

## ارزیابی مدل WOFOST در شبیه‌سازی عملکرد دو رقم برنج تحت

### رژیم های مختلف آبیاری

زهرا سعادت، نادر پیرمردیان<sup>1\*</sup>، ابراهیم امیری و مجتبی رضایی

دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان؛

zsaadati66@yahoo.com

استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان؛

npirmorad@yahoo.com

استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان؛

eamiri57@yahoo.com

مریی پژوهش موسسه تحقیقات برنج کشور؛

mrezaei@yahoo.com

### چکیده

در راستای افزایش بهره‌وری آب، آگاهی از واکنش گیاه به تنش آب و نیز استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی واکنش گیاه به عوامل مختلف محیطی به ویژه آب، مورد نیاز است. مدل‌هایی که اثرات مقادیر مختلف آب بر عملکرد محصول را به صورت کمی شبیه‌سازی می‌کنند، ابزارهایی مفید در مدیریت آب در سطح مزرعه و بهینه‌سازی بهره‌وری آب هستند. در این تحقیق از مدل WOFOST جهت شبیه‌سازی پاسخ عملکرد دو رقم برنج محلی تحت پنج رژیم آبیاری شامل آبیاری برنج به صورت غرقاب دائم و آبیاری صفر، سه، شش و نه روز پس از ناپدید شدن آب از روی سطح زمین در منطقه رشت در دو فصل زراعی 1382 و 1383 استفاده شد. مدل با استفاده از داده‌های سال 1382 واسنجی شد و بر این اساس ضرایب واسنجی مدل بدست آمد و ارزیابی مدل بر پایه داده‌های سال 1383 انجام گرفت. با توجه به نتایج، مقدار ریشه میانگین مربعات خطای نسبی شبیه‌سازی عملکرد توسط مدل برای ارقام بینام و حسنی در سال 1382 به ترتیب برابر 12/57 و 5/01 درصد و در سال 1383 به ترتیب برابر 7/94 و 13/71 درصد بدست آمد. مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده بهره‌وری آب بر اساس مجموع آب مصرفی و بارش بسیار به هم نزدیک بود. به طور کلی یافته‌های تحقیق، کارایی مطلوب مدل WOFOST در شبیه‌سازی فرآیند رشد و تاثیر آب بر عملکرد و بهره‌وری آب برنج در مناطق مرطوب را تایید می‌نماید. از اینرو کاربرد مدل در تعیین استراتژی‌های بهینه مدیریت برای بهبود بهره‌وری آب در کشت برنج توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مدل WOFOST، عملکرد برنج، بهره‌وری آب

1. آدرس نویسنده مسئول: رشت، کیلومتر 6 جاده تهران، دانشگاه گیلان، دانشکده کشاورزی - کدپستی: 4188958643 - صندوق

پستی: 4188958643

\* دریافت: اسفند، 1390 و پذیرش: شهریور، 1391

## مقدمه

برنج نقش مهمی در تغذیه نیمی از مردم جهان دارد که بیشتر آنها در کشورهای در حال توسعه زندگی می کنند. در حدود 75 درصد از کل برنج تولید شده در قاره آسیا از اراضی پست شالیزاری به دست می آید. این مقدار تولید نزدیک به 50 درصد آب آبیاری اختصاص داده شده برای کشاورزی را مصرف می کند (گوئرا و همکاران، 1998).

آب مهمترین جزء برای تولید پایدار در مناطق برنج خیز است، کاهش سرمایه گذاری در مسایل زیربنایی آبیاری رقابت برای بدست آوردن آب را افزایش می دهد. بنابراین ضروری است که با مدیریت صحیح آب، بهره وری آب را افزایش دهیم. برای بهبود مدیریت آبیاری از مدل های شبیه ساز رشد گیاه می توان به عنوان یک ابزار استفاده نمود. مدل های گیاهی برای اهداف مختلفی استفاده می شوند. به طور کلی این مدل ها نتایج آزمایشات و تحقیقات کشاورزی را مورد تجزیه و تحلیل قرار می دهند (استدوتو و همکاران، 2009). برای تعیین زمان بندی مطلوب در کم آبیاری نیاز به درک درستی از واکنش گیاه به تنش آبی می باشد، که این امر می تواند با استفاده از مدل های شبیه ساز رشد گیاه صورت گیرد (فراهانی و همکاران، 2009).

مدل WOFOST در چارچوب مطالعات جهانی امنیت غذا و پتانسیل جهانی تولید غذا، توسط مرکز جهانی مطالعات غذایی در همکاری با دانشگاه واخنینگن و مرکز بیولوژیکی کشاورزی و حاصلخیزی خاک واخنینگن ایجاد گردید (بومن و همکاران، 1996). مدل مذکور شبیه سازی رشد گیاه را بر اساس میزان تشعشع رسیده انجام می دهد. مدل WOFOST یک عضو از خانواده مدل هایی است که در دانشگاه واخنینگن توسط دوویت پایه گذاری شد و جزء مدل هایی است که از مدل SUCROS مشتق شده است (ون ایترسام و همکاران، 2003).

اصول اولیه این مدل توسط ون کولن و ولف نوشته شده است. مدل WOFOST در ابتدا به عنوان مدل شبیه سازی رشد گیاه برای ارزیابی عملکرد پتانسیل گیاهان مختلف در کشورهای استوایی توسعه یافت (ون کولن و ون دیپن، 1990). اولین پژوهش با استفاده از مدل WOFOST، منجر به افزایش استفاده از کود شیمیایی در سه کشور آفریقایی بوركینافاسو، غنا و کنیا گردید (CWFS، 1985). در چارچوب نمایش منابع اکولوژیکی کشت با سنجش از دور و مدل های شبیه سازی، WOFOST به عنوان ابزاری برای برآورد پتانسیل عملکرد در برنامه امنیت غذایی در زامبیا مطرح شد و برای ذرت واسنجی و اعتباریابی شد و مورد آزمایش قرار گرفت (هیجن، 1990؛ ولف و همکاران، 1989).

روتر و همکاران (1997) واسنجی و اعتباریابی مدل را برای ذرت در کنیا انجام دادند و نتیجه گرفتند که مدل مقدار عملکرد را با خطای 15 درصدی پیش بینی می کند. مدل WOFOST برای برآورد تولید پتانسیل گیاهان در اتحادیه اروپا به عنوان تابعی از شرایط خاک و اقلیم مورد استفاده قرار گرفت (رابینگ و ون لستینجن، 1992). هم چنین WOFOST برای مطالعات ارزیابی اثر تغییر شرایط اقلیمی بر رشد محصول مورد استفاده قرار گرفته است (ولف و ون دیپن، 1994). این مدل در سیستم پایش رشد گیاهی برای تخمین عملکرد گیاهان مختلف نظیر گندم، جو، پنبه، آفتابگردان، برنج، سویا، سیب زمینی و دانه های روغنی در اتحادیه اروپا مورد استفاده قرار گرفت. در این سیستم مدل با سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) متصل گردید (بوگارد و همکاران، 2002).

ایتزینگر و همکاران (2004) سه مدل SWAP، CERES و WOFOST را برای شبیه سازی رشد و نمو، جو و گندم در شرایط لایسیمیتری برای سه نوع خاک در منطقه ای واقع در اتریش در طول دو سال 2000 و 2001 استفاده کردند. در این آزمایش مقادیر اندازه گیری شده

سه گیاه برنج، گندم و پنبه به ترتیب 0/94، 1/39 و 0/23 کیلوگرم بر مترمکعب و  $WP_{ETQ}$  (میزان تولید نسبت به مجموع تبخیرتعرق و نفوذ عمقی) برای برنج، گندم و پنبه را به ترتیب 0/84، 1/041 و 0/21 کیلوگرم بر متر مکعب گزارش کرد. امیری (1385) در تحقیقی مقدار بهره‌وری آب شامل  $WP_I$ ،  $WP_{ET}$ ،  $WP_T$  و  $WP_{ETQ}$  برنج رقم هاشمی را در مدیریت‌های آبیاری مختلف، با استفاده از مدل به ترتیب 0/69، 0/89، 1/35، 0/51 کیلوگرم دانه بر متر مکعب محاسبه کرد.

هدف از این مطالعه واسنجی و ارزیابی توانایی مدل WOFOST در شبیه‌سازی عملکرد دو رقم برنج بینام و حسنی تحت پنج تیمار آبیاری مختلف در منطقه رشت بود.

#### مواد و روشها

##### موقعیت محل آزمایش

بخشی از اطلاعات مورد نیاز این پژوهش از یک آزمایش مزرعه‌ای انجام شده در منطقه رشت (رضایی و نحوی، 1386) با عرض جغرافیایی  $12^{\circ} 37'$  شمالی و طول جغرافیایی  $39^{\circ} 49'$  شرقی و ارتفاع 36/7 متر از سطح دریا، در طی 2 سال 1382 و 1383 بدست آمد. اطلاعات هواشناسی شامل بارندگی، ساعات آفتابی روزانه، سرعت باد، دما و رطوبت نسبی از ایستگاه هواشناسی مجاور محل آزمایش برداشت شد. برای یک دوره آماری 40 ساله (1965-2005) محدوده تغییرات دمای رشت از 14/4 تا 18/3 درجه سانتی‌گراد با میانگین دمای 16/1 درجه سانتی‌گراد، محدوده تغییرات رطوبت نسبی از 75 تا 88 درصد با میانگین رطوبت نسبی 82/3 درصد است. هم‌چنین میانگین بارش در دوره آماری فوق 1371/75 میلی‌متر است. پارامترهای هواشناسی در طول فصل رشد در منطقه مورد مطالعه در جدول 1 ارائه شده است.

رطوبت خاک، اجزای بیلان آب، سرعت پیشروی ریشه و عملکرد گیاه با مقادیر شبیه‌سازی شده مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل CERES و SWAP نسبت به مدل WOFOST عملکرد را با دقت بیشتری شبیه‌سازی می‌کند ولی هر سه مدل رطوبت خاک را تقریباً با نتایج مشابهی شبیه‌سازی کردند، دامنه ریشه میانگین مربعات خطای رطوبت خاک برای جو بین 0/71 تا 4/67 درصد و برای گندم 2/32 تا 6/77 درصد بدست آمد. امیری و همکاران (1390) مدل رشد گیاهی WOFOST در شرایط مدیریت آبیاری را بر روی گیاه برنج ارزیابی کردند. نتایج نشان داد به طور متوسط مقادیر ریشه میانگین مربعات خطای مدل برای ماده خشک کل بین 389 تا 553 کیلوگرم بر هکتار، ماده خشک پانیکول بین 139 تا 420 کیلوگرم بر هکتار و شاخص سطح برگ بین 0/46 تا 0/58 مترمربع سطح برگ در هر مترمربع سطح زمین بدست آمد، هم‌چنین ریشه میانگین مربعات خطای نسبی برای ماده خشک کل بین 10 تا 14 درصد، ماده خشک پانیکول بین 7 تا 16 درصد و شاخص سطح برگ بین 54 تا 83 درصد بدست آمد.

مدل WOFOST مقدار شاخص سطح برگ را در این مطالعه بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده آن شبیه‌سازی نمود. این مدل برای شبیه‌سازی گیاه ذرت در چین (یانگ و همکاران، 2004)، گندم در چین (سانگ و همکاران، 2006) و گندم در شمال ایتالیا (مارلتو و همکاران، 2007) استفاده شد. هم‌چنین کانفالونیری و همکاران (2009) مدل WOFOST را با دو مدل CropSyst و WARM در شبیه‌سازی رشد برنج در منطقه‌ای واقع در ایتالیا مقایسه کردند. برای هر سه مدل مقادیر بازده مدل بزرگتر از 0/9 و ضریب همبستگی بزرگتر از 0/98 بدست آمد.

سینگ (2005) از مدل SWAP برای محاسبه اجزای بهره‌وری آب برای گیاهان برنج، گندم و پنبه در منطقه سیرسای هند استفاده کرد و میزان  $WP_{ET}$  را برای

جدول 1- پارامترهای هواشناسی در طول فصل رشد برای دو رقم بینام و حسنی در منطقه رشت

1383		1382		پارامترهای هواشناسی در طول فصل رشد
حسنى	بینام	حسنى	بینام	
25/84	26/07	26/23	26/04	تشنه با طول موج کوتاه، $MJm^{-2}d^{-1}$
18/7	18/7	19/4	19/4	میانگین حداقل دمای روزانه، $^{\circ}C$
27/3	27/5	28/2	28/3	میانگین حداکثر دمای روزانه، $^{\circ}C$
78/9	78/6	76/05	76	درصد رطوبت نسبی
291/8	309/1	300/2	316	تبخیر، mm
317	317	127/2	130/1	کل بارش، mm

## اطلاعات خاک محل آزمایش

اطلاعات رطوبت در نقاط ظرفیت زراعی، پژمردگی دائم، اشباع و رطوبت بحرانی و هدایت هیدرولیکی اشباع در محدوده توسعه ریشه دارد، که با استفاده از برنامه RETC اطلاعات مورد نیاز محاسبه گردید.

برخی خصوصیات خاک محل آزمایش به عنوان بخشی از اطلاعات ورودی مدل WOFOST در جدول 2 ارائه شده است. مدل WOFOST فقط یک لایه عمق توسعه ریشه دوانی را در نظر می گیرد. این مدل نیاز به

جدول 2- برخی خصوصیات خاک محل آزمایش

$\theta_s(cm^3/cm^3)$	$\theta_{PWP}(cm^3/cm^3)$	$\theta_{FC}(cm^3/cm^3)$	درصد رس	درصد سیلت	درصد شن	عمق (سانتی - متر)
0/61	0/23	0/34	46	40/67	13/33	0-30

$\theta_{FC}$ ،  $\theta_{PWP}$  و  $\theta_s$  به ترتیب رطوبت در نقاط ظرفیت زراعی، پژمردگی دائم و اشباع

## عملیات مزرعه ای

مربوط به تاریخ کاشت و برداشت برای ارقام بینام و حسنی در جدول 3 ارائه شده است. تمام مراحل کاشت، داشت و برداشت به روش معمول منطقه و زیر نظر متخصصین مربوطه انجام گرفت. قبل از برداشت ارتفاع بوته و تعداد پنجه هر کرت و سایر صفات پس از برداشت بر اساس تعداد 5 نمونه از هر پلات اندازه گیری شد. عملکرد تیمارها با حذف اثر حاشیه و بر مبنای رطوبت 14 درصد، حداقل 5 مترمربع از هر کرت اندازه گیری شد.

تیمارهای آزمایش شامل آبیاری برنج به صورت غرقاب دائم (CI) و آبیاری صفر (DIS0)، سه (DIS3)، شش (DIS6) و نه (DIS9) روز پس از ناپدید شدن آب از روی سطح زمین بود. منظور از ناپدید شدن آب از روی سطح زمین عدم وجود آب به صورت پیوسته روی سطح است و اگر به صورت پراکنده آب روی سطح زمین بود در نظر گرفته نمی شد. حجم آب ورودی به کرت توسط کنتور حجمی اندازه گیری شد. فاکتور رقم در دو سطح شامل ارقام محلی بینام (B) و حسنی (H) بود. اطلاعات

جدول 3-اطلاعات مربوط به تاریخ کاشت و برداشت در دو رقم بینام و حسنی

سال	تاریخ بذریاشی	تاریخ نشاء	تاریخ برداشت	
			بینام	حسنی
1382	13 اردیبهشت	6 خرداد	29 مرداد	25 مرداد
1383	30 فروردین	20 اردیبهشت	21 مرداد	17 مرداد

### توصیف مدل WOFOST

در این تحقیق از نسخه 7,1,2 مدل WOFOST که برای شبیه‌سازی سالانه محصولات در اروپا توسعه یافته بود، استفاده شد. مدل WOFOST یک مدل شبیه‌ساز رشد گیاه بر مبنای چرخه کربن بوده و دارای ساختاری پیچیده است. این مدل رشد گیاه را در سه وضعیت عدم وجود عامل محدود کننده، محدودیت آب و محدودیت مواد غذایی شبیه‌سازی می‌کند. در مدل WOFOST رشد محصولات بر اساس فرآیندهای اکو-فیزیولوژیکی شبیه‌سازی می‌شود.

فرآیندهای اصلی شامل توسعه فنولوژیکی، جذب دی اکسید کربن، تعرق، تنفس، تجزیه و توزیع میزان ماده خشک بین اندام‌های مختلف بر اساس مرحله نمو صورت می‌گیرد. رشد در حالت پتانسیل و محدودیت آبی به صورت دینامیکی با گام زمانی یک روزه شبیه‌سازی می‌شود (بوگارد و همکاران، 1998).

مدل WOFOST توسعه فنولوژیکی، شکل‌گیری و رشد گیاه را از آغاز جوانه‌زنی تا زمان رسیدن بر اساس خواص ژنتیکی محصول و شرایط محیطی شرح می‌دهد. این برنامه ماده خشک گیاه را بعنوان تابعی از تشعشع، دما و خصوصیت‌های گیاه در مراحل زمانی یک روز شبیه‌سازی می‌کند. اصول محاسبه تولید ماده خشک، میزان سرعت ناخالص جذب CO<sub>2</sub> توسط پوشش گیاهی است، که به انرژی تابشی جذب شده بستگی دارد که تابعی از تشعشع روزانه، سطح برگ گیاه و ضریب خاموشی نور در پوشش گیاهی است. برای توصیف نمو فنولوژیکی گیاه

در مدل WOFOST از متغیر مرحله توسعه گیاه (DVS)<sup>1</sup> استفاده می‌شود که برای جوانه‌زنی (یا انتقال برای گیاهان نشایی مانند برنج)، گلدهی و برداشت به ترتیب مقادیر 0، 1 و 2 در نظر می‌گیرد که تابعی از درجه روز است (ون کولن، 1986).

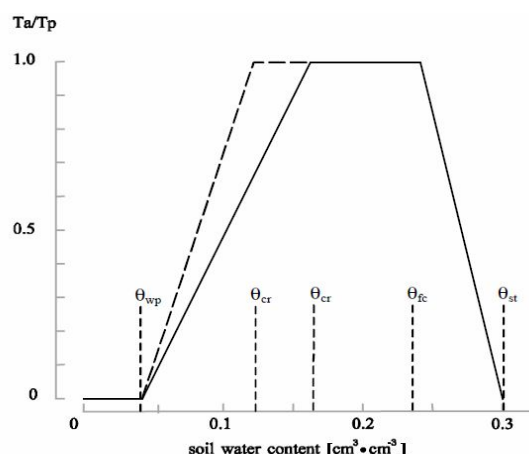
دوره زندگی برنج در مدل WOFOST به دو مرحله‌ی دوره رویشی (از جوانه‌زنی یا نشاء (DVS = 0) تا زمان گلدهی (DVS = 1)) و دوره زایشی (از گلدهی (DVS = 1) تا زمان رسیدگی فیزیولوژیکی (DVS = 2)) تقسیم می‌شود.

این مدل از یک معادله ساده برای تخمین میزان جذب و میزان رشد گیاه در شرایط آب مازاد یا کمبود آب استفاده می‌کند (تدورویک و همکاران، 2009):

$$A = \frac{T_a}{T_p} A_p \quad (1)$$

که در این معادله A میزان جذب واقعی، A<sub>p</sub> میزان جذب پتانسیل، T<sub>a</sub> میزان تعرق واقعی و T<sub>p</sub> میزان تعرق پتانسیل است.

<sup>1</sup>. Development stage of crop



شکل 1- رابطه بین رطوبت خاک و نسبت  $T_a/T_p$

و بارش) و خاک را انتخاب کند و مقادیر آنها را ویرایش نماید (بوگارد و همکاران، 1998). در بخش مربوط به اطلاعات کلی کاربر می‌تواند رشد گیاه را تحت یکی از شرایط عدم وجود عامل محدود کننده، محدودیت آب و یا محدودیت مواد غذایی شبیه‌سازی کند. وقتی که کاربر وضعیت عدم وجود عامل محدود کننده و یا محدودیت آب را انتخاب کند، نیازی به وارد کردن اطلاعات مواد غذایی نیست. وقتی که وضعیت رشد گیاه تحت شرایط محدودیت آب انتخاب شود، کاربر می‌تواند تاریخ شروع بیلان آب را برای شبیه‌سازی بیلان آب مشخص کند. در قسمت نتایج اجرای مدل WOFOST نتایج رشد گیاه تحت شرایط پتانسیل، محدودیت آب، محدودیت مواد غذایی و شبیه‌سازی بیلان آب در دسترس کاربر قرار می‌گیرد. در بخش مربوط به بیلان آب، نتایج شبیه‌سازی بیلان آب در کل سیستم و در منطقه ریشه وجود دارد.

### بهره‌وری آب

بر اساس نتایج حاصل از مدل WOFOST مقادیر بهره‌وری آب بر اساس میزان تعرق، بهره‌وری آب بر اساس میزان تبخیر-تعرق و بهره‌وری آب بر اساس مجموع آب مصرفی و بارش در تیمارهای مختلف با

در محدوده رطوبت بحرانی ( $\theta_{cr}$ ) و ظرفیت زراعی ( $\theta_{FC}$ )، نسبت تعرق واقعی به تعرق پتانسیل ( $\frac{T_a}{T_p}$ ) یک است (شکل 1). خارج از این محدوده، کوچکتر از 1 می‌شود، در نتیجه منجر به کاهش جذب در نتیجه کاهش عملکرد گیاه می‌شود. رطوبت بحرانی ( $\theta_{cr}$ ) به نوع گیاه و آب و هوا بستگی دارد (دریسن، 1986). هم‌چنین میزان رشد در این مدل از طریق معادله زیر محاسبه می‌شود (تدروویک و همکاران، 2009):

$$\Delta W = C_e \times (A - R_m) \quad (2)$$

در این رابطه  $\Delta W$  نرخ رشد،  $C_e$  بازده تبدیل مواد فتوسنتزی،  $R_m$  شدت تنفس و  $A$  نرخ جذب ناخالص هستند.

### پارامترهای ورودی و خروجی مدل WOFOST

اطلاعات ورودی مورد نیاز برای اجرای مدل WOFOST، در چندین بخش (اطلاعات کلی، گیاه، هواشناسی، خاک، مواد غذایی و اجرای مجدد<sup>1</sup>) توصیف می‌شوند. در این بخش‌ها کاربر می‌تواند فایل‌های گیاه، هواشناسی (تشعشع خورشید، حداقل و حداکثر دما، فشار بخار، میانگین سرعت باد در ارتفاع 2 متری از سطح زمین

<sup>1</sup> . Rerun

و ریشه میانگین مربعات خطای نسبی (RRMSE) ارزیابی آماری مدل انجام گرفت (پیرمردیان و سپاسخواه، 2006). مقادیر  $E_r$ ،  $C_{RM}$ ،  $RMSE$  و  $RRMSE$  هر چه به صفر نزدیکتر باشند، نشان دهنده‌ی این مطلب است که مدل شبیه‌سازی را بهتر انجام داده است.

$$E_r = \frac{O - S}{O} \quad (6)$$

(7)

$$C_{RM} = \frac{[\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n S_i]}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (9)$$

$$RRMSE = [1/n \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2]^{0.5} \left(\frac{100}{MO}\right) \quad (10)$$

در روابط بالا،  $O_i$  و  $S_i$  به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده،  $MO$  میانگین مقادیر مشاهده شده و  $n$  تعداد مشاهدات است.

#### نتایج و بحث

##### نتایج واسنجی مدل

پس از آماده‌سازی اطلاعات ورودی مدل WOFOST، برای سال 1382 مدل اجرا گردید. مدل با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده برای سال 1382 واسنجی شد و ارزیابی مدل بر پایه داده‌های سال 1383 انجام گرفت. با تغییر ضرایب واسنجی مدل و بر اساس بهترین تطابق نتایج خروجی، ضرایب واسنجی به صورت مقادیر گزارش شده در جدول 4 بدست آمد.

استفاده از معادلات زیر محاسبه شد (گووین‌داراجان و همکاران، 2008):

$$WP_T = \frac{Y_g}{T} \quad (3)$$

$$WP_{ET} = \frac{Y_g}{E+T} = \frac{Y_g}{ET} \quad (4)$$

$$WP_{I+R} = \frac{Y_g}{I+R} \quad (5)$$

در روابط بالا  $WP_T$  بهره‌وری آب بر اساس میزان

تعرق (کیلوگرم بر مترمکعب)،  $WP_{ET}$  بهره‌وری آب بر اساس میزان تبخیر-تعرق (کیلوگرم بر مترمکعب)،  $WP_{I+R}$  بهره‌وری آب بر اساس مجموع آب مصرفی و بارش (کیلوگرم بر مترمکعب)،  $Y_g$  عملکرد (کیلوگرم بر هکتار)،  $T$  مقدار تعرق شبیه‌سازی شده توسط مدل (میلی‌متر)،  $E$  مقدار تبخیر شبیه‌سازی شده توسط مدل (میلی‌متر)،  $I$  مقدار آبیاری (میلی‌متر) و  $R$  مقدار بارش (میلی‌متر) است.

##### معیارهای ارزیابی مدل

مدل WOFOST با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده برای سال 1382 واسنجی شد و ارزیابی مدل بر پایه داده‌های سال 1383 انجام گرفت. در ارزیابی گرافیکی مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده‌ی پارامترها از ضریب تبیین ( $R^2$ ) استفاده گردید، همچنین جهت ارزیابی نتایج شبیه‌سازی از آزمون F استفاده شد. بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده و با استفاده از معیارهای خطای نسبی ( $E_r$ )، ضریب جرم باقی‌مانده‌ها ( $C_{RM}$ )، ریشه میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ )

جدول 4- پارامترهای گیاهی استفاده شده در مدل WOFOST برای شبیه سازی عملکرد گیاه برنج

پارامتر	مقدار		پارامتر	واحد	مقدار		پارامتر
	بینام	حسنى			بینام	حسنى	
درجه سانتی گراد روز از جوانه زنی تا گلدهی	600	525	کسر ماده خشک هوایی به برگ -	°C-days	0/0	0/0	0/0 ; 0/6
درجه سانتی گراد روز از گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیکی	470	380	ها به صورت تابعی از مراحل توسعه گیاه	°C-days	0/0	0/0	0/54 ; 0/6
مرحله توسعه گیاه در شروع شبیه سازی	0/0	0/0		-	1	1	0/2 ; 0/2
مرحله توسعه گیاه در برداشت	2	2		-	1/3	1/3	0/0 ; 0/0
شاخص سطح برگ در جوانه زنی	0/15	0/15		ha ha <sup>-1</sup>	1/64	1/64	0/0 ; 0/0
بازده مصرف نور توسط تک برگ به صورت تابعی از میانگین روزانه دما	10 ; 0/4	10 ; 0/4		kg ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> J <sup>-1</sup> m <sup>2</sup> s	2	2	0/0 ; 0/0
حداکثر سرعت جذب CO <sub>2</sub> در برگ ها به صورت تابعی از مراحل توسعه گیاه	42 ; 0/0	44 ; 0/0	کسر ماده خشک هوایی به ساقه ها به صورت تابعی از مراحل توسعه گیاه		1	1	0/4 ; 0/0
	42 ; 1/9	44 ; 1/9		kg ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	0/54	0/54	0/4 ; 0/4
	42 ; 2/0	44 ; 2/0			1/3	1/3	0/0 ; 0/0
ضریب کاهنده AMAX به عنوان تابعی از دمای میانگین	0/0 ; 0/0	0/0 ; 0/0			1/64	1/64	0/0 ; 0/0
	69 ; 12	69 ; 12			2	2	0/0 ; 0/0
	85 ; 18	85 ; 18	کسر ماده خشک هوایی به اندام های ذخیره به صورت تابعی از مراحل توسعه گیاه	°C ; -	0/0	0/0	0/0 ; 0/0
	1 ; 24	1 ; 24			0/54	0/54	0/0 ; 0/0
	87 ; 36	87 ; 36			1	1	0/3 ; 0/3
	27 ; 42	27 ; 42			1/64	1/64	1 ; 1/3
کسر کل ماده خشک به ریشه به صورت تابعی از مراحل توسعه گیاه	0/0 ; 0/4	0/0 ; 0/4			2	2	1 ; 1/64
	15 ; 0/25	15 ; 0/25	عمق اولیه ریشه		5	5	1 ; 2
	0/0 ; 1/3	0/0 ; 1/3		kg kg <sup>-1</sup>	0/8	0/8	1 ; 1/64
	0/0 ; 2	0/0 ; 2	عمق افزایش روزانه در عمق ریشه		35	35	1 ; 2
	0/0 ; 1/3	0/0 ; 1/3	حداکثر عمق ریشه		0/8	0/8	1 ; 1/64
	0/0 ; 2	0/0 ; 2		cmday <sup>-1</sup>	35	35	1 ; 2

### نتایج ارزیابی مدل

نتایج پارامترهای آماری که برای ارزیابی مدل WOFOST استفاده شده اند، در جداول 5 و 6 ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود مقدار خطای نسبی بین مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده و شبیه سازی شده عملکرد در سال 1382 برای رقم بینام بین 30/36- تا 8/28 درصد و برای رقم حسنی بین 8/87- تا 1/02 درصد و در سال

1383 برای رقم بینام بین 12/56- تا 1/23 درصد و برای رقم حسنی بین 0/36 تا 29/77 درصد است. هم چنین به طور متوسط مقدار خطای نسبی بین مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده عملکرد در سال 1382 برای رقم بینام و حسنی به ترتیب 5/87- و 4/11- درصد و در سال 1383 به ترتیب 6/88- و 10/89 درصد بدست آمد.



جدول 5- مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده شده گیاه برنج و درصد خطای نسبی شبیه‌سازی توسط مدل WOFOST

1383			1382			تیمار
خطای نسبی (درصد)	شبیه‌سازی شده (تن بر هکتار)	مشاهده شده (تن بر هکتار)	خطای نسبی (درصد)	شبیه‌سازی شده (تن بر هکتار)	مشاهده شده (تن بر هکتار)	
-1/23	3/358	3/4	6/63	3/217	3/017	B-CI
-4/45	3/284	3/437	-7/71	3/076	3/333	B-DIS0
-10/54	2/963	3/312	8/28	3/14	2/9	B-DIS3
-5/61	3/126	3/312	-30/36	1/544	2/217	B-DIS6
-12/56	2/896	3/312	-6/21	2/673	2/85	B-DIS9
-6/88			-5/87			میانگین
5/15	3/102	2/95	-1/06	2/803	2/833	H-CI
29/77	3/082	2/375	-1/02	2/804	2/833	H-DIS0
0/36	2/791	2/781	-8/87	2/506	2/75	H-DIS3
8/42	2/575	2/375	-3/28	2/74	2/833	H-DIS6
10/76	2/831	2/556	-6/32	2/358	2/517	H-DIS9
10/89			-4/11			میانگین

B: رقم بینام، H: رقم حسنی، CI: آبیاری برنج به صورت غرقاب دائم، DIS0: آبیاری 0 روز پس از ناپدید شدن آب از روی سطح زمین، DIS3: آبیاری 3 روز پس از ناپدید شدن آب از روی سطح زمین، DIS6: آبیاری 6 روز پس از ناپدید شدن آب از روی سطح زمین و DIS9: آبیاری 9 روز پس از ناپدید شدن آب از روی سطح زمین

جدول 6- مقادیر (RMSE)، (C<sub>RM</sub>) و (RRMSE) برای نتایج شبیه‌سازی عملکرد

1383			1382			رقم
RRMSE (%)	C <sub>RM</sub>	RMSE (tha <sup>-1</sup> )	RRMSE (%)	C <sub>RM</sub>	RMSE (tha <sup>-1</sup> )	
7/94	0/068	0/27	12/57	0/047	0/36	بینام
13/71	-0/1	0/36	5/01	0/04	0/14	حسنی

بینام و حسنی مثبت بدست آمده که نشان دهنده‌ی این مطلب است که مقادیر شبیه‌سازی شده در اکثر تیمارها کمتر از مقادیر مشاهده شده است یا به عبارتی در بیشتر تیمارها مدل تخمین کمتر از حد داشته است. برای سال ارزیابی نیز مقدار ضریب جرم باقی‌مانده‌ها برای رقم حسنی منفی بدست آمده که نشان دهنده‌ی این مطلب است که مدل در این موارد دارای تخمین بیش از حد بوده است.

مدل WOFOST برای بعضی از گیاهان خاص واسنجی شده است، مثلاً روتر و همکاران (1997)

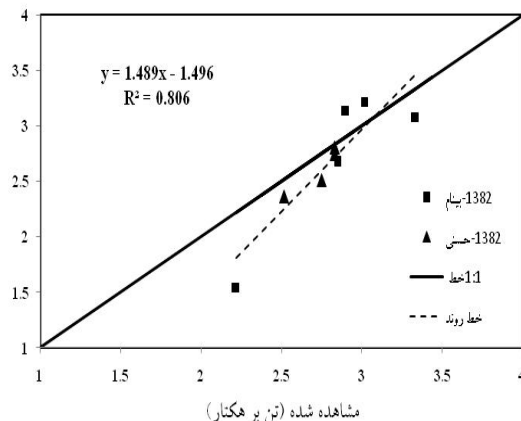
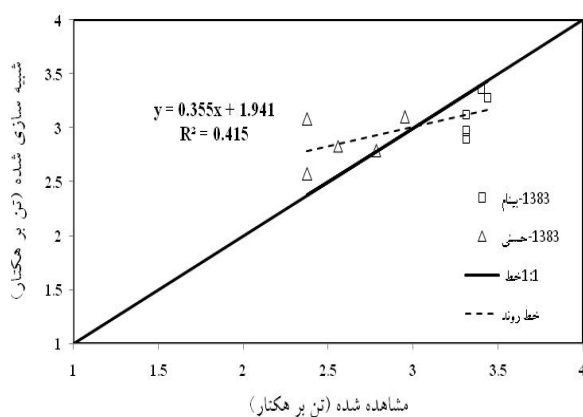
با توجه به جدول فوق در سال ارزیابی (1383)، برای رقم بینام با ریشه میانگین مربعات خطای برابر با 0/27 تن بر هکتار، ریشه میانگین مربعات خطای نسبی برابر با 7/94 درصد و ضریب جرم باقی‌مانده‌ها برابر با 0/068 نسبت به رقم حسنی با ریشه میانگین مربعات خطای برابر با 0/36 تن بر هکتار، ریشه میانگین مربعات خطای نسبی برابر با 13/71 درصد و ضریب جرم باقی‌مانده‌ها برابر با -0/1 تطابق بهتری بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده وجود دارد. برای سال واسنجی مقدار ضریب جرم باقی‌مانده‌ها برای هر دو رقم

آمد. همچنین در تحقیقات دیگری توسط امیری و همکاران (1388) برای ارزیابی مدل های گیاهی WOFOST و SWAP، ORYZA2000 در مدیریت های مختلف آبیاری بر روی گیاه برنج، مقادیر ریشه میانگین مربعات خطای نسبی برای تخمین ماده خشک کل در مدل های WOFOST و SWAP، ORYZA2000 به ترتیب بین 14 تا 24 درصد، 13 تا 21 درصد و 10 تا 14 درصد، ماده خشک پانیکول به ترتیب بین 10 تا 24 درصد، 6 تا 24 درصد و 7 تا 16 درصد و شاخص سطح برگ به ترتیب بین 27 تا 70 درصد، 47 تا 93 درصد و 54 تا 83 درصد بدست آمد. مقایسه ی این نتایج با مقادیر بدست آمده در این پژوهش برای گیاه برنج نشان می دهد که مدل WOFOST توانسته عملکرد ارقام برنج مورد مطالعه را نیز به خوبی شبیه سازی نماید.

مقایسه مقادیر عملکرد مشاهده شده و مقادیر شبیه سازی شده ی آن توسط مدل WOFOST برای سال های 1382 و 1383 در دو رقم بینام و حسنی با خط یک به یک در شکل 2 نشان داده شده است.

واسنجی و اعتباریابی مدل را برای ذرت در کنیا انجام دادند و نتیجه گرفتند که مدل مقدار عملکرد را با خطای 15 درصدی پیش بینی می کند. همچنین این مدل برای شبیه سازی گیاهان مختلف نظیر گندم، جو، پنبه، آفتابگردان، برنج، سویا، سیب زمینی و دانه های روغنی مورد واسنجی قرار گرفت.

در تحقیقات ایتزینگر و همکاران (2004) بر روی شبیه سازی رشد و نمو، جو و گندم در شرایط لایسیمیتری برای سه نوع خاک در منطقه ای واقع در اتریش با استفاده از سه مدل SWAP، CERES و WOFOST، مقدار خطا بین مقادیر شبیه سازی شده و مشاهده شده ی عملکرد در مدل WOFOST برای گیاه جو برای سه نوع خاک بین 38/5- تا 72/7- درصد و برای گیاه گندم بین 55/3- تا 16/7 درصد بدست آمد. در تحقیقات امیری و همکاران (1390) در رابطه با ارزیابی مدل رشد گیاهی WOFOST در شرایط مدیریت آبیاری بر روی گیاه برنج، مقادیر ریشه میانگین مربعات خطای نسبی برای تخمین ماده خشک کل بین 10 تا 14 درصد، ماده خشک پانیکول بین 7 تا 16 درصد و شاخص سطح برگ بین 54 تا 83 درصد بدست



شکل 2- مقایسه مقادیر شبیه سازی شده و مشاهده شده عملکرد برنج برای دو رقم بینام و حسنی

در جدول 7 ارائه شده است. مقادیر بهره‌وری بر اساس مجموع آب مصرفی و بارش در هر دو سال واسنجی و ارزیابی برای رقم بینام در تیمار DIS9 و برای رقم حسنی در تیمار DIS3 بیشترین مقدار را داشته است. با توجه به تغییرات میزان بارش در سالهای مختلف، ارزیابی بهره‌وری آب در تیمارهای مختلف بر اساس مجموع بارش و آبیاری ارجح است. مقادیر تعرق، تبخیر و تبخیر-تعرق شبیه‌سازی شده توسط مدل WOFOST در جدول 8 ارائه شده است. هم‌چنین بر اساس نتایج حاصل از مدل WOFOST مقادیر بهره‌وری بر اساس میزان تعرق، بهره‌وری بر اساس میزان تبخیر-تعرق و بهره‌وری بر اساس مجموع آب مصرفی و بارش در تیمارهای مختلف محاسبه شد و در جدول 9 ارائه شد.

با توجه به شکل فوق مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده در اکثر تیمارها برای رقم بینام کمتر از مقدار مشاهده شده بوده است. برای رقم حسنی در سال واسنجی مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده در اکثر تیمارها کمتر از مقدار مشاهده شده بوده است. تجزیه و تحلیل‌های آماری از طریق آزمون F برای مقایسه‌ی خط 1:1 و خط روند نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین خط 1:1 و خط روند از لحاظ شیب و عرض از مبدا وجود ندارد و در نتیجه اختلاف بین مقادیر عملکرد مشاهده شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل WOFOST از نظر آماری معنی‌دار نبود. با توجه به مقادیر مشاهده شده‌ی عملکرد و اندازه‌گیری میزان آب مصرفی و بارش، مقادیر بهره‌وری بر اساس مجموع آب مصرفی و بارش در تیمارهای مختلف آبیاری

جدول 7- مقادیر مشاهده شده‌ی بهره‌وری بر اساس مجموع آب مصرفی و بارش در تیمارهای مختلف آبیاری

1383				1382				
عملکرد مشاهده شده (کیلوگرم بر هکتار)	مقدار آب مصرفی (میلی متر)	بارش (میلی متر)	WP <sub>I+R</sub> (کیلوگرم بر متر مکعب)	عملکرد مشاهده شده (کیلوگرم بر هکتار)	مقدار آب مصرفی (میلی متر)	بارش (میلی متر)	WP <sub>I+R</sub> (کیلوگرم بر متر مکعب)	تیمار
3400	249		0/6	3017	477		0/5	B-CI
3437	194		0/67	3333	363		0/676	B-DIS0
3312	209	317	0/63	2900	394	130/1	0/55	B-DIS3
3312	118		0/76	2217	238		0/6	B-DIS6
3312	87		0/72	2850	289		0/68	B-DIS9
2950	279	317	0/5	2833	444	127/2	0/5	H-CI
2375	239		0/43	2833	489		0/46	H-DIS0
2781	112		0/648	2750	352		0/574	H-DIS3
2388	52		0/647	2833	498		0/45	H-DIS6
2675	118		0/61	2517	313		0/572	H-DIS9

B: رقم بینام، H: رقم حسنی، CI: آبیاری برنج به صورت غرقاب دائم، DIS0: آبیاری 0 روز پس از ناپدید شدن آب از روی سطح زمین، DIS3: آبیاری 3 روز پس از ناپدید شدن آب از روی سطح زمین، DIS6: آبیاری 6 روز پس از ناپدید شدن آب از روی سطح زمین و DIS9: آبیاری 9 روز پس از ناپدید شدن آب از روی سطح زمین

جدول 8- مقادیر تعرق، تبخیر و تبخیر-تعرق شبیه سازی شده توسط مدل WOFOST در تیمارهای مختلف

تیمار	1383			1382		
	تبخیر-تعرق (میلی متر)	تبخیر (میلی متر)	تعرق (میلی متر)	تبخیر-تعرق (میلی متر)	تبخیر (میلی متر)	تعرق (میلی متر)
B-CI	318	236	82	313	229	84
B-DIS0	285	208	77	284	206	78
B-DIS3	276	206	70	287	207	80
B-DIS6	270	196	74	241	194	47
B-DIS9	265	197	68	255	190	65
H-CI	286	223	63	287	223	64
H-DIS0	276	214	62	276	212	64
H-DIS3	253	197	56	255	196	59
H-DIS6	251	200	51	238	179	59
H-DIS9	246	190	56	231	180	51

B: رقم بینام، H: رقم حسنی، CI: آبیاری برنج به صورت غرقاب دائم، DIS0: آبیاری 0 روز پس از ناپدید شدن آب از روی سطح زمین، DIS3: آبیاری 3 روز پس از ناپدید شدن آب از روی سطح زمین، DIS6: آبیاری 6 روز پس از ناپدید شدن آب از روی سطح زمین و DIS9: آبیاری 9 روز پس از ناپدید شدن آب از روی سطح زمین

جدول 9- مقادیر بهره‌وری آب بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی توسط مدل WOFOST در تیمارهای مختلف

تیمار	1383			1382		
	WP <sub>I+P</sub> (Kg m <sup>-3</sup> )	WP <sub>ET</sub> (Kg m <sup>-3</sup> )	WP <sub>T</sub> (Kg m <sup>-3</sup> )	WP <sub>I+P</sub> <sup>*</sup> (Kg m <sup>-3</sup> )	WP <sub>ET</sub> <sup>*</sup> (Kg m <sup>-3</sup> )	WP <sub>T</sub> <sup>*</sup> (Kg m <sup>-3</sup> )
B-CI	0/59	1/06	4/1	0/53	1/03	3/83
B-DIS0	0/64	1/15	4/26	0/62	1/08	3/94
B-DIS3	0/56	1/07	4/23	0/6	1/09	3/93
B-DIS6	0/719	1/16	4/22	0/42	0/64	3/29
B-DIS9	0/717	1/09	4/26	0/64	1/05	4/11
میانگین	0/65	1/11	4/21	0/56	0/98	3/82
H-CI	0/52	1/08	4/92	0/49	0/98	4/38
H-DIS0	0/55	1/12	4/97	0/46	1/02	4/38
H-DIS3	0/65	1/1	4/98	0/52	0/98	4/25
H-DIS6	0/62	1/03	5/05	0/44	1/15	4/64
H-DIS9	0/62	1/15	5/06	0/54	1/02	4/62
میانگین	0/59	1/1	4/996	0/49	1/03	4/45

WP<sub>T</sub><sup>\*</sup>: بهره‌وری بر اساس میزان تعرق؛ WP<sub>ET</sub>: بهره‌وری بر اساس میزان تبخیر-تعرق؛ WP<sub>I+P</sub>: بهره‌وری بر اساس مجموع آبیاری و بارش

نتیجه، بهره‌وری بر اساس میزان تعرق برای گیاه برنج، متغیر قابل سنجش می‌باشد که به شرایط اکوهیدرولوژیکی بستگی دارد. نتایج نشان داد که مقادیر بهره‌وری بر اساس میزان

عملکرد فیزیولوژیکی گیاه برنج در مدیریت‌های آبیاری شرایط محیطی متغیر، منجر به نیازهای تعرق مختلف شده و متعاقب آن مقدار تعرق در گیاه تغییر می‌کند. در

حسنى نتايج بسيار به هم نزديك است ولى براى رقم بينام در سال ارزىابى اختلاف ديده مى‌شود.

### نتيجه‌گيرى

نتايج آزمون F نشان داد كه مقادير مشاهده شده و شبیه‌سازى شده‌ى عملكرد در مدل WOFOST از نظر آمارى اختلاف معنى‌دارى ندارند و مدل WOFOST توانسته عملكرد دو رقم برنج محلى بينام و حسنى را در منطقه رشت به خوبى شبیه‌سازى نمايد. به‌طور متوسط مقادير بهره‌ورى بر اساس ميزان تعرق، بهره‌ورى بر اساس ميزان تبخير-تعرق و بهره‌ورى بر اساس مجموع آب مصرفى و بارش در سال 1382 براى رقم بينام و حسنى به ترتيب 0/98، 0/56 و 0/49، 1/03، 4/45 و 0/65 بر مترمكعب و در سال 1383 به ترتيب 1/11، 4/21 و 0/59، 1/1، 4/996 بر مترمكعب بدست آمد.

مقايسه مقادير بهره‌ورى آب بر اساس نتايج حاصل از شبیه‌سازى توسط مدل و نتايج بدست آمده از مقادير اندازه‌گيرى شده نشان داد كه تيمار DIS3 و DIS9 مى‌توانند براى رقم‌هاى بينام و حسنى در منطقه مورد مطالعه توصيه شوند. کاربرد مدل براى دستيابى به بهره‌ورى آب مطلوب محصول برنج در مناطق مختلف كشور توصيه مى‌شود. به طور كلى از اين مدل مى‌توان براى بهبود مديريت آبيارى شاليزار استفاده نمود.

تعرق براى سال واسنجى و ارزىابى به ترتيب در تيمار DIS6 و DIS9 بيشترين مقدار را داراست. مقادير بهره‌ورى بر اساس ميزان تبخير-تعرق براى هر دو سال واسنجى و ارزىابى در تيمار DIS6 بيشترين مقدار را داراست. مقادير بهره‌ورى بر اساس مجموع آب مصرفى و بارش براى سال واسنجى و ارزىابى به ترتيب در تيمار DIS6 و DIS9 بيشترين مقدار را داشته است. هم‌چنين مقادير بهره‌ورى بر اساس مجموع آب مصرفى و بارش در سال واسنجى براى هر دو رقم بينام و حسنى در تيمار DIS9 و در سال ارزىابى براى رقم بينام در تيمار DIS6 و براى رقم حسنى در تيمار DIS3 بيشترين مقدار را داشته است.

همان‌طور كه در جدول 7 مشاهده شد مقادير مشاهده شده‌ى بهره‌ورى بر اساس مجموع آب مصرفى و بارش در هر دو سال واسنجى و ارزىابى براى رقم بينام در تيمار DIS9 و براى رقم حسنى در تيمار DIS3 بيشترين مقدار را داشته است. مقايسه‌ى مقادير مشاهده شده‌ى بهره‌ورى بر اساس مجموع آب مصرفى و بارش و مقادير شبیه‌سازى شده‌ى آن نشان داد كه براى رقم حسنى در سال واسنجى مقدار مشاهده شده‌ى بهره‌ورى بر اساس مجموع آب مصرفى و بارش در تيمار DIS3 بيشترين مقدار را نشان داد كه با تيمار DIS9، اختلاف ناچيزى (0/002 كيلوگرم بر مترمكعب) داشته است و براى سال ارزىابى نيز همخوانى وجود دارد پس بنا بر اين براى رقم

### منابع مورد استفاده

1. اميرى، ا. 1385. بررسى بيلان آب و عملكرد برنج در مديريت‌هاى آبيارى در شاليزار با استفاده از مدل. رساله دكتورى. دانشگاه آزاد اسلامى واحد علوم و تحقيقات تهران. 181 صفحه.
2. اميرى، ا.، رضايى، م.، معتمد، م. ك. و امامى، س. 1390. ارزىابى مدل رشد گياهمى WOFOST در شرايط مديريت آبيارى. نشریه زراعت (پژوهش و سازندگى). شماره 90. صفحه: 9-17.
3. اميرى، ا.، كاوسى، م. و كاوه، ف. 1388. ارزىابى مدل‌هاى گياهمى ORYZA2000 و SWAP. WOFOST در مديريت‌هاى مختلف آبيارى. مجله تحقيقات مهندسى كشاورزى. جلد 10. شماره 3. صفحه: 13-28.

4. رضایی، م. و نحوی، م. 1386. بررسی تاثیر دور آبیاری در خاک های رسی بر کارایی مصرف آب و برخی از صفات دو رقم برنج محلی در استان گیلان. پژوهشنامه علوم کشاورزی. جلد 1. شماره 9. صفحه: 15-25.
5. Boogaard, H. L., Diepen, C. A., Van Rötter, R. P., Cabrera, J. M. C. A. and Van Laar, H. H. 1998. User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5. Technical document 52, DLO Winand Staring Centre, Wageningen, Netherlands.
6. Boogaard, H. L., Van Diepen, C. A., Eerens, H., Kempeneers, P., Piccard, I., Verheijen, Y. and Supit, I. 2002. Description of the MARS Crop Yield Forecasting System (MCYFS). ETAMP (Methodology Assessment of MARS Predictions) Report 1/3, Alterra, Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO), Supit Consultancy, Wageningen, Mol, Houten.
7. Bouman, B. A. M., Van Keulen, H., Van Laar, H. H. and Rabbinge, R. 1996. The "School of de Wit", crop growth simulation models: pedigree and historical overview. *Agric. Sys.* 52: 171-198.
8. Confalonieri, R., Acutis, M., Bellocchic, G. and Donatelli, M. 2009. Multi-metric evaluation of the models WARM, CropSyst, and WOFOST for rice. *Ecol. Model.* 220: 1395-1410.
9. CWFS, 1985. Potential food production increases from fertilizer aid: a case study of Burkina Faso, Ghana and Kenya. CWFS, Wageningen.
10. Driessen, P. M. 1986. The water balance of the soil. In: Van Keulen and Wolf, 1986. 76-116.
11. Eitzinger, J., Trnka, M., Hosch, J., Zalud, Z. and Dubrovsk, M. 2004. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. *Ecol. Model.* 171: 223-246.
12. Farahani, H. J., Izzi, G. and Oweis, T. Y. 2009. Parameterization and Evaluation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Cotton. *Agron. J.* 101: 469-476.
13. Govindarajan, S., N. K. Ambujam and K. Karunakaran. 2008. Estimation of paddy water productivity (WP) using hydrological model: an experimental study. *Paddy Water Environ.* 6: 327-339.
14. Guerra, L. C., Bhuiyan, S. I., Tuong, T. P. and Barker, R. 1998. Production more rice with less water from irrigated systems. SWIM paper5. IWMI / IRRI, Colombo, SriLanka, P. 24.
15. Huygen, J. (ed.). 1990. Simulation studies on the limitations to maize production in Zambia. Report 27. DLO Winand Staring Centre, Wageningen.
16. Marletto, V., Ventura, F., Fontana, G. and Tomei, F. 2007. Wheat growth simulation and yield prediction with seasonal forecasts and a numerical model. *Agric. Meteorol.* 147: 71-79.
17. Pirmoradian, N. and A. R. Sepaskhah. 2006. A Very Simple Model for Yield Prediction of Rice under Different Water and Nitrogen Applications. *Biosystems Engineering.* 93(1): 25-34.
18. Rabbinge, R. and Van Latesteijn, H. C. 1992. Long-term options for land use in the European Community. *Agric. Sys.* 40:195-210.
19. Rotter, R., Van Keulen, H. and Jansen, M. J. W. 1997. Variations in yield response to fertilizer application in the tropics: I. quantifying risks for small holders based on crop growth simulation. *Agric. Sys.* 53: 41-68.

20. Singh, R. 2005. Water productivity analysis from field to regional scale: integration of crop and soil modelling, remote sensing and geographical information. Doctoral thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
21. Song, Y. I., Chen, D. L. and Dong, W. J. 2006. Influence of climate on winter wheat productivity in different climate regions of China, 1961–2000. *Clim. Res.* 32: 219–227.
22. Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles. *Agron. J.* 101: 426–437.
23. Todorovic, M., R. Albrizio, L. Zivotic, M. Abi Saab, C. Stöckle and P. Steduto. 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST Models in the Simulation of Sunflower Growth under Different Water Regimes. *Agron. J.* 101: 509–521.
24. Van Ittersum, M. K., Leffelaar, P. A., Van Keulen, H., Kropff, M. J., Bastiaans, L. and Goudriaan, J. 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *Eur. J. Agron.* 18: 201–234.
25. Van Keulen, H. 1986. The collection and treatment of basic data. Plant data. In: Van Keulen and Wolf, 1986. 235-247.
26. Van Keulen, H. and Van Diepen, C. A. 1990. Crop growth models and agroecological characterization. In: Scaife, A. (ed.): Proceedings of the first congress of the European Society of Agronomy, 5-7 December 1990, Paris. CEC, ESA, INRA. Session 2: 1-16. Paris.
27. Wolf, J. and Van Diepen, C. A. 1994. Effects of climate change on silage maize production potential in the European Community. *Agric. Forest Meteorol.* 71, 1/2: 33-60.
28. Wolf, J., Berkhout, J. A. A., Van Diepen, C. A. and Van Immerzeel, C. H. 1989. A study on the limitations to maize production in Zambia using simulation models and a geographic information system. In: Bouma, J. and A. K. Brecht (Eds.). Land qualities in space and time, proceedings of a symposium organized by the International society of soil science (ISSS), Wageningen, the Netherlands, 22-26 August 1988. Pudoc, Wageningen. 209-215. Keulen, eds., The Future of the Land, Mobilising and Integrating knowledge for land use options, John Wiley & Sons. p. 249-260.
29. Yang, H. S., Dobermann, A., Lindquist, J. L., Wolters, D. T., Arkebauer, T. J. and Cassman, K. G. 2004. Hybrid-maize—A maize simulation model that combines two crop modeling approaches. *Field Crops Res.* 87: 131–154.