سال دوم، شماره ۱، شهریور ۱۳۹٤، صفحات ٦٧ تا ۸۰
نشریه آب و توسعه پایدار

2015, Vol.2, No.1, Pages 67 to 80
Journal of Water and Sustainable Development

معادلات اساسی بکار گرفته شده در مدل SWAP و راهنمای کاربردی مدل

خدیجه براتی[۱*]، هاجر طاهری سودجانی[۲]، محمد شایان نژاد[۳]

۱ و ۲ - دانشجوی دکتری رشته آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان. ۳ - دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: kh_barati@yahoo.com)
تاریخ دریافت: ۹۴/۲/۲۲
تاریخ پذیرش: ۹۴/۵/۳۰

چکیده

امروزه استفاده از مدل تقریباً در تمامی علوم، کاری متعارف می‌باشد. استفاده از مدل‌ها، زمینه لازم را برای پاسخ‌های سریع، مطلوب و اقتصادی به بسیاری از سؤالات فراهم آورده است. در علوم مختلف کشاورزی از جمله آبیاری و زهکشی نیز مدل‌سازی در حال توسعه می‌باشد. آزمایش‌های صحرایی برای تعیین و تحلیل مدیریت‌های مختلف آبیاری مفید هستند اما محدودیت‌های قابل توجهی نیز دارند. مهم‌ترین محدودیت این است که اعتبار آزمایش‌ها با شرایط فیزیکی منطقه‌ای که آزمایش در آن انجام می‌شود محدود می‌گردد. یکی از مدل‌هایی که در علوم کشاورزی از آن استفاده می‌شود مدل SWAP است که یک مدل شبیه‌سازی خاک، آب، اتمسفر و گیاه می‌باشد. این مدل قابلیت تحلیل اثرات متقابل میان حرکت آب، رشد گیاه و انتقال مواد محلول، پیش‌بینی عملکرد تحت رژیم‌های مختلف آب و شوری، شبیه‌سازی درازمدت و برنامه‌ریزی آبیاری را داراست. اگرچه مدل SWAP توانایی شبیه‌سازی همه جانبه روابط بین خاک، آب، اتمسفر و گیاه را تحت شرایط مختلف مدیریتی مزرعه داراست اما با محدودیت‌هایی نیز روبروست. از جمله محدودیت‌های این مدل، تعداد ورودی‌های زیاد آن است. تاکنون تحقیقات زیادی با استفاده از این مدل صورت گرفته است اما با جستجو در مقالات علمی، هیچ منبع کاملی که معادلات اساسی بکار گرفته شده در مدل و همچنین راهنمای کاربردی آن را ارائه داده باشد وجود ندارد. در این مقاله، با استناد به راهنمای مدل، معادلات بکار گرفته شده در مدل برای انجام محاسبات، شرح داده شده است. همچنین راهنمای کاربردی برای کاربرانی که قصد استفاده از این مدل را دارند ارائه گردیده است.

واژه‌های کلیدی: مدل SWAP، شبیه‌سازی، معادلات اساسی، راهنمای کاربردی.

The Basic equations used in the SWAP model and practical guide of model

Kh. Barati[1*], H. Taheri-Sodejani[2], M. Shayannejad[3]

1,2- PhD student of Irrigation and Drainage, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Iran. 3- Associate Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Iran.
*(Corresponding Author Email: kh_barati@yahoo.com)
Received: 12-5-2015
Accepted: 21-8-2015

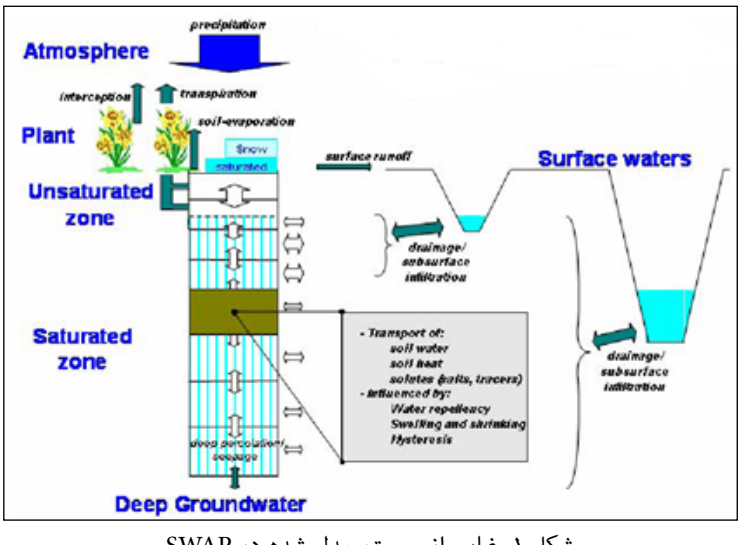
Abstract

Nowadays, it's very usual to use these models in almost all sciences. use of these models has provided quick, appropriate and economic answers to many questions. Modeling is developing In different fields of agriculture, including irrigation and drainage. Field tests are useful to determine and analyze the different irrigation management but there are significant limitations. The most important limitation is the validity of the experiment that is limited by the physical conditions of the area where the experiment performes there. One of the models that is used in agricultural science is the SWAP model that is a model for simulating of soil, water, atmosphere and plant. This model is able to analyze interactions between water movement, growth of plant and transfer of solutions, prediction of yield under different regimes of water and salt, long-term simulation and irrigation scheduling. Although SWAP model is able to simulate relations between soil, water, atmosphere and plant under different management field conditions completely but it has limitations too. One of these limitations is many numbers of input data. So far many researches have been done using this model but by searching on the scientific articles, there is no complete source that offers the basic equations used in the model and also the practical guide is not available. In this article, according to the model guide, the equations that used for model calculations, has been described. Also a useful and practical guide for users who want to use this model has been presented.

Keywords: SWAP model, Simulations, Basic equations, practical guide

مقدمه

امروزه مدل‌های شبیه‌سازی معتبری در علوم مختلف کشاورزی از جمله آبیاری و زهکشی توسعه یافته‌اند. یکی از این مدل‌ها مدل SWAP[1] می‌باشد که یک مدل شبیه‌سازی خاک، آب، اتمسفر و گیاه بوده، یک بعدی و هیدرولوژیکی است. مدل SWAP نسخه اصلاح شده‌ای از مدل‌های SWATR، SWATRE و SWACROP است. موارد اصلی استفاده از مدل SWAP، شبیه‌سازی عملکرد محصول و نحوه حرکت آب و املاح در پروفیل خاک، تحت شرایط اقلیمی و مدیریت‌های آبیاری متفاوت است. این مدل همچنین قادر است تغییرات شوری در پروفیل خاک را در طولانی مدت پیش‌بینی نموده و مشخص نماید که اگر خاکی با آب شور آبیاری شود بعد از چه مدت و به چه میزان نیاز به آبشویی خواهد داشت (شهیدی، ۱۳۸۷). از جمله ویژگی‌های این مدل، استفاده از روابط و معادلات متعدد و تفصیلی جهت محاسبه پارامترهای مختلف و ارتباطات موجود بین این پارامترهاست که سبب افزایش دقت محاسبات صورت گرفته توسط مدل و به تبع آن، نتایج ارائه شده توسط مدل می‌گردد. به‌عنوان مثال، در این مدل برای شبیه‌سازی رشد محصول از مدل گیاهی WOFOST 6.0 استفاده شده است که شبیه‌سازی فتوسنتز و رشد گیاه را با جزئیات کامل در نظر می‌گیرد (Kroes و Van Dam، ۲۰۰۳). دقت مدل SWAP به تعداد ورودی‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه آزمایشی و دقت اندازه‌گیری آن‌ها بستگی دارد. اگرچه مدل SWAP توانایی شبیه‌سازی همه جانبه مانند عملکرد محصول، نحوه حرکت آب و املاح در خاک و انتقال حرارت را تحت شرایط مختلف مدیریتی مزرعه دارد اما با محدودیت‌هایی نیز روبروست. از جمله محدودیت‌های مدل، تعداد ورودی‌های زیاد آن است (شهیدی، ۱۳۸۷). از دیگر محدودیت‌های این مدل، یک بعدی بودن آن است. به عبارت دیگر، انتقال آب، املاح و گرما را صرفاً در جهت عمودی شبیه‌سازی می‌کند (Kroes و Van Dam، ۲۰۰۳). مدل SWAP شامل یک برنامه اصلی و پنج زیر مدل است که خروجی هر زیر مدل در واقع یکی از ورودی‌های مدل اصلی است. زیر مدل‌های مذکور عبارتند از: هواشناسی، آبیاری، گیاه، خاک، انتقال آب، انتقال محلول و انتقال گرما (Huygen و همکاران، ۲۰۰۰). نمایی از سیستم مدل شده در SWAP در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- نمایی از سیستم مدل شده در SWAP

بررسی منابع

Marinov و همکاران (۲۰۰۵) در پژوهشی از مدل SWAP برای شبیه‌سازی جریان آب و انتقال نیتروژن در خاک یک قطعه آزمایشی استفاده کردند. با توجه به مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده، مشخص شد که مدل SWAP توانایی لازم برای شبیه‌سازی حرکت آب و نیتروژن در محیط خاک را دارد. نتایج حاصل از تحقیقی در بلژیک که در آن، میزان آب مصرفی گیاه موز با استفاده از مدل SWAP شبیه‌سازی شده بود نشان داد که مدل SWAP مقدار رطوبت خاک را بیشتر از مقدار واقعی آن گزارش می‌کند (Van Vosselen و همکاران، ۲۰۰۵).

مقایسه عملکرد سه مدل SWAP، Cropsyst و MACRO در خاک تحت کشت ذرت در شمال ایتالیا نشان داد مدل SWAP عملکرد بهتری نسبت به دو مدل دیگر، بخصوص در شبیه‌سازی نفوذ سطحی و روند خشک شدن خاک دارد. پس از مدل SWAP، به ترتیب مدل‌های Cropsyst و MACRO عملکرد بهتری از خود نشان دادند (Bonfante و همکاران، ۲۰۱۰).

Ma و همکاران (۲۰۱۱) برای ارزیابی چرخه آب در مزرعه تحت

رژیم کم‌آبیاری، از مدل SWAP استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد مدل SWAP می‌تواند به عنوان یک ابزار قدرتمند برای شبیه‌سازی چرخه آب در مزرعه و ارزیابی شیوه‌های مختلف مدیریت آبیاری مزرعه استفاده شود.

در تحقیقی کاربرد مدل‌های Drainmod و SWAP برای طراحی بهینه شبکه‌های زهکشی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده از این تحقیق، مدل Drainmod مقدار آب زهکشی شده را کمتر از مقدار واقعی و مدل SWAP بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند (Samipour و همکاران، ۲۰۱۱).

مقایسه مدل‌های اگروهیدرولوژیکی SWAP و FAO برای برنامه‌ریزی آبیاری درخت انگور نشان داد که هر دو مدل به‌طور رضایت‌بخشی مقدار آب خاک را شبیه‌سازی می‌کنند و رفتار مشابهی را نشان می‌دهند (Rallo و همکاران ، ۲۰۱۲).

ارزیابی مدل‌های Hydrus-1D و SWAP از نظر شبیه‌سازی حرکت آب و املاح در خاک نشان داد که هر دو مدل، برآورد قابل قبولی از میزان رطوبت خاک را ارائه می‌دهند. هر دو مدل میزان رطوبت خاک را بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده نشان می‌دهند؛ اما مدل Hydrus-1D نتایج بهتری نسبت به مدل SWAP نشان می‌دهد. همچنین مدل SWAP میزان شوری را بسیار بهتر از مدل Hydrus-1D برآورد می‌کند (Moghabeli Damaneh و همکاران، ۲۰۱۳).

Kumar و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی پویایی نمک در منطقه ریشه و مقدار محصول واریته‌های مقاوم و غیرمقاوم به شوری در گیاه گندم را تحت رژیم آبیاری با آب شور با استفاده از مدل SWAP شبیه‌سازی کردند. بر اساس نتایج این تحقیق، مدل SWAP می‌تواند برای شبیه‌سازی پویایی نمک در منطقه ریشه و همچنین محصول گندم تحت رژیم‌های آبیاری با آب شور، با دقت قابل قبول مورد استفاده قرار گیرد. نتایج همچنین نشان دادند که مدل SWAP برای پیش‌بینی عملکرد نسبی واریته‌های مقاوم در برابر شوری در مقایسه با واریته‌های غیرمقاوم، عملکرد بهتری داشته است.

شبیه‌سازی انتقال آب، املاح و عملکرد نسبی گندم طی دو سال زراعی با استفاده از مدل SWAP نشان داد که مدل SWAP با وجود متغیرهای متعدد در شرایط مزرعه‌ای، مقدار رطوبت، شوری خاک و عملکرد نسبی گندم را به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کند (کیانی، ۱۳۸۶). در تحقیقی تأثیر مدیریت آبیاری با آب شور بر رطوبت خاک در منطقه رودشت اصفهان با استفاده از مدل SWAP مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد هر چند آزمون صحت‌یابی مدل SWAP با چهار شاخص آماری مؤید آن است که این مدل در مناطق خشک قابل استفاده است، اما این مدل، میزان رطوبت خاک را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی نمی‌کند (منصوری و همکاران، ۱۳۸۶).

بررسی توانایی مدل SWAP در برآورد عملکرد گندم تحت کیفیت‌ها و کمیت‌های مختلف آب آبیاری نشان داد که توانایی این مدل در شبیه‌سازی عملکرد گندم در سطوح مختلف آبیاری و شوری در مقایسه با نتایج میدانی قابل قبول است. نتایج این مطالعه نشان داد که می‌توان از مدل SWAP برای پیش‌بینی اثرات اعمال تنش آبی و شوری در کشت گندم استفاده کرد (شهیدی و همکاران، ۱۳۸۸).

نتایج حاصل از شبیه‌سازی رطوبت نیمرخ خاک در سه مزرعه گندم با استفاده از مدل SWAP نشان داد که بر اساس شاخص‌های آماری، مدل SWAP می‌تواند رطوبت را در نیمرخ خاک در اعماق و زمان‌های مختلف به خوبی شبیه‌سازی کند (دهقان و همکاران، ۱۳۸۹).

نتایج پژوهشی که به منظور شبیه‌سازی عملکرد محصولات مختلف در شرایط شوری آب آبیاری با استفاده از مدل SWAP صورت گرفته بود، نشان داد که مدل SWAP با واسنجی دقیق و کامل، در تخمین انتقال آب و املاح خاک و نیز عملکرد محصول در شرایط شوری خاک از دقت خوبی برخوردار است (وردی نژاد و همکاران، ۱۳۸۹).

به منظور ارزیابی عملکرد سیستم زهکشی زیرزمینی، در تحقیقی از مدل شبیه‌سازی شرایط غیرماندگار زهکشی SWAP استفاده شد. نتایج نشان داد مقادیر شبیه‌سازی شده شدت تخلیه زهکش و سطح ایستابی تطابق خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارند. مدل SWAP همچنین توانست با دقت قابل قبولی شوری خاک و زه‌آب خروجی از زهکش را شبیه‌سازی نماید (وردی نژاد و همکاران، ۱۳۹۱).

نتایج حاصل از شبیه‌سازی رطوبت و غلظت شوری در خاک با استفاده از مدل SWAP حاکی از آن بود که بر اساس شاخص‌های آماری، مدل SWAP در پیش‌بینی حرکت آب و شوری از کارایی بالایی برخوردار است و می‌تواند در مدیریت آبیاری مورد استفاده قرار گیرد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۲).

بررسی امکان بهبود برآورد عملکرد محصول در مدل SWAP با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای نشان داد با به‌روزرسانی شاخص سطح برگ ماهواره‌ای، می‌توان خطاهای داده‌های ورودی مدل و عدم قطعیت موجود در آن‌ها را به میزان زیادی کاهش داد و با دقت مطلوبی عملکرد را در سطح وسیع و با تفکیک مزرعه به مزرعه برآورد کرد (بادیه‌نشین و همکاران، ۱۳۹۳). شفیعی و همکاران (۱۳۹۳) روش عمومی عدم قطعیت تشابهات[۲] را برای واسنجی و تحلیل عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی خاك در مدل آگروهیدرلوژی SWAP نسبت به داده‌های رطوبت اندازه‌گیری شده در یک مزرعه تحت کشت ذرت واقع در دشت قیام در استان اصفهان مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد از بین شش پارامتر هیدرولیکی خاك در مدل ونگنوختن-معلم،

پارامترهای θ_r و K_s در روند واسنجی از قابلیت تشخیص کمتری برخوردار بوده و بیشترین نقش را در عدم‌قطعیت رطوبت شبیه‌سازی شده داشتند. همچنین، نتایج نشان داد که نمی‌توان پارامترهای هیدرولیکی خاك در رابطه ونگنوختن -معلم را که ماهیت برازشی دارند در فرآیند واسنجی ثابت فرض کرد. بررسی عدم قطعیت رطوبت شبیه‌سازی شده نشان داد که روش عدم قطعیت تشابهات به خوبی توانست تغییرات رطوبت را در نیمرخ خاك در طول دوره رشد محصول واسنجی کند؛ به طوری که اغلب داده‌های اندازه‌گیری شده در محدوده اطمینان ۹۵ درصد قرار گرفتند.

نتایج شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP تحت شرایط آبیاری با آب شور نشان داد که اعمال تیمارهای کم‌آبی و شوری باعث کاهش دقت مدل در پیش‌بینی رطوبت در مراحل زمانی مختلف پس از کاشت می‌گردد (شهیدی و همکاران، ۱۳۹۳).

شرح معادلات اساسی بکار گرفته شده در مدل SWAP

۱- جریان عمومی آب در محیط‌های اشباع و غیر اشباع

بخش مرکزی مدل SWAP براساس جریان عمومی آب در محیط‌های اشباع و غیر اشباع است که با معادله ریچاردز تشریح می‌شود. معادله ریچاردز که از ترکیب معادلات دارسی و پیوستگی بدست آمده است بصورت رابطه‌ی (۱) تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = C(h)\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial\left[K(h)\left(\frac{\partial h}{\partial z}+1\right)\right]}{\partial z} - S_a(h) \qquad (۱)$$

θ: رطوبت حجمی خاک (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)، t: زمان (روز)، h: پتانسیل ماتریک خاک (سانتی‌متر)، Z: فاصله عمودی از سطح خاک (سانتی‌متر)، K: هدایت هیدرولیکی به عنوان تابعی از پتانسیل ماتریک خاک (سانتی‌متر در روز)، $S_a(h)$: بیانگر جذب آب توسط ریشه گیاه (عکس روز) است که با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد:

$$S_a(h) = \alpha_{rw}\alpha_{rs}\frac{T_p}{D_{root}} \qquad (۲)$$

T_{pot}: تعرق پتانسیل (سانتی‌متر در روز)، T_{pot}: تعرق پتانسیل (سانتی‌متر در روز)، D_{root}: عمق ریشه (سانتی‌متر)، α_{rw}: فاکتور کاهش دهنده جذب آب توسط ریشه در اثر کاهش رطوبت خاک، α_{rs}: فاکتور کاهش دهنده جذب آب توسط ریشه در اثر افزایش شوری

مدل SWAP معادله ریچاردز را به‌صورت عددی برای شرایط اولیه و شرایط مرزی خاص و همچنین رابطه‌های معلوم بین θ، h و K را حل می‌کند (Kroes و Van Dam، ۲۰۰۳).

۲- توابع هیدرولیکی خاک

بطور کلی رابطه‌های بین مقدار آب خاک (θ)، پتانسیل فشاری (h) و هدایت هیدرولیکی (K) در تابع نگهداشت $\theta(h)$ و تابع هدایت هیدرولیکی غیر اشباع $K(\theta)$ خلاصه می‌شود. لازم است این توابع هیدرولیکی خاک برای هر لایه خاک بدست آورده شود. تابع تحلیلی که توسط ون‌گنوختن (۱۹۸۰) پیشنهاد شد به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود (Kroes و Van Dam، ۲۰۰۳):

$$\theta = \theta_{res} + \frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{\left(1+|\alpha h|^n\right)^m} \qquad (۳)$$

θ_{sat}: مقدار رطوبت اشباع (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)، θ_{res}: مقدار آب باقیمانده در حالت بسیار خشک (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)

α، n و m فاکتورهای تجربی شکل می‌باشند. m را می‌توان از رابطه $m = 1 - \frac{1}{n}$ بدست آورد.

با استفاده از تابع تحلیلی ون‌گنوختن و بکارگیری هدایت هیدرولیکی غیراشباع معادله معلم (۱۹۷۶)، رابطه (۴) بدست می‌آید:

$$K = K_{sat}S_e^{\lambda}\left[1-\left(1-S_e^{\frac{1}{m}}\right)^m\right]^2 \qquad (۴)$$

K_{sat}: هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی‌متر در روز)، λ : یک پارامتر شکل است و وابسته به $\frac{\partial k}{\partial h}$ می‌باشد و S_e: به‌صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \qquad (۵)$$

۳- شرایط مرزی فوقانی

شرایط محدوده فوقانی در مدل SWAP توسط میزان تبخیر و تعرق پتانسیل، آبیاری و بارندگی تعیین می‌شود. ET_p توسط معادله پنمن- مونتیث برآورد می‌شود. تحت شرایط مزرعه که محصولات نسبتاً خاک را می‌پوشانند، ET_p به دو بخش تبخیر پتانسیل خاک E_p و تعرق پتانسیل T_p تقسیم می‌شود. این تقسیم با استفاده از شاخص سطح برگ به عنوان عاملی در مرحله توسعه گیاه به دست می‌آید (Kroes و Van Dam، ۲۰۰۳):

$$E_p = ET_p e^{-K_{gr}LAI} \qquad (۶)$$

K_{gr}: ضریب نابودی تشعشع و برابر ۰/۳۹ برای گیاهان متعارف و LAI: شاخص سطح برگ می‌باشد.

SWAP برای تخمین میزان تعرق پتانسیل از رابطه (۷) استفاده می‌کند:

$$T_P = \left[1 - \frac{P_i}{ET_{Po}}\right] ET_P - E_P \quad (۷)$$

P_i: میزان برگاب (سانتی‌متر)،

ET_{po}: تبخیر و تعرق پتانسیل که می‌تواند با معادله پنمن-مونتیث با فرض مقاومت صفر گیاه محاسبه شود (میلی‌متر در روز).

۴- شرایط مرزی کف (بستر)

SWAP هشت گزینه را برای تعیین شرایط مرزی کف در اختیار کاربر قرار می‌دهد: ۱- سطح آب زیرزمینی تابعی از زمان باشد ۲- شدت جریان از کف تابعی از زمان باشد ۳- محاسبه شدت جریان از کف بر اساس مشخصات سفره آب صورت گیرد ۴- شدت جریان از کف به عنوان تابعی نمایی معرفی شود ۵- شدت جریان با توجه به بار هیدرولیکی آب در خاک تابعی از زمان معرفی شود ۶- جریان از کف برابر صفر باشد ۷- جریان زهکشی آزاد از کف با شیب هیدرولیکی برابر یک صورت گیرد ۸- جریان آزاد از منافذ خاک صورت گیرد (Huygen و همکاران، ۲۰۰۰).

۵- عملکرد نسبی محصول

در مدل SWAP با بهره‌گیری از ضرایب عملکرد محصول در دوره‌های مختلف رشد و استفاده از رابطه (۸) عملکرد نسبی محصول تعیین می‌گردد (Kroes و Van Dam، ۲۰۰۳):

$$1 - \frac{Y_{a,k}}{Y_{p,k}} = K_{y,k} \cdot \left(1 - \frac{T_{a,k}}{T_{p,k}}\right) \quad (۸)$$

k: مرحله رشد گیاه در طول فصل رشد، $K_{y,k}$: ضریب عملکرد محصول در مرحله Kام از رشد محصول، $Y_{a,k}$: عملکرد واقعی محصول در مرحله Kام از رشد محصول ($kg.ha^{-1}$)، $Y_{p,k}$: عملکرد پتانسیل محصول در مرحله Kام از رشد محصول ($kg.ha^{-1}$)، $T_{a,k}$: تعرق واقعی محصول در مرحله Kام از رشد محصول (cm)، $T_{p,k}$: تعرق پتانسیل محصول در مرحله Kام از رشد محصول (cm)

عملکرد نسبی در کل فصل رشد با استفاده از عملکرد نسبی در هر مرحله از رشد از رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

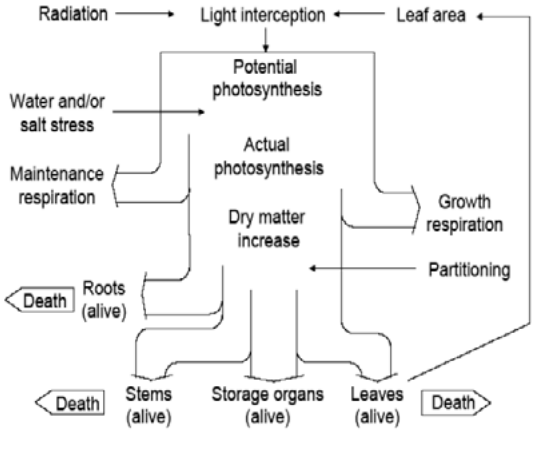
$$\frac{Y_a}{Y_p} = \prod_{k=1}^{n} \left(\frac{T_{a,k}}{T_{p,k}}\right)^{K_{y,k}} \quad (۹)$$

Ya: عملکرد واقعی محصول در انتهای فصل رشد ($kg.ha^{-1}$)

Yp: عملکرد پتانسیل محصول در انتهای فصل رشد ($kg.ha^{-1}$)

۶- رشد محصول

SWAP از مدل گیاهی WOFOST 6.0 برای شبیه‌سازی رشد محصول استفاده می‌کند. مدل گیاهی WOFOST، شبیه‌سازی فتوسنتز و رشد گیاه را با جزئیات کامل در نظر می‌گیرد و با استفاده از آن اثرات تنش‌های خشکی و شوری بر رشد محصول را محاسبه می‌کند. روابط و فرآیندهای موجود در مدل گیاهی WOFOST 6.0 در شکل (۲) نشان داده شده است. انرژی تابشی جذب شده توسط پوشش گیاهی تابعی از تابش ورودی و سطح برگ گیاه می‌باشد. با استفاده از تابش جذب شده و با توجه به ویژگی‌های فتوسنتزی برگ، فتوسنتز پتانسیل ناخالص محاسبه می‌شود که در اثر تنش آبی یا شوری، کاهش می‌یابد. بخشی از کربوهیدرات‌های تولید شده، جهت تأمین انرژی برای نگهداری زیست توده زنده موجود مورد استفاده قرار می‌گیرد[۳]. کربوهیدرات‌های باقیمانده نیز به مواد ساختاری تبدیل می‌شوند. در این تبدیل، مقداری از وزن به عنوان تنفس رشد[۴] کم می‌شود. ماده خشک تولید شده، بین ریشه‌ها، برگ‌ها، ساقه‌ها و اندام ذخیره تقسیم‌بندی می‌شود. این تقسیم‌بندی با استفاده از فاکتورهای تقسیم‌بندی که تابعی از مرحله توسعه فنولوژیکی گیاه هستند، صورت می‌گیرد. در طول مدت توسعه گیاه، بخشی از زیست توده زنده در اثر پیری[۵] از بین می‌رود. برخی از فرآیندهای شبیه‌سازی شده رشد گیاه، مثل نرخ ماکزیمم فتوسنتز و تنفس نگهداری، تحت تأثیر دما قرار می‌گیرند. سایر فرآیندها مثل تقسیم‌بندی مواد جذب شده یا زوال بافت گیاهی به‌وسیله مرحله توسعه فنولوژیکی هدایت می‌شوند. در ادامه، بخش‌های مختلف ارائه شده در شکل (۲) شرح داده شده‌اند (Kroes و Van Dam، ۲۰۰۳).



شکل ۲- روابط و فرآیندهای موجود در مدل گیاهیWOFOST6.0

۶-۱- مرحله فنولوژیکی

رشد و توسعه فنولوژیکی برای گیاهان را می‌توان با دادن ارزش صفر برای جوانه‌زنی، ۱ برای گلدهی و ۲ برای مرحله رسیدن محصول بیان کرد. بنابراین مرحله رشد فنولوژیکی یک محصول در محدوده ۲-۰ قرار می‌گیرد که به‌وسیله طول روز و یا درجه حرارت کنترل می‌شود. در این مدل، قبل از گلدهی هر دو فاکتور می‌توانند فعال باشند؛ اما بعد از گلدهی فقط درجه حرارت بر

روی مقدار سرعت رشد تأثیر خواهد گذاشت. مدل از مجموع درجه حرارت برای تخمین یا تعیین سرعت رشد استفاده می‌کند. درجه حرارت مؤثر با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$T_{eff} = T_{air} - T_{emin} \qquad 0 < T_{eff} < T_{emax} - T_{emin} \qquad (۱۰)$$

T_{air}: میانگین درجه حرارت (^oC)، T_{emin} و T_{emax} به ترتیب حداقل و حداکثر درجه حرارت مؤثر (^oC).

در مناطق بسیار گرم T_{emin}=0-3 و برای نواحی گرمسیر و غیرگرمسیر T_{emin}=9-14 می‌باشد. محاسبه مرحله رشد گیاه با استفاده از رابطه (۱۱) انجام می‌گیرد :

$$D_s^{j+1} = D_s^j + \frac{T_{eff}}{T_{sum,i}} \qquad (۱۱)$$

j: شماره روز، $T_{sum,i}$: مجموع درجه حرارت مورد نیاز برای کامل شدن مرحله رویشی یا زایشی.

۶-۲- فلاکس تشعشع پوشش گیاهی

تخمین و اندازه‌گیری روزانه تشعشعات خورشیدی (طول موج ۳۰۰۰-۳۰۰ نانومتر) به عنوان ورودی مدل می‌باشد. فقط ۵۰ درصد از تشعشعات خورشیدی، تشعشعات فعال فتوسنتزی[۶] می‌باشند (طول موج ۷۰۰-۴۰۰ نانومتر) که معمولاً تشعشع مرئی یا روشن نامیده می‌شود. تشعشعات فعال فتوسنتز لحظه‌ای با استفاده از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$PAR = 0.5 R_s \frac{\sin\beta_{sun}\left(1 + 0.4\sin\beta_{sun}\right)}{\int \sin\beta_{\mathrm{mod},sun}} \qquad (۱۲)$$

R_s: میزان فلاکس تشعشع خورشیدی ($J\ m^{-2}d^{-1}$)، β_{sun}: ارتفاع خورشیدی (درجه)، $\int \sin\beta_{\mathrm{mod},sun}$: انتگرال $\sin\beta_{sun}$ در روز.

پراکنده شدن تشعشع در نتیجه پراکنده شدن تشعشع خورشید به وسیله ابر، گاز و غبار موجود در اتمسفر است که مدل برای تخمین آن از رابطه (۱۳) استفاده می‌کند:

$$PAR_{dif} = 0.5 I_{fdif} A_t S_{sun} \sin\beta_{sun} \qquad (۱۳)$$

I_{fdif}: بخشی از تشعشعات پراکنده شده، A_t: انتقال اتمسفری، S_{sun}: ثابت خورشیدی

به‌وسیله کم کردن تشعشع پراکنده شده از کل تشعشع فعال فتوسنتزی، مقدار تشعشع مستقیم طبق رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$PAR_{dir} = PAR - PAR_{dif} \qquad (۱۴)$$

از کل تشعشع فعال فتوسنتز ورودی، قسمتی بوسیله پوشش گیاهی منعکس یا برگشت داده می‌شود. ضریب بازتابش، کسری از جریان تشعشع پایین می‌باشد که به‌وسیله تمام پوشش گیاهی بازتابش می‌شود. ضریب بازتابش از سطح یک برگ سبز، با زاویه برگ محاسبه می‌شود.

۶-۳- سرعت جذب ناخالص روزانه

برای تعیین میزان سرعت جذب CO_2 هر لایه از کانوپی از رابطه نمایی (۱۵) استفاده می‌شود:

$$A_L = A_{\max}\left(1 - e^{\frac{\varepsilon_{PAR} PAR_{L,a}}{A_{\max}}}\right) \qquad (۱۵)$$

A_L: سرعت جذب ناخالص CO_2 در عمق L از کانوپی ($kg\ CO_2\ m^{-2}\ leaf\ d^{-1}$)، A_{max}: سرعت جذب ناخالص برای شرایط اشباع نور ($kg\ CO_2\ m^{-2}\ leaf\ d^{-1}$)، ε_{PAR}: راندمان مصرف نور($kg\ CO_2\ J^{-1}$ absorbed)، $PAR_{L,a}$: تشعشعات فعال فتوسنتزی در عمق L از کانوپی ($J\ m^{-2}\ leaf\ d^{-1}$)، L: شاخص سطح برگ تجمعی.

مدل در سه زمان انتخاب شده در طول روز، مقدار PAR را فقط در قسمت بالای سایبان محاسبه می‌کند. سپس با استفاده از این مقادیر تابش، جذب در سه عمق انتخاب شده در کانوپی محاسبه می‌شود. با استفاده از ترکیب گوسین این مقادیر، میزان سرعت روزانه جذب ناخالص[۷] پتانسیل بدست می‌آید. از جمله عواملی که ممکن است میزان جذب روزانه را کاهش دهد،ویژگی‌های خاص گیاه، دماهای نامطلوب و تنش آبی می‌باشد. ویژگی‌های گیاه بستگی به مرحله فنولوژیکی دارد. این با مشخص نمودن حداکثر میزان جذب[۸] به عنوان تابعی از مرحله رشد به دست می‌آید.

یک عامل کاهش f_{tday} که تابعی از دمای متوسط در طول روز (T_{day}) است و برای دماهای زیر حد مطلوب محاسبه می‌شود، توسط مدل در نظر گرفته می‌شود. T_{day} طبق رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود:

$$T_{day} = 0.75 T_{\max} + 0.25 T_{\min} \qquad (۱۶)$$

که T_{max} و T_{min} به ترتیب حداکثر و حداقل دما می‌باشند.

خصوصیات گیاهی و دمای روز منجر به کاهش از A_{max} به $A^1_{p\text{-}gross}$ طبق رابطه (۱۷) می‌شود:

$$A^1_{pgross} = Max\left(A_{pgross}, f_{tday}, A_{\max}\right) \qquad (۱۷)$$

به‌علاوه، دمای پایین در طول شب، جذب را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تولیدات جذب در طول روز، در شب به مواد آلی ساختاری تبدیل می‌شود. این فرآیند با کاهش دما مختل می‌شود. اگر این دماهای پایین به مدت چند روز ادامه یابد، کل جذب در گیاه و نرخ جذب کاهش پیدا کردهو در نهایت متوقف می‌شود. در این مدل، تأثیر این دما با عامل کاهش f_{7min} محاسبه می‌شود که تابعی از حداقل دما طی هفت روز آخر است. از عوامل مهم دیگر که ممکن است جذب را کاهش دهد، تنش آب و یا شوری است. مدل، نسبت تعرق واقعی و پتانسیل (T_a/T_p) را به عنوان ضریب کاهش به کار می‌برد. این کاهش، به دلیل حداقل دمای پایین، تنش آبی و شوری می‌باشد. در نهایت، میزان سرعت جذب ناخالص روزانه با استفاده از رابطه (۱۸) محاسبه می‌گردد:

$$A_{gross} = \frac{30}{44} f_{7\min} \frac{T_a}{T_p} A^1_{pgross} \qquad (۱۸)$$

۶-۴- تنفس نگهداری

مقداری از کربوهیدرات‌های تولید شده، برای تهیه انرژی جهت حفظ ساخت‌های گیاهی زنده، اکسید می‌شوند. تنفس نگهداری، ۱۵ تا ۳۰ درصد از کربوهیدرات‌های تولید شده‌ی یک گیاه در فصل رشد را مصرف می‌کند. هزینه‌های این تنفس از پروتئین‌ها، مواد معدنی موجود و از فعالیت متابولیسم گیاه تأمین می‌شود. بر اساس روش بکار گرفته شده در مدل گیاهی WOFOST، مقادیر تنفس نگهداری متناسب با وزن خشک اندام‌های گیاهی می‌باشد. میزان تنفس نگهداری باید برای پیری و دما تصحیح شود. عامل کاهش برای پیری، F_{senes} است که تابعی از مرحله رشد به شمار می‌آید. دماهای بالاتر، میزان هزینه‌های تنفس نگهداری را نیز بالا می‌برد. افزایش ۱۰ ^{o}C در دما، تنفس نگهداری را با فاکتور حدود ۲ افزایش می‌دهد. در نهایت، طبق رابطه (۱۹)، میزان جذب ناخالص A_{gross} منهای میزان تنفس R_m برابر میزان جذب خالص می‌شود:

$$A_{net} = A_{gross} - R_m \qquad A_{net} \geq 0 \qquad (۱۹)$$

۶-۵- تقسیم‌بندی مواد خشک و تنفس رشد

افزایش در وزن کلی مواد خشک یک گیاه بین تمام اندام‌های گیاه تقسیم‌بندی می‌شود که عبارتند از: ریشه‌ها، برگ‌ها، ساقه‌ها و اندام‌های ذخیره. در فرآیند تغییر و تبدیل جذب‌های اولیه به مواد معدنی ساختار گیاه، مولکول‌های گلوکز، CO_2 و H_2O آزاد می‌شوند. در SWAP میانگین عوامل تغییر و تبدیل $C_{e,i}$ برای برگ، اندام ذخیره، ساقه و ریشه بکار می‌روند. مقدار ξ_i عامل تقسیم کننده برای ارگان I است.

$$C_e = \frac{1}{\left[\frac{\xi_{leaf}}{C_{e,leaf}} + \frac{\xi_{stor}}{C_{e,stor}} + \frac{\xi_{stem}}{C_{e,stem}}\right]\left(1-\xi_{root}\right) + \frac{\xi_{root}}{C_{e,root}}} \qquad (۲۰)$$

میزان رشد ناخالص مواد خشک W_{gross} با میزان جذب خالص ارتباط دارد که به صورت رابطه (۲۱) است:

$$W_{gross} = C_e A_{net} \qquad (۲۱)$$

طبق رابطه (۲۲) افزایش ناخالص مواد خشک بین اندام‌های هوایی (برگ‌ها، ساقه‌ها و اندام‌های ذخیره با هم) و ریشه تقسیم می‌شود:

$$W_{gross,root} = \xi_{root} W_{gross} \quad , \quad W_{gross,sh} = \left(1-\xi_{root}\right) W_{gross} \qquad (۲۲)$$

ξ_{root} : عامل تقسیم کننده برای ریشه، $W_{gross,root}$: میزان رشد ناخالص مواد خشک ریشه‌ها($kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$)، $W_{gross,sh}$: میزان رشد ناخالص مواد خشک اندام‌های هوایی.

این عوامل تقسیم‌کننده، تابعی از مرحله رشد و نوع گیاه می‌باشند.

۶-۶- پیری

میزان از بین رفتن اندام‌های ذخیره، صفر و میزان از بین رفتن ساقه‌ها و ریشه‌ها تابعی از مرحله رشد در نظر گرفته می‌شود. میزان از بین رفتن برگ‌ها پیچیده‌تر است. پیری برگ به علت تنش آب، سایه و نیز به علت افزایش طول مدت زندگی صورت می‌گیرد. میزان از بین رفتن برگ‌ها به علت تنش آبی بصورت رابطه (۲۳) محاسبه می‌شود:

$$\xi_{leaf,w} = W_{leaf}\left[1 - \frac{T_a}{T_p}\right]\xi_{leaf.p} \qquad (۲۳)$$

W_{leaf}: وزن ماده خشک برگ ($kg\ ha^{-1}$)

T_p و T_a: به ترتیب، میزان تعرق واقعی و تعرق پتانسیل ($cm\ d^{-1}$)

$\xi_{leaf.p}$: حداکثر میزان از بین رفتن نسبی برگ‌ها به علت تنش آبی ($kg\ kg^{-1}\ d^{-1}$)

میزان از بین رفتن برگ‌ها به علت خود سایه کردن بصورت رابطه (۲۴) محاسبه می‌شود:

$$\xi_{leaf,shade} = 0.03\ W_{leaf}\left[\frac{LAI - LAI_c}{LAI_c}\right] \qquad 0 < \left[\frac{LAI - LAI_c}{LAI_c}\right] < 1 \qquad (۲۴)$$

LAI_c: شاخص سطح برگ بحرانی است و برابر ۴ ($ha\ ha^{-1}$) می‌باشد.

۶-۷- رشد خالص

میزان رشد خالص اندام‌های گیاه($W_{net,i}$ $kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$) طبق رابطه (۲۵) از میزان رشد ناخالص و میزان پیری $\xi_i\ (kg\ kg^{-1} d^{-1})$ بدست می‌آید:

$$w_{net,i} = w_{gross,i} - \xi_i W_i \qquad (۲۵)$$

با انتگرال‌گیری $w_{net,i}$ در طول زمان، وزن ماده خشک اندام i، (kg W_i (ha^{-1}) محاسبه می‌شود. یک استثناء برای رشد برگ‌ها وجود دارد. در مرحله اولیه، میزان ظهور برگ و اندازه برگ بوسیله دما از طریق تأثیر آن بر تقسیم و تکثیر سلول تحمیل می‌شود. برای محدوده وسیع دمایی، میزان رشد کم و بیش نسبت به دما واکنش خطی نشان می‌دهد. میزان رشد شاخص برگ W_{LAI} ($ha\ ha^{-1}\ d^{-1}$)، در مرحله به اصطلاح نمایی به صورت رابطه (۲۶) می‌باشد:

$$W_{LAI} = LAI\ W_{LAI,\max} T_{eff} \qquad (۲۶)$$

$W_{LAI,max}$: حداکثر افزایش نسبی شاخص سطح برگ ($^{o}C^{-1}d^{-1}$)

WOFOST فرض می‌کند که میزان رشد نمایی شاخص سطح برگ ادامه پیدا خواهد کرد تا شاخص سطح برگ مساوی ۱ شود. از این مرحله رشد به بعد، W_{LAI} بصورت رابطه (۲۷) محاسبه می‌گردد:

$$W_{LAI} = W_{net,leaf} S_{la} \qquad (۲۷)$$

S_{la}: سطح برگ ویژه ($ha\ kg^{-1}$)

قسمت‌های سبز ساقه‌ها و اندام‌های ذخیره، ممکن است یک مقدار از تابش را جذب کنند. بنابراین شاخص سطح سبز GAI_i ($ha\ ha^{-1}$) باید به شاخص سطح برگ اضافه شود. شاخص سطح

سبز ساقه‌ها و اندام‌های ذخیره، طبق رابطه (۲۸) از وزن مواد خشک آن اندام‌ها محاسبه می‌شود:

$$GAI_i = S_{ga,i} W_i \qquad (۲۸)$$

$S_{ga,i}$: سطح سبز ویژه ساقه‌ها و یا اندام‌های ذخیره ($ha\ kg^{-1}$)

۶-۸- رشد ریشه

رشد ریشه به صورت مستقیم به سمت جلو محاسبه می‌شود.

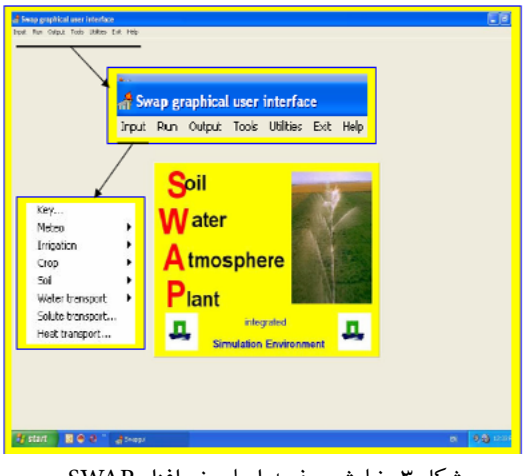
تعیین عمق اولیه ریشه و حداکثر عمق ریشه ($d_{root,max}$(cm)) مورد نیاز می‌باشد. افزایش روزانه در عمق ریشه با حداکثر روزانه برابر است مگر آنکه به حداکثر عمق ریشه برسد یا هیچ جذبی برای رشد ریشه در دسترس نباشد:

$$D_{root}^{j+1} = D_{root}^{j} + d_{root,max} \qquad D_{root}^{j+1} \le d_{root,max} \ , \ W_{net,root} \ge 0 \qquad (۲۹)$$

$D_{root,j}$: عمق ریشه بر حسب سانتی‌متر در روز j

راهنمای کاربردی مدل SWAP

نمایش صفحه اصلی نرم افزار SWAP به همراه نوار ابزار و گزینه ورودی در شکل (۳) نشان داده شده است. اسامی فایل‌های ورودی مورد نیاز و انتخابی مدل نیز در جدول (۱) ارائه شده است (Huygen و همکاران، ۲۰۰۰).



شکل ۳- نمایش صفحه اصلی نرم‌افزار SWAP
به همراه نوار ابزار و گزینه ورودی

جدول ۱- اسامی فایل‌های ورودی مورد نیاز و انتخابی مدل SWAP

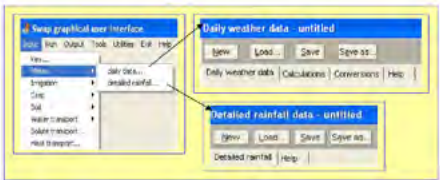
گزینه منو	محتویات فایل	نام	اجباری	اختیاری
کلید	اطلاعات کلی	*.KEY	+	
هواشناسی	داده‌های روزانه	*.YYY	+	
	بارش تفصیلی	*R.YYY		+
آبیاری	ثابت	*.IRG		+
	زمان‌بندی شده	*.CAP		+
گیاه	تقویم	*.CAL		+
	مدل تفصیلی	*.CRP		+
	مدل تفصیلی برای چمن	*.CRP		+
	مدل ساده	*.CRP		+
خاك	پروفیل خاک	*.SWA	+	
	توابع هیدرولیکی	*.SOL	+	
زهکشی	پایه	*.DRB		+
	توسعه یافته	*.DRE		+
مرز پایین	شرایط مرزی	*.BBC	+	
انتقال محلول	انتقال محلول	*.SLT		+
انتقال گرما	انتقال گرما	*.HEA		+

۱- مراحل تعریف پروژه در مدل

با اجرای دستور input/key، پنجره‌ای برای تعریف پروژه باز می‌شود. در سربرگ عمومی، کاربر باید نام پروژه، مسیر ذخیره فایل‌های ورودی و خروجی، نام ایستگاه هواشناسی، عرض جغرافیایی و ارتفاع نسبت به سطح دریای آزاد را مشخص نماید. SWAP توانایی محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل از داده‌های هواشناسی روزانه را دارد. اگر کاربر، گزینه use ET_{ref} values in meteo data set را انتخاب کند مقادیر تبخیر و تعرق مرجع به‌وسیله ضریب گیاهی به تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه تبدیل می‌شود. در صورتیکه کاربر گزینه use detailed rainfall data را انتخاب کند، بایستی در یک فایل جداگانه، داده‌های بارش تفصیلی با گام‌های زمانی کوتاه را تهیه نماید. در سربرگ Timing، شروع و پایان دوره شبیه‌سازی و ماه اول سال زراعی باید مشخص شود. خروجی SWAP می‌تواند با فواصل منظم و یا نامنظم تولید شود. برای تولید خروجی نامنظم، باید تاریخ روزها بطور صریح در قسمت پایین صفحه مشخص شود. بعضی از فایل‌های ورودی، مقادیر درستی برای تمام دوره‌های شبیه‌سازی هستند، مثل اطلاعات کلی، توصیف پروفیل خاك، توابع هیدرولیکی خاك، مقادیر انتقال محلول و مقادیر جریان گرما. سایر مقادیر ورودی ممکن است برای هر یك از زیر برنامه‌ها تغییر کنند. اسامی این فایل‌های وابسته می‌توانند در سربرگ sub-run(s) مشخص شوند. در سربرگ Run options، برای شبیه‌سازی زهکشی سه گزینه در دسترس است: بدون شبیه‌سازی زهکشی، شبیه‌سازی زهکشی معمولی (زهکشی با حداکثر ۵ سطح زهکشی، بدون شبیه‌سازی تعادل آب سطحی) و شبیه‌سازی زهکشی توسعه‌یافته (زهکشی با حداکثر ۵ سطح زهکشی با شبیه‌سازی تعادل آب سطحی) (Huygen و همکاران، ۲۰۰۰).

۲- داده‌های هواشناسی

همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، ورود داده‌های هواشناسی به مدل SWAP در دو بخش داده‌های هواشناسی روزانه و داده‌های بارش تفصیلی صورت می‌گیرد که در زیر شرح داده شده‌اند.



شکل ۴- دستور ورود داده‌های هواشناسی در مدل SWAP

با اجرای دستور input/meteo/daily data پنجره‌ای برای ورود داده‌های هواشناسی نمایان می‌شود. SWAP برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از فرمول پنمن- مونتیث از داده‌های تابش خورشیدی، دمای هوا، رطوبت هوا و سرعت باد استفاده می‌کند. برای ورود داده‌های هواشناسی باید ضوابطی در نظر گرفته شود: ۱- داده‌های گم شده باید با رقم ۹۹- یا کمتر نشان داده شوند ۲- داده‌های گم شده بارش مجاز نمی‌باشد ۳- اگر تبخیر و تعرق پتانسیل باید توسط مدل محاسبه شود هیچ داده گمشده‌ای در ستون‌های Hum، Tmax، Tmin، Rad و Wind نباید وجود داشته باشد. تبخیر و تعرق پتانسیل تنها در صورتیکه مقادیر ET_{ref} استفاده نشده باشند (در دستور General/Key/ Input) محاسبه می‌شود و یا هنگامی که مقادیر ET_{ref} گم شده باشند ۴- چنانچه لازم باشد سرعت توسعه گیاه یا دمای خاک شبیه‌سازی شوند مقادیر Tmin و Tmax نباید گم شده باشند ۵- هنگامی که مدل چمن تفصیلی یا مدل گیاه تفصیلی فعال باشند مقادیرRad نباید گم شده باشند.

در سربرگ محاسبات، ستون‌های داده‌های هواشناسی می‌توانند توسط کاربر با اضافه کردن یا ضرب کردن مقادیر ثابت تعدیل شوند. در این سربرگ همچنین روش مورد استفاده برای محاسبه ET_{ref} بر اساس یکی از پنج روش پنمن-مونتیث، پریستلی-تیلور، مکینک، هارگریوز و تورک بایستی توسط کاربر انتخاب شود. مولد بارش[۹] به ورودی بارش ماهانه و تعداد روزهای بارندگی در هر ماه نیاز دارد. بارش ماهانه بر اساس یك توزیع گاما بر روی روزهای بارانی توزیع می‌یابد. SWAP به فرمت استاندارد تشعشع سراسری (kJ/m2/d)، حداقل و حداکثر دمای هوا (°C)، رطوبت هوا (kPa) و سرعت باد (بر حسب m/s در ارتفاع ۲ متری) نیاز دارد. یك تبدیل عملگرها برای تبدیل مقادیر از قالبی که اغلب استفاده می‌شود به قالب استاندارد، در سربرگ تبدیلات در دسترس است. در صورتیکه نیاز به شبیه‌سازی رواناب یا جریان ترجیحی باشد باید یك فایل با داده‌های بارش تفصیلی فراخوانی شود، یا داده‌ها می‌توانند به صورت دستی وارد شود. برای وارد کردن داده‌های بارش تفصیلی، دستور input/meteo/detailed rainfall باید اجرا شود (Huygen و همکاران، ۲۰۰۰).

۳- اطلاعات مربوط به آبیاری

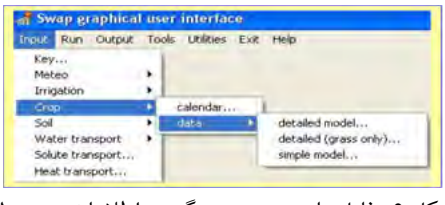
دو نوع آبیاری متفاوت می‌تواند در SWAP مشخص شود. یکی آبیاری ثابت[۱۰] و دیگری، آبیاری برای یك کشت مشخص مطابق تعدادی ضوابط[۱۱]. نحوه انتخاب هر یک از دو حالت فوق در شکل (۵) نشان داده شده است.

شکل ۵- گزینه‌های موجود در مدل SWAP برای ورود اطلاعات آبیاری

آبیاری ثابت می‌تواند در کل دوره سالانه انجام شود. آبیاری زمان‌بندی شده فقط در طول دوره کشت می‌تواند فعال باشد. نوع آبیاری می‌تواند با (۰) برای آبیاری بارانی و یا (۱) برای آبیاری سطحی مشخص شود. در آبیاری زمان‌بندی شده، کیفیت آب آبیاری و نوع آبیاری باید تعریف شوند. در صورت انتخاب آبیاری زمان‌بندی شده، کاربر می‌تواند در سربرگ ضوابط زمان‌بندی، یکی از پنج ضابطه زیر را انتخاب نماید: ۱- تنش روزانه مجاز باشد ۲- تخلیه آب سهل‌الوصول مجاز باشد ۳- تخلیه کل آب قابل دسترس مجاز باشد ۴- مقداری تخلیه، مجاز باشد که برابر با ماکزیمم مقدار آبی است که می‌تواند از ناحیه ریشه استخراج شود ۵- تجاوز از هد فشار بحرانی یا مقدار رطوبت که در این حالت، به محض اینکه یك گیرنده فرضی در خاك هد فشار یا مقدار رطوبت کمتر از مقدار مشخص شده را نشان بدهد، آبیاری شروع می‌شود. در سربرگ مربوط به ضوابط عمق[۱۲] دو گزینه برای معیار عمق فعال در اختیار کاربر قرار داده شده است. گزینه برگشت به ظرفیت زراعی در مورد آبیاری قطره‌ای یا بارانی مفید است که می‌تواند به عنوان تابعی از مرحله توسعه گیاه مشخص شود. چنانچه نیاز به آبشویی نمك وجود داشته باشد یا بارندگی منظم (کمتر از آبیاری) مورد انتظار باشد، این گزینه می‌تواند مفید باشد. هنگامی که سیستم‌های آبیاری ثقلی شبیه‌سازی شوند که در آن‌ها معمولاً اجازه تغییرات کم در عمق آب کاربرد وجود دارد، گزینه عمق آبیاری ثابت، معمول است (Huygen و همکاران، ۲۰۰۰).

۴- داده‌های گیاه

در شکل (۶) زیر منوی Crop نشان داده شده است. با انتخاب گزینه Calander و باز شدن پنجره مربوطه، حداکثر ۳ گیاه در هر سال زراعی می‌تواند برای شبیه‌سازی تعریف شود. در مزرعه در یك زمان تنها یك گیاه می‌تواند رشد کند. بنابراین روزهای کاشت و برداشت باید به ترتیب باشند و نمی‌توانند همپوشانی کنند. برای هر گیاه به ترتیب، نوع مدل گیاهی، فایل پارامترهای گیاهی، روزهای کاشت و برداشت و (بطور اختیاری) فایل خصوصیات برنامه آبیاری، لازم است مشخص شوند. انواع مدل‌های گیاهی مورد استفاده در SWAP در زیر شرح داده شده‌اند (Huygen و همکاران، ۲۰۰۰):



شکل ۶- فایل‌های موجود در گزینه اطلاعات محصول

۴-۱- مدل تفصیلی[۱۳]

با انتخاب مدل تفصیلی، SWAP از مدل گیاهیWOFOST6.0 برای شبیه‌سازی رشد محصول استفاده می‌کند. در صورتیکه کاربر، مدل تفصیلی را انتخاب نماید پنجره‌ای که شامل هفت صفحه است، نمایان می‌شود. در صفحه یک، اگر رشد قبل از گلدهی گیاه[۱۴] بر اساس دما انتخاب شده باشد، مقادیر دمای مناسب (مجموع دما از ابتدای رشد تا گلدهی و مجموع دما از گلدهی تا بلوغ) باید تعریف شوند که مرحله رشد گیاه را مشخص می‌کند. اگر طول روز انتخاب شده باشد، برای مشخص کردن ضریب کاهش سرعت رشد گیاه، طول روز آستانه و مناسب باید تعریف شود. اگر گزینه ترکیب انتخاب شده باشد، کاربر باید هر دو مقادیر طول روز و دما را مشخص کند. مرحله رشد در برداشت نیز باید تعریف شود که معمولاً مساوی ۲ در نظر گرفته می‌شود. در قسمت پایین صفحه یک، بایستی مقادیر متوسط دمای روزانه در برابر افزایش روزانه مقدار دما وارد گردد. رابطه این دو می‌تواند با حداکثر ۱۵ جفت داده تعریف شود.

در صفحه دو، پارامترهای رشد اولیه بر اساس وزن اولیه گیاه، شاخص سطح برگ و حداکثر افزایش نسبی شاخص سطح برگ بایستی تعیین شوند. ضریب گیاهی یا ارتفاع گیاه به عنوان تابعی از مرحله رشد، برای تبدیل تبخیر تعرق پتانسیل گیاه مرجع (چمن با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر) به تبخیر تعرق پتانسیل گیاه واقعی مورد نیاز می‌باشد. برای محاسبه جذب کل، داشتن سطح سبز ساقه و اندام‌های ذخیره را از زمانی که این سطوح، اشعه را جذب می‌نمایند، لازم است. در مرحله دوم رشد، حداکثر افزایش شاخص سطح برگ به‌وسیله سطح ویژه برگ تعیین می‌شود. سطح ویژه برگ یك گیاه می‌تواند بسته به مرحله رشد، متفاوت باشد. امکان ترسیم یك منحنی سطح ویژه برگ تا ۱۵ نقطه به عنوان تابعی از مرحله رشد، توسط گزینه graph امکان‌پذیر است. تحت شرایط بهینه (ثابت ۳۵ درجه سانتی‌گراد) برگ‌ها یك طول عمر معین دارند[۱۵]. طول عمر برگ‌ها با دمای پایین‌تر محدود می‌شود. جدا از دمای بهینه ۳۵ درجه سانتی‌گراد، یك آستانه دمای پایین‌تر که برای هر گیاه معین است[۱۶]، باید مشخص شود.

صفحه سه شامل مقادیر مورد نیاز برای محاسبه سرعت جذب ناخالص است. با استفاده از تشعشع جذب شده (براساس تابش خورشیدی ورودی و دو ضریب اطفاء برای نور مرئی منتشر شده و برای نور مرئی مستقیم)، راندمان استفاده از نور برگ منفرد نیز باید مشخص شود. با توجه به ویژگی‌های فتوسنتزی برگ و عوامل کاهش محتمل، فتوسنتز ناخالص بالقوه محاسبه می‌شود. حداکثر سرعت جذب دی اکسید کربن[۱۷] تابعی از مرحله رشد است. کاربر می‌تواند برای مشخص کردن این رابطه، تا ۱۵ جفت داده را وارد کند. ضریب کاهش جذب[۱۸] بر اساس متوسط دمای روزانه برای دماهای زیر بهینه محاسبه می‌شود. همچنین تأثیر حداقل دمای روز بر ضریب کاهش حداکثر سرعت جذب دی اکسید کربن می‌تواند با یك رابطه تا ۱۵ جفت داده تعریف شود.

در صفحه چهار، پارامترهای مربوط به نگهداشت تنفس[۱۹] وارد می‌شود. آنچه توسط گیاه جذب می‌شود جهت تهیه انرژی برای نگهداری جرم زنده موجود، مورد استفاده قرار می‌گیرد که در اصطلاح به آن نگهداشت تنفس می‌گویند. افزایش دما سبب افزایش نگهداشت تنفس می‌شود. معمولاً ۱۰ درجه سانتی‌گراد افزایش دما باعث افزایش نگهداشت تنفس با ضریب ۲ می‌شود[۲۰]. نیازهای نگهداشت تقریباً متناسب با وزن خشك اندام‌های گیاهی است که باید نگهداری شود. پیری[۲۱] تنفس را کاهش می‌دهد. ضریب کاهش در اثر پیری از خواص گیاه است و ممکن است به مرحله رشد گیاه بستگی داشته باشد. کاربر می‌تواند تا ۱۵ جفت داده برای تعریف این رابطه وارد کند. کربوهیدرات باقیمانده به ساختار ماده تبدیل می‌شود. در این تبدیل مقداری از وزن به عنوان تنفس رویش کاهش می‌یابد که بوسیله راندمان تبدیلات در قسمت پایین صفحه، به محاسبات وارد می‌شود.

در صفحه پنج، جزءبندی ساختمان ماده گیاهی تولید شده به اندام‌های گیاهیِ متفاوت از قبیل ریشه، برگ، ساقه و اندام‌های ذخیره، با ضرایب جزءبندی[۲۲] تعریف شده است که هر کدام به مرحله رشد گیاه وابسته است. باید توجه داشت که مجموع ضرایب جزءبندی برای برگ‌ها، ساقه‌ها و اندام‌های ذخیره (بدون ریشه) در هر مرحله رشد باید مساوی ۱ باشد. برای هر ضریب جزءبندی یك رابطه تا ۱۵ جفت داده می‌تواند تعریف شود.

در صفحه شش، سرعت مرگ اندام‌های گیاهی مطرح می‌شود. البته سرعت مرگ اندام‌های ذخیره، صفر در نظر گرفته شده

است. کاربر می‌تواند یك سرعت مرگ برای ریشه‌ها و ساقه‌ها به عنوان تابعی از مرحله رشد مشخص کند. کاربر باید عمق ریشه اولیه، حداکثر افزایش روزانه و حداکثر عمق ریشه را تعیین کند. کاربر همچنین می‌تواند تا ۱۱ داده برای تعیین رابطه چگالی ریشه به عنوان تابعی از عمق ریشه وارد کند.

در صفحه هفت، تنش‌های خشکی و شوری مورد بررسی قرار می‌گیرند. SWAP فرض می‌کند که فاکتورهای کاهش به علت تنش آب و تنش شوری، برای استنتاج کاهش کل، می‌توانند در هم ضرب شوند. کاربر باید هدهای فشار را برای کاهش استخراج آبِ ریشه تعریف کند. در نیاز اتمسفری بالا، تعرق واقعی ممکن است سریع‌تر از نیاز اتمسفری پایین کاهش یابد. بنابراین کاربر باید سطوح نیاز اتمسفری بالا و پایین را مشخص کند. SWAP یك رابطه خطی بین هد فشار بحرانی و نیاز اتمسفری پایین و بالا فرض می‌کند. محاسبه کاهش جذب آب به علت تنش شوری، نیازمند به ورود مقدار آستانه شوری گیاه (مقدار EC بحرانی که بیش از آن تنش شوری اتفاق می‌افتد) و کاهش جذب آب ریشه بالای این حد آستانه، طبق مفهوم مَس و هافمن (۱۹۷۷) است. حداقل مقاومت سایه در معادله پنمن مونتیث برای محاسبه نرخ تبخیر و تعرق مورد استفاده قرار می‌گیرد. ضریب حائل شدن بارش برای محاسبه مقدار بارش بر اساس مفهوم Braden (۱۹۸۵) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴-۲- مدل تفصیلی فقط برای چمن[۲۳]

این مدل همان مدل تفصیلی شرح داده شده در قسمت قبل است که فقط برای گیاه چمن ryegrass چند ساله تعریف شده است. فرض شده است که چمن مرتب درو شده و گیاه باقی می‌ماند، چرای دام انجام نمی‌شود و چمن‌زار دائمی است.

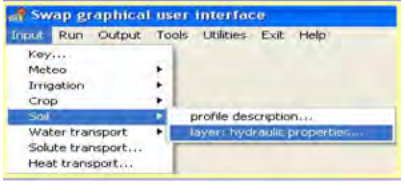
۴-۳- مدل ساده[۲۴]

مدل ساده، رشد محصول را مستقل از فاکتورهای تنش بیرونی، شبیه‌سازی می‌کند. تابع اصلی در این مدل، ارائه شرایط مرزی بالادست مناسب برای حرکت آب در خاک است. اگر شبیه‌سازی دقیق آب مورد استفاده گیاه، خیلی مهم‌تر از شبیه‌سازی دقیق محصول گیاهی باشد، مدل ساده گیاه، مفید است. با انتخاب مدل ساده، پنجره‌ای مشتمل بر سه صفحه نمایان می‌شود. در صفحه یک، ضریب خاموش‌سازی[۲۵] برای محاسبه مقدار نوری که به سطح خاك برای محاسبه تبخیر پتانسیل خاك، می‌رسد مورد نیاز است. رشد گیاه هم می‌تواند به صورت خطی مدل شود و هم توسط مقدار دمایی کنترل شود. با کلیك گزینه مناسب، گزینه‌های ورودی برای پارامترهای اضافی آماده می‌شوند. در مورد چرخه گیاهی ثابت، فقط طول چرخه گیاهی باید وارد شود. در مورد طول متغیر چرخه گیاهی، مقادیر مختلف دمایی باید وارد شوند. کاربر می‌تواند تا ۱۱ جفت داده برای تعریف چگالی نسبی ریشه به عنوان تابعی از عمق نسبی ریشه وارد کند.

در صفحه دو، کاربر باید شاخص سطح برگ یا ضریب پوشش خاك، ارتفاع گیاه یا ضریب گیاه، عمق ریشه و واکنش محصول را به عنوان تابعی از مرحله رشد مشخص کند. ارتفاع گیاه برای تعیین مقاومت آیرودینامیك در معادله پنمن- مونتیث مورد استفاده قرار می‌گیرد. ضریب واکنش گیاهی در هر مرحله رشد، رابطه بین محصول نسبی و تعرق نسبی را تعیین می‌کند. در مورد رابطه خطی بین محصول نسبی و تعرق نسبی، یا هنگامی که اطلاعات واکنش محصول به عنوان تابعی از مرحله رشد گیاه در دسترس نیست، برای 2<DVS<0، بایستی Ky=1 در نظر گرفته شود. صفحه سه مشابه صفحه هفت در مدل تفصیلی می‌باشد، لذا از تکرار توضیحات خودداری می‌شود.

۵- توصیف پروفیل خاک

همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، برای توصیف پروفیل خاک و خصوصیات هیدرولیکی آن در مدل SWAP دو گزینه در زیرمنوی خاک وجود دارد.



شکل ۷- زیرمنوی خاک در مدل SWAP

برای توصیف پروفیل خاک از زیرمنوی Soil/profile description، پنجره‌ای مشتمل بر چهار صفحه نمایان می‌شود. در صفحه یک، در قسمت ponding، حداکثر ضخامت لایه آب که می‌تواند در بالای سطح خاك ظاهر شود، قبل از اینکه رواناب شروع شود تعیین می‌گردد. ضریب گیاهی خاك بدون پوشش گیاهی[۲۶]، سرعت تبخیر پتانسیل خاك که بر اساس معادله پنمن- مونتیث محاسبه شده را به تبخیر پتانسیل خاك مورد استفاده در شبیه سازی SWAP تبدیل می‌کند. در مورد خاك خیس، تبخیر واقعی مساوی تبخیر پتانسیل است. هنگامی که خاك سطحی خشك است، SWAP سرعت واقعی تبخیر خاك که با حداکثر سرعت جریان آب خاك تعیین شده است را محاسبه می‌کند. برای محاسبه دقیق تبخیر واقعی، ضخامت قسمت بالا نباید خیلی زیاد باشد. راهنما، ضخامت حدود یک سانتی‌متر را پیشنهاد می‌کند. از آنجا که با استفاده از توابع هیدرولیکی خاك تبخیر خاك می‌تواند زیاد برآورد شده باشد SWAP اجازه می‌دهد از دو تابع تجربی اضافی هم استفاده شود. از آنجا که توابع تجربی‌اند، پارامترها برای خاک

و محل ویژه‌ای هستند. SWAP با گرفتن حداقل مقدار تبخیر پتانسیل از داده‌های هواشناسی، حداکثر سرعت جریان آب خاك بر اساس رابطه دارسی و حداکثر تعرق بر اساس توابع تجربی (اگر به‌وسیله کاربر انتخاب شده باشند)، تبخیر واقعی را تعیین می‌کند. برای حل دقیق و مؤثر برنامه عددی، SWAP ازحداقل و حداکثر گام‌های زمانی استفاده می‌کند. در قسمت پایین صفحه، دو نوع برنامه ضمنی می‌تواند توسط کاربر انتخاب شود: ۱- معادله ریچاردز در هر گام زمانی دو بار حل شده است. برای خیلی از مسائل ساده، در شرایط ماندگار یا شرایطی که برنامه، همگرایی خیلی سریعی می‌دهد، این حالت ممکن است مناسب باشد ۲- معادله ریچاردز تا زمان همگرایی حل شده است. این رویه برای بیشتر مسائل جریان غیر اشباع توصیه شده است.

در صفحه دو، SWAP اجازه می‌دهد حداکثر ۱۰ لایه خاك توسط کاربر تعریف شود. به علاوه، کاربر می‌تواند خاك را به حداکثر ۶۰ قسمت[۲۷] تقسیم‌بندی کند که در برنامه تفاضل محدود مورد استفاده قرار می‌گیرد. حداقل کردن تعداد تقسیمات، زمان محاسبات را کاهش می‌دهد؛ اما ممکن است خطای تعادل جرمی را افزایش دهد. لایه‌های خاك از بالا به پایین شماره‌بندی می‌شوند. برای هر قسمت، ضخامت نیز باید تعیین شود. برای محاسبات مؤثر سرعت‌های مرزی بالا، ضخامت قسمت باید کوچك و نزدیك سطح خاك باشد (حدود یک سانتی‌متر). SWAP کسر وزن ماسه شکسته، سیلت یا رس و کسر وزن مواد آلی را برای محاسبه خصوصیات گرمایی خاك، به کار می‌برد. عمقی که ریشه با مقطع عرضی خاك محدود شده باید در قسمت پایین صفحه وارد شود. برنامه، حداکثر عمق ریشه‌ی گیاه را کنترل می‌کند و هنگامی که رشد ریشه را شبیه‌سازی می‌کند از مینیمم دو عمق حداکثر به عنوان مرز استفاده می‌کند.

اولین موردی که در صفحه سه بررسی می‌شود، هیسترسیس است. در SWAP هیسترسیس فقط بر تابع نگهداشت آب اثر می‌کند. SWAP از روش مقیاس‌گذاری اِسکات و همکاران (۱۹۸۳) برای استنتاج منحنی‌های خیس‌شدن و خشك‌شدن استفاده می‌کند. اگر کاربر بخواهد هیسترسیس شبیه سازی شود باید شرایط اولیه مقطع عرضی خاك را که خیس یا خشك است تعیین کند. اگر خاك در ابتدا خشك است و یا در حین عملیات شبیه‌سازی خشك می‌شود، شبیه‌سازی باید از شرایط اولیه خیس شروع شود. متناوباً اگر شرایط اولیه خیس است، شرایط اولیه برای هیسترسیس باید خشك باشد. یك حداقل اختلاف هد برای تغییر از خیس به خشك در یك توده خاك باید مشخص شود. در قسمت مقیاس‌گذاری پارامترهای VG، مدل اجازه می‌دهد که توابع هیدرولیکی خاك برای شبیه‌سازی متغیرهای فضایی بر اساس میلر (۱۹۶۵) پیمایش شوند. SWAP مشخصه انقباض رس را برای شبیه‌سازی شکل‌گیری شکاف‌های خاک و انتقال آب و املاح در شکاف به کار می‌گیرد. SWAP همچنین می‌تواند جریان ترجیحی را که به علت جبهه رطوبتی ناپایدار به‌وجود می‌آید، شبیه‌سازی می‌کند.

در صفحه چهار در بخش اول، اگر کاربر بخواهد انتقال محلول با زهکش عرضی را شبیه سازی کند، بایستی گزینه مربوطه را فعال نموده وسپس در قسمت مقابل آن، ضریب غیرایزوتروپی هر لایه از خاک را در جدول وارد نماید. این ضریب، نسبت هدایت هیدرولیکی عمودی به افقی، در حالت اشباع است. در قسمت شرایط رطوبتی اولیه، دو نوع شرایط رطوبتی اولیه در اختیار کاربر قرار دارد. در گزینه اول، امکان تعیین هد فشار گره‌ای برای هر جزء وجود دارد. اگر موقعیت شبیه‌سازی شده از یك حالت نامتعادل شروع شود و یا اگر سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی نشود، این گزینه مفید است. هد فشار اولیه باید بر حسب سانتی‌متر وارد شود که اعداد منفی شرایط غیر اشباع را مشخص می‌کند. در گزینه دوم، امکان تعیین شرایط اولیه رطوبتی به عنوان تابعی از یك مقطع عرضی متعادل با سطح آب زیر زمینی وجود دارد. در این مورد فشار گره‌ای در سطح آب زیرزمینی مساوی صفر است و فشار گره‌ای با ارتفاع نسبت به سطح خاك به صورت خطی کاهش می‌یابد. در این حالت، سطح اولیه آب زیرزمینی باید مشخص شود. مقدار مشخص شده باید منفی باشد تا یك تراز زیر سطح خاك را نشان دهد (Huygen و همکاران، ۲۰۰۰).

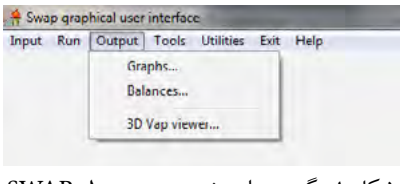
تعیین خصوصیات هیدرولیکی خاک در مدل SWAP با اجرای دستور Input/Soil/layer: hydraulic properties بنا به انتخاب کاربر می‌تواند بصورت جدولی و یا با تعریف توابع تحلیلی صورت گیرد. در روش جدولی، کاربر می‌تواند مقادیر رطوبت، پتانسیل ماتریک و هدایت هیدرولیکی را به روش‌های آزمایشگاهی و یا میدانی، اندازه‌گیری نموده و به‌صورت داده‌های جدولی در مدل وارد کند. اما در صورت انتخاب روش توابع تحلیلی، کاربر بایستی جهت تعیین پارامترهای معادله ون گنوختن-معلم، یکی از سه گزینه Staring Series، Hypres Series و یا Pedotransfer Function را انتخاب نماید. گزینه Staring Series دارای محدودیت‌های خاصی است از جمله اینکه صرفاً برای شرایط خاک‌های هلند قابل استفاده است. گزینه Hypres Series نیز صرفاً برای خاک‌های قاره اروپا قابل استفاده است. با انتخاب گزینه Pedotransfer Function، مقادیر $\theta(h)$ و $K(\theta)$ از داده‌های زود یافت خاک از قبیل بافت خاک، دانسیته حجمی و مقدار مواد آلی خاک تعیین می‌شوند (Kroes و Van Dam، ۲۰۰۳).

۶- خروجی‌های مدل

با توجه به شکل (۸) خروجی‌ها در مدل SWAP شامل سه بخش نمودارها، تعادل‌ها و نمای سه‌بعدی نتایج است. خروجی‌های نموداری می‌توانند به صورت نمودار X-Depth و یا نمودار X-Y (سری‌های زمانی) باشند. در خروجی‌های نموداری X-Y امکان

اضافه کردن مقادیر مشاهده‌ای به نمودارهای رسم شده توسط مدل، از طریق وارد کردن داده‌های مشاهداتی در قسمت observed values و در نتیجه، مقایسه نتایج بدست آمده توسط مدل و داده‌های میدانی وجود دارد. امکان ترسیم رگرسیون خطی و بدست آوردن رابطه رگرسیونی بین متغیرهای رسم شده در نمودارهای نوع X-Y نیز وجود دارد. در خروجی نوع تعادلی، می‌توان نتایج شبیه‌سازی آب و املاح را با هم مورد ارزیابی قرار داد و گزینه مناسب را استخراج نمود. امکان مقایسه نتایج به دوصورت متنی و نموداری نیز وجود دارد. با خروجی سه بعدی، امکان نمایش بار فشار، رطوبت خاک، دما و اطلاعات غلظت محلول به صورت همزمان وجود دارد.

محتوای فایل‌های خروجی مدل SWAP به همراه پسوند فایل خروجی در جدول (۲) ارائه شده‌اند.



شکل ۸- گزینه‌های خروجی در مدل SWAP

جدول ۲- فایل‌های خروجی در مدل SWAP

نام فایل خروجی	محتوای فایل
*.bal	بیلان کوتاه مدت آب و املاح
*.blc	بیلان آب توسعه یافته
*.inc	بیلان آب تدریجی
*.wba	بیلان حجمی آب
*.sba	بیلان تجمعی املاح
*.ate	درجه حرارت‌های خاک
*.vap	پروفیل‌های خاک
*.irg	مشخصات آبیاری‌ها
*.crp	روند رشد گیاه
*.drf	اجزاء زهکشی توسعه یافته
*swb	مدیریت آب سطحی ۱
*.man	مدیریت آب سطحی ۲
*.snw	بیلان آب برف
*.bma	بیلان آب تفصیلی منافذ درشت
swap.log	گزارش عملیات انجام شده
*.end	مقادیر نهایی متغیرهای تعیین شده

جمع‌بندی

مدل SWAP یک مدل شبیه‌سازی خاک، آب، اتمسفر و گیاه است. این مدل قابلیت تحلیل اثرات متقابل میان حرکت آب، رشد محصول و انتقال مواد محلول، پیش‌بینی عملکرد تحت شرایط رژیم‌های مختلف آب و شوری، شبیه‌سازی درازمدت و برنامه‌ریزی آبیاری را داراست. در این مدل، جریان عمومی آب در محیط‌های اشباع و غیر اشباع با معادله ریچاردز تشریح می‌شود. مدل SWAP معادله ریچاردز را به‌صورت عددی برای شرایط اولیه و شرایط مرزی خاص و همچنین رابطه‌های معلوم بین θ، h و K حل می‌کند. در این مدل، از تابع تحلیلی ون گنوختن و بکارگیری هدایت هیدرولیکی غیر اشباع معادله معلم برای بیان رابطه‌های بین مقدار آب خاک، پتانسیل فشاری و هدایت هیدرولیکی استفاده می‌شود. روش مورد استفاده برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع بر اساس یکی از پنج روش پنمن-مونتیث، پریستلی-تیلور، مکینک، هارگریوز و تورک می‌تواند توسط کاربر انتخاب شود. در مدل SWAP با بهره‌گیری از ضرایب عملکرد محصول در دوره‌های مختلف رشد، عملکرد نسبی محصول تعیین می‌گردد. همچنین SWAP از مدل گیاهی WOFOST6.0 برای شبیه‌سازی رشد محصول استفاده می‌کند. انواع مدل‌های گیاهی مورد استفاده در مدل SWAP شامل مدل تفصیلی، مدل تفصیلی فقط برای چمن و مدل ساده می‌باشد. خروجی‌ها در مدل SWAP، شامل سه بخش نمودارها، تعادل‌ها و نمای سه‌بعدی نتایج است.

پی‌نوشت

1- Soil-Water-Atmosphere-Plant
2- GLUE
3-maintenance respiration
4-growth respiration
5- senescence
6- Photosynthetically Active Radiation (PAR)
7- A_{pgross}
8- A_{max}
9- Generation of rainfall
10- Fixed irrigations
11- Scheduled irrigations
12- Depth criteria
13- Detailed model
14- Pre-anthesis development

15- Life span of leaves under optimum conditions
16- Lower threshold temperature for ageing of leaves
17- AMAX
18- TMPF
19- Maintenance respiration
20- Relative increase in respiration rate with temperature (/10C)=2
21- Senescence
22- FR,FL,FS,FO
23- Detailed (grass only)
24- Simple model
25- Extinction of light
26- Crop factor bare soil
27- Soil compartment

منابع

بادیه‌نشین، ع.، نوری، ح. و وظیفه‌دوست، م. ۱۳۹۳. بهبود برآورد عملکرد محصول در مدل شبیه‌سازی SWAP با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای. مجله علمی-پژوهشی تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۵(۴): ۳۷۹-۳۸۸.

دهقان، ه.، علیزاده، ا.، حقایقی مقدم، س.ا. و انصاری، ح. ۱۳۸۹. پیش‌بینی رطوبت نیمرخ خاک در سه مزرعه گندم با استفاده از مدل SWAP. نشریه علمی- پژوهشی آب و خاک، ۲۴(۵): ۱۰۰۸-۱۰۱۸.

شفیعی، م.، قهرمان، ب.، ثقفیان، ب.، داوری، ک. و وظیفه‌دوست، م. ۱۳۹۳. واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAP با استفاده از روش GLUE. نشریه علمی-پژوهشی پژوهش آب در کشاورزی، ۲۸(۲): ۴۷۷-۴۸۸.

شهیدی، ع. ۱۳۸۷. اثر برهم‌کنش کم آبیاری و شوری بر عملکرد و اجزاء عملکرد ارقام گندم با تعیین تابع تولید آب-شوری در منطقه بیرجند. پایان‌نامه دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

شهیدی، ع.، نحوی نیا، م. و پارسی‌نژاد، م. ۱۳۸۸. ارزیابی مدل SWAPدر برآورد عملکرد گندم تحت کیفیت‌ها و کمیت‌های مختلف آب آبیاری. همایش ملی الگوهای توسعه پایدار در مدیریت آب. شرکت مهندسین مشاور مهاب ثامن، مشهد، ایران.

شهیدی، ع.، نحوی نیا، م.، مکاری قهرودی، ا. و پارسی‌نژاد، م. ۱۳۹۳. ارزیابی مدل SWAP به منظور بررسی تأثیر آبیاری با آب شور بر رطوبت خاک (مطالعه موردی منطقه‌ی بیرجند). مجله علمی-پژوهشی دانش آب و خاک، ۲۴(۱): ۷-۲۷.

کیانی، ع. ۱۳۸۶. استفاده از مدل SWAP در شبیه‌سازی انتقال آب، املاح و عملکرد نسبی گندم. نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر. دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

منصوری، ح. و مصطفی‌زاده فرد، ب. ۱۳۸۵. راهنمای نصب و اجرای مدل SWAP. اولین همایش منطقه‌ای بهره‌برداری بهینه از منابع آب حوضه‌های کارون و زاینده رود. دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

منصوری، ح.، مصطفی‌زاده فرد، ب.، موسوی، س. ف. و فیضی، م. ۱۳۸۶. استفاده از مدل SWAP به منظور بررسی تأثیر مدیریت آبیاری با آب شور بر رطوبت خاک منطقه رودشت اصفهان. نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر. دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

محمدی، ا.، دلبری، م.، چاری، م. و محمدی، م. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی رطوبت و غلظت شوری در خاک با استفاده از مدل SWAP. دومین کنفرانس بین المللی مدل‌سازی گیاه، آب، خاک و هوا. دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.

وردی‌نژاد، و.، ابراهیمیان، ح. و احمدی، ح. ۱۳۹۱. ارزیابی عملکرد سیستم زهکشی زیرزمینی با استفاده از مدل SWAP (مطالعه موردی شبکه زهکشی ران بهشهر). نشریه علمی-پژوهشی آب و خاک، ۲۶(۵):۱۲۵۷-۱۲۶۷.

وردی‌نژاد، و.، سهرابی، ت.، فیضی، م.، حیدری، ن. و عراقی‌نژاد، ش. ۱۳۸۹. الگوبندی عملکرد محصولات مختلف در شرایط شوری آب آبیاری با استفاده از مدل SWAP. مجله علمی-پژوهشی دانش آب و خاک، ۱(۴): ۹۷-۱۱۱.

Bonfante A., Basile A., Acutis M., De Mascellis R., Manna P., Perego A. and Terribile F. 2010. SWAP, CropSyst and MACRO comparison in two contrasting soils cropped with maize in Northern Italy. Agricultural Water Management, 97: 1051-1062.

Huygen J., Van Dam J.C., and Kroes J.G. 2000. SWAP graphical user interface, User manual.

Kroes J.G. and Van Dam J.C. 2003. Reference manual SWAP version 3.0.3.

Kumar P., Sarangi A., Singh D.K., Parihar S.S. and Sahoo R.N. 2015. Simulation of salt dynamics in the root zone and yield of wheat crop under irrigated saline regimes using SWAP model. Agricultural Water Management, 148: 72–83.

Ma Y., Feng Sh., Huo Z. and Song X. 2011. Application of the SWAP model to simulate the field water cycle under deficit irrigation in Beijing, China. Mathematical and Computer Modelling, 54: 1044-1052.

Marinov D., Querner E. and Roelsam J. 2005. Simulation of water flow and nitrogen transport for a Bulgarain experimental plot using SWAP and ANIMO models. Journal of Contaminant Hydrology, 77: 145-164.

Moghabeli Damaneh I., Hasanpour F. and Behrouj M. 2013. Evaluation of HYDRUS-1D and SWAP models in simulating water and minerals movement in soil. Switzerland Research Park Journal, 102: 275-284.

Rallo G., Agnese C., Minacapilli M. and Provenzano G. 2012. Comparison of SWAP and FAO agro-hydrological models to schedule irrigation of wine grapes. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 138: 581–591.

Samipour F., Golmohammadi G., Mohammadi K. and Mahdian M.H. 2011. Aplication of Drainmod and SWAP in southwest of Iran for optimal design of drainage network. ICID 21st International Congress on Irrigation and Drainage, 15-23 Oct. Tehran, Iran.

Van Vosselen A., Verplancke H. and Van Rants E. 2005. Assessing water consumption of banana: traditional versus modeling approach. Journal of Agricultural Water Management, 74: 201-218.