)
ضخامت شیار (b)	۱۸۴ (میلی‌متر)
ارتفاع بازشدگی شیارها (d)	۲ (میلی‌متر)
قطر متوسط دانه‌بندی مصالح 3B (D50 <sub>1</sub> )	۲/۱ (میلی‌متر)
قطر متوسط دانه‌بندی مصالح 3C (D50 <sub>2</sub> )	۱/۸ (میلی‌متر)
زاویه شیار نسبت به افق (θ)	۰/۵ و ۶۰ (درجه)
ارتفاع شیار از کف بستر کانال (P)	۲۳۵-۱۵ (میلی‌متر)

**نتایج و بحث**

برای مطالعه تاثیر محیط متخلخل موجود در پایین‌دست شیار، ارتفاع محل شیار و زاویه شیار و سایر پارامترهای هیدرولیکی موثر بر روی ضریب CD، در مجموع ۵۰ آزمایش برای بدست آوردن ارتفاع پیژومتریک و دبی خروجی انجام و اطلاعات مورد نظر برداشت و

به منظور تحقیق تاثیر پارامترهای مختلف روی ضریب دبی جریان عبوری از شیار در کل ۵۴ آزمایش انجام گردید. آزمایش‌ها با تغییر در محل قرارگیری شیار و زاویه شیار نسبت به افق و تغییر ارتفاع سطح آب بالادست انجام شد. در ابتدا آزمایش‌ها برای ۴ محل متفاوت



وارد محاسبات گردید.

مقادیر CD به ازای تمامی مقادیر با استفاده از فرمول زیر محاسبه گردید:

$$Cd = Q / b d \sqrt{2gh} \quad (6)$$

که Q دبی عبوری از شیار (m<sup>3</sup>/s)؛ b عرض شیار (m)؛ d میزان گشودگی شیار (m)؛ g شتاب ثقل (m<sup>2</sup>/s)؛ و Δh اختلاف سطح آب دو طرف شیار (m) می‌باشد. همانطور که مشخص است کاهش دبی عبوری از شیار و افزایش سطح آب دو طرف شیار، سبب کاهش ضریب دبی عبوری از شیار می‌گردد. محدوده تغییرات پارامترهای موثر بی‌بعد در این تحقیق در جدول شماره ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. محدوده تغییرات پارامترهای موثر بی‌بعد

پارامترهای بی‌بعد	محدوده تغییرات
Δh/H	۰/۲۳۴ - ۰/۴۱۵
P/H	۰/۲۳۸ - ۰/۷۶۵
$\overline{D \ 50} / b$	۰/۱۱۲۰ - ۰/۱۱۲۸
tan θ	۰/۰۰۸۷۲ - ۱/۷۳۲۰۵۱

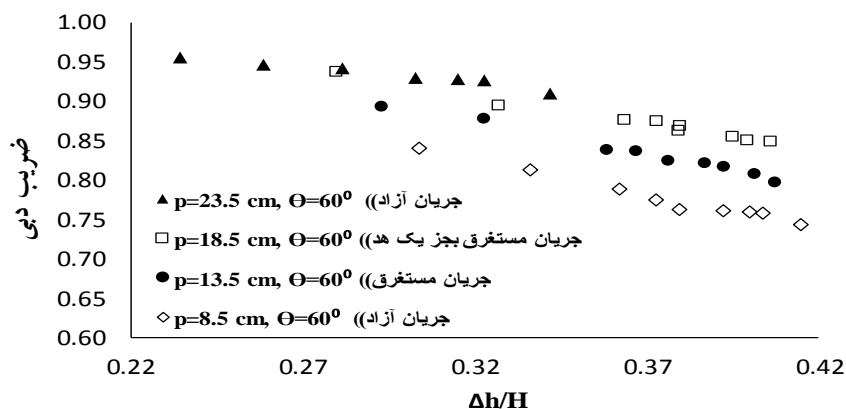
اثر پارامترهای بدون بعد جمع آوری شده در معادله ۵ بر روی ضریب دبی جریان بررسی شده است و در ذیل آورده شده است.

همانطور که در شکل شماره ۶ نشان داده شده است با افزایش نسبت Δh/H، مقدار ضریب دبی عبوری از شیار کاهش می‌یابد که بدلیل افزایش سرعت و افزایش افت ناشی از آن می‌باشد که منجر به کاهش ضریب دبی عبوری از شیار می‌گردد. در شرایط جریان مستغرق با ثابت ماندن سطح آب بالادست و فقط با افزایش ارتفاع محل شیار نسبت به کف، ضریب دبی جریان افزایش می‌یابد. بدین علت که در شیارهای بالاتر خطوط جریان انقباض کمتری در مسیر جریان ایجاد می‌نمایند و جریان راحت‌تر عبور می‌کند و تخلیه می‌شود و در نتیجه افت

کاهش و ضریب دبی عبوری از شیار افزایش می‌یابد. با ثابت ماندن ارتفاع محل شیار از کف و سایر شرایط و فقط با بالابردن سطح آب بالادست عملاً مشابه پایین آمدن شیار عمل می‌کند که منجر به ایجاد افت بیشتر و تولید ضریب دبی عبوری کمتری می‌گردد. در شرایط جریان آزاد نیز با ثابت ماندن ارتفاع محل شیار از کف و سایر شرایط و فقط با بالابردن سطح آب بالادست، اتفاق مشابهی رخ می‌دهد و منجر به افت بیشتر و ضریب دبی عبوری پایین‌تر می‌گردد.

در شرایط جریان مستغرق با افزایش ۳۸/۸۲ درصدی مقدار Δh/H، مقدار ضریب CD، ۱۰/۸۸ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در حالت جریان مستغرق و زاویه ۶۰ درجه شیار، با افزایش ۳۷ درصدی ارتفاع محل شیار نسبت به بستر (از ۱۳/۵ سانتی‌متر به ۱۸/۵ سانتی‌متر)، و یکسان بودن سایر شرایط، مقدار ضریب دبی عبوری از شیار حدود ۴/۵ درصد افزایش می‌یابد. در شرایط جریان آزاد با افزایش ۴۵/۷ درصدی مقدار Δh/H، مقدار ضریب دبی جریان ۴/۸ درصد کاهش می‌یابد. شکل ۷ تغییرات افزایش ارتفاع محل شیار در جریان مستغرق را با ثابت ماندن سطح آب بالادست نشان می‌دهد.

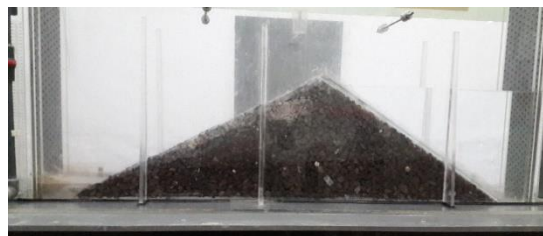
همچنین برای حالت مشابه و فقط با تغییر زاویه شیب شیار نسبت به افق همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌گردد در حالت جریان مستغرق با افزایش زاویه شیب شیار نسبت به افق، بدلیل مستغرق بودن جریان، تاثیر چندانی در تغییر میزان ضریب دبی عبوری جریان نخواهد داشت لذا در هر دو زاویه جواب به همدیگر نزدیک است. در حالت جریان آزاد نیز با افزایش زاویه شیار نسبت به افق، مقدار Δh/H ثابت مانده و ضریب دبی جریان بدلیل افزایش سرعت جریان و تخلیه راحت‌تر جریان، افزایش می‌یابد.



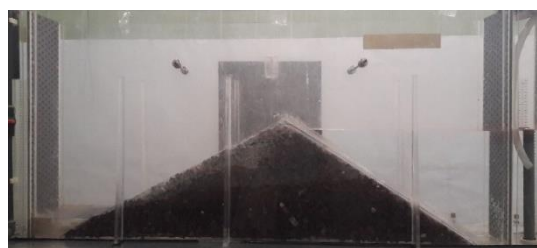
شکل ۶. تغییرات بین ضریب دبی جریان و نسبت  $\Delta h/H$



شکل ۷. ب

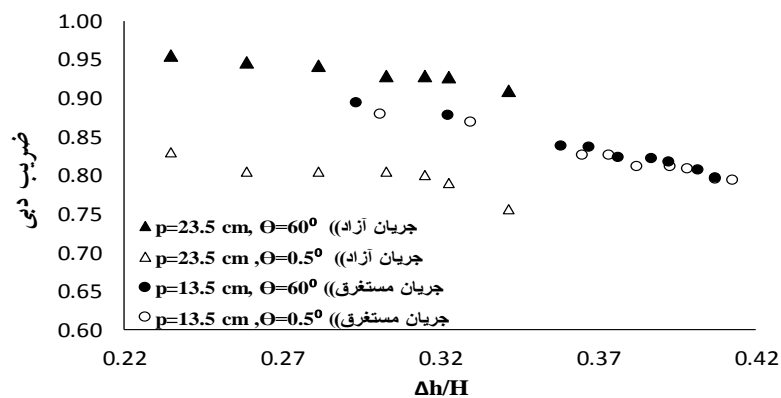


شکل ۷. الف



شکل ۷. ج

شکل ۷. الف- ج تغییرات افزایش ارتفاع محل شیار نسبت به کف در جریان مستغرق را با ثابت ماندن سطح آب بالادست. (۷. الف. ارتفاع محل شیار ۸/۵ سانتی متر. ۷. ب. ارتفاع محل شیار ۱۳/۵ سانتی متر و ۷. ج. ارتفاع محل شیار ۱۸/۵ سانتی متر)



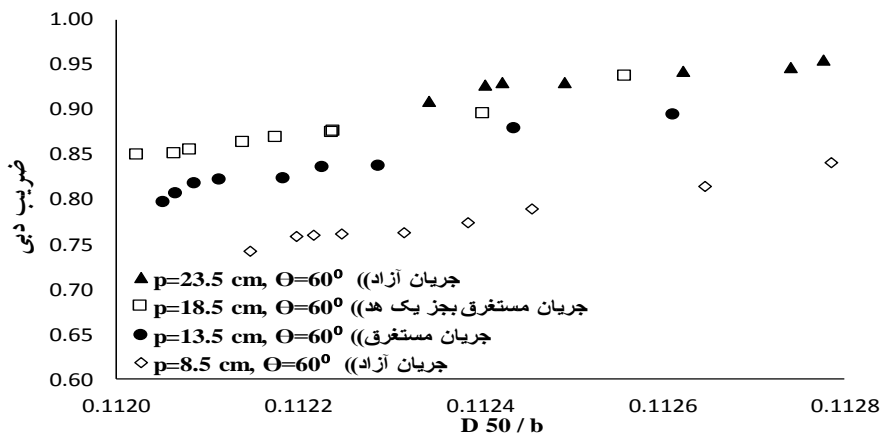
شکل ۸. مقایسه تغییرات بین ضریب دبی جریان و نسبت  $\Delta h/H$  برای زاویه‌های متفاوت شیار

این امر بدلیل سهولت عبور جریان و خطوط جریان راحت‌تر و ملایم‌تر می‌باشند. در حالت آزاد هم بدلیل ارتفاع بیشتر شیار و اینکه جریان آزاد و راحت‌تر عبور می‌کند لذا مقدار ضریب دبی بیشتر از حالت مستغرق می‌باشد.

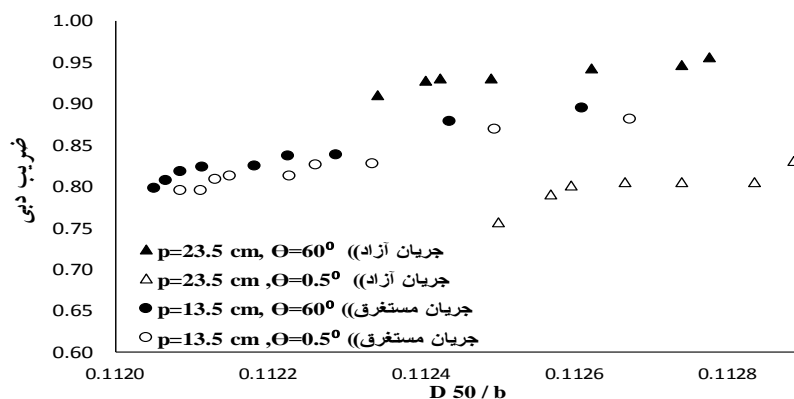
در حالت مستغرق با زاویه ۰/۵ درجه شیار نسبت به افق، با افزایش ۰/۵ درصدی مقدار تخلخل معادل، ضریب دبی جریان ۹/۷ درصد افزایش می‌یابد. و همچنین در زاویه شیار ۰/۵ درجه نسبت به افق، در یک محل ارتفاع یکسان شیار از کف و ارتفاع سطح آب بالادست یکسان با حالت زاویه ۶۰ درجه شیار، با افزایش ۰/۰۵ درصدی مقدار تخلخل معادل نسبه به حالت زاویه ۶۰ درجه، ضریب دبی عبوری از شیار ۱/۵۷ درصد کاهش می‌یابد.

شکل ۹ تغییرات ضریب دبی جریان نسبت به مقدار  $\overline{D50}/b$  را نشان می‌دهد همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار  $\overline{D50}/b$  ضریب دبی جریان افزایش می‌یابد. که این امر بدلیل افزایش تخلخل محیط ( $b/\overline{D50}$ ) می‌باشد. در حالت مستغرق با افزایش ۰/۵ درصدی مقدار  $\overline{D50}/b$  ضریب دبی جریان حدود ۱۰/۸۸ درصد افزایش می‌یابد. در حالت آزاد با افزایش ۰/۳۸ درصدی تخلخل ضریب دبی جریان ۴/۸ درصد افزایش می‌یابد.

همچنین همانطور که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌گردد در حالت یکسان میزان ارتفاع محل شیار از کف و ثابت ماندن سطح آب بالادست، با افزایش زاویه شیار نسبت به افق، در هر دو حالت جریان آزاد و مستغرق، با افزایش مقدار  $\overline{D50}/b$  ضریب دبی جریان افزایش می‌یابد. که



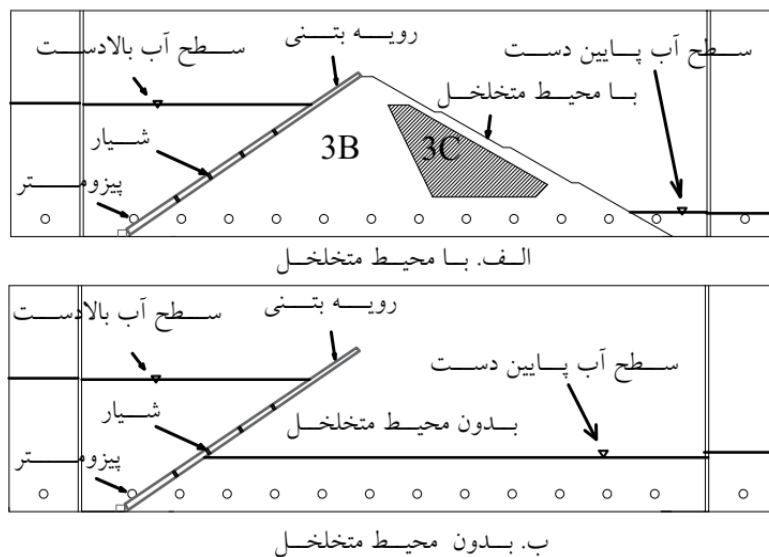
شکل ۹. تغییرات بین ضریب دبی جریان و  $\overline{D50}/b$



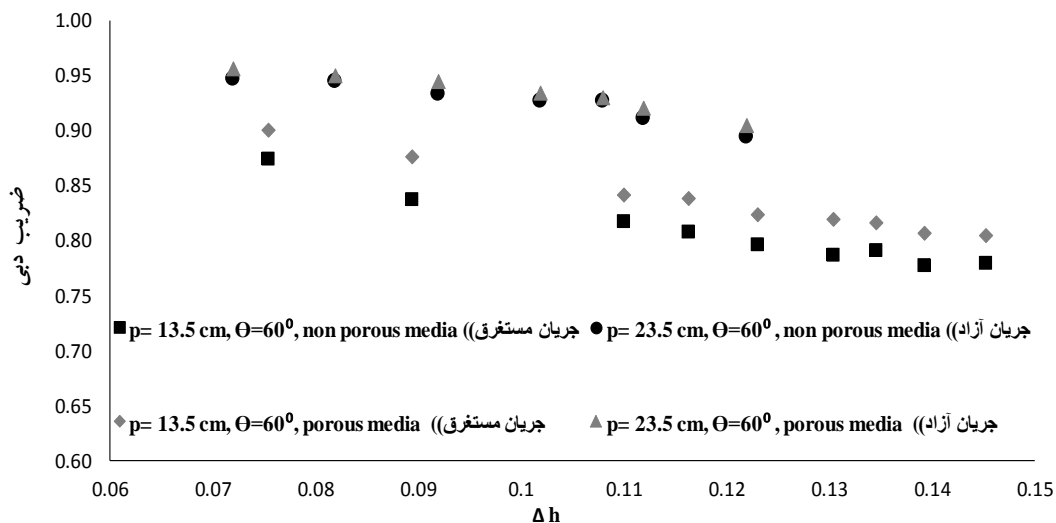
شکل ۱۰. تغییرات بین ضریب دبی جریان و  $\overline{D50}/b$  برای زاویه‌های متفاوت شیار

همانطور که مشاهده می‌گردد در ارتفاع P شیار مستغرق با حضور محیط متخلخل افت افزایش می‌یابد در قیاس با حالت آزاد که ارتفاع P بیشتر است و خطوط جریان راحت‌تر و روان‌تر حرکت می‌کنند که باعث افزایش ضریب دبی می‌گردند. ضریب دبی عبوری از شیار، در حالت وجود محیط متخلخل در پایین دست نسبت به حالت عدم وجود آن، در حالت جریان مستغرق حدود ۳ الی ۴ درصد و در حالت جریان آزاد حدود ۱ درصد افزایش می‌یابد.

همچنین برای ارزیابی اختلاف بین ضریب‌های دبی عبوری در حالت وجود و عدم وجود محیط متخلخل در پایین دست (شکل ۱۱ شمای کلی حالت با و بدون محیط متخلخل را نشان می‌دهد). اقدام به آزمایش و مقایسه ضریب‌های دبی عبوری در هر دو حالت گردید. همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است ضریب دبی عبوری در حالت عدم وجود محیط متخلخل افزایش چشمگیری در هر دو حالت استغراق و آزاد دارد.



شکل ۱۱. شمای کلی شرایط پایین دست با و بدون محیط متخلخل (الف. با محیط متخلخل ب. بدون محیط متخلخل)



شکل ۱۲. تغییرات بین ضریب دبی جریان در حالت شرایط پایین دست با و بدون محیط متخلخل

**- تحلیل آماری:**

به منظور تجزیه و تحلیل آماری و بدست آوردن معادله کلی بین متغیرها از نرم‌افزار آماری SPSS 16 استفاده گردید و معادلات غیر خطی زیر برای پیش‌بینی معادله بین ضریب CD و متغیرهای وابسته  $\Delta$ ,  $P/H$ ,  $h/H$ ,  $\tan \theta$  (D 50  $\bar{b}$ ) در شرایط جریان آزاد و مستغرق حاصل گردید. نتایج در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. همچنین ضرایب R<sup>2</sup>, RE و RMSE محاسبه و ارائه گردیده‌اند. همانطور که در جدول نشان داده شده است معادله ۷ برای شرایط مستغرق و معادله ۸ برای حالت جریان آزاد، با دقت بالایی مقدار CD را پیش‌بینی می‌نمایند.

**- آنالیز حساسیت:**

بمنظور رسیدن به مقایسه‌های کمی، آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای فرمول با استفاده از روش درصد تغییرات ۵٪ و ۱۰٪ براساس روابط کلی انجام شد (Samani و همکاران (2003)) و نتایج در جداول ۵ و ۶ برای معادلات ۷ و ۸ ارائه گردیده است. همانطور که در جدول ۵ نشان داده شده است در شرایط جریان مستغرق پارامترهای  $\Delta h/H$  و  $P/H$  بیشترین تاثیر را بر روی ضریب CD دارند و بعد از آنها پارامتر  $\bar{D} 50/b$  تاثیر زیادی دارد که بدلیل تاثیر داشتن شرایط پایین‌دست بر روی ضریب

دبی می‌باشد و در آخر کمترین تاثیر را زاویه شیار بر روی ضریب دبی عبوری دارد.

همانطور که در جدول ۵ نشان داده شده است در نتیجه معادله شماره ۷ ارائه شده در جدول ۴ جهت پیش‌بینی مقدار CD شیار با شرایط پایین‌دست محیط متخلخل ناهمگن در حالت جریان مستغرق پیشنهاد می‌گردد.

همانطور که در جدول ۶ نشان داده شده است در شرایط جریان آزاد پارامتر  $P/H$  بیشترین تاثیر را بر روی ضریب CD دارند و بعد از آن پارامتر  $\bar{D} 50/b$  و  $\Delta h/H$  تاثیر زیادی دارد که بدلیل تاثیر داشتن شرایط پایین‌دست بر روی ضریب دبی می‌باشد و بعد از آنها  $\tan \theta$  (زاویه شیار)، کمترین تاثیر را بر روی ضریب دبی عبوری دارد. در نتیجه معادله شماره ۸ ارائه شده در جدول ۴ جهت پیش‌بینی مقدار CD شیار با شرایط پایین دست محیط متخلخل ناهمگن در حالت جریان آزاد پیشنهاد می‌گردد.

همچنین در شکل ۱۳ و ۱۴ مقایسه پیش‌بینی نتایج با استفاده از معادله ۷ (جریان مستغرق) و معادله ۸ (جریان آزاد) در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ارائه گردیده است که نشان از برآورد با دقت بالای معادلات پیشنهاد شده می‌باشد.

جدول ۴. عاده رگرسیونی غیرخطی پیشنهادی برای بدست آوردن ضریب CD

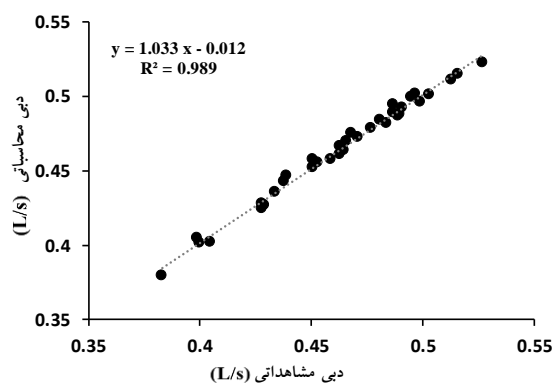
شماره معادله	معادله	شرایط جریان	R <sup>2</sup>	RE	RMSE
۷	$CD = (\tan \Theta)^f \times (dh/H)^i \times (P/H)^k \times ((\bar{D} 50/b)^o)$ $f = 0.002, i = -0.187, k = 0.146, o = 0.112$	مستغرق	۰/۹۸۴	۰/۵۳۷	۰/۰۰۵۲
۸	$CD = (\tan \Theta)^f \times (dh/H)^i \times (P/H)^k \times ((\bar{D} 50/b)^o)$ $f = 0.029, i = 0.327, k = 1.183, o = -0.335$	آزاد	۰/۹۸۸	۰/۶۸۵	۰/۰۰۷۵

جدول ۵. آنالیز حساسیت معادله ۷ حالت جریان مستغرق بدست آمده از روش درصد تغییرات ۵٪ و ۱۰٪

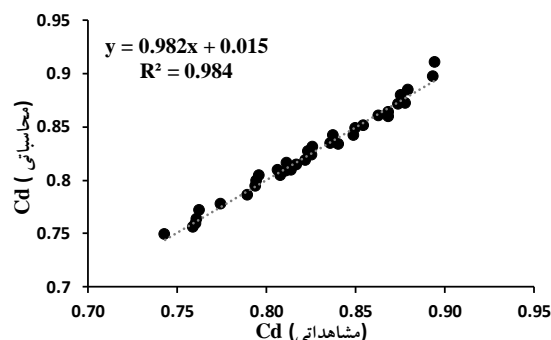
پارامترهای متغیر	درصد تغییرات		ترتیب میزان حساسیت
	± ۵%	± ۱۰%	
$\Delta h/H$	۰/۹۴	۱/۸۷	$\Delta h/H$
P/H	۰/۷۳	۱/۴۷	P/H
$(\overline{D} \ 50 /b)$	۰/۵۶	۱/۱۲	$(\overline{D} \ 50 /b)$
$\tan\theta$	۰/۰۱	۰/۰۲	$\tan\theta$
P/H, $\Delta h/H$	۱/۶۷	۳/۳۴	P/H, $\Delta h/H$
$(\overline{D} \ 50 /b)$ , $\Delta h/H$	۱/۵۰	۳/۰۰	$(\overline{D} \ 50 /b)$ , $\Delta h/H$
$\Delta h/H$ , $\tan\theta$	۰/۹۵	۱/۸۹	$\Delta h/H$ , $\tan\theta$
P/H, $\tan\theta$	۰/۷۲	۱/۴۵	P/H, $\tan\theta$
$(\overline{D} \ 50 /b)$ , $\tan\theta$	۰/۵۵	۱/۱۰	$(\overline{D} \ 50 /b)$ , $\tan\theta$
P/H, $(\overline{D} \ 50 /b)$	۰/۱۷	۰/۳۴	P/H, $(\overline{D} \ 50 /b)$
$\Delta h/H$ , $(\overline{D} \ 50 /b)$ , $\tan\theta$	۱/۳۰	۲/۶۱	$\Delta h/H$ , $(\overline{D} \ 50 /b)$ , $\tan\theta$
P/H, $(\overline{D} \ 50 /b)$ , $\tan\theta$	۰/۳۷	۰/۷۳	P/H, $(\overline{D} \ 50 /b)$ , $\tan\theta$
$\Delta h/H$ , P/H, $(\overline{D} \ 50 /b)$	۰/۳۶	۰/۷۱	$\Delta h/H$ , P/H, $(\overline{D} \ 50 /b)$
$\Delta h/H$ , P/H, $\tan\theta$	۰/۲۰	۰/۳۹	$\Delta h/H$ , P/H, $\tan\theta$

جدول ۶. آنالیز حساسیت معادله ۸ حالت جریان آزاد بدست آمده از روش درصد تغییرات ۵٪ و ۱۰٪

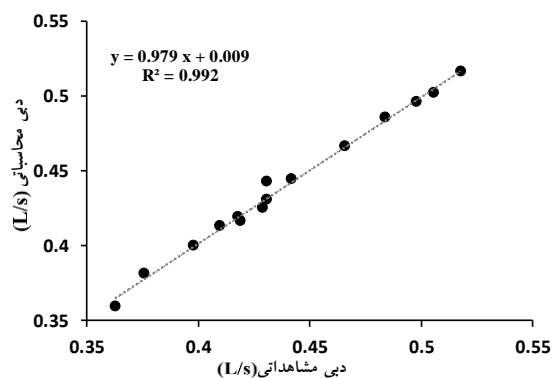
پارامترهای متغیر	درصد تغییرات		ترتیب میزان حساسیت
	± ۵%	± ۱۰%	
P/H	۵/۹۳	۱۱/۹۷	P/H
$(\overline{D} \ 50 /b)$	۱/۶۸	۳/۳۶	$(\overline{D} \ 50 /b)$
$\Delta h/H$	۱/۶۴	۳/۲۹	$\Delta h/H$
$\tan\theta$	۰/۱۵	۰/۲۹	$\tan\theta$
P/H, $(\overline{D} \ 50 /b)$	۷/۶۱	۱۵/۳۶	P/H, $(\overline{D} \ 50 /b)$
P/H, $\tan\theta$	۵/۷۹	۱۱/۶۸	P/H, $\tan\theta$
P/H, $\Delta h/H$	۴/۲۹	۸/۶۶	P/H, $\Delta h/H$
$(\overline{D} \ 50 /b)$ , $\Delta h/H$	۳/۳۱	۶/۶۵	$(\overline{D} \ 50 /b)$ , $\Delta h/H$
$(\overline{D} \ 50 /b)$ , $\tan\theta$	۱/۸۲	۳/۶۵	$(\overline{D} \ 50 /b)$ , $\tan\theta$
$\Delta h/H$ , $\tan\theta$	۱/۴۹	۳/۰۰	$\Delta h/H$ , $\tan\theta$
P/H, $\Delta h/H$ , $\tan\theta$	۷/۷۲	۱۵/۶۲	P/H, $\Delta h/H$ , $\tan\theta$
P/H, $(\overline{D} \ 50 /b)$ , $\Delta h/H$	۵/۸۹	۱۱/۸۹	P/H, $(\overline{D} \ 50 /b)$ , $\Delta h/H$
P/H, $(\overline{D} \ 50 /b)$ , $\tan\theta$	۴/۳۹	۸/۸۵	P/H, $(\overline{D} \ 50 /b)$ , $\tan\theta$
$(\overline{D} \ 50 /b)$ , $\Delta h/H$ , $\tan\theta$	۰/۱۱	۰/۲۱	$(\overline{D} \ 50 /b)$ , $\Delta h/H$ , $\tan\theta$



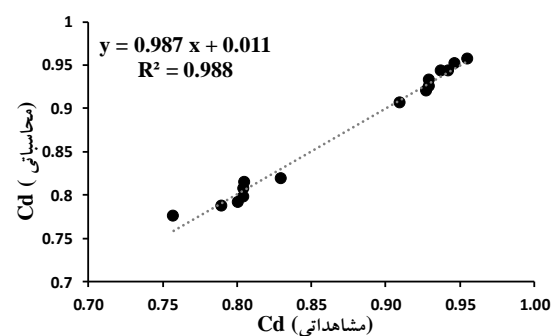
شکل ۱۵. مقایسه بین برآورد مقدار دبی محاسباتی با معادله (جریان مستغرق) و ۷ داده‌های آزمایشگاهی



شکل ۱۳. مقایسه بین برآورد مقدار ضریب CD با روش رگرسیونی معادله ۷ (جریان مستغرق) و داده‌های آزمایشگاهی



شکل ۱۶. مقایسه بین برآورد مقدار دبی محاسباتی با معادله ۸ (جریان آزاد) و داده‌های آزمایشگاهی



شکل ۱۴. مقایسه بین برآورد مقدار ضریب CD با روش رگرسیونی معادله (در حالت جریان آزاد) ۸ و داده‌های آزمایشگاهی

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر پارامترهای مختلف روی ضریب دبی عبوری جریان از شیار واقع شده بر روی رویه بالادست سد سنگریزه‌ای با رویه بتنی مورد تحقیق قرار گرفت. در این پژوهش آزمایش‌ها با تغییر در محل قرارگیری شیار و زاویه شیار نسبت به افق و تغییر ارتفاع سطح آب بالادست انجام شد و نتایج بطور خلاصه در ذیل آورده شده است:

در شرایط جریان آزاد با افزایش ۴۵/۷ درصدی مقدار  $\Delta h/H$ ، مقدار ضریب دبی جریان ۴/۸ درصد کاهش و در شرایط جریان مستغرق با افزایش ۳۸/۸۲ درصدی مقدار  $\Delta h/H$ ، مقدار ضریب CD، ۱۰/۸۸ درصد کاهش می‌یابد. که بدلیل تاثیر بیشتر مقدار  $\Delta h/H$ ، در حالت مستغرق می‌باشد.

در نتیجه معادله‌های ۷ (جریان مستغرق) و ۸ (جریان آزاد) ارائه شده در جدول شماره ۴ جهت تخمین ضریب دبی عبوری از شیار مستطیلی واقع بالادست سد سنگریزه‌ای با رویه بتنی (CFRD) در حالت جریان مستغرق و آزاد جهت استفاده طراحان در این زمینه پیشنهاد می‌گردد.

برای ارزیابی معادلات بدست آمده اقدام به محاسبه مقدار دبی عبوری از شیار با استفاده از معادله مذکور و مقایسه بین برآورد جواب‌ها با داده‌های آزمایشگاهی گردید، نتیجه آن در شکل شماره ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است که حاکی از دقت بالای معادله در برآورد مقدار دبی عبوری از شیار می‌باشد.

$\tan \theta$  و  $\Delta h/H$  بیشترین تاثیر را بر روی ضریب دبی عبوری از شیار دارند.

ضریب دبی عبوری از شیار، در حالت وجود محیط متخلخل در پایین دست نسبت به حالت عدم وجود آن، در حالت جریان مستغرق حدود ۳ الی ۴ درصد و در حالت جریان آزاد حدود ۱ درصد افزایش می یابد.

معادلات ۷ (جریان مستغرق) و ۸ (جریان آزاد) ارائه شده در جدول شماره ۴ با ضرایب همبستگی ۰/۹۸۴ و ۰/۹۸۸، جهت تخمین ضریب دبی عبوری از شیار مستطیلی واقع در روی بالادست سد سنگریزه‌ای با رویه بتنی (CFRD) پیشنهاد می گردند.

برای تحقیقات آتی، بررسی شیار مایل و کج (شیاری که ابتدا و انتهای آن در یک تراز نباشد) پیشنهاد می گردد.

در حالت آزاد با افزایش ۰/۳۸ درصدی تخلخل معادل  $(\overline{D50/b})$ ، ضریب دبی جریان ۴/۸ درصد افزایش می یابد.

در حالت مستغرق با افزایش ۰/۵ درصدی مقدار  $b$  /  $\overline{D50}$ ، ضریب دبی جریان حدود ۱۰/۸۸ درصد افزایش می یابد.

در مجموع با افزایش مقدار  $b / \overline{D50}$ ،  $\tan \theta$  و  $P/H$ ، ضریب دبی عبوری از شیار افزایش و با افزایش مقدار  $\Delta h/H$ ، ضریب دبی عبوری از شیار کاهش می یابد.

در حالت جریان مستغرق به ترتیب پارامترهای  $(\Delta h/H)$ ،  $(P/H)$ ،  $b / \overline{D50}$  و  $\tan \theta$  بیشترین تاثیر را بر روی ضریب دبی عبوری از شیار دارند.

در حالت جریان آزاد به ترتیب پارامترهای  $P/H$ ،  $b$

#### منابع مورد استفاده

- Abdelhaleem F. S. F. (2017). "Hydraulics of submerged radial gates with a sill." *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, pp. 177-186, DOI: 10.1080/09715010.2016.1273798
- Alhamid, A. A, 1999." Coefficient of Discharge for Free Flow Sluice Gates" *J. King Saud Univ.*, Vol 11 , Eng. Sci. (I), pp. 33-47 (A.H. 1419/ 1999).
- Bos, M.G. 1989. *Discharge measurement structures*, Wageningen, Netherlands. 3rd edition, ILRI.
- D'Alpaos, L & Ghetti, A. (1984) *Some New Experiments on Surface Tension and Viscosity Effects on the Trajectory of a Falling Jet*, Padova : Istituto di Idraulica.
- De Martino, G., Ragone, A., *Effects of viscosity and surface tension on slot weirs flow*, (1984), *J. Hydraul. Res.* 22 (5) 327-341.
- Goudarzi, A. and MahinRoosta, R. (2012). "Effect of the Height of Crack in the Slab of CFRD's in Water Pressure Distribution in the Dam Body" 9th International Congress on Civil Engineering. Isfahan University of Technology (IUT), Isfahan, Iran
- Knauss, J, (1989)." Scale Effects in Modelling Free Falling Jets Emerging Horizontally from a Slot-Orifice", Technical University of Munich, Federal Republic of Germany. P.2.4-1:2.4-3.
- Nicholas, A. M & Bobai, S. B, 2018. "Determination of Orifice Coefficients for Flow Through Circular and Rectangular Orifices". *ATBU, Journal of Science, Technology & Education (JOSTE)*; Vol. 6 (1), March, 2018:188-197.
- Prohaska, P. D. Khan, A. A., Kaye N. B. (2010) "Investigation of Flow through Orifices in Riser Pipes." *JOURNAL OF IRRIGATION AND DRAINAGE ENGINEERING © ASCE*, Vol. 136, No. 5, 340-347.
- Salmasi, f., Nouri, m., Abraham, j. (2019). "Laboratory Study of the Effect of Sills on Radial Gate Discharge Coefficient" *KSCE Journal of Civil Engineering. Hydraulic Engineering* . [www.springer.com/12205](http://www.springer.com/12205)
- 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*. 129:448-454.
- Samani, J. M. V., Samani, H. M. V., and Shaiannejad, M. (2004) "Reservoir routing with outflow through rockfill dams" *Journal of Hydraulic Research* Vol. 42, No.4 (2004), pp. 435-439.
- Sarhan, S. A. (2013). "ANALYSIS OF SUBMERGED FLOW UNDER A GATE WITH PRISMATIC SILL" *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8 (10), 849-856.
- Seo, M. W., Ha, I. S., Kim, Y. S., and Olson, S. M. (2009). "Behavior of concrete-faced rockfill dams during initial impoundment." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol. 135, No. 8, pp. 1070-1081.
- Shaker, A. J. (2014). "Submerged flow analysis below a vertical gate with stepped sill." *Caspian Journal of Applied Sciences Research*, Vol. 3, No. 5, pp, 41-52.



- Sherard, J. 1985, "The Upstream Zone in Concrete\_FaceRockfill Dams," Consulting Engineer, San Diego, California
- Swamee, P. K., Ojha, S. P, Kumar,S., 1998. "Discharge Equation for Rectangular Slots. Journal of Hydraulic Engineering". 124: 973-974.
- Szostak\_Chrzanowski, A, Deng, N, and Massiera, M, 2008, "Monitoring and Deformation Aspects of Large Concrete Face Rockfill Dams," 13st Fig Symposium on Deformation Measurment and Analysis.
- Wu, D. Burton, R. Schoenau, G. 2002. "AN EMPIRICAL DISCHARGE COEFFICIENT MODEL FOR ORIFICE FLOW" International Journal of Fluid Power 3 (2002) No.3 pp. 13-18
- Xing, H. F., Gong, X. N., Zhou, X. G., and Fu, H. F. (2006). "Construction of concrete faced rockfill dams with weak rocks." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 132, No.6, pp. 778-785.
- Yun Wook Choo, Dong Hoon Shin, Sung Eun Cho, Eun Sang Im, and Dong-Soo Kim. (2013). "Seepage Behavior of Drainage Zoning in a Concrete Faced Gravel-fill Dam via Centrifuge and Numerical Modeling." KSCE Journal of Civil Engineering (2013) 17(5):949-958.



## Experimental Study of Discharge Coefficient of the Groove upstream of Concrete-Face Rockfill Dam (using Hydraulic Models)

Zahra Rahiminejad<sup>1</sup>, Seyed Habib musavi-Jahromi<sup>\*2</sup>, Amir Khosrojerdi<sup>3</sup>, Hossein Hassanpour Darvishi<sup>4</sup> and Jamal Mohammad Vali Samani<sup>5</sup>

1) Phd. Student, Department of Water Engineering and Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2\*) Professor, College of Water Science Engineering, Shahid Chamran University, Khozestan, Iran

\*Corresponding author email: h-mousavi@srbiau.ac.ir

3) Assistant Professor, Department of Water Engineering and Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

4) Associate Professor, Department of Civil Engineering-Engineering and Management of Water Resources. Islamic Azad University, Shahr-e-Qods Branch, Tehran, Iran

5) Professor, Department of Water Structures, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 27-10-2020

Accepted: 03-07-2021

### Abstract

Considering the role of heterogeneous dams in flood control and also water storage, it is very important to consider the flow hydraulic in them. On the other hand, proper design of rockfill dams requires accurate study of flow behavior in these dams. In this regard, by studying the concrete-face rockfill dam (CFRD) in the present study, by creating different cracks on the concrete face of the dam in the laboratory model, the water infiltration behavior inside the dam body was investigated. Transverse cracks of concrete slab on concrete-face rockfill dam (CFRD) and water flow and how to control it in rockfill dams is one of the most important issues considered by experts in the design of dams. Determining the discharge coefficient of the groove to estimate the flow rate is important and unavoidable. The purpose of this study is to calculate the discharge coefficient of a rectangular groove located in the concrete surface upstream of the concrete-face rockfill dam (CFRD) in both submerged and free conditions. Variable geometric parameters in this study include the height of the groove from the bed, the angle of the groove located upstream of the horizon and, the variable hydraulic parameters include the height of the water head upstream of the rockfill dam. A total of 50 different experiments were performed and entered into the calculations. Finally, two equations were developed using dimensional analysis and nonlinear equation analysis, in order to predict the discharge coefficient of the upstream groove of a concrete-face rockfill dam in both free and submerged states. The developed equations are in good agreement (correlation coefficient of 0.988 for free flow and 0.984 for submerged flow) with experimental results. There is also a good agreement between the observed and computational flow using the predicted equation (0.992 for free flow and 0.989 for submerged flow).

**Keywords:** concrete-face rockfill dam (CFRD); discharge coefficient of the groove; orifice discharge rate; Rectangular groove.