

مدیریت مصرف تلفیقی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی در وضعیت کم‌آبی (مطالعه موردی: غرب شبکه آبیاری دشت قزوین)

احمد مهرابی^{۱*}، منوچهر حیدرپور^۲ و حمیدرضا صفوی^۳

چکیده

برای کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی و همچنین ارائه برنامه‌ریزی صحیح جهت استفاده تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی در شبکه‌های آبیاری، مسأله کم‌آبیاری برای محصولات عمده تحت کشت در غرب شبکه آبیاری دشت قزوین بررسی شد. برای حل مدل بهینه‌ساز با هدف رسیدن به حداکثر سودخالص اقتصادی در وضعیت کم‌آبی، الگوریتم جست‌وجوی گرانشی (GSA) انتخاب و مسأله با استفاده از برنامه متلب حل شد. جهت معرفی عملیات کم‌آبیاری در منطقه مورد مطالعه، پنج سناریوی کم‌آبیاری با درصدهای کم‌آبیاری ماهانه ۱۰ تا ۰، ۲۰ تا ۰، ۳۰ تا ۰، ۴۰ تا ۰ و ۵۰ تا ۰ درصد و یک سناریوی آبیاری کامل تعریف شد. کاهش حجم برداشت از منابع آب زیرزمینی نیز در پنج حالت شامل درصدهای متفاوت از ۸۰ تا ۱۰۰ درصد حداکثر حجم قابل برداشت در سال خشک تعریف شد. از ترکیب شش حالت (پنج حالت کم‌آبیاری و یک حالت آبیاری کامل) با ۵ درصد متفاوت از مقدار برداشت از آب زیرزمینی، سی سناریو تعیین و نتایج برای هر سناریو تحلیل شد. در سناریوهای آبیاری کامل با انتخاب الگوی کشت بهینه، با کاهش برداشت از سفره آب زیرزمینی از ۵ تا ۲۰ درصد، درآمد خالص اقتصادی از ۱/۷ تا ۱۰/۹ درصد کاهش یافت و از مصرف منابع آب زیرزمینی تا ۲۵/۳ میلیون مترمکعب کاسته شد؛ همچنین سود خالص اقتصادی در واحد حجم نه تنها کاهش نیافت، بلکه با کاهش حجم برداشت، آب زیرزمینی، اندکی افزایش یافت. با اجرای سناریوهای کم‌آبیاری و اصلاح الگوی کشت در وضعیت خشک‌سالی، سطوح زیرکشت از ۴۱ تا ۵۴ درصد نسبت به آبیاری کامل افزایش و در عین حال سودخالص اقتصادی از ۶/۴ تا ۱۰/۷ درصد کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: الگوی کشت، مصرف تلفیقی، الگوریتم جست‌وجوی گرانشی (GSA)، بهینه‌سازی، کم‌آبیاری.

ارجاع: مهرابی، ا. حیدرپور، م. و صفوی، ح. ر. ۱۴۰۰. مدیریت مصرف تلفیقی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی در وضعیت کم‌آبی (مطالعه موردی: غرب شبکه آبیاری دشت قزوین). مجله پژوهش آب ایران. ۴۰: ۱۰۹-۹۷.

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان.

۳- استاد گروه آب، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

* نویسنده مسئول: a.mehrabi@ag.iut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۲

مقدمه

در کشت‌های با مصارف تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی، منابع آب سطحی اعم از تنظیم شده مانند سدها و بهنگام مانند رودخانه‌ها، تکافوی نیازهای کشاورزی را نمی‌دهد و از منابع آب زیرزمینی، به‌عنوان یک منبع مکمل و پایدار استفاده می‌شود. در این زمینه، نقش الگوهای کشت و توسعه عملیات کم‌آبیاری به‌خصوص در سال‌های خشک، از جمله راهبردهای اساسی کاهش مصارف آبی هستند. محمدخانی و همکاران (۱۳۹۶) بهینه‌سازی تخصیص آب بین محصولات مختلف در شبکه آبیاری دشت قزوین را در وضعیت تنش آبی با استفاده از نرم افزار لینگو بررسی کردند. کارآموز و همکاران (۲۰۰۴) از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی تلفیق آب سطحی و زیرزمینی در جنوب تهران استفاده و برای کاهش هزینه‌های پمپاژ و کنترل نوسانات سطح آب زیرزمینی از مدل شبیه‌سازی شبکه عصبی در پیوند با آن استفاده نمودند. صفوی و همکاران (۲۰۱۰) از مدل بهینه‌سازی حاصل از روش ژنتیک و مدل شبیه‌سازی شبکه عصبی مصنوعی در سه سناریو برای به حداقل رساندن نیازهای آبیاری و کنترل سطح ایستابی استفاده و کارایی مدل را اثبات کردند. کارآموز و همکاران (۲۰۱۰) یک روش را برای استفاده تلفیقی از منابع سطحی و زیرزمینی با تأکید بر کیفیت آب، کاهش هزینه‌های پمپاژ و کنترل نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از الگوریتم ژنتیک^۱ (GA) و شبکه‌های عصبی مصنوعی^۲ (ANN) توسعه دادند. منتظر و همکاران یک مدل توازنی رطوبتی خاک را با مدل بهینه‌سازی غیرخطی ترکیب کردند. نتایج نشان داد که با اجرای کم‌آبیاری، مقدار افت سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه کاهش می‌یابد و افت سطح آب زیرزمینی نیز ممکن است به تغذیه آبخوان برای حفظ تعادل رودخانه-آبخوان محدود شود. دلاور و همکاران (۲۰۱۲) در سیستم سد و شبکه آبیاری زاینده‌رود برای تخصیص منابع آب سطحی، از یک مدیریت بهنگام بر مبنای یک مدل پیش‌بینی جریان ورودی به سد و میزان بارش منطقه و یک مدل بهینه‌سازی استفاده کردند. صفوی و اسمی‌خانی (۲۰۱۳) از مدل شبیه‌سازی شبکه عصبی SVM^۳ و برنامه MODFLOW

4- Non-dominated Storing Genetic Algorithm

5- Fuzzy Multi-objective Particle Swarm Optimization

6- Particle Swarm Optimization

7- DYnamic COordinate Search search using Response Surface models

1- Genetic Algorithm

2- Artificial Neural Networks

3- Support Vector Machine

برای شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی در مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک استفاده کردند و مدل SVMs-GA را برای حل مسأله پیشنهاد دادند. ریگولوار و همکاران (۲۰۱۳) یک مدل برنامه‌ریزی آبیاری برای استفاده تلفیقی از آب سطحی و زیرزمینی را با هدف بهره‌وری حداکثر از منابع آب فرموله کردند. صفوی و انتشاری (۲۰۱۶) مدل ترکیبی بهینه‌سازی منتج از الگوریتم مورچگان را به مدل شبیه‌سازی شبکه عصبی پیوند دادند. صفوی و فلسفیون (۲۰۱۷) از مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک در دو سناریوی مختلف برای استفاده تلفیقی از آب سطحی و زیرزمینی در منطقه آبیاری نکوآباد اصفهان استفاده کردند. نتایج نشان داد مصرف آب ۲۴ میلیون مترمکعب و میزان بازدهی مالی تا ۲۲ درصد نسبت به وضعیت موجود کاهش می‌یابد. لاله‌زاری و همکاران (۲۰۱۶) برای تخصیص بهینه منابع سطحی و زیرزمینی در وضعیت کم‌آبی از یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه استفاده و نشان دادند که تکنیک‌های بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم NSGAI^۴ می‌تواند به طور مؤثری دقت در برنامه‌ریزی آبیاری را افزایش دهد. مولی و همکاران (۲۰۱۶) یک مدل برنامه‌ریزی دوهدفه را 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. رضایی و همکاران (۲۰۱۷) یک الگوریتم جدید را به نام الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات فازی^۵ (F-MPSO) پیشنهاد دادند و با شبکه عصبی در یک دوره ده ساله ترکیب و سپس نتایج را با الگوریتم ازدحام ذرات تک‌هدفه^۶ (PSO) و الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه (MPSO) مقایسه و برتری این روش جدید را نسبت به دو روش قبلی نتیجه‌گیری کردند. یوسف‌دوست و همکاران (۱۳۹۵) سطح زیر کشت بهینه برخی از محصولات کشاورزی در وضعیت آب و هوایی متفاوت را با استفاده از الگوریتم ژنتیک در دشت قزوین تعیین کردند. وو و همکاران (۲۰۱۶) برای مصرف تلفیقی بهینه بین آب سطحی و زیرزمینی و برای در نظر گرفتن واکنش متقابل بین این دو از یک مدل تقریبی جایگزین به نام DYCORs^۷ استفاده کردند و آن را برای حوضه

حداقل‌سازی کمبودها در یک سیستم مخزن چندگانه استفاده و کارایی این الگوریتم هیبریدی را اثبات کردند. هدف از انجام این مطالعه، مدیریت مصرف تلفیقی آب‌های سطحی و زیرزمینی با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی گرانشی با تابع هدف حداکثرسازی سودخالص سالانه در غرب شبکه آبیاری دشت قزوین در وضعیت خشک‌سالی است. طراحی و توسعه یک الگوریتم نوین بهینه‌سازی معتبر، تقویت برخی قابلیت‌های این الگوریتم مانند بهینه‌سازی پارامترهای آن، تعریف فرمول‌های مرتبط با حل مسائل مدیریت تلفیقی منابع آب و تعریف کاربردی از سیستم کم‌آب‌یاری از نوآوری‌های این مطالعه است. در این پژوهش در اجرای روش کم‌آب‌یاری، میزان درصد تخصیص آب نسبت به نیاز آبی ناخالص برای هر محصول در هر ماه متفاوت است و بسته به میزان بارش مؤثر، مرحله رشد گیاه (اثر بر تابع عملکرد)، موجودیت منابع آب و تعریف حداقل درصد کم‌آب‌یاری در سناریوی موردنظر تغییر می‌کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در غرب شبکه آبیاری دشت قزوین در استان قزوین واقع است. اقلیم منطقه خشک و نیمه خشک و متوسط بارش سالانه آن، ۳۱۲ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه آن ۱۹/۲ درجه سلسیوس است. مشخصات کانال‌های درجه ۲ غرب در جدول ۱ نشان داده شده و در این جدول، طول و فاصله از ابتدای کانال اصلی بر حسب کیلومتر و ظرفیت بر حسب مترمکعب بر ثانیه است.

جدول ۱- پارامترهای کانال‌های انشعابی غرب شبکه آبیاری

نام کانال	L7	L8	L9	L10	L20
طول	۱۲/۷	۱۸/۹	۲/۶۵	۲/۵۵	۵/۹۵
ظرفیت	۳/۳	۴/۷	۰/۶	۱	۰/۷۷
فاصله	۶۲/۰	۷۳۰/۶۳	۸۱/۸۴	۸۵/۸۷	۹۴/۰۳

منابع آب‌های سطحی برای تأمین نیازهای آبیاری محصولات کافی نیست و آب زیرزمینی تکمیلی به‌عنوان مکمل استفاده می‌شود که شامل چاه‌های تلفیقی با مالکیت دولتی و چاه‌های کشاورزی با مالکیت شخصی هستند (منتظر و همکاران ۲۰۱۰). دلیل انتخاب این منطقه، افت زیاد سطح آب زیرزمینی، برداشت زیاد از

غربی جیوکوان^۱ در چین به کاربرند. یوسفی و همکاران (۲۰۱۸) مدل بهینه‌سازی چندهدفه بهره‌برداری تلفیقی سبب و آب زیرزمینی را در شبکه آبیاری ورامین با اهداف حداکثرسازی سود حاصله از الگوی کشت، کاهش آبشویی نیتروژن و بهبود تغذیه آبخوان انجام دادند. نتایج حاصل از مدل سه‌هدفه PSO و از مدل سه‌هدفه MPSO کارایی دو مدل را نشان داد. سپهوند و همکاران (۲۰۱۹) از یک مدل ترکیبی شبیه‌ساز (الگوریتم ژنتیک)- بهینه‌ساز (چندهدفه ژنتیک) استفاده کردند و در سناریوهای مختلف برای استفاده تلفیقی از آب سطحی و زیرزمینی در سه سال خشک، نرمال و تر بررسی کردند که نتیجه، افزایش سود خالص در هر سه سال نسبت به وضع موجود بود. شیرشاهی و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی با هدف رسیدن به حداکثر بهره‌وری اقتصادی، پنج نوع سطح کم‌آب‌یاری را با سه سطح زیرکشت در شبکه آبیاری دشت قزوین تلفیق و بهترین گزینه اقتصادی را آبیاری کامل با کاهش ۱۰ درصد زیرکشت معرفی کردند. الگوریتم جست‌وجوی گرانشی، از جدیدترین الگوریتم‌های فراکاوشی که بر مبنای راه حل قانون گرانش نیوتن است و آن را راشدی و همکاران (۲۰۰۹) مطرح کردند. از جمله تحقیقات کاربردی در زمینه آب، می‌توان به مطالعات معینی و همکاران (۲۰۱۷) اشاره کرد. آنان برای کاهش فضای جست‌وجوی الگوریتم از دو نسخه محدودشده GSA با کاربرد در حل مسأله ساده و برقابی سد دز و دو نوع فرمول‌بندی در خوزستان استفاده کردند. نتایج آنان کارایی روش GSA و به‌ویژه نسخه دوم محدود شده این روش را در حل مسائل بهینه‌سازی مخزن سد نشان می‌دهد. اکبری فرد و همکاران (۱۳۹۴) بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن را با استفاده از دو الگوریتم چرخه آب^۲ (WCA) و جست‌وجوی گرانشی (GSA) با مطالعه موردی روی حوضه گرگانرود و با هدف کمینه‌سازی کل کمبودآبی انجام دادند و با مقایسه با روش سیاست بهره‌برداری استاندارد^۳ (SOP) بدین نتیجه رسیدند که الگوریتم جست‌وجوی گرانشی کارایی بهتری نسبت به روش دیگر دارد. فلاح و همکاران (۲۰۱۹) از یک الگوریتم ترکیبی شامل ترکیب الگوریتم جست‌وجوی گرانشی و الگوریتم ازدحام ذرات، برای

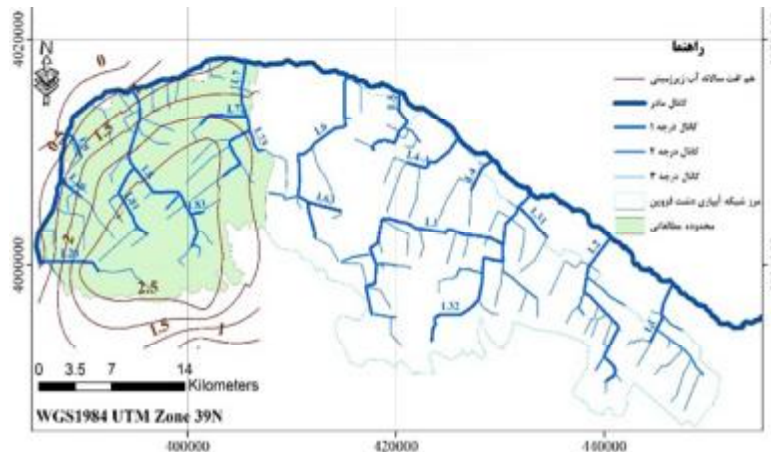
1- Jiuquan

2- Water Cycle Algorithm

3- Standard Operation Policy

در این مقاله میزان حجم تخصیص آب سطحی از ابتدای کانال درجه ۳ منظور شده است؛ با توجه به این‌که مسیر انتقال آب چاه‌ها تا مزارع از طریق کانال‌های درجه ۳ شبکه انجام می‌شود، بازدهی انتقال آب زیرزمینی و آب سطحی یکسان و ۸۰ درصد منظور می‌شود. با توجه به این‌که بازدهی کاربرد آب در مزرعه ۵۰ درصد می‌باشد و ۸۰ درصد بازدهی انتقال و بازدهی کلی ۴۰ درصد در نظر گرفته می‌شود (مهندسی مشاور پندام ۱۳۸۵).

چاه‌ها، تخصیص کمتر آب سطحی و تنوع و تراکم کشت بیشتر نسبت به شرق شبکه است. در این منطقه تعداد چاه‌های با مالکیت شخصی زیردست شبکه ۱۱۶ حلقه چاه و تعداد چاه‌های تلفیقی ۳۰ حلقه چاه است. کنترل چاه‌های تلفیقی در اختیار مدیریت شبکه می‌باشد. در شکل ۱ نقشه شبکه آبیاری دشت قزوین و کانال‌های درجه ۲ و ۳ نشان داده شده است.



شکل ۱- نقشه کانال‌های شبکه آبیاری دشت قزوین

$$R_{ij}(t) = \|X_i(t) \cdot X_j(t)\|_2 \quad (3)$$

M_{pi} و M_{aj} به ترتیب جرم گرانشی فعال جسم j و جرم گرانشی غیر فعال جسم i هستند، $G(t)$ ثابت گرانش در زمان t و R_{ij} فاصله اقلیدسی بین دو جسم i و j اند. ϵ یک عدد بسیار کوچک است. p توان فاصله که یک عدد حقیقی بزرگ‌تر از یک است. این مقدار غالباً برابر یک در نظر گرفته شده است. نیروی وارد بر جسم i در جهت بعد d در زمان t ($F_i^d(t)$) نام‌گذار شده است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_i^d(t) = \sum_{j \in K_{best}, j \neq i} rand_j F_{ij}^d(t) \quad (4)$$

K_{best} بیانگر مجموعه K جسم برتر جمعیت است و مقدار K به صورت متغیر با زمان تعریف می‌شود. به این صورت که در زمان شروع تمام اجسام روی هم مؤثرند؛ اما با گذشت زمان از تعداد اعضاء مؤثر بر جمعیت، به صورت یک نسبت خطی کم تا این‌که در انتها تنها دو درصد از بهترین‌های جمعیت بر سایر اعضا نیرو وارد می‌کنند. شتاب جسم i در جهت بعد d در زمان t با $a_i^d(t)$ و به صورت زیر تعریف می‌شود:

روش جستجوی گرانشی

در این الگوریتم، از مفاهیم جرم، نیروی جاذبه نیوتن و قوانین گرانشی نیوتن استفاده شده است که در آن، کانداید‌های پاسخ، مجموعه‌ای از اجرام هستند که به علت نیروی گرانشی بر هم اثر می‌گذارند، موقعیت‌شان تغییر می‌کند و معیار برازندگی بهتر جرم بیشتر هر جسم است. این الگوریتم دو مرحله دارد: مرحله اول شامل تشکیل سیستم، وضع قوانین و تنظیم پارامترهاست.

در این الگوریتم فضای سیستم به صورت مجموعه‌ای از N جسم منظور می‌شوند. موقعیت هر جسم مکانی از این فضا است. موقعیت بعد d از جرم i با x_i^d نشان داده می‌شود؛ لذا:

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

در این سیستم، در زمان t به جسم i از سوی جسم j در جهت بعد d نیرویی به اندازه $F_{ij}^d(t)$ وارد می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t) \times M_{aj}(t)}{R_{ij}(t)^p + \epsilon} (x_j^d(t) - x_i^d(t)) \quad (2)$$

مکان هر جسم پس از محاسبه معادلات (۶) تا (۷) محاسبه می‌شود و در زمان بعد جسم در آن موقعیت قرار می‌گیرد. جرم‌های گرانشی، جرم اینرسی و ثابت گرانش نیوتن در هر مرحله طبق معادلات (۸) تا (۱۵) بروز رسانی می‌شوند. در صورت برآورده شدن شرط توقف الگوریتم نهایی می‌شود در غیر این صورت فرآیند تکرار می‌شود (راشدی و همکاران، ۲۰۰۹).

الگوی کشت، تعریف سناریوها و تابع عملکرد

بر مبنای تعیین بارش متوسط سالانه غرب شبکه و آنالیز شاخص خشک‌سالی SPI^۱ در دوره آماری (سال آبی ۴۹-۴۸ تا ۹۶-۹۷) و نیز با توجه به اطلاعات منابع آبی موجود در سال‌های اخیر سال آبی ۸۷-۸۶ به‌عنوان سال خشک مطالعه شد. در این سال، تخصیص آب سطحی حدود ۳۰/۱ میلیون مترمکعب و برداشت کل آب زیرزمینی برای زراعت حدود ۱۲۶/۷ میلیون مترمکعب محاسبه شد. ترکیب کشت محصولات موجود در شبکه در جدول ۲ و الگوی کشت مورد مطالعه بر مبنای محصولات منتخب در جدیدترین الگوی کشت پیشنهادی جهاد کشاورزی از جدول ۳ نشان داده شده است. ترکیب باغ‌ها در منطقه حفظ و نیاز آبی آن‌ها از آب مصرفی کل کسر می‌شود.

متغیرهای تصمیم در این برنامه بهینه‌سازی برابر ۸۲ مورد است که شامل ۷ سطح زیرکشت، ۱۲ برداشت ماهانه آب سطحی، ۱۲ برداشت ماهانه آب زیرزمینی و ۵۱ میزان ماهانه آبیاری (نه ماه گندم، نه ماه جو، نه ماه کلزا، شش ماه چغندرقدند، شش ماه گوجه‌فرنگی، شش ماه ذرت دانه‌ای و شش ماه ذرت علوفه‌ای) می‌باشد. تعداد ابعاد ۱۰۰ و تعداد تکرار ۲۰۰ هزار منظور شد. نیاز آبی محصولات منتخب در این الگوی کشت، برای سال آبی ۸۶-۸۷ به‌صورت جداگانه محاسبه می‌شود. تبخیر و تعرق پتانسیل از طریق داده‌های ایستگاه سینوپتیک قزوین و اجرای برنامه CROPWAT8 محاسبه می‌شود. روش انتخابی روش فائو پنمن مانیتیس اصلاح شده است. سناریوهای ترکیبی ۳۰ مورد و از تلفیق سناریوهای آبیاری کامل و ۵ سطح کم‌آبیاری با ۵ سطح تخصیص آب‌زیرزمینی تشکیل می‌شود که راهکارهای انعطاف‌پذیری را برای مدیریت شبکه در وضعیت خشکسالی مهیا می‌کند. این سناریوها شامل کاهش برداشت از آب زیرزمینی در

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)} \quad (5)$$

M_{ii} جرم اینرسی جسم i است. سرعت بعدی هر جسم براساس معادله زیر تعریف می‌شود:

$$v_i^d(t+1) = rand_i \times v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (6)$$

$v_i^d(t)$ سرعت بعد d جسم i در زمان t است. $rand_i$ و $rand_j$ اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $[-1, 1]$ هستند که برای حفظ خصوصیت تصادفی بودن جست‌وجو استفاده شده‌اند. موقعیت جدید بعد d از جسم i بر مبنای معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (7)$$

$G(t)$ به‌عنوان تابعی از $\frac{t}{T}$ و از معادله زیر به دست می‌آید:

$$G(t) = G_0 \times \left(\frac{t}{T}\right)^\beta \quad \beta < 1 \quad (8)$$

در معادله بالا G_0 ثابت گرانش اولیه، b ثابت مثبت و T کل تکرارهای الگوریتم و به عبارتی طول عمر سیستم است.

در این الگوریتم، اجرام گرانشی و اینرسی مطابق معادله زیر، برابر در نظر گرفته شده است و برای تنظیم آن‌ها، از مقدار تابع هدف اجسام با استفاده از معادله (۱۱) استفاده می‌شود. مقدار اجرام در معادله (۱۱)، نرمالیزه می‌شود. در این معادلات، به اجسام با شایستگی بهتر، جرم بیشتری نسبت داده شود.

$$M_{ai} = M_{pi} = M_{ii} = M_i \cdot i = 1.2 \dots N \quad (9)$$

$$q_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)} \quad (10)$$

$$M_i(t) = \frac{q_i(t)}{\sum_{j=1}^N q_j(t)} \quad (11)$$

در این معادلات $fit_i(t)$ بیانگر میزان برزندگی جسم i در زمان t است. در مسایل کمینه‌یابی می‌توان از معادلات (۱۲) و (۱۳) برای محاسبه بهترین و بدترین مقدار شایستگی استفاده کرد. در مسایل بیشینه‌یابی بهترین و بدترین طبق معادلات (۱۴) و (۱۵) تعریف می‌شود:

$$best(t) = \min_{j \in \{1, \dots, N\}} fit_j(t) \quad (12)$$

$$worst(t) = \max_{j \in \{1, \dots, N\}} fit_j(t) \quad (13)$$

$$best(t) = \max_{j \in \{1, \dots, N\}} fit_j(t) \quad (14)$$

$$worst(t) = \min_{j \in \{1, \dots, N\}} fit_j(t) \quad (15)$$

مرحله دوم: گذر زمان، حرکت اجرام و به روزرسانی پارامترها. در ابتدای تشکیل سیستم، هر جسم به‌صورت تصادفی در یک نقطه از فضا قرار می‌گیرد که جوابی از مسأله است. در هر لحظه از زمان، اجسام ارزیابی، تغییر

در معادله فوق، Y_a عملکرد واقعی، Y_m حداکثر عملکرد سطح ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد و کم‌آبیاری ماهانه صفر تا ۵۰ درصد در پنج حالت است. حداکثر تأمین از آب زیرزمینی معادل $126/7$ میلیون مترمکعب می‌باشد. درصد کم‌آبیاری برای هر محصول به صورت ماهانه برآورد و از ۰ تا ۵۰ درصد متغیر است. دلیل انتخاب سناریوهای کم‌آبیاری تمایل کشاورزان به کشت بیشتر در ابتدای سال آبی که با توجه به کمبود منابع آب زیرزمینی و عدم کفایت بارش به خصوص در سال‌های خشک این مسأله از طریق اجرای کم‌آبیاری قابل حل است. تافته و همکاران (۲۰۱۳) بهترین تابع عملکرد را به صورت معادله (۱۶) در دشت قزوین معرفی کردند:

سطح ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد و کم‌آبیاری ماهانه صفر تا ۵۰ درصد در پنج حالت است. حداکثر تأمین از آب زیرزمینی معادل $126/7$ میلیون مترمکعب می‌باشد. درصد کم‌آبیاری برای هر محصول به صورت ماهانه برآورد و از ۰ تا ۵۰ درصد متغیر است. دلیل انتخاب سناریوهای کم‌آبیاری تمایل کشاورزان به کشت بیشتر در ابتدای سال آبی که با توجه به کمبود منابع آب زیرزمینی و عدم کفایت بارش به خصوص در سال‌های خشک این مسأله از طریق اجرای کم‌آبیاری قابل حل است. تافته و همکاران (۲۰۱۳) بهترین تابع عملکرد را به صورت معادله (۱۶) در دشت قزوین معرفی کردند:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(1 - K_{yi} \left\{ 1 - \frac{ET_{a,j}}{ET_{m,j}} \right\} \right)^{\frac{K_{yi}}{\sum_{i=1}^n K_{yi}}} \quad (16)$$

جدول ۲- سطح زیر کشت محصولات غرب شبکه آبیاری دشت قزوین

محصول	گندم	جو	چغندر قند	نخود	عدس	لوبیا	سیب‌زمینی	گوجه‌فرنگی
سطح زیر کشت (هکتار)	9108	2079	314	266	81	251	114	482
درصد کشت به کل اراضی	39/6	9	1/4	1/2	0/4	1/1	0/5	2/1
محصول	ذرت علوفه‌ای	ذرت دانه‌ای	یونجه	باغ انگور	باغ میوه	جمع کاشت	جمع آیش	جمع کل
سطح زیر کشت (هکتار)	108	48	1794	382	319	15348	7678	23027
درصد کشت به کل اراضی	0/5	0/2	7/8	1/7	1/4	66/7	33/3	100

جدول ۳- الگوی کشت مورد مطالعه

آیش	کشت تابستانه					کشت پاییزه		نوع کشت
	گوجه‌فرنگی	چغندر قند	ذرت علوفه‌ای	ذرت دانه‌ای	کلزا	جو	گندم	
+	+	+	+	+	+	+	+	الگوی کشت

* در الگوی کشت منتخب جمعاً ۶۵ درصد کاشت و آیش ۳۵ درصد است.

** محصولات منتخب بر مبنای سوابق کاشت و پیشنهادیه جهاد کشاورزی است و حداقل درصد کشت محصولات در محدوده ۵۰ درصد فعلی است.

جدول ۴- مقادیر ضرایب واکنش ماهانه کالیبره شده (K_{yi}) برای محصولات منتخب در شبکه آبیاری دشت قزوین (تافته و همکاران، ۲۰۱۴)

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
گندم	0/5	0/5	0/5	0/6	0/6	0/6	0/62	1/1	0/9			
جو	0/5	0/5	0/75	0/75	0/8	0/8	0/82	0/88	0/8			
کلزا	0/35	0/6	0/6	0/6	0/6	0/6	0/63	0/75	0/52			
چغندر قند	0/6							0/6	0/6	1/35	1/35	0/63
گوجه‌فرنگی	0/4							0/7	1/1	1/1	1/14	0/4
ذرت دانه‌ای	0/7							0/5	0/85	1/2	1/4	1/1
ذرت علوفه‌ای	0/85							0/5	0/48	0/7	1/1	1/2

کشت محصول در سناریوهای ترکیبی تعریف شده است. تابع هدف اصلی به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$Z^* = \text{Max} \sum_{i=1}^n [p_j (Y_a)_j - C_j] A_j \quad (17)$$

n تعداد محصولات، z شاخص محصول Z^* کل درآمد منطقه بر حسب ریال، p_j قیمت فروش محصول z (ریال در

توسعه مدل بهینه‌سازی، محدوده‌های پائین و بالای

متغیرها و قیود مدل

در این مقاله هدف اصلی مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه مورد نظر بیشینه‌سازی سود ناشی از

قید اول: جمع تأمین نیازهای آبی ماهانه محصولات الگوی کشت در هرماه باید مساوی با آب سطحی و زیرزمینی اختصاصی به کل محصولات در ماه موردنظر باشد. برای هر ماه این قید باید رعایت شود.

$$\left(\frac{\sum_{j=1}^n (A_j \times Sup_{ij})}{a_z} \right) = (SW_{ij} + GW_{ij}) \quad ; \quad i = constant \quad (18)$$

$$(1 - deficit) \times D_{ij} \leq Sup_{ij} \leq D_{ij}$$

i شماره ماه، n شماره ماه محصول، D_{ij} عمق آب خالص مورد نیاز برای محصول j در ماه i ، Sup_{ij} عمق آب خالص تأمین شده برای محصول j در ماه i ، SW_{ij} حجم آب شده سطحی برای محصول j در ماه i ، GW_{ij} حجم آب تأمین شده زیرزمینی برای محصول j در ماه i ، A_j مساحت کاشت محصول j ، a_z بازدهی کل آبیاری که در این تحقیق برابر 0.4 و $deficit$ نسبت کم آبیاری تعریف شده در سناریو (بین 0.5 و 1) و در واقع حداکثر نسبت مجاز تنش آبی به گیاه است که در حالت آبیاری کامل صفر تعریف می شود.

قید دوم: کل آب سطحی تخصیص یافته در ماه های مختلف از آب سطحی تخصیص یافته همان سال در محدوده موردنظر کمتر یا مساوی باشد.

$$\sum_{i=1}^{12} (SW_i) \leq SW \quad (19)$$

SW حجم آب سطحی تخصیص یافته در سال موردنظر و SW_i حجم آب سطحی تخصیص یافته در ماه موردنظر است.

قید سوم: کل آب زیرزمینی تخصیص یافته در ماه های مختلف از آب زیرزمینی تخصیص یافته همان سال در محدوده موردنظر کمتر یا مساوی باشد.

$$\sum_{i=1}^{12} (GW_i) \leq GW \quad (20)$$

GW حجم آب زیرزمینی تخصیص یافته در سال موردنظر و GW_i حجم آب زیرزمینی تخصیص یافته در ماه موردنظر. قید چهارم: با توجه به اختصاص 35 درصد کل اراضی زراعی (برابر 22326 هکتار بدون احتساب سطح باغها) به آیش، مجموع سطوح کشت بهینه از 65 درصد این مقدار (14512 هکتار) تجاوز نکند.

نتایج و بحث

بررسی پارامترهای مدل بهینه سازی

در این زمینه یک سناریوی نمونه (برداشت کامل از آب زیرزمینی و آبیاری کامل) از مدل با مقادیر مختلف G_0 از 100 تا 500 ، نیز مقادیر مختلف b از 0.3 تا 0.9 ، تعداد

هکتار C_j هزینه تولید محصول z (ریال در هکتار)، A_j مساحت کاشت محصول z و Y_a عملکرد نسبی همان تابع تولید محصول از آب (بدون بعد) است که از رابطه توابع تولید درون فصلی محاسبه می شود. با توجه به مطالعات تافته و همکاران (۲۰۱۳) برای برآورد عملکرد نسبی محصول در دشت قزوین از فرمول پیشنهادی آنان برای برآورد عملکرد نسبی گیاهان استفاده می شود (معادله (۱۶)). تقویم زراعی محصولات کشاورزی منتخب در شبکه آبیاری دشت قزوین در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- 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
گوجه فرنگی	دهم اردیبهشت	دهم مهر
ذرت دانه ای	دهم اردیبهشت	دهم مهر
ذرت علوفه ای	پانزدهم اردیبهشت	پانزدهم مهر

به طور کلی 82 متغیر تصمیم در برنامه وجود دارد که به صورت اجرام $x(k)$ در مدل الگوریتم جست و جوی گرانشی تعریف و محدوده پائین و بالای آنها به شرح ذیل می باشد: الف- 7 متغیر مربوط به سطح زیرکشت (A_j) که جهت حفظ تقریبی الگوی کشت موجود، حد پائین این متغیرها 50 درصد سطح زیرکشت فعلی هستند. برای تعریف الگوی کشت بهینه و انعطاف مدل حد بالایی در این زمینه تعریف نمی شود.

ب- 51 متغیر به عنوان میزان تخصیص ماهانه به هر محصول در هر ماه (Sup_{ij}) است. حد پائین آن نسبتی از نیاز آبی گیاه در آن ماه با توجه به درصد کم آبیاری تعریفی در سناریو و حد بالای آن نیاز آبی گیاه در آن ماه می باشد.

ج- 12 متغیر به عنوان آب زیرزمینی تخصیص یافته در هر ماه (GW_i) که بین حداقل و حداکثر برداشت آب زیرزمینی در دوره آماری (مهر 1380 تا مهر 1397) هستند.

د- 12 متغیر به عنوان آب سطحی تخصیص یافته در هر ماه (SW_i) که بین حداقل و حداکثر تخصیص آب سطحی در دوره آماری (مهر 1380 تا مهر 1397) می باشد. قیود مدل بهینه سازی به صورت روابط زیر تعریف می شوند:

میلیون مترمکعب در آبیاری کامل و کم‌آبیاری‌های مختلف در جدول ۷ و برای یک نمونه کم‌آبیاری یکسان (۰ تا ۵۰ درصد) در حجم‌های مختلف برداشت آب زیرزمینی در جدول ۸ نشان داده شده است. افزایش جزئی درصد کشت گندم در محصولات پاییزه و افزایش جزئی درصد کشت گوجه‌فرنگی از تغییرات الگوی کشت در مواجهه با کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی است و افزایش درصد کشت گندم و کلزا در محصولات پاییزه و کاهش درصد کشت گوجه‌فرنگی، ذرت دانه‌ای و علوفه‌ای از دیگر تغییرات الگوی کشت در مواجهه با اجرای کم‌آبیاری هستند. طبق جداول ۷ و ۸، فارغ از مساحت آیش، بیشترین درصد کشت پاییزه مربوط به گندم و بیشترین درصد کشت تابستانه مربوط به گوجه‌فرنگی در تمامی سناریوها است. افزایش درصد گندم 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 افزایش درصد گوجه‌فرنگی به دلیل سود بالای اقتصادی این محصول می‌باشد. در این زمینه درصد چغندر قند به دلیل سود پایین اقتصادی کمتر از سایر محصولات است. افزایش درصد کم‌آبیاری منجر به افزایش درصد کلزا و کاهش درصد جو و کاهش درصد محصولات تابستانه می‌شود. مقایسه بین مساحت تحت کشت در سناریوهای مختلف در جدول ۹ نشان داده شده است. طبق این جدول، کاهش حجم برداشت از آب زیرزمینی منجر به کاهش کل سطوح زیرکشت و افزایش سطوح کم‌آبیاری باعث افزایش سطوح زیرکشت می‌شود. از این نکته چنین استنباط می‌گردد که تمایل کشاورزان به حفظ سطوح زیرکشت قبلی در سال‌های نرمال و تر در مواقع خشک‌سالی، می‌تواند با راهکار کم‌آبیاری و بهینه‌سازی الگوهای کشت جبران شود.

ابعاد از ۲۰ تا ۲۰۰ و تعداد تکرار از ۲۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰۰ اجرا و مقادیر تابع هدف (سود خالص بر حسب هزار میلیون ریال) مشخص شد که در جدول ۶ نشان داده شده است. با توجه به جدول مقدار G_0 برابر ۴۰۰، b برابر ۰/۵، تعداد ابعاد ۱۰۰ و تعداد تکرار ۲۰۰۰۰۰ بالاترین سود را دارد؛ لذا برای کلیه سناریوها از این مقادیر استفاده شد.

جدول ۶- سود خالص بازاء مقادیر مختلف G_0 و b

G_0				
۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰
۹۲/۶	۱۱۹/۸	۱۳۶/۰	۱۳۶/۸	۱۳۵/۲
β				
۰/۳	۰/۵	۰/۷	۰/۸	۰/۹
۱۳۵/۹	۱۳۶/۸	۱۳۵/۳	۱۳۴/۵	۱۳۴/۶
تعداد ابعاد یا d				
۲۰	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
۱۲۸/۵	۱۳۴/۳	۱۳۶/۸	۱۳۵/۸	۱۳۶/۲
تعداد تکرار (هزار)				
۲۰	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
۱۰۳/۴	۱۱۷/۲	۱۳۵/۸	۱۳۵/۶	۱۳۶/۸

معرفی الگوهای کشت بهینه در سناریوهای منتخب

برای سناریوهای با کم‌آبیاری مشابه با کاهش حجم برداشت از آب زیرزمینی و برای سناریوهای با حجم برداشت مشابه از سفره آب زیرزمینی، با افزایش میزان کم‌آبیاری (شکل ۲)، درصد کشت پاییزه افزایش و درصد کشت تابستانه کاهش می‌یابد؛ لذا به طور کلی کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی چه از طریق کاهش برداشت از چاه‌ها یا ازدیاد درصد کم‌آبیاری چرخش الگوهای کشت از محصولات تابستانه به محصولات پاییزه را به دنبال دارد. ترکیب کشت برای حجم برداشت ۱۲۶/۷

جدول ۷- درصد کشت در سناریوهای مختلف کم‌آبیاری برای حجم برداشت آب زیرزمینی معادل ۱۲۶/۷ میلیون مترمکعب

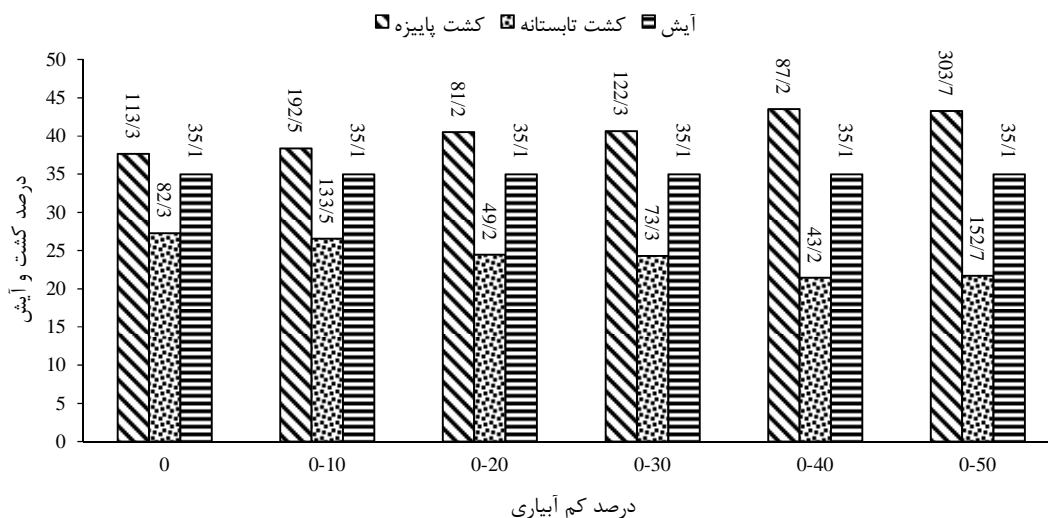
درصد کم‌آبیاری ماهانه	درصد کشت محصول							
	گندم	جو	کلزا	چغندر قند	گوجه‌فرنگی	ذرت دانه‌ای	ذرت علوفه‌ای	آیش
۰	۲۹/۵	۶/۸	۱/۴	۱/۱	۹/۶	۷/۴	۹/۲	۳۵
۱۰ تا ۰	۲۹/۰	۶/۸	۲/۶	۱/۰	۹/۱	۷/۸	۸/۷	۳۵
۲۰ تا ۰	۳۱/۲	۶/۱	۳/۳	۱/۲	۸/۳	۶/۷	۸/۳	۳۵
۳۰ تا ۰	۳۱/۱	۵/۷	۳/۹	۲/۵	۷/۷	۶/۸	۷/۳	۳۵
۴۰ تا ۰	۳۱/۸	۵/۱	۶/۵	۱/۸	۷/۱	۶/۰	۶/۶	۳۵
۵۰ تا ۰	۳۰/۱	۵/۹	۷/۲	۴/۷	۶/۸	۴/۰	۶/۳	۳۵

جدول ۸- درصد کشت در سناریوهای با کم آبیاری یکسان (۰ تا ۵۰ درصد) و حجم برداشت آب زیرزمینی متفاوت

آیش	درصد کشت محصول						حجم برداشت (میلیون مترمکعب)
	ذرت علوفه‌ای	ذرت دانه‌ای	گوجه‌فرنگی	چغندر قند	کلزا	جو	
۳۵	۶/۳	۴/۰	۶/۸	۴/۷	۷/۲	۵/۹	۳۰/۱
۳۵	۵/۶	۵/۱	۶/۷	۲/۶	۸/۸	۵/۱	۳۱/۱
۳۵	۵/۷	۴/۹	۶/۷	۳/۵	۶/۰	۵/۶	۳۲/۵
۳۵	۴/۳	۵/۶	۶/۸	۲/۰	۷/۱	۵/۷	۳۳/۵
۳۵	۵/۸	۳/۵	۷/۰	۱/۴	۶/۷	۵/۱	۳۵/۴

جدول ۹- مساحت قابل کشت سناریوهای مختلف بر حسب هکتار

درصد حجم برداشت آب زیرزمینی به کل پتانسیل حجم آب زیرزمینی					درصد کم آبیاری ماهانه
۸۰ درصد	۸۵ درصد	۹۰ درصد	۹۵ درصد	۱۰۰ درصد	
۹۰۲۸	۹۱۵۸	۹۴۳۸	۹۸۴۳	۱۰۰۹۶	۰ درصد
۹۲۹۷	۹۵۸۹	۹۸۷۹	۱۰۲۶۱	۱۰۶۱۱	۰ تا ۱۰ درصد
۱۰۲۲۳	۱۰۵۵۶	۱۰۷۳۰	۱۰۹۱۴	۱۱۴۳۶	۱۰ تا ۲۰ درصد
۱۱۷۲۲	۱۱۵۲۸	۱۱۸۶۲	۱۲۱۱۱	۱۲۴۱۱	۲۰ تا ۳۰ درصد
۱۲۴۸۲	۱۲۸۸۰	۱۳۴۴۵	۱۳۰۸۸	۱۳۶۲۴	۳۰ تا ۴۰ درصد
۱۳۹۲۴	۱۳۹۰۰	۱۴۰۴۰	۱۴۲۱۳	۱۴۲۸۲	۴۰ تا ۵۰ درصد



شکل ۲- درصد کشت محصولات پاییزه و تابستانه در سناریوهای مختلف با حجم برداشت ۱۲۶/۷ میلیون مترمکعب

۱۳۶/۸ هزارمیلیون ریال به‌عنوان مبنا قرار گرفت و درصد سود سناریوهای دیگر به این حالت محاسبه و در جدول ۱۰ نشان داده شدند. در این زمینه با کاهش حجم برداشت از سفره آب زیرزمینی در حالت‌های دارای درصد کم آبیاری یکسان در تمام سناریوها، سود خالص در واحد حجم یا همان بهره‌وری مؤثر از یک مترمکعب آب افزایش می‌یابد.

سود خالص^۱ (NB) و سود خالص اقتصادی در واحد حجم^۲ (NBPD)

برای متقاعد کردن کشاورزان به تغییر الگوی کشت، معیارهای اقتصادی به‌عنوان یک انگیزه اصلی می‌تواند مدنظر قرار گیرد. در این رابطه سناریوی با حجم برداشت ۱۲۶/۷ میلیون مترمکعب و با آبیاری کامل با سود کل

1- Net Benefit

2- Net Benefit Per Demand

مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که در این جدول مشهود است، میزان تخصیص آب سطحی در همه سناریوهای آبیاری کامل و کم‌آبیاری‌ها حدود ۳۰/۲ میلیون مترمکعب و تخصیص آب زیرزمینی در سایر سناریوها از ۱۰۱/۵ تا ۱۲۶/۹ میلیون مترمکعب متغیر هستند.

کفایت تأمین نیاز آبیاری

از لحاظ متوسط کفایت تأمین نیازهای سالانه، تقریباً در تمامی سناریوها حدود ۶۳ تا ۱۰۰ درصد نیازها تأمین و از لحاظ کفایت تأمین نیازهای ماهانه، در بحرانی‌ترین ماه‌ها حداقل ۵۰ درصد نیاز تأمین می‌شود. در شکل ۴ متوسط درصد سالانه کم‌آبیاری سناریوهای مختلف نشان داده شده است. بیشترین درصد کم‌آبیاری مربوط به سناریوی با کاهش حجم ۲۰ درصد و کم‌آبیاری تا ۵۰ درصد که برابر ۳۷ درصد است. در سناریوهای با کم‌آبیاری یکسان، با کاهش ۲۰ درصدی برداشت از سفره آب زیرزمینی، حداکثر به میزان ۵ درصد از درصد تأمین آب کاسته می‌شود، و در سناریوهای با حجم برداشت یکسان و کم‌آبیاری‌های متفاوت، حداکثر ۳۷ درصد از درصد تأمین آب کاسته می‌شود. در جدول ۱۲ به‌عنوان نمونه درصد تأمین ماهانه درآبیاری‌های متفاوت در حجم برداشت آب زیرزمینی معادل ۱۲۶/۷ میلیون مترمکعب، نشان داده شده است. با توجه به این جدول، در تمام حالت‌ها، بیشترین تنش آبی در ماه‌های اسفند تا خرداد مشاهده می‌شود که به دلیل کاهش بارش، افزایش دما و نیاز آبی، درصد زیاد کشت محصولات پاییزه در ترکیب الگوی کشت و تقارن کاشت محصولات تابستانه با آبیاری ماه‌های پایانی محصولات پاییزه است. در سناریوهای با حجم‌های برداشت کمتر از ۱۲۶/۷ میلیون مترمکعب هم روند درصد تأمین نیازماهانه مشابه طبق جدول ۱۲ هستند.

نتیجه‌گیری

در حالت آبیاری کامل، با کاهش برداشت از سفره آب زیرزمینی از ۵ تا ۲۰ درصد (۶/۳۴ تا ۲۵/۳۴ میلیون مترمکعب) درآمد خالص اقتصادی الگوی بهینه کشت صرفاً از ۱/۷ تا ۱۰/۹ درصد کاهش می‌یابد. از طرفی انجام عملیات کم‌آبیاری منجر به کاهش سود خالص اقتصادی حداکثر از ۶/۴ تا ۱۰/۷ درصد و در عین حال منجر به

جدول ۱۰- سودخالص اقتصادی سناریوها به سناریوی مبنا

درصد کم‌آبیاری	درصد حجم برداشت آب زیرزمینی به کل پتانسیل			
	۸۰	۸۵	۹۰	۹۵
۰	۸۹/۱	۹۳/۰	۹۵/۷	۹۸/۳
۱۰ تا ۰	۸۸/۴	۹۱/۶	۹۳/۵	۹۶/۹
۲۰ تا ۰	۸۵/۸	۸۸/۸	۹۳/۴	۹۶/۴
۳۰ تا ۰	۸۳/۲	۸۸/۵	۹۲/۷	۹۳/۴
۴۰ تا ۰	۸۴/۳	۸۷/۵	۸۹/۹	۸۸/۲
۵۰ تا ۰	۸۳/۱	۸۴/۰	۸۵/۴	۹۲/۰

همچنین با افزایش سطوح کم‌آبیاری تا سطح ۳۰ درصد، بهره‌وری آب روند کاهشی دارد. در سطوح آبیاری تا ۴۰ و تا ۵۰ درصد، روند هم کاهش جزئی و هم افزایش جزئی دارد. علت کاهش بهره‌وری آب کاهش باردهی محصولات به سبب تنش‌هاست. مقایسه بین سود خالص در واحد حجم بر حسب ریال بر مترمکعب در شکل ۳ نشان داده شده است. سناریوی با کاهش ۲۰ درصد حجم برداشت از سفره آب زیرزمینی بالاترین و سناریوهای با کم‌آبیاری‌های تا ۴۰ و ۵۰ درصد، کمترین میزان بهره‌وری آب را دارند. در آبیاری کامل با کاهش حجم برداشت آب زیرزمینی تا ۲۰ درصد، سود خالص اقتصادی حدود ۱۰/۹ درصد کاهش می‌یابد. این در حالیست که سود خالص اقتصادی در واحد حجم بر حسب ریال بر مترمکعب یا بهره‌وری آب تا ۴/۵ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش میزان کم‌آبیاری تا ۵۰ درصد، سود خالص اقتصادی حدود ۶/۴ تا ۱۰/۷ درصد کاهش می‌یابد و با همین روند برای سود خالص اقتصادی در واحد حجم ۵/۹ تا ۱۰/۳ درصد کاهش می‌یابد. به طور کلی سرعت کاهش درصد سود خالص در مقایسه با سرعت کاهش درصد حجم برداشت و درصد افزایش کم‌آبیاری کمتر است. این امر ناشی از بهره‌وری زیاد حاصل از کم‌آبیاری و مصرف بهینه آب می‌باشد.

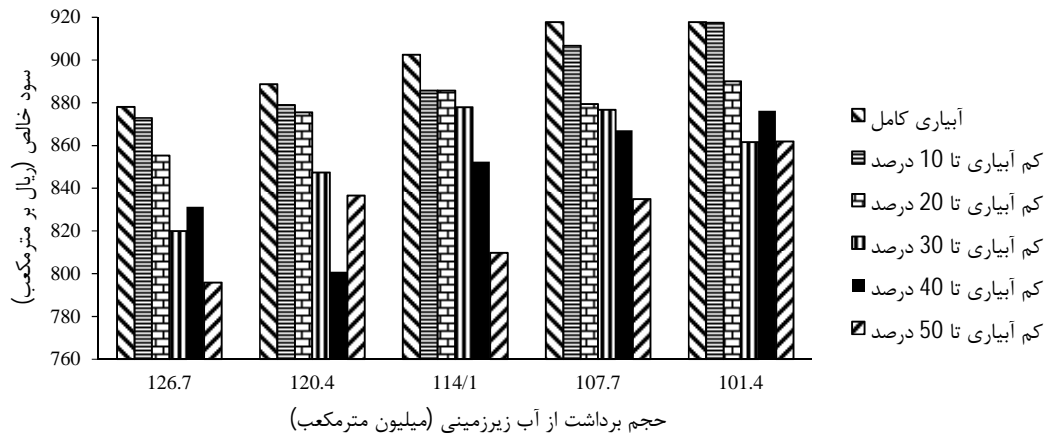
تخصیص منابع آب سطحی و زیرزمینی

از لحاظ برداشت از منابع آبی، اولویت با برداشت از منابع آب سطحی و سپس منابع آب زیرزمینی است. در کلیه سناریوها قسمت اعظم نیازهای آبی از منابع آب زیرزمینی (حدود ۷۷/۰ تا ۸۰/۸ درصد کل) و مابقی از منابع آب سطحی (حدود ۱۹/۲ تا ۲۳/۰ درصد کل) تأمین می‌شوند.

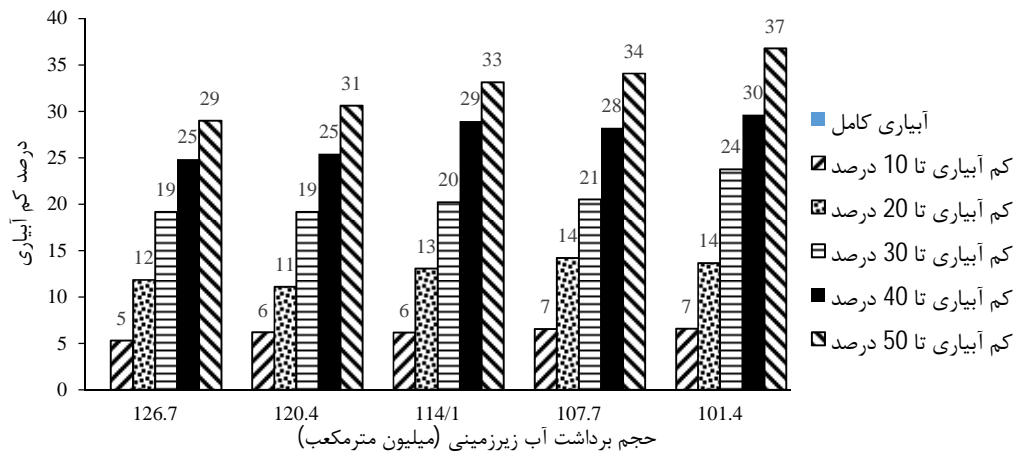
در جدول ۱۱ مقایسه بین میزان تخصیص منابع آب سطحی (SW) و منابع آب زیرزمینی (GW) در سناریوهای

مدیریتی می‌باشد. دستاورد سیستم‌های کم‌آبیاری بر این است که در صورت عدم افتخار کشاورزان به کاهش سطوح زیرکشت، با انتخاب ترکیب کشت مناسب و کم‌آبیاری در ماه‌های پرمصرف می‌توان از خسارات زیانبار اقتصادی جلوگیری کرد.

افزایش سطوح زیرکشت از ۴۱ تا ۵۴ درصد نسبت به آبیاری کامل می‌شود. تمایل کشاورزان به حفظ مساحت زیرکشت قبلی در مواجهه با بحران‌های خشک‌سالی، از مشکلات شبکه است. در این زمینه، توصیه به روش‌های کم‌آبیاری با لحاظ ترکیب کشت مناسب از راهکارهای



شکل ۳- میزان سود خالص سناریوهای مختلف بر حسب ریال بر مترمکعب



شکل ۴- میزان درصد کم‌آبیاری در سناریوهای مختلف

جدول ۱۱- حجم تخصیص منابع آب سطحی و زیرزمینی در سناریوهای مختلف بر حسب میلیون مترمکعب

درصد حجم برداشت آب زیرزمینی به کل پتانسیل حجم آب زیرزمینی										درصد کم‌آبیاری ماهانه
۸۰ درصد		۸۵ درصد		۹۰ درصد		۹۵ درصد		۱۰۰ درصد		
GW	SW	GW	SW	GW	SW	GW	SW	GW	SW	
۱۰۲/۴	۳۰/۴	۱۰۸/۴	۳۰/۳	۱۱۴/۷	۳۰/۳	۱۲۱/۲	۳۰/۱	۱۲۵/۵	۳۰/۳	درصد ۰
۱۰۱/۶	۳۰/۲	۱۰۸/۰	۳۰/۲	۱۱۴/۳	۳۰/۲	۱۲۰/۶	۳۰/۲	۱۲۶/۲	۳۰/۳	۰ تا ۱۰ درصد
۱۰۱/۷	۳۰/۲	۱۰۸/۰	۳۰/۲	۱۱۴/۲	۳۰/۲	۱۲۰/۵	۳۰/۲	۱۲۶/۳	۳۰/۲	۰ تا ۲۰ درصد
۱۰۱/۹	۳۰/۳	۱۰۸/۰	۳۰/۲	۱۱۴/۲	۳۰/۲	۱۲۰/۶	۳۰/۲	۱۲۶/۶	۳۰/۱	۰ تا ۳۰ درصد
۱۰۱/۵	۳۰/۱	۱۰۷/۹	۳۰/۲	۱۱۴/۲	۳۰/۱	۱۲۰/۵	۳۰/۱	۱۲۶/۹	۳۰/۲	۰ تا ۴۰ درصد
۱۰۱/۵	۳۰/۴	۱۰۷/۹	۳۰/۲	۱۱۴/۱	۳۰/۱	۱۲۰/۳	۳۰/۱	۱۲۶/۹	۳۰/۲	۰ تا ۵۰ درصد

جدول ۱۲- درصد متوسط کم‌آبیاری ماهانه سناریوهای مختلف کم‌آبیاری برای حجم برداشت ۱۲۶/۷ میلیون مترمکعب

درصد کم‌آبیاری ماهانه	ماه											
	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
۰ درصد	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰ تا ۱۰ درصد	۱/۸	۰/۵	۰	۰	۵/۱	۱/۳	۷/۶	۸/۸	۴/۷	۵/۰	۵/۱	۲/۹
۱۰ تا ۲۰ درصد	۵/۶	۰/۶	۰	۰	۳/۲	۷/۴	۱۳/۳	۱۹/۳	۱۴/۰	۷/۴	۱۲/۴	۴/۰
۲۰ تا ۳۰ درصد	۷/۰	۱/۷	۰	۰	۱۱/۵	۲/۳	۲۶/۱	۲۷/۳	۲۳/۲	۱۸/۹	۱۴/۵	۱۳/۲
۳۰ تا ۴۰ درصد	۱۱/۵	۵/۸	۰	۰	۱۵/۴	۱۲/۸	۳۵/۵	۳۶/۵	۲۸/۷	۲۰/۹	۱۵/۳	۱۱/۴
۴۰ تا ۵۰ درصد	۱۱/۷	۴/۷	۰	۰	۱۸/۱	۱۵/۲	۳۹/۱	۴۱/۱	۳۱/۹	۲۷/۴	۱۸/۰	۲۱/۷

منابع

۱. اکبری‌فرد س.، قادری س. و علیان‌نژاد م. ۱۳۹۴. بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن با استفاده از دو الگوریتم چرخه‌آب (WSA) و جستجوی گرانشی (GSA) (مطالعه موردی حوضه آبریز گرگانرود). نشریه سد و نیروگاه برقایی ایران. ۲(۵): ۳۷-۴۹.
۲. محمدخانی م.، کریمی م. و گمرکچی ا. ۱۳۹۶. بهینه‌سازی تخصیص آب بین محصولات مختلف در شرایط تنش آبی در شبکه آبیاری دشت قزوین. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۳۱(۱): ۱-۱۰.
۳. مهندسین مشاور پندام. ۱۳۸۵. مطالعات بازنگاری شبکه آبیاری زهکشی دشت قزوین. جلد چهارم: راندمان آبیاری، الگوی زراعی و نیاز آبی. ۱۵۹ ص.
۴. یوسف دوست آ.، محمدرضایپور ا. و ابراهیمی م. ۱۳۹۵. تعیین سطح زیرکشت بهینه برخی از محصولات کشاورزی در شرایط متفاوت آب و هوایی با استفاده از الگوریتم ژنتیک در دشت قزوین. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۳۰(۳): ۳۱۷-۳۳۱.
5. Delavar M. Moghaddasi M. and Morid S. 2012. Real-time model for optimal water allocation in irrigation systems during droughts. Journal of irrigation and drainage engineering. 138: 517-524.
6. Fallah H. Sadeghi Gh. Suribaba C. R. and Rashedi E. 2019. Optimal pipe dimensioning in water distribution networks using Gravitational Search Algorithm. ISH Journal of Hydraulic Engineering. 1-14.
7. Karamouz M. Rezapour Tabari M. M. Kerachian R. 2004. Conjunctive Use of Surface and Groundwater Resources: Application of Genetic Algorithms and Neural Networks. Critical. World Water Congress .Transitions in Water and Environmental Resources Management. 1-10.
8. Karamouz M. Rezapour Tabari M. M. Kerachian R. and Zahraie B. 2010. Crop pattern and conjunctive use management: a case study. Irrigation and drainage. 59: 161-173
9. Lalehzari R. Boroomand Nasab S. Moazed H. and Haghighi A. 2016. Multiobjective management of water allocation to sustainable irrigation planning and optimal cropping pattern. Journal of irrigation and drainage engineering. 142(1): 0501500801-0501500810.
10. Mo L. Guo P. and Singh V. P. 2016. Biobjective Optimization for Efficient Irrigation under Fuzzy Uncertainty. Journal of irrigation and drainage engineering. 142(8): 0501600301-0501600310
11. Moeini R. Soltani-nezhad M. and Daei M. 2017. Constrained gravitational search algorithm for large scale reservoir operation optimization problem. Engineering Application of Artificial Intellegence. 62: 222-233.
12. Montazar A. Riazi H. and Behbahani S. M. 2010. Conjunctive water use planning in an irrigation command area. Water Resources Management. 24(3): 577-596.
13. Rashedi E. Nezamabadi-pour H. Saryazdi S. 2009. GSA: A Gravitational Search Algorithm. Journal of Information Sciences. 179(13): 2232-2248.
14. Regulwar D. G. and Pradhan V. S. 2013. Irrigation planning with conjunctive use of surface and groundwater using fuzzy resources. Journal of Water Resource and Protection. 5: 816-823
15. Rezaee, F. Safavi H. R. Mirchi A. and Madani K. 2017. f.MOPSO : An alternative Multi-Objective PSO algorithm for Conjunctive Water Use Management. Journal of Hydro-Environment Research.

- 14: 1-18.
16. Safavi H. R. Darzi F. and Marino M. A. 2010. Simulation-optimization modeling of conjunctive use of surface water and groundwater. *Water Resources Management*. 24: 1965-1988.
17. Safavi H. R. and Esmikhani M. 2013. Conjunctive use of surface water and groundwater : application of support vector machine (SVMs). *Water Resources Management* 27: 2623-2644.
18. Safavi H. R. and Falsafioun M. 2017. Conjunctive use of surface water and groundwater resources under deficit Irrigation. *Journal of irrigation and drainage Engineering*. 143(2): 050160121-050160129.
19. Safavi H. R. and Enteshari S. 2016. Conjunctive use of surface water and groundwater resources using the ant system optimization. *Agricultural Water Management*. 173: 23-34
20. Sepahvand R. Safavi H. R. 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.
21. Shirshahi F. Babazadeh H. Ebrahimipak N. A. and Khaledian M. R. 2019. Optimum crop cultivation at different levels of irrigation water allocation (case study: Qazvin plain). *Applied Economy and Enviromental Research*. 17(3): 6189-6200.
22. Tafteh A. Babazadeh H. EbrahimiPak N. A. and Kaveh F. 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.
23. Tafteh A. Babazadeh H. Ebrahimipak N. A. and Kaveh F. 2014. Determine yield response factors of important crops by different production functions in Qazvin plain. *Ecology, Enviroment and Conservation*. 20(2): 415-422.
24. Wu X. Zheng Y. Wu B. Tian Y. Han F. and Zheng Ch. 2016. Optimizing conjunctive use of surface water and groundwater for irrigation to address human-naturewater conflicts: a surrogate modeling approach. *Agricultural Water Management*. 163: 380-392.
25. Yousefi M. Banihabib M. E. Soltani J. and Rozbahani A. 2018. Multi-objective particle swarm optimization model for conjunctive use of treated wastewater and groundwater. *Agricultural Water Management*. 208: 224-231.

