

مقاله علمی-پژوهشی

شبیه‌سازی عددی جهت ارائه رابطه‌ای برای برداشت بهینه آب زیرزمینی
(مطالعه موردی: آبخوان دامنه)

علی احمدی بادجانی^۱، مهدی ملک محمودی^{۲*}، طاهر رجایی^۳، محمد جوادی راد^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۲/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۳/۲۳

چکیده

هدف از این پژوهش شناخت رفتار آبخوان دامنه نسبت به تنش‌های مختلف آبی و ارائه رابطه‌ای برای برداشت بهینه آب زیرزمینی از این آبخوان می‌باشد. ابتدا از سامانه اطلاعات جغرافیایی برای پردازش داده‌های زمین‌شناسی، هیدروژئولوژیکی و هیدروژئولوژیکی و سپس کد MODFLOW-2000 برای شبیه‌سازی جریان استفاده شد. پس از شبیه‌سازی اولیه، پارامتر هدایت هیدرولیکی در حالت پایدار (فروردین ۱۳۸۴) و در حالت ناپایدار (۱۳۸۳-۱۳۸۴) ضریب آبدهی‌ویژه واسنجی گردید. سپس برای یک دوره ۱۸ ماهه، با داده‌های سال ۹۱-۹۲ و برای پارامترهای بهینه شده آزمون صحت‌سنجی انجام شد. برای پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی و تاثیر پمپاژ آب از آبخوان دامنه، دو سناریو مدیریتی متفاوت برای یک بازه زمانی ۱۰۲ ماهه، تعریف شد. نتایج تحلیل مدل عددی مبین این است که اگر با وضعیت فعلی از آبخوان بهره‌برداری شود افت شدید آب در آبخوان و خشک شدن تدریجی آبخوان در آینده ادامه پیدا خواهد کرد. البته کاهش دبی پمپاژ باعث بهبود نسبی این وضعیت می‌شود. پس با توجه به اینکه آبخوان دامنه کاملاً توسعه یافته است، نمودار تغذیه-پمپاژ استخراج گردید. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از نمودار تغذیه-پمپاژ می‌توان سطح آب را با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی در یک حد مشخصی کنترل کرد و محدوده‌هایی از آبخوان که نزدیک مرز آبخوان (مرزهای تراوا) هستند تحت تاثیر این مرزها قرار گرفته و چاه‌های بهره‌برداری در این محدوده کمترین اثر را روی افت سطح آب دارند.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی عددی، مدل آب‌های زیرزمینی، آبخوان دامنه، نوسانات سطح آب، MODFLOW

مقدمه

توسعه تأمین آب از منابع آب‌های زیرزمینی، معمولاً با حفر تعدادی چاه‌های پمپاژ پراکنده در سطح حوضه شروع می‌شود. با گذشت زمان، چاه‌های بیشتری حفر می‌شود و نرخ برداشت آب افزایش می‌یابد. هرچه تعداد چاه‌ها بیشتر شود، در نتیجه میزان برداشت از حد تعادل تجاوز می‌کند و قابلیت تغذیه طبیعی حوضه جهت ایجاد تعادل کم می‌شود. توسعه حفر چاه و برداشت از آب زیرزمینی بعد از این مرحله، چنانچه بر اساس یک برنامه مدیریتی نباشد، در نهایت منجر به از بین رفتن منابع آب زیرزمینی می‌شود (عطایی آشتیانی، ۱۳۹۳). برای مدیریت آب‌های زیرزمینی به اطلاعات زیادی در خصوصیات آبخوان و سیستم جریان آب زیرزمینی نیاز است که به دست آوردن آن‌ها دشوار و معمولاً با هزینه و عدم قطعیت زیاد همراه است. در این رابطه، مدل‌ها، به‌ویژه مدل‌های ریاضی، امکان بررسی کم‌هزینه و مؤثر سیستم‌های پیچیده آب زیرزمینی را فراهم کرده‌اند (نظری و همکاران، ۱۳۹۳). محققان متعددی به مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی پرداختند از جمله، دان و همکاران با استفاده از مدل MODFLOW

استفاده از منابع آب زیرزمینی مستلزم اعمال مدیریت صحیح است (وزارت نیرو، ۱۳۹۳). مدیریت یک حوضه آب زیرزمینی به یک برنامه توسعه بهره‌برداری از منابع زیرزمینی آب برای برخی اهداف خاص اشاره دارد که معمولاً این اهداف دارای طبیعت اجتماعی یا اقتصادی‌اند. در کل هدف مطلوب دستیابی به حداکثر مقدار آب، برآورده سازی کیفیت‌های از پیش تعیین شده با حداقل هزینه‌هاست.

- ۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه قم
 - ۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مدیریت منابع آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران
 - ۳- دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم
 - ۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه قم
- (*)- نویسنده مسئول: (Email: mehdi_m_1995@yahoo.com)

مختلف برای نرخ پمپاژ، تأثیر برداشت آب از نقاط مختلف آبخوان و همچنین ارائه رابطه‌ای برای برداشت بهینه با توجه به تغییرات بارش بررسی شود. از آنجایی که نتایج حاصل از آبخوان‌های مدل‌سازی شده برای همان آبخوان مورد استفاده قرار می‌گیرد، برای مدل‌سازی یک آبخوان نمی‌توان از سایر آبخوان‌ها استفاده کرد. همچنین در این پژوهش علاوه بر کنترل نتایج با سایر کارهای قبلی از نرم‌افزارهای تخصصی مرتبط هم بهره گرفته شده، و پارامترهای تأثیرگذار در نتایج مدل‌سازی به صورت منطقی برآورد شده است. در انتهای پژوهش نیز رابطه پمپاژ - تغذیه استخراج شده است.

مواد و روش‌ها

موقعیت و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

دشت دامنه با مساحت تقریبی ۱۲۵ کیلومتر مربع در غرب استان اصفهان واقع شده و بخشی از حوضه آبریز گاوخونی محسوب می‌شود، شکل ۱ موقعیت آبخوان دامنه را نشان می‌دهد. این دشت به دلیل داشتن زمین‌های مستعد کشاورزی همواره مورد توجه بوده است. خشک شدن چاه‌های کشاورزی، کاهش کیفیت آب شرب منطقه، فرونشست زمین و تخریب مناطق مسکونی شهر دامنه از جمله مشکلاتی است که برداشت بیش از حد آب زیرزمینی در این منطقه به وجود آورده است.

این ناحیه از دیدگاه ساختاری بخش‌هایی از زون سنندج - سیرجان را در برمی‌گیرد. رخنمون‌های سنگی این محدوده عمدتاً مربوط به برون زدهای مزوزوئیک^۱ و قسمت‌هایی هم متعلق به سنوزوئیک^۲ است. همچنین رسوبات نهشته شده در دامنه ارتفاعات و پهنه دشت‌ها نیز به کواترنر^۳ تعلق دارند (شکل ۱). نهشته‌های کواترنر بسته به موقعیت خود از نظر شرایط تغذیه و ویژگی‌های دانه‌بندی و اثرات سازندهای حاشیه‌ای از نظر آبدی پتانسیل‌های متفاوت دارند. بیشترین تعداد چاه‌های بهره‌برداری در این منابع آبرفتی حفر شده‌اند. چاه‌هایی که در محدوده‌های با ستبرای زیاد آبرفت آبدار و بافت درشت دانه حفر شده‌اند از توان آبدی مناسبی برخوردار هستند (وزارت نیرو، ۱۳۹۴).

هیدرولوژی، هیدروژئولوژی و پارامترهای مدل آبخوان دشت دامنه

میانگین بارندگی دراز مدت چندساله حدود ۳۷۵ میلی‌متر که عمدتاً به صورت برف در ارتفاعات و باران در دشت، و میانگین بلندمدت دما ۱۰/۳ درجه سانتی‌گراد و به طور متوسط میزان تبخیر

MT3D هیدرولیک جریان آب زیرزمینی، فروکش کردن زمین و انتقال املاح در زمین‌های آبرفتی را شبیه‌سازی کردند (Don et al., 2005). یاوتی و همکاران در مطالعه آبخوان آزاد بوارگ در دشت‌های شمال مراکش ضمن مدل‌سازی دشت با استفاده از کد MODFLOW در محیط GIS سناریوهای مختلف متناسب با مکان‌های مختلف دشت ارائه دادند (Yaouti et al., 2008). یوکان هو و همکاران در مطالعه‌ای تحت عنوان "صرف جویی در آب کشاورزی و مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی منطقه شی جیا ژوانگ" در شمال چین از مدل MODFLOW استفاده کردند (Yukun Hu et al., 2010). فقیهی و همکاران ضمن مطالعه و شبیه‌سازی آبخوان دشت قزوین با استفاده از کد MODFLOW در محیط Visual Modflow نتایج مدل را در شرایط فعلی کالیبره کردند و نهایتاً با ارائه سه سناریو وضعیت آینده آبخوان را ارائه نمودند (Faghihi et al., 2010). ایزدی و همکاران به مدل‌سازی آب زیرزمینی دشت نیشابور در شمال شرق ایران پرداختند (Izady et al., 2013). دی-مایو و همکاران به بررسی تلفیق آب‌های سطحی زیرزمینی به صورت عددی با استفاده از کد MODFLOW و نرم‌افزار GMS بر روی حوضه رودخانه لانگات در مالزی پرداختند (Di Maio et al., 2013). بانژاد و همکاران برای شبیه‌سازی جریان و انتقال آلودگی آبخوان نهبوند واقع در غرب ایران از کدهای MODFLOW و MODPATH در غالب نرم‌افزار GMS استفاده کردند (Banejadi et al., 2014). سورین آدو و همکاران از کد MODFLOW جهت مدل‌سازی آبخوان و برآورد میزان جریان ورودی آب زیرزمینی به معادن زغال‌سنگ در آندرا پرادش هند استفاده کردند (Surinaidu et al., 2014). دولت آبادی و همکاران با به‌کارگیری دو مدل MODFLOW و SWAT مدل‌سازی تلفیقی جریان‌های سطحی و جریان زیرزمینی دشت فیروزآباد در ایران را تشریح کردند (Dowlatabadi et al., 2015). پالینو و همکاران برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در شمال اسپانیا که آبخوان تشکیل شده از سنگ آهک از کد تفاضل محدود MODFLOW استفاده کردند (Paulino et al., 2015). موحدیان و همکاران جهت مدیریت دشت عقیلی در جنوب ایران و تأثیر متقابل رودخانه و آبخوان به یکدیگر از MODFLOW استفاده کردند (Movahedian et al., 2016). انوار و همکاران از کد MODFLOW برای شبیه‌سازی سه بعدی آبخوان آبرفتی اسماعیل‌خان پاکستان، استفاده کردند (Anwar et al., 2016). خادری و همکاران از کد MODFLOW برای مدل‌سازی عددی جریان آب زیرزمینی حوضه رودخانه ماهش در جنوب غربی هند در حالت پایدار استفاده نمودند (Khadri et al., 2016). هدف از این پژوهش، در مرحله اول بررسی و شناخت دقیق وضع موجود آبخوان دامنه با استفاده از نرم‌افزار GMS10.1 است و سپس با توجه به نتایج مرحله اول و اطمینان از مدل‌سازی صحیح، با اعمال شرایط

1- Mesozoic
2- Cenozoic
3- Quaternary

خاک و نوع گیاه بستگی دارد. در محدوده مورد مطالعه آبیاری به صورت غرقابی (۴۵ درصد) و تحت فشار (۵۵ درصد) انجام می‌گیرد (وزارت نیرو، ۱۳۹۴)، با توجه به خصوصیات ذکر شده میزان آب برگشتی از کشاورزی صفر تا ۱۵ درصد در نظر گرفته شد. شکل ۴ موقعیت چاه‌ها بهره‌برداری آبخوان دامنه را نشان می‌دهد. آب برگشتی از کشاورزی صفر تا ۱۵ درصد در نظر گرفته شد. شکل ۴ موقعیت چاه‌ها بهره‌برداری آبخوان دامنه را نشان می‌دهد.

مدل‌سازی

معادله حاکم بر جریان آب‌های زیرزمینی

معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی در آبخوان آزاد، و در محیط متخلخل با رابطه دیفرانسیل جزئی زیر توصیف می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h^2}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h^2}{\partial z} \right) = 2 S_y \frac{\partial h}{\partial t} + 2$$

k_x ، k_y و k_z ضرایب هیدرولیکی^۴ بر حسب واحد طول بر زمان (L/T) ، h سطح آب بر حسب واحد طول (L) ، پارامتر تخلیه و یا تغذیه^۵ بر حسب حجم، S_y ضریب آبدهی ویژه^۶ و t زمان بر حسب واحد زمان (T) (نظری و همکاران، ۱۳۹۳).

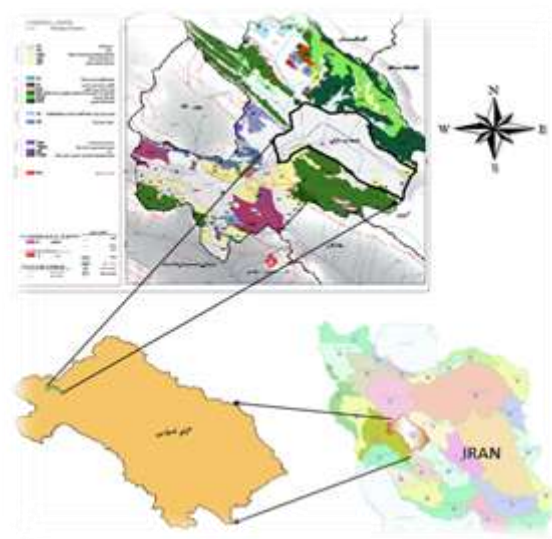
MODFLOW یک مدل عددی بر پایه روش تفاضل محدود است که برای حل مسائل جریان آب زیرزمینی در یک، دو و یا سه بعد استفاده می‌شود (عطایی آشتیانی و همکاران، ۱۳۹۳). در این پژوهش از کد MODFLOW-2000 در نرم‌افزار GMS استفاده شد.

ایجاد مدل مفهومی و مدل عددی

برای ایجاد مدل مفهومی، ابتدا لایه‌های توپوگرافی سطح زمین، سنگ کف، چاه‌های بهره‌برداری و مشاهده‌ای، مرز آبخوان، ضریب هدایت هیدرولیکی و تغذیه در نرم‌افزار ARC GIS10.2 تهیه و بعد از وارد کردن تمام این اطلاعات به نرم افزار GMS10.1، مدل مفهومی سه بعدی ایجاد شد.

برای محدوده مورد مطالعه، شبکه با سلول‌های با ابعاد 150×150 متر تقسیم‌بندی شده و با در نظر داشتن شرایط هیدروژئولوژی آبخوان، به صورت یک لایه طراحی گردید. شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای مدل در سرتاسر مرز آبخوان از نوع وابسته به بار هیدرولیکی GHB و مرز بدون جریان Wall می‌باشد. شکل ۵ مش سه بعدی آبخوان دامنه را نشان می‌دهد.

۲۶۰ میلی‌متر است. سطح دشت دامنه دارای شیب تقریباً یکنواخت و ملایمی است، که بیشترین ارتفاع حدود ۲۴۳۸ متر از کناره‌های شمالی و شرقی آبخوان به کمترین ارتفاع حدود ۲۳۱۲ متر در مناطق جنوب غربی آبخوان تغییر می‌کند. ضخامت آبرفت^۱ در نقاط مختلف آبخوان متفاوت هست به طوری که در قسمت‌های شمال شرقی دارای کمترین مقدار (۲۶ متر) و در قسمت‌های جنوب غربی دارای بیشترین مقدار (بیش از ۸۰ متر) می‌باشد. چاه‌های مشاهده‌ای^۲ در شروع مدل‌سازی (سال ۱۳۸۳) تعداد ۹ حلقه می‌باشد و نسبتاً پراکندگی مناسبی در سطح دشت دارند. در مرحله صحت‌سنجی (سال ۹۲) اطلاعات ۸ حلقه چاه (که دارای اندازه‌گیری بود) استفاده شد، موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای و جهت جریان که با استفاده از داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای فروردین ۱۳۸۴ تهیه شده، در شکل ۲ نمایش داده شده است.

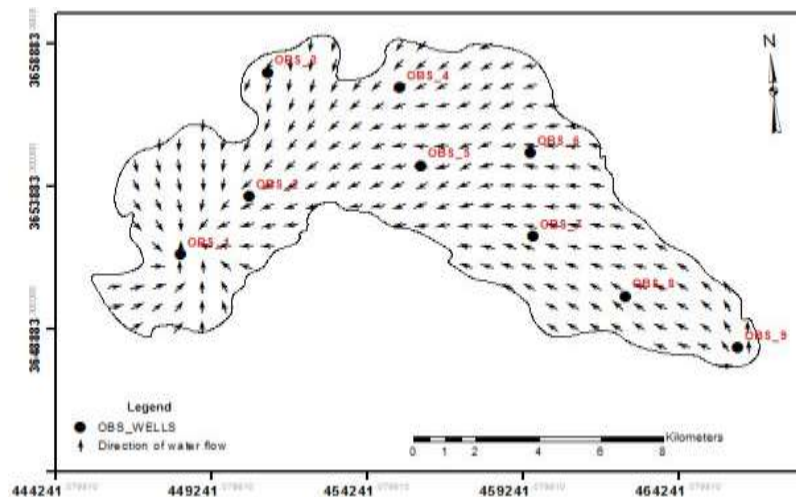


شکل ۱- موقعیت و نقشه زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی

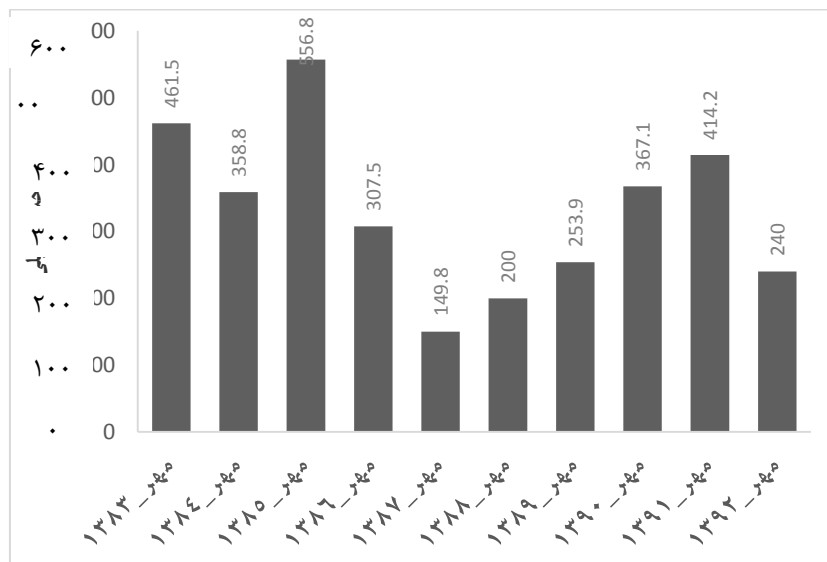
آمار چاه‌های مشاهده‌ای نشان می‌دهد که آبخوان دامنه آزاد^۳ بوده، به همین دلیل قادر است به صورت مستقیم از بارندگی تغذیه شود. میزان بارش سالانه در شکل ۳ ارائه شده است. در این پژوهش با توجه به وضعیت توپوگرافی سطح زمین در این محدوده که غالباً دارای شیب کمی می‌باشد و در بیشتر قسمت‌های آبخوان اراضی کشاورزی وجود دارند لذا روان آب قابل ملاحظه‌ای ایجاد نشده و بیشتر بارندگی نفوذ کرده و به آب زیرزمینی تبدیل می‌شود، به همین دلیل روان آب حوضه محاسبه نشده است. نفوذ از آب مصرفی کشاورزی به نوع روش، نوبت و نحوه آبیاری، جنس و نفوذپذیری

4- Hydraulic conductivity
5- Recharge
6- Specific yield

1- Alluvium
2- Observation wells
3- Phreatic aquifer



شکل ۲- موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای و جهت جریان براساس آمار چاه‌های مشاهده‌ای فروردین ۱۳۸۴



شکل ۳- میزان بارش سالانه (دوره آماری ۱۳۸۳-۱۳۹۲)

هیدرولیکی لایه‌های آبدار برای پیش‌بینی وضعیت آبدهی چاه‌ها، موقعیت سطح ایستابی یا سطح پیرومتریک و میزان تغذیه و تخلیه دارد (صفوی، ۱۳۹۳).

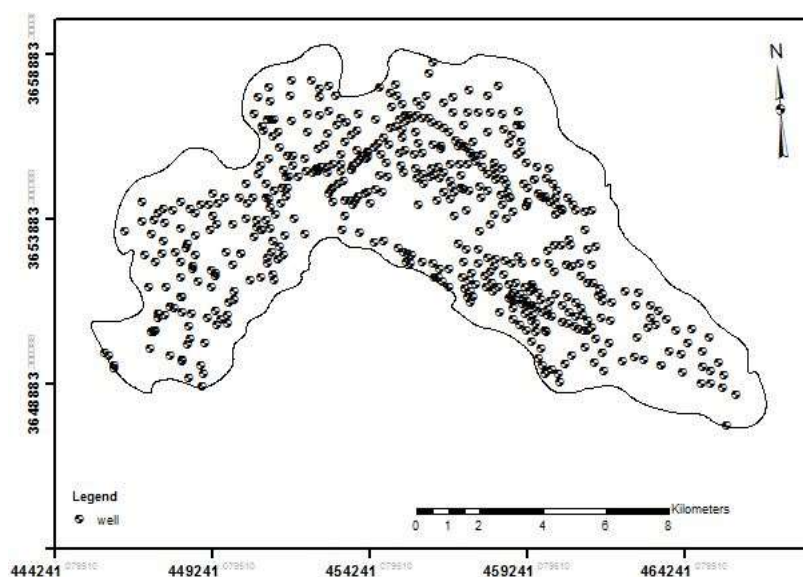
برای تعیین مقدار هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه، ابتدا از نتایج آزمایش پمپاژ استفاده شد که این نتایج در محدوده مورد مطالعه انجام شده بود. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که مقدار ضریب قابلیت انتقال در بخش جنوبی آبخوان ۲۰۰۰ متر در روز و در شمال و شمال‌شرق آبخوان این ضریب به کمتر از ۵۰۰ متر در روز می‌رسد. بعد از ایجاد شبکه سه‌بعدی، برای مدل‌سازی در حالت پایدار از داده‌های فروردین ماه سال ۱۳۸۴ که کمترین نوسان سطح آب را بین ماه‌های این سال داشت استفاده شد، پس از اعمال کردن پارامترهای لازم، مدل برای اولین بار اجرا شد.

نتایج و بحث

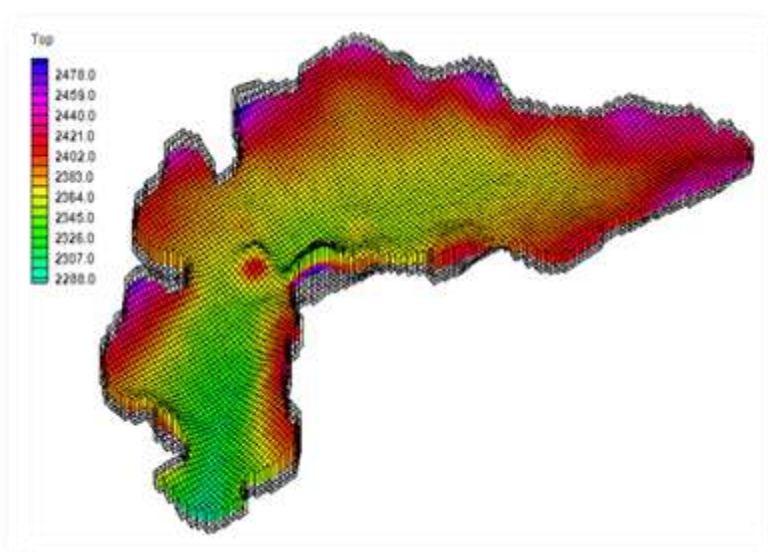
بهینه‌سازی^۱ ضرایب هیدرودینامیکی^۲

ضرایب هدایت هیدرولیکی، قابلیت انتقال^۳، ضریب ذخیره آبدهی ویژه، خواص هیدرودینامیکی لایه‌های آبدار هستند که تعیین کننده سرعت حرکت آب در خاک و نیز تغییرات سطح ایستابی و پیرومتریک در انواع لایه آبدار است. پیش‌بینی دقیق وضعیت حرکت آب زیرزمینی بستگی به تخمین و ارزیابی دقیق این ضرایب هیدرودینامیکی دارد. آزمایشات پمپاژ نقش مهمی در ارزیابی خواص

- 1- Optimization
- 2- Hydrodynamic coefficients
- 3- Transmissivity



شکل ۴- موقعیت چاه‌های بهره‌برداری در سطح آبخوان



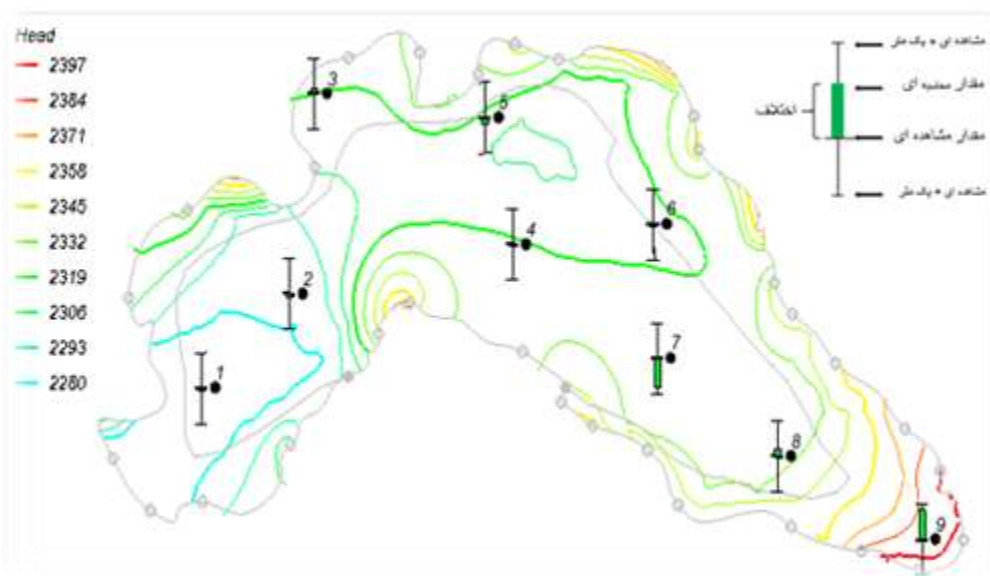
شکل ۵- مدل سه بعدی آبخوان دامنه (ضخامت لایه آبدار)

مشاهده‌ای اختلاف زیادی داشت اقدام به واسنجی مدل در حالت پایدار شد. در این حالت پارامتر ضریب هدایت هیدرولیکی به صورت دستی و با استفاده از کد PEST واسنجی گردید. جدول ۱ اختلاف سطح آب محاسبه‌ای و مشاهده‌ای را نشان می‌دهد که بیشتر این اختلاف ۰/۸۷ متر در محدود چاه ۹ می‌باشد. نرم‌افزار GMS برای نشان دادن اختلاف سطح مشاهده‌ای و محاسبه‌ای و اینتروال، در مجاورت هر یک از نقاط مشاهده‌ای، ابزاری قرار می‌گیرد که می‌توان به وضعیت واسنجی مدل در نقاط مختلف پی برد، این حدود در شکل ۶ مشخص شده است.

تقریباً در ساخت هر مدلی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی در اولین محاسبه، با مشاهدات اختلاف زیادی داشته، بر آن منطبق نشده و اختلاف آن با مشاهدات، در حد قابل قبولی نمی‌باشد. به منظور کاهش اختلاف بین نتایج محاسبات با مشاهدات، کالیبراسیون یا واسنجی^۱ مدل صورت گرفته مدل کالیبره می‌شود پارامترهای متغیر در کالیبراسیون، به هدف از ساخت مدل و سطح اطمینان به داده‌های خام اولیه بستگی دارد (طاهری و همکاران، ۱۳۹۰). پس از اجرای اولیه مدل، به لحاظ اینکه سطح محاسبه‌ای آب زیرزمینی با سطح

جدول ۱- مقایسه سطح آب مشاهده‌ای و محاسبه‌ای

شماره چاه	سطح آب مشاهده‌ای (متر)	سطح آب محاسبه‌ای (متر)	اختلاف (متر)
OBS_1	۲۲۷۴٫۸۹۰	۲۲۷۴٫۸۴۰	-۰٫۰۵۰
OBS_2	۲۲۸۵٫۸۰۰	۲۲۸۵٫۷۳۰	-۰٫۰۷۰
OBS_3	۲۳۱۸٫۲۵۰	۲۳۱۸٫۴۰۹	۰٫۱۵۹
OBS_4	۲۳۱۲٫۲۹۰	۲۳۱۲٫۱۲۴	-۰٫۱۵۶
OBS_5	۲۲۱۶٫۳۸۰	۲۲۱۹٫۳۵۹	-۰٫۰۲۱
OBS_6	۲۳۱۷٫۲۹۰	۲۳۱۷٫۲۴۴	-۰٫۰۴۶
OBS_7	۲۲۲۱٫۲۶۰	۲۲۲۰٫۵۷۲	-۰٫۷۸۸
OBS_8	۲۲۳۳٫۴۳۰	۲۲۳۳٫۶۶۸	۰٫۲۳۸
OBS_9	۲۳۹۱٫۴۷۰	۲۳۹۲٫۳۵۰	۰٫۸۸۰



شکل ۶- مقایسه میان ترازهای مشاهده شده و محاسبه شده با شاخص کالیبراسیون

جدول ۲- مقادیر آماری خطاها در دوره واسنجی و صحت‌سنجی

مراحل	زمان (ماه)	خطای میانگین (متر)	خطای میانگین مطلق (متر)	جذر میانگین مربعات خطاها (متر)	ضریب همبستگی (درصد)
مدلسازی					
واسنجی	۱۲	-۰٫۲۴	۰٫۷۸	۰٫۹۹	۹۹٫۹
صحت‌سنجی	۱۸	۰٫۱۴	۰٫۶۶	۱٫۱۱۳	۹۹٫۷

انتخاب شد. مدل تا رسیدن به بهترین برازش بین بارهای هیدرولیکی مشاهده‌ای و محاسبه‌ای به صورت متوالی اجرا شد و در هر بار اجرا با تغییر پارامترهای جریان تبدالی در مرزها، تا رسیدن به نتیجه قابل قبول ادامه یافت. مقادیر خطای میانگین (ME) خطای میانگین مطلق (MAE) و جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) و ضریب همبستگی در طول دوره واسنجی در جدول ۲ نمایش داده شده است.

پس از اجرای مدل، انطباق قابل قبولی بین داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های محاسبه‌ای دیده شد، لازم به ذکر است که میزان اینتروال برای حالت پایدار برای تمامی چاه‌های مشاهده‌ای مقدار یکسان یک متر در نظر گرفته شده است. شکل ۶ شاخص کالیبراسیون را در چاه‌های مشاهده‌ای نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه شرایط ناپایدار بر آبخوان حاکم هست، مدل برای یک دوره ۱۲ ماه (مهر ماه ۱۳۸۳ تا شهریور ۱۳۸۴) اجرا شد. سپس پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آب‌دهی ویژه برای بهینه‌سازی

1- Root mean squared error

چاه می‌باشد (طاهری و همکاران، ۱۳۹۰). با توجه به هیدروگراف چاه‌های مشاهده‌ای، در آبخوان دامنه نرخ مختلف دبی پمپاژ تاثیر متفاوتی در نقاط مختلف این آبخوان گذاشته، به همین منظور برای ارزیابی واکنش لایه آبدار به تنش‌های مختلف یک دوره ۱۰۲ ماهه (از مهر ۱۳۹۱ تا فروردین ۱۴۰۰)، با تغذیه ثابت (بارش سال ۱۳۹۲) و دو نرخ متفاوت برای پمپاژ، ۱- ادامه بهره‌برداری با سیاست فعلی برای بهره‌برداری، ۲- ادامه بهره‌برداری با کاهش ۳۰ درصد در نرخ پمپاژ، مدل برای دوره پیش‌بینی طراحی شد. لازم به ذکر ضرایب هدایت هیدرولیکی و ضریب آب‌دهی ویژه با بهره‌گیری از پارامتر بهینه شده از مرحله‌ای واسنجی، برای دوره پیش‌بینی در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه بارش در سال ۱۳۹۲ به مقدار میانگین سالانه نزدیک است، نتایج سناریوهای تعریف شده نشان می‌دهد که استحصال از آبخوان دامنه باسیاست فعلی باعث خشک شدن قسمت‌های بیشتری از آبخوان شده بطوری که حداکثر افت در محدود چاه مشاهداتی پنج به میزان ۱۲/۲۰ متر و حداقل مقدار افت در محدود چاه مشاهده ای ۳ به میزان ۱/۷۰ متر می‌باشد (جدول ۳). کاهش در نرخ پمپاژ از آبخوان تاثیر مثبت و البته متفاوت روی سطح آبخوان داشته است (شکل ۷) بطوری که بیشترین تاثیر در محدوده چاه ۲ به میزان ۹۴ درصد می‌باشد.

ارائه رابطه برای بهره‌برداری بهینه از آبخوان دامنه

وقتی که منابع آب زیرزمینی به مرحله توسعه کامل می‌رسد مشکلات مدیریتی به طور محسوسی افزایش می‌یابد بنابراین لازم است در یک لایه آبدار میزان آب ورودی (تغذیه) و خروجی (تخلیه) برابر شود. نتایج نشان می‌دهد که آبخوان دامنه کاملاً توسعه یافته و بهره‌برداری با مدیریت فعلی از آبخوان دامنه باعث خشک شدن بیشتر این آبخوان می‌شود، برای جلوگیری از روند خشک شدن و نگه‌داشتن سطح آب در یک حد معین، باید میزان بهره‌برداری از آبخوان بهینه شود. برای تعیین برداشت مجاز از آبخوان، تغذیه و افت سطح آب سال آبی ۱۳۸۴ به عنوان مبنا مدل‌سازی قرار گرفت (شکل ۸). نرخ پمپاژ مدل را با توجه به شکل ۹، از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۲ تغییر داده و مدل اجرا شد. سپس هیدروگراف چاه‌های مشاهده‌ای استخراج شد. هیدروگراف چاه مشاهده‌ای ۲ نشان می‌دهد که با تغییر نرخ برداشت متناسب با تغذیه می‌توان سطح آب را در یک محدود معینی کنترل کرد. هیدروگراف چاه مشاهده‌ای ۴ که در مرکز تراکم چاه‌های بهره‌برداری قرار گرفته نشان می‌دهد که افت سطح آب در این محدوده بیشتر بوده که ناشی از تداخل مخروط افت چاه‌های بهره‌برداری است، لذا با تغییر در پمپاژ به صورت محدود نمی‌توان سطح آب را در یک سطح مشخصی کنترل کرد.

با توجه به این جدول مقدار خطای RMS کمتر از یک متر می‌باشد که مناسب است و مقدار ۹۹ درصد ضریب همبستگی تطابق خوب سطح آب زیرزمینی و مشاهده‌ای را نشان می‌دهد.

صحت‌سنجی

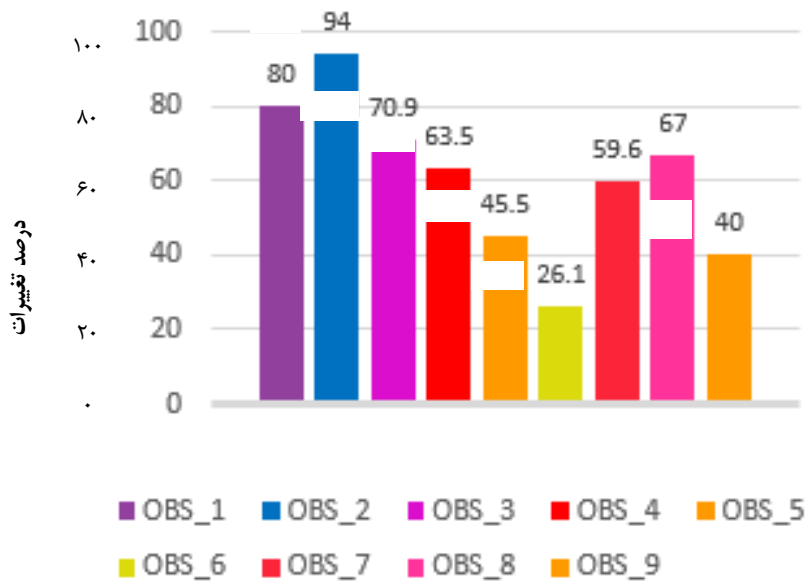
به علت وجود عدم قطعیت^۱ در واسنجی، مجموعه مقادیر پارامترهای استفاده شده در مدل واسنجی شده ممکن است مقادیر صحیحی را با دقت خوبی نشان ندهد. در نتیجه امکان دارد پارامترهای واسنجی شده، سیستم را تحت شرایط مرزی و تنش‌های هیدرولوژیک مختلف به خوبی نشان ندهد. صحت‌سنجی^۲ مدل به حصول اطمینان بیشتر از واسنجی کمک می‌کند (نظری و همکاران، ۱۳۹۳). در مرحله صحت‌سنجی اگر مدل بتواند حوادث دوره‌ای زمانی غیر از کالیبراسیون را شبیه‌سازی کند ترکیب پارامترهای بکار رفته درست می‌باشد. برای بررسی صحت ضرایب هیدرودینامیکی بکار رفته، مدل از مهر ماه ۱۳۹۰ تا فروردین ۱۳۹۲ به مدت ۱۸ ماه مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. مقادیر خطای میانگین (ME) خطای میانگین مطلق (MAE) و جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) و ضریب همبستگی در طول دوره واسنجی در جدول ۲ نمایش داده شده است.

اعمال تنش‌های متفاوت برای تغذیه

با توجه به شرایط اقلیمی منطقه، دشت دامنه با دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی به صورت متناوبی روبه روست، به همین دلیل، برای اینکه مدل با طبیعت آبخوان بهتر منطبق شود و یک دوره ترسالی و خشک به مدل اعمال شده باشد. مدل‌سازی برای یک دوره ۱۰۲ ماهه (از مهر ۱۳۸۳ تا فروردین ۱۳۹۲) اجرا شد. باتوجه آمار بارندگی ماهانه از سال ۸۳ تا ۸۷ به عنوان ترسالی و از ۸۸ تا ۹۲ با افت نسبی زیادی در بارندگی وجود داشته که به عنوان دوره خشک زیادی در بارندگی بررسی افت آب در هریک از پیژومترها مشخص گردید که سطح آب آبخوان به طور متوسط هر سال ۲/۲ متر کاهش می‌یابد.

تاثیر اثر پمپاژ بر نقاط مختلف آبخوان

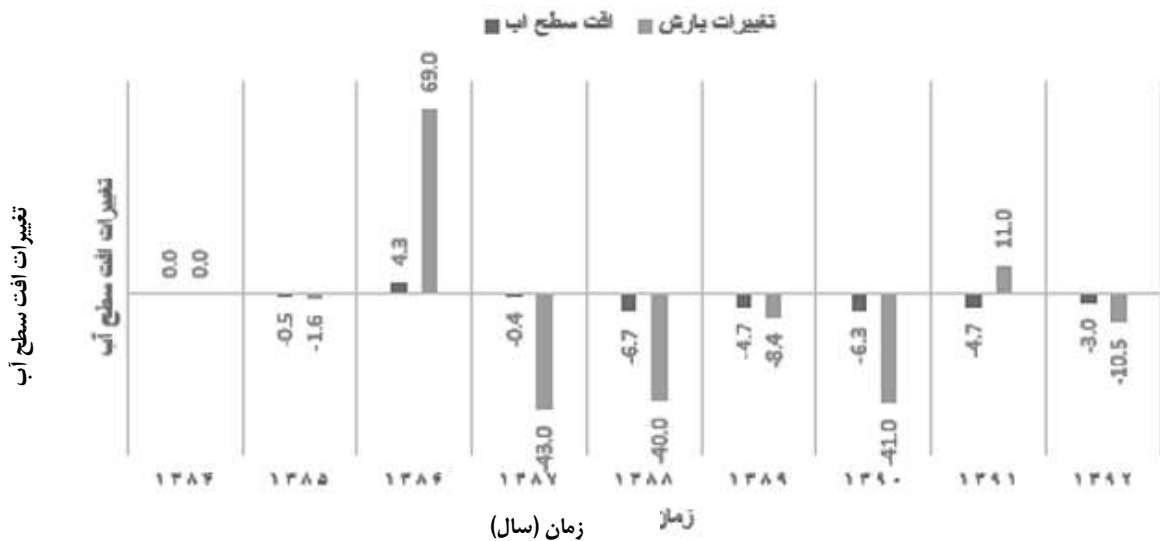
استخراج و استحصال آب‌های زیرزمینی توسط چاه‌ها باعث حرکت آب به سمت آنها شده و لذا ممکن است حرکت آب‌های زیرزمینی قبل از پمپاژ را تحت تاثیر خود قرار دهد. در لایه‌های آبدار همگن و همروند، پمپاژ آب از طریق چاه باعث ایجاد افت در سطح ایستایی در اطراف چاه می‌گردد، که به صورت متقارن نسبت به محور



شکل ۷- تاثیر تغییر نرخ پمپاژ در چاه‌های مشاهده‌ای

جدول ۳- مقایسه اثرات متفاوت نرخ پمپاژ در سطح آبخوان

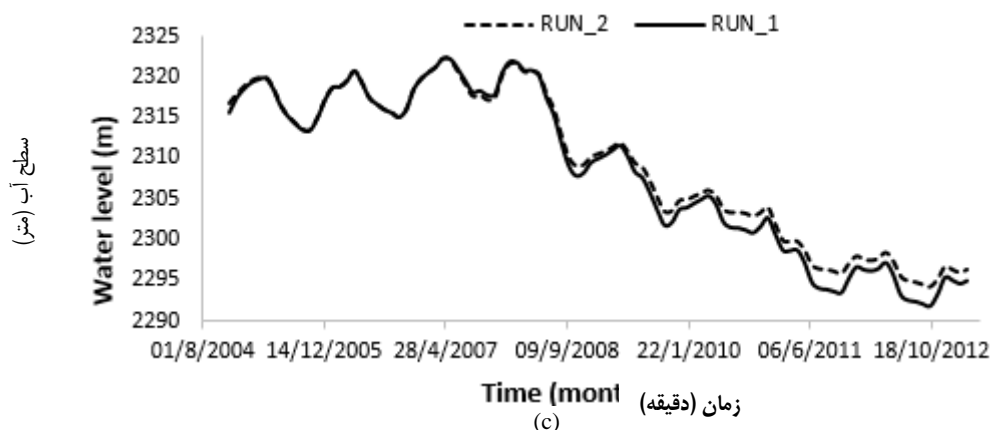
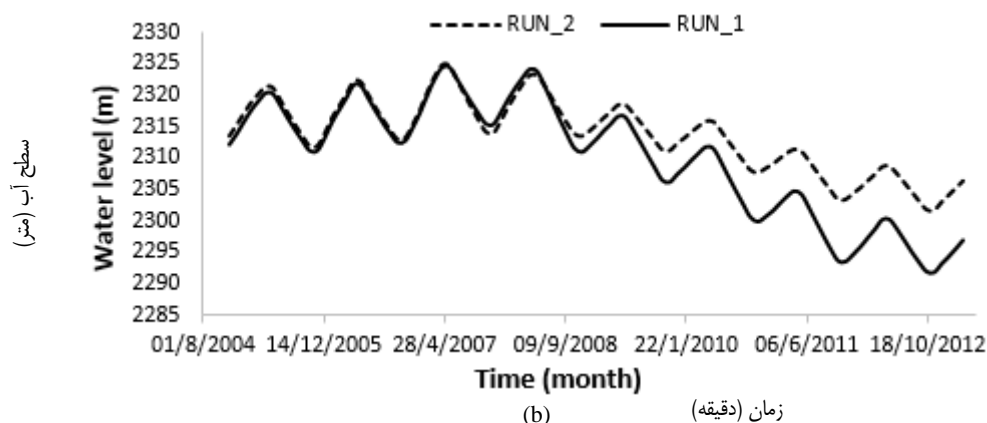
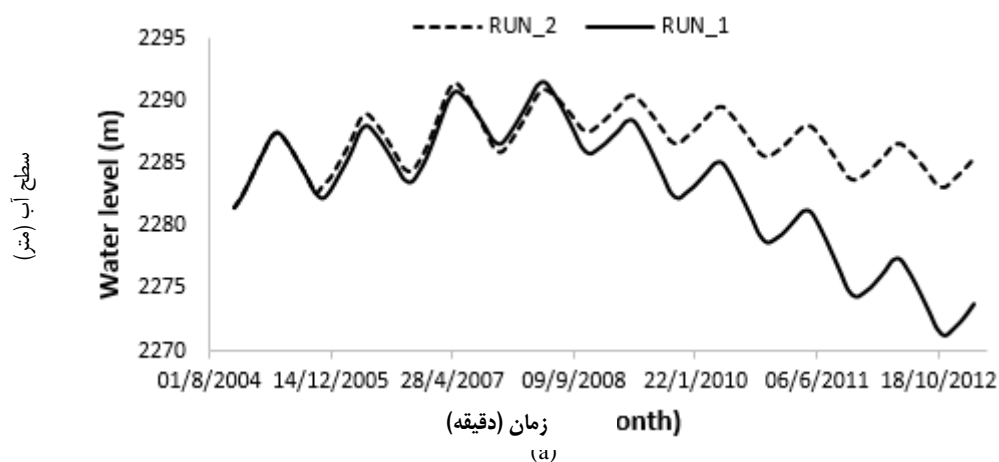
چاه های مشاهده	سطح آب در اکتبر ۲۰۱۳	سناریو شماره ۱	سناریو شماره ۲	افت آب (سناریو شماره ۱)	افت آب (سناریو شماره ۲)
OBS_1	۲۲۶۲,۷۶	۲۲۵۵,۰۰	۵۵۶۱,۲۳	۷,۷۶	۱,۵۳
OBS_2	۲۲۷۵,۶۲	۲۲۶۳,۶۶	۲۲۷۴,۹۹	۱۱,۹۶	۰,۶۳
OBS_3	۲۲۹۴,۵۰	۲۲۹۲,۷۸	۲۲۹۴,۰۰	۱,۷۲	۰,۵۰
OBS_4	۲۲۹۱,۶۰	۲۲۸۴,۹۴	۲۲۹۱,۴۰	۶,۶۶	۰,۲۰
OBS_5	۲۲۹۳,۶۱	۲۲۸۱,۴۲	۲۲۸۶,۹۷	۱۲,۱۹	۶,۶۴
OBS_6	۲۲۹۲,۹۷	۲۲۸۱,۴۸	۲۲۸۴,۴۸	۱۱,۴۹	۸,۴۹
OBS_7	۲۲۹۳,۷۰	۲۲۸۲,۰۰	۲۲۸۸,۹۸	۱۱,۷۰	۴,۷۲
OBS_8	۲۳۲۳,۴۹	۲۳۲۰,۷۴	۲۳۲۲,۵۹	۲,۷۵	۰,۹۰
OBS_9	۲۳۷۸,۰۰	۲۳۷۲,۴۴	۲۳۷۴,۶۸	۵,۵۶	۳,۳۲



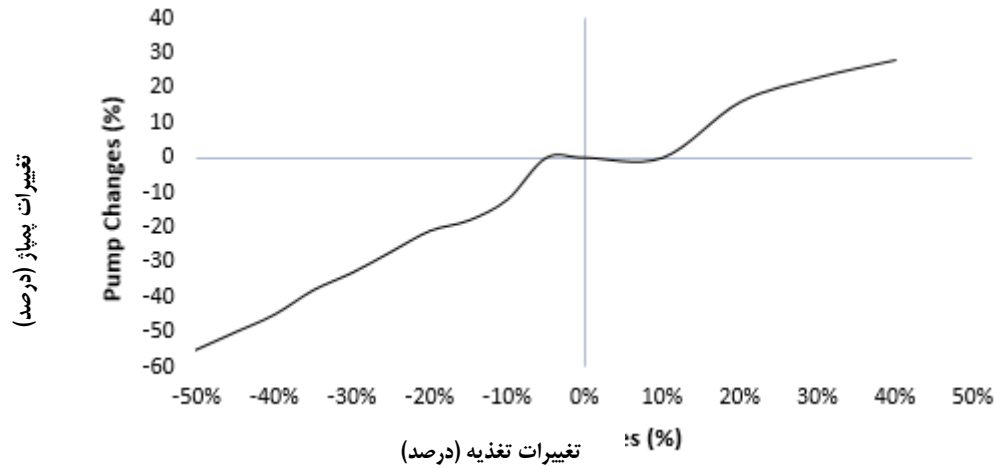
شکل ۸- نمودار تغییرات تغذیه و افت سطح آب زیر زمینی نسبت به سال مبنا (۱۳۸۴)

نمی‌دهد. شکل ۹ هیدروگراف چاه‌های مشاهده‌ای را نشان می‌دهد که در تمام این اشکال خط ممتد و خط چین به ترتیب مربوط به اجرای مدل بدون تغییر در نرخ پمپاژ و اجرای مدل با تغییر در نرخ پمپاژ می‌باشد.

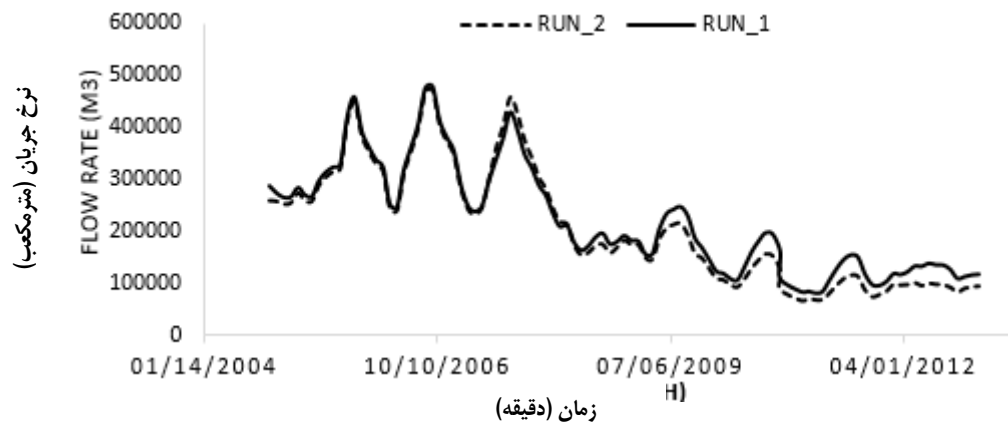
چاه شماره ۳ نزدیک به مرز آبخوان قرار گرفته که در این مرز آبخوان با آبخوان مجاور در تبادل آبی قرار گرفته است. هیدروگراف چاه ۳ نشان می‌دهد که این چاه تحت تاثیر تغییرات آب ورودی به آبخوان قرار گرفته و تقریباً واکنشی نسبت به تغییرات پمپاژ نشان



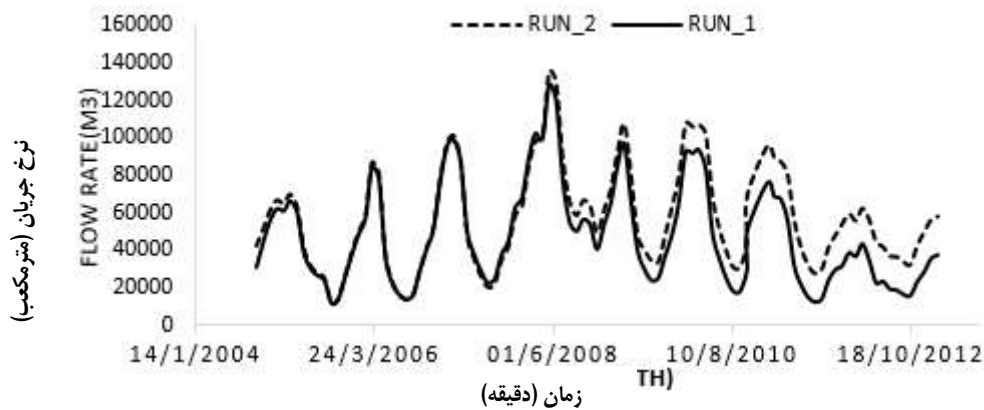
شکل ۹- هیدروگراف چاه‌های مشاهده‌ای (a) شماره ۱، (b) شماره ۴ و (c) شماره ۳



شکل ۱۰- نمودار تغذیه- پمپاژ



(a)



شکل ۱۱- تغییر حجم آب ناشی از تغییر در نرخ پمپاژ، (a) آب ورودی، (b) آب خروجی

نمودار پیداست که کاهش در نرخ پمپاژ در زمان خشک‌سالی نسبت به افزایش پمپاژ در زمانی که بارش در منطقه افزایش پیدا کند، بیشتر است. این مسئله می‌تواند ناشی از تاثیر مرزهای GHB باشد. زمانی که بارش در یک منطقه کاهش پیدا می‌کند، این کاهش تغذیه بر

با توجه به شکل‌های ۹-a و ۹-b با تغییر در نرخ پمپاژ متناسب با تغذیه می‌توان تراز آب زیرزمینی را با در نظر گرفتن مسائل زیست محیطی در یک حد معینی کنترل کرد. شکل ۱۰ میزان برداشت از آبخوان را بصورت بهینه نسبت به تغییرات تغذیه نشان می‌دهد. از این

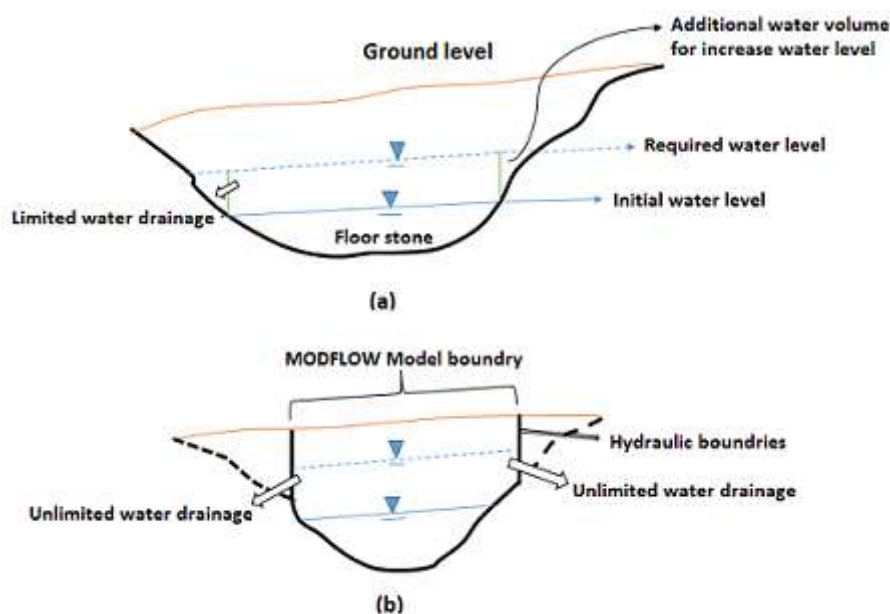
می‌شود. زمانی که سطح آب در داخل آبخوان به هر دلیل نسبت به خارج آبخوان بالاتر می‌رود به طور مشخص آب از مرزها خارج شده و به بیرون از مرز تخلیه می‌شود. در طبیعت این تخلیه تا رسیدن به سطح آب یکسان بین داخل و خارج آبخوان ادامه پیدا می‌کند. اما در مرزهای مدل شده روند تخلیه آب به بیرون از مرز متفاوت از حالت طبیعی است، چرا که در مدل‌سازی، آب بدون هیچ سطح کنترلی از آبخوان خارج می‌شود و با توجه به ماهیت این نوع مرزها هر چه سطح آب در آبخوان بالاتر رود مشخصاً آب بیشتری تخلیه می‌شود. پس:

۱- مدل شبیه‌سازی شده، سطح آب را نسبت به شرایط طبیعی کمتر برآورد می‌کند. پس می‌توان انتظار داشت که شرایط بهتری در طبیعت فراهم می‌شود.

۲- شناخت مرزها و مدل‌سازی مرزها از تاثیرگذارترین و حیاتی‌ترین مراحل مدل‌سازی می‌باشد.

روی تمام آبخوان‌ها اثر می‌گذارد و اگر تصمیم به بالا بردن سطح آب زیرزمینی با کاهش برداشت از یک محدود مشخصی از آبخوان باشد باید اثرگذاری این تغییر تنش بر روی کل منطقه در نظر گرفته شود. این موضوع با بررسی تغییرات حجم آب ورودی و خروجی مرزهای آبخوان دامنه مورد بررسی قرار گرفت. شکل (a-۱۱) نمودار حجم ورودی آب را به آبخوان دامنه نشان می‌دهد این شکل نشان می‌دهد که با کاهش نرخ پمپاژ، حجم آب ورودی از مرزهای GHB کاهش پیدا می‌کند. شکل (b-۱۱) نشان می‌دهد که با کاهش نرخ پمپاژ، حجم آب خروجی از مرزها افزایش پیدا می‌کند.

در خصوص این موضوع باید فرض محدود کردن مرز آبخوان در شبیه‌سازی در نظر گرفته شود. مرزهای طبیعی آبخوان‌های آبرفتی (مانند آبخوان دامنه) معمولاً به شکل (a-۱۲) می‌باشند، ولی در مدل‌سازی مرز آبخوان محدودتر شده و همانند شکل (b-۱۲) مدل



شکل ۱۲- تصویری شماتیک از ارزیابی مرزها در زمان افزایش سطح آب (a) برای حالت طبیعی (b) برای حالت شبیه‌سازی

شرایط آبخوان دارد و رفتار سیستم هیدرولوژیکی را به خوبی شبیه‌سازی کرده است.

با توجه به اینکه بارش در سال ۱۳۹۲ به مقدار میانگین سالانه نزدیک است، نتایج سناریوهای تعریف شده نشان می‌دهد که استحصال از آبخوان دامنه با سیاست فعلی باعث خشک شدن قسمت‌های بیشتری از آبخوان شده بطوری که حداکثر افت در محدوده چاه مشاهداتی ۵ به میزان ۱۲/۲۰ متر و حداقل مقدار افت در محدود چاه مشاهده‌ای ۳ به میزان ۱/۷۰ متر می‌باشد. کاهش در نرخ پمپاژ از آبخوان تاثیر مثبت و البته متفاوت بر روی سطح آبخوان

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل جریان آبخوان آزاد دامنه با استفاده از کد MODFLOW در قالب نرم‌افزار GMS10.1 در حالت پایدار و ناپایدار شبیه‌سازی شد. تحلیل آماری خطاها برای مدل‌سازی جریان در حالت پایدار حداکثر اختلاف تراز آب مشاهده‌ای با محاسباتی ۰/۸۷ متر و میزان خطای RMSE و ضریب همبستگی در حالت ناپایدار برای دوره واسنجی به ترتیب ۰/۹۹ متر و ۹۹/۹ درصد و برای دوره صحت‌سنجی به ترتیب ۱/۱۱۳ متر و ۹۹/۷ درصد است. این نتایج نشان می‌دهد مدل ریاضی طراحی شده برای جریان تطبیق خوبی با

منتهی به سال آبی ۱۳۸۹-۹۰، (آبان‌ماه ۱۳۹۴)، گزارش بیلان منابع آب محدوده مطالعاتی دامنه و داران، جلد پنجم، ۵۰ص.

Movahedian, A., Chitsazan, M. and Nozarpour, L. 2016. Management of an aquifer with an emphasis on the interaction of the aquifer and river using MODFLOW model in Gotvand-Aghili plain, Khuzestan, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(2), p.119.

Qadir, A., Ahmad, Z., Khan, T., Zafar, M., Qadir, A. and Murata, M. 2016. A spatio-temporal three-dimensional conceptualization and simulation of Dera Ismail Khan alluvial aquifer in visual MODFLOW: a case study from Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(2), p.149.

Banejad, H., Mohebzadeh, H., Ghobadi, M.H. and Heydari, M. 2014. Numerical simulation of groundwater flow and contamination transport in Nahavand Plain aquifer, west of Iran. *Journal of the Geological Society of India*, 83(1), pp.83-92.

Di Maio, R., Fabbrocino, S., Forte, G. and Piegari, E. 2014. A three-dimensional hydrogeological-geophysical model of a multi-layered aquifer in the coastal alluvial plain of Sarno River (southern Italy). *Hydrogeology journal*, 22(3), pp.691-703.

Don, N.C., Araki, H., Yamanishi, H. and Koga, K. 2005. Simulation of groundwater flow and environmental effects resulting from pumping. *Environmental Geology*, 47(3), pp.361-374.

Dowlatabadi, S. and Zomorodian, S.A. 2016. Conjunctive simulation of surface water and groundwater using SWAT and MODFLOW in Firoozabad watershed. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(1), pp.485-496.

Faghihi, N., Kave, F. and Babazadeh, H. 2010. Prediction of aquifer reaction to different hydrological and management scenarios using visual MODFLOW model-Case study of Qazvin plain, *Journal of Water Sciences Research*, Vol.2, No.1, Fall 2010, 39-45.

Izady, A., Davary, K., Alizadeh, A., Ziaei, A.N., Alipoor, A., Joodavi, A. and Brusseau, M.L. 2014. A framework toward developing a groundwater conceptual model. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(9), pp.3611-3631.

Fernández-Álvarez, J.P., Álvarez-Álvarez, L. and Díaz-Noriega, R. 2016. Groundwater numerical simulation in an open pit mine in a limestone formation using MODFLOW. *Mine Water and the Environment*, 35(2), pp.145-155.

Khadri, S.F.R. and Pande, C. 2016. Ground water flow modeling for calibrating steady state using MODFLOW software: a case study of Mahesh River basin, India. *Modeling Earth Systems and*

داشته، بگونه‌ای که بیشترین تاثیر در محدوده چاه ۲ به میزان ۹۴ درصد می‌باشد. در این مطالعه برای تحقق برداشت مجاز ابتدا رابطه‌ای برای تغذیه و افت سطح آب نسبت به سال ۱۳۸۴ تهیه و متناسب با نمودار حاصله نرخ پمپاژ را تغییر داده و بعد از اجرای مدل هیدروگراف چاه‌ها استخراج شد. نتایج مبین این است که با استفاده از نمودار تغذیه-پمپاژ می‌توان سطح آب را با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی و زیست محیطی در یک حد معینی کنترل کرد.

تفسیر هیدروگراف‌های حاصل‌شده از مدل‌سازی با استفاده از نمودار تغذیه-پمپاژ نشان می‌دهد مناطقی که به مرز آبخوان نزدیک هستند بیشتر تحت تاثیر مرز آبخوان قرار گرفته و به تنش‌های اعمال شده به آبخوان واکنشی نشان نمی‌دهد. همچنین در نقاطی که مخروط افت چاه‌های بهره‌برداری با هم تلاقی دارند اثر کاهش برداشت آب تاثیر کمتری نسبت به مناطقی که چاه‌های بهره‌برداری دارای تراکم کم هستند را دارد.

تغییرات بیلان آبی، در زمانی که سطح آب با کاهش نرخ پمپاژ افزایش می‌یابد، با بررسی حجم آب ورودی و خروجی از مرزهای (GHB) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که با کاهش نرخ پمپاژ، حجم آب ورودی از مرزهای GHB کاهش و حجم آب خروجی از مرزها افزایش پیدا می‌کند.

منابع

صفوی، ح. ۱۳۹۳. هیدرولوژی مهندسی، چاپ چهارم، انتشارات ارکان دانش اصفهان، ۷۰۶ص.

طاهری تیزرو، ع.، و روشنی، ا. ۱۳۹۰. مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه رازی، ۲۱۳ص.

عطایی آشتیانی، ب.، و کتابچی، ح. ۱۳۹۳. هیدرولیک و آلودگی آب‌های زیرزمینی، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، ۹۱۷ص.

نظری، ر.، و جودوی، ع. ۱۳۹۳. مدل‌سازی کاربردی جریان و انتقال آلاینده در آبخوان، چاپ اول، انتشارات آفتاب عالمتاب مشهد، ۲۳۰ص.

وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع ایران، معاونت پژوهش و مطالعه پایه، دفتر استانداردها و معیارهای فنی، ۱۳۹۳، پیش‌نویس راهنمای تهیه مدل ریاضی آب‌های زیر زمینی.

وزارت نیرو، شرکت آب منطقه‌ای اصفهان، ۱۳۹۴. گزارش زمین شناسی فریدن.

وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع آب ایران. ۱۳۹۴. بهنگام‌سازی بیلان منابع آب محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریزگاو خونی

- and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco). *Journal of Hydro-environment Research*, 2(3), pp.192-209.
- Hu, Y., Moiwo, J.P., Yang, Y., Han, S. and Yang, Y. 2010. Agricultural water-saving and sustainable groundwater management in Shijiazhuang Irrigation District, North China Plain. *Journal of Hydrology*, 393(3-4), pp.219-232.
- Environment, 2(1), PP:2-39.
- Surinaidu, L., Rao, V.G., Rao, N.S. and Srinu, S. 2014. Hydrogeological and groundwater modeling studies to estimate the groundwater inflows into the coal Mines at different mine development stages using MODFLOW, Andhra Pradesh, India. *Water Resources and Industry*, 7, pp.49-65.
- El Yaouti, F., El Mandour, A., Khattach, D. and Kaufmann, O. 2008. Modelling groundwater flow

Numerical Simulation for Present a Relationship for Optimize Exploitation Groundwater (Case Study: Damaneh Aquifer)

A. Ahmadi Badejani¹, M. Malekmahmoudi², T. Rajaei³, M. Javadi Rad⁴

Received: Apr.30, 2020

Accepted: Jun.12, 2020

Abstract

In this study, an Analytical program has been conducted to identify the behavior of of amplitude aquifer to different water turbulence and find a relationship for optimal groundwater abstraction of this aquifer. The geographic information system is first used to process geological, hydrological, and hydrogeological data, and then the MODFLOW-2000 code is used to simulate the flow. After the initial simulation, the hydraulic conductivity parameter in a stabilized steady situation (April 2005) and in a unstable situation (2004-2005) The hydraulic conductivity parameter and the discharge coefficient, in particular, were measured. Then, for a period of 18 months, with the data of 2012-2013 and for the optimized parameters, the validation test was performed. Two different management scenarios for a 102-month period were defined to predict groundwater level fluctuations and the effect of water pumping from the domain aquifer. The results of the numerical model analysis show that if the aquifer is operate with the current situation, the sharp drop in water in the aquifer and the gradual drying of the aquifer will continue in the future, so that the maximum and minimum drop limit of observation wells number 5 und 3 is respectively 12/20 meters and 1.70 meters. Of course, lowering the discharge pumping rate will improve this situation. Therefore, considering that the range amplifier is fully developed, the power supply-pumping diagram was drawn. The results show that by using the nutrition-pumping diagram, the water level can be controlled to a certain extent by considering economic and environmental issues and the areas of aquifer that are close to the aquifer (trava boundaries) are affected and the wells operating in this area have the least effect on the drop in water level.

Keywords: Numerical simulation, Groundwaters modelling, Damanh Aquifer, Water level fluctuations, MODFLOW2000

1- Graduate Student of Water and Hydraulic structures, Department of Civil Engineering, Qom University
2- M.Sc. Graduated Student of Civil Engineering, Water Resources Management, Yasouj University, Yasouj, Iran
3- Associate Professor of Department of Civil Engineering, Qom University
4- Graduate Student of Water and Hydraulic structures, Department of Civil Engineering, Qom University
(*- Corresponding Author Email: mehdi_m_1995@yahoo.com)