برآورد ضرایب هیدرودینامیک منابع آب زیرزمینی حوضه آبخیزکوهپایه- سگزی با استفاده از مدلMODFLOW

جهانگیر عابدی کوپایی و مریم گلابچیان[1*]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۷/۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۲/۱۳)

چکیده

امروزه، به‌دلیل قابلیت تطابق زیاد مدل‌های پیشرفته شبیه‌سازی آب زیرزمینی با سیستم هیدرولیکی آبخوان، امکان استفاده از این مدل‌ها برای مدیریت و بهره‌برداری جامع از منابع آب زیرزمینی فراهم شده است. هدف از این تحقیق، بررسی و مدل‌سازی منابع آب زیرزمینی زیرحوضه کوهپایه- سگزی و به‌طور خاص تخمین ضرایب هیدرودینامیک آبخوان سطحی این زیرحوضه می‌باشد. در این راستا، پس از تهیه لایه‌های ورودی به مدل، پارامترهای مؤثر در مدل‌سازی، شرایط مرزی و شبکه‌بندی آبخوان تعیین ردید. سپس با استفاده از اطلاعات موجود اقدام به اجرا و واسنجی مدل در حالت ماندگار (سال آبی ۱۳۸۱) و ناماندگار سال‌های آبی (۱۳۸۱ تا ۱۳۸۳) نموده و برای کسب اطمینان از نتایج شبیه‌سازی آزمون صحت‌سنجی برای سال آبی ۱۳۸۴ انجام شد. هدایت هیدرولیکی آبخوان از ۱۵/۲۶ تا ۱۹/۸۷ متر بر روز و آبدهی ویژه (ضریب ذخیره) آبخوان از ۰/۰۱۰۷ تا ۰/۰۱۸۶ به‌دست آمد. با بررسی هیدروگراف معرف تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان از سال آبی ۱۳۷۴ تا ۱۳۹۱ میزان افت سطح آب به‌علت وجود دو ناحیه زیر پوشش شبکه آبیاری کانال‌های آبشار و رودشتین (ناحیه سبز) که موجب بالاآمدگی سطح آب زیرزمینی شده زیاد نیست و متوسط سالانه آن حدود ۲۲ سانتی‌متر می‌باشد ولی با حذف ناحیه سبز، میزان افت سطح آب زیرزمینی آبخوان به‌طور متوسط بیش از ۸۰ سانتی‌متر در سال حاصل شده است. با تحلیل حساسیت مدل در حالت ناماندگار به‌منظور بررسی نحوه و میزان تأثیر هر یک از پارامترهای تغذیه، هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه (ضریب ذخیره) بر نتایج مدل، صحت نتایج حاصل از واسنجی مدل مورد تأیید قرار گرفت. همچنین در طول دوره‌های زمانی اجرای مدل، مقادیر تراز هیدرولیکی محاسبه شده توسط مدل با مقادیر مشاهده شده در محل کلیه پیزومترها تطابق خوبی دارند.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی، MODFLOW، آبخوان، ضریب قابلیت انتقال، آبدهی ویژه

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان،

*:مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: koupai@cc.iut.ac.ir

مقدمه

امروزه دسترسی به منابع آب یکی از مهم‌ترین چالش‌های دولت‌ها و ملت‌هاست، چرا که به موازات رشد سریع جمعیت و افزایش نیازهای بشری از یک سو و محدودیت منابع آب‌های سطحی از سوی دیگر، تأمین آب برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار گردیده است. این در حالی است که منابع قابل استفاده بشر فقط تقریباً ۰/۶۳۵ درصد از کل ذخیره آبی کره زمین را تشکیل می‌دهد (۸). ایران در محدوده خشک و نیمه‌خشک کره زمین قرار دارد. علاوه بر این، زمان و محل ریزش نزولات جوی در ایران نیز با نیازهای آبی مطابقت ندارد. عمده شهرهای بزرگ ایران در مناطقی واقع شده‌اند که دسترسی آنها به منابع آب‌های سطحی کم بوده و لذا اکثراً از آب‌های زیرزمینی استفاده می‌کنند. وجود چاه‌های متعدد عمیق و نیمه‌عمیق در آبخوان‌ها و قنات‌های موجود در این شهرها دلیلی بر این ادعا می‌باشد. با توجه به موارد فوق و هم‌گام با پیشرفت فن‌آوری، بهره‌برداری از این ذخایر در چند دهه اخیر به شدت رو به فزونی گذاشته، که موجب عدم تعادل بین تغذیه و برداشت از این ذخایر و منفی شدن بیلان آب زیرزمینی شده است و پیامدهای زیانباری چون افت سطح ایستابی، کاهش آبدهی چاه‌ها، جابجایی و کف شکنی چاه‌ها و افزایش هزینه پمپاژ از عمق و کاهش غیرقابل برگشت حجم آبخوان و متراکم شدن پیکره آبخوان که خود سبب کاهش ضریب قابلیت انتقال، ضریب ذخیره و فرونشت زمین می‌شود را به دنبال دارد. برای جلوگیری از ادامه افت کمی و کیفی، مدیریت صحیح بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی باید به‌عنوان یک اصل و پایه در برنامه‌ریزی‌های کشور به‌طور جدی مدنظر مسئولان و دست اندرکاران قرارگیرد (۹). مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی از لحاظ کمی و کیفی نیازمند شناخت وضعیت سفره در شرایط طبیعی در وهله اول و سپس پیش‌بینی اثرات برداشت و یا تغذیه می‌باشد. شناخت رفتار یک سیستم آب زیرزمینی، نیازمند حفر تعداد زیادی چاه اکتشافی و انجام عملیات پمپاژ و آزمایشات ژئوفیزیک و انجام یک سری تحقیقات دراز مدت برای هر منطقه خاص می‌باشد که با توجه به وضعیت کنونی و سقف محدود بودجه‌ها عملاً امکان‌پذیر نیست. در این میان، با ابزاری مانند شبیه‌سازها و یا مدل‌ها می‌توان شرایطی مشابه آنچه در طبیعت موجود است را به وجود آورد. شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی توسط مدل عددی یک روش غیرمستقیم مطالعه است که با صرف هزینه کمتر نسبت به‌روش‌های مستقیم از یک سو و قابلیت تطابق زیاد مدل‌های پیشرفته شبیه‌سازی آب زیرزمینی با سامانه هیدروژئولوژی آبخوان می‌تواند مشکلات موجود را تا حد زیادی رفع کند. مدل‌های کامپیوتری آب زیرزمینی در دهه‌های اخیر به‌عنوان روشی ارزان و سریع در مطالعه چگونگی حرکت آب، تعیین جهت جریان و سرعت آب زیرزمینی، تعیین مکان‌های مناسب برای حفر چاه‌های استخراج آب در یک حوضه آبریز، تخمین پارامترهای هیدرولیکی، تعیین عکس‌العمل سفره در اثر تغذیه‌ها و برداشت‌های مختلف و پیش‌بینی رفتار فعلی و آینده سفره‌های آب زیرزمینی استفاده می‌شوند (۵).

هم‌گام با تحقق اهداف برنامه‌ریزی پایدار این منابع، مدل MODFLOW همواره مورد توجه بوده است که بر دو معادله اساسی دارسی و اصل بقای جرم استوار بوده و از ترکیب این دو معادله می‌تواند به حل عددی مدل دست یابد. معادلات دیفرانسیل حاکم را به‌صورت تفاضل محدود مرکز- بلوک براساس شرایط اولیه، شرایط مرزی، تنش‌های وارد بر سیستم و پارامترهای تعریف شده، در قالب بسته‌های نرم‌افزاری مختلف تحلیل می‌کند و برای آبخوان محصور، نیمه‌محصور و آزاد در حالت ماندگار و ناماندگار استفاده می‌شود. مدل سه بعدی MODFLOW در دهه ۱۹۸۰ توسط مک دونالد و هرباق (۱۱) نوشته شده است و توسط مرکز مطالعات زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا (USGS) به زبان فرترن ۷۷ تهیه شده و بسته‌ها و نرم‌افزارهای دیگری برای مطالعات آب زیرزمینی به آن اضافه شده است.

اصولاً یک مدل آب زیرزمینی با عدم قطعیت‌های مختلفی روبه‌رو است. یکی از بارزترین پارامترهای ایجاد کننده عدم

قطعیت در شبیه‌سازی، داده‌های هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه (ضریب ذخیره) می‌باشند که باید به‌نحوی مطلوب ناحیه‌بندی گردیده و مقادیر مناسبی برای آنها درنظر گرفته شود. لی‌پیچ و همکاران (۱۰) به شبیه‌سازی یک آبخوان نیمه خشک در مراکش پرداختند. در این تحقیق برای شبیه‌سازی آبخوان موردنظر از مدل MODFLOW استفاده گردید و مقادیر هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره پس از واسنجی دستی مدل به‌روش سعی و خطا محاسبه گردید. محرم و همکاران (۱۲) برای جلوگیری از کاهش سطح آب زیرزمینی و جلوگیری از آسیب رساندن به آبخوانی در در غرب کشور مصر برای به دست آوردن مقدار بهینه پمپاژ و همچنین تعداد بهینه چاه‌ها در منطقه از مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک GA در کنار مدلMODFLOW استفاده نمودند. ایشان با درنظر گرفتن سناریوهای مختلف به بررسی وضعیت آب زیرزمینی منطقه پرداخته و در نهایت با توجه به بررسی سناریوها و انتخاب بهترین سناریو مقدار بهینه پمپاژ از چاه‌های منطقه تعیین گردید. سدکی و اوزار (۱۳) یک مدل شبیه سازی به کمک نرم افزار MODFLOW برای شرایط ناماندگار جریان آب زیرزمینی در آبخوان ساحلی آرهیس- نکور در مراکش طراحی و واسنجی کرده و ضرایب هیدرودینامیک این آبخوان را بهینه نمودند.

حسن‌پور و همکاران (۳) با شبیه‌سازی آبخوان دشت شبستر توسط مدل ریاضی Visual Modflow، ضمن صحت‌سنجی مدل دریافتند که ترکیب پارامترهای به کار رفته جهت واسنجی مدل مناسب نبوده و مدل از قطعیت خوبی برخوردار نیست که دلیل اصلی آن عدم قطعیت داده‌های ورودی به‌مدل تشخیص داده شد. به‌همین جهت راهکارهایی از جمله برآورد قابلیت انتقال و هدایت هیدرولیکی از طریق آزمایش ظرفیت ویژه و نیز انتخاب یک راهکار اعتباری مناسب، اصلاح شرایط مرزی و تعیین دقیق‌تر منابع تغذیه و تخلیه کننده آبخوان در این طرح مورد بررسی قرار گرفت. کریمی و همکاران (۶) با استفاده از مدل عددی MODFLOW PMWIN 5.3 به بررسی تأثیرآب‌های سطحی بر سطح آب زیرزمینی ماهیدشت در استان کرمانشاه پرداختند و دریافتند که سطح آب زیرزمینی در پیزومترهای نزدیک به رودخانه در حالت تغذیه از بستر رودخانه افزایش بیشتری نسبت به پیزومترهای دورتر داشته است و حجم آبخوان نیز افزایش یافته است و با توجه به این نتیجه، با استفاده از آب‌های سطحی به‌عنوان منبع تغذیه کننده آبخوان، در فصول سرد سال که برای کشاورزی استفاده نمی‌شوند، می‌توان سطح آب زیرزمینی و حجم آبخوان را افزایش داد و آن را تا حدودی احیا نمود. چیت‌سازان و ساعت‌ساز (۲) با هدف بررسی گزینه‌های مختلف مدیریتی منابع آب دشت رامهرمز اقدام به شبیه‌سازی آبخوان توسط مدل عددی MODFLOW نمودند. نتایج آنها نشان می‌دهد که ادامه روند کنونی برداشت از آبخوان از نظر مدیریتی گزینه قابل قبول نمی‌باشد و برعکس حفر چاه‌های بهره‌برداری در مناطق شرقی و مرکزی واعمال زهکشی در شمال و جنوب دشت راهکارهای مناسبی برای استفاده توأم منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی خواهد بود.

با توجه به خشکسالی‌های اخیر در ایران فشار زیادی بر منابع آب زیرزمینی شرق اصفهان، به‌خصوص دشت کوهپایه- سگزی، وارد شده است. لذا تبیین دقیق وضعیت منابع آب زیرزمینی منطقه می‌تواند کمک مؤثری در مدیریت منابع آب داشته باشد. هدف از پژوهش حاضر بررسی و آبخوان سطحی دشت کوهپایه- سگزی و به‌طور خاص تعیین پارامترهای هیدرودینامیک آبخوان با توجه به داده‌های چاه‌های مشاهداتی با استفاده از مدل عددی MODFLOW برای دوره زمانی ۳ ساله ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۳ می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

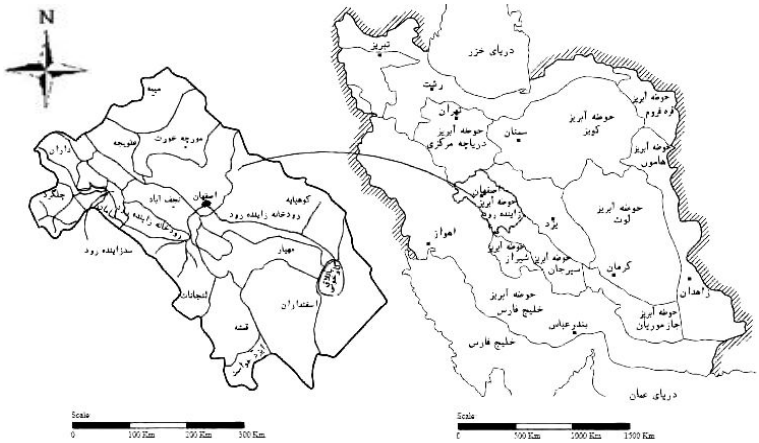
زیرحوضه کوهپایه – سگزی بزرگ‌ترین زیرحوضه در محدوده حوضه آبریز زاینده‌رود می‌باشد که در شرق این حوضه آبریز قرار می‌گیرد. این زیر حوضه از شمال به زیرحوضه نایین- اردستان و طرق آبیازن، از جنوب به زیرحوضه مهیارجنوبی دشت آسمان، از شرق به محدوده گاوخونی و از غرب به

زیرحوضه اصفهان برخوار و نجف‌آباد مرتبط است. بین مدارهای ۵۱ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۵۳ درجه طول جغرافیایی و مدارهای ۳۳ درجه و ۱۳ دقیقه عرض جغرافیایی واقع شده است. بلندترین نقطه ارتفاعی در کوه مارشنان، در شمال شرقی روستای فشارک با ارتفاع ۳۲۷۱ متر و پست‌ترین نقطه در جنوب شرقی منطقه، در جنوب شرقی شهر هرند با ارتفاع ۱۴۴۰ متر است. متوسط ارتفاع محدوده ۱۵۲۶ متر از سطح دریا برآورد گردیده است. وسعت زیرحوضه ۶۸۱۹ کیلومتر مربع می‌باشد که ۵۳۰۷ کیلومترمربع آن را دشت و بقیه را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. رودخانه زاینده‌رود و شبکه‌های آبیاری آبشار و رودشتین منابع اصلی تأمین آب سطحی برای فعالیت کشاورزی در منطقه هستند. در زیر حوضه کوهپایه- سگزی دو سفره آب زیرزمینی سطحی و عمقی موجود می‌باشد که لایه مارنی غیر قابل نفوذی این دو سفره را از یکدیگر مجزا می‌سازد. آبخوان سطحی حدود ۲۸۸۹ کیلومتر مربع از دشت را شامل می‌شود. سفره آب زیرزمینی سطحی حدود ۵ تا ۷۰ متر بوده که معمولاً ضخامت لایه آبدار از غرب به شرق کاهش می‌یابد. این سفره از نظر کمی نسبتاً مناسب بوده ولی از نظر کیفیت آب نامناسب است. تغذیه و کیفیت آب در سفره سطحی به‌صورت عمده تحت تأثیر آب برگشتی حاصل از آبیاری سطوح زیر کشت از طریق چاه‌ها و شبکه کانال‌های آبیاری، نفوذ از بستر رودخانه زاینده‌رود، بارندگی بر سطح آبخوان و انتقال جریان آب زیرزمینی از آبخوان‌های مجاور واقع در دشت‌های برخوار و مهیار جنوبی است. منابع برداشت از آبخوان سطحی شامل چاه‌های نیمه عمیق، قنوات و چشمه‌ها می‌باشد. با توجه به این‌که در منطقه دو سفره آب زیرزمینی موجود می‌باشد، گاهی اوقات بخشی از آب چاه‌ها از طریق سفره سطحی و بقیه از سفره عمقی تأمین گردیده و یا کل آب برداشتی تنها از سفره عمقی با بستن چاه در محدوده سفره سطحی تأمین می‌گردد. تعیین منابع آب چاه‌ها در این منطقه بسیار مشکل و پیچیده بوده و تاکنون نیز در این خصوص آمار برداری دقیقی انجام نشده است. سفره عمقی که امکان دسترسی به آب شیرین را میسر می‌سازد در زیر سفره اول تا عمق حداکثر ۴۰۰ متر واقع شده و لایه‌ای رسی با قابلیت نفوذ بسیارکم و ضخامت بین ۳۰ تا حداکثر ۵۰ متر دو سفره را از یکدیگر مجزا می‌سازد. این سفره تحت فشار و آرتزین بوده و در حال حاضر پتانسیل عمودی خود را به میزان زیادی از دست داده است. به‌علت وجود لایه رسی ناتراوا با ضخامت زیاد کیفیت آب در این سفره در حد مناسبی است و کیفیت آن به‌صورت عمده تحت تأثیر تغذیه از طریق انتقال جریان آب زیرزمینی از آبخوان محدوده اصفهان- برخوار می‌باشد. منابع برداشت از آبخوان عمقی به‌طور عمده چاه‌های عمیق می‌باشند. مطابق آماربرداری انجام شده در سال آبی ۹۰-۸۹ جمعاً ۹۲۵ حلقه چاه عمیق، ۱۶۵۱۷ حلقه چاه نیمه عمیق، ۲۶۳ رشته قنات و ۱۲۷ دهانه چشمه در حوضه مذکور وجود دارد(۷). برای این پژوهش سفره سطحی درنظر گرفته شده که با توجه به شبکه‌بندی انتخابی مدل (سلول‌های فعال و غیرفعال) وسعت منطقه مورد مطالعه ۲۸۱۰ کیلومترمربع می‌باشد.

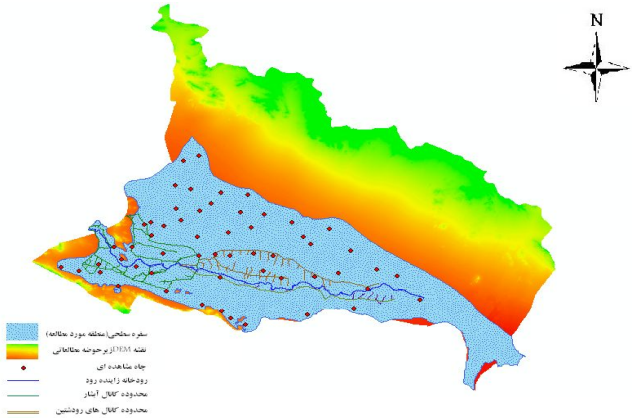
شکل(۱) موقعیت زیرحوضه کوهپایه- سگزی را در حوضه آبریز زاینده‌رود نشان می‌دهد.

مدل کامپیوتری منابع آب زیرزمینی

در ابتدا داده‌های زمین‌شناسی، هیدرولوژی و هیدروژئولوژی در ارتباط با پروژه گردآوری شده است. این داده‌ها شامل نقشه توپوگرافی، نقشه DEM، آمار هواشناسی، لوگ زمین‌شناسی چاه‌های مشاهده‌ای، عمق چاه‌های بهره‌برداری و آمار منابع و مصارف آب اخذ شده از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان اصفهان می‌باشند. در این مطالعه از اطلاعات مربوط به تراز آب و همچنین لوگ ۵۶ چاه مشاهده‌ای که در سطح منطقه پراکنده‌اند مطابق شکل (۲) استفاده شد. با توجه به لوگ چاه‌ها غالب دشت از رس، سیلت، شن و ماسه می‌باشد. ضخامت آبرفت آبخوان سطحی در مناطق مختلف متفاوت و بین حداقل چند ده متر تا حداکثر ۷۰ متر متفاوت می‌باشد. ساختار مدل مفهومی آبخوان دشت کوهپایه، شامل محدوده مدل‌سازی،



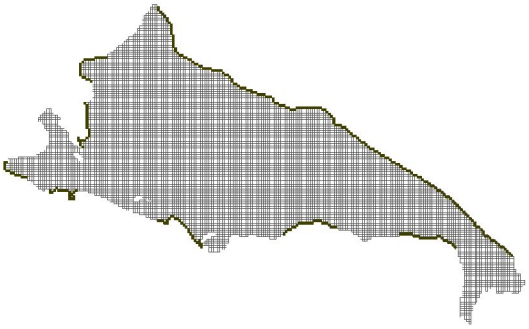
شکل ۱. موقعیت زیر حوضه کوهپایه- سگزی در حوضه آبریز زاینده‌رود



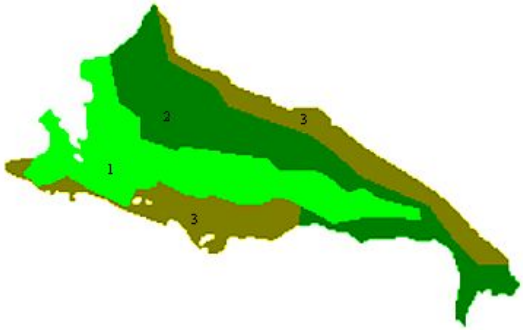
شکل ۲. موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان و مرز آبخوان سطحی و کانال‌های آبشار و رودشتین

ناحیه‌بندی و توزیع اولیه پارامترهای هیدروژئولوژیک (هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه)، تخلیه چاه‌های بهره‌برداری و تغذیه آبخوان و شرایط مرزی آبخوان مانند رودخانه زاینده‌رود و شرط مرز با بار عمومی (GHB) می‌باشد. ابتدا مرز آبخوان با استفاده از نقشه‌های DEM اخذ شده از شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان و با به‌کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی مطابق شکل (۲) مشخص گردید.

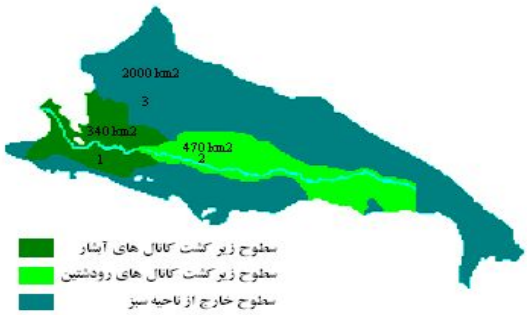
مدل شامل ۲۴۴ ستون و ۱۴۹ ردیف به ابعاد ۵۰۰×۵۰۰ متر و دو بخش سلول‌های فعال و غیرفعال می‌باشد. سلول‌های بدون جریان، همان سلول‌های غیرفعالند که مدل بار هیدرولیکی برای این سلول‌ها محاسبه نمی‌نماید. توپوگرافی سطح زمین و توپوگرافی سنگ کف پس از درون‌یابی به‌روش کریجینگ مکانی به شبکه تخصیص داده شده است. برای تعیین موقعیت سنگ کف با توجه به این‌که اطلاعات ژئوفیزیکی از این منطقه در دسترس نبود، از عمق لوگ‌هایی که با سنگ برخورد کرده بودند و از عمق عمیق‌ترین چاه‌های موجود در آبخوان سطحی استفاده شده است. جهت اعمال شرایط مرزی رودخانه در مدل، نخست موقعیت و مختصات دقیق رودخانه در سیستم اطلاعات جغرافیایی بررسی و سپس براساس اندازه‌گیری‌های انجام شده در دو ایستگاه پل‌چوم و ورزنه و همچنین نقشه‌های توپوگرافی مشخصات مقطع رودخانه نظیر تراز آب، تراز کف و عرض رودخانه تعیین و در مدل شبیه‌ساز وارد گردید. جهت برآورد پارامتر قابلیت انتقال لایه بستر رودخانه، نتایج شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه، و با به حداقل رساندن خطا، پارامتر در مدل معکوس وارد گردید. تخمین پارامتر قابلیت انتقال رودخانه به موازات تخمین پارامتر ضریب هدایت



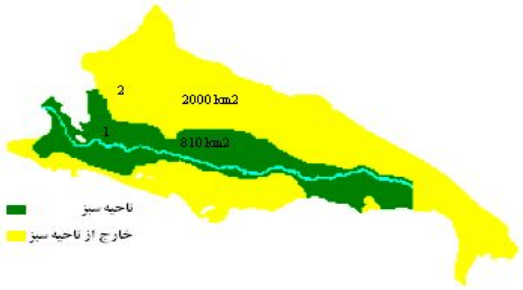
شکل۳. موقعیت سلول‌های مرزی با بار عمومی



شکل.۴. محدوده ضرایب هیدرودینامیک آبخوان



شکل ۵. نواحی تغذیه در آبخوان



شکل ۶. نواحی تخلیه در آبخوان

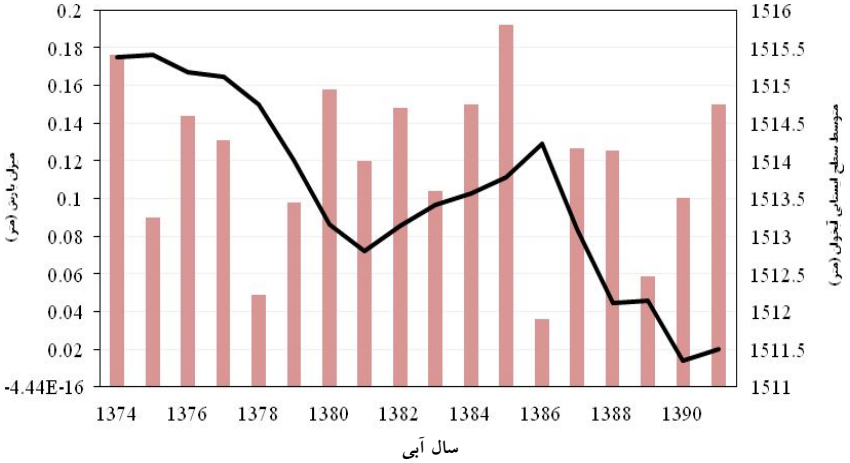
هیدرولیکی صورت پذیرفته و مدل معکوس نهایی برحسب پارامتر قابلیت انتقال لایه بستر رودخانه و پارامتر هدایت هیدرولیکی آبخوان سطحی تنظیم و اجرا گردیده است. با توجه به شبکه‌بندی انجام شده در مدل به‌ابعاد ۵۰۰×۵۰۰ متر، طول بازه رودخانه در هر شبکه حدود ۵۰۰ متر درنظر گرفته شده و با انتخاب عرض جریان متوسط ۴۰ متر و ضخامت بستر حدود ۱ متر برای رودخانه، ضریب هدایت هیدرولیکی لایه بستر مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌گردد. K هدایت هیدرولیکی لایه بستر، L و W به‌ترتیب طول و عرض ناحیه تماس و M ضخامت بستر می‌باشد.

$$CRIV=KLW/M \qquad [۱]$$

جهت اعمال شرط مرزی با بار عمومی جبهه‌های ورودی به آبخوان سطحی مطابق شکل(۳) در مرزهای ارتباطی با ارتفاعات شمال و شمال غربی منطقه، ارتفاعات شمال غربی مرغ، دشت برخوار در شمال غربی منطقه و دشت مهیار در جنوب و جنوب غربی منطقه تعیین گردید و تنها یک جبهه خروجی در جنوب شرقی آبخوان سطحی در نزدیکی ورزنه به سمت باتلاق گاوخونی درنظر گرفته شد.

برآورد اولیه و ناحیه‌بندی پارامتر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه (ضرب ذخیره) با توجه به ساختار زمین‌شناسی، لوگ چاه‌های مشاهده‌ای و مشخصات فیزیکی ساختارهای مختلف مطابق شکل (۴) صورت گرفت.

به‌منظور تخمین تغذیه آبخوان محدوده طرح مطابق شکل (۵) به سه ناحیه تقسیم گردید. تغذیه در ناحیه۱ مجموع نفوذ بارندگی، آب برگشتی ناشی از چاه‌های بهره‌برداری و شبکه کانال آبشار ، در ناحیه ۲ مجموع نفوذ بارندگی، آب برگشتی ناشی از چاه‌های بهره‌برداری و شبکه کانال رودشتین و در ناحیه ۳ مجموع نفوذ بارندگی و آب برگشتی ناشی از چاه‌های بهره‌برداری می‌باشد. به‌همین ترتیب جهت تخمین تخلیه آبخوان منطقه مطابق شکل (۶) به دو ناحیه تقسیم گردید. ناحیه ۱



شکل ۷. هیدروگراف آبخوان سطحی زیرحوضه کوهپایه- سگزی همراه با بارش سالانه طی سال‌های ۱۳۷۴ تا۱۳۹۱

سطوح زیرکشت شبکه کانال‌های آبشار و رودشتین (ناحیه سبز) که درصد بیشتری از برداشت سالانه آبخوان را جهت آبیاری سطوح زیرکشت به خود اختصاص می‌دهد و ناحیه۲، ناحیه خارج از سطوح زیرکشت می‌باشد. در حالت ماندگار و ناماندگار به تخمین مقدار تغذیه و تخلیه در هر یک از دوره‌های شبیه‌سازی پرداخته شده است.

برای حالت ماندگار، سال آبی ۸۲-۸۱ و حالت ناماندگار سال‌های آبی ۸۴-۸۱ به‌ترتیب از ترازهای درون‌یابی شده چاه‌های مشاهده‌ای در بهمن سال۸۱ و اسفند سال ۸۱ به‌عنوان شرایط اولیه استفاده و به‌مدل معرفی گردیده است. زمان واسنجی در این تحقیق در حالت ماندگار یک سال آبی ۸۲-۸۱ و در حالت ناماندگار سه سال، سال‌های آبی ۸۲-۸۱ تا ۸۴-۸۳ (۱۰۸۰ روز) درنظر گرفته شده است. در مدل شبیه‌ساز زیرحوضه هر سال آبی به دو دوره تر و خشک (هر دوره ۱۸۰ روز) و هر دوره به ۶ گام زمانی سی روزه تقسیم گردیده است. بنابراین مدل شامل ۶ دوره با ۳۶ گام زمانی می‌باشد. در حالت ماندگار میانگین ۱۲ ماهه ترازهای هر یک از چاه‌های مشاهده‌ای در سال آبی ۸۲-۸۱ به‌عنوان داده‌های مشاهده‌ای ماندگار و در حالت ناماندگار آمار ماهانه هر یک از چاه‌های مشاهده‌ای در سال‌های آبی ۸۱ تا ۸۳، به‌عنوان داده‌های مشاهده‌ای ناماندگار در مدل درنظر گرفته شده‌اند.

نتایج و بحث

بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی آبخوان

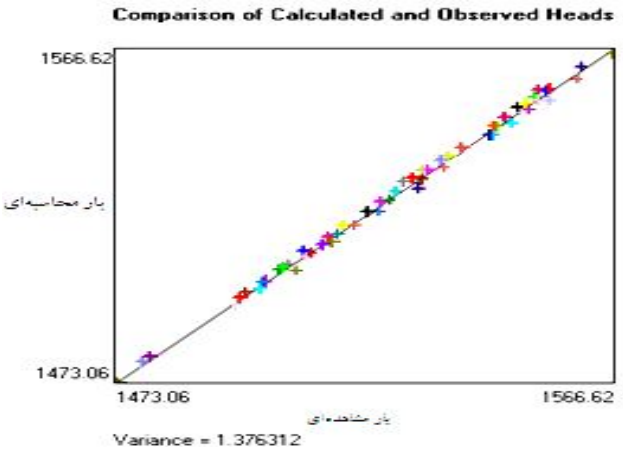
هیدروگراف معرف تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان طی سال‌های ۱۳۷۴ تا ۱۳۹۱ به همراه بارش سالانه مطابق شکل(۷)، نشان‌دهنده افت کلی سطح آب زیرزمینی در این مدت بوده است، اما میزان افت سطح آب در آبخوان مورد نظر به‌علت وجود دو ناحیه زیر پوشش شبکه آبیاری (ناحیه سبز) که موجب بالاآمدگی سطح آب زیرزمینی شده زیاد نیست و متوسط سالانه آن ۲۲ سانتی‌متر می‌شود که در طی مدت ۱۸ سال افت سطح آب حدود ۴ متر می‌باشد ولی با حذف ناحیه سبز، میزان افت سطح آب زیرزمینی آبخوان به‌طور متوسط بیش از ۸۰ سانتی‌متر در سال حاصل شده است.

نتایج مدل در حالت ماندگار

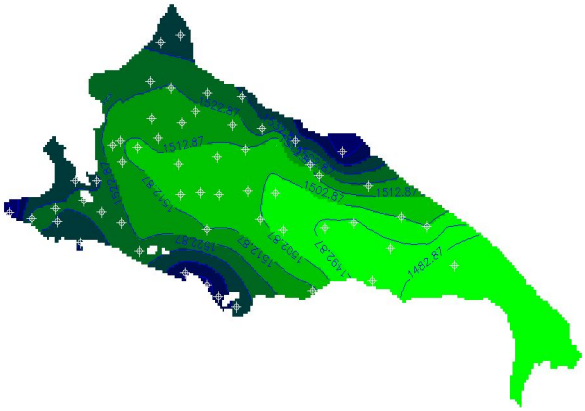
تخمین پارامتر هدایت هیدرولیکی

مقادیر هدایت هیدرولیکی براساس واسنجی مدل معکوس، مطابق جدول (۱) برای محدوده‌های درنظر گرفته شده در لایه آبدار سطحی محاسبه گردید.

طبق جدول فوق، مقدار هدایت هیدرولیکی آبخوان در نواحی شمالی و جنوبی حدود ۱۵/۲۶ متر بوده و در نواحی



شکل۸. نتایج تراز هیدرولیکی شبیه‌سازی شده در مقابل مقادیر چاه‌های مشاهده‌ای در حالت ماندگار



شکل۹. نتایج شبیه‌سازی مدل ماندگار به‌صورت خطوط هم‌تراز هیدرولیکی با فاصله ارتفاعی ۱۰ متر

جدول ۲. مقادیر آبدهی ویژه (ضریب ذخیره) حاصل از واسنجی مدل ماندگار

شماره ناحیه	۱	۲	۳
آبدهی ویژه (ضریب ذخیره)	۰/۰۱۰۷	۰/۰۱۵	۰/۰۱۸۶

مرکزی از ۱۸/۱۳ تا ۱۹/۸۷ متر در روز تغییر می‌کند که نشان می‌دهد بافت خاک آبخوان از شن و ماسه تشکیل شده و تغییرات ترکیب مقدار سیلت و رس در سه ناحیه فوق باعث تغییرات‌اندک مقدار هدایت هیدرولیکی گردیده است.

تخمین پارامتر قابلیت انتقال رودخانه

براساس نتایج حاصل از واسنجی پارامتر قابلیت انتقال رودخانه به‌طور متوسط برابر ۸۶۴ مترمربع در روز محاسبه گردید و ضریب هدایت هیدرولیکی لایه بستر مطابق فرمول (۱)، ۰/۰۴۳۲ متر در روز به‌دست آمد.

خطوط تراز هیدرولیکی حالت ماندگار

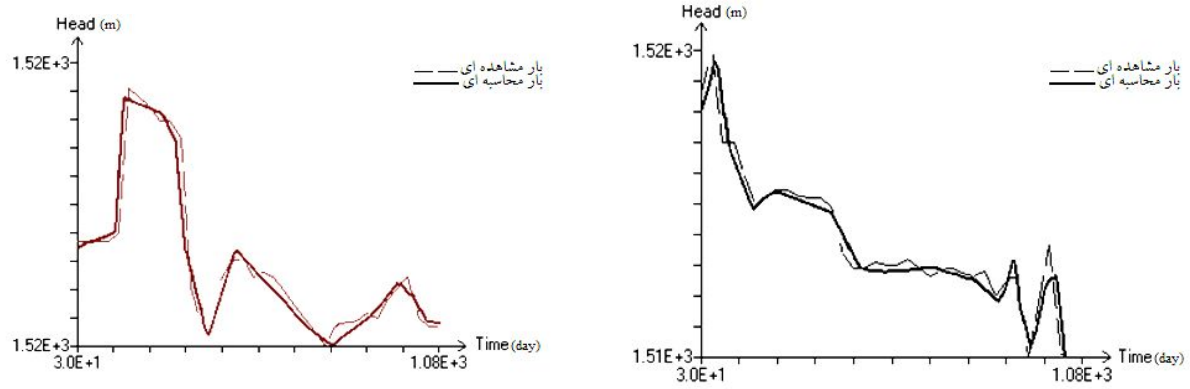
شکل (۸) مقادیر تراز هیدرولیکی شبیه‌سازی شده توسط مدل در حالت ماندگار را در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده در چاه‌های مشاهده‌ای برحسب متر نشان می‌دهد. این شکل بیانگر آن است که مدل، عملکرد واقعی و رفتار هیدرولیکی آبخوان را به‌خوبی شبیه‌سازی کرده است. مطابق شکل (۹) مقادیر تراز هیدرولیکی از سمت شمال غربی به جنوب شرقی روند کاهشی را نشان می‌دهد که با نتایج حاصل از پیزومترهای منطقه و جهت جریان آب زیرزمینی در آبخوان نیز تطابق دارد.

نتایج مدل در حالت ناماندگار

تخمین پارامتر آبدهی ویژه (ضریب ذخیره)

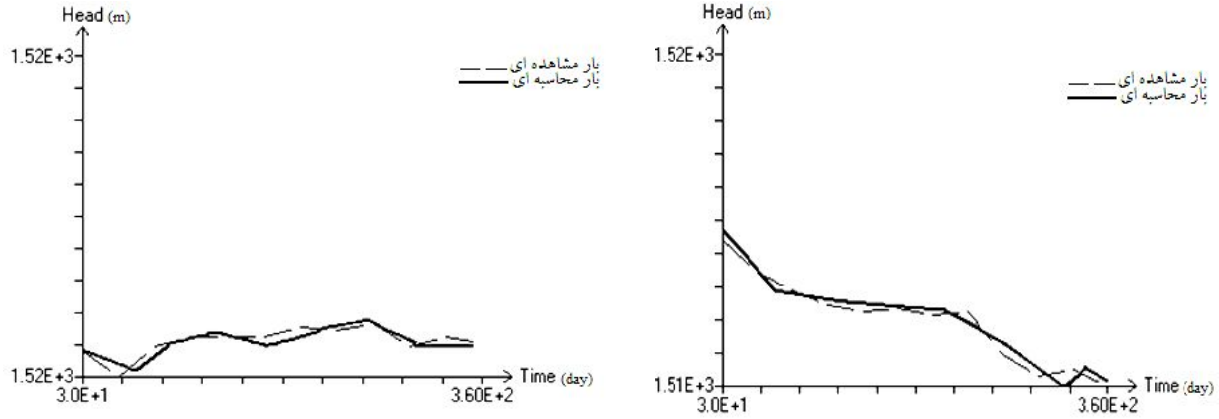
مقادیر آبدهی ویژه (ضریب ذخیره) حاصل از واسنجی مدل ناماندگار توسط کد PEST برای هریک از ناحیه‌های تعیین شده در جدول (۲) ارائه گردیده است.

طبق مقادیر جدول فوق، آبدهی ویژه (ضریب ذخیره) از ۰/۰۱۰۷ تا ۰/۰۱۸۶ در سطح کل دشت متغیر است. حداقل مقدار آن مربوط به نواحی مجاور رودخانه و حداکثر آن مربوط به نواحی شمالی و جنوبی آبخوان می‌باشد. علت بیشتر بودن این پارامتر در نواحی شمالی، درشت بودن تشکیلات آبرفتی این مناطق و قرار داشتن در مسیر مخروط افکنه‌ها و مسیل‌ها می‌باشد.



(ب) (الف)

شکل ۱۰. بار هیدرولیکی محاسبه‌ای در مقابل مقادیر بار مشاهده‌ای، الف) چاه شماره ۱۵ و ب) چاه شماره ۱۶



(ب) (الف)

شکل ۱۱. بار هیدرولیکی محاسبه‌ای در مقابل مقادیر بار مشاهده‌ای، الف) چاه شماره ۱۵ و ب) چاه شماره ۱۶

خطوط تراز هیدرولیکی حالت ناماندگار

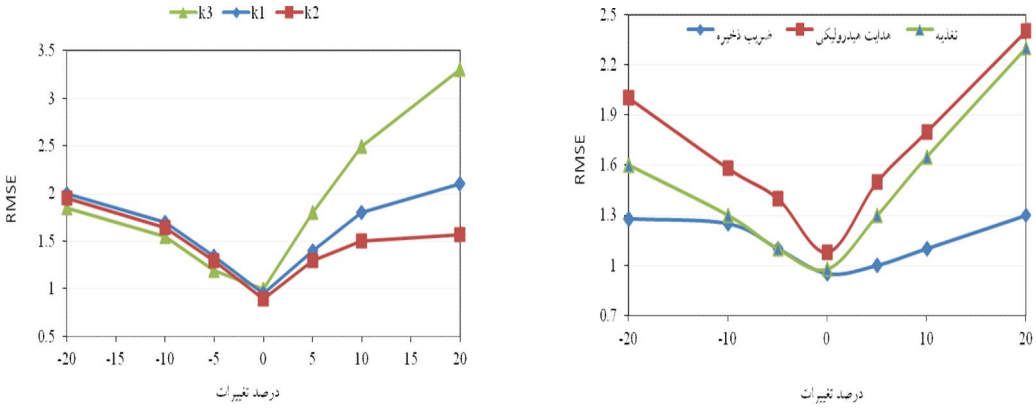
در شکل (۱۰) به‌ترتیب نحوه تغییرات سطح آب زیرزمینی در طول دوره زمانی شبیه‌سازی برای چاه مشاهده‌ای ۱۵و ۱۶ به همراه مقادیر اندازه‌گیری شده محلی نشان داده شده است.

صحت‌سنجی مدل

در مرحله صحت‌سنجی اگر مدل بتواند حوادث دوره زمانی غیر از واسنجی را شبیه‌سازی کند، ترکیب پارامترهای درست می‌باشد. برای بررسی صحت و درستی مدل، لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز برای یک سال آبی بعد (۸۵-۸۴) با فرض اینکه روند تغییرات تنش در سیستم مثل سال‌های قبل باشد، به مدل وارد گردید. نتایج برازش مقادیر بار هیدرولیکی محاسبه شده توسط مدل و مشاهده شده در محل چاه‌های مشاهده‌ای برای دوره صحت‌سنجی بیانگر آن است که مدل توانسته است تا حد قابل قبولی شرایط حاکم بر جریان آب زیرزمینی در آبخوان را شبیه‌سازی کند. شکل (۱۱) نحوه تغییرات تراز هیدرولیکی شبیه‌سازی شده در مقابل مقادیر چاه‌های مشاهده‌ای ۱۵ و ۱۶ را در طول دوره صحت‌سنجی نشان می‌دهد.

تحلیل حساسیت مدل

به‌منظور تحلیل صحت نتایج حاصل از واسنجی مدل حالت ماندگار در عملکرد مدل ناماندگار و بررسی تغیرات نتایج مدل



(ب) (الف)

شکل ۱۲. نمودار تغییرات خطا نسبت به تغییرات، الف) مقادیر پارامترهای ورودی و ب) هدایت هیدرولیکی

ناماندگار نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی در حالت ناماندگار، پارامترهای هدایت هیدرولیکی، تغذیه و ضریب ذخیره را جداگانه و با درصد یکسان تغییر داده و میزان بار آبی محاسبه شده توسط مدل با مقادیر مشاهداتی مقایسه شد و مقادیر RMSE، ریشه میانگین مربعات خطا محاسبه گردید. تغییر پارامترهای ورودی ذکر شده برای میزان افزایش و کاهش ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد مقادیر واسنجی شده نهایی توسط مدل مطابق شکل (۱۲- الف) انجام گردید. همان‌طور که در شکل مشخص است در حالت کلی مدل نسبت به تغییرات هدایت هیدرولیکی نسبت به دو پارامتر دیگر از حساسیت بیشتری برخوردار است و همچنین حساسیت مدل نسبت به مقادیر آبدهی ویژه (ضریب ذخیره) حداقل می‌باشد. حال که مشخص شد مدل نسبت به مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی حساس می‌باشد، تحلیل حساسیت دیگری برای ضریب هدایت هیدرولیکی در محدوده‌های انتخابی ۱ تا ۳ (Kx_1، Kx_2 و Kx_3) با انتخاب میزان افزایش و کاهش ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد مقادیر واسنجی شده نهایی توسط مدل مطابق شکل (۱۲- ب) انجام گردید.

تغییر نتایج مدل نسبت به مقادیر بزرگ‌تر هدایت هیدرولیکی در مقایسه با مقادیر واسنجی شده، قابل توجه بوده و مقادیر ضریب هدایت هیدرولیکی در محدوده‌های شمالی و جنوبی آبخوان Kx_1 و ناحیه مجاور حریم رودخانه Kx_3 به شدت بر نتایج مدل تأثیرگذار است. همچنین با قرارگیری مقدار حداقل تابع خطا در مقدار درصد کمتر از ۵، صحت نتایج حاصل از واسنجی مدل ماندگار در عملکرد مدل ناماندگار نسبت به مقادیر هدایت هیدرولیکی واسنجی شده ماندگار آبخوان تأیید می‌گردد.

بیلان آب ناماندگار

با بررسی بیلان آب در حالت ناماندگار معلوم گردید که آبخوان نقش اصلی در تغذیه رودخانه دارد. در جدول (۳) بیلان آب زیرزمینی در پایان دوره زمانی دوم هر یک از سال‌های شبیه‌سازی حالت ناماندگار (پایان هر سال آبی) برحسب میلیون مترمکعب ارائه شده است. مطابق این جدول و مقایسه مقادیر فاکتورهای مؤثر مختلف و با توجه به نقش زهکش رودخانه و تغذیه رودخانه از طریق آبخوان و همچنین افزایش حجم ذخیره آبخوان بالابودن تراز آب زیرزمینی در آبخوان مذکور تأیید می‌گردد. بالابودن سطح آب زیرزمینی در آبخوان باعث ایجاد مناطق تبخیری و اتلاف آب می‌گردد.

ابراهیمی و همکاران با محاسبه بیلان آب زیرحوضه کوهپایه- سگزی در دراز مدت و در سال ۸۵-۱۳۸۴ دریافتند که میزان تبخیر آبخوان در طول یک دوره خشکسالی طولانی حدود ۲۵ میلیون مترمکعب می‌باشد و با خاتمه دوره خشک حجم آب تبخیری به بیش از دو برابر نیز رسیده است. در این

جدول۳. بیلان آب زیرزمینی در پایان دوره زمانی دوم هر یک از سال‌های شبیه‌سازی حالت ناماندگار

سال آبی	فاکتورهای ورودی (MCM)				فاکتورهای خروجی (MCM)			
	مرزها	رودخانه	تغذیه سطحی	تغییر حجم ذخیره	مرزها	رودخانه	چاه‌ها	تغییر حجم ذخیره
۸۲-۸۱	۱۷۲/۵۸	۱۰/۷۵	۴۴۱/۰۹	۷/۸۸	۱۰/۵۳	۵۶/۶۹	۵۴۵/۳۳	۱۹/۷۲
۸۳-۸۲	۱۶۵/۳۸	۹/۵۴	۴۹۶/۳۶	۱/۸۲	۱۱/۶۸	۶۵/۵۳	۵۷۵/۶۰	۲۰/۲۳
۸۴-۸۳	۱۷۴/۴۶	۱۰/۸۷	۴۵۰/۱۶	۱۶/۷۸	۹/۴۸	۵۷/۸۶	۵۸۴/۶۲	۰/۳۱

تحقیق با بررسی بیلان آب به‌دست آمده و با توجه به نقش زهکش رودخانه و تغذیه رودخانه از طریق آبخوان و همچنین افزایش حجم ذخیره آبخوان مورد مطالعه در بیشتر دوره‌ها، بالابودن تراز آب زیرزمینی و تبخیر از آبخوان مذکور تأیید می‌گردد (۱).

صفری و کمالی با بررسی وضعیت لایه‌های آبدار در دشت ورزنه در زیرحوزه کوهپایه - سگزی دریافتند که در سال‌های اخیر برداشت بیش از حد از ذخایر زیرزمینی سبب افت سطح آب زیرزمینی و کاهش ضخامت آبخوان و در نتیجه کاهش ضرایب هیدرودینامیک گردیده است. هیدروگراف واحد علی‌رغم وجود بارندگی در حال کاهش می‌باشد، به جز در هنگام فصول بارندگی که نمودار سطح آب به میزان خیلی کم افزایش می‌یابد، این امر حاکی از آن است که نوسانات سطح آب زیرزمینی بیشتر تحت تأثیر تخلیه آبخوان می‌باشد که نتایج حاصله از این تحقیق را تأیید می‌کند (۴).

نتیجه‌گیری

از نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل و بررسی بیلان آبخوان معلوم گردید که تغذیه منابع آب زیرزمینی آبخوان سطحی زیر حوضه کوهپایه- سگزی بیشتر از طریق تغذیه سطحی و مرزهای سیستم صورت می‌گیرد و مناطق تحت پوشش کانال‌های آبیاری آبشار و رودشتین (مجموع ناحیه ۱ و ۲ تغذیه) بیشترین مقدار تغذیه را داردکه در این میان سهم مربوط به سطح زیرکشت شبکه آبشار بیشترین است. همچنین مشخص گردید که بیشترین سهم برداشت آبخوان مربوط به چاه‌های بهره‌برداری در ناحیه سبز (سطوح زیر کشت شبکه آبشار و رودشتین) می‌باشد.

جهت ادامه مطالعات تکمیلی در آینده موارد زیر پیشنهاد می‌گردد:

۱- حفر تعدادی چاه مشاهده‌ای دیگر به‌منظور تعیین دقیق شرایط مرزی آبخوان در نواحی مجاور مرزها و بازنگری و افزایش دقت در جمع‌آوری داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای و تفکیک دقیق چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان سطحی و عمقی.

۲- جمع‌آوری اطلاعات دقیق از عمق سنگ کف آبخوان در کل زیرحوضه مطالعاتی از طریق تلفیق اطلاعات چاه‌ها و مطالعات تکمیلی ژئوفیزیکی برای تهیه مدل شبیه‌سازی با انطباق بیشتر با داده‌های زمین‌شناسی و پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان.

منابع مورد استفاده

۱. ابراهیمی، خ.، م. جنت رستمی، ق. رستمی‌زاده و م. جعفری. ۱۳۸۸. مدیریت آبخوان حوزه کوهپایه - سگزی براساس محاسبه بیلان آب. همایش ملی بحران آب در کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر ری.

۲. چیت‌سازان، م. و م. ساعت ساز. ۱۳۸۴. کاربرد مدل ریاضی MODFLOW در بررسی گزینه‌های مختلف مدیریت منابع آب دشت رامهرمز، *علوم مهندسی و آبیاری* ۱۴: ۱-۱۶.

۳. حسن‌پور، م. ع.، ف. میرحیدری، ا. اصغری مقدم و ه. طهماسبی نژاد. ۱۳۸۸. ارزیابی خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان دشت شبستر و شبیه‌سازی آن با استفاده از مدل ریاضی Visual Modflow. دومین کنفرانس سراسرس آب. دانشگاه آزاد اسلامی واحد بهبهان.

۴. صفری، ع. ا. و غ. ر. کمالی. ۱۳۹۲. تحلیل و بررسی لایه‌های آبدار دشت ورزنه. *پژوهش آب ایران* ۱۳: ۱۰-۱۸.

۵. فاتحی‌مرج، ا.، م. طائی‌سمیرمی و خ. میرنیا. ۱۳۹۰. مدیریت منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل عددی MODFLOW (مطالعه موردی: دشت گربایگان استان فارس)، *چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران*، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران.

۶. کریمی، ز.، م. حیدری‌زاده و ع. ا . عبده کلاهچی. ۱۳۹۱. بررسی تأثیر آب‌های سطحی بر روی سطح آب زیرزمینی ماهیدشت، مجله زمین ۲۳: ۴۵-۳۷.

۷. مطالعات به‌هنگام سازی اطلس منابع آب محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز گاوخونی. ۱۳۸۹. مهندسین مشاور آب و توسعه پایدار.

۸. نکوآمال کرمانی، م. ۱۳۸۶. *شبیه‌سازی و مدیریت آبخوان دشت بوچیر- حمیران*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۹. وقارفرد، ح. و ع. پورجنایی. ۱۳۹۰. *بررسی و ارزیابی تأثیرات کمی تغذیه مصنوعی بر سفره آب زیرزمینی با استفاده از مدل* MODFLOW (مطالعه موردی: دشت سرزه رضوان، استان هرمزگان)، گزارش نهایی، پژوهشکده هرمز، دانشگاه هرمزگان.

10. Le Page, M., B. Berjamy, Y. Fakir, F. Bourgin, L. Jarlan, A. Abourida, M. Benrhanem, G. Jacob, M. Huber, F. Sghrer, V. Simonneaux and G. Chehbouni. 2012. An integrated DSS. groundwater management based on remote sensing. The case of semi- arid aquifer in Morocco. J. Water Resour Manage. 26: 3209-3230.
11. McDonald, M .G. and A .W. Harbaugh. 1998. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, USGS. J. Water Resour. Inv. Book 6.
12. Moharram, S. H., M. I. Gad, T. A. Saafan and S. Khalaf Allah. 2011. Optimal groundwater management using genetic algorithm in El-Farafra oasis, Western Desert, Egypt. J. Water Resour Manage. 26: 927-948.
13. Sedki, A. and D. Ouazar. 2011. Simulation-Optimization Modeling for Sustainable Groundwater Development: A Moroccan Coastal Aquifer Case Study. J. Water. Resour. Manage. 25: 2855-2875.