

ارزیابی مدل SWAP در شبیه‌سازی انتقال آب و املاح در نیمرخ خاک

علی‌رضا کیانی و مهدی همایی*

* به ترتیب عضو هیئت علمی بخش تحقیقات فنی و مهندسی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی گلستان، نشانی: گرگان، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی گلستان، ص. پ. ۳۶۳-۴۹۱۶۵، تلفن: ۶۵-۳۳۵۰۰۶۳ (۰۱۷۱)، پیام‌نگار: akiani71@yahoo.com و عضو هیئت علمی دانشگاه تربیت مدرس
تاریخ دریافت مقاله: ۸۴/۳/۳؛ تاریخ پذیرش: ۸۵/۷/۱۵

چکیده

برای توسعه و کاربرد مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی انتقال آب و املاح در شرایط آبیاری، لازم است این‌گونه مدل‌ها برای مناطق مختلف واسنجی و ارزیابی شوند. به همین منظور، مدل SWAP به مدت دو سال زراعی (۸۱-۸۲ و ۸۰-۸۱) در زمین تحت کشت گندم در شمال گرگان مورد ارزیابی قرار گرفت؛ این مدل، شرایط مزرعه‌ای انتقال آب، املاح و حرارت را در خاک شبیه‌سازی می‌کند. داده‌های مورد نیاز این پژوهش با استفاده از چهار سطح آب آبیاری شامل W_1 ۵۰، W_2 ۷۵، W_3 ۱۲۵ و W_4 درصد نیاز گیاه به همراه چهار سطح شوری شامل S_1 ، S_2 ، S_3 و S_4 جمع‌آوری شد که در سال اول به ترتیب برابر $1/6$ ، $7/9$ ، $10/8$ و $13/6$ در سال دوم معادل 1 ، $9/3$ ، $12/2$ و $14/7$ دسی‌زیمنس بر متر در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی به صورت کرت‌های خردشده با سه تکرار اجرا شده بود. به استناد تحلیل‌های آماری، با وجود متغیرهای متعدد در شرایط مزرعه‌ای، مدل SWAP، مقدار رطوبت، شوری خاک، و عملکرد نسبی گندم را به خوبی شبیه‌سازی کرد. در همه موارد ضریب همبستگی بالاتر از ۸۰ درصد و میانگین مربعات خطا کمتر از انحراف معیار داده‌ها بود. اما در سال اول و در مرحله آخر رشد گندم به دلیل فرض زهکشی آزاد برای شرایط مرزی پایین و بالا آمدن سفره آب زیرزمینی در این زمان، رطوبت خاک در عمق ۸۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری توسط مدل کمتر از مقادیر واقعی پیش‌بینی شده بود. اختلاف مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر و تعرق در سال دوم به دلیل فراوانی روزهای بارندگی و در نظر نگرفتن سهم نفوذ عمقی مطلوب نبود.

واژه‌های کلیدی

انتقال آب و املاح، تبخیر و تعرق، شبیه‌سازی، گندم، مدل SWAP

مقدمه

نمی‌گیرند. برسلر و هافمن (Bresler & Hoffman, 1984) و ماینهاس و گوپتا (Minhas & Gupta, 1993) اعلام کردند که به دلیل تغییرات شوری نسبت به زمان و مکان، مدل‌های فوق برای شبیه‌سازی دینامیک انتقال آب و املاح مناسب نیستند و برای در نظر گرفتن تغییرات اشاره شده باید از مدل‌های غیر ماندگار استفاده کرد. کیث و گرین (Keith & Green, 1991) جامعیت کاربرد مدل‌ها را در شبیه‌سازی پدیده‌های واقعی از نظر ساختاری به چهار گروه

مدل‌های رایانه‌ای متعددی برای شبیه‌سازی روابط پیچیده آب، خاک، اتمسفر، و گیاه توسعه یافته‌اند. تعدادی از این نوع مدل‌ها را مولز (Molz, 1981) و ونکرت (Wenkert, 1983) جمع‌آوری کردند. اصولاً این نوع مدل‌ها به دو دسته ماندگار و غیر ماندگار تقسیم می‌شوند. مدل‌های ماندگار مدلی هستند که واکنش گیاهان را در مقابل تغییرات زمانی و مکانی شوری و رطوبت خاک در نظر



بررسی آنها نشان داد هیچ‌یک از مدل‌ها نسبت به دیگری برتری ندارد و خطای متوسط و نسبی آنها به ترتیب معادل $\pm 0/04$ و $\pm 0/29$ برآورد شد. آنها اختلاف مشاهده‌شده بین مدل‌ها را به نحوه برآورد تبخیر خاک و تعرق گیاه نسبت دادند. اندازه‌گیری رطوبت و شوری خاک، از عوامل اصلی برنامه‌ریزی آبیاری است و نیاز به صرف وقت و هزینه زیادی دارد. این پژوهش با هدف بررسی توانایی مدل SWAP در شبیه‌سازی انتقال آب و املاح در نیمرخ خاک اجرا شد.

توصیف مدل

مدل SWAP، با استفاده از معادله عمودی و یک‌بعدی ریچاردز (Richards, 1931) که ترکیبی است از دو معادله داری و پیوستگی، جریان انتقال آب را شبیه‌سازی می‌کند. معادله دیفرانسیلی فوق به شرح زیر نوشته می‌شود:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} - K(h) \right) - S_w(z, t) \quad (1)$$

که در آن، h = بار فشاری آب خاک (بر حسب سانتی‌متر)؛ K = هدایت هیدرولیکی غیر اشباع (بر حسب سانتی‌متر بر روز)؛ $C(h)$ = ظرفیت آب خاک (بر حسب یک بر سانتی‌متر) برابر با شیب منحنی نگهداری آب در خاک ($d\theta/dh$)؛ که θ رطوبت حجمی خاک است؛ t = زمان (بر حسب روز)؛ Z = عمق خاک (بر حسب سانتی‌متر)؛ و $S_w(z, t)$ = شدت تخلیه آب خاک^۱ به وسیله گیاه (بر حسب سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب روز) است.

مقدار $S_w(z, t)$ در شرایط بدون تنش رطوبتی برابر حداکثر جذب (S_{max}) است که از نسبت تعرق پتانسیل گیاه به عمق توسعه ریشه و در شرایط تحت تنش از رابطه ۲ به‌دست می‌آید:

تقسیم کردند. ۱- تک‌فرآیندی^۱، فقط یک عامل را بررسی می‌کند ۲- چندفرآیندی^۲، دو یا چند عامل را در نظر می‌گیرد ۳- جامع^۳، تقریباً همه عوامل مهم را در مدل بررسی می‌کند، و ۴- مزرعه‌ای^۴، که مدلی جامع است و تغییرات زمانی و مکانی پدیده‌ها در آن لحاظ می‌شود. مدل SWAP^۵ یک مدل مزرعه‌ای است که با در نظر گرفتن عوامل خاک، آب، اتمسفر و گیاه که می‌تواند انتقال آب، املاح و حرارت را در خاک در محیط‌های اشباع و غیر اشباع شبیه‌سازی می‌کند (Van Dam et al., 1997).

اولین نسخه این مدل، SWATRE^۶ بود که فدس و همکاران (Feddes et al., 1978) آن را توسعه دادند. باستیانسسن و همکاران (Bastiaanssen et al., 1996) با استفاده از این مدل گزینه‌های مختلف توزیع آب آبیاری را ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که اگر مقدار آب نامحدود باشد، برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس تقاضا نسبت به توزیع آب بر اساس مقادیر ثابت، بهره‌وری آب را تا ۳۰ درصد افزایش می‌دهد. فچتر و همکاران (Fechter et al., 1991) مدل SWATRE را برای برآورد رطوبت خاک ارزیابی کردند. نتایج ارزیابی آنها نشان داد که این مدل رطوبت خاک را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند. این پژوهشگران خطای مطلق^۷ بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده با مقادیر پیش‌بینی‌شده را ۳/۵ درصد برآورد کردند. دروگزر و همکاران (Droogers et al., 2000) مدل SWAP را برای برآورد رطوبت خاک تحت دو نوع کشت پنبه و گندم ارزیابی و ضریب تعیین (R^2) را برای دو گیاه به ترتیب برابر ۶۷ و ۸۴ درصد برآورد کردند. کلمنت و همکاران (Clement et al., 1994) نتایج شبیه‌سازی رطوبت خاک حاصل از سه مدل SWATRE، SWASIM^۸ و LEACHM^۹ را با نتایج اندازه‌گیری‌شده مقایسه کردند. همه مدل‌ها رطوبت خاک را به خوبی شبیه‌سازی کردند.

1- Single-Process	2- Multiple-Process	3- Comprehensive	4- Field Scale
5- Soil Water Atmosphere Plant	6- Soil Water & Actual Transpiration Rate Extended		7-Mean Absolute Error
8- Soil Water Simulation Model	9-Leaching Estimation & Chemistry Model		10- Sink Term

ارزیابی مدل SWAP در شبیه‌سازی انتقال آب و ...

که در آن، $c =$ غلظت املاح آب خاک (بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب)؛ $q =$ شدت جریان آب خاک (بر حسب سانتی‌متر بر روز)؛ $L =$ طول انتشار محلول (بر حسب سانتی‌متر)؛ و $S_s(z, t) =$ شدت تخلیه آب خاک توسط گیاه (بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب روز) است. مقدار q از رابطه داری به شرح زیر قابل محاسبه است (جهت جریان آب از پایین به سمت بالا مثبت است):

$$q = -K(h) \left[\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right] \quad (5)$$

جوری و همکاران (Jury *et al.*, 1991) مقدار معمول L را در شرایط آزمایشگاهی بین ۰/۵ تا ۲ سانتی‌متر و در شرایط مزرع‌های بین ۵ تا ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفتند (در این پژوهش مقدار آن برابر ۱۵ سانتی‌متر فرض شد). برای محاسبه $S_s(z, t)$ همانند رابطه ۲ می‌توان نوشت:

$$S_s(z, t) = \alpha(h_o) S_{\max} \quad (6)$$

که در آن، $\alpha(h_o)$ تابع کاهش نامیده می‌شود و مقدار آن بستگی به شوری آب در خاک دارد و از صفر تا ۱ در نوسان است و از تابع ماس و هافمن (Maas & Hoffman, 1977) به دست می‌آید:

$$a(h_o) = 1 - \frac{a}{360} (h^* - h_o) \quad (7)$$

که در آن، $a =$ شیب خط رابطه عملکرد نسبی - شوری خاک (برابر ۶ درصد بر دسی‌زیمنس بر متر)؛ $h_o =$ شوری عصاره اشباع خاک (بر حسب دسی‌زیمنس بر متر)؛ و h^* مقدار آستانه شوری خاک (بر حسب دسی‌زیمنس بر متر) است.

برای حل معادله‌های دیفرانسیلی فوق نیاز به توابع هیدرولیکی خاک (منحنی نگهداری آب در خاک، $\theta(h)$ ، تابع هدایت هیدرولیکی خاک، $K(h)$ یا رابطه

$$S_w(z, t) = \alpha(h) S_{\max} \quad (2)$$

که در آن، $\alpha(h)$ تابع کاهش نامیده می‌شود و بستگی به بار فشار آب خاک دارد و بین صفر تا ۱ در نوسان است و ویزیورا و همکاران (Wyseure *et al.*, 1994) آن را به صورت معادله ۳ تعریف کردند.

$$\alpha(h) = 0 \quad h < h_a \text{ or } h \geq h_{pwp}$$

$$\alpha(h) = \frac{h - h_a}{h_{fc} - h_a} \quad h \leq h_{fc} \quad (3)$$

$$\alpha(h) = 1 \quad h < h_c$$

$$a(h) = \frac{\left(\frac{1}{h_{pwp}} - \frac{1}{h} \right)}{\left(\frac{1}{h_{pwp}} - \frac{1}{h_c} \right)} \quad h < h_{pwp}$$

که در آن، h_a ، h_{fc} و $h_c =$ به ترتیب مقادیر مطلق بار فشاری آب خاک در نقطه ورود هوا؛ ظرفیت مزرعه؛ حد بحرانی؛ و نقطه پژمردگی گیاه است. این ضرایب از منابع مختلف مانند وسلینگ (Wesseling, 1991)، تیلور و اشکروفت (Taylor & Ashcroft, 1972)، دورنباس و کسام (Doorenbos & Kassam, 1979) و اسمیت (Smith, 1992) قابل دسترس است. در این پژوهش، مقادیر فوق به ترتیب برابر ۳۰، -۱۰۰، -۸۰۰ و -۱۵۰۰۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شدند.

انتقال املاح در مدل SWAP بر اساس پدیده انتقال - انتشار^۱ به شرح معادله زیر بیان می‌شود (Singh, 2003):

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(qL \frac{\partial c}{\partial z} - qc \right) - S_s(z, t) \quad (4)$$

است. برای این منظور، از روابط وان گنوختن-معلم (Van Genuchten, 1980) به شرح زیر استفاده شد:

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(1 + |ah|^n\right)^{-m} \quad (8)$$

$$, m = 1 - 1/n$$

که در آن، θ_r و θ_s = به ترتیب رطوبت باقیمانده و اشباع خاک (بر حسب درصد حجمی رطوبت) است؛ و n و a = ضرایب تجربی (بر حسب یک بر سانتی‌متر) هستند. تابع هدایت هیدرولیکی برابر است با:

$$s_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (9)$$

$$K(s_e) = K_s s_e^{0.5} \left[1 - \left(1 - s_e^{1/m}\right)^m \right]^2,$$

که در آن، K_s = هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (بر حسب سانتی‌متر بر روز) است.

برای برآورد ضرایب معادله‌های غیرخطی فوق، وان گنوختن و همکاران (Van Genuchten et al., 1991) برنامه RETC¹ را پیشنهاد کردند.

روش اجرا

این پژوهش در منطقه شمال گرگان به مدت دو سال زراعی (۸۰-۸۱ و ۸۱-۸۲) در زمین تحت کشت گندم به اجرا درآمد. به دلیل محدودیت شوری و خشکی، سطح وسیعی از منطقه شمالی استان گلستان به کشت گندم و جو اختصاص دارد. عوامل اقلیمی شامل باران، دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی به صورت روزانه از ایستگاه هواشناسی مزرعه نمونه و در موارد کمبود از نزدیک‌ترین ایستگاه مشابه اقلیم منطقه (سینوپتیک گنبد) گرفته شد.

داده‌های مورد نیاز مربوط به کمیت و کیفیت آب آبیاری، توزیع شوری و رطوبت در نیمرخ خاک از ۱۶ تیمار آزمایشی تعیین شد. تیمارها شامل ۴ سطح مقدار آب ۵۰ (W_1)، ۷۵ (W_2)، ۱۰۰ (W_3) و ۱۲۵ (W_4) درصد نیاز آبی گیاه به همراه ۴ سطح شوری آب آبیاری S_1 ، S_2 ، S_3 و S_4 که در سال اول به ترتیب برابر ۱/۶، ۷/۹، ۱۰/۸ و ۱۳/۶ و در سال دوم معادل ۱، ۹/۳، ۱۲/۲ و ۱۴/۷ دسی زیمنس بر متر بود. تیمارها در سه تکرار و در کرت‌هایی به ابعاد ۴×۳ متر با فاصله ۲ متر از یکدیگر و در زمین تحت کشت گندم به اجرا درآمدند (محل کرت‌ها طی دو سال آزمایش ثابت بودند). در هر سال چهار نوبت آبیاری انجام شد. در سال اول مقدار آب مصرف‌شده برای تیمارهای W_1 ، W_2 ، W_3 و W_4 به ترتیب ۱۱۸، ۱۶۳، ۲۰۹ و ۲۴۶ میلی‌متر و در سال دوم ۱۰۴، ۱۶۰، ۲۱۲ و ۲۶۲ میلی‌متر و باران موثر با استفاده روش USDA^۲ (Smith, 1992) نیز برای دو سال برابر ۱۶۳ و ۱۸۴ میلی‌متر برآورد شد. توزیع رطوبت (به روش وزنی) و شوری (به روش عصاره اشباع) در نیمرخ خاک تا عمق یک متری به ازای هر ۲۰ سانتی‌متر از سطح خاک در تیمارهای مختلف با نمونه‌گیری در چند مرحله زمانی (زمان کاشت، قبل و ۴۸ ساعت پس از آبیاری و در زمان برداشت) تعیین شد. رطوبت و شوری نیمرخ خاک در زمان کاشت به عنوان شرایط اولیه، عوامل اقلیمی به عنوان شرایط مرزی بالا، و زهکشی آزاد در سال اول و اعماق مختلف سطح آب زیرزمینی در سال دوم به عنوان شرایط مرزی پایین به مدل داده شدند.

عوامل گیاهی مانند عملکرد دانه، اجزای عملکرد، عمق ریشه، ارتفاع گیاه و سطح برگ اندازه‌گیری و ضریب واکنش گیاه^۳ از دورنباس و کسام (Doorenbos & Kassam, 1979) استفاده شد. مقدار آب مصرفی گیاه از طریق اندازه‌گیری اجزای بیلان آب بر اساس رابطه زیر محاسبه شد:

$$ET = I + P - (D_d + R_o) \pm \Delta S \quad (10)$$

1- Retention Curve

2- United State Department of Agriculture

3- Yield Response Factor

فشاری^۱ و محفظه فشاری^۲ رطوبت حجمی خاک در مکش‌های مختلف اندازه‌گیری شد. به کمک داده‌های فوق و برنامه RETC ضرایب توابع هیدرولیکی خاک و از روش بار افتان^۳ نیز هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_s) تعیین شد. جدول ۱ نتایج برآورد ضرایب توابع هیدرولیکی خاک و همچنین مقادیر مورد نیاز برای حل معادله ۹ را به تفکیک هر عمق نشان می‌دهد.

که در آن، P و I = به ترتیب مقدار آب آبیاری و آب باران؛ ET ، D_d و R_o = به ترتیب مقدار مصرف گیاه، عمق آب زهکشی‌شده و رواناب؛ ΔS = تغییرات ذخیره رطوبت خاک (همه بر حسب میلی‌متر) هستند. برای تعیین ضرایب توابع هیدرولیکی خاک (رابطه‌های ۸ و ۹)، نمونه‌های خاک از ۳ عمق ۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ سانتی‌متری برداشت و با استفاده از دستگاه‌های صفحه

جدول ۱- بعضی از ضرایب فیزیکی و توابع هیدرولیکی خاک

n	a (یک بر سانتی‌متر)	B_d ^۴ (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	K_s (میلی‌متر بر ساعت)	θ_s (درصد حجمی رطوبت)	θ_r (درصد حجمی رطوبت)	عمق خاک (سانتی‌متر)
۱/۳۰۶	۰/۰۰۴۸	۱/۵	۱۴	۰/۴۲	۰/۰۸	۰-۳۰
۱/۲۴۷	۰/۰۱۱	۱/۴۸	۹/۱	۰/۴۹	۰/۱	۳۰-۶۰
۱/۲۵۷	۰/۰۰۶	۱/۳۶	۸/۳	۰/۵۱	۰/۱	۶۰-۹۰

$$MAE = \left(\sum_{i=1}^n |O_i - S_i| \right) / n \quad (12)$$

$$CRM = \left(\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i \right) / \sum_{i=1}^n O_i \quad (13)$$

$$S_d = \left(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 / n \right)^{1/2} \quad (14)$$

که در این معادله‌ها، P ، O ، \bar{O} و n = به ترتیب نماینده مقادیر پیش‌بینی‌شده، اندازه‌گیری‌شده، متوسط مقادیر اندازه‌گیری‌شده و تعداد داده‌ها هستند؛ و شاخص i نیز نشان‌دهنده هر یک از داده‌هاست.

معادله‌های دیفرانسیلی ۱ و ۴ برای گام‌های زمانی یک روز و مکانی ۵ سانتی‌متر از عمق خاک با استفاده از روش عددی اختلاف‌های محدود^۵ حل شدند. برای ارزیابی مدل علاوه بر ضریب همبستگی (R)، انحراف معیار (S_d)^۶ از شاخص‌های آماری پیشنهاد شده^۷ لوگ و گرین (Loague & Green, 1991) نیز استفاده شد. این شاخص‌ها عبارت‌اند از: ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$)^۸، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب مقدار باقیمانده (CRM)^۹. روابط ریاضی برای محاسبه هر یک از شاخص‌های اشاره شده به شرح زیر است:

$$RMSE = \left(\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n \right)^{1/2} \quad (11)$$

1- Pressure Plate 2- Pressure Membrane 3- Falling Method 4- Bulk Density
5- Finite Differences 6- Standard Division 7- Root Mean Square Error 8- Coefficient of Residual Mass

آخر رشد به دلیل در نظر گرفتن زهکشی آزاد برای شرایط مرزی پایین، مدل نتوانسته است رطوبت خاک را به خوبی مراحل دیگر شبیه‌سازی کند. اختلاف دوم مربوط است به تیمارهای شور و در عمق خاک، به طوری که مدل رطوبت خاک را، اگرچه با اختلاف کم، کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد کرد. برای روشن شدن موضوع، شکل‌های ۳ و ۴ ارائه می‌شود. این شکل‌ها توزیع رطوبت شبیه‌سازی شده را در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده در ۳ مرحله زمانی مربوط به یکی از تیمارهای شور (S_3) به تفکیک هر سال نشان می‌دهد. در شکل‌ها دیده می‌شود که در مراحل اولیه رشد گندم، که هنوز آبیاری صورت‌نگرفته و تبخیر حاکم است، در هر دو سال بین مقادیر شبیه‌سازی شده و واقعی رطوبت اختلافی نیست. اما در مراحل بعدی و در عمق‌های پایین‌تر، مقادیر شبیه‌سازی شده اندکی کمتر از مقادیر واقعی هستند. از آنجا که شوری در نیمرخ خاک متفاوت و در سطح خاک بیشتر از عمق است از نظر مدل، گیاه می‌تواند آب را از مناطق پایین‌تر که شوری کمتری دارد، جذب کند ولی در شرایط واقعی انرژی گیاه برای جذب در شرایط شوری کمینه و مقدار جذب دچار اختلال می‌شود. عامل دیگر اختلاف مشاهده شده به پارامترهای هیدرولیکی خاک خصوصاً هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) خاک مرتبط است.

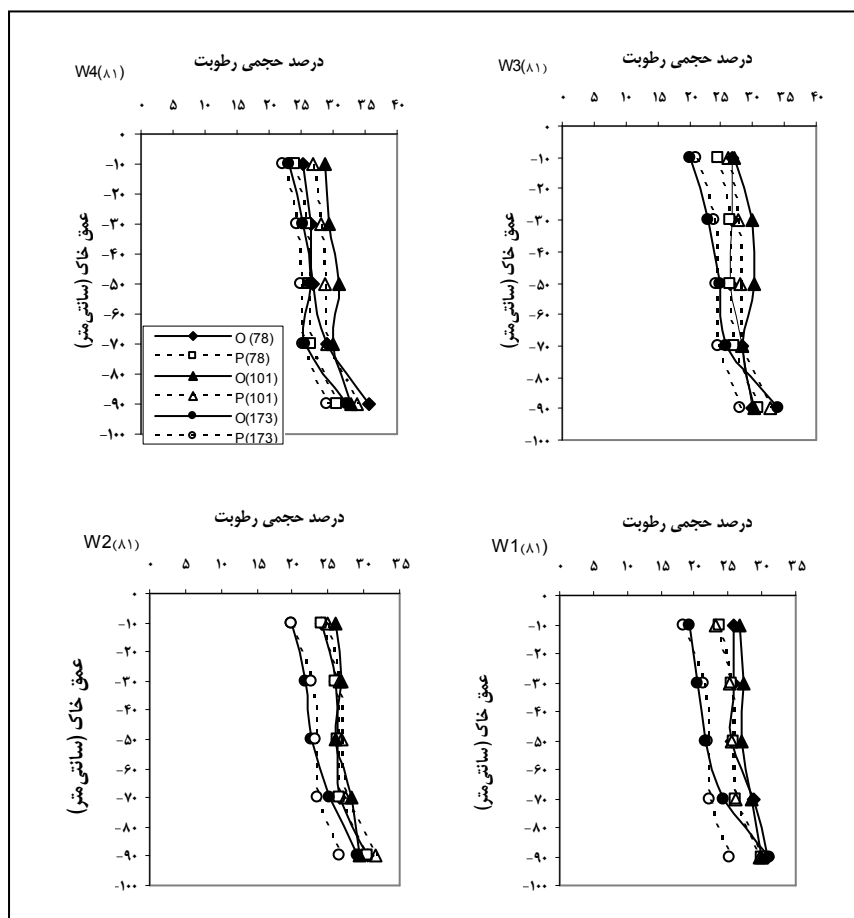
دورجی (Dorji, 2003) نشان داد که در مدل SWAP در مقادیر بالاتر K_s (بیشتر از ۲۸ سانتی‌متر بر روز)، میزان تعرق حساسیتی نشان نمی‌دهد ولی در مقادیر کمتر از ۲۰ سانتی‌متر بر روز تعرق نسبت به تغییرات K_s خیلی حساس است. در این پژوهش نیز مقدار K_s در لایه‌های پایین که تعرق حاکم است کمتر از مقادیر فوق است (جدول ۱). دورجی همچنین نشان داد که میزان تعرق نسبت به پارامترهای a و θ_s در دامنه وسیعی از تغییرات آنها و نسبت به پارامتر n تا ۱/۵، حساسیتی را نشان نمی‌دهد (Dorji, 2003).

$RMSE$ مشخص می‌کند که چه مقدار از شبیه‌سازی‌ها بیشتر یا کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده هستند. MAE نشان‌دهنده خطای مطلق مدل و CRM تمایل مدل را در برآورد بیشتر یا کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. اگر $RMSE$ کمتر از S_d باشد نشان‌دهنده کارکرد مطلوب مدل است. هرگاه CRM منفی شود به معنی آن است که مدل تمایل به برآورد بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری شده را دارد (و بر عکس). در صورتی که همه مقادیر پیش‌بینی شده برابر مقادیر اندازه‌گیری شده باشند شاخص‌های $RMSE$ ، MAE ، S_d و CRM برابر صفر خواهند شد.

نتایج و بحث

توزیع رطوبت و شوری خاک

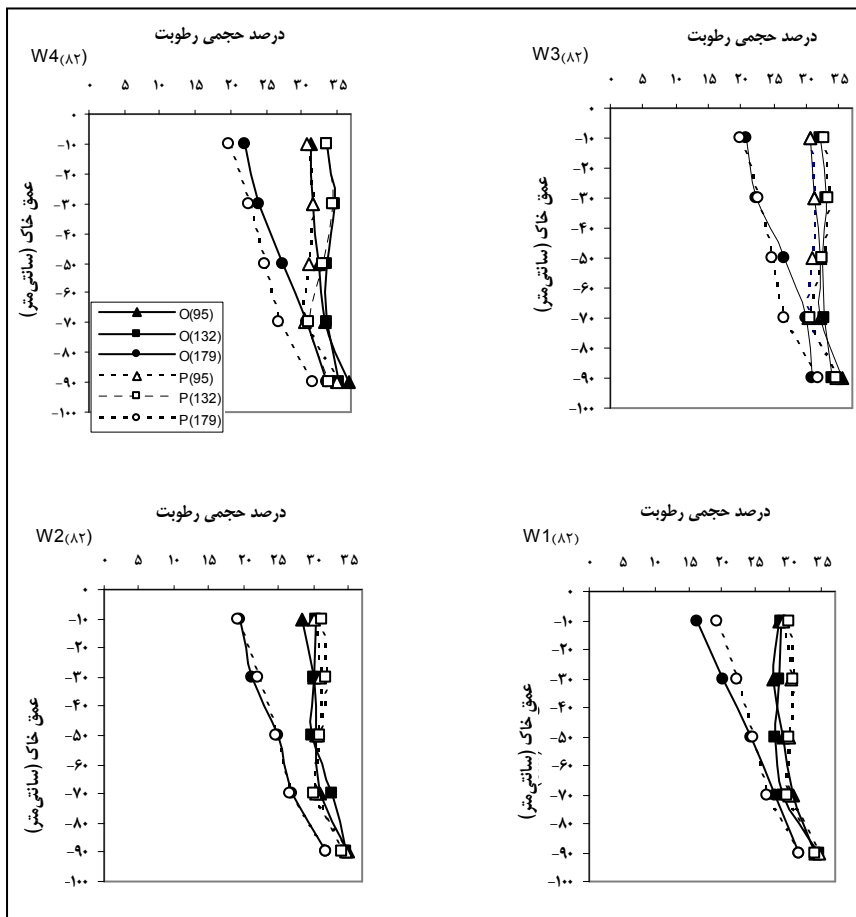
شکل‌های ۱ و ۲ مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده را در مقابل مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل $SWAP$ برای سه مرحله زمانی به ترتیب ۷۸، ۱۰۱ و ۱۷۳ روز پس از کاشت در سال اول و ۹۵، ۱۳۲ و ۱۷۹ روز پس از کاشت در سال دوم نشان می‌دهند. به طور کلی نتایج دو ساله نشان می‌دهد که رطوبت در نیمرخ خاک توسط مدل $SWAP$ به خوبی شبیه‌سازی شده است. اما در روند توزیع رطوبت دو اختلاف مشخص مشاهده شد. یکی از آنها مربوط به مرحله آخر رشد گندم در سال اول (۱۷۳ روز پس از کاشت) و در عمق ۱۰۰-۸۰ سانتی‌متری خاک است. در این مرحله، مدل برای همه تیمارها رطوبت خاک را به شکلی قابل توجه کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داد (شکل ۱). یکی از عوامل اصلی این اختلاف به بالا آمدن سطح سفره آب زیرزمینی زمین‌های مجاور به دلیل آب‌تخت کردن آنها برای کشت شالی در اواخر دوره رشد مرتبط است. این اختلاف در زمان‌های دیگر و همچنین در سال دوم (شکل ۲) که سطوح آب زیرزمینی در مراحل مختلف به عنوان شرایط مرزی پایین وارد مدل شدند وجود ندارد، با این همه می‌توان گفت که در سال اول و در مرحله



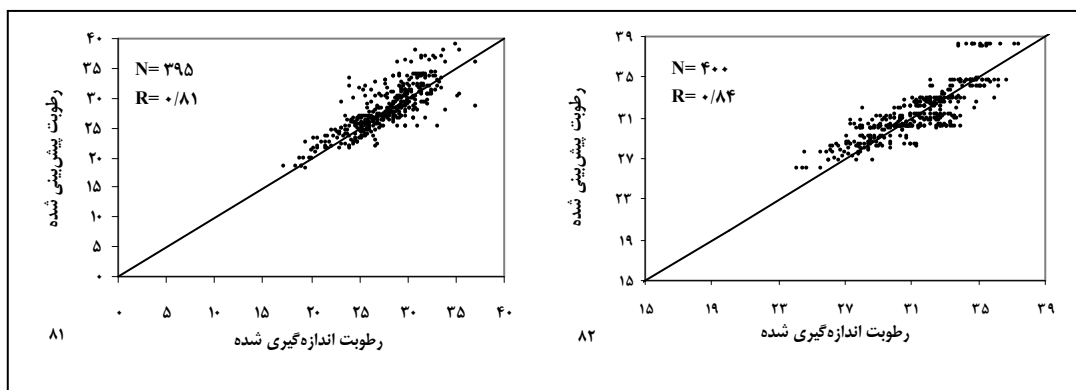
شکل ۱- مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت (O)، در مقابل مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP (P)، در نیمرخ خاک در تیمارهای مختلف آبی سال ۱۳۸۱

کردند. این محققان ضریب همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده را برای دو گیاه فوق به ترتیب ۸۲ و ۹۰ درصد برآورد کردند. خطای مطلق را فچتر و همکاران (Fechter *et al.*, 1991) با استفاده از مدل SWATRE برابر ۳/۵ و فاریا و همکاران (Faria *et al.*, 1992) برای مدل SWACROP^۱ بین ۲/۸ و ۳/۶ درصد به دست آوردند. ضریب *RMSE* نیز در هر دو سال کمتر از ضریب S_e و در نتیجه نشان‌دهنده دقت مطلوب مدل در برآورد رطوبت خاک است. ضریب *CRM* در هر دو سال کم است ولی مقدار منفی آن تمایل مدل را به برآورد بیشتر از واقعیت نشان می‌دهد (به جز در تیمارهای شور که مدل تمایل به برآورد کمتر دارد).

برای تحلیل نهایی دقت مدل در شبیه‌سازی رطوبت خاک، شکل ۳ و جدول ۲ ارائه می‌شود که به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی شده رطوبت خاک را در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده، و تحلیل آماری آنها را به تفکیک دو سال نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج سال دوم نسبت به سال اول به طور کلی رضایت‌بخش‌تر است. عامل اصلی آن به تغییر شرایط مرزی پایین مرتبط است. در سال اول، شرایط مرزی پایین به صورت زهکشی آزاد و در سال دوم سطوح آب زیرزمینی در چند مرحله به عنوان شرایط مرزی پایین وارد مدل شدند. در هر دو سال، ضریب *R* بالا و مقادیر *RMSE* و *MAE* در حد پایین است. دروگرز و همکاران (Droogers *et al.*, 2000) مدل SWAP را در شبیه‌سازی رطوبت خاک برای دو گیاه پنبه و گندم ارزیابی



شکل ۲- مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت (O)، در مقابل مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP (P)، در نیمرخ خاک در تیمارهای مختلف آبی سال ۱۳۸۲



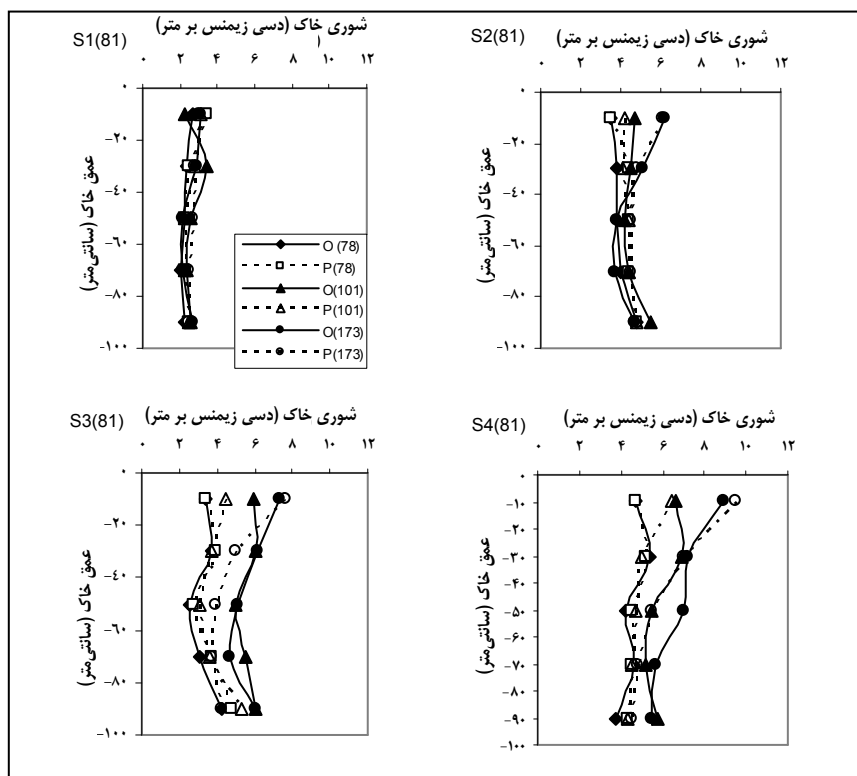
شکل ۳- مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت (بر حسب درصد حجمی رطوبت) در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل SWAP در سال‌های ۸۲-۱۳۸۱ (N تعداد داده‌ها و R ضریب همبستگی داده‌هاست)

جدول ۲- ارزیابی آماری رطوبت شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP

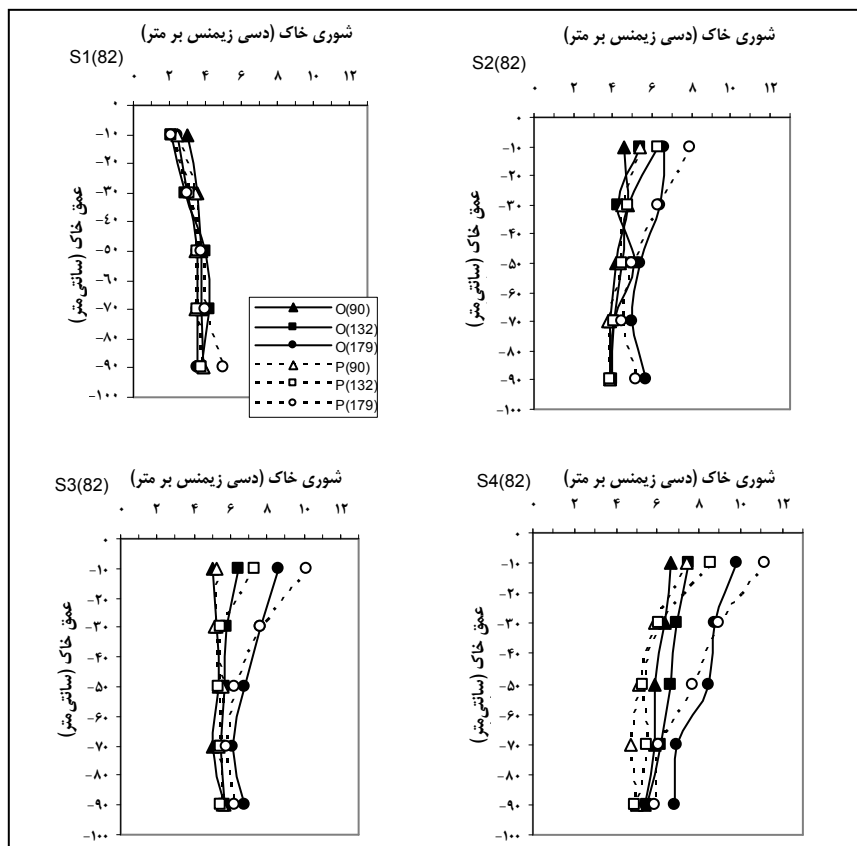
۱۳۸۲	۱۳۸۱	ضرایب
۸۴	۸۱	R (درصد)
۱/۴۴	۲/۳۴	RMSE (درصد حجمی)
۱/۳	۱/۷	MAE (درصد حجمی)
-۰/۰۰۲۰۵	-۰/۰۰۹۹	CRM
۲/۵۶	۳/۴۵	S _d (درصد حجمی)

حساسیت زیادی نشان می‌دهد و عامل تغییرات K_s نیز شوری نیمرخ خاک و همچنین توزیع غیر یکنواخت ریشه گندم در شرایط شوری است. K_s در شرایط خاک بدون شوری و بدون حضور گیاه اندازه‌گیری شده است. بنابراین با فرض ثابت در نظر گرفتن K_s در مدل، اختلاف‌های مشاهده‌شده نیز طبیعی است. اما به طور کلی و به استناد تحلیل آماری (شکل ۶ و جدول ۳) می‌توان گفت که مدل در شبیه‌سازی شوری خاک نیز از دقت مطلوبی برخوردار است. مشاهده می‌شود که در هر دو سال، ضریب همبستگی در حد قابل قبول (۸۳ درصد) و ضرایب RMSE و MAE به ترتیب و به طور متوسط معادل ۰/۸ و ۰/۷ دسی زیمنس بر متر و ضریب RMSE در هر دو سال کمتر از ضریب S_d است که دقت مناسب مدل را در شبیه‌سازی شوری خاک نشان می‌دهد. ضریب CRM نشان می‌دهد که مدل، شوری خاک را قدری کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد می‌کند. سینگ (Singh, 2003) مدل SWAP را در شرایط کشت گندم ارزیابی کرد و نتیجه گرفت که مدل، رطوبت و شوری خاک را به‌خوبی شبیه‌سازی و ضریب RMSE را برای شوری خاک در دامنه ۰/۰۹۴ تا ۱/۸۴ دسی زیمنس بر متر برآورد می‌کند.

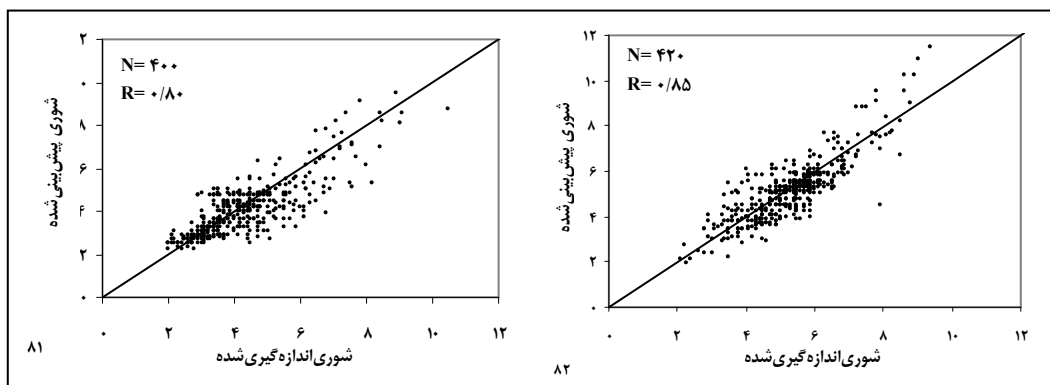
برای ارزیابی مدل در شبیه‌سازی شوری خاک، شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده‌اند. این شکل‌ها تغییرات شوری اندازه‌گیری شده در نیمرخ خاک را در چند مرحله زمانی به تفکیک هر سال در مقابل مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که بیشترین تطابق مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده از نظر زمانی مربوط به مرحله قبل از تیمار آبیاری (به ترتیب ۷۸ و ۹۰ روز پس از کاشت در سال ۸۱ و ۸۲) و در تیمارهای غیر شور است. اما بین مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده شوری خاک در مراحل بعدی رشد و در تیمارهای شور (S_4 , S_3) اختلاف مشاهده می‌شود و برای هر دو سال تقریباً روند مشابهی دارند. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است توزیع شوری در نیمرخ خاک در تیمارهای شور غیر یکنواخت‌تر از تیمارهای غیر شور است. در چنین شرایطی به دلیل جذب آب از نقاط غیر شور توسط مدل و ایجاد گرادیان حرکتی در خاک، میزان تخلیه رطوبت به وسیله مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده قدری متفاوت و شوری نیز دستخوش این تغییرات است. در قسمت قبلی توضیح داده شد که تعرق در مدل SWAP نسبت به تغییرات K_s در مقادیر پایین آن



شکل ۴- مقادیر اندازه‌گیری شده شوری (O)، در مقابل مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP (P)، در نیمرخ خاک در تیمارهای مختلف شوری سال ۱۳۸۱



شکل ۵- مقادیر اندازه‌گیری شده شوری (O)، در مقابل مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP (P)، در نیمرخ خاک در تیمارهای مختلف شوری سال ۱۳۸۲



شکل ۶- مقادیر اندازه‌گیری شده شوری (دسی زیمنس بر متر) در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل SWAP در سال‌های ۸۲-۱۳۸۱

جدول ۳- ارزیابی آماری شوری خاک شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP

۱۳۸۲	۱۳۸۱	ضرایب
۸۵	۸۰	R (درصد)
۰/۷۵	۰/۸۵	RMSE (دسی زیمنس بر متر)
۰/۷	۰/۷	MAE (دسی زیمنس بر متر)
۰/۰۲۸۵	۰/۰۶۴	CRM
۱/۲۳	۱/۴	S_d (دسی زیمنس بر متر)

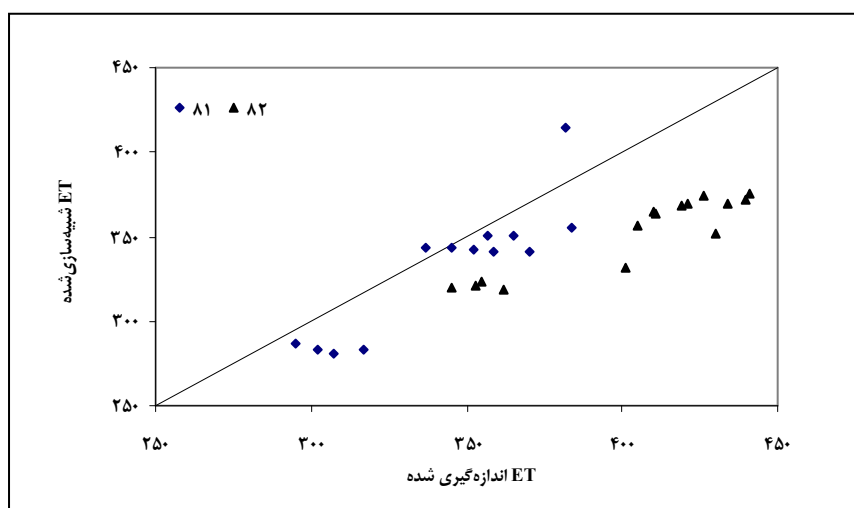
تبخیر و تعرق و عملکرد نسبی

مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده ET در سال دوم بیشتر از سال اول است. ممکن است بخشی از این اختلاف را به عوامل اشاره شده در قسمت توزیع رطوبت و شوری نسبت داد، ولی همان‌طور که بحث شد، با وجود عوامل اشاره شده، مدل نتایج رضایت‌بخشی در برآورد رطوبت و شوری خاک داشت. ممکن است فرضیات در نظر گرفته شده مربوط به تابع جذب آب (معادله ۳) باعث ایجاد این تفاوت‌ها شده باشد، اما آنالیز حساسیت مدل نسبت به ضرایب فوق در محدوده $\pm 50\%$ درصد مقادیر آنها، تنها روی ET به مقدار ۳ میلی‌متر اثر گذاشت. اما عامل اصلی اختلاف بین مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده ET خصوصاً در سال ۱۳۸۲ (شکل ۷ و جدول ۴) مربوط به سهم نفوذ عمقی در محاسبه ET است. در همه موارد، سهم مقدار نفوذ عمقی در مدل به

شکل ۷، مقادیر ET شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP را در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده و جدول ۴ نتیجه تحلیل آماری آنها را به تفکیک هر سال نشان می‌دهند. ضریب مثبت CRM در هر دو سال نشان می‌دهد که مدل، به طور کلی، ET را کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد می‌کند. ضریب همبستگی در هر دو سال مطلوب و ضریب RMSE در سال اول در حد قابل قبول و کمتر از انحراف معیار (S_d) است، اما نتایج تحلیل آماری در سال دوم (جدول ۴) نشان می‌دهد که عملکرد مدل در شبیه‌سازی تبخیر و تعرق گیاه رضایت‌بخش نیست؛ به دلیل اینکه مقدار RMSE در این حالت برابر ۵۳ میلی‌متر و بزرگ‌تر از مقدار S_d یعنی $31/2$ میلی‌متر) و خطای مطلق (MAE) بین

مراتب بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بود و دلیل آن نیز به برآورد ET در این پژوهش برمی‌گردد. در روش اجرا توضیح داده شد که در این آزمایش فرض کردیم مقدار رطوبت بیشتر از حد ظرفیت زراعی خاک زهکشی می‌شود، ولی برای دستیابی دقیق و واقعی، به اندازه‌گیری روزانه رطوبت خاک نیاز دارد. فراوانی روزهای بارانی، مقدار بیشتر باران در سال ۱۳۸۲ نسبت به سال ۱۳۸۱، و اندازه‌نگرفتن رطوبت خاک

بلافاصله پس از باران باعث شده‌است تا سهم نفوذ عمقی در این شرایط نادیده گرفته‌شود (میزان بارندگی طی فصل رویش گندم در سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۸۲ به ترتیب ۱۶۳ میلی‌متر در ۲۵ روز و ۱۸۴ میلی‌متر در ۴۵ روز بود). بنابراین ملاحظه‌شد که اختلاف اشاره‌شده بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده ET خصوصاً در سال دوم رضایت‌بخش نباشد.



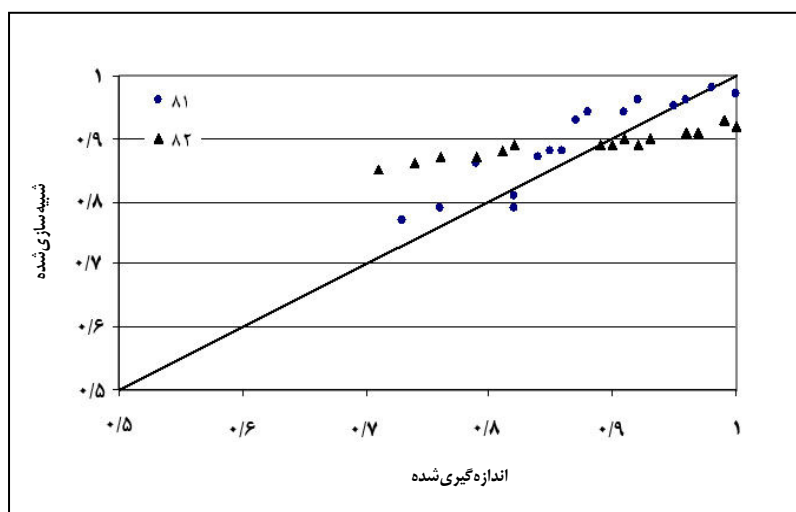
شکل ۷- مقادیر ET (میلی‌متر) شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده ET در دو سال زراعی

جدول ۴- ارزیابی آماری تبخیر و تعرق شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP

۱۳۸۲	۱۳۸۱	ضرایب
۹۲	۸۶	R (درصد)
۵۳/۶	۲۳/۴	RMSE (میلی‌متر)
۵۱/۷	۲۰/۵	MAE (میلی‌متر)
۰/۱۲۸	۰/۰۳۵	CRM
۳۱/۲	۲۹/۵	S _d (میلی‌متر)

نتیجه ارزیابی عملکرد نسبی گندم شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP در مقابل عملکرد نسبی اندازه‌گیری شده در شکل ۸ و نتیجه تحلیل آماری آن به تفکیک هر سال در جدول ۵ ارائه شده است. به طور کلی نتایج به دست آمده در هر دو سال دلالت بر شبیه‌سازی مطلوب عملکرد نسبی گندم به وسیله مدل SWAP دارد. در جدول ۵ مشاهده می‌شود که ضرایب همبستگی بالا و ضریب RMSE در حد پایین است. ضریب RMSE برای عملکرد نسبی در هر دو سال کمتر از انحراف معیار است. ضریب CRM در هر دو سال کوچک و منفی است و تمایل مدل را در برآورد بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. نتایج بررسی‌های ۵ ساله رویز و آتسیت (Ruiz & Utset, 2003) روی مدل

برای شبیه‌سازی عملکرد نسبی نیشکر نیز نشان می‌دهد مدل فوق تمایل به برآورد بالاتر از مقادیر واقعی عملکرد نسبی نیشکر را دارد. برای شبیه‌سازی عملکرد نسبی گیاه در مدل SWAP می‌توان از روش ساده دورنیاس و کسام (Doorenbos & Kassam, 1979) یا روش دقیق مبتنی بر جداسازی انتقال کربوهیدرات‌ها در قسمت‌های مختلف و در مراحل رشدی گیاه استفاده کرد. در این پژوهش به دلیل نبود اطلاعات بسیار دقیق، از روش اول استفاده شده است. بنابراین بخشی از اختلاف‌های مشاهده شده بین مقادیر اندازه‌گیری شده عملکرد نسبی و مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل مربوط به انتخاب نوع روش است.



شکل ۸- مقادیر عملکرد گندم (نسبی) شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده آن در سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۸۲

جدول ۵- ارزیابی آماری عملکرد گندم شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP

۱۳۸۲	۱۳۸۱	ضرایب
۹۵	۹۲	R (درصد)
۰/۰۷	۰/۰۳۶	RMSE (درصد)
۵/۶	۳	MAE (درصد)
-۰/۰۱۷	-۰/۰۲۴	CRM
۰/۰۸۹	۰/۰۷۶	S _d (درصد)

اما عامل دیگر اختلافها مربوط به تابع کاهش عملکرد در شرایط شوری است. در توصیف مدل توضیح داده شد که تابع کاهش عملکرد در شرایط شوری بر اساس رابطه دو تیکه‌ای ۷ برآورد می‌شود. این تابع شیب عملکرد- شوری را بعد از آستانه و برای شرایط بدون تنش آبی را به صورت خطی در نظر می‌گیرد، در حالی که کیانی و همکاران (Kiani *et al.*, 2005) نشان دادند که در اثر تغییر رطوبت خاک، شیب فوق نیز ثابت نیست و به صورت غیر خطی تغییر می‌کند. همچنین در شرایط توأم دو تنش شوری و آبی نیز SWAP فرض می‌کند که تابع جذب آب از حاصل ضرب دو تابع کاهش شوری و کم‌آبی پیروی می‌کند در حالی که همایی (Homaei, 1999) نشان داد که در شرایط توأم شوری و کم‌آبی تابع حاصل ضربی نمی‌تواند اثر دو تنش را به خوبی کمی کند.

نتیجه‌گیری

با توجه به تغییرات عوامل متعدد در شرایط مزرع‌های، به طور کلی می‌توان گفت که نتایج ارزیابی مدل SWAP در شبیه‌سازی انتقال آب، املاح، تبخیر و تعرق و

عملکرد نسبی به استناد تحلیل‌های آماری ارائه شده در این مقاله رضایت‌بخش است. اما جهت ارتقای مدل در برآورد دقیق‌تر عوامل اشاره شده و با توجه به نتایج به دست آمده موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

- رطوبت خاک نسبت به تغییرات سطح سفره آب زیرزمینی حساسیت زیادی نشان می‌دهد. در نتیجه تعیین دقیق نوسانات سفره آب زیرزمینی برای تعیین شرایط مرزی پایین حایز اهمیت است.
- به طور طبیعی، توزیع ریشه گیاه و شوری در نیمرخ خاک غیر یکنواخت است. در این شرایط میزان جذب توسط گیاه دچار اختلال می‌شود. اما مدل SWAP فرض می‌کند که گیاه قادر است آب را از مناطق پایین‌تر که شوری کمتری دارد جذب کند.
- برای شبیه‌سازی انتقال املاح در شرایط واقعی، لازم است داده‌های ورودی تاثیرگذار، خصوصاً K_s ، در همان شرایط (با حضور گیاه و در شرایط شوری) اندازه‌گیری شود.
- تابع کاهش عملکرد در شرایط توأم شوری و کم‌آبی در مدل SWAP نیاز به بازنگری دارد.

منابع

- Bastiaanssen, W. G. M., Huygen, J., Schakel, J. K. and Van Den Broek, B. J. 1996. Modeling the Soil-Water-Crop-Atmosphere System to Improve Agricultural Water Management in Arid Zone (SWATRE). In: Van Den Broek, B. J. (Ed.). Dutch Experiences Irrigation Water Management Modeling. Report 123. Winand Staring Center. Wageningen. Netherlands.
- Bresler, E. and Hoffman, G. J. 1984. Irrigation management for soil salinity control: Theories and tests. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, 1552-1559.
- Clemente, R. S., De Jong, R., Hayhoe, H. N., Reynolds, W. D. and Hares, M. 1994. Testing and comparison of three unsaturated soil water flow models. *Agric. Water Manag.* 25, 135-152.
- Doorenbos, J. and Kassam, A. H. 1979. Yield response to water. *Irrig. Drain. Paper* 33. FAO. Rome.

- Dorji, M. 2003. Integration of SWAP model and sebal for evaluation of on-farm irrigation scheduling with minimum field data. M. Sc. Thesis. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation. Enschede. the Netherlands. ITC.
- Droogers. P., Bastiaanssen, W. G. M., Beyazgul, M., Kayam, Y., Kite, G. W. and Murray-Rust, H. 2000. Distributed agro-hydrological modeling of an irrigation system in western Turkey. *Agric. Water Manag.* 43, 183-202.
- Faria, R. T., Madramootoo, C. A., Boisvert, J. and Prasher, S. O. 1992. A comparison of the versatile soil moisture budget and SWACROP models in Brazil. The American Society of Agricultural Engineers Charlohe. June. 21-24. North Carolina.
- Fechter, J., Allison, B. E., Sivalcumar, M. V. K., Van Der Ploeg, R.R. and Beley, J. 1991. An evaluation of the SWATRE and CERES-Milet models for southwest Niger. Proceedings of the Niame Workshop IAHS Pub.
- Feddes, R. A., Kowalik, P. J. and Zaradny, H. 1978. Simulation of Field Water Use and Crop Yield. Pudoc. Wageningen.
- Homaee, M. 1999. Root water uptake under non-uniform transient salinity and water stress. Ph.D. Thesis. Wageningen Agricultural University.
- Jury, W. A., Gardner, W. R. and Gardner, W. H. 1991. Soil Physics. Fifth edition. Wiley. N. Y.
- Keith, L. and Green, R. E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. *J. Cont. Hydrol.* 7, 51-73.
- Kiani, A. R., Asadi, M. E., Homaee, M. and Mirlatifi, M. 2005. Wheat production function under salinity and water stress conditions. Proceedings of MTERM International Conference. June 6-10. AIT. Thailand.
- Loague, K. and Green, R. E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *J. Cont. Hydrol.* 7, 51-73.
- Maas, E. V. and Hoffman, G. J. 1977. Crop salt tolerance current assessment. *J. Irrig. Drain. Eng.* 103(2): 115-134.

- Minhas, P. S. and Gupta, R. K. 1993. Conjunctive use of saline and non saline waters. III. Validation of applications of transient model for wheat. *Agric. Water Manag.* 23, 149-160.
- Molz, F. J. 1981. Models of water transport in the soil - plant system. A review. *Water Resour. Res.* 17(5): 1245-1260.
- Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics.* 1, 318-333.
- Ruiz, M. E. and Utset, A. 2003. Models for predicting water use and crop yields. A Cuba experience. Available on the: http://users.ictp.it/~pub-off/Lectures/inso18/28_Ruiz.pdf.
- Singh, R. 2003. Water productivity of irrigated crops in Sirsa distraction, India. Interaction of remote sensing crop and soil models and GIS. In: Van Dam, J. C. and Malik, R. S. (Eds.). WATRO Final Report. ISBN 90-6464-864-6.
- Smith, M., 1992. Cropwat: A computer program for irrigation planning and management. FAO Irrig. Drain. paper No. 46.
- Taylor, S. A. and Ashcroft, G. M, 1972. *Physical Edaphology.* Freeman and Co. San Francisco. California.
- Van Dam, J. C., Huygen, J., Wesseling, J. G., Feddes, R. A., Kabat, P., Van Walsum, P. E. V., Groenendijk, P. and Van Diepen, C. A. 1997. Theory of SWAP, version 2. Simulation of water flow, solute transported plant growth in the soil-water-atmosphere-plant environment. Report No.71. Dept. Water Resour. Wageningen Agricultural University.
- Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898.
- Van Genuchten, M. Th., Leij, F. J. and Yates, S.R., 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Report No. EPA/600/2-91/065. Ada. Okla. U.S. Environmental Protection Agency. Kerr, R. S. Environmental Research Laboratory.
- Wenkert, W. 1983. Water Transport and Balance Within the Plant: An overview.P.137-172. In: Taylor, H. M. (Eds.). *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production.* ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.

ارزیابی مدل SWAP در شبیه‌سازی انتقال آب و ...

- Wesseling, J. G., 1991. Meerjarige simulaties van grondwateronttrekking voor verschillende bodemprofielen, grondwatertrappen en gewassen met het model SWATRE. Report No. 152. Winald Staring Centre. Wageningen.**
- Wyseure, G. C. L., Sanmuganathan, K. and O'Callaghan, J. R. 1994. Use of simulation for combining rainfed and irrigated sugarcane production in dry zone of Sri Lanka. Electron Agri. 11, 323-335.**

Evaluating SWAP Model for Simulation of Water and Solute Transport in Soil Profile

A. R. Kiani* and M. Homaei

* Academic Member, Agriculture Engineering Research Department, Agriculture and Natural Resources Research Center, P. O. Box: 49165-363, Gorgan, Iran. E-mail: akiani71@yahoo.com

Many mathematical models have been applied and developed for simulation of water and solute transport in irrigated agriculture. Using a model, it should be first calibrated and validated for different regions. SWAP is a field scale model that simulates water, solute and heat movement in the soil profile. In this study, the SWAP model was evaluated for two years (2001 and 2002) on wheat in a semi-arid area in North of Gorgan. Required data were collected by field experiments. The experiments were consisted of four water quantity levels (50, 75, 100 and 125 percent of crop water requirements) and four water quality levels including S_1 , S_2 , S_3 and S_4 having 1.6, 7.9, 10.8 and 13.6 dS/m in the first year and 1, 9.3, 12.2 and 14.7 dS/m in the second year, respectively. The experimental design was performed by randomized complete block design as a split plot layout with three replications. Based on statistical analysis, results from the simulation of SWAP model were in good agreement with the field measurements of water content (θ), salinity (ECe) along the soil profile and wheat relative yield. In all cases, correlation coefficient (R), was higher than 80 percent and root mean square error (RMSE) was less than standard division (S_d). In the first year, bottom boundary condition was supposed to be free drainage, but due to fluctuations of water table in harvest time, model under predicted soil water content in 80-100 cm depth. Since the high frequency of rainfall (especially in second year) and elimination of deep percolation, the discrepancy between the measured and predicted ET was not satisfied.

Key words: ET, Simulation, SWAP model, Water and solute transport, Wheat