تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد دهم، شماره اول، بهار ۱۳۹۶
۱-۱۱
http://dx.doi.org/10.22077/escs.2017.526

ارزیابی مدل MEDIWY برای شبیه‌سازی عملکرد گندم در شرایط رژیم‌های مختلف آبیاری (مطالعه موردی منطقه کرج)

مریم کریمیان[۱]، فیاض آقایاری[۲]*، فرزاد پاک‌نژاد[۳]

۱. دانشجوی سابق کارشناسی ارشد رشته اگرواکولوژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، گروه زراعت، کرج، ایران.
۲. استادیار دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، گروه زراعت، کرج، ایران.
۳. دانشیار دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، گروه زراعت، کرج، ایران.

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۷/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۷/۲۰

چکیده

با توجه به اهمیت موجود، در سال‌های اخیر مدل‌های زیادی برای پیش‌بینی میزان عملکرد محصول بسط و توسعه‌یافته است. یکی از این مدل‌ها مدل MEDIWY بوده که برای گندم زمستانه رقم عدل در شرایط آب و هوایی منطقه باجگاه واقع در استان فارس ارائه‌شده است. کاربرد گسترده‌تر آن نیاز به آزمون برای ارقام دیگر و در شرایط متفاوت آب و هوایی دارد. این تحقیق با هدف ارزیابی توانایی مدل MEDIWY برای شبیه‌سازی عملکرد گندم (رقم مرودشت) برای شرایط آب و هوایی منطقه کرج صورت گرفت. برای واسنجی مدل از نتایج آزمایشی که در سال زراعی ۸۳-۱۳۸۲ که دارای ۹ رژیم متفاوت آبیاری بوده و در منطقه کرج اجرا شده بود، استفاده شد. برای واسنجی دقیق‌تر مدل، رژیم‌های متفاوت آبیاری ازلحاظ شدت تنش خشکی گروه‌بندی‌شده و واسنجی مدل برای هر گروه به‌طور جداگانه انجام شد. همچنین برای اعتبارسنجی مدل از اطلاعات مستقل محصول دانه رقم گاسپارد که در سال زراعی ۸۳-۱۳۸۲ در منطقه کرج اجرا شده بود، استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد مدل MEDIWY با دقت بالایی قابلیت شبیه‌سازی عملکرد گندم در منطقه کرج را دارد. به‌طوری‌که با توجه به نتایج اعتبارسنجی مدل شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده و کارایی مدل بین مقادیر عملکرد دانه اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده به ترتیب برابر ۴۱۲ کیلوگرم در هکتار، ۸/۵ درصد و ۰/۹۹ به دست آمد. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، اگرچه مدل MEDIWY نسبت به سایر مدل‌های گیاهی نیاز به داده‌های ورودی کمتری دارد، بااین‌وجود از دقت و توانمندی مناسبی برای شبیه‌سازی عملکرد محصول برخوردار است.

***واژه‌های کلیدی*: مدل‌سازی گیاهی، تنش خشکی، اعتبارسنجی.**

مقدمه

استفاده از مدل‌های گیاهان زراعی در بسیاری از کشورها برای شبیه‌سازی پاسخ گیاهان زراعی به تنش‌های محیطی و روش‌های مدیریتی متفاوت در دهه‌های مختلف استفاده شده است (Mehraban, 2013). میزان عملکرد محصول نتیجه برهمکنش بین عوامل خاک، آب، گیاه و اتمسفر به‌عنوان یک سیستم پیوسته می‌باشد (Soltani and Torabi, 2009). در علوم زراعی مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی دانش انسان درباره جنبه‌های مختلف علمی شامل هواشناسی کشاورزی، فیزیک خاک، شیمی خاک، فیزیولوژی گیاهان زراعی، اصلاح گیاهان و زراعت را به‌وسیله روابط ریاضی برای پیش‌بینی رشد، نمو و عملکرد گیاهان زراعی امکان‌پذیر ساخته است، ازاین‌رو مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی به‌عنوان ابزار اصلی انتقال علوم زراعی به عصر اطلاعات شناخته می‌شوند (Kiyani et al., 2004). هم‌اکنون مدل‌ها به‌طور وسیعی در مناطق مختلف دنیا به‌عنوان یک ابزار مهم مدیریتی در ابعاد پژوهشی و اجرایی مورداستفاده قرار می‌گیرند (Bannayan et al., 2003). به بیانی دیگر مدل رایانه‌ای مجموعه عملیاتی است که طی آن

* نگارنده پاسخگو: فیاض آقایاری. پست الکترونیک: Aghayari_ir@yahoo.com.

یک فرآیند به‌صورت مصنوعی و با تقلید از حالت واقعی آن بررسی می‌شود (Ziaei and Sepaskhah, 2003). کانگ و همکاران (Kang et al., 2001) ضمن ارائه مدلی برای بررسی حرکت آب، از آن برای شبیه‌سازی در مزرعه گندم در یک منطقه نیمه‌خشک کشور چین استفاده کردند. پارامترهای موردنیاز، مخصوصاً پارامترهای هیدرولیکی خاک و گیاه به‌وسیله اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای و آزمایشگاهی تعیین شدند. تطابق خوبی بین مقادیر رطوبت، تعرق گیاه، تبخیر از سطح خاک و جذب آب شبیه‌سازی‌شده با مقادیر اندازه‌گیری شده وجود داشت. سپاسخواه و همکاران (Sepaskhah et al., 2006) مدلی را برای تولید عملکرد گندم، ذرت و چغندرقند تحت شرایط تنش شوری و آب ارزیابی نمودند. مدل موردنظر برای محاسبه عملکرد محصول گندم، چغندرقند و ذرت در سطوح مختلف شوری آب آبیاری، جزء آبشویی و مقدار آب کاربردی به‌خصوص برای دوره‌های آبیاری معمول (کمتر از ۱۰ روز) بکار برده می‌شود. به‌هرحال این مدل جهت محاسبه عملکرد محصول برای دوره‌های آبیاری بزرگ‌تر از ۷ روز، با در نظر گرفتن یک ضریب همبستگی در داخل مدل اصلاح گردید. مدل موردنظر برای مدیریت آبیاری مزرعه تحت سطوح مختلف شوری بسیار ارزشمند می‌باشد. پاک‌نژاد و همکاران (Paknejad et al., 2012) نیز در بررسی شبیه‌سازی عملکرد دانه ۵ رقم گندم در شرایط تنش خشکی انتهای فصل توسط مدل CERES-Wheat نتایج رضایت‌بخشی را گزارش کردند. یانگ و همکاران (Yang et al., 2006) مدیریت بهینه آبیاری برای محصول گندم به‌منظور کاهش تخلیه سفره آب زیرزمینی را بررسی کردند و اعلام نمودند با رعایت یک سری اصول مدیریتی می‌توان مقدار ۷۶ میلی‌متر تبخیر و تعرق و ۹۹/۵ میلی‌متر آب آبیاری را ذخیره نمود، بدون اینکه کاهش زیادی در عملکرد گندم زمستانه رخ دهد (فقط ۴/۵ درصد). وانگ و همکاران (Wang et al., 2009) در مدل بهره‌وری گندم و ذرت در پاسخ به تغییرات اقلیم و آبیاری در چین بیان کردند، در یک سیستم دو کشتی گندم و ذرت، عملکرد گندم در شرایط بدون آبیاری و استفاده از آب باران دامنه‌ای از ۰ تا ۶/۱ تن در هکتار (میانگین ۱/۲ تن در هکتار) و عملکرد ذرت دامنه‌ای از صفر تا ۹/۷ تن در هکتار (میانگین ۳/۵ تن در هکتار) داشت. همین‌طور هر ۶۰ میلی‌متر آبیاری اضافی گندم باعث افزایش عملکرد به میزان ۱/۲ تن در هکتار می‌شود و میزان آبیاری بالاتر از ۵۴۰ میلی‌متر باعث افزایش پتانسیل عملکرد گندم تا میزان ۷/۱ تن در هکتار و در ذرت ۸/۳ تن در هکتار می‌شود (عملکرد کل ۱۵/۴ تن در هکتار). در ارزیابی مدل شبیه‌سازی CERES-WHEAT در شرایط اقلیمی اهواز مشخص شد که جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) محاسبه‌شده برای گلدهی، رسیدگی فیزیولوژیک و همچنین برای تولید ماده خشک و عملکرد دانه به ترتیب برابر ۲/۵ روز،۵ روز، ۶۴۰ کیلوگرم در هکتار و ۴۶۰ کیلوگرم در هکتار به دست آمد که مقدار RMSE در همه موارد کمتر از ۱۰ درصد میانگین داده‌های مشاهده شده بود (Andarziyan et al., 2008).

یکی از اهداف مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی، استفاده از آن‌ها برای پیش‌بینی عملکرد محصول می‌باشد. مدل‌های مختلفی برای این منظور توسعه داده‌شده و توسط محققین مختلف بکار رفته‌اند. مدل‌هایی چون CERES[1] (Jones and Kiniry, 1986)، WOFOST[2] (Van Keulen and Wolf, 1986)، CropSyst[3] (Stockle et al., 1984) و غیره که البته مستلزم مهارت زیاد کاربر در واسنجی می‌باشد و متغیرهای ورودی آن‌ها زیاد و اندازه‌گیری آن‌ها سخت است.

بر اساس روابط ارائه‌شده برای شبیه‌سازی مراحل رشد و اثر آب در این مراحل، کردری و گراهام (Cordery and Graham, 1989) مدلی را بنا نهادند. این مدل برای گندم زمستانه رقم عدل در شرایط آب و هوایی منطقه باجگاه پس از بازسازی و واسنجی، MEDIWY[4] نام‌گذاری شد (Ziaei and Sepaskhah, 2003). به‌طورکلی مدل با استفاده از داده‌های متداول که تقریباً در تمامی ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌شود قادر به برآورد مناسب شاخص‌های رشد و درنهایت برآورد مطلوب مقدار عملکرد دانه گندم دیم و آبی می‌باشد. کاربرد گسترده‌تر آن نیاز به آزمون در شرایط متفاوت آب و هوایی دارد.

سپاسخواه و همکاران (Sepaskhah et al., 2006) مدل MEDIWY را برای شرایط آب و هوایی منطقه مراغه مورد واسنجی قرار دادند و مدل توانست نتایج قابل قبولی برای پیش‌بینی عملکرد گندم رقم سبلان ارائه نماید.

---

[1]. Crop Environment REsource Synthesis
[2]. World Food STudies
[3]. Cropping Systems Simulation Model
[4]. Model for Estimation of Dryland and Irrigated Wheat Yield

بنابراین با توجه به کاربردی بودن مدل MEDIWY و نیاز به حداقل داده‌های ورودی در آن، هدف از این تحقیق ارزیابی مدل MEDIWY برای شبیه‌سازی عملکرد گندم رقم مرودشت در شرایط رژیم‌های متفاوت آبیاری در منطقه کرج می‌باشد.

مواد و روش‌ها

تئوری مدل

مدل MEDIWY توسط ضیائی و سپاسخواه (Ziaei and Sepaskhah, 2003) به زبان فرترن[5] نوشته شده است. در این مدل، برای تعیین آب خاک از معادلات ساده بیلان حجمی آب خاک استفاده شده است. بدین معنی که حداکثر آب قابل ذخیره در خاک حد ظرفیت زراعی دانسته شده و لایه سطحی خاک که مشتمل بر ۱۰ سانتی‌متر اولیه خاک می‌باشد تا رطوبت هوا خشک، تخلیه می‌گردد. رطوبت در لایه دوم که از انتهای لایه اول تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری را در برمی‌گیرد تا حد نقطه پژمردگی دائم قابل تخلیه شدن می‌باشد.

مدل مذکور از واحدهای مجزا تشکیل‌شده و مشتمل بر یک برنامه اصلی و ۹ زیر برنامه است. زیربرنامه‌ها به ترتیب فراخوانی در مدل عبارت‌اند از ۱- زیر برنامه مقادیر ثابت، ۲- زیر برنامه محاسبه تبخیر- تعرق، ۳- زیر برنامه محاسبه شاخص تنش، ۴- زیر برنامه بیلان آب خاک، ۵- زیر برنامه تعیین تاریخ کاشت، ۶- زیر برنامه محاسبه تبخیر از سطح خاک، ۷- زیر برنامه مراحل فنولوژیکی، ۸- زیر برنامه برآورد محصول، ۹- زیر برنامه محاسبه پارامترهای آماری.

به‌طورکلی، مدل ابتدا بخشی از داده‌های ورودی را به‌صورت پرسشی از صفحه‌کلید و بخشی دیگر را که مقادیر ثابت هستند، از زیر برنامه مقادیر ثابت دریافت می‌کند. داده‌های ورودی که به‌صورت پرسشی از طریق صفحه‌کلید وارد مدل می‌گردد عبارت‌اند از تاریخ کاشت (روز از ابتدای مهر)، ضخامت لایه اول، ضخامت لایه دوم، ظرفیت زراعی لایه اول، ظرفیت زراعی لایه دوم، نقطه پژمردگی دائم در لایه اول، نقطه پژمردگی دائم در لایه دوم، مقدار رطوبت خاک در تاریخ کاشت در لایه اول، مقدار رطوبت خاک در تاریخ کاشت در لایه دوم، شرایط آبیاری (دیم یا آبی)، ضریب رواناب، ظرفیت نگهداشت سطحی.

مدل با توجه به مقدار بارندگی روزانه، مقدار آب خاک را از طریق زیر برنامه بیلان آب خاک محاسبه می‌کند و سپس، زیر برنامه تعیین روز کاشت برای شرایطی که روز کاشت نامشخص باشد تخمینی از روز کاشت را ارائه می‌دهد. در حین تعیین روز کاشت مقدار تبخیر از سطح خاک توسط زیر برنامه تبخیر از سطح خاک تعیین می‌شود. پس از تعیین روز کاشت، رشد فیزیولوژیکی گیاه شروع و با توجه به مقدار تبخیر تجمعی از تشت، مراحل مختلف رشد توسط زیر برنامه مراحل فنولوژیکی مشخص می‌شود. در مراحل رشد، مقدار تعرق گیاه و تبخیر از سطح خاک به ترتیب توسط زیر برنامه‌های تبخیر و تبخیر- تعرق محاسبه می‌گردد. مقدار تعرق واقعی نیز در زیر برنامه تبخیر- تعرق محاسبه و با استفاده از آن، زیر برنامه محاسبه شاخص تنش، این شاخص را در مراحل مختلف رشد تعیین می‌نماید. زیر برنامه برآورد عملکرد نیز، ماده خشک و پس از گلدهی تعداد دانه، وزن دانه و درنهایت عملکرد دانه را برآورد می‌نماید. نتایج حاصل از مراحل مختلف برنامه در فایل‌های خروجی درج می‌شود.

داده‌های مورداستفاده

آنچه در این تحقیق مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد، ارزیابی مدل MEDIWY برای شبیه‌سازی عملکرد گندم (رقم مرودشت) در شرایط آب و هوایی منطقه کرج می‌باشد. برای این منظور از اطلاعات ۹ تیمار آبیاری که در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج در سال زراعی ۸۳-۱۳۸۲ اجرا شده بود (Paknejad, 2005)، استفاده شد. در ضمن، اطلاعات هواشناسی (مقادیر روزانه تبخیر از تشت و بارندگی) از ایستگاه هواشناسی ماهدشت کرج تهیه شد.

تیمارهای آبیاری عبارت بودند از تیمار اول (T_1): آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبتی در تمام دوره رشد (تیمار شاهد)، تیمار دوم (T_2): آبیاری در ۶۰ درصد تخلیه رطوبتی از ابتدای طویل شدن ساقه‌ها (تشخیص اولین گره: مرحله رشدی ۳۱ زادوکس) تا پایان دوره رشد، تیمار سوم (T_3): آبیاری در ۸۰ درصد تخلیه رطوبتی از ابتدای طویل شدن ساقه‌ها تا پایان دوره رشد، تیمار چهارم (T_4): آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبتی تا زمان گلدهی (مرحله رشدی آبستنی: مرحله رشدی ۴۳ زادوکس) و آبیاری در ۶۰ درصد تخلیه رطوبتی در زمان گلدهی (از مرحله رشدی آبستنی: مرحله رشدی ۴۳ زادوکس تا پایان گلدهی کامل: مرحله ۶۹

[5]. Fortran

زادوکس) و آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبتی از پایان گلدهی تا پایان رشد، تیمار پنجم (T_5): آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبتی تا زمان گلدهی و آبیاری در ۶۰ درصد تخلیه رطوبتی از زمان گلدهی تا پایان دوره رشد، تیمار ششم (T_6): آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبتی تا زمان گلدهی و آبیاری در ۸۰ درصد تخلیه رطوبتی در زمان گلدهی (از مرحله رشدی آبستنی: مرحله رشدی ۴۳ زادوکس تا پایان گلدهی کامل: مرحله ۶۹ زادوکس) و آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبتی از پایان گلدهی تا پایان رشد، تیمار هفتم (T_7): آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبتی تا زمان گلدهی و آبیاری در ۸۰ درصد تخلیه رطوبتی از زمان گلدهی تا پایان دوره رشد، تیمار هشتم (T_8): آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبتی تا زمان گلدهی و قطع آبیاری از گلدهی تا پایان دوره رشد، تیمار نهم (T_9): آبیاری در ۴۰ درصد تخلیه رطوبتی تا ابتدای پر شدن دانه (از مرحله شیری شدن دانه: مرحله رشدی ۷۰ زادوکس تا انتهای دوره رشد). مقادیر عمق و زمان آبیاری در تیمارهای مختلف در جدول ۱ ارائه شده است.

هسته مرکزی مدل در ابتدا داده‌های روزانه هواشناسی، آبیاری و شماره روز از اول مهرماه هرسال را به‌صورت فایل-های اطلاعات سالانه دریافت می‌کند. با توجه به اینکه تاریخ کاشت معلوم بود (۱۹ آبان)، در اجرای مدل از گزینه مربوط به قبول کردن یک تاریخ کاشت استفاده شد. با توجه به اینکه در مدل باید تاریخ کاشت به‌صورت تعداد روز از ابتدای مهر وارد شود، عدد ۴۹ وارد مدل گردید.

با توجه به اطلاعات در دسترس مقدار رطوبت در حالت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم به ترتیب برابر ۲۴ و ۹ درصد حجمی، در هر اجرا وارد مدل گردید. میزان رطوبت اولیه خاک در زمان کاشت برای لایه‌های اول (۱۰ سانتی-متر) و دوم (۱۰۰ سانتی‌متر) خاک برابر ۱۵ درصد حجمی وارد مدل گردید (طبق اطلاعات مقادیر مشاهده‌ای). در ضمن، ضریب رواناب و ظرفیت نگهداشت سطحی برابر صفر وارد مدل شد. بعد از تخمین مقادیر عملکرد دانه در تیمارهای مختلف آبیاری، نتایج حاصل با مقادیر مشاهده‌ای مقایسه شد.

واسنجی مدل

پس از مقایسه نتایج بین مقادیر محصول دانه برآورد شده و مشاهده‌ای در آزمون اول مدل معلوم گردید که مدل جواب رضایت‌بخشی برای تیمارهای مختلف آبیاری در منطقه کرج نشان نمی‌دهد و مقادیر محصول دانه را خیلی کمتر از مقادیر مشاهده‌ای برآورد می‌کند و در ضمن مقادیر محصول دانه شبیه‌سازی‌شده در مدل نزدیک به هم بوده و اختلاف در بین تیمارهای نرمال و تنش خشکی دیده نشد. لذا با توجه به اجراهای مختلف مدل، اقدامات زیر برای واسنجی مدل انجام شد.

تعدیل ضریب تخلیه مجاز رطوبتی

ضریب تخلیه مجاز رطوبتی از ۰/۶۵ به ۰/۳ تغییر پیدا کرد. با این تدبیر مدل مقدار آب سهل‌الوصول را کمتر در نظر گرفته و اختلاف عملکرد در بین تیمارهای آبیاری نرمال و تنش بهتر برآورد می‌شود.

اصلاح معادله بازده تعرق

منظور از بازده تعرق، مقدار تولید ماده خشک برحسب کیلوگرم در هکتار به ازای یک میلی‌متر تعرق واقعی می-باشد. درواقع هرچه بازده تعرق بیشتر باشد، بازده و کارایی تعرق برای تولید ماده خشک بیشتر خواهد بود. در مدل موردنظر بازده تعرق از طریق رابطه زیر تعیین می‌شود (Ziaei and Sepaskhah, 2003):

$$TE=\left(102-13E+0.35E^2\right)\times K \qquad [۱]$$

که در آن TE بازده تعرق برحسب کیلوگرم بر میلی‌متر، E تبخیر از تشت برحسب میلی‌متر و K ضریب واسنجی می-باشد. با جایگذاری مقادیر مختلف تبخیر از تشت در منطقه موردمطالعه در معادله بازده تعرق (رابطه ۱) ملاحظه می-گردد، مقدار بازده تعرق از محدوده تبخیر از تشت حدود ۹ میلی‌متر به بعد، منفی می‌شود و این وضعیت نباید به وجود آید. به خاطر اینکه اگر مقدار بازده تعرق منفی باشد مدل در تخمین عملکرد دانه مسیر اشتباهی را طی خواهد کرد. لذا این مقادیر منفی باید به طریقی اصلاح می‌گردید. با توجه به داده‌های هواشناسی در منطقه موردمطالعه (کرج) در سال زراعی ۸۳-۱۳۸۲ ملاحظه می‌شود که حداکثر مقدار تبخیر از تشت روزانه در محدوده طول دوره رشد گیاه ۱۵ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به اینکه مقدار بازده تعرق مربوط به تبخیر از تشت ۱۵ میلی‌متر، معادل ۶۰- کیلوگرم بر میلی‌متر به دست می‌آید لذا برای اصلاح معادله بازده تعرق عدد ثابت ۶۰ به رابطه بازده تعرق اضافه شد و معادله بازده تعرق از

جدول ۱. مقدار و زمان آبیاری در تیمارهای مختلف آبیاری گندم (رقم مرودشت) در منطقه کرج در سال زراعی ۸۳-۱۳۸۲

Table 1. The amount and time of Irrigation in different irrigation treatments of wheat (cultivar of Marvdasht) on 2003-2004 cropping season in the Karaj area.

تیمارها Treatments	تعداد آبیاری Irrigation number	زمان‌های آبیاری در سال زراعی ۸۳-۱۳۸۲ Irrigation times on 2003-2004 cropping season									عمق آبیاری در هر مرتبه (میلی‌متر) Irrigation depth in one interval (mm)
T_1	9	۲۰ آبان 11 Nov.	۱۱ اسفند 2 Mar.	۱۰ فروردین 30 Mar.	۲۷ فروردین 16 Apr.	۸ اردیبهشت 28 Apr.	۲۰ اردیبهشت 10 May	۱ خرداد 22 May	۱۰ خرداد 31 May	۲۰ خرداد 10 June	59.5
T_2	8	۲۰ آبان 11 Nov.	۱۱ اسفند 2 Mar.	۱۰ فروردین 30 Mar.	۱ اردیبهشت 21 Apr.	۱۵ اردیبهشت 5 May	۳ خرداد 24 May	۱۶ خرداد 6 June	۲۵ خرداد 15 June	-	59.5
T_3	7	۲۰ آبان 11 Nov.	۱۱ اسفند 2 Mar.	۱۰ فروردین 30 Mar.	۶ اردیبهشت 26 Apr.	۲۰ اردیبهشت 10 May	۱۰ خرداد 31 May	۲۳ خرداد 13 June	-	-	59.5
T_4	9	۲۰ آبان 11 Nov.	۱۱ اسفند 2 Mar.	۱۰ فروردین 30 Mar.	۲۷ فروردین 16 Apr.	۸ اردیبهشت 28 Apr.	۲۵ اردیبهشت 15 May	۵ خرداد 26 May	۱۵ خرداد 5 June	۲۵ خرداد 15 June	59.5
T_5	8	۲۰ آبان 11 Nov.	۱۱ اسفند 2 Mar.	۱۰ فروردین 30 Mar.	۲۷ فروردین 16 Apr.	۸ اردیبهشت 28 Apr.	۲۵ اردیبهشت 15 May	۱۰ خرداد 31 May	۲۰ خرداد 10 June	-	59.5
T_6	8	۲۰ آبان 11 Nov.	۱۱ اسفند 2 Mar.	۱۰ فروردین 30 Mar.	۲۷ فروردین 16 Apr.	۸ اردیبهشت 28 Apr.	۳۰ اردیبهشت 20 May	۱۰ خرداد 31 May	۲۰ خرداد 10 June	-	59.5
T_7	7	۲۰ آبان 11 Nov.	۱۱ اسفند 2 Mar.	۱۰ فروردین 30 Mar.	۲۷ فروردین 16 Apr.	۸ اردیبهشت 28 Apr.	۳۰ اردیبهشت 20 May	۲۰ خرداد 10 June	-	-	59.5
T_8	5	۲۰ آبان 11 Nov.	۱۱ اسفند 2 Mar.	۱۰ فروردین 30 Mar.	۲۷ فروردین 16 Apr.	۸ اردیبهشت 28 Apr.	-	-	-	-	59.5
T_9	6	۲۰ آبان 11 Nov.	۱۱ اسفند 2 Mar.	۱۰ فروردین 30 Mar.	۲۷ فروردین 16 Apr.	۸ اردیبهشت 28 Apr.	۲۰ اردیبهشت 10 May	-	-	-	59.5

حالت $TE=102-13E+0.35E^2$ به حالت $TE=162-13E+0.35E^2$ تغییر یافت.

اصلاح ضریب واسنجی معادله بازده تعرق

در معادله بازده تعرق ضریب K که به‌عنوان ضریب واسنجی معادله بازده تعرق نامیده می‌شود، اصلاح شد. مقدار ضریب واسنجی K در نسخه اصلی مدل MEDIWY برای منطقه باجگاه برابر ۱/۳ می‌باشد و هرچه این ضریب بیشتر باشد، کارایی تعرق بیشتر شده و عملکرد محصول نیز بیشتر برآورد می‌شود. در این تحقیق برای واسنجی بهتر مدل طول دوره رشد گیاه به دو مرحله تقسیم گردید مرحله اول قبل از شروع طویل شدن ساقه (Stem Extension) که تمام تیمارها به‌طور یکسان آبیاری شده بودند و مرحله دوم بعد از شروع طویل شدن ساقه که تیمارهای تنش خشکی اعمال شده بود. با بررسی‌های انجام‌شده مقدار ضریب واسنجی K برای مرحله قبل از طویل شدن ساقه $k_{befor\ stem\ extension}$ برای تمامی تیمارها برابر ۰/۵ تعیین شد که به‌اختصار به‌صورت $k_{bs}=0.5$ نشان داده شد و ضریب واسنجی برای مرحله بعد از شروع طویل شدن ساقه $k_{after\ stem\ extension}$ به‌اختصار به‌صورت k_{as} نشان داده شد و برای تیمارهای مختلف، ضرایب مختلف واسنجی تعیین شد.

اصلاح معادله تعرق پتانسیل

در مدل MEDIWY برای برآورد تعرق بالقوه گیاه معادله زیر که شبیه معادلات بلمنز و همکاران (Belmans et al., 1983) و سپاسخواه و ایلام‌پور (Sepaskhah and Ilampour, 1996) می‌باشد، استفاده شده است:

$$T_{pot} = E_{pan} \times [1 - \exp(-0.55LAI)] \qquad [۲]$$

که در آن *Epan*: شدت تبخیر از تشت کلاس الف (میلی‌متر در روز)؛ LAI: شاخص سطح برگ (بدون بعد) و *Tpot*: شدت تعرق بالقوه (میلی‌متر در روز) می‌باشد.

با بررسی فایل‌های خروجی مدل در تیمارهای مختلف مشخص شد مقدار تعرق پتانسیل از سوی مدل پایین برآورد می‌شود. لذا در این قسمت با اعمال ضریبی در معادله تعرق پتانسیل، رابطه تعرق پتانسیل در داخل مدل اصلاح شد. ضریب اصلاحی $K_{pot} = 2$ بهترین گزینه واسنجی شناخته شد؛ یعنی معادله تعرق پتانسیل از

به $T_{pot} = E_{pan} \times [1 - \exp(-0.55LAI)]$ تغییر پیدا کرد $T_{pot} = 2 \times E_{pan} \times [1 - \exp(-0.55LAI)]$

گروه‌بندی تیمارها

بعد از اعمال اصلاحات چهارگانه ذکرشده در داخل مدل MEDIWY، مدل برای تیمارهای مختلف آبیاری اجرا شد. نتایج نشان داد مدل نسبت به حالت اولیه و قبل از اعمال ضرایب اصلاحی جواب بهتری ارائه می‌کند اما هنوز با مقادیر مشاهده‌ای اختلاف زیادی دارد؛ به‌عبارت‌دیگر مدل نمی‌تواند انعطاف لازم را نسبت به تیمارها و رژیم‌های مختلف آبیاری از خود نشان دهد و این درواقع به خاطر این است که هرکدام از تیمارهای آبیاری مربوط به یک رژیم خاص بوده و در مراحل مختلف رشد گیاه اعمال شده است. لذا به نظر می‌رسد این تیمارها (۹ رژیم متفاوت آبیاری) بایستی ازلحاظ شدت تنش خشکی طبقه‌بندی‌شده و مدل برای هر طبقه و گروه به‌طور مجزا واسنجی شود. به‌طورکلی هرچه اختلاف بین مقادیر عملکرد دانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی در تیمارهای مختلف کمتر باشد را می‌توان در یک گروه جای داد. برای هر چه‌بهتر در نظر گرفتن تفاوت بین رژیم‌های متفاوت آبیاری و طبقه‌بندی آن‌ها، از معیار زیر استفاده شد.

$$ID=\frac{P-O}{\Delta L} \qquad [۳]$$

که در آن ID: شاخص تفاوت بین تیمارها، ΔL: متوسط اختلاف عملکرد در بین دو اجرای متوالی مدل، P: مقدار عملکرد دانه شبیه‌سازی‌شده و O: مقدار عملکرد دانه مشاهده‌شده می‌باشد.

اعتبار سنجی و ارزیابی مدل

اعتبارسنجی[6] مدل که مرحله مهمی برای سنجش کارایی مدل به شمار می‌رود، عبارت است از مقایسه بین داده‌های مزرعه‌ای مستقل که در مرحله واسنجی به کار نرفته‌اند، با داده‌های خروجی شبیه‌سازی‌شده توسط مدل. برای اعتبار سنجی مدل از اطلاعات مستقل محصول دانه رقم گاسپارد که در سال زراعی ۸۳-۱۳۸۲ اجرا شده بود (Paknejad, 2005) استفاده شد.

[6] - Validation

برای ارزیابی کارایی مدل از چندین آماره ارزیابی شامل برازش رگرسیون خطی بین مشاهدات و داده‌های شبیه‌سازی‌شده و مقایسه آن با خط یک‌به‌یک، ضریب تعیین[۷] (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا[۸] (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده[۹] (NRMSE) و کارایی مدل[۱۰] (ME) استفاده شد. این معیارها را می‌توان از طریق روابط زیر تعیین کرد:

$$R^2=\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-\bar{O})^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2} \qquad [۴]$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{n}} \qquad [۵]$$

$$NRMSE=\frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{n}}}{\bar{O}} \qquad [۶]$$

$$ME=\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2-\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2} \qquad [۷]$$

که در آن‌ها Pi مقادیر پیش‌بینی‌شده، O_i مقادیر اندازه‌گیری شده، $\bar{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n تعداد مشاهدات می‌باشد (Mereu, 2009).

نتایج و بحث

برای گروه‌بندی تیمارها ازلحاظ شدت تنش خشکی، دامنه‌ای از مقادیر مختلف ضریب واسنجی (K_{as}) با اختلاف ۰/۱ انتخاب و مدل برای هر حالت اجرا شد و متوسط تفاوت عملکرد در دو اجرای متوالی (ΔL) برای هر تیمار به دست آمد. سپس شاخص تفاوت تیمارها (ID) از طریق رابطه ۳ تعیین شد. نتایج گروه‌بندی و جزئیات تعیین شاخص تفاوت تیمارها در جدول ۲ ارائه شده است.

برای گروه‌بندی تیمارها هر چه شاخص تفاوت تیمارها نزدیک به هم باشد قاعدتاً می‌توانند در یک گروه قرار بگیرند. با توجه به دامنه تغییرات شاخص تفاوت تیمارها، تصمیم بر این گرفته شد تا تیمارها به سه گروه زیر تقسیم گردد.

گروه ۱ (آبیاری نرمال و تنش خشکی کم): تیمارهای T_1 و T_2 (شاخص تفاوت تیمارها بین ۲/۰۴- تا ۰/۷۱)؛ گروه ۲ (تنش خشکی متوسط): تیمارهای T_3، T_4، T_6 و T_9 (شاخص تفاوت تیمارها بین ۴/۰۹ تا ۶)؛ گروه ۳ (تنش خشکی زیاد): تیمارهای T_5، T_7 و T_8 (شاخص تفاوت تیمارها بین ۷/۶۶ تا ۹/۸).

بعد از گروه‌بندی تیمارها ازلحاظ شدت تنش خشکی، ضریب واسنجی معادله بازده تعرق برای مرحله بعد از شروع طویل شدن ساقه (K_{as})، برای هر گروه تعیین گردید (جدول ۳).

مقایسه مقادیر برآورد شده و مشاهده‌ای عملکرد دانه گندم رقم مرودشت با استفاده از مدل MEDIWY واسنجی شده در منطقه کرج و همچنین شاخص‌های آماری برای ارزیابی آن در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است.

هرچه مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) به صفر نزدیک‌تر باشد، مدل برآورد دقیق‌تری ارائه داده است. اگر مقدار جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE)، کمتر از ۱۰ درصد باشد، نشان‌دهنده کارایی بالای مدل در شبیه‌سازی است (Zhao et al., 2011). کارایی مدل (ME)، توانمندی مدل را نشان می‌دهد و هر چه مقدار آن به ۱ نزدیک‌تر باشد، توانمندی مدل در برآورد نتایج بیشتر بوده است. شکل ۱، همبستگی خطی بین مقادیر نهایی عملکرد دانه شبیه‌سازی‌شده توسط مدل و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. مقدار R^2 معادل با ۰/۹۷، نشان می‌دهد که مقادیر شبیه‌سازی‌شده عملکرد دانه، توافق و همبستگی خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. طبق نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۴ و مشاهده شاخص‌های آماری در جدول ۵، مشخص است که مدل MEDIWY به‌خوبی واسنجی شده و مقادیر عملکرد دانه در منطقه کرج را شبیه‌سازی می‌کند.

نتایج اعتبار سنجی مدل

نتایج مقادیر عملکرد دانه شبیه‌سازی‌شده و شاخص‌های آماری برای اعتبارسنجی مدل MEDIWY در جداول ۶ و ۷ ارائه شده است. نتایج شاخص‌های اعتبارسنجی مندرج در جدول ۷ نشان می‌دهد که مقادیر RMSE و NRMSE که به‌نوعی کارایی مدل را نشان می‌دهد، کم بوده و نشان‌دهنده کارایی مناسب مدل می‌باشد؛ بنابراین با توجه به شاخص-

[7] - Coefficient of Determination
[8]- Root Mean Square Error
[9]- Normalized Root Mean Square Error
[10]- Model Efficiency

های آماری به‌دست‌آمده می‌توان عنوان نمود که مدل MEDIWY واسنجی شده، به‌خوبی می‌تواند مقادیر عملکرد گندم را در منطقه کرج شبیه‌سازی نماید.

جدول ۲. جزئیات تعیین شاخص تفاوت تیمارهای آبیاری برای تخمین عملکرد گندم (رقم مرودشت).

Table 2. Determination of difference index between irrigation treatments for simulation of wheat yield (cultivar of Marvdasht).

تیمارها Treatments	عملکرد مزرعه‌ای (کیلوگرم در هکتار) Observed yield ($Kg.ha^{-1}$)	عملکرد محاسبه‌ای (کیلوگرم در هکتار) Predicted Yield ($Kg.ha^{-1}$)				ΔL	ID
		K_{as} = 2.2	K_{as} = 2.1	K_{as} = 2	K_{as} = 1.9		
T_1	7583	7247	6930	6613	6296	320	-2.04
T_2	6229	6722	6432	6141	5850	285	0.71
T_3	4729	6018	5765	5512	5260	253	4.09
T_4	5296	7040	6740	6440	6140	300	4.81
T_5	4042	6406	6135	5864	5593	273	7.66
T_6	4500	6391	6120	5850	5580	270	6
T_7	3271	5621	5386	5150	4916	237	8.9
T_8	2313	4153	3984	3816	3648	170	9.8
T_9	3604	5007	4791	4576	4361	217	5.47

K_{as}: ضریب واسنجی معادله بازده تعرق برای مرحله بعد از شروع طویل شدن ساقه، ΔL: متوسط اختلاف عملکرد در بین دو اجرای متوالی مدل، ID: شاخص تفاوت بین تیمارها.

K_{as}: Modify coefficient of equation of transpiration efficiency for stage of after stem extension, ΔL: Mean difference yield between two operations, ID: Difference index between treatments.

جدول ۳. ضرایب واسنجی معادله بازده تعرق (K_{as}) در مدل MEDIWY برای شبیه‌سازی عملکرد گندم (رقم مرودشت) در گروه‌ها و تیمارهای مختلف آبیاری.

Table 3. Modify coefficient of equation of transpiration efficiency (K_{as}) in MEDIWY model for simulation of wheat yield (cultivar of Marvdasht) under different groups and irrigation treatments.

تیمارهای آبیاری Irrigation treatments	ضرایب واسنجی (K_{as}) Modify coefficients
گروه ۱ (تیمار ۱ و ۲) Group 1 (T_1, T_2)	2.2
گروه ۲ (تیمار ۳، ۴، ۶، ۹) Group 2 (T_3, T_4, T_6, T_9)	1.6
گروه ۳ (تیمار ۵، ۷، ۸) Group 3 (T_5, T_7, T_8)	1.2

جدول ۴. مقایسه مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای عملکرد دانه گندم (رقم مرودشت) با استفاده از مدل MEDIWY واسنجی شده در منطقه کرج.

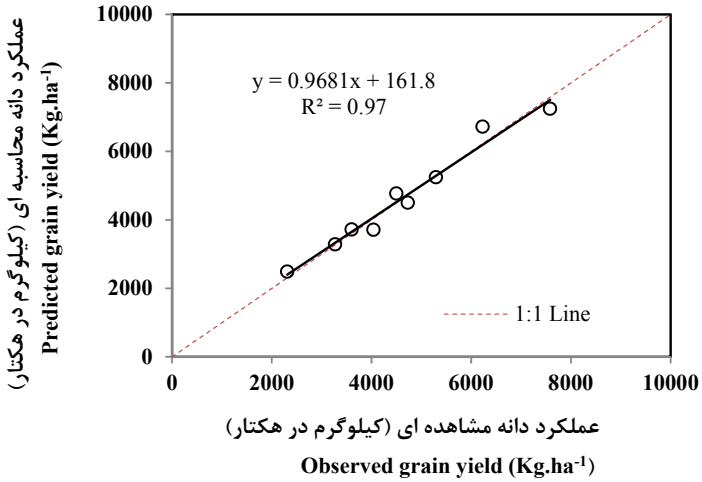
Table 4. Comparison between observed and simulated wheat grain yield (cultivar of Marvdasht) by modified MEDIWY model in Karaj area.

عملکرد دانه (رقم مرودشت) Grain yield (Marvdasht Cv.)	تیمارهای آبیاری Irrigation treatments								
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9
شبیه‌سازی‌شده (کیلوگرم در هکتار) Simulated ($kg.ha^{-1}$)	7247	6722	4504	5244	3713	4773	3287	2488	3721
مشاهده‌ای (کیلوگرم در هکتار) Observed ($Kg.ha^{-1}$)	7583	6229	4729	5296	4042	4500	3271	2313	3604

جدول ۵. مقادیر شاخص‌های آماری شبیه‌سازی عملکرد دانه گندم (رقم مرودشت) با استفاده از مدل MEDIWY واسنجی شده در منطقه کرج.

Table 5. Statistical index for simulation of wheat grain yield (cultivar of Marvdasht) by modified MEDIWY model in Karaj area.

شاخص‌های آماری (رقم مرودشت) Statistical index (Marvdasht Cv.)	مقادیر Amounts
RMSE ($Kg.ha^{-1}$)	265
NRMSE (%)	5.7
ME	0.99
R^2	0.97



شکل ۱. میزان همبستگی بین مقادیر محاسبه‌ای و مشاهده‌ای عملکرد دانه گندم (رقم مرودشت) با استفاده از مدل MEDIWY واسنجی شده در منطقه کرج.

Fig. 1. Regression relationship between observed and predicted wheat grain yield (cultivar of Marvdasht) by modified MEDIWY model in Karaj area.

جدول ۶. مقایسه مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای عملکرد دانه گندم مربوط به اعتبارسنجی مدل MEDIWY با استفاده از اطلاعات مستقل (رقم گاسپارد) در منطقه کرج.

Table 6. Comparison between observed and simulated wheat grain yield for validation of MEDIWY model by independent data (cultivar of Gaspard) in Karaj area.

عملکرد دانه (رقم گاسپارد) Grain yield (Gaspard Cv.)	تیمارهای آبیاری Irrigation treatments								
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9
شبیه‌سازی‌شده (کیلوگرم در هکتار) Simulated ($kg.ha^{-1}$)	8890	6491	4105	4956	4515	4552	3055	2450	3738
مشاهده‌ای (کیلوگرم در هکتار) Observed ($Kg.ha^{-1}$)	8958	6458	4958	5479	4192	4679	3354	1967	3458

جدول ۷. مقادیر شاخص‌های آماری شبیه‌سازی عملکرد دانه گندم برای اعتبارسنجی مدل MEDIWY با استفاده از اطلاعات مستقل (رقم گاسپارد) در منطقه کرج.

Table 7. Statistical index for simulation of wheat grain yield for validation of MEDIWY model by independent data (cultivar of Gaspard) in Karaj area.

شاخص‌های آماری (رقم گاسپارد) Statistical index (Gaspard Cv.)	مقادیر Amounts
RMSE ($Kg.ha^{-1}$)	412
NRMSE (%)	8.5
ME	0.99
R^2	0.92

نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه تیمارهای آبیاری بکار رفته در این تحقیق هرکدام به‌صورت یک رژیم آبیاری بخصوصی می‌باشد و در مراحل مختلف رشد نیز اعمال شده است برای واسنجی دقیق‌تر مدل MEDIWY، تیمارهای آبیاری بر اساس شدت تنش خشکی به سه گروه طبقه‌بندی شد و واسنجی مدل برای هر گروه به‌طور جداگانه انجام گردید. بعد از واسنجی مدل برای شبیه‌سازی عملکرد گندم (رقم مرودشت) در منطقه کرج، مقادیر جذر میانگین مربعات خطا، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده و کارایی مدل به ترتیب برابر ۲۶۵ کیلوگرم در هکتار، ۵/۷ درصد و ۰/۹۹ به دست آمد که نشان‌دهنده شاخص‌های آماری مناسب در قسمت واسنجی مدل می‌باشد. نتایج اعتبار سنجی مدل نشان داد شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده و کارایی مدل به ترتیب برابر ۴۱۲ کیلوگرم در هکتار، ۸/۵ درصد و ۰/۹۹ به دست می‌آید که نشان می‌دهد مدل واسنجی شده به‌خوبی می‌تواند مقادیر عملکرد گندم را در منطقه کرج شبیه‌سازی نماید. نتایج این تحقیق نشان داد که اگرچه مدل MEDIWY نسبت به سایر مدل‌های گیاهی نیاز به داده‌های ورودی کمتری دارد، بااین‌وجود از دقت و توانمندی مناسبی برای شبیه‌سازی عملکرد محصول برخوردار است.

منابع

Andarziyan, B., Bakhshande, A., Fathi, G., Alami, K., Bannayan, M., Emam, Y., 2008. Evaluation of CERES-Wheat model under Ahvaz climatic condition. Journal of Iranian Agronomy Research. 6(1), 11-22. [In Persian with English summary].

Bannayan, M., Crout, N.M.J., Hoogenboon, G., 2003. Application of the CERES-Wheat Model for within-season predication of winter wheat yield in the United Kingdom. AgronomyJounnal. 95, 114-125.

Belmans, C., Wesseling, J.G., Feddes, R.A., 1983. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. Journal of Hydrology. 63(3-4), 271-286.

Cordery, I., Graham, A.G., 1989. Forecasting wheat yields using a water budgeting model. Australian Journal of Agricultural Research. 40(4), 715-728.

Kang, S., Zhang, F., Zhang, J., 2001. A Simulation model of water dynamics in winter wheat field and its application in a semiarid region. Agricultural Water Management. 49(2), 115-129.

Jones, C.A., Kiniry, J.R., 1986. CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development. Texas A&M University Publication, College Station. 194P.

Kiyani, A., Kochaki, A., Bannayan, M., Nasiri-Mahalati, M., 2004. Evaluation of CERES-Wheat model at two different climatic

locations in Khorasan province. Desert. 9(1), 125-142. [In Persian with English summary].

Mehraban, A., 2013. Simulation of wheat yield by Aqua Crop model. International Journal of Farming and Allied Sciences. 2(21), 939-943.

Mereu, V. 2009. Climate change impact on durum wheat in Sardinia. Ph.D. dissertation. Agrometeorologia e EcofisiologiadeiSistemiAgrari e Forestali. XXII ciclo – UniversitàdegliStudi di Sassari.

Paknejad, F., 2005. Effects of drought stress on physiological characteristics of grain yield and components of wheat cultivars. Ph.D. dissertation, Faculty of Agriculture, Karaj Branch, Islamic Azad University, Iran. [In Persian with English Summary].

Paknejad, F., Majidifakhr, F., Mirtaheri, S.M., 2012. Validation of the CERES-Wheat for predication of wheat varieties in irrigation and terminal drought stress. American Journal of agricultural and Biological Sciences. 7(2), 180-185.

Sepaskhah, A.R., Aghayari, F., Tavakoli, A.R., 2006. Evaluation and modification of MEDIWY model for irrigated and rainfed wheat in Maragheh area. Journal of Agricultural Engineering Research. 7(28), 133-150. [In Persian with English Summary].

Sepaskhah, A.R., Bazrafshan-Jahromi, A.R., Shirmohammadi-Aliakbarkhani, Z., 2006.Development and Evaluation of a Model for Yield Production of Wheat, Maize and Sugarbeet under Water and Salt Stresses. Biosystems Engineering. 93(2), 139-152.

Sepaskhah, A.R., Ilampour, S., 1996. Relationships between yield, crop water stress index (CWSI) and transpiration of cowpea (*Vignasinensis* L.). Agronomie. 16, 269-279.

Soltani, A., Torabi, B., 2009. Crop Modeling. Ferdowsi University of Mashhad Publication. 232p. [In Persian].

Stockle, C.O., Martin, S.A., Campbel, G.S., 1984. CropSyst, a Cropping Simulation Model: Water/ Nitrogen Budgets and Crop Yield. Agricultural Systems. 46(3),335-359.

Van Keulen, H., Wolf, J., 1986. Modeling of Agricultural Production: Weather Soils and Crops. Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen, the Netherlands, 479p.

Wang. E., Chen, C., Yu, Q., 2009. Modeling the response of wheat and maize productivity to climate variability and irrigation in the North China Plain. 18th world IMACS/MODSIM Congress, Cairns, Australia.

Yang, Y., Watanabe, M., Zhang, X., Zhang, J., Wang, Q., Hayashi, S., 2006. Optimizing irrigation managementfor wheat to reduce groundwater depletion in the piedmont region of the Taihang Mountains in the North China Plain. Agricultural Water Management. 82(1-2), 25- 44.

Zhao, H., Gao, G., Yan, X., Zhang, Q., Hou, H., Zhu, Y., Tian, Z., 2011. Risk assessment of agricultural drought using the CERES-Wheat model: a case study of Henan Plain, China. Climate Research. 50, 247-256.

Ziaei, A.N., Sepaskhah, A.R., 2003. Model for simulation of winter wheat yield under dryland and irrigated conditions. Agricultural Water Management. 58,1-17.