

ارزیابی مدلی برای شبیه‌سازی رشد و نمو گندم (*Triticum aestivum* L.) تحت شرایط تنش خشکیفرزاد حسین‌پناهی^{*۱} - محمد کافی^۲ - مهدی پارسا^۳ - مهدی نصیری محلاتی^۴ - محمد بنایان اول^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۷/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۳/۲

چکیده

مدلسازی یکی از ابزارهای تجزیه و تحلیل کمی سیستم‌های بیولوژیک است که کمک زیادی در شناخت اساس فیزیولوژیکی رشد و نمو گیاهان زراعی به ویژه تحت شرایط محدودیت عوامل موثر بر رشد از جمله آب می‌کند. در این مطالعه ابتدا مدلی با تکیه بر روش پنمن-مونتیت فائو جهت شبیه‌سازی تبخیر و تعرق و سایر اجزای موازنه آب خاک ساخته شد و این مدل با مدل رشد گندم، که با استفاده از مدل‌های پایه SUCROS و LINTUL ساخته شد تلفیق گردید. سپس آزمایشی مزرعه‌ای در سال زراعی ۹۰-۱۳۸۹ جهت تعیین اعتبار مدل در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد به اجرا در آمد. آزمایش در قالب طرح کرت‌های خرد شده با سه تکرار اجرا شد. برای کرت‌های اصلی ۵ تیمار آبیاری شامل آبیاری به میزان نیاز کامل آبیاری گیاه (FI)، بدون آبیاری در فصل بهار (NI)، آبیاری به میزان ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه (FI ۷۵ درصد)، آبیاری به میزان ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه (FI ۵۰ درصد) و آبیاری به میزان ۲۵ درصد نیاز آبی گیاه (FI ۲۵ درصد) در نظر گرفته شد و کرت‌های فرعی شامل ارقام مقاوم (پیشگام، یک رقم ریشک‌دار) و حساس (گاسکوژن، بدون ریشک) به خشکی گندم بودند. نیاز آبی گیاه بر اساس روش پنمن-مونتیت فائو محاسبه شد. سپس نتایج شبیه‌سازی با دو روش برازش رگرسیون خطی بین مشاهدات و داده‌های شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با خط ۱:۱ و همچنین روش جذر میانگین مربعات خطا (RMSE%) تعیین اعتبار گردید. نتایج نشان داد که مدل روند شاخص سطح برگ رقم حساس را در شرایط بدون تنش (تیمار FI) عالی شبیه‌سازی کرد اما در شرایط تنش شدید (تیمارهای NI و FI ۲۵ درصد) دقت شبیه‌سازی متوسط ارزیابی شد. در سایر سطوح آبیاری نیز دقت شبیه‌سازی برای رقم حساس خوب بود. شبیه‌سازی روند شاخص سطح برگ رقم مقاوم نیز در تمام سطوح آبیاری در درجه کیفی خوب قرار گرفت. همچنین توانایی مدل از نظر شبیه‌سازی حداکثر میزان شاخص سطح برگ (LAI_{max}) و روز رسیدن به آن در هر دو رقم عالی ارزیابی شد. مدل تولید ماده خشک رقم حساس را فقط در تیمار FI عالی شبیه‌سازی کرد و در سایر تیمارها دقت شبیه‌سازی برای رقم حساس خوب بود. اما قدرت مدل در شبیه‌سازی تولید ماده خشک رقم مقاوم در تمام سطوح آبیاری عالی به دست آمد. همچنین قدرت مدل در شبیه‌سازی عملکرد هر دو رقم عالی ارزیابی شد. مدل عملکرد تیمارهای NI، FI ۲۵٪، FI ۵۰٪، FI ۷۵٪ و FI را به ترتیب ۱۲۸۵، ۳۰۳۱، ۴۶۹۷، ۶۱۳۷ و ۷۶۴۹ کیلوگرم در هکتار شبیه‌سازی کرد. در شرایط آزمایشی نیز عملکرد رقم گاسکوژن در سطوح آبیاری مذکور به ترتیب ۱۶۱۵، ۲۹۵۴، ۴۴۸۳، ۵۹۵۲ و ۸۱۳۲ کیلوگرم و برای رقم پیشگام به ترتیب ۱۷۵۸، ۳۶۵۲، ۵۰۷۱، ۶۰۶۴ و ۷۵۴۸ کیلوگرم در هکتار بدست آمد. در مجموع نتایج حاکی از کارآمدی مدل ارائه شده در پیش‌بینی تغییرات رشد و نمو گندم تحت مقادیر متفاوت فراهمی آب می‌باشد. اما جهت حصول نتایج بهتر مدل موجود باید با آزمایشات گوناگون تعیین اعتبار گردد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق، مدل پنمن-مونتیت فائو، مدلسازی، مدل سوکروز، مدل لینتول

مقدمه

بسیاری از مناطق سبب شده که الگوی مشخصی از میزان و زمان بارندگی در اختیار نبوده و در نتیجه تصمیمات مدیریتی در ارتباط با عملیات کشت و کار گاه‌ها با مشکلاتی مواجه شود (۱۴). پیامدهای این مسئله از قبیل کاهش تولید و افزایش خلاء عملکرد مشکلاتی را برای تولیدکنندگان بخش کشاورزی به بار می‌آورد. به همین دلیل طی سالیان متمادی تلاش‌های زیادی در ارتباط با بررسی تغییرات عملکرد گندم در محیط‌های مستعد خشکی و ارائه راهکارهایی برای مواجهه با آن انجام گرفته است. عمده تلاش‌ها در این زمینه معطوف به فعالیت‌های به‌نژادی جهت تولید وارته‌های مقاوم به خشکی و تغییر

بدون شک کمبود آب عامل اصلی تغییرات عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.) در بسیاری از مناطق دنیا، بالاخص مناطق خشک و نیمه خشک می‌باشد (۳۳). نوسانات سالیانه بارندگی در

۱- استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان
* - نویسنده مسئول: (Email : agro_expert@yahoo.com)
۲، ۳، ۴ و ۵- به ترتیب استاد، دانشیار، استاد و دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه می‌باشند جایگزین آن شد (۳۱). چندین نمونه از مدل‌های مهم مکانیستیکی نیز عبارتند از: CERES (۱۰، ۱۴ و ۱۵)، SUCROS (۶، ۹ و ۳۵)، DSSAT (۳۷) و Sirius (۲۷).

به طور کلی اساس کار در شبیه‌سازی رشد و نمو گیاهان زراعی تحت شرایط تنش خشکی مبتنی بر دو مرحله شبیه‌سازی می‌باشد. در یک مرحله اجزای دخیل در موازنه آب خاک شامل بارندگی، آبیاری، رواناب، نفوذ عمقی، صعود کاپیلاری و تبخیر و تعرق تخمین زده می‌شود (۱۶). بدیهی است که تخمین دقیق این اجزاء میزان آب قابل دسترس خاک برای گیاه در مراحل مختلف رشدی را مشخص کرده و در نتیجه رشد و نمو گیاه بر اساس آب قابل دسترس می‌تواند شبیه‌سازی شود. در این میان تبخیر و تعرق گیاه مهم‌ترین پارامتر تلفات آب در سیستم خاک-گیاه-اتمسفر بوده که تعیین کننده سطح آب خاک است و متغیر کلیدی برای محاسبه قابلیت دسترسی آب و تنش خشکی می‌باشد (۱۶). روش‌های محاسبه تبخیر و تعرق از نظر نیاز به داده بسیار متفاوتند و بسته به هدف و میزان دسترسی اطلاعات هواشناسی می‌توانند بسیار ساده (روش‌های تجربی که فقط نیاز به میانگین ماهیانه درجه حرارت دارد) و یا بسیار پیچیده باشند که در این حالت نیازمند داده‌های روزانه هواشناسی از قبیل دماهای حداقل و حداکثر هوا، تشعشع خورشیدی، رطوبت نسبی، سرعت باد و همچنین برخی مشخصه‌های گیاهی خواهند بود (۴). در مدل‌های رشد تبخیر و تعرق اغلب به وسیله معادلات پنمن محاسبه می‌شود اما روش‌های مک کینک و پرستلی-تیلور نیز بسته به موضوع و قابلیت دسترسی داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند (۳۹). در این میان روش پنمن-مونتیث فائو که تبخیر و تعرق واقعی را بر اساس تبخیر و تعرق مرجع (تبخیر و تعرق یک گیاه چمن فرضی) محاسبه می‌کند نیز از اهمیت خاصی برخوردار است و به اعتقاد فائو تنها روش استاندارد برای محاسبه روزانه تبخیر و تعرق می‌باشد (۴).

از آنجائیکه نتایج اکثر مدل‌های رشد گیاهان زراعی در منطقه‌ای که ساخته شده‌اند اعتبار بیشتری دارد (۲۹)، لذا ساخت و ارزیابی مدلی متناسب با شرایط آب و هوایی ایران بسیار ضروری به نظر رسید. بنابراین این مطالعه با هدف ارزیابی روش پنمن-مونتیث فائو در محاسبه تبخیر و تعرق و سایر اجزای موازنه آب خاک، و تلفیق آن با مدل رشد و نمو گندم جهت شبیه‌سازی عملکرد تحت شرایط تنش خشکی صورت گرفته است.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه ابتدا مدلی با تکیه بر روش پنمن-مونتیث فائو (۴) جهت شبیه‌سازی تبخیر و تعرق و سایر اجزای موازنه آب خاک ساخته شد و این مدل با مدل رشد و نمو گندم، که با استفاده از مدل‌های پایه SUCROS (۴۰) و LINTUL (۳۶) ساخته شد تلفیق گردید. سپس

در عوامل مدیریتی بوده است (۵). با این وجود هنوز مشکلات زیادی در ارتباط با رشد و نمو گندم در مناطق خشک و نیمه‌خشک وجود دارد که می‌تواند جزء اولویت‌های تحقیقاتی قرار بگیرد.

با وجودی که گندم در بین تمام گیاهان زراعی به دلیل وجود تنوع ژنتیکی طبیعی بیش از هر گیاه دیگری مورد علاقه متخصصان اصلاح نباتات می‌باشد (۳۰)، بخش عمده‌ای از موفقیت فعالیت‌های اصلاحی گذشته، در نواحی مطلوب رشدی بوده و برنامه‌های اصلاحی در محیط‌های مستعد تنش خشکی فقط به میزان نصف مناطق معتدله سبب افزایش عملکرد گندم شده است (۳۸). در محیط‌های خشک تنش‌های دیگری از قبیل دمای بالا، تشعشع بالا و کمبود عناصر غذایی همزمان با تنش خشکی حادث می‌شوند که فرآیند اصلاح گیاهان برای مقاومت به خشکی را پیچیده‌تر می‌سازند (۴۲). بنابراین به نظر می‌رسد که افزایش تولید گندم در مناطق خشک کاری بسیار پیچیده و دشوار باشد. این در حالیست که به احتمال زیاد کاهش در میزان بارندگی و افزایش تبخیر و تعرق، از جمله مشکلات پیش‌رو در آینده کشاورزی مناطق خشک و نیمه خشک خواهد بود (۴۱).

از آنجائیکه روش‌های تجربی اصلاح نباتات، که مبتنی بر انتخاب بر اساس عملکرد بود وراثت‌پذیری پایینی دارد (۲۴)، لذا اکثر محققین معتقدند که روش‌های غیرمستقیم اصلاحی (روش‌های تحلیلی) بر اساس شناخت گیاه در سطح فیزیولوژیکی و مولکولی می‌توانند صفات کلیدی تعیین کننده عملکرد (با وراثت‌پذیری بالا) در شرایط تنش خشکی را شناسایی کنند (۱۳). این مسئله نیازمند درک مبانی فیزیولوژیکی عملکرد گیاه است (۲۴). یکی از علوم تقریباً جدیدی که بسیار مورد توجه متخصصان قرار گرفته و کمک زیادی در درک مبانی فیزیولوژیکی رشد و نمو گیاهان زراعی می‌کند مدل‌سازی است (۲۱). مدل‌های رشد قادرند با تلفیق علوم مختلف، بالاخص علوم خاک، فیزیولوژی گیاهان زراعی و هواشناسی در قالب معادلات ریاضی رشد، نمو و عملکرد گیاهان مختلف را تحت گستره وسیعی از شرایط محیطی و عوامل مدیریتی شبیه‌سازی کنند (۲۳).

طی چند دهه گذشته مدل‌های زیادی برای شبیه‌سازی رشد و نمو گیاهان زراعی تحت شرایط تنش خشکی ارائه شده‌اند که در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان آنها را به مدل‌های تجربی و مدل‌های مکانیستیکی تقسیم‌بندی کرد (۳۱). از مدل‌های تجربی ارائه شده می‌توان به جنسن و همکاران (۲۸)، هانکس و راسموسن (۲۲)، جامیسون و همکاران (۲۵) و لاند و همکاران (۲۹) اشاره کرد. مهم‌ترین ایراد مدل‌های تجربی این است که عمدتاً مبتنی بر روابط رگرسیونی هستند که همبستگی عملکرد گیاه با داده‌های محلی هواشناسی، فاکتورهای ژئوستاتیسیکی و فاکتورهای مدیریتی (مثل آبیاری) را نشان می‌دهند. بنابراین این مدل‌ها فقط قادر به پیش‌بینی عملکرد در مقیاس محلی می‌باشند (۱۷). با توجه به محدودیت زیاد مدل‌های تجربی به تدریج مدل‌های مکانیستیکی، که مبتنی بر

آب در منطقه ریشه، میزان تخلیه رطوبتی اولیه (Dr_{i-1}) بایستی محاسبه شود، که بر اساس معادله ۲ تخمین زده شد.

$$Dr_{i-1} = 1000 * (\theta_{FC} - \theta_{i-1}) * Z_r \quad (2)$$

که θ_{i-1} مقدار متوسط آب خاک در منطقه توسعه ریشه در انتهای روز 1-ام (متر مکعب آب در هر متر مکعب خاک)، θ_{FC} مقدار متوسط رطوبت خاک در نقطه ظرفیت زراعی (متر مکعب آب در هر متر مکعب خاک) و Z_r عمق ریشه دهی (متر) می باشد. مقدار روزانه عمق ریشه دهی بر اساس معادله ۳ به دست آمد (۱۸).

$$Z_r(m) = (DPP + (DMM - DPP) / (1 + \exp(FFA - FFB * t / RTM))) / 100 \quad (3)$$

که DMM مقدار تخمینی حداکثر عمق ریشه (سانتی متر)، t شماره روز بعد از کاشت، RTM طول دوره ای که حداکثر عمق ریشه حاصل می شود (تعداد روز)، FFA و FFB ضرایب تجربی ثابت و DPP عمق کاشت (سانتی متر) می باشد. مقادیر DMM، RTM و DPP در این مطالعه بر اساس نتایج آزمایشات محلی به ترتیب ۱۲۰ سانتی متر، ۱۸۰ روز و ۶ سانتی متر انتخاب شد. مقادیر FFA و FFB نیز بر اساس گزارش فرشی و همکاران (۱۸) به ترتیب ۵ و ۷ در نظر گرفته شد.

مقدار آب اضافه شده به منطقه توسعه ریشه در اثر صعود کاپیلاری بسته به نوع خاک، سطح آب ایستایی و درجه مرطوب بودن خاک عمق ریشه متفاوت می باشد. آن و همکاران (۴) بیان کردند که در مناطقی که سطح آب ایستایی به میزان یک متر پایین تر از عمق فعال ریشه دهی می باشد میزان صعود کاپیلاری صفر در نظر گرفته می شود. بنابراین در مدل ارائه شده در این مطالعه نیز میزان صعود کاپیلاری با توجه به پایین بودن سطح آب ایستایی در دشت مشهد صفر در نظر گرفته شد. در صورت نیاز روش هایی برای محاسبه صعود کاپیلاری توسط آن و همکاران (۴) ارائه شده است.

به دنبال بارندگی و یا آبیاری سنگین مقدار آب خاک در منطقه ریشه از ظرفیت زراعی فراتر رفته و این مسئله منجر به نفوذ عمقی آب و از دسترس خارج شدن بخشی از آب منطقه توسعه ریشه خواهد شد. بنابراین میزان نفوذ عمقی بر اساس معادله ۴ محاسبه گردید.

$$DP_i = (P_i - RO_i) + I_i - ET_{c,i} - Dr_{i-1} \geq 0 \quad (4)$$

بدیهی است تا زمانی که میزان آب در منطقه توسعه ریشه کمتر از رطوبت ظرفیت زراعی باشد نفوذ عمقی صورت نخواهد گرفت. بنابراین همانطور که در معادله ۴ نشان داده شده است در محاسبات فقط مقادیر مثبت نفوذ عمقی لحاظ شده و مقادیر منفی صفر در نظر گرفته می شود.

با توجه به اینکه مقادیر بارندگی و آبیاری به صورت ورودی در مدل تعریف می شوند بنابراین تنها جزء باقیمانده از اجزای موازنه آب خاک که باید مورد محاسبه قرار بگیرد میزان تبخیر و تعرق است.

یک آزمایش مزرعه ای جهت تعیین اعتبار مدل انجام گرفت. در این بخش ابتدا ساختار مدل تشریح شده و در نهایت جزئیات آزمایش صورت گرفته همراه با مراحل تعیین اعتبار مدل ارائه خواهند شد.

تشریح ساختار مدل

جهت ساخت مدل از برنامه FST^۱ استفاده شد. مدل ساخته شده شامل ۶ بخش اصلی می باشد (شکل ۱) که عبارتند از: محاسبه اجزای موازنه آب خاک، بهار سازی، مراحل نمو، تولید سطح برگ و جذب نور، تولید ماده خشک و تخصیص ماده خشک ساخته شده به اندام های مختلف.

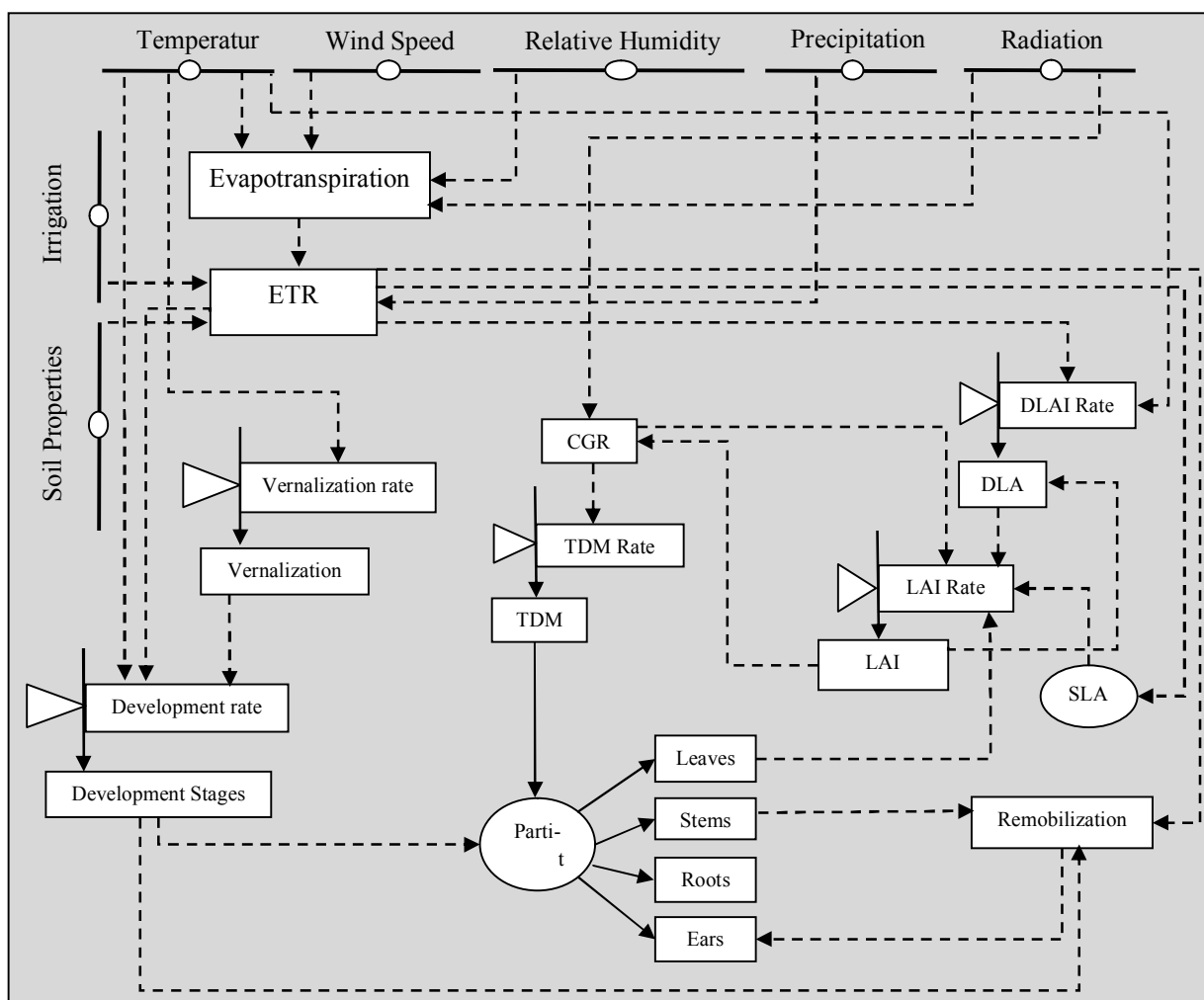
شبیه سازی اجزای موازنه آب خاک

شبیه سازی رشد گیاه در شرایط کمبود آب نیازمند محاسبه اجزای موازنه آب خاک می باشد. در این مطالعه محاسبه تمام اجزای موازنه آب خاک بر اساس روش ارائه شده توسط فائو (۴) صورت گرفت. موازنه آب خاک تحت تاثیر پارامترهای اقلیمی، خصوصیات خاک و میزان آبیاری قرار می گیرد (شکل ۱). بارندگی، آبیاری، رواناب، صعود کاپیلاری، نفوذ عمقی و تبخیر و تعرق اجزای اصلی موازنه آب خاک در منطقه توسعه ریشه هستند. منطقه توسعه ریشه به مانند ظرفی عمل می کند که مقدار آب درون آن در حال نوسان است. به همین دلیل استفاده از مفهوم تخلیه رطوبتی^۲ در منطقه توسعه ریشه برای بیان میزان تغییرات آب بسیار مناسب است. در این شرایط اضافه شدن یا کم شدن مقدار آب منطقه ریشه توسط اجزای مختلف موازنه آب خاک بر حسب عمق آب (میلی متر) بیان می شود. بارندگی، آبیاری و صعود کاپیلاری مقدار آب منطقه توسعه ریشه را افزایش داده و در نتیجه سبب کاهش میزان تخلیه رطوبتی خواهند شد. تبخیر از سطح خاک، تعرق گیاه و نفوذ عمقی نیز سبب کاهش مقدار آب منطقه توسعه ریشه و در نتیجه افزایش میزان تخلیه رطوبتی خواهند شد. محاسبه روزانه مقدار تخلیه رطوبتی بر اساس معادله ۱ صورت گرفت.

$$Dr_i = Dr_{i-1} - (P-RO)_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (1)$$

که Dr_i میزان تخلیه رطوبتی منطقه توسعه ریشه در انتهای روز ام (میلی متر)، Dr_{i-1} میزان تخلیه رطوبتی منطقه توسعه ریشه در انتهای روز 1-ام (میلی متر)، P_i بارندگی در روز ام (میلی متر)، RO_i میزان رواناب در روز ام (میلی متر)، I_i عمق خالص آبیاری در روز ام (میلی - متر)، CR_i صعود کاپیلاری از آب تحت الارض در روز ام (میلی متر)، $ET_{c,i}$ تبخیر و تعرق گیاه در روز ام (میلی متر) و DP_i مقدار آب از دست رفته به واسطه نفوذ عمقی (میلی متر) می باشند. در شروع توازن

1- Fortran Simulation Translator
2- Root zone depletion



شکل ۱- نمودار گردش و عملیاتی مدل

در روز، G شار گرما به داخل خاک (مگاژول بر متر مربع در روز)، T دمای هوا (درجه سانتیگراد)، U_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین (متر بر ثانیه)، e_s فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)، e_a فشار بخار واقعی (کیلوپاسکال)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع نسبت به دما (کیلوپاسکال به ازاء هر درجه سانتیگراد) و γ ضریب سایکومتري (کیلوپاسکال به ازاء هر درجه سانتیگراد) می‌باشد. جزئیات محاسبه اجزای معادله ۶ در آلن و همکاران (۴) موجود است.

با توجه به اینکه بیشتر تأثیرات آب و هوایی روی تبخیر و تعرق، در محاسبه ET_0 گنجانده شده است لذا مفهوم ضریب K_c در معادله ۵ بیانگر مشخصاتی است که گیاه زراعی را از گیاه مرجع فرضی متمایز می‌سازد. مقدار K_c بسته به نوع گیاه و مرحله رشدی متفاوت می‌باشد. فائو مقادیر مختلف K_c را برای مراحل مختلف رشدی در گیاهان مختلف ارائه کرده است که این مقادیر برای گندم 0.4 ، $1/15$ و 0.4 به ترتیب برای مراحل رشدی آغازین، میانی و پایانی می‌باشد (۴).

تبخیر و تعرق گیاه (ET_c) در شرایط بدون محدودیت آب بر اساس معادله ۵ بدست آمد.

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (5)$$

که ET_0 تبخیر و تعرق مرجع 2 و K_c ضریب گیاهی است. بر اساس تعریف، تبخیر و تعرق مرجع تبخیر و تعرق یک گیاه چمن فرضی متراکم با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر، مقاومت سطحی 70 ثانیه بر متر مربع و ضریب آلبدو 0.23 ، که به صورت فعال در حال رشد می‌باشد، بوده که در مدل بر اساس معادله ۶ تعریف شد.

$$ET_0 = 0.408 * \Delta * (R_n - G) + (\gamma * 900 * U_2 * (e_s - e_a) / (T + 273)) / \Delta + \gamma * (1 + 0.34 * U_2) \quad (6)$$

که R_n تشعشع خالص در سطح پوشش گیاهی (مگاژول بر متر مربع

- 1- Crop evapotranspiration
- 2- Reference evapotranspiration

که TAW و RAW به ترتیب مقدار کل آب قابل دسترس^۴ در منطقه توسعه ریشه (میلی متر، معادله ۱۱) و میزان آب سهل الوصول^۵ در منطقه توسعه ریشه (میلی متر، معادله ۱۲) می باشند.

$$TAW = 1000 * (\Theta_{FC} - \Theta_{WP}) * Z_r \quad (11)$$

$$RAW = P * TAW \quad (12)$$

Θ_{WP} مقدار متوسط آب خاک در نقطه پژمردگی (متر مکعب آب در هر متر مکعب خاک) و متغیر p در معادله ۱۲ بیانگر جزء متوسطی از کل آب قابل دسترس خاک است که قبل از وارد آمدن تنش به گیاه می تواند از منطقه توسعه ریشه ها خارج شود. مقادیر این ضریب بین صفر و یک متغیر است و فائو یک مقدار متوسط برای هر گیاه را ارائه کرده است. البته مقدار توصیه شده فائو (P_{FAO}) برای شرایطی است که میزان ET_c برابر با ۵ میلی متر در روز باشد. در شرایطی که میزان ET_c برابر با ۵ میلی متر در روز نباشد می توان مقدار دقیق p را از طریق معادله ۱۳ محاسبه کرد.

$$P = P_{FAO} + 0.04 * (5 - ET_c) \quad (13)$$

بدین ترتیب تمام اجزای اصلی موازنه آب خاک به صورت دقیق برآورد شد و این محاسبات از طریق متغیر ETR با مدل اصلی رشد و نمو گندم پیوند خورد.

شبیه سازی فرآیند بهار سازی

گندم زمستانه برای گذار از مرحله گلدهی و تکمیل مراحل نموی خود نیازمند فرآیند بهار سازی می باشد. تکمیل فرآیند بهار سازی نیازمند قرارگیری گیاه در گستره ای از دماهای پایین برای مدت زمان مشخصی است. بنابراین طبق معادله ۱۴ میزان بهار سازی (VERN) بر حسب تعداد تجمعی روزهای بهار سازی بیان شد و از انتگرال گیری سرعت روزانه بهار سازی (RVERN) محاسبه گردید (۲۰).

$$VERN = \int RVERN . dt \quad (14)$$

سرعت بهار سازی نیز به عنوان تابعی از دما در مدل تعریف شد. گستره دمایی مورد استفاده در مدل این مطالعه بر اساس گزارش پورتر و گاویس (۳۲) بین صفر تا ۱۵ درجه سانتیگراد تعریف شد. بدین صورت که با افزایش درجه حرارت از صفر تا ۴ درجه سانتیگراد سرعت بهار سازی به تدریج افزایش، از ۴ تا ۱۰ درجه سانتیگراد به عنوان گستره دمایی بهینه، ثابت و در بیشترین مقدار (۳۲) و از ۱۰ تا ۱۵ درجه سانتیگراد به صورت خطی کاهش پیدا می کند و به صفر می رسد. در مدل فرض شد که دماهای خارج از این گستره تأثیری در پیشرفت بهار سازی ندارند. مدت زمان لازم برای تکمیل فرآیند بهار سازی نیز ۵۰ روز در نظر گرفته شد (۱۱) بدین معنی که گیاه قبل از مرحله گلدهی باید ۵۰ روز را در معرض دماهای بین صفر تا

لازم به ذکر است که این اعداد مقادیر کلی برای K_c متوسط در یک اقلیم مرطوب با رطوبت نسبی روزانه ۴۵ درصد و سرعت باد آرام تا حدود ۲ متر بر ثانیه که شرایطی استاندارد است، تعریف شده اند. تغییرات در باد، تغییر در مقاومت آترو دینامیکی گیاه زراعی و همچنین ارتفاع گیاه بر ضریب گیاهی تأثیر می گذارند. بنابراین مقدار دقیق K_c طبق معادله ۷ اصلاح شد.

$$K_{cadj} = K_{cFAO} + (0.04 * (U_2 - 2) - 0.004 * (RH_{min} - 45)) * (H/3)^{0.3} \quad (7)$$

که در این معادله H میانگین ارتفاع گیاه بر حسب متر می باشد. تا زمانی که میزان رطوبت خاک منطقه توسعه ریشه در حد ظرفیت زراعی باشد میزان تبخیر و تعرق در حد بیشینه بوده و اصطلاحاً تبخیر و تعرق پتانسیل (ET_p) نامیده می شود (۴۴). با افزایش میزان تخلیه رطوبت خاک، درجه گشودگی روزنه های گیاه کمتر شده و میزان تبخیر و تعرق واقعی (ET_a) نیز کمتر از تبخیر و تعرق پتانسیل خواهد شد. بنابراین نسبت تبخیر و تعرق واقعی به تبخیر و تعرق پتانسیل (ET_r) همواره بین صفر و یک متغیر بوده، به گونه ای که در شرایط مطلوب این نسبت برابر با یک و در شرایط محدودیت شدید آب برابر با صفر می شود. از آنجائیکه تعرق و فتوسنتز تقریباً به طور مشابهی به کاهش گشودگی روزنه ها پاسخ خواهند داد (۳)، لذا می توان از ETR به عنوان یک ضریب کاهش برای محاسبه تولید در شرایط محدودیت آب استفاده کرد. در این مطالعه نیز از نسبت ETR جهت شبیه سازی رشد و نمو گندم تحت شرایط خشکی استفاده شد (معادله ۸).

$$ETR = ET_a / ET_p \quad (8)$$

ET_c در شرایط بدون محدودیت آب همان ET_p بوده (۴۴) و تبخیر و تعرق واقعی نیز از طریق معادله ۹ در مدل تعریف شد.

$$ET_a = K_s * ET_c \quad (9)$$

ضریب K_s اثرات تنش خشکی روی تعرق گیاه را تشریح می کند. در شرایط بدون محدودیت آب K_s برابر با یک بوده و در نتیجه میزان تبخیر و تعرق واقعی برابر با تبخیر و تعرق پتانسیل خواهد بود. در شرایط محدودیت آب میزان این ضریب کمتر از یک بوده و در نتیجه میزان تبخیر و تعرق واقعی کمتر از تبخیر و تعرق پتانسیل می باشد. در این شرایط ETR نیز کمتر از یک شده و اثر تنش خشکی روی رشد و نمو گیاه از این طریق اعمال خواهد شد. مقدار K_s از طریق معادله ۱۰ بدست آمد.

$$K_s = TAW - D_r / TAW - RAW \quad \text{if } RAW < D_r < TAW \quad (10)$$

$$K_s = 1 \quad \text{if } D_r \leq RAW$$

$$K_s = 0 \quad \text{if } D_r \geq TAW$$

4- Total available soil water

5- Readily available soil water

1- Potential evapotranspiration

2- Actual evapotranspiration

3- evapotranspiration ratio

$$LAI = \int GLAI . dt \quad (18)$$

سرعت رشد سطح برگ نیز طبق معادله ۱۹ از حاصل ضرب سرعت روزانه رشد گیاه (CGR)، گرم ماده خشک در متر مربع در روز) در سطح ویژه برگ (SLA، متر مربع برگ به ازاء هر گرم برگ) در کسری از ماده خشکی که به برگ‌ها اختصاص می‌یابد (FLV)، منهای میزان مرگ و میر برگ‌ها (DLAI، متر مربع برگ در متر مربع زمین در روز) محاسبه شد (۳۶).

$$LAI = CGR * SLA * FL - DLAI \quad (19)$$

میزان مرگ و میر برگ‌ها نیز طبق معادله ۲۰ از حاصل ضرب میزان شاخص سطح برگ در سرعت مرگ و میر برگ‌ها (RDR، بر روز) بدست آمد.

$$DLAI = LAI * RDR \quad (20)$$

سرعت مرگ و میر برگ‌ها نیز به عنوان تابعی از دما و خشکی بر اساس معادله ۲۱ در مدل تعریف شد.

$$RDR = RDRT + RDRD \quad (21)$$

که RDRT و RDRD توابع تجربی هستند که به ترتیب اثرات دما و خشکی را روی سرعت مرگ و میر برگ‌ها تشریح می‌کنند. در مدل فرض شد که تا قبل از مرحله گلهی دما تأثیری در سرعت مرگ و میر برگ‌ها ندارد. به عبارتی بهتر مرگ و میر ناشی از دما بعد از مرحله گلهی شروع می‌شود (۳۶). میزان RDRT برای مراحل بعد از گلهی، ۰/۰۳ برای دماهای کمتر از ۱۵ درجه سانتیگراد تعریف شد که به صورت خطی تا ۰/۰۹ برای دماهای ۳۰ درجه سانتیگراد و بالاتر افزایش یافت (۴۰). تابع RDRD برای کل فصل رشد در نظر گرفته شد و فرض شد که تأثیر خشکی روی مرگ و میر برگ‌ها وابسته به مرحله نمو نیست و هر زمان که تنش خشکی اتفاق بیفتد بخشی از برگ‌ها در اثر کمبود آب از بین خواهند رفت. RDRD نیز به عنوان تابعی تجربی از ETR به این صورت تعریف شد که مقدار آن تا ETR برابر با ۰/۸ (تنش خفیف) صفر در نظر گرفته شد و به صورت خطی تا ۰/۰۹ در ETR برابر با صفر افزایش یافت.

مقادیر روزانه جذب نور توسط کانوپی بر اساس معادله ۲۲ شبیه سازی شد (۲۰).

$$I_{ABS} = (1 - \exp(-K \times (1 - RO) \times I_0 \times 0.5)) \times PAR \quad (22)$$

I_{ABS} نور جذب شده توسط کانوپی (مگاژول PAR^۱ بر متر مربع در روز)، I_0 نور حادث شده به سطح زمین (مگاژول بر متر مربع در روز)، RO ضریب انعکاس کانوپی است که مقدار آن بسته به گونه گیاهی بین ۰/۰۵ تا ۰/۰۸ تغییر می‌کند (۳) که در این مطالعه ۰/۰۸ در نظر گرفته شد و K ضریب خاوشی نور می‌باشد که در این مطالعه ۰/۰۶ (۲۷) منظور شد. مقادیر PAR نیز که تشعشع با طول موج ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر می‌باشد به عنوان ۵۰ درصد نور حادث شده در نظر گرفته

۱۵ درجه سانتیگراد بگذرانند. تأثیر بهاره سازی روی نمو توسط فاکتوری به نام فاکتور بهاره سازی (VERNF) که مقدار آن بین صفر و یک تغییر می‌کند اعمال شد. مقادیر صفر و یک به ترتیب به منزله عدم شروع بهاره سازی و تکمیل بهاره سازی می‌باشند و مقادیر حدواسط نشان می‌دهد که بهاره سازی در حال انجام است. این فاکتور در سرعت نمو که در بخش بعدی به توضیح آن خواهیم پرداخت ضرب می‌شود.

شبیه سازی مراحل نموی

ما از رهیافت موجود در مدل SUCROS (۴۰) برای شبیه سازی مراحل نموی (DVS) گندم استفاده کردیم. الگوی توزیع ماده خشک تولید شده بین اندام‌های مختلف مستقیماً وابسته به مراحل نموی گیاه است. مراحل نموی به عنوان متغیری بدون واحد توصیف شد که مقدار آن در زمان سبز شدن صفر، در مرحله گلهی ۱ و در زمان رسیدگی ۲ در نظر گرفته شد و از انتگرال گیری سرعت نمو (DVR) بدست آمد (معادله ۱۵).

$$DVS = \int DVR . dt \quad (15)$$

سرعت نمو که تابعی از دماست در قالب یک معادله تجربی در دو دوره مجزا محاسبه شد. در دوره اول که مابین زمان سبز شدن گیاه تا زمان گلهی بود، سرعت نمو در مقدار صفر در روز در صفر درجه سانتیگراد تا حداکثر ۰/۰۲۷ در روز در دماهای ۳۰ درجه سانتیگراد و بالاتر تعریف شد. مدل مقادیر سرعت نمو برای سایر دماها را از طریق توابع درون یابی و برون یابی محاسبه می‌کند. در دوره دوم نیز که از زمان گلهی تا زمان رسیدگی بود سرعت نمو در مقدار صفر در روز در صفر درجه سانتیگراد تا حداکثر ۰/۰۳۱ در روز در دماهای ۳۰ درجه سانتیگراد و بالاتر تعریف شد. تحت شرایط تولید پتانسیل دما به عنوان تنها عامل تأثیرگذار روی سرعت نمو در مدل‌ها تعریف می‌شود، اما از آنجائیکه خشکی نیز سبب افزایش سرعت نمو می‌گردد، لذا در مدل این مطالعه یک تابع تجربی برای بیان تأثیر خشکی روی سرعت نمو تعریف گردید (معادله ۱۶).

$$DVR_{adj} = DVR * DVR_{mod} \quad (16)$$

که DVR_{adj} سرعت نمو تغییر یافته در اثر متغیر DVR_{mod} می‌باشد و DVR_{mod} نیز یک فاکتور افزایشی است که اثر افزایشده خشکی روی سرعت نمو را بیان می‌کند (معادله ۱۷).

$$DVR_{mod} = 1 + ((1 - ETR) / (1 + ETR)) \quad (17)$$

شبیه سازی شاخص سطح برگ و جذب نور

شاخص سطح برگ (LAI) از انتگرال سرعت رشد سطح برگ (GLAI، متر مربع برگ در متر مربع زمین در روز) شبیه سازی شد (معادله ۱۸).

1- Photosynthetically active radiation

$$RWLTV = FLV \times FSH \times CGR \quad (31)$$

$$RWSO = FSO \times FSH \times CGR + TRANSL \quad (32)$$

در این معادلات FR_{adj} ، FSH ، FST ، FLV و FSO بخشی از ماده خشک تولیدی در هر روز است که به ترتیب به اندام‌های ریشه، مجموع اندام‌های هوایی، ساقه‌ها، برگ‌ها و اندام‌های ذخیره‌ای اختصاص می‌یابد. در شرایط تولید پتانسیل تخصیص ماده خشک به اندام‌ها فقط وابسته به مرحله نمو می‌باشد اما تنش خشکی شدید ($ETR < 0.5$) منجر به افزایش تخصیص ماده خشک به ریشه شده و در نتیجه سهم ماده خشک تخصیص یافته به اندام‌های هوایی کم می‌شود (۳۶). بنابراین ضرایب تعریف شده برای اختصاص مواد به ریشه در شرایط پتانسیل (FR)، توسط تابعی تجربی به نام FR_{mod} به FR_{adj} تغییر می‌کند (معادلات ۳۳ و ۳۴).

$$FR_{adj} = FR * FR_{mod} \quad (33)$$

$$FR_{mod} = \max(1, (1 / ETR + 0.5)) \quad (34)$$

عبارت \max در معادله ۵۰ یک تابع دستوری است که بین عدد یک و حاصل عبارت $(1/ETR+0.5)$ بیشترین مقدار را انتخاب می‌کند. از نظر کاربردی هم بدین معنی است که تا زمانیکه ETR بیشتر از 0.5 باشد مقدار FR_{mod} برابر با یک بوده و در نتیجه FR_{adj} برابر با FR خواهد بود. در تنش‌های شدیدتر مقدار FR_{mod} بیشتر از یک شده و این مسئله سبب اختصاص درصد بیشتری از ماده خشک به ریشه‌ها خواهد شد.

مقادیر FSH نیز بر اساس معادله ۳۵ تعریف شد و مقادیر FR ، FST ، FLV و FSO نیز بر اساس یکسری ضرایب تجربی است که از مدل SUCROS استخراج شد.

$$FSH = 1 - FR_{adj} \quad (35)$$

در مدل فرض شد که بعد از مرحله گلدهی حدود ۲۰ درصد از وزن ساقه‌ها به اندام‌های ذخیره‌ای انتقال مجدد می‌یابد (۴۰). این مسئله در قالب یک پارامتر به نام $TRANSL$ در مدل تعریف شد (معادلات ۳۰ و ۳۲).

تعیین اعتبار مدل

شرط اعتبار نتایج هر مدلی آزمودن مدل با آزمایشات واقعی و مقایسه نتایج آن با نتایج شبیه‌سازی است (۳). بدین منظور جهت تعیین اعتبار نتایج مدل، آزمایشی در سال زراعی ۱۳۹۰-۱۳۸۹ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد واقع در ۱۰ کیلومتری جنوب شرقی شهر مشهد (عرض جغرافیایی؛ ۳۶ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی؛ ۵۶ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی، ارتفاع از سطح دریا؛ ۹۸۵ متر، متوسط بارندگی سالیانه؛ ۲۸۶ میلی‌متر) اجرا شد. داده‌های این آزمایش مستقل از داده‌هایی بود که برای ساخت مدل استفاده شد. هدف از اجرای آزمایش مطالعه تنش خشکی در ارقام مقاوم و حساس به خشکی گندم بود و در قالب طرح کرت‌های خرد شده با

شد (۲۰).

شبیه‌سازی تولید ماده خشک

ما از رهیافت موجود در مدل LINTUL (۳۶) جهت شبیه‌سازی تولید ماده خشک (TDM) استفاده کردیم که طبق معادله ۲۳ از انتگرال CGR بدست آمد.

$$TDM = \int CGR \cdot dt \quad (23)$$

مقادیر روزانه CGR نیز از حاصل ضرب PAR جذب شده در میزان کارایی مصرف نور (RUE)، گرم ماده خشک به ازاء هر مگاژول PAR جذب شده) بدست آمد (معادله ۲۴).

$$CGR = I_{ABS} \times RUE_{adj} \quad (24)$$

از آنجائیکه کارایی مصرف نور تحت تأثیر تنش خشکی قرار می‌گیرد (۲۷)، لذا مقدار پایه RUE (RUE_{base}) در یک فاکتور کاهش RUE_{mod} ضرب شد و RUE جدید تحت عنوان RUE_{adj} (معادله ۲۵) در معادله ۲۴ قرار داده شد. مقدار RUE_{base} ، $2/4$ گرم به ازاء هر مگاژول PAR در نظر گرفته شد (۲۷) فاکتور کاهش نیز به عنوان تابعی از ETR تعریف شد (معادله ۲۶).

$$RUE_{adj} = RUE_{base} * RUE_{mod} \quad (25)$$

$$RUE_{mod} = 1 - ((1 - ETR) / (1 + ETR)) \quad (26)$$

شبیه‌سازی تخصیص ماده خشک بین اندام‌های مختلف

تخصیص ماده خشک تولیدی بین اندام‌های مختلف توسط یکسری توابع تجربی که خود تابع مرحله نمو هستند تعریف شد (۴۰). بر این اساس تخصیص در دو مرحله اتفاق می‌افتد. در مرحله اول ماده خشک تولیدی بین اندام‌های هوایی و اندام‌های زیرزمینی تقسیم می‌شود و در مرحله دوم ماده خشک اختصاص یافته به اندام‌های هوایی نیز بر اساس ضرایبی بین ساقه‌ها، برگ‌ها و اندام‌های ذخیره‌ای توزیع می‌شود. تا قبل از مرحله گلدهی بخش اعظمی از ماده خشک تولیدی به ریشه‌ها، ساقه‌ها و برگ‌ها اختصاص می‌یابد و بعد از مرحله گلدهی اغلب ماده خشک تولیدی به اندام‌های ذخیره‌ای اختصاص پیدا می‌کند. وزن هر کدام از اندام‌ها (W_{organ}) حاصل انتگرال سرعت تولید آنها (R_{organ}) در طول زمان است (معادله ۲۷).

$$W_{organ} = \int R_{organ} \cdot dt \quad (27)$$

نحوه محاسبه سرعت تولید اندام‌های زیرزمینی (RWR)، اندام‌های هوایی ($RWSH$)، ساقه‌ها ($RWST$)، برگ‌ها ($RWLTV$) و اندام‌های ذخیره‌ای ($RWSO$) به ترتیب در معادلات ۲۸ تا ۳۲ ارائه شده است.

$$RWR = FR_{adj} \times CGR \quad (28)$$

$$RWSH = FSH \times CGR \quad (29)$$

$$RWST = FST \times FSH \times CGR - TRANSL \quad (30)$$

تیمارهای FI ۷۵٪، FI ۵۰٪ و FI ۲۵٪ به ترتیب ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد نیاز آبی گیاه به عنوان آبیاری اعمال شد. تیمار شاهد ۲ (NI) نیز در فصل بهار هیچ‌گونه آبی دریافت نکرد. در طول فصل رشد نمونه‌گیری تخریبی جهت اندازه‌گیری سطح برگ و وزن خشک اندام‌های مختلف و در پایان فصل رشد عملکرد و اجزای عملکرد تیمارهای مختلف اندازه‌گیری شد.

اطلاعات هواشناسی شامل تشعشع، بارندگی، دماهای حداکثر و حداقل، رطوبت نسبی، سرعت باد و تعداد ساعات آفتابی مربوط به سال زراعی ۹۰-۱۳۸۹ به همراه مقادیر آبیاری در تیمارهای مختلف به عنوان ورودی وارد مدل شد و سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل با نتایج واقعی مورد مقایسه قرار گرفت تا صحت و اعتبار مدل ساخته شده مورد آزمون قرار بگیرد. روش‌های مختلفی برای تعیین اعتبار مدل وجود دارد. برازش رگرسیون خطی بین مشاهدات و داده‌های شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با خط ۱:۱ از جمله رایج‌ترین و دقیق‌ترین روش‌های تعیین اعتبار مدل هاست (۳). بر اساس این روش داده‌های مشاهده شده در مقابل داده‌های شبیه‌سازی شده در قالب یک گراف ترسیم گردید. سپس برازش خطی روی نقاط ایجاد شده انجام شد و مقایسه آماری بین عرض از مبدأ و شیب خط حاصله با خط ۱:۱ ($y=x$) از طریق آزمون t صورت گرفت. عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین عرض از مبدأ و شیب دو خط مذکور نشان‌دهنده قدرت بالای مدل در پیش‌بینی مشاهدات خواهد بود. همچنین نتایج آزمایش و مدل از طریق معادله ۳۸ که به روش جذر میانگین مربعات خطا (RMSE%) معروف است نیز تعیین اعتبار شد (۲۶).

$$RMSE(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \cdot \frac{100}{O} \quad (38)$$

در این معادله O_i و S_i به ترتیب مشاهده آم و مقدار شبیه‌سازی شده آن، n تعداد مشاهدات و \bar{O} میانگین مشاهدات می‌باشد. در این روش چنانچه مقادیر RMSE% کمتر از ۱۰ درصد باشد شبیه‌سازی عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد متوسط و بیشتر از ۳۰ درصد ضعیف ارزیابی خواهد شد (۳).

نتایج و بحث

شاخص سطح برگ

مقایسه روند شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده شده مربوط به ارقام مقاوم و حساس، حاکی از توانایی بالای مدل در شبیه‌سازی این پارامتر مهم می‌باشد (شکل ۲). مقادیر RMSE% نشان داد که مدل روند شاخص سطح برگ رقم حساس را در شرایط بدون تنش با دقت عالی شبیه‌سازی کرد (۹۷/۷۵ درصد) اما در شرایط تنش شدید (تیمارهای FI ۲۵ درصد و NI) دقت شبیه‌سازی متوسط ارزیابی شد (به ترتیب ۲۴/۰۱ و ۲۶/۱۴ درصد). در سایر سطوح آبیاری نیز دقت شبیه‌سازی برای رقم حساس بر اساس نتایج

سه تکرار اجرا شد. برای کرت‌های اصلی ۵ تیمار آبیاری شامل آبیاری به میزان نیاز کامل آبیاری گیاه (FI، شاهد اول)، بدون آبیاری در فصل بهار (NI، شاهد دوم)، آبیاری به میزان ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه (FI ۷۵ درصد)، آبیاری به میزان ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه (FI ۵۰ درصد) و آبیاری به میزان ۲۵ درصد نیاز آبی گیاه (FI ۲۵ درصد) در نظر گرفته شد و کرت‌های فرعی شامل ارقام مقاوم (پیشگام، یک رقم ریشک دار) و حساس (گاسکوئن، بدون ریشک) به خشکی گندم بودند. کرت‌های فرعی در ابعاد ۶ متر طول و ۲ متر عرض ایجاد شد و بین دو کرت فرعی در هر کرت اصلی، یک متر فاصله به صورت نکاشت در نظر گرفته شد. همچنین جهت جلوگیری از نشت آب از هر کرت اصلی به کرت اصلی مجاور، فاصله ۲ متر بین کرت‌های اصلی و فاصله ۴ متر بین تکرارهای آزمایش منظور شد. قبل از کاشت معادل ۲۵ تن در هکتار کود دامی پوسیده شده، ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود شیمیایی سوپر فسفات تریپل، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود شیمیایی سولفات پتاسیم و ۵۰ کیلوگرم در هکتار کود شیمیایی اوره به صورت یکنواخت در زمین پخش گردید. کشت ارقام در تاریخ ۲۰ مهرماه سال ۱۳۸۹ و با تراکم ۴۰۰ بذر در متر مربع صورت گرفت. در طول فصل رشد معادل ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود شیمیایی اوره طی دو مرحله ساقه‌رفتن و سنبله‌دهی مورد استفاده قرار گرفت و دو مرحله سمپاشی نیز جهت پیشگیری از بیماری‌های قارچی و سن گندم انجام شد. با توجه به رویش محدود علف‌های هرز در مزرعه، کنترل آنها طی فصل رشد به صورت دستی صورت گرفت.

جهت کنترل میزان آب مصرفی، کرت‌های آزمایش با استفاده از لوله‌های پلی‌اتیلنی لوله کشی شد و مقدار آب مصرفی در هر آبیاری و برای هر کرت توسط کنتور اندازه‌گیری شد. جهت استقرار یکنواخت گیاه، تمام تیمارها در فصل پاییز در دو مرحله و به میزان برابر آبیاری شدند و از زمان از سرگیری رشد فعال در فصل بهار تیمارهای مختلف خشکی اعمال شد. جهت اعمال تیمارهای خشکی ابتدا نیاز آبی گیاه در هر هفته مطابق معادله ۳۶ برآورد گردید (۴).

$$WR = (ET_c - P_e) / (E_i / 100) \quad (36)$$

که WR نیاز آبی گیاه (میلی‌متر)، P_e بارندگی موثر (میلی‌متر) و E_i راندمان آبیاری (درصد) می‌باشد. لازم به ذکر است که در این معادله اجزاء صعود کاپیلاری و رواناب به ترتیب به دلیل پایین بودن سطح ایستابی آب در منطقه آزمایش و محصور بودن کرت‌های آزمایش جهت جلوگیری از هدر رفت آب لحاظ نشده‌اند (۴). محاسبه بارندگی مؤثر نیز از طریق معادله ۳۷ صورت گرفت (۲):

$$P_e = a.P \quad (37)$$

که P مقدار بارندگی و a درصد ثابتی از بارندگی است که مقدار آن معمولاً بین ۰/۷ و ۰/۹ در نظر گرفته می‌شود (۲). در این آزمایش مقدار a ، ۰/۸ در نظر گرفته شد. بدین ترتیب نیاز آبی برآورد شده برای هر هفته معیار آبیاری در تیمار شاهد اول (FI) قرار گرفت و برای

نتایج RMSE% نشان می‌دهد. بر این اساس کارایی مدل از نظر شبیه‌سازی LAI_{max} در تمام تیمارهای آبیاری به جز تیمار NI عالی بود. آرورا و گاجری (۶) نیز در شبیه‌سازی رشد و نمو گندم تحت مقادیر مختلف فراهمی آب با استفاده از مدل SUCROS نشان دادند که مدل در شرایط فراهمی مطلوب آب LAI_{max} را بسیار خوب شبیه‌سازی کرد اما در شرایط محدودیت آب LAI_{max} شبیه‌سازی شده بسیار کمتر از LAI_{max} مشاهده شده بود و اختلاف معنی‌داری با آن داشت. در مطالعه ضیایی و سپاسخواه (۴۶) نیز نتایج مشابهی گزارش شده است. در تمام تیمارها به جز تیمار FI ۲۵ درصد مقدار LAI_{max} شبیه‌سازی شده بالاتر از مقادیر مشاهده شده بود. این مسئله نشان می‌دهد که در شرایط واقعی عوامل دیگری از قبیل گرما و تنش‌های زنده وجود دارند که روی سطح برگ اثر منفی می‌گذارند و این عوامل در مدل تعریف نشده‌اند.

در تیمارهایی که در فصل بهار آب کمتری دریافت کردند (برای مثال تیمارهای FI ۲۵ درصد و NI) میزان پیری و مرگ و میر برگ ناشی از خشکی خیلی بیشتر بود. در نتیجه پیک شاخص سطح برگ نسبت به سایر تیمارها خیلی زودتر افت کرد (شکل ۲). به همین دلیل روز رسیدن به LAI_{max} در تیمارهای مختلف بسیار متفاوت بود به گونه‌ای که اختلاف بین تیمارهای FI و NI از این نظر ۲۲ روز برای رقم گاسکوژن، ۱۹ روز برای رقم پیشگام و ۳۲ روز برای مدل بود (جدول ۱). با این حال بر اساس نتایج RMSE% توانایی مدل از نظر تخمین این زمان در تمام تیمارها و برای هر دو رقم عالی ارزیابی شد.

RMSE% خوب بود. شبیه‌سازی روند شاخص سطح برگ رقم مقاوم نیز در تمام سطوح آبیاری در درجه کیفی خوب قرار گرفت. هر چند با کاهش فراهمی آب قدرت مدل در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ ارقام تا حدودی افت کرد اما در مجموع دقت مدل در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ بر اساس نتایج RMSE% خوب ارزیابی شد. تغییرات RMSE% در رقم مقاوم کمتر از رقم حساس بود به گونه‌ای که مقادیر RMSE% از ۹/۷۵ تا ۲۶/۱۴ در رقم حساس و از ۱۱/۳۴ تا ۱۹/۴۱ در رقم مقاوم تغییر کرد.

یکی از مهمترین صفاتی که بسیار حائز اهمیت است حداکثر میزان شاخص سطح برگ (LAI_{max}) و روز رسیدن به آن است (۲۶). از آنجائیکه مدل، شبیه‌سازی اجزای مختلف رشد را به صورت روزانه انجام می‌دهد لذا مشخص کردن روزی که در آن LAI_{max} حاصل می‌شود کاری بسیار آسان است اما برای آزمایشات واقعی این امر فقط از طریق برازش معادلات مربوط به سطح برگ امکان‌پذیر است. لذا در این مطالعه مقدار واقعی LAI_{max} و روز رسیدن به آن در هر دو رقم از طریق برازش معادله ۳۹ و بر اساس نمونه‌گیری‌های تخریبی که در طول فصل رشد صورت گرفت به دست آمد. سپس نتایج حاصل با داده‌های شبیه‌سازی شده مورد مقایسه قرار گرفت.

$$y = a + b * 4 * (\exp(-(x-c)/d)) / (1 + \exp(-(x-c)/d))^2 \quad (39)$$

در این معادله a عرض از مبدا، b حداکثر LAI ، c زمان رسیدن به حداکثر LAI و d نقطه عطف منحنی است که در آن رشد سطح برگ وارد مرحله خطی می‌شود.

جدول ۱ مقادیر دقیق LAI_{max} و روز رسیدن به آن را همراه با

جدول ۱ - مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده شده حاصل از ارقام مقاوم (پیشگام) و حساس (گاسکوژن) به خشکی گندم تحت

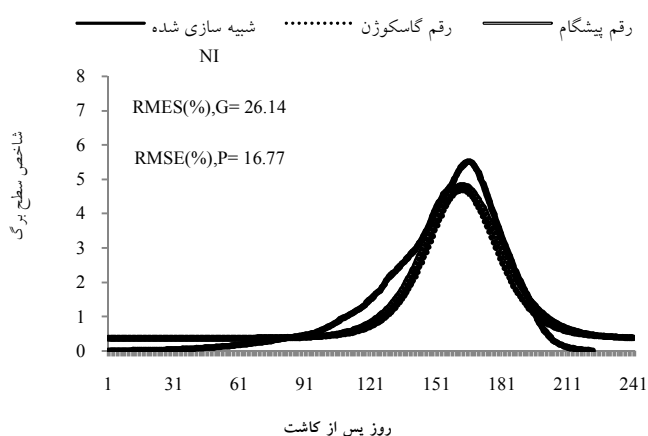
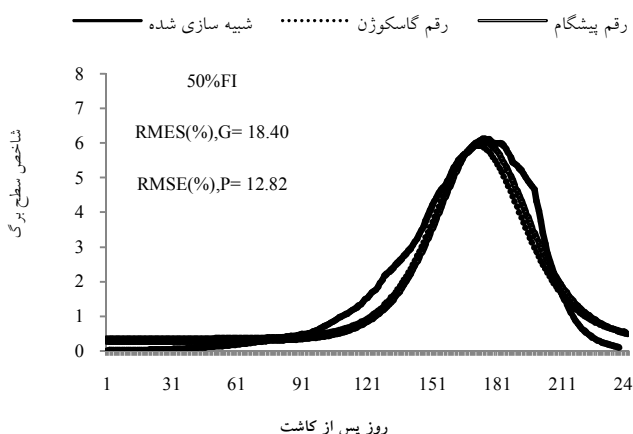
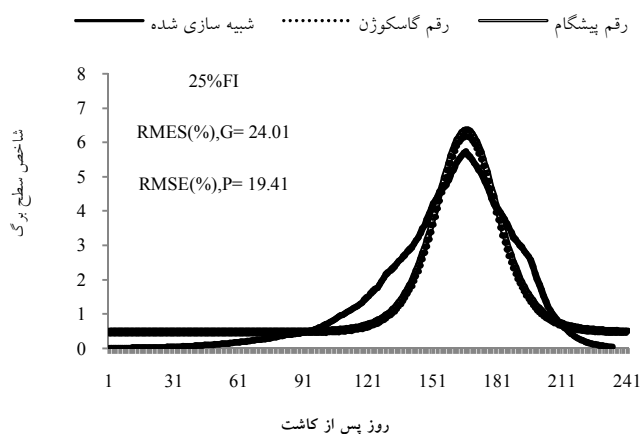
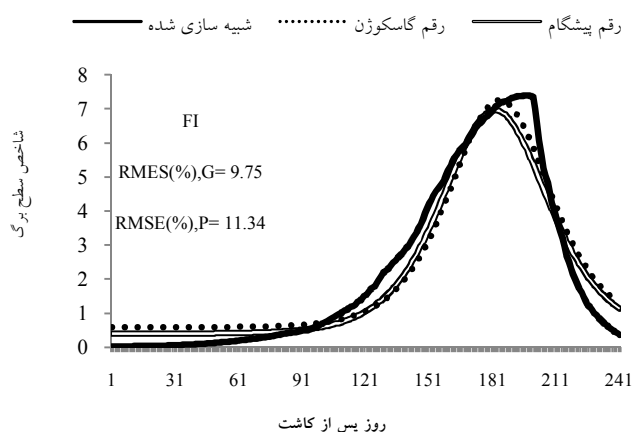
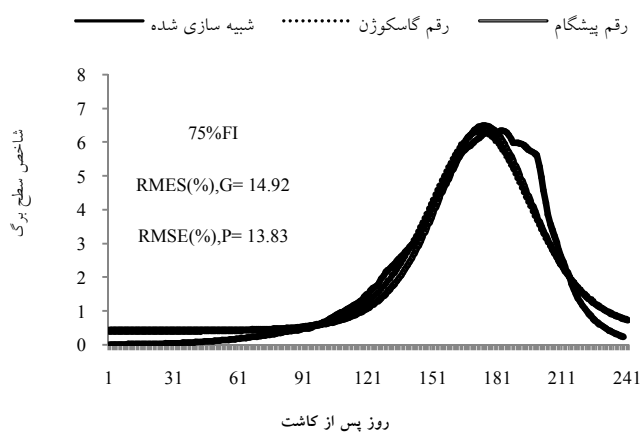
تیمارهای مختلف آبیاری در شرایط آب و هوایی مشهد از نظر صفات LAI_{max} و روز رسیدن به LAI_{max}

تیمارهای آبیاری	حداکثر شاخص سطح برگ (شبیه‌سازی شده)	حداکثر شاخص سطح برگ (رقم گاسکوژن)	حداکثر شاخص سطح برگ (رقم پیشگام)	روز رسیدن به حداکثر شاخص سطح برگ (شبیه‌سازی شده)	روز رسیدن به حداکثر شاخص سطح برگ (رقم گاسکوژن)	روز رسیدن به حداکثر شاخص سطح برگ (رقم پیشگام)	مقادیر RMSE%	مقادیر RMSE%	مقادیر RMSE%
FI	۷/۳۸	۷/۲۵	۱/۷۹	۶/۹۵	۶/۱۸	۶/۱۸	۶/۱۸	۶/۱۸	۶/۱۸
۷۵٪ FI	۶/۳۴	۶/۳۲	۰/۳۱	۶/۵۰	۲/۴۶	۲/۴۶	۲/۴۶	۲/۴۶	۲/۴۶
۵۰٪ FI	۶/۱۱	۵/۹۲	۳/۲۰	۶/۰۵	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
۲۵٪ FI	۵/۷۳	۶/۱۷	۷/۲۹	۶/۳۶	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
NI	۵/۵۱	۴/۶۹	۱۷/۴	۴/۸۲	۱۴/۳۲	۱۴/۳۲	۱۴/۳۲	۱۴/۳۲	۱۴/۳۲

FI: آبیاری به میزان نیاز کامل آبیاری گیاه، NI: بدون آبیاری در فصل بهار، FI ۷۵٪: آبیاری به میزان ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه، FI ۵۰٪: آبیاری به میزان ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه،

FI ۲۵٪: آبیاری به میزان ۲۵ درصد نیاز آبی گیاه

LAI_{max} : حداکثر میزان شاخص سطح برگ؛ RMSE: جذر میانگین مربعات خطا



شکل ۲- روند شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده و مشاهده شده طی فصل رشد در ارقام مقاوم (پیشگام) و حساس (گاسکوژن) به خشکی گندم تحت تیمارهای مختلف آبیاری (FI؛ آبیاری به میزان نیاز کامل آبیاری گیاه، NI؛ بدون آبیاری در فصل بهار، FI ۷۵٪؛ آبیاری به میزان ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه، FI ۵۰٪؛ آبیاری به میزان ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه، FI ۲۵٪؛ آبیاری به میزان ۲۵ درصد نیاز آبی گیاه)، RMSE؛ جذر میانگین مربعات خط، G؛ گاسکوژن P؛ پیشگام

این مدل‌ها جهت برآورد صحیح مقادیر سطح برگ مناسب باشد. ژانگ و همکاران (۴۳) کارایی مدل SUCROS در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ گیاه کتان برای شرایط پتانسیل رشد را موفقیت-

در مطالعات دیگر کارایی مدل‌های پایه SUCROS و LINTUL در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ، که در این مطالعه نیز مورد استفاده قرار گرفت نشان داده شده و به نظر می‌رسد که رهیافت موجود در

پاسخ خواهند داد و در نتیجه می‌توان میزان تولید و تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل را در ارتباط مستقیم با هم دانست (۳). با این توضیح شاید بتوان اینگونه نتیجه‌گیری کرد که بر اساس نتایج این مطالعه شباهت پاسخ دو فرآیند تعرق و فتوسنتز نسبت به کاهش گشودگی روزنه‌ها در شرایط محدودیت آب در رقم مقاوم بالاتر از رقم حساس باشد و به همین دلیل دقت مدل در شبیه‌سازی تولید ماده خشک رقم مقاوم در تیمارهای در معرض تنش خشکی بالاتر از رقم حساس بود. به طور کلی توانایی مدل‌ها از نظر شبیه‌سازی ماده خشک تولیدی بسته به شرایط اقلیمی بسیار متفاوت است. به عنوان مثال بنیان و کراوت (۹) در انگلستان با مدل SUCROS نشان دادند که بعد از گلدهی اختلاف قابل توجهی بین ماده خشک شبیه‌سازی شده و مشاهده شده وجود نداشت اما قبل از گلدهی اختلافات معنی‌دار بود. در حالیکه در این مطالعه اختلاف بین ماده خشک شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در مراحل پایانی فصل رشد بیشتر بود (شکل ۳). در مطالعه دیگری در شرایط آب و هوایی ایران نشان داده شد که توانایی مدل در شبیه‌سازی تولید ماده خشک و عملکرد تحت شرایط تنش خشکی کمتر از شرایط پتانسیل رشد است (۴۶).

مدل‌های مختلف نیز از نظر شبیه‌سازی تولید ماده خشک متفاوت هستند. به عنوان مثال جامیسون و همکاران (۲۶) ۵ مدل SUCROS، CERES-wheat، Sirius AFRCWHEAT2 را برای شبیه‌سازی رشد و نمو گندم تحت مقادیر متفاوت فرآهمی آب با هم‌دیگر مقایسه کردند و توانایی تمام مدل‌های نامبرده را در پیش‌بینی رشد بخش‌های مختلف گیاه به اثبات رساندند اما بهترین مدل را از نظر شبیه‌سازی تولید ماده خشک SUCROS و AFRCWHEAT2 معرفی کردند. این در حالیست که در مطالعات دیگر توانایی مدل SUCROS در شبیه‌سازی تولید ماده خشک ذرت (*Zea mays*) (۷) و گندم (۶) بسیار عالی ارزیابی شده است.

بخش عمده‌ای از این اختلافات به این دلیل است که مدل‌ها قادر به پیش‌بینی اثرات تمام عوامل مؤثر در رشد به صورت همزمان نیستند. به عنوان مثال در این مطالعه با وجودی که سعی شد اثرات آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز در مزرعه به حداقل ممکن برسد اما حذف کامل آن‌ها تقریباً غیرممکن است. از طرفی در شرایط مزرعه تنش‌های دیگری از قبیل سرما، شوری و غیره وجود دارند که روی رشد گیاه تأثیرگذار هستند. عواملی از این قبیل در مدل به صورت تعریف نشده باقی مانده‌اند. به همین دلیل مدل مقادیر سطح برگ، وزن خشک و حتی عملکرد را فراتر از مقادیر واقعی شبیه‌سازی کرد.

عملکرد

هدف نهایی مدل‌های رشد گیاهان زراعی تخمین عملکرد نهایی می‌باشد. در واقع برآیند تمام روابطی که بین فرآیندهای اصلی درگیر در رشد و نمو گیاه وجود دارند در متغیری به نام عملکرد خلاصه

آمیز ارزیابی کردند.

شیبو و همکاران (۳۴) نیز در ارزیابی مدل LINTUL3 در برنج نشان دادند که اگرچه مدل LAI را در تیمارهای ۱۸۰ و ۲۲۵ کیلوگرم نیتروژن در هکتار مقداری فراتر از مقادیر واقعی شبیه‌سازی کرد، اما در مجموع توانایی مدل در شبیه‌سازی LAI بسیار خوب بود. در یک مطالعه مقایسه‌ای نیز بیرناس و همکاران (۱۲) نتیجه گرفتند که مدل SUCROS شاخص سطح برگ گندم بهاره را بهتر از مدل‌های GECROS، CERES و SPASS شبیه‌سازی کرد. البته در مجموع اعتقاد بر این است که مدل‌های کنونی رشد گیاهان زراعی شاخص سطح برگ را نسبت به سایر مشخصات گیاهی از جمله تولید ماده خشک و عملکرد نهایی با دقت نسبتاً کمتری شبیه‌سازی می‌کنند چرا که برگ‌ها اولین اندام‌هایی هستند که مستقیماً تحت تأثیر اثرات مخرب کمبود آب قرار می‌گیرند و نحوه پاسخ آنها به تغییرات فرآهمی آب فرآیندی پیچیده می‌باشد (۸). ژو و همکاران (۴۵) معتقدند که به دلیل وجود اثرات متقابل بسیاری زیادی که در درون یک برگ بین فتوسنتز، تنفس، نیتروژن، میزان رطوبت و شکل و اندازه برگ‌ها وجود دارد، مدل‌های آینده باید این اثرات متقابل را نیز، که هم روی رشد و توسعه برگ و هم روی تولید ماده خشک تأثیرگذار خواهند بود مدنظر داشته باشند.

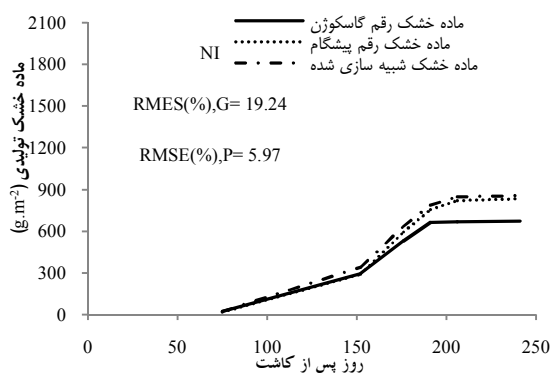
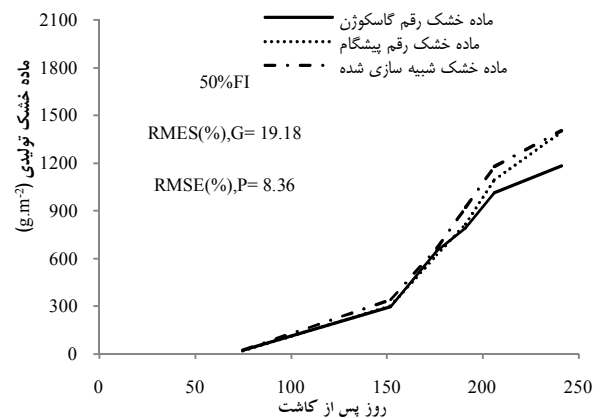
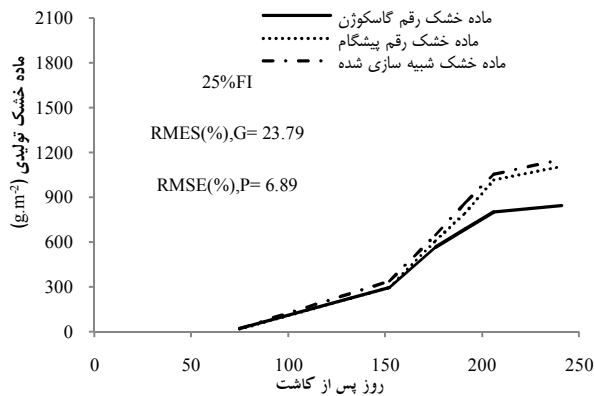
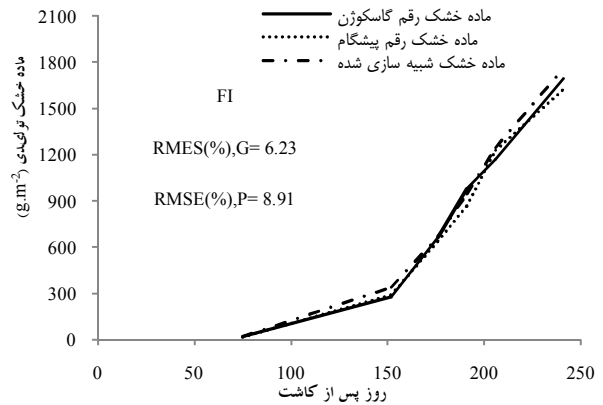
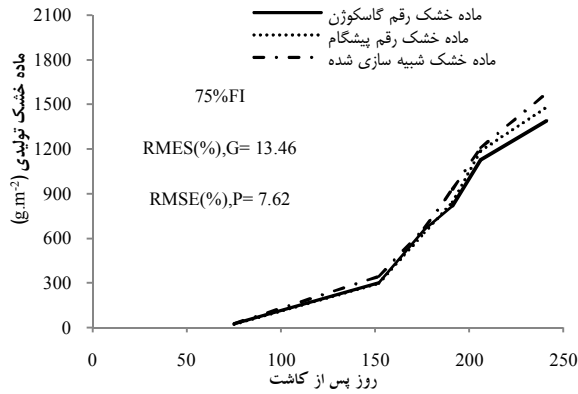
تولید ماده خشک

در تمام تیمارها مقدار ماده خشک شبیه‌سازی شده کمی فراتر از مقادیر مشاهده شده بود و این اختلاف در تیمارهای در معرض تنش بیشتر آشکار شد (شکل ۳). با این حال توانایی مدل در شبیه‌سازی تولید ماده خشک بر اساس نتایج $RMSE\%$ قابل قبول بود. مقادیر $RMSE\%$ نشان داد که مدل تولید ماده خشک رقم حساس را فقط در تیمار FI با دقت عالی شبیه‌سازی کرد ($RMSE\% = 6.23$) و در سایر تیمارها دقت شبیه‌سازی برای رقم حساس خوب ارزیابی شد. در مقابل توانایی مدل در شبیه‌سازی تولید ماده خشک رقم مقاوم در تمام سطوح آبیاری عالی بود. اختلاف قابل توجهی بین دقت مدل در شبیه‌سازی تولید ماده خشک رقم مقاوم در سطوح مختلف آبیاری وجود نداشت و مقادیر $RMSE\%$ از ۵/۹۷ در سطح آبیاری NI تا ۸/۹۱ در سطح آبیاری FI متغیر بود اما دامنه تغییرات برای رقم حساس بالاتر بود و از ۶/۲۳ در سطح آبیاری FI به ۲۳/۷۹ در سطح آبیاری FI ۲۵ درصد رسید. در شرایط آبیاری مطلوب (تیمار FI) دقت مدل در شبیه‌سازی تولید ماده خشک رقم حساس بالاتر بود و این مسئله در مورد شاخص سطح برگ نیز دیده شد اما با کاهش فرآهمی آب این وضعیت به نفع رقم مقاوم تغییر کرد.

در مدل محدودیت آب با استفاده از ضریب کاهش ETR تعریف شد. در این روش از شبیه‌سازی فرض بر این است که تعرق و فتوسنتز تقریباً به طور مشابهی به کاهش گشودگی روزنه‌ها در اثر خشکی

خشک بود. هر چند که تحت شرایط تنش دقت مدل نسبت به شرایط پتانسیل اندکی کاهش یافت اما نتایج شبیه‌سازی در مجموع قابل قبول بود.

می‌شود. بدیهی است که لازمه پیش‌بینی صحیح عملکرد نهایی برآورد صحیح شاخص سطح برگ، جذب نور و تولید ماده خشک می‌باشد (۲۷). در بخش‌های قبل نشان داده شد که مدل به خوبی قادر به شبیه‌سازی مراحل نمو، طول دوره رشد، تغییرات سطح برگ و ماده



شکل ۳- روند شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده و مشاهده شده طی فصل رشد در ارقام مقاوم (پیشگام) و حساس (گاسکوژن) به خشکی گندم تحت تیمارهای مختلف آبیاری (FI؛ آبیاری به میزان نیاز کامل آبیاری گیاه، NI؛ بدون آبیاری در فصل بهار، ۷۵٪ FI؛ آبیاری به میزان ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه، ۵۰٪ FI؛ آبیاری به میزان ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه، ۲۵٪ FI؛ آبیاری به میزان ۲۵ درصد نیاز آبی گیاه)، RMSE؛ جذر میانگین مربعات خطا؛ G؛ گاسکوژن، P؛ پیشگام

ترتیب ۱۲۸۵، ۳۰۳۱، ۴۶۹۷، ۶۱۳۷ و ۷۶۴۹ کیلوگرم در هکتار شبیه‌سازی کرد. در شرایط آزمایشی نیز عملکرد رقم گاسکوژن در سطوح آبیاری مذکور به ترتیب ۱۶۱۵، ۲۹۵۴، ۴۴۸۳، ۵۹۵۲ و ۸۱۳۲

بر این اساس توانایی مدل در تخمین عملکرد نهایی نیز بر اساس شاخص RMSE% عالی ارزیابی شد (شکل ۴). مدل عملکرد تیمارهای NI، FI ۲۵ درصد، FI ۵۰ درصد، FI ۷۵ درصد و FI را به

مقاوم (پیشگام) یکی از دلایلی بود که سبب شد عملکرد آن در تیمارهای در معرض تنش بیشتر از مقادیر شبیه سازی شده باشد. لازم به ذکر است که گاسکوژن یک رقم بدون ریشک می باشد. با این حال دلیل بالاتر بودن عملکرد رقم گاسکوژن در تیمار FI نسبت به عملکرد مدل در این تیمار برای ما مشخص نشد.

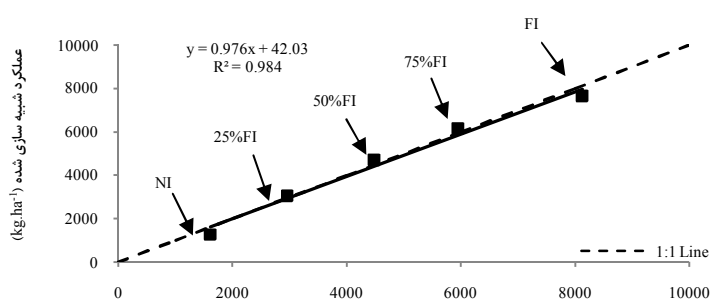
مطمئناً عوامل دیگری در تعیین عملکرد نقش دارند که در مدل (به عنوان شکل ساده شده ای از دنیای واقعی) گنجانده نشده اند. با وجود تمام این تغییرات نتیجه مقایسه عرض از مبدأ و شیب خط حاصل از رگرسیون بین عملکرد شبیه سازی شده و مشاهده شده در تیمارهای مختلف با عرض از مبدأ و شیب خط ۱:۱ نشان داد که اختلاف بین داده های شبیه سازی شده و داده های مشاهده شده در هیچکدام از ارقام معنی دار نبود (جدول ۲).

در مطالعات گذشته توانایی مدل های DSSAT (۳۷)، CERES-wheat (۶ و ۳۵) و بسویاری از مدل های دیگر در شبیه سازی عملکرد گندم تحت رژیم های مختلف رطوبتی موفقیت آمیز ارزیابی شد.

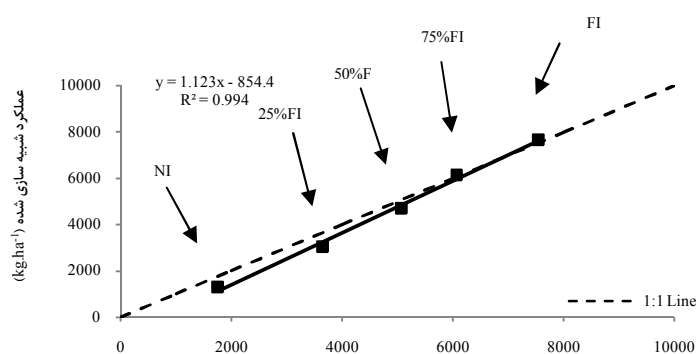
کیلوگرم و برای رقم پیشگام به ترتیب ۱۷۵۸، ۳۶۵۲، ۵۰۷۱، ۶۰۶۴ و ۷۵۴۸ کیلوگرم در هکتار بدست آمد.

از آنجائیکه مدل تولید ماده خشک را اندکی فراتر از مقادیر واقعی شبیه سازی کرد لذا انتظار می رفت که عملکرد نهایی را نیز فراتر از مقادیر واقعی شبیه سازی کند. اما این مسئله برای رقم گاسکوژن در تیمارهای NI و FI و برای رقم پیشگام در تیمارهای NI، FI ۲۵ درصد و FI ۵۰ درصد اتفاق نیفتاد. یکی از دلایل این مسئله بالاتر بودن رقم پیشگام در مراحل پایانی فصل رشد (یعنی زمانیکه دانه ها در حال پر شدن هستند) نسبت به مقادیر مدل، مخصوصاً در تیمارهای NI، FI ۲۵ درصد و FI ۵۰ درصد بود (داده ها نشان داده نشده اند. رجوع شود به حسین پناهی (۱)).

احتمالاً وجود مکانیزم های پیچیده مقاومت به خشکی در رقم مقاوم مخصوصاً در مراحل پایانی فصل رشد نیز در این مسئله دخیل باشند. به عنوان مثال ریشک ها صرف نظر از نقشی که در مقاومت به خشکی دارند توانایی انجام فتوسنتز را نیز دارا هستند و سبب افزایش کارایی مصرف آب می گردند (۱۹) در حالیکه این نقش ها در مدل به صورت تعریف نشده باقی مانده اند. بنابراین شاید ریشک دار بودن رقم



عملکرد مشاهده شده رقم گاسکوژن (kg. ha⁻¹)



عملکرد مشاهده شده رقم پیشگام (kg. ha⁻¹)

شکل ۴- رگرسیون خطی بین عملکرد شبیه سازی شده و مشاهده شده در ارقام مقاوم (پیشگام) و حساس (گاسکوژن) به خشکی گندم تحت تیمارهای مختلف آبیاری (FI؛ آبیاری به میزان نیاز کامل آبیاری گیاه، NI؛ بدون آبیاری در فصل بهار، FI ۷۰٪؛ آبیاری به میزان ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه، FI ۵۰٪؛ آبیاری به میزان ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه، FI ۲۵٪؛ آبیاری به میزان ۲۵ درصد نیاز آبی گیاه)؛

RMSE؛ جذر میانگین مربعات خطا

جدول ۲- نتایج آماری مربوط به مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده شده حاصل از ارقام مقاوم (پیشگام) و حساس (گاسکوژن) به خشکی گندم تحت تیمارهای مختلف آبیاری در شرایط آب و هوایی مشهد از نظر صفت عملکرد دانه

رقم	تعداد مشاهدات	عرض از مبدأ منحنی	شیب منحنی	خطای معیار عرض از مبدأ منحنی	خطای معیار شیب منحنی	مقدار t	مقدار p	RMSE (%)
گاسکوژن	۵	۴۲/۰۳	۰/۹۷۶	۳۶۵/۶	۰/۰۷۰۸	۰/۳۳	^{ns} ۰/۷۵	۶/۳۲
پیشگام	۵	-۸۵۴/۴	۱/۱۲۳	۲۴۲/۱	۰/۰۴۶۴	۲/۶۵	^{ns} ۰/۰۶	۸/۱۲

***، ** و ns- به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال یک و پنج درصد و غیر معنی‌دار RMSE؛ جذر میانگین مربعات خطا

می‌باشند. ماراکس و همکاران (۳۱) شبیه‌سازی صحیح اجزای موازنه آب خاک را عامل موفقیت در پیش‌بینی عملکرد تحت شرایط تنش خشکی عنوان کردند. در این مطالعه نیز پیش‌بینی صحیح شاخص سطح برگ مخصوصاً میزان حداکثر آن که معمولاً همزمان با مرحله گلدهی نیز می‌باشد از مهمترین دلایل موفقیت مدل در شبیه‌سازی عملکرد نهایی بود. شبیه‌سازی روزانه تخمیر و تخریب بر اساس روش پنمن-مونتیث فائو به همراه سایر اجزای موازنه آب خاک نیز یکی دیگر از دلایل موفقیت مدل این مطالعه در پیش‌بینی عملکرد گندم تحت گستره‌ای از مقادیر متفاوت فراهمی آب بود (۱). ژانگ و همکاران (۴۴) نیز نشان دادند که استفاده از روش پنمن-مونتیث فائو در مقیاس زمانی ده روزه دقت کمتری نسبت به مقیاس زمانی روزانه آن دارد.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه در مجموع نشان داد که مدل ارائه شده در این مطالعه به خوبی قادر به شبیه‌سازی رشد و نمو گندم تحت شرایط تنش خشکی می‌باشد. حسین‌پناهی (۱) گزارش کاملی از تعیین اعتبار مدل با چندین آزمایش صورت گرفته تحت رژیم‌های مختلف رطوبتی ارائه کرده است. با استفاده از این مدل می‌توان برنامه‌هایی بهینه برای مدیریت آبیاری تکمیلی در شرایط دیم و کم‌آبیاری در شرایط آبی ارائه کرد. همچنین مدل قادر به شناسایی خلاء عملکرد ناشی از تنش خشکی در شرایط مختلف آب و هوایی می‌باشد. با این وجود این مدل ضعف‌هایی دارد که در مطالعات آینده باید با دقت بیشتری مورد بررسی قرار بگیرد. به عنوان مثال مکانیسم مقاومت به سرما، به عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار در عملکرد گندم در مدل گنجانده نشده است.

در شرایط آب و هوایی ایران ضیایی و سپاسخواه (۴۶) مدلی جهت پیش‌بینی عملکرد گندم تحت گستره‌ای از مقادیر متفاوت فراهمی آب ارائه کردند و پس از انجام آزمایشات تعیین اعتبار و تأیید مدل به این نتیجه رسیدند که مدل ارائه شده قادر به برآورد زمان و مقدار آب مورد استفاده در آبیاری‌های تکمیلی در شرایط دیم می‌باشد. فرشی و همکاران (۱۸) نیز مدل SWLEWW-WTGRO را با آزمایشات انجام شده در دو شهر تبریز و قزوین تعیین اعتبار کردند و کاربرد این مدل را برای برنامه‌های مدیریت آبیاری مناسب دانستند. بیرناس و همکاران (۱۲) با مقایسه مدل‌های SUCROS، GECROS، CERES و SPASS نتیجه گرفتند که بهترین مدل از نظر شبیه‌سازی عملکرد گندم تحت مقادیر متفاوت فراهمی آب مدل SPASS بود و بعد از آن مدل SUCROS قرار داشت. آرورا و گاجری (۶) عملکرد دانه شبیه‌سازی شده توسط مدل SUCROS را تحت رژیم‌های مختلف رطوبتی بین ۰/۶ تا ۶/۲ تن در هکتار بدست آوردند. بنایان و کروت (۹) نیز با مدل SUCROS نتایج موفقیت آمیزی در شرایط آب و هوایی انگلستان بدست آوردند. سیمانه و همکاران (۳۵) نیز عملکرد شبیه‌سازی را بین ۱/۵ و ۹/۷ تن در هکتار برآورد کردند و نتیجه گرفتند که تأثیر تنش‌های بعد از مرحله گلدهی روی عملکرد دانه بسیار مخرب‌تر از تنش‌های قبل از آن می‌باشد. همچنین آنها بر اساس نتایج شبیه‌سازی خود تغییرات بارندگی را عامل اصلی کاهش پایداری عملکرد گندم در گستره‌ای از زمان‌ها و مکان‌های مختلف دانستند. سمنو و همکاران (۳۳) با استفاده از شبیه‌سازی نشان دادند که تحت شرایط خشکی تغییر در پارامترهایی که اثرات تنش آب روی پیری برگ و تجمع بیوماس را کنترل می‌کنند بیشترین تأثیر را روی عملکرد دانه خواهند گذاشت. جامیسون و همکاران (۲۷) نیز عنوان کردند که پیش‌بینی صحیح تاریخ گلدهی و شاخص سطح برگ مهمترین عوامل در برآورد دقیق عملکرد نهایی

منابع

- ۱- حسین‌پناهی، ف. ۱۳۹۱. بهره‌گیری از رهیافت مدل‌سازی در طراحی تیپ ایده‌آل گندم برای شرایط تنش خشکی در شرایط آب و هوایی مشهد. پایان‌نامه دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.
- ۲- علیزاده، ا.، و غ. کمالی. ۱۳۸۷. نیاز آبی گیاهان در ایران. چاپ دوم. انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد، ۲۲۷ صفحه.

۳- نصیری محلاتی، م. ۱۳۸۷. مدلسازی. در کتاب زراعت نوین. گردآورندگان: کوچکی، ع.، و خواجه حسینی، م. انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد، مشهد، ۷۰۴ صفحه.

- 4- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome.
- 5- Araus, J. L., G. A. Slafer, M. P. Reynolds, and C. Roya. 2002. Plant breeding and drought in C3 cereals: what should we breed for?. *Annals of Botany*, 89: 925-940.
- 6- Arora, V. K., and P. R. Gajri. 1998. Evaluation of a crop growth-water balance model for analyzing wheat responses to climate- and water-limited environments. *Field Crops Research*, 59: 213-224.
- 7- Arora, V. K., and P. R. Gajri. 2000. Assessment of a crop growth-water balance model for predicting maize growth and yield in a subtropical environment. *Agricultural Water Management*, 46: 157-166.
- 8- Asseng, S., B. A. Keating, I. R. P. Fillery, P. J. Gregory, J. W. Bowden, N. C. Turner, J. A. Palta, and D. G. Abrecht. 1998. Performance of the APSIM-wheat model in Western Australia. *Field Crops Research*, 57: 163-179.
- 9- Bannayan, M., and N. M. J. Crout. 1999. A stochastic modelling approach for real-time forecasting of winter wheat yield. *Field Crops Research*, 62: 85-95.
- 10- Behera, S. K., and R. K. Panda. 2009. Integrated management of irrigation water and fertilizers for wheat crop using field experiments and simulation modeling. *Agricultural Water Management*, 96: 1532-1540.
- 11- Bergjord, A. K., H. Bonesmo, and A. O. Skjelvag. 2008. Modelling the course of frost tolerance in winter wheat I. Model development. *European Journal of Agronomy*, 28: 321-330.
- 12- Biernath, C., S. Gayler, S. Bittner, C. Klein, P. Högy, A. Fangmeier, and E. Priesack. 2011. Evaluating the ability of four crop models to predict different environmental impacts on spring wheat grown in open-top chambers. *European Journal of Agronomy*, 35: 71-82.
- 13- Boote, K. J., M. J. Kropff, and P. S. Bindraban. 2001. Physiology and modelling of traits in crop plants: implications for genetic improvement. *Agricultural Systems*, 70: 395-420.
- 14- Chipanshi, A. C., E. A. Ripley, and R. G. Lawford. 1999. Large-scale simulation of wheat yields in a semi-arid environment using a crop-growth model. *Agricultural Systems*, 59: 57-66.
- 15- Eitzinger, J., M. Stastna, Z. Zalud, and M. Dubrovsky. 2003. A simulation study of the effect of soil water balance and water stress on winter wheat production under different climate change scenarios. *Agricultural Water Management*, 61: 195-217.
- 16- Eitzinger, J., M. Trnka, J. Hösch, Z. Žalud, and M. Dubrovský. 2004. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. *Ecological Modelling*, 171: 223-246.
- 17- Faramarzi, M., H. Yang, R. Schulin, and K. C. Abbaspoura, 2010. Modeling wheat yield and crop water productivity in Iran: Implications of agricultural water management for wheat production. *Agricultural Water Management*, 97: 1861-1875.
- 18- Farshi, A. A., Feyen, J., Belmans, C., and Wijngaert, K. 1987. Modeling of yield of winter wheat as a function of soil water availability. *Agricultural Water Management*, 12: 323-339.
- 19- Foulkes, M. J., R. S. Bradley, R. Weightman, and J. W. Snape. 2007. Identifying physiological traits associated with improved drought resistance in winter wheat. *Field Crops Research*, 103: 11-24.
- 20- Goudriaan, J., and H. H. Van Laar. 1994. Modelling potential crop growth processes. Textbook with exercises. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 274 pp.
- 21- Hammer, G. L., M. J. Kropff, T. R. Sinclair, and J. R. Porter. 2002. Future contributions of crop modelling*/from heuristics and supporting decision making to understanding genetic regulation and aiding crop improvement. *European Journal of Agronomy*, 18: 15-31.
- 22- Hanks, R. J., and V. P. Rasmussen. 1982. Predicting crop production as related to plant water stress. *Advances in Agronomy*, 35: 193-215.
- 23- Hunt, L. A., M. P. Reynolds, K. D. Sayre, S. Rajaram, J. W. White, and W. Yan. 2003. Crop modeling and the identification of stable coefficients that may reflect significant groups of genes. *Agronomy Journal*, 95: 20-31.
- 24- Jackson, P., M. Robertson, M. Copper, and G. L. Hammer. 1996. The role of physiological understanding in plant breeding: from a breeding perspective. *Field Crops Research*, 49: 11-37.
- 25- Jamieson, P. D., R. J. Martin, and G. S. Francis. 1995. Drought influences on grain yield of barley, wheat and maize. *New Zealand Journal of Crop and Horticulture Science*. 23: 55-66.
- 26- Jamieson, P. D., J. R. Porter, J. Goudriaan, J. T. Ritchie, H. Van Keulen, and W. Stol. 1998a. A comparison of the models ARECWHEAT, CERES-wheat, Sirius, SUCROS2 and SWHEAT with measurement from wheat grown under drought. *Field Crops Research*, 55: 23-44.
- 27- Jamieson, P. D., M. A. Semenov, I. R. Brooking, and G. S. Francis. 1998b. Sirius: a mechanistic model of wheat response to environmental, variation. *European Journal of Agronomy*, 8: 161-179.
- 28- Jensen, M. E., J. L. Wright, and B. J. Pratt. 1971. Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data. *Trans. ASAE*, 14: 954-959.

- 29- Landau, S., R. A. C. Mitchell, V. Barnett, J. J. Colls, J. Craigon, and R. W. Payne. 2000. A parsimonious, multiple-regression model of wheat yield response to environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 101: 151-166.
- 30- Loggini, B., A. Scartazza, E. Brugnoli, and F. Navari-Izzo. 1999. Antioxidant defense system, pigment composition, and photosynthetic efficiency in two wheat cultivars subjected to drought. *Plant Physiology*, 119: 1091-1099.
- 31- Maraux, F., F. Lafolie, and L. Bruckler. 1998. Comparison between mechanistic and functional models for estimating soil water balance: deterministic and stochastic approaches. *Agricultural Water Management*, 38: 1-20.
- 32- Porter, J. R., and M. Gawith. 1999. Temperatures and the growth and development of wheat: a review. *European Journal of Agronomy*, 10: 23-36.
- 33- Semenov, M. A., P. Martre, and P. D. Jamieson. 2009. Quantifying effects of simple wheat traits on yield in water-limited environments using a modeling approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149: 1095-1104.
- 34- Shibu, M. E., P. A. Leffelaar, H. Van Keulen, and P. K. Aggarwal. 2010. LINTUL3, a simulation model for nitrogen limited situations: Application to rice. *European Journal of Agronomy*, 32: 255-271.
- 35- Simane, B., H. Van Keulen, W. Stol, and P. C. Struik. 1994. Application of a Crop Growth Model (SUCROS-87) to Assess the Effect of Moisture Stress on Yield Potential of Durum Wheat in Ethiopia. *Agricultural Systems*, 44: 337-353.
- 36- Spitters, C. J. T., and A. H. C. M. Schapendonk. 1990. Evaluation of breeding strategies for drought tolerance in potato by means of crop growth simulation. *Plant and Soil*, 123: 193-203.
- 37- Timsina, J., D. Godwin, E. Humphreys, Y. Singh, B. Singh, S. S. Kukal, and D. Smith. 2008. Evaluation of options for increasing yield and water productivity of wheat in Punjab, India using the DSSAT-CSM-CERES-Wheat model. *agricultural water management*, 95: 1099-1110.
- 38- Turner, N. C. 2004. Agronomic options for improving rainfall-use efficiency of crops in dryland farming systems. *Journal of Experimental Botany*, 55: 2413-2427.
- 39- Van Ittersum, M. K., P. A. Leffelaar, H. Van Keulen, M. J. Kropff, L. Bastiaans, and J. Goudriaan. 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy*, 18: 201-234.
- 40- Van Laar, H. H., J. Goudriaan, and H. Van Keulen. 1997. SUCROS97: Simulation of crop growth for potential and water-limited production situations. C.T. de Wit Graduate School for Production Ecology and Resource Conservation, Wageningen, The Netherlands, pp.52.
- 41- Villegas, D., J. Casadesus, S. G. Atienza, V. Martos, F. Maalouf, F. Karam, I. Aranjuelo, and S. Nogues. 2010. Tritordeum, wheat and triticale yield components under multi-local mediterranean drought conditions. *Field Crops Research*, 116: 68-74.
- 42- Whitmore, A. P., and W. R. Whalley. 2009. Physical effects of soil drying on roots and crop growth. *Journal of Experimental Botany*, 60: 2845-2857.
- 43- Zhang, L., W. Van DerWerf, W. Cao, B. Li, X. Pan, and J. H. J. Spiertz. 2008. Development and validation of SUCROS-Cotton: a potential crop growth simulation model for cotton. *NJAS (Wageningen Journal of Life Sciences)*, 56: 59-83.
- 44- Zhang, Y., Q. Yu, C. Liu, J. Jiang, and X. Zhang. 2004. Estimation of winter wheat evapotranspiration under water stress with two semiempirical approaches. *Agronomy Journal*, 96: 159-168.
- 45- Zhu, X. G., G. L. Zhang, D. Tholen, Y. Wang, C. P. Xin, and Q. F. Song. 2011. The next generation models for crops and agro-ecosystems. *Science China Information Science*, 54: 589-597.
- 46- Ziaei, A. N., and A. R. Sepaskhah. 2003. Model for simulation of winter wheat yield under dryland and irrigated conditions. *Agricultural Water Management*, 58: 1-17.