

## ارزیابی مدل شبیه‌سازی (COUP) جهت برآورد رطوبت و دمای خاک با پوشش گیاهی ذرت و خاک بدون پوشش

رضا نوروز ولاشدی، نوذر قهرمان<sup>۱\*</sup> و پرویز ایران‌نژاد

دانش آموخته کارشناسی ارشد هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران؛ rezanorooz@yahoo.com  
استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج؛

nghahreman@ut.ac.ir

دانشیار گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران؛ piran@ut.ac.ir

### چکیده

شبیه‌سازی دما و رطوبت اعماق خاک با توجه به کمبود اندازه‌گیری‌های مستقیم در مزرعه، جهت مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری و برآورد تبخیر - تعرق در پوشش‌های گیاهی مختلف حائز اهمیت می‌باشد. در این پژوهش، کارایی مدل COUP در شبیه‌سازی پویایی دما و رطوبت خاک، در دو کرت با پوشش گیاه ذرت و بدون پوشش گیاهی در منطقه کرج مورد ارزیابی قرار گرفته است. جهت اجرای مدل، متغیرهای هواشناسی شامل دمای بیشینه و کمینه، رطوبت جوی، ساعات آفتابی، سرعت باد و بارندگی در مقیاس روزانه اندازه‌گیری شد. خصوصیات فیزیکی خاک (بافت، درصد مواد آلی، pH، وزن مخصوص ظاهری) با نمونه‌برداری از اعماق مختلف تعیین شد. جهت برآورد شاخص سطح برگ از رابطه تجربی بین این شاخص و بیشینه عرض برگ در دوره تحقیق استفاده شد. همچنین عمق گسترش ریشه‌ها و ارتفاع بوته در فواصل منظم ثبت شد. نیمرخ خاک به ۴ لایه تقسیم و دمای خاک با استفاده از دماسنج‌های جیوه‌ای استاندارد و رطوبت خاک توسط دستگاه تتاپروب در چهار عمق ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری شد. پس از اجرای مدل، مقادیر شبیه‌سازی شده دما و رطوبت خاک در مقایسه با داده‌های مشاهده با استفاده از سنج‌های آماری مورد ارزیابی قرار گرفت. یافته‌های این مطالعه، قابلیت کاربرد مدل را نشان داد، لیکن برای حصول به برآوردهای دقیق‌تر از رطوبت خاک و اسنجی بیشتری مورد نیاز است.

واژه‌های کلیدی: مدل شبیه‌سازی، تجزیه خاک، عمق ریشه، کرج

### مقدمه

در چند دهه گذشته مدل‌های متفاوت، از روابط ساده تجربی تا مدل‌های پیچیده عددی نظیر طرحواره‌های خاک-گیاه-جو که فرایندهای متفاوت درگیر در خاک، گیاه و جو و برهمکنش‌های بین آن‌ها را مدل می‌کنند،

ما و رطوبت خاک از عوامل کلیدی در تولید محصولات کشاورزی هستند. تغییرات دما و رطوبت نه تنها به متغیرهای واداشتی بلکه به ویژگی‌های خاک و گیاه به شدت وابسته است. به دلیل دشواری و هزینه‌های بالای اندازه‌گیری دما و رطوبت خاک در شرایط مختلف،

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، آدرس: تهران، کرج، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی

\* دریافت: مهر ۱۳۹۰ و پذیرش: اردیبهشت ۱۳۹۱

SOILN در سال ۱۹۹۸ توسط یانسن، اکرستن<sup>۶</sup> و همکاران با تلفیق معادلات جریان رطوبتی و دمایی خاک به‌طور همزمان این فرآیند توأمان را شبیه‌سازی کردند، که ساختار اصلاح شده آن تحت عنوان مدل COUP توسط یانسن و موون<sup>۷</sup> در سال ۲۰۰۱ ارائه شد. مبانی تئوریک و معادلات مورد استفاده در این مدل در بخش مواد و روش‌ها با تفصیل بیشتر ارائه شده است. پس از تدوین نسخه نهایی مدل COUP، یانسن در سال ۲۰۰۵ این مدل را در کشور چین جهت شبیه‌سازی دما و رطوبت در چند نوع خاک با رژیم‌های بارندگی متفاوت بکار برد و نتایج حاصله رضایت بخش بود.

هدف از این مطالعه، ارزیابی مدل COUP در شبیه‌سازی همزمان دما و رطوبت خاک با دو پوشش متفاوت در اقلیم کرج می‌باشد.

### مواد و روشها

مدل COUP، با هدف تخمین و مدلسازی چگونگی رفتار رطوبتی و دمایی خاک با تکنیک‌های حل عددی صریح معادلات دیفرانسیلی جفت شده‌ی رطوبت و دما در خاک توسعه یافته است. این مدل از متغیرهای استاندارد هواشناسی روزانه استفاده می‌کند. مقادیر پارامترهای مدل نیز همانند متغیرهای واداشتی با زمان تغییر می‌کنند. اساسی‌ترین متغیرهای ورودی هواشناسی روزانه مورد نیاز برای اجرای این مدل، بارش، دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش هستند. تفصیل جزئیات فیزیکی و تشریح الگوریتم رایانه‌ای در منابع (یانسن، ۲۰۰۵) و (یانسن و کارلبرگ<sup>۸</sup>، ۲۰۰۵) موجود است و در ادامه خلاصه‌ای کوتاه از چگونگی شبیه‌سازی در زیرروال‌های دما و رطوبت اعماق خاک ارائه می‌شود.

جریان گرما در خاک ناشی از هدایت و همرفت گرما توسط آب مایع و بخار آب است:

$$q_h = -k_h \frac{\partial T}{\partial z} + C_w T q_w + L_v q_v \quad (1)$$

که در آن  $q_h$ ،  $q_w$  و  $q_v$  به ترتیب شار گرما، آب مایع و بخار آب،  $k_h$  ضریب رسانایی گرمایی،  $T$  دما،  $z$  عمق خاک،  $C_w$  ظرفیت گرمایی آب و  $L_v$  گرمای نهان تبخیر است. از ترکیب معادله (۱) با قانون پایستاری انرژی، معادله عمومی پیش‌یابی دمای خاک بدست می‌آید:

$$\frac{\partial}{\partial t}(CT) - L_f \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}(k_h \frac{\partial T}{\partial z}) - C_w T \frac{\partial q_w}{\partial z} - L_v \frac{\partial q_v}{\partial z} - s_h \quad (2)$$

برای برآورد آن‌ها ارائه شده است. مدل‌های اخیر جهت اجرا نیازمند داده‌های ورودی شامل متغیرهای هواشناسی (مهمترین آن‌ها بارندگی، دمای هوا، رطوبت هوا، سرعت باد و تابش)، خصوصیات فیزیکی خاک و پارامترهای گیاهی هستند. دشواری اندازه‌گیری‌های میدانی و زمان‌بر بودن آن‌ها موجب گسترش کاربرد این مدل‌ها شده است. در اکثر مدل‌های شبیه‌سازی موجود چگونگی رفتار رطوبتی و دمایی خاک با تکنیک‌های حل عددی معادلات دیفرانسیلی جفت شده‌ی رطوبت و دما در خاک تخمین و قابل تجزیه و تحلیل است. فیلیپ و دفریس<sup>۱</sup> دریافتند که انتشار دما در خاک بوسیله خصوصیات گرمایی خاک کنترل می‌شود (فیلیپ و دفریس، ۱۹۵۷). اغلب مطالعات صورت گرفته در سال‌های ۱۹۵۸ تا ۱۹۸۱ از تئوری فیزیکی ارائه شده توسط این دو محقق و یا با کمی تغییر و اصلاح استفاده کرده‌اند. در طی سه دهه اخیر، محققان زیادی جهت توسعه مدل‌های شبیه‌سازی توأمان پویایی رطوبت و دما در خاک تلاش نمودند. مدل SHAW یک مدل شبیه‌سازی یک بعدی است که به منظور شبیه‌سازی فرآیندهای یخ زدن و ذوب یخ در خاک توسعه داده‌شد. این مدل توانایی شبیه‌سازی انتقال حرارت و رطوبت خاک را در حالات پوشیده از گیاه، برف، رسوبات و بقایای گیاه در اقلیم‌های مختلف داراست (فلرچینگر<sup>۲</sup> و همکاران، ۱۹۹۶). ایران‌نژاد و شائو<sup>۳</sup> در سال ۱۹۹۸ طرحواره‌های سطح خشکی‌ها را بر پایه مدل‌های چند لایه خاک همراه با پوشش گیاهی جهت پیش‌بینی عددی و شبیه‌سازی رطوبت و دمای خاک و شارهای گرمای نهان و محسوس در مطالعات بزرگ مقیاس ارائه کردند. ایران‌نژاد و شائو<sup>۳</sup> (۲۰۰۲) برای بیان بهتر شرایط در خاک‌های غیرهمگن با کوتاه‌کردن گام‌های زمانی به حل عددی معادلات پرداختند. قهرمان و هوندال (۲۰۰۶) مدل SWACROP را برای شبیه‌سازی رطوبت خاک در ایالت پنجا ب هند مورد واسنجی و ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان دهنده دقت این مدل در برآورد رطوبت خاک بود. یانسن و هالدین<sup>۴</sup> در سال ۱۹۷۹ به مدلسازی فرایندهای انتقال گرما و رطوبت در خاک پرداختند. یانسن و تان‌هالم<sup>۵</sup> سال ۱۹۹۰ از مدل SOIL که مبتنی بر تئوری پیشنهادی فیلیپ و دفریس می‌باشد برای پیش‌بینی دمای خاک و حل معادلات جریان رطوبت و دما در نیمرخ خاک استفاده کرده و به شبیه‌سازی دو بعدی دما و رطوبت خاک در شرایط مانا پرداختند. پس از ارائه مدل SOIL

1. De Vries
2. Flerchinger
3. Shao
4. Jansson and Haldin
5. Thunholm

6. Eckersten

7. Moon

8. Karlberg

در یکی از کرت‌ها در تاریخ اول خرداد ۱۳۹۰ ذرت (SC704) کشت شد و کرت دیگر بدون گیاه رها شد. قبل از کاشت بستر مزرعه آماده‌سازی شده و جهت تعیین پارامترهای خاکشناسی، نیمرخ خاک مزرعه به چهار لایه به ضخامت‌های ۲۰ سانتی‌متر از سطح خاک تقسیم و از لایه‌های مختلف نمونه‌برداری صورت پذیرفت. نمونه‌ها در آزمایشگاه خاکشناسی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی آزمایش و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها تعیین شد (جدول ۱). بافت خاک با در نظر گرفتن درصد‌های رس، سیلت و شن بر اساس مثلث خاک اداره کشاورزی ایالات متحده تعیین شد.

حل معادله (۵) به عنوان بستار به مدل‌های هیدرولیکی، یعنی منحنی مشخصه رطوبتی  $(\theta(\psi))$  و تابع هدایت هیدرولیکی  $(k_w(\psi))$  یا  $(k_w(\theta))$  خاک، نیازمند است. مدل‌های هیدرولیکی گوناگون بر اساس مطالعات آماری و حل‌های تحلیلی ارائه شده است. در مطالعه حاضر، منحنی مشخصه رطوبتی ارائه شده توسط بروکس و کوری<sup>۱</sup> (۱۹۶۴):

$$\Theta = \left( \frac{\psi}{\psi_s} \right)^2, \quad \psi \leq \psi_s \quad (6)$$

یا  $\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$  و تابع هدایت هیدرولیکی غیر اشباع بر اساس مدل معلم (۱۹۹۱) و فان گنوختن<sup>۲</sup> (۱۹۸۰):

$$k_w(\psi) = \frac{k_s [1 - (\alpha\psi)^{n-1} (1 + (\alpha\psi)^n)^{-m}]^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{m/2}} \quad (7)$$

بکار برده شده است. در این روابطه  $\psi_s$  پتانسیل ماتریکی اشباع،  $\theta_s$  و  $\theta_r$  به ترتیب درصد رطوبت اشباع و باقیمانده (m3/m3)،  $k_s$  رسانایی هیدرولیکی اشباع، و  $(\frac{1}{\pm})$   $n$  و  $m$  ضرایب تجربی هستند. پارامترهای توابع هیدرولیکی بر اساس بافت خاک و استفاده از نتایج شاپ<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۱) برآورد شده است (جدول ۲).

داده‌های ورودی مدل COUP شامل سه بخش هواشناسی، پوشش گیاهی و خاکشناسی می‌باشد. متغیرهای هواشناسی شامل دمای بیشینه و کمینه، رطوبت نسبی، سرعت باد، ساعات آفتابی و بارندگی به صورت روزانه

که در آن  $t$  زمان،  $L_f$  گرمای نهان انجماد،  $\rho_i$  چگالی یخ و  $\theta_i$  رطوبت حجمی خاک در حالت یخ و  $h$  عبارت چشمه و چاهه گرما در خاک است.  $C$  ظرفیت گرمایی خاک است که به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$C = f_s \Delta z C_s + \theta C_w + \theta_i C_i \quad (3)$$

که  $f_s$  و  $\theta$  نسبت‌های حجمی به ترتیب مواد جامد (معدنی و آلی) و آب مایع، و  $C_s$  و  $C_i$  ظرفیت گرمایی مواد جامد و یخ است. جریان رطوبت در نیمرخ خاک از قانون داریسی تعمیم‌یافته توسط ریچاردز (۱۹۳۱) محاسبه می‌شود:

$$q_w = -k_w \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) - D_v \frac{\partial c_v}{\partial z} \quad (4)$$

که  $\psi$  مکش رطوبتی خاک،  $c_v$  رطوبت ویژه هوای خاک،  $D_v$  ضریب پخش برای بخار داخل خاک و  $k_w$  رسانایی هیدرولیکی خاک است. با ترکیب معادله (۴) با قانون پایستاری جرم، معادله عمومی تغییرات زمانی مقدار آب در خاک‌های غیر اشباع به صورت رابطه (۵) بدست می‌آید:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q_w}{\partial z} + S_w \quad (5)$$

که  $S_w$  در آن نمایانگر چشمه یا چاهه است. این مدل نیمرخ خاک را به تعدادی لایه تقسیم می‌کند، که معیار این لایه بندی عموماً تغییر نوع بافت خاک است. جهت محاسبه جریان دما و رطوبت در خاک با پوشش‌های متفاوت اطلاعات مورد نیاز خاک نظیر پارامترهای منحنی مشخصه (نگهداری) رطوبت و تابع هدایت هیدرولیکی خاک، و پارامترهای گیاهی مانند عمق ریشه‌دهی، ارتفاع گیاه و شاخص سطح برگ باید به مدل وارد شود.

به منظور ارزیابی مدل COUP اندازه‌گیری‌های میدانی به مدت دو ماه متوالی (خرداد و تیر ماه ۱۳۸۹) طی فصل کشت در دو کرت آزمایشی در مجاورت ایستگاه هواشناسی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران صورت پذیرفت. این محل دارای اقلیم نیمه خشک است و در دشت جنوبی رشته کوه البرز در حوضه فرعی رودخانه کرج با عرض و طول جغرافیایی به ترتیب ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه شمالی و ۵۰ درجه و ۵۹ دقیقه شرقی و ارتفاع متوسط ۱۳۱۱ متر از سطح دریا قرار دارد. زمین محل آزمایش به دو کرت با ابعاد ۱۰ در ۱۰ متر مربع تقسیم شد.

1. Brooks and Corey

2. Van Genuchten

3. Schaap

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \quad (8)$$

$$MAPE = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|O_i - S_i|}{|O_i|}}{n} \quad (9)$$

$$ME = \text{Max} |O_i - S_i| \quad (10)$$

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum (S - O)^2}{\sum (|S - \bar{O}| + |O - \bar{O}|)^2} \right], 0 \leq d \leq 1 \quad (11)$$

که در روابط فوق  $O$ ،  $\bar{O}$  و  $S$  به ترتیب مقادیر مشاهده شده، میانگین مقادیر مشاهده شده، مقادیر شبیه‌سازی شده و  $n$  تعداد داده‌ها است. علاوه بر نمایه‌های کمی فوق، برای ارزیابی مدل از نمودار پراکنش<sup>۶</sup> داده‌های اندازه‌گیری شده در مقابل داده‌های شبیه‌سازی شده در اطراف خط نیمساز (۱:۱) استفاده شد. که عملکرد مدل را به صورت کیفی بیان می‌کند. همچنین از تحلیل رگرسیون خطی بین جفت داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده استفاده شد، که معادله آن به صورت زیر است:

$$Y_{Obs.} = a_1 Y_{Sim.} + a_0 \quad (12)$$

که  $Y_{obs}$  و  $Y_{sim}$  به ترتیب مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است. چنانچه مقادیر شیب و عرض از مبدا به ترتیب یک و صفر باشد، نشانگر دقت و همخوانی بیشتر مقادیر برآورد شده مدل با مقادیر واقعی است. لازم به ذکر است هر یک از نمایه‌های فوق به تنهایی معیاری مناسب و جامع برای ارزیابی عملکرد یک مدل به حساب نمی‌آید.

### نتایج و بحث

پس از اجرای مدل برای دو کرت، دما و رطوبت نیمرخ خاک برآورد شدند. سپس خروجی‌های مدل جهت ارزیابی با مقادیر روزانه مشاهده شده در طول فصل کشت مقایسه شد، که سری‌های زمانی آن در شکل‌های ۱ و ۲ برای دما و رطوبت خاک لخت و همچنین شکل‌های ۵ و ۶ برای پوشش ذرت آمده است. ارزیابی کمی نتایج مدل‌سازی با نمایه‌های عملکرد مدل در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. همچنین پراکنش نقاط شبیه‌سازی و مشاهده شده دما و رطوبت نیمرخ خاک تحت پوشش‌های مختلف در شکل‌های ۳ و ۴ و شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. بررسی نمودارهای دمای خاک نشان می‌دهد که مدل تغییرات مشاهده شده دما در عمق‌های مختلف خاک را به‌طور قابل قبولی شبیه‌سازی می‌کند. در هر دو نوع پوشش با افزایش عمق از دامنه تغییرات دمای خاک کاسته می‌شود.

جمع‌آوری و درفایل ورودی مدل وارد شد. متوسط دمای روزانه هوا در دوره مطالعه ۲۸/۲ درجه سانتی‌گراد و بیشینه و کمینه آن به ترتیب ۳۵/۳ و ۲۰/۴ درجه سانتی‌گراد بوده، متوسط رطوبت نسبی هوا در دوره شبیه‌سازی معادل ۳۷ درصد، متوسط تبخیر از تشت کلاس A ۹/۳ میلی‌متر در روز، سرعت باد ۱/۸ متر برثانیه و ساعات روشنایی ثبت شده به‌طور متوسط ۷۰۰ دقیقه در هر روز بوده است.

پس از تهیه فایل ورودی هواشناسی، پارامترهای فیزیکی لایه‌های خاک و پارامترهای گیاهی در پایگاه داده‌های مدل ثبت شد. پارامترهای پوشش گیاهی ذرت شامل ارتفاع، نمایه سطح برگ و مراحل نمو آن اندازه‌گیری شد (جدول ۳). در مدل COUP تبخیر-تعرق با بکار بردن معادله پنمن-مانتین محاسبه می‌شود. مقاومت پوشش گیاهی (سطحی) به‌عنوان تابعی از شاخص سطح برگ، تابش کلی و کمبود اشباع با استفاده از معادله لوهار (۱۹۸۰) و طول زبری و ارتفاع جابجایی صفر از رابطه شائو و پریرا (۱۹۸۲) به شکل تابع شاخص سطح گیاه (سطح برگ + شاخه) برآورد می‌شود.

در طول فصل کشت، که از اول خرداد ماه آغاز شد، بارندگی قابل ملاحظه‌ای رخ نداده و هر دو کرت ذرت و خاک لخت به ترتیب ۱۰ میلی‌متر در روز و ۵ میلی‌متر در روز با دور آبیاری هفت روز به‌روش سطحی آبیاری شدند. دیگر پارامترها با توجه به مطالعه یوهانسون و یانسن (۱۹۹۱) انتخاب شد. همچنین دمای واقعی اعماق و رطوبت لایه‌های مختلف خاک با نصب ادوات دماسنجی و لوله‌های رطوبت‌سنجی در هر کرت به‌طور روزانه چندین نوبت جهت اعتبارسنجی مدل ثبت شد. دمای خاک با نصب دماسنج‌های ساقه خمیده جیوه‌ای اعماق استاندارد سازمان هواشناسی و رطوبت حجمی نیز در چهار عمق با سه تکرار در هر کرت به‌طور روزانه توسط تترابوب اندازه‌گیری شد.

برای ارزیابی خطا در شبیه‌سازی مدل COUP از نمایه‌های ریشه دوم میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> (RMSE) بیشینه درصد خطای مطلق شبیه‌سازی<sup>۲</sup> MAPE و بیشینه خطای مطلق<sup>۳</sup> (ME) و نمایه توافق<sup>۴</sup> d استفاده شد (ویلموت<sup>۵</sup>، ۱۹۸۱). این سنج‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

<sup>۱</sup> Root mean squared error

<sup>۲</sup> Maximum absolute percent error

<sup>۳</sup> Maximum absolute error

<sup>۴</sup> Index of agreement (d)

<sup>۵</sup> Willmot

<sup>۶</sup> Scatter diagram

دمای خاک به پارامترهای ترمودینامیکی خاک است. همچنین حساسیت یا خطا در داده‌های انرژی نسبت به خطا در داده‌های بارندگی و آبیاری مطالعات پیشین (ایران‌نژاد و شائو، ۱۹۹۷ و ایران‌نژاد و همکاران، ۱۹۹۸) نشان داد در مکان‌هایی که داده‌ها از دقت بیشتری برخوردار بودند، مدل در شبیه‌سازی موفق‌تر عمل کرده است. با وجود این حل توأمان معادلات گرما، رطوبت و اثر متقابل آنها از خطاها کاسته است در حالی که عدم اندازه‌گیری مستقیم تابش خالص رسیده به سطح در زیر پوشش‌های مختلف و تخمین بیلان تابش ورودی در پیکره مدل، بر تجمیع خطا در شبیه‌سازی دمای اعماق سطحی خاک افزوده است. در حالی که به طور مشهود در زیر پوشش ذرت با افزایش عمق، به دلیل کمتر شدن اثر تابش ورودی، دمای شبیه‌سازی شده در اعماق زیرین از خطای کمتری نسبت به اعماق بالاتر برخوردار است. با وجود این، همانند پژوهش یانسن در سال ۲۰۰۵، مدل COUP توانسته است روند تغییرات دمایی و رطوبتی نیمرخ خاک را به‌طور قابل قبولی شبیه‌سازی کند و افزایش رطوبت و کاهش دمای نیمرخ خاک در زمان‌های آبیاری را به خوبی نشان دهد.

### نتیجه‌گیری

با نگاه کلی به نتایج بدست آمده از این پژوهش و با در نظر گرفتن برآوردی بودن برخی از پارامترهای گیاهی ورودی (نظیر نمایه سطح برگ)، می‌توان اظهار داشت مدل COUP از نظر فیزیکی نتایج قابل قبولی ارائه کرده‌است ولی جهت حصول به نتایج دقیق‌تر، انجام آزمایشات بیشتر و واسنجی مدل در اقلیم‌های دیگر ضروری است. همچنین نکته قابل بحث تغییرات نمایه‌های رطوبتی خاک پس از اولین آبیاری و لحاظ شدن اثر مقدار و زمان آبیاری‌های بعدی پس از اولین بار در مدل می‌تواند نتایج شبیه‌سازی را بهبود بخشد. با این حال، حل توأمان معادلات گرما، رطوبت و اثر متقابل آنها توانسته از خطاها کاسته و روند تغییرات دمایی و رطوبتی نیمرخ خاک را به‌طور قابل قبولی شبیه‌سازی کند.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله تقدیر و تشکر خود را از مساعدت سازمان هواشناسی کشور به ویژه معاون محترم عملیاتی و فناوری اطلاعات سازمان در تأمین ابزار دماسنجی مورد نیاز طرح، ابراز می‌دارند.

که علت آن را می‌توان تأخیر زمانی انتشار گرما از سطح به اعماق خاک دانست. در دوره آغازین که ذرت جوانه نزده است یا پوشش گیاهی هنوز چشمگیر نیست، دمای خاک کثرت ذرت و کثرت بدون پوشش به زمان افزایش می‌یابد. در طی زمان با افزایش ارتفاع و سطح برگ و در نتیجه تضعیف بیشتر تابش خورشیدی در پوشش گیاهی دمای خاک کثرت ذرت در لایه سطحی کاهش می‌یابد و در لایه‌های عمیق‌تر تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. این در حالی است که دمای خاک بدون پوشش (به‌ویژه در لایه‌های عمیق) با گذر به سمت تابستان افزایش می‌یابد. اثر آبیاری با افت شدید دمای مشاهده شده و شبیه‌سازی شده به‌خصوص در لایه بالایی خاک به‌خوبی مشهود است.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی در زیر پوشش گیاهی ذرت و خاک لخت مشاهده می‌شود، که کمترین خطاها مربوط به اعماق زیرین رطوبت و دمای نیمرخ سطحی می‌باشد. با توجه به نمودارها مشاهده می‌شود، مدل به خوبی توانسته روند تغییرات دما و رطوبت را با توجه به آبیاری مزرعه به خوبی شبیه‌سازی کند.

خطای شبیه‌سازی دمای خاک بدون پوشش کمتر بوده است. در حالی که هر دو پوشش با توجه به شکل‌های ۳ و ۷ (ابر پراکنش نقاط) بیش‌برآوردی (۱+ تا ۲+ درجه سانتی‌گراد) در نتایج نشان می‌دهد. همچنین خطای نتایج در نیمه پایینی نیمرخ خاک، که دما نوسان کمتری دارد، کوچک‌تر بوده است. در مورد رطوبت نیمرخ خاک در عمق‌های کم اثر آبیاری بر نیمرخ رطوبتی به درستی شبیه‌سازی شده در حالی که شبیه‌سازی دامنه نوسان در سطح خاک به خوبی نبوده و بیشترین دقت در اعماق ۴۰ تا ۸۰ سانتی‌متری بوده است. این می‌تواند به دلیل تأخیر در پسماند رطوبتی در اعماق و تخییر سریع آب در لایه‌های بالایی خاک به‌ویژه در خاک عاری از پوشش گیاهی باشد. همچنین در مورد نتایج رطوبت در زیر هر دو کثرت مشاهده می‌شود در آبیاری اول دقت برآورد بیشتر از آبیاری‌های بعدی می‌باشد و این می‌تواند به دلیل تغییر در مشخصه‌های فیزیکی خاک نظیر نمایه توزیع اندازه خلل و فرج خاک باشد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی مدل COUP می‌توان اظهار نمود این مدل کارایی لازم را جهت شبیه‌سازی دما و رطوبت دارد، اما برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر به خصوص در مورد نیمرخ رطوبتی بایستی واسنجی‌های بیشتری صورت پذیرد و پارامترهای خاک به‌طور دقیق‌تری برآورد شود. حساسیت مدل در پیش‌بینی رطوبت خاک نسبت به پارامترهای هیدرولیکی بیشتر از

جدول ۱- مشخصات اندازه‌گیری شده خاک مزرعه در اعماق مختلف

عمق خاک (cm)	بافت خاک	شن (%)	سیلت (لای) (%)	رس (%)	چگالی ظاهری (g/cm <sup>3</sup> )	کربن آلی (%)	pH
۰-۲۰	لومی	۳۸/۹	۲۳/۲	۳۷/۹	۱/۵	۰/۷۴۵	۸/۳
۲۰-۴۰	لوم	۳۰/۵	۴۴/۰	۲۵/۵	۱/۶۵	۰/۸۱	۸/۳
۴۰-۶۰	لومی	۴۰/۹	۲۲/۱	۳۷/۰	۱/۵	۰/۷۷۵	۸/۳
۶۰-۸۰	رسی	۳۸/۹	۱۹/۱	۴۰/۰	۱/۱۵	۰/۷۴	۸/۳

جدول ۲- ویژگی‌های هیدرولیکی خاک برای تابع هدایت هیدرولیکی فان گنوختن و معلم

بر اساس بانک اطلاعاتی شاپ<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۱

عمق خاک (cm)	بافت خاک	K <sub>s</sub> (mm/day)	n (-)	α (cm <sup>-1</sup> )	θ <sub>s</sub> (%)	θ <sub>r</sub> (%)
۰-۲۰	لومی رسی	۸۱/۸	۱/۴۱۴۵	۰/۰۱۵۸	۴۳	۷/۹
۲۰-۴۰	لوم	۱۲۰/۴	۱/۴۷۳۸	۰/۰۱۱۱	۳۷	۶/۰
۴۰-۶۰	لومی رسی	۸۱/۸	۱/۴۱۴۵	۰/۰۱۵۸	۵۰	۷/۹
۶۰-۸۰	رسی	۴۵/۲	۱/۲۵۲۹	۰/۰۱۵	۵۴	۹/۰

جدول ۳- پارامترهای گیاهی و میزان آبیاری در طول دوره مطالعه

پارامتر	خاک بدون پوشش	ذرت
بیشینه شاخص سطح برگ (متر مربع بر متر مربع)	-	۷/۲
بیشینه ارتفاع گیاه (سانتی متر)	-	۲۵۸
بیشینه عمق ریشه (متر)	-	۰/۸
آبیاری (میلی متر)	۳۰۰	۷۱۵

جدول ۴- سنجح های خطای مقایسه مقادیر شبیه سازی شده با اندازه گیری شده دما و رطوبت خاک بر پایه مقادیر

متوسط روزانه (اول خرداد ماه الی ۳۱ تیرماه ۱۳۸۹) در کرت بدون پوشش گیاهی

عمق (سانتی متر)	نمایه	MAPE <sup>۲</sup>	ME <sup>۳</sup>	d <sup>۴</sup>	RMSE <sup>۵</sup>	R <sup>۲</sup>	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>
دمای خاک ۰-۲۰	۳/۴	۱/۶	-۰/۹۵	-۰/۹۴	۰/۹۵	۲/۴	۰/۹	
دمای خاک ۲۰-۴۰	۳/۶	۲/۰	-۰/۹۴	-۰/۹۸	۰/۹۶	۱/۴	۱/۰	
دمای خاک ۴۰-۶۰	۴/۵	۱/۷	-۰/۹۰	-۱/۱۹	۰/۹۳	۴/۱	۰/۹	
دمای خاک ۶۰-۸۰	۳/۸	۱/۶	-۰/۹۳	-۱/۰۴	۰/۹۵	۷/۳	۰/۸	
رطوبت خاک ۰-۲۰	۲۹/۳	۲۰/۵	-۰/۸۴	-۷/۷۵	۰/۶۶	۳/۶	۱/۰	
رطوبت خاک ۲۰-۴۰	۱۴/۴	۱۱/۱	-۰/۸۵	-۵/۹۱	۰/۷۹	۳/۴	۰/۸	
رطوبت خاک ۴۰-۶۰	۷/۰	۱۴/۲	-۰/۹۷	-۳/۴۱	۰/۹۰	-۰/۶	۱/۰	
رطوبت خاک ۶۰-۸۰	۱۰/۹	۱۶/۷	-۰/۹۳	-۵/۱۶	۰/۸۷	-۱۶/۰	۱/۴	

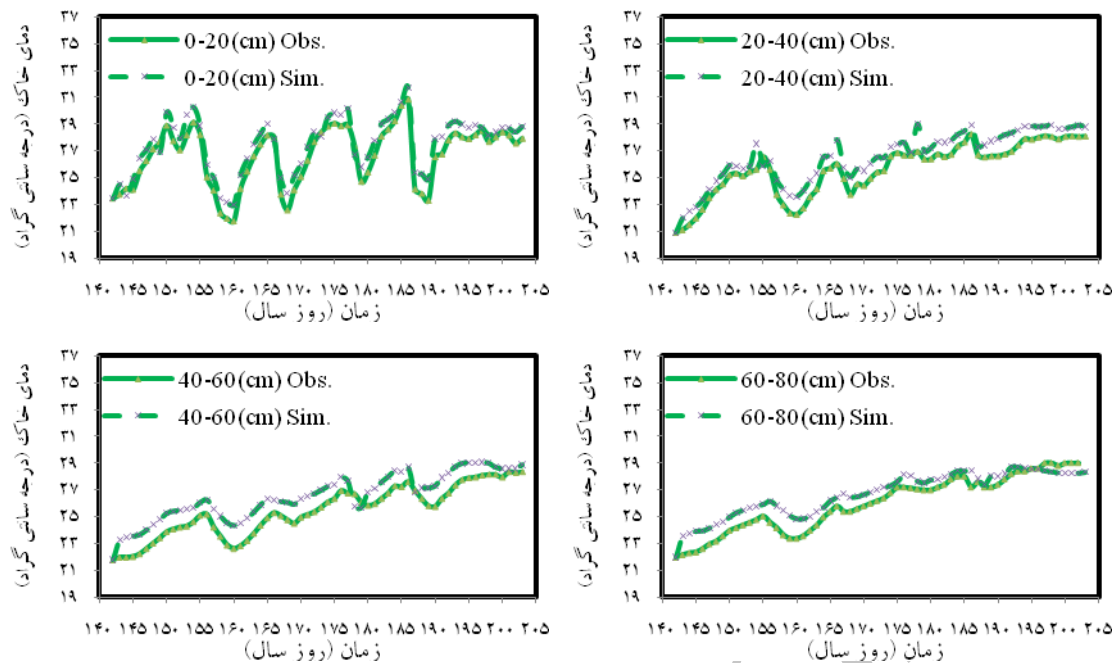
1. Schaap

2. Maximum Absloute Percent Error

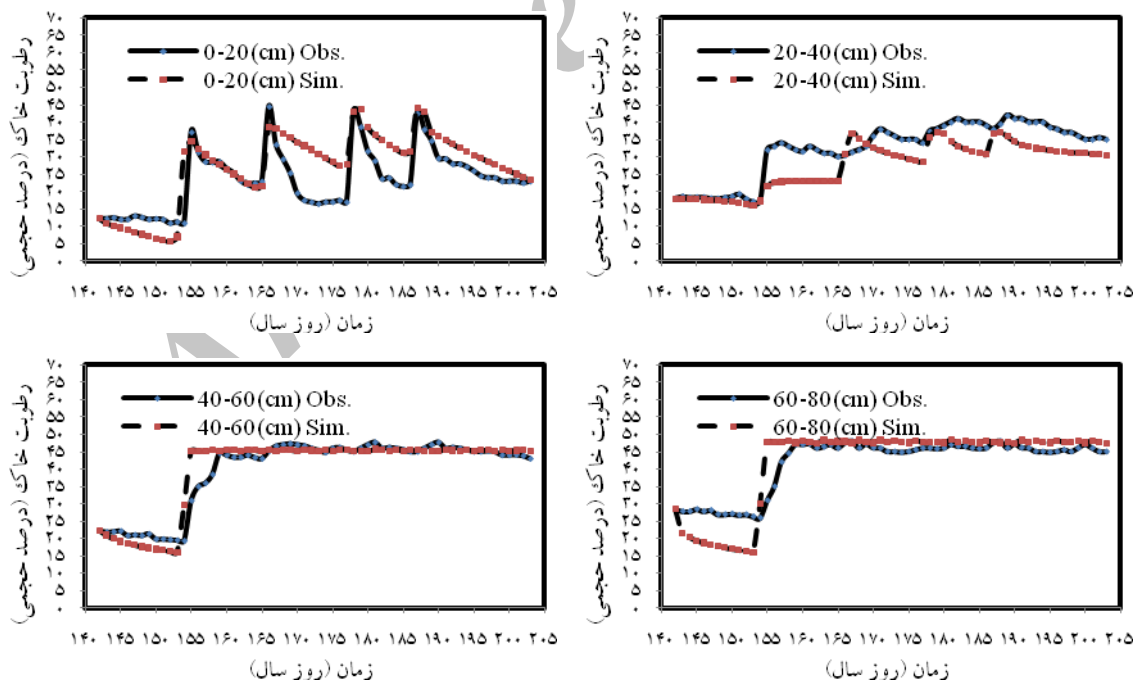
3. Maximum Error

4. Index of agreement (d) Willmot(1982)

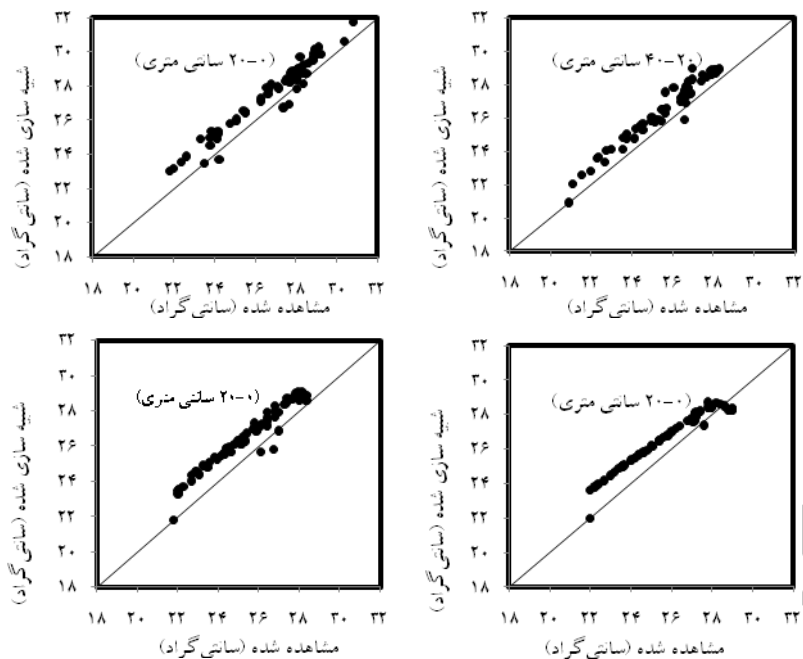
5. Root Mean Sqeur Error



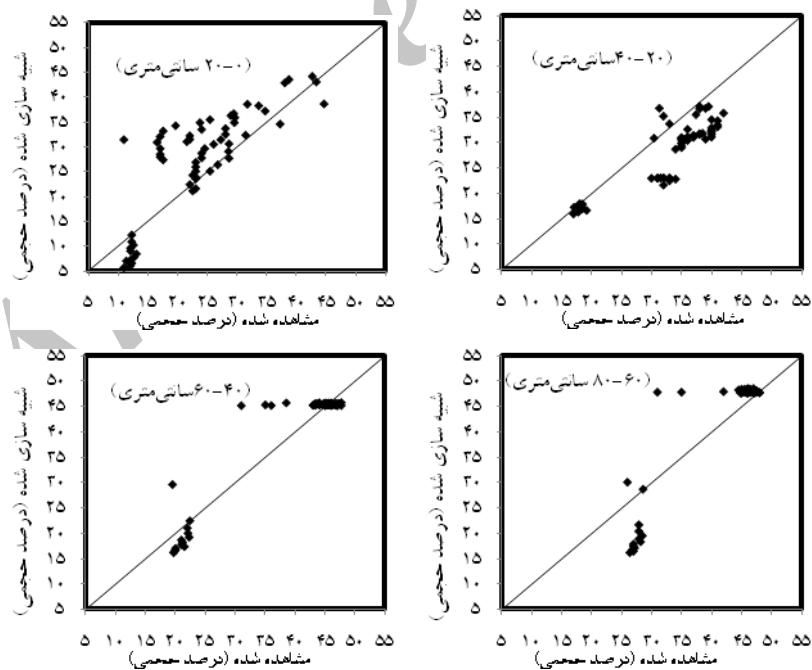
شکل ۱- سری زمانی مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده دمای اعماق مختلف خاک در کرت عاری از پوشش گیاهی



شکل ۲- سری زمانی مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده رطوبت اعماق مختلف خاک در کرت عاری از پوشش گیاهی



شکل ۳- مقایسه مقادیر دمای شبیه‌سازی و مشاهده شده اعماق مختلف خاک در کرت عاری از پوشش گیاهی

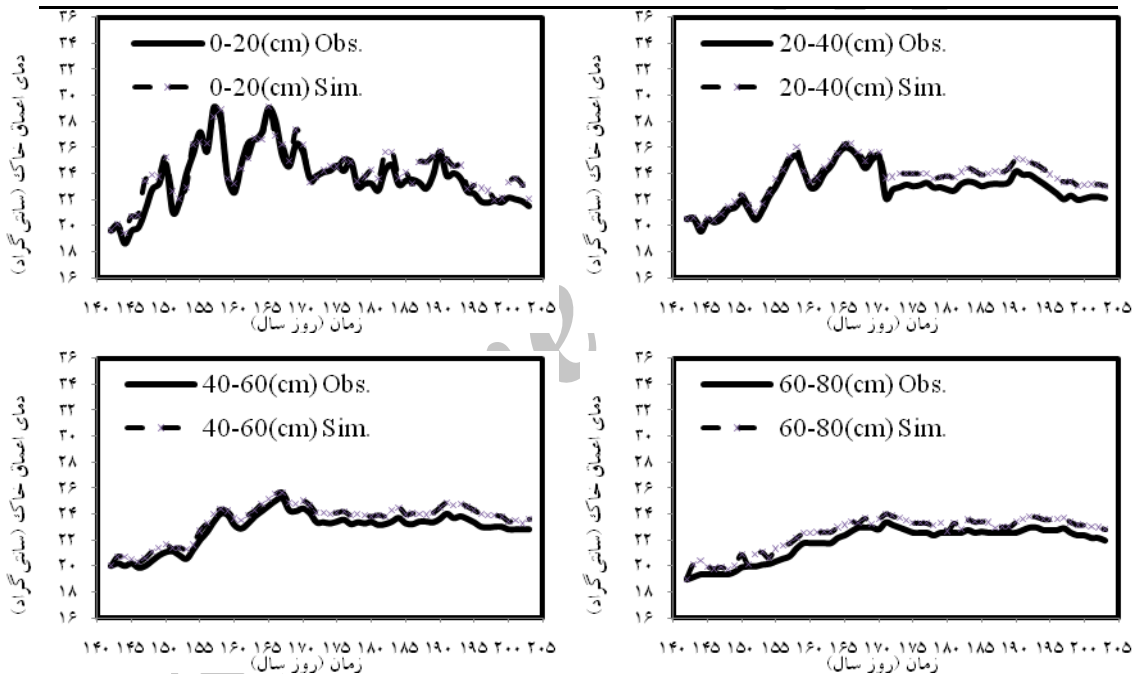


شکل ۴- مقایسه مقادیر رطوبت شبیه‌سازی و مشاهده شده اعماق مختلف خاک در کرت عاری از پوشش گیاهی

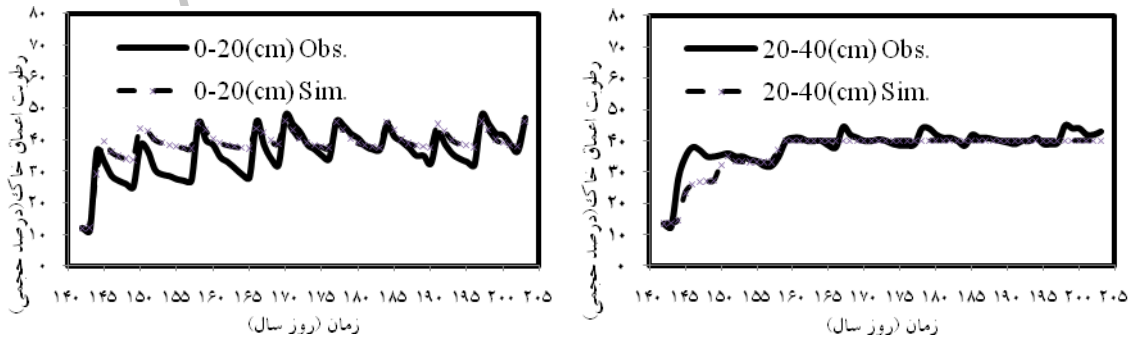


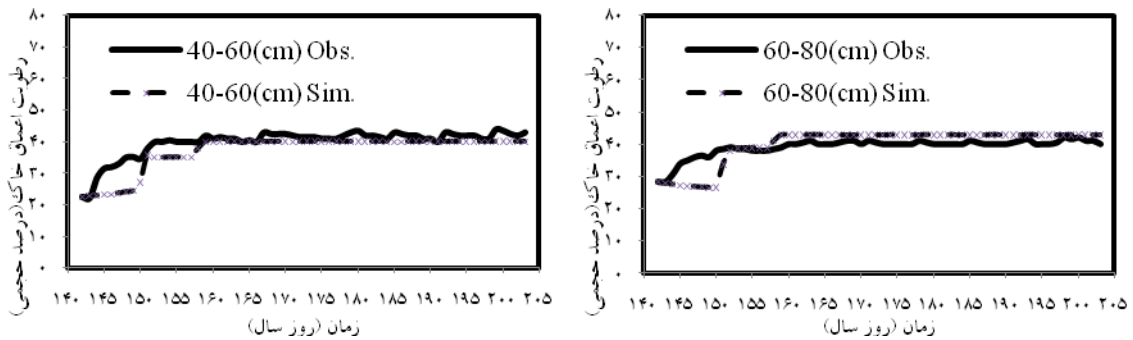
جدول ۵- سنجه‌های خطای مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده با اندازه‌گیری شده دما و رطوبت خاک بر پایه مقادیر متوسط روزانه (اول خرداد ماه تا ۳۱ تیرماه ۱۳۸۹) در زیر پوشش گیاه ذرت

$a_1$	$a_0$	$R^2$	RMSE	d	ME	MAPE	نمایه عمق (سانتی متر)
۰/۹	۳/۹	۰/۹۰	۰/۹	۰/۹۶	۲/۲	۳/۱	دمای خاک ۰-۲۰
۱/۰	۰/۵	۰/۹۴	۰/۸	۰/۹۴	۱/۵	۳/۰	دمای خاک ۲۰-۴۰
۱/۰	-۰/۳	۰/۹۸	۰/۷	۰/۹۴	۱/۰	۲/۹	دمای خاک ۴۰-۶۰
۱/۰	۰/۳	۰/۹۷	۰/۷	۰/۹۳	۱/۰	۳/۱	دمای خاک ۶۰-۸۰
۰/۷	۱۵/۴	۰/۶۹	۳/۷	۰/۹۳	۱۰/۵	۱۲/۸	رطوبت خاک ۰-۰۲
۱/۰	-۱/۷	۰/۷۳	۳/۸	۰/۹۰	۱۳/۵	۶/۱	رطوبت خاک ۲۰-۴۰
۱/۲	-۹/۵	۰/۸۲	۳/۸	۰/۸۶	۱۰/۹	۷/۵	رطوبت خاک ۴۰-۶۰
۱/۷	-۲۶/۳	۰/۷۰	۳/۷	۰/۷۹	۱۱/۴	۷/۶	رطوبت خاک ۶۰-۸۰

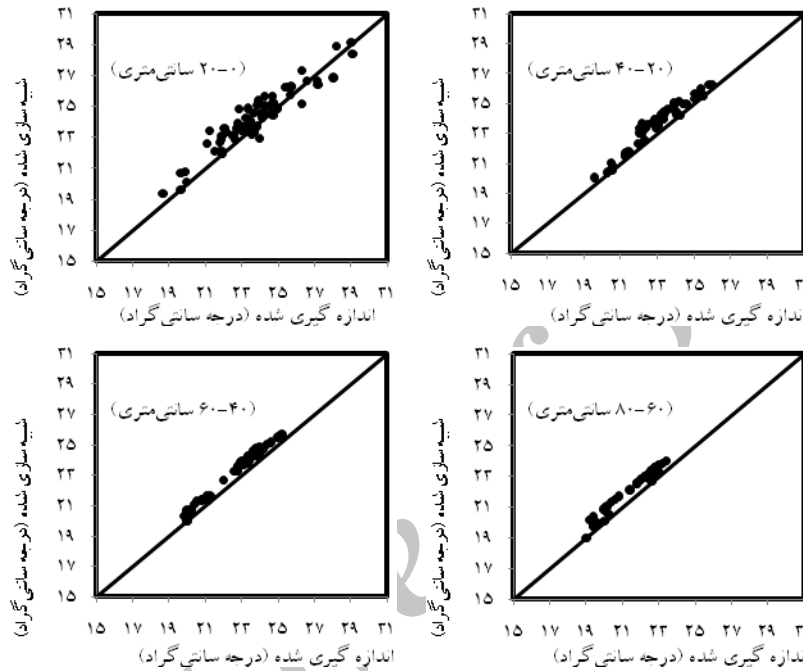


شکل ۵- سری زمانی مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده دمای عمق مختلف خاک در کرت پوشش ذرت

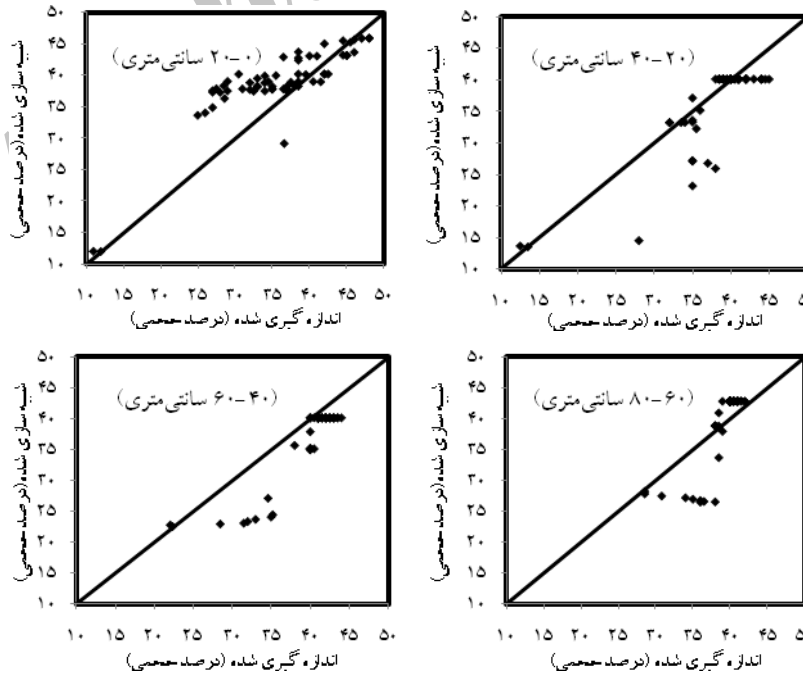




شکل ۶- سری زمانی مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده رطوبت اعماق مختلف خاک در کرت پوشش ذرت



شکل ۷- مقایسه مقادیر دمای شبیه‌سازی و مشاهده شده اعماق مختلف خاک در زیر پوشش گیاهی ذرت



شکل ۸- مقایسه مقادیر رطوبت شبیه‌سازی و مشاهده شده اعماق مختلف خاک در زیر پوشش گیاهی ذرت

فهرست منابع:

1. Ahrens, C. D. 2000. Essentials of Meteorology – An Invitation to the Atmosphere (Third Edition). Brooks/Cole Publishers.
2. Brooks, R. H. and Corey, A. T., 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper No. 3, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 27 pp.
3. Eckersten, H., Jansson, P.E., and Johnsson, H., 1998. SOILN Model, Version 9.2, User's Manual. Division of Hydromechanics, Communication 98:6. Swedish Agricultural University, Uppsala.
4. Fischer, R. D. 1982. Models of simultaneous heat and moisture. Battelle Columbus Labs, 2. Transfer in soils, ORNL-Sub, 80-7800-1&06 October 1983.
5. Flerchinger, G.N., Hanson, C.L. and Wight, J.R. 1996. Modeling evapotranspiration and surface energy budgets across a watershed. Water Resour. Res., 32(8):2539-2548.
6. Ghahreman, N. and Hundal, S. S., 2006. Modeling soil water contents, potato growth and yield with SWACROP model in Punjab, India. J. Agrometeorology. 6(2): 21-27.
7. Irannejad, P. and Shao, Y. 1998. Description and validation of the atmosphere-land-surface interaction scheme (ALSIS) with HAPEX and Cabauw data. Global and Planetary Change. 19: 87-114.
8. Irannejad, P. and Shao, Y., 2002. Land-surface Processes, in: Peng, G., Leslie, L.M. and Shao, Y. (eds), Environmental Modeling and Prediction. Springer-Verlag Germany, 173-213.
9. Irannejad, P., Shao, Y. and Findlater, P. A., 1997. The Impact of Vegetation Cover on Soil Water Balance, a Model Simulation, in: Munro, R. K. and Leslie, L. M. (eds), Climate Prediction for Agricultural and Resource Management, BRS, Canberra, 165-184.
10. Jansson, P.-E. and Karlberg L., 2005. Coupled heat and mass transfer model for Soil-Plant-Atmosphere Systems. Royal Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Stockholm, pp 453.
11. Jansson, P.-E., 1998. Simulating model for soil water and heat conditions, Division of Hydromechanics, Communication 98:2. Swedish University of Agricultural Science, Uppsala, Sweden.
12. Jansson, P.-E., 2005. Simulation of soil temperature and moisture dynamics for different rainfall conditions in northeast China. Proceedings of the 3rd International Symposium on Intelligent Information Technology in Agriculture (ISIITA), Part Three Agriculture System Simulation, 293-296.
13. Jansson, P.-E., and Moon, D.S., 2001. A coupled model of water, heat and mass transfer using object orientation to improve flexibility and functionality. Environ. Modeling and Software, 16:37-46.
14. Jansson, P.-E. and Haldin, S., 1979. Model for the annual water and energy flow in a layered soil. In: S. Haldin (ed.) Comparison of forest and energy exchange models. Society for Ecological Modeling, Copenhagen, 145-163.
15. Johnsson, H. and Jansson, P.-E., 1991. Water balance and soil moisture dynamics of field plots with barley and grass ley. J. Hydrology., 173: 129-149.
16. Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res. 12:513-522.
17. Philip, J. R., and de Vries, D. A., 1957. Moisture movement in porous materials under temperature gradients, Trans. American Geophysical Union, 38: 222-232.
18. Schaap, M. G., Leij, F. J. and Van Genuchten, M. Th., 2001. ROSETTA: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer function. J Hydrol., 251: 163-176.

19. Shaw R.H. and Pereira, A.R., 1982. Aerodynamic roughness of a plant canopy: a numerical experiment. *Agricultural Forest Meteorology*, 26: 51-65.
20. Thunholm, B. 1990. A comparison of measured and simulated soil temperature using air temperature and soil surface energy balance as boundary conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 53:59-72.
21. 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.
22. Willmot, C.J., 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bul. Amer. Meteorol. Soc.*, 63:1309-1313.

Archive of SID