

مقاله پژوهشی

برآورد زمان تأخیر تغذیه در آبخوان مشهد-چناران با استفاده از روش همبستگی متقابل

محمود ارجمند شریف^۱ - هادی جعفری^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۵

چکیده

آبخوان مشهد - چناران با وسعت حدود ۲۵۲۷ کیلومتر مربع، مهم‌ترین آبخوان استان خراسان رضوی است. در این تحقیق، زمان واکنش آب زیرزمینی نسبت به بارش با استفاده از داده‌های ۳۱ حلقه چاه مشاهده‌ای به روش همبستگی متقابل در یک دوره ۱۵ ساله (سال آبی ۸۱ - ۱۳۸۰ تا ۹۵ - ۱۳۹۴) تعیین شده است. نتایج آزمون همبستگی نشان می‌دهد، پس از گذشت حدود ۲ تا ۳ ماه، تأثیر بارش به تدریج بر سطح آب زیرزمینی مشاهده شده و ضریب همبستگی در سطح خطای ۹۵ و ۹۰ درصد به ترتیب برای ۷۷ و ۹۷ درصد از چاه‌ها معنی‌دار می‌شود. حداقل زمان تأخیر، ۲ ماه و حداکثر آن نیز ۷ ماه برآورد شده است. به‌طور کلی، زمان تأخیر برآورد شده تطابق خوبی با عمق آب زیرزمینی که بیانگر ضخامت ناحیه غیراشباع است، دارد و به صورت کامل از الگوی نقشه هم‌عمق تبعیت می‌نماید. مقدار تغذیه در سراسر آبخوان مشهد- چناران بیشتر توسط شرایط ناحیه غیراشباع (ضخامت، جنس و ...) کنترل و تغییرات عمق آب زیرزمینی به‌نوعی عامل اصلی ایجاد تأخیر زمانی بین وقوع بارندگی و شروع تغذیه در آبخوان محسوب می‌شود. با شروع بارندگی از اواخر مهرماه، تغذیه آب زیرزمینی در اغلب چاه‌ها از اواسط فصل پاییز شروع شده و تا اواخر فصل بهار ادامه می‌یابد. بیشینه مقدار تغذیه در اواخر فصل زمستان صورت می‌گیرد. در فصل تابستان، بارندگی نقش بسیار کم‌رنگی در تغذیه دارد و استخراج بی‌رویه آب از آبخوان و به تبع آن افت شدید و ادامه‌دار سطح ایستابی، نقش اصلی در نوسانات آب را ایفا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: رگرسیون خطی، ضریب همبستگی پیرسون و ضریب همبستگی متقابل، واکنش آب زیرزمینی نسبت به بارش، همبستگی نگار متقابل

مقدمه

به عقیده هیلی (۶) تغذیه یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌ها در مطالعات بیلان آب زیرزمینی است. پس از یک واقعه بارندگی، مقداری از بارش به درون زمین نفوذ می‌کند. این مقدار در ناحیه غیراشباع به نفوذ عمقی ادامه داده و در نهایت به سطح ایستابی رسیده و موجب خیز^۳ آن می‌شود. درک درست فرآیند تغذیه آب زیرزمینی و برآورد مقدار دقیق آن، مستلزم برآورد زمان واکنش آب زیرزمینی نسبت به وقایع بارندگی است. مدل‌سازی واکنش آب زیرزمینی به تنش‌های طبیعی از جمله

بارندگی با استفاده از روش‌های آماری، از قبیل همبستگی^۴، همبستگی متقابل^۵ و رگرسیون در یک دهه گذشته رواج زیادی پیدا کرده است. هدف اصلی در تحلیل سری‌های زمانی، ایجاد یک مدل آماری برای داده‌های وابسته به زمان بر اساس اطلاعات گذشته آن است. تحلیل آماری رابطه بین دو متغیر، اولین گام در بررسی روابط علت و معلولی بین متغیرها در سری‌های زمانی است. در صورتی که بارندگی و سطح آب زیرزمینی را به‌عنوان دو سری زمانی در نظر بگیریم، می‌توان ویژگی‌های تغذیه آب زیرزمینی و زمان تأخیر را با استفاده از همبستگی زمانی بین دو سری ارزیابی نمود. به دلایل مختلفی، واکنش آب زیرزمینی نسبت به بارش به تأخیر می‌افتد. جدا از دلایل ایجاد این تأخیر، می‌توان اثر متقابل باران و آب زیرزمینی را با استفاده از روش آماری همبستگی متقابل بررسی و مورد مطالعه قرار

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی و دانشیار هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود

*- نویسنده مسئول: (Email: h_jafari@shahroodut.ac.ir)

DOI: 10.22067/JSW.2021.70672.1058

3- Water-table rise

4- Correlation

5- Cross-correlation

زیرزمینی نشان داده که بارندگی‌ها با یک تأخیر ۱۰ ماهه بیشترین تأثیر را بر سطح آب زیرزمینی دشت نیشابور دارند.

برآورد مقدار تغذیه آب زیرزمینی، مستلزم محاسبه زمان تأخیر ورود اولین‌ها پالس‌های بارش به آبخوان است. تاکنون در آبخوان مشهد - چناران، زمان تأخیر به دلیل وجود شرایط بسیار پیچیده زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی آبخوان محاسبه نشده است. در این پژوهش تلاش شده است، زمان تأخیر را که بیشتر متأثر از عمق سطح ایستابی است بر اساس سری زمانی داده‌های عمق آب زیرزمینی و بارش در محل چاه‌های مشاهده‌ای منتخب با استفاده از تحلیل همبستگی متقابل محاسبه و نقشه تغییرات آن در سطح آبخوان ارائه شود.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی

محدوده مطالعاتی مشهد-چناران به وسعت حدود ۹۹۵۷ کیلومترمربع در حوضه آبریز درجه دو قره‌قوم واقع شده است. این محدوده از نظر موقعیت جغرافیایی (شکل ۱) در حدفاصل $23^{\circ} 58'$ تا $27^{\circ} 60'$ طول شرقی و $59^{\circ} 35'$ تا $2^{\circ} 37'$ عرض شمالی قرار گرفته است. آبخوان آبرفتی مشهد-چناران، مهم‌ترین آبخوان به لحاظ وسعت و میزان بهره‌برداری در استان خراسان رضوی می‌باشد.

هیدروژئولوژی

آبخوان آبرفتی مشهد - چناران با وسعت حدود ۲۵۲۷ کیلومترمربع، حوضه فروافتاده‌ای با کشیدگی شمال غرب- جنوب شرق می‌باشد که در حدفاصل رشته‌کوه‌های بینالود در غرب و جنوب غرب و رشته‌کوه‌های هزار مسجد در شمال و شمال شرق قرار گرفته است (۱). بررسی خصوصیات آبخوان مشهد - چناران نشان می‌دهد که این آبخوان از نوع آزاد است. تنوع واحدهای زمین‌شناسی حاشیه شمالی و جنوبی آبخوان، عملکرد گسل‌های اصلی و فرعی و سیکل‌های فرسایش و رسوب‌گذاری حاصل از جریان‌های سطحی خروجی از بلندی‌های شمالی و جنوبی، باهم باعث تنوع و تغییرات قابل توجه در ضخامت و جنس آبرفت، مورفولوژی سنگ کف و خصوصیات هیدرولیکی آبخوان شده است. این ناهمگونی در خصوصیات، موجب شده در برخی نقاط سنگ کف در سطح زمین ظاهر شود و در برخی نقاط نیز ضخامت آبرفت به بیش از ۳۰۰ متر برسد. جنس سنگ کف در بخش شمال غرب تا محدوده شهر چناران از رسوب‌های تئوزن، در حاشیه جنوبی از فلیت و سنگ‌های آذرین، در بخش شمالی بیشتر از سازندهای شوربجه و تیرگان و در بخش جنوب شرقی آبخوان نیز از رخساره‌های تئوزن تشکیل شده است. در

داد. روش همبستگی متقابل، به‌عنوان یک روش ساده و کاربردی، توسط محققین مختلفی مطالعه و مورد پذیرش قرار گرفته است. چیاثودانی و همکاران (۳) با استفاده از روش‌های آماری و فرکانالی رابطه بین آب زیرزمینی و آب سطحی را در یک دشت آبرفتی واقع در مرکز ایتالیا ارزیابی نمودند. در این تحقیق، از روش‌های آماری تک متغیره و دو متغیره برای تحلیل بارندگی و برای ارزیابی رابطه بارندگی و آب زیرزمینی نیز از تحلیل همبستگی متقابل و خودهمبستگی استفاده شده است. چای و همکاران (۲) با تحلیل سری زمانی داده‌های سه ساله تراز آب زیرزمینی، تغذیه آبخوان منطقه شهری سئول، واقع در جنوب کره جنوبی را برآورد نمودند. زمان تأخیر با استفاده از روش همبستگی متقابل بین ۱ تا ۷ روز برای تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای و ۱۵ تا ۵۸ روز نیز برای گروه دیگری از چاه برآورد شده و عمق برخورد به آب زیرزمینی، تراز سطح زمین و ضخامت لایه خاک نیز از عوامل تعیین‌کننده زمان تأخیر ذکر شده‌اند. هایکنگ و کلی (۷) با استفاده از توابع پاسخ ناگهانی تغذیه آب زیرزمینی و زمان تأخیر را در ورتیسول‌های (خاک‌های حاوی رس زیاد) حوضه رودخانه کاندماین (جنوب کویزلند، استرالیا) محاسبه نمودند. در این تحقیق، حداقل، حداکثر و میانگین زمان تأخیر در بازه زمانی بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۲ میلادی به ترتیب ۱۸۸ روز، ۴۸ سال و ۵/۳ سال تعیین شده است. کراسبی و همکاران (۴) رویکرد تحلیل سری‌های آماری را برای برآورد تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از روش نوسانات سطح ایستابی معرفی نموده‌اند. در این تحقیق، زمان تأخیر بین تغییرات تراز سطح آب و سیگنال‌های بارندگی، به‌عنوان یکی پارامترهای مورد استفاده مدل با استفاده از آزمون همبستگی متقابل جزئی^۱ تعیین شده است. هیلی و کوک (۵) از تحلیل سری‌های زمانی تراز سطح آب زیرزمینی برای برآورد تغذیه استفاده نموده و این روش را رایج‌ترین روش مورد استفاده برای برآورد تغذیه ذکر نموده‌اند. شمس‌زاده و همکاران (۱۴) به بررسی زمان تأخیر واکنش آب زیرزمینی به حجم آب انتقالی خارج از حوضه پرداخته و نتیجه گرفته‌اند که اثرات ورود آب خارج از حوضه، بعد از یک تأخیر ۴ ماهه بر روی سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای محدوده شهر مشهد نمایان می‌شود. مردانه و همکاران (۱۲) رابطه بین بارندگی و سطح آب زیرزمینی را در دشت شیراز با استفاده از روش همبستگی متقابل ارزیابی نموده‌اند. در این تحقیق، حدود ۸۶ درصد چاه‌ها همبستگی مثبت با بارندگی نشان داده و زمان تأخیر نیز حدود ۱ ماه محاسبه شده است. نادریان‌فر و همکاران (۱۳) روند تغییرات نوسانات سطح آب زیرزمینی را در حوضه آبریز نیشابور تحت شرایط اقلیمی مختلف بررسی نموده‌اند. نتایج همبستگی پیرسون بین بارش و سطح آب

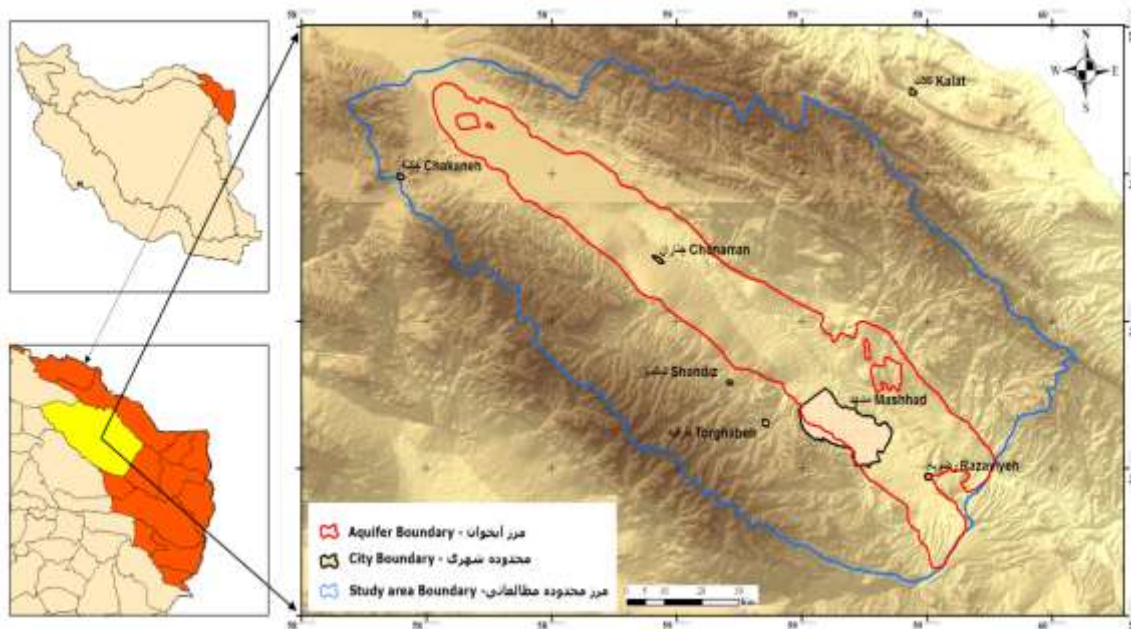
شناسایی شده‌اند (۹).

داده‌ها و اطلاعات

در این تحقیق، از داده‌های ماهانه عمق آب زیرزمینی و بارندگی در یک دوره آماری ۱۵ ساله (مهر ۱۳۸۰ تا شهریور ۱۳۹۵) استفاده شده است. در آبخوان مشهد - چناران، ۷۴ حلقه چاه مشاهده‌ای فعال وجود دارند که به‌صورت ماهانه عمق آب زیرزمینی در آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود. رفتار هیدرولیکی این چاه‌ها را می‌توان در سه گروه تقسیم‌بندی نمود. گروه اول شامل چاه‌هایی است که در لایه آبدار آزاد فوقانی حفر شده و سطح آب در آن‌ها دارای نوسانات سینوسی و متأثر از نزولات جوی می‌باشد. در گروه دوم، چاه‌هایی که در آبخوان اصلی مشهد - چناران حفر شده‌اند، قرار دارند. سطح آب در این چاه‌ها به‌طور مستمر، ولی با شدت کمتری افت می‌نماید. گروه سوم، شامل چاه‌هایی هستند که بیشتر در محدوده‌های شهری، در مجاورت مسیل‌ها و رودخانه‌ها و یا در مکان‌هایی که آبخوان آبرفتی بر روی سنگ کف آهکی قرار گرفته، مشاهده می‌شوند. با توجه به این گروه‌بندی و با در نظر گرفتن پیوستگی داده‌ها در طول دوره آماری، ۳۱ حلقه چاه به‌عنوان معرف انتخاب و سپس محاسبات و تحلیل‌های لازم بر روی آن‌ها انجام شده است.

بخش مرکزی و جنوب شرقی سنگ‌کف بسیار ناهموار بوده و از تنوع لیتولوژیکی بیشتری برخوردار است. ضخامت آبرفت در بخش شمال غربی نسبت به بخش مرکزی و جنوب شرقی کمتر است. در حاشیه بلندی‌های بینالود، رسوب‌های مخروطه افکنه‌ای درشت‌دانه شامل شن، ماسه و قلوه‌سنگ، با تناوبی از رسوب‌های ریزدانه، پیکره آبخوان را تشکیل می‌دهند. در نواحی شمالی دشت، آبرفت ریزدانه و بیشتر از جنس پهنه‌های سیلت و رس و در حاشیه جنوبی نیز، درشت‌دانه و نسبتاً هموژن است که با نزدیک شدن به کشف‌رود، ریزدانه‌تر شده و دارای لایه‌بندی متناوبی می‌شود. این روند در بخش شرقی آبخوان (خروجی دشت) نیز قابل مشاهده است (۱ و ۱۰).

متوسط ضریب ذخیره آبخوان ۶ درصد و مقدار قابلیت انتقال آبخوان نیز از حداقل حدود ۲۰۰ متر مربع بر روز در حاشیه بلندی‌های جنوب غرب تا حداکثر حدود ۳۰۰۰ متر مربع بر روز در مرکز دشت است. عمق آب زیرزمینی در آبخوان تابعی از شرایط زمین‌شناسی، توپوگرافی و الگوی رسوب‌گذاری است. مقادیر عمق آب زیرزمینی در شمال آبخوان نسبت به جنوب آن کم‌تر است. در جنوب آبخوان به دلیل ضخامت زیاد آبرفت و تأثیر توپوگرافی، عمق آب زیرزمینی به‌تدریج از حوالی کشف‌رود به‌طرف حاشیه جنوبی آبخوان افزایش می‌یابد (۱۰). بر اساس سوابق آخرین آماربرداری سراسری در محدوده آبخوان مشهد-چناران، ۳۷۷۳ حلقه چاه، ۴۰ رشته قنات و ۲ دهنه چشمه به ترتیب با تخلیه ۷۶۴، ۱۳ و ۰/۲۲ میلیون مترمکعب



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی مشهد-چناران نسبت به حوضه‌های آبریز اصلی ایران

Figure 1- Geographical location of the Mashhad-Chenaran study area with respect to Iran's major basins

فرض بررسی و مشخص می‌شود. در این پژوهش، فرض شده است بین بارندگی و تغییرات سطح آب رابطه خطی وجود دارد، بنابراین، فرض صفر (H_0) بیانگر عدم ارتباط بین دو بین متغیر ($r = 0$) و فرض جانشین (H_1) نیز بیانگر وجود ارتباط بین دو بین متغیر ($r \neq 0$) است. در صورتی که وابستگی زمانی بین دو متغیر وجود داشته باشد، یک متغیر به لحاظ زمانی تحت تأثیر متغیر دیگر است. به فرآیند مقایسه دو سری زمانی در گام‌های زمانی مختلف، همبستگی متقابل گفته می‌شود (۲). با استفاده از آزمون همبستگی متقابل می‌توان رابطه زمانی تغییرات سطح ایستایی به عنوان متغیر وابسته و بارندگی به عنوان متغیر مستقل را برای تأخیرهای مختلف ارزیابی و تحلیل نمود. رابطه مورد استفاده برای محاسبه همبستگی متقابل، همان رابطه همبستگی پیرسون است. در عمل به دلیل اینکه واریانس در نمونه‌های کوچک با تغییر سری زمانی، تغییر می‌کند ضریب همبستگی متقابل با استفاده از نمونه آماری و از رابطه ۲ تخمین زده می‌شود (۱۱).

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} x_i \times y_{i+k} - \frac{1}{n-k} \left(\sum_{i=1}^{n-k} x_i \right) \left(\sum_{i=1}^{n-k} y_{i+k} \right)}{\left[\sum_{i=1}^{n-k} x_i^2 - \frac{1}{n-k} \left(\sum_{i=1}^{n-k} x_i \right)^2 \right]^{1/2} \times \left[\sum_{i=1}^{n-k} y_{i+k}^2 - \frac{1}{n-k} \left(\sum_{i=1}^{n-k} y_{i+k} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه r_k ضریب همبستگی متقابل، k زمان تأخیر، n طول سری زمانی (تعداد داده‌ها) و x و y نیز متغیرها هستند. زمان تأخیر برای نمونه‌های کوچک، حدود ۱۰ درصد تعداد کل داده‌ها و برای نمونه‌های بزرگ (مانند مقادیر اندازه‌گیری شده روزانه یک متغیر طی یک یا چند سال متوالی) تا حدود ۳۰ درصد تعداد کل داده‌ها قابل محاسبه است (۱۱). در این تحقیق، برای محاسبه ضریب همبستگی، از نرم‌افزار SPSS 21 و توابع موجود در بسته نرم‌افزاری اکسل ۲۰۱۹ استفاده شده است. پس از محاسبه ضرایب همبستگی، مقادیر آن برای تأخیرهای مختلف بر روی یک نمودار به نام همبستگی‌نگار متقابل^۲ رسم و تحلیل می‌شوند. برای ارزیابی معنی‌داری ضریب همبستگی متقابل (رد کردن یا پذیرفتن فرض صفر)، از آزمون‌های آماری استفاده می‌شوند. به عقیده کرسیک (۱۱) برای آن که ضریب همبستگی در سطح خطای آزمون ۰/۰۵ (احتمال ۹۵ درصد)، به‌طور قابل ملاحظه‌ای متفاوت از صفر باشد، باید ضریب همبستگی بیشتر از مقدار به‌دست‌آمده از رابطه بارتلت^۳ (رابطه ۳) شود.

برای محاسبه بارندگی در محل‌های مشاهده‌ای از داده‌های روزانه بارندگی ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی موجود (۲۵ ایستگاه باران‌سنجی و ۹ ایستگاه تبخیرسنجی) استفاده شده است. نخست، مقادیر تجمعی باران روزانه در محل هر ایستگاه طی یک ماه، (از روز پانزدهم هر ماه تا روز پانزدهم ماه بعد) محاسبه شد، سپس در محیط ArcGIS، ابتدا فایل رستر بارندگی ماهانه تهیه و در نهایت مقادیر بارندگی در محل‌های مشاهده‌ای از روی فایل رستر استخراج و استفاده گردید. لاگ حفاری تعدادی از چاه‌های منتخب در شکل ۲ و مشخصات چاه‌ها و خصوصیات آماری داده‌های ماهانه عمق سطح آب زیرزمینی و بارندگی نیز در جدول ۱ ارائه شده است.

سری‌های زمانی و ضریب همبستگی

در مباحث هیدرولوژیک، سری‌های زمانی به دو صورت پیوسته و یا گسسته (ناپیوسته) مشاهده می‌شوند. با توجه به تغییرات مداوم و دوره‌ای تراز آب زیرزمینی در آبخوان مشهد - چناران و همچنین ماهیت بارندگی، می‌توان این متغیرها را به‌عنوان سری زمانی ناپیوسته در نظر گرفت. بر این اساس، زمان تأخیر شروع تغذیه آب زیرزمینی در آبخوان مشهد - چناران با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی به‌صورت کمی قابل محاسبه است. دو متغیر، زمانی مرتبط قلمداد می‌شوند که توزیع مقادیر یکی از آن‌ها برحسب مقادیر متغیر دیگر تغییر کند. اگرچه رابطه آماری بین دو متغیر لزوماً به معنای وجود رابطه علت و معلولی بین آن‌ها نیست، با این‌وجود رابطه آماری می‌تواند یک مشاهده تجربی در تأیید فرضیه‌ای باشد که بر اساس استدلال نظری قائل به وجود رابطه علی بین دو متغیر است (۸).

معمول‌ترین روش اندازه‌گیری وابستگی بین دو متغیر کمی، محاسبه ضریب همبستگی پیرسون^۱ (r) است. اگر فرض کنیم x و y دو متغیر تصادفی باشند، ضریب پیرسون از رابطه ۱ محاسبه می‌شود. اگر ضریب پیرسون بیش از ۰/۸ باشد، رابطه بسیار قوی و اگر کمتر از ۰/۱۹ باشد بیانگر رابطه ناچیز و یا فقدان رابطه است. بین این مقادیر، شدت رابطه از رابطه ضعیف تا رابطه قوی در تغییر است.

$$Corr(x, y) = r = \frac{COV(xy)}{(VAR_x VAR_y)^{1/2}} \quad \text{رابطه ۱}$$

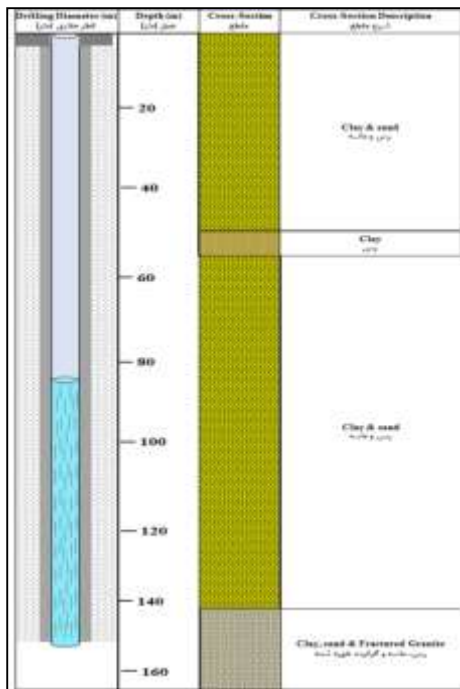
در این رابطه، x و y متغیر تصادفی، $Corr(x, y)$ ضریب همبستگی، $COV(xy)$ کوواریانس، VAR_x و VAR_y واریانس هستند.

پس از تعیین رابطه و بررسی ویژگی‌های آن، معنی‌دار بودن آماری رابطه نیز از طریق آماره تصمیم P-Value و آزمون‌های

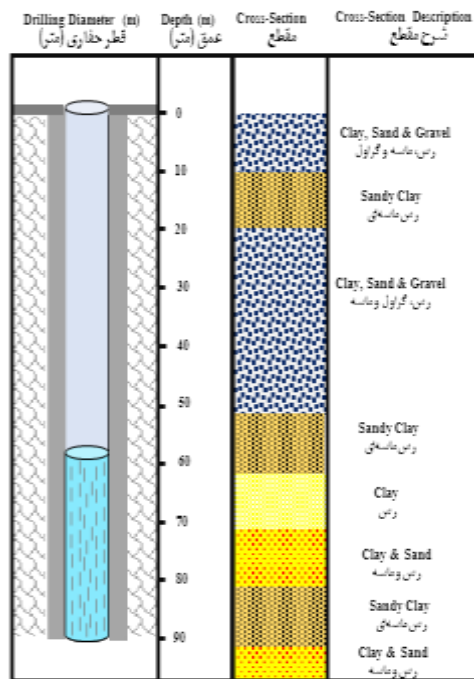
2- Cross-correlogram

3- Bartlett

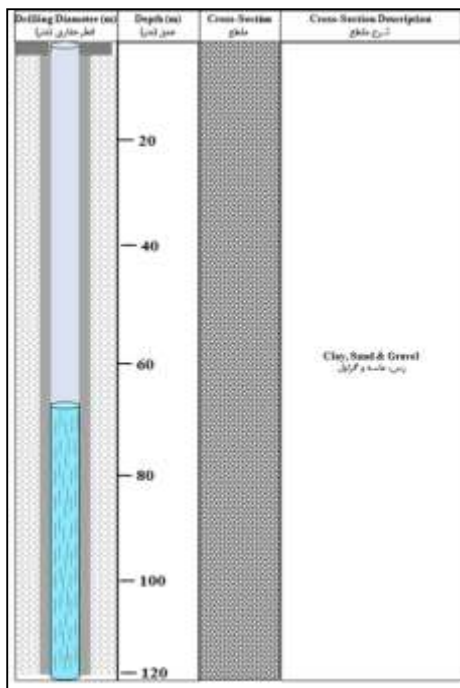
1- Pearson Correlation Coefficient



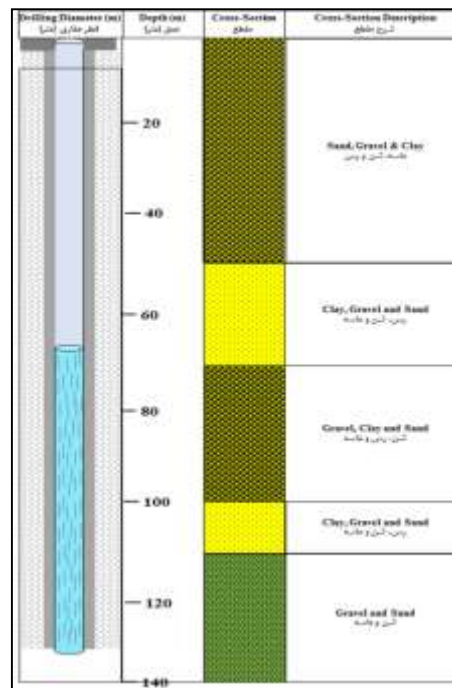
لاگ حفاری چاه مشاهده‌ای جیم‌آباد
Jimabad observation well log



لاگ حفاری چاه مشاهده‌ای اراضی کنه‌بیست
Kenebist observation well log



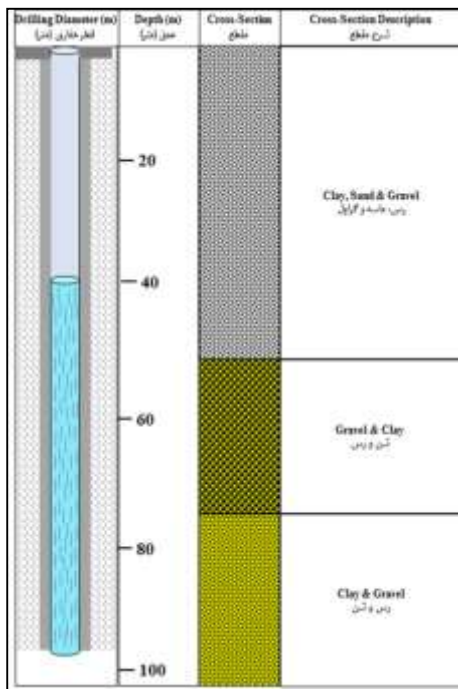
لاگ حفاری چاه مشاهده‌ای قره‌تپه
Gharehtapeh observation well log



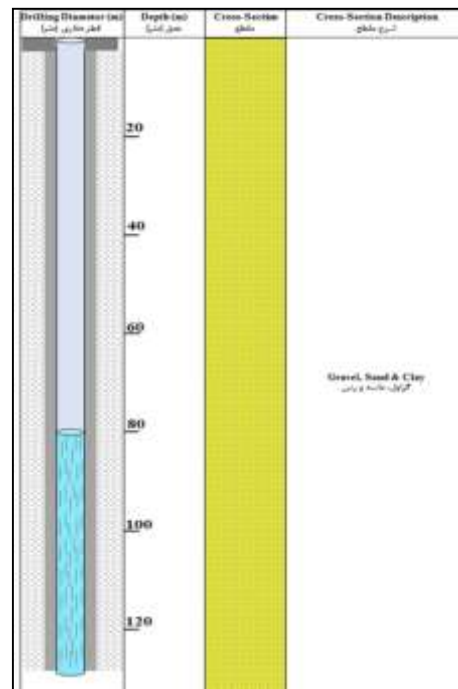
لاگ حفاری چاه مشاهده‌ای چمگرد
Chamgard observation well log

شکل ۲- لاگ حفاری تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای منتخب

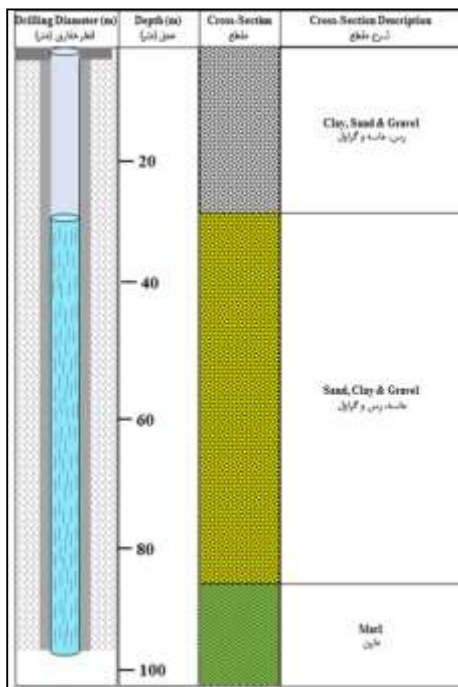
Figure 2- Well Logs for some of the representative observation wells



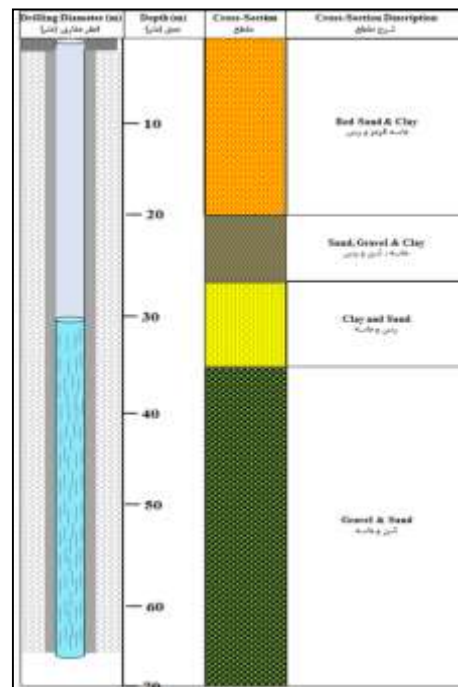
لاگ حفاری چاه مشاهده‌ای مزرعه نمونه
Mazrae-nemoneh observation well log



لاگ حفاری چاه مشاهده‌ای موچنان
Mochenan observation well log



لاگ حفاری چاه مشاهده‌ای قره‌چنگل
Gharehjangal observation well log



لاگ حفاری چاه مشاهده‌ای حاجی‌آباد
Hajiabad observation well log

شکل ۲ (ادامه) - لاگ حفاری تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای منتخب
Figure 2 (Cont.)- Well Logs for some of the representative observation wells

جدول ۱- چاه‌های مشاهده‌ای معرف آبخوان مشهد-چناران و مشخصات آماری بارندگی و عمق سطح آب زیرزمینی در دوره آماری ۱۵ ساله
Table 1- The representative observation wells of Mashhad-Chenaran aquifer and the statistical characteristics of rainfall and depth to water-table in a 15-year statistical period

نام چاه Well name	بارندگی ماهانه (میلی‌متر) Monthly precipitation (mm)			عمق برخورد به سطح ایستابی ماهانه (متر) Monthly depth to water-table (m)				میانگین Ave.
	کمینه Min.	مقدار Value	بیشینه Max. تاریخ (ماه/سال) Date (YY/MM)	کمینه Min.		بیشینه Max.		
				مقدار Value	تاریخ Date	مقدار Value	تاریخ Date	
دوغایی (Dooghaei)	0	146.8	1386/01	53.62	1381/07/15	55.96	1394/11/15	54.49
قره چاه (Gharechah)	0	148.5	1386/01	39.31	1381/01/15	41.6	1395/05/15	40.44
شورچه (Shoorcheh)	0	120.8	1386/01	14.78	1391/04/15	17.83	1394/05/15	16.37
مؤمن‌آباد (Momen Abad)	0	127.9	1386/01	82.91	1381/11/15	93.57	1395/06/15	88.29
رضآباد شرقی (RezaAbad Sharghi)	0	117.9	1386/01	60.03	1380/12/15	73.81	1395/05/15	68.07
موچنان (Moochenan)	0	113.4	1381/02	75.38	1380/12/15	91.95	1395/06/15	84.58
چنبرغربال (Chanbargharbal)	0	122.6	1386/01	79.62	1380/07/15	108.04	1395/06/15	91.42
قره‌تپه (Ghareh Tapeh)	0	116.7	1386/01	61.26	1380/07/15	81.06	1395/06/15	71.58
یکه لنگه (Yekeh Lengeh)	0	120.6	1386/01	86.48	1381/01/15	108.56	1395/06/15	98.41
چمگرد (Chamgard)	0	116.1	1381/02	67.82	1380/07/15	83.88	1395/06/15	75.82
حاجی‌آباد (HajiAbad)	0	124.7	1386/01	47.2	1380/07/15	58.24	1394/05/15	54.16
سیدآباد (SeyedAbad)	0	121	1386/01	56.39	1380/07/15	70.72	1395/05/15	64.30
افصل‌آباد (AfsalAbad)	0	151.3	1386/01	45.08	1380/12/15	62.91	1395/06/15	54.70
ساروجه (Saroojeh)	0	128.8	1386/01	24.11	1380/12/15	30.42	1395/05/15	27.84
قزل حصار (Ghezel Hesar)	0	129.1	1386/01	26.35	1381/02/15	47.34	1395/04/15	40.09
جمع‌آب (JamAb)	0	118.7	1386/01	79.1	1380/07/15	97.65	1395/06/15	91.20
کبیر (Kabir)	0	123.7	1386/01	8.11	1380/07/15	12.95	1395/04/15	11.17
کلاته شیخها (Kalateh Sheikha)	0	131.5	1386/01	59.81	1380/12/15	83.79	1394/06/15	73.92
قره‌جنگل (GharehJangal)	0	142.7	1386/01	29.29	1380/07/15	59.61	1395/06/15	43.40
شیرحصار (Shir Hesar)	0	142.8	1386/01	46.74	1380/12/15	62.25	1395/06/15	55.94
عسکریه (Askariyeh)	0	139.3	1386/01	70.32	1380/12/15	94.16	1395/06/15	83.46
سهل‌الدین (Sahl-o-din)	0	137.6	1386/01	17.33	1381/01/15	26.06	1394/11/15	22.57
کلاته برفی (Kalateh Barfi)	0	130.3	1386/01	75.27	1380/12/15	96.27	1394/10/15	86.23
قیهقهه (Ghah-gha-heh)	0	122.4	1386/01	28.07	1381/01/15	34.09	1395/06/15	30.52
مزرعه نمونه (Mazrae Nemoneh)	0	128.2	1388/02	82.74	1380/07/15	107.28	1395/06/15	94.14
مزرعه نمونه - شهرک رضویه (Mazrae Nemoneh -Shahrak Razaviyeh)	0	130.4	1388/02	82.96	1384/02/15	90.38	1395/06/15	85.91
جیم‌آباد (JimAbad)	0	122.5	1388/02	98.5	1380/07/15	121.79	1395/06/15	110.69
اراضی کنه‌بیست (Arazi Kenebist)	0	120.3	1393/01	58.82	1381/01/15	67.84	1394/06/15	63.84
اراضی جیم‌آباد (Arazi JimAbad)	0	123.9	1388/02	57.77	1380/07/15	78.29	1395/06/15	67.53
کنه‌بیست (Kenebist)	0	121.5	1393/01	58.48	1381/01/15	63.09	1394/06/15	61.55
تنگل شور - مرغ پردک (Tangalshor)	0	127.1	1388/02	27.84	1380/12/15	48.29	1394/08/15	38.42

همبستگی‌نگار با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌کند (۱۱).

$$LC(r_k) = \frac{1 \pm Z_{\alpha} \times \sqrt{n-k-2}}{n-k-1} \quad \text{رابطه ۴}$$

در این رابطه، n تعداد نمونه‌ها، K تأخیر زمانی و Z مقدار متغیر استاندارد شده دارای توزیع نرمال با حدود اطمینان α است. مقادیر Z در جداول آماری گوناگون ارائه شده است.

رابطه بارتلت در مباحث هیدرولوژیکی، تنها برای اولین و یا دومین تأخیر خوب عمل می‌کند و استفاده از آن خیلی توصیه نمی‌شود، بنابراین استفاده از یک آزمون که کل همبستگی‌نگار را پوشش دهد و تأخیرهای احتمالی را که باید در سری زمانی به صورت مستقل (عدم معنی‌داری ضریب همبستگی) در نظر گرفته شوند، نمایان سازد بسیار مناسب‌تر است (۱۱). آزمون ارائه شده توسط آندرسون^۱، حدود اطمینان را برای تمام

جدول ۲- زمان تأخیر تغذیه آب زیرزمینی در محل چاه‌های مشاهده‌ای بر اساس بیشترین ضریب همبستگی متقابل
 Table 4- Groundwater recharge lage time at the location of observation wells based on the highest cross-correlation coefficient

شماره چاه Well No.	نام چاه Well name	بیشترین ضریب همبستگی متقابل The highest Cross-Correlation Coefficient	P-Value	بیشینه زمان تأخیر (ماه) Max. Lag time (month)	
				$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.05$
6007-OW101	دوغایی (Dooghaei)	0.145	0.055	3	—
6007-OW102	قره چاه (Gharechah)	0.146	0.052	2	—
6007-OW104	شورچه (Shoorchah)	—	—	—	—
6007-OW106	مؤمن‌آباد (Momen Abad)	0.301	0.000	4	4
6007-OW107	رضاآباد شرقی (RezaAbad Sharghi)	0.385	0.000	4	4
6007-OW109	موچنان (Moochenan)	0.176	0.020	7	7
6007-OW110	چنبرغربال (Chanbargharbal)	0.174	0.021	6	6
6007-OW111	قره‌تپه (Ghareh Tapeh)	0.280	0.000	5	5
6007-OW112	یکه لنگه (Yekeh Lengeh)	0.132	0.080	4	—
6007-OW113	چمگرد (Chamgard)	0.134	0.083	12	—
6007-OW114	حاجی‌آباد (HajiAbad)	0.205	0.006	2	2
6007-OW115	سیدآباد (SeyedAbad)	0.249	0.001	5	5
6007-OW118	افصل‌آباد (AfsalAbad)	0.274	0.000	4	4
6007-OW123	ساروجه (Saroojeh)	0.329	0.000	4	4
6007-OW126	قزل حصار (Ghezel Hesar)	0.332	0.000	5	5
6007-OW127	جمع‌آب (JamAb)	0.322	0.000	5	5
6007-OW128	کبیر (Kabir)	0.328	0.000	2	2
6007-OW130	کلاته شیخها (Kalateh Sheikhha)	0.495	0.000	4	4
6007-OW145	قره‌جنگل (GharehJangal)	0.156	0.039	3	3
6007-OW147	شیرحصار (Shir Hesar)	0.390	0.000	5	5
6007-OW149	عسکریه (Askariyeh)	0.466	0.000	4	4
6007-OW151	سهل‌الدین (Sahl-o-din)	0.457	0.000	3	3
6007-OW153	کلاته برفی (Kalateh Barfi)	0.427	0.000	5	5
6007-OW163	قهقهه (Ghah-gha-heh)	0.144	0.057	4	—
6007-OW184	مزرعه نمونه (Mazrae Nemoneh)	0.314	0.000	5	5
6007-OW185	مزرعه نمونه - شهرک رضویه (Mazrae Nemoneh - Shahrak Razaviyeh)	0.314	0.000	5	5
6007-OW187	جیم‌آباد (JimAbad)	0.289	0.000	5	5
6007-OW188	اراضی کنه‌بیست (Arazi Kenebist)	0.304	0.000	4	4
6007-OW190	اراضی جیم‌آباد (Arazi JimAbad)	0.219	0.003	4	4
6007-OW191	کنه‌بیست (Kenebist)	0.193	0.010	4	4
6007-OW192	تنگل شور - مرغ پردک (Tangalshor)	0.129	0.091	8	—

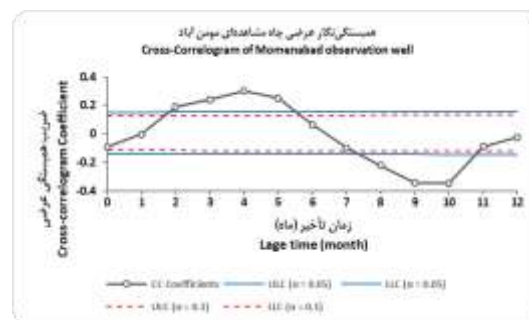
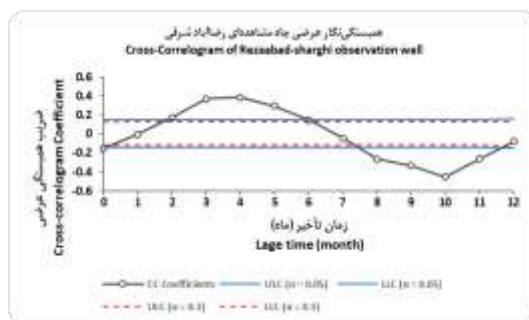
نتایج و بحث

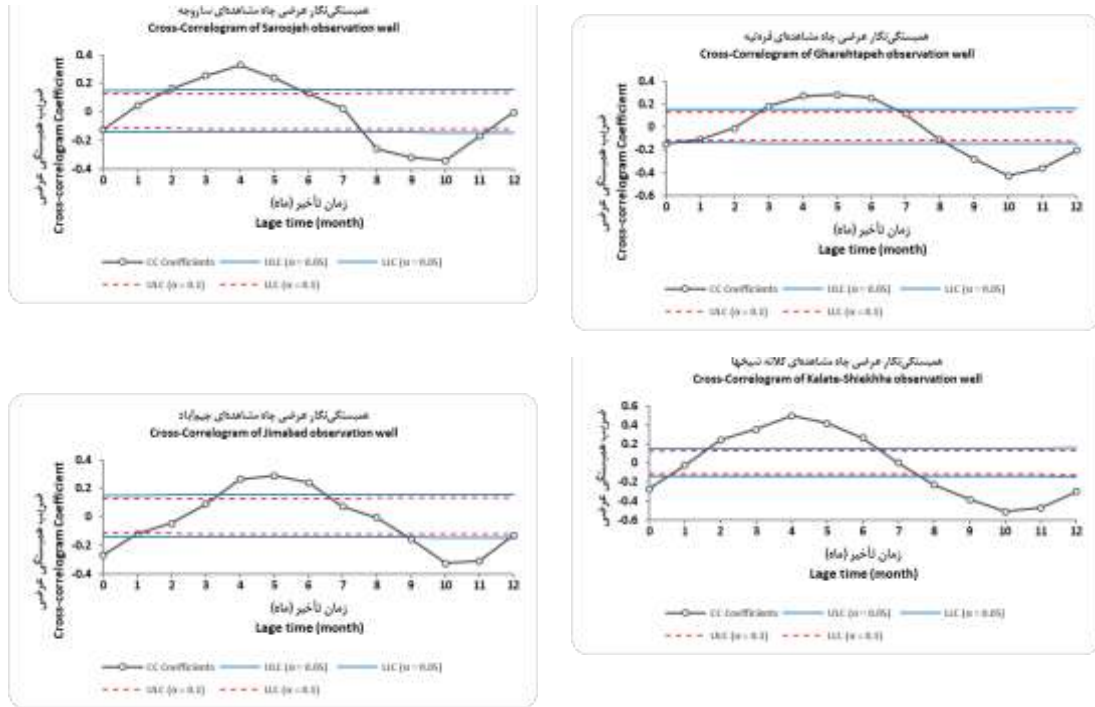
برآورد زمان تأخیر تغذیه آب زیرزمینی

تغییرات سطح، همواره متأثر از بارندگی است. با در نظر گرفتن دو اصل توأمی و هم‌تعبیری، می‌توان رابطه آماری بین تغییرات سطح ایستابی و بارندگی را رابطه علت و معلولی فرض و از آزمون همبستگی متقابل برای ارزیابی رابطه استفاده نمود. ضریب همبستگی متقابل برای چاه‌های مشاهده‌ای معرف در دو سطح خطای آزمون ($\alpha = 0.1$ و $= 0.05$) محاسبه و معنی‌داری رابطه نیز از طریق آزمون آندرسون و آماره تصمیم P-Value بررسی و ارزیابی شده است. سپس زمان تأخیر در محل چاه‌های مشاهده‌ای منتخب بر اساس بیشترین ضریب همبستگی متقابل، برای دو سطح خطای ۹۰ و ۹۵ درصد محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند، ضریب همبستگی متقابل از حداقل ۰/۱۲۹ در چاه مشاهده‌ای تنگل شور - مرغ پردک (رابطه خیلی ضعیف) تا ۰/۴۹۵ در چاه مشاهده‌ای کلاته شیخها (رابطه متوسط) در تغییر است. بررسی آماره تصمیم P-Value نشان می‌دهد، رابطه تغییرات زمانی سطح آب و بارش در دو سطح خطای ۰/۰۵ و ۰/۱ به ترتیب برای ۷۷ و ۹۷ درصد چاه‌ها معنی‌دار است. این رابطه، در سطح خطای ۹۵ درصد، برای ۷ حلقه چاه مشاهده‌ای دوغایی، قره‌چاه، شورچه، یک‌ه‌لنگه، چمگرد، قهقهه و تنگل شور - مرغ پردک و در سطح خطای ۹۰ نیز فقط برای چاه مشاهده‌ای شورچه معنی‌دار نمی‌باشد.

به منظور درک بهتر رابطه تغییرات سطح ایستابی و بارش، ضریب همبستگی متقابل با استفاده از رابطه ۱ و مقادیر حدود اطمینان نیز با استفاده از رابطه ۴ برای دوره آماری ۱۵ ساله محاسبه و نتایج برحسب زمان تأخیر بر روی یک نمودار به نام همبستگی نگار متقابل رسم و در

شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. در همبستگی نگار، در محور افقی که بیانگر زمان تأخیر است، ماه صفر (۰) معادل مهرماه و ماه ۱۱ نیز معادل شهریور سال بعد تعریف شده است. محور عمودی نیز مقادیر ضریب همبستگی را نشان می‌دهد. بررسی همبستگی نگار نشان می‌دهد، ضریب همبستگی در همه چاه‌ها در ماه صفر (مهر) به دلیل نقص داده در اولین ماه دوره آماری، منفی است. با حذف این ماه، مشاهده می‌شود روند تغییرات ضریب همبستگی از دو الگوی مشخص به شرح زیر پیروی می‌کند. در گروه اول (شکل ۳)، سطح ایستابی معمولاً پس از ماه دوم (آذر) و سوم (دی) نسبت به بارندگی واکنش نشان داده و ضریب همبستگی بین آن‌ها به تدریج افزایش می‌یابد. در این چاه‌ها پس از ماه سوم، ضریب همبستگی بیش از مقادیر حاصل از رابطه آندرسون شده و رابطه معنی‌دار است. ضریب همبستگی در ماه‌های چهار (بهمن) و پنج (اسفند) به بیشینه مقدار خود رسیده و سپس با یک شیب ملایم کاهش می‌یابد. از حدود ماه هفت (اردیبهشت) و هشت (خرداد)، ضریب همبستگی منفی شده و مقدار آن نیز کمتر از مقادیر حاصل از رابطه آندرسون شده و رابطه معنی‌دار نمی‌باشد. از ماه نه (تیر) تا ماه یازده (شهریور)، مقدار ضریب همبستگی، همواره منفی است. با وجود اینکه، در این ماه‌ها رابطه معنی‌دار است، اما رابطه علت و معلولی بین تغییرات سطح ایستابی و بارش برقرار نیست و عوامل دیگری از جمله برداشت از آبخوان باعث نوسانات سطح ایستابی می‌شوند. به‌طور کلی، با مقایسه سری زمانی بارندگی و تغییرات سطح ایستابی با زمان تأخیر، می‌توان گفت تغذیه آب زیرزمینی در این گروه از چاه‌ها، از اواسط فصل پاییز شروع شده و تا اواخر فصل بهار تداوم دارد. بیشینه مقدار تغذیه در اواخر فصل زمستان صورت می‌گیرد. در فصل تابستان، بارندگی نقش کم‌رنگی در تغذیه دارد و استخراج بی‌رویه آب از آبخوان و به‌تبع آن افت شدید و ادامه‌دار سطح ایستابی، نقش اصلی در نوسانات آب ایفا می‌کند.

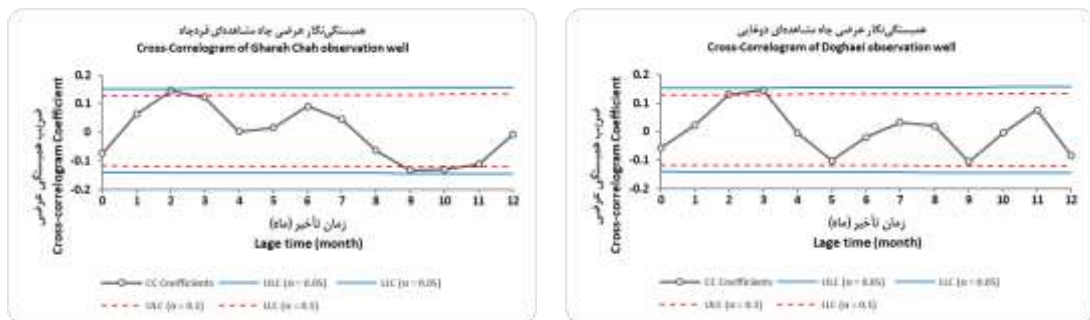


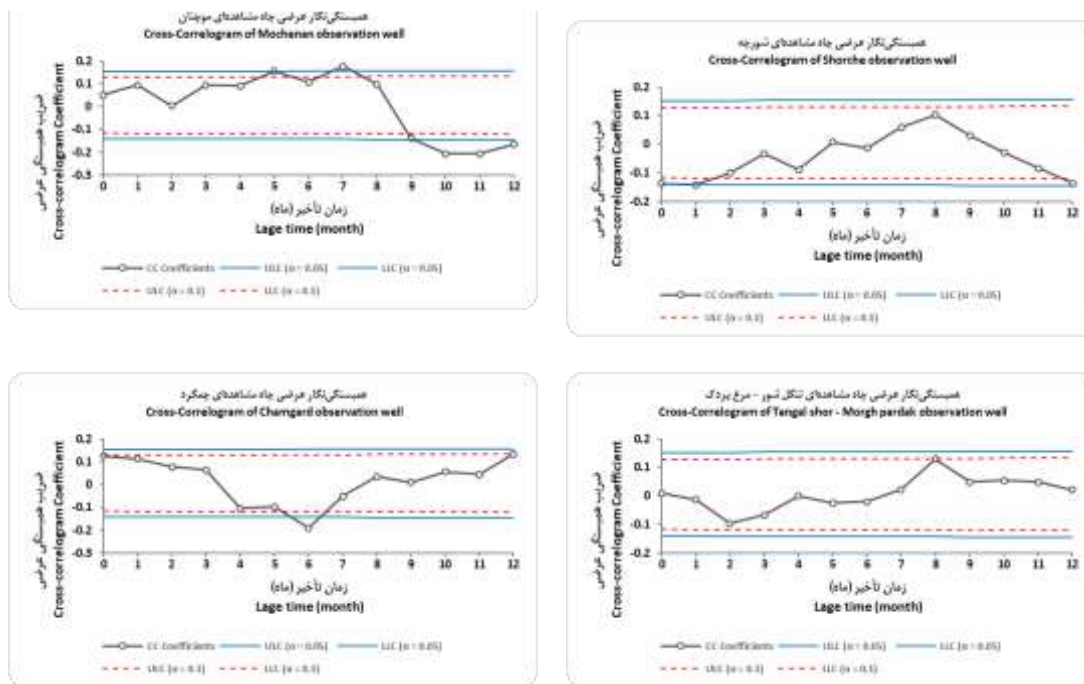


شکل ۳- همبستگی نگار متقابل برای تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای گروه ۱
 Figure 3- Cross-Correlogram for some of the representative observation wells in Group 1

آبخوان و یا در خروجی آبخوان قرار گرفته و ستون زمین‌شناسی آن‌ها تا عمق برخورد به سطح آب، حاوی لایه‌های رسی و ماری است که از نفوذ مستقیم آب باران به آبخوان جلوگیری می‌کنند. علاوه بر محدودیت‌های زمین‌شناسی، بهره‌برداری شدید از منابع آب زیرزمینی نیز یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر تغییرات سطح ایستابی در محل این چاه‌ها است. با توجه به معنی‌دار نبودن رابطه بین تغییرات سطح ایستابی و بارش، محاسبه زمان تأخیر تغذیه برای این گروه‌ها از چاه‌ها میسر نمی‌باشد.

در گروه دوم (شکل ۴)، چاه‌هایی که رابطه تغییرات زمانی سطح ایستابی و بارندگی در آن‌ها در سطح خطای ۹۵ معنی‌دار نمی‌باشد، قرار می‌گیرند. این گروه شامل چاه‌های مشاهده‌ای دوغایی، قره‌چاه، شورچه، موچنان، یک‌لنگه، چمگرد، قهقهه، تنگل شور - مرغ پردک و شورچه است. تغییرات ضریب همبستگی این چاه‌ها بسیار نامنظم و عموماً کم‌تر از مقادیر حاصل از رابطه آندرسون است و احتمالاً رابطه بین بارش و تغییرات سطح ایستابی متأثر از سایر عوامل است. بررسی موقعیت این چاه‌ها، نشان می‌دهد اغلب آن‌ها یا در ورودی‌های





شکل ۴- همبستگی نگار متقابل برای تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای گروه ۲
Figure 4- Cross-Correlogram for some of the representative observation wells in Group 2

با استفاده از رابطه همبستگی بررسی و نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، رابطه معنی‌داری بین زمان تأخیر و عمق آب زیرزمینی وجود دارد و ضریب همبستگی پیرسون (r) در سطح خطای آزمون ۹۰ درصد ($\alpha = 0.1$) مقدار ۰/۶۵۶ و در سطح خطای آزمون ۹۵ درصد ($\alpha = 0.05$) نیز مقدار ۰/۶۳۵ است. این مقادیر بیانگر وجود رابطه قوی و مثبت بین دو متغیر است. از طرف دیگر، اگرچه در خیلی از مناطق، توپوگرافی منطقه و شیب سطح زمین به‌طور غیرمستقیم بر تغذیه تأثیر دارند، اما در آبخوان مشهد - چناران رابطه معنی‌داری بین زمان تأخیر و تراز سطح زمین مشاهده نمی‌شود و مقدار P- Value بیش از مقدار سطح خطای آزمون برآورد شده است. در سطح خطای آزمون ۹۰ درصد، ضریب همبستگی پیرسون ۰/۱۳۱ - است. این مقدار بیانگر ارتباط معکوس بین تراز سطح زمین و زمان تأخیر است. اگرچه با افزایش سطح خطای آزمون، ضریب همبستگی مثبت می‌شود اما کماکان، رابطه معنی‌دار نمی‌باشد.

ارزیابی تأثیر عوامل مختلف بر زمان تأخیر

طبق تعریف، زمان تأخیر به فاصله زمانی رسیدن اولین پالس باران به آب زیرزمینی گفته می‌شود. تغییرات سطح ایستابی در آبخوان‌های آزاد با درجات مختلفی (از کم تا زیاد) تحت تأثیر بارندگی است و با توجه به ضخامت پوشش لایه خاک فوقانی، خصوصیات ناحیه غیراشباع، عمق برخورد به سطح آب، مقدار و شدت بارندگی، تراز سطح زمین و ... تأخیرهای متفاوتی را تجربه می‌کند. در بین این عوامل، عمق برخورد به سطح آب بیشترین تأثیر را دارد. در آبخوان‌هایی که ناحیه غیراشباع از رسوب‌های یکنواختی تشکیل شده و عمق برخورد به سطح آب نیز کم است، سطح ایستابی پس از وقوع بارش با تأخیر اندکی نسبت به آن واکنش نشان می‌دهد و تغذیه سریع آب زیرزمینی اتفاق می‌افتد. با افزایش عمق سطح آب، زمان بیشتری برای رسیدن اولین پالس بارندگی لازم است و تغذیه آب زیرزمینی پس از مدتی شروع می‌شود. اثر عمق برخورد به آب زیرزمینی و تراز سطح زمین بر زمان تأخیر

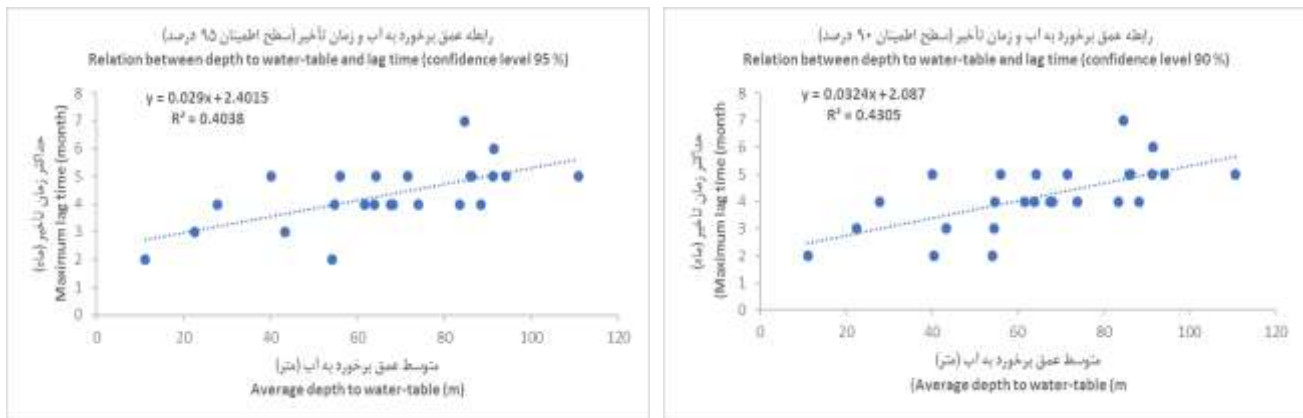
جدول ۳- ضریب همبستگی بین زمان تأخیر، عمق سطح ایستابی و تراز سطح زمین

Table 3- The correlation coefficient between the lag time, depth to water-table and ground surface level

		عمق آب زیرزمینی		تراز سطح زمین	
		Depth to Water-table		Ground Surface Elevation	
		$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.05$
زمان تأخیر	r	0.655	0.635	-0.131	0.109
Lag time	P- Value	0.000	0.001	0.524	0.613

به عبارت دیگر، بر اساس مقدار ضریب تعیین (R^2)، ۴۳ درصد متغیر وابسته (زمان تأخیر) تحت تاثیر متغیر مستقل (عمق سطح ایستابی) بوده و بقیه تغییرات متغیر وابسته نیز مربوط به سایر عوامل احتمالی از جمله بهره‌برداری از آبخوان می‌باشد.

برای بررسی مقدار تأثیر عمق سطح ایستابی بر زمان تأخیر، از رگرسیون خطی استفاده و نتیجه نیز در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مدل رگرسیون در سطح خطای ۰/۱، حدود ۴۳ درصد و در سطح خطای ۰/۰۵ نیز حدود ۴۰ درصد تغییرپذیری داده‌های پاسخ در اطراف میانگین آن را تبیین می‌کند.



شکل ۵- رگرسیون خطی بین عمق برخورد به آب زیرزمینی و زمان تأخیر تغذیه

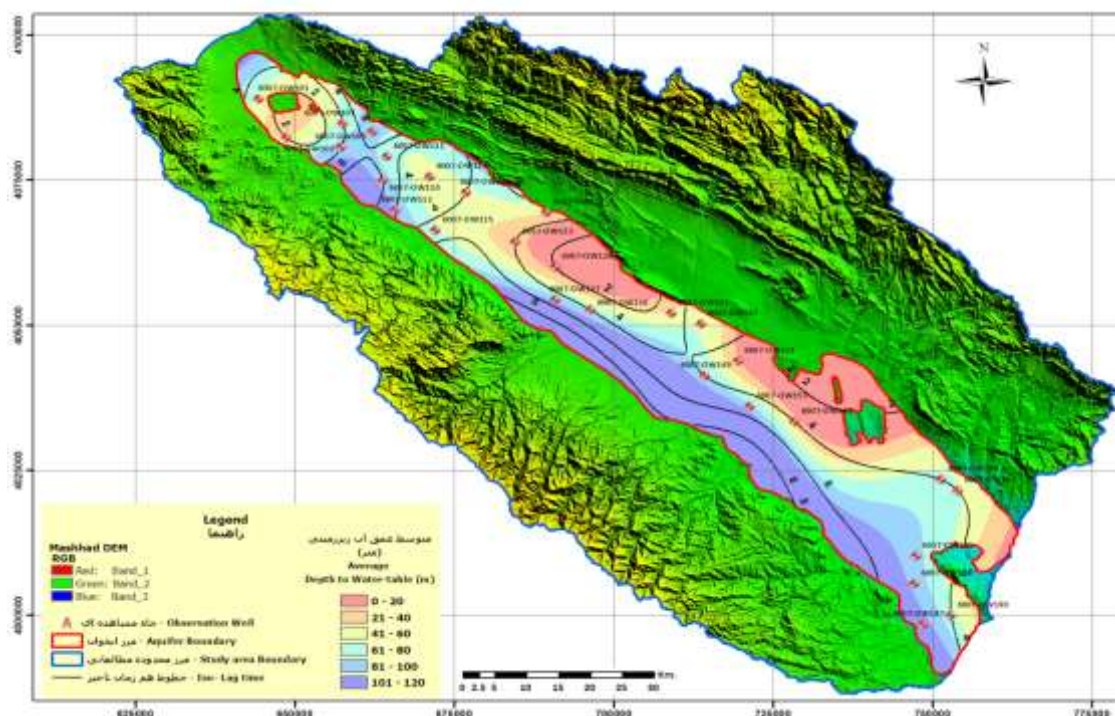
Figure 5- The linear regression between depth to water-table and groundwater recharge lag time

شمال رودخانه نسبت به واحد جنوبی کم و تغییرات کم‌تری را نشان می‌دهد. در واحد جنوبی به دلیل ضخامت زیاد آبرفت و تأثیر توپوگرافی، عمق آب زیرزمینی به تدریج از حوالی کشف‌رود به طرف حاشیه جنوبی آبخوان افزایش می‌یابد.

تطبیق نقشه تغییرات مکانی زمان تأخیر با واحدهای هیدروژئولوژیک آبخوان نشان می‌دهد که تغییرات مکانی زمان تأخیر به صورت کامل از الگوی نقشه هم عمق تبعیت نموده و برازش خیلی خوبی با آن دارد. در آبخوان مشهد - چناران، به طور کلی زمان تأخیر تابعی از تغییرات عمق سطح آب زیرزمینی در آبخوان است و با افزایش عمق آب، زمان تأخیر نیز افزایش می‌یابد. بررسی دقیق‌تر نقشه نشان می‌دهد که در حاشیه شمالی و جنوبی واحد هیدروژئولوژیک اول، به دلیل شرایط زمین‌شناسی و گسترش لایه‌های رسی و ماری در سطح، زمان تأخیر بیش از مرکز آن است. با کاهش رخنمون لایه‌های محدوده کننده و کاهش عمق آب زیرزمینی در مرکز دشت، به تدریج زمان تمرکز نیز کاهش می‌یابد. در دو واحد هیدروژئولوژیک شمالی و جنوبی، زمان تأخیر بیشترین تطابق را با نقشه هم عمق نشان می‌دهد. مقدار زمان تأخیر از حاشیه شمالی آبخوان به طرف جنوب به تدریج افزایش می‌یابد و در نهایت در دامنه مخروط افکنه‌های فریزی، اخلمد، طرهبه - شانديز و ... به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

نقشه تغییرات مکانی زمان تأخیر در آبخوان مشهد-چناران

همان‌گونه که قبلاً نیز بیان شد، رابطه معنی‌داری بین زمان تأخیر و عمق سطح ایستابی در آبخوان مشهد - چناران وجود دارد. برای بررسی تغییرات مکانی زمان تأخیر، نقشه متوسط عمق سطح ایستابی برای دوره ۱۵ ساله (سال آبی ۸۱ - ۱۳۸۰ تا ۹۵ - ۱۳۹۴) در محیط ArcGIS به روش درون‌یابی IDW تهیه و نقشه هم‌ارزش زمان تأخیر نیز به همین ترتیب رسم و در شکل ۶ ارائه شده است. بررسی نقشه‌های متوسط عمق آب زیرزمینی در دوره ۱۵ ساله نشان می‌دهد، الگوی تغییرات عمق آب زیرزمینی در آبخوان تابعی از شرایط زمین‌شناسی و توپوگرافی منطقه است. بر اساس تغییرات عمق آب، آبخوان مشهد - چناران به سه واحد هیدروژئولوژیک شامل واحد ابتدای آبخوان، واحد شمالی و واحد جنوبی تقسیم می‌شود. واحد اول از ابتدای آبخوان در شمال غرب شروع و تا محدوده چاه‌های مشاهده‌ای چنبر غربال و قره‌تپه ادامه دارد. در این واحد حداقل و حداکثر متوسط عمق آب به ترتیب در محل چاه‌های مشاهده‌ای قره‌چاه و مومن‌آباد به مقدار ۴۰ و ۸۹ متر است. واحدهای هیدروژئولوژیک شمالی و جنوبی، منطبق بر الگوی رسوب‌گذاری دشت از شمال به طرف جنوب آبخوان گسترش می‌یابند. اگر رودخانه کشف‌رود را به عنوان خط جدا کننده دو حوضه رسوبی کپه‌داغ و بینالود در نظر بگیریم، مقادیر عمق آب زیرزمینی در واحد هیدروژئولوژیک



شکل ۶- تغییرات مکانی زمان تأخیر تغذیه (ماه) و عمق آب زیرزمینی (متر) در آبخوان مشهد-چناران

Figure 6- The spatial distribution of groundwater recharge lag time (month) and depth to water-table (meter) in Mashhad-Chenaran aquifer.

نتیجه گیری

ایستایی، نقش اصلی در نوسانات آب را ایفا می کند. به طور کلی زمان تأخیر برآورد شده تطابق خوبی با عمق آب زیرزمینی که بیانگر ضخامت ناحیه غیراشباع است، دارد. همچنین، رابطه معنی داری بین زمان تأخیر و تغییرات تراز سطح زمین (توپوگرافی) مشاهده نشد و توپوگرافی دشت، هیچ تأثیر قابل ملاحظه ای بر تغذیه آبخوان نشان نمی دهد. بنابراین، به نظر می رسد که تغذیه آب زیرزمینی در سراسر آبخوان مشهد-چناران بیشتر توسط شرایط ناحیه غیراشباع (ضخامت، جنس و ...) کنترل و تغییرات عمق آب زیرزمینی به نوعی عامل اصلی ایجاد تأخیر زمانی بین وقوع بارندگی و شروع تغذیه در آبخوان محسوب می شود. با وجود بررسی نقش این دو عامل مهم در ایجاد زمان تأخیر، نقش عوامل مهم دیگری از جمله کاربری اراضی، بهره برداری از آبخوان و ... در ایجاد زمان تأخیر همچنان نامشخص و ضروری است در تحقیقات آینده مدنظر قرار گیرد.

سپاسگزاری

از شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی برای در اختیار قرار دادن داده ها، گزارش ها و اطلاعات مورد نیاز این تحقیق سپاس گذاری و قدردانی می شود.

در این تحقیق با استفاده از سری زمانی ۱۵ ساله عمق آب زیرزمینی و باران در محل چاه های مشاهده ای آبخوان مشهد - چناران، زمان واکنش آب زیرزمینی نسبت به باران با استفاده از روش همبستگی متقابل بررسی و نقشه تغییرات مکانی آن ارائه شده است. به منظور درک بهتر رابطه تغییرات سطح ایستابی و بارش، از همبستگی نگار متقابل که تصویر گرافیکی بسیار مناسبی را از رابطه دو متغیر نمایان می سازد، استفاده شده است.

نتایج نشان می دهد، آزمون همبستگی متقابل، توانایی ارزیابی رابطه تغییرات سطح ایستابی و بارش را در اغلب چاه ها دارد. بر این اساس، در آبخوان مشهد - چناران پس از گذشت حدود ۲ تا ۳ ماه اولین تأثیر بارش بر سطح آب زیرزمینی مشاهده و ضرایب همبستگی متقابل معنی دار می شوند. در صورتی که شروع فصل بارندگی را در دشت مشهد از اواخر مهرماه در نظر بگیریم، تغذیه آب زیرزمینی در اغلب چاه ها از اواسط فصل پاییز شروع و تا اواخر فصل بهار ادامه می یابد. بیشینه مقدار تغذیه در اواخر فصل زمستان صورت می گیرد. در فصل تابستان، بارندگی نقش بسیار کم رنگی در تغذیه دارد و استخراج بی رویه آب از آبخوان و به تبع آن افت شدید و ادامه دار سطح

منابع

- 1- Aghanabati A. 2006. Geology of Iran. Ministry of Industry and Mine, Geological Survey of Iran. (In Persian)
- 2- Chae G.T., Yun S.T., Kim D.S., Kim. K.H., et al. 2016. Time-series analysis of three years of groundwater level data (Seoul , South Korea) to characterize urban groundwater recharge. *Journal of Engineering Geology and Hydrogeology (Quarterly)* 43: 117–127.
- 3- Chiaudani A., Di Curzio D., Palmucci W., et al. 2017. Statistical and Fractal Approaches on Long Relationship Assessment: A Central Italy Alluvial Plain Case Study, *Water* 9: 850-878.
- 4- Crosbie R.S., Binning P., and Kalma J.D. 2005. A time series approach to inferring groundwater recharge using the water table fluctuation method. *Water Resources Research* 41: 1–9.
- 5- Healy R.W., and Cook P.G. 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal* 10: 91–109.
- 6- Healy R.W., and Scanlon B.R. 2010. *Estimating Groundwater Recharge*. Cambridge University Press, Cambridge.
- 7- Hocking M., and Kelly B.F.J. 2016. Groundwater recharge and time lag measurement through Vertosols using impulse response functions. *Journal of Hydrology* 535: 22–35.
- 8- Karimi R., 2015. *Easy statistical analysis guide with SPSS*. Hengam, Tehran. (In Persian)
- 9- Water Resources Basic Studies Office. 2008. *Water Resorces Status of Mashhad plain*. Khorasan Razavi Regional Water Company. (In Persian)
- 10- Water Resources Basic Studies Office. 2012. *Prohibition Extension Report of Mashhad-Chenaran study area water resources*. Khorasan Razavi Regional Water Company. (In Persian)
- 11- Kresic N. 2010. Modeling. p. 165–230. In Kresic N., and Stevanovic Z. (ed) *Groundwater Hydrology of Springs*. Chapter 5. Butterworth-Heinemann, Boston.
- 12- Mardaneh M., Aflatooni M., and Boostani F. 2012. Evaluate the Correlation between Rainfall and Groundwater level in the Plain of Shiraz. *Water Engineering* 5: 89–98. (In Persian)
- 13- Naderianfar M., Ansari H., Ziaie, et al. 2011. Evaluating the Groundwater level fluctuations under different climatic conditions in the basin Neyshabour. *Journal of Irrigation and Water Engineering (Quarterly)* 1: 22–37. (In Persian with English abstract)
- 14- Shamszadeh S.H., Barati R., Gord Noshahri A., et al. 2018. Study of Groundwater Response to Water Transfer from Outside Basin (Case Study: Water Transfer from Doosti Dam to Holy City of Mashhad). *Journal of Aquifer and Qanat (semi-annual)* 2: 41–52. (In Persian with English abstract)



Estimation of Groundwater Recharge Lag Time in Mashhad-Chenaran Aquifer Using Cross-Correlation Method

M. Arjmand Sharif¹- H. Jafari^{2*}

Received: 03-07-2021

Accepted: 16-09-2021

Introduction: In hydrological studies, time series are observed as continuous or discrete. Groundwater level and rainfall can be considered as discrete time series. The most common way to measure the dependence between two variables in a discrete time series is to calculate the Pearson correlation coefficient (r). Pearson correlation test is a parametric test that quantitatively measures the linear relationship between variables. This coefficient is essentially a dimensionless index that describes the relationship between two variables numerically. The groundwater level is more or less influenced by rainfall, and this influence may be delayed for a variety of reasons. The process of comparing two time series in different time steps is called cross-correlation. In the cross-correlation analysis, the time-dependent relationship between the dependent and the independent variables is analyzed by computing the coefficients of cross-correlation for various time lags. Results are plotted on a graph called a cross-correlogram.

Mashhad-Chenaran aquifer with an area of about 2527 km² is the most important aquifer in Khorasan Razavi province. Unfortunately, so far in the Mashhad-Chenaran aquifer, the recharge lag time has not been calculated due to the very complex geological and hydrogeological conditions of the aquifer. In this study, an attempt has been made to calculate the groundwater recharge lag time.

Materials and Methods: In this study, 15 years (Sep. 2001 to Sep. 2016) data of monthly depth to water-table and rainfall have been used. There is 74 active observation well in Mashhad-Chenaran aquifer. Out of 74 wells, 31 well were selected based on geological and hydrogeological conditions. To calculate the rainfall at the observation wells, the daily rainfall data from rain gauge and evaporation stations (25 rain gauge stations and 9 evaporator stations) have been used. First, the cumulative daily rainfall at each station for one month (from 15 months to 15 months later) was calculated. Then, a monthly rainfall raster was prepared using ArcGIS. Finally, the rainfall at the observation well was extracted from the raster file.

Results and Discussion: The correlation coefficient between the groundwater level and rainfall was calculated for the 31 wells at two confidence levels ($\alpha = 0.05$ and $\alpha = 0.1$). The lag time was calculated based on the highest correlation coefficient for the two confidence levels. Results showed that the cross-correlation coefficient varied from at least 0.129 in the Tanglshour-Morgh Pardak observation well (very weak) to 0.495 in the Kalateh Sheikhha observation well (moderate). The coefficients of cross-correlation for various time lags were plotted on the cross-correlogram. In cross-correlogram, the month zero was equivalent to October and the month 11 was equivalent to September of the next year. It was observed that the trend of correlation coefficient followed the two specific patterns. In the first group, the water table usually reacts to rainfall after the second month. Then, the correlation coefficient gradually increased. The correlation coefficient reached its maximum in the fourth and fifth months and then decreased with a gentle slope. From the seventh month to the eleventh month the correlation coefficient has become negative. Although there was a significant relationship during these months, there was no cause-and-effect relationship between changes in the water table and rainfall. In the second group, the relationship between the groundwater level and rainfall was not significant at the 95% confidence level. This group includes Doghai observation wells, Qarachah, Shurcheh, Mochenan, Yekehlengh, Chamgard, Ghahghahe, Tanglshour - Morgh Pardak, and Shorcheh. Changes in the correlation coefficient of these wells were very irregular and the relationship between rainfall and water table changes was probably influenced by other factors. The map of lag time showed that the spatial variations of the lag time completely followed the pattern of the Iso-depth map. In general, the lag time was a function of the depth to the water-table in the Mashhad-Chenaran aquifer. With increasing water depth, the lag time also increased. A closer look at the map showed that in the northern and southern margins of the first hydrogeological unit, the lag time was more than its

1 and 2- Ph.D. Student and Associate Professor of Hydrogeology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: h_jafari@shahroodut.ac.ir)

DOI: 10.22067/JSW.2021.70672.1058

center. In the northern and southern hydrogeological units, the lag time showed the greatest compliance with the groundwater depth. The amount of lag time from the northern margin of the aquifer to the south gradually increased and finally reached its maximum value in the Akhlamad, Torqabeh-Shandiz.

Conclusion: As discussed previously, the groundwater level was influenced by rainfall, and this influence may be delayed for a variety of reasons. In this study, the groundwater response to rainfall has been estimated from 31 observation wells by cross-correlation method in a period of 15 years (Sep. 2001 to Sep. 2016). The correlation test results showed that after about 2 to 3 months, the effect of rainfall was gradually observed on the groundwater level and the correlation coefficient at the confidence level $\alpha = 0.05$ and $\alpha = 0.1$ for 77 % and 97% of wells became meaningful, respectively. The minimum lag time was 2 months and the maximum was 7 months. In general, the estimated lag time was well matched to the groundwater depth and fully followed the Iso-depth map pattern. The amount of groundwater recharge throughout the Mashhad-Chenaran aquifer was mainly controlled by the unsaturated area properties such as thickness, material, etc. Changes in groundwater depth were the major factor affecting the lag time. It seems that with the start of rainfall in late October, groundwater recharge in most wells begin in mid-autumn and continues until late spring. Most of the groundwater recharge takes place in late winter. In summer, rainfall has a very small role in groundwater recharge. In this period, the uncontrolled extraction of water from the aquifer and consequently a sharp and continuous drop in groundwater level plays a major role in water table fluctuations.

Keywords: Cross-correlogram, Groundwater response to rainfall, Linear regression, Pearson correlation coefficient and Cross-correlation coefficient