

مدیریت منابع آب زیرزمینی دشت میان آب شوشتر با تأکید بر نیاز آبی محصولات کشاورزی با استفاده از مدل سازی آب زیرزمینی

سید یحیی میرزایی ارجنکی^{۱*}، پوریا شیخی بگری^۲، منوچهر چیت سازان^۳

۱- استادیار، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران

۲- کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، شرکت مهندسی مشاور آب آتی پژوه، اهواز، ایران

۳- استاد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران

* نویسنده مسئول: Yahyamirzaee@scu.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۶

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۲۱

چکیده

دشت میان آب شوشتر یکی از دشتهای مهم استان خوزستان است که عمده مصارف آبی آن در بخش کشاورزی می باشد. با توجه به لزوم بازنگری در مصارف منابع آب در حوزه کشاورزی در این تحقیق جهت مدیریت منابع و مصارف، ابتدا نیاز آبی محصولات کشاورزی با استفاده از روش پنمن مانیت فائو محاسبه گردید سپس به منظور اطلاع از بیلان آبی و میزان آب مصرفی، مدل عددی منطقه برای سال آبی ۹۵-۹۶ با خطای RMSE ۰/۹۴ متر در حالت ناپایدار تهیه شد. پس از واسنجی مدل در شرایط ناپایدار، جهت اطمینان از مدل ساخته شده آبخوان دشت میان آب شوشتر نتایج واسنجی مدل برای مدت ۶ ماه، از مهر ۱۳۹۶ الی اسفند ۱۳۹۶ با خطای RMSE ۰/۹۵ مورد صحت سنجی قرار گرفت. طبق محاسبات، مقدار واقعی آب مورد نیاز جهت کشت محصولات برابر با ۲۷۸/۸۹ میلیون مترمکعب در سال می باشد. بر اساس نتایج مدل مجموعاً ۴۲۷/۰۷ میلیون مترمکعب آب از طریق شبکه آبیاری و چاه های بهره برداری در بخش کشاورزی منطقه استفاده می گردد. لذا مقدار ۱۴۸/۱۸ میلیون مترمکعب آب به صورت مازاد مصرف می شود. جهت مدیریت آب مازاد مصرفی سه سناریو مورد بررسی قرار گرفت که شامل انتقال تمامی آب مازاد به اراضی جنوبی از طریق توسعه شبکه آبیاری، کاهش پمپاژ چاه ها و مدیریت تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی می باشند. اعمال سناریوهای مذکور در مدل نشان داد که سناریوی اول باعث افت سطح ایستابی در قسمت شمالی آبخوان و بالا آمدگی سطح ایستابی در جنوب منطقه می گردد. اعمال سناریوی دوم باعث بالا آمدگی شدید سطح ایستابی در شمال دشت خواهد گردید. در سناریوی سوم با کاهش ۳۵ درصدی پمپاژ معادل ۳۳ میلیون مترمکعب آب و انتقال ۶۰ میلیون مترمکعب آب از شبکه به اراضی جنوبی، مقدار زیادی از آب مازاد بر نیاز مصرفی مدیریت گردید. بنابراین با توجه به وضعیت هیدرو دینامیک آبخوان و نتایج مدل، سناریوی سوم جهت مدیریت آب مازاد مصرفی در منطقه مطلوب تر می باشد.

واژه های کلیدی: نیاز آبی، مدل سازی آب زیرزمینی، مدیریت منابع آب، نرم افزار نتوات.

مقدمه

کشاورزی شده است. تأمین آب مورد نیاز جهت کشت محصولات یکی از مهم ترین مسائل در بخش کشاورزی می باشد، این در حالی است که در مناطق خشک و نیمه خشک منابع آب و دسترسی به آن ها محدودتر است. ایران از نظر جغرافیایی در کمربند خشک و نیمه خشک کره زمین واقع شده است. میانگین

با توجه به افزایش چشم گیر جمعیت و محدودیت منابع آب، خاک و سایر عوامل طبیعی، تأمین منابع غذایی انسان ها به یکی از مهم ترین و جدی ترین چالش های بشر تبدیل شده است. این محدودیت ها باعث عدم ایجاد تعادل بین رشد جمعیت و تولیدات

می‌توان مدیریت مناسبی را برای استحصال و تأمین آب اعمال نمود. از جمله تحقیقات صورت گرفته در زمینه محاسبه و تعیین نیاز آبی گیاهان به روش بیلان توسط صارمی و همکاران (۱۳۹۴) می‌باشد که در این مطالعه به اندازه‌گیری نیاز آبی و تعیین ضرایب گیاهی برای عدس در خرم‌آباد پرداختند. به همین منظور ابتدا یک آزمایش لایسیمتری انجام دادند، سپس میزان تبخیر و ترق گياه عدس و چمن درون لایسیمترها با استفاده از روش بیلان آبی تعیین گردید. در نهایت مقادیر ضریب گیاهی عدس در چهار مرحله ابتدایی، توسعه، میانی و انتهایی محاسبه شد. تحقیق دیگری که در زمینه نیاز آبی گیاهان توسط محمدی و همکاران (۱۳۹۵) به‌منظور توسعه پایدار منابع آب همچنین مدیریت کم‌آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک انجام شد. در این مقاله با استفاده از شاخص رد پای آب، آب سبز و آب آبی گیاهان زراعی دشت دزفول با استفاده از نرم‌افزار نت‌وات تخمین زده شده است. بدین منظور نیاز خالص آبیاری و باران مؤثر برای گیاهان مورد کشت دشت دزفول محاسبه شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق مشخص شد برای گیاهان تحت کشت در دشت دزفول، با توجه به حجم کل آب مصرفی دشت ۸۳ درصد از نیاز آبی گیاهان از طریق آبیاری و ۱۷ درصد آن از طریق بارندگی تأمین می‌شود. بنابراین رد پای آبی برای همه‌ی گیاهان بزرگ‌تر از رد پای آب سبز می‌باشد، بدین معنی که برای تأمین نیاز آبی گیاهان زراعی دشت دزفول باید آبیاری صورت گیرد. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که بیشترین حجم آب مصرفی در این دشت مربوط به گندم می‌باشد و کاربرد روش رد پای آب می‌تواند برای کمی‌سازی منابع آب مورد استفاده و حفاظت از منابع آب بسیار مفید باشد. مدل‌سازی آب زیرزمینی در ایران برای اولین بار در سال ۱۳۴۸ انجام گرفت که طی آن مدل آبخوان دشت ورامین (جنوب شرق تهران) توسط سازمان خواروبار جهانی تهیه شد. شمسایی و فرقانی (۱۳۹۰) با استفاده از مدل MODFLOW-PMWIN به بررسی موضوع بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در مناطق خشک پرداختند. آن‌ها موضوع بهره‌برداری تلفیقی در مناطق خشکی که فقط دارای منبع آب سطحی انتقالی بوده و فاقد دیگر منابع آب

بارندگی در سطح خشکی‌های جهان ۸۶۰ میلی‌متر در سال تخمین زده می‌شود و متوسط بارندگی سالانه ایران ۲۵۰ میلی‌متر می‌باشد، بنابراین مقدار بارندگی در ایران کمتر از یک‌سوم بارندگی در دنیا است (علیزاده، ۱۳۸۸). مدیریت منابع آب و بهره‌وری مناسب از آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک حساس و مهم می‌باشد همچنین در کشور ما حدود ۹۰ درصد مصرف آب در بخش کشاورزی است (سپه‌وند، ۱۳۸۸). استان خوزستان یکی از استان‌هایی است که در اغلب نقاط دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک می‌باشد، از طرفی این استان به دلیل برخورداری از اراضی حاصلخیز نقش مهمی در تولید محصولات کشاورزی دارد. در این راستا جهت نیل به اصلاح الگوی مصرف آب در بخش کشاورزی، تعیین میزان واقعی مصرف آب محصولات کشاورزی امری مهم می‌باشد. میزان واقعی مصرف آب توسط محصولات کشاورزی در قالب نیاز آبی گیاه مطرح می‌شود. طبق تعریف، نیاز آبی گیاه به عمق آب لازم (برحسب میلی‌متر) برای تأمین آب مصرفی از طریق تبخیر و ترق (ETC) توسط یک گیاه عاری از بیماری اطلاق می‌شود (دورن بوس و همکاران، ۱۹۹۶). از آنجاکه محاسبه نیاز آبی گیاه مقدار آب واقعی موردنیاز جهت کشاورزی و کشت محصولات موردنیاز یک منطقه را نشان می‌دهد، با آگاهی از این مقادیر می‌توان به مدیریت منابع آب منطقه مورد مطالعه پرداخت. برای مدیریت صحیح منابع آب باید مکانیسم و نحوه ارتباط آن‌ها را مورد بررسی قرارداد. مدل‌های کامپیوتری ابزاری مناسب برای شناخت و نحوه ارتباط منابع آب می‌باشند زیرا از دقت مناسبی برخوردار بوده و استفاده از آن‌ها باعث صرفه‌جویی در وقت و هزینه می‌گردد. از این‌رو تهیه مدل ریاضی یکی از مناسب‌ترین و باصرفه‌ترین ابزار جهت مطالعه و مدیریت آب‌های زیرزمینی می‌باشد (چیت‌سازان و موسوی، ۱۳۹۱). در صورتی که شبیه‌سازی آبخوان با موفقیت صورت گیرد می‌توان در مباحث مدیریتی از آن بهره گرفت. یکی از کاربردی‌ترین اهداف مدل‌سازی آبخوان، تهیه و بررسی بیلان منطقه مورد مطالعه است. تفاوت در مجموع مقادیر ورودی و مجموع مقادیر خروجی آب در یک سیستم آب زیرزمینی بیلان آب زیرزمینی نامیده می‌شود. با آگاهی از بیلان آب منطقه

۳۵° تا ۳۸° ۴۸' شمالی در شمال استان خوزستان قرار گرفته است. این دشت بین شهرستان شوشتر و بند قیر (حدود ۴۰ کیلومتری شمال اهواز) به صورت جزیره‌ای بین رودخانه گرگر در شرق و رودخانه شطیط در غرب آن قرار گرفته است. محدوده مطالعاتی از نظر زمین‌ساختی در کمربند چین‌خورده - رو رانده زاگرس واقع شده است. آبخوان میان‌آب شوشتر از شرق و جنوب شرق به سازند آغاچاری، از شمال و شمال غرب به برون‌زدهایی از سازند بختیاری و از غرب به آهو دشت محدود می‌گردد. در محدوده مطالعاتی به جز مقدار اندکی از کنگلومرای بختیاری در جنوب غربی شهرستان شوشتر، رخنمونی از هیچ سازند زمین‌شناسی دیگری دیده نمی‌شود و آبرفت‌های عهد حاضر تمام این سازندها را پوشانیده است (شکل ۱).

در دشت میان‌آب شوشتر تعداد ۱۶۷ سونداژ ژئوالکتریک بر روی ۱۳ پروفیل در محدوده‌ای به وسعت ۲۰۰۰ کیلومترمربع به روش شولومبرژه انجام گرفته است که نقشه‌های مقاومت ظاهری حاصل از این مطالعه اعماق ۱۰ تا ۱۵۰ متری از سطح زمین را نشان می‌دهند. بررسی لاگ چاه‌ها و چاه‌های مشاهده‌ای همچنین نتایج ژئوفیزیک انجام شده در منطقه نشان می‌دهد که آبخوان دشت میان‌آب شوشتر از نوع آزاد و تک لایه می‌باشد. در دشت میان‌آب شوشتر اکثر چاه‌های بهره‌برداری در شمال و مرکز دشت قرار دارند. بر اساس آمار کسب‌شده از سازمان آب و برق استان خوزستان، محدوده مطالعاتی میان‌آب شوشتر دارای ۹۳۸ حلقه چاه بهره‌برداری اعم از چاه‌های شرب، صنعتی، کشاورزی، عمیق و دهانه‌گشاد می‌باشد که سالانه ۹۴/۲۴ میلیون مترمکعب آب از آبخوان برداشت می‌کنند. شبکه آبیاری و زهکشی دشت میان‌آب شوشتر با عنوان طرح شبکه آبیاری داریون شناخته می‌شود که در هفت فاز مطالعاتی شامل طرح‌های داریون یک تا داریون هفت می‌شود. در حال حاضر طرح‌های داریون یک، داریون دو، داریون سه، داریون پنج و قسمتی از داریون شش (در حال تکمیل و توسعه) در حال بهره‌برداری می‌باشند. با توجه به بررسی‌های به‌عمل‌آمده در منطقه مطالعاتی و سیمای کلی طرح، در حال حاضر حدود ۲۳ هزار هکتار از راضی تحت پوشش شبکه کانال‌های آبیاری و زهکشی قرار می‌گیرد. محصولات کشت‌شده

سطحی می‌باشند را مورد بررسی قرار دادند. سپس از نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی، در تدوین مدل بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک استفاده کردند و گزینه‌های مختلف جهت بهره‌برداری بهینه از منابع آب را بررسی کردند. از تحقیقات دیگری که در آن با استفاده از مدل‌سازی به مدیریت آبخوان پرداخته شد، توسط گُرد و همکاران (۱۳۹۷) انجام شد که با استفاده از مدل عددی به مدل‌سازی آبخوان دشت اردبیل و مدیریت آن با استفاده از بهینه‌سازی برداشت آب زیرزمینی پرداختند. بدین منظور ابتدا بر اساس پروتکل مدل‌سازی، مدل مفهومی دشت اردبیل را تهیه کردند. پس از تهیه پایگاه داده‌ای موردنیاز، تعیین هندسه آبخوان، پارامترهای ورودی و خروجی، سیستم جریان آب زیرزمینی و سیستم هیدرولیک آبخوان از کد MODFLOW2005 و نرم‌افزار PMWIN8 برای مدل‌سازی دشت مورد مطالعه استفاده کردند. پس از مدل‌سازی دشت، بر اساس میزان افت دشت زون‌بندی و پس از بهینه‌سازی توسط نرم‌افزار مقادیر برداشت از آبخوان محاسبه شد. دشت میان‌آب شوشتر یکی از دشت‌های مهم استان خوزستان می‌باشد که عمده مصرف آبی در این دشت مربوط به کشاورزی و زراعت می‌باشد. در این منطقه علاوه بر بهره‌برداری از منابع آب سطحی، تعداد زیادی چاه جهت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی نیز وجود دارد. لذا در این دشت استفاده تلفیقی از منابع آب زیرزمینی و سطحی صورت می‌پذیرد و این منابع بر یکدیگر تأثیرگذارند. این امر ضرورت بررسی و شناخت آبخوان در راستای مدیریت بهینه و جلوگیری از آسیب آبخوان را نشان می‌دهد. در این تحقیق با توجه به اهمیت منطقه مورد مطالعه در بخش کشاورزی جهت محاسبه نیاز واقعی منطقه برای کشت محصولات کشاورزی، ابتدا نیاز آبی گیاهان کشت‌شده محاسبه سپس با استفاده از ابزار مدل‌سازی آب زیرزمینی به مدیریت منابع آب دشت مورد مطالعه تحت سناریوهای مختلف مدیریتی پرداخته شد.

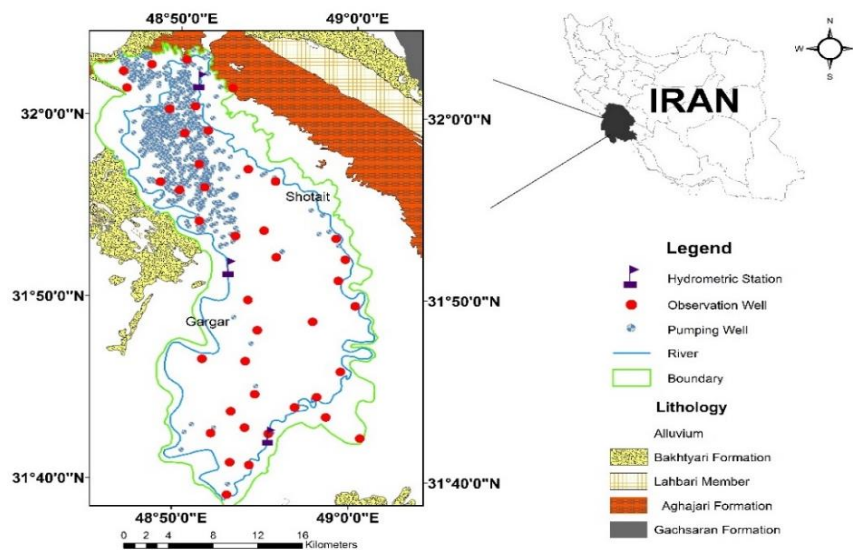
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت میان‌آب شوشتر با مساحتی حدود ۶۴۰ کیلومترمربع بین طول جغرافیایی ۸۰° ۲۸' و ۳۱° ۳۰' شرقی و عرض ۰۲°

و تمرکز چاه‌های بهره‌برداری به صورت آبی و در جنوب دشت به دلیل عدم توسعه کامل شبکه آبیاری همچنین شوری آب زیرزمینی به صورت دیم می‌باشد.

در این منطقه عمدتاً به گندم، جو، برنج، صیفی‌جات و سبزی‌ها، حبوبات و دانه‌های روغنی تعلق دارد. کشت محصول در شمال و قسمتی از میانه دشت میان‌آب به دلیل وجود کانال‌های آبیاری



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و نقشه زمین‌شناسی دشت میان‌آب شوشتر.

تا حدودی با یکدیگر تفاوت دارند. فائو در سال ۱۹۹۸، روش پنمن مانیت فائو را به‌عنوان روش استاندارد برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع معرفی نمود که با استفاده از معادله ۱ به‌دست می‌آید (شرقی و همکاران، ۱۳۸۹):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left[\frac{890}{(T + 273)} \right] U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

که در آن ET_0 ، R_n ، T و U_2 به ترتیب تبخیر و تعرق گیاه موردنظر (mm/day)، تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$)، میانگین دمای هوا ($^{\circ}\text{C}$) و سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (KPa) می‌باشد. همچنین Δ ، γ ، G به ترتیب متعلق به عوامل کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری (KPa)، ضریب رطوبتی می‌باشد. همچنین $(e_a - e_d)$ ، Δ ، γ ، G به ترتیب متعلق به عوامل کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری (KPa)، ضریب رطوبتی می‌باشد. همچنین $(e_a - e_d)$ ، Δ ، γ ، G به ترتیب متعلق به عوامل کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری (KPa)، ضریب رطوبتی می‌باشد.

پس از محاسبه و اطلاع از میزان نیاز آبی گیاهان کشت‌شده در منطقه مورد مطالعه، گام بعدی اطلاع از میزان آب مصرفی از منابع آب زیرزمینی و سطحی با استفاده از بیلان آبی منطقه می‌باشد. نیاز آبی دشت میان‌آب شوشتر جهت کشاورزی از دو طریق آب زیرزمینی (از طریق چاه) و سطحی (شبکه آبیاری) تأمین می‌شود. محدوده مطالعاتی میان‌آب شوشتر دارای ۹۳۸

برآورد نیاز آبی گیاهان دشت میان‌آب شوشتر

دشت میان‌آب شوشتر به لحاظ تولید محصولات کشاورزی در استان خوزستان از اهمیت زیادی برخوردار است. مساحت دشت میان‌آب شوشتر ۶۴۰۰۰ هکتار است که حدود ۴۶۰۰۰ هکتار از آن تحت کشت محصولات مختلف زراعی مانند گندم، جو، برنج، ذرت، نیشکر و ... می‌باشد. در جدول (۱) محصولات تحت کشت و سطح زیر کشت دشت میان‌آب شوشتر ذکر شده، همچنین نیاز آبی محصولات کشاورزی این منطقه با استفاده از نرم‌افزار نت‌وات و روش پنمن مانیت فائو و برآورد شده است. نرم‌افزار نت‌وات به‌عنوان سند ملی آب نیز معروف است که جهت برآورد نیاز آبی گیاهان باغی و زراعی در ایران به‌کار برده می‌شود. این نرم‌افزار درواقع خروجی و نتیجه طرح نیاز خالص آبیاری محصولات زراعی و باغی ایران است. در این نرم‌افزار اطلاعات مربوط به تبخیر و تعرق گیاهان کشت‌شده در ۶۲۰ دشت ایران موجود می‌باشد. اساس روش محاسباتی این نرم‌افزار، روش پنمن مانیت فائو است. روش‌های مختلفی جهت محاسبه تبخیر و تعرق گیاهان پیشنهاد شده است که هرکدام از نظر داده‌های موردنیاز

حلقه چاه بهره‌برداری اعم از چاه‌های شرب، صنعتی، کشاورزی، عمیق و دهانه‌گشاد می‌باشد که طبق پروانه‌ی بهره‌برداری در فصول مختلف سال فعال می‌باشند. در دشت میان‌آب شوشتر به‌منظور استفاده و بهره‌برداری بهینه از منابع آب سطحی موجود در منطقه در راستای کمک به رونق کشاورزی، طرح شبکه آبیاری و زهکشی داریون به کارفرمایی سازمان آب و برق خوزستان اجرا شد. شبکه آبیاری دشت میان‌آب شوشتر از طریق کانال‌های درجه‌یک و درجه‌دو آب رودخانه‌های گرگر و شطیپ را به اراضی کشاورزی و تحت کشت منطقه منتقل می‌کند. تفاوت در مجموع مقادیر ورودی و مجموع مقادیر خروجی آب در یک سیستم آب زیرزمینی (آبخوان) بیلان آب زیرزمینی نامیده می‌شود. با آگاهی از بیلان آب منطقه می‌توان مدیریت مناسبی را برای استحصال و تأمین آب اعمال نمود. مدل‌سازی عددی یکی از مناسب‌ترین و به‌صرفه‌ترین ابزار جهت محاسبات بیلان و مطالعه آب‌های زیرزمینی می‌باشد. مدل ریاضی ابزاری کارآمد برای مطالعات آبخوان، تهیه ترازنامه آبی (بیلان آبی)، شناخت

دقیق‌تر مؤلفه‌های مختلف بیلان و محاسبه آن‌ها برای یک دوره مشخص همچنین پیش‌بینی تأثیر تنش‌های مختلف هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی است. امروزه استفاده از مدل‌های ریاضی به‌منظور شبیه‌سازی آبخوان و شرایط حاکم بر آن به امری متداول در مبحث آب‌های زیرزمینی تبدیل شده است (چیت‌سازان و موسوی، ۱۳۹۱). با تهیه مدل عددی آبخوان دشت مورد مطالعه و سپس آگاهی از مؤلفه‌های بیلان آبی، ضمن اطلاع از نیاز آبی منطقه می‌توان به مدیریت مناسبی جهت تأمین آب برای نیازهای آبی مختلف پرداخت. به‌منظور تهیه بیلان آبی دشت همچنین اطلاع از عوامل تأثیرگذار هیدرولوژیک و هیدروژئولوژیک بر بیلان منطقه مورد مطالعه، ابتدا مدل عددی دشت میان‌آب شوشتر در دو حالت پایدار و ناپایدار اجرا و واسنجی شد. سپس جهت مدیریت منابع و مصارف دشت، با استفاده از مدل عددی صحت‌سنجی شده اثر اعمال سناریوهای مدیریتی برای آبخوان پیش‌بینی گردید.

جدول ۱- محاسبات نیاز آبی محصولات تحت کشت دشت میان‌آب شوشتر.

محصول	آب مصرفی برای کشت محصول (مترمکعب)	نیاز خالص آبیاری سالانه (مترمکعب در هکتار)	سطح زیر کشت (هکتار)
گندم	۴۱۴۸۱۶۳۱/۵۱	۲۲۷۰	۱۸۲۷۳/۸۰
جو	۶۲۳۴۵۷	۱۷۹۰	۳۴۸/۳۰
برنج	۶۳۷۰۱۶۷۳/۲۲	۸۵۵۰	۷۴۵۰/۴۰
ذرت دانه‌ای	۱۳۱۳۳۶۴/۷۷	۵۷۳۰	۲۲۹/۲۰
لوبیا	۷۰۵۲۵۹۹/۴۵	۴۹۳۰	۱۴۳۰/۵۴
ماش	۳۶۱۷۱۲۷/۳۰	۴۹۷۰	۷۲۷/۷۹
باقلا خشک	۳۵۰۶۶/۶۹	۵۶۰	۶۲/۶۱
نیشکر	۱۴۷۰۵۵۲۷۰/۷۰	۱۱۳۸۰	۱۲۹۲۲/۲۵
کلزا	۹۰۶۹۲۶/۹۸	۲۰۰۰	۴۵۳/۴۶
خریزه	۱۷۱۷۵۸/۳۱	۵۵۰۰	۳۱/۲۲
هندوانه	۵۶۱۳۹۰۴/۹۵	۴۲۱۰	۱۳۳۳/۴۶
خیار	۱۱۱۱۷۴/۴۷	۳۵۶۰	۳۱/۲۲
کدو	۹۶۵۲۹/۲۵	۷۲۰۰	۱۳/۴۰
پیاز	۴۳۳۶۸۱/۶۷	۳۹۱۰	۱۱۰/۹۱
گوجه‌فرنگی	۴۱۴۲۹۵/۰۵	۱۱۹۰	۳۴۸/۱۴
بادمجان	۵۱۲۸۵۲/۰۲	۷۶۲۰	۶۷/۳۰
هویج‌فرنگی	۱۴۸۸۱/۵۹	۳۳۳۰	۴/۴۶
کلم	۴۲۳۷۹/۰۲	۳۱۶۱	۱۳/۴۰
یونجه	۱۰۸۲۶۰/۵۰	۱۲۰۴۰	۸/۹۹
ذرت علوفه‌ای	۵۴۹۶۵۶۴/۴۱	۲۵۷۰	۲۱۳۸/۷۴
مجموع آب مصرفی جهت کشت (میلیون مترمکعب)		۲۷۸/۸۹	

تهیه مدل ریاضی آبخوان دشت میان آب

این معادله دیفرانسیل با اعمال شرایط اولیه و مرزی حل می‌گردد و نیاز به فرضیات زیادی دارد و پیچیدگی‌های موجود در دشت نیز حل آن را بسیار دشوار می‌نماید. از راه‌های حل معادله یادشده روش‌های عددی می‌باشند که در کدهای نرم‌افزاری مختلفی از آن استفاده شده است.

جهت انجام موفق طراحی مدل، باید از یک پروتکل مدل‌سازی مناسب تبعیت شود (رضایی و همکاران، ۱۳۹۹). به‌طور کلی پروتکل‌های مدل‌سازی شامل مراحل اساسی تعیین هدف، انتخاب کد و تعیین صحت طراحی مدل، کالیبراسیون، آنالیز حساسیت و در نهایت پیش‌بینی می‌باشند. هر یک از این مراحل باعث می‌شوند تا مدل تهیه‌شده نتایج بهتری را ارائه دهد. در تحقیق حاضر مراحل تهیه مدل ریاضی آبخوان دشت میان آب شوشتر شامل مراحل زیر می‌باشد: تعیین هدف، تهیه مدل مفهومی، انتخاب معادله حاکم و کد کامپیوتری مناسب، طرحی یا ساخت مدل، کالیبراسیون، تحلیل آنالیز حساسیت پارامترهای هیدروپنماتیک، صحت‌سنجی مدل، ارائه نتایج و مدیریت آبخوان با استفاده از مدل. تعیین هدف از مدل‌سازی اولین مرحله از این فرآیند می‌باشد. برای این‌که هدف از مدل‌سازی مشخص شود باید ابتدا تعیین شود که مدل چه مسائلی را باید پاسخگو باشد و یا اینکه چه موضوعی را باید بررسی کند (افت سطح ایستابی، اثر آلودگی و ...). در تحقیق حاضر هدف از مدل‌سازی، تهیه مدل عددی دشت میان آب شوشتر جهت شناخت و مدیریت منابع آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. در فرآیند مدل‌سازی باید قبل از انجام هر مطالعه‌ای، داده‌های صحرایی موردنیاز را جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل نمود. ترکیبی از جمع‌آوری، تجزیه و تحلیل داده‌های موردنیاز و شناخت سیستم آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه را مدل مفهومی منطقه گویند (کرسیک و میکسوزکی، ۲۰۱۳). مدل مفهومی اطلاعات ارزشمندی در رابطه با مرزهای سیستم، واحدهای آب چینه‌ای و شرایط هیدروژئولوژیک آبخوان منطقه مورد مطالعه در اختیار مدل‌ساز قرار می‌دهد. آبخوان دشت میان آب شوشتر، یک آبخوان آزاد است که متشکل از آبرفت و رسوبات عهد حاضر می‌باشد. در

مدل شمائی و یا برداشت ذهنی از یک پدیده است و به‌عبارت دیگر هر چیزی که تقریبی از یک سیستم واقعی باشد را مدل گویند (وانگ و اندرسون، ۱۹۸۲). مدل آب زیرزمینی وسیله‌ای برای شبیه‌سازی سیستم جریان آب زیرزمینی به شکلی ساده‌تر از شرایط صحرایی می‌باشد، درواقع با استفاده از مدل آب زیرزمینی می‌توان به یک بیان تفهیمی یا ترسیمی از سیستم آبخوان با استفاده از معادلات ریاضی پرداخت (اندرسون و همکاران، ۲۰۱۵). مدل‌های ریاضی عبارت‌اند از مجموعه روابط ریاضی که پدیده‌ی موردنظر را در یک شکل ساده شده تعریف می‌نمایند. این‌گونه مدل‌ها یک سیستم پیچیده را به‌طور ساده نمایش می‌دهند به طریقی که رفتار آن و روابط بین متغیرها و پارامترهای مدل توسط عبارات ریاضی و یا گاهی با عبارات منطقی بیان شده است (کلارک، ۱۹۷۳). اساس کار این مدل‌ها انتخاب معادلات دیفرانسیلی حاکم بر مسئله، جایگزینی آن‌ها با یک دستگاه معادلات از روش تفاضلات محدود^۱ یا عناصر محدود^۲، روش مشخصه و درنهایت حل آن دستگاه معادلات توسط یکی از روش‌های عددی مربوطه توسط کامپیوتر می‌باشد (اندرسون و همکاران، ۲۰۱۵).

فرم کلی معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی از دیدگاه سیستم جریان عبارت است از:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right] = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \pm W \quad (2)$$

که k_x و k_y و k_z مؤلفه‌های تنسور هدایت هیدرولیکی، S_y آبدهی ویژه و W مؤلفه تغذیه یا تخلیه کننده (به ترتیب با علامت مثبت یا منفی) آبخوان می‌باشند. با توجه به این‌که آبخوان دشت میان آب از نوع آزاد است و $T_x = K_x h$ ، $T_y = K_y h$ و $T_z = K_z h$ است. از این‌رو معادله حاکم بر جریان آب‌های زیرزمینی که به معادله غیرخطی بوزینسک معروف است به‌صورت معادله زیر درمی‌آید (اندرسون و همکاران، ۲۰۱۵):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z h \frac{\partial h}{\partial z} \right] = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \pm W \quad (3)$$

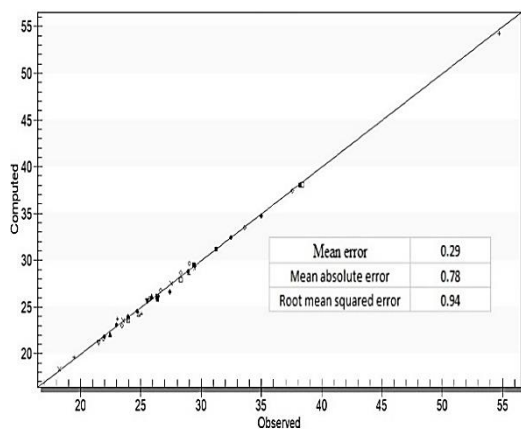
² Finite Difference

¹ Finite Element

علاوه بر این داده‌های ماهانه امکان پیش‌بینی‌های درازمدت از طریق تحلیل اثرات فصلی را برای ما میسر می‌سازند.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل

مدل جریان دشت میان‌آب در حالت پایدار به‌منظور کم کردن مجهولات رابطه حاکم بر جریان آب زیرزمینی و استفاده از نتایج آن در تهیه مدل ناپایدار ساخته شد. پس از وارد نمودن داده‌های اولیه، مدل اجرا شد. با مشاهده خطا مرحله واسنجی آغاز شد. واسنجی مدل برای تمامی چاه‌های مشاهده‌ای با تابع هدف (Interval) یک متر صورت گرفت. پس از واسنجی مدل نامدگار برای مهر ۱۳۹۵، مدل برای یک سال آبی (از مهر ۱۳۹۵ تا شهریور ۱۳۹۶) در حالت نامدگار اجرا شد. پس از تصحیح مقادیر آبدی و ویژه در مدل نامدگار، واسنجی مدل دشت میان‌آب شوشتر در حالت نامدگار نیز انجام شد. شکل (۲) برازش بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی و همچنین انواع خطاهای مدل نامدگار را نشان می‌دهد.



شکل ۲- برازش بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی مدل ناپایدار دشت میان‌آب و جدول خطاهای مدل در گام آخر.

پس از طراحی مدل، اعمال داده‌ها، اجرای مدل و در نهایت واسنجی، برای تأمین اعتبار و سنجش دقت مدل و اثبات این‌که مدل قابلیت پیش‌بینی صحیح را خواهد داشت، صحت‌سنجی مدل صورت می‌گیرد. برای اطمینان از مدل ساخته‌شده آبخوان دشت میان‌آب شوشتر نتایج واسنجی مدل برای مدت ۶ ماه، از

محدوده مورد مطالعه ۴۱ حلقه چاه مشاهداتی وجود دارد که به کارفرمایی سازمان آب و برق خوزستان احداث شده‌اند و آمار سطح آب آن‌ها به‌طور ماهانه ثبت می‌شود. در دشت میان‌آب شوشتر اکثر چاه‌های بهره‌برداری در شمال و مرکز دشت قرار دارند. بر اساس آمار کسب‌شده از سازمان آب و برق استان خوزستان، محدوده مطالعاتی میان‌آب شوشتر دارای ۹۳۸ حلقه چاه بهره‌برداری اعم از چاه‌های شرب، صنعتی، کشاورزی، عمیق و دهانه‌گشاد می‌باشد که طبق پروانه‌ی بهره‌برداری در فصول مختلف سال فعال می‌باشند. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، تراکم چاه‌های منطقه بیشتر در شمال و قسمتی از میانه دشت می‌باشد (شکل ۱). جهت عمومی جریان آب زیرزمینی از شمال به جنوب منطقه است. حداکثر ضخامت آبخوان در شمال منطقه و برابر با ۱۸۲ متر و همچنین حداقل ضخامت آبخوان برابر با ۱۰۹ متر واقع در جنوب منطقه می‌باشد. مقادیر ضریب آب‌گذری (T) آبخوان از ۳۲ تا ۶۱۰ مترمربع در روز تغییر می‌کند. مقدار میانگین آبدی ویژه (Sy) آبخوان دشت میان‌آب شوشتر برابر با ۰/۰۹ می‌باشد. تمامی پارامترهای هیدرودینامیک آبخوان منطقه مورد مطالعه از شمال به جنوب دشت به‌دلیل افزایش سیلت، رس و ذرات ریزدانه کاهش می‌یابند. جهت ساخت مدل عددی دشت میان‌آب شوشتر از نرم‌افزار GMS10.1 استفاده گردید. GMS محیط گرافیکی و جامع برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی است که شامل یک رابط کاربری و تعدادی کدهای تحلیلی مختلف از جمله کد MODFLOW می‌باشد. مدل منطقه مورد مطالعه برای حالت پایدار^۳ در یک دوره زمانی یک‌ماهه (مهرماه سال ۱۳۹۵) به مدت ۳۰ روز با خطای RMSE ۰/۶۲ متر شبیه‌سازی شد. مدل‌سازی جریان آب و انتقال آب‌های زیرزمینی دشت میان‌آب شوشتر در سال آبی ۹۵-۹۶ از مهرماه سال ۱۳۹۵ تا شهریورماه سال ۱۳۹۶ به مدت ۳۶۵ روز با ۱۲ پریود و هر پریود یک گام زمانی در حالت ناپایدار^۴ انجام شد. در حالت ناپایدار دوره‌های تنش یک‌ماهه است و دلیل آن واکنش با تأخیر سیستم آب زیرزمینی به تنش‌های هیدرولوژیکی و سطحی است.

³ Steady State

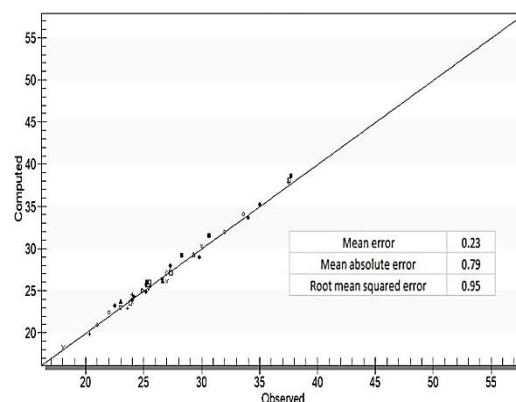
⁴ Unsteady State

در جدول بیلان حجمی مؤلفه‌های ورودی و خروجی دشت میان‌آب شوشتر مشاهده می‌شود. مؤلفه تغذیه در جدول (۲) شامل مقدار آب حاصل از بارندگی و آب برگشتی ناشی از کانال‌های آبیاری برای مصارف کشاورزی می‌باشد که باعث تغذیه آبخوان می‌شوند؛ بنابراین دو عامل بارندگی و آب برگشتی کانال‌های آبیاری مقدار عددی بسته تغذیه را تشکیل می‌دهند. همان‌گونه که پیش‌تر توضیح داده شد، نیاز آبی گیاه برابر با میزان واقعی مصرف آب توسط محصولات کشاورزی می‌باشد. با توجه به محصولات کشت‌شده در دشت میان‌آب شوشتر و سطح زیر کشت هر محصول، مقدار واقعی آب موردنیاز جهت کشت محصولات در این منطقه برابر با ۲۷۸/۸۹ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد. بنابراین مقدار ۱۴۸/۱۸ میلیون مترمکعب آب به‌صورت مازاد مصرف می‌شود. مصرف این مقدار آب مازاد می‌تواند تحت‌تأثیر عوامل مختلفی نظیر روش‌های نامناسب آبیاری و یا قرار گرفتن آب بیش‌ازحد نیاز در اختیار کشاورز باشد که می‌توان آن را جهت مصارف دیگر مدیریت کرد. کشت محصولات در اراضی جنوب منطقه به دلیل عدم توسعه شبکه آبیاری در این مناطق، به‌صورت دیم انجام می‌شود که می‌توان از طریق آب مازاد مصرفی نیاز آبی این نواحی را تأمین کرد.

مدیریت منابع و مصارف آب در منطقه مورد مطالعه سناریو اول: توسعه شبکه کانال‌های آبیاری و زهکشی جهت انتقال آب مصرفی مازاد

توسعه شبکه‌های آبیاری نقش کلیدی در افزایش تولید محصولات کشاورزی در ۵۰ سال گذشته در سطح جهان داشته است (حیدری دهنوی، ۱۳۹۴). در دشت میان‌آب شوشتر به‌منظور استفاده و بهره‌برداری بهینه از منابع آب سطحی موجود در منطقه در راستای کمک به رونق کشاورزی، طرح شبکه آبیاری و زهکشی داریون به کارفرمایی سازمان آب و برق خوزستان اجرا شد. شبکه آبیاری دشت میان‌آب شوشتر از طریق کانال‌های درجه‌یک و درجه‌دو آب رودخانه‌های گرگر و شطیط را به اراضی کشاورزی و تحت کشت منطقه منتقل می‌کند. شبکه آبیاری و زهکشی دشت میان‌آب در حال حاضر فقط اراضی شمالی و میانی دشت را تحت پوشش قرار می‌دهد (شکل ۴) و

مهر ۱۳۹۶ الی اسفند ۱۳۹۶ مورد صحت‌سنجی قرار گرفتند. شکل (۳) برازش مقادیر مشاهداتی و محاسباتی آخرین اجرای مدل واسنجی و همچنین مقادیر خطاهای مختلف واسنجی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- برازش مقادیر بار هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی مدل واسنجی و مقادیر خطاهای مختلف مدل.

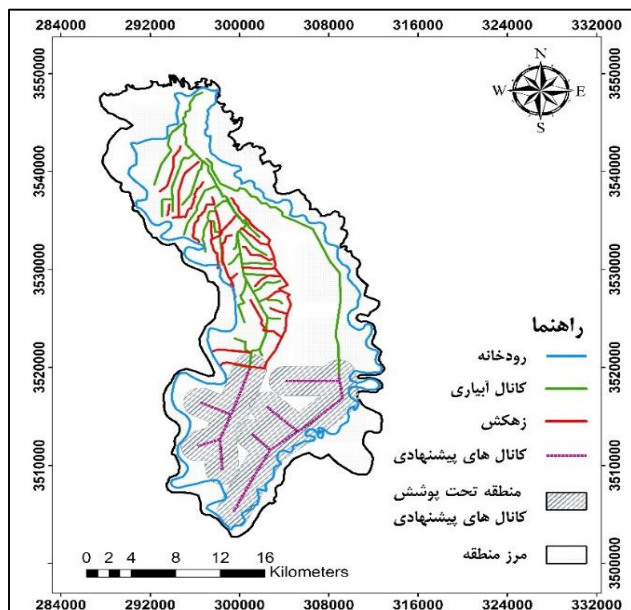
بیلان دشت میان‌آب شوشتر

محاسبه بیلان در نرم‌افزار مدل‌ساز، پس از پایان یافتن فرآیندهای واسنجی، تحلیل حساسیت و صحت‌سنجی به دلیل تصحیح پارامترهای گوناگون و محاسبه سلول به سلول تغییرات حجم ذخیره، دقیق‌تر از روش‌های محاسبه دستی است. در این تحقیق پس از تهیه و تصحیح پارامترهای هیدروژئولوژی توسط مدل در حالت ماندگار و نیز در حالت ناماندگار و اجرای مدل بیلان نهایی مدل آبخوان دشت میان‌آب شوشتر در حالت ناماندگار در سال آبی ۹۵-۹۶ محاسبه شد که در جدول (۲) تشریح شده است.

جدول ۲- بیلان حجمی مدل دشت میان‌آب شوشتر در سال آبی (۹۶-۹۵).

بیلان حجمی مدل (میلیون مترمکعب در سال)		
اجزای بیلان	ورودی	خروجی
چاه‌ها	۰	۹۴/۲۴
رودخانه	۸۲/۸۰	۴۷/۳۲
جریان‌های زیرزمینی	۳۷/۲۰	۲۰/۹۴
زهکشی	۰	۴۹/۸۶
تغذیه	۹۰/۲۰	۰
مجموع	۲۱۰/۲۰	۲۱۲/۳۶
ورودی- خروجی	-۲/۱۶	

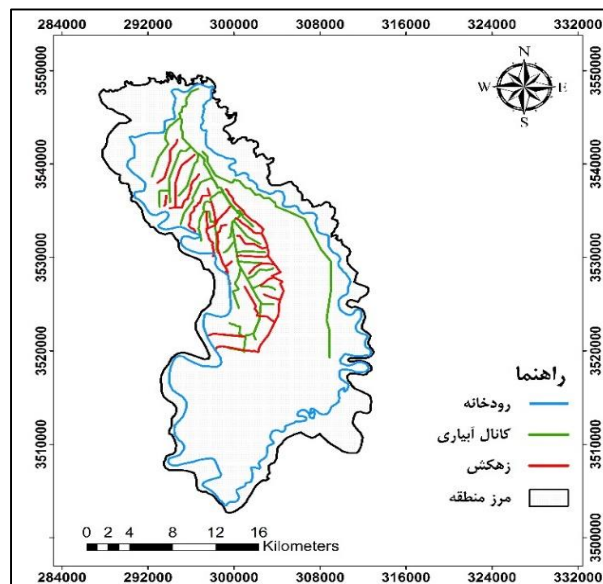
تحت پوشش کانال‌های آبیاری در جنوب منطقه (شکل ۵)، مساحت اراضی تحت پوشش کانال‌های آبیاری در این اراضی برابر با ۱۴۴۰۰ هکتار می‌باشد که ۲۲/۵ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه را شامل می‌شود.



شکل ۵- نقشه پیشنهادی اولیه و اراضی تحت پوشش توسعه شبکه آبیاری در قسمت جنوبی دشت.

با در نظر گرفتن مساحت اراضی تحت پوشش جنوبی و الگوی کشت منطقه، ۹۰ میلیون مترمکعب آب جهت تأمین نیاز آبی کشاورزی جنوب دشت میان آب شوشتر مورد نیاز می‌باشد که می‌توان آن را از طریق انتقال آب مازاد مصرفی در بالادست تأمین کرد. بدین ترتیب می‌توان بخشی از آب مازاد بالادست را از طریق انتقال به اراضی جنوبی دشت منتقل و مدیریت کرد. همان‌طور که ذکر شد، مدل‌ها ابزار مناسبی جهت مدیریت و پیش‌بینی وضعیت آبخوان تحت شرایط مختلف هستند. در سناریوی اول مقدار آب مازادی که در شمال دشت مصرف می‌شود، به‌وسیله تکمیل و توسعه شبکه آبیاری به قسمت‌های جنوبی منطقه منتقل شد. بدین ترتیب آب مازاد بر نیاز مدیریت‌شده و با توسعه شبکه آبیاری در جنوب منطقه مورد مطالعه، پتانسیل کشاورزی این قسمت به حداکثر مقدار خود می‌رسد. اما کاهش حجم مشخصی از آب در قسمتی از منطقه، باعث تغییر در شرایط

در اراضی جنوبی به دلیل عدم توسعه شبکه آبیاری کشت محصولات کشاورزی (غالباً گندم و جو) به‌صورت دیم انجام می‌شود.



شکل ۴- نقشه کنونی شبکه آبیاری و زهکشی دشت میان آب.

در قسمت‌های جنوبی دشت میان‌آب شوشتر به دلیل گسترش رسوبات ریزدانه ماری و رسی حاصل از فرسایش سازند آغاچاری، آب زیرزمینی دارای کیفیت مطلوبی جهت بهره‌برداری از طریق حفر چاه نیست. بنابراین توسعه شبکه آبیاری در قسمت‌های جنوبی دشت می‌تواند به بهره‌وری مناسب‌تر از اراضی این قسمت کمک کند. در شکل (۵) طرح اولیه و پیشنهادی توسعه شبکه کانال‌های آبیاری و همچنین منطقه تحت پوشش کانال‌های پیشنهادی در منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. با توسعه شبکه آبیاری در قسمت‌های جنوبی دشت میان‌آب و انتقال آب از طریق کانال‌های درجه ۱ و درجه ۲ می‌توان میزان آب مازادی که در بخش کشاورزی استفاده می‌شود را مدیریت کرد و بخش زیادی از آب مورد نیاز زمین‌های کشاورزی در قسمت جنوبی دشت را با استفاده از آب مازاد تأمین کرد. مقدار حجم آب تخصیص داده‌شده به کشاورزان از شبکه کانال‌های آبیاری و زهکشی، معمولاً به مقدار مساحت اراضی و نوع محصولات کشت‌شده وابسته است (صمدی بهرامی و همکاران، ۱۳۸۵). با توجه به طرح توسعه شبکه آبیاری و اراضی

آبیاری بر آبخوان دشت میان آب، ابتدا با استفاده از بیلان مدل حجم آب مازاد مصرفی از قسمت‌های شمالی منطقه کسر و به قسمت‌های جنوبی اضافه شد. سپس با توجه به مساحت اراضی تحت پوشش، مقدار نفوذپذیری خاک منطقه در قسمت‌های جنوبی و همچنین نرخ تغذیه شرایط آبخوان شبیه‌سازی و پیش‌بینی شد. شکل‌های (۶-الف) و (۶-ب) وضعیت و تراز سطح ایستابی آبخوان را با استفاده از مدل عددی منطقه مورد مطالعه به ترتیب در شرایط قبل و بعد از توسعه شبکه آبیاری منطقه و انتقال حجم آب مازاد مصرفی به قسمت‌های جنوبی نشان می‌دهند.

هیدروژئولوژیک و هیدرودینامیک آبخوان می‌شود؛ زیرا تغییر در پارامترهای مختلف بیلان آبی منطقه، مستقیماً بر شرایط هیدرودینامیک آبخوان تأثیراتی همچون افت در آبخوان در اثر کاهش تغذیه و یا بالا آمدگی سطح آب در اثر قسمتی از آبخوان به دلیل افزایش میزان تغذیه، تغییر گرادیان هیدرولیکی در اثر تغییر در تراز سطح ایستابی و ... می‌گذارد. در این مرحله با توجه به حجم آب مازاد مصرفی محاسبه شده همچنین اراضی تحت پوشش طرح اولیه و پیشنهادی توسعه شبکه آبیاری، مقدار آب مازاد مصرفی از قسمت‌های شمالی و میانی منطقه کسر شد و به قسمت‌های جنوبی انتقال داده شد. سپس مدل با مقادیر جدید شبکه آبیاری، اجرا شد. جهت شبیه‌سازی تأثیر توسعه شبکه



شکل ۶- وضعیت تراز سطح ایستابی آبخوان به ترتیب در شرایط (الف) قبل و (ب) بعد از توسعه شبکه آبیاری.

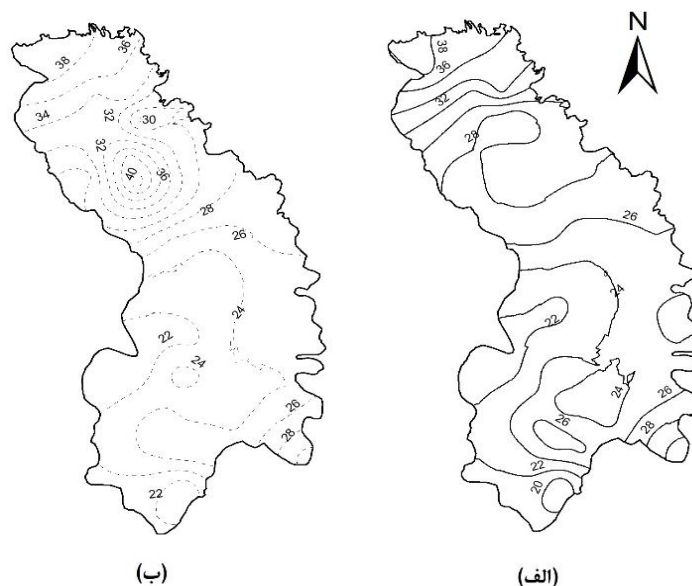
سناریو دوم: بهینه‌سازی و کاهش برداشت از آب زیرزمینی

مشخص شد مجموع آب مصرفی در بخش کشاورزی، ۴۲۷/۰۷ میلیون مترمکعب می‌باشد که ۹۴/۲۴ میلیون مترمکعب از مقدار ذکر شده، سهم چاه‌های پمپاژ آب زیرزمینی است. بنابراین برداشت آب از آبخوان منطقه مورد مطالعه درصد بالایی از آب موردنیاز در بخش کشاورزی را تأمین می‌کند. در این سناریوی مدیریتی می‌توان برخلاف سناریوی قبل، دبی کانال‌های آبیاری و زهکشی را تغییری نداد و مقدار آب مازاد مصرفی فقط از پمپاژ چاه‌های آب زیرزمینی کسر شود تا آبی مازاد بر نیاز مصرف نشود. با توجه به سهم چاه‌ها در مصارف کشاورزی منطقه و مقدار

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، محدوده مطالعاتی میان آب شوشتر دارای ۹۳۸ حلقه چاه بهره‌برداری اعم از چاه‌های شرب، صنعتی، کشاورزی، عمیق و دهانه‌گشاد می‌باشد که طبق پروانه بهره‌برداری در فصول مختلف سال فعال می‌باشند. تراکم چاه‌های منطقه بیشتر در شمال و قسمتی از میانه دشت می‌باشد. اغلب چاه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه دارای کاربری کشاورزی هستند، بنابراین نقش مهمی در تأمین آب موردنیاز کشاورزی دارند. همچنین با استفاده از بیلان حجمی دشت میان آب شوشتر

میان آب نشان داد که عدم برداشت از آب زیرزمینی علی‌رغم اینکه حدود دوسوم از تولید آب مازاد مصرفی جلوگیری می‌کند، باعث افزایش تراز سطح ایستابی آبخوان در مناطقی می‌شود که تراکم چاه‌های بهره‌برداری بالا است. همان‌طور که ذکر شد، تراکم چاه‌های منطقه بیشتر در شمال و میانه دشت می‌باشد که عدم بهره‌برداری از آب زیرزمینی، باعث بالا آمدگی شدید آب زیرزمینی می‌شود.

برداشت آب زیرزمینی توسط چاه‌ها، می‌توان برای جلوگیری از ایجاد حجم زیادی از آب مازاد مصرفی، برداشت از آب زیرزمینی را متوقف کرد. شرایط این سناریو در مدل عددی دشت میان آب شوشتر شبیه‌سازی و پیش‌بینی شد که وضعیت تراز سطح ایستابی آبخوان در شکل (۷-الف) و (۷-ب) به ترتیب در شرایط قبل و بعد از کاهش پمپاژ چاه‌های آب نشان داده شده است. با توجه به هدف این سناریوی مدیریتی که جلوگیری از مقدار زیادی از ایجاد آب مازاد بر نیاز می‌باشد، مدل عددی دشت



شکل ۷- وضعیت تراز سطح ایستابی آبخوان در شرایط (الف) قبل و (ب) بعد از کاهش پمپاژ چاه‌های آب زیرزمینی.

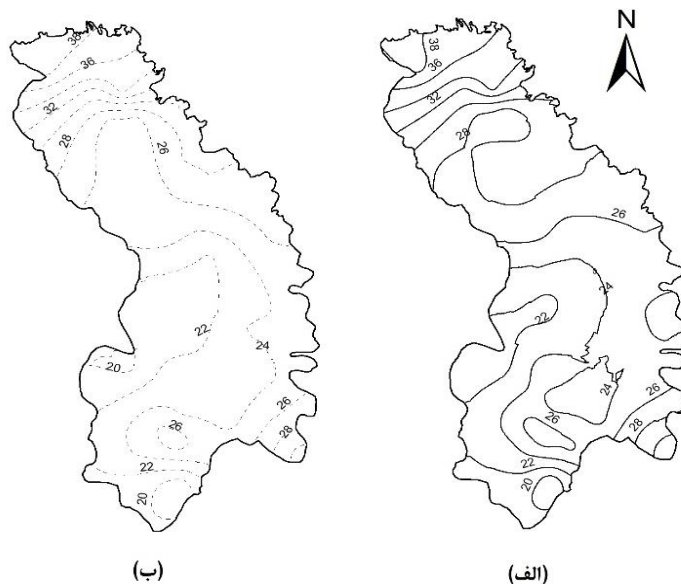
در قسمت‌های قبل با توجه به نیاز آبی واقعی گیاهان و همچنین سطح زیر کشت هر محصول کشاورزی در دشت میان آب شوشتر، مشخص شد که ۱۴۸/۱۸ میلیون مترمکعب در سال آب مازاد مصرف می‌شود. همچنین اشاره شد که منابع آب زیرزمینی (از طریق پمپاژ چاه) و همچنین منابع آب سطحی (شبکه آبیاری) تأمین‌کننده مقدار آب مورد نیاز جهت مصارف کشاورزی می‌باشد و آب مازاد مصرفی نتیجه‌ی برداشت بیش از حد نیاز از منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌باشد. یکی از بهترین راه‌های کاهش و مدیریت مصرف آب مازاد موجود در منطقه، بهره‌برداری بهینه از منابع آب سطحی و زیرزمینی به صورت تلفیقی می‌باشد. بدین ترتیب که مقداری از مصرف آب زیرزمینی جهت جلوگیری از افت و ایجاد فشار بر آبخوان کاهش یابد که این امر با توجه به

سناریو سوم: مدیریت مصرف آب مازاد کشاورزی از منابع آب سطحی و زیرزمینی به صورت تلفیقی

یکی از جنبه‌های مدیریت جامع منابع آب، بحث بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی است. از مزایای بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌توان به جلوگیری از سرمایه‌گذاری اضافی در منابع آب سطحی مانند طراحی سیستم انتقال آب با ظرفیت بیش از حد بهینه همچنین جلوگیری از فشار بیش از حد به منابع آب زیرزمینی اشاره کرد (شمسایی و فرقانی، ۱۳۹۰). از مدل‌ها می‌توان به عنوان ابزار مدیریتی جهت استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی جهت تبیین استراتژی‌های راهبردی در سیستم آبی بهره برد زیرا به‌خوبی اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی را نشان می‌دهند.

انتقال آب مازاد، ابتدا ۳۵ درصد از مقدار پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری موجود در منطقه کاهش داده شد. بدین ترتیب ضمن اینکه حدود ۳۳ میلیون مترمکعب از حجم آب مازاد مصرفی کسر می‌شود، از ایجاد افت بیش‌ازحد به‌خصوص در مناطقی که تراکم چاه‌های بهره‌برداری بالاست جلوگیری می‌شود. در گام بعدی جهت مدیریت حجم آب باقی‌مانده از آب مازاد مصرفی، تصمیم گرفته شد که ۱۵ درصد از حجم آب کانال‌های آبیاری و زهکشی (۶۰ میلیون مترمکعب) در شمال دشت باهدف پایدار ماندن وضعیت هیدرودینامیک آبخوان توسط تکمیل و توسعه شبکه آبیاری به قسمت‌های جنوبی دشت انتقال داده شود. بدین‌صورت علاوه بر جلوگیری از مصرف مقدار زیادی از آب مازاد بر نیاز در قسمت‌های شمالی و میانی منطقه، آب موردنیاز قسمت‌های جنوبی دشت جهت کشاورزی نیز با حفظ نسبی وضعیت هیدرودینامیک آبخوان تأمین می‌شود. شکل‌های (۸-الف) و (۸-ب) وضعیت تراز سطح ایستابی آبخوان را به‌ترتیب در شرایط قبل و بعد از کاهش پمپاژ و انتقال آب به قسمت‌های جنوبی دشت را نشان می‌دهند.

منفی بودن بیلان حجمی سیستم آبخوان منطقه مورد مطالعه امری ضروری به‌نظر می‌رسد. همچنین پیش‌تر اشاره شد که قسمت‌های جنوبی دشت میان آب به‌دلیل عدم توسعه شبکه آبیاری و زهکشی و عدم استفاده از منابع آب زیرزمینی به‌دلیل شوری بالا، کشت محصولات کشاورزی به‌صورت دیم انجام می‌شود. در این حالت می‌توان آب مازاد بر نیاز از کانال‌های آبیاری به مناطقی انتقال یابد که فاقد دسترسی به منابع مناسب آب سطحی و زیرزمینی هستند. یکی از مباحث مهم در مدیریت تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی، تعیین سهم هریک از منابع در تأمین مصارف آبی است که عوامل متعددی نظیر پایداری وضعیت هیدرودینامیک آبخوان، شرایط هیدرولوژیک و هیدروژئولوژیک، نسبت‌های سود در مقابل هزینه‌ها در برنامه‌ریزی‌های خطی و پویا، قیمت تمام‌شده آب در منابع آب سطحی و زیرزمینی و ... بستگی دارد. در منطقه مورد مطالعه جهت مدیریت منابع آب زیرزمینی و سطحی با توجه به شرایط هیدرولوژیک و هیدروژئولوژیک منطقه، باهدف تلاش برای پایدار باقی ماندن وضعیت هیدرودینامیک آبخوان در صورت حذف و



شکل ۸- وضعیت تراز سطح ایستابی به ترتیب در شرایط قبل (الف) و بعد از کاهش پمپاژ و انتقال آب مازاد به جنوب دشت (ب)

بحث و نتایج

در حال حاضر اراضی شمالی و میانی دشت را تحت پوشش قرار می‌دهد و در جنوب منطقه به دلیل عدم توسعه شبکه در این اراضی و همچنین عدم بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی به دلیل شوری بالا کشاورزی به صورت دیم انجام می‌شود. در سناریوی اول تصمیم گرفته شد که جهت مدیریت مصرف آب مازاد محاسبه شده و جلوگیری از انتقال آب بیش از حد نیاز کشاورز به قسمت‌های شمالی و میانی منطقه، تمام حجم آب مازاد مصرفی از طریق کانال‌های درجه ۱ و ۲ به قسمت‌های جنوبی انتقال داده شود همچنین جهت تکمیل و توسعه شبکه آبیاری با توجه به فاصله میان کانال‌های درجه ۱ و ۲ در قسمت‌های شمالی و میانی دشت، اراضی تحت پوشش کانال‌ها در قسمت جنوب دشت تخمین زده شد که شکل (۵) نشان می‌دهد اراضی جنوبی در صورت توسعه شبکه به خوبی تحت پوشش قرار می‌گیرند. با توجه به وضعیت تراز سطح ایستابی نشان داده شده توسط مدل در شرایط قبل و بعد از انتقال آب به قسمت‌های جنوبی، در صورت انتقال تمام حجم آب مازاد به قسمت‌های جنوبی علی‌رغم تأمین آب مورد نیاز این مناطق، در قسمت‌های شمالی آبخوان به دلیل کاهش تغذیه آبخوان توسط آب برگشتی کانال‌های آبیاری و همچنین وجود پمپاژ زیاد در آبخوان افت ایجاد شده که باعث کاهش تراز سطح ایستابی در این مناطق می‌شود. همچنین خطوط تراز در شکل (۶-الف و ۶-ب) نیز نشان می‌دهند که تغییرات گرادیان هیدرولیکی در شمال دشت در فواصل مساوی بعد از اجرای سناریوی اول شدیدتر شده و در فاصله کمتر شاهد افت بیشتر هستیم، در جنوب منطقه نیز به دلیل انتقال آب مازاد و افزایش تغذیه آبخوان از طریق آب برگشتی شاهد بالا آمدگی خواهیم بود.

در سناریو دوم تصمیم گرفته شد که جهت جلوگیری از مصرف آب مازاد بر نیاز، تمام حجم آب مازاد محاسبه شده از طریق کاهش پمپاژ چاه‌های آب زیرزمینی جبران شده و از طریق کاهش نرخ پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری دشت میان آب از ایجاد آب مازاد بر نیاز جلوگیری کرد. این سناریو به لحاظ نظری باعث جلوگیری از افت در آبخوان می‌شود و همچنین جهت مدیریت آب مازاد مصرفی، نیازی به ایجاد هزینه برای تکمیل و توسعه

در جدول (۱) نیاز آبی گیاهان کشت شده در دشت میان آب شوشتر محاسبه شده است که بر اساس آن، نیاز خالص آبیاری دشت میان آب با توجه به کشت انواع محصولات و سطح زیر کشت محصولات مذکور برابر با $278/89$ میلیون مترمکعب در طول دوره رشد گیاه و سال آبی می‌باشد. پس از محاسبه و اطلاع از میزان نیاز آبی گیاهان کشت شده در منطقه مورد مطالعه، گام بعدی اطلاع از میزان آب مصرفی از منابع آب زیرزمینی و سطحی با استفاده از بیلان آبی منطقه می‌باشد. بر اساس اطلاعات و آمار ایستگاه سینوپتیک سازمان هواشناسی استان خوزستان در شهرستان شوشتر و با توجه به جنس، بافت، نفوذپذیری و نوع خاک منطقه مورد مطالعه، در سال آبی ۹۵-۹۶ آبخوان به میزان $22/52$ میلیون مترمکعب از طریق بارندگی تغذیه شده است. با توجه به بیلان محاسبه شده در جدول (۲) و میزان تغذیه آبخوان از طریق بارندگی، مشاهده می‌شود که آبخوان به مقدار $67/68$ میلیون مترمکعب در سال از طریق آب برگشتی شبکه آبیاری زهکشی تغذیه شده است. طبق آمار اخذ شده از سازمان آب و برق خوزستان، حجم آب ورودی کانال‌های شبکه آبیاری و زهکشی منطقه مورد مطالعه برابر $40/51$ میلیون مترمکعب در سال آبی ۹۵-۹۶ بوده است. با احتساب آب برگشتی کانال‌های آبیاری به آبخوان، میزان آب مصرف شده از شبکه آبیاری و زهکشی جهت مصارف کشاورزی $332/83$ میلیون مترمکعب بوده است همچنین بیلان حجمی مدل دشت میان آب شوشتر نشان می‌دهد که با احتساب آب برگشتی ناشی از آبیاری اراضی کشاورزی از طریق چاه و با توجه به ضریب نفوذ خاک منطقه، $94/24$ میلیون مترمکعب در سال آب از چاه‌های پمپاژ منطقه که غالباً کاربری کشاورزی دارند استخراج می‌شود. بنابراین مجموعاً $427/07$ میلیون مترمکعب آب از طریق شبکه آبیاری و چاه‌های پمپاژ صرف کشاورزی شده است که مقدار $148/18$ میلیون مترمکعب از آن به صورت مازاد مصرف می‌شود و جهت مدیریت منابع و مصارف دشت، با استفاده از مدل عددی صحت‌سنجی شده اثر اعمال سناریوهای مدیریتی برای آبخوان پیش‌بینی گردید همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، شبکه آبیاری و زهکشی داریون

شبکه آبیاری دشت مورد مطالعه جهت انتقال آب به قسمت‌های جنوبی نیست. بدین ترتیب مقدار ۹۴/۲۴ میلیون مترمکعب معادل حدود دوسوم حجم آب مازاد مصرفی از پمپاژ سالیانه چاه‌های بهره‌برداری آب زیرزمینی دشت میان آب کسر شد. سناریو سوم باهدف استفاده از بهره‌برداری تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی، در نظر گرفتن اندرکنش این منابع با یکدیگر و همچنین جلوگیری از آسیب به هر دو منبع در مدل طراحی و اجرا شد. بنابراین در سناریو سوم تصمیم گرفته شد جهت جلوگیری از مشکلات ایجادشده در سناریوهای اول و دوم مدیریت تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی برای کنترل آب مازاد مصرفی صورت گیرد. یکی از مسائل مهم در مدیریت و بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب، سهم هرکدام از منابع آب زیرزمینی و سطحی در تأمین مصارف آبی منطقه می‌باشد. در این سناریو جهت جلوگیری از پیامدهای سناریوهای اول و دوم، پایداری نسبی سیستم هیدرودینامیک آبخوان در صورت کاهش پمپاژ و انتقال آب به اراضی جنوبی مدنظر بود. بنابراین در این سناریو مدیریتی جهت جبران بخشی از آب مازاد بر نیاز ۳۵ درصد از نرخ پمپاژ چاه‌های آب زیرزمینی کسر شد، بدین ترتیب ضمن این که مقدار ۳۳ میلیون مترمکعب از آب مازاد مصرفی جبران شد، هم از ایجاد بالاآمدگی آب زیرزمینی در قسمت‌های شمالی و میانی دشت جلوگیری شد و هم وضعیت هیدرودینامیک آبخوان در حالت انتقال آب کانال‌های آبیاری و کاهش تغذیه آبخوان از طریق آب برگشتی کانال‌ها به‌طور نسبی پایدار خواهد بود. مدل عددی دشت میان آب نشان داد که در صورت انتقال ۱۵ درصد از حجم آب تخصیصی کانال‌های بالادست معادل ۶۰ میلیون مترمکعب به اراضی جنوبی، حین تأمین دوسوم نیاز آبی اراضی جنوبی شدت بالاآمدگی آب زیرزمینی بسیار کمتر از زمانی است که تمام حجم آب مازاد به اراضی جنوبی انتقال داده شود. از طرفی حجم زیادی از آب مازاد مصرفی نیز مدیریت می‌شود.

نتیجه‌گیری

بر اساس نیاز آبی گیاهان کشت‌شده در دشت میان آب شوشتر، نیاز خالص آبیاری دشت میان آب با توجه به کشت انواع

محصولات همچنین سطح زیر کشت محصولات مذکور برابر با ۲۷۸/۸۹ میلیون مترمکعب در طول دوره رشد گیاه و سال آبی می‌باشد. طبق جدول بیلان حجمی، میزان مصرف آب به‌منظور کشاورزی در دشت مورد مطالعه برابر با ۴۲۷/۰۷ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد. بنابراین مقدار ۱۴۸/۱۸ میلیون مترمکعب آب به‌صورت مازاد مصرف می‌شود. نیاز آبی منطقه مورد مطالعه در بخش کشاورزی از طریق آب کانال‌های شبکه آبیاری همچنین برداشت از منابع آب زیرزمینی توسط چاه‌های بهره‌برداری تأمین می‌شود.

مدل عددی دشت میان آب نشان داد که در سناریو اول در صورت انتقال تمام حجم آب مازاد مصرفی به قسمت‌های جنوبی دشت، شاهد بالاآمدگی آب‌های زیرزمینی نیز خواهیم بود که این مسئله مشکلات مختص به خود را در پی خواهد داشت. اجرای سناریو دوم در مدل نشان داد که علی‌رغم مدیریت و جلوگیری از حجم زیادی از آب مازاد مصرفی، به‌دلیل کاهش نرخ پمپاژ چاه‌ها و تراکم چاه‌های بهره‌برداری در قسمت‌های شمالی و میانی منطقه بالاآمدگی سطح آب زیرزمینی را در پی خواهیم داشت که ممکن است باعث ایجاد اراضی تالابی، خسارت به زمین‌های کشاورزی و همچنین کاهش کیفیت آب زیرزمینی به دلیل بالاآمدگی آب زیرزمینی شود همچنین به دلیل عدم انتقال آب اراضی جنوبی منطقه از دسترسی به منابع آب سطحی مناسب محروم خواهند بود و به‌دلیل عدم امکان استفاده از آب‌های زیرزمینی به‌دلیل شوری بالا، نمی‌توان از حداکثر پتانسیل جنوب منطقه جهت کشاورزی استفاده کرد. همچنین به لحاظ عملی نیز امکان عدم برداشت آب از آبخوان به‌طور کامل وجود ندارد.

در سناریوهای اول و دوم جهت جبران و مدیریت آب مازاد مصرفی فقط بر منابع آب سطحی یا زیرزمینی تمرکز شد که هر کدام حاوی پیامدها و مشکلاتی برای آبخوان بودند. با توجه به مسائل بررسی‌شده در سه سناریو مدیریتی که برای مدیریت آب مازاد بر نیاز مصرفی مطرح شد، در سناریو سوم آبخوان از نظر هیدرودینامیکی در شرایط پایداری نسبت به سناریوهای اول و دوم به سر می‌برد و همچنین نسبت به دو سناریو دیگر پیامدهای

صمدی بهرامی، ر.، کرمی، و.، زاده دلیر، ح.، ۱۳۸۵. ارائه مدل مدیریت تقاضای آب در شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دومین کنفرانس مدیریت منابع آب، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

علیزاده، ا.، ۱۳۸۹. اصول هیدروژئولوژی کاربردی. چاپ بیست و هشتم. انتشارات آستان قدس رضوی. ۹۴۲ ص.

کرد، م.، اصغری مقدم، ا.، نخعی، م.، ۱۳۹۸. مدل‌سازی عددی آبخوان دشت اردبیل و مدیریت آن با استفاده از بهینه‌سازی برداشت آب زیرزمینی، مجله هیدروژئولوژی، دوره ۴، شماره ۱، ۱۵۳-۱۶۷.

محمدی، ا.، فرازمنش، س.، حزباوی، ف.، ۱۳۹۵. برآورد آب سبز و آب آبی گیاهان زراعی دشت دزفول، همایش ملی الکترونیکی پدافند غیرعامل در بخش کشاورزی، همایش ملی الکترونیکی پدافند غیر عامل در بخش کشاورزی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین.

Anderson, M.P., Woessner, W.W., Hunt, R.J., 2015. Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. Second edition, Academic press, 381 p.

Clarke, R.T., 1973. Mathematical Models in Hydrology, Irrigation and Drainage, Paper 19, FAO, Rome.

Doorenbos, J., Pruitt, W.O., 1996. Crop water requirements, Paper 24, FAO, Rome

Doorenbos, J., W.O. Pruitt., 1977. Crop water requirements. Irrig. and Drainage, Paper No. 24, (rev.) Rome, Italy: FAO.

Kresic, N., Mikszewski, A., 2014. Hydrogeological conceptual site models: data analysis and visualization, 72, 623-623.

Wang, H.F., Anderson, M.P., 1982. Introduction to Groundwater Modeling; Finite Difference and Finite Element methods, W.H. Freeman and Company, San Diego, 237 p.

کمتری برای منطقه مورد مطالعه خواهد داشت. بنابراین با توجه به وضعیت هیدروژئولوژیک و هیدرودینامیک آبخوان، سناریو سوم جهت مدیریت آب مازاد مصرفی مطلوب‌تر می‌باشد.

منابع

چیت‌سازان، م.، کشکولی، ح.ع.، ۱۳۸۱. مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی و حل مسائل هیدروژئولوژی، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز. ۷۰۲ ص.

چیت‌سازان، م.، موسوی، ف.، ۱۳۹۱. مدیریت کمی و کیفی آبخوان دشت رامهرمز با استفاده از مدل ریاضی در MODFLOW و MD3DMS. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۵، ۸-۱.

حیدری دهنوی، س.، ۱۳۹۴. بررسی مطالعات توسعه شبکه آبیاری و زهکشی داریون در بحث ماندگاری و جلوگیری از مهاجرت‌ها در روستاهای بخش میان آب شوشتر، اولین همایش مدیریت تقاضا و بهره‌وری مصرف آب، همدان.

رضایی، س.، جوادی، س.، کاردان مقدم، ح.، ۱۳۹۹. ارزیابی راهکارهای مدیریت منابع آب زیرزمینی با استفاده از رویکرد اجزای محدود در شبیه‌سازی عددی. هیدروژئولوژی، دوره ۵، شماره ۲، ۳۲-۴۲.

سپه‌وند، م.، ۱۳۸۸. مقایسه نیاز آبی بهره‌وری آب و بهره‌وری اقتصادی آن در گندم و کلزا در غرب کشور در سال‌های پرباران. پژوهش آب ایران، جلد ۴، ۶۳-۶۸.

شرقی، ط.، بری ابرقویی، ح.، اسدی، م.، کوثری، م.، ۱۳۸۹. برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش فائو-پنمن-مانتیت و پهنه‌بندی آن در استان یزد، فصلنامه علمی-پژوهشی خشک بوم، سال ۱، شماره ۱، ۲۵-۳۳.

شمسایی، ا.، قربانی، ع.، ۱۳۹۰. بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در مناطق خشک. تحقیقات منابع آب ایران، شماره ۲، ۲۶-۳۶.

صارمی، م.، فرهادی، ب.، ملکی، ع.، فراستی، م.، ۱۳۹۴. تعیین ضرایب گیاهی و نیاز آبی عدس به روش بیلان آبی (مطالعه موردی: خرم‌آباد)، نشریه پژوهش‌های حبوبات ایران، جلد ۶، شماره ۲، ۸۷-۹۷.