مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی دوهدفه الگوی کشت و تخصیص آب در دشت سمنان

محمد قدس‌پور[۱]، مهدی سرائی تبریزی[۱*]، علی صارمی[۱]، حمید کاردان مقدم[۲] و محمود اکبری[۳]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۱۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۴)

چکیده

استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی- بهینه‌سازی ابزار ارزشمندی برای انتخاب الگوی کشت مناسب هستند. هدف اصلی این تحقیق، توسعه یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی دوهدفه برای تعیین الگوی کشت و تخصیص آب است. این مدل پس از شبیه‌سازی حالات مختلف الگوی کشت، بهینه‌سازی را با الگوریتم فراابتکاری چندهدف شیرمورچه (MOALO) انجام می‌دهد. بر این اساس متغیرهای تصمیم شامل زمین و آب تخصیص‌یافته به دوره‌های ده روزه رشد گیاهان به‌گونه ای طراحی شدند که حداقل بهره‌برداری از منابع آب و حداکثرسازی اقتصادی به عنوان توابع هدف مشخص شدند. مدل توسعه‌یافته برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی الگوی کشت با سطح زیرکشت ۵۵۰۰هکتار و تخصیص آب دشت سمنان با آب تجدیدپذیر به میزان ۶۰/۸ میلیون‌مترمکعب استفاده شد. سناریوی‌های برداشت ۸۰ (GW80) و ۱۰۰ (GW100) درصد از آب تجدیدپذیر زیرزمینی و سناریوهای تغییر در الگوی کشت موجود ۳۰ (AC30) و ۶۰ (AC60) درصد در نظر گرفته که هر یک از این ۴ سناریو با الگوریتم MOALO شبیه‌سازی شدند. بهینه‌سازی با استفاده از مدل پیشنهادی در چهار سناریو، باعث بهبود توابع هدف آبی و اقتصادی نسبت به عملکرد اولیه شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که چهار سناریوی پیشنهادی با کمینه‌سازی تابع هدف آبی و بیشینه سازی تابع هدف اقتصادی نسبت به وضع موجود(شبیه سازی) بدست آمده است. در مجموع مدل پیشنهادی که ابزاری تخصصی برای بهینه‌سازی الگوی کشت زراعی با تخصیص آب است، با وجود سادگی کارایی بسیار مناسبی داشت.

واژه‌های کلیدی: مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، الگوی کشت، تخصیص آب، الگوریتم MOALO.

۱. گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲. مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو، تهران، ایران
۳. گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک، اراک، ایران
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: m.sarai@srbiau.ac.ir

مقدمه

خشکسالی، کم بارشی و محدودیت منابع آبی در دشت سمنان به‌علت موقعیت جغرافیایی ایران یک واقعیت اقلیمی و ذاتی است، که در این وضعیت خاص کم‌آبی، مطالعه و ارائه طرح‌های استراتژیک در جهت استفاده بهینه از پتانسیل و منابع موجود، در ایجاد کشاورزی پایدار حائز اهمیت است. - واقعیت گریزناپذیر آن است که با توجه به کاهش میزان منابع آب قابل استحصال کشور، به‌دلیل کاهش بارندگی‌ها و افزایش برداشت از منابع آبی، می‌بایست با استفاده از روش-های علمی مناسب برای افزایش بهره‌وری آب کشاورزی گام برداشته شود. در چنین شرایطی یکی از راهکارهای مؤثر و عملی استفاده بهینه و صرفه‌جویی در مصرف آب است که این موضوع لزوم اصلاح و بهینه‌سازی الگوی کشت را برای جلوگیری از تلفات آب ضروری خواهد بود. در چنین شرایطی انتخاب روشی که بتواند اهداف متعدد را در یک محیط شبیه‌سازی کرده و ابزار مناسبی را برای مدیران برای انتخاب بهترین روش راهنمایی کند مهم و ضروری به‌حساب می‌آید که یکی از این روش‌ها استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه است. الگوی بهینه کشت برنامه‌ای است که با هدف مدیریت بهینه ترکیب مکانی محصول تدوین می‌شود. سیاست‌های ناکارآمد و تصمیم‌گیری غیرمتمرکز بهره‌برداران در زیرکشت بردن اراضی موجب پدید آوردن سناریوهای مختلفی از الگوی کشت در هر سال می‌شود. نمونه‌هایی از افزایش قیمت یک محصول در سالی خاص و تمایل کشاورزان برای تولید حداکثری آن در سال بعد و درنهایت مواجه شدن با عدم تقاضا و هدررفت سرمایه انرژی و آب فراوان یافت می‌شود (۱۲). طراحی و اجرای الگوی بهینه کشت سال‌هاست که در بسیاری از کشورهای جهان به‌کار گرفته شده و به‌کمک آن بسیاری از مشکلات تولید محصولات زراعی، باغی و مرتعی نیز مرتفع شده است. رسیدن به الگوی کشت مناسبی که از آن بتوان حداکثر بهره‌برداری را از عوامل و نهاده‌های تولید به‌دست آورد ضرورتی انکارناپذیر است (۱۳). در فرایند افزایش بهره‌وری آب در کشاورزی، اهداف زیر دنبال می‌شوند:

اهداف اقتصادی مانند افزایش درآمد و بیشینه کردن سود کشاورزان، کاهش هزینه‌های متغیر مانند هزینه انتقال آب و پمپاژ (۲)؛ مصرف بهینه آب برای افزایش عملکرد و راندمان آبیاری، ارائه الگوی کشت و برنامه‌ریزی آبیاری از طریق بهینه‌سازی نیاز آبی گیاهان (۹). اهداف مذکور در جریان شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژی و هیدروژئولوژی و بهینه‌سازی سیستم آب، خاک و گیاه برآورده شده و موجب پدید آمدن مفهوم تخصیص بهینه آب با توابع هدف مشخص به‌ویژه در شرایط خشکی می‌شود (۷).

در سال‌های اخیر کاربرد روش‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در مدیریت آب در کشاورزی رواج یافته است. تکنیک‌هایی مانند برنامه‌ریزی آرمانی فازی (۱۷)، برنامه‌ریزی غیرخطی (۱)، برنامه‌ریزی چندهدفه فاصله‌ای (۸) و برنامه‌ریزی فازی چندهدفه (۱۵) در برآورد آب مورد نیاز آبیاری و تعیین الگوهای زراعی تأیید کرده‌اند. با تدوین یک مدل و با درنظر گرفتن عوامل تأثیرگذار در بهره‌وری، از جمله مقدار آب در دسترس و بارندگی مؤثر می‌توان نسبت به برنامه‌ریزی و مدیریت بخش کشاورزی راهکارهایی را ارائه کرد. از آنجا که بهینه‌سازی الگوی کشت متأثر از مقدار آب مصرفی گیاه است، لذا لازم است که تخصیص آب مصرفی در طول دوره رشد به نحوی مدیریت شود که حداکثر بهره‌وری فیزیکی (عملکرد گیاه به میزان آب مصرفی) و بهره‌وری اقتصادی (سود حاصل از فروش محصول بر میزان آب مصرفی) به‌دست آید. با بهینه‌سازی تخصیص می‌توان نحوه تخصیص آب در شبکه و در نتیجه هر محصول را طی یک دوره مشخص، مدیریت کرد. از طرفی در راستای افزایش و بهبود کارایی مصرف آب، توجه روزافزونی به اعمال مدیریت کم‌آبیاری مشاهده می‌شود (۱۴). کاربرد یک سیستم پیوسته تصمیم‌گیری مبتنی بر چندین هدف کارایی فراوانی در مدیریت مطلوب مصرف آب دارد. به‌گونه‌ای که حفظ منابع آب زیرزمینی، استفاده مؤثر از آب

باران، رسیدن به حداکثر عملکرد محصول و بالاترین درآمد خالص از الگوی کشت به‌صورت همزمان در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیقات انجام شده بهینه‌سازی الگوی کشت تک‌هدفه و عمدتاً از دیدگاه اقتصادی انجام گرفته است. برنامه‌ریزی خطی تکنیک غالب در یافتن بهترین ترکیب از متغیرهای تصمیم بوده (۵) و با پیشرفت علم، الگوریتم‌های هوشمند جایگزین روش‌های کلاسیک شده‌اند. کشاورزی در مطالعات گذشته به‌عنوان بخشی از کل نیاز بوده و قیود حاکم بر آن با فرضیات زیاد اعمال شده است. همچنین پارامتر تصمیم‌گیری منحصراً آب و یا زمین درنظر گرفته شده است. در تحقیق حاضر تابع دوهدفی بهینه‌سازی سود و کارایی مصرف آب به‌عنوان توابع هدف و آب و زمین نیز به‌طور همزمان به‌عنوان متغیر تصمیم درنظر گرفته شده‌اند. از طرفی الگوریتم جدید بهینه‌سازی فراابتکاری چندهدفه MOALO که در سال‌های اخیر کاربرد روزافزونی یافته است و در مسائل آب به‌کار گرفته نشده است به‌جای الگوریتم‌هایی که پیش‌تر در مسائل بهینه‌سازی منابع آب به‌کار رفتند شامل الگوریتم‌های ژنتیک، گرگ خاکستری و چند کهکشانی به‌عنوان یک نوآوری نسبی درنظر گرفته شد و در این تحقیق به‌کار گرفته شده و درنهایت با کدنویسی توسط نرم‌افزار MATLAB اجرا شده‌اند. اهداف فوق با داده‌های دشت سمنان اجرا شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت سمنان واقع در شمال کویر مرکزی، در یک اقلیم خشک و نیمه‌خشک در مختصات ۵۳ درجه و ۳ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۳۵ دقیقه طول شرقی و از ۳۵ درجه و ۲۲ دقیقه تا ۳۵ درجه ۳۹ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. تشکیلات زمین شناسی سنگ‌های مادری خاک دشت بیشتر متعلق به منطقه البرز مرکزی بوده که مساحت آن ۷۰۳ کیلومترمربع است. سطح زراعی دشت سمنان در حدود ۵۵۰۰ هکتار در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ است. در شکل ۱ محدوده مطالعاتی دشت سمنان قابل مشاهده است. با دریافت اطلاعات از شرکت آب منطقه‌ای استان سمنان، تغییرات بارش و درجه حرارت دشت سمنان، طی دوره ۱۰ ساله میانگین درجه حرارت (حداقل و حداکثر ماهانه) در بازه ۲۹ و ۱۳ درجه سانتی‌گراد قرار دارد. میانگین ۱۰ ساله بارش ۱۳۴ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است و میزان بهره‌برداری از آب زیرزمینی ۶۰/۸ میلیون مترمکعب است.

توسعه مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی الگوی کشت

از نظر علم بهینه‌سازی، می‌توان به‌طور مستقیم بهینه‌سازی را بدون شبیه‌سازی اولیه انجام داد، اما ورود به بهینه‌سازی پس از شبیه‌سازی اولیه مزایایی دارد. از جمله اینکه با مقایسه شرایط قبل و بعد از بهینه‌سازی، امکان بررسی نقش بهینه‌سازی در بهبود شرایط فراهم می‌شود. همچنین می‌توان به نقش متغیرهای تصمیم در بهبود عملکرد پی برد. به‌علاوه می‌توان پس‌پردازش (شبیه‌سازی پس از بهینه‌سازی) را انجام داد. به‌دلیل عدم وجود جعبه‌ابزارهای مربوطه با شرایط مسئله در نرم‌افزار MATLAB، تمام مراحل الگوریتم متناسب با ساختار مطالعه برنامه‌نویسی شد. از مزیت‌های مدل توسعه یافته اینکه برای هر محدوده مطالعاتی که داده‌های مورد نیاز را دارا باشد، برنامه‌ریزی موردنظر بهره‌بردار بدون تغییر در کد برنامه، با تنظیم ضرایب مدل، انجام خواهد گرفت. به‌عبارت دیگر، مسئله و الگوریتم مستقل از هم پیاده‌سازی شده‌اند. در ادامه ابتدا شبیه‌سازی (شامل ورودی‌ها، محاسبات و خروجی‌ها) و سپس شبیه‌سازی-بهینه‌سازی الگوی کشت در مدل توسعه یافته بررسی شده‌اند.

شبیه‌سازی الگوی کشت در مدل توسعه یافته

این بخش مبتنی بر ایجاد یک مدل شبیه‌سازی است که اطلاعات ورودی آن شامل سه فایل ورودی گیاهی (جدول ۱)، تحلیل اقتصادی و الگوی کشت (جدول ۲) و منابع آب شامل بارندگی،

شکل ۱. محدوده مطالعاتی دشت سمنان

جدول ۱. فایل ورودی گیاهی (نشریه فائو۵۶ و کتاب نیاز آبی گیاهان زراعی سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی)

	ضرایب گیاهی			طول دوره چهار مرحله رشد روز				شماره دهه کاشت	ضرایب حساسیت چهار مرحله رشد			
محصول	Kc3	Kc2	Kc1	P4	P3	P2	P1	---	Ky4	Ky3	Ky2	Ky1
گندم	۰/۷۱۵	۱/۲	۰/۴۵	۳۰	۶۰	۷۰	۳۰	۵	۰/۰۱	۰/۵	۰/۶	۰/۲
جو	۰/۷۱۵	۱/۲	۰/۴۵	۳۰	۶۰	۷۰	۳۰	۵	۰/۰۱	۰/۵	۰/۶	۰/۲
ذرت علوفه‌ای	۱/۰۶	۱/۱۵	۰/۵	۳۰	۴۰	۳۰	۲۰	۳۲	۰/۲	۰/۵	۱/۵	۰/۴
خربزه	۰/۸۷	۱	۰/۴	۲۰	۴۰	۳۰	۳۰	۲۶	۰/۳	۰/۸	۰/۸	۰/۷
طالبی و گرمک	۰/۹	۱	۰/۴	۲۰	۴۰	۳۰	۳۰	۲۶	۰/۳	۰/۸	۰/۸	۰/۷
بادمجان	۰/۹۲	۱/۱	۰/۴	۳۰	۴۰	۴۰	۳۰	۲۳	۰/۴	۰/۸	۱/۱	۰/۴
هندوانه	۰/۸۱	۱/۰۵	۰/۵	۳۰	۳۰	۴۰	۳۰	۲۴	۰/۳	۰/۸	۰/۸	۰/۷
گوجه فرنگی	۰/۸۳۷	۱/۱۵	۰/۵	۳۰	۴۰	۴۰	۳۰	۲۳	۰/۴	۰/۸	۱/۱	۰/۴
خیار	۰/۷۵	۰/۹۵	۰/۵	۲۰	۳۰	۳۰	۳۰	۲۳	۰/۴	۰/۸	۱/۱	۰/۴
یونجه	۱/۰۴۵	۱/۱	۱	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۱۳	۰/۷	۱/۱	۰/۱۳	۰/۲
چغندر علوفه‌ای	۰/۹۴	۱/۱	۰/۵۵	۴۰	۶۰	۵۰	۳۰	۲۱	۰/۱۲	۱/۳	۲	۰/۱۲

جدول ۲. فایل ورودی اقتصادی و الگوی کشت (سازمان جهادکشاورزی سمنان، ۱۳۹۸)

محصول	راندمان انتقال	حجم ناخالص آب مصرفی مترمکعب/هکتار	تغییرات مجاز سطح زیرکشت درصد	نوع منبع تأمین آب	سطح زیرکشت هکتار	قیمت محصول ریال/ کیلوگرم	پتانسیل عملکرد کیلوگرم/هکتار	هزینه متغیر استحصال آب ریال سطحی	راندمان کاربرد سیستم آبیاری سطحی قطره ای بارانی			هزینه ثابت عملیات زراعی ریال سطحی	نوع سیستم آبیاری سطحی
گندم	۰/۹	۶۱۵۰	۲۵	-۱	۱۱۸۰	۱۷۳۰۰	۷۰۰۰	۵۰۰۰	۰/۴۹	۰/۴۹	۰/۴۹	۳۲۳۰۰۰۰۰	۱
جو	۰/۹	۶۱۵۰	۲۵	-۱	۱۲۲۰	۱۳۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۰/۴۹	۰/۴۹	۰/۴۹	۳۲۳۰۰۰۰۰	۱
ذرت علوفه‌ای	۰/۹	۹۶۴۰	۲۵	-۱	۶۱۰	۳۰۰۰	۶۰۰۰۰	۵۰۰۰	۰/۴۹	۰/۴۹	۰/۴۹	۳۲۳۰۰۰۰۰	۱
خربزه	۰/۹	۱۵۳۵۰	۲۵	-۱	۸۰۰	۲۵۰۰۰	۳۰۰۰۰	۵۰۰۰	۰/۴۹	۰/۴۹	۰/۴۹	۱۳۱۱۵۰۰۰۰	۱
طالبی و گرمک	۰/۹	۱۳۲۶۰	۲۵	-۱	۲۸۰	۲۵۰۰۰	۳۰۰۰۰	۵۰۰۰	۰/۴۹	۰/۴۹	۰/۴۹	۱۳۱۱۵۰۰۰۰	۱
بادمجان	۰/۹	۱۸۲۰۰	۲۵	-۱	۱۳۰	۳۰۰۰۰	۲۲۰۰۰	۵۰۰۰	۰/۴۹	۰/۴۹	۰/۴۹	۱۵۵۶۰۰۰۰	۱
هندوانه	۰/۹	۱۶۶۴۰	۲۵	-۱	۱۱۰	۲۰۰۰۰	۵۰۰۰۰	۵۰۰۰	۰/۴۹	۰/۴۹	۰/۴۹	۱۲۶۹۱۹۳۵۴/۸	۱
گوجه فرنگی	۰/۹	۱۸۹۴۰	۲۵	-۱	۱۷۰	۷۰۰۰۰	۵۰۰۰۰	۵۰۰۰	۰/۴۹	۰/۴۹	۰/۴۹	۱۶۶۳۰۰۰۰۰	۱
خیار	۰/۹	۱۴۰۳۰	۲۵	-۱	۱۳۰	۶۵۰۰۰	۳۰۰۰۰	۵۰۰۰	۰/۴۹	۰/۴۹	۰/۴۹	۱۶۹۹۰۰۰۰۰	۱
یونجه	۰/۹	۱۷۰۰۰	۲۵	-۱	۶۳۰	۲۰۰۰۰	۸۵۰۰	۵۰۰۰	۰/۴۹	۰/۴۹	۰/۴۹	۵۰۲۰۰۰۰۰۰	۱
چغندر علوفه‌ای	۰/۹	۲۷۰۰۰	۲۵	-۱	۲۴۰	۴۰۰۰۰	۴۰۰۰۰	۵۰۰۰	۰/۴۹	۰/۴۹	۰/۴۹	۵۵۷۰۰۰۰۰۰	۱

ستون ۱: نوع سیستم آبیاری (سطحی با عدد ۱ نشان داده شده است)، ستون ۲: هزینه ثابت عملیات زراعی (ریال در هکتار) طی سال۹۸-۹۷، ستون ۳ تا ۵: راندمان کاربرد سیستم آبیاری (نسبت)، ستون ۶: هزینه متغیر استحصال آب (ریال در مترمکعب) طی سال۹۸-۹۷، ستون ۷: پتانسیل عملکرد (کیلوگرم در هکتار)، ستون ۸: قیمت محصول (ریال در کیلوگرم) طی سال۹۸-۹۷، ستون ۹: سطح زیر کشت موجود محصول (هکتار)، ستون ۱۰: نوع منبع تأمین آب (سطحی مثبت و زیرزمینی منفی)، ستون ۱۱: تغییرات مجاز سطح زیر کشت موجود محصول (٪)، ستون ۱۲: حجم ناخالص آب مصرفی (مترمکعب در هکتار)(نرم‌افزار AGWAT)، ستون ۱۹: راندمان انتقال (نسبت) و ستون ۲۰ : نام محصول.

تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع و سه مقدار دیگر است. این سه مقدار شامل تعداد آبیاری تکمیلی در سیستم دیم (برابر با صفر به‌علت عدم کشت به‌صورت دیم در منطقه)، ضریب سناریوی برداشت از آب تجدیدپذیر زیرزمینی (۲ سناریوی برداشت ۸۰ (GW80) و ۱۰۰ (GW100) درصد از آب تجدیدپذیر زیرزمینی و ۲ سناریوی تغییر در الگوی کشت موجود ۳۰ (AC30) و ۶۰ (AC60) درصد و با اطلاعات دریافت شده از سازمان آب منطقه‌ای استان سمنان مقدار آب تجدیدپذیر زیرزمینی (برابر با ۶۰۸۶۰۰۰۰ مترمکعب در سال) هستند.

ستون ۱: نوع سیستم آبیاری (سطحی با عدد ۱ نشان داده شده است)، ستون ۲: هزینه ثابت عملیات زراعی (ریال در هکتار) طی سال ۹۸-۹۷، ستون ۳ تا ۵: راندمان کاربرد سیستم آبیاری (نسبت)، ستون ۶: هزینه متغیر استحصال آب (ریال در متر مکعب) طی سال ۹۸-۹۷، ستون ۷: پتانسیل عملکرد (کیلوگرم در هکتار)، ستون ۸: قیمت محصول (ریال در کیلوگرم) طی سال ۹۸-۹۷، ستون ۹: سطح زیرکشت موجود محصول (هکتار)، ستون ۱۰: نوع منبع تأمین آب (سطحی مثبت و زیرزمینی منفی)، ستون ۱۱: تغییرات مجاز سطح زیر کشت موجود محصول (٪)، ستون ۱۲: حجم ناخالص آب مصرفی (متر مکعب در هکتار) (نرم‌افزار AGWAT)، ستون ۱۹: راندمان انتقال (نسبت) و ستون ۲۰ : نام محصول.

سطر ۱: آب سطحی قابل تأمین (مترمکعب در دوره ده روزه)، سطر ۲: بارندگی (میلی‌متر در دوره ده روزه) (سازمان آب منطقه‌ای استان سمنان) و سطر ۳: تبخیرتعرق پتانسیل گیاه مرجع (میلی‌متر در دوره ده روزه) (جدول ۳).

پس از شبیه‌سازی، شش مرحله خروجی زیر حاصل می‌شود:

۱- محاسبات اولیه. شامل تعداد گیاهان، تعداد دوره‌های ده روزه و ضریب تبدیل ارتفاع آب خالص (میلی‌متر) به حجم آب ناخالص (مترمکعب)

۲- باران مؤثر هر دوره ده روزه توسط روابط پیشنهادی سرویس حفاظت خاک ایالات متحده آمریکا (به نقل از ۴).

۳- ضرایب گیاهی هر گیاه در هر دوره ده روزه، از درونیابی خطی ضرایب سه‌گانه برای همان گیاه در مراحل رشد.

۴- تعداد و حدود متغیرهای تصمیم و تبخیر و تعرق پتانسیل هر گیاه. تبخیر و تعرق پتانسیل هر گیاه در هر دوره ده روزه در الگوی کشت منطقه، از حاصل ضرب ضرایب گیاهی هر دوره ده روزه از رشد در تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع در هر دوره ده روزه محاسبه و به‌عنوان نیاز آبیاری کامل هر محصول درنظر گرفته شد. متغیرهای تصمیم در مدل توسعه یافته شامل مقدار آب تخصیص یافته به یک گیاه در یک دوره ۱۰ روزه برحسب میلی‌متر و سطح زیر کشت هر محصول برحسب هکتار است. حد پایین و بالای آب تخصیص‌یافته، به‌ترتیب ارتفاع بارندگی مؤثر در هر دوره و تبخیر و تعرق پتانسیل برای هر گیاه در هر دوره است.

۵- تقاضا (نیاز در محل مصرف) و عرضه (تأمین از منبع) آب سطحی، زیرزمینی و بارندگی در دوره ده روزه و سالانه.

۶- محاسبات نهایی شامل دو تابع وضع موجود آبی و اقتصادی

شبیه‌سازی-بهینه‌سازی الگوی کشت در مدل توسعه‌یافته

در مدل توسعه‌یافته، بهینه‌سازی تابعی (ارائه تابع هدف با رابطه ریاضی)، چندبعدی (بیش از یک متغیر تصمیم)، ایستا (عدم تغییرات مکانی و زمانی ورودی‌ها و خروجی‌ها و لحاظ نشدن پنجره زمانی (Time Window))، مقید (لحاظ شدن قیود)، پیوسته (استفاده از الگوریتم‌های پیوسته برای حل مسئله پیوسته)، چندهدفه (دو تابع هدف شامل مباحث آبی، گیاهی و اقتصادی) و فراابتکاری (استفاده از سازوکارهایی برای خروج از بهینه محلی) استفاده شد (۶).

جدول ۳: فایل ورودی منابع آب و تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع (اداره آب منطقه سمنان، ۱۳۹۸ و سازمان جهادکشاورزی سمنان، ۱۳۹۸)

مهر۱	مهر۲	مهر۳	آبان۴	آبان۵	آبان۶	آذر۷	آذر۸	آذر۹	دی۱۰	دی۱۱	دی۱۲	بهمن۱۳	بهمن۱۴	بهمن۱۵	اسفند۱۶	اسفند۱۷	اسفند۱۸
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰/۷	۰/۳	۱/۴۲	۹/۲۲	۲/۲	۲/۰۱	۰	۷/۴۱	۰/۴	۰	۱۰/۳۲	۹	۰/۲۱	۷/۲۱	۰	۰/۰۱	۰/۸۱	۰/۰۱
۳۱/۵	۲۵/۲	۲۱/۵۰	۱۸/۴۰	۱۵/۶۰	۱۲/۹۰	۱۱/۲۰	۹/۳۰	۸/۳۰	۸/۰۰	۷/۹۰	۸/۴۰	۹/۵۰	۱۰/۹۰	۱۲/۷۰	۱۵/۰۰	۱۷/۹۰	۱۹/۶۰
فروردین۱۹	فروردین۲۰	اردیبهشت۲۱	اردیبهشت۲۲	اردیبهشت۲۳	اردیبهشت۲۴	خرداد۲۵	خرداد۲۶	خرداد۲۷	تیر۲۸	تیر۲۹	تیر۳۰	مهر۳۱	مهر۳۲	مهر۳۳	شهریور۳۴	شهریور۳۵	شهریور۳۶
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۴/۸۳	۰/۰۱	۱۵/۸۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۳۰/۰۲	۴/۱۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۱	۰	۰	۰	۰/۲
۲۲/۹۰	۲۷/۶۰	۳۶/۷۰	۳/۶۸	۳/۴۶	۴۶/۵۰	۴۶۵/۰۱	۴۷/۵۰	۵۸/۸۰	۵۳/۸۰	۵۲/۷۰	۵۶/۵۰	۵۱/۴۰	۴۸/۴۰	۴۸/۹۰	۴۱/۲۰	۳۸/۷۰	۳۸/۹۰

سطر ۱: آب سطحی قابل تأمین (مترمکعب در دوره ده روزه)، سطر ۲: بارندگی (میلی‌متر در دوره ده روزه) (سازمان آب منطقه ای استان سمنان) و سطر ۳: تبخیرتعرق پتانسیل گیاه مرجع (میلی‌متر در دوره ده روزه)

پس از شبیه‌سازی، شش مرحله خروجی زیر حاصل می‌شود:

۱- محاسبات اولیه. شامل تعداد گیاهان، تعداد دوره‌های ده روزه و ضریب تبدیل ارتفاع آب خالص (میلیمتر) به حجم آب ناخالص (مترمکعب)

۲- باران موثر هر دوره ده روزه توسط روابط پیشنهادی سرویس حفاظت خاک ایالات متحده آمریکا (به نقل از ۱۲).

۳- ضرایب گیاهی هر گیاه در هر دوره ده روزه، از درون‌یابی خطی ضرایب سه‌گانه برای همان گیاه در مراحل رشد.

۴- تعداد و حدود متغیرهای تصمیم و تبخیر و تعرق پتانسیل هر گیاه. تبخیر و تعرق پتانسیل هر گیاه در هر دوره ده روزه در الگوی کشت منطقه، از حاصل ضرب ضرایب گیاهی هر دوره ده روزه از رشد در تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع در هر دوره ده روزه محاسبه و به‌عنوان نیاز آبیاری کامل هر محصول در نظر گرفته شد. متغیرهای تصمیم در مدل توسعه‌یافته شامل مقدار آب تخصیص‌یافته به یک گیاه در یک دوره ۱۰ روزه بر حسب میلیمتر و سطح زیر کشت هر محصول بر حسب هکتار می‌باشد. حد پایین و بالای آب تخصیص‌یافته، به‌ترتیب ارتفاع بارندگی مؤثر در هر دوره و تبخیر و تعرق پتانسیل برای هر گیاه در هر دوره است.

توابع هدف

بهینه‌سازی در تحقیق حاضر عبارت از مجموعه تلاش‌هایی است که سعی در بهبود فرایند تصمیم‌گیری برای بیشینه‌سازی نسبت سود به هزینه به‌عنوان تابع هدف اقتصادی و کمینه‌سازی میزان آب مصرفی به‌عنوان تابع هدف آبی دارد. هدف اول کاهش آب مصرفی یا بیشینه‌سازی شاخص بهره‌وری آب (رابطه ۱) و هدف دوم بیشینه کردن سود خالص طرح (رابطه ۲) است:

$$\sum_{p=1}^{k}\left[\left(1-\sum_{i=1}^{n}K_{yi}\left(1-\frac{ET_{ai}}{ET_{mi}}\right)\right)\times\frac{\sum_{i=1}^{n}ET_{mi}}{\sum_{i=1}^{n}ET_{ai}}\right]_p \qquad (1)$$

p، شماره گیاه در الگوی کشت و k، تعداد کل گیاهان است. با استخراج فاکتور حساسیت گیاه و طول دوره رشد در مراحل مختلف رشد گیاهان موجود در الگوی کشت، طول سال به ۳۶ دوره ۱۰ روزه تقسیم و آب مورد نیاز آبیاری در هر دوره با توجه به تناوب زراعی محاسبه می‌شود. بنابراین حجم آب تخصیص یافته از منابع برداشت به تفکیک برای هر گام ۱۰ روزه قابل محاسبه و برداشت خواهد بود.

$$\text{Max NB}=\sum_{p=1}^{k}\left(B_pY_{ap}-C_p-I_pC_w\right)\times A_p \qquad (2)$$

که در آن، NB، درآمد خالص از الگوی کشت (ریال)؛ B_p، قیمت فروش محصول (ریال در کیلوگرم)، C_p، هزینه ثابت برای هر گیاه (ریال در هکتار)، C_w، هزینه آب آبیاری (ریال در مترمکعب)؛ I_p، حجم ناخالص آب آبیاری به‌کار رفته برای هر محصول (مترمکعب در هکتار) و A_p، مساحت زمین اختصاص داده به محصول pام است.

متغیرهای تصمیم

مکانیزم یافتن توابع هدف بهینه، از طریق جستجوی قانونمند در فضای امکان‌پذیر برای یافتن متغیرهای تصمیم شامل آب تحویل شده به گیاه نسبت به کل آب مورد نیاز در یک دوره ۱۰ روزه و زمین اختصاص یافته به هر محصول تأمین می‌شود. در انتهای خروجی‌ها، توابع هدف حساب شده و شایستگی متغیرهای تصمیم پیشنهاد شده بررسی می‌شود. در انتها، متغیرهایی که به‌ازای آنها، توابع هدف بهینه هستند، گزارش می‌شوند.

الگوریتم بهینه‌سازی

الگوریتم دقیق برای حل توابع هدف مدل توسعه یافته وجود ندارد. لذا استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری یا فراابتکاری اجتناب‌ناپذیر بود. به‌خاطر عدم وجود مکانیزم خروج از بهینه موضعی در الگوریتم‌های ابتکاری، در مدل توسعه یافته از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شد. از بین الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه، الگوریتم MOALO (Multi-Objective Ant Lion Optimizer) (۱۱) استفاده شد. این الگوریتم در حوزه علوم آب نیز به‌کار گرفته شده است (۱۰). برای تنظیم پارامترهای الگوریتم MOALO از روش ارجاع به مطالعات گذشته استفاده شد.

قیود

قیودی شامل قیود تأمین از منابع آب (عرضه یا تخصیص)، قیود مصرف آب (تقاضا یا نیاز)، قیود سیستم‌های آبیاری، قیود سطح زیر کشت و قیود اقتصادی لحاظ شد.

فرایند شبیه‌سازی- بهینه‌سازی در مدل توسعه یافته

با اقتباس از (۳)، پنج مرحله برای حل با الگوریتم MOALO طی شد: ۱- ایجاد مکانیزمی برای تعریف، ذخیره و بازخوانی مدل، ۲- تعریف مکانیزمی برای ایجاد راه حل تصادفی شامل متغیرهای تصمیم خام، ۳- ایجاد مکانیزم تبدیل متغیرهای تصمیم خام به متغیرهای تصمیم اصلی مسئله، ۴- محاسبه مقدار تابع هدف و برآورده کردن قیود مسئله، ۵- اتصال تابع هدف به الگوریتم بهینه‌سازی

نتایج و بحث

در این تحقیق، یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی دوهدفه برای الگوی کشت و تخصیص آب تهیه شد. این مدل پس از

شبیه‌سازی الگوی کشت، بهینه‌سازی را با الگوریتم فراابتکاری چندهدفه MOALO انجام می‌دهد. جدول ۴ یکی از جواب‌های بهینه در چهار سناریو را نمایش می‌دهد. بهینه‌سازی چندهدفه، معمولا منتج به بیش از یک جواب بهینه می‌شود. این جواب‌ها روی منحنی یا رویه پرتو قرار می‌گیرند و هر یک بهینه محسوب می‌شوند. دو جواب موجود در گوشه منحنی پرتو، یکی از اهداف را بیش از دیگری لحاظ می‌کنند. جواب‌های دیگر، بین این دو جواب قرار می‌گیرند و بهره‌ای از هر یک از اهداف را دارند و هر دو هدف را به‌طور عادلانه برآورده می‌کند. تعداد جواب‌های موجود در منحنی پرتو، یکی از ملاک‌های برتری یک الگوریتم بر الگوریتم دیگر است.

سناریوی GW100AC60

در جواب گزارش شده این سناریو (سناریو اول) نسبت به وضع موجود (شبیه‌سازی)، سطح زیر کشت از ۵۵۰۰ به ۵۶۷۷ هکتار افزایش یافته است. نیاز پتانسیل الگو برای کشت بدون تنش آبی هر یک از ۱۱ گیاه، با وجود افزایش سطح زیر کشت مجموع، از میزان ۶۱/۵ به ۵۹/۹ میلیون مترمکعب کاهش یافته است. اما با اعمال درجه مناسبی از کم‌آبیاری با استفاده از رابطه دورنبوس- کاسام در مراحل مناسبی از رشد هر یک از گیاهان، عرضه به الگو از میزان ۶۳/۱ به ۳۸/۳ میلیون مترمکعب کاهش یافته است. همان‌طور که در سناریوهای دیگر نیز گزارش شده است، کاهش چشمگیری در عرضه آب به الگو مشاهده می‌شود که با توجه به موقعیت خاص دشت سمنان، بسیار راهگشا است. از دید عرضه، از ۶۳/۱ میلیون مترمکعب عرضه به الگو در وضع موجود (شبیه‌سازی)، عرضه از آب سطحی، زیرزمینی و بارندگی به‌ترتیب صفر، ۵۸/۳ و ۴/۸ میلیون مترمکعب است. از ۳۸/۳ میلیون مترمکعب عرضه به الگو در جواب گزارش شده این سناریو، عرضه از آب سطحی، زیرزمینی و بارندگی به‌ترتیب صفر، ۳۳/۶ و ۴/۷ میلیون مترمکعب است. تقریباً تمام کاهش عرضه، به‌علت کاهش برداشت از آب زیرزمینی است. تابع هدف آبی گیاهی ۰/۶۴۵۲ و تابع هدف اقتصادی ۰/۴۷۶۹ به‌دست آمدند. با توجه به برداشت بیش از حد وضع موجود، برداشت مجاز ۱۰۰ درصد در گام اول و برداشت ۸۰ درصد برای رعایت اطمینان در افق آتی لحاظ شدند.

سناریوی GW100AC30

در جواب گزارش شده این سناریو (سناریو دوم) نسبت به وضع موجود (شبیه‌سازی)، سطح زیر کشت از ۵۵۰۰ به ۴۷۰۵ هکتار کاهش یافته است. این مقدار در بین سناریوها، کمترین است و تغییرات در الگوی کشت اکثراً به‌سمت کاهش سطح زیر کشت محصولات مختلف متمایل شده است. نیاز پتانسیل الگو برای کشت بدون تنش آبی هر یک از ۱۱ گیاه، با توجه به کاهش سطح زیر کشت مجموع، از میزان ۶۱/۵ به ۵۲/۴ میلیون مترمکعب کاهش یافته است. این میزان نسبت به سناریوهای دیگر کمترین مقدار است. با اعمال درجه مناسبی از کم‌آبیاری در مراحل مناسبی از رشد هر یک از گیاهان، عرضه به الگو از میزان ۶۳/۱ به ۲۸/۷ میلیون متر مکعب کاهش یافته است. این میزان کمترین مقدار در بین سناریوها است و عرضه را به کمتر از نصف کاهش می‌دهد. از دید عرضه، از ۶۳/۱ میلیون مترمکعب عرضه به الگو در وضع موجود (شبیه‌سازی)، عرضه از آب سطحی، زیرزمینی و بارندگی به‌ترتیب صفر، ۵۸/۳ و ۴/۸ میلیون مترمکعب است. از ۲۸/۷ میلیون مترمکعب عرضه به الگو در جواب گزارش شده این سناریو، عرضه از آب سطحی، زیرزمینی و بارندگی به‌ترتیب صفر، ۲۴/۹ و ۳/۸ میلیون مترمکعب است. اکثر کاهش عرضه، به‌علت کاهش برداشت از آب زیرزمینی است. تابع هدف آبی گیاهی ۰/۵۶۷۹ و تابع هدف اقتصادی ۰/۶۰۴۶ به‌دست آمدند که نتایج این سناریو با نتایج پژوهش شیرشاهی و همکاران (۱۶) مطابقت خوبی دارد.

جدول ۴. یکی از جواب‌های بهینه حاصل شده در چهار سناریو

گیاه	موجود (شبیه‌سازی)	GW100		GW80	
	GW100AC0	AC60	AC30	AC60	AC30
گندم (هکتار)	۱۱۸۰	۱۶۳۰	۱۴۹۱	۱۲۴۷	۱۵۳۴
جو(هکتار)	۱۲۲۰	۱۶۸۲	۱۵۸۶	۱۵۵۲	۱۵۷۱
ذرت علوفه‌ای (هکتار)	۶۱۰	۹۳۶	۷۹۳	۴۳۶	۷۹۳
خربزه (هکتار)	۸۰۰	۱۱۶۷	۹۲۷	۱۲۸۰	۷۵۵
طالبی و گرمک (هکتار)	۲۸۰	۲۰۸	۳۶۴	۴۳۰	۳۱۱
بادمجان (هکتار)	۱۳۰	۱۹۸	۱۶۹	۱۶۳	۱۰۰
هندوانه (هکتار)	۱۱۰	۶۱	۱۴۲	۱۵۲	۱۰۳
گوجه فرنگی (هکتار)	۱۷۰	۲۷۱	۲۲۱	۱۲۷	۲۲۱
خیار (هکتار)	۱۳۰	۲۰۸	۱۶۲	۱۸۴	۱۵۳
یونجه (هکتار)	۶۳۰	۹۱۳	۷۷۹	۵۴۴	۷۰۴
چغندر علوفه‌ای (هکتار)	۲۴۰	۳۸۴	۲۱۸	۳۳۳	۳۱۲
نیاز پتانسیل الگو (MCM)	۶۱/۵	۸۶/۸	۷۵/۲	۶۹/۳	۷۱/۱
عرضه به الگو (MCM)	۶۳/۱	۶۷/۰	۶۶/۳	۵۳/۱	۵۴/۰
عرضه از آب سطحی (MCM)	۰	۰	۰	۰	۰
عرضه از آب زیرزمینی (MCM)	۵۸/۳	۶۰/۸	۶۰/۸	۴۸/۲	۴۸/۵
عرضه از بارندگی (MCM)	۴/۸	۶/۲	۵/۵	۴/۸	۵/۵
حجم مجاز پمپاژ (MCM)	۶۰/۹	۶۰/۹	۶۰/۹	۴۸/۷	۴۸/۷
سطح کشت (ha)	۵۵۰۰	۷۶۵۹	۶۸۵۳	۶۴۴۷	۶۵۵۵
عملکرد محصول (تن بر هکتار)	۱۸/۴۶	۱۱/۵۹	۱۵/۲۸	۱۲/۰۲	۱۰/۵۹
تولید (تن)	۱۰۱۵۳۴	۸۸۷۵۲	۱۰۴۷۴۴	۷۷۵۲۵	۶۹۳۹۹
تبخیر و تعرق نسبی	۱/۰۵	۰/۸	۰/۸۹	۰/۸۲	۰/۷۷
درآمد (میلیارد ریال)	۲۱۲۶	۲۳۴۵	۲۴۸۵	۱۹۲۶	۱۶۸۶
هزینه ثابت و متغیر (میلیارد ریال)	۷۰۲	۸۶۶	۸۰۹	۷۵۰	۷۰۳
سود خالص (میلیارد ریال)	۱۴۲۴	۱۴۷۹	۱۶۷۶	۱۱۷۶	۹۸۴
نسبت درآمد به هزینه	۳/۰۳	۲/۷۱	۳/۰۷	۲/۵۷	۲/۴۰
آب خالص مصرف الگو (MCM)	۲۸	۳۰	۲۹	۲۳	۲۴
آب ناخالص مصرف الگو (MCM)	۶۳	۶۷	۶۶	۵۳	۵۴
آب تلف شده الگو (MCM)	۳۵	۳۷	۳۷	۳۰	۳۰
بهره‌وری فیزیکی (کیلوگرم بر مترمکعب)	۱/۶۱	۱/۳۳	۱/۵۸	۱/۴۶	۱/۲۹
بهره‌وری اقتصادی (ریال بر مترمکعب)	۲۲۵۸۲	۲۲۰۹۳	۲۵۲۹۳	۲۲۱۷۲	۱۸۲۱۹
جریمه	۳/۲۴	۰	۰	۰	۰
تابع هدف آبی گیاهی	۴/۴۵	۰/۸۰	۰/۸۹	۰/۸۲	۰/۷۷
تابع هدف اقتصادی	۱/۴۰	۰/۳۷	۰/۳۳	۰/۳۹	۰/۴۲

سناریوی GW80AC60

در جواب گزارش شده این سناریو (سناریو سوم) نسبت به وضع موجود (شبیه‌سازی)، سطح زیر کشت از ۵۵۰۰ به ۵۸۸۲ هکتار افزایش یافته است. مقدار سطح زیرکشت در بین سناریوها، بیشترین است و تغییرات در الگوی کشت اکثراً به‌سمت افزایش سطح زیر کشت محصولات مختلف متمایل شده است. نیاز پتانسیل الگو برای کشت بدون تنش آبی هر یک از ۱۱ گیاه، با توجه به افزایش سطح زیر کشت مجموع، از میزان ۶۱/۵ به ۶۹/۱ میلیون مترمکعب افزایش یافته است. این میزان نسبت به سناریوهای دیگر بیشترین مقدار است. اما با اعمال کم‌آبیاری در مراحل مناسبی از رشد هر یک از گیاهان، عرضه به الگو از میزان ۶۳/۱ به ۴۶/۰ میلیون مترمکعب کاهش یافته است. از دید عرضه، از ۶۳/۱ میلیون مترمکعب عرضه به الگو در وضع موجود (شبیه‌سازی)، عرضه از آب سطحی، زیرزمینی و بارندگی به‌ترتیب ۰، ۵۸/۳ و ۴/۸ میلیون مترمکعب است. تابع هدف آبی گیاهی ۰/۶۶۰۹ و تابع هدف اقتصادی ۰/۴۹۴۱ به‌دست آمدند.

سناریوی GW80AC30

در جواب گزارش شده این سناریو (سناریو چهارم) نسبت به وضع موجود (شبیه‌سازی)، سطح زیر کشت از ۵۵۰۰ به ۵۰۰۲ هکتار کاهش یافته است. نیاز پتانسیل الگو برای کشت بدون تنش آبی هر یک از ۱۱ گیاه، با توجه به کاهش سطح زیر کشت مجموع، از میزان ۶۱/۵ به ۵۴/۷ میلیون مترمکعب کاهش یافته است. اما با اعمال درجه مناسبی از کم‌آبیاری در مراحل مناسبی از رشد هر یک از گیاهان، عرضه به الگو از میزان ۶۳/۱ به ۳۲/۴ میلیون مترمکعب کاهش یافته است. تابع هدف آبی گیاهی ۰/۵۹۷۸ و تابع هدف اقتصادی ۰/۵۴۴۳ به‌دست آمدند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل توسعه یافته برای شبیه‌سازی - بهینه‌سازی الگوی کشت و تخصیص آب دشت سمنان با الگوریتم MOALO راستی‌آزمایی شد. نتایج نشان داد که دو سناریوی برداشت ۸۰ (GW80) و ۱۰۰ (GW100) درصد از آب تجدیدپذیر زیرزمینی و دو سناریوی تغییر در الگوی کشت موجود ۳۰ (AC30) و ۶۰ (AC60) درصد قادرند منافعی را در بهبود عملکرد محصول، کاهش آب مصرفی و افزایش تراز آب زیرزمینی را همراه با بهبود شاخص‌های مدیریتی آبیاری شامل بهره‌وری مصرف آب فیزیکی و اقتصادی را به‌همراه داشته باشند. همچنین بهینه‌سازی با استفاده از مدل پیشنهادی در ۴ سناریو، باعث بهبود توابع هدف نسبت به عملکرد اولیه شبیه‌سازی شد. در مجموع مدل پیشنهادی که ابزاری تخصصی برای الگوی کشت و تخصیص آب است، با وجود سادگی قابلیت بسیار مناسبی داشت. یکی از علل عدم موفقیت اکثر مدل‌های بهینه‌سازی الگوی کشت، عدم توجه به وضع موجود الگوی کشت و در نتیجه، توصیه تغییر غیرعملی است. لذا تغییرات ملایم ۳۰ درصد در گام اول و ۶۰ درصد در گام دوم درنظر گرفته شدند تا با مقاومت زارعین در به هم ریختن کلی شرایط موجود مواجه نشویم. پیشنهاد می‌شود تا در گردآوری داده‌های باغی دشت سمنان تدقیق اساسی صورت گیرد تا امکان بهینه‌سازی دوهدفه به صورت مناسب‌تر فراهم شود.

منابع مورد استفاده

1. Abdi Rokni, Kh., S. A. Hosseini-Yekani and F. Kashiri Kolai. 2018. Determining of optimal cropping pattern in sari goharbaran (comparing the ordinary non-linear mathematical programming and genetic algorithm). *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production* 4(28): 207-216.
2. Ahmad, I. and D. Tang. 2016. Multi-objective linear programming for optimal water allocation based on satisfaction and economic criterion. *Arabian Journal for Science and Engineering* 41(4): 1421-1433.
3. Akbari, M., M. Gheysari, B. Mostafazadeh-Fard and M. Shayannejad. 2018. Surface irrigation simulation-optimization model based on meta-heuristic algorithms. *Agricultural Water Management* 201: 46-57.

4. Alizadeh, A. and A. Kamali. 2007. Crop Water Requirements in Iran. Ferdowsi University of Mashhad Publications.
5. Asaadi Mehrabani, M. 2018. Fuzzy linear programming model for the optimization of cropping pattern in Zarrinehroud Basin. *Iran-Water Resources Research* 14(1): 13-24.
6. Haupt, R. L. and S. E. Haupt. 2004. Practical Genetic Algorithms. John Wiley & Sons.
7. Lalehzari, R., S. M. ASCE, S. Boroomand Nasab, H. Moazed and A. Haghighi. 2016. Multiobjective management of water allocation to sustainable irrigation planning and optimal cropping pattern. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 142(1): 501-508.
8. Li, M., Q. Fu, V. P. Singh and D. Liu. 2018. An interval multi-objective programming model for irrigation water allocation under uncertainty. *Agricultural Water Management* 196(1): 24-36.
9. Lopez-mata, E., J. J. Orengo-Valverde, J. M. Tarjuelo, A. Martinez-Romero and A. Dominguez. 2016. Development of a direct-solution algorithm for determining the optimal crop planning of farms using deficit irrigation. *Agricultural Water Management* 171: 173-187.
10. Mani, M., O. Bozorg-Haddad and H. A. Loáiciga. 2019. A new framework for the optimal management of urban runoff with low-impact development stormwater control measures considering service-performance reduction. *Journal of Hydroinformatics* 21(5): 727-744.
11. Mirjalili, S., P. Jangir and S. Saremi. 2017. Multi-objective ant lion optimizer: a multi-objective optimization algorithm for solving engineering problems. *Applied Intelligence* 46(1): 79-95.
12. Mirzaee, Sh., M. Shahabi Far and H. Sharifan. 2017. Determining the optimum cropping pattern in Golestan Dam irrigation and drainage network using genetic algorithm. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering* 40(3): 181-190.
13. Nakhjavanimoghaddam, M., B. Ghahraman and Gh. Zarei. 2017. Wheat water productivity analysis under different irrigation management practices in some regions of Iran. *Journal of Water Research in Agriculture* 31(1): 43-57.
14. Nazarifar, M, H. Salari and A. R. Momeni. 2018. Development of a nonlinear programming model optimal cropping pattern based on deficit irrigation scenarios. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 49(5): 1055-1070.
15. Ren, C., P. Guo, Q. Tan and L. Zhang. 2017. A multi-objective fuzzy programming model for optimal use of irrigation water and land resources under uncertainty in Gansu Province, China. *Journal of Cleaner Production* 164(1): 85-94.
16. Shirshahi, F., H. Babazadeh, N. EbrahimiPak and M. Khaledian. 2020. Sustainable optimization of regional agricultural water use by developing a two-level optimization model. *Arabian Journal of Geosciences* 13: 167. https://doi.org/10.1007/s12517-020-5175-5.
17. Srivastava, P. and R. M. Singh. 2015. Optimization of cropping pattern in a canal command area using fuzzy programming approach. *Water Resources Management* 29(12): 4481-4500.

Journal of Water and Soil Science
Vol. 25, No. 3, Fall 2021, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Two-Objective Simulation-Optimization Model for Cropping Pattern and Water Allocation in Semnan Plain

M. Ghodspour[1], M. Sarai Tabrizi[1*], A. Saremi[1], H. Kardan Moghadam[2] and M. Akbari[3]

(Received: September 1-2020; Accepted: January 13-2021)

Abstract

The application of simulation-optimization models is a valuable tool for selecting the appropriate cropping pattern. The main objective of this research is to develop a two-objective simulation-optimization model to determine the pattern of cultivation and water allocation. The model performs the optimization with the multi-objective metamorphic algorithm (MOALO) after simulating different states of the cultivation pattern. The decision variables including land and water allocated to ten-day periods of plant growth were designed in a way that the minimum utilization of water resources and economic maximization were identified as target functions. The developed model was used to simulate and optimize the cultivation pattern with an area of 5500 hectares and water allocation of Semnan plain with renewable water at the rate of 60.8 million cubic meters. Harvesting scenarios of 80 (GW80) and 100 (GW100) percent of renewable groundwater and scenarios of change in existing cropping pattern of 30 (AC30) and 60 (AC60) percent were considered and each scenario was simulated with the MOALO algorithm. Optimization using the proposed model in four scenarios improved the water and economic objective functions compared to the initial simulation performance. The results showed that the four proposed scenarios were obtained by minimizing the water objective function and maximizing the economic objective function relative to the current situation (simulation). In general, the proposed model had a good performance despite its simplicity, which is a specialized tool to optimize the crop pattern with water allocation.

Keywords: Simulation-optimization model, Cropping pattern, Water allocation, MOALO algorithm

1. Department of Water Engineering and Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2. Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran.
3. Department of Water Engineering and Sciences, Arak University, Arak, Iran.
Corresponding author, Email: m.sarai@srbiau.ac.ir