

## حداقل جریان مورد نیاز زاینده‌رود برای حفظ تعادل هیدرولوژیکی در محدوده شهر اصفهان

فرید فضیله<sup>۱\*</sup>، غلامحسین کرمی<sup>۲</sup> و رسول اجل‌لوئیان<sup>۳</sup>

### چکیده

بر اثر کاهش جریان در بالادست رودخانه زاینده‌رود طی چند سال اخیر، این رودخانه به‌صورت متناوب و بدون الگوی زمانی خاصی خشک و آبدار می‌شود. این پدیده، تأثیر بسزایی بر الگوی جریان آب زیرزمینی دارد. تغییر الگوی جریان و افت سطح ایستابی منجر به تحکیم آبخوان، کاهش ضریب ذخیره و فرونشست در سطح شهر اصفهان می‌شود. برای مدیریت و برقراری تعادل بین رودخانه و آبخوان، نیاز به تشخیص ارتباط آن دو و همچنین تعیین میزان تبادل آب بین آنهاست که در این تحقیق برای دستیابی به این هدف از خطوط هم‌پتانسیل و معادله لاهمن استفاده شد. طی دو دوره که در یکی رودخانه پنج ماه کاملاً خشک و در دوره بعد آب در آن جاری شد، سطح ایستابی اندازه‌گیری و خطوط هم‌پتانسیل برای این دو دوره رسم شد. میزان آب محاسبه‌شده که سفره از رودخانه می‌گیرد، حدود  $55 \times 28$  مترمکعب در روز است. برای صحت‌سنجی از آمار هیدرومتری قبل و بعد شهر اصفهان استفاده شد که با کاستن پساب فاضلاب و افزودن آب‌های برداشتی از رودخانه به عدد حاصل از تفاضل جریان ورودی به شهر و خروجی از آن که معادل  $1/9$  مترمکعب در روز بوده است، نتیجه به‌دست آمده قابل قبول و معقول است.

**واژه‌های کلیدی:** آب زیرزمینی، ارتباط آب سطحی و زیرزمینی، زاینده‌رود، شهر اصفهان، معادله لاهمن.

ارجاع: فرید فضیله ف. کرمی غ. و اجل‌لوئیان ر. ۱۳۹۸. جریان مورد نیاز زاینده‌رود برای حفظ تعادل هیدرولوژیکی در محدوده شهر اصفهان. مجله پژوهش آب ایران. ۳۳: ۱۶۳-۱۷۳.

۱- دانشجوی دکتری گروه آب‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود.

۲- دانشیار گروه آب‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود.

۳- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان.

\* نویسنده مسئول: [farid\\_zich@yahoo.com](mailto:farid_zich@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۲۵

## مقدمه

در بسیاری از مناطق دنیا، منابع آبی، تحت فشار ناشی از رشد جمعیت، اقتصاد و تغییر آب و هوا هستند. تخمین زده می‌شود تا سال ۲۰۲۵، ۱/۸ میلیارد نفر در مناطقی که آب کمیاب است، زندگی خواهند کرد و بنابراین، تنها دو سوم جمعیت جهان امکان دسترسی به آب سالم را خواهند داشت. پیش‌بینی می‌شود نیاز آبی تا سال ۲۰۵۰، حدود ۴۰٪ افزایش یابد (سازمان ملل، ۲۰۱۵). با رشد شهرنشینی و توسعه شهرها، چالش‌های مدیریت تأمین آب و خدمات فاضلاب، تأثیر توسعه شهری بر منابع طبیعی و همچنین وقایع شدید آب و هوایی بیشتر خواهند شد (نورتاجادا، ۲۰۰۸). سناریوهای شبیه‌سازی تغییرات آینده آب و هوایی در مدل‌های جهانی، بیانگر کاهش آب‌های سطحی در بخش زیادی از آسیا خواهد بود که بر اثر کاهش ضخامت یخچال‌های طبیعی است (ایمرزیل و همکاران، ۲۰۱۲).

در چند دهه اخیر، استفاده از آب‌های زیرزمینی با توجه به کاهش منابع آب سطحی در سراسر جهان رشد روزافزونی داشته است. تخمین زده می‌شود که امروزه در دنیا ۳۶٪ از آب آشامیدنی، ۴۲٪ از آب کشاورزی و ۲۴٪ نیاز آبی صنایع از آب زیرزمینی تأمین می‌شود که باعث می‌شود منابع آب زیرزمینی کاهش یافته است و برآورد شده است که ۲۰٪ آبخوان‌های دنیا تحت برداشت بیش از حد هستند که منجر به کاهش آب، فرونشست و پیشروی آب شور در مناطق ساحل شده است (گلیسون و همکاران، ۲۰۱۲). در ایران ۹۲ درصد منابع آبی کشور در کشاورزی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. برای بهره‌برداری پایدار از آب‌های زیرزمینی، مدیریت دقیق آب‌های زیرزمینی همراه با برنامه‌هایی برای افزایش میزان تغذیه بسیار لازم و ضروری است (تیلور و همکاران، ۲۰۱۳). در این راستا، مدیریت هماهنگ آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌تواند ضامنی بر تأمین آب در دسترس بیشتر، مطمئن‌تر و با کیفیت‌تر در مواجهه با تغییرات آب و هوایی، مصرف زیاد و در نتیجه، کاهش منابع آبی باشد. هدف از مدیریت یکپارچه آب‌های سطحی و زیرزمینی، بهترین شیوه مصرف منابع آبی شامل آب‌های سطحی، زیرزمینی و پساب‌ها و سیلاب‌ها در مقیاس رودخانه و آبخوان است (چارچوب جهانی مدیریت حوزه آب زیرزمینی، ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶). درک جهت جریان آب‌های زیرزمینی و میزان

تبادل بین آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی برای ارزیابی تخصیص منابع آب و بررسی آثار بالقوه افزایش استفاده از آب‌های زیرزمینی وابسته به اکوسیستم‌ها، امری ضروری و لازم است (کالیوس و همکاران، ۲۰۰۶؛ بانک و همکاران، ۲۰۱۱). تعیین میزان تغذیه آب زیرزمینی از سال ۱۹۸۰ به دفعات مورد بررسی قرار گرفته است که بیشتر مطالعات به علت نیاز به آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، در این گونه محیط‌ها انجام شده است (درایز و سیمر، ۲۰۰۲؛ رادولوویچ و همکاران، ۲۰۱۲). اندازه‌گیری مستقیم تغذیه به علت شرایط هیدرولیکی و هیدرولوژیکی پیچیده و جریان در محیط ناهمگن، دشوار است و به روش‌های غیرمستقیم آن را اندازه‌گیری می‌کنند (جاکیک و دنیک- جاکیک، ۲۰۰۸). روش‌های مختلفی برای تخمین تغذیه و تخلیه آب زیرزمینی ارائه شده است. روش‌های اندازه‌گیری تغذیه از لحاظ مقیاس اندازه‌گیری از کوچک تا حوضه‌های بزرگ (اسکانلن و همکاران، ۲۰۰۲) و همچنین از تخمین ساده بیلان آبی تا مدل‌های پیچیده تغذیه متغیر هستند (ماسوئل و همکاران، ۲۰۱۳؛ آوان و همکاران، ۲۰۱۷؛ سیلویین و همکاران، ۲۰۱۴). تجزیه و تحلیل داده‌های فیزیکی، شامل ردیاب‌های دما، هدایت الکتریکی (EC)، مدل‌سازی موازنه جرمی از حجم تخلیه رودخانه، شیب هیدرولیکی سطح ایستایی و رودخانه و مدل‌های عددی، به‌عنوان بیشترین تکنیک‌های استفاده‌شده در مطالعات ارتباط آب سطحی و زیرزمینی گزارش شده‌اند (کالیوس و همکاران، ۲۰۰۶؛ کری و همکاران، ۲۰۰۷؛ برونر و همکاران، ۲۰۰۹؛ جی‌آم‌باستیانی و همکاران، ۲۰۱۲). مقیاس مطالعه و همچنین نوع اتصال مورد انتظار (از قبیل گیرنده یا دهنده و یا متصل در مقابل منقطع) مهم‌ترین معیارهای اصلی برای انتخاب روش مناسب هستند (بانک و همکاران، ۲۰۱۱). از دیگر روش‌های ذکر شده برای بررسی رابطه آب سطحی و زیرزمینی، بررسی ایزوتوپی (مارتینز و همکاران، ۲۰۱۵)، بررسی ژئوشیمیایی (نودریور و همکاران، ۱۳۹۳؛ محمدی، ۱۳۹۰؛ موسگروو و همکاران، ۲۰۱۰). تحلیل رابطه گرمایی بستر رودخانه (کونانت، ۲۰۰۴) و بررسی‌های کمی (هانت و همکاران، ۲۰۰۶؛ جاوید و اصغری‌مقدم، ۱۳۸۵) است. مارشال و همکاران (۲۰۰۶) از روش بیلان آبی برای تعیین آبدی ویژه و تغذیه آب زیرزمینی را در یک آبخوان آزاد با تغییرات

دروگزر، ۲۰۰۴). در این تحقیق، بخشی از رودخانه زاینده‌رود که از شهر تاریخی اصفهان می‌گذرد، مدّ نظر قرار گرفته است (شکل ۱). وسعت این محدوده حدود ۱۰۰ کیلومتر مربع است. در این محدوده، یک آبخوان آزاد که شیب آن از جنوب به شمال و همچنین از غرب به شرق است، وجود دارد.

برای بررسی تأثیر آب‌های سطحی و زیرزمینی بر یکدیگر، روش‌های متنوع کمی و کیفی وجود دارد که بسته به وجود اطلاعات، هزینه و زمان لازم برای دستیابی به این اطلاعات، به کار گرفته می‌شوند. در این تحقیق، با توجه به نبود اطلاعات آماری کافی و نبود مطالعات هیدروشیمیایی، از معادله لهن (۱۹۷۲) استفاده شد. به این منظور لازم است که در ابتدا خطوط هم‌پتانسیل رسم و به کمک ضریب آب‌گذری میزان دبی گذر کرده از هر بخش محاسبه شود.

$$T = \frac{2Q}{(L_1 + L_2) \left( \frac{\Delta h}{\Delta r} \right)} \quad (1)$$

در معادله (۱)  $L_1$  و  $L_2$  طول دو خط تراز مجاور؛  $\Delta h$  اختلاف ارتفاع این دو خط تراز؛  $\Delta r$  فاصله افقی میان دو خط هم‌پتانسیل مجاور؛  $T$  ضریب آب‌گذری و  $Q$  میزان دبی گذر کرده است.

برای بررسی تأثیر رودخانه بر آبخوان شهر اصفهان لازم بود که در دو حالت رژیم جریانی زاینده‌رود (رودخانه ابدار و رودخانه بدون جریان)، سطح ایستابی اندازه‌گیری شود تا از این طریق میزان تفاوت در تغذیه ناشی از رودخانه مشخص شود. بنابراین، زمانی که رودخانه حدود نیمی از سال خشک بود، اندازه‌گیری اولیه سطح ایستابی در شهر انجام گرفت و سپس در حالتی که آب در رودخانه جاری بود، نیز اندازه‌گیری‌ها تکرار شد.

داده‌برداری طی دو ماه آبان و آذر ۱۳۹۵، در ۲۳ حلقه چاه مشاهده‌ای در شهر اصفهان انجام پذیرفت که مکان هر یک از چاه‌های مشاهده‌ای در شکل ۲ آورده شده است. آبان‌ماه رودخانه به مدت تقریباً ۶ ماه خشک و در آذر رودخانه دارای جریان بود. سپس، با استفاده از داده‌های به دست آمده، خطوط هم‌پتانسیل به روش دستی ترسیم، سپس در ادامه به کمک نرم‌افزار Arc GIS تبدیل به فایل دیجیتال شده و در ادامه با استفاده از تغییراتی همچون نرم‌سازی خطوط تراز بهینه‌سازی شد.

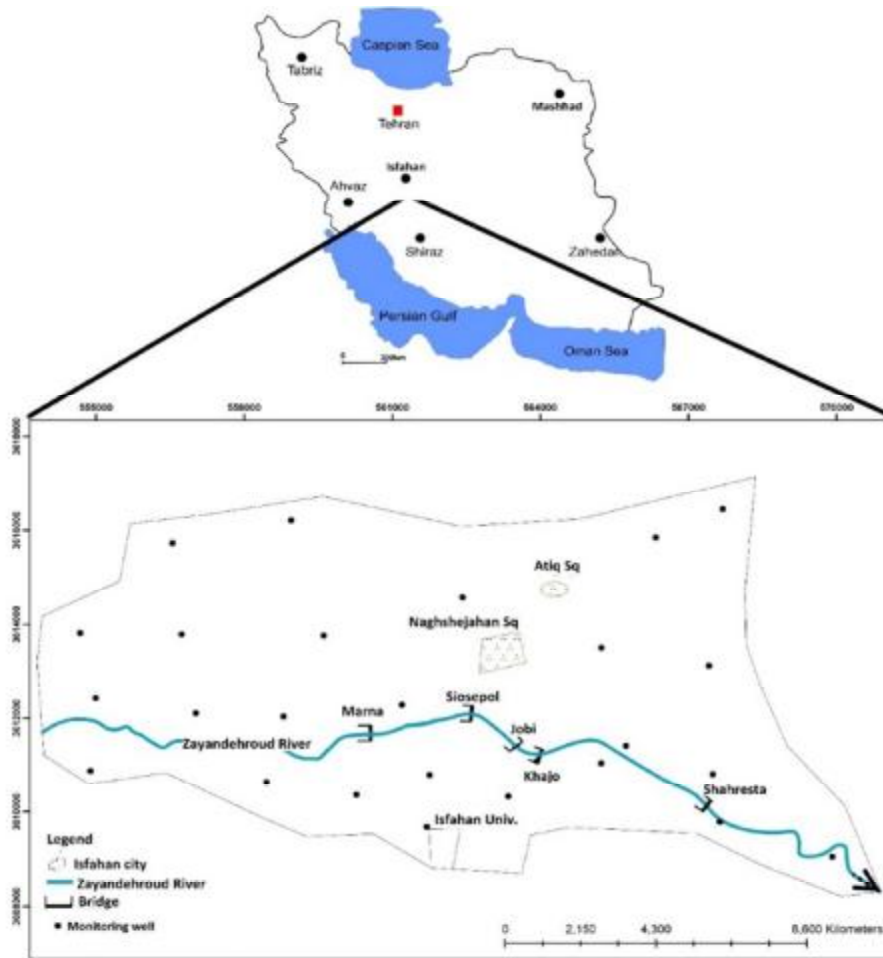
شدید فصلی سطح ایستابی استفاده کردند. آنها اشاره کردند که در این روش، این مزیت وجود دارد که بدون نیاز به داده‌ها و اندازه‌گیری‌های گسترده، نتیجه مناسبی حاصل می‌شود. در این تحقیق سعی شده است این ارتباط را با روش کمی آشکار شود.

با توجه به محدودیت منابع آبی، لازم است که طرح‌های مدیریتی یکپارچه منابع آب انجام گیرد که یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های طرح‌های مدیریتی، برآورد رابطه آبخوان و رودخانه است. در این تحقیق، رابطه رودخانه زاینده‌رود و سفره آب زیرزمینی (که به علت تعامل ناصحیح انسان با منابع آبی، رودخانه زاینده‌رود در شهر اصفهان خشک شده است)، تعیین و برای نخستین بار میزان تبادل آب بین این دو منبع آبی مشخص شده است که می‌توان از نتایج حاصل در مباحث مدیریتی بهره جست؛ گرچه تعیین دقیق میزان تبادل آب سطحی و زیرزمینی هنوز چالش‌برانگیز است (روزنبری و همکاران، ۲۰۱۵). از این رو، در راستای این هدف از بررسی تغییرات سطح ایستابی استفاده شده است که جزء اساسی‌ترین و پایه‌ای‌ترین مبانی آب‌شناسی است. متأسفانه، تاکنون مطالعه جامعی در راستای میزان تغذیه و ارتباط هیدرولیکی این دو منبع آبی در شهر اصفهان صورت نگرفته است.

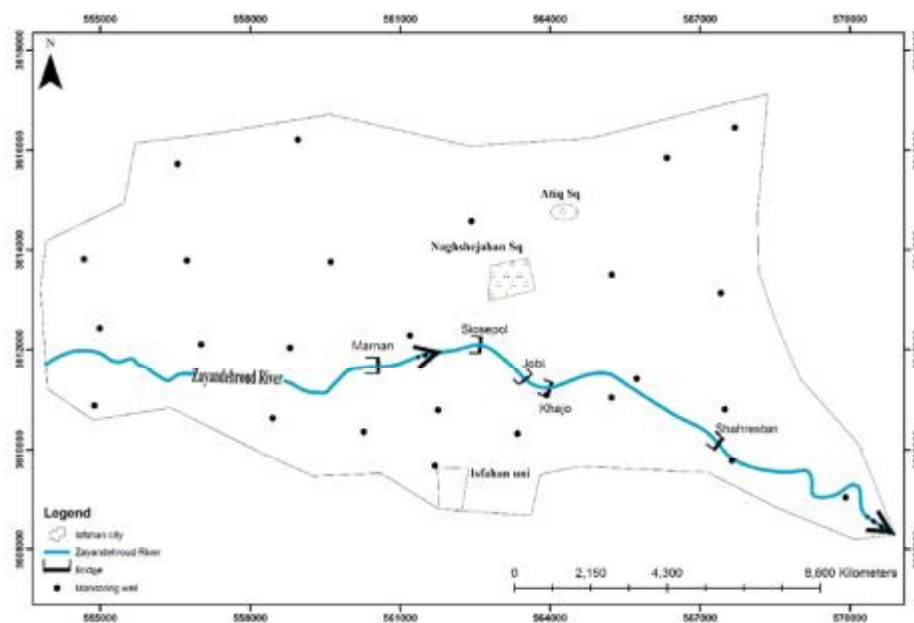
## مواد و روش‌ها

حوضه زاینده‌رود با اقلیم خشک و نیمه‌خشک، یکی از استراتژیک‌ترین حوضه‌های رودخانه‌ای ایران است (مدنی و مارینو، ۲۰۰۹). رودخانه زاینده‌رود دارای آورد آبی حدود ۱/۴ میلیارد مترمکعب در سال است که شامل ۶۵۰ میلیون مترمکعب جریان طبیعی و ۷۵۰ میلیون مترمکعب آب انتقال‌یافته از حوضه دیگر است که از ارتفاعات زاگرس در غرب شروع و در شرق با جاری شدن به باتلاق گاوخونی پایان می‌یابد (گوهری و همکاران، ۲۰۱۳).

این رودخانه از شهر اصفهان با جمعیت بالغ بر ۲/۵ میلیون نفر گذر می‌کند و مهم‌ترین منبع تأمین‌کننده مصارف شرب، کشاورزی، صنعت و فضای سبز است. از سوی دیگر، با توجه به بارش ناچیز منطقه و پتانسیل بالای تبخیر و تعرق، زاینده‌رود اصلی‌ترین منبع تغذیه‌کننده آب زیرزمینی شهر اصفهان است. بارش سالیانه در شهر اصفهان حدود ۱۶۰ میلی‌متر و ظرفیت تبخیر و تعرق سالیانه نیز حدود ۱۵۰۰ میلی‌متر است (مورای-راست و



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی و چاه‌های مشاهده‌ای



شکل ۲- موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای

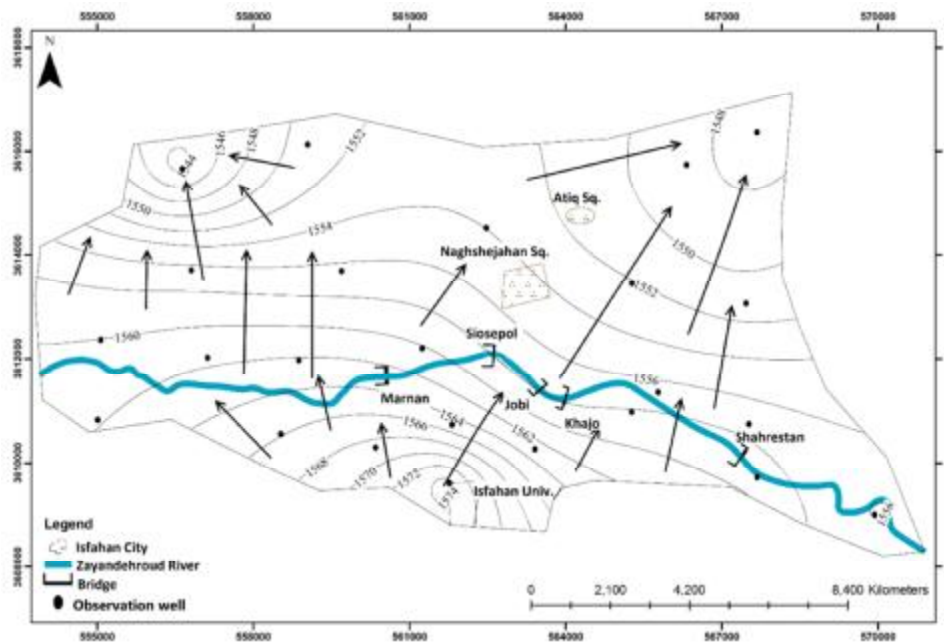
### نتایج و بحث

طی دو دوره خشک و آبدار رودخانه، اندازه‌گیری سطح ایستابی از چاه‌های مشخص شده انجام و خطوط هم‌پتانسیل آب زیرزمینی برای آن‌ها رسم شد. سپس، تأثیر آب جاری در رودخانه بر سطح ایستابی مورد بررسی قرار گرفت که در زیر جداگانه به آن‌ها پرداخته می‌شود.

### وضعیت رودخانه و آبخوان در دوران خشکی رودخانه

طی آبان‌ماه داده‌برداری از ۲۳ حلقه چاه مشاهده‌ای در سطح شهر اصفهان انجام شد و بعد از ترسیم دستی و بهینه‌سازی نرم‌افزاری به صورت نقشه خطوط هم‌پتانسیل ترسیم شد که در شکل ۳ آورده شده است. همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، در زمان خشکی، رودخانه تأثیری بر آبخوان نمی‌گذارند. جهت جریان آب زیرزمینی با جهت توپوگرافی سنگ بستر تطابق دارد (جنوب به شمال). در این حالت نقطه تغذیه بیشتر مربوط به جنوب شهر اصفهان و نقطه تخلیه در شمال غرب و

شمال شرق است. در مورد تغذیه در قسمت جنوب، با توجه به بیرون‌زدگی‌های شیل ژوراسیک (نفوذناپذیر و کم‌تراوا) و عدم بارندگی مؤثر در این محدوده، انتظار این میزان تغذیه به صورت طبیعی وجود ندارد. علت این تغذیه می‌تواند ناشی از پمپاژ آب از اطراف رودخانه به سمت جنوب برای مصارف شهری و فضای سبز و در نتیجه نفوذ این آب به آبرفت بوده که با توجه به شیب توپوگرافی زیاد به سمت شمال، زهکشی آن به این سمت، می‌باشد. نقطه تخلیه در شمال شرق به علت پایین بودن سنگ بستر و در نتیجه پایین انداختن سطح ایستابی به وجود آمده است؛ در صورتی که در قسمت شمال غربی، به علت برداشت زیاد آب برای کشت و زراعت، این افت سطح آب پدیدار شده است. بیشترین گرادیان هیدرولیکی را نیز می‌توان مربوط به جنوب، بین دانشگاه اصفهان و سی و سه پل و همچنین در قسمت شمال غرب مشاهده کرد. قابل ذکر است که در محدوده شرقی، از پل شهرستان به بعد، به علت جاری بودن پساب تصفیه‌خانه در رودخانه، این قسمت از رودخانه حالت تغذیه‌کنندگی دارد.



شکل ۳- خطوط تراز و جهت جریان آب زیرزمینی در آبان ۱۳۹۵

### وضعیت رودخانه آبدار و آبخوان

با اندازه‌گیری مجدد سطح ایستابی در آذرماه ۱۳۹۵ که آب در رودخانه زاینده‌رود جاری شده است، نقشه خطوط

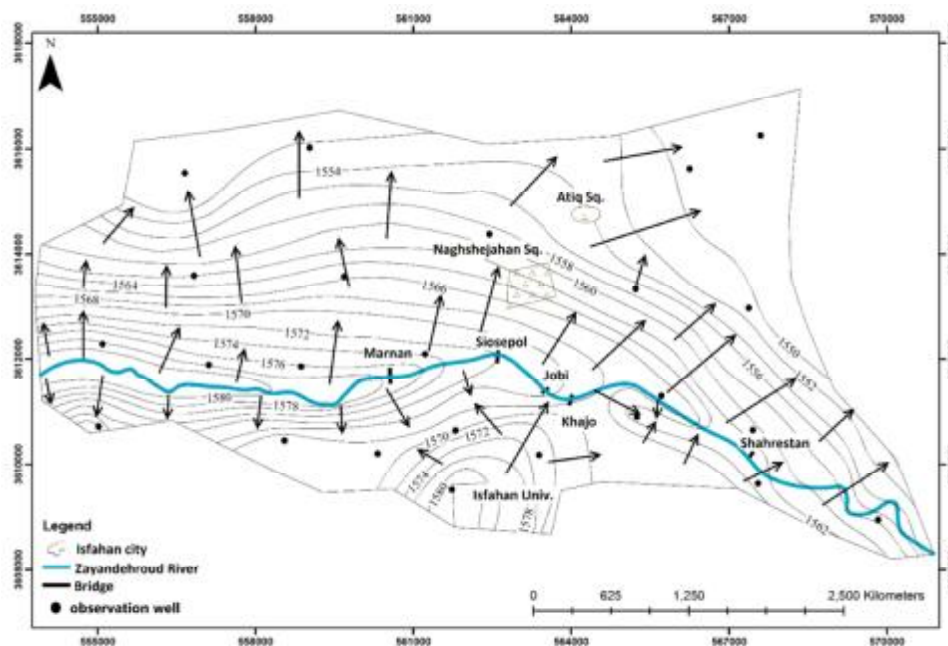
هم‌پتانسیل زیر حاصل شده است (شکل ۴). با توجه به شکل ۴، بعد از جاری شدن آب در رودخانه، جهت جریان آب زیرزمینی به‌طور کامل تغییر کرده است. در این حالت،

تغذیه کننده است؛ سپس، در قسمتی قبل از پل شهرستان رودخانه تغذیه شونده و در انتها از سمت جنوب تغذیه شونده و از سمت شمال تغذیه کننده سفره آب زیرزمینی است.

در قسمت شمالی رودخانه، جهت جریان غالب جنوب به شمال (رودخانه به دشت) و بیشتر دارای شیب نسبتاً نرمالی است. در قسمت غرب و شمال غرب رودخانه که فعالیت کشاورزی و مصارف گوناگون دیگر فراوان است، شیب تند گرادیان هیدرولیکی را می توان نظاره کرد. لازم به ذکر است در همین محدوده ولی قسمت جنوب رودخانه، شیب شدید گرادیان هیدرولیکی، علاوه بر عوامل انسانی مانند برداشت از آب زیرزمینی، مربوط به وجود ارتفاعات و شیب شدید توپوگرافی نیز می باشد که منجر به این گرادیان هیدرولیکی تندی شده است.

در آبخوان محدوده ای در شرق رودخانه، سفره از رودخانه تغذیه می شود. اگرچه به طور همزمان قسمت جنوبی محدوده نیز اثر تغذیه کنندگی را دارد؛ ولی به علت وجود چاه های برداشت شهرداری در امتداد جنوبی رودخانه، تغذیه اجباری با توجه به شیب خلاف توپوگرافی با جریان آب زیرزمینی وجود دارد؛ زیرا شیب توپوگرافی از جنوب به شمال است؛ در صورتی که رودخانه قسمت بالادست (جنوبی) خود را نیز تغذیه می کند. میان پل خواجه و پل شهرستان نیز این پدیده مشهود است.

از پل شهرستان به بعد، رودخانه از سمت جنوب تغذیه و به شمال تخلیه می شود. علت این نوع از ارتباط در این محدوده، بالازدگی شیل های ژورایسک است که در قسمت جنوب شرق رودخانه قرار گرفته اند و منجر به شیب توپوگرافی تندی از سمت جنوب به سمت رودخانه شده است. بنابراین، در امتداد رودخانه ابتدا رودخانه کاملاً



شکل ۴- خطوط تراز و جهت جریان آب زیرزمینی در آذر ۱۳۹۵

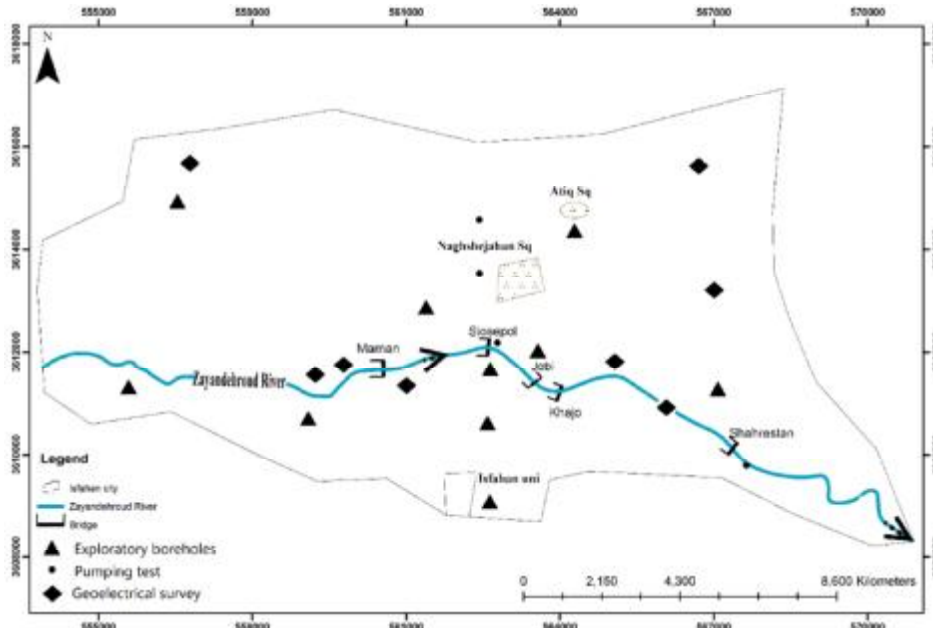
محدوده های با ضریب آب گذاری متفاوت مشخص شد (شکل ۵). در ادامه، به کمک این منطقه بندی و نقشه های همپتانسیل از روش لهنمن استفاده شد و حجم آب گذر کرده از هر محدوده به دست آمد (شکل ۶). نظر به اینکه ضریب آب گذاری تابعی از دو پارامتر هدایت هیدرولیکی و همچنین ضخامت منطقه اشباع است، لزوماً

#### محاسبه تغذیه آبخوان از رودخانه

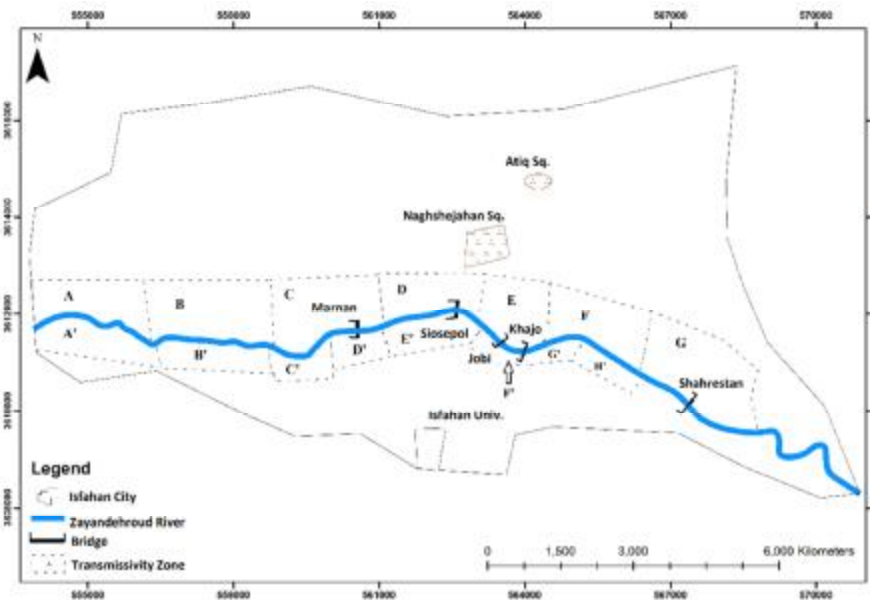
بعد از تعیین ارتباط هیدرولیکی آبخوان شهر اصفهان و رودخانه زاینده رود، با پهنه بندی محدوده ای از حریم رودخانه که بیشترین تأثیر را بر آب زیرزمینی داشت، با استفاده از داده های آزمون پمپاژ، اطلاعات گمانه ها و همچنین داده برداری ژئوفیزیک از نوع مقاومت ویژه،

زمان آبان و آذر (به ترتیب دوران خشک و تر رودخانه) می‌توان میزان آب تغذیه‌شده ناشی از رودخانه را به دست آورد.

در زمانی که رودخانه خشک بوده، سطح ایستابی پایین افتاده است و از ایرو، مقادیر قابلیت انتقال نیز متناسب با آن تغییر می‌کند؛ بنابراین، با محاسبه آب گذر کرده در دو



شکل ۵- موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده برای تعیین هدایت هیدرولیکی



شکل ۶- محدوده‌های تفکیک شده نسبت به ضرایب آبگذری متفاوت

همان‌گونه که مشخص است، در قسمت جنوبی رودخانه تنها برای یک حالت (زمانی که رودخانه خشک بوده است) محاسبات انجام گرفته که دلیل آن وجود جریان یک طرفه

در جدول ۱ و ۲، به ترتیب اطلاعات محاسبه شده به روش لهن برای هر بخش تفکیک شده در شکل ۶ برای دوران خشک و آبدار رودخانه نشان داده شده است.

متحول شده و جریان آب از رودخانه به سفره آب زیرزمینی در دو سمت شمال و جنوب آن دیده می‌شود. در این شرایط، طبق محاسبه صورت گرفته در مجموع، در دو سمت رودخانه ۶۲۳۸۴ مترمکعب آب در روز از سمت رودخانه به شمال و جنوب آبخوان جریان پیدا می‌کند. با کاستن جریان پایه (۷۳۵۶ مترمکعب در روز) از این میزان عدد ۵۵۰۲۸ مترمکعب بر روز حاصل می‌شود که می‌توان ادعا کرد این عدد میزان آبی است که در روز از رودخانه وارد آب زیرزمینی می‌شود.

از شمال به جنوب است. در این حالت، عملاً رودخانه تأثیری بر آب‌های زیرزمینی شهر ندارد و میزان آب گذرکرده در دو سمت رودخانه نه تنها جهت یکسانی دارند؛ بلکه کمیت برابری نیز دارند. طی محاسبات صورت گرفته، زمانی که رودخانه زاینده‌رود خشک است، حدود ۷۳۵۶ مترمکعب در روز، آب در آبخوان، از سمت جنوب رودخانه به سمت شمال جریان دارد. می‌توان این میزان را جریان پایه سفره در نظر گرفت که رودخانه در آن نقشی ایفا نمی‌کند؛ اما هنگامی که جریان آب در رودخانه برقرار می‌شود، شرایط به کلی

جدول ۱- محاسبات انجام شده به روش لهن برای قسمت شمالی رودخانه در حالت خشک

بخش	Q (m <sup>3</sup> /D)	Δr	L (m)	T (m <sup>2</sup> /d)
A	۱۱۸۶/۵	۱۰۰۶	۲۳۰۵	۲۸۰
B	۱۸۴۴/۳	۷۵۱/۵	۲۵۷۲	۲۵۰
C	۱۶۹۳/۷	۶۳۴/۵	۲۳۰۲/۵	۲۴۰
D	۱۶۴۶/۶	۶۵۳/۵	۲۵۰۶/۵	۲۰۰
E	۴۱۸/۱	۸۹۷/۵	۱۵۸۷/۵	۱۲۰
F	۳۳۷/۲	۸۲۲/۵	۲۱۰۲/۵	۷۰
G	۲۲۹/۹	۹۳۵	۲۴۱۱	۵۰
مجموع	۷۳۵۶			

جدول ۲- محاسبات انجام شده به روش لهن برای دو سمت رودخانه در حالت آبدار

بخش	Q (m <sup>3</sup> /D)	Δr	L (m)	T (m <sup>2</sup> /d)
A	۱۰۳۴۲/۵	۶۰۹/۵	۲۴۵۸/۵	۴۲۰
B	۱۰۶۹۸/۹	۸۱۷	۲۶۵۲/۵	۳۸۰
C	۵۰۶۶/۴	۵۸۸/۵	۲۲۹۶	۳۶۰
D	۴۲۱۷/۸	۳۲۰	۲۱۹۱/۵	۳۰۰
E	۱۰۳۲/۶	۴۵۲/۵	۱۴۵۱/۵	۱۵۰
F	۱۸۰۵/۱	۲۲۱	۲۴۷۶	۸۰
G	۵۲۰/۵	۵۳۹/۵	۳۱۶۶/۵	۵۰
A'	۷۱۷۰/۹	۱۸۴/۵	۲۴۴۶	۲۵۰
B'	۸۵۴۸/۲	۱۳۵/۵	۲۵۳۸/۵	۲۱۰
C'	۵۶۰۳/۱	۲۱۴	۱۲۱۱/۵	۲۴۰
D'	۳۷۲۲/۲	۱۵۱	۱۱۸۴	۲۵۰
E'	۲۵۵۷/۱	۲۶۲/۵	۱۹۸۶/۵	۱۶۰
F'	۷۷۹/۸	۳۸۵/۵	۱۴۳۷/۵	۱۲۰
G'	۲۲۷/۳	۳۴۴	۷۵۶	۵۰
H'	۹۲/۱	۲۵۳	۱۱۴۹/۵	۱۰
A'	۷۱۷۰/۹	۱۸۴/۵	۲۴۴۶	۲۵۰
مجموع	۶۲۳۸۴			



## مقایسه نتایج با داده‌های هیدرومتری

برای صحت‌سنجی محاسبات انجام‌شده در این تحقیق، میزان دبی رودخانه در دو ایستگاه هیدرومتری، قبل از ورود به شهر اصفهان و همچنین در محل خروجی زاینده‌رود از شهر، اندازه‌گیری شد. طی این اندازه‌گیری میانگین دبی گذرکرده از ایستگاه موسیان (۱۰ کیلومتر قبل از ورود به شهر اصفهان) حدود  $۵/۴$  مترمکعب بر ثانیه و در ایستگاه پل چوم (خروجی شهر)  $۴/۲$  مترمکعب بر ثانیه بوده است. لازم به ذکر است از  $۴/۲$  مترمکعب آبی که در ایستگاه پل چوم اندازه‌گیری شده است، حداقل  $۰/۷$  مترمکعب بر ثانیه میزان پساب فاضلابی است که ۷ کیلومتر قبل از این ایستگاه توسط تصفیه‌خانه فاضلاب شهر اصفهان به رودخانه وارد می‌شود؛ از این‌رو، مقدار دبی واقعی خود رودخانه  $۳/۵$  مترمکعب بر ثانیه است.

میزان تلفات دبی در طول این مسیر حدود ۲۵ کیلومتری رودخانه حدود  $۱/۹$  مترمکعب بر ثانیه بود. چنانچه در این تحقیق برای طول حدود ۱۶ کیلومتر از مسیر رودخانه که از شهر اصفهان می‌گذرد، میزان  $۰/۶۴$  مترمکعب بر ثانیه میزان تغذیه رودخانه به سفره به‌دست آمده است. با توجه به میزان تبخیر طی این مسیر و همچنین برداشت مستقیم از رودخانه در قسمت ورودی شهر توسط نیروگاه برق حرارتی اسلام‌آباد اصفهان به میزان حدود  $۰/۷۵$  مترمکعب بر ثانیه، در نتیجه طی مسیر ۲۵ کیلومتری در حقیقت  $۱/۱۵$  مترمکعب بر ثانیه تلفات آب (نفوذ به زمین) است. از این‌رو، با انجام یک تناسب بین مسیر ۲۵ کیلومتری و میزان تلفات آب  $۱/۱۵$  مترمکعب بر ثانیه در این مسیر، برای هر کیلومتر از مسیر  $۰/۰۴۶$  مترمکعب بر ثانیه آب نیاز است. با وجود مسیر ۱۶ کیلومتری مورد مطالعه این تحقیق،  $۰/۷۶$  مترمکعب بر ثانیه آب تلفات خواهد داشت که با عدد به‌دست آمده در این تحقیق ( $۰/۶۴$ ) همخوانی خوبی داشته، اعداد به‌دست آمده توجیه‌پذیر است و می‌توان گفت این روش دارای دقت بالایی برای محاسبه تغذیه است.

براساس نتایج به دست آمده، اگر رودخانه دارای حداقل جریان پایه  $۰/۷$  مترمکعب بر ثانیه در ورودی شهر اصفهان باشد، می‌تواند پاسخ‌گوی افت سطح ایستابی ناشی از برداشت از چاه‌ها باشد و در غیر این صورت، شاهد افت شدید سطح ایستابی و خسارات ناشی از آن خواهیم بود. کیخانی و دل‌زاده (۱۳۹۴)، بیان کردند که طی مسیر

۱۸ کیلومتری رودخانه در شهر اصفهان حدود  $۱/۵$  مترمکعب در ثانیه برای جریان پایدار در رودخانه آب نیاز است. علت دو مقدار متفاوت جریان مورد نیاز رودخانه را می‌توان به روش‌های اندازه‌گیری انجام‌شده نسبت داد؛ مضاف بر اینکه در مطالعه کیخانی و دل‌زاده (۱۳۹۴)، مشخص نشده است که جریان پساب از این حجم کم شده است یا خیر؛ زیرا روش اندازه‌گیری ذکرشده براساس جریان ورودی و خروجی است.

مهم‌ترین خطرهای محتمل، عبارت‌اند از: خشکی آبخوان شهر اصفهان در زمان خشکی رودخانه به‌علت ضخامت کم آبرفت و بالابودن سنگ بستر از یک سو و افت شدید سطح ایستابی از سوی دیگر و همچنین، نشست‌های ناشی از این افت، مخصوصاً در حریم رودخانه که آثار باستانی مشهوری همچون پل‌های تاریخی، میدان نقش جهان و ابنیه‌های فنی و تاریخی دیگر وجود دارد. مطالعات گسترده‌ای در مورد تأثیر افت سطح ایستابی بر فرونشست در سراسر جهان انجام گرفته است. تمامی این مطالعات علت اصلی فرونشست را مربوط به افت سطح ایستابی می‌دانند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۱؛ هانگ و همکاران، ۲۰۱۲؛ مودونی و همکاران، ۲۰۱۳؛ ژو و همکاران، ۲۰۱۴). بنابر نتایج مطالعات، مشخص شده است به‌طور متوسط فرونشست زمین برای هر ۱۰ متر افت سطح آب زیرزمینی برابر ۵ تا ۵۰ سانتی‌متر خواهد بود (سازمان آب منطقه‌ای اصفهان، ۱۳۷۲).

## نتیجه‌گیری

اطلاعات درباره میزان تغذیه آب زیرزمینی برای مدیریت منابع آبی بسیار حیاتی است. روش لهن با استفاده از ضریب آب‌گذری و نقشه هم‌پتانسیل در این تحقیق استفاده شد تا بتوان میزان آب تبادل‌شده بین آبخوان شهر اصفهان و زاینده‌رود را به‌دست آورد. زمانی که آب در رودخانه زاینده‌رود جاری باشد، ارتباط هیدرولیکی بین دو منبع آبی برقرار خواهد بود و در غیر این صورت، هیچ ارتباطی بین سفره و رودخانه وجود ندارد. رودخانه در اکثر مسیر خود نقش تغذیه‌کننده آب زیرزمینی را دارد.

نتیجه کلی حاصل‌شده در این تحقیق، میزان تغذیه آبی است که از رودخانه وارد آبخوان شهر اصفهان می‌شود معادل  $۰/۶۴$  مترمکعب بر ثانیه بوده و در صورت تأمین این میزان می‌توان از خطرهای ناشی از افت سطح ایستابی

۱۳۹۴. تأثیر رهاسازی حداقل نیاز زیست محیطی رودخانه زاینده رود در ایستگاه پل خواجه بر اکوسیستم رودخانه در بازه شهر اصفهان، دهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، اهواز، دانشگاه شهید چمران اهواز. ۲۹ دی ماه تا ۱ بهمن ماه.

6. Awan U. K. Ibrakhimov M. Benli B. Lamers J. and Liaqat U. W. 2017. A new concept of irrigation response units for effective management of surface and groundwater resources- a case study from the multi-country Fergana valley, Central Asia. *Irrigation Science*. 35(1): 55-58.
7. Banks E. W Simmons C. T. Love A. J. and Shand P. 2011. Assessing spatial and temporal connectivity between surface water and groundwater in a regional catchment: Implications for regional scale water quantity and quality. *Journal of Hydrology*. 404: 30-49.
8. Brunner P. Cook P. G. and Simmons C. T. 2009. Hydrogeologic controls on disconnection between surface water and groundwater, *Water Resource Research*. 45, W01422, doi 10.1029/2008WR006953.
9. Conant B. 2004. Delineating and quantifying groundwater discharge zones using streambed temperatures. *Groundwater*. 42(2): 243-257.
10. De Vries J. J. and Simmers I. 2002. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology journal*. 10: 5-17.
11. Giambastiani B. M. S. McCallum A. M. Andersen M. S. Kelly B. F. J. and Acworth R. I. 2012. Understanding groundwater processes by representing aquifer heterogeneity in the Maules Creek Catchment, Namoi Valley (New South Wales, Australia) 20: 1027-1044.
12. Gleeson T. Wada Y. Bierkens M. F. and van Beek L. P. 2012. Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*. 488(7410): 197-200.
13. Gohari A. Eslamian S. Abedi-Koupaei J. Massah avani A. Wang D. and Madani K. 2013. Climate change impacts on crop production in Iran's Zayandeh-Rud River Basin. *Science of the Total Environment*. 442: 405-419.
14. Groundwater Governance Global Framework for Action (GGGFA), 2015a. Global Diagnostic on Groundwater Governance.
15. Hung C. W. Hwang C. H. Liou C. J. Lin S. Y. and Yang L. H. 2012. Modeling aquifer-system compaction and predicting land

در صورت عدم تغذیه جلوگیری کرد. مزیت دیگری که این جریان آب دارد، برگشت حیات به اصلی ترین رودخانه مرکزی ایران و شکوفایی دوباره گردشگری در این کلان شهر تاریخی ایران و جلوه تمدن ایران در دنیا خواهد بود. با توجه به میزان مصارف بالای آب در صنایع بالادستی، روش غلط الگوی کشت و پمپاژ بی رویه و غیراصولی آب در بالادست رودخانه برای کشاورزی توجیه ناپذیر، می توان با طرح های مدیریتی صحیح برای مدیریت یکپارچه آب سطحی و زیرزمینی و همچنین انتقال پساب فاضلاب به صنایع، این میزان آب ناچیز را برای رونق اقتصادی و جلوگیری از خطرهای زمین شناسی احتمالی برای کلان شهر اصفهان، تأمین کرد. همچنین از خطرهای زمین شناختی مربوط به افت سطح ایستابی همچون تغییر کیفیت آب و فرونشست سطح زمین جلوگیری کرد.

#### منابع

۱. صالحی ر. غفوری م. لشکری پور غ. ر. و دهقانی م. ۱۳۹۰. بررسی فرونشست دشت مهاباد جنوبی و تأثیر شکاف های ناشی از آن بر زمین های کشاورزی. هفتمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود. ۱۵ شهریور ماه.
۲. جاوید ع. و اصغری مقدم ا. ۱۳۸۵. آنالیز نتایج اندازه گیری دبی رودخانه سنگ سیاه و بررسی ارتباط هیدرولیکی آن با آبخوان دشت دهگلان، دهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، تهران، انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه تربیت مدرس. ۱۳ شهریور ماه.
۳. نودرپور ل. چیت سازان م. ندروی آ و فرهادی منش م. ۱۳۹۳. بررسی ارتباط هیدرولیکی رودخانه دز با آبخوان دشت دزفول - اندیمشک، دومین همایش ملی بحران آب (تغییر اقلیم، آب و محیط زیست). شهرکرد، دانشگاه شهرکرد. ۱۸ و ۱۹ اردیبهشت ماه.
۴. محمدی ا. ۱۳۹۰. اندرکنش آب های سطحی و زیرزمینی دشت سملقان خراسان شمالی، چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر. ۱۳ و ۱۴ اردیبهشت ماه.
۵. کیخایی م. دلالت زاده ع. ر. پورآباد ط. و زادباقر ا.

27. Murray-Rust H. and Droogers P. (Eds.) 2004. Water for the future: linking irrigation and water allocation in the Zayandeh Rud Basin, Iran. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI). iii, 168 p.
28. Musgrove M. Stern L. A. and Banner J. L. 2010. Springwater geochemistry at Honey Creek State Natural Area, central Texas: Implications for surface water and groundwater interaction in a karst aquifer", *Journal of Hydrology*. 388: 144-156.
29. Radulovic M. Stevanovic Z. and Radulovic M. 2012. A new approach in assessing recharge of highly karstified terrains–Montenegro case studies, *Environ Earth Science*. 65: 2221-2230.
30. Rosenberry D. O. Lewandowski J. Meinikmann K. and Nützmann G. 2015. Groundwater –the disregarded component in lake water and nutrient budgets. Part 1: effects of groundwater hydrology. *Hydrological Process*. 29(13): 2895-2921.
31. Scanlon B. R. Healy R. W. and Cook P. G. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrology Journal*. 10: 18-39.
32. Sylvain F. Yvan C. Jérôme P. Simon G. Benoit D. Aulong S. Dazin F. Ahmed S. and Maréchal J. C. 2014. Projected impacts of climate change on farmers' extraction of groundwater from crystalline aquifers in South India. *Scientific Reports*. 4, 3697 Nature Publishing Group.
33. Taylor R. G. Bridget S. and Holger T. 2013. Groundwater and climate change. *Nature Climate Change*. 3(4): 322-329.
34. Tortajada C. 2008. Challenges and realities of water management of megacities: the case of Mexico City metropolitan area. *Journal of International Affairs* Vol. 61, No. 2, WATER A Global Challenge (SPRING/SUMMER 2008), pp. 147-166.
35. United Nations. 2015. The Millennium Development Goals Report 2015. <[http://www.undp.org/content/dam/undp/library/MDG/english/UNDP\\_MDG\\_Report\\_2015.pdf](http://www.undp.org/content/dam/undp/library/MDG/english/UNDP_MDG_Report_2015.pdf).
36. Zhu J. and Guo H. 2014. Relation between Land Subsidence and Deep Groundwater Exploitation in Cangzhou City. *Advanced Materials Research*. 864-867.
37. Zu-jiang L. and Feng Z. 2011. Finite element numerical simulation of land subsidence and groundwater exploitation based on visco-elastic-plastic biot's consolidation theory. *Journal of hydrodynamics*. 23(5): 615-624.
- subsidence in central Taiwan. *Engineering Geology*. 147-14: 78-90.
16. Hunt J. H. Strand M. and Walker J. F. 2006. Measuring groundwater–surface water interaction and its effect on wetland stream benthic productivity, Trout Lake watershed, northern Wisconsin, USA", *Journal of Hydrology*. 320: 370-384.
17. Immerzeel W. W. Lutz A. F. and Droogers P. 2012. Climate Change Impacts on the Upstream Water Resources of the Amu and Syr Darya River Basins. Wageningen The Netherlands.
18. Jukic D. and Denic– Jukic V. 2008. Estimating parameters of groundwater recharge model in frequency domain: Karst springs Jadro and Zrnovnia, *Hydrological processes*. 23: 4532-4542.
19. Kalbus E. Reinstorf F. and Schirmer M. 2006. Measuring methods for groundwater-surface water interactions: a review *Hydrology, Earth System Science*. 10: 873-887.
20. Keery J. Binley A. Crook N. and Smith J. W. N. 2007. Temporal and spatial variability of groundwater–surface water fluxes: development and application of an analytical method using temperature time series, *Journal of Hydrology*. 336: 1-16.
21. Lohman S. W. 1972. Ground-water Hydraulics, U.S. Geological survey Prof. Paper 708, 70 p.
22. Madani K. and Marino M. A. 2009. System dynamics analysis for managing Iran's Zayandeh-Rud River Basin. *Water Resource Management*. 23: 2163-87.
23. Maréchal J. C. Dewandel B. Ahmed S. Galeazzi L. and Zaidi F. K. 2006. Combined estimation of specific yield and natural recharge in a semi-arid groundwater basin with irrigated agriculture. *Journal of Hydrology*. 329(281-796): 293.
24. Martinez J. L. Raiber M. and Cox M. E. 2015. Assessment of groundwater–surface water interaction using long-term hydrochemical data and isotope hydrology: Headwaters of the Condamine River, Southeast Queensland, Australia, *Science of the Total Environment*. 356: 499- 516.
25. Massuel S. George B. A. Venot J. P. and Bharathi L. 2013. Improving assessment of the sustainable groundwater availability with deterministic modelling –a case study of Musi sub-basin India. *Hydrogeology Journal*. Springer Verlag. 21(7): 1567-1580.
26. Modoni G. Darini L. G. Spacagna R. L. Saroli M. Russo M. and Croce P. 2013. Spatial analysis of land subsidence induced by groundwater withdrawal. *Engineering Geology*. 167: 59-71.

