اعتباریابی و ارزیابی مدل رشد گیاهی CropSyst در تعیین الگوی کشت مناسب در شرایط کم آبیاری- مطالعه موردی شبکه آبیاری و زه‌کشی شهید چمران

محمد هادی نظری فر* و رضوانه مومنی[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۱/۲۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۸/۹)

چکیده

کم آبیاری از استراتژی‌های به کار رفته در سال‌های اخیر برای کسب محصول با درآمد و سود ماکزیمم است. در این راستا، تحقیق در زمینه تعیین سطوح مناسب کم آبیاری ضروری است. از آنجایی‌که تعیین سطوح متفاوت عملکرد از طریق آزمایش‌های مزرعه‌ای مشکل می‌باشد، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی راه‌کاری است که از طریق آن می‌توان بیلان آبی را مورد بررسی قرار داده، فرآیند رشد را شبیه‌سازی کرده و به مطالعه سناریوهای مختلف مدیریتی پرداخت. هدف این مطالعه، اعتباریابی و ارزیابی مدل رشد گیاهی CropSyst جهت تعیین الگوی کشت مناسب در شرایط کم آبیاری است. با اعمال سه سناریوی کم آبیاری با مقادیر ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ روی شش محصول باقلا، لوبیا، گندم، سیب زمینی، آفتابگردان و برنج در مدل، نتیجه‌گیری شد که اعمال کم آبیاری۱۰٪ در باقلا، سیب زمینی و لوبیا؛ ۲۰٪ در آفتابگردان و ۳۰٪ در گندم مناسب بوده و بهتر است که در مورد برنج شرایط کم آبیاری اعمال نشود. هم‌چنین از آنجایی‌که میزان بهره‌وری آب یکی از معیارهای اساسی در گزینش نهایی هر یک از محصولات فوق می‌باشد با تعیین شاخص سود خالص بهره‌وری به ازای متر مکعب (NBPD) مشخص گردید که بیشترین میزان NBPD مربوط به محصول باقلا با مقدار۶۸۵۳ ریال در متر مکعب و کمترین میزان مربوط به آفتابگردان با ارزشی معادل ۲۸۰۹ریال در متر مکعب می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: الگوی کشت، بهره‌وری آب، کم آبیاری، مدل رشد گیاهی CropSyst

۱. به ترتیب کارشناسان پژوهشی مهندسی آبیاری و زه‌کشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: nazarifar@ut.ac.ir

مقدمه

در مناطق خشک و نیمه خشک ایران، آب مهم‌ترین عامل محدود کننده توسعه کشاورزی است. بنابراین ایجاد تعادل بین عرضه و تقاضای آب اهمیت فوق العاده‌ای در مسأله مدیریت مربوط به آن دارد. با توجه به محدودیت عرضه اقتصادی آب و بالا رفتن میزان تقاضای آن ناشی از رشد جمعیت، برنامه‌ریزی برای استفاده بهینه از منابع آبی بسیار ارزشمند است. در نتیجه ضرورت استفاده از مکانیزم‌های مناسب و کاراتر از موارد موجود جهت تخصیص و بهره‌برداری از منابع آب بیشتر احساس می‌شود. یکی از این مکانیزم‌ها، برنامه‌ریزی در قالب بهینه‌سازی کم آبیاری است. طبق تعریفی ساده کم آبیاری استفاده حداکثر از واحد آب (به جای واحد زمین) است(۲). مهم‌ترین مؤلفه تشدید در این حالت شرایطی است که محدودیت آب با فراوانی زمین همراه باشد به طوری‌که اگر در یک منطقه نسبت آب به اراضی را ضریب فراوانی بنامیم، در این وضعیت کوچک‌تر از واحد خواهد بود(۱۲). این ضریب در ایران حدود ۰/۱۳ و رقم بسیار پایینی است(۳). بنابراین استفاده از «کم آبیاری» امری بسیار ضروری می‌باشد. کم آبیاری یک روش یا سیستم آبیاری نیست بلکه نوعی مدیریت کارا و پویا در بهره‌برداری به شمار می‌رود که آثار ویژه‌ای بر مدیریت منابع آبی، استحصال، انتقال و مصرف آن و نهایتاً در اقتصاد کشاورزی (افزایش عملکرد و یا سود خالص به ازاء واحد آب مصرفی) دارد(۱۷). کم آبیاری یک راه‌کار بهینه برای به عمل آوردن محصولات تحت شرایط کمبود آب است که همراه با کاهش محصول در واحد سطح و افزایش آن با گسترش سطح می‌باشد(۵). تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه کم آبیاری محصولات مختلف از طریق آزمایش‌های مزرعه‌ای صورت پذیرفته است. در تحقیقی که رستمی و همکاران در دو سال زراعی روی عکس العمل ارقام مقاوم یونجه به خشکی در دانشکده کشاورزی شیراز انجام دادند، نتیجه‌گیری شد که با یک یا دو آبیاری به منظور سبز شدن کامل مزرعه بدون آن‌که نیازی به آبیاری مجدد باشد، می‌توان ۹۵۶ کیلوگرم ماده خشک علوفه در هکتار به دست آورد و با دور آبیاری ۳۰ روز یک بار، این مقدار به ۲۰۹۴/۶ کیلوگرم در هکتار و در ۲۰ روز یک بار به ۲۹۳۰ کیلوگرم در هکتار می‌رسد. یعنی با تبدیل دور آبیاری از ۲۰ روز به ۳۰ روز حدود ۳۰٪ محصول کاهش پیدا خواهد کرد(۶). انگلیش و همکاران در سال ۱۹۹۷ آنالیزی روی کم آبیاری به منظور بررسی مفید بودن این استراتژی در سه مکان مختلف روی گندم، پنبه و ذرت اجرا کردند و به این نتیجه رسیدند که کم آبیاری بین ۱۵ تا ۹۵ درصد بسته به شرایط محیطی و مکانی، منجر به حصول سود حداکثر می‌شود(۱۶).

نورجو تأثیر کم آبیاری روی شاخص‌های مصرف آب، کمیت و کیفیت عملکرد چغندر قند را با دو مقدار کم آبیاری(۵۰٪ و ۷۵٪ نیاز آبی گیاه) بررسی کرده و بیان نمود که تأثیر سطوح مختلف آبیاری بر عملکرد ریشه و شکر بسیار معنی‌دار است(۱۰). داگدلن و همکاران یک آزمایش زراعی در دو سال زراعی در کشور ترکیه و به منظور بررسی اثر کم آبیاری روی عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت انجام دادند. آنها نتیجه گرفتند که متوسط دامنه تغییرات کارایی ذرت بین ۱/۶۵ تا ۲/۵ کیلوگرم در متر مکعب است و بیشترین مقدار تغییر آن مربوط به تیمارهای کم آبیاری می‌باشد(۱۵). در این راستا باید گفت که برنامه‌ریزی برای کم آبیاری به طور بالقوه دشوارتر از آبیاری کامل است. در حالت ایدآل لازم است که تصمیم گیرنده به غیر از ارزیابی میزان آب باقیمانده در پروفیل خاک، مقدار تنش وارده به محصول و چگونگی تأثیرات این تنش‌ها بر عملکرد محصول را نیز بسنجد. هیل و کلر جهت برقراری ارتباط بین مقدار آب کاربردی با نسبت مساحت‌های آبیاری شده و عملکرد حاصل راه‌کاری را به منظور طراحی روش آبیاری ارائه نمودند. آنها برای انواع روش‌های آبیاری، یکنواختی آبیاری قابل دسترس را برآورد کردند و مقدار بهینه آب کاربردی با حداکثر سود را محاسبه نمودند(۱۸).

تکنیک‌هایی که اخیراً ارایه شده‌اند به شخص تصمیم گیرنده این امکان را می‌دهند که مسأله تنش و عملکرد را در نظر گرفته

و با دقت کم آبیاری را برنامه‌ریزی کند. جهت بررسی این تکنیک‌ها نیاز به آزمایش‌های میدانی مزرعه‌ای می‌باشد. با توجه به این‌که انجام آزمایش‌های مزرعه ای برای فصل‌ها و موقعیت‌های جغرافیایی مختلف مشکل است استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی از جمله راه‌کارهایی است که امکان بررسی فرآیندهای اتفاق افتاده در زنجیره خاک- گیاه- اتمسفر، بیلان آبی، شبیه‌سازی فرآیند رشد و مطالعه سناریوهای مختلف مدیریتی را فراهم می‌سازد. مدل‌های رشد گیاهی امکان بررسی مجدد وضعیت گذشته، شبیه‌سازی حال و پیشگویی آینده را می‌دهند و قابلیت تغییر در تمام موقعیت‌ها را دارند. هم‌چنین با اعمال مدیریت مناسب همراه با توانایی پیش‌بینی پارامترهای محیطی می‌توانند احتمال خطر در آینده را به حداقل برسانند.

تاکنون مدل‌های رشد قابل ملاحظه‌ای ارائه شده است که از مهم‌ترین آنها به ترتیب توسعه می‌توان به مدل‌های SUCROS و دیگر مدل‌های وابسته (۱۳)، CERES (۲۳) و CROPGRO (۲۹)، مدل EPIC و CROPGRO که تحت پوشش DSSAT قرار دارند(۱۹) اشاره نمود. ولی هر کدام از این مدل‌ها دارای محدودیت‌هایی هستند. به عنوان نمونه مدل EPIC روشی ساده و در عین حال مؤثر با شبیه‌سازی چند محصوله دارد و برای آنالیز تناوب محصول و سیستم‌های کشت مناسب است ولی با توجه به سادگی توصیف مراحل رشد محصول و فرایندهای بیوفیزیکی وابسته به آن محدودیت‌هایی دارد(۲۴). تلاش برای رفع محدودیت‌های قبلی مدل‌ها منجر به توسعه مدل رشد گیاهی دیگری به نام CropSyst گردید. مدل CropSyst با توجه به مفاهیم EPIC طراحی شده است اما از روش جامع‌تری برای شبیه‌سازی رشد گیاه و اثر متقابل آن با مدیریت و محیط اطراف استفاده می‌کند(۲۵). از ویژگی‌های CropSyst می‌توان به موضوع برقراری تعادل بین شناخت کامل مدل‌ها و عملیات طراحی مناسب نرم‌افزار از ابتدای توسعه آن اشاره کرد. در این ارتباط بخشی از اهداف معمول با روش مدل‌سازی APSIM که منابع اساسی را در توسعه کیفیت عملیات مهندسی نرم افزار در نظر می‌گیرد، به اشتراک گذاشته شد. این مدل یک مدل شبیه‌سازی سیستم‌های کشت چند ساله، چند محصوله و با گام زمانی روزانه می‌باشد که به عنوان ابزاری جهت تحلیل اثر اقلیم، خاک و مدیریت در بهره‌وری سیستم‌های کشت و محیط، توسعه یافته است(۲۶ و ۲۷).

در حال حاضر کاربرد مدل‌های رشد گیاهی در تحقیقات مربوط به کم آبیاری با توجه به مزایای قابل توجه آن رو به رشد است. منوچی و مکارلی از مدل EPIC جهت برآورد توابع تولید در سطوح مختلف آبیاری الگوی کشت استفاده نمودند. مقایسه نتایج با آزمایش‌های میدانی نشان داد که مدل به خوبی قادر است در ارزیابی سناریوهای مختلف کم آبیاری استفاده شود(۲۲). هم‌چنین مدل CropSyst توسط بلهوچته و همکاران در سه سطح کم آبیاری برای گندم در تونس ارزیابی شد و مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل با داده‌های آزمایشی نتایج خوبی را نشان داد(۱۴). پانکوک و همکاران نیز در شرق واشنگتن با استفاده از مدل CropSyst، شبیه‌سازی‌هایی در مورد سطوح مختلف کم آبیاری گندم بهاره و زمستانه با استفاده از عملیات شخم و شیار متفاوت و مدیریت باقی‌مانده‌های گیاهی در یک دوره شش ساله انجام دادند که نتایج نشان‌دهنده تشابه ساختار آماری داده‌های شبیه‌سازی شده و میدانی بود. هم‌چنین داده‌های شبیه‌سازی شده و میدانی، توابع مشابه تولید آب را نتیجه داد(۲۸). بنابراین مطالعه، تحقیق و بررسی در خصوص این نوع مدیریت آبیاری با استفاده از مدل‌های رشد گیاهی ضروری است. از این رو هدف این مطالعه، ارزیابی مدل CropSyst و تعیین الگوی کشت مناسب در شرایط کم آبیاری در شبکه آبیاری و زه‌کشی توسعه اراضی شهید چمران اهواز با استفاده از مدل است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه، اراضی تحت پوشش یک کانال درجه ۲ آبیاری مربوط به طرح شبکه آبیاری و زه‌کشی توسعه اراضی شهید چمران اهواز است. این طرح در جنوب غربی شهر اهواز و حد فاصل جاده اهواز- خرمشهر تا هور العظیم واقع شده

است. سطح کل منطقه طرح در حدود ۵۰۰۰۰ هکتار است. بافت خاک اراضی عمدتاً سنگین تا نیمه سنگین و شوری(EC) اراضی بالای ۴ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد. منبع تأمین آب برای طرح، رودخانه کرخه است که محل آبگیری آن نیز در مجاورت سد انحرافی کرخه قرار دارد. در جدول ۱ آب مورد نیاز طرح و میزان شوری (EC) آب آبیاری در محل برداشت آب نشان داده شده است(۵).

یک کانال درجه ۲ با نام GC19 از طرح مزبور انتخاب گردید و پارامترهای مورد نیاز مدل برای این کانال تهیه و به مدل اعمال شد. سطح تحت کشت کانال GC19 معادل ۱۰۰۰ هکتار و طول آن ۸۰۰۰ متر است. الگوی کشت مورد بررسی برای کاشت در محدوده این کانال شامل باقلا، لوبیا، گندم، سیب زمینی، آفتابگردان و برنج می‌باشد. سطح زیر کشت پیشنهادی به ترتیب ۱۱، ۹، ۳۹، ۱۸، ۱۲/۵ و ۹ درصد است.

با توجه به دشواری تعیین سطوح متفاوت عملکرد 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 بیوماس، عملکرد محصول، تولید و تجزیه باقی‌مانده گیاهی، فرسایش آبی خاک و شوری توسط این مدل شبیه‌سازی می‌شود. این فرایندها تحت تأثیر شرایط آب و هوایی، مشخصات خاک و گیاه و گزینه‌های مدیریتی سیستم‌های کشت شامل تناوب محصول، انتخاب نوع شخم و شیار، آبیاری، کوددهی ازته، شوری آب آبیاری و خاک، عملیات کشت و مدیریت باقی‌مانده گیاهی قرار گرفته‌اند. ویرایشگر CropSyst، شبیه‌ساز سیستم‌های کشت (CropSyst model)، مولد داده‌های هواشناسی (ClimGen)، GIS-CropSyst (ArcCS) و ابزار تحلیلی حوزه آبخیز (CropSyst Watershed) از مولفه‌های مهم و زیر مجموعه CropSyst هستند. 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 بخش‌های مختلف اراضی با در نظر گرفتن شرایط یک‌نواختی خاک، آب و هوا، تناوب محصول و مدیریت می‌باشد، رشد در گیاه و اجزای آن توصیف شده است. ترکیب این گزینه‌ها 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، فرونشت عمقی، تعرق محصول و تبخیر می‌باشد. توزیع مجدد آب در خاک می‌تواند با روش آبشاری ساده یا حل عددی معادله جریان خاک ریچارد شبیه‌سازی شود. CropSyst برای محاسبه تبخیر تعرق گیاه مرجع(ET_0)، دو گزینه مدل پنمن- مانتیث و مدل پریستلی- تیلور را پیشنهاد می‌کند. شبیه‌سازی عملکرد نیز بستگی به زیست توده تجمعی در بلوغ فیزیولوژیکی (B_{PM}) و شاخص برداشت دارد:

$$HI = \frac{\text{عملکرد قابل برداشت}}{\text{بیوماس روی سطح زمین}} \qquad [۱]$$

$$Y = B_{PM} HI \qquad [۲]$$

Y = عملکرد ($kg\ m^{-2}$)

HI= شاخص برداشت

واحد B_{PM} نیز $kg\ m^{-2}$ بوده و 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 حایل شده توسط آن، محاسبه می‌شود. سپس رشد پتانسیل با محدودیت‌های آبی و نیتروژن تصحیح می‌شود تا مقدار واقعی بیوماس روزانه تعیین شود. گذرگاه معمول برای تبادل بخار و کربن در برگ‌ها قرار گرفته و بین تعرق گیاه و تولید بیوماس

جدول ۱. مقادیر آب مورد نیاز طرح و شوری آب آبیاری(سال ۱۳۸۵)

ماه	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	Jul	Agu	Sep	Oct	Nov	Dec
دبی مورد نیاز(m^3/s)	۱۴/۰۲	۲۰/۶۷	۲۸/۹	۳۳/۲۸	۲۷/۴۵	۱۷/۸۲	۱۷/۰۷	۲۷/۷۰	۳۸/۴	۳۳/۳۲	۱۸/۱۳	۶/۶۲
شوری آب آبیاری(dS/m)	۱/۲۳	۱/۱۵	۱/۱۲	۰/۹۱	۰/۹۰	۱/۴۷	۱/۷۶	۲/۰۵	۲/۰۵	۱/۷۵	۱/۵۸	۱/۴۴

رابطه‌ای وجود دارد. بنابراین تولید پتانسیل بیوماس روزانه را می‌توان با فرمول زیر محاسبه کرد (۳۰):

$$B_{PT} = \frac{K_{BT} T_P}{VPD} \qquad [۳]$$

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

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

VPD = میانگین روزانه کمبود فشار بخار اشباع (kPa)

K_{BT} = ضریب تعرق بیوماس (kPa)

مقادیر پارامتر اخیر در مطالعات قبلی، موجود است (۲۱ و ۳۰). رابطه تانر- سینکلایر در مقادیر کم VPD ناپایدار می‌شود و در VPD نزدیک به صفر، رشد نامحدودی را پیش‌بینی می‌کند. برای غلبه بر این مشکل، مانتیث (۱۹۷۷) برآورد ثانویه‌ای از تولید بدون تنش بیوماس را محاسبه کرده است:

$$B_{IPAR} = eIPAR \qquad [۴]$$

B_{IPAR} = تولید بیوماس وابسته به PAR حایل شده ($kg\ m^{-2}\ day^{-1}$)

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

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

مقادیر پارامتر e را می‌توان با مراجعه به مطالعات قبلی پیدا کرد (۲۰).

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) (۱، ۴، ۸ و ۱۱) و زیر برنامه 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 مربوط به ایستگاه هواشناسی اهواز که در نزدیکی منطقه مورد مطالعه قرار گرفته از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید. از یک مولد هواشناسی برای پردازش اطلاعات مورد نیاز استفاده شد. به همین منظور داده‌های دما، تابش خورشیدی، رطوبت نسبی و غیره برای تک تک دوره‌های آماری و ایستگاه‌ها در مدل ClimGen که یک مولد هواشناسی و نیز از ضمائم مدل CropSyst است 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 اطلاعات منطقه‌ای، گزارش‌ها و تحقیقات انجام پذیرفته(فائو- منطقه‌ای) و راهنمای مدل به عنوان منابع اطلاعاتی استفاده شد. مدل برای سناریوهای مختلف کم آبیاری به روش کاهش متغیر میزان آبیاری برای مراحل رشد در دور ثابت اجرا و نتایج بررسی شد. هم‌چنین با توجه به اینکه میزان بهره‌وری آب یکی از معیارهای اساسی در گزینش نهایی محصولات الگوی کشت است با تعیین شاخص سود خالص

بهره‌وری به ازاء متر مکعب (NBPD) نتایج حاصل از مدل رشد گیاهی با این شاخص ارزیابی شد.

شاخص NBPD یکی از شاخص‌های مفید اندازه‌گیری بهره‌وری آب درکشاورزی است که از نسبت مقدار سود خالص حاصل از فروش محصول به مقدار آب مصرف شده محاسبه می‌شود. اگر چه محاسبه این شاخص قدری مشکل می‌باشد ولی از دقت بالاتری نسبت به شاخص‌های دیگر بر خوردار است. در این مطالعه به منظور محاسبه شاخص بهره‌وری ارزش افزوده به ازای یک مترمکعب آب مصرفی، نیاز خالص آبی گیاهان از روش پنمن توسط ویرایشگر ClimGen مدل رشد محاسبه شد.

ستاده در محاسبه شاخص NBPD، ارزش خالص و یا ارزش افزوده محصولات است که برای برآورد آن ریز اقلام هزینه‌های تولید محصولات شامل هزینه‌های نهاده‌ای، هزینه ماشین‌آلات و هزینه‌های نیروی کار برای گیاهان بررسی شد.

ارزش ناخالص تولید، حاصل‌ضرب قیمت محصول در عملکرد آن است و ارزش افزوده محصولات که از مجموع ارزش خالص محصولات و هزینه کارگری محاسبه می‌شود، علاوه بر ارزش خالص در برگیرنده اشتغال‌زایی نیز است.

نتایج و بحث

شکل ۱ برای نمونه نتایج حاصل از اعتباریابی مدل در مورد محصول گندم با استفاده از داده‌های سال‌های زراعی ۸۳-۱۳۸۰ یک مزرعه آزمایشی در ایستگاه تحقیقاتی ملاثانی را نشان می‌دهد. در مزرعه مذکور دور آبیاری در چهار تیمار، بعد از ۵۰، ۶۵، ۸۰ و ۹۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی از تشت کلاس A انجام شده است. در هر نوبت آبیاری به اندازه میزان تبخیر تجمعی از تشت در آن تیمار آبیاری انجام گرفته است.

هم‌چنین در جدول ۲ نتایج ارزیابی عملکرد برآورد شده توسط مدل به کمک شاخص‌های آماری ارائه شده است.

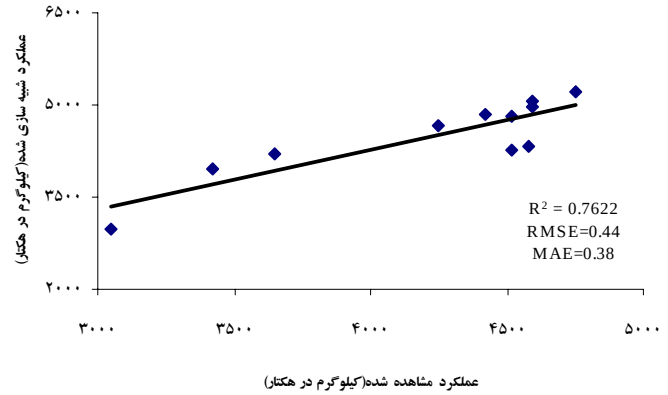
ضریب هم‌بستگی مقادیر واقعی برآورد شده توسط مدل برای محصول گندم ۰/۷۶ درصد و ریشه میانگین مربعات خطاها ۰/۴۴تن در هکتار است. هم‌چنین شاخص میانگین خطای مطلق و انحراف مدل نشان می‌دهد که مدل با خطای ۳۷۸ و ۱۱۰ کیلوگرم بر هکتار، عملکرد محصول گندم را برآورد نموده و از دقت قابل قبولی برخوردار است.

از جدول ۲ نتیجه‌گیری می‌شود که ریشه میانگین مربعات خطاها با توجه به متوسط عملکرد محصولات لوبیا، سیب زمینی، آفتابگردان و برنج به ترتیب ۱/۳، ۶/۹۷، ۳/۴، ۴/۵ و به طور متوسط حدود ۴ درصد می‌باشد. 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 می‌دهند که مدل از دقت قابل قبولی برخوردار است.

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

با انجام عملیات پارامتردهی و اجرای مدل، میزان عملکرد محصولات در سناریوهای مختلف کم آبیاری، پیش‌بینی و در جدول ۳ ارائه شده است. هم‌چنین از آنجایی‌که کم آبیاری انجام شده، از روش کاهش متغیر میزان آبیاری برای مراحل رشد استفاده می‌کند با انجام عملیات سعی و خطا عملکرد بیشینه برای سناریوهای کم آبیاری با توجه به ضریب واکنش عملکرد به آب هر محصول و تغییرات آن در مراحل مختلف رشد، تعیین شد. حساس‌ترین مرحله از نظر واکنش عملکرد به آب نیز برای هر محصول در این جدول قابل مشاهده است.

بررسی نتایج محاسبات نشان می‌دهد که وقتی کمبود آب در زمان خاصی از کل دوره رشد یک محصول رخ می‌دهد واکنش عملکرد نسبت به آن عمدتاً مربوط به نحوه حساسیت محصول به کمبود آب در آن دوره خاص است. به طور کلی بر اساس گزارشات انتشار یافته از فائو حساسیت به کمبود آب در



شکل ۱. مقایسه عملکردهای شبیه‌سازی شده و واقعی محصول گندم (kg/ha)

جدول ۲. شاخص‌های سازگاری ارزیابی کارایی مدل با استفاده از عملکردهای واقعی و شبیه‌سازی شده (Ton/ha)

شاخص / محصول	گندم	باقلا	لوبیا	سیب زمینی	آفتابگردان	برنج
GSD	۰/۰۱۸	۰/۰۲۱	۰/۰۳۲	۰/۰۱۵	۰/۰۴۱	۰/۰۵۲
d	۱/۰۰۰	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۹۹	۱	۰/۹۱
R^2	۰/۷۶	۰/۶۸	۰/۷۸	۰/۵۹	۰/۶۲	۰/۵۲
RMSE	۰/۴۴	۲/۹	۱/۳	۶/۹۷	۳/۴	۴/۵
MAE	۰/۳۷۸	۱/۹۹	۲/۰۵	۵/۹۷	۱/۲	۵/۲۵
ME	−۰/۱۱	−۰/۹	−۰/۸۲	−۵/۷	۲/۳۵	−۴/۵۴
متوسط عملکرد	۵/۰۸	۳/۲۰	۲/۴۰۰	۳۸/۰۴	۱/۸	۴/۱

جدول۳. مقادیر عملکرد پیش‌بینی شده محصولات منتخب تحت اعمال سناریوهای مختلف کم آبیاری(کیلوگرم در هکتار)

نام محصول	حساس ترین مرحله واکنش عملکرد به آب	سناریوی آبیاری کامل	سناریوی ۱۰٪ کم آبیاری	سناریوی ۲۰٪ کم آبیاری	سناریوی ۳۰٪ کم آبیاری
باقلا	شکل‌گیری	۲۰۸۵	۱۸۵۰	۱۸۶۲	۱۵۷۹
لوبیا	گل‌دهی	۱۸۰۰	۱۶۴۲	۱۴۹۵	۱۳۲۴
گندم	گل‌دهی	۳۵۸۰	۳۲۴۰	۳۰۲۱	۲۸۹۴
سیب زمینی	شکل‌گیری	۲۶۰۰۰	۲۵۲۱۰	۲۳۵۹۰	۲۱۵۴۰
آفتابگردان	گل‌دهی	۱۲۳۰	۱۱۹۸	۱۰۸۴	۹۷۸
برنج	شکل‌گیری	۳۲۵۰	۲۹۱۲	۲۶۷۴	۲۴۸۰

دوره‌های جوانه زدن، گلدهی و شکل‌گیری محصولات نسبت به دوره‌های اولیه و اواخر رشد بیشتر است. در بین محصولات فوق، حساس‌ترین مرحله نسبت به اعمال کم آبیاری برای محصولات لوبیا، گندم و آفتابگردان، مرحله گل‌دهی است و برای سایر محصولات مرحله شکل‌گیری می‌باشد. قابلیت این مدل در ارزیابی و تعیین مراحل حساس رشد گیاه نسبت به عوامل تولید یکی دیگر از توانمندی‌های این مدل است که می‌توان از آن جهت مدیریت تخصیص آب سود جست.

با توجه به اعمال کم آبیاری و هیدرومدول های تعیین شده، در هر سناریو مقادیری از حجم آب به صورت مازاد باقی می‌ماند که منجر به افزایش سطح زیر کشت به ازای هر سناریو می‌شود. جدول ۴ افزایش سطح زیر کشت را در نتیجه اعمال کم آبیاری ارائه می‌دهد.

هم‌چنین شکل‌های۲ و ۳ درصد تغییرات عملکرد و سطح زیر کشت در سناریوهای مختلف آبیاری را نشان می‌دهند.

بررسی این جداول و شکل‌ها نشان می‌دهد که میزان عملکرد کل باقلا در سناریوی آبیاری کامل در مقایسه با سایر سناریوها به ترتیب ۲۰۵۰، ۲۲۴۲ و ۲۸۳۲ کیلوگرم تفاوت دارد. اختلاف عملکرد در بین سناریوهای کم آبیاری ناچیز و قابل اغماض است. این اختلاف عملکردهای بسیار کم در مقایسه با مصرف آب اضافی و قیمت تأمین آب و هزینه‌های آبیاری قابل توجیه نیست. زیرا تغییر سناریوی آبیاری کامل به سناریوی ۱۰ درصدی موجب می‌شود عملکرد و سطح به ترتیب به میزان ۲۸٪ و ۲۰٪ تغییر نمایند. به بیان دیگر در این وضعیت تغییر یک واحد عملکرد محصول نیازمند به تغییر ۰/۷۱ واحد سطح است. در حالی‌که انتخاب سناریوی ۲۰ درصدی موجب افزایش این نسبت تا ۰/۸۴ می‌شود. بنابراین اختلاف عملکرد در سناریوی ۱۰ درصدی با سناریوی آبیاری کامل چشمگیر و قابل توجیه می‌باشد. اعمال این سناریو موجب می‌شود که سطح زیر کشت به میزان ۱۰ هکتار افزایش یابد.

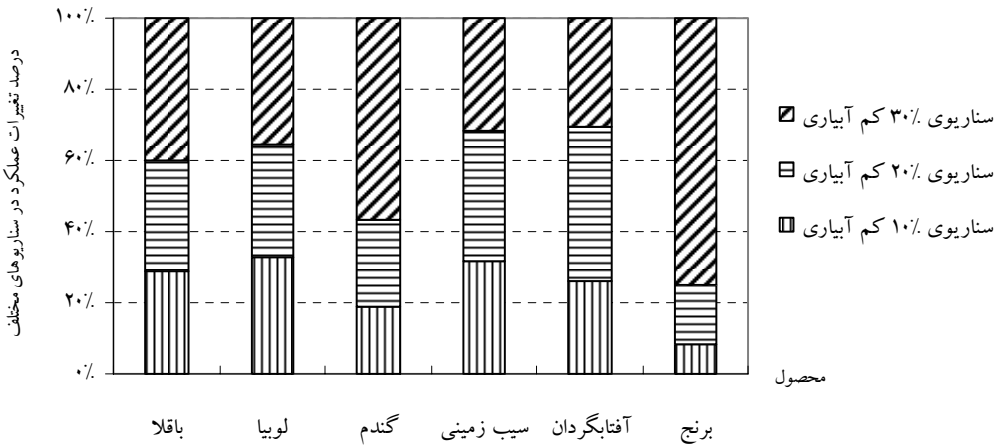
برای محصولات سیب زمینی و لوبیا نیز همانند باقلا انتخاب سناریوی ۱۰ درصد مناسب است. در این صورت افزایش سطوح زیر کشت به ترتیب ۳۰ و ۱۸ هکتار می‌شود. نتایج بررسی در محصول آفتابگردان نشان می‌دهد که انتخاب سناریوی ۲۰ درصدی نسبت به سایر سناریوها بهتر است و باعث افزایش ۴۳ هکتار در سطح و افزایش ۳۴۹۳۲ کیلوگرم در هکتار در عملکرد می‌شود. انتخاب سناریوی ۳۰ درصد کم آبیاری فقط در مورد گندم مناسب است چرا که باعث افزایش عملکرد به میزان۲۳۳۶۶۰ کیلوگرم در هکتار نسبت به آبیاری کامل می‌گردد. این افزایش عملکرد به علت افزایش در سطح به میزان ۱۴۰ هکتار در مقایسه با سناریوی آبیاری کامل و اعمال تنش در مرحله‌ای مناسب از رشد محصول می‌باشد. هم‌چنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که بهتر است در مورد برنج شرایط کم آبیاری اعمال نشود. در این محصول هر چند اعمال سناریوی ۳۰ درصد کم آبیاری در نهایت باعث افزایش عملکرد کل می‌شود اما این تغییر عملکرد در ازای افزایش سطح و هزینه تولید محصول، مطلوب نمی‌باشد.

بعد از انتخاب سناریوهای مناسب کم آبیاری برای هر محصول با بررسی نسبت تغییرات سطوح کشت به ازای تغییرات عملکرد ناشی از اعمال کم آبیاری مشخص گردید که این نسبت در باقلا – در بین محصولات الگوی کشت مورد نظر به غیر از برنج – دارای کمترین مقدار است. به طوری‌که در سناریوی ۱۰ درصد کم آبیاری محصول باقلا مقدار آن ۰/۷۱ است که بهتر است در اولویت اول الگوی کشت قرار گیرد. اما آفتابگردان با دارا بودن مقداری معادل ۰/۸۱ دارای بیشترین میزان در بین محصولات فوق است که در نتیجه در اولویت نهایی الگوی کشت قرار می‌گیرد.

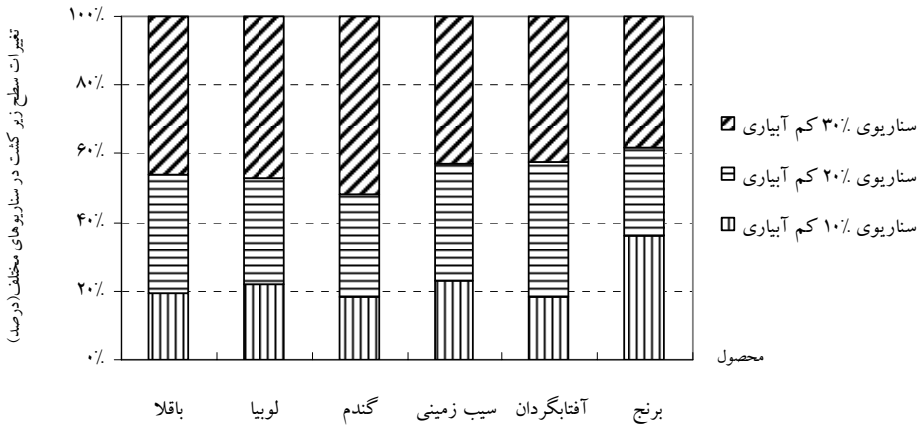
جدول ۵ میزان NBPD را برای محصولات منتخب ارائه می‌دهد. از آنجایی که میزان بهره‌وری آب یکی از معیارهای اساسی در گزینش نهایی هر یک از محصولات فوق است با توجه به ارقام جدول مشخص می‌گردد که باقلا در مقایسه با سایر محصولات دارای مقدار بالاتری می‌باشد. بنابراین پیشنهاد می‌شود در الگوی کشت مربوط به شرایط کم آبیاری در اولویت اول قرار گیرد. بعد از این محصول به ترتیب لوبیا،

جدول۴. افزایش سطح زیر کشت (هکتار) و عملکرد در نتیجه اعمال سناریوهای کم آبیاری (تن در هکتار)

سطح زیر کشت(هکتار) / محصول		باقلا	لوبیا	گندم	سیب زمینی	آفتابگردان	برنج
سناریوی آبیاری کامل	سطح زیر کشت	۷۰	۶۰	۲۵۰	۱۲۰	۸۰	۶۰
	افزایش سطح زیر کشت	–	–	–	–	–	–
	درصد سطح زیر کشت	۱۱	۹	۳۹	۱۸	۱۲/۵	۹
سناریوی ۱۰٪ کم آبیاری	سطح زیر کشت	۸۰	۱۰۰	۳۰۰	۱۵۰	۹۸	۷۸
	افزایش سطح زیر کشت	۱۰	۱۸	۵۰	۳۰	۲۰	۱۸
	درصد سطح زیر کشت	۱۰/۳۲	۱۰/۰۶	۳۸/۷۱	۱۹/۳۵	۱۲/۹	۸/۶۵
	افزایش میزان عملکرد	۲۰۵۰	۲۰۰۷۶	۷۷۰۰۰	۶۶۱۵۰۰	۲۱۴۰۰	۱۰۴
سناریوی ۲۰٪ کم آبیاری	سطح زیر کشت	۸۸	۸۵	۳۳۰	۱۶۵	۱۲۳	۷۳
	افزایش سطح زیر کشت	۱۸	۲۵	۸۰	۴۵	۴۳	۱۳
	درصد سطح زیر کشت	۱۰/۲	۹/۸	۳۸/۱۹	۱۹	۱۴/۲۴	۸/۴۵
	افزایش میزان عملکرد	۲۲۴۲	۱۹۰۷۵	۱۰۱۹۳۰	۶۷۲۳۵۰	۳۴۹۳۲	۲۰۲
سناریوی ۳۰٪ کم آبیاری	سطح زیر کشت	۹۴	۹۸	۳۹۰	۱۷۶	۱۲۶	۷۹
	افزایش سطح زیر کشت	۲۴	۳۸	۱۴۰	۵۶	۴۶	۱۹
	درصد سطح زیر کشت	۹/۷۶	۱۰/۱۷	۴۰/۵۰	۱۸/۲۷	۱۳/۰۸	۸/۲
	افزایش میزان عملکرد	۲۸۳۲	۲۱۷۵۲	۲۳۳۶۶۰	۶۷۴۰۴۰	۲۴۸۲۸	۹۲۰



شکل ۲. مقایسه درصد تغییرات عملکرد در سناریوهای مختلف آبیاری



شکل ۳. مقایسه درصد تغییرات سطح زیر کشت در سناریوهای مختلف آبیاری

جدول۵ . شاخص سود خالص بهره‌وری (NBPD) (ریال در متر مکعب) در سال ۱۳۸۵

محصول	باقلا	سیب زمینی	لوبیا	آفتابگردان	گندم	برنج
شاخص بهره وری	۶۸۵۳	۳۸۲۴	۶۶۱۹	۲۸۰۹	۴۶۱۱	۱۲۵۴۷

گندم، سیب زمینی و آفتابگردان دارای اولویت می‌باشند. لذا به طور کلی توصیه می‌شود در صورت نیاز به انجام روش کم آبیاری، بهتر است اولویت نوع و سطح کشت با گیاهانی باشد که این شاخص برای آنها بالاتر است. هم‌چنین این موضوع با نتایج کار حیدری و همکاران و فراهانی و همکار که مقادیر بهره‌وری آب را برای ۱۷ نوع محصول در استان خوزستان بررسی نموده اند همخوانی دارد(۱ و ۷).

نتیجه‌گیری

در شرایط کمبود آب، شناخت حد بحرانی آب که با حداقل مصرف آن بتوان حداکثر عملکرد قابل قبول را تولید نمود امری ضروری است. زیرا با این روش می‌توان از مصرف اضافی آب اجتناب نمود و از آن برای توسعه سطح زیر کشت آبی استفاده کرد. محصولات مختلف در برابر تنش آبی عکس‌العمل متفاوتی را نشان می‌دهند که تعیین آن از طریق آزمایش‌های صحرایی پرهزینه و وقت‌گیر است. بنابراین استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی مانند مدل CropSyst ضروری است. در این تحقیق به کمک مدل این امکان فراهم شد تا بتوان سناریوهای مختلف کم آبیاری را مورد آنالیز و بررسی قرار داد و کاهش عملکرد و افزایش سطح ناشی از آن را تعیین نمود. نتایج این مطالعه نشان داد در صورت انتخاب محصولات باقلا، سیب زمینی و لوبیا برای کم آبیاری بهتر است که برای این محصولات سناریوی ۱۰ درصد کم آبیاری اعمال شد. در مورد گیاه آفتابگردان سناریوی ۲۰ درصدی و برای گندم سناریوی ۳۰ درصد مناسب‌تر است. ولی در مورد برنج بهتر است کم آبیاری صورت نگیرد. هم‌چنین بررسی نتایج حاصل از شاخص بهره‌وری اقتصادی آب نشان داد که معیارهای اقتصادی می‌تواند از جمله معیارهای اساسی در گزینش نهایی محصول باشد. با توجه به توانمندی‌های مدل پیشنهاد می‌شود که این مدل برای هر منطقه کالیبره و سپس در مطالعات و برنامه‌ریزی‌ها برای افزایش بهره‌وری از منابع آب و خاک استفاده شود.

منابع مورد استفاده

۱. حیدری، ن.، ا. اسلامی، ع. قدمی فیروز آبادی، ا. کانونی، م.ا. اسدی و م.ح. خواجه عبداللهی. ۱۳۸۴. گزارش پژوهشی تعیین کارایی مصرف آب محصولات زراعی خوزستان. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

۲. خیرابی، ج. ۱۳۷۳. تحلیلی بر کم آبیاری تعریف و تبیین انواع آن. ماهنامه آب و خاک و ماشین. شماره ۱۳.

۳. خیرابی، ج.، س. اسدالهی، م. انتصاری و ع. سلامت. ۱۳۷۵. کم آبیاری تنظیم شده، اهمیت و ضرورت آن در شرایط ایران. هشتمین سمینار کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران .۱ -۲ آبان. ۲۷۱-۲۹۰.

۴. دارابی، ع. و ع. قنواتی مقدم. ۱۳۸۳. بررسی آثار تراکم بوته و تاریخ برداشت بر عملکرد کولتیوارهای سیب زمینی در کشت زمستانه. مرکز تحقیقات کشاورزی خوزستان.

۵. رستمی، م. ۱۳۶۸. ارزیابی مقاومت به خشکی و عکس العمل ارقام یونجه در شرایط عادی و تنش رطوبت، مجله علوم کشاورزی ایران ۲۳ (۳و۴): ۱۳-۱۰.

۶. سپاسخواه، ع. ر.، ع. توکلی و ف. توکلی. ۱۳۸۵. *اصول و کاربرد کم آبیاری*. انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.

۷. فراهانی، ع. و ح. دانایی فخر. ۱۳۸۳. یازدهمین سمینار کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۳ -۴ دی، صفحات ۴۰۵-۴۱۷.

۸. کجباف، ع. ۱۳۸۳. گزارش پژوهشی بررسی اثرات تاریخ‌های کاشت و میزان‌های متفاوت بذر روی عملکرد گندم تیپ دوورم رقم Cr"S"/stk"S"L92-6ap-Lap-oap، مرکز تحقیقات کشاورزی خوزستان.

۹. مهندسین مشاور آب و خاک تهران. ۱۳۸۵. گزارش طبقه‌بندی و قابلیت اراضی توسعه اراضی شهید چمران اهواز. سازمان آب و برق خوزستان، وزارت نیرو.

۱۰. نورجو، ا. ۱۳۸۷. تأثیر کم آبیاری روی عملکرد و اجزای عملکرد چغندرقند و بهره‌وری مصرف آب. مجله آبیاری و زهکشی ایران ۱(۲):۱۰-۱۳.

۱۱. نوری، ع. و ح. کمالی. ۱۳۸۱. *بررسی اثرات تراکم بوته بر عملکرد برنج*. مرکز تحقیقات کشاورزی خوزستان.

12. Baumhardt, R.L. and T. Howell. 2004. Deficit irrigation, seeding practices and cultivarmaturity effects on simulated grain sorghum yield; Biological Systems Simulation Proceedings, London.
13. Bouman, B.A.M., H. van Keulen, H.H. van Laar and R. Rabbinge. 1996. The `School of de Wit' crop growth simulation models: a pedigree and historical overview. Agric. Sys. 52:171–198.
14. Belhouchette, H., Donatelli, M. Braudeau and E. Wery. 2001. Test of the cropping systems model CropSyst in Tunisian conditions. Proc. Second International Symposium Modelling Cropping Systems, 16–18 July, Florence, Italy. 47–48
15. Dagdelen, N., E. Yilmaz, F. Sezgin and T. Gurbuz. 2005.Water yield relation and water use efficiency of cotton and second crop corn in western Turkey. Agric.Water Manag. 82(1-2):63-85.
16. English, M., L. James and C.F.Chen. 1990. Deficit Irrigation. II: Observation in Columbia. J. Irrig. and Drain. 16(2):413-426.
17. Haouari, M. and M. N. Azaiez. 2001. Optimal cropping pattern under water deficits. Eur. J. Operation Res. 130:133-146.
18. Hill, R. W. and J. Keller. 1980. Irrigation system selection under limited water. Trans. ASAE. 23: 366-372.
19. Jones, J.W., G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom, L.A. Hunt, P.K. Thornton, P.W. Wilkens, D.T. Imamura, W.T. Bowen and U. Singh. 1998, Decision support system for agrotechnology transfer DSSAT v3. PP: 157–177. *In*: G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom and P.K. Thornton (Eds.), Understanding Options for Agricultural Production, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
20. Kiniry, J.R., C.A. Jones, J.C. O'Toole, R. Blanchet, M. Cabelguenne and D.A. Spanel. 1989. Radiation-use efficiency in biomass accumulation prior to grain filling for five grain crop species. Field Crop Res. 20:51–64.
21. Loomis R. and D. Connors. 1992. Crop Ecology: Productivity and Management in Agricultural Systems. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
22. Mannochi, F., Mecarelli. 1994.Optimization analysis of deficit irrigation systems. J. Irrig. and Drain. ASCE

120(3):484-503.
23. Ritchie, J.T., U. Singh, D.C. Godwin and W.T. Bowen. 1998. Cereal growth, development and yield. PP: 79–98. *In*: G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom and P.K. Thornton, (Eds.), Understanding Options for Agricultural Production, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
24. Stöckle, C.O., J.R. Williams, N.J. Rosenberg and C.A. Jones. 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. Agric. Sys. 38(3): 225–238.
25. Stöckle, C.O. and R.L. Nelson. 2000. Cropsyst User's manual (Version 3.0), Biological Systems Engineering Dept., Washington State University, Pullman, WA.
26. Stöckle, C.O. and R.L. Nelson. 1999. Cropsyst User's manual, Biological Systems Engineering Dept., Washington State University, Pullman, WA, USA.
27. Stöckle, C.O., M. Donatelli and R. Nelson. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. Eur. J. Agron. 18(3,4): 289-307.
28. Pannkuk, C.D., C.O. Stöckle and R.I. Papendick. 1998. Validation of CropSyst for winter and spring wheat under different tillage and residue management practices in a wheat-fallow region. Agric. Sys. 57:121–134.
29. Williams, J.R., C.A. Jones and P.T. Dyke. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. Trans. ASAE 27(1): 129–144.
30. Tanner, C.B. and T.R. Sinclair. 1983. Efficient water use in crop production: research or re-search. *In*: H.M. Taylor, W.R. Jordan and T.R. Sinclair (Eds.), Limitations to Efficient Water Use in Crop Production, Amer. Soc. Agron. Madison, WI.