



## توسعه پایدار الگوی کشت بر پایه برنامه‌ریزی بهینه آبیاری در زمان واقعی (مطالعه موردی: دشت شوشتر)

صائب خوش نواز<sup>\*۱</sup>

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

\* نویسنده مسؤل مکاتبات: [Saeb.khosnavaz@gmail.com](mailto:Saeb.khosnavaz@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۱۱

### چکیده

اطلاعات به هنگام و تصمیم‌گیری در زمان نزدیک به واقعیت از عوامل مؤثر مدیریت آب در مزرعه است. از این رو در مطالعه حاضر یک سیستم پشتیبان تصمیم مبتنی بر زمان واقعی برای برنامه‌ریزی آبیاری تدوین شد. مدل توسعه یافته برای ۲۴ الگوی کشت زیرمجموعه کانال‌های شبکه آبیاری میاناب شهرستان شوشتر اجرا و ارزیابی گردید. برای مدل‌سازی در زمان واقعی داده‌هایی شامل بیلان آب در خاک، تولید محصول، رشد گیاه و ریشه، گام زمانی یک‌روزه با جایگزینی اعداد ورودی واقعی انجام شد. بدین منظور مدل AquaCrop و الگوریتم بهینه‌سازی مجموعه ذرات با هدف حداکثرسازی سود خالص برای یک سال زراعی بکار گرفته شدند. نتایج نشان داد بهترین راندمان اقتصادی آب برابر با ۹۲۵۰ تومان بر مترمکعب برای گوجه‌فرنگی به دست آمد. همچنین این محصول در برنامه بهینه با ۳۵ درصد کاهش آب مصرفی افزایش عملکرد بیش از ۳ تن در هکتار داشت. در حالت کلی دوره‌های بحرانی نیاز آبی برای گیاهان در حداقل بین حداکثر پوشش تا شروع پیری آن است. گیاهانی مانند گندم، جو و کلزا که پس از شروع دوره پیری با افت سطح سایه‌انداز مواجه می‌شوند سازگاری بیشتر با کم‌آبیاری دارند.

**کلید واژه‌ها:** الگوی کشت؛ بهره‌وری آب؛ توسعه پایدار؛ زمان واقعی

### مقدمه

بهره‌برداری و رشد جمعیت موجب شده است تا آب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده توسعه در بخش کشاورزی محسوب گردد (Sun et al., 2017). اهداف اقتصادی مانند بیشینه کردن سود از رایج‌ترین هدف‌هایی است که کارشناسان در این فرایند مدنظر قرار می‌دهند (Moolman et al., 2006). کشاورزان نیز الگوی کشتی که بازگشت مالی بیشتری را تضمین کند مورد حمایت قرار می‌دهند. از این رو، یکی از راهکارهای مناسب برای افزایش بهره‌وری در بخش کشاورزی،

پیش‌بینی می‌شود در آینده تغییرات اقلیمی و گرم شدن هوا موجب افزایش نیاز آبی گیاهان شده که بر محدودیت منابع آبی می‌افزاید (دهقان و همکاران، ۱۳۹۳؛ Shahnazari et al., 2004). اصلاح الگوی مصرف آب یکی از راهکارهای اصلی توزیع بهینه آب، نقش مهمی در اقتصاد کشورها و حفظ ذخایر آب شیرین دارد (Huang et al., 2004). در سال‌های اخیر بهره‌برداری غیر بهینه از منابع آب، خشک‌سالی، عدم رعایت اصول حفاظت در

آکواکراپ ترکیب و مطالعه شده است. این تحقیق که در مقیاس مزرعه‌ای با چهار گیاه پنبه، ذرت، سیب‌زمینی و آفتابگردان انجام شد ترکیب گیاهان و سناریوهای آبیاری برای شرایط مختلف ذخیره آب و سیاست‌های موردنظر در کشاورزی بررسی شده است (Vila and Fereres, 2012). در تحقیقی حداکثرسازی راندمان استفاده از آب دو محصول گندم و ذرت از شاخص کارایی مصرف آب و تابع عملکرد در تعیین الگوی کشت استفاده شده است. نتایج نشان داد در مناطقی با مصرف ۳۰۰ میلی‌متر آب، کارایی گندم حدود ۱/۵ کیلوگرم بر مترمکعب و مصرف ۶۰۰ میلی‌متر آب، کارایی ذرت در حدود ۱/۳ کیلوگرم بر مترمکعب بهینه بوده و دارای اولویت کشت هستند (دهقانی و نخجوانی، ۱۳۸۵). سیاست طراحی بهینه برای تعیین اینکه چه گیاهانی اعم از فصلی و یک‌ساله در الگوی کشت قرار می‌گیرند و چه مساحت و حجم آبی باید به آن‌ها اختصاص داده شود استوار است. متغیرهای تصمیم‌گیری در این گونه مسائل می‌تواند شامل سطح زیر کشت و آب مورد نیاز هر گیاه باشد (Haouari. and Azaiez, 2001).

تصمیم‌گیری برای تخصیص آب در کشاورزی بر پایه اطلاعاتی صورت می‌گیرد که در ابعاد زمانی و مکانی دچار تغییرات کنترل نشده می‌شوند. از جمله این پارامترها می‌توان به داده‌های اقلیمی، اقتصادی و حجم آب در دسترس اشاره کرد. پیش‌بینی واکنش محصول به این تغییرات در لحظه ایجاد تغییر می‌تواند دقت نتایج به دست آمده از مدلسازی را افزایش دهد. در مطالعات گذشته برای هر یک از داده‌های مذکور عمده‌تاً مقدار ثابت از ابتدا تا انتهای شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. با تکیه بر این مفهوم تحقیق حاضر به منظور تدوین یک برنامه بهینه برای افزایش درآمد خالص الگوی کشت در سال آبی ۹۷-۱۳۹۶ در شبکه آبیاری میان آب شوشتر برنامه‌ریزی شده است. این موضوع در دو بخش ۱. واسنجی مدل

اصلاح الگوی کشت محصولات با توجه به معیارهای اقتصادی و در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی و عوامل تولید است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۱).

با توجه به اینکه اثرات کمبود آب در میزان، مدت و زمان آبیاری متفاوت است، مدل‌سازی واکنش محصول به کمبود آب بسیار سخت و پیچیده است (Bradford and Hsiao, 1982). توابع تولید به‌طور گسترده در تجزیه و تحلیل‌های اقتصادی پاسخ عملکرد محصول به آب مورد استفاده قرار می‌گیرند (غفاری و همکاران، ۱۳۸۹؛ نوذری و همکاران، ۱۳۹۲). (Doorenbos and Kassam (1979). اولین روابط بین آب و عملکرد گیاه را ارائه کردند که نتیجه آن توسعه یک رابطه خطی بین نسبت آب دریافتی به حداکثر آب مورد نیاز و نسبت عملکرد واقعی محصول به حداکثر عملکرد ممکن بوده و بر پایه میزان حساسیت گیاهان در دوره‌های مختلف رشد به کمبود آب استوار است. سپس در سال ۲۰۰۹ مدل آکواکراپ<sup>۱</sup> با تکیه بر جزئیات روابط بین آب، خاک و گیاه معرفی گردید (Steduto et al., 2009; FAO, 2012). در این مدل به منظور محاسبه تعرق و تفکیک تبخیر از سطح خاک با تعرق، به جای استفاده از شاخص سطح برگ از پوشش تاجی که سطح زمین را می‌پوشاند استفاده می‌شود (رمضانی و همکاران، ۱۳۹۱).

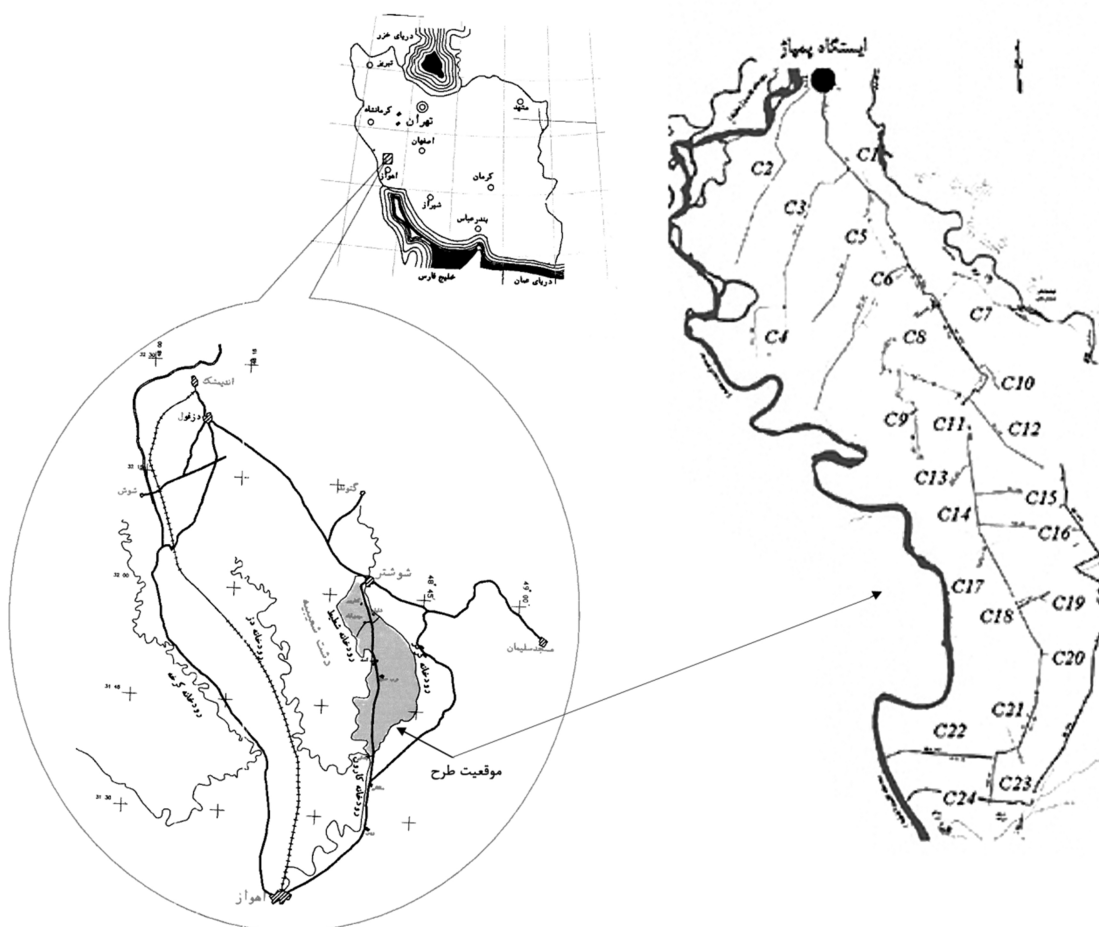
کاربرد این مدل برای انواع گیاهان توسط محققان مختلف مطالعه و تأیید شده است (Vila et al., 2009)؛ فراهانی و همکاران، ۲۰۰۹). نتایج ارزیابی آکواکراپ در مدیریت کم آبیاری گندم در منطقه کرج نشان داد که مدل در پیش‌بینی مقدار عملکرد دانه، تبخیر - تعرق و کارایی مصرف آب برای دور آبیاری ۷ روزه بیشتر از دور آبیاری ۱۴ روزه بوده است (توکلی و همکاران، ۱۳۹۰). در یک مطالعه مدل‌سازی اقتصادی با شبیه‌سازی گیاه توسط

رودخانه گرگر و از غرب به رودخانه شطیپ (منبع تأمین آب شبکه) محدود شده است (بی‌نام، ۱۳۸۰). یازده گیاه کشت شده در سال آبی ۹۷-۱۳۹۶ در این شبکه آبیاری از ۲۴ کانال آبیاری می‌شوند (شکل ۱) که در جدول ۱ الگوی کشت هر یک از آنها برای دوره زمانی مطالعه (سال آبی ۹۷-۱۳۹۶) بر اساس گزارش‌ها آورده شده است. همچنین دوره‌های زمانی کاشت و برداشت یازده محصول عمده این شبکه که بر اساس تهیه پرسشنامه به دست آمد در جدول ۲ خلاصه شده است. زمان کاشت و طول دوره رشد بایستی بر اساس مبدأ زمانی مدل (اول مهرماه ۱۳۹۶) معرفی گردد که در ستون‌های چهارم و هشتم جدول آمده است.

شبیه‌سازی شد محصولات توسط نرم‌افزار آکوکرپ برای واسنجی چهار تاریخ اصلی رشد گیاه شامل جوانه‌زنی، پوشش کامل، آغاز پیری تاج و زمان برداشت و ۲. بهینه‌سازی مدل شبیه‌سازی توسعه داده شده در قالب مدل بهینه‌سازی مجموعه ذرات در زمان واقعی برای دستیابی به بالاترین درآمد خالص به ازای بهبود برنامه آبیاری انجام گرفت.

### مواد و روش‌ها

دشت میان آب با وسعتی حدود ۳۶ هزار هکتار در شهرستان شوشتر استان خوزستان حدفاصل عرض جغرافیایی ۳۱°۳۹' تا ۳۲°۰۲' شمالی و طول جغرافیایی ۴۸°۴۶' تا ۴۹°۰۵' واقع شده است. این دشت از شمال به شهر شوشتر، از جنوب به تپه‌های عله، از شرق به



شکل ۱. موقعیت شبکه آبیاری دشت میان آب شوشتر

جدول ۱. سطح زیر کشت محصولات در شبکه آبیاری میان آب بر حسب هکتار در سال آبی ۹۷-۱۳۹۶\*

کمانال	گندم	جو	کلزا	ذرت	باقلا	لوبیا	ماش	پیاز	خیار	گوجه‌فرنگی	هندوانه	جمع
C1	۳۶۵	۰/۳	۰	۰	۳/۷	۰/۳	۱/۴۵	۰	۰	۱	۰	۴۳/۲۵
C2	۵۰۷	۲/۱	۳/۱	۴۷	۳۴	۱۹	۴۴/۵	۰	۰/۲	۱/۸	۰	۶۵۸/۸
C3	۱۹۵	۰	۰	۳۷	۱/۳	۰/۹	۳/۴	۰	۰	۰	۶	۲۴۷/۶
C4	۴۸۳	۰/۳	۳۵	۱۲۱	۳۲	۱۸	۱۷/۲	۰	۰/۴۵	۰	۰	۷۰۶/۹
C5	۵۵۹	۰/۶	۰	۱۷۹	۵۹	۱۹	۴۱	۰/۳	۰	۰/۶	۰	۸۵۸/۵
C6	۱۱۴	۱/۵	۰	۱	۲/۶	۴	۵/۷	۰	۰	۰	۰	۱۲۸/۸
C7	۱۳۹۹	۴۷	۴۲	۰	۰	۲۳۴	۵۱/۲	۰	۰/۳	۰	۱۸	۱۷۹۲/۳
C8	۶۸۸	۱/۵	۰	۵	۶۲	۱۳/۵	۴۲/۶	۱/۹	۰	۳/۸	۰	۸۱۸
C9	۱۸۶	۲/۱	۰	۰	۸/۳	۰	۴/۳	۰	۰	۱	۰	۲۰۱/۶
C10	۳۲۸	۱/۷	۷/۵	۱۸	۱/۸	۳	۱۰/۵	۰	۰	۰	۰	۳۷۰/۵
C11	۱۶۱	۰	۰	۷	۰	۲/۵	۵/۸	۰	۰	۰	۰	۱۷۵/۷
C12	۳۶۰	۱/۲	۴/۵	۴/۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۷۰/۷
C13	۳۰۸	۷/۱	۲۵	۶	۰	۶/۵	۱۵/۸	۰	۰	۰	۰	۳۶۸/۴
C14	۱۵۳	۴	۰	۰	۰/۵	۷۱	۰	۰	۰	۰	۰	۲۲۸/۴
C15	۱۷۳	۱/۷	۰	۰	۰	۲/۵	۲/۱	۰	۰	۰	۰	۱۷۹/۵
C16	۱۴۲	۰	۲/۳	۰	۰	۸	۵	۰	۰	۰	۰	۱۵۷
C17	۲۹۸	۳/۸	۹۴	۰	۰/۲	۳۵	۵/۵	۰	۰	۰	۰	۴۳۵/۷
C18	۲۶۱	۰/۵	۱۴	۰	۰	۵۲	۲۵/۳	۰	۰	۰	۰	۳۵۳/۶
C19	۳۴۰	۰	۲۲	۰	۰	۴/۵	۴/۶	۰	۰	۰	۰	۳۷۱
C20	۲۶۵	۳	۰	۰	۰	۴۸	۵۱/۲	۰	۰	۰	۰	۳۶۶/۷
C21	۲۴۵	۰	۹/۲	۰	۰/۴	۲۲	۱۵/۴	۰	۰	۰	۰	۲۹۲/۹
C22	۲۰۳	۱۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۱۹/۶
C23	۲۱۹	۹/۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۲۸/۶
C24	۱۱۲	۰/۲۵	۰	۰	۰	۶۹	۳/۳	۰	۰/۳۷	۰	۲۴	۲۰۹/۳
کل	۷۷۳۶	۱۰۵	۲۶۰	۴۲۵	۲۰۵	۶۳۲	۳۵۶	۲/۲	۱/۳	۸/۲۵	۴۸	۹۷۷۹

\* منبع: (بی‌نام ۱۳۸۰)

روزه برای سایر محصولات در نظر گرفته شده است محاسبه گردید (FAO, 1992). سپس شبیه‌سازی تولید هر یک محصولات توسط نرم‌افزار آکوکرپ و بهینه‌سازی تابع هدف بر پایه ترکیب مدل زمان واقعی برای افزایش دقت و صحت مدل (Azamathulla et al., 2008) و الگوریتم بهینه‌سازی مجموعه ذرات انجام شده است که با عنوان بهینه‌سازی مجموعه ذرات در زمان واقعی به آن اشاره خواهد شد. محدودیت‌های تعریف شده برای مسأله

مراحل اصلی تدوین مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی شبکه آبیاری مطابق با گام‌های ترسیم شده در فلوجارت شکل ۲ است. مطابق فلوجارت ارائه شده تبخیر- تعرق پتانسیل به روش فائو - پنمن - مانتیث و با استفاده از نرم‌افزار کراپ‌وات ۱ برای دوره‌های ۱۴ روزه که به‌عنوان دور آبیاری گیاهان گندم، جو، کلزا و ذرت و دوره‌های ۷

سال نهم / شماره ۳ / بهار ۹۹

I - CropWat

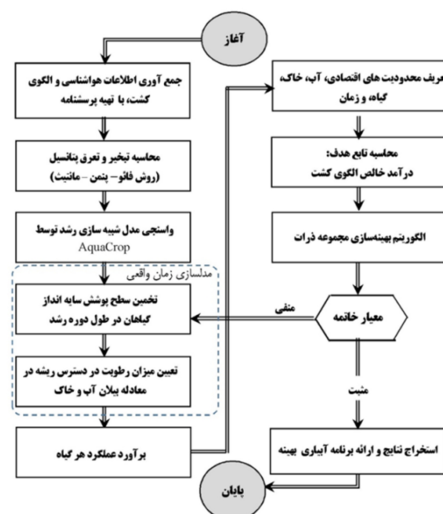
متناسب با هر دوره رشد برای هر گیاه است. این داده‌های در هر تکرار مدل بهینه‌سازی برای هر گام زمانی مدل شبیه‌سازی بر اساس شرایط آب و خاک آن روز برای هر گیاه جداگانه محاسبه و در محاسبه آب موردنیاز گیاه دخالت داده می‌شود. معیار خاتمه در فلوچارت شکل ۲ زمانی مثبت خواهد بود که در ۲۰ تکرار متوالی از اجرای مدل بهینه‌سازی، سطح درآمد خالص به دست آمده (تابع هدف) تغییر نداشته باشد.

شامل حداقل برگشت سرمایه در بخش اقتصادی، میزان آب در دسترس و تأثیر آن بر تنش‌های وارده به گیاه، بیلان آب در خاک و حفظ حداقل رطوبت خاک و محدودیت‌های زمانی برای رعایت دور آبیاری می‌باشند. با ساختار به دست آمده، مدل ترکیبی شبیه‌سازی - بهینه‌سازی به منظور تعیین مقادیر بهینه حجم آب تخصیص یافته به هر یک از محصولات در هر دور آبیاری صورت گرفت. داده‌های زمان واقعی شامل بارندگی، آب موجود در خاک، دمای هوا و تنش‌های عامل بر گیاه

جدول ۲. زمان‌بندی کاشت و برداشت محصولات کشاورزی در دشت میان آب\*

محصول	دوره کاشت		دوره برداشت		شماره روز کاشت	شماره روز برداشت
	ابتدا	انتهای	ابتدا	انتهای		
گندم	۷/۲۰	۹/۰۵	۲/۱۰	۳/۱۰	۳۵	۲۳۲
جو	۷/۲۰	۹/۰۵	۲/۱۰	۳/۱۰	۴۰	۲۳۵
کلزا	۷/۱۵	۹/۱۵	۲/۰۵	۳/۱۵	۴۵	۲۳۰
ذرت	۱/۰۵	۱/۱۵	۴/۲۵	۵/۳۰	۱۹۰	۳۲۲
باقلا	۱۲/۱۵	۱/۳۰	۳/۲۵	۵/۱۵	۱۸۵	۳۰۰
لوبیا	۱۲/۱۵	۱/۳۰	۳/۲۵	۵/۱۵	۱۸۵	۲۹۰
ماش	۱۲/۰۱	۱/۱۵	۳/۰۱	۴/۱۵	۱۷۰	۲۵۵
پیاز	۱۲/۱۰	۱۲/۲۵	۴/۰۱	۵/۱۵	۱۷۰	۲۹۰
خیار	۱۲/۲۰	۱/۳۰	۳/۳۰	۵/۳۰	۱۹۵	۳۰۵
گوجه‌فرنگی	۱۲/۲۵	۱/۱۵	۴/۲۰	۵/۳۰	۱۸۵	۳۱۰
هندوانه	۱/۳۰	۲/۱۵	۶/۰۱	۷/۱۵	۲۱۵	۳۵۰

\* منبع: یافته‌های تحقیق



شکل ۲. فلوچارت مراحل برنامه‌ریزی آبیاری

ناحیه ریشه از طریق بیلان آبی جریان آب ورودی (آبیاری و بارندگی) و خروجی (رواناب، نفوذ عمقی و تبخیر-تعرق) در ناحیه ریشه شبیه‌سازی شد. شدت ضرایب تنش آبی (Ks) مؤثر بر توسعه پوشش تاجی (CC)، هدایت روزنه‌ای تعرق (شدت تعرق در واحد CC)، پیری و کاهش پوشش تاجی و شاخص برداشت به‌وسیله کسر تخلیه آب در ناحیه ریشه تعیین می‌شود (Steduto et al., 2009).

دو گونه اطلاعات برای شبیه‌سازی رشد گیاه توسط مدل آکواکراپ نیاز است. بخش اول که مقادیر پارامترهای گیاهی ثابت هستند برای اکثر گیاهان زراعی به عنوان پیش فرض در مدل وجود داشته و 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 (Steduto et al., 2009) (جدول ۳). زمان‌بندی مراحل رشد هر گیاه نیز از اطلاعاتی است که بر اساس مشاهدات میدانی جمع‌آوری گردید و با زمان‌های مدل شبیه‌سازی از طریق سعی و خطا واسنجی شد که نتایج آن انطباق قابل قبولی با اطلاعات به دست آمده در جدول ۴ نشان داد.

در جدول ۴ مبدأ زمانی برای همه محصولات از زمان کاشت در نظر گرفته شده است. بخش واسنجی مدل شبیه‌سازی که ساختار اولیه مدلسازی را تشکیل می‌دهد توسط نرم افزار آکواکراپ تهیه شد. در فرایند بهینه‌سازی، تغییرات ایجاد شده در بیلان رطوبت خاک، تبخیر-تعرق و در نتیجه عملکرد نهایی که بایستی در زمان واقعی محاسبه شوند بر اساس دستورالعمل آکواکراپ توسط کد کامپیوتری توسعه یافته در نرم‌افزار متلب<sup>۱</sup> انجام گرفته

آکواکراپ مدل تکامل‌یافته روش تخمین تابع عملکرد در نشریه 33 FAO است که از طریق تفکیک سهم تولید یعنی تعرق از تبخیر-تعرق و میزان بیوماس تولیدی نظیر آن و به‌واسطه شاخص برداشت می‌تواند پارامترهایی از جمله مقادیر شاخص بهره‌وری آب و عملکرد محصول در گام زمانی روزانه را برآورد کند. از دیگر ویژگی‌های مدل آکواکراپ این است که به‌جای شاخص سطح برگ از پوشش سبز روی سطح زمین استفاده می‌کند. در این شاخص درجه-روز رشد اهمیت ویژه‌ای دارد و به‌جای کاهش نسبی عملکرد نسبت به میزان آب دریافتی از معیار بهره‌وری آب استفاده می‌کند (Steduto et al., 2009). AquaCrop تبخیر-تعرق (ET) را در دو بخش تعرق از سطح محصول (Tr) و تبخیر از سطح خاک (E) برای توسعه یک مدل ساده رشد تفکیک کرده است. تاج پوشش گیاهی به‌عنوان پارامتر پایه در برآورد بیوماس (B) و اضافه شدن شاخص برداشت (HI) به رابطه برای شبیه‌سازی عملکرد نهایی (Y) اساس محاسباتی این نرم‌افزار را تشکیل می‌دهد. علاوه بر این اثرات تنش آبی در چهار بخش جوانه‌زنی، حداکثر پوشش، شروع پیری سطح سایه‌انداز و بلوغ کامل برنامه‌ریزی شده است. حاصل ضرب نسبت تعرق روزانه (Tri) به تبخیر-تعرق پتانسیل روزانه ET<sub>oi</sub> در بهره‌وری آب نرمال شده به بیوماس تولیدی گیاه تبدیل می‌شود (Steduto et al., 2009):

$$B_i = WP^* \left( \frac{Tr_i}{ET_{o,i}} \right) \quad (1)$$

در این معادله WP بهره‌وری آب (بیوماس هر واحد تعرق تجمعی) بوده که مقدار آن در شرایط اقلیمی مشابه ثابت و برابر است (Tanner and Sinclair, 1983; Hanks, 1983). با نرمال کردن WP برای شرایط اقلیمی متفاوت مقدار آن به یک پارامتر ثابت تبدیل خواهد شد (Steduto et al., 2009). در تمام دوره رشد گیاه، مقدار آب ذخیره شده در

خود برآیند دو بردار بهترین موقعیت یک ذره که تاکنون به آن رسیده و بهترین موقعیت بهترین ذره در همسایگی آن است. در این الگوریتم هر کدام از اعضای مجموعه در هر تکرار یک راه‌حل را ارائه می‌دهد. مکان نامین ذره به وسیله یک بردار  $d$  بعدی موقعیت به نام  $xi=(xi1, xi2, \dots, xid)$  و سرعت هر ذره به وسیله یک بردار  $d$  بعدی سرعت به نام  $Vi=(vi1, vi2, \dots, vid)$  نشان داده می‌شود. در نهایت، جمعیت با استفاده از روابط زیر و به صورت هوشمند به سمت نقطه بهینه حرکت می‌کند (Shi. and Eberhart, 1998).

$$V_{id}^{n+1} = \omega V_{id}^n + c_1 r_1^n (P_{id}^n - x_{id}^n) + c_2 r_2^n (P_{pg}^n - x_{id}^n) \quad (2)$$

$$x_{id}^{n+1} = x_{id}^n + V_{id}^{n+1} \quad (3)$$

که در آن  $X$ ، فاکتور انقباض؛  $\omega$ ، وزن اینرسی،  $n$ ، شماره تکرارها؛  $c1$  و  $c2$ ، ضرایب اجتماعی و شناختی و  $r1$  و  $r2$  اعداد تصادفی در بازه  $[0, 1]$  با توزیع یکنواخت می‌باشد. انتخاب مقادیر مناسب برای  $c1$  و  $c2$  منجر به تسریع الگوریتم و جلوگیری از همگرایی زودرس در نقاط بهینه محلی می‌شود. تحقیقات نشان داده است که انتخاب ضریب شناختی بزرگ‌تر از ضریب اجتماعی با این شرط که باشد، نتایج بهتری به دست خواهد داد (Carlisl and Dozier, 2001). این روش در مسائل مرتبط با مدیریت آب و کشاورزی کاربرد زیادی داشته است (Liu et al., 2018; Lalehzari et al., 2016).

اطلاعات اصلی که در مدل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد، اطلاعات اقتصادی است که مهم‌ترین آن‌ها قیمت فروش هر کیلوگرم محصول (شکل ۳) و هزینه‌های تولید برای یک هکتار (شکل ۴) است. این اطلاعات از طریق تهیه پرسشنامه جمع‌آوری شده است. هزینه تولید محصولاتی مانند هندوانه، گوجه‌فرنگی، خیار و پیاز به دلیل نیاز بالای هزینه کارگری تا بیش از دو برابر متوسط هزینه سایر محصولات است. در بخش قیمت فروش، محصول نهایی ماش و لوبیا بالاترین ارزش را دارند. در

است. برای رسیدن به برنامه‌ریزی بهینه تخصیص آب روش‌های مختلف خطی و ریاضی مورد بررسی قرار گرفته است (Varade and Patel 2018). اما امروزه به دلیل پیچیدگی بالا و حجم محاسبات روش‌های هوشمند با توابع هدف، متغیرهای تصمیم و محدودیت‌های مختلف مورد توجه بوده‌اند. تابع هدف در مسائل کشاورزی می‌تواند دارای چندین نقطه بهینه موضعی و یک نقطه بهینه سراسری باشد که روش‌های کلاسیک به راحتی قادر به تفکیک آن‌ها و یافتن نقطه بهینه سراسری نمی‌باشند (Osama et al., 2017). 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 کارایی مناسبی نخواهند داشت. برای رفع این مشکل روش‌های محاسبات تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک، شبیه‌سازی سرد شدن فلزات و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>۱</sup> در برنامه‌ریزی آبیاری و الگوی کشت توسعه یافته‌اند (بابازاده و همکاران، ۱۳۹۰؛ آذرافزا و همکاران، ۱۳۹۱، مقدسی و همکاران، ۱۳۸۷).

(Kennedy and Eberhart, 1995) با الهام از رفتارهای اجتماعی گروه‌های دسته‌جمعی مثل پرندگان و ماهی‌ها الگوریتم مجموعه ذرات، PSO را پیشنهاد کردند. تفاوت اساسی PSO با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی این است که هر ذره علاوه بر داشتن بردار حرکت دارای یک بردار سرعت نیز می‌باشد که اعضای مجموعه را به تغییر موقعیت در فضای جستجو وادار می‌کند. این بردار سرعت

بین محصولات دشت میان آب هندوانه بالاترین عملکرد و بالاترین قیمت فروش را داشته‌اند. و کمترین قیمت فروش و بالعکس ماش کمترین عملکرد

جدول ۳. ضرایب گیاهی مورد استفاده در مدل شبیه‌سازی

محصول	پوشش اولیه	درصد حداکثر پوشش	ضریب رشد پوشش	ضریب کاهش پوشش	بهره‌وری آب نرمال شده گرم بر مترمربع
گندم	۳ درصد	۸۶ درصد	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

جدول ۴. زمان‌بندی رشد محصولات بر اساس تعداد روز از زمان کاشت

محصول	جوانه‌زنی روز	حداکثر پوشش روز	حداکثر ریشه روز	گل‌دهی روز	پیرشدگی روز	برداشت روز
گندم	۱۷	۱۳۹	۹۳	۱۵۵	۱۵۸	۱۹۷
جو	۱۷	۱۲۵	۸۷	۱۵۰	۱۶۰	۱۹۵
کلزا	۱۵	۹۲	۸۵	۱۳۰	۱۴۰	۱۸۵
ذرت	۷	۳۷	۸۰	۶۰	۱۲۵	۱۳۲
باقلا	۱۵	۴۵	۷۵	۵۰	۸۲	۱۱۵
لوبیا	۵	۳۵	۷۵	۵۰	۷۲	۱۰۵
ماش	۱۱	۴۱	۶۲	۴۵	۶۵	۸۵
پیاز	۱۲	۴۶	۶۰	۸۰	۹۶	۱۲۰
خیار	۸	۴۵	۵۰	۵۶	۷۸	۱۱۰
گوجه فرنگی	۴	۶۳	۵۵	۵۴	۹۸	۱۲۵
هندوانه	۱۲	۲۶	۸۵	۸۰	۷۲	۱۴۵



متغیرهای تصمیم بر پایه توابع ذیل در طول فرایند بهینه‌سازی مقید می‌شود:

$$\sum_{p=1}^P A_{pc} \leq A_c \quad c=1, \dots, 24$$

$$\sum_{p=1}^P SW_{pc} \leq SW_c \quad c=1, \dots, 24$$

$$\sum_{c=1}^{24} SW_c \leq SW_T$$

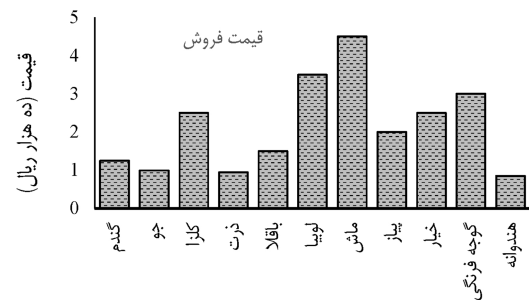
$$ST_i \leq SW_i \leq SM_i \quad i = 1, \dots, NI$$

$$S_i = S_{i-1} - E_i - Tr_i - D_i + R_i - O_i \quad i = 1, \dots, NI$$

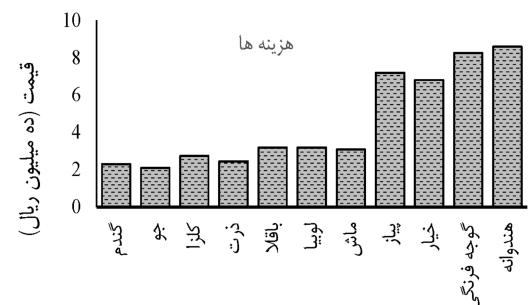
در این روابط SWc و SWT به ترتیب حجم آب قابل برنامه‌ریزی کل شبکه و کانال c، ذخیره رطوبتی خاک، E تبخیر، D نفوذ عمقی، R بارندگی و O رواناب برای گام زمانی i هستند. علاوه بر این‌ها حجم آب دریافتی گیاه بایستی کمتر از کل نیاز رطوبتی خاک SM و بیشتر از حداقل نیاز آستانه تنش گیاه ST باشد.

### نتایج و بحث

اولین گام برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان تخمین سطح سایه‌انداز محصولات در هر الگوی کشت است. محاسبات سطح سایه‌انداز در زمان واقعی در هر تکرار مدل شبیه‌سازی می‌گردد. متوسط سطح پوشش سایه‌انداز محصولات برای هر یک از گیاهان در جدول ۴ نشان داده شده است. در حالت کلی پس از کاشت بذر یا نشاء تا رسیدن به ۹۰ درصد جوانه‌زنی مرحله اول رشد به شمار می‌رود که میزان تبخیر بیشترین مقدار است. پس‌از آن تا کامل شدن تاج پوشش به تدریج نقش تبخیر کاهش و تعرق افزایش خواهد یافت و پس‌از آن تا رسیدن به مرحله آغاز پیری سطح سایه‌انداز گیاه، تعرق پدیده غالب بوده و گیاه نیازمند بیشترین آبیاری است. در نهایت تا رسیدن به مرحله برداشت با توجه به نوع محصول که در ادامه بحث خواهد شد نیاز به آبیاری متغیر است. مطابق جدول ۵ بیشترین سطح سایه‌انداز در کل الگوی



شکل ۳. قیمت فروش هر کیلوگرم محصول



شکل ۴. مجموع هزینه‌های زمین، کاشت، داشت و برداشت

طبق تعریف بهینه‌سازی تغییر دادن ورودی‌ها و خصوصیات یک دستگاه، فرایند ریاضی و یا آزمایش تجربی است، به نحوی که بهترین خروجی یا نتیجه حاصل گردد. ورودی‌ها متغیرهای فرآیند یا تابع مورد بررسی هستند که تابع هدف، تابع هزینه و یا تابع برازندگی نامیده می‌شود. خروجی نیز به صورت هزینه، سود و یا برازندگی تعریف می‌شود. تابع هدف حداکثرسازی درآمد خالص الگوی کشت برای هر کانال c در نظر گرفته شده است که برابر است با:

$$F = \max(\sum_{c=1}^C \sum_{p=1}^P (I_{pc}A_{pc} - C_{pc}A_{pc}) \quad (4)$$

که در آن I درآمد ناخالص هر گیاه در واحد سطح شامل فروش محصول اصلی و در صورت وجود محصولات فرعی، C هزینه تولید گیاه در واحد سطح، A سطح زیرکشت محصول، p شماره گیاه از ۱ تا ۱۱ و c شماره کانال از ۱ تا ۲۴ است. متغیر تصمیم در این مسئله میزان آب تخصیص یافته به هر رویداد آبیاری برای هر گیاه و به تفکیک کانال‌های مختلف است. تابع هدف و

هکتار افزایش یابد. برنامه آبیاری بهینه گوجه‌فرنگی برای افزایش سود و بهره‌وری در شکل ۵ ارائه شده است. مطابق شکل در شرایط موجود هفده مرحله آبیاری با میانگین ۵۰ میلی‌متر و مجموعاً ۸۵۰ میلی‌متر انجام می‌گیرد که نتیجه آن حدود ۲۰ تن در هکتار محصول بوده است. ولی در شرایط بهینه با توزیع نشان داده شده در شکل و لحاظ نمودن اثر بارندگی عملکرد محصول به بیش از ۲۳ تن در هکتار افزایش یافته است. کمترین افزایش سود برای گندم با حدود دویست هزار تومان در هکتار به دست آمده است. شکل ۶ برنامه بهینه آبیاری گندم را نشان می‌دهد. مطابق این برنامه در دو ماه پایانی رشد به فاصله هر چهارده روز یک آبیاری به عمق ۲۵ تا ۵۰ میلی‌متر مورد نیاز است. در برخی مناطق این آبیاری به دو مرحله به‌عنوان آبیاری تکمیلی محصول دیم خلاصه می‌گردد.

کشت به گندم، جو، کلزا و ذرت تعلق دارد و پیری تاج پوشش در آن‌ها نیز به‌وضوح مشهود است.

در جدول ۶ پارامترهای ارزیابی الگوی کشت شامل میزان عملکرد، بهره‌وری آب، کارایی زمین و کارایی مصرف آب را برای گیاهان مختلف در شرایط بهینه و وضعیت موجود مقایسه شده است. همان‌گونه که در جدول آمده است بهترین راندمان اقتصادی آب در شرایط فعلی و بهینه متعلق به محصول گوجه‌فرنگی با ۵۹۷۴ و ۹۲۵۰ تومان بر مترمکعب می‌باشد. این در حالی است که بیشترین جهش در افزایش کارایی بهینه نسبت به شرایط موجود در مورد محصول ماش با بیش از سه برابر افزایش محاسبه شده است. در مقابل خیار کمترین تفاوت را در این خصوص داشته است. نتایج نشان می‌دهد در صورت استفاده از یک برنامه‌ریزی بهینه در توزیع آب بین روزهای مختلف از فصل رشد، سود خالص برای محصولات با بازدهی بالا مثل گوجه‌فرنگی (اکبری و همکاران، ۱۳۹۲) می‌تواند حدود ۱۰ میلیون تومان در

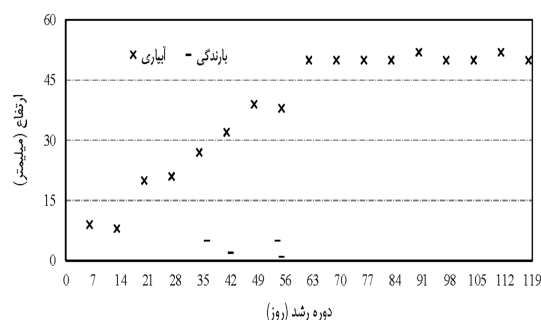
جدول ۵. متوسط سطح پوشش سایه‌انداز گیاهان مختلف در ماه‌های مختلف سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶

زمان	گندم	جو	کلزا	ذرت	باقلا	لوبیا	ماش	پیاز	خیار	گوجه	هندوانه
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
آبان	۱/۶	۰/۶	۰/۴								
آذر	۲۲	۱۰	۱۸								
دی	۷۳	۶۲	۶۸								
بهمن	۸۵	۸۲	۷۷								
اسفند	۹۶	۹۳	۸۸	۰/۷	۲/۱						
فروردین	۹۴	۹۱	۸۵	۱۹	۲/۳	۲۱	۴۹	۶۲	۳/۶	۲۳	
اردیبهشت	۸۹	۸۸	۷۳	۸۴	۶۳	۷۰	۷۲	۷۰	۶۹	۷۸	۳۰
خرداد				۸۵	۷۰	۶۹	۶۳	۷۹	۸۵	۸۶	۷۵
تیر				۸۸	۶۶	۶۵	۶۵	۷۴	۸۰	۸۴	۸۹
مرداد				۸۵						۷۶	۸۱
شهریور											۶۳

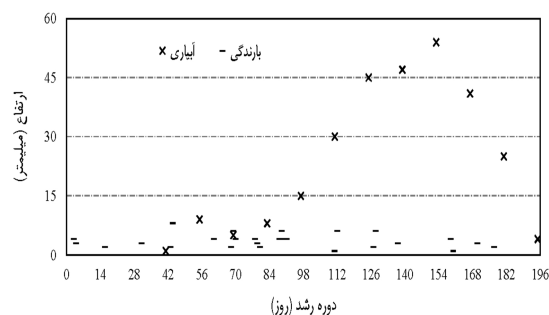
جدول ۶. ارزیابی الگوی کشت فعلی و بهینه بر اساس شاخص‌های بهره‌وری آب و زمین

شاخص	کارایی اقتصادی آب		کارایی اقتصادی زمین		بهره‌وری آب		عملکرد	
	تومان بر مترمکعب	میلیون تومان بر هکتار	کیلوگرم بر مترمکعب	تن بر هکتار	موجود	بهینه	موجود	بهینه
گندم	۳۱۵	۱/۵۸	۰/۷	۱/۷۷	۳/۵	۱/۲۷	۳/۶۲	۳/۶۲
جو	۱۲۰	۰/۶	۰/۶۴	۱	۳/۲	۱/۱	۳/۵۶	۳/۵۶
کلزا	۴۰۲	۱/۸۱	۰/۴۴	۲/۹۵	۲	۰/۹۷	۲/۴۴	۲/۴۴
ذرت	۹۹۲	۸/۴۳	۱/۴۱	۱۰/۱۶	۱۲	۳/۳۶	۱۳/۷	۱۳/۷
باقلا	۶۵۱	۴/۵۶	۰/۷۹	۵/۸	۵/۵	۱/۱۸	۶/۳	۶/۳
لوبیا	۷۸۰	۵/۰۷	۰/۳۸	۶/۲۷	۲/۵	۰/۶	۲/۸۳	۲/۸۳
ماش	۴۶۸	۲/۸۷	۰/۳	۴/۵۹	۱/۲	۰/۷۹	۱/۸	۱/۸
پیاز	۳۲۵۳	۳۵/۷۸	۲	۴۴/۰۸	۲۲	۳/۷۳	۲۶/۱	۲۶/۱
خیار	۴۶۵۵	۳۷/۲۴	۲/۲۵	۴۲/۳۳	۱۸	۳/۴	۲۰/۰۲	۲۰/۰۲
گوجه‌فرنگی	۵۹۷۴	۵۰/۷۸	۲/۳۵	۶۰/۰۵	۲۰	۳/۵۵	۲۳/۰۸	۲۳/۰۸
هندوانه	۲۱۸۰	۲۳/۹۸	۲/۵۵	۲۹/۷۲	۲۸	۵/۰۳	۳۲/۷	۳۲/۷

مقایسه بین الگوهای کشت در کانال‌های مختلف نشان از ویژگی‌های مدل آکواکراپ جداسازی آب هدررفته به‌وسیله تبخیر از تعرق گیاه است که موجب رشد محصول می‌شود. جدول ۷ میزان آب تبخیر شده از سطح خاک و تعرق به‌وسیله گیاه را نشان می‌دهد. کمترین تلفات تبخیر در گیاه ذرت به‌واسطه سطح پوشش سایه‌انداز و زمان رسیدن به حداکثر پوشش برآورد شده است. نسبت تبخیر به تعرق نیز در گندم، جو و کلزا به‌واسطه طولانی بودن دوره رشد اولیه و در ماش به دلیل کم بودن سطح سایه‌انداز بیشترین مقادیر است. ذکر این نکته ضروری است که بخش زیادی از تبخیر در محصولات زمستانه از بارندگی بوده و تلفات به شمار نمی‌رود. شکل‌های ۷ و ۸ برنامه آبیاری بهینه محصولات جو و کلزا را نشان می‌دهد.

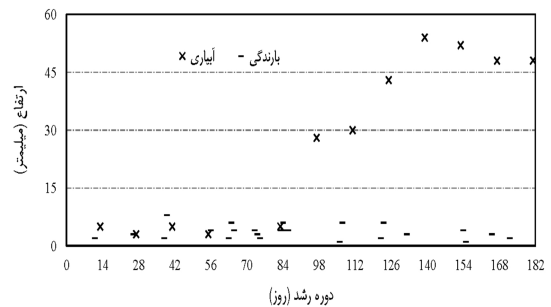


شکل ۵. برنامه بهینه آبیاری گوجه‌فرنگی

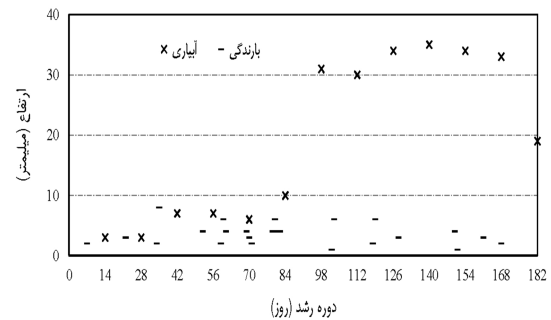


شکل ۶. برنامه بهینه آبیاری گندم

می‌دهد آب تخصیص یافته در همه کانال‌ها در حالت بهینه کمتر از وضعیت موجود است و درآمد خالص آن بیشتر است (شکل‌های ۹ و ۱۰). هر چه تنوع و سطح زیر کشت محصولات در اراضی تحت کشت هر کانال بیشتر باشد اختلاف بین آب مصرفی و درآمد نیز افزایش خواهد یافت. کانال‌های C11 و C7 نمونه این مسئله هستند. درآمد خالص در کانال‌هایی که محصولات جالیزی مانند خیار، گوجه‌فرنگی، پیاز و هندوانه را در الگوی کشت خود دارند (C3، C7، C8، C24) سطح درآمد بهینه در آن‌ها افزایش بیشتری را نشان می‌دهد. از این جهت بهینه‌سازی می‌تواند بهترین راهکار برای گیاهان پرمصرف باشد. برنامه بهینه آبیاری سه محصول پیاز، خیار و هندوانه در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ ترسیم شده است.



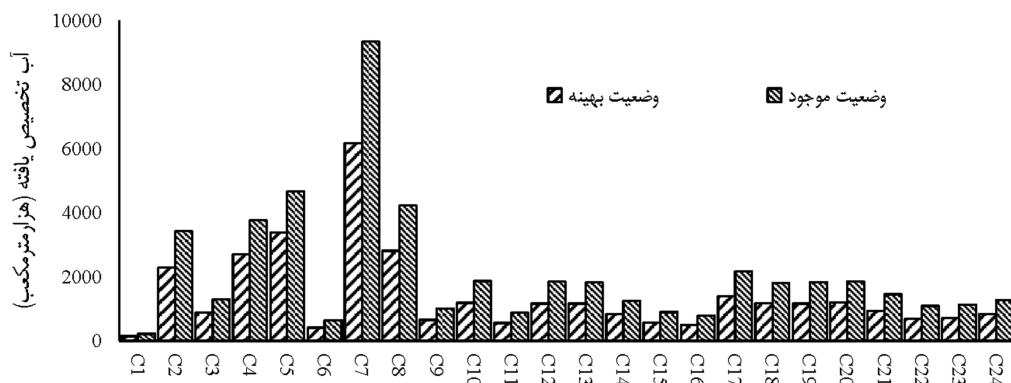
شکل ۷. برنامه بهینه آبیاری جو



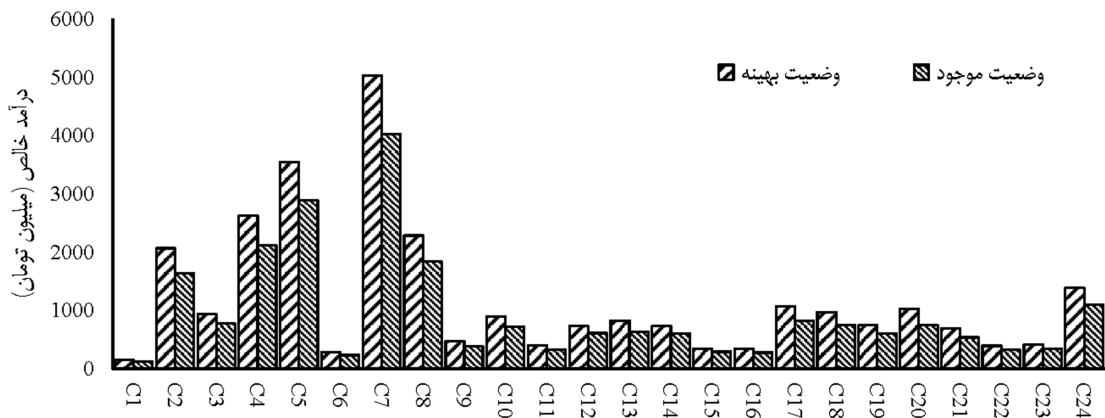
شکل ۸. برنامه بهینه آبیاری کلزا

جدول ۷. تفکیک میزان تبخیر از سطح خاک و تعرق گیاهی

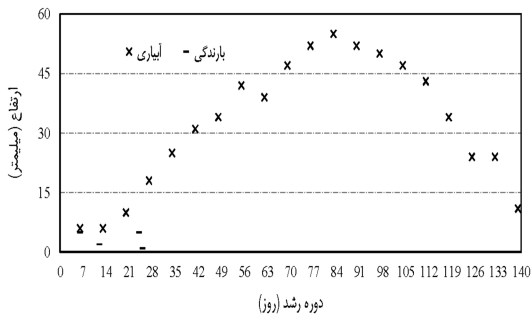
محصولات	تعرق (میلی متر)	تبخیر (میلی متر)	نسبت تبخیر به تعرق-تبخیر (درصد)	محصولات	تعرق (میلی متر)	تبخیر (میلی متر)	نسبت تبخیر به تعرق-تبخیر (درصد)
گندم	۴۲۹	۱۳/۹	۳/۱۴	ماش	۲۵۳	۱۵/۹	۵/۹
جو	۴۱۴	۱۹/۷	۴/۵۴	پیاز	۶۹۴	۱۸/۴	۲/۵۸
کلزا	۳۴۲	۱۵/۵	۴/۳۳	خیار	۵۳۶	۱۶/۲	۲/۹۳
ذرت	۴۷۸	۶/۳	۱/۳	گوجه‌فرنگی	۶۷۷	۱۶/۶	۲/۳۹
باقلا	۵۸۴	۲۱/۹	۳/۶۲	هندوانه	۶۳۲	۱۴/۶	۲/۲۶
لوبیا	۵۳۵	۱۹/۶	۳/۵۴				



شکل ۹. مقایسه آب تخصیص یافته از کانال‌های زیرمجموعه شبکه آبیاری میان آب

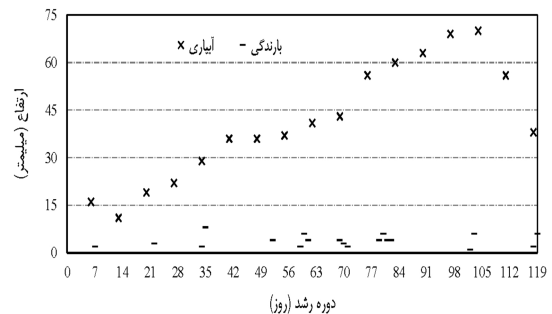


شکل ۱۰. مقایسه درآمد خالص کانال‌های زیرمجموعه شبکه آبیاری میان آب

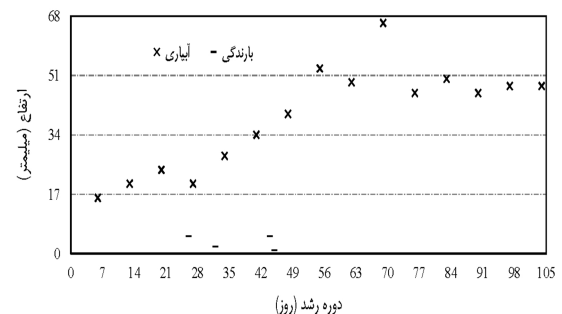


شکل ۱۳. برنامه‌ریزی بهینه آبیاری محصول هندوانه

الگوی آبیاری بهینه محصول هندوانه پس از تکمیل جوانه‌زنی به مرور افزایش و بعد از رسیدن به مرحله پیری سطح سایه‌انداز به تدریج افت می‌کند. در شرایط فعلی آبیاری هندوانه به صورت ثابت با ارتفاع ثابت حدود ۵۵ میلی‌متر انجام می‌شود و با احتساب شرایط بهینه بیش از چهل درصد در مصرف آب صرفه‌جویی خواهد شد.



شکل ۱۱. برنامه‌ریزی بهینه آبیاری محصول پیاز



شکل ۱۲. برنامه‌ریزی بهینه آبیاری محصول خیار

جدول ۸ حجم آب تخصیص یافته از هر کانال زیرمجموعه شبکه را به همراه کارایی اقتصادی و بهره‌وری آن نشان می‌دهد. با توجه به یکنواختی توزیع بهره‌وری در کانال‌های مختلف می‌توان تأثیر مثبت آن‌ها را در افزایش درآمد خالص کل شبکه استنتاج نمود. در مطالعه وردی نژاد و همکاران (۱۳۸۹) سود خالص الگوی کشت حوضه آبریز زاینده‌رود در الگوی بهینه نسبت به الگوی موجود، حدود ۴۱/۶ درصد و بهره‌وری آب در کل شبکه، ۱۰۸/۴ درصد افزایش نشان داد. در این تحقیق بهره‌وری کل الگوی کشت به میزان ۸۱ درصد و سود خالص ۲۴ درصد نسبت به وضع موجود افزایش داشته است.

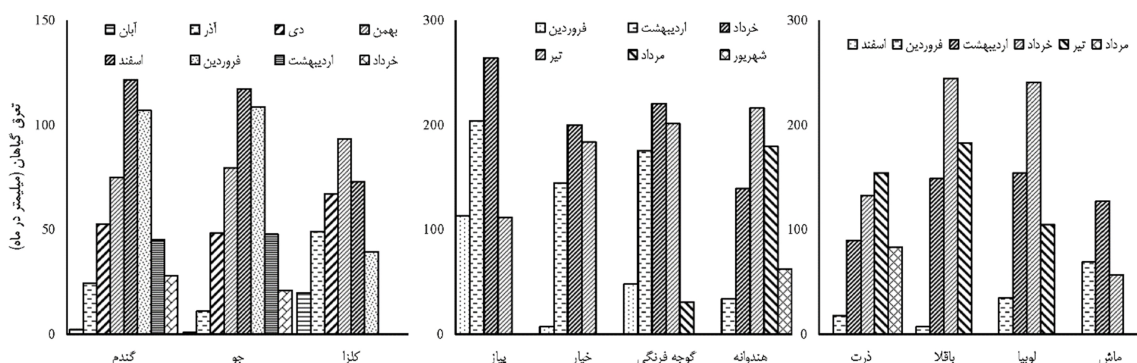
مهم‌ترین محدودیت اعمال شده به مسئله مربوط به قید حداکثر برداشت مجاز از شبکه در ماه‌های بحرانی و کم آب در طول فصل رشد است که بایستی برنامه‌ریزی آبیاری به گونه‌ای باشد که تنش آبی حاصل از نقطه پیک

نسبتاً زیاد بوده و لذا باید مقدار دقیق تعرق و نیاز آبیاری آن‌ها در این دوره‌ها مورد توجه قرار گیرد. شکل‌های ۱۵ تا ۱۸ به ترتیب برنامه بهینه آبیاری ذرت، باقلا، لوبیا و ماش را نشان می‌دهد. مطابق شکل حداکثر نیاز همه محصولات در شروع مرحله رسیدگی است.

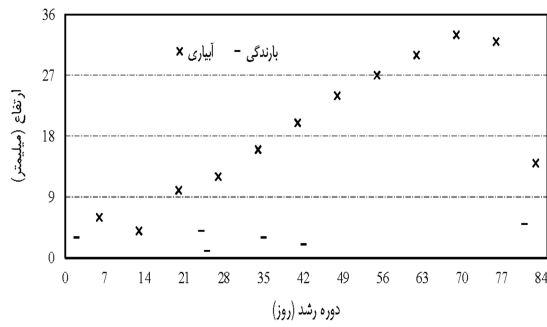
مصرف موجب کاهش عملکرد گیاهان نشود. از این رو شکل ۱۴ میزان تعرق هر گیاه با توجه به کلیه محدودیت‌های اعمال شده را به ازای ماه‌هایی که در دوره رشد آن‌ها قرار دارند نشان می‌دهد. با توجه به انتخاب زمان کاشت هر محصول نقطه پیک مصرف ماهانه شبکه آبیاری در خردادماه قرار دارد. تفاوت ماه پرمصرف در محصولاتی مانند ماش، لوبیا و باقلا با سایر ماه‌های رشد

جدول ۸. ارزیابی الگوهای کشت زیرمجموعه شبکه آبیاری میان آب

آب تخصیص یافته			کارایی اقتصادی آب بهره‌وری آب	آب تخصیص یافته			کارایی اقتصادی آب بهره‌وری آب
کانال	مترمکعب در هکتار	تومان بر مترمکعب	کانال	مترمکعب در هکتار	تومان بر مترمکعب	کانال	مترمکعب در هکتار
C1	۳۲۲۲	۵۸۳	C13	۳۱۷۲	۵۸۸	C1	۳۲۲۲
C2	۳۲۵۰	۵۷۳	C14	۳۱۸۳	۵۸۷	C2	۳۲۵۰
C3	۳۳۱۸	۵۶۰	C15	۳۱۵۰	۵۹۲	C3	۳۳۱۸
C4	۳۴۳۵	۵۴۱	C16	۳۱۴۸	۵۹۱	C4	۳۴۳۵
C5	۳۵۲۴	۵۲۷	C17	۳۲۰۵	۵۸۲	C5	۳۵۲۴
C6	۳۱۷۵	۵۸۷	C18	۳۱۷۹	۵۸۵	C6	۳۱۷۵
C7	۳۱۹۲	۵۸۴	C19	۳۱۵۹	۵۸۹	C7	۳۱۹۲
C8	۳۲۱۸	۵۷۹	C20	۳۱۷۷	۵۸۶	C8	۳۲۱۸
C9	۳۱۶۷	۵۸۸	C21	۳۱۶۳	۵۹۰	C9	۳۱۶۷
C10	۳۱۶۲	۵۸۹	C22	۳۱۳۳	۵۹۵	C10	۳۱۶۲
C11	۳۱۴۹	۵۹۱	C23	۳۱۲۸	۵۹۵	C11	۳۱۴۹
C12	۳۱۴۴	۵۹۳	C24	۳۱۹۶	۵۸۴	C12	۳۱۴۴

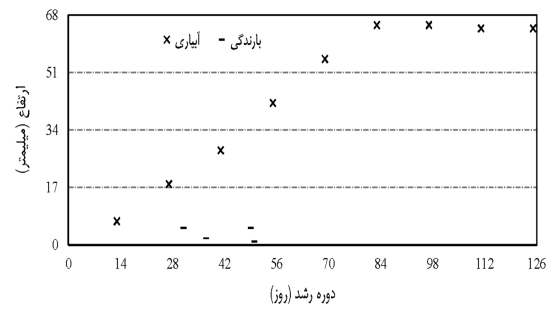


شکل ۱۴. آب موردنیاز گیاهان در ماه‌های مختلف سال

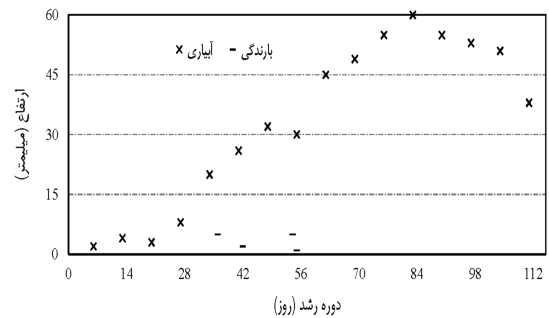


شکل ۱۸. برنامه‌ریزی بهینه آبیاری محصول ماش

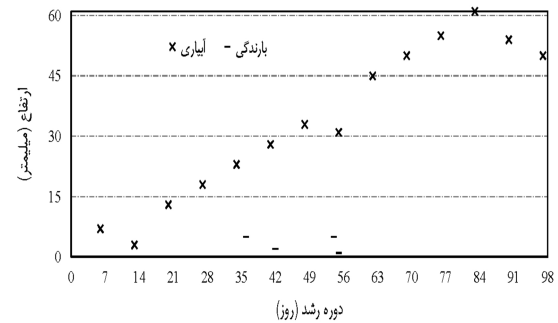
برای تحقیق در خصوص برآورد حساسیت عملکرد محصولات در برابر تنش یا افزایش آب دریافتی نسبت به شرایط بهینه، حجم آب تخصیص یافته در محدوده ۲۵ درصد مقدار بهینه متغیر در نظر گرفته شد و مدل شبیه‌سازی مجدداً برای کل محصولات اجرا گردید. درصد تغییرات عملکرد نهایی محصولات در این شرایط در شکل ۱۹ با یکدیگر مقایسه شده است. بیشترین افزایش محصول با تغییر محدودیت آب به گیاه ماش با ۵ درصد و کمترین آن به محصول جو با ۰/۸ درصد تعلق دارد. علاوه بر این، جو نسبت به تنش آبی یکسان اعمال شده بیشترین مقاومت را داشته و کمتر از ۷ درصد کاهش عملکرد را نشان می‌دهد. لوبیا و هندوانه بیشترین تأثیر را از کم‌آبی پذیرفته و در خصوص تأمین حجم آب برنامه‌ریزی شده آنان باید دقت نمود.



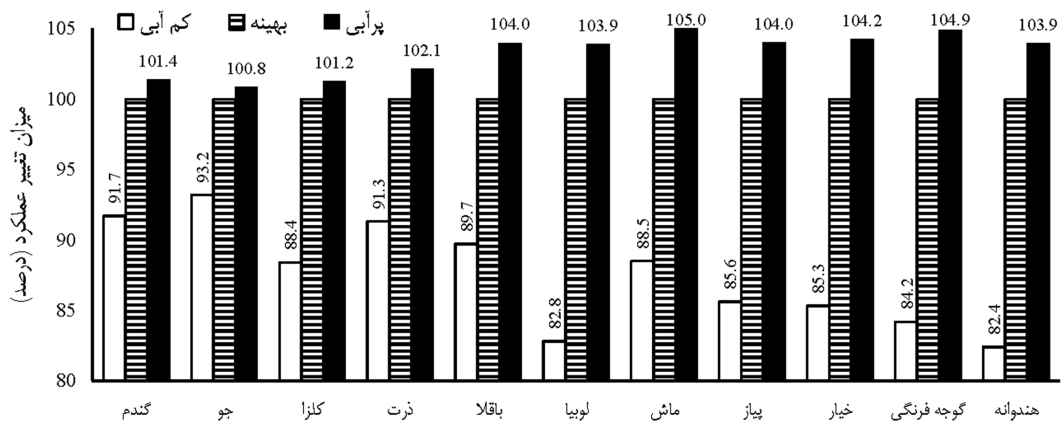
شکل ۱۵. برنامه‌ریزی بهینه آبیاری محصول ذرت



شکل ۱۶. برنامه‌ریزی بهینه آبیاری محصول باقلا



شکل ۱۷. برنامه‌ریزی بهینه آبیاری محصول لوبیا



شکل ۱۹. برآورد حساسیت عملکرد محصولات به کاهش یا افزایش آب دریافتی

## نتیجه‌گیری

افزایش داده و تا ۴۰ درصد تخصیص آب که بیشتر صرف مؤلفه تبخیر در معادله بیلان آب خاک می‌گردد را کاهش دهد. نتایج آنالیز حساسیت عملکرد محصولات به حجم آب دریافتی نشان داد که دریافت آب به میزان بیشتر از نیاز واقعی یا فراتر از حد بهینه موجب افزایش ۳ درصدی محصول اما کم آبیاری تا سقف ۲۵ درصد به‌طور متوسط ۱۵ درصد از عملکرد بهینه را کاهش خواهد داد. توجه به عدم قطعیت در دبی ورودی شبکه آبیاری و کانال‌ها و مدیریت زمان در تخصیص آب به منظور فراهم نمودن آب موردنیاز گیاهان در زمان‌های بحرانی می‌تواند جهت تکمیل اهداف تحقیق پیش‌رو موردتوجه قرار گیرد.

## سیاسگذاری:

نتایج به دست آمده از این پژوهش، با حمایت‌های مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شوشتر در قالب طرح پژوهشی با شماره اینترنتی ۲۰۴۹۶۱۱۱۷۰۰۰۵ انجام گرفته است که بدینوسیله کمال تشکر و قدردانی خود را اعلام می‌دارم.

برنامه‌ریزی آبیاری و تخصیص منابع آب با استفاده از آمار درازمدت نیاز آبی گیاهان و میانگین‌گیری رخدادهای هیدرولوژی مانند بارندگی، دمای هوا و رطوبت نمی‌تواند نتایج قابل‌اتکایی را برای اجرا در سطح مزرعه و دستیابی به عملکرد و درآمد مورد انتظار داشته باشد. بنابراین استفاده از گام زمانی کوچک و بهره‌گیری از اطلاعات گام قبل مدل‌سازی بهترین راهکار دقت بخشیدن به نتایج تحقیق است که از آن به‌عنوان مدل‌سازی در زمان واقعی نام برده می‌شود. محاسبه میزان آب در دسترس گیاه و تبخیر - تعرق در زمان واقعی تأثیر مهمی در دقت برنامه‌ریزی الگوهای زراعی دارد. در تحقیق حاضر برنامه‌ریزی آبیاری بر پایه مدل زمان واقعی و بهینه‌سازی ازدحام ذرات در شبکه آبیاری میان آب شوشتر انجام شده است. نتایج مدل‌سازی در قالب یاد شده نشان داد سود خالص محصولات پربازده جالیزی بین ۵ تا ۱۰ میلیون تومان در اثر تغییر آبیاری به برنامه بهینه افزایش یافته است. این برنامه می‌تواند تا ۸۰ درصد بهره‌وری آب را

## فهرست منابع

- آذرفرا، ه.، رضایی، ح.، بهمنش، ج. و بشارت، س. ۱۳۹۱. مقایسه نتایج بکارگیری الگوریتم‌های GA، PSO و SA در بهینه‌سازی سیستم‌های تک مخزنه (مطالعه موردی: سد شهرچای، ارومیه). نشریه آب و خاک. ۲۶(۵): ۱۱۰۱-۱۱۰۸.
- اکبری، د.، عزیزی، ع.ا. و رضایی سوخت‌آبدانی، ر. ۱۳۹۲. بررسی رابطه میزان مصرف آب و عملکرد گوجه‌فرنگی در استان مازندران. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۲۷(۴): ۵۰۳-۵۱۲.
- بابازاده، ح.، افتخار، ش. و صدقی، ح. ۱۳۹۰. بهینه‌سازی برنامه‌ریزی آبیاری با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مطالعه موردی: دشت قزوین. مجله پژوهش آب در کشاورزی. ۲۵(۲): ۱۸۳-۱۹۴.
- بی‌نام. ۱۳۸۰. بازنگری مطالعات مرحله اول آبیاری و زهکشی اراضی دشت میاناب-شوشتر. سازمان آب و برق خوزستان. ۱۸۶ ص.
- توکلی، ع.ر.، لیاقت، ع.م. و مهدوی مقدم، م. ۱۳۹۰. الگوی تخصیص آب در شرایط بکارگیری توأمان مدیریت برتر زراعی و تک آبیاری در زراعت دیم. مجله پژوهش آب در کشاورزی. ۲۵(۲): ۹۳-۱۰۶.
- دهقان، ز.، کوچک‌زاده، م. و علیخانی، م. ۱۳۹۳. آسیب‌پذیری شبکه‌های آبیاری تحت شرایط تغییر اقلیم با بهینه‌نمودن سطح زیرکشت در شرایط محدودیت منابع آبی و ارائه راه‌کارهای تطبیق. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۳(۱): ۲۳-۴۳.
- رمضانی اعتدالی، ه.، لیاقت، ع.، پارس‌نژاد، م.، توکلی، ع.ر. و بزرگ‌حداد، ا. ۱۳۹۱. توسعه مدل تخصیص بهینه آب در اراضی آبی و دیم جهت افزایش بهره‌وری اقتصادی. رساله دکتری آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران. ۱۷۰ ص.



- غفاری، ا.، منتظر، ع.ا. و رحیمی جمنانی، ع. ۱۳۸۹. توسعه و ارزیابی مدل تعیین الگوی کشت بهینه شبکه‌های آبیاری با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی (مطالعه موردی: شبکه آبیاری دشت ورامین). نشریه آب و خاک. ۲۴(۶): ۱۱۱۹-۱۱۲۸.
- محمدی، ح.، بوستانی، ف. و کفیل‌زاده، ف. ۱۳۹۱. تعیین الگوی کشت بهینه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه غیرخطی فازی: مطالعه موردی. آب و فاضلاب. ۴: ۴۳-۵۵.
- مقدسی، م.، مرید، س. و عراقی‌نژاد، ش. ۱۳۸۷. بهینه‌سازی تخصیص آب در شرایط کم‌آبی با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی غیرخطی، هوش جمعی و الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی). تحقیقات منابع آب ایران. ۴(۳): ۱-۱۳.
- نوذری، ح.، حیدری، م. و آزادی، س. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی عملکرد محصولات زراعی در مدیریت‌های مختلف آبیاری با روش تحلیل پویایی سیستم. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۲۷(۴): ۱۳۹۲.
- Azamathulla, H.M., Wu, F.C., Ghani, A.A., Narulkar, S.M., Zakaria, N.A. and Chang, C.K. 2008. Comparison between genetic algorithm and linear programming approach for real time operation. *Journal of Hydro-environment Research*. 2:172-181.
- Bradford, K. J. and Hsiao, T. C. 1982. Stomatal behavior and water relations of waterlogged tomato plants. *Plant physiol*. 70: 1508-1513
- 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.
- Hanks JR (1983) Yield and water-use relationships: an overview. In: Taylor HM, Jordan WA, Sinclair TR (eds) Limitations to efficient water use in crop production. ASA, Madison, pp 393-411
- Haouari, M. and Azaiez, M.N. 2001. Optimal cropping patterns under water deficits. *European Journal of Operational Research*. 130:133-146.
- Huang, M., Gallichand, J., and Zhang, L. 2004. Water-yield relationships and optimal water management for winter wheat in the Loess Plateau of China. *Irrig. Sci*. 23: 47-54.
- Kennedy, J. and Eberhart, R. 1995. Particle Swarm Optimization. *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*. 4: 1942-1948.
- Lalehzari, R., Boroomand-Nasab, S., Moazed, H., Haghghi, A. 2016. Multi-objective management of water allocation to sustainable irrigation planning and optimal cropping pattern. *J. Irri. Drain. Eng*. 142(1), 05015008.
- Liu, D., Li, G., Fu, Q., Li, M., Liu, C., Faiz, M.A., Khan, M.I., Li, T., Cui, S. 2018. Application of particle swarm optimization and extreme learning machine forecasting models for regional groundwater depth using nonlinear prediction models as preprocessor. *J. Hydrol. Eng*. 23(12), 04018052.
- Moolman, C., Lignaut, J. and Eyden, R. 2006. Modeling the marginal revenue of water in selected agriculture commodities. *Agricultural Economics*. 45(1): 132-149.
- Osama, S., Elkholy, M., Kansoh, R.M. 2017. Optimization of the cropping pattern in Egypt. *Alexandria Engineering Journal*. 56(4), 557-566.
- Shahnazari, A., Jensen, C.R., Jacobsen, S.E., Liu, F., Andersen. M.N. 2004. Partial root zone drying for water saving. Published online in public domain of The Royal Veterinary and Agricultural University, Højbakkegaard Allé 9, DK-2630 Taastrup, Denmark.
- Shi, Y. and Eberhart, R. 1998. Parameter selection in particle swarm optimization, In: Porto VW, Saravanan N, Waagen D and Eiben AE (eds) *Evolutionary Programming VII*, pp. 611-616.
- Steduto, P., T.C. Hsiao, D. Raes, and E. Fereres. 2009. AquaCrop - FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agron. J*. 101:426-437.
- Sun, Q., Xu G., Ma, C., Chen, L. 2017. Optimal crop-planting area considering the agricultural drought degree. *J. Irri. Drain. Eng*. 143(12), 04017050.
- Tanner CB, Sinclair TR (1983) Efficient water use in crop production: research or re-search? In: Taylor HM, Jordan WA, Sinclair TR (eds) *Limitations to efficient water use in crop production*. ASA, Madison, pp 1-27
- Varade, S., Patel, J.N. 2018. Determination of optimum cropping pattern using advanced optimization algorithms. *J. Hydrol. Eng*. 23(6), 05018010.
- Vila, M. J., Fereres E., Mateos L., Orgaz F. and Steduto P. 2009. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. *Agronomy Journal*. 101: 477-487.
- Vila, M.J. and Fereres, E. 2012. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *European Journal of Agronomy*. 36:21-31.



## Sustainable development of cropping pattern based on optimal irrigation scheduling in real time (Case study: Shoushtar plain)

Saeb khoshnavaz<sup>\*1</sup>

1) Department of Water Sciences Engineering, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran  
\*Corresponding author email: Saeb.khoshnavaz@gmail.com

Received :02-07-2019      Accepted: 17-02-2020

### Abstract

On-time information and real time decision-making are effective factors in the process of water management in the farm. Therefore, in the present study, a real-time decision support system has been developed for the irrigation scheme of Mian-Ab irrigation network in Shoushtar plain with 24 sub-sets of cropping pattern and results are compared with existing pattern. To increase the accuracy of modeling, including soil water balance, crop production and root growth, a one-day time step is considered by replacing real-time data. For this purpose, the Particle Swarm Optimization Algorithm (PSOA) is used to maximize the net benefit of a growing season. The results showed that the optimal economic efficiency of water was obtained for tomato by 92500 IRR/m<sup>3</sup>. Its yield production also has increased more than 3000 kg/ha in an optimal strategy with a 35 percent reduction in water consumption. Furthermore, critical periods of crop water requirement was between the maximum canopy cover and the start of senescence. Crops like wheat, barley, and rapeseed which their canopy coverage decrease after senescence stage, are more compatible with deficit irrigation.

**Keywords:** Sustainable development, Cropping pattern, Real-time, Water productivity