

بررسی اثر مقیاس در برآورد مقدار نشت آب از مخزن و تکیه‌گاه سد بهشت‌آباد

حسین عابدیان

دانشجوی دکتری آب شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

غلامحسین کرمی

گروه زمین شناسی زیست محیطی و آب شناسی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

حاجی کریمی

گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۲۵

hoseinkhf@gmail.com

چکیده

ساخت سدها بر روی سازندهای کربناته کارستی عمدتاً با مشکل نشت از تکیه‌گاه و مخزن مواجه است. احداث سد بر روی این سازندها باعث نشت از مخزن سد به سمت پایین دست و یا حوضه‌های مجاور می‌گردد. در گستره‌های کارستی مقدار هدایت هیدرولیکی با مقیاس رابطه مستقیم دارد به طوری که هدایت هیدرولیکی در مقیاس‌های کوچک (مغزه‌های حفاری، آزمایش لوژن و اسلاگ) در مقایسه با مقیاس‌های محلی (آزمایش پمپاژ) و مقیاس‌های بزرگ (منحنی فرود، ردیابی و دارسی) به مراتب کمتر می‌باشد. سد بهشت‌آباد در حال حاضر در مرحله مطالعات قرار دارد و تقریباً در انتهای محور تاقدیسی به نام سنگویل از جنس دولومیت - آهکی با ضخامت حدود ۷۰۰ متر واقع شده است. جناح راست مخزن این سد عمدتاً به طور مستقیم با این سازند در تماس می‌باشد. روش‌های مختلفی برای برآورد مقدار هدایت هیدرولیکی با هدف نشت از مخزن در جناح راست مورد استفاده قرار گرفت. این روش‌ها شامل آزمایش‌های لوژن، اسلاگ، قانون دارسی، منحنی فرود چشمه و استفاده از دبی چشمه و سطح آب گمانه مجاور با فرضیات چاه پمپاژ می‌باشد. بررسی‌های انجام شده بر اساس روش‌های مختلف نشان‌دهنده طیفی از مقادیر هدایت هیدرولیکی معادل توده بین 10^{-6} تا 10^{-2} متر بر ثانیه در مقیاس کوچک (Sub-local scale) تا 10^{-4} متر بر ثانیه در مقیاس ناحیه‌ای (Regional scale) است. به این ترتیب که مقدار نشت در هر متر از مخزن از حدود 0.04 لیتر بر ثانیه در شرایط مقیاس کوچک تا $2/7$ لیتر بر ثانیه در مقیاس ناحیه‌ای محاسبه شده است. بر اساس نتایج مطالعات توصیه می‌گردد از روشهای مقیاس ناحیه‌ای برای بررسی نشت این سد بهره گرفته شود که با در نظر گرفتن سطح مقطع تماس آهک با مخزن در حالت بدون ایجاد پرده تزریق، مقدار نشت حدود $6/3$ تا $8/1$ متر مکعب بر ثانیه پیش‌بینی می‌شود.

کلمات کلیدی: کارستی، اثر مقیاس، نشت، سد، هدایت هیدرولیکی

مقدمه

مقیاس در محیط‌های کارستی بالا می‌رود و کمترین هدایت هیدرولیکی با استفاده از روشهای آزمایشگاهی و بیشترین هدایت هیدرولیکی از ارزیابی مقیاس حوضه حاصل می‌گردد.

کلوزر (Clouser, 1992) انواع مختلف از سنگهای بلورین را آنالیز نمود و بیان نمود نفوذپذیری این سنگها می‌تواند از مقیاس کوچک (Small scale) تا محلی (Local scale) به سه برابر افزایش یابد ولی از مقیاس محلی تا ناحیه‌ای (Regional scale) تغییر چندانی نمی‌کند.

راوی تو و چرکاور (Rovey II and Cherkauer 1995) هدایت هیدرولیکی را در ۵ واحد هیدرواستراتیگرافی کربناته در مقیاس‌های مختلف اندازه‌گیری کردند و دریافتند هدایت هیدرولیکی با مقیاس اندازه‌گیری به طور مستقیم ارتباط دارد. این دو محقق در همان سال (Rovey II and Cherkauer 1995) دریافتند اثر مقیاس با محیط زمین‌شناسی و تخلخل ثانویه ارتباط دارد. به این ترتیب که در رسوبات با تخلخل ثانویه نرخ افزایش هدایت هیدرولیکی بیشتر از رسوبات با تخلخل اولیه می‌باشد به همین دلیل در محیط‌های مترکم هدایت هیدرولیکی ۲ تا ۵۰۰ برابر آزمایش اسلاگ و در

مهمترین پارامتر برای تعیین مقدار نشت از مخزن و تکیه‌گاه سدها در محیط‌های کارستی میزان هدایت هیدرولیکی می‌باشد. آهک‌های ناحیه‌ای به طور معمول ناهمسو و ناهمگن می‌باشد (Castany, 1984) و ناهمگنی آبخوان‌های کارستی معمولاً با هدایت هیدرولیکی مشخص می‌گردد (Karami, 2002). وجود تخلخل ثانویه و شبکه‌های جریان باعث ناهمگنی کارستی می‌گردد و به همین دلیل میزان هدایت هیدرولیکی و به دنبال آن مقدار نشت با تغییر مقیاس تغییرات بسیار زیادی را شامل می‌شود. در این شرایط تعیین دقیق مقدار نفوذپذیری کارستی با توجه به مطالعات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی و مقیاس مناسب مخزن، در تحلیل نشت اهمیت بسزایی دارد.

کیرالی (Kiralay, 1975) با مطالعه بر روی آبخوان‌های کارستی و درز و شکافی کوه جورا (Jura) در سوئیس بیان کرد افزایش کوچک تا محلی هدایت هیدرولیک به علت شکستگی‌ها ایجاد می‌گردد و افزایش هدایت هیدرولیکی در مقیاس ناحیه‌ای به علت شبکه کارستی مجرای ایجاد می‌گردد.

ساتر (Sauter, 1991) هدایت هیدرولیکی در کارستی را با استفاده از روشهای مختلف محاسبه نمود و نتیجه گرفت هدایت هیدرولیکی با افزایش

سوتر (Sauter, 2005) روشهای مختلف آزمایش تعیین تراوایی در مقیاسهای کوچک تا ناحیه‌ای را در محیط کارستی مورد ارزیابی قرار داد و بیان نمود روابط مختلف هدایت هیدرولیکی و مقیاس می‌تواند ناشی از شکل و رتبه شبکه سیستم زهکشی کارستی باشد.

تحقیقات دیگر هیدروژئولوژیک ارتباط اثر مقیاس با میزان هدایت هیدرولیکی را در سنگهای درز و شکافی (Marchul et al., 2004; Ilman, 2007) و سازندهای رسوبی (Lundon et al., 2001; Kurikami et al., 2008) و (Chapuis, 2013; Galvao et al., 2016) بررسی نموده است. این تحقیقات ارتباط افزایش میزان هدایت هیدرولیکی با افزایش مقیاس در سنگهای ناهمگن و ناهمسو را به شکل‌های مختلف بیان کرده‌اند.

سد بتنی دو قوسی بهشت آباد به ارتفاع ۱۸۰ متر و حجم مخزن ۱۰۵۰ میلیون متر مکعب در مرحله مطالعات برای ساخت می‌باشد. هدف از احداث این سد تأمین آب شرب برای استانهای فلات مرکزی در ایران است. موقعیت سد بر روی رودخانه بهشت‌آباد با میانگین آبدهی ۳۳ متر مکعب بر ثانیه قرار دارد. تراز نرمال پیشبینی شده ۱۷۸۰ متر بالاتر از سطح آب آزاد دریا است این میزان حدود ۱۶۰ متر بالاتر از بستر رودخانه در محل ساختگاه می‌باشد. مخزن در جناح چپ به طور عمده در تماس با تناوب کنگلومرا و مارنهای دریاچه‌ای است. در جناح راست مخزن با دولومیت‌های آهکی تاقدیس سنگویل با نام سازندی چهارم-آسماری و ضخامت حدود ۷۰۰ متر در تماس می‌باشد (شکل ۱).

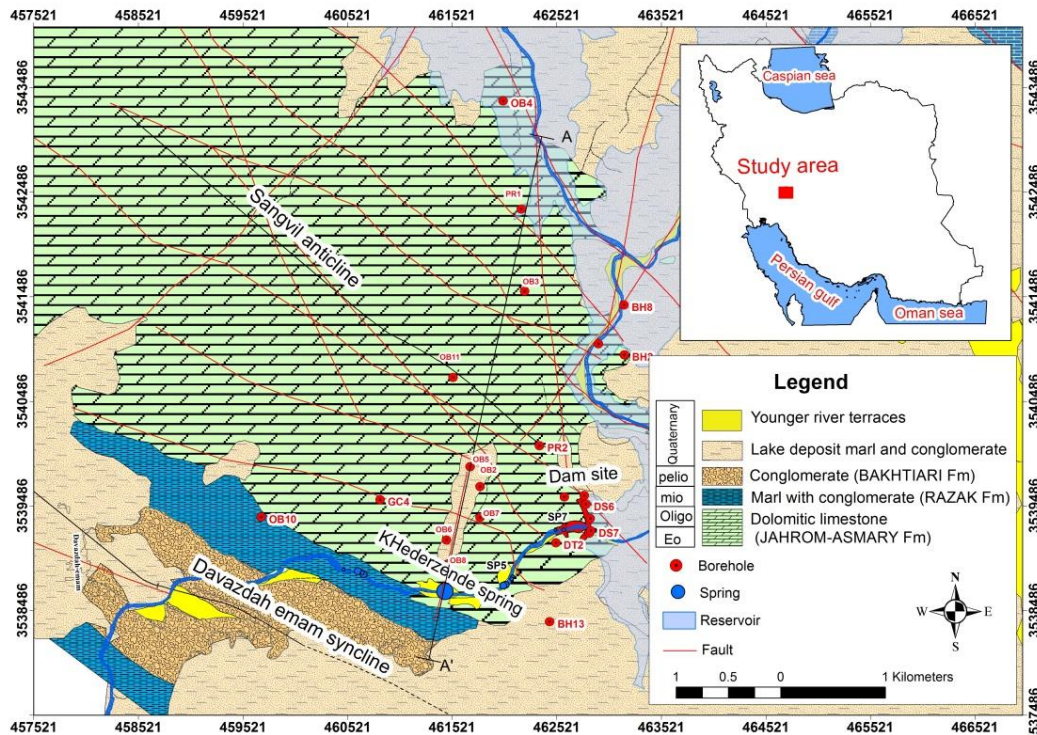
هدف اصلی از این مقاله ارزیابی اثر مقیاس در میزان نفوذپذیری دولومیت‌های آهکی جناح راست مخزن سد بهشت‌آباد و اثر آن در مقدار نشت آب از مخزن و تکیه‌گاه سد می‌باشد.

محیطهای درزه‌دار نرخ افزایش معمولاً ضریبی از ۳ و برای محیطهای کارستی نرخ افزایش بدون محدودیت می‌باشد.

براون (Brown, 1998) پارامترهای آبخوان‌های کارستی را در مقیاس‌های مختلف جمع‌آوری نمود این محقق اثر ناهمگنی را با روشهای مختلف اندازه‌گیری بررسی کرد در این مطالعات از آزمایشهای مقیاس کوچک (آزمایش لوژن) تا محلی (Pumping test) استفاده و ناهمگنی محیط کارستی بررسی گردید. ویتاکرا و اسمارت (Whitakera and Smart 2000) با مطالعه بر روی آبخوان لوکایان (Lucayan) در ایسلند دریافتند تأثیر اثر مقیاس این آبخوان از مقیاس‌های کمتر از آزمایش پمپاژ به صورت خطی افزایش می‌یابد و به نمونه‌های کمتر از یک متر محدود می‌گردد.

میک و هورورکا (Mace and Hovorka 2000) از روشهای مختلف برای تعیین هدایت هیدرولیکی در آبخوان ادوارد (Edward) در تگزاس استفاده کردند و دریافتند هدایت هیدرولیکی ماتریکس 1×10^{-3} متر بر روز و هدایت هیدرولیکی تستهای گمانه‌ای $3/3$ متر بر روز و تقریباً ۲۵۰ برابر بزرگتر از ماتریکس می‌باشد. هالیهان و همکاران (Halihan et al., 2001) از اطلاعات نفوذپذیری در مقیاس‌های مختلف (آزمایشگاهی، محلی و ناحیه‌ای) در آبخوان ادوارد (Edwards) در تگزاس برای ارزیابی و استنباط هدایت هیدرولیکی در مقیاس بزرگ با مقیاس‌های کوچک استفاده نمودند و نتیجه گرفتند هدایت هیدرولیکی با اثر مقیاس افزایش پیدا می‌کند و در صورت افزایش نیافتن دلیل آن مرتبط نبودن کامل شکستگی‌ها و مجاری با هم می‌باشد.

دیلون و همکاران (Dillon et al., 2001) مطرح کردند استفاده از اطلاعات گمانه‌ای برای تعیین میزان نفوذپذیری تخمین‌های کمی نسبت به واقعیت توده ارائه می‌دهند و دلیل آن در برنگرفتن فضاهای خالی است که در حجم آزمایش قرار نگرفته است.

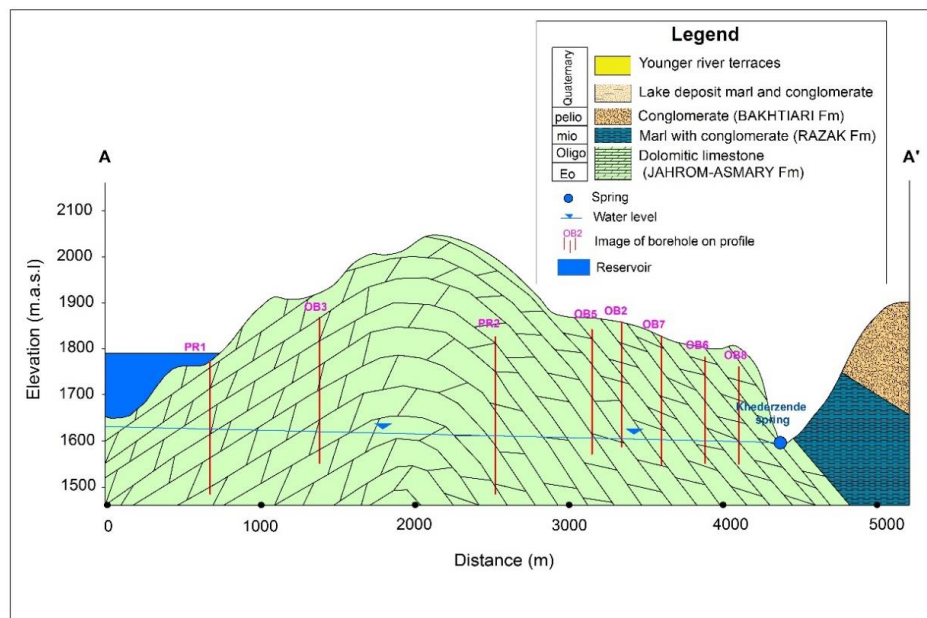


شکل ۱. زمین شناسی محدوده ساختگاه و مخزن سد بهشت‌آباد.

زمین شناسی و هیدروژئولوژی

سطحی کارست اکثراً به صورت کارنهای شکافی است. چشمه‌های موجود در این تاکدیس، در یال جنوبی و بلافاصله بعد از محور ساختگاه سد قرار دارند مجموع آبدهی میانگین چشمه‌ها در یال جنوبی حدود ۸۵۰ لیتر بر ثانیه است. بزرگترین چشمه پایین دست محور به نام خدرزنده با متوسط آبدهی ۴۴۰ لیتر بر ثانیه در یال جنوبی تاکدیس و در جناح راست رودخانه قرار دارد. بررسیهای اکتشافی و هیدروژئولوژی نشان می‌دهد سازند کربناته و کارستی جهرم - آسماری یک آبخوان با نوع جریان افشان تا حدواسط است. تغذیه این آبخوان هم یال شمالی و هم یال جنوبی تاکدیس سنگویل می‌باشد و کل تاکدیس در چشمه‌های یال جنوبی تخلیه می‌گردد. این بررسی‌ها ارتباط هیدرولیکی یال شمالی تاکدیس با یال جنوبی را تأیید می‌نماید در این شرایط در زمان تشکیل مخزن ارتباط هیدرولیکی از جناح راست بین مخزن و چشمه‌های پایین دست محور برقرار و نشت از مخزن به سمت چشمه‌های یال جنوبی اتفاق خواهد افتاد (شکل ۲).

محدوده مورد مطالعه از نظر زمین‌شناسی در زون زاگرس قرار گرفته است، زون زاگرس یکی از پنج زون ساختاری اصلی در ایران می‌باشد (Stocklin, 1968) در این زون بیشتر سازندهای کارستی بین سازندهای غیرقابل نفوذ ساندویچ و آبخوان‌های کارستی جداگانه را تشکیل داده است (Raеisi, 2008). سازندهای موجود در محدوده شامل دولومیت با میان لایه‌های آهکی سازند جهرم - آسماری به سن ائوسن و الیگوسن و سازند مارنی رازک به سن میوسن و سازند کنگلومرای بختیاری به سن پلیوسن می‌باشد. مخزن سد در جناح راست با یال شمالی تاکدیس سنگویل، شامل سازند کربناته و کارستی جهرم - آسماری در تماس است این سازند در یال جنوبی به وسیله سازند رازک که یک سازند نفوذناپذیر است در یک ساختار تاکدیس - ناودیس احاطه می‌گردد (زاینداب ۱۳۸۵). در این سازند سیمای کارست پیشرفته از قبیل آب فروچاله (Sinkhole)، چاه قائم (Shaft) و پلیه (Polje) مشاهده نشده است و آثار



شکل ۲. پروفیل زمین شناسی محدوده مخزن به سمت پایین دست در جناح راست.

میزان نفوذپذیری براساس آزمایش‌های لوژن

در بررسیهای اکتشافی گمانه‌ها در حین حفاری ۱۴۵۸ تست لوژن انجام شده است مطابق (شکل ۳) بیشترین فراوانی آزمایشهای لوژن مربوط به لوژن ۱ با حدود ۴۴۰ آزمایش و در مرحله بعد لوژن بین ۸۰ تا ۱۰۰ با ۴۱۵ آزمایش است (زاینداب ۱۳۸۶) این شرایط نشان دهنده ناهمگنی در کارست محدوده می‌باشد میانگین لوژنهای اندازه‌گیری شده در تاکدیس حدود ۳۲ لوژن می‌باشد. روشهای مختلفی برای تبدیل اعداد لوژن به نفوذپذیری وجود دارد ولی به طور تقریبی برای اعداد لوژن ۱ تا ۱۰۰، تراوایی 1×10^{-5} تا 1×10^{-7} متر بر ثانیه ذکر شده است (Pearson, 1977). با این حساب میزان نفوذپذیری معادل توده بر اساس این روش حدود $3/2 \times 10^{-6}$ متر بر ثانیه می‌باشد.

اثر مقیاس در برآورد مقدار نشت از مخزن

تعیین مقدار نشت از مخزن نیازمند برآورد صحیح میزان هدایت هیدرولیکی با توجه به مقیاس درگیر مخزن با کارست دارد در این راستا هدایت هیدرولیکی با روشهای مختلف در مقیاسهای کوچک، محلی و ناحیه‌ای در آهکهای جهرم - آسماری جناح راست مخزن آزمایش و محاسبه شد. در مقیاسهای کوچک آزمایشهای لوژن و اسلاگ استفاده گردید. در مقیاس محلی از روش اندازه‌گیری همزمان دبی چشمه و سطح آب گمانه روی چشمه استفاده شد. در مقیاس ناحیه‌ای از روش منحنی فرود، ردیابی و روش دارسی برای تعیین میزان هدایت هیدرولیکی استفاده گردید. در نهایت مقدار نشت با استفاده از میزان هدایت هیدرولیکی در مقیاسهای مختلف محاسبه و مقایسه گردید.

میزان نفوذپذیری با استفاده از آزمایش اسلاگ (Slug)

میزان نفوذپذیری با استفاده از این آزمایش در شش گمانه حفاری شده در جناح راست با عمق برخورد به سطح آب کم، انجام گردید و داده‌های افت زمان با استفاده از روش بوور و رایس (Bouwer and Rice 1976) تحلیل گردید (شکل ۴) مطابق با تحلیل‌های انجام شده میزان نفوذپذیری با استفاده از این روش در کمترین حالت $1/1 \times 10^{-6}$ متر بر ثانیه و در بیشترین حالت $3/3 \times 10^{-6}$ متر بر ثانیه برآورد گردید میزان هدایت هیدرولیکی با استفاده از این روش بطور میانگین حدود $2/1 \times 10^{-6}$ متر بر ثانیه محاسبه گردید.

میزان نفوذپذیری براساس روش دارسی

با استفاده از روش دارسی $Q = KA \frac{dh}{dl}$ و براساس تراز آب گمانه‌های موجود بر روی چشمه در مقاطع مختلف میزان هدایت هیدرولیکی برآورد گردید در این روش بیشترین هدایت هیدرولیکی مربوط به مقطعی در فاصله ۵۰۰ متری چشمه و با گرادیان $0/023$ و میزان $1/4 \times 10^{-4}$ متر بر ثانیه است و کمترین هدایت هیدرولیکی مربوط به مقطعی در فاصله ۱۱۳۰ متر و با گرادیان $0/044$ و میزان $1/05 \times 10^{-4}$ متر بر ثانیه می‌باشد. همچنین میزان نفوذپذیری معادل توده کارستی با توجه به مقاطع مختلف و در زمانهای حداقل و حداکثر سطح آب حدود $1/2 \times 10^{-4}$ متر بر ثانیه محاسبه گردید.

میزان نفوذپذیری با استفاده از آنالیز منحنی فرود چشمه

برای تخمین میزان تراوایی از آنالیز منحنی فروکش از معادله رورابوف (Rorabouqh, 1964) استفاده گردید:

$$T = \frac{\alpha 4Sl^2}{\pi^2}$$

در این معادله T میزان قابلیت انتقال، S ضریب ذخیره، l فاصله خروجی آبخوان تا خط تقسیم آب زیرزمینی و α ضریب منحنی فرود چشمه کارستی است برای این منظور دبی چشمه‌ها در یال جنوبی به صورت هفتگی اندازه‌گیری گردید مطابق با اندازه‌گیری‌های انجام شده چشمه دارای سه منحنی فرود می‌باشد (شکل ۵).

بر اساس این معادله میزان نفوذپذیری بین $1/4 \times 10^{-4}$ تا $3/6 \times 10^{-4}$ متر بر ثانیه محاسبه گردید (جدول ۱) و با استفاده از درصدهای جریان منحنی

فروکش چشمه میزان نفوذپذیری معادل در این روش حدود $1/6 \times 10^{-4}$ متر بر ثانیه محاسبه شد.

میزان نفوذپذیری با استفاده از اندازه‌گیری دبی چشمه و سطح آب گمانه مجاور

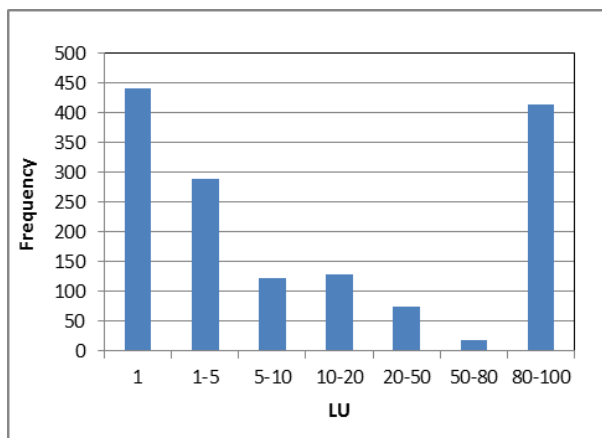
تخلیه از یک چشمه را میتوان مانند یک آزمایش پمپاژ با دبی متغیر مورد بررسی قرار داد در این صورت مقادیر ΔH در گمانه مجاور به عنوان نزول متوالی بار آبی آبخوان در جریان غیردائم در طول دوره تخلیه بحساب می‌آید. معادله تیس از نظر ریاضی بهترین شکل بیان این نوع جریان می‌باشد و برای یک آبخوان کارستی ضرایب هیدرودینامیک از روابط زیر حاصل می‌گردد (Milanovic, 1981).

$$\Delta H = \frac{0.185Q}{T} \left(\log \frac{2.25T}{x^2 S} + \log t \right)$$

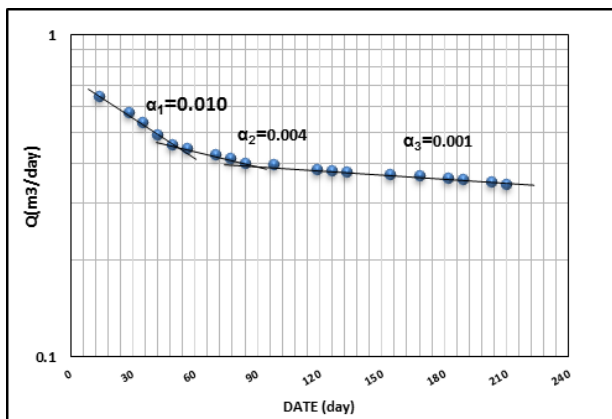
$$T = \frac{0.183Q_a}{C}$$

$$S = \frac{\Delta R}{\Delta H} \text{ or } S = \frac{2.25T t_0}{x^2}$$

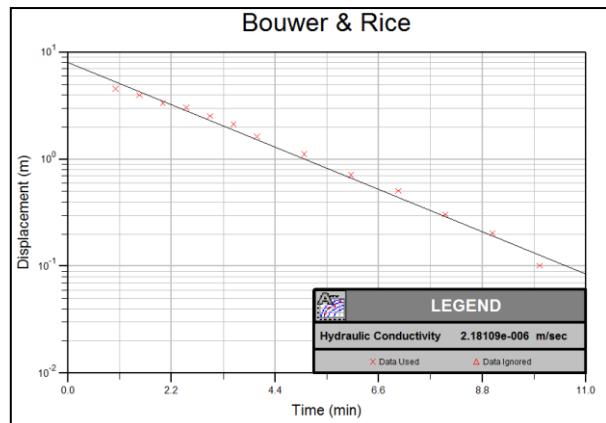
که در این معادلات ΔH کاهش سطح آبخوان در یک گمانه در زمان t برحسب متر، Q آبدی چشمه برحسب متر مکعب بر ثانیه، x فاصله بین چشمه و گمانه برحسب متر، t زمانی که آبدی Q اتفاق می‌افتد بر حسب ثانیه، Q_a میانگین تخلیه در مدت زمان فروکش چشمه بر حسب متر مکعب بر ثانیه، ΔR تغییر ذخیره آبخوان بر حسب میلی‌متر بار پیرومتری، C کاهش ΔH در فاصله زمانی $\log t = 1$ ، t_0 زمانی که سطح آب آبخوان $\Delta H = 0$ ، T میزان تراوایی بر حسب متر مربع بر ثانیه و S ضریب ذخیره بر حسب درصد می‌باشد. در این روش اطلاعات دبی چشمه و گمانه نزدیک به چشمه به صورت هفتگی برداشت گردید (شکل ۶). میزان K محاسبه شده در این روش برای منحنی‌های فرود در جریان افشان بین $4/1 \times 10^{-5}$ تا $7/1 \times 10^{-5}$ متر بر ثانیه و برای جریان متوسط 2×10^{-4} متر بر ثانیه محاسبه گردید. که بر اساس درصد جریان متوسط و افشان نفوذپذیری معادل توده با استفاده از این روش 8×10^{-5} متر بر ثانیه محاسبه گردید (جدول ۲).



شکل ۳. فراوانی آزمایشهای لوژن در گمانه‌های اکتشافی.

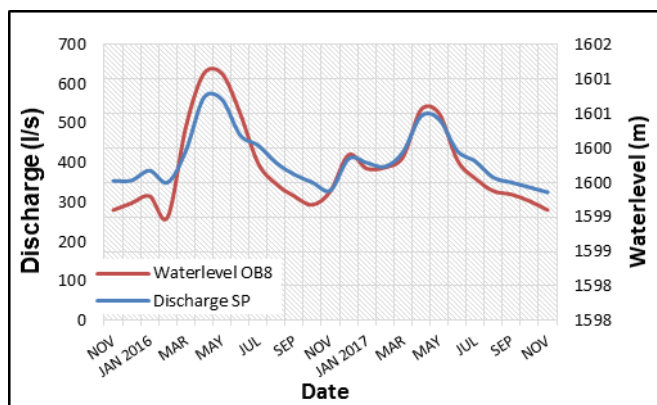


شکل ۵. ضرایب فرود چشمه خدرزنده در سال آبی (۹۶-۱۳۹۵).


 شکل ۴. میزان نفوذپذیری در آزمایش اسلاگ گمانه TB₄.

جدول ۱. مقادیر نفوذپذیری بر اساس ضرایب فرود چشمه

مساحت حوضه آبرگیر (km ²)	فاصله تا خط تقسیم l(m)	ضریب ضخیره (S)	ضریب فرود (α)	قابلیت انتقال T (m ² /day)	هدایت هیدرولیکی K (m/s)
۶۴	۱۰۰۰۰	۰/۰۰۷	۰/۰۱۱	۳۱۲۳	۰/۰۰۰۳۶۰
۶۴	۱۰۰۰۰	۰/۰۱۰	۰/۰۰۳	۱۲۲۹	۰/۰۰۰۱۴۲
۶۴	۱۰۰۰۰	۰/۰۳۰	۰/۰۰۱	۱۲۱۷	۰/۰۰۰۱۴۱



شکل ۶. تغییرات دبی چشمه و سطح آب گمانه نزدیک چشمه (سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ و ۹۶-۱۳۹۵).

جدول ۲. مقادیر نفوذپذیری بر اساس تغییرات سطح آب و دبی چشمه

K (m/s)	T (m ² /day)	S	α	ΔH_0 (mm)	ΔH_1 (mm)	ΔR (mm)	Q_0 (m ³ /s)	Q_{ave} (m ³ /s)	C	مساحت حوضه آبرگیر (km ²)
2×10^{-4}	۵۳۲/۷۰	۰/۰۲۸	۰/۰۱۰	۷۷/۶۳	۶۰/۷۵	۱۶/۸۸	۰/۵۸	۰/۵۲	۱۲/۷	۶۴
$7/1 \times 10^{-5}$	۱۵۴/۷۵	۰/۰۳۲	۰/۰۰۳	۲۰۲/۵۰	۱۸۰/۰۰	۲۲/۵۰	۰/۴۵	۰/۴۳	۵۲/۸	۶۴
$4/1 \times 10^{-5}$	۸۸/۷۲	۰/۰۴۸	۰/۰۰۱	۵۴۰/۰۰	۵۰۶/۲۵	۳۳/۷۵	۰/۴۰	۰/۳۷	۶۵/۹	۶۴

تخمین نشت آب از مخزن

نفوذپذیری‌های معادل محاسبه شده در روشهای مختلف برای آبخوان آهکی در جناح راست مخزن متفاوت بوده و در محدوده 10^{-6} تا 10^{-4} متر بر ثانیه قرار دارد (جدول ۳). حداقل نفوذپذیری مربوط به آزمون لوژن در مقیاس کوچک و حداکثر نفوذپذیری مربوط به روش دارسی و منحنی فرود است که در مقیاس ناحیه‌ای برآورد گردید همچنین روش دبی چشمه و سطح آب گمانه به صورت چاه پمپاژ در مقیاس محلی میزان نفوذپذیری را برآورد می‌کند. میزان نفوذپذیری محاسبه شده در مقیاس ناحیه‌ای حدود ۷۰ برابر بزرگتر از مقیاس کوچک برآورد گردید که این میزان اختلاف به دلیل تاثیر اثر مقیاس در محیط کارستی می‌باشد. مطابق با نمودار (شکل ۷) به طور تقریبی می‌توان گفت حجم نفوذپذیری معادل ناحیه‌ای توده کارستی در آزمایشهای با شعاع تاثیر بالای ۵۰۰ متر مشخص می‌گردد.

برای تعیین مقدار نشت از نرم افزار Seep2D در محیط GIS استفاده شد و مقدار نشت از مخزن در یال شمالی به سمت پایین دست و یال جنوبی محاسبه گردید. با توجه به تغییرات نفوذپذیری مقدار نشت بین 0.04 لیتر بر ثانیه (براساس روشهای مقیاس کوچک) تا $2/7$ لیتر بر ثانیه (براساس روشهای ناحیه‌ای) متغیر می‌باشد. این مقدار نشت بر اساس متوسط مقطع درگیر مخزن با آبخوان آهکی در مقیاس کوچک 0.12 متر مکعب بر ثانیه، با نفوذپذیری در مقیاس محلی

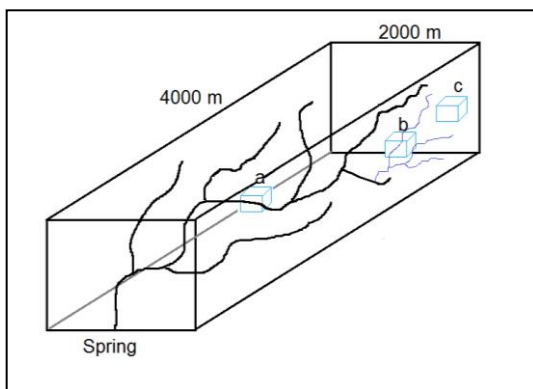
$3/9$ متر مکعب بر ثانیه و با در نظر گرفتن نفوذپذیری ناحیه‌ای $5/4$ تا $8/1$ متر مکعب بر ثانیه برآورد گردید. این مقدار اختلاف در برآورد مقدار نشت، ناشی از تاثیر اثر مقیاس در محیطهای ناهمگن کارستی است.

تخمین صحیح نشت از سدها نیازمند بررسیهای هیدروژئولوژی در تعیین چگونگی تماس سد و مخزن با آبخوانهای کارستی دارد. در زمان تماس ناحیه‌ای (Regional) با کارست (شکل ۸a) نفوذپذیریهای ناحیه‌ای همچون ردیابی، روش دارسی و روش منحنی فرود برای تخمین مقدار نشت صحیح تر است. در صورتی که مقیاس درگیر مخزن به صورت محلی (local) باشد (شکل ۸b) آزمایش پمپاژ برای تعیین مقدار نشت آب صحیح‌تر است و هنگامی که مقیاس درگیر به صورت کوچک (Sub-local) باشد (شکل ۸c) آزمایش پکرتست، تزریق و اسلاگ برای تعیین مقدار نشت روش صحیح‌تری است.

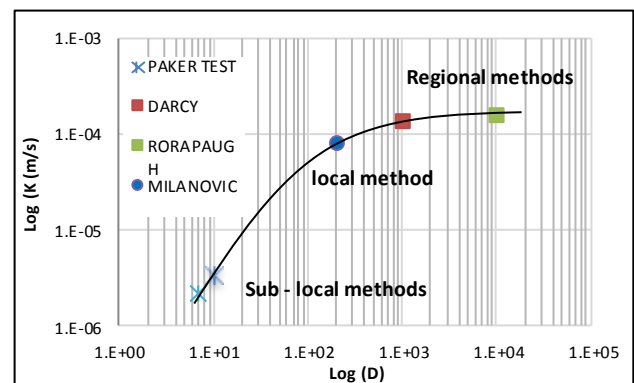
مطالعات هیدروژئولوژی نشان می‌دهد مخزن به صورت ناحیه‌ای با آبخوان آهکی جناح راست در تماس می‌باشد به همین دلیل مقدار نشت باید براساس نفوذپذیری ناحیه‌ای ملاک مدلسازی قرار گیرد. مطابق با روشهای محاسبه هدایت هیدرولیکی (K) در مقیاس ناحیه‌ای، نفوذپذیری معادل توده بین 10^{-4} تا 10^{-6} متر بر ثانیه محاسبه گردیده است. با این میزان نفوذپذیری مقدار نشت از مخزن سد بین حدود $6/3$ تا $8/1$ متر مکعب بر ثانیه (در حالت بدون ایجاد پرده تزریق) رخ خواهد داد (شکل ۹).

جدول ۳- میزان نفوذپذیری محاسبه شده با استفاده از روشهای مختلف

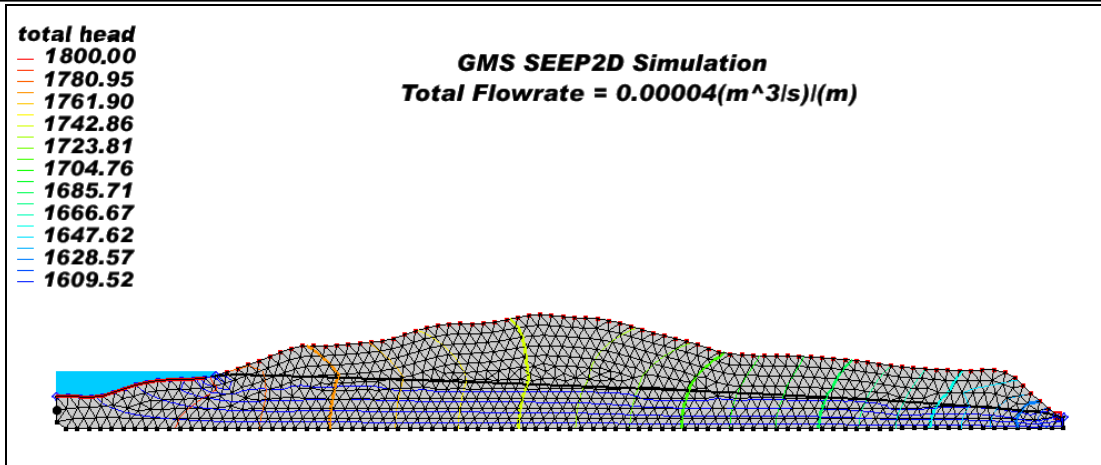
روش	K_{MIN} (m/s)	K_{MAX} (m/s)	K_{RE} (m/s)
لوژن	10^{-7}	10^{-5}	$3/2 \times 10^{-6}$
اسلاگ	10^{-6}	$3/3 \times 10^{-6}$	$2/1 \times 10^{-6}$
دارسی	10^{-4}	$1/3 \times 10^{-4}$	$1/2 \times 10^{-4}$
روراپوف	10^{-4}	$3/6 \times 10^{-4}$	$1/6 \times 10^{-4}$
میلانویچ	$4/1 \times 10^{-5}$	$2/0 \times 10^{-4}$	$8/0 \times 10^{-5}$



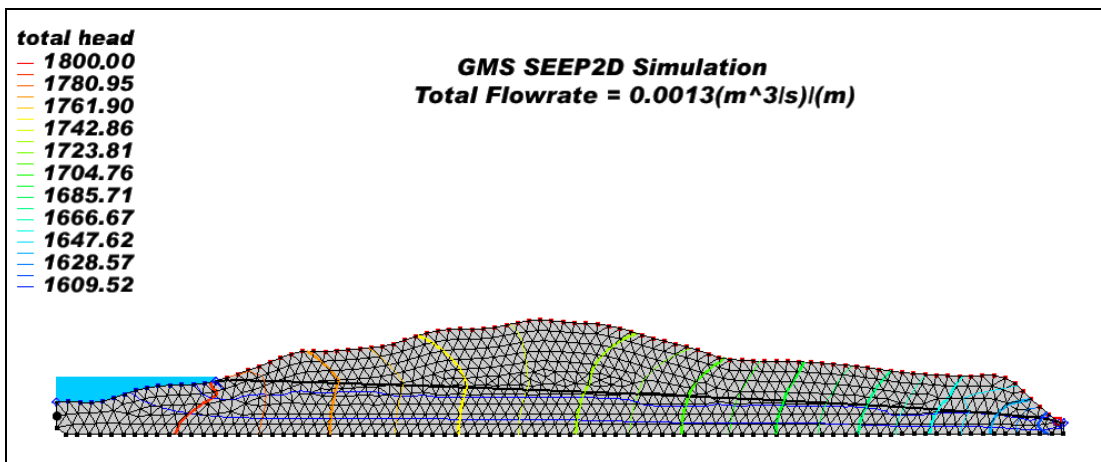
شکل ۸. نمودار شماتیک از تماس مخزن با شبکه کارستی a: تماس مخزن با آهک در مقیاس ناحیه‌ای b: تماس مخزن با آهک در مقیاس محلی c: تماس مخزن با آهک در مقیاس کوچک.



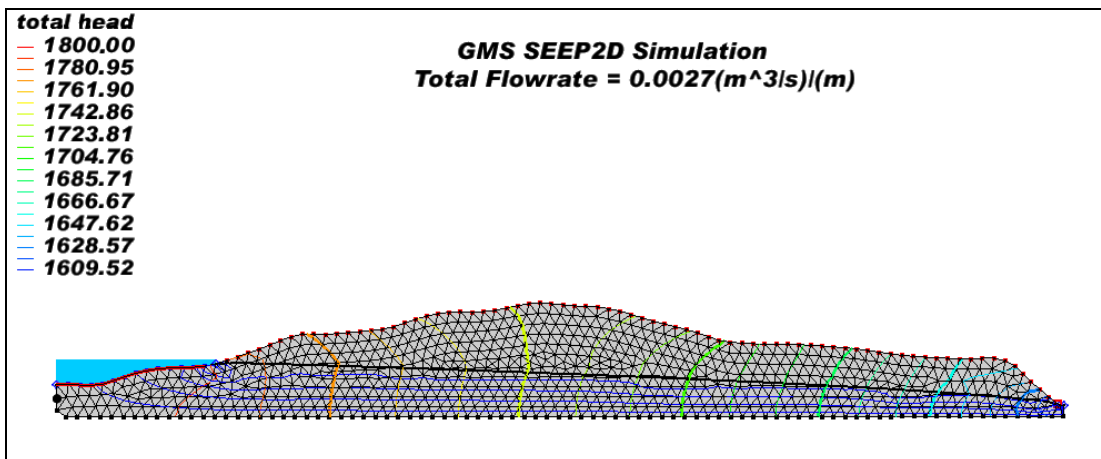
شکل ۷. تاثیر اثر مقیاس در میزان هدایت هیدرولیکی دولومیت‌های آهکی سازند جهرم - آسماری.



الف



ب



ج

شکل ۹. مقدار نشت در شرایط مختلف الف: مقدار نشت با نفوذپذیری در مقیاس کوچک ب: مقدار نشت بر اساس نفوذپذیری در مقیاس محلی ج: مقدار نشت بر اساس نفوذپذیری در مقیاس ناحیه‌ای.

نتیجه گیری

با توجه به غیرهمگن و ناهمسو بودن محیطهای کارستی، پارامترهای آبخوان نسبت به مقیاس متغیر می‌باشد به طوری که هر چه توسعه کارست بیشتر باشد تاثیر اثر مقیاس بیشتر است به همین دلیل احداث سد و درگیری مخزن در مقیاس‌های متفاوت با آهک‌های کارستی می‌تواند با مقادیر نشت متفاوتی مواجه شود. مهمترین پارامتر برای تعیین مقدار نشت از مخازن سدها میزان نفوذپذیری است که با تغییر مقیاس در محیطهای کارستی تغییر می‌کند. برای تعیین میزان نفوذپذیری در مقیاس‌های مختلف روشهای مختلفی به کار گرفته می‌شود. در زمان تماس ناحیه‌ای با کارست روشهای تعیین نفوذپذیری ناحیه‌ای همچون ردیابی، روش دارسی و روش منحنی فرود برای تخمین مقدار نشت صحیح‌تر است. در صورتی که مقیاس درگیر مخزن به صورت محلی باشد آزمایش پمپاژ برای تعیین مقدار نشت آب صحیح‌تر است و هنگامی که مقیاس درگیر به صورت کوچک باشد آزمایش لوژن، تزریق و اسلاگ برای تعیین مقدار نشت روش صحیح‌تری است.

برای تخمین صحیح نشت از مخازن کارستی مطالعات هیدروژئولوژی در تعیین مقیاس درگیری مخزن بسیار با اهمیت است. با تعیین مقیاس درگیر مخزن با کارست استفاده از روش‌های متناسب با مقیاس هر منطقه می‌تواند به محاسبه نشت واقعی از سدها منتهی گردد. در دولومیت‌های آهکی جناح راست سد بهشت

آباد میزان نفوذپذیری با استفاده از روشهای مختلف بین $2/1 \times 10^{-6}$ تا $1/6 \times 10^{-4}$ متر بر ثانیه محاسبه گردید میزان نفوذپذیری در مقیاس کوچک معادل $2/1 \times 10^{-6}$ تا $3/2 \times 10^{-6}$ متر بر ثانیه، در مقیاس محلی حدود $6/8 \times 10^{-5}$ متر بر ثانیه، و در مقیاس ناحیه‌ای بین $1/1 \times 10^{-4}$ تا $1/6 \times 10^{-4}$ متر بر ثانیه برآورد گردید. نسبت اختلاف میزان نفوذپذیری گستره کربناته در مقیاس ناحیه‌ای ۷۰ برابر نفوذپذیری در مقیاس کوچک است. این اختلاف باعث تفاوت زیاد در برآورد مقدار نشت می‌گردد. به همین نسبت مقدار نشت از مخزن در شرایط هدایت هیدرولیکی در مقیاس محلی حدود $0/04$ لیتر بر ثانیه، با مقیاس محلی حدود $1/3$ لیتر بر ثانیه و در مقیاس ناحیه‌ای بین $2/1$ تا $2/7$ لیتر بر ثانیه در هر متر مخزن برآورد گردید. با توجه به درگیری مخزن در جناح راست در مقیاس ناحیه‌ای می‌توان گفت مقدار نشت از مخزن در مقیاس ناحیه‌ای اتفاق خواهد افتاد. در این صورت با در نظر گرفتن سطح مقطع در تماس با مخزن مقدار نشت حدود $6/3$ تا $8/1$ متر مکعب بر ثانیه برآورد می‌گردد. تاثیر اثر مقیاس یکی از مهمترین فاکتورها در محیطهای کارستی برای آببندی مخزن می‌باشد که در مرحله انتخاب محور سد باید در نظر گرفته شود. این اثر باعث می‌گردد در یک گستره کربناته کارستی در موقعیتهای مختلف نشت‌های متفاوت رخ دهد به همین خاطر باید حتی امکان محورهای انتخاب گردد که مخزن سد به صورت ناحیه‌ای در تماس با شبکه کارستی نباشد.

منابع

- شرکت مهندسی مشاور زاینده‌آب، ۱۳۸۵، گزارش زمین شناسی محدوده مخزن و ساختگاه سد بهشت آباد
- شرکت مهندسی مشاور زاینده‌آب، ۱۳۸۶، گزارش ژئوتکنیک محدوده مخزن و ساختگاه سد بهشت آباد
- Bouwer. H., Rice. R.C., 1976. A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, *Water Resources Research*, vol. 12, no. 3, pp. 423-428
- Brown. D., 1998, An investigation into the controls on groundwater flow at increasing scales in the carboniferous limestone of Middlebarrow Quarry, S. Cumbria, U.K. PhD. Univ. of Lancaster, Lancaster
- Castany. G., 1984, Hydrogeological features of carbonate rocks. In: LaMoreaux PE, Wilson BM, Memon BA (eds) *Guide to the hydrology of carbonate rocks. IHP studies and reports in hydrology*, vol 41. UNESCO, Paris, pp 47- 67
- Chapuis. R.P., 2013, Permeability scale effect in sandy aquifers: a few case studies. In: *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, pp. 507-510.
- Clauser. C., 1992, Permeability of crystalline rocks. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union* 73 (21), 233-238.
- Dillon. P., Pavelic. P., Wright. M., Peter. P., Nefiodovas. A., 2001, Small-scale heterogeneity and anisotropy of a confined carbonate aquifer from triaxial tests on core samples. S. a. wohnlich, editor, *New Approaches Characterising Groundwater Flow*, Swets and Zeitlinger Lisse, 815-819
- Galvão. P., Halihan. T., Hirata. R., 2015, The karst permeability scale effect of Sete Lagoas, MG, Brazil. *Journal of Hydrology*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.026>
- Halihan. T., Sharp. Jr., J.M., Mace. R.E., 2000, Flow in the San Antonio segment of the Edwards Aquifer: matrix, fractures, or conduits? In: Wicks, C.M., Sasowsky, I.D. (Eds.), *Groundwater Flow and Contaminant Transport in Carbonate Aquifers*. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 129-146.
- Illman. W.A., 2007, Strong field evidence of directional permeability scale effect in fractured rock. *J. Hydrol.* 319 (1-4), 227-236.
- Karami. G. H., 2002, Assessment of heterogeneity and flow systems in karstic aquifers using pumping test data, Ph.D. thesis Univ. of Newcastle, Newcastle upon Tyne.
- Király. L., 1975, Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domaine des caracteres physique des roches karstique. - In: Burger, A. & L. Dubertret (eds.) *Hydrogeology of karstic terrains*. International Union of Geological Sciences, B, 3, pp. 53-67, Paris
- Kurikami. H., Takeuchi. R., Yabuuchi. S., 2008, Scale effect and heterogeneity of hydraulic conductivity of sedimentary rocks at Horonobe URL site. *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C* 33 (Suppl. 1), S37-S44.
- Landon. M.K., Rus. D.L., Harvey. F.E., 2001, Comparison of instream methods for measuring hydraulic conductivity in sandy streambeds. *Groundwater* 39 (6), 870-885.

- Mace. R.E., Hovorka. S.D., 2000, Estimating porosity and permeability in a karstic aquifer using core plugs, well tests, and outcrop measurements, in Sasowsky, I.D., and Wicks, C.M., Groundwater flow and contaminant transport in carbonate aquifers: Brookfield, Vt., A.A. Balkema, p. 93-111
- Maréchal. J.C., Dewandel. B., Subrahmanyam. K., 2004, Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered fractured layer of a hard rock aquifer. Water Resour. Res. 40, W11508. <http://dx.doi.org/10.1029/2004WR003137>.
- Milanovic. P. T., 1981, Karst hydrogeology. Littleton, CO: Water Resources Publications, 434 p.
- Pearson. R., Money. M. S., 1977, Improvements in the lugeon or packer permeability test. Q. JI Engng Geol. Vol. 10 pp. 221-239
- Raeisi. E., 2008, Groundwater storage calculation in karst aquifers with alluvium or no-flow boundaries: Journal of Cave and Karst Studies, Vol. 63, pp. 62-70
- Rorabough. M. I., 1964, Estimating changes in bank storage as groundwater contribution streamflow. Int. Ass. Sci. Hydrogeology, Pub. 63, 432-441
- Rovey II. C.W., Cherkauer. D.S., 1995, scale dependency of hydraulic conductivity measurements. - Ground Water, 33, 5, 769-780. doi: 10.1111/j.1745-6584.1995.tb00023.x
- Sauter. M., 1991, Assessment of hydraulic conductivity in a karst aquifer at local and regional scale.- In: Quinlan, J. (ed.) Proceedings of the 3rd conference on hydrogeology, ecology, monitoring, and management of ground water in karst terranes, 4th-6th December 1991, Nashville, Tennessee. National Ground Water Association, 39-56, Dublin, Ohio.
- Sauter. M., 2005, Scale effects of hydraulic conductivity in karst and fractured aquifers. - Geophysical Research Abstracts, 7, 7748.
- Stocklin. J., 1968, Structural history and tectonics map of Iran: a review. Am Assoc Petrol Geol Bull 52(7):1229-1258
- Whitakera. F.F., Smart. P.L., 2001, Characterising scale-dependence of hydraulic conductivity in carbonates: evidence from the Bahamas. Journal of Geochemical Exploration, pp. 133-137