نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۳، شماره ۵، آذر – دی ۱۳۹۸، ص. ۶۸۳-۶۷۱

Journal of Water and Soil
Vol. 33, No. 5, Nov.-Dec. 2019, p. 671-683

بررسی اندرکنش رودخانه و آبخوان در دشت بجنورد به‌وسیله اندازه‌گیری‌های میدانی و مدل‌سازی عددی

سعید سروری[۱]- علی نقی ضیائی[۲*]- عطاءاله جودوی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۳۰

چکیده

مدیریت جامع و منطقی منابع آب، مستلزم شناخت روابط بین منابع آب سطحی و زیرسطحی و مدیریت تلفیقی می‌باشد. آبخوان آبرفتی دشت بجنورد با مساحت ۶۵/۲ کیلومتر مربع در استان خراسان شمالی می‌باشد که بخش اعظم آن را منطقه شهری تشکیل می‌دهد. تأمین آب شرب از خارج محدوده آبخوان آبرفتی در سال‌های اخیر افزایش ارتفاع سطح آب در بعضی نقاط دشت را در پی داشته است که باعث ایجاد مشکلاتی برای ساکنان و زیرساخت‌های شهر شده است. به منظور شناخت راهکارهای کاهش این مشکلات، شبیه‌سازی تراز سطح آب با استفاده از کد MODFLOW و به کمک نرم‌افزار GMS با در نظر گرفتن رودخانه فیروزه انجام شد و نقش رودخانه در تغذیه و تبادلات با آبخوان مورد بررسی قرار گرفت. بازدیدهای میدانی به منظور اندازه‌گیری دبی و عمق آب در چندین مقطع رودخانه انجام شد و از این داده‌ها برای واسنجی مدل بهره گرفته شد. مدل‌سازی در حالت ماندگار برای مهرماه سال ۱۳۹۰ صورت گرفت و پس از واسنجی، خطای مدل برابر ۰/۵۳ متر به‌دست آمد. دوره مدل‌سازی غیر ماندگار از مهر ماه سال ۱۳۸۰ الی مهر ماه ۱۳۹۵ شامل ده سال واسنجی و چهار سال صحت‌سنجی بود که پس از اجرا و واسنجی مدل، میانگین خطا در دوره واسنجی به ۰/۸۳ متر و خطای دوره صحت‌سنجی به یک متر کاهش یافت. بر اساس نتایج حاصل از بیلان، رودخانه در یک قسمت از مسیر خود حدود ۲/۴ میلیون متر مکعب در سال آبخوان را تغذیه می‌کند و در قسمتی دیگر زهکش کننده آبخوان می‌باشد. در نهایت سناریوهای ادامه روند موجود، حذف چاه‌های شرب شهر بجنورد و اثر اجرای سیستم فاضلاب تا سال ۲۰۲۵ به مدل اعمال شد که در انتهای دوره سناریو نتایج به ترتیب حاکی از افت حدود یک متری سطح آب‌زیرزمینی، افزایش تراز سطح آب به میزان چهار متر و فرو افتادن سطح آب به میزان ۴/۵ متر بود.

واژه‌های کلیدی: تبادل رودخانه و آبخوان، تغذیه آب‌زیرزمینی، دشت بجنورد، GMS، MODFLOW

مقدمه

منابع آب‌زیرزمینی مهمترین منبع تأمین نیازهای آبی در مناطق خشک و نیمه خشک می‌باشد. شناخت سامانه آب‌زیرزمینی و مؤلفه‌های تغذیه و تخلیه آن و همچنین مدل‌سازی جریان آب‌زیرزمینی لازمه بهره‌برداری بهینه و مدیریت این منابع می‌باشد. در برخی مناطق مانند دشت بجنورد در استان خراسان شمالی، وجود ارتباط هیدرولیکی قابل توجه بین رودخانه و آبخوان باعث پیچیده شدن وضعیت هیدرولوژیکی منطقه می‌شود. برای مثال برداشت بی‌رویه از آبخوان می‌تواند باعث پایین افتادن بیش از حد سطح آب در آبخوان و خشک شدن رودخانه شود. همچنین آلوده شدن آب رودخانه می‌تواند عامل آلوده شدن آب‌زیرزمینی و بدنبال آن ایجاد مسائل مختلف زیست محیطی و بهداشتی باشد. در نتیجه، در این مناطق شناخت و کمی کردن ارتباط هیدرولیکی بین رودخانه و آبخوان از اهمیت بسیاری برخوردار است.

به طور کلی اگر ارتفاع سطح آب‌زیرزمینی بالاتر از ارتفاع سطح آب رودخانه باشد، رودخانه تغذیه شونده و در حالت برعکس، رودخانه تخلیه شونده محسوب می‌شود. گاهی رودخانه در قسمتی از مسیر خود و یا در زمان خاصی تغذیه کننده و در قسمتی دیگر (یا زمان دیگر) تغذیه شونده می‌باشد. نفوذ عمقی از بستر رودخانه‌ها به سطح ایستابی به دو صورت اتفاق می‌افتد و بستگی به متصل بودن رودخانه‌ها و سطح ایستابی دارد. در مناطق خشک که سطح ایستابی معمولا عمیق است چنین اتصالی وجود ندارد و آب از بستر به سمت پایین حرکت می‌کند. در این حالت شدت تغذیه تحت تأثیر سطح ایستابی نیست. در مناطقی که رودخانه و سطح ایستابی به هم متصل هستند، پارامترهای مؤثر در فرآیند تغذیه شامل عرض، عمق و مدت جریان رودخانه و خصوصیات هیدرولیکی مصالح بستر کانال و زیر آن می‌باشد. به

۱ و ۲- به‌ترتیب کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آب و دانشیار، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: (Email: an-ziaei@um.ac.ir
۳- دکترای هیدروژولوژی، گروه هیدروانفورماتیک، مرکز پژوهشی آب و محیط زیست شرق
DOI: 10.22067/jsw.v33i5.72735

منظور شناخت تبادل آبخوان و رودخانه روش‌های مختلفی مانند اندازه‌گیری‌های میدانی میزان تبادل رودخانه و آبخوان بر اساس بیلان آب رودخانه و نشت‌سنج‌ها، جریان پایه، روش دارسی، جداسازی هیدروگراف پایه، تحلیل فیزیکی هیدروگراف جریان رودخانه، منحنی تداوم جریان و مدل‌های ریاضی بکار گرفته می‌شود. در این مطالعه بر اساس اطلاعات و امکانات موجود، از روش‌های بیلان آب رودخانه و مدل‌سازی ریاضی جریان آب‌زیرزمینی برای ارزیابی تبادل هیدرولیکی رودخانه و آبخوان استفاده شد.

مدل ریاضی، جریان آب‌زیرزمینی را به‌طور غیر مستقیم با استفاده از یک معادله ریاضی شبیه‌سازی می‌کند. امروزه مدل‌های ریاضی عددی به‌طور گسترده‌ای در مطالعات هیدروژئولوژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در صورتی‌که بتوان شبیه‌سازی یک سیستم مرکب از آب سطحی و زیرزمینی را انجام و با شرایط طبیعی تطبیق داد، به سهولت می‌توان با تغییرات در محل، مقدار و زمان برداشت به بررسی اثرات برداشت بر روی سفره پرداخت (۲۲). در بین مدل‌های عددی جریان آب‌زیرزمینی، کد مادفلو[1] امروزه به صورت یک مدل استاندارد و قابل اعتماد شناخته می‌شود و در آن بسته رودخانه به منظور شبیه‌سازی میزان و نحوه تبادلات آب‌سطحی و زیرسطحی فراهم آمده است. در کد مادفلو محدوده مطالعاتی به سلول‌هایی با اندازه مشخص تفکیک و محاسبات سلول به سلول انجام می‌شود. در خصوص روابط آب سطحی و زیرزمینی، تبادل میان این دو سیستم به میزان رسانایی بستر رودخانه (تابعی از هدایت هیدرولیکی مواد بستر رودخانه) و اختلاف بار هیدرولیکی بین رودخانه و آبخوان بستگی دارد. معادلات مربوط به اندرکنش آبخوان–رودخانه به شکل روابط ۱ و ۲ می‌باشد:

$$if: h_{i,j,k} > R_{Bot} \quad ; \quad Q_{Riv} = C_{Riv} * (H_{Riv} - h_{i,j,k}) \quad (۱)$$

$$if: h_{i,j,k} \le R_{Bot} \quad ; \quad Q_{Riv} = Q_{Riv} * (H_{Riv} - R_{Bot}) \quad (۲)$$

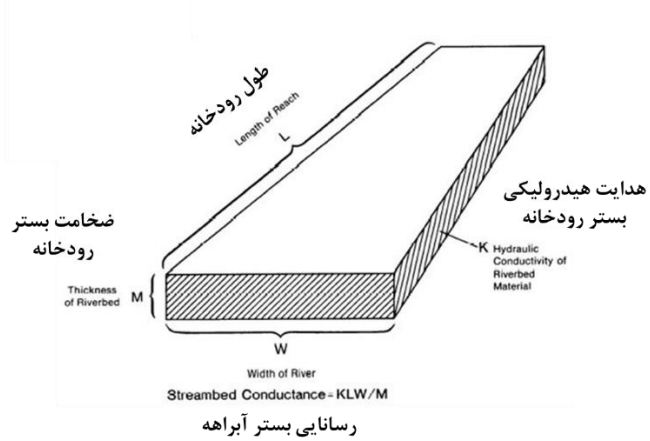
Q_{Riv} جریان تبادلی بین رودخانه و آبخوان، C_{Riv} رسانایی هیدرولیکی بستر رودخانه، $h_{i,j,k}$ بار هیدرولیکی در گره متناظر آن سلول در آبخوان، H_{Riv} بار هیدرولیکی رودخانه و R_{Bot} بار هیدرولیکی در قاعده سلول بستر رودخانه می باشد. رسانایی آبراهه (رودخانه) به صورت رابطه (۳) محاسبه می شود که در آن K هدایت هیدرولیکی مواد بستر رودخانه، W و L به ترتیب عرض و طول ناحیه تماس رودخانه و آبخوان و M ضخامت مواد بستر رودخانه می‌باشد.

$$C_{Riv} = K.L.(W/M) \quad (۳)$$

به‌این ترتیب با مشخص بودن رسانایی هیدرولیکی، ارتفاع سطح آب، دبی و تراز بستر رودخانه در هر سلول ابتدا و انتهای بازه رودخانه، مدل در هر گام زمانی با توجه به تراز سطح آب، تراز بستر و سطح آب رودخانه، وضعیت تبادل آب بین رودخانه و آبخوان را مشخص کرده و مقدار تغذیه یا تخلیه آب در آن سلول را محاسبه می‌کند.

کاربرد مدل مادفلو در راستای توصیف و پیش‌بینی رفتار سامانه‌های آب‌زیرزمینی توسعه بسیاری داشته است. شاکی و آدلوی مدل رایانه‌ای دشت ایراوان کشور لیبی را با استفاده از کد مادفلو ساختند. صحت‌سنجی مدل نشان می‌داد که مدل به طور مناسب سطوح آب مشاهده‌ای را در سفره تولید می‌کند (۱۹). رسیو و همکاران جهت بررسی سیستم مدیریت منابع آب‌زیرزمینی در حوضه منچای اسپانیا، با استفاده از مادفلو مدل سه بعدی منطقه را به منظور بررسی خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان تهیه کردند (۱۷). ونگ و همکاران با استفاده از تلفیق مادفلو و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) وضعیت آبخوانی را در شمال چین مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی لایه‌های ورودی به مدل تعریف شد. نتایج نشان داد وضعیت منابع آب‌زیرزمینی این دشت در اثر برداشت بی‌رویه در شرایطی بحرانی به سر می‌برد (۲۱). سینتون و همکاران با استفاده از مدل مادفلو مدلی سه بعدی برای آب‌زیرزمینی معدن طلای مجاور واشنگتن ارائه نمودند (۱۸). تترات و هالی با استفاده از مادفلو مدل آب‌زیرزمینی منطقه باربادوس را تهیه نمودند. کریمی و همکاران به بررسی تأثیر آب‌های سطحی بر روی سطح آب‌زیرزمینی ماهیدشت پرداختند و نتیجه گرفتند با استفاده از آب‌های سطحی به عنوان منبع تغذیه کننده آبخوان، در فصول سرد سال که برای کشاورزی استفاده نمی‌شوند می‌توان سطح آب‌زیرزمینی و حجم آبخوان را افزایش و آبخوان را تا حدودی احیا نمود (۲۰). منصوری و همکاران به بررسی تأثیر مقدار جریان رودخانه بر آبگیری زیرسطحی با محیط متخلخل در رودخانه‌های فصلی پرداختند و مدلی آزمایشگاهی از سازه‌های جمع‌آوری جریان و شبکه زهکشی برای انحراف جریان ساخته و در آن میزان جریان انحرافی با شبکه زهکشی با فواصل و عمق‌های متفاوت متاثر از دبی‌های مختلف جریان اصلی رودخانه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که میزان جریان انحرافی رابطه مستقیم با دبی ورودی بالادست دارد و با افزایش فاصله بین زهکش‌ها دبی هر زهکش افزایش می‌یابد (۱۳). موحدیان و همکاران اثر متقابل آبخوان و رودخانه کارون در دشت گتوند عقیلی به کمک مدل مادفلو بررسی کردند. به کمک داده‌های سطح ایستابی مهر ۱۳۸۶ تا شهریور ۱۳۸۷، آبخوان گتوند–عقیلی در حالت ناماندگار واسنجی و در مرحله بعد به کمک داده‌های سطح ایستابی مهر ۱۳۸۷ تا شهریور ۱۳۸۸ صحت سنجی شد. سپس ارتباط رودخانه کارون و آبخوان در سناریوهای مختلف مدیریتی شامل افزایش و کاهش سطح آب رودخانه در اثر بهره‌برداری از دو سد گتوند و پیش‌بینی روابط متقابل آبخوان و رودخانه در دوره‌های خشک و ترسالی بررسی شد. نتایج نشانگر زهکش بودن رودخانه در زون‌های شمالی و خصوصا مرکزی، و تغذیه آبخوان توسط آن در زون‌های جنوبی بود و تبادلات بیشتر متاثر از نوسانات تراز رودخانه می‌باشد (۱۲).

1- MODFLOW



شکل ۱- شماتیک مرز رودخانه و رسانایی هیدرولیکی بستر آبراهه
Figure 1- Schematic of River Boundary and streambed conductance

چیت‌سازان و همکاران با استفاده از کد مادفلو به ارزیابی ارتباط هیدرولیکی آبخوان دشت لوراندیمشک و رودخانه دز پرداختند و سناریوهای مختلف مدیریتی کاهش تغذیه آبخوان بر اثر خشکسالی و افزایش تغذیه آبخوان بر اثر ترسالی و اثر آن بر تبادل هیدرولیکی آبخوان و رودخانه را انجام دادند. نتایج پژوهش حاکی از آن بود که رودخانه دز در بیشتر مسیر خود تغذیه کننده آبخوان است (۱). چیت سازان و همکاران با استفاده از مدل مادفلو اثر متقابل آبخوان-رودخانه دشت دوسلق واقع در استان خوزستان بررسی کردند. هدف آن‌ها ساخت مدلی بود که سیستم جریان آب‌های زیرزمینی و روابط متقابل آب‌های زیرزمینی و سطحی را نیز شبیه‌سازی کند. پس از اطمینان از اینکه مدل می‌تواند جریان آب‌زیرزمینی دشت را شبیه‌سازی کند از آن به عنوان یک ابزار مدیریتی استفاده شد و سناریوهایی به آن اعمال شد (۲). کتابچی و همکاران تبادل بین تالاب کانیبرازان و آبخوان را بررسی کردند. نتایج موید آن بود که در سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۴ تالاب کانیبرازان همواره از منابع آب‌زیرزمینی تغذیه شده است و سال‌های ۱۳۷۷، ۱۳۸۱ و ۱۳۹۴ تالاب بیشترین تغذیه را از منابع آب زیرزمینی داشته و همچنین نتایج حاکی از آن بود که در صورت نادیده گرفتن اثر زهکش‌ها، کانال‌ها و انهار سنتی بر تالاب، حجم آب تالاب با کاهشی حدود ۱۵ و ۳۰ درصد مواجه خواهد شد (۱۱). در پژوهشی دیگر به بررسی تأثیر آب‌های سطحی و زیرزمینی با استفاده از سیستم مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی در مکان‌هایی که مقاطع رودخانه متغیر است، پرداخته شد و به کمک آنجام آزمون پمپاژ و همچنین نمونه برداری از جنس بستر رودخانه به منظور آزمایش و تعیین مشخصات بستر در طول ۱۰ کیلومتر طول رودخانه، و روش هیدروژئووژیک مناسب اقدام به تعیین ضرایب هیدرودینامیک شد. سپس به کمک GMS نوسانات ارتفاع هیدرولیکی در آب‌زیرزمینی را نشان دادند و نتیجه گرفتند این نوسانات به دلایلی همچون بارش و سرعت جریان در مقاطعی از رودخانه می تواند تحت تأثیر قرار گیرد (۳). ایزدی و همکاران دو مدل SWAT و مادفلو را برای شبیه‌سازی سطح آب و جریان زیرزمینی دشت نیشابور ترکیب کردند. آن‌ها مدل را برای سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ کالیبره و برای سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۲ بر اساس جریان رودخانه، عملکرد گندم، برداشت آب و داده‌های سطح آب اعتبارسنجی نمودند. مدل SWAT یک پیش‌بینی رضایت‌بخش برای بیلان هیدرولوژیکی حوضه ارائه داد همچنین پیش‌بینی خوبی از بازدهی آبیاری گندم و استخراج آب بدست داد. میانگین ۱۰ ساله نرخ تغذیه سالانه تا حد زیادی با استفاده از ترکیب دو مدل تخمین زده شد. نتایج نشان از توافق بالای تخمین مستقل سالانه تغذیه و استفاده از مدل ترکیبی برای این منظور داشت (۶). جودوی و همکاران یک مدل نیمه توزیعی هیدرولوژیکی چند مخزنه برای تخمین تغذیه آب-زیرزمینی در یک سیستم آبرفت-کارست ایجاد کردند. این مدل برای سیستم پیچیده آبرفت- کارست در حوضه آبریز فیروزآباد برای تخمین تغذیه آبخوان ناشی از بارش، آب برگشتی و ارتباط بین آبخوان آبرفتی و رودخانه فیروزآباد بکار گرفته شد. نتایج مدل نشان داد رودخانه فیروزآباد در گذشته در ابتدای دشت زهکش کننده آبخوان و در انتهای آن تغذیه کننده آبخوان بوده است. اما با افت زیاد آب‌زیرزمینی سطح ایستابی در پایین‌تر از بستر رودخانه قرار گرفته است (۹). ایزدی و همکاران در مطالعه‌ای دیگر با استفاده از ترکیب تغییرات سطح ایستابی و روش بیلان آب به تخمین تغذیه آب‌زیرزمینی در آبخوان-های آبرفت-سازند سخت پرداختند. یک رویکرد جهت تخمین تغذیه آب‌های زیرزمینی با استفاده از ترکیب یک مدل بهینه‌سازی و روش بیلان آب‌زیرزمینی در یک منطقه آبرفت-سازند سخت در مرز بین کشورهای عمان و امارات ارائه شد. نتایج مدل نشان از تطابق بالا بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی داشت. همچنین نتایج نشان داد رویکرد پیشنهادی یک روش اثربخش در جهت تخمین تغذیه آب‌زیرزمینی در مناطقی با مشخصه‌های زمین‌شناسی پیچیده که در آن اندرکنش بین محیط متخلخل و درز و شکاف‌دار و رودخانه و آبخوان به آسانی قابل سنجش نیست، را فراهم می‌کند (۷).

همان‌طور که قبلا بیان شد در دشت بجنورد شواهد میدانی از

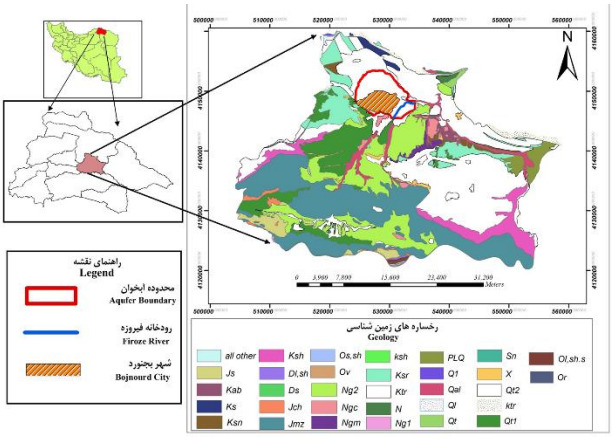
تبادل آبخوان و رودخانه وجود دارد اما در مطالعات هیدرولوژی و هیدروژئولوژی دشت بجنورد تا بحال مولفه تبادل آبخوان و رودخانه با دقت مناسب اندازه‌گیری و در محاسبات بیلان لحاظ نشده است. به این منظور در این تحقیق، به وسیله شبیه‌سازی ارتباط آبخوان و رودخانه توسط مدل عددی مادفلو و واسنجی مدل توسط داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی این مؤلفه برای اولین بار با دقت مناسب برآورد شد.

مواد و روش‌ها

حوضه آبریز (محدوده مطالعاتی) بجنورد با مساحت ۱۲۶۵/۸ کیلومتر مربع در مرکز استان خراسان شمالی واقع شده است که ۱۰۵/۶ کیلومتر مربع آن را دشت تشکیل داده است و مابقی شامل ارتفاعات و آبرفت میان ارتفاعات می‌شود. بلندترین نقطه حوضه با ارتفاع ۳۰۱۰ متر از سطح دریا و پست‌ترین نقطه حوضه که خروجی حوضه است با ارتفاع ۱۰۰۰ متر از سطح دریا در بخش شرقی آن و در محل روستای باباامان است. آبخوان آبرفتی دشت بجنورد با مساحت ۶۵/۲ کیلومتر مربع، از کوچکترین آبخوان‌های آبرفتی استان خراسان شمالی می‌باشد و شهر بجنورد بیش از ۴۰٪ مساحت آبخوان را پوشش می‌دهد. آبراهه‌های سطحی و مسیل‌های موجود در این محدوده پس از عبور از ارتفاعات جنوبی-شمالی وارد آبخوان آبرفتی دشت بجنورد شده و از آنجا در جهت شرق محدوده را ترک و به اترک می‌ریزد. رودخانه فیروزه از روستای اسدلی آغاز و پس از عبور از سرچشمه‌های گریوان و فیروزه پر آب شده و در نزدیکی پارک باباامان به رودخانه چهارخروار می‌ریزد و سپس از محل ایستگاه باباامان به اترک می‌ریزد. رودخانه چهارخروار از روستای پاکتل سرمنشا گرفته و سرچشمه‌های پرآب اسفیدان و چناران به آن می‌ریزد. ایستگاه هیدرومتری باباامان در خروجی حوضه آبریز تنها ایستگاه معرف این حوضه است. متوسط بارندگی محدوده مطالعاتی بجنورد با ارتفاع متوسط ۱۴۶۳ متر از سطح دریا برابر ۲۹۳/۸ میلی‌متر در سال برآورد شده است. اقلیم منطقه از نوع خشک است. به طورکلی بخش اعظم محدوده مطالعاتی بجنورد در زون زمین‌شناسی کپه‌داغ قرار گرفته است. تنها بخشی از ارتفاعات جنوبی این محدوده در زون بینالود قرار دارد.

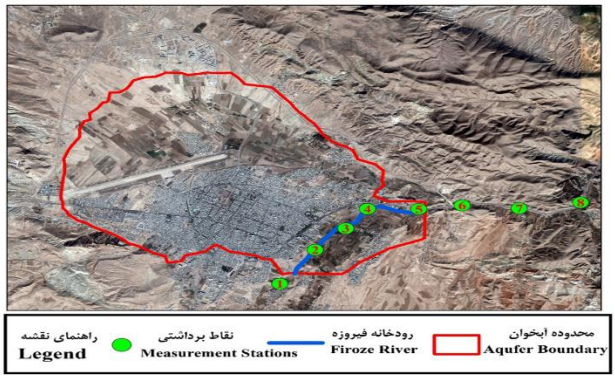
به منظور ایجاد مدل مفهومی شامل چگونگی ارتباط رودخانه و آبخوان سه بازدید در تاریخ‌های ۲ اسفند سال ۱۳۹۵، ۲ اردیبهشت ۱۳۹۶ و ۲ مرداد سال ۱۳۹۶ از رودخانه فیروزه واقع در محدوده مطالعاتی انجام شد. در این بازدیدها ارتفاع آب و دبی رودخانه در چند مقطع مختلف و همچنین مقادیر برداشت و یا ورودی در طول رودخانه اندازه‌گیری شد.

همچنین برای ایجاد مدل عددی توسط کد مادفلو، با استفاده از داده‌های ژئوفیزیک، هیدرولوژی و هیدروژئولوژی مدل مفهومی آبخوان دشت بجنورد طراحی شد. پس از تهیه مدل مفهومی، محدوده مدل‌سازی به کمک نرم‌افزار GMS به ۱۲۷۴ سلول فعال با ابعاد ۲۵۰ در ۲۵۰ متر تقسیم‌بندی شد. شرایط مرزی مدل شامل جریان ورودی زیرزمینی در بخش‌های جنوبی و مرز خروجی در بخش شرقی است (شکل ۶). با توجه به آمار و اطلاعات موجود، دوره شبیه‌سازی از مهرماه سال ۱۳۸۰ تا مهرماه سال ۱۳۹۵ انتخاب شد. بازه بین سال های (۱۳۹۰-۱۳۸۰) به عنوان دوره واسنجی و سال‌های (۱۳۹۵-۱۳۹۰) به عنوان دوره صحت‌سنجی در نظر گرفته شد و سطح آب‌زیرزمینی محاسباتی و مشاهداتی در نقاط هدف (۱۱ چاه مشاهداتی) مقایسه شدند.



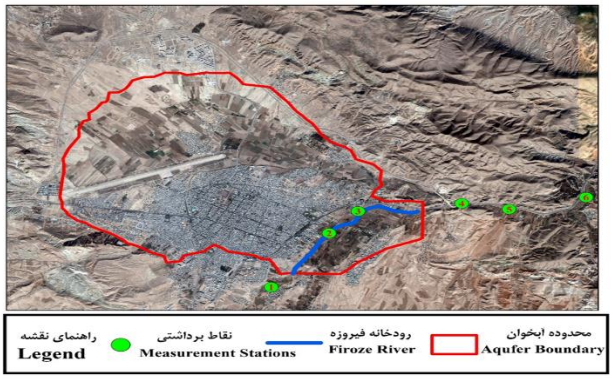
شکل ۲- موقعیت محدوده مطالعاتی در استان خراسان شمالی و محدوده دشت بجنورد

Figure 2- Location of Bojnourd plain in north Khorasan province



شکل ٤- موقعیت نقاط برداشت شده و رودخانه در بازدید دوم

Figure 4- Location of river flow measurement stations (the second visit)



شکل ۳- موقعیت نقاط برداشت شده و رودخانه در بازدید اول

Figure 3- Location of river flow measurement stations (first visit)

شکل ۵- موقعیت نقاط برداشت شده و رودخانه در بازدید سوم

Figure 5- River flow measurement stations (the third visit)

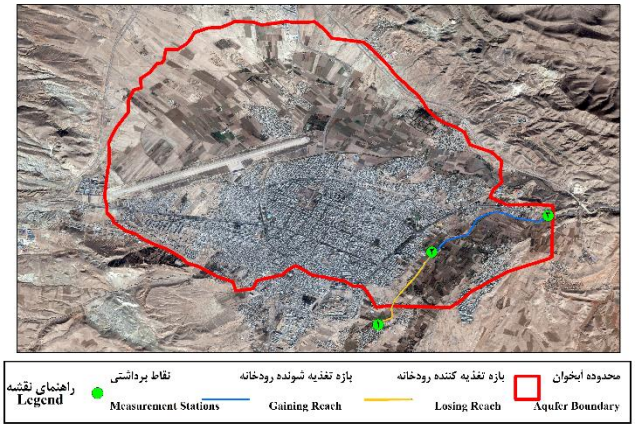
نتایج و بحث

نتایج بازدیدهای میدانی نشان داد بطور کلی در حد فاصل نقاط ۱ تا ۲ شکل ۶ رودخانه در نقش تغذیه کننده آبخوان و بازه دوم (حد فاصل نقاط ۲ تا ۳) در نقش تخلیه کننده آبخوان می‌باشد. در جدول ۱ دبی رودخانه در نقاط برداشتی آمده است. میزان تبادل بین هر دو نقطه با تفریق دبی هر دو نقطه متوالی تخمین زده شد. میزان تبادل مثبت نشان‌دهنده تخلیه رودخانه و میزان تبادل منفی نشان‌دهنده تغذیه رودخانه است.

جدول ۱- دبی ایستگاه های اندازه‌گیری در سه بازدید و تخمین مقدار تبادلات رودخانه و آبخوان

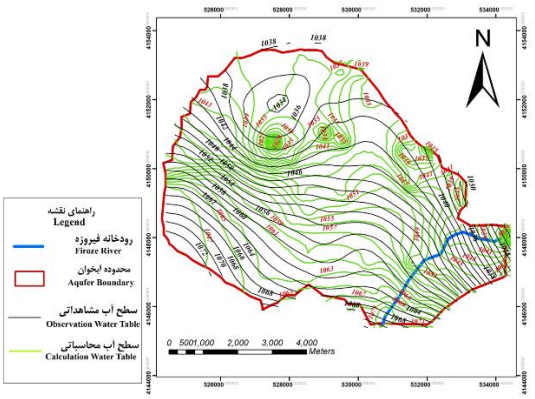
Table 1- Measured river flow and estimated river-aquifer interactions

دبی اندازه‌گیری شده در بازدید اول (L/s) Measured river flow in the first visit			دبی اندازه‌گیری شده در بازدید دوم (L/s) Measured river flow in the second visit			دبی اندازه‌گیری شده در بازدید سوم (L/s) Measured river flow in the third visit		
1	2	3	1	2	3	1	2	3
412	330	421	7	0	280	380	1	200
تبادل آبخوان و رودخانه بین نقاط ۱ و ۲ (Mm3/years) river-aquifer exchange flows between points 1 and 2	تبادل آبخوان و رودخانه بین نقاط ۲ و ۳ رودخانه (Mm3/years) river-aquifer exchange flows between points 2 and 3		تبادل آبخوان و رودخانه بین نقاط ۱ و ۲ رودخانه (Mm3/years) river-aquifer exchange flows between points 1 and 2	تبادل آبخوان و رودخانه بین نقاط ۲ و ۳ رودخانه (Mm3/years) river-aquifer exchange flows between points 2 and 3		تبادل آبخوان و رودخانه بین نقاط ۱ و ۲ رودخانه (Mm3/years) river-aquifer exchange flows between points 1 and 2	تبادل آبخوان و رودخانه بین نقاط ۲ و ۳ (Mm3/years) river-aquifer exchange flows between points 2 and 3	
0.64	-0.71		0.05	-2.18		5.89	-1.55	



شکل ٦- بازه تغذیه-تخلیه شونده رودخانه بر اساس نتایج بازدیدهای میدانی

Figure 6- Gaining and losing reaches recognized based on river flow measuring



شکل ۷- تراز مشاهده‌ای و محاسبه‌ای مهرماه سال ۱۳۹٤

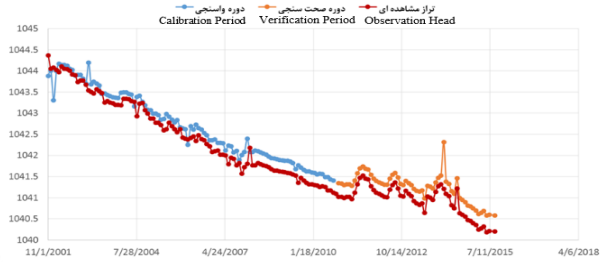
Figure 7- Observed and Calculated groundwater level in October, 2015

برای سال‌های واسنجی و صحت‌سنجی که داده سطح آب و دبی رودخانه موجود نبود، به کمک داده‌های ایستگاه باباامان که هم‌زمان در ماه‌های بازدید دارای داده‌های ذکر شده بودند، با تقسیم دبی رودخانه در بازدید بر دبی ایستگاه باباامان میزان سهم دبی رودخانه از باباامان با یک تقریب بدست آمد و در نهایت به کمک ضرایب هر فصل، دبی برای ماه‌هایی که در طول سه نقطه در رودخانه (ابتدا، وسط و انتها) بدست آمد. برای فصل پاییز که فاقد دبی بازدید بود از میانگین بهار و تابستان میزان دبی بدست آورده شد. همچنین با رسم نمودار دبی-سطح آب هر نقطه در سه بازدید و یافتن رابطه رگرسیونی برای سطح آب و دبی، با استفاده از دبی‌های بدست آمده در مرحله قبل سطح آب بدست آمد.

مدل‌سازی در حالت ماندگار آبخوان بجنورد برای مهرماه سال ۱۳۹۰ صورت گرفت. پس از اجرا و واسنجی، خطای مدل برابر ۰/۵۳ متر بود. در مدل غیرماندگار، خطای دوره واسنجی ۰/۸۳ متر و خطای دوره صحت‌سنجی ۱ متر بود. برای روشن‌تر شدن نتیجه مدل‌سازی شکل ۷ سطح آب مشاهده‌ای و محاسباتی مدل در مهر ۱۳۹۴ را نمایش می‌دهند. منحنی‌های تراز محاسباتی توسط مدل ترسیم شده و به دلیل اعمال اثرات هیدرولیکی، این منحنی‌ها با منحنی‌های حاصل از درون‌یابی ترازهای مشاهداتی در پیزومترها متفاوت می‌باشد اگرچه در محل پیزومترها مقادیر مشاهداتی و محاسباتی تطابق مناسبی نشان می‌دهند.

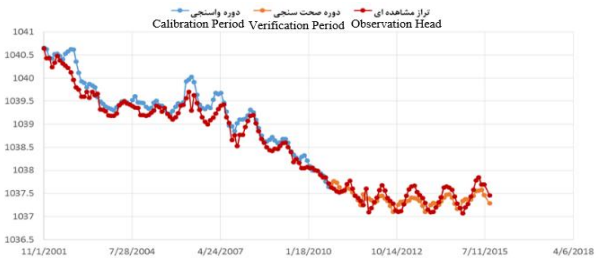
سطح آب مشاهداتی و محاسباتی در دو پیزومتر جاده لنگر و علی آباد از یازده پیزومتر موجود در منطقه مطالعاتی برای دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی به صورت اشکال ۸ و ۹ است که بر طبق آن توافق خوبی بین سطح آب مشاهداتی و محاسباتی وجود دارد.

به کمک بازدیدهای صورت گرفته و همچنین آمار ایستگاه هیدرومتری باباامان و فیروزه، دبی مشاهداتی برای دوره مدل‌سازی بدست آمد. پس از اجرای مدل در حالت غیرماندگار، دبی محاسباتی توسط مدل بدست آمد. امتداد رودخانه در مدل را به دلیل متفاوت بودن رفتار آن‌ها به دو قسمت تفکیک شد که نتایج دبی حاصل شده از مدل در هر کدام از بازه‌های رودخانه در طول دوره مدل‌سازی در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ آورده شده است.



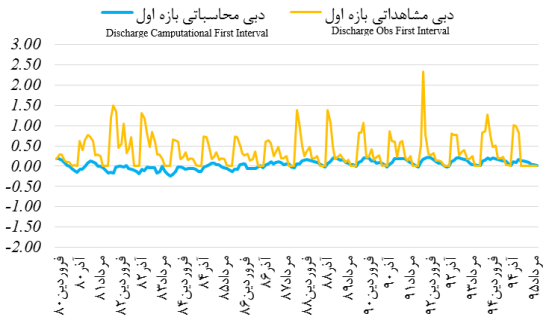
شکل ۸- سطح آب مشاهده‌ای و محاسباتی در پیزومتر جاده لنگر در دوره واسنجی و صحت‌سنجی

Figure 8- Observed and Calculated groundwater level in jade langar piezometer during calibration and verification periods



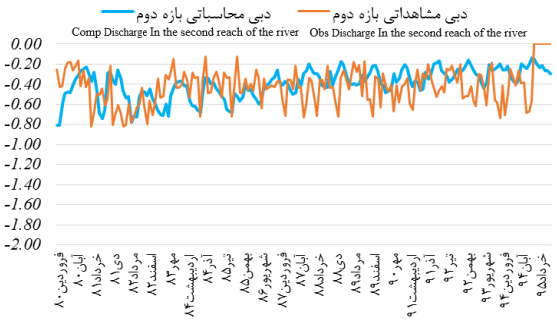
شکل ۹- سطح آب مشاهده‌ای و محاسباتی در پیزومتر جاده لنگر در دوره واسنجی و صحت‌سنجی

Figure 9- Observed and Calculated groundwater level in Aliabad piezometer during calibration and verification periods



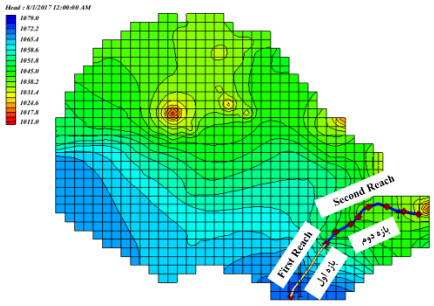
شکل ۱۰- دبی محاسباتی و مشاهداتی در بازه اول رودخانه

Figure 10- Computed and observed river flow in the first reach



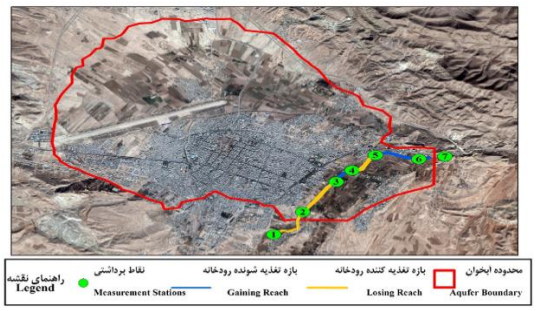
شکل ۱۱- دبی محاسباتی و مشاهداتی در بازه دوم رودخانه

Figure 11- Computed and observed river flow in the second reach



شکل ۱۲- دو بازه رودخانه در مدل و سطح آب ۲ مرداد ۱۳۹۶

Figure 12- Two river reachs in the model and the water level on 24 July 2017



شکل ۱۳- بازه‌های تغذیه-تخلیه شونده رودخانه در بازدید ۲ مرداد ۱۳۹۶

Figure 13- Gainig and losing reaches on 24 July 2017

با توجه به اینکه دبی رودخانه در بازه اول مثبت و در بازه دوم منفی است می‌توان نتیجه گرفت به طور کلی بازه اول رودخانه در نقش تغذیه کننده آبخوان و بازه دوم در نقش تخلیه کننده آبخوان می باشد که این موضوع با نتایج بازدیدهای میدانی سازگار است. در شکل ۱۲ دو بازه یاد شده مربوط به رودخانه در مدل با دو رنگ تفکیک شده است. همچنین در شکل ۱۳ قسمت‌های تغذیه-تخلیه شونده رودخانه منتج از بازدید میدانی سوم (۲ مرداد ۱۳۹۶) به ترتیب با رنگ‌های آبی و نارنجی مشخص شده است.

روشن است که با استفاده از مدل‌سازی میزان تبادلات رودخانه و آبخوان در مکان و زمان قابل حصول است در حالی‌که نتایج حاصل از اندازه‌گیری میدانی دبی فقط محدود به زمان و مکان خاصی بوده و هزینه زیادی را نیز در بر خواهد داشت. در جدول ۲ میزان تبادلات در چند نقطه از رودخانه در اسفندماه سال ۱۳۹۵ آمده است. مطابق این جدول در برخی نقاط رودخانه تغذیه کننده آبخوان و در برخی نقاط جهت جریان از آبخوان به رودخانه بوده و همچنین نقاطی از رودخانه وجود دارند که در طول گام زمانی مدل‌سازی در قسمتی از زمان تغذیه کننده آبخوان و در قسمت دیگر زهکش کننده آبخوان می باشند.

جدول ۲- بررسی تبادل رودخانه و آبخوان در نقاط مختلف

Table 2- The assessment of river-aquifer interactions in some points of the river

شماره نقاط Point's number	UTM X	UTM Y	وضعیت Condition	مقدار جریان (m^3/month) Flow rate
1	530791	4145768	تغذیه	67.72
7	531541	4147018	تغذیه/تخلیه	-7.19
8	531791	4147018	تخلیه	-11.95
18	533791	4148018	تغذیه/تخلیه	-10.12
20	534041	4148018	تغذیه	10.47

جدول ۳- میانگین سالانه مؤلفه‌های بیلان آب برآورد شده توسط مدل در طول دوره شبیه‌سازی بر حسب میلیون متر مکعب (MCM)

Table 3- Mean annual water budget components estimated by the model in simulation period (MCM)

جبهه ورودی Subsurface flow In	تغذیه Recharge	تغذیه آبخوان توسط رودخانه River Leakage In	تخلیه آبخوان توسط رودخانه River Leakage Out	جبهه خروجی Subsurface flowOut	چاه‌های برداشت Wells Discharge	تغییرات ذخیره Changes in aquifer storage
5.2	20	6.4	-4	-2.1	-21	4.5

در جدول ۳ نتایج حاصل از بیلان مدل‌سازی برای میانگین هر یک از مؤلفه‌های بیلان در بازه شبیه‌سازی ۱۵ ساله (۱۳۹۵-۱۳۸۰) آورده شده است. مطابق این جدول رودخانه مقدار ۲/۴ میلیون‌متر مکعب موجب تغذیه آبخوان شده است.

بیلان مدل در مقایسه با بیلان "گزارش مدل ریاضی آب زیرزمینی دشت بجنورد" شرکت آب‌منطقه‌ای خراسان شمالی سال ۱۳۹۳ به صورت زیر می‌باشد. در این گزارش مقادیر هر مؤلفه بیلان مربوط به سال ۱۳۹۰ است، به همین دلیل به‌منظور مقایسه از مقادیر مؤلفه‌های بیلان سال ۱۳۹۰ مدل‌سازی استفاده شد.

در مقایسه‌ای دیگر نتایج بیلان حاصل از مدل با نتایج بیلان گزارش "مطالعات جامع‌نگری منابع و مصارف شهر و دشت بجنورد" شرکت آب‌منطقه‌ای خراسان شمالی سال ۱۳۹۰ انجام شد. لازم به ذکر است که این گزارش مقادیر بیلان میانگین سال‌های ۸۰ تا ۹۰ است و به همین دلیل از میانگین ده ساله اجزای بیلان بازه زمانی سال‌های ۹۰-۸۰ مدل‌سازی به منظور مقایسه استفاده شد. در گزارش ذکر شده رودخانه مشخصا مورد بررسی قرار نگرفته و تغذیه ناشی از رودخانه به طور کلی و تحت عنوان "میزان آب نفوذی جریانات سطحی" و مقدار زهکش شده از آبخوان صفر در نظر گرفته شده است.

جدول ٤- مقایسه بیلان آب حاصل از این مطالعات با گزارش آب‌منطقه‌ای سال ۱۳۹۳

Table 4- Comparison of the water budget components reported in this study and regional water authority (2014)

مولفه بیلان Budget component	تغذیه Recharge (MCM)		تخلیه Discharge (MCM)		
	جبهه ورودی Subsurface flow In	بارش+ آب برگشتی Recharge from precipitation and return flows	رودخانه River	جبهه خروجی Subsurface flow out	تخلیه از چاه Well discharge	رودخانه River
مطالعه حاضر This study	5.2	20	6.4	-2.1	-21	-4
گزارش سال۱۳۹۳ Regional water authority (2014)	3	23	*-	-2	-25	*

*در این گزارش رودخانه در نظر گرفته نشده است.

*River-aquifer interactions have not been considered in this report.

پیش‌بینی

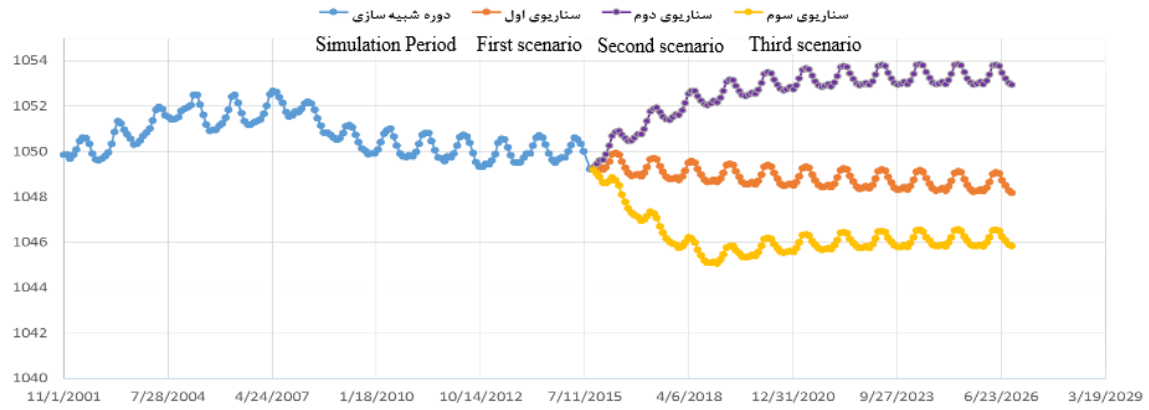
سناریوی اول: ادامه روند موجود

در این سناریو کلیه عوامل با فرض دستخوش تغییر قرار نگرفتن آن‌ها تا ده سال آینده با این هدف که هیچ تغییری در مدیریت منابع آب آبخوان صورت نگیرد به مدل اعمال شد. در اثر این سناریو در پایان دوره پیش بینی سطح آب‌زیرزمینی در حدود یک متر افت خواهد کرد که در شکل ۱۴ مشهود است.

جدول ۵- مقایسه بیلان آب حاصل از این مطالعات با بیلان گزارش آب‌منطقه‌ای سال ۱۳۹۰

Table 5- Comparison of the water budget components reported in this study and regional water authority (2011)

مؤلفه بیلان Budget component	تغذیه Recharge (MCM)			تخلیه Discharge (MCM)		
	جبهه ورودی Subsurface flow In	رودخانه (آب نفوذی جریانات سطحی) River	بارش+ آب برگشتی Recharge from precipitation and return flows	جبهه خروجی Subsurface flow out	تخلیه چاه‌ها Wells discharge	رودخانه (زهکش از آبخوان) River (drainage from aquifer)
مطالعه حاضر This study	5.6	6.9	18.9	-2.1	-20.4	-3.8
گزارش آب منطقه‌ای سال ۱۳۹۰ Regional Water Authority (2011)	6.87	3.97	12.24	-2.33	-21.14	0



شکل ١٤- هیدروگراف معرف آبخوان در اثر اعمال سه سناریو به مدل

Figure 14- Model-estimated composite groundwater level hydrograph for Bojnourd aquifer resulted from the different scenarios

سناریوی دوم: حذف چاه‌های شرب محدوده آبخوان به مدت ده سال

در این سناریو، برداشت از چاه‌های شرب آبخوان به مدت ده سال با فرض تامین آب شرب از خارج از آبخوان، متوقف می‌شود. در اثر رخداد این سناریو انتظار می‌رود که سطح آب زیرزمینی افزایش یابد. هیدروگراف واحد آبخوان شکل ۱۴ به خوبی گواه این موضوع است و با توجه به آن قابل مشاهده است که سطح آب حدود چهار متر افزایش می‌یابد.

سناریوی سوم: کسر۴۷٪ از تغذیه در پلیگون‌های محدوده شهر به دلیل اجرای سیستم فاضلاب و بررسی تأثیر آن بر سطح آب‌زیرزمینی تا سال ۱۴۰۰

با توجه به توسعه شهری و به طبع آن نیاز به اجرای سیستم فاضلاب، این سناریو با هدف بررسی تأثیر این رخداد بر سطح آب‌زیرزمینی در سطح شهر اعمال شد. بر اساس مطالعات انجام گرفته در صورت اجرای کامل سیستم فاضلاب در حدود ۴۷٪ از تغذیه آبخوان در ناحیه شهری که ناشی از نفوذ فاضلاب از طریق چاه‌های جذبی است از تغذیه آبخوان کم می‌شود (جعفری و همکاران، ۲۰۱۳). لذا در این سناریو میزان ۴۷٪ از تغذیه پلیگون‌های محدوده شهری کسر شد و تغذیه در مابقی پلیگون‌ها همان تغذیه سال آخر در نظر گرفته شد. این سناریو تأثیر اجرای سیستم فاضلاب را تا سال ۱۴۲۵ بر سطح آب‌زیرزمینی بررسی بدست می‌دهد. در شکل ۱۴ تأثیر این سناریو بر تأثیر آن بر روی هیدروگراف واحد آبخوان و همچنین بر پیزومترهای واقع در محدوده شهر نشان داده شده است.

نتیجه اعمال این سناریو به طور کلی پایین افتادن سطح آب‌زیرزمینی است که قابل پیش‌بینی هم بود. آنچه که جلب توجه می‌کند این است که در برخی مناطق شدت افت سطح آب بیشتر است که این مساله در مباحث مدیریت شهری اهمیت بسیاری دارد. قابل ذکر است که به دلایل شرایط فیزیکی آبخوان، پس از مدتی همه پیزومترها با تنش مذکور خود را هماهنگ کرده و سطح آب در

آن‌ها به تعادل می‌رسد. همچنین افت در پیزومترهای نزدیک به رودخانه به دلیل تغذیه ناشی از رودخانه کمتر است. پارامترهای معادله بیلان از جمله تبادلات آبخوان-رودخانه در اثر اعمال سه سناریو به صورت زیر است:

جدول ٦- مؤلفه‌های بیلان آب در دوره شبیه‌سازی و پیش بینی (میلیون متر مکعب)

Table 6- Model-estimated water budget components in simulation and prediction periods (MCM)

مؤلفه بیلان Budget component	جبهه ورودی Subsurface flow In	تغذیه Recharge from precipitation and return flows	نشت از بستر رودخانه River leakage	زهکشی توسط رودخانه Groundwater discharge drained by the river	جبهه خروجی Subsurface flow out	تخلیه چاه‌ها Wells discharge	تغییرات ذخیره In - out
دوره شبیه‌سازی Simulation	5.2	20	6.4	-4.2	-2.1	-21	4.5
سناریوی اول First scenario	3.8	22.5	6	-4.4	-2.6	-22	3.2
سناریوی دوم The second scenario	1.6	22.5	6.7	-4.3	-4.3	-16.4	5.8
سناریوی سوم The third scenario	6.8	14.9	4.9	-5.4	-2.2	-21	-2

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با استفاده از روش بیلان آب رودخانه (اندازه‌گیری میدانی دبی رودخانه در مقاطع مختلف) و شبیه‌سازی ارتباط آبخوان و رودخانه توسط مدل عددی مادفلو و واسنجی مدل توسط داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی مولفه‌های بیلان آب شامل تبادل آبخوان و رودخانه برآورد شد. نتایج نشان داد که در حالت فعلی بطور متوسط مقدار ۶/۴ میلیون‌متر مکعب در سال از بستر رودخانه به آبخوان نفوذ می‌کند در حالی‌که چهار میلیون متر مکعب در سال توسط رودخانه از آبخوان زهکش شده است. همچنین این نکته مشخص شد که تبادلات آبخوان و رودخانه در این منطقه قابل توجه بوده و نادیده گرفتن آن باعث می‌شود دیگر مؤلفه‌های بیلان با خطا برآورد شوند. در مطالعات قبلی مانند گزارشات آب منطقه‌ای و تحقیق جعفری و همکاران (۲۰۱۳) برای تبادلات بین رودخانه موجود در شهر بجنورد و آبخوان مقداری ذکر نشده که همین عامل سبب کم شدن دقت محاسبات می‌شود. در این تحقیق مقادیر تبادل رودخانه و آبخوان برای اولین بار با دقت مناسب برآورد شده است. همچنین ارزیابی سناریوهای ممکن در دشت بجنورد نشان می‌دهد که در صورت حذف چاه‌های شرب محدوده آبخوان سطح آب‌زیرزمینی افزایش یافته و مقدار بیشتری آب به رودخانه زهکش می‌شود. در این‌صورت امکان آلودگی آبخوان و رودخانه توسط فاضلاب شهری بسیار محتمل است. با اجرای کامل شبکه فاضلاب به‌دلیل کم شدن تغذیه آبخوان سطح آب‌زیرزمینی کاهش یافته و مقدار زهکشی به رودخانه افزایش می‌یابد. روش به‌کار گرفته شده در این مطالعه به منظور برآورد تبادلات رودخانه و آبخوان کم هزینه و مؤثر بوده و قابل اجرا در مناطقی با وجود ارتباط آب‌سطحی و آب‌زیرزمینی می‌باشد.

منابع

1- Chitsazan M., Nozarpour L., Nadri A., and Farhadimanesh M. 2016. Evaluation of the hydraulic relationship between the laur Andimeshk and Dez River aquifers using the MODFLOW model. Journal of Advanced Applied Geology .17. (In Persian)

2- Chitsazan M., Chavoshi Z., and Naseri H.R. 2016. Prediction of the interaction of aquifer-river in Daszelq plain, Khuzestan province using MODFLOW model. Journal of Iranian Water Research 9(4): 139-147. (In Persian)

3- Debsarkar P., Roy P.K., Banerjee G., and Mazumdar A. 2015. Study of impact on developed groundwater system around flow fields by using numerical approach in Purulia District. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research 7(1): 298-306.

4- Eckhardt K. 2005. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. Hydrological Processes 19: 507–515.

5- Healy R.W. 2010. Estimating GroundWater Recharge. 1nd ed.

6- Izady A., Davary K., Alizadeh A., Ziaei A.N., Akhavan S., Alipoor A., Joodavi A., and Brusseau M.L. 2014. Groundwater conceptualization and modeling using distributed SWATbased recharge for the semi-arid agricultural

Neishaboor plain, Iran. Hydrogeology Journal 23(1): 47-68.
7- Izady A., Abdalla O.A.E., Joodavi A., Karimi A., Chen M., and Tompson A. 2017. Groundwater recharge estimation in arid hardrock-alluvium aquifers using combined water-table fluctuation and groundwater balance approaches. Hydrological Processes 31: 3437–3451.
8- Jafari z., Ansari H., Faridhoseini A., Ziaei A.N., and Davari K. 2013. Using GMS to simulate the groundwater Flow in an urban Region (case study: bojnourd plain). MSc Thesis, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian with English abstract)
9- Joodavi A., Zare M., Raeisi E., and Ahmadi M.B. 2015. A multi-compartment hydrologic model to estimate groundwater recharge in an alluvial-karst system. Arabian Journal of Geosciences.
10- Karimi Z., porhamat J., Heidarizadeh M., and Kolahchi A. 2012. Investigation of the Effect of Surface Water on Groundwater Level of Mahidsht. Earth Magazine 7(23): 63-78. (In Persian)
11- Ketabchi H., Mahmoudzadeh D., and Farhodihafdaran R. 2017. Estimation of water exchange between wetland and aquifer (case study of canyrabzan wetland). Ecohydrology 4(3): 699-709. (In persian)
12- Movahedian A., and Chitsazan M. 2014. Investigating the interaction of aquifer and Karun river in Gotvand-Aghili plain using MODFLOW model. Watershed Research 111: 9-18.
13- Mansori R., Esmaili K., Ziaei A.N., Ansari H., and Khodashenas S.R. 2012.Study of River Flow Effects on Subsurface Water Diversion Using Porous Media in Seasonal Rivers. Journal of soil and Water 26(5): 1200-1214. (In Persian with English abstract)
14- North Khorasan Regional Water Company. 2014. Report of the Groundwater Mathematical Model of Bojnourd Plain, HydroTech Toos Consulting Engineers Co.
15- North Khorasan Regional Water Company. 2011. Holistic Studies uses and resources of the city and the plain Bojnoord, Consulting Engineers Toossab.
16- Nazari R., and Joodavi A. 2014. Applied Flow and Contaminant Transport Modeling in Aquifers. Mashhad.
17- Recio B., Ibanez J., Rubio F., and Criado J.A. 2005. A decision support system for analyzing the impact of water restriction policies. Journal of Decision Support System 39(3): 385-402.
18- Sinton P., Flynn J., Dixon R., Bonton D., Smith L., and Moreno J. 2011. Modflow and more 2011-Integrated Hydrologic Modeling, International Groundwater Modeling Center (IGWMC).
19- Shaki A.A., and Adeloy A.J. 2007. Mathematical modelling of effects of Irawan irrigation project water abstractions on the Murzuq aquifer systems in Libya, Journal of Arid Environments,Article in Press, Elsevier 2: 133-156.
20- Tetreault M., and Hulley M. 2011. Modflow and more 2011-Integrated Hydrologic Modeling, International Groundwater Modeling Center (IGWMC).
21- Wang S., Shao J., Song X., Zhang Y., Huo Z., and Zhou X. 2008. Application of MODFLOW and geographical information system to groundwater flow Simulation in North Plain, China. Environmental Geology 55: 1449-1462.
22- Winter T.C., Harvey J.W., Franke O.L., and Alley W.M. 1998. Ground water and surface water; a single resource. US Geological Survey Circular 1139.

Journal of Water and Soil
Vol. 33, No. 5, Nov.-Dec. 2019, p. 671-683

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۳، شماره ۵، آذر – دی ۱۳۹۸، ص. ۶۸۳-۶۷۱

Investigation of River-aquifer Interactions in Bojnourd Plain Using Reach Measurements and Numerical Modeling

S. Sarvari[1]- A.N. Ziaei[2]*- A. Joodavi[3]
Received: 10-09-2018
Accepted: 20-05-2019

Introduction: Understanding water budget components is crucial for making decisions regarding water resources planning and management. Surface water–groundwater interactions are commonly investigated at the river reach scale and generally classified as connected or disconnected type systems. Connected systems are either gaining surface water system, where groundwater discharges through the streambed to contribute to streamflow, or losing surface water system which loses (or recharges) water to the local groundwater system. Disconnected systems are defined by an unsaturated zone beneath the surface water system which loses water at a rate related to the hydrogeological properties of the streambed and the aquifer. These interactions have significant implications for both water quantity and quality. Seepage of fresh groundwater into a river can be important in maintaining flows during extended dry periods. This can be critical for supplying the needs of surface water users such as irrigators as well as for aquatic ecosystems. Pumping from an aquifer near a river can dramatically change the amount of this base-flow to the river. In contrast, if the groundwater is contaminated, increased groundwater discharge can have a negative effect on river water quality. The Bojnourd catchment is located in North Khorasan province. The catchment covers an area of about 1265.8 km^2. The main river in this area, Firouze River, is approximately 10 km in length, and is hydraulically connected to the Bojnourd alluvial aquifer. The alluvial aquifer of Bojnourd plain with 65.2 km^2 area is mostly covered by urban area. Hence, effective management of water quantity and quality issues in the Bojnourd catchment requires quantifying flow between surface water and groundwater. Furthermore, conveying water from the outside of basin caused water table to rise which made some problems for urban buildings and infrastructures. Therefore, the river and aquifer interaction needs to be studied more comprehensively.

Materials and Methods: Numerous techniques and methods are available to describe and quantify the flow between surface water and ground water. This study combined two methods, numerical modeling using MODFLOW code and reach measurements, to quantitatively evaluate groundwater/surface water interactions under highly transient conditions. The groundwater flow system of the study area was conceptualized based on borehole logs, pumping tests, and available hydrogeological and geophysical information. Moreover, field work, including measuring streamflow in three seasons, was carried out to conceptualize and quantify the groundwater/surface water interactions. Following the conceptual model, the numerical model was developed to simulate flow through the system. The model grid had 1274 active cells with a uniform cell spacing of 250×250 m. The water exchanges between the main regional river, Firouze river, and Bojnourd aquifer was simulated using the River (RIV) package. Both hydraulic head target and flux target were used to calibrate the model. The head targets were compiled from the monitoring network which contains 11 observation wells. The flux targets were located in three measurement points along the Firouze river. The data obtained from the fieldwork were used as observed values for the groundwater/surface-water exchanges. The transient model was calibrated and validated for 15 hydrological years, i.e. from 1 October 2001 to 1 October 2016

Results and Discussion: Model performance was evaluated using root-mean-square error (RMSE). The model results were in agreement with corresponding observed data, including groundwater heads and measured groundwater/surface-water exchanges. The RMSE values during calibration and validation periods were 0.83 m and 1 m, respectively. Analyzing water balances resulted from transient simulation showed that Firouze river is gaining in some reaches and losing in other reaches. In losing reaches, the total flux into the aquifer is 6.4 MCM per year. In gaining reaches, the volume of groundwater discharges through the streambed is about 4 MCM per year. Furthermore,

1 And 2- M.Sc. in Water Science and Engineering and Associate Professor, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, respectively.
(*- Corresponding Author Email: an-ziaei@um.ac.ir)
3- Ph.D. in Hydrogeology, Department of Hydro Informatics, East Water and Environment Research Center

the effect of several management scenarios, including continuing the existing condition, turning the domestic wells off and implementing a sewage system by 2025, on groundwater heads and groundwater/surface-water exchanges was examined using the numerical model. Results showed that by implementing the sewage system, the volume of water discharged to the river would decrease, but it will prevent aquifer and river contamination caused by sewage water.

Conclusion: In this study, groundwater budget components in Bojnourd aquifer including groundwater/surface-water exchanges were calculated. The results showed that understanding of these surface water-groundwater interactions, which has been ignored in previous studies, is important for effective management of water quantity and quality issues in Bojnourd plain. Moreover, the methodology used in this study including numerical modeling and measuring flow at multiple points along the stream is effective and easy to apply to estimate the direction and magnitude of seepage on a stream reach basis.

Keywords: Bojnourd plain, GMS, Groundwater feeding, MODFLOW, River and aquifer exchange