

دستور العمل فنی

کاربرد مدل AquaCrop در برنامه‌ریزی عملیات زراعی و مدیریت آبیاری برای پیش‌بینی رشد و عملکرد گندم

امیر اسلامی و زهرا جهانانیده



بسم الله الرحمن الرحيم

مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

دستورالعمل فنی:

کاربرد مدل AquaCrop در برنامه‌ریزی عملیات زراعی و مدیریت
آبیاری برای پیش‌بینی رشد و عملکرد گندم

تهیه و تدوین:

امیر اسلامی و زهرا جهاننده

به ترتیب عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس و
دانشجوی دکتری دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز

سال انتشار:

۱۴۰۵



وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی



نوع نوشتار: دستورالعمل فنی
عنوان نوشتار: کاربرد مدل AquaCrop در برنامه‌ریزی عملیات زراعی و مدیریت آبیاری برای پیش‌بینی رشد و عملکرد گندم
نگارندگان: امیر اسلامی و زهرا جهان‌دیده
ویراستار ادبی: محمدرضا داهی
صفحه‌آرا: شبنم جباری
طراح جلد: سمیه وطن‌دوست
ناشر: مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
شمارگان: محدود
نوبت چاپ: اول
سال انتشار: ۱۴۰۵



مسئولیت صحت مطالب با نگارندگان است.

شماره ثبت ۶۹۴۸۴ در مرکز فناوری اطلاعات و اطلاع‌رسانی کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی به تاریخ ۱۴۰۵/۰۳/۳۰

مخاطبان دستورالعمل:

گروه هدف این دستورالعمل تکنیسین‌ها، کارشناسان کشاورزی، محققان، مهندسين مشاور، دانشجویان و کشاورزان نمونه با حداقل تحصیلات دیپلم است که زمینه کاری آنها با مبحث دستورالعمل ارتباط دارد.

هدف‌های آموزشی:

شما خوانندگان گرامی در این دستورالعمل با:

- ابزار مدلسازی برای مدیریت کشت گندم
- چارچوب مدل شبیه‌سازی AquaCrop
- آماده‌سازی اطلاعات برای بهینه‌سازی کشت گندم
- نتایج شبیه‌سازی برای مدیریت کشت گندم

آشنا خواهید شد.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
مقدمه	۱
فصل اول: آشنایی با ابزار مدل‌سازی برای مدیریت کشت گندم	۳
فصل دوم: آماده‌سازی اطلاعات برای بهینه‌سازی کشت گندم	۴
۱-۲- گردآوری داده‌های هواشناسی	۵
۱-۲-۱- روش اول: ثبت داده‌های هواشناسی به صورت مستقیم	۵
۱-۲-۲- روش دوم: ثبت داده‌های هواشناسی به صورت غیرمستقیم	۱۰
۲-۲- تدوین اطلاعات رشد گندم	۱۶
۱-۲-۲- ایجاد فضای اولیه برای ورود اطلاعات رشد گندم	۱۶
۲-۲-۲- توضیحات اطلاعات رشد گندم	۱۸
۳-۲-۲- انتخاب روش شبیه‌سازی رشد گندم	۱۹
۴-۲-۲- تحلیل توسعه مراحل فنولوژیکی رشد گندم	۲۰
۵-۲-۲- ارزیابی تبخیر-تعرق در رشد گندم	۲۷
۶-۲-۲- پیش‌بینی عملکرد و تولید گندم	۳۰
۷-۲-۲- تنش‌های آبی گندم	۳۲
۸-۲-۲- تاثیر دما بر شبیه‌سازی رشد گندم	۴۱
۹-۲-۲- تحلیل اثر شوری بر رشد گندم	۴۴
۱۰-۲-۲- بهینه‌سازی حاصل‌خیزی خاک برای گندم	۴۷
۱۱-۲-۲- برنامه‌ریزی تقویم رشد گندم	۴۹
۳-۲- برنامه‌ریزی مدیریت آبیاری برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گندم	۴۹
۴-۲- طراحی عملیات زراعی برای شبیه‌سازی رشد و محصول گندم	۵۳
۱-۴-۲- ایجاد فضای اولیه برای ورود اطلاعات عملیات زراعی	۵۳
۲-۴-۲- توضیحات عملیات زراعی گندم	۵۵
۳-۴-۲- مدیریت حاصل‌خیزی خاک	۵۶
۴-۴-۲- کاربرد مالچ به عنوان بخشی از عملیات زراعی گندم	۵۶
۵-۴-۲- شرایط سطح مزرعه	۵۸
۶-۴-۲- کنترل علف‌های هرز در مزرعه گندم	۵۸
۵-۲- تحلیل اطلاعات مربوط به پروفیل خاک در کشت گندم	۶۰
۱-۵-۲- ایجاد فضای اولیه برای ورود اطلاعات پروفیل خاک	۶۰
۲-۵-۲- توضیحات پروفیل خاک	۶۲
۳-۵-۲- بررسی ویژگی‌های لایه‌های خاک در کشت گندم	۶۲
۴-۵-۲- تحلیل ویژگی‌های سطح خاک مزرعه	۶۳
۵-۵-۲- اثرات صعود کاپیلاری بر رشد گندم	۶۴
۶-۲- مدیریت آب زیرزمینی در کشت گندم	۶۵
۱-۶-۲- ایجاد فضای اولیه برای ورود اطلاعات آب زیرزمینی	۶۵

۶۸	۲-۶-۲- توضیحات آب زیرزمینی
۶۸	۲-۶-۳- مدیریت سطح آب زیر زمینی در آبیاری گندم
۶۹	۲-۶-۴- تحلیل گرافیکی وضعیت آب زیرزمینی
۷۰	۲-۷- کالیبراسیون اطلاعات مدل برای بهینه‌سازی کشت گندم
۷۴	فصل سوم: جمع‌بندی نتایج شبیه‌سازی برای مدیریت کشت گندم
۷۴	۳-۱- برنامه‌ریزی دوره شبیه‌سازی کشت گندم
۷۵	۳-۲- تعیین شرایط اولیه کشت گندم
۷۸	۳-۳- طراحی پروژه مدیریت کشت گندم
۸۲	۳-۴- به کارگیری اطلاعات زراعی واقعی برای افزایش دقت شبیه‌سازی
۸۴	فصل چهارم: تحلیل نتایج شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی کشت گندم
۹۱	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و توصیه‌های کاربردی
۹۳	پیوست ۱
۹۷	پیوست ۲
۱۰۲	منابع

مقدمه

گندم (*Triticum spp.*) یکی از مهم‌ترین محصولات زراعی در سطح جهانی است و نقش حیاتی در تأمین امنیت غذایی و معیشت کشاورزان دارد. با توجه به افزایش جمعیت و نیاز به تولید بیشتر غذا، بهینه‌سازی فرآیندهای زراعی و مدیریت منابع آب، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، امری ضروری است. طراحی عملیات زراعی و برنامه‌ریزی مناسب برای مدیریت آبیاری می‌تواند به بهبود رشد و عملکرد گندم کمک شایانی کند.

مدیریت زراعی شامل مجموعه‌ای از فعالیت‌هاست که هدف آن به حداکثر رساندن تولید و کیفیت محصول با استفاده بهینه از منابع موجود است. این فعالیت‌ها شامل انتخاب ارقام مناسب، زمان‌بندی کاشت، مدیریت خاک، کنترل آفات و بیماری‌ها و برنامه‌ریزی آبیاری می‌شود. هر یک از این عوامل می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر رشد و عملکرد نهایی گیاه داشته باشد. آبیاری یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تولید گندم است. در بسیاری از مناطق، کمبود آب چالش جدی برای کشاورزان محسوب می‌شود. بنابراین، طراحی سیستم‌های آبیاری کارآمد و برنامه‌ریزی مناسب برای توزیع آب می‌تواند به افزایش بهره‌وری و کاهش هدررفت منابع آب کمک کند.

با توجه به تغییرات اقلیمی و چالش‌های روزافزون در حوزه کشاورزی، نیاز به رویکردهای نوین در مدیریت زراعی بیش از پیش احساس می‌شود. شبیه‌سازی رشد و عملکرد گندم با استفاده از مدل‌های مختلف، ابزاری قدرتمند برای پیش‌بینی اثر شرایط محیطی و مدیریتی بر تولید محصول است. این مدل‌ها می‌توانند به کشاورزان و محققان کمک کنند تا تصمیمات بهتری در زمینه مدیریت زراعی اتخاذ کنند. در این راهنما، به بررسی اصول طراحی عملیات زراعی، برنامه‌ریزی و مدیریت آبیاری پرداخته خواهد شد. همچنین، مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه و کاربرد آن‌ها در بهینه‌سازی مدیریت زراعی از جمله مدل AquaCrop معرفی و نحوه کاربرد آن در محصول استراتژیک گندم به طور کامل تشریح خواهد شد. استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی مانند مدل AquaCrop به کشاورزان و کارشناسان کمک می‌کند تا با تحلیل دقیق شرایط محیطی، خاک، و آب بتوانند کشت محصولات زراعی از جمله محصول استراتژیک گندم را به شکلی کارآمد مدیریت کنند. این ابزارها اطلاعاتی کلیدی در زمینه انتخاب رقم مناسب گندم، زمان کاشت، فاصله بوته‌ها، روش‌های آبیاری، و مدیریت زراعی ارائه می‌دهند تا محصولی با کیفیت و سازگار با شرایط محیطی تولید شود. هدف اصلی این رویکرد، افزایش بهره‌وری نهاده‌های کشاورزی، کاهش هزینه‌ها، و سرانجام بهبود سودآوری کشت گندم است.

با توجه به محدودیت منابع آبی، تعیین عمق آبیاری و تنظیم زمان آبیاری بر اساس مراحل رشد گیاه و شرایط اقلیمی برای کشت گندم اهمیت ویژه‌ای دارد. گیاهان، از جمله گندم، به مقادیر مختلف آب پاسخ‌های متفاوتی می‌دهند و بررسی این پاسخ‌ها با آزمایش‌های مزرعه‌ای زمان‌بر و پرهزینه است (Talbot, 2014). به همین دلیل، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی مانند AquaCrop برای تحلیل واکنش گندم به شرایط مختلف آبیاری و بررسی سناریوهای مدیریتی متفاوت ضروری است. این مدل مراحل رشد گندم را از جوانه‌زنی تا پر شدن دانه شبیه‌سازی می‌کند و به کشاورزان امکان می‌دهد تا تأثیر عوامل محیطی و مدیریتی را بر عملکرد محصول پیش‌بینی کنند.

مدل AquaCrop، توسعه‌یافته توسط سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO)، ابزاری کارآمد برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گندم است. این مدل با سادگی، دقت، و سهولت استفاده به کشاورزان، محققان، و مدیران مزرعه کمک می‌کند تا با وارد کردن داده‌های آب‌وهوایی، خاک، و مدیریت زراعی، عملکرد گندم را در شرایط مختلف پیش‌بینی کنند (Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009). این مدل با تحلیل عواملی مانند تاریخ کاشت، نوع خاک، و برنامه آبیاری، بهینه‌سازی کشت گندم را تسهیل می‌کند. این مدل عواملی مانند شاخص برداشت، توسعه پوشش گیاهی، پیری پوشش سبز، و هدایت روزه‌ای را به عنوان پاسخ‌های فیزیولوژیکی گندم به تنش آبی تحلیل می‌کند. برای مثال، اثر کوددهی، زمان‌بندی آبیاری، و مقدار آب بر مراحل رشد گندم بررسی و تأثیرات آن بر عملکرد محصول تخمین زده می‌شود. یکی از ویژگی‌های برجسته AquaCrop، جداسازی تفرق (آب خارج شده از گیاه) از تبخیر (آب خارج شده از خاک) است. این روش دقت پیش‌بینی عملکرد گندم را

افزایش می‌دهد، زیرا تنها تعرق در تولید محصول نقش دارد (Heng et al., 2009) این مدل همچنین می‌تواند شرایط مختلف آبیاری (دیم، کم‌آبیاری، یا آبیاری کامل) را شبیه‌سازی کند.

پژوهش‌های متعددی کارایی AquaCrop را برای گیاهان مختلف در شبیه‌سازی رشد، عملکرد، تبخیر-تعرق و رطوبت خاک، از جمله ذرت (Paredes et al., 2014; Hasanli et al., 2015)، جو (Abrha et al., 2012; Abi-Saab et al., 2014; Pereira et al., 2015)، سورگوم (Araya et al., 2016)، پنبه (Garcia-Vila et al., 2009)، و سویا (Paredes et al., 2015) تایید کرده‌اند. در مورد گندم، جرعه‌نوش و همکاران (۱۴۰۲) در قزوین نشان دادند که AquaCrop با دقت بالایی ماده خشک و عملکرد گندم را شبیه‌سازی می‌کند. شیرشاهی و همکاران (۱۳۹۷) در آزمایشی در شهرکرد، تأثیر پنج سطح آبیاری (۱۰۰، ۸۵، ۷۰، ۵۵ درصد تبخیر-تعرق و بدون آبیاری) را بر گندم بررسی کردند. با تقسیم مراحل رشد گندم به شش دوره (جوانه‌زنی، پنجه‌زنی، ساقه‌دهی، گلدهی، شیری-خمیری، و رسیدن)، مدل AquaCrop عملکرد دانه را با خطای کمتر از ۱۰ درصد (NRMSE) شبیه‌سازی کرد، که نشان‌دهنده دقت بالای مدل است. تومی و همکاران (Toumi et al., 2016) در مناطق نیمه‌خشک، توانایی AquaCrop را در شبیه‌سازی پوشش گیاهی، تبخیر-تعرق، رطوبت خاک، و عملکرد دانه گندم تأیید کرده‌اند.

لازم است گفته شود ارزیابی عملکرد مدل‌های شبیه‌سازی صرفاً بر اساس دقت برآورد عملکرد دانه کافی نیست و بررسی توانایی مدل در شبیه‌سازی دیگر مؤلفه‌های فیزیولوژیکی و هیدرولوژیکی، به‌ویژه اجزای بیلان آب شامل تعرق واقعی، تبخیر سطحی و تغییرات رطوبت خاک نیز مهم است. مدل AquaCrop با تکیه بر رابطه مستقیم بین تعرق و تولید زیست‌توده، ساختار محاسباتی ساده‌تری نسبت به بسیاری از مدل‌های فرایندمحور دارد و رشد پوشش گیاهی، تعرق گیاه، تبخیر از سطح خاک و تغییرات رطوبت خاک را به‌صورت پویا در فصل رشد شبیه‌سازی می‌کند (Steduto et al., 2009; Raes et al., 2009). مطالعات مختلف نشان داده‌اند که این مدل در شبیه‌سازی تبخیر-تعرق، رطوبت خاک و اجزای بیلان آب تحت شرایط مختلف آبیاری و اقلیمی توانایی قابل قبولی دارد. برای مثال، شبیه‌سازی تعرق واقعی و رطوبت خاک در شبیه‌سازی‌های تجربی رضایت‌بخش گزارش شده است (Heng et al., 2009; Paredes et al., 2014; Toumi et al., 2016). این امر موجب شده تا مدل به‌عنوان ابزاری مفید برای برنامه‌ریزی آبیاری و مدیریت آب در شرایط خشک و نیمه‌خشک شناخته شود (Jallal et al., 2024).

از جمله نقاط قوت AquaCrop می‌توان به تعادل بین سادگی، دقت و نیاز داده‌ای پایین‌تر نسبت به بسیاری از مدل‌های پیچیده‌تر، قابلیت شبیه‌سازی سناریوهای مختلف آبیاری و مدیریت آب، و تمرکز بر پاسخ رشد به تنش آبی اشاره کرد که آن را برای کاربردهای مدیریتی، آموزشی و ترویجی مناسب می‌سازد. در مقابل، این مدل برای شبیه‌سازی برخی فرآیندهای پیچیده غیرآبی مانند تنش‌های ناشی از کمبود عناصر غذایی، آفات و بیماری‌ها، یا اثر آلودگی‌ها طراحی نشده است و دقت پیش‌بینی آن در این موارد محدود است. برای مثال، در مورد کمبود نیتروژن، AquaCrop از رویکرد نیمه‌کمی برای شبیه‌سازی اثر نیتروژن بر تولید زیست‌توده استفاده می‌کند که دقت آن نسبتاً کمتر از رویکرد مستقیم و محاسباتی شبیه‌سازی غلظت نیتروژن در خاک است، زیرا مدیریت دقیق کوددهی نیازمند شبیه‌سازی مستقیم وضعیت نیتروژن گیاه طی دوره رشد است (Rahimikhoob et al., 2021). بنابراین، AquaCrop به‌عنوان ابزاری برای تحلیل مقایسه‌ای سناریوهای مدیریتی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در مدیریت آب و زراعت استفاده می‌شود.

هدف این نوشتار، ارائه اطلاعات علمی و عملی به کشاورزان، محققان و مشاوران زراعی است تا بتوانند با استفاده از این اطلاعات، عملکرد گندم را در سیستم‌های زراعی خود بهبود بخشند. کشاورزان می‌توانند با تحلیل تأثیر عوامل محیطی، نوع خاک، و برنامه‌های آبیاری، تصمیمات آگاهانه‌ای برای بهینه‌سازی کاشت، داشت، و برداشت گندم بگیرند. بدیهی است کاربرد چنین رویکردی به همراه استفاده از ابزار شبیه‌سازی، نقش بسزایی در مدیریت منابع و بهبود بهره‌وری آب در کشاورزی پایدار خواهد داشت.

فصل اول

آشنایی با ابزار مدلسازی برای مدیریت کشت گندم

برای مدیریت بهینه کشت گندم، استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی مانند AquaCrop می‌تواند به کشاورزان و مدیران مزرعه کمک کند تا با تنظیم دقیق آبیاری و مدیریت زراعی، عملکرد محصول را به حداکثر برسانند. در این بخش، نحوه استفاده از رابط کاربری مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی و مدیریت کشت گندم توضیح داده شده است. این راهنما به گونه‌ای تدوین شده که با تمرکز بر محصول استراتژیک گندم، بهره‌برداران را گام به گام با فرآیندهای مدل و کاربرد آن در مزرعه آشنا سازد.

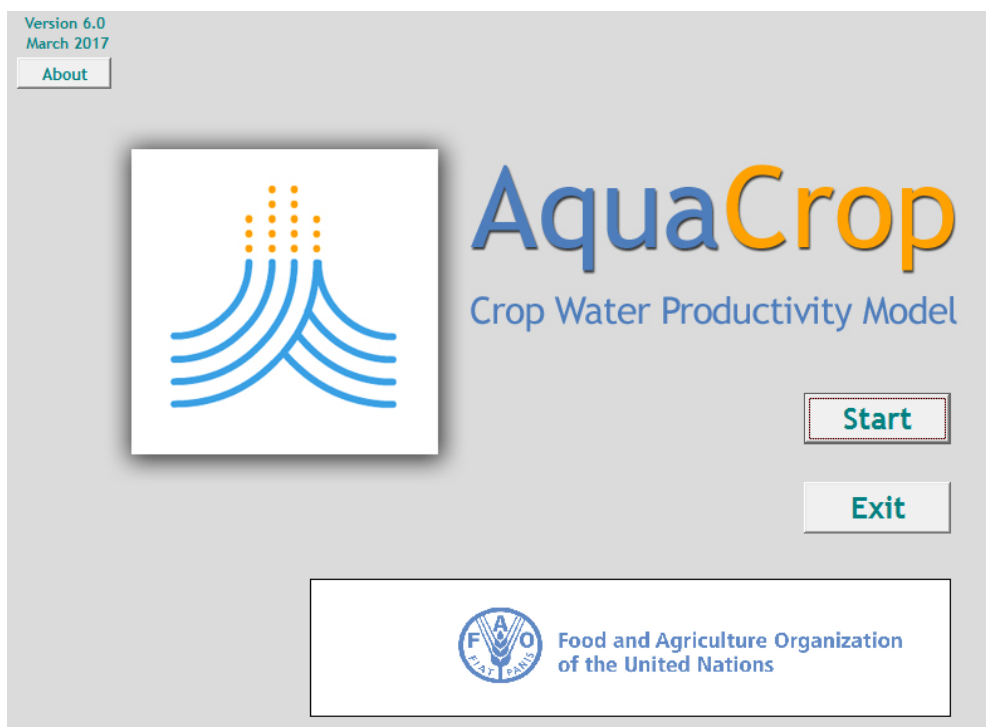
برای شروع کار با مدل AquaCrop در مدیریت کشت گندم، باید نسخه اجرایی این مدل به صورت یک فایل مستقل از وبسایت رسمی سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) به آدرس <https://www.fao.org/aquacrop/en/> دانلود شود. پس از آن در بخش Standard Programme، روی لینک AquaCrop standard interface and database کلیک شود تا آخرین نسخه مدل بارگیری گردد. توصیه می‌شود همیشه از این آدرس برای دانلود استفاده کنید تا از به‌روز بودن نسخه مطمئن شوید.

پس از دانلود شدن، فایل دریافتی شامل یک پوشه با فایل اجرایی مدل و دو زیرپوشه است:

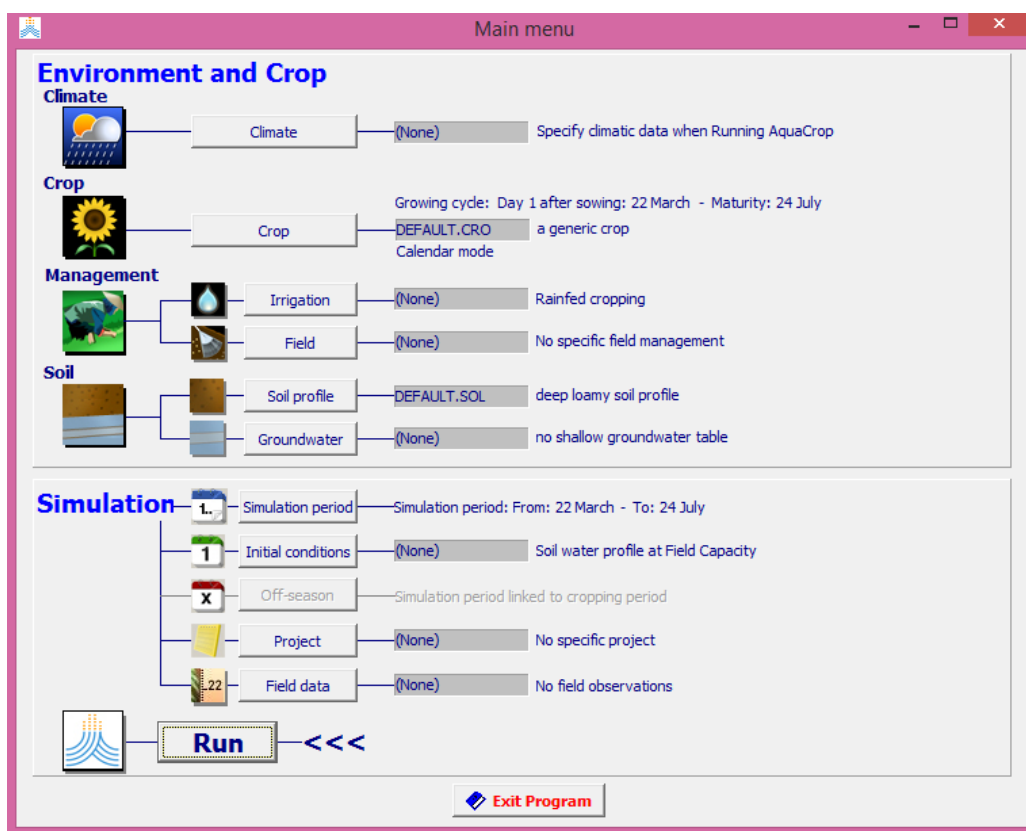
۱- Data: شامل فایل‌های ورودی مانند داده‌های هواشناسی، مشخصات خاک، و اطلاعات زراعی گندم.

۲- Output: محل ذخیره خروجی‌های شبیه‌سازی، مانند پیش‌بینی عملکرد گندم و مصرف آب.

با اجرای فایل مدل، صفحه ابتدایی (شکل ۱) ظاهر می‌شود. با کلیک روی Start، منوی اصلی (شکل ۲) نمایش داده می‌شود که شامل دو بخش کلیدی است: محیط و گیاه (Environment and Crop) و شبیه‌سازی (Simulation).



شکل ۱- صفحه ابتدایی مدل AquaCrop



شکل ۲- صفحه ابتدایی مدل AquaCrop

منوی اصلی مدل AquaCrop به شما امکان می‌دهد تا داده‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی کشت گندم را وارد کنید. این منو شامل چهار بخش است:

هواشناسی: برای وارد کردن داده‌های آب‌وهوایی، مانند دما و بارندگی، که بر رشد گندم تأثیر می‌گذارد.
گیاه: برای تنظیم پارامترهای خاص گندم، مانند تاریخ کاشت و ویژگی‌های رشد.
مدیریت: برای تعریف برنامه آبیاری و اقدامات زراعی مانند زمان‌بندی آبیاری و کوددهی.
خاک: برای وارد کردن اطلاعات پروفیل خاک و وضعیت آب زیرزمینی.
هر بخش شامل یک مستطیل خاکستری است که نام فایل ورودی و توضیحات مختصری را نمایش می‌دهد تا انتخاب داده‌های مناسب برای گندم آسان‌تر شود.

مدل AquaCrop تمام داده‌های ورودی را در پوشه DATA ذخیره می‌کند و امکان فراخوانی آن‌ها را فراهم می‌آورد. این مدل همچنین فایل‌های پیش‌فرض برای داده‌های گندم، خاک و مدیریت آبیاری را ارائه می‌دهد، داده‌هایی که برای شروع کار مناسب هستند.

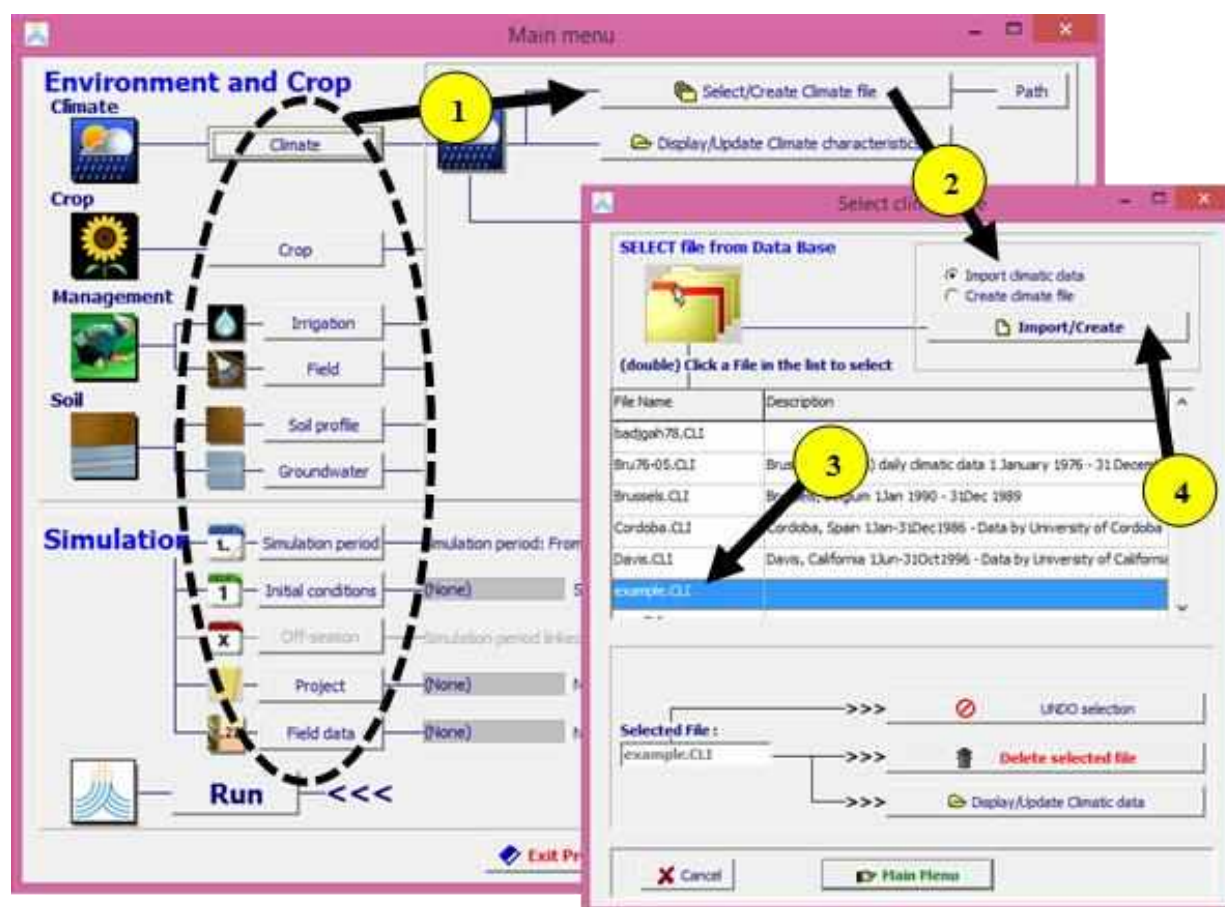
برای مثال، نحوه فراخوانی فایل هواشناسی در شکل ۳ توضیح داده شده است. با کلیک روی بخش Climate، دو گزینه ظاهر می‌شود: Select/Create Climate file: برای انتخاب یا ایجاد فایل هواشناسی.

Display/Update Climate Characteristics: برای مشاهده یا ویرایش جزئیات فایل.

با انتخاب گزینه Select/Create Climate file، پنجره‌ای باز می‌شود که در آن می‌توانید فایل‌های موجود (مانند فایل example در شکل ۳) را انتخاب کنید یا با استفاده از گزینه Create Climate File یک فایل جدید برای داده‌های هواشناسی منطقه کشت گندم خود بسازید. برای وارد کردن فایل، از گزینه Path استفاده کنید تا به دایرکتوری مورد نظر هدایت شوید.

اگر بخواهید داده‌های جدیدی برای گندم وارد کنید، می‌توانید از گزینه Create Climate File استفاده کنید. این فرآیند برای دیگر بخش‌ها مانند تنظیمات گیاه گندم، مدیریت آبیاری، یا پروفیل خاک مشابه است. برای مثال، در بخش گیاه می‌توانید تاریخ کاشت گندم و پارامترهای رشد مانند طول دوره رشد یا نیاز آبی را تنظیم کنید.

برای درک بهتر، فرض کنید می‌خواهید کشت گندم را در مزرعه‌ای با خاک لومی و شرایط آبیاری محدود شبیه‌سازی کنید. ابتدا فایل هواشناسی منطقه را انتخاب یا ایجاد کنید. پس از آن، در بخش گیاه اطلاعات گندم را (مانند تاریخ کاشت و پارامترهای موثر در رشد) وارد کنید. در بخش مدیریت، برنامه آبیاری (مثلاً آبیاری قطره‌ای یا سطحی) و سطح کوددهی را مشخص و پروفیل خاک را بر اساس داده‌های محلی تنظیم کنید. این تنظیمات به شما کمک می‌کند تا تأثیر استراتژی‌های مختلف آبیاری و زراعی را بر عملکرد گندم ارزیابی کنید. در فصل بعد جزئیات بیشتری درباره ایجاد فایل‌های ورودی جدید و تنظیم دقیق آنها برای بهینه‌سازی کشت گندم ارائه خواهد شد.



شکل ۳- فراخوانی و انتخاب فایل‌های ورودی پیش فرض یا فایل‌های ورودی ذخیره شده قبلی

فصل دوم

آماده‌سازی اطلاعات برای بهینه‌سازی کشت گندم

۲-۱- گردآوری داده‌های هواشناسی

۲-۱-۱- روش اول: ثبت داده‌های هواشناسی به صورت مستقیم

برای مدیریت دقیق آبیاری و زراعت گندم با استفاده از مدل AquaCrop، وارد کردن داده‌های هواشناسی صحیح و به‌روز ضروری است. این داده‌ها شامل بارندگی (میلی‌متر)، تبخیر-تعرق مرجع (میلی‌متر)، دمای حداقل و حداکثر (درجه سانتی‌گراد)، و غلظت CO₂ در اتمسفر هستند که باید به صورت روزانه در بخش‌های مربوط مدل ثبت شوند. بارندگی و دمای حداقل و حداکثر معمولاً از ایستگاه‌های هواشناسی برداشت می‌شوند. این اطلاعات به مدل کمک می‌کنند تا رشد و عملکرد گندم را در شرایط آب‌وهوایی خاص منطقه شبیه‌سازی کند.

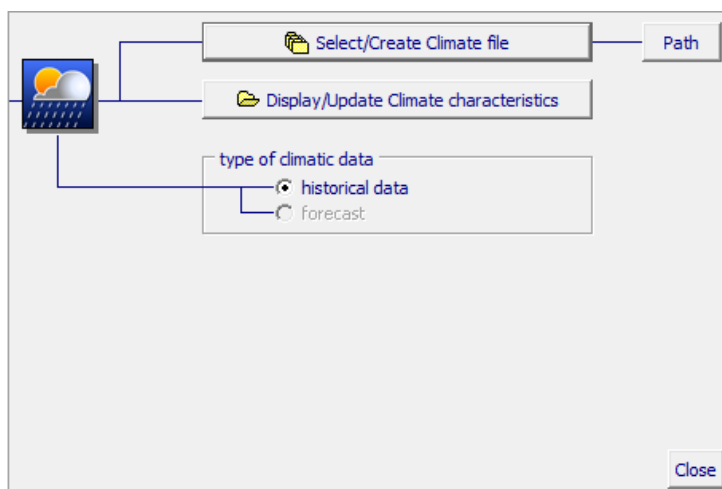
برای اجرای دقیق شبیه‌سازی رشد و عملکرد گندم در مدل AquaCrop، هر یک از متغیرهای هواشناسی ورودی نقش مشخصی دارد. بارندگی روزانه (Rain) برای محاسبه رواناب و تغییرات ذخیره رطوبتی خاک در مدل استفاده می‌شود. دمای حداقل و حداکثر (Temp) برای تعیین سرعت رشد گیاه، مراحل توسعه و اثرهای تنش حرارتی و محاسبه تبخیر-تعرق مرجع (ET_o) معیاری استاندارد برای محاسبه نیاز آبی گیاه و تنش آبی است و معمولاً از داده‌های پایه ایستگاه‌های هواشناسی شامل دما، رطوبت نسبی، تابش خورشید و سرعت باد محاسبه می‌شود. کاربر می‌تواند ET_o را با استفاده از روش‌های استاندارد مانند FAO Penman-Monteith محاسبه کند. غلظت CO₂ جو نیز برای شبیه‌سازی اثر افزایش CO₂ بر رشد و تولید زیست‌توده و بهره‌وری آب استفاده می‌شود و در مدل فایل پیش‌فرض Mauna Loa.CO₂ ارائه شده که برای گیاهان زراعی ایران مناسب است.



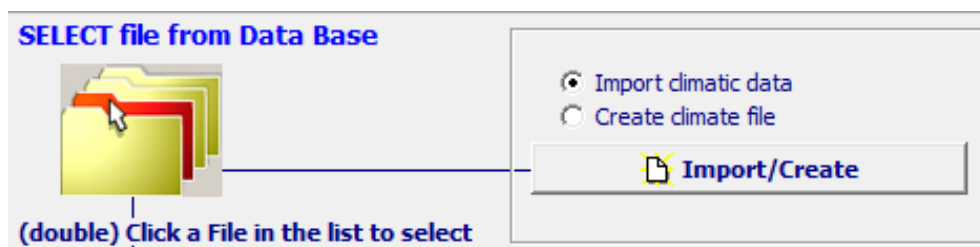
شکل ۴- تجهیزات معمول موجود در یک ایستگاه هواشناسی

همان‌طور که در فصل پیش گفته شد، در منوی اصلی با کلیک روی بخش Climate (هواشناسی) می‌توان به صفحه نمایش داده شده در شکل ۵ دسترسی پیدا کرد، در این صفحه کاربر می‌تواند با هدف ساختن یک فایل هواشناسی جدید روی گزینه انتخاب/ساخت فایل هواشناسی

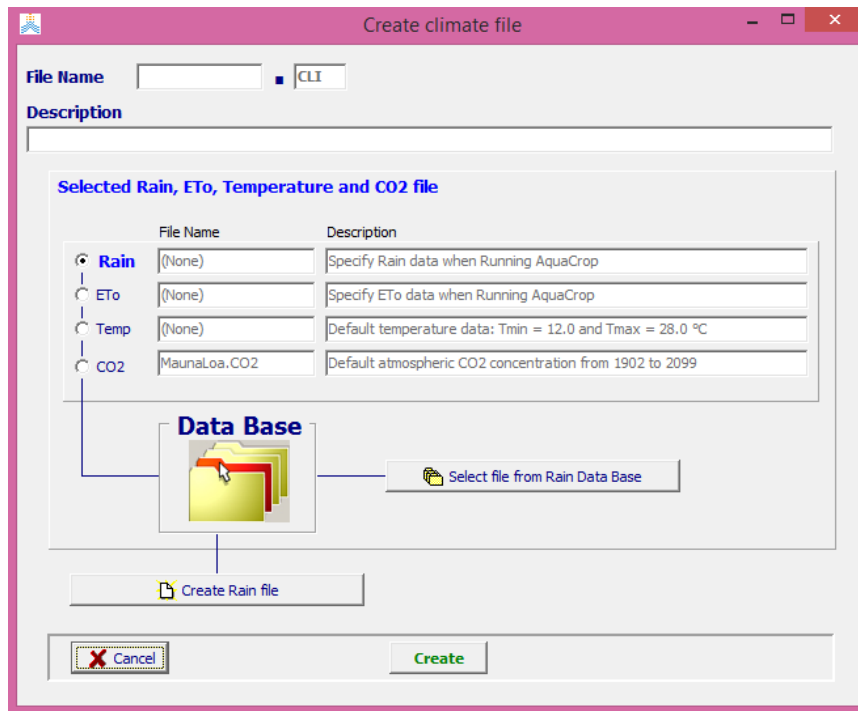
(Select/Create Climate File) کلیک کند. پس از آن پنجره نشان داده شده در شکل ۶ نمایان می‌شود. در این پنجره گزینه اول یعنی Import Climate data به منظور فرخوانی یکی از فایل‌های پیش فرض یا یکی از فایل‌هایی که پیش‌تر توسط کاربر ساخته شده است مورد استفاده قرار می‌گیرد. نحوه وارد کردن این فایل‌ها به طور کامل در فصل پیش توضیح داده شد. اما به منظور دسترسی به صفحه ساخت فایل هواشناسی جدید، باید در شکل ۶ گزینه Create climate file انتخاب شود و سپس روی Import/Create کلیک گردد. در اینجا کاربر با پنجره نشان داده شده در شکل ۷ مواجه می‌گردد.



شکل ۵- صفحه انتخاب نحوه ورود اطلاعات هواشناسی (انتخاب فایل پیش فرض یا ساخت فایل جدید)



شکل ۶- کلید ساخت فایل جدید هواشناسی در مدل



شکل ۷- پنجره ساخت اجزای فایل داده های هواشناسی

در این پنجره، کاربر باید نام فایل و در صورت لزوم توضیحات لازم را در ارتباط با فایل در بخش‌های File Name و Description وارد کند. پسوند CLI به صورت خودکار توسط مدل روی تمامی فایل های هواشناسی ساخته شده قرار می‌گیرد که بدین طریق فایل های هواشناسی را از دیگر فایل‌های ورودی متمایز می‌کند. در بخش میانی صفحه، چهار گزینه Rain، ETo، Temp و CO2 دیده می‌شود که به ترتیب فایل‌های مقادیر بارندگی، تبخیر-تعرق مرجع، دما و غلظت CO2 هستند. در واقع این چهار فایل در کنار یکدیگر فایل اطلاعات هواشناسی را تشکیل می‌دهند.

برای وارد کردن اطلاعات مربوط و ساخت این چهار فایل، کاربر می‌تواند پس از انتخاب هریک از گزینه‌های Rain، ETo، Temp و CO2 یکی از دو گزینه انتخاب فایل از دیتابیس (Select file from database) یا ساخت فایل (Create file) را انتخاب کند، این دو گزینه به ترتیب انتخاب فایل‌های بارندگی، تبخیر-تعرق مرجع، دما و CO2 را که قبلاً ساخته شده باشند، و وارد کردن اطلاعات را به صورت دستی برای کاربر فراهم می‌کنند. بنابراین، در اینجا برای ادامه فرآیند ساخت فایل هواشناسی جدید باید گزینه Create file انتخاب شود. پس از کلیک روی این گزینه صفحه‌ای مشابه با شکل ۸ باز می‌شود و کاربر باید اطلاعات اولیه مانند نام و توضیحات فایل، نوع سری زمانی داده ها (روزانه، ده روزه و ماهانه) و تاریخ شروع و پایان داده ها را وارد کند. ستون‌های اول تا پنجم در جدول به ترتیب ردیف، روز، ماه، سال و مقدار بارندگی روزانه (میلی متر بر روز) را نشان می‌دهند. پیشنهاد می‌شود در بخش نام فایل، همان نامی در نظر گرفته شود که برای فایل اصلی هواشناسی با پسوند CLI انتخاب شده بود، تا از تداخل فایل های بارندگی، دما و تبخیر-تعرق مرجع مربوط به هر فایل هواشناسی با سایر فایل‌ها جلوگیری گردد. مشابه این کار برای داده‌های تبخیر-تعرق مرجع و دما نیز باید اجرا گردد. پس از وارد کردن اطلاعات اولیه و با کلیک کردن روی Create صفحه نشان داده شده در شکل ۸ باز می‌شود.

File: example.PLU

Description:

Records: 227

Remove Last record

Add 1 records

Record	Day	Month	Year	Rain mm/day
1	11	November	2022	0.0
2	12	November	2022	0.0
3	13	November	2022	0.0
4	14	November	2022	0.0
5	15	November	2022	0.0
6	16	November	2022	0.0
7	17	November	2022	5.0
8	18	November	2022	0.0

Fill Empty cells: 0.0 mm/day

Plot: ☒ daily, ☐ 10-day, ☐ monthly, ☐ yearly

Cancel Climate file

شکل ۸- صفحه ورود مقادیر بارندگی در مدل AquaCrop

برای مثال، به‌منظور شبیه‌سازی دورهٔ رشد گندم با فرض اینکه تاریخ کاشت ۲۰ آبان ۱۴۰۱ (۱۱ نوامبر ۲۰۲۲) و تاریخ برداشت ۵ تیر ۱۴۰۲ (۲۵ ژوئن ۲۰۲۳) باشد، لازم است مقادیر بارندگی، تبخیر-تعرق مرجع و دما به صورت روزانه از تاریخ کاشت تا تاریخ برداشت وارد شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در شکل ۸ مقادیر بارندگی به صورت دستی در تاریخ‌های مذکور وارد شده است. همچنین امکان مشاهدهٔ نمودار تغییرات مقدار بارش به صورت روزانه، ده روزه، ماهانه و سالانه نیز از بخش Plot وجود دارد. در شکل‌های ۹ و ۱۰ نیز برای مثال مقادیر روزانه تبخیر-تعرق مرجع و دما برای کشت گندم نمایش داده شده است. در این دو شکل ستون‌های اول تا چهارم به ترتیب ردیف، روز، ماه و سال هستند. در شکل ۹ ستون پنجم مقادیر روزانه تبخیر-تعرق مرجع (میلی متر در روز)، و در شکل ۱۰ ستون‌های پنجم و ششم به ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر دمای روزانه (درجه سانتی گراد) هستند.

File: example.ETo

Description:

Records: 227

Remove Last record

Add 1 records

Record	Day	Month	Year	ETo mm/day
1	11	November	2022	4.3
2	12	November	2022	4.6
3	13	November	2022	4.0
4	14	November	2022	3.7
5	15	November	2022	4.0
6	16	November	2022	3.8
7	17	November	2022	3.7
8	18	November	2022	4.0

Fill Empty cells 0.0 mm/day

Plot: ☒ daily, ☐ 10-day, ☐ monthly, ☐ yearly

Cancel Climate file

شکل ۹- صفحه ورود مقادیر تبخیر-تعرق مرجع در مدل AquaCrop

آخرین جزء فایل هواشناسی، غلظت CO₂ است که خود مدل تعدادی فایل را به صورت پیش فرض پیشنهاد می‌دهد و کاربر می‌تواند از بین این فایل‌های پیشنهادی مناسب‌ترین و نزدیک‌ترین فایل به منطقه مورد مطالعه خود را انتخاب کند. بنابراین، برای داده‌های غلظت CO₂ امکان وارد کردن آن توسط کاربر وجود ندارد. در هنگام اجرای مدل AquaCrop برای گیاهان زراعی کشت شده در ایران پیشنهاد می‌شود از فایل Maunaloa.CO₂ استفاده شود. این فایل به صورت پیش فرض در مدل وجود دارد و در شکل ۷ نیز نشان داده شده است، بنابراین برای فایل غلظت CO₂ نیازی به انتخاب فایل نیست.

پس از وارد کردن اطلاعات هر سه فایل Rain، ETo و Temp و همچنین بعد از چک کردن فایل CO₂ با کلیک کردن روی Climate file فایل اطلاعات هواشناسی با نامی ساخته می‌شود که برای فایل‌های Rain، ETo و Temp انتخاب شده بود.

File: example.TMP

Description:

Records: 227

Remove Last record

Add 1 records

Record	Day	Month	Year	Tminimum ° (Celsius)	Tmaximum ° (Celsius)
1	11	November	2022	13.0	36.5
2	12	November	2022	13.4	36.0
3	13	November	2022	14.2	35.5
4	14	November	2022	14.8	35.0
5	15	November	2022	14.0	35.5
6	16	November	2022	14.4	35.0
7	17	November	2022	13.0	35.0
8	18	November	2022	12.6	34.5

Fill Empty cells

Plot

- daily
- 10-day
- monthly
- yearly

Cancel Climate file

شکل ۱۰- صفحه ورود مقادیر حداکثر و حداقل دما در مدل AquaCrop

۲-۱-۲- روش دوم: ثبت داده‌های هواشناسی به صورت غیرمستقیم

در بخش پیشین نحوه ایجاد فایل هواشناسی جدید از طریق رابط کاربری مدل AquaCrop توضیح داده شد. با این حال، روش دیگری نیز وجود دارد که به کاربران امکان می‌دهد بدون ورود به محیط مدل، فایل هواشناسی جدیدی بسازند. در این روش، کاربر می‌تواند به پوشه DATA، واقع در پوشه اصلی مدل AquaCrop، مراجعه و فایل هواشناسی جدیدی را با فرمت مناسب ایجاد کند. این رویکرد برای مدیریت داده‌های هواشناسی مانند بارندگی، دما، و تبخیر-تعرق به صورت مستقل از مدل مناسب است و انعطاف‌پذیری بیشتری برای آماده‌سازی داده‌های کشت گندم فراهم می‌کند.

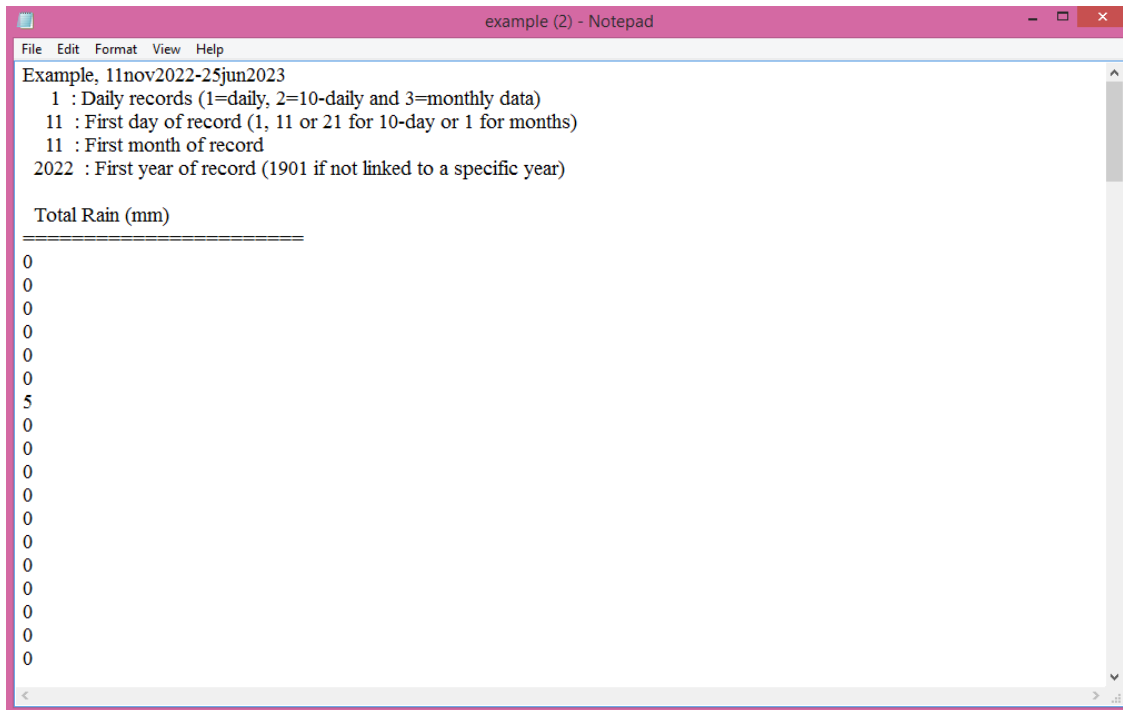
در پوشه DATA تعدادی فایل متنی (txt) حاوی داده‌های ورودی پیش فرض وجود دارد. این فایل‌ها پسوندهای مختلفی دارند. پسوندهای ETo و TMP، PLU به ترتیب مربوط به فایل‌های بارندگی، حداقل و حداکثر دما و تبخیر-تعرق مرجع هستند که در این فایل‌ها داده‌های مربوط قرار می‌گیرند. پسوند CLI نیز مربوط به فایل هواشناسی است؛ در فایل هواشناسی هیچ داده‌ای قرار ندارد، بلکه در آن تنها نام و پسوند فایل‌های بارندگی، حداقل و حداکثر دما و تبخیر-تعرق مرجع نوشته می‌شود.

برای ساخت فایل هواشناسی جدید، کاربر می‌تواند یک نسخه کپی از فایل‌های ETo، PLU و TMP موجود را در همان پوشه DATA ایجاد کند و مقادیر بارندگی، تبخیر-تعرق گیاه مرجع و دمای مربوط به پروژه خود را جایگزین مقادیر پیش فرض موجود در فایل کند. کاربر باید نام فایل‌ها را نیز تغییر دهد و نام مرتبط با پروژه خود را برای اجزای فایل هواشناسی انتخاب کند. پس از وارد کردن داده‌ها در این فایل‌ها و ذخیره کردن آنها باید وارد مدل AquaCrop شد و مانند روش قبلی گزینه انتخاب یا ساخت فایل هواشناسی (Select/Create Climate file)

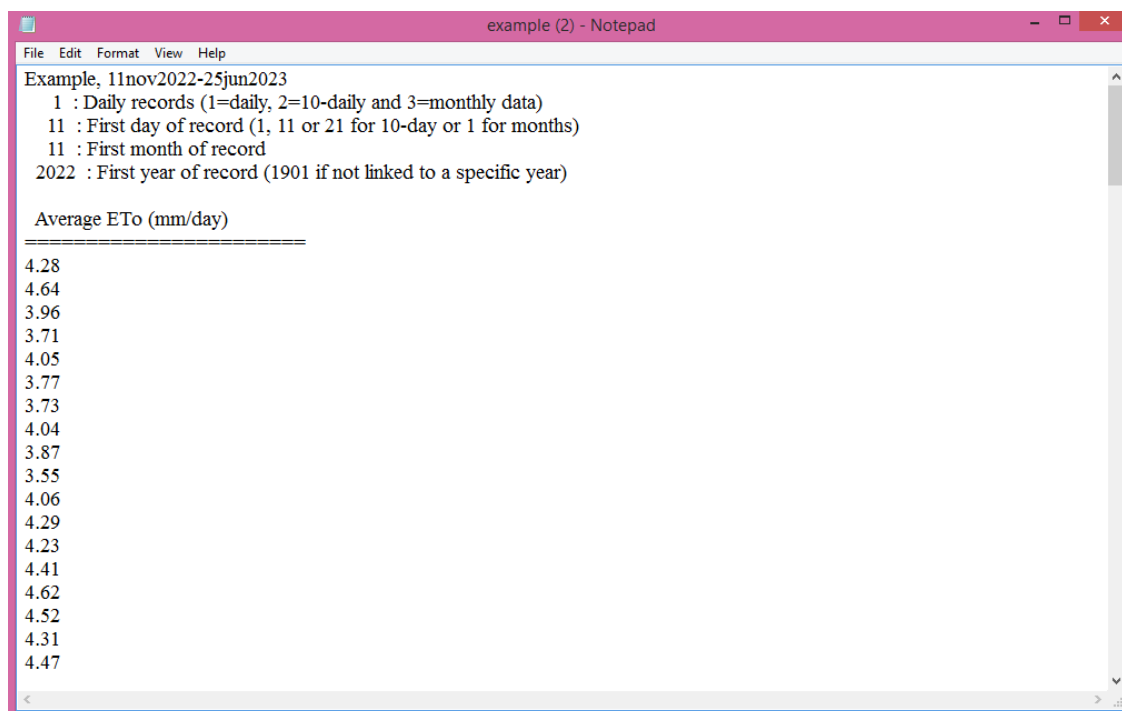
در شکل ۵، و گزینه ساخت فایل هواشناسی (Create Climate file) در شکل ۶ را انتخاب کرد و پس از هدایت به صفحه انتخاب یا ساخت فایل‌های بارندگی، تبخیر-تعرق و دما در شکل ۷، با استفاده از گزینه انتخاب فایل از دیتابیس (Select file from Data Base) فایل‌های بارندگی، دما و تبخیر-تعرق مرجع ساخته شده در پوشه DATA را انتخاب کرد. فایل CO2 نیز باید مطابق با روش توضیح داده شده در بخش پیشین انتخاب گردد.

شکل های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ نمونه‌ای از فایل‌های متنی مربوط به اطلاعات بارندگی، تبخیر-تعرق مرجع و دمای موجود در مدل را نشان می‌دهند. با فرض اینکه فایل اطلاعات هواشناسی روزانه برای کشت گندم در تاریخ ۲۰ آبان ۱۴۰۱ باشد، ابتدا باید روزانه، ده روزه و ماهانه بودن داده‌ها در خط دوم به ترتیب با استفاده از اعداد ۱، ۲ و ۳ مشخص گردد که با توجه به روزانه بودن داده‌ها، عدد ۱ در جای مربوط نوشته شده است. در ابتدای خط سوم تا پنجم نیز به ترتیب باید روز، ماه و سال مربوط به اولین داده - که منظور همان تاریخ کشت گندم است - نوشته شود؛ بنابراین، تاریخ ۲۰ آبان ۱۴۰۱ که معادل ۱۱ نوامبر ۲۰۲۲ (۲۰۲۲/۱۱/۱۱) است در ابتدای خطوط سوم تا پنجم نوشته می‌شود و در نهایت مقادیر بارندگی، تبخیر-تعرق مرجع و دمای روزانه در بخش مشخص شده نوشته خواهد شد.

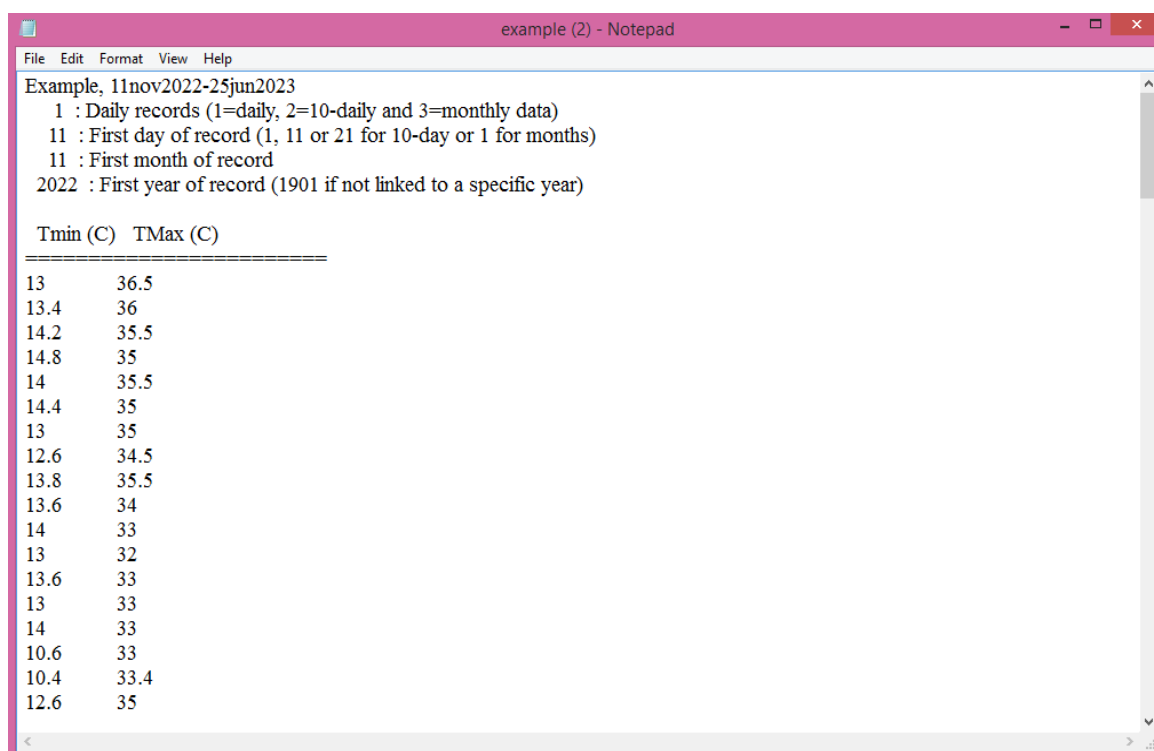
پس از ساخت فایل هواشناسی جدید با یکی از روش‌های توضیح داده شده، می‌توان از طریق منوی Climate در صفحه اصلی برنامه (شکل ۳)، و گزینه Display/Update climate characteristics به صفحه نشان داده شده در شکل ۱۴ ورود کرد و از آن طریق به نمودارهای داده های هواشناسی وارد شده دسترسی یافت و داده‌های مذکور را بررسی کرد.



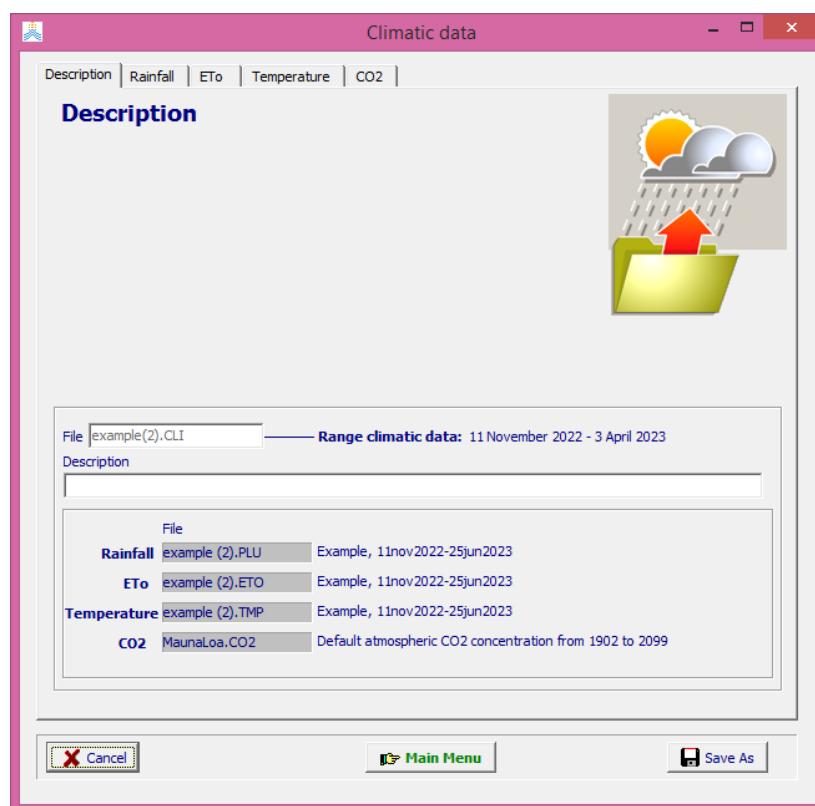
شکل ۱۱- فایل متنی اطلاعات مقدار بارندگی روزانه



شکل ۱۲- فایل متنی اطلاعات مقدار تبخیر-تعرق گیاه مرجع روزانه



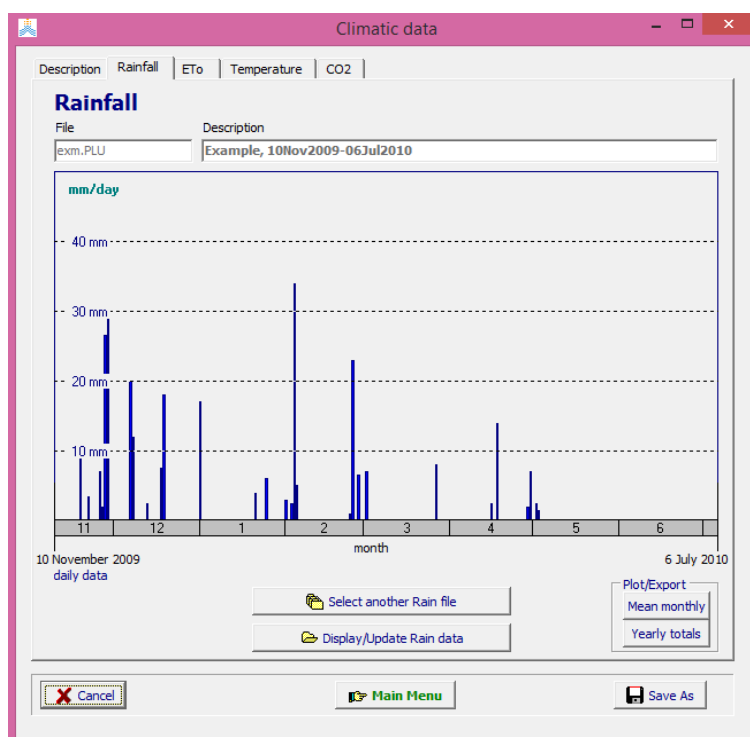
شکل ۱۳- فایل متنی اطلاعات مقدار حداقل و حداکثر دمای روزانه



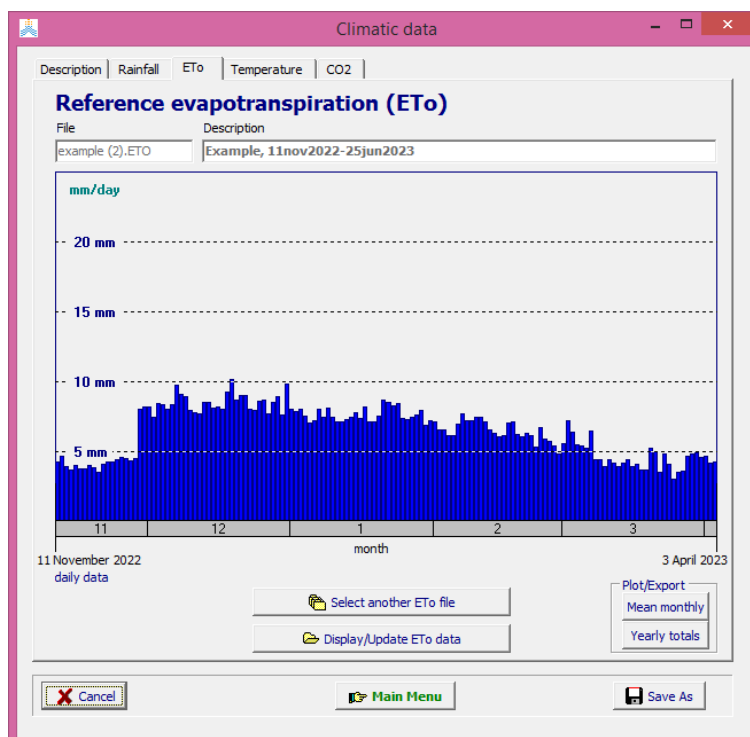
شکل ۱۴- صفحه دسترسی دهنده به نمودارهای داده‌های هواشناسی

همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، منوی Description شامل اسامی و توضیحات فایل اجزای هواشناسی است. چهار منوی دیگر یعنی Rainfall، ETo، Temperature و CO2 نیز در این صفحه وجود دارد که با کلیک کردن روی این منوها، نمودارهای مربوط نمایش داده می‌شوند (شکل‌های ۱۵ تا ۱۸).

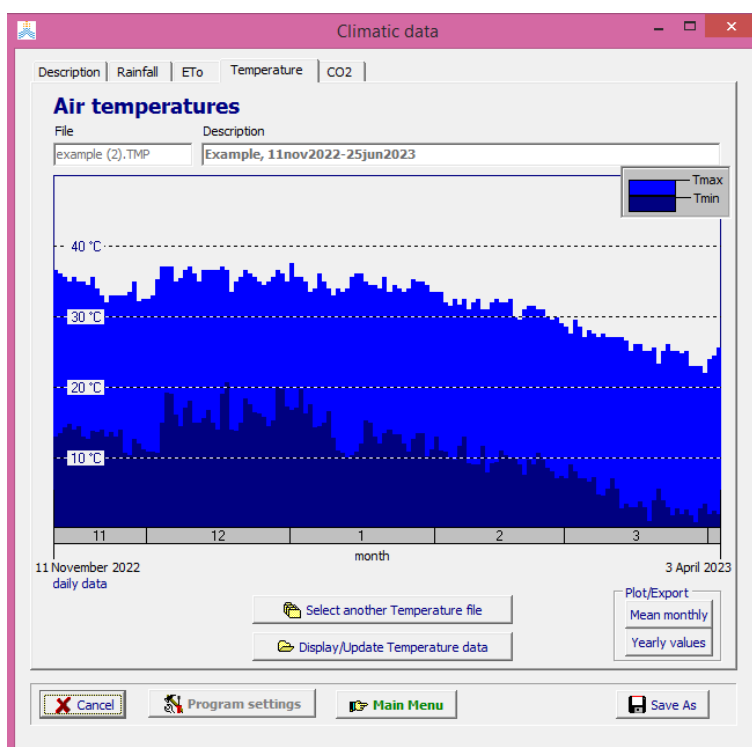
نکته: در مدل AquaCrop هیچ روشی برای محاسبه تبخیر-تعرق گیاه مرجع وجود ندارد و کاربر باید مقادیر این پارامتر را با استفاده از داده‌های هواشناسی و روش‌های مختلف محاسبه تبخیر-تعرق مرجع مانند روش پنمن-ماتنیث، هارگریوز سامانی و... محاسبه و پس از آن طبق روش‌های توضیح داده شده در این فصل به مدل وارد کند.



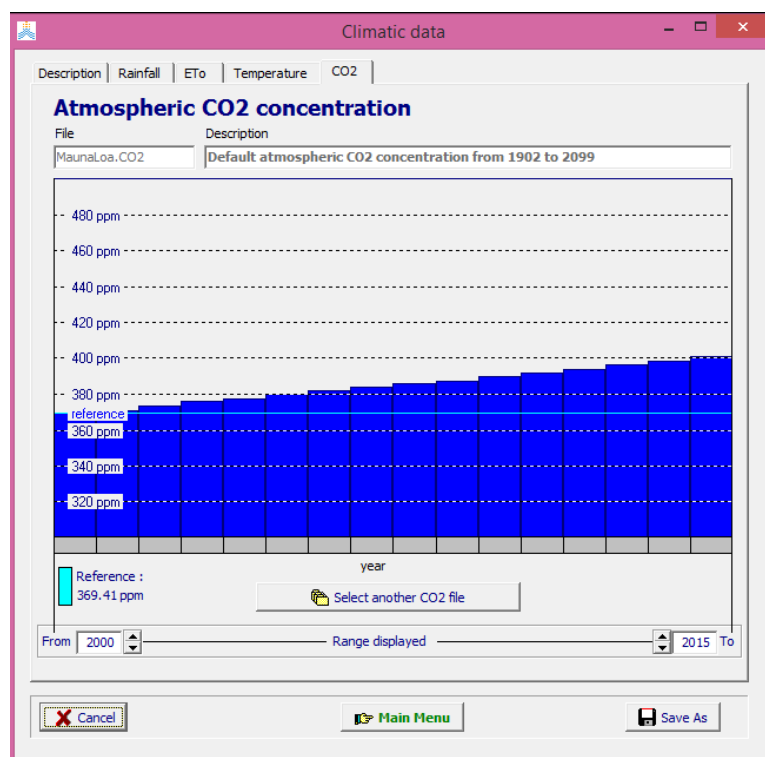
شکل ۱۵- نمودار مقدار بارندگی طی زمان



شکل ۱۶- نمودار مقادیر تبخیر-تعرق گیاه مرجع طی زمان



شکل ۱۷- نمودار مقادیر حداقل و حداکثر دما طی زمان



شکل ۱۸- نمودار مقادیر غلظت CO2 در سال‌های مختلف

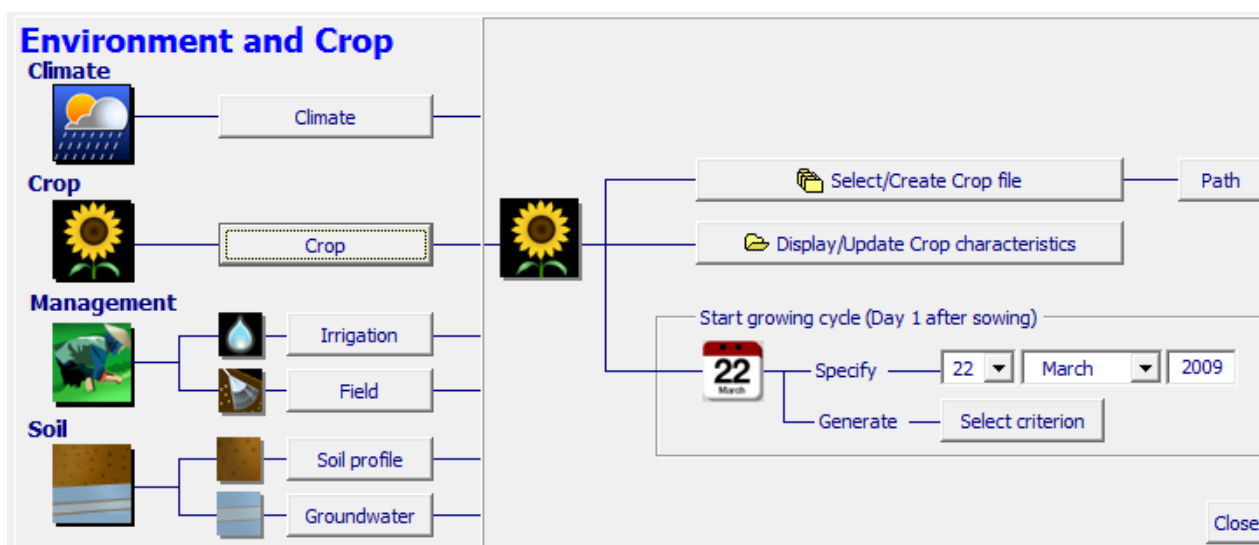
۲-۲- تدوین اطلاعات رشد گندم

۲-۲-۱- ایجاد فایل ورودی اطلاعات رشد گندم

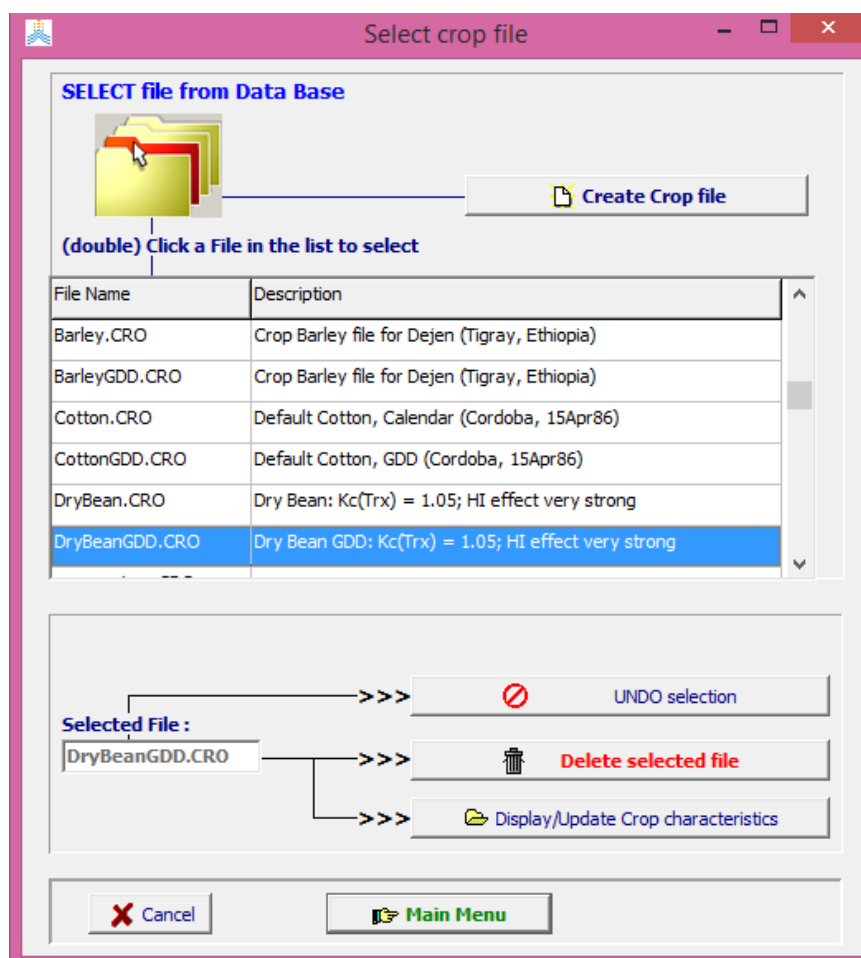
برای شبیه‌سازی دقیق رشد و عملکرد گندم در مدل AquaCrop، وارد کردن اطلاعات مربوط به گیاه ضروری است. فرآیند ساخت فایل اطلاعات گیاه مشابه روش ایجاد فایل هواشناسی است، اما شامل پارامترهای بیشتری مانند ویژگی‌های رشد، نیازهای آبی، و مراحل فنولوژیکی گندم می‌شود. در این بخش، نحوه ایجاد فایل اطلاعات گیاه شرح داده می‌شود و جزئیات پارامترهای آن در بخش‌های بعدی توضیح داده خواهد شد.

پس از وارد کردن داده‌های هواشناسی، کاربر می‌تواند با کلیک کردن روی گزینه Crop در منوی اصلی مدل (شکل ۳) به بخش مدیریت فایل‌های گیاهی دسترسی پیدا کند. در این بخش، علاوه بر امکان استفاده از فایل‌های پیش‌فرض مدل برای گندم، قابلیت ایجاد یک فایل گیاهی جدید نیز وجود دارد. با انتخاب گزینه Crop، پنجره‌ای مطابق شکل ۱۹ نمایش داده می‌شود که کاربر می‌تواند از طریق آن اطلاعات مربوط به گندم را وارد یا ویرایش کند. در این پنجره (شکل ۱۹)، با استفاده از گزینه Select/Create Crop file می‌توان فایل جدید را انتخاب کرد یا ساخت. گزینه Display/Update Crop characteristics به منظور نمایش فایل انتخاب شده (در صورتی که فایلی انتخاب شده باشد) استفاده می‌شود. شکل ۲۰ صفحه‌ای است که پس از انتخاب گزینه Select/Create Crop file به کاربر نمایش داده می‌شود.

همانطور که در شکل ۲۰ دیده می‌شود، در اینجا نیز مانند فرآیندی که در فایل هواشناسی طی شد، می‌توان یکی از فایل‌های موجود در لیست را انتخاب کرد. در صورت نیاز به ساخت فایل جدید می‌توان از گزینه Create Crop file در همین صفحه استفاده کرد تا پنجره زیر باز شود (شکل ۲۱).



شکل ۱۹- پنجره انتخاب گزینه مورد نظر برای انتخاب فایل گیاهی پیش فرض یا ساخت فایل گیاهی جدید



شکل ۲۰- صفحه انتخاب فایل های گیاهی پیش فرض یا هدایت به پنجره ساخت فایل گیاهی جدید

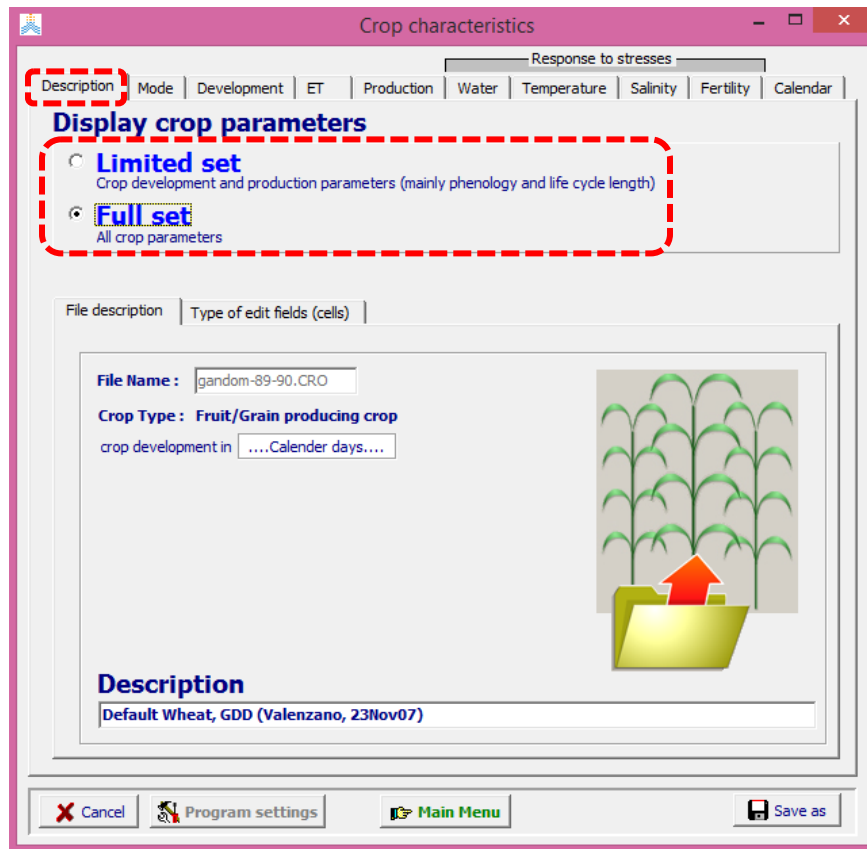
در پنجره باز شده کاربر باید اطلاعاتی مانند نام انتخابی برای فایل (File Name)، و در صورت لزوم توضیحات فایل (Description) را در بخش بالای صفحه وارد و نوع گیاه (Crop Type) و روش کاشت (Planting Method) را نیز انتخاب کند. زمان شروع و پایان شبیه سازی را که همان تاریخ کاشت و برداشت است (Cropping period)، و همچنین طول دوره رشد (Length of growing cycle) نیز باید در بخش پایین صفحه وارد کنید. با کلیک کردن روی Create فایل گیاهی جدید ساخته می شود. البته فایل ساخته شده خام است و کاربر باید اطلاعات و پارامترهای مربوط به گیاه مورد نظر را در بخش های مختلف این فایل وارد کند. در اینجا پارامترهای گیاهی موجود در این فایل و نحوه واسنجی این پارامترها توضیح داده می شود.

شکل ۲۱- پنجره ورود اطلاعات اولیه و ساخت فایل گیاهی جدید

۲-۲-۲- توضیحات اطلاعات رشد گندم

پس از انتخاب یا ایجاد فایل اطلاعات گیاه، کاربر می‌تواند با کلیک‌کردن روی گزینه Crop در منوی اصلی و پس از آن انتخاب Display/Update Crop Characteristics در پنجره شکل ۱۹، به صفحه تنظیمات ویژگی‌های گیاه دسترسی پیدا کند (شکل ۲۲). این صفحه امکان مشاهده و ویرایش پارامترهای گندم، مانند ویژگی‌های رشد، نیازهای آبی، و مراحل فنولوژیکی را فراهم می‌کند که برای بهینه‌سازی شبیه‌سازی کشت گندم ضروری هستند.

همان‌طور که در شکل ۲۲ مشاهده می‌شود، در بخش پنجره ویژگی‌های گیاه ۱۰ منوی وجود دارد که هر یک از این منوها شامل اطلاعات خاصی است که باید کاربر آنها را تکمیل کند تا اطلاعات فایل گیاهی کامل شود. تصویر نمایش داده شده در شکل ۲۲ در واقع مربوط به منوی اول است که منوی توضیحات (Description) است. در این منو دو گزینه Limited Set و Full Set وجود دارد. اگر حالت Limited Set انتخاب شود، تعدادی از منوهای بالای صفحه نمایش داده می‌شوند و نه همه آنها؛ اما در صورت انتخاب Full Set تمامی منوها برای کاربر نمایش داده می‌شوند؛ بنابراین، پیشنهاد می‌شود در هنگام استفاده از مدل AquaCrop همیشه حالت Full Set انتخاب شود. در منوی Description مورد دیگری وجود ندارد که نیازی باشد کاربر آنها را تغییر دهد.

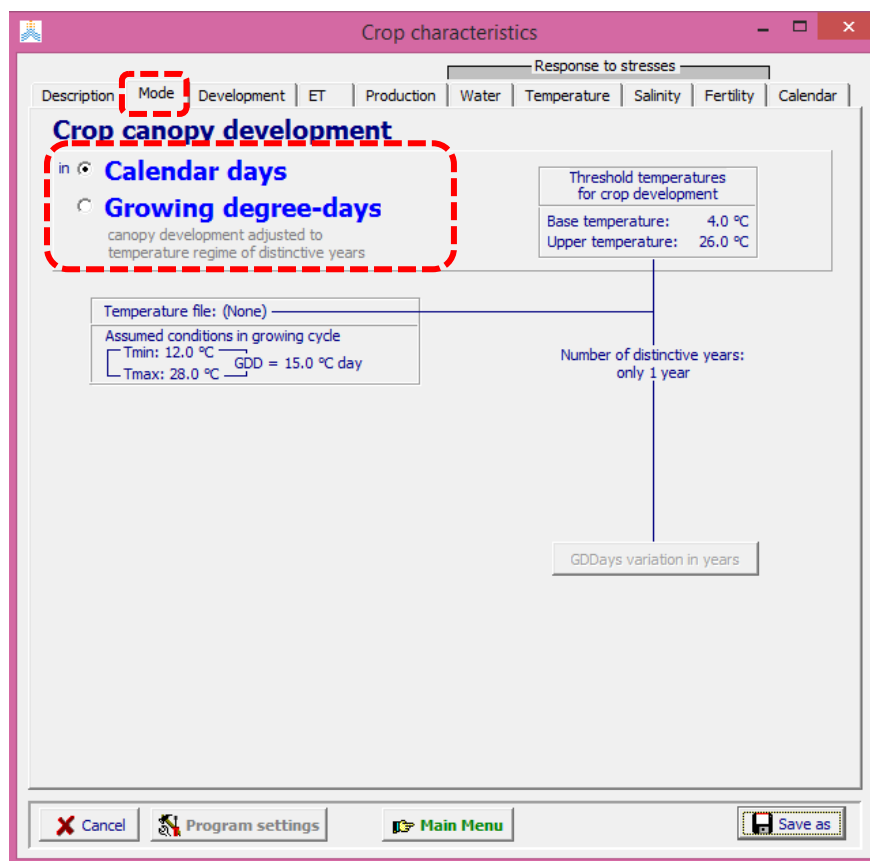


شکل ۲۲- پنجره ویژگی‌های گیاه-منوی توضیحات (Description)

دکمه‌های پایین صفحه نیز برای فعالیت‌های مربوط به ذخیره فایل به کار می‌روند؛ اگر به ذخیره کردن تغییرات ایجاد شده در فایل نیاز نباشد می‌توان با استفاده از دکمه Cancel بدون ذخیره کردن تغییرات از فایل خارج شد؛ در صورت نیاز به ذخیره کردن تغییرات باید از دکمه Main Menu استفاده کرد تا ضمن ذخیره شدن تغییرات از فایل خارج شد و به منوی اصلی برنامه بازگشت. برای ذخیره کردن فایل و اطلاعات موجود در آن با نام و توضیحات جدید می‌توان از دکمه Save as استفاده کرد.

۲-۲-۳- انتخاب روش شبیه‌سازی رشد گندم

منوی بعدی که در شکل ۲۳ نشان داده شده است Mode نام دارد که کاربر باید در این منو روش مورد نظر برای فرآیند شبیه‌سازی دوره رشد گیاه توسط مدل را انتخاب کند. این روش‌ها شامل روزهای تقویم (Calendar Days) و روز-درجات رشد (Growing degree-days) هستند.

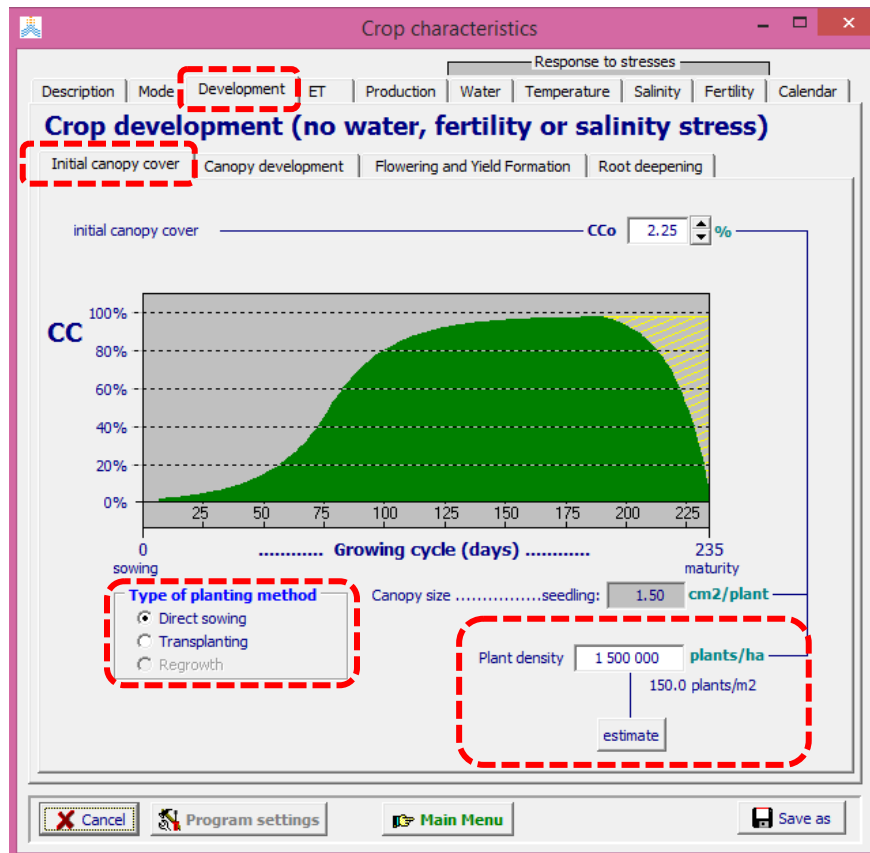


شکل ۲۳- پنجره ویژگی‌های گیاه-منوی Mode

۲-۲-۴- تحلیل توسعه مراحل فنولوژیکی رشد گندم

در منوی بعدی اطلاعات مرتبط با رشد گیاه و توسعه پوشش گیاهی (Development) باید تکمیل شود. این منو دارای چهار بخش مجزا است که در شکل ۲۴ نشان داده شده‌اند. با این فرض که تکمیل اطلاعات فایل گیاهی مربوط به کشت گندم است، در ادامه ابتدا نحوه تکمیل اطلاعات بخش اول از منوی Development و پس از آن دیگر بخش‌ها توضیح داده خواهد شد. این بخش پوشش گیاهی اولیه (Initial canopy cover) نام دارد (شکل ۲۴). در این بخش دو بخش مشخص شده با خط چین در پایین صفحه باید توسط کاربر تکمیل شود. بخش اول مربوط به نحوه کاشت است که بسته به گیاه می‌تواند کاشت دانه (Direct Sowing) یا نشاکاری (Transplanting) باشد که در اینجا گزینه کاشت دانه انتخاب شده است. بخش بعدی مربوط به Plant density یا تعداد گیاه در هر متر مربع است؛ که کاربر اگر این شاخص را داشته باشد می‌تواند آن را وارد کند، وگرنه با استفاده از کلید estimate می‌توان وارد پنجره نشان‌داده شده در شکل ۲۵ شد و تعداد گیاه در هر متر مربع را تخمین زد.

نکته: فضای پس‌زمینه برخی از پارامترهای موجود در فایل گیاهی مدل سفید و برخی خاکستری‌رنگ (مانند seedling در شکل ۲۴) هستند. باید توجه کرد که سازندگان مدل AquaCrop توصیه کرده‌اند کاربر پارامترهایی را که فضای پس‌زمینه خاکستری رنگ دارند تا آنجا که ممکن است تغییر ندهد زیرا این پارامترها با توجه به دیگر اطلاعات تکمیل شده توسط کاربر، به کمک مدل محاسبه می‌گردد.



شکل ۲۴- پنجره ویژگی‌های گیاه-منوی Development- بخش اول (Initial canopy cover)

همان‌طور که در شکل ۲۵ دیده می‌شود، مدل به دو روش می‌تواند تعداد گیاه را در هر متر مربع تخمین زند؛ در روش اول (Sowing rate) کاربر باید اطلاعاتی مثل وزن بذرهای کاشته شده در هر هکتار (kg seed/ha)، وزن هزاردانه (1000 seed mass) و درصد جوانه زنی بذر (germination rate)، و در روش دوم (Row planting) فاصله ردیف‌های کاشت (row spacing) و فاصله گیاهان روی یک ردیف (plant spacing) را وارد کند. در اینجا با توجه به پیش‌فرض در دسترس بودن وزن هزاردانه و درصد جوانه زنی، روش اول انتخاب شده است.

داده‌های مربوط به تراکم گیاه به‌منظور برآورد تعداد گیاه در واحد سطح وارد مدل می‌شوند که یکی از متغیرهای کلیدی در شبیه‌سازی توسعه پوشش گیاهی در AquaCrop است. مدل از تعداد گیاه در هر متر مربع برای محاسبه سرعت گسترش پوشش سبز، زمان رسیدن به حداکثر پوشش سبز و نسبت تبخیر به تعرق استفاده می‌کند. تراکم بیشتر گیاه معمولاً منجر به کامل شدن سریع‌تر پوشش گیاهی، کاهش تبخیر از سطح خاک و افزایش سهم تعرق در مصرف آب می‌شود که این موضوع تأثیر مستقیمی بر تولید زیست‌توده و عملکرد نهایی دارد. بنابراین، چه در روش اول (Sowing rate) و چه در روش دوم (Row planting)، اطلاعات واردشده در نهایت به یک مقدار معادل برای تعداد گیاه در واحد سطح تبدیل می‌شود و در محاسبات رشد، بیلان آب و عملکرد محصول به کار می‌رود.

با تکمیل شدن این اطلاعات، مدل پارامتر CC0 (درصد پوشش سبز اولیه در زمین) و مساحت اشغال شده توسط هر گیاه را در این مرحله (seedling) حسب سانی متر مربع تخمین می‌زند. این مساحت در واقع همان مساحتی است که گیاه در مراحل اولیه رشد (جوانه زنی) به خود اختصاص می‌دهد (شکل ۲۶). بخش دوم در منوی Development، توسعه گیاه (Canopy development) است (شکل ۲۷).

Estimate plant density

Plant density

1 500 000 plants/ha
150.0 plants/m²

Direct sowing

Sowing rate

250.00 kg seed/ha
1000 seed mass 50.00 g
germination rate 30 %

Row planting

row spacing 0.13 m
plant spacing 0.10 m

Canopy size seedling: 1.50 cm²

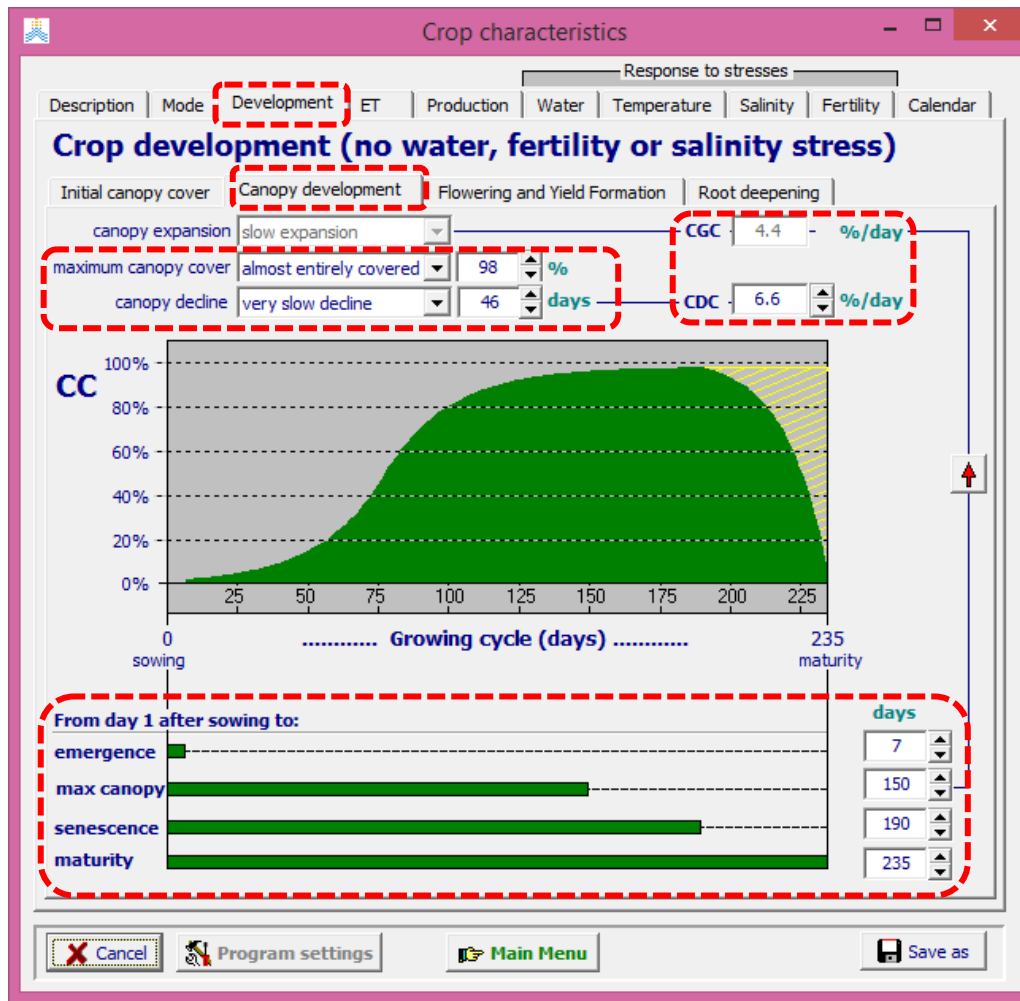
Initial canopy cover: 2.25 %

Cancel OK

شکل ۲۵- صفحه تخمین تعداد گیاه در هر متر مربع



شکل ۲۶- مرحله جوانه زنی گندم و مساحت اشغال شده توسط هر گیاه (سانتی‌متر مربع)



شکل ۲۷- پنجره ویژگی‌های گیاه-منوی Development- بخش دوم (Canopy development)-(اطلاعات مربوط به کشت گندم در شیراز)

در این بخش نیز قسمت‌هایی که باید توسط کاربر تکمیل شوند با خط چین قرمز مشخص شده‌اند. در پایین صفحه چهار مرحله رشد گیاه بر اساس تعداد روزهای پس از کاشت قرار دارد. این چهار مرحله به ترتیب جوانه زنی (emergence)، حداکثر پوشش گیاهی که منظور انتهای مرحله رشد رویشی و قبل از ورود گیاه به مرحله رشد زایشی و گلدهی است (max canopy)، پیری (senescence) و رسیدن فیزیولوژیکی (maturity) هستند. به طور مثال، با در نظر گرفتن کشت گندم در تاریخ ۲۰ آبان ۱۴۰۱، مرحله جوانه زنی ۷ روز بعد از کاشت (شکل ۲۸) و مرحله حداکثر پوشش گیاهی ۱۵۰ روز بعد از کاشت بوده است که در اواسط فروردین ماه است (شکل ۲۹)؛ زمان رسیدن به پیری ۱۹۰ روز بعد از کاشت یعنی اواخر اردیبهشت (شکل ۳۰) و رسیدن فیزیولوژیکی ۲۳۵ روز بعد از کاشت در اوایل تیر ماه (شکل ۳۱) بوده است.

همان طور که در شکل ۲۷ دیده می‌شود، در بخش بالایی صفحه canopy development دو پارامتر با نام‌های CGC و CDC نیز وجود دارد، که به ترتیب حروف اول canopy decline coefficient (ضریب کاهش پوشش گیاهی) و canopy growth coefficient (ضریب رشد یا افزایش پوشش گیاهی) هستند؛ منظور از ضریب افزایش پوشش گیاهی این است که گیاه از زمان جوانه زنی تا زمانی که به حداکثر پوشش گیاهی برسد با چه سرعتی، حسب درصد بر روز، رشد می‌کند؛ ضریب کاهش پوشش گیاهی نیز نشان‌دهنده این است که گیاه بعد از زمان رسیدن به حداکثر پوشش گیاهی و بعد از طی کردن مراحل رشد زایشی با چه سرعتی به سمت کاهش پوشش سبز و زرد شدن برگ‌ها می‌رود.



شکل ۲۸- مرحله جوانه زنی (emergence) گندم



شکل ۲۹- مرحله حداکثر پوشش گیاهی و انتهای مرحله رشد رویشی (max canopy) گندم



شکل ۳۰- مرحله شروع پیری گیاه (senescence) گندم

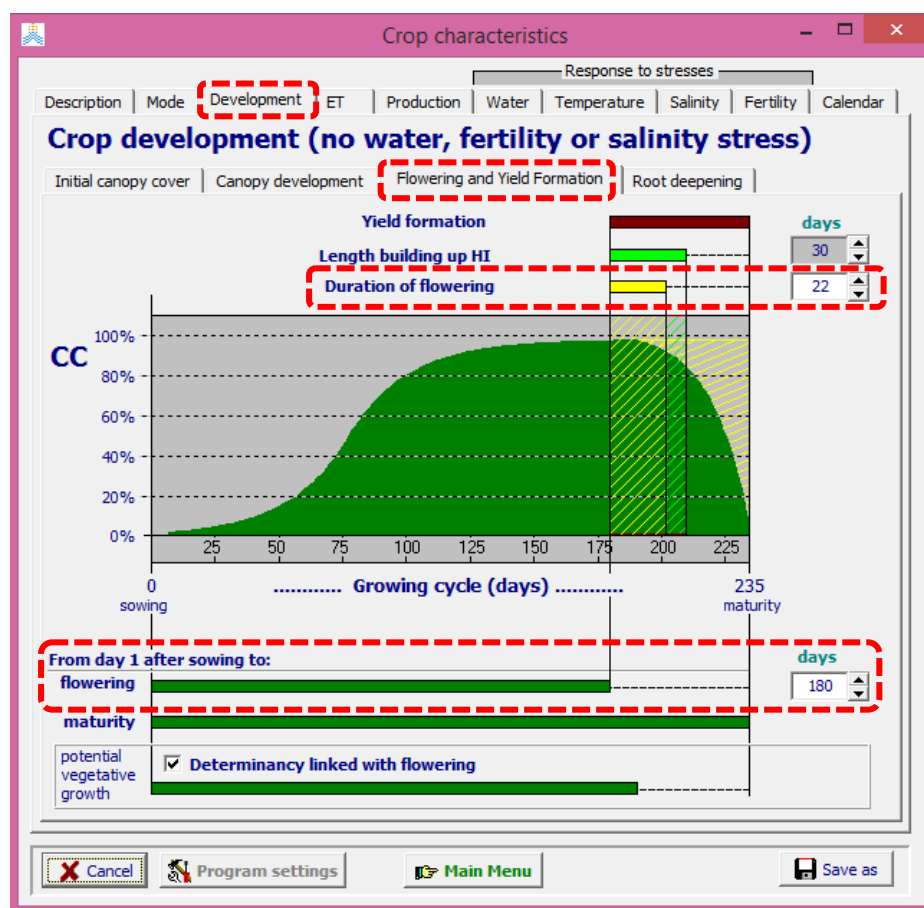


شکل ۳۱- مرحله رسیدن فیزیولوژیکی (maturity) گندم

پس از اینکه کاربر زمان رسیدن به مرحله حداکثر پوشش گیاهی (max canopy) را در بخش پایین صفحه وارد کرد، مقدار CGC توسط مدل تخمین زده می‌شود و نیازی نیست کاربر آن را تغییر دهد. مقدار CDC را نیز می‌توان با استفاده از پارامتر کاهش پوشش گیاهی (canopy decline) در بخش بالا و سمت چپ صفحه canopy development (شکل ۲۷) تغییر داد؛ در واقع، با تغییر دادن مقدار canopy decline نیز توسط مدل تخمین زده خواهد شد. لازم است گفته شود پارامتر canopy decline و پارامتر maximum canopy cover (حداکثر پوشش گیاهی) در شکل ۲۷ به دو صورت کمی و کیفی قابل تغییر هستند. به طور مثال، این دو پارامتر در اینجا برای کشت گندم از طریق جایگذاری مقدار کمی تغییر داده شده و مقدار حداکثر پوشش گیاهی و مقدار کاهش پوشش گیاهی به ترتیب برابر با ۹۸ درصد و ۴۶ درصد بوده‌اند، که مدل شاخص‌های کیفی متناظر با این مقادیر کیفی وارد شده را به ترتیب almost entirely covered (پوشش تقریباً کامل) و very slow declined (کاهش بسیار کند) در نظر گرفته است.

در صفحه canopy development پارامتر دیگری برای تغییر وجود ندارد؛ در وسط این صفحه نمودار گرافیکی نشان‌دهنده تغییرات پوشش گیاهی در دوره رشد گیاه، با توجه به اطلاعات دریافت شده از کاربر نمایش داده می‌شود.

بخش سوم از منوی Development، بخش گلدهی و تشکیل دانه (Flowering and yield formation) است که در شکل ۳۲ نشان داده شده است. در این بخش، تنها اطلاعات مربوط به دو پارامتر را باید کاربر تکمیل کند که در شکل ۳۲ با خطچین قرمز مشخص شده‌اند.



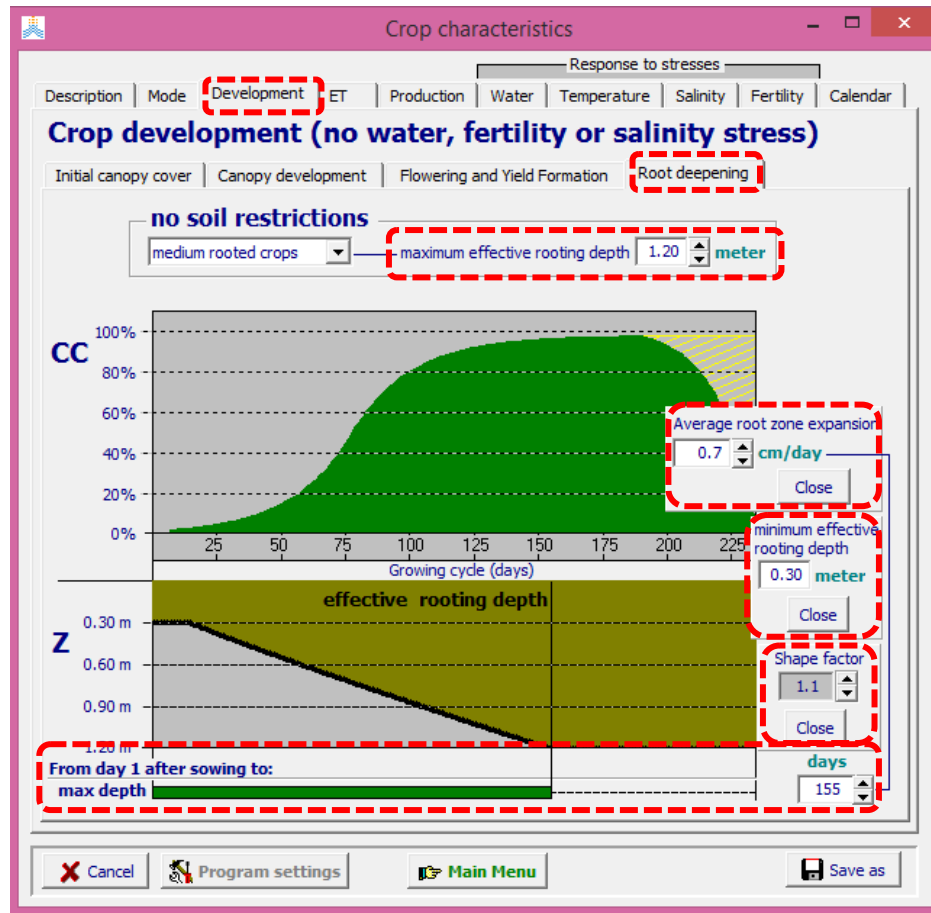
شکل ۳۲- پنجره ویژگی‌های گیاه-منوی Development- بخش سوم (Flowering and yield formation)

همان‌طور که در شکل ۳۲ مشاهده می‌شود، در این صفحه کاربر باید اطلاعات مربوط به گلدهی (شکل ۳۳) مانند زمان رسیدن به گلدهی در بخش مشخص شده با خطچین پایین صفحه- و همچنین طول دوره گلدهی (Duration of flowering) را وارد کند. برای مثال، در کشت گندم این مقادیر در شکل ۳۲ به ترتیب با مقادیر ۱۸۰ روز و ۲۲ روز جایگذاری شده‌اند.

بخش چهارم منوی Development با نام Root deepening (عمق ریشه) به اطلاعات مربوط به ریشه گیاه اختصاص دارد. شکل ۳۴ این صفحه را به همراه بخش‌هایی که باید توسط کاربر تکمیل شوند نشان می‌دهد.



شکل ۳۳- مرحله گلدهی گندم



شکل ۳۴- پنجره ویژگی‌های گیاه-منوی Development- بخش چهارم (Root deepening)

همان طور که در شکل ۳۴ مشخص است، در این بخش علاوه بر نمودار تغییرات پوشش گیاهی در دوره رشد گیاه، یک نمودار نیز تغییرات رشد ریشه را در دوره رشد نشان می‌دهد. در بخش پایین صفحه باید تعداد روزهای لازم برای رسیدن به حداکثر عمق ریشه گیاه وارد شود (max depth)، که در اینجا برای گندم ۱۵۵ روز جایگذاری شده است. پس از جایگذاری این مورد، پارامتر میانگین توسعه ناحیه ریشه (Average root zone expansion) توسط مدل تخمین زده شده و نیازی به تغییر دادن آن نیست. پارامتر shape factor که خطی یا غیرخطی بودن منحنی تغییرات عمق ریشه را نسبت به زمان نشان می‌دهد با توجه به خاکستری بودن پس‌زمینه آن- جزء پارامترهایی است که مدل به صورت پیش فرض جایگذاری کرده و نیازی به تغییر دادن آن نیست. دو پارامتر حداقل عمق مؤثر ریشه (minimum effective rooting depth) و حداکثر عمق مؤثر ریشه (maximum effective rooting depth) نیز باید توسط کاربر تکمیل شوند. به طور مثال، در اینجا حداقل و حداکثر عمق مؤثر ریشه برای گندم به ترتیب برابر با ۰/۳ و ۱/۲ متر بوده است.

۲-۵- ارزیابی تبخیر-تعرق در رشد گندم

منوی تبخیر-تعرق در مدل AquaCrop بعد از منوی توسعه گیاه قرار گرفته است. در این منو، امکان تعیین مقادیر یا ایجاد تغییر در مقادیر برخی از پارامترهای مؤثر در محاسبات مربوط به تبخیر-تعرق در مدل وجود دارد. این منو شامل دو بخش ضرایب (Coefficients) و الگوی

جذب آب (Water extraction pattern) است که پنجره ضرایب و الگوی جذب آب به ترتیب در شکل‌های ۳۵ و ۳۶ نشان داده شده‌اند. پارامترهای موجود در صفحه ضرایب، برای محاسبه تبخیر-تعرق استاندارد گیاه (ETC) را مدل استفاده می‌کند. منظور از شرایط استاندارد وضعیتی است که در آن گیاهان در مزارع وسیع و تحت مدیریت زراعی مطلوب بدون محدودیت آب در خاک کشت می‌شوند.

تبخیر-تعرق مرجع (ET_o) با تبخیر-تعرق استاندارد (ETC) به دلیل متفاوت بودن بعضی شرایط مانند وضعیت سطح زمین، ویژگی‌های پوشش گیاهی و... متفاوت است. این تفاوت‌ها در ضریب گیاهی (K_c) گنجانده شده است و ETC با ضرب کردن K_c در ET_o محاسبه می‌شود:

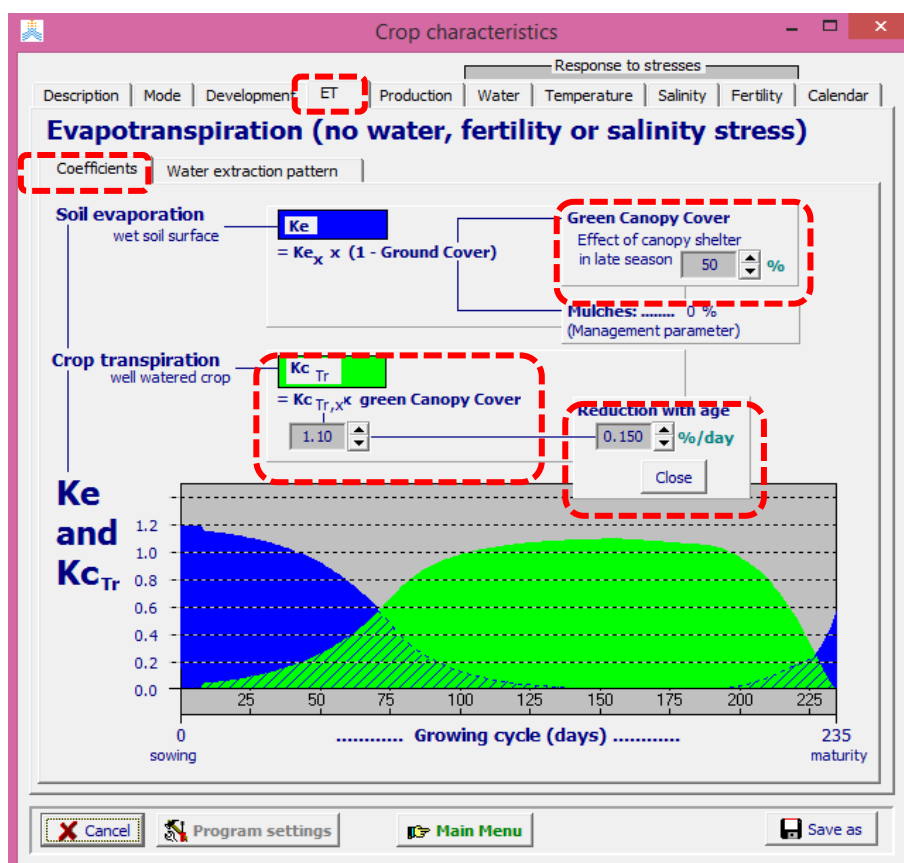
$$ETC = K_c \times ET_o$$

تفاوت‌های تبخیر-تعرق دیگر گیاهان با تبخیر-تعرق مرجع را می‌توان در یک ضریب گیاهی یک جزیی (K_c) تلفیق کرد یا از روش ضرایب گیاهی دوگانه استفاده کرد، یعنی ضریب گیاهی را به صورت دو ضریب جداگانه یعنی ضریب گیاهی پایه (K_{cTr}) و ضریب تبخیر از خاک (K_e) تفکیک کرد (K_c=K_{cTr}+K_e). قطعاً روش دوم یعنی استفاده از ضریب‌های گیاهی دوگانه دقت بسیار بالاتری دارد. مدل AquaCrop جزو محدود مدل‌های گیاهی است که برای محاسبه تبخیر-تعرق استاندارد گیاه از روش ضریب‌های گیاهی دوگانه استفاده می‌کند. درواقع این روش باعث می‌شود تا مقدار آبی که از طریق تبخیر از سطح خاک از دسترس گیاه خارج می‌شود، از مقدار آب تعرق شده تفکیک شود و همین موضوع سبب افزایش دقت مدل AquaCrop در محاسبه مقدار ماده خشک گیاه می‌شود، زیرا آب تبخیر شده در تولید ماده خشک تاثیری ندارد و باید از مقدار تعرق تفکیک گردد، زیرا تنها آب تعرق شده در تولید ماده خشک گیاهی مؤثر است.

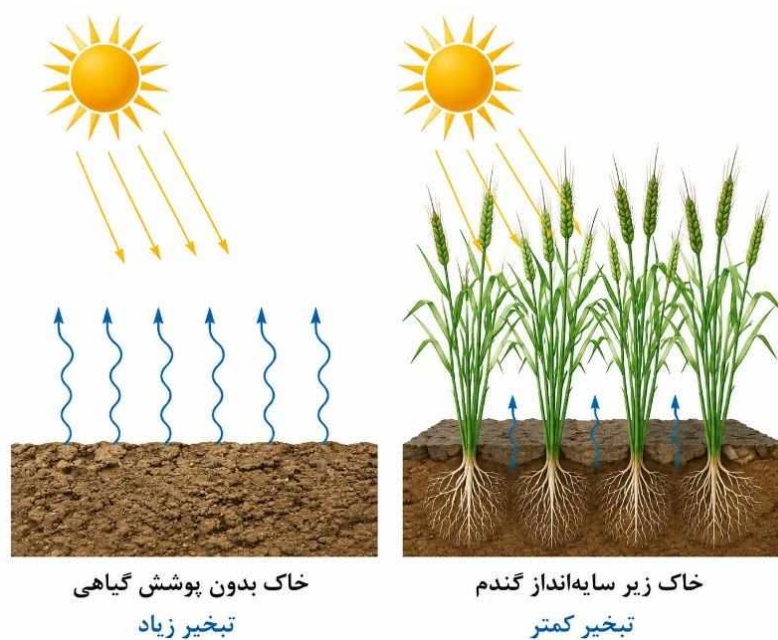
همان‌طور که در شکل ۳۵ مشاهده می‌شود، در صفحه Coefficients در منوی ET، K_e و K_{cTr} قرار دارند. بخش‌هایی که باید توسط کاربر تکمیل شوند با خط‌چین‌های قرمز نشان داده شده‌اند. با توجه به رنگ خاکستری پس‌زمینه مقادیر، مشخص است که این پارامترها با توجه به اطلاعات وارد شده در منوی قبلی (منوی Development) به صورت پیش‌فرض توسط مدل در نظر گرفته می‌شوند. در بخش Green canopy cover یک ضریب اصلاح کننده برای K_e قرار دارد که همزمان با رشد گیاه با توجه به افزایش سطح سایه انداز، مقدار K_e را اصلاح می‌کند و در نتیجه تبخیر از سطح خاک را کاهش می‌دهد؛ یک مثال از وضعیت افزایش سطح سایه انداز در شکل ۳۶ قابل مشاهده است.

مقدار K_{cTr} و ضریب اصلاحی آن (Reduction with age) نیز می‌تواند توسط کاربر تغییر داده شود. ضریب اصلاحی کاهش دهنده مقدار K_{cTr} است که می‌تواند از صفر تا ۱۰ درصد بر روز متغیر باشد. درواقع، با اعمال این ضریب مقدار تعرق پس از طی شدن مرحله حداکثر پوشش گیاهی و همزمان با شروع مرحله پیری گیاه روند کاهشی پیدا می‌کند. در بخش پایین صفحه coefficients نیز نمودار K_e و K_{cTr} در روزهای مختلف بعد از کاشت نمایش داده شده است. مشخص است که در ابتدای فصل رشد به دلیل پوشش سبز کمتر در مزرعه، مقدار تبخیر بیشتر و مقدار تعرق حداقل است و با افزایش سطح پوشش سبز و سایه اندازی گیاهان در سطح مزرعه مقدار تبخیر از سطح خاک کاهش و مقدار تعرق افزایش می‌یابد؛ بنابراین، مدل به درستی تغییرات مقدار تبخیر و تعرق را نشان می‌دهد.

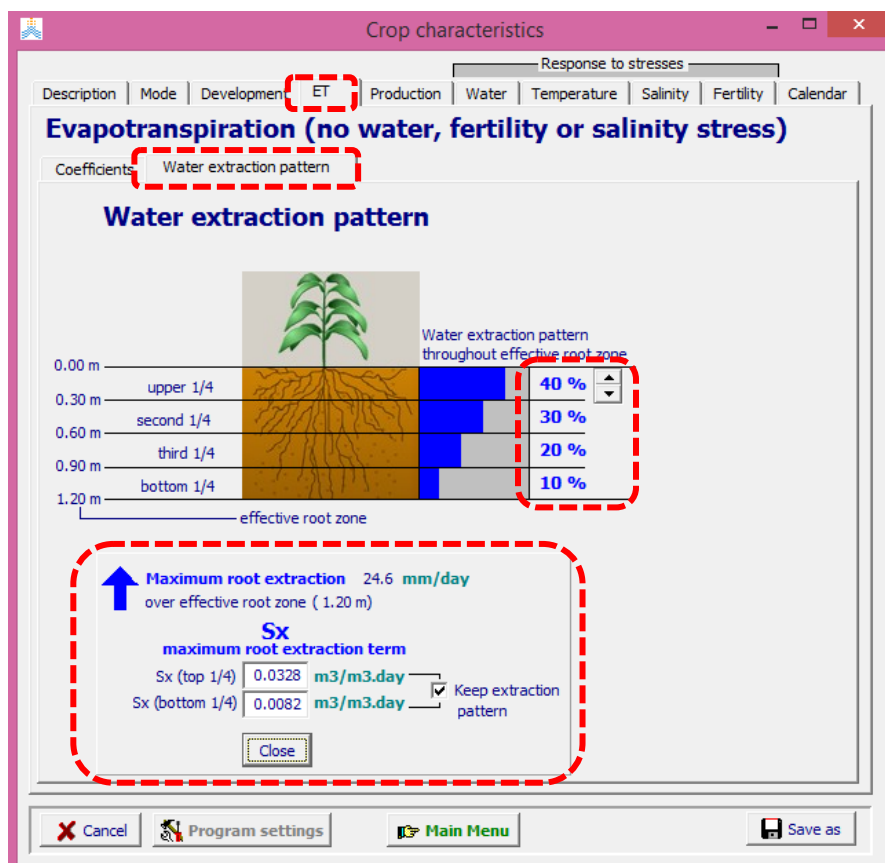
پس از تعیین مقادیر ضریب تبخیر و ضریب گیاهی پایه، برای محاسبه درست مقدار تبخیر-تعرق توسط مدل باید الگوی جذب آب توسط ریشه نیز مشخص گردد. صفحه Water extraction pattern در منوی ET مربوط به الگوی جذب آب توسط ریشه است (شکل ۳۷). در این شکل نشان داده شده است که الگوی جذب آب توسط ریشه برحسب درصد قابل تعیین است که در اینجا به عنوان مثال الگوی تعیین شده به این شکل است که جذب آب در بخش‌های اول تا چهارم به ترتیب برابر با ۴۰، ۳۰، ۲۰ و ۱۰ درصد است. در بخش پایین صفحه نیز امکان تعیین مقدار دقیق پارامتر S_x (حداکثر جذب ریشه) در یک چهارم بالایی (top 1/4) و پایینی ریشه (bottom 1/4) وجود دارد. لازم است توضیح داده شود که با زدن تیک keep extraction pattern مقادیر پارامتر S_x متناظر با الگوی جذب آب انتخاب شده در بخش بالای صفحه توسط مدل تعیین می‌گردد و نیازی به وارد کردن مقادیر دقیق S_x نیست.



شکل ۳۵- صفحه ویژگی‌های گیاه، منوی تبخیر-تعرق، بخش اول (Coefficients)



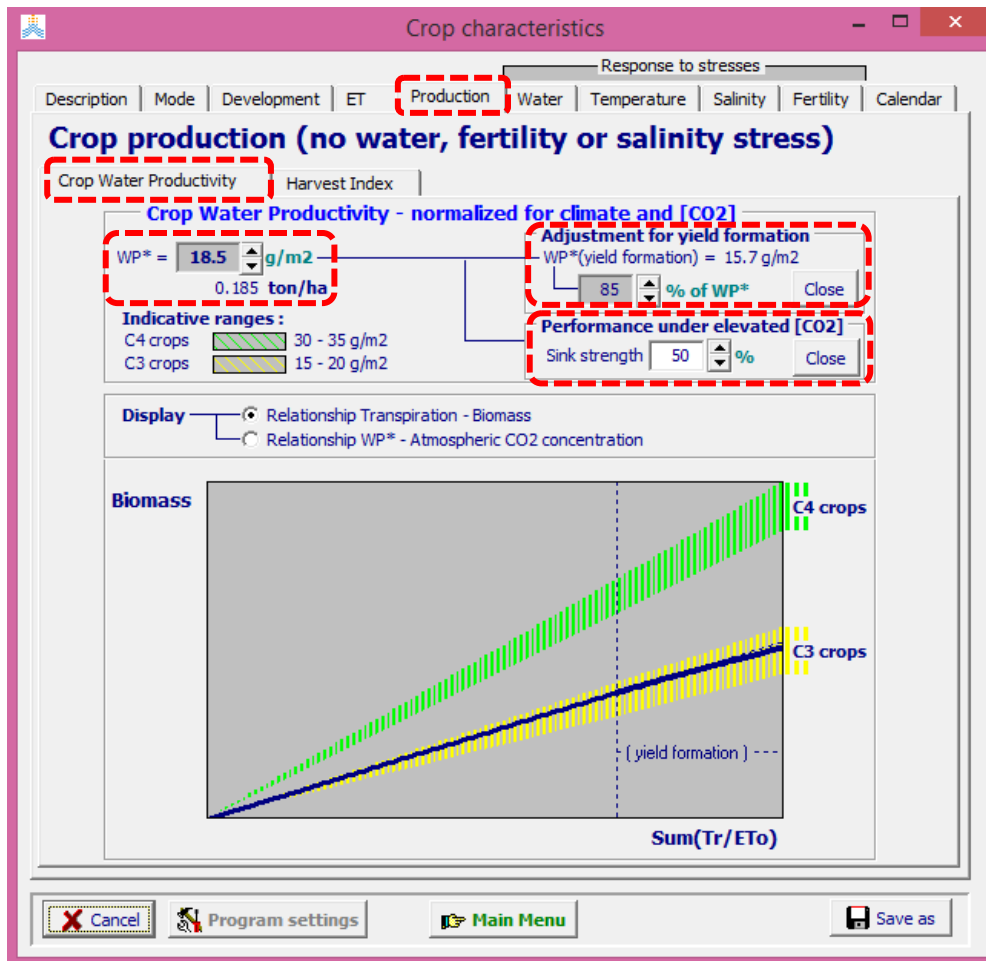
شکل ۳۶- سطح سایه انداز گیاه و نقش آن در کاهش مقدار تبخیر از سطح خاک



شکل ۳۷- صفحه ویژگی‌های گیاه، منوی تبخیر-تعرق، بخش دوم (Water extraction pattern)

۲-۲-۶- پیش‌بینی عملکرد و تولید گندم

پنجمین منو در صفحه ویژگی‌های گیاه منوی تولید (Production) است. اولین بخش از منوی تولید با نام Crop water productivity شامل اطلاعاتی در زمینه بهره‌وری آب است (شکل ۳۸). در مدل AquaCrop پارامتر بهره‌وری آب (WP) با توجه به آب و هوا و غلظت CO₂ تعدیل شده است؛ در واقع با لحاظ شدن اثر غلظت CO₂ در WP پارامتری به نام WP* ایجاد شده که در مدل AquaCrop جایگزین WP شده است که بر خلاف WP می‌تواند برای مناطق و شرایط آب و هوایی و فصل‌های مختلف استفاده گردد که در آن‌ها غلظت CO₂ متفاوت است. مقدار WP* در مدل AquaCrop با توجه به C3 یا C4 بودن گیاه متفاوت است. همان‌طور که در شکل ۳۸ دیده می‌شود، بازه پیشنهادی مدل برای مقدار WP* برای گیاهان C3 بین ۱۵ تا ۲۰ گرم بر متر مربع و برای گیاهان C4 بین ۳۰ تا ۳۵ گرم بر متر مربع است. برای مثال، در اینجا برای گندم که یک گیاه C3 است، این مقدار برابر با ۱۸/۵ گرم بر متر مربع قرار داده شده است. دو پارامتر Adjustment for yield formation و Performance under elevated CO₂ نیز به عنوان ضرایبی برای اصلاح مقدار WP* انتخاب شده هستند که به ترتیب برای اصلاح و لحاظ کردن اثرهای کاهشی WP* در مرحله تولید دانه در گیاه و در شرایط افزایش غلظت CO₂ کاربرد دارند.

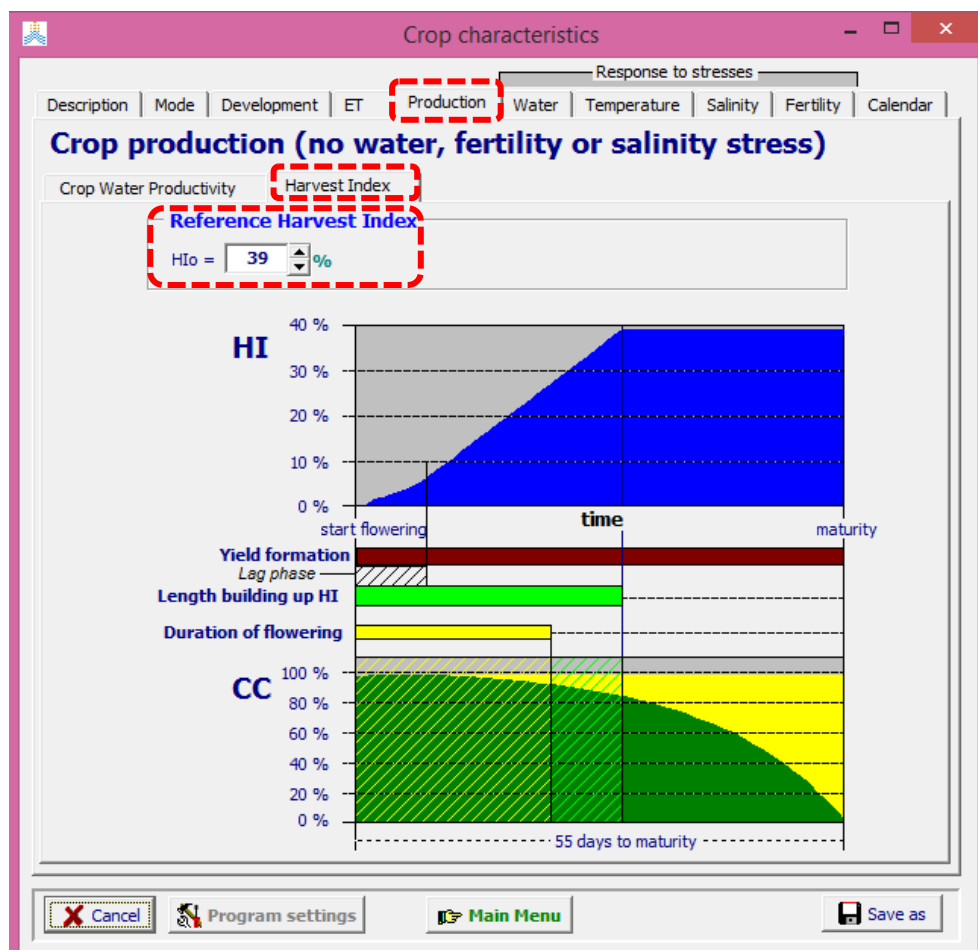


شکل ۳۸- صفحه ویژگی‌های گیاه، منوی تولید، بخش اول (Crop water productivity)

در بخش پایین صفحه نیز مقادیر تجمعی نسبت تعرق به تبخیر-تعرق مرجع در برابر مقادیر ماده خشک نشان داده شده است که می‌توان با انتخاب گزینه مربوط از بخش Display، نمودار را تغییر داد تا مقادیر WP^* را در برابر غلظت CO_2 نشان دهد.

دومین بخش از منوی تولید (Production) نیز مربوط به شاخص برداشت (Harvest Index: HI) است که در شکل ۳۹ نشان داده شده است. شاخص برداشت ضریبی است که حاصل ضرب آن در مقدار ماده خشک تولیدی گیاه، برابر با مقدار عملکرد دانه در گیاهان دانه‌ای است ($Yield = Biomass \times HI$).

در هنگام اجرای مدل AquaCrop، مقدار HI با توجه به فاکتورهایی مانند دما اصلاح می‌شود. بنابراین در صفحه Harvest Index در شکل ۳۹ مقدار HI اولیه‌ای که کاربر تعیین می‌کند با نام شاخص برداشت مرجع (Reference Harvest Index) یا HI_0 نشان داده شده است. مقدار این شاخص برای گیاهان دانه‌ای مختلف متفاوت است، به طور مثال، در اینجا برای گندم این شاخص برابر با ۳۹ درصد در نظر گرفته شده و جایگذاری شده است. لازم است گفته شود HI_0 و WP^* جزء پارامترهایی هستند که باید کاربر آنها را وارد کند. مقدار تعیین شده برای HI_0 و نمودار تغییرات شاخص برداشت و پوشش گیاهی در شکل ۳۹ نشان داده شده‌اند. در این نمودار دیده می‌شود که با شروع دوره گلدهی گیاه مقدار شاخص برداشت از صفر شروع می‌گردد و رفته رفته با گذشت زمان و اتمام دوره گلدهی و تشکیل دانه به حداکثر مقدار خود (در اینجا ۳۹ درصد) می‌رسد و این مقدار را تا رسیدن به مرحله رسیدگی کامل حفظ می‌کند.

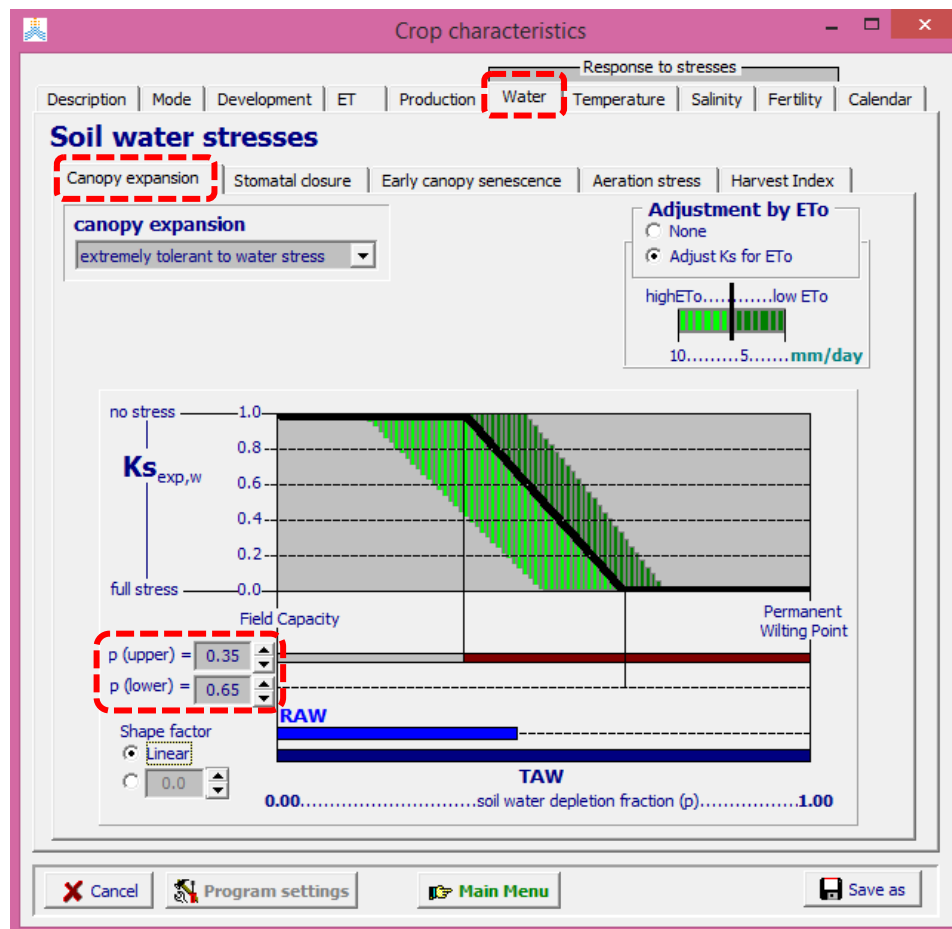


شکل ۳۹- صفحه ویژگی‌های گیاه، منوی تولید، بخش دوم (Harvest Index)

۷-۲-۲- تنش‌های آبی گندم

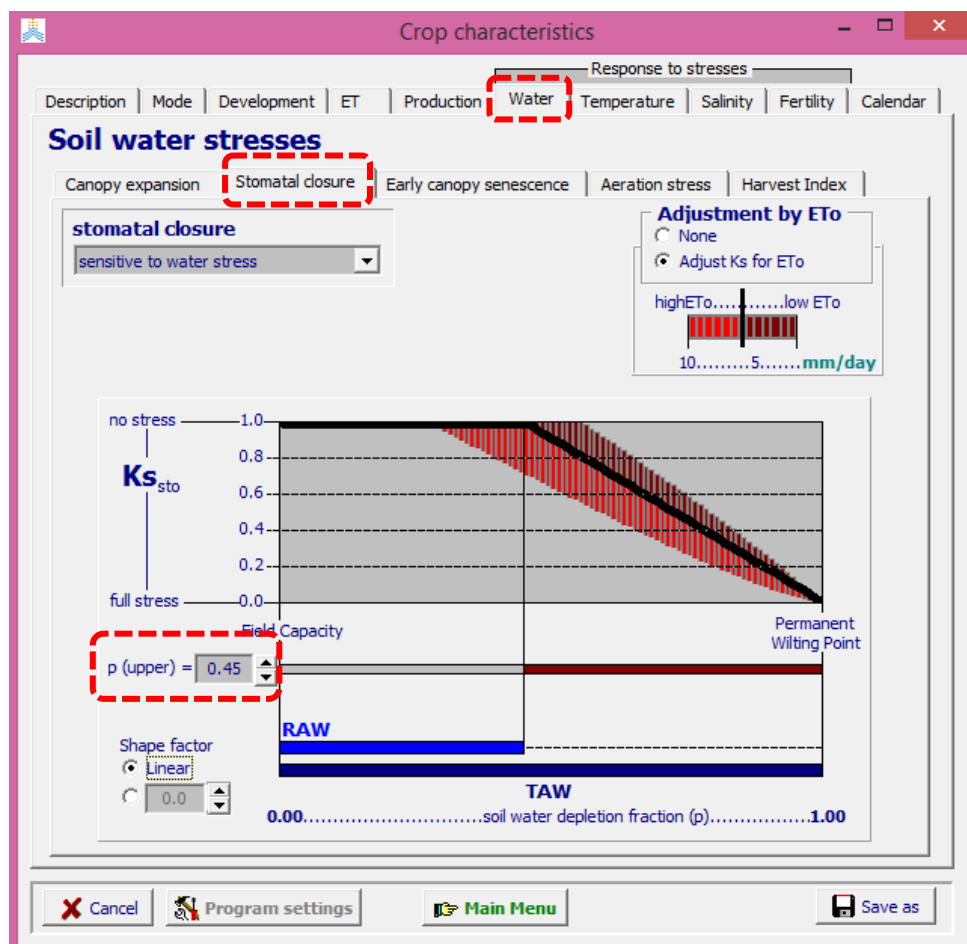
ششمین منو در صفحه ویژگی‌های گیاه منوی آب (Water) است. در این منو، اثر شرایط تنش آبی و شرایط ماندابی بر رشد و محصول گیاه لحاظ می‌شود. بخش اول از منوی آب مربوط به اثر تنش آبی بر توسعه پوشش گیاهی (Canopy Expansion) است که در شکل ۴۰ نشان داده شده است.

در این صفحه دو ضریب به نام آستانه بالای تقلیل آب خاک (P (upper)) و آستانه پایین تقلیل آب خاک (P (lower)) وجود دارد که مدل مقدار آن را با توجه به نوع گیاه به صورت پیش‌فرض تخمین می‌زند؛ اما در صورت نیاز کاربر نیز می‌تواند مقدار آن را تغییر دهد. مقدار P (upper) در واقع شروع اثر تنش آبی است و همزمان با افزایش مقدار این ضریب، اثر تنش آبی بر توسعه پوشش گیاهی نیز شدیدتر می‌شود و با رسیدن به مقدار P (lower) اثر تنش آبی به حداکثر مقدار خود می‌رسد و گیاه به صورت کامل تحت تنش خواهد بود. در شکل بالا مقادیر P (upper) و P (lower) برای گندم برابر با ۰/۳۵ و ۰/۶۵ قرار داده شده است.



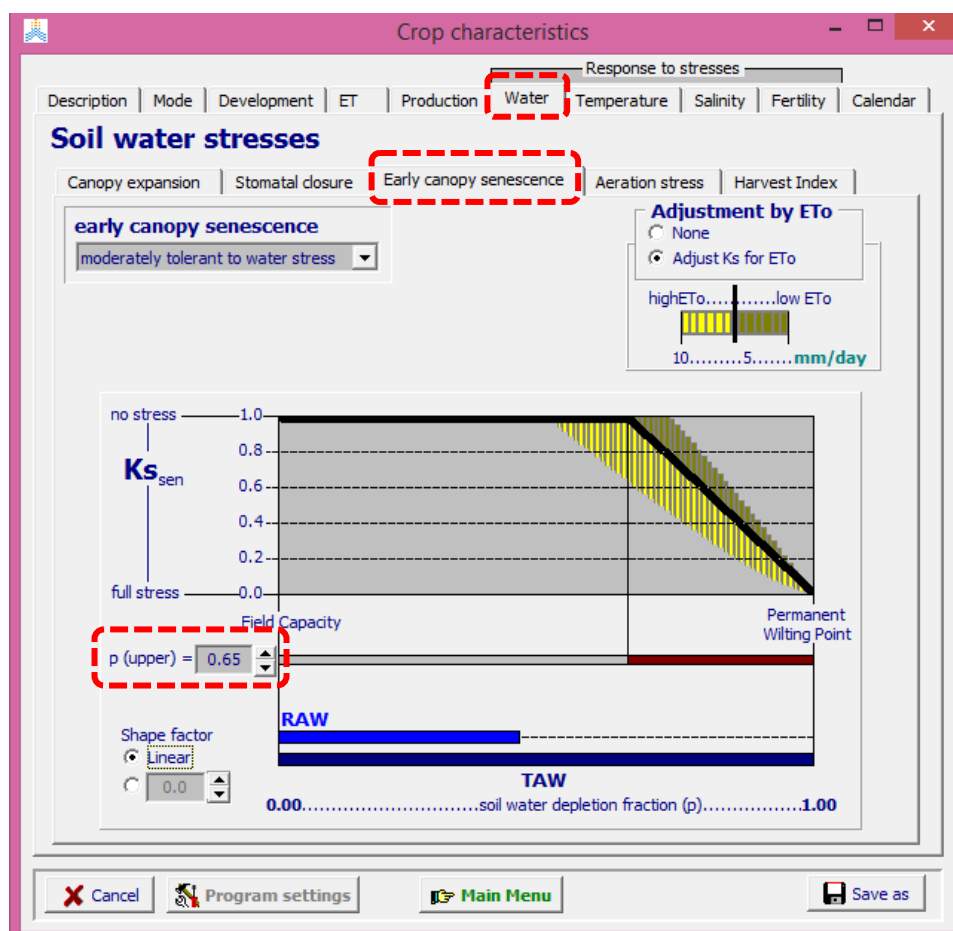
شکل ۴۰- صفحه ویژگی‌های گیاه، منوی آب، بخش اول (Canopy Expansion)

بخش دوم در منوی آب نشان‌دهنده اثر تنش آبی بر بسته شدن روزنه‌های گیاه (Stomatal Closure) است که در شکل ۴۱ نشان داده شده است. در این بخش، اثر تنش آبی فقط با یک ضریب آستانه پایین تقلیل آب خاک ($P_{(upper)}$) نشان داده می‌شود. در واقع زمانی که گیاه تحت تنش آبی قرار می‌گیرد، روزنه‌ها شروع به بسته شدن می‌کنند تا مقدار تعرق را کاهش دهند. این شرایط تا زمانی ادامه خواهد داشت که مقدار آب خاک به نقطه پژمردگی دائم برسد و می‌توان گفت گیاه در آن نقطه به صورت کامل تحت تنش خواهد بود، بنابراین در این بخش نیازی به $P_{(lower)}$ نیست زیرا اثر حداکثر تنش آبی به جای $P_{(lower)}$ با نقطه پژمردگی دائم لحاظ خواهد شد. مقدار $P_{(upper)}$ برای گندم در این بخش برابر با ۰/۴۵ جایگذاری شده است.



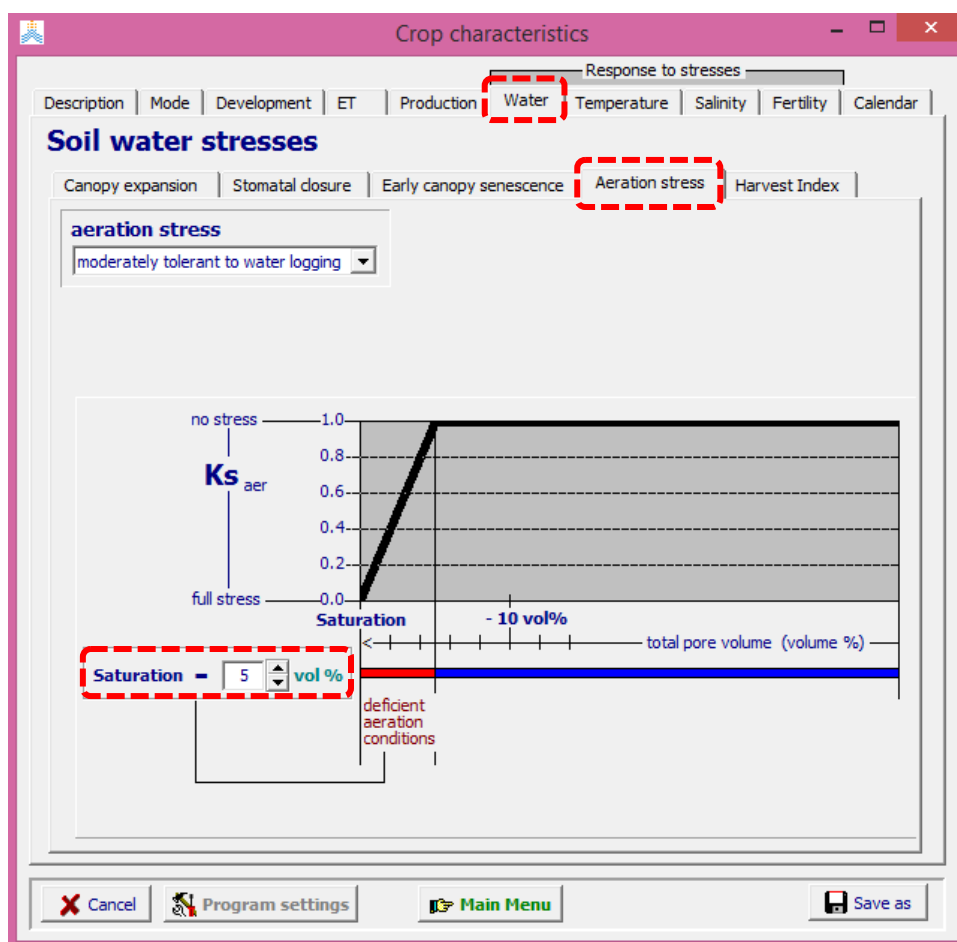
شکل ۴۱- صفحه ویژگی‌های گیاه، منوی آب، بخش دوم (Stomatal Closure)

در منوی آب، بخش سوم مربوط به اثر تنش آبی بر پیری زودهنگام پوشش سبز است. در این بخش نیز مانند بخش قبل، یک ضریب P (upper) اثر تنش آبی را بر پیری پوشش سبز لحاظ می‌کند. این بخش در شکل ۴۲ نشان داده شده است و برای گندم مقدار P (upper) برابر با ۰/۶۵ جایگذاری شده است.



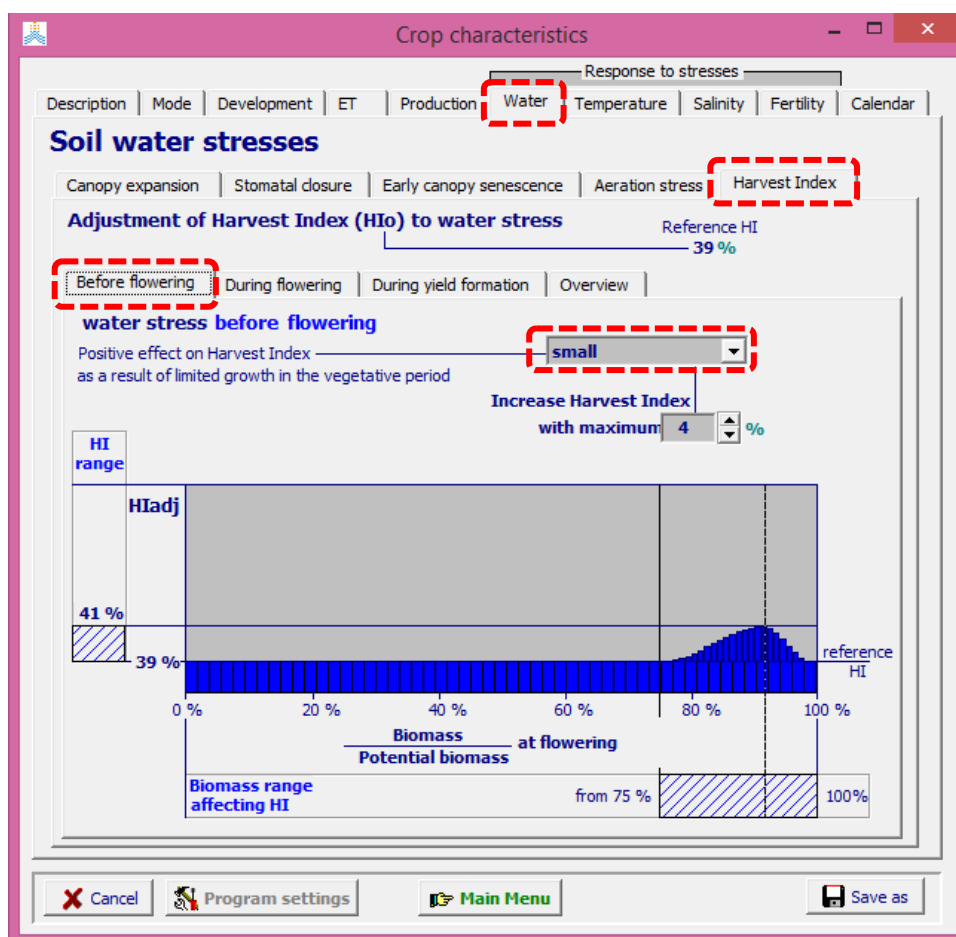
شکل ۴۲- صفحه ویژگی‌های گیاه، منوی آب، بخش سوم (Early canopy senescence)

علاوه بر شرایط تنش آبی، اثر شرایط ماندابی (Aeration Stress) نیز در منوی آب قابل بررسی است. این بخش در شکل ۴۳ نشان داده شده است. شرایط ماندابی می‌تواند باعث از بین رفتن ریشه و در نتیجه ایجاد اختلال در فرآیند جذب آب توسط ریشه شود. بنابراین، در این بخش کاربر باید درصد حجمی رطوبت حالت اشباع (Saturation) را با توجه به بافت خاک و شرایط آبیاری وارد کند. اگر از نبود شرایط ماندابی در خاک اطمینان وجود دارد باید مقدار صفر را جایگذاری کرد. برای مثال، در کشت گندم با توجه به شرایط خاک مقدار رطوبت اشباع برابر با ۵ درصد حجمی بوده است که جایگذاری شده است.



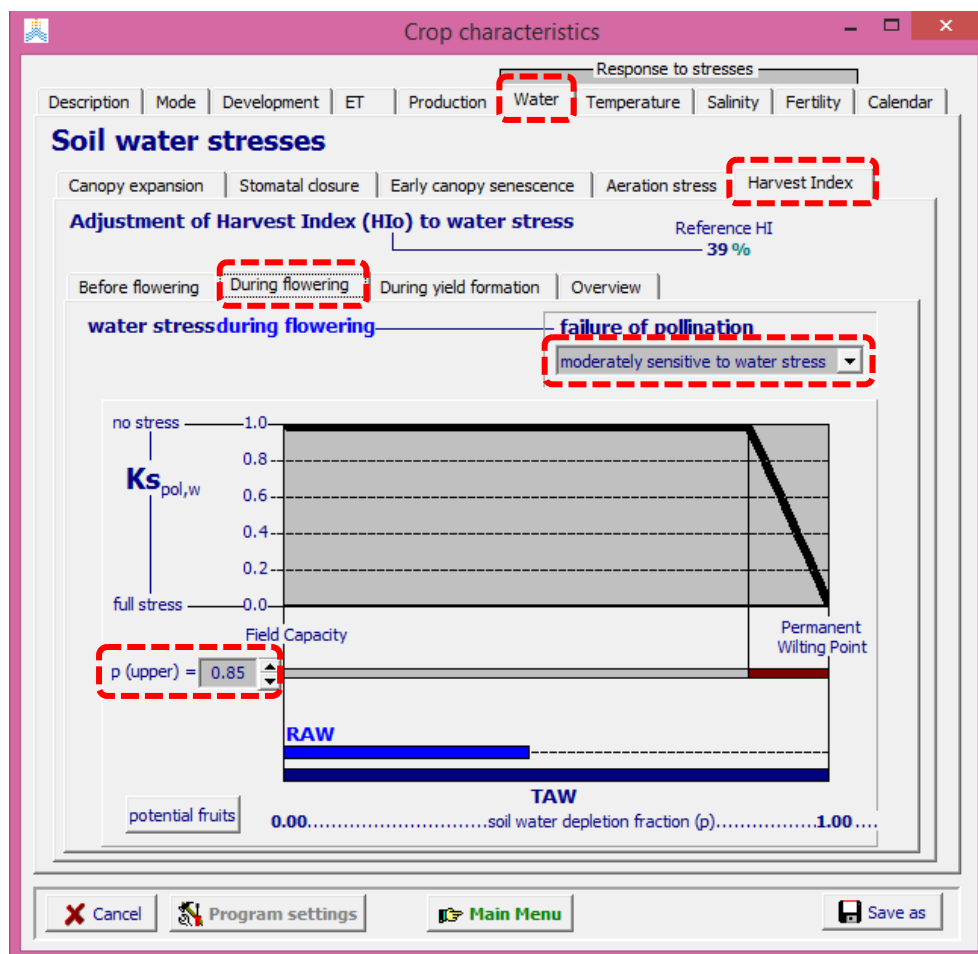
شکل ۴۳- صفحه ویژگی‌های گیاه، منوی آب، بخش چهارم (Aeration Stress)

بخش پنجم از منوی آب نیز به اثر تنش آبی بر شاخص برداشت اشاره دارد. اثر تنش آبی را در این سه مرحله می‌توان بررسی کرد: پیش از گلدهی (Before Flowering)، در زمان گلدهی (During Flowering) و در زمان پر شدن دانه (During yield formation). در مدل هر یک از این مراحل در یک صفحه گنجانده شده است و خلاصه اثر تنش آبی بر شاخص برداشت نیز به صورت کلی در یک صفحه جداگانه قرار داده شده است. این صفحه‌ها در شکل‌های ۴۴ تا ۴۷ نمایش داده شده‌اند.



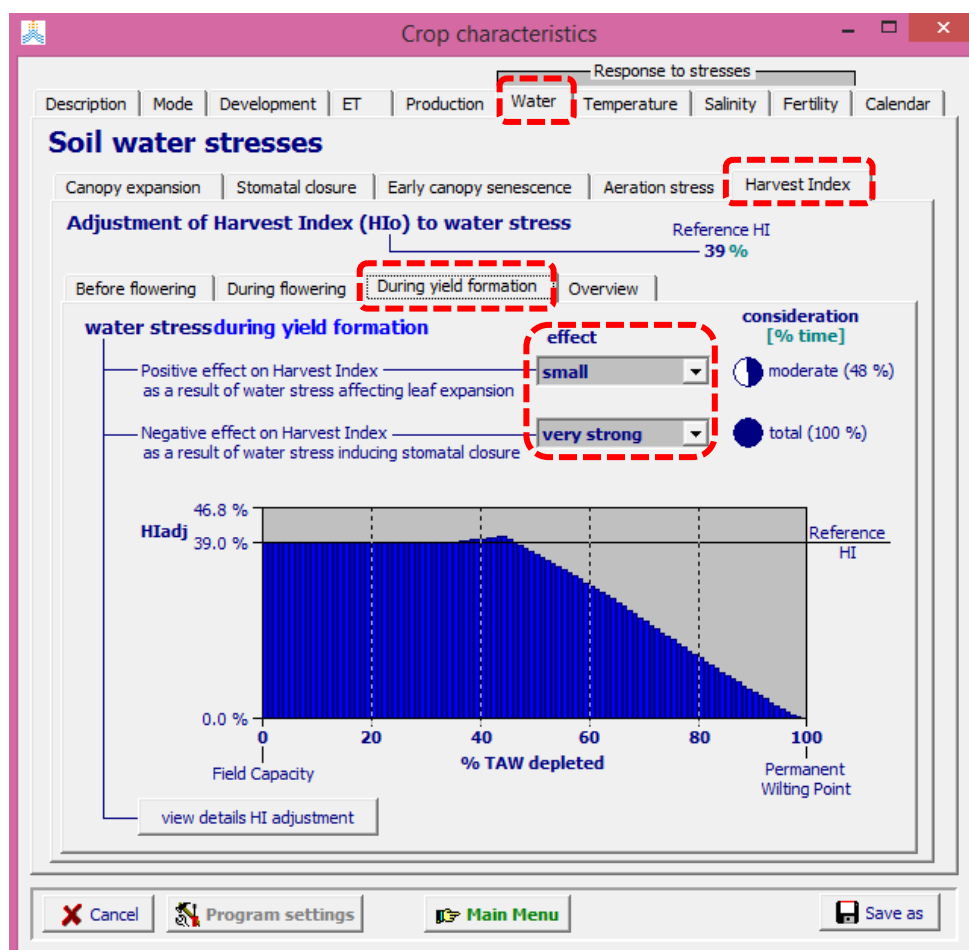
شکل ۴۴- صفحه ویژگی‌های گیاه، منوی آب، بخش پنجم (Harvest Index – Before Flowering)

همان‌طور که در شکل ۴۴ دیده می‌شود، در این بخش کاربر باید مقدار تاثیر مثبت تنش آبی پیش از گلدهی بر شاخص برداشت را از منوی کشویی مشخص شده انتخاب کند. به عبارت بهتر، هنگامی که تنش آبی در مرحله پیش از گلدهی اتفاق افتد، می‌تواند باعث افزایش شاخص برداشت شود که کاربر می‌تواند مقدار آن را به صورت کیفی در این بخش تعیین کند. شاخص‌های کیفی موجود در منوی کشویی شامل اثر کم، اثر متوسط، اثر زیاد و اثر بسیار زیاد است.



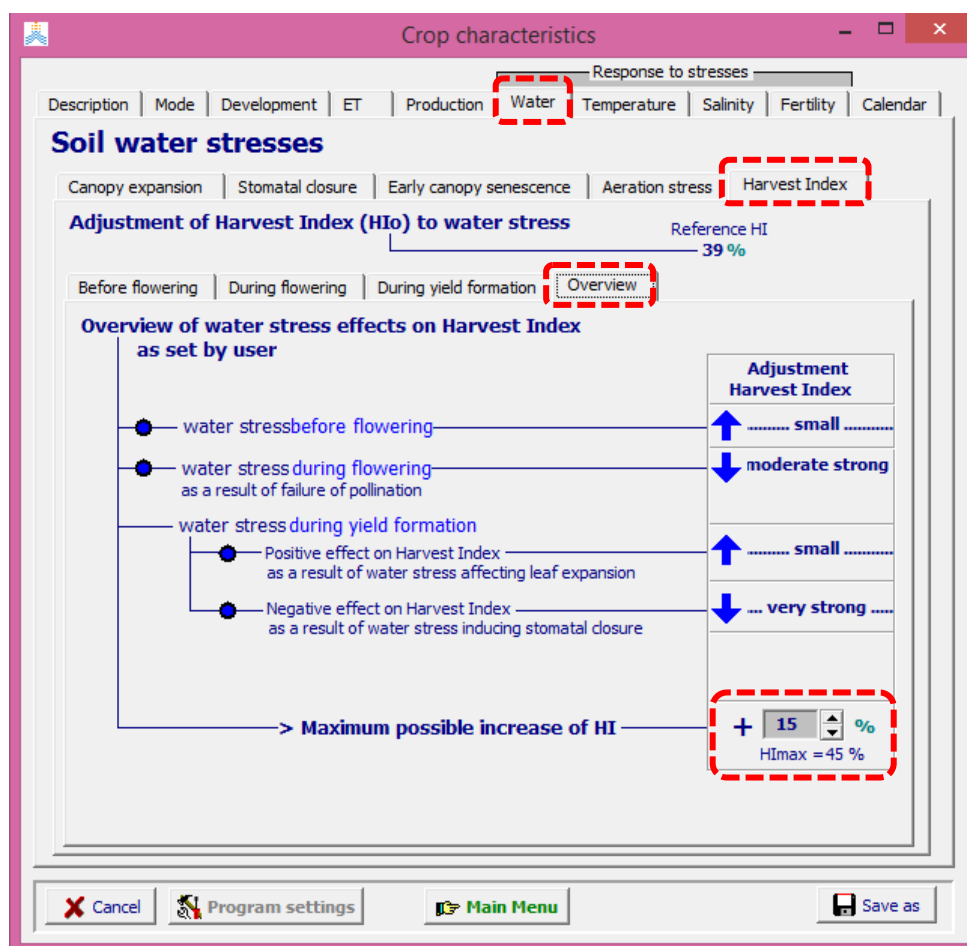
شکل ۴۵- صفحه ویژگی‌های گیاه، منوی آب، بخش پنجم (Harvest Index – During Flowering)

در شکل ۴۵ نیز صفحه اثر تنش آبی در زمان گلدهی بر شاخص برداشت نشان داده شده است. تنش آبی در زمان گلدهی باعث ایجاد اختلال در فرآیند گرده افشانی می‌شود و اثر منفی بر شاخص برداشت دارد. بنابراین، کاربر در این صفحه می‌تواند اثر منفی تنش آبی را از طریق منوی کشویی و با شاخص‌های کیفی موجود در این منو مشخص کند. شاخص‌های موجود در منو بر اساس حساسیت گیاه نسبت به تنش آبی در این مرحله تعیین شده‌اند که از بسیار حساس تا بسیار مقاوم متغیر است. در این بخش، یک ضریب P (upper) نیز وجود دارد که اگر کاربر تمایلی به تعیین اثر تنش آبی با شاخص‌های کیفی نداشته‌باشد یا اطلاعات دقیق‌تری از شرایط تنش آبی در مزرعه در دست داشته باشد، می‌تواند با تعیین مقدار مناسب برای این ضریب اثر تنش آبی را بر شاخص برداشت در این مرحله لحاظ کند.



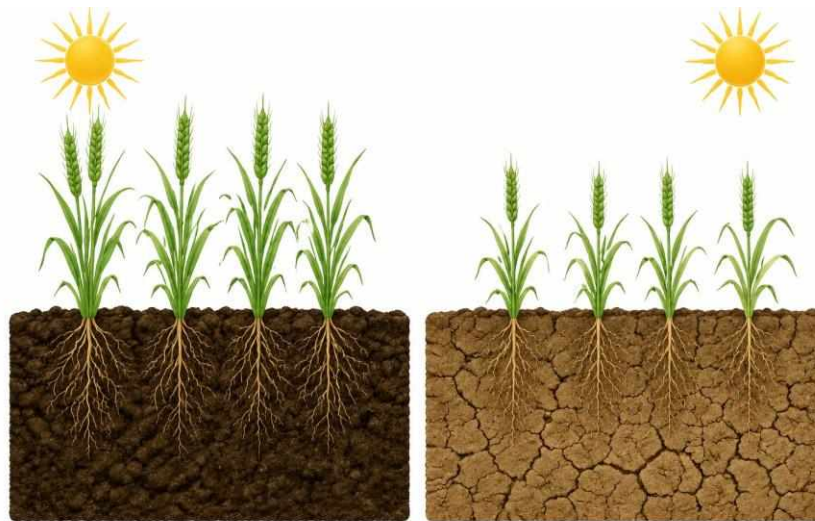
شکل ۴۶- صفحه ویژگی‌های گیاه، منوی آب، بخش پنجم (Harvest Index – During Yield Formation)

در شکل ۴۶ صفحه اثر تنش آبی بر شاخص برداشت در زمان پر شدن دانه نمایش داده شده است. اثر تنش آبی در زمان پر شدن دانه ممکن است حاصل ایجاد اختلال در توسعه پوشش سبز گیاه یا بسته شدن روزنه‌ها باشد که این رویدادها به ترتیب اثر مثبت و اثر منفی بر شاخص برداشت خواهند داشت. کاربر باید این اثرهای مثبت و منفی را با استفاده از شاخص‌های کیفی موجود در منوی کشویی مشخص شده در شکل تعیین کند. پس از تعیین این شاخص‌ها در هر یک از صفحه‌های نشان داده شده در شکل‌های ۴۴ تا ۴۶، کاربر می‌تواند خلاصه اثرهای تنش آبی را بر شاخص برداشت در صفحه Overview ببیند؛ این صفحه در شکل ۴۷ نشان داده شده است.



شکل ۴۷- صفحه ویژگی‌های گیاه، منوی آب، بخش پنجم (Harvest Index – Overview)

در شکل مشاهده می‌شود که تمام شاخص‌های تعیین شده در صفحه‌های پیشین در این صفحه به صورت خلاصه نشان داده شده است. حداکثر مقدار قابل افزایش برای شاخص برداشت نیز می‌تواند توسط کاربر در این صفحه وارد شود تا اگر شاخص‌های کیفی در تغییر و اصلاح مقدار شاخص برداشت دچار خطا شوند، مقدار این پارامتر از حد تعیین شده فراتر نرود. برای مثال، در شکل بالا نشان داده شده است که حداکثر مقدار افزایش شاخص برداشت برای گندم برابر با ۱۵ درصد بوده است. به طور کلی توصیه می‌شود اگر اطلاعات دقیقی از شرایط تنش آبی یا سرمادگی (شکل ۴۸) و اثرهای آن بر شاخص برداشت در دست نیست، شاخص‌ها و مقادیر موجود در این صفحه‌ها تغییر داده نشوند و فرآیند شبیه‌سازی با استفاده از مقادیر پیش فرضی ادامه یابد که توسط مدل تعیین شده است.



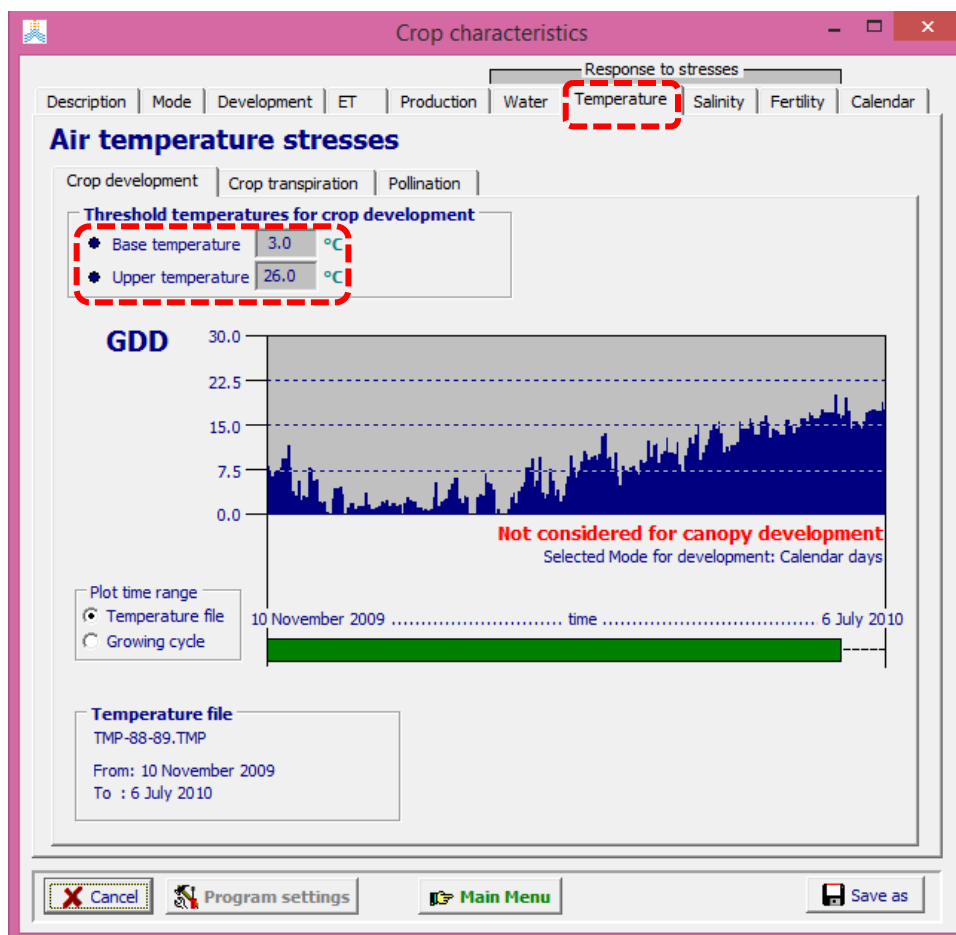
شکل ۴۸- اثر تنش آبی بر گندم

۲-۲-۸- تاثیر دما بر شبیه‌سازی رشد گندم

منوی بعدی در صفحه ویژگی‌های گیاه مربوط به اثر دماست. کاهش یا افزایش دما به بیش از حد آستانه تحمل گیاه می‌تواند موجب بروز اختلالاتی در فرآیند رشد و تولید محصول شود که در این بخش نحوه لحاظ کردن اثر تنش دمایی (شکل ۴۹) بر گیاه بررسی می‌شود. مدل اثر دما را بر رشد گیاه، فرآیند تعرق و گرده‌افشانی لحاظ می‌کند که هر یک از آنها به صورت جداگانه در یک صفحه قرار داده شده‌است. صفحه اول مربوط به اثر دما بر رشد گیاه است که در شکل ۵۰ نشان داده شده است. در این شکل دو پارامتر دمای حد پایه (Base temperature) و دمای حد بالا (Upper temperature) قرار دارد که کاربر باید این دو پارامتر را با توجه به نوع گیاه وارد کند. دمای حد پایه و دمای حد بالا به ترتیب برابر با دمایی است که پایین‌تر و بالاتر از آن رشد گیاه متوقف می‌شود، در مثال کشت گندم این دما برابر با ۳ درجه سانتی‌گراد تعیین شد. به این معنی که هر گاه دما به پایین‌تر از ۳ درجه سانتی‌گراد می‌رسد دوره خواب زمستانه گندم آغاز می‌شود. در این مثال با توجه به اینکه گندم گیاهی است زمستانه و دوره رشد رویشی آن نهایتاً در اواسط یا اواخر فروردین ماه به پایان می‌رسد، اگر دما بیشتر از ۲۶ درجه سانتی‌گراد گردد، رشد گیاه با مشکل مواجه می‌شود.

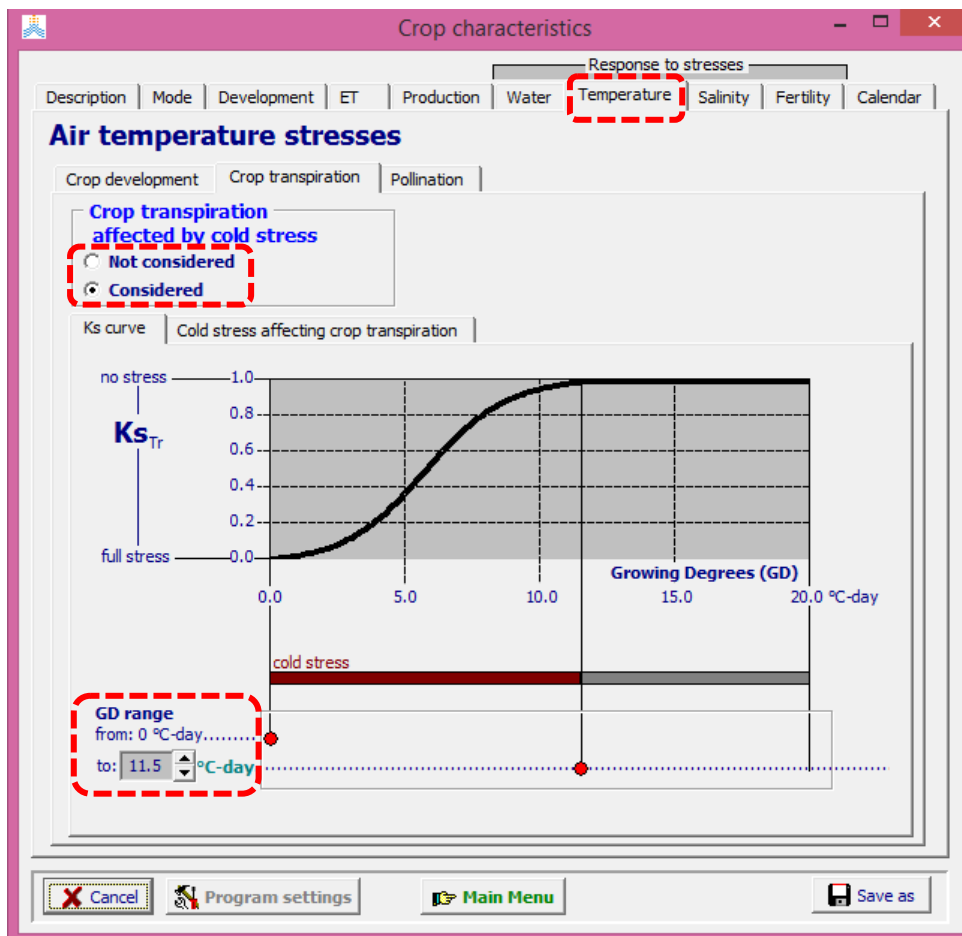


شکل ۴۹- اثر سرمازدگی بر گندم



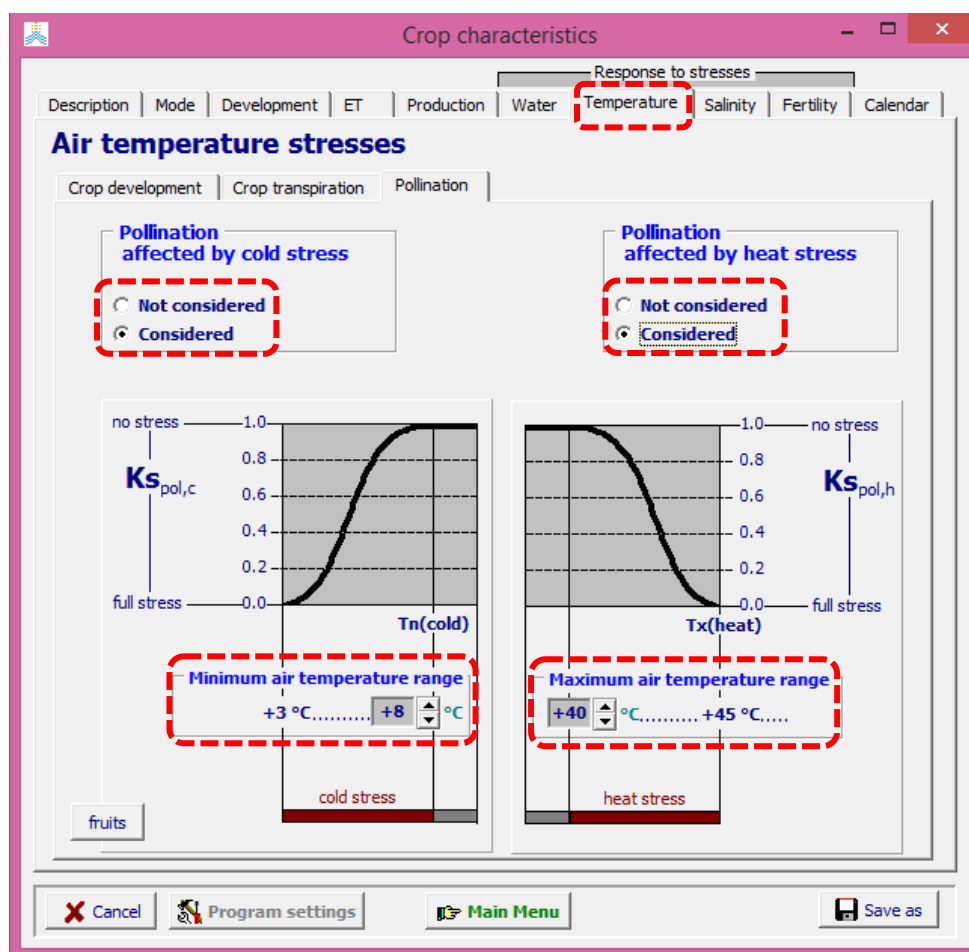
شکل ۵۰- صفحه ویژگی‌های گیاه، منوی دما، بخش اول (Crop development)

در صفحه بعد اثر دما بر تعرق گیاه جایگذاری شده که در شکل ۵۱ نشان داده شده است. در این بخش اگر دما بر تعرق گیاه اثرگذار باشد باید گزینه Considered، وگرنه گزینه Not Considered انتخاب گردد. اگر گزینه Considered انتخاب شد، باید تعداد درجه روز لازم برای تعرق گیاه نیز توسط کاربر وارد شود. به طور مثال، در شکل ۵۱ تعداد درجه روز لازم برای تعرق گندم برابر با ۱۱/۵ قرار داده شده است.



شکل ۵۱- صفحه ویژگی‌های گیاه، منوی دما، بخش دوم (Crop transpiration)

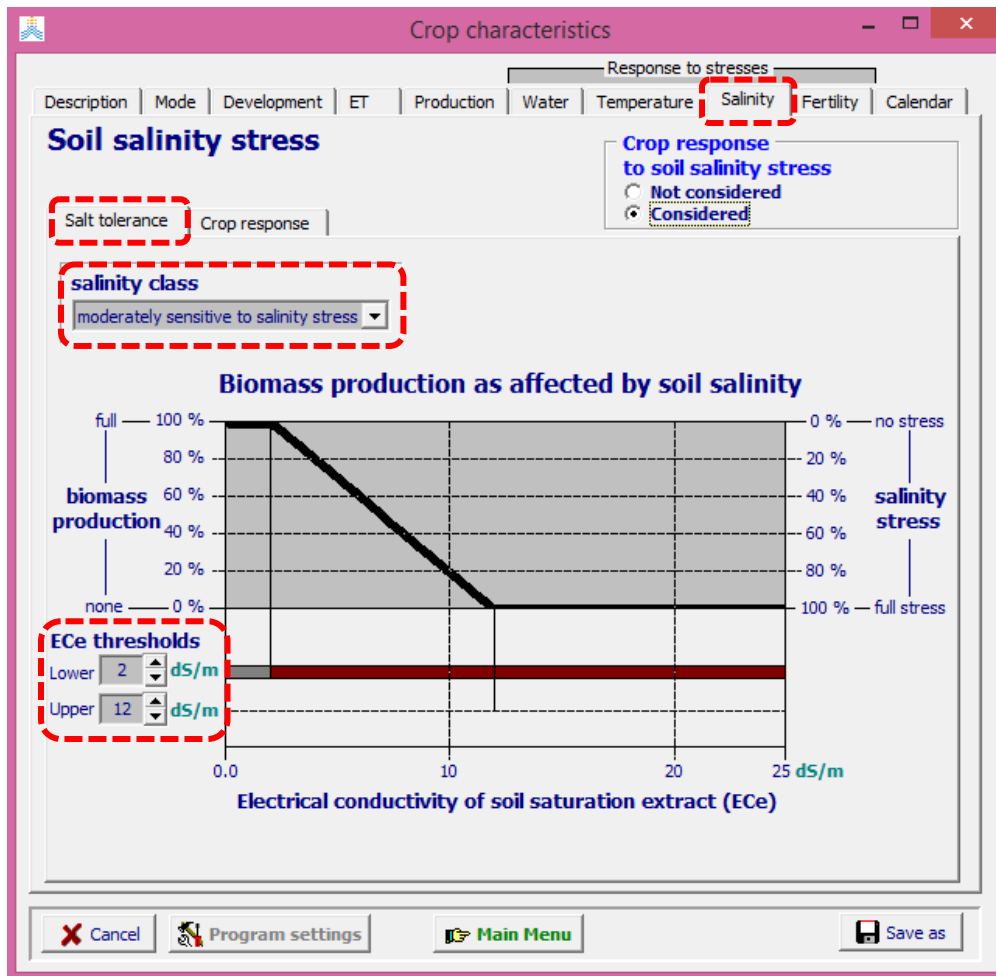
صفحه سوم اثر دما را بر گرده‌افشانی گیاه نشان می‌دهد که در شکل ۵۲ مشاهده می‌شود. در این صفحه نیز اگر هر یک از شرایط وجود دمای کمتر از حد تحمل گیاه (Cold Stress) و یا بیشتر از حد تحمل گیاه (Heat Stress) در مزرعه، بر گرده‌افشانی گیاه اثرگذار باشد باید گزینه Considered، وگرنه گزینه Not Considered انتخاب گردد. اگر گزینه Considered انتخاب شد، باید حداقل دمایی که دماهای کمتر از آن و حداکثر دمایی که دماهای بیشتر از آن باعث ایجاد اختلال در فرآیند گرده‌افشانی گیاه می‌شوند، توسط کاربر وارد شود. همان طور که در شکل نیز مشاهده می‌شود، در این جا به طور مثال دماهای ۸ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد به عنوان حداقل و حداکثر دمای بحرانی برای گرده‌افشانی گندم جایگذاری شده است که در نهایت با توجه به این مقادیر، مدل نیز تعیین کرده است زمانی که دمای هوا به کمتر از ۳ درجه سانتی‌گراد یا بیشتر از ۴۵ درجه سانتی‌گراد برسد، فرآیند گرده‌افشانی به طور کامل مختل خواهد شد و حداکثر مقدار تنش دمایی به گیاه وارد می‌شود. به عبارت دیگر، مدل مقدار حداقل و حداکثر دمای بحرانی را که توسط کاربر جایگذاری می‌شود به عنوان نقطه شروع تنش دمایی و شروع ایجاد اختلال در فرآیند گرده‌افشانی در نظر می‌گیرد و با توجه به این مقادیر، حداقل دما و حداکثر دمایی را تعیین می‌کند که در آن تنش دمایی حداکثر خواهد شد و باعث اختلال کامل در فرآیند گرده‌افشانی گیاه می‌شود.



شکل ۵۲- صفحه ویژگی‌های گیاه، منوی دما، بخش سوم (Pollination)

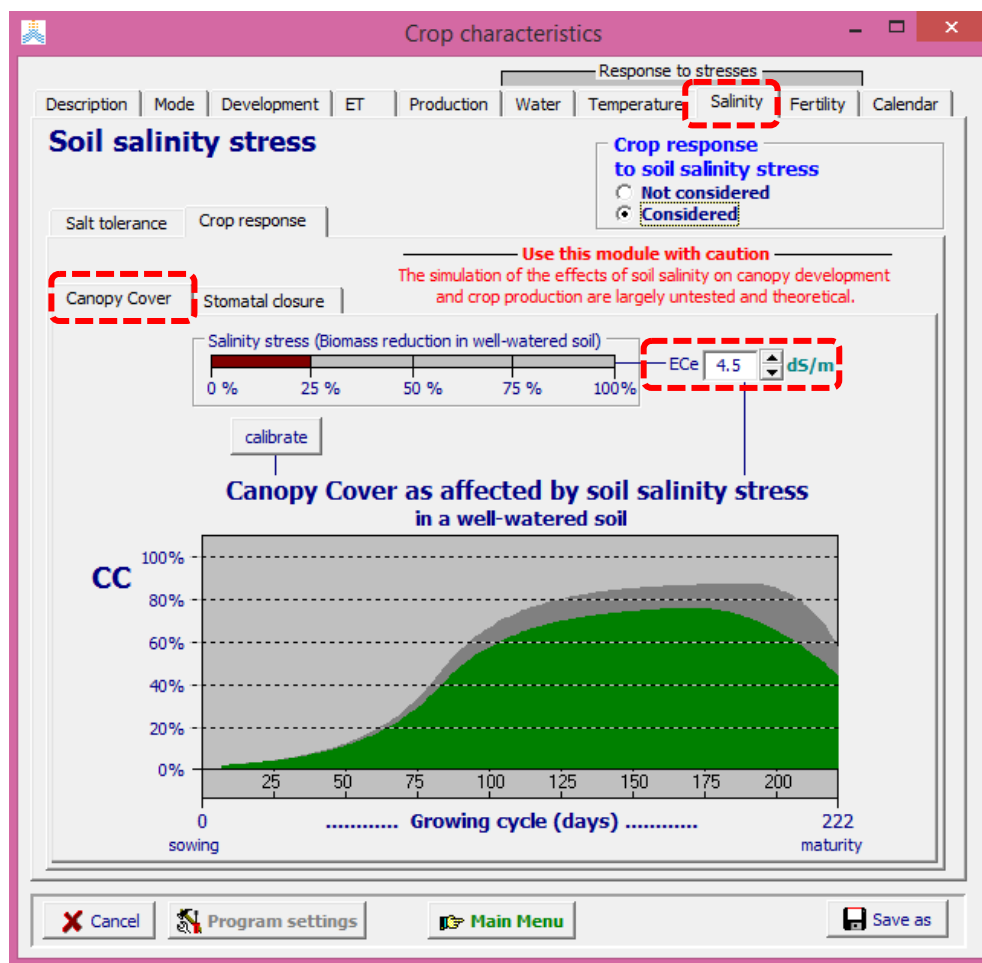
۹-۲-۲- تحلیل اثر شوری بر رشد گندم

مدل AquaCrop امکان شبیه‌سازی اثر تنش شوری بر رشد و عملکرد گیاه را به‌صورت ساده‌شده و نیمه‌تجربی فراهم می‌کند، اما این شبیه‌سازی مبتنی بر توصیف تفصیلی و محاسباتی فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی انتقال و تجمع املاح در خاک نیست. اثر شوری در این مدل از طریق اعمال ضرب‌های تنش بر توسعه پوشش گیاهی و هدایت روزه‌ای لحاظ می‌شود و بنابراین برای بررسی‌های مدیریتی و مقایسه‌ای قابل استفاده است، اما برای تحلیل‌های دقیق فرایندی مربوط به شوری خاک و جذب یون‌ها دارای محدودیت‌هایی است. پژوهش‌ها در موضوع بررسی کارایی مدل در شبیه‌سازی شوری خاک نیز به این موضوع اشاره دارند که مدل در شرایط شوری کم تا متوسط به خوبی سطح شوری خاک و اثر آن را بر رشد و عملکرد گیاه شبیه‌سازی می‌کند اما در سطوح بالاتر شوری دقت خوبی ندارد (Pourgholam-Amiji et al., 2021). این پژوهش‌ها همچنین به این موضوع اشاره دارند که با وجود محدودیت مدل در شبیه‌سازی حرکت املاح در خاک و استفاده از روش نیمه‌کیفی، مدل توانسته است تعادل مناسبی بین سادگی، دقت و کاربرپسندی برقرار کند و به عنوان ابزاری کاربردی برای برنامه‌ریزی آبیاری با آب شور پیشنهاد شود. اما در نهایت تأکید شده است که برای بهبود عملکرد مدل لازم خواهد بود فرآیندهای مربوط به حرکت املاح در خاک و تنش شوری گیاه در AquaCrop تقویت شود (Zhai et al., 2022). خود مدل نیز استفاده از این بخش را در سطح مفهومی دانسته است و توصیه می‌کند نتایج حاصل با احتیاط تفسیر شوند. این منو دارای دو بخش مقاومت گیاه در برابر شوری (Salt tolerance) و پاسخ گیاه به شوری (Crop response) است. این دو بخش در شکل‌های ۵۳ و ۵۴ نشان داده شده‌اند.



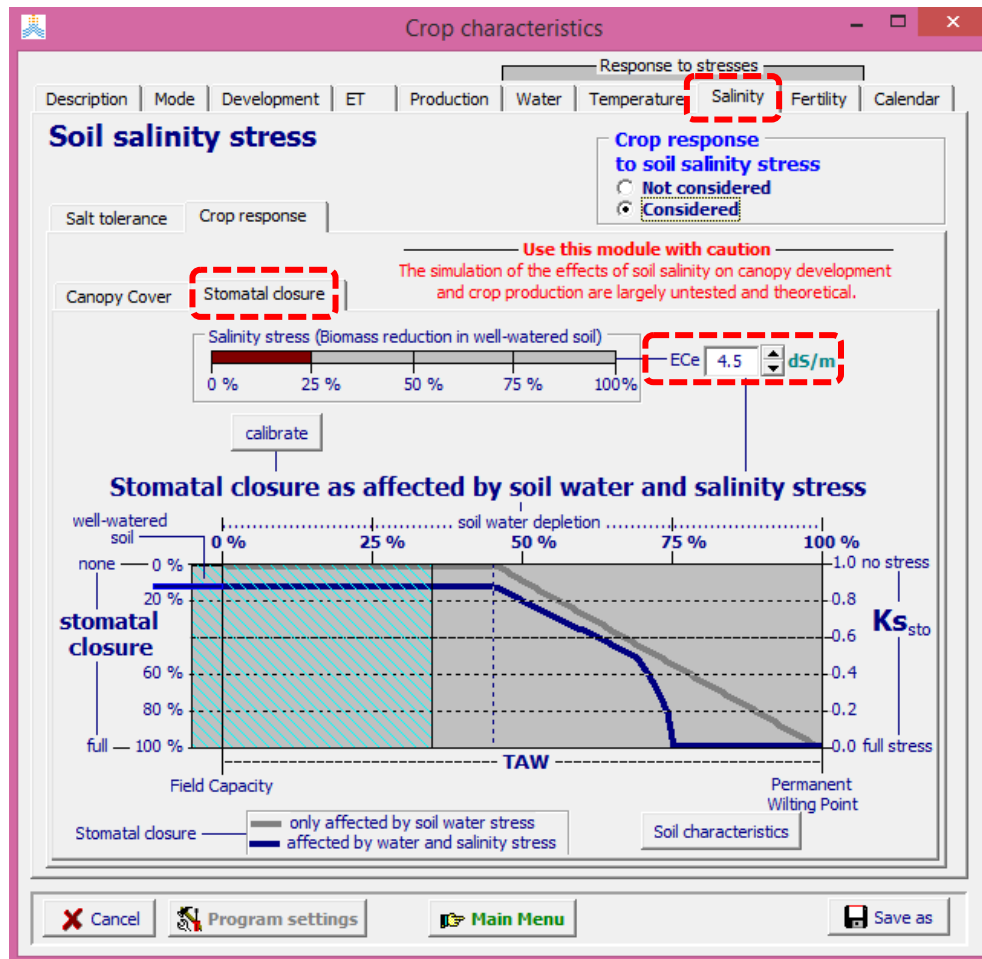
شکل ۵۳- صفحه ویژگی‌های گیاه، منوی شوری، بخش اول (Salt tolerance)

همان‌طور که در شکل مشخص است، کاربر می‌تواند برای مشخص کردن میزان مقاومت گیاه به شوری یا از منوی کشویی مشخص شده یک شاخص کیفی مناسب انتخاب کند (که شاخص‌های کیفی موجود در منوی کشویی از بسیار حساس تا بسیار مقاوم متغیر هستند) یا در صورت داشتن اطلاعات دقیق‌تر، حد پایین (Lower) و بالای (Upper) آستانه تحمل گیاه را در برابر شوری تعیین کند. زمانی که شوری خاک برابر با مقدار تعیین شده برای حد پایین باشد، گیاه تحت تنش شوری قرار خواهد گرفت و زمانی که شوری خاک به مقدار حد بالا برسد، گیاه تحت حداکثر شدت تنش شوری قرار خواهد گرفت.



شکل ۵۴- صفحه ویژگی‌های گیاه، منوی شوری، بخش دوم (Crop response – Canopy Cover)

شکل‌های ۵۴ و ۵۵ به ترتیب پاسخ گیاه را به تنش شوری در زمینه توسعه پوشش گیاهی و در زمینه بسته شدن روزنه‌ها نشان می‌دهند. در صفحه نشان داده شده در شکل ۵۴ کاربر باید مقدار شوری را که سبب کاهش توسعه پوشش گیاهی و در نتیجه کاهش مقدار ماده خشک گیاه می‌شود وارد کند. برای مثال، مقدار شوری که باعث کاهش توسعه پوشش گیاهی گندم می‌شود برابر با $4/5$ دسی‌زیمنس بر متر در نظر گرفته شده است. در شکل ۵۵ نیز کاربر باید مقدار شوری را که سبب بسته شدن روزنه‌ها و در نتیجه کاهش مقدار ماده خشک گیاه می‌شود وارد کند.



شکل ۵۵- صفحه ویژگی‌های گیاه، منوی شوری، بخش دوم (Crop response – Stomatal Closure)

۲-۱۰- بهینه‌سازی حاصلخیزی خاک برای گندم

در مدل AquaCrop اثر مستقیم کوددهی و حاصلخیزی خاک شبیه‌سازی نمی‌شود. بنابراین، زمانی که مدل اجرا می‌شود اساساً فرض می‌کند که شرایط حاصلخیزی خاک طبیعی و معمولی است، یعنی خاک بدون کمبود شدید مواد مغذی است و گیاه می‌تواند حداکثر رشد خود را داشته باشد. برای شبیه‌سازی اثر کاهش حاصلخیزی، مانند کمبود کود یا ضعیف بودن خاک، کاربر می‌تواند به صورت دستی درصد کاهش تولید ماده خشک، حداکثر پوشش گیاهی و پوشش گیاهی در فصل رشد را در منوی حاصلخیزی وارد کند (شکل ۵۶). به این ترتیب مدل می‌تواند اثرهای نامطلوب پایین بودن حاصلخیزی خاک را به صورت تقریبی و شاخص‌های کیفی نشان دهد، بی آنکه شیمی خاک یا کوددهی واقعی را شبیه‌سازی کند.

در شکل دیده می‌شود که مدل اثر شرایط نامناسب حاصلخیزی مانند کمبود کود را به سه صورت کاهش تولید ماده خشک، کاهش حداکثر پوشش گیاهی و کاهش پوشش گیاهی در کل فصل رشد مشخص کرده است که می‌توان آن‌ها را به صورت شاخص‌های کیفی یا درصد کاهش تعیین کرد.

Calibration soil fertility stress

Field observations



Reference field

no water stress

not stressed



Stressed field

soil fertility stress

observations

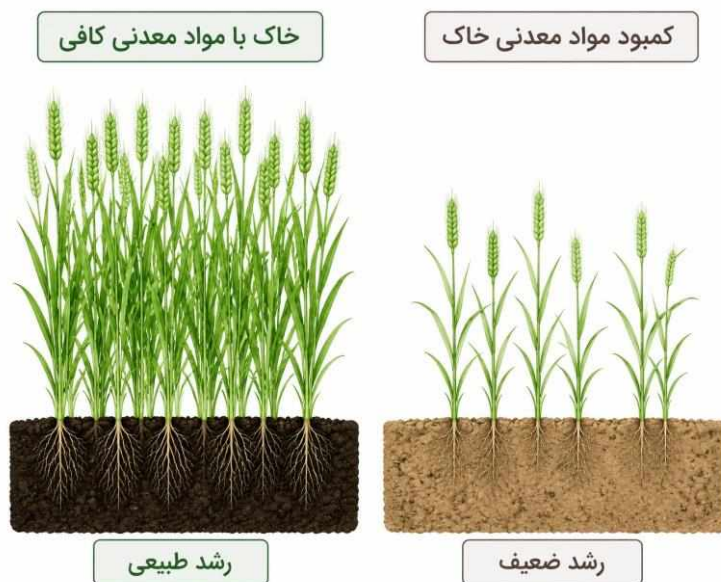
100 %	1	Biomass production	about half	relative biomass
				50 %
CCx = 88 %	2	Maximum Canopy Cover	strongly reduced	CCx
				53 %
absent	3	Canopy decline in season	medium	

calibration

Start

X Cancel
Close

شکل ۵۶- صفحه ویژگی‌های گیاه، منوی حاصلخیزی



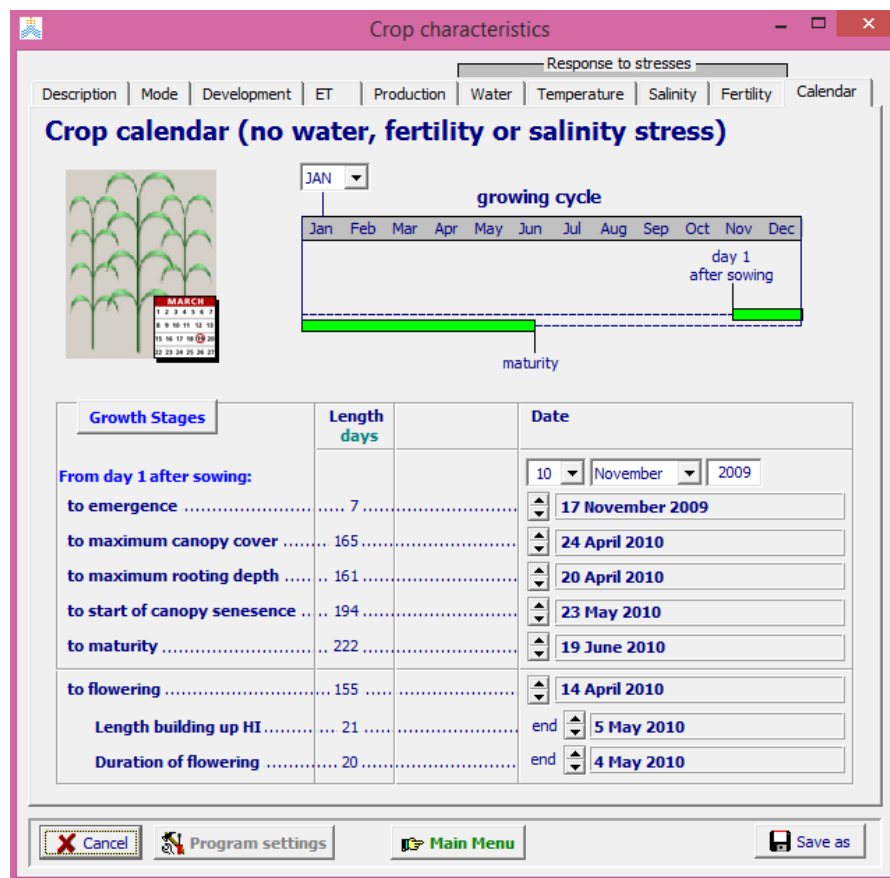
شکل ۵۷- اثر کمبود مواد معدنی خاک بر گندم

۲-۱۱- برنامه‌ریزی تقویم رشد گندم

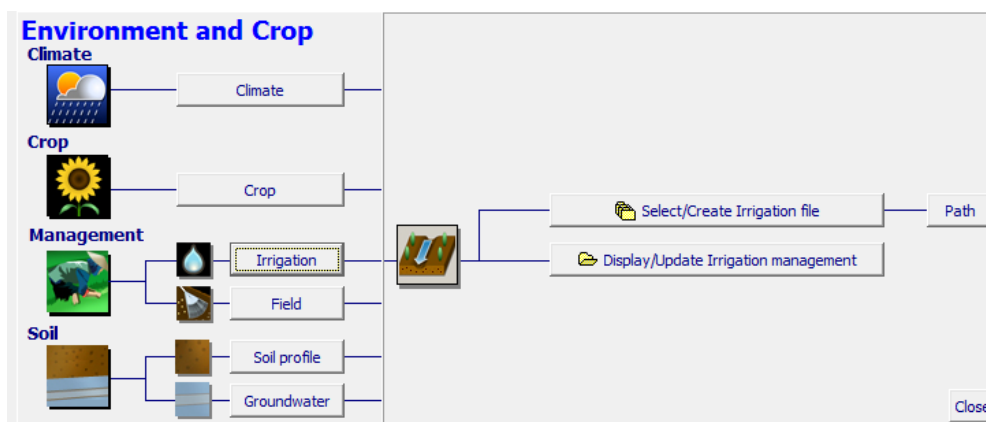
آخرین منو در صفحه ویژگی‌های گیاه منوی تقویم است که در شکل ۵۸ نشان داده شده است. در این منو مدل تاریخ فرارسیدن هر یک از مراحل رشد گیاه مانند جوانه زنی، رسیدن به حداکثر پوشش گیاهی، رسیدن به حداکثر عمق ریشه، گلدهی و... را به صورت خلاصه نشان می‌دهد. برای مثال، در شکل زیر برای کشت گندم در تاریخ ۲۰ آبان معادل با ۱۰ نوامبر، تاریخ جوانه زنی گیاه ۱۷ نوامبر معادل با ۲۷ آبان یعنی ۷ روز پس از کاشت نوشته شده است. تاریخ دیگر مراحل رشد گیاه نیز در شکل مشاهده می‌شود.

۲-۳- برنامه‌ریزی مدیریت آبیاری برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گندم

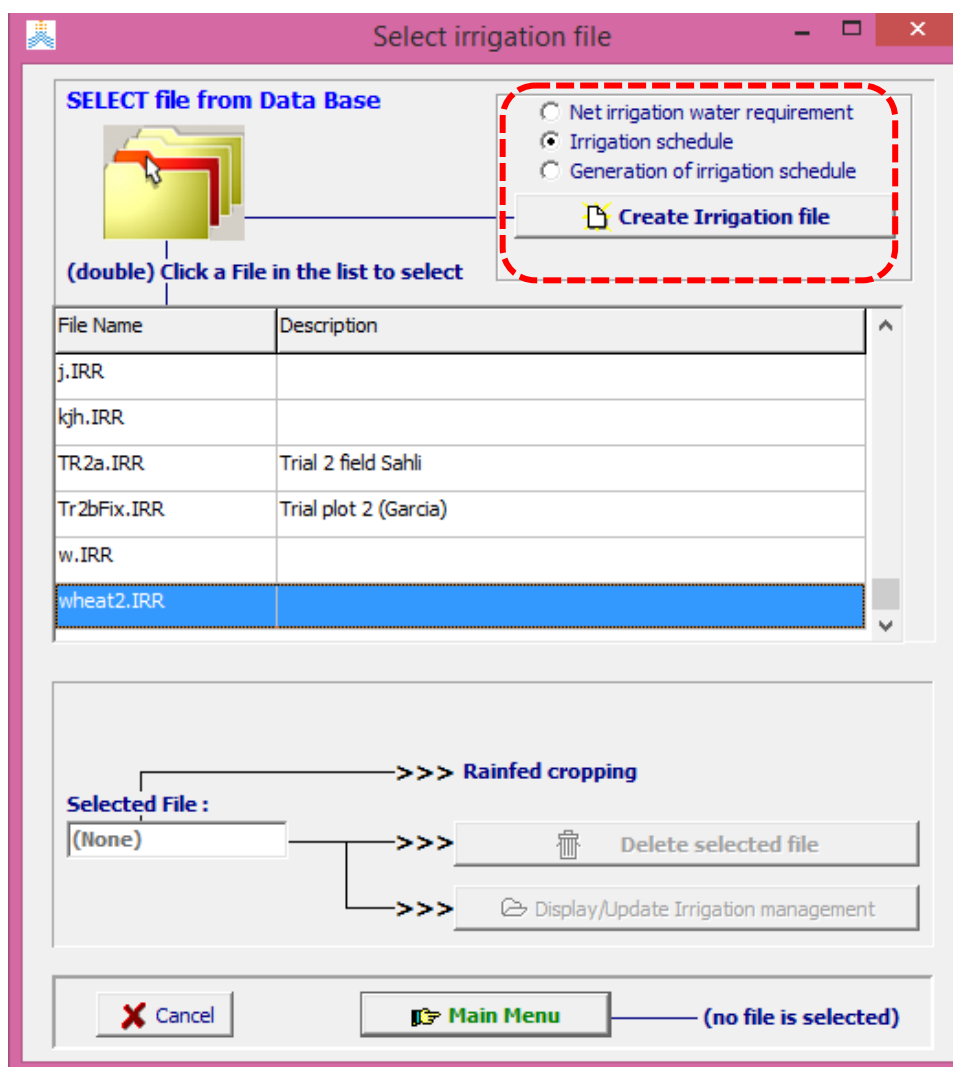
پس از اینکه اطلاعات فایل گیاهی تکمیل شد، نوبت به ساخت فایل آبیاری و تکمیل اطلاعات آن می‌رسد. با انتخاب گزینه Irrigation در صفحه اصلی مدل، پنجره نشان داده‌شده در شکل ۵۹ نمایش داده می‌شود. در این پنجره، با استفاده از گزینه Select/Create Irrigation file می‌توان فایل جدید را انتخاب کرد یا ساخت. گزینه Display/Update Irrigation management به منظور نمایش فایل انتخاب شده (در صورتی که فایلی انتخاب شده باشد) به کار می‌رود. شکل ۶۰ صفحه‌ای است که پس از انتخاب گزینه Select/Create Irrigation file کاربر نمایش داده می‌شود.



شکل ۵۸- صفحه ویژگی‌های گیاه، منوی تقویم



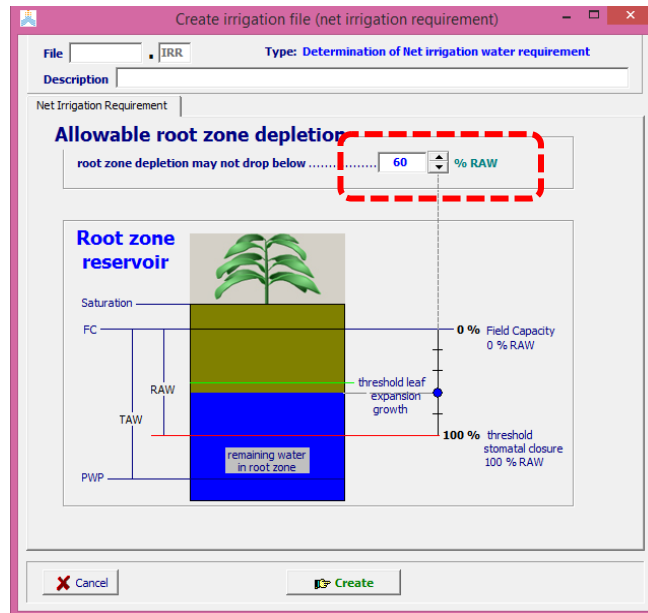
شکل ۵۹- پنجره انتخاب گزینه مورد نظر برای انتخاب فایل آبیاری پیش فرض یا ساخت فایل آبیاری جدید



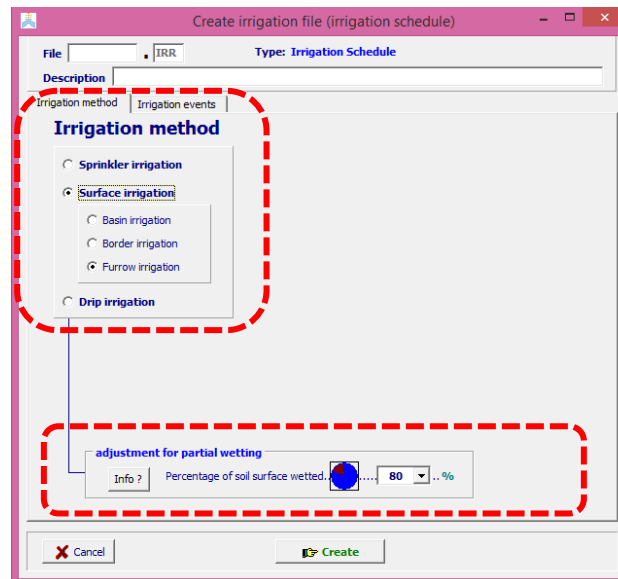
شکل ۶۰- صفحه انتخاب فایل های آبیاری پیش فرض یا هدایت به پنجره ساخت فایل آبیاری جدید

همانطور که در شکل ۶۰ دیده می‌شود، در اینجا می‌توان یکی از فایل‌های موجود در لیست را انتخاب کرد. در صورت نیاز به ساخت فایل جدید می‌توان از گزینه Create Irrigation file در همین صفحه استفاده کرد. لازم است یادآوری شود پیش از آن باید نوع فایل آبیاری مورد

نظر از بین سه گزینه‌ای که وجود دارد انتخاب شود. گزینه اول نیاز خالص آبیاری (Net irrigation water requirement)، گزینه دوم برنامه‌بندی آبیاری (Irrigation schedule)، و گزینه سوم تولید فایل برنامه‌بندی آبیاری (Generation of irrigation schedule) است. اگر گزینه اول (Net irrigation water requirement) انتخاب شود، پس از کلیک کردن روی Create Irrigation file صفحه زیر باز می‌شود. در شکل ۶۱ مشخص است که برای ساخت فایل آبیاری در این حالت باید پس از نوشتن نام فایل و توضیحات، درصد مجاز تخلیه رطوبتی خاک را بر حسب درصدی از آب در دسترس ریشه (RAW) وارد کرد. اما اگر گزینه دوم (Irrigation schedule) انتخاب شود، پس از کلیک کردن روی Create Irrigation file صفحه نشان داده شده در شکل ۶۲ باز می‌شود.



شکل ۶۱- صفحه ساخت فایل آبیاری بر اساس نیاز خالص آبیاری



شکل ۶۲- صفحه ساخت فایل آبیاری بر اساس برنامه بندی آبیاری، بخش اول (Irrigation method)

در این صفحه، کاربر باید روش آبیاری و درصد سطح خیس شده خاک را مشخص کند تا مدل بتواند اثر آبیاری را بر رطوبت خاک و رشد گیاه شبیه‌سازی کند. برای آبیاری سطحی، بسته به نوع سیستم، درصد سطح خیس شده متفاوت است؛ به طور پیش‌فرض، مدل درصد سطح خیس شده را در سیستم کرتی (Basin) و نواری (Border) ۱۰۰ درصد و در سیستم جویچه‌ای (Furrow) ۸۰ درصد در نظر می‌گیرد. در آبیاری قطره‌ای نیز این مقدار را که به فاصله و طول نوارهای آبیاری بستگی دارد، ۳۰ درصد در نظر می‌گیرد. این درصد که در آبیاری بارانی به شعاع پاشش و توزیع آب بستگی دارد، در مدل به صورت پیش‌فرض ۱۰۰ درصد است. این مقادیر بر اساس تجربیات مزرعه‌ای و مقادیر مرجع توصیه شده در منابع علمی تعیین می‌شوند و کاربر می‌تواند با توجه به شرایط محلی آن‌ها را تغییر دهد تا شبیه‌سازی مدل نزدیک‌تر به واقعیت مزرعه باشد.

کمی‌سازی تفاوت روش‌های آبیاری در مدل به این صورت است که اثر هر سیستم بر درصد سطح خیس شده خاک و سطح موثر در تبخیر و در نتیجه تامین آب در ناحیه ریشه در فصل رشد در نظر گرفته می‌شود و مدل با استفاده از این مقادیر، میزان رطوبت خاک و تاثیر آن را بر رشد گیاه و تولید محصول شبیه‌سازی می‌کند.

صفحه دوم مربوط به زمان و عمق آب به کار رفته در هر نوبت آبیاری است که در شکل ۶۳ نشان داده شده است. در این صفحه باید در ستون‌های اول تا سوم جدول مشخص شده به ترتیب روزهای بعد از کاشت، عمق آب آبیاری بر حسب mm و شوری آب آبیاری بر حسب ds/m نوشته شود و با کلیک کردن روی Create فایل آبیاری مورد نظر ساخته خواهد شد. اگر در شکل ۶۰ گزینه سوم (Generation of irrigation schedule) انتخاب شود، کاربر به صفحه موجود در شکل ۶۴ هدایت می‌شود.

The screenshot shows the 'Create irrigation file (irrigation schedule)' window. It includes a 'Description' field, 'Irrigation method' and 'Irrigation events' tabs, and a table of irrigation events. The table has columns for Event, Date, Day No., Net application (mm), and dS/m. A red dashed box highlights the 'When?' and 'Depth?' columns. The 'Irrigation water quality' is set to 'excellent' with ECw at 0.0 dS/m. The 'Growing cycle' is shown as a calendar from March to July 2009.

Event	Date	Day No.	Net application (mm)	dS/m
1	22 March 2009	1	150	0.0
2	28 March 2009	7	42	0.0
3	4 April 2009	14	42	0.0
4	11 April 2009	21	44	0.0
5	18 April 2009	28	27	0.0
6	25 April 2009	35	28	0.0
7	3 May 2009	43	27	0.0
8	11 May 2009	51	37	0.0

شکل ۶۳- صفحه ساخت فایل آبیاری بر اساس برنامه بندی آبیاری، بخش دوم (Irrigation events)

شکل ۶۴- صفحه ساخت فایل آبیاری بر اساس تولید برنامه بندی آبیاری، بخش دوم (Time and depth criteria)

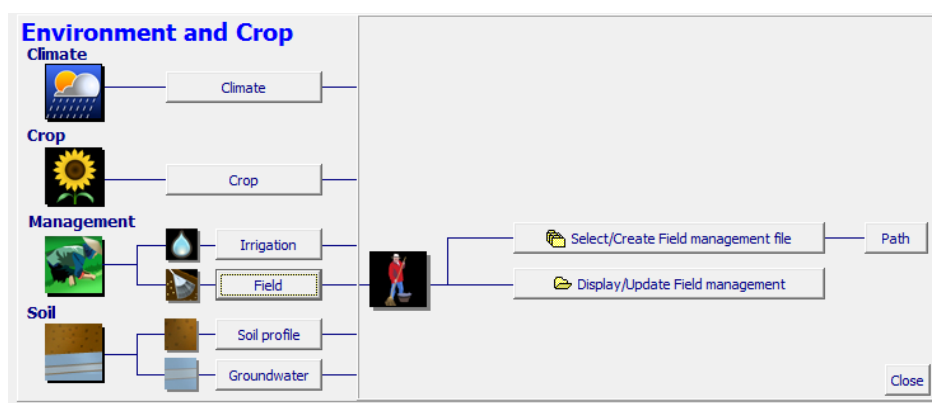
در این شکل، ستون اول جدول مربوط به روز بعد از کاشت است و ستون‌های اول و دوم با توجه به گزینه‌های انتخاب شده در بخش Time Criteria و Depth Criteria می‌توانند متفاوت باشند. برای مثال، در اینجا گزینه‌های Fixed interval (دور آبیاری مشخص) و Fixed net application (عمق خالص آبیاری مشخص) انتخاب شده‌اند به همین دلیل در ستون‌های اول و دوم جدول باید دور آبیاری و عمق آب آبیاری بر حسب mm نوشته شود. حال اگر در بخش‌های Time Criteria و Depth Criteria گزینه‌های مربوط به Allowable depletion (تخلیه مجاز رطوبتی) و Back to field capacity (برگشت رطوبت خاک به حد ظرفیت زراعی) انتخاب شود، باید در ستون‌های دوم و سوم جدول به ترتیب مقدار تخلیه مجاز رطوبتی و رطوبت حد ظرفیت زراعی نوشته شود. در ستون چهارم نیز باید شوری آب آبیاری بر حسب ds/m نوشته شود. سرانجام، با کلیک کردن روی Create فایل آبیاری ساخته خواهد شد.

۲-۴- طراحی عملیات زراعی برای شبیه‌سازی رشد و محصول گندم

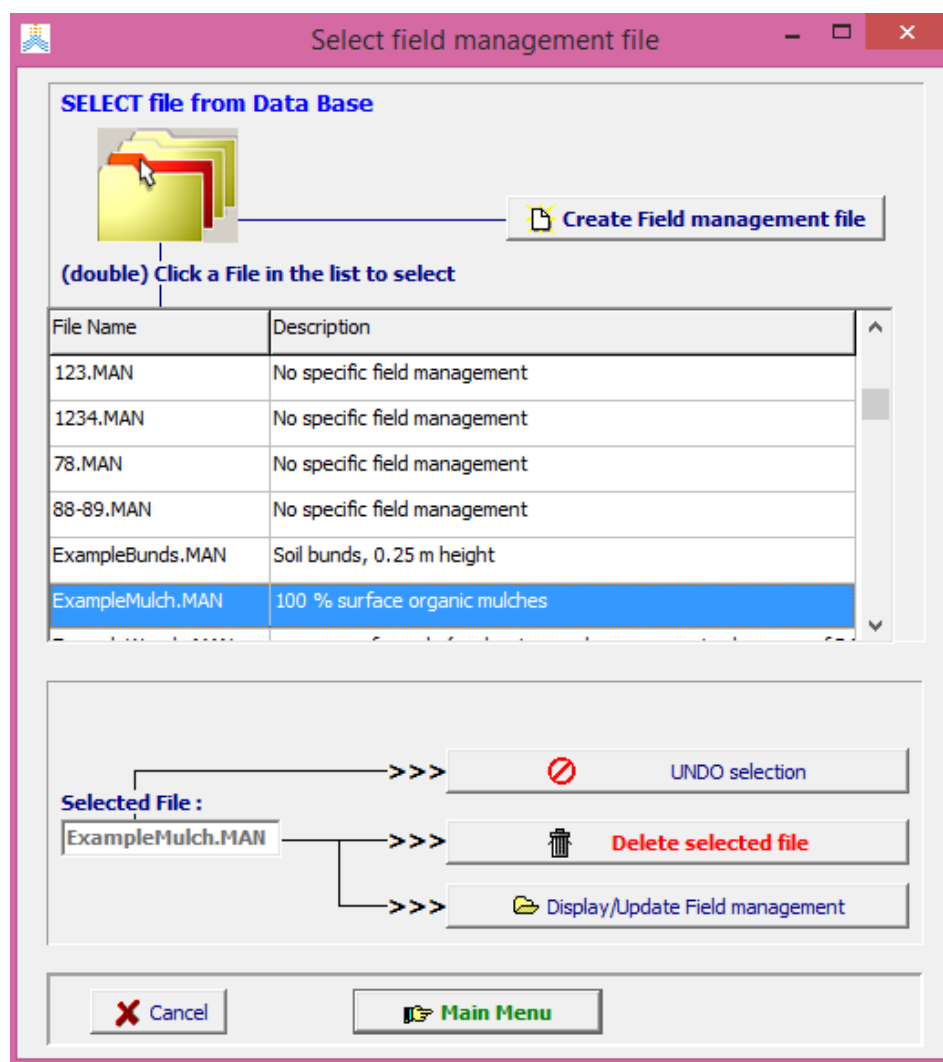
۲-۴-۱- ایجاد فایل اطلاعات ورودی عملیات زراعی

در مدل AquaCrop عملیات زراعی در مزرعه مانند کوددهی، استفاده از مالچ و... به صورت کاملاً کلی در نظر گرفته شده است. برای ساخت یک فایل عملیات زراعی باید گزینه Field در صفحه اصلی مدل انتخاب گردد. با انتخاب این گزینه کاربر به صفحه نشان داده شده در شکل ۶۵ هدایت می‌شود.

در این پنجره، با استفاده از گزینه Select/Create field management file می‌توان فایل جدید را انتخاب کرد یا ساخت. گزینه Display/Update field management به منظور نمایش فایل انتخاب شده (اگر فایلی انتخاب شده باشد) استفاده می‌گردد. شکل ۶۶ صفحه ای است که پس از انتخاب گزینه Select/Create field management file به کاربر نمایش داده می‌شود.



شکل ۶۵- پنجره انتخاب گزینه مورد نظر برای انتخاب فایل عملیات زراعی پیش فرض یا ساخت فایل عملیات زراعی جدید



شکل ۶۶- صفحه انتخاب فایل‌های عملیات زراعی پیش فرض یا هدایت به پنجره ساخت فایل عملیات زراعی جدید

در شکل ۶۶ دیده می‌شود که می‌توان یکی از فایل‌های موجود در لیست را انتخاب کرد. در صورت نیاز به ساخت فایل جدید می‌توان از گزینه 'Create field management file' در همین صفحه استفاده کرد که در این صورت شکل ۶۷ نمایش داده خواهد شد. در این شکل باید

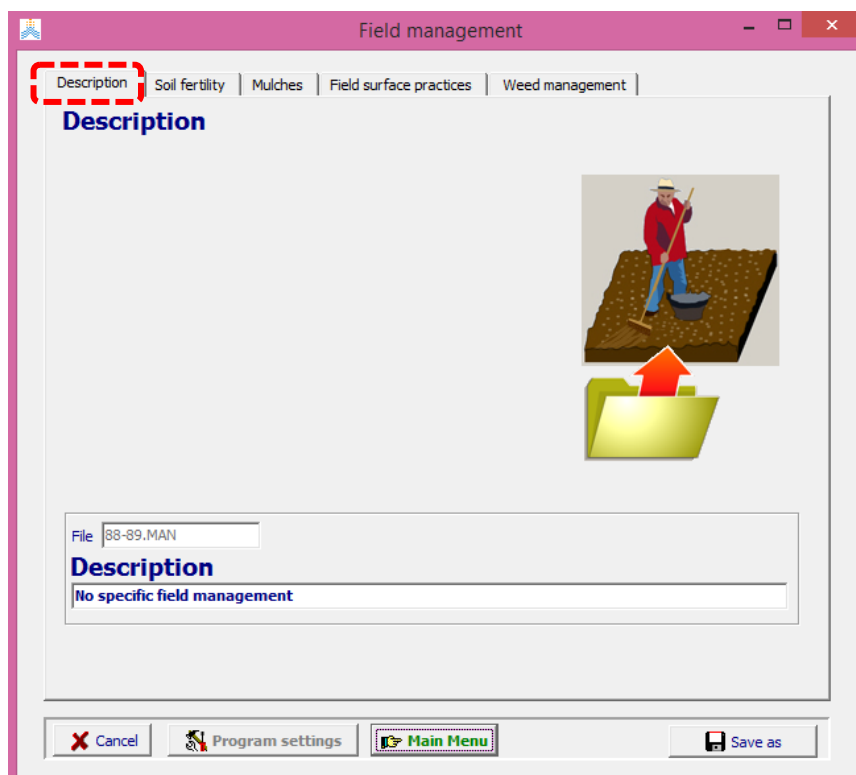
در چهار بخشی که با خط‌چین قرمز مشخص شده است اطلاعات مربوط به عملیات زراعی وارد شود. بخش اول مربوط است به وضعیت حاصلخیزی خاک یا همان کوددهی. در این بخش می‌توان وضعیت مزرعه را از نظر کوددهی با شاخص‌های کیفی و کمی مشخص کرد. به طور مثال، در اینجا شاخص کیفی بدون محدودیت انتخاب شده که شاخص کمی معادل آن کوددهی به صورت ۱۰۰ درصد است به این معنی که هیچ کمبود کودی در مزرعه وجود ندارد. در بخش دوم نیز می‌توان به همان شکلی که در بخش کوددهی توضیح داده شد، شرایط مزرعه را از نظر مالچ مشخص کرد.

در بخش سوم، شرایط سطح مزرعه مانند بود یا نبود رواناب گنجانده شده است. اگر آبیاری به نحوی باشد که رواناب ایجاد نشود باید گزینه None و گر نه باید گزینه Present انتخاب گردد. اگر پشته‌هایی در مزرعه وجود داشته باشند که به صورت مانع در برابر جریان آب آبیاری یا بارندگی عمل کنند باید در بخش مربوط گزینه Present و گر نه گزینه None انتخاب شود. سرانجام با کلیک کردن روی Create فایل عملیات زراعی ساخته خواهد شد.

شکل ۶۷- صفحه ورود اطلاعات و ساخت فایل عملیات زراعی جدید

۲-۴-۲- توضیحات عملیات زراعی گندم

پس از ساخت فایل خام عملیات زراعی می‌توان با استفاده از گزینه Display/Update field management فایل ساخته شده را از لیست فایل‌های عملیات زراعی موجود در مدل انتخاب و آن را مشاهده کرد. کاربر پس از انتخاب فایل ساخته شده، به پنجره مدیریت زراعی هدایت می‌شود که در شکل ۶۸ نشان داده شده است.



شکل ۶۸- پنجره مدیریت زراعی - منوی Description

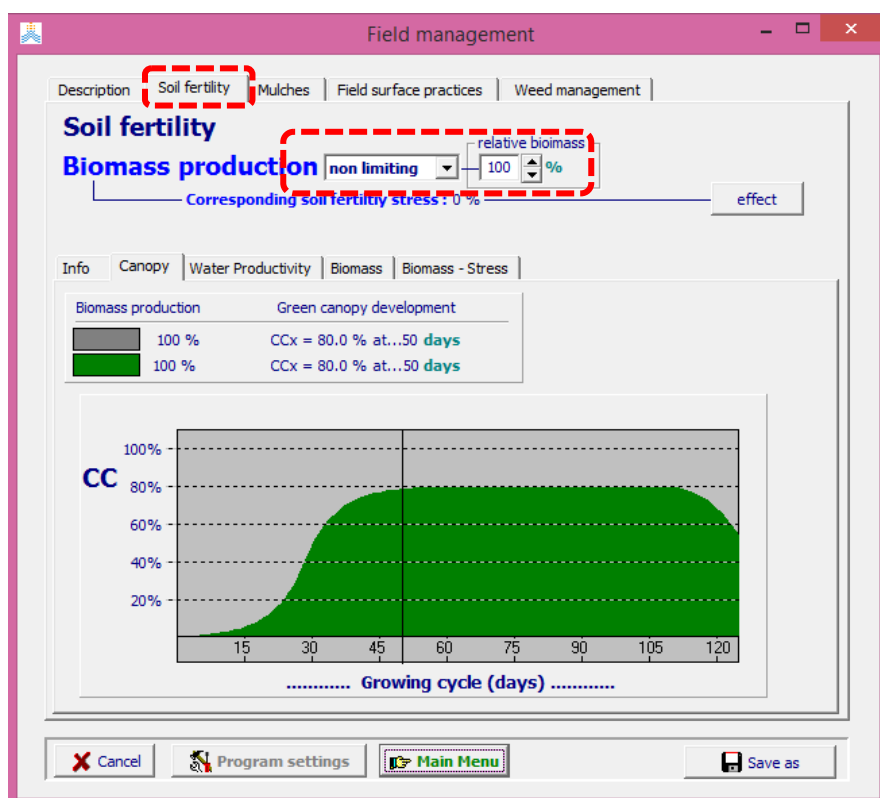
در این صفحه می‌توان نام و توضیحات فایل ساخته شده را مشاهده کرد.

۲-۴-۳- مدیریت حاصلخیزی خاک

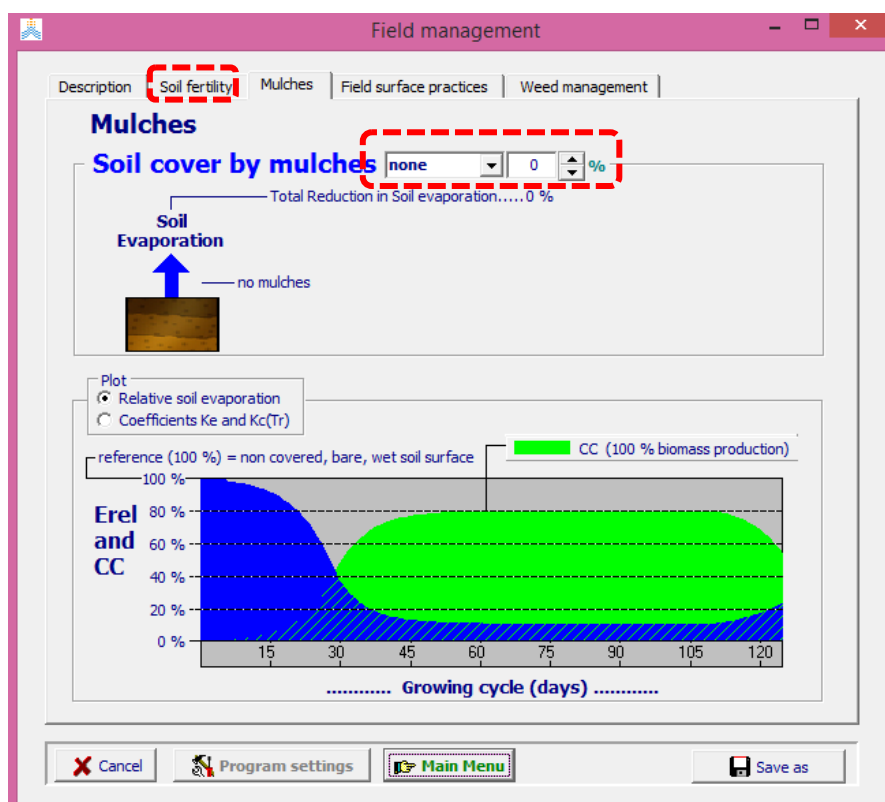
منوی دوم در پنجره مدیریت زراعی مربوط به حاصلخیزی خاک (Soil fertility) است که در شکل ۶۹ نشان داده شده است. در این صفحه شاخص‌های کیفی و کمی مشخص شده برای وضعیت کوددهی در مزرعه قابل مشاهده و ویرایش کردن است.

۲-۴-۴- کاربرد مالچ به عنوان بخشی از عملیات زراعی گندم

منوی بعد که نشان دهنده وضعیت کاربرد مالچ در مزرعه است، در شکل ۷۰ قابل مشاهده است. در این منو نیز اطلاعات مربوط به مالچ قابل مشاهده و ویرایش کردن است. منوی مربوط به مالچ در مدل AquaCrop امکان ثبت و ویرایش اطلاعات پوشش سطح خاک با مالچ را فراهم می‌کند. در این منو، کاربر می‌تواند درصدی از کل سطح مزرعه را که با مالچ پوشیده شده است وارد کند و مدل به صورت نیمه کیفی اثر مالچ را بر کاهش تبخیر از خاک شبیه‌سازی می‌کند. به عبارت دیگر، مالچ باعث کاهش تبخیر آب از خاک و حفظ رطوبت ناحیه ریشه می‌شود و در عین حال از خاک در برابر دمای بالا و خشکی محافظت می‌کند. این اثرها به رشد گیاه و افزایش کارایی آب مصرفی کمک می‌کند. در شکل ۷۱ نمونه‌ای از کاربرد مالچ در مزرعه گندم نشان داده شده است.



شکل ۶۹- پنجره مدیریت زراعی - منوی soil fertility



شکل ۷۰- پنجره مدیریت زراعی - منوی mulch



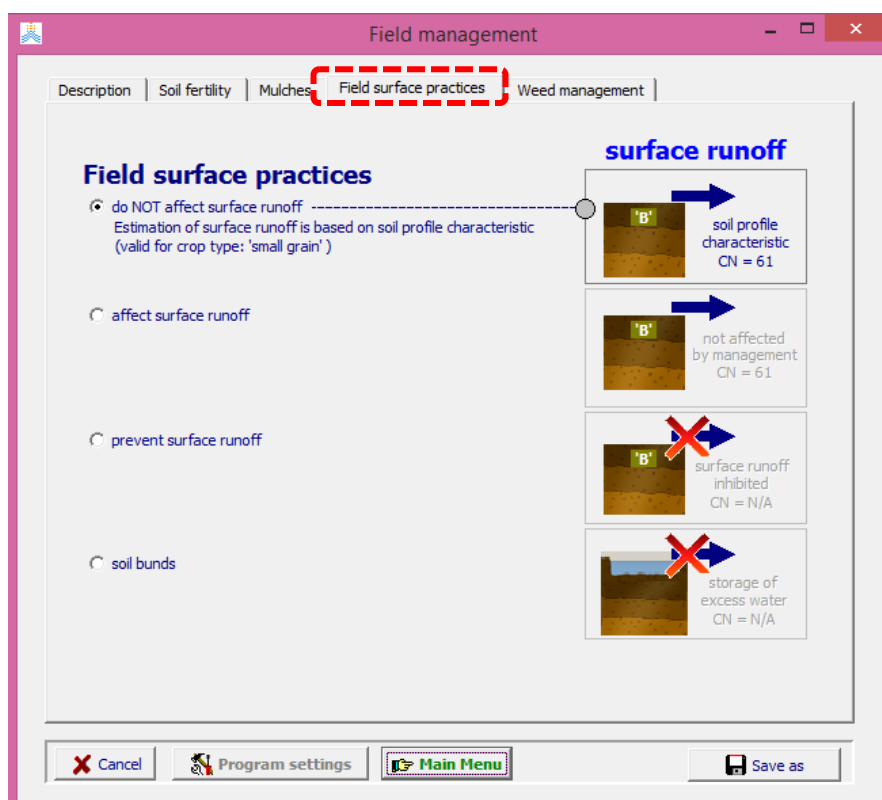
شکل ۷۱- یک نمونه از کاربرد مالچ در مزرعه گندم

۲-۴-۵- شرایط سطح مزرعه

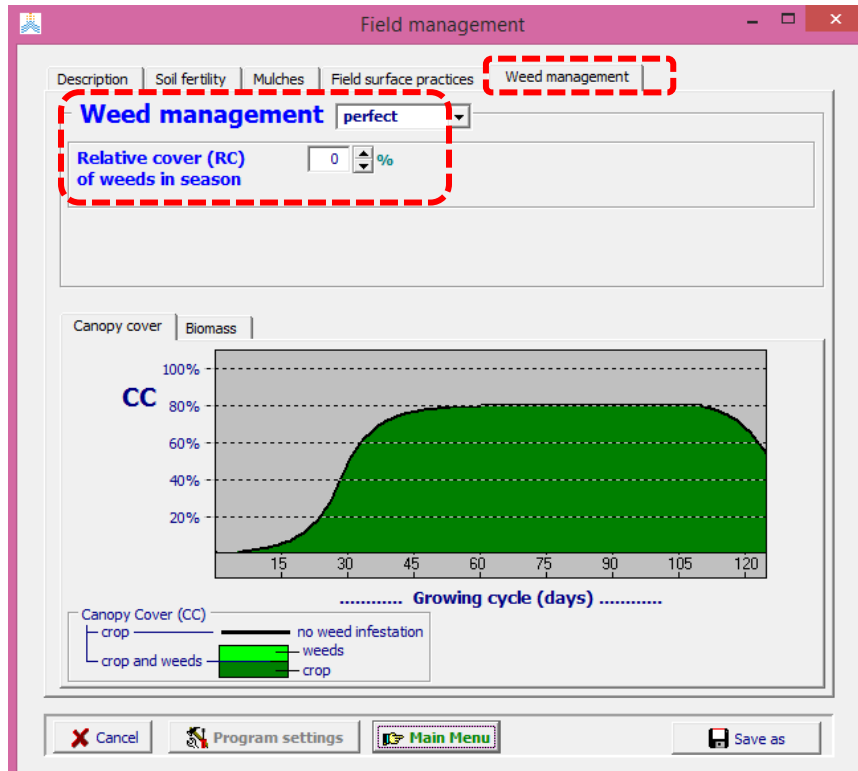
در شکل ۷۲ شرایط سطح مزرعه مانند رواناب قابل بررسی است. در مدل AquaCrop، وضعیت رواناب در مزرعه قابل شبیه‌سازی است و چهار گزینه برای تعیین نحوه محاسبه آن وجود دارد. در گزینه اول، مدل مقدار رواناب را با استفاده از ویژگی‌های خاک و شماره منحنی (Curve Number) محاسبه می‌کند. این روش دقیق‌تر است و اثر نوع خاک و شیب مزرعه را در نظر می‌گیرد. در گزینه دوم، مدل هنوز رواناب را تخمین می‌زند اما این تخمین به جزئیات خاک وابسته نیست. در این حالت محاسبه رواناب بر اساس بارندگی و رطوبت خاک است و مدل فرآیند ساده‌تری برای پیش‌بینی رواناب به کار می‌برد. گزینه سوم زمانی انتخاب می‌شود که مزرعه مطمئناً رواناب ندارد و نیازی به محاسبه آن نیست، و گزینه چهارم برای مواقعی است که موانعی مانند پشته‌ها در مسیر جریان آب وجود دارد و رفتار رواناب تحت تأثیر این موانع قرار می‌گیرد. به این ترتیب کاربر می‌تواند بر اساس شرایط واقعی مزرعه، روش مناسب محاسبه رواناب را انتخاب کند.

۲-۴-۶- کنترل علف‌های هرز در مزرعه گندم

آخرین منو در صفحه مدیریت زراعی مربوط به مدیریت و عملیات اعمال شده بر علف‌های هرز در مزرعه است که صفحه مربوط در شکل ۷۳ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، در این پنجره باید شرایط مزرعه از نظر وضعیت مبارزه با علف‌های هرز با شاخص‌های کیفی و کمی مشخص شده تعیین شود. به طور مثال، در اینجا شاخص کیفی انتخاب شده Perfect و شاخص کمی صفر است به این معنی که وضعیت مبارزه با علف‌های هرز در مزرعه عالی است.



شکل ۷۲- پنجره مدیریت زراعی- منوی Field surface practices

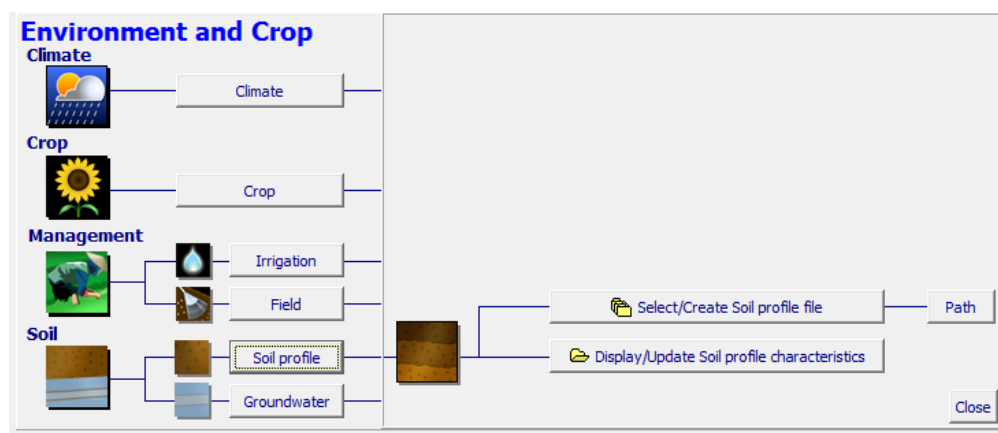


شکل ۷۳- پنجره مدیریت زراعی- منوی weed management

۲-۵- تحلیل اطلاعات مربوط به پروفیل خاک در کشت گندم

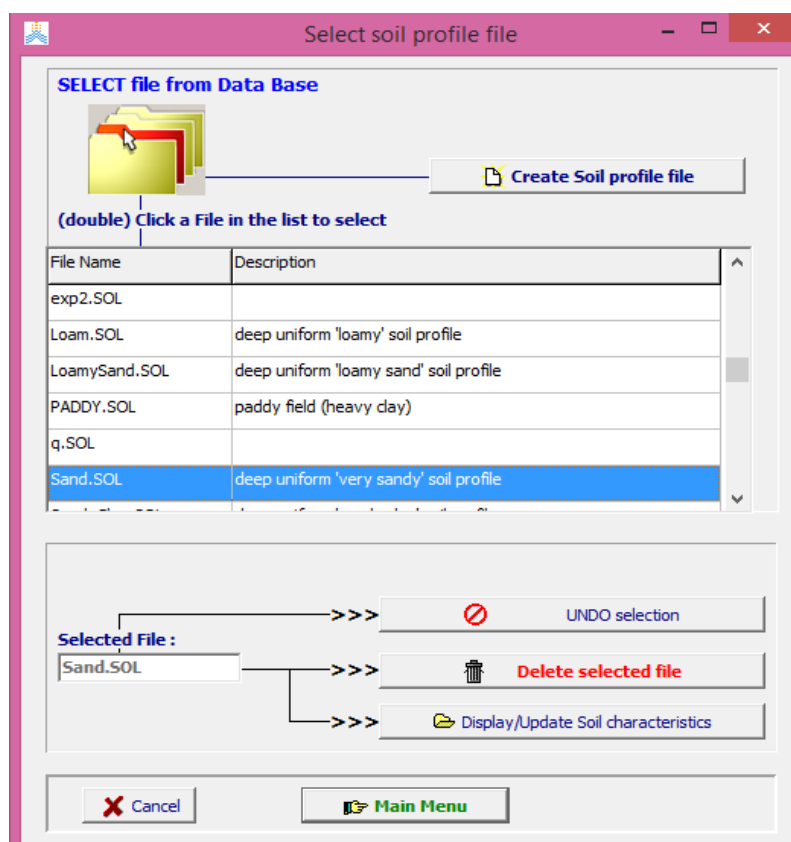
۲-۵-۱- ایجاد فایل اطلاعات ورودی پروفیل خاک

در مدل AquaCrop اطلاعاتی مانند بافت خاک، رطوبت خاک در حالت‌های مختلف و سایر ویژگی‌های خاک در فایل پروفیل خاک گنجانده شده است. برای ساخت فایل پروفیل خاک باید گزینه Soil profile در صفحه اصلی مدل انتخاب گردد. با انتخاب این گزینه کاربر به صفحه نشان داده شده در شکل ۷۴ هدایت می‌شود.

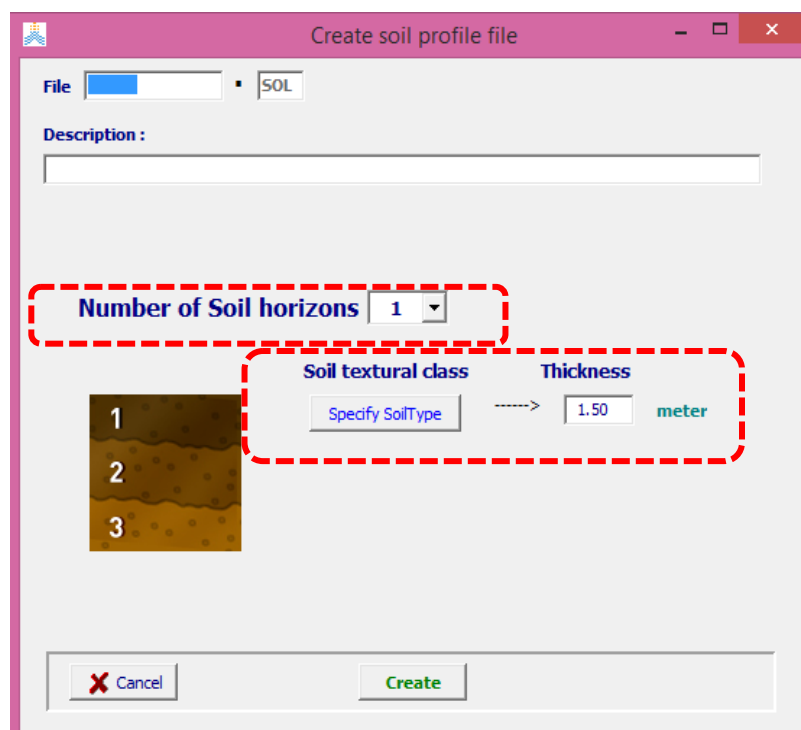


شکل ۷۴- پنجره انتخاب گزینه مورد نظر برای انتخاب فایل پروفیل خاک پیش فرض با ساخت فایل پروفیل خاک جدید

در این پنجره با استفاده از گزینه Select/Create soil profile file می‌توان فایل جدید را انتخاب کرد یا ساخت. گزینه Display/Update soil profile characteristics به منظور نمایش فایل انتخاب شده (اگر فایلی انتخاب شده باشد) استفاده می‌شود. شکل ۷۵ صفحه‌ای است که پس از انتخاب گزینه Select/Create soil profile file به کاربر نمایش داده می‌شود. در اینجا می‌توان یکی از فایل‌های موجود در لیست را انتخاب کرد. در صورت نیاز به ساخت فایل جدید می‌توان از گزینه Create soil profile file در همین صفحه استفاده کرد که در این صورت شکل ۷۶ نمایش داده خواهد شد.



شکل ۷۵- صفحه انتخاب فایل های پروفیل خاک پیش فرض یا هدایت به پنجره ساخت فایل پروفیل خاک جدید

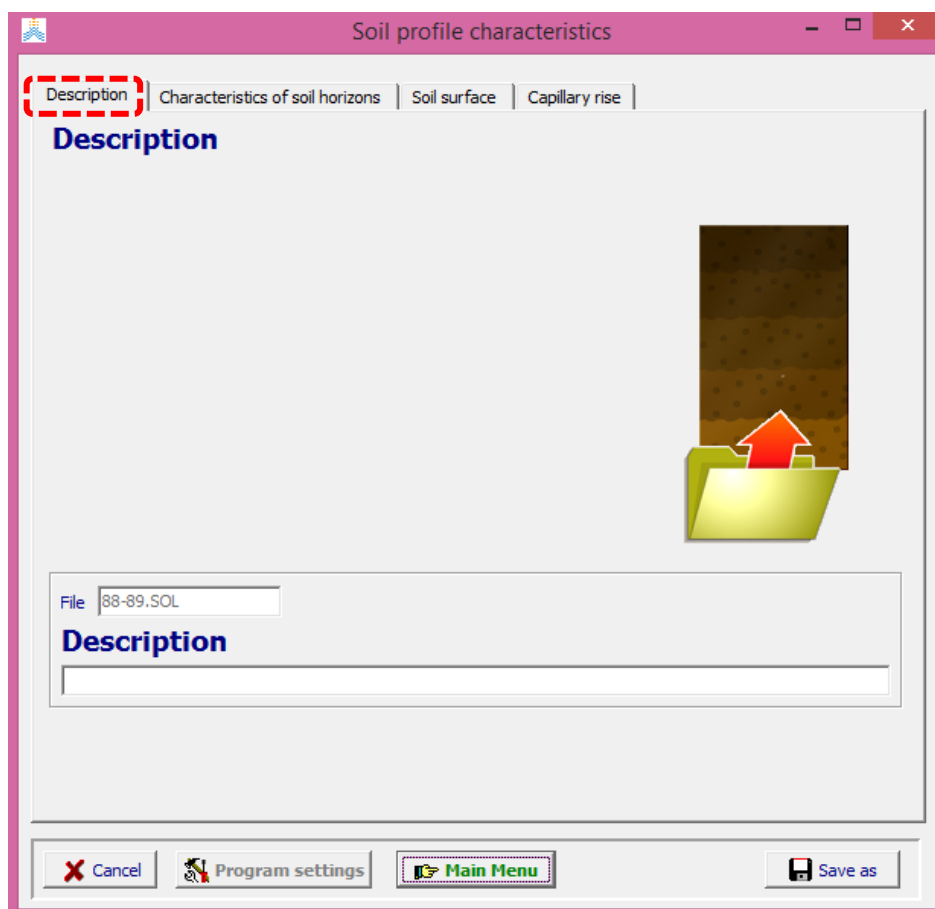


شکل ۷۶- صفحه ورود اطلاعات و ساخت فایل پروفیل خاک جدید

در شکل ۷۶ مشاهده می‌شود که در این صفحه امکان انتخاب تعداد لایه‌های خاک وجود دارد. انتخاب‌هایی که برای لایه‌های خاک وجود دارد از ۱ تا ۵ متغیر است؛ تعداد لایه‌های خاک که در مدل AquaCrop در نظر گرفته می‌شود حداکثر ۵ لایه است. کلاس بافت خاک و ضخامت لایه‌های خاک جزء مواردی هستند که کاربر باید در این صفحه انتخاب کند.

۲-۵-۲- توضیحات پروفیل خاک

پس از ساخت فایل خام پروفیل خاک می‌توان با استفاده از گزینه Display/Update soil profile characteristics فایل ساخته شده را از لیست فایل‌های پروفیل خاک موجود در مدل انتخاب و آن را مشاهده کند. کاربر پس از انتخاب فایل ساخته شده، به پنجره پروفیل خاک نشان داده شده در شکل ۷۷ هدایت می‌شود. در این صفحه می‌توان نام و توضیحات فایل ساخته شده را مشاهده کرد.



شکل ۷۷- پنجره پروفیل خاک - منوی Description

۲-۵-۳- بررسی ویژگی‌های لایه‌های خاک در کشت گندم

دومین منو از پنجره پروفیل خاک مربوط به اطلاعات ویژگی‌های لایه‌های خاک برای کشت گندم است. این اطلاعات شامل بافت و ضخامت لایه، رطوبت‌های خاک و هدایت هیدرولیکی خاک است که برای مدیریت آبیاری و رشد گندم اهمیت دارد. بنابراین، برای بررسی و مشاهده این اطلاعات باید به این منو که در شکل ۷۸ نشان داده شده است مراجعه کرد. در شکل مشاهده می‌شود که تعداد ۱ لایه برای خاک انتخاب شده است، زیرا از نظر ویژگی‌های خاک تفاوتی بین عمق‌های مختلف وجود ندارد و خاک همگن است. بخش مشخص شده با خط‌چین

در واقع همان ویژگی‌های لایه‌های خاک است که باید در صورت نیاز توسط کاربر ویرایش شود. این اطلاعات به ترتیب از چپ به راست از این قرارند: بافت خاک، ضخامت لایه خاک مورد بررسی، کل آب در دسترس گیاه (که با توجه به دیگر پارامترهای وارد شده برای گندم در منوهای قبلی، توسط مدل محاسبه می‌شود و نیاز به تغییر آن نیست)، رطوبت‌های نقطه پژمردگی دائم، حد ظرفیت زراعی، حد اشباع و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک. در آخر نیز ضریب تنش برشی خاک گنجانده شده است که با توجه به هدایت هیدرولیکی اشباع خاک توسط مدل محاسبه می‌شود و نیازی به تغییر آن نیست. با استفاده از این اطلاعات، کاربر می‌تواند شرایط خاک مزرعه خود را برای کشت گندم بهتر مدیریت کند.

horizon	description	thickness m	TAW mm/m	Soil water retention in fine soil fraction vol %			Penetrability hydraulic conductivity mm/day	
				PWP	FC	SAT	Ksat	tau
1	loam	1.90	150	15.0	30.0	50.0	500.0	0.76

شکل ۷۸- پنجره پروفیل خاک - منوی Characteristics of soil horizons

۲-۵-۴- ویژگی‌های سطح خاک مزرعه

مواردی مانند تبخیر از سطح خاک و رواناب در منوی سطح خاک قرار دارند. این منو در شکل ۷۹ نشان داده شده است. بخش‌های مشخص شده مربوط به پارامترهایی است که توسط کاربر باید ویرایش شوند. یکی از این پارامترها شماره منحنی (CN) و دیگری مقدار آب قابل تبخیر از لایه سطحی خاک (REW) است؛ مقدار CN بستگی به عواملی مانند بافت خاک، پوشش گیاهی و وضعیت رطوبتی اولیه خاک دارد. همچنین REW وابسته به بافت خاک است. در شکل دیده می‌شود که برای هر دو این پارامترها مدل یک مقدار را به عنوان مقدار پیش‌فرض و با توجه به اطلاعات وارد شده در بخش‌های پیشین در مورد بافت خاک و... مشخص می‌کند که کاربر در صورت نیاز می‌تواند آن را تغییر دهد و مقدار مورد نظر خود را جایگذاری کند.

Soil profile characteristics

Description | Characteristics of soil horizons | **Soil surface** | Capillary rise

Soil surface characteristics

Surface runoff

Curve Number
CN 61 for proper field management
 Default value (CN = 61)
 for hydrologic soil group : 'B'
 classification based on Ksat of top horizon

Soil evaporation

Readily Evaporable Water
REW 9 mm
 Default value (9 mm)

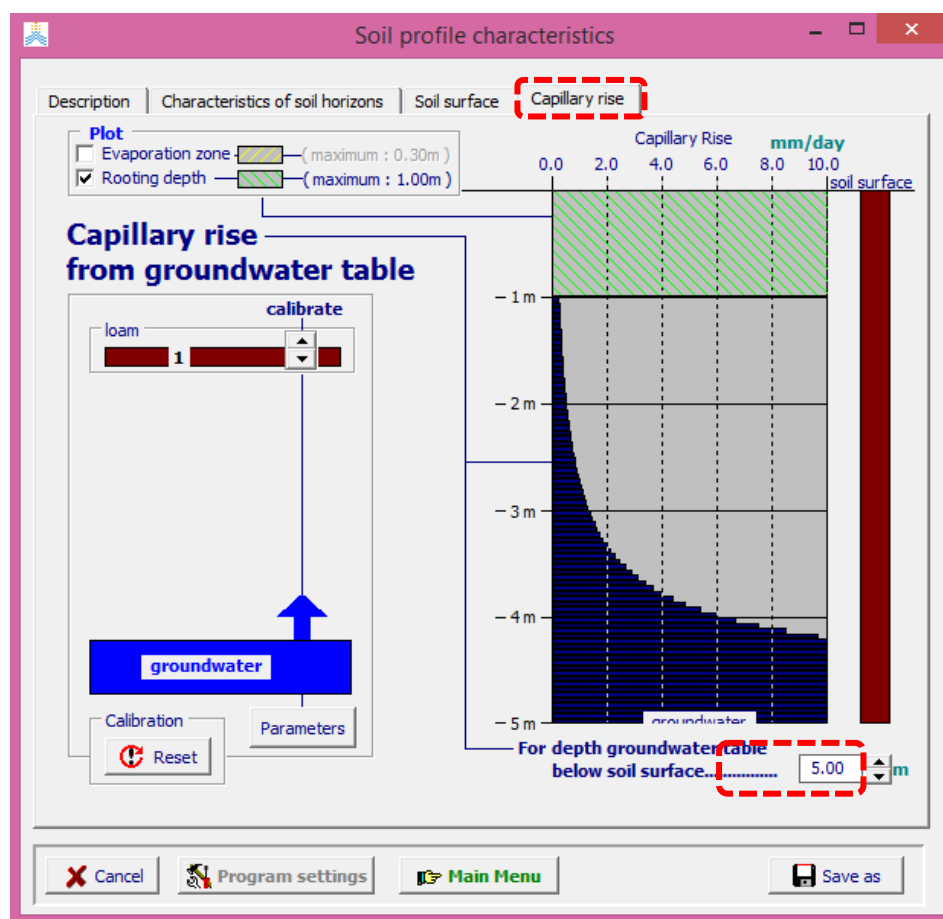
evaporating soil surface layer 0.04 m

Cancel Program settings Main Menu Save as

شکل ۷۹- پنجره پروفیل خاک - منوی Soil surface

۲-۵-۵- اثر صعود کاپیلاری بر رشد گندم

آخرین منوی در پنجره پروفیل خاک، منوی صعود کاپیلاری است که در آن می‌توان عمق آب زیرزمینی را در منطقه مورد بررسی مشخص کرد تا جذب شدن یا جذب نشدن آب توسط ریشه از آب زیرزمینی نیز در فرآیند شبیه‌سازی جریان آب در خاک توسط مدل لحاظ گردد. شکل ۸۰ منوی صعود کاپیلاری را نشان می‌دهد. عمق آب زیرزمینی باید در بخشی که با خط چین قرمز مشخص شده است جایگذاری شود.

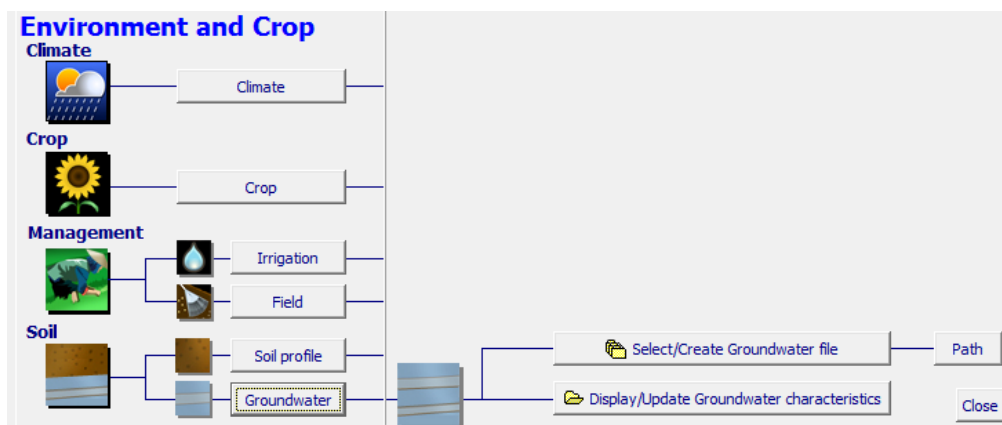


شکل ۸۰- پنجره پروفیل خاک - منوی Capillary rise

۶-۲- مدیریت آب زیرزمینی در کشت گندم

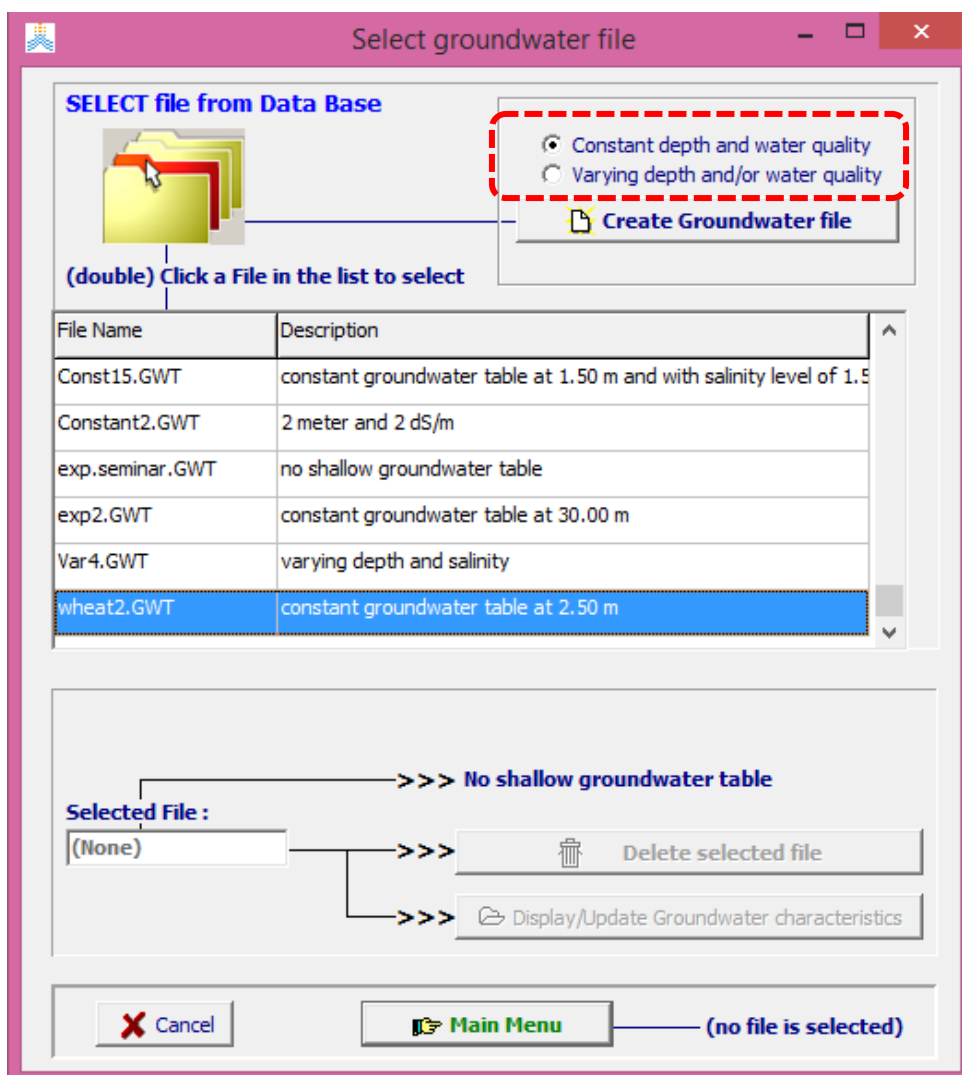
۶-۲-۱- ایجاد فایل اطلاعات ورودی آب زیرزمینی

شرایط آب زیرزمینی و اطلاعات مربوط به آن مانند ثابت بودن یا متغیر بودن سطح آب زیرزمینی، کیفیت آب و... در منوی آب زیرزمینی (Groundwater) قرار دارد. برای ساخت فایل آب زیرزمینی باید گزینه Groundwater در صفحه اصلی مدل انتخاب شود. با انتخاب این گزینه کاربر به صفحه نشان داده شده در شکل ۸۱ هدایت می‌شود.



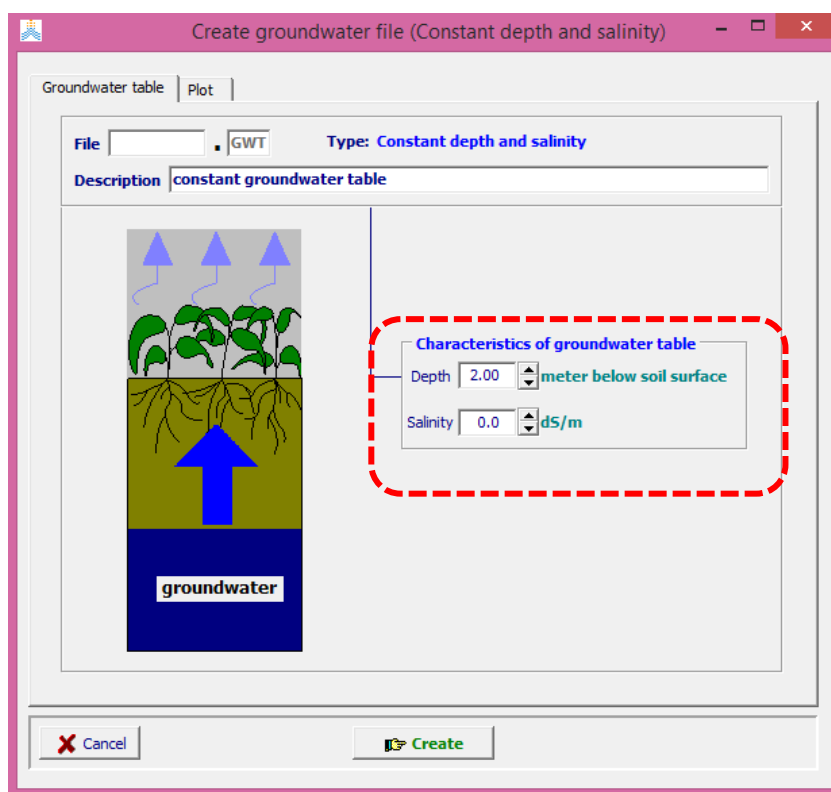
شکل ۸۱- پنجره انتخاب گزینه مورد نظر برای انتخاب فایل آب زیر زمینی پیش فرض یا ساخت فایل آب زیر زمینی جدید

در این پنجره با استفاده از گزینه Select/Create Groundwater file می‌توان فایل جدید را انتخاب کرد یا ساخت. گزینه Display/Update Groundwater characteristics به منظور نمایش فایل انتخاب شده (اگر فایلی انتخاب شده باشد) به کار گرفته می‌شود. شکل ۸۲ صفحه‌ای است که پس از انتخاب گزینه Select/Create Groundwater file به کاربر نمایش داده می‌شود.

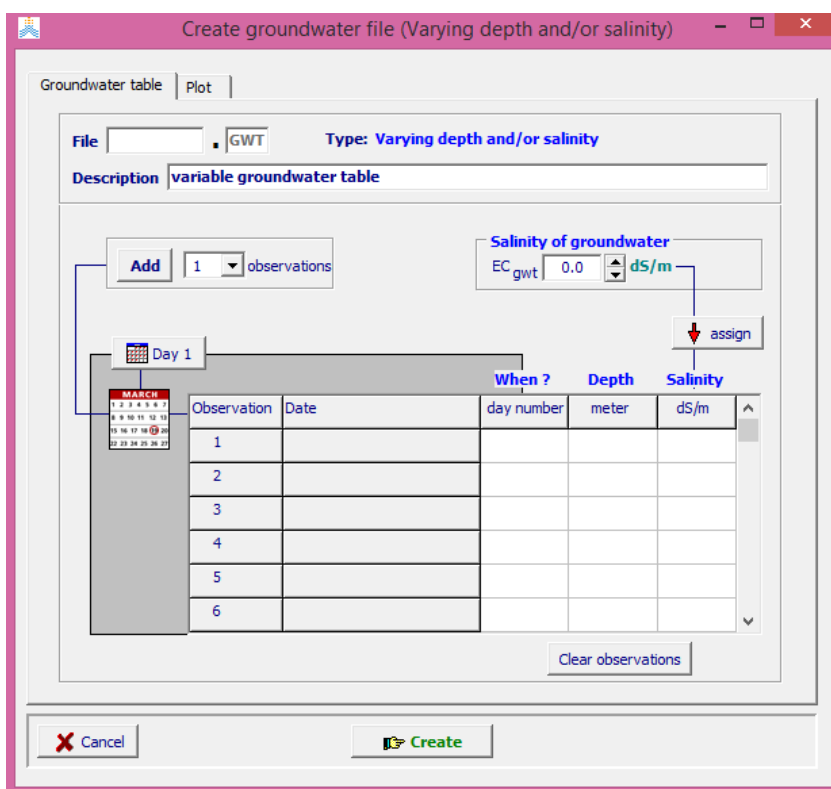


شکل ۸۲- صفحه انتخاب فایل های آب زیر زمینی پیش فرض یا هدایت به پنجره ساخت فایل آب زیر زمینی جدید

همان‌طور که در شکل ۸۲ دیده می‌شود، در اینجا می‌توان یکی از فایل‌های موجود در لیست را انتخاب کرد. در صورت نیاز به ساخت فایل جدید می‌توان از گزینه Create Groundwater file در همین صفحه استفاده کرد. اما پیش از آن باید نوع فایل از بین یکی از گزینه‌های کیفیت و عمق ثابت آب زیرزمینی (Constant depth and water quality) و کیفیت و عمق متغیر آب زیرزمینی (Varying depth and/or water quality) انتخاب شده باشد. عمق و کیفیت آب زیرزمینی اگر ثابت باشد و گزینه اول انتخاب شده باشد، پس از کلیک کردن روی Create Groundwater file شکل ۸۳ نمایش داده می‌شود و در صورت متغیر بودن کیفیت و عمق آب زیرزمینی و انتخاب گزینه دوم شکل ۸۴ به کاربر نمایش داده خواهد شد. در بخش مشخص شده در شکل ۸۳ باید عمق آب زیرزمینی از سطح زمین بر حسب متر (با در نظر گرفتن عمق صفر برای سطح زمین) و شوری آب زیرزمینی بر حسب ds/m وارد شود.



شکل ۸۳- صفحه ساخت فایل آب زیر زمینی با در نظر گرفتن عمق و کیفیت ثابت برای آب زیر زمینی

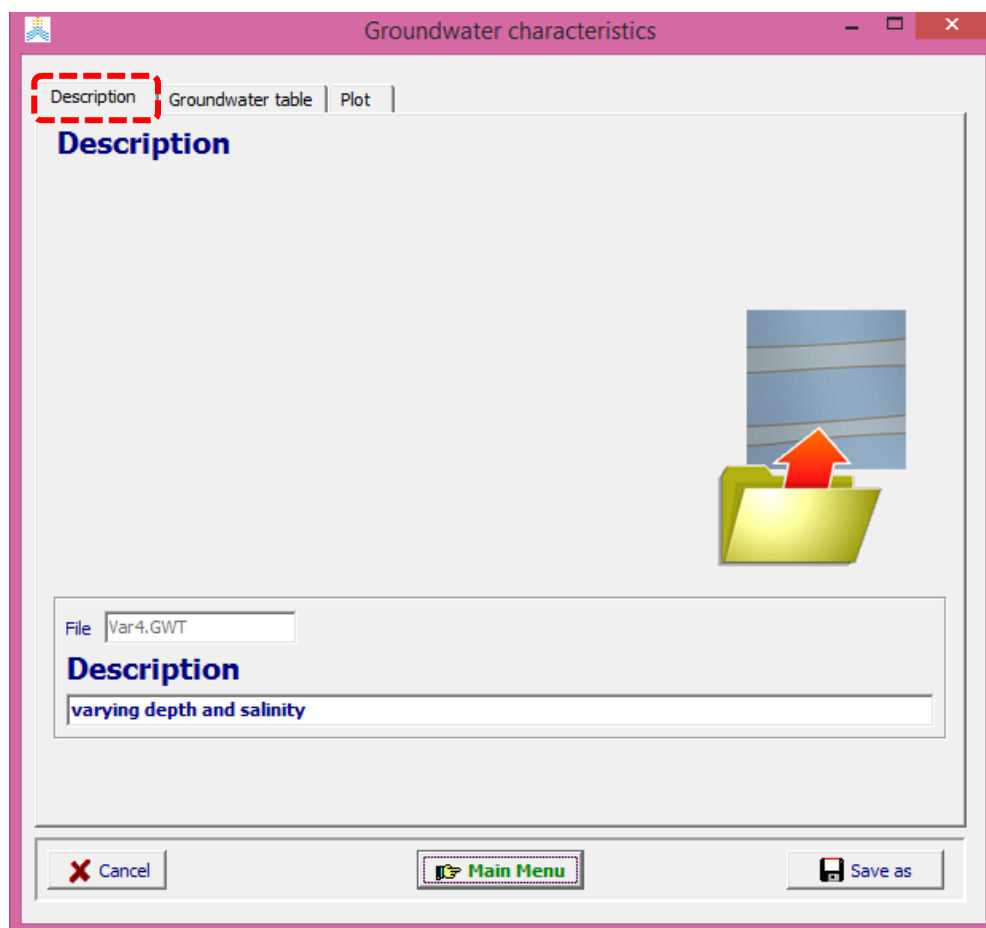


شکل ۸۴- صفحه ساخت فایل آب زیر زمینی با در نظر گرفتن عمق و کیفیت متغیر برای آب زیر زمینی

در حالت دوم و در صورت متغیر بودن عمق و کیفیت آب زیرزمینی نیز همان طور که در شکل ۸۴ نشان داده شده است، در ستون‌های اول تا سوم جدول به ترتیب شماره روزهای مختلف پس از کاشت، عمق آب زیرزمینی و شوری آن نوشته می‌شود. بنابراین کاربر می‌تواند در شرایط متغیر بودن عمق و کیفیت آب زیرزمینی و در صورت داشتن اطلاعات دقیق در مورد این اطلاعات در روزهای مختلف، فایل آب زیرزمینی را به این شکل تکمیل کند.

۲-۶-۲- توضیحات آب زیرزمینی

پس از ساخت فایل خام آب زیر زمینی می‌توان با استفاده از گزینه Display/Update Groundwater characteristics فایل ساخته شده را از لیست فایل‌های آب زیر زمینی موجود در مدل انتخاب و آن را مشاهده کرد. کاربر پس از انتخاب فایل ساخته شده، به پنجره آب زیر زمینی نشان داده شده در شکل ۸۵ هدایت می‌شود. در این صفحه می‌توان نام و توضیحات فایل ساخته شده را مشاهده کرد.



شکل ۸۵- پنجره آب زیر زمینی - منوی Description

۲-۶-۳- مدیریت سطح آب زیر زمینی در آبیاری گندم

در منوی سطح آب زیرزمینی، کاربر امکان مشاهده و ویرایش اطلاعات مربوط به عمق و کیفیت آب زیرزمینی و متغیر یا ثابت بودن آن را دارد. این منو در شکل ۸۶ نشان داده شده است. در این صفحه نیز امکان ایجاد تغییر در زمینه ثابت بودن یا متغیر بودن عمق و کیفیت آب زیرزمینی برای کاربر ایجاد شده است. تغییر در مقادیر عمق و شوری آب زیرزمینی نیز امکان‌پذیر است.

Groundwater characteristics

Description: **Groundwater table** | Plot

Groundwater table

☒ Present ☐ Absent

☒ Varying in depth and/or salinity ☐ Constant depth and salinity

Add 1 observations

Salinity of groundwater: EC_{gwt} 0.0 dS/m

assign

Day 1

Observation	Date	When ? day number	Depth meter	Salinity dS/m
1	1 March	60	1.00	1.0
2	10 April	100	1.50	2.0
3	19 July	200	2.00	3.0
4	27 October	300	1.30	1.0

Clear observations

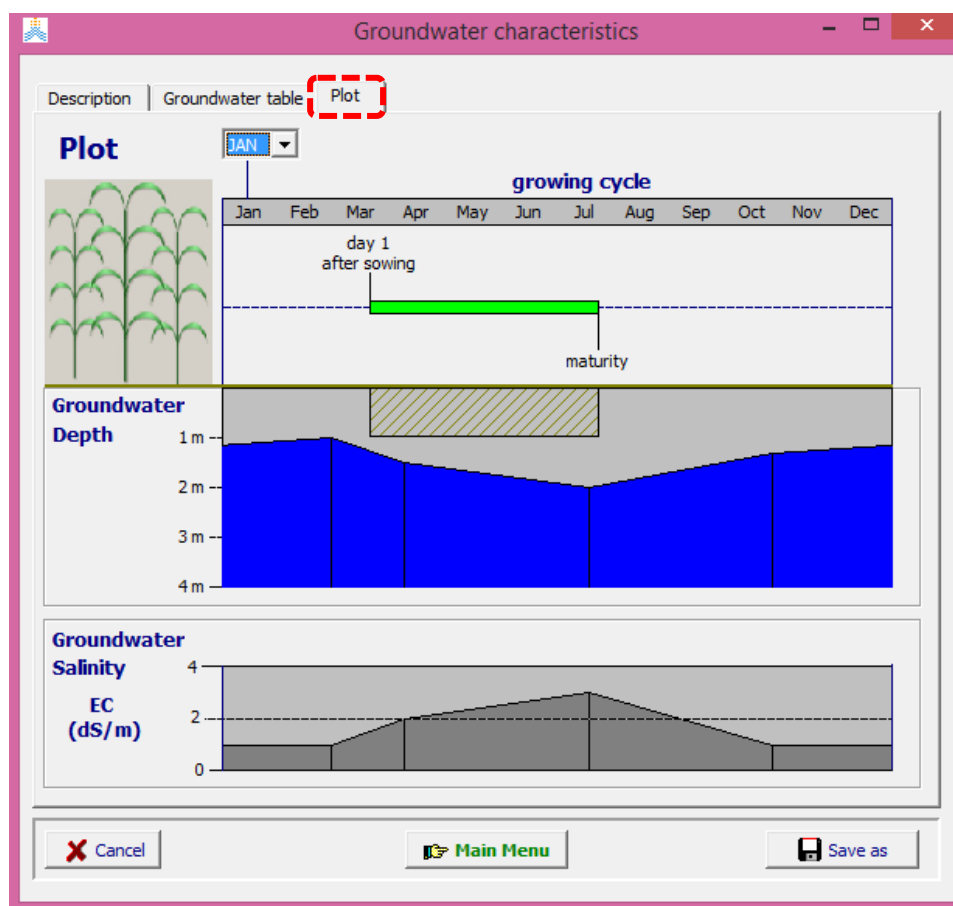
Cancel Main Menu Save as

شکل ۸۶- پنجره آب زیر زمینی - منوی Groundwater table

۲-۶-۴- تحلیل گرافیکی وضعیت آب زیرزمینی

با توجه به اینکه کاربر در منوهای قبلی چه شرایطی را برای وضعیت آب زیرزمینی انتخاب کرده باشد و چه مقادیری را برای عمق آب زیر زمینی وارد کرده باشد، در آخرین منو از پنجره آب زیرزمینی یعنی منوی نمودار آب زیرزمینی، تغییرات عمق آب طی زمان در قالب یک نمودار نمایش داده خواهد داشت. شکل ۸۷ مثالی از نمودار آب زیرزمینی در منوی مربوط را نشان می‌دهد.

در این شکل نمودار اول نشان دهنده تغییرات عمق آب زیرزمینی طی زمان و نمودار دوم نشان دهنده تغییرات شوری آب زیرزمینی در طول زمان است که مدل آن‌ها را بر حسب اطلاعات وارد شده در بخش‌های پیشین رسم کرده است.



شکل ۸۷- پنجره آب زیر زمینی - منوی Plot

۷-۲- کالیبراسیون اطلاعات مدل برای بهینه‌سازی کشت گندم و آنالیز حساسیت

در این فصل ساخت فایل‌های ورودی مدل به طور کامل توضیح داده شد. پس از آنکه تمام مراحل توضیح داده شده در این فصل به‌انجام رسید و فایل‌های ورودی ساخته شده و اطلاعات موجود در آن تکمیل گردید، می‌توان با کلیک کردن روی Run در صفحه اصلی، مدل را اجرا کرد. اما نکته قابل توجه این است که بسیاری از پارامترهای موجود در فایل گیاهی نیاز به واسنجی دارند.

در توضیحات فصل دو اشاره شد که فضای پس‌زمینه برخی از پارامترها سفید و برخی دیگر خاکستری است. باید توجه داشت که سازندگان مدل AquaCrop توصیه کرده‌اند کاربر حتی‌الامکان پارامترهای با پس‌زمینه خاکستری رنگ را تغییر ندهد زیرا این پارامترها با توجه به سایر اطلاعات تکمیل شده توسط کاربر، به کمک مدل محاسبه می‌شود. بنابراین، به طور کلی می‌توان گفت پارامترهایی که فضای پس‌زمینه خاکستری دارند نیازی به واسنجی ندارند و پارامترهای دیگر حتما نیاز به واسنجی دارند.

به طور کلی منظور از واسنجی پارامترها، تخصیص مقادیر بهینه به پارامترهای ورودی مدل با توجه به منطقه مورد مطالعه و شرایط آب و هوایی به منظور کاهش خطای مدل در فرآیند شبیه‌سازی رشد و محصول گیاه است. این کار با استفاده از داده‌های کشت گیاه مورد نظر در سال‌های گذشته صورت می‌گیرد. پارامترهای موجود در فایل‌های آبیاری، عملیات زراعی، پروفیل خاک و آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه در جای خود وارد می‌شوند. پارامترهایی از فایل گیاهی که داده‌های اندازه‌گیری شده آن‌ها موجود است در جای خود جایگذاری شده‌اند و سایر پارامترها وارد فرآیند واسنجی می‌شوند. پس از واسنجی، عملکرد مدل با استفاده از مجموعه داده‌های مستقل ارزیابی

می‌شود که به این مرحله اعتبارسنجی (Validation) گفته می‌شود. اجرای صحیح این دو مرحله باعث می‌شود تا مدل بتواند رفتار گیاه را در شرایط مختلف زراعی و مدیریتی با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند.

در فرآیند واسنجی، از داده‌های اندازه‌گیری شده مزرعه‌ای مانند ماده خشک و عملکرد دانه استفاده می‌شود. مدل با استفاده از مقادیر اولیه پارامترها اجرایی می‌شود و پس از آن نتایج شبیه‌سازی شده با داده‌های واقعی مزرعه مقایسه می‌شوند. اگر اختلاف قابل توجهی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده وجود داشته باشد، مقادیر پارامترهای مدل تغییر داده می‌شوند تا این اختلاف کاهش یابد. این فرآیند به صورت تکراری ادامه پیدا می‌کند تا بهترین مجموعه پارامترها برای شبیه‌سازی شرایط واقعی مزرعه تعیین شود.

به طور معمول، فرآیند واسنجی به این صورت است که در هر مرحله یکی از پارامترهای مدل به عنوان پارامتر متغیر در نظر گرفته می‌شود و دیگر پارامترها ثابت نگه داشته می‌شوند. پس از آن، مدل اجرا خواهد شد و نتایج حاصل، مانند ماده خشک و عملکرد دانه، با مقادیر اندازه‌گیری شده در مزرعه مقایسه می‌گردند. مقدار پارامتر مورد نظر به تدریج تغییر داده می‌شود و پس از هر بار اجرای مدل، میزان اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و داده‌های واقعی با استفاده از شاخص‌های آماری ارزیابی می‌شود. این فرآیند تا زمانی ادامه می‌یابد که کمترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده حاصل شود. پس از تعیین مقدار مناسب برای یک پارامتر، همین روند برای دیگر پارامترهای مدل تکرار می‌شود تا در نهایت مجموعه‌ای از پارامترهای بهینه برای مدل تعیین گردد.

برای ارزیابی دقت مدل در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی، معمولاً از شاخص‌های آماری مختلفی مانند ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، و شاخص کارایی (NSE) استفاده می‌شود. هرچه مقدار خطا کمتر و شاخص‌های آماری به مقادیر ایده‌آل نزدیک‌تر باشند، عملکرد مدل دقیق‌تر خواهد بود. بر اساس نتایج مطالعات Paredes و همکاران (۲۰۱۴)، یکی از مهم‌ترین مراحل واسنجی مدل AquaCrop تنظیم دقیق پارامترهای مربوط به رشد و توسعه پوشش گیاهی است که نقش بسیار مهمی در برآورد تبخیر از خاک، تعرق گیاه، تولید ماده خشک و عملکرد نهایی محصول دارد. به همین دلیل، این پارامترها مهم‌ترین پارامترهای گیاهی در مدل AquaCrop شناخته می‌شوند.

در واسنجی مدل، ابتدا از داده‌های مربوط به تیمارهای کامل آبیاری شده استفاده می‌شود تا شرایط رشد بالقوه گیاه مشخص گردد. در این مرحله، پارامترهای مربوط به رشد و توسعه پوشش گیاهی شامل حداکثر پوشش گیاهی (CCX)، ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC) و ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC) تنظیم می‌شوند. این پارامترها سرعت گسترش پوشش گیاهی، مقدار حداکثر آن و روند کاهش پوشش گیاهی در انتهای فصل رشد را مشخص می‌کنند. پس از تنظیم پارامترهای رشد و توسعه پوشش گیاهی، واسنجی پارامترهای مربوط به تعرق و تولید محصول اجرا می‌شود. مهم‌ترین این پارامترها شامل ضریب حداکثر تعرق گیاه (K_{CTrx})، بهره‌وری آب نرمال شده (WP^*) و شاخص برداشت بالقوه (HI_0) هستند. این پارامترها نقش مهمی در شبیه‌سازی تولید ماده خشک و عملکرد دانه دارند. پارامتر WP^* بیان‌کننده رابطه بین آب مصرف شده توسط گیاه و تولید ماده خشک است، در حالی که HI_0 نسبت عملکرد دانه به کل ماده خشک تولید شده را مشخص می‌کند.

در مرحله بعد، پارامترهای مرتبط با واکنش گیاه به کم‌آبی تنظیم می‌شوند. برای این منظور، در صورت وجود تیمارهای دارای کم آبیاری، از داده‌های مرتبط با تیمارهای مذکور برای واسنجی این دسته از پارامترها استفاده می‌شود. در این مرحله، پارامترهایی مانند آستانه‌های بالا و پایین رطوبت خاک برای شروع اثر تنش آبی بر توسعه پوشش گیاهی (P_{exp})، آستانه بالای رطوبت خاک برای شروع بسته شدن روزنه‌ها (P_{sto}) و آستانه بالای رطوبت خاک برای شروع پیری زودرس گیاه (P_{sen}) واسنجی می‌شوند. این پارامترها مشخص می‌کنند گیاه در چه شرایطی نسبت به کاهش رطوبت خاک واکنش نشان می‌دهد و رشد یا تعرق آن محدود می‌شود. پس از تکمیل شدن فرآیند واسنجی، مقادیر نهایی پارامترها بدون تغییر در مرحله اعتبارسنجی استفاده می‌شوند. در این مرحله، مدل با استفاده از داده‌های مستقل اجرا می‌شود تا توانایی آن در شبیه‌سازی شرایط واقعی ارزیابی گردد. اگر نتایج شبیه‌سازی شده تطابق مناسبی با داده‌های اندازه‌گیری شده داشته باشند، می‌توان از مدل برای پیش‌بینی رشد گیاه، عملکرد محصول و بررسی سناریوهای مختلف مدیریتی در سال‌های آینده استفاده کرد. این روش واسنجی مرحله‌ای (شکل ۸۸) یکی

از معتبرترین روش‌های پارامتردهی مدل AquaCrop محسوب می‌شود و در مطالعات مختلف به کار گرفته شده است (Paredes *et al.*, 2014; Jahandideh *et al.*, 2026).



شکل ۸۸- مراحل روش کالیبره کردن مدل AquaCrop بر اساس روش پیشنهادی Paredes *et al.*, 2014 و Jahandideh *et al.*, 2026

مدل AquaCrop به طور پیش فرض دارای مجموعه‌ای از فایل‌های گیاهی واسنجی شده برای برخی محصولات زراعی متداول است. این فایل‌ها شامل پارامترهای گیاهی پیشنهادی هستند که بر اساس نتایج مطالعات و آزمایش‌های تهیه شده‌اند که توسعه‌دهندگان مدل تهیه کرده‌اند. این فایل‌ها هم‌زمان با نصب و دانلود نرم‌افزار AquaCrop در اختیار کاربر قرار می‌گیرند و معمولاً در پوشه DATA نرم‌افزار ذخیره شده‌اند. بنابراین، کاربر می‌تواند برای بسیاری از گیاهان، از فایل‌های آماده مدل به عنوان نقطه شروع شبیه‌سازی و واسنجی استفاده کند. از آنجا که شرایط اقلیمی، مدیریت زراعی، ویژگی‌های خاک، رقم گیاهی و شرایط آبیاری در مناطق مختلف متفاوت است، استفاده مستقیم از پارامترهای پیش فرض مدل ممکن است همواره بهترین نتایج را ایجاد نکند. بنابراین توصیه می‌شود اگر به داده‌های اندازه‌گیری شده مزرعه‌ای دسترسی هست، پارامترهای مدل متناسب با شرایط منطقه مورد مطالعه مجدداً تنظیم و واسنجی شوند تا دقت شبیه‌سازی افزایش یابد. آنالیز حساسیت یکی از ابزارهای کلیدی در شبیه‌سازی‌های کشاورزی است که امکان بررسی اثر تغییرات هر یک از پارامترهای مدل را بر نتایج خروجی، مانند عملکرد گندم، پوشش گیاهی، تولید ماده خشک و مصرف آب فراهم می‌کند. با اجرای این تحلیل می‌توان پارامترهایی شناسایی کرد که بیشترین تاثیر را بر نتایج دارند و مشخص کرد که تغییرات کوچک در کدام ورودی‌ها می‌تواند باعث ایجاد نوسان‌های قابل توجه در پیش‌بینی‌های مدل شود. این موضوع اهمیت ویژه‌ای در طراحی آزمایش‌ها و جمع‌آوری داده‌های میدانی دارد، زیرا به کاربر کمک می‌کند توجه و منابع خود را روی پارامترهای حساس متمرکز کند و از دقت نتایج شبیه‌سازی اطمینان حاصل کند.

این تحلیل می‌تواند به صورت دستی اجرا شود یا از روش‌های آماری مانند روش موریس (Morris method) یا تحلیل واریانس (ANOVA) استفاده گردد. خروجی این تحلیل معمولاً نشان می‌دهد که کدام پارامترها بیشترین اثرگذاری و حساسیت را دارند و کدام یک اثر نسبتاً کمی بر نتایج مدل دارند. کاربرد عملی آنالیز حساسیت در کشاورزی بسیار گسترده است. با استفاده از نتایج این تحلیل، کشاورز یا کاربر مدل می‌تواند اولویت جمع‌آوری داده‌های میدانی را مشخص کند، برنامه آبیاری و کوددهی را بهینه‌سازی کند و از منابع آب و کود به صورت کارآمدتری بهره برد. برای مثال، اگر مشخص شود عملکرد گندم بیشترین حساسیت را نسبت به K_{CTr} یا K_e دارد، تمرکز بر دقت این پارامترها می‌تواند تاثیر مستقیم و قابل توجهی بر دقت پیش‌بینی تولید و مدیریت مزرعه داشته باشد. علاوه بر این، آنالیز حساسیت به شناسایی تعاملات پیچیده بین پارامترها کمک می‌کند. برای نمونه، تغییر میزان آبیاری ممکن است اثر متفاوتی بر تولید ماده خشک و مصرف آب داشته باشد. با آنالیز حساسیت، این روابط پیچیده قابل مشاهده و کمی‌سازی می‌شوند و مدل می‌تواند تصویری واقع‌بینانه‌تر از پاسخ گیاه به شرایط محیطی و مدیریتی ارائه دهد. به این ترتیب، آنالیز حساسیت نه تنها به بهبود دقت مدل کمک می‌کند، بلکه ابزاری ارزشمند برای تصمیم‌گیری علمی و مدیریت بهینه مزرعه محسوب می‌شود.

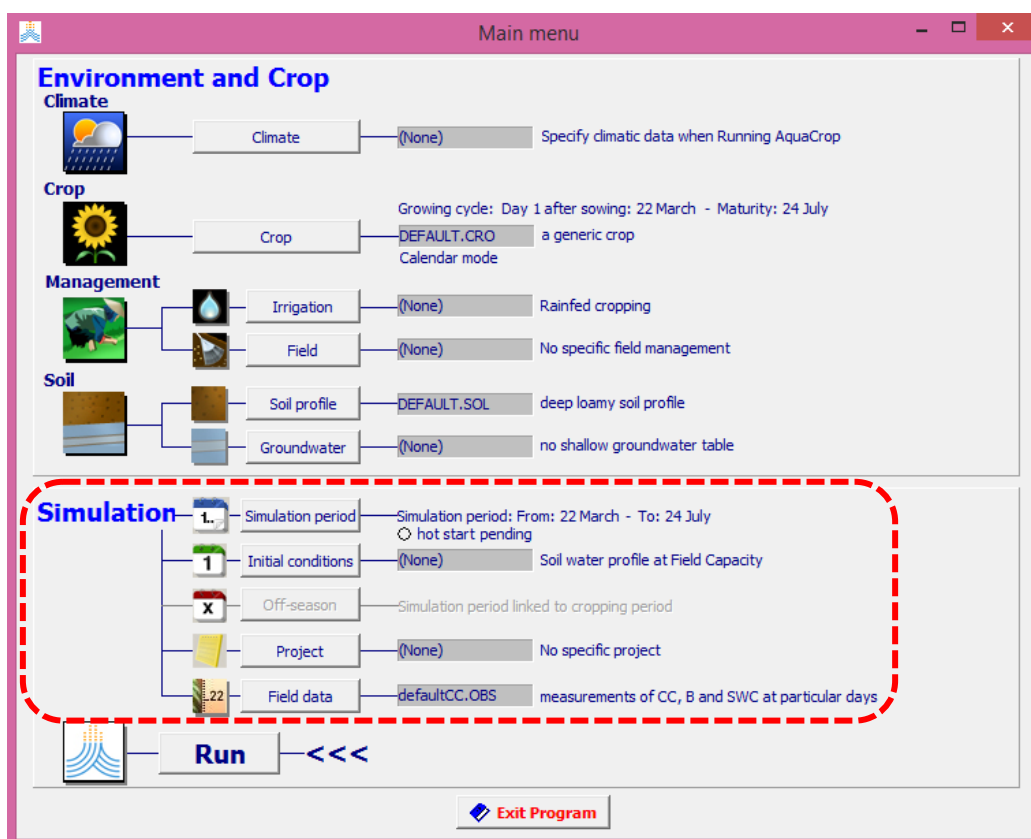
در مدل AquaCrop آنالیز حساسیت معمولاً با تغییر تدریجی پارامترهای کلیدی مدل و بررسی اثر آن بر خروجی‌هایی مانند ماده خشک و محصول دانه اجرا می‌شود. در این روش، یکی از پارامترهای کلیدی مدل (CGC , CDC , CCX , WP^* , HI_0 , K_{CTrx}) در یک بازه مشخص افزایش یا کاهش داده می‌شود، در حالی که سایر پارامترها ثابت نگه داشته می‌شوند. پس از آن، مدل برای هر مقدار جدید پارامتر اجرا شده و تغییرات در نتایج شبیه‌سازی ثبت می‌گردد. با مقایسه نتایج حاصل می‌توان مشخص کرد کدام پارامترها بیشترین تاثیر را بر خروجی‌های مدل دارند و نتایج مدل نسبت به تغییر کدام پارامترها حساسیت بیشتری دارد. اگرچه تحلیل حساسیت در موارد استفاده‌های پیشرفته‌تر صورت می‌گیرد، اما شناسایی این پارامترها به پژوهشگران و کاربران مدل کمک می‌کند فرآیند واسنجی مدل را هدفمندتر در نظر بگیرند و دقت پیش‌بینی عملکرد و مصرف آب را افزایش دهند.

فصل سوم

جمع‌بندی نتایج شبیه‌سازی برای مدیریت کشت گندم

در صفحه اصلی مدل AquaCrop بخشی تحت عنوان Simulation (شبیه‌سازی) وجود دارد که در آن اطلاعات ورودی داده شده به مدل به صورت خلاصه قرار داده شده است. در این بخش برخی اطلاعات تکمیلی نیز قرار داده شده است که کاربر می‌تواند به منظور دقت بیشتر در فرآیند شبیه‌سازی این اطلاعات را تکمیل کند. تکمیل اطلاعات در Simulation ضروری نیست و به طور کلی با استفاده از توضیحات فصل اول و دوم می‌توان تمام فایل‌های ورودی مدل AquaCrop را ساخت و اجرا کرد. با این حال، در این فصل توضیحاتی در باره Simulation داده می‌شود.

همان طور که در شکل ۸۹ نشان داده شده است Simulation شامل پنج بخش است: دوره شبیه‌سازی (Simulation period)، شرایط اولیه (Initial conditions)، شبیه‌سازی خارج از فصل رشد (Off-season)، پروژه (Project) و اطلاعات مزرعه‌ای (Field data) که به جز شبیه‌سازی خارج از فصل رشد (Off-season) که در حال حاضر در مدل غیرفعال و امکان استفاده از آن فراهم نیست، از بقیه بخش‌ها می‌توان برای اجرای بهتر و دریافت نتایج دقیق‌تر استفاده کرد.

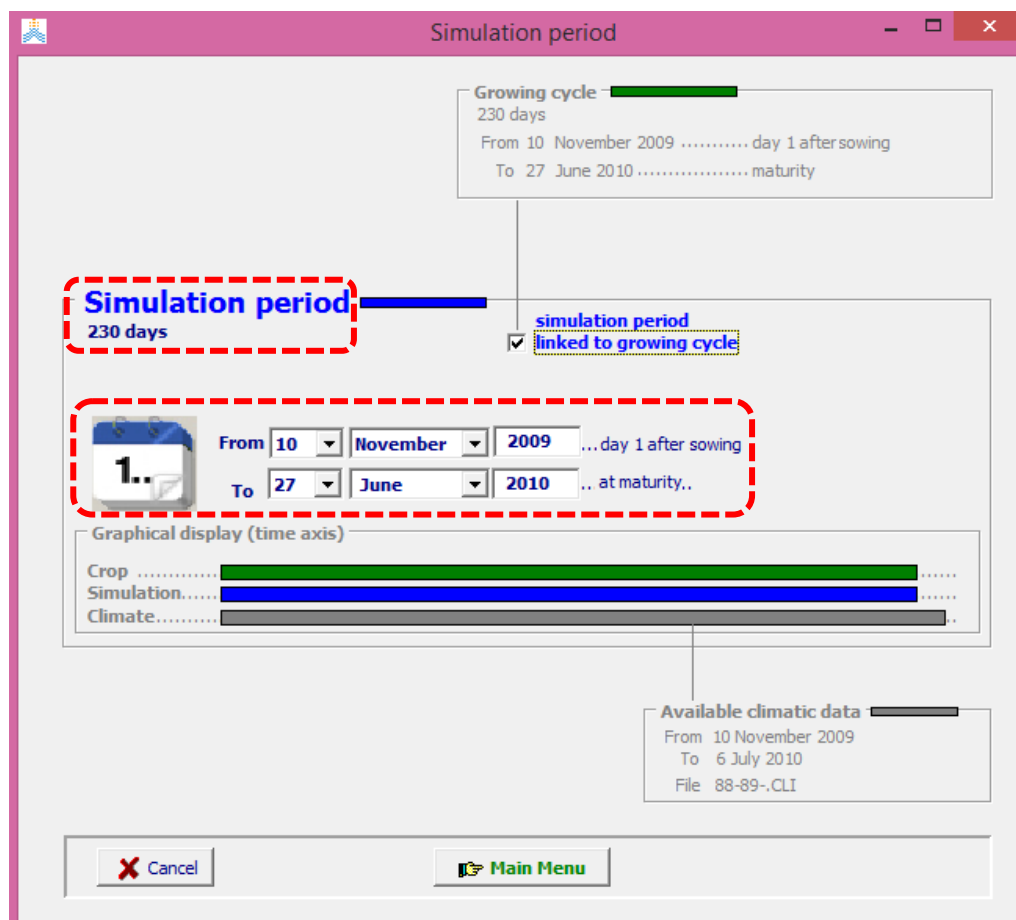


شکل ۸۹- صفحه اصلی مدل- بخش Simulation

۳-۱- برنامه‌ریزی دوره شبیه‌سازی کشت گندم

با کلیک کردن روی Simulation period مانند صفحه نشان داده شده در شکل ۹۰ باز می‌شود. در صفحه Simulation period تاریخ شروع و پایان شبیه‌سازی و تعداد روزهای دوره رشد گیاه نوشته شده است. برای مثال، تاریخ کاشت و برداشت گندم زمستانه در

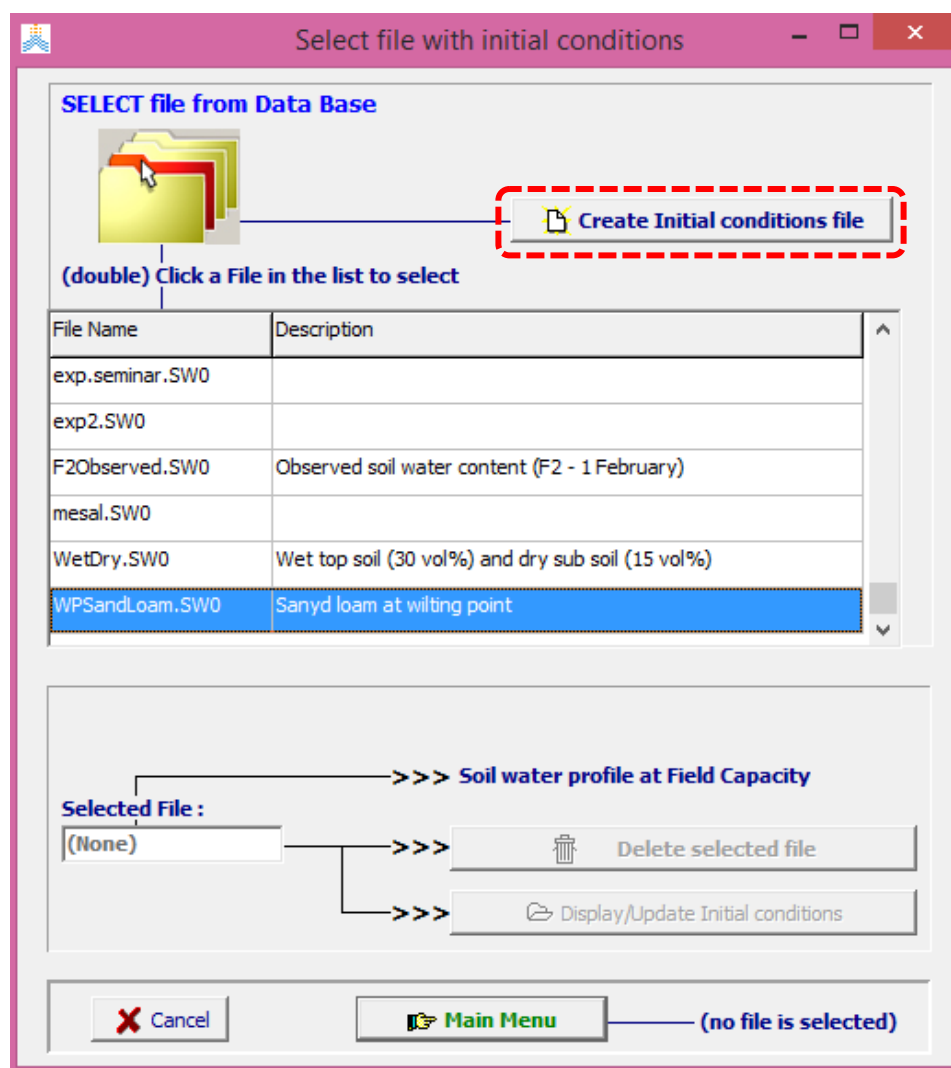
شکل زیر ۱۰ نوامبر و ۲۷ ژوئن جایگذاری شده که در واقع همان تاریخ شروع و پایان شبیه سازی محسوب می شود و بازه بین این دو تاریخ بازه- ای ۲۳۰ روزه است که طول دوره رشد گندم است. بسته به شرایط محلی و اطلاعات دقیق تحقیقاتی، این تاریخ ها قابل جایگزینی هستند.



شکل ۹۰- بخش Simulation - پنجره Simulation period

۳-۲- تعیین شرایط اولیه کشت گندم

برای دریافت نتایج بهتر از مدل می توان اطلاعات مربوط به شرایط اولیه رطوبتی خاک، شوری خاک، و گیاه را در این بخش تکمیل کرد. با کلیک کردن روی Initial conditions در شکل ۸۸ می توان به صفحه انتخاب یا ساخت فایل وارد شد که در شکل ۹۱ نیز نشان داده شده است.

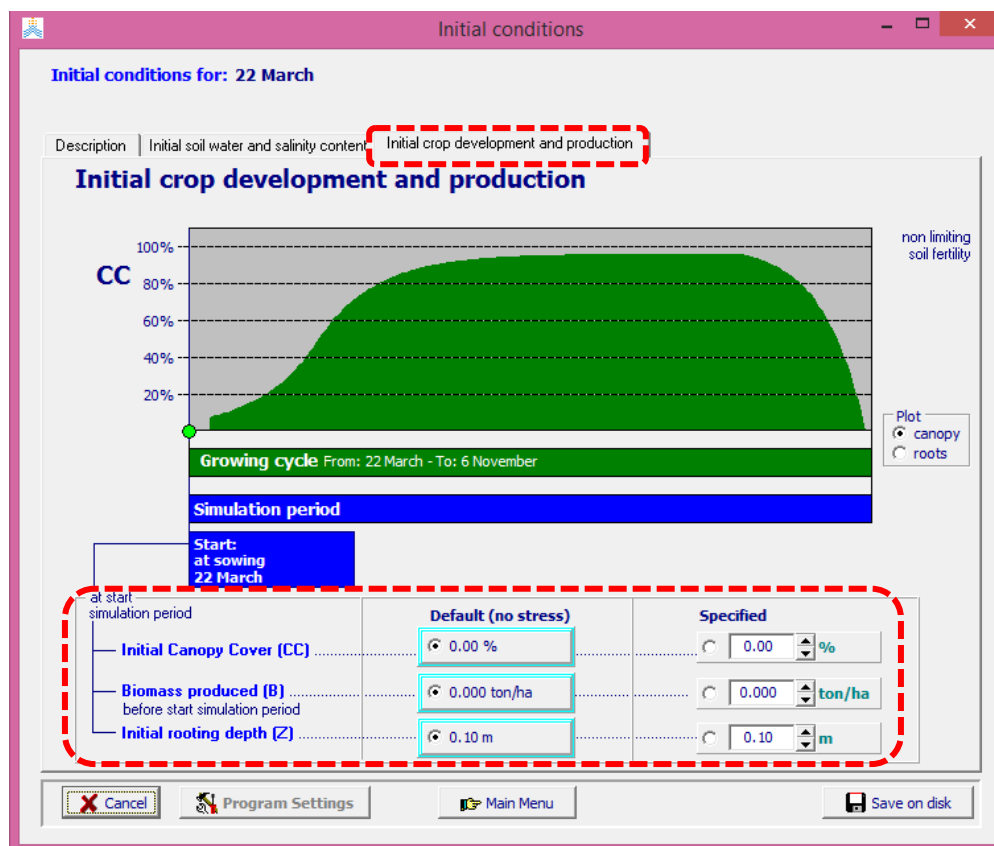


شکل ۹۱- بخش Simulation - پنجره انتخاب یا ساخت فایل Initial conditions

مانند فرآیندی که برای انتخاب یا ساخت فایل‌ها در فصل دوم توضیح داده شد، برای انتخاب فایل Initial conditions نیز می‌توان اگر پیش‌تر فایلی ساخته شده باشد، آن را از لیست انتخاب کرد. ساخت فایل Initial conditions نیز با کلیک‌کردن روی Create initial conditions file مقدور است و کاربر به صفحه نشان داده شده در شکل ۹۲ هدایت می‌شود.

شکل ۹۲- بخش Simulation - پنجره ساخت فایل Initial conditions - منوی Initial soil water and salinity content

همان‌طور که در بخش مشخص شده با خط چین قرمز در شکل ۹۲ نشان داده شده است، برای تکمیل کردن اطلاعات شرایط اولیه خاک از نظر رطوبت و شوری می‌توان یکی از دو گزینه عمق‌های مشخص‌شده (at particular depths) و لایه‌های مشخص‌شده (for specific layers) را انتخاب کرد. در صورت انتخاب گزینه اول در عمق‌های مختلف از پروفیل خاک اطلاعات رطوبت و شوری توسط کاربر تکمیل می‌شود و مدل برای بقیه عمق‌ها و بخش‌های خاک با استفاده از اطلاعات وارد شده میان‌یابی خواهد کرد. با انتخاب گزینه دوم نیز با توجه به همگن یا ناهمگن بودن خاک می‌توان یک یا چند لایه را انتخاب و ضخامت لایه، رطوبت حجمی خاک و میزان شوری خاک را وارد کرد. در این شکل می‌توان به منوی دوم یعنی منوی Initial crop development and production دسترسی یافت که در شکل ۹۳ نشان داده شده است. در این منو نیز اطلاعات شرایط اولیه گیاه مانند پوشش سبز، ماده خشک و عمق ریشه اولیه قرار دارد که این اطلاعات با توجه به موارد تکمیل شده در فایل گیاهی، در این بخش توسط مدل جایگذاری می‌شوند و نیازی به تغییر ندارند.

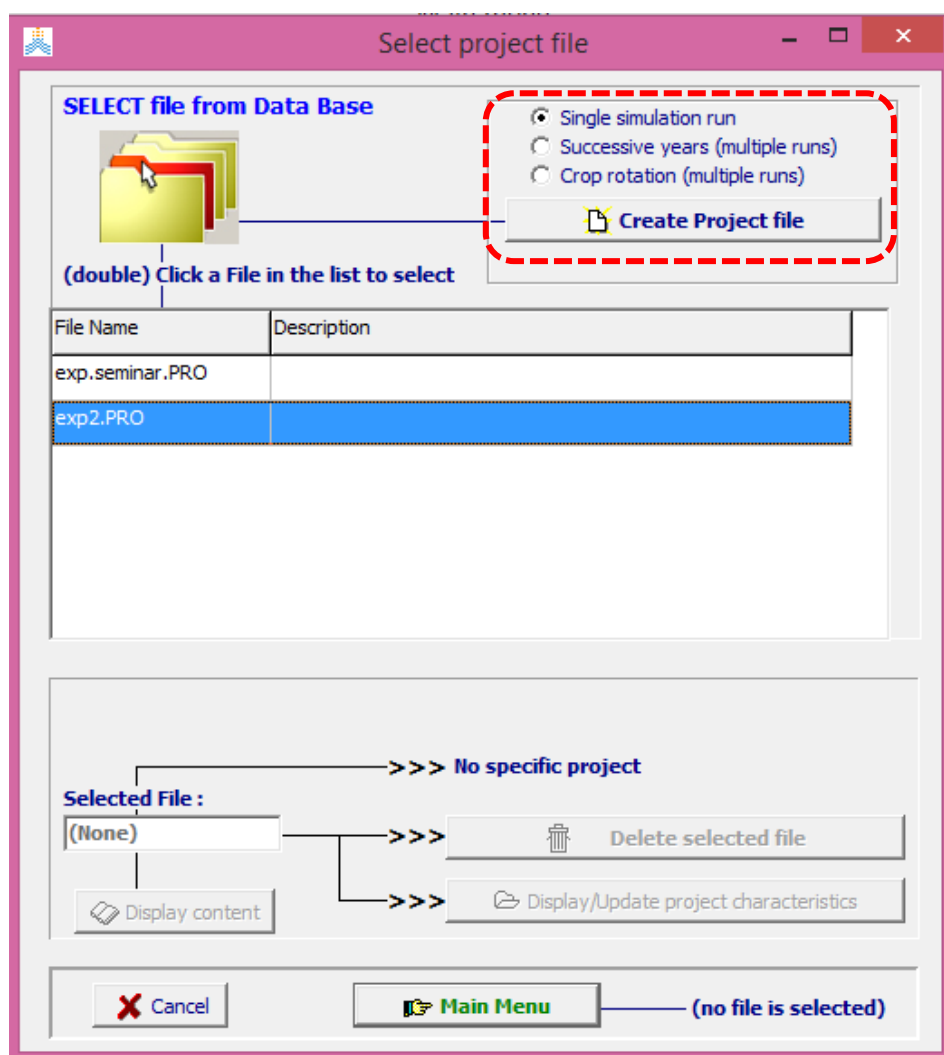


شکل ۹۳- بخش Simulation - پنجره ساخت فایل Initial conditions- منوی Initial crop development and production

۳-۳- طراحی پروژه مدیریت کشت گندم

برای دسترسی آسان‌تر به فایل‌های ورودی مربوط به کشت گیاه خاص در زمان و مکان مشخص، و جمع کردن تمام این فایل‌ها در یک فایل، مدل AquaCrop امکان استفاده از فایل پروژه را فراهم کرده است. به عبارت دیگر، کاربر می‌تواند تمام فایل‌های ورودی ساخته شده اعم از فایل گیاهی، آبیاری، مدیریت زراعی و... را در قالب یک فایل پروژه جمع‌بندی کند و در دفعات بعدی مراجعه به مدل، تنها با انتخاب فایل پروژه و بدون نیاز به انتخاب مجدد فایل‌های ورودی مدل را اجرا کند.

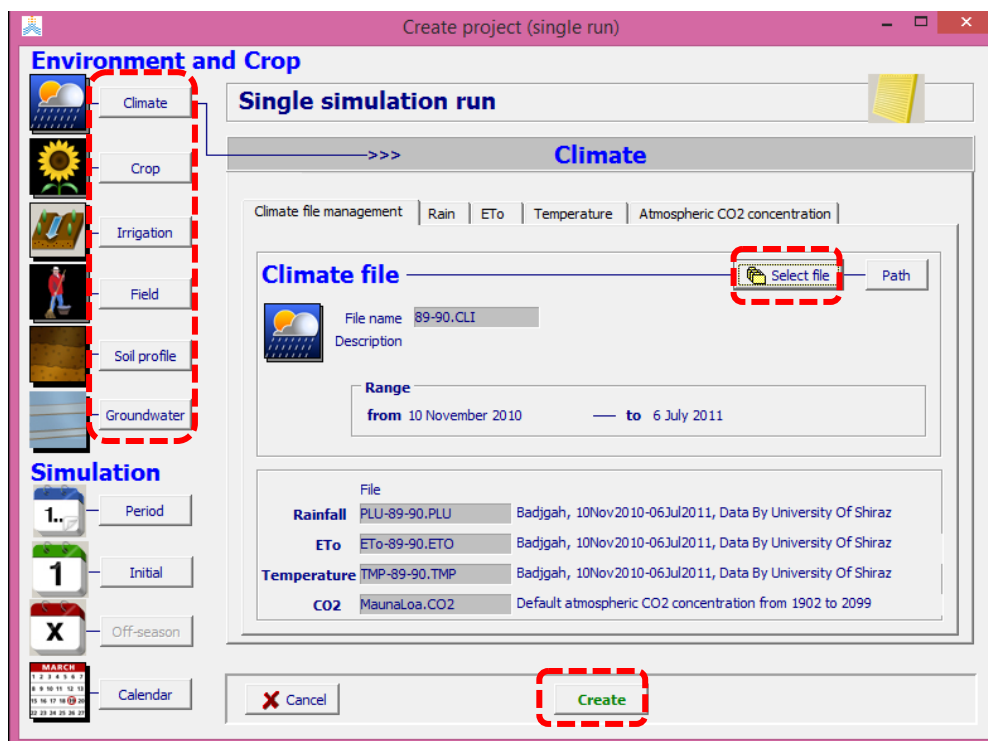
به منظور انتخاب یا ساخت فایل پروژه، کاربر باید در صفحه اصلی مدل که در شکل ۹۱ نشان داده شده است، روی Project کلیک کند تا به صفحه انتخاب یا ساخت فایل پروژه هدایت گردد که در شکل ۹۴ مشاهده می‌شود.



شکل ۹۴- بخش Simulation - پنجره انتخاب یا ساخت فایل Project

در شکل دیده می شود که در این پنجره اگر فایل پروژه از قبل ساخته شده باشد می توان یکی از فایل های موجود را از لیست انتخاب کرد و اگر نه باید فایل پروژه ساخته شود.

برای ساخت فایل پروژه باید یکی از گزینه های single simulation run، successive years (multiple runs) و crop rotation (multiple runs) انتخاب شود. گزینه اول در صورتی انتخاب می شود که فایل پروژه مربوط به یک سال کشت یک گیاه مشخص باشد. گزینه دوم مربوط به شرایطی است که یک گیاه در سال های مختلف کشت می شود و باید اطلاعات هواشناسی تمام سال ها به مدل داده شود. گزینه سوم نیز در صورتی انتخاب می شود که در یک سال دو یا چند گیاه کاشته شده باشد. در صورت انتخاب هر یک از این گزینه ها به ترتیب صفحات نشان داده شده در شکل های ۹۵ تا ۹۷ به کاربر نمایش داده می شود.

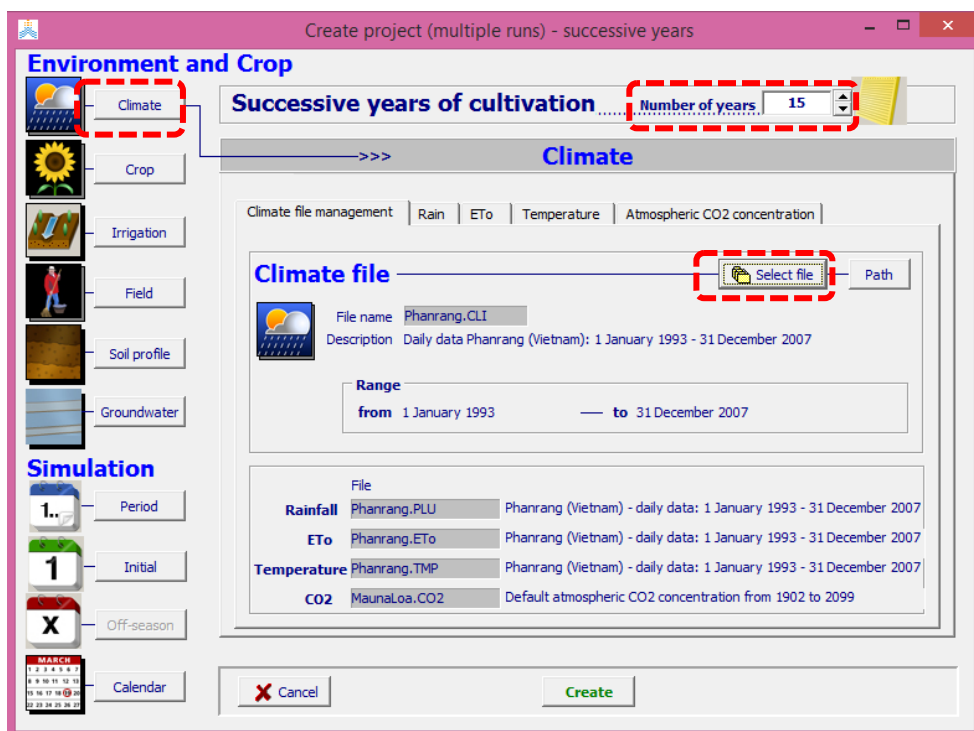


شکل ۹۵- پنجره ساخت فایل Project- حالت single simulation run

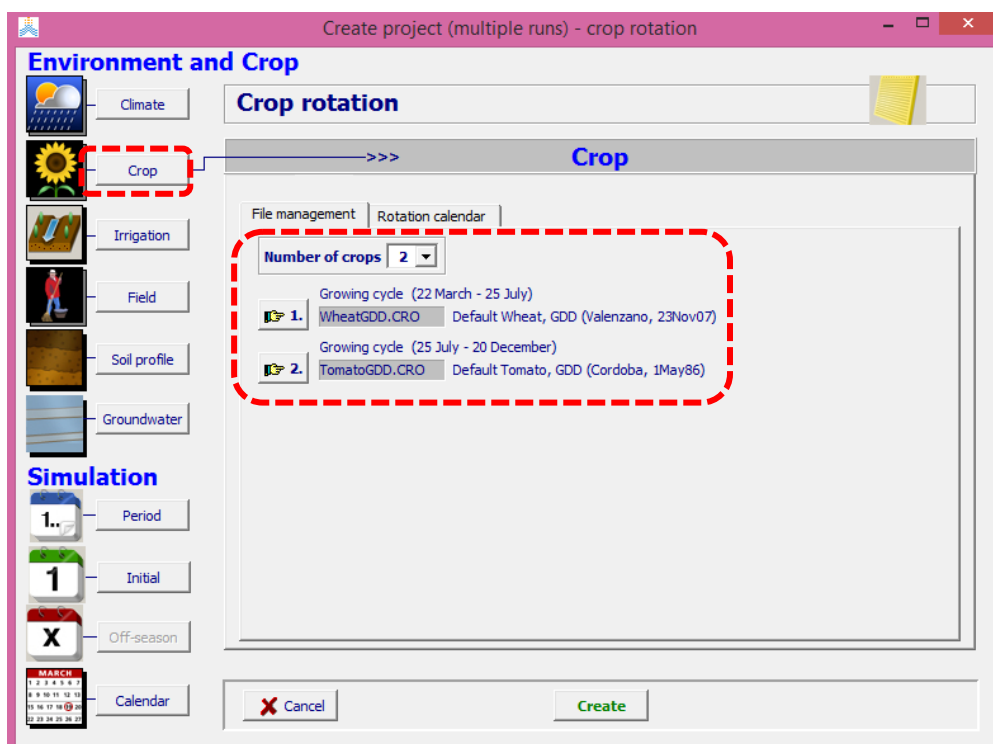
در شکل ۹۵ مشخص است که در این صفحه باید با کلیک کردن روی نام هر یک از فایل‌های ورودی مانند فایل گیاهی، آبیاری، مدیریت زراعی، پروفیل خاک و آب زیرزمینی در سمت چپ صفحه و سپس انتخاب فایل مربوط با استفاده از گزینه select file، تمام فایل‌های ورودی را جمع کرد و سپس با کلیک کردن روی create فایل پروژه مورد نظر خود را ساخت.

شکل ۹۶ نیز ساخت فایل پروژه را در حالت successive years (multiple runs) نشان می‌دهد. تفاوت این حالت با حالت قبل این است که باید تعداد سال‌ها توسط کاربر وارد شود و پس از آن فایل هواشناسی انتخاب گردد که داده‌های مربوط به تعداد سال‌های انتخاب شده را پوشش می‌دهد. بقیه فایل‌ها نیز مطابق آن چه در حالت قبل توضیح داده شد، انتخاب می‌شوند و فایل پروژه ساخته می‌شود.

در حالت crop rotation (multiple runs) که در شکل ۹۷ نشان داده شده است نیز انتخاب فایل‌ها مانند آنچه در حالت اول توضیح داده شد خواهد بود. تنها تفاوت این است که با توجه به کاشت دو یا چند گیاه در یک سال باید ابتدا تعداد گیاه تعیین شود و پس از آن فایل گیاهی مربوط به هر یک از گیاهان مورد نظر را انتخاب گردد.



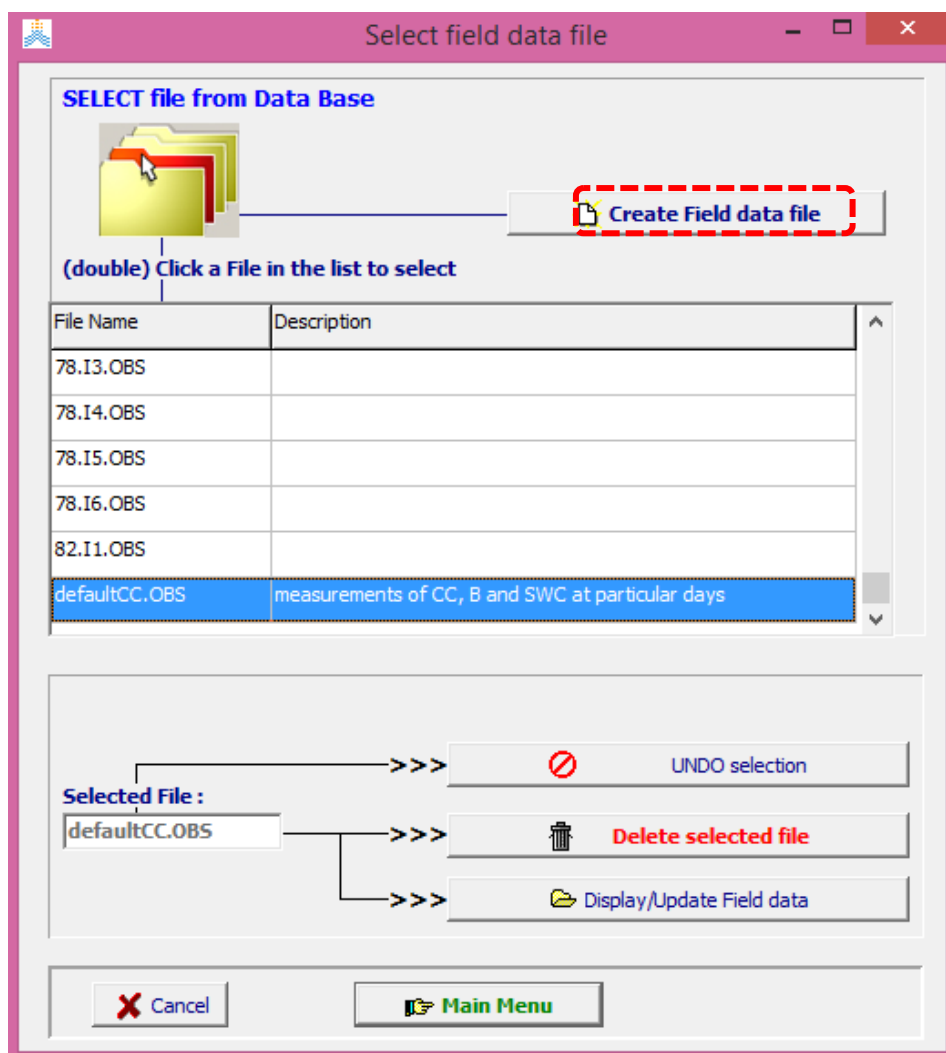
شکل ۹۶- پنجره ساخت فایل Project- حالت successive years (multiple runs)



شکل ۹۷- پنجره ساخت فایل Project- حالت crop rotation (multiple runs)

۳-۴- به کارگیری اطلاعات زراعی واقعی برای افزایش دقت شبیه‌سازی

آخرین قسمت از بخش Simulation مربوط به اطلاعات زراعی است که در مزرعه برداشت می‌شوند و ممکن است وارد کردن این اطلاعات به فرآیند شبیه‌سازی مدل و دریافت نتایج دقیق‌تر کمک کند. این اطلاعات شامل درصد سطح پوشش سبز، ماده خشک گیاهی و رطوبت خاک است. برای وارد کردن داده‌های زراعی گندم، اندازه‌گیری‌ها باید در طول فصل رشد و در نقاط نماینده مزرعه عملی شوند. درصد سطح پوشش سبز معمولاً با مشاهده چشمی یا با استفاده از عکس‌های مزرعه و تخمین درصد پوشش برگ‌ها نسبت به خاک تعیین می‌شود. ماده خشک گیاهی با نمونه‌برداری از گیاهان، خشک کردن در دمای حدود ۷۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت و سپس توزین محاسبه می‌شود. رطوبت خاک نیز با نمونه‌برداری از خاک در عمق ریشه و اندازه‌گیری با روش‌های سنتی یا با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری رطوبت خاک مانند نوترون‌متر تعیین می‌گردد. این داده‌ها به مدل کمک می‌کنند تا شرایط واقعی مزرعه و وضعیت رشد گندم را بهتر شبیه‌سازی کند. برای ورود به بخش اطلاعات زراعی باید روی Field data در صفحه اصلی مدل که در شکل ۸۹ نشان داده شده است کلیک شود. پس از آن به منظور انتخاب یا ساخت فایل اطلاعات زراعی، کاربر به صفحه نمایش داده شده در شکل ۹۸ هدایت می‌شود.



شکل ۹۸- پنجره ساخت فایل Field data

در این شکل نیز مانند سایر فایل‌ها، اگر از قبل فایل اطلاعات زراعی ساخته شده باشد می‌توان از لیست مربوطه یکی از فایل اطلاعات زراعی مد نظر خود را انتخاب کرد، و گر نه از طریق گزینه select field data file و سپس تکمیل اطلاعات در صفحه نشان داده شده در شکل ۹۹ فایل اطلاعات زراعی جدید را ساخت.

همان طور که در شکل مشخص است، یک نمونه از مقدار میانگین و انحراف معیار هر یک از داده‌های درصد سطح پوشش سبز، ماده خشک گیاهی و رطوبت خاک به همراه تاریخ و شماره روزی که داده‌های گندم در مزرعه برداشت شده است، در جدول موجود در شکل وارد می‌شود.

The screenshot shows the 'Field data' window with the following data table:

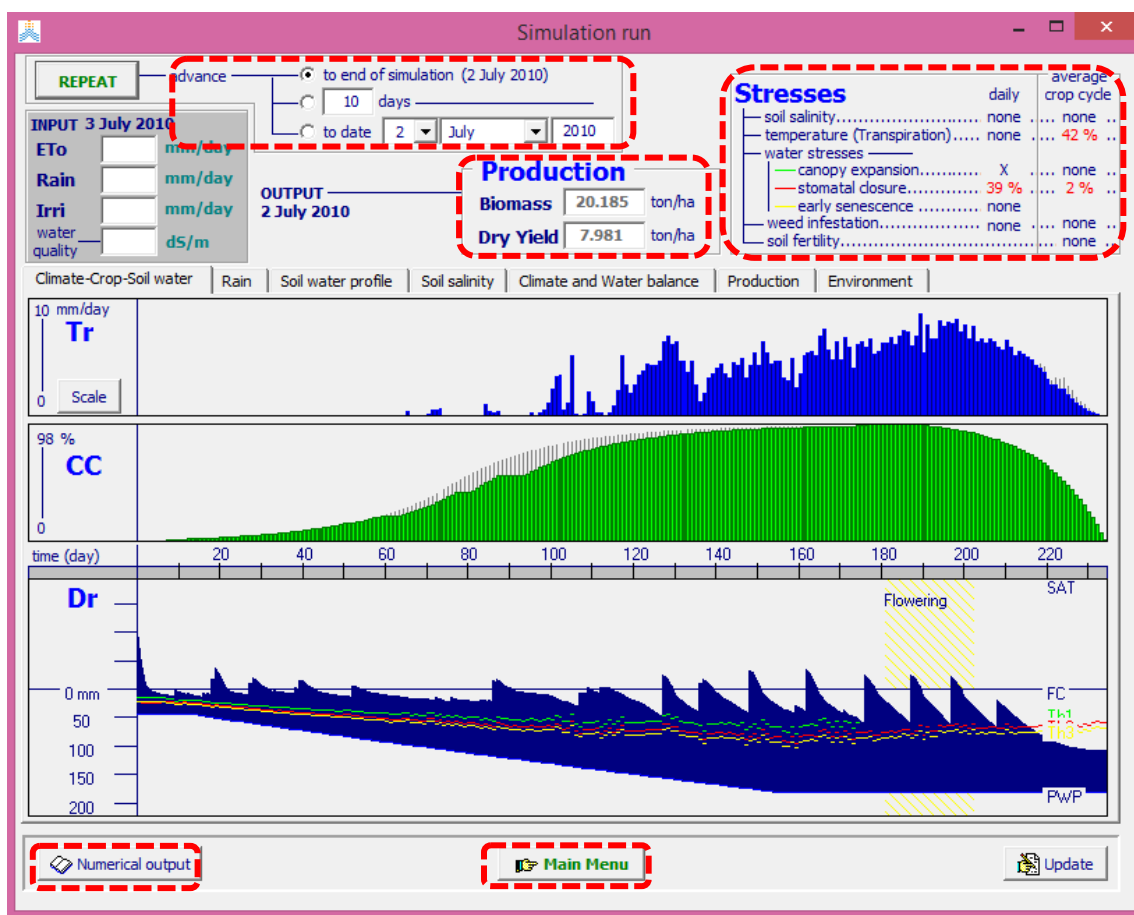
Nr	Date	day number	Green Canopy Cover (CC) [%]		dry above-ground Biomass (B) [ton/ha]		Soil water content (SWC) [mm water]	
			mean	st dev	mean	st dev	mean	st dev
1	1 April	11	5.0	3.0			300.0	20.0
2	20 April	30	30.0	5.0	1.000	0.300		
3	30 April	40	50.0				250.0	25.0
4	10 May	50	60.0	5.0				
5	1 June	72			4.000	0.200	150.0	30.0
6	19 June	90			4.400	0.300		
7	9 July	110	45.0	6.0	5.000	0.500	100.0	10.0
8	19 July	120			5.500	0.500	100.0	10.0

شکل ۹۹- پنجره ساخت فایل Field data- ورود اطلاعات

فصل چهارم

تحلیل نتایج شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی کشت گندم

پس از وارد کردن داده‌های ورودی و اجرای مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی کشت گندم، کاربر می‌تواند با مراجعه به بخش خروجی‌ها، نتایج شبیه‌سازی را بررسی کند. در فصل‌های پیشین گفته شد که با تکمیل اطلاعات ورودی و کلیک کردن روی گزینه Run در صفحه اصلی مدل، فرآیند شبیه‌سازی آغاز می‌شود. پس از چند ثانیه و اتمام شبیه‌سازی، کاربر به بخش خروجی‌ها هدایت می‌شود. این بخش به گونه‌ای طراحی شده که اطلاعات را به صورت ساده، جامع و دسته‌بندی شده ارائه دهد (شکل ۱۰۰).



شکل ۱۰۰ - صفحه خروجی‌های مدل

در بخش Stresses تمام تنش‌هایی نشان داده شده است که گیاه امکان مواجه شدن با آنها را در فصل رشد دارد. این تنش‌ها به ترتیب از این قرارند: تنش شوری (soil salinity)، تنش دمایی (Temperature)، تنش آبی (water stresses) که با توجه به اینکه در چه مرحله‌ای از رشد گیاه اتفاق افتد می‌تواند بر توسعه پوشش سبز (canopy expansion)، بسته شدن روزانه‌ها (stomatal closure) و پیری زودرس پوشش سبز (early senescence) اثر بگذارد، اثر علف‌های هرز (weed infestation) و اثر کمبود کود یا شرایط حاصل خیزی خاک (soil fertility). در این بخش اثر تنش‌های مختلف به دو صورت روزانه (daily) و میانگین در کل فصل رشد (average crop cycle) حسب درصد نشان داده می‌شود. به منظور درک بهتر فرآیند شبیه‌سازی مدل، در صفحه خروجی‌ها نوسان‌های مقادیر تعرق (Tr)، پوشش سبز (CC) و رطوبت خاک (Dr) نیز در سه شکل جداگانه نشان داده شده است.

همان‌طور که مشخص است، در این صفحه از بین پارامترهای خروجی فقط مقادیر ماده خشک و محصول دانه به صورت کمی نشان داده شده است. به منظور دستیابی به مقادیر تمام پارامترهای خروجی مدل باید از گزینه Numerical output استفاده شود که پس از کلیک بر روی آن کاربر به صفحه نشان داده شده در شکل ۱۰۱ هدایت می‌شود. در این صفحه، مقادیر تمام پارامترهای خروجی مدل در قالب جدول نشان داده شده است. ستون‌های اول تا پنجم جدول به ترتیب روز، ماه، سال، شماره روز بعد از کاشت و مرحله رشد گیاه هستند و از ستون ششم تا انتها پارامترهای خروجی مدل قرار داده شده‌اند. انتخاب نحوه نمایش پارامترهای خروجی به صورت روزانه، ده روزه، ماهانه و سالانه در بخش Time Aggregate برای کاربر امکان‌پذیر است که در شکل نیز نشان داده شده است.

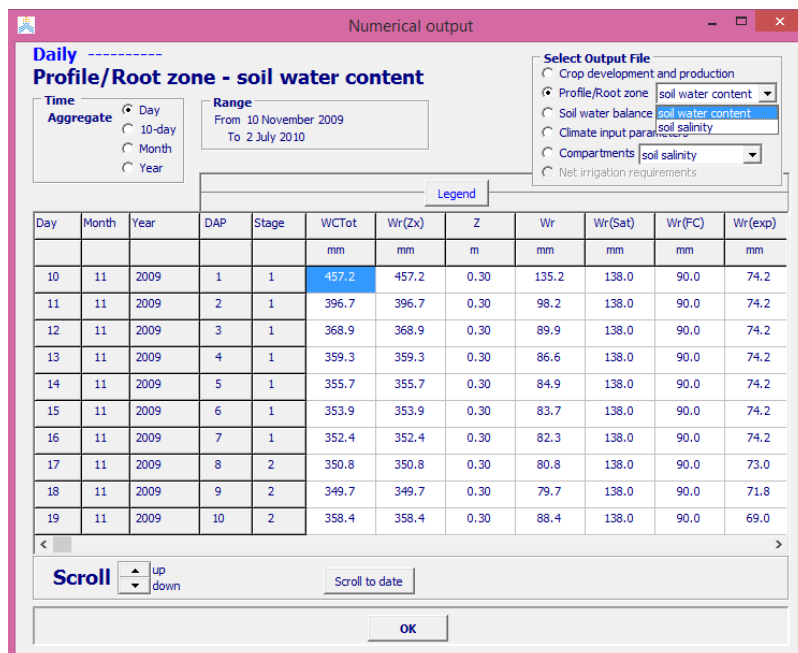
Day	Month	Year	DAP	Stage	Kc(Tr)	Trx	Tr	TrW	Tr/Trx	WP	Biomass
					-	mm	mm	mm	%	g/m2	ton/ha
10	11	2009	1	1		0.0	0.0	0.0	100	19.4	0.000
11	11	2009	2	1		0.0	0.0	0.0	100	19.4	0.000
12	11	2009	3	1		0.0	0.0	0.0	100	19.4	0.000
13	11	2009	4	1		0.0	0.0	0.0	100	19.4	0.000
14	11	2009	5	1		0.0	0.0	0.0	100	19.4	0.000
15	11	2009	6	1		0.0	0.0	0.0	100	19.4	0.000
16	11	2009	7	1		0.0	0.0	0.0	100	19.4	0.000
17	11	2009	8	2	0.04	0.2	0.2	0.2	100	19.4	0.008
18	11	2009	9	2	0.05	0.2	0.2	0.2	100	19.4	0.017
19	11	2009	10	2	0.05	0.1	0.1	0.1	100	19.4	0.024

شکل ۱۰۱- صفحه پارامترهای خروجی مدل - Crop development and production

مدل AquaCrop پارامترهای خروجی را به صورت دسته‌بندی شده ارائه می‌دهد. به همین دلیل در شکل ۱۰۱ یک بخش تحت عنوان انتخاب فایل خروجی (select output file) وجود دارد که کاربر می‌تواند فایل یا در واقع دسته خاصی از پارامترهای خروجی را انتخاب کند. به طور مثال در صورت انتخاب گزینه Crop development and production مانند آن چه در شکل نشان داده شده است، مقادیر پارامترهایی مانند تعرق، ماده خشک، محصول دانه و... نمایش داده می‌شود. در گزینه دوم یعنی Profile/Root zone شامل اطلاعات خروجی در دسته پروفیل خاک مانند مقدار آب خاک یا شوری خاک است؛ این گزینه خود دارای دو حالت soil salinity و soil water content است که در صورت انتخاب حالت اول اطلاعات خروجی مربوط به مقدار آب خاک مانند مقدار آب در عمق موثر ریشه و... را نمایش می‌دهد و در صورت انتخاب حالت دوم اطلاعات خروجی مربوط به مقدار شوری خاک را نشان می‌دهد مانند مقدار نمک زهکشی شده یا مقدار نمک صعود یافته به لایه‌های بالایی خاک از طریق صعود کاپیلاری و... .

گزینه سوم (soil water balance) شامل دسته‌ای از اطلاعات خارجی مرتبط با بیلان آب خاک مانند مقدار رواناب، نفوذ عمقی و... است و گزینه چهارم (climate input parameters) نیز بر خلاف بقیه موارد اطلاعات خروجی نیست و داده‌ها و اطلاعات ورودی هواشناسی را در بر

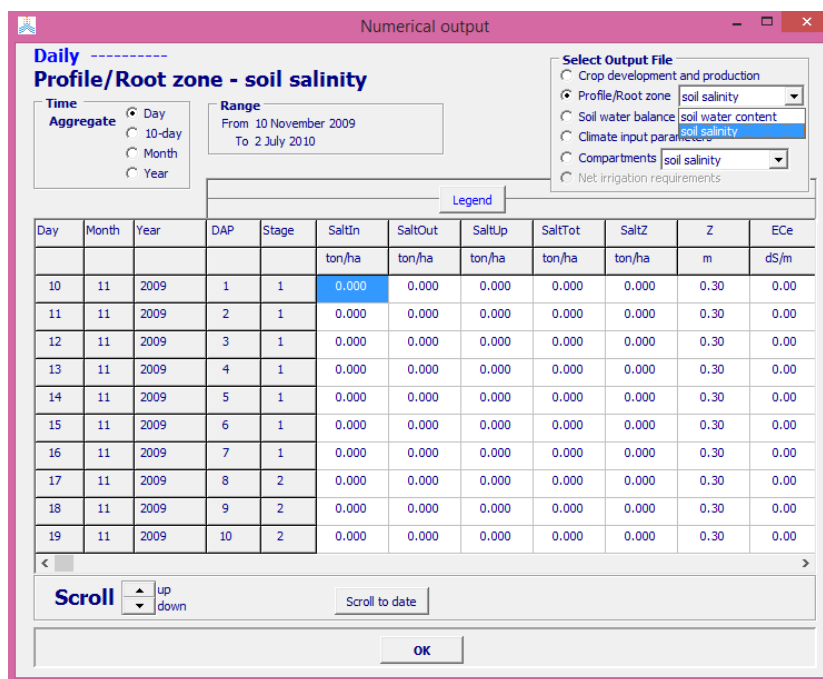
می‌گیرد. آخرین گزینه یعنی compartments نیز مانند Profile/Root zone دارای دو حالت soil salinity و soil water content است که با انتخاب حالت اول مقدار رطوبت خاک در لایه‌های مختلف خاک، و با انتخاب حالت دوم شوری خاک در لایه‌های مختلف نمایش داده می‌شود. صفحه خروجی‌های مدل مربوط کشت گندم با توجه به انتخاب هر یک از گزینه‌های توضیح داده شده، در شکل‌های ۱۰۲ تا ۱۰۷ نشان داده شده است. تمامی پارامترهای خروجی با توجه به دسته‌بندی مدل AquaCrop جداگانه در جدول‌های ۲ تا ۸ معرفی و توضیح داده شده‌اند.



The screenshot shows the 'Daily Profile/Root zone - soil water content' window. The 'Time' section is set to 'Aggregate' with 'Day' selected. The 'Range' is from 10 November 2009 to 2 July 2010. The 'Select Output File' section has 'Profile/Root zone' selected with 'soil water content'. The table below shows the profile data.

Day	Month	Year	DAP	Stage	WCTot	Wr(Zx)	Z	Wr	Wr(Sat)	Wr(FC)	Wr(exp)
					mm	mm	m	mm	mm	mm	mm
10	11	2009	1	1	457.2	457.2	0.30	135.2	138.0	90.0	74.2
11	11	2009	2	1	396.7	396.7	0.30	98.2	138.0	90.0	74.2
12	11	2009	3	1	368.9	368.9	0.30	89.9	138.0	90.0	74.2
13	11	2009	4	1	359.3	359.3	0.30	86.6	138.0	90.0	74.2
14	11	2009	5	1	355.7	355.7	0.30	84.9	138.0	90.0	74.2
15	11	2009	6	1	353.9	353.9	0.30	83.7	138.0	90.0	74.2
16	11	2009	7	1	352.4	352.4	0.30	82.3	138.0	90.0	74.2
17	11	2009	8	2	350.8	350.8	0.30	80.8	138.0	90.0	73.0
18	11	2009	9	2	349.7	349.7	0.30	79.7	138.0	90.0	71.8
19	11	2009	10	2	358.4	358.4	0.30	88.4	138.0	90.0	69.0

شکل ۱۰۲- صفحه خروجی‌های مدل – profile/Root zone (soil water content)



The screenshot shows the 'Daily Profile/Root zone - soil salinity' window. The 'Time' section is set to 'Aggregate' with 'Day' selected. The 'Range' is from 10 November 2009 to 2 July 2010. The 'Select Output File' section has 'Profile/Root zone' selected with 'soil salinity'. The table below shows the profile data.

Day	Month	Year	DAP	Stage	SaltIn	SaltOut	SaltUp	SaltTot	SaltZ	Z	ECe
					ton/ha	ton/ha	ton/ha	ton/ha	ton/ha	m	dS/m
10	11	2009	1	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.30	0.00
11	11	2009	2	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.30	0.00
12	11	2009	3	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.30	0.00
13	11	2009	4	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.30	0.00
14	11	2009	5	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.30	0.00
15	11	2009	6	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.30	0.00
16	11	2009	7	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.30	0.00
17	11	2009	8	2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.30	0.00
18	11	2009	9	2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.30	0.00
19	11	2009	10	2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.30	0.00

شکل ۱۰۳- صفحه خروجی‌های مدل – profile/Root zone (soil salinity)

Numerical output

Daily -----
Soil water balance

Time Aggregate: ☒ Day ☐ 10-day ☐ Month ☐ Year

Range: From 10 November 2009 To 2 July 2010

Select Output File:
☐ Crop development and production
☐ Profile/Root zone soil salinity
☒ Soil water balance
☐ Climate input parameters
☐ Compartments soil salinity
☐ Net irrigation requirements

Legend

Day	Month	Year	DAP	Stage	WCTot	Rain	Irrigation	Top Surface	Infiltrated	Run Off	Drained
					mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
10	11	2009	1	1	457.2	0.0	100.0	0.0	100.0	0.0	0.0
11	11	2009	2	1	396.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	57.8
12	11	2009	3	1	368.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.3
13	11	2009	4	1	359.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.9
14	11	2009	5	1	355.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3
15	11	2009	6	1	353.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7
16	11	2009	7	1	352.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
17	11	2009	8	2	350.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
18	11	2009	9	2	349.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	11	2009	10	2	358.4	10.5	0.0	0.0	10.5	0.0	0.0

Scroll: up down Scroll to date OK

شکل ۱۰۴ - صفحه خروجی‌های مدل - soil water balance

Numerical output

Daily -----
Climate input parameters

Time Aggregate: ☒ Day ☐ 10-day ☐ Month ☐ Year

Range: From 10 November 2009 To 2 July 2010

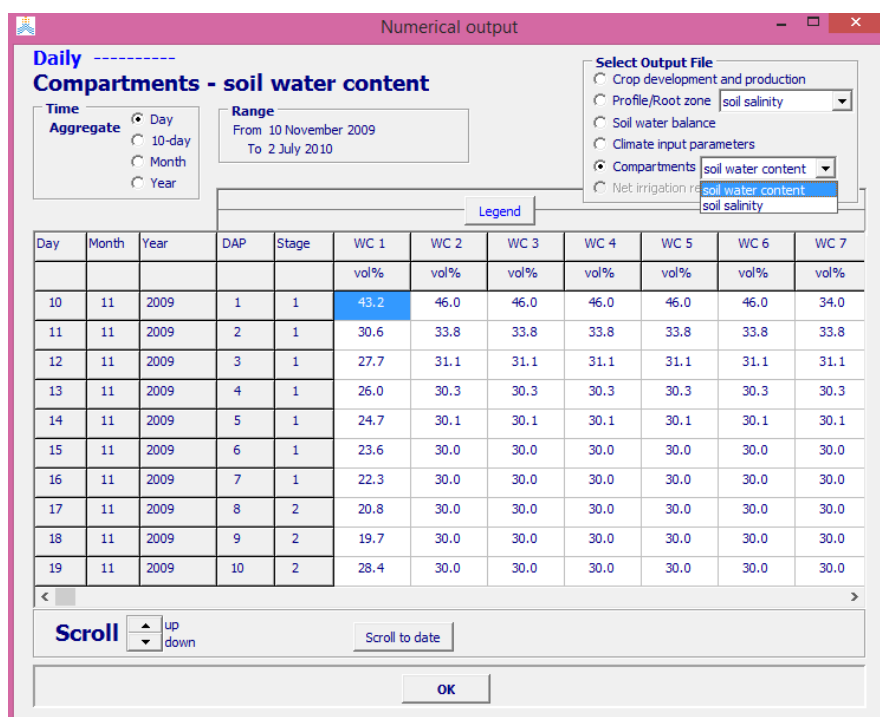
Select Output File:
☐ Crop development and production
☐ Profile/Root zone soil salinity
☐ Soil water balance
☒ Climate input parameters
☐ Compartments soil salinity
☐ Net irrigation requirements

Legend

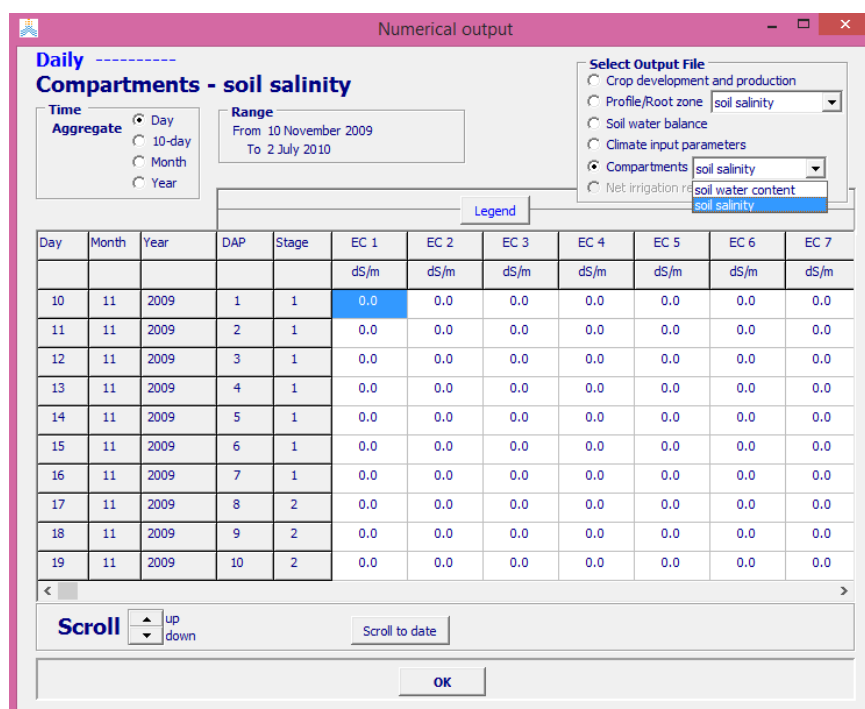
Day	Month	Year	DAP	Stage	Rain	ETo	Tmin	Tavg	Tmax	CO2
					mm	mm	°C	°C	°C	ppm
10	11	2009	1	1	0.0	2.9	1.0	11.3	21.5	388.7
11	11	2009	2	1	0.0	2.8	0.4	10.2	20.0	388.7
12	11	2009	3	1	0.0	2.4	0.0	9.5	19.0	388.7
13	11	2009	4	1	0.0	2.4	0.0	10.3	20.5	388.7
14	11	2009	5	1	0.0	2.4	-0.4	10.6	21.5	388.7
15	11	2009	6	1	0.0	2.3	0.0	11.0	22.0	388.7
16	11	2009	7	1	0.0	3.3	-0.2	12.4	25.0	388.7
17	11	2009	8	2	0.0	4.1	3.4	12.4	21.5	388.7
18	11	2009	9	2	0.0	3.3	12.0	14.8	17.5	388.7
19	11	2009	10	2	10.5	1.5	8.8	10.9	13.0	388.7

Scroll: up down Scroll to date OK

شکل ۱۰۵ - صفحه خروجی‌های مدل - Climate input parameters

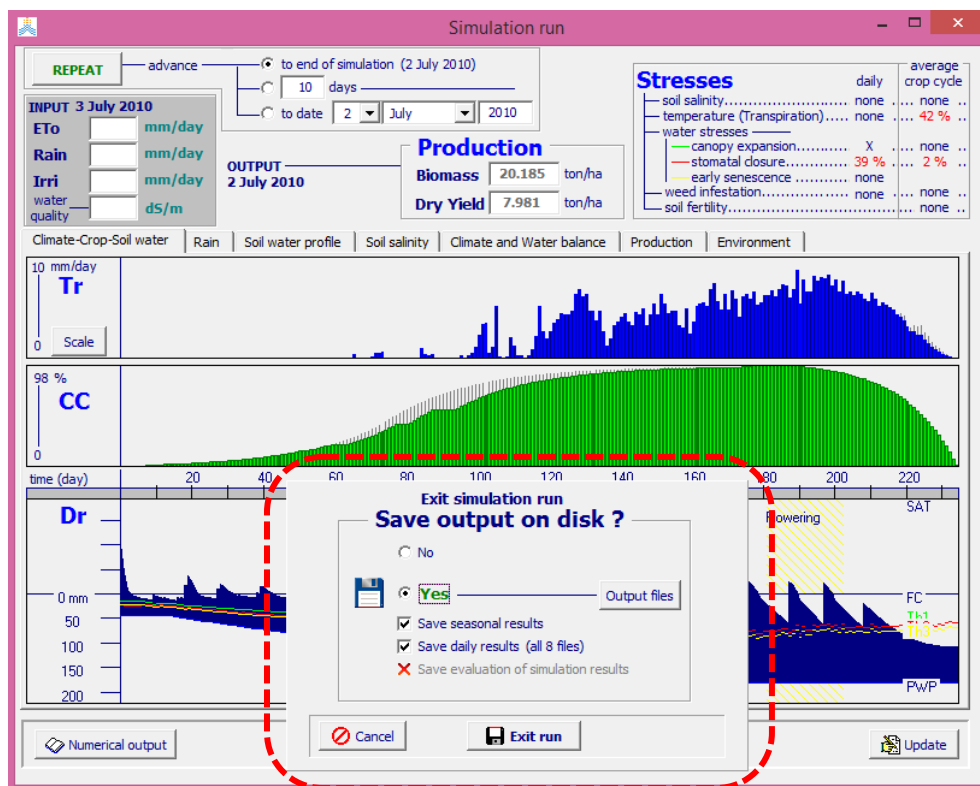


شکل ۱۰۶- صفحه خروجی‌های مدل – Compartments (soil water contents)



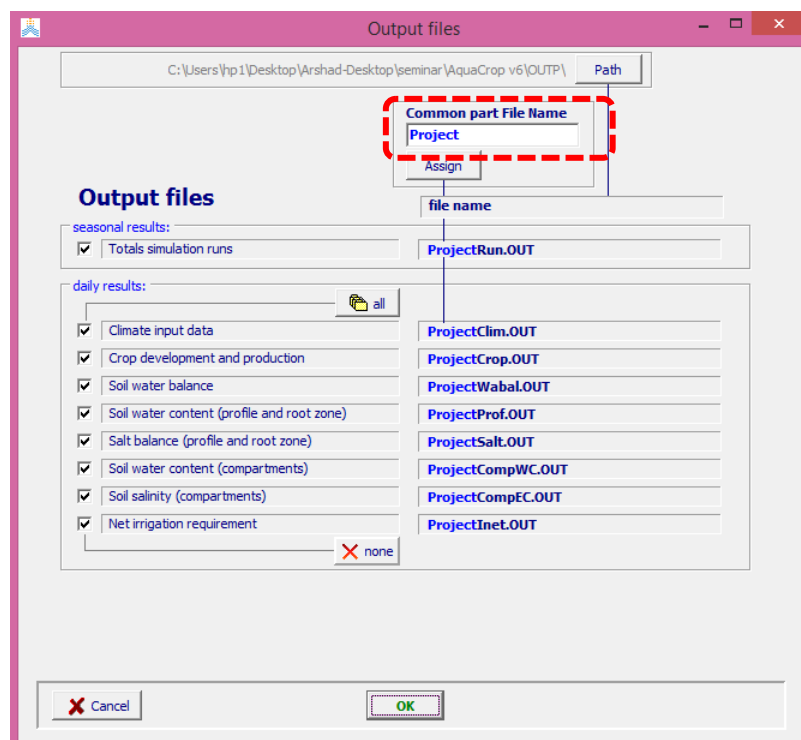
شکل ۱۰۷- صفحه خروجی‌های مدل – Compartments (soil salinity)

در شکل‌های بالا، تنها امکان مشاهده مقادیر پارامترهای خروجی وجود دارد، امکان دانلود یا دریافت اطلاعات به صورت فایل وجود ندارد. برای ذخیره‌کردن و دریافت اطلاعات به صورت فایل، بعد از برگشت به صفحه اصلی خروجی‌های مدل که در شکل ۱۰۰ نشان داده شده است، با کلیک کردن روی Main Menu در آن صفحه، یک پنجره جدید باز می‌شود که در شکل ۱۰۸ قابل مشاهده است.



شکل ۱۰۸- صفحه خروجی‌های مدل - پنجره ذخیره اطلاعات خروجی

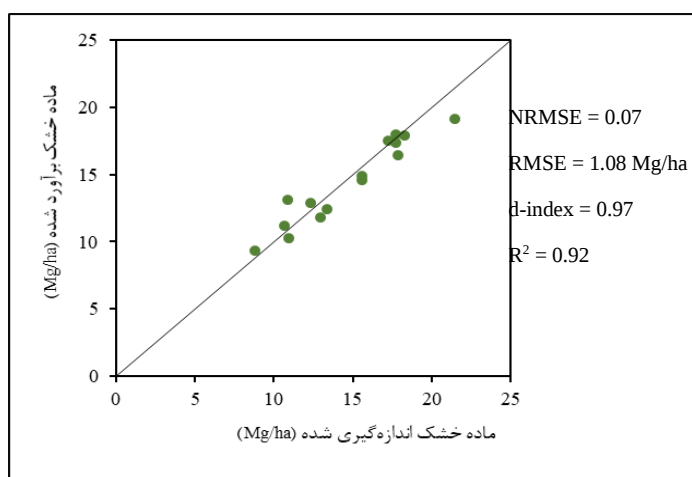
در پنجره جدید، کاربر با انتخاب گزینه Yes و سپس کلیک کردن روی گزینه Output files وارد صفحه نشان داده شده در شکل ۱۰۹ می‌شود.



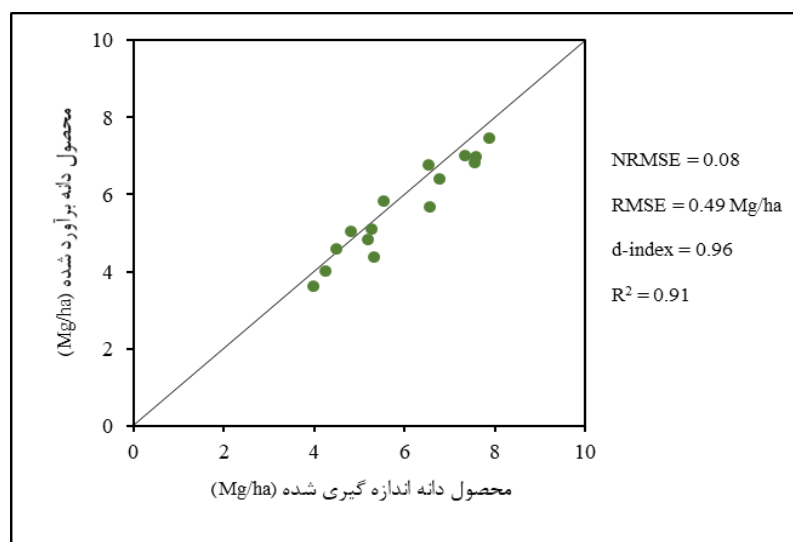
شکل ۱۰۹- صفحه انتخاب و ذخیره‌کردن فایل‌های خروجی مدل

در این صفحه باید در بخش Common Part File Name یک نام دلخواه برای فایل‌های خروجی انتخاب شود. امکان انتخاب هر یک از گزینه‌ها برای دریافت اطلاعات خروجی مطابق با توضیحات داده شده نیز وجود دارد. در شکل مشاهده می‌شود تمام گزینه‌ها به صورت پیش‌فرض انتخاب شده هستند و با کلیک کردن روی OK تمام فایل‌ها همراه با مقادیر پارامترهای خروجی با نام Project ذخیره خواهند شد. گفتنی است فایل‌های خروجی در واقع فایل‌های متنی هستند که در پوشه Output موجود در پوشه اصلی مدل قرار می‌گیرند.

نتایج اجرای مدل برای کشت گندم در سال ۱۴۰۱ در شکل‌های ۱۱۰ و ۱۱۱ نشان داده شده است. در این شکل‌ها مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده ماده خشک و محصول دانه گندم مقایسه شده است. نتیجه این مقایسه و مقادیر شاخص‌های آماری نشان دهنده کارایی خوب مدل در برآورد ماده خشک و محصول دانه گندم است. مقادیر شاخص آماری NRMSE در بازه صفر تا ۰/۱ به معنی دقت عالی مدل است. مقدار این شاخص برای برآورد ماده خشک و محصول دانه گندم به ترتیب برابر با ۰/۰۷ و ۰/۰۸ است که می‌توان نتیجه گرفت دقت مدل در برآورد محصول گندم بالا است. مقدار شاخص RMSE نیز نشان می‌دهد در برآورد ماده خشک و محصول دانه گندم مدل به ترتیب ۱/۰۸ و ۰/۴۹ تن در هکتار خطا داشته است. مقادیر نزدیک به ۱ شاخص‌های d و R^2 نیز تاییدی هستند بر صحت کار مدل. بنابراین، به طور کلی مدل AquaCrop در صورت کالیبره‌شدن صحیح می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد برای پیش‌بینی محصول گندم به کار رود.



شکل ۱۱۰- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده ماده خشک گندم توسط مدل



شکل ۱۱۱- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده محصول دانه گندم توسط مدل

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و توصیه‌های کاربردی

تمام مراحل کاشت و دوره رشد محصولات زراعی از جمله گندم، با تصمیم‌گیری‌های متعددی همراه است. از انتخاب زمان مناسب برای کاشت گرفته تا برنامه‌ریزی برای آبیاری‌های دوره‌ای و پیش‌بینی اثر تغییرات بارندگی بر عملکرد محصول، همگی نیاز به تجربه، بررسی و تصمیم‌گیری‌های دقیق دارند. علاوه بر این، شرایطی مانند کیفیت آب آبیاری یا تغییرات اقلیمی می‌توانند نتایج تولید را تحت تأثیر قرار دهند. این تصمیم‌گیری‌ها به دلیل تنوع شرایط خاک و آب و هوا از سالی به سال دیگر پیچیده‌تر می‌شوند و هرچند تجربه کشاورزان نقشی ارزشمند در مدیریت مزرعه دارد، اما گاهی ممکن است به تنهایی نتواند پاسخگوی همه این تغییرات باشد. در چنین شرایطی، استفاده از ابزارهایی مانند مدل AquaCrop می‌تواند راهنمایی بسیار مؤثر برای کشاورزان و مشاوران آنها باشد. این مدل با استفاده از اطلاعات ساده‌ای مانند نوع خاک، میزان بارندگی، تاریخ کاشت و برنامه آبیاری می‌تواند رشد گیاه و عملکرد نهایی گندم را پیش‌بینی کند و به تصمیم‌گیری‌های مهم جهت دهد.

با توجه به توضیحات پیشین، مدل AquaCrop در بسیاری از زمینه‌ها مانند مدیریت آبیاری، زراعی، اطلاعات گیاه، هواشناسی، اثر تنش‌های محیطی و... می‌تواند به کار گرفته شود. یکی از مهم‌ترین کاربردهای این مدل در زمینه مدیریت آبیاری است. آب حیاتی‌ترین نهاده برای کشت گندم است و محدودیت منابع آبی بزرگ‌ترین چالش کشاورزی در کشور ما به شمار می‌رود. مدل این امکان را فراهم می‌کند که کشاورز مقدار کاهش محصول تولیدی را به ازای کاهش مقدار مشخص عمق آبیاری بررسی کند، امکان بررسی شدت اثرهای منفی ناشی از کاهش عمق آبیاری در هر مرحله از رشد گیاه نیز وجود دارد. برای نمونه، مدل نشان می‌دهد که اگر در دوره گل‌دهی یا پر شدن دانه آب کافی در اختیار گیاه نباشد، کاهش عملکرد بسیار شدید خواهد بود. در مقابل، کم‌آبی در مراحل ابتدایی رشد ممکن است خسارت کمتری وارد کند. این آگاهی باعث می‌شود تا کشاورز بتواند آبیاری خود را اولویت‌بندی کند و در شرایط کم‌آبی با کمترین خسارت، بیشترین محصول ممکن را برداشت کند.

اما تنها کمبود آب نیست که محصول گندم را تهدید می‌کند. مسائل دیگر مانند دمای بالا در فصل گرما نیز می‌تواند خسارت‌های زیادی به همراه داشته باشد. وقتی گرمای شدید در دوره گل‌دهی رخ می‌دهد، عملکرد پایین می‌آید. مدل AquaCrop می‌تواند چنین شرایطی را شبیه‌سازی کند و نشان دهد اگر دمای هوا در یک سال خاص بالاتر از حد معمول برود، چه میزان از عملکرد از دست خواهد رفت. این موضوع به کشاورز کمک می‌کند تا تاریخ کاشت خود را طوری تنظیم کند که مراحل حساس رشد گندم با دوره‌های گرمای شدید تداخل نداشته باشد. درست به همین شکل، سرمازدگی نیز می‌تواند یکی از خطرهای جدی در مراحل ابتدایی رشد یا زمان گل‌دهی باشد. مدل این امکان را می‌دهد تا با تغییر فرضی تاریخ کاشت، بررسی شود در چه زمانی احتمال سرمازدگی کمتر خواهد بود و کدام برنامه کاشت بهترین نتیجه را به همراه دارد.

موضوع دیگر، نوع خاک و ویژگی‌های آن است. خاک‌های سبک مثل خاک شنی خیلی سریع خشک می‌شوند، در حالی که خاک‌های سنگین مثل رسی آب را بیشتر در خود نگه می‌دارند. اما پیش‌بینی دقیق اثر تفاوت در بافت خاک بر زمان‌بندی آبیاری ممکن است بدون محاسبات هیدرولوژیکی دشوار باشد. مدل AquaCrop با در نظر گرفتن ویژگی‌های خاک، به‌طور دقیق نشان می‌دهد که مزرعه چه زمانی دچار کمبود رطوبت خواهد شد. این اطلاعات به کشاورز کمک می‌کند تا برنامه آبیاری را متناسب با خاک مزرعه طراحی کند.

مدیریت بذر و تراکم کاشت نیز از دیگر موارد در تصمیم‌گیری‌های مهم کشاورزی است. کاشت گندم با تراکم بذر مناسب و بهینه، موجب برداشت حداکثر مقدار محصول خواهد شد. تراکم بذر بیش از حد، باعث رقابت گیاهان برای آب و مواد غذایی می‌شود و عملکرد نهایی کاهش می‌یابد. برعکس، اگر تراکم خیلی کم باشد، سطح مزرعه به‌خوبی پوشش داده نمی‌شود و بهره‌وری آب پایین خواهد آمد. مدل AquaCrop این امکان را فراهم می‌کند تا سناریوهای مختلف برای تراکم بذر و فاصله‌های مختلف برای ردیف‌ها در کاشت گندم بررسی شود و سپس بهترین تراکم از بین سناریوهای مورد نظر انتخاب گردد و در عمل به کار برده شود، زیرا مدل نشان می‌دهد که در نهایت کدام تراکم بهترین بازده را خواهد داشت.

کیفیت آب آبیاری هم یکی دیگر از چالش‌های کشاورزی امروز است. در بسیاری از مناطق، شوری آب رو به افزایش است و همین موضوع باعث کاهش عملکرد محصول می‌شود. مدل AquaCrop اثر شوری آب را در نظر می‌گیرد و نشان می‌دهد اگر با آب شور در مراحل مختلف آبیاری شود چه میزان کاهش عملکرد رخ خواهد داد. برای مثال، کشاورز می‌تواند تصمیم بگیرد که در مراحل حساس مانند گل‌دهی، از آب شیرین‌تر یا مخلوط آب با کیفیت بهتر استفاده کند تا خسارت ناشی از شوری به حداقل برسد. دیگر سناریوها مانند آبیاری متناوب، آبیاری با پساب و... نیز می‌توانند پیش از پیاده‌سازی، با استفاده از مدل بررسی گردد تا بهترین مورد انتخاب شود. این موضوع به دلیل افزایش سطح اطمینان از سناریوی آبیاری مورد نظر، در کاهش هزینه‌ها به شدت موثر خواهد بود.

از سوی دیگر، شرایط آب‌وهوایی در تغییر است. با استفاده از مدل AquaCrop می‌توان سناریوهای مختلف تغییر اقلیم را بررسی یا شرایط سال‌های متفاوت را شبیه‌سازی کرد. این کار به کشاورزان و مشاوران آنها کمک می‌کند تا برای هر سناریو برنامه‌ای آماده داشته باشند. اگر سالی کم‌بارش باشد، کشاورزان از قبل می‌دانند که چه راه‌هایی باید در پیش بگیرند و اگر سال پر بارش باشد، چگونه می‌توانند بهترین بهره‌برداری را داشته باشند.

افزون بر این عوامل اصلی، مدل AquaCrop برخی جنبه‌های مدیریتی دیگر را نیز در مزرعه به صورت کیفی در نظر می‌گیرد. برای نمونه، استفاده از مالچ روی خاک که بسیاری از کشاورزان برای حفظ رطوبت و کاهش تبخیر به کار می‌برند، در مدل به‌عنوان یکی از جنبه‌های مدیریت زراعی برای صرفه‌جویی در مصرف آب، به صورت کیفی بر شبیه‌سازی ماده خشک و محصول دانه گندم اعمال می‌شود. حضور علف‌های هرز که رقیب مستقیم گندم در استفاده از آب و مواد غذایی هستند، می‌تواند در مدل لحاظ شود و نشان دهد که اگر با علف‌های هرز به‌خوبی مبارزه نشود، چه مقدار از عملکرد محصول کاهش خواهد یافت. در زمینه کوددهی نیز AquaCrop به صورت کیفی اثر کم‌بودن یا کافی‌بودن تغذیه گیاه را بر رشد و عملکرد نشان می‌دهد. کشاورز می‌تواند بررسی کند اگر کوددهی کمتر از حد نیاز باشد، عملکرد تا چه حد کاهش می‌یابد. حتی موضوع شوری خاک که در بسیاری از مناطق مشکل جدی به شمار می‌آید، در این مدل به صورت کیفی دیده شده است و نشان می‌دهد که با افزایش شوری، توان گیاه برای جذب آب کاهش می‌یابد و عملکرد محصول پایین می‌آید. بدین ترتیب، کشاورزان و مشاوران آنها می‌توانند ترکیبی از این شرایط را نیز شبیه‌سازی و راهکارهای بهتری برای مدیریت مزرعه طراحی کنند.

باید گفت AquaCrop به کشاورزان و مشاوران آنها این امکان را می‌دهد که روش‌های مختلف مدیریتی را با هم مقایسه کنند. مثلاً کشت در تاریخ‌های مختلف، استفاده از آبیاری سطحی در برابر آبیاری قطره‌ای، یا مصرف بیشتر و کمتر کود، همه در مدل قابل شبیه‌سازی هستند. کشاورز پیش از آنکه هزینه زیادی صرف تغییر روش‌ها کند، می‌تواند با استفاده از مدل متوجه شود کدام گزینه نتیجه‌ای بهتر خواهد داد. به همین دلیل توصیه می‌شود کشاورزان و مشاوران آنها پیش از آغاز فصل کشت گندم (یا دیگر محصولات)، زمانی را صرف استفاده از این مدل کنند و با شبیه‌سازی شرایط گوناگون مانند برنامه‌ها و سیستم‌های آبیاری، انتخاب نوع خاک، تاریخ‌های متفاوت کاشت، مقدار آب آبیاری و کیفیت آن و حتی مدیریت کوددهی و مبارزه با علف‌های هرز بهترین سناریو را برای مزرعه خود بیابند. بهره‌گیری از نتایج این مدل راه را برای تصمیم‌گیری‌های دقیق‌تر و علمی‌تر باز می‌کند و کمک خواهد کرد عملیات زراعی و آبیاری با برنامه‌ریزی بهتر پیش رود. ترکیب تجربه عملی کشاورزان با توصیه‌های علمی حاصل از AquaCrop نه تنها باعث افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها خواهد شد، بلکه آینده‌ای پایدارتر برای کشاورزی رقم می‌زند.

در این دستورالعمل اگر چه تمرکز اصلی بر کشت گندم بود، اما باید توجه داشت که مدل AquaCrop برای طیف گسترده‌ای از محصولات زراعی مانند ذرت، برنج، جو، پنبه یا حتی گیاهان علوفه‌ای قابل استفاده است. همین ویژگی، این مدل را به ابزاری ارزشمند برای مدیریت زراعی و آبیاری در محصولات مختلف تبدیل کرده است. بنابراین تجربه و مهارتی که کشاورزان و مشاوران آنها در کار با این مدل در زمینه گندم به دست می‌آورند به راحتی می‌تواند در مدیریت زراعی و آبیاری دیگر محصولات نیز با اعمال شرایط خاص گیاهی مربوط برای محصول مورد نظر، به کار رود و به بهبود بهره‌وری منابع آب و سایر نهاده‌ها در مقیاس وسیع‌تر کمک کند.

پیوست ۱

ورودی‌های مدل AquaCrop

جدول ۱- پارامترهای ورودی مدل AquaCrop

شماره	پارامتر ورودی	نام انگلیسی یا علامت اختصاری	واحد	مقادیر کالیبره شده برای گندم در منطقه مورد مطالعه
هواشناسی				
۱	بارندگی روزانه	Rain	mm/day	به صورت روزانه در فایل هواشناسی
۲	تبخیر-تعرق مرجع	Eto	mm/day	به صورت روزانه در فایل هواشناسی
۳	حداقل دما	Tmin	°C	به صورت روزانه در فایل هواشناسی
۴	حداکثر دما	Tmax	°C	به صورت روزانه در فایل هواشناسی
۵	غلظت کربن دی اکسید	CO ₂	ppm	به صورت روزانه در فایل هواشناسی
گیاه				
۶	تاریخ کاشت	cycle Start growing	-	۲۰ آبان
۷	درصد پوشیدگی سطح خاک با گیاه در مرحله جوانه زنی	CC ₀	%	۲/۲۵
۸	درصد پوشیدگی سطح خاک با گیاه در مرحله حداکثر پوشش گیاهی	CC _x	%	۹۸
۹	ضریب نشان دهنده درصد توسعه پوشش گیاهی در هر روز	CGC	%/day	۴/۴
۱۰	ضریب نشان دهنده درصد کاهش پوشش گیاهی در هر روز	CDC	%/day	۶/۶
۱۱	تعداد بوته در هکتار	Numner of plants per hectare	plants/ha	۱۵۰۰۰۰
۱۲	تعداد روز از زمان کاشت تا جوانه زنی	from day 1 after sowing to emergence	days	۷
۱۳	تعداد روز از زمان کاشت تا رسیدن فیزیولوژیکی	from day 1 after sowing to maturity	days	۲۳۵
۱۴	تعداد روز از زمان کاشت تا شروع مرحله پیری	from day 1 after sowing to senescence	days	۱۹۰
۱۵	تعداد روز از زمان کاشت تا گلدهی	from day 1 after sowing to flowering	days	۱۸۰
۱۶	طول دوره گلدهی	duration of flowering	days	۲۲
۱۷	حداقل عمق موثر ریشه	Z _n	m	۰/۳
۱۸	حداکثر عمق موثر ریشه	Z _x	m	۱/۲
۱۹	ضریب شکل نشان دهنده وضعیت توسعه ریشه	shape factor	-	۱/۱
۲۰	حداکثر ضریب گیاهی در مرحله رسیدن به پوشش گیاهی کامل	KC _{Tr}	-	۱/۱

ادامه جدول ۱- پارامترهای ورودی مدل AquaCrop

۰/۱۵	%/day	Reduction with age	درصد روزانه کاهش حداکثر ضریب گیاهی با افزایش سن گیاه	۲۱
۵۰	%	Effect of canopy shelter in late season	ضریب کاهش دهنده تبخیر با توجه به اثر سایه انداز گیاه	۲۲
۰/۰۳۲	m3/m3.day	Sx (top 1/4)	حداکثر جذب ریشه در یک چهارم بالایی خاک	۲۳
۰/۰۰۸	m3/m3.day	Sx (bottom 1/4)	حداکثر جذب ریشه در یک چهارم پایینی خاک	۲۴
۱۸/۵	gr/m2	WP*	بهره‌وری آب نرمال شده	۲۵
۸۵	%	Adjustment for yield formation	ضریب اصلاح بهره‌وری آب نرمال شده در مرحله تولید دانه	۲۶
۵۰	%	Performance under elevated CO ₂	ضریب اصلاح بهره‌وری آب نرمال شده در صورت افزایش غلظت CO ₂	۲۷
۳۹	%	Harvest index	شاخص برداشت	۲۸
۱۵	%	Allowable maximum increase of specified HI	حداکثر مقدار مجاز افزایش شاخص برداشت در کل دوره رشد	۲۹
small	%	Possible increase of HI due to water stress before flowering	مقدار مجاز افزایش شاخص برداشت در اثر تنش آبی پیش از گلدهی	۳۰
small	-	Positive effect on HI as a result of water stress affecting leaf expansion	اثر مثبت تنش آبی و محدودیت توسعه پوشش گیاهی بر شاخص برداشت	۳۱
very strong	-	Negative effect on HI as a result of water stress inducing stomatal closure	اثر منفی تنش آبی و بسته شدن روزنه‌ها بر شاخص برداشت	۳۲
۰/۳۵	-	P _{exp,upper}	آستانه بالای تقلیل آب خاک برای توسعه پوشش گیاهی	۳۳
۰/۶۵	-	P _{exp,lower}	آستانه پایین تقلیل آب خاک برای توسعه پوشش گیاهی	۳۴
Linear	-	shape factor - exp	ضریب شکل تغییرات منحنی تنش آبی-رطوبت خاک در توسعه پوشش گیاهی	۳۵
۰/۴۵	-	P _{sto,upper}	آستانه بالای تقلیل آب خاک برای بسته شدن روزنه‌ها	۳۶
Linear	-	shape factor - sto	ضریب شکل تغییرات منحنی تنش آبی-رطوبت خاک در بسته شدن روزنه‌ها	۳۷
۰/۶۵	-	P _{sen,upper}	آستانه بالای تقلیل آب خاک برای پیری گیاه	۳۸
Linear	-	shape factor - sen	ضریب شکل تغییرات منحنی تنش آبی-رطوبت خاک در پیری گیاه	۳۹
۵	%	Saturation	رطوبت اشباع خاک در حالت ماندابی	۴۰
۳	°C	Base Temperature	دمای حد پایه	۴۱
۲۶	°C	Upper Temperature	دمای حد بالا	۴۲

ادامه جدول ۱- پارامترهای ورودی مدل AquaCrop

۴۳	درجه روز لازم برای تعرق گیاه	GDD range for crop transpiration	°C-day	۱۱/۵
۴۴	حداقل دمایی که در دماهای کمتر از آن گرده‌افشانی مختل می‌شود	Minimum air temperature below which pollination starts to fail	°C	۸
۴۵	حداکثر دمایی که در دماهای بیشتر از آن گرده‌افشانی مختل می‌شود	Maximum air temperature above which pollination starts to fail	°C	۴۰
۴۶	حد پایین آستانه تحمل گیاه در برابر شوری	ECe threshold - lower	ds/m	۲
۴۷	حد بالای آستانه تحمل گیاه در برابر شوری	ECe threshold - upper	ds/m	۱۲
آبیاری				
۴۸	عمق آب در دسترس ریشه گیاه	RAW	%	۶۰
۴۹	درصد سطح خیس شده خاک در اثر آبیاری	Percentage of soil surface wetted	%	۸۰
۵۰	شوری آب آبیاری	EC _w	ds/m	۰
عملیات زراعی				
۵۱	وضعیت حاصلخیزی خاک از نظر کوددهی	Soil fertility	%	۱۰۰
۵۲	وضعیت پوشیدگی سطح مزرعه از مالچ (خاکپوش)	Soil surface cover	%	۰
۵۳	وضعیت پوشیدگی سطح مزرعه از علف‌های هرز	Relative cover of weeds	%	۰
پروفیل خاک				
۵۴	تعداد لایه‌های خاک	Number of soil horizons	-	۱۲
۵۵	ضخامت هر لایه خاک	Soil thickness	m	۰/۱
۵۶	رطوبت نقطه پژمردگی دائم	PWP	%	۱۵
۵۷	رطوبت ظرفیت زراعی خاک	FC	%	۳۰
۵۸	رطوبت اشباع خاک	SAT	%	۵۰
۵۹	هدایت هیدرولیکی اشباع خاک	Ksat	mm/day	۵۰۰
۶۰	شماره منحنی	CN	-	۶۱
۶۱	عمق آب قابل تبخیر در لایه سطحی خاک	REW	mm	۹
آب زیرزمینی				
۶۲	عمق سطح آب زیرزمینی از سطح خاک	Depth	m	۵
۶۳	شوری آب زیرزمینی	Salinity	ds/m	۰

پیوست ۲

خروجی‌های مدل AquaCrop

جدول ۲ - پارامترهای خروجی مدل AquaCrop - بخش Crop development and production

شماره	پارامتر خروجی	علامت اختصاری	واحد
۱	درجه روز	GD	°C-day
۲	عمق ریشه موثر	Z	m
۳	درصد تنش آبی کاهش دهنده پوشش گیاهی	StExp	%
۴	درصد تنش آبی موثر در بسته شدن روزنه‌ها	StSto	%
۵	درصد تنش آبی موثر در تسریع فرآیند پیری گیاه	StSen	%
۶	درصد تنش شوری	StSalt	%
۷	پوشش نسبی علف‌های هرز	StWeed	%
۸	مجموع پوشش سبز گیاه و علف‌های هرز	CC	%
۹	درصد پوشش گیاهی	CCw	%
۱۰	درصد تنش دمایی اثرگذار بر تعرق گیاه	StTr	%
۱۱	ضریب گیاهی برای تعرق گیاه	Kc(Tr)	-
۱۲	مقدار حداکثر مجموع تعرق گیاه و علف‌های هرز	Trx	mm
۱۳	مجموع تعرق گیاه و علف‌های هرز	Trx	mm
۱۴	تعرق گیاه	TrW	mm
۱۵	نسبت مجموع تعرق گیاه و علف‌های هرز به مقدار حداکثر آن	Tr/Trx	%
۱۶	بهره‌وری آب اصلاح شده بر اساس غلظت CO ₂ و شرایط کوددهی	WP	g/m ²
۱۷	ماده خشک	Biomass	ton/ha
۱۸	شاخص برداشت اصلاح شده با توجه به تنش آبی و اثر آن بر فرآیندهای گرده‌افشانی و فتوسنتز	HI	%
۱۹	محصول دانه خشک	Y(dry)	ton/ha
۲۰	محصول دانه تر	Y(fresh)	ton/ha
۲۱	نسبت ماده خشک به مقدار حداکثر آن در شرایط پتانسیل و بدون تنش	Brelative	%
۲۲	بهره‌وری تبخیر-تعرق بر اساس محصول دانه	WPet	kg/m ³

جدول ۳ - پارامترهای خروجی مدل AquaCrop - بخش profile/Root zone (soil water content)

شماره	پارامتر خروجی	علامت اختصاری	واحد
۱	مقدار آب خاک در کل پروفیل خاک	WCTot	mm
۲	مقدار آب خاک در حداکثر عمق موثر ریشه	Wr(Zx)	mm
۳	عمق ریشه موثر	Z	m
۴	مقدار آب خاک در عمق موثر ریشه	Wr	mm
۵	مقدار آب خاک در عمق موثر ریشه در حالت اشباع	Wr(SAT)	mm
۶	مقدار آب خاک در عمق موثر ریشه در رطوبت ظرفیت زراعی	Wr(FC)	mm
۷	مقدار آب خاک در عمق موثر ریشه در حد بالایی آستانهٔ تقلیل خاک برای توسعهٔ پوشش گیاهی	Wr(exp)	mm
۸	مقدار آب خاک در عمق موثر ریشه در حد بالایی آستانهٔ تقلیل خاک برای بسته شدن روزنه‌ها	Wr(sto)	mm
۹	مقدار آب خاک در عمق موثر ریشه در حد بالایی آستانهٔ تقلیل خاک برای تسریع فرآیند پیری گیاه	Wr(sen)	mm
۱۰	مقدار آب خاک در عمق موثر ریشه در نقطهٔ پژمردگی دائم	Wr(PWP)	mm

جدول ۴ - پارامترهای خروجی مدل AquaCrop - بخش profile/Root zone (soil salinity)

شماره	پارامتر خروجی	علامت اختصاری	واحد
۱	مقدار نمک نفوذ یافته در پروفیل خاک	SaltIn	ton/ha
۲	مقدار نمک زهکشی شده از پروفیل خاک	SaltOut	ton/ha
۳	مقدار نمک بالا آمده از سطح آب زیرزمینی در اثر صعود کاپیلاری	SaltUp	ton/ha
۴	مقدار کل نمک در کل پروفیل خاک	SaltTot	ton/ha
۵	مقدار نمک در عمق موثر ریشه	SaltZ	ton/ha
۶	عمق موثر ریشه	Z	m
۷	هدایت الکتریکی عصارهٔ اشباع خاک از ناحیهٔ عمق ریشه	ECe	dS/m
۸	هدایت الکتریکی آب خاک در ناحیهٔ عمق ریشه	ECsw	dS/m
۹	تنش شوری	StSalt	%
۱۰	عمق سطح آب زیرزمینی	Zgwt	m
۱۱	هدایت الکتریکی آب زیرزمینی	ECgw	dS/m

جدول ۵ - پارامترهای خروجی مدل AquaCrop - بخش soil water balance

شماره	پارامتر خروجی	علامت اختصاری	واحد
۱	عمق آب موجود در کل پروفیل خاک	WCTot	mm
۲	بارندگی	Rain	mm
۳	عمق آب آبیاری	Irr	mm
۴	آب ذخیره شده روی سطح خاک بین پشته‌ها (در صورت وجود پشته)	Surf	mm
۵	عمق آب نفوذ یافته در پروفیل خاک	Infilt	mm
۶	رواناب سطحی	RO	mm
۷	عمق آب زهکشی شده از پروفیل خاک	Drain	mm
۸	عمق آب بالا آمده از طریق صعود کاپیلاری	CR	mm
۹	عمق سطح آب زیرزمینی	Zgwt	m
۱۰	حداکثر مقدار مجاز تبخیر	Ex	mm
۱۱	مقدار تبخیر واقعی	E	mm
۱۲	نسبت تبخیر واقعی به حداکثر مقدار مجاز تبخیر	E/Ex	%
۱۳	حداکثر تعرق گیاه	Trx	mm
۱۴	مجموع تعرق گیاه و علف‌های هرز	Tr	mm
۱۵	نسبت مجموع تعرق گیاه و علف‌های هرز به حداکثر تعرق گیاه	Tr/Trx	%
۱۶	حداکثر مقدار تبخیر-تعرق	ETx	mm
۱۷	مقدار تبخیر-تعرق واقعی	ET	mm
۱۸	نسبت تبخیر-تعرق واقعی به حداکثر مقدار تبخیر-تعرق	ET/ETx	%

جدول ۶ - پارامترهای خروجی مدل AquaCrop - بخش Climate input parameters

شماره	پارامتر خروجی	علامت اختصاری	واحد
۱	بارندگی	Rain	mm
۲	تبخیر-تعرق مرجع	ETo	mm
۳	حداقل دمای هوا	Tmin	°C
۴	میانگین دمای هوا	Tavg	°C
۵	حداکثر دمای هوا	Tmax	°C
۶	غلظت کربن دی اکسید	CO ₂	ppm

جدول ۷ - پارامترهای خروجی مدل AquaCrop - بخش (soil water contents) Compartments

شماره	پارامتر خروجی	علامت اختصاری	واحد
۱	مقدار آب خاک در لایه ۱	WC 1	%
۲	مقدار آب خاک در لایه ۲	WC 2	%
۳	مقدار آب خاک در لایه ۳	WC 3	%
۴	مقدار آب خاک در لایه ۴	WC 4	%
۵	مقدار آب خاک در لایه ۵	WC 5	%
۶	مقدار آب خاک در لایه ۶	WC 6	%
۷	مقدار آب خاک در لایه ۷	WC 7	%
۸	مقدار آب خاک در لایه ۸	WC 8	%
۹	مقدار آب خاک در لایه ۹	WC 9	%
۱۰	مقدار آب خاک در لایه ۱۰	WC 10	%
۱۱	مقدار آب خاک در لایه ۱۱	WC 11	%
۱۲	مقدار آب خاک در لایه ۱۲	WC 12	%

جدول ۸ - پارامترهای خروجی مدل AquaCrop - بخش (soil salinity) Compartments

شماره	پارامتر خروجی	علامت اختصاری	واحد
۱	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در لایه ۱	ECe 1	%
۲	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در لایه ۲	ECe 2	%
۳	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در لایه ۳	ECe 3	%
۴	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در لایه ۴	ECe 4	%
۵	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در لایه ۵	ECe 5	%
۶	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در لایه ۶	ECe 6	%
۷	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در لایه ۷	ECe 7	%
۸	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در لایه ۸	ECe 8	%
۹	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در لایه ۹	ECe 9	%
۱۰	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در لایه ۱۰	ECe 10	%
۱۱	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در لایه ۱۱	ECe 11	%
۱۲	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در لایه ۱۲	ECe 12	%

- جرعه‌نوش، م. ه.، اگدرنژاد، ا.، شاهرخ‌نیا، م. ع.، و ابراهیمی‌پاک، ن. ع. (۱۴۰۲). ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه گندم تحت سناریوهای مختلف مدیریت زراعی در قزوین. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۱)، ۱-۱۶.
- شیرشاهی، ف.، بابازاده، ح.، ابراهیمی‌پاک، ن. ع.، و زراعت کیش، ی. (۱۳۹۷). واسنجی و ارزیابی عملکرد مدل آکواکراپ در مدیریت مقدار و زمان اعمال کم‌آبیاری در گندم. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۱(۱)، ۳۱-۴۴.
- Abi-Saab, M.T., Todorovic, M., & Albrizio, R. (2014). Comparing AquaCrop and CropSyst models in simulating barley growth and yield under different water and nitrogen regimes. Does calibration year influence the performance of crop growth models?. *Agricultural Water Management*, 147, 21-33.
- Abbrha, B., Delbecque, N., Raes, D., Tsegay, A., Todorovic, M., Heng, L., Vanutrecht, E., Geerts, S., Garcia-Vila, M., & Deckers, S. (2012). Sowing strategies for barley (*Hordeum Vulgare*) based on modelled yield response to water with AquaCrop. *Experimental Agriculture*, 48(2), 252-271.
- Araya, A., Kisseka, I., & Holman, J. (2016). Evaluating deficit irrigation management strategies for grain sorghum using AquaCrop. *Irrigation Science*, 34(6), 465-481.
- Hassanli, M., Afrasiab, P., & Ebrahimian, H. (2015). Evaluation of AquaCrop vs SALTMED Models to Estimate Crop Yield and Soil Salinity. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 46(3), 487-498.
- Heng L.K., Hsiao T.C., Evett S., Howell T., & Steduto P. (2009). "Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize", *Agron. J* 101, 488-498.
- Jahandideh, Z., Zand-Parsa, Sh., Sepaskhah, A.R., Paredes, P., Pereira, L.S. (2026). Using the AquaCrop model for maize in arid water deficient conditions: A new version for improved accuracy when adopting a varied normalized water productivity. *Agricultural Water Management*, 326, 110239.
- Jallal, L., Er-Raki, S., Khabba, S., Ezzahar, J., & Chehbouni, A. (2024). Assessment of AquaCrop model for simulating the pea crop growth in Chichaoua region, Morocco. In *V All Africa Horticultural Congress-AAHC2024* 1422 (pp. 259-266).
- Jin X.l., Feng, H.k., Zhu, X.k., Li, Z.h., Song, S.n. & Song, X.y. (2014). Assessment of the AquaCrop Model for Use in Simulation of Irrigated Winter Wheat Canopy Cover, Biomass, and Grain Yield in the North China Plain. *PLoS ONE*, 9(1), pp. e86938.
- Mirsafi, Z.S., Sepaskhah, A.R., Ahmadi, S.H., & Kamgar-Haghighi, A.A. (2016). Assessment of AquaCrop model for simulating growth and yield of saffron (*Crocus sativus* L.). *Scientia Horticulturae*, 211, 343-351.
- Montoya, F., Camargo, D., Ortega, J.F., Córcoles, J.I. & Domínguez, A. (2016). Evaluation of Aquacrop model for a potato crop under different irrigation conditions. *Agricultural Water Management*, 164, 267- 280.
- Paredes, P., Alves, I., & Pereira, L.S. (2014). Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yield and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization. *Agricultural Water Management*, 144, 81-97.
- Pereira, L.S., Paula, P., Rodrigues, G.C., & Neves, M. (2015). Modeling malt barley water use and evapotranspiration partitioning in two contrasting rainfall years. *Assessing AquaCrop and SIMDualKc models. Agriculture Water Management*, 159, 239-254.
- Pourgholam-Amiji, M., Liaghat, A., Ghameshlou, A. N., & Khoshravesh, M. (2021). The evaluation of DRAINMOD-S and AquaCrop models for simulating the salt concentration in soil profiles in areas with a saline and shallow water table. *Journal of Hydrology*, 598, 126259.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2009). AquaCrop the FAO crop model to simulate yield response to water: II. main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101(3), 438-447.
- Rahimikhoob, H., Sohrabi, T., & Delshad, M. (2021). Simulating crop response to Nitrogen-deficiency stress using the critical Nitrogen concentration concept and the AquaCrop semi-quantitative approach. *Scientia Horticulturae*, 285, 110194.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop the FAO crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426-437.

Talbot, G. (2014). Relative yield composition: A method for understanding behavior of complex crop models. *Environmental Modelling and Software*, 51,136-148.

Toumi, J., Er-Raki, S., Ezzahar, J., Khabba, S., Jarlan, L. & Chehbouni, A. (2016). Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. *Agricultural Water Management*, 163, 219-235.

Zhai, Y., Huang, M., Zhu, C., Xu, H., & Zhang, Z. (2022). Evaluation and application of the AquaCrop model in simulating soil salinity and winter wheat yield under saline water irrigation. *Agronomy*, 12(10), 2313.