

## مقایسه برخی از شاخص‌های بهینه بهره‌وری آب در آبیاری تناوبی اراضی شالیزاری رشت

محبوبه آقاجانی<sup>۱</sup> - مریم نوابیان<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۴/۴

### چکیده

آب یکی از نهاده‌های اصلی کشت برنج محسوب می‌شود. هدف اساسی مدیریت‌های نوین آبیاری برنج، افزایش بهره‌وری آب مصرفی و صرفه‌جویی آب در اراضی شالیزاری می‌باشد. در این تحقیق، به منظور بهینه‌سازی مدیریت آبیاری تناوبی متناسب با نیاز آبی مراحل مختلف رشد گیاه برنج، یک مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی ارائه شده است که قادر به حداکثرسازی نمایه بهره‌وری تعرق، آب آبیاری و تبخیر-تعرق می‌باشد. عمق آب در هر نوبت آبیاری در مراحل استقرار، پنجه‌زنی، زایشی و رسیدگی و دوره تناوب آبیاری به عنوان متغیرهای تصمیم انتخاب شدند. شبیه‌سازی مراحل رشد گیاه، با استفاده از مدل هیدرولوژیکی کشاورزی SWAP و حل مدل بهینه‌سازی برای حداکثر نمودن بهره‌وری، به روش الگوریتم ژنتیک انجام شد. در نهایت، مقادیر بهینه بهره‌وری آب آبیاری، تعرق و تبخیر-تعرق به ترتیب ۱/۶۰، ۲/۹۰ و ۱/۳۳ کیلوگرم در متر مکعب بدست آمدند. پس از بررسی شاخص‌های بهره‌وری بهینه آب، به دلیل اعمال دور آبیاری متناسب با شبکه آبیاری سفیدرود و سهولت اندازه‌گیری آب ورودی، شاخص بهره‌وری آب آبیاری از میان شاخص‌های تعیین بهره‌وری آب مناسب‌تر تشخیص داده شد. نتایج حداکثرسازی شاخص بهره‌وری آب آبیاری نشان داد که عمق آب آبیاری ۵۱، ۲۹، ۳۹ و ۱۱ میلی‌متر به ترتیب در مراحل استقرار، پنجه‌زنی، زایشی و رسیدگی با دوره تناوب ۸ روز منجر به بهبود بهره‌وری آب مصرفی برای برنج رقم هاشمی اراضی شالیزاری رشت می‌شود. نتایج بهینه‌یابی نشان‌دهنده برتری آبیاری تناوبی بهینه در مقایسه با آبیاری غرقاب برنج است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، برنج، بهره‌وری آب، مدیریت آبیاری تناوبی، مدل SWAP

### مقدمه

هیدرولوژیکی نظیر تبخیر، تعرق، تلفات عمقی و مطالعه فیزیولوژی گیاه و مرفولوژی خاک ضروری به نظر می‌رسد.

یزدانی و پارسی‌نژاد (۱۰)، در شرایط کنونی، بهترین راهکار برخورد با پدیده کم‌آبی در اراضی شالیزاری کشور را، استفاده از روش آبیاری متناوب می‌دانند. آبیاری تناوبی با اعمال عمق آب و دوره آبیاری مناسب، ضمن جلوگیری از اتلاف آب، افزایش بهره‌وری آب در اراضی شالیزاری را به همراه دارد و می‌تواند یک راهکار مناسب برای مقابله با بحران کم‌آبی باشد. امیری و رضایی (۴)، تغییر مدیریت آبیاری از شیوه سنتی غرقاب به غیرغرقاب را موجب ارتقاء بهره‌وری آب آبیاری دانستند، زیرا با کاهش آب آبیاری از میزان عملکرد دانه نیز کاسته می‌شود اما به ازای هر یک واحد کاهش آب آبیاری عملکرد دانه حدود ۰/۳ واحد کاهش نشان می‌دهد. مقدار بهره‌وری آب آبیاری در اراضی شالیزاری رشت در محدوده ۱/۶۳ - ۰/۵ کیلوگرم دانه به ازای هر مترمکعب آبیاری متغیر می‌باشد. امیری و رضایی (۴) با یک بررسی در طول سه سال، بهره‌وری تبخیر-تعرق را ۰/۶۵ کیلوگرم دانه به ازای هر مترمکعب تلفات تبخیر-تعرق و نفوذ عمقی محاسبه نمودند. امیری و همکاران (۲) در رشت برای برنج رقم هاشمی بهره‌وری آب را در سطح مزارع تحقیقاتی ۰/۷۵ - ۰/۲۸ کیلوگرم در

مدیریت صحیح آبیاری و کنترل عمق آب در سراسر فصل رشد، می‌تواند موجب بهبود عملکرد محصول برنج شود. فاکون (۱۸)، توسعه کشت ارقام پرمحصول، بهبود مدیریت زراعی، تغییر تاریخ کشت، استفاده موثر از آب باران، کاهش مصرف آب در زمان آماده‌سازی زمین، تغییر در روش‌های کشت برنج، استفاده از زهاب در آبیاری برنج، کاهش مصرف آب در طول دوره رشد گیاه و استفاده از آبیاری تناوبی را موجب افزایش بهره‌وری مصرف آب در اراضی شالیزاری می‌داند. افزایش بهره‌وری به عنوان یکی از ارکان اصلی توسعه منابع آب و افزایش تولیدات کشاورزی، نقش مهمی در بهبود سطح رفاه انسان‌ها ایفا می‌کند. در شرایط بحران خشکسالی، بهره‌برداری بهینه از واحد حجم آب، عدول از موازین کلاسیک تعیین نیاز آبی گیاه را اجتناب‌ناپذیر نموده است. در چنین شرایطی با هدف تدوین الگوی مدیریت کارآمد آبیاری گیاهان، شناسایی ارتباط بین پارامترهای

۱ و ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد گرایش آبیاری و زهکشی و استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان  
(\* نویسنده مسئول: (Email: Navabian@guilan.ac.ir

با حداکثر کردن مقدار سود برای پروژه آبیاری مناسب ارزیابی کردند. در سال‌های اخیر، تشدید پدیده کم‌آبی در استان گیلان، احداث سد‌های پرشمار در بالادست حوزه آبریز سفیدرود، الویت‌گذاری وزارت نیرو در تامین آب کشاورزی پس از بخش‌های شرب و صنعت، توزیع نامناسب ریزش نزولات جوی در طول سال و مصرف بالای آب در اراضی شالیزاری موجب کاهش منبع آب کشاورزی در استان گیلان شده است. استان گیلان با مساحت ۱۴۰۳۰ کیلومتر مربع در طول جغرافیایی ۳۴°۴۸' تا ۳۶°۳۳' شرقی و عرض جغرافیایی ۲۷°۲۸' تا ۲۸°۳۳' شمالی در شمال کشور واقع شده است. ارتفاع متوسط بارندگی سالانه آن، حدود ۱۲۰۰ میلی‌متر است که تقریباً ۷۰ درصد آن در فصل‌های پاییز و زمستان رخ می‌دهد. مهم‌ترین رودخانه حوزه آبریز سفیدرود که عمده‌ترین منبع آب آبیاری استان به شمار می‌رود، رودخانه سفیدرود است. این رودخانه از قزل‌اوزن سرچشمه گرفته و پس از طی ۸۰۴/۴ کیلومتر در استان‌های کردستان، زنجان و گیلان به دریای خزر می‌ریزد. رودخانه سفیدرود طی سال‌های اخیر با بحران کم‌آبی مواجه شده است (۱). بنابراین در این پژوهش، تلاش شده است الگوهای مختلف افزایش بهره‌وری مصرف آب آبیاری برای بهینه‌سازی مدیریت آبیاری تناوبی برنج رقم هاشمی رشت، با تلفیق مدل شبیه‌ساز SWAP و روش حل الگوریتم ژنتیک ارائه و مناسب‌ترین مدل بهره‌وری مصرف آب برای تعیین عمق و دوره تناوب بهینه آبیاری انتخاب شود.

## مواد و روش‌ها

به منظور مقایسه شاخص‌های بهره‌وری آب در آبیاری تناوبی، ابتدا باید مقادیر بهینه شاخص‌های بهره‌وری آب آبیاری، تعرق و تبخیر-تعرق تعیین شوند. بهینه‌سازی شاخص‌های بهره‌وری آب نیازمند شبیه‌سازی رشد گیاه به ازای الگوی آب آبیاری مصرفی است. بنابراین برای دستیابی به اهداف تحقیق به تفکیک الگوریتم بهینه‌سازی، شبیه‌سازی و حل مدل بهینه‌سازی در ادامه توضیح داده می‌شوند.

## الگوریتم بهینه‌سازی

در این تحقیق، با هدف حداکثر نمودن بهره‌وری مصرف آب آبیاری برنج رقم هاشمی در شرایط کمبود منابع آبی، سه مدل بهینه‌سازی برای پیشنهادی سه نوع شاخص بهره‌وری تعرق، آب آبیاری و تبخیر-تعرق تعریف شدند (معادلات ۱ تا ۳). پارامترهای عمق آب در هر نوبت آبیاری در مراحل استقرار، پنجه‌زنی، زایشی و رسیدگی آبیاری و دوره تناوب آبیاری به عنوان متغیرهای تصمیم مدل بهینه‌سازی انتخاب شدند. قیود مدل بهینه‌سازی که محدوده فضای تصمیم را برای دستیابی به جواب عمومی بهینه نشان می‌دهد با توجه

مترمکعب برآورد نمودند. بومان و تانگ (۱۴) در شمال هند و فیلیپین و بلدور و همکاران (۱۳) در فیلیپین و چین بهره‌وری آب را به ترتیب ۱/۱-۰/۲، ۱/۴۸-۰/۷۳ و ۱/۱۳-۰/۵ کیلوگرم در مترمکعب گزارش دادند. بومان و همکاران (۱۵) طی پژوهشی در هندوستان، مقدار بهره‌وری تبخیر-تعرق را ۱/۴ کیلوگرم دانه به ازای مترمکعب تبخیر-تعرق محاسبه نمودند. وزارت و باستانسن (۲۷)، براساس آزمایشات ۲۵ ساله مقدار بهره‌وری تبخیر-تعرق را ۱/۶-۰/۶ کیلوگرم در هکتار گزارش دادند. مولدن و همکاران (۲۱)، در گزارشی بهره‌وری آب آبیاری را در سری لانکا ۱/۶-۰/۱۵ کیلوگرم در مترمکعب اعلام کردند.

امروزه استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی رشد و توسعه گیاه، به منظور اداره و پیش‌بینی رفتار سیستم‌های کشاورزی متداول شده است. مدل‌های شبیه‌سازی رشد و توسعه گیاه، با به کارگیری مجموعه‌ای از متغیرهای محیطی وابسته و خصوصیات ژنتیکی، با ارائه پاسخ‌های دقیق، سریع و اقتصادی به بسیاری از سوالات شبیه‌سازی مراحل رشد گیاه و پیش‌بینی عملکرد محصول و محاسبات مربوط به آب آبیاری مصرفی، تبخیر-تعرق پتانسیل و واقعی، امکان برنامه‌ریزی و مدیریت مطلوب در فرآیند تولید محصول و دستیابی به حداکثر بهره‌وری آب آبیاری را فراهم می‌نمایند. مدل‌های SWAP و WOFOST از جمله مدل‌های شبیه‌سازی فرآیند رشد و توسعه گیاهان محسوب می‌شوند که بر اساس میزان تشعشع رسیده، رشد و توسعه برنج را در شرایط تولید پتانسیل و کمبود آب شبیه‌سازی می‌نمایند. امیری و همکاران (۳) در موسسه تحقیقات برنج رشت، مدل هیدرولوژی کشاورزی SWAP را برای شبیه‌سازی رشد و توسعه برنج در مدیریت‌های مختلف آبیاری گیلان توصیه نمودند.

مدیریت بهینه آبیاری به معنای اعمال مقدار و زمان مناسب آب در هر مرحله از رشد گیاه است که بدون کاهش عملکرد محصول قادر به صرفه‌جویی در مصرف آب و افزایش بهره‌وری آب مصرفی است که در این راستا می‌توان از ابزار مدل بهینه‌سازی استفاده کرد. وظیفه یک مدل بهینه‌سازی، یافتن مقدار بهینه تابع هدف مفروض است که مقید به مجموعه‌ای از قیود در فضای متغیرهای تصمیم باشد. ساویچ و والتز (۲۴) با به کارگیری الگوریتم ژنتیک مدل کامپیوتری GANET را تدوین کردند که طراحی شبکه‌های توزیع آب آبیاری را با کمترین هزینه بهره‌برداری انجام می‌دهد. اختر و همکاران (۱۲) در تایلند از ترکیب مدل هیدرولوژیکی کشاورزی SWAP و مدل بهینه‌سازی که به روش الگوریتم ژنتیک حل شده است، مقدار بهینه تبخیر-تعرق را برآورد نمودند. ژائو و همکاران (۲۶) در چین، با بهره‌گیری از روش حل الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی مدل برنامه‌ریزی خطی چند منظوره با حداکثر کردن مقدار عملکرد گیاه و سود اکولوژی، به نتایج خوبی در سیستم‌های کشاورزی اراضی شالیزاری دست یافتند. راجو و کومار (۲۳) در هند، الگوریتم ژنتیک را

پایه‌گذاری شد. SWAP یک مدل هیدرولوژیکی کشاورزی بسیار جامع برای انتقال آب، گرما و املاح در محیط اشباع و غیر اشباع می‌باشد. در این مدل برای شبیه‌سازی رشد گیاهی از مدل WOFOST استفاده می‌شود. اساس مدل، ارتباط فیزیکی پارامترهای آب، خاک، گیاه و اتمسفر می‌باشد و شبیه‌سازی رشد و توسعه گیاه در این مدل، با استفاده از اطلاعات مختلف اقلیم، آب، خاک و گیاه صورت می‌پذیرد. داده‌های زیرمدل هواشناسی براساس اطلاعات ایستگاه سینوپتیک هواشناسی کشاورزی رشت در سال ۱۳۸۶ بدست آمدند. خصوصیات هیدرولیکی مورد نیاز زیرمدل خاک شامل رطوبت باقی‌مانده و اشباع، هدایت آبی اشباع و پارامترهای ون گنوختن در دو لایه خاک با استفاده از درصد رس و سیلت، ماده آلی، وزن مخصوص ظاهری و تغییرات مکش آب خاک در رطوبت‌های مختلف از طریق روش حل معکوس که در مدل RETC آمده است، برآورد شدند. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه تحقیقاتی موسسه تحقیقات برنج رشت در جداول ۱ و ۲ ارائه شده‌اند.

زیرمدل آبیاری شامل اطلاعات مدیریت آبیاری نظیر شیوه آبیاری، عمق آب آبیاری، دوره تناوب و کیفیت آب آبیاری (شوری ۱/۰۴ دسی زیمنس بر متر و مجموع نمک‌های محلول ۵۹۸ میلی گرم در لیتر) است که بر طبق رقم برنج (رقم هاشمی) و قیود مدل بهینه‌سازی تعریف شدند. شرایط مرزی براساس عمق آب زیرزمینی ۲۰۰ سانتی‌متر به مدل شبیه‌ساز پیشنهاد شد.

برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAP از داده‌های رقم هاشمی مزرعه پژوهشی موسسه تحقیقات برنج رشت استفاده شد (۷). در طرح صحرایی انجام شده، تیمارهای آبیاری با دوره تناوب صفر (غرقاب دائم)، ۵ و ۸ روز (دوره‌های آبیاری متداول برنج رقم هاشمی در منطقه) با عمق آب در هر نوبت آبیاری ۵ سانتی‌متر در طول دوره رشد بودند.

به مقادیر عرف منطقه براساس مطالعات مهدوی و پورعزیزی (۹) و رضایی و نحوی (۶) انتخاب شدند (معادله ۴).

$$\text{model 1: } WUE_1 = \frac{Y}{V_{irr} + p} \quad (1)$$

$$\text{model 2: } WUE_2 = \frac{Y}{ET_{act}} \quad (2)$$

$$\text{model 3: } WUE_3 = \frac{Y}{T_{act}} \quad (3)$$

$$50 \leq D_1 \leq 60mm$$

$$20 \leq D_2 \leq 30mm$$

$$20 \leq D_3 \leq 40mm$$

$$10 \leq D_4 \leq 20mm$$

$$0 \leq T \leq 8day$$

که  $Y$ ،  $V_{irr}$ ،  $ET_{act}$  و  $T_{act}$  به ترتیب عملکرد محصول (کیلوگرم در مترمکعب)، حجم آب آبیاری (متر مکعب در هکتار)، تبخیر-تعرق واقعی (متر مکعب در هکتار)، تعرق واقعی (متر مکعب در هکتار) و بارندگی (متر مکعب در هکتار) هستند.  $WUE_1$ ،  $WUE_2$  و  $WUE_3$  به ترتیب بهره‌وری آب آبیاری، تبخیر-تعرق و تعرق بر حسب کیلوگرم در مترمکعب می‌باشند.  $D_1$  تا  $D_4$  به ترتیب عمق آب در هر نوبت آبیاری در مراحل استقرار، پنجه‌زنی، زایشی و رسیدن بر حسب میلی‌متر و  $T$  دوره تناوب آبیاری بر حسب روز هستند.

### الگوریتم شبیه‌سازی

در شاخص بهره‌وری آب، حجم آب آبیاری از مجموع عمق آب در هر نوبت آبیاری در واحد هکتار محاسبه گردید. همچنین به منظور برآورد اجزای بهره‌وری مصرف آب یعنی عملکرد محصول، آب آبیاری مصرفی، تبخیر-تعرق و تعرق به ازای عمق آب در هر نوبت آبیاری و دوره تناوب آبیاری (براساس قیود ارائه شده در معادله ۴) از مدل شبیه‌سازی هیدرولوژی کشاورزی SWAP استفاده شد. مدل SWAP (۱۹) یک عضو از خانواده مدل‌هایی است که در دانشگاه واگنینگن

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

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

جدول ۲- تغییرات رطوبت خاک در مکش‌های مختلف

عمق (سانتی‌متر)	۳۳ (کیلو پاسکال)	۱۰۰ (کیلو پاسکال)	۴۵۰ (کیلو پاسکال)	۱۲۰۰ (کیلو پاسکال)	۱۵۰۰ (کیلو پاسکال)
۰-۱۵	۰/۴	۰/۳۶	۰/۳۱	۰/۲۸	۰/۲۷
۱۵-۳۰	۰/۴	۰/۳۷	۰/۳۳	۰/۳۱	۰/۳۰

تشکیل و ظهور اندام‌های مختلف توصیف می‌شود. معادله ۶ نیز برای محاسبه مراحل توسعه‌یافتگی توصیه می‌شود (۵).

$$D_s^{j+1} = D_s^j + \frac{T_{eff}}{T_{sum,i}} = D_s^j + \frac{T_{av} - T_b}{\sum T_{av} - T_b} \quad (6)$$

که  $j$  تعداد روز،  $D_s$  مرحله توسعه‌یافتگی،  $T_{sum,i}$  مجموع دمای موردنیاز تا تکامل گیاه (سانتی‌گراد) و  $T_{eff}$  دمای موثر که به میانگین درجه حرارت روزانه برحسب درجه سانتی‌گراد وابسته است. ۳- پارامترهای حساس در فرآیند شبیه‌سازی رشد و تولید ماده خشک برنج در مدل SWAP، (۱۷) شامل شاخص سطح برگ در مرحله جوانه‌زنی، سطح ویژه برگ، ضرایب خاموشی برای پخش و هدایت نور مرئی، راندمان مصرف نور، حداکثر میزان همانندسازی دی‌اکسیدکربن، راندمان تبدیل به برگ و ساقه که به عنوان پارامترهای واسنجی و با استفاده از نرم‌افزار تخمین غیرخطی PEST و با توجه به مشاهدات صحرایی مجموع ماده خشک، ماده خشک خوشه و شاخص سطح برگ به روش تکرار ژاکوبی برآورد شدند. سایر پارامترها که تاثیر زیادی بر فرآیند رشد و شبیه‌سازی نداشتند براساس تحقیقات کنفالیبیری و همکاران (۲۰۰۶) و مطالعات محققان موسسه بین‌المللی تحقیقات برنج بر روی رقم IR72 (۱۶) که مشابه رقم هاشمی گیلان و از نوع ایندیکا هستند، انتخاب شدند.

مقادیر شاخص سطح برگ و ماده خشک اجزای مختلف برنج که در واسنجی و اعتبارسنجی مورد نیاز بودند، در ۵ نوبت در طول دوره رشد اندازه‌گیری شدند (جدول ۳).

با هدف شبیه‌سازی رشد و توسعه گیاه برنج توسط مدل هیدرولوژی کشاورزی SWAP، داده‌های مورد نیاز شبیه‌سازی به ۳ گروه زیر تقسیم‌بندی شدند:

۱- پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایش صحرایی، شامل داده‌های اجزای خاک، اطلاعات روزانه هواشناسی، مقادیر مجموع ماده خشک، شاخص سطح برگ، عمق آب آبیاری (جداول ۱ و ۲)

۲- پارامترهای محاسبه شده از طریق روابط موجود در مدل شبیه‌ساز SWAP، شامل دمای تجمعی و مراحل توسعه‌یافتگی، ساده‌ترین روشی که به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد روش مجموع درجه حرارت است که ارتباط خطی بین درجه حرارت و سرعت نمو برقرار می‌باشد (معادله ۵).

$$T_{sum,i} = \sum (T_{av} - T_b) \quad (5)$$

که در این رابطه  $T_{av}$  میانگین درجه حرارت روزانه ( $^{\circ}C$ ) و  $T_b$  درجه حرارت پایه است که در درجات کمتر از آن، رشد گیاه متوقف می‌گردد که برای برنج ۱۲ درجه سانتی‌گراد فرض می‌شود. کمترین مقدار تفاضل دمای میانگین و پایه برابر صفر است زیرا رشد فنولوژیکی گیاه یک فرآیند غیرقابل بازگشت است (۵).

مراحل نمو گیاه بر اساس سن فیزیولوژیکی تعریف و به وسیله

جدول ۳- مقادیر اندازه‌گیری صحرایی پارامترهای گیاهی برنج رقم هاشمی

پارامتر	روز قرائت	مقدار اندازه‌گیری شده		
		دوره تناوب صفر روز	دوره تناوب ۵ روز	دوره تناوب ۸ روز
شاخص سطح برگ	۱۳۸۶/۳/۲۱	۰/۱	۰/۰۶	۰/۱۲
	۱۳۸۶/۴/۱۰	۱/۲۴	۱/۰۸	۱/۳۳
	۱۳۸۶/۴/۲۵	۲/۹۷	۲/۳۵	۳/۰۰
	۱۳۸۶/۵/۹	۱/۵۷	۰/۷۴	۲/۰۹
	۱۳۸۶/۵/۲۵	۰/۸۸	.	۰/۶۸
	۱۳۸۶/۳/۲۱	.	.	.
	۱۳۸۶/۴/۱۰	.	.	.
	۱۳۸۶/۴/۲۵	.	.	.
	۱۳۸۶/۵/۹	۱۴۵۵	۱۶۰۶	۹۴۶
ماده خشک کل (کیلوگرم بر هکتار)	۱۳۸۶/۵/۲۵	۵۰۷۹	۵۱۴۸	۵۲۷۸
	۱۳۸۶/۳/۲۱	۱۵۵	۱۳۸	۱۵۸
	۱۳۸۶/۴/۱۰	۱۴۵۰	۱۶۳۳	۱۷۰۴
	۱۳۸۶/۴/۲۵	۴۶۸۸	۳۴۳۳	۴۴۳۸
	۱۳۸۶/۵/۹	۷۶۶۳	۴۶۳۳	۵۱۱۷
	۱۳۸۶/۵/۲۵	۱۰۸۰۴	۱۰۰۸۱	۱۰۱۳۲

متغیرهای تصمیم،  $m_j$  مجموع ژن‌های متغیر تصمیم می‌باشند.

#### جدول ۴- پارامترهای الگوریتم ژنتیک برای دستیابی به همگرایی مطلق در مدل‌های بهینه این تحقیق

مقدار پارامترهای الگوریتم ژنتیک	
تعداد نسل	۲۰۰
احتمال جهش	۰/۰۰۹
احتمال تزویج	۰/۹۵
طول کروموزوم	۱۰۱
تعداد جمعیت	۲۵۰

به منظور تولید مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، مدل شبیه‌ساز رشد و توسعه گیاهی SWAP به مدل بهینه‌یابی اضافه شد. از آنجا که زبان برنامه‌نویسی روش حل الگوریتم ژنتیک فترن بود، بنابراین داده‌های ورودی مدل SWAP که حاوی اطلاعات آب آبیاری، خاک، گیاه، اقلیم و شرایط مرزی هستند به زبان برنامه‌نویسی فترن تبدیل شد و به صورت زیرروال به برنامه الگوریتم ژنتیک اضافه شد. با اجرای مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی متغیرهای تصمیم در محدوده قیود یاد شده (معادله ۴) به صورت ورودی در مدل شبیه‌ساز گیاهی اعمال شدند. در هر نسل، از میان جواب‌های ۲۵۰ جمعیت مربوط به آن نسل، مقدار بیشینه تابع هدف انتخاب می‌شود. با ارتقاء نسل‌ها، جواب عمومی توابع هدف به سمت مقدار ثابتی همگرا شدند (شکل‌های ۶-۴) و در خروجی مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی در نسل شماره ۲۰۰، جواب بهینه عمومی توابع هدف و مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم تعیین شدند. شکل ۱ راهکار بهینه‌یابی- شبیه‌سازی ارائه شده، برای رسیدن به جواب عمومی بهینه منطقی را نشان می‌دهد.

### نتایج و بحث

مقادیر ضرایب واسنجی پارامترهای گیاهی مدل شبیه‌ساز SWAP در دوره‌های تناوب صفر (غرقاب دائم) و ۸ روز در جدول ۵ ارائه شده است. شکل‌های ۲ و ۳ نتایج اعتبارسنجی مدل را برحسب گزاره‌های آماری ضریب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده نشان می‌دهند. براساس این نتایج، مدل شبیه‌ساز SWAP، براساس ضرایب واسنجی با دوره تناوب ۸ روز، به ترتیب با ضریب همبستگی، جذر میانگین خطا و جذر میانگین خطای نرمال شده ۰/۹۸۴، ۴۵۴/۲۳ کیلوگرم در هکتار و ۱۱/۴ درصد توانست مدیریت آبیاری متناوب ۵ روز را با دقت بیشتری نسبت به ضرایب واسنجی با دوره تناوب صفر روز شبیه‌سازی نماید.

به دلیل تاثیرپذیری نتایج مدل بهینه‌سازی از صحت و دقت مدل شبیه‌سازی، داده‌های مشاهداتی به دو سری داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی تقسیم و پس از واسنجی، اعتبار نتایج به دست آمده برای سری داده‌های اعتبارسنجی مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور واسنجی مدل در محدوده مورد مطالعه، از اطلاعات عملکرد برنج در مدیریت‌های آبیاری با دوره تناوب صفر و ۸ روز (بهترین و بدترین شرایط تنش خشکی) استفاده شد. پس از سازگاری مدل شبیه‌ساز در شرایط اشباع و خشکی شدید (دوره تناوب صفر و ۸ روز)، اعتبارسنجی مدل SWAP، برای دوره تناوب ۵ روز که حد میانه‌ای از شرایط خشکی و اشباع می‌باشد با استفاده از میانگین ضرایب واسنجی صفر و هشت روز صورت گرفت.

جهت ارزیابی آماری نتایج شبیه‌سازی مجموع ماده خشک در بخش اعتبارسنجی از پارامترهای جذر میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده<sup>۲</sup> استفاده گردید (معادلات ۷ و ۸).

$$RMSE = \left( \sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2 / n \right)^{0.5} \quad (7)$$

$$RMSE - N = 100 \left( \sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2 / n \right)^{0.5} / \bar{o} \quad (8)$$

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

### الگوریتم حل مدل بهینه‌سازی

به منظور تعیین مقادیر بهینه مدل بهینه‌سازی این تحقیق، به دلیل توانمندی‌های قابل توجه و انعطاف‌پذیری مناسب در فرآیند بهینه‌سازی از روش حل الگوریتم ژنتیک که یک روش حل برنامه‌ریزی غیرخطی برای حل بهینه عمومی است، استفاده شد (۱۱). الگوی حل الگوریتم ژنتیک شامل پنج مرحله‌ی تولید جمعیت اولیه و ارزیابی آن‌ها، انتخاب والد، عملگر تزویج<sup>۳</sup>، عملگر جهش و ایجاد نسل جدید است. پرووین و همکاران (۲۲) جمعیت اولیه، مقادیر احتمال جهش و تزویج، تابع برازندگی و چگونگی انتخاب جمعیت مرحله بعد را، از عوامل موثر در سرعت همگرایی جواب‌های الگوریتم ژنتیک به سمت بهینه مطلق دانستند. طول کروموزوم با استفاده از معادله ۹ و مقادیر سایر پارامترهای حل الگوریتم ژنتیک، شامل تعداد جمعیت اولیه، تعداد نسل، احتمال جهش و تزویج براساس راهکار پرووین و همکاران (۲۰۰۶) محاسبه و در جدول ۴ نشان داده شده‌اند.

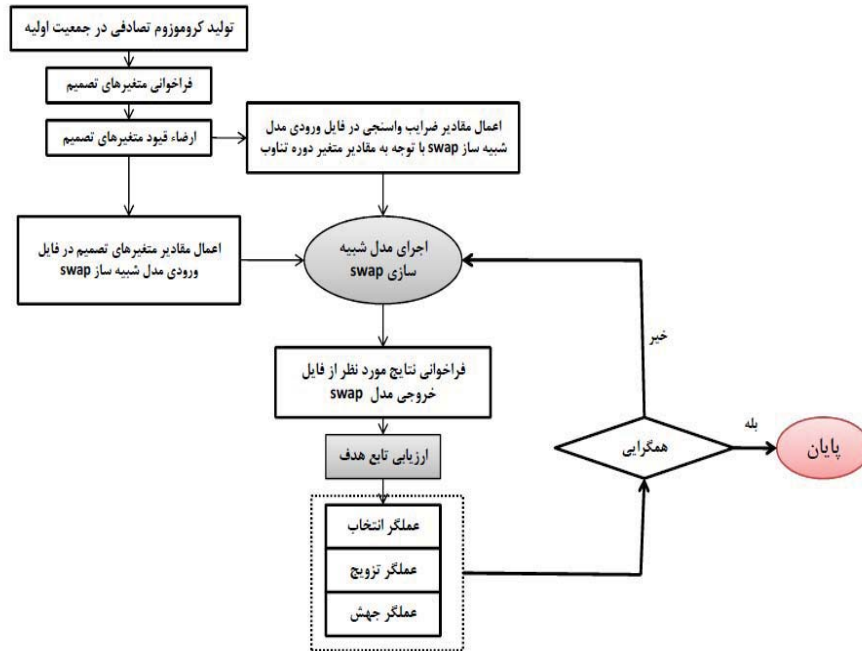
$$2^{(m_j-1)} < (b-a) \times 10^5 < 2^{m_j} - 1 \quad (9)$$

که در این رابطه،  $a$  حدپایین متغیرهای تصمیم،  $b$  حد بالای

1 - RMSE (Root Mean square Error)

2 - RMSE-N(Root Mean square Error- Normal)

3 - Crossover



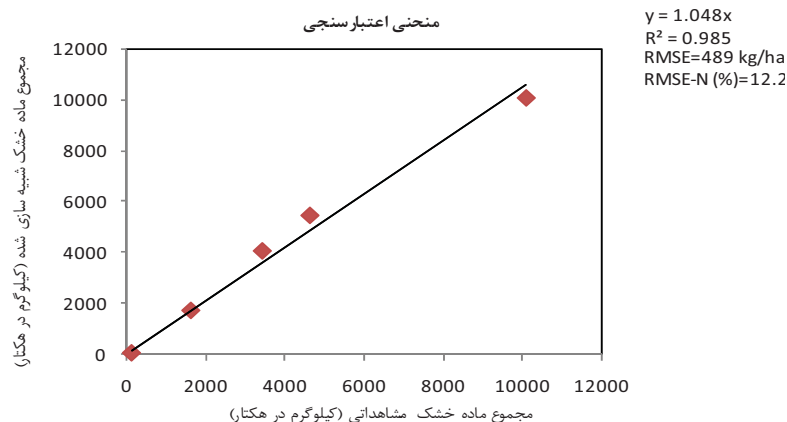
شکل ۱- الگوی سازمانی مدل شبیه‌سازی- بهینه‌یابی در تحقیق حاضر

معنای رابط بین محصول (ستاده) و عوامل تولید (نهاده) است، مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل بهینه‌سازی به روش حل الگوریتم ژنتیک، بر طبق محدوده متغیرهای تصمیم، اقدام به پیشینه‌سازی تابع هدف شاخص بهره‌وری نمود. مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم عمق آب در هر نوبت آبیاری در مراحل توسعه‌یافتگی و دوره تناوب آبیاری برای یافتن مقدار بهینه جواب عمومی تابع هدف، در جدول ۶ ارائه شده است. باید توجه داشت که به جهت دستیابی به جواب دقیق، مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم به صورت اعشاری تعیین شده‌اند که در نهایت به جهت سهولت اجرا و نزدیکی به شرایط عرف منطقه، در محدوده بهینه‌سازی شده، به اصلاح این مقادیر به صورت عدد صحیح مبادرت شد.

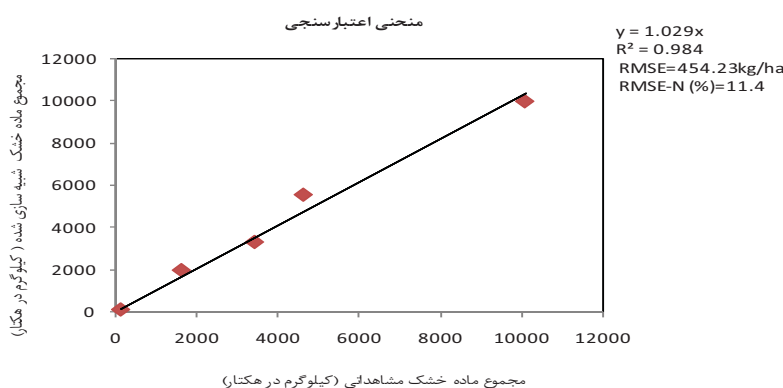
بدیهی است که پارامترهای واسنجی گیاه برنج در دوره‌های تناوب ۵ و ۸ روز، به دلیل مشابه بودن شرایط تنش خشکی بر گیاه، به هم نزدیک‌تر خواهند بود. بنابراین به منظور اعتبارسنجی مدل SWAP در شرایط آبیاری تناوبی می‌توان به ضرایب واسنجی ۸ روز اتکا نمود. در این تحقیق به دلیل بهینه‌سازی در دامنه پیوسته از دوره تناوب (صفر تا ۸ روز)، از میانگین ضرایب واسنجی صفر و ۸ روز استفاده شد. به طور کلی، نتایج حاکی است که مدل SWAP از توانایی زیادی در تخمین اجزای بهره‌وری آب مصرفی برخوردار است. بنابراین از نتایج شبیه‌سازی مدل SWAP، با ضریب اطمینان بالایی در مدل بهینه‌سازی استفاده شد. به منظور بهینه‌سازی مدیریت آبیاری تناوبی، بهره‌وری آب که به

جدول ۵- ضرایب واسنجی تخمین زده شده توسط PEST برای مدیریت آبیاری با دوره تناوب صفر و ۸ روز

مقادیر ضرایب واسنجی		واحد	پارامترهای گیاهی
دوره تناوب صفر روز	دوره تناوب ۸ روز		
۰/۲۸۰۰۰	۰/۱۰۰۰۰	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	شاخص سطح برگ در مرحله جوانه زنی
۰/۰۰۶۴۶	۰/۰۰۲۲۰	ha/kg	سطح ویژه برگ
۰/۷۹۶۴۰	۰/۷۰۰۲۰	-	ضریب خاموشی برای پخش نور مرئی
۰/۶۳۷۳۰	۰/۵۵۶۷۱	-	ضریب خاموشی برای هدایت نور مرئی
۰/۹۸۳۲۰	۱/۰۰۰۰۶۸	g ha <sup>-1</sup> hr <sup>-1</sup> /j m <sup>2</sup>	راندمان مصرف نور EFF
۴۰/۲۰۷۰۰	۳۵/۹۰۹۰۰	Kg ha <sup>-1</sup> hr <sup>-1</sup>	حداکثر میزان همانندسازی دی اکسید کربن
۰/۹۷۰۰۰	۱/۰۰۰۰۰	Kg/kg	راندمان تبدیل به برگ
۰/۱۹۹۲۱۱	۰/۲۵۱۸۰۶	Kg/kg	راندمان تبدیل به ساقه
۰/۴۱	۰/۳۶	-	مجموع مربعات وزن باقیمانده



شکل ۲- اعتبارسنجی مدل SWAP با استفاده از ضرایب واسنجی دوره تناوب صفر روز



شکل ۳- اعتبارسنجی مدل SWAP با استفاده از ضرایب واسنجی دوره تناوب ۸ روز

جدول ۶- مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم و توابع هدف مدل‌های بهینه‌سازی بهره‌وری آب مصرفی، تبخیر-تعرق و تعرق

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

۱/۳۳ و ۲/۹۰ همگرا شدند.

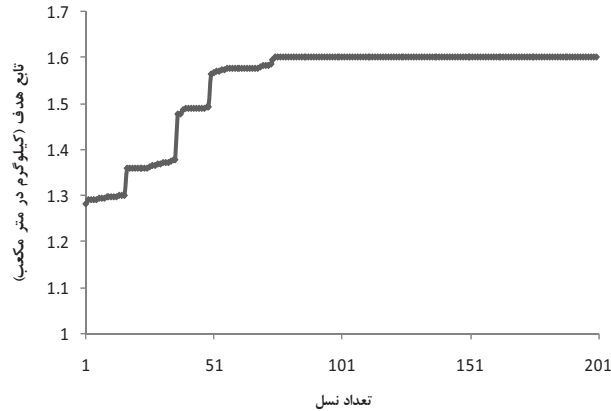
با هدف بررسی و تحلیل نمایه بهره‌وری آب مصرفی، مقادیر اجزای تابع هدف شامل آب آبیاری، مجموع ماده خشک، تعرق و تبخیر-تعرق از نتایج مدل‌های بهینه‌سازی استخراج گردید که در جدول ۷ مشاهده می‌شود. نتایج جدول اخیر نشان می‌دهد که به دلیل افزایش تنش خشکی و اتمام ذخیره آب آبیاری، گیاه برای غلبه بر خسارات ناشی از تنش خشکی از ذخیره رطوبتی پروفیل خاک استفاده می‌کند که موجب افزایش حجم تبخیر-تعرق نسبت به آب آبیاری

شکل‌های ۴ تا ۶ تغییرات مقادیر توابع هدف را به ازای شماره نسل نشان می‌دهند. همان‌گونه که در شکل‌ها مشخص است، با ارتقاء شماره نسل، جواب تابع هدف برای دستیابی به مقدار بیشینه، افزایش می‌یابد و سرانجام در یک مقدار ثابتی به همگرایی می‌رسد. روند همگرایی در مقادیر تابع هدف و عدم نوسان آنها در تعداد زیادی از نسل‌ها نشان دهنده، دستیابی به جواب بهینه عمومی می‌باشد. در این شکل‌ها، مقادیر تابع هدف بهره‌وری آب مصرفی برحسب آب آبیاری، تبخیر-تعرق و تعرق به ترتیب به سمت جواب بهینه عمومی ۱/۶۰،

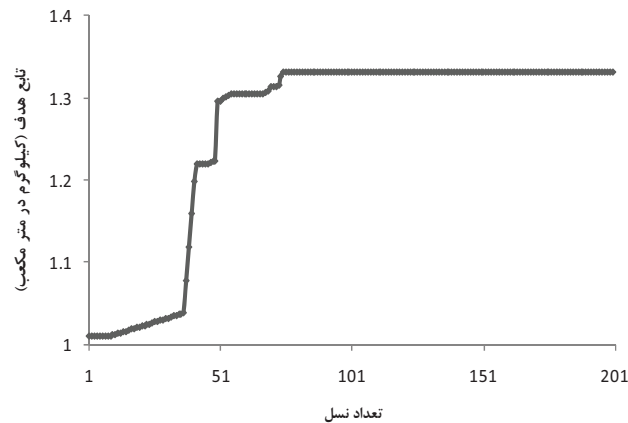
شده است.

به جهت فیزیولوژی خاص گیاه برنج، که موجب تفاوت و تمایز این گیاه نسبت به سایر گیاهان زراعی شده است، با کاهش حجم آب آبیاری و افزایش تنش خشکی، سطح برگ و تعداد روزنه‌های برگ افزایش می‌یابد (جدول ۵ نشان می‌دهد که با افزایش تنش خشکی در دوره تناوب ۸ روز در مقایسه با دوره تناوب صفر روز، سطح برگ

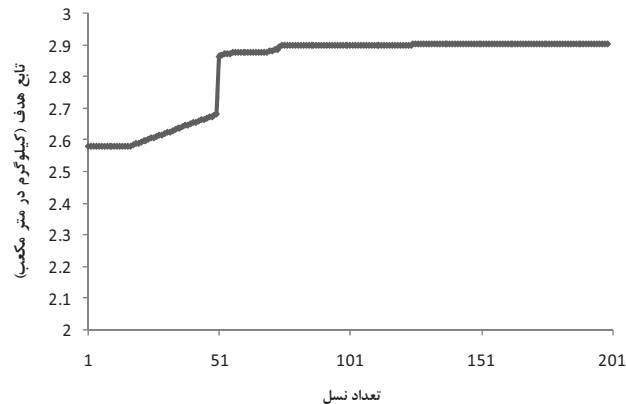
افزایش می‌یابد). این پدیده موجب افزایش میزان تعرق گیاه می‌گردد. افزایش سطح برگ می‌تواند منجر به افزایش میزان سایه‌اندازی برگ و در نتیجه کاهش تبخیر از سطح خاک گردد. باید توجه داشت که تغییرات تعرق در مقایسه با تغییرات تبخیر بسیار اندک است بنابراین همواره در تحلیل فرآیند تبخیر-تعرق، نقش تغییرات تبخیر چشم‌گیرتر است.



شکل ۴- روند تغییرات تابع هدف شاخص بهره‌وری اب آبیاری در برابر شماره نسل



شکل ۵- روند تغییرات تابع هدف شاخص بهره‌وری تبخیر-تعرق در برابر شماره نسل



شکل ۶- روند تغییرات تابع هدف شاخص بهره‌وری تعرق در برابر شماره نسل



جدول ۷- مقادیر اجزای تابع هدف در مدل‌های بهینه‌سازی بهره‌وری آب مصرفی، تبخیر-تعرق و تعرق

شماره مدل بهینه‌یابی	نمایه بهره‌وری	میزان آب مصرفی (مترمکعب بر هکتار)		
		تبخیر - تعرق	تبخیر	تعرق
۱	آب آبیاری	۳۰۰۴	۳۶۳۰	۲۱۰۳
۲	تبخیر - تعرق	۳۰۰۱	۳۵۸۵	۲۱۱۳
۳	تعرق	۳۲۲۱	۳۹۶۶	۱۶۵۹

رشد رخ داده است. در این شرایط با کاهش حجم آب مصرفی (جدول ۷) و پذیرش تنش بیشتر، شاخص سطح برگ زیاد می‌شود. همان‌طور که پیشتر اشاره شد با افزایش سطح برگ و تعداد روزنه‌ها، تعرق گیاه نیز افزایش می‌یابد. بنابراین در مدل بهینه‌سازی شماره ۲، با پذیرش بیشترین تنش خشکی، حداکثر تعرق اتفاق افتاده است. اما با افزایش سطح سایه‌انداز برگ‌ها، تبخیر از خاک کم می‌شود. از آنجایی که میزان افزایش تعرق در مقایسه با کاهش تبخیر اندک است، بنابراین در پدیده تبخیر-تعرق، نقش کاهش تبخیر محسوس‌تر است. این امر موجب می‌شود که در مدل بهینه‌سازی شماره ۲، با کاهش تبخیر از خاک، در مقایسه با نمایه‌های بهره‌وری آب آبیاری و تعرق، کمترین تبخیر-تعرق به این الگوی مدیریت آبیاری اختصاص یابد. بررسی جدول ۷ نشان می‌دهد که به دلیل اعمال تنش خشکی، متناسب با شرایط خاص فیزیولوژی برنج، ماده خشک در حد مطلوبی تولید شده است. اما در مقایسه با نمایه بهره‌وری آب آبیاری و تعرق، تشدید تنش خشکی موجب شده است که کمترین میزان تولید ماده خشک به الگوی مدیریت آبیاری مدل بهینه‌یابی شماره ۲ اختصاص یابد.

### شاخص بهره‌وری تعرق

به منظور بهینه‌سازی مدیریت آبیاری تناوبی با هدف دستیابی به بهترین شاخص بهره‌وری تعرق، متغیرهای تصمیم عمق آب در هر نوبت آبیاری و دوره تناوب نسبت به شرایط بهینه جواب عمومی تابع هدف بهره‌وری آب آبیاری کاهش نشان می‌دهد (جدول ۶). به این ترتیب در این الگوی مدیریتی آبیاری تناوبی، در مراحل بحرانی پنجه‌زنی و زایشی علی‌رغم کاهش دور آبیاری، به منظور جلوگیری از نقصان عملکرد تمایل به حد بالای قیود متغیرهای تصمیم عمق آب در هر نوبت آبیاری مشاهده می‌شود. در حالی که در دوره‌های رسیدگی و فیزیولوژیکی با کاهش دور آبیاری، گرایش به سوی مقادیر پایین عمق آب در هر نوبت آبیاری به چشم می‌خورد (جدول ۶). در تمامی مراحل توسعه‌یافتگی نسبت به نمایه بهره‌وری آب آبیاری، از میزان عمق آب در هر نوبت آبیاری کاسته شده است؛ اما با توجه به کاهش دور آبیاری، میزان آب مصرفی نسبت به نمایه‌های بهره‌وری آب آبیاری و تبخیر-تعرق ارتقا یافته است (جدول ۷). در مدل بهینه‌سازی شماره ۳، با مصرف بیشتر آب آبیاری و کاهش سطح برگ، به جهت ضخیم شدن برگ‌ها و کاهش تعداد روزنه‌ها روی سطح

### شاخص بهره‌وری آب آبیاری

بررسی نتایج مدل بهینه‌سازی در جدول ۶ نشان می‌دهد که برای همگرایی جواب عمومی بهینه تابع هدف و دستیابی به حداکثر مقدار بهره‌وری آب آبیاری، مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم عمق آب در هر نوبت آبیاری در مراحل بحرانی شامل پنجه‌زنی و زایشی به سمت حد بالای قیود و در مراحل مقاوم‌تر استقرار و رسیدگی به سمت حد پایین میل می‌کند که با فیزیولوژی گیاه برنج همخوانی دارد. یوشیدا (۲۵) معتقد است حساس‌ترین دوره به تنش خشکی از مرحله کاهش تقسیم سلولی تا آخر دوره زایشی می‌باشد. خشکی در این مراحل موجب کاهش طول ساقه، نسبت پر شدن دانه، افزایش نسبت عقیم شدن و در نهایت منجر به افت عملکرد محصول برنج می‌گردد (۲۰). مقدار بهینه متغیر تصمیم دوره تناوب آبیاری در این مدل بهینه‌سازی ۷/۳۳ روز تعیین گردید. فرداد و شیردلی (۸) در یک بررسی نشان دادند که با افزایش دور آبیاری از ۲ تا ۷ روز عملکرد محصول برنج افزایش می‌یابد ولی ادامه روند افزایش دور آبیاری به دلیل مقاومت ریشه در برابر جذب آب و مواد غذایی منجر به کاهش وزن هزار دانه، ارتفاع گیاه و عملکرد بیولوژیکی محصول می‌گردد.

بررسی مقادیر اجزای بهره‌وری آب که از نتایج مدل بهینه‌سازی شماره ۱ استخراج گردید (جدول ۷) حاکی از آن است که، با اعمال دور آبیاری ۷/۳۳ روز و کاهش حجم آب آبیاری در کل فصل رشد (۳۰۰۴ مترمکعب در هکتار)، تنش خشکی زیادی به گیاه تحمیل شده است. به طور کلی، این الگوی مدیریت آبیاری تناوبی، به جهت اعمال تنش خشکی منطبق با فیزیولوژی مراحل مختلف رشد، بیشترین میزان مجموع ماده خشک را به خود اختصاص داده است.

### شاخص بهره‌وری تبخیر-تعرق

بررسی نتایج نشان می‌دهد که مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم به گونه‌ای که در جدول ۶ ارائه شده است، بهره‌وری تبخیر-تعرق را به سمت عدد ۱/۳۳ همگرا نموده است. با افزایش دور آبیاری، متغیرهای تصمیم عمق آب در هر نوبت آبیاری در مراحل مقاوم استقرار و رسیدگی، به مقادیر پایین قیود گرایش نشان می‌دهند، که موجب می‌شود تنش بیشتری به گیاه تحمیل شود.

در مدل بهینه‌یابی شماره ۲، نسبت به نمایه‌های بهره‌وری آب آبیاری و تعرق، کاهش عمق آب در هر نوبت آبیاری در تمامی مراحل

هکتار در مقایسه با ۱۰۰۲۴ کیلوگرم ماده خشک در هکتار در نمایه آب آبیاری)، مقدار بهره‌وری کمتری را به خود اختصاص داده است. پس به دلیل بهره‌وری پایین و دشواری اندازه‌گیری میزان تبخیر-تعرق شاخص بهره‌وری تبخیر-تعرق، گزینه مطلوبی برای برنامه‌ریزی توزیع و تحویل آب در اراضی شالیزاری به شمار نمی‌آید.

نمایه بهره‌وری آب آبیاری نسبت به نمایه بهره‌وری تعرق، به جهت صرفه‌جویی منطقی در مصرف آب، می‌تواند عملکرد محصول را بهبود بخشد. شاخص بهره‌وری آب آبیاری نسبت به بهره‌وری تعرق، با حجم آب کمتری (۳۰۰۴ مترمکعب در هکتار در مقایسه با ۳۲۲۱ مترمکعب در هکتار در نمایه تعرق) مجموع ماده خشک را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی توزیع و تحویل آب به اراضی شالیزاری از طریق شبکه‌های آبیاری، بر اساس حجم آب ورودی صورت می‌پذیرد. بنابراین حجم آب آبیاری نقش مهمی در برنامه‌ریزی مدیریت آبیاری برنج ایفا می‌کند.

به طور کلی، با توجه به بحران‌های خشکسالی و کم‌آبی، به دلیل صرفه‌جویی در منابع آبیاری، افزایش مجموع ماده خشک و سهولت اندازه‌گیری آب آبیاری و اعمال دوره تناوب متناسب با شرایط کم‌آبی شبکه آبیاری سفیدرود، الگوی آبیاری مدل بهینه‌سازی شماره ۱، براساس نمایه بهره‌وری آب آبیاری به منظور آبیاری رقم هاشمی رشت برای زارعین توصیه می‌شود.

به جهت کاربردی شدن نتایج مدل بهینه‌سازی شماره ۱، عمق آب آبیاری در مراحل مختلف توسعه‌یافتگی گیاه برنج و دوره تناوب آب آبیاری به صورت عدد صحیح (نزدیک به محدوده‌های بهینه‌سازی شده) اصلاح گردید و در این شرایط ثابت مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی اجرا شد. در نهایت با بررسی شرایط مختلف، عمق‌های ۵۱، ۲۹، ۳۹ و ۱۱ میلی‌متر به ترتیب در مراحل استقرار، پنجه‌زنی، زایشی و رسیدگی و دوره تناوب ثابت ۸ روز در طول فصل رشد با بهترین میزان بهره‌وری آب آبیاری (۱/۶۰ کیلوگرم در متر مکعب) برای مدیریت بهینه آبیاری برنج رقم هاشمی رشت پیشنهاد می‌شود.

برگ، تعرق گیاه کاهش می‌یابد. از آنجایی که بیشترین حجم آب آبیاری به این الگوی مدیریتی تعلق دارد، بنابراین به جهت فیزیولوژی متفاوت گیاه برنج، کمترین میزان تعرق را نسبت به مدل‌های بهینه‌سازی شماره ۲ و ۳ به خود اختصاص داده است. بنابراین با افزایش آب مصرفی به دلیل کاهش تعرق برنج، طبق مفهوم بیلان تبخیر از سطح خاک بیشتر می‌شود. در نهایت به دلیل اینکه با افزایش حجم آب آبیاری، تغییرات افزایشی تبخیر از سطح خاک بیشتر از تغییرات کاهش تعرق است، پس در این شرایط میزان تبخیر-تعرق نسبت به نمایه‌های بهره‌وری آب آبیاری و تبخیر-تعرق، زیاده‌تر می‌شود. نتایج جدول ۷ ثابت می‌کند که الگوی مدیریت آبیاری ارائه شده در جدول ۶ برای نمایه بهره‌وری تعرق (مدل شماره ۳)، با شرایط فیزیولوژی خاص گیاه برنج تطابق دارد و توانسته محصول برنج را به میزان مطلوبی تولید نماید.

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق، علی‌رغم اینکه بیشترین مقدار بهره‌وری به نمایه بهره‌وری تعرق (۲/۹ کیلوگرم بر مترمکعب) اختصاص دارد اما به دلیل اینکه برآورد دقیق میزان تعرق و تبخیر-تعرق امری دشوار و هزینه‌بر محسوب می‌شود، از مقبولیت عام برخوردار نیست.

در نمایه بهره‌وری تعرق، با توجه به فیزیولوژی خاص گیاه برنج، برای دستیابی به میزان تعرق کمتر، باید آب آبیاری زیادی در اراضی شالیزاری (۳۲۲۱ مترمکعب در هکتار در مقایسه با ۳۰۰۴ و ۳۰۰۱ مترمکعب در هکتار در نمایه‌های آب آبیاری و تبخیر-تعرق) مصرف شود. بنابراین حتی در مدیریت آبیاری بهینه، به دلیل مصرف آب بیشتر در دوره‌های بحرانی، حجم آب ورودی افزایش می‌یابد که منجر به عدم استقبال مدیران برنامه‌ریز نسبت به نمایه بهره‌وری تعرق شده است. نمایه بهره‌وری تبخیر-تعرق علی‌رغم صرفه‌جویی در مصرف آب و کاهش تبخیر-تعرق به جهت کاهش عملکرد محصول در مقایسه با نمایه بهره‌وری آب آبیاری (۹۹۴۴ کیلوگرم ماده خشک در

## منابع

- ۱- آرمسا س. و رشتچی ل. ۱۳۸۴. مجموعه تجربیات شرکت بهره برداری از شبکه‌های آبیاری و زهکشی گیلان در مدیریت بحران. مجموعه مقالات کارگاه آموزشی مدیریت آب در شالیزار. ۲۰ صفحه
- ۲- امیری ا.، کاوسی م. و جهرمی س. ۱۳۸۵. مدیریت آبیاری در شالیزار. همایش ملی شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز. اردیبهشت ماه.
- ۳- امیری ا.، رضایی م.، یزدانی م. و رضوی پور ت. ۱۳۸۶. ارزیابی کاربرد مدل SWAP جهت پیش‌بینی عملکرد برنج در شرایط خشک‌سالی. اولین همایش سازگاری با کم‌آبی، تهران. بهمن ماه.
- ۴- امیری ا. و رضایی م. ۱۳۸۸. بررسی تغییرات بهره‌وری آب در شالیزارهای گیلان. دومین همایش ملی اثرات خشک‌سالی و راهکارهای مدیریت آن. مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان و ستاد حوادث غیر مترقبه استانداری اصفهان، اردیبهشت ماه.

- ۵- رحیمیان ح. و شریعتی ش. ۱۳۷۸. مدل‌سازی رقابت علف‌های هرز و گیاهان زراعی (ترجمه). نشر آموزش کشاورزی. ۲۹۴ صفحه.
- ۶- رضایی م. و نحوی م. ۱۳۸۲. اثر دور آبیاری بر مقدار مصرف آب و عملکرد برنج در گیلان. مجموعه مقالات یازدهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. ۸۳ شماره: ۲۴۰-۲۳۳.
- ۷- 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.
- ۸- فرداد ح. و شیردلی ع. ۱۳۷۴. اثر دور آبیاری بر عملکرد محصول دانه جو و رشد آن. مجله علوم کشاورزی ایران. جلد ۲۶ (۱): ۱۲۹-۱۲۰.
- ۹- مهدوی ف. و پورعزیزی م. ۱۳۸۲. مصرف بهینه آب در برنج. سایت برنج. [www.berenge.com](http://www.berenge.com)
- ۱۰- یزدانی م. ر. و پارسی‌نژاد. م. ۱۳۸۷. مدیریت آبیاری و زهکشی سطحی در اراضی شالیزاری. پنجمین کارگاه فنی زهکشی و محیط زیست، تهران. آبان ماه.
- 11- Aly A.H., and Peralta R.C. 1999. Comparison of a genetic algorithm and mathematical programming to the design of groundwater cleanup systems Agricultural systems 35: 2415-2425.
- 12- Akhtar S., Kiyoshi H., and Yann C. 2005. Input assimilation of soil water atmosphere and plant (SWAP) model with GA using cluster computers. Global Change Biol. 8 (4): 372-389.
- 13- Belder P., Bouman B.A.M., Spiertz J.H.J., and Guoan L. 2007. Exploring options for water savings in lowland rice using a modeling approach. Agric. Syst 92: 114-91.
- 14- Bouman B., and Tuong T.P. 2001. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice. Agricultural Water Management 49: 11-30.
- 15- Bouman B.A.M.L., Feng T.P., Tuong, G. Lu., Wang H., and Feng Y. 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.
- 16- Boogaard H.L., Van Diepen C.A., Rötter R.P., Cabrera J.M.C.A., and Van Laar H.H. 1998. WOFOST 7.1 User guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 5.1. Techn. Doc. 52, Alterra, WUR, Wageningen, The Netherlands, 144 pp.
- 17- Confalonieri R., Gusberty D., and Acutis M. 2006. Comparison of WOFOST, CropSyst and WARM for simulating rice growth (Japonica type – short cycle varieties). Italian Journal of Agrometeorology: 37-16.
- 18- Facon T. 2006. Water management in rice in AsiaWorld. Journal of Microbiology and Biotechnology. 13: 689-692.
- 19- Feddes, R.A., Kowalik P.J., and Zaradny H. 1978. Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monographs. Pudoc. Wageningen. 189 pp.
- 20- Hwang Gi., Kim Kt., and Jeong Ju. 1989. The effect of drought at the reproductive stage on the degeneration sterility, ripening and nutrient uptake of rice. Research Report of the Rural Development Administration, Rice.31(1): 36-42.
- 21- Molden D., Murry-Rust H., Sakthivadival R., and Makin I. 2007. Water Productivity in Agriculture, Limits and Opportunities for Improvement. CABI Publishing. Wallingford, UK: 1-18.
- 22- Praveen k., Almeda J., Bajcsy P., Folk M., and Markus M. 2006. Hydro informatics data integrative approaches in computation, analysis and modeling. Chapter 24: Genetic Algorithm. CRC press, Taylor and France group. 529 pages.
- 23- Raju K and Kumar D. N., 2004. Irrigation Planning using Genetic Algorithms. In: Water Resources Management, 18 (2):163-176.
- 24- Savic D., and Walter G. 1997. Genetic Algorithms for least cost design of water distribution networks. J. Water Resour. Plng. Mgmt. ASCE. 123(2): 67-77.
- 25- Yoshida Sh. 1981. Fundamentals of Rice Crop Science. Theintern Rice Inst. Philippines.
- 26- Zhao Y., Zhang D., Yonglu T., Jiao W., and Lingyong J. 2009. An optimal model of a agriculture circular system for paddy & edible fungus & dry land International Journal of Management Science and Engineering Management .69 (4): 302-310.
- 27- Zwart S.J, and Bastiaanssen W.G.M. 2004. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. Agric. Water Manage. 69(2): 115-133.

## Comparison of Optimized Some Water Use Efficiency in Paddy Fields of Rasht

M. Aghajani<sup>1</sup>- M. Navabian<sup>2\*</sup>

Received: 21-02-2012

Accepted: 25-06-2012

### Abstract

Water for rice cultivation is one of the main inputs. The new administration of irrigated rice is increase water efficiency and water conservation in the paddy fields. In this research, for optimization of intermittent irrigation management in proportion to water requirement of different stages of rice growth was present an optimization-simulation model to maximize irrigation water, transpiration and evapotranspiration productivity Indexes. Irrigation water depth in stages of tiller, vegetative, maturity, harvest and irrigation intervals were selected as decided values in optimization model. Simulation of plant growth stages, using the hydrological model SWAP and genetic algorithm was used to solve the optimization model to maximize agricultural productivity. Finally, the optimum amount of irrigation water productivity, transpiration and evaporation - transpiration were obtained 1.60, 2.90 and 1.33(kg/m<sup>3</sup>) respectively. Results showed, irrigation water productivity index has more harmonize with Sefidroud irrigation network. Also the index is user-friendly in applying and calculating. So according to maximizing of water productivity index irrigation depth was recommended 51, 29, 39 and 11 mm respectively in stages of tiller, vegetative, maturity, harvest and and 8 days period of irrigation intervals to improve water productivity index in Hashemi variety in Rasht. Optimization results showed optimal intermittent irrigation is successive compared with flood irrigation in rice.

**Keywords:** Genetic Algorithm, Rice, Optimization model, SWAP model, Intermittent irrigation management

---

1,2- MSc Student and Assistant prof., Dept. of Water Eng., Faculty of Agriculture, University of Guilan, Rasht, Iran  
(\*-Corresponding Author Email: Navabian@guilan.ac.ir)