مقدمه

در حال حاضر برای تامین امنیت مواد غذایی بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف کننده منابع آب تجدیدپذیر کشور می‌باشد (شهرستانی، ۱۳۹۳) و به نظر می‌رسد، در آینده‌ای نزدیک و با افزایش جمعیت و همچنین شتاب گرفتن چرخ‌های صنعت کشور، رقابت سختی‌بین بخش‌های مصرف‌کننده آب شامل شرب، صنعت، محیط‌زیست و کشاورزی به وجود آید. در چنین شرایطی راه حل بحران آب را در چگونگی توسعه و مدیریت صحیح منابع آبی باید جستجو کرد. در این راستا راهکارهای زیادی ارائه شده‌اند که معمولا به دلیل پیچیدگی‌ها و تعدد عوامل موثر، تبعات و عواقب هر کدام از این راهکارها یا در نظر گرفته نمی‌شود و یا پیش‌بینی‌های نادرستی از آن‌ها بیان می‌گردد. به همین دلیل استفاده از روش‌های مدل‌سازی قوی برای مطالعه و شناخت حلقه‌های بازخورد موجود در سیستم‌های منابع آب ضروری است. مدل‌های شبیه‌سازی بسیاری برای توسعه یک مدل منابع آب وجود دارند اما انتخاب مدل بستگی به هدف بررسی و نقاط قوت آن مدل دارد. در میان این مدل‌ها، سیستم پویایی با شفافیت و وضوح به بررسی بازخوردهای حلقه‌های متغیرهای گوناگون می‌پردازد، بطوریکه به سادگی قابل استفاده برای افراد غیرمتخصص نیز می‌باشد (Kelly et al., 2008).

Simonovic and Rajasekaram (2004) مدل مدیریت جامع منابع آب کانادا را با استفاده از دیدگاه مدل‌سازی پویایی سیستم توسعه دادند. آن‌ها ۱۲ سناریو را بر اساس هفت متغیر جمعیت، توسعه کشاورزی، تولید غذا، سرمایه‌گذاری، تولید برق، استفاده از منابع تجدید ناپذیر و آلودگی مورد ارزیابی قرار دادند و بیان داشتند، نتایج حاصله بسیار وابسته به پیشرفت‌های کشور کانادا، مسائل زیست‌محیطی پیش روی منابع آب و همچنین کنترل مصارف آب در آینده دارد. Elmahdi et al. (2007) در مطالعه‌ای از روش مدل‌سازی پویایی سیستم‌ها برای ترکیب نمودن قیود بیشمار سیستم‌های آبیاری جهت بهبود کارآیی تخصیص آب استفاده نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد، روش پویایی سیستم‌ها دارای مزایای معناداری در تخمین و ارزیابی استراتژی‌های مختلف مدیریت آب در طی زمان و مکان است. شبیه‌سازی پویا در جنوب فلوریدا باعث درک ارتباطات درونی بین دسترسی به آب و افزایش رقابت تقاضای آب در بخش‌های مصرفی شهری، کشاورزی و محیط زیست گردید (Ahmad and Prashar., 2010). در حوضه رودخانه مناس چین یک مدل پویایی سیستم برای دستیابی به روابط و بازخوردهای بین آب موجود و افزایش تقاضای آب به دلیل رشد جمعیت و صنعت در راستای رسیدن به تصمیمات و سیاست‌های مدیریتی کارا تهیه و تدوین شد. شبیه‌سازی با استفاده از این مدل نشان داد، راهکارهای فنی در جهت افزایش راندمان آب و دسترسی به آب نمی‌توانند در این حوضه مفید باشند و حوضه گرم و خشک مناس نیاز به سیاست‌گذاری‌های متفاوتی دارد (Dai et al., 2013). نتایج مدل پویای مدیریت پایدار منابع آب در حوضه رودخانه ولتا واقع در کشور غنا نشان داد، توسعه زیرساخت‌های ذخیره، توزیع و انتقال آب در صورت عدم مدیریت صحیح می‌تواند منجر به افزایش مصرف آب و ناپایداری منابع آب این حوضه گردد (Kotir et al., 2016). مدل یکپارچه مدیریت منابع آب حوضه زاینده‌رود نشان داد، انتقال آب از حوضه‌های دیگر تنها راه حل کمبود آب حوضه زاینده‌رود نمی‌باشد، بلکه اعمال سیاست‌های مدیریت تقاضا همراه با انتقال بین حوضه‌ای و جلوگیری از برداشت‌های غیرمجاز از منابع آب زیرزمینی می‌تواند راهگشای مشکل باشد (Madani and Mariño., 2009). نتایج مدل پویای شبکه آبیاری قزوین نشان داد، کم‌آبیاری و تغییر سیستم آبیاری از سیستم سطحی به سیستم تحت فشار بهره‌وری فیزیکی آب را در سطح مزرعه و شبکه افزایش می‌دهد اما اثر این دو راهکار بر روی بهره‌وری آب اقتصادی بسته به نوع محصول و شرایط اقتصادی متفاوت خواهد بود (نظری، ۱۳۹۲). بررسی مسأله توسعه پایدار در سیستم منابع آب حوضه اترک با استفاده از رویکرد پویایی سیستم‌ها نشان داد، در برنامه‌ریزی توسعه حوضه آبریز اترک، به دلیل عدم توجه به مکانیزم شکل‌دهنده رشد در حوضه، در درازمدت بهره‌وری منابع آب با کاهش مواجه شده است و این موضوع به‌منزله روند توسعه ناپایدار منطقه قابل تفسیر است (کوماسی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۲). ارزیابی یکپارچه منابع آب دشت مشهد و اقدامات و سیاست‌های اتخاذ شده در فرآیند برنامه‌های توسعه

اقتصادی کشور نشان داد، تغییر الگوی کشت می‌تواند به عنوان یک سیاست برتر، گامی اثربخش برای بهبود وضعیت منابع آب دشت مشهد باشد (حسینی و باقری، ۱۳۹۲). مدل پویای منابع آب در حوضه‌ی آبریز دریاچه ارومیه نشان داد، مدیران و مسئولان ذیربط در این حوضه باید برای جلوگیری از نابودی همیشگی این میراث ملّی به سرعت تصمیمات مهم کوتاه‌مدت و بلندمدت اتخاذ نمایند (۱لاری و همکاران، ۱۳۹۳). علیزاده و همکاران (۱۳۹۳) مدل یکپارچه منابع آب دشت ورامین را با استفاده از روش پویایی سیستم ارائه نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد، توسعه نامتوازن و بدون برنامه سیستم‌های آبیاری تحت فشار نه تنها باعث صرفه‌جویی در مصرف آب نشده بلکه منجر به تخریب آبخوان‌های آب زیرزمینی کشور نیز خواهد شد. حافظ پرست و همکاران (۱۳۹۴) مدیریت یکپارچه منابع آب حوضه ارس را بر اساس شاخص‌های پایداری اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی را در قالب رویکرد DPSIR و در سه سناریوی وضع موجود، خوشبینانه و بدبینانه بررسی کردند. نتایج آن‌ها بر اساس شاخص‌های بررسی شده نشان داد، افزایش راندمان آبیاری کمک شایانی به تعادل پایداری حوضه ارس می‌نماید.

با توجه به اینکه مطالعات صورت گرفته در زمینه مدیریت منابع آب در ایران معمولا در مقیاس کوچک بوده، لذا توسعه مدلی که بتوان از طریق آن جنبه‌های مختلف یک تصمیم یا سیاست را در سطح حوضه‌های آبریز وسیع مورد بررسی قرار داد، ضروری می‌باشد. در این مطالعه از روش تحلیل پویایی سیستم برای مدل‌سازی جهت مدیریت آب کشاورزی در سطح حوضه ارس بهره برده شد تا به کمک آن بتوان پیامدهای سیاست‌های توسعه و بهبود سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار و ارتقاء مدیریت سیستم‌های آبیاری سطحی را در این حوضه مورد ارزیابی قرار داد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز ارس با مساحت حدود چهار میلیون هکتار در تقسیم‌بندی کلی هیدرولوژی ایران بخشی از حوضه آبریز دریای خزر می‌باشد و تقریبا ۲/۴ درصد از مساحت کشور را شامل می‌شود. این حوضه در منتهی الیه شمال غرب کشور واقع شده است و از نظر اقلیمی عمدتا تحت تأثیر توده‌های هوای سرد قطبی و معتدل مدیترانه‌ای قرار می‌گیرد. متوسط ریزش در حوضه آبریز ارس بین سال‌های ۴۸-۱۳۴۷ تا ۹۵-۱۳۹۴ حدود ۲۸۵ میلی‌متر در سال می‌باشد (دفتر مطالعات پایه منابع آب ایران، ۱۳۹۵). حوضه آبریز ارس با وسعت ۱/۱۵ میلیون هکتار اراضی کشاورزی در مجموع از پتانسیل کشت مناسبی جهت کشت انواع محصولات زراعی و باغی برخوردار می‌باشد. از مجموع اراضی کشاورزی یاد شده حدود ۴۵۰ هزار هکتار تحت کشت آبی و ۷۰۰ هزار هکتار دیگر به صورت دیم کشت و کار می‌شود.

تعریف مسئله و سناریوهای مختلف

در حوضه ارس، حدود ۶۲ درصد از کل مزارع کشاورزی منطقه به شکل دیم‌زار کشت می‌گردد و سالانه بخش قابل توجهی از اراضی به شکل نکاشت رها می‌شود که یکی از دلایل عمده شرایط مذکور محدودیت کمی منابع آب در این حوضه می‌باشد. حدود ۶۶ درصد از آب مصرفی حوضه آبریز ارس از منابع آب‌های سطحی تأمین می‌گردد. بخش اعظمی از انتقال و توزیع آب از طریق انهار سنتی صورت می‌گیرد که با توجه به شرایط مالکیتی اراضی (خرده مالکی)، عبور این انهار از مسیرهای طولانی و پر پیچ و خم باعث افزایش تلفات و کاهش شدید راندمان آبیاری می‌گردد، در حالی که به دلیل نیاز آبی بالای محصولات، آب اراضی کشاورزی در این حوضه آبریز، به طور کامل تأمین نمی‌گردد (مطالعات بهنگام‌سازی طرح جامع آب کشور، ۱۳۹۲). بنابراین یکی از مهم‌ترین چالش‌های حوضه ارس بحث مدیریت و حفظ منابع آبی در آینده خواهد بود، هر چند که این حوضه جزء حوضه‌های با منابع آب نسبتاً مناسب در کشور می‌باشد.

برای جلوگیری از تشدید شرایط بحران آبی، مطمئناً نیاز به پیش‌بینی شرایط آینده حوضه از جنبه‌های گوناگون و شبیه‌سازی آثار و تبعات سناریوهای مختلف سیاست‌ها و راهکارهای مدیریتی می‌باشد. در این مطالعه جهت نیل به اهداف مذکور از مدل‌سازی پویایی سیستم بهره برده شد و برای بررسی شرایط آینده حوضه از جنبه‌های مختلف، اقدامات حفاظتی شامل توسعه و بهبود سامانه‌های آبیاری

تحت‌فشار و اصلاح مدیریت سیستم‌های آبیاری سطحی و همچنین تلفیق آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

در حال حاضر سطح اراضی دارای سیستم‌های آبیاری تحت‌فشار در حوضه ارس حدود ده درصد از کل اراضی آبی تحت کشت این حوضه می‌باشد و متوسط توسعه سالانه سطح آبیاری تحت‌فشار طی سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۴، حدود ۲۰۰۰ هکتار بوده است. متوسط راندمان کاربرد آب سیستم‌های آبیاری سطحی و تحت فشار در حوضه ارس بترتیب ۵۵ و ۶۷ درصد می‌باشد، در حالی که مقادیر پتانسیل آن بترتیب ۶۵، ۸۶ درصد می‌باشد (نحوی‌نیا، ۱۳۹۳). در حال حاضر اگر بتوان اقدام به اصلاح مدیریت سیستم‌های آبیاری سطحی و تحت فشار موجود بترتیب به میزان ۱۵۰۰۰ و ۱۵۰۰ هکتار در سال نمود می‌توان به دستیابی به بازدهی پتانسیل این سیستم‌ها در افق ۱۴۲۰ امیدوار بود. بنابراین اختلاف راندمان کاربرد آب تا میزان پتانسیل آن و همچنین تمرکز بیشتر سیاست‌های کشور بر توسعه آبیاری تحت فشار به همراه توجه حداقل به بحث ارتقای راندمان کاربرد آب در این سیستم‌ها نسبت به سیستم‌های آبیاری سطحی مبنای طراحی سناریوهای زیر قرار گرفت:

- سناریوهای توسعه و بهبود سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار: ۱-عدم توسعه و عدم بهبود مدیریت سیستم‌های آبیاری تحت‌فشار (شرایط موجود، PIS1) ۲-توسعه سیستم‌های آبیاری تحت فشار سالانه به میزان ۲۰۰۰ هکتار (متوسط توسعه سال‌های گذشته) و عدم بهبود مدیریت در این سیستم‌ها(PIS2) ۳-توسعه سیستم‌های آبیاری تحت فشار سالانه به میزان ۴۰۰۰ هکتار و عدم بهبود مدیریت این سیستم‌ها(PIS3) ۴-عدم توسعه سیستم‌های آبیاری تحت فشار و فقط بهبود مدیریت این سیستم‌ها (PIS4) ۵-توسعه سیستم‌های آبیاری تحت فشار سالانه به میزان ۲۰۰۰ هکتار و بهبود مدیریت این سیستم‌ها (PIS5) ۶-توسعه سیستم‌های آبیاری تحت فشار سالانه به میزان ۴۰۰۰ هکتار و بهبود مدیریت این سیستم‌ها (PIS6).

- سناریوهای اصلاح مدیریت سیستم‌های آبیاری سطحی: ۱- وضع موجود (SE1) ۲- اصلاح مدیریت آبیاری سطحی در اراضی آبی موجود سالانه به میزان ۷۵۰۰ هکتار (SE2) ۳- اصلاح مدیریت آبیاری سطحی در اراضی آبی موجود سالانه به میزان ۱۵۰۰۰ هکتار (SE3).

سناریوهای SE2 و SE3 بدین مفهوم هستند که این سناریوها در صورت تحقق می‌توانند تا افق ۱۴۲۰ متوسط راندمان کاربرد آب در سیستم‌های آبیاری سطحی حوضه ارس را بترتیب به ۶۰ و ۶۵ درصد ارتقا دهند.

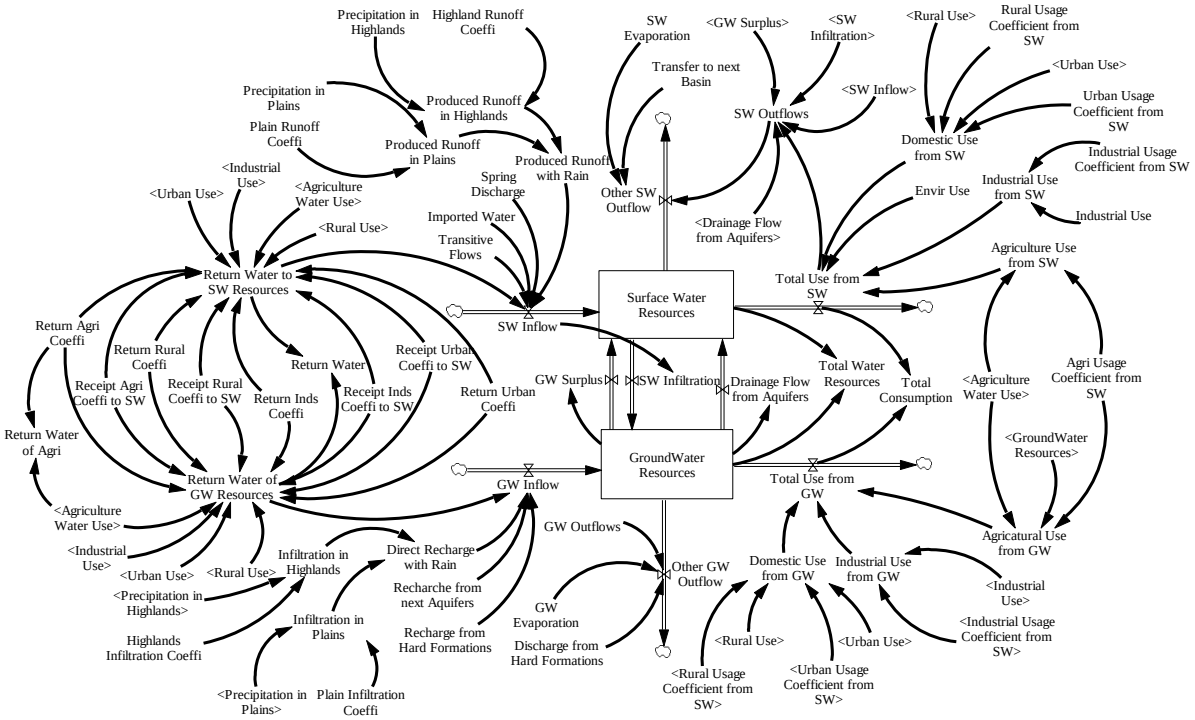
میزان ظرفیت توسعه سیستم‌های آبیاری تحت فشار برای حوضه ارس بالغ بر ۱۴۰ هزار هکتار گزارش شده است (دفتر سامانه‌های نوین آبیاری اخذ گردید). در سناریوهای با توسعه سالانه ۴۰۰۰ هکتار آبیاری تحت‌فشار می‌توان تا افق ۱۴۲۰ به سقف این ظرفیت رسید.

توسعه مدل

مدل مفهومی در قالب زیرمدل‌های منابع آب(آب‌های سطحی و زیرزمینی، آب‌های برگشتی حاصل از زهاب‌ها و پساب‌ها)، مصارف آب(کشاورزی، محیط زیست، صنعت و شرب)، فنی(سیستم‌های آبیاری تحت‌فشار، الگوی کشت، کم‌آبیاری، مدیریت آبیاری سطحی و ...)، اقتصادی (هزینه‌ها و درآمد حاصل از کشاورزی، هزینه ارتقای سیستم‌های آبیاری و...) و اجتماعی (جمعیت، کفایت غذا) تدوین شد. در ادامه اثرات مثبت و منفی متغیرهای کلیدی در قالب تعیین روابط علی معلولی و بازخوردها تعیین شد. سپس در محیط Vensim، ساختار حالت-جریان مدل ترسیم شد. ساختار حالت-جریان(Stock-Flow) زیرمدل منابع آب مذکور در شکل (۱) نمایش داده شده است. در مرحله بعد(شبیه‌سازی) روابط بین متغیرها (متغیرهای کلیدی و متغیرهای کمکی) و مقادیر متغیرها (متغیرهای ثابت) تعیین گردید.

در این مطالعه جهت تدوین مدل مورد نظر در مقیاس حوضه‌ای، واحد گام زمانی سالانه در نظر گرفته شد، زیرا اکثر اطلاعات مورد نیاز در سطح حوضه، با گام‌های زمانی کوچکتر از سال موجود نمی‌باشد. مدل توانایی شبیه‌سازی از سال آبی۷۴-۱۳۷۳ تا ۲۱-۱۴۲۰ را دارا می‌باشد و افق برنامه شبیه‌سازی ۲۶ ساله خواهد بود. شبیه‌سازی سال‌های قبل و بعد از سال ۹۵-۱۳۹۴ به ترتیب با هدف

واسنجی و اعتبارسنجی مدل و پیش‌بینی شرایط آینده می‌باشد.



شکل(۱): ساختار حالت-جریان(Stock-Flow) زیر مدل منابع آب

مدل قابلیت فراخوانی اطلاعات مربوط به جمعیت، اقلیم، بیلان آب (آبهای ورودی حاصل از بارندگی، رودخانه‌ها، بین حوضه‌ای و ...)، اطلاعات کشاورزی(سطح زیر کشت محصولات آبی و دیم، سطح اراضی آبی تحت‌فشار و سطحی و ...)، سرانه مصارف روستایی و شهری آب شرب، مصارف آب در صنعت، هزینه‌های کاشت، داشت و برداشت، هزینه‌های عملیات آبیاری و آب بهاء، هزینه اجرای آبیاری تحت‌فشار و ... را در سناریوهای مختلف دارا می‌باشد.

محصولات عمده و استراتژیک گندم، جو، چغندرقند، سیب‌زمینی، ذرت علوفه‌ای و یونجه به تفکیک دیم و آبی در مدل مورد بررسی قرار گرفتند و بقیه محصولات با عناوین سایر محصولات زراعی دیم و آبی، محصولات باغی دیم و آبی و محصولات گلخانه‌ای در نظر گرفته شد.

زیرمدل مصارف آب

مصارف آب کشاورزی از رابطه نسبی بین کاهش عملکرد و کمبود نسبی تبخیر و تعرق استفاده شد (Doorenbos and Kassam.,1979):

$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = K_y\left(1 - \frac{ET_a}{ET_m}\right) \quad (1)$$

در این رابطه، Y_a و Y_m به ترتیب متوسط و حداکثر عملکرد واقعی برداشت شده بر حسب تن در هکتار، K_y ضریب واکنش عملکرد به آب (بدون بعد)، ET_a و ET_m به ترتیب تبخیر-تعرق واقعی و حداکثر بر حسب میلیمتر می‌باشد. متوسط عملکرد و حداکثر عملکرد واقعی برداشت شده از اطلاعات آماری وزارت جهاد کشاورزی و مقادیر K_y از نشریه شماره ۳۳ فائو استخراج گردید. با استفاده از روش میانگین‌گیری وزنی بر اساس مساحت هر کدام از دشت‌های واقع در حوضه ارس و میزان تبخیر-تعرق‌های ارائه شده در سند ملی، تبخیر-تعرق حداکثر در این حوضه برآورد شد. در ادامه میزان ET_a هر محصول با استفاده از رابطه(۱) محاسبه شده و با لحاظ بارندگی مؤثر، مصرف خالص آبیاری برای هر محصول به دست آمد. سپس بر اساس متغیرهای الگوی کشت و راندمان آبیاری (راندمان کاربرد وابسته به نوع سیستم آبیاری، راندمان انتقال و توزیع وابسته به نوع منبع آب) میزان مصرف ناخالص آبیاری محاسبه شد.

جهت محاسبه بارندگی مؤثر از روش فائو استفاده شد(Dastane., 1974):

$$P_e = ۰.۶ \times P - ۱۰ \quad if\ P \leq ۷۰\ mm \qquad (۲)$$

$$P_e = ۰.۸ \times P - ۲۴ \quad if\ P > ۷۰\ mm \qquad (۳)$$

در این رابطه، P میزان بارندگی ماهانه بر حسب میلی‌متر می‌باشد. بارندگی مؤثر هر محصول بسته به فصل کشت محاسبه شد. تاریخ کشت محصولات مختلف از سند ملی آب استخراج شد. جهت محاسبه عملکرد محصولات دیم، از رابطه (۱) استفاده شد، بدین گونه که ET_a معادل بارندگی مؤثر در نظر گرفته شد.

راندمان کاربرد آبیاری با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$E_a = \frac{E_{a\,(SI)} \times A_{SI} + E_{a\,(PI)} \times A_{PI}}{A_{SI} + A_{PI}} \qquad (۴)$$

در این رابطه، E_a: راندمان کاربرد آبیاری در سطح حوضه (درصد)، $E_{a(SI)}$: متوسط راندمان آبیاری سطحی (درصد)، $E_{a(PI)}$: متوسط راندمان آبیاری تحت‌فشار (درصد)، A_{SI}: مساحت اراضی آبی با سیستم آبیاری سطحی (هکتار) و A_{PI}: مساحت اراضی آبی با سیستم آبیاری تحت‌فشار(هکتار) می‌باشند. متوسط راندمان کاربرد آبیاری سطحی و تحت‌فشار به ترتیب ۵۵ و ۶۷ در نظر گرفته شد (نحوی‌نیا، ۱۳۹۳). راندمان آبیاری تحت‌فشار از طریق میانگین وزنی بین راندمان آبیاری قطره‌ای و بارانی براساس مساحت‌های تحت پوشش هر کدام به دست آمد. در ادامه راندمان آبیاری بر اساس نوع منبع تأمین آب (سطحی یا زیرزمینی)، محاسبه گردید بدین گونه که اگر منبع آب زیرزمینی بود، راندمان انتقال و توزیع برابر ۰/۸۵ در نظر گرفته می‌شد و اگر منبع آب سطحی بود مقادیر راندمان انتقال و توزیع از آمار ارائه شده توسط شرکت مدیریت منابع آب ایران و پژوهش نحوی‌نیا (۱۳۹۳) اقتباس گردید.

پارامتر راندمان آبیاری، برای یک کشاورز و در سطح مزرعه دارای اهمیت و معنا است زیرا این شاخص مطابق با نگاه یک کشاورز در یک مزرعه، رواناب و نفوذ عمقی برگشتی به چرخه آب حوضه را نیز جز تلفات در نظر می‌گیرد. اما در نگاه کلان مدیریتی در سطح یک حوضه نباید زهاب‌های کشاورزی و پساب‌های شرب و صنعت را که بصورت رواناب و یا نفوذ عمقی مجدداً به چرخه منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی یک حوضه می‌پیوندد را تلفات محسوب نمود و بایستی مدیران و مسئولان ذیربط این بخش از منابع آب را نیز در ارائه سیاست‌ها و راهکارهای مدیریتی خود مد نظر قرار دهند. در این تحقیق علاوه بر راندمان آبیاری، راندمانی با نام راندمان حوضه تعریف گردید. راندمان آب حوضه در واقع آبهای برگشتی را به عنوان تلفات محسوب نمی‌نماید و به همین دلیل مقدار آن معمولاً از راندمان آبیاری بیشتر است. رابطه(۵) نحوه محاسبه راندمان حوضه(E_B) را نمایش می‌دهد:

$$E_B = \frac{E_I \times AWU + RAW}{AWU} \qquad (۵)$$

در این رابطه، E_I: راندمان آبیاری(درصد)، AWU: آب مصرفی در کشاورزی (میلیون متر مکعب) و RAW: آب برگشتی از مصارف کشاورزی (میلیون متر مکعب) می‌باشد. برای محاسبه آب برگشتی از بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب از اطلاعات طرح-های جامع مطالعاتی منابع آب استفاده شد. بدین‌گونه که با داشتن ضرایب پساب و زهاب تولیدی و همچنین ضریب دریافت آنها توسط منابع سطحی یا زیرزمینی، میزان آب برگشتی محاسبه گردید و وارد بیلان منابع آب حوضه گشت. بر اساس این مطالعات ضریب آب‌های برگشتی حاصل از مصارف کشاورزی در حوضه ارس ۱۶/۷ درصد است.

تقاضای آب شرب با استفاده از نرخ رشد جمعیت، جمعیت پایه، سرانه مصرف و کاهش سرانه مصرف به دلیل توسعه زیرساخت‌ها محاسبه شد. تقاضای بخش صنعت و محیط‌زیست از مطالعات بهنگام‌سازی طرح جامع کشور استخراج شد.

زیرمدل منابع آب

در زیرمدل منابع آب برای شبیه‌سازی تغییرات حجم آب زیرزمینی از معادله بقاء جرم استفاده شد:

$$Q_P + Q_{in} + Q_R + Q_I + Q_{sw} + Q_A - (Q_W + Q_d + Q_E + Q_{out}) = \Delta V \qquad (۶)$$

در این رابطه، Q_P: تغذیه از نفوذ بارش بر سطح حوضه، Q_{in}: جریان زیرزمینی ورودی از حوضه مجاور، Q_R: تغذیه از جریان‌های سطحی یا رودخانه‌ها، Q_I: تغذیه از آب‌های نفوذی کشاورزی، Q_{SW}: تغذیه از پساب آب مصرفی شرب و صنعت، Q_A: میزان تغذیه مصنوعی، Q_W: مصارف آب زیرزمینی (شامل مصارف کشاورزی، شرب و صنعت)، Q_d: جریان زهکشی به رودخانه، Q_E: تبخیر از آب زیرزمینی، Q_{out}: جریان زیرزمینی خروجی و ΔV: تغییر ذخیره آب زیرزمینی می‌باشد. و برای این منظور کلیه اطلاعات ورودی مورد نیاز در این رابطه از مطالعات بهنگام‌سازی طرح جامع آب کشور استخراج گردید. سری زمانی Q_P، Q_R، Q_I و Q_{SW}، با استفاده از متوسط ضرایب رواناب، نفوذ باران، نفوذ آب برگشتی و نفوذ رواناب و با داشتن میانگین بارندگی سالیانه و مساحت دشت‌ها و ارتفاعات موجود در حوضه محاسبه شد. بر اساس مطالعات بهنگام‌سازی طرح جامع آب کشور متوسط ضریب رواناب حوضه ارس در در دشت و ارتفاعات بترتیب ۵ و ۱۹ درصد و متوسط ضریب نفوذ آن در دشت و ارتفاعات بترتیب ۳/۶ و ۶/۸ درصد می‌باشد. برای Q_{out} ضریب ثابتی در نظر گرفته شده و از تغییرات این ضریب صرف نظر شد. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته میزان Q_A، Q_{in}و Q_E، در این حوضه ناچیز بوده و برابر صفر فرض شد.

در نهایت حجم دینامیک آب زیرزمینی از رابطه(۷) محاسبه گردید (علیزاده و همکاران، ۱۳۹۳):

$$V(t+dt) = V(t) + \Delta V(dt) \qquad (۷)$$

در این رابطه، V(t+dt): حجم آب زیرزمینی در زمان t+dt و V(t): حجم آب زیرزمینی در زمان t می‌باشد.

در زیرمدل آب سطحی رواناب حاصل از بارش به تفکیک دشت و ارتفاعات محاسبه گردید. سری زمانی آب‌های ورودی برون مرزی نیز از طرح جامع منابع آب اقتباس گردید. میزان تبخیر از سطح دریاچه‌ها بصورت ثابت و برابر متوسط ۴۰ ساله آن در نظر گرفته شد.

زیرمدل اقتصادی

در زیرمدل اقتصادی، هزینه‌های عملیات زراعی، آبیاری و آب بهاء و همچنین ارزش تولید محصولات مختلف بر اساس بانک اطلاعاتی هزینه و ارزش تولید محصولات زراعی وزارت جهاد کشاورزی برآورد گردید. در زیرسیستم اقتصادی هزینه‌های سالیانه سرمایه‌گذاری، استهلاک و بهره سرمایه با استفاده از سری یکنواخت سالیانه و نرخ بازگشت سرمایه به هزینه‌های یکنواخت سالیانه تبدیل شد. اثر تورم در سال‌های آینده بر اساس نرخ تورم سال ۱۳۹۴ محاسبه گردید که معادل ۱۱/۹ درصد می‌باشد.

برای محاسبه بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب از روابط (۸) و (۹) استفاده شد (Kijne et al.,2003):

$$WP_P = \frac{Y}{I+P_e} \qquad (۸)$$

$$WP_E = \frac{NB}{I+P_e} \qquad (۹)$$

در این رابطه‌ها، WP_P بهره‌وری فیزیکی بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، WP_E بهره‌وری اقتصادی آب بر حسب ریال بر متر مکعب، Yعملکرد محصول بر حسب کیلوگرم، NB درآمد خالص بر حسب ریال، I و P_e به ترتیب کل آب آبیاری و بارندگی مؤثر در طول فصل رشد بر حسب مترمکعب می‌باشند. کل آب آبیاری نیز با استفاده از رابطه‌های (۱) تا (۵) محاسبه شد.

فرضیات

در این تحقیق سعی شده تا از معتبرترین منابع آماری موجود در کشور بهره‌مند گردد اما در برخی موارد به دلیل محدودیت‌های آماری و پژوهشی کشور بالاجبار از یک منبع خاص بهره برده شد. برای مثال در مورد اطلاعات منابع و مصارف آب کشور تنها مرجع آماری کامل، طرح جامع منابع آب کشور بود که از آن بهره برده شد.

در سال‌های اخیر سیاست وزارت نیرو و وزارت جهاد کشاورزی صرفاً در راستای تامین آب اراضی موجود قرار گرفته و تلاش می‌شود از برنامه‌های توسعه سطح زیرکشت تا حد زیادی ممانعت به عمل آید. لذا بر اساس سیاست مذکور و همچنین با هدف ارزیابی بهتر سناریوها فرض گردید با صرفه‌جویی‌های حاصل از اجرای آبیاری تحت فشار و اصلاح مدیریت سیستم‌های آبیاری سطحی، اقدامی در راستای توسعه سطح زیرکشت صورت نپذیرد.

نسبت میزان توسعه آبیاری تحت‌فشار در اراضی با منبع آب سطحی و زیرزمینی، متناسب با نسبت برداشت آب از منابع سطحی و زیرزمینی در این حوضه در نظر گرفته شد.

فرض شد، توسعه آبیاری تحت فشار باعث افزایش ۳۰ درصدی تولید گردد (Phocaides.,20000).

برای بررسی بهتر سناریوهای مورد بررسی فرض شد، سایر شرایط از جمله راندمان انتقال و توزیع و الگوی کشت مشابه وضع موجود باقی بماند.

صحت‌سنجی مدل

صحت‌سنجی مدل از دو طریق آزمون ساختار غیرمستقیم(آزمون رفتار ساختارگرا) و صحت‌سنجی با اطلاعات مشاهده‌ای موجود انجام گرفت. آزمون‌های صحت‌سنجی ساختاری غیرمستقیم شامل اجرای تخصصی مدل بوده و می‌تواند عیب‌های مدل را غیرمستقیم مشخص نماید (Saysel and Barlas.,2006). همچنین جهت تعیین میزان پارامتر Ky در محصولات چغندرقند و یونجه که دارای دامنه تغییرات بین ۰/۷ تا ۱/۱ (Doorenbos and Kassam.,1979) بودند، اقدام به واسنجی به روش سعی و خطا گردید.

آزمون رفتار مدل به شرایط حدی یکی از ابتدایی‌ترین و در واقع پایه‌ای‌ترین آزمون‌های صحت‌سنجی مدل‌های پویا می‌باشد که در این مقاله از آن بهره برده شد.

در قسمت ارزیابی رفتار مدل در شبیه‌سازی، از شاخص‌های آماری ضریب تعیین چندگانه (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین درصد مطلق خطا(MAPE) و خطای میانگین (ME) استفاده شدند (Lulu et al.,2008 and Tofallis.,2015):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(\bar{P_i} - O_i)^2} \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (11)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)}{n} \quad (12)$$

$$MAPE = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{P_i - O_i}{O_i}\right| \quad (13)$$

در این رابطه‌ها، Oi مقادیر مشاهده(اندازه‌گیری) شده، Pi مقادیر پیش‌بینی (شبیه‌سازی) شده، $\bar{P_i}$ میانگین مقادیر پیش‌بینی (شبیه‌سازی) شده و n تعداد کل مشاهدات می‌باشد.

نتایج و بحث

نتایج صحت‌سنجی مدل

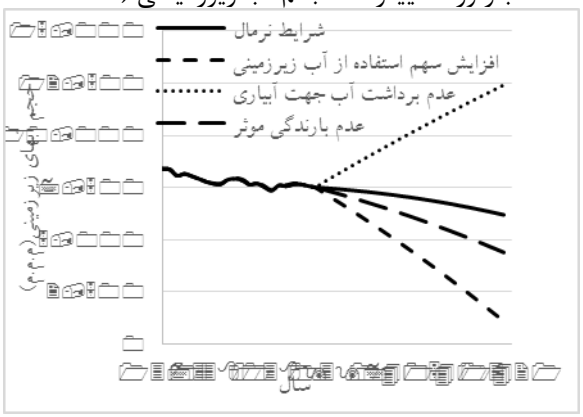
در نتیجه واسنجی، میزان Ky برای دو محصول چغندرقند و یونجه ۰/۹ تعیین شد. برای محصولات گندم، جو، سیب زمینی و ذرت علوفه‌ای Ky طبق گزارش فائو بترتیب برابر ۱، ۱، ۱/۱ و ۱/۲۵ در نظر گرفته شد.

رفتار متغیر مرجع حجم آب‌های زیرزمینی در حوضه ارس در شرایط حدی عدم برداشت آب جهت آبیاری از منابع آب زیرزمینی، عدم وجود بارندگی مؤثر و افزایش سهم استفاده از آب‌های زیرزمینی در کشاورزی در مقایسه با شرایط نرمال (وضع موجود) در شکل (۲) مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد، در شرایط عدم برداشت آب از منابع آب زیرزمینی جهت آبیاری، تغذیه آبخوان‌ها بیشتر از تخلیه آنها خواهد بود و وجود مصارف شرب و صنعت نمی‌تواند باعث کاهش حجم آب‌های زیرزمینی گردد. در شرایط حدی عدم وجود بارندگی مؤثر و با فرض عدم محدودیت تخصیص منابع آب، برای جلوگیری از کاهش عملکرد محصولات مختلف در وضع موجود، نیاز به افزایش برداشت آب خواهد بود، بنابراین در این شرایط حجم آب‌های زیرزمینی با شیب بیشتری نسبت به شرایط نرمال کاهش یافته به طوری که در افق ۱۴۲۰ تقریباً مقدار آن حدود ۴۴۰۰ میلیون مترمکعب خواهد شد. همچنین همانگونه که مشخص است، در صورتی‌که ۴۰ درصد آب مورد نیاز کشاورزی در حوضه ارس از آبهای زیرزمینی تأمین گردد، شیب کاهش ذخایر آب‌های زیرزمینی این حوضه افزایش می‌یابد. نتایج مذکور نشان‌دهنده رفتار صحیح و منطقی مدل بود.

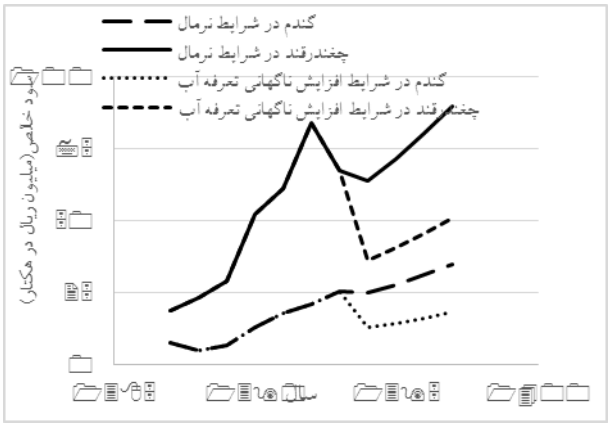
در شکل (۳) آزمون رفتار مدل در برآورد سود خالص دو محصول گندم و چغندرقند تحت شرایط افزایش ناگهانی تعرفه آب (ده برابر) در سال ۱۳۹۴ ارائه شده است. انتظار می‌رود با افزایش قابل ملاحظه و ناگهانی تعرفه آب از سال اعمال تغییر، سود خالص کشاورزان به علت افزایش هزینه‌های آبیاری به شدت کاسته شود. نتایج بیانگر صحت رفتار مدل در شرایط

حدی افزایش ناگهانی تعرفه آب می‌باشد بطوریکه در سال ۱۳۹۴ سود خالص حاصل از کشت گندم و چغندرقند به ترتیب حدود ۱۲ و ۲۷ میلیون ریال در هکتار کاسته می‌شود.

در بخش صحت‌سنجی با اطلاعات مشاهده‌ای (شکل ۴ و ۵)، نتایج نشان دهنده توانایی مدل در برآورد تغییرات حجم آب زیرزمینی (RMSE=74 MCM، ME=-17 MCM ، MAPE=1.52% و R^2=0.78) و عملکرد محصولات مورد بررسی از جمله عملکرد گندم دیم(RMSE=0.09 ton، ME=-0.01 ton، MAPE=9.4%و R^2=0.78) و عملکرد یونجه(RMSE=0.15 ton، ME=-0.06 ton، MAPE=6.8% و R^2=0.75) می‌باشد.

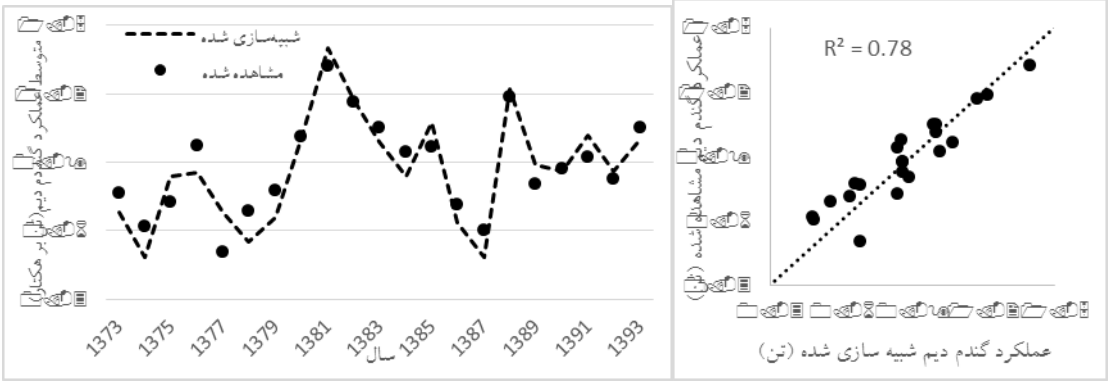


شکل(۲): حجم آب‌های زیرزمینی در شرایط حدی عدم برداشت آب جهت آبیاری، عدم بارندگی مؤثر و افزایش سهم تأمین استفاده از منابع آب زیرزمینی

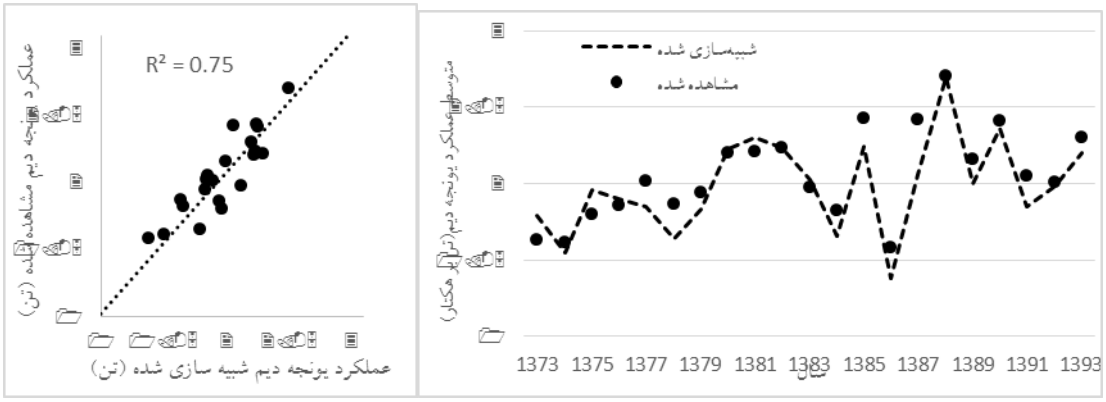


شکل(۳): سود خالص یک هکتار محصولات گندم و چغندرقند در شرایط افزایش ناگهانی تعرفه آب

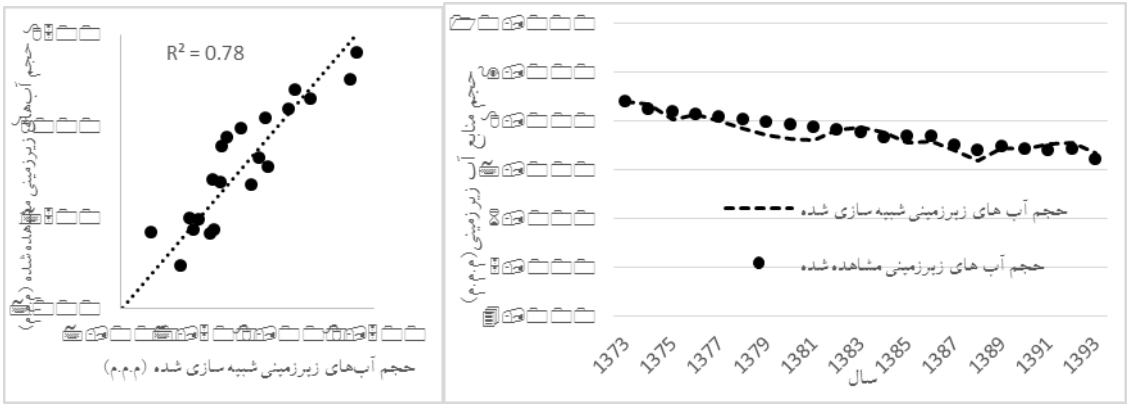
(الف)



(ب)



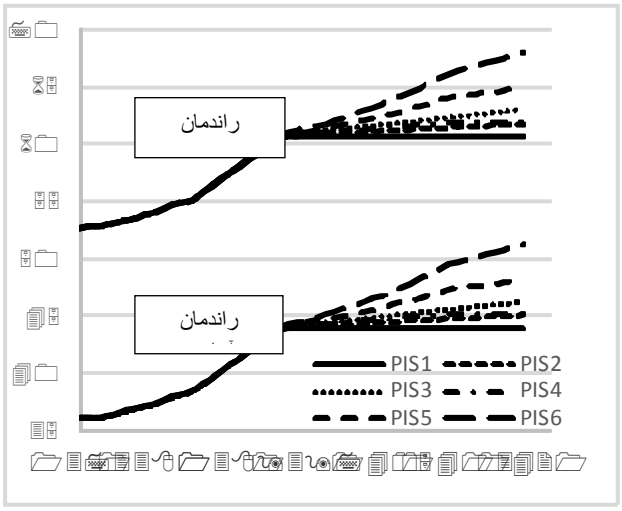
شکل(۴): مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده عملکرد گندم دیم(الف) و عملکرد یونجه دیم(ب)



شکل(۵): مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده حجم آب زیرزمینی

تحلیل توسعه و بهبود سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار

شکل (۶) به مقایسه راندمان کل آبیاری و راندمان حوضه در سناریوهای توسعه و بهبود سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار می‌پردازد. روند صعودی افزایش راندمان در سال‌های پیش از شبیه‌سازی در درجه اول به دلیل توسعه و بهبود شبکه‌های انتقال و توزیع آب و در درجه دوم به دلیل توسعه سیستم‌های آبیاری تحت‌فشار می‌باشد. راندمان آبیاری در سال شروع شبیه‌سازی ۹۵-۹۴ حدود ۴۴ درصد و راندمان حوضه برابر ۶۰/۵ درصد است که تا افق ۱۴۲۰ در سناریوی PIS1 ثابت مانده‌اند، زیرا فرض بر این بود که سایر متغیرها، همانند راندمان کاربرد آبیاری سطحی و راندمان انتقال و توزیع مشابه شرایط موجود باقی بمانند تا تاثیرات سناریوهای توسعه و بهبود آبیاری تحت‌فشار بهتر قابل بررسی باشد.



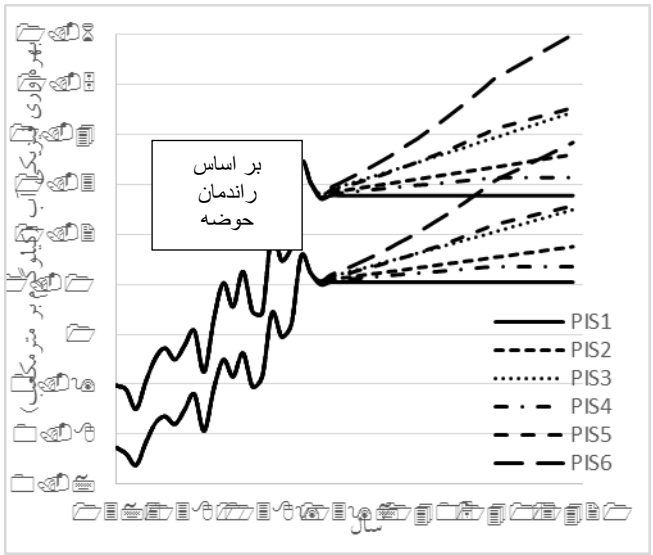
شکل(۶): راندمان‌های کل آبیاری و حوضه در سناریوهای توسعه و بهبود آبیاری تحت‌فشار

راندمان حوضه در مقایسه با راندمان آبیاری از مقادیر بالاتری در تمامی سناریوها برخوردار است، بطوریکه راندمان آبیاری در سناریوهای PIS2 تا PIS6 در افق ۱۴۲۰ بترتیب برابر ۴۵، ۴۶/۲، ۴۵/۱، ۴۸/۲ و ۵۱/۲ درصد و این ارقام برای راندمان حوضه برابر ۶۱/۷، ۶۲/۹، ۶۱/۸، ۶۴/۸، و ۶۷/۹ درصد بود. دلیل این امر، عدم احتساب آب‌های برگشتی به عنوان تلفات در راندمان حوضه می‌باشد. سناریوهای PIS2 و PIS3 در واقع بیانگر این مطلب هستند که اگر بدون توجه به بهبود راندمان کاربرد آب سامانه‌های تحت‌فشار، اقدام به توسعه این سامانه‌ها در حوضه ارس گردد، در طی ۲۶ سال شبیه‌سازی بترتیب فقط ۱/۳ و ۲/۵ درصد ارتقای راندمان حوضه ارس را می‌توان متصور بود. همچنین مقایسه بین سناریوی PIS2 و PIS4 نشان داد، ارتقای راندمان کاربرد آبیاری

تحت‌فشار نسبت به توسعه سالانه سطح آبیاری تحت‌فشار به میزان ۲۰۰۰ هکتار، تاثیرات مشابه در افزایش راندمان حوضه داشته است. بنابراین توسعه آبیاری تحت‌فشار بدون توجه به بهبود راندمان کاربرد آن از کارایی مناسبی برخوردار نخواهد بود و لازم است تا سناریوهای ترکیبی PIS5 و PIS6 برای آینده هدف‌گذاری شوند تا از طریق این دو سناریو بتوان در افق ۱۴۲۰ بترتیب افزایش حدود ۴/۵ و ۷/۵ درصدی را نسبت به راندمان حال حاضر حوضه ارس بدست آورد. در این راستا بایستی در توسعه آینده سامانه‌های آبیاری تحت فشار، دستگاه‌های نظارتی کنترل بهتر و دقیق‌تری بر مراحل طراحی، اجرا و بهره‌برداری انجام دهند تا از اجرای سیستم‌های با راندمان پایین که سبب تحمیل هزینه‌های اصلاحی می‌گردد، جلوگیری شود. همچنین می‌توان سیستم‌های آبیاری تحت فشار اجرا شده را با هزینه‌ای بالغ بر ۲۰ تا ۳۰ درصد سرمایه‌گذاری اولیه (بر اساس اطلاعات اخذ شده از دفتر سامانه‌های نوین آبیاری) بهبود بخشید..

در سناریوی PIS6 شیب صعودی روند افزایش راندمان حوضه تقریبا نزدیک به شیب سال‌های پیش از شبیه‌سازی می‌باشد، که این امر نشان می‌دهد اگر صرفا سیاست‌گذاران بخواهند با استفاده از توسعه و بهبود آبیاری تحت‌فشار روند صعود گذشته را حفظ کنند لازم خواهد بود تا سالانه ۴۰۰۰ هکتار توسعه به همراه بهبود راندمان کاربرد سیستم‌های آبیاری تحت‌فشار در برنامه‌ریزی‌های کلان مد نظر قرار دهند که با مدیریت کنونی ممکن به نظر نمی‌رسد. از دلایل پایین‌تر بودن راندمان کاربرد آبیاری تحت‌فشار نسبت به راندمان پتانسیل آن می‌توان به عدم مکان‌یابی صحیح طرح‌ها، عدم طراحی مناسب، انتخاب نامناسب سیستم آبیاری، استفاده از تجهیزات مغایر با مبانی طراحی، عدم توجه به ملاحظات بهره‌برداری و نگهداری و ... نام برد که می‌توان با سیاست‌گذاری و سرمایه‌گذاری صحیح در راستای بهبود راندمان کاربرد سیستم‌های آبیاری تحت‌فشار نتایج بهتری در کنار توسعه آن‌ها بدست آورد.

در شکل (۷) بهره‌وری آب حوضه بر اساس راندمان آبیاری و حوضه در سناریوهای توسعه و بهبود سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار مقایسه شده اند. نوسانات موجود در سال‌های پیش از شبیه‌سازی به دلیل وجود عملکردها و مصرف آب متفاوت محصولات کشاورزی در سال‌های مختلف بوده است. در حالی که به منظور شبیه‌سازی سال‌های آینده متوسط عملکرد محصولات در سال‌های گذشته لحاظ شد و به همین دلیل روند شبیه‌سازی شده بهره‌وری فیزیکی آب در سال‌های آینده به صورت نمودار خطی مشاهده می‌شود. طی سال‌های ۱۳۷۳ تا ۱۳۹۳ روند بهره‌وری فیزیکی صعودی بود و مقدار آن بر اساس راندمان حوضه و آبیاری بترتیب از ۰/۸۵ تا ۱/۳ و از ۰/۷۵ تا ۱/۱ تغییر نمود. این روند صعودی به دلیل توسعه سامانه‌های تحت‌فشار، ایجاد شبکه‌های آبیاری و زهکشی، تسطیح، بهبود عملکرد از طریق آموزش کشاورزان و... بوده است.

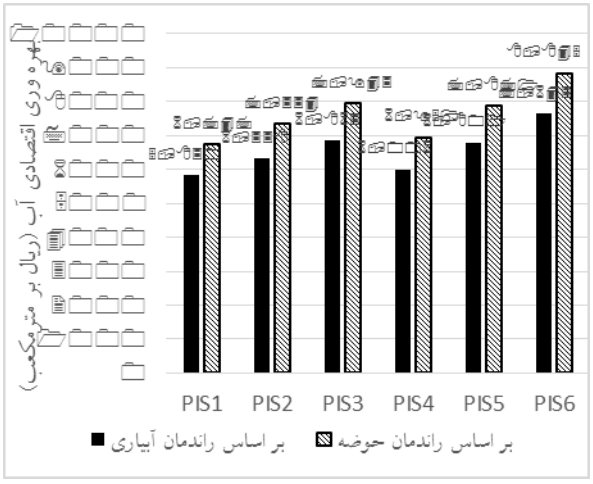


شکل(۷): بهره‌وری فیزیکی آب حوضه ارس بر اساس راندمان آبیاری و حوضه در سناریوهای توسعه و بهبود آبیاری تحت‌فشار

متوسط بهره‌وری فیزیکی آب در سال‌های قبل از شبیه‌سازی، بر اساس راندمان آبیاری و راندمان حوضه بترتیب حدود ۰/۹ و ۱/۰۵ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد اما با توجه به ماهیت حوضه‌های آبریز که نمی‌توان آب‌های برگشتی را در آن‌ها تلفات دانست، رقم ۱/۰۵ کیلوگرم بر مترمکعب بیشتر به واقعیت نزدیک است. سناریوهای PIS2 تا PIS6 با ایجاد صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی و همچنین افزایش عملکرد، باعث صعودی شدن مقادیر بهره‌وری فیزیکی آب تا افق ۱۴۲۰ شدند. در افق ۱۴۲۰ بیشترین و کمترین بهره‌وری فیزیکی آب در بین این سناریوها بر اساس راندمان آبیاری بترتیب متعلق به سناریوی PIS6 و PIS4 با مقادیر ۱/۴ و ۱/۱۵ کیلوگرم

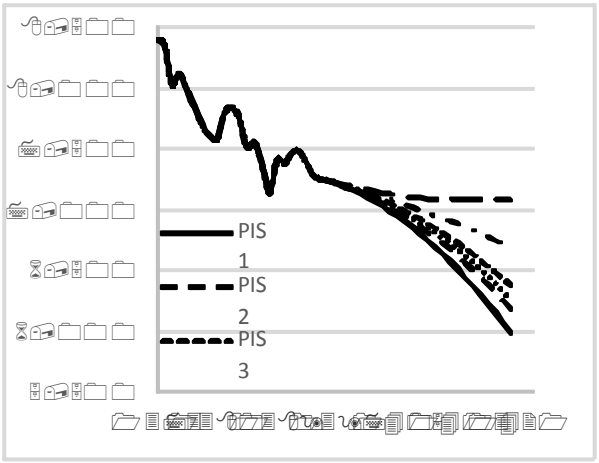
بر مترمکعب می‌باشد، در حالی‌که این مقادیر بر اساس راندمان حوضه برابر ۱/۶ و ۱/۳ ریال بر مترمکعب بود. افزایش بهره‌وری فیزیکی آب در سناریوهای PIS3 و PIS5 تقریبا مشابه یکدیگر بود که نشان‌دهنده تاثیر تقریبا یکسان این دو سناریو در افزایش بهره‌وری فیزیکی حوضه ارس از طریق سیاست‌های مجزای توسعه و بهبود راندمان سیستم‌های آبیاری تحت‌فشار می‌باشد.

در شکل (۸) ارزش فعلی بهره‌وری اقتصادی آب بر اساس راندمان آبیاری و حوضه در افق ۱۴۲۰ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، سناریوهای توسعه و بهبود آبیاری تحت‌فشار به دلیل افزایش درآمد حاصل از عملکرد محصول بیشتر، صرفه‌جویی در مصرف آب و کاهش هزینه‌های مرتبط با آبیاری باعث ارتقای بهره‌وری اقتصادی آب شده‌اند. بالاترین و پایین‌ترین میزان بهره‌وری اقتصادی آب بر اساس راندمان حوضه بترتیب متعلق به سناریوی PIS6 و PIS1 با مقادیر ۸۸۴۵ و ۶۷۴۷ ریال بر مترمکعب می‌باشد.



شکل(۸): بهره‌وری اقتصادی آب حوضه ارس بر اساس راندمان آبیاری و حوضه در سناریوهای توسعه و بهبود آبیاری تحت‌فشار در افق ۱۴۲۰

تغییرات حجم آب‌های زیرزمینی در سناریوهای توسعه و بهبود آبیاری تحت‌فشار در شکل(۹) مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد، حجم آب‌های زیرزمینی در سناریوهای PIS2، PIS3 و PIS4 با اختلاف کم دارای شیب نزولی می‌باشند و قادر به ایجاد تغییر اساسی در روند مدیریت و کنترل منابع آب زیرزمینی و جلوگیری از بروز بحران آبی در این حوضه نمی‌باشند. بنابراین می‌توان گفت سیاست‌های توسعه و بهبود سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار بصورت مجزا تاثیر اندکی بر منابع آب‌های زیرزمینی دارد و بایستی سناریوهای تلفیقی PIS5 و PIS6 هدف‌گذاری گردند. در واقع سیاست تامین بودجه توسعه آبیاری تحت‌فشار حتی به میزان دو برابر متوسط سال‌های گذشته و یا بهبود شرایط مدیریتی این سیستم‌ها، صرفا نمی‌تواند راهکاری برای جلوگیری از ایجاد بحران آبی در سال‌های آینده در این حوضه گردد و بایستی تلفیقی از سیاست‌های مذکور بهمراه سایر راهکارها همانند اصلاح مدیریت سامانه‌های آبیاری سطحی مورد توجه قرار گیرد.

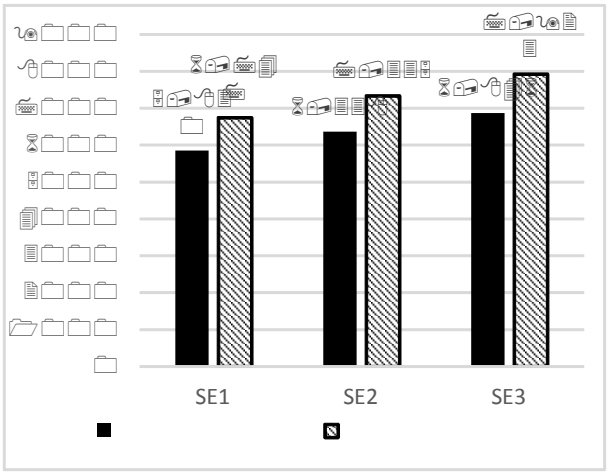


شکل(۹): حجم آب‌های زیرزمینی حوضه ارس در سناریوهای توسعه و بهبود آبیاری تحت‌فشار

تحلیل سناریوهای اصلاح مدیریت آبیاری سطحی

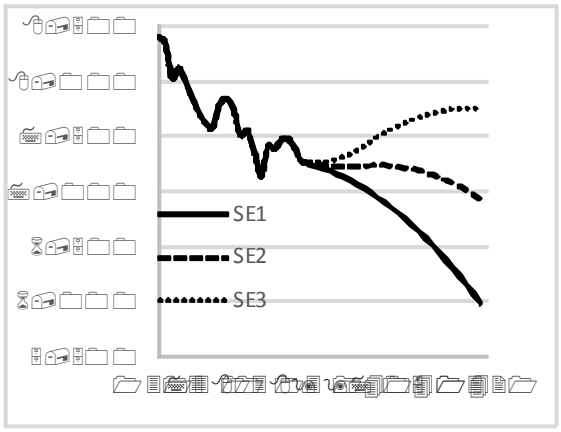
در حال حاضر حدود ۹۰ درصد اراضی کشاورزی حوضه ارس دارای سیستم آبیاری سطحی است. با وجود محدودیت‌های اعتباری و فنی در ظرفیت اجرای سیستم آبیاری تحت‌فشار، اصلاح مدیریت سیستم‌های آبیاری سطحی از طریق آموزش کشاورزان، تسطیح، تجمیع و یکپارچه‌سازی اراضی، استفاده از هیدروفلوم، انتخاب روش آبیاری سطحی مناسب، انتخاب روش و بستر مناسب کاشت، برنامه‌ریزی آبیاری مناسب و ... می‌تواند به عنوان راهکاری مهم و کارا در نظر گرفته شود. سه سناریوی اصلاح مدیریت آبیاری سطحی(SE1، SE2 و SE3) که در واقع بیانگر سه سطح مدیریتی در این زمینه می‌باشند، در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در شروع شبیه‌سازی راندمان آبیاری و حوضه بترتیب حدود ۴۴ و۶۱ درصد بودند و در افق ۱۴۲۰ سناریوی SE3 راندمان آبیاری و حوضه را بترتیب تا حدود ۵۰ و ۶۶ درصد ارتقاء داد و سناریوی SE2 این ارقام بترتیب به حدود ۴۶ و ۶۳ درصد رسانید. افزایش راندمان طبیعتاً مصرف آب در کشاورزی کاهش می‌یابد بطوریکه در افق ۱۴۲۰ کمترین و بیشترین مصرف سالانه آب در کشاورزی را بر اساس راندمان آبیاری بترتیب سناریوهایSE3 وSE1 با مقادیر ۲۳۵۰ و ۲۷۵۰ میلیون مترمکعب دارا خواهند بود در حالی‌که این مقادیر بر اساس راندمان حوضه بترتیب حدود ۱۹۵۰ و ۲۳۰۰ میلیون مترمکعب می‌باشد. بالتبع مصرف آب کمتر در سناریوی SE3 نسبت به سناریوی SE1، مقادیر بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی بر اساس راندمان حوضه در سناریوی SE3 نسبت به سناریوی SE1، بترتیب حدود ۰/۲ کیلوگرم بر مترمکعب و ۱۱۷۵ ریال بر متر مکعب افزایش یافت (شکل ۱۰).



شکل(۱۰): بهره‌وری اقتصادی آب بر اساس راندمان آبیاری و حوضه در سناریوهای اصلاح مدیریت آبیاری سطحی در افق ۱۴۲۰

در شکل (۱۱) کاهش حجم آب‌های زیرزمینی حوضه ارس در سناریوهای مختلف اصلاح مدیریت آبیاری سطحی را ارائه شده است. در افق ۱۴۲۰ حجم ذخیره آب‌های زیرزمینی سناریوی SE3، از سناریوهای SE1 و SE2 بترتیب حدود ۱۷۵۰ و ۸۰۰ میلیون مترمکعب بیشتر بود. بیشترین شیب کاهش حجم آب‌های زیرزمینی متعلق به سناریوی SE1 بود. در سناریوی SE3 تا سال ۱۴۱۸ حجم ذخایر آب زیرزمینی افزایش یافته اما در ادامه با افزایش رشد جمعیت و افزایش تقاضا در بخش‌های شرب و صنعت این افزایش متوقف گردیده بطوریکه ممکن است در سال‌های پس از افق ۱۴۲۰ مجددا نزولی گردد. اما با کمک گرفتن از راهکارهای دیگر همانند توسعه و بهبود آبیاری تحت فشار می‌توان از افت مجدد حجم آب‌های زیرزمینی در این سناریو جلوگیری و حتی باعث افزایش آن نیز گردید.



شکل(۱۱): حجم آب‌های زیرزمینی حوضه ارس در سناریوهای اصلاح مدیریت آبیاری سطحی

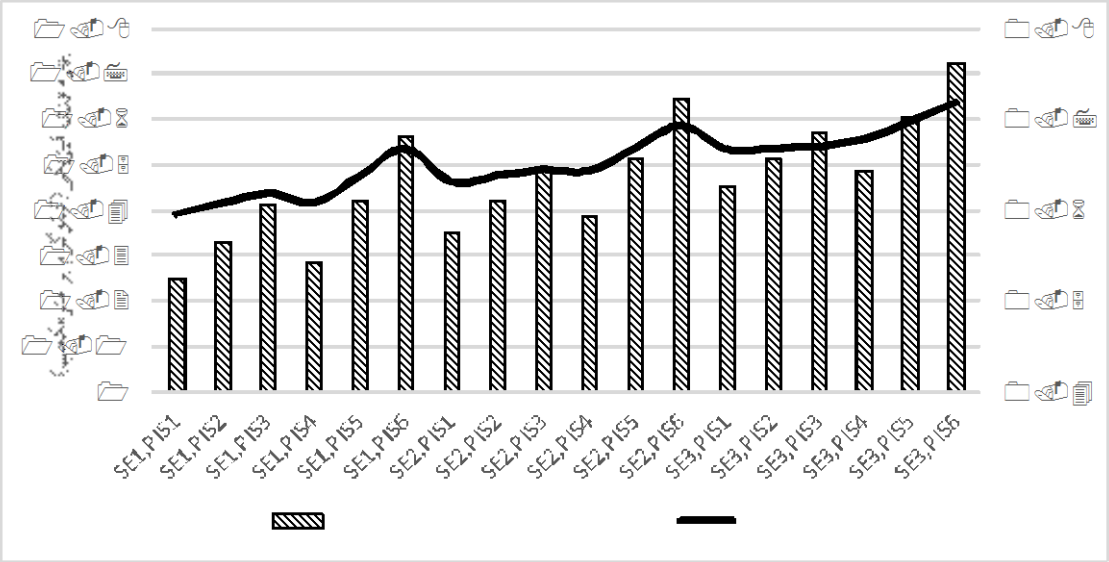
تحلیل تلفیق سناریوهای توسعه و بهبود سامانه-های آبیاری تحت‌فشار و سطحی

شکل (۱۲) بهره‌وری فیزیکی آب و راندمان حوضه در سناریوهای ترکیبی اصلاح مدیریت آبیاری سطحی و توسعه و بهبود آبیاری تحت‌فشار در افق ۱۴۲۰ را نشان می‌دهد. سناریوهای توسعه و بهبود سیستم‌های آبیاری سطحی و تحت فشار به دلیل کاهش مصرف آب و افزایش عملکرد محصول سبب افزایش راندمان و بهره‌وری فیزیکی حوضه شدند. بطوریکه حداقل مقدار این دو پارامتر در ترکیب سناریوهای SE1 و PIS1 و حداکثر آن در ترکیب سناریوهای SE3 و PIS6 رقم خورد.

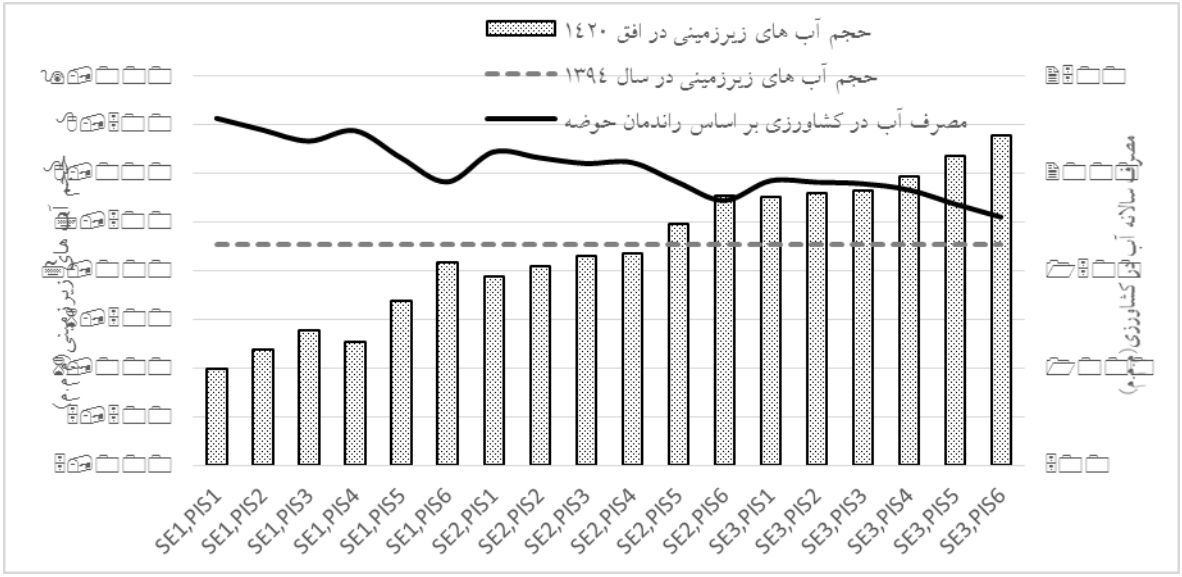
در شکل (۱۳) حجم آب‌های زیرزمینی و مصرف آب در کشاورزی در سناریوهای ترکیبی اصلاح مدیریت آبیاری سطحی و توسعه و بهبود آبیاری تحت‌فشار در افق ۱۴۲۰ ارائه شده است. بر اساس این شکل سناریوهای ترکیبی که دارای راندمان حوضه بیشتر بودند، با کاهش بیشتر مصرف آب همراه بودند و منجر به حفظ بیشتر ذخائر آب زیرزمینی نیز گشتند.

همچنین با مقایسه دو شکل (۱۲) و (۱۳) نشان می-دهد، تغییرات بهره‌وری فیزیکی حوضه بیشتر به دلیل تغییرات در راندمان حوضه و مصرف آب بوده است و افزایش عملکرد حاصل از توسعه آبیاری تحت فشار اثر کمتری را بر بهره‌وری فیزیکی حوضه داشته است.

بطورکلی سناریوهای توسعه و بهبود آبیاری تحت‌فشار، تحت شعاع سناریوهای مدیریت آبیاری سطحی می‌باشند و تاثیر کمتری بر حفظ ذخایر آب زیرزمینی حوضه دارند. به عبارتی اصلاح مدیریت آبیاری سطحی می‌تواند تاثیر به مراتب بیشتری نسبت به توسعه و اصلاح آبیاری تحت‌فشار در راندمان حوضه و صرفه‌جویی در مصرف آب را بهمراه داشته باشد و در صورتی که بتوان راندمان کاربرد آبیاری سطحی در حوضه ارس را به میزان یک درصد افزایش داد، این امر کارایی معادل توسعه ۲۲ هزار هکتار آبیاری تحت‌فشار با راندمان کاربرد آب ۶۷ درصد را خواهد داشت که با فرض توسعه آبیاری تحت‌فشار به میزان ۲۰۰۰ هکتار در سال، این امر حداقل حدود ۱۱ سال به طول خواهد انجامید. با توجه با اینکه هزینه لازم برای اصلاح سامانه‌های آبیاری سطحی در هر هکتار حدود ۱۵ میلیون ریال برآورد شده است(نظری و لیاقت، ۱۳۹۴)، بنابراین اگر بخشی از اعتبارات سالانه برای توسعه سامانه‌های نوین آبیاری را در جهت بهبود مدیریت آبیاری سطحی صرف نمود، به نتایج سریع‌تر و بهینه‌تری در راستای پایداری منابع آب حوضه ارس می‌توان دست یافت.



شکل(۱۲): بهره‌وری فیزیکی آب و راندمان حوضه در سناریوهای ترکیبی اصلاح مدیریت آبیاری سطحی و توسعه و بهبود آبیاری تحت‌فشار در افق ۱۴۲۰



شکل(۱۳): حجم آب‌های زیرزمینی و مصرف آب در کشاورزی در سناریوهای ترکیبی اصلاح مدیریت آبیاری سطحی و توسعه و بهبود آبیاری تحت‌فشار در افق ۱۴۲۰

نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثرات مختلف راهکارهای مدیریت آب در کشاورزی شامل توسعه سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار و اصلاح مدیریت سیستم‌های آبیاری سطحی در حوضه ارس مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد، اثر بخشی توسعه سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار بدون توجه به بهبود و ارتقای این سیستم‌ها نمی‌تواند افزایش محسوسی در راندمان حوضه ایجاد نماید و در نتیجه در مدیریت و حفظ منابع آب این حوضه نقش قابل توجهی ایفا کند. همچنین بر اساس نتایج، حساسیت مدل به اصلاح مدیریت آبیاری سطحی زیاد بود، بطوریکه در سناریوهای تلفیقی، سناریوهای توسعه و بهبود آبیاری تحت‌فشار تحت‌الشعاع سناریوهای مدیریت آبیاری سطحی قرار می‌گرفتند. هر چند سناریوی SE3 به تنهایی توانست از کاهش افت منابع آب زیرزمینی این حوضه جلوگیری نماید ولی نباید از نظر دور داشت حصول این سناریو نیازمند ایجاد تمهیدات ویژه و سیاست‌گذاری‌های متفاوتی می‌باشد. در حالی که حصول سناریوی SE2 سهل‌تر بوده و در تلفیق با سناریوهای توسعه و بهبود آبیاری تحت‌فشار می‌تواند آینده پایدارتری برای منابع آب حوضه ارس رقم بزند. در نهایت می‌توان گفت، جهت نیل به اهداف حفظ منابع آب و کشاورزی پایدار در حوضه ارس بایستی هر دو سیاست مذکور به همراه ایجاد تمهیدات و ساختارهای لازم مورد توجه قرار گیرند و از نگاه یکجانبه به یک سیاست بدون در نظر گرفتن جوانب آن پرهیز شود. اما در این راستا بایستی ارتقای مدیریت سیستم‌های آبیاری سطحی را راهکار اصلی برای رهایی از ایجاد بحران آبی در آینده حوضه ارس دانست و به توسعه و بهبود سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار به عنوان یک راهکار کمکی نگریست.

لازم به ذکر است که نتایج مذکور با فرض عدم افزایش سطح زیرکشت بر اثر صرفه‌جویی در مصارف آب با استفاده از سیاست‌های مورد بررسی بود. بنابراین بر اساس نتایج این پژوهش، در صورتی که تدابیر لازم در راستای ممانعت از افزایش سطح زیرکشت اتخاذ گردد، می‌توان امیدوار بود، توسعه و بهبود سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار و اصلاح مدیریت سامانه‌های آبیاری سطحی به حفظ منابع آب در آبخوان‌های حوضه ارس کمک نماید. در غیر این صورت، بازخوردهای منفی این سیاست‌ها می‌تواند حتی منجر به برداشت اضافه از منابع آب نیز گردد.

منابع

بی‌نام. ۱۳۹۲. بهنگام‌سازی طرح جامع آب کشور در حوضه های ارس، ارومیه، تالش–تالاب انزلی، سفیدرود بزرگ، سفیدرود-هراز، هراز-قره سو، گرگانرود و اترک. جلدهای ۳۸-۴۷.

حافظ پرست، م.، ش. عراقی نژاد و س. شریف آذری. ۱۳۹۴. معیارهای پایداری در ارزیابی مدیریت یکپارچه منابع آب حوضه آبریز ارس بر اساس رویکرد DPSIR. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۲(۲): ۶۱-۷۷.

حسینی، س. ا. و ع. باقری. ۱۳۹۲. مدل‌سازی پویایی سیستم منابع آب دشت مشهد برای تحلیل استراتژی‌های توسعه پایدار. مجله آب و فاضلاب. ۲۴(۴): ۲۸-۳۹.

دفتر مطالعات پایه منابع آب ایران. ۱۳۹۵. بخش آمار و اطلاعات (آنلاین). قابل دسترس در http://www.wrm.ir.

علیزاده، ح. ع.، ع. م. لیاقت و ت. سهرابی. ارزیابی سناریوهای توسعه سیستم های آبیاری تحت فشار بر منابع آب زیرزمینی با استفاده ازمدل‌سازی پویایی سیستم. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. شماره ۴. ص ۱-۱۵.

شهرستانی، ح. ۱۳۹۳. سازماندهی و مدیریت مصرف بهینه آب در بخش کشاورزی. فصلنامه نظام مهندسی کشاورزی و منابع طبیعی. شماره ۴۵. ص ۳۷-۴۱.

کوماسی‌زاده ز.، ع. ر. فریدحسینی، ک. داوری، ا. علیزاده و ع. صلوی‌تبار. ۱۳۹۲. مکانیزیم عرضه و تقاضای حوضه اترک از دیدگاه توسعه پایدار منابع آب. پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران.

۱.لاری ع.، ج. مهرکار و م. س. پیشوایی. ۱۳۹۳. ارزیابی سیاست‌های مواجهه با بحران حوضه آبریز «دریاچه ارومیه» با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم. نشریه علمی پژوهشی مدیریت فردا، شماره ۴۰، ص ۳۷-۶۲.

نحوی‌نیا، ج. ۱۳۹۳. تحلیل بهره‌وری و پهنه‌بندی راندمان‌های آبیاری با مفاهیم جدید در برخی حوضه‌های ایران. دانشگاه تهران. رساله دکتری.

نظری، ب. ۱۳۹۲. مدل‌سازی پویای شبکه‌های آبیاری با رویکرد بهره‌وری آب. دانشگاه تهران. رساله دکتری.

نظری، ب. و ع. لیاقت. ۱۳۹۴. گزارش کارشناسی تدوین برنامه ششم توسعه. معونت آب و خاک وزارت جهاد کشاورزی.

Ahmad, S. and D. Prashar. 2010. Evaluating municipal water conservation policies using a dynamic simulation model. Water Resources Management, 24(13), pp.3371-3395.

Dai, S., L., Li, H., Xu, X. Pan, and X. Li. 2013. A system dynamics approach for water resources policy analysis in arid land: a model for Manas River Basin. Journal of Arid Land, 5(1), pp.118-131.

Dastane, N. G., 1974. Effective Rain. FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations). Irrigation and Drainage, Paper, 25.

Doorenbos, J. and A. H. Kassam. 1979. Yield response to water. Irrigation and drainage paper 33, 257 p.

Elmahdi, A., Malano, H. and Etchells, T., 2007. Using system dynamics to model water-reallocation. The Environmentalist, 27(1), pp.3-12.

Kelly, R.A., Jakeman, A.J., Barreteau, O., Borsuk, M.E., ElSawah, S., Hamilton, S.H., Henriksen, H.J., Kuikka, S., Maier, H.R., Rizzoli, A.E. and van Delden, H. 2013. Selecting among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management. Environmental Modelling & Software, 47, pp.159-181.

Kijne, J. W., Barker, R. and Molden, D. J. 2003. Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement. CabI Publication, USA, 332 p.

Kotir, J.H., Smith, C., Brown, G., Marshall, N. and Johnstone, R.. 2016. A system dynamics simulation model for sustainable water resources management and agricultural development in the Volta River Basin, Ghana. Science of the Total Environment, 573, pp.444-457.

Lulu, J., Sentelhas, P.C., Júnior, P., José, M., Pezzopane, J.R.M. and Blain, G.C., 2008. Estimating leaf wetness duration over turfgrass, and in a'Niagara Rosada'vineyard, in a subtropical environment. Scientia Agricola, 65(SPE), pp.10-17.

Madani, K. and Mariño, M.A. 2009. System dynamics analysis for managing Iran’s

Zayandeh-Rud river basin. Water resources management, 23(11), pp.2163-2187.

Phocaides, A. 2000. Technical handbook on pressurized irrigation techniques. FAO, Rome, 196 p.

Saysel, A.K. and Barlas, Y. 2006. Model simplification and validation with indirect structure validity tests. System Dynamics Review, 22(3), pp.241-262.

Simonovic, S.P. and Rajasekaram, V. 2004. Integrated analyses of Canada's water resources: A system dynamics approach. Canadian Water Resources Journal, 29(4), pp.223-250.

Tofallis, C., 2015. A better measure of relative prediction accuracy for model selection and model estimation. Journal of the Operational Research Society, 66(8), pp.1352-1362.

Assessment of Development and Improvement Policies of Pressurized and Surface Irrigation Systems Using System Dynamics ;Case Study Aras Basin

Hossein Molavi[1], Abdol Majid Liaghat[2], Bijan Nazari[3]

Abstract

In the future, planning and management practices for preventing water crisis are essential, because of population growth and more restrictions of water resources in frontier basins. The objectives of this study were to evaluate the effect of water resources management policies, including development and improvement of pressurized irrigation systems and improving management of surface irrigation systems, on the sustainability of agricultural and water resources in Aras basin. For this purpose, an integrated water resources management using system dynamics model was developed for Aras basin by considering economic and environmental aspects. These Policies were analyzed in the form of several scenarios. The results showed that 4000-ha annual development of pressurized irrigation systems would cause to increase basin efficiency only 2.5 percent until the year of 1420, regardless of improvement in water application efficiency. The effect of management improvement scenarios of surface irrigation systems was more than combined scenarios of development and improvement of pressurized irrigation systems in terms of water saving in Aras basin. So that the saving water by increasing one percent surface irrigation application efficiency is equal to water saving through development of 22000 hectare pressurized irrigation systems with application efficiency of 67 percent. In general, both the abovementioned policies should be performed together in order to prevent water crisis and sustainable management of water resources in Aras basin. In this regard, the improvement of surface irrigation systems should be considered as the main strategy and development and improvement of pressurized irrigation systems should be followed as an auxiliary strategy.

Keywords: Dynamic modeling, Management strategies, Pressurized Irrigation systems, Sustainable agriculture, Water crisis, Water resources.

[1] PhD Student, Department of Irrigation Engineering, Agriculture and Natural Resources (Karaj), University of Tehran, Iran; molavi@ut.ac.ir

[2] Professor, Department of Irrigation Engineering, Agriculture and Natural Resources (Karaj), University of Tehran, Iran; aliaghat@ut.ac.ir (Corresponding Author)

[3] Assistant Professor, Department of Water Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran; b.nazari@ENG.ikiu.ac.ir