هیدروژئولوژی، سال دوم، شماره ۱، پاییز ۱۳۹۶
Hydrogeology, Volume 2, No. 1, Fall 2017

بررسی تأثیر دیوار آب‌بند بر گرادیان هیدرولیکی و نشت در سد سنگریزه‌ای سبلان با شبیه‌سازی عددی

رضا نوروزی سرکارآباد *[۱]، فرزین سلماسی [۲]، هادی ارونقی [۳]

چکیده

نشت و جریان آب یکی از مهم‌ترین عوامل در طراحی سدهای خاکی و سنگریزه‌ای است. نشت از پی سدهای خاکی را می‌توان با استفاده از دیوار آب‌بند کنترل کرد. ارتفاع هیدرولیکی در محل اتصال دیوار آب‌بند و هسته رسی کاهش می‌یابد که پیامد آن افزایش مقدار گرادیان هیدرولیکی می‌باشد. بنابراین، در این تحقیق اثر دیوار آب‌بند بر روی بعضی از پارامترهای طراحی در سد سنگریزه‌ای سبلان مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور دیوار آب‌بند در موقعیت‌های مختلف با عمق و مقادیر نفوذپذیری‌های متفاوت در پی سد فرض شده و تحلیل‌شده است. نتایج این مطالعه نشان داد که بیشینه گرادیان هیدرولیکی در پی سد سبلان، در دیوار آب‌بند اتفاق می‌افتد. تغییر در موقعیت دیوار آب‌بند سد برای دستیابی به حداقل گرادیان هیدرولیکی نشان داد که محل بهینه به لحاظ حداقل گرادیان هیدرولیکی، پنجه هسته و به لحاظ کاهش دبی نشتی در پاشنه هسته می‌باشد. با کاهش نفوذپذیری و افزایش عمق دیوار آب‌بند، گرادیان هیدرولیکی افزایش یافته و مقدار نشت کاهش می‌یابد. تأثیر نفوذپذیری و عمق دیوار آب‌بند بر مقدار نشت آب سد سبلان با مقادیر متناظر سد کرخه مقایسه گردیده و تطابق مناسبی ملاحظه گردید.

واژه‌های کلیدی: سد سنگریزه‌ای سبلان، دیوار آب‌بند، گرادیان هیدرولیکی، نشت آب.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۱۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۱۹

- دانشجوی دکتری، گرایش سازه های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
۳- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
*_ نویسنده مسئول

Effect of cut off wall on hydraulic gradient and seepage in the Sabalan rock fill dam by numerical simulation

Reza Norouzi Sarkarabad* *[1], *Farzin Salmasi* [2], *Hadi Arvanaghi* [3]

Abstract

Seepage and water flow is one of the most important factors in design of earth and rockfill dams. The seepage through the foundation of earth dams can be controlled using the cut off walls. The hydraulic head reduces in the connection zone of the cut off wall and core of the dam that results in high hydraulic gradients. Therefore, this study investigates the efficiency of cutoff wall on some design parameters in Sabalan rockfill dam. For this purpose, different hypothetical positions of cut off wall with various depth and permeability were used and analyzed in the foundation of dam. The results showed that the maximum hydraulic gradient in foundation of Sabalan dam, occurs at the cutoff wall. Change in cutoff wall position for obtaining minimum hydraulic gradient showed that the optimal position of cut off wall for reducing the hydraulic gradient is in the toe of the core and the optimal position of cut off wall for reducing the seepage is in the heel of the core. By reducing the permeability and increasing the depth of the cutoff wall, the hydraulic gradient is increased and the seepage is decreased. Comparison of the effect of permeability and depth of the cutoff wall on seepage with corresponding values in Karkheh embankment dam, showed proper agreement between them.

Keywords: Cutoff wall, Hydraulic gradient, Sabalan rockfill dam, Seepage.

Received: 2016/06/02
Accepted: 2016/08/09

1- Ph.D Student of hydraulic structures, Department of water engineering, Agricultural faculty, Tabriz University, Tabriz, Iran.
E-mail: rezanoruzi1992@gmail.com
2- Associate professor, Department of water engineering, Agricultural faculty, Tabriz University, Tabriz, Iran.
3- Associate professor, Department of water engineering, Agricultural faculty, Tabriz University, Tabriz, Iran.
*- Corresponding Author

مقدمه

شرایط اقلیمی کشور و نیاز آن به احداث سازه‌های ذخیره آب، احداث سدهای مخزنی را در دستور کار برنامه ریزان قرار داده است. این سدها به عنوان سازه‌های مهارکننده آب‌های سطحی و کنترل سیلاب، امکان استفاده بیشتر از آب رودخانه‌ها را فراهم می‌نمایند. آب ذخیره شده در پشت سد به دلیل داشتن پتانسیل بالا همیشه به دنبال راهی برای فرار می‌باشد و لذا در توده متخلخل پی و بدنه سدهای خاکی نفوذ کرده و بطرف پایین‌دست نشت پیدا می‌کند(حسینی و سی و سه مرده، ۲۰۱۵). چنانچه در قسمت انتهایی سدها، سرعت نشت جریان آب افزایش یابد، ممکن است این سرعت بالا سبب حرکت ذرات خاک شده و پدیده رگاب[1] ایجاد کند. این پدیده تسریع کننده پدیده مهم دیگری تحت عنوان زیرشویی می‌شود. نتایج مطالعات محققین مختلف نشان می‌دهد که هر چه اثرات مخرب نشت تقلیل یابد، به همان اندازه هزینه‌های ساخت و نگهداری این سازه کاهش می‌یابد یکی از مهم‌ترین نکات در مراحل طراحی و ساخت سدهای خاکی نشت از بدنه و پی سد می‌باشد(داسیلوا، ۲۰۰۶). بنابراین محاسبه میزان نشت آب در بدنه و پی سدهای خاکی و ارزیابی روش‌های کنترل یا کاهش این مشکل، ضروری است (سلیمانی و اختر پور، ۲۰۱۱). هر چند احداث دیوار آب‌بند[2] یکی از روش‌های کاهش دبی تراوش از زیر سدهای خاکی می‌باشد ولی بررسی تأثیر آن بر موقعیت خط نشت آزاد و مقدار دبی تراوش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به دلیل این‌که خط نشت آزاد مرز تفکیک ناحیه اشباع از غیراشباع می‌باشد تعیین دقیق موقعیت آن در مسائل پایداری سدهای خاکی اهمیت دارد (قبادیان و همکاران، ۲۰۱۳). صدقی اصل و همکاران (۱۳۸۴) به بررسی اثر موقعیت بهینه پرده آب‌بند قائم در کاهش نشت و سرعت جریان در زیر سازه‌های آبی با استفاده از مدل عددی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بهترین مکان برای کنترل نشت و زیر شویی، پاشنه و پنجه سد می‌باشد. قبادیان و خدائی (۱۳۸۸) تأثیرات دیوار آب‌بند و زهکش بر نیروی زیرفشار[3] و گرادیان خروجی زیر سازه‌های آبی با حل عددی معادله عمومی جریان آب در خاک به روش احجام محدود را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که با احداث یک دیوار آب‌بند در هر وضعیت مکانی مقدار گرادیان خروجی نسبت به گرادیان خروجی مبنا (بدون دیوار آب‌بند) کاهش می‌یابد. همچنین بیشترین نیروی زیر فشار و کمترین گرادیان هیدرولیکی خروجی در موقعیتی که دیوار آب‌بند در پایین‌دست احداث شود، دیده می‌شود.

پاک‌باز و همکاران (۲۰۰۹) با مدل Seep-3D به ارزیابی ساخت دیوار آب‌بند بتن پلاستیک در تکیه‌گاه راست و چپ سد خاکی کرخه در کاهش مقدار تراوش پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با ساخت دیوار آب‌بند چپ و راست مقدار تراوش به ترتیب ۶۰ و۲۰ درصد کاهش می‌یابد. معصومی و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی و تحلیل نشت در سد خاکی علویان توسط نرم‌افزار Seep/w پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان نشت از پی سد پایین بوده (۵/۸۲۵ مترمکعب بر روز)، بنابراین دیوار آب‌بند ایجاد شده گزینه مناسبی در کاهش نشت از پی سد می‌باشد و همچنین میزان گرادیان هیدرولیکی ایجاد شده در اثر فرار آب در نزدیکی دیوار آب‌بند بسیار پایین، به میزان ۰/۵ می‌باشد. بنابراین پی در محدوده آب‌بند از پایداری بسیار مناسبی برخوردار است. منصوری و سلماسی (۲۰۱۳) به بررسی اثر طول زهکش افقی و دیوار آب‌بند بر نشت و نیروی زیر فشار در سدهای خاکی ناهمگن با شبیه‌سازی عددی پرداختند. در این تحقیق طول‌های مختلف زهکش و همچنین عمق و موقعیت‌های مختلف دیواره در زیر سد با نرم‌افزار Seep/w مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه دست یافتند که با افزایش طول زهکش افقی، سبب افزایش ناچیز مقدار نشت و گرادیان هیدرولیکی می‌شود و همچنین مناسب‌ترین موقعیت دیوار آب‌بند در وسط پی سد می‌باشد و با افزایش عمق دیواره مقدار نشت کاهش می‌یابد. منصوری و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی اثر موقعیت و زاویه دیوار آب‌بند بر نیروی زیر فشار در سد انحرافی پرداختند. در این تحقیق موقعیت‌های مختلف با زاویه‌های مختلف دیوار آب‌بند مورد بررسی قرار گرفت و به این نتیجه دست یافتند که دیوار آب‌بند در پاشنه و به صورت عمودی تأثیر زیادی در کاهش نشت دارد. مرتضوی و سلیمانی (۲۰۱۵) به بررسی نشت از سد خاکی با نرم‌افزارهای Seep/w و Seep-3D پرداختند که در این تحقیق، گرادیان هیدرولیکی در دو نرم‌افزار دوبعدی و سه‌بعدی برابر با

1- Piping
2- Cut off wall
3- Uplift

۰/۵ بدست آمد که از گرادیان هیدرولیکی بحرانی کمتر می‌باشد. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد اگر دیوار آب‌بند در پنجه سد قرار گیرد در کاهش نشت بیشتر مؤثر خواهد بود و گرادیان هیدرولیکی خروجی تقریباً سه‌چهارم گرادیان هیدرولیکی بحرانی خواهد بود.

با توجه به مطالعات صورت گرفته در رابطه با روش‌های کاهش نشت در سدهای خاکی، مطالعه در رابطه با اثر دیوار آب‌بند در زیر هسته رسی سد خاکی صورت نگرفته است، بنابراین هدف از این تحقیق شبیه‌سازی اثر عمق و نفوذپذیری دیوار آب‌بند در موقعیت‌های مختلف در زیر هسته سد سنگریزه‌ای سبلان با پی نفوذپذیر هم‌روند بر گرادیان هیدرولیکی و میزان نشت است. این تحقیق به روش اجزای محدود توسط نرم‌افزار Seep/w که متعلق به بسته نرم‌افزاری Geostudio می‌باشد، صورت گرفته است.

مواد و روش‌ها

قانون حرکت آب در محیط‌های متخلخل در حالت اشباع توسط دارسی به صورت رابطه ۱ بیان می‌شود.

$$Q = -K.A.i \qquad [۱]$$

که در آن Q دبی آب عبوری، k هدایت هیدرولیکی خاک، A سطح مقطع جریان و i شیب یا گرادیان هیدرولیکی است که از رابطه ۲ به دست می‌آید. S طول مسیر حرکت آب درون محیط متخلخل است.

$$i = \frac{\partial h}{\partial s} \qquad [۲]$$

بر همین اساس معادله حرکت آب در خاک اشباع به‌وسیله رابطه لاپلاس به صورت رابطه ۳ می‌باشد.

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial h}{\partial z}) = 0 \qquad [۳]$$

که در آن h بیانگر بار آبی و Kx, Ky و Kz بیانگر ضریب نفوذپذیری در جهت‌های مختلف می‌باشد. در محیط هم‌روند، Kx = Ky = Kz بوده و چنانچه محیط متخلخل در دو بعد در نظر گرفته شود، معادله لاپلاس در محیط‌های هم‌روند به صورت رابطه ۴ درخواهد آمد (رحیمی، ۱۳۹۲):

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \qquad [۴]$$

شبیه‌سازی عددی: نخستین گام در استفاده از شبیه‌سازی عددی، انتخاب مدل عددی مناسب برای مسئله موردنظر می‌باشد. در تحقیق حاضر با توجه به توانایی‌های نرم‌افزار Seep/w در شبیه‌سازی نشت، از این نرم‌افزار استفاده شده است. این نرم‌افزار تمام منطقه‌هایی را که جریان در آن وجود دارد را به صورت شبکه‌ای از المان‌های متناهی درمی‌آورد. بعد از این‌که یک جواب همگرا به دست آمد، خط فریاتیک[1] یا سطح جداکننده را نمایش می‌دهد. این سطح، مرز جریان نیست بلکه به‌طور ساده می‌توان گفت که خطی است که فشار آب منفذی در امتداد آن صفر است. این امر نه‌تنها آنالیز جریان غیر محبوس را ساده می‌کند، بلکه مزیت دیگر آن این است که جریان موئین واقع در بالای سطح جداکننده که در محاسبه میزان جریان کل، یک مؤلفه مهم به‌حساب می‌آید را نیز در حل مسئله در نظر می‌گیرد. این بخش از جریان (جریان موئینه) با بردارهای جریانی که بالای سطح جداکننده هستند در خروجی نرم فزار نشان داده می‌شود (نصرالهی، ۱۳۹۰).

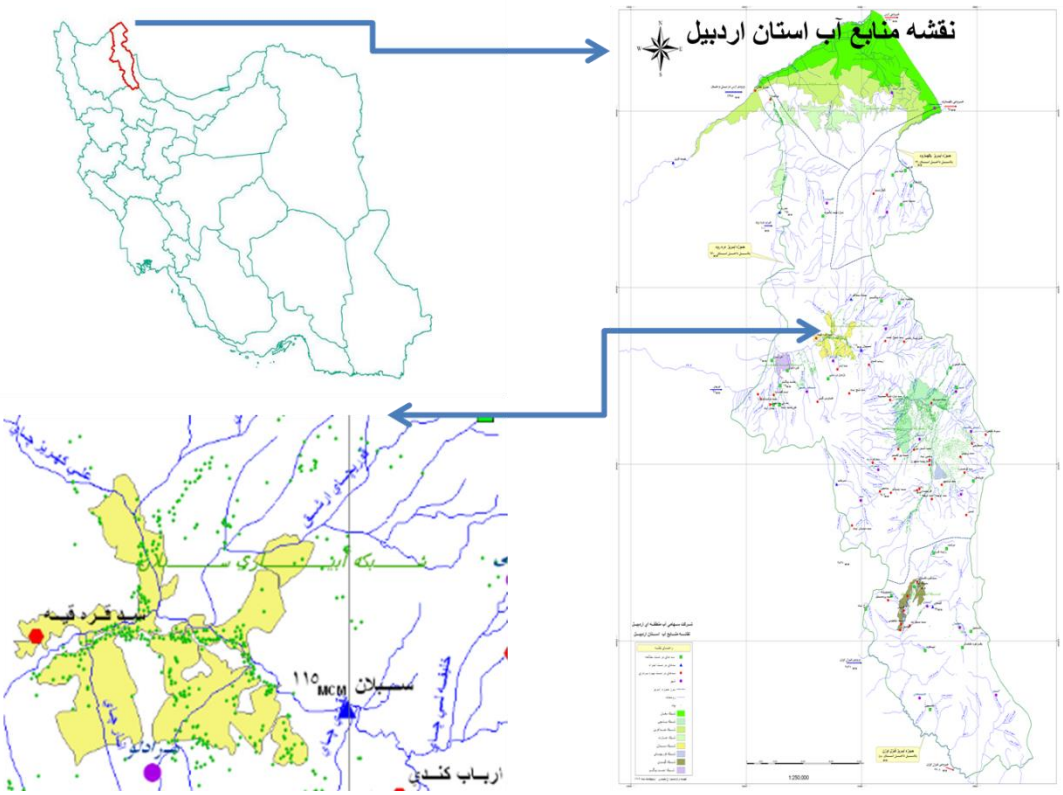
جهت نتیجه‌گیری بهتر از تحلیل، ابتدا تعداد و اندازه المان بهینه را توسط آزمون مستقل از شبکه بدست آمد. اندازه بهینه المان برابر با ۱/۱ متر و تعداد المان بهینه برابر ۷۰۷۰۳ المان (۷۰۶۳۸ گره) بدست آمد. بنابراین تمامی مدل‌های عددی مورد استفاده در این تحقیق با تعداد المان بهینه مدل‌سازی شده‌اند. شکل ۲ بزرگ‌ترین مقطع عرضی و نحوه شبکه‌بندی سد سنگریزه‌ای سبلان را نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر، این حالت به عنوان حالت مبنا در نظر گرفته شده است که در واقع از نقشه‌های چون ساخت[2] سد اخذ گردیده است. در شکل ۲ برای نمایش واضح‌تر مدل شبیه‌سازی شده، شبکه‌بندی با اندازه المان ۱۰متر نشان داده شده است، هر چند در تمامی مدل‌های شبیه‌سازی شده از شبکه‌بندی بهینه با تعداد المان ۷۰۷۰۳ استفاده شده است.

کلیاتی در مورد سد سنگریزه‌ای سبلان

سد سبلان در ۵۵ کیلومتری شمال غربی شهر اردبیل و در فاصله ۴۰ کیلومتری شمال شرقی مشگین شهر واقع شده است (شکل۱). هدف از احداث سد سنگریزه‌ای سبلان ذخیره‌سازی ۱۰۵ میلیون مترمکعب، تنظیم حدود ۱۱۵

1- Phreatic Line
2- As built

میلیون مترمکعب رواناب رودخانه قره‌سو در محل طرح، آبیاری ۱۵ هزار هکتار از اراضی دیم و باغات مشگین شهر در طرفین رودخانه، تأمین آب شرب شهر مشگین شهر تا ۱۰ میلیون مترمکعب سالیانه تا افق سال ۱۴۰۵، کنترل سیلاب و ایجاد اشتغال و کاهش مهاجرت بوده است.



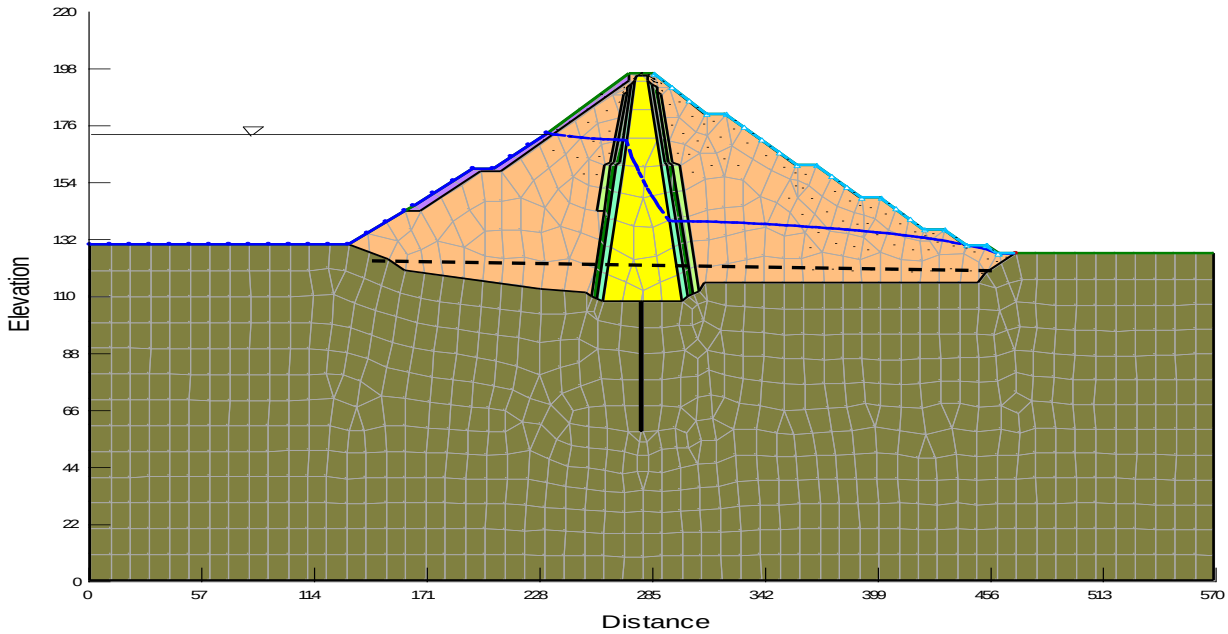
شکل ۱ – موقعیت سد سنگریزه‌ای سبلان.

شکل ۲ بزرگ‌ترین مقطع عرضی سد سنگریزه‌ای سبلان با هسته رسی می‌باشد که مشخصات آن در جدول ۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که هسته سد در بالادست و پایین‌دست دارای سه لایه فیلتر می‌باشد. با توجه به خط‌چین نشان داده شده در شکل ۲، تراز کف رودخانه قبل احداث سد در آن سطح بوده است ولی در هنگام احداث سد خاک‌برداری شده و به بالادست منتقل شده است.

وجوه بالادست و پایین‌دست سد به ترتیب به صورت مرز با پتانسیل معلوم و مرز تراوش آزاد به مدل معرفی شده است. مرز سمت چپ، راست و پایین پی نفوذپذیر به صورت مرز بسته با گرادیان صفر تعریف شده است که به عنوان حالت مبنا در نظر گرفته شده است. در جدول ۲ مقادیر نفوذپذیری لحاظ شده در شبیه‌سازی عددی سد سنگریزه‌ای سبلان ارائه شده است.

جدول۱- مشخصات بزرگ‌ترین مقطع عرضی سد سنگریزه‌ای سبلان.

ارتفاع از بستر افقی رودخانه قره‌سو	۷۷ متر
ارتفاع از پی	۸۷ متر
طول تاج	۳۰۴ متر
عرض تاج	۱۲ متر
ضخامت تاج هسته	۶ متر
ضخامت هسته روی پی	۴۰ متر
ضخامت دیوار آب‌بند	۱ متر
عمق دیوار آب‌بند	۵۰ متر
ارتفاع آب پشت سد	۴۳ متر
شیب دامنه بالادست بدنه سد	1V:2.1H
شیب دامنه پایین‌دست بدنه سد	1V:1.8H
شیب دامنه هسته در بالادست	1V:4.3H
شیب دامنه هسته در بالادست	1V:4.3H



شکل۲- مقطع عرضی و نحوه شبکه‌بندی سد سنگریزه‌ای سبلان (با اندازه المان ۱۰ متر).

مطالعات مرحله شناخت حوزه آبریز دره رود در سال ۱۳۶۸ آغاز و با تصویب گزارش‌های آن پروژه‌های سدسازی این حوزه در سال ۱۳۷۲ پایان یافت. در تداوم این مطالعات، مطالعات مرحله اول سبلان و اراضی پایاب آن در اوایل سال ۱۳۷۳ و مطالعات مرحله دوم این سد در اواخر سال ۱۳۷۵ توسط مهندسین مشاور آشناب آغاز گردید. عملیات اجرایی سیستم انحراف همزمان با مطالعات مرحله دوم از اوایل سال ۱۳۷۵ شروع شده و تا دی ماه سال ۱۳۷۹ ادامه یافت. عملیات اجرایی اصلی سد از مرداد ۱۳۸۰ توسط قرارگاه سازندگی خاتم‌الانبیاء (مؤسسه عاشورا) شروع و طبق برنامه پیش‌بینی‌شده تا پایان سال ۱۳۸۴ به اتمام رسید. بهره‌برداری از این سد در مرداد ماه سال ۱۳۸۵آغاز گردیده است.

بررسی نتایج حاصل از مطالعات زمین‌شناسی در محدوده محور و ساختگاه سد نشانگر وجود دو واحد آبرفتی و سنگی در آن می‌باشد. ضخامت بخش آبرفتی از ۴/۷ الی ۸/۵ متر متغیر بوده و عموماً درشت‌دانه می‌باشد. کمبود مواد ریزدانه باعث چسبندگی کم، مقاومت صحرایی پایین و نفوذپذیری بالا و در نتیجه خصوصیات مهندسی نامناسب پی آبرفتی می‌باشد.

قسمت اعظم ساختگان سد از سازندهای سنگی تشکیل یافته که نتیجه چند مرحله فعالیت آذرین بیرونی بوده که به صورت هم‌شیب با ضخامت متوسط ۲۵ متر برای هر مرحله به‌طرف غرب بر روی هم نهشته شده‌اند. در محور سد نیز ۳ مرحله آذرین برون‌زدگی داشته و ۲ مرحله دیگر نیز طی عملیات حفاری مشخص گردیده و در آن‌ها از پایین به بالا از درجه مقاومت صحرایی کاسته شده و درجه هوازدگی افزایش می‌یابد. در مجموع لایه‌های آندزی بازالتی محدوده مطالعاتی از خصوصیات فیزیکی خوب ولی نفوذپذیری بالا و لایه‌های اگلومرا و توفیت از خصوصیات فیزیکی مناسب و نفوذپذیری کم برخوردارند.

لازم به ذکر است که با ابزار دقیق نصب شده بیشینه نشست هسته سد پس از گذشت ۵ ماه از آبگیری سد ۱۱۲ سانتی‌متر و بیشینه نشست بدنه سنگ‌ریز پس از گذشت ۵ ماه از آبگیری آن ۹۲ سانتی‌متر بوده است.

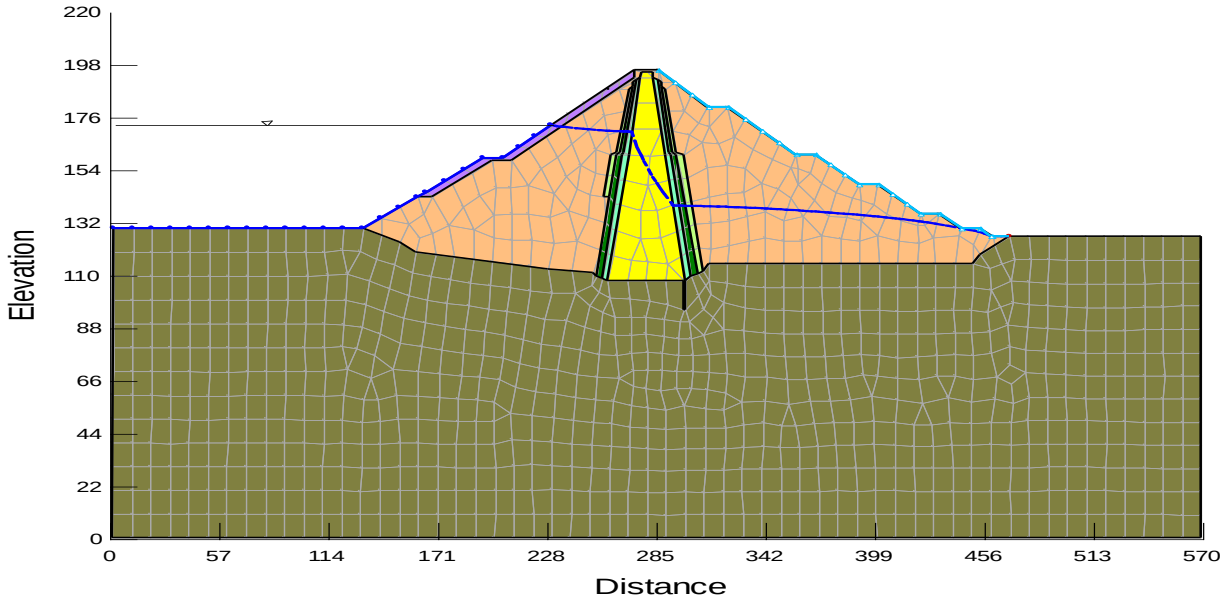
جدول ۲- نفوذپذیری قسمت‌های مختلف سد سنگریزه‌ای سبلان در حالت مبنا (شرکت مهندسین مشاور آشناب، ۱۳۷۸).

لایه‌ها	نفوذپذیری
	$m.\ s^{-1}$
هسته رسی	۱×۱۰^{-۷}
فیلتر۱	۱×۱۰^{-۵}
فیلتر۲	۵×۱۰^{-۵}
فیلتر۳	۱×۱۰^{-۴}
پوسته سنگریزه‌ای	۱×۱۰^{-۳}
دیوار آب‌بند	۱×۱۰^{-۹}
آبرفت	۱×۱۰^{-۵}

سپس در ادامه طبق جدول ۳، تغییراتی در موقعیت دیوار آب‌بند در زیر هسته (X)، عمق دیوار آب‌بند (d') و هدایت هیدرولیکی دیوار آب‌بند (k') داده شده تا اثرات آن بر گرادیان هیدرولیکی و دبی عبوری (نشت) از بدنه و پی سد بررسی گردد. شایان ذکر است که L عرض کف هسته رسی در پی می‌باشد. در شکل ۳ مقطع عرضی سد سنگریزه‌ای سبلان در موقعیت (X/L = 1) با عمق دیوار آب‌بند ۱۲/۵ متر نشان داده شده است.

جدول ۳- محدوده تغییرات ویژگی‌های دیوار آب‌بند در زیر هسته سد سنگریزه‌ای سبلان.

تغییرات	۱	۲	۳	۴	۵
X/L	۰	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۱
d' / m	۱۲/۵	۲۵	۳۷/۵	۵۰	۷۵
k' / $m\ s^{-1}$	۱×۱۰^{-۱۰}	۱×۱۰^{-۹}	۱×۱۰^{-۸}	۵×۱۰^{-۸}	۱×۱۰^{-۷}

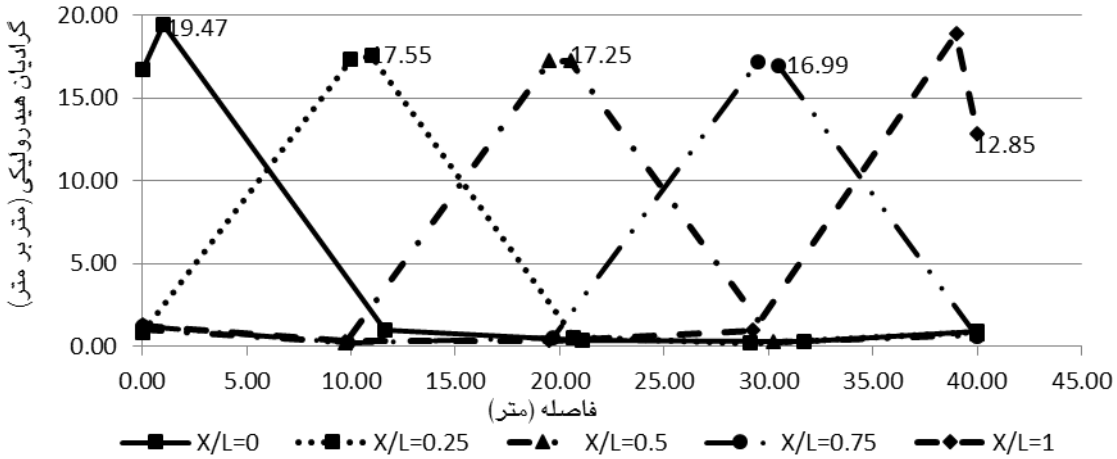


شکل ۳- مقطع عرضی سد سنگریزه‌ای سبلان در موقعیت (X/L = 1) با عمق دیوار آب‌بند ۱۲/۵ متر.

نتایج و بحث

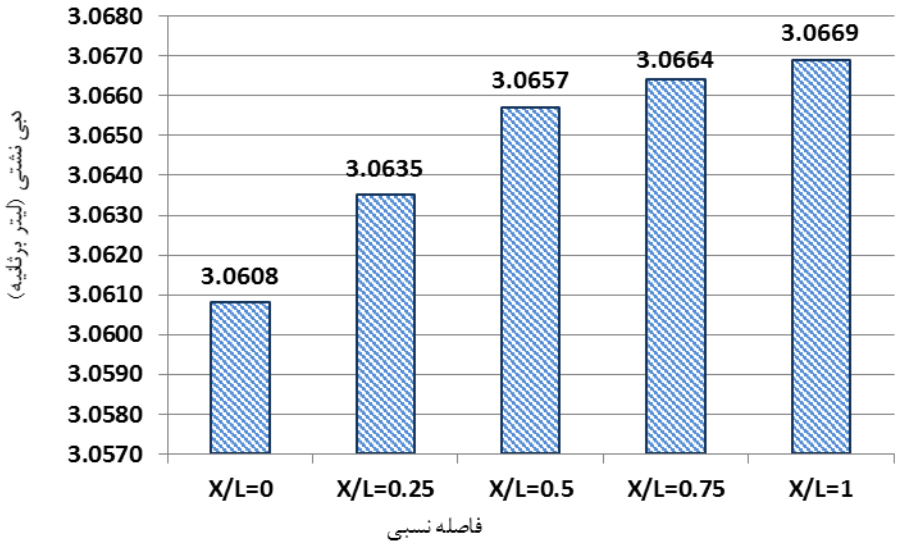
برای آنالیز گرادیان هیدرولیکی و مقدار نشت از بدنه و پی سد سنگریزه‌ای، دیوار آب‌بند در ۵ موقعیت مختلف طبق جدول ۳ قرار داده شد. توسط شبیه‌سازی عددی، تغییرات گرادیان هیدرولیکی در عرض هسته روی پی به صورت شکل ۴ می‌باشد. شکل ۴ نشان می‌دهد که گرادیان هیدرولیکی قبل از دیوار آب‌بند (در سمت چپ)، به‌تدریج تا محل دیواره افزایش می‌یابد. در محل دیواره به حداکثر خود رسیده و سپس مجدداً در سمت راست دیواره روند کاهش داشته تا وارد پوسته پایین‌دست گردد. در محل پوسته، گرادیان هیدرولیکی به حداقل مقدار خود می‌رسد. همچنین با توجه به شکل ۴ می‌توان گفت که دیوار آب‌بند هر چه از پاشنه سد به‌طرف

پنجه سد جابجا شود، گرادیان هیدرولیکی کاهش یافته و در صد اختلاف بین دو گرادیان هیدرولیکی محل دیواره در پاشنه و پنجه سد، تقریباً ۳۴ درصد می‌باشد. بنابراین موقعیت بهینه دیوار آب‌بند برای کاهش گرادیان هیدرولیکی در پنجه سد می‌باشد.



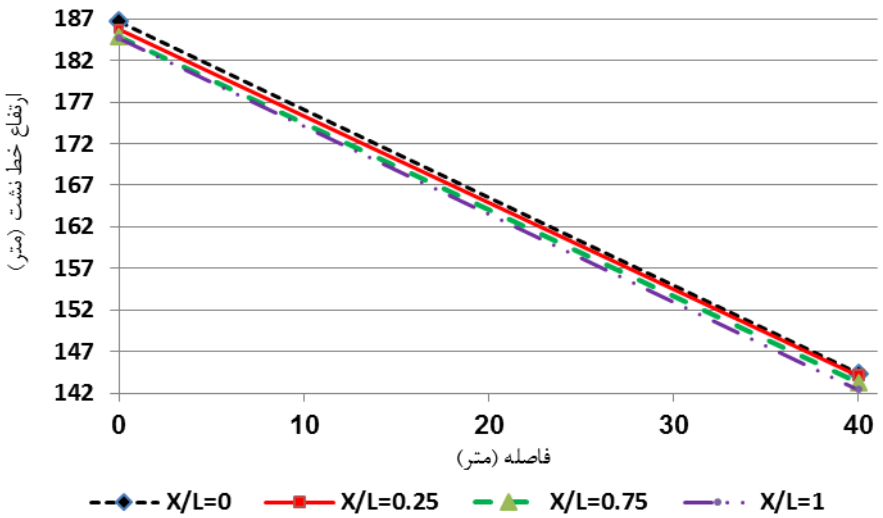
شکل ۴- تغییرات گرادیان هیدرولیکی در موقعیت‌های مختلف دیوار آب‌بند برای مدل مبنا.

در شکل ۵ تغییرات مقدار نشت در موقعیت‌های مختلف دیوار آب‌بند ارائه شده است. با توجه به این شکل هر چه محل دیوار آب‌بند از پاشنه هسته به‌طرف پنجه هسته سد جابجا شود، مقدار نشت افزایش می‌یابد. البته درصد اختلاف بین دو مقدار نشت برای دیوار آب‌بند در سمت راست و چپ عرض هسته حدود ۰/۲درصد است که رقم ناچیزی است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که موقعیت دیواره آب‌بند در زیر هسته تأثیری بر دبی نشت ندارد.



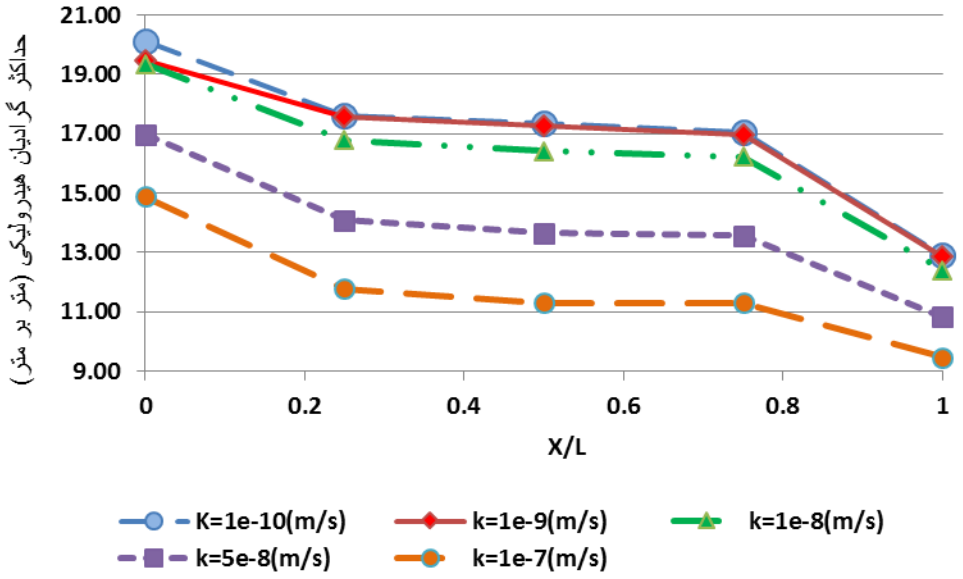
شکل ۵- تغییرات مقدار نشت در طول واحد از بدنه و پی سد در موقعیت‌های مختلف دیوار آب‌بند.

در شکل ۶ تأثیر موقعیت دیوار آب‌بند بر موقعیت خط نشت در داخل هسته رسی سد نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶ هر چه محل دیوار آب‌بند از پاشنه به سمت پنجه هسته سد جابجا شود ارتفاع خط نشت کاهش می‌یابد البته با توجه به شکل ۶ کاهش ارتفاع خط نشت ناچیز می‌باشد.



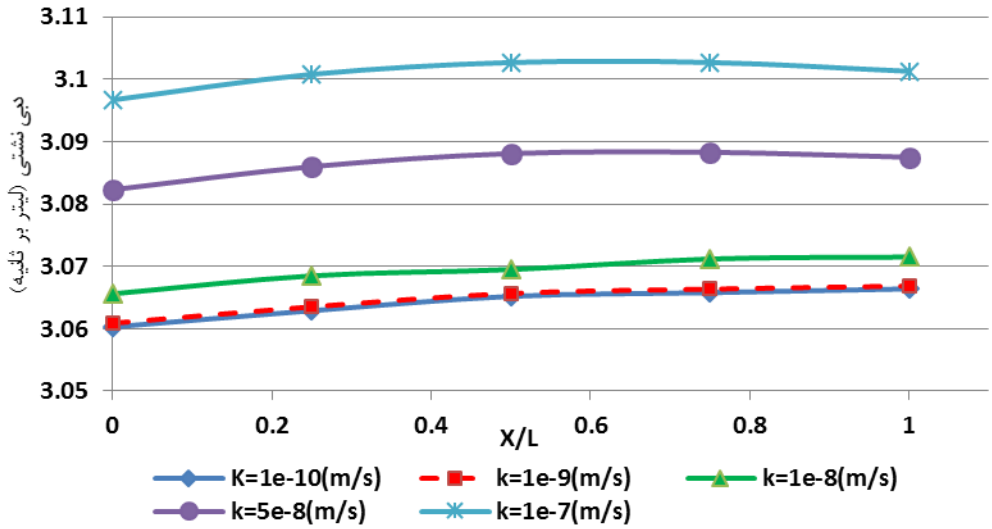
شکل ۶- تأثیر موقعیت دیوار آب‌بند در زیر هسته بر موقعیت خط نشت (مبنای ارتفاع از سنگ کف).

برای بررسی اثر تغییرات نفوذپذیری مصالح دیوار آب‌بند بر گرادیان هیدرولیکی و مقدار نشت، دیوار آب‌بند با پنج مقدار نفوذپذیری مختلف و در پنج نقطه مختلف طبق جداول ۲ و ۳ قرار داده شد. شکل ۷ اثر نفوذپذیری مصالح دیوار آب‌بند در موقعیت‌های مختلف بر حداکثر گرادیان هیدرولیکی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷، با کاهش نفوذپذیری دیوار آب‌بند، حداکثر گرادیان هیدرولیکی (گرادیان هیدرولیکی در سمت راست محل دیوار آب‌بند) افزایش می‌یابد. این موضوع چنین توجیه می‌شود که با کاهش نفوذپذیری مصالح خاکی، تراکم خطوط هم‌پتانسیل بیشتر می‌شود. بدین معنی که افت‌های پتانسیل بیشتری در فواصل کمتری رخ می‌دهد. در نتیجه مخرج کسر در رابطه ۲ کوچک شده و این باعث افزایش گرادیان هیدرولیکی می‌گردد.



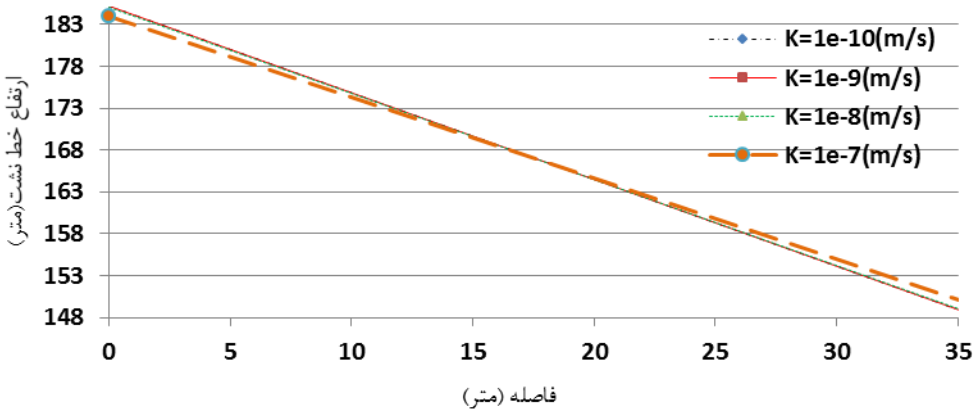
شکل ۷- اثر نفوذپذیری دیوار آب‌بند در موقعیت‌های مختلف بر حداکثر گرادیان هیدرولیکی.

در شکل ۸ اثر نفوذپذیری دیوار آب‌بند در موقعیت‌های مختلف بر مقدار نشت از بدنه و پی سد ارائه شده است. شکل ۸ نشان می‌دهد که با افزایش نفوذپذیری مصالح دیوار آب‌بند، مقدار نشت افزایش می‌یابد. البته قابل ذکر است که تغییرات مقدار نشت بسیار ناچیز می‌باشد اما با توجه به شکل ۸ می‌توان گفت که در نفوذپذیری ۱×۱۰^{-۷} متر بر ثانیه، مقدار نشت نسبت به مدل‌های دیگر بیشتر افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش نفوذپذیری، مقدار نشت در موقعیت استقرار دیوار آب‌بند در وسط نسبت به موقعیت‌های دیگر بیشتر می‌شود.



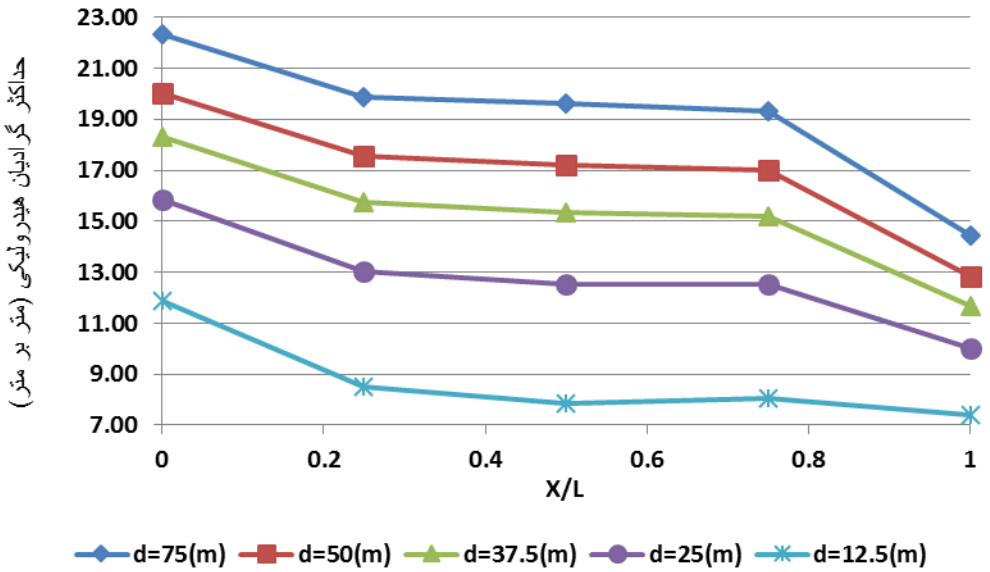
شکل ۸- اثر نفوذپذیری دیوار آب‌بند در موقعیت‌های مختلف بر دبی عبوری از بدنه و پی سد.

در شکل ۹ تأثیر مقادیر نفوذپذیری دیوار آب‌بند (موقعیت استقرار دیوار آب‌بند وسط هسته) بر موقعیت خط نشت نشان داده شده است. در شکل ۹ ارتفاع خط نشت قبل از دیوار آب‌بند با کاهش نفوذپذیری، افزایش می‌یابد و بعد از دیوار آب‌بند در داخل هسته با کاهش نفوذپذیری ارتفاع خط نشت کاهش می‌یابد. پس با کاهش نفوذپذیری دیوار آب‌بند، مقدار نشت کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۹، تغییر نفوذپذیری دیوار آب‌بند تغییرات ناچیزی در ارتفاع خط نشت ایجاد می‌کند. در نفوذپذیری ۱×۱۰^{-۷} متر بر ثانیه تغییرات ارتفاع خط نشت نسبت به نفوذپذیری‌های دیگر بیشتر است که نشانگر این می‌باشد که قبل از دیوار آب‌بند با افزایش نفوذپذیری مقدار نشت افزایش می‌یابد و ارتفاع خط نشت کاهش می‌یابد.



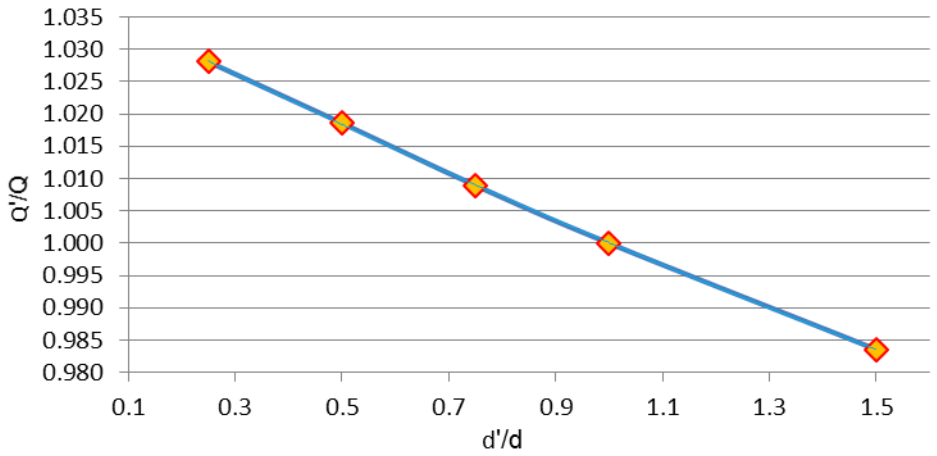
شکل ۹- تأثیر نفوذپذیری دیوار آب‌بند بر موقعیت خط نشت.

برای بررسی اثر تغییرات عمق دیوار آب‌بند در زیر هسته سد بر گرادیان هیدرولیکی و مقدار نشت از بدنه و پی سد، دیوار آب‌بند با پنج عمق مختلف و در پنج نقطه مختلف طبق جدول ۳ قرار داده شد. شکل ۱۰ اثر عمق دیوار آب‌بند در موقعیت‌های مختلف بر حداکثر گرادیان هیدرولیکی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۰، با افزایش عمق دیوار آب‌بند، گرادیان هیدرولیکی در محل دیوار آب‌بند افزایش می‌یابد.

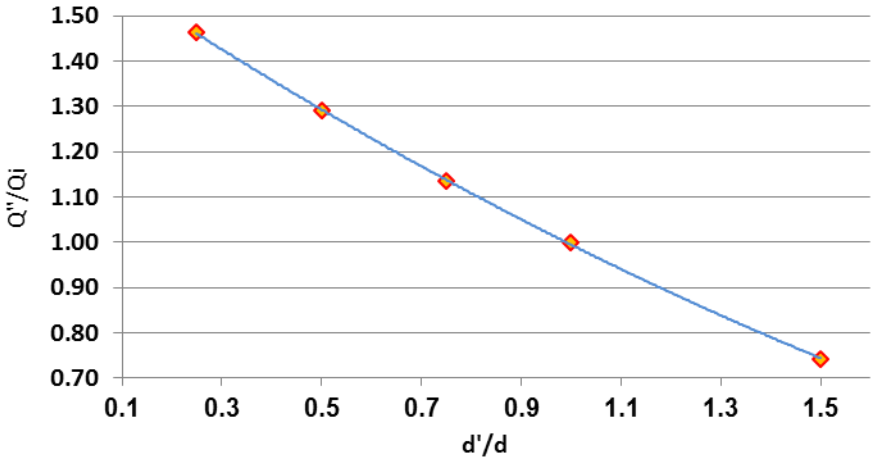


شکل ۱۰- اثر عمق دیوار آب‌بند در موقعیت‌های مختلف بر حداکثر گرادیان هیدرولیکی.

در شکل ۱۱ تغییرات نسبی مقدار نشت در برابر تغییرات نسبی عمق دیوار آب‌بند و در شکل ۱۲ تغییرات نسبی مقدار نشت از پی سد در برابر تغییرات نسبی عمق دیوار آب‌بند (محل اجرای دیوار آب‌بند در وسط هسته سد) نشان داده شده است که با افزایش عمق دیوار آب‌بند در زیر هسته سد، مقدار نشت از پی نسبت به نشت از بدنه و پی بیشتر کاهش می‌یابد. درصد اختلاف بین دو مقدار نشت برای کوتاه‌ترین دیوار آب‌بند و بلندترین دیوار آب‌بند در بدنه و پی سد ۴/۳۳ درصد و در پی ۴۹/۳۱ درصد می‌باشد. پس می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات عمق دیوار آب‌بند بر مقدار نشت از پی بیشتر اثر می‌گذارد. لازم به ذکر است که d عمق دیوار آب‌بند در حالت مبنا (۵۰ متر) و 'd تغییرات عمق دیوار آب‌بند زیر هسته سد است که توسط محقق اعمال شده است. در شکل ۱۱، 'Q مقدار نشت از بدنه و پی سد در حالت‌های مختلف دیوار آب‌بند و Q مقدار نشت در حالت مبنا می‌باشد و همچنین در شکل ۱۲، "Q مقدار نشت از پی در حالت‌های مختلف دیوار آب‌بند و Qi مقدار نشت از پی در حالت مبنا سد سنگریزه‌ای سبلان می‌باشد.

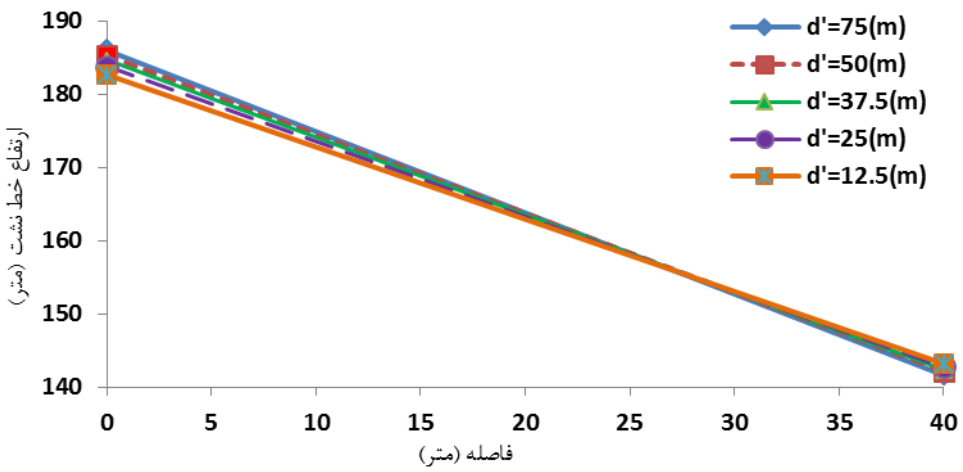


شکل ۱۱- تغییرات نسبی مقدار نشت از بدنه و پی سد در برابر تغییرات نسبی عمق دیوار آب‌بند (محل استقرار دیوار آب‌بند در وسط هسته سد).



شکل ۱۲- تغییرات نسبی دبی عبوری از پی سد در برابر تغییرات نسبی عمق دیوار آب‌بند (محل استقرار دیوار آب‌بند در وسط هسته سد).

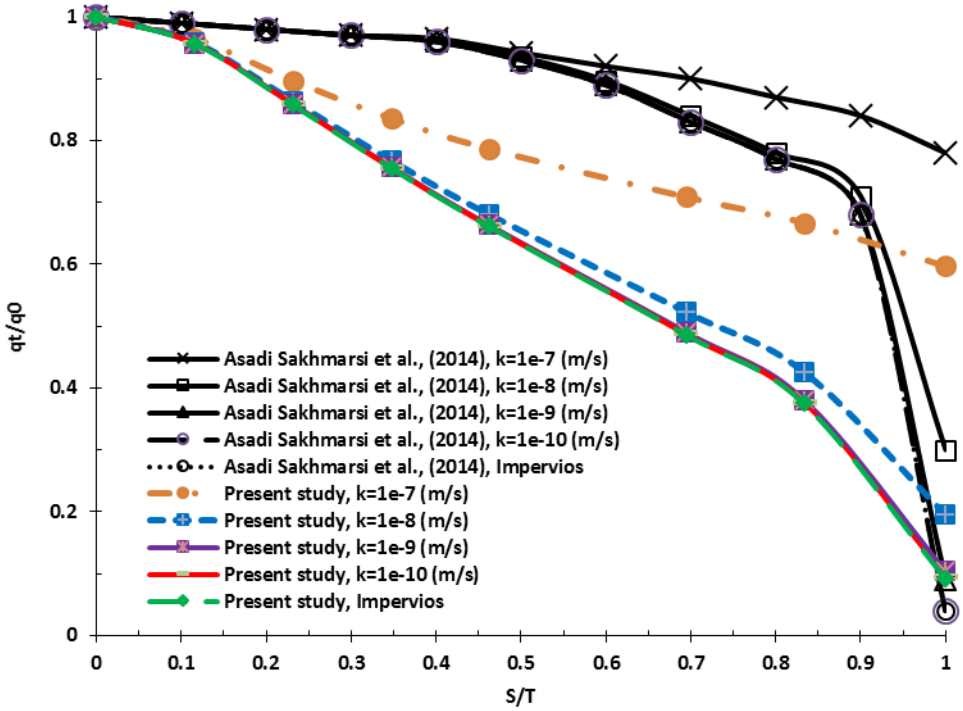
در شکل ۱۳ تأثیر عمق دیواره آب‌بند بر موقعیت خط نشت نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۳ می‌توان گفت که با کاهش عمق دیواره آب‌بند دبی نشتی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۳- تأثیر عمق دیوار آب‌بند بر خط نشت داخل هسته.

مقایسه نتایج مدل عددی با تحقیقات انجـام شـده روی سد کرخه

مقایسه نتایج مدل عددی برای شبیه‌سازی تأثیر دیوار آب‌بند بر نشت با مدل Seep/w نشان می‌دهد که نتایج عددی این تحقیق با نتایج مدل عددی اسدی سخمارسی و همکاران (۲۰۱۴) که مطالعه‌ای بر تأثیر دیوار آب‌بند بر نشت در سد خاکی کرخه پرداخته‌اند، تقریباً روند یکسانی دارد. با توجه به شکل ۱۴، با افزایش عمق دیوار آب‌بند و کاهش نفوذپذیری، مقدار نشت کاهش می‌یابد و همچنین وجه مشترک دیگر نتایج این دو تحقیق، مقدار نشت در نفوذپذیری‌های ۱×۱۰^{-۹} و ۱×۱۰^{-۱۰} متر بر ثانیه تقریباً بر هم منطبق می‌باشند.



شکل ۱۴- اثر عمق دیوار آب‌بند در نفوذپذیری‌های مختلف بر مقدار نشت نسبی از بدنه و پی سد کرخه (خطوط مشکی رنگ) و سد سبلان (منحنی‌های خط‌چین).

لازم به ذکر می‌باشد که در شکل ۱۴، S عمق دیوار آب‌بند در حالت‌های مختلف، T ضخامت آبرفت، q_t تغییرات دبی در حالت‌های مختلف از پی سد و q_0 دبی عبوری از پی سد در حالت بدون دیوار آب‌بند می‌باشد.

در مطالعه حاضر موقعیت بهینه دیوار آب‌بند برای کاهش مقدار نشت در سد مورد مطالعه، پاشنه هسته می‌باشد که البته اختلاف درصد بین دو مقدار نشت در پاشنه و پنجه، ۰/۲ درصد می‌باشد که مقدار ناچیزی است. همچنین کمترین مقدار نشت از بدنه و پی سد، پاشنه هسته می‌باشد. که در مقایسه با مطالعه اسدی سخمارسی و همکاران (۲۰۱۴) تقریباً منطبق بوده اما در S/T=1 موقعیت بهینه دیوار آب‌بند برای کاهش نشت، وسط هسته می‌باشد که در مطالعه حاضر پاشنه سد تعیین شد.

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، اثر دیواره آب‌بند در زیر هسته رسی سد سنگریزه‌ای سبلان بر مقدار نشت از بدنه و پی سد، گرادیان هیدرولیکی داخل هسته سد و ارتفاع خط نشت در داخل هسته سد توسط نرم‌افزار Seep/w مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج بدست آمده، اهم نتایج به‌طور خلاصه به صورت زیر است:

هر چه محل دیواره آب‌بند از پاشنه هسته سد به‌طرف پنجه هسته سد جابجا شود، مقدار نشت از بدنه و پی سد افزایش یافته و مقدار گرادیان هیدرولیکی و ارتفاع خط نشت کاهش می‌یابد. با کاهش نفوذپذیری مصالح دیوار آب‌بند، مقدار نشت و گرادیان هیدرولیکی به ترتیب کاهش، افزایش می یابد. ارتفاع خط نشت با کاهش نفوذپذیری مصالح دیوار آب‌بند، قبل از دیوار آب‌بند افزایش و بعد از دیوار آب‌بند کاهش می‌یابد. با افزایش عمق دیوار آب‌بند، مقدار نشت از پی سد نسبت به مقدار نشت از بدنه و پی سد بیشتر کاهش می‌یابد و گرادیان هیدرولیکی افزایش می‌یابد. ضمناً ارتفاع خط نشت قبل از دیوار آب‌بند به دلیل این‌که مقدار نشت کاهش می‌یابد، افزایش می‌یابد اما بعد از دیواره کاهش می‌یابد.

منابع

رحیمی، ح.، ۱۳۹۲. سدهای خاکی. انتشارات دانشگاه تهران. ۶۷۱ ص.

شرکت مهندسین مشاور آشناب، ۱۳۷۸. گزارش مطالعات ژئوتکنیک سد سنگریزه‌ای سبلان. کارفرما: شرکت سهامی آب منطقه ای اردبیل.

صدقی اصل، م.، رحیمی، ح.، خالقی، ح.، ۱۳۸۴. بررسی اثر موقعیت بهینه دیوار آب‌بند قائم در کاهش نشت و سرعت جریان در زیر سازه‌های آبی با استفاده از مدل عددی. مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۲۱ آبان ، دانشگاه باهنر کرمان، کرمان.

قبادیان، ر.، خدائی، ک.، ۱۳۸۸. تأثیرات دیواره آب‌بند و زهکش بر نیروی زیرفشار و گرادیان خروجی زیر سازه‌های آبی با حل عددی معادله عمومی جریان آب در خاک به روش احجام محدود. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۳، شماره ۴، ۱۴۸تا ۱۶۰.

معصومی، ح.، سپاهیان، س.، کرد، انجرکی ا.، ۱۳۹۲. بررسی و تحلیل نشت در سد خاکی علویان توسط نرم‌افزار Seep/w. هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ، ۱۶- ۱۵ آبان ، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

نصرالهی، م.،۱۳۹۰. بررسی ترکیب های مختلف عمق ترانشه و بلانکت رسی برای کاهش نشت از سد خاکی (مطالعه موردی سد ستارخان). پایان نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز. ۱۰۷ص.

Asadi Sakhmarsi, A., Akhbari, H., Naeimi, P., Kiapey, A., 2014. The effect of the cutoff wall conditions on the seepage characteristics of homogeneous earth-fill dams using SEEP/W. WALIA journal, 30(S2), 176-182.

Da Silva, J., 2006. Optimization of concrete gravity dams foundation systems. 22nd International congress on large dams-ICOLD,18 June, Barcelona, Spain.

Ghobadian, R., Fattahi Choghabaghi, A., Mohamadi, S., 2013. The Effect of cutoff curtain location on phreatic seepage line and seepage discharge by numerical finite volumes method. Caspian Journal of Applied Sciences Research, 2(8), 27-37.

Hosainy, E., Siosemarde, M., 2015. Seepage analysis in body and foundation of Sang Siah Dam using the Seep/W. Science Journal (CSJ), 36(4), 1697-1701.

Pakbaz, MS., Dardaei, A., Salahshoor, J., 2009. Evaluation of Performance of Plastic Concrete Cuttoff Wall in Karkheh Dam Using 3-D Seepage Analysis Actual Measurement. Journal of Applied Sciences, 9(4), 724-730.

Soleymani, S., Akhtarpur, A., 2011. Seepage Analysis for Shurijeh Reservoir Dam Using Finite Element Method. Geo-Frontiers 2011, 3227-3234.

Zoorasna, Z., Hamidi, A., Ghanbari, A., 2008. Seepage Through Different Concrete Cut Off Wall Connection Systems Case Study: Karkheh Storage Dam. International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, 11 August, Missouri, U.S. state.

Mansuri, B., Salmasi, F., 2013. Effect of Horizontal Drain Length and Cutoff Wall on Seepage and Uplift Pressure in Heterogeneous Earth Dam with Numerical Simulation. Journal of Civil Engineering and Urbanism, 3(3), 114-121.

Mansuri, B., Salmasi, F., Oghati, B., 2014. Effect of Location and Angle of Cutoff Wall on Uplift Pressure in Diversion Dam. Geotech Geol Eng, 32,1165–1173.

Mortazavi, M., Soleimani, S., 2015. Leakage Analysis of Embankment Dams Using SEEP/W, 3D SEEP Software. Journal of Applied Environmental and Biological Sciences, 5(10), 122-128.