

بررسی رفتار هیدرولیکی جریان در سرریز سدهای زیرزمینی

محمدرضا شمس^۱، عبدالرضا کبیری سامانی^{۲*}، محمد کریم بیرامی^۳، حمیدرضا صفوی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانشیار مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد استهبان

۴- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

* اصفهان، کد پستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱

akabiri@cc.iut.ac.ir

چکیده- استفاده از سدهای زیرزمینی یکی از روشهایی است که در سالهای اخیر برای ذخیره سازی آب های زیرزمینی مورد توجه ویژه قرار گرفته است. موضوعی که در طراحی سدهای زیرزمینی کم تر به آن توجه شده، بررسی سرریز در سدهای زیرزمینی است.

در تحقیق حاضر، تأثیر ابعاد هندسی و مشخصات سرریز بر عبور جریان آب زیرزمینی به پایین دست سد با توجه به مشخصات هیدرودینامیکی آبخوان بالادست مطالعه می شود. همچنین تأثیر پارامترهای مختلف هیدرولیکی بر دبی عبوری از سرریز در سدهای زیرزمینی مطالعه می شود. در این تحقیق مدل آزمایشگاهی آبخوان سد زیرزمینی شامل مخزن و سرریز سد زیرزمینی ساخته شده است. در مدل آزمایشگاهی تأثیر پارامترهایی مانند هدایت هیدرولیکی لایه های آبدار، هد در بالادست سرریز سد زیرزمینی، ارتفاع سرریز سد و طول تاج سرریز سد بر دبی عبوری از سرریز سد زیرزمینی در حالت پایدار آزمایش شده است. همچنین با افزایش ارتفاع سرریز، هد در بالادست سرریز سد و طول تاج سرریز، دبی عبوری از سرریز سد افزایش می یابد. به منظور بررسی عوامل مؤثر و تحلیل اثر آنها بر دبی عبوری از سرریز از نرم افزار Seep3D استفاده شده است. بررسی مدل های عددی نیز نشان می دهد که هندسه سرریز، هدایت هیدرولیکی مصالح آبخوان، هد در بالاست سد زیرزمینی و عرض مؤثر در جریان آب های زیرزمینی بیشترین تأثیر را بر دبی عبوری از سرریز در سدهای زیرزمینی دارند. در این تحقیق با انجام تحلیل ابعادی، نتایج برای هر نوع آبخوان و سد تعمیم داده شده است. همچنین رابطه (۲۳) به عنوان معیار مناسبی برای طراحی سرریز در سد زیرزمینی پیشنهاد شده است.

کلید واژگان: آبخوان، سد زیرزمینی، رفتار هیدرولیکی جریان، سرریز، هدایت هیدرولیکی.

۱- مقدمه

آب‌های زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب شیرین در بسیاری از مناطق دنیا، به‌ویژه در اقلیم‌های خشک و نیمه خشک، مانند ایران است. حجم آب شیرین ذخیره شده در زیر سطح زمین به مراتب بیشتر از کل ذخایر آب‌های شیرین سطحی موجود در رودخانه‌ها، مخازن و دریاچه‌های طبیعی و مصنوعی است (صفوی، ۱۳۸۸). در سال‌های اخیر، استفاده از آب ذخیره شده در زیر سطح زمین و در لایه‌های آبدار زیرزمینی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این مسأله در مناطقی که آب و هوای خشک یا گرمسیری دارند و همچنین در مناطقی که آب و هوای بارانی موسمی دارند اهمیت ویژه‌ای دارد. به این منظور آب را باید در زیر سطح زمین و در آبخوان ذخیره کرد تا در فصل خشک بتوان آنرا استخراج کرد. یکی از روش‌هایی که در سال‌های اخیر برای ذخیره‌سازی هرچه بیشتر آب در آبخوان‌های زیرزمینی مورد توجه قرار گرفته، استفاده از سدهای زیرزمینی است (سعادت، ۱۳۸۱). از آنجا که در سدهای زیرزمینی آب در زیرزمین و در آبخوان ذخیره می‌شود، می‌توان در محل مخزن سد و بر روی زمین به فعالیت‌های مختلفی نظیر کشاورزی پرداخت. بنابراین سدهای زیرزمینی آسیب جدی به محیط زیست وارد نمی‌کنند و مشکلات اجتماعی مانند مهاجرت برای ساکنان این مناطق به‌وجود نخواهد آمد. این مسأله در سدهای سطحی و مخازن این گونه سدها مشکل‌آفرین است. آب موجود در مخزن سدهای زیرزمینی بر اثر تبخیر نیز از دست نمی‌رود. این مسأله به‌ویژه در مناطق خشک و گرم بسیار مهم است. سد زیرزمینی از جریان یافتن آب زیرزمینی به پایین‌دست سد جلوگیری می‌کند و باعث خشک شدن آبخوان پایین‌دست می‌شود. ممکن است تنها منبع تغذیه آبخوان

پایین‌دست، آب زیرزمینی موجود در مخزن بالادست سد باشد، لذا می‌توان با طراحی مناسب سد زیرزمینی اجازه عبور آب را به آبخوان پایین‌دست سد داد. اما در صورتی که تاج سد در تراز مناسبی قرار نگیرد، با افزایش بیش از اندازه سطح آب در مخزن سد و رسیدن آب زیرزمینی به سطح زمین، بر روی سطح زمین مانند آب به‌وجود خواهد آمد. بر اثر تبخیر این آب، نمک بر سطح زمین انباشته می‌شود. لذا در طراحی بهینه سدهای زیرزمینی حداکثر تراز آب زیرزمینی پس از احداث سد باید مورد توجه قرارگیرد. اولین سد زیرزمینی در اروپا توسط رومی‌ها و در «ساردینیا» ساخته شد (سعادت، ۱۳۸۱). Wipplinger در سال ۱۹۵۸، مطالعات گسترده‌ای را در زمینه هیدرولیک و هیدرولوژی جریان در سدهای ذخیره‌ای ماسه‌ای انجام داد. Kalmykov در سال ۱۹۶۸ رابطه‌ای را برای تعیین ضخامت سدهای زیرزمینی پیشنهاد کرد. Matso در سال ۱۹۷۰، بحث‌هایی را در باره مسائل فنی سدهای زیرزمینی و هزینه‌های روش‌های مختلف ساخت سدهای زیرزمینی ارائه کرد. Cederwall و Larson در سال ۱۹۸۰، مطالعاتی را در زمینه گنجایش حجم مخزن سدهای زیرزمینی انجام دادند. Nilsson و Petersen در سال ۱۹۸۲ با ارائه مقاله‌ای، راهنمایی‌های بسیار مفیدی را در باره طراحی سدهای ذخیره‌ای ماسه‌ای (آبرفتی) ارائه کردند. در سال ۱۹۸۴، Hanson و Nilsson، اعلام کردند که سدهای زیرزمینی برای توسعه منابع آب به‌ویژه در مناطق خشک بسیار مفیدند. بر اساس مطالعات ایشان پیش از احداث سد زیرزمینی باید مطالعات هیدروژئولوژیکی در منطقه انجام شود. در سال ۱۳۸۱، سعادت مطالعاتی را در زمینه تعیین شاخص‌های مکان‌یابی سدهای زیرزمینی و شبیه‌سازی مدل ریاضی جریان در سد زیرزمینی انجام داد. در این زمینه وی از

دیوار آب‌بند با ارتفاع کوتاه‌تر به تخلیه آب شور باقیمانده بیشتر کمک می‌کند.

یکی از مهمترین مسائل مربوط به سدهای زیرزمینی، انتخاب محل مناسب برای ساخت این سدها است. سد زیرزمینی را در هر محلی نمی‌توان احداث کرد. دیواره سدهای زیرزمینی تا حد ممکن باید در کمترین عرض تنگه زیرزمینی احداث شود تا هزینه‌ها کاهش یابد. محل اجرای دیواره سد باید در دورترین نقطه پایین‌دست آبخوان باشد تا بتواند حجم بیشتری از آب را ذخیره کند. همچنین باید با ایجاد سرریز مناسب در سد، آب اضافی را از مخزن بالادست سد خارج کرد. در صورت بالا آمدن تراز آب زیرزمینی و رسیدن آن به سطح زمین ممکن است کاربری زمین در آن قسمت مختل شده و آسیب‌های زیست محیطی جبران ناپذیری به طبیعت وارد آید. در صورت عبور آب اضافی از طریق سرریز سد می‌توان تراز آب در مخزن را تا حد ممکن افزایش داد و از هزینه‌های مربوط به استخراج آب از مخزن سد کاست.

لذا در این تحقیق تأثیر ابعاد هندسی و مشخصات سرریز بر عبور جریان آب زیرزمینی به پایین‌دست سد و مشخصات هیدرودینامیکی آبخوان بالادست، مطالعه می‌شود. همچنین تأثیر پارامترهای مختلف هیدرولیکی بر میزان دبی عبوری از سرریز در سدهای زیرزمینی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- تحلیل ابعادی و پارامترهای مؤثر

به‌منظور کاهش تعداد متغیرها و پارامترهای مؤثر می‌توان با گروه‌بندی متغیرها از پارامترهای بی‌بعد استفاده کرد. همچنین با بی‌بعد کردن پارامترها می‌توان نتایج را برای سایر حالت‌های مشابه اعتبار بخشید. پارامترهای مؤثر بر هیدرولیک سرریز سدهای زیرزمینی عبارتند از: دبی عبوری از روی سرریز Q ، هدایت هیدرولیکی لایه آبدار

نرم‌افزار MODFLOW استفاده کرد. در سال ۲۰۰۴، Janardhana Raju و همکاران ذخیره‌سازی آب باران در فصول بارانی با احداث سد زیرزمینی را مطالعه کردند. Onder و Yilmaz در سال ۲۰۰۵، تأثیر سدهای زیرزمینی را بر توسعه منابع آب‌های زیرزمینی تحلیل و بررسی کردند و برای بررسی‌های خود در باره تأثیر سدهای زیرزمینی بر رفتار جریان آب‌های زیرزمینی، از مدل‌سازی عددی و نرم‌افزار MODFLOW استفاده کردند. بر اساس بررسی‌های آنها، پس از احداث سد زیرزمینی مناسب در منطقه‌ای ساحلی، می‌توان علاوه بر ذخیره‌سازی و افزایش سطح آب در آبخوان پشت سد، از حرکت جریان آب زیرزمینی به سمت دریا نیز جلوگیری کرد. مقیم در سال ۱۳۸۶ به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف هیدرولیکی ارتفاع آب در سد زیرزمینی پرداخت. در این تحقیق وی تأثیر پارامترهایی مانند مشخصات لایه‌های آبدار، مشخصات سد و دبی عبوری بر ارتفاع آب در سد زیرزمینی را مطالعه کرد. در سال ۲۰۰۸، Forizieri و همکاران روش‌های انتخاب مکان مناسب برای ساخت سدهای سطحی و زیرزمینی را در مناطق خشک و نیمه‌خشک بررسی کردند. ایشان برای بررسی بیشتر موضوع، منطقه Kidāl در مالی را بررسی کردند. در سال ۲۰۰۹، Olufayo و همکاران در زمینه تأثیر ذخیره‌سازی آب در مخازن ماسه‌ای با احداث سیل‌بند در مسیر جریان در رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای در آفریقای جنوبی تحقیقاتی را انجام دادند. Luyun و همکاران در سال ۲۰۰۹، با استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی، فرآیند پخش آب شور باقی‌مانده در مخزن سد زیرزمینی ساحلی را بررسی کردند. ایشان برای مدل‌سازی عددی، از مدل SEAWAT استفاده کردند. بر اساس نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی ایشان،

لازم است ذکر شود که سوراخ‌های مربوط به نصب پیزومترها در کف مخزن در محل قرار گرفتن سرریز به هم نزدیک‌ترند و در این محل پیزومترها بر روی دیواره مخزن نیز دیده می‌شوند. برای اندازه‌گیری سطح آب در نقاط مختلف از پیزومترهای فشارسنجی استفاده شد. پیزومترهای شفاف و انعطاف‌پذیر، از یک سو به مخزن در محل سوراخ‌ها متصل شده و از سوی دیگر بر روی تابلوی مدرجی نصب شدند، تا بتوان در زمان انجام آزمایش هد را در طول مدل تنظیم کرد.

پس از ساخته شدن مخزن و نصب پیزومترها، آب‌بند کردن مخزن در محل سوراخ‌ها و درزها با استفاده از چسب آکواریوم انجام شد. به منظور تأمین آب ورودی به مخزن، مخزن فولادی به ابعاد $0.5 \times 0.5 \times 0.5$ متر ساخته شد. در وسط این مخزن سرریزی به منظور کنترل سطح آب و برقراری جریان پایدار قرار داده شد. این مخزن فولادی در بالادست مخزن اصلی قرار گرفته و با شیلنگ به شیر ورودی مخزن اصلی متصل شد. شیر ورودی مخزن از نوع تنظیمی است و دبی ورودی مخزن اصلی از طریق آن تنظیم می‌شد. در ابتدای مخزن سرریزی برای کنترل هد در بالا دست مخزن قرار داده شد. در شکل ۲ نمای کلی محل قرارگیری سد زیرزمینی و سرریز بالادست مخزن اصلی و ورودی و خروجی آن ارائه شده است. در ۲۰ سانتی‌متری ابتدای مخزن از سمت چپ (نقطه ورودی) از مصالح درشت‌دانه‌تر به منظور آرام کردن جریان ورودی استفاده شد. محل قرارگیری سرریز سد نیز همان‌گونه که گفته شد در ۳۰ سانتی‌متری انتهای مخزن جای داده شده است. فاصله مابین سرریز سد تا انتهای مخزن نیز با استفاده از مصالح شن نخودی پر شد تا جریان آب درون مصالح اصلی پس از عبور از سرریز سد زیرزمینی بتواند به راحتی از داخل این مصالح عبور کرده و از خروجی تخلیه شود.

K، بارکل روی سد زیرزمینی در بالادست سد H، عرض مؤثر در جریان B، طول تاج سرریز سد زیرزمینی b، ارتفاع سرریز سد زیرزمینی P، ضخامت سد زیرزمینی t، طولی از آبخوان بالادست که افت سطح آب در آن اتفاق می‌افتد L، کشش سطحی σ ، لزجت دینامیکی سیال μ و قطر مؤثر ذرات خاک de.

رابطه بین متغیرها به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$\Phi_1(Q, K, H, B, b, p, t, L, \sigma, \mu, de) = 0 \quad (1)$$

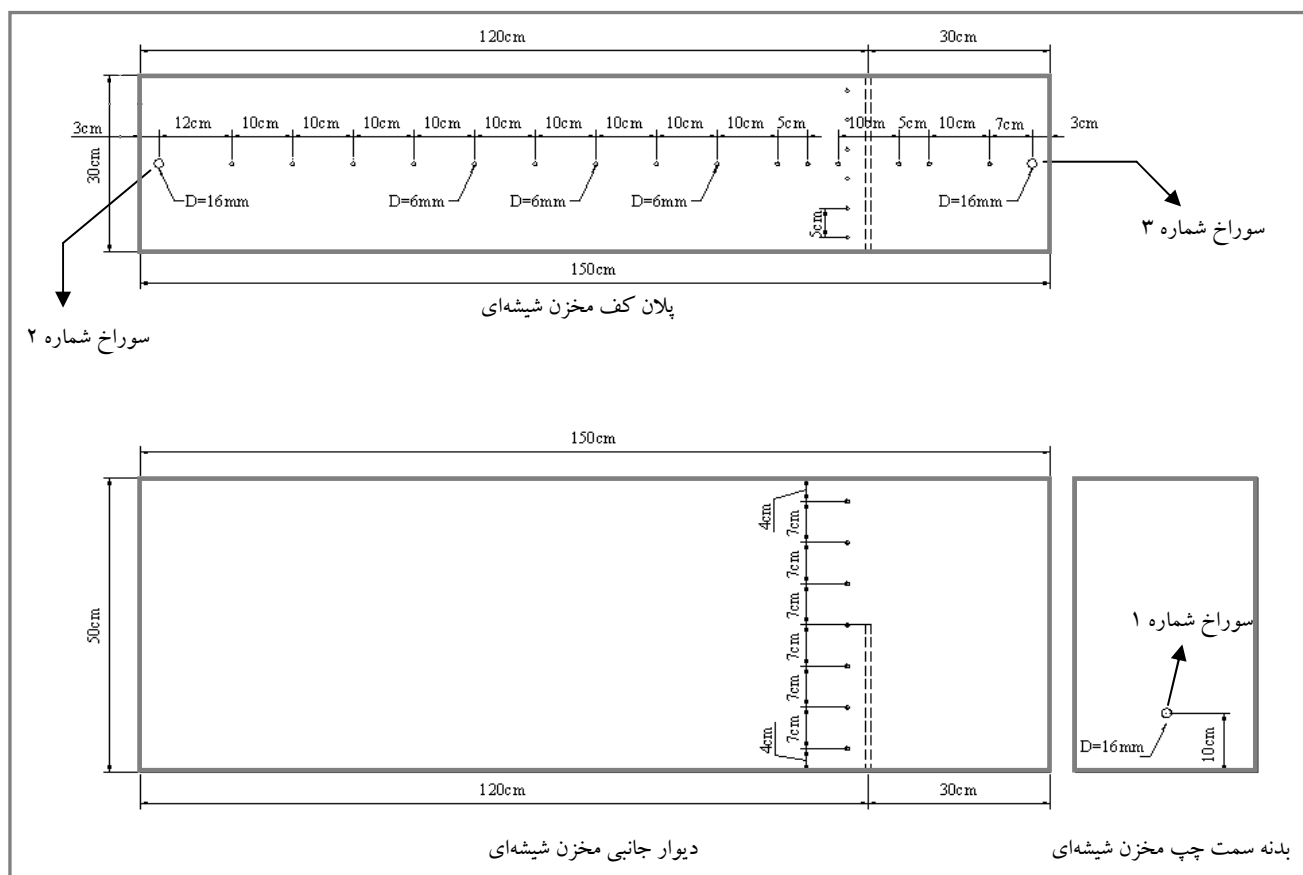
با انجام تحلیل ابعادی، پارامترهای بی‌بعد زیر حاصل می‌شوند:

$$(Q/KbH) = \Phi_2(H/b, B/b, P/b, L/P, t/P, Re, We) \quad (2)$$

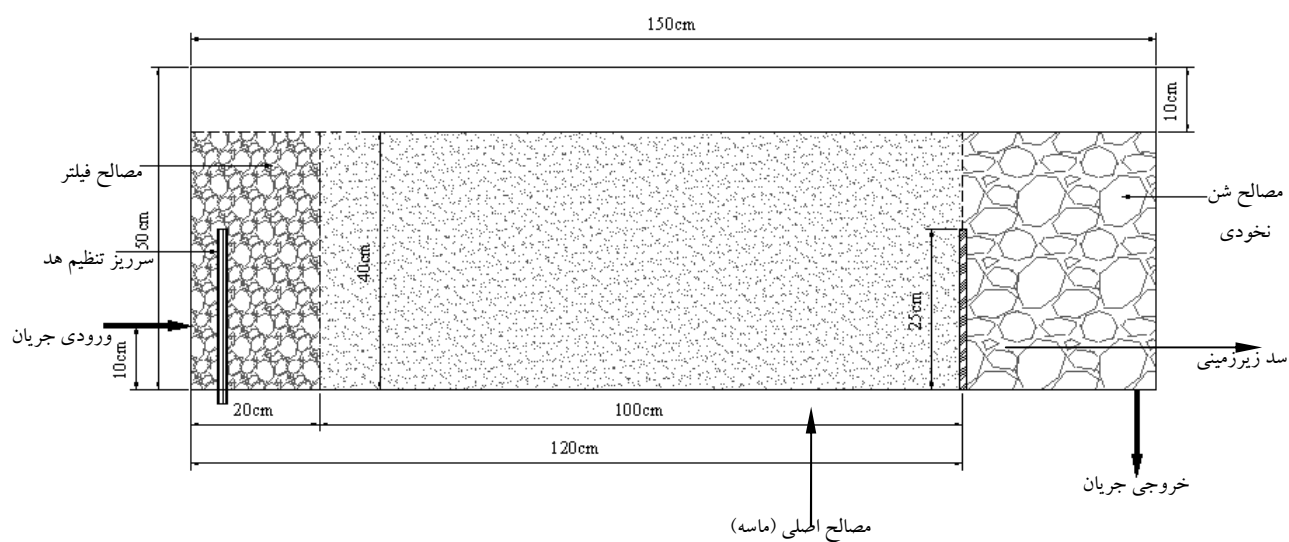
که Re و We به ترتیب اعداد بی‌بعد رینولدز و وبر است. در ادامه تحقیق با سنجش میزان تأثیر هر یک از این پارامترها این امکان وجود دارد که بتوان از تعدادی از آنها صرف‌نظر کرد.

۳- مدل سازی آزمایشگاهی آبخوان و سرریز سد زیرزمینی

برای انجام آزمایشهای این تحقیق، مخزنی شیشه‌ای به طول ۱/۵ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۵ متر از جنس شیشه ایمن^۱ (با ضخامت ۱۰ میلی‌متر) در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی اصفهان ساخته شد. در طول کف و ارتفاع دیواره مخزن سوراخ‌هایی با فواصل مشخص و به‌منظور نصب پیزومترهای لازم برای مشاهده افت هد در طول و ارتفاع مخزن ایجاد شد. در شکل ۱ محل و شماره سوراخ‌ها در کف و دیواره مخزن مشاهده می‌شود (شمس، ۱۳۸۹). سوراخ ۱ محل نصب شیر ورودی، سوراخ ۲ محل نصب سرریز کنترل هد در بالادست مخزن و سوراخ ۳، محل اندازه‌گیری دبی خروجی از مخزن در پایین‌دست است.



شکل ۱. نمایی از دیواره و کف مخزن شیشه‌ای



شکل ۲. طرحواره مدل آزمایشگاهی

یک متر میانی آکواریوم محل قرارگیری نمونه اصلی است که قبلاً دانه‌بندی و هدایت هیدرولیکی آن تعیین شده است. مصالح اصلی مورد نظر در این آزمایشها ماسه بود که در چند لایه و با تراکم مناسب در مخزن اصلی قرار می‌گرفت. در مرحله اول برای انجام آزمایش دانه‌بندی باید از انبار ماسه مورد نظر به صورت صحیح نمونه‌برداری کرد. پس از آزمایش دانه‌بندی و مشخص شدن درصد عبوری از هر الک، منحنی دانه‌بندی نمونه مورد نظر ترسیم شد. این مرحله برای ۳ نوع مصالح (ماسه) متفاوت انجام شد که نتایج آن در شکل ۳ نشان داده شده است. از آنجا که مصالح مورد نظر ماسه و درشت‌دانه است، آزمایش تعیین ضریب نفوذپذیری با بار ثابت انجام شد. در مرحله بعدی باید شرایط لازم برای انجام آزمایشها فراهم شود.

در این مرحله سرریز تنظیم هد بالادست، در ارتفاع مناسب قرار می‌گرفت. سپس مصالح درشت‌دانه در ۲۰ سانتی‌متری ابتدای مخزن (از سمت چپ) و تا ارتفاع ۴۰ سانتی‌متری ریخته و سرریز و سد زیرزمینی در محل خود ثابت می‌شد. در ۳۰ سانتی‌متری انتهای مخزن و در پایین‌دست سرریز، مصالح شن نخودی برای سهولت در گزردگی آب قرار می‌گرفت. اتصال تمامی شیرها و آب بند بودن مخزن بررسی می‌شد. پس از آماده‌سازی مخزن، مصالحی که قبلاً دانه‌بندی و هدایت هیدرولیکی آنها تعیین شده بود، در یک متر میانی مخزن در لایه‌های ۵ سانتی‌متری ریخته و متراکم می‌شدند. ابتدا مخزن ذخیره فولادی از آب پر شده و سپس توسط سرریز، ارتفاع آب در مخزن ثابت نگاه داشته می‌شد. با باز کردن شیر ورودی آب مخزن، جریان برقرار می‌شد. مخزن شیشه‌ای از آب پر شده و از سرریز انتهایی آب سرریز می‌کرد و از خروجی انتهای مخزن خارج می‌شد. وجود سرریز در ابتدای مخزن شیشه‌ای موجب می‌شد که ارتفاع آب در مخزن در ارتفاع مورد نظر ثابت

باقی بماند. این ارتفاع همان هد بالادست سرریز است که توسط پیزومترها خوانده می‌شود. میزان افت سطح آب در پیزومترهای نصب شده بر روی تابلو خوانده و ثبت می‌شد. پس از ثابت شدن پیزومترها و تغییر نکردن ارتفاع آب در آنها، حالت پایدار در مدل به‌وجود می‌آمد.

پس از ایجاد شرایط پایدار در مدل، دبی عبوری از سرریز ثابت شده که می‌توان آن را از طریق خروجی به روش حجمی اندازه‌گیری و ثبت کرد. در هر مرحله به کمک سرریز بالادست مخزن و شیرکنترلی ورودی، هد بالادست سرریز به دلخواه تغییر کرده و پس از برقراری مجدد حالت پایدار، دبی عبوری از سرریز از خروجی مخزن اندازه‌گیری می‌شد. آزمایشها برای ۵ هد مختلف و برای ۳ عرض مختلف سرریز تکرار شد. در مرحله بعدی ارتفاع سرریز تغییر کرده و آزمایشها بار دیگر انجام و نتایج ثبت می‌شد. در مرحله بعدی مصالح اصلی تعویض می‌شد تا اثر هدایت هیدرولیکی بر دبی عبوری از سرریز سد زیرزمینی مشاهده شود. آزمایشها برای ۳ نوع مصالح متفاوت انجام و نتایج ثبت شد. همان‌گونه که در بخش قبلی گفته شد، آزمایشهای مختلفی با پارامترهای متفاوت انجام شد. در جدول ۱ پارامترهای مورد نظر و مقادیر هر یک در آزمایشها ارائه شده است.

۴- مدل‌سازی عددی آبخوان و سرریز سد

زیرزمینی با نرم‌افزار Seep 3D

نرم‌افزار Seep 3D جزو مجموعه نرم‌افزارهای Geo-slope است و به کمک آن می‌توان مسائل مربوط به جریان آب زیرزمینی را تحلیل کرد. این نرم‌افزار قابلیت تحلیل مدل را در دو حالت اشباع و غیراشباع به روش اجزای محدود دارد. این نرم‌افزار برای مدل‌سازی حالت‌های سه‌بعدی جریان و مشاهده نتایج در این حالتها نیز مناسب است. در

این نرم افزار، معادله جریان در محیط اشباع و غیر اشباع با قانون داریسی توصیف می شود:

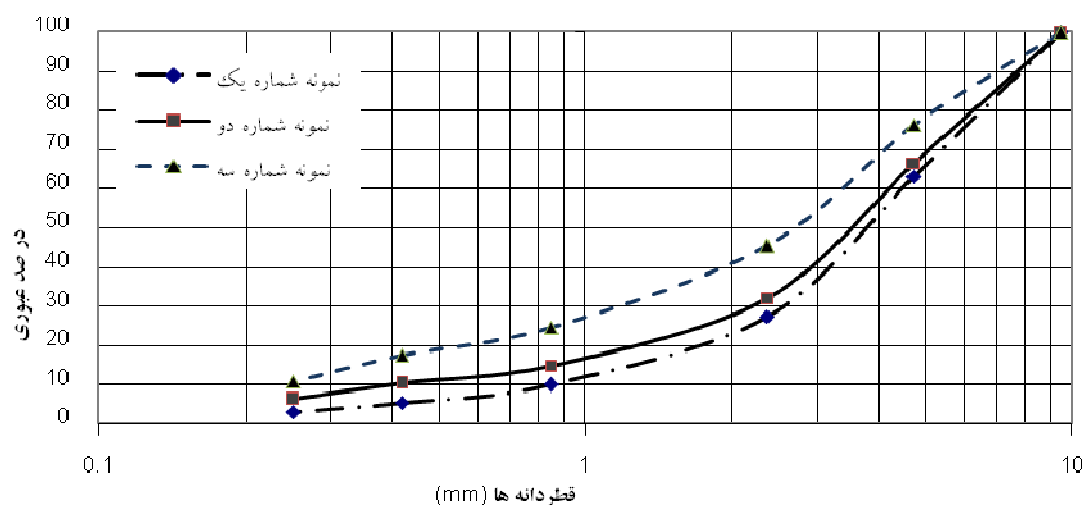
$$Q = k.i \quad (3)$$

Q دبی ویژه، k هدایت هیدرولیکی و i گرادیان هیدرولیکی است. قانون داریسی در محیط های متخلخل با جریان آرام، قابل استفاده است. برای تعیین نوع جریان،

باید عدد رینولدز (Re) را محاسبه کرد.

$$Re = \frac{v.d}{\nu} \quad (4)$$

در رابطه فوق، V سرعت ظاهری و d قطر مؤثر ذرات خاک است. اعتبار فرمول داریسی با توجه به وضعیت جریان و مقدار عدد رینولدز در جدول ۲ مشخص شده است (شمسایی، ۱۳۸۱).



شکل ۳ منحنی دانه بندی سه نوع ماسه مورد آزمایش

جدول ۱ پارامترهای مختلف در مدل آزمایشگاهی

ردیف	هدایت هیدرولیکی (k) (m/s)	هد بالادست (H) (cm)	طول تاج سرریز (b) (cm)	ارتفاع سرریز (P) (cm)	تعداد آزمایشات
۱	9×10^{-3}	۲ و ۳/۵ و ۵ و ۶/۵ و ۸	۱۰ و ۲۰ و ۳۰	۲۰ و ۲۵	۳۰
۲	$2/5 \times 10^{-3}$	۲ و ۳/۵ و ۵ و ۶/۵ و ۸	۱۰ و ۲۰ و ۳۰	۲۵	۱۵
۳	5×10^{-4}	۲ و ۳/۵ و ۵ و ۶/۵ و ۸	۳۰	۲۵	۵

جدول ۲ محدوده اعتبار رابطه داریسی با توجه به وضعیت جریان و مقدار عدد رینولدز (سعادت، ۱۳۸۱)

عدد رینولدز	$Re < 1$	$1 < Re < 10$	$Re > 10$
وضعیت جریان در محیط متخلخل	جریان آرام	جریان در منطقه حد واسط	جریان متلاطم
امکان استفاده از رابطه داریسی	می توان	با تقریب می توان	نمی توان

بار نسبت به زمان هستند و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\lambda = m_w \gamma_w \quad (10)$$

$$\int_v (\lambda \langle N \rangle^T \langle N \rangle) dv \quad (11)$$

$$[B] = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial x} \\ \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial y} \\ \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (13)$$

که در آن :

$$C_{11} = K_x \cos^2 \alpha \cos^2 \beta + K_y \sin^2 \alpha \sin^2 \beta + K_z \sin^2 \beta \cos^2 \alpha \quad (14-الف)$$

$$C_{12} = K_x \sin \alpha \cos \alpha \cos \beta - K_y \sin \alpha \cos \alpha \cos \beta - K_z \sin \alpha \sin \beta \cos \alpha \quad (14-ب)$$

$$C_{13} = K_x \sin \beta \cos \beta \cos^2 \alpha + K_y \sin \beta \cos \beta \sin^2 \alpha - K_z \sin \beta \cos \beta \cos^2 \alpha \quad (14-پ)$$

$$C_{21} = C_{12} \quad (14-ت)$$

$$C_{22} = K_x \sin^2 \alpha + K_y \cos^2 \alpha + K_z \sin^2 \alpha \quad (14-ث)$$

$$C_{23} = K_x \sin \alpha \sin \beta \cos \alpha - K_y \sin \alpha \sin \beta \cos \alpha + K_z \sin \alpha \cos \alpha \cos \beta \quad (14-ج)$$

$$C_{31} = C_{13} \quad (14-چ)$$

$$C_{32} = C_{23} \quad (14-ح)$$

$$C_{33} = K_x \sin^2 \beta \cos^2 \alpha + K_y \sin^2 \alpha \sin^2 \beta + K_z \cos^2 \alpha \cos^2 \beta \quad (14-خ)$$

در این روابط، α زاویه بین بردار K_x و صفحه افقی x-z و β زاویه بین بردار K_x و صفحه قائم x-y است. در شرایط ایزوتروپ، زوایای α و β برابر صفر بوده و معادله (13) به صورت زیر درمی‌آید:

$$[C] = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix} \quad (15)$$

در شرایط پایدار، بار مستقل از زمان بوده و در نتیجه

تجربه پژوهشگران مختلف نشان می‌دهد که انحراف از کاربرد رابطه داریسی بسیار کند صورت می‌پذیرد، به طوری که تعیین حد مشخصی برای آن دشوار است. باید توجه داشت که مقدار بحرانی عدد رینولدز به شکل ذرات و شکل فضای خالی داخل خاک نیز بستگی دارد. در ادامه به بررسی معادلات حاکم بر جریان پرداخته می‌شود. معادله دیفرانسیل حاکم برای حالت زهکشی در نرم افزار Seep3D به صورت زیر است (Seep 3D Manual):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (5)$$

در این رابطه، H بارکل و Q دبی جریان است. در شرایط پایدار، سمت راست معادله (5) برابر صفر است. تغییر در فشار آب حفره‌ای باعث تغییر درصد حجم آب در خاک می‌شود. در نتیجه:

$$\partial \theta = m_w \partial u_w \quad (6)$$

در این رابطه، u_w فشار آب حفره‌ای و m_w شیب منحنی درصد حجمی آب در خاک است. بیشینه بار کل به صورت زیر توصیف می‌شود:

$$H = \frac{u_w}{\gamma_w} + y \quad (7)$$

در این رابطه، y ارتفاع و γ_w وزن مخصوص آب است. با ترکیب رابطه‌های (6) و (7) با معادله (5)، معادله (8) حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial (H-y)}{\partial t} \quad (8)$$

این معادله در شکل اجزای محدود با استفاده از روش گالرکین به صورت زیر است:

$$\int_v ([B]^T [C] [B]) dv \{H\} + \int_v (\lambda \langle N \rangle^T \langle N \rangle) dv \{H\}_t = \int A (q \langle N \rangle^T \langle N \rangle) dA \quad (9)$$

که در آن $[B]$ ماتریس گرادیان، $[C]$ ماتریس هدایت هیدرولیکی، $[M]$ ماتریس جرم المان، $\{H\}$ بردار بارهای گره‌ای، q جرم واحد طول، $\langle N \rangle$ توابع شکل و $\{H\}_t$ تغییر

معادله اجزای محدود، به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$[K]\{H\} = \{Q\} \quad (۱۶)$$

که در آن $[K]$ ماتریس خصوصیات المان و $\{Q\}$ بردار جریان المان است که با روابط (۱۷) و (۱۸) تعریف می‌شوند.

$$[K] = \int_V ([B]^T [C] [B]) dv \quad (۱۷)$$

$$[Q] = \int_A (q \langle N \rangle^T \langle N \rangle) dA \quad (۱۸)$$

ماتریس‌های خصوصیات المان، جرم و بردار جریان المان به روش انتگرال گیری عددی گوس به دست می‌آیند.

معمولاً انتخاب هشت نقطه انتگرال برای المان‌های شش‌وجهی مناسب است. با کاهش تعداد نقاط انتگرال نیز می‌توان نتایج قابل قبولی را به دست آورد. برای مثال، نقاط کمتری برای نواحی اشباع که گرادیان هیدرولیکی کم و هدایت هیدرولیکی ثابت است، مناسب به نظر می‌رسد. برای حل معادله اجزای محدود در حالت انتقالی که به صورت تابعی از زمان معرفی می‌شود، از تقریب تفاضل محدود به صورت زیر استفاده می‌شود.

$$(w \Delta t [k] + [M])\{H_1\} = \Delta t ((1-w)\{Q_0\} + w\{Q_1\}) + ([M] - (1-w)\Delta t [K])\{H_0\} \quad (۱۹)$$

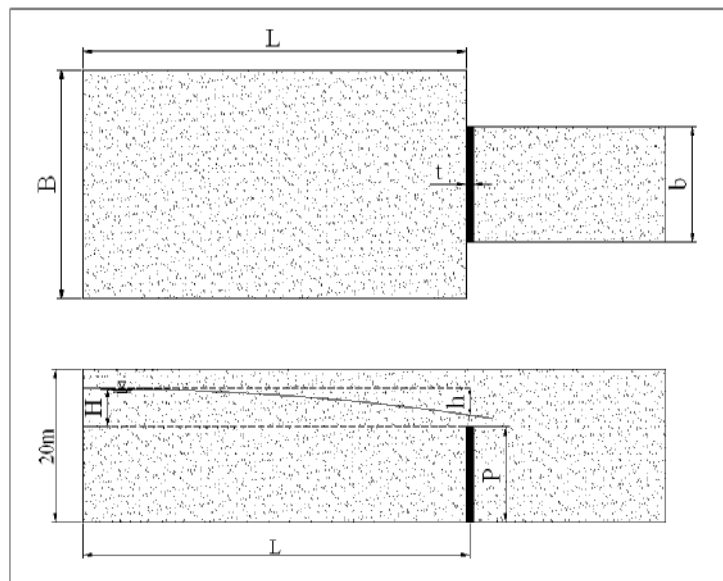
که در آن Δt نمو زمانی، w نسبتی بین ۰ و ۱، $\{H_1\}$ بار در انتهای نمو زمانی، $\{H_0\}$ بار در شروع نمو زمانی، $\{Q_1\}$ جریان گرهی در انتهای نمو زمانی و $\{Q_0\}$ جریان گرهی در شروع نمو زمانی است. Seep3D، از روش تفاضل پیشرو استفاده کرده و w را برابر یک قرار می‌دهد. در نتیجه معادله (۱۹) به شکل رابطه (۲۰) در می‌آید.

$$(\Delta t [k] + [M])\{H_1\} = \Delta t \{Q_1\} + [M]\{H_0\} \quad (۲۰)$$

تعریف هندسی مدل در این نرم‌افزار به کمک «بلوک‌ها» انجام می‌شود. این بلوک‌ها به شکل مکعب یا شش‌وجهی، هرم سه گوشه یا چهار وجهی و منشور هستند. نرم‌افزار این امکان را به کاربر می‌دهد که بتواند ابعاد و اندازه هر

یک از این بلوک‌ها را در وجوه مختلف تغییر دهد. به کمک مجموعه‌ای از این بلوک‌ها می‌توان حوزه را تا حد امکان به شکل دلخواه مدل‌سازی کرد. شرایط مرزی در نرم‌افزار Seep3D به چهار شکل بار کل، بار فشار، جریان و پتانسیل زهکشی است. با تعریف نام شرط مرزی مورد نظر و انتخاب نوع آن، می‌توان مقدار مربوط به شرط مرزی مورد نظر را به صورت ثابت یا تابعی از زمان به نرم‌افزار وارد کرد. شرایط مرزی تعریف شده را می‌توان به خطوط، نقاط و سطوح بلوک‌ها اختصاص داد. باید دقت شود که در صورت انتخاب جریان به عنوان شرط مرزی و اختصاص آن به نقطه، از بعد L^3/T ، در صورت اختصاص آن به خط، از بعد L^2/T و چنانچه مقدار جریان به عنوان شرط مرزی به سطح بلوک اختصاص یابد از بعد L/T استفاده می‌شود. پس از آنکه هندسه مدل در نرم‌افزار ساخته شد، با انتخاب خطوط مربوط به هر بلوک در راستاهای x و y و z در بخش مربوط به شبکه تعداد تقسیمات مورد نظر به نرم‌افزار وارد می‌شود. در شکل ۴ مقطع مدل‌های ساخته شده در نرم‌افزار بر اساس پارامترهای مختلف نشان داده شده است (شمس، ۱۳۸۹).

در این شکل، Q دبی عبوری از روی سرریز، k هدایت هیدرولیکی لایه آبدار، H بار کل روی سد زیرزمینی در بالادست سد، B عرض مؤثر در جریان، b طول تاج سرریز سد زیرزمینی، P ارتفاع سرریز سد زیرزمینی، t ضخامت سد زیرزمینی، L طولی از آبخوان بالادست از محل سد زیرزمینی تا جایی که بار کل ثابت شده و سطح آب زیرزمینی افقی می‌شود (طولی که افت هد در آبخوان، در آن اتفاق می‌افتد) و T ضخامت لایه آبدار در بالادست سد زیرزمینی است. در جدول ۳ پارامترهای مختلف مورد استفاده در مدل عددی معرفی شده است.



شکل ۴ مقطع مدل‌های ساخته شده در نرم افزار بر اساس پارامترهای مختلف

جدول ۳ پارامترهای مختلف مورد آزمایش در مدل نرم افزاری

ردیف	K (m/s)	H (m)	B (m)	b (m)	P (m)	L (m)	t (m)	تعداد مدل‌های ساخته شده
۱	1×10^{-4}	۵ و ۴ و ۳ و ۲ و ۱	۱۵۰ و ۷۰ و ۳۵	۳۵ و ۲۵ و ۱۵	۷ و ۱۰ و ۱۳	۱۵۰ و ۹۰ و ۶۰	۱ و ۳ و ۵	۷۵
۲	5×10^{-4}	۵ و ۴ و ۳ و ۲ و ۱	۱۵۰ و ۷۰ و ۳۵	۳۵ و ۲۵ و ۱۵	۷ و ۱۰ و ۱۳	۱۵۰ و ۹۰ و ۶۰	۱ و ۳ و ۵	۷۵
۳	1×10^{-3}	۵ و ۴ و ۳ و ۲ و ۱	۱۵۰ و ۷۰ و ۳۵	۳۵ و ۲۵ و ۱۵	۷ و ۱۰ و ۱۳	۱۵۰ و ۹۰ و ۶۰	۱ و ۳ و ۵	۷۵
۴	5×10^{-3}	۵ و ۴ و ۳ و ۲ و ۱	۱۵۰ و ۷۰ و ۳۵	۳۵ و ۲۵ و ۱۵	۷ و ۱۰ و ۱۳	۱۵۰ و ۹۰ و ۶۰	۱ و ۳ و ۵	۷۵
۵	8×10^{-3}	۵ و ۴ و ۳ و ۲ و ۱	۱۵۰ و ۷۰ و ۳۵	۳۵ و ۲۵ و ۱۵	۷ و ۱۰ و ۱۳	۱۵۰ و ۹۰ و ۶۰	۱ و ۳ و ۵	۷۵

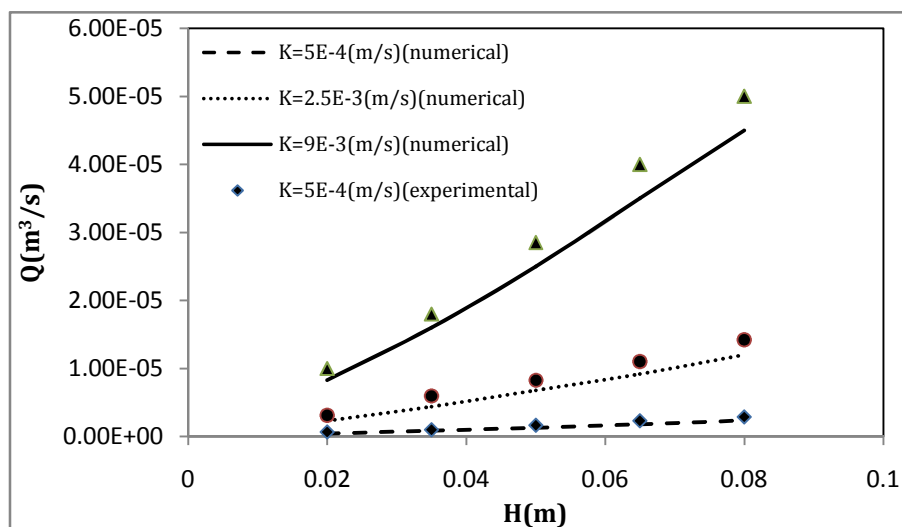
۵- تحلیل نتایج

شکل ۵ مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی و عددی برای دبی عبوری از سرریز در مقابل هد بالادست به ازای مقادیر مختلف هدایت هیدرولیکی را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که در شکل ۵ دیده می‌شود نتایج مربوط به دبی عبوری از سرریز سد زیرزمینی در مدل آزمایشگاهی ساخته شده در آزمایشگاه و مدل عددی بسیار به هم نزدیک هستند. بنابراین نتایج مربوط به مدل ساخته شده در نرم‌افزار با آنچه در طبیعت روی می‌دهد مطابقت خوبی دارد. با دقت در شکل ۵ می‌توان دریافت که در هر

سه نمونه خاک، نتایج مربوط به دبی عبوری از سرریز سد زیرزمینی در مدل آزمایشگاهی کمی بیشتر از میزان دبی عبوری از سرریز سد در مدل ساخته شده در نرم‌افزار است. در ارتباط با علل اختلاف نتایج مدل‌های عددی و آزمایشگاهی می‌توان موارد زیر بر شمرده.

الف) یکی از مواردی که می‌تواند موجب بیشتر بودن دبی در مدل آزمایشگاهی باشد، تأثیر خاصیت مویینگی است که در مدل عددی به صورت دقیق در نظر گرفته نمی‌شود، اما در مدل آزمایشگاهی اثرگذار است.



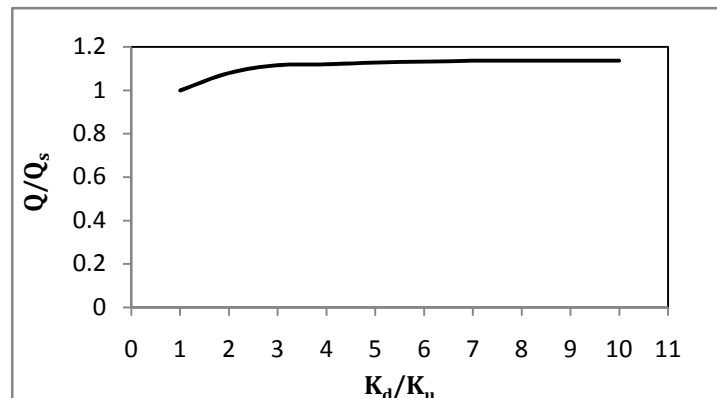
شکل ۵ مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی و عددی

در مجموع نتایج مربوط به مدل فیزیکی و مدل ساخته شده در نرم افزار برای دبی عبوری از سرریز سد زیرزمینی بسیار به هم نزدیک هستند. لذا می توان با قابل قبول دانستن نتایج مدل عددی و نرم افزار Seep3D، تأثیر سایر پارامترهای هیدرولیکی را بر میزان دبی عبوری از سرریز سد زیرزمینی بررسی کرد.

در ادامه و پیش از ساخت مدل های مختلف در نرم افزار و بررسی تمامی پارامترهای مؤثر بر دبی عبوری از سرریز سد های زیرزمینی، تأثیر پارامترهای مربوط به پایین دست سد زیرزمینی مانند هدایت هیدرولیکی مصالح موجود در پایین دست سد یا مقدار هد در پایین دست سد زیرزمینی بر دبی عبوری از سد زیرزمینی بررسی می شود. به منظور بررسی تأثیر هدایت هیدرولیکی مصالح پایین دست سرریز، مدلی مشابه با مدل آزمایشگاهی ساخته شده در آزمایشگاه، در نرم افزار با مقیاس ۱۰۰ برابر ساخته شد. در هر مرحله از تحلیل مدل، هدایت هیدرولیکی مصالح در پایین دست سد افزایش یافته و نتایج آن ثبت شد که به صورت بی بعد در شکل ۶ نشان داده شده است.

ب) به علت محدودیت در مدل سازی هندسه مدل در نرم افزار، ضخامت سد در نرم افزار ناگزیر ۱۰ سانتی متر انتخاب شده، درحالی که این ضخامت در مدل فیزیکی فقط ۱ سانتی متر است. در ادامه تحقیق و در بررسی سایر پارامترهای هیدرولیکی مؤثر بر دبی عبوری از سرریز سد زیرزمینی به این نکته اشاره خواهد شد که با افزایش ضخامت سرریز سد زیرزمینی دبی عبوری از سرریز کاهش می یابد. لذا یکی از عوامل تأثیرگذار بر کاهش میزان دبی در مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی، اختلاف ضخامت سرریز سد در دو مدل است.

ج) هدایت هیدرولیکی خاک یکی از مهمترین پارامترهای مؤثر بر دبی عبوری از سرریز سد زیرزمینی است. ایجاد مقداری ثابت برای هدایت هیدرولیکی خاک موجود در مخزن شیشه ای در آزمایشگاه با توجه به نحوه تراکم و نبود امکان ایجاد شرایط یکنواختی کار ساده ای نیست. این در حالی است که در نرم افزار مقدار هدایت هیدرولیکی به صورت ثابت وارد می شود و این موضوع یکی از دلایلی است که می تواند باعث اختلاف مقدار دبی عبوری از سرریز سد در مدل های آزمایشگاهی و عددی شود.

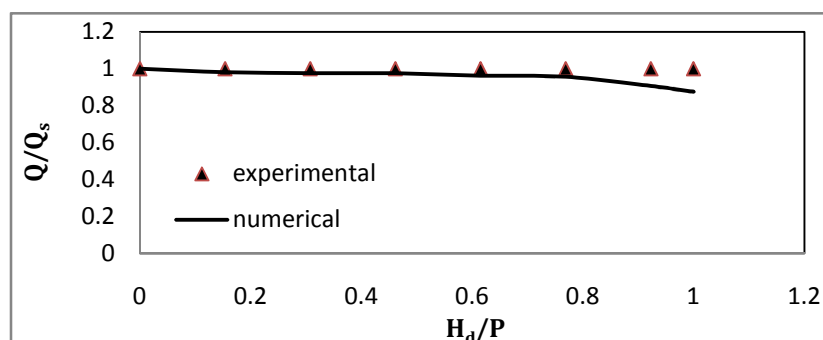


شکل ۶ اثر هدایت هیدرولیکی مصالح پایین‌دست سد بر دبی عبوری از سرریز سد زیرزمینی

بررسی شود لذا در ادامه تحقیق و در مدل‌سازی عددی نمونه‌ها توسط نرم‌افزار Seep3D هدایت هیدرولیکی مصالح پایین‌دست و بالادست سد زیرزمینی یکنواخت فرض می‌شود. جهت بررسی تأثیر مقدار هدایت پایین‌دست سد زیرزمینی در آزمایشگاه، آزمایشهایی با هدهای مختلف پایین‌دست سد زیرزمینی انجام و دبی عبوری از سرریز سد در حالت پایدار تعیین شد. همچنین مدلی عددی با ابعاد ۱۰۰ برابر مدل آزمایشگاهی ساخته شده و در هر مرحله از تحلیل، مقدار هدایت پایین‌دست سد زیرزمینی از مقدار صفر تا ارتفاع سرریز سد، P افزایش یافت و مقدار دبی عبوری از سرریز در هر حالت ثبت شد. نتایج مربوط به این تحلیل در شکل ۷ ارائه شده است. در این شکل H_d مقدار هدایت کل در پایین‌دست سد زیرزمینی، P ارتفاع سرریز سد زیرزمینی، Q مقدار دبی عبوری از سرریز سد زیرزمینی در هر مرحله از اجرا و Q_s مقدار دبی عبوری از سرریز سد در حالتی است که پایین‌دست سرریز سد زیرزمینی خشک باشد ($H_d=0$). علت اختلاف نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی در H_d/P بزرگتر از ۰/۶، کوچک بودن دبی‌های اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه است که اندازه‌گیری دقیق دبی خروجی را بسیار مشکل می‌سازد.

در این شکل K_d هدایت هیدرولیکی مصالح در پایین‌دست سد، K_u هدایت هیدرولیکی مصالح در بالادست سد، Q مقدار دبی عبوری از سرریز سد زیرزمینی در هر مرحله از اجرا و Q_s مقدار دبی عبوری از سرریز سد در حالتی است که مقدار هدایت هیدرولیکی بالادست و پایین‌دست سرریز یکسان باشد. همان‌گونه که در شکل ۶ مشخص است، با افزایش هدایت هیدرولیکی پایین‌دست سرریز نسبت به بالادست آن، دبی عبوری از سرریز در حدود ۱۵ درصد افزایش می‌یابد و سپس ثابت می‌ماند. یعنی با افزایش بیشتر هدایت هیدرولیکی مصالح پایین‌دست سرریز، دبی عبوری از سرریز سد زیرزمینی تغییر نمی‌کند.

علت این پدیده پایین بودن عدد رینولدز جریان است. از آنجا که در محیط‌های متخلخل این تحقیق، جریان کاملاً آرام است، به نظر می‌رسد که هدایت هیدرولیکی مصالح پایین‌دست سد تأثیر چندانی بر دبی عبوری از سرریز سد ندارند. البته لازم است ذکر شود که این موضوع حالتی را که در پایین‌دست سد زیرزمینی جریان آزاد وجود داشته باشد، در بر نمی‌گیرد. در این حالت سد به صورت آبرفتی بوده و نرم افزار قابلیت تحلیل جریان در محیط مرکب (متخلخل و آزاد) را ندارد. این موضوع باید به‌طور جداگانه

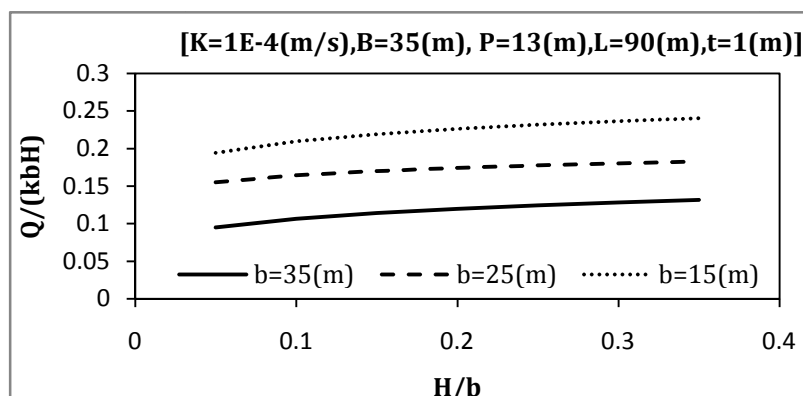
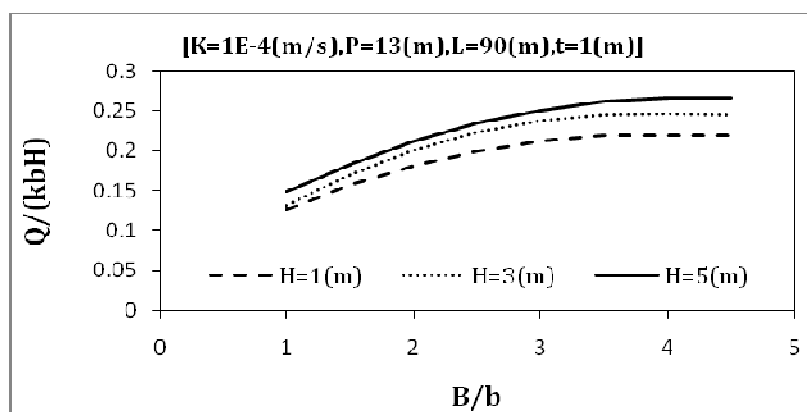
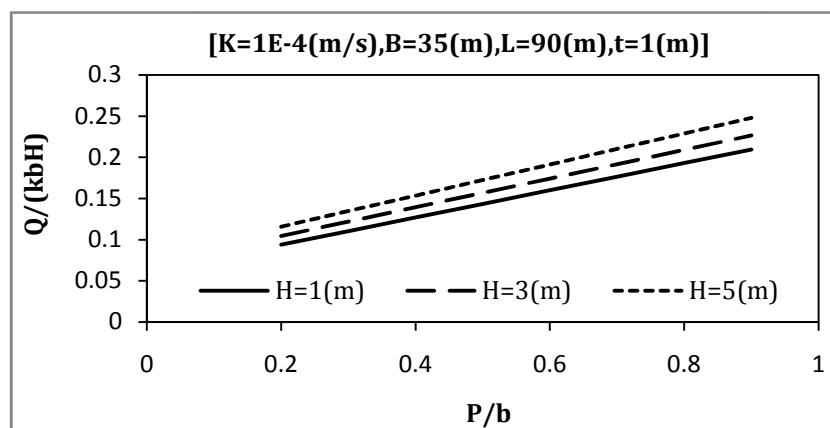


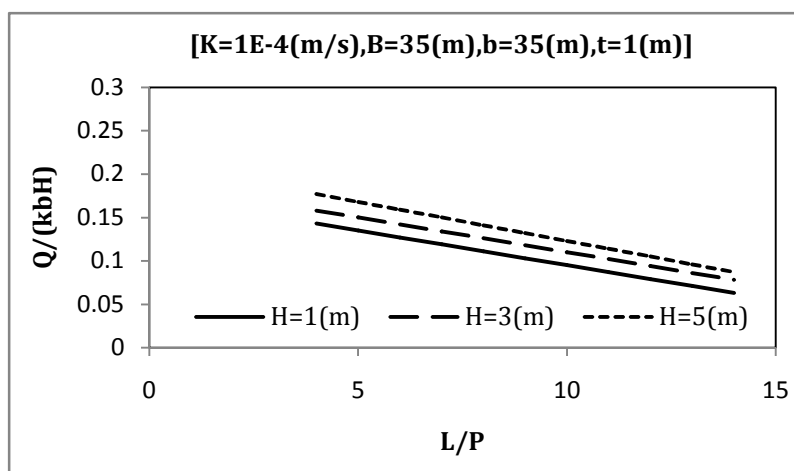
شکل ۷ اثر هد در پایین دست سد بر دبی عبوری از سرریز سد زیرزمینی

در این شکل مشخص است با افزایش B/b ، پارامتر Q/KbH ابتدا افزایش یافته و با افزایش بیشتر پارامتر B/b ، تأثیر این پارامتر بر مقدار Q/KbH کم می شود، به نحوی که برای مقادیر B/b بزرگتر از $3/5$ ، مقدار Q/KbH ثابت می ماند. اثر پارامتر P/b بر Q/KbH در شکل ۱۰ نشان داده شده است. شکل ۱۰ نشان می دهد که با افزایش پارامتر P/b مقدار Q/KbH نیز افزایش می یابد. شکل ۱۱ تأثیر پارامتر L/P را بر مقدار Q/KbH نشان می دهد. با توجه به شکل ۱۱ مشخص است که با افزایش L/P ، مقدار Q/KbH کاهش می یابد. در شکل ۱۲ تأثیر پارامتر t/P بر پارامتر Q/KbH نشان داده شده است. شکل ۱۲ نشان می دهد که با افزایش پارامتر t/P مقدار Q/KbH کاهش می یابد، هر چند این تأثیر بسیار اندک و ناچیز است. ضمن این که برای t/P های بزرگتر از $0/2$ ، مقدار Q/KbH ثابت می شود. بنابراین به طور کلی می توان نتیجه گیری کرد که با ضخیم شدن تاج سرریز، شرایط لبه پهن شدن سرریز فراهم می شود که بدین ترتیب دبی با افزایش ضخامت تاج کاهش می یابد (مشابه سرریزهای سطحی در سدها و شبکه های آبیاری و زهکشی). شکل ۱۳ روند تغییرات پارامتر Q/KbH را نسبت به عدد بی بعد رینولدز (Re) نشان می دهد.

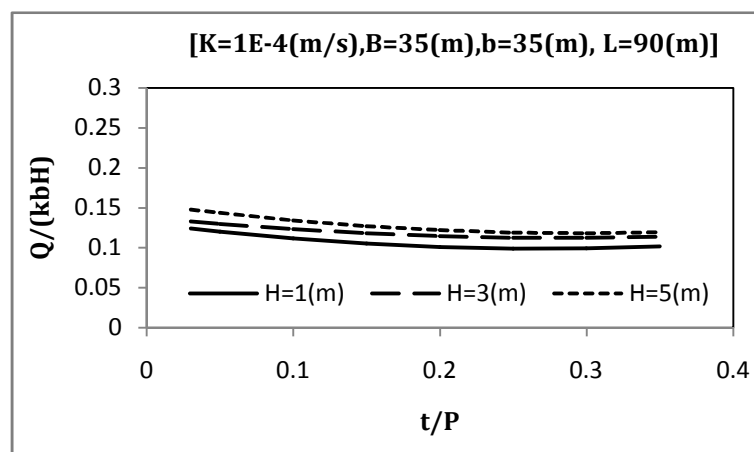
در مدل آزمایشگاهی با افزایش هد در پایین دست سرریز سد، در عمل تغییری در دبی و ارتفاع آب در پیزومترها مشاهده نشد. شکل ۶ نشان می دهد که با افزایش هد در پایین دست سد زیرزمینی تغییری در مقدار دبی عبوری از سرریز سد رخ نمی دهد. زمانی که هد در پایین دست سد زیرزمینی به $0/8$ ارتفاع سرریز می رسد، دبی عبوری کمی کاهش می یابد. این شرایط به عنوان آستانه استغراق در سرریز سد زیرزمینی تلقی شد. مقدار کاهش دبی در بدترین حالت به حدود ۱۵ درصد دبی اولیه رسیده و این در شرایطی است که هد در پایین دست سد زیرزمینی هم تراز با سرریز باشد.

در طبیعت چنین حالتی رخ نمی دهد و سطح آب در پایین دست سد زیرزمینی معمولاً پایین تر از تاج سرریز است. همان گونه که گفته شد، هد در پایین دست سد زیرزمینی تأثیر چندانی بر دبی عبوری از سرریز سد ندارد. علت این پدیده پایین بودن سرعت جریان و عدد رینولدز است که نشان می دهد جریان کاملاً آرام بوده و نیروی ثقل در محیط های متخلخل چندان نقشی ندارد. اثر پارامتر H/b بر پارامتر Q/KbH در شکل ۸ نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل دیده می شود با افزایش پارامتر H/b ، پارامتر Q/KbH افزایش می یابد. در شکل ۹ پارامتر Q/KbH بر حسب B/b ترسیم شده است. همان گونه که

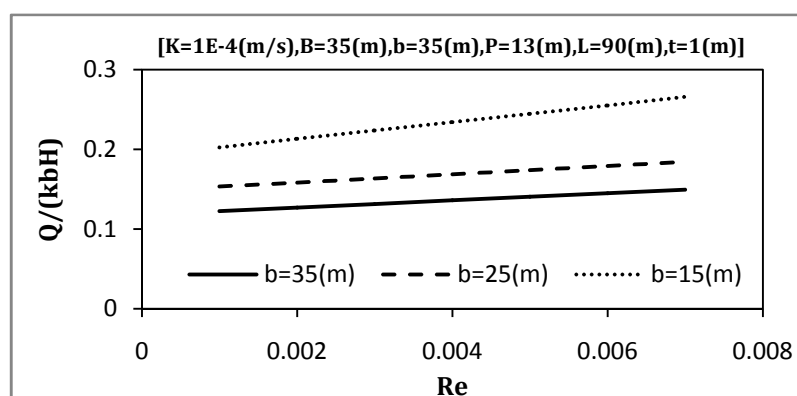

 شکل ۸ تغییرات پارامتر (Q/KbH) در مقابل پارامتر بدون بعد (H/b)

 شکل ۹ تغییرات پارامتر (Q/KbH) در مقابل پارامتر بدون بعد (B/b)

 شکل ۱۰ تغییرات پارامتر (Q/KbH) در برابر تغییرات پارامتر بی بعد (P/b)



شکل ۱۱ تغییرات پارامتر (Q/KbH) در برابر تغییرات پارامتر بی بعد (L/P)



شکل ۱۲ تغییرات پارامتر (Q/KbH) در برابر پارامتر بی بعد (t/P)



شکل ۱۳ تغییرات پارامتر (Q/KbH) در برابر عدد (Re)

شده‌اند که در ادامه معرفی می‌شوند. برای بررسی دقت رابطه حاصل، از توابع خطای NRMSE و WQD و R^2 و محدوده پراکندگی مقادیر تخمینی استفاده شده است.

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum (F(x) - f(x))^2}{\sum (f(x) - \bar{f})^2}} \quad (21)$$

$$WQD = \frac{[\sum f(x).F(x).(f(x) - F(x))^2]^{0.5}}{\sum f(x).F(x)} \quad (22)$$

که در این روابط، $f(x)$ مقادیر اندازه‌گیری شده، $F(x)$ مقادیر تخمینی، $\bar{f}$ متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده و x ها پارامترهای مستقل مورد بررسی هستند. در جدول ۴ روابط مختلفی همراه با مقادیر توابع خطای مربوط به هر یک مشاهده می‌شود. در روابط ارائه شده، محدودیت‌های زیر برقرار است. این محدودیت‌ها با معیارهای طبیعت مطابقت خوبی دارد.

$$0.035 < H/b < 0.35, H < 7 \quad (26)$$

$$4.5 < L/P < 12 \quad (27)$$

$$1 < B/b < 4.5 \quad (28)$$

$$0.2 < P/b < 1 \quad (29)$$

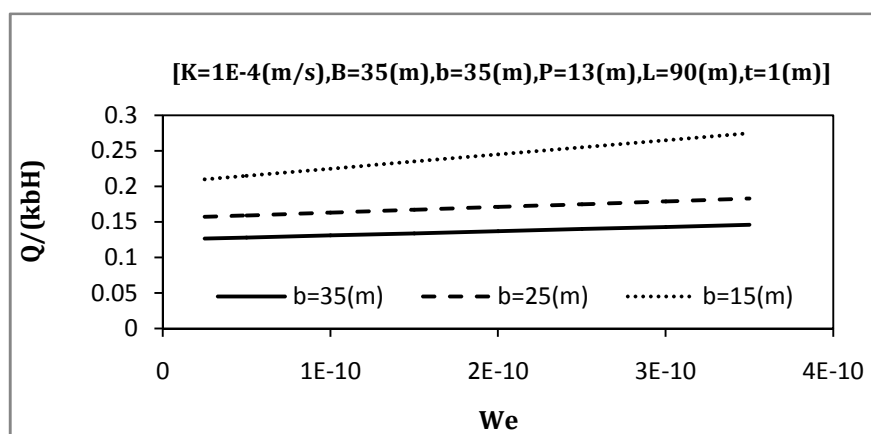
$$0.08 < t/P < 0.38 \quad (30)$$

با دقت در این شکل می‌توان دریافت که با افزایش عدد رینولدز، Q/KbH افزایش می‌یابد. شکل ۱۴ روند تغییرات پارامتر Q/KbH را نسبت به عدد بی‌بعد وبر (We) نشان می‌دهد. با دقت در شکل ۱۴ می‌توان دریافت که با افزایش عدد وبر مقدار Q/KbH افزایش می‌یابد.

۶- روابط پیشنهادی برای تخمین دبی عبوری از سرریز

با انجام تحلیل ابعادی، پارامترهای بی‌بعد مؤثر در استخراج روابط مناسبی که بیانگر شرایط هیدرولیکی حاکم بر جریان عبوری از روی سرریز سدهای زیرزمینی باشد، به‌دست آمدند. در این بخش با توجه به متغیرهای فوق و با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS و Excel، روابطی که بهترین برازش و همبستگی را با نتایج عددی و مدل آزمایشگاهی داشته باشند، پیشنهاد می‌شود. SPSS نرم‌افزار ریاضی قوی با قابلیت برقراری ارتباط بین پارامترهای توابع چند متغیره است.

در این تحقیق با تکرار سعی و خطاهای متعدد، روابطی که کمترین خطا و بیشترین همبستگی را دارند، انتخاب



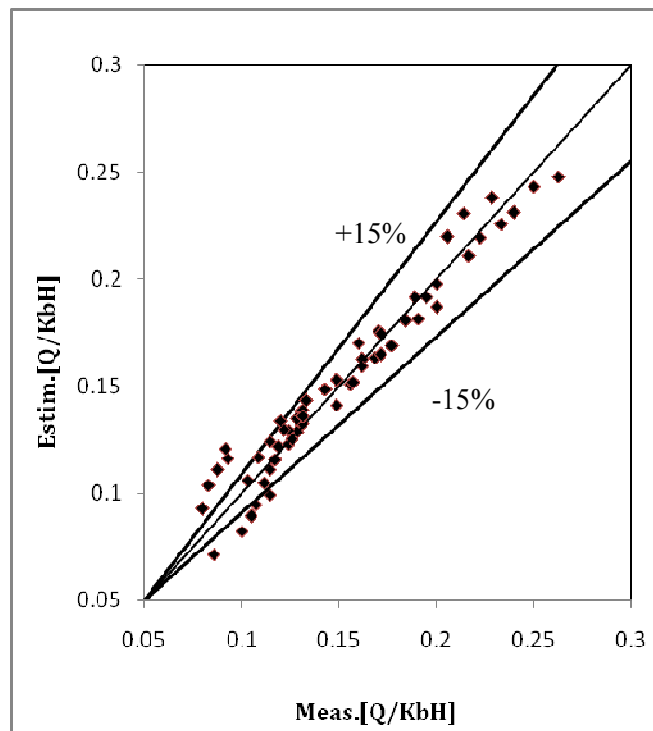
شکل ۱۴ تغییرات پارامتر (Q/KbH) در برابر تغییرات (We)

جدول ۴ روابط به دست آمده و مقادیر توابع خطا

ردیف	رابطه	R^2	$NRMSE$	WQD
(۲۳)	$\left(\frac{Q}{KbH}\right) = 0.15\left(\frac{H}{b}\right)^{0.2} + 0.12\left(\frac{B}{b}\right)^{0.4} + 0.022\left(\frac{P}{b}\right) - 0.007\left(\frac{L}{P}\right) + 0.023\left(\frac{t}{P}\right)^{-0.3} - 0.078$	۰/۹۶	۰/۲۳	۰/۰۰۳
(۲۴)	$\left(\frac{Q}{KbH}\right) = 0.15\left(\frac{H}{b}\right)^{0.15} + 0.04\left(\frac{B}{b}\right)^{0.82} + 0.036\left(\frac{P}{b}\right) - 0.007\left(\frac{L}{P}\right) + 0.007\left(\frac{t}{P}\right)^{-0.52} + 0.0016(Re)^{0.1} + 0.0016(We)^{+0.002} + 0.012$	۰/۹	۰/۳۵	۰/۰۰۷
(۲۵)	$\left(\frac{Q}{KbH}\right) = 0.13\left(\frac{H}{b}\right)^{0.2} + 0.19\left(\frac{B}{b}\right)^{0.3} + 0.06\left(\frac{P}{b}\right) - 0.16$	۰/۸۳	۰/۴۱	۰/۰۰۹

رابطه (۲۳) مطالعه می‌شود. بررسی‌ها نشان داد که در رابطه (۲۳)، با سه برابر شدن پارامتر H/b دبی عبوری از سرریز سد زیرزمینی ۲۰ درصد افزایش یافته و با پنج برابر شدن این پارامتر، دبی عبوری ۲۷ درصد افزایش می‌یابد. با بیشتر شدن مقدار این پارامتر تأثیر آن بر دبی کمتر نیز می‌شود. بیشترین حساسیت این رابطه نسبت به پارامتر B/b است. با سه برابر شدن این پارامتر، دبی حدود ۵۰ درصد افزایش می‌یابد. در صورتی که مقدار این پارامتر چهار برابر شود، دبی ۶۵ درصد افزایش یافته و با پنج برابر شدن این پارامتر، دبی عبوری از سرریز ۷۰ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر این پارامتر از تأثیر آن بر دبی باز هم کاسته خواهد شد. با افزایش پارامتر P/b ، مقدار دبی در رابطه (۲۳) افزایش می‌یابد. با سه برابر شدن این پارامتر، دبی ۱۵ درصد و با پنج برابر شدن آن دبی در حدود ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر این پارامتر، دبی نیز با همین روند نه چندان چشمگیر افزایش می‌یابد.

مقادیر توابع خطا برای رابطه (۲۲) به صورت $R^2=0.98$ ، $NRMSE=0.2$ ، $WQD=0.04$ است. شکل ۱۵ محدوده پراکندگی مقادیر تخمینی و حاصل از نرم‌افزار را برای رابطه (۲۳) نشان می‌دهد. همان‌گونه که در جدول ۴ مشخص است، روابط حاصل برای تخمین دبی به صورت مجموع چند جمله‌ای‌های توانی است. لازم است ذکر شود که سایر نسبت‌های ریاضی ممکن بین پارامتر (Q/KbH) و سایر پارامترهای بی‌بعد از قبیل ضرب پارامترها در یکدیگر به صورت توانی نیز کنترل گردید که نتایج خوبی حاصل نشد. لذا بهترین همبستگی بین خروجی‌های نرم‌افزار و روابط مختلف، زمانی به دست می‌آید که روابط به شکل مجموع چندجمله‌ای‌های توانی باشند. از مقایسه روابط ارائه شده می‌توان دریافت که رابطه (۲۳)، بر اساس حداقل خطای حاصل بهترین همبستگی را با خروجی‌های نرم‌افزار دارد و از دقت بیشتری برخوردار است. پس از مشخص شدن بهترین رابطه برای تعیین میزان دبی عبوری از سرریز سدهای زیرزمینی، در این قسمت تأثیر هر یک از پارامترها بر



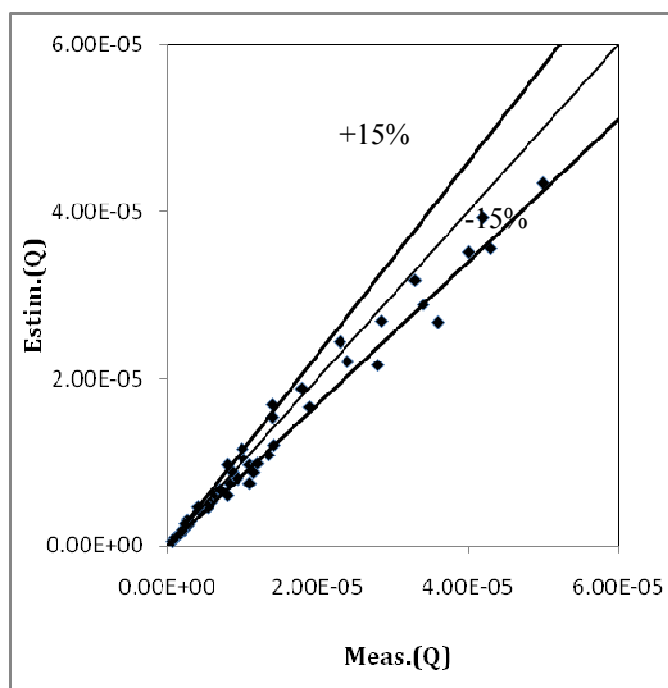
شکل ۱۵ مقایسه مقادیر تخمینی رابطه (۲۳) و مقادیر خروجی‌های مدل عددی

۷- نتیجه‌گیری

- نتایج بررسی‌های انجام شده روی مدل آزمایشگاهی به شرح زیر است:

با افزایش هدایت هیدرولیکی، افزایش دبی عبوری از سرریز تقریباً به شکل خطی است. از نتایج این‌گونه بر می‌آید که دبی عبوری از سرریز سد تابعی از هد با توان $1/2$ تا $1/3$ است. نتایج آزمایشها مشخص کرد که با کاهش طول تاج سرریز سد زیرزمینی و به‌ازای هد بالادست ثابت، دبی عبوری از سرریز کاهش می‌یابد. همچنین دبی عبوری از سرریز تقریباً تابعی از توان $0/2$ تا $0/3$ طول تاج سرریز است. با افزایش ارتفاع سرریز سد زیرزمینی و به‌ازای هد بالادست ثابت، دبی عبوری از سرریز نیز افزایش می‌یابد.

با افزایش L/P ، در محدوده مشخص شده در رابطه (۲۳)، دبی حاصل از رابطه (۲۳)، با روند کندی کاهش می‌یابد. با سه برابر شدن L/P دبی در حدود ۱۲ درصد و با پنج برابر شدن آن در حدود ۱۶ درصد کاهش می‌یابد. با افزایش بیشتر این پارامتر، تأثیر آن بر دبی به‌دست آمده از رابطه (۲۳) بسیار کاهش می‌یابد. همچنین در تحلیل دیگری اثر حذف هر یک از پارامترها در رابطه فوق بررسی شد. بر اساس نتایج حاصل، حذف پارامتر B/b بیشترین تأثیر را بر رابطه می‌گذارد. در این بخش با توجه به پارامترهای مدل آزمایشگاهی دبی عبوری از سرریز با استفاده از رابطه نهایی به‌دست آمده و با نتایج مدل آزمایشگاهی مقایسه شده است. شکل ۱۶ محدوده پراکندگی مقادیر تخمینی و اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶ مقایسه مقادیر تخمینی رابطه (۲۳) و مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه

- نتایج مدل‌سازی عددی نیز نشان داد:

افزایش عرض مؤثر در جریان، در شرایطی که سایر پارامترهای هیدرولیکی مانند هدایت هیدرولیکی لایه آبدار و هد ثابت است، موجب افزایش دبی عبوری از سرریز سد زیرزمینی می‌شود. کاهش طول تاج سرریز سد زیرزمینی b ، در شرایطی که سایر پارامترهای هیدرولیکی ثابت باشند، موجب کاهش دبی عبوری از سرریز سد زیرزمینی می‌شود. افزایش ارتفاع سرریز سد، هنگامی که سایر پارامترهای هیدرولیکی ثابت باشند و مقدار هد در بالادست سرریز ثابت است، موجب افزایش دبی عبوری از سرریز سد می‌شود. افزایش طولی از لایه آبدار بالادست از محل سد زیرزمینی تا نقطه‌ای که هد در بالادست سد ثابت می‌شود (L)، موجب کاهش دبی عبوری از سرریز سد زیرزمینی می‌شود. افزایش ضخامت سد زیرزمینی، در شرایطی که سایر پارامترهای هیدرولیکی ثابت باشند موجب کاهش

دبی عبوری از سرریز سد زیرزمینی می‌شود.

این نکته قابل توجه است که اثر عرض مؤثر در جریان B و هد در بالادست سد زیرزمینی H بر دبی عبوری از سرریز سد زیرزمینی نسبت به سایر پارامترها بیشتر و تعیین کننده‌تر است. در نهایت رابطه (۲۳) به‌منظور تخمین دبی عبوری از سرریز سد زیرزمینی پیشنهاد شد.

۸- فهرست علائم

B	عرض مؤثر در جریان
$[B]$	ماتریس گرادیان
$[C]$	ماتریس هدایت هیدرولیکی
$F(x)$	مقادیر تخمینی
H_d	مقدار هد کل در پایین‌دست سد زیرزمینی
$\{H\}$	بردار بارهای گرهی
$\{H_1\}$	بار در انتهای نمو زمانی
$\{H_0\}$	بار در شروع نمو زمانی

α	زاویه بین بردار K_x و صفحه افقی $x-z$	H	بارکل روی سد زیرزمینی در بالادست سد
β	و زاویه بین بردار K_x و صفحه قائم $x-y$	K	هدایت هیدرولیکی لایه آبدار
γ_w	وزن مخصوص آب	K_d	هدایت هیدرولیکی مصالح در پایین دست سد
μ	لزجت دینامیکی سیال	K_u	هدایت هیدرولیکی مصالح در بالادست سد
σ	کشش سطحی	$[K]$	ماتریس خصوصیات المان
		L	طولی از آبخوان بالادست که افت سطح آب در آن اتفاق می افتد
		$[M]$	ماتریس جرم المان
		$\langle N \rangle$	توابع شکل و تغییر بار نسبت به زمان
		P	ارتفاع سرریز سد زیرزمینی
		Q	دبی عبوری از روی سرریز
			مقدار دبی عبوری از سرریز سد در حالتی که مقدار هدایت هیدرولیکی بالادست و پایین دست سرریز یکسان باشد
		Q_s	
		$\{Q_1\}$	جریان گرهی در انتهای نمو زمانی
		$\{Q_0\}$	جریان گرهی در شروع نمو زمانی
		Re	عدد رینولدز
		V	سرعت ظاهری
		We	عدد وبر
		b	طول تاج سرریز سد زیرزمینی
		d	قطر ذرات خاک
		de	قطر مؤثر ذرات خاک
		$f(x)$	مقادیر اندازه گیری شده
		$\bar{f}$	متوسط مقادیر اندازه گیری شده
		i	گرادیان هیدرولیکی
		k	هدایت هیدرولیکی
		m_w	شیب منحنی درصد حجمی آب در خاک
		q	جرم واحد طول
		t	ضخامت سد زیرزمینی
		u_w	فشار آب حفره ای
		w	نسبتی بین ۰ و ۱
		y	ارتفاع
		Δt	نمو زمانی،

۹- منابع

- سعادت، م. (۱۳۸۱). تعیین شاخص های مکان یابی جهت ایجاد سد زیرزمینی و شبیه سازی مدل ریاضی جریان در سد زیرزمینی، پایان نامه کارشناسی ارشد، گرایش مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران.
- شمس، م. ر. (۱۳۸۹). بررسی هیدرولیک جریان در سرریز سدهای زیرزمینی، پایان نامه کارشناسی ارشد، گرایش مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران.
- شمسایی، الف. (۱۳۸۱). هیدرولیک جریان آب در محیط های متخلخل، جلد دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- صفوی، ح. (۱۳۸۸). هیدرولوژی مهندسی، انتشارات ارکان دانش.
- مقیم، س.، (۱۳۸۶). بررسی تاثیر ضرایب هیدرودینامیکی در سدهای زیرزمینی، پایان نامه کارشناسی ارشد در مهندسی عمران، سازه های هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف، ایران.
- Forzieri, G., Gardenti, M., Capparrini F., and Castelli, F. (2008). "A methodology for pre-selection of suitable sites for surface and underground small dams in arid areas: A case study in the region of Kidal, Mali", Physics and Chemistry of the Earth, (33) pp. 74-85.
- Geo-Slope International Ltd. Seep 3D, A Modeling System for 3D finite element seepage analysis, Reference Manual. Canada.
- Gupta, R., and Mukherjee, k. (1987). "Design of underground dams for mine water storage", International Journal of Mine Water, Vol.6, No.2, pp. 1-14.

- Matsuo, S. (1975). "Undergrond dams to control groundwater", Publication 117 de L'Association International des sciences Hydrologiques. Symposium de Tokyo.
- Nilssen, A., and Petersen, E. (1982). Rain catchment and water supply in rural Africa: a manual, Hodder and Stoughton, Great Britain.
- Olufayo, A.O, Otieno, F.A.O., and Ochieng, G.M. (2009). "Run-off storage in sand reservoirs as an alternative source of water supply for rural and semi-arid areas of south africa", World academy of Science, Engineering and Technology, (56) pp. 686-689.
- Onder, H., and Yilmaz M. (2005). "Underground dams a tool of development and management of groundwater resources", European Water J., 11(12), pp. 35-45.
- Wipplinger, O. (1958). The storage of water in sand, South West Africa administration, water affairs branch.
- Hanson, G., and Nilsson, A. (1984). "Ground-Water dams for rural-water supplies in developing countries", Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Janardhana Raju, N., Reddy, T.V.K., and Munirathnam, P. (2004). "Subsurface dams to harvest rainwater: A case study of the Swarnamukhi River basin, Southern India", Hydrogeology Journal, 14, pp. 525-531.
- Larsson. I., and Cederwall, K. (1980). "Underground storage of water in natural and artificial openings in hard rocks in developing countries", Rockstore 80, International Symposium for Environmental Protection, Low-Cost Storage and Energy Savings, Stockholm, pp. 23-27.
- Luyun, R.Jr., Momii K., and Nakagawa, K. (2009). "Laboratory-scale behavior due to subsurface cutoff wall", Journal of Hydrology, (377) pp. 227-236.