پیش‌بینی عملکرد بهینه آبخوان دشت برخوار به روش شبیه‌سازی- بهینه‌سازی

کیوان اصغری، جبار سوری نژاد و عبدالرحیم ذوالانوار[۱]

چکیده

در این پژوهش، شبیه‌سازی آبخوان دشت برخوار واقع در شمال شرق اصفهان، برای تخمین ضرایب هیدرودینامیک و تهیهٔ مدل پیش‌بینی و مدیریتی آبخوان به منظور بررسی وضعیت سطح آب سفره در سال‌های آینده مورد بررسی قرار گرفته است. با بررسی وضعیت زمین‌شناسی دشت و لوگ چاه‌های موجود در دشت، مشخص شد که دشت برخوار شامل دو آبخوان تحت فشار و آزاد می‌باشد. با توجه به اطلاعات موجود که مربوط به آبخوان آزاد می‌شد، محدوده‌ای از این آبخوان برای مدل‌سازی ریاضی انتخاب گردید. با تقسیم منطقه به ۴ واحد ژئوهیدروژئولوژیک و استفاده از PEST، از اجزای مدل MODFLOW، واسنجی مدل برای تخمین ضرایب K و S_y صورت گرفت. با استفاده از مدل واسنجی شده، وضعیت تراز آب سفره در سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۸۰ با توجه به گزینه‌های مختلف مدیریتی بررسی شد. بررسی گزینهٔ تأثیر روند بهره‌برداری کنونی بر روی سطح آب آبخوان در سال‌های آتی، بیانگر حداکثر افتی برابر با ۴۸ متر می‌باشد. به منظور ارائهٔ یک راه‌کار عملی برای بهبود وضعیت آبخوان، گزینهٔ کنترل بهره‌برداری آبخوان با اعمال کاهش ۳۰ درصد دبی تخلیهٔ چاه‌های بهره‌برداری بررسی گردید. از مهم‌ترین نتایج اجرایی این راه‌کار می‌توان به کاهش افت ۲۶ درصد اشاره نمود. با توسعه یک مدل بهینه‌سازی و اعمال محدودیت‌های لازم در نقاط بحرانی منطقه و هم‌چنین انتقال آب از دیگر نقاط منطقه روند افت آب در حد قابل قبولی (کمتر از ۱۰ متر تا سال ۱۳۹۰) قابل کنترل به نظر می‌رسد. با به کارگیری مدل بهینه‌سازی روند افت در هر کدام از نقاط ماکزیمم افت منطقه مشخص کنندهٔ تغییر روند افزایشی افت و بهبود وضعیت آبخوان است.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، ضرایب هیدرودینامیک، مدل مدیریتی آبخوان

مقدمه

در کشور ما برداشت اضافی از منابع آب‌های زیرزمینی در بسیاری از دشت‌های کشور مانند دشت برخوار واقع در شمال شرق اصفهان باعث افت سطح آب زیرزمینی گشته و مشکلاتی را برای توسعهٔ اقتصادی این مناطق فراهم نموده است. برای جلوگیری از خسارات بیشتر، مدیریت بهره‌برداری و حفاظت از آب‌های زیرزمینی باید به عنوان یک اصل و پایه در برنامه‌ریزی‌های مملکت قرار گیرد. مدیریت منابع آب‌های

۱. به ترتیب استادیار، دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و استادیار مهندسی منابع آب، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-30]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1384.9.3.2.9]

زیرزمینی نیاز به شناخت عملکرد آبخوان در شرایط طبیعی و پیش‌بینی آثار برداشت و یا تغذیه دارد. در این میان با شبیه‌سازی یک آبخوان می‌توان با تغییرات در محل، مقدار و زمان برداشت و یا گزینه‌های دیگر به بررسی آثار آنها پرداخت. برای شبیه‌سازی یک آبخوان باید پارامترهای ورودی مدل مانند ضرایب هیدرودینامیک آبخوان ارزش و اعتبار لازم را داشته باشند. این ضرایب در طی فرآیند واسنجی مدل برآورد می‌شوند. در این پژوهش ضرایب هیدرودینامیک آبخوان آزاد دشت برخوار به کمک روش معکوس و با استفاده از روش واسنجی اتوماتیک تعیین شدند. در زمینهٔ مدل‌سازی ریاضی آبخوان‌ها، تحقیقات زیادی در سراسر دنیا انجام شده است. در هر یک از این پژوهش‌ها با توجه به شرایط خاص منطقه، معیارهای متفاوتی برای پذیرش نتایج در نظر گرفته شده است.

در بین این پژوهش‌ها می‌توان به کارهای بردلی (٤) جیائو و لرنر (٥) رامیرددیگاری و همکاران (٦) و ریو و همکاران (٧) اشاره نمود. بردلی (٤) با استفاده از یک مدل شبیه‌سازی و داده‌های مربوط به نوسانات سطح ایستابی، تعدیل دو پارامتر آبدهی ویژه و هدایت هیدرولیکی، تأثیر سطح آب در آبخوان را نسبت به تغذیه ناشی از بارندگی و نفوذ بررسی کرده و نتایج قابل قبولی را به دست آورد. جیائو و لرنر (٥) در مدل شبیه‌سازی خود با تقسیم بندی آبخوان به چند ناحیه مجزا و به کارگیری آنالیز حساسیت در اندازه‌گیری تأثیر پارامترهای فیزیکی بر روی آبخوان، تخمین نسبتاً نزدیکی با مقادیر اندازه‌گیری شده از این پارامترها را ارائه نمودند. برای بررسی واکنش متقابل رودخانه و آبخوان، رامیرددیگاری و همکاران (٦) با تلفیق دو مدل آب سطحی و آب زیرزمینی (Modflow) تأثیر سازه‌های حوضه آبریز و آب آبیاری بر روی تراز آب زیرزمینی و جریان رودخانه را گزارش نمودند. تخمین این تأثیرات به وسیله این دو مدل شبیه‌سازی به خوبی قابل انجام بود. ریو و همکاران (٧) نیز در یک مطالعه منطقه‌ای با استفاده از مدل Modflow تأثیر جریان آب زیرزمینی بر روی بیلان آبی مرتبط با دریاچه اطراف آبخوان را محاسبه کردند.

مواد و روش‌ها

۱. معرفی دشت برخوار

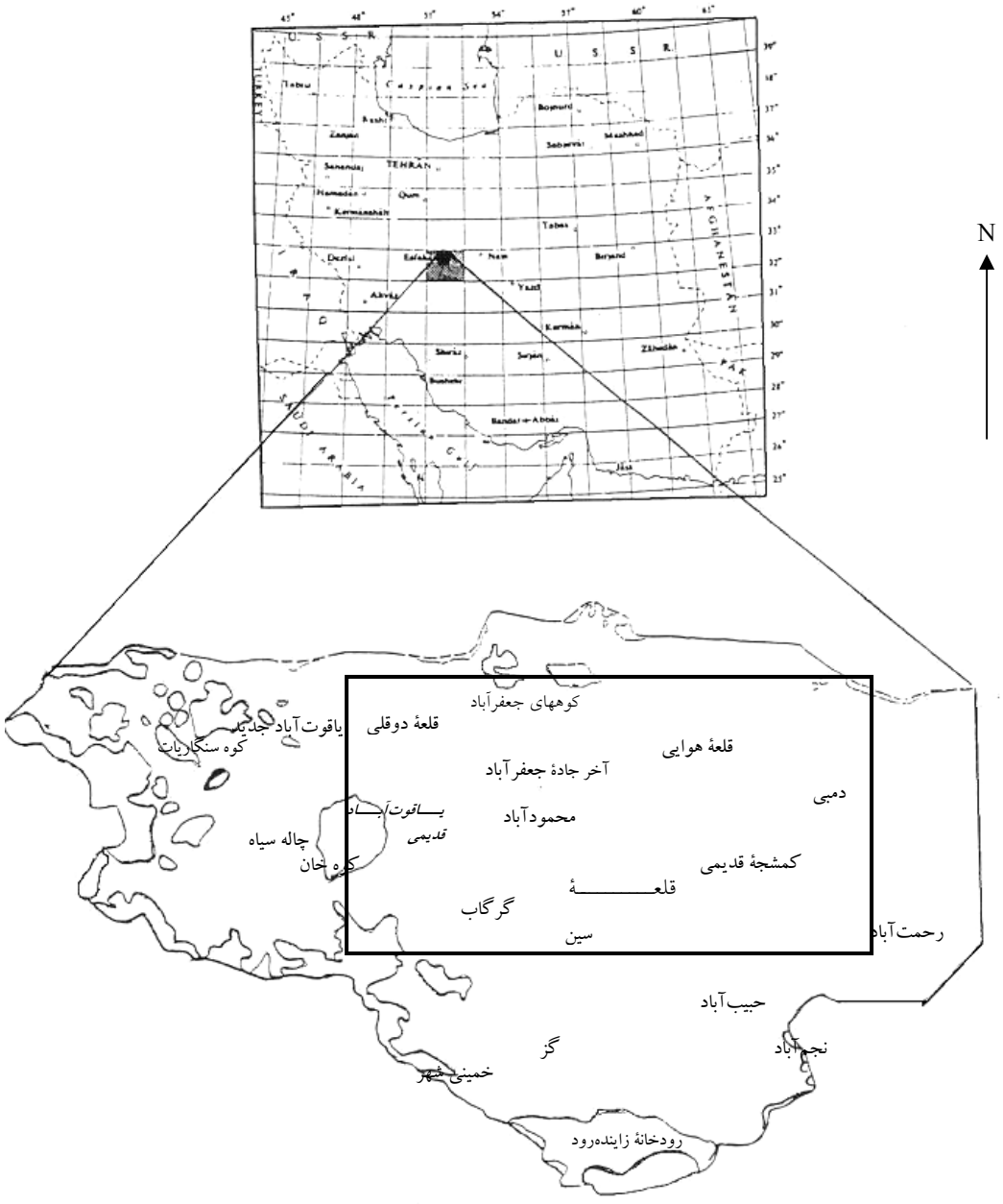
دشت برخوار در شمال شهرستان اصفهان قرار داشته و از شمال به ارتفاعات جعفرآباد و از شرق به زیر حوضهٔ کوهپایه- سگزی و بخش قهاب، از جنوب به شهر اصفهان و از غرب به کوه‌های محمودآباد، کوه خان و سنگاریات محدود می‌باشد. با بررسی وضعیت زمین‌شناسی و لوگ چاه‌های موجود در دشت مشخص شد که دشت برخوار شامل دو آبخوان آزاد و تحت فشار می‌باشد. از آنجا که اکثر داده‌های موجود در دشت برخوار به خصوص داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای و چاه‌های تخلیه مربوط به آبخوان آزاد می‌باشند، بنابراین محدودهٔ انتخابی برای مدل‌سازی ریاضی به صورتی انتخاب شد که فقط شامل آبخوان آزاد باشد. محدودهٔ انتخابی از نظر مختصات U.T.M بین طول‌های ۵۳۵۰۰۰ تا ۵۸۰۰۰۰ و عرض‌های ۳۶۳۵۰۰۰ تا ۳۶۵۰۰۰۰ قرار دارد. وسعت محدودهٔ مورد مطالعه با توجه به مختصات طول و عرض U.T.M، ۵۵۷ کیلومترمربع می‌باشد. شکل ۱ موقعیت دشت برخوار و محدودهٔ انتخابی جهت مدل‌سازی ریاضی را نشان می‌دهد. در محدودهٔ انتخاب شده تعداد ۱۷ چاه مشاهده‌ای وجود دارد که آمار سطح ایستابی ماهانهٔ این چاه‌ها از طریق سازمان آب منطقه‌ای اصفهان تهیه شده است. تعداد چاه‌های بهره‌برداری موجود در منطقه، ۲۰۸ حلقه می‌باشد که اکثریت چاه‌های بهره‌برداری به منظور مصارف کشاورزی ایجاد شده‌اند.

۲. روش معکوس در واسنجی مدل برای تخمین ضرایب هیدرودینامیک

به طور مشخص مدل‌سازی ریاضی آبخوان، عبارت است از حل عددی معادلات ریاضی حاکم بر جریان آب‌های زیرزمینی که به کمک آنها، سیستم واقعی، شبیه‌سازی می‌شود. برای تهیهٔ یک مدل ریاضی برای آبخوان، باید پارامترهای ورودی مدل به درستی شناخته شده باشند تا ساختار مدل توصیف صحیحی از سیستم واقعی ارائه نماید. از آنجا که پارامترهای ورودی مدل

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-30]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1384.9.3.2.9]



شکل ۱. موقعیت دشت برخوار و محدودهٔ انتخابی برای تهیهٔ مدل ریاضی

مانند ضرایب هیدرودینامیک آبخوان یا پارامترهای تغذیه، تخلیه و ... در اندازه‌گیری‌های صحرایی دقت قابل قبولی ندارند، بنابراین بدون برآورد دقیق پارامترهای مدل، نمی‌توان اقدام به شبیه‌سازی و یا بهینه‌سازی کرد. یک مدل و سیستم طبیعی بر پایهٔ معیار واسنجی با یکدیگر مقایسه می‌شوند. شاخص معیار واسنجی بدین صورت است که پارامترهای مدل طوری تعیین شوند که مقادیر هد هیدرولیکی محاسبه شده با مشاهده شده انطباق قابل قبولی پیدا کنند. برای توضیح بیشتر مطلب معادلهٔ ۲ را به عنوان معادلهٔ جریان آب زیرزمینی در نظر می‌گیریم.

$$T_{xx}\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}+T_{yy}\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}=S\frac{\partial h}{\partial t}+R(x,y) \qquad [1]$$

در این معادله، h سطح آب در آبخوان، T تانسور ضریب

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-30]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1384.9.3.2.9]

قابلیت انتقال آبخوان، S ضریب ذخیره، R مقدار تغذیه و یا تخلیه از آبخوان، x و y مختصات جغرافیایی و t متغیر زمان می‌باشند. در مرحلهٔ اجرای مدل با ورود ضرایب هیدرودینامیک آبخوان (TوS برای آبخوان تحت فشار) یا (K و S_y برای آبخوان آزاد) و پارامتر تغذیه و تخلیه (R) و تعریف شرایط مرزی و اولیه، مقدار سطح آب آبخوان (h)، سلول به سلول و برای زمان‌های مختلف محاسبه می‌شود.

به طور کلی مراحل فوق را در مدل‌سازی، حل مستقیم می‌نامند. حل مستقیم را برای تعیین مقادیر هد سفره به طور خلاصه می‌توان به صورت تابع M تعریف کرد.

$$h = M(r, q, f, \vec{x}, t) \qquad [۲]$$

در معادلهٔ ۲، r پارامترهای هیدرودینامیک آبخوان، q پارامترهای تغذیه و تخلیه، f شرایط اولیه و شرائط مرزی، $\vec{x}$ مختصات جغرافیایی می‌باشند. مقدار سطح آب آبخوان در واقع متغیر مجهول در معادلات ۲ و ۳ است. در قریب به اتفاق حالات مدل‌سازی، نتیجهٔ اجرای مدل یعنی مقدار سطح آب محاسبه شده با مقدار سطح آب مشاهده شده در نقاط کنترل که همان چاه‌های مشاهده‌ای باشند، به دلیل عدم دقت کافی در ضرایب هیدرودینامیک آبخوان و یا ورودی‌های دیگر با هم مطابقت ندارند. بنابراین به منظور استفاده از مدل در جهت مدیریت بهره‌برداری از آبخوان، باید آن را با منطقهٔ مورد نظر تطبیق داد. بدین معنی که مقادیر ضرایبی را که عدم قطعیت در آنها وجود دارد، در یک محدودهٔ قابل قبول و مشخص به اندازه‌ای تغییر دهیم تا مقادیر هد آب محاسبه و مشاهده شده تقریباً و در حد قابل قبولی بر هم منطبق شوند. برای واسنجی مدل ریاضی تهیه شده از دشت برخوار، از روش معکوس حل معادلات دیفرانسیل جزئی استفاده می‌شود. به این ترتیب که با توجه به این که، آمار و اطلاعات سطح چاه‌های مشاهده‌ای به مراتب بیشتر از تعداد چاه‌های اکتشافی (آزمایش پمپاژ ــ ضرائب هیدرودینامیک آبخوان) می‌باشد، بنابراین در حل معکوس معادلهٔ ۳، مقادیر سطح آب و بعضی از پارامترهای مربوط به دشت برخوار به عنوان ورودی داده می‌شوند و مقدار ضرایب هیدرودینامیک آبخوان به عنوان خروجی مدل به دست می‌آیند. سپس نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با نتایج حاصل از مشاهدات مقایسه می‌شود، تا جایی که کمترین اختلاف را با هم داشته باشند. در تهیهٔ مدل ریاضی دشت برخوار از نرم‌افزار MODFLOW استفاده شد. واسنجی مدل نیز با استفاده از کد PEST (از اجزای MODFLOW) به روش معکوس برای محدودهٔ انتخابی صورت گرفت.

محدودهٔ انتخاب شده از سفرهٔ آب زیرزمینی دشت برخوار پس از شبکه‌بندی شامل ۴۰ ستون و ۱۵ ریف، به ۶۰۰ سلول به ابعاد ۱۰۰۰ متر در ۱۰۰۰ متر تقسیم گردید. از آنجا که مدل MODFLOW، کلیهٔ سلول‌های فعال را با کد یک و سلول‌های غیر فعال را با کد صفر در نظر می‌گیرد، در محدودهٔ انتخابی تعداد ۴۳ سلول غیرفعال با کد صفر و بقیه سلول‌ها، فعال با کد یک تشخیص داده شده‌اند. شکل ۲ شبکهٔ منطقه را با سلول‌های فعال و غیر فعال نشان می‌دهد. در این شکل منطقه انتخابی براساس مطالعات موجود در منطقه(۱) و نوع بافت زمین شناسی آن به چهار ناحیه تقسیم شده است. تمامی سلول‌های غیرفعال در روی مرزها وجود دارند و مربوط به ارتفاعات و دامنهٔ ارتفاعات (مخروط افکنه‌ها) می‌باشند. با استفاده از رقوم توپوگرافی و سنگ کف چاه‌های مشاهده‌ای موجود در منطقه، نقشهٔ توپوگرافی و نقشهٔ تراز سنگ کف محدودهٔ انتخابی تهیه و برای مدل تعریف شد. برای تعیین شرایط مرزی در روی مرزهای منطقه، با بررسی داده‌های سطح ایستابی چاه‌های پیزومتریک در دو طرف مرزهای شمالی، جنوبی، شرقی و غربی مشخص شد که در این چهار مرز یک جریان انتقالی از بیرون مرزها به سمت داخل منطقه وجود دارد. برای نمونه تراز هد آب‌های زیرزمینی چاه‌های پیزومتریک دو طرف مرزهای شرقی برای سال‌های آبی ۷۶-۷۵ و ۸۰-۷۹ رسم شده است که در شکل ۳ آمده است. برای اعمال این نوع شرایط مرزی از بستهٔ نرم‌افزاری شرایط مرزی با کمیت معلوم در مدل MODFLOW استفاده شد. این بستهٔ نرم‌افزاری برای تعیین مقدار جریان انتقالی از رابطهٔ زیر استفاده می‌کند.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-30]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1384.9.3.2.9]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1384.9.3.2.9] [Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-30]

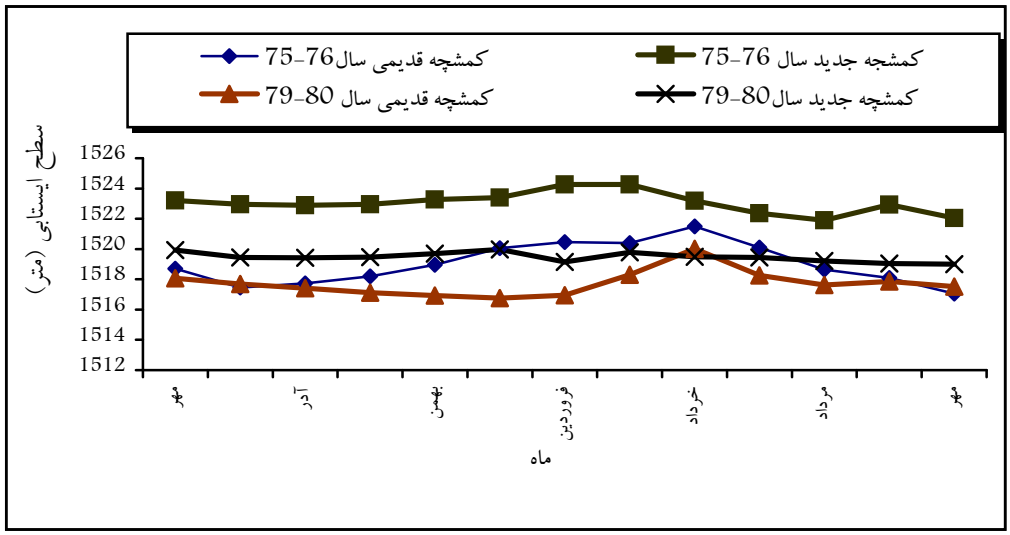
سلول فعال

سلول غیرفعال (٤٦ سلول)

سلول تخلیه (١٣٤ سلول)

سلول GHB

شکل۲. منطقهٔ مورد مطالعه برای واسنجی مدل ریاضی همراه با ناحیه‌بندی منطقه



شکل۳. نمودار سطح ایستابی ماهانهٔ چاه‌های مشاهده‌ای کمشچه جدید (خارج مرز شرقی) و کمشچه قدیمی (داخل مرز شرقی)

$$Q_b = C_b \times (h_b - h) \qquad [۳]$$

در رابطهٔ ۱ h_b هد هیدرولیکی در روی منبع تأمین کنندهٔ جریان و C_b میزان هدایت هیدرولیکی بین منبع تأمین کنندهٔ جریان و مرز شبکهٔ اصلی است که به مقدار K ضریب هدایت هیدرولیکی روی مرز، A مساحت عمود بر جریان انتقالی و L فاصلهٔ بین منبع تأمین کنندهٔ جریان و مرز شبکهٔ اصلی وابسته است. مقادیر پارامترهای K و L مشخص است و فقط برای تعیین پارامتر A، باید یک سری عملیات محاسباتی انجام شود. با توجه به معلوم بودن یکی از اضلاع مساحت A که همان طول هر سلول (۱۰۰۰ متر) می‌باشد، لازم است فقط ضلع عمود بر جریان تعیین شود. برای به دست آوردن این ضلع، مقدار هد هر سلول مرزی را که از توزیع هد در شبکه به دست آورده‌ایم، از مقدار سنگ کف متناظر با آن سلول کم می‌کنیم. با حاصل ضرب این ضلع در طول هر سلول مرزی، مقدار مساحت A به دست می‌آید. به این ترتیب مقدار پارامتر C_b برای دوره‌های تحریک مدل، محاسبه و تعریف شدند. با در نظرگرفتن یک شبکهٔ فرضی با ۴۸ ستون و ۲۶ ردیف شامل کلیهٔ چاه‌های پیزومتریک داخل و خارج مرزهای منطقه مقادیر هد در روی مرزهای شبکه فرضی به عنوان مقادیر h_b برای مدل تعریف شدند. برای واسنجی مدل، دو حالت ماندگار و ناماندگار در نظر گرفته شد. در حالت ماندگار سال آبی ۷۷-۷۶ به عنوان دورهٔ تحریک مدل و در حالت ناماندگار نیز سال‌های آبی ۷۷-۷۶ تا ۸۰-۷۹ به ترتیب به عنوان دوره‌های تحریک ۱ تا ۴ برای مدل انتخاب شدند. در حالت ناماندگار، هر سال آبی به دوازده گام زمانی بر اساس ماه‌های سال تقسیم شد. ۱۷ درصد نفوذ حاصل از بارش و ۲۷ درصد آب برگشتی کشاورزی چاه‌های بهره‌برداری منطقه (۱) به عنوان مقادیر تغذیه در هر دورهٔ تحریک، محاسبه و برای مدل معرفی شدند.

برای تعیین مقادیر تخلیه با در نظر گرفتن ۷ چاه بهره‌برداری به عنوان چاه‌های معرف، بقیهٔ چاه‌های بهره‌برداری موجود در منطقه (۲۰۱ چاه) به عنوان چاه‌های هم رژیم با چاه‌های معرف تعیین شدند. سپس با احتساب ضرایب سالانه برای چاه‌های هم رژیم، مقادیر تخلیه برای کلیهٔ دوره‌های تحریک محاسبه و به مدل معرفی گردیدند. شرایط اولیهٔ مدل برای دو حالت ماندگار و ناماندگار توزیع هد هیدرولیکی در شهریورماه ۷۷-۷۶ تعریف شد. در حالت ماندگار ضریب هدایت هیدرولیکی برای کل منطقه $۱/۴۵\times۱۰^{-۲}\ cm/s$ تخمین زده شد. سپس این مقدار برای تعیین شرایط مرزی حالت ناماندگار (پارامتر C_b) و

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-30]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1384.9.3.2.9]

هم‌چنین مقدار اولیهٔ ضریب K در حالت ناماندگار در نظر گرفته شد. با توجه به این که رژیم جریان حاکم بر آبخوان در اکثر مواقع حالت ناماندگار دارد، بنابراین تخمین واقعی ضرایب هیدرودینامیک (K و S_y) در حالت ناماندگار صورت می‌گیرد. در این حالت ابتدا ضریب هدایت هیدرولیکی برای کل منطقه $1.6\times10^{-3}\,cm/s$ به دست آمد. سپس با استفاده از این مقدار و تقسیم منطقه به ۴ واحد ژئوهیدرولوژیک شامل شرق و شمال شرق، شمال غرب، جنوب غرب و مرکز منطقه دو پارامتر K و S_y برای هر ناحیه برآورد گردید که نتایج آن در جدول ۱ آمده است. برای پذیرش نتایج به دست آمده از واسنجی مدل، از شاخص‌های آماری ضریب هم‌بستگی و واریانس خطاها استفاده شده است که مقادیر این شاخص‌ها در شکل ٤ آمده است (۲).

۳. کاربرد و نتایج مدل شبیه‌سازی در پیش‌بینی وضعیت آبخوان و عملکرد بهینه آن

با استفاده از مدل شبیه‌سازی، می‌توان گزینه‌های مدیریتی مختلف را در مورد سفرهٔ آب زیرزمینی تحلیل نموده و نتایج را بررسی نمود. این گزینه‌ها می‌توانند شامل شرایط مختلفی باشند که در حال حاضر در منطقه وجود داشته و یا احتمال دارد که در آینده برای آبخوان به وجود بیاید. به منظور ارزیابی عکس‌العمل آبخوان در برابر اعمال این گزینه‌ها، علاوه بر بررسی توزیع افت از یکسری نقاط کنترل نیز استفاده شد.

الف) بررسی روند بهره‌برداری کنونی و اثر آن بر روی سطح آب آبخوان در آینده

برای پیش‌بینی وضعیت آبخوان در آینده، سال‌های آبی ۸۱-۸۰ تا ۹۰-۸۹ به عنوان دوره‌های تحریک ۵ تا ۱۴ انتخاب شدند. هر یک از دوره‌ها به دوازده گام زمانی بر اساس ماه‌های سال تقسیم شد. در مدل پیش‌بینی، روند تغذیه، بهره‌برداری و شرایط مرزی برای دوره‌های تحریک ۵ تا ۱۴ همانند شرایط تغذیه، بهره‌برداری و شرایط مرزی دورهٔ تحریک ۴ (سال آبی ۸۰-۷۹) در نظرگرفته شد. شکل ۵ توزیع افت هد گام زمانی ۱۲ از دورهٔ تحریک ۱۰ (شهریورماه سال آبی ۸۶-۸۵) را نشان می‌دهد. تراکم زیاد خطوط تراز در ناحیهٔ مرکزی نشان می‌دهد که بیشترین افت در منطقه در این ناحیه اتفاق خواهد افتاد که به دلیل تراکم زیاد چاه‌های بهره‌برداری در این ناحیه است. هم‌چنین برای نشان دادن نقاطی که دارای افت زیاد هستند، در هر یک از واحدهای ژئوهیدرولوژیک که به منظور واسنجی انتخاب شده بودند، سلول‌هایی که بیشترین افت را در هر یک از ناحیه‌ها، دارا بودند (سلول‌های تخلیه) به عنوان نقاط کنترل در نظر گرفتیم. جدول ۲ مختصات سلول‌هایی که در هر یک از نواحی دارای بیشترین افت بوده‌اند، به همراه مقایر افت آنها در شهریور ماه ۸۱-۸۰ (نسبت به شهریورماه ۸۰-۷۹) را نشان می‌دهد. در شکل ۶ نمودار روند افت در گام زمانی ۱۲ از هر یک از دوره‌های تحریک ۵ تا ۱۴ که شامل شهریورماه ۸۱-۸۰ تا ۹۰-۸۹ می‌شود را برای این سلول‌ها نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶ مشخص می‌شود که بیشترین افت در بین این سلول‌ها مربوط به ناحیه ۴ و سلول (۸ و ۲۶) می‌شود. بعد از ناحیهٔ ۴ (ناحیهٔ مرکزی) نواحی دیگری که دارای بیشترین افت می‌باشند، به ترتیب شامل ناحیه‌های ۱، ۲ و ۳ می‌شوند. هر کدام از این نواحی بر اساس تعداد چاه‌های بهره‌برداری که در مناطق تحت پوشش آنها وجود دارد و هم‌چنین نزدیک بودن به ناحیهٔ مرکزی که بیشترین تمرکز چاه‌های بهره‌برداری را دارا می‌باشد، به ترتیب دارای بیشترین افت بوده‌اند. دلیل اصلی افت در ناحیهٔ مرکزی بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی این ناحیه، توسط چاه‌های کشاورزی می‌باشد.

ب) کنترل بهره‌برداری از آبخوان با کاهش دبی تخلیهٔ چاه‌های بهره‌برداری

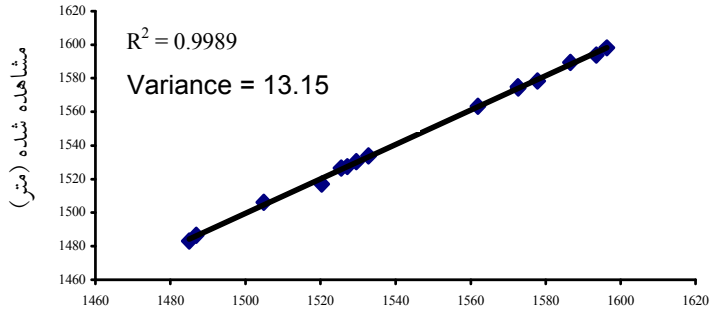
در این راه‌کار مقدار ۳۰ درصد دبی فعلی تخلیهٔ چاه‌های بهره‌برداری از ۱۲۴ سلول تخلیهٔ منطقه کسر و آن را به عنوان دبی بهره‌برداری سلول‌های تخلیه برای دوره‌های تحریک ۶ تا ۱۴ اعمال نمودیم. شکل ۷ توزیع افت هد نتیجه شده از اعمال

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-30]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1384.9.3.2.9]

جدول ۱. نتایج حاصل از تخمین ضرایب K و S_y

ردیف	ناحیه	موقعیت جغرافیایی	ضریب هدایت هیدرولیکی (K) (cm/s)	آبدهی ویژه (S_y) (٪)
۱	۱	شرق و شمال شرق	$۱/۱۶\times۱۰^{-۶}$	۵۰
۲	۲	شمال غرب	$۴/۱۲\times۱۰^{-۳}$	۳۹/۹۵
۳	۳	جنوب غرب	$۱/۷۶۱\times۱۰^{-۳}$	۴۵/۲۹
۴	۴	مرکز منطقه	$۱/۱۱۶\times۱۰^{-۶}$	۵۰



شکل ٤. مقادیر مشاهده شده نسبت به محاسبه شده برای گام زمانی ۱۲ از دورهٔ تحریک ۴ در محل چاه‌های مشاهده‌ای

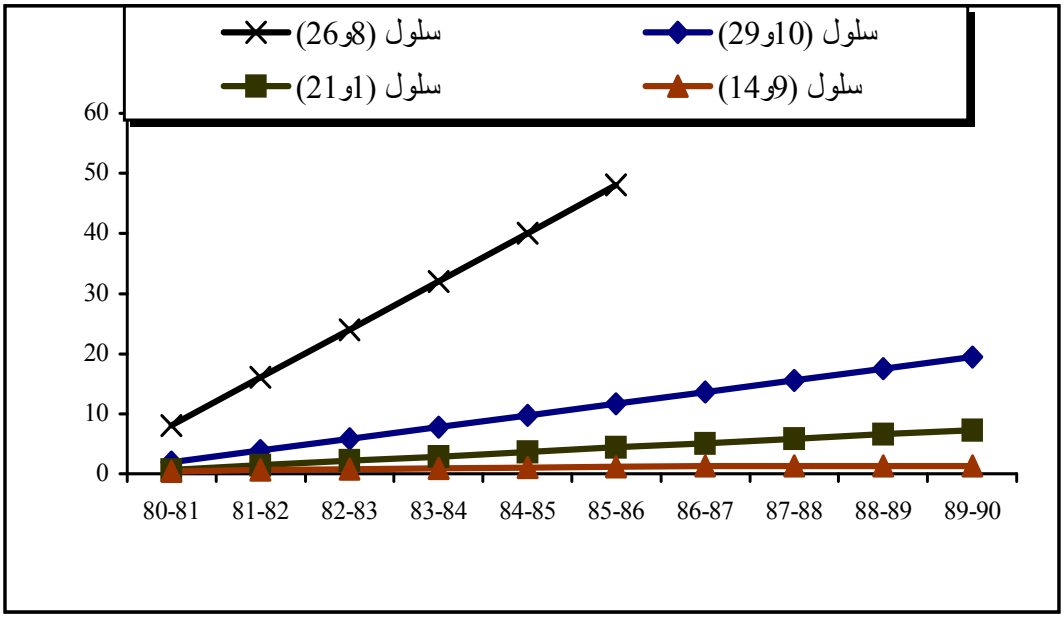
شکل ۵. توزیع افت هد در شهریورماه ۸۶–۸۵ نسبت به توزیع هد شهریورماه ۸۰–۷۹ در صورت روند بهره‌برداری کنونی

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-30]

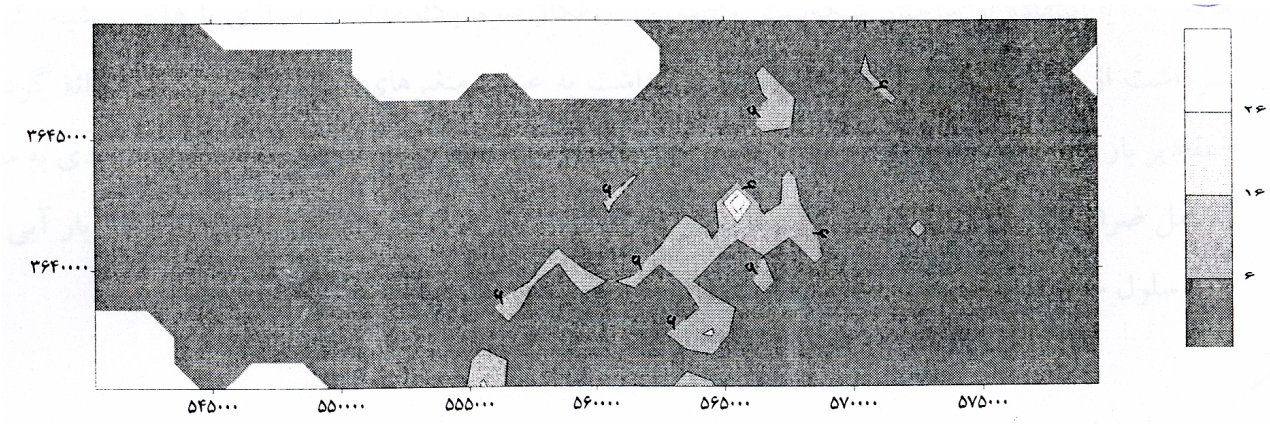
[DOR: 20.1001.1.22518517.1384.9.3.2.9]

جدول۲. سلول‌های ماکزیمم افت در هر ناحیه به همراه مقدار افت آنها در دورهٔ تحریک۵ نسبت به دورهٔ تحریک ۴

ردیف	ناحیه	مختصات U.T.M		مختصات شبکه‌ای		
		Y	X	I	J	افت (متر)
۱	۱	۳۶۴۵۰۰	۵۶۸۵۰۰	۱۰	۲۹	۱/۹۶
۲	۲	۳۶۴۹۵۰۰	۵۶۰۵۰۰	۱	۲۱	۰/۷
۳	۳	۳۶۴۱۵۰۰	۵۵۳۵۰۰	۹	۱۴	۰/۳۳
۴	۴	۳۶۴۲۵۰۰	۵۶۵۵۰۰	۸	۲۶	۸/۰۱



شکل٦. نمودار روند افت در شهریورماه سال‌های آبی ۸۱-۸۰ تا ۹۰-۸۹



شکل۷. توزیع افت هد در شهریورماه ۸۶-۸۵ نسبت به توزیع هد شهریورماه ۸۰-۷۹ در حالت کاهش دبی تخلیهٔ چاه‌ها

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-30]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1384.9.3.2.9]

این گزینه را، در گام زمانی ۱۲ از دورهٔ تحریک ۱۰ نشان می‌دهد. تراکم کمتر خطوط تراز در ناحیهٔ مرکزی تأثیر کاهش دبی بر سطح آب آبخوان را مشخص می‌کند. هم‌چنین به منظور بررسی دقیق‌تر، سلول‌های ماکزیمم افت هر ناحیه که در بخش (الف) برای بررسی تأثیر روند بهره‌برداری کنونی انتخاب شده بودند را به عنوان نقاط کنترل در نظر گرفتیم. شکل ۸ روند افت در سلول‌های (۱۰و۲۹) و (۱و۲۱) را در دو حالت با کاهش دبی و بدون کاهش دبی تخلیهٔ چاه‌های بهره‌برداری نشان می‌دهند. تأثیر ۳۰ درصد کاهش دبی در این شکل به خوبی مشخص است. روند سریع افت آب در سلول (۸ و ۲۶) که باعث خشکی چاه در سال ۸۶–۸۵ گردید، پس از اعمال این راه‌کار باعث کاهش افت در این سلول گشته و خشکی آن را تا سال آبی ۸۸–۸۷ به تعویق می‌اندازد.

۴. کاربرد مدل بهینه‌سازی در پیش‌بینی وضعیت آبخوان

با استفاده از ساختار شبکه‌بندی منطقه، در راه‌کار سوم یک مدل بهینه‌سازی با هدف بیشینه کردن برداشت از منابع آب زیرزمینی، شامل مقادیر پمپاژ به عنوان متغیرهای تصمیم در این مدل ارائه گردید. مقادیر هد سفره در مرکز هر سلول جزو متغیرهای حالت محسوب می‌گردند. پارامترهای ورودی به مدل شامل ضرایب هیدرودینامیکی، ورودی‌های به آبخوان، نیاز آبی هر سلول، حداقل و حداکثر مجاز هد در هر سلول خواهند بود. مدل فوق از دو قسمت تابع هدف و معادلات قیود تشکیل شده است.

(الف) تابع هدف

$$\text{Max. } Z = \sum_{i=1}^{n} (G_i) \qquad [٤]$$

به طوری که G_i مقدار برداشت آب زیرزمینی از سلول i و n تعداد سلول‌ها می‌باشند.

(ب) قیود

۱– از آنجا که رفتار آب‌های زیرزمینی و هرگونه اعمال تنش بر سفره چه به صورت طبیعی و چه به صورت مصنوعی در قالب معادلات حاکم بر جریان آب‌های زیرزمینی قابل بررسی می‌باشد، بنابراین کلیه عوامل و مؤلفه های هر سلول بایستی از معادله حاکم پیروی نماید. از این رو به تعداد سلول‌های موجود در شبکه قیودی اعمال خواهند شد که همان معادلات حاکم در هر سلول می‌باشند. در حقیقت با این عمل مدل قادر به شبیه‌سازی رفتار سفره آب زیرزمینی نسبت به محرکه‌های آن می‌باشد. معادله ۲ را که توصیف کننده رفتار هیدرولیکی سفره می‌باشد با اختصار به صورت فرم کلی زیر نمایش می‌دهیم(۳):

$$F\left(G_i, h_i^k, K, S_y, \Delta x, \Delta t\right) = 0 \qquad [٥]$$

h_i^k مقدار هد در سلول i در زمان k و $\Delta x, \Delta t$ به ترتیب اندازه گام زمانی و ابعاد شبکه می‌باشند.

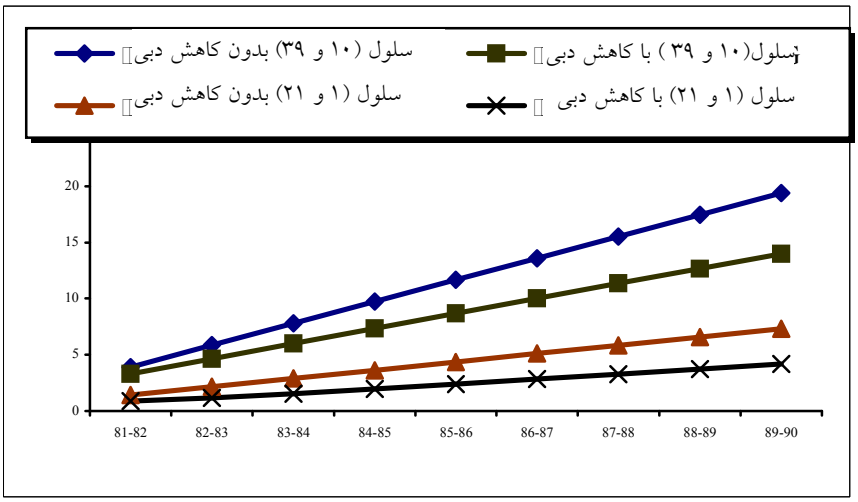
۲– حداکثر و حداقل هد مجاز: $h_i^{max} \geq h_i^k \geq h_i^{min}$

۳– حداکثر تأمین نیاز آبی: $G_i \geq W_i$

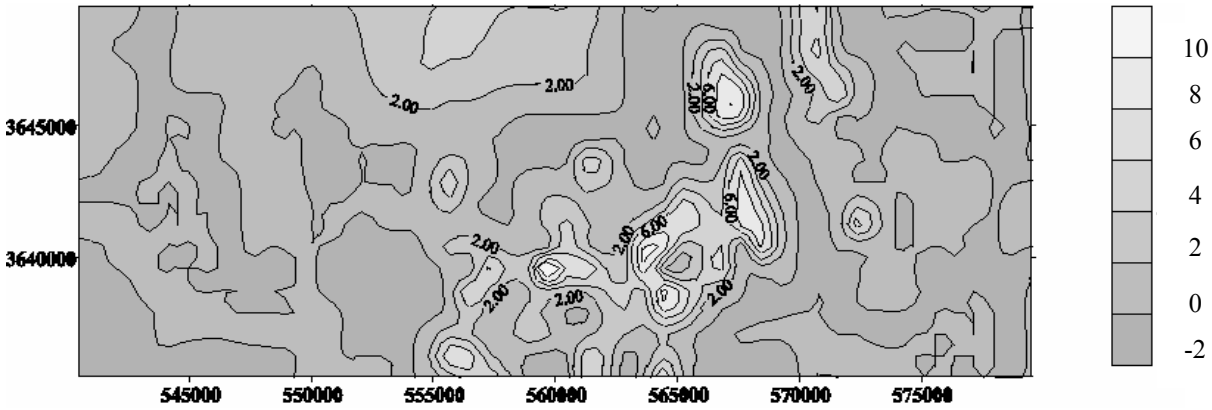
در معادله قید دوم حداقل مجاز هد سفره برابر با ۱۰ متر کمتر از هد کنونی و حداکثر آن ارتفاع سطح زمین در طول دوره بهینه‌سازی انتخاب گردیده شد. حداکثر مجاز برداشت آب در قید سوم ۳۰ درصد اضافه بر نیاز آبی هر سلول اعمال شد که با اضافه برداشت از دیگر سلول‌ها و انتقال آب به سلول‌های بحرانی، بتوان کمبود تأمین آب در سلول‌های بحرانی را جبران نمود. مدل بهینه‌سازی در حالت دینامیک برای ۹ سال (دوره‌های تحریک ۶ تا ۱۴) به صورت جداگانه اجرا گردید. در شکل ۹، توزیع افت هد در دوره تحریک ۱۰ نسبت به شرایط اولیه مدل (دوره تحریک ۵)، نشان‌دهنده بهبود وضعیت آبخوان در مقایسه نسبت به مدل بهره برداری با روند کنونی است. همان طور که در توضیح قید سوم آورده شد، در سلول‌های بحرانی مدل، مجاز به برداشت آب از سلول‌های کناری خود هستند که همین امر باعث روند کاهش افت هد در این سلول‌ها شده است. در شکل ۱۰ روند افت در سلول‌های ماکزیمم افت منطقه در مدل بهینه‌سازی نسبت به حالت (الف) کاهش چشم‌گیری را نشان می‌دهد.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-30]

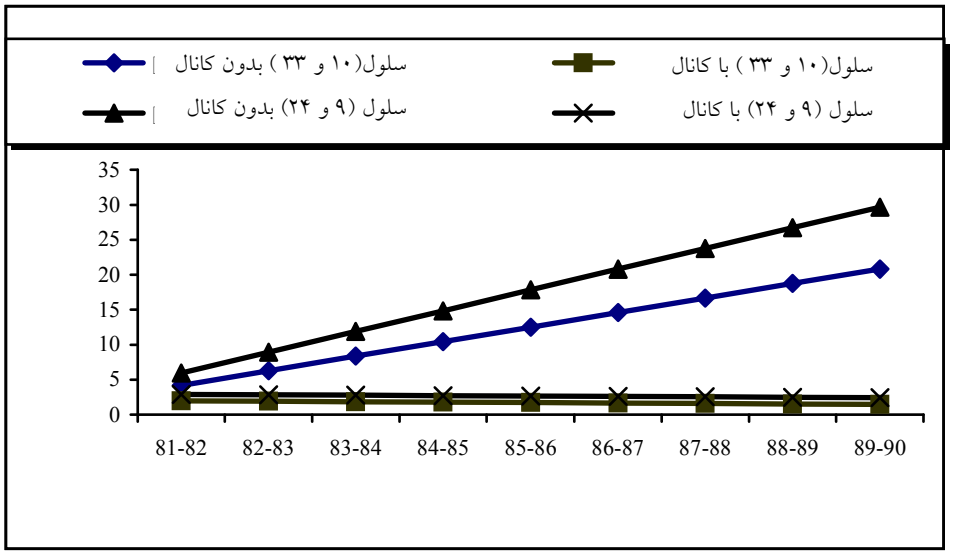
[DOR: 20.1001.1.22518517.1384.9.3.2.9]



شکل ۸. روند افت در سلول‌های (۱۰ و ۲۹) و (۱ و ۲۱) در دو حالت با کاهش دبی و بدون کاهش دبی



شکل۹. بهینه‌سازی توزیع افت هد (متر)در شهریورماه ۸۶-۸۵ نسبت به توزیع هد شهریورماه ۸۰-۷۹



شکل ۱۰. مقایسه روند افت در سلول‌های (۱۰ و ۲۳) و (۹ و ۲۴) در شرائط بهینه و برداشت روند کنون

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-30]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1384.9.3.2.9]

نتایج و بحث

از مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق می‌توان به تخمین مقدار و توزیع ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان اشاره نمود. به طور کلی ضریب K در چهار محدوده متفاوت در منطقه مورد مطالعه قابل توزیع است و محدوده تغییرات کمی آن (1.116×10^{-6} تا 4.12×10^{-3} سانتی‌متر بر ثانیه) مطابقت نزدیکی با مقادیر به دست آمده از لوگ چاه‌های مشاهده‌ای (10^{-6} تا 10^{-3} سانتی‌متر بر ثانیه) دارد. بالا بودن ضریب هم‌بستگی ۹۹ درصد بین مقادیر سطح آب مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و هم‌چنین پایین بودن شاخص آماری واریانس خطاها (Variance = ۱۳/۱۵) نشان داد که نتایج به دست آمده از واسنجی مدل در حالت ناماندگار دقت قابل قبولی دارند. با بررسی روند بهره‌برداری کنونی مشخص شد که در سال‌های آتی بیشترین افت سطح آب آبخوان در منطقهٔ انتخابی، مربوط به ناحیهٔ مرکزی شامل مناطق گرگاب، سین و محمودآباد می‌شود که علت آن برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی این ناحیه است. در گزینهٔ مربوط به مدل بهینه‌سازی و تعیین قابلیت این روش در بهبود وضعیت آبخوان، اگر چه بخشی از نیاز آبی سلول‌های بحرانی از دیگر سلول‌ها تأمین می‌گردد ولی با بررسی روند افت در سلول‌های ماکزیمم افت طی سال‌های آبی ۸۲–۸۱ تا ۹۰–۸۹ مشخص شد که علاوه بر تأمین نیاز آبی هر سلول افت هد نسبت به ادامه روند برداشت کنونی کنترل گردیده و از افزایش آن به اندازه قابل توجهی جلوگیری شده است. به علاوه در این حالت با بررسی روند افت در نقطهٔ کنترل ناحیهٔ مرکزی، مشخص گردید که این منطقه طی سال‌های آبی ۸۲–۸۱ تا ۹۰–۸۹ خشک نخواهد شد. روند افت در این منطقه نسبت به ادامه شرایط کنونی و یا کنترل بهره برداری آبخوان با کم نمودن دبی تخلیهٔ چاه‌های بهره‌برداری، کاهش بیشتری خواهد داشت. با توجه با نتایج به دست آمده می‌توان چنین نتیجه گیری نمود که هر دو روش شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در مطالعه و بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی جایگاه و قابلیت‌های خود را خواهند داشت. امکان استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی در تعیین راه‌کارهای بهره‌برداری پایدار بسیار محدود و همراه با هزینه‌های بیشتر خواهد بود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی اصفهان که اعتبار مالی لازم برای انجام این پروژه را فراهم نموده است تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع مورد استفاده

۱. امیری، ب. ۱۳۷۶. طرح جامع احیا و توسعهٔ کشاورزی و منابع طبیعی حوزه‌های آبخیز زاینده‌رود– اردستان. معاونت برنامه‌ریزی و بودجه، مؤسسهٔ پژوهش‌های برنامه‌ریزی و اقتصاد کشاورزی، وزارت کشاورزی، اصفهان.

۲. سوری نژاد، ج. ۱۳۸۱. شبیه‌سازی آبخوان دشت برخوار جهت تخمین ضرایب هیدرودینامیکی و تحلیل عملکرد بهینه. پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

3. Bear, J. 1979. Hydraulics of Groundwater. McGraw-Hill, New York.
4. Bradley, C. 1996. Transient modeling of water-table variation in a floodplain wetland. Narborough Bog, Leicestershire, J. Hydrol. 185: 87-114.
5. Jiao, J. J. and D. N. Lerner. 1996. Using sensitivity analysis to assist parameter zonation in groundwater flow model. Water Resour. Bull. 32(1): 75-78.
6. Ramireddygari, S. R., M. A. Sophocleous, J. K. Koelliker, S. P. Perkins and R. S. Govindaraju. 2000. Development and application of a comprehensive simulation model to evaluate impacts of watershed structures and irrigation water use streamflow and groundwater: the case of Wet Walnut Creek Watershed. J. Hydrol. 236(3): 223-246.
7. Reeve, A. S., J. Warzocha, P. H. Glaser and D. I. Siegel. 2001. Regional groundwatrer flow modeling of the Glacial Lake Agassiz Peatlands. J. Hydrol. 243: 91-100.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2024-04-30]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1384.9.3.2.9]