نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۲، جلد ۱۶، خرداد - تیر ۱۴۰۱، ص. ۲۹۳-۲۸۰

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.2, Vol. 16, Jun.-Jul. 2022, p. 280-293

مقاله علمی-پژوهشی

تأثیر سناریوهای مدیریتی و اقلیمی در تغییرات سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی مدل‌سازی عددی در آبخوان دشت سلماس)

مهرنگ دوستی رضایی[۱]، کامران زینال‌زاده[۲]*، سینا بشارت[۳]، بابک امیرعطایی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۶

چکیده

در دهه‌های اخیر، عوامل متعددی مانند افزایش جمعیت، محدودیت منابع آب‌های سطحی به دلیل کاهش بارندگی و برداشت بیش از اندازه از آبخوان‌ها، باعث افت شدید سطح آب زیرزمینی در بسیاری از دشت‌های ایران از جمله دشت سلماس واقع در استان آذربایجان غربی شده است. در این مطالعه، مدل عددی آبخوان دشت سلماس با استفاده از مدل MODFLOW در محیط نرم‌افزار GMS در دو حالت جریان ماندگار (شهریورماه سال آبی ۹۵-۹۴) و جریان غیر ماندگار (از مهرماه تا مردادماه سال آبی ۹۶-۹۵) تهیه گردید. پارامترهای ورودی مدل به ازای مقادیر اندازه‌گیری‌شده تراز آب زیرزمینی در موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای واسنجی و در بازه زمانی شهریورماه سال آبی ۹۶-۹۵ تا مردادماه سال آبی ۹۷-۹۶ صحت‌سنجی گردید. درنهایت، سطح آب زیرزمینی با اعمال ۶ سناریو شامل کاهش ۱۰ تا ۳۰ درصدی پمپاژ چاه‌ها و افزایش ۵ تا ۱۵ درصدی میزان بارندگی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج سناریوهای موردمطالعه نشان داد که کاهش نرخ پمپاژ چاه‌ها، شرایط منابع آب زیرزمینی را به‌طور معنی‌دار بهبود می‌دهد، به‌طوری‌که با کاهش نرخ پمپاژ چاه‌ها به میزان ۳۰٪، ضمن جبران کمبود مخزن آبخوان، حجم آب زیرزمینی به میزان ۱۳/۶۶ میلیون مترمکعب افزایش خواهد یافت. این در حالی است که افزایش ۱۵ درصدی در میزان بارش سالانه، تنها ۰/۵ میلیون مترمکعب موجب بهبود وضعیت آبخوان خواهد شد. کاهش میزان نرخ تخلیه توسط چاه‌های بهره‌برداری، موجب کاهش میزان جریان آب زیرزمینی ورودی به محدوده آبخوان از ۴۱/۹۸ میلیون مترمکعب در شرایط واسنجی مدل به ۳۸/۷ میلیون مترمکعب در شرایط کاهش ۳۰ درصدی نرخ تخلیه چاه‌ها گردید. بااین‌حال، افزایش میزان بارندگی، موجب تغییرات قابل‌توجهی در میزان جریان‌های ورودی و خروجی آب زیرزمینی نگردید. همچنین، نتایج بیانگر این است که سناریوهای مدیریتی مانند جلوگیری از اضافه برداشت چاه‌های مجاز و انسداد چاه‌های غیرمجاز نسبت به سناریوهای اقلیمی محتمل اثرات قابل‌توجه‌تری بر بهبود وضعیت منابع آب زیرزمینی دارد.

واژه‌های کلیدی: بهبود منابع آب زیرزمینی، جریان غیر ماندگار، جریان ماندگار، مدیریت پایدار، GMS

مقدمه

نیاز به آب از اساسی‌ترین نیازهای بشری است، لذا بایستی با مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح، به‌صورت بهینه از آن استفاده کرد. امروزه با توجه به تغییرات اقلیمی در سطح کره زمین و نیز اثرات آن بر منابع آبی، مدیریت سفره‌های آب زیرزمینی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع اصلی تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت جایگاه ویژه‌ای را در مطالعات منابع آبی به خود اختصاص داده است (مفتاح هلقی و همکاران، ۱۳۹۷). در جهان ۳۳ درصد از کل برداشت‌ها از منابع آب زیرزمینی بوده به‌طوری‌که نیاز آبی بیش از دو میلیارد نفر به این منبع مهم وابسته است (Famiglietti, 2014). در روند کنونی جهان، استخراج آب زیرزمینی از ذخیره مجدد سفره آب زیرزمینی پیشی گرفته و این باعث افت متوالی سطح ایستابی و ایجاد اختلال در سیستم جریان پایه رودخانه‌های تغذیه‌کننده آب زیرزمینی گردیده است (Gleeson et al. 2012; Konikow 2011). در سال‌های اخیر، افزایش استفاده از منابع آب زیرزمینی به دلیل بروز خشک‌سالی‌های متعدد و همچنین سایر فعالیت‌های مخرب

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۳- دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۴- دکتری مهندسی منابع آب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: k.zeinalzadeh@urmia.ac.ir
DOR: 20.1001.1.20087942.1401.16.2.2.1

زیست‌محیطی، موجب افت چشمگیر سطح آب زیرزمینی شده است. این مسئله به‌خصوص در مناطقی که منبع اصلی آب مصرفی از طریق آب زیرزمینی تأمین می‌شود بسیار بحران‌زاست (زارعی و همکاران، ۱۳۹۹). در ایران سالانه حدود ۳۱ میلیارد مترمکعب آب اضافی به‌صورت غیراصولی برداشت می‌شود که افت هر چه بیشتر کمی و کیفی منابع آب را در پی دارد (شایان نژاد و عابدی، ۱۳۸۵). پایش تغییرات سطح آب زیرزمینی و شناخت عوامل مؤثر بر آن، جایگاه ویژه‌ای در مدیریت آبخوان دارد؛ بنابراین مدل‌سازی و مطالعه سیستم منابع آب زیرزمینی برای مدیریت بهتر در آینده ضروری به نظر می‌رسد. در این بین استفاده از مدل‌های عددی کمک شایانی در شبیه‌سازی رفتار سفره آب زیرزمینی می‌کند. مطالعاتی نظیر مدل‌سازی تبادل آب‌های سطحی مانند دریاچه و رودخانه با آب زیرزمینی (Ala-Aho et al., 2015; Cai et al., 2020)، مدل‌سازی یکپارچه در مقیاس جهانی آب‌های زیرزمینی و بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای فیزیکی آبخوان‌ها (de Graaf et al. 2015)، شبیه‌سازی‌های عددی آبخوان و بررسی اثرات احداث سد بر آن (پارسا صدر و همکاران، ۱۳۹۵؛ رضایی و همکاران، ۱۳۹۹) از جمله مطالعات محققین در این زمینه است.

مدل GMS از جمله مدل‌های ریاضی قوی جهت شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی بوده که از کد کامپیوتری MODFLOW برای این منظور بهره می‌برد. این مدل توسط سازمان تحقیقات زمین‌شناسی آمریکا تهیه و به‌روزرسانی شده است که جریان را به‌صورت سه‌بعدی و با استفاده از روش تفاضل محدود، مدل می‌نماید. مطالعات بسیاری وجود دارد که از MODFLOW در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی استفاده کرده است. به‌عنوان‌مثال، طاهری تیزرو و همکاران (۱۳۹۰) در تحقیقی تحت عنوان مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی در دشت کبودرآهنگ با استفاده از مدل ریاضی MODFLOW، به این نتیجه رسیدند که مدل‌سازی می‌تواند به‌عنوان روشی کارآمد و کم‌هزینه به‌خوبی شناخت ماهیت پیچیده آبخوان را ممکن سازد. مهم‌ترین هدفی که محققین با شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی دنبال کرده‌اند، بررسی سناریوهای مدیریتی و یا ارائه راهکارهای مدیریتی در جهت کاهش تنش آبی و افت تراز سطح ایستابی بوده است. در این خصوص، کرونی و همکاران (۱۳۹۲) با مدل‌سازی دشت حسن آباد–قوری در شهرستان نیریز دو راهبرد مدیریتی و پنج راهکار کاهش برداشت از چاه‌های موجود پیشنهاد دادند. قبادیان و همکاران (۱۳۹۳) اثر احداث شبکه آبیاری و زهکشی پائین‌دست سد گاوشان بر منابع آب زیرزمینی دشت میان دربند را با استفاده از بسته نرم‌افزاری GMS6.5 مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بعد از یک سال، سطح آب زیرزمینی آبخوان در نواحی مرکزی دشت تا ۱/۸ متر بالا می‌آید. این مقدار برای پنج و ۱۰ سال به ترتیب برابر با ۳/۲ و ۵/۲ متر است. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد پس از یک، پنج و ۱۰ سال، به ترتیب ۶/۵۹، ۳۷/۹۱ و ۵۶/۲۸ درصد از اراضی دشت، زه دار می‌شوند. پورمحمدی و همکاران (۱۳۹۴) در دشت تویسرکان به‌عنوان یکی از دشت‌های مهم استان همدان با زمین‌های کشاورزی وسیع، به بررسی بیلان آبی در سال آبی ۱۳۸۸–۱۳۸۷ برای شناسایی ورودی‌ها و خروجی‌های دشت و مدیریت بهینهٔ منابع آب به‌ویژه برای مصارف کشاورزی با استفاده از مدل عددی MODFLOW در نرم‌افزار GMS پرداختند. نتایج نشان داد که بیلان دشت منفی و کسری مخزن به میزان ۲/۱۲– میلیون مترمکعب در سال آبی ۱۳۸۸– ۱۳۸۷ است. مفتاح هلقی و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی اثرات ناشی از تغییرات اقلیمی بر آبخوان قره‌سو در استان گلستان با استفاده از نرم‌افزار GMS7.1 پرداخته و شبیه‌سازی کمی آبخوان را در دو حالت پایدار و ناپایدار به ازای سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه ایشان نشان داد با اجرای هر سناریو نه تنها در همان ماه، بلکه تا چندین ماه بعد نیز افتی در آبخوان ایجاد می‌گردد. ولیزادگان و یزدان پناه (۱۳۹۷) به بررسی استفاده بهینه تلفیقی از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی دشت مهاباد پرداختند. برای این منظور، ابتدا تغییرات سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی دشت مهاباد با استفاده از نرم‌افزار GMS شبیه‌سازی نموده و سپس بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی، شبکه عصبی مصنوعی آموزش داده شد تا در سیستم شبیه‌سازی– بهینه‌سازی مورداستفاده قرار گیرد. نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق و اجرای مدل کمی بهره‌برداری تلفیقی بهینه نشان داد، سهم تقریبی آب تأمینی از منابع آب، به ترتیب ۱۳/۵ درصد مربوط به آب‌های سطحی و ۸۶/۵ درصد مربوط به آب‌های زیرزمینی بوده و باید نیاز آبی منطقه بر اساس این درصدها تأمین گردد تا منابع آب در حالت تعادل قرار گیرد. قبادی علمداری و همکاران (۱۳۹۸)، به شبیه‌سازی سیستم هیدروژئولوژیکی آبخوان دشت دهلران در محیط نرم‌افزار GMS 9.1 با استفاده از کد MODFLOW در دو حالت ماندگار و غیر ماندگار پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده تلفیقی صحیح از منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌تواند سبب افزایش ذخیره آبخوان تا حدود ۲/۲۳ میلیون مترمکعب در سال شود. عباس نوین‌پور و همکارانش (۱۳۹۸) اثرات احداث سد مخزنی شهرچای بر نوسانات سطح آب زیرزمینی در دشت ارومیه استان آذربایجان غربی را با استفاده از مدل عددی MODFLOW و روش‌های ناپارمتری من‌کندال، تخمینگر شیب سن و پتی‌بویشند بررسی نمودند. آن‌ها بدین نتیجه رسیدند که در ۸۰ درصد پیزومترها، روند تغییرات تراز آب زیرزمینی نزولی بوده و نقطه شکست در سری زمانی پیزومترهای نزدیک به سد در سال ۸۷–۱۳۸۶ و در پیزومترهای دورتر از سد و رودخانه معمولاً در سال‌های بعد از سال ۱۳۸۷ اتفاق افتاده است. همچنین، آن‌ها گزارش نمودند که اثرات کاهش سطح آب زیرزمینی ناشی از احداث سد بوده است. جبالبارزی و همکاران (۱۳۹۹) به

مدل‌سازی آبخوان دشت جعفریه با کد MODFLOW در قالب نرم‌افزار GMS برای دو دوره آماری ۱۰ ساله (۱۳۸۱-۱۳۷۱ و ۱۳۹۱-۱۳۸۱) در دو حالت ماندگار و غیر ماندگار پرداختند. نتایج نشان داد که مدل نسبت به تغییرات تغذیه آب زیرزمینی بیش‌ترین حساسیت را نشان می‌دهد و متوسط افت آبخوان در سال‌های ۱۳۷۱ تا ۱۳۸۰ از ۰/۰۵ به ۱/۵- متر رسیده است. همچنین، محمد میرزایی و همکاران (۱۳۹۹) سناریوهای مختلف مدیریت منابع آب حوضه گرگان رود را با تلفیق مدل‌های WEAP و MODFLOW بررسی کرده و نشان دادند که به‌کارگیری هم‌زمان راهبردهای مختلف کاهش مصرف آب نتیجه‌بخش خواهد بود. انصاری فر و همکارانش (۲۰۲۰a) تراز آب زیرزمینی در آبخوان ساحلی بندر گز در منطقه خلیج گرگان در شمال ایران را با استفاده از مدل MODFLOW شبیه‌سازی نمودند. آن‌ها در دو حالت پایدار و ناپایدار مدل را واسنجی و صحت‌سنجی کرده و جهت ارزیابی نتایج از میانگین خطای مطلق (MAE) و میانگین خطای تقریبی (MBE) استفاده نمودند. مقدار این دو پارامتر آماری به ترتیب برای حالت ناپایدار دوره واسنجی برابر ۰/۳۱ و ۰/۰۸- متر و برای شرایط ناپایدار دوره صحت‌سنجی مدل برابر ۰/۴۲ و ۰/۳۱- متر محاسبه گردید که اعتبار مدل را تأیید می‌کرد. همچنین آن‌ها نشان دادند که تغییرات تراز آب دریا تأثیرات قابل‌توجهی روی رفتار هیدرولیکی آبخوان ساحلی داشته است.

دشت سلماس واقع در شمال غرب حوضه آبریز دریاچه ارومیه، یکی از کانون‌های ارزشمند فعالیت کشاورزی این حوضه محسوب شده و خروجی دشت منتهی به دریاچه ارومیه می‌باشد؛ بنابراین مدیریت منابع آب این دشت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آب زیرزمینی دشت سلماس منبع اصلی تأمین آب شرب و کشاورزی می‌باشد که در سال‌های اخیر افت قابل‌توجهی داشته است. استحصال بیش از حد منابع آب زیرزمینی منطقه، موجب تخریب لوله‌های جدار برخی چاه‌ها شده و در بعضی مناطق با فرونشست نگران‌کننده زمین و ایجاد درز و ترک در سطح اراضی همراه بوده است. مطالعات متعددی به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان، آلودگی، وضعیت هیدروژئوشیمی، خشک‌سالی هیدرولوژیکی و فرونشست زمین در دشت سلماس صورت گرفته است (سرچشمه و شاه‌محمدی کلالق، ۱۳۹۵؛ نادری و همکاران، ۱۳۹۷؛ شاکر سوره و اسدی، ۱۳۹۸؛ عاشوری و شاه‌محمدی کلالق، ۱۳۹۸؛ زارعی و همکاران، ۱۳۹۹؛ قره‌خانی و همکاران، ۱۴۰۰)، با توجه به افزایش روزافزون برداشت از منابع آب زیرزمینی و نیز کاهش میزان نزولات جوی در محدوده موردمطالعه، لازم است با درک درست از عکس‌العمل سامانه منابع آب زیرزمینی به تنش‌های وارده، بتوان با اتخاذ روش‌های مدیریتی صحیح ضمن تأمین آب موردنیاز فعلی، از افت هرچه بیشتر حجم ذخایر منابع آب زیرزمینی جلوگیری نمود. تاکنون مطالعه‌ای به‌منظور تحلیل سناریوهای مختلف مدیریتی تحت شرایط اقلیمی مختلف، بر تغییرات سطح ایستابی آب زیرزمینی این دشت بحرانی انجام نشده است. لذا در این مطالعه سامانه سفره آب زیرزمینی دشت سلماس با استفاده از نرم‌افزار GMS مدل‌سازی و تأثیر سناریوهای مختلف اقلیمی و مدیریتی بر سطح ایستابی آب زیرزمینی مورد ارزیابی قرار گرفته و تلاش شده است با کاربرد دقیق مدل‌سازی، راه‌کار مناسب برای برون‌رفت از بحران فزاینده کاهش منابع آب زیرزمینی منطقه موردمطالعه ارائه گردد.

مواد و روش‌ها

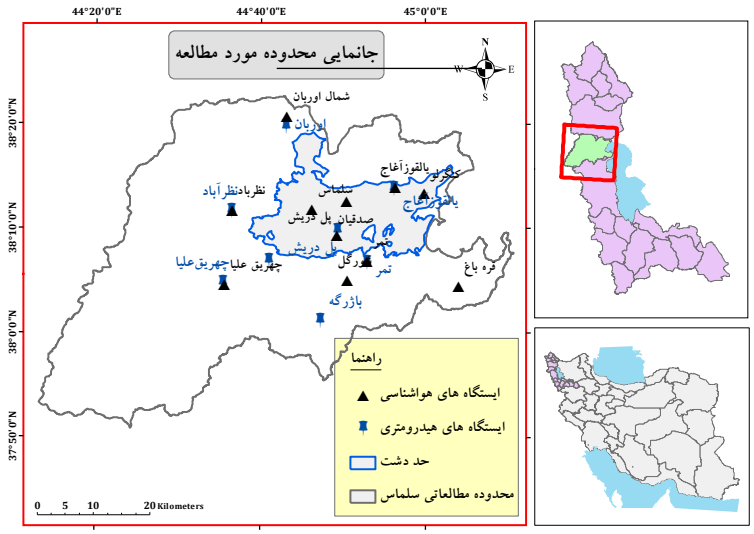
معرفی مدل GMS

شناخت رفتارهای یک سیستم سفره آب زیرزمینی نیاز به انجام مطالعات بلندمدت دارد که با توجه به سقف بودجه‌ها در شرایط فعلی امکان‌پذیر نمی‌باشد. در این میان نرم‌افزارهای شبیه‌سازی می‌توانند شرایطی مانند آنچه که در طبیعت موجود است را به وجود بیاورند. استفاده از مدل‌های رایانه‌ای یکی از مؤثرترین و سریع‌ترین روش‌های غیرمستقیم مطالعه چگونگی حرکت، بررسی بیلان و مدیریت بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی است. این مدل‌ها با استفاده از یکسری روابط ریاضی، شرایط طبیعی سفره آب زیرزمینی را شبیه‌سازی می‌کنند که در صورت دقیق بودن می‌توانند جهت پیش‌بینی وضعیت منابع آب در آینده و همچنین بررسی تأثیر شرایط مدیریتی اعمال‌شده مورداستفاده قرار گیرند (Wang and Anderson, 1995; Ansarifar et al., 2020b). از میان مدل‌های عددی و تحلیلی شبیه‌سازی سفره آب‌های زیرزمینی، مدل‌های عددی جایگزین مدل‌های تحلیلی در محیط‌های طبیعی می‌شوند. نرم‌افزار GMS یک بسته نرم‌افزاری جامع در لایه‌های آبدار می‌باشد که در تحقیق حاضر از نرم‌افزار یادشده با کد MODFLOW استفاده گردیده است. GMS یا Groundwater Modeling System نرم‌افزار بسیار پیچیده و جامعی است که برای مدل‌سازی سفره آب-های زیرزمینی مورداستفاده قرار می‌گیرد. این نرم‌افزار در حقیقت واسط گرافیکی و به‌عنوان پیش پرداز و پس پرداز برای مدل آب‌های زیرزمینی است که عمدتاً به روش‌های تفاضل محدوده به شبیه‌سازی کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی می‌پردازد. این مدل توسط آزمایشگاه تحقیقات محیط‌زیست دانشگاه بیرمنگهام و با مشارکت بخش مهندسی آب ارتش آمریکا توسعه داده شده است.

محدوده موردمطالعه

دشت سلماس در شهرستان سلماس در استان آذربایجان غربی با مساحت ۵۳۸ کیلومترمربع بین طول‌های شرقی ۴۴/۶۵۴ تا ۴۵/۰۲۷ و عرض‌های شمالی ۳۸/۱۱۷ تا ۳۸/۳۱۵ واقع شده است. شیب عمومی دشت از سمت غرب به شرق می‌باشد و مرتفع‌ترین نقطه دشت بیش از ۱۶۲۰ متر و پست‌ترین قسمت آن ۱۲۶۰ متر از سطح آزاد دریاها

اختلاف دارد. متوسط بارش سالانه و تبخیر از سطح آزاد آب در دشت به ترتیب ۲۶۳/۹ و ۱۶۲۸/۳ میلی‌متر و میانگین سالانه دما ۹/۸ درجه سانتی‌گراد است. مهم‌ترین جریان سطحی در دشت سلماس رودخانه زولاچای است که از ارتفاعات مرزی ترکیه سرچشمه می‌گیرد و از سمت غرب به شرق جریان دارد و سپس وارد دریاچه ارومیه می‌شود. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی محدوده موردمطالعه، ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری را نشان می‌دهد. آب زیرزمینی دشت سلماس تأمین‌کننده بخش عمده آب موردنیاز کشاورزی و همچنین آب شرب بخشی از ساکنین این منطقه است. در سال‌های اخیر تغییرات اقلیم و کاهش ذخایر برف و باران از یک طرف و افزایش تقاضا برای کشاورزی از طرف دیگر باعث افت بیش از ۱۵ متری تراز آب زیرزمینی دشت سلماس گردیده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت سلماس و ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری

روش کار

در تهیه مدل‌های ریاضی آب زیرزمینی، پارامترهای هواشناسی و هیدرولوژیکی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند. پارامترهای هواشناسی شامل دما، بارندگی و تبخیر می‌باشد. علاوه بر داده‌های هواشناسی، از لایه‌های رقومی ارتفاع جهت معرفی لایه سطحی آبخوان نیز استفاده گردید. از داده‌های حاصل از لوگ زمین‌شناسی چاه‌های اکتشافی و پیزومتری به‌منظور تعیین لایه سنگ کف آبخوان و تعیین مقادیر اولیه ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان شامل هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه استفاده گردید. عمده منابع آب زیرزمینی شامل تعداد ۸۰۵ حلقه چاه بهره‌برداری عمیق و نیمه عمیق جهت مصارف کشاورزی، شرب و صنعت و خدمات می‌باشد. در جدول ۱ و ۲ مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری محدوده مطالعاتی سلماس ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هوشناسی محدوده مطالعاتی سلماس

نام ایستگاه	سال تأسیس	مختصات جغرافیائی			سازمان تابعه	نوع ایستگاه	کد
		طول	عرض	ارتفاع			
چهریق علیا	۱۳۴۶	۴۴-۳۶	۳۸-۰۵	۱۶۰۰	وزارت نیرو	تبخیرسنجی	۳۶-۰۰۱
یالقوزآغاج	۱۳۵۶	۴۴-۵۶	۳۸-۱۴	۱۳۰۰	وزارت نیرو	تبخیرسنجی	۳۶-۰۱۱
اوربان	۱۳۴۹	۴۴-۴۴	۳۸-۲۰	۱۶۴۰	وزارت نیرو	باران‌سنج معمولی	۳۶-۰۰۵
نظرآباد	۱۳۴۹	۴۴-۳۶	۳۸-۱۱	۱۶۲۰	وزارت نیرو	باران‌سنج معمولی	۳۶-۰۰۳
تمر	۱۳۴۹	۴۴-۵۲	۳۸-۰۷	۱۴۱۰	وزارت نیرو	باران‌سنج معمولی	۳۶-۰۰۹
قره‌باغ	۱۳۷۶	۴۵-۰۴	۳۸-۰۴	۱۵۲۰	وزارت نیرو	باران‌سنج معمولی	۳۶-۲۲۲
بروشخوران	۱۳۸۶	۴۴-۲۹	۳۸-۱۷	۲۴۴۰	وزارت نیرو	باران‌سنج معمولی	۳۶-۲۵۱
سلماس	۱۳۵۶	۴۴-۴۶	۳۸-۱۱	۱۳۵۰	وزارت نیرو	باران‌سنج معمولی	۳۶-۰۰۲

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری محدوده مطالعاتی سلماس

نام ایستگاه	رودخانه	مختصات جغرافیایی			سال تأسیس	مساحت به کیلومترمربع	تجهیزات نصب‌شده			کد ایستگاه
		طول	عرض	ارتفاع			اشل	تلفریک	لیمینیگ راف	
چهریق علیا	زولا چای	۴۴-۳۶	۳۸-۰۵	۱۶۰۰	۱۳۵۱	۸۱۹	*	*		۳۶-۰۰۱
نظرآباد	دریک چای	۴۴-۳۷	۳۸-۱۲	۱۶۲۰	۱۳۵۱	۲۴۰	*	*		۳۶-۰۰۳
اوربان	دیر علی چای	۴۴-۴۳	۳۸-۲۰	۱۶۴۰	۱۳۵۲	۱۱۴	*	-	-	۳۶-۰۰۵
تمر	خرخره چای	۴۴-۵۳	۳۸-۰۷	۱۳۶۸	۱۳۴۸	۲۱۸	*	-	-	۳۶-۰۰۹
یالقوز آغاج	زولا چای	۴۴-۵۶	۳۸-۱۴	۱۳۰۰	۱۳۵۳	۲۲۰۴	*	*	-	۳۶-۰۱۱
اجواج	زولا چای	۴۴-۳۹	۳۸-۰۴	۱۴۵۰	۱۳۵۵	۹۵۶	*	-	-	۳۶-۰۱۳

نخستین اقدام جهت تهیه مدل عددی، ساخت مدل مفهومی سیستم آبخوان می‌باشد. در طی این فرآیند پیچیدگی‌های فیزیکی و هیدرولوژیکی آبخوان به‌طور ساده‌شده به همراه داده‌های مشاهده‌ای وارد مدل می‌شوند. مدل مفهومی تعیین‌کننده ابعاد مدل عددی و شبکه آن می‌باشد. لذا هر چه در طراحی مدل مفهومی دقت بیشتری صورت گیرد و اطلاعات کامل‌تری در آن وارد شود، مدل عددی نهایی دقیق‌تر خواهد بود. جهت تهیه مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی گام‌های زیر انجام می‌پذیرد:

گام اول انتخاب معادله جریان با بررسی نوع آبخوان می‌باشد. برای آبخوان آزاد معادله جریان پایدار دوبعدی برای یک تفاضل فرضی واقع در سفره مطابق رابطه ۱ نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial h}{\partial z}\right)+w=s_s\frac{\partial h}{\partial t} \quad (۱)$$

در رابطه فوق w میزان جریان ورودی به سیستم، K_x, K_y, K_z هدایت هیدرولیکی آبخوان در جهات مختلف، h بار هیدرولیکی، t زمان و s_s آبدهی ویژه آبخوان می‌باشد. حل معادله فوق با استفاده از تکنیک تفاضل محدود با شبکه‌بندی محیط موردمطالعه صورت می‌گیرد. شرایط مرزی نیز برای حل چنین معادلاتی از اهمیت بالای برخوردار است (Wang and Anderson, 1995). در تحقیق حاضر کد MODFLOW برای حل عددی معادلات جریان مورداستفاده قرار گرفته است.

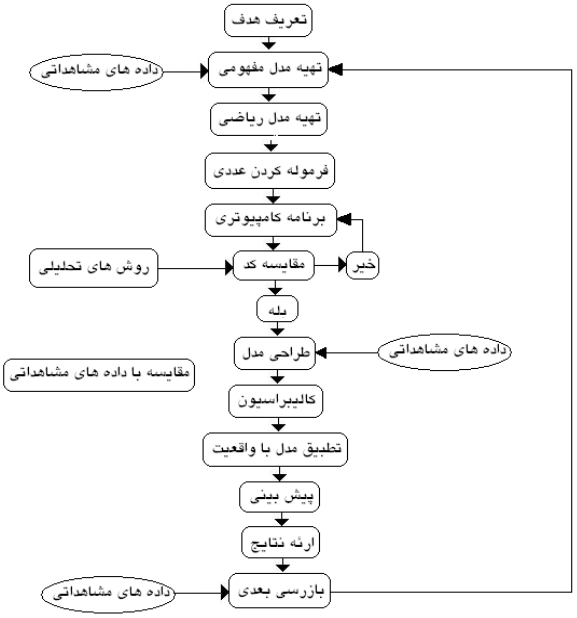
گام بعدی گسسته سازی مکانی و زمانی دشت موردمطالعه است. انتظار پیش‌بینی‌های صحیح از یک مدل شبیه‌سازی انتخاب اندازه‌های سلولی کوچک‌تر جهت اعمال تغییرات مکانی پارامترهای مؤثر در مدل مانند بار هیدرولیکی و جهت جریان می‌باشد. جهت به حداقل رساندن پخشیدگی عددی می‌بایست اندازه سلولی شبکه، جهت‌گیری شبکه و اندازه گام‌های زمانی به‌طور مناسبی انتخاب شوند. در تحقیق حاضر، با توجه به کیفیت و کمیت اطلاعات موجود از شبکه سلولی ۲۵۰ متری و گام‌های زمانی ماهانه جهت مدل‌سازی عددی استفاده گردید.

گام نهایی، واسنجی و صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی شده است. واسنجی خودکار با استفاده از کدهایی صورت می‌گیرد که برای حل مدل معکوس به روش مستقیم یا غیرمستقیم ساخته شده‌اند. در روش مستقیم پارامترهای مدل به‌عنوان متغیر وابسته و بارهای هیدرولیکی به‌عنوان متغیر مستقل در معادله کنترل‌کننده در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین بارهای هیدرولیکی باید برای تک‌تک سلول‌های مدل وارد گردد؛ اما تنها در تعداد اندکی از سلول‌ها، بار هیدرولیکی وجود دارد و در سایر سلول‌ها باید بار هیدرولیکی با درون‌یابی محاسبه گردد. در این روش به دلیل استفاده از بارهای هیدرولیکی و مقادیر محاسباتی پارامترها در تک‌تک سلول‌ها، خطای بیلان سلولی کاهش می‌یابد. در روش مستقیم احتمال ناپایدار شدن حل وجود دارد. علاوه بر این، خطای اندازه‌گیری در این روش در نظر گرفته نمی‌شود. در روش غیرمستقیم، مدل به‌طور مکرر اجرا شده و در هر تکرار کد معکوس بارهای هیدرولیکی محاسبه‌شده را کنترل کرده و پارامترهای مدل را با هدف حداقل کردن تابع هدف تغییر می‌دهد. تابع هدف می‌تواند مربع اختلاف مقادیر محاسباتی و مشاهداتی باشد. با وجود اینکه روش غیرمستقیم پایدارتر از روش مستقیم است احتمال ناپایدار شدن این روش نیز وجود دارد. در واقع صحت‌سنجی فرآیندی است که طی آن ما اطمینان می‌یابیم کلیه فرایندهایی که در ارتباط بین استرس‌های وارده و پاسخ مدل به آن‌ها تأثیرگذارند به‌درستی در نظر گرفته‌شده است یا خیر؟

نتایج و بحث

با ساخت مدل عددی، مدل به ازای مقادیر اولیه ورودی لایه‌های مذکور اجرا، واسنجی و صحت‌سنجی گردیده و در مرحله آخر با اعمال سناریوهای مدیریتی و اقلیمی (کاهش ۱۰ تا ۳۰ درصد نرخ پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری و افزایش ۵ تا ۱۵ درصد میزان بارندگی) واکنش سیستم به تغییرات مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به توضیح است

انتخاب سناریوهای اقلیمی با توجه به روند و تغییرات بارندگی در محدوده موردمطالعه انتخاب گردید و کاهش نرخ بهره‌برداری از چاه‌های بهره‌برداری نیز متناسب با برنامه‌های طرح احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی به‌منظور جلوگیری از افت تراز آب زیرزمینی در مدل اعمال گردید. فلوچارت مراحل روش تحقیق در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- شیوه‌نامه مدل‌سازی برگرفته از (Anderson and Woessner, 1992)

ساخت مدل عددی

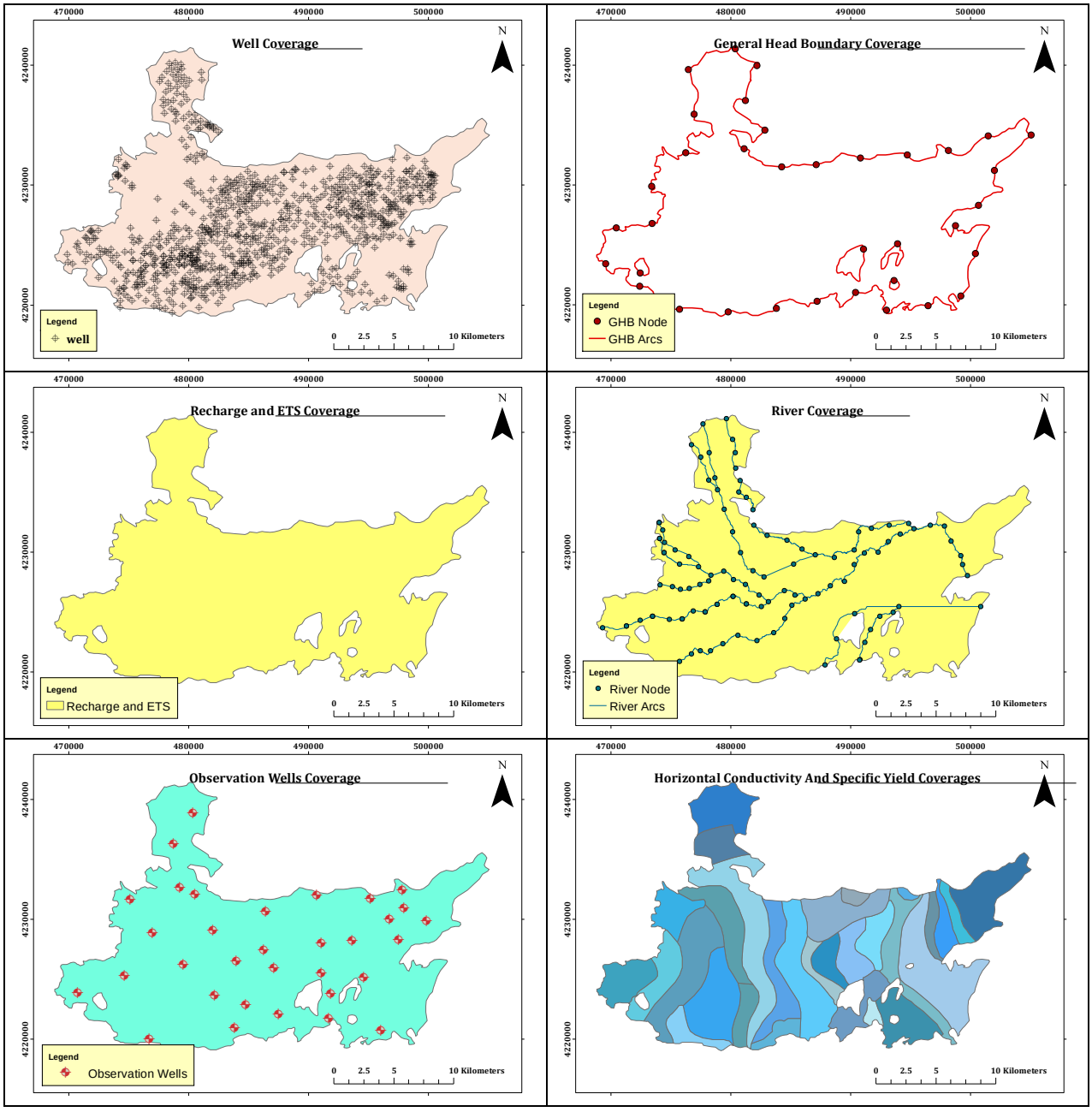
کلیه اطلاعات موردنیاز و مورداستفاده جهت مدل‌سازی آبخوان در قالب یک مدل مفهومی و از طریق بسته‌های موردنظر در مدل وارد گردید. اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری شامل نرخ پمپاژ از طریق بسته Well، لایه نفوذ حاصل ریزش‌های جوی در واحد متر بر روز از طریق بسته Recharge، لایه تبخیر از سطح آب زیرزمینی از طریق بسته ETS و با وارد نمودن اطلاعات حداکثر عمق مربوط به تبخیر، حداکثر نرخ تبخیر بر حسب متر بر روز و تعریف ضرایب مربوط به میزان تبخیر از عمق‌های مختلف بر اساس منحنی وایت، ارتباط هیدرولیکی رودخانه و آبخوان با استفاده از بسته River و وارد نمودن اطلاعات مربوط به تراز کف رودخانه، تراز مربوط به سطح آب رودخانه و همچنین ضرایب رسانایی رسوبات کف رودخانه در مدل تعریف گردید. مضافاً میزان جریان‌های زیرزمینی ورودی و خروجی نیز با توجه به اطلاعات سطح تراز آب زیرزمینی و با استفاده از بسته GHB و مقادیر مربوط به ضریب هدایت هیدرولیکی و ضریب آبدهی ویژه با استفاده از بسته‌های HK و Sy در مدل تعریف شدند (شکل ۳). سطح آب در مرز از نوع GHB ثابت نبوده و با رسیدن اثر تنش‌های داخلی به مرز، سطح آب آن تغییر می‌کند. دبی جریان ورودی یا خروجی با توجه به بار هیدرولیکی در مرز و رسانایی سلول مرزی تغییر می‌کند.

یکی دیگر از گام‌های مهم در مدل‌سازی عددی سفره‌های آب زیرزمینی، تعیین زمان شرایط پایدار آبخوان می‌باشد. بررسی روند هیدروگراف درازمدت واحد دشت سلماس با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده سطح تراز آب زیرزمینی در ۴۰ حلقه چاه پیزومتری، نشان داد که شهریورماه سال آبی ۹۵-۹۴ دارای کمترین تغییرات نسبت به ماه‌های قبل و بعد می‌باشد، لذا این دوره به‌عنوان زمان شرایط پایدار انتخاب و کلیه داده‌های مربوطه به هر یک از لایه‌های مورداستفاده در زمان یادشده وارد مدل گردید.

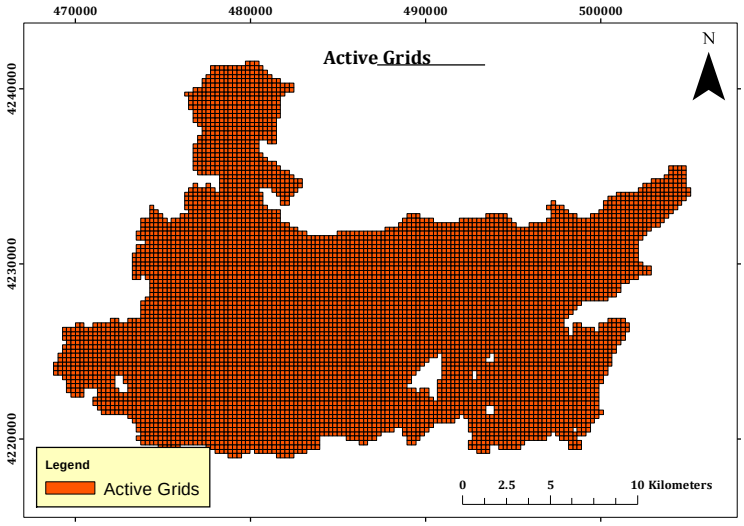
با تعین شرایط اولیه و وارد نمودن اطلاعات هر یک از لایه‌های مورداستفاده و ساخت مدل مفهومی، محدوده مدل با توجه به میزان داده‌های در دسترس و وسعت دشت به شبکه‌ای به ابعاد سلولی ۲۵۰ متر تقسیم گردید و مدل مفهومی ساخته‌شده به مدل عددی تبدیل گردید. در شکل ۴ شبکه‌بندی آبخوان موردمطالعه ارائه شده است.

مدل ساخته‌شده با استفاده از مقادیر اولیه ورودی در زمان مربوط به شرایط پایدار اجرا و با توجه به اختلاف بین مقادیر سطح تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی توسط مدل، مقادیر مربوط به ضریب هدایت هیدرولیکی و ضریب رسانایی رسوبات کف رودخانه و ضریب رسانایی مرزهای هیدرولیکی مدل واسنجی گردید. مدل عددی واسنجی شده در شرایط پایدار، برای یک دوره ۱۱ ماهه و شرایط

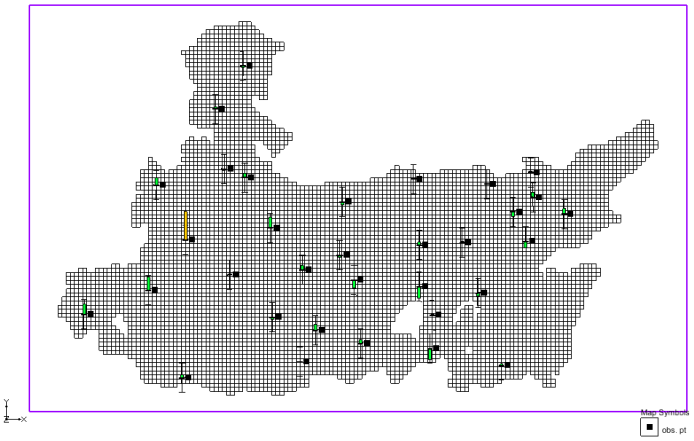
ناپایدار از شهریورماه سال آبی ۹۵-۹۴ تا مردادماه سال آبی ۹۶-۹۵ اجرا و مقدار مربوط به ضریب آبدهی ویژه آبخوان واسنجی گردید. واسنجی مدل عددی در هر دو شرایط پایدار و ناپایدار با استفاده از روش واسنجی خودکار و با استفاده از کد PEST انجام شد.در شکل ۵ تراز آب زیرزمینی محاسباتی توسط مدل به ازای اولین گام زمانی دوره واسنجی، نشان داده‌شده است.



شکل ۳- لایه‌های مورداستفاده در ساخت مدل مفهومی



شکل ٤- شبکه‌بندی مدل مفهومی آبخوان دشت سلماس با ابعاد سلولی ۲۵۰ متر

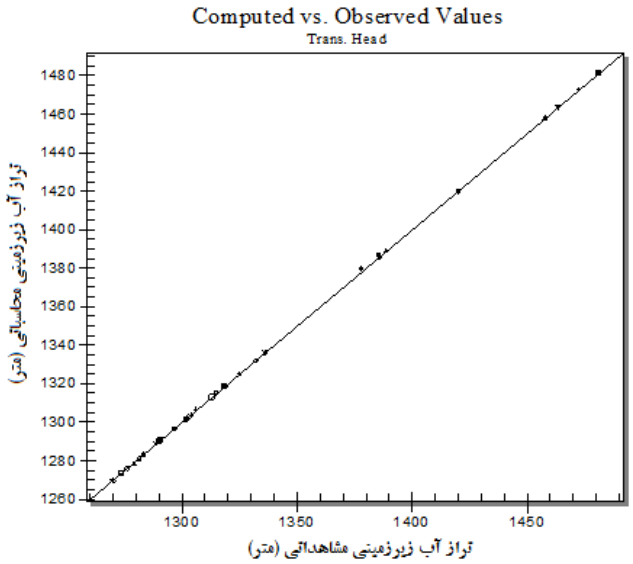


شکل ٥- اختلاف تراز سطح آب زیرزمینی محاسباتی با تراز سطح آب زیرزمینی مشاهداتی

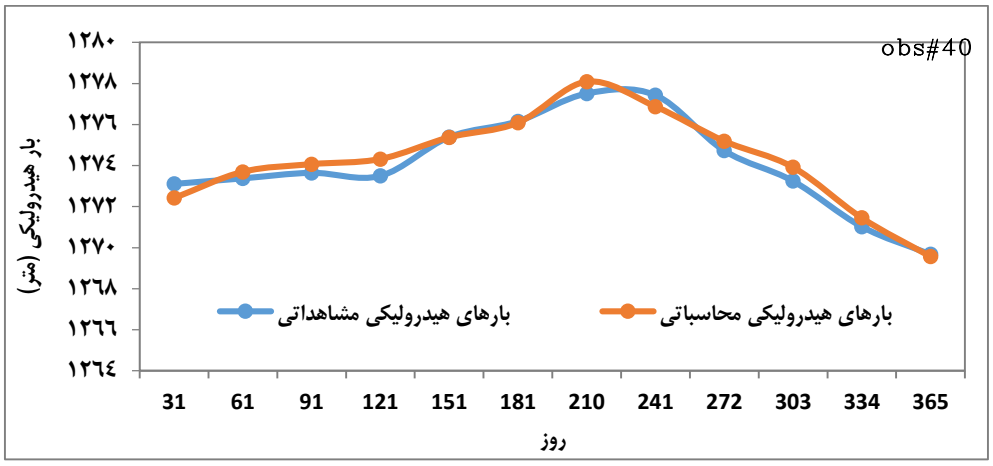
به‌منظور بررسی نتایج واسنجی نیز از معیارهای آماری میانگین خطا (میانگین خطای تخمین یا میانگین اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی)، میانگین خطای مطلق (میانگین قدر مطلق خطای تخمین یا میانگین قدر مطلق اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی) و میانگین مربعات خطا (جذر میانگین مربع اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی‌شده) استفاده گردید که توسط مدل به ازای کل گام‌های زمانی محاسبه می‌شود. (جدول ۳) و نمودار پراکنش مقادیر بارهای هیدرولیکی محاسباتی نسبت به بارهای هیدرولیکی مشاهداتی (شکل ۶) نشان دادند که پارامترهای مدل به‌خوبی واسنجی شده و برای انجام پیش‌بینی قابل‌اعتماد می‌باشد. بررسی هیدروگراف‌های نمونه‌ای از پیزومترها (شکل‌های ۷ تا ۱۰)، نیز توانایی مدل را در پیش‌بینی سری زمانی تراز آب زیرزمینی نشان می‌دهد. پیزومتر شماره ۳۱ با توجه به اینکه به‌طور هم‌زمان تحت تأثیر مرز مدل و رودخانه بوده، دارای روندی نسبتاً متفاوت با دیگر پیزومترهای ارائه‌شده دارد.

جدول ۳- پارامترهای آماری مربوط به خطای واسنجی (متر)

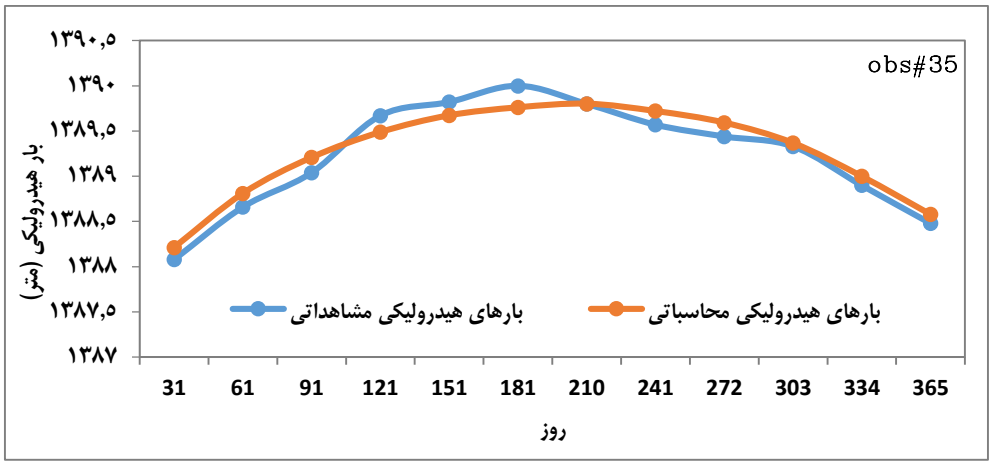
Mean Residual (Head)	-۰/۰۴۷
Mean Absolute Residual (Head)	۰/۴۳۳
Root Mean Squared Residual (Head)	۰/۷۸۶



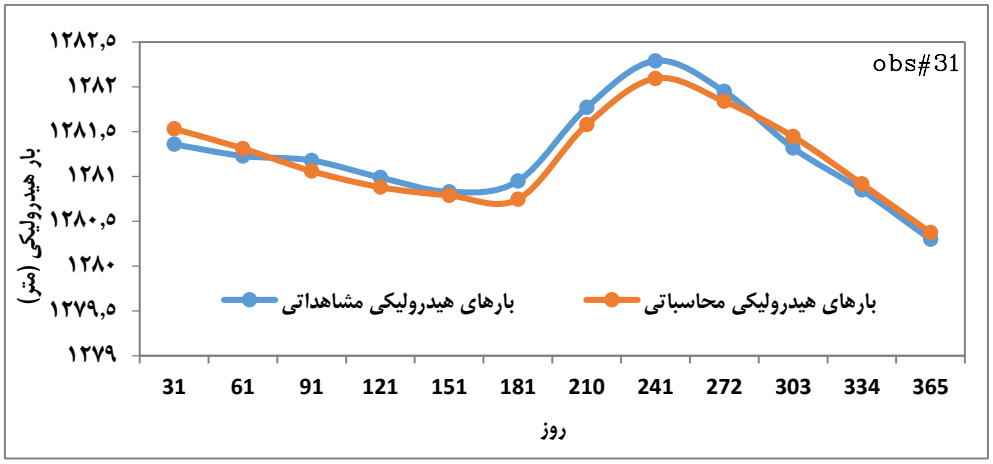
شکل ٦- پراکنش بارهای هیدرولیکی محاسباتی نسبت به بارهای هیدرولیکی مشاهداتی



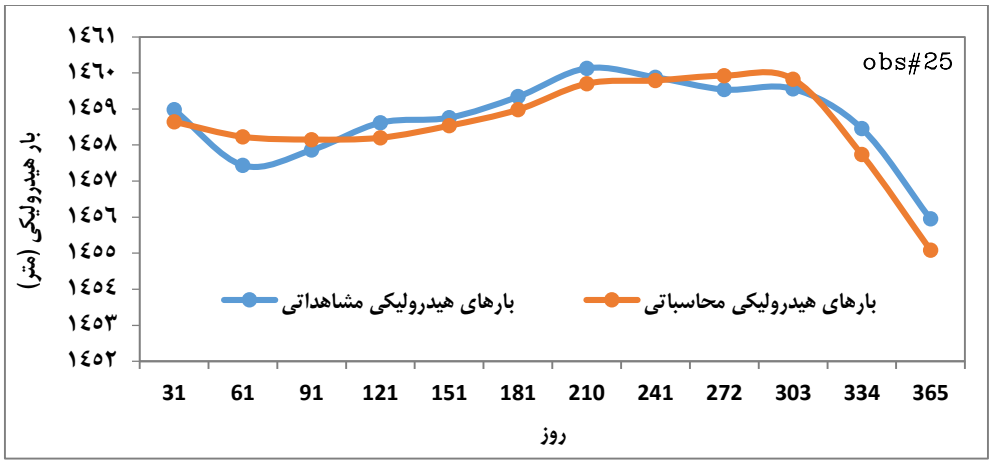
شکل ۷- سری زمانی بارهای هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی در پیزومتر شماره ٤٠ (به‌عنوان نمونه) طی دوره واسنجی



شکل ۸- سری زمانی بارهای هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی در پیزومتر شماره ۳۵ (به‌عنوان نمونه) طی دوره کالیبراسیون



شکل ۹- سری زمانی بارهای هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی در پیزومتر شماره ۳۱ (به‌عنوان نمونه) طی دوره واسنجی



شکل ۱۰- سری زمانی بارهای هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی در پیزومتر شماره ۲۵ (به‌عنوان نمونه) طی دوره واسنجی

پس از واسنجی اطلاعات اولیه ورودی مدل، به‌منظور افزایش اعتماد نسبت به مدل ساخته‌شده، مدل مورد صحت‌سنجی قرار گرفت که بدین منظور مدل برای یک دوره ۱۲ ماهه از شهریورماه سال آبی ۹۶-۹۵ تا مردادماه سال آبی ۹۷-۹۶ با استفاده از مقادیر بهینه پارامترها که در واسنجی به‌دست‌آمده بود و همچنین استرس‌های وارده به سیستم، اجرا و نتایج آن‌که شامل تراز سطح آب زیرزمینی مشاهداتی در محل چاه‌های پیزومتری است با مشاهدات صحرایی مقایسه گردید که نتایج حاصل از مرحله واسنجی مدل را تأیید می‌کرد.

اعمال سناریوهای مدیریتی

در بحث پیش‌بینی، هدف بررسی پاسخ سیستم نسبت به حوادث آینده است. وقتی مدل نسبت به پارامترهای آبخوان و تنش‌های هیدرولوژیکی واسنجی شده باشد برای پیش‌بینی آماده خواهد بود. پس برای پیش‌بینی بایستی مدل را برای حوادث احتمالی آتی شبیه‌سازی کرد. بعد از پایان یافتن واسنجی و بهینه‌سازی پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان، با استفاده از نتایج واسنجی، مدل برای ۶ سناریوی کاهش ۱۰ تا ۳۰ درصدی پمپاژ چاه و افزایش ۵ تا ۱۵ درصدی میزان بارندگی سالانه بر اساس روند تغییرات بارندگی سالانه و برنامه‌های عملیاتی طرح احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی دشت‌های کشور که در خصوص کاهش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی از طریق انسداد چاه‌های غیرمجاز و اصلاح و تعدیل پروانه‌های بهره‌برداری انتخاب شده‌اند، اجرا گردید. نتایج حاصل از اعمال سناریوها در جدول ۴ نشان داده شده است. بر اساس این جدول، با کاهش میزان پمپاژ (۱۰ تا ۳۰٪)، میزان تغییرات حجم آبخوان افزایش یافته، به‌طوری‌که به‌عنوان نمونه با کاهش ۳۰ درصد پمپاژ از چاه‌ها، تغییرات حجم آبخوان به مقدار ۱۳/۶۶+ میلیون مترمکعب خواهد رسید. لازم به ذکر است بر اساس جدول مذکور، اثر کاهش میزان پمپاژ نسبت به افزایش میزان بارندگی قابل‌توجه بوده و تأثیرات معنی‌داری در بهبود وضعیت آبخوان دارد.

جدول ٤- بیلان آب زیرزمینی آبخوان دشت سلماس با اعمال سناریوهای اقلیمی و مدیریتی

سناریوهای مدیریتی	عوامل ورودی (میلیون مترمکعب)				عوامل خروجی (میلیون مترمکعب)				تغییرات حجم ذخیره آبخوان
	جریان زیرزمینی ورودی	نفوذ از بارندگی	نفوذ از جریان‌های سطحی	جمع	تخلیه توسط چاه	جریان زیرزمینی خروجی	زهکشی آبخوان	تبخیر از آبخوان	جمع	
مرحله واسنجی	۴۱/۹۸	۵/۲۴	۳۴/۴۰	۸۱/۶۲	۷۹/۳۵	۶/۷۸	۰/۰۰۳	۱/۹۱	۸۸/۰۵	-۶/۴۲
سناریوی کاهش ۱۰ درصدی نرخ پمپاژ	۴۰/۸۸	۵/۲۴	۳۴/۴۰	۸۰/۵۲	۷۱/۴۱	۶/۸۳	۰/۰۰۳	۱/۹۹	۸۰/۲۴	+۰/۲۷
سناریوی کاهش ۲۰ درصدی نرخ پمپاژ	۳۹/۷۹	۵/۲۴	۳۴/۳۹	۷۹/۴۲	۶۳/۰۴	۶/۸۹	۰/۰۰۳	۲/۰۸	۷۲/۰۱	+۷/۴
سناریوی کاهش ۳۰ درصدی نرخ پمپاژ	۳۸/۷۰	۵/۲۴	۳۴/۳۹	۷۸/۳۳	۵۵/۵۴	۶/۹۵	۰/۰۰۳	۲/۱۷	۶۴/۶۷	+۱۳/۶۶
سناریوی افزایش ۵ درصدی متوسط بارندگی سالانه	۴۱/۹۱	۵/۵۰	۳۴/۴۰	۸۱/۸۱	۷۹/۳۵	۶/۷۹	۰/۰۰۳	۱/۹۲	۸۸/۰۷	-۶/۲۵
سناریوی افزایش ۱۰ درصدی متوسط بارندگی سالانه	۴۱/۸۴	۵/۷۶	۳۴/۴۰	۸۲/۰۰	۷۹/۳۵	۶/۸	۰/۰۰۳	۱/۹۴	۸۸/۰۹	-۶/۰۸
سناریوی افزایش ۱۵ درصدی متوسط بارندگی سالانه	۴۱/۷۷	۶/۰۲	۳۴/۳۹	۸۲/۱۹	۷۹/۳۵	۶/۸	۰/۰۰۳	۱/۹۵	۸۸/۱۱	-۵/۹۱

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از اجرای سناریوهای مذکور بر روی مدل نشان می-دهد که کاهش میزان پمپاژ چاه‌ها باعث بهبود وضعیت بیلان آب زیرزمینی می‌گردد. به صورتی که با کاهش نرخ پمپاژ چاه‌ها به میزان ۳۰٪، ضمن جبران کسری مخزن آب زیرزمینی، بیلان آب زیرزمینی به میزان ۱۳/۶۶ میلیون مترمکعب خواهد رسید و این در حالی است که افزایش ۱۵ درصدی در میزان بارش سالانه تنها ۰/۵ ((۵/۹۱-)-۶/۴۲-) میلیون مترمکعب موجب بهبود وضعیت آبخوان خواهد شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که اعمال سناریوهای مدیریتی و اقلیمی تغییرات محسوسی بر روی تبادلات بین آبخوان و رودخانه نداشته است و بررسی بیلان قطعه به قطعه رودخانه نشان داد که در نواحی ابتدایی دشت، رودخانه به‌عنوان تغذیه‌کننده آبخوان و در نواحی خروجی دشت و با بالا بودن تراز آب زیرزمینی و بالا آمدن سنگ کف آبخوان، به‌عنوان زهکش آبخوان عمل کرده‌اند و نرخ نفوذ جریان از مرزهای مدل نیز با اعمال سناریوهای مدل رابطه عکس داشته است، به صورتی که با کاهش میزان برداشت از آبخوان، آب کمتری از مرزهای مدل وارد محدوده بیلان شده است و برعکس جریان خروجی از محدوده بیلان از مرزهای مدل به‌طور نسبی افزایش یافته است و مشاهده گردید که یک مرز از نوع GHB همواره به‌عنوان یک مرز ورودی یا خروجی عمل ننموده و با تغییرات تراز آب زیرزمینی می‌تواند نقشی متفاوت نسبت به گام‌های زمانی قبلی یا بعدی داشته باشد. همچنین نتایج به‌دست‌آمده از تأثیرات بارندگی با نتایج حاصل از مطالعه شاکر سوره و اسدی، (۱۳۹۷) مطابقت دارد. لذا به‌منظور جلوگیری از افت تراز آب زیرزمینی در شرایط فعلی و شرایط خشک‌سالی موجود، جلوگیری از افزایش میزان بهره‌برداری و انسداد چاه‌های غیرمجاز و همچنین جلوگیری از اضافه برداشت چاه‌های مجاز می‌تواند اثرات قابل‌توجهی داشته باشد.

منابع

پارسا صدر، ح.، محمدزاده، ح. و ناصری، ح. ۱۳۹۵. شبیه‌سازی عددی آبخوان دشت رواب سبزوار و بررسی اثرات احداث سد رواب بر آن، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۳ (۱): ۱۱۹-۱۳۵.

پورمحمدی، س.، دستورانی، م.، جعفری، ه.، رحیمیان، م.، گودرزی، م.، مسماریان، ز. و باقری، ف. ۱۳۹۴. بررسی بیلان آب زیرزمینی دشت تویسرکان همدان به کمک مدل ریاضی مادفلو. مجله اکو هیدرولوژی. ۲ (۴): ۳۷۱-۳۸۲.

جبالبارزی، ب.، زهتابیان، غ.، طویلی، ع و خسروی، ح. ۱۳۹۹. ارزیابی تغییرات تراز سفره آب زیرزمینی دشت جعفریه با استفاده از نرم‌افزار GMS و کد MODFLOW. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱۴ (۵۰): ۵۱-۵۸.

رضایی، م.، پایمزد، ش و اعظمی، ا. ۱۳۹۹. بررسی اثر سد کرخه بر

منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل GMS (مطالعه موردی: دشت عباس، دهلران). فصلنامه علوم و تکنولوژی محیطزیست. ۲۲ (۳): ۲۶۵-۲۷۶.

زارعی، ک.، رسول‌زاده، ع.، صدیقی، م.، احمدزاده، غ. و رمضانی مقدم، ج. ۱۳۹۹. تعیین رابطه فرونشست زمین و افت سطح آب زیرزمینی با دو روش تداخل سنجی راداری و ایستگاه ثابت GPS (مطالعه موردی: دشت سلماس). مجله مهندسی آبیاری و آب ایران. ۱ (۴۱): ۱۶۸-۱۸۲.

سرچشمه، ب. و شاه‌محمدی کلالق، ش. ۱۳۹۵. ارزیابی آسیب‌پذیری آلودگی آبخوان دشت سلماس با مدل دراستیک و سیستم اطلاعات جغرافیایی. فصلنامه دانش آب و خاک. ۲۶ (۴): ۵۵-۶۶.

شاکر سوره، ف. و اسدی، ا. ۱۳۹۸. ارتباط بین خشک‌سالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در دشت سلماس. نشریه مهندسی اکوسیستم بیابان. ۸ (۲۲): ۸۹-۱۰۰.

شایان نژاد، م، و عابدی، م.ج. ۱۳۸۵. نقش تغذیه مصنوعی در بهره‌برداری بهینه از منابع آب، اولین همایش منطقه‌ای بهره‌برداری از منابع آب حوضه‌های کارون و زاینده‌رود (فرصت‌ها و چالش‌ها). دانشگاه شهرکرد.

طاهری تیزرو، ع.، زارع، م. و الیاسی، م. ۱۳۹۰. مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی در دشت کبودرآهنگ با استفاده از مدل ریاضی MODFLOW، چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران.

عاشوری، ش. و شاه‌محمدی کلالق، ش. ۱۳۹۸. پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان دشت سلماس با مدل سینتکس و سیستم اطلاعات جغرافیایی. فصلنامه دانش آب و خاک. ۲۹ (۲): ۱۰۱-۱۱۳.

عباس نوین پور، ا.، محمدحسین پور، م و رضایی، ح. ۱۳۹۸. اثر احداث سد مخزنی بر نوسانات سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی سد مخزنی شهرچای، دشت ارومیه، ایران). پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۶(۴): ۹۳-۷۶.

قبادی علمداری، ش.، اصغری مقدم، ا. و شهسواری، ع. ا. ۱۳۹۸. امکان‌سنجی استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در دشت دهلران با استفاده از مدل MODFLOW. نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی). ۲۳ (۴): ۴۵-۵۷.

قبادیان، ر.، فتاحی چقابگی، ع. و زارع، م. ۱۳۹۳. تأثیر احداث شبکه آبیاری و زهکشی سد گاوشان بر منابع آب زیرزمینی دشت میان دربند با استفاده از مدل GMS 6.5. مجله پژوهش آب در کشاورزی. ۲۸ (۴): ۷۵۹-۷۷۲.

قره‌خانی، م.، ندیری، ع.، اصغری مقدم، ا. و صادق فام، س. ۱۴۰۰. بررسی ریسک آلودگی آبخوان دشت سلماس با استفاده از روش DRASTIC-L بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیکی. مجله مهندسی آبیاری و آب ایران. ۱۱ (۴۴): ۱۶۰-۱۷۴.

کرونی، س.، اسدی، ن. و نصیری، م. ع. ۱۳۹۲. مدیریت آبخوان با استفاده از مدل ریاضی، مطالعه موردی: دشت حسن آباد-قوری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

محمد میرزایی، ف.، ذاکری نیا، م. و هزارجریبی، ا. ۱۳۹۹. ارزیابی سناریوهای مختلف مدیریت منابع آب حوضه گرگان رود با استفاده از مدل‌های WEAPو MODFLOW. مجله علوم آب و خاک. ۲۴ (۲) :۱۳۷-۱۵۲

مفتاح هلقی، م.، ابارشی، ف.، دهقانی، ا. ا. و قربانی، خ. ۱۳۹۷. ارزیابی عملکرد آبخوان تحت تأثیر سناریوهای مختلف اقلیمی (مطالعه موردی: حوضه آبریز قره‌سو). مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۱۲ (۵): ۱۱۴۰-۱۱۵۳.

نادری، ک.، ندیری، ع.، اصغری مقدم، ا. و کرد، م. ۱۳۹۷. ارزیابی وضعیت هیدروژئوشیمی آبخوان دشت سلماس با استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره. مجله اکو هیدرولوژی. ۵ (۳): ۷۹۱-۸۰۰.

ولیزادگان، ا. و یزدان پناه، س. ۱۳۹۷. مدل کمی بهره‌برداری تلفیقی بهینه از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی دشت مهاباد. مجله مهندسی عمران و محیطزیست امیرکبیر. ۵۰ (۴): ۶۳۱-۶۴۰.

Ala-Aho, P., Rossi, P.M., Isokangas, E. and Kløve, B. 2015. Fully integrated surface–subsurface flow modelling of groundwater–lake interaction in an esker aquifer: Model verification with stable isotopes and airborne thermal imaging. Journal of Hydrology. 522: 391-406.

Anderson, M. P. and Woessner, W.W. 1992. Applied groundwater modeling, simulation of flow and advective transport, Academic Press, 381.

Ansarifar, M.M., Salarijazi, M., Ghorbani, K. and Kaboli, A.R. 2020a. Simulation of groundwater level in a coastal aquifer. Marine Georesources & Geotechnology. 38(3): 257-265.

Ansarifar, M.M., Salarijazi, M., Ghorbani, K. and Kaboli, A.R. 2020b. Spatial estimation of aquifer's hydraulic parameters by a combination of borehole data and inverse solution. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 79(2): 729-738.

Cai, Z., Wang, W., Zhao, M., Ma, Z., Lu, C. and Li, Y., 2020. Interaction between Surface Water and Groundwater in Yinchuan Plain. Water, 12(9), 2635.

de Graaf, I.D., Sutanudjaja, E.H., Van Beek, L.P.H. and Bierkens, M.F.P. 2015. A high-resolution global-scale groundwater model. Hydrology and Earth System Sciences. 19(2): 823-837.

Famiglietti, J. S. 2014. The Global Groundwater Crisis. Nature Climate Change. 4(11): 945–48.

Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M.F. and Van Beek, L.P. 2012. Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. Nature: 488(7410): 197-200.

Konikow, L.F. 2011. Contribution of global groundwater depletion since 1900 to sea-level rise. Geophysical Research Letters. 38(17). https://doi.org/10.1029/2011GL048604.

Wang, H.F. and Anderson, M.P. 1995. Introduction to groundwater modeling: finite difference and finite element methods. Academic Press.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.2, Vol. 16, Jun.-Jul. 2022, p. 280-293

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۲، جلد ۱۶، خرداد - تیر ۱۴۰۱، ص. ۲۹۳-۲۸۰

Effects of Management and Climate Scenarios on Groundwater Level Changes: Case Numerical Modeling Study in Salmas Plain Aquifer

M. Dousti Rezaie[1], K. Zeinalzadeh[2]*, S. Besharat[3], B. Amirataee[4]

Recived: Oct.27, 2021 Accepted: Dec.27, 2021

Abstract

In recent decades, several factors such as population growth, limited surface water resources due to reduced rainfall, and over-withdrawal of aquifers have caused a sharp drop in groundwater levels (GWLs) in many plains of Iran, including Salmas plain located in the province of West Azerbaijan. In this study, the numerical model of the Salmas plain aquifer was prepared using MODFLOW model in GMS software in both states of steady flow (September 2015) and non-steady flow (from September 2016 to August 2017). The input parameters of the model were calibrated for the measured values of GWL at the location of observation wells and validated from August 2016 to July 2018. Finally, the GWL was investigated applying 6 scenarios including a 10% to 30% decrease in pumping wells and a 5% to 15% increase in rainfall. The results of studied scenarios showed that reducing the pumping rate of the wells significantly improves the condition of groundwater resources. By reducing the pumping rate of the wells up to 30%, the volume of groundwater will increase by 13.66 mcm and shortage of the aquifer reservoir will be compensated. However, 15% increase in annual rainfall will improve the condition of the aquifer by only 0.5 mcm. Results show that reducing the rate of withdrawal from wells reduced the amount of groundwater flow entering the aquifer from 41.98 mcm in the calibration state of the model to 38.7 mcm in terms of 30% reduction of discharge rate in the wells. However, the increase in rainfall did not cause significant changes in the amount of groundwater inflow and outflow. The results of this study indicate that management scenarios such as preventing over-withdrawal from authorized wells and blocking unauthorized wells have more significant effects on improving the GWL than possible climatic scenarios.

Keywords: GMS, Improvement of groundwater resources, Steady flow, Sustainable management, Unsteady flow

1- Ph.D Student of Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
2- Corresponding Author: Associate Professor, Department of Water Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
3 - Associate Professor, Department of Water Engineering, Urmia University. Email: sina323@yahoo.com.
4- Ph.D in Water Resources Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
(*- Corresponding Author Email: k.zeinalzadeh@urmia.ac.ir)