تحلیل حساسیت مدل آکواکراپ برای محصول جو در منطقه پاکدشت

حبیب کریمی‌اورگانی، علی رحیمی‌خوب* و محمدهادی نظری‌فر[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۲ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۷/۱۵)

چکیده

در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی روی مدل آکواکراپ انجام شده است و نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که این مدل عملکرد محصول را برای شرایط کم‌آبیاری با دقت خوبی شبیه‌سازی می‌کند. ولی این مدل مثل سایر مدل‌های شبیه‌ساز به مقادیر متغیرهای مستقل (ورودی مدل) حساس است. در این پژوهش حساسیت مدل آکواکراپ برای چهار پارامتر ورودی تبخیر و تعرق مرجع، بهره‌وری آب نرمال شده، درصد پوشش گیاهی مرحله اول رشد و حداکثر پوشش گیاهی با استفاده از روش بون برای محصول جو بررسی شد. تیمارهای آبیاری شامل آبیاری کامل و دو تیمار کم‌آبیاری ۸۰ و ۶۰ درصد بود که در سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳ در مزرعه پردیس ابوریحان اعمال شد. مقادیر اندازه‌گیری‌شده زیست‌توده در تیمارها به‌عنوان مقادیر مبنا استفاده شدند. نتایج نشان داد بیشترین حساسیت مدل نسبت به تبخیر و تعرق گیاه مرجع است، به‌طوری که مقدار ضریب حساسیت این پارامتر برای تیمارهای آبیاری کامل، ۸۰ درصد آبیاری کامل و ۶۰ درصد آبیاری کامل به‌ترتیب برابر ۱/۱-، ۱/۲- و ۲/۳- به‌دست آمد که علامت منفی نشان می‌دهد، درصورتی که مقدار تبخیر و تعرق مرجع بیش از مقدار واقعی به مدل وارد شود، عملکرد محصول کمتر از واقعیت شبیه‌سازی می‌شود و در این میان هر قدر درجه کم‌آبیاری بیشتر شود، حساسیت مدل بیشتر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری نرمال شده، تبخیر و تعرق مرجع، حداکثر پوشش گیاه، شبیه‌سازی رشد گیاه

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

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

مقدمه

مدل‌های شبیه‌ساز عملکرد گیاهان در این دهه اخیر به‌عنوان یک ابزار مدیریت آب در مزرعه و بهینه‌سازی بهره‌وری آب اهمیت زیادی پیدا کرده است. انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای برای تعیین عملکرد گیاه با سناریوهای مختلف آبیاری، کاری زمان‌بر و پرهزینه است. با استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز، اثر سناریوهای مختلف کم‌آبیاری روی عملکرد محصول بررسی و با توجه به مقدار منابع آب، بهترین برنامه کم‌آبیاری استنتاج می‌شود (۱۲ و ۱۴). مدل‌های متعددی مثل Cropsyst و WOFOST برای شبیه‌سازی عملکرد محصول ارائه شده است، ولی کار کردن با این مدل‌ها به‌علت زیاد بودن پارامترهای ورودی سخت و دشوار است. سازمان فائو مدلی به نام Aquacrop ارائه داد که عملکرد محصول را در پاسخ به مقدار آب کاربردی شبیه‌سازی می‌کند (۱۶). این مدل در مقایسه با دیگر مدل‌های شبیه‌سازی گیاه مثل مدل‌های اشاره شده فوق از پارامترهای کمتری استفاده می‌کند و تعادل بین دقت، سادگی و سهولت استفاده برای کاربران برقرار شده است (۸).

از زمان ارائه مدل آکواکراپ تاکنون پژوهش‌های زیادی در رابطه با صحت‌سنجی و واسنجی پارامترهای مدل آکواکراپ برای محصولات مختلف در مناطق مختلف جهان انجام شده است. به‌عنوان نمونه برای ارزیابی این مدل پژوهش‌هایی به‌مدت شش فصل زراعی روی ذرت در دانشگاه کالیفرنیا انجام شد و نتایج نشان داد که این مدل می‌تواند عملکرد محصول را در شرایط مختلف تراکم بوته، تاریخ کاشت و نیاز آبی با دقت مناسبی شبیه‌سازی کند (۳). همچنین این مدل برای شبیه‌سازی زیست‌توده و عملکرد جو در شمال اتیوپی ارزیابی شد و نتایج نشان داد که مدل از دقت مناسبی برخوردار است (۳). مدل آکواکراپ برای شرایط آبیاری کامل و کم‌آبیاری (۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد آبیاری کامل) روی محصول پنبه در منطقه گرم و خشک و بادخیز مدیترانه‌ای شمال سوریه ارزیابی شد و به‌جز کم‌آبیاری‌های ۶۰ و ۴۰ درصد که بیش از ۳۲ درصد خطا داشت، در بقیه موارد خطا در حدود ۱۰ درصد گزارش شد (۶). نتایج واسنجی و صحت‌سنجی این مدل برای محصول زمستانه گندم در دشت شمالی چین نشان داد که عملکرد زیست‌توده در شرایط مختلف کم‌آبیاری با دقت مناسبی برآورد می‌شود (۹). دقت مدل آکواکراپ برای یکی از گیاهان گرمسیری به‌نام تارو در منطقه نیمه‌خشک آفریقای جنوبی بررسی و نشان داده شد، ضریب تعیین و جذر میانگین خطا به‌ترتیب ۰/۹۹ و ۱/۷۴ تن در هکتار است (۱۳).

مدل آکواکراپ برای تعدادی محصول و برخی از مناطق ایران ارزیابی شده است. این مدل در منطقه کرج برای پیش‌بینی عملکرد گندم و سویا در شرایط کم‌آبیاری نتایج قابل قبولی ارائه داد (۱ و ۴). مدل آکواکراپ برای محصول آفتابگردان در استان خوزستان بررسی شد و نتایج نشان داد این مدل با دقت بالایی عملکرد محصول را شبیه‌سازی می‌کند (۷). مدل فوق برای ذرت علوفه‌ای در منطقه قزوین توسط رحیمی‌خوب و همکاران (۱۵) واسنجی و بر اساس نتایج آنها متوسط خطای مدل حدود ۱۰ درصد تعیین شد.

مدل آکواکراپ دارای پارامترهای ورودی متعددی است که به چهار گروه تقسیم می‌شوند ۱) پارامترهای آب‌وهوایی مثل دمای حداقل و حداکثر روزانه، بارندگی و تبخیر و تعرق مرجع، ۲) پارامترهای مربوط به خاک مثل بافت خاک، قابلیت نگهداری رطوبت در خاک در لایه‌های مختلف خاک، ۳) پارامترهای مقادیر عمق آبیاری در طول فصل رشد و ۴) پارامترهایی که مربوط به گیاه می‌شود مثل دماهای پایه و حداکثر، پوشش گیاهی، تعداد بوته‌ها در هکتار و ضریب بهره‌وری نرمال شده. بسیاری از پارامترهای فوق برای گیاه ثابت هستند و یا با اندازه‌گیری مشخص می‌شوند، ولی برخی از پارامترها مثل تبخیر و تعرق گیاه مرجع، درصد پوشش گیاهی و بهره‌وری نرمال شده آب را نمی‌توان با قطعیت براورد کرد. تبخیر و تعرق گیاه مرجع با استفاده از مدل‌هایی که در این ارتباط تدوین شده است براورد می‌شود. مدلی که برای براورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع استفاده می‌شود بستگی به داده‌های هواشناسی دارد که در دسترس است. سازمان فائو برای شرایطی که داده‌های کامل

هواشناسی اندازه‌گیری شده باشد، معادله پنمن مانتیث فائو را توصیه کرده است ولی وقتی برخی از پارامترها اندازه‌گیری نشده باشد، سایر روش‌های تجربی و ریاضی استفاده می‌شود و در این شرایط بدیهی است که مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع با خطا برآورد می‌شود. مدل آکواکراپ برای براورد زیست‌توده در طی رشد از پارامتر درصد پوشش گیاهی استفاده می‌کند. این پارامتر در مراحل مختلف رشد با استفاده از معادلاتی در مدل آکواکراپ بر اساس پوشش گیاهی اولیه و حداکثر پوشش گیاهی در مرحله میانی تعیین می‌شود.

بررسی منابع نشان می‌دهد تاکنون پارامترهای مدل آکواکراپ تحلیل حساسیت نشده‌اند. تحلیل حساسیت برای تعیین آن است که تا چه اندازه عدم قطعیت متغیرهای ورودی در یک محدوده مشخص بر نتایج مدل آکواکراپ تأثیر می‌گذارد. لذا هدف از انجام این پژوهش، تعیین حساسیت پارامترهای تبخیر و تعرق مرجع، حداکثر پوشش گیاهی، درصد پوشش گیاهی اولیه و حداکثر و ضریب بهره‌وری نرمال شده روی عملکرد محصول است. این تحلیل به‌دنبال آن هست تا اثر تغییر در پارامترهای فوق روی براورد عملکرد محصول تعیین شود و حساس‌ترین آن مشخص شود. محصول مورد بررسی جو و منطقه انجام پژوهش پاکدشت است. ضریب بهره‌وری این محصول در منطقه پاکدشت واسنجی شد و نتایج پژوهش نشان داد که مدل با دقت مناسبی عملکرد محصول را شبیه‌سازی می‌کند (۱۰).

مواد و روش‌ها

تشریح مدل اکواکراپ

در این پژوهش از نسخه چهار مدل اکواکراپ استفاده شد. در این مدل، مقدار عملکرد زیست‌توده تا i امین روز پس از کاشت از رابطه (۱) حساب می‌شود (۱۶):

$$B = BWP\left(\sum \frac{T_{r,i}}{ET_{o,i}}\right) \qquad (۱)$$

در رابطه فوق، B عملکرد زیست‌توده تا i امین روز پس از کاشت (گرم بر مترمربع)، BWP ضریب بهره‌وری نرمال شده (گرم بر مترمربع) ، $T_{r,i}$ تعرق روزانه گیاه (میلی‌متر در روز) و ETo,i تبخیر و تعرق مرجع (میلی‌متر در روز) است. مقدار پارامتر BWP برابر با ۱۴/۸ گرم بر مترمربع تعیین شده است (۱۰). در این پژوهش دو پارامتر BWP و ETo مورد تحلیل حساسیت قرار می‌گیرند. در مدل آکواکراپ، پارامتر تعرق گیاه (Tr) از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$T_r=K_s\times K_C\times CC\times ET_o \qquad (۲)$$

در رابطه فوق، K_s ضریب تنش آبی، K_C ضریب گیاهی، CC ضریب پوشش گیاهی و ET_o تبخیر و تعرق مرجع است. ضریب گیاهی K_C نسبت بین تبخیر و تعرق گیاه بدون تنش آبی به تبخیر و تعرق مرجع است. این ضریب در مدل آکواکراپ با استفاده از روش ارائه شده در نشریه شماره ۵۶ فائو در طول دوره رشد براورد شد (۲) و ضریب پوشش گیاهی در مدل آکواکراپ از زمان کاشت بذر تا پایان مرحله توسعه با استفاده از دو معادله زیر براورد شد (۱۶) :

$$CC=CC_o\times e^{(CGC\times t)} \qquad (۳)$$

$$CC=CC_x-CC_x-CC_o\times e^{(-CGC\times t)} \qquad (۴)$$

معادله (۳) برای دوره زمانی کاشت بذر تا نیمه مرحله توسعه استفاده شد و معادله (۴) برای دوره زمانی از نیمه مرحله توسعه تا آخر مرحله توسعه مورد استفاده قرار گرفت. در معادلات فوق، CC پوشش گیاهی در t روز پس از کاشت، CC_x حداکثر پوشش گیاهی، CC_o پوشش اولیه گیاه در زمان t=۰ و CGC نرخ رشد پوشش گیاه در روز است. برای تعیین پوشش گیاه در طول دوره مرحله آخر که در آن شیب پوشش گیاهی به‌صورت نزولی است، از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$CC = CC_x \times \left\{ ۱ - ۰/۰۵ \times \left[e^{\left(\frac{CDC}{CCx}\times t\right)} - ۱ \right] \right\} \qquad (۵)$$

در روابط فوق، CDC نرخ کاهش پوشش گیاهی و t زمان برحسب روز که از مرحله چهارم رویش (پیری) شروع می‌شود. در این پژوهش دو پارامتر CC_o و CC_x تحلیل حساسیت می‌شوند.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

ضخامت لایه (m)	بافت خاک	رطوبت مزرعه (٪)	رطوبت پژمردگی (٪)	جرم مخصوص ظاهری (gr/cm^3)	رطوبت اشباع (٪)	EC (dS/m)
۰/۲	Silt loam	۲۰/۱۵	۱۰/۰۱	۱/۳۶	۴۴/۶۴	۳/۵۵
۰/۲	Sandy loam	۲۰/۴۵	۱۰/۲۲	۱/۲۳	۴۳/۵۸	۳/۶۹
۰/۲	Sandy loam	۲۱/۴۵	۱۰/۶۵	۱/۳۲	۴۰/۸۶	۴/۰۶
۰/۴	Sandy loam	۱۸/۸۲	۹/۶۰	۱/۳۳	۴۸/۵۷	۴/۵۵

جدول ۲. ویژگی‌های شیمیایی آب

پارامتر	Ca+Mg (meq/lit)	Na (meq/lit)	pH	EC (dS/m)
مقدار	۱۶	۲/۹	۷/۲	۱/۴

مشخصات آزمایش

پژوهشی در رابطه با واسنجی و ارزیابی مدل آکواکراپ در شرایط کم‌آبیاری در پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران در سال زراعی ۹۴- ۱۳۹۳ انجام شد (۱۰ و ۱۱). پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران در منطقه پاکدشت قرار گرفته و این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی آن روی گیاه جو رقم ریحان انجام شد. این مزرعه در طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۰۲۷ متر واقع است. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و آب محل آزمایش در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است. پاکدشت مطابق طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن جزو مناطق خشک محسوب می‌شود که در آن میانگین بارندگی سالانه ۱۴۱ میلی‌متر، دمای متوسط سالانه ۱۵/۶ سانتی‌گراد و تبخیر و تعرق سالانه ۱۳۹۰ میلی‌متر است (۱۰). تیمارهای آزمایش شامل سه تیمار آبیاری با سه تکرار بود که عبارت بودند از : ۱) آبیاری کامل، ۲) ۸۰ درصد آبیاری و ۳) ۶۰ درصد آبیاری. تیمارهای ۸۰ و ۶۰ درصد آبیاری جز تیمارهای کم‌آبیاری این پژوهش‌اند. تیمارهای آبیاری کامل، آبیاری ۸۰ و ۶۰ درصد به‌ترتیب با نمادهای I_1 ، I_2 و I_3 نام‌گذاری شدند.

کرت‌ها به ابعاد ۴×۲/۸ (متر × متر) انتخاب شدند و به‌منظور مستقل بودن تیمارها نسبت به هم، یک متر بین کرت‌ها فاصله گذاشته شد. تمام عملیات کشاورزی در طول فصل کشت بر اساس توصیه‌های متخصصین کشاورزی انجام گرفت. بذور با دست به‌صورت یکنواخت در سطح کرت پخش شدند. مقدار تراکم بذر ۱۵۰ دانه در مترمربع بود و مقدار کود ازت و پتاسیم به‌ترتیب ۱۰۰ و ۷۰ کیلوگرم در هکتار مصرف شد. کل کود پتاسیم و نصف کود ازت در زمان کاشت و باقی‌مانده کود ازت قبل از مرحله گل‌دهی به زمین داده شد. تاریخ کاشت بذر ۱۸ آبان و برداشت محصول ۳۱ اردیبهشت (۱۹۳ روز پس از کاشت) بود. مشخصات دفعات و مقادیر آبیاری، کیفیت آب، اندازه‌گیری‌های پوشش گیاهی و زیست‌توده در منابع کریمی و همکاران (۱۰) و کریمی و همکاران (۱۱) ارائه شده است. متغیرهای هواشناسی شامل دمای حداکثر و حداقل هوا، حداکثر و حداقل رطوبت نسبی هوا، ساعات آفتابی و سرعت باد در ارتفاع دو متری سطح زمین از ایستگاه پردیس ابوریحان مربوط به دوره رشد محصول جو از تاریخ اول آبان ۱۳۹۳ تا آخر خرداد ۱۳۹۴ جمع‌آوری شدند. تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از روش پنمن مانتیث فائو به‌طور روزانه در طی رشد محصول جو محاسبه شد (۲). مقادیر اصلی پارامترهای ورودی ET_0 در دوره رشد، WP^*، CC_0 و CC_x و

جدول ۳. مقادیر اصلی ET_0 در دوره رشد، WP^*، CC_0 و CC_x و عملکرد واقعی زیست‌توده در تیمارهای آبیاری

ET_0 (mm)	WP^* ($gr/m^2/day$)	CC_0 (%)	CC_X (%)	عملکرد واقعی زیست‌توده در تیمارهای مختلف آبیاری (تن در هکتار)		
				آبیاری کامل (I_1)	۸۰ درصد آبیاری کامل (I_2)	۶۰ درصد آبیاری کامل (I_3)
۵۵۲	۱۴/۸	۲/۲۵	۹۰	۱۱/۷	۱۰/۳	۸/۴

عملکرد واقعی زیست‌توده در تیمارهای آبیاری در جدول (۳) ارائه شده است.

تحلیل حساسیت

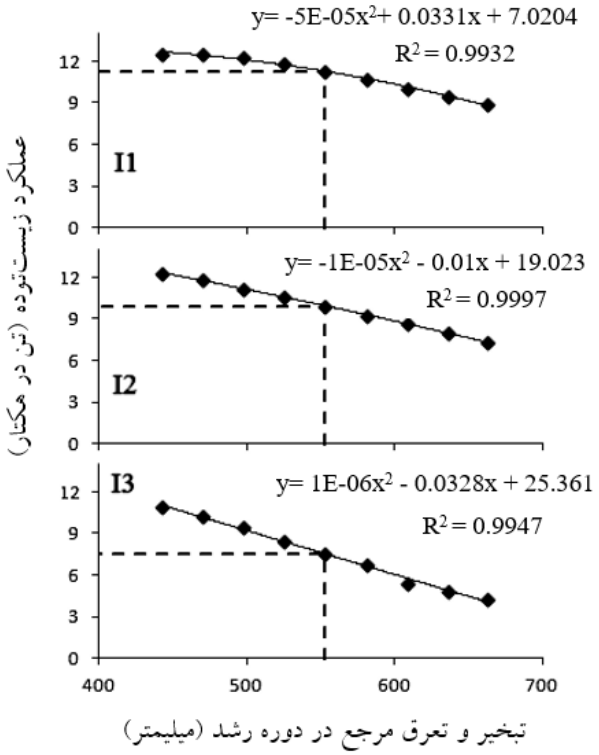
متغیرهای مدل‌های چندمتغیره مثل مدل آکواکراپ ابعاد و دامنه تغییرات مختلفی دارند و برای مقایسه ضریب حساسیت متغیرها نسبت به‌هم باید از روشی استفاده شود که ضریب حساسیت نسبی بدون بعد براورد شود. در این پژوهش از روش بون و همکاران (۵) استفاده شده است (رابطه ۶):

$$S_{Vi}=\lim_{(\Delta Vi\to 0)}((\Delta y/y)/(\Delta vi/vi))=\partial y/\partial vi.vi/y \qquad (۶)$$

در معادله فوق، Svi ضریب حساسیت نسبی بدون بعد است (از این به بعد" ضریب حساسیت" نامیده می‌شود)، vi، i امین متغیر و y عملکرد محصول است. به‌طورکلی، مثبت و یا منفی بودن ضریب حساسیت یک متغیر نشان‌دهنده این است که با افزایش متغیر، عملکرد محصول افزایش و یا کاهش می‌یابد. بزرگ بودن ضریب حساسیت به این معنی است که متغیر مورد بررسی اثرات بیشتری روی عملکرد محصول دارد. از نظر ترسیمی، ضریب حساسیت شیب زاویه منحنی حساسیت در نقطه مقدار اصلی متغیر مدل است. در این پژوهش دامنه تغییر متغیرهای مورد بررسی مشخص و در این دامنه مقادیر مختلفی انتخاب و با ارائه آنها به مدل، عملکرد زیست‌توده شبیه‌سازی شد. سپس برای هر یک از متغیرهای مورد بررسی، پراکنش مقادیر متغیر ورودی و عملکرد زیست‌توده ترسیم و بهترین معادله برازش بین نقاط تعیین شد. ضریب حساسیت هر متغیر از حاصل ضرب شیب معادله در نقطه مقدار اصلی در نسبت مقدار اصلی متغیر ورودی به عملکرد (Vi/y) براورد شد.

نتایج و بحث

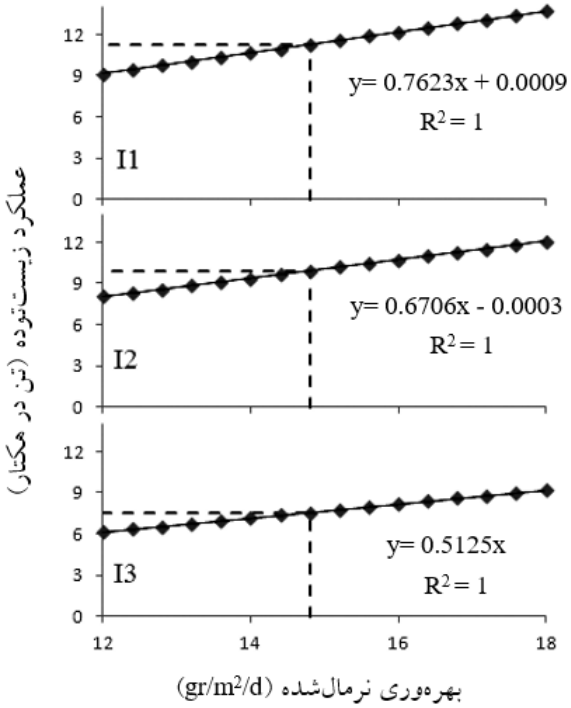
برای بررسی اثر تبخیر و تعرق مرجع بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد زیست‌توده، مقادیر روزانه واقعی تبخیر و تعرق مرجع تا ۲۰± درصد با نمو پنج درصد تغییر داده شد و مقادیر زیست‌توده با استفاده از مدل آکواکراپ برای تیمارهای مختلف شبیه‌سازی شد. تغییر مثبت تبخیر و تعرق نسبت به مقدار واقعی به این مفهوم است که تبخیر و تعرق مرجع بیش‌براورد شده و تغییر منفی نشان‌دهنده این است که تبخیر و تعرق مرجع کم‌براورد شده است. شکل (۱) اثر تغییرات تبخیر و تعرق مرجع بر نتایج شبیه‌سازی شده عملکرد نشان می‌دهد. مقدار واقعی تبخیر و تعرق مرجع در طول دوره رشد حدود ۵۵۲/۶ میلی‌متر است و عملکرد شبیه‌سازی شده برای این مقدار تبخیر و تعرق در تیمارهای آبیاری کامل، ۸۰ درصد آبیاری کامل و ۶۰ درصد آبیاری کامل به‌ترتیب ۱۱/۳، ۹/۹ و ۷/۶ تن در هکتار است. خطوط مربوط به مقدار واقعی تبخیر و تعرق و مقدار براورد شده زیست‌توده روی شکل (۱) برای نشان دادن اثر روند تغییرات عملکرد نمایش داده شده است. در شکل (۱) ملاحظه می‌شود، تغییرات زیست‌توده شبیه‌سازی شده با تغییر پارامتر ورودی تبخیر و تعرق مرجع روند مخالف هم دارند و به‌عبارتی اگر مقدار تبخیر و تعرق مرجع، بیش از مقدار واقعی به مدل وارد شود، باعث کاهش بیشتر زیست‌توده و برعکس می‌شود. بهترین معادله با ضریب تعیین بالا به نقاط برازش داده شده که این معادلات در شکل (۱) ارائه شده است. طبق رابطه ۶ ضریب حساسیت پارامتر تبخیر و تعرق مرجع در تیمارهای مختلف از حاصل مشتق این معادلات در نسبت دو مقدار واقعی تبخیر و تعرق مرجع و عملکرد زیست‌توده تعیین شد



شکل ۱. اثر تغییر تبخیر و تعرق گیاه مرجع روی نتایج شبیه سازی عملکرد زیست‌توده در مدل آکواکراپ برای تیمارهای مختلف آبیاری

که بر این اساس ضریب حساسیت در تیمارهای آبیاری کامل و تیمارهای کم‌آبیاری ۸۰ و ۶۰ درصد به‌ترتیب برابر ۱/۰۴-، ۱/۱۳- و ۲/۰۹- براورد می‌شود. علامت منفی اعداد فوق نشان‌دهنده این است که پارامتر تبخیر و تعرق مرجع اثر معکوسی روی نتایج شبیه‌سازی زیست‌توده در مدل آکواکراپ دارد. به‌عبارتی اگر مقدار این پارامتر بیش از مقدار واقعی به مدل وارد شود، باعث می‌شود مقدار زیست‌توده کمتر از مقدار واقعی براورد شود. مقایسه اعداد فوق نشان می‌دهد که مقدار مطلق ضریب حساسیت در تیمارهای کم‌آبیاری بیشتر از آبیاری کامل است و هر قدر کم‌آبیاری بیشتر باشد، مدل حساسیت بیشتری به پارامتر ورودی تبخیر و تعرق مرجع دارد و به‌عبارتی برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه در شرایط کم‌آبیاری، باید پارامتر تبخیر و تعرق مرجع با دقت بیشتری به مدل داده شود.

مقدار اصلی پارامتر بهره‌وری نرمال شده ۱۴/۸ گرم بر مترمربع در روز است. مقدار مختلف این پارامتر از ۱۲ تا ۱۸ گرم بر مترمربع در روز با نمو ۰/۲ به مدل آکواکراپ داده شد و عملکرد زیست‌توده شبیه‌سازی شد. در شکل (۲) اثر این تغییرات بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد زیست‌توده در مدل آکواکراپ در تیمارهای مختلف آبیاری ارائه شده است. در این شکل نیز مقدار اصلی پارامتر بهره‌وری نرمال شده و مقدار شبیه‌سازی شده زیست‌توده نشان داده شده است. مشاهده می‌شود برخلاف پارامتر تبخیر و تعرق مرجع روند تغییر پارامتر بهره‌وری نرمال شده با نتایج شبیه‌سازی شده زیست‌توده یکسان است، یعنی با افزایش بهره‌وری نرمال شده مقدار شبیه‌سازی عملکرد زیست‌توده نیز افزایش می‌یابد. ضریب تعیین معادلات برازش شده به نقاط یک بوده و نشان‌دهنده این است که با استفاده از معادلات مندرج در شکل، تغییرات عملکرد زیست‌توده تا ۱۰۰ درصد تابع معادلات مندرج در شکل است. شیب این توابع شدت تغییرات زیست‌توده را نسبت به بهره‌وری نرمال شده نشان می‌دهد که بیشترین شیب را تیمار آبیاری کامل و کمترین شیبِ تیمار آبیاری ۶۰ درصد دارد.



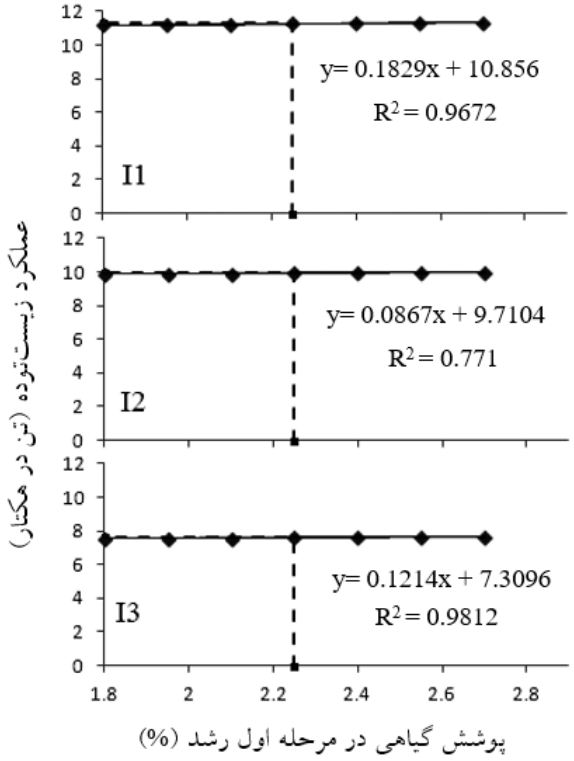
شکل ۲. اثر تغییر بهره‌وری نرمال شده روی نتایج شبیه‌سازی عملکرد زیست‌توده در مدل آکواکراپ در تیمارهای مختلف آبیاری

ضریب حساسیت پارامتر بهره‌وری نرمال شده در تیمارهای آبیاری کامل، کم‌آبیاری‌های ۸۰ و ۶۰ درصد به‌ترتیب ۰/۹۶، ۰/۹۴ و ۰/۸۹ براورد شده است.

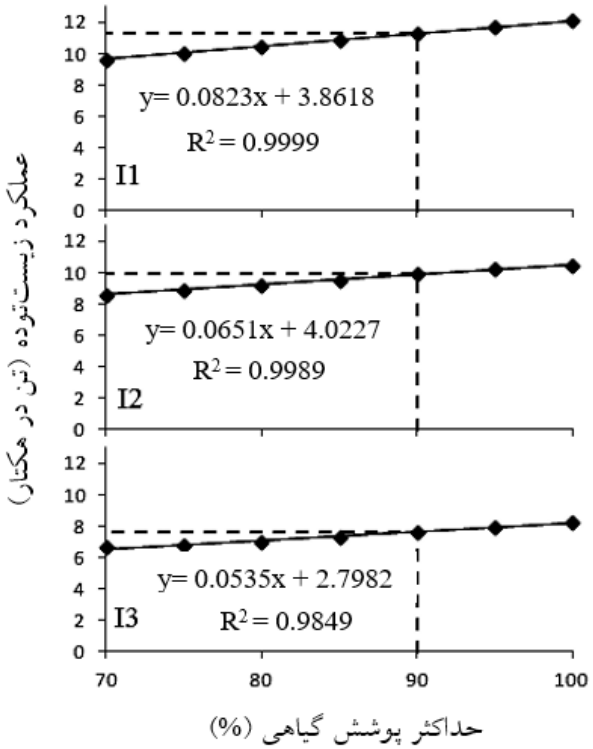
مقدار واقعی پارامتر پوشش گیاهی در مرحله اولیه رشد ۲/۲۵ درصد است. برای اثر تغییر این پارامتر بر روی عملکرد زیست‌توده، مقدار آن از ۱/۸ تا ۲/۷ درصد با نمو ۰/۰۵ به مدل آکواکراپ داده شد و برای هر مقدار زیست‌توده برای تیمارهای مختلف شبیه‌سازی شد که نتایج در شکل (۳) ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود تغییرات این پارامتر اثر ناچیزی بر روی نتایج زیست‌توده دارد. ضریب حساسیت این پارامتر با استفاده از معادله (۶) برای تیمارهای آبیاری کامل و کم‌آبیاری ۸۰ و ۶۰ درصد به‌ترتیب ۰/۰۳، ۰/۰۲ و ۰/۰۳ براورد شده است که مقادیر ناچیزی هستند و لذا مدل حساسیت کمی به مقدار پارامتر پوشش گیاهی در مرحله اولیه رشد دارد.

مدل آکواکراپ با مقادیر مختلف حداکثر پوشش گیاهی از ۷۰ تا ۱۰۰ درصد با نمو پنج درصد برای تیمارهای مختلف آبیاری اجرا شد. مقدار واقعی حداکثر پوشش گیاهی ۹۰ درصد است که نتایج شبیه‌سازی شده در شکل (۴) ارائه شده است. ملاحظه می‌شود حداکثر پوشش گیاهی با عملکرد زیست‌توده روند یکسانی دارند یعنی با افزایش حداکثر پوشش گیاهی مقدار زیست‌توده بیشتر براورد می‌شود. ملاحظه می‌شود برخلاف پوشش گیاهی اولیه، تغییر حداکثر پوشش گیاهی اثرات چشمگیری روی عملکرد زیست‌توده دارد. بهترین معادلات برازش شده به نقاط حالت خطی و ضریب تعیین آنها نزدیک به یک است. با استفاده از معادله (۶)، ضریب حساسیت این پارامتر برای تیمارهای آبیاری کامل و کم‌آبیاری ۸۰ و ۶۰ درصد به‌ترتیب برابر ۰/۶۱، ۰/۵۹ و ۰/۵۹ براورد شد. این ارقام نشان می‌دهد ضریب حساسیت پارامتر حداکثر پوشش گیاهی برخلاف پارامتر تبخیر و تعرق مرجع در روش‌های مختلف آبیاری تغییر چندانی نمی‌کند.

مدل آکواکراپ با مقادیر مختلف حداکثر پوشش گیاهی از ۷۰ تا ۱۰۰ درصد با نمو پنج درصد برای تیمارهای مختلف آبیاری اجرا شد. مقدار واقعی حداکثر پوشش گیاهی ۹۰ درصد است که نتایج شبیه‌سازی شده در شکل (۴) ارائه شده است.



شکل ۳. اثر تغییر پوشش گیاهی در مرحله اول رشد بر نتایج شبیه‌سازی شده عملکرد زیست‌توده در مدل آکواکراپ در تیمارهای مختلف آبیاری



شکل ۴. اثر تغییر حداکثر پوشش گیاهی بر نتایج شبیه‌سازی شده عملکرد زیست‌توده مدل آکواکراپ در تیمارهای مختلف آبیاری

جدول ۴. ضرایب حساسیت متغیرهای ورودی مدل آکواکراپ در تیمارهای مختلف آبیاری

متغیر ورودی	تیمار آبیاری		
	آبیاری کامل I_1	۸۰ درصد آبیاری کامل I_2	۶۰ درصد آبیاری کامل I_3
تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_0)	-۱/۰۴	-۱/۱۳	-۲/۰۹
بهره‌وری نرمال شده (WP^*)	۰/۹۶	۰/۹۴	۰/۸۹
پوشش گیاهی در مرحله اولیه رشد (CCo)	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۳
حداکثر پوشش گیاه (CCx)	۰/۶۱	۰/۵۹	۰/۵۹

ملاحظه می‌شود حداکثر پوشش گیاهی با عملکرد زیست‌توده روند یکسانی دارند یعنی با افزایش حداکثر پوشش گیاهی مقدار زیست‌توده بیشتر براورد می‌شود. همچنین بر خلاف پوشش گیاهی اولیه، تغییر حداکثر پوشش گیاهی اثرات قابل توجهی روی عملکرد زیست‌توده دارد. بهترین معادلات برازش شده به نقاط حالت خطی و ضریب تعیین آنها نزدیک به یک است. با استفاده از معادله (۶)، ضریب حساسیت این پارامتر برای تیمارهای آبیاری کامل و کم‌آبیاری ۸۰ و ۶۰ درصد به‌ترتیب برابر ۰/۶۱، ۰/۵۹ و ۰/۵۹ براورد شد. این ارقام نشان می‌دهد ضریب حساسیت پارامتر حداکثر پوشش گیاهی برخلاف پارامتر تبخیر و تعرق مرجع در روش‌های مختلف آبیاری تغییر چندانی نمی‌کند.

خلاصه نتایج ضرایب حساسیت متغیرهای ورودی مدل آکواکراپ در تیمارهای مختلف آبیاری در جدول (۴) ارائه شده است. مشاهده می‌شود، از میان متغیرهای ورودی، متغیر تبخیر و تعرق مرجع بیشترین ضریب حساسیت و پس از آن بهره‌وری نرمال شده بیشترین ضریب حساسیت را دارد. ضریب حساسیت پارامتر پوشش گیاهی ناچیز است. نتایج درج شده در جدول (۴) نشان می‌دهد بیشترین ضریب حساسیت مربوط به تیمار ۶۰ درصد کم‌آبیاری با متغیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع است. به‌عبارتی اگر مقدار تبخیر و تعرق مرجع با خطا وارد مدل شود، بیشترین خطا برای تیمارهای کم‌آبیاری اتفاق می‌افتد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش حساسیت مدل آکواکراپ به پارامترهای ورودی تبخیر و تعرق مرجع، بهره‌وری نرمال شده، پوشش گیاهی در مرحله اولیه رشد و حداکثر پوشش گیاه بررسی شد. نتایج نشان داد که مدل آکواکراپ به پارامتر تبخیر و تعرق گیاه مرجع نسبت به سه پارامتر دیگر حساسیت بیشتری دارد و در این میان هرچه قدر شدت اعمال تنش رطوبتی بیشتر باشد، حساسیت مدل بیشتر می‌شود. لذا از میان پارامترهای ورودی باید مقدار تبخیر و تعرق مرجع با دقت بیشتری تعیین و به مدل وارد شود. پس از پارامتر تبخیر و تعرق مرجع، پارامتر بهره‌وری نرمال شده بیشترین اثر را در دقت مدل آکواکراپ دارد ولی اثر این پارامتر در تیمارهای مختلف آبیاری یکسان است. مدل آکواکراپ کمترین حساسیت را نسبت به پارامتر پوشش گیاهی در مرحله اولیه رشد دارد و مقدار ضریب حساسیت مدل نسبت به پارامتر بسیار ناچیز است ولی مدل به پارامتر حداکثر پوشش گیاه حساس بوده و باید این پارامتر نیز با دقت خوبی به مدل وارد شود.

منابع مورد استفاده

1. Alizadeh, H. A., B. Nazari, M. Parsinejad, H. Ramezani, H. R. Eetedali and H. R. Janbaz. 2010. Evaluation of AquaCrop Model on Wheat Deficit Irrigation in Karaj area. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 4(2): 273-283. (In Farsi).

2. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome.
3. Araya, A., S. Habtu, K. M. Hadgu, A. Kebede and T. Dejene. 2010. Test of aquacrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management* 11: 1838-1846.
4. .Babazadeh, H. and M. Sarai Tabrizi. 2012. Assessment of aquacrop model under soybean deficit irrigation management conditions. *Journal of Water and Soil* 26(2): 329-339. (In Farsi).
5. Beven, K. A. 1979. Sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. *Journal of Hydrology* 44: 169–190.
6. Farahani, H. J., G. Izzi and T. Y. Oweis. 2009. Parameterization and evaluation of the aquacrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy Journal* 101(3): 469-476.
7. Haydarinia, M., A. A. Naseri and S. Broomabd-Nasab. 2012. Investigate the possibility of application of aquacrop model for irrigation scheduling of sunflower in Ahwaz. *Journal of Water Resources* 5(1): 39-41. (In Farsi).
8. Hsiao, T. C., P. Steduto, D. Raes and E. Fereres. 2009. AquaCrop: the FAO crop water model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal* 101: 448-459.
9. Iqbal, M. A., Y. Shen, R. Stricevic, H. Pei, H. Sun, E. Amiri, A. Penas and S. Rio. 2014. Evaluation of the FAO aquacrop model for winter wheat on the north china plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agricultural Water Management* 135: 61–72.
10. Karimi Avargani, H., A. Rahimikhoob and M. H. Nazarifard. 2016. Calibration and validation of aquacrop model for barley in Pakdasht Region - Iran. *Journal of Soil and Water Research* 47(3): 539-549. (In Farsi).
11. Karimi Avargani, H., A. Rahimikhoob and M. H. Nazarifard. 2017. Evaluation of aquacrop model in simulating barley biomass production under deficit irrigation. *Journal of Water Research in Agriculture (Soil and Water Science)* 31(3): 341-353. (In Farsi).
12. Liu, J., D. Wiberg, A. Zehnder and H. Yang. 2007. Modeling the role of irrigation in winter wheat yield, crop water productivity and production in china. *Irrigation Science* 26: 21–23.
13. Mabhaudhi, T., A. T. Modi and Y. G. Beletse. 2014. Parameterisation and evaluation of the FAO-aquaCrop model for a South African taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) landrace. *Agricultural and Forest Meteorology* 192-193: 132–139.
14. Pereira, L. S., T. Oweis and A. Zairi. 2002. Irrigation management under water scarcity. *Agric*ultural *Water Management* 57: 175–206.
15. Rahimikhoob, H., A. Sotoodehnia and A. R. Massahbavani. 2014. Calibration and evaluation of aquacrop for maize in Qazvin region. *Iranian Journal of lrrigation and Drainage* 8(1): 108-115. (In Farsi).
16. Steduto, P., T. C. Hsiao, D. Raes and E. Fereres. 2009. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles. *Agronomy Journal* 101: 426–437.

Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)
Vol. 23, No. 3, Fall 2019, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Sensitivity Analysis of Aquacrop Model for Barley in Pakdasht Region

H. Karimi Avargani, A. Rahimikhoob* and M. H. Nazarifar[1]

(Received: February 21-2018 ; Accepted: October 7-2018)

Abstract

In recent years, a lot of research has been done on the Aquacrop model, the results show that this model simulates the product performance for deficit irrigation conditions. But this model, like other models, is sensitive to values of independent variables (model inputs). In this research, the sensitivity of the Aquacrop model was analyzed for 4 input parameters of reference evapotranspiration, normalized water productivity, initial canopy cover percentage and maximum canopy cover for barley. Irrigation treatments included full irrigation and two deficit irrigation treatments of 80% and 60%, the experiment was done in 2014-15 growing season in the field of Abourihan College. The values of measured biomass were used as the base values for treatments. The Beven's method (Beven et al., 1979) was used for sensitivity analysis of Aquacrop model. The results showed that the model is most sensitive to the reference crop evapotranspiration, So the sensitivity coefficient for this parameter for full irrigation treatments, 80% full irrigation and 60% full irrigation were -1.1, -1.2 and -2.3 respectively. The negative sign indicates that if the value of reference evapotranspiration input is exceeded the actual value into the model, Yield performance is simulated less than actual value. In the meantime, the higher the degree of deficit irrigation, the greater the sensitivity of the model.

Keywords: Maximum Canopy Cover, Normalized water productivity, Reference Evapotranspiration, Simulation of Crop Growing

1. Irrigation and Drainage Engineering Department, Aburaihan College, University of Tehran, Tehran, Iran.
*: Corresponding Author, Email: akhob@ut.ac.ir