مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۲ ■ پای‌ی‌ز و زمستان ۱۳۹۵

صفحه‌های ۳۳۶-۲۱۷

ارزیابی سیاست‌های اصلاح الگوی کشت و مدیریت کم‌آبیاری با استفاده از مدل‌سازی پویایی سیستم (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ آبریز ارس)

حسین مولوی[۱]، عبدالمجید لیاقت[۲]* و بیژن نظری[۳]

۱. دانشجوی دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی، گروه آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. استاد، گروه آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳. استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام‌خمینی(ره)، قزوین، ایران

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۲۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۰۴

چکیده

برای مدیریت و کنترل بحران آب، راهکارهای مختلفی قابل‌پیشنهاد و اجراست. در این راستا، سیاست های اصلاح الگوی کشت و مدیریت کم‌آبیاری دو راهبرد برای استفادهٔ بهینه از آب در کشاورزی مطرح است. هدف از این پژوهش بررسی اثر دو سیاست مذکور بر پایداری کشاورزی و منابع آب حوضهٔ آبریز ارس بود. بدین‌منظور با استفاده از روش پویایی سیستم، مدل مدیریت یکپارچهٔ منابع آب حوضهٔ ارس با لحاظ جنبه‌های اقتصادی ومحیط‌زیستی تدوین و سه سناریوی الگوی کشت و شش سناریوی مدیریت کم‌آبیاری بررسی شد. نتایج نشان داد، در حالتی که استفاده از سایر راهکارهای مدیریتی میسر نباشد، می‌توان از ترکیب سناریوی کم‌آبیاری ۴۰ درصد با سناریوهای الگوی کشت وضع موجود یا بهینه، برای کنترل و مدیریت منابع آب حوضهٔ ارس بهره برد. همچنین، با توجه به پتانسیل بالای منابع آب سطحی در حوضهٔ ارس، کاهش سهم استفاده از منابع آب زیرزمینی در کشاورزی به میزان ۳ درصد، به کنترل و پایداری منابع آب خواهد انجامید و پیشنهاد می‌شود این راهکار نیز سیاستی مؤثر و مد نظر مسئولان و مدیران مربوط قرارگیرد تا با مطالعات جامع، برنامه‌ریزی و اقدام‌های مورد نیاز، مشکلات بحران آبی پیش روی این حوضه کاهش یابد.

کلیدواژه‌ها: بحران آب، راهکارهای مدیریتی، رشد جمعیت، کشاورزی پایدار، منابع آب.

* نویسنده مسئول Emaliaghat@ut.ac.ir

مقدمه

هدررفت آب در ایران بیش از میانگین جهانی است و بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کنندهٔ آب در کشور است. این در حالی است که پیش‌بینی می‌شود تا سال ۱۴۰۰ شمسی، جمعیت به مرز ۱۰۰ میلیون نفر برسد و برای تأمین نیازهای غذایی این جمعیت، سالانه به حدود ۱۵۰ میلیارد مترمکعب آب نیاز خواهد بود (۸). با توجه به قرارگیری ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک و افت روزافزون آبخوان‌ها تأمین این حجم تقریباً ناممکن خواهد بود. بنابراین، باید راه‌حل را مدیریت صحیح منابع آب مصرفی در کشاورزی دانست. در این رابطه، راهکارهای زیادی ارائه شده است که گرایش بیشتر به هر کدام از آن ها تحت تأثیر سیاست‌گذاری‌های بخش آب در سطح ملی است. از جملهٔ این راهکارها می توان به استفادهٔ مجدد از منابع آب‌های غیرمتعارف، احداث و مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی، استفاده از روش‌های نوین آبیاری، مدیریت کم آبیاری، و تغییر الگوی کشت اشاره کرد. عوامل متعددی بر موفقیت راهکار تأثیرگذار است، به طوری که تغییر در هر یک از این عوامل، خود به‌وجودآورندهٔ بازخوردهای دیگر در سیستم است.

استفاده از روش های مدل سازی برای مطالعه و شناخت سیستم های منابع آب مفید است، اما انتخاب نوع روش مدل سازی 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 می پردازد، به‌طوری که به‌سادگی قابل‌استفاده برای افراد غیرمتخصص نیز است (۱۳). در ادامه برخی مطالعات و پژوهش‌های صورت‌پذیرفته با استفاده از مدل سیستم پویایی و در بحث مدیریت منابع آب و کشاورزی را مرور می‌کنیم.

روش پویایی سیستم را می توان روشی تصمیم گیری در مدیریت کم آبیاری استفاده کرد (۱۱). با استفاده از روش پویایی سیستم می توان حجم آب مورد نیاز مزرعه، زمان آبیاری و تأثیر آن بر عملکرد محصول را پیش بینی کرد (۹). شبیه سازی الگوی کشت، عملکرد محصول و آلودگی کشاورزی با روش پویایی سیستم در منطقه ای در جنوب ترکیه نشان داد، سیاست های اتخاذشده آسیب های جدی محیط زیستی را در پی خواهد داشت (۱۹). نتایج حاصل از مدل پویای مدیریت جامع منابع آب در کانادا، بسیار وابسته به پیشرفت‌های این کشور و مسائل محیط‌زیستی پیش‌روی منابع آب، همچنین کنترل مصرف آب در آینده بود (۲۰). استفاده از روش پویایی سیستم‌ها برای مدیریت پایدار آب آبیاری در حوضهٔ سفلی رودخانهٔ زرد چین نشان داد، تحت چه شرایطی آب زیرزمینی به حد نگران‌کننده رسید و با چه راهبردهایی می‌توان آن را کنترل کرد (۱۶).

بررسی بیلان آبی و عملکرد فیزیکی و اقتصادی محصولات کشاورزی تا سال ۲۰۵۰، از طریق مدل جامع پویایی سیستم برای منطقهٔ رزتا در مصر نشان داد، در حالی که اکثر شبیه‌سازی‌ها بر کنترل بهره‌بردای بیش از حد از منابع آب تأکید داشت، می توان با دادن آگاهی های عمومی در صرفه جویی مصرف آب یا تغییر الگوی کشت، شرایط را تعدیل کرد (۲۲). پژوهشگران هلندی مدل جامع سیستم پویایی برای سیاست گذاری توسعه و مدیریت سفره‌های آب زیرزمینی ساحلی مؤثر را ارائه کردند، به طوری که قابل استفاده در سایر نقاط دنیا نیز باشد (۱۵). سیستم مدل‌سازی پویا برای تجزیه‌وتحلیل تعارضات موجود در مدیریت منابع آب های زیرزمینی نشان داد، هر چند طراحی و پیاده‌سازی سیاست‌های حفاظت از منابع آب زیرزمینی بسیار بااهمیت است، در بسیاری از موارد تلاش برای حل مشکل مدیریت آب به‌علت عوارض پیش‌بینی‌نشده اثر عکس می گذارد (۱۲). نتایج حاصل از مدل یکپارچه

مدیریت منابع آب حوضهٔ زاینده‌رود نشان داد، انتقال آب از حوضه‌های دیگر تنها راه‌حل کمبود آب حوضهٔ زاینده‌رود نیست و راه‌گشای مشکل اعمال سیاست‌های مدیریتی تقاضا همراه با انتقال بین حوضه‌ای و جلوگیری از برداشت‌های غیرمجاز از منابع آب زیرزمینی است (۱۷). ارزیابی یکپارچهٔ منابع آب دشت مشهد و اقدامات و سیاست‌های اتخاذشده در فرایند برنامه‌های توسعهٔ اقتصادی کشور نشان داد، تغییر الگوی کشت سیاستی برتر و گامی اثربخش برای بهبود وضعیت منابع آب دشت مشهد است (۳). مدل تهیه‌شده برای بهره‌برداری و مدیریت پساب در دشت ورامین با استفاده از روش پویایی سیستم در مدیریت یکپارچهٔ منابع آب دشت ورامین مثمر ثمر خواهد بود (۵). استفاده از مدل تحلیل پویایی سیستم در مدیریت بهره برداری از زهاب کشاورزی در طراحی و مدیریت سیستم های زهکشی کارایی خوبی خواهد داشت (۷). استفاده از کم آبیاری و آبیاری تحت فشار بهره وری فیزیکی را افزایش می‌دهد T اما اثر این دو راهکار بر بهره وری اقتصادی بسته به نوع محصول و شرایط اقتصادی متفاوت خواهد بود (٦).

پژوهش های صورت پذیرفته نشان می دهد ارزیابی کارایی تصمیم ها و سیاست ها در مدیریت منابع آب به‌علت پیچیدگی و به‌هم‌پیوستگی درونی سیستم های منابع آب و تبعات متفاوت هر کدام از آن ها دشوار است و استفاده از روش مدل‌سازی پویایی سیستم برای مطالعه و شناخت حلقه‌های بازخورد موجود در سیستم‌های منابع آب مفید خواهد بود. بر این اساس در این مطالعه، هدف استفاده از مدل پویایی سیستم در مدیریت آب کشاورزی در سطح حوضهٔ ارس است تا به کمک آن بتوان به ارزیابی پیامدها و تبعات متفاوت دو سیاست اصلاح الگوی کشت و مدیریت کم‌آبیاری در شرایط آیندهٔ این حوضه پرداخت.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ مورد مطالعه

حوضهٔ آبریز ارس با مساحت حدود ۳/۹۵ میلیون هکتار در تقسیم‌بندی کلی هیدرولوژی ایران بخشی از حوضهٔ آبریز دریای خزر است و تقریبا ۲/٤ درصد از مساحت کشور را شامل می‌شود. این حوضه در منتهی‌الیه شمال‌غرب کشور واقع شده است، به طوری که از ناحیهٔ شمال با کشورهای ارمنستان، آذربایجان و از غرب با کشور ترکیه و از سمت جنوب و شرق با حوضه‌های ارومیه و تالش-انزلی هم‌مرزاست و از نظر اقلیمی عمدتا ًتحت تأثیر توده‌های هوای سرد قطبی و معتدل مدیترانه‌ای قرارمی‌گیرد. متوسط ریزش در حوضهٔ آبریز ارس معادل ۳۱۳/٤ میلی‌متر در سال است. در ایستگاه‌های هواشناسی واقع در حوضهٔ ارس متوسط سالانهٔ دما بین ۵ تا ۱۵ درجهٔ سانتی‌گراد، تبخیر از سطح آزاد آب بین ۱۱۲۷/۷ تا ۱٦۰۵/۵ میلی‌متر و میزان تبخیر- تعرق پتانسیل بین ۸٤۷ تا ۱٤۰٦ میلی متر در سال متغیر است (۲).

زیرحوضهٔ مطالعاتی رودخانهٔ ارس با وسعت ۱۱۵۷۰۰۷ هکتار اراضی کشاورزی در مجموع از پتانسیل کشت مناسبی برای کشت انواع محصولات زراعی و باغی برخوردار است. از مجموع اراضی کشاورزی یادشده ٤۳۸۷۸۱ هکتار تحت کشت آبی و ۷۱۸۲۲٦ هکتار دیگر به‌صورت دیم کشت‌وکار می‌شود. از این رقم، ۵۳۲۲۵ هکتار تحت پوشش انواع باغات میوه قراردارد (۲).

تعریف مسئله و سناریوهای مختلف

در حوضهٔ ارس، کشت حدود ٦۲ درصد از کل مزارع کشاورزی منطقه به شکل دیمزار از یک‌سو و رهاشدن بخش قابل توجهی از اراضی به شکل نکاشت تحت عنوان آیش سالانه از سوی دیگر حکایت از محدودیت کمی منابع آب در این حوضه دارد. حدود ٦۸ درصد از آب

مصرفی حوضهٔ آبریز ارس از منابع آب‌های سطحی تأمین می‌شود. بخش عمدهٔ انتقال و توزیع آب کشاورزی در حوضهٔ ارس، از طریق انهار سنتی صورت می گیرد که با توجه به شرایط مالکیتی اراضی (خرده مالکی)، این انهار از مسیرهای طولانی و پرپیچ و خمی عبور می‌کند که افزایش تلفات و کاهش شدید راندمان کل آبیاری را در این اراضی درپی‌دارد. این در حالی است که به‌دلیل نیاز آبی بالای محصولات، متوسط درصد تأمین آب اراضی کشاورزی در این حوضهٔ آبریز، در حدود ۵۵ درصد است (۲). مطمئناً با عدم تغییر نحوهٔ مدیریت کنونی منابع آب و رشد جمعیت و در نتیجه افزایش رقابت بین بخش کشاورزی و بخش‌های صنعت و شرب در آینده، شاید تأمین میزان آب کنونی نیز برای کشاورزی ممکن نباشد.

بنابراین، می‌توان بیان داشت، یکی از مهم‌ترین چالش های حوضهٔ ارس بحث مدیریت و حفظ منابع آبی در آینده خواهد بود، هر چند که این حوضه جزء حوضه های با منابع آب نسبتاً مناسب در کشور است. برای جلوگیری از تشدید شرایط بحران آبی، مطمئناً نیاز به پیش‌بینی شرایط آیندهٔ حوضه از جنبه‌های گوناگون و شبیه سازی آثار و تبعات سناریوهای مختلف سیاست ها و راهکارهای مدیریتی است. در این مطالعه به منظور نیل به اهداف مذکور از مدل‌سازی پویایی سیستم بهره برده شد و برای بررسی شرایط آیندهٔ حوضه از جنبه‌های مختلف، اقدامات حفاظتی شامل اصلاح الگوی کشت و مدیریت کم‌آبیاری در قالب سناریوهای زیر بررسی شد.

برای ارزیابی آثار سیاست اصلاح الگوی کشت سه سناریو تعریف شد (جدول ۱). در بررسی بهتر آثار اصلاح الگوی کشت فرض شد، سایر شرایط مانند سطح آبیاری تحت فشار و کم‌آبیاری مشابه وضع موجود باقی بماند.

جدول ۱. سناریوهای الگوی کشت (درصد)

سناریو		گندم	جو	چغندرقند	سیب‌زمینی	ذرت علوفه‌ای	یونجه
الگوی کشت وضع موجود	CP1	۴۵	۱۲	۴	۸	۴	۲۷
الگوی کشت بهینه (۱)	CP2	۷۷	۵	۱	۹	۱	۷
الگوی کشت اقتصادی	CP3	۴۵	۵	۲۰	۵	۲۰	۵

سناریوی CP1 الگوی کشت موجود محصولات آبی مورد بررسی در حوضهٔ ارس است. در بین شش محصول مورد بررسی، بیشترین درصد کشت متعلق به محصولات گندم و یونجه و کمترین آن متعلق به محصولات چغندرقند و ذرت علوفه‌ای است. سناریوی الگوی کشت بهینه (CP2) از نتایج پژوهش احمدالی و همکاران (۱) اقتباس شد. آن‌ها برای به‌دست‌آوردن الگوی کشت بهینه از تابع هدف حداقل‌کردن آب مجازی بهره بردند. بر اساس سناریوی الگوی کشت بهینه درصد عمدهٔ الگوی کشت متعلق به محصول گندم است. بر مبنای یافته های تحقیق طی سالیان گذشته، در بین محصولات مورد بررسی بالاترین بهره وری اقتصادی به ترتیب متعلق به چغندرقند، ذرت علوفه‌ای و گندم است. این در حالی است که محصول چغندرقند و ذرت علوفه‌ای در سناریوهای CP1 و CP2 حداقل درصد کشت را به خود اختصاص داده است. بر این اساس سناریوی الگوی کشت اقتصادی (CP3) با

فرض حفظ درصد کشت گندم مشابه وضع موجود و افزایش درصد زیرکشت چغندرقند و ذرت علوفه‌ای تعریف شد.

در حال حاضر، در محصولات مختلف زیرکشت حوضهٔ ارس کم‌آبیاری راهبردی برای استفادهٔ بهتر از آب به‌کارمی‌رود. بر مبنای یافته‌های این پژوهش، به‌طور میانگین ۷۰ درصد نیاز آبی شش محصول گندم، جو، چغندرقند، سیب زمینی، ذرت علوفه‌ای و یونجه در این حوضه تأمین می‌شود. در بررسی سیاست مدیریت کم‌آبیاری شش سناریو بررسی شد:

۱. آبیاری کامل (حداکثر عملکرد مورد انتظار، FI)
۲. ۹۰ درصد آبیاری کامل (DI10%)
۳. ۸۰ درصد آبیاری کامل(DI20%)
٤. ۷۰ درصد آبیاری کامل (وضع موجود، DI30%)
۵. ٦۰ درصد آبیاری کامل (DI40%)
٦. ۵۰ درصد آبیاری کامل (DI50%).

لازم به ذکر است، برای بررسی بهتر آثار سناریوهای مدیریت کم آبیاری، سایر راهکارهای مدیریتی از جمله الگوی کشت مشابه وضع موجود (CP1) در نظر گرفته شد.

تدوین مدل مفهومی و تبیین فرضیه های دینامیکی و شبیه‌سازی

مدل مفهومی در قالب زیرمدل‌های منابع آب (آب‌های سطحی و زیرزمینی، آب‌های برگشتی)، مصارف آب (کشاورزی، محیط‌زیست، صنعت و شرب)، فنی (سیستم‌های آبیاری تحت فشار، الگوی کشت، کم‌آبیاری، مدیریت آبیاری سطحی و جزآن)، اقتصادی (هزینه ها و درآمد حاصل از کشاورزی، هزینهٔ ارتقای سیستم های آبیاری و جزآن)، اجتماعی(جمعیت، کفایت غذا و جزآن) و محیط زیستی (میزان تولید زهاب کشاورزی، میزان تولید پساب‌های شرب و صنعتی) تدوین شد. در شکل ۱، نمودار علّی و معلولی مدل ترسیم شده است که شامل حلقه های بازخوردی تعادلی و تقویتی است و آثار مثبت و منفی متغیرهای کلیدی در قالب روابط علّی و معلولی و بازخوردها تعیین شده است. نمودار علّی و معلولی یکی از مهم‌ترین ابزارها در ترسیم ساختار بازخوردی سیستم‌ها و شامل نحوهٔ تأثیر و تأثر هر یک از متغیرها بر یا از دیگری است که با بردارها و پیکان‌ها نمایش داده می‌شود. سپس، در محیط Vensim، ساختار حالت- جریان[1] مدل ترسیم شد. ساختار حالت- جریان زیر مدل بیلان آبی (منابع و مصارف آب) مذکور در شکل ۱ نمایش داده شده است.

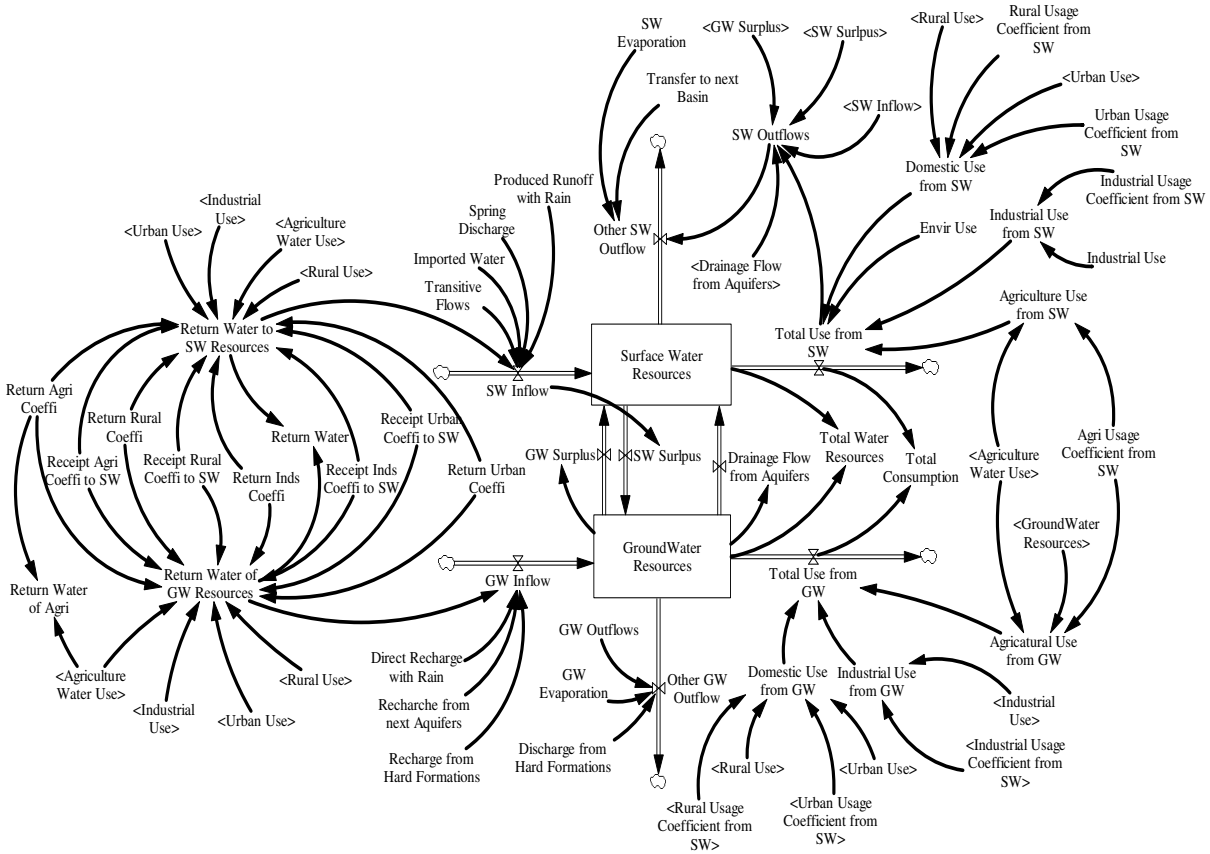
در مرحلهٔ بعد (شبیه‌سازی) روابط بین متغیرها (متغیرهای کلیدی و متغیرهای کمکی) و مقادیر متغیرها (متغیرهای ثابت) تعیین می شود (۲۱). در این مطالعه، برای تدوین مدل مورد نظر در مقیاس حوضه ای، واحد گام زمانی سالانه در نظر گرفته شد، زیرا اکثر اطلاعات مورد نیاز در سطح حوضه با گام های زمانی کوچک تر از سال موجود نیست. مدل توانایی شبیه سازی از سال آبی ٧٤-۱۳۷۳ تا ۲۱-۱٤۲۰ را داراست و افق برنامهٔ شبیه سازی ۲٦ ساله خواهد بود. به‌عبارتی، شبیه‌سازی سال‌های قبل و بعد از ۹۵-۱۳۹٤ به‌ترتیب با هدف اعتبارسنجی مدل و پیش بینی شرایط آینده است. محصولات عمده و راهبردی گندم، جو، چغندرقند، سیب زمینی، ذرت علوفه ای و یونجه به تفکیک دیم و آبی در مدل بررسی شده است و بقیهٔ محصولات با عناوین سایر محصولات زراعی دیم و آبی، محصولات باغی دیم و آبی و محصولات گلخانه ای در مدل در نظر گرفته شد.

مدل قابلیت فراخوانی اطلاعات مربوط به جمعیت، اقلیم، بیلان آب (آب‌های ورودی حاصل از بارندگی،

1. stock-flow

رودخانه‌ها، بین حوضه‌ای و جزآن)، اطلاعات کشاورزی (سطح زیر کشت محصولات آبی و دیم، سطح اراضی آبی تحت فشار و سطحی و جزآن)، سرانهٔ مصارف روستایی و شهری آب شرب، مصارف آب در صنعت، هزینه‌های کاشت، داشت و برداشت، هزینه های عملیات آبیاری و آب‌بها، هزینهٔ اجرای آبیاری تحت‌فشار و جزآن را در سناریوهای مختلف داراست.

تقاضای آب در بخش کشاورزی با استفاده از رابطهٔ نسبی بین کاهش عملکرد و کمبود نسبی تبخیر- تعرق به‌دست آمد (۱۰).



شکل ۱. ساختار حالت- جریان زیر مدل بیلان آبی (منابع و مصارف آب)

$$1-\frac{Y_a}{Y_m}=K_y\left(1-\frac{ET_a}{ET_m}\right) \qquad (۱)$$

در این رابطه، Y_a و Y_m به‌ترتیب متوسط و حداکثر عملکرد واقعی برداشت شده بر حسب تن در هکتار، K_y ضریب واکنش عملکرد به آب (بدون بعد)، و ET_a و ET_m به ترتیب تبخیر- تعرق واقعی و حداکثر بر حسب میلی متر است. متوسط عملکرد و حداکثر عملکرد واقعی برداشت شده از اطلاعات آماری وزارت جهاد کشاورزی و مقادیر K_y از نشریهٔ شمارهٔ ۳۳ فائو(۱۰) استخراج شد. با استفاده از روش میانگین‌گیری وزنی بر اساس مساحت هر کدام از دشت‌های واقع در حوضهٔ 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 رابطهٔ (۱) محاسبه شد و با لحاظ بارندگی مؤثر، مصرف خالص آبیاری برای هر محصول به‌دست 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.

برای محاسبهٔ بارندگی مؤثر از روش فائو استفاده شد.

$$P_e = 0.6 \times P - 10 \qquad if\ P \le 70\ mm \qquad (۲)$$

$$P_e = 0.8 \times \mathrm{P} - 24 \qquad if\ P > 70\ mm \qquad (۳)$$

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

برای شبیه‌سازی تغییرات حجم آب زیرزمینی از معادلهٔ بقای جرم استفاده شد. برای این کار تمامی اطلاعات ورودی مورد نیاز از مطالعات بهنگام‌سازی طرح جامع آب کشور (۲) استخراج شد.

$$Q_P + Q_{in} + Q_R + Q_I + Q_{sw} + Q_A - (Q_W + Q_d + Q_E + Q_{out}) = \Delta V \qquad (٤)$$

در این رابطه، Q_P تغذیه از نفوذ بارش بر سطح حوضه، Q_{in} جریان زیرزمینی ورودی از حوضهٔ مجاور، Q_R تغذیه از جریان‌های سطحی یا رودخانه‌ها، Q_I تغذیه از آب های نفوذی کشاورزی، Q_{SW} تغذیه از پساب آب مصرفی شرب و صنعتی، Q_A میزان تغذیهٔ مصنوعی، Q_W مصارف آب زیرزمینی (شامل مصارف کشاورزی، شرب و صنعتی)، Q_d جریان زهکشی به رودخانه، Q_E تبخیر از آب زیرزمینی، Q_{out} جریان زیرزمینی خروجی و ΔV تغییر ذخیرهٔ ثابت آب زیرزمینی است. در نهایت، حجم دینامیکی آب زیرزمینی از رابطهٔ (۵) محاسبه شد.

$$V(t + dt) = V(t) + \Delta V(dt) \qquad (۵)$$

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

راندمان کاربرد آبیاری با استفاده از رابطهٔ (٦) محاسبه شد.

$$E_a = \frac{E_{a(SI)} \times A_{SI} + E_{a(PI)} \times A_{PI}}{A_{SI} + A_{PI}} \qquad (٦)$$

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 تحت فشار (درصد)، A_{SI} مساحت اراضی آبی با سیستم آبیاری سطحی (هکتار) و A_{PI} مساحت اراضی آبی با سیستم آبیاری تحت فشار (هکتار) است. متوسط راندمان کاربرد آبیاری سطحی و تحت فشار به‌ترتیب ۵۵ و ٦۷ در نظر گرفته شد (٤). راندمان آبیاری تحت فشار از طریق میانگین وزنی بین راندمان آبیاری قطره‌ای و بارانی بر اساس مساحت های تحت پوشش هر کدام به دست آمد. در ادامه، راندمان آبیاری بر اساس نوع منبع تأمین آب (سطحی یا زیرزمینی) محاسبه شد، بدین گونه که اگر منبع آب زیرزمینی بود، راندمان انتقال و توزیع برابر ۱ در نظر گرفته می‌شد و اگر منبع آب سطحی بود مقادیر راندمان انتقال و توزیع از آمار ارائه شده توسط شرکت مدیریت منابع آب و پژوهش عباسی و همکاران (٤) اقتباس شد.

پارامتر راندمان آبیاری، شاخصی برای کشاورز و در سطح مزرعه دارای اهمیت و معناست، زیرا این شاخص مطابق با نگاه یک کشاورز در یک مزرعه، رواناب و نفوذ عمقی برگشتی به چرخهٔ آب حوضه را نیز جز تلفات در نظر می‌گیرد. اما، در نگاه کلان مدیریتی در سطح حوضه نباید زهاب های کشاورزی و پساب های شرب و صنعتی را که به‌صورت رواناب یا نفوذ عمقی مجدداً به چرخهٔ منابع

آب های سطحی و زیرزمینی حوضه می پیوندد تلفات محسوب کرد و باید مدیران و مسئولان ذی ربط این بخش از منابع آب را نیز در تدوین سیاست‌ها و راهکارهای مدیریتی خود در نظر گیرند. در این تحقیق، علاوه‌بر راندمان آبیاری، راندمانی با نام راندمان حوضه تعریف شد. راندمان آب حوضه در واقع آب های برگشتی را تلفات محسوب می‌کند. به‌همین دلیل مقدار آن معمولاً از راندمان آبیاری بیشتر است. رابطهٔ (۷) نحوهٔ محاسبه راندمان حوضه (E_B) را نمایش می‌دهد.

$$E_B = \frac{E_I \times AWU + RAW}{AWU} \qquad (۷)$$

در این رابطه، E_I راندمان آبیاری (درصد)، AWU آب مصرفی در کشاورزی (میلیون مترمکعب) و RAW آب برگشتی از مصارف کشاورزی (میلیون مترمکعب) است. برای محاسبهٔ آب برگشتی از بخش‌های کشاورزی، صنعتی و شرب از اطلاعات طرح های جامع مطالعات منابع آب در سال‌های ۱۳۷۳ و ۱۳۸۵ استفاده شد، بدین گونه که با داشتن ضرایب پساب و زهاب تولیدی، همچنین ضریب دریافت آن از منابع سطحی یا زیرزمینی، میزان آب برگشتی محاسبه و وارد بیلان منابع آب حوضه شد.

برای محاسبهٔ بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب از معادله‌های (۸) و (۹) استفاده شد (۱٤).

$$FSI = \frac{FS}{FR} \qquad (۱۰)$$

در این رابطه، FSI شاخص کفایت غذا (بدون بعد)، و FS و FR به ترتیب میزان تولید و نیاز سالانهٔ غذا بر حسب تن است. FR بستگی به میزان جمعیت و مقدار نیاز سرانهٔ محصولات مختلف دارد.

در زیرسیستم اقتصادی هزینه‌های سالیانهٔ سرمایه‌گذاری، استهلاک و بهرهٔ سرمایه با استفاده از سری یکنواخت سالیانه و نرخ بازگشت سرمایه به هزینه‌های یکنواخت سالیانه تبدیل شد.

صحت‌سنجی مدل از دو طریق آزمون ساختار غیرمستقیم و صحت‌سنجی با اطلاعات مشاهده‌ای موجود انجام گرفت. آزمون‌های صحت‌سنجی ساختاری غیرمستقیم شامل اجرای تخصصی مدل بود و عیب‌های مدل را غیرمستقیم مشخص می‌کند (۱۸). در این مقاله آزمون ساختاری مدل از طریق آزمون ساختاری غیرمستقیم (آزمون رفتار ساختارگرا) انجام گرفت که به اصطلاح واقعیت مصنوعی نامیده می‌شود. آزمون رفتار مدل به شرایط حدی یکی از ابتدایی‌ترین و در واقع پایه‌ای‌ترین آزمون‌های صحت‌سنجی مدل‌های پویاست که در این مقاله از آن بهره برده شد.

در قسمت ارزیابی رفتار مدل در شبیه‌سازی، از شاخص های آماری ضریب تعیین چندگانه (R^2)، ریشهٔ میانگین مربعات خطا ($RMSE$) و خطای نسبی (RE) استفاده شد (۲۳).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(\bar{P}_i - O_i)^2} \qquad (۱۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}} \qquad (۱۲)$$

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)}{n} \qquad (۱۳)$$

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

نتایج و بحث

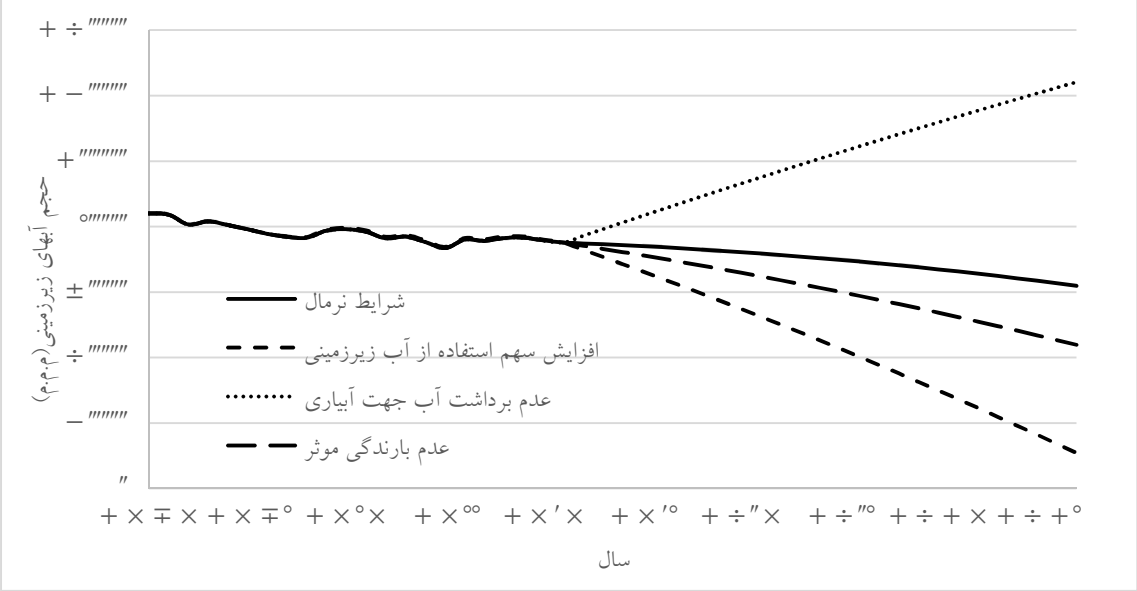
صحت‌سنجی مدل

در شکل ۲ رفتار متغیر کلیدی حجم آب های زیرزمینی در حوضهٔ ارس در شرایط حدی عدم برداشت آب برای آبیاری از منابع آب زیرزمینی، عدم وجود بارندگی مؤثر و افزایش سهم استفاده از آب های زیرزمینی در کشاورزی در مقایسه با شرایط نرمال (وضع موجود) مشاهده می شود. نتایج نشان می‌دهد، در شرایط عدم برداشت آب از منابع آب زیرزمینی در آبیاری، تغذیهٔ آبخوان‌ها بیشتر از تخلیهٔ آن

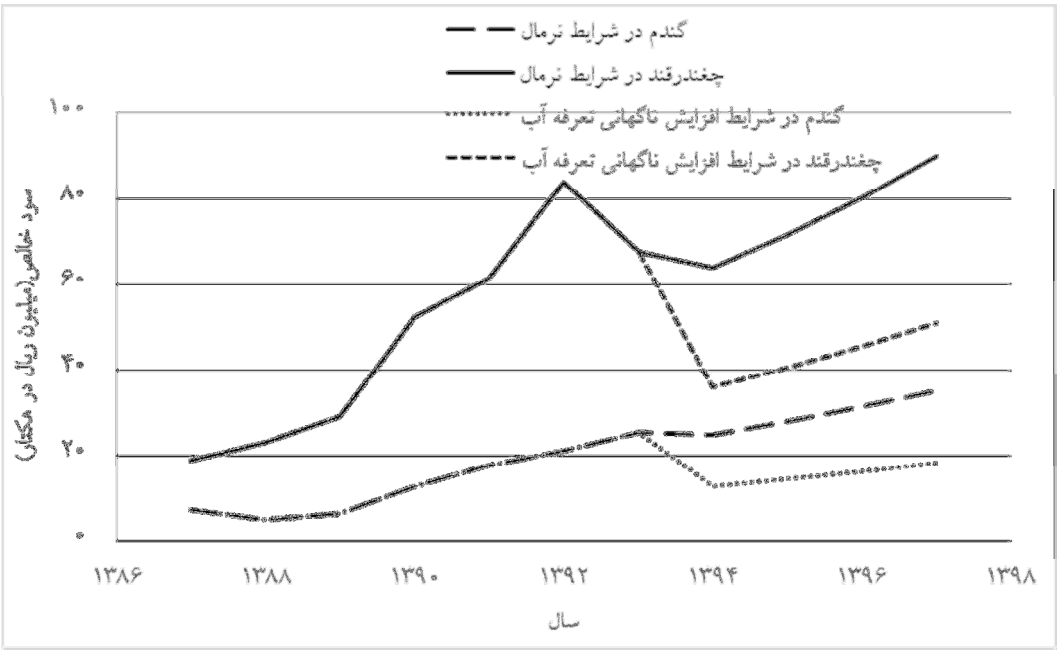
خواهد بود و وجود مصارف شرب و صنعتی باعث کاهش حجم آب‌های زیرزمینی نمی‌شود. در شرایط حدی عدم وجود بارندگی مؤثر و با فرض عدم محدودیت تخصیص منابع آب، برای جلوگیری از کاهش عملکرد محصولات مختلف در وضع موجود، نیاز به افزایش برداشت آب خواهد بود. بنابراین، در این شرایط حجم آب‌های زیرزمینی با شیب بیشتری نسبت به شرایط نرمال کاهش می‌یابد، به‌طوری که در افق ۱٤۲۰ تقریباً مقدار آن معادل ٤۳۸۸ میلیون مترمکعب خواهد شد. در صورتی که ٤۰ درصد آب مورد نیاز کشاورزی در حوضهٔ ارس از آب های زیرزمینی تأمین شود، شیب کاهش ذخایر آب‌های زیرزمینی این حوضه افزایش می‌یابد. نتایج مذکور نشان‌دهندهٔ 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 تعرفهٔ آب (ده برابر) در سال ۱۳۹٤ ارائه شده است. انتظار می‌رود با افزایش قابل‌ملاحظه و ناگهانی تعرفهٔ آب از سال اعمال تغییر، سود خالص کشاورزان به‌علت افزایش هزینه های آبیاری به شدت کاسته شود. نتایج بیانگر صحت رفتار مدل در شرایط حدی افزایش ناگهانی تعرفهٔ آب است، به طوری که در سال ۱۳۹٤ سود خالص حاصل از کشت گندم و چغندرقند به ترتیب حدود ۱۲ و ۲۷ میلیون ریال کاسته می‌شود.

در بخش صحت‌سنجی با اطلاعات مشاهده‌ای (شکل ٤ و ۵)، نتایج نشان دهندهٔ توانایی مدل در برآورد تغییرات حجم آب زیرزمینی (RMSE=74 MCM، RE=-15 MCM و R^2=0.78) و عملکرد محصولات مورد بررسی از جمله عملکرد گندم دیم (RMSE=0.09 ton، RE=-0.01 ton و R^2=0.77) و عملکرد یونجه (RMSE=0.15 ton، RE=- 0.06 ton و R^2=0.75) است.

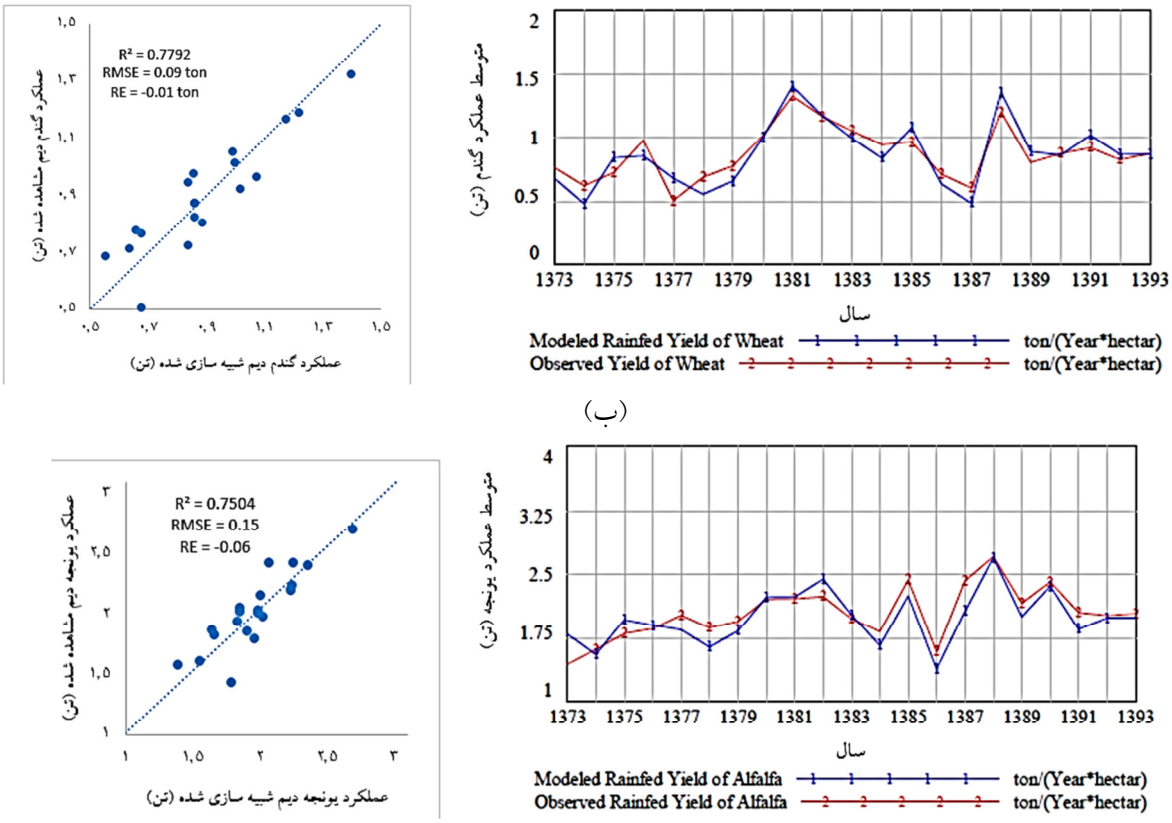


شکل ۲. میزان حجم آب‌های زیرزمینی در حوضهٔ ارس در شرایط حدی عدم برداشت آب از منابع آب زیرزمینی برای آبیاری، عدم بارندگی مؤثر و افزایش ناگهانی ضریب تأمین آب کشاورزی از منابع آب زیرزمینی



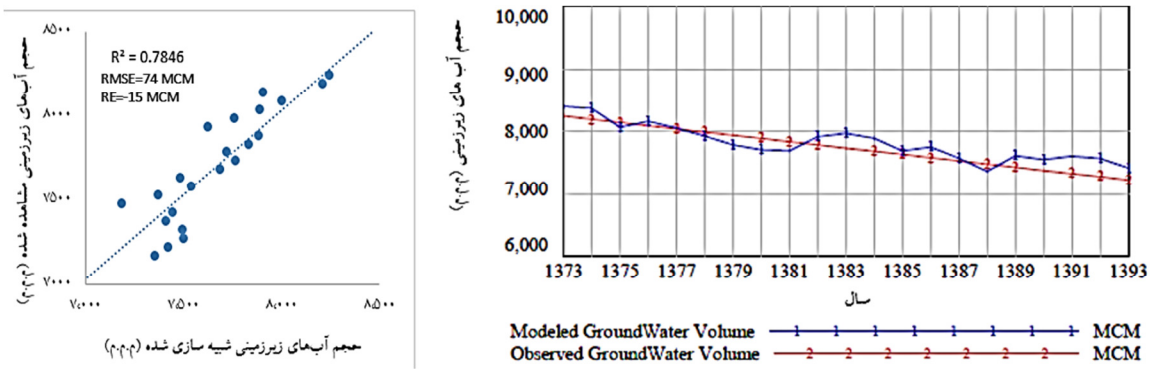
شکل ۳. سود خالص یک هکتار محصولات گندم و چغندرقند در شرایط افزایش ناگهانی تعرفهٔ آب

(الف)



(ب)

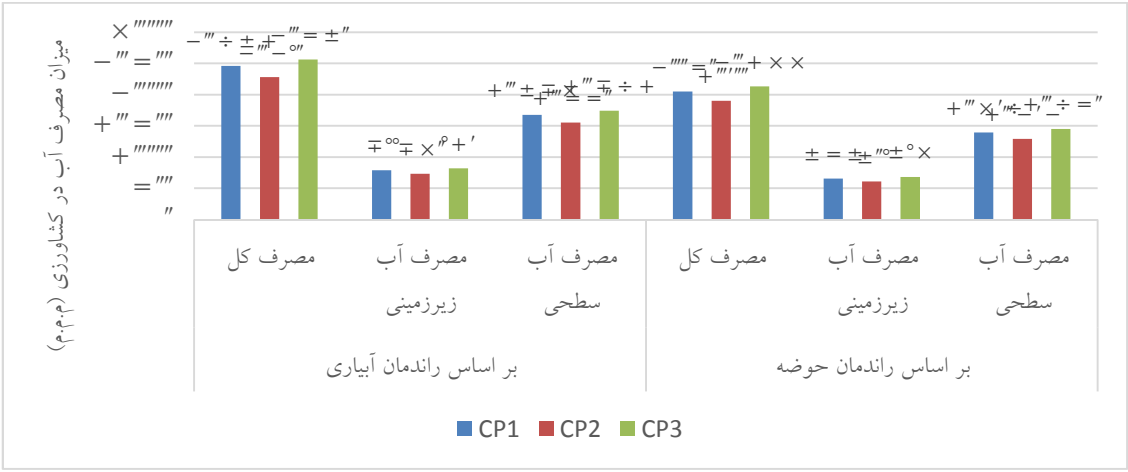
شکل ٤. مقایسهٔ مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شدهٔ عملکرد گندم دیم (الف) و عملکرد یونجهٔ دیم (ب)



شکل ۵. مقایسهٔ مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شدهٔ حجم آب زیرزمینی

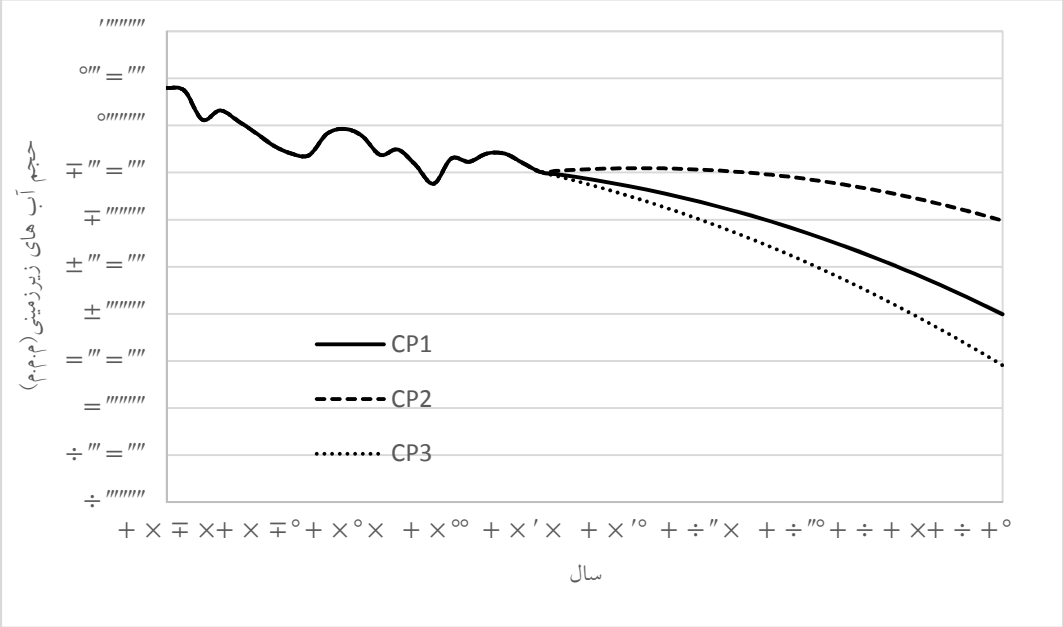
تحلیل سناریوهای اصلاح الگوی کشت

شکل ٦ به مقایسهٔ میزان مصرف آب سطحی و زیرزمینی حوضهٔ ارس در بخش کشاورزی بر اساس راندمان حوضه و آبیاری در سناریوهای مختلف الگوی کشت می‌پردازد. بیشترین و کمترین میزان مصرف سالانهٔ آب در کشاورزی بر اساس راندمان آبیاری به‌ترتیب متعلق به سناریوهای CP3 و CP2 با مقادیر ۲۵٦۰ و ۲۲۸۰ میلیون مترمکعب است، در حالی که این مقادیر بر اساس راندمان حوضه به ترتیب برابر ۲۱۳۳ و ۱۹۰۰ میلیون مترمکعب است. میزان مصرف آب زیرزمینی بر اساس راندمان حوضه در سناریوهای CP1 تا CP3 به‌ترتیب ۱۳۲، ۱۲۲ و ۱۳٦ میلیون مترمکعب بیش از میزان مصرف آب زیرزمینی بر اساس راندمان آبیاری بود. همان‌طور که مشاهده می شود مقادیر میزان مصرف آب بر اساس راندمان آبیاری با راندمان حوضه دارای اختلاف قابل‌ملاحظه ای است، اما بهتر است راندمان حوضهٔ معیار ارزیابی و ملاک عمل قرارگیرد، زیرا در نگاه کلان و با هدف مدیریت آب یک حوضه، راندمان آبیاری به‌دلیل درنظرگرفتن آب های برگشتی، به‌عنوان تلفات، گمراه‌کننده است. لذا، در ادامهٔ این مقاله شاخص‌ها بر اساس راندمان آبیاری، صرفاً برای مقایسه ارائه می‌شود و مبنای تحلیل‌ها شاخص‌ها بر اساس راندمان حوضه خواهد بود.



شکل ٦. میزان مصرف سالانهٔ آب سطحی و زیرزمینی در کشاورزی بر اساس راندمان آبیاری و حوضه در سناریوهای مختلف اصلاح الگوی کشت

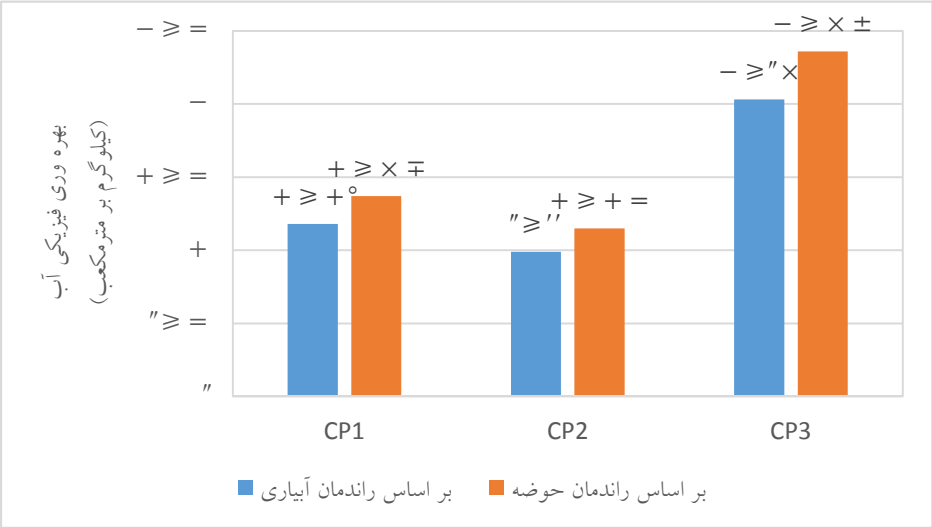
شکل ۷ نشان می‌دهد که به‌دلیل مصرف متفاوت آب در سناریوهای مختلف اصلاح الگوی کشت، شیب کاهش حجم آب‌های زیرزمینی متغیر بوده است، به طوری که بیشترین و کمترین شیب افت حجم آب های زیرزمینی به سناریوی CP3 و CP2 تعلق داشت. به عبارتی، سناریوی الگوی کشت بهینه در حفظ پایداری منابع آب حوضهٔ ارس بهتر عمل کرده و در افق ۱۴۲۰ حجم ذخیرهٔ آب های زیرزمینی در این سناریو نسبت به سناریوی الگوی کشت وضع موجود، حدود ۱۰۰۰ میلیون مترمکعب بیشتر بوده است.



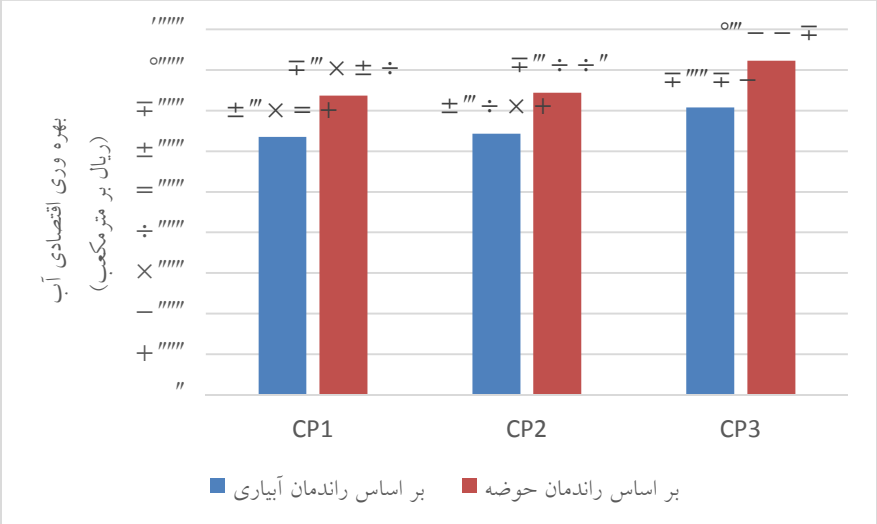
شکل ۷. حجم آب‌های زیرزمینی در سناریوهای مختلف اصلاح الگوی کشت

میزان تولید سالانهٔ اراضی آبی در سناریوهای CP1، CP2 و CP3 به ترتیب ۳/۵، ۲/۷ و ۶/۲ میلیون تن بود. در شکل ۸ میزان بهره وری فیزیکی آب حوضهٔ ارس ارائه شده است. میزان بهره وری فیزیکی آب حوضهٔ ارس در شرایط موجود بر اساس راندمان حوضه و آبیاری به ترتیب برابر ۱/۱۸ و ۱/۳۷ کیلوگرم بر مترمکعب است. بیشترین میزان بهره‌وری فیزیکی آب بر اساس راندمان حوضه در سناریوی CP3 با مقدار ۲/۳۶ کیلوگرم بر مترمکعب و کمترین آن در سناریوی CP2 با مقدار ۱/۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب رقم خورده است. دلیل این امر بیشتر بودن تولید در مقایسه با مصرف آب در سناریوی CP3 بوده است.

در شکل ۹ بهره وری اقتصادی آب بر اساس راندمان آبیاری و حوضه در افق ۱۴۲۰ ارائه شده است. بهره‌وری اقتصادی آب بر اساس راندمان آبیاری در سناریوهای CP1، CP2 و CP3 به ترتیب ۵۳۵۱، ۵۴۳۱ و ۷۰۷۲ ریال بر مترمکعب و بر اساس راندمان حوضه به ترتیب ۷۳۶۴، ۷۴۴۰ و ۸۲۲۷ ریال بر مترمکعب است. همان گونه که ذکر شد، در سناریوی CP2 به‌دلیل کاهش تولید، بهره‌وری فیزیکی آب حوضه نسبت به سناریوی CP1 کمتر شده است، در حالی که بهره‌وری اقتصادی سناریوی CP2 به‌دلیل کاهش مصرف آب و در نتیجه کاهش هزینه‌های مرتبط با آبیاری تقریباً معادل سناریوی CP1 بود.

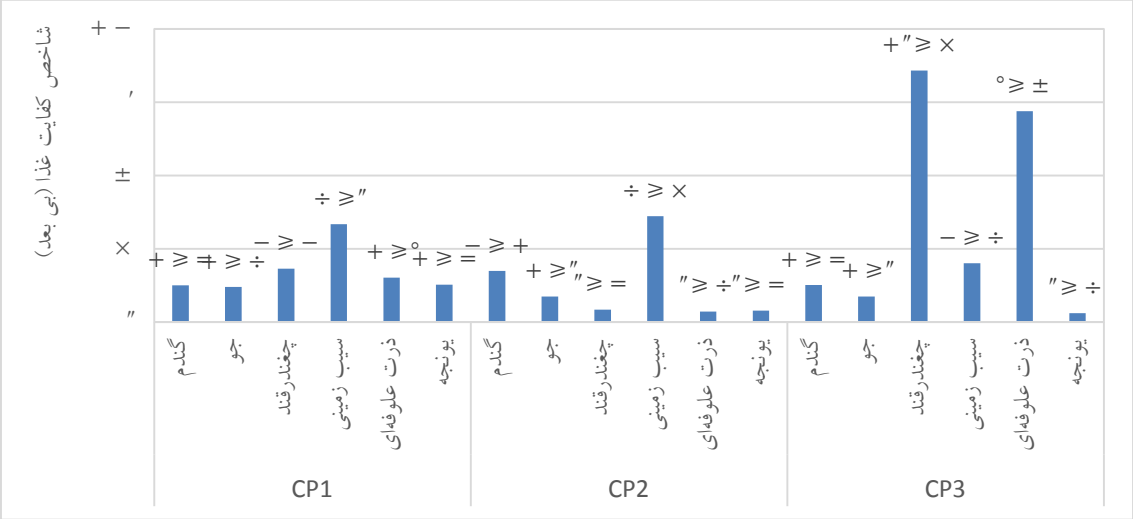


شکل ۸. میزان بهره‌وری فیزیکی آب حوضهٔ ارس بر اساس راندمان آبیاری و حوضه در سناریوهای مختلف اصلاح الگوی کشت



شکل ۹. بهره‌وری اقتصادی آب حوضهٔ ارس بر اساس راندمان آبیاری و حوضه در سناریوهای مختلف اصلاح الگوی کشت در افق ۱۴۲۰

شکل ۱۰ به مقایسهٔ شاخص کفایت غذا در سناریوهای مختلف الگوی کشت در افق ۱۴۲۰ می‌پردازد. مقدار شاخص کفایت غذا در سناریوی CP1، برای تمامی محصولات، بالاتر از ۱ است و می‌توان گفت که الگوی کشت حال حاضر حوضهٔ ارس در راستای تعادل‌بخشی بین عرضه و تقاضای محصولات مورد نیاز در حوضه است. این در حالی است که این تعادل بین عرضه و تقاضا، در سناریوهای CP2 و CP3 دستخوش تغییر شده است و در



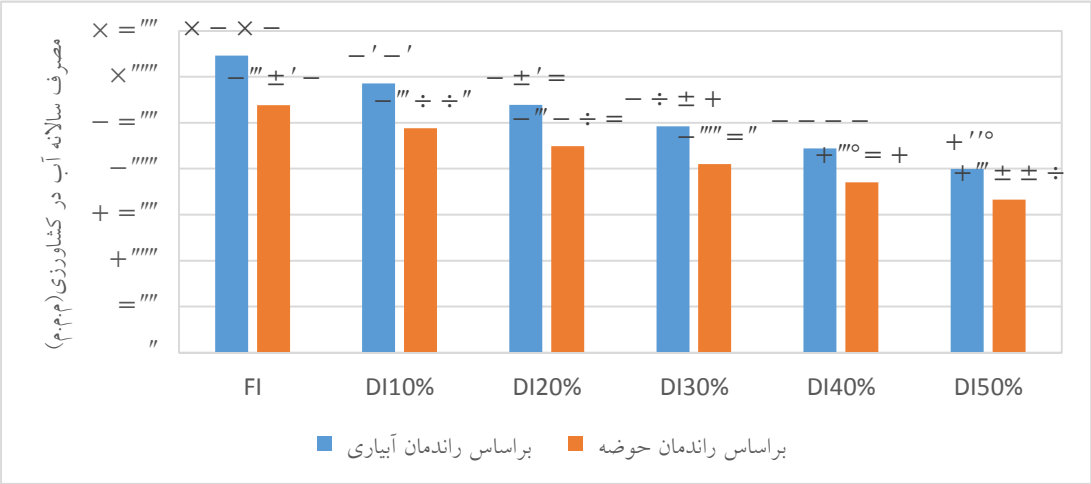
شکل ۱۰. میزان شاخص کفایت غذا در سناریوهای مختلف اصلاح الگوی کشت در افق ۱۴۲۰

این سناریوها شاخص کفایت غذا در تمامی محصولات بیشتر از ۱ نیست. در سناریوی CP3 دامنهٔ تغییرات این شاخص قابل توجه است، به طوری که در محصول یونجه ۰/٤ و در محصول چغندرقند ۱۰/۳ است.

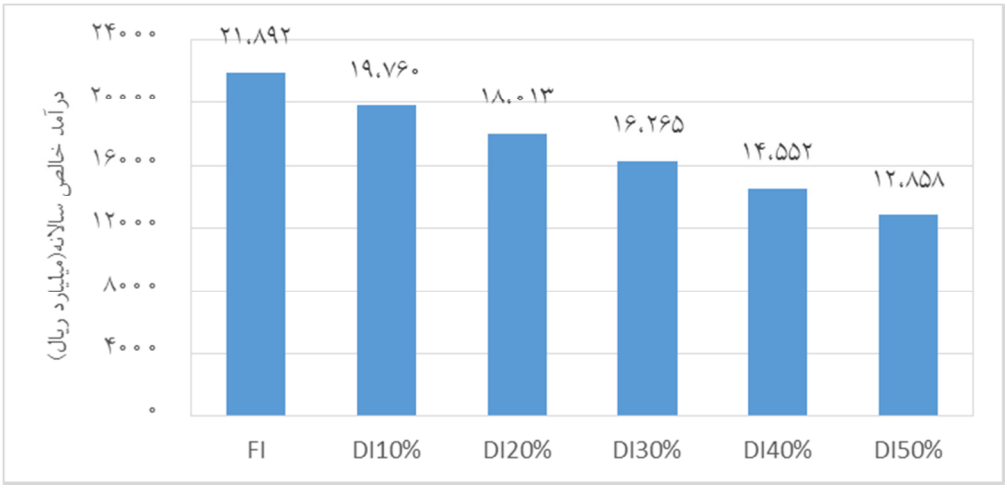
به طور کلی، نتایج نشان می دهد که انتخاب الگوی کشت برتر بر اساس شاخص‌ها و معیارهای مختلف تغییر می کند. سناریوی CP3 دارای بالاترین میزان بهره وری فیزیکی و اقتصادی آب است، ولی میزان مصرف آب در آن نسبتاً زیاد است، به‌گونه‌ای که در افق ۱٤۲۰ حجم آب‌های زیرزمینی را به حدود ٥٤٥۰ میلیون مترمکعب تقلیل می دهد. بنابراین، سناریوی CP3 در راستای مدیریت و پایداری منابع آب حوضهٔ ارس در سال‌های آینده توجیه پذیر نیست. در مورد دو سناریوی CP1 و CP2، اگر معیار مصرف آب کمتر باشد، سناریوی CP2 و اگر معیار شاخص کفایت غذا و بهره‌وری فیزیکی آب بیشتر باشد، سناریوی CP1 مناسب خواهد بود. اما باید توجه داشت، در صورت اجرای الگوی کشت بهینه، نیاز خواهد بود تا بخشی از نیاز به محصولات مختلف از طریق حوضه های مجاور یا واردات تأمین شود.

تحلیل سناریوهای مدیریت کم‌آبیاری

شکل ۱۱ حجم مصرف سالانهٔ آب کشاورزی حوضهٔ ارس را بر اساس راندمان آبیاری و حوضه نمایش می دهد. بیشترین و کمترین میزان مصرف سالانهٔ آب در کشاورزی به ترتیب متعلق به سناریوهای FI و DI50% است که مقادیر آن بر اساس راندمان آبیاری به‌ترتیب معادل ۳۲۳۲ و ۱۹۹۸ میلیون مترمکعب و بر اساس راندمان حوضه به ترتیب برابر ۲٦۹۲ و ۱٦٦٤ میلیون مترمکعب است. بنابراین، میزان متفاوت مصرف آب در این دو سناریو بالاترین ارقام تولید و سود خالص از اراضی آبی حوضهٔ ارس در سناریوی FI و کمترین آن در سناریوی DI50% رقم خورد (شکل ۱۲). برابری حدودی میزان مصرف سالانهٔ آب بر اساس راندمان آبیاری در سناریوی DI30% و میزان مصرف سالانهٔ آب بر اساس راندمان حوضه در سناریوی DI10% گواه این مطلب است که تحلیل ها بر اساس راندمان حوضه و آبیاری نتایج کاملاً متفاوتی به همراه داشته است و حتی باعث بروز خطا در اتخاذ سیاست های مدیریت منابع آب می‌شود. بنابراین، در مدیریت کلان حوضه، باید در این امر دقت داشت.



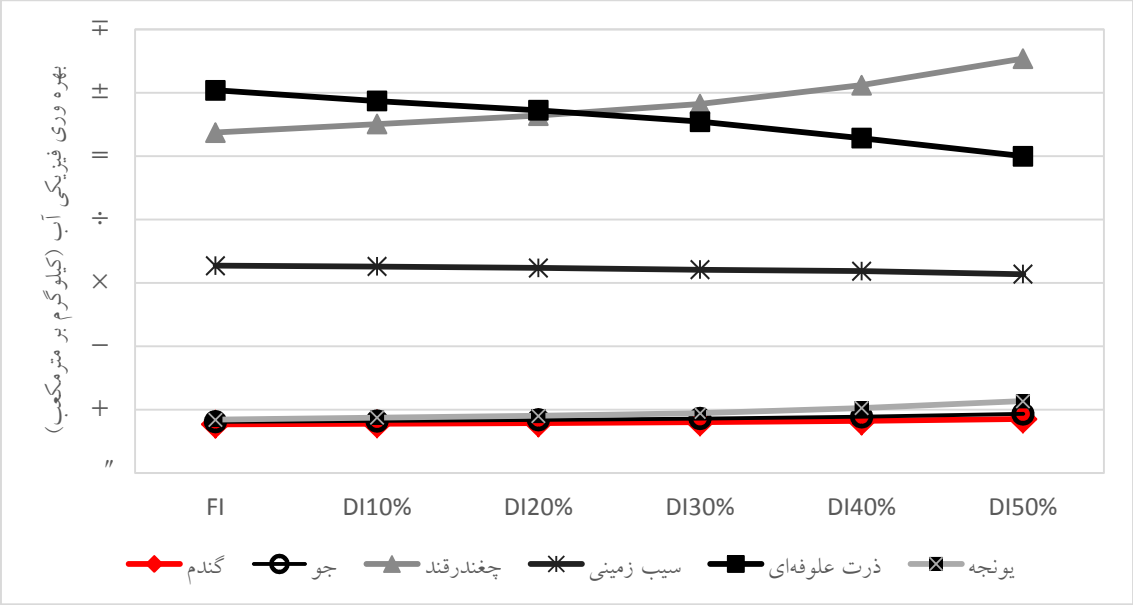
شکل ۱۱. میزان مصرف سالانهٔ آب در کشاورزی در سناریوهای مختلف مدیریت کم‌آبیاری



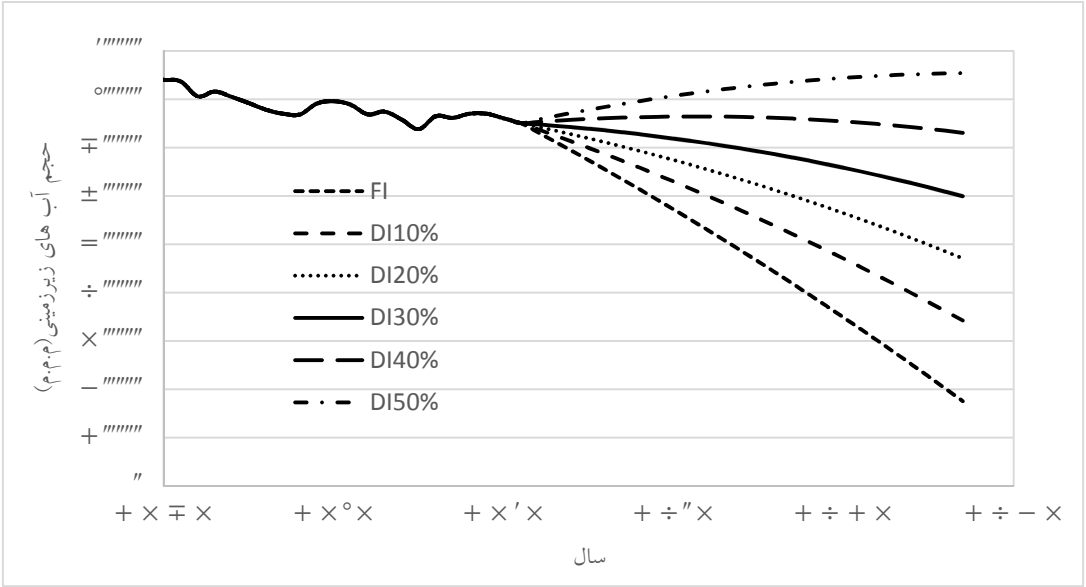
شکل ۱۲. ارزش فعلی درآمد خالص سالانهٔ اراضی آبی حوضهٔ ارس در سناریوهای مختلف مدیریت کم‌آبیاری در افق ۱۴۲۰

در شکل ۱۳ میزان بهره‌وری فیزیکی آب در محصولات و سناریوهای مختلف مدیریت کم آبیاری ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش کم‌آبیاری، بهره وری فیزیکی آب محصولات گندم و جو تقریباً ثابت است و بهره‌وری آب چغندرقند و یونجه روند نسبتاً صعودی و بهره‌وری آب سیب‌زمینی و ذرت علوفه‌ای روند نسبتاً نزولی داشته است. البته، روند صعودی و نزولی به‌ترتیب یونجه و سیب‌زمینی بسیار ناچیز و قابل‌اغماض است. اما، به طور کلی، دلیل این روندهای گوناگون، متفاوت بودن درجهٔ حساسیت محصولات مورد بررسی به تنش آبی است. این روندهای متفاوت، همچنین ارزش اقتصادی متفاوت محصولات و آب بهای نسبتاً کم باعث شد تا بهره وری فیزیکی و اقتصادی آب حوضهٔ ارس در سناریوهای مختلف اختلاف قابل توجهی نداشته باشد، به‌طوری که میزان بهره‌وری فیزیکی آب در سناریوهای FI و DI50% بر اساس راندمان حوضه به ترتیب برابر ۱/٤٤ و

۱/۳۱ کیلوگرم بر مترمکعب و بهره‌وری اقتصادی آب این سناریوها به‌ترتیب معادل ۷۶۴۲ و ۷۲۵۹ ریال بر مترمکعب بود. در صورتی که آب‌بها افزایش قابل‌توجهی یابد، سناریوهای کم‌آبیاری دارای بهره‌وری اقتصادی بیشتری نسبت به سناریوی آبیاری کامل خواهد بود.



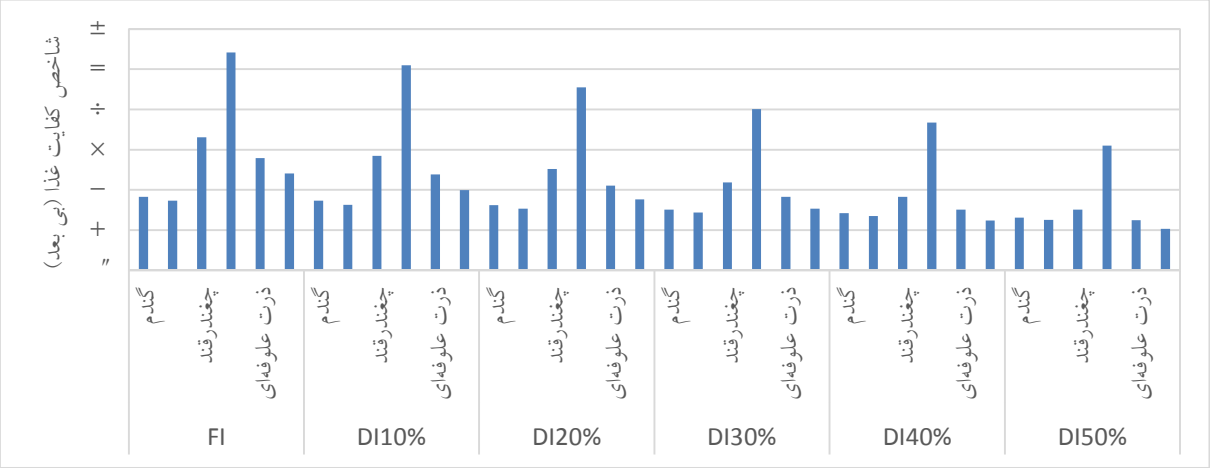
شکل ۱۳. میزان بهره‌وری فیزیکی آب در محصولات و سناریوهای مختلف مدیریت کم‌آبیاری



شکل ۱۴. حجم آب‌های زیرزمینی در سناریوهای مختلف مدیریت کم‌آبیاری

شکل ١٤ به مقایسهٔ حجم آب‌های زیرزمینی در سناریوهای مختلف مدیریت کم آبیاری در حوضهٔ ارس می پردازد. در افق ١٤٢٠ حجم ذخیرهٔ آب های زیرزمینی در سناریوهای FI تا DI50% به ترتیب برابر ١٧٥٧، ٣٤٢٤، ٤٧١٠، ٥٩٩٥، ٧٣٠٧ و ٨٥٤٠ میلیون مترمکعب خواهد بود. مصرف سالانهٔ آب در سناریوی DI50%بر اساس راندمان حوضه، ١٠٢٨ میلیون مترمکعب کمتر از سناریوی FI است و این امر باعث شد تا حجم آب‌های زیرزمینی حوضهٔ ارس در سناریوی با کم‌آبیاری ٥٠ درصد روندی صعودی یابد. در سناریوی DI40% تا سال ١٤٠٥ حجم آب های زیرزمینی با شیب کمی افزایش یافت و از سال ١٤٠٥ به بعد به‌دلیل رشد جمعیت و افزایش مصرف در بخش‌های شرب و صنعت، حجم آب های زیرزمینی مجدداً روند نزولی پیدا کرد.

شکل ١٥ به مقایسهٔ شاخص کفایت غذا در محصولات و سناریوهای مختلف مدیریت کم‌آبیاری پرداخته است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، شاخص کفایت غذا تقریباً در تمامی سناریوها و محصولات بالاتر از ١ است. در واقع، این شاخص عامل محدودکننده ای در انتخاب سناریوی مدیریت کم‌آبیاری نیست. اما سناریوی DI50% نامطمئن‌ترین وضعیت این شاخص را به خود اختصاص داده است، به‌طوری که با تغییر سناریوی جمعیتی از حالت نرمال به کرانهٔ بالا، تأمین نیاز حوضه در برخی محصولات با مشکل مواجه می‌شود.

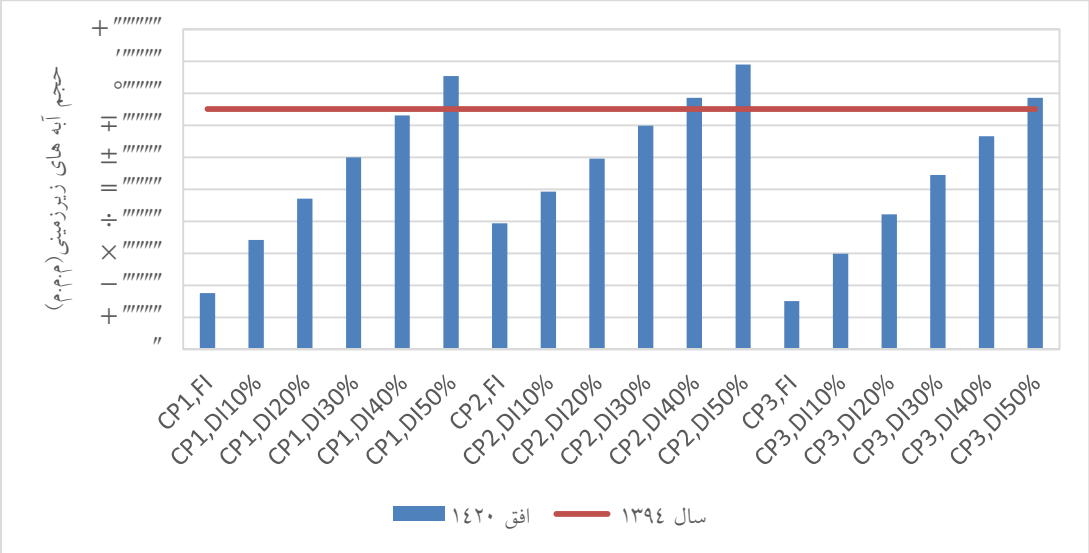


شکل ١٥. میزان شاخص کفایت غذا در محصولات و سناریوهای مختلف مدیریت کم‌آبیاری در افق ١٤٢٠

به‌طور کلی، هر چند سناریوی FI دارای بالاترین میزان تولید و درآمد خالص سالانه است، با وضعیت حال حاضر و شیوهٔ کنونی مدیریت منابع آب این حوضه، دستیابی به این سناریو نامحتمل و ناممکن می‌نماید و تکیه بر آن منابع آب در این حوضه را با بحران مواجه می کند. در سناریوهای DI10% و DI20% به دلیل مصرف نسبتاً زیاد آب و افزایش قابل توجه شیب کاهش حجم منابع آب، لازم است تا راهکارهای مدیریتی دیگر نیز به موازات اجرایی شود تا اثر آن بر منابع آب زیرزمینی تعدیل شود. همچنین، سناریوی DI50% اگرچه دارای حداقل مصرف آب و شیب کاهش حجم آبخوان‌هاست، به‌دلیل کاهش محسوس درآمد خالص کشاورزان در شرایط کنونی عملی نیست. در

این میان در سناریوی DI40% که در واقع نسبت به شرایط موجود (DI30%) ۱۰ درصد کم آبیاری بیشتری اعمال می کند، کنترل و مدیریت قابل قبولی بر منابع آبی خواهد داشت و در عین حال درآمد خالص کشاورزی و تولید حوضه نیز با کاهش شدید مواجه نمی‌شود.

در شکل ۱۶ ترکیب سناریوهای اصلاح الگوی کشت و مدیریت کم آبیاری ارائه شده است. آنچه مسلم است، هیچ کدام از سیاست های اصلاح الگوی کشت و مدیریت کم آبیاری به تنهایی در دستیابی به کشاورزی، اقتصاد و منابع آب پایدار حوضهٔ ارس مؤثر نیست. همان گونه که مشخص است، سناریوهای اصلاح الگوی کشت، تحت شعاع سناریوهای مدیریت کم آبیاری است. به عبارتی، مدیریت کم آبیاری نسبت به اصلاح الگوی کشت در صرفه جویی در مصرف آب تأثیر به مراتب بیشتری دارد. بیشترین کاهش منابع آب زیرزمینی در ترکیب سناریوهای کم آبیاری با سناریوی CP3 وجود دارد، بنابراین این سناریوها در راستای اهداف جلوگیری از ایجاد بحران آبی در این حوضه توجیه پذیر نیست. ترکیب سناریوهای کم آبیاری با سناریوی الگوی کشت بهینه (CP2) در مقایسه با سناریوی الگوی کشت موجود (CP1)، در حفظ و مدیریت منابع آب زیرزمینی حوضهٔ ارس عملکرد بهتری داشت.



شکل ۱۶. حجم آب‌های زیرزمینی در سناریوهای مختلف مدیریت کم‌آبیاری در افق ۱۴۲۰

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، آثار مختلف راهکارهای مدیریت آب در کشاورزی شامل اصلاح الگوی کشت و مدیریت کم‌آبیاری بررسی شده است. نتایج نشان داد، هیچ کدام از راهکارها به تفکیک گره‌گشای بحران آبی حوضه و مسائل اقتصادی و کفایت تولید محصولات کشاورزی نیست. بنابراین، تلفیقی از راهکارهای ذکرشده باید مورد توجه مسئولان و مدیران قرارگیرد. بر اساس یافته های این پژوهش، انتخاب الگوی کشت و سطح کم آبیاری مناسب، با توجه به معیارهای گوناگون اقتصادی، پایداری منابع آب و جزآن تغییر خواهد کرد. در حالتی که استفاده از سایر راهکارهای صرفه جویی در مصرف آب همانند توسعهٔ آبیاری تحت فشار و اصلاح

مدیریت آبیاری سطحی به دلایل فنی یا اقتصادی میسر نباشد، ترکیب سناریوی DI40% با سناریوهای CP1 و CP2 در مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی حوضهٔ ارس نقش مؤثری دارد. البته، در صورت اجرای الگوی کشت بهینه، نیاز خواهد بود تا برای تعدیل کاهش تولید و درآمد خالص کشاورزان در اثر کم‌آبیاری، از راهکارهای مدیریتی دیگر همانند استفاده از ارقام پرمحصول و مقاوم به کم آبی بهره برد و در صورت لزوم از طریق محصولات دیگر حوضه‌ها یا واردات تأمین شود.

مطلب دیگر که باید بدان اشاره داشت این است که در حال حاضر سهم استفاده از منابع آب زیرزمینی در حوضهٔ ارس ۳۲ درصد است، در حالی که سالانه به غیر از حقابه های محیط زیستی، حدود ٤۰۰۰ میلیون مترمکعب از آب های سطحی از این حوضه خارج و عمدتاً به دریای خزر می ریزد. بنابراین، با توجه به پتانسیل مناسب منابع آب سطحی در این منطقه، سهم استفاده از منابع آب زیرزمینی کاهش می یابد. اگر سهم استفادهٔ آب کشاورزی از منابع آب زیرزمینی ۳ درصد کاهش یابد و در عین حال هیچ‌گونه سیاست حفاظتی نیز اجرا نشود، می توان به مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی این حوضه دست‌یافت. بنابراین، پیشنهاد می شود این راهکار نیز سیاستی مؤثر در راستای کاهش مشکلات بحران آبی پیش روی این حوضه، مد نظر مسئولان و مدیران مربوط قرارگیرد. اما، نباید از نظر دور داشت، نیل به این هدف با توجه به توزیع نامتقارن آب های سطحی و زیرزمینی در گسترهٔ حوضهٔ ارس به سادگی میسر نیست و نیاز به مطالعات جامع‌تر و در ادامه سیاست‌گذاری‌های متفاوتی دارد.

منابع

۱. احمدالی خ. (۱۳۹۲) توسعهٔ مدل انتقال آب مجازی برای اصلاح الگوی کشت و استفادهٔ بهینه از آب کشاورزی در کشور. دانشگاه تهران، رسالهٔ دکتری.

۲. بی‌نام (۱۳۹۲) بهنگام‌سازی طرح جامع آب کشور در حوضه‌های ارس، ارومیه، تالش- تالاب انزلی، سفیدرود بزرگ، سفیدرود- هراز، هراز- قره‌سو، گرگان‌رود و اترک. جلدهای ۳۸-٤۷.

۳. حسینی س.ا. و باقری ع. (۱۳۹۲) مدل‌سازی پویایی سیستم منابع آب دشت مشهد برای تحلیل استراتژی های توسعهٔ پایدار. مجلهٔ آب و فاضلاب، ۲٤(٤): ۲۸-۳۹.

٤. عباسی ف. ناصری ا. سهراب ف. باغانی ج. عباسی ن. و اکبری م. (۱۳۹٤) ارتقای بهره‌وری مصرف آب. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ٦۸ ص.

۵. علیزاده ح. (۱۳۹۳) مدل سازی پویای بهره‌برداری از پساب با رویکرد پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی (مطالعهٔ موردی: دشت ورامین). دانشگاه تهران، رسالهٔ دکتری.

٦. نظری ب. (۱۳۹۲) مدل‌سازی پویای شبکه‌های آبیاری با رویکرد بهره‌وری آب. دانشگاه تهران، رسالهٔ دکتری.

۷. نوذری ح. (۱۳۸۸) مدیریت شوری و بهره‌برداری از زهاب کشاورزی با استفاده از تحلیل پویایی سیستم. دانشگاه تهران، رسالهٔ دکتری.

8. Alizadeh A. and Keshavarz A. (2005) Status of agricultural water use in Iran. In Water conservation, reuse, and recycling. Proceedings of an Iranian-American Workshop, Washington DC, USA.

9. Bala B.K. Satter M.A. Halim M.A. and Talukdar M.S.U. (1988) Simulation of crop-irrigation systems. Agricultural Systems, 27(1): 51-65.

10. Doorenbos J. and Kassam A.H. (1979) Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper 33, 257 p.

11. Fletcher E.J. (1998) The use of system dynamics as a decision support tool for the management of surface water resources. In First International Conference on New Information Technologies for Decision Making in Civil Engineering.

12. Giordano, R. Brugnach, M. and Vurro, M. (2012) System dynamic modelling for conflicts analysis in groundwater management. International Environmental Modelling and Software Society, Ph.D. Dissertation.

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

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

15. Kwakkel J.H. and Slinger J.H. (2012) A system dynamics mode-based exploratory analysis of salt water intrusion in coastal aquifers. In Proceedings of the 30th International Conference of the System Dynamics Society, St. Gallen, Switzerland.

16. Luo Y. Khan S. Cui Y. Zhang Z. and Zhu X. (2006) Sustainable irrigation water management in the lower Yellow River Basin: a system dynamics approach. Australian Centre for International Agricultural Research Proceedings, Australia.

17. Madani K. and Mariño M.A. (2009) System dynamics analysis for managing Iran's Zayandeh-Rud river basin. Water Resources Management, 23(11): 2163-2187.

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

19. Saysel A.K. Barlas Y. and Yenigün O. (2002) Environmental sustainability in an agricultural development project: a system dynamics approach. Environmental Management, 64: 247-260.

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

21. Sterman J. (2002) System dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. ESD Internal Symposium. Massachusetts Institute of Technology, USA.

22. Sušnik J. Vamvakeridou-Lyroudia L.S. Savić D.A. and Kapelan Z. (2013) Integrated modelling of a coupled wateragricultural system using system dynamics. Water and Climate Change, 4(3): 209-231.

23. Willmott C.J. Ackleson S.G. Davis R.E. Feddema J.J. Klink K.M. Legates D.R. and Rowe C.M. (1985) Statistics for the evaluation and comparison of models. Geophysical Research, 90(C5): 8668-9005.