اکوهیدرولوژی

دورهٔ ۲، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۴، ص ۳۸۲-۳۷۱

بررسی بیلان آب زیرزمینی دشت تویسرکان همدان به کمک مدل ریاضی مادفلو

سمانه پورمحمدی[۱]، محمدتقی دستورانی[۲*]، هادی جعفری[۳]، محمدحسن رحیمیان[۴]، مسعود گودرزی[۵]، زهرا مسماریان[۶]، فاطمه باقری[۷]

۱. پژوهشگر مؤسسهٔ تحقیقات آب ایران و کارشناس مرکز ملی تحقیقات و مطالعات باروری ابرها (Ph.D)

۲. دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد

۳. استادیار دانشکدهٔ علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود

٤. دانشجوی دکتری مهندسی آب، دانشگاه صنعتی اصفهان و کارشناس مرکز ملی تحقیقات شوری

۵. عضو هیئت علمی پژوهشکدهٔ حفاظت خاک و آبخیزداری

٦. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان

۷. دانشجوی دکتری آب‌شناسی دانشگاه صنعتی شاهرود

(تاریخ دریافت ۱۳۹٤/۰۵/۱۵ تاریخ تصویب ۱۳۹٤/۱۰/۲۹)

چکیده

خشکسالی‌های اخیر و استفادهٔ بی‌رویه از آب زیرزمینی به‌ویژه برای مصارف کشاورزی از مشکلات بارز بسیاری از دشت‌های کشور است. بحران آب گریبانگیر تمامی دشت‌های کشور شده است و به‌علت کاهش منابع آب سطحی و خشکسالی‌های پی‌درپی به‌ناچار بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی به‌صورت غیرمجاز فزونی یافته است. در این میان اطلاع از وضعیت بیلان آبی دشت‌ها می‌تواند در مدیریت مناسب منابع آب منطقه کمک کند. دشت تویسرکان یکی از دشت‌های مهم استان همدان است که زمین‌های کشاورزی وسیعی دارد و هر ساله به وسعت آن‌ها افزوده می‌شود و به تبع آن فشار به منابع آب زیرزمینی هر ساله افزایش می‌یابد. بنابراین، هدف از تحقیق حاضر بررسی بیلان آبی دشت تویسرکان در سال آبی ۱۳۸۷ــ ۱۳۸۸ برای مدیریت بهینهٔ منابع آب به‌ویژه برای مصارف کشاورزی است. به این منظور بعد از ترسیم خطوط هم‌پتانسیل دشت به شناسایی ورودی‌ها و خروجی‌های دشت اقدام و بیلان آب زیرزمینی به‌صورت دستی محاسبه شد. در گام بعدی با استفاده از تعیین تغییرات حجم ذخیره، صحت محاسبات بیلان دشت تعیین شد. درنهایت، با تعیین نقشه‌های ورودی لازم و تهیهٔ اطلاعات اولیه مدل عددی مادفلو در نرم‌افزار GMS ران شد. نتایج نشان داد که بیلان دشت منفی و کسری مخزن به میزان ۱۲/۲- میلیون مترمکعب در سال آبی ۱۳۸۷ـ ۱۳۸۸ است. نتایج بیلان آب دستی و تغییرات حجم سطح ایستابی دشت، نتایج مدل آب زیرزمینی مادفلو را تأیید کرد.

کلیدواژگان: بیلان آب زیرزمینی، دشت تویسرکان، مادفلو، GMS.

* نویسندهٔ مسئول

Email: dastorani@um.ac.ir

مقدمه

دانش کافی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در یک منطقه می‌تواند در مدیریت بهینهٔ منابع آب مفید و مؤثر باشد و به کارشناسان و مدیران در جهت افزایش بهره‌وری کمک کند. بیلان آب زیرزمینی از جمله پارامترهای مؤثر و ضروری برای دشت است و از جمله اطلاعات پایه و اساسی‌ای است که باید برای تصمیم‌گیری‌های کلان در مدیریت منابع آب به آن توجه شود. در زمینهٔ بیلان آب زیرزمینی در داخل و خارج کشور تحقیقات وسیعی انجام شده است که در زیر به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود: نیکبخت و همکارانش [۶] به بررسی بیلان آبی دشت عجب‌شیر آذربایجان به کمک مدل ریاضی آب زیرزمینی پرداختند. نتایج نشان داد که تبدیل سیستم آبیاری سنتی به سیستم تحت فشار سبب افزایش سطح ایستابی دشت تا ارتفاع ۸۸ سانتی‌متری خواهد شد. محمدی قلعه‌نی و همکارانش [۷] در پژوهشی به بررسی اثر عوامل اقلیمی بر افت سطح ایستابی دشت ساوه پرداختند. با استفاده از آمار چاه‌های مشاهداتی، بهره‌برداری چشمه‌ها و قنات‌های دشت تغییرات بیلان آبی دشت بررسی شد. در مرحلهٔ بعد با بررسی رابطهٔ سطح ایستابی دشت با ایستگاه‌های باران‌سنج و شاخص خشکسالی و ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه به این نتیجه رسیدند که رابطهٔ همبستگی مناسبی بین کاهش دبی رودخانه، شاخص خشکسالی SPI و سطح ایستابی دشت وجود دارد. فاتحی و همکارانش [۴] طی پژوهشی به بررسی اثر تغذیهٔ مصنوعی بر توزیع مکانی و زمانی خشکسالی‌های هیدرولوژیک با استفاده از شاخص حالت پیزومتریک (PSI) پرداختند. به این منظور از مدل ریاضی مادفلو استفاده شد. نتایج نشان داد که تغذیهٔ سیلاب به‌طور مصنوعی تنها در سال‌های اولیه بر کاهش افت سطح آب زیرزمینی مؤثر بوده و در سال‌های بعدی بر اثر برداشت بی‌رویهٔ چاه تأثیر چندانی نداشته است. پورمحمدی و همکارانش [۱] در تحقیقی به بررسی کارایی شبکهٔ عصبی مصنوعی و سری‌های زمانی (آریما) در پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی پرداختند. این تحقیق که در یکی از دشت‌های حوضهٔ آبخیز بختگان فارس صورت گرفت از آمار سطح ایستابی ۳۵ چاه در دورهٔ آماری ۱۳۸۱ـ ۱۳۸۹ استفاده کردند. نتایج این تحقیق کارایی و دقت زیاد هر دو تکنیک شبکهٔ عصبی و سری زمانی آریما را در پیش‌بینی سطح ایستابی چاه‌های منطقه نشان داد. در پژوهش شیرافکن و جعفری [۳] بیلان آبی دشت بهاباد استان یزد بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که میزان افت سطح ایستابی دشت در قسمت‌های شمالی ۶۰ سانتی‌متر و در قسمت‌های جنوبی ۴۰ سانتی‌متر بوده است. پیسیناراس[1] و همکارانش [۱۵] به ارزیابی و ارائهٔ راه‌کارهایی برای تعدیل تأثیرات ۸۷ چاه بهره‌برداری واقع در اراضی کشاورزی دشت اسماریدا[2] یونان به مساحت ۴۶/۷۵ کیلومترمربع پرداختند. جریان آب زیرزمینی در این آبخوان به واسطهٔ وجود ۳ سال داده‌های صحرایی از طریق مدل مادفلو[3] شبیه‌سازی شد. در این زمینه ۴ گزینهٔ مدیریتی مد نظر قرار گرفت و هر یک در مدل اعمال شدند. برمبنای این سناریوها بیلان آب زیرزمینی دشت شبیه‌سازی شد که نتایج نشان داد کاهش ۳۳ درصدی میزان برداشت مناسب‌ترین گزینهٔ مدیریتی است. همچنین در صورت اعمال این گزینه تخلیهٔ آبخوان به رودخانهٔ واقع در نزدیکی آن، بعد از یک دورهٔ ۲۰ ساله به‌میزان بسیار کمی کاهش می‌یابد. دیلیپ[4] و همکارانش [۱۰] در پژوهشی به بررسی دو روش شبکهٔ عصبی مصنوعی پس انتشار و شبکهٔ عصبی مصنوعی شعاعی پرداختند. در این پژوهش از داده‌های هیدرواقلیمی برای پیش‌بینی سطح ایستابی دشت استفاده شد. درنهایت، به این نتیجه رسیدند که شبکهٔ عصبی نوع پس‌انتشار کارایی مناسب‌تری در تعیین سطح ایستابی منطقه دارد. اکانون[5] و کلف[6] [۱۳] با استفاده از مدل مفهومی آب زیرزمینی به بررسی تغییرات سطح ایستابی دشتی در فنلاند پرداختند. در این پژوهش با استفاده از تعیین رابطهٔ بین بارش و دما با تغییرات سطح ایستابی توانستند تأثیرات تغییرات اقلیمی بر سطح آب زیرزمینی در این دشت را در دورهٔ ۲۰۱۰ــ ۲۰۳۹ بررسی کنند. نتایج این پژوهش نوسانات شدید سطح ایستابی در زمستان را در این حوضه تحت تأثیر تغییرات اقلیمی نشان داد. چنینی[7] و مامو[8] [۹] به بررسی نقاط مستعد تغذیهٔ مصنوعی با استفاده از تکنیک‌های GIS در حوضهٔ آبریز مکنسی پرداختند. شبیه‌سازی سطح ایستابی در این حوضه نیز به کمک مدل مادفلو با استفاده از چاه‌های پیزومتری

1. Pisinaras
2. Ismarida
3. MODFLOW
4. Dillip
5. Okkonen
6. Kløve
7. Chenini
8. Mammou

صورت گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که نقاط مستعد تغذیهٔ مصنوعی در حوضه نقاط مناسبی بودند که توسط آب زیرزمینی نتایج آن تست شد. گور[1] و همکارانش [۱۱] در پژوهشی روی آبخوان رودخانهٔ بنگانگا در هند از مدل ترکیبی مادفلو و GIS برای تعیین زون‌های مستعد آب زیرزمینی استفاده کردند. به این منظور از نقشهٔ کاربری اراضی، توپوگرافی، زهکشی، خاک و زمین‌شناسی و فاکتور شیب برای تعیین زون‌های مستعد آب زیرزمینی استفاده شد. نتایج نشان داد که افزایش تخلیهٔ آب چاه‌ها در زون‌های مستعد، تنش زیادی بر سطح آب آبخوان نخواهد داشت و درنهایت به این نتیجه رسیدند که استفادهٔ تلفیقی از این دو مدل برای ارزیابی منابع آب زیرزمینی منطقه و به دست آوردن آب مؤثر خواهد بود. در پژوهشی که توسط پچایی و پانگنو[2] [۱۴] صورت گرفت به ارائهٔ یک مدل ریاضی برای حرکت آب‌های شور سطحی به‌صورت افقی و عمودی در شالیزارهای برنج پرداختند. مدل عددی ارائه‌شده به‌وسیلهٔ دیفرانسیل محدود حل و کارایی آن تأیید شد. نتایج پژوهش نشان داد که مدل ارائه‌شده می‌تواند حرکت آب زیرزمینی شور به‌صورت افقی و عمودی را به‌خوبی نمایش دهد. جینان[3] و همکارانش [۱۲] به بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر سطح ایستابی در دشت‌های شمالی کشور فنلاند پرداختند. طبق نتایج به‌دست‌آمده کاهش بارش و افزایش دما در دورهٔ ۲۰۶۰ـ ۲۰۹۰ سبب افت ۲۰ درصد سطح ایستابی این دشت می‌شود. در پژوهشی آله[4] و همکارانش [۷] به بررسی مدل‌های توزیعی در ارزیابی زهکشی آب زیرقشری در مقیاس حوضه‌های آبخیز پرداختند. این پژوهش که در یکی از حوضه‌های آبخیز مرکزی هندوستان صورت گرفت از مدلی به‌نام درین‌مد[5] برای بررسی آب زهکشی زیرقشری و مدل‌سازی جریان سطحی، تغذیه و میزان نیترات آب استفاده شده است. این پژوهش در ۶۰۰ شبکهٔ سلولی و از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۹ صورت گرفته است. ضریب نش‌ـ ساتکلیف نشان داد که جریان سطحی پیش‌بینی‌شده توسط این مدل دقت زیادی داشته است (۸۷ درصد). نتایج این پژوهش همچنین نشان داد که مدل درین‌مد برای ارزیابی و مدیریت آب‌های زیرزمینی و جریان زیرقشری در مقیاس حوضهٔ آبخیز مناسب است. نتایج پژوهش یانگ[6] و همکارانش [۱۸] روی یکی از آبخوان‌های چین که با استفاده از یک مدل عددی انتقالی به بررسی سطح ایستابی دشت از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۰ پرداختند، نشان داد که شعاع مخروط افت در چاه‌ها افزایش و سطح ایستابی دشت پایین افتاده است. اشرف و احمد[7] [۸] با استفادهٔ مدل‌سازی آب زیرزمینی و با کمک ابزارهای تصمیم‌گیری در منطقهٔ چاج در حوضهٔ ایندوس پاکستان به این نتیجه رسیدند که فاکتورهای تغییر اقلیم و بهره‌برداری زیاد از منابع آب زیرزمینی تأثیرات طولانی‌مدتی روی سیستم آب زیرزمینی در منطقهٔ مطالعه‌شده می‌گذارند. سینگ[8] [۱۷] به بررسی مدل‌سازی آب زیرزمینی برای مدیریت منابع آب در منطقه‌ای در هند پرداخت. این پژوهش در منطقهٔ هاریانا که منطقهٔ مردابی با مشکل شوری‌زایی ثانویه است صورت گرفته است. در این مقاله از مدل آب زیرزمینی SGMP برای شبیه‌سازی آب زیرزمینی استفاده شده است. نتایج مدل نشان داد برای پایین افتادن سطح آب زیرزمینی باید ۵ـ ۲۰ درصد تغذیهٔ سالانه کاهش یابد و برای کاهش شورشدن آب منطقه باید برداشت از سفره افزایش و میزان آبیاری محصولات براساس نیاز آبی گیاهان باشد. درنهایت، اینکه مدل SGMP می‌تواند در مدیریت بهینهٔ منابع آب منطقه کمک شایانی کند. سارا[9] و همکارانش [۱۶] به بررسی بیلان آب زیرزمینی توسط مدل‌های اتورگرسیون در حوضهٔ آبخیز کریستالین در کانادا پرداختند. در این پژوهش سناریورهای مختلفی برای مخروط افت آب زیرزمینی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که ناهمگنی‌های زمین‌شناسی منطقه تأثیر زیادی بر سطح ایستابی دشت دارد. بررسی منابع بالا نشان می‌دهد که مدل مفهومی مادفلو به‌خوبی می‌تواند در تعیین بیلان آب زیرزمینی و شبیه‌سازی سطح ایستابی چاه‌های پیزومتری دشت مفید باشد علاوه بر این مدل مفهومی مادفلو نسبت به سایر روش‌ها همچون بیلان دستی، شبکهٔ عصبی و یا استفاده از منوی آب زیرزمینی نرم‌افزار arcmap دقت بسیار زیادتری دارد چراکه تمامی معادلات مربوط به حرکت آب در خاک

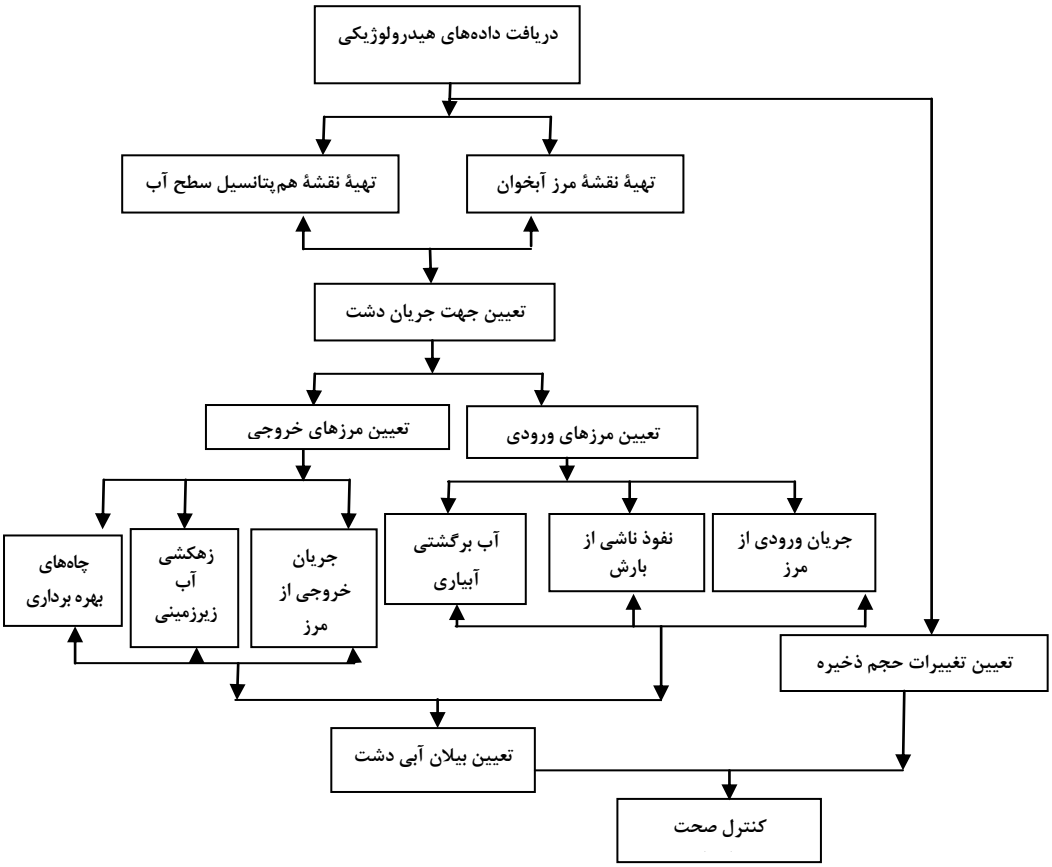
1. Gaur
2. Poch and Pongnoo
3. Jinnan
4. Ale
5. DRAINMOD
6. Yang
7. Ashraf and ahmad
8. Singh
9. Sarah

(معادلات دارسی) را در شرایط مرزی در نظر می‌گیرد. هدف از پژوهش حاضر بررسی بیلان آب زیرزمینی دشت تویسرکان توسط مدل ریاضی آب زیرزمینی مادفلو توسط نرم‌افزار GMS است.

روش پژوهش

حوضهٔ آبخیز تویسرکان در جنوب شرقی استان همدان واقع شده است. میزان بارش این حوضه ۳۵۰ میلی‌متر در سال است. دشت تویسرکان در مرکز حوضهٔ آبخیز تویسرکان واقع شده است. این پژوهش شامل دو بخش کلی است که در زیر مفصل بیان می‌شود.

۱. ابتدا برای آشنایی با تمامی ورودی‌ها و خروجی‌های دشت بیلان زیرزمینی اولیه بدون واردکردن داده‌ها به مدل بررسی شد. به این منظور پس از جمع‌آوری داده‌های اولیهٔ هیدروژئولوژیکی دشت تویسرکان، به تهیهٔ نقشه‌های پایه شامل مدل رقومی ارتفاع، پراکنش چاه‌ها، مرزدشت و.... اقدام شد. سپس با استفاده از عمق سطح ایستابی در چاه‌های مشاهده‌ای و ارتفاع دهانهٔ پیزومتر از سطح دریا، نقشهٔ هم‌پتانسیل سطح آب دشت ترسیم شد. با توجه به این اطلاعات جهت جریان ترسیم و ورودی‌ها و خروجی‌های دشت مشخص شدند. سپس جریان ورودی از مرز، نفوذ ناشی از بارش و آب برگشتی ناشی از آبیاری به‌عنوان ورودی‌های دشت و جریان خروجی از مرز، زهکشی آب زیرزمینی و تخلیهٔ چاه‌های بهره‌برداری به‌عنوان خروجی‌های دشت محاسبه شد. سپس با استفاده از مقادیر کل ورودی‌ها و خروجی‌های دشت، بیلان آبی دشت محاسبه و با مقدار تغییرات حجم ذخیره مقایسه شد (حاصل ضرب میزان افت در مساحت در آبدهی ویژهٔ دشت) تا صحت بیلان ارزیابی شود. در شکل ۱ مراحل انجام پژوهش در رابطه با این بخش نشان داده شده است.



شکل ۱. روند نمای تعیین بیلان دستی آب زیرزمینی دشت تویسرکان

در معادلۀ ۱ فرمول کلی بیلان آب استفاده‌شده، مشاهده می‌شود.

$$(QIn+Qp+QI+QSW)-(Qout-QD-Qex)=\pm\Delta \quad (۱)$$

که در این فرمول Q_{IN} حجم جریان ورودی زیرزمینی به بیلان، Q_p حجم آب نفوذی از ریزش‌های جوّی، Q_I حجم آب ورودی از زمین‌های کشاورزی، Q_{sw} حجم آب نفوذیافته از پساب برگشت‌شدۀ کارخانجات و صنایع، Q_{out} حجم آب زیرزمینی خروجی از محدودۀ بیلان، Q_D حجم آب زهکشی‌شده از آبخوان، Q_{EX} حجم آب تخلیه‌شده از چاه‌ها و ΔV: تغییرات حجم ذخیرۀ آبخوان است.

برای رسم هیدروگراف دشت و تعیین تغییرات حجم ذخیره از فرمول ۲ استفاده شد در این بخش ابتدا توسط پلی‌گون‌های تیسن مساحت تحت تأثیر هر چاه پیزومتری تعیین و سپس میانگین سالانۀ ارتفاع سطح آب حوضه تعیین شد.

$$\Delta h=\frac{\Sigma(Ai\times h)}{A} \quad (۲)$$

در مرحلۀ بعدی به کمک معادلۀ ۳ تغییرات حجم ذخیره در طول سال آبی ۱۳۸۷ـ ۱۳۸۸ به دست آمد. در این معادله S_y آبدهی ویژه است که با توجه به ویژگی‌های بافت خاک دشت ضریب ۰/۰۳ (اوبوبی و همکاران، ۲۰۱۲) در نظر گرفته شد، A: مساحت کل دشت و Δh: میزان افت یا خیز سطح ایستابی چاه‌های دشت است.

$$\Delta V=A*Sy*\Delta H \quad (۳)$$

جریان خروجی و ورودی در محدودۀ بیلان: دشت تویسرکان یک خروجی و ۴ ورودی دارد که با توجه به معادلۀ دارسی که در زیر آمده است، میزان جریان ورودی و خروجی از مرزها محاسبه می‌شود.

$$Q=W.I.T \quad (۴)$$

در این معادله Q دبی ورودی یا خروجی از مرز، W: عرض لولۀ جریان و T: ضریب قابلیت انتقال در دشت است.

تغذیۀ ناشی از نفوذ بارش و تغذیۀ ناشی از آب برگشتی از دیگر جریان‌های ورودی به دشت هستند که جداگانه محاسبه شدند. برای تعیین میزان نفوذ بارش در دشت با توجه به بافت خاک دشت ضریب ۱۵ درصد در نظر گرفته شد و برای تغذیۀ ناشی از آب برگشتی ضریب ۲۰ درصد در نظر گرفته شد. برای تعیین تخلل و سایر ضرایب نیز از بافت خاک استفاده شد. برای تعیین تخلیۀ ناشی از چاه‌های بهره‌برداری و قنات‌ها از میزان دبی هر چاه و ساعات کارکرد آن‌ها در طول سال آبی ۱۳۸۷ــ ۱۳۸۸ استفاده شد. مورد دیگری که باید به عنوان خروجی از دشت بررسی می‌شد تخلیۀ ناشی از زهکش رودخانۀ موجود در دشت بود که با توجه به میزان دبی پایه در فصل خشک و نقشۀ جهت جریان که زهکشی را از حوضه نشان می‌دهد، تعیین شد. به این صورت تمامی اجزای بیلان آب زیرزمینی تعیین و معادلۀ بیلان تعیین شد.

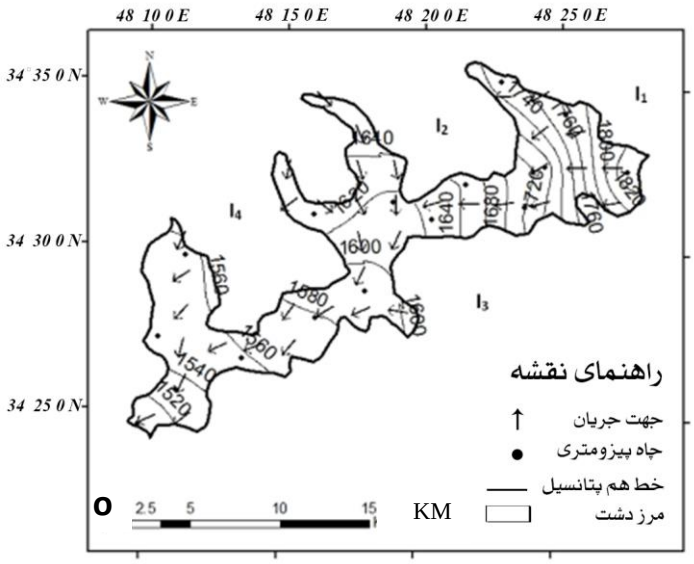
۲. بعد از تعیین بیلان دستی آب زیرزمینی و شناخت کامل ورودی‌ها و خروجی‌های دشت، به مدل‌سازی آب زیرزمینی اقدام شد. در این راستا از مدل ریاضی مادفلو در نرم‌افزار جی ام اس (GMS) استفاده شد. برای این منظور سه دستۀ کلی داده‌های ورودی نیاز است، که عبارت‌اند از خصوصیات فیزیوگرافی حوضه (مرز آبخوان، توپوگرافی سطح و کف و ضخامت آبخوان)، ضرایب هیدرودینامیک دشت (ضریب ذخیره و هدایت هیدرولیکی) و اطلاعات هیدرواقلیمی و هیدروژئولوژیکی (تغذیه، ورودی و خروجی جریان زیرقشری از دشت، برداشت از چاه‌های بهره‌برداری و تراز سطح ایستابی). با توجه به اینکه اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری در دسترس، مربوط به سال آبی ۱۳۸۷ـ ۱۳۸۸ است، برای کالیبراسیون مدل در شرایط پایدار و ناپایدار از همین سال استفاده شد. به این منظور از میانگین سه ماه بهمن، اسفند و فروردین که براساس هیدروگراف معرف دشت سطح ایستابی تقریباً ثابتی در سال داشت به‌عنوان دورۀ پایدار (steady) و از داده‌های سطح ایستابی ۱۲ ماه سال آبی ۱۳۸۷ـ ۱۳۸۸ به‌عنوان دورۀ ناپایدار (unsteady) استفاده شد. برای صحت‌سنجی مدل از داده‌های سطح ایستابی در سال‌های آبی ۱۳۸۸ــ ۱۳۸۹ استفاده شد. آماره‌های خطا بعد از کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل بررسی شد و مقادیر خطای استاندارد، خطای مطلق و میانگین خطا برای هر سه دوره تعیین شد.

یافته‌های پژوهش

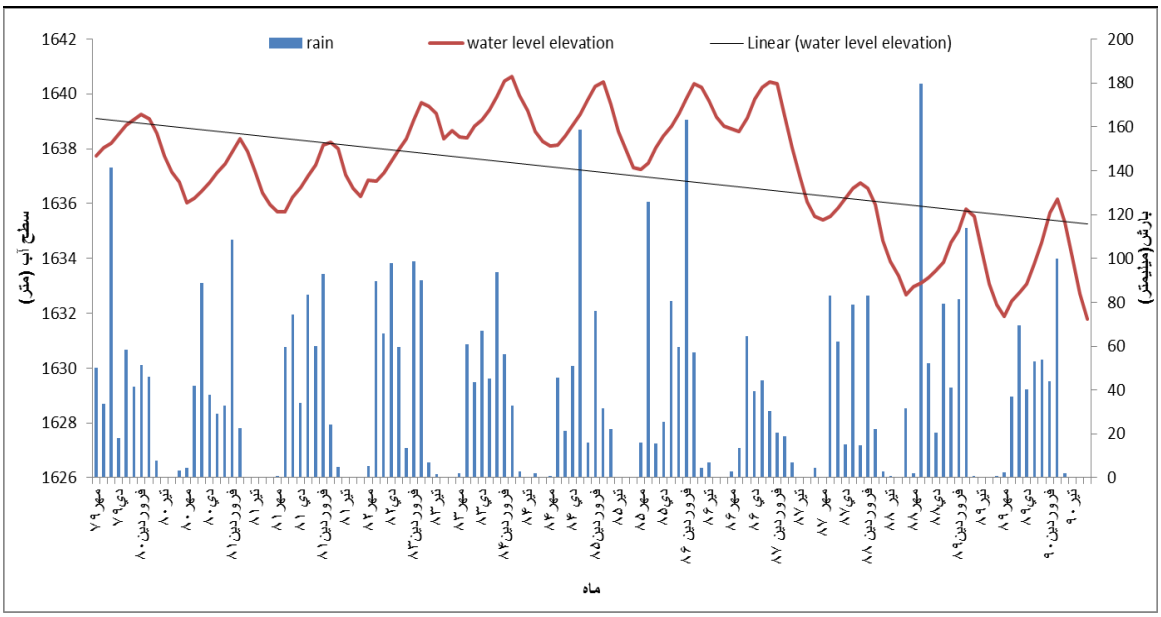
نتایج بیلان آب زیرزمینی به‌صورت دستی: همان‌طور که در قسمت روش تحقیق بیان شد، ابتدا محاسبات بیلان آب زیرزمینی در دشت به‌صورت دستی انجام شد. بنابراین، ابتدا نتایج بیلان دستی و سپس نتایج مدل‌سازی آب

زیرزمینی ارائه خواهد شد. در شکل ۲ الف نقشهٔ هم‌پتانسیل دشت تویسرکان در ماه اردیبهشت سال ۱۳۸۸ مشاهده می‌شود. با توجه به خطوط جریان ترسیم‌شده (عمود بر منحنی‌های هم‌پتانسیل) دشت تویسرکان ۴ ورودی و یک خروجی دارد. ورودی‌ها به‌ترتیب با علامت I1، I2، I3، I4 نمایش داده شده و خروجی با علامت O نمایش داده شده است. شکل ۲ب هیدروگراف واحد دشت تویسرکان از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۹ را نمایش می‌دهد. هر چند افت متوسط دشت با توجه به نمودار، ۰/۳۲ متر در سال بوده است، لیکن در سال آبی ۱۳۸۷ـ ۱۳۸۸ این افت حدود ۲/۴ متر در سال بوده است و دلیل آن خشکسالی‌ای است که در سال آبی ۱۳۸۶ـ ۱۳۸۷ (با توجه به نمودار بارش) رخ داده است.

الف)



ب)



شکل ۲. الف) نقشهٔ هم‌پتانسیل دشت تویسرکان در ماه اردیبهشت سال ۱۳۸۸؛ ب) هیدروگراف واحد تویسرکان از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۹ [۲]

با توجه به بافت خاک دشت تویسرکان و نتایج آزمایش پمپاژ در یکی از چاه‌های پیزومتریک دشت، آبدهی ویژهٔ تقریبی (۰/۰۳) در نظر گرفته شد. با استفاده از فرمول ۳ میزان تغییرات حجم دشت تویسرکان در سال آبی ۱۳۸۷ـ ۱۳۸۸ به میزان ۱۲/۸- میلیون مترمکعب بوده است. به‌طورکلی، روند نمودار شیب کاملاً نزولی داشته که نشان از افت شدید سفرهٔ آب زیرزمینی در سال‌های اخیر در دشت تویسرکان است. همان‌طور که در بخش روش تحقیق بیان شد، سال آبی ۱۳۸۸ـ ۱۳۸۹ به‌عنوان سال صحت‌سنجی در نظر گرفته شد. بنابراین، با توجه به میزان افت ۰/۶۸ سطح ایستابی دشت در این سال (با توجه به هیدروگراف واحد)، و در نظر گرفتن آبدهی ویژه (۰/۰۳) میزان تغییرات حجم، ۳/۷۳- میلیون مترمکعب در سال بوده است. جدول ۱ مشخصات لوله‌های ورودی و خروجی جریان براساس نقشهٔ هم‌پتانسیل اردیبهشت‌ماه را نمایش می‌دهد. با توجه به جدول مجموع ورودی‌ها از مرز آبخوان ۴۴/۳۲ میلیون مترمکعب و مجموع خروجی از مرز ۳/۵۶ میلیون مترمکعب در سال آبی ۱۳۸۷ـ ۱۳۸۸ است. جدول ۱ مشخصات پارامترهای بیلان دشت تویسرکان را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است بیشترین سهم ورودی به دشت جریان زیرزمینی ورودی به محدودهٔ بیلان بوده که به میزان ۴۴/۲ میلیون مترمکعب است. تغذیهٔ ناشی از آب برگشتی آبیاری از چاه، چشمه و قنات‌ها در دشت ۱۹/۱ میلیون مترمکعب بوده است و تغذیهٔ ناشی از بارش کمترین سهم در جریان‌های ورودی به دشت را شامل می‌شود. درمجموع ۷۱/۵ میلیون مترمکعب آب ورودی به دشت در سال آبی ۱۳۸۷ـ ۱۳۸۸ است. دربارهٔ پارامترهای خروجی از دشت با توجه به همین جدول، خروجی ناشی از پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری و قنات‌ها بیشترین سهم در خروجی آب از دشت را داشته‌اند که به میزان ۸۰ میلیون مترمکعب است. جریان خروجی از مرز دشت ۳/۵۶ میلیون مترمکعب و جریان خروجی ناشی از زهکشی آب زیرزمینی صفر است. درمجموع آب خروجی از دشت در این سال ۸۳/۵ میلیون مترمکعب بوده است.

جدول ۱. مشخصات لوله‌های ورودی و خروجی جریان براساس نقشهٔ هم‌پتانسیل اردیبهشت‌ماه

نوع جریان	علامت روی نقشه	عرض جریان (m)	قابلیت انتقال (m3/day)	شیب هیدرولیکی (m/m)	دبی جریان[1] دارسی (m3/day)
ورودی	I1	۶۰۰۵	۳۲۳	۰/۰۱۴	۲۷۹۸۶
	I2	۵۸۳۷	۱۴۰۰	۰/۰۰۷	۵۶۱۰۳
	I3	۲۹۷۲	۱۳۰۰	۰/۰۰۵	۱۹۸۴۸
	I4	۴۵۷۷	۱۰۶۰	۰/۰۰۴	۱۷۲۲۵
خروجی	O	۱۵۳۱	۸۵۰	۰/۰۰۷	۹۷۵۶

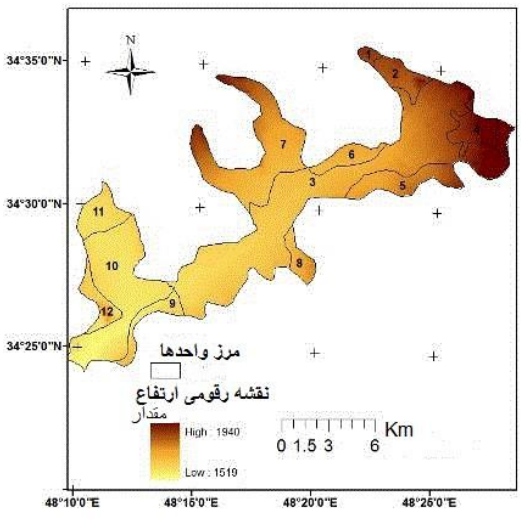
جدول ۲. مشخصات پارامترهای بیلان دشت تویسرکان

نوع جریان	پارامتر	مقدار (میلیون مترمکعب)	جمع (میلیون مترمکعب)
ورودی	تغذیهٔ ناشی از نفوذ بارش	۸/۲۶	۷۱/۵
	جریان زیرزمینی ورودی به محدودهٔ بیلان	۴۴/۲	
	تغذیهٔ ناشی از آب برگشتی	۱۹/۱	
خروجی	جریان خروجی از محدودهٔ بیلان	۳/۵۶	۸۳/۵
	خروجی ناشی از زهکشی آب زیرزمینی	۰	
	خروجی ناشی از پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری و قنات‌ها	۸۰	
	بیلان (تفاوت ورودی‌ها و خروجی‌ها)	-	-۱۲

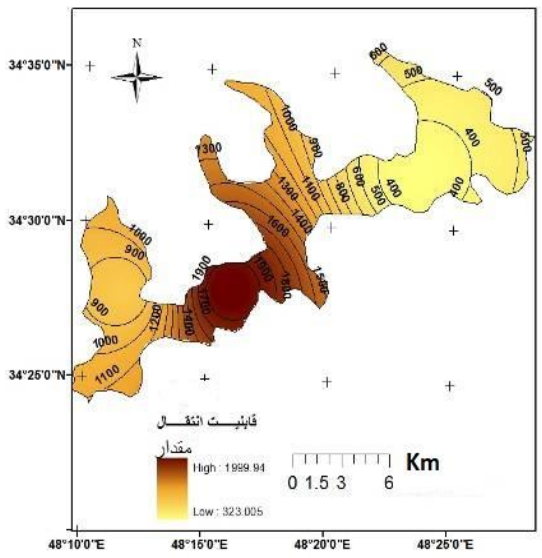
۱. با استفاده از فرمول دارسی محاسبه شده است.

با توجه به اعداد ارائه‌شده در بالا و بررسی پارامترهای ورودی و خروجی دشت می‌توان به این نتیجه رسید که بیلان در دشت تویسرکان در سال آبی ۱۳۸۷ــ ۱۳۸۸ منفی و به میزان ۱۲ میلیون مترمکعب خروجی‌ها از ورودی‌ها بیشتر بوده است. بین عدد به‌دست‌آمده مربوط به تغییرات حجم در دورهٔ بیلان (۱۲/۸-) و مقدار بیلان به‌دست‌آمده از ورودی‌ها و خروجی‌ها به میزان ۰/۸ میلیون مترمکعب اختلاف است که می‌تواند به‌علت در دسترس‌نبودن اطلاعات کافی از دشت و تقریبی‌بودن بسیاری از فاکتورها باشد. نتایج خروجی از مدل بیلان آب زیرزمینی: واحدهای تقسیمی در دشت تویسرکان روی نقشهٔ رقومی ارتفاع در شکل ۳ الف نشان داده شده است. تقسیم‌بندی انجام‌شده براساس ویژگی بافت خاک، نقشهٔ زمین‌شناسی و کاربری اراضی صورت گرفته است. این پلی‌گون‌بندی برای تمامی ورودی‌های مربوط به مدل‌سازی آب زیرزمینی در نظر گرفته شد. درواقع ۱۲ واحد کاری برای دشت تویسرکان در نظر گرفته شد و برای هر پلی‌گون اعداد مربوط به هدایت هیدرولیکی، ضریب قابلیت انتقال، ضریب ذخیره و تغذیه معرفی شد. این تقسیم‌بندی برای اجرای دقیق‌تر مدل آب زیرزمینی استفاده شد. شکل ۳ ب نقشهٔ قابلیت انتقال دشت تویسرکان نمایش داده شده است. همان‌طور که در نقشه مشخص است میزان قابلیت انتقال در قسمت‌های شمالی دشت کمترین و هر چه به سمت مرکز دشت نزدیک می‌شود، بیشتر می‌شود و درواقع بیشترین مقدار قابلیت انتقال در مرکز دشت است، هر چه به انتهای دشت نزدیک‌تر می‌شویم از میزان قابلیت انتقال کاسته و کمتر می‌شود. به‌طورکلی، دشت از نظر میزان قابلیت انتقال به سه بخش قابلیت انتقال زیاد، متوسط و کم است که به‌ترتیب در مرکز، انتها و ابتدای دشت تویسرکان است. شکل ۴ الف توزیع مقادیر هدایت هیدرولیکی (ضریب آبگذری) را در دشت تویسرکان نشان می‌دهد. بیشترین ضریب آبگذری مربوط به مرکز دشت و در حاشیه‌ها ضریب آبگذری کمتر است. شکل ۴ ب نقشهٔ آبدهی ویژهٔ دشت تویسرکان در هر یک از پلی‌گون‌های مشخص‌شده نشان داده شده است. ذخیرهٔ ویژه در مرکز بیشترین و در حاشیه کمتر است. در شکل ۵ الف نقشهٔ تغذیه (شامل: نفوذ ناشی از بارش، آب برگشتی چاه، و نفوذ از کف رودخانه) دشت تویسرکان نشان داده شده است. همان‌طور که در نقشه نشان داده شده است بیشترین میزان تغذیه مربوط به مرکز دشت و کمترین میزان تغذیه مربوط به کناره‌های دشت است. شکل ۵ ب نقشهٔ سطح ایستابی اولیهٔ دشت تویسرکان را نمایش می‌دهد. از نقشهٔ یادشده چنین استنباط می‌شود که سطح ایستابی اولیهٔ معرفی‌شده به مدل آب زیرزمینی، در ابتدای دشت زیاد و به‌تدریج در مرکز کم می‌شود و در انتهای دشت به کمترین مقدار خود می‌رسد.

الف)

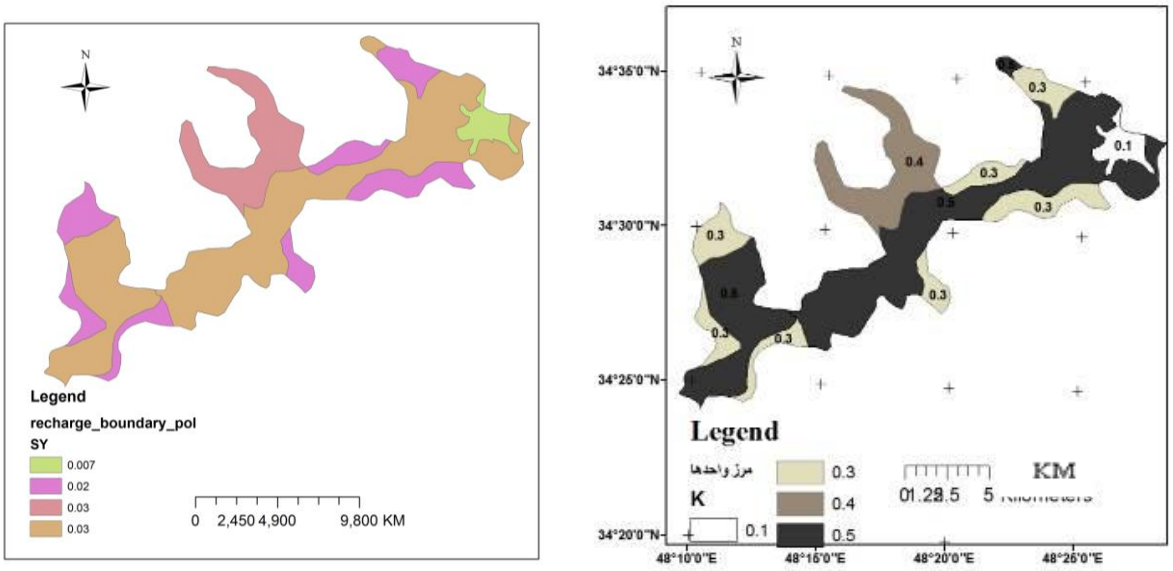


ب)



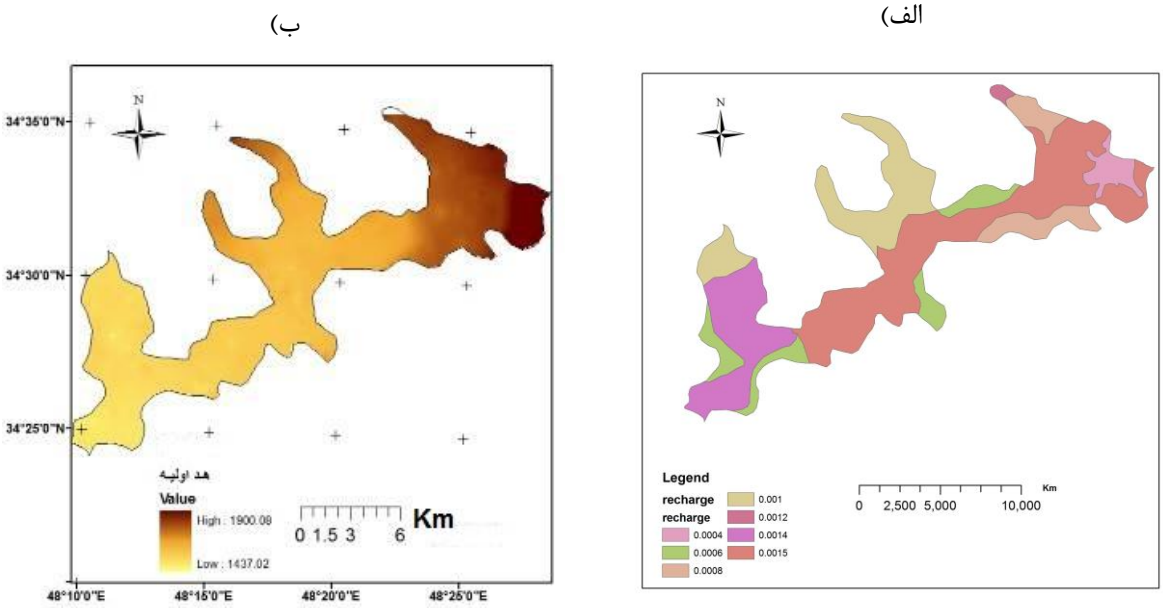
شکل ۳. الف) واحدهای تقسیمی در دشت تویسرکان روی نقشهٔ رقومی ارتفاع؛ ب) نقشهٔ قابلیت انتقال دشت تویسرکان (مترمربع در روز)

الف) ب)



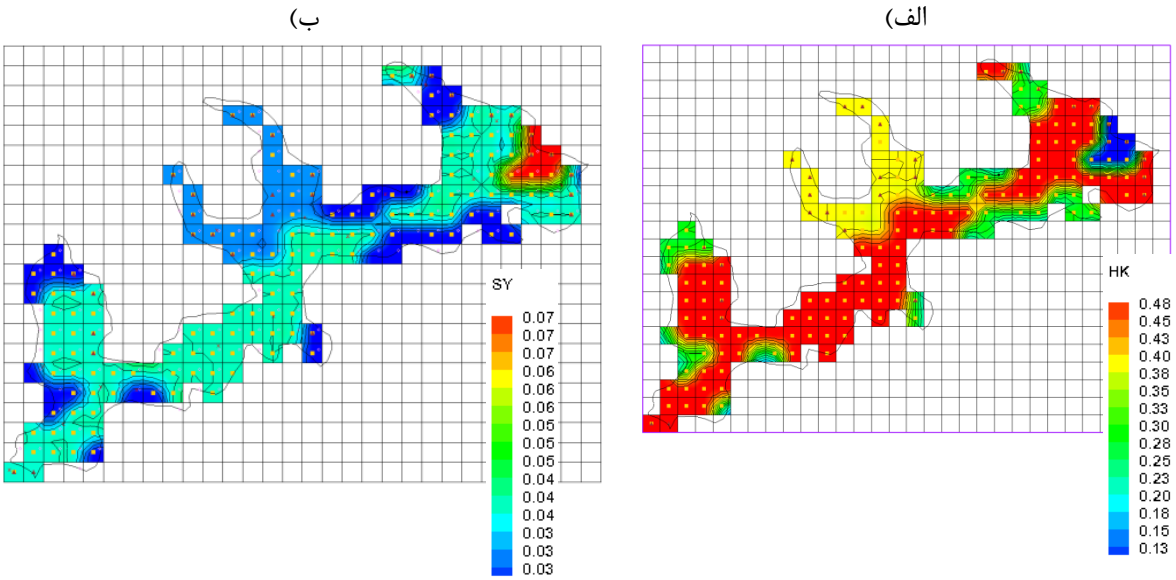
شکل ۴. الف) نقشهٔ هدایت هیدرولیکی دشت تویسرکان (متر بر روز)؛ ب) نقشهٔ آبدهی ویژهٔ دشت تویسرکان (بدون واحد)

الف) ب)



شکل ۵. الف) نقشهٔ تغذیهٔ دشت تویسرکان؛ ب) نمایی از نقشهٔ سطح ایستابی

شکل ۶ الف و ب نقشهٔ پهنه‌بندی شدهٔ پارامتر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه توسط مدل GMS در حالت ناپایدار را نمایش می‌دهد. مقایسهٔ نقشهٔ ورودی به مدل (مقادیر اولیهٔ پیشنهادی به مدل) و خروجی (نقشهٔ تولیدشده توسط مدل)، نشان می‌دهد مدل به‌خوبی کالیبره شده است.



شکل ۶. الف) نقشهٔ توزیع هدایت هیدرولیکی براساس خروجی مدل GMS (متر بر روز)؛ ب) نقشهٔ توزیع آبدهی ویژهٔ خروجی مدل GMS سال آبی ۱۳۸۷ـ ۱۳۸۸ (بدون واحد)

جدول ۳ بررسی بیلان آب زیرزمینی دشت تویسرکان توسط مدل در شرایط پایدار، ناپایدار و اعتبارسنجی را نمایش می‌دهد. مدل کالیبره‌شده در حالت پایدار مربوط به سال آبی ۱۳۸۷ـ ۱۳۸۸ بوده و همان‌طور تغییرات ذخیرهٔ آن در جدول نشان داده شده است ۰/۲- میلیون مترمکعب در سال است. ازآنجاکه در شرایط پایدار، بیلان باید صفر و مجموع ورودی‌ها و خروجی‌ها مساوی باشد، نتیجهٔ مدل‌سازی بیلان آب زیرزمینی در شرایط پایدار تغییرات ذخیره را نزدیک صفر برآورد کرده است که نشان از کالیبراسیون مناسب مدل است. در حالت پایدار چون بسیاری از پارامترها یا اعمال نمی‌شود یا بر فرض ثابت‌بودن اعمال می‌شود، باید نتایج بیلان و عدد تغییرات ذخیره صفر باشد یعنی خروجی‌ها و ورودی‌ها در شرایط پایدار یکسان باشد. ازآنجاکه نتیجهٔ تغییرات ذخیرهٔ مدل کالیبره‌شده در این پژوهش عدد پایینی است (با خطایی که در جدول ۵ ذکر می‌شود) مدل به‌طور قابل قبولی، کالیبره می‌شود و کارایی مناسبی خواهد داشت، درواقع مدل فقط کمی دچار کم‌برآورد شده است. در حالت ناپایدار به‌علت در نظر گرفتن پارامترها به‌صورت متغیر (در این پژوهش ۱۲ ماه سال آبی ۱۳۸۷ـ ۱۳۸۸) تا حدودی به شرایط واقعی نزدیک شده و مقادیر خروجی‌ها و ورودی‌ها به دشت تویسرکان متفاوت و نزدیک به شرایط واقعی بوده و به‌تبع مقدار تغییرات ذخیره عددی منفی یا مثبت خواهد بود. شایان ذکر است بسته‌های تنش به‌صورت ماهانه و برای مقادیر تغذیه و چاه‌های بهره‌برداری متفاوت در نظر گرفته شد. همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است بیلان آب زیرزمینی دشت تویسرکان در حالت ناپایدار به میزان ۱۲/۵- میلیون مترمکعب بوده است. نتایج مدل ریاضی اعتبارسنجی‌شده نشان داد که دشت در سال ۱۳۸۸ــ ۱۳۸۹ تغییرات ذخیره و بیلان منفی دارد. میزان تغییرات ذخیرهٔ خروجی از مدل GMS در سال آبی ۱۳۸۸ـ ۱۳۸۹ (۴/۰۸- میلیون مترمکعب در سال) مشابه تغییرات حجم سفره (۳/۷۳- میلیون مترمکعب در سال) است که نشان‌دهندهٔ اعتبارسنجی مناسب مدل است. در جدول ۴ به تفکیک میزان ورودی‌ها و خروجی‌های مدل در هر سه شرایط پایدار، ناپایدار و اعتبارسنجی نشان داده شده است. شایان ذکر است به‌علت اینکه تنها آمار بهره‌برداری از چاه‌ها فقط در سال آبی ۱۳۸۷ـ ۱۳۸۸ موجود بود، در سال اعتبارسنجی یعنی سال آبی ۱۳۸۸ـ ۱۳۸۹ از همین اطلاعات استفاده شد. بنابراین، میزان برداشت در شرایط ناپایدار و سال آبی ۱۳۸۸ـ ۱۳۸۹ برابر در نظر گرفته شد.

جدول ۳. بررسی بیلان آب زیرزمینی دشت تویسرکان توسط مدل در شرایط پایدار، ناپایدار و اعتبارسنجی

سال	ورودی‌ها (میلیون مترمکعب در سال)		خروجی‌ها (میلیون مترمکعب در سال)		تغییرات ذخیره (میلیون مترمکعب در سال)
حالت پایدار (سه ماه بهمن، اسفند، فروردین)	تغذیه	۱۹/۹	برداشت	-۲۶/۱	-۰/۲
	ورودی زیرقشری	۱۰/۲	خروجی زیرقشری	-۴/۲	
	جمع	۳۰/۱	جمع	-۳۰/۳	
حالت ناپایدار (سال ۱۳۸۷ـ ۱۳۸۸)	تغذیه	۲۸/۳	برداشت	۸۰	-۱۲/۵
	ورودی زیرقشری	۴۳/۱	خروجی زیرقشری	-۳/۹	
	جمع	۷۱/۴	جمع	-۸۳/۹	
اعتبارسنجی (سال ۱۳۸۸ـ ۱۳۸۹)	تغذیه	۳۶/۷۲	برداشت	۸۰	-۴/۰۸
	ورودی زیرقشری	۴۳/۱	خروجی زیرقشری	-۳/۹	
	جمع	۷۹/۸۲	جمع	-۸۳/۹	

جدول ۴. آماره‌های خطای مدل در شرایط کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل

آماره‌های خطا	شرایط پایدار (سه ماه)	شرایط ناپایدار (سال ۱۳۸۷ـ ۱۳۸۸)	اعتبارسنجی (سال ۱۳۸۸ـ ۱۳۸۹)
میانگین خطا[1]	۰/۱۹	۰/۰۵	۰/۴۸
میانگین مطلق خطا[2]	۰/۶۹	۰/۷۷	۰/۶۷
میانگین خطای استاندارد[3]	۰/۷۳	۰/۸۶	۰/۸۵
ضریب همبستگی[4]	٪۹۸	٪۹۷	٪۹۷

جدول ۴ آماره‌های خطای مدل در شرایط کالیبراسیون در حالت پایدار، ناپایدار و صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود آماره‌های خطا در تمامی دوره‌ها اعداد پایین و همبستگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بالاست. کمترین میانگین خطا مربوط به شرایط ناپایدار (سال ۱۳۸۷ـ ۱۳۸۸) بوده و کمترین میزان خطای مطلق و خطای استاندارد مربوط به شرایط پایدار سال ۱۳۸۷ـ ۱۳۸۸ که به‌ترتیب مقادیر ۰/۶۹ و ۰/۷۳ را نشان می‌دهد. مقادیر خطای کم تمامی دوره‌ها نشان‌دهندهٔ کالیبراسیون مناسب مدل آب زیرزمینی دشت تویسرکان است.

بحث و نتیجه‌گیری

از بررسی بیلان آب زیرزمینی دشت تویسرکان چنین نتیجه‌گیری می‌شود که مدل کالیبره‌شده در حالت پایدار و ناپایدار با دقت زیادی توانسته است سطح ایستابی چاه‌های پیزومتری را شبیه‌سازی کند. درمجموع هیدروگراف چاه‌های پیزومتری دشت تویسرکان نشان داد که سطح ایستابی دشت تویسرکان رو به کاهش است، نتایج مدل‌سازی بیلان آب زیرزمینی نیز نشان داد که تغییرات ذخیرهٔ ناشی از بیلان آبی دشت منفی است و سیر نزولی هیدروگراف دشت، کاهش سطح ایستابی و بحران آب را نشان داد. افزایش روزافزون زمین‌های کشاورزی داخل دشت و اطراف آن به افت سطح آب زیرزمینی دشت منجر شده است. با توجه به کاهش بارش و خشکسالی‌های اخیر، اراضی زیر کشت دیم در منطقه کاهش و کشاورزان به کشت آبی و استفاده از آب چاه‌ها و قنات‌ها رو آورده‌اند که می‌تواند به افت شدید سفره و بروز بحران آبی در دشت منجر شود.

منابع

[۱]. پورمحمدی، سمانه؛ ملکی‌نژاد، حسین؛ ربابه، پورشرعیانی،۱۳۹۱، «مقایسهٔ کارایی روش‌های شبکهٔ عصبی و سری‌های زمانی در پیش‌بینی سطح آب

1. Mean Error
2. Mean Absolout Error
3. Mean Root Square Error
4. correlation coefficient

زیرزمینی (مطالعهٔ موردی: زیرحوضهٔ بختگان استان فارس)»، مجلهٔ *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک گرگان*.

[۲]. پورمحمدی، سمانه؛ جعفری، هادی؛ دستورانی، محمدتقی؛ مساح بوانی، علی‌رضا، ۱۳۹۳، بررسی بیلان آب زیرزمینی دشت تویسرکان، همایش ملی قنات و قنات‌داری، دانشگاه بیرجند (چاپ شده).

[۳]. شیرافکن، ملیحه؛ جعفری، هادی، ۱۳۹۲، ارزیابی بیلان هیدروژئولوژیکی آبخوان بهاباد در استان یزد، هشتمین همایش زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه فردوسی مشهد.

[۴]. فاتحی مرج، احمد؛ طائی سمیرمی، مجید؛ میرنیا، سیدخلاق، ۱۳۹۰، مدیریت منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل عددی MODFLOW مطالعهٔ موردی: دشت گربایگان استان فارس، چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، http://www.civilica.com/Paper-WRM04-WRM04_153.html

[۵]. محمدی قلعه‌نی، مهدی؛ کیومرث، ابراهیم؛ عراقی‌نژاد، شهاب، ۱۳۹۱، «ارزیابی تأثیر عوامل اقلیمی بر افت منابع آب زیرزمینی (مطالعهٔ موردی: آبخوان دشت ساوه)»، مجلهٔ *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، جلد نوزدهم، ش چهارم.

[۶]. نیکبخت، جعفر؛ نجیب، زهرا؛ حسن، پوراقدم،۱۳۹۱، تبدیل سیستم‌های آبیاری سنتی به تحت فشار بر افزایش ذخیره و سطح آب زیرزمینی مطالعهٔ موردی: دشت عجب‌شیر، آذربایجان، اولین کنفرانس ملی راهکارهای دستیابی به توسعهٔ پایدار.

[7].Ale.S, L.C., Bowling, P.R., Owens, S.M., Brouder, J.R and Frankenberger, V., 2012, Development and application of a distributed modeling approach to assess the watershed-scale impact of drainage water management , journal of Agricultural Water Management, Volume 107, Pages 23-33.

[8].Ashraf, A and Zulfiqar, Ahmad., 2012, Integration of Groundwater Flow Modeling and GIS, Water Resources Management and Modeling, ISBN: 978-953-51-0246-5.

[9].Chenini, I and Abdallah, B.M., 2010, Groundwater recharge study in arid region: An approach using GIS techniques and numerical modeling Computers & Geosciences, Volume 36, Issue 6, Pages 801-817.

[10]. Dillip, K., Ghose, S., Panda, S., Prakash, C and Swain, M., 2010, Prediction of water table depth in western region, Orissa using BPNN and RBFN neural networks, Journal of Hydrology, Volume 394, Issues 3–4, 26 November 2010, Pages 296-304.

[11]. Gaur, S., Chahar, B and Didier, R., 2011, Graillot a,2Combined use of groundwater

[12]. modeling and potential zone analysis for management of groundwater, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 13 (2011) 127–139.

[13]. Jinnan, G., Kaiyun, W., Seppo, K., Chao, Z., Pertti, J.M and Narasinha, S., 2012, Modeling water table changes in boreal peatlands of Finland under changing climate conditions ,Journal of Ecological Modelling, Volume 244, 10, Pages 65-78.

[14]. Okkonen, J and BjørnKløve, A., 2010, A conceptual and statistical approach for the analysis of climate impact on ground water table fluctuation patterns in cold conditions , Journal of Hydrology, Volume 388, Issues 1–2, 25 June 2010, Pages 1-12.

[15]. Poch. N and Pongnoo, N., 2012, A Numerical Treatment of a Mathematical Model of Ground Water Flow in Rice Field near Marine Shrimp Aquaculture Farm,Journal of Procedia Engineering, Volume 32, Pages 1191-1197.

[16]. Pisinaras, V., Petalas, C., Tsihrintzis, V.A and Zagana, E., 2007: A Groundwater Flow Model for Water Resources Management in the Ismarida Plain, North Greece. Environmental Modeling and Assessment, 12: 75-89.

[17]. Sarah S, Ahmed, S., Boisson, A., Violette, S and Marsily, G., 2014, Projected groundwater balance as a state indicator for addressing sustainability and management challenges of overexploited crystalline aquifers, Journal of HydrologyVolume 519, Part B, 27 November 2014, Pages 1405–1419.

[18]. Singh, A., 2013, Groundwater modelling for the assessment of water management alternatives , Journal of Hydrology, Volume 481, Pages 220-229.

[19]. Yang, Q. C., Liang, J., Yang, Z. P., 2012, Numerical Modeling of Groundwater Flow in Daxing(Beijing, China), 2nd International Conference on Advances in Energy Engineering.