نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۳، بهمن - اسفند ۱۳۹۸، ص. ۱۵۷۹-۱۵۶۵

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 13, Feb.-Mar. 2020, p. 1565-1579

آنالیز حساسیت موضعی مدل AquaCrop برای دو محصول گندم و ذرت در دو منطقه دشت قزوین و پارس‌آباد مغان

وحید ادبی[۱]، اصغر عزیزیان[۲]، هادی رمضانی اعتدالی[۳*]، عباس کاویانی[۴]، بهنام آبابایی[۵]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۴/۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۶/۲۴

چکیده

استفاده از مدل‌های گیاهی برای اهداف مختلف مانند پیش‌بینی عملکرد، تعیین نیاز آبی، بررسی های اثر تغییر اقلیم، خشکسالی و مدیریت‌های مختلف آبیاری و زراعی ضروری است. این مدل‌ها ابزار ارزشمندی برای تحلیل کمی رشد گیاه و تولید محصول می‌باشند. یکی از چالش‌ها در برابر کاربرد این مدل‌ها، تعدد پارامترهای ورودی آنهاست. اندازه گیری این پارامترها هزینه‌بر، زمان‌بر و گاه با توجه به محدودیت‌های مختلف غیرممکن است و معمولاً از طریق واسنجی و حل معکوس تخمین زده می‌شوند. تحلیل حساسیت فرآیندی است که اثر پارامترهای ورودی بر متغیرهای خروجی مدل‌های ریاضی را بررسی می‌کند. در هنگام واسنجی، پارامترهای حساس باید با دقت بالاتری اندازه‌گیری یا برآورد شوند. اعمال روش‌های مبتنی بر اجراهای زیاد بر مدل‌های متن‌بسته (Closed Source) به آسانی مدل‌های متن‌باز (Open Source) نمی‌باشد. در این تحقیق، اثر ۴۷ پارامتر گیاهی (نام پارامترها در جداول ۱ و ۲ آمده است) مدلِ متن‌بسته‌ی AquaCrop بر ۵ متغیر خروجی مدل شامل تبخیر از سطح خاک، تعرق، تبخیر-تعرق، زیست‌توده و عملکرد دانه برای دو محصول گندم و ذرت در مناطق دشت قزوین و پارس‌آباد مغان مورد مطالعه قرار گرفت و با استفاده از شاخص کارایی مدل نش-ساتکلیف نسبی، درجه حساسیت این پارامترها مشخص گردید. پارامترهای درجه روز رشد افزایش پوشش تاج (X45)، درجه روز رشد بذرافشانی تا بلوغ (X42)، درجه روز رشد بذرافشانی تا آغاز پیری (X41) و بیشترین پوشش تاج در نسبت پوشش خاک (X30) بطور مشترک در هر دو محصول بیشترین حساسیت را از خود نشان دادند. بنابراین تعیین دقیق دوره‌های مختلف رشد گیاه برحسب روز و یا درجه روز رشد که اتفاقاً اندازه‌گیری آن‌ها آسان‌تر از سایر پارامترها است از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد. برای هر ۵ خروجی گندم و ذرت منطقه‌ی قزوین، حدود نیمی از پارامترهای ورودی بدون تأثیرند و در هنگام واسنجی از اهمیت ناچیزی برخوردار می‌باشند. با اینکه روش تحلیل حساسیت موضعی (Local Sensitivity Analysis) پیچیدگی‌های محاسباتی و مفهومی روش‌های تحلیل حساسیت کلی (Global Sensitivity Analysis) را ندارد، نتایج نشان داد که این روش می‌تواند به نتایج مشابه با مطالعاتی که از روش‌های تحلیل حساسیت کلی استفاده کرده‌اند منجر گردد.

واژه‌های کلیدی: AquaCrop، تحلیل حساسیت، حساسیت موضعی، عملکرد دانه، زیست‌توده

مقدمه

ورود علوم جدید به کشاورزی برای استفاده‌ی هر چه بهتر از نهاده‌ها و رسیدن به حداکثر محصول در سال‌های اخیر روندی رو به رشد داشته است. استفاده از مدل‌های گیاهی برای اهداف مختلف مانند پیش‌بینی عملکرد، تعیین نیاز آبی، بررسی‌های اثر تغییر اقلیم، خشکسالی و مدیریت‌های مختلف آبیاری و زراعی ضروری است (ضیایی و همکاران، ۱۳۹۳). در ۴ دهه‌ی اخیر، بخاطر توجه به امنیت غذایی و تولیدات کشاورزی ، مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی، رواج یافته اند. (Vanuytrecht et al., 2014). از جمله‌ی این مدل‌ها می‌توان به APSIM Next Generation،APSIM ، DSSAT، CropSyst و AquaCrop اشاره کرد. این مدل‌ها ورودی‌های مختلفی از منابع اقلیم، خاک، آب و گیاه دارند که اغلب آنها به سادگی در دسترس نمی‌باشند و کاربرد آن‌ها را بخصوص در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی، که باید قبل از فصل کشت صورت گیرد، دچار مشکل می‌کند (غلامی و همکاران، ۲۰۱۱). معمولا این پارامترها با واسنجی و حل معکوس تخمین زده می شوند. سوال اساسی در این نوع پژوهش‌ها این است که چه پارامترهایی در فرآیند واسنجی باید با دقت بیشتری اندازه‌گیری یا واسنجی شوند. با استفاده از آنالیز حساسیت، پارامترهایی که بیشترین تأثیر را در عدم قطعیت خروجی مدل دارند شناسایی شده و با ثابت نگه داشتن پارامترهای غیرمهم در مقادیر مشخص، ابعاد

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)
۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)
۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)
۴- استادیار گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)
۵- پژوهشگر مرکز علوم گیاهی، دانشگاه کوئینزلند، استرالیا
(*- نویسنده ی مسئول: Email: Ramezani@eng.ikiu.ac.ir)

بهینه‌سازی کاهش یافته در حالیکه از قابلیت اطمینان و کارائی مدل کاسته نمی‌شود (فتح آبادی و همکاران، ۱۳۹۶). در تعدادی از روش‌های تحلیل حساسیت، اندرکنش و تاثیر متغیرهای مختلف بر یکدیگر نیز مورد بررسی قرار می‌گیرند. روش‌های متعددی برای تحلیل حساسیت وجود دارد. این روش‌ها به سه دسته‌ی آزمایشی، محلی (موضعی) و کلی تقسیم می‌شوند. روش آزمایشی برای تحلیل سریع حساسیت پارامترهای ورودی به کار می‌رود. در روش محلی اثر تغییرات پارامتر ورودی موردنظر در یک بازه محدود بر خروجی مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد. روش تحلیل حساسیت کلی برمبنای تابع احتمالاتی متغیر و همچنین اندرکنش بین متغیرها استوار است. از مهمترین و پرکاربردترین روش‌های آنالیز حساسیت کلی می‌توان به چهار روش RSM، FAST، MII و Sobol اشاره کرد. هدف روش‌های RSM ساده‌تر نمودن تحلیل حساسیت مدل‌های بزرگ و پیچیده همراه با صرفه‌جویی در زمان است. روش FAST بر اساس سهم هر متغیر ورودی بر واریانس کلی تمام پارامترها عمل می‌کند و به همین خاطر هم برای ساختارهای خطی و هم غیرخطی کاربرد دارد. روش MII بر اساس تحلیل حساسیت شرطی (شرایط خاص) و بیشتر برای مدل‌های با خروجی‌های دوبخشی (گسسته) کاربرد دارد. روش‌های Sobol جزء روش‌های کلی بر مبنای واریانس و همچنین شاخص‌های کلی حساسیت است که این شاخص بیانگر تمامی روابط درونی پارامترهای مدل است (کوثری و همکاران، ۱۳۸۹).

شکوهی و همکاران (۱۳۹۶) برای تحلیل حساسیت موضعی مدل مبتنی بر موج سینماتیک KW-GIUH نسبت به روش‌های مختلف برآورد نفوذ و ضرایب زبری، از شاخص کارائی مدل نش–ساتکلیف بهره گرفتند. نتایج به دست آمده از روش‌های مختلف نفوذ نشان داد که مدل KW-GIUH نسبت به روش‌های گرین–امپت و شاخصØ به ترتیب بیشترین و کمترین حساسیت را داراست. همچنین این مدل نسبت به روش برآورد نفوذ و ضریب زبری جریان دامنه‌ای از حساسیت بالایی برخوردار می‌باشد.

وانویترخت و همکاران آنالیز حساسیت کلی مدل AquaCrop را برای خروجی عملکرد مورد مطالعه قرار دادند. آنها تحت شرایط مختلف برای محصولات ذرت، گندم زمستانه و برنج ،روش موریس و روش گسترده‌ی آزمایش حساسیت سری فوریه (EFAST) را برای شناسایی بیشترین حساسیت پارامترها اعمال کردند. این کار برای ۲۲ ترکیب مختلف اقلیم–گیاه–خاک–هواشناسی انجام شد. طبق نتایج بدست آمده، پارامتر X39 در بین پارامترهای گیاهی در همه‌ی شرایط زیست‌محیطی دارای بیشترین حساسیت بود (Vanuytrecht et al., 2014).

جین و همکاران در منطقه‌ای از پکن و منطقه‌ای از کانادا اثر دامنه تغییرات پارامترها بر حساسیت خروجی AquaCrop و واسنجی و ساده‌سازی مدل تحت شرایط جوی–کشاورزی مختلف توسط روش EFAST را برای متغیرهای خروجی عملکرد، بیشینه زیست توده خشک و پوشش گیاهی گندم بررسی کردند. شاخص حساسیت کل (TSI) و شاخص حساسیت کل وابسته به زمان پارامتر های گیاهی حساس‌تر از شاخص حساسیت مرتبه اول (FOSI) و شاخص حساسیت وابسته به زمان مرتبه اول بودند. شاخص حساسیت رتبه اول و شاخص حساسیت کلی نشان داد برای عملکرد و بیشینه‌ی زیست‌توده‌ی خشک محصول گندم پارامترهای X14، X15، X30، X34، X32، X20، X21، X22، X23، X24، X45 و X46 بیشترین حساسیت را دارا می‌باشند. همچنین X26 و X30 برای پوشش تاج و X15، X45، X46 و X32 برای زیست‌توده‌ی خشک بیشتر حساسند. پارامترهای X36، X10، X38، X12، X4، X25 و X47 برای عملکرد و بیشینه‌ی زیست‌توده بدون حساسیت بوده اما برای پوشش تاج و زیست‌توده‌ی خشک حساسند (Jin et al., 2018).

هویی مین و همکاران با دو هدف، ۴۲ پارامتر گیاهی مدل AquaCrop را با روش EFAST مورد تحلیل قرار دادند: اول پیدا کردن پارامترهای اثرگذار و بی‌اثر برای زیست‌توده‌ی بالای زمین، پوشش تاج و عملکرد دانه‌ی گندم زمستانه‌ی پکن تحت تیمارهای دیم، آبیاری عادی و بیش‌آبیاری. دوم تولید مدل AquaCrop قابل استفاده در منطقه‌ی پکن که پارامترهای غیرحساس را ثابت در نظر می‌گیرد و پارامترهای حساس را مطابق نتایج تحلیل حساسیت تنظیم می‌کند. مطابق نتایج بدست‌آمده در شرایط دیم نسبت به شرایط آبیاری عادی و بیش‌آبیاری پارامترهای حساس بیشتری وجود داشت. همچنین پارامترهای توسعه‌ی ریشه حساسیت بیشتری را از خود نشان دادند. پارامترهای X3، X18، X26، X28، X31، X32، X34، X45، X46 و X47 پارامترهای حساس بدست آمده برای منطقه‌ی پکن می‌باشند (Hui-min et al., 2017).

ونگ و همکاران روش تحلیل حساسیت سری فوریه‌ی پیشرفته (EFAST) را بر روی ۴۷ پارامتر گیاهی در مدل WOFOST اعمال کردند. نتایج نشان داد که اندازه نمونه بر روی همگرایی شاخص های حساسیت بسیار تاثیر گذار است. دو نوع از دامنه تغییرات پارامتر برای تجزیه و تحلیل استفاده شد و نتایج نشان داد که پارامترهای حساس دو فضای کاملا متفاوت دارند. علاوه بر این، با استفاده از زیست‌توده‌های موجود در انبار ذخیره سازی در مراحل مختلف رشد به عنوان خروجی هدف، ویژگی های زمان سنجی حساسیت پارامتر مورد بحث قرار گرفت. نتایج نشان داد که چندین پارامتر حساس در زیست‌توده‌ی دانه در تمام مرحله توسعه وجود دارد. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل دوازده پارامتر حساس ثابت کرده است که گرچه پارامترهای قطعی بر عملکرد نهایی تاثیر نمی گذارد، ولی آنها نقش مهمی در مراحل خاص رشد دارند و اهمیت این پارامترها به تدریج افزایش می‌یابد. در نهایت نتایج نشان داد میزان حساسیت خروجی-های مدل WOFOST از جمله زیست‌توده، عملکرد، شاخص سطح

برگ و ضریب تعرق نسبت به پارامترهای مختلف ورودی مدل متفاوت می‌باشد. این مطالعه اهمیت بررسی ویژگی های چندگانه پارامترهای مدل و پاسخ مدل ها در مراحل فنولوژیکی خاص را برجسته می کند (Wang et al., 2013).

سازمان خواروبار و کشاورزی ملل متحد (FAO) مدل AquaCrop را بخاطر سادگی، دقت و توانایی بالا برای شبیه‌سازی واکنش محصولات زراعی به مقدار آب مصرفی و مدیریت آبیاری توسعه داد. مدل AquaCrop زیست‌توده و عملکرد محصول را بر اساس سه مفهوم ساختمان گیاه، آب، خاک و تعادل نمک شبیه‌سازی می‌کند (Vanuytrecht et al., 2014; Steduto et al., 2009). داده‌های ورودی مدل AquaCrop شامل چهار گروه داده‌های اقلیمی، گیاهی، خاک، و مدیریت مزرعه است.

جدول ۱- اسامی لاتین پارامترهای گیاهی (* پارامترهایی که در AquaCrop نمی‌توانند مقدار اعشاری بپذیرند)

	Name of Crop Parameters
X1 *	Soil water depletion factors (p) are adjusted by Eto
X2	Base temperature (°C) below which crop development does not progress
X3	Upper temperature (°C) above which crop development no longer increases with an increase in temperature
X4	Soil water depletion factor for canopy expansion (p-exp) - Upper threshold
X5	Soil water depletion factor for canopy expansion (p-exp) - Lower threshold
X6	Shape factor for water stress coefficient for canopy expansion (0.0 = straight line)
X7	Soil water depletion fraction for stomatal control (p - sto) - Upper threshold
X8	Shape factor for water stress coefficient for stomatal control (0.0 = straight line)
X9	Soil water depletion factor for canopy senescence (p - sen) - Upper threshold
X10	Shape factor for water stress coefficient for canopy senescence (0.0 = straight line)
X11	Soil water depletion factor for pollination (p - pol) - Upper threshold
X12 *	Vol% for Anaerobiotic point (* (SAT - [vol%]) at which deficient aeration occurs *)
X13 *	Minimum air temperature below which pollination starts to fail (cold stress) (°C)
X14 *	Maximum air temperature above which pollination starts to fail (heat stress) (°C)
X15 *	Minimum growing degrees required for full biomass production (°C - day)
X16 *	Electrical Conductivity of soil saturation extract at which crop starts to be affected by soil salinity (dS/m)
X17 *	Electrical Conductivity of soil saturation extract at which crop can no longer grow (dS/m)
X18	Crop coefficient when canopy is complete but prior to senescence (KcTr,x)
X19	Decline of crop coefficient (%/day) as a result of ageing, nitrogen deficiency, etc.
X20	Minimum effective rooting depth (m)
X21	Maximum effective rooting depth (m)
X22 *	Shape factor describing root zone expansion
X23	Maximum root water extraction (m3water/m3soil.day) in top quarter of root zone
X24	Maximum root water extraction (m3water/m3soil.day) in bottom quarter of root zone
X25 *	Effect of canopy cover in reducing soil evaporation in late season stage
X26	Soil surface covered by an individual seedling at 90 % emergence (cm2)
X27	Canopy size of individual plant (re-growth) at 1st day (cm2)
X28 *	Number of plants per hectare
X29	Canopy growth coefficient (CGC): Increase in canopy cover (fraction soil cover per day)
X30	Maximum canopy cover (CCx) in fraction soil cover
X31	Water Productivity normalized for ETo and CO2 (WP*) (gram/m2)
X32 *	Water Productivity normalized for ETo and CO2 during yield formation (as % WP*)
X33 *	Crop performance under elevated atmospheric CO2 concentration (%)
X34 *	Reference Harvest Index (HIo) (%)
X35 *	Possible increase (%) of HI due to water stress before flowering
X36	Coefficient describing positive impact on HI of restricted vegetative growth during yield formation
X37	Coefficient describing negative impact on HI of stomatal closure during yield formation
X38 *	Allowable maximum increase (%) of specified HI
X39 *	GDDays: from sowing to emergence
X40 *	GDDays: from sowing to maximum rooting depth
X41 *	GDDays: from sowing to start senescence
X42 *	GDDays: from sowing to maturity (length of crop cycle)
X43 *	GDDays: from sowing to flowering
X44 *	Length of the flowering stage (growing degree days)
X45	CGC for GGDays: Increase in canopy cover (in fraction soil cover per growing-degree day)
X46	CDC for GGDays: Decrease in canopy cover (in fraction per growing-degree day)
X47 *	GDDays: building-up of Harvest Index during yield formation

جدول ۲- اسامی فارسی پارامترهای گیاهی (* پارامترهایی که در AquaCrop نمی‌توانند مقدار اعشاری بپذیرند).

اسامی پارامتر های ورودی گیاهی	
فاکتور تخلیه ی آب خاک تعدیل شده با تبخیروتعرق مرجع	X1 *
دمای پایه (°C) که در آن رشد محصول پیشرفتی نداشته است	X2
دمای بالا (°C) بالاتر از آن که رشد محصول با افزایش دما افزایش نمی یابد	X3
فاکتور تخلیه آب خاک برای گسترش تاج – آستانه بالا	X4
فاکتور تخلیه آب خاک برای گسترش تاج – آستانه پائین	X5
فاکتور شکل برای ضریب تنش آب برای گسترش تاج	X6
کسری تخلیه آب خاک برای کنترل زهکش – آستانه بالا	X7
فاکتور شکل برای ضریب تنش آب برای کنترل روزنه ای	X8
فاکتور تخلیه آب خاک برای پیری تاج – آستانه بالا	X9
فاکتور شکل برای ضریب تنش آب برای پیری تاج	X10
ضریب تخلیه ی آب خاک برای گرده افشانی – آستانه بالا	X11
درصد حجمی برای نقطه ی بی هوازی (که در آن فرسایش هوا رخ می دهد)	X12 *
حداقل دمای هوا که زیر آن گرده افشانی شروع به شکست می کند (تنش سرمایی) درجه ی سانتی گراد (°C)	X13 *
حداکثر دمای هوا که بالای آن گرده افشانی شروع به شکست می کند (تنش گرمایی) (درجه ی سانتی گراد °C)	X14 *
حداقل درجه رشد مورد نیاز برای تولید کامل زیست توده (درجه ی سانتی گراد °C – روز)	X15 *
هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک که در آن تأثیر گرفتن محصول از شوری خاک (دسی زیمنس بر متر) شروع می شود.	X16 *
هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک که در آن محصول دیگر نمی تواند رشد کند (دسی زیمنس بر متر)	X17 *
ضریب گیاهی زمانی که تاج کامل است اما قبل از پیری	X18
کاهش ضریب گیاهی (٪ / روز) به عنوان یک نتیجه از پیری، کمبود نیتروژن و غیره	X19
حداقل عمق ریشه مؤثر (متر)	X20
حداکثر عمق ریشه مؤثر (متر)	X21
فاکتور شکل توصیف گسترش منطقه ی ریشه	X22 *
حداکثر استخراج ریشه (مترمکعب آب بر مترمکعب خاک در روز) در چارک بالای منطقه ی ریشه	X23
حداکثر استخراج ریشه (مترمکعب آب بر مترمکعب خاک در روز) در چارک پائین منطقه ی ریشه	X24
اثر پوشش تاج بر کاهش تبخیر خاک در مرحله اواخر فصل	X25 *
سطح خاک تحت پوشش نهال در ۹۰٪ پیدایش (سانتی متر مربع)	X26
اندازه تاج گیاه فردی (رشد دوباره) در روز اول (سانتی متر)	X27
تعداد گیاهان در هکتار	X28 *
ضریب رشد تاج: افزایش پوشش تاج (کسر خاک در روز)	X29
حداکثر پوشش تاج در کسر پوشش خاک	X30
بهره وری آب نرمال شده برای ETo و CO2 (گرم / متر مربع)	X31
بهره وری آب نرمال شده برای ETo و CO2 در طی روند تولید (٪)	X32 *
عملکرد محصول تحت افزایش غلظت CO2 در اتمسفر (٪)	X33 *
شاخص برداشت مرجع (HIo) (٪)	X34 *
افزایش محتمل اندیس برداشت به دلیل تنش آبی قبل از گلدهی	X35 *
ضریب تأثیر مثبت بر شاخص برداشت رشد رویشی محدود شده در طی روند تولید	X36
ضریب تأثیر منفی بر شاخص برداشت انسداد روزنه ای در طول روند تولید	X37
حداکثر افزایش مجاز (٪) شاخص برداشت مشخص شده	X38 *
درجه روز رشد از کاشت تا نمایان شدن	X39 *
درجه روز رشد از کاشت تا حداکثر عمق ریشه	X40 *
درجه روز رشد از کاشت تا آغاز پیری	X41 *
درجه روز رشد از کاشت به بلوغ (طول دوره محصول)	X42 *
درجه روز رشد از کاشت تا گلدهی	X43 *
طول مرحله گلدهی (درجه روز رشد)	X44 *
افزایش پوشش تاج (در کسر پوشش خاک بر درجه روز رشد)	X45
کاهش پوشش تاج (در کسر پوشش خاک بر درجه روز رشد)	X46
درجه روز رشد: ساخت شاخص برداشت در طی روند تولید	X47 *

داده‌های اقلیمی شامل چهار بخش میزان تبخیر- تعرق گیاه مرجع روزانه، دمای حداقل و حداکثر روزانه، مقادیر بارندگی روزانه، و میانگین سالیانهٔ غلظت CO2 است (حسن لی و همکاران، ۱۳۹۴).

هدف از این پژوهش، تحلیل حساسیت محلی برای یافتن اثر مستقل هر متغیر ورودی گیاهی بر تبخیر، تعرق، تبخیر-تعرق و عملکرد گندم و ذرت در مدل متن‌بسته‌ی AquaCrop در یک دوره‌ی ۳۶ ساله در دشت قزوین و یک دورهٔ ۱۳ ساله در منطقه‌ی پارس‌آباد می‌باشد. در این پژوهش از نسخه‌ی ۵ مدل AquaCrop استفاده شده است. نسخه ۵ به دلیل در نظر گرفتن تنش شوری، دقت بیشتری دارد. این موضوع به خصوص در هنگامی که منابع آب و

خاک شوری بالایی دارند و یا گیاه به شوری حساس است آشکارتر است (رمضانی اعتدالی و همکاران، ۱۳۹۵).

مواد و روش‌ها

اسامی فارسی و لاتین ۴۷ پارامتر ورودی گیاهی مدل AquaCrop مورد استفاده برای تحلیل حساسیت (X1 تا X47) در این تحقیق در جداول (۱) و (۲) آورده شده است:

منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق برای تحلیل حساسیت داده‌های مربوط به واسنجی مدل AquaCrop در منطقه‌ی قزوین و پارس‌آباد برای محصولات گندم و ذرت مورد مطالعه قرار گرفت. ۵ متغیر خروجی شامل تبخیر از سطح خاک، تعرق، تبخیر–تعرق، زیست‌توده و عملکرد برای تحلیل حساسیت مورد استفاده قرار گرفتند. پس از واسنجی مدل با توجه به اطلاعات اقلیمی (دما، باران و تبخیر–تعرق) موجود در پایگاه داده های هواشناسی که در فایل های مربوطه وارد شده‌اند، فرآیند شبیه-سازی برای گندم و ذرت مناطق قزوین و پارس‌آباد به ترتیب به مدت ۳۶ سال (۱۹۷۹–۲۰۱۴) و ۱۳ سال (۲۰۰۱–۲۰۱۳) انجام گرفت. خروجی این شبیه‌سازی ها بعنوان تیمار شاهد جهت اعمال تحلیل حساسیت درنظر گرفته شده است. همچنین برای تحلیل عدم قطعیت مدل AquaCrop در منطقه‌ی دشت قزوین برای محصول گندم، فرآیند شبیه‌سازی برای گندم قزوین به مدت ۳۶ سال (۱۹۷۹–۲۰۱۴) انجام گرفت.

تحلیل حساسیت موضعی

برای تحلیل حساسیت موضعی (محلی) خروجی مدل AquaCrop، هر کدام از پارامترهای مدل واسنجی شده در محدوده ۵۰- تا ۵۰+ درصد با فرض ثابت بودن دیگر پارامترهای تغییر داده شده و مدل مجدداً اجرا گردید. در هر بار اجرای مدل به ازای مقادیر مختلف در بازه مذکور، شاخص کارائی نش–ساتکلیف محاسبه گردید. شاخص کارائی مدل نش–ساتکلیف بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(X_{p_i} - X_{o_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(X_{o_i} - \mu_o\right)^2} \quad (۱)$$

که در آن X_{p_i} داده‌ی برآورد شده توسط مدل برای تیمارهای مختلف، X_{o_i} داده‌ی مشاهداتی (واسنجی) ، n تعداد داده‌ها و μ_o میانگین داده‌های مشاهداتی است. مقدار این شاخص از منفی بی-نهایت تا مثبت یک می‌باشد. هرچه مقدار شاخص به یک نزدیکتر باشد، مدل کارائی بهتری دارد (شکوهی و همکاران ۱۳۹۶). برای تحلیل حساسیت مدل از شاخص نش–ساتکلیف نسبی استفاده شد که مقدار آن از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$Relative\ NS = \frac{(NS_{ac} - NS_{cal})}{NS_{ac}} \times 100 \quad (۲)$$

که در آن NS_{ac} مقدار شاخص نش–ساتکلیف بدست آمده از مقادیر مشاهداتی و مقادیر واسنجی شده است. NS_{cal} نیز برابر با شاخص نش–ساتکلیف بدست آمده از مقادیر مشاهداتی و مقادیر برآورد شده توسط مدل (برای تیمارهای افزایشی و کاهشی) می‌باشد. با توجه به اینکه مدل به دقت واسنجی شده است، مقدار NS_{ac} برابر با یک در نظر گرفته می‌شود.

طبقه‌بندی حساسیت متغیرها

در این پژوهش جهت تعیین اثر متغیرها بر خروجی مدل از ۲ طبقه بندی مختلف استفاده شده است. طبقه‌بندی اول براساس جدول (۳) است. طبقه‌بندی دوم برحسب شدت رنگ قرمز انجام شد. شدت رنگ قرمز با یک تابع غیرخطی به شاخص نش–ساتکلیف نسبی (حساسیت) تعلق می‌گیرد. با افزایش شدت رنگ، حساسیت پارامتر موردنظر افزایش می‌یابد. با توجه به زمان‌بر بودن و سختی اجرای دستی مدل AquaCrop که به دلیل ساختار متن‌بسته (Closed Source) آن است، با کدنویسی در نرم افزار MATLAB تمامی تیمارها تولید شده و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. همچنین با توجه به عدم تغییر ۲۶ پارامتر از ۷۳ پارامتر موجود در فایل گیاهی، ۴۷ پارامتر جهت اعمال روش تحلیل حساسیت محلی مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول۳- طبقه بندی نوع اول

درجه اثر	Relative NS (%)
بدون حساسیت (None Sensitive)	کمتر از ۵
کم حساسیت (Low Sensitive)	۱۰–۵
میانه (Moderate)	۲۰–۱۰
حساس (Sensitive)	۵۰–۲۰
بسیار حساس (High Sensitive)	بیشتر از ۵۰

نتایج و بحث

همانطور که در بخش‌های قبل عنوان شد، برای تعیین میزان حساسیت خروجی مدل AquaCrop به پارامترهای ورودی مختلف از یک روش تحلیل حساسیت موضعی استفاده گردید. در این روش پس از تعیین مقادیر واسنجی شده پارامترهای مدل بر اساس داده‌های مشاهداتی، اقدام به تغییر هر پارامتر در بازه ۵۰- تا ۵۰+ درصد گردید. به عبارت بهتر هر بار یک پارامتر در بازه مذکور و با فرض ثابت بودن سایر پارامترها تغییر داده شده و مدل اجرا و شاخص کارائی NS برای آن محاسبه گردید. در نهایت با مقایسه شاخص NS در این حالت با مقدار بدست آمده در مرحله واسنجی (NS_{ac}) مقایسه گردید تا میزان

حساسیت خروجی مدل نسبت به پارامتر موردنظر مشخص شود. نتایج بدست آمده برای دو محصول گندم و ذرت در دو اقلیم مختلف قزوین و پارس آباد مغان در شکل‌های ۱ تا ۴ نشان داده شده است. با توجه به محاسبات صورت گرفته، تعداد قابل توجهی از پارامترهای مدل از حساسیت کمی برخوردار می‌باشند که می‌توان به هنگام واسنجی و برای صرفه‌جویی در زمان و هزینه، از تعداد زیادی از آنها صرفه‌نظر نمود. از آنجا که مدل با استفاده از پارامترهای درجه روز رشد برای محصولات گندم و ذرت واسنجی شده است، پارامترهای تقویمی در هر دو منطقه مطالعاتی حساسیت نداشته و بطور کامل در خروجی مدل بی‌اثر می‌باشند. نتایج حاکی از آن است که برای برآورد عملکرد محصول (Yield) و زیست توده (Biomass) گندم در هر دو منطقه قزوین و پارس آباد مغان، پارامترهای درجه روز رشد از کاشت به بلوغ (X42)، درجه روز رشد از کاشت تا آغاز پیری (X41)، بهره‌وری آب نرمال شده برای ETo و Co_2 (X31)، شاخص برداشت مرجع (X34) و ضریب گیاهی زمانی که تاج کامل است اما قبل از پیری (X18) از تاثیرگذاری بسیار زیادی بر نتایج شبیه‌سازی شده توسط مدل AquaCrop برخوردار می‌باشند. همانطور که ملاحظه می‌گردد، حساسیت عملکرد محصول و زیست توده برآورد شده توسط مدل AquaCrop برای محصول گندم تقریباً مستقل از اقلیم بوده و برای بازه‌های مطالعاتی نتایج یکسانی را بدست داده است.

E			Tr			ET			Biomass			Yield		
X47	0	None Sensitive	X47	0	None Sensitive	X47	0	None Sensitive	X47	0	None Sensitive	X47	231.88	High Sensitive
X46	20.62	Sensitive	X46	149.83	High Sensitive	X46	76.86	High Sensitive	X46	151.51	High Sensitive	X46	151.33	High Sensitive
X45	425.3	High Sensitive	X45	150.7	High Sensitive	X45	18.94	Moderate	X45	516.22	High Sensitive	X45	386.02	High Sensitive
X44	0	None Sensitive	X44	0	None Sensitive	X44	0	None Sensitive	X44	0	None Sensitive	X44	18.1	Moderate
X43	0	None Sensitive	X43	0	None Sensitive	X43	0	None Sensitive	X43	0	None Sensitive	X43	1626.25	High Sensitive
X42	178.58	High Sensitive	X42	974.3	High Sensitive	X42	459.81	High Sensitive	X42	1549.7	High Sensitive	X42	4131.85	High Sensitive
X41	254.67	High Sensitive	X41	1236.99	High Sensitive	X41	522.93	High Sensitive	X41	2007.76	High Sensitive	X41	2518.43	High Sensitive
X40	3.85	None Sensitive	X40	0.02	None Sensitive	X40	0.59	None Sensitive	X40	0.11	None Sensitive	X40	0.04	None Sensitive
X39	42.13	Sensitive	X39	2.26	None Sensitive	X39	1.74	None Sensitive	X39	28.25	Sensitive	X39	22.02	Sensitive
X38	0	None Sensitive	X38	0	None Sensitive	X38	0	None Sensitive	X38	0	None Sensitive	X38	0	None Sensitive
X37	0	None Sensitive	X37	0	None Sensitive	X37	0	None Sensitive	X37	0	None Sensitive	X37	0	None Sensitive
X36	0	None Sensitive	X36	0	None Sensitive	X36	0	None Sensitive	X36	0	None Sensitive	X36	0.45	None Sensitive
X35	0	None Sensitive	X35	0	None Sensitive	X35	0	None Sensitive	X35	0	None Sensitive	X35	0	None Sensitive
X34	0	None Sensitive	X34	0	None Sensitive	X34	0	None Sensitive	X34	0	None Sensitive	X34	2784.44	High Sensitive
X33	0	None Sensitive	X33	0	None Sensitive	X33	0	None Sensitive	X33	0	None Sensitive	X33	0	None Sensitive
X32	0	None Sensitive	X32	0	None Sensitive	X32	0	None Sensitive	X32	1429.09	High Sensitive	X32	1107.85	High Sensitive
X31	0	None Sensitive	X31	0	None Sensitive	X31	0	None Sensitive	X31	3590.57	High Sensitive	X31	2789.85	High Sensitive
X30	479.58	High Sensitive	X30	482.61	High Sensitive	X30	137.46	High Sensitive	X30	1012.57	High Sensitive	X30	791.85	High Sensitive
X29	0	None Sensitive	X29	0	None Sensitive	X29	0	None Sensitive	X29	0	None Sensitive	X29	0	None Sensitive
X28	52.38	High Sensitive	X28	3.78	None Sensitive	X28	2	None Sensitive	X28	38.76	Sensitive	X28	28.5	Sensitive
X27	0	None Sensitive	X27	0	None Sensitive	X27	0	None Sensitive	X27	0	None Sensitive	X27	0	None Sensitive
X26	52.38	High Sensitive	X26	3.78	None Sensitive	X26	2	None Sensitive	X26	38.76	Sensitive	X26	28.5	Sensitive
X25	3.06	None Sensitive	X25	0.01	None Sensitive	X25	0.42	None Sensitive	X25	0.05	None Sensitive	X25	0.02	None Sensitive
X24	0	None Sensitive	X24	0	None Sensitive	X24	0	None Sensitive	X24	0	None Sensitive	X24	0	None Sensitive
X23	0.14	None Sensitive	X23	0	None Sensitive	X23	0.02	None Sensitive	X23	0	None Sensitive	X23	0	None Sensitive
X22	3.38	None Sensitive	X22	0.01	None Sensitive	X22	0.51	None Sensitive	X22	0.09	None Sensitive	X22	0.03	None Sensitive
X21	22.05	Sensitive	X21	0.36	None Sensitive	X21	2.37	None Sensitive	X21	1.21	None Sensitive	X21	0.48	None Sensitive
X20	5.45	Low Sensitive	X20	0.01	None Sensitive	X20	0.74	None Sensitive	X20	0.07	None Sensitive	X20	0.04	None Sensitive
X19	0.42	None Sensitive	X19	0.99	None Sensitive	X19	0.72	None Sensitive	X19	1.46	None Sensitive	X19	1.12	None Sensitive
X18	9.38	Low Sensitive	X18	1431.7	High Sensitive	X18	927.09	High Sensitive	X18	3695.03	High Sensitive	X18	2915.11	High Sensitive
X17	0	None Sensitive	X17	0	None Sensitive	X17	0	None Sensitive	X17	0	None Sensitive	X17	0	None Sensitive
X16	0	None Sensitive	X16	0	None Sensitive	X16	0	None Sensitive	X16	0	None Sensitive	X16	0	None Sensitive
X15	6.81	Low Sensitive	X15	100.27	High Sensitive	X15	62.53	High Sensitive	X15	771.89	High Sensitive	X15	607.94	High Sensitive
X14	0	None Sensitive	X14	0	None Sensitive	X14	0	None Sensitive	X14	0	None Sensitive	X14	906.38	High Sensitive
X13	0	None Sensitive	X13	0	None Sensitive	X13	0	None Sensitive	X13	0	None Sensitive	X13	125.08	High Sensitive
X12	0	None Sensitive	X12	0	None Sensitive	X12	0	None Sensitive	X12	0	None Sensitive	X12	0	None Sensitive
X11	0	None Sensitive	X11	0	None Sensitive	X11	0	None Sensitive	X11	0	None Sensitive	X11	0	None Sensitive
X10	0	None Sensitive	X10	0	None Sensitive	X10	0	None Sensitive	X10	0	None Sensitive	X10	0	None Sensitive
X9	0.03	None Sensitive	X9	0.01	None Sensitive	X9	0	None Sensitive	X9	0.04	None Sensitive	X9	0.01	None Sensitive
X8	0	None Sensitive	X8	0	None Sensitive	X8	0	None Sensitive	X8	0	None Sensitive	X8	0	None Sensitive
X7	40.26	Sensitive	X7	0.14	None Sensitive	X7	5.32	Low Sensitive	X7	0.4	None Sensitive	X7	1.35	None Sensitive
X6	0	None Sensitive	X6	0	None Sensitive	X6	0	None Sensitive	X6	0	None Sensitive	X6	0	None Sensitive
X5	1.07	None Sensitive	X5	0.39	None Sensitive	X5	0.05	None Sensitive	X5	1.27	None Sensitive	X5	0.9	None Sensitive
X4	0.47	None Sensitive	X4	0.07	None Sensitive	X4	0.01	None Sensitive	X4	0.57	None Sensitive	X4	0.51	None Sensitive
X3	13.13	Moderate	X3	54.34	High Sensitive	X3	28.47	Sensitive	X3	32.84	Sensitive	X3	444.34	High Sensitive
X2	0	None Sensitive	X2	0	None Sensitive	X2	0	None Sensitive	X2	0	None Sensitive	X2	0	None Sensitive
X1	0	None Sensitive	X1	0	None Sensitive	X1	0	None Sensitive	X1	0	None Sensitive	X1	0	None Sensitive
	Sensitivity (%)	Effectiveness		Sensitivity (%)	Effectiveness		Sensitivity (%)	Effectiveness		Sensitivity (%)	Effectiveness		Sensitivity (%)	Effectiveness

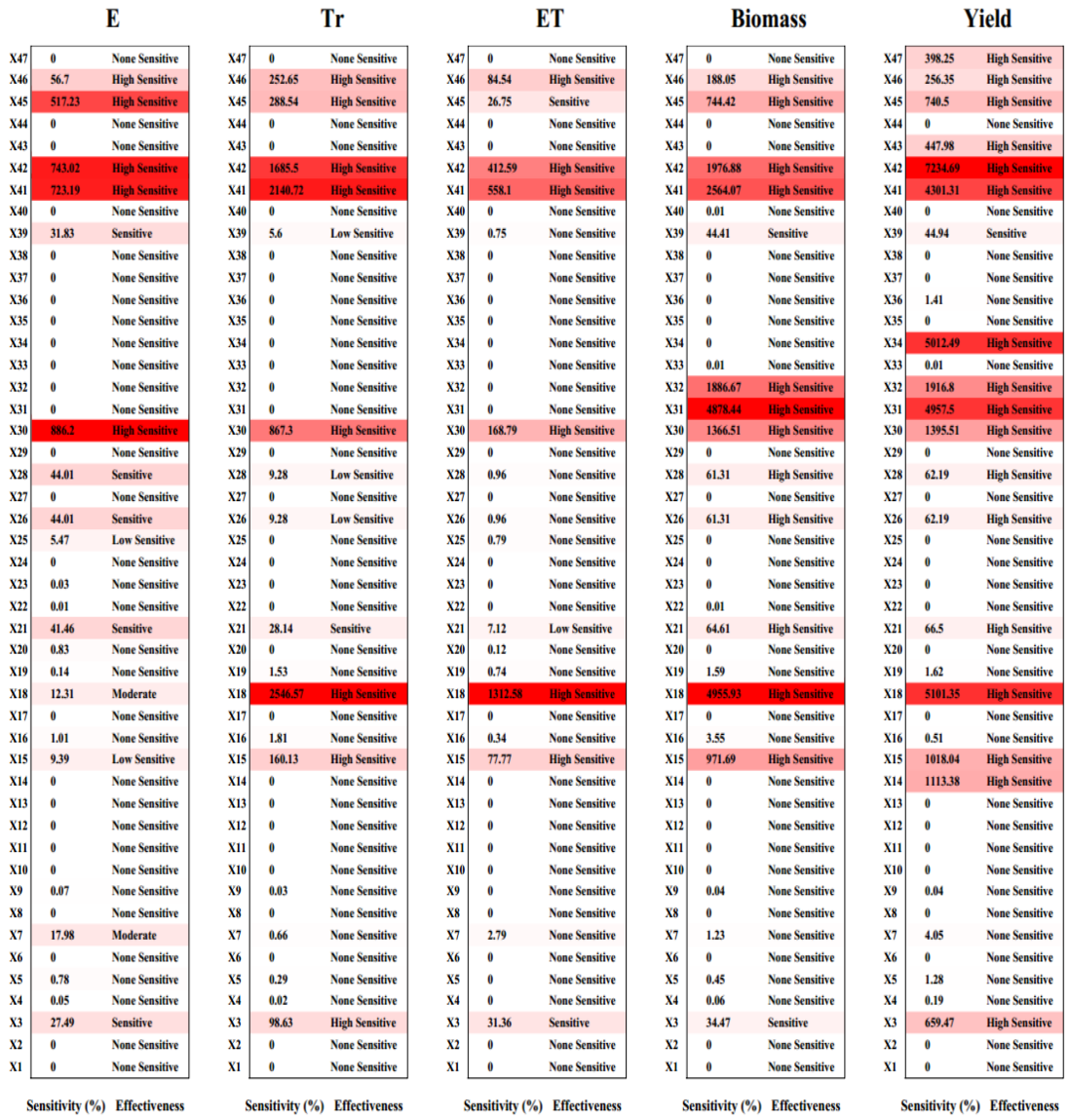
شکل ۱- طبقه‌بندی حساسیت پارامترها با استفاده از جدول (۳) و شدت رنگ قرمز (شدت حساسیت) برای گندم در منطقه‌ی قزوین. ستون چپ میزان اثرگذاری پارامتر و ستون راست درجه‌ی حساسیت براساس جدول (۳) را نشان می‌دهد. نام پارامترها در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه شده‌اند.

بررسی نتایج بدست آمده برای محصول ذرت در دو منطقه قزوین و پارس آباد مغان حاکی از آن است که بر خلاف محصول گندم، عملکرد محصول برآورد شده توسط مدل نسبت به پارامترهای دمای پایه که در آن رشد محصول پیشرفتی نداشته است (X2)، دمائی که بالاتر از آن رشد محصول با افزایش دما افزایش نمی‌یابد (X3)، درجه روز رشد از کاشت تا گلدهی (X43) و درجه روز رشد از کاشت تا بلوغ (X42) از حساسیت بسیار زیادی برخوردار است. نکته قابل توجه این است که برای هر دو منطقه مطالعاتی ترتیب پارامترهای حساس مدل برای برآورد عملکرد محصول یکسان می‌باشد. همچنین برای خروجی‌های دیگر مدل AquaCrop همچون زیست توده و تبخیر و تعرق، ترتیب پارامترهای تاثیرگذار تقریباً مشابه یکدیگر می‌باشد. در یک جمع‌بندی کلی می‌توان چنین عنوان نمود که برای یک محصول مشخص، پارامترهای تاثیرگذار و حساس وابستگی چندان قابل توجهی به نوع منطقه مطالعاتی و اقلیم آن ندارد. این نتیجه برای هر دو محصول گندم و ذرت قابل مشاهده است.

همچنین برای ارزیابی هرچه بهتر پارامترهای حساس و غیرحساس مدل AquaCrop نسبت به خروجی‌های مختلف مورد انتظار از مدل، تعداد و درصد پارامترهای غیرحساس محاسبه و نتایج آن در جدول (۳) ارائه شده است.

E			Tr			ET			Biomass			Yield		
X47	0	None Sensitive	X47	0	None Sensitive	X47	0	None Sensitive	X47	0	None Sensitive	X47	1253.65	High Sensitive
X46	0.62	None Sensitive	X46	0.83	None Sensitive	X46	0.28	None Sensitive	X46	11.64	Moderate	X46	0.47	None Sensitive
X45	768.21	High Sensitive	X45	603.81	High Sensitive	X45	124.54	High Sensitive	X45	3744.84	High Sensitive	X45	118.78	High Sensitive
X44	0	None Sensitive	X44	0	None Sensitive	X44	0	None Sensitive	X44	0	None Sensitive	X44	0.01	None Sensitive
X43	51.89	High Sensitive	X43	5.93	Low Sensitive	X43	0.12	None Sensitive	X43	45.28	Sensitive	X43	1421.4	High Sensitive
X42	142.36	High Sensitive	X42	1561.61	High Sensitive	X42	759.54	High Sensitive	X42	13441.59	High Sensitive	X42	1391.66	High Sensitive
X41	114.09	High Sensitive	X41	1329.95	High Sensitive	X41	650.84	High Sensitive	X41	11692.48	High Sensitive	X41	1171.05	High Sensitive
X40	135.73	High Sensitive	X40	2.65	None Sensitive	X40	11.64	Moderate	X40	7.43	Low Sensitive	X40	0.23	None Sensitive
X39	20.67	Sensitive	X39	9.24	Low Sensitive	X39	2.12	None Sensitive	X39	53.79	High Sensitive	X39	1.71	None Sensitive
X38	0	None Sensitive	X38	0	None Sensitive	X38	0	None Sensitive	X38	0	None Sensitive	X38	0	None Sensitive
X37	0	None Sensitive	X37	0	None Sensitive	X37	0	None Sensitive	X37	0	None Sensitive	X37	0	None Sensitive
X36	0	None Sensitive	X36	0	None Sensitive	X36	0	None Sensitive	X36	0	None Sensitive	X36	0.01	None Sensitive
X35	0	None Sensitive	X35	0	None Sensitive	X35	0	None Sensitive	X35	0	None Sensitive	X35	0	None Sensitive
X34	0	None Sensitive	X34	0	None Sensitive	X34	0	None Sensitive	X34	0	None Sensitive	X34	550.55	High Sensitive
X33	0	None Sensitive	X33	0	None Sensitive	X33	0	None Sensitive	X33	0	None Sensitive	X33	0	None Sensitive
X32	0	None Sensitive	X32	0	None Sensitive	X32	0	None Sensitive	X32	4152.43	High Sensitive	X32	136.01	High Sensitive
X31	0	None Sensitive	X31	0	None Sensitive	X31	0	None Sensitive	X31	18778.85	High Sensitive	X31	592.84	High Sensitive
X30	1216.94	High Sensitive	X30	653.19	High Sensitive	X30	191.86	High Sensitive	X30	5028.62	High Sensitive	X30	161.88	High Sensitive
X29	0	None Sensitive	X29	0	None Sensitive	X29	0	None Sensitive	X29	0	None Sensitive	X29	0	None Sensitive
X28	20.09	Sensitive	X28	15.93	Moderate	X28	4.71	None Sensitive	X28	93.06	High Sensitive	X28	2.94	None Sensitive
X27	0	None Sensitive	X27	0	None Sensitive	X27	0	None Sensitive	X27	0	None Sensitive	X27	0	None Sensitive
X26	20.09	Sensitive	X26	15.93	Moderate	X26	4.71	None Sensitive	X26	93.06	High Sensitive	X26	2.94	None Sensitive
X25	0.01	None Sensitive	X25	0	None Sensitive	X25	0	None Sensitive	X25	0	None Sensitive	X25	0	None Sensitive
X24	0.08	None Sensitive	X24	1.04	None Sensitive	X24	0.64	None Sensitive	X24	3.05	None Sensitive	X24	0.09	None Sensitive
X23	0.58	None Sensitive	X23	38.97	Sensitive	X23	22.51	Sensitive	X23	151.48	High Sensitive	X23	4.88	None Sensitive
X22	155.4	High Sensitive	X22	4.67	None Sensitive	X22	10.93	Moderate	X22	14.91	Moderate	X22	0.47	None Sensitive
X21	178.28	High Sensitive	X21	65.38	High Sensitive	X21	25.99	Sensitive	X21	270.01	High Sensitive	X21	8.87	Low Sensitive
X20	329.39	High Sensitive	X20	0.34	None Sensitive	X20	30.63	Sensitive	X20	1.58	None Sensitive	X20	0.06	None Sensitive
X19	0.09	None Sensitive	X19	7.25	Low Sensitive	X19	4.53	None Sensitive	X19	69.07	High Sensitive	X19	2.25	None Sensitive
X18	21.95	Sensitive	X18	2339.29	High Sensitive	X18	1517.25	High Sensitive	X18	18397.78	High Sensitive	X18	590.58	High Sensitive
X17	0	None Sensitive	X17	0	None Sensitive	X17	0	None Sensitive	X17	0	None Sensitive	X17	0	None Sensitive
X16	0	None Sensitive	X16	0	None Sensitive	X16	0	None Sensitive	X16	0	None Sensitive	X16	0	None Sensitive
X15	4.19	None Sensitive	X15	194.76	High Sensitive	X15	127.19	High Sensitive	X15	1666.33	High Sensitive	X15	50.77	High Sensitive
X14	0	None Sensitive	X14	0	None Sensitive	X14	0	None Sensitive	X14	0	None Sensitive	X14	1383.06	High Sensitive
X13	0	None Sensitive	X13	0	None Sensitive	X13	0	None Sensitive	X13	0	None Sensitive	X13	0	None Sensitive
X12	0	None Sensitive	X12	0	None Sensitive	X12	0	None Sensitive	X12	0	None Sensitive	X12	0	None Sensitive
X11	0	None Sensitive	X11	0	None Sensitive	X11	0	None Sensitive	X11	0	None Sensitive	X11	0	None Sensitive
X10	0	None Sensitive	X10	0	None Sensitive	X10	0	None Sensitive	X10	0	None Sensitive	X10	0	None Sensitive
X9	182.17	High Sensitive	X9	197.75	High Sensitive	X9	50.04	High Sensitive	X9	1284.68	High Sensitive	X9	38.85	Sensitive
X8	0	None Sensitive	X8	0	None Sensitive	X8	0	None Sensitive	X8	0.01	None Sensitive	X8	0	None Sensitive
X7	1307.4	High Sensitive	X7	1306.76	High Sensitive	X7	1225.04	High Sensitive	X7	9360.57	High Sensitive	X7	334.77	High Sensitive
X6	0	None Sensitive	X6	0	None Sensitive	X6	0	None Sensitive	X6	0	None Sensitive	X6	0	None Sensitive
X5	206.77	High Sensitive	X5	224	High Sensitive	X5	56.06	High Sensitive	X5	1406.3	High Sensitive	X5	39.07	Sensitive
X4	2.17	None Sensitive	X4	1.23	None Sensitive	X4	0.35	None Sensitive	X4	7.68	Low Sensitive	X4	0.17	None Sensitive
X3	1136.98	High Sensitive	X3	1971.72	High Sensitive	X3	611.59	High Sensitive	X3	14253.59	High Sensitive	X3	1900.75	High Sensitive
X2	273.33	High Sensitive	X2	356.51	High Sensitive	X2	126.46	High Sensitive	X2	3058.05	High Sensitive	X2	1652.82	High Sensitive
X1	0	None Sensitive	X1	0	None Sensitive	X1	0	None Sensitive	X1	0	None Sensitive	X1	0	None Sensitive
	Sensitivity (%)	Effectiveness		Sensitivity (%)	Effectiveness		Sensitivity (%)	Effectiveness		Sensitivity (%)	Effectiveness		Sensitivity (%)	Effectiveness

شکل ۲- طبقه‌بندی حساسیت پارامترها با استفاده از جدول ۳ و شدت رنگ قرمز (شدت حساسیت) برای ذرت در منطقه‌ی قزوین. ستون چپ میزان اثرگذاری پارامتر و ستون راست درجه‌ی حساسیت براساس جدول (۳) را نشان می‌دهد. نام پارامترها در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه شده‌اند.



شکل ۳- طبقه‌بندی حساسیت پارامترها با استفاده از جدول (۳) و شدت رنگ قرمز (شدت حساسیت) برای گندم در منطقه‌ی پارس‌آباد. ستون چپ میزان اثرگذاری پارامتر و ستون راست درجه‌ی حساسیت براساس جدول (۳) را نشان می‌دهد. نام پارامترها در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه شده‌اند.

جدول ٤- درصد پارامترهای غیرحساس مدل AquaCrop برای محصول گندم و ذرت در مناطق قزوین و پارس‌آباد به تفکیک خروجی‌های مورد انتظار از مدل

	پارس آباد		قزوین	
	گندم	ذرت	گندم	ذرت
E	۵۳	۳۸	۶۸	۶۲
Tr	۶۲	۴۳	۸۳	۶۲
ET	۶۴	۴۰	۸۱	۶۶
Biomass	۵۱	۳۸	۷۲	۴۹
Yield	۴۵	۲۸	۶۰	۶۲
میانگین	۵۵	۳۵	۷۳	۶۰

	E		Tr		ET		Biomass		Yield	
X47	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	27164.78	High Sensitive
X46	14.67	Moderate	13.5	Moderate	2.12	None Sensitive	88.52	High Sensitive	299.28	High Sensitive
X45	2412.46	High Sensitive	1744.56	High Sensitive	169.77	High Sensitive	2034.24	High Sensitive	1901.77	High Sensitive
X44	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0.08	None Sensitive
X43	85.02	High Sensitive	17.04	Moderate	1.64	None Sensitive	35.85	Sensitive	31818.31	High Sensitive
X42	1863.3	High Sensitive	5212.51	High Sensitive	1692.39	High Sensitive	13071.78	High Sensitive	35197.36	High Sensitive
X41	1304.14	High Sensitive	4373.36	High Sensitive	1557.44	High Sensitive	11610.46	High Sensitive	30900.95	High Sensitive
X40	188.27	High Sensitive	299.1	High Sensitive	103.85	High Sensitive	570.71	High Sensitive	535.65	High Sensitive
X39	63.74	High Sensitive	77.6	High Sensitive	34.94	Sensitive	157.54	High Sensitive	148.6	High Sensitive
X38	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive
X37	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive
X36	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0.13	None Sensitive
X35	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive
X34	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	13563.13	High Sensitive
X33	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive
X32	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	4167.6	High Sensitive	3887.27	High Sensitive
X31	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	13617.91	High Sensitive	12704.55	High Sensitive
X30	3812.38	High Sensitive	1982.74	High Sensitive	613.86	High Sensitive	3981.14	High Sensitive	3718.23	High Sensitive
X29	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive
X28	67.74	High Sensitive	85.37	High Sensitive	29.56	Sensitive	133.72	High Sensitive	126.78	High Sensitive
X27	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive
X26	67.74	High Sensitive	85.37	High Sensitive	29.56	Sensitive	133.72	High Sensitive	126.78	High Sensitive
X25	1.21	None Sensitive	0	None Sensitive	0.29	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive
X24	1.76	None Sensitive	51.39	High Sensitive	37.77	Sensitive	79.53	High Sensitive	75.27	High Sensitive
X23	2.55	None Sensitive	363.42	High Sensitive	250.22	High Sensitive	412.58	High Sensitive	388.02	High Sensitive
X22	243	High Sensitive	115.97	High Sensitive	100.02	High Sensitive	267.58	High Sensitive	252.76	High Sensitive
X21	295.28	High Sensitive	617.88	High Sensitive	189.49	High Sensitive	1078.74	High Sensitive	1012.4	High Sensitive
X20	629.79	High Sensitive	91.62	High Sensitive	177.13	High Sensitive	221.27	High Sensitive	208.42	High Sensitive
X19	0.63	None Sensitive	20.13	Sensitive	13.55	Moderate	72.09	High Sensitive	67.01	High Sensitive
X18	29.82	Sensitive	5883.86	High Sensitive	4273.7	High Sensitive	12141.56	High Sensitive	11320.18	High Sensitive
X17	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive
X16	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive
X15	3.74	None Sensitive	439.38	High Sensitive	313.57	High Sensitive	1225.62	High Sensitive	1148.56	High Sensitive
X14	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	22264.24	High Sensitive
X13	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive
X12	8.11	Low Sensitive	2398.24	High Sensitive	1692.31	High Sensitive	3978.63	High Sensitive	3726.34	High Sensitive
X11	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive
X10	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive
X9	212.58	High Sensitive	200.66	High Sensitive	29.85	Sensitive	282.22	High Sensitive	264.98	High Sensitive
X8	1.5	None Sensitive	11.06	Moderate	10.45	Moderate	45.29	Sensitive	42.94	Sensitive
X7	1853.24	High Sensitive	6877.87	High Sensitive	5430.23	High Sensitive	11596.64	High Sensitive	12072.83	High Sensitive
X6	4.27	None Sensitive	21.82	Sensitive	18.04	Moderate	73.7	High Sensitive	68.94	High Sensitive
X5	262.6	High Sensitive	245.08	High Sensitive	39.39	Sensitive	357.68	High Sensitive	291.8	High Sensitive
X4	6.54	Low Sensitive	27.08	Sensitive	20.56	Sensitive	81.31	High Sensitive	75.75	High Sensitive
X3	5607.88	High Sensitive	8568.22	High Sensitive	1759.76	High Sensitive	13485.02	High Sensitive	40060.42	High Sensitive
X2	573.35	High Sensitive	1040.99	High Sensitive	353.07	High Sensitive	3170.83	High Sensitive	37605.97	High Sensitive
X1	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive	0	None Sensitive
	Sensitivity (%)	Effectiveness	Sensitivity (%)	Effectiveness	Sensitivity (%)	Effectiveness	Sensitivity (%)	Effectiveness	Sensitivity (%)	Effectiveness

شکل٤- طبقه‌بندی حساسیت پارامترها با استفاده از جدول ۳ و شدت رنگ قرمز (شدت حساسیت) برای ذرت در منطقه‌ی پارس‌آباد. ستون چپ میزان اثرگذاری پارامتر و ستون راست درجه‌ی حساسیت براساس جدول (۳) را نشان می‌دهد. نام پارامترها در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه شده‌اند.

با توجه به جدول (۴) درصد پارامترهای غیرحساس مدل AquaCrop برای محصول گندم در پارس آباد مغان در حدود ۱۸ درصد کمتر از محصول گندم در منطقه قزوین می‌باشد. همچنین برای محصول ذرت درصد و تعداد پارامترهای غیرحساس به ویژه برای منطقه پارس آباد به مراتب بیشتر می‌باشد و این بدین معنی است که استفاده از مدل AquaCrop برای برآورد خروجی‌هایی همچون عملکرد محصول، زیست توده و تبخیر و تعرق در این منطقه نیاز به پارامترهای حساس کمتری می‌باشد. بر خلاف منطقه پارس آباد، در منطقه قزوین و برای محصول گندم درصد پارامترهای حساس مدل کمتر از محصول ذرت می‌باشد. اگرچه در بخش قبل عنوان شد که پارامترهای بسیار حساس مدل برای برآورد عملکرد محصول گندم در هر دو منطقه مذکور یکسان می‌باشد، اما درصد پارامترهایی که در دسته حساس و با حساسیت بالا قرار می‌گیرند برای منطقه قزوین به مراتب کمتر می‌باشد. در منطقه قزوین و برای محصول گندم خروجی مربوط به عملکرد محصول و تعرق گیاه به ترتیب دارای بیشترین و کمترین درصد پارامترهای حساس می‌باشند و این در حالیست که برای محصول ذرت، خروجی زیست توده شبیه‌سازی شده توسط مدل به پارامترهای ورودی بیشتری حساس می‌باشد. همچنین در منطقه پارس آباد و برای محصول گندم خروجی مربوط به عملکرد محصول و تبخیر و تعرق به ترتیب دارای بیشترین و کمترین پارامترهای حساس می‌باشند. در یک نتیجه‌گیری کلی برای تمام حالات بررسی شده، محصولات در منطقه‌ی قزوین نسبت به نمونه‌ی مشابه در منطقه‌ی پارس آباد به پارامترهای گیاهی کمتری حساس‌اند.

جدول ۵- رتبه‌بندی پارامترهای گیاهی برای هر یک از خروجی‌های تبخیر از سطح خاک، تعرق، تبخیر-تعرق، زیست‌توده و عملکرد محصول در هر یک از مناطق قزوین و پارس‌آباد برای هریک از محصولات گندم و ذرت (* پارامترهایی که در AquaCrop نمی‌توانند مقدار اعشاری بپذیرند).

	گندم قزوین					ذرت قزوین					گندم پارس آباد					ذرت پارس آباد				
	Yield	Biomass	ET	Tr	E	Yield	Biomass	ET	Tr	E	Yield	Biomass	ET	Tr	E	Yield	Biomass	ET	Tr	E
X1 *	۳۱	۳۴	۲۲	۲۲	۲۳	۳۲	۲۸	۲۵	۲۵	۲۶	۲۷	۳۴	۱۸	۱۹	۲۳	۳۵	۳۰	۲۹	۲۸	۲۹
X2	۳۱	۳۴	۲۲	۲۲	۲۳	۲	۱۰	۸	۸	۶	۲۷	۳۴	۱۸	۱۹	۲۳	۲	۱۰	۸	۹	۸
X3	۱۱	۱۲	۷	۸	۱۱	۱	۳	۵	۲	۳	۱۱	۱۴	۷	۸	۱۰	۱	۲	۳	۱	۱
X4	۳۳	۱۷	۲۱	۱۶	۱۹	۲۷	۳۳	۳۲	۲۱	۲۰	۲۴	۱۹	۱۸	۱۸	۲۰	۲۸	۲۴	۲۲	۲۲	۲۱
X5	۳۲	۱۵	۱۹	۱۳	۱۸	۱۶	۱۲	۱۰	۹	۷	۲۲	۱۸	۱۸	۱۶	۱۷	۲۱	۱۶	۱۶	۱۴	۱۰
X6	۳۱	۳۴	۲۲	۲۲	۲۳	۳۲	۲۸	۲۵	۲۵	۲۶	۲۷	۳۴	۱۸	۱۹	۲۳	۳۰	۲۶	۲۳	۲۳	۲۲
X7	۳۰	۱۸	۹	۱۵	۸	۱۱	۶	۲	۵	۱	۱۹	۱۷	۱۰	۱۵	۱۱	۱۰	۶	۱	۲	۵
X8	۳۱	۳۴	۲۲	۲۲	۲۳	۳۲	۲۷	۲۵	۲۵	۲۶	۲۷	۳۴	۱۸	۱۹	۲۳	۳۳	۲۸	۲۵	۲۷	۲۶
X9	۳۰	۲۳	۲۲	۱۸	۲۲	۱۷	۱۳	۱۱	۱۰	۸	۲۵	۲۰	۱۸	۱۷	۱۹	۲۲	۱۷	۱۹	۱۵	۱۲
X10	۳۱	۳۴	۲۲	۲۲	۲۳	۳۲	۲۸	۲۵	۲۵	۲۶	۲۷	۳۴	۱۸	۱۹	۲۳	۳۵	۳۰	۲۹	۲۸	۲۹
X11	۳۱	۳۴	۲۲	۲۲	۲۳	۳۲	۲۸	۲۵	۲۵	۲۶	۲۷	۳۴	۱۸	۱۹	۲۳	۳۵	۳۰	۲۹	۲۸	۲۹
X12 *	۳۱	۳۴	۲۲	۲۲	۲۳	۳۲	۲۸	۲۵	۲۵	۲۶	۲۷	۳۴	۱۸	۱۹	۲۳	۱۳	۹	۵	۶	۲۰
X13 *	۱۵	۳۴	۲۲	۲۲	۲۳	۳۲	۲۸	۲۵	۲۵	۲۶	۲۷	۳۴	۱۸	۱۹	۲۳	۳۵	۳۰	۲۹	۲۸	۲۹
X14 *	۸	۳۴	۲۲	۲۲	۲۳	۵	۲۸	۲۵	۲۵	۲۶	۸	۳۴	۱۸	۱۹	۲۳	۷	۳۰	۲۹	۲۸	۲۹
X15 *	۱۰	۷	۶	۷	۱۳	۱۵	۱۱	۷	۱۱	۱۹	۹	۷	۶	۷	۱۳	۱۶	۱۲	۹	۱۱	۱۳
X16 *	۳۱	۳۴	۲۲	۲۲	۲۳	۳۲	۲۸	۲۵	۲۵	۲۶	۲۳	۱۵	۱۶	۱۳	۱۵	۳۵	۳۰	۲۹	۲۸	۲۹
X17 *	۳۱	۳۴	۲۲	۲۲	۲۳	۳۲	۲۸	۲۵	۲۵	۲۶	۲۷	۳۴	۱۸	۱۹	۲۳	۳۵	۳۰	۲۹	۲۸	۲۹
X18	۲	۱	۱	۱	۱۲	۹	۲	۱	۱	۱۵	۲	۱	۱	۱	۱۲	۱۱	۴	۲	۳	۱۸
X19	۲۱	۱۴	۱۵	۱۲	۲۰	۲۲	۱۸	۱۹	۱۷	۲۳	۲۰	۱۶	۱۵	۱۴	۱۸	۳۱	۲۷	۲۴	۲۴	۲۸
X20	۲۶	۲۱	۱۴	۱۸	۱۴	۲۹	۲۶	۱۲	۲۴	۵	۲۷	۲۴	۱۷	۱۹	۱۶	۲۴	۱۹	۱۲	۱۷	۷
X21	۲۴	۱۶	۱۰	۱۴	۹	۱۸	۱۴	۱۳	۱۲	۹	۱۵	۱۰	۹	۹	۸	۱۷	۱۳	۱۱	۱۰	۹
X22 *	۲۸	۲۰	۱۷	۱۸	۱۶	۲۴	۲۱	۱۶	۱۹	۱۰	۲۷	۲۱	۱۸	۱۹	۲۲	۲۳	۱۸	۱۵	۱۶	۱۱
X23	۳۱	۲۳	۲۰	۲۲	۲۱	۱۹	۱۵	۱۴	۱۳	۲۲	۲۷	۲۴	۱۸	۱۹	۲۱	۱۹	۱۵	۱۰	۱۲	۲۴
X24	۳۱	۲۴	۲۲	۲۲	۲۳	۲۸	۲۵	۲۱	۲۲	۲۴	۲۷	۲۴	۱۸	۱۹	۲۳	۲۹	۲۵	۱۷	۲۱	۲۵
X25 *	۲۹	۲۲	۱۸	۱۸	۱۷	۳۲	۲۸	۲۵	۲۵	۲۵	۲۷	۲۴	۱۳	۱۹	۱۴	۳۵	۳۰	۲۸	۲۸	۲۷
X26	۱۶	۱۰	۱۱	۹	۵	۲۰	۱۶	۱۷	۱۴	۱۷	۱۷	۱۱	۱۱	۱۰	۶	۲۶	۲۱	۲۰	۱۸	۱۵
X27	۳۱	۲۴	۲۲	۲۲	۲۳	۳۲	۲۸	۲۵	۲۵	۲۶	۲۷	۲۴	۱۸	۱۹	۲۳	۳۵	۳۰	۲۹	۲۸	۲۹
X28 *	۱۶	۱۰	۱۱	۹	۵	۲۰	۱۶	۱۷	۱۴	۱۷	۱۶	۱۱	۱۱	۱۰	۶	۲۶	۲۱	۲۰	۱۸	۱۵
X29	۳۱	۲۴	۲۲	۲۲	۲۳	۳۲	۲۸	۲۵	۲۵	۲۶	۲۷	۲۴	۱۸	۱۹	۲۳	۳۵	۳۰	۲۹	۲۸	۲۹
X30	۹	۶	۴	۴	۱	۱۲	۷	۶	۶	۲	۷	۶	۴	۴	۱	۱۴	۸	۷	۷	۲
X31	۳	۲	۲۲	۲۲	۲۳	۸	۱	۲۵	۲۵	۲۶	۴	۲	۱۸	۱۹	۲۳	۹	۱	۲۹	۲۸	۲۹
X32 *	۷	۵	۲۲	۲۲	۲۳	۱۳	۸	۲۵	۲۵	۲۶	۶	۵	۱۸	۱۹	۲۳	۱۲	۷	۲۹	۲۸	۲۹
X33 *	۳۱	۲۴	۲۲	۲۲	۲۳	۳۲	۲۸	۲۵	۲۵	۲۶	۲۶	۲۱	۱۸	۱۹	۲۳	۳۵	۳۰	۲۹	۲۸	۲۹
X34 *	۴	۲۴	۲۲	۲۲	۲۳	۱۰	۲۸	۲۵	۲۵	۲۶	۳	۲۴	۱۸	۱۹	۲۳	۸	۳۰	۲۹	۲۸	۲۹
X35 *	۳۱	۲۴	۲۲	۲۲	۲۳	۳۲	۲۸	۲۵	۲۵	۲۶	۲۷	۲۴	۱۸	۱۹	۲۳	۳۵	۳۰	۲۹	۲۸	۲۹
X36	۲۵	۲۴	۲۲	۲۲	۲۳	۳۰	۲۸	۲۵	۲۵	۲۶	۲۱	۲۴	۱۸	۱۹	۲۳	۳۳	۳۰	۲۹	۲۸	۲۹
X37	۳۱	۲۴	۲۲	۲۲	۲۳	۳۲	۲۸	۲۵	۲۵	۲۶	۲۷	۲۴	۱۸	۱۹	۲۳	۳۵	۳۰	۲۹	۲۸	۲۹
X38 *	۳۱	۲۴	۲۲	۲۲	۲۳	۳۲	۲۸	۲۵	۲۵	۲۶	۲۷	۲۴	۱۸	۱۹	۲۳	۳۵	۳۰	۲۹	۲۸	۲۹
X39 *	۱۸	۱۳	۱۱	۷	۲۳	۱۹	۲۰	۱۶	۱۶	۱۶	۱۸	۱۳	۱۴	۱۹	۲۳	۲۵	۲۰	۱۸	۲۰	۱۷
X40 *	۲۶	۱۹	۱۶	۱۵	۲۶	۳۴	۲۶	۱۵	۲۰	۱۲	۲۷	۲۱	۱۸	۱۹	۲۳	۱۸	۱۴	۱۴	۱۳	۱۳
X41 *	۵	۳	۲	۲	۳	۷	۵	۴	۴	۱۳	۵	۳	۲	۲	۲	۵	۵	۶	۵	۶
X42 *	۱	۴	۳	۳	۴	۴	۴	۳	۳	۱۱	۱	۴	۳	۳	۲	۳	۳	۴	۴	۴
X43 *	۶	۲۴	۲۲	۲۲	۲۳	۳	۲۰	۲۴	۱۸	۱۴	۱۲	۲۴	۱۸	۱۹	۲۳	۴	۲۹	۲۷	۲۵	۱۴
X44 *	۱۹	۲۴	۲۲	۲۲	۲۳	۳۰	۲۸	۲۵	۲۵	۲۶	۲۷	۲۴	۱۸	۱۹	۲۳	۳۴	۳۰	۲۹	۲۸	۲۹
X45	۱۲	۸	۸	۵	۲	۱۴	۹	۹	۷	۴	۱۰	۸	۸	۵	۴	۱۸	۱۱	۱۳	۸	۳
X46	۱۴	۹	۵	۶	۱۰	۲۴	۲۲	۲۳	۲۳	۲۱	۱۴	۹	۵	۶	۵	۲۰	۲۳	۲۶	۲۶	۱۹
X47 *	۱۳	۲۴	۲۲	۲۲	۲۳	۶	۲۸	۲۵	۲۵	۲۶	۱۳	۲۴	۱۸	۱۹	۲۳	۶	۳۰	۲۹	۲۸	۲۹

جدول ٦- رتبه‌بندی پارامترها برای محصولات گندم و ذرت به تفکیک و مجموع دو منطقه (* پارامترهایی که در AquaCrop نمی‌توانند مقدار اعشاری بپذیرند).

	گندم			ذرت			مجموع دو محصول در دو منطقه
	پارس آباد	قزوین	مجموع	پارس آباد	قزوین	مجموع	
X1 *	۱۱۱	۱۲۲	۲۳۳	۱۵۱	۱۳۶	۲۸۷	۵۲۰
X2	۱۱۱	۱۲۲	۲۳۳	۳۷	۳۴	۷۱	۳۰۴
X3	۵۰	۴۹	۹۹	۸	۱۴	۲۲	۱۲۱
X4	۹۹	۹۶	۱۹۵	۱۱۷	۱۱۳	۲۳۰	۴۲۵
X5	۹۱	۸۷	۱۷۸	۷۷	۵۴	۱۳۱	۳۰۹
X6	۱۱۱	۱۲۲	۲۳۳	۱۲۴	۱۳۶	۲۶۰	۴۹۳
X7	۷۲	۸۰	۱۴۲	۲۴	۲۵	۴۹	۱۹۱
X8	۱۱۱	۱۲۲	۲۳۳	۱۳۸	۱۳۵	۲۷۳	۵۰۶
X9	۹۹	۱۱۵	۲۱۴	۸۵	۵۹	۱۴۴	۳۵۸
X10	۱۱۱	۱۲۲	۲۳۳	۱۵۱	۱۳۶	۲۸۷	۵۲۰
X11	۱۱۱	۱۲۲	۲۳۳	۱۵۱	۱۳۶	۲۸۷	۵۲۰
X12 *	۱۱۱	۱۲۲	۲۳۳	۵۳	۱۳۶	۱۸۹	۴۲۲
X13 *	۱۱۱	۱۰۶	۲۱۷	۱۵۱	۱۳۶	۲۸۷	۵۰۴
X14 *	۹۲	۹۹	۱۹۱	۱۲۳	۱۰۹	۲۳۲	۴۲۳
X15 *	۴۲	۴۳	۸۵	۷۱	۶۳	۱۳۴	۲۱۹
X16 *	۸۲	۱۲۲	۲۰۴	۱۵۱	۱۳۶	۲۸۷	۴۹۱
X17 *	۱۱۱	۱۲۲	۲۳۳	۱۵۱	۱۳۶	۲۸۷	۵۲۰
X18	۱۷	۱۷	۳۴	۳۸	۲۸	۶۶	۱۰۰
X19	۸۳	۸۲	۱۶۵	۱۳۴	۹۹	۲۳۳	۳۹۸
X20	۱۰۳	۹۳	۱۹۶	۷۹	۹۶	۱۷۵	۳۷۱
X21	۵۱	۷۳	۱۲۴	۶۰	۶۶	۱۲۶	۲۵۰
X22 *	۱۰۷	۹۹	۲۰۶	۸۳	۹۰	۱۷۳	۳۷۹
X23	۱۰۹	۱۱۸	۲۲۷	۸۰	۸۳	۱۶۳	۳۹۰
X24	۱۱۱	۱۲۲	۲۳۳	۱۱۷	۱۲۰	۲۳۷	۴۷۰
X25 *	۹۷	۱۰۴	۲۰۱	۱۴۸	۱۳۵	۲۸۳	۴۸۴
X26	۵۵	۵۱	۱۰۵	۱۰۰	۸۴	۱۸۴	۲۸۹
X27	۱۱۱	۱۲۲	۲۳۳	۱۵۱	۱۳۶	۲۸۷	۵۲۰
X28 *	۵۴	۵۱	۱۰۵	۱۰۰	۸۴	۱۸۴	۲۸۹
X29	۱۱۱	۱۲۲	۲۳۳	۱۵۱	۱۳۶	۲۸۷	۵۲۰
X30	۲۲	۲۴	۴۶	۳۸	۳۳	۷۱	۱۱۷
X31	۶۶	۷۲	۱۳۶	۹۶	۸۵	۱۸۱	۳۱۹
X32 *	۷۱	۷۹	۱۵۰	۱۰۵	۹۷	۲۰۲	۳۵۲
X33 *	۱۰۷	۱۲۲	۲۲۹	۱۵۱	۱۳۶	۲۸۷	۵۱۶
X34 *	۸۷	۹۵	۱۸۲	۱۲۴	۱۱۴	۲۳۸	۴۲۰
X35 *	۱۱۱	۱۲۲	۲۳۳	۱۵۱	۱۳۶	۲۸۷	۵۲۰
X36	۱۰۵	۱۱۶	۲۲۱	۱۴۹	۱۳۴	۲۸۳	۵۰۴
X37	۱۱۱	۱۲۲	۲۳۳	۱۵۱	۱۳۶	۲۸۷	۵۲۰
X38 *	۱۱۱	۱۲۲	۲۳۳	۱۵۱	۱۳۶	۲۸۷	۵۲۰
X39 *	۶۶	۶۲	۱۲۸	۱۰۰	۹۴	۱۹۴	۳۲۲
X40 *	۱۰۸	۹۳	۲۰۱	۷۲	۹۷	۱۶۹	۳۷۰
X41 *	۱۵	۱۵	۳۰	۲۷	۳۳	۶۰	۹۰
X42 *	۱۳	۱۵	۲۸	۱۸	۲۵	۴۳	۷۱
X43 *	۹۶	۹۷	۱۹۳	۹۹	۷۹	۱۷۸	۳۷۱
X44 *	۱۱۱	۱۱۰	۲۲۱	۱۵۰	۱۳۴	۲۸۴	۵۰۵
X45	۳۵	۳۵	۷۰	۵۳	۴۳	۹۶	۱۶۳
X46	۳۹	۴۴	۸۳	۱۱۴	۱۱۳	۲۲۷	۳۱۰
X47 *	۹۷	۱۰۴	۲۰۱	۱۲۲	۱۱۰	۲۳۲	۴۳۳

در نهایت برای تحلیل هرچه بهتر ترتیب پارامترهای حساس ورودی مدل AquaCrop برای برآورد خروجی‌های همچون عملکرد محصول، زیست توده، تبخیر و تعرق و تبخیر از روشی مبتنی بر رتبه-بندی (Ranking based method) استفاده گردید که نتایج آن در جدول (۵) ارائه شده است. بدین ترتیب که به پارامتر دارای بیشترین حساسیت برای هر خروجی مدل، رتبه‌ی یک تعلق گرفته و بقیه پارامترها نسبت به آن رتبه‌ی صعودی می‌گیرند. پارامترهای دارای کمترین حساسیت بیشترین رتبه را دریافت کرده‌اند. جدول (۶) مجموع رتبه‌ی بدست آمده برای پارامترهای مورد مطالعه را نشان می‌دهند. به عنوان مثال برای گندم در منطقه قزوین رتبه پارامتر X1 برابر با ۱۲۲ است که از مجموع رتبه‌های این پارامتر در ۵ خروجی مورد مطالعه از مدل اکواکراپ یعنی تبخیر، تعرق، تبخیروتعرق، زیست توده و عملکرد (۱۲۲=۲۳+۲۲+۲۲+۲۴+۳۱) محاسبه شده است.

همانطور که در جدول (۶) مشخص است پارامتر درجه روز رشد از کاشت به بلوغ (X42) برای محصول گندم و پارامتر دمای بیشینه که با افزایش آن رشد محصول زیاد نمی‌شود (X3) برای محصول ذرت در مجموع دو منطقه‌ی مورد بررسی، حساس‌ترین پارامترها بوده‌اند. حداکثر پوشش تاج در کسر پوشش خاک (X30) برای خروجی تبخیر از سطح خاک، پارامتر ضریب گیاهی تکامل تاج قبل از پیری (X18) برای خروجی‌های تعرق و تبخیر–تعرق، پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده (X31) برای خروجی زیست‌توده و پارامتر درجه روز رشد از کاشت به بلوغ (X42) برای خروجی عملکرد در تمام حالات بررسی شده دارای کمترین رتبه (بیشترین حساسیت) می‌باشند. مطالعات هیو مین و همکاران و جین و همکاران نتایج مطالعهٔ حاضر در ارتباط با محصول گندم را تأیید می‌کند که در بخش نتیجه‌گیری بصورت کامل شرح داده شده است (Hui-min et al., 2017; Jin et al., 2018).

در مقایسه با نتایج هویی مین و همکاران مشخص است که پارامترهای دمای بالاتر از آن که رشد محصول با افزایش دما افزایش نمی یابد (X3)، ضریب گیاهی زمانی که تاج کامل است قبل از پیری (X18)، سطح خاک تحت پوشش نهال در ۹۰٪ پیدایش (X26) ، تعداد گیاهان در هکتار (X28)، بهره وری آب نرمال شده (X31 و X32)، شاخص برداشت مرجع (X34)، افزایش پوشش تاج (X45)، کاهش پوشش تاج (X46) و درجه روز رشد ساخت شاخص برداشت در طی روند تولید (X47) پارامترهای حساس بدست آمده بصورت مشترک برای عملکرد محصول گندم در مناطق پکن و قزوین می‌باشد (Hui-min et al., 2017). همچنین همراستا با نتایج جین و همکاران بهره وری آب نرمال شده (X32)، شاخص برداشت مرجع (X34)، افزایش پوشش تاج (X45) و کاهش پوشش تاج (X46) بصورت مشترک برای گندم قزوین، پکن و کانادا حساس می‌باشند (Jin et al., 2018).

نتایج این پژوهش سازگاری بسیار زیادی با نتایج حاصل از تحلیل حساسیت کلی گندم با روش EFAST در دو منطقه از پکن و منطقه‌ای از کانادا دارد که نشان می‌دهد با اینکه روش تحلیل حساسیت موضعی (Local Sensitivity Analysis) پیچیدگی‌های محاسباتی و مفهومی روش‌های تحلیل حساسیت کلی (Global Sensitivity Analysis) را ندارد اما نتایج مشابهی را با مطالعات یاد شده تولید کرده است. مسلماً چنین برداشتی برای حالات دیگر (مناطق، گیاهان، مدل‌ها، ...) قابل تعمیم نبوده و برای حالات یاد شده باید بررسی شود که نتایج حاصل از روش های مختلف تحلیل حساسیت چگونه است.

نتیجه‌گیری

اگرچه مدل‌سازی صحیح رشد گیاه نیازمند اطلاعات و داده‌های متعددی می‌باشد اما اندازه‌گیری همه‌ی آن‌ها میسر نبوده و از طرفی اهمیت و تاثیرگذاری هر کدام از داده‌های مذکور بر خروجی فرآیند مدلسازی یکسان نمی‌باشد. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و شناسائی پارامترهای موثر بر عملکرد مدل گیاهی AquaCrop در شبیه‌سازی مولفه‌هایی همچون عملکرد محصول، زیست توده و تبخیر و تعرق در دو منطقه جغرافیایی قزوین و پارس آباد و با استفاده از یک روش تحلیل حساسیت موضعی به انجام رسیده است. با توجه با تعداد کل پارامترهای ورودی، مشخص است که در کمترین حالت ۲۸ درصد و در بیشترین حالت ۸۳ درصد پارامترهای ورودی فاقد حساسیت بوده‌اند.

منابع

حسن‌لی، م.، افراسیاب، پ.، ابراهیمیان، ح. ۱۳۹۴. ارزیابی مدل های AquaCropو SALTMED در تخمین عملکرد محصول ذرت و شوری خاک. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۶: ۴۸۷-۴۹۸.

رمضانی‌اعتدالی، ه.، لیاقت، ع.م.، پارسی‌نژاد، م.، توکلی، ع. ۱۳۹۵. واسنجی و اعتبارسنجی مدل AquaCrop در مدیریت آبیاری غلات مهم. مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۱۰(۳): ۳۸۹-۳۹۷.

شکوهی، ع. عزیزیان، ا. جماعت، سینگ، و. ۱۳۹۶. تحلیل حساسیت مدل متنی بر موج سینماتیک نسبت به روش‌های مختلف برآورد نفوذ و ضرایب زبری. نشریه علمی–پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز. ۹(۳): ۲۷۵-۲۶۲.

ضیایی، غ. بابازاده، ح. عباسی، ف و فریدون، ک. ۱۳۹۳. بررسی عملکرد مدل‌های AquaCrop و CERES-Maize در برآورد

اجزای بیلان آب خاک و عملکرد ذرت. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۵(۴): ۴۴۵-۴۳۵.

فتح آبادی، ا. روحانی، ح و سیدیان، س. ۱۳۹۶. تعیین اهمیت نسبی پارامترهای دو مدل هیدرولوژیکی یکپارچه با استفاده از روشهای موریس، سوبول و شاخص آنتروپی. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۴(۲):۲۱-۱.

کوثری، م. صارمی نایینی، م. تازه، م و رحیم فروزه، م. ۱۳۸۹. آنالیز حساسیت چهار رابطه برآورد زمان تمرکز در حوزه های آبخیز. فصلنامه علمی-پژوهشی خشک بوم. ۱(۱): ۶۷-۵۵.

غیاث، م. ۱۳۹۳. مقدمه‌ای بر روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو. فصلنامه‌ی علمی—ترویجی بسپارش. ۴: ۷۷-۶۷.

Gholami, A. R. and Pirmoradiyan, N. 2011. Calibration of a simple model (VSM) for yield prediction of corn under different water and nitrogen managements. Journal of Water and Soil, 25(2):258-265.

Holzworth D, Huth NI, Fainges J, Brown H, Zurcher E, Cichota R, et al. 2018. APSIM Next Generation: Overcoming challenges in modernising a farming systems model. Environmental Modelling and Software. 103:43–51.

Hui-min X., Xin-gang X. U., Zhen-hai L. I., Yi-jin C., Hai-kuan, F. and Gui-jun Y. 2017. Global sensitivity analysis of the AquaCrop model for winter wheat under different water treatments based on the extended Fourier amplitude sensitivity test. J. Integrated. Agriculture. 16(11):2444–2458.

Jin X., Li Z., Nie C., Xu X., Feng H., and Guo W. 2018. Field Crops Research Parameter sensitivity analysis of the AquaCrop model based on extended fourier amplitude sensitivity under di ff erent agro-meteorological conditions and application. F. Crop. Res., vol. 226, no. July, 1–15.

Jones J., Hoogenboom G, Porter C., Boote K., Batchelor W., Hunt L., et al. 2003. The DSSAT cropping system model. European Journal of Agronomy. 18(3–4):235–65.

Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. 2009. Aquacrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. main algorithms and software description. Agronomy Journal. 101(3):438–47.

Stöckle CO, Donatelli M, Nelson R. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. In: European Journal of Agronomy.289–307.

Steduto P., Hsiao T.C., Raes D., Fereres E. 2009. AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water. I. Concepts. Agronomy Journal. 101:426–437.

Vanuytrecht E., Raes D., and Willems P. 2014. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. Environmental Modelling and Software. 62:351–360.

Vanuytrecht E., Raes D., and Willems P. 2014. Environmental Modelling & Software Global sensitivity analysis of yield output from the water productivity model. Environ. Environmental Modelling and Software. 51:323–332.

Wang, J., Li, X., Lu, L. and Fang, F. 2013. Environmental Modelling and Software Parameter sensitivity analysis of crop growth models based on the extended Fourier Amplitude Sensitivity Test method. Environ. Environmental Modelling and Software. 48:171–182.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 13, Feb.-Mar. 2020, p. 1565-1579

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۳، بهمن - اسفند ۱۳۹۸، ص. ۱۵۷۹-۱۵۶۵

Local sensitivity Analysis of AquaCrop Model for Wheat and Maize in Qazvin Plain and Moghan Pars-Abad in Iran

V. Adabi[1], A. Azizian[2], H. Ramezani Etedali[3*], A. Kaviani[4], B. Ababaei[5]
Recived: Jun.30, 2019 Accepted: Sept.15, 2019

Abstract

Application of crop models is essential for numerous purposes including prediction of crop yield and water requirement, evaluation of the impact of climate change, drought and irrigation and agronomic management on crop growth and development. One challenge with the application of these models is the large number of input parameters. Measurement of input parameters can be time-consuming, costly and sometimes practically impossible and they are usually estimated using calibration and inverse modelling. Sensitivity Analysis is a procedure during which the impact of input parameters on target output variables is investigated. During model calibration, sensitive parameters must be measured or estimated with higher accuracy. Analysis of the sensitivity of closed-source models is not as straightforward as it is with open-source models. In this research, the impact of 47 crop parameters on five output variables of AquaCrop, a closed-source crop model, namely soil evaporation, crop transpiration, evapotranspiration, biomass at harvest and grain yield, were studied for wheat and maize in Qazvin Plain and Moghan Pars-Abad in Iran. The sensitivity of the selected parameters was evaluated with the relative Nash–Sutcliffe Efficiency Index. Increase in canopy cover, degree-days from sowing to maturity, degree-days from sowing to start of senescence and maximum canopy cover in fraction of soil cover were identified as sensitive parameters for both crops. Therefore, accurate determination of crop growth stages, in calendar days or degree-days, which are easier to measure than most of the other parameters, is of greater importance. In Qazvin and for all output variables, around half of the selected parameters were ineffective and considered unimportant during calibration. Despite that the methods of local SA are computationally and conceptually simpler than the methods of global SA, the results showed that this method could lead to similar outcomes to previous studies in which global methods were used.

Keywords: AquaCrop, Sensitivity Analysis, Local Sensitivity, Grain Yield, Biomass

1-M.Sc. Student, Department of Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University
2-Assistant professor, Department of Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University
3-Associate professor, Department of Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University
4-Assistant professor, Department of Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University
5- The Centre for Crop Science,The Queensland Alliance for Agriculture and Food Innovation (QAAFI), The University of Queensland, Australia
(*- Corresponding Author Email: Ramezani@eng.ikiu.ac.ir)