مقایسه مدل‌های شبیه‌سازی- بهینه‌یابی بهره‌وری آب با دوره تناوب ثابت و متغیر آبیاری برنج رقم هاشمی در رشت

محبوبه آقاجانی، مریم نوابیان[۱] *، مجید وظیفه دوست و مجتبی رضایی

دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان ، **mahbob88_aghajani@yahoo.com**

استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان ، **Navabian@guilan.ac.ir**

استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان ، **majid.vazifedoust@gmail.com**

عضو هیات علمی موسسه تحقیقات برنج کشور ، **mrezaeii@yahoo.com**

چکیده

در سال‌های اخیر، تشدید خشکسالی موجب کاهش آبدهی رورخانه سفیدرود به عنوان منبع اصلی تامین آب اراضی شالیزاری در استان گیلان شده است. در چنین شرایطی، تولید برنج به رویکرد بهینه‌سازی مصرف آب در اراضی شالیزاری وابسته است. در این پژوهش، تلاش شد با هدف حداکثرسازی بهره‌وری آب مصرفی در اراضی شالیزاری، دو مدل بهینه‌یابی مدیریت آبیاری تناوبی با دوره آبیاری ثابت در طول فصل رشد و دوره آبیاری متناسب با فیزیولوژی مراحل مختلف رشد برنج رقم هاشمی، با راهکار تلفیق مدل شبیه‌ساز SWAP و روش حل الگوریتم ژنتیک ارائه شود. پس از اعتبارسنجی مدل SWAP، با استفاده از روش حل الگوریتم ژنتیک به تعیین مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم مدل‌های بهینه‌یابی اقدام شد. در مدل‌های بهینه‌یابی، آبیاری تناوبی برنج، عمق آب و دوره تناوب آبیاری در مراحل مختلف رشد به عنوان متغیرهای تصمیم انتخاب شدند. در مدیریت آبیاری تناوبی با دوره تناوب ثابت، دوره تناوب ثابت ۷/۳۳ روز در طول فصل رشد، حداکثر بهره‌وری آب آبیاری را در بر داشت. این در حالی است که مقادیر بهینه دوره تناوب متغیر ۶/۵۳، ۴/۶۰، ۴/۳۱ و ۷/۴۷ روز به ترتیب در مراحل استقرار، پنجه‌زنی، زایشی و رسیدگی بدست آمد. در نهایت پس از بررسی مدل‌های بهینه‌یابی، به دلیل صرفه‌جویی در مصرف آب، سهولت اندازه‌گیری حجم آب ورودی، الگوی آبیاری با دوره تناوب ثابت هشت روز و عمق آب آبیاری به ترتیب ۵۲، ۳۰، ۴۰ و ۱۲ میلی‌متر در مراحل یاد شده بهینه تشخیص داده شد. بهترین نمایه بهره‌وری آب آبیاری به میزان ۱/۵۹ کیلوگرم در مترمکعب به دست آمد. استفاده از داده‌های چند ساله برای افزایش اعتبار نتایج مدل شبیه‌سازی- بهینه‌یابی توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، مدلSWAP، مراحل توسعه‌یافتگی، مدیریت آبیاری تناوبی

مقدمه

برنج به عنوان مهم‌ترین غله گرمسیری نقش مهمی در تغذیه مردم جهان دارد. از آن‌جا که آب یکی از نهاده‌های اصلی کشت برنج است، روند کاهشی منابع آب در سال‌های اخیر و مصرف بی‌رویه‌ی آن در اراضی شالی‌کاری لزوم

---

[۱]. نویسنده مسئول، آدرس: رشت، دانشگاه گیلان، دانشکده علوم کشاورزی، گروه مهندسی آب

* دریافت: خرداد ۱۳۹۱ و پذیرش: آبان ۱۳۹۲

بازنگری در شیوه‌های سنتی مدیریت آبیاری برنج نظیر غرقاب دائم را امری اجتناب‌ناپذیر نموده است.آبیاری تناوبی متناسب با فیزیولوژی رشد گیاه برنج حساسیت آن به تنش خشکی، عمق آب و دوره تناوب آبیاری می‌تواند ضمن صرفه‌جویی آب، افزایش بهره‌وری آب مصرفی را هم به دنبال داشته باشد. برای مهندسان و مدیران آبیاری مقدار عملکرد محصول نسبت به آب مصرفی که به عنوان نمایه بهره‌وری آب مطرح می‌شود، اهمیت ویژه‌ای دارد.

مقدار بهره‌وری آب آبیاری در اراضی شالیزاری رشت توسط امیری و رضایی (۱۳۸۸) در محدوده ۱/۶۳ – ۰/۵ کیلوگرم دانه به ازای هر مترمکعب آب آبیاری متغیر برآورد شد. این پژوهشگران با یک بررسی در طول سه سال، بهره‌وری تبخیرتعرق را ۰/۶۵ کیلوگرم دانه به ازای هر مترمکعب تلفات تبخیرتعرق و نفوذ عمقی محاسبه نمودند. امیری و همکاران (۱۳۸۵) در رشت برای برنج رقم هاشمی بهره‌وری آب را در سطح مزارع تحقیقاتی ۰/۷۵– ۰/۲۸ کیلوگرم در مترمکعب برآورد نمودند.

طی پژوهشی بومان و همکاران (۲۰۰۷) مقدار بهره‌وری تبخیرتعرق را ۱/۴ کیلوگرم دانه به ازای مترمکعب تبخیرتعرق محاسبه نمودند. در حالی که بهره‌وری آب آبیاری در اراضی شالیزاری سری‌لانکا ۱/۶– ۰/۱۵ کیلوگرم در مترمکعب تعیین شد (مولدن و همکاران ،۲۰۰۷). پلایان و ماتئوس (۲۰۰۴) به نقل از محققان موسسه بین‌اللمللی سیاست غذا[1] گزارش دادند که شاخص شاخص بهره‌وری آب آبیاری در اراضی شالیزاری طی سال‌های ۲۰۲۵– ۱۹۹۵ در کشورهای در حال توسعه از ۰/۳۹ به ۰/۵۳ کیلوگرم در متر مکعب افزایش می‌یابد. حال آنکه طی همین مدت، این شاخص در کشورهای توسعه‌یافته از میزان ۰/۴۷ به ۰/۵۷ کیلوگرم در مترمکعب ارتقا می‌یابد.

رضایی و نحوی (۱۳۸۲) هشت روز را بهترین دوره تناوب برای رقم هاشمی در آبیاری تناوبی با دور یکسان و عمق پنج سانتی‌متر بدست آوردند. به دلیل کاهش اتلاف آب دوره‌ی تناوب هشت روز توسط اسدی و همکاران (۱۳۸۳) برای رقم ندا توصیه گردید. ابراهیم و همکاران (۱۹۹۵) در مصر نشان دادند که در رقم حساس به خشکی IER دوره تناوب ۱۰ روز در مراحل استقرار و رویشی موجب کاهش ۶۷ درصدی عملکرد نسبت به غرقاب دائم می‌شود.

اعتبار آزمایش‌های صحرایی به شرایط فیزیکی و منطقه مورد آزمایش بستگی دارد. تعداد گزینه‌های صحرایی و آزمایشگاهی، به دلیل ملاحظات عملی نظیر ورودی‌های آزمایش و هزینه‌های بالای پژوهش، محدود می‌باشند. بنابراین، بهره‌مندی از ابزارهای جدید نظیر مدل‌های شبیه‌سازی به دلیل انعطاف‌پذیری و جزئی‌نگری برای تحلیل مدیریت‌های زراعی بسیار مناسب می‌باشند. از جمله مدل‌های شبیه‌سازی فرآیند رشد و توسعه گیاهان می‌توان به مدل‌های ORYZA2000، SWAP، WARM ، AquaCrop، CropSyst و WOFOST اشاره کرد.

اینس (۲۰۰۹) در تایلند نشان داد که در صورت ارزیابی دقیق، مدل SWAP با دقت بالایی قادر به شبیه‌سازی فرآیند رشد گیاه می‌باشد. کاربرد مدل شبیه‌ساز SWAP، به مدیران پروژه، مشاوران، مهندسان آبیاری و کشاورزان در اعمال شیوه‌های نوین آبیاری و زراعی به منظور بیشینه‌سازی شاخص بهره‌وری آب کمک شایانی می‌نماید (اینس و همکاران، ۲۰۰۶).

باید توجه داشت، مسئله‌ی برنامه‌ریزی برای توزیع و تحویل آب در اراضی شالیزاری یک مسئله پیچیده‌ی بهینه‌سازی چند هدفه، چند متغیره و چند محدودیتی با انواع متغیرها می‌باشد که حل آن نیازمند کاربرد روش‌های توانمند بهینه‌سازی است. در این شرایط مدل‌های بهینه‌سازی در فضای تصمیم امکان‌پذیر، قادر به ارائه الگوی مدیریت تحویل و توزیع آب آبیاری بهینه در سطح مزارع کشاورزی خواهند بود تا بتوان از منابع آبی موجود در زمین به نحو شایسته‌ای بهره‌گیری شود. اختر و همکاران (۲۰۰۵) در تایلند از ترکیب مدل هیدرولوژیکی کشاورزی SWAP و مدل بهینه‌یابی که به روش الگوریتم

---

۱ - International Food Policy Research Institute (IFPRI)

ژنتیک حل شده، مقدار بهینه تبخیرتعرق را برآورد نمودند. منعم و همکاران (۱۳۸۶) برنامه بهینه توزیع و تحویل آب در کانالی از شبکه آبیاری فومنات را با استفاده از الگوریتم ژنتیک پیشنهاد دادند.

اینس و همکاران (۲۰۰۶) در پژوهشی در هندوستان، از داده‌های ماهواره‌ای شاخص سطح برگ را تعیین نمودند و سپس با استفاده از مقادیر شبیه‌سازی مدل SWAP، گزینه بهینه مدیریت آبیاری برنج را براساس روش حل الگوریتم ژنتیک تعیین کردند. در هندوستان، الگوریتم ژنتیک را با هدف بیشینه‌سازی مقدار سود اقتصادی توسط راجو و کومار (۲۰۰۴) برای پروژه آبیاری مناسب ارزیابی شد. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که علی‌رغم اینکه الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی نتایج نزدیک به هم دارند، ولی الگوریتم ژنتیک برای طرح آبیاری مناسب‌تر است.

به طور کلی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که آبیاری تناوبی در بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی نقش مهمی را ایفا کرده است و مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌یابی می‌توانند ابزار مناسبی برای دستیابی به مدیریت کارآمد برنامه آبیاری باشد. بنابراین در پژوهش حاضر با توجه به کاهش آبدهی رودخانه سفیدرود به عنوان اصلی‌ترین منبع تامین آب اراضی شالیزاری استان گیلان، لزوم افزایش بهره‌وری آب، نیاز آبی متفاوت در مراحل مختلف رشد گیاه برنج و حساسیت گیاه برنج به تنش خشکی به منظور حداکثرسازی بهره‌وری آب مصرفی، با تلفیق مدل هیدرولوژیکی کشاورزی SWAP و روش حل الگوریتم ژنتیک مدل‌های بهینه‌یابی زیر ارائه شده است:

مدل بهینه‌یابی آبیاری تناوبی برنج رقم هاشمی براساس دوره‌ی تناوب یکسان در کل فصل رشد (دوره تناوب ثابت).مدل بهینه‌یابی آبیاری تناوبی برنج رقم هاشمی براساس دوره‌ی تناوب متناسب با فیزیولوژیکی مراحل مختلف رشد برنج (دوره تناوب متغیر).

مواد و روش‌ها

برنج به عنوان کشت اصلی استان گیلان از طریق آب رودخانه سفیدرود آبیاری می‌شود. اما خشکسالی‌های اخیر و کاهش آبدهی رودخانه سفیدرود، نگرانی زارعین را برای تامین مطلوب آب اراضی شالیزاری به همراه داشته است (آزرمسا و همکاران، ۱۳۷۹).

در این پژوهش، به منظور بررسی تغییرات نیاز آبی گیاه در مراحل مختلف توسعه‌یافتگی گیاه برنج و بهینه‌یابی عمق و دوره تناوب آبیاری برنج رقم هاشمی از مدل شبیه‌سازی هیدرولوژی کشاورزی SWAP استفاده شد. مدل پس از واسنجی و اعتبارسنجی در مدل بهینه‌یابی بکار گرفته شد. آزمایش‌های صحرایی برنج رقم هاشمی طی سال زراعی ۱۳۸۶ در اراضی شالیزاری رشت (رضایی، ۱۳۸۷) برای واسنجی و اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفتند. در این آزمایش، مقادیر اجزای مختلف ماده خشک برای تیمارهای مدیریت‌های آبیاری با دوره تناوب صفر، پنج و هشت روز و عمق ثابت پنج سانتی‌متر در طول دوره رشد اندازه‌گیری شد.

با استفاده از اطلاعات روزانه ایستگاه سینوپتیک هواشناسی کشاورزی رشت در سال ۱۳۸۶ (شکل ۱)، داده‌های ورودی مورد نیاز بخش هواشناسی به مدل معرفی شد. از طریق روش مدل معکوس و با استفاده از درصد رس و سیلت، ماده آلی و وزن مخصوص ظاهری (جدول ۱) پارامترهای معادله ون‌گنوختن مورد نیاز زیر مدل خاک (جدول ۲) برآورده شد.

زیر مدل آبیاری حاوی اطلاعات شیوه آبیاری، عمق آب آبیاری، دوره تناوب و کیفیت آب آبیاری است که بر طبق شرایط کشت برنج و قیود مدل بهینه‌یابی تعریف شد. پارامترهای گیاهی در زیر مدل گیاهی پیشرفته[1] به دو دسته پارامترهای حساس و غیرحساس طبقه‌بندی شد. پارامترهای گیاهی حساس که اهمیت زیادی در نتایج شبیه‌سازی دارند، شامل شاخص سطح برگ در مرحله جوانه‌زنی، سطح ویژه برگ، ضرایب خاموشی برای پخش

1- Detailed

و هدایت نور مرئی، راندمان مصرف نور، حداکثر میزان همانندسازی دی‌اکسیدکربن، راندمان تبدیل به برگ و ساقه می‌باشند که برطبق نتایج حساسیت‌سنجی کنفالینیری و همکاران (۲۰۰۶) به عنوان ضرایب واسنجی انتخاب و با استفاده از مدل تخمین پارامتر PEST برآورد شدند. پارامترهای گیاهی غیرحساس به دلیل مشابهت به رقم هاشمی از نتایج پژوهش‌های کنفالینیری و همکاران (۲۰۰۶) و داده‌های رقم IR72 تعیین شد.

پس از آماده‌سازی اطلاعات ورودی، گزینه‌های واسنجی و اعتبارسنجی مدل شبیه‌ساز باید مورد ارزیابی قرار گیرند تا صحت نتایج شبیه‌سازی مدل تایید شود. به منظور واسنجی مدل در منطقه مورد مطالعه، از داده‌های مجموع ماده خشک در مدیریت‌های آبیاری با دوره تناوب صفر و هشت روز استفاده شد. اعتبارسنجی مدل SWAP، با استفاده از ضرایب واسنجی مدیریت آبیاری با دوره تناوب هشت روز انجام شد و مدل برای مدیریت آبیاری با دوره تناوب پنج روز مورد ارزیابی قرار گرفت.

گزینه‌های آماری RMSE-N (جذر میانگین مجذور خطای نرمال شده) و E (کارایی مدل) برای ارزیابی نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مجموع ماده خشک به کار گرفته شدند (معادلات ۱ و ۲). نمایه d (شاخص سازگاری) به دلیل عدم حساسیت ضریب تبیین و کارایی مدل به بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی براساس معادله ۳ محاسبه شد.

$$RMSE-N = 100\left(\sum_{I=1}^{n}(p_i - o_i)^2 / n\right)^{0.5} / \bar{o} \quad (۱)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(o_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(o_i - \bar{o})^2} \quad (۲)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(o_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|p_i - \bar{o}| + |o_i - \bar{o}|)^2} \quad (۳)$$

که در آن‌ها: p_i مقدار شبیه‌سازی مدل، o_i مقدار اندازه‌گیری واقعی، n تعداد اندازه‌گیری واقعی، $\bar{o}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری واقعی می‌باشند.

با تایید صحت نتایج شبیه‌سازی در مدل SWAP، مدل شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی مدیریت آبیاری تناوبی با هدف حداکثرسازی بهره‌وری آب مصرفی در اراضی شالیزاری مهیا شد. بیشنه سازی شاخص بهره‌وری آب به منظور افزایش عملکرد محصول برنج و صرفه‌جویی در مصرف آب که به صورت نسبت عملکرد محصول به آب مصرفی ارائه می‌شود، در معادلات ۴ تا ۶، به عنوان توابع هدف ارائه شدند (کیجن و همکاران، ۲۰۰۳):

$$Maximize\ wp_{ir} = \frac{y_a}{(IR + P_e)} \quad (۴)$$

$$Maximize\ wp_{ET} = \frac{y_a}{ET_a} \quad (۵)$$

$$Maximize\ wp_T = \frac{y_a}{T_a} \quad (۶)$$

که در آن‌ها: y_a عملکرد نهایی محصول (کیلوگرم در هکتار)، P_e بارندگی موثر (مترمکعب در هکتار)، wp_{ir} بهره‌وری آب آبیاری (کیلوگرم در متر مکعب)، wp_T بهره‌وری آب بر حسب تعرق (کیلوگرم در متر مکعب) و wp_{ET} بهره‌وری بر حسب تبخیرتعرق (کیلوگرم در متر مکعب) می‌باشند. IR مجموع عمق آب مصرفی بر حسب مترمکعب در هکتار که در مراحل مختلف توسعه‌یافتگی بر حسب دوره تناوب هر مرحله، به بوته می‌رسد. پارامترهای ET_a تبخیر وتعرق واقعی (متر مکعب در هکتار) و T_a تعرق واقعی (متر مکعب در هکتار)، در مرحله شبیه‌سازی می‌باشند که مقادیر روزانه تعرق و تبخیرتعرق از فایل WBA.* مدل SWAP، استخراج می‌شود.

برای بهینه‌سازی مدیریت آبیاری، پارامترهای عمق آب آبیاری در هر نوبت آبیاری در مراحل استقرار، پنجه‌زنی، زایشی و رسیدگی و دوره تناوب آبیاری به عنوان متغیرهای تصمیم در مدل بهینه‌سازی انتخاب شد. قیود مدل بهینه‌یابی که محدوده فضای تصمیم را برای

دستیابی به جواب عمومی بهینه تعیین می‌نمایند، با توجه به مقادیر عرف منطقه و مطالعات مهدوی و پورعزیزی (۱۳۸۲) و رضایی و نحوی (۱۳۸۲) انتخاب شد (معادله ۷).

$$\begin{aligned} &\text{model 1 } subject\ to: \\ &50 \le D_1 \le 60mm \\ &20 \le D_2 \le 30mm \\ &20 \le D_3 \le 40mm \\ &10 \le D_4 \le 20mm \\ &0 \le T \le 8day \end{aligned} \quad (۷)$$

که در آن‌ها: D_1 تا D_4 به ترتیب عمق آب آبیاری در مراحل استقرار، پنجه‌زنی، زایشی و رسیدن برحسب میلی‌متر و T دوره تناوب آبیاری بر حسب روز می‌باشند. در مدل بهینه‌یابی شماره ۱، دوره تناوب آبیاری به ازای تمام دوره رشد یکسان در نظر گرفته شد. این روش مدیریتی از نظر اجرا توسط کشاورز و توزیع آب در شبکه آبیاری سهولت بیشتری دارد.

با توجه به بحران کم‌آبی و نیاز آبی متفاوت گیاه برنج در مراحل مختلف رشد به منظور بهره‌مندی کارآمدتر از منابع آب موجود در این پژوهش مدل بهینه‌یابی دیگری (مدل بهینه‌یابی شماره ۲)، با هدف تعیین عمق و دوره تناوب آب آبیاری در مراحل مختلف رشد و توسعه گیاه برنج مورد بررسی قرار گرفت (معادله ۸).

$$\begin{aligned} &\text{model 2 } subject\ to: \\ &50 \le D_1 \le 60mm \\ &20 \le D_2 \le 30mm \\ &20 \le D_3 \le 40mm \\ &10 \le D_4 \le 20mm \\ &0 \le T_1 \le 8day \\ &0 \le T_2 \le 8day \\ &0 \le T_3 \le 8day \\ &0 \le T_4 \le 8day \end{aligned} \quad (۸)$$

که در آن‌ها: D_1 تا D_4 و T_1 تا T_4 به ترتیب عمق آب آبیاری (میلی‌متر) و دوره تناوب آبیاری (روز) در مراحل استقرار، پنجه‌زنی، زایشی و رسیدگی فیزیولوژیکی می‌باشند.

برای حل مدل بهینه‌یابی، از الگوریتم ژنتیک استفاده شد که یک روش حل برنامه‌ریزی غیرخطی برای حل بهینه عمومی است پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد این روش نسبت به سایر روش‌های بهینه‌یابی نتایج بهتری به دنبال دارد (پراوین و همکاران، ۲۰۰۶). الگوریتم ژنتیک با بهره‌گیری از نظریات تکامل و اصول علم ژنتیک به عنوان روشی موثر برای بهینه‌سازی ابداع شده است. این روش براساس اصل انتخاب اصلح استوار است که در آن موجوداتی با شایستگی بالاتر امکان بقا و تولید مثل بیشتری پیدا می‌کنند و پس از چندین نسل به درجه شایستگی بالاتری می‌رسند. در این روش، فرآیند تکامل طبیعی یک جامعه اولیه از موجودات با عنوان جمعیت اولیه وجود دارد که زوج‌های آن به صورت تصادفی با یکدیگر تلاقی نموده و بر اساس عملگرهای جهش[۱] و تزویج[۲] کروموزوم‌های نسل بعد تولید می‌شوند. با تکرار این فرآیند و با توجه به اصل انتخاب اصلح نسل‌های بعدی دارای شایستگی خواهند بود.

مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم ژنتیک به منظور دستیابی به همگرایی مطلق در راستای بهینه‌یابی توابع هدف ارائه شده در مدل‌های بهینه‌یابی ۱ و ۲ در جدول (۳) نشان داده شده است. شکل (۲) راهکار بهینه‌یابی- شبیه‌سازی ارائه شده، برای رسیدن به جواب عمومی بهینه منطقی را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

مدل شبیه‌ساز SWAP

مقادیر ضرایب واسنجی پارامترهای گیاهی موثر در فرآیند شبیه‌سازی، برای مدیریت‌های مختلف آبیاری تناوبی که از طریق مدل غیرخطی PEST تخمین زده شده اند، در جدول (۴) مشاهده می‌شود. در جدول (۵)، نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی به صورت آماره‌های ضریب همبستگی، جذر میانگین خطای نرمال شده، کارایی مدل و شاخص سازگاری ارائه شده است.

---

[۱]- Mutation

[۲]- Crossover

نتایج حاکی از آن است که مدل SWAP، از توانایی بالایی در شبیه‌سازی اجزای بهره‌وری آب در طول دوره رشد برخوردار است.

نتایج مدل‌های بهینه‌یابی

مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم و جواب عمومی بهینه تابع هدف را در مدل‌های سه گانه بهینه‌یابی به منظور حداکثرسازی بهره‌وری مصرف آب در اراضی شالیزاری با دوره تناوب ثابت در فصل رشد، در جدول (۶) نشان داده شده اند. مقادیر اجزای بهره‌وری آب مصرفی در تعیین جواب عمومی بهینه توابع هدف در جدول (۷) آمده است.

در مدل بهینه‌یابی شماره ۲، متغیرهای تصمیم عمق آب و دور آبیاری متناسب با مراحل مختلف رشد گیاه برنج قادرند مقدار جواب بهینه عمومی توابع هدف بهره‌وری آب مصرفی را در محدوده قیود تعیین شده متغیرهای تصمیم برآورد نمایند (جدول ۸). در این مدل بهینه‌یابی، مقادیر جواب عمومی بهینه توابع هدف به منظور تعیین عمق و دور آبیاری تناوبی متناسب با حساسیت مراحل مختلف رشد گیاه برنج به تنش خشکی بر حسب آب آبیاری، تعرق و تبخیرتعرق به ترتیب ۱/۵۹، ۲/۹۲ و ۱/۳۴ به دست آمد. مقادیر اجزای بهره‌وری آب مصرفی در تعیین بهینگی جواب عمومی تابع هدف در جدول (۹) آمده است.

به منظور بررسی و تحلیل خروجی‌های مدل بهینه‌یابی، حساسیت‌سنجی مدل شبیه‌ساز SWAP نسبت به متغیرهای تصمیم عمق و دوره تناوب آب آبیاری، با اعمال اغتشاش ۱٪ برای عمق یکسان ۵ سانتی‌متر و دوره تناوب هشت روز مدل شبیه‌ساز SWAP اجرا شد. نتایج جدول (۱۰) و (۱۱) نشان می‌دهند که با تغییرات یکسان در پارامترهای ورودی یاد شده، میزان تغییرات دوره تناوب بیشتر است.

از سوی دیگر جدول (۸) نشان می‌دهد که در مراحل مختلف رشد به ویژه مراحل بحرانی پنجه‌زنی و زایشی عمق آب آبیاری کاهش یافته است و با کاهش دوره تناوب مدیریت آبیاری مطلوب پیشنهاد شده است. این پدیده به دلیل حساسیت بیشتر دوره تناوب آبیاری در فرآیند شبیه‌سازی (نتایج جداول ۱۰ و ۱۱) روی داده است. بنابراین، به دلیل حساسیت کمتر عمق آب آبیاری، در تخمین مجموع ماده خشک برای صرفه‌جویی در مصرف آب و افزایش بهره‌وری آب مصرفی می‌توان عمق آب آبیاری را در مراحل مختلف توسعه‌یافتگی کاهش داد و با انتخاب دوره تناوب آبیاری مناسب، می‌توان از خسارات ناشی از تنش خشکی جلوگیری نمود.

در الگوهای مدیریت آبیاری تناوبی که برای حداکثرسازی بهره‌وری آب آبیاری، تبخیروتعرق و تعرق ارائه شده است، دوره تناوب و عمق آب متفاوتی در مراحل مختلف رشد متفاوت اعمال شده است. این کار سبب می‌شود تا بتوان با اعمال مدیریت صحیح و منطبق با حساسیت آن مرحله به تنش خشکی، علاوه بر صرفه‌جویی آب ورودی، با بهبود عملکرد محصول، بهره‌وری آب هم ارتقا یابد.

مقایسه مدل‌های بهینه‌یابی ۱و ۲ به ازای شاخص‌های بهره‌وری

شاخص بهره‌وری آب آبیاری

مدیریت آبیاری پیشنهادی در مدل بهینه‌یابی با دوره تناوب متناسب با رشد گیاه برنج، با بهره‌مندی از مدیریت بهینه آب در شرایط تنش خشکی و مقابله با خسارات ناشی از تنش آبی عملکرد محصول را بهبود بخشید. در مدل بهینه‌یابی ۲، به جهت اینکه در مراحل حساس پنجه‌زنی و زایشی آب بیشتری به مصرف گیاه می‌رسد، حجم آب آبیاری افزایش یافته است، اما با اعمال شرایط تنش خشکی، مجموع ماده‌ی خشک افزایش نشان می‌دهد. براساس نتایج حساسیت‌سنجی ارائه شده در جداول(۱۰) و (۱۱)، مجموع ماده خشک حساسیت کمی به میزان آب آبیاری دارد. بنابراین، در مدل بهینه‌یابی شماره ۲، اگرچه با افزایش حجم آب ورودی، مجموع ماده خشک نیز زیاد شده است، اما در نمایه بهره‌وری آب آبیاری، به میزان یک درصد کاهش مشاهده شود. به دلیل تفاوت بسیار کم

(۰/۶۲ درصد) شاخص بهره‌وری آب آبیاری در دو مدل ۱و ۲، در شرایط بحران خشکسالی و بروز پدیده کم‌آبی، برای صرفه‌جویی در مصرف آب و افزایش شاخص بهره‌وری آب آبیاری، مدیریت آبیاری متناوب با دوره تناوب ثابت در سراسر فصل رشد در مقایسه با دوره آبیاری متغیر، برای کشت برنج رقم هاشمی در رشت مناسب‌تر ارزیابی شد.

شاخص بهره‌وری تبخیرتعرق

اعمال مدیریت آبیاری تناوبی با دور آبیاری متغیر در فصل رشد، با افزایش کاربرد آب آبیاری در مراحل بحرانی، عملکرد محصول را بهبود بخشیده است. بر اساس نتایج جداول (۱۰) و (۱۱)، حساسیت مجموع ماده‌خشک به ترتیب به تعرق، تبخیروتعرق و آب آبیاری است. بنابراین علی‌رغم استفاده بیشتر از منابع آب، افزایش تبخیرتعرق موجب بهبود عملکرد محصول شده است که می‌تواند نمایه بهره‌وری تبخیرتعرق را بهبود بخشد. بنابراین، به منظور دستیابی به بیشترین بهره‌وری تبخیرتعرق، الگوی مدیریت آبیاری مدل بهینه‌یابی شماره ۲، برای زارعین پیشنهاد می‌شود.

البته در شرایط بحران‌های شدید آب و کمبود منابع آبی می‌توان از یک درصد ارتقاء بهره‌وری تبخیروتعرق در مدل بهینه‌یابی یادشده چشم‌پوشی نمود و الگوی مدیریتی ارائه شده در مدل بهینه‌یابی با دوره تناوب یکسان را به دلیل صرفه‌جویی در مصرف آب آبیاری، ملاک مدیریت آبیاری اراضی شالیزاری قرار داد.

شاخص بهره‌وری تعرق

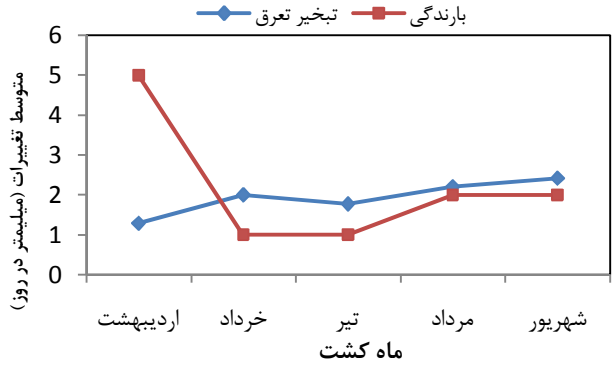
مدیریت آبیاری تناوبی متناسب با فیزیولوژی مراحل رشد گیاه، با کاهش مصرف آب و بهبود عملکرد محصول برنج توانسته شاخص بهره‌وری تعرق را افزایش دهد. زیرا با افزایش تنش خشکی، برگ‌ها نازک‌تر و تعداد روزنه‌ها بیشتر می‌شود و در نتیجه تعرق افزایش می‌یابد. تنش‌های زیاد، به دلیل بهبود هوادهی ریشه‌ها در دوران پنجه‌زنی، پنجه‌ها و برگ‌های بیشتری تولید می‌نماید که می‌تواند توان فتوسنتز را افزایش دهد. با توجه به نتایج جداول (۱۰) و (۱۱) مجموع ماده‌ی خشک به تعرق حساسیت بیشتری دارد. پس با افزایش تعرق می‌توان ماده خشک بیشتری را تولید نمود. بنابراین، به دلیل افزایش عملکرد محصول، علی‌رغم افزایش تعرق، رویکرد مدیریتی پیشنهادی در مدل بهینه‌یابی شماره ۲ قابل توصیه است. اما به دلیل تفاوت اندک در شاخص بهره‌وری تعرق در مدل‌های ۱و ۲، به سبب سهولت اجرا، مدیریت بهینه‌یابی مدل ۱ پیشنهاد می‌شود.

نتیجه‌گیری

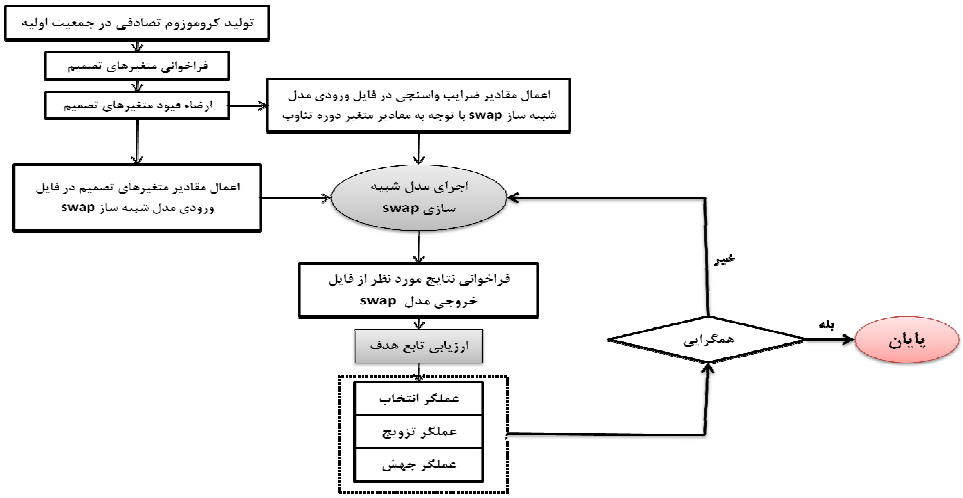
الگوی مدیریت آبیاری تناوبی که در مدل بهینه‌یابی شماره ۲، ارائه شده،توانسته با مصرف بیشتر آب، کاهش تعرق و افزایش مجموع ماده خشک موجب حداکثرسازی بهره‌وری آب مصرفی شود. بنابراین، بیشترین میزان آب مصرفی به این مدیریت تعلق دارد. پس در شرایط کم‌آبی و بحران خشکسالی شیوه مطلوبی برای آبیاری برنج محسوب نمی‌شود. از سوی دیگر، محاسبه میزان تعرق بسیار هزینه‌بر و زمان‌بر می‌باشد که این مسئله موجب شده است که نمایه بهره‌وری تعرق در میان نهادهای متولی توزیع آب از مقبولیت بالایی برخوردار نباشد. نمایه بهره‌وری تبخیرتعرق، علی‌رغم صرفه‌جویی در مصرف آب که موجب کاهش تبخیرتعرق شد به دلیل افت تولید ماده خشک، کمترین بهره‌وری آب مصرفی را به خود اختصاص داد. از سوی دیگر، این پارامتر همانند تعرق به سادگی محاسبه نمی‌شود، پس محبوبیت اندکی در میان کارشناسان و متولیان آب دارد. بنابراین، می‌توان به الگوی مدیریت آبیاری در مدل دوره تناوب ثابت توجه بیشتری مبذول داشت. در این برنامه‌ریزی آبیاری، به دلیل تامین آب به میزان مورد نیاز در مراحل مختلف رشد، آب بیشتری به مصرف گیاه می‌رسد. اما مدیریت منطقی تنش خشکی سبب شده است با افزایش مجموع ماده خشک بهره‌وری افزایش یابد. از آنجایی که برنامه‌ریزی توزیع آب براساس حجم آب ورودی ساده‌تر و پرطرفدارتر می‌باشد، علی‌رغم مصرف بیشتر آب می‌تواند گزینه مناسبی برای

آبیاری برنج براساس حساسیت هر مرحله از رشد به تنش خشکی باشد.

در این پژوهش با توجه به بحران‌های خشکسالی، به دلیل صرفه‌جویی در بهره‌گیری از منابع آبیاری، کاهش تبخیرتعرق و بهبود شاخص بهره‌وری آب آبیاری (۰/۰۱کیلوگرم در متر مکعب) علی‌رغم کاهش عملکرد محصول نهایی (۲۱۲ کیلوگرم در هکتار)، الگوی آبیاری براساس نمایه بهره‌وری آب آبیاری مدل بهینه‌یابی مدیریت آبیاری تناوبی یکسان در طول فصل رشد به منظور آبیاری برنج رقم هاشمی استان گیلان برای زارعین توصیه می‌شود. به دلیل کاربردی شدن نتایج مدل بهینه‌یابی، دوره تناوب هشت روز برای مدیریت بهینه آبیاری متناوب برای رقم هاشمی رشت و عمق آب آبیاری در هر نوبت آبیاری در مراحل مختلف رشد گیاه برنج اصلاح می‌شود و عمق‌های ۵۲، ۳۰، ۴۰ و ۱۲ میلی‌متر در هر نوبت آبیاری به ترتیب در مراحل استقرار، پنجه‌زنی، زایشی و رسیدگی حاصل شد. لازم به ذکر است نتایج ارائه شده در این تحقیق حاصل شبیه‌سازی و بهینه‌یابی بر اساس یک سال تحقیقات میدانی است و افزایش قابلیت تعمیم این نتایج نیازمند چند سال تحقیقات میدانی می‌باشد.



شکل ۱- اطلاعات ایستگاه سینوپتیک هواشناسی کشاورزی رشت در سال زراعی ۱۳۸۶



شکل ۲- الگوی سازمانی مدل شبیه‌سازی- بهینه‌یابی در تحقیق حاضر

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

عمق (سانتی‌متر)	بافت خاک	کربن آلی (درصد)	رس (درصد)	سیلت (درصد)	شن (درصد)	وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
۰-۱۵	رسی	۱/۷۲	۴۷	۳۹	۱۴	۱/۱
۱۵-۳۰	رسی	۱/۵۴	۴۴	۳۹	۱۷	۱/۲

جدول۲- پارامترهای مدل ون‌گنوختن برای مزرعه آزمایش

عمق (سانتی‌متر)	کلاس بافت خاک	پارامتر شکل n	پارامتر شکل α (عکس سانتی‌متر)	هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی‌متر بر روز)	رطوبت اشباع خاک	رطوبت باقیمانده
۰-۱۵	رسی	۱/۰۷۱۵	۰/۲۰۴	۰/۹۵۰۲	۰/۵۱	۰/۰۱
۱۵-۳۰	رسی	۱/۰۶۹۱	۰/۰۰۲	۰/۱۶۴۱	۰/۴۶	۰/۰۱

جدول۳- مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم ژنتیک برای دستیابی به همگرایی مطلق

پارامتر	مدل بهینه یابی	
	۱	۲
	مقادیر پارامترهای الگوریتم ژنتیک	
تعداد نسل	۲۰۰	۲۰۰
احتمال جهش	۰/۰۰۹	۰/۰۰۶
احتمال تزویج	۰/۹۵۰	۰/۹۵۰
طول کرموزوم	۱۰۱	۱۶۱
تعداد جمعیت	۲۵۰	۲۵۰

جدول ۴- ضرایب واسنجی تخمینی توسط PEST برای مدیریت آبیاری با دوره تناوب صفر و هشت روز

پارامترهای گیاهی	علامت اختصاری	واحد	مقادیر ضرایب واسنجی	
			دوره تناوب صفر روز (غرقاب دائم)	دوره تناوب ۸ روز
شاخص سطح برگ در مرحله جوانه زنی	LAIEM	m^2/m^2	۰/۱۰۰۰	۰/۲۸۰۰
سطح ویژه برگ	SLA	ha/kg	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۶۴
ضریب خاموشی برای پخش نور مرئی	KDIF	-	۰/۷۰۰۲	۰/۷۹۶۴
ضریب خاموشی برای هدایت نور مرئی	KDIR	-	۰/۵۵۶۷	۰/۶۳۷۶
راندمان مصرف نورEFF	EFF	$kg\ ha^{-1}\ hr^{-1}$ / $j\ m^2\ s^{-1}$	۱/۰۰۰۶۸	۰/۹۸۳۲
حداکثر میزان همانندسازی دی اکسید کربن	AMAX	$kg\ ha^{-1}\ hr^{-1}$	۳۵/۹۰۹۰	۴۰/۲۰۷۰
راندمان تبدیل به برگ	CVL	kg/kg	۱/۰۰۰۰	۰/۹۷۰۰
راندمان تبدیل به ساقه	CVS	kg/kg	۰/۲۵۱۸	۰/۱۹۹۲
مجموع مربعات وزن باقیمانده	-	-	۰/۳۶	۰/۴۱

جدول ۵- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل بر اساس گزاره‌های آماری

گزینه	مدیریت آبیاری	کارایی مدل (-)	جذر میانگین مجذور خطای نرمال شده (درصد)	شاخص سازگاری	ضریب تبیین
		مجموع ماده خشک			
واسنجی	غرقاب دائم (صفر روز)	۰/۹۹۳	۲/۷۰	۰/۹۹۵	۰/۹۹۹
	دوره تناوبی ۸ روز	۰/۹۸۴	۷/۹۹	۰/۹۷۹	۰/۹۸۹
اعتبارسنجی (ارزیابی مدل شبیه‌سازی برای دوره تناوب ۵ روز)	ضرایب واسنجی دوره تناوب ۸ روز	۰/۹۸۱	۱۱/۴	۰/۹۷۲	۰/۹۸۴

جدول۶- مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم و توابع هدف مدل بهینه‌یابی با دور تناوبی یکسان

نمایه بهره‌وری	عمق آب در هر نوبت آبیاری (میلی‌متر)			دوره تناوب (روز)	بهره‌وری (کیلوگرم در متر مکعب)
	مرحله استقرار	مرحله پنجه‌زنی	مرحله زایشی	مرحله رسیدگی	
آب آبیاری	۵۱/۹۷	۲۹/۷۳	۳۹/۵۸	۱۱/۶۲	۷/۳۳	۱/۶۰
تعرق	۵۱/۳۱	۲۸/۷۰	۳۴/۴۲	۱۱/۱۰	۴/۶۵	۲/۹۰
تبخیر تعرق	۵۱/۲۱	۲۸/۳۹	۳۴/۲۱	۱۰/۴۵	۶/۷۱	۱/۳۳

جدول ۷- مقادیر اجزای تابع هدف در مدل بهینه‌یابی

نمایه بهره‌وری	میزان آب مصرفی (مترمکعب در هکتار)			مجموع ماده خشک (کیلوگرم در هکتار)
	آب آبیاری	تبخیر تعرق	تعرق	
آب آبیاری	۳۰۰۴	۳۶۳۰	۲۱۰۳	۱۰۰۲۴
تعرق	۳۲۲۱	۳۹۶۶	۱۶۵۹	۱۰۰۱۵
تبخیرتعرق	۳۰۰۱	۳۵۸۵	۲۱۱۳	۹۹۴۴

جدول ۸- مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم و توابع هدف مدل بهینه‌یابی با دوره تناوبی متغیر

نمایه بهره‌وری	عمق آب آبیاری (میلی‌متر)				دوره تناوب (روز)				بهره‌وری (کیلوگرم در متر مکعب)
	مرحله استقرار	مرحله پنجه‌زنی	مرحله زایشی	مرحله رسیدگی	مرحله استقرار	مرحله پنجه‌زنی	مرحله زایشی	مرحله رسیدگی	
آب آبیاری	۵۱/۰۷	۲۵/۳۲	۳۰/۴۲	۱۱/۱۱	۶/۵۳	۴/۶۰	۴/۳۱	۷/۴۷	۱/۵۹
تعرق	۵۰/۶۵	۲۴/۸۵	۲۹/۹۸	۱۰/۸۱	۶/۱۲	۴/۲۰	۳/۱۱	۷/۱۲	۲/۹۲
تبخیر تعرق	۵۰/۷۹	۲۴/۱۴	۲۸/۱۱	۱۰/۱۳	۷/۰۳	۴/۸۱	۴/۹۴	۷/۲۴	۱/۳۴

جدول۹- مقادیر اجزای تابع هدف در مدل بهینه‌یابی

نمایه بهره‌وری	میزان آب مصرفی (مترمکعب در هکتار)			مجموع ماده خشک (کیلوگرم در هکتار)
	آب آبیاری	تبخیر تعرق	تعرق	
آب آبیاری	۳۰۸۸	۳۹۱۱	۱۸۲۳	۱۰۲۳۶
تعرق	۳۱۸۱	۳۹۵۱	۱۶۶۱	۱۰۰۷۳
تبخیر تعرق	۳۰۱۵	۳۶۰۴	۱۹۹۶	۹۹۹۷

جدول ۱۰- نتایج شبیه‌سازی براساس اغتشاش یک درصدی در متغیر تصمیم عمق آب آبیاری

پارامتر حساسیت سنجی	میزان آب مصرفی (مترمکعب در هکتار)				مجموع ماده خشک (کیلوگرم در هکتار)	دوره تناوب (روز)
	آب آبیاری	تبخیرتعرق	تبخیر	تعرق		
عمق ۵ سانتی‌متر	۳۲۲۰	۳۹۸۸	۱۸۹۳	۲۰۹۵	۱۰۱۴۲	۸
عمق ۵/۰۵ سانتی‌متر	۳۲۷۰	۴۰۰۱	۱۹۰۷	۲۰۹۴	۱۰۱۳۳	۸
درصد تغییرات	۱/۵۵۲۸	۰/۳۲۵۹	۰/۷۳	۰/۰۴۷۷۳	۰/۰۸۸۳	-

جدول ۱۱- نتایج شبیه‌سازی براساس اغتشاش یک درصدی در متغیر تصمیم دوره تناوب

پارامتر حساسیت سنجی	میزان آب مصرفی (مترمکعب در هکتار)			مجموع ماده خشک (کیلوگرم در هکتار)	عمق آب آبیاری (سانتی‌متر)
	آب آبیاری	تبخیر تعرق	تبخیر	تعرق		
دوره تناوب ۸ روز	۳۲۲۰	۳۹۸۸	۱۸۹۳	۲۰۹۵	۱۰۱۴۲	۵
دوره تناوب ۸/۰۸ روز	۳۱۷۵	۳۹۵۱	۱۸۵۲	۲۰۹۹	۱۰۱۶۴	۵
درصد تغییرات	۱/۳۹۷۵	۰/۹۲۷۷	۱/۱۶۵	۰/۱۹۰۹	۰/۲۱۶۹	-

فهرست منابع

۱.آزرمسا، س.، فیاض، م. و م. تطهیری. ۱۳۷۹. مدیریت منابع و مصرب آب شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود. مجموعه مقالات دهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. ۲۵ و ۲۶ آبان ماه ۱۳۷۹. تهران. ۱۴ ص.

۲.اسدی، ر.، رضایی، م. و م. ک. معتمد. ۱۳۸۳. راه‌حل ساده برای مقابله با خشک‌سالی‌ها در شالیزارهای مازندران. فصل‌نامه علمی- ترویجی خشکی و خشک‌سالی کشاورزی. شماره.۴ ص: ۹۰-۸۷.

۳.رضایی، م. و م. نحوی. ۱۳۸۲. اثر دور آبیاری بر مقدار مصرف آب و عملکرد برنج در گیلان. مجموعه مقالات یازدهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. نشریه شماره ۸۳ . ۳ و ۴ دی ۱۳۸۲-تهران. ص: ۲۴۰-۲۳۳.

۴.رضایی، م. ۱۳۸۷. گزارش سالیانه طرح بررسی اثر آبیاری تناوبی و مقادیر مختلف کود ازته بر عملکرد برنج رقم محلی هاشمی. انتشارات موسسه تحقیقات برنج کشور. ۳۴ ص.

۵.سلیمانی، ع. و ب. امیری لاریجانی. ۱۳۸۴. اصول بهزراعی برنج. انتشارات آرویج. ۳۰۳ ص.

۶.منعم، م.ج.، نجفی، م. ر . و ص. خوشنواز. ۱۳۸۶. برنامه‌ریزی بهینه تحویل آب در کانال‌های آبیاری با استفاده از الگوریتم ژنتیک. مجله تحقیقات منابع آب ایران، جلد ۳، شماره ۱، ص. ۱۱-۱.

۷.منعم، م. ج. و م.ع. نوری. ۱۳۸۹. کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی PSO در توزیع و تحویل بهینه اب در شبکه‌های آبیاری. مجله آبیاری و زهکشی ایران، جلد ۴، شماره ۱، ، ص. ۸۳-۷۲.

۸.یزدانی، م. ر. و م. پارسی‌نژاد. ۱۳۸۷. مدیریت آبیاری و زهکشی سطحی در اراضی شالیزاری. پنجمین کارگاه فنی زهکشی و محیط زیست. تهران-۱۶ آبان ماه ۱۳۸۷. ۱۷ ص.

9.Akhtar, S., Kiyoshi H., and C. Yann. 2005. Input assimilation of soil water atmosphere and plant (SWAP) model with GA using cluster computers. Global Change Biol. 8 (4): 372–389.

10. Bouman, B.A.M., Feng L., Tuong T.P., Lu G. Wang H. and Y. Feng. 2007. Exploring options to grow rice under water-short conditions in northern China using a modeling approach. II: Quantifying yield, water balance components, and water productivity. Agric Water Manage. 88: 23-33.

11. Confalonieri R., Acutis. M., Bellocchi. G. and I. Cerrani. 2006. Exploratory sensitivity analysis of CROPSYST, WARM and WOFOST: A case-study with rice biomass. Italian Journal of Agrometeorology, 5 (3): 37-16.

12. Feddes, R.A. Kowalik, P.J. and H. Zaradny. 1978. Simulation of field water use and crop yield.Simulation Monographs. Pudoc. Wageningen. 189 pp.

13. Ibrahim, M. El-Gohary, S.A. Willardson, L.S. and D.V. Sission. 1995. Irrigation interval effects on rice production in the Nile Delta. Irrig. Sci. 16(1): 33-29.

14. Ines, A. V. and M. Amor. 2009. SWAP crop model Parameter Identification using SPOT Vegetation in Suphanburi, Thailand. Crop Sci. 24 (6): 1213–1214.

15. Ines, A. V.M. Amor, Kiyoshi, H. Ashim, s. Droogers, P. and R.S. Clemente. 2006. Combining remote sensing-simulation modeling and genetic algorithm optimization to explore water management options in irrigated agriculture. Agricultural Water Management, 8 3: 221– 232.

16. Molden, D. Murry- Rust, H. Sakthivandival, R. and I. Makin. 2007. A water productivity framework for understanding and action. Workshop on Water productivity. Wadduwe, Sri Lanka, November 2007.

17. Nour, M. and S.A. Ghanem.1994. Broadcast- seed rice as affected by different irrigation intervals. Egypt. J. Apple. Sci. 9 (8): 671- 683.

18. Playán, E. and L. Mateos. 2004. Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. New directions for a diverse planet. Proceedings of the 4th International Crop Science Congress, 26 Sep – 1 Oct 2004, Brisbane, Australia.

19. Praveen, k. Almeda, J. Bajcsy, M. and M. Markus. 2006. Hydro informatics data integrative approaches in computation, analysis and modeling. Chapter 24: Genetic Algorithm. CRC press, Taylor and France group. 529 p.
20. Raju K. and D. N. Kumar. 2004. Irrigation Planning using Genetic Algorithms. In: Water Resources Management, 18 (2). 163-176.
21. Singh, Y.P. and S. Misra. 1974. Yield and water use irrigated tropical aerobic rice system. J. P. 1974. Indian, J. of Agronomy, 19(1): 60-63.
22. Yambao, EB and K.T. Ingram. 1988. Drought stress index for rice. Philippine Journal of Crop Science, 13 (2): 105-115.