هیدروژئولوژی نامتعارف سازند آسماری در تاقدیس کمردراز ایذه

حمیدرضا ناصری، فرشاد علیجانی

گروه زمین شناسی دانشگاه شهید بهشتی

محمد نخعی

گروه زمین شناسی دانشگاه تربیت معلم تهران

علی محرابی نژاد

کارشناس ارشد سنجش از دور و GIS، سازمان آب و برق خوزستان

تاریخ دریافت۱۳۹۰/۰۴/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۶/۲۲

falijani2000@yahoo.co.uk

چکیده

به منظور توصیف رفتار هیدروژئولوژی نامتعارف سازند آسماری در تاقدیس کمردراز، جنوب غرب ایذه، تحلیل سری های زمانی هیدروگراف سطح آب چاه های مشاهده ای و چشمه هلایجان و شبیه سازی سیستم جریان با استفاده از محیط متخلخل معادل انجام شده است. تحلیل آماری سری های زمانی با روش های همبستگی خودکار، چگالی طیفی، همبستگی متقاطع، نوسان متقاطع، و تابع وابستگی صورت گرفته است. اطلاعات پایه در یک مدل عددی تفاضل محدود، MODFLOW، وارد شده و مدل جریان در حالت ناماندگار با پیش فرض شیوه محیط متخلخل معادل مورد واسنجی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل هیدروگراف دبی چشمه هلایجان و عمق سطح آب دیتا لاگرها نشان می دهد که سیستم سازند آسماری در تاقدیس کمردراز دارای ظرفیت ذخیره زیادی می باشد. در آبخوان سازند آسماری ایذه جریان پایه غالب می باشد و جریان سریع در سیستم مجرایی نسبت به جریان پایه سهم کمی دارد. با وجود ماهیت کارستی آبخوان های سازندهای آهکی، مدل جریان محیط متخلخل معادل می تواند جهت نمایش بار هیدرولیکی و روابط تغذیه / تخلیه به کار گرفته شود.

کلمات کلیدی: *سازند آسماری، تحلیل سری زمانی، چشمه، MODFLOW، ایذه*

مقدمه

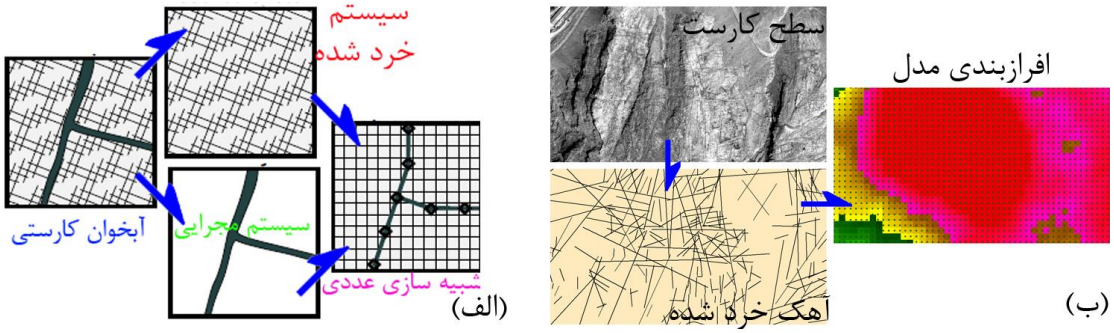
در مناطقی همانند ایذه که آب سطحی وجود ندارد، آبخوان های کارستی مهمترین منبع تامین آب شرب شهری و روستایی می باشند. با رخداد خشکسالی های مداوم از سال ۱۳۸۶ به بعد، افت سطح آب در آبخوان های کارستی خوزستان با توجه به ذخیره زمینه آهکی، نحوه رفتار سیستم، و درجه کارست شدگی به طور متفاوتی رخ داده است. یکی از آبخوان هایی که در طی رخداد خشک سالی ها افت سطح آب کمی داشته است، آبخوان کارستی کمردراز واقع در ۵ کیلومتری جنوب غرب ایذه می باشد که نقش مهمی در تامین آب شرب شهر ایفا نموده است. به منظور توصیف رفتار هیدروژئولوژی نامتعارف سازند آسماری در تاقدیس کمردراز، تحلیل سری های زمانی هیدروگراف سطح آب چاه های مشاهده ای و چشمه هلایجان و شبیه سازی سیستم جریان با استفاده از محیط متخلخل معادل انجام شده است.

یک آبخوان کارستی توسط مجراهای کارستی متصل به هم با هدایت هیدرولیکی زیاد و حجم کم که توسط یک محیط با نفوذپذیری کم (توده زمینه آهک) محاط شده اند، مشخص می شود. آبخوان های کارستی تیپیک با خصوصیات به شدت ناهمگن، شبکه مجرایی کاملا توسعه یافته، تخلیه سریع بارش نفوذی، و نوسانات شدید در سطح آب زیرزمینی و دبی چشمه های کارستی در دوره زمانی کوتاه پس از بارش، مشخص می شوند (Padilla & Pulido-Bosch, 1995). قابلیت انتقال این گونه آبخوان ها بسیار زیاد و توانایی ذخیره آنها کم می باشد. به همین دلیل اختلاف سطح ایستابی حداقل و حداکثر در طی یک سال آبی تا ۵۰ متر نیز می رسد (Milanovic, 1981). محققین زیادی وجود آبخوان های کارستی متفاوت از موارد تیپیک کارست را گزارش داده اند. اختلاف اصلی از غالب بودن جریان پایه در قیاس با جریان سریع به واسطه ظرفیت ذخیره زیاد زمینه آهک ایجاد می شود. این حالت در سیستم های با توسعه کارست نابالغ وجود دارد که آب را در طی دوره تغذیه ذخیره نموده و بعدا در طی فصل خشک تخلیه می نمایند(Larocque et al., 1998).

فنون کلاسیک از قبیل آزمایشات پمپاژ یا ردیابی جهت توصیف سیستم های کارستی ضروری می باشند، هر چند که آنها اطلاعاتی درباره نوع جریان و تغییرات زمانی آن به دست نمی دهند (Larocque et al., 1998). بنابراین، در مطالعات عملکرد رفتار هیدرودینامیکی آبخوان های کارستی بر روی تحلیل هیدروگراف چشمه ها و سطح آب در چاه‌های آهکی (Bonnacci, 1993) یا منحنی های فرود (Padilla et al., 1994) تمرکز می شود. دیگر روش،

تحلیل سری زمانی می باشد که بارش را به عنوان ورودی و دبی چشمه و / یا سطح ایستابی را به عنوان خروجی در نظر می‌گیرد. این روش به طور گسترده ای در مطالعات مورد استفاده قرار می گیرد زیرا آسان بوده، جمع آوری داده های مورد نیاز آن کم هزینه می باشد، و نتایج قابل قبولی به دست می دهد. مطالعاتی که از تحلیل سری های زمانی در هیدروژئولوژی کارست استفاده نمودند در مقالات مختلف ارایه شده است (Eisenlohr et al., 1997; Larocque et al., 1998; Lambrakis et al., 2000; Bouchaou et al., 2002; Panagopolous & Lambrakis, 2005; Panagopolous & Lambrakis, 2006).

در این مقاله سعی گردیده است تا با به کارگیری تحلیل سری های زمانی متغیرهای هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی از قبیل بارش، دبی چشمه، و سطح آب کارست شناختی از خصوصیات هیدرودینامیکی و هیدرولیکی آبخوان کارستی کمردراز حاصل آید و سپس سیستم جریان با دیدگاه محیط متخلخل معادل و با استفاده از MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1988) شبیه سازی شود.. تحلیل آماری سری های زمانی با روش های همبستگی خودکار (Autocorrelation)، چگالی طیفی (Spectral density)، همبستگی متقاطع (Cross-correlation)، نوسان متقاطع (Cross-amplitude)، و تابع وابستگی (Coherency function) صورت گرفته است. برای حصول جزییات نظری بیشتر پیرامون این توابع می توان به مقالات مربوطه (Jenkins &Watts, 1968; Box et al., 1994; Padilla & Pulido-Bosch, 1995; Larocque et al., 1998) رجوع نمود. روش همبستگی خودکار ابزاری برای تشخیص بعضی از مشخصات سری زمانی دبی و یا سطح ایستابی، به ویژه تغییرات چرخه‌ای آنها، می‌باشد. این تغییرات می‌توانند به بعضی از مشخصات ساختاری آبخوان‌های کارستی ارتباط داده شود. روش همبستگی خودکار، سری زمانی دبی چشمه را با خودش مقایسه می‌کند. نمودار نمایش دهنده همبستگی خودکار، کورلوگرام نامیده می‌شود. زمان مورد نیاز برای افتادن کورلوگرام در زیر مقادیر از پیش تعیین شده (معمولا ۰/۲) به نام اثر حافظه (Memory effect) نامیده می‌شود. سیستم کارستی با توسعه کم و ذخیره زیاد آب زیرزمینی دارای اثر حافظه زیاد می باشد، کورلوگرام شیب کاهشی ملایمی نشان می دهد و مقادیر همبستگی خودکار کمتر از ۰/۲ را در زمان طولانی دارند. بر خلاف این، شبکه کارستیک فعال، بدون ذخیره آب زیرزمینی قابل توجه، منطبق با سیستم حافظه کم می باشد، کورلوگرام آن دارای شیب بیشتر، و در نتیجه زمان تاخیر دکورلیشن (Decorrelation) کوتاه می باشد. تبدیل فوریه (Fourier transformation) تابع همبستگی خودکار از بعد زمان به فرکانس، تابع چگالی طیفی را به دست می‌دهد. تحلیل طیفی تک متغیره چگونگی توزیع واریانس سری ها را بر روی فرکانس های مختلف تعیین می کند. نقاط اوج مجزای یک سری زمانی در فرکانس های مختلف به تشخیص پدیده های تناوبی و در نتیجه خصوصیات سیستم کارستی منجر می شود. روش همبستگی متقاطع مقایسه بین سری زمانی دبی چشمه و سطح آب چاه را با بارش ممکن می‌سازد. این تکنیک اطلاعات شدت رابطه بین دو سری و تاخیر بین آنها را به دست می‌دهد. هر چقدر دو سری یکسان نباشند، کورلوگرام - متقاطع در حول میانه آن غیرمتقارن می‌شود. تاخیر، یعنی زمان اختلاف بین lag=0 و حداکثر همبستگی متقاطع، نشان دهنده درجه کارست شدگی آبخوان می باشد و تخمینی از زمان انتقال پالس فشار و زمان سیر ذرات در آبخوان است. در حالتی که آبخوان دارای زهکشی ضعیف با ظرفیت ذخیره زیاد باشد، نمودار همبستگی متقاطع شیب ملایمی (حتی تا ۱۰۰ روز) نشان می دهد در حالی که میانگین زمان تاخیر آن چند هفته می باشد. در شبکه کارستی خوب توسعه یافته با ظرفیت ذخیره اندک و زهکشی سریع آبخوان، سیستم کارستی با زمان پاسخ کوتاهتر بدون تاخیر یا تاخیر چند روزه مشخص می شود. تابع نوسان متقاطع، خصوصیات فیلترینگ داده های تناوبی بارش توسط سیستم را نشان می دهد. سیستم کارستی با توسعه ضعیف با ظرفیت ذخیره زیاد می تواند به عنوان فیلتر اینرسی (Inertial filter) در نظر گرفته شود که در آن سیگنال های کوتاه مدت (فرکانس زیاد) در قیاس با سیگنال های طولانی مدت (یعنی تغییرات فصلی) کمتر می باشند. سیستم کارستی پیشرفته و شبکه کارستی پیوسته اغلب به صورت فیلتر غیر اینرسی رفتار می کند و اثر تنظیم کنندگی خاصی ندارد. در دامنه فرکانسی، تابع نوسان متقاطع با پهنای باند زیاد مشخص می شود که جهت حصول اثر فیلترینگ خوب می بایست فرکانس به بیش از ۰/۲ برسدکاربرد مدل های عددی آبخوان های کارستی با چالش های زیادی روبرو می باشد (Birk et al., 2003; Bridget et al., 2003; Nico and David, 2007; Rain and Chen, 2010).سیستم جریان کارست می تواند بر حسب توده آهک خرد شده و سیستم مجرایی مفهومی شود (شکل ۱). در شرایطی که جریان پایه افشان در سیستم کارست غالب باشد و جریان سریع در سیستم مجرایی نسبت به آن بسیار کم باشد می توان با فرض محیط متخلخل معادل، مدل MODFLOW را جهت شبیه سازی سیستم با اعمال تغییرات ناگهانی هدایت هیدرولیکی در مرز توده نسبتا همگن با مجاری به کار گرفت. در مناطق کارست تیپیک با تخلخل دوگانه معادل می توان از کد MODFLOW-2005 CFP (Harbaugh, 2005) استفاده نمود (Hill, 2008). جهت ارزیابی نحوه پاسخ چشمه هلایجان به رفتار هیدرودینامیک کارست، مدل سازی مبتنی بر فرآیند، جهت شبیه سازی جریان در سیستم کارست تاقدیس کمردراز به کار گرفته شده است. آبخوان کمردراز با مفهومی نمودن توزیع مکانی خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان در کد MODFLOW شبیه سازی گردید و نتایج با داده های واقعی آبدهی و سطح آب چاه های مشاهده ای مورد واسنجی قرار گرفت.

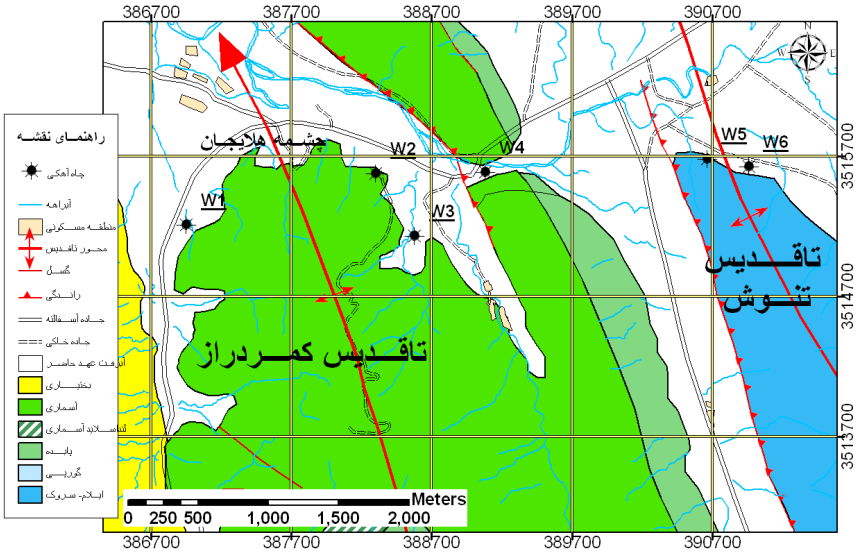


شکل ۱. کمی نمودن جریان یک آبخوان کارستی در مدل عددی (الف) فرضی و (ب) واقعی در بخشی از آبخوان کمردراز

زمین شناسی و هیدروژئولوژی

آبخوان کارستی کمردراز در سنگ آهک سازند آسماری (الیگومیوسن) در پنج کیلومتری جنوب غرب ایذه واقع شده است (شکل ۲). سازند آسماری شامل سنگ‌های آهکی با بین لایه‌های آهک فسیل دار کرم رنگ تا قهوه‌ای، هوازده و کاملاً درز و ترک‌دار می‌باشد. به علت مقاومت و سختی خاص آهک‌های آسماری این سازند ارتفاعات و بخش‌های مقاوم منطقه زاگرس چین خورده را تشکیل می‌دهد و غالباً پوشش خارجی تاقدیس‌های طویل و پشت نهنگی را به وجود می آورد. لایه های ضخیم تا توده‌ای آهک آسماری دارای حفرات انحلالی فراوان کوچک و بزرگ در نواحی مختلف تاقدیس مورد مطالعه می‌باشند (شکل ۳). فشار حاصل از حرکات تکتونیکی موجب ایجاد درز و شکاف‌های فراوان و متقاطع در این سازند شده است که عرض بازشدگی‌ها متجاوز از چندین سانتی‌متر می‌باشد. شکستگی‌ها و گسل‌ها باعث ارتباط عمودی شکاف‌های انحلالی شده است که به موجب آن آب زیرزمینی به راحتی بین لایه‌های آهکی جریان می‌یابد. سازند آسماری در تاقدیس چال خشک واقع در شرق تاقدیس کمردراز به علت عملکرد گسل هلایجان برگشتگی پیدا نموده است که این برگشتگی به صورت ناودیس گون در تنگ هلایجان قابل مشاهده است. در یال شمال شرقی تاقدیس رخنمون سازند گچساران وجود ندارد ولی در یال جنوب غربی سازند آسماری در بعضی نقاط توسط سازند گچساران پوشیده شده است. حفاری سه حلقه چاه آهکی در اطراف دماغه شمال شرقی تاقدیس کمردراز نمایانگر وجود آبخوان کارستی با قابلیت انتقال و ذخیره زیاد می باشد.

در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۶ سه حلقه چاه در آبخوان کارستی مذکور جهت تامین آب شرب شهر ایذه حفر شده‌اند (شکل ۲) که پس از سه سال خشکسالی افت کمی (حدود ۲ تا ۳ متر) را متحمل شده اند. آبخوان کارستی کمردراز دارای یک سیستم تخلیه اصلی (چشمه هلایجان) در دماغه شمال غربی تاقدیس می‌باشد. آب چشمه هلایجان دارای کیفیت خوب با هدایت الکتریکی بین ۴۵۰ تا ۵۰۰ میکرو موهس برسانتی متر می‌باشد. دبی مجموع سه دهنه چشمه هلایجان در سال‌های با بارش میانگین بین ۲۰۰ تا ۱۲۰۰ لیتر در ثانیه متغیر بوده است ولی رخداد خشک سالی‌های اخیر در سال‌های آبی ۸۷-۸۶ و ۸۸-۸۷ باعث خشک شدن چشمه هلایجان که مهمترین سرریز مخزن آبخوان کمردراز می‌باشد، شده است (معاونت مطالعات پایه و طرح های جامع منابع آب خوزستان ، ۱۳۸۸).

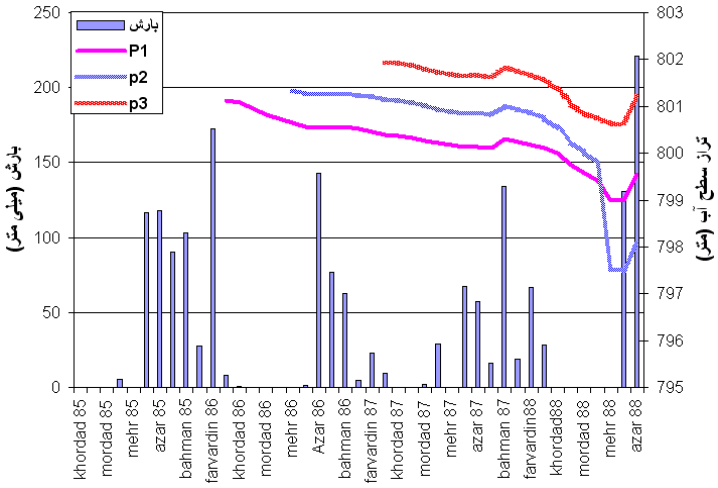


شکل ۲. نقشه زمین شناسی و موقعیت منابع آب منطقه مورد مطالعه (چاه های مشاهده ای P1 تا P3 در مجاورت چاه های بهره برداری W1 تا W3 واقع شده

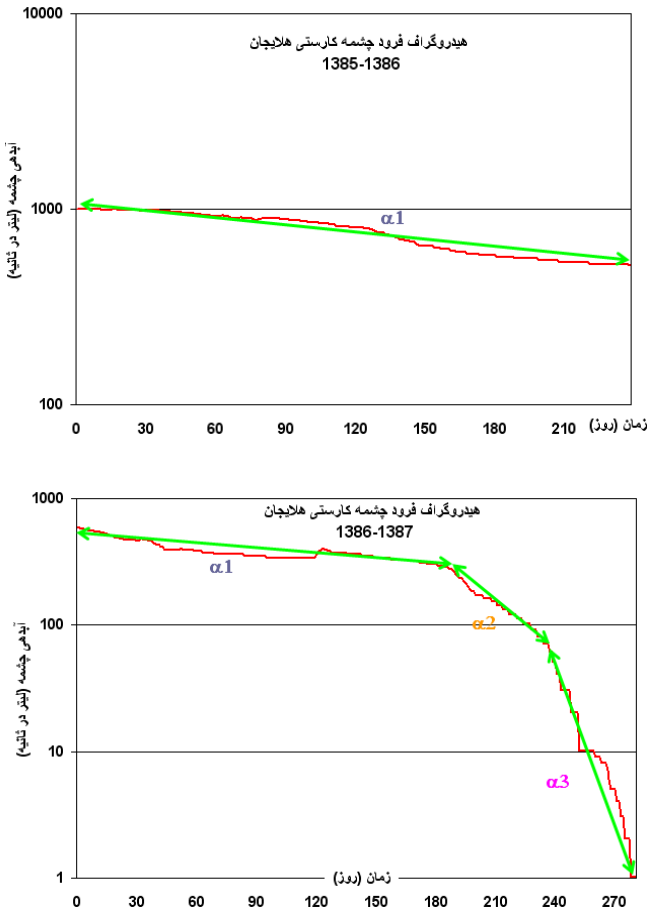
شکل ۳. توسعه غار در سازند آسماری (یال جنوب غربی تاقدیس کمردراز - روبروی پادگان قدس)

با استفاده از داده های سطح آب اندازه گیری شده در چاه های مشاهده ای آهکی، افت سطح آب در آبخوان کارستی کمردراز در اثر رخداد خشکسالی های مداوم از ۱۳۸۶ تا ۱۳۸۸ مورد بررسی قرار گرفته است. چاه های مشاهده ای P1 تا P3 در فواصل حدود ۲۰ تا ۳۰ متری از چاه های بهره برداری W1 تا W3 در تاقدیس کمردراز حفاری شده اند، بدین لحاظ نمایش آنها در شکل ۲ ممکن نگردیده است. شکل ۴ نمودار تغییرات سطح آب چاه های آهکی منطقه مورد مطالعه و اثرات بارش بر افت سطح آب در چاه ها را نشان می دهد. داده های سطح آب از دیتالاگرهای منصوب در چاه های مشاهده ای مجاور چاه های بهره برداری استخراج شده است.

بارش میانگین سالانه منطقه ایذه برابر ۶۲۰ میلی متر می باشد. میزان بارش ایستگاه ایذه در سال آبی ۸۶-۸۵ برابر ۶۳۶ میلی متر (تقریبا معادل میانگین)، در سال آبی ۸۷-۸۶ برابر ۳۵۱ میلی متر (کاهش ۴۳ درصد نسبت به میانگین)، در سال آبی ۸۸-۸۷ برابر ۳۸۸ میلی متر (کاهش ۳۸ درصد نسبت به میانگین) بوده است. در سه ماهه پاییز ۱۳۸۸ برابر ۳۵۱ میلی متر (برابر ۵۷ درصد میانگین سالانه) بوده است. هیدروگراف چاه های آهکی منطقه مورد مطالعه بر اساس داده های موجود از زمان نصب دیتا لاگر ها در سال ۱۳۸۶ تا آذر ماه ۱۳۸۸ تهیه شده است. بر اساس هیدروگراف سطح آب ماهانه چاه های آهکی در تاقدیس های آهکی منطقه مورد مطالعه نتایج زیر حاصل شده است:سطح آب چاه P1 در سازند آسماری تاقدیس کمردراز در اردیبهشت ۸۶ برابر ۸۰۱/۱۳ متری بوده است. با رخداد خشکسالی های مداوم سطح آب در شهریور ۸۸ به ۷۹۹/۴۲ متری رسیده است. با آغاز بهره برداری همزمان از چاه ها سطح آب در طی یک ماه از ۷۹۹/۴۲ به ۷۹۸/۹۹ متری رسیده و در طی بارش آبان ۸۸ سطح آب تقریبا ثابت مانده است. بارش آذر ماه ۸۸ باعث بالا آمدن سطح آب چاه مذکور تا عمق ۷۹۹/۵۴ شده است. افت ناچیز سطح آب این چاه در طی خشک سالی ها نمایانگر ظرفیت ذخیره بسیار زیاد آهک آسماری در این محل می باشد. با رخداد خشکسالی های مداوم سطح آب چاه P2 از ۸۰۱/۳۵ متری در مهر ۸۶ به ۷۹۹/۸ متری در شهریور ۸۸ رسیده و با آغاز بهره برداری همزمان از چاه ها سطح آب در طی یک ماه حدود ۲/۳ متر افت داشته است. بارش آذر ماه ۸۸ باعث بالا آمدن سطح آب چاه مذکور تا عمق ۷۹۸/۰۵ متری شده است. نوسانات کم سطح آب در چاه ۲ نیز موید ظرفیت ذخیره بسیار زیاد سازند آسماری در تاقدیس کمردراز می باشد. سطح آب چاه P3 در اردیبهشت ۸۷ برابر ۸۰۱/۹۴ متری بوده است. با رخداد خشکسالی های مداوم سطح آب در شهریور ۸۸ به ۸۰۰/۷۵ متری رسیده است. با آغاز بهره برداری همزمان از چاه ها سطح آب در طی یک ماه حدود ۰/۱ متر افت داشته است. بارش آذر ماه ۸۸ باعث بالا آمدن سطح آب چاه مذکور تا عمق ۸۰۱/۲۱ شده است. به منظور تحلیل سالانه آبدهی چشمه و تعیین ضرایب فرود، هیدروگراف چشمه برای سال های ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۷ استفاده شده است (شکل ۵). با استفاده از مدل مخزن نمایی ضرائب فروکش تخلیه آبخوان برای دوره مورد مطالعه محاسبه شده‌اند (جدول ۱). ضریب α نشانگر توانایی تخلیه آب زیرزمینی می‌باشد و متاثر از خصوصیات هیدروژئولوژیکی محیط یعنی تخلخل مؤثر و قابلیت انتقال آبخوان است. مقدار ضریب فرود کمتر وقتی حاصل می شود که تأخیر در تخلیه زیرزمینی (منحنی فرود با شیب کمتر اما طولانی‌تر) رخ دهد. در سال آبی ۱۳۸۶-۱۳۸۵ چشمه هلایجان دارای یک ضریب فرود در رژیم جریان پایه می باشد و ضرایب تخلیه مربوط به سیستم مجرایی و شکستگی به وضوح در آن نمایان نمی باشد هرچند که با حجم جریان بسیار کم نسبت به جریان پایه در تغذیه چشمه هلایجان مشارکت دارند. این رژیم در سال آبی مذکور ۲۳۸ روز به طول می انجامد. حداکثر آبدهی چشمه ۹۹۹ لیتر در ثانیه و در انتهای دوره ۵۱۴ لیتر در ثانیه بوده است. این بر ذخیره دینامیک حدود ۳۱ میلیون متر مکعب (بر اساس رابطه $V_d = \frac{86400 * Q_{t0}}{\alpha}$) در کارست کمردراز دلالت دارد.



شکل۴. نمودار تغییرات سطح آب چاه های آهکی تاقدیس کمردراز



شکل ۵. تحلیل هیدروگراف بی چشمه هلایجان تخلیه کننده آهک آسمار تاقدیس کمردراز

جدول ۱. ضرائب فروکش چشمهٔ هلایجان و طول مدت تأثیر آنها

سال آبی	رژیم جریان پایه		رژیم میانه		رژیم مجرایی	
	$\alpha 1$	طول دوره (روز)	$\alpha 2$	طول دوره (روز)	$\alpha 3$	طول دوره (روز)
۱۳۸۵-۱۳۸۶	۰/۰۰۰۲۲	۱۴۱	-		-	
۱۳۸۶-۱۳۸۷	۰/۰۰۴	۱۸۸	۰/۰۲۸۱	۴۸	۰/۰۹۶۹	۴۴

در سال آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۶ با رخداد اولین دوره خشک سالی، رژیم جریان متفاوت از آبخوان های کارستی بر چشمه هلایجان حاکم می شود. در این سال بارش برابر ۳۵۱ میلی متر بوده است که از این مقدار ۹۳ میلی متر آن در طی بارش زیاد هفدهم آذر ماه ۱۳۸۶ نازل شده و عملا تغذیه بسیار کمی در آبخوان کارستی آسماری رخ داده است. همانگونه که در هیدروگراف چشمه هلایجان مشخص است با گذشت زمان دبی چشمه از ۵۸۰ لیتر در ثانیه پس از بارش سیل آسا در آذر ماه ۱۳۸۶ تا خشک شدن آن در انتهای دوره کاهش می یابد. در طی فرود ابتدا ۱۸۸ روز رژیم جریان پایه رخ می دهد. رژیم جریان در انتهای دوره با $\alpha 3$ برابر ۴۴ روز رخ می دهد که نمایانگر تخلیه انتهایی چشمه از طریق خالی نمودن مجاری می باشد. بین این دو حالت رژیم میانه به مدت ۴۸ روز رخ می دهد. این نمایانگر آنست که در طی منحنی فرود چشمه هلایجان ابتدا آب از ذخیره زمینه سنگ با فرود کم شیب (معادل با محیط متخلخل) رخ می دهد. در انتها تخلیه از سیستم مجرایی و به سرعت رخ می دهد تا آبدهی چشمه به صفر برسد. حجم ذخیره دینامیک در رژیم جریان پایه، جریان میانه، و جریان سریع به ترتیب حدود ۱۳، ۰/۸، و ۰/۰۶ میلیون متر مکعب محاسبه شده است. این روند معکوس در ضرایب فرود احتمالا در ارتباط با تغذیه دوگانه چشمه هلایجان می باشد، به طوری که علاوه بر سیستم مجرایی و شکستگی در بخش فراتیک کارست، احتمالا جریان رو به بالا از طریق گسل عمقی هلایجان برقرار شده و عملا افت این جریان باعث باعث کاهش شدید و ناگهانی آب چشمه و رخداد فرود معکوس شده است. با تحلیل کلی هیدروگراف چشمه هلایجان در سال های با بارش میانگین و یا بیشتر از آن می توان استنباط نمود که ظرفیت ذخیره کارست آسماری زیاد بوده و مخزن عظیم آب زیرزمینی را در خود جای داده است. جریان پایه کارست آسماری نسبت به جریان سریع کاملا غالب می باشد و شواهد نشان دهنده غالب بودن جریان نزدیک به دارسی در منطقه فراتیک می باشد. جهت مدل نمودن سطح آب در سیستم کارست آسماری، مدل دو مخزنی (مخزن مجرایی و مخزن زمینه سنگ آهک) با تبادل جریان برابر ۰/۰۰۵ میلیون متر مکعب بین دو مخزن درنظر گرفته شد. به طور کلی مدل مخزن دو گانه تا اوایل شروع دوره بارش تا حدی توانسته سطح آب کارست را در چاه های آهکی تاقدیس کمردراز شبیه سازی نماید ولی با رخداد بارش ها، اختلافات سطح آب مشاهده ای و اندازه گیری شده جهت دار می شوند.

در شرایط طبیعی سیستم کارست آسماری افزایش یکنواخت سطح آب در چاه های یک و دو را نشان می دهد که منطبق با تغذیه افشان و سیستم جریان زمینه غالب با قابلیت ذخیره زیاد می باشد که این با نتایج حاصل از تحلیل آماری سطح آب چاه های سازند آسماری در طی چند سال گذشته (ناصری و همکاران، ۱۳۸۹) منطبق است. تغذیه از بارش در مدل مخزن دوگانه کارست سازند آسماری منطقه ایذه به صورت ناگهانی و روزانه بوده و نتایج سطح آب حاصل از مخزن شکستگی و کارستی نمی تواند جواب منطقی به دست دهد. در مدل مخزن دوگانه، اثرات تغذیه آهسته در سیستم افشان و جریان غالب در زمینه آهک با نفوذپذیری کم و قابلیت ذخیره بسیار زیاد نمی تواند به خوبی شبیه سازی شود. از اینرو از مدل معادل محیط متخلخل برای تحلیل سیستم جریان آب زیرزمینی در سازند آسماری (تاقدیس کمردراز) به کار گرفته شد.

روش کار

تحلیل سری های زمانی با استفاده از داده های سطح آب اندازه گیری شده توسط دیتالاگرها در چاه های مشاهده ای، داده های روزانه بارش، و داده های روزانه دبی چشمه هلایجان انجام شده است. با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی تاقدیس کمردراز، بارش روزانه اندازه گیری شده در ایستگاه سینوپتیک ایذه، و رابطه گرادیان بارش – ارتفاع منطقه مورد مطالعه، بارش روزانه میانگین تاقدیس محاسبه و به عنوان داده ورودی سیستم در نظر گرفته شد. در این تحقیق، داده های روزانه عمق آب زیرزمینی در پیزومتر P1 و دبی چشمه هلایجان جهت تحلیل سری های زمانی مورد استفاده قرار گرفته است. سپس با در نظر گرفتن فرض محیط متخلخل معادل، آبخوان کارستی کمردراز شبیه سازی شده است. اولین مرحله در تهیه مدل، توصیف قالب هیدروژئولوژی کارست تاقدیس کمردراز بوده است. خطواره های سطح آهک آسماری با تفسیر بصری تصویر ماهواره ای Quick Bird 2010 با قدرت تفکیک مکانی (Spatial resolution) شصت سانتی متر استخراج گردید. سپس نقشه چگالی خطواره ها تهیه شد (شکل ۶). چگالی خطواره ها می تواند به صورت ابزاری جهت تخمین توزیع هدایت هیدرولیکی نواحی کارستی مورد استفاده قرار گیرد. بدین منظور همبستگی چگالی خطواره های سطحی تاقدیس کمردراز با داده های هدایت هیدرولیکی حاصل از تفسیر آزمایش پمپاژ سه حلقه چاه تعیین و بر اساس آن تخمین اولیه ای از توزیع مکانی هدایت

هیدرولیکی به دست آمد. با فرض آنکه مجاری کارستی دارای هدایت هیدرولیکی کم باشد، نسبت عکس هدایت هیدرولیکی به عنوان قابلیت ذخیره آبخوان در نظر گرفته شد. در مرحله بعد، مدل مفهومی سیستم جریان آب کارست با جمع بندی نتایج حاصل از بررسی های اکتشافی ژئوالکتریک، تحلیل سری های زمانی داده های دبی چشمه هلایجان و سطح آب چاه های مشاهده ای، و مطالعات زمین شناسی و ژئومورفولوژی تهیه شد. کد MODFLOW برای شبیه سازی سه بعدی جریان آب زیرزمینی به کار گرفته شد. واسنجی پارامترهای مدل تحت شرایط ماندگار طی ۲۷ ماه (از مهر ۱۳۸۶ تا آذر ۱۳۸۸) انجام شد. با استفاده از بیلان محاسباتی مدل آبدهی چشمه هلایجان تعیین گردید و با داده های واقعی دبی چشمه مورد مقایسه قرار گرفت. مدل به صورت ۶ واحد استراتیگرافیک طراحی گردید. لایه بالایی به عنوان بخش فراتیک سطحی با هدایت هیدرولیکی برآورد شده از طریق فنون سنجش از دور، لایه دوم به عنوان سیستم کارست مجرایی با هدایت هیدرولیکی ۱/۲ برابر و در لایه های زیرین با کاهش عمقی کارست شدگی، هدایت هیدرولیکی تا ۰/۲ برابر مقدار برآورد، کاهش داده شد. شرایط تغذیه سیستم از طریق بارش، و جریان جانبی جنوب شرقی از طریق یال های تاقدیس تعریف گردید. نتایج ژئوفیزیک آبرفت دشت هلایجان مشخص نمود که سازند گچساران در زیر آبرفت کم ضخامت بر روی آهک آسماری قرار دارد و ارتباط هیدرولیکی آبخوان کارستی را در یال جنوب غربی با دشت هلایجان محدود نموده است. عمده تخلیه کارست از طریق چشمه هلایجان رخ می دهد.

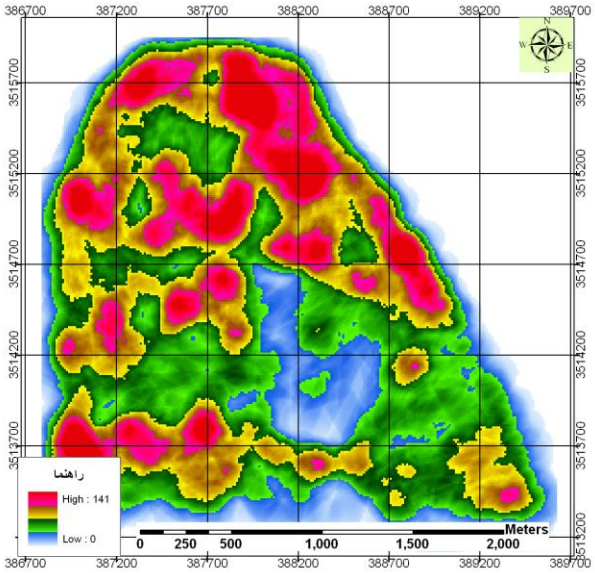
بحث

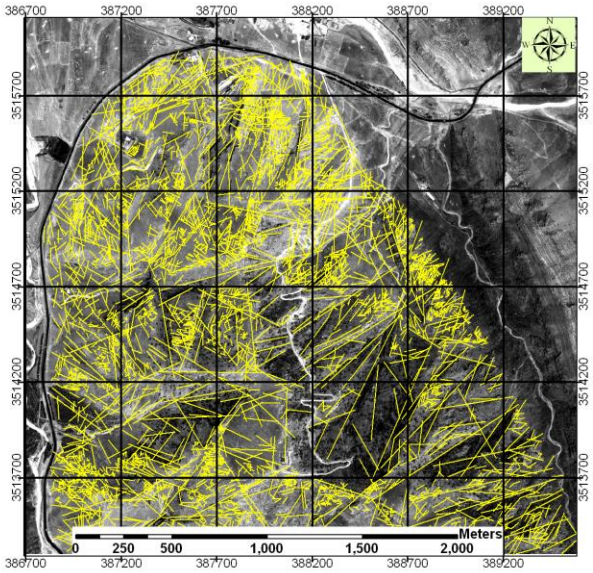
تحلیل سری های زمانی

طول دوره سری های زمانی حدود ۲/۷ سال، از اردیبهشت ۱۳۸۶ تا دی ماه ۱۳۸۸ و شامل ۹۹۹ عدد بوده است. در طی این تحقیق، الکترودهای پروب تک پارامتری (سطح آب) در دیتالاگرها نصب گردید که عمق سطح آب زیرزمینی را روزانه اندازه گیری می نمودند. اکثر مطالعات انجام شده در ارتباط هیدرولیکی زیاد و ذخیره ناچیز و زمینه آهک دارای ذخیره زیاد و هدایت

با تحلیل سری های زمانی، آبدهی چشمه را به عنوان داده خروجی در نظر می گیرند. با این حال، محققین مختلف نیز نشان دادند که علاوه بر آبدهی چشمه می توان تاثیر بارش یا بهره برداری را بر روی سطح آب زیرزمینی مورد بررسی قرار داد (Larocque et al., 1998; Lee & Lee, 2000; Panagopolous &) Lambrakis, 2005). در نتیجه می توان داده های سطح آب را جهت حصول اطلاعاتی در مورد دینامیک نوسانات سطح ایستابی و منشا و نوع نفوذ و تغذیه سیستم کارستی مورد استفاده قرار داد.

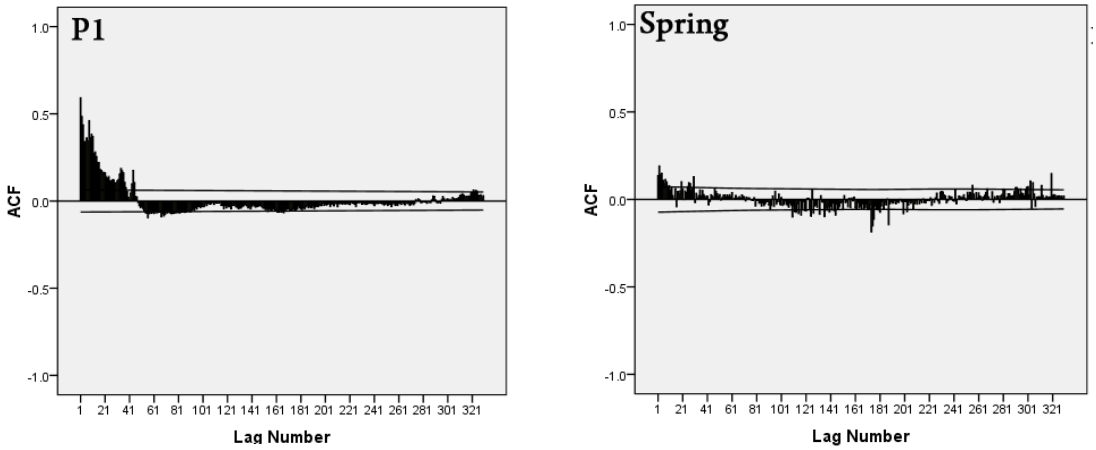
کورلوگرام پیزومتر P1 که در آبخوان آهک آسماری کمردراز حفر شده است در زمان اولیه پر شیب بوده و منطبق با سیستم تاخیر کم در مجاری کارستی قسمت بالایی آبخوان می باشد ولی در زمان حدود ۴۵ روز تابع همبستگی خودکار به کمتر از ۰/۲ می رسد که نمایانگر قابلیت ذخیره زیاد آبخوان می باشد. تابع همبستگی خودکار چشمه کارستی هلایجان اینرسی زیادی نشان می دهد، یعنی سیستم بارش ورودی را به خوبی فیلتر می نماید. تفسیر فیزیکی کورلوگرام چشمه هلایجان مبین درجه کارست شدگی کمتر (نبود مجاری با هدایت زیاد) و ظرفیت ذخیره زیاد است. شکل ۸ توابع چگالی طیفی چشمه هلایجان و چاه مشاهده ای معرف آبخوان کارستی مورد مطالعه را نشان می دهد. نقطه اوج بزرگ در فرکانس های کمتر از ۰/۰۰۴ (۲۵۰ روزه) وجود چرخه سالانه تغذیه آبخوان ها را مشخص می نماید. در نمودارهای چگالی طیفی پیزومتر P1، واریانس کم در فرکانس های پایین، یعنی کمتر از ۰/۰۲ (بیشتر از ۵۰ روز) نمایانگر اثر تنظیم کنندگی زیاد، اینرسی زیاد سیستم، و عدم مولفه جریان سریع می باشد. بر خلاف این، چشمه هلایجان که سیستم مجرایی بخش بالایی آبخوان آهک آسماری (ذخیره دینامیک) را تخلیه می کند پهنای طیف وسیعی را نشان می دهد، به طوری که فیلترینگ خوب در فرکانس بیش از ۰/۲ (دوره کمتر از ۵ روز) وجود دارد. این تفاوت احتمالا از کاهش ناگهانی آبدهی چشمه هلایجان در طی دوره های خشک سالی و عدم کاهش ذخیره استاتیک کارست کمردراز (که در سطح آب چاه P1 مشخص می شود) ناشی شده است.



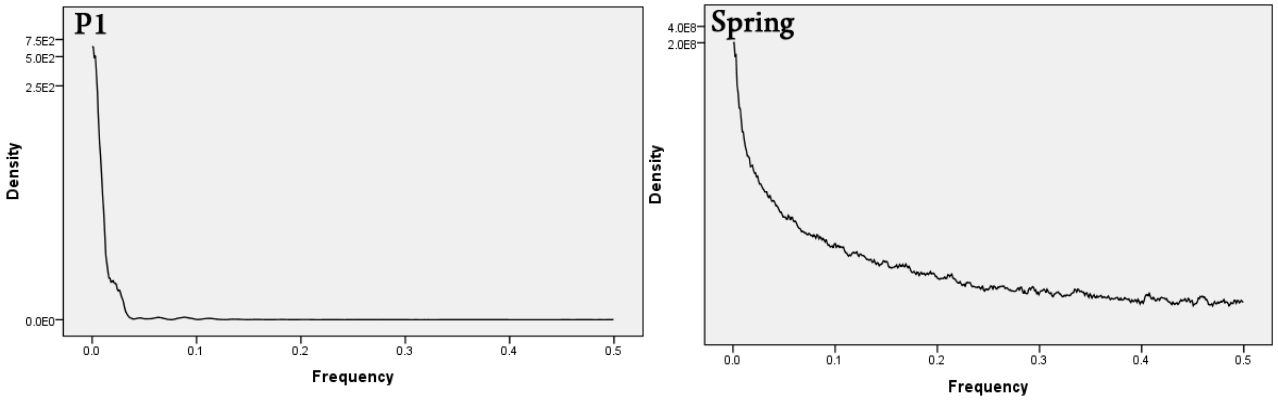


تـابع همبسـتگی متقـاطع (Cross Correlation Function or CCF) (شکل ۹) در سیستم کارست آسماری نامتقـارن بـه سـمت مقـادیر مثبـت مـی باشد. نمودارهای CCF نقطه اوج واضحی را نشان نمی دهند. جریان پایـه غالـب در مورد چشمه هلایجان به وضوح مشخص می باشد. پاسخ طولانی به پالس هـا در چشمه هلایجان نمایانگر قابلیت ذخیره زیاد سیستم می باشـد. نمـودار CCF چشمه هلایجان دارای شیب کمی است که این نمایانگر نبود جریان سـریع مـی باشد. مقادیر کم CCF چشمه هلایجان نشان دهنده آنست که سـرعت سـیگنال بارش به طور قابل ملاحظه ای بین زمان ورود بـه سیسـتم و زمـان رسـیدن بـه سطح ایستابی در زون غیر اشباع کاهش یافته است که نمایانگر ظرفیـت ذخیـره زیاد سیسـتم مـی باشـد. نمودارهـای نوسـان متقـاطع (Cross Amplitude Function or CAF) (شکل ۱۰) نشـان دهنـده آن هسـتند کـه فیلتراسـیون سیستم و ترقیق کنندگی سیگنال ورودی به سرعت در فرکانس های بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ رخ داده و در فرکانس های زیاد به سمت صفر میل می نماید. این بـدان معنی است که نمودار CAF مولفه جریان سریع را بـرای آهـک آسـماری نشـان نمی دهد. تـابع وابسـتگی (Coherency Funcion or COF)، خطـی بـودن سیستم کارستی را مشخص می نماید. سیستم وقتی خطی است که یـک تغییـر در تابع ورودی باعث تغییر متناسب با آن در تابع خروجـی شـود. خطـی بـودن یکی از خصوصیات آبخوان های به شدت کارستی، می باشـد کـه در آن رخـداد بارش سنگین باعث ایجاد تخلیه شدید چشمه کارستی در طی دوره زمانی کوتاه می شود. تابع وابستگی (شکل ۱۱) رابطه ورودی – خروجی را بیان می کند.

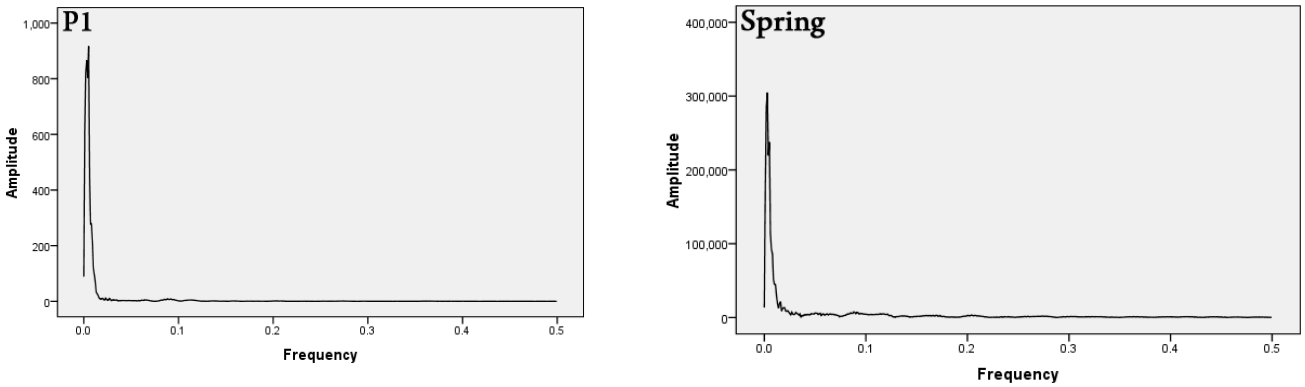
نوسانات COF بین ۰/۱ تا ۰/۸ در کل فرکانس ها متغیـر اسـت. ایـن بـدان معنی است که رابطه کاملا خطی بین بارش و داده های سـطح آب زیرزمینـی و دبی چشمه در آبخوان مورد مطالعه وجود نـدارد و رفتـار شـبیه حالـت کارسـت تیپیک در سازند آسماری تاقدیس کمردراز دیـده نمـی شـود. بـر اسـاس نتـایج حاصل از تحلیل سری های زمانی، سازند آسماری در تاقدیس کمردراز به عنوان سیستم با ظرفیت ذخیره زیاد و جریان پایه غالب تشخیص داده شده اسـت. بـر خلاف آبخوان های کارستی تیپیک، ظرفیت ذخیره این آبخوان هـا زیـاد بـوده و زمینه آهکی نیز می تواند جریان افقـی را انتقـال دهـد. بـر ایـن اسـاس، سـازند آسماری در تاقدیس کمردراز با جریـان انتشـاری غالـب در منطقـه اشـباع (کـه احتمالا نزدیک به شرایط دارسی می باشـد) مشـخص مـی شـود، در حـالی کـه انحرافات موضعی از این حالت نیز وجود دارد. هر چند که رخداد غارها و حفرات در بخش غیر اشباع سازند آسماری در منطقه ایذه در سـطح و در حفـاری هـای اکتشافی محرز شده اسـت ولـی توسـعه شـبکه مجرایـی در بخـش عمـده‌ای از آبخوان ضعیف می باشد. ظرفیت ذخیـره سـازند آسـماری زیـاد بـوده و مخـزن عظیم آب زیرزمینی را در خود جای داده است. جریان انتشاری سازند آسـماری نسبت به جریان سریع کاملا غالب می باشد و شواهد نشان دهنـده غالـب بـودن جریان نزدیک به دارسی در منطقه فراتیک می باشد.



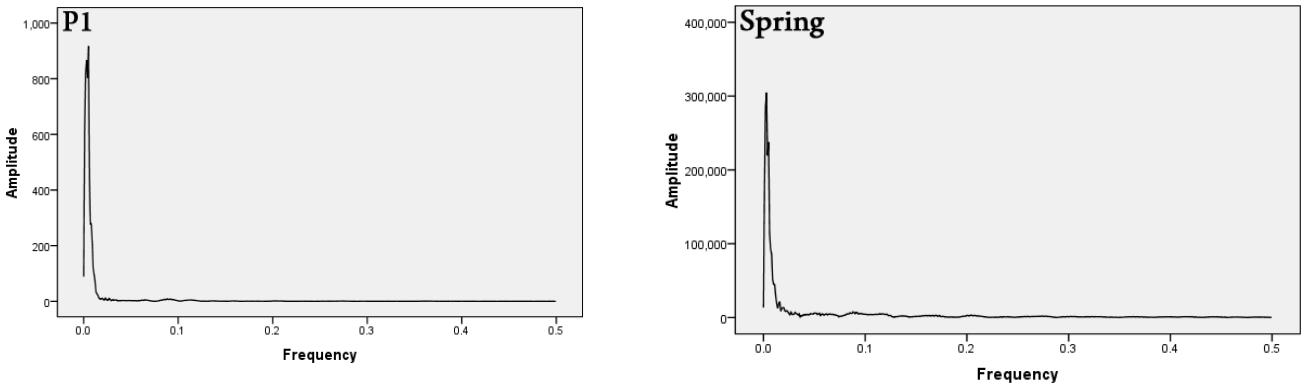
شکل ۷. کورلوگرام های چاه P1 و چشمه هلایجان در آبخوان کمردراز



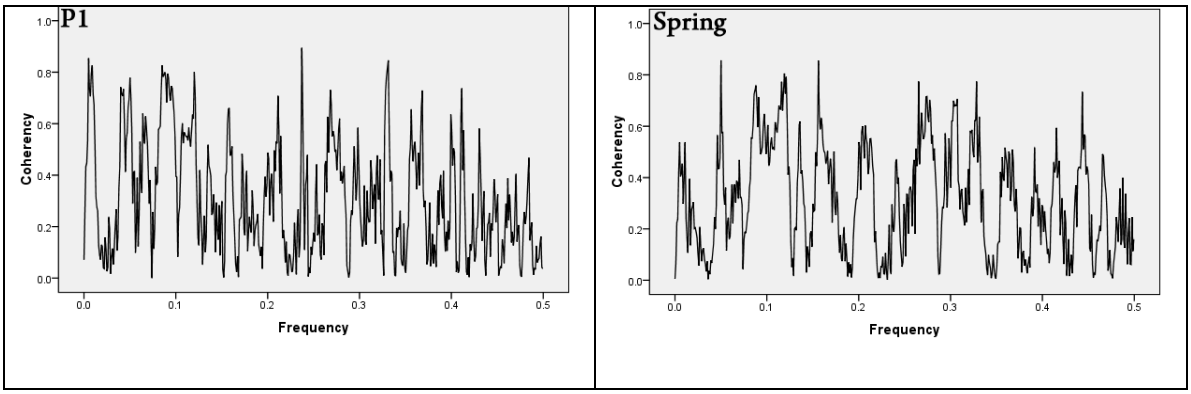
شکل ۸. نمودار چگالی طیفی چاه P1 و چشمه های هلایجان در آبخوان کمردراز



شکل ۹. نمودار همبستگی متقاطع چاه P1 و چشمه هلایجان در آبخوان کمر دراز



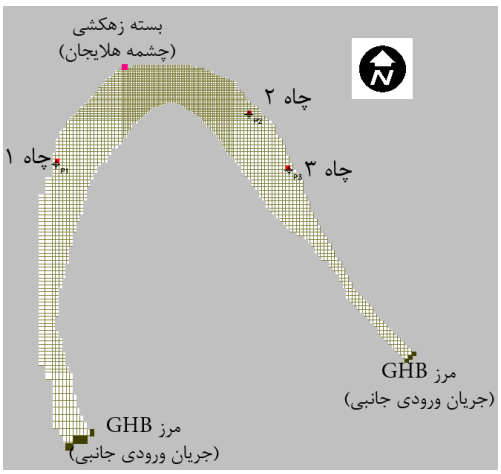
شکل ۱۰. نمودار نوسان متقاطع چاه P1 و چشمه هلایجان در آبخوان کمردراز



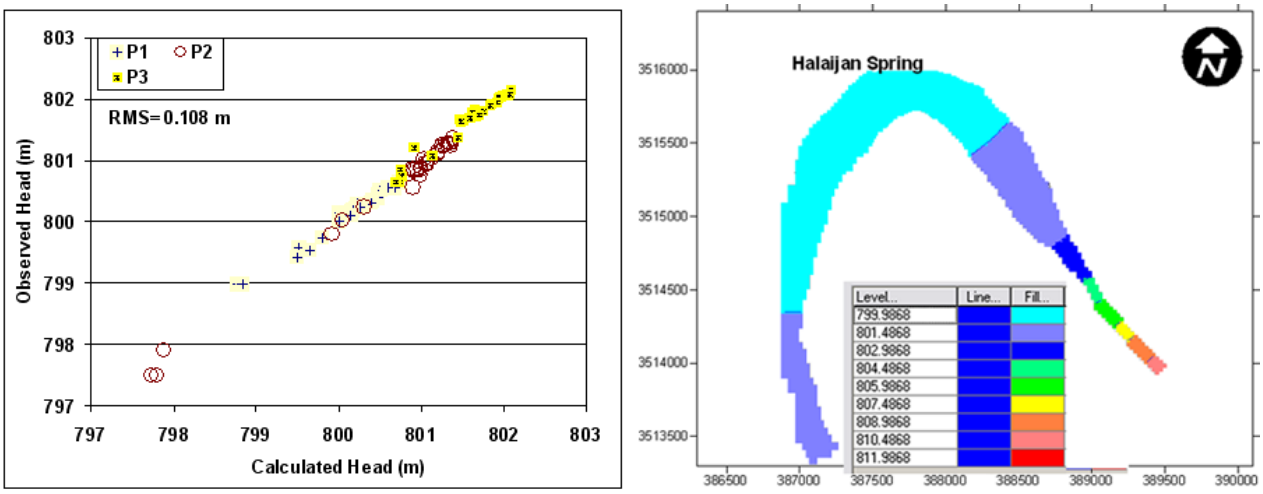
شکل ۱۱. نمودار تابع وابستگی چاه معرف P1 در آبخوان کمردراز و چشمه هلایجان

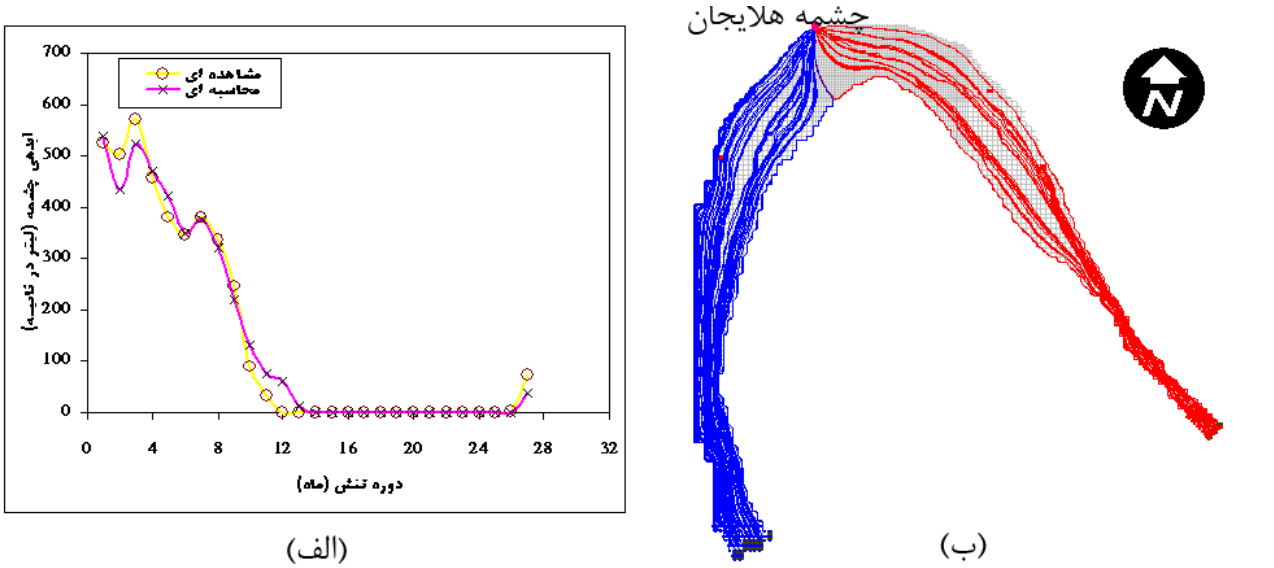
مدل سازی آبخوان کمردراز

هدف از مدل سازی عددی آبخوان کمردراز، ارزیابی اعتبار تفسیرهای انجام شده سیستم جریان با استفاده از تحلیل سری های زمانی، تعیین نوع مرزها و موقعیت آنها، برآورد تغذیه، و شبیه سازی تغییرات آبدهی چشمه هلایجان با استفاده از MODFLOW می باشد. محدوده مدل به ۱۲۸ ردیف و ۱۵۷ ستون با اندازه سلولی متغیر از ۱۲/۵ تا ۱۰۰ متر افرازبندی گردید (شکل ۱۲). بخش های مختلف سازند آسماری در ۶ لایه برای مدل تعریف شد. مرز هیدرولیکی بار عمومی (GHB) جهت تغذیه زیرزمینی از طریق یال ها، مرز ناحیه بندی تغذیه ای جهت شبیه سازی بارش نفوذی (پهنه بندی درصد نفوذ بر اساس چگالی خطواره های سطحی بین ۱۰ تا ۷۰ درصد بارش ماهانه به صورت اولیه برآورد گردید)، و بسته زهکشی با هدایت ۱۰۰۰۰ متر مربع بر روز و تراز زهکشی معادل با ۷۹۹/۹ متر جهت شبیه سازی چشمه هلایجان تعریف گردید. شرایط اولیه با استفاده از داده های سطح آب سه پیزومتر و تراز چشمه در شهریور ۱۳۸۶ درونیابی شد. شبیه سازی ناماندگار به مدت ۲۷ ماه تا آذر ۱۳۸۸ انجام گردید که اثرات آغاز بهره برداری از چاه های آب شرب از شهریور ۱۳۸۸ را نیز در خود جای داده باشد. برای هر اجرای مدل، تراز آب محاسبه ای و مشاهده ای در سه پیزومتر جهت واسنجی مورد مقایسه قرار گرفت. معیار واسنجی با خطای RMS برابر ۱۰ سانتی متر تعیین گردید. پارامترهای هیدرولیکی کارست، تغذیه از بارش، و بار هیدرولیکی در شرایط مرزی GHB به سمتی تغییر داده شد تا تراز سطح آب محاسباتی به طور معقولی با سطح آب مشاهده ای منطبق گردد. نمودار واسنجی داده های بار مشاهده ای در مقابل بار محاسبه ای در شکل ۱۳ نشان داده شده است. منحنی هم پتانسیل شبیه سازی شده آبخوان تاقدیس کمردراز (شکل ۱۳) برای انتهای دوره مدل سازی نمایانگر شیب هیدرولیکی ملایم و تبعیت عمومی جریان از شرایط نزدیک به دارسی می باشد.



شکل ۱۲. شبکه مدل جریان آبخوان تاقدیس کمردراز





شکل ۱۴. (الف) نمودار آبدهی اندازه گیری شده در مقابل محاسبه ای چشمه هلایجان در دوره مدل سازی و (ب) نقشه خطوط سیر ذرات در یال های سیستم تاقدیس کمر دراز

بر اساس نتایج بیلان محاسباتی توسط مدل، حجم آب تخلیه شده از بسته زهکشی که نمایانگر تخلیه از چشمه هلایجان می باشد در هر دوره استخراج گردید. حجم آب تخلیه شده از بسته زهکشی شبیه سازی شده (بر حسب لیتر در ثانیه) به عنوان آبدهی چشمه تبدیل شد. انطباق کلی در نمودار آبدهی اندازه گیری شده در مقابل دبی محاسبه ای چشمه هلایجان (شکل ۱۴ الف) نمایانگر واسنجی مطلوب مدل جریان کارست تاقدیس کمردراز می باشد. دوره

خشیدگی چشمه توسط مدل با دو ماه تاخیر مشخص شده است. همچنین در دوره های انتهایی آبدهی مجدد چشمه با تاخیر یک ماهه توسط مدل مشخص می شود. با توجه به این برازش داده ای می توان با تراز بار هیدرولیکی زهکش برابر ۷۹۹/۹ متر، زمان آبدار شدن و خشک شدن چشمه را پیش بینی نمود. خشک شدن چشمه هلایجان یک سال پیش از آغاز بهره برداری از چاه های آب شرب کمردراز رخ داده است و این به علت افت تراز سطح آب کارست در مظهر چشمه تا زیر رقم ۷۹۹/۹ متر می باشد. با این حال با شبیه سازی سیر

نتیجه گیری

رفتار هیدروژئولوژی آبخوان آهک آسماری کمردراز ایذه نسبت به سیستم های کارستی متفاوت می باشد. افت کم سطح آب زیرزمینی در آبخوان پس از طی دو سال خشک سالی و به ویژه در مجاورت چاه های بهره برداری نمایانگر قابلیت ذخیره بسیار زیاد سیستم می باشد. تحلیل هیدروگراف چشمه هلایجان نشانگر آنست که بر خلاف دیگر سیستم های کارستی، مولفه جریان انتشاری در آبخوان کمردراز غالب می باشد و در انتهای دوره خشک سالی، کاهش سریع آبدهی و خشک شدن کامل چشمه رخ می دهد. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل سری های زمانی، آبخوان کمردراز به عنوان سیستم با ظرفیت ذخیره زیاد و جریان انتشاری غالب تشخیص داده شده است. بر خلاف آبخوان‌های ذرات در یال های تاقدیس کمردراز توسط PMPATH (Chiang & Kinzelbach, 1994)مشخص می شود (شکل ۱۴ ب) که چشمه هلایجان از هر دو یال تاقدیس تغذیه می شود. بر این اساس می توان در سال های با بارش میانگین و با استفاده از شبیه سازی و مدیریت بهینه سیستم کارست توسط مدل، میزان بهره برداری مجاز از چاه ها را طوری تعیین نمود که حداقل آسیب را به آبدهی چشمه هلایجان وارد نماید.

کارستی تیپیک، ظرفیت ذخیره این آبخوان زیاد بوده و زمینه آهکی نیز می تواند جریان افقی را انتقال دهد. ظرفیت ذخیره سازند آسماری زیاد بوده و مخزن عظیم آب زیرزمینی را در خود جای داده است. جریان پایه آبخوان کمردراز نسبت به جریان سریع کاملا غالب می باشد و شواهد نشان دهنده غالب بودن جریان نزدیک به دارسی در منطقه فراتیک می باشد. با تلفیق نتایج تحلیل سری زمانی و شبیه سازی آبخوان کمردراز با مدل MODFLOW استنباط گردیده است که هیدروژئولوژی آهک آسماری در این آبخوان متفاوت از آبخوان های کارستی تیپیک می باشد. توانایی بسته زهکشی با هدایت بسیار زیاد در مدل برای شبیه سازی تخلیه از طریق چشمه هلایجان، امکان مناسبی را جهت مدیریت کمی آبخوان و تعیین بهینه حجم بهره برداری از چاه های آب شرب بدون آنکه باعث خشک شدن چشمه شود، به وجود آورده است.

منابع

معاونت مطالعات پایه و طرح های جامع منابع آب خوزستان، ۱۳۸۸، گزارش آماربرداری ماهانه منابع آب، سازمان آب و برق خوزستان.

ناصری. ح.ر.، علیجانی. ف.، نخعی. م.، ۱۳۸۹، مقایسه خصوصیات هیدرودینامیک سیستم کارست سازندهای آسماری و ایلام – سروک در تاقدیس های جنوب غرب ایذه، نخستین کنفرانس ملی پژوهش های کاربردی منابع آب ایران، کرمانشاه.

Birk. S., Bauer. S., Liedl. R., Sauter. M., 2003, Coupling a pipe-network to MODFLOW to predict the evolution of karst aquifers, in Poeter, E.P., Zheng, C., Hill, M.C., and Doherty, John, eds., MODFLOW and more 2003—Understanding through modeling, Golden, Colo., September 16–19, 2003, Proceedings: Colorado School of Mines, p:65–69.

Bonacci. O., 1993, Karst springs hydrographs as indicators of karst aquifers, Hydrological Sciences Journal, Vol:38, p:51–62.

Box. G.E.P., Jenkins. G.M., Reinsel. G.C., 1994, Time Series Analysis: Forecasting and Control, third ed. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, USA.

Bridget. R.S., Mace. R.E., Barrett. M.E., Smith. B., 2003, Can we simulate regional groundwater flow in a karst system using equivalent porous media models? Case study, Barton Springs Edwards Aquifer, Journal of Hydrolgy, No:276, p:137-158.

Chiang. W.H., Kinzelbach. W., 1994, PMPATH: An advective transport model for Processing Modflow and Modflow, Geological Survey of Hamburg, Germany.

Eisenlohr. L., Bouzelboudjen. M., Kiraly. L., Rossier. Y., 1997, Numerical versus statistical modelling of natural response of a karst hydrogeological system, Journal of Hydrology, No:202, p:244–262.

Harbaugh. A.W., 2005, MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular ground-water Model - the Ground-Water Flow Process, U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16.

Hill. M.E., 2008, Conduit conceptualizations and model performance, Ph.D. diss., Department of Geology, University of South Florida, Tampa.

Jenkins. G.M., Watts. D.G., 1968, Spectral Analysis and its Applications. Holden Day, San Francisco, CA, 525 pp.

Lambrakis. N., Andreou. A.S., Polydoropoulos. P., Georgopoulos. E., Bountis. T., 2000, Non-linear analysis and forecasting of a brackish

karstic spring, Water Resources Researches, Vol:36, No:4, p:875–884.

Larocque. M., Mangin. A., Razack. M., Banton. O., 1998, Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France), Journal of Hydrology, No:205, p:217–231.

McDonald. M.G., Harbaugh. A.W., 1988, A Modular Three-Dimensional Finite difference Ground-Water Flow Model, Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations. No: twri6a1.

Milanovic. P., 1981, Karst Hydrogeology, W.R.P., Colorado, 434pp.

Nico. G., David. D., 2007, Methods in Karst Hydrogeology, Taylor and Francis Group, London, UK., 246pp.

Padilla. A., Pulido-Bosch. A., 1995, Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis, Journal of Hydrology, No:168, p:73–89.

Padilla. A., Pulido-Bosch. A., Mangin. A., 1994, Relative importance of baseflow and quickflow from hydrographs of karst spring, Ground Water, Vol:32, No:2, p:267–277.

Panagopoulos. G., Lambrakis. N., 2005, Groundwater responses to recharge and human-induced stresses in the Trifilia karst aquifer, Greece, In: Krasny, J., Hrkal, Z., Bruthans, J. (Eds.), Proceedings of International Conference on Groundwater in Fractured Rocks, IHP-VI, Series on Groundwater, Prague, No:7, p:167–168.

Panagopoulos. G., Lambrakis. N., 2006, The contribution of time series analysis to the study of the hydrodynamic characteristics of the karst systems: Application on two typical karst aquifers of Greece (Trifilia, Almyros Crete), Journal of Hydrology, No:329, p:368– 376.

Rani. F.M., Chen. Z.H., 2010, Numerical Modeling of Groundwater Flow in Karst Aquifer, Makeng Mining Area, American Journal of Environmental Sciences, Vol:6, No:1, p:78-82.