

Development of a Nonlinear Programming Model for determination of Optimal Cropping Pattern Based on Deficit Irrigation Scenarios

MOHAMMAD-HADI NAZARIFAR, AMIR SALARI* AND REZWANEH MOMENI

1. Research Expert, Department of irrigation and drainage, Pardis of Aboreihan, Tehran University, Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Department of Plant Production, Faculty of Agricultural and Natural Resources and Saffron Institute University of Torbat Heydarieh, Torbat Heydarieh, Iran
3. Research Expert, Department of irrigation and drainage, Pardis of Aboreihan, Tehran University, Tehran, Iran

(Received: Oct. 14, 2017- Revised: Feb. 14, 2018- Accepted: March. 4, 2018)

ABSTRACT

Obtaining appropriate levels of deficit irrigation is necessary to improve water productivity and performance of irrigation networks in deficit irrigation conditions. This study was carried out to develop a nonlinear programming model for determination of an optimal cropping pattern in deficit irrigation conditions. A non-linear model with the objective function of economical water productivity index (Net profit to water consumption ratio) was combined with a crop growth model and it was evaluated using the data of Shahid Chamran irrigation network. Results showed that the highest cultivation area in all scenarios is related to wheat crop. The wheat cultivation area for the 10, 20 and 30 percent deficit irrigation were estimated to be 674, 949 and 1362 ha, respectively. The increased cultivation area in 30 percent deficit irrigation scenario was estimated 92 percent as compared to the full irrigation scenario. The lowest cultivation area in the network was for sunflower with an area of 189 hectares (in 30 percent scenario). The results of this study for the 10 percent scenario indicated that the overall economical water productivity of the network can be increased up to 19% by managing cropping pattern as compared to the full irrigation scenario. While in the 20 and 30 percent deficit irrigation scenarios, the economical water productivity index values increased 21 and 23 percent respectively by implementing optimal cropping pattern. Also studies show that the different combinations of deficit irrigation scenarios for the crops could present different results. Accordingly, the overall water productivity of the network can be increased to a maximum of 15250 Rls/m³, if 10 percent for broad bean and bean, 20 percent for sunflower and potatoes and 30 percent deficit irrigation for wheat are considered.

Keywords: Cropping pattern, Deficit irrigation, Optimization, Water economic productivity.

توسعه یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی برای تعیین الگوی کشت بهینه در شرایط کم‌آبایی

محمد‌هادی نظری^۱، امیر سالاری^{۲*} و رضوانه مومنی^۳

۱. کارشناس پژوهشی، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. استادیار، گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی و پژوهشکده زعفران دانشگاه تربت‌حیدریه، تربت

حیدریه، ایران

۳. کارشناس پژوهشی، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۷/۲۲ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۱۱/۲۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱۲/۱۳)

چکیده

بهبود کارایی مصرف آب و عملکرد شبکه‌های آبیاری در شرایط کم‌آبایی، مستلزم تعیین سطوح مناسب کم‌آبایی است. این تحقیق با هدف توسعه یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی برای تعیین الگوی کشت بهینه در شرایط کم‌آبایی انجام شد. یک مدل غیرخطی با تابع هدف شاخص بهره‌وری آب اقتصادی (سود خالص به میزان آب مصرفی) با یک مدل رشد گیاهی ترکیب و توسعه‌یافته و با استفاده از داده‌ها و اطلاعات شبکه آبیاری شهید چمران اهواز، مدل توسعه‌یافته اجرا و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین سطح زیرکشت در تمامی سناریوهای کم‌آبایی مربوط به محصول گندم می‌باشد و برای سناریوهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد کم‌آبایی به ترتیب مقادیر ۶۷۴، ۹۴۹ و ۱۳۶۲ هکتار از اراضی شبکه را شامل می‌گردد. افزایش سطح زیرکشت شبکه، در سناریوی ۳۰ درصد کم‌آبایی نسبت به سناریوی آبیاری کامل ۹۲ درصد برآورد گردید. کمترین سطح زیرکشت نیز مربوط به محصول آفتابگردان با مساحت ۱۸۹ هکتار (در سناریوی ۱۰ درصد کم‌آبایی) است. آنالیز نتایج بیانگر آن است که در سناریوی ۱۰ درصد کم‌آبایی، مقدار شاخص بهره‌وری آب اقتصادی شبکه با مدیریت الگوی کشت می‌تواند تا ۱۹ درصد افزایش نسبت به آبیاری کامل را داشته باشد. درحالی‌که در سناریو ۲۰ درصد و ۳۰ درصد کم‌آبایی، با اجرای الگوی کشت بهینه مربوطه، مقادیر این شاخص به ترتیب معادل ۲۱ و ۲۳ درصد افزایش برآورد می‌گردد. همچنین بررسی‌ها حاکی از آن دارد که ترکیب متفاوت از سناریوهای کم‌آبایی برای محصولات الگوی کشت می‌تواند نتایج متفاوت‌تری را حاصل نماید. بر این اساس در الگوی کشتی که در آن برای محصولات لوبیا و باقلا ۱۰ درصد، برای محصولات آفتابگردان و سیب‌زمینی ۲۰ درصد و برای محصول گندم ۳۰ درصد کم‌آبایی اعمال گردد، شاخص بهره‌وری آب اقتصادی شبکه می‌تواند به حداکثر میزان ۱۵۲۵۰ ریال بر مترمکعب افزایش یابد.

واژه‌های کلیدی: الگوی کشت، بهره‌وری اقتصادی آب، بهینه‌سازی، کم‌آبایی.

مقدمه

قرار گرفته که عمده دلایل آن را می‌توان در عواملی چون تغییر در ارزش اقتصادی محصولات، تغییرات مقدار کمی آب قابل تأمین در دوره‌های مختلف آبی، تغییرات در مدیریت مزارع، پیشرفت سریع فناوری و به تبعه آن مکانیزاسیون کشاورزی، تغییر در سیاست‌های کلان ملی - منطقه‌ای در بخش کشاورزی و نارسایی و ناکامی‌های موجود در مدیریت بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری جستجو نمود. تغییر الگوی کشت در دوره‌های کوتاه‌مدت (به‌ویژه در دوره‌های کمبود آب) و همچنین اتخاذ برنامه و تصمیم مناسب در زمانی که نیاز به بازنگری مجدد می‌باشد، بهره‌وری سیستم را ارتقاء بخشیده و زمینه تحقق مدیریت تقاضامدار را با ملحوظ داشتن اثرات منبع فراهم می‌سازد. علاوه بر این الگوی کشت بهینه با میزان آب مصرفی، تولید و سود بهینه در تعامل بوده و از این رو می‌تواند از دو جنبه افزایش

محدودیت منابع آب و پایین بودن عملکرد اغلب شبکه‌های آبیاری، ضرورت توجه بیش‌ازپیش به بازنگری و اصلاح مدیریت توزیع و بهره‌برداری آب و اتخاذ رویه‌های اصولی و کارا به‌منظور استفاده بهینه از منابع آب موجود را ضروری می‌نماید. الگوی کشت محصولات زراعی، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی شبکه‌های آبیاری که در مراحل اولیه طراحی، با توجه به شرایط زمانی و مکانی و با در نظر گرفتن سیاست‌های کلان در بخش کشاورزی، پیشنهاد گردیده و مبنای طراحی ساختار فیزیکی شبکه آبیاری قرار می‌گیرد. الگوی کشت در شرایط بهره‌برداری، دستخوش تغییرات زیادی در نوع و تراکم کشت

(and Kodal, 2003). محققین متعددی با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی خطی و غیرخطی، مطالعاتی را در زمینه الگوی کشت بهینه به‌منظور بهینه‌سازی سود خالص از اراضی کشاورزی انجام داده‌اند (Mainuddin *et al*, 1997; Reza *et al*, 2001; Kipkorir 2001; Singh *et al*, 2001; Amir and Fisher, 1999; Li *et al*, Ghahraman and Sepaskhah, 2004, *et al*, 2002). برخی از محققان از نرم‌افزار GAMS-MINOS جهت بهینه‌سازی الگوی کشت استفاده کردند و بعضی دیگر برای بهینه‌سازی الگوی کشت یک شبکه آبیاری، مدلی را بر اساس الگوریتم ژنتیک ارائه نمودند (Kuo *et al*, Carvallo *et al*, 1998, 2000).

نتایج بهینه‌سازی الگوی کشت برای دشت قوچان و شیروان در شرایط خشکسالی نشان داد که در صورت آبیاری کامل و تولید پتانسیل محصولات، کل سطح زیر کشت در مدل بهینه‌سازی، ۴۸/۵ درصد نسبت به وضعیت موجود کاهش و سود کل ۵۸ درصد افزایش خواهد یافت و الگوی کشت منطقه نیز تغییر خواهد کرد (Ashoubgar-Toosi *et al*, 2004).

Nozari & Mohseni (2015) با کاربرد روش پویایی سیستم در شبیه‌سازی و بهینه‌سازی الگوی کشت شبکه آبیاری و زهکشی سمت راست آبشار اصفهان نتیجه گرفتند که این مدل از دقت بالایی برخوردار بوده و در صورت حفظ و عدم حفظ محدودیت مجموع مساحت زیرکشت در سال مبنای، بیشترین مقدار درآمد به هزینه، به ترتیب، برابر با ۳/۰۲۵ و ۳/۱۴۴ مربوط به نحوه برداشت از آب زیرزمینی بر اساس نیاز آبی با اجازه ۵۰ درصد تغییر در سطح زیرکشت هر یک از محصولات می‌باشد.

در رابطه با مطالعه سناریوهای عرضه و تقاضای آب کشاورزی، نرم‌افزارهای متعددی از جمله WEAP، SIMIS، EPIC و OPDM توسعه یافت. اما هر کدام از این مدل‌ها دارای محدودیت‌هایی می‌باشند (Stöckle *et al*, 1992). تلاش جهت رفع این محدودیت‌ها منجر به توسعه مدل رشد گیاهی دیگری به نام CropSyst شد. این مدل که یک مدل شبیه‌سازی نظام‌های کشت چندساله، چند محصوله و با گام زمانی روزانه می‌باشد، به‌عنوان ابزاری جهت تحلیل اثر اقلیم، خاک و مدیریت در بهره‌وری نظام‌های کشت و محیط، مورد استفاده قرار می‌گیرد (Stöckle *et al*, 2003; Stöckle and Nelson, 1999).

مدل گیاهی CropSyst، جهت تعیین الگوی کشت مناسب در شرایط کم‌آبیاری در شبکه آبیاری و زهکشی توسعه اراضی شهید چمران اهواز مورد اعتباریابی و ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد که مدل از قابلیت بسیار بالایی در شبیه‌سازی

درآمد و کارایی مصرف آب، نقش قابل‌توجهی در بهبود مدیریت شبکه‌های آبیاری ایفا نماید (Nazarifar and Momeni, 2011). ارزیابی اقتصادی مدیریت آبیاری، غالباً مستلزم کمی‌سازی واکنش عملکرد محصول در برابر مقدار آب دریافتی می‌باشد. بیش از یک قرن از معطوف‌سازی نظر محققین متعدد در زمینه تحقیق روی واکنش عملکرد محصولات نسبت به مدیریت آبیاری می‌گذرد. در این راستا، توصیه‌ها و روابط مختلفی به‌منظور مطالعه نیاز آبیاری و واکنش‌های عملکرد محصول به ترکیبات مختلف تاریخ کشت، مقادیر نهاده‌ها و معیارهای تصمیم‌گیری در رابطه با آبیاری مطرح گردیده است. در دو دهه اخیر نیز متدولوژی و مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی متعددی به‌منظور طراحی، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از سامانه‌های منابع آبی توسعه‌یافته است. در این بین، تعدادی از مدل‌ها در ارتباط با بهینه‌سازی توزیع آب می‌باشند، تعدادی بهینه‌سازی اقتصادی و برخی نیز هر دو هدف را دنبال می‌نمایند. عدم نظر گرفتن یک رابطه منطقی و کاربردی میان آب قابل تأمین و بخش موردتقاضا، یکی از ناکارآمدی‌های غالب در مدل‌های موجود است (Diaz and Brown, 1996). ساده‌ترین مدل بهینه‌سازی، مدلی است که صرف‌نظر از هرگونه محدودیت آبی، امکان محاسبه عمق آبیاری بهینه برای یک محصول مجزا را با هدف بهینه‌سازی تابع سود فراهم می‌سازد (Young, 1996). برخی محققین از روش‌های بهینه‌سازی تحلیلی استفاده نموده‌اند که در آن‌ها تغییرات شرایط بهینه‌سازی در صورت محدودیت منابع آب و زمین در نظر گرفته می‌شود (English, Yaron and Bresler, 1983; 1992). در اکثر مدل‌های اقتصادی، الگوی کشت به‌منظور تخصیص آب و زمین بین محصولات مختلف در سطح مزرعه و یا یک ناحیه آبیاری مدنظر قرار می‌گیرد.

Reca *et al* (2001) یک مدل بهینه‌سازی برای توزیع آب در شبکه آبیاری تحت شرایط کم‌آبی ارائه نمودند که در آن، حداکثر میزان آب مصرفی گیاهان به‌طور مجزا موردبررسی قرار می‌گرفت. در منطقه‌ای از جنوب کشور فرانسه، مدل ADEAUMIS به‌منظور برآورد میزان تقاضای آبی در مدیریت منابع آب در مقیاس منطقه‌ای مورد استفاده قرار گرفت (Leenhardt *et al*, 2004). یک مدل غیرخطی نیز جهت بهینه‌سازی توزیع آب در سطح مزرعه با منابع آبی محدود، برای جنوب‌شرقی منطقه کشاورزی آناتولیان (Anatolian) ترکیه توسعه یافت. نتایج مدل فوق با نتایج یک مدل خطی مقایسه و نتیجه‌گیری شد که بهینه‌سازی غیرخطی، جواب‌های مناسب‌تری نسبت به بهینه‌سازی خطی ارائه می‌دهد (Benli

زمان باعث کاهش اندازه برگ‌ها می‌شود. Bekele and Tilahun (2007) در یک آزمایش کم‌آبیاری تنظیم‌شده در یک ناحیه نیمه‌خشک (اتیوپی) از ۸ تیمار آبیاری (یک دوره تنش در مراحل اول، دوم، سوم و چهارم رشد به میزان 25%ETc، تنش‌های پیوسته در تمام مراحل رشد به میزان 50%ETc و 75%ETc) و دو تیمار کنترل (25%ETc و 100%ETc) با روش آبیاری ثقلی نتیجه گرفتند که به جز در تیمارهای کم‌آبیاری در مراحل اول و چهارم رشد، عملکرد در بقیه تیمارهای تنش با آبیاری کامل اختلاف معنی‌داری داشته است. عملکرد کمی و کیفی علوفه در شرایط مختلف با فاکتورهای زراعی مثل ارتفاع بوته، قطر ساقه، نسبت برگ به ساقه و تعداد پنجه و صفات مورفولوژیکی مانند تراکم بوته در واحد سطح، عناصر غذایی و آب (Buxton, 1996) و زمان گل‌دهی بستگی دارد (Pendleton et al, 1994). اجزای عملکرد در گیاهان علوفه‌ای برگ، ساقه غلاف برگ و گل‌آذین می‌باشند (Cummins, 1981). بین اجزای عملکرد در گیاهان علوفه‌ای، برگ دارای ارزش غذایی بالایی است و ساقه از ارزش غذایی کمتری برخوردار است؛ بنابراین با افزایش نسبت برگ به ساقه کیفیت علوفه افزایش می‌یابد (Buxton, 1996). تنش آب از مهم‌ترین فاکتورهای محیطی تأثیرگذار بر عملکرد و کیفیت علوفه می‌باشد (Berenguer and Faci, 2001; Kang et al, 2000).

اما در این راستا باید گفت که برنامه‌ریزی برای کم‌آبیاری به‌طور بالقوه دشوارتر از آبیاری کامل است؛ بنابراین مطالعه، تحقیق و بررسی در خصوص این نوع مدیریت آبیاری با استفاده از مدل‌های رشد گیاهی ضروری می‌باشد. هدف از این تحقیق، توسعه و کاربرد یک مدل بهینه‌سازی غیرخطی به‌منظور تعیین الگوی بهینه کشت و تخصیص آب در سطح شبکه‌های آبیاری برای شرایط کم‌آبیاری می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

اراضی تحت پوشش طرح شبکه آبیاری و زهکشی توسعه اراضی شهید چمران اهواز برای این تحقیق در نظر گرفته شد. این طرح در جنوب‌غربی شهر اهواز و حدفاصل جاده اهواز-خرمشهر تا هورالعظیم واقع است. سطح کل منطقه طرح حدود ۵۰۰۰۰ هکتار است. بافت خاک اراضی عمدتاً سنگین تا نیمه‌سنگین و شوری (EC) اراضی، بیش از ۴ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد. منبع تأمین آب برای طرح، رودخانه کرخه است که محل آبیگری آن نیز در مجاورت سد انحرافی کرخه قرار دارد. یک کانال درجه ۲ با نام GC19 از طرح مزبور انتخاب و پارامترهای

عملکرد گیاهان تحت اعمال تنش‌های مختلف رطوبتی برخوردار می‌باشد (Nazarifar and Momeni, 2011). در تحقیقی دیگر که در حوزه کرخه در جنوب‌غربی ایران صورت پذیرفت، سناریوهای افزایش بهره‌وری مصرف آب گندم با استفاده از آنالیزهای مدیریتی مدل رشد گیاهی CropSyst مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بررسی توسط مدل نشان داد که رسیدن رطوبت اولیه خاک به حد ظرفیت زراعی (حدود ۱۹/۶ درصد)، عدم جمع‌آوری کل بقایای گیاهی از روی زمین، بارندگی و تاریخ کشت زود هنگام نسبت به روش مرسوم در منطقه و تعداد بذر (۳۰۰ عدد در مترمربع) در افزایش بهره‌وری آب و عملکرد مؤثر می‌باشند (Momeni et al, 2011).

شبیه‌سازی سطوح مختلف کم‌آبیاری به‌وسیله مدل CropSyst در تونس (Belhouchette et al, 2001) و آمریکا (Pannkuk et al, 1998) نشان‌دهنده تطابق مناسب نتایج شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشی بود.

کم‌آبیاری یک راهکار بهینه برای به عمل آوردن محصولات تحت شرایط کمبود آب است که همراه با کاهش محصول در واحد سطح و افزایش محصول با گسترش سطح می‌باشد (Kajbaf, 2005).

در بحث کم‌آبیاری بر روی عملکرد گیاهان تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است (Doorenbos and Kassam, 1979; Engilsh et al, 1992; FAO, 2002). در بسیاری از گیاهان، تأثیر مقدار آبیاری بر عملکرد، وابستگی زیادی به موقعیت و اقلیم رشد گیاهان دارد. بدین‌صورت که نوع خاک بر جذب آب توسط گیاهان تأثیر داشته و اقلیم تعیین‌کننده میزان تبخیر و تعرق گیاهان می‌باشد (Otegui and Andrade, 2000). کاهش عملکرد نه تنها به شدت تنش، بلکه به زمان وقوع، مرحله رشد گیاه و ژنوتیپ گیاه بستگی دارد (Gelize et al, 1995; Denmead and Shaw, 1960; NeSmith and Ritchie, 1992). در بین گیاهان، ذرت، گیاهی نسبتاً مقاوم به خشکی در مرحله اولیه رشد به دلیل نیاز آبی کم می‌باشد (Shaw, 1997). Kanber and Kirda (1994) نشان دادند که استفاده از سه آبیاری در مراحل شروع ابریشمی شدن، شیری شدن و مرحله رسیدگی در مقایسه با چهار آبیاری معمول می‌تواند باعث سطوح یکسان و یا حتی بالاتری از عملکرد گردد. Doorenbos and Kassam (۱۹۷۹) گزارش کردند که ذرت در مراحل رویشی و رسیدگی نسبت به کمبود آب، نسبتاً متحمل به نظر می‌رسد اما در دوره گلدهی، بیشترین کاهش عملکرد در اثر تنش آبی اتفاق می‌افتد. Ritchie et al. (1992) گزارش کردند که سرعت رشد ذرت در مرحله ۱۰ برگی افزایش می‌یابد و کمبود آب در این

توزیع یکنواخت تبعیت می‌کند. در بخشی از مزرعه که کم-آبیاری به وقوع پیوسته، مقدار آن با Dd (میلی‌متر) نشان داده شد. ضریب کم‌آبیاری در مزرعه از رابطه (۳) تعیین شد:

$$Cd = Dd/D \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن Dd عمق خالص آبیاری (میلی‌متر) و D عمق ناخالص آبیاری (میلی‌متر) است. با خطی فرض نمودن و در نظر گرفتن شیب یکنواخت، رابطه بین مقدار این ضریب و کمبود نسبی تبخیر-تعرق به صورت رابطه (۴) به دست می‌آید (Diaz and Brown, 1996):

$$1 - \frac{ET_{ai}}{ET_{pi}} = C_{di}(1 - p_i) \quad (\text{رابطه ۴})$$

با جایگذاری در رابطه ۴ (رابطه استوارت)، رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$\frac{Y_a}{Y_p} = \prod_{i=1}^m \left[1 - k_{yi} C_{di} (1 - p_i) \right] \quad (\text{رابطه ۵})$$

p_i در این روابط، بخشی از ET_p است که از سایر منابع به‌جز آبیاری مانند بارندگی و صعود مویبندی تأمین می‌شود. در توزیع یکنواخت، مقدار ضریب کم‌آبیاری (Cd) به سه پارامتر ضریب یکنواختی توزیع آب (CU) و مقادیر عمق خالص (Dn) و ناخالص آبیاری (Dg) بستگی داشته و مقدار آن از روابط (۶ و ۷) قابل محاسبه می‌باشد (Li et al, 2005):

$$Dn < D_{max} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$C_d = \frac{D_d}{D_n} = \left[\frac{(1 - 2CU_{ch} + D_n/D_g)}{(8 - 8CU_{ch})} \right] \left[1 - \left(\frac{D_g}{D_n} \right) (2CU_{ch} - 1) \right]$$

اگر

$$Dn > D_{max} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$C_d = \frac{D_d}{D_n} = 1 - \frac{D_g}{D_n}$$

تابع هدف مربوط به یک محصول منفرد از الگوی کشت، بر اساس اختلاف میزان عملکرد پتانسیل و واقعی محصول قابل‌بیان است (رابطه ۸). در این رابطه، Z تابع هدف و y_{pi} و y_{ai} به ترتیب مقدار عملکرد پتانسیل و واقعی مرحله رشد i می‌باشد. با کمیته‌سازی مقدار این تابع، می‌توان مقدار عمق بهینه آب آبیاری هر مرحله از رشد گیاه و همچنین عمق بهینه کل آب آبیاری گیاه را در هر شرایط آبی تعیین نمود (Mainuddin et al, 1997).

موردنیاز مدل برای این کانال تهیه و به مدل اعمال شد. سطح طول کانال GC19 حدود ۸ کیلومتر و سطح تحت کشت آن ۱۰۰۰ هکتار است. الگوی کشت موردبررسی برای کاشت در محدوده این کانال شامل باقلا، لوبیا، سیب‌زمینی، آفتابگردان و گندم می‌باشد. تخصیص آب برای اراضی این منطقه، یک مترمکعب در ثانیه است. سامانه‌های آبیاری در سطح شبکه غالباً از نوع سطحی بوده و سامانه‌های تحت‌فشار عموماً مربوط به شرکت‌های کشت و صنعت موجود در منطقه می‌باشد. مساحت نسبی کشت محصولات بر اساس ماکزیمم و مینیمم درصد زیر کشت محصولات مشاهده شده منطقه تا سال ۱۳۹۵، تعیین شد. مقدار هزینه آب تخصیص یافته معادل ۴۵۰ ریال بر مترمکعب در نظر گرفته شد (Anonymous, 2010). سود ناخالص هر محصول نیز با توجه به میزان عملکرد محصول به ازای واحد آب مصرفی در شرایط آبی مختلف و قیمت واحد فروش محصول برآورد گردید (Statistical Center of Iran, Organization for Management and Planning of the Country, 2007). همچنین، متوسط بارندگی و تبخیر سالانه منطقه، به ترتیب ۲۱۳ و ۱۷۵۰ میلی‌متر بوده و درجه حرارت متوسط سالانه نیز ۲۲/۳ درجه سانتی‌گراد است.

توسعه مدل بهینه‌سازی

در توسعه مدل، از تابع پاسخگویی محصولات به مقدار تبخیر و تعرق واقعی که یکی از کاربردی‌ترین توابع موجود در این زمینه است و در مطالعات متعدد به کار برده شد (Stewart and Hagan, 1973; Doorenbos Reca et al, 2001; De-Juan et al, 1996; and Kassam, 1979)، استفاده گردید. این رابطه برای یک محصول منفرد، به صورت رابطه (۱) نمایش داده می‌شود:

$$\frac{Y_a}{Y_p} = \prod_{i=1}^m \left[1 - k_{yi} \left(1 - \frac{ET_{ai}}{ET_{pi}} \right) \right] \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن؛ Y_a مقدار عملکرد واقعی محصول، Y_p مقدار عملکرد پتانسیل محصول، K_{yi} ضریب پاسخگویی محصول به کمبود آب آبیاری در مرحله رشد i ، ET_{ai} تبخیر و تعرق واقعی و ET_{pi} تبخیر و تعرق پتانسیل محصول در مرحله رشد i می‌باشد. m نشان‌دهنده مرحله رشد محصول است. با جایگزینی نسبت آب کاربردی به عمق آب پتانسیل موردنیاز (Wa/Wp) به جای ET_a/ET_p در رابطه (۱)، رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$\frac{Y_a}{Y_p} = \prod_{i=1}^m \left[1 - k_{yi} \left(1 - \frac{W_{ai}}{W_{pi}} \right) \right] \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این تحقیق فرض شد توزیع آب در سطح مزارع از تابع

قابل محاسبه است (Yaron and Bresler, 1983):

$$B_j = (B_m + B_l)_j - (C_l + C_w)_j \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

که در آن، B_m و B_l به ترتیب سود حاصل از تولیدات اصلی و فرعی محصول Z به ازای عمق بهینه آب آبیاری، C_l هزینه کارگری و سایر هزینه‌های تولید به جز آب و C_w هزینه آب مصرفی (تخصیص یافته) محصول می‌باشد. برای بیشینه‌سازی تابع هدف (رابطه ۱۴)، باید روابط محدودیت (۱۶، ۱۷ و ۱۸) در نظر گرفته شود (Yaron and Bresler, 1983):

$$A_j \geq 0 \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

$$A_{Min(j)} \leq A_j \leq A_{Max(j)} \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

$$\sum_{j=1}^m W_{op(j)} \cdot A_j \leq W_T \cdot A_T \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

در روابط فوق، A_T کل سطح زیر کشت ممکن شبکه آبیاری، $A_{Min(j)}$ و $A_{Max(j)}$ به ترتیب حداقل و حداکثر سطح زیر کشت ممکن برای محصول Z می‌باشد. بهینه‌سازی توابع هدف با استفاده از مایکروسافت اکسل (Microsoft Excel solver) انجام شد.

معرفی مدل رشد گیاهی

با توجه به دشواری تعیین سطوح متفاوت عملکرد، ارزیابی و تعیین مراحل حساس رشد گیاه نسبت به عوامل تولید از طریق آزمایش‌های مزرعه‌ای، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی راهکاری مناسب برای انجام مطالعات و آنالیز سناریوهای مورد نظر است. در بین مدل‌های رشد گیاهی ارائه شده مدل CropSyst قابلیت و توانمندی‌های ویژه‌ای دارد. موازنه آب خاک، موازنه نیتروژن گیاه- خاک، فنولوژی محصول، سطح سایه‌انداز گیاه و رشد ریشه، تولید ماده خشک، عملکرد محصول، تولید و تجزیه باقیمانده گیاهی، فرسایش آبی خاک و شوری توسط این مدل شبیه‌سازی می‌شود. این فرایندها تحت تأثیر شرایط آب‌وهوایی، مشخصات خاک و گیاه و گزینه‌های مدیریتی سامانه‌های کشت شامل تناوب محصول، انتخاب نوع شخم و شیار، آبیاری، کوددهی از ته، شوری آب آبیاری و خاک، عملیات کشت و مدیریت باقیمانده گیاهی قرار گرفته‌اند. ویرایشگر، شبیه‌ساز سامانه‌های کشت، مولد داده‌های هواشناسی، ابزار تحلیلی حوزه آبخیز از مؤلفه‌های مهم و زیرمجموعه CropSyst می‌باشند. برای اجرای مدل باید اطلاعات مربوط به فایل‌های کنترل شبیه‌سازی شامل اقلیم، موقعیت، خاک، گیاه و مدیریت زراعی پارامتردهی شود.

در این مدل که هدف آن شبیه‌سازی رشد محصول در

$$Z = \sum_{i=1}^m \frac{1}{y_{pi}} (y_{pi} - y_{ai})^2 \quad (\text{رابطه ۸})$$

با تلفیق روابط (۲ و ۸)، می‌توان تابع Z را به صورت رابطه (۹) نشان داد:

$$Z = \sum_{i=1}^m \frac{k_i^2}{W_{pi}^2} (W_{pi} - W_{ai})^2 \quad (\text{رابطه ۹})$$

رابطه (۹) در حالت الگوی کشت شامل n محصول به رابطه (۱۰) تبدیل می‌شود. به منظور تعیین عمق بهینه آب آبیاری هر محصول در شرایط آبی مختلف، باید مقدار این رابطه کمینه شود (Raju and Nagesh Kumar, 1999).
(رابطه ۱۰)

$$Min(Z) = Min \left[\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \frac{k_i^2}{W_{plji}^2} (W_{plji} - W_{alji})^2 \right]$$

روابط محدودیت در نظر گرفته شده برای کمینه‌سازی رابطه (۱۰) عبارت‌اند از روابط (۱۱، ۱۲ و ۱۳) (Raju and Nagesh Kumar, 1999).

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m W_{alji} \leq W_T \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$$\sum_{i=1}^m W_{ai} \leq \sum_{i=1}^m W_{pi} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

$$W_{ai} > 0 \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

W_T کل عمق آب در دسترس از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی در سطح شبکه می‌باشد.

تعیین الگوی کشت بهینه، با بیشینه‌سازی تابع شاخص بهره‌وری اقتصادی آب (سود خالص به واحد حجم آب مصرفی) شبکه صورت گرفته که به صورت رابطه (۱۴) قابل نمایش می‌باشد (Tanner and Sinclair, 1983):
(رابطه ۱۴)

$$Max((B/Vol)_s) = Max \left(\frac{\sum_{j=1}^n B_j \cdot A_j}{\sum_{j=1}^n A_j \cdot W_{op(j)}} \right)$$

که در آن $(B/Vol)_s$ نسبت سود خالص به حجم آب مصرفی در شبکه آبیاری، B_j سود خالص حاصل از کشت محصول Z و A_j سطح زیر کشت محصول Z و $W_{op(i)}$ عمق بهینه آب آبیاری محصول Z می‌باشد.

سود خالص حاصل از کشت هر محصول از رابطه (۱۵)

مقدار ضریب تعرق بیوماس بر اساس مطالعات قبلی، Loomis and Connors, 1992) ۵ در نظر گرفته شد (Tanner and Sinclair, 1983 Momeni *et al*, 2011; رابطه تانرسینکلایر در مقادیر کم VPD ناپایدار می‌شود و در VPD نزدیک به صفر، رشد نامحدودی را پیش‌بینی می‌کند. برای غلبه بر این مشکل، مانیتیت برآورد ثانویه‌ای از تولید بدون تنش ماده خشک را طبق رابطه (۲۲) محاسبه کرده است:

$$B_{IPAR} = eIPAR \quad (\text{رابطه } 22)$$

B_{IPAR} = تولید ماده خشک وابسته به PAR حائل شده $(\text{kg m}^{-2} \text{ day}^{-1})$

$$e = \text{راندمان کاربرد تابش } (\text{kg MJ}^{-1})$$

$IPAR$ = مقدار تابش فعال فتوسنتزی حائل شده روزانه توسط گیاه $(\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1})$.

مقدار پارامتر e ، معادل با ۰/۸ می‌باشد (Kiniry *et al*, 1989).

برای استفاده از مدل پارامتردهی، اعتباریابی و کالیبراسیون آن ضروری می‌باشد. کالیبراسیون مدل با توجه به داده‌های آزمایشی جمع‌آوری شده (طرح‌های تحقیقاتی و پژوهشی که برای محصولات منتخب در سال‌های مختلف در مراکز تحقیقاتی منطقه انجام پذیرفته است (Darabi and Ghanawati-Moghaddam, 2005; Kajbaf, 2005; Momeni *et al*, 2006; Heidari *et al*, 2011; *al*), و زیربرنامه Crop Calibration نسخه ۴/۰۴/۱۳ مدل CropSyst انجام گرفت. از تکنیک‌های رگرسیون خطی، شاخص توافق ویلموت، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، انحراف استاندارد کلی (GSD)، میانگین انحراف (ME) و میانگین خطای مطلق (MAE) نیز جهت آنالیز کارایی مدل استفاده شد. در این مطالعه داده‌های هواشناسی ۴۳ ساله مربوط به ایستگاه هواشناسی اهواز که در نزدیکی منطقه مورد مطالعه قرار گرفته است از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید. از یک مولد هواشناسی جهت پردازش اطلاعات مورد نیاز استفاده شد. به همین منظور داده‌های دما، تابش خورشیدی، رطوبت نسبی و غیره برای تک‌تک دوره‌های آماری و ایستگاه‌ها در مدل ClimGen که یک مولد هواشناسی و نیز از ضمایم مدل CropSyst می‌باشد وارد و مراحل فرآوری داده‌های هواشناسی و سپس بررسی و اصلاح داده‌های نادرست انجام شد. مدل CropSyst امکاناتی را برای تعیین نوع عملیات مدیریتی شخم و کاشت، باقیمانده گیاهی، آبیاری، کوددهی نیتروژنی، برداشت و حفاظت خاک در نظر می‌گیرد. به همین جهت از داده‌ها و

بخش‌های مختلف اراضی با در نظر گرفتن شرایط یکنواختی خاک، آب‌وهوا، تناوب محصول و مدیریت می‌باشد، رشد گیاه و اجزاء آن توصیف شده است. ترکیب این گزینه با روش اولر و گام زمانی روزانه صورت می‌گیرد. بیلان آبی در مدل شامل بارش، آبیاری، رواناب، برگاب، نفوذ آب، توزیع مجدد آب در پروفیل خاک، فرونشست عمقی و تبخیر و تعرق محصول می‌باشد. توزیع مجدد آب در خاک می‌تواند با روش آبخاری ساده یا حل عددی معادله جریان در خاک (ریچارد) شبیه‌سازی شود. مدل CropSyst برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET0)، دو گزینه مدل پنمن‌مانیتیت و مدل پرستلی‌تیلور را پیشنهاد می‌کند. شبیه‌سازی عملکرد نیز بستگی به زیست توده جمععی در بلوغ فیزیولوژیکی (BPM) و شاخص برداشت دارد (Stöckle and Nelson, 1999):

$$HI = \frac{Y}{B} \quad (\text{رابطه } 19)$$

$$Y = B_{PM}HI \quad (\text{رابطه } 20)$$

Y = عملکرد قابل برداشت (kg m^{-2})

HI = شاخص برداشت

B = ماده خشک روی سطح زمین (kg m^{-2})

واحد B_{PM} نیز kg m^{-2} می‌باشد. شاخص برداشت بر مبنای شرایط بدون تنشی که با شدت تنش (آب و نیتروژن) و حساسیت محصول به تنش در طول گلدهی و کامل شدن اصلاح می‌شود تعیین شده است.

رشد بیوماس در CropSyst ابتدا بدون وارد شدن تنش و بر اساس تعرق پتانسیل گیاه و مقدار تابش فعال فتوسنتزی روزانه حائل شده توسط آن، محاسبه می‌گردد. سپس رشد پتانسیل با محدودیت‌های آبی و نیتروژن تصحیح می‌شود تا مقدار واقعی بیوماس روزانه تعیین گردد. گذرگاه معمول برای تبادل بخار و کربن در برگ‌ها قرار گرفته و بین تعرق گیاه و تولید بیوماس رابطه‌ای وجود دارد. بنابراین تولید پتانسیل بیوماس روزانه را می‌توان با رابطه (۲۱) محاسبه کرد (Tanner and Sinclair, 1983):

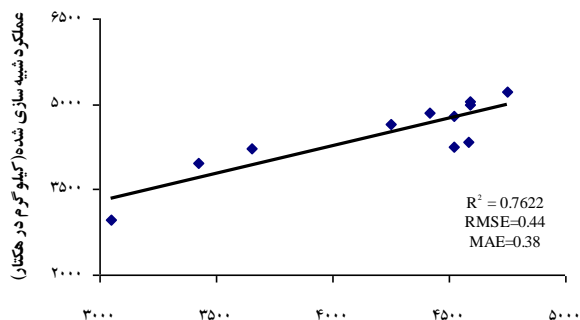
$$B_{PT} = \frac{K_{BT}T_P}{VPD} \quad (\text{رابطه } 21)$$

B_{PT} = تولید بیوماس وابسته به تعرق پتانسیل گیاه $(\text{kg m}^{-2} \text{ day}^{-1})$

T_P = تعرق پتانسیل گیاه $(\text{kg m}^{-2} \text{ day}^{-1})$

VPD = میانگین روزانه کمبود فشار بخار اشباع (kPa)

K_{BT} = ضریب تعرق بیوماس (kPa)



عملکرد مشاهده شده (کیلوگرم در هکتار)

شکل ۱. مقایسه عملکردهای شبیه‌سازی شده و واقعی محصول گندم

(kg/ha)

از جدول (۱) نتیجه‌گیری می‌شود که ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده با توجه به متوسط عملکرد محصولات باقلا، لوبیا، سیب‌زمینی و آفتابگردان به ترتیب ۲/۹، ۱/۳، ۶/۹۷، ۳/۴ و به‌طور متوسط حدود ۳/۶ درصد است. همچنین، متوسط میانگین خطای مطلق و ضریب همبستگی در محصولات مختلف به ترتیب در حدود ۲/۸ و ۶۵ درصد است. این شاخص‌های آماری نشان می‌دهد که مدل از دقت قابل قبولی برخوردار است.

جدول ۱. شاخص‌های سازگاری ارزیابی کارایی مدل با استفاده از عملکردهای واقعی

و شبیه‌سازی شده (Ton/ha)

شاخص	محصول گندم	باقلا	لوبیا	سیب‌زمینی	آفتابگردان
GSD	۰/۰۱۸	۰/۰۲۱	۰/۰۳۲	۰/۰۱۵	۰/۰۴۱
d	۱/۰۰۰	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۹۹	۱
R ²	۰/۷۶	۰/۶۸	۰/۷۸	۰/۵۹	۰/۶۲
RMSE	۰/۴۴	۲/۹	۱/۳	۶/۹۷	۳/۴
MAE	۰/۳۷۸	۱/۹۹	۲/۰۵	۵/۹۷	۱/۲
ME	-۰/۱۱	-۰/۹	-۰/۱۲	-۵/۷	۲/۳۵
متوسط عملکرد	۵/۰۸	۳/۲۰	۲/۴۰۰	۳۸/۰۴	۱/۸

به‌طور کلی بررسی نتایج صحت‌یابی بیانگر این واقعیت است که مدل ترکیبی در شرایط مورد مطالعه از دقت قابل قبولی برخوردار است. بنابراین می‌توان از آن برای شبیه‌سازی عملکرد محصول در شرایط مختلف کمی و کیفی آب کاربردی و عملیات زراعی استفاده کرد.

با اجرای مدل، میزان عملکرد پتانسیل محصولات (که شامل عملکرد فیزیولوژیکی است و عوامل گیاهی و محیطی مورد نیاز جهت جذب نور، تثبیت گازکربنیک و تولید ماده خشک به شکل مطلوب فرض می‌شود) در سناریوهای مختلف کم‌آبباری، پیش‌بینی و در جدول (۲) ارائه گردیده است. چون در کم‌آبباری، از روش کاهش متغیر میزان آبیاری برای مراحل مختلف رشد استفاده شده است، با انجام عملیات سعی و خطا،

اطلاعات منطقه‌ای، گزارشات و تحقیقات انجام پذیرفته (فائو- منطقه‌ای) و راهنمای مدل به‌عنوان منابع اطلاعاتی استفاده شد. مدل برای سناریوهای مختلف کم‌آبباری به دو روش کاهش یکسان و کاهش متغیر میزان آبیاری بر اساس مراحل رشد در دور ثابت اجرا و نتایج مورد بررسی قرار گرفت.

در این تحقیق، ترکیب و توسعه مدل‌های رشد گیاهی در CropSyst و سولور^۱ (در محیط Excel) به صورتی است که زمانیکه برنامه اول اجرا می‌شود یک فایل متنی بر اساس محصول تعیین شده برای ورود سایر داده‌های مورد نیاز ایجاد می‌کند. کاربر اطلاعات لازم را در آن فایل وارد کرده و سپس برنامه اول، فایل متنی رو خوانده و میزان عملکرد را به‌عنوان خروجی تولید می‌نماید. این خروجی‌ها جهت ورودی برنامه دوم مورد استفاده قرار می‌گیرد. بعد از آنکه توابع مورد نظر به حد مطلوب رسیدند مقادیر آن‌ها مشخص می‌گردد. تمامی مراحل مربوط به ترکیب بین دو نرم‌افزار از طریق برنامه‌ای که در محیط ویژوال بیسک برنامه‌نویسی گردید، صورت پذیرفت. سولور یکی از امکانات جانبی نرم‌افزار اکسل و برنامه‌ای است که بر روی اکسل پیاده شده و توسط آن می‌توان مسائل بهینه‌سازی و مسائلی از جمله برنامه‌ریزی خطی را انجام داد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل در مورد محصول گندم و با استفاده از داده‌های سال‌های زراعی ۸۳-۱۳۸۰ یک مزرعه آزمایشی در ایستگاه تحقیقاتی ملاتانی به‌عنوان نمونه در شکل (۱) نشان داده شده است. در مزرعه مذکور دور آبیاری در چهار تیمار، بعد از ۵۰، ۶۵، ۸۰ و ۹۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی از تشت کلاس A انجام شد. در هر نوبت، آبیاری به‌اندازه میزان تبخیر تجمعی از تشت مربوط به آن تیمار انجام گرفته است.

در جدول (۱) نتایج ارزیابی عملکرد برآورد شده توسط مدل به کمک شاخص‌های آماری ارائه شده است. ضریب همبستگی مقادیر واقعی و برآورد شده توسط مدل برای محصول گندم ۰/۷۶ درصد و ریشه میانگین مربعات خطا ۴۴۰ کیلوگرم در هکتار است. همچنین شاخص میانگین خطای مطلق و انحراف مدل نشان می‌دهد که مدل با خطای ۳۷۸ و ۱۱۰ کیلوگرم بر هکتار، عملکرد محصول گندم را برآورد نموده و از دقت قابل قبولی برخوردار است.

عملکرد بیشینه برای سناریوهای کم‌آب‌یاری با توجه به ضریب واکنش عملکرد به آب هر محصول و تغییرات آن در مراحل مختلف رشد تعیین شد. از این‌رو حساس‌ترین مرحله از نظر واکنش عملکرد به آب نیز برای هر محصول در این جدول قابل‌مشاهده است. بر اساس نتایج جدول (۲) در سناریوی ۱۰ درصد کم‌آب‌یاری؛ بیشترین تغییرات عملکرد نسبت به آبیاری کامل، مربوط به محصول باقلا (۱۱/۲ درصد) و کمترین مربوط به محصول آفتابگردان (۳ درصد) می‌باشد. محصول لوبیا در دو سناریوی دیگر، از بیشترین میزان تغییرات برخوردار است (۱۷ و ۲۶ درصد) و کمترین تغییرات در هر دو سناریو، برای محصول سیب‌زمینی مشاهده می‌گردد (۹ و ۱۷ درصد). به‌طور کلی در بین تمامی سناریوها، بیشترین تغییرات مربوط به گیاه لوبیا (۲۶ درصد) در سناریوی ۳۰ درصد کم‌آب‌یاری و کمترین تغییرات برای محصول آفتابگردان (۳ درصد) در سناریوی ۱۰ درصد کم-جست.

جدول ۲. مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد پتانسیل محصولات منتخب تحت اعمال سناریوهای مختلف کم‌آب‌یاری (کیلوگرم در هکتار)

نام‌محصول	حساس‌ترین مرحله واکنش عملکرد به آب	سناریوی کامل آبیاری	سناریوی ۱۰ درصد کم‌آب‌یاری	سناریوی ۲۰ درصد کم‌آب‌یاری	سناریوی ۳۰ درصد کم‌آب‌یاری
باقلا	شکل‌گیری	۲۰۸۵	۱۸۵۰	۱۸۶۲	۱۵۷۹
لوبیا	گلدهی	۱۸۰۰	۱۶۴۲	۱۴۹۵	۱۳۲۴
گندم	گلدهی	۳۵۸۰	۳۲۴۰	۳۰۲۱	۲۸۹۴
سیب‌زمینی	شکل‌گیری	۲۶۰۰۰	۲۵۲۱۰	۲۳۵۹۰	۲۱۵۴۰
آفتابگردان	گلدهی	۱۲۳۰	۱۱۹۸	۱۰۸۴	۹۷۸

در جدول (۳) مقادیر عمق آب پتانسیل (Wp) مربوط به عملکرد پتانسیل برای هر یک از مراحل رشد ارائه شد. در تمامی سناریوهای آبیاری، برای مراحل اولیه رشد، ثانویه، گل‌دهی و شکل‌گیری محصول، سیب‌زمینی از بیشترین عمق آب پتانسیل برخوردار است؛ اما در مرحله رسیدن، بیشترین عمق آب پتانسیل در تمامی سناریوهای آبیاری مربوط به محصول گندم می‌باشد. همچنین محصول سیب‌زمینی در سناریوی ۱۰ درصد کم‌آب‌یاری با مقدار ۸۴۳/۷ میلی‌متر از بیشترین میزان مجموع عمق آب پتانسیل برخوردار است. گندم در دو مرحله رشد اولیه و ثانویه در سناریوی ۳۰ درصد کم‌آب‌یاری به حداقل عمق آب پتانسیل نیاز دارد. در مرحله گل‌دهی محصول لوبیا برای سناریوی ۳۰ درصد، در مرحله شکل‌گیری محصول گندم برای سناریوی ۲۰ درصد و در مرحله رسیدن باقلا برای سناریوی ۲۰

درصد کمترین عمق آب پتانسیل را به‌خود اختصاص داده‌اند. محصول گندم در سناریوی ۳۰ درصد کم‌آب‌یاری با مقدار ۴۷۸/۳ میلی‌متر از کمترین میزان مجموع عمق آب پتانسیل برخوردار می‌باشد. درصد تغییرات مجموع عمق آب پتانسیل در سناریوهای کم‌آب‌یاری نسبت به سناریوی آبیاری کامل به‌ترتیب ۹، ۲۲ و ۲۸ درصد می‌باشد.

پس از تعیین عمق آب پتانسیل، عمق بهینه آب آبیاری هر محصول به کمک مدل توسعه‌یافته در این تحقیق تعیین شد و مقادیر حاصله در جدول (۴) ارائه شد. متوسط تغییرات عمق بهینه آب آبیاری محصول گندم نسبت به آبیاری کامل، برای مراحل پنج‌گانه رشد به‌ترتیب ۲۴، ۲۰، ۴۴، ۴۱ و ۶۱ درصد می‌باشد.

محصول سیب‌زمینی در سناریوی ۳۰ درصد کم‌آب‌یاری در

سناریوی یکسان کم آبیاری در کل الگوی کشت در جدول (۵) ارائه شده است. در این جدول، مقادیر بهینه سطح زیر کشت هر یک از محصولات الگوی کشت برای سناریوهای متفاوت کم-آبیاری بر حسب هکتار مشخص گردیده است. در الگوی کشت بهینه، بیشترین سطح زیر کشت مربوط به محصول گندم بود و در هر یک از سناریوهای کم آبیاری به ترتیب مقادیر ۶۷۴، ۹۴۹ و ۱۳۶۲ هکتار از اراضی شبکه را شامل می شود. افزایش سطح زیر کشت شبکه در سناریوی ۳۰ درصد کم آبیاری نسبت به سناریوی ۲۰ درصد و ۱۰ درصد کم آبیاری به ترتیب ۴۱۳/۵ و ۶۸۸ هکتار برآورد می شود. کمترین سطح زیر کشت نیز مربوط به محصول آفتابگردان با مساحت ۱۸۹ هکتار (در سناریوی ۱۰ درصد کم آبیاری) می باشد.

مراحل رشد اولیه و ثانویه و در مرحله گل دهی سناریوی ۱۰ درصد کم آبیاری، از بیشترین مقدار عمق بهینه آب آبیاری برخوردار می باشند. بیشترین مقدار عمق بهینه آب آبیاری در مرحله رسیدن مربوط به گیاه آفتابگردان در سناریوی ۱۰ درصد کم آبیاری است. بیشترین مجموع عمق بهینه آب آبیاری مربوط به محصول سیب زمینی در سناریوی ۱۰ درصد کم آبیاری با مقدار ۵۶۲/۹ میلی متر می باشد و کمترین مربوط به گندم در سناریوی ۳۰ درصد کم آبیاری با مقدار ۲۹۱/۵ میلی متر است. به منظور بهینه سازی شاخص بهره‌وری سود خالص به مقدار آب مصرفی شبکه آبیاری، روابط ۱۰ تا ۱۸ مورد استفاده قرار گرفت. در این بهینه سازی، مقدار P و ضریب یکنواختی توزیع آب به ترتیب معادل ۲۰ و ۵۰ درصد در نظر گرفته شد (جدول ۴). نتایج بهینه سازی سطوح الگوی کشت برای اعمال

جدول ۳. مقادیر عمق آب پتانسیل (Wp) محصولات الگوی کشت برای سناریوهای متفاوت کم آبیاری (میلی متر)

سناریو	محصول	اولیه	ثانویه	گل دهی	شکل گیری	رسیدن	مجموع
سناریوی آبیاری کامل	گندم	۱۳/۸	۲۰/۷	۲۴۵/۹	۲۵۹/۲	۱۵۶/۵	۶۹۶/۱
	باقلا	۲۰/۱	۳۱/۰	۱۷۳/۶	۳۷۰/۱	۸۶/۱	۶۸۰/۹
	آفتابگردان	۲۰/۶	۳۱/۱	۱۹۴/۷	۴۲۶/۶	۱۵۰/۱	۸۲۳/۱
	سیب زمینی	۳۵/۲	۵۲/۷	۲۶۰/۳	۴۷۶/۱	۱۰۳/۷	۹۲۸
	لوبیا	۲۰/۱	۳۱/۰	۱۷۳/۶	۳۷۰/۱	۸۶/۱	۶۸۰/۹
سناریوی ۱۰ درصد کم آبیاری	گندم	۱۲/۶	۱۸/۹	۲۲۳/۵	۲۳۵/۷	۱۴۲/۲	۶۳۲/۹
	باقلا	۱۸/۳	۲۸/۲	۱۵۷/۸	۳۳۶/۴	۷۸/۲	۶۱۸/۹
	آفتابگردان	۱۸/۷	۲۸/۳	۱۷۷/۰	۳۸۷/۸	۱۳۶/۴	۷۴۸/۲
	سیب زمینی	۳۲/۰	۴۷/۹	۲۳۶/۷	۴۳۲/۹	۹۴/۳	۸۴۳/۸
	لوبیا	۱۸/۳	۲۸/۲	۱۵۷/۸	۳۳۶/۴	۷۸/۲	۶۱۸/۹
سناریوی ۲۰ درصد کم آبیاری	گندم	۹/۸	۱۴/۷	۱۵۷/۳	۱۸۳/۹	۱۱۵/۰	۴۸۰/۷
	باقلا	۱۷/۵	۲۶/۹	۱۴۳/۳	۲۸۸/۸	۶۲/۹	۵۳۹/۴
	آفتابگردان	۱۴/۹	۲۲/۶	۱۴۶/۹	۳۲۶/۹	۱۱۴/۹	۶۲۶/۲
	سیب زمینی	۲۵/۵	۳۸/۳	۱۹۷/۲	۳۶۴/۸	۷۹/۱	۷۰۴/۹
	لوبیا	۱۷/۵	۲۶/۹	۱۴۳/۳	۲۸۸/۸	۶۲/۹	۵۳۹/۴
سناریوی ۳۰ درصد کم آبیاری	گندم	۹/۱	۱۳/۷	۱۴۸/۹	۱۸۸/۲	۱۱۸/۴	۴۷۸/۳
	باقلا	۱۴/۷	۲۲/۵	۱۳۱/۴	۲۸۲/۸	۶۶/۰	۵۱۷/۴
	آفتابگردان	۱۴/۶	۲۲/۱	۱۴۲/۶	۳۱۸/۶	۱۱۲/۶	۶۱۰/۵
	سیب زمینی	۲۴/۹	۳۷/۴	۱۹۱/۶	۳۵۶/۱	۷۷/۸	۶۸۷/۸
	لوبیا	۱۴/۷	۲۲/۵	۱۳۰/۴	۲۸۲/۸	۶۶/۰	۵۱۶/۴

جدول ۴. مقادیر عمق آب بهینه آب آبیاری محصولات الگوی کشت در سناریوهای آبیاری مختلف (میلی‌متر)

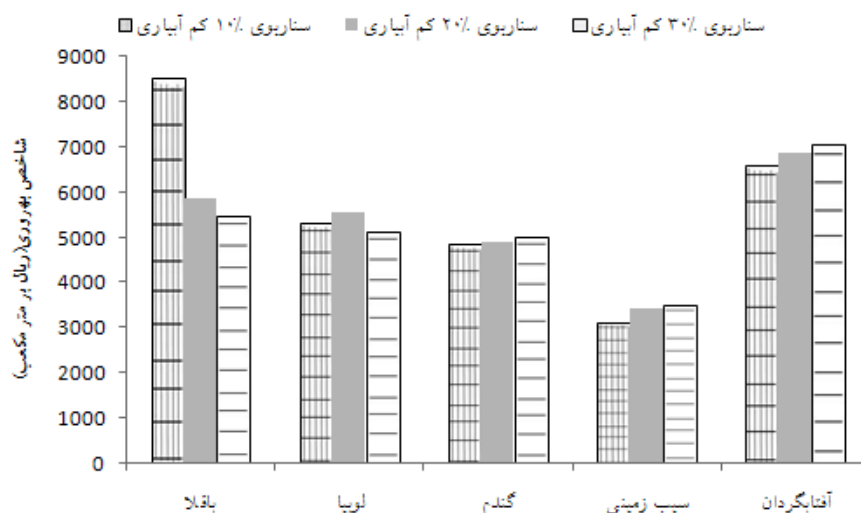
سناریو	محصول	اولیه	ثانویه	گل‌دهی	شکل‌گیری	رسیدن	مجموع
	گندم	۱۲/۶	۱۸/۴	۲۲۳/۵	۲۳۵/۷	۱۴۲/۲	۶۳۲/۴
سناریوی آبیاری کامل	باقلا	۱۶/۲	۲۵/۶	۱۱۳/۵	۱۴۸/۳	۲/۷	۳۰۶/۳
	آفتابگردان	۱۷/۸	۲/۵	۱۱۵/۱	۱۶۸/۹	۷/۹	۳۱۲/۲
	سیب‌زمینی	۲/۵	۳۶/۷	۱۴۲/۲	۱۶۶/۶	۷۳/۳	۴۲۱/۳
	لوبیا	۱۸/۳	۲۴/۶	۱۱۳/۵	۱۴۸/۳	۵۸۷	۸۹۱/۷
	گندم	۹/۱	۱۳/۷	۱۴۸/۰	۱۵۱/۷	۵۴/۰	۳۷۶/۵
سناریوی ۱۰ درصد	باقلا	۱۴/۷	۲۲/۵	۱۳۰/۴	۲۲۸/۴	۵۶/۸	۴۵۲/۸
	آفتابگردان	۱۴/۶	۲۲/۱	۱۴۲/۶	۲۵۰/۱	۹۵/۵	۵۲۴/۹
	سیب‌زمینی	۲۴/۹	۳۷/۴	۱۹۱/۶	۲۴۷/۲	۶۱/۷	۵۶۲/۸
	لوبیا	۱۴/۷	۲۲/۵	۱۳۰/۴	۲۲۸/۴	۵۶/۸	۴۵۲/۸
	گندم	۹/۸	۱۴/۷	۱۲۸/۸	۱۲۸/۰	۴۵/۴	۳۲۶/۷
سناریوی ۲۰ درصد	باقلا	۱۴/۶	۲۴/۷	۱۴۳/۳	۱۹۶/۹	۴۷/۵	۴۲۷
	آفتابگردان	۱۴/۹	۲۲/۶	۱۴۶/۹	۲۱۶/۹	۸۲/۷	۴۸۴
	سیب‌زمینی	۲۵/۵	۳۸/۳	۱۸۶/۹	۲۱۴/۳	۵۳/۴	۵۱۸/۴
	لوبیا	۱۴/۲	۲۴/۸	۱۴۳/۳	۱۹۶/۹	۴۷/۴	۴۲۶/۶
	گندم	۹/۵	۱۵/۹	۱۱۷/۶	۱۱۰/۳	۳۸/۳	۲۹۱/۶
سناریوی ۳۰ درصد	باقلا	۱۱/۴	۱۹/۴	۱۳۳/۸	۱۶۱/۳	۴۰/۱	۳۶۶
	آفتابگردان	۱۸/۷	۲۸/۳	۱۳۵/۱	۱۷۸/۹	۶۸/۱	۴۲۹/۱
	سیب‌زمینی	۳۲/۰	۴۷/۹	۱۵۶/۳	۱۷۶/۸	۴۴/۱	۴۵۷/۱
	لوبیا	۱۱/۴	۱۹/۴	۱۳۳/۸	۱۶۱/۳	۴۰/۱	۳۶۶

جدول ۵. سطح زیر کشت محصولات با مدیریت آبیاری کامل و سطوح کم‌آبیاری (هکتار)

سناریو	محصول	سطح زیر کشت	درصد سطح زیر کشت	افزایش سطح زیر کشت
	گندم	۶۶۵	۴۱	
	باقلا	۱۹۸	۱۱	
سناریوی آبیاری کامل	آفتابگردان	۱۷۰	۱۱	
	سیب‌زمینی	۲۹۳	۱۸	
	لوبیا	۲۸۳	۱۸	
	گندم	۶۷۴	۳۹	۹
	باقلا	۲۲۰	۱۴	۲۲
سناریوی ۱۰ درصد	آفتابگردان	۱۸۹	۱۱	۱۹
	سیب‌زمینی	۳۲۵	۱۹	۳۳
	لوبیا	۳۱۵	۱۸	۳۱
	گندم	۹۴۹	۴۲	۲۷۵
	باقلا	۲۹۱	۱۲	۷۱
سناریوی ۲۰ درصد	آفتابگردان	۲۵۰	۱۰	۶۱
	سیب‌زمینی	۴۲۹	۱۸	۱۰۴
	لوبیا	۴۱۶	۱۷	۱۰۱
	گندم	۱۳۶۲	۴۴	۶۹۷
	باقلا	۳۶۳	۱۲	۱۶۴
سناریوی ۳۰ درصد	آفتابگردان	۳۱۱	۱۰	۱۴۱
	سیب‌زمینی	۵۳۶	۱۷	۲۴۳
	لوبیا	۵۱۸	۱۷	۲۳۵

ریال بر مترمکعب بیشترین مقدار و محصول سیب زمینی با ۳۵۱۲/۱۴ ریال بر مترمکعب کمترین مقدار شاخص بهره‌وری آب اقتصادی را به خود اختصاص داده است. مقدار کمی شاخص بهره‌وری کلی شبکه آبیاری بر اساس الگوی کشت بهینه در هر یک از سناریوهای کم‌آبیاری مورد مقایسه قرار گرفت. بر اساس نتایج این محاسبات، در سناریوی ۱۰ درصد کم‌آبیاری، مقدار شاخص بهره‌وری کلی شبکه با مدیریت الگوی کشت می‌تواند تا ۱۳۷۵۰ ریال بر مترمکعب برسد. درحالی‌که در سناریوی ۲۰ درصد و ۳۰ درصد کم‌آبیاری، با اجرای الگوی کشت بهینه مربوطه، مقادیر این شاخص به ترتیب معادل ۱۳۹۸۰ و ۱۴۰۸۲/۵۴ ریال بر مترمکعب برآورد می‌شود.

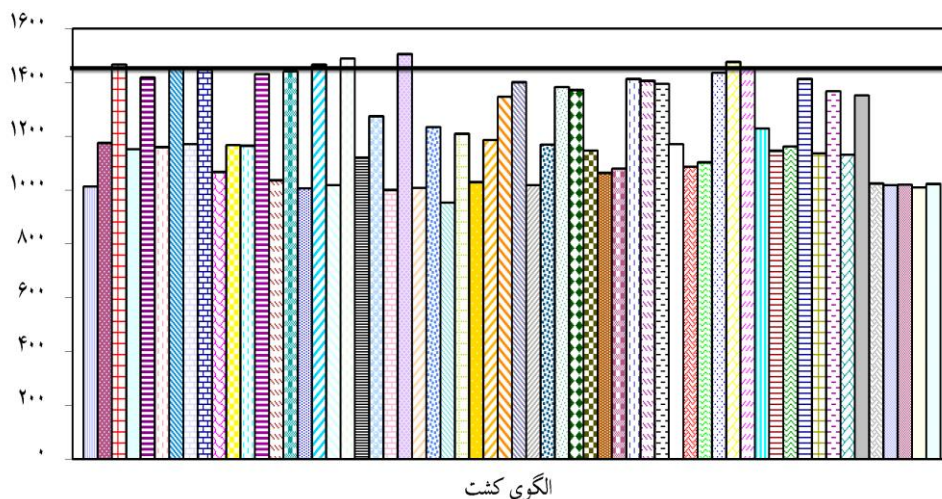
با استفاده از مقادیر سطح زیر کشت الگوی بهینه و مقدار آب تخصیص‌یافته هر یک از محصولات، مقدار شاخص بهره‌وری هر محصول در هر یک از سناریوهای کم‌آبیاری محاسبه گردید. نتایج در شکل (۲) ارائه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد، در سناریوی ۱۰ درصد کم‌آبیاری محصول باقلا با ۸۵۴۰ ریال بر مترمکعب، بیشترین مقدار و محصول سیب زمینی با ۳۱۳۲/۲۵ ریال بر مترمکعب، کمترین مقدار شاخص بهره‌وری سود به آب مصرفی را داراست. بیشترین و کمترین مقدار شاخص بهره‌وری در سناریو ۲۰ درصد کم‌آبیاری به ترتیب مربوط به محصول آفتابگردان و سیب زمینی می‌باشد. در سناریوی ۳۰ درصد کم‌آبیاری نیز محصول آفتابگردان با ۷۲۵۰



شکل ۲. مقادیر شاخص بهره‌وری اقتصادی محصولات الگوی کشت در هر یک از سناریوهای کم‌آبیاری

می‌باشد. در این الگوی کشت شاخص بهره‌وری کلی شبکه با مدیریت الگوی کشت می‌تواند به ۱۵۲۵۰ ریال بر مترمکعب برسد. برای این الگوی کشت سطح بهینه نسبت به سناریوی آبیاری کامل ۱۱ درصد افزایش پیدا نموده است؛ اما با توجه به اینکه به غیر از الگوی کشت ۲۳، تعدادی دیگر از الگوهای کشت دارای مقادیر قابل توجهی از مقدار NBPD نیز می‌باشند و همچنین به منظور انعطاف‌پذیری در انتخاب الگوی کشت، به غیر از الگوی کشت ۲۳، الگوهای کشتی که مقدار NBPD آن‌ها به میزان ۵ درصد کمتر از NBPD الگوی کشت ۲۳ باشد نیز به عنوان الگوی کشت مناسب پیشنهاد می‌گردد (جدول ۶).

نتایجی که تاکنون بررسی گردید بر اساس اعمال کم-آبیاری یکسان برای کلیه محصولات الگوی کشت می‌باشد؛ اما به نظر می‌رسد که ترکیب متفاوت از سناریوهای کم‌آبیاری برای محصولات الگوی کشت، می‌تواند نتایج متفاوت‌تری را حاصل نماید؛ بنابراین برای کلیه ترکیبات ممکن، شاخص بهره‌وری محاسبه گردید. بر اساس شکل (۳)، الگوی کشت شماره ۲۳ دارای حداکثر میزان بهره‌وری می‌باشد. در این الگوی کشت برای محصولات لوبیا و باقلا، اعمال ۱۰ درصد کم‌آبیاری، برای محصولات آفتابگردان و سیب زمینی اعمال ۲۰ درصد کم‌آبیاری و برای محصول گندم اعمال ۳۰ درصد کم‌آبیاری مناسب



شکل ۳. مقادیر شاخص بهره‌وری (ریال بر مترمکعب) برای کلیه ترکیب‌های الگوی کشت ممکن

جدول ۶. مشخصات سناریوهای کم‌آبیاری برای هر محصول و مقادیر بهینه سطح کشت (هکتار) در الگوهای کشت منتخب

شماره الگوی کشت	محصولات	بقلا	چغندر	سبب زمینی	آفتابگردان	بهره‌وری
۲۳	سناریو کم‌آبیاری	۱۰ درصد	۱۰ درصد	۳۰ درصد	۲۰ درصد	۱۵۲۵۰
	سطح بهینه کشت	۱۷۱	۲۷۳	۷۰۲	۳۲۵	۲۳۹
۱۷	سناریو کم‌آبیاری	۱۰ درصد	۱۰ درصد	۳۰ درصد	۲۰ درصد	۱۵۰۳۰
	سطح بهینه کشت	۲۵۵	۲۵۵	۷۶۶	۳۱۰	۲۳۷
۱۹	سناریو کم‌آبیاری	۱۰ درصد	۲۰ درصد	۳۰ درصد	۲۰ درصد	۱۴۹۸۰
	سطح بهینه کشت	۲۲۸	۲۱۱	۶۳۳	۳۶۹	۳۱۶
۳	سناریو کم‌آبیاری	۱۰ درصد	۱۰ درصد	۳۰ درصد	۲۰ درصد	۱۴۵۶۰
	سطح بهینه کشت	۲۸۵	۲۳۳	۷۶۰	۳۶۱	۲۰۹
۴۶	سناریو کم‌آبیاری	۱۰ درصد	۲۰ درصد	۳۰ درصد	۲۰ درصد	۱۴۳۵۰
	سطح بهینه کشت	۲۱۴	۲۹۷	۶۱۱	۲۴۷	۲۸۰

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق، یک مدل غیرخطی با تابع هدف شاخص بهره‌وری سود خالص به میزان آب مصرفی و یک مدل رشد گیاهی ترکیب و توسعه داده شد. با استفاده از ترکیب مدل‌ها، الگوی کشت بهینه محصولات زراعی شبکه آبیاری مورد مطالعه در سه سناریوی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد کم‌آبیاری تعیین و با شرایط الگوی کشت موجود مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین سطح زیر کشت در هر یک از سناریوهای کم‌آبیاری مربوط به محصول گندم می‌باشد و به ترتیب مقادیر ۶۷۴، ۹۴۹ و ۱۳۶۲ هکتار از اراضی شبکه را شامل می‌شود. افزایش سطح زیر کشت شبکه در سناریوی ۳۰ درصد کم‌آبیاری نسبت به

سناریوی ۲۰ درصد و ۱۰ درصد کم‌آبیاری به ترتیب ۴۱۳/۵ و ۶۸۸ هکتار برآورد می‌شود. کمترین سطح زیر کشت نیز مربوط به محصول آفتابگردان با مساحت ۱۸۹ هکتار (در سناریوی ۱۰ درصد کم‌آبیاری) است. در سناریوی ۱۰ درصد کم‌آبیاری محصول باقلا با ۸۵۴۰ ریال بر مترمکعب، بیشترین مقدار و محصول سیب‌زمینی با ۳۱۳۲/۲۵ ریال بر مترمکعب، کمترین مقدار شاخص بهره‌وری سود به آب مصرفی را داراست. بیشترین و کمترین مقدار شاخص بهره‌وری در سناریوی ۲۰ درصد کم‌آبیاری به ترتیب مربوط به محصول آفتابگردان و سیب‌زمینی می‌باشد. در سناریوی ۳۰ درصد کم‌آبیاری نیز محصول آفتابگردان با ۷۲۵۰ ریال بر مترمکعب بیشترین مقدار و محصول

بیش‌ازپیش نمایان می‌سازد؛ اما به‌منظور بهبود بهره‌وری آب مصرفی، ارتقای سطح درآمد بهره‌برداران محلی و فراهم نمودن امکان توسعه مدیریت پایدار منابع آب در شبکه‌های آبیاری، بررسی و مطالعه بیشتر و جامع‌تر قابل توصیه می‌باشد. همچنین چون اعمال درآمدت کم‌آبیاری به‌خصوص در منطقه خوزستان از لحاظ گسترش شوری خاک سیاست پایداری نیست، پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آینده سایر محققین سناریوهای کم‌آبیاری را با اعمال عمق آب موردنیاز برای آبخوبی موردتحقیق و بررسی قرار دهند. به‌منظور افزایش دقت مدل‌های رشد گیاهی که ضرورت استفاده فراوان آن‌ها در آینده حتمی می‌باشد، پیشنهاد می‌گردد، محققین و مراکز علمی از هم‌اکنون اقدام به انجام آزمایش‌ها و جمع‌آوری داده‌های آزمایشی چندین ساله موردنیاز مدل نمایند تا بتوان با پارامتردهی، اعتباریابی و کالیبراسیون دقیق مدل‌ها، نتایج مطلوب‌تری را حاصل نمود. همچنین باید با دعوت از متخصصان برنامه‌نویسی اقدام به تولید و ارزیابی مدل‌های رشد گیاهی منطبق با شرایط موجود در ایران نمود تا بتوانیم در آینده نه‌چندان دور در زمینه مدل‌های رشد گیاهی در سطح جوامع علمی بین‌الملل اقدام به ایفا نقش موثری نمود.

سیب‌زمینی با ۳۵۱۲/۱۴ ریال بر مترمکعب، از کمترین مقدار شاخص بهره‌وری سود به آب مصرفی برخوردار است. آنالیز نتایج بیانگر آن است که در سناریوی ۱۰ درصد کم‌آبیاری، مقدار شاخص بهره‌وری کلی شبکه با مدیریت الگوی کشت می‌تواند تا ۱۳۷۵۰ ریال بر مترمکعب برسد. درحالی‌که در سناریوی ۲۰ درصد و ۳۰ درصد کم‌آبیاری، با اجرای الگوی کشت بهینه مربوطه، مقادیر این شاخص به‌ترتیب معادل ۱۳۹۸۰ و ۱۴۰۸۲/۵۴ ریال بر مترمکعب برآورد می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که ترکیب متفاوت از سناریوهای کم‌آبیاری برای محصولات الگوی کشت، می‌تواند نتایج متفاوت‌تری را حاصل نماید. بر این اساس در الگوی کشتی که در آن برای محصولات لوبیا و باقلا، ۱۰ درصد کم‌آبیاری، برای محصولات آفتابگردان و سیب‌زمینی ۲۰ درصد کم‌آبیاری و برای محصول گندم ۳۰ درصد کم‌آبیاری اعمال گردد، شاخص بهره‌وری آب اقتصادی شبکه می‌تواند به حداکثر میزان ۱۵۲۵۰ ریال بر مترمکعب نیز برسد. یافته‌های این تحقیق، ضرورت استفاده از مدل‌های رشد گیاهی و بهینه‌سازی را در تعیین الگوی کشت و تخصیص آب بهینه در هر شرایط آبی و از طرفی نقش اجرای دقیق الگوی کشت مناسب در بهبود کارایی و عملکرد شبکه‌های آبیاری را

REFERENCES

- Amir, I., and Fisher, F.M. (1999). Analyzing agricultural demand for water with an optimizing model. *Agricultural Systems*, 61(1), 45-56.
- Anonymous (2010). Deputy of Planning and Economic Affairs, Ministry of Jihad-e-Agriculture. Journal of No. 89.01. The cost of agricultural production of 2008-2009 crop year. Volume II. (In Farsi).
- Ashoubgar-Toosi, Sh., Alizadeh, A., and Taghizadeh-kakhki, H. (2004). Optimization of Crop Pattern in Drought Condition. *Journal of Drought and Agricultural Drought*, 10, 1-18 (In Farsi).
- Belhoucette, H., Donatelli, M., Braudeau, E., and Wery, J. (2001). Test of the cropping systems model CropSyst in Tunisian conditions. *Proceedings Second International Symposium Modelling Cropping Systems*, 16-18 July, Florence, Italy. Pp. 47-48
- Benli, B., and Kodali, S. (2003). A non-linear model for farm optimization with adequate and limited water supplies application to the south-east Anatolian project (GAP) region. *Agricultural Water Management*, 62(3), 187-203.
- Berenguer, M. J., and Faci, J. M. (2001). Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) yield compensation processes under different plant densities and variable water supply. *European Journal of Agronomy*, 15, 43-55.
- Bekele, S., and Tilahun, K. (2007). Regulated deficit irrigation scheduling of onion in a semiarid region of Ethiopia. *Agricultural water management*, 89, 148 – 152.
- Buxton, D. R. (1996). Quality-related characteristics of forages as influenced by plant environment and agronomic factors. *Animal Feed Science and Technology*, 59, 37-49.
- Carvalho, H.O., Holzapfel, E.A., Lopez, M.A., and Marino, M.A. (1998). Irrigated cropping optimization. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124(2), 67-72.
- Cummins, D. G. (1981). Yield and quality changes with maturity of silage- type sorghum fodder. *Agronomy Journal*, 73, 988-990.
- Darabi, A., and Ghanawati-Moghaddam, A. (2005). Effect of plant density and harvest history on the performance of potato cultivars in winter cultivars. Khuzestan Agricultural Research Center. (In Farsi).
- De-Juan, J.A., Tarjuelo, J.M., Valiente, M., and Garcia, P. (1996). Model for optimal cropping patterns within the farm based on crop water production functions and irrigation uniformity. I. Development of a decision model. *Agricultural Water Management*, 31(1-2), 115-143.
- Denmead, O. T. and Shaw, R. H. (1960). The effects of soil moisture stress at different stages of growth on the development and yield of corn. *Agronomy journal*, 52, 272 - 274.
- Diaz, G.E., and Brown, T.C. (1996). Aquarius: an object-oriented model for the efficient allocation of water in river basins. Technical report no. 7.

- Colorado State University, pp. 32-48.
- Doorenbos, J., and Kassam, A.H. (1979). Yield response to water. *Irrigation and Drainage Paper*. No. 33, FAO, Rome, 193 pp.
- English, M.J. (1992). Deficit irrigation. I. Analytical framework. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 116 (3), 399-412.
- FAO. (2002). Production Yearbook. Vol. 56, pp. 83
- Gelize, A., Persolo, D., Guevarna, E., Avila, L.G., and Casped, L. M. (1995). Performance of inbred lines of maize under conditions of water stress. Memoria de I a III Reunion Latino Americana YXVI Reunion dela zona Andinia de Mvestigadores en maize. Cochama, Santa Gruz Bolivia. Tomo. I 67-177.
- Ghahraman, B., and Sepaskhah, A .R. (2004). Linear and non-linear optimization models for allocation of a limited water supply. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 53(1), 39-54.
- Heidari, N., Eslami, A., Ghadami-Firoozabadi, A., Kanooni, A., Asadi, M.A., and Khajeh-Abdollahi, M.H. (2006). Research report on determining water use efficiency of crops in Khuzestan. Agricultural engineering research institute. (In Farsi).
- Kajbaf, A. (2005). The research report on the effects of planting dates and seed rates on wheat yield of variety Cr"S"/stk"S"L92-6ap-Lap-oap. Khuzestan Agricultural Research Center. (In Farsi).
- Kanber, R., Kirda, C. (1994). Evaluation of deficit irrigation programmes for cotton, maize, wheat and soybean. Proc Int Conf of Land and Water Resources Management in the Mediterranean Region. Istituto Agronomico Mediterraneo Bari-Italy, 4-8 Sept., 5, 117-133.
- Kang, Sh., Shi, W., and Zhang, J. (2000). An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation. *Field Crops Research*, 67, 207-214.
- Kiniry, J.R., Jones, C.A., O'Toole, J.C., Blanchet, R., Cabelguenne, M., and Spanel, D.A. (1989). Radiation-use efficiency in biomass accumulation prior to grain filling for five grain crop species. *Field Crops Research*, 20(1), 51-64.
- Kipkorir, E.C., Sahli, A., and Raes, D. (2002). MIOS: a decision tool for determination of optimal irrigated cropping pattern of a multicrop system under water scarcity constraints. *Irrigation and Drainage*, 51(1), 155-166.
- Kuo, M-H., Vom-Baur, E., Struhl, K., and Allis, C.D. (2000) Gcn4 activator targets Gcn5 histone acetyltransferase to specific promoters independently of transcription. *Mol Cell*, 6(6), 1309-1320.
- Leenhardt, D., Trouvat, J.L., Gonzales, G., Perarnaud, V., Prats, S., and Bergez, J.E. (2004). Estimation irrigation demand for water management on a regional scale. II. Validation of ADEAUMIS, *Agricultural Water Management*, 68, 233-250.
- Li, Q.Sh., Willardson, L.S., Deng, W., Li, X.J., and Liu, Ch.J. (2005). Crop water deficit estimation and irrigation scheduling in western Jilin province, Northeast China. *Agricultural Water Management*, 71(1), 47-60.
- Loomis, R., and Connors, D. (1992). Crop Ecology: Productivity and Management in Agricultural Systems, Cambridge University Press, Cambridge, UK. Pp. 514-520.
- Mainuddin, M., Das-Gupta, A., and Raj-Onta, P. (1997). Optimal crop planning model an existing groundwater irrigation project in Thailand. *Agricultural Water Management*, 33(1), 43-62.
- Momeni, R., Behbahani, M., and Nazarifar, M.H. (2011). Assessing the scenarios for increasing the productivity of rainfed wheat water in the Karkheh area by using managerial analyzes of CropSyst. *Journal of Irrigation and Water Management of Pardis Abourihan University of Tehran*, 1(1), 29-40. (In Farsi)
- Nazarifar, M.H., and Momeni, R. (2011). Validation and evaluation of plant growth model of CropSyst in determination of proper cropping pattern under deficit irrigation conditions. Case study of Shahid Chamran irrigation and drainage network. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 15(56), 49-61. (In Farsi)
- NeSmith, D.S., and Ritchie, J.T. (1992). Short- and long-term response of corn to a preanthesis soil water deficit. *Agronomy journal*, 84, 107-113.
- Nozari, H., Mohseni, V. (2015). Applying system dynamics approach for simulation and optimization of the cropping pattern in Esfahan right side Abshar irrigation and drainage network. *Iranian journal of soil and water research*, 46(3), 465-474. (In Farsi).
- Otegui, M.E., and Andrade, F.H. (2000). New relationships between light interception, ear growth and kernel set in maize. In: Physiology and modeling kernel set in maize (Westgate M.E., Boote K., eds). pp. 89-102.
- Pannkuk, C.D., Stöckle, C.O., and Papendick, R.I. (1998). Validation of CropSyst for winter and spring wheat under different tillage and residue management practices in a wheat-fallow region. *Agricultural Systems*, 57(2), 121-133.
- Pendleton, B.B., Teetce, G.L. and Peterson, G.C. (1994). Phenology of sorghum flowering. *Crop Sciences*, 34, 1263-1266.
- Raju, K.S., and Nagesh Kumar, D. (1999). Multicriteria decision making in irrigation development strategies. *Journal of Agricultural Systems*, 62(2), 117-129.
- Reca, J., Roldan, J., Alcaide, M., Lopez, R., and Camacho, E. (2001). Optimisation model for water allocation in deficit irrigation systems. I. Description of the model. *Agricultural Water Management*, 48(2), 103-116.
- Ritchie, S.W., Hanway, J.J., and Benson, G.O. (1992). How a corn plant develops. Special Report No. 48. Iowa State University, p. 21.
- Singh, D.K., Jaiswal, C.S., Reddy, K.S., Singh, R.M. and Bhandarkar, D.M. (2001). Optimal cropping pattern in a canal command area. *Agricultural Water Management*, 50(1), 1-8.

- Shaw, R.H. (1977). Climatic requirement. In: Corn and corn improvement (Sprague G.F., ed). Agron Monogr 18. ASA,CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- Statistical Center of Iran, Organization for Management and Planning of the Country. (2007). Selling prices and costs of agricultural services in rural areas of the country, Selling prices and costs of agricultural services in rural areas of the country. (In Farsi).
- Stewart, J.I., and Hagan, R.M. (1973). Function to predict effects of crop water deficits. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 99(IR. 4), 421-439.
- Stöckle, C.O., Williams, J.R., Rosenberg, N.J., and Jones, C.A. (1992). A method for estimating the direct and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on growth and yield of crops: Part I. modification of the EPIC model for climate change analysis. *Agricultural Systems*, 38(3), 225-238.
- Stöckle, C.O., and Nelson, R.L. (1999). Cropsyst User's manual, Biological Systems Engineering Dept., Washington State University, Pullman, WA, USA.
- Stöckle, C.O., Donatelli, M., and Nelson, R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model, *European Journal of Agronomy*, 18(3-4), 289-307.
- Tanner, C.B. and Sinclair, T.R. (1983). Efficient water use in crop production: research or re-search. In: H.M. Taylor, W.R. Jordan and T.R. Sinclair, Editors, Limitations to efficient water use in crop production, American society agronomy, Madison, WI.
- Yaron, D., and Bresler, E. (1983). Economic analysis of on-farm irrigation using response functions of crops. In: Hillel, D.(Ed.), *Advances in Irrigation*, Vol. 2, academic Press, New york, pp. 223-255.
- Young, J. (1996). Water economics. In: Mays, L.W. (Ed.), *Water Resources Handbook*. MacGraw-Hill, New York.