

برآورد ضرایب هیدرودینامیک منابع آب زیرزمینی حوضه آبخیز کوهپایه- سگزی با استفاده از مدل MODFLOW

جهانگیر عابدی کوپایی^{*} و مریم گلابچیان^۱

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

چکیده

امروزه، به دلیل 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 به طور 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 رდید. سپس با استفاده از اطلاعات موجود اقدام به اجرا و واسنجی مدل در حالت نامندگار (سال آبی ۱۳۸۱) و نامندگار سال‌های آبی (۱۳۸۳ تا ۱۳۸۱) نموده و برای کسب اطمینان از نتایج شبیه‌سازی آزمون صحت‌سنجی برای سال آبی ۱۳۸۴ انجام شد. هدایت هیدرولیکی آبخوان از ۱۵/۲۶ متر بر روز و آبدهی ویژه (ضریب ذخیره) آبخوان از ۰/۰۱۸۶ تا ۰/۰۱۰۷ بدست آمد. با بررسی هیدرولیکی آبخوان سطح آب زیرزمینی آبخوان از سال آبی ۱۳۷۴ تا ۱۳۹۱ میزان افت سطح آب به علت وجود دو ناحیه زیر پوشش شبکه آبیاری کانال‌های آبشار و رودشتین (ناحیه سبز) که موجب بالا‌مدگی 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 به طور متوسط بیش از ۸۰ سانتی‌متر در سال حاصل شده است. با تحلیل حساسیت مدل در حالت نامندگار به منظور 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 پیزومنترها 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

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 به روش‌های 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 کامپیوتی آب زیرزمینی در دهه‌های اخیر به عنوان 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 عکس العمل 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 به صورت 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 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 روبرو است. یکی از بارزترین پارامترهای ایجاد کننده عدم

امروزه دسترسی به منابع آب یکی از مهم‌ترین چالش‌های دولت‌ها و ملت‌های است، 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. عملده 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 دلیل بر این ادعا می‌باشد. با توجه به موارد فوق و هم‌گام با پیشرفت فناوری، 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 آبدی چاه‌ها، جابجایی و کف شکنی چاه‌ها و افزایش هزینه پمپاژ از عمق و کاهش غیرقابل برگشت حجم آبخوان و متر acum شدن پیکره آبخوان که خود سبب کاهش ضربی قابلیت انتقال، ضربی ذخیره و فرونشت زمین می‌شود را به دنبال دارد. برای جلوگیری از ادامه افت کمی و کیفی، مدیریت صحیح بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی باید به عنوان یک اصل و پایه در برنامه‌ریزی‌های کشور به طور جدی مدنظر مسئولان و دست اندکاران قرار گیرد (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

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 به عنوان 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 بر عکس حفر چاه‌های بهره‌برداری در مناطق شرقی و مرکزی و اعمال 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، به خصوص 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 به طور 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 مهیار جنوبی دشت آسمان، از شرق به محدوده گاوخونی و از غرب به

قطعیت در شبیه‌سازی، داده‌های هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه (ضریب ذخیره) می‌باشند که باید به نحوی مطلوب ناحیه‌بندی گردیده و مقادیر مناسبی برای آنها درنظر گرفته شود. لی پیچ 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 به روش سعی و خطأ محاسبه گردید. محram 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 مدل MODFLOW 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 شبیه‌سازی 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 صحبت‌سنجدی 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 به مدل تشخیص داده شد. به همین 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 تأثیر آب‌های سطحی بر سطح آب زیرزمینی ماهیدشت در استان کرمانشاه

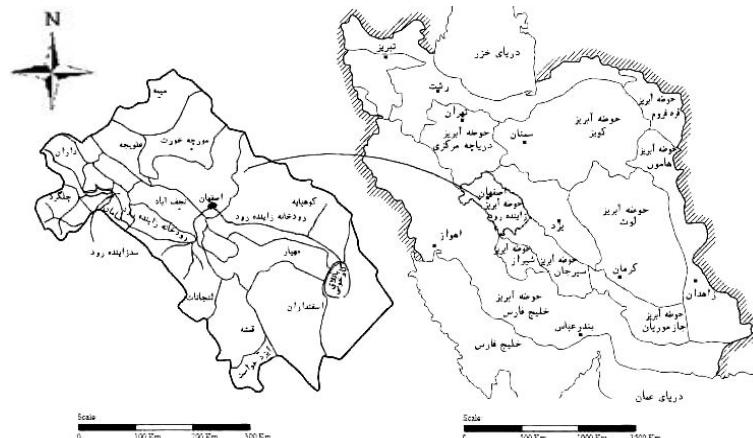
می‌سازد در زیر سفره اول تا عمق حداقل ۴۰۰ متر واقع شده و لایه‌ای رسی با قابلیت نفوذ بسیار کم و ضخامت بین ۳۰ تا حداقل ۵۰ متر دو سفره را از یکدیگر مجزا می‌سازد. این سفره تحت فشار و آرتزین بوده و در حال حاضر پتانسیل عمودی خود را به میزان زیادی از دست داده است. به علت وجود لایه رسی ناتراوا با ضخامت زیاد کیفیت آب در این سفره در حد مناسبی است و کیفیت آن به صورت عمده تحت تأثیر تغذیه از طریق انتقال جریان آب زیرزمینی از آبخوان محدوده اصفهان-برخوار می‌باشد. منابع برداشت از آبخوان عمقی به طور عمده چاه‌های عمیق می‌باشند. مطابق آمار برداری انجام شده در سال آبی ۸۹-۹۰ 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.

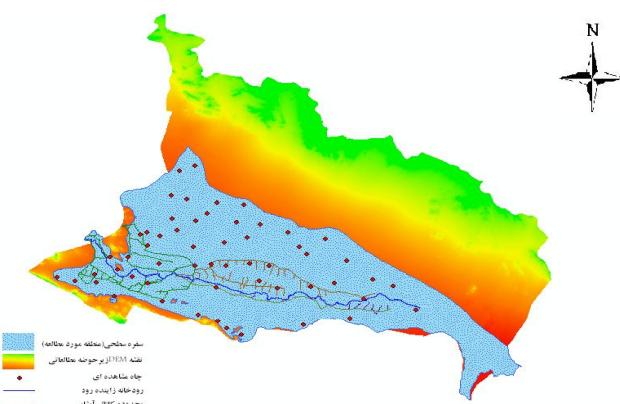
مدل کامپیوتری منابع آب زیرزمینی

در ابتدا داده‌های زمین‌شناسی، هیدرولوژی و هیدروژئولوژی در ارتباط با پژوهه 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 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 حداقل ۷۰ متر متفاوت می‌باشد. ساختار مدل مفهومی آبخوان دشت کوهپایه، شامل محدوده مدل‌سازی،

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 هرنند 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 رودشتنین 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 به صورت 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 این که 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 باستن 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



شکل ۱. موقعیت زیر حوضه کوهپایه - سگزی در حوضه آبریز زاینده رود

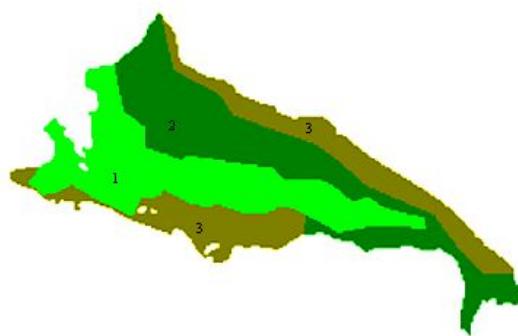


شکل ۲. موقعیت چاههای مشاهده‌ای آبخوان و مرز آبخوان سطحی و کانال‌های آبشار و رودشیان

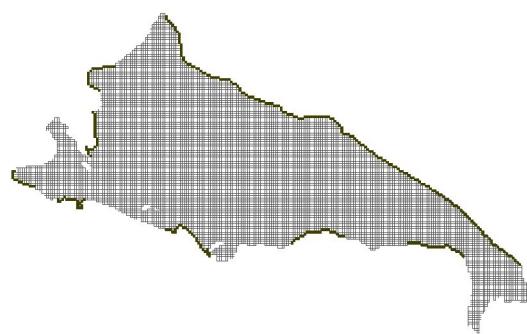
سنگ کف با توجه به این که اطلاعات ژئوفیزیکی از این منطقه در دسترس نبود، از عمق لوگ‌هایی که با سنگ برخورد کرده بودند و از عمق عمیق‌ترین چاههای موجود در آبخوان سطحی استفاده شده است. جهت اعمال شرایط مرزی رودخانه در مدل، نخست موقعیت و مختصات دقیق رودخانه در سیستم اطلاعات جغرافیایی بررسی و سپس براساس اندازه‌گیری‌های انجام شده در دو ایستگاه پل چوم و ورزنه و همچنین نقشه‌های توپوگرافی مشخصات مقطع رودخانه نظیر تراز آب، تراز کف و عرض رودخانه تعیین و در مدل شبیه‌سازی وارد گردید. جهت برآورد پارامتر قابلیت انتقال لایه بستر رودخانه، نتایج شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه، و با به حداقل رساندن خطأ، پارامتر در مدل معکوس وارد گردید. تخمین پارامتر قابلیت انتقال رودخانه به موازات تخمین پارامتر ضربیت هدایت

ناحیه‌بندی و توزیع اولیه پارامترهای هیدرولوژیک (هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه)، تخلیه چاههای بهره‌برداری و تعذیب 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 به کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی مطابق شکل (۲) مشخص گردید.

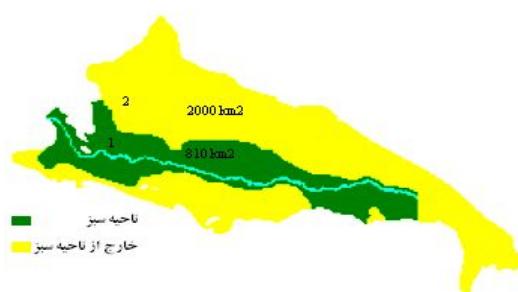
مدل شامل ۲۴۴ ستون و ۱۴۹ ردیف به ابعاد 500×500 متر و دو بخش سلول‌های فعال و غیرفعال می‌باشد. سلول‌های بدون جریان، همان سلول‌های غیرفعالند که مدل بار هیدرولیکی برای این سلول‌ها محاسبه نمی‌نماید. توپوگرافی سطح زمین و توپوگرافی سنگ کف پس از درون‌یابی به روش کریجینگ مکانی به شبکه تخصیص داده شده است. برای تعیین موقعیت



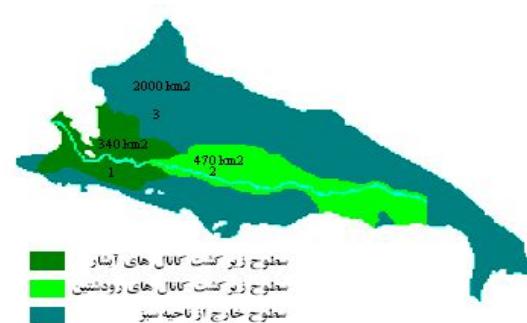
شکل ۴. محدوده ضرایب هیدرودینامیک آبخوان



شکل ۳. موقعیت سلول‌های مرزی با بار عمومی



شکل ۶. نواحی تخلیه در آبخوان



شکل ۵. نواحی تغذیه در آبخوان

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 آبدھی ویژه (ضرب ذخیره) با توجه به ساختار زمین‌شناسی، لوگ چاه‌های مشاهده‌ای و مشخصات فیزیکی ساختارهای مختلف مطابق شکل (۴) صورت گرفت.

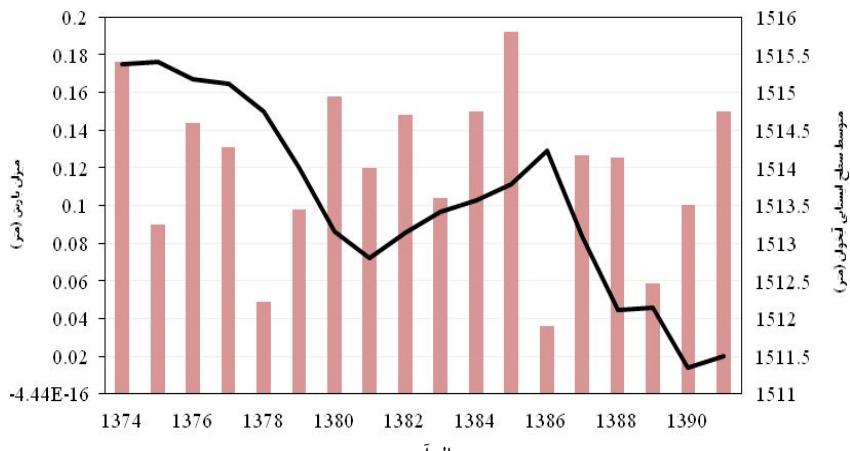
به منظور تخمین تغذیه آبخوان محدوده طرح مطابق شکل (۵) به سه ناحیه تقسیم گردید. تغذیه در ناحیه ۱ مجموع نفوذ (۵) به چاه‌های ناشی از چاه‌های بهره‌برداری و شبکه بارندگی، آب برگشتی ناشی از چاه‌های بهره‌برداری کanal آبشار، در ناحیه ۲ مجموع نفوذ بارندگی، آب برگشتی کanal آبشار، در ناحیه ۳ مجموع نفوذ بارندگی و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

هیدرولیکی صورت پذیرفته و مدل معکوس نهایی بر حسب 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 به ابعاد 500×500 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 به ترتیب طول و عرض ناحیه تماس و ضخامت بستر می‌باشد.

$$CRIV = KLW/M$$

[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



شکل ۷. هیدروگراف آبخوان سطحی زیرحوضه کوهپایه - سگزی همراه با بارش
سالانه طی سالهای ۱۳۹۱ تا ۱۳۷۴

نتایج و بحث

بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی آبخوان

هیدروگراف معرف تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان طی سالهای ۱۳۹۱ تا ۱۳۷۴ به همراه بارش سالانه مطابق شکل (۷)، نشان دهنده افت کلی سطح آب زیرزمینی در این مدت بوده است، اما میزان افت سطح آب در آبخوان مورد نظر به علت وجود دو ناحیه زیر پوشش شبکه آبیاری (ناحیه سبز) که موجب بالامدگی سطح آب زیرزمینی شده زیاد نیست و متوسط سالانه آن ۲۲ سانتی متر می شود که در طی مدت ۱۸ سال افت سطح آب حدود ۴ متر می باشد ولی با حذف ناحیه سبز، میزان افت سطح آب زیرزمینی آبخوان به طور متوسط بیش از ۸۰ سانتی متر در سال حاصل شده است.

نتایج مدل در حالت نامندگار

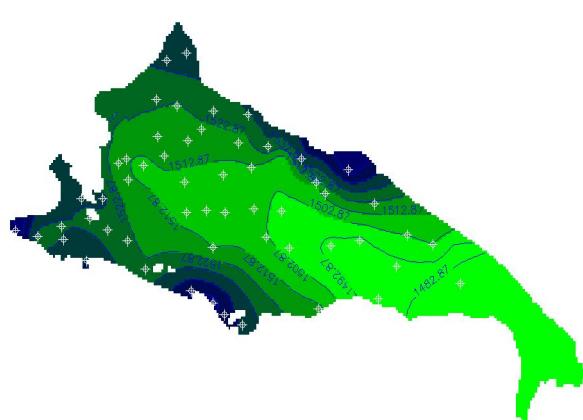
تخمین پارامتر هدایت هیدرولیکی

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

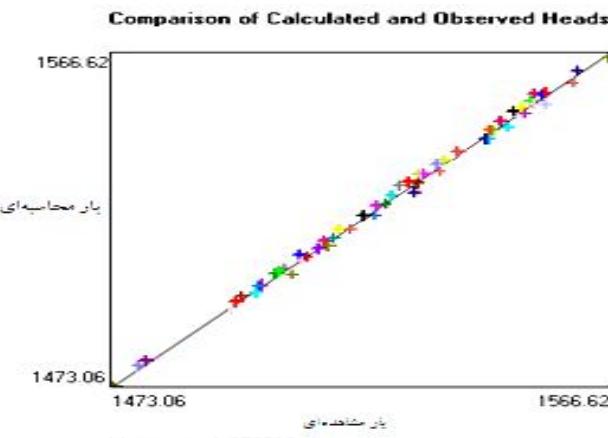
طبق جدول فوق، مقدار هدایت هیدرولیکی آبخوان در نواحی شمالی و جنوبی حدود ۱۵/۲۶ متر بوده و در نواحی

سطح زیرکشت شبکه کanalهای آبشار و رودشتن (ناحیه سبز) که درصد بیشتری از برداشت سالانه آبخوان را جهت آبیاری سطوح زیرکشت به خود اختصاص می دهد و ناحیه ۲، ناحیه خارج از سطوح زیرکشت می باشد. در حالت نامندگار و ناماندگار به تخمین مقدار تغذیه و تخلیه در هر یک از دوره های شبیه سازی پرداخته شده است.

برای حالت نامندگار، سال آبی ۸۱-۸۲ و حالت نامندگار سالهای آبی ۸۱-۸۴ به ترتیب از ترازهای درون یابی شده چاههای مشاهده ای در بهمن سال ۸۱ و اسفند سال ۸۱ به عنوان شرایط اولیه استفاده و به مدل معرفی گردیده است. زمان واسنجی در این تحقیق در حالت نامندگار یک سال آبی ۸۱-۸۲ و در حالت نامندگار سه سال، سالهای آبی ۸۱-۸۲ تا ۸۳-۸۴ (۱۰۸۰ روز) در نظر گرفته شده است. در مدل شبیه ساز 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 می باشد. در حالت نامندگار میانگین ۱۲ ماهه ترازهای هر یک از چاههای مشاهده ای در سال آبی ۸۱-۸۲ به عنوان داده های مشاهده ای نامندگار در حالت نامندگار آمار ماهانه هر یک از چاههای مشاهده ای در سالهای آبی ۸۱ تا ۸۳ به عنوان داده های مشاهده ای نامندگار در مدل در نظر گرفته شده اند.



شکل ۹. نتایج شبیه‌سازی مدل ماندگار به صورت خطوط هم تراز هیدرولیکی با فاصله ارتفاعی ۱۰ متر



شکل ۸ نتایج تراز هیدرولیکی شبیه‌سازی شده در مقابل مقادیر چاه‌های مشاهده‌ای در حالت ماندگار

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

| شماره ناحیه | ۱ | ۲ | ۳ |
|-------------------------|--------|-------|--------|
| آبدھی ویژہ (ضریب ذخیره) | ۰/۰۱۰۷ | ۰/۰۱۵ | ۰/۰۱۸۶ |

به خوبی شیوه‌سازی 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 حجمان آب زیرزمینی در آبخوان نیز تطابق دارد.

نتایج مدل در حالت ناماندگار

تخدمین پارامتر آیده‌ی ویژه (ضریب ذخیره)

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

طبق مقادیر جدول فوق، آبدهی ویژه (ضریب ذخیره) از ۱۰٪ تا ۱۸٪ در سطح کل دشت متغیر است. حداقل مقدار آن مربوط به نواحی مجاور رودخانه و حداقل 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.

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 تغییرات اندازه هدایت هیدرولیکی گردیده است.

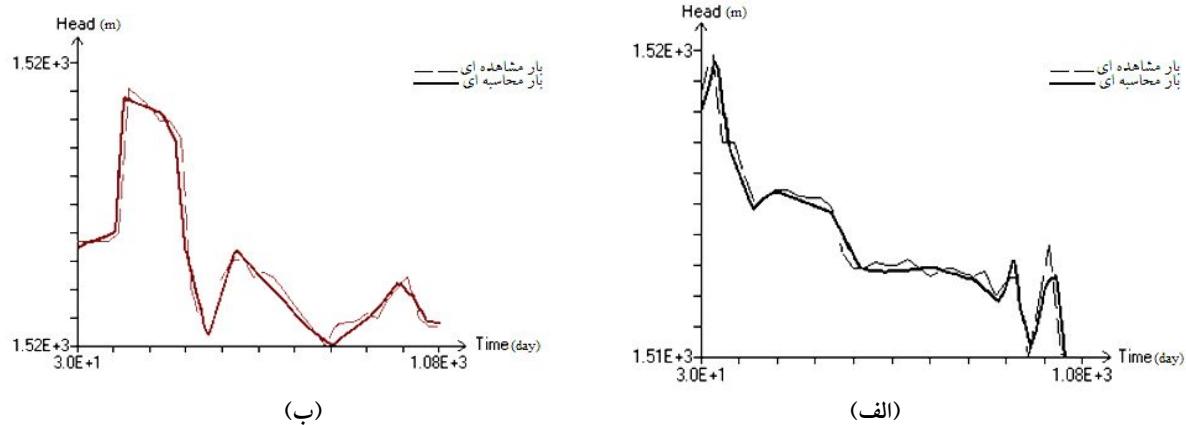
تخدم: با، امت، قابلست انتقال، و دخانه

براساس نتایج حاصل از واسنجی پارامتر قابلیت انتقال رودخانه به طور متوسط برابر $864 \text{ مترمربع در روز محاسبه گردید}$ و ضریب هدایت هیدرولیکی لایه بستر مطابق فرمول (۱)،

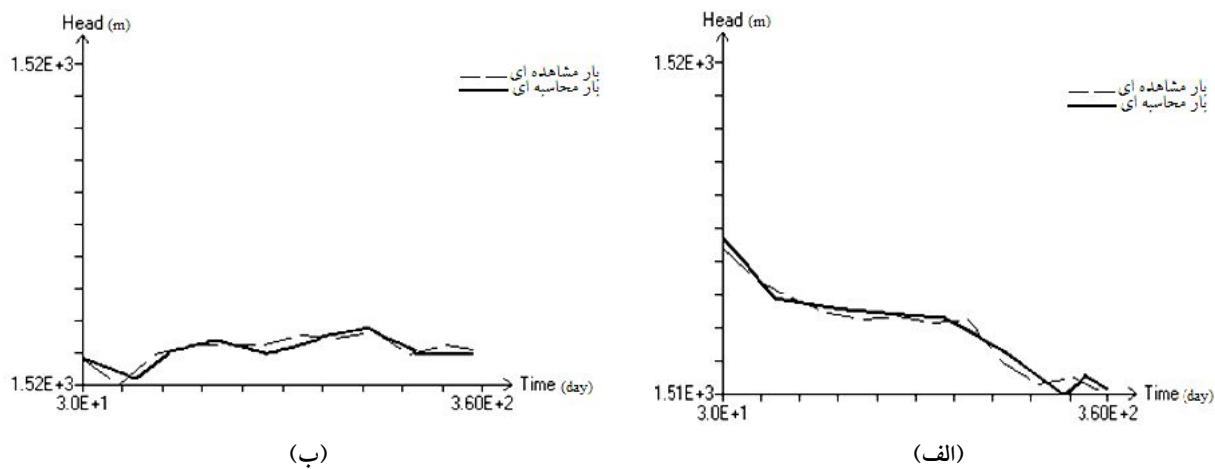
$$0.0432 \text{ متر در روز به دست آمد.}$$

خطوط تراز هیدرولیک، حالت ماندگار

شکل (۸) مقادیر تراز هیدرولیکی شبیه‌سازی شده توسط مدل در حالت ماندگار را در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده در چاههای مشاهده‌ای بر حسب متر نشان می‌دهد. این شکل بیانگر آن است که مدل، عملکرد واقعی و رفتار هیدرولیکی، آبخوان را



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



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

گردید. نتایج برآنش مقادیر بار هیدرولیکی محاسبه شده توسط مدل و مشاهده شده در محل چاههای مشاهده‌ای برای دوره صحبت‌سنجی 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 صحبت‌سنجی نشان می‌دهد.

تحلیل حساسیت مدل

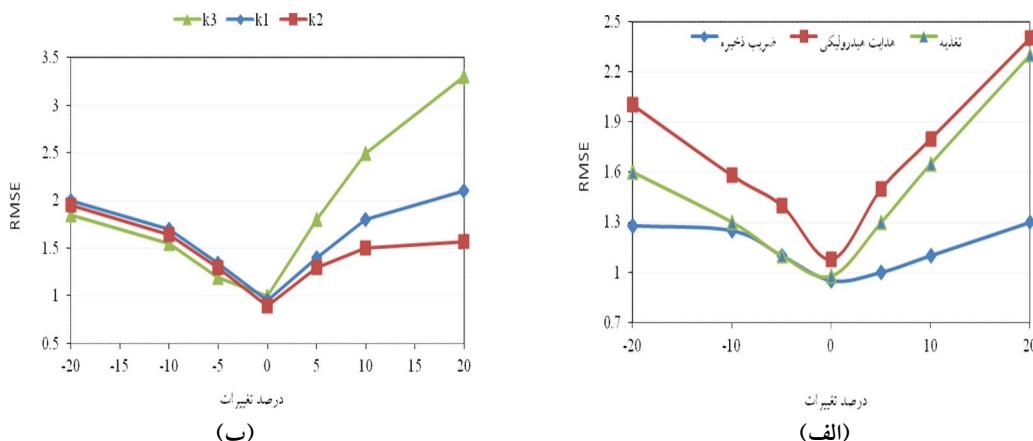
به‌منظور تحلیل صحت نتایج حاصل از واسنجی مدل حالت نامندگار در عملکرد مدل نامندگار و بررسی تغییرات نتایج مدل

خطوط تراز هیدرولیکی حالت نامندگار

در شکل (۱۰) به ترتیب نحوه تغییرات سطح آب زیرزمینی در طول دوره زمانی شبیه‌سازی برای چاه مشاهده‌ای ۱۵ و 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 (۸۴-۸۵) با فرض اینکه روند تغییرات تنش در سیستم مثل سال‌های قبل باشد، به مدل وارد



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

شدت بر نتایج مدل تأثیرگذار است. همچنین با قرارگیری مقدار حداقل تابع خطای 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 ۱۳۸۴-۸۵ 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

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 خطای محاسبه گردید. تغییر پارامترهای ورودی ذکر شده برای میزان افزایش و کاهش ۵٪ 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 (K_{x1} و K_{x2}) و ۱۰ تا 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 K_{x1} و ناحیه مجاور حریم رودخانه K_{x3} به

جدول ۳. بیلان آب زیرزمینی در پایان دوره زمانی دوم هر یک از سال‌های شبیه‌سازی حالت ناماندگار

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

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 دارد که 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 به منظور تعیین دقیق شرایط مرزی آبخوان در نواحی مجاور مرزها و بازنگری و افزایش دقت در جمع آوری داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای و تکیک دقیق چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان سطحی و عمقی.
- ۲- جمع آوری اطلاعات دقیق از عمق سنگ کف آبخوان در کل زیر حوضه مطالعاتی از طریق تلفیق اطلاعات چاهها و مطالعات تکمیلی ژئوفیزیکی برای تهیه مدل شبیه‌سازی با انطباق بیشتر با داده‌های زمین‌شناسی و پارامترهای هیدرولوژیکی آبخوان.

تحقیق با بررسی بیلان آب به دست 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، بالا بودن 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. هیدرولگراف 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

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: ۱۶-۱.

۳. حسن پور، م. ع.، ف. میر حیدری، 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 بجهان.
۴. صفری، ع. ا. و غ. ر. کمالی. ۱۳۹۲. تحلیل و بررسی لایه‌های آبدار دشت ورزنه. پژوهش آب ایران ۱۳: ۱۰-۱۸.
۵. فاتحی مرج، ا.، م. طائی سعیری 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. حیدری زاده و ع. ا. عبده کلاهچی. ۱۳۹۱. بررسی تأثیر آب‌های سطحی بر روی سطح آب زیرزمینی ماهیدشت، مجله زمین ۲۳: ۴۵-۳۷.
۷. مطالعات به هنگام 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. وقارفرو، ح. و ع. پور جنایی. 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.