شبیه‌سازی اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی در شرایط بهره‌برداری تلفیقی (مطالعه موردی: دشت دز)

آرش آذری[1*]، علی محمد آخوندعلی[2]، فریدون رادمنش[3] و علی حقیقی[4]

۱*- نویسنده مسئول،دانشجوی دکتری هیدرولوژی دانشگاه شهید چمران اهواز arashazari.ir@gmail.com

۲- استاد گروه هیدرولوژی و منابع آب دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- استادیار گروه هیدرولوژی و منابع آب دانشگاه شهید چمران اهواز

۴- استادیار گروه عمران دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت: ۹۲/۶/۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۰/۱۵

چکیده

بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی محققین منابع آب می‌باشد. استفاده تلفیقی در واقع، بهره‌برداری از منبع آب سطحی و زیرزمینی به منظور افزایش میزان آب قابل دسترسی و استفاده پایدار از منابع آبی موجود است. از این رو برنامه‌ریزی صحیح در این زمینه مستلزم آگاهی از نحوه برهم کنش آب سطحی و زیرزمینی در منطقه‌و تخمین و محاسبه پارامترها و عوامل سطحی و زیرزمینی موثر بر آن می‌باشد. بنابراین از اهداف اساسی مطالعه جاری، شبیه‌سازی برهم کنش آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از ایجاد اتصال دینامیکی بین منابع آب سطحی و زیرزمینی در دشت دز (شامل دشت‌های لور، دیمچه، دز غربی، دز شرقی و سبیلی) است، به طوری که داده‌ها و نتایج به‌طور ماهیانه بین مدل آب‌سطحی ویپ و مدل آب‌زیرزمینی مادفلو در گردش می‌باشد. لذا در هر گام زمانی ماهانه مقادیر برداشت، نفوذ، تراز رودخانه‌ها، رواناب و غیره از مدل ویپ وارد مدل مادفلو شده تا مقادیر تراز آب زیرزمینی، جریان بین آبخوان‌ها و غیره محاسبه و به مدل ویپ برگردد و این روند تا پایان دوره شبیه‌سازی ادامه خواهد داشت. نتایج نشان داد در قسمت‌های شمالی تا میانه دشت، رودخانه‌های دز و کرخه بیشتر باعث تغذیه آبخوان شده و در قسمت‌های میانه دشت به پایین (مانند سایر رودخانه‌های دشت دز) بیشتر نقش زهکش را به عهده دارند. به علت تراکم زیاد چاه‌ها و عدم بهره‌برداری از آب سطحی بیشترین افت سطح آب مربوط به دشت لور و کمترین افت مربوط به قسمت‌های جنوبی دشت محاسبه شد. همچنین نتایج نشان داد به‌طور کلی در دشت دز در مناطقی که از هر دو منبع تامین آب استفاده می‌شود، بیش از ۸۰ درصد از نیازها توسط آب سطحی و کمتر از ۲۰ درصد توسط آب زیرزمینی تامین می‌شود.

کلید واژه ها: برهم کنش آب سطحی و زیرزمینی، موازنه آب ، ویپ، مادفلو.

Groundwater–Surface Water Interaction Simulation in Terms of Integrated Water Resource Management (Case Study: Dez Plain)

A. Azari[1*], A. M. Akhoond-Ali[2], F. Radmanesh[3] and A. Haghighi[4]

1*- Ph. D Candidate of Shahid Chamran University, College of Water Science Engineering, Ahvaz-Iran.
2- Professor of Shahid Chamran University, College of Water Science Engineering, Ahvaz-Iran.
3- Assistant Professor of Shahid Chamran University, College of Water Science Engineering, Ahvaz-Iran.
4- Assistant Professor of Shahid Chamran University, College of Technical Engineering, Ahvaz-Iran.

Received: 3 September 2013 Accepted: 5 January 2014

Abstract

One of the important challenges for water resource researchers is Integrated Water Resource Management (IWRM). Indeed, IWRM is conjunct surface- ground water operation for sustainable water use and increase of available water. Hence, normative planning in this area requires knowledge

of surface- ground water interaction process, estimation of effective parameters and factors affecting inside the system. So the basic objective in current study is surface- ground water interaction simulation in terms of dynamic coupling between ground and surface water in Dez plain (consist of five under plain: Loor, Dimcheh, Dez-Gharbi, Dez-Sharghi, Sabili). When properly linked, data and results flow back and forth between WEAP and MODFLOW for each calculation time step and for any feedback WEAP value for groundwater infiltration and abstraction, river stage and surface runoff will be sent to MODFLOW as inputs for its calculations, and MODFLOW results for (head), lateral flow between aquifers, and etc. come back to WEAP as inputs for its calculations. Results illustrate that in northern to central parts of the plain, aquifer recharge by Dez and Karkheh rivers. Most of the times these rivers in central to southern parts of the plain act as drainage (such as other rivers in Dez plain). Simulation results illustrate that due to operation of deep wells as the only available water source in Loor, Maximum drawdown was done in this area. However water table increased in Dimcheh. Generally in areas of Dez plain, where focuses on sustainable conjunctive use of surface and ground waters, water demands will be coverage more than 80% by surface water and 20% by ground water.

Key words: Groundwater–surface water interactions, Water Balance, WEAP, MODFLOW.

مقدمه

به منظور کاهش مشکلات اساسی مخزن سطحی بزرگ و یا آبخوان‌هایی که هر کدام جداگانه مدیریت شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند، سیستم بهره‌برداری تلفیقی متشکل از دو زیر سیستم آب سطحی (مخزن سطحی و رودخانه) و آب زیرزمینی به عنوان رویکردی برتر در مدیریت منابع آب می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به اینکه دشت مستعد دز جزء منابع اصلی در تولیدات کشاورزی و فرآورده های جانبی دیگر در کشور می‌باشد، هرگونه اختلال در توزیع آب بخصوص در شرایط خشکسالی، آثار جبران ناپذیری بر فعالیت‌های اقتصادی، اجتماعی و به تبع آن مسائل سیاسی و فرامنطقه‌ای خواهد گذاشت. از این رو برنامه ریزی صحیح در این زمینه مستلزم آگاهی از نحوه برهم کنش آب سطحی و زیرزمینی در منطقه و تخمین و محاسبه پارامترها و عوامل سطحی و زیرزمینی موثر بر آن می‌باشد. اجرای این امر باعث محققین منابع آب درک بهتری از موضوع داشته و با شناسایی اجزای دخیل در برنامه‌ریزی یکپارچه منابع آب، از ذخایر منابع آب سطحی و زیرزمینی با حداکثر مطلوبیت استفاده نمایند. در این صورت اثر تغییرات تراز آب زیرزمینی بر میزان منابع آب سطحی تخصیص داده شده و یا برعکس، در سال‌های خشک و تر قابل رؤیت خواهد بود. در چهار دهه اخیر فنون تحلیل سیستم ها در برنامه ریزی و مدیریت منابع آب مورد توجه محققان مهندسی منابع آب قرار گرفته است. انواع مدل‌های به‌کار رفته در این گونه مسائل به سه دسته مدل‌های شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و ترکیب شبیه‌سازی و بهینه‌سازی تقسیم می‌شوند. مدل‌های شبیه‌سازی بر اساس "اگر آنگاه" استوار است. این به آن معنا است که تحت یک طراحی و یا سیاست بهره برداری، به احتمال زیاد در هر زمان و در یک یا چند مکان چه اتفاقی خواهد افتاد. مزیت روش‌های شبیه‌سازی در توانایی آنها برای حل مدل‌هایی از تحلیل سیستم‌های منابع آب است که دارای روابط و قیدهای غیر خطی هستند. در حالی که روش‌های بهینه‌سازی به ندرت توانایی رسیدگی به آنها را دارند. بیشتر این روشها توسط لاکس و همکاران[1] (۲۰۰۵) شرح داده شده‌اند. یکی از اولین مطالعاتی که در زمینه بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی انجام شد توسط براس[2] (۱۹۶۳) ارائه گردید. در مدل تهیه شده مذکور، از تلفیق منابع آب سطحی (سد) و زیرزمینی برای تامین نیاز آبی اراضی کشاورزی استفاده شد و تغذیه مصنوعی از سد به آبخوان نیز مد نظر قرار گرفت. راشتون و تام لینسن[3] (۱۹۸۲)، یک مدل شبیه‌سازی برای استفاده توام از سیستم ذخیره سطحی و آبخوان با بستر سنگ آهکی ارائه دادند. در این تحقیق پنج حالت عملکردی برای سیستم در نظر گرفته شد که در هر حالت زمان و نحوه پمپاژ از مخزن سطحی و آب زیرزمینی تعیین شد. کو[4] (۱۹۹۰) استفاده همزمان از سیستم آب سطحی و زیرزمینی و مزایا و معایب آن را مورد بررسی قرار داد و نشان داد که این سیستم ها باعث افزایش کارایی و کاهش هزینه نسبت به استفاده از تعداد بیشتری سد و مخزن مجزا، می‌شود. جان و همکاران[5] (۲۰۱۰) با مطالعه روند پیشرفت مدل‌های ریاضی به بررسی عوامل موثر در اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی در محدوده حوضه آبریز پرداختند. نتایج نشان داد مجموعه‌ای از عوامل محیطی

1- Loucks *et al.*
2- Buras
3- Rashton and Tomlinson
4- Coe
5- Jan *et al.*

شامل دما و شوری آب، عوامل هیدرولیکی مانند مقاطع رودخانه و سطح خیس شده و پارامترهای هیدرولیکی آبخوان، نحوه توزیع و برداشت آب در حوضه و غیره در این امر موثر می‌باشند. نوید و تئو[1] (۲۰۱۱) مدل‌سازی استفاده تلفیقی از آب‌های سطحی و زیرزمینی را در حوضه رود سند با استفاده از مدل IBMR[2] در شرایط افزایش ارتفاع سد منگلا بر روی این رودخانه انجام دادند و اثر آن را بر تعادل بلند مدت آب زیرزمینی بررسی نمودند. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد افزایش ارتفاع سد به اندازه ۹ متر باعث پایداری استفاده از آب زیرزمینی شده و در دسترس بودن آب را تا ۶۸ درصد افزایش می‌دهد. یای و شنگ[3] (۲۰۱۱) با بررسی پارامترهایی مانند رواناب، بارش، آبیاری، زهکشی، تبخیر و تعرق و نشت با استفاده از روشی موسوم به روند جریان خروجی[4]، رابطه متناظر بین نشت از رودخانه به آبخوان و برعکس را در هشت بازه از رود ریو گراند[5] تخمین زدند. بر اساس این مطالعات این رابطه در پنج بازه ابتدایی به‌صورت خطی و در سه بازه انتهایی به‌صورت نمایی بود. سه بازه انتهایی رودخانه بیشتر به عنوان زهکش عمل می‌نمود.

زامپیری و همکاران[6] (۲۰۱۲) با انجام تغییراتی در مدل CLM و اضافه کردن پارامترهایی مانند دمای سطح زمین و رطوبت خاک تا حدودی در مقیاس منطقه‌ای اقدام به شبیه‌سازی اندرکنش آب رودخانه و آب زیرزمینی نمودند و نتایج نشان داد این دو پارامتر در برآورد صحیح موازنه آب و انرژی در محدوده اندرکنش موثرند. شمسایی و فرقانی (۱۳۹۰) به تدوین الگوی ماهیانه برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی پرداختند. طبق نتایج به دست آمده، تغییر الگوی برداشت باعث کاهش افت تراز آب زیرزمینی به میزان دو متر خواهد شد و در صورت افزایش ۴۰ درصدی انتقال آب بین حوضه‌ای به منطقه افت تراز به صفر می‌رسد. زیبایی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از یک مدل ریاضی در دشت فیروزآباد نشان دادند که استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی با اعمال محدودیت‌های مدیریتی و هیدرولوژیکی منجر به افزایش بهره‌وری آب به میزان ۱۳ درصد خواهد شد. در تمامی تحقیقات موجود در زمینه بهره‌برداری تلفیقی، توجهی به اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی و اجزای دخیل در آن در شرایط اتصال دینامیکی نشده است. بنابراین از اهداف اساسی مطالعه جاری، شبیه‌سازی برهم کنش آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از ایجاد اتصال دینامیکی یکپارچه بین منابع آب سطحی و زیرزمینی در منطقه توسط مدل‌های ریاضی مربوطه می‌باشد. در مدل ارائه شده در این تحقیق بر خلاف مدل‌های پیشنهادی که تاکنون ارائه شده، تمامی اجزاء و پارامترهای دخیل در دو سیستم آب سطحی و زیرزمینی و ارتباط دینامیکی و هیدرولیکی بین آن‌ها و تحلیل‌های درون سیستمی در منطقه مطالعاتی شبیه‌سازی شده است. طوری که داده‌ها و اطلاعات بین این دو سیستم در گردش بوده و این گردش در هر یک از بازه‌های زمانی اتفاق می‌افتد. از اهداف دیگر این تحقیق بررسی سهم هر یک از منابع سطحی و زیرزمینی در تامین آب منطقه و استخراج پارامترهای تاثیر گذار در این زمینه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

دشت دز به عنوان یکی از وسیع ترین دشت‌های ایران، دارای پنج زیر دشت به نام های دشت سبیلی واقع در شمال شرقی شهرستان دزفول، دشت لور واقع در شمال غربی شهرستان دزفول، دشت‌های دز شرقی و دز غربی به ترتیب در شرق و غرب رودخانه دز و دشت دیمچه واقع در غرب رودخانه کهنک می‌باشد (شکل ۱). به دلیل وجود سازند نفوذ پذیر کنگلومرای بختیاری و امکان تغذیه آبخوان‌های موجود در اکثر مناطق دشت، بیش از ۳۰۰۰ حلقه چاه به‌صورت مجاز و غیر مجاز حفر شده است (خواجه پور و همکاران، ۱۳۹۰). در قسمت اعظمی از محدوده مطالعاتی، بهره‌برداری از آب سطحی توسط شبکه گسترده آبیاری و زهکشی سد دز انجام می‌شود. در دشت دیمچه، برداشت از سد تنظیمی گتوند توسط کانال‌های انتقال آب و در برخی مناطق برداشت مستقیم از رودخانه دز صورت می‌گیرد. مساحت ناخالص اراضی قابل کشت این دشت در محدوده مطالعاتی حدود ۱۵۹۰۰۰ هکتار بوده که ۱۲۵۰۰۰ هکتار آن تحت شبکه آبیاری و زهکشی دز و ۳۴۰۰۰ هکتار تحت کشت نیشکر کارون و هفت تپه می‌باشد.

منابع اصلی تامین آب سطحی منطقه سد مخزنی دز، رودخانه و شبکه آبیاری پایین دست سد و سد تنظیمی گتوند می‌باشد. علاوه بر آب سطحی منبع دیگر تامین آب منطقه، منبع آب زیرزمینی با استفاده از چاه‌های عمیق و نیمه عمیق در سطح دشت است که تراکم چاه‌ها بخصوص در نیمه شمالی دشت به‌علت آبدهی مناسب و عدم وجود شبکه آبیاری، بیشتر است. در منطقه مطالعاتی حدود ۲۴۵۰ حلقه چاه فعال وجود دارد. مقادیر نیاز ماهیانه مصارف مختلف (کشاورزی، شرب و صنایع کوچک، واحدهای پرورش ماهی، کارخانجات نیشکر هفت تپه، کاغذسازی پارس و شرکت حریر خوزستان) در مدل تعریف شد. همچنین نیازهای پایین دست منطقه شامل طرح نیشکرهای میاناب، دهخدا، امام خمینی غربی، اراضی کشاورزی شعیبیه غربی و نیاز حقابه بران، نیاز زیست محیطی، تغذیه مصنوعی رودخانه کرخه توسط دز و سایر نیازها محاسبه شده و در مدل وارد شد. نیازها در دشت‌های دز غربی، دز شرقی و سبیلی از دو منبع آب سطحی و زیرزمینی تامین می‌شود. در دشت لور تمام نیازها از آب زیرزمینی تامین می‌شود و در دشت دیمچه نیز که کاملاً به

1- Naveed and Theo
2- Indus Basin Model Revised
3- Yi and sheng.
4- trend-outflow method
5- Rio Grande
6- Zampieri *et al.*

کشت نیشکر اختصاص دارد، آب کشاورزی از منبع آب سطحی و آب شرب از منبع آب زیرزمینی تامین می‌گردد. اولین بخش از اجرای این تحقیق مدل‌سازی دو سیستم آب سطحی و زیرزمینی است که با استفاده از مدل‌های ویپ[1] و مادفلو[2] در یک دوره شبیه‌سازی شش ساله (مهر ۱۳۸۵ تا شهریور ۱۳۹۱) انجام شد. برای مدل‌سازی آب سطحی، ابتدا محدوده مطالعاتی مورد نظر را در مدل تعریف کرده و نقشه‌های پایه مربوط به مدل، در محیط GIS تهیه شد. این نقشه‌ها شامل محدوده مورد نظر جهت برنامه ریزی منابع آب، مرزها، جانمایی رودخانه‌ها، منابع آب سطحی و زیرزمینی و تمامی عوارض مرتبط با طرح بود که در هدایت و ساخت سیستم و تعیین چارچوب اصلی مدل مورد استفاده قرار گرفت. پس از آن اجزای مدل شامل سد و نیروگاه دز، مسیر رودخانه‌ها، مقاطع رودخانه‌ای، ایستگاههای هیدرومتری و دبی آنها، نقاط برداشت آب و برگشت آب و میزان هر یک، مصارف کشاورزی، شرب و صنعت شهری، مصارف روستایی، مصارف پایین دست و نیاز زیست محیطی و ... تعریف شد. به منظور محاسبه تغییرات آبدهی و ذخیره مخزن و سایر مولفه‌های بهره‌برداری، از رابطه توازن جرمی برای سیستم به صورت زیر استفاده شد:

$$S_{t+1} = S_t + Q_{t+1} - RD_t - SPL_t - RE_t - (EVAP_t - P_t) \quad (۱)$$

S_{t+1}: حجم مخزن در انتهای دوره t

S_t: حجم مخزن در ابتدای دوره t

Q_t: حجم جریان ورودی به مخزن در طی دوره t

RD_t: حجم جریان خروجی از مخزن جهت تامین نیازهای آبی پایین دست در طی دوره t

SPL_t: حجم سرریز از مخزن در طی دوره t

RE_t: حجم جریان خروجی از مخزن برای تولید انرژی در طی دوره t

$EVAP_t$: حجم تبخیر از مخزن سد طی دوره t

P_t: حجم بارش روی مخزن سد طی دوره t

بر اساس رابطه فوق شبیه‌سازی بهره‌برداری از مخزن انجام شد و مولفه‌های مختلف مورد محاسبه قرار گرفت. پارامترهای بهره‌برداری سد دز، مانند دبی ورودی به مخزن، تراز نرمال، حداقل تراز بهره برداری، حجم مخزن در این ترازها، حجم غیر مفید مخزن، حداکثر جریان عبوری از توربین و دریچه ها، ضریب بافر، راندمان تولید و ضریب کارکرد نیروگاه، تبخیر خالص ماهیانه، دبی خروجی و تراز پایاب نیروگاه و غیره در مدل تعریف شدند.

چنانچه حجم حداقل بهره بردرای مخزن $S_{\min}$ و حجم حداکثر آن $S_{\max}$ باشد در این صورت:

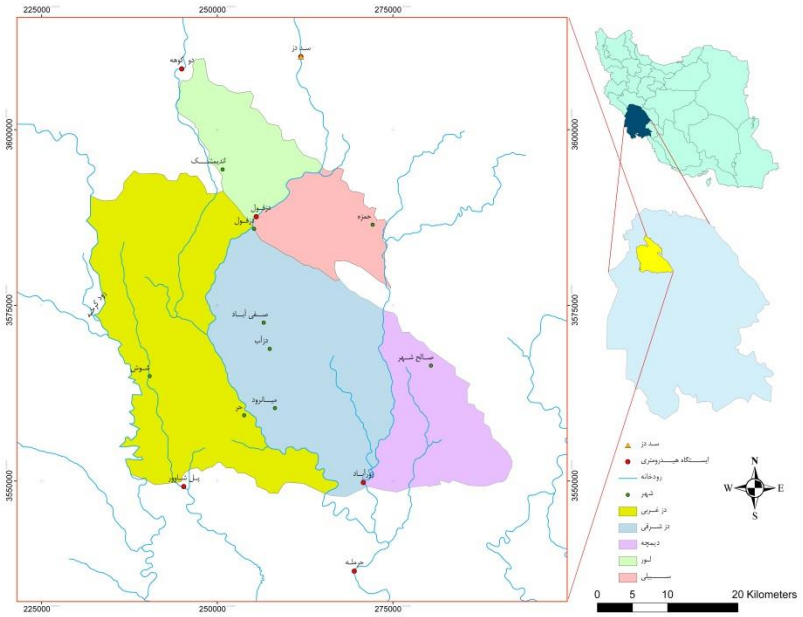
اگر $S_{\min} < S_t < S_{\max}$ باشد تمام یا بخشی از نیاز آبی پایین دست تأمین خواهد شد، در صورتی‌که در این محدوده، مجموع حجم آب ذخیره شده در مخزن سد و آورد رودخانه در محل سد در یک دوره برابر مجموع نیازهای آبی آن دوره بیشتر باشد، کل نیاز تأمین خواهد شد و کمبود یا سرریز وجود نخواهد داشت. اما اگر کمتر باشد در این صورت بخشی از نیاز آبی اراضی تأمین می‌گردد و همچنان سرریز وجود ندارد.

اگر $S_t > S_{\max}$ باشد، با توجه به محدودیت حد بالای مخزن ($S_t \le S_{\max}$) این حجم برابر حجم حداکثر گردیده و مقدار حجم اضافی ($S_t - S_{\max}$) به عنوان سرریز در نظر گرفته می‌شود. در این حالت نیز مانند حالت قبل کمبودی در آب مورد نیاز وجود نخواهد نداشت.

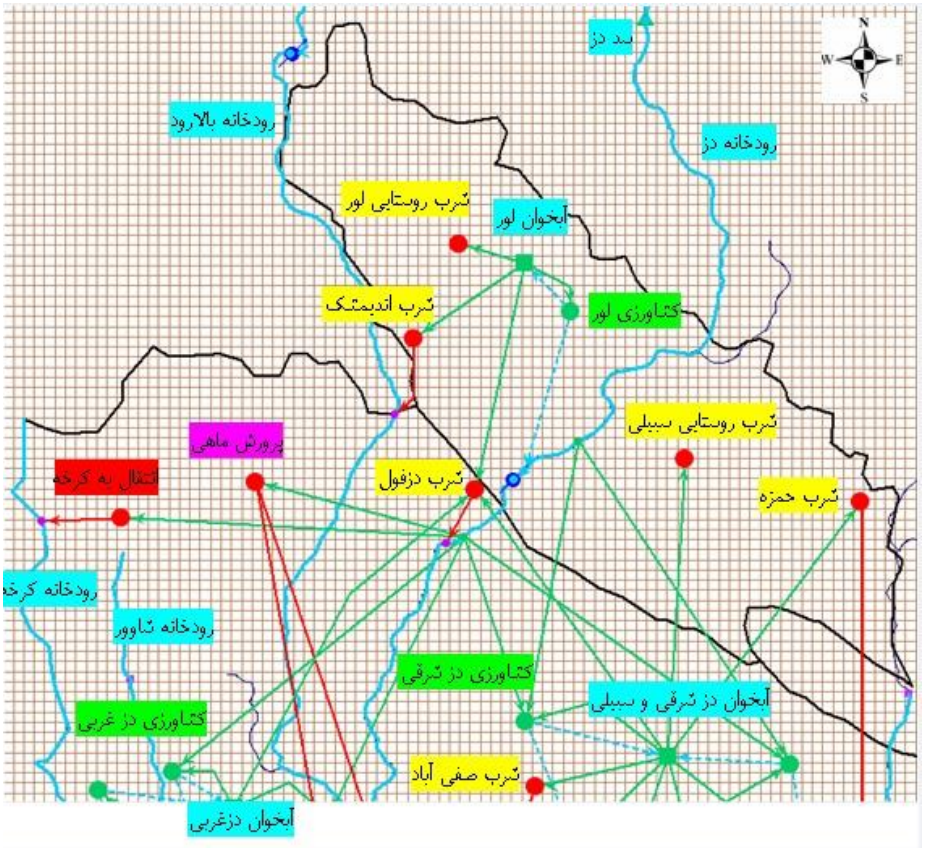
اگر S_t در محدوده ذخیره حداقل مخزن باشد، با توجه به محدودیت حد پایینی مخزن ($S_t \ge S_{\min}$) در صورت کم آبی شدید، حجم S_t برابر حجم حداقل مخزن گردیده و در این شرایط در تأمین آب مورد نیاز پایین دست با کمبود مواجه خواهیم شد.

در بدنه مدل آب سطحی، گره‌های آب زیرزمینی و مصارف مربوط به آن نیز جهت اتصال به مدل آب زیرزمینی در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است برای محاسبه پارامترهایی مانند رواناب ناشی از بارش در سطح منطقه، میزان آب آبیاری و میزان نفوذ یا برگشت آن از طریق زهکش‌ها و میزان نیاز آبی کشاورزی از روش پیچیده رطوبت خاک در مدل آب‌سطحی استفاده شد. در مدل آب زیرزمینی پس از جمع آوری آمار و اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری و معرف منطقه، آزمایش‌های پمپاژ صورت گرفته، شبکه پیزومتری، آمار هواشناسی و پارامترهای مرتبط با آن، وضعیت توپوگرافی و زمین شناسی منطقه، وضعیت آب‌های سطحی مانند رودخانه‌ها و غیره، مدل مفهومی و سطح و شرایط مرزی مدل تهیه شد. شبکه بندی مدل با تعداد ۱۶۷۲۸ سلول (۱۳۶ ردیف و ۱۲۳ ستون) با فواصل ۵۰۰ متر انجام شد که شامل ۸۲۹۹ سلول فعال بود. معادله دیفرانسیل مشتقات جزئی جریان آب‌های زیرزمینی که در مادفلو مورد استفاده قرار گرفت به شکل زیر می‌باشد (مک دونالد و هاربا[3]، ۱۹۹۸).

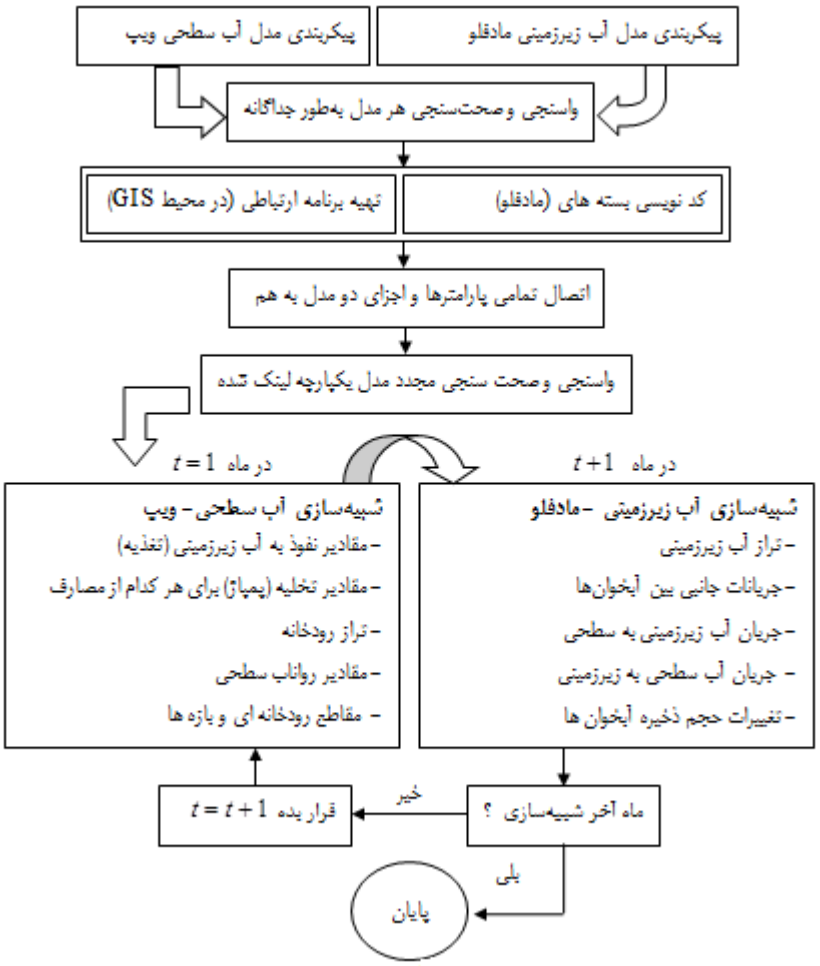
1- WEAP
2- MODFLOW
3- McDonald and Harbaugh



شکل ۱- محدوده مطالعاتی، موقعیت دشت‌ها، رودخانه‌ها، شهرها و ایستگاه‌های هیدرومتری



شکل ۲- قسمتی از مدل یکپارچه آب سطحی و زیرزمینی در بخش شمالی محدوده مطالعاتی در حالت اتصال پویا



شکل ۳- چرخش داده‌ها و نتایج در مدل متصل شده آب سطحی و زیرزمینی در هر ماه در طول دوره شبیه‌سازی

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial h}{\partial z}\right)+W=S_S\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (۲)$$

در این معادله:

K_x، K_y و K_z: مقادیر هدایت هیدرولیکی در راستای محورهای X، Y و Z بوده که راستای این محورها با راستای اصلی هدایت هیدرولیکی موازی است (L/T).

h: بار هیدرولیکی (L)

W: جریان حجمی بر واحد حجم می‌باشد که معرف منبع تغذیه یا تخلیه آب است. برای جریان خروجی از آب‌های زیرزمینی $W<0$ و برای جریان ورودی به آب‌های زیرزمینی $W>0$ در نظر گرفته می شود (T^{-1}).

S_s: قابلیت ذخیره ویژه محیط متخلخل است (L^{-1}).

t: معرف زمان می‌باشد (T).

با توجه به اینکه آبخوان دشت دز، از نوع آزاد می‌باشد و $T_x=k_xh$ و $T_y=k_yh$ و $T_z=k_zh$ (Tx و Ty و Tz ضریب آبگذری و h ضخامت بخش اشباع) است. از این رو معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی که به معادله غیرخطی بوزینسک[1] معروف است به صورت معادله زیر در می‌آید:

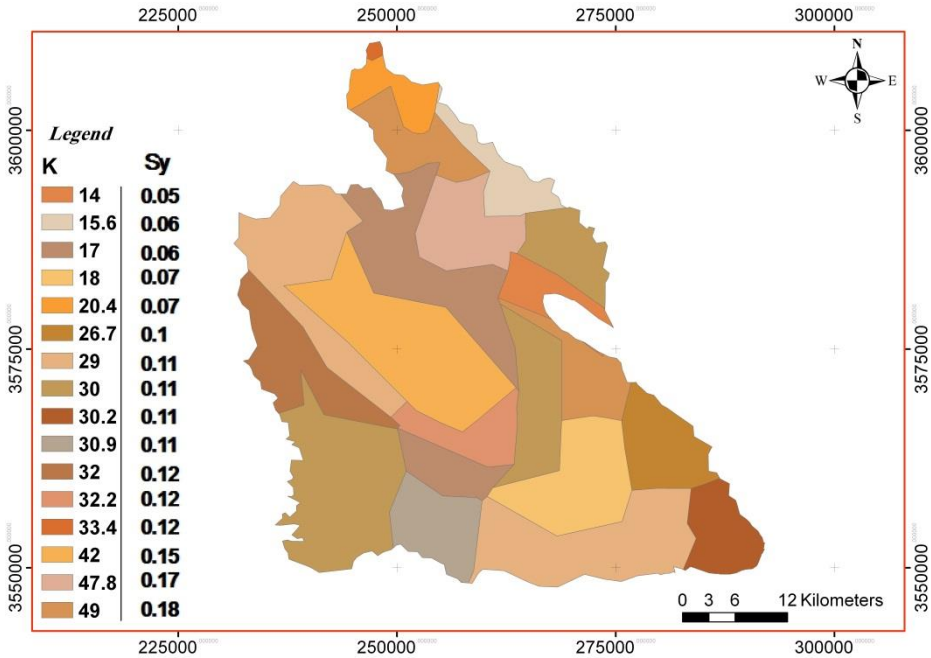
$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_xh\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_yh\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_zh\frac{\partial h}{\partial z}\right)=S_s\frac{\partial h}{\partial t}\pm w \qquad (۳)$$

1- Buzinck

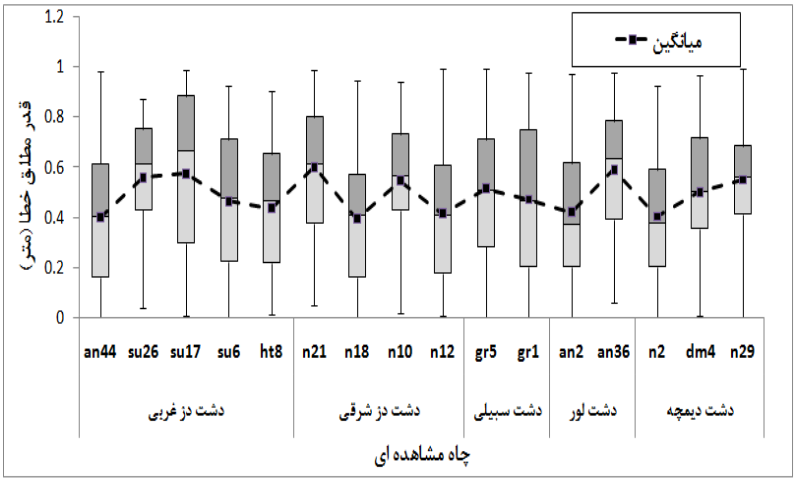
این معادله دیفرانسیل با اعمال شرایط اولیه و مرزی حل می‌گردد و نیاز به فرضیات زیادی دارد و پیچیدگی‌های موجود در دشت نیز حل آن را بسیار دشوار می‌نماید. پس از انجام واسنجی و صحت سنجی و تخمین ضرایب هیدرودینامیک، بسته‌های مدل آب زیرزمینی (DIS، LPF، BA6، GHB ، OC، PCG، MFN، RIV و غیره) با استفاده از مدل ریاضی مادفلو ۲۰۰۰ برای اتصال به مدل آب‌سطحی کدنویسی شد. این بسته‌ها تمامی اطلاعات تحلیلی مورد نیاز مدل آب زیرزمینی را در بر داشت. در مرحله آخر از فرآیند شبیه‌سازی آب سطحی و زیرزمینی، دو مدل آب سطحی و زیرزمینی به هم متصل شدند. برای این کار اقدام به تهیه و نوشتن یک برنامه رابط در محیط GIS شد. مطابق با شکل (۲)، توسط این برنامه، هر سلول فعال از شبکه سلول‌های آب زیرزمینی به لایه یا سطح متناظر با آن در ویپ متصل شد. لذا سلول‌های متناظر با زیرحوضه ها و کاربری هر یک از آنها، سلول‌های چاه‌ها، سلول‌های مصارف موجود (کشاورزی، شرب، روستایی و ...)، سلول‌های متناظر با محدوده آبخوان‌ها، سلول‌های رودخانه‌ای و بسته‌های تهیه شده مادفلو و غیره همگی در برنامه رابط تعریف شدند. به طوری که همه اجزای متناظر این برنامه هم در مدل آب سطحی و هم در مدل آب زیرزمینی موجود بود.

با اتصال مدل‌های ویپ و مادفلو، مطابق شکل (۳) داده‌ها و نتایج به صورت پویا می‌توانند بین این دو مدل گردش کنند. این بازخورد بین دو مدل آب سطحی و زیرزمینی در هر گام زمانی محاسباتی (ماه) اتفاق می‌افتد. با اتصال صحیح، می‌توان اثر تغییرات تراز در سطح آب زیرزمینی و یا تغییرات تراز مخزن آب سطحی را بر کل سیستم مشاهده کرد که این موضوع به خوبی آزمایش و صحت‌سنجی شد. پس از آن در حالت اتصال دو مدل بار دیگر عملیات واسنجی و صحت‌سنجی برای کل سیستم انجام شد و در نهایت شبیه‌سازی یکپارچه منابع آب در کل دشت انجام شد.

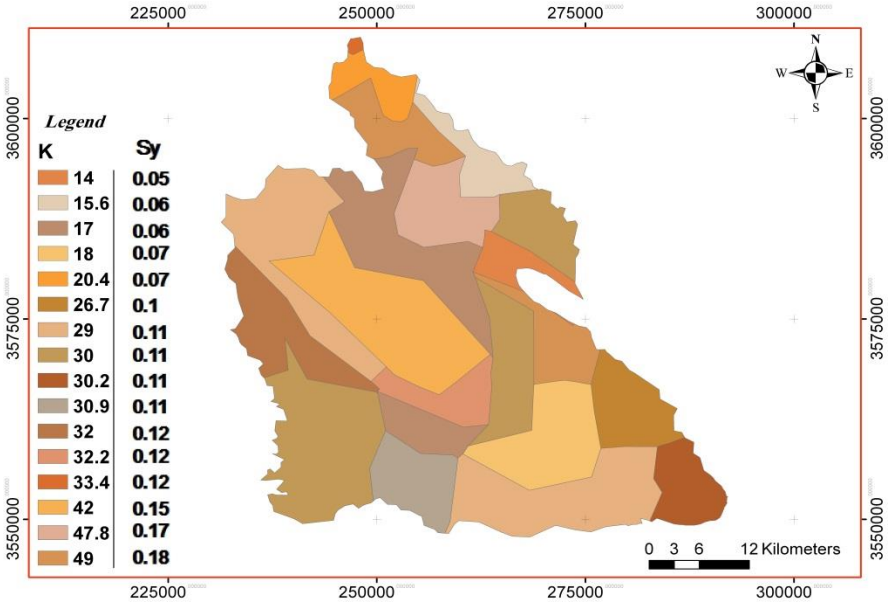
برای بررسی اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی، بیلان آب در شرایط اتصال پویای مدل‌ها و در هر یک از دشت‌های منطقه انجام شد. در محاسبه بیلان، مقادیر برداشت از هر کدام از منابع سطحی و زیرزمینی، مصارف مختلف، مقادیر رواناب و برگشت آب کشاورزی و فاضلاب به هر کدام از سیستم‌های رودخانه‌ای، مقادیر نشت از رودخانه‌ها به آب زیرزمینی و بلعکس، مقدار نفوذ عمقی (تغذیه آب زیرزمینی)، بارندگی روی دشت، شرایط رطوبتی خاک و غیره در نظر گرفته شد. در کل منطقه، ۳۷۵ مقطع رودخانه‌ای به مدل معرفی شد که از بین آن‌ها ۱۵۰ مقطع عرضی مربوط به رودخانه دز بود. تبادل بین رودخانه و دشت با توجه عرض مقطع، تراز سطح آب رودخانه در بازه بین دو مقطع، تراز بستر، ضریب قابلیت انتقال بستر، سطح آب زیرزمینی، برداشت از رودخانه یا آبخوان و غیره در تمامی بازه‌ها محاسبه شد. از بین این مقاطع، ۲۲ مقطع رودخانه‌ای برای بررسی اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی انتخاب شد که موقعیت آن‌ها در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴- موقعیت مقاطع رودخانه‌ای انتخابی بر روی شبکه سلولی آب زیرزمینی



شکل ۵- مقادیر آماره متوسط قدرمطلق خطای تراز آب در مدل آب زیرزمینی



شکل ۶- پهنه بندی مقادیر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه واسنجی شده مدل آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی

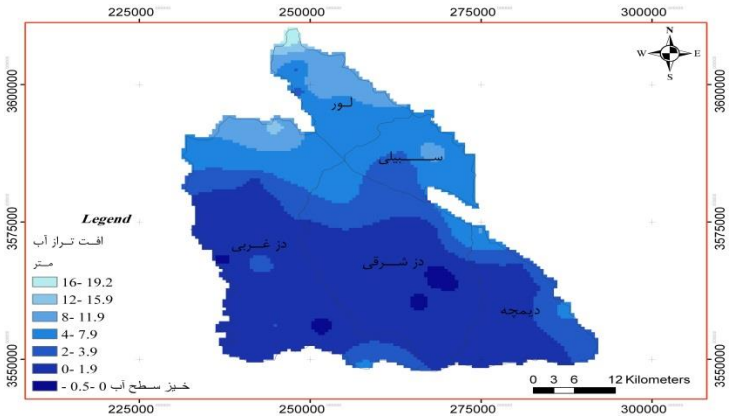
نتایج و بحث

قبل از اتصال مدل‌های آب سطحی و زیرزمینی، مدل آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های پیزومتری ثبت شده از سال آماری ۸۶-۱۳۸۵ تا ۸۹-۱۳۸۸ برای پارامترهای اصلی مدل یعنی هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه واسنجی شد. به منظور مقایسه آماری مقادیر محاسباتی و ثبت شده تراز آب زیرزمینی در محل چاهک های مشاهده‌ای در هر دشت از آماره متوسط خطای مطلق[1]، استفاده شد. نتایج حاصل از این بررسی در شکل (۵) نشان داده شده است. پهنه‌بندی نهایی مقادیر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه پس از آزمون و صحت سنجی مدل در شکل (۶) ارائه شده است.

1 - Absolute Mean Error

جدول ۱- مقادیر آماره آزمون های مختلف پس از اتصال دو مدل آب سطحی و زیرزمینی در خروجی دشت

آزمون	آماره آزمون				
	مجذور ضریب همبستگی	متوسط خطای مطلق	انحراف استاندارد تخمین	متوسط خطای نسبی	حد اکثر خطای نسبی
واسنجی	۰/۹۷	۱۲/۸۸	۲۲/۰۱	۰/۲۳	۰/۲۹
صحت سنجی	۰/۹۴	۹/۲۸	۱۱/۱۱	۰/۱۴	۰/۴۱



شکل ۷- افت تراز آب زیرزمینی در طول دوره شبیه‌سازی

پس از اتصال دو مدل، عملیات واسنجی و صحت سـنجی مجـدد در محیط ویپ انجام شد تا مقادیر رواناب، نشت متقابـل آب سـطحی و زیرزمینی، مقادیر برگشت آب کشاورزی و فاضلاب شهری و صنعتی، نفوذ عمقـی و تلفـات بـه‌خـوبی مـدل شـود. بـرای مقایسـه مقـادیر محاسباتی دبی جریان در خروجی دشت با مقادیر واقعی ثبت شده در محل ایستگاه حرمله از آماره‌های مجذور ضـریب همبسـتگی خطـی بین مقادیر محاسـباتی و مشـاهداتی در محـل ایسـتگاه‌هـا، متوسـط خطای مطلق، انحراف استاندارد تخمین[1]، متوسط خطـای نسـبی[2] و حداکثر خطای نسبی[3] استفاده گردید که چهار روش اخیر به ترتیب به صورت زیر تعریف می شوند. ایـن مقـادیر بـرای دو دوره واسـنجی و صحت سنجی در جدول (۱) ارائه شده و نشان می‌دهد کـه مـدل در سطح اعتماد ۹۵ درصد نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد.

$$AME = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}| Q_{pi} - Q_{mi} | \qquad (۱)$$

$$SEE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}(Q_{Pi} - Q_{mi})^2} \qquad (۲)$$

$$ARE = \frac{1}{N}(\sum_{i=1}^{N}\frac{|Q_{Pi} - Q_{mi}|}{Q_{mi}}) \qquad (۳)$$

$$MRE = Max(\left|\frac{Q_{Pi} - Q_{mi}}{Q_{mi}}\right|_{i=1}^{i=n}) \qquad (۴)$$

در همه آنها:

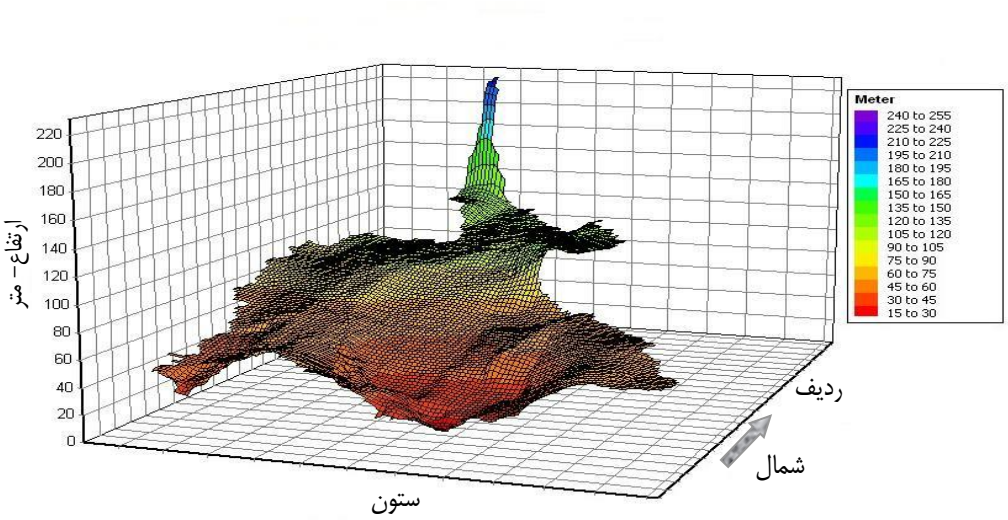
N: تعداد کل داده‌ها

Q_{pi}: دبی محاسبه شده

Q_{mi}: دبی ثبت‌شده در محل ایستگاه حرمله می‌باشد.

میزان افت تراز آب زیرزمینی پس از اتمام دوره شبیه‌سازی در شـکل (۷) آورده شده است. مطابق با این شـکل بیشـترین میـزان افـت در منطقه مربوط به قسمت‌های شمالی دشت لور به میزان حدود ۱۹ متر و کمترین میزان افت مربوط به قسمت‌های جنوبی منطقه مطالعاتی و کمتر از ۲ متر می‌باشد. در برخی مناطق جنوبی حدود ۰/۵ متـر خیـز سطح آب محاسبه شد. همچنین مطابق با شکل (۸) تـراز سـطح آب زیرزمینی در پایان دوره مطالعاتی (شـهریور ۱۳۹۱) در حالـت اتصـال پویای مدل آب سطحی و زیرزمینی به‌صورت سه بعدی شـبیه‌سـازی شد.

1 - Standard Error of Estimate
2 - Average Relative Error
3 - Maximum Relative Error



شکل ۸- تراز آب زیرزمینی در پایان دوره شبیه‌سازی در مدل متصل شده- شهریور ۱۳۹۱

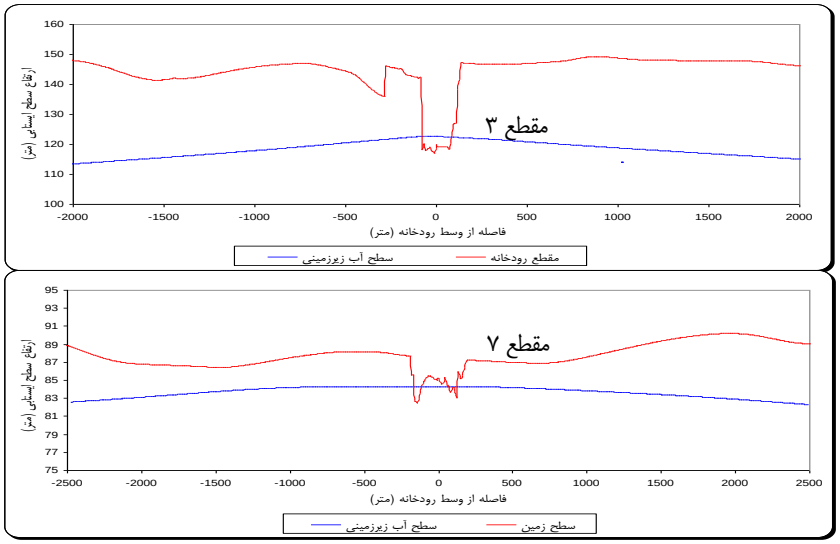
پس از انجام شبیه‌سازی، مقادیر تامین نیازها از هر کدام از منابع آب سطحی و زیرزمینی مشخص شد که در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین مطابق با جدول (۳)، نتایج شبیه‌سازی نشان داد در دشت دز غربی با در نظر گرفتن همه مصارف (کشاورزی، شرب و صنت و غیره)، به‌طور متوسط حدود ۸۰ درصد از نیازها توسط آب سطحی و ۲۰ درصد توسط آب زیرزمینی تامین می‌شود اما پراکنش آن در ماه‌های مختلف متفاوت است. در دشت دز شرقی و سبیلی با در نظر گرفته همه مصارف به‌طور متوسط حدود ۸۰/۶ درصد از نیازها توسط آب سطحی و ۱۹/۴ درصد توسط آب زیرزمینی تامین می‌گردد. در دشت دیمچه به دلیل اختصاص تمامی اراضی به طرح نیشکر کارون، با در نظر گرفتن همه مصارف به‌طور متوسط تنها حدود نیم درصد توسط آب زیرزمینی و ۹۹/۵ درصد از آب سطحی تامین می‌شود. در دشت لور که قسمتی از آن در محدوده مطالعاتی قرار دارد، تمامی نیازهای آن از آب زیرزمینی تامین می‌شود.

جدول ۲- میانگین ماهیانه مقادیر تامین نیاز از هر کدام از منابع موجود (میلیون متر مکعب) در کل دشت دز

نوع مصرف	نوع منبع	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
کشاورزی	سطحی	۲۵۱/۴	۱۳۳/۹	۸۳/۰	۶۱/۹	۸۸/۴	۲۰۴/۴	۲۳۷/۵	۱۵۲/۵	۱۹۰/۹	۲۲۳/۰	۲۷۵/۳	۲۹۱/۵
	زیرزمینی	۴۹/۱	۲۲/۸	۱۵/۰	۱۳/۴	۲۹/۲	۵۶/۸	۶۲/۳	۴۴/۹	۳۴/۴	۴۱/۸	۵۹/۷	۶۷/۴
شرب و صنایع کوچک	زیرزمینی	۶/۲	۴/۱	۴/۱	۴/۱	۴/۱	۴/۰	۶/۴	۶/۴	۶/۴	۶/۴	۶/۴	۶/۴
پرورش ماهی	سطحی	۳/۷	۲/۶	۱/۶	۴/۱	۱/۳	۱/۶	۲/۵	۳/۲	۴/۰	۴/۲	۴/۲	۴/۱
صنایع بزگ		۴/۵	۹/۶	۹/۲	۹/۲	۹/۵	۶/۸	۹/۲	۹/۲	۶/۱	۴/۴	۴/۴	۴/۴
انتقال به کرخه		۲۵/۲	۳۰/۵	۳۴/۶	۴۰/۲	۲۴/۲	۴۰/۰	۴۸/۸	۵۴/۱	۵۹/۴	۴۰/۲	۳۴/۹	۳۸/۰

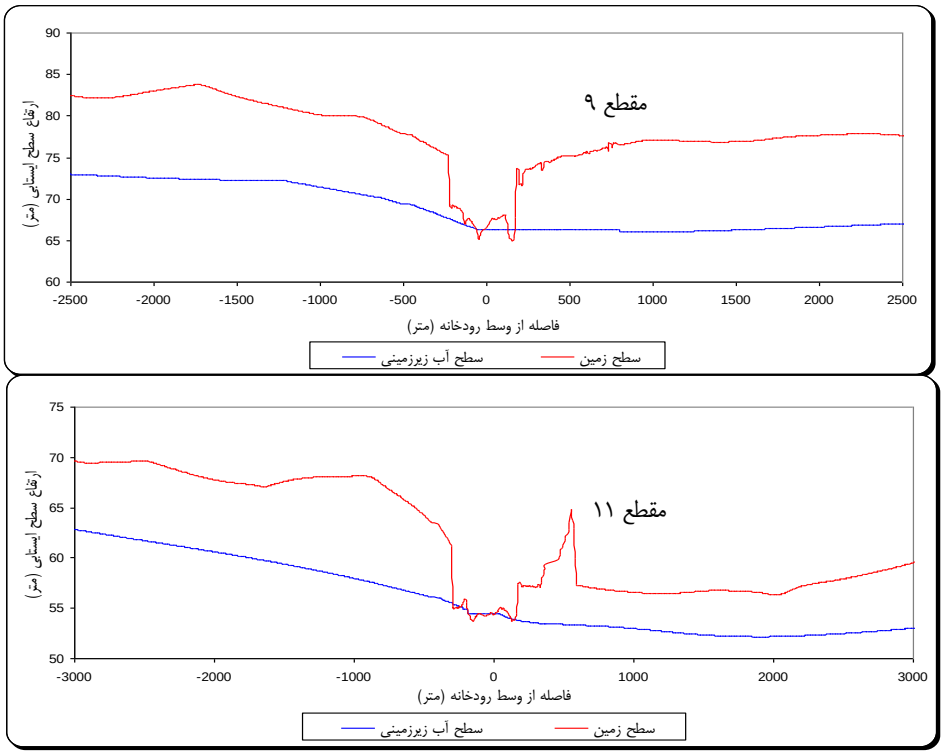
جدول ۳- درصد برداشت از آب سطحی و زیرزمینی با توجه به نوع مصرف

دشت	نوع منبع	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	میانگین
دز غربی	سطحی	۸۰/۸	۸۲/۵	۸۳/۲	۸۳/۶	۷۷/۳	۷۸/۸	۷۹/۴	۷۷/۴	۸۲/۲	۸۱/۸	۷۹/۶	۷۹/۵	۸۰/۵
	زیرزمینی	۱۹/۲	۱۷/۵	۱۶/۸	۱۶/۴	۲۲/۷	۲۱/۲	۲۰/۶	۲۲/۶	۱۷/۸	۱۸/۲	۲۰/۴	۲۰/۵	۱۹/۵
دز شرقی و سبیلی	سطحی	۸۴/۶	۸۴/۶	۸۱/۴	۷۲/۴	۷۱/۸	۸۰/۹	۸۳/۱	۸۱/۳	۸۰/۸	۸۲	۸۳/۴	۸۰/۸	۸۰/۶
	زیرزمینی	۱۵/۴	۱۵/۴	۱۸/۶	۲۷/۶	۲۸/۲	۱۹/۱	۱۶/۹	۱۸/۷	۱۹/۲	۱۸	۱۶/۶	۱۹/۲	۱۹/۴
دیمچه	سطحی	۹۹/۶	۹۹/۵	۹۹	۹۹/۱	۹۹/۲	۹۹/۶	۹۹/۶	۹۹/۶	۹۹/۷	۹۹/۷	۹۹/۷	۹۹/۷	۹۹/۵
	زیرزمینی	۰/۴	۰/۵	۱	۰/۹	۰/۸	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۵

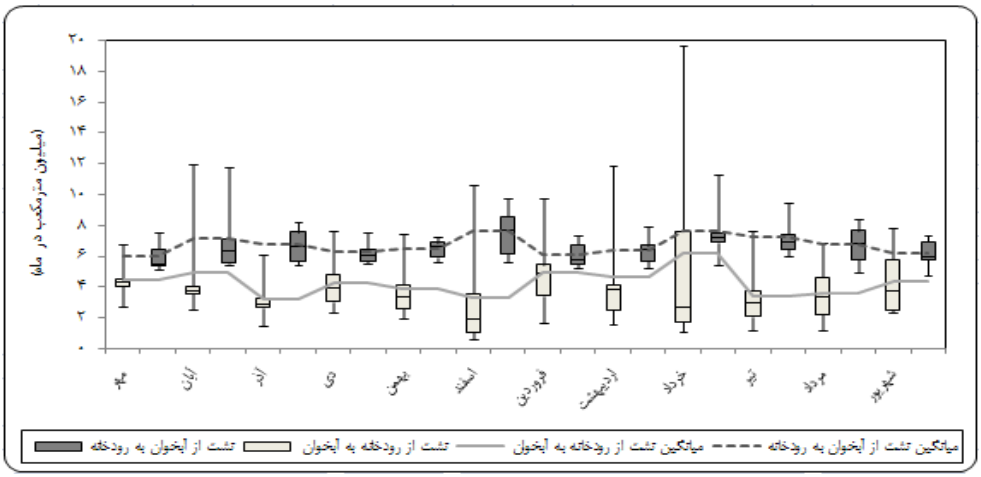


شکل ۹- پروفیل سطح آب زیرزمینی در امتداد مقاطع رودخانه‌ای در نیمه شمالی دشت

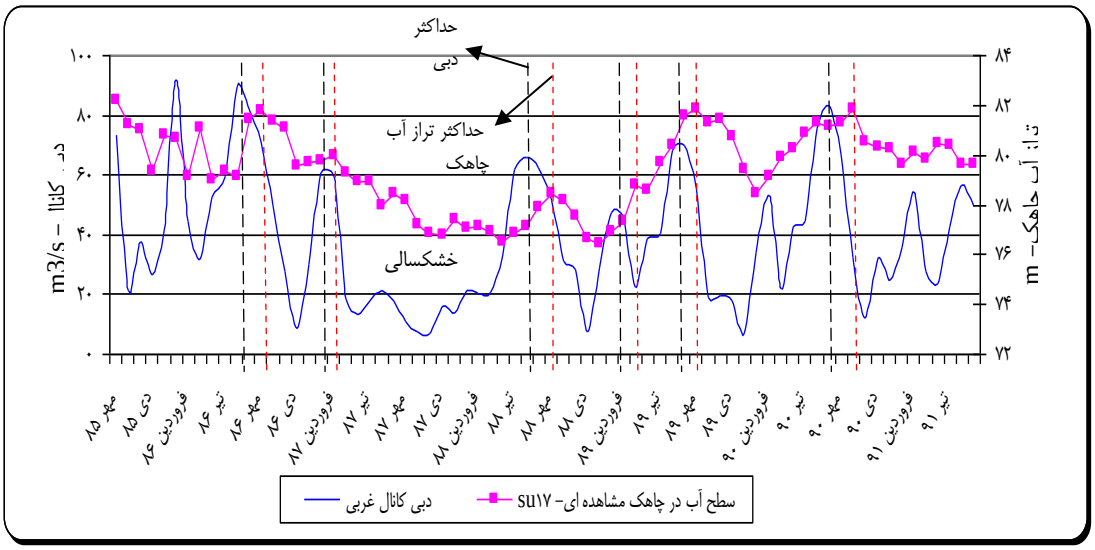
از بین مقاطع تعریف شده در مدل تلفیقی، نتایج محاسبات در ۲۲ مقطع رودخانه‌ای برای بررسی اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی بررسی شد که در تمامی آنها با توجه به تراز آب و بستر رودخانه و سطح آب زیرزمینی دشت در شبکه سلولی در امتداد این مقاطع، پروفیل سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شد. در این تحقیق به‌طور نمونه، در شکل‌های (۹) و (۱۰) پروفیل دو مقطع در نیمه شمالی و دو مقطع در نیمه جنوبی دشت بر روی رودخانه دز ارائه شده است. این شکل‌ها نشان می‌دهند که در قسمت‌های شمالی تا میانه دشت، رود دز بیشتر نقش تغذیه دشت را داشته و در قسمت‌های جنوبی رودخانه در بیشتر مناطق در ساحل غربی به عنوان زهکش عمل می‌کند و در ساحل شرقی به‌طور توام نقش تغذیه و تخلیه آبخوان را بر عهده دارد. در رودخانه کرخه نیز شرایط مشابه با رود دز است. رودخانه شاوور بیشتر دشت را زهکشی می‌کند و تبادل آب زیرزمینی در این قسمت بیشتر به سمت رودخانه است. سهم قابل‌توجهی از آبدهی رودخانه کهنک مربوط به آب‌زهکشی و تبادل نشت از دشت‌های دز شرقی و دیمچه است. لذا این رودخانه نیز در بازه داخل دشت مشابه با رودخانه کرخه عمل می‌کند. میزان آب تبادلی بین آب رودخانه‌ها و آب زیرزمینی در ماه‌های مختلف متفاوت بوده و در هر بازه متناسب با آب رها شده از سد یا دبی سرشاخه و میزان پخش آب روی دشت توسط شبکه آبیاری و زهکشی در طول شبیه‌سازی است. بر این اساس میزان تبادل نشت بین رودخانه‌ها و کل آبخوان دز در محدوده مطالعاتی محاسبه شد که در شکل (۱۱) ارائه شده است. این شکل مقادیر بیشترین، کمترین، میانگین و سایر آماره‌های مرتبط با میزان تبادل بین رودخانه‌ها و آبخوان دز را به خوبی نمایش می‌دهد. به دلیل اینکه رودخانه‌های شاوور و کهنک و حدود نیمی از مسیر رودخانه‌های دز و کرخه، آبخوان دز را تخلیه می‌نمایند لذا همان‌طور که از این شکل مشخص است در تمامی ماه‌ها میزان نشت از آبخوان دز به رودخانه‌ها بیشتر از نشت از رودخانه‌ها به آبخوان است.



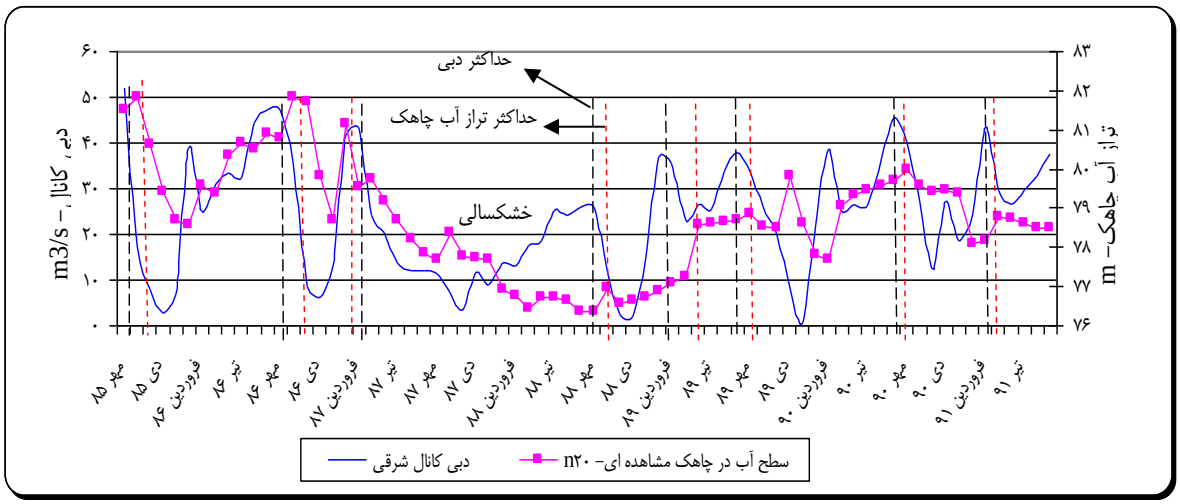
شکل ۱۰- پروفیل سطح آب زیرزمینی در امتداد مقاطع رودخانه‌ای در نیمه جنوبی دشت



شکل ۱۱- مقادیر آماره تبادل آب بین رودخانه‌ها و آبخوان (میلیون متر مکعب) در کل دشت دز



شکل ۱۲- مقایسه نوسانات هیدروگراف آب زیرزمینی و هیدروگراف آب توزیعی روی دشت دز غربی



شکل ۱۳- مقایسه نوسانات هیدروگراف آب زیرزمینی و هیدروگراف آب توزیعی روی دشت دز شرقی

بر اساس مطالعات بیلان آب، نوسانات هیدروگراف سطح آب زیرزمینی در چاهک های مشاهده‌ای نمونه در دشت‌های غربی و شرقی با مقادیر هیدروگراف آب توزیعی روی دشت در طول دوره شبیه‌سازی مقایسه شد. همچنین نتایج نشان داد صعود یا نزول سطح ایستابی در این دشت‌ها به دلیل محدودیت‌های حرکت آب در خاک با کمی تاخیر اما متناسب با نوسانات هیدروگراف آب توزیعی روی دشت است. مطابق با شکل‌های (۱۲) و (۱۳)، این نوسانات نشان داد در شرایط خشک سالی و عدم توزیع مناسب آب روی دشت، سطح آب زیرزمینی به سرعت افت می‌نماید. لذا نفوذ از طریق آب آبیاری سهم قابل توجهی از تغذیه آبخوان را به خود اختصاص می‌دهد. به دلیل توزیع آب توسط شبکه آبیاری و زهکشی در این دو دشت فرکانس این نوسانات در سایر چاهک های مشاهده‌ای نیز مشابه این دو چاهک بود. نزری و همکاران[1] (۲۰۱۲) با استفاده از مدل‌های

1- Nazri *et al.*

ترکیبی ژئوفیزیکی، بیلان آب و روش‌های ردیابی ایزوتوپی، میزان نشت از کانال های آبیاری در یک شبکه آبیاری را برآورد نمودند. این در حالی است که در این تحقیق علاوه بر نشت از طریق کانال ها، تبادل نشت بین تمامی اجزای رودخانه و آبخوان با در نظر گرفتن تمامی مولفه‌های بیلان آب سطحی و زیرزمینی و شرایط رطوبتی ناحیه غیر اشباع به خوبی مدل شد.

نتیجه گیری

در مراحل واسنجی و صحت سنجی مدل یکپارچه آب سطحی و زیرزمینی در حالت اتصال دینامیک مشخص شد پارامترهای گسترده‌ای مانند پارامترهای محیطی (دما، رطوبت خاک، تبخیر و تعرق)، شرایط هیدرولیکی رودخانه و مقاطع آن، فاکتور رواناب، ضریب نگه داشت آب خاک، هدایت هیدرولیکی منطقه غیر اشباع، ضرایب هیدرودینامیک آبخوان (هدایت هیدرولیکی آبخوان و آبدهی ویژه) ، میزان تغذیه، تراز سطح آب در رودخانه و آبخوان و غیره در تعیین اثر برهم کنش آب سطحی و زیرزمینی دخالت دارند. نتایج نشان داد از بین همه آنها، ضریب گذردهی بستر رودخانه، مقدار تغذیه روی دشت و هدایت هیدرولیکی آبخوان بیشترین اثر را داشته و مدل نسبت به تغییرات آنها بیشترین حساسیت را دارد. این در حالی است که جان و همکاران (۲۰۱۰) با بررسی روند تکامل مدل‌های ریاضی در این زمینه، به برخی از این پارامترها اشاره کرده و در نهایت مشخص نمود هر کدام از این مدل‌ها تنها تعدادی از این پارامترها را در بر دارد. در مطالعات صورت گرفته توسط زامپیری و همکاران (۲۰۱۲) نیز تنها اثر دو پارامتر دمای سطح و رطوبت خاک به همراه خصوصیات کاربری منطقه مورد بررسی قرار گرفته است که این عوامل به تنهایی قابلیت مدل کردن شرایط واقعی را ندارند.

نتایج نشان داد در طول رودخانه دز، بازه‌های ابتدایی آن تا نیمه دشت به دلیل شرایط توپوگرافی و پایین بودن سطح آب زیرزمینی در دشت‌های لور و سبیلی نسبت به سطح آب رودخانه، نقش تغذیه آبخوان را بر عهده دارد و در بازه‌های منتهی به خروجی دشت در حال تخلیه زه آب حاصل از آب برگشتی شبکه آبیاری و زهکشی دز و همچنین تخلیه آب نشتی از آبخوان‌های مجاور می‌باشد. یای و شنگ (۲۰۱۱) نیز به نتایج مشابهی در طول بازه‌های انتهایی رودخانه ریو گراند دست یافتند. رودخانه کرخه نیز مشابه رودخانه دز است و تنها در بازه‌های انتهایی جریان از آب زیرزمینی به رودخانه جریان دارد و در بیشتر بازه‌های ابتدایی، دشت را تغذیه می کند. رودخانه شاوور به دلیل گسترش شبکه آبیاری و زهکشی در تمام حوضه اطراف آن و بالا بودن نسبی سطح آب زیرزمینی، بیشتر نقش زهکش را دارد و در بیشتر ماه‌ها آب به داخل رودخانه نشت دارد. در دشت دیمچه در سال‌های اخیر در اثر نفوذ آب مازاد حاصل از آبیاری طرح نیشکر کارون و عدم برداشت آب زیرزمینی، تراز سطح آب زیرزمینی در قسمت‌هایی از وسط دشت حدود ۱/۵ متر بالا آمده است ولی در نواحی مرزی دشت به دلیل ارتباط با رودخانه کهنک و شیب هیدرولیکی جریان آب زیرزمینی، تراز آب زیرزمینی پایین آمده است. از طرفی آب‌های نشتی از حوضه شرقی و همچنین سیلاب جریان یافته در فصول سیلابی، رژیم رودخانه کهنک را تحت تاثیر شدید قرار داده و با کوچک‌ترین تغییر در تراز سطح آب زیرزمینی جهت نشت تغییر می‌نماید. لذا در طول تمام بازه‌ها جهت جریان بسیار متغیر است و در برخی از ماه‌ها نقش تغذیه دشت و در برخی نقش زهکش را دارد. در دشت‌های دز غربی، دز شرقی و سبیلی که به‌طور تلفیقی از آب سطحی و زیرزمینی استفاده می‌کنند، به‌طور متوسط ۸۰ درصد نیاز از آب سطحی و ۲۰ درصد از آب زیرزمینی تامین می‌گردد.

در طول دوره شش ساله شبیه‌سازی، متوسط میزان افت در دشت‌های دز غربی، دز شرقی، سبیلی، لور و دیمچه به ترتیب ۳، ۲/۷، ۵/۵، ۸/۵ محاسبه شد. در نواحی مرکزی دشت دیمچه حدود ۱/۵ متر تراز آب زیرزمینی بالا آمده است اما در مرزها افت سطح آب اتفاق افتاده است.

نتایج نشان داد در بازه ابتدایی رودخانه دز و قبل از سد تنظیمی دزفول، نوسانات تراز آب زیرزمینی در مناطق نزدیک‌تر به رودخانه متناسب با آب رها شده از سد دز در مقطع رودخانه است. مطابق با نتایج شبیه‌سازی، در فصول سیلابی به دلیل رهاسازی حجم زیاد جریان در مسیر رودخانه و افزایش سطح خیس شده، میزان نشت به آبخوان افزایش پیدا کرده و تراز آب زیرزمینی در ماه‌های بعد از وقوع سیل به‌طور محسوسی بالا آمده است. علت تاخیر در بالا آمدن تراز آب زیرزمینی آهستگی حرکت آب در خاک و عمق سطح آب زیرزمینی در این منطقه است. جرج و همکاران[1] (۲۰۱۳) نیز با بررسی رفتار هیدرولیکی بین آب سطحی و زیرزمینی در مقابل رهاسازی آب کنترل شده در مرز رودخانه کلرادو به نتایج مشابهی دست یافتند. در نیمه جنوبی دشت به دلیل انحراف حجم گسترده ای از آب رودخانه توسط کانال‌های غربی و شرقی بند انحرافی دزفول (با حداکثر ظرفیت ۱۵۷ و ۹۲ متر مکعب بر ثانیه) و توزیع آن روی دشت‌های غربی و شرقی، نوسانات سطح آب زیرزمینی در این دشت‌ها با کمی تاخیر متناسب با دبی آب توزیع شده توسط کانال‌های مذکور است.

1- Jorge *et al.*

منابع

۱- خواجه پور، م.، خیامی،م. و م. غیاثی. ۱۳۹۰. مدیریت بهره برداری بهینه آب در آبیاری اراضی کشاورزی در دوران خشک و تر (مطالعه موردی: اراضی شبکه آبیاری دز). پنجمین کنفرانس سراسری آبخیز داری و مدیریت منابع آب و خاک، انجمن مهندسی آبیاری و آب ایران، کرمان.

۲- زیبایی، م. ح.، زیبایی، م. و ک. اردوخانی. ۱۳۹۲. ارزیابی سناریوهای استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در دشت فیروزآباد فارس، مجله علمی- پژوهشی تحقیقات اقتصاد کشاورزی. ۵ (۱): ۱۸۱-۱۵۷.

۳- شمسایی، ا. و ع. فرقانی. ۱۳۹۰. بهره برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در مناطق خشک. مجله علمی- پژوهشی تحقیقات منابع آب ایران. ۷ (۲): ۳۶-۲۶.

4- Buras, N. 1963. Conjunctive operation of dams and aquifers. Journal of the Hydraulics Division, 89 (6): 111-132.

5- Coe, J. J. 1990. Conjunctive use-advantages, constraints and examples. Journal of Irrigation and. Drainage Engineering, ASCE, 116 (3): 427-443.

6- Jan, H., Fleckenstein, S. K., David M. H. and B. Fulvio. 2010. Groundwater-surface water interactions-New methods and models to improve understanding of processes and dynamics. Journal of Advances in Water Resources, 33: 1291–1295.

7- Jorge, R. H., Osvel, H. H., Auricio, P. L., Alejandra, C. F. and C. V. Edgar. 2013. Groundwater responses to controlled water releases in the limitrophe region of the Colorado River: Implications for management and restoration. Journal of Ecological Engineering. 59: 93–103.

8- Loucks, D.P., Beek, E.V., Stedinger, J. R., Dijkman, J. P. M. and M.T. Villars. 2005. Water resources system planning and management- An Introduction to methods, models and applications. 1st Ed., UNESCO, Paris.

9- McDonald, M.G. and A.W. Harbaugh. 1998, a modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: U.S. geological survey techniques of water resources investigations, book 6, chap. A1, 586 p.

10- Naveed, A. And N. O. Theo. 2011. sustainable conjunctive use of surface and ground water. modelling on the basin scale. International Journal of Natural Resources and Marine Sciences, 1 (1): 1-12.

11- Nazri, A. A., Syafalni, M., Abustan. I., Rahman, M. T. A., Zawawi M. H. and N. Dor. 2012. authentication relation between surface-groundwater in kerian irrigation canal system, perak using integrated geophysical, water balance and isotope method. International Conference on Advances Science and Contemporary Engineering, Procedia Engineering, 50: 284 – 296.

12- Rashton, K .R. and L. M. Tomlinson. 1982. operation policies for a surface groundwater system. Water Resource Bull, 17 (3): 406-413.

13- Yi, L. and Z. Sheng. 2011. trend-outflow method for understanding interactions of surface water with groundwater and atmospheric water for eight reaches of the upper rio grande. Journal of Hydrology, 409: 710–723.

14- Zampieri, M., Serpetzoglou, E., Anagnostou E. N., Nikolopoulos, E.I. And A. Papadopoulos. 2012. Improving the representation of river–groundwater interactions in land surface modeling at the regional scale: Observational evidence and parameterization applied in the Community Land Model. Journal of Hydrology, 420–421: 72–86.