DOI: 10.22059/ijswr.2019.281948.668217 تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۱، شماره ۱، فروردین ۱۳۹۹ (ص ۱۶۴-۱۵۱)

Uncertainty Analysis of Water Distribution Planning in Mian-Ab Irrigation Network in Shooshtar Plain: Application of Genetic Algorithm and Simulated Annealing

SAEB KHOSHNAVAZ*[1]

1. Department of Water Sciences Engineering, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran
(Received: May. 27 2019- Revised: Aug. 12, 2019- Accepted: Aug. 28, 2019)

ABSTRACT

Allocated water for agricultural crops in a cropping pattern in different regions and seasons is faced with much variation. Therefore, the cultivation of each crop is subject to climatic conditions, drought tension, precipitation, and crop sensitivity with different levels of uncertainty and risk. In this study, the role of allocated water and its time fluctuations for the main crops in Mian-Ab irrigation network in Shooshtar plain have been investigated. The simulation model of cropping pattern with the objective of maximizing net income with irrigation, investment, cultivation, and land constraints was optimized using a simulated annealing algorithm. The obtained responses in the uncertainty conditions will determine the effect of tension fluctuations in fuzzy analysis process. Fuzzy set theory has been defined with triangular membership function and has been divided into five alpha levels of 0, 0.25, 0.5, 0.75, and 1 to find the fuzzy response of the problem. In each positive or negative α level, a genetic algorithm sub-model has been used with a proximity criterion to find the boundary responses. The results showed that the application of optimal strategy reduced water consumption up to 7 MCM/year and increased the net benefit in cropping pattern more than 5×10^{10} IRR annually. The developed fuzzy model showed that the water efficiency will be increased at least 30% with a 25% reduction in optimal irrigation..

Keywords: Cropping pattern, Genetic algorithm, Mian-Ab irrigation network.

* Corresponding Author's Email: Saeb khoshnavaz@Gmail.com

تحلیل عدم قطعیت در برنامه‌ریزی توزیع آب شبکه آبیاری میان‌آب دشت شوشتر: کاربرد الگوریتم ژنتیک و شبیه سازی فرایند سرد شدن فلزات

صائب خوش نواز*

گروه مهندسی علوم آب، واحد شوشتر، دانشگاه آزاداسلامی، شوشتر، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۳/۶- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۵/۲۱- تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۶/۶)

چکیده

آب دریافتی محصولات کشاورزی در یک الگوی کشت در اراضی و فصول مختلف با تغییرات زیادی مواجه می‌گردد. از این جهت کاشت هر محصول با توجه به شرایط اقلیمی، تنش خشکی، بارندگی و حساسیت گیاهی با سطوح متفاوتی از عدم قطعیت و ریسک همراه است. در این مطالعه نقش نوسانات زمانی آب تخصیص داده شده برای محصولات عمده الگوی کشت شبکه آبیاری میان‌آب دشت شوشتر بررسی شده است. مدل شبیه‌سازی الگوی کشت با هدف بیشینه‌سازی درآمد خالص با محدودیت‌های آبیاری، سرمایه‌گذاری، گیاهی و زمین توسط روش شبیه‌سازی فرایند سرد شدن فلزات بهینه‌سازی شده است. پاسخ‌های به‌دست آمده در شرایط عدم قطعیت برای تعیین اثر نوسانات تنش خشکی به هر یک از محصولات در فرایند تحلیل فازی قرار گرفته است. تئوری فازی با تابع عضویت مثلثی تعریف و در پنج سطح آلفا برابر با ۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ برای یافتن پاسخ فازی مسأله به کار گرفته شده است. در هر سطح مثبت و منفی آلفا برای جستجوی پاسخ‌های مرزی از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. نتایج نشان داد کاربرد برنامه بهینه موجب کاهش سالانه ۷ میلیون متر مکعب در تخصیص آب و افزایش بیش از پنج میلیارد تومان در سود خالص کل الگوی دشت می‌گردد. تحلیل فازی سیستم توسعه داده شده نشان داد با کاهش ۲۵ درصدی آبیاری بهینه، بهره‌وری اقتصادی آب حداقل ۳۰ درصد افزایش خواهد یافت.

واژه های کلیدی: الگوی کشت، الگوریتم ژنتیک، شبکه آبیاری میاناب شوشتر

مقدمه

کشاورزی به‌عنوان یکی از محورهای اساسی رشد و توسعه، نقش مهمی در بهبود اقتصادی کشورها ایفا می‌کند. در ایران محدودیت منابع آب یکی از مهم‌ترین موانع توسعه بخش کشاورزی، به‌عنوان بستر اصلی نیل به خودکفایی مواد غذایی بوده است. افزایش بهره‌وری استفاده از منابع آب با توجه به افزایش تقاضای محصولات کشاورزی، ، ضرورتی انکارناپذیر است. بهره‌برداری مطلوب از این منابع به منزله یک هدف کلان، می‌تواند افزایش درآمد بهره‌برداران را که برای آن‌ها فعالیت کشاورزی علاوه بر یک فعالیت اقتصادی به‌عنوان شیوه‌ای از زندگی نیز محسوب می‌شود، به دنبال داشته باشد. به همین دلیل در برنامه‌ریزی‌های اقتصادی و کلان کشورهای مختلف، افزایش بهره‌وری استفاده از منابع یکی از مهم‌ترین شاخص‌های مورد توجه در توسعه کشاورزی بوده است (Mohammadi *et al.*,2013). از این رو الگوهای زراعی در مناطقی که با مشکل کمبود آب مواجه‌اند بایستی به‌گونه‌ای تغییر یابد تا ضمن تأمین منافع مادی کشاورزان، منابع آب موجود را در مقابله با پدیده کم‌آبی حفظ نماید. تصمیم‌گیری غیرمتمرکز بهره‌برداران در زیر کشت بردن اراضی موجب پدید آوردن سیاست های مختلفی از الگوی کشت در هر سال می‌گردد.

با تدوین یک مدل و با در نظر 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 نمود. 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 از آب 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 آبیاری مشاهده می‌شود (Heydari *et al.*, 2005; Nimah *et al.*, 2003). حداکثر نمودن سود خالص از اهداف مهم تعیین الگوی کشت بهینه در بسیاری از مطالعات بوده است (Raju and Kumar, 2004 ;Singh *et al.*, 2001; Singh and Panda, 2012; Lalehzari et al., 2016). کشاورزان

* نویسنده مسئول: Saeb.khoshnavaz@gmail.com

نیز الگوی کشتی که بازگشت مالی بیشتری را تضمین کند مورد حمایت قرار می‌دهند. از سوی دیگر یک الگوی اقتصادی کارآمد تولید باید کمترین ریسک را برای کشاورزان در نظر گرفته باشد. بهینه‌سازی در بسیاری از مسائل مهندسی راهکاری برای رسیدن به یک پاسخ مطلوب به عنوان تابع هدف در فضایی از محدودیت‌ها است. در این مسائل، تابع هدف دارای چندین نقطه بهینه موضعی و یک نقطه بهینه سراسری است که روش‌های کلاسیک به‌راحتی قادر به تفکیک آن‌ها و یافتن نقطه بهینه سراسری نمی‌باشند. علاوه بر آن در قالب مسائل عملی، تابع هدف ممکن است منفصل و یا همراه با تغییرات ناگهانی باشد که روش‌های کلاسیک و غیرمستقیم عموماً از حل آن‌ها عاجز می‌باشند. روش‌های جستجوی مستقیم هم ممکن است در مسائل کوچک با تعداد متغیرهای محدود مؤثر باشند، اما در عمل در شرایطی که متغیرهای تصمیم زیاد باشند و دامنه آن‌ها بزرگ باشد کارائی مناسبی نخواهند داشت. برای رفع این مشکل روش‌های محاسبات تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک، شبیه‌سازی سرد شدن فلزات و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در مدیریت آبیاری توسعه یافته‌اند (Ghadami *et al*., 2009; Moghaddasi *et al*., 2008; Babazadeh *et al*., 2011; Anwar and Haq, 2012; Dandy *et al*., 2001; Wardlaw and Bhaktikul, 2004; Zhang *et al*., 2008; Azarafza *et al*., 2012).

Janova (2012) برای صحت‌سنجی و ارزیابی مدل‌های بهینه‌سازی الگوی کشت از روش برنامه‌ریزی احتمالی بر مبنای کسب حداکثر سود استفاده کردند. نتایج نشان داد سیستم‌های تصمیم‌گیری کشاورزی می‌تواند راهکار خوبی برای هدایت کشاورزان به تغییر تناوب گیاهی باشد. الگوی تولید و فروش محصولات کشاورزی در دشت ارژن فارس توسط سه مدل برنامه‌ریزی قطعی برای تحلیل کوتاه‌مدت شرایط عادی، خشکسالی و ترسالی و نیز یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای برای تحلیل بلندمدت شرایط انجام شد. بهینه‌سازی برای هجده محصول رایج منطقه انجام شد و نتایج حاصل از آن نشان داد که الگوی زراعی فعلی یک الگوی نسبتاً بهینه می‌باشد. از سوی دیگر مدل‌های قطعی در قیاس با مدل‌های برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای این امکان را ایجاد می‌کند که در بلندمدت الگوی کشت منطقه در تمامی شرایط آب و هوایی قادر به تأمین نیاز خودمصرفی منطقه باشد (Mortazavi *et al*., 2012).

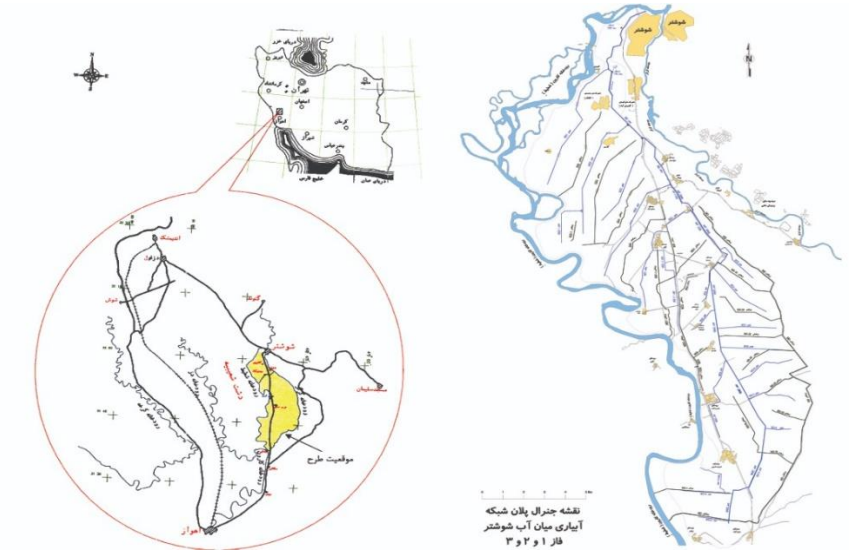
کاربرد یک سیستم پیوسته تصمیم‌گیری مبتنی بر چندین هدف کارایی فراوانی در مدیریت مطلوب مصرف آب دارد. به‌گونه‌ای که حفظ منابع آب زیرزمینی، استفاده مؤثر از آب باران، صرفه‌جویی در برداشت آب از رودخانه، رسیدن به حداکثر عملکرد محصول و بالاترین درآمد خالص از الگوی کشت به‌صورت هم‌زمان در فضای توجه به داده‌های غیرقطعی می‌تواند راهکاری قابل توجه برای تصمیم‌گیری بهینه در الگوی تخصیص آب کشاورزی باشد. وجود بسیاری از عدم قطعیت‌ها در هزینه‌ها و تولید عملکرد و همچنین در شرایط هیدرولوژیکی (مؤثر بر منابع آب) مناطق مورد مطالعه و سیاست‌های بهره‌برداری منابع آب، منجر به غیرخطی شدن و غیرقطعی شدن بسیاری از مدل‌های بهینه‌سازی الگوی کشت و استفاده از روش‌های بهینه‌سازی غیرقطعی شده است (Asadpour *et al*., 2004; Toyonaga and Itoh, 2005; Vedula *et al*., 2005; Lu *et al*., 2010; Regulwar and Gurav, 2012).

برآورد الگوی بهینه زراعی با تکیه بر اصول کشاورزی پایدار و خشکسالی در منطقه تایباد با استفاده از دو مدل برنامه‌ریزی خطی فازی و برنامه‌ریزی آرمانی فازی ناموزون اجرا شده است. با توجه به اهمیت حفظ منابع آب، آرمان اصلی تحقیق میزان آب مصرفی بوده که با ۵ درصد کاهش و ۲/۵ درصد دامنه تغییرات در نظر گرفته شده است. از میان محصولات عمده منطقه سطح زیر کشت گندم در الگوهای بهینه نسبت به الگوی فعلی افزایش داشته درصورتی‌که زمین‌های تحت کشت جو، چغندرقند و پنبه کاهش یافته‌اند. مقایسه الگوها نشان داد سطح زیر کشت گندم، یونجه، ذرت و نخود در الگوی برنامه‌ریزی خطی فازی نسبت به مدل آرمانی فازی کاهش و در مورد سایر محصولات افزایش داشته است (Kohansal and Hamraz, 2008).

با توجه به مطالعات گذشته و لزوم ارزیابی نتایج یک برنامه-ریزی بهینه در فضای غیرقطعی متغیر تصمیم‌گیری، در این تحقیق تحلیل فازی حجم آب تخصیص یافته به گیاهان مورد توجه قرار گرفته است. مدل تصمیم‌گیری تقسیم آب در مزارع و کانال‌های شبکه آبیاری میان‌آب در شهرستان شوشتر استان خوزستان با شبیه‌سازی توسط AquaCrop و بهینه‌سازی به وسیله الگوریتم شبیه‌سازی فرایند سرد شدن فلزات توسعه یافته است. محاسبه نقاط حدی پاسخ فازی مدل به بازه غیرقطعی آب دریافتی نیز از روش شکست آلفا و الگوریتم ژنتیک انجام شد.

مواد و روش ها

دشت میان‌آب شوشتر با وسعتی حدود ۳۶ هزار هکتار در استان خوزستان حدفاصل عرض جغرافیایی ۳۹ ۳۱ تا ۲ ۳۲ شمالی و طول جغرافیایی ۴۶ ۴۸ تا ۵ ۴۹ واقع شده است (شکل ۱). این دشت از شمال به شهر شوشتر، از جنوب به تپه‌های عله، از شرق به رودخانه گرگر و از غرب به رودخانه شطیط محدود شده است.



شکل۱. موقعیت دشت میان‌آب شوشتر در استان خوزستان

اقلیم منطقه تحت تاثیر فشار زیاد فوق استوایی به‌خصوص در تابستان با بارندگی بسیار ناچیز است که از اوایل پاییز به تدریج فضای منطقه جهت عبور سیستم‌های کم‌فشار مناطق مدیترانه و شمال آفریقا آزاد می‌شود و موجب آغاز بارندگی‌های ناحیه می‌گردد. جدول (۱) وضعیت منابع و مصارف آب را در این محدوده نشان می‌دهد. مطابق جدول کنترل مصرف آب در بخش کشاورزی نقش بسیار مهمی در مدیریت منابع آب در این منطقه دارد. آب مورد استفاده در الگوی کشت دشت میان‌آب از شبکه آبیاری این دشت برنامه‌ریزی شده است و آب زیرزمینی در این خصوص نقشی ندارد.

سطح زیرکشت، هزینه تولید، قیمت فروش، عملکرد و آب مورد نیاز گیاهان موجود در الگوی کشت دشت میان‌آب در سال آبی ۹۷-۱۳۹۶ در جدول (۲) خلاصه شده است. گندم و حبوبات از محصولات عمده این محدوده به‌شمار می‌روند که بیش از ۸۰ درصد سطح زیر کشت را تشکیل می‌دهند. متوسط عملکرد و آب مورد نیاز بر اساس میانگین تولید محصول و برنامه آبیاری از طریق مصاحبه حضوری به دست آمده است. بدیهی است مقادیر واقعی آب مصرفی و عملکرد نظیر آن از طریق شبیه‌سازی فرایند رشد محاسبه شده است.

تقویم زراعی گیاهان الگوی کشت به تفکیک مراحل رشد در جدول (۳) آمده است.

جدول ۱. وضعیت مصارف آب در دشت میان‌آب - شوشتر

نام دشت	مصارف آب (میلیون متر مکعب)				هدایت الکتریکی
	کشاورزی	صنعت	شرب	جمع	(میکروزیمنس بر سانتیمتر)
میان‌آب – شوشتر	۱۱۸/۳	۰/۳	۳/۲	۱۲۱/۸	۲۵۳۷

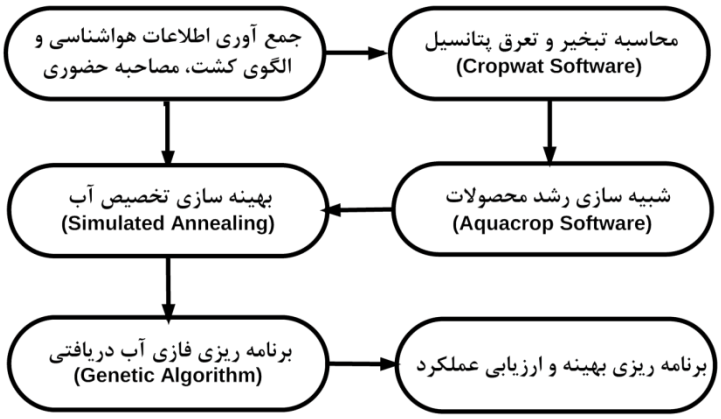
جدول ۲. مشخصات الگوی کشت شبکه آبیاری میان‌آب

محصولات	سطح کشت هکتار	قیمت فروش ده ریال بر کیلوگرم	هزینه ها ده هزار ریال در هکتار	متوسط عملکرد کیلوگرم در هکتار	آب موردنیاز متر مکعب در هکتار
گندم	۷۷۳۶	۱۲۵۰	۲۷۰۰	۳۵۰۰	۳۴۷۰
جو	۱۰۵	۱۰۰۰	۲۵۰۰	۳۲۰۰	۲۹۹۰
کلزا	۲۶۰	۲۵۰۰	۳۱۰۰	۲۰۰۰	۶۲۴۰
ذرت	۴۲۵	۹۵۰	۲۸۰۰	۱۲۰۰	۵۳۹۰
باقلا	۲۰۵	۱۵۰۰	۳۵۵۰	۵۵۰۰	۴۰۸۰
لوبیا	۶۳۲	۳۵۰۰	۳۵۵۰	۲۵۰۰	۴۵۲۰
ماش	۳۵۶	۴۵۰۰	۳۴۵۰	۱۲۰۰	۴۰۵۰
پیاز	۲/۲	۲۰۰۰	۸۰۰۰	۲۲۰۰۰	۵۶۴۰
خیار	۱/۳	۲۵۰۰	۷۶۰۰	۱۸۰۰۰	۴۷۶۰
گوجه فرنگی	۸/۲۵	۳۰۰۰	۹۰۵۰	۲۰۰۰۰	۶۰۶۰
هندوانه	۴۸	۸۵۰	۹۴۰۰	۲۸۰۰۰	۵۴۱۰

جدول۳. تقویم زراعی محصولات الگوی کشت دشت میان‌آب.

محصولات	کاشت	جوانه زنی	پوشش کامل	آغاز پیری تاج	برداشت	طول دوره رشد روز
گندم	۵ آبان	۲۲ آبان	۲۴ اسفند	۱۳ فروردین	۲۱ اردیبهشت	۱۹۷
جو	۱۰ آبان	۲۷ آبان	۱۵ اسفند	۲۰ فروردین	۲۴ اردیبهشت	۱۹۵
کلزا	۱۵ آبان	۲ آذر	۱۷ بهمن	۲۵ اسفند	۲۰ فروردین	۱۸۵
ذرت	۱۰ فروردین	۱۷ فروردین	۱۷ اردیبهشت	۱۱ مرداد	۱۸ مرداد	۱۳۲
باقلا	۵ فروردین	۲۰ فروردین	۲۰ اردیبهشت	۲۵ خرداد	۲۷ تیر	۱۱۵
لوبیا	۵ فروردین	۱۰ فروردین	۱۰ اردیبهشت	۱۵ خرداد	۱۲ تیر	۱۰۵
ماش	۲۰ اسفند	۲۱ اسفند	۱ اردیبهشت	۲۴ اردیبهشت	۱۳ خرداد	۸۵
پیاز	۲۰ اسفند	۲ فروردین	۵ اردیبهشت	۲۴ خرداد	۱۷ تیر	۱۲۰
خیار	۱۵ فروردین	۲۳ فروردین	۲۹ اردیبهشت	۳۱ خرداد	۱۱۰	۱۱۰
گوجه فرنگی	۵ فروردین	۹ فروردین	۵ تیر	۱۰ تیر	۶ مرداد	۱۲۵
هندوانه	۱۵ اسفند	۲۷ اسفند	۱۱ فروردین	۲۶ اردیبشهت	۷ مرداد	۱۴۵

شکل (۲) شمای کلی مدل فازی برنامه‌ریزی آبیاری بکار گرفته شده را نشان می‌دهد. اطلاعات مورد نیاز علاوه بر موارد فوق شامل زمان‌بندی و ضرایب رشد، داده‌های هواشناسی و محدودیت‌ها و ظرفیت‌های شبکه آبیاری می‌گردد که از طریق جمع‌آوری، اندازه‌گیری و مصاحبه حضوری به دست آمده است.



شکل۲. مراحل تهیه مدل شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و تحلیل عدم قطعیت

تعرق گیاهی و بارندگی مؤثر دو مؤلفه اصلی معادله بیلان آب در کشاورزی هستند که قبل از فرایند شبیه‌سازی به صورت تبخیرتعرق پتانسیل و بارندگی محاسبه و اندازه گیری شده و در طول فرایند مدلسازی بروزرسانی خواهند شد. در شکل (۳) تبخیرتعرق پتانسیل محاسبه شده توسط نرم افزار CropWat (FAO 1992) و ارتفاع بارندگی به صورت روزانه نشان داده شده است. جزئیات بیشتر در خصوص نرم‌افزار و محاسبات نیاز آبی در دستورالعمل‌های سازمان خوار و بار جهانی آمده است (Doorenbos and Kassam 1979; Allen *et al.*, 1998). خرداد تا شهریور بیشترین نیاز آبی و حد فاصل آذر تا اسفند نیز بیشترین مقدار بارندگی به دست آمده است.

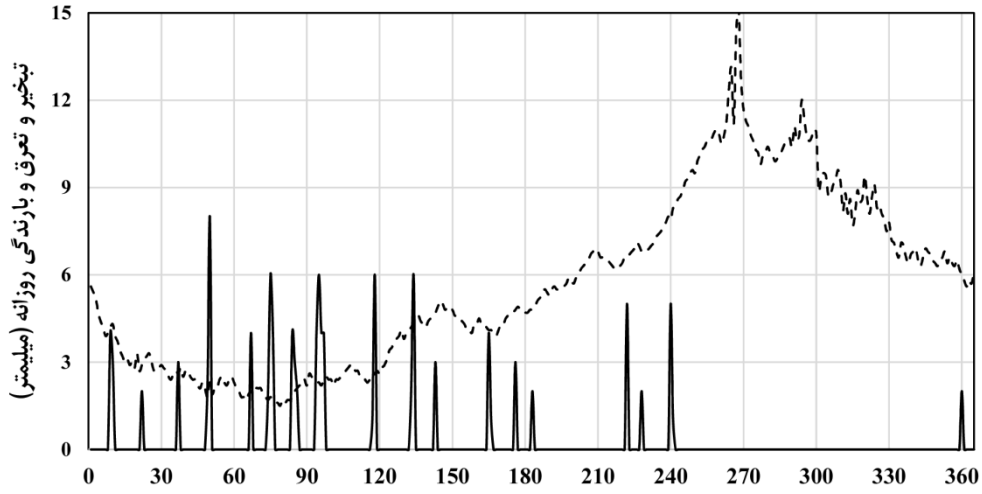
برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان از نرم‌افزار AquaCrop (FAO 2012) استفاده شده است. رابطه اساسی محاسبه ماده خشک تولیده شده بر اساس معادله ذیل تخمین زده می‌شود:

$$B_i = WP^* \left(\frac{Tr_i}{ET_{o,i}} \right) \quad \text{(رابطه ۱)}$$

که در آن B_i، بیوماس در روز i؛ Tr، تعرق از سطح محصول و ET_o میزان تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه است. WP* بهره‌وری

آب نرمال شده است (جدول ۴) که یک مقدار ثابت برای شرایط اقلیمی متفاوت است (Steduto *et al*., 2009). این مدل از طریق تفکیک تعرق از مقدار کل تبخیرتعرق میزان بیوماس تولیدی را محاسبه و با ضرب شدن در شاخص برداشت، مقادیر شاخص بهره-وری آب و عملکرد محصول در گام زمانی روزانه را برآورد می‌کند.

از دیگر ویژگی‌های مدل AquaCrop این است که به جای شاخص سطح برگ از پوشش سبز روی سطح زمین استفاده می‌کند. در آن شاخص درجه روز رشد اهمیت ویژه‌ای دارد و به جای ضریب کاهش نسبی عملکرد به بررسی شاخص بهره‌وری می‌پردازد (Tavakoli *et al*., 2014).



شکل ۳. تبخیر - تعرق پتانسیل و بارندگی در سال آبی ۹۷-۱۳۹۶

اگرچه مدل AquaCrop بر مبنای فرایندهای بیو-فیزیکی پیچیده بنا نهاده شده (*Steduto et al., 2009*)، اما تعداد نسبتاً کمی از پارامترهای ساده و قابل دسترس به عنوان پارامترهای ورودی استفاده می‌شوند. ورودی‌های مدل شامل چهار دسته اطلاعات شامل: داده‌های اقلیمی، داده‌های و پارامترهای گیاهی، اطلاعات خاک و مدیریت (مزرعه‌ای و آبیاری) می‌باشند.

مهم‌ترین داده‌های اقلیمی مورد نیاز مدل عبارت از داده‌های بیشینه و کمینه دمای روزانه، تبخیرتعرق گیاه مرجع (ET_o) و بارندگی می‌باشند. AquaCrop از داده‌های ماکزیمم و مینیمم دمای روزانه برای محاسبه درجه روز رشد (GDD) به منظور تعدیل عملکرد بیوماس بر اثر خسارات ناشی از سرما، استفاده می‌کند (*Raes et al., 2009*). میانگین غلظت CO_2 یکی دیگر از پارامترهای اقلیمی ورودی به مدل است. داده‌های مورد نیاز خاک عبارت از هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat})، رطوبت حجمی در ظرفیت زراعی (θ_{FC})، رطوبت حجمی در نقطه پژمردگی (θ_{PWP}) می‌باشند. این مقادیر برای منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۴/۵ متر در روز، ۳۰ درصد و ۱۴ درصد برآورد شده است. از داده‌های مربوط به گیاه ضرایب رشد تاج پوشش گیاهی و ضریب پیری تاج پوشش گیاهی هستند که در جدول (۴) آمده است. دسته ای از داده های ورودی که توسط کاربر به مدل داده می شود (مانند درصد پوشش اولیه و حداکثر پوشش که در جدول (۴) ارائه شده است) و برخی از آن‌ها مانند دوره رشد نیاز به واسنجی دارند.

مقادیر پارامترهای گیاهی ثابت برای اکثر گیاهان زراعی به‌عنوان پیش‌فرض در مدل وجود دارد. این پارامترها با گذشت زمان یا موقعیت جغرافیایی تغییر نمی‌کنند. این پارامترها با استفاده از داده‌های رشد گیاه در شرایط مطلوب و بدون محدودیت واسنجی شده‌اند و برای کاربرد آن‌ها در شرایط وجود تنش آبی از طریق تاثیر ضریب پاسخ به تنش تعدیل می‌شوند. این پارامترها به عنوان پیش‌فرض در مدل و برای گونه‌های زراعی مهم وجود دارد. در مورد رقم‌ها فرض شده است که اختلاف رقم‌ها فقط در مراحل فنولوژیکی آن‌ها است. درحالی‌که به طور حتم اختلاف‌های دیگری به‌ویژه در مقاومت به تنش وجود دارد. با این وجود این اختلافات معمولاً کوچک‌اند و انتظار می‌رود که پارامترهای ثابت بدون واسنجی برای هر رقم بکار روند (*Ramezani et al., 2012*).

علاوه بر پارامترهای ثابت، دیگر اطلاعات مورد نیاز برای اجرای شبیه‌سازی اغلب وابسته به محصول زراعی بوده و کاربرد آن‌ها برای شرایط مختلف مقادیر متفاوت دارد. چهار تاریخ اصلی رشد گیاه شامل جوانه‌زنی، پوشش کامل، آغاز پیری تاج و برداشت که در جدول (۳) با استفاده از مشاهدات میدانی ثبت شده است از پارامترهای واسنجی شده مدل هستند. تاریخ جوانه‌زنی علاوه بر شرایط رطوبتی خاک به عمق کاشت بستگی دارد. تاریخی که

در آن ۹۰ درصد بذرها سبز می‌شوند به عنوان تاریخ ظهور پوشش تاجی لحاظ می‌شود. زمان شروع پیری نزدیک تاریخ رسیدگی فیزیولوژیکی است و برای یک گونه خاص به رژیم دمایی منطقه بستگی دارد. علاوه بر این، مدل قابلیت این را دارد که شروع زمان پیری و رسیدگی فیزیولوژیکی گیاه را با استفاده از درجه روز رشد حساب کند.

تخمین دقیق پارامترهای یاد شده نیازمند داده‌برداری میدانی از سطح پوشش گیاهان و زمان‌بندی در مقاطع جوانه‌زنی، آغاز دوره حداکثر پوشش و پیری تاج گیاه و زمان برداشت است. زمان های مذکور از طریق سعی و خطا واسنجی شد که نتایج آن انطباق قابل قبولی با اطلاعات به دست آمده در جدول (۳) نشان داد.

جدول ۴. ضرایب گیاهی مورد استفاده در مدل شبیه‌سازی

محصول	پوشش اولیه درصد	درصد حداکثر پوشش درصد	ضریب رشد پوشش -	ضریب کاهش پوشش -	بهره‌وری آب نرمال شده گرم بر مترمربع
گندم	۳	۸۶	۰/۰۰۷	۰/۰۰۴	۱۵
جو	۱	۸۳	۰/۰۰۸	۰/۰۰۶	۱۵
کلزا	۳	۷۸	۰/۰۰۹	۰/۰۰۴	۱۵
ذرت	۲	۸۵	۰/۰۱۵	۰/۰۱	۳۴
باقلا	۰/۵	۷۰	۰/۰۲۹	۰/۰۰۳	۱۵
لوبیا	۰/۵	۷۰	۰/۰۳۱	۰/۰۰۳	۱۵
ماش	۷/۵	۶۵	۰/۰۲۰	۰/۰۰۳	۱۵
پیاز	۳	۷۸	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۵	۱۸
خیار	۲	۷۶	۰/۰۰۸	۰/۰۰۴	۱۹
گوجه فرنگی	۶	۸۶	۰/۰۰۷	۰/۰۰۴	۱۸
هندوانه	۵	۹۰	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۱۹

بهینه‌سازی جستجوی متغیرهای تصمیم در یک فضای تصمیم امکان‌پذیر برای یافتن بهترین پاسخ مورد انتظار است. هر مسأله بهینه‌سازی از سه بخش تابع هدف، متغیرهای تصمیم و محدودیت‌ها تشکیل شده است. متغیر تصمیم در این پژوهش مقدار آب اختصاص داده شده جهت آبیاری محصول در هر نوبت و تابع هدف حداکثرسازی درآمد خالص الگوی کشت است:

$$F = \max(\sum_{p}^{P}(I_{pc}A_{pc} - C_{pc}A_{pc})) \quad \text{(رابطه ۲)}$$

Subject to:

$$\sum_{p=1}^{P} A_{pc} \le A_c \quad c=1, \ldots, 24 \quad \text{(رابطه ۳)}$$

$$\sum_{p=1}^{P} SW_{pc} \le SW_c \quad c=1, \ldots, 24 \quad \text{(رابطه ۴)}$$

$$\sum_{c=1}^{24} SW_c \le SW_T \quad \text{(رابطه ۵)}$$

$$ST_i \le SW_i \le SM_i \quad i = 1, \ldots, NI \quad \text{(رابطه ۶)}$$

$$S_i = S_{i-1} - E_i - Tr_i - D_i + R_i - O_i \quad i = 1, \ldots, NI \quad \text{(رابطه ۷)}$$

که I برابر است با کل درآمد ناخالص الگوی کشت شامل فروش محصول اصلی و در صورت وجود محصولات فرعی، و C برابر است با مجموع کل هزینه‌ها و A سطح زیرکشت محصول p در اراضی تحت پوشش کانال c. SW_T و SW_c به‌ترتیب حجم آب قابل برنامه‌ریزی کل شبکه و کانال c، S ذخیره رطوبتی خاک، E تبخیر، D نفوذ عمقی، R بارندگی و O رواناب برای گام زمانی i هستند. علاوه بر این، حجم آب برنامه‌ریزی شده برای گیاه بایستی از کل ظرفیت آب در خاک در آن گام زمانی کمتر و از حداقل نیاز آستانه تنش گیاه بیشتر باشد. هزینه‌های تولید از طریق تهیه پرسشنامه جمع‌آوری و میانگین مقادیر به‌دست آمده در مدل-سازی استفاده شده است. قیمت فروش نیز بر اساس میانگین قیمت یک کیلوگرم از محصول در محل مزرعه در سال مطالعه می‌باشد.

برای محاسبه پاسخ بهینه از الگوریتم شبیه‌سازی فرایند سرد شدن فلزات، شبیه‌سازی فرایند تبرید یا شبیه‌سازی آنییلینگ استفاده شده است. این روش که برای اولین بار توسط *et al.* Kirkpatrick (1982) ارائه شد، یکی از روش‌های جستجوی تصادفی در بهینه‌سازی می‌باشد. اساس این تکنیک بر پایه شبیه‌سازی فرایند نورد است. هرگاه ماده‌ای را در محفظه گرمایش جهت رسیدن به پایین‌ترین سطح انرژی ممکن و یا کمترین حرارت سرد کنند، فرایند نورد صورت گرفته است. در هر دمایی امکان تغییر انرژی کل ماده با تغییر مکان‌های کوچک وجود دارد

که به این فرایند آشفتگی گویند. در هر دمایی ممکن است چندین فرایند آشفتگی صورت گرفته و در هر کدام از نتایج، میزان انرژی باقیمانده متفاوت باشد، اما پس از چند تکرار از این فرایند، میزان تغییرات انرژی کل ماده بسیار اندک می‌گردد. در این حالت ماده به تعادل گرمایی رسیده است، یعنی در یک دمای ثابت به پایین‌ترین تراز ممکن انرژی خود رسیده است. در واقع با کاهش دما و ایجاد آشفتگی مجدد در دمای جدید، ماده به حالت تعادل گرمایی خود می‌رسد و در نهایت فرایند نورد با رسیدن به پایین‌ترین دمای ممکن به پایان می‌رسد. در این تحقیق برای به‌هنگام‌سازی دما از تابع نمایی و برای فرایند سرد کردن از تابع بولتزمن استفاده شده است.

علاوه بر داده های قابل اندازه‌گیری یا قطعی، عدم قطعیت در میزان آب دریافتی گیاه به دلیل تلفات، سیلاب، تغییر ساختمان خاک، آورد رودخانه و شرایط اقلیمی منجر به کاهش یا افزایش حدود برنامه‌ریزی شده در برنامه بهینه می‌گردد (Reddy and Kumar, 2008). با رویکرد سیستم فازی و ایجاد انعطاف در ضرایب مدل می‌توان تا حدود زیادی بی‌دقتی موجود در اطلاعات را برطرف کرده و از منابع و نهاده‌ها به نحو مطلوب‌تری استفاده کرد. در این تحقیق جهت برآورد میزان عملکرد نسبت به نیاز آبی هر دوره تنش از سیستم فازی برای لحاظ داشتن اثر عدم قطعیت در محاسبات استفاده می‌شود. مدل ریاضی توزیع آب در کشاورزی نیازمند حل یک سیستم معادلات غیرخطی است که با لحاظ نمودن ضرایب حساسیت به تنش آب به‌عنوان پارامتر فازی، حل آن بسیار پیچیده خواهد بود. زیرا به هنگام به‌کارگیری روش گسست آلفا جهت محاسبه توابع عضویت خروجی، پارامترهای ورودی می‌بایست به‌صورت یک بازه به مدل معرفی شوند. به عبارت دیگر آب تخصیص یافته، x، به‌صورت ذیل باید وارد معادله می‌گردد.

$$\left(w_{\min}\right)_{\alpha=\alpha^*} \prec w \prec \left(w_{\max}\right)_{\alpha=\alpha^*}$$

که $\left(w_{\min}\right)_{\alpha=\alpha^*}$ و $\left(w_{\max}\right)_{\alpha=\alpha^*}$ به ترتیب بیشترین و کمترین مقادیر ارتفاع آبیاری در بازه متناظر با $\alpha cut = \alpha^*$ از توابع عضویت پاسخ هستند. بنابراین اعداد فازی به سطوح $\alpha cut = 0.25, 0.5, 0.75, 1$ تقسیم شده و بر پایه توابع عضویت مثلثی تحلیل خواهد شد. پاسخ مدل در این شرایط از طریق جستجوی فضای تصمیم برای یافتن مقادیر حدی متناظر با هر سطح از توابع فازی به دست می‌آید. بنابراین هر $\alpha cut = \alpha^*$ یک مسأله بهینه‌سازی جداگانه است که توسط الگوریتم ژنتیک جستجو و بهترین نقطه آن انتخاب می‌گردد.

الگوریتم ژنتیک در سال ۱۹۶۰ میلادی توسط جان هالند و در سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ توسط وی و همکارانش در دانشگاه میشیگان ابداع و توسعه یافت. الگوریتم ژنتیک با اقتباس از دانش ژنتیک یک روش جستجو برای راه‌حل‌های تقریبی مسائل پیچیده است (Goldberg,1989). در فرایند جستجو تعداد زیادی از پاسخ‌های احتمالی تولید می شود که باید در هر مرحله پاسخ‌ها به سمت مقدار بهینه سوق داده شود. در الگوریتم ژنتیک هر پاسخ دارای خواص منحصربه‌فرد است و به آن ژن یا کروموزوم گفته می‌شود. مهمترین عملگرهای مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک عبارتند از: انتخاب، جهش و تقاطع. جواب نهایی با تکرار و قیود اعمال شده به هر نسل محاسبه می‌شود (Anwar and Haq, 2012). پارامترهای مدلسازی و عملگرهای الگوریتم ژنتیک در جدول (۵) خلاصه شده است.

جدول ۵. مقادیر بهینه ضرایب مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک

جمعیت اولیه	تعداد تکرار	نرخ جهش	درصد تقاطع
۲۰۰	۱۰۰۰	۰/۰۲	۰/۷

یکی از پارامترهایی که برای ارزیابی اقتصادی تخصیص آب مورد استفاده قرار می‌گیرد بهره‌وری اقتصادی آب است (لاله‌زاری، ۱۳۹۶) که به صورت معادله (۸) تعریف می‌شود:

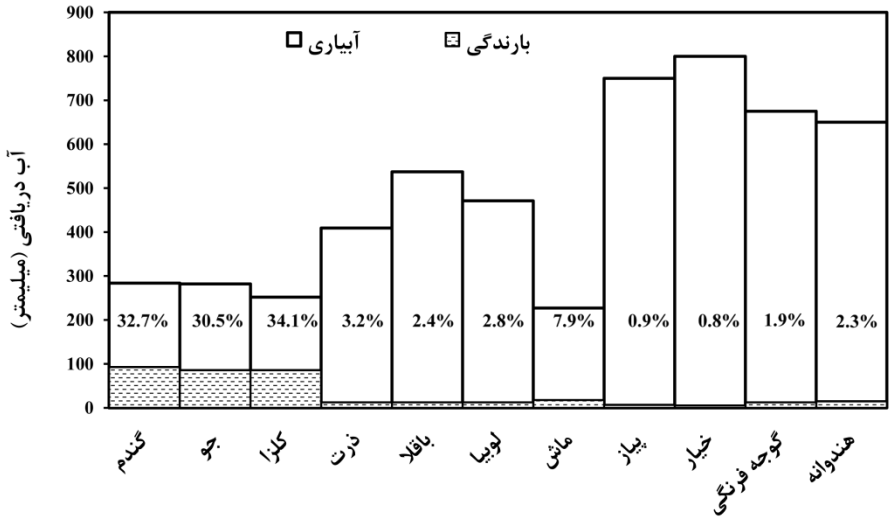
$$EW = \frac{P \times SP}{WI} \quad \text{(رابطه ۸)}$$

که در این رابطه، P، عملکرد محصول (کیلوگرم در هکتار)، SP، قیمت فروش هر کیلوگرم محصول (تومان بر کیلوگرم) و WI، حجم آب مورد استفاده برای تولید P (متر مکعب در هکتار) است. این معیار برای ارزیابی عدم قطعیت نتایج بهینه الگوی کشت نسبت به تغییرات حجم آب دریافتی مورد استفاده قرار گرفته است.

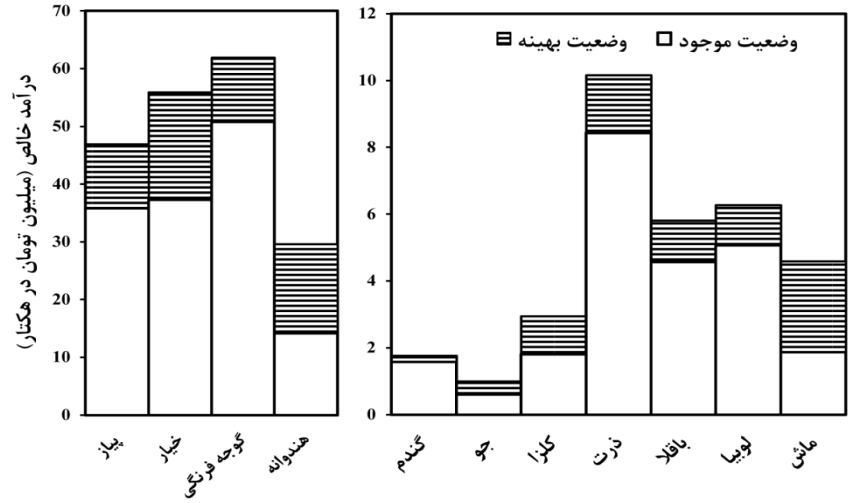
یافته‌ها و بحث

شکل (۴) نقش بارندگی در کل آب دریافتی هر گیاه از شبکه آبیاری را نشان می‌دهد. ستون سمت چپ ارتفاع آب آبیاری برای هر گیاه در طول فصل رشد و اعداد روی هر ستون درصد بارندگی نسبت به آب تأمین شده برای هر گیاه است. مطابق شکل، کلزا، گندم و جو به دلیل تطابق فصل رشد با فصل بارش بیشترین

دریافتی باران مؤثر را با بیش از ۳۰ درصد داشته‌اند. در اولویت-بندی آب مصرفی گیاه نقش بارندگی اولین و بخش اجتناب‌ناپذیر سیستم برنامه‌ریزی محسوب می‌شود (khashei *et al.*, 2018; *Lalehzari et al.*, 2016). کل آب دریافتی خیار، پیاز و گوجه فرنگی بالاتر از ۷۰۰ میلیمتر در یک فصل و نسبت به سایر محصولات الگوی کشت بالاترین مقادیر است. سهم زیاد این محصولات برای دریافت آب به دلیل عملکرد و قیمت فروش بالای آنها بوده است. در مطالعه *Saboohi and Alvanchi* (2008) سطح زیر کشت گندم و پیاز افزایش و گوجه فرنگی و جو از الگوی کشت حذف گردید. از طرفی در مطالعه *Khashei et al.* (2013) افزایش سطح زیرکشت گوجه فرنگی پیشنهاد شده است. مقایسه درآمد خالص در شرایط موجود و در حالت بهینه‌سازی شده در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۴. آب دریافتی هر گیاه (میلی‌متر) و درصد تأمین آب به صورت بارندگی (هاشورزده)

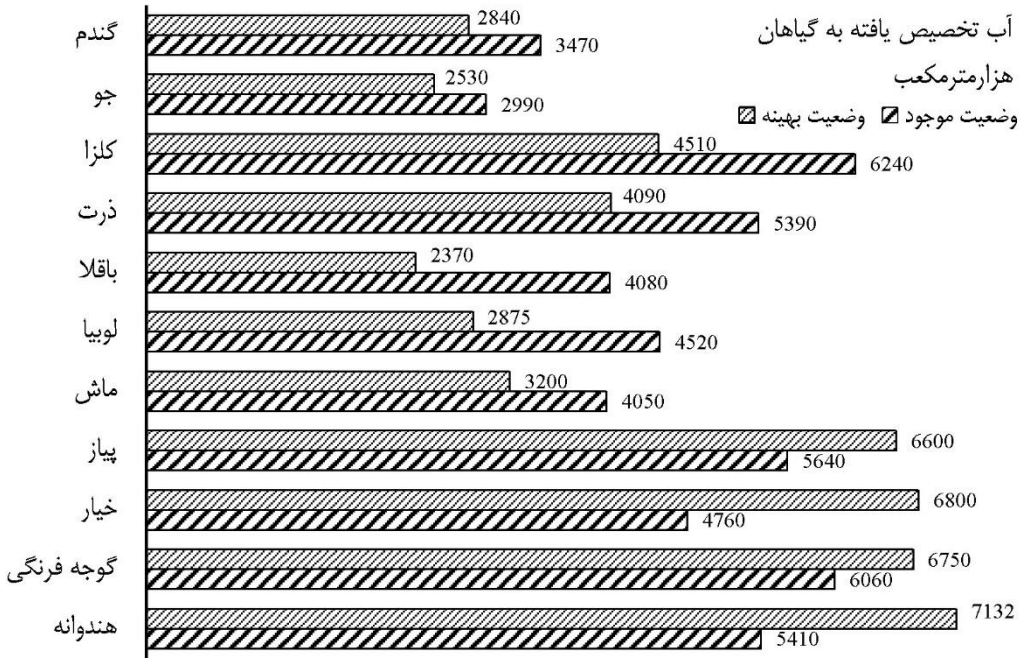


شکل۵. مقایسه درآمد خالص در شرایط موجود و وضعیت بهینه

بیشترین افزایش درآمد نسبت به حالت موجود در مورد محصول ماش اتفاق افتاده است که از محصولات عمده دشت مطالعه شده به‌حساب می‌آید. توزیع بهینه آب با توجه به نیاز واقعی محصول بدون توجه به برنامه و عمق ثابت ابیاری گذشته موجب افزایش درآمد این گیاه شده است. درآمد محصولاتی نظیر پیاز، خیار و گوجه فرنگی به طور متوسط حدود ۱۲ میلیون تومان در هکتار افزایش داشته است. در مطالعه مشابه نیز این محصولات بازده اقتصادی بالایی را در منطقه باغملک در استان خوزستان داشته‌اند (*Lalehzari et al.*, 2015). لازم به توضیح است که سطح زیرکشت این سه محصول نسبت به سایر محصولات اندک و به-صورت خرده در مساحت‌های چند صد متری بوده است، لذا میزان عملکرد و سود حاصل از آن به دلیل کنترل و برنامه‌ریزی دقیق‌تر

افزایش چشمگیری داشته است. هر چند که در شرایط خشکی نمی‌توان آن‌ها را در الگوی کشت پیشنهادی قرار داد و اولویت با گیاهان کم مصرف خواهد بود. نمودار سمت راست شکل محصولات عمده با درآمد پایدار که عمدتاً به صورت معیشتی نیز کشت می‌شوند را نشان می‌دهد. از این جهت شاید افزایش عملکرد آنها بیش از درآمد معادل آن اهمیت داشته باشد.

شکل (۶) حجم آب تخصیص یافته به هر هکتار از محصولات الگوی کشت را بر حسب متر مکعب نشان می‌دهد. حجم آب استفاده شده در سناریوی فعلی از متوسط آب دریافتی گیاهان مطابق با برنامه آبیاری موجود محاسبه شده است. مطابق شکل بیشترین آب دریافتی در شرایط کنونی متعلق به محصول کلزا با ۶۲۴۰ متر مکعب در هکتار برآورد شده است اما با توجه به شبیه‌سازی انجام شده این مقدار می‌تواند با بهره‌گیری از باران زمستانه به ۴۵۱۰ متر مکعب در هکتار با حفظ عملکرد سابق کاهش یابد. مطابق محصولات جالیزی مانند گوجه فرنگی، خیار، هندوانه و پیاز در شرایط بهینه نیاز به آب بیشتری برای افزایش شاخص‌های اقتصادی دارند که با توجه به فصل رشد آن‌ها تأمین آب مورد نیاز آن‌ها با مشکل مواجه خواهد بود (Montazar 2013). مجموع آب صرفه‌جویی شده نسبت به وضعیت موجود به همراه سود متناظر آن به تفکیک محصولات در جدول (۶) ارائه شده است. از این رو سالانه ۷۵۲۵ هزارمتر مکعب کاهش مصرف آب در شبکه آبیاری و پنج میلیارد و چهارصد و پنجاه میلیون تومان افزایش سود خالص کل الگوی دشت میاناب در پی استفاده از برنامه‌ریزی بهینه تخمین زده می‌شود.

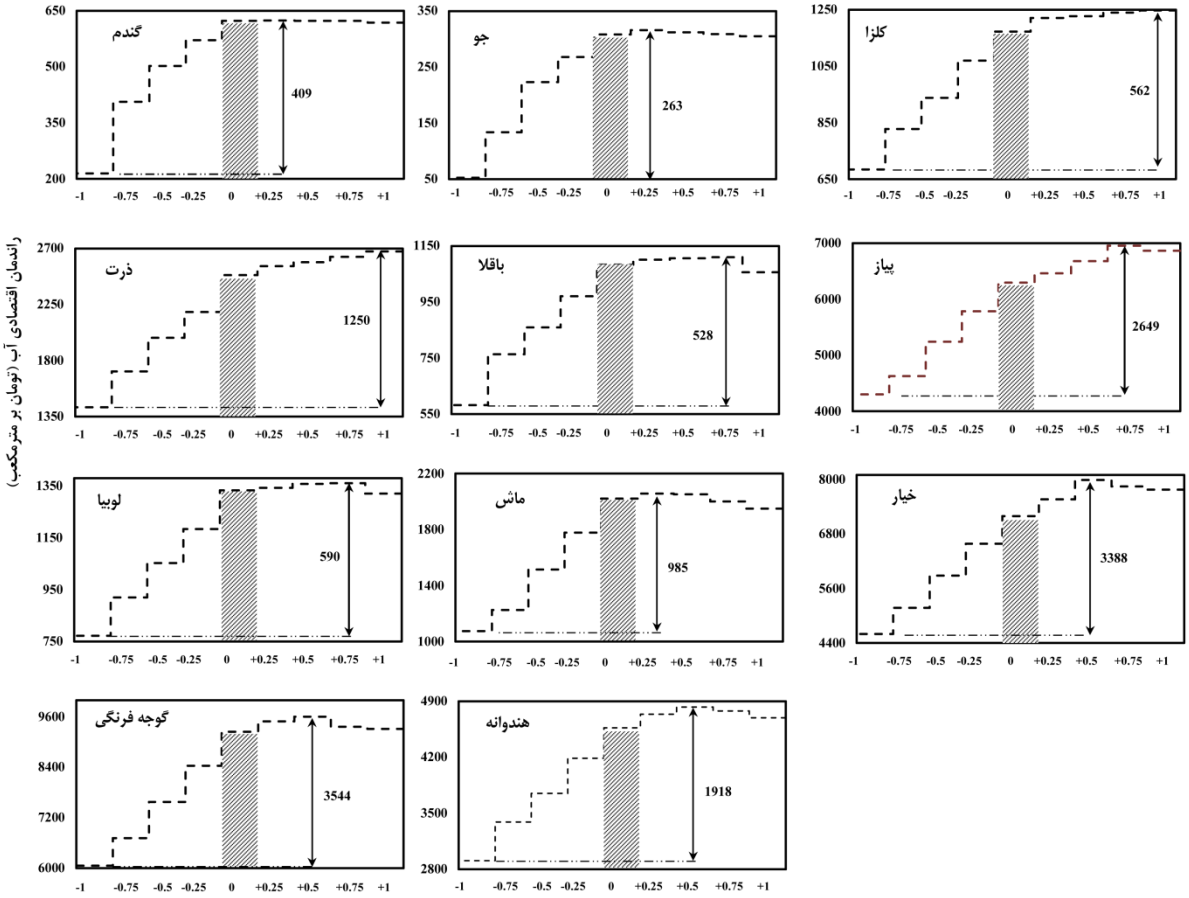


شکل ۶. مقایسه آب تخصیص یافته به محصولات در شرایط بهینه و موجود

جدول ۶. برآورد کاهش مصرف آب و افزایش درآمد خالص حاصل از کاربرد برنامه بهینه

هدف	گندم	جو	کلزا	ذرت	باقلا	لوبیا	ماش	پیاز	خیار	گوجه فرنگی	هندوانه	کل
کاهش مصرف آب (هزارمتر مکعب)	۴۸۷۳	۴۹	۴۵۰	۵۵۲	۳۵۱	۱۰۳۹	۳۰۲	-۱/۹	-۲	-۵/۵	-۸۲	۷۵۲۵
افزایش درآمد خالص (میلیون تومان)	۱۵۱۹	۴۲	۲۹۶	۷۳۷	۲۵۷	۷۵۹	۹۶۷	۲۲	۱۹	۸۹	۷۴۳	۵۴۵۰

عدم قطعیت در حجم آب دریافتی محصولات در ۹ نقطه تصمیم‌گیری فازی (۱، ۰/۷۵، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰، ۰/۲۵- ، ۰/۵- ، ۰/۷۵- و ۱-) و با محدوده ٪۲۵ از کل آب تخصیص یافته انجام گرفته است. استفاده از بهینه‌سازی در یافتن نقاط حدوی فضای تصمیم در مطالعات متعددی انجام شده است (Haghighi and Zahedi-Asl 2014; Moradi-Sabzkouhi and Haghighi, 2016). نتایج پاسخ مدل بهینه‌سازی در بخش تغییرات بهره‌وری اقتصادی آب، EW (تومان بر متر مکعب) در شکل (۷) ترسیم شده است.



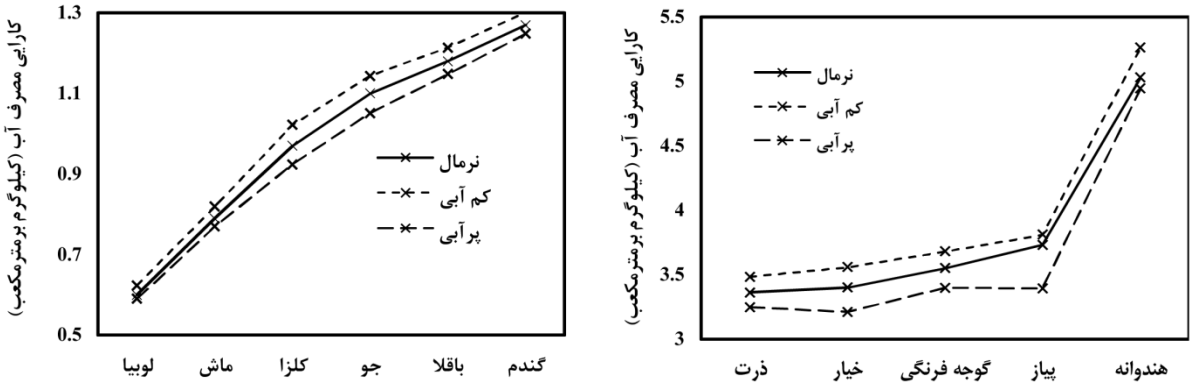
شکل ۷. نتایج پاسخ مدل فازی به تغییر در متغیر تصمیم‌گیری مسأله

این تحلیل مبنای دقیق تصمیم‌گیری، ارزیابی و پیش‌بینی تأثیر کم‌آبی و یا پرآبی بر نتایج برنامه‌ریزی از پیش تعیین شده است. بر این اساس محصولاتی از قبیل باقلا، لوبیا و ماش که بیشترین نیاز آبی خود را دریافت کرده‌اند پس از افزایش حجم آب و کاهش شیب عملکرد، بهره‌وری اقتصادی آب به تدریج کاهش خواهد یافت (*Zhang et al.*. 2008; *Solis et al.*, 2009). خیار و پیاز به واسطه تراکم کشت پایین‌تر (حداکثر سطح سایه انداز به ترتیب ۷۶ و ۷۸ درصد) و هندوانه به دلیل نیاز آبی بالا همچنان در دو سطح ۰/۲۵ و ۰/۵ بعد از میزان بهینه که به صورت ستونی نشان داده شده است با افزایش راندمان اقتصادی همراه بوده اند. بیشترین بهره‌وری اقتصادی آب در شرایط بهینه مربوط به گوجه فرنگی با ۸۴۳۷ تومان بر متر مکعب و کمترین آن مربوط به گیاه جو با حصول ۲۶۸ تومان به ازای هر متر مکعب آب دریافتی است. همانگونه که در شکل نشان داده شده است در صورت کاهش تخصیص آب به هر یک از محصولات الگوی کشت تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش تولید و سود خالص آن‌ها داشته است. درصد کاهش یا افزایش بهره‌وری اقتصادی آب نسبت به ۲۵ درصد تغییر در متغیر تصمیم مسأله در جدول (۷) آمده است. بیشترین کاهش برای جو با ۸۳ درصد در سطح فازی ۱- و بیشترین افزایش برای پیاز با ۱۱ درصد دز سطح فازی ۰/۵ برآورد شده است. جو به دلیل ارزش اقتصادی و عملکرد پایین‌تر نسبت به سایر محصولات کمترین میزان آب دریافتی را داشته و از این جهت نمی‌تواند در سناریوهای کاهش مصرف شرکت کرده و دچار افت عملکرد و بازده اقتصادی خواهد شد.

جدول ۷. حداکثر درصد کاهش یا افزایش بهره‌وری اقتصادی آب نسبت به سطح بهینه

پارامتر	گندم	جو	کلزا	ذرت	باقلا	لوبیا	ماش	پیاز	خیار	گوجه فرنگی	هندوانه
سطح فازی منفی	۱-	۱-	۱-	۱-	۱-	۱-	۱-	۱-	۱-	۱-	۱-
کاهش بهره‌وری(٪)	۶۵	۸۳	۴۲	۴۳	۴۶	۴۲	۴۷	۳۲	۳۶	۳۵	۳۶
سطح فازی مثبت	۰/۲۵	۰/۲۵	۱	۱	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۲۵	۰/۷۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
افزایش بهره‌وری (٪)	۰/۱۶	۲/۶	۶/۳	۷/۶	۲/۵	۲/۱	۱/۹	۱۰/۴	۱۱	۳/۸	۵/۶

شکل (۸) تغییرات پاسخ مدل را در شرایط فازی تعریف شده برای نسبت محصول به‌دست آمده از تخصیص هر متر مکعب آب را نشان می‌دهد که کارایی مصرف آب یا بهره‌وری آب نامیده می‌شود. بیشترین بهره‌وری آب با ۵/۱ کیلوگرم بر متر مکعب برای هندوانه و کمترین آن با ۰/۵۸ کیلوگرم بر متر مکعب برای لوبیا در شرایط بهینه به‌دست آمده است. بر اساس نتایج به دست آمده جو، کلزا، پیاز و خیار بیشترین حساسیت را به نوسانات آب داشته‌اند. در حالت کلی کارایی مصرف آب با افزایش حجم آب مصرفی کاهش خواهد یافت. از این جهت پیاز به دلیل کاهش شیب عملکرد بیشترین اختلاف را با شرایط بهینه دارد. گندم به دلیل برخورداری حدود ۳۰ درصدی از بارندگی و دریافت درصد بالایی از نیاز آبی، مقاومت مطلوبی در شرایط مختلف دارد.



شکل ۸. بهره‌وری آب در گیاهان مختلف الگوی کشت دشت میان‌آب

نتیجه‌گیری

حجم آب تخصیص‌یافته به هر محصول می‌تواند در اثر عوامل قابل کنترل مانند زمان و مدت آبیاری و غیر قابل کنترل مانند بارندگی افزایش یا کاهش یابد. از این رو آورد جریان یکی از منابع عدم قطعیت در برنامه‌ریزی تخصیص آب به شمار می‌رود. در الگوی تخصیص آب شبکه آبیاری میان‌آب نیز یافتن راهکاری که قادر به پیش‌بینی شرایط ناخواسته و غیرقطعی باشد می‌تواند ضریب اطمینان برنامه‌ریزی را افزایش دهد. نتایج نشان داد بارندگی در محصولات زمستانه سهمی بالاتر از سی درصد در تأمین آب مورد نیاز گیاهان داشته است. بنابراین با توجه به مقاومت تنش آبی به ویژه در مراحل پس از پوشش کامل و پیری سطح سایه‌انداز می‌توان با اعمال دو آبیاری تکمیلی عملکرد و بهره‌وری قابل توجهی را بدست آورد. بهره‌وری اقتصادی آب به عنوان یکی از اصلی‌ترین پارامترهای شایستگی برنامه آبیاری نشان می‌دهد کاهش آب دریافتی در بازه فازی تعریف شده تأثیر بیشتری نسبت به افزایش آن داشته است. با این وجود تغییرات بهره‌وری آب در این بازه ناچیز و در بیشترین حالت کمتر از ۱۰ درصد است. توجه به سایر منابع عدم قطعیت از قبیل شرایط جوی و بازاری از مواردی است که می‌تواند در مطالعات مشابه مورد توجه قرار گیرد.

سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت‌های مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد جامع شوشتر در قالب طرح پژوهشی با شماره اینترنتی ۲۰۴۹۶۱۱۱۷۰۰۰۵ انجام گرفته است که بدین وسیله بر خود لازم می دانم، کمال تشکر و قدردانی خود را اعلام نمایم.

REFERENCES

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, no 56. Rome, Italy.

Anwar, A.A. and Haq, Z.U. (2012). Genetic algorithms for the sequential irrigation scheduling problem. Irrigation Science. DOI 10.1007/s00271-012-0364-y.

Asadpour, H. Khalilian, S and Paekani, G.R. (2004). Theory and application of fuzzy Armani linner programming model in Cropping Pattern optimization. Agricultural Economic and Development. 338-307. (In Farsi)

Azarafza, H. Rezaei, H. Behmanesh, J. and Besharat S. (2012) Results Comparison of Employing PSO, GA and SA Algorithms in Optimizing Reservoir Operation (Case Study: Shaharchai Dam, Urmia, Iran). Journal of Water and Soil, 26(5), 1101-1108. (In Farsi)

Babazadeh, H. Eftekhar, Sh. and Sedghi, H. (2011). Irrigation Scheduling optimization with using of Genetic alghorithm(Case Study: Ghazvin plain). Journal of Water Research in Agriculture, 25(2):183-194. (In Farsi)

Dandy, G.C., Engelhardt, (2001). The optimal scheduling of water main replacement using genetic algorithm. Journal of Water Resource Planning and Management. ASCE, 127(4): 214-

223.
Doorenbos, J. and Kassam, A.H. (1979). Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage paper No. 33, FAO, Rome, Italy, p. 193.
FAO. (1992). CROPWAT, a Computer Program for Irrigation Planning and Management by M. Smith. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 26. Rome.
FAO. (2012). Crop yield response to water by P. Steduto, T.C. Hsiao, E. Fereres, and D. Raes. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66. Rome.
Ghadami, S. M. Ghahraman, B. M. Sharifi, B. and Rajabi Mashhadi, H.(2009). Optimization of Multireservoir Water Resources Systems Operation Using Genetic Algorithm. Journal of Iran-Water Resources Research,5(2):1-15. (In Farsi)
Goldberg, D.E. (1989). Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Addison-Wesley, Reading, Mass. Pp: 399.
Gurav, J.B. and Regulwar, D.G. (2012). Multi objective sustainable irrigation planning with decision parameters and decision variables fuzzy in nature. Water resource management. 26:3005-3021.
Haghighi, A., Zahedi-Asl, A. 2014. Uncertainty analysis of water supply networks using the fuzzy set theory and NSGA-II. Eng. App. Art. Int. 32, 270–282.
Heydari, N., Eslami, A., Ghadami, A., Kanoni, A., Asadi, M.E. and Khajehabdollahi, M.H. (2005). Determination and evaluation of agricultural water use efficiency (WUE) in Iran. International Agricultural Engineering Conference, Asian Institute of Technology (AIT), Bangkok, Thailand.
Janova, J. (2012). Crop planning optimization model: the validation and verification processes. Central European Journal of Operations Research. 20:451-462.
Khashei, A., Ghahraman, B. and Kouchakzadeh, M. 2013. Application of Allocation and Agricultural Water Management Using Particle Swarm Optimization (Case study: Neishabour Plain). Journal of Water and Soil. 27(2): 292-303. (In Farsi)
Khashei, A., Shahidi, A., pourrezabilondi,M., Amirabadizadeh, M. and Jafarzadeh A. (2018).Performance Assessment of ANN and SVR for downscaling of daily rainfall in dry regions.Iranian Journal of Soil and Water Research.49(4):781-793
Kirkpatrick, S., Gelatt C.D. and Vecchi M.P. (1982). Optimization by Simulated Annealing. Science. 220(4598): 671-680.
Kohansal, M. and Hamraz, S. S. (2008) Drought management in Agriculture with using of optimum Cropping Pattern based on Fuzzy logic(case study: Taibad plain).In: Proceedings of 1th International Congress on Water Crisis, 10-12 Mar., Zabol university, Iran, pp. 140-153. (In Farsi)
Lalehzari, R., Boroomand-Nasab, S., Moazed, H., and Haghighi, A. (2016). Multi-objective management of water allocation to sustainable irrigation planning and optimal cropping pattern. J. Irri. Drain. Eng. 142(1): 05015008.
Lalehzari, R., Moazed, H., Boroomand Nasab, S. and Haghighi, A. 2015. Development of Mathematical and Optimization Model for Agricultural Water Allocation Based on Non-dominated Sorting. Water and Soil Resources Conservation Journal. 5(1): 17-30. (In Farsi)
Lu, H.W., Huang, G.H. and He, L. (2010). Development of an interval-valued fuzzy linear programming method based on infinite α-cuts for water resources management. Environmental Modelling and Software. 25(3): 354-361.
Moghaddasi, M. Morid, S. and Araghinejad, S. (2008) Optimization of Water Allocation During Water Scarcity Condition Using Non-Linear Programming, Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization (Case Study). Journal of Iran-Water Resources Research, 4(3):1-13. (In Farsi)
Mohammadi, H. Bostani, F. and Kafil zadeh, F. (2013). Determination of optimum Cropping Pattern using of Fuzzy nonliner multiobjective optimization algorithm (Case Study). Journal of water and wastewater.4:43-55. (In Farsi)
Montazar, A. (2013). A decision tool for optimal irrigated crop planning and water resources sustainability. Journal of Global Optimization. 55:641–654.
Moradi-Sabzkouhi, A., Haghighi, A. (2016). Uncertainty Analysis is of pipe-network hydraulics using a many-objective particle swarm optimization. J. Hyd. Eng. 142(9), 04016030.
Mortazavi, A. Azdari, S. and Mousavi, S. H. (2012). Determination of optimum Cropping Pattern and marketing in uncertainty situation (case study: Arzan,Fars). Journal of Agriculture Economy,5(3):75-94. (In Farsi)
Nimah, M.N., Bsaibes, A., Alkahl, F., Darwish, M.R. and Bashour, I. (2003). Optimizing cropping pattern to maximize water productivity. Published in river Basinn Management. Pp: 187-197.
Raju, K.S. and Kumar, D.N. (2004). Irrigation planning using genetic algorithm. Water Resource Management. 18:163-176.
Ramezani, H., Liaghat, A., Parsinejad, M., Tavakoli,A.R. and Bozorg-Hadad, O.S. (2012). Development of an Optimization Model for Water Allocation in Irrigated and Rainfed Lands to increase Economical Productivity. Ph.D. Thesis. University of Tehran. Pp:170. (In Farsi)
Reddy, J.M., and Kumar, N.D. (2008). Evolving Strategies for Crop Planning and Operation of Irrigation Reservoir System using Multi-Objective Differential Evolution. Irrigation Science, 26(2): 177-190.
Regulwar, D.G. and Gurav, J.B. (2012). Sustainable irrigation planning with imprecise parameters under fuzzy environment. Water Resource Management. 26:3871–3892.
Saboohi, M. and Alvanchi, M. (2008). Application of Multi Objective and Compromise Programming to

Farm Planning: A Case Study of Mashhad plain. J. Agric. Sci. Natur. Resour.,15(3): 292-303. (In Farsi)

Singh, A. and Panda, S.N. (2012). Development and application of an optimization model for the maximization of net agricultural return. Agricultural Water Management. 115:267-275.

Singh, D.K., Jaiswal, C.S., Reddy, K.S., Singh, R.M., Bhandarkar, D.M. (2001). Optimal cropping pattern in a canal command area. Agricultural Water Management 50 (1): 1-8.

Solis, F.J., Gonzalez-Sanchez, A.G. and Larre, M. (2009). A new method for optimal cropping pattern. MICAI: Advances in Artificial Intelligence. 5845:566-577.

Steduto, P., T.C. Hsiao, D. Raes, and E. Fereres. (2009). AquaCrop—Th e FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. Agron. J. 101:426–437.

Tavakoli, A. R. Liaghat, A. and Alizadeh, A. (2014). Soil Water Balance, Sowing Date and Wheat Yield Using AquaCrop Mode under Rainfed and Limited Irrigation. Journal of Agricultural Engineering Research 14(4):41-56

Toyonaga, T., Itoh, T. (2005). A Crop Planning Problem with Fuzzy Random Profit Coefficients. Fuzzy Optimization and Decision Making, 4, 51–69.

Vedula, S., Mujumdar, P.P. and Sekhar, G.C. (2005). Conjunctive use modeling for multicrop irrigation. Agricultural Water Management. 73:193-221.

Wardlaw, R. and Bhaktikul, K. (2004). Application of genetic algorithms for irrigation water scheduling. Irrigation and Drainage. 53(4): 397-414.

Zhang, B., Yuan, S., Zhang, J.S. and Li, H. (2008). Study of Corn Optimization Irrigation Model by Genetic Algorithms. Computer and Computing Technologies in Agriculture. 258:121-132.