

حداکثرسازی شاخص بهره‌وری اقتصادی آب در کشاورزی با کاربرد سطوح مختلف کم‌آبیاری

احمد مهربانی^{۱*}، منوچهر حیدرپور^۱ و حمیدرضا صفوی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱/۱۶)

چکیده

طراحی الگوی کشت بهینه و تخصیص به موقع منابع آب همراه با کم‌آبیاری از جمله راهکارهای بهینه حداکثرساختن شاخص بهره‌وری اقتصادی از آب است. در این مقاله به بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و تخصیص آب با استفاده از شیوه کم‌آبیاری پرداخته شده است. منطقه مورد مطالعه غرب شبکه آبیاری دشت قزوین و ۶ سطح متفاوت درصد کاهش میزان آبیاری نسبت به پتانسیل نیاز آبی ماهانه (۰، ۱۰ تا ۰، ۲۰ تا ۰، ۳۰ تا ۰، ۴۰ تا ۰ و ۵۰ تا ۰ درصد) در سه سال خشک، نرمال و تر مورد مقایسه قرار گرفت و در هر سال بهترین سناریوی کم‌آبیاری انتخاب و نتایج با الگوی کشت موجود همان سال مقایسه شد. الگوی کشت جدید شامل محصولات اصلی منطقه و اضافه شدن محصول کلزا بود. هدف، رسیدن به حداکثر بهره‌وری اقتصادی آب (سود خالص در واحد حجم آب) با رعایت سقف برداشت ماهانه و سالانه آب‌های سطحی و زیرزمینی بود. نتایج نشان داد که بهترین سناریو در سال خشک حداکثر درصد کاهش میزان آبیاری نسبت به پتانسیل نیاز آبی ماهانه ۲۰ درصد، در سال نرمال آبیاری کامل و در سال تر حداکثر درصد کاهش میزان آبیاری نسبت به پتانسیل نیاز آبی ماهانه ۱۰ درصد می‌باشد. بهبود شاخص بهره‌وری اقتصادی آب برای سال خشک ۵۲/۲ درصد، سال نرمال ۴۱/۵ درصد و سال تر ۱۹/۶ درصد بوده و متوسط درصد تأمین آبیاری سالانه در سال خشک از ۶۴/۳ به ۹۱/۷ درصد، در سال نرمال از ۷۰/۰ به ۱۰۰ درصد و در سال تر از ۷۷/۵ به ۹۷/۱ درصد افزایش می‌یابد، همچنین عملکرد نسبی کلیه محصولات به‌ویژه گندم، یونجه و چغندر قند را به مقدار قابل توجهی ارتقا می‌دهد. بنابراین، الگوریتم جستجوی گرانشی، به‌عنوان یک مدل بهینه‌ساز می‌تواند در انتخاب الگوی کشت و تخصیص مناسب منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی با لحاظ منافع اقتصادی در مدیریت شبکه‌های آبیاری مدنظر قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: الگوی کشت، شاخص بهره‌وری آب، الگوریتم جستجوی گرانشی، مدل بهینه‌ساز، کم‌آبیاری

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

*. مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: a.mehrabi@ag.iut.ac.ir

مقدمه

یکی از ارکان اساسی مدیریت آب و افزایش بهره‌وری مصرف آب در کشاورزی، توزیع بهینه آب می‌باشد. عدم بهره‌برداری بهینه از منابع آبی از موضوعات مهمی است که امروزه طراحان با آن مواجه هستند. کم‌توجهی به این امر باعث عدم بهره‌برداری بهینه و اتلاف سرمایه‌های اولیه خواهد شد. طراحی و اجرای الگوی کشت یکی از مهم‌ترین مباحث در برنامه‌ریزی کشاورزی محسوب می‌شود. بطورکلی عوامل مؤثر بر الگوی کشت محصولات زراعی و باغی را می‌توان عوامل و منابع طبیعی شامل اقلیم، منابع آب و خاک و...، عوامل زیست‌محیطی، عوامل اجتماعی، سیاست‌گذاری‌های دولت و عوامل اقتصادی دانست. الگوی کشت محصولات به عنوان برنامه تولیدات کشاورزی آینده، در درجه اول باید برآیندی مناسب و قابل اجرا از تلفیق صحیح کلیه پتانسیل‌ها، محدودیت‌ها و نیازهای هر منطقه باشد؛ درحالی که همزمان بایستی به نیازهای ملی نیز پاسخگو باشد (۸). غلامی و همکاران (۵) اهمیت بهره‌وری آب در کشاورزی را در دشت مروودشت-رامجرد مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. رضایی (۱۵) شاخص‌های بهره‌وری آب کشاورزی در شبکه آبیاری و زهکشی درودزن فارس را مورد بررسی قرار دادند. کریمی و جلیلی (۶) سه شاخص مهم بهره‌وری آب کشاورزی را در محصولات مهم زراعی برای انتخاب محصولات مناسب در دشت مشهد مورد مطالعه قرار دادند و بدین نتیجه رسیدند محصولات پرمصرف با بهره‌وری اقتصادی کم بایستی از الگوی کشت حذف شوند. ولی‌زاده و همکاران (۲۲) تحقیقات مشابهی در تحلیل شاخص‌های بهره‌وری آب انجام دادند. نظری فر و همکاران (۱۲) یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی با تابع هدف شاخص بهره‌وری اقتصادی (سود خالص به ازای واحد آب مصرفی) با یک مدل رشد گیاهی ترکیب و توسعه دادند. نتایج نشان داد که در سناریوی ۱۰ درصد کم‌آبیاری، مقدار شاخص بهره‌وری اقتصادی آب تا ۱۹ درصد نسبت به آبیاری کامل ارتقا می‌یابد. در سناریوهای ۲۰ درصد و ۳۰ درصد کم‌آبیاری، با اجرای الگوی کشت بهینه مربوطه، مقادیر این شاخص به ترتیب

معادل ۲۱ و ۲۳ درصد افزایش یافت. در نشریات علمی خارج از کشور هم مقاله‌های متعددی در زمینه شاخص بهره‌وری آب چاپ شده است. منتظر و رحیمی‌خوب (۱۱) شاخص بهره‌وری اقتصادی شبکه‌های آبیاری را در مناطق خشک و نیمه‌خشک با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی در شرایط مختلف آب و هوایی مورد بررسی قرار دادند و بهبود این شاخص را با انتخاب الگوی کشت بهینه و انجام کم‌آبیاری نتیجه گرفتند. ریگلولار و پرادهان (۱۴) با هدف بهره‌وری حداکثر از منابع آب یک مدل برنامه‌ریزی آبیاری جهت استفاده تلفیقی از آب سطحی و زیرزمینی پیشنهاد دادند. صفوی و انتشاری (۱۷) جهت حل مسئله بهره‌برداری تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی در شبکه‌های آبیاری پایاب سد زاینده رود با اهداف اقتصادی و کنترل افت سطح آب زیرزمینی، مدل بهینه‌ساز الگوریتم مورچگان را به شبیه‌ساز شبکه عصبی پیوند دادند. لی و همکاران (۹) یک مدل برنامه‌ریزی دوهدفه با اهداف حداکثر بهره‌وری محصول و حداقل کردن کمبودهای آبی با ورودی‌های فازی و در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در تخصیص آب به مناطق آبیاری توسعه دادند. صفوی و فلسفیون (۱۶) از یک مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک طی یک دوره ۵ ساله (نرمال، خشک و تر) جهت استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی استفاده و نشان دادند نسبت به شرایط موجود مصرف آب ۲۴ میلیون مترمکعب و نرخ بازدهی مالی تا ۲۲ درصد کاهش می‌یابد. مهسافر و همکاران (۷) در شش سطح مختلف برداشت آب سطحی و زیرزمینی اراضی زیردست سد طالقان را از طریق مدل برنامه‌ریزی غیرخطی بررسی و نتیجه‌گیری کردند سناریوی ۶۰ درصد برداشت بالاترین بهره‌وری اقتصادی را دارد. سپه‌وند و همکاران (۱۸) از یک مدل ترکیبی شبیه-ساز (الگوریتم ژنتیک)- بهینه‌ساز (چندهدفه ژنتیک) استفاده کردند و در سناریوهای مختلف جهت استفاده تلفیقی از آب سطحی و زیرزمینی در سه سال خشک، نرمال و تر بکار بردند که نتیجه آن، افزایش سود خالص در هر سه سال نسبت به وضع موجود بود. شیرشاهی و همکاران (۱۹) با استفاده از مدل

حداقل‌سازی کمبودها در یک سیستم مخزن چندگانه استفاده و کارایی آن را اثبات نمودند.

پژوهش حاضر تدوین سناریوهای مدیریتی مصرف تلفیقی آبهای سطحی و زیرزمینی با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی و تعریف الگوی کشت بهینه در غرب شبکه آبیاری دشت قزوین می‌باشد؛ در واقع تابع هدف، رسیدن به بالاترین شاخص بهره‌وری اقتصادی با تعریف سودخالص به ازای متر مکعب آب مصرفی در شرایط مختلف آب و هوایی تحت شرایط کم‌آب‌باری است. در هر سال اقلیمی سناریوهای متفاوت با نسبت‌های مختلف تأمین نیاز ماهانه محصولات الگوی کشت از ۵۰ تا ۱۰۰ درصد تعریف می‌شوند. سناریوهای ترکیبی ۱۸ مورد و از تلفیق سناریوهای آبیاری کامل و ۵ سطح در سه سال خشک، نرمال و تر هستند که راهکارهای انعطاف‌پذیری برای مدیریت شبکه در شرایط متفاوت مهیا می‌کنند. در این راستا، ابتدا در بخش مواد و روش، منطقه مورد مطالعه و روش جستجوی گرانشی تشریح شده و سپس الگوی کشت منتخب، تابع عملکرد زراعی و سناریوهای پژوهش تعریف می‌شوند. در ادامه، متغیرها، تابع هدف مدل و قیود مدل به صورت فرمول بیان می‌شوند. در قسمت بعد نتایج شامل الگوی کشت بهینه و خلاصه نتایج مدل شامل درصد کشت، سطوح زیرکشت، شاخص بهره‌وری اقتصادی، میزان تخصیص منابع آب و درصدهای کم‌آب‌باری در هر سال اقلیمی نشان داده می‌شوند. در انتها نتایج مورد بحث قرار می‌گیرند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در غرب شبکه آبیاری دشت قزوین در استان قزوین واقع شده است. منطقه آبیاری دشت قزوین بین ۳۵ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۸ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۵۱ دقیقه طول شرقی

برنامه‌ریزی خطی با هدف رسیدن به حداکثر شاخص بهره‌وری اقتصادی، سناریوهای سطوح مختلف کم‌آب‌باری را با سطوح مختلف زیر کشت ترکیب کرده و سطوح کشت را بهینه نمودند و بدین نتیجه رسیدند که سناریوی آبیاری کامل با ده درصد کاهش سطح زیرکشت بهترین درآمد اقتصادی را دارد و سطح کم‌آب‌باری ۱۰ درصد باعث بهبود شاخص تا ۷/۵ درصد می‌شود. بافتی و همکاران (۲) با استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی مثبت و برنامه‌ریزی خطی ارزش اقتصادی آب را تحت شرایط خشکسالی جهت رسیدن به الگوی کشت بهینه و برآورد درآمد ناخالص کشاورزان بررسی کردند. نتایج مطالعه، افزایش ۱۲/۲ تا ۹۴/۱ درصدی شاخص بهره‌وری را تحت شرایط محدودیت آب (از ۱۰ تا ۵۰ درصد) نشان می‌دهد. چوپان و امامی (۳) از طریق دو الگوریتم فراابتکاری گرگ خاکستری و الگوریتم انتخابی (Election Algorithm) الگوی کشت بهینه را در دشت مغان با هدف حداکثرسازی منفعت اقتصادی تعیین کردند و نتیجه گرفتند الگوریتم گرگ خاکستری با ۴۲ درصد افزایش منفعت اقتصادی کارایی بهتری نسبت به الگوریتم دیگر دارد.

الگوریتم جستجوی گرانشی (Gravitational Search Algorithm) یا GSA یکی از جدیدترین الگوریتم‌های فراکاوشی است که بر مبنای راه‌حل قانون گرانش نیوتن بوده و توسط راشدی و همکاران (۱۳) مطرح شد. اکبری‌فرد و همکاران (۱) بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن را با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی و الگوریتم چرخه آب (Water Cycle Algorithm) با مطالعه موردی بر روی حوضه آبریز گرگانرود و با هدف کمینه‌سازی کل کمبود آبی انجام دادند. از دیگر تحقیقات کاربردی در زمینه آب می‌توان به مطالعات معینی و همکاران (۱۰) اشاره نمود. آنها از دو نسخه محدودشده جستجوی گرانشی جهت حل مسأله ساده و برقیابی سد دز در دو نوع فرمول‌بندی در خوزستان ایران استفاده کردند. نتایج کارایی روش جستجوی گرانشی و به‌ویژه نسخه دوم محدود شده این روش را در حل مسائل بهینه‌سازی مخزن سد نشان می‌دهد. فلاح و همکاران (۴) از یک الگوریتم هیبریدی شامل ترکیب الگوریتم جستجوی گرانشی و الگوریتم ازدحام ذرات، جهت

$$X_i = (x_i^1, \dots, x_i^d, \dots, x_i^m) \text{ for } i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$$q_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)} \quad (2)$$

$$M_i(t) = \frac{q_i(t)}{\sum_{i=1}^N q_i(t)} \quad (3)$$

در این الگوریتم، اجرام گرانشی و اینرسی برابر در نظر گرفته شده و برای تنظیم آنها از مقدار تابع هدف اجسام یا $q_i(t)$ استفاده می شود (رابطه ۲). مقدار اجرام در رابطه ۳ نرمالیزه می شود. در این روابط $fit_i(t)$ و $M_i(t)$ به ترتیب بیانگر میزان برازندگی جسم و جرم i در زمان t ، تعداد اجرام m و تعداد ابعاد هستند و برای یک مسئله حداکثرسازی $worst(t)$ و $best(t)$ به عنوان حداقل و حداکثر تابع برازندگی در بین تمام عامل ها تعریف می شود.

کل نیروهای وارده از یک دسته از اجرام سنگین تر که روی یک هدف بکار می رود برای محاسبه شتاب یک عامل بر مبنای قانون گرانشی (معادله ۵) باید در نظر گرفته شود که توسط محاسبه شتاب عامل با استفاده از معادله حرکت (معادله ۷) پیروی می کند. سپس، سرعت بعدی یک عامل به عنوان نسبتی از سرعت زمان جاری به معادله شتاب اضافه می شود (معادله ۸). سپس، موقعیت آن از معادله ۹ محاسبه می شود:

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t) \times M_{aj}(t)}{R_{ij}(t)^p + \epsilon} (x_j^d(t) - x_i^d(t)) \quad (4)$$

$$F_i^d(t) = \sum_{j \in K_{best}, j \neq i} rand_j F_{ij}^d(t) \quad (5)$$

$$R_{ij}(t) = X_i(t) \cdot X_j(t) \quad (6)$$

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)} \quad (7)$$

$$v_i^d(t+1) = rand_i \times v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (8)$$

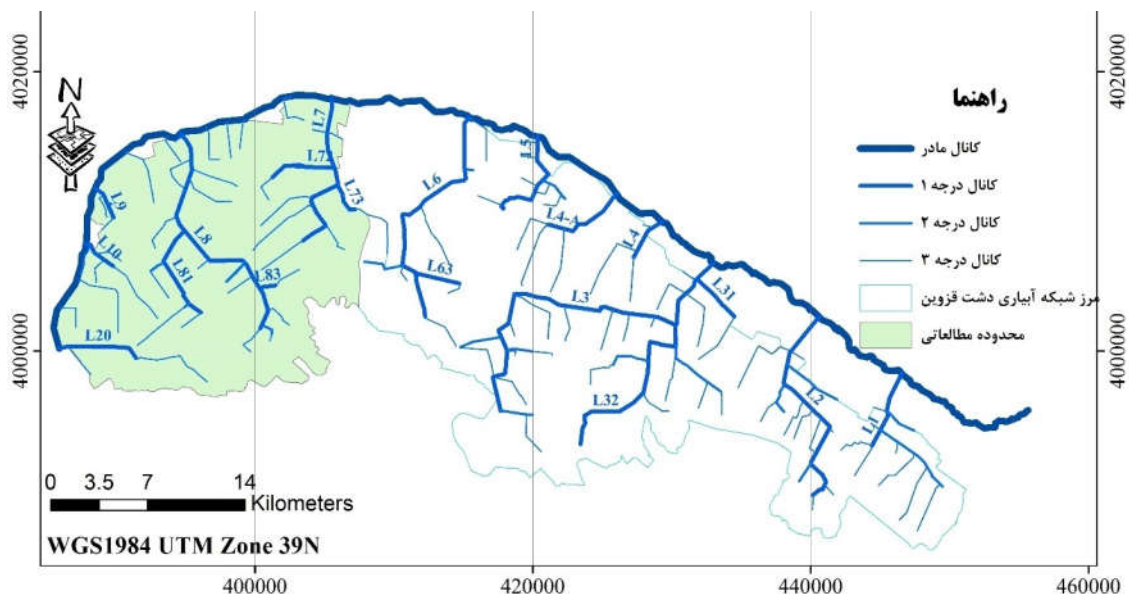
$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (9)$$

$rand_i$ و $rand_j$ اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $[0-1]$ هستند که برای حفظ خصوصیت تصادفی بودن جستجو

قرار دارد. متوسط بارش سالانه ۲۷۰ میلی متر است در حالی که تبخیر سالانه به ۱۳۴۵ میلی متر می رسد و میانگین دمای سالانه ۱۴/۴ درجه سلسیوس می باشد. بنابراین، ضریب خشکی دومارتن ۱۱/۱ است و بر مبنای روش دومارتن این منطقه دارای اقلیم نیمه خشک می باشد. توزیع مکانی و زمانی بارش غیریکنواخت می باشد که منتج به کمبودهای شدید نیازآبی کشاورزی می شود. منابع آب های سطحی برای تأمین نیازهای آبیاری محصولات کافی نبوده و منابع آب زیرزمینی به عنوان مکمل استفاده می شوند که شامل چاه های تلفیقی با مالکیت دولتی و چاه های کشاورزی با مالکیت شخصی می باشند. دلیل انتخاب این منطقه افت زیاد سطح آب زیرزمینی، برداشت زیاد از چاه ها، تخصیص کمتر آب سطحی و تنوع و تراکم کشت بیشتر نسبت به شرق شبکه می باشد. تعداد چاه های با مالکیت شخصی زیر دست شبکه ۱۱۶ حلقه چاه و تعداد چاه های تلفیقی ۳۰ حلقه چاه می باشند. کنترل چاه های تلفیقی در اختیار مدیریت شبکه می باشد. در شکل ۱ نقشه کانال های شبکه آبیاری دشت قزوین شامل کانال های درجه ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است. در این مقاله حجم تخصیص آب سطحی از ابتدای کانال درجه ۳ منظور شده است، با توجه به اینکه مسیر انتقال آب چاه ها تا مزارع از طریق کانال های درجه ۳ شبکه انجام می شود راندمان انتقال آب زیرزمینی و آب سطحی یکسان و ۸۰ درصد منظور شد. با توجه به اینکه راندمان کاربرد آب در مزرعه ۵۰ درصد برآورد شد، راندمان کلی ۴۰ درصد در نظر گرفته شد.

روش جستجوی گرانشی

در این الگوریتم سیستم بصورت مجموعه ای از N جرم تصور می شود که موقعیت هر جرم می تواند جوابی برای مسئله باشد و برای تعیین راه حل بهینه از طریق شبیه سازی قوانین حرکت و گرانشی نیوتون معرفی می شوند. موقعیت هر جسم مکانی از این فضا هست. موقعیت بعد d از جرم i با x_i^d نشان داده می شود (رابطه ۱). بنابراین:



شکل ۱. کانال‌های شبکه آبیاری دشت قزوین

نرمال و سال آبی ۸۸-۸۹ سال تر انتخاب شد. ترکیب کشت محصولات موجود در شبکه در جدول ۱، درصد کشت محصولات شبکه در شکل ۲ و الگوی کشت مورد مطالعه بر مبنای محصولات منتخب در جدیدترین الگو کشت پیشنهادی جهاد کشاورزی جدول ۲ نشان داده شده است. ترکیب باغات در منطقه حفظ و نیاز آبی آنها از آب مصرفی کل کسر شد. علاوه بر الگوی کشت جدید برنامه برای الگوی کشت موجود هم برای مقایسه اجرا می‌شود. بر مبنای بررسی سوابق، حداکثر برداشت از منابع آب زیرزمینی پس از کسر نیاز باغات در سال خشک، نرمال و تر ۹۱/۴۲ و ۱۰۰/۱۸، ۱۲۵/۴۷ و ۳۰/۱۳، ۲۶/۰ و ۳۴/۴۳ میلیون مترمکعب محاسبه و به صورت قیود حداکثر برداشت در مدل وارد شد.

متغیرهای تصمیم در این برنامه بهینه‌سازی ۹۲ مورد است که شامل ۸ سطح زیرکشت، ۱۲ برداشت ماهانه آب سطحی، ۱۲ برداشت ماهانه آب زیرزمینی و ۶۰ میزان ماهانه آبیاری (نه ماه گندم، نه ماه جو، نه ماه کلزا، شش ماه چغندرقد، شش ماه گوجه‌فرنگی، شش ماه ذرت دانه‌ای، شش ماه ذرت علوفه‌ای و نه ماه یونجه) می‌باشد. تعداد اجرام ۱۰۰ و تعداد تکرار ۱۰۰ هزار منظور شد و برنامه در محیط نرم‌افزار متلب نوشته شد. نیاز آبی محصولات

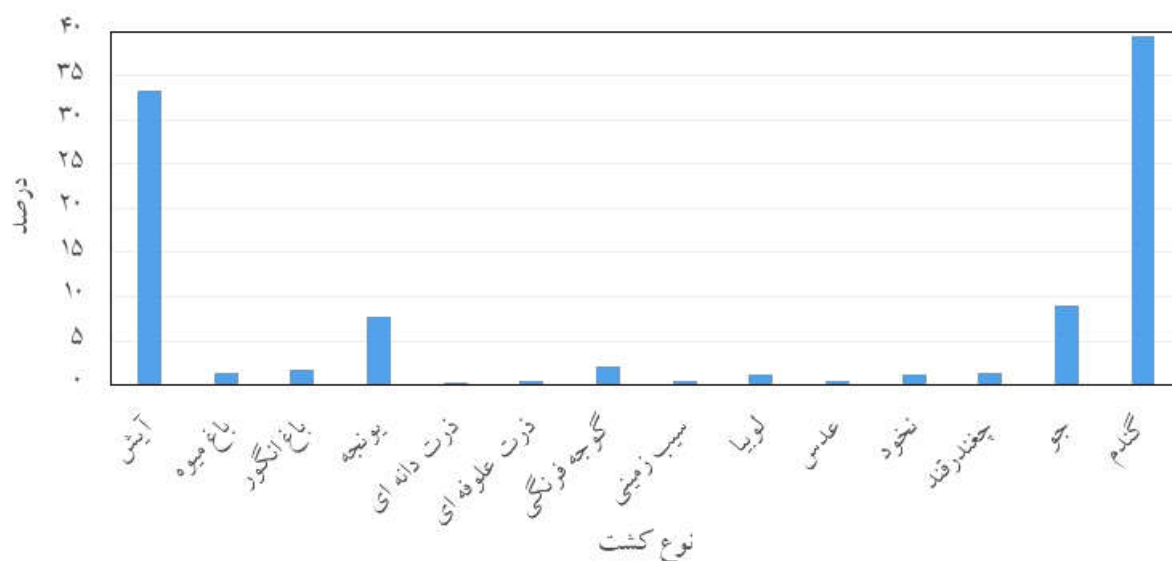
استفاده شده‌اند. M_{pi} و M_{aj} به ترتیب جرم گرانشی فعال جسم Z و جرم گرانشی غیر فعال جسم i می‌باشند، $G(t)$ ثابت گرانش در زمان t و R_{ij} فاصله اقلیدسی بین دو جسم i و j هستند. \in یک عدد بسیار کوچک است. p توان فاصله است که یک عدد حقیقی بزرگ‌تر از یک می‌باشد. این مقدار اغلب برابر یک در نظر گرفته شده است. K_{best} بیانگر مجموعه K جسم برتر جمعیت است، مقدار K به صورت متغیر با زمان تعریف می‌شود که با K_0 در شروع آغاز می‌شود و با زمان کاهش می‌یابد. در اینجا، K_0 تا N (کل تعداد اجرام) تنظیم می‌شود و به صورت خطی تا یک کاهش می‌یابد.

$G(t)$ به عنوان تابعی از $\frac{t}{T}$ و از رابطه ۱۰ بدست می‌آید:

$$G(t) = G_0 \times \left(\frac{t}{T}\right)^\beta \quad \beta < 1 \quad (10)$$

در رابطه بالا G_0 ثابت گرانش اولیه β ثابت مثبت و T کل تکرارهای الگوریتم و به عبارتی طول عمر سیستم است (۱۳).

انتخاب الگوی کشت منتخب، تعریف سناریوها و تابع عملکرد
بر مبنای آنالیز شاخص خشکسالی (Standard Precipitation Index) SPI در سال‌های اخیر سال آبی ۸۷-۸۶ به عنوان سال خشک، سال ۸۸-۸۷ به عنوان سال



شکل ۲. درصد زیر کشت محصولات غرب شبکه آبیاری دشت قزوین

جدول ۱. سطح زیر کشت محصولات غرب شبکه آبیاری دشت قزوین

محصول	گندم	جو	چغندر قند	نخود	عدس	لوبیا	سبب زمینی	گوجه فرنگی
سطح زیر کشت (هکتار)	۹۱۰۸	۲۰۷۹	۳۱۴	۲۶۶	۸۱	۲۵۱	۱۱۴	۴۸۲
درصد کشت به کل اراضی	۳۹/۶	۹	۱/۴	۱/۲	۰/۴	۱/۱	۰/۵	۲/۱
محصول	ذرت علوفه ای	ذرت دانه ای	یونجه	باغ انگور	باغ میوه	جمع کاشت	جمع آیش	جمع کل
سطح زیر کشت (هکتار)	۱۰۸	۴۸	۱۷۹۴	۳۸۲	۳۱۹	۱۵۳۴۸	۷۶۷۸	۲۳۰۲۷
درصد کشت به کل اراضی	۰/۵	۰/۲	۷/۸	۱/۷	۱/۴	۶۶/۷	۳۳/۳	۱۰۰

جدول ۲. الگوی کشت مورد مطالعه

نوع کشت	کشت پاییزه	آیش	کشت تابستانه
محصول	گندم جو کلزا	ذرت دانه ای	ذرت علوفه ای یونجه چغندر قند گوجه فرنگی

مانتیس اصلاح شده است. برای هر محصول تبخیر و تعرق ماهانه از ضرب تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع از گیاهی آن محصول در ماه مورد نظر بدست می آید. پس از محاسبه تبخیر و تعرق واقعی محصولات در هر ماه، این

منتخب در این الگوی کشت برای سال آبی خشک، نرمال و تر به صورت جداگانه محاسبه می شود. تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع از طریق داده های ایستگاه سینوپتیک قزوین و با اجرای برنامه CROPWAT8 محاسبه می شود. روش انتخابی روش فائو پنمن

برای هر محصول با فرض ۳۵ درصد آیش طبق طرح کشت شبکه آبیاری دشت قزوین می‌باشد. تابع هدف اصلی به صورت زیر فرموله می‌شود (رابطه ۱۲):

$$Z^* = \frac{(0.97 \times \sum_{i=1}^n [p_i (Y_a)_i - C_i] A_i)}{(SW + GW)} \quad (12)$$

n تعداد محصولات، i شاخص محصول Z^* کل درآمد منطقه برحسب ریال بر متر مکعب، p_i قیمت فروش محصول i (ریال بر کیلوگرم)، C_i هزینه تولید محصول i (ریال در هکتار)، A_i مساحت کاشت محصول i بر حسب هکتار، SW حجم آب سطحی تخصیص یافته در سال موردنظر برحسب مترمکعب، GW حجم آب زیرزمینی برداشت شده در سال موردنظر برحسب مترمکعب و Y_a عملکرد واقعی (کیلوگرم بر هکتار) است که از رابطه‌ی توابع تولید درون فصلی محاسبه می‌شود. دیاگرام نحوه برنامه نویسی برای سناریوهای مدل بهینه‌ساز در شکل ۳ نشان داده شده است.

تقویم زراعی محصولات کشاورزی منتخب در شبکه آبیاری دشت قزوین در جدول ۴ نشان داده شده است.

محدودیت‌های استفاده شده در مدل برای کاربردی ساختن، تابع هدف به توسط قیود زیر بیان می‌شوند:

قید اول: جهت حفظ تقریبی الگوی کشت موجود، حداقل سطح زیرکشت محصولات عمده ۵۰ درصد سطح زیرکشت فعلی رعایت شود. برای محصول کلزا حداقل سطح زیرکشت ۱۰۰ هکتار منظور شد.

قید دوم: جمع نیازهای آبی ماهانه تمام محصولات الگوی کشت در هر سال بایستی کمتر یا مساوی با آب سطحی و زیرزمینی اختصاصی به کل محصولات در سال موردنظر باشد (رابطه ۱۳).

$$\left(\frac{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^n R_{ij} \times [D_{ij}]}{a_z} \right) \geq \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^n [SUP_{ij}] \quad (13)$$

$$SUP_{ij} = SW_{ij} + GW_{ij}$$

میزان از بارش مؤثر همان ماه کم شده و به عنوان نیاز آبی خالص آن محصول در ماه موردنظر تلقی می‌شود.

سناریوها در ۱۸ حالت ترکیبی تعریف شدند. این سناریوها شامل سه حالت سال خشک، نرمال و تر در ترکیب با ۵ حالت کم‌آبیاری و یک حالت آبیاری کامل است.

تافته و همکاران (۲۰) بهترین تابع عملکرد به صورت رابطه ۱۱ در دشت قزوین معرفی نمودند:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(1 - K_{yi} \left\{ 1 - \frac{ET_{a,j}}{ET_{m,j}} \right\} \right)^{\frac{K_{yi}}{\sum_{i=1}^n K_{yi}}} \quad (11)$$

در رابطه فوق، Y_a عملکرد واقعی، Y_m حداکثر عملکرد $ET_{a,j}$ تبخیر-تعرق واقعی در بازه زمانی j (میلی‌متر) و $ET_{m,j}$ حداکثر تبخیر-تعرق گیاه در بازه زمانی j (میلی‌متر)، i مرحله رشد و توسعه، n تعداد مراحل دوره رشد و K_{yi} ضریب واکنش محصول است که مقادیر ماهانه آن برای محصولات منتخب شبکه آبیاری دشت قزوین در جدول ۳ نشان داده شده است.

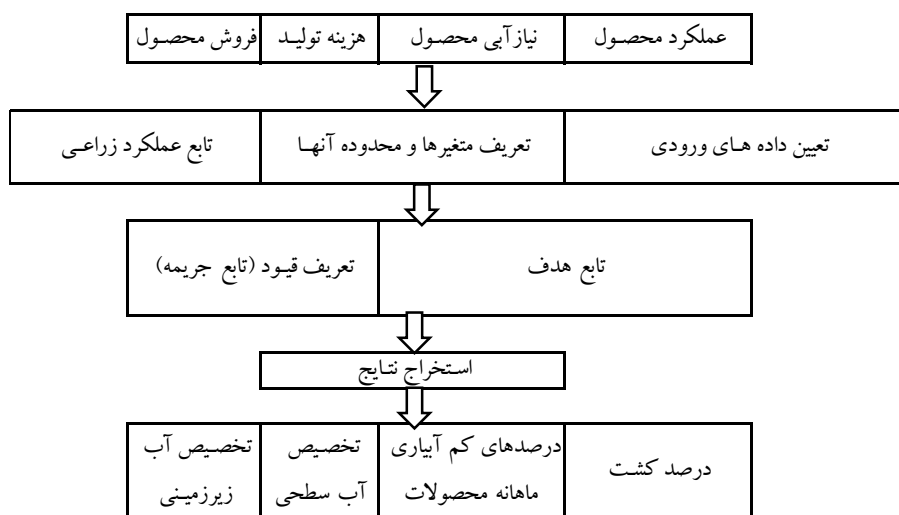
توسعه مدل بهینه‌سازی و قیود مدل

در بخش کشاورزی شاخص بهره‌وری اقتصادی آب یا NBPD (Net Benefit Per Demand) به عنوان عملکرد محصول یا سود محصول در واحد حجم آب تعریف می‌شود. در این مطالعه شاخص NBPD به عنوان سود خالص اقتصادی به حجم آب مصرفی مورد نیاز گیاهان تعریف می‌شود. حداکثرسازی NBPD شامل مراحل زیر می‌باشد: ۱. تعیین داده‌های ورودی (عملکرد محصول، نیاز آبی محصول، مساحت زیرکشت و هزینه تولید و فروش محصول) ۲. تعیین تابع عملکرد واقعی محصول بر مبنای معادله تافته ۳. تشکیل تابع هدف ۴. به‌کاربردن سناریوهای کم‌آبیاری در سال‌های خشک، نرمال و تر ۵. تعیین مقدار بهینه NBPD برای هر حالت و ۶. تعیین الگوی کشت بهینه هر حالت و مقایسه نتایج.

قیود مدل بهینه‌سازی نیز شامل قیود مربوط به بیشینه آب سطحی تحویلی شبکه آبیاری و نیز قیود مربوط به کمینه سطح زیرکشت

جدول ۳. مقادیر ضرایب واکنش ماهانه واسنجی شده (K_{vi}) برای محصولات منتخب در شبکه آبیاری دشت قزوین (۲۱)

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
گندم	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۶۲	۱/۱	۰/۹			
جو	۰/۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۸	۰/۸	۰/۸۲	۰/۸۸	۰/۸			
کلزا	۰/۳۵	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۶۳	۰/۷۵	۰/۵۲			
یونجه							۰/۸۵	۰/۹۰	۱/۰	۰/۹۹	۱/۱	۱/۰
چغندر قند	۰/۶						۰/۶	۰/۶	۰/۶	۱/۳۵	۱/۳۵	۰/۶۳
گوجه فرنگی	۰/۴						۰/۶	۰/۶	۱/۱	۱/۱۴	۱/۱۴	۰/۴
ذرت دانه‌ای	۰/۷						۰/۵	۰/۵	۰/۸۵	۱/۲	۱/۴	۱/۱
ذرت علوفه‌ای	۰/۸۵						۰/۵	۰/۵	۰/۴۸	۰/۷	۱/۱	۱/۲



شکل ۳. دیاگرام نحوه برنامه‌نویسی برای سناریوهای مدل بهینه‌ساز

جدول ۴. تقویم زراعی محصولات کشاورزی منتخب

محصول	زمان کاشت	زمان برداشت
گندم	اول آبان	اول تیر
جو	اول آبان	بیستم خرداد
کلزا	بیستم مهر	دهم خرداد
چغندر قند	اول اردیبهشت	دهم مهر
یونجه	اول مهر	سی و یکم شهریور
گوجه فرنگی	دهم اردیبهشت	دهم مهر
ذرت دانه‌ای	دهم اردیبهشت	دهم مهر
ذرت علوفه‌ای	پانزدهم اردیبهشت	پانزدهم مهر

جو و کلزا، آبیاری کامل در زمان کاشت به میزان ۳۰۰ متر مکعب در هکتار منظور می‌گردد. قیود بالا با هم جمع شده و به صورت یک تابع جریمه در مدل وارد شده و پس از ضرب در ضریب جریمه با تابع هدف جمع می‌شوند. با توجه به کم‌آبیاری فعلی کشاورزان در ماه‌های کم‌آب، در قید ششم کم‌آبیاری ماهانه با حداقل تأمین ۵۰ درصد نیاز محصول منظور می‌گردد. همچنین، با توجه به شرایط متفاوت اقلیمی در هر سال و جهت انطباق نیازآبی با تخصیص‌ها در قید اول میزان سطح کشت محصولات اصلی مدل شامل گندم، جو، یونجه، ذرت دانه‌ای و علوفه‌ای، چغندر قند و گوجه‌فرنگی بین ۹۰ تا ۱۱۰ درصد کشت فعلی منظور شده و سایر محصولات همان کشت موجود لحاظ می‌شوند.

نتایج

در این مطالعه، الگوریتم جستجوی گرانشی با تعریف یک تابع هدف شامل حداکثرسازی سود خالص بر واحد حجم آب مصرفی کشاورزی استفاده شد.

الگوی کشت بهینه

در این راستا، الگوی کشت بهینه جدید و الگوی کشت بهینه شده موجود برای سال‌های خشک، نرمال و تر در جدول‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده است. در تمامی الگوهای کشت در محصولات پاییزه ابتدا گندم و سپس جو به عنوان کشت غالب و در محصولات تابستانه ابتدا یونجه و سپس گوجه‌فرنگی محصولات عمده می‌باشند. افزایش درصد گندم و جو در کشت‌ها متأثر از کاهش مصرف آب به دلیل کمک بارش مؤثر در فصول پائیز و زمستان، الگوی رایج منطقه و سود اقتصادی بالای گندم و جو و افزایش درصد گوجه‌فرنگی و یونجه به دلیل سود بالای اقتصادی این محصولات می‌باشد. در این راستا درصد چغندر قند به دلیل سود پایین اقتصادی کمتر از سایر محصولات می‌باشد. در سال‌های نرمال و تر افزایش درصد کم‌آبیاری منجر به افزایش درصد کلزا و کاهش درصد جو

i: شمارنده ماه، n: شمارنده محصول، R_{ij} : نسبت تأمین نیازآبی خالص در ماه i برای محصول j (یک منهای نسبت کم‌آبیاری)، D_{ij} : نیازآبی خالص در ماه i برای محصول j، SUP_{ij} : حجم آب تأمین شده سطحی و زیرزمینی در ماه i برای محصول j، SW_{ij} : حجم آب تأمین شده سطحی در ماه i برای محصول j، GW_{ij} : حجم آب تأمین شده زیرزمینی در ماه i برای محصول j و a_z راندمان کل آبیاری که در این تحقیق برابر ۰/۴۰ است. قید سوم: کل آب سطحی تخصیص یافته در ماه‌های مختلف از آب سطحی قابل تخصیص همان سال در محدوده مورد نظر کمتر یا مساوی باشد (رابطه ۱۴).

$$\sum_{i=1}^{12} (SW_i) \leq SW \quad (14)$$

SW : حجم آب سطحی تخصیص یافته در سال مورد نظر و SW_i : حجم آب سطحی تخصیص یافته در ماه مورد نظر قید چهارم: کل آب زیرزمینی تخصیص یافته در ماه‌های مختلف از آب زیرزمینی تخصیص یافته همان سال در محدوده مورد نظر کمتر یا مساوی باشد (رابطه ۱۵).

$$\sum_{i=1}^{12} (GW_i) \leq GW \quad (15)$$

GW : حجم آب زیرزمینی تخصیص یافته در سال مورد نظر و GW_i : حجم آب زیرزمینی تخصیص یافته در ماه مورد نظر قید پنجم: آب زیرزمینی تخصیص یافته در هر ماه بین حداقل و حداکثر دوره آماری باشد.

قید ششم: حداقل میزان کم‌آبیاری در سناریوهای تعریفی هرماه حداقل ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد نیازآبی در همان ماه و حداکثر ۱۰۰ درصد نیاز آبی است. بنابراین، حد بالا و پایین نیاز ماهانه هر محصول برای آبیاری کامل برابر و برابر اعداد برنامه کراپوات در همان سال می‌باشد و در سناریوهای کم‌آبیاری حد بالای نیاز آبی هر محصول در هرماه حداکثر نیازآبی در آن ماه و حد پایین حاصل ضرب نسبت تأمین نیاز آبی در هر سناریو (۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹) منظور و خود برنامه نیازآبی ماهانه را برای هر محصول بهینه می‌کند. برای محصولات گندم،

جدول ۵. الگوی کشت بهینه در سناریوهای مختلف سال خشک

الگوی کشت	حداقل درصد تأمین	گندم	جو	کلزا	چغندر قند	گوجه‌فرنگی	ذرت دانه‌ای	ذرت علوفه‌ای	یونجه	سایر محصولات	درصد کشت تابستانه	درصد کشت پاییزه	آبش
	۱۰۰	۵/۳۴	۸/۸	۱/۶	۸/۲	۹/۲	۹/۳	۵/۲	۹/۷	۰/۰	۲/۰	۰/۴۵	۳۵
	۹۰	۷/۳۲	۳/۸	۷/۴	۱/۴	۲/۴	۵/۱	۲/۳	۲/۶	۰/۰	۲/۱۹	۸/۴۵	۳۵
	۸۰	۱/۳۲	۲/۷	۱/۷	۶/۱	۶/۵	۶/۲	۸/۳	۲/۵	۰/۰	۶/۱۸	۴/۴۶	۳۵
جدید	۷۰	۵/۳۲	۵/۸	۹/۷	۲/۴	۱/۴	۳/۱	۷/۰	۸/۵	۰/۰	۱/۱۶	۹/۴۸	۳۵
	۶۰	۰/۳۴	۳/۸	۷/۶	۰/۲	۳/۴	۹/۲	۰/۲	۴/۴	۰/۰	۹/۱۵	۱/۴۹	۳۵
	۵۰	۷/۲۲	۹/۹	۶/۶	۲/۲	۲/۲	۲/۳	۱/۲	۲/۶	۰/۰	۱۵/۹	۴۹/۱	۳۵
موجود-کم‌آبیاری		۴/۳۷	۰/۹	۰/۰	۵/۱	۱/۲	۲/۰	۵/۰	۱/۸	۲/۳	۰/۱۵	۱/۴۶	۳۷/۹

جدول ۶. الگوی کشت بهینه در سناریوهای مختلف سال نرمال

الگوی کشت	حداقل درصد تأمین	گندم	جو	کلزا	چغندر قند	گوجه‌فرنگی	ذرت دانه‌ای	ذرت علوفه‌ای	یونجه	سایر محصولات	درصد کشت تابستانه	درصد کشت پاییزه	آبش
	۱۰۰	۳۵/۱	۶/۶	۸/۳	۱/۰	۶/۲	۱/۸	۰/۸	۵/۲	۰/۰	۰/۱۵	۰/۵۰	۳۵
	۹۰	۳۶/۲	۶/۸	۷/۰	۱/۱	۵/۹	۲/۱	۱/۰	۴/۹	۰/۰	۰/۱۵	۰/۵۰	۳۵
	۸۰	۳۴/۹	۶/۱	۸/۰	۱/۰	۵/۶	۴/۱	۰/۸	۴/۶	۰/۰	۰/۱۶	۰/۴۹	۳۵
جدید	۷۰	۳۷/۷	۶/۹	۵/۵	۱/۰	۵/۰	۲/۰	۲/۳	۴/۶	۰/۰	۹/۱۴	۱/۵۰	۳۵
	۶۰	۳۹/۳	۵/۷	۴/۹	۱/۱	۴/۳	۴/۰	۱/۵	۴/۱	۰/۰	۰/۱۵	۰/۵۰	۳۵
	۵۰	۴۰/۲	۵/۰	۴/۷	۱/۰	۴/۲	۳/۷	۱/۱	۵/۰	۰/۰	۱۵/۱	۴۹/۹	۳۵
موجود-کم‌آبیاری		۴۳/۴	۹/۷	۰/۰	۱/۴	۲/۲	۰/۲	۰/۵	۸/۰	۳/۲	۲/۱۶	۴/۵۱	۳۱/۴

می‌شود. در تمام سناریوهای سالهای نرمال و تر نسبت محصولات پاییزه نسبت به کل اراضی حدود ۵۰ درصد و نسبت محصولات تابستانه به کل اراضی حدود ۱۵ درصد نظیر الگوی کشت پیشنهادی جهاد کشاورزی رعایت می‌شود اما در

در سال‌های خشک تغییر درصد کم‌آبیاری اثر بسیار کمی در تغییر الگوهای کشت دارد. در حالت کم‌آبیاری زیاد (حداقل ۵۰ درصد) افزایش کشت کلزا و کاهش کشت جو و نیز افزایش کشت یونجه و کاهش کشت گوجه‌فرنگی پیشنهاد

جدول ۷. الگوی کشت بهینه در سناریوهای مختلف سال تر

الگوی کشت	حداقل درصد تأمین	گندم	جو	کلزا	چغندر قند	گوجه‌فرنگی	ذرت دانه‌ای	ذرت علوفه‌ای	پوینجه	سایر محصولات	درصد کشت تابستانه	درصد کشت پاییزه	آبش
	۱۰۰	۳/۳۶	۱۱/۹	۱/۵	۲/۸	۴/۹	۰/۸	۱/۵	۵/۲	۰/۰	۱۵/۲	۴۹/۸	۳۵
	۹۰	۳۸/۴	۱۰/۵	۱/۰	۱/۵	۵/۰	۰/۶	۲/۷	۵/۳	۰/۰	۱۵/۲	۴۹/۸	۳۵
جدید	۸۰	۳۶/۰	۱۱/۱	۲/۷	۳/۱	۳/۳	۰/۳	۲/۰	۶/۴	۰/۰	۱۵/۱	۴۹/۹	۳۵
	۷۰	۳۵/۸	۱۰/۷	۳/۵	۴/۰	۱/۳	۱/۱	۳/۲	۵/۴	۰/۰	۱۵/۱	۴۹/۹	۳۵
	۶۰	۳۴/۶	۹/۰	۶/۳	۲/۶	۳/۰	۱/۴	۱/۵	۶/۵	۰/۰	۱۵/۱	۴۹/۹	۳۵
	۵۰	۳۸/۸	۶/۱	۵/۰	۲/۱	۱/۳	۳/۸	۱/۵	۶/۴	۰/۰	۱۵/۰	۵۰/۰	۳۵
موجود-کم‌آبیاری		۴۲/۰	۹/۶	۰/۰	۱/۴	۲/۳	۰/۲	۰/۵	۸/۷	۳/۲	۱۵/۹	۵۲/۵	۳۲

۲. در هر سناریو بر اساس سوابق برداشت، حدود بالا و پایین برداشت ماهانه آب سطحی و زیرزمینی تعیین و سپس حجم کل برداشت سالانه آب‌های سطحی و زیرزمینی به عنوان معیار مهم دیگر جهت تعیین تخصیص‌ها منظور شد. از لحاظ برداشت از منابع آبی، اولویت با برداشت از منابع آب سطحی بوده و سپس منابع آب زیرزمینی می‌باشد. در سناریوهای سال خشک متوسط ۸۰/۶ درصد، سال نرمال ۷۹/۴ درصد و سال تر ۷۲/۶ درصد از منابع آب زیرزمینی و مابقی از منابع آب سطحی تأمین می‌شود.

۳. درصد متوسط سالانه کم‌آبیاری در تمام سناریوها با افزایش درصد کم‌آبیاری افزایش می‌یابد. بیشترین درصد متوسط کم‌آبیاری ۲۴/۵ درصد و مربوط به سناریوی کم‌آبیاری تا سقف ماهانه ۵۰ درصد در سال خشک می‌باشد. درصد متوسط کم‌آبیاری سالانه برای سناریوهای کم‌آبیاری سال خشک و نرمال تقریباً برابر و معادل ۱۲ درصد و برای سال تر ۷ درصد می‌باشد که نشان از کمک بارش مؤثر در ماه‌های تحت تنش آبی می‌باشد.

۴. در مقایسه بین الگوی کشت موجود با الگوی کشت بهینه، مساحت زیرکشت این الگو از سایر حالات بهینه تقریباً در تمامی سناریوها بیشتر می‌باشد این درحالیست که شاخص بهره‌وری و درآمد خالص کل آن کمتر از الگوهای کشت بهینه است. با مقایسه

سناریوهای سال خشک به دلیل کمبود بارش مؤثر در فصل بهار نیاز آبی محصولات پاییزه افزایش یافته و از درصد آن کاسته می‌شود در این سال با افزایش درصد کم‌آبیاری کمبودها از طریق کم‌آبیاری جبران می‌شود و درصد محصولات پاییزه از ۴۵ تا ۵۰ درصد افزایش می‌یابد. این مسئله بیانگر عدم توان بارش مؤثر در کمک به تأمین نیاز آبی محصولات پاییزه در سال‌های خشک دارد.

خلاصه نتایج مدل

خلاصه نتایج مدل‌ها شامل درصد کشت، سطوح زیرکشت، شاخص بهره‌وری، میزان تخصیص منابع آب و درصدهای کم‌آبیاری برای الگوی کشت جدید و موجود در جدول‌های ۸ تا ۱۰ نمایش داده شده‌اند. نتایج حاصل به شرح ذیل می‌باشند:

۱. با مقایسه بین مساحت زیر کشت در سناریوهای مختلف مشاهده می‌شود که افزایش سطح کم‌آبیاری منجر به افزایش سطوح زیرکشت می‌گردد که دلیل آن کاهش نیاز و افزایش سطح کشت می‌باشد. همچنین، با مقایسه بین سطوح زیر کشت در سال‌های نرمال، خشک و تر، بیشترین سطح زیرکشت مربوط به سال تر، سپس سال نرمال و در نهایت سال خشک مشاهده می‌شود.

جدول ۸. خلاصه نتایج سناریوهای سال خشک

الگوی موجود	متوسط سال	الگوی کشت جدید						سناریو حداقل تأمین
		۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰	
۱۲۸۳۰	۱۱۲۱۹	۱۳۹۵۱	۱۲۹۰۹	۱۱۶۱۸	۱۰۳۳۰	۹۶۰۳	۸۹۰۴	کل سطح کشت
۵۶۹	۸۶۷	۷۷۰	۹۰۹	۸۵۰	۹۵۱	۸۷۳	۸۴۶	درآمد خالص
۶/۷۳	۱۳۱	۱۲۲	۱۴۱	۱۳۰	۱۴۱	۱۲۸	۱۲۲	درآمد کل
۲/۳۰	۴/۲۹	۰/۳۰	۹/۲۹	۷/۳۰	۸/۲۸	۶/۲۸	۲/۲۸	آب سطحی
۷/۹۸	۱/۱۲۲	۰/۱۲۵	۸/۱۲۴	۵/۱۲۴	۳/۱۲۰	۵/۱۱۹	۴/۱۱۸	آب زیرزمینی
۹/۱۲۸	۴/۱۵۱	۰/۱۵۵	۷/۱۵۴	۱/۱۵۵	۰/۱۴۹	۰/۱۴۸	۶/۱۴۶	کل مصرف
۳/۶۴	۰/۸۸	۵/۷۵	۴/۷۹	۳/۸۵	۷/۹۱	۹/۹۵	۰/۱۰۰	درصد تأمین

جدول ۹. خلاصه نتایج سناریوهای سال نرمال

الگوی موجود	متوسط سال	الگوی کشت جدید						سناریو حداقل تأمین
		۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰	
۱۴۲۵۷	۱۲۱۹۲	۱۴۳۱۰	۱۳۴۹۰	۱۲۴۶۵	۱۱۵۴۷	۱۰۹۲۹	۱۰۴۰۹	کل سطح کشت
۱۰۹۳	۱۵۴۶	۱۴۶۲	۱۴۸۷	۱۵۴۹	۱۵۸۳	۱۵۸۷	۱۶۰۴	درآمد خالص
۱۶۶	۱۹۵	۱۸۵	۱۸۸	۱۹۶	۲۰۰	۲۰۱	۲۰۲	درآمد کل
۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۶	آب سطحی
۸/۹۵	۲/۱۰۰	۲/۱۰۰	۰/۱۰۰	۳/۱۰۰	۱/۱۰۰	۱/۱۰۰	۲/۱۰۰	آب زیرزمینی
۳/۱۱۸	۲/۱۲۶	۳/۱۲۶	۹/۱۲۵	۳/۱۲۶	۱/۱۲۶	۱/۱۲۶	۲/۱۲۶	کل مصرف
۰/۷۰	۰/۸۸	۷/۷۵	۴/۷۹	۴/۸۶	۵/۹۰	۱/۹۶	۰/۱۰۰	درصد تأمین

جدول ۱۰. خلاصه نتایج سناریوهای سال تر

الگوی موجود	متوسط سال	الگوی کشت جدید						سناریو حداقل تأمین
		۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰	
۱/۱۴۴۳۸	۱۳۴۲۷	۱۵۳۶۶	۱۴۵۷۰	۱۳۶۳۵	۱۲۹۲۹	۱۲۳۸۶	۱۱۶۷۹	کل سطح کشت
۱۴۸۰	۱۷۷۱	۱۷۷۳	۱۷۴۷	۱۶۱۶	۱۷۴۷	۱۹۰۱	۱۸۴۱	درآمد خالص
۱۶۱	۲۱۴	۲۲۰	۲۱۷	۲۰۱	۲۱۱	۲۲۵	۲۱۳	درآمد کل
۳/۳۴	۵/۳۳	۹/۳۳	۱/۳۴	۹/۳۳	۴/۳۳	۱/۳۳	۷/۳۲	آب سطحی
۴/۷۴	۹/۸۸	۴/۹۰	۷/۸۹	۰/۹۰	۷/۸۸	۷/۸۷	۸/۸۶	آب زیرزمینی
۶/۱۰۸	۴/۱۲۲	۳/۱۲۴	۸/۱۲۳	۹/۱۲۳	۱/۱۲۲	۸/۱۲۰	۵/۱۱۹	کل مصرف
۵/۷۷	۰/۹۳	۲/۸۴	۴/۸۸	۱/۹۳	۲/۹۵	۱/۹۷	۰/۱۰۰	درصد تأمین

نمایش عملکرد نسبی تمام سناریوها وجود ندارد. لذا فقط اعداد مقایسه‌ای بین سناریوی موجود و برتر در هر سال بررسی و در جدول ۱۲ نشان داده شده است. سناریوی برتر سال خشک، حداکثر درصد کم‌آبیاری ماهانه تا ۲۰ درصد، سناریوی برتر سال نرمال آبیاری کامل و سناریوی برتر سال تر حداکثر درصد کم‌آبیاری ماهانه تا ۱۰ درصد می‌باشد. جدول مذکور افزایش عملکرد نسبی کلیه محصولات را نسبت به شرایط موجود در تمام شرایط آب و هوایی تأیید می‌کند.

بحث و نتیجه‌گیری

با هدف نیل به حداکثر سودخالص اقتصادی در واحد حجم تحقیقات مشابهی در دشت قزوین از طریق برنامه‌ریزی غیرخطی انجام گرفته است. مهسافر و همکاران (۷) در سال ۲۰۱۷ با بررسی گزینه‌های مختلف در شبکه آبیاری دشت قزوین سناریوی آبیاری کامل و ۱۰ درصد کاهش سطوح زیرکشت را پیشنهاد دادند. شیرشاهی و همکاران (۱۹) در سال ۲۰۱۹ با بررسی سناریوهای مختلف درصد کم‌آبیاری ۶۰ درصد همراه با اصلاح الگوی کشت را پیشنهاد دادند. الگوکشت‌های بهینه این دو تحقیق در جدول ۱۳ نشان داده شده است (۷ و ۱۹). الگوی کشت‌های بهینه سناریوهای برتر در سال‌های خشک، نرمال و تر هم در جدول ۱۳ نشان داده شده‌اند. با تحلیل این اعداد می‌توان به این نتیجه رسید که در سناریوهای برتر سال‌های خشک، نرمال و تر یونجه محصول برتر تابستانه بوده درحالی که در پژوهش حاضر گوجه‌فرنگی محصول برتر تابستانه بوده و در ضمن کلزا هم به محصولات پاییزه اضافه شده است. همچنین، در تحقیق حاضر نسبت به تحقیق مهسافر و همکاران (۷)، درصد محصولات پاییزه کمتری و نسبت به تحقیقات شیرشاهی و همکاران درصد محصولات کشت پاییزه بیشتر می‌باشد. برترین سناریو در سال خشک، کم‌آبیاری ماهانه تا سقف ۲۰ درصد، در سال نرمال آبیاری کامل و در سال تر کم‌آبیاری

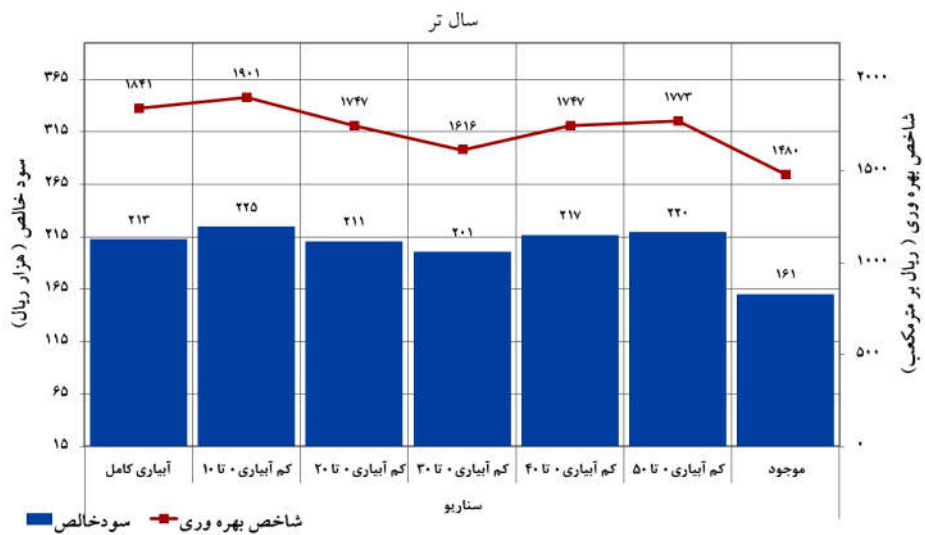
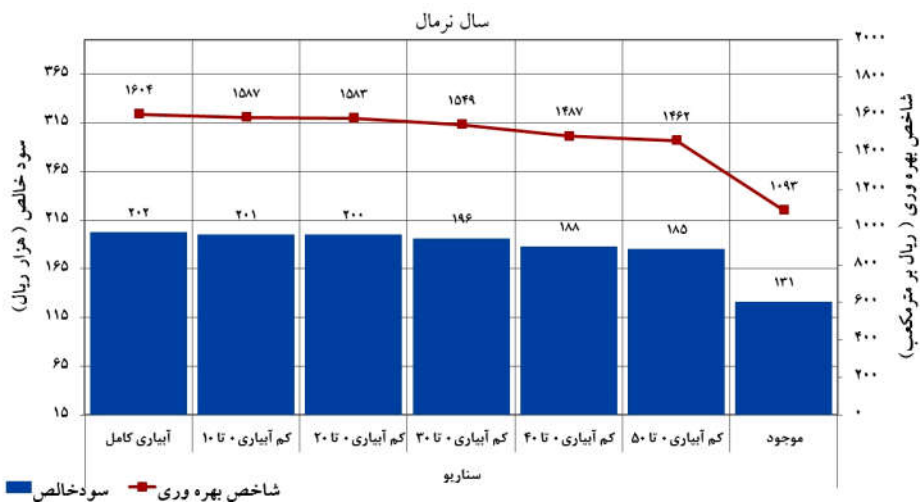
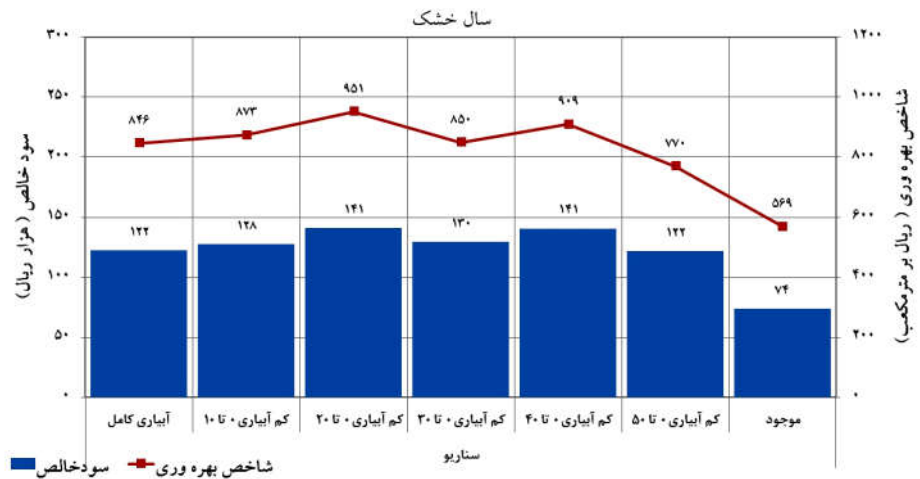
بین شاخص بهره‌وری متوسط سناریوهای هر سال با الگوی کشت موجود بهینه هر سال، در سال خشک ۵۲/۲ درصد، سال نرمال ۴۱/۵ درصد و سال تر ۱۹/۶ افزایش می‌یابد. نمودار مقایسه‌ای بین شاخص بهره‌وری و سود خالص برای سال‌های مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. از لحاظ شاخص بهره‌وری یا درآمد خالص در واحد حجم و درآمد کل برای سال خشک درصد کم‌آبیاری ۲۰ درصد، سال نرمال آبیاری کامل و سال تر درصد کم‌آبیاری ۱۰ درصد بیشترین بهره‌وری را دارند.

کفایت تأمین نیاز ماهانه و آب مصرفی آبیاری

برای بهره‌گیری از بارش مؤثر، درصد کم‌آبیاری ماهانه به صورت متغیر از حداقل ماهانه تا سقف تعیین می‌شود. با توجه به تعدد سناریوها امکان نمایش درصد کم‌آبیاری و تخصیص ماهانه تمام سناریوها وجود ندارد. با توجه به مشابهت توزیع ماهانه درصدهای تنش آبی و تخصیص در سناریوهای کم‌آبیاری هر سال، نمودارهای با حداقل کم‌آبیاری ۵۰ درصد به عنوان نمونه مدل کم‌آبیاری انتخاب و نمودارهای نیازآبی و آب مصرفی ماهانه آن در هر سال مقایسه شد. همانطور که در جدول ۱۱ نشان داده شده است، بیشترین تنش آبی ماهانه در ماه‌های فروردین و اردیبهشت اتفاق می‌افتد که ناشی از تقارن آبیاری یونجه و سایر محصولات تابستانه با محصولات پاییزه می‌باشد. در سال تر به علت بارش‌های بهاره شدت تنش کمتر و درصد متوسط کمبود در سال تر از سال‌های خشک و نرمال کمتر می‌شود. در مقایسه بین تخصیص ماهانه آب زیرزمینی و آب سطحی در ماه‌های پرمصرف با توجه به محدودیت سقف برداشت ماهانه از چاه‌ها، برای تأمین نیاز آبی تخصیص آب سطحی در این ماه‌ها افزایش می‌یابد. برای نمونه نمودار توزیع تخصیص‌ها و نیازها در شکل ۵ نشان داده شده است.

مقایسه عملکرد نسبی محصولات بین الگوی کشت موجود و سناریوی برتر در هر سال

با توجه به تعدد محصولات و سناریوهای مختلف، امکان



شکل ۴. مقایسه بین شاخص بهره‌وری و درآمد خالص اقتصادی بین سناریوهای مختلف در شرایط مختلف آب و هوایی

جدول ۱۱. درصد تأمین نیاز آبی ماهانه سناریوهای با کم‌آبایی ماهانه تا ۵۰ درصد در شرایط اقلیمی مختلف

سال	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	متوسط
خشک	۹۲/۷	۹۵/۶	۱۰۰	۱۰۰	۷۲/۸	۸۰/۲	۶۰/۱	۶۱/۹	۸۱/۶	۸۶/۲	۹۱/۶	۸۹/۸	۷۵/۵
نرمال	۹۱/۷	۱۰۰	۸۸/۲	۹۱	۷۹/۹	۶۳/۷	۶۲/۶	۶۸/۹	۷۵/۸	۸۵/۶	۸۵/۱	۸۴/۳	۷۵/۷
تر	۹۲/۲	۱۰۰	۱۰۰	۵۷	۶۹/۹	۷۹/۶	۸۶/۵	۹۱/۸	۷۷/۱	۸۸/۴	۸۴/۳	۸۷/۳	۸۴/۲



شکل ۵. توزیع تخصیص آب سطحی و زیرزمینی برای سناریوی کم‌آبایی ۵۰ درصد در سال خشک، نرمال و تر (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۱۲. مقایسه بین درصد نسبی عملکرد محصولات اصلی بین سناریوی برتر و موجود در سال خشک، نرمال و تر

سال	سناپز	کنجد	پنبه	کلما	چغندر قند	گوجه‌فرنگی	ذرت دان‌های	ذرت علوفه‌ای	بجته
خشک	موجود	۰/۷۲	۰/۸۳	—	۰/۶۴	۰/۷۴	۰/۸۰	۰/۷۶	۰/۶۵
انتخابی	انتخابی	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۶	۰/۸۹	۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۹۰
نرمال	موجود	۰/۷۲	۰/۸۲	—	۰/۷۶	۰/۹۱	۰/۷۵	۰/۷۶	۰/۶۹
انتخابی	انتخابی	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
تر	موجود	۰/۷۷	۰/۸۹	—	۰/۷۳	۰/۸۲	۰/۷۲	۰/۷۳	۰/۷۶
انتخابی	انتخابی	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۶
حداکثر عملکرد	۶۰۰۰	۵۰۰۰	۴۰۰۰	۴۰۰۰	۴۰۰۰	۵۵۰۰۰	۱۲۰۰۰	۶۰۰۰۰	۱۷۰۰۰

واحد حداکثر عملکرد کیلوگرم بر هکتار است.

جدول ۱۳. الگوی کشت بهینه در سناریوهای برتر تحقیقات مهسافر و همکاران (۷) و شیرشاهی و همکاران (۱۹)

سناریوی برتر	درصد تأمین آب	گندم	جو	کلزا	چغندررقند	گوجرفرنگی	ذرت دانهای	ذرت علوفه‌ای	یونجه	سایر محصولات	درصد کشت تابستانه	درصد کشت پائیزه	آبش
مهسافر و همکاران (۷)	۶۰	۸/۴۷	۷/۰	۰	۰	۲/۶	۲/۴	۰	۵/۱	۰/۰	۱۰/۱	۵۴/۹	۳۵
شیرشاهی و همکاران (۱۹)	۱۰۰	۲۰/۷	۹/۸	۰	۱/۱	۳/۱	۱۱/۹	۱/۶	۱۰/۵	۰/۰	۲۸/۱	۳۰/۴	۴۱/۵
سال خشک	۱۰۰-۸۰	۱۳/۲	۲/۷	۱/۷	۶/۱	۶/۵	۶/۲	۸/۳	۲/۵	۰/۰	۶/۱۸	۴/۴۶	۳۵
سال نرمال	۱۰۰	۳۵/۱	۶/۶	۸/۳	۱/۰	۶/۲	۱/۸	۰/۸	۵/۲	۰/۰	۰/۱۵	۰/۵۰	۳۵
سال تر	۱۰۰-۹۰	۳۸/۴	۱۰/۵	۱/۰	۱/۵	۵/۰	۰/۶	۲/۷	۵/۳	۰/۰	۱۵/۲	۴۹/۸	۳۵

افزایش عملکرد نشده و تغییر الگوی کشت را هم می‌طلبد. بنابراین، توصیه به روش‌های کم‌آبیاری جزئی، برای جبران تنش‌های آبی در ماه‌های پرمصرف در سال‌های خشک و تر با لحاظ ترکیب کشت مناسب توصیه می‌شود. در سال نرمال نیز انتخاب یک الگوی کشت مناسب با تخصیص مناسب ماهانه آب سطحی و زیرزمینی راهکار مدیریتی است. حداقل دستاورد روش‌های کم‌آبیاری علاوه بر مدیریت مصرف این است که در صورت عدم اقتناع کشاورزان به کاهش سطوح زیرکشت، با انتخاب ترکیب کشت مناسب و کم‌آبیاری در ماه‌های پرمصرف می‌توان از خسارات زیان‌بار اقتصادی ممانعت کرد.

ماهانه حداکثر ده درصد پیشنهاد می‌شود که سبب بهبود شاخص بهره‌وری نسبت به وضع موجود برای سال خشک ۵۲/۲ درصد، برای سال نرمال ۴۱/۵ درصد و برای سال تر ۱۹/۶ درصد شده و متوسط درصد تأمین آبیاری سالانه در سال خشک از ۶۴/۳ به ۹۱/۷ درصد، در سال نرمال از ۷۰/۰ به ۱۰۰ درصد و در سال تر از ۷۷/۵ به ۹۷/۱ درصد افزایش می‌دهد و نیز عملکرد نسبی کلیه محصولات به‌ویژه گندم، یونجه و چغندررقند را به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهد. الگوکشت-های بهینه جدید شامل اضافه کردن کلزا و کاهش سطح زیرکشت گندم و کاهش درصد یونجه و افزایش درصد گوجه-فرنگی و سایر محصولات تابستانه هستند. در سال‌های خشک نمود تغییر الگوی کشت توأم با کم‌آبیاری بیشتر می‌باشد. اعمال روش بهینه کم‌آبیاری طبق الگوی کشت موجود به تنهایی باعث

منابع مورد استفاده

1. Akbari fard, S., K. Ghaderi and M. Alian nejad. 2015. Optimal operation of reservoir system using two algorithms: Water Cycle Algorithm (WCA) and Gravitational Search Algorithm (GSA). Case study: Gorganrood catchment. *Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant* 5:37-49 (In Farsi).
2. Bafti, M. M., S. Rahmani and A. Parhizkar. 2019. The Economic value of irrigation water, cropping pattern and farmer gross margin under drought conditions: The case of the Qazvin plain. *Journal of Hydrosiences and Environment* 3(6): 32-42.
3. Choopan, Y. and S. Emami. 2020. An approach to reduce water consumption by optimizing and determining of crop cultivation pattern using meta-heuristic algorithms: A case study on Moghan plain. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater* 7(1): 48-56.
4. Fallah, H., Gh. Sadeghi, C. R. Suribaba and E. Rashedi. 2019. Optimal pipe dimensioning in water distribution networks using Gravitational Search Algorithm. *Journal of Hydraulic Engineering* 1-14.

5. Gholami, M., M. Mazloumi and L. Ghaderpour. 2010. The importance of water productivity in agriculture (Case study: Marvdasht-Ramjard plain). *In: The National Conference on Water Crisis Management, Islamic Azad University of Marvdasht, Marvdasht, I.R. Iran (In Farsi).*
6. Karimi, M. and M. Jalini. 2016. Investigation of agricultural water productivity indicators in important crops. Case study: Mashhad plain (technical note). *Journal of Water and Sustainable Development* 1: 133-138 (In Farsi).
7. Mahsfar, H., M. Najarchi, M. M. Najafzadeh and M. Hezaveh. 2017. Conjunctive effect of water productivity and cultivation pattern on agricultural water management. *Water Resources and Technology: Water Supply* 17(6): 1515-1523.
8. Mirzaee, Sh. 2014. Optimization of crop pattern of lands under irrigation and drainage network of Golestan dam. Master thesis, Gorgan Faculty of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran (In Farsi).
9. Mo, L., P. Guo and V. P. Singh. 2016. Biobjective Optimization for Efficient Irrigation under Fuzzy Uncertainty. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 142(8): 0501600301-0501600310.
10. Moeini, R., M. Soltani-nezhad and M. Daei. 2017. Constrained gravitational search algorithm for large scale reservoir operation optimization problem. *Engineering Application of Artificial Intelligence* 62: 222-233.
11. Montazar, A. and A. Rahimikhob. 2008. Optimal water productivity of irrigation networks in arid and semi-arid regions. *Irrigation and Drainage* 57:411-423 (In Farsi).
12. Nazarifar, M. H., A. Salari and R. momeni. 2018. Development of a nonlinear programming model for determination of optimal cropping pattern based on deficit irrigation scenarios. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 49(5): 1055-1080 (In Farsi).
13. Rashedi, E., H. Nezamabadi-pour and S. Saryazdi. 2009. GSA: A Gravitational Search Algorithm. *Journal of Information Science* 179(13): 2232-2248.
14. Regulwar, D. G. and V. S. Pradhan. 2013. Irrigation planning with conjunctive use of surface and groundwater using fuzzy resources. *Journal of Water Resource and Protection* 5: 816-823.
15. Rezaee, A. 2014. Agricultural water productivity indicators in Dorodzan Fars irrigation and drainage network. *In: Sixth Conference on Watershed Management and Soil and Water Resources Management. Iranian Society of Irrigation and Water Engineering, Kerman, I.R. Iran (In Farsi).*
16. Safavi, H. R. and M. Falsafioun. 2017. Conjunctive use of surface water and groundwater resources under deficit Irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage* 143(2): 050160121-050160129.
17. Safavi, H. R. and S. Enteshari. 2016. Conjunctive use of surface water and groundwater resources using the ant system optimization. *Agricultural Water Management* 173: 23-34.
18. Sepahvand, R., H. R. Safavi and F. Rezaee. 2019. Multi-Objective planning for conjunctive use of surface water and groundwater resources using genetic programming. *Water Resources Management* 33(6): 2123-2137.
19. Shirshahi, F., H. Babazadeh, N. A. Ebrahimipak and M. R. Khaledian. 2019. Optimum crop cultivation at different levels of irrigation water allocation (case study: Qazvin plain). *Applied Economy and Environmental Research* 17(3): 6189-6200.
20. Tafteh, A., H. Babazadeh, N. A. Ebrahimipak and F. Kaveh. 2013. Evaluation and improvement of crop production functions for simulation winter wheat yields with two types of yield response factors. *Journal of Agricultural Science* 5(3): 111-122.
21. Tafteh, A., H. Babazadeh, N. A. Ebrahimipak and F. Kaveh. 2014. Determine yield response factors of important crops by different production functions in Qazvin plain. *Ecology, Environment and Conservation* 20 (2): 415-422.
22. Valizadeh, F. and M. Valizadeh. 2018. Investigation of agricultural water productivity indices in crops, a case study of Mazandaran. *In: First National Conference on Water Resources Management Strategies and Environmental Challenges. Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, I.R. Iran. (In Farsi).*

Maximizing Economic Water Productivity Index in Agriculture in Different Levels of Irrigation

A. Mehrabi^{1*}, M. Heidarpour¹ and H. R. Safavi²

(Received: September 9-2020; Accepted: April 5-2021)

Abstract

Designing an optimal crop pattern and on-time water allocation of water resources along with deficit irrigation are among the optimal solutions to maximize the water economic efficiency index. In this paper, the simultaneous optimization of crop pattern and water allocation are discussed using the deficit irrigation method. The study area is located west of the Qazvin plain irrigation network. The six different levels of percentage reduction of irrigation rate (0, 0 to 10, 0 to 20, 0 to 30, 0 to 40, and 0 to 50%) in three climatic conditions consist of dry, normal, and wet years were compared. The best irrigation scenario was selected for each year, and the results were compared with the existing crop pattern of the same year. The new crop pattern included the main crops of the region and the addition of rapeseed. The objective was to reach the maximum net benefit per unit volume of water by considering the maximum extraction of monthly and annual surface and groundwater. The results showed that the best scenario in the dry year was maximum deficit irrigation up to 20%, in a normal year full irrigation, and a wet year maximum deficit irrigation up to 10%. The improvement of economic water productivity in a dry year was 52.2%, in a normal year 41.5%, and in a wet year is 19.6% compared to the existing crop pattern. The average percentage of annual irrigation supply increases from 64.3 to 91.7% in a dry year, from 70 to 100% in a normal year, and from 77.5 to 97.1% in a wet year. Also, the relative yield of all crops, especially wheat, alfalfa, and sugar beet significantly increases. Therefore, the gravitational search algorithm as an optimization model can be considered in selecting the suitable crop pattern and allocation of surface and groundwater resources concerning economic benefits in irrigation networks management.

Keywords: Crop pattern, Water productivity index, Gravitational search algorithm, Optimization model, Deficit irrigation

1. Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2. Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

*: Corresponding author, Email: a.mehrabi@ag.iut.ac.ir