

## اعتبارسنجی مدل تعیین احتمال روزهای کاری مناسب عملیات خاک‌ورزی (مطالعه

## موردی: استان قزوین)

روح اله یوسفی<sup>۱\*</sup>، علیرضا علامه<sup>۲</sup><sup>۱\*</sup> - موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران<sup>۲</sup> - موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایرانایمیل نویسنده مسئول: [r.yousefi1348@gmail.com](mailto:r.yousefi1348@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۷

## چکیده

برای انجام عملیات خاک‌ورزی در زمان معین، مهم‌ترین فاکتور تخمین تعداد روزهای کاری است. جهت تعیین احتمال روزهای کاری یک مدل رایانه‌ای در محیط دلفی طراحی گردید. مدل با استفاده از اطلاعات خصوصیات فیزیکی خاک و هواشناسی، پس از تقسیم کردن خاک به لایه‌های متعدد، رطوبت خاک را در گام‌های زمانی مختلف تخمین می‌زند. رطوبت هر لایه از طریق میانگین‌گیری گام‌های زمانی در ساعات کاری هر روز تعیین می‌گردد. با مقایسه رطوبت خاک با حدود کارپذیری، امکان کار در آن روز تعیین می‌شود. با جمع زدن روزهای قابل انجام کار، تعداد و احتمال روزکاری به دست می‌آید. برای اطمینان از عملکرد مدل، نتایج شبیه سازی برای رطوبت خاک، مشخصه‌های منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیراشباع و اطلاعات هواشناسی با داده‌های اندازه‌گیری شده مقایسه گردید. برای ارزیابی اعتبار مدل، از تحلیل خطاهای باقی مانده و اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده استفاده شد. پایین بودن درصد ضریب تغییرات (حداقل ۱۳/۷ و حداکثر ۲۲/۴۳)، نزدیک بودن ضریب کارایی مدل به عدد ۱، پایین بودن میانگین درصد انحراف نسبی (حداقل ۱۲/۳ و حداکثر ۱۸/۳۹)، بالا بودن ضریب تعیین مدل (۸۱ تا ۸۸ درصد) نشان داد که مدل با اعتبار بالایی قادر به برآورد رطوبت خاک است. همچنین مقایسه داده های شبیه سازی منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع مدل با مقادیر بانک‌های اطلاعاتی موجود و نیز پیش بینی داده‌های هواشناسی گویای عملکرد خوب مدل در برآورد متغیرهای مربوطه می‌باشد. بطور کلی می‌توان از مدل با دقت بالایی در تعیین احتمال روزهای کاری عملیات خاک‌ورزی بهره‌برداری نمود.

کلمات کلیدی

"احتمال روزکاری"، "اعتبارسنجی"، "خاک‌ورزی"، "رطوبت خاک"، "مدل"

## ۱- مقدمه

برای هر منطقه مورد بررسی قرار گرفته و با توجه به آمار به‌دست آمده در سال‌های متمادی، احتمال روز کاری تعیین می‌گردد. با توجه به تغییرات آب و هوا از سالی به سال دیگر، برای قضاوت کلی در مورد این مسئله نیاز به داده‌برداری در طی چند سال است که یک برنامه‌ریزی درازمدت را می‌طلبد. این روش دقت بالایی دارد و پایه‌ای ترین روش برای برآورد این کمیت است. اما متأسفانه به کارگیری آن چندان عملی نیست. زیرا این کار مستلزم صرف هزینه و وقت زیادی می‌باشد.

با توجه به مشکلات روش اول، نیاز است که با روش‌های دیگری مقدار این کمیت محاسبه شود. یک راه این است که امکان‌پذیری عملیات خاک‌ورزی در سالیان گذشته را حدس بزینم، سپس با مقایسه شرایط برآورد شده و معیارهای کارپذیری، در مورد امکان‌پذیری انجام عملیات قضاوت شود. گاهی شرایط آب و هوایی به صورت غیرمستقیم مانع انجام عملیات می‌شود. رطوبت خاک از مهمترین عوامل محدودکننده انجام اکثر عملیات زراعی می‌باشد ولی نمی‌توان به صورت مستقیم از داده‌های هواشناسی استخراج کرد. بنابراین ابتدا باید با روش‌هایی رطوبت خاک برآورد شود و سپس با مقایسه رطوبت به دست آمده با شرایط رطوبتی مناسب، امکان‌پذیری عملیات تعیین گردد. برای تعیین رطوبت خاک نیاز به یک مدل بیلان آب خاک است. در این مدل‌ها با در نظر گرفتن رطوبت در یک روز یا یک بازه زمانی و نیز با محاسبه ورودی‌ها و خروجی‌های آب به پروفیل خاک، مقدار رطوبت را برای گام زمانی بعدی

برای انجام عملیات خاک‌ورزی در زمان معین، مهم‌ترین فاکتور تخمین تعداد روزهای کاری است. احتمال روز کاری (PWD) نسبت روزهای قابل انجام کار به روزهای موجود در طول فصل کاری برای عملیات موردنظر می‌باشد (Khani et al., ۲۰۱۱). مقدار PWD در برخی از مهمترین روابط مورد استفاده در مکانیزاسیون کشاورزی کاربرد دارد و به عنوان یکی از عوامل مؤثر در محاسبه اندازه بهینه ماشین‌های مورد نیاز، محاسبه ظرفیت مزرعه‌های ماشین‌های موجود و همچنین در محاسبه هزینه به موقع انجام نشدن عملیات به کار می‌رود. برای محاسبه احتمال روزکاری و یا تعداد روزهای کارپذیر، موضوع تعیین امکان‌پذیری انجام عملیات در یک بازه زمانی خاص مطرح می‌گردد. بنابراین برای هر روز و یا هر بازه زمانی، امکان انجام عملیات به صورت جداگانه بررسی می‌شود. روز کاری خاک‌ورزی به روزی اطلاق می‌شود که در آن رطوبت خاک در حدی باشد که ماشین بتواند با حفظ دانه بندی خاک عملیات مورد نظر را انجام دهد. عوامل مختلفی از جمله شرایط آب و هوایی، نوع عملیات و بافت خاک می‌تواند در وجود روز کاری اثرگذار باشد (Rotz and Harrigan, ۲۰۰۵). برای تعیین احتمال روز کاری معمولاً از دو روش؛ آمارگیری از شرایط واقعی و برآورد امکان‌پذیری عملیات در سال‌های گذشته استفاده می‌شود. در روش اول امکان انجام عملیات خاک‌ورزی به طور مستقیم در فصل کار

مناطق، مدل را باید واسنجی کرد (Rounsevell and Jones, ۱۹۹۳). در پژوهشی، با استفاده از مدل Soil و داده‌های ۱۰ ساله هواشناسی چهار منطقه اسکاتلند، تعداد روزهای کاری مناسب در خاک های لوم رسی و لوم شنی تعیین شد. در این مدل علاوه بر باران، دمای بالا در زمستان نیز باعث کاهش روزهای کاری برای خاک ورزی گردید (Cooper et al., ۱۹۹۷). بررسی اثر عوامل مختلف بر تعداد روزهای کاری برای انجام عملیات‌های دیگر کشاورزی نیز در پژوهش‌هایی مورد توجه قرار گرفته است. برای مثال، در پژوهشی که به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر هواشناسی در تعیین زمان عملیات سمپاشی علف‌های هرز مزارع نیشکر در هفت تپه انجام گرفت نشان داده شد که عوامل محدودکننده برای انجام کار سمپاشی شامل دما، بارندگی، باد و رطوبت نسبی بوده است. علاوه بر این، در میان این عوامل، دما بیشترین تأثیر را در تعیین تاریخ سمپاشی و تعداد روزهای کاری دارد (کمالی و همکاران، ۱۳۸۹). برآورد تعداد روزهای کاری یکی از عوامل مؤثر در محاسبه اندازه بهینه ماشین‌های مورد نیاز، محاسبه ظرفیت مزرعه‌ای ماشین‌های موجود و همچنین در محاسبه هزینه به موقع انجام نشدن عملیات به شمار می‌رود. برای محاسبه امکان وجود روزکاری عملیات خاک‌ورزی بطور معمول از مدل‌های پیش‌بینی رطوبت روزانه خاک که بر اساس داده‌های هواشناسی طولانی مدت و مشخصات خاک استفاده می‌شود. هدف از این مطالعه، اعتبارسنجی مدل پیشنهادی برای تعیین احتمال روزهای کاری مناسب عملیات خاک‌ورزی است.

## ۲- روش انجام تحقیق

- محدوده مورد مطالعه

استان قزوین یکی از استان‌های مرکزی کشور با مساحت ۱۵۸۰۵ کیلومتر مربع است. این استان با دارا بودن ۴۸۸ هزار هکتار اراضی کشاورزی، بیش از ۳ درصد تولید کل کشور را بخود اختصاص داده است. کمتر از ۱ درصد خاک کشور را داراست. سطح زیر کشت محصولات زراعی استان ۲۵۹۰۸۸ هکتار است که ۵۶/۵۷ درصد آن به اراضی آبی و ۴۳/۴۳ درصد آن به اراضی دیم اختصاص دارد (آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی، ۱۴۰۲). بر اساس آخرین تقسیمات کشوری، این استان دارای ۶ شهرستان، ۲۴ شهر و ۱۹ بخش، ۴۶ دهستان و ۱۱۴۸ آبادی است.

- طراحی مدل

شرایط اقلیمی و رطوبت خاک از عوامل کلیدی در تولید محصولات کشاورزی هستند. به دلیل دشواری و هزینه‌های بالای اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی و رطوبت خاک در شرایط مختلف، در چند دهه گذشته مدل‌های مختلفی 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، پارامترهایی نظیر رطوبت خاک و بقایای گیاهی هستند. دشواری اندازه‌گیری میدانی و زمان بر بودن آنها موجب گسترش طراحی و کاربرد این مدل‌ها شده است. برای تعیین احتمال روزهای کاری نیاز به مدلی است که بتواند رژیم رطوبتی خاک لخت را در سال‌های مختلف تخمین زده و با تعیین رطوبت خاک در لایه‌های

تعیین می‌کنند. برای محاسبه امکان وجود روزکاری غالباً از مدل‌های پیش‌بینی رطوبت روزانه خاک که بر اساس داده‌های هواشناسی طولانی مدت و مشخصات خاک منطقه می باشد، استفاده شده است. در اغلب مدل‌های ذکر شده میزان بارندگی روزانه و بارندگی در چند روز متوالی به عنوان عامل تأثیر گذار در تعداد روزکاری در نظر گرفته شده است. علاوه بر این در برخی از مدل‌ها فقط با استفاده از داده‌های هواشناسی و بدون در نظر گرفتن رطوبت روزانه خاک، تعداد روزکاری محاسبه شده است (کوثری مقدم و همکاران، ۱۳۹۵). متناسب با هر منطقه و شرایط اقلیمی، معیارهای متفاوتی برای تعیین روزهای کاری مد نظر قرار گرفته است. یکی از این مدل‌ها براساس تعیین عوامل مختلف معادله رطوبتی خاک (تبخیر و ترقق، زهکشی و رواناب) ایجاد شده است. این مدل، رطوبت روزانه خاک را در لایه ۳۰ سانتی‌متری بالایی محاسبه می‌کند. روزهای کاری برای دو نوع خاک در سطح احتمال ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ درصد محاسبه و معیار کارپذیری برای این دو خاک ۱۰۵، ۱۱۰ و ۱۱۵ درصد حد ظرفیت زراعی در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده با داده‌های چهار ساله زمین‌های اسکاتلند مقایسه گردید (Witney et al., ۱۹۸۲). مدل دیگری نیز با استفاده از معادله آب خاک برای محاسبه مقدار رطوبت روزانه خاک ایجاد شد که برای انجام عملیات خاک‌ورزی و کاشت در منطقه موروگرو تانزانیا مورد استفاده قرار گرفت. معیار کارپذیری خاک، رطوبت کمتر از ۹۵ درصد حد ظرفیت زراعی خاک در نظر گرفته شد. این مدل برای خاک لوم رسی شنی مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج با داده‌های دو ساله منطقه مقایسه گردید. ضریب همبستگی مدل در بازه ۰/۹۴۲ تا ۰/۹۹۸ بود. روزهای کاری برای خاک‌ورزی و کاشت به طور میانگین ۳۴ و ۱۴ روز تعیین شد (Simalenga and Have, ۱۹۹۲). به منظور پیش‌بینی روزهای کاری برای عملیات خاک‌ورزی در نیجریه مدلی ایجاد شد که رطوبت خاک را برای لایه ۳۰ سانتی‌متری بالایی محاسبه کرده است. معیار کارپذیری در این مدل، رطوبت کمتر از ۹۵ درصد حد ظرفیت زراعی خاک بوده است. همچنین رطوبت خاک در همین لایه نباید کمتر از نقطه پژمردگی دائم باشد و در صورتی که روز قبل، روز کاری بوده؛ بارندگی روز بعد نباید بیش از ۵ میلی‌متر باشد. ضریب همبستگی مدل برای خاک شنی و رسی ۰/۹۳ بوده است (Ahaneku and Onwualu, ۲۰۰۷). مدل دیگری نیز به منظور پیش‌بینی زمان در دسترس عملیات کشاورزی به عنوان تابعی از شرایط آب و هوایی و رطوبت خاک در لایه ۳۰ سانتی‌متری بالایی تهیه شد. رطوبت کمتر از ۹۹ درصد حد ظرفیت زراعی علاوه بر بارندگی کمتر از ۰/۵ سانتی‌متر، بارندگی در سه روز پیاپی کمتر از ۰/۱۳ سانتی‌متر و عدم وجود برف روی زمین، معیارهای وجود روز کاری در این مدل بوده‌اند (Babeir et al., ۱۹۸۶).

MAFF مدل دیگری بود که برای تعیین روزهای کاری استفاده شد. این مدل در دوره‌های زمانی ۱۴ روزه کار می‌کرد و با استفاده از آمار روزانه بارندگی و تبخیر پتانسیل تجمعی در طول ۱۴ روز و بدون توجه به نوع خاک، رطوبت خاک را برآورد می‌کرد. در این مدل با تنظیمات تجربی طبق فاکتورهای چون نوع خاک و عمق لایه نفوذپذیری، روزهای کاری را مشخص می‌کرد. این تنظیمات برای استفاده مدل از داده‌های انگلستان و ولز واسنجی شده بود. برای استفاده در سایر

بیان آب خاک (موازنه آب خاک)  
 بیان آب خاک (موازنه آب خاک)، تفاوت بین مقدار ابتدایی و انتهایی آب خاک در دوره اندازه‌گیری است. بر اساس قانون بقا جرم مقدار آب ورودی به نیمرخ خاک با جمع جبری میزان خروجی و مقدار ذخیره شده برابر می‌باشد. در صورتی که از حرکت افقی آب صرف‌نظر گردد و به صورت یک بعدی در نظر گرفته شود، بیان آب خاک منبای محاسبه مقدار رطوبت خاک می‌باشد. رابطه ۱، رابطه موازنه آب خاک است.

$$P + C + I = E + D + \Delta M \quad (1)$$

که در آن:

$$P = \text{مقدار بارندگی (L)}$$

$$C = \text{صعود مویینه‌ای (L)}$$

$$I = \text{عمق آبیاری (L)}$$

$$E = \text{میزان تبخیر نهایی (L)}$$

$$D = \text{زهکشی عمقی (L)}$$

$$\Delta M = \text{رطوبت ذخیره شده در نیمرخ خاک برای عمق مورد بررسی محاسبه تبخیر}$$

فرآیند تبخیر از خاک لخت (بدون پوشش گیاهی) در معرض هوا طی دو مرحله روی می‌دهد:

محاسبه مرحله اول تبخیر: تبخیر پتانسیل

با توجه به اینکه خاک‌ورزی در زمانی انجام می‌شود که محصولی روی مزرعه نبوده و خروج رطوبت از خاک از طریق تبخیر از خاک بدون پوشش گیاهی انجام می‌شود، لذا جهت محاسبه تبخیر نیاز به استفاده از رابطه‌ای است که تبخیر را از خاک لخت (بدون پوشش گیاهی) محاسبه نماید و داده‌های ورودی آن متغیرهای استاندارد هواشناسی باشد. برای محاسبه این مرحله از تبخیر در مدل طراحی شده، از رابطه پنمن-مانتیث (برای خاک لخت) استفاده شد (رابطه ۲) (Aydin et al., ۲۰۰۵).

$$E_p = \frac{\Delta(R_n - G_s) + 86.4 \rho c_p \delta / r_a}{\lambda(\Delta + \gamma)} \quad (2)$$

که در آن:

$$E_p = \text{تبخیر پتانسیل (} \text{mm/day} \approx \text{kg/m}^2 \text{day)}$$

$$\Delta = \text{شیب منحنی فشار بخار (} \text{KPa/C}^\circ)$$

$$R_n = \text{تابش خالص در سطح زمین (} \text{MJ/m}^2 \cdot \text{day)}$$

$$G_s = \text{شدت جریان گرمای خاک (} \text{MJ/m}^2 \cdot \text{day)}$$

$$\rho = \text{چگالی هوا (} \text{kg/m}^3)$$

$$C_p = \text{گرمای ویژه هوا (} \text{KJ/kg}^\circ \text{C} = 1.013)$$

$$\delta = \text{کمبود فشار بخار (} \text{KPa)}$$

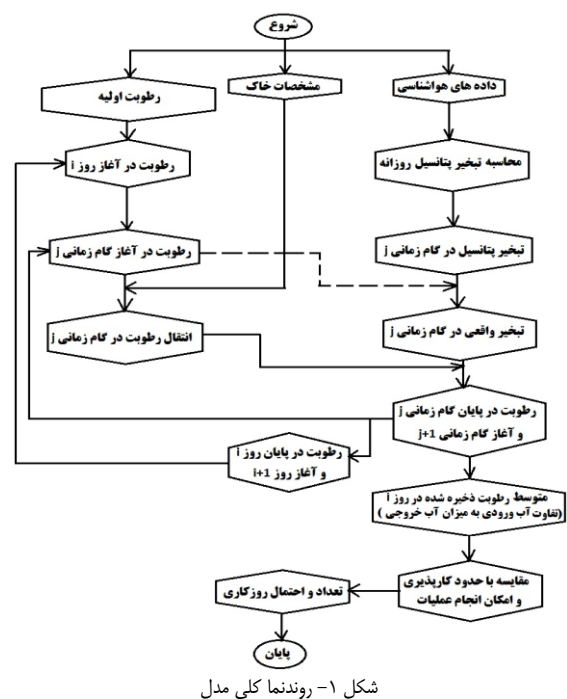
$$r_a = \text{مقاومت آیرودینامیکی (} \text{sec/m)}$$

$$\lambda = \text{گرمای نهان تبخیر (} \text{MJ/kg)}$$

مختلف و مقایسه آن با حدود رطوبتی، امکان کار را در روز مشخص کند. سپس با جمع زدن روزهای کارپذیر، تعداد و احتمال روزهای کاری را تعیین کند. برای تعیین احتمال روزهای کاری مناسب برای عملیات خاک‌ورزی، در محیط دلفی مدلی طراحی گردید. همچنین از این مدل می‌توان برای تخمین تبخیر، رواناب، رطوبت خاک در موارد دیگر نیز استفاده نمود.

• طرز کار کلی مدل

این مدل پس از تقسیم کردن خاک به لایه‌های متعدد، رطوبت خاک را در گام‌های زمانی مختلف تخمین می‌زند. بدین صورت که با داشتن رطوبت اولیه خاک در کل پروفیل خاک و با استفاده از داده‌های هواشناسی و خصوصیات خاک، ورودی (باران، نفوذ عمقی) و خروجی (تبخیر، رواناب) رطوبت هر لایه خاک را محاسبه کرده و با جمع زدن با رطوبت اولیه، رطوبت جدیدی به هر لایه خاک نسبت می‌دهد. این چرخه مکرراً ادامه پیدا می‌کند و رطوبت خاک در هر گام زمانی و در هر روز مشخص می‌گردد. در این مدل با توجه به داده‌های هواشناسی و رطوبت سطح خاک، تبخیر از سطح خاک محاسبه شده و از رطوبت لایه‌های سطحی که تبخیر از آن صورت می‌گیرد کم می‌شود. انتقال رطوبت میان لایه‌های خاک با توجه به اختلاف مکش کل (جمع مکش و گرانش) میان دو لایه و قابلیت هدایت آب در خاک (هدایت هیدرولیکی) برآورد می‌شود. در نتیجه ورودی و خروجی از هر لایه خاک در هر مرحله مشخص شده و با توجه به رطوبت اولیه آن لایه در ابتدای مرحله، رطوبت در انتهای مرحله تعیین شده و به عنوان رطوبت اولیه در مرحله دوم شبیه سازی به کار می‌رود. رطوبت هر لایه در هر روز از طریق میانگین‌گیری گام‌های زمانی در ساعات کاری آن روز تعیین می‌گردد. با مقایسه رطوبت خاک با حدود کارپذیری، امکان کار در آن روز تعیین می‌شود. با جمع زدن روزهای کاری، تعداد و احتمال روزکاری تعیین می‌شود. در شکل ۱ روند کلی مدل مشاهده می‌شود.



شکل ۱- روند کلی مدل

یک بعدی در نظر گرفت. متداول ترین روش شبیه سازی رفتار جریان آب در لایه های مختلف خاک بر اساس رابطه یک بعدی در حالت غیر اشباع، استفاده از معادله ریچاردز است (Richards, ۱۹۳۱). این معادله ترکیبی از معادلات داری و پیوستگی است که در حالت جریان یک بعدی به صورت رابطه ۴ نوشته می شود. برای این منظور نیاز به مشخصات هیدرولوژیکی خاک (منحنی مشخصه رطوبتی خاک و هدایت هیدرولوژیکی غیر اشباع)، منابع تغذیه و تخلیه (بارندگی و تبخیر) و شرایط مرزی است.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (۴)$$

که در آن:

$$\theta = \text{رطوبت حجمی خاک} \left( \frac{L^3}{L^3} \right)$$

$$\psi = \text{مکش ماتریک} (L)$$

$$K(\theta) = \text{هدایت هیدرولوژیکی خاک} \left( \frac{L}{T} \right)$$

$$t = \text{زمان} (T)$$

$$z = \text{عمق خاک} (L)$$

در مدل طراحی شده برای شبیه سازی حرکت آب در خاک، رابطه ریچاردز را با استفاده از الگوی خطی المان های محدود حل می کند. از آنجایی که در حالت یک بعدی، الگوی خطی المان های محدود و اختلافات محدود مشابه است، لذا رابطه ۴ با استفاده از یک الگوی غیر صریح اختلافات محدود شده است.

منحنی مشخصه رطوبتی خاک

این منحنی از مشخصه های مهم فیزیکی خاک و بیانگر رابطه بین مکش ماتریک و رطوبت خاک می باشد. رطوبت خاک بیانگر آن است که چه مقدار آب در خاک وجود دارد، اما مکش ماتریک نشان می دهد که آب موجود در خاک با چه نیرویی در خاک نگهداری می شود. همچنین مکش ماتریک با رطوبت خاک رابطه عکس دارد. روابط تجربی زیادی برای بیان کمی منحنی مشخصه رطوبتی خاک موجود است که مهمترین آنها مدل ون گنوختن است. در مدل طراحی شده از مدل ون گنوختن (رابطه ۵) استفاده شد (Van Genuchten, ۱۹۸۰).

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (۵)$$

که در آن:

$$\theta(h) = \text{درصد رطوبت در مکش یا پتانسیل ماتریک} (L) h$$

$$\theta_s = \text{درصد رطوبت در حالت اشباع}$$

$$\theta_r = \text{درصد رطوبت باقیمانده}$$

$$h = \text{پتانسیل ماتریک} (L)$$

$$\alpha = \text{معکوس پتانسیل ورود هوا به خاک} \left( \frac{1}{L} \right)$$

$m$  و  $n$  ضرایب تجربی بوده که شکل منحنی را تعیین می کنند.

منحنی هدایت هیدرولوژیکی غیر اشباع

هدایت هیدرولوژیکی، قدرت و توان خاک را در انتقال آب نشان می دهد. هرچه هدایت هیدرولوژیکی خاک بیشتر باشد، توانایی خاک در انتقال آب بیشتر خواهد بود. هدایت هیدرولوژیکی غیر اشباع به صورت تابعی از رطوبت یا مکش ماتریک خاک تعریف می شود. عوامل موثر بر آن، به

$$\gamma = \text{ضریب رطوبتی یا ضریب سایکرومتری} \left( \frac{KPa}{C^\circ} \right)$$

محاسبه مرحله دوم تبخیر: تبخیر واقعی

مرحله دوم تبخیر پس از رسیدن رطوبت خاک به آستانه تبخیر و اتمام مرحله اول تبخیر آغاز می گردد. در این مرحله خصوصیات خاک (هدایت هیدرولوژیکی) عامل کنترل کننده نرخ تبخیر خواهد بود. تبخیر واقعی کم تر از تبخیر پتانسیل می باشد. برای محاسبه تبخیر واقعی در مدل طراحی گردیده از رابطه آیدین (رابطه ۳) استفاده شد (Aydin et al., ۲۰۰۵).

$$E_a = \frac{1}{\log|\psi_{tp}| - \log|\psi_{ad}|} (\log|\psi| - \log|\psi_{ad}|) E_p \quad (۳)$$

که در آن:

$$E_a = \text{تبخیر واقعی} \left( \frac{mm}{day} \right)$$

$$E_p = \text{تبخیر پتانسیل} \left( \frac{mm}{day} \right)$$

$\psi_{tp}$  = مقدار مطلق پتانسیل آب خاک که در شرایط بین  $\psi_{ad}$  و  $\psi_{tp}$  تعیین می شود ( $cm H_2O$ ).

$\psi_{tp}$  = مقدار مطلق پتانسیل آب خاک در جایی که تبخیر واقعی شروع به کم کردن پتانسیل می کند ( $cm H_2O$ ).

$\psi_{ad}$  = مقدار مطلق پتانسیل آب خاک در هوای خشک ( $cm H_2O$ ).

محاسبه انتقال رطوبت

سیستم آب و خاک ممکن است بصورت دو جزئی (خاک و آب) حالت اشباع) یا خاک و هوا (حالت خشک)) و یا سه جزئی (خاک، آب و هوا (حالت غیر اشباع)) باشد. در هر دو حالت اشباع و غیر اشباع جریانی از آب مایع از لابلای ذرات خاک صورت می گیرد. با این تفاوت که در حالت اول قسمت عمده جریان از منافذ درشت خاک عبور می کند و کمتر در برخورد و تماس با دانه های خاک قرار می گیرد، حال آنکه در حالت دوم بسته به این که خاک تا چه اندازه غیر اشباع باشد، جریان آب از منافذ ریزتر خاک عبور کرده و در نتیجه با اصطکاک بیشتری با ذرات خاک روبروست. به همین دلیل جریان در حالت اشباع سریع و زیاد و در حالت غیر اشباع بسته به درجه خشکی خاک کند و اندک می باشد. عامل اصلی حرکت آب از یک نقطه به نقطه دیگر، اختلاف پتانسیل هیدرولوژیکی است. حرکت آب در داخل خاک به مقدار رطوبت آن بستگی ندارد. در خاک های اشباع از آب، پتانسیل ماتریک در انتقال آب نقش ندارد، پتانسیل ماتریک در این خاک ها صفر است. حرکت آب در خاک های اشباع، ناشی از اختلاف پتانسیل فشاری و ثقلی می باشد. در خاک های غیر اشباع، پتانسیل فشاری در انتقال آب نقش ندارد. حرکت آب در خاک های غیر اشباع، ناشی از اختلاف پتانسیل ماتریک و ثقلی می باشد. هرچه خاک خشک شود مقدار پتانسیل ماتریک کمتر می گردد، زیرا آب باقی مانده در خاک خشک با نیروی بیشتری به ذرات خاک می چسبد. بدین ترتیب مقدار پتانسیل ماتریک همیشه منفی و یا حداکثر صفر است. حرکت رطوبت به صورت یک بعدی، دوبعدی و سه بعدی قابل بررسی است. در شرایط خاک لخت و بدون حضور گیاه و زهکش، می توان حرکت رطوبت را به صورت عمودی فرض کرد و انتقال رطوبت را

شماره می‌توانیم عمق یا ارتفاع رواناب، حجم رواناب و شدت رواناب را محاسبه نماییم. اگر  $S=0$  باشد (یعنی هیچ آبی نگهداری نمی‌شود) در این حالت  $C.N=100$  است، یعنی همه آن رواناب است (نشاط و صدقی، ۱۳۸۵). نحوه کاربرد مدل طراحی مدل از نرم افزار برنامه نویسی به زبان بولند دلفی ۷ استفاده شد. در جدول ۱ قسمت‌های مختلف مدل نشان داده شده است.

جدول ۱- قسمت‌های مختلف مدل

اعتبار سنجی	نمودارها	پردازش اطلاعات	ورود اطلاعات
ارزیابی مدل ۱	۱- نمودار اطلاعات هواشناسی	۱- محاسبه تبخیر پتانسیل	۱- ثبت موقعیت جغرافیایی
		۲- محاسبه منحنی مشخصه رطوبتی خاک	
	۲- نمودار محاسبات انتقال رطوبت	۳- محاسبه منحنی هدایت هیدرولیکی غیر اشباع	۲- ثبت اطلاعات منطقه، محصول و عملیات خاک‌ورزی
ارزیابی مدل ۲	۳- نمودار اطلاعات تعیین روزهای کاری	۴- محاسبه رواناب	
		۵- محاسبه تبخیر واقعی	
		۶- محاسبه حدود کارپذیری	۳- ورود اطلاعات هواشناسی
		۷- محاسبه امکان پذیری خاک‌ورزی	
		۸- مثال کاربردی - محاسبه تعداد دستگاه	۴- ورود اطلاعات مشخصات خاک

اعتبار سنجی مدل

برای استفاده عملی از مدل نتایج شبیه سازی مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده توسط سامانه هواشناسی کشاورزی و مزرعه مقایسه گردید. در این آزمایش برای اندازه‌گیری رطوبت در مزرعه از روش TDR استفاده شد. پس از جایگذاری لوله‌های Prob در داخل خاک اعداد حسگرها در سه نوبت (۶ صبح، ۱۲ ظهر و ۱۸ عصر) توسط دستگاه پروب  $HH^2$  قرائت شد. همچنین خصوصیات خاک با آزمایش تعیین شد (جدول ۲) و به‌همراه آمار هواشناسی به‌عنوان ورودی مدل برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت خروجی مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده مورد مقایسه قرار گرفتند.

جدول ۲- خصوصیات فیزیک خاک

۰-۲۵	عمق (سانتی‌متر)
۱۵	رس (درصد)
۵۷	شن (درصد)
۲۸	سیلت (درصد)
Sandy Loam	یافت خاک
۰/۵	ماده آلی (درصد)
۱/۷۴	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی مترمربع)

برای ارزیابی اعتبار مدل، از تحلیل خطاهای باقی مانده و اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری و پیش بینی شده استفاده شد. آماره‌های مورد استفاده عبارتند از (نشاط و همکاران، ۱۳۸۵): میانگین انحراف معیار (رابطه ۱۰):

طور عمده آنهایی هستند که منحنی مشخصه رطوبتی خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهند. همانند منحنی مشخصه رطوبتی، رابطه ریاضی منحصر به فرد و کلی برای هدایت هیدرولیکی غیراشباع وجود ندارد. اما روابط تجربی زیادی برای این منظور پیشنهاد شده‌اند که معروف‌ترین رابطه هدایت هیدرولیکی غیر اشباع مدل ون گنوختن - معلم (رابطه ۶) است که در مدل طراحی شده از آن استفاده شد (Van Genuchten, ۱۹۸۰).

$$K(h) = K_s \times S_e^L [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (6)$$

$$K(h) = \text{هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک } (L/T)$$

$$K_s = \text{هدایت هیدرولیکی اشباع خاک } (L/T)$$

$L$  = ثابتی موسوم به ضریب اعوجاج (معمولاً ۰/۵) در نظر گرفته می‌شود).

$$S_e = \text{درجه اشباع مؤثر یا نقصان رطوبت حجمی.}$$

برای محاسبه درجه اشباع مؤثر از رابطه ۷ استفاده شد.

$$S_e = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \quad (7)$$

که در آن :

$$\theta_s = \text{درصد رطوبت در حالت اشباع}$$

$$\theta_r = \text{درصد رطوبت باقیمانده}$$

$$\theta = \text{رطوبت حجمی خاک } (L^3/L^3)$$

محاسبه رواناب

رواناب حاصل از بارندگی را می‌توان بر حسب ارتفاع یا حجم توصیف کرد. برای محاسبه رواناب در مدل، از روش پیشنهادی سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) استفاده شد. در این روش ارتفاع رواناب حاصله از یک بارندگی از رابطه ۸ محاسبه می‌شود (نشاط و صدقی، ۱۳۸۵):

$$R = \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8S)} \quad P > 0.2S \quad (8)$$

$$R = 0 \quad P \leq 0.2S$$

که در آن:

$$R = \text{ارتفاع رواناب (cm)}$$

$$P = \text{ارتفاع بارندگی ۲۴ ساعته (cm)}$$

$S$  = عامل مربوط به نگهداشت آب در سطح زمین است که مقدار آن از رابطه ۹ محاسبه شد.

$$S = \frac{2540}{C.N} - 2.54 \Rightarrow C.N = \frac{2540}{2.54+S} \quad (9)$$

در رابطه ۹، شماره منحنی رواناب (C.N) مربوط به مقدار نفوذ آب می‌باشد. در این روش با بررسی خصوصیات از منطقه مورد مطالعه، به عددی می‌رسیم که نماینده تولید رواناب در آن حوزه است. مقدار این شماره بین صفر تا ۱۰۰ متغیر است. هر چه به ۱۰۰ نزدیکتر شود توانایی آن حوزه برای تولید رواناب بیشتر می‌شود و تمامی بارش در سطح زمین جاری یافته و ارتفاع رواناب برابر ارتفاع بارندگی خواهد بود. هر چه از ۱۰۰ دورتر شود توانایی آن حوزه برای تولید رواناب کمتر است و در C.N برابر صفر روانابی از بارندگی حاصل نمی‌گردد. شماره منحنی رواناب از روی مشخصات خاک، نوع بهره‌برداری از زمین و شرایط قبلی خاک و با استفاده از جریان مربوطه تعیین می‌گردد. با بدست آوردن این

$$MRPD = \frac{100}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - O_i|}{O_i} \quad (13)$$

که در آن:

MRPD = میانگین درصد انحراف نسبی

$P_i$  = مقدار رطوبت برآورد شده (درصد)

$O_i$  = مقدار رطوبت اندازه گیری شده (درصد)

$n$  = تعداد نقاط

گاهی تغییرات یک پارامتر ورودی منجر به افزایش تخمین رطوبت در بخشی از دوره شبیه سازی و کاهش در قسمت دیگر دوره می شود. با توجه به تعیین رطوبت متوسط به عنوان خروجی مدل، ضریب حساسیت اهمیت چنین پارامتری را دست کم می گیرد. بنابراین نیاز به معیاری است که قدر مطلق تغییرات برآورد رطوبت در هر روز را در نظر بگیرد. میانگین درصد انحراف نسبی برای چنین هدفی استفاده شد. بهترین برازش زمانی است که میانگین درصد انحراف نسبی کمترین مقدار را داشته باشد.

رگرسیون مجموع مربعات مربع (رابطه ۱۴):

$$SSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n-1}} \quad (14)$$

SSE = رگرسیون مجموع مربعات مربع

$P_i$  = مقدار رطوبت برآورد شده (درصد)

$O_i$  = مقدار رطوبت اندازه گیری شده (درصد)

$n$  = تعداد نقاط

برای مطمئن شدن از نتایج مدل، از یک تکنیک رگرسیونی چند متغیره و غیر خطی استفاده می شود که در آن مجموع مربعات (SST) به دو مولفه رگرسیون مجموع مربعات (SSR) و رگرسیون مجموع مربعات مربع (SSE) تقسیم می شود. هدف این مدل بالا بردن دقت مدل آماری رگرسیونی، ضمن کاهش SSE و افزایش SSR می باشد. در فرآیند برازش و برآورد متغیرهای آماری بایستی SSE را تا حد امکان کاهش داد. زیرا این عبارت نشان دهنده میزان خطاهای تصادفی است و هرچه کمیت آن کمتر گردد، دقت مدل افزایش خواهد یافت. مدل در حین پردازش داده های ورودی آماره های مختلفی را محاسبه می کند که از طریق آنها می توان به میزان دقت و حساسیت مدل پی برد. SSE مطمئن ترین پارامتر آماری که میزان دقت یک مدل رگرسیونی را نشان می دهد، هر چه SSE کمتر باشد به همان اندازه مدل دقیق تر خواهد بود.

نسبت مقدار محاسبه شده بر مقدار مشاهداتی (رابطه ۱۵):

$$R' = \frac{P}{O} \quad (15)$$

که در آن:

$R'$  = نسبت مقدار محاسبه شده بر مقدار مشاهداتی

$P$  = مقدار برآورد شده

$O$  = مقدار اندازه گیری شده

هرچه مقدار این نسبت به یک نزدیکتر باشد نشان دهنده برآورد بهتر مدل در آن نقطه می باشد.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (10)$$

که در آن:

MBE = میانگین انحراف معیار

$P_i$  = مقدار رطوبت برآورد شده (درصد)

$O_i$  = مقدار رطوبت اندازه گیری شده (درصد)

$n$  = تعداد نقاط

این معیار بیانگر انحراف است. این معیار علاوه بر دارا بودن علامت مثبت (بیش برآورد مدل) و یا منفی (کم برآوردی مدل) مقدار انحراف از مقادیر مشاهده شده را نیز نشان می دهد. MBE برابر صفر، نشان دهنده برآورد خوب مدل می باشد. ضریب تغییرات (رابطه ۱۱):

$$CV = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \times \frac{100}{O} \quad (11)$$

که در آن:

CV = ضریب تغییرات

$P_i$  = مقدار رطوبت برآورد شده (درصد)

$O_i$  = مقدار رطوبت اندازه گیری شده (درصد)

$n$  = تعداد نقاط

$\bar{O}$  = میانگین مقدار اندازه گیری شده (درصد)

این ضریب بصورت درصد بیان شده و از آن برای تعیین دقت استفاده می شود. هر چه این ضریب بزرگتر باشد، دقت انجام آزمایش کم و هر چه این ضریب کمتر باشد، دقت آن بیشتر است.

ضریب کارایی مدل (رابطه ۱۲):

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (12)$$

که در آن:

ME = ضریب کارایی مدل

$P_i$  = مقدار رطوبت برآورد شده (درصد)

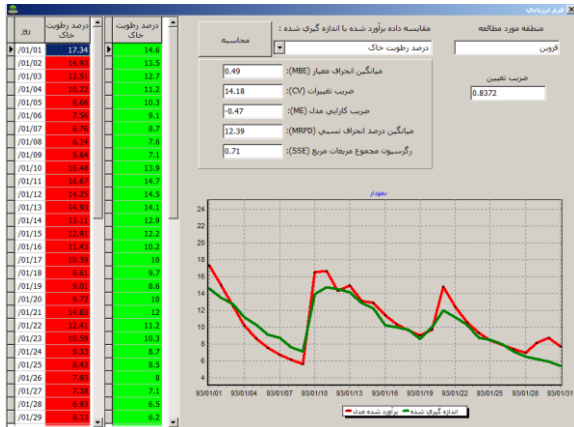
$O_i$  = مقدار رطوبت اندازه گیری شده (درصد)

$\bar{O}$  = میانگین مقدار اندازه گیری شده (درصد)

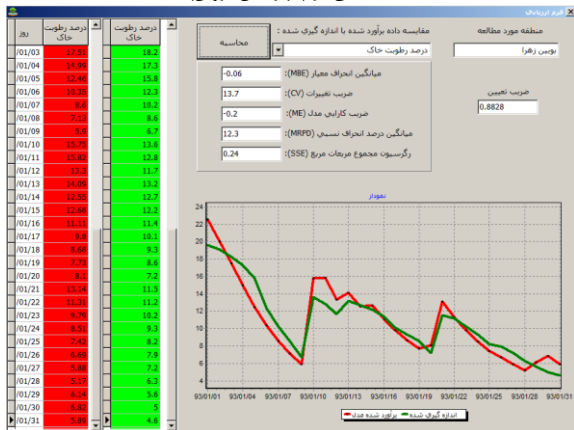
از این ضریب برای مقایسه بین خروجی مدل و مقادیر مشاهده ای استفاده می شود. این شاخص معیاری است که اختلاف نسبی بین مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده را نشان می دهد. مقدار کارایی مدل بین یک تا منفی بی نهایت تغییر می کند. مقدار بهینه این شاخص یک است. اگر میزان آن بیشتر از ۰/۵ باشد مدل شبیه سازی خوبی داشته است و در صورت منفی شدن آن بهتر است که به نتایج مدل بسنده نشود و متوسط مقادیر مشاهده ای استفاده شود.

میانگین درصد انحراف نسبی (۱۳):

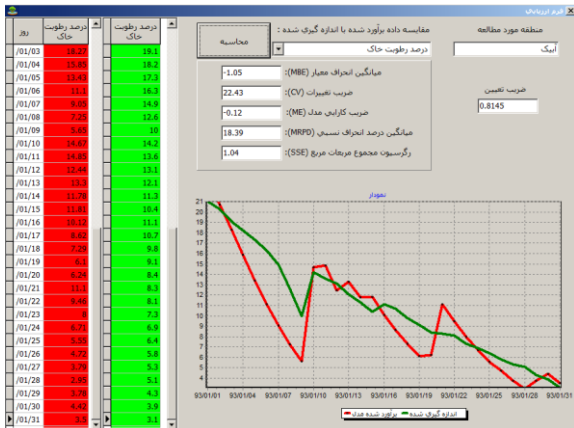
هرچه کمیت آن کمتر باشد، دقت مدل افزایش خواهد یافت. نتایج بدست آمده برای رگرسیون مجموع مربعات مربع نشان از دقت بالای مدل می باشد.



شکل ۲- مقایسه آماری و ترسیم رطوبت برآورد شده و اندازه گیری شده در عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متر (شهرستان قزوین)



شکل ۳- مقایسه آماری و ترسیم رطوبت برآورد شده و اندازه گیری شده در عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متر (شهرستان بوئین زهرا)



شکل ۴- مقایسه آماری و ترسیم رطوبت برآورد شده و اندازه گیری شده در عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متر (شهرستان آبیک)

ضریب تبیین مدل در سه شهرستان از ۰/۸۱ تا ۰/۸۸ می باشد، که بیانگر میزان احتمال همبستگی میان دو دسته داده در آینده می باشد. حدود ۸۱ تا ۸۸ درصد پراکندگی بین مقدار برآورد شده و مقدار اندازه گیری شده مشترک است. اعتبارسنجی مدل در شبیه سازی منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع در فرآیند برآورد رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع در مدل طراحی شده، متغیرهای  $n$ ،  $\theta_r$ ،

ضریب تبیین (رابطه ۱۶):

$$R^2 = (r_{OP})^2 \times 100 \quad (16)$$

که در آن:

$$R^2 = \text{ضریب تبیین}$$

$$r_{OP} = \text{ضریب رگرسیون}$$

ضریب تبیین بیانگر میزان احتمال همبستگی میان دو دسته داده در آینده می باشد. این ضریب در واقع نتایج تقریبی پارامتر موردنظر در آینده را براساس مدل ریاضی تعریف شده که منطبق بر داده های موجود است، بیان می کند. این ضریب بین صفر تا یک متغیر است و اکثراً بر حسب درصد بیان می شود. محاسبه این ضریب نشان می دهد که چند درصد نوابری های  $P$  (مقدار برآورد شده) و  $O$  (مقدار اندازه گیری شده) را باید به رابطه متقابل آنها نسبت داد. چنانچه ضریب همبستگی بین  $P$  و  $O$  یک باشد، ضریب تبیین برابر ۱۰۰ می باشد و بدین معناست که صد درصد پراکندگی بین دو متغیر مشترک است و یا ضریب تبیین ۴۰ بیان کننده آنست که ۴۰ درصد پراکندگی بین دو متغیر  $P$  و  $O$  مشترک است.

۳- نتایج

اعتبارسنجی مدل در برآورد رطوبت خاک

برای بررسی اعتبار یک مدل لازم است که نتایج آن با اندازه گیری های واقعی مقایسه گردد. برای این منظور از روش های آماری و ترسیمی استفاده شد. بدین منظور میانگین انحراف معیار، ضریب تغییرات، میانگین درصد انحراف نسبی، رگرسیون مجموع مربعات مربع و ضریب تبیین به عنوان شاخص های اصلی اعتبارسنجی مدل تعیین شد. نتایج میانگین انحراف معیار، ضریب تغییرات، میانگین درصد انحراف نسبی و رگرسیون مجموع مربعات مربع برای شهرستان های قزوین، بوئین زهرا و آبیک به همراه نمودار مقایسه رطوبت برآورد شده توسط مدل و مقدار رطوبت اندازه گیری شده در شکل های ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است. رطوبت اندازه گیری شده و برآورد شده در اکثر نقاط بسیار به هم نزدیک می باشند. مقدار میانگین انحراف معیار در شهرستان های بوئین زهرا و آبیک نشان دهنده کم برآوردی مدل و در شهرستان قزوین نشان دهنده بیش برآوردی مدل می باشد. در کل مقدار انحراف از مقادیر مشاهده شده بسیار کم است. با توجه به اینکه این مقدار نزدیک به صفر است، نشان دهنده برآورد خوب مدل بوده و انحراف بسیار کمی در آن مشاهده می شود. با توجه به اینکه درصد ضریب تغییرات در شهرستان های مورد مطالعه پایین است نشان از دقت بالای مدل در برآورد رطوبت خاک می باشد. مقدار کارایی مدل که نشان دهنده کیفیت و چگونگی برازش داده های مشاهده ای و برآورد شده می باشد، بین ۰/۱۲ تا ۰/۴۷ - متغیر است. با توجه به نزدیک بودن مقادیر کارایی مدل به عدد ۱، برازش مطلوبی بین مقادیر رطوبت اندازه گیری شده و برآورد شده وجود دارد که در نتیجه حاکی از دقت بالای مدل در برآورد رطوبت خاک می باشد.

نتایج بدست آمده از محاسبه میانگین درصد انحراف نسبی نشان از برازش قابل قبول داده های بدست آمده از مدل بوده و می توان از مدل برای اندازه گیری مقدار رطوبت خاک استفاده نمود.

مقدار رگرسیون مجموع مربعات مربع (SSE) در فرآیند برازش باید تا حد امکان پایین باشد، زیرا نشان دهنده میزان خطاهای تصادفی است و

کاهش می‌یابد و نرخ انتقال رطوبت نیز کم می‌شود. بدین ترتیب تغییرات رطوبت در اعماق مختلف خاک به اندازه افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع نمی‌باشد. هنگامی که هدایت هیدرولیکی اشباع خاک کم باشد، در ابتدای حالتی که اختلاف پتانسیل میان اعماق خاک وجود دارد، انتقال رطوبت کم است و کاهش اختلاف پتانسیل نیز به کندی صورت می‌گیرد. در نتیجه انتقال رطوبت با وجود نرخ نسبی کم‌تر، کندتر خواهد بود. بنابراین پس از مدتی رطوبت خاک در این حالت تفاوت چندانی با حالت پیشین نخواهد داشت. هدایت هیدرولیکی اشباع وقتی که ورودی و خروجی رطوبت به خاک زیاد باشد، مهم‌تر است. زیرا همواره نوعی عدم تعادل رطوبت در پروفیل خاک وجود دارد و هدایت هیدرولیکی نقش بیش‌تری در انتقال رطوبت و تعیین رطوبت جدید به لایه‌های خاک دارد. با توجه به مقدار محاسبه گردیده توسط مدل و مقدار ارائه شده توسط سایر مدل‌ها بخصوص مدل روزتا تفاوت آنچنانی مشاهده نمی‌شود. ضریب تجربی تعیین کننده شکل منحنی ( $n$ ): با توجه به رابطه ون گنوختن و رابطه معلم - وان گنوختن، تغییر در مکش خاک و تغییر در هدایت هیدرولیکی غیر اشباع بر انتقال رطوبت در خاک بر این ضریب ( $n$ ) تأثیرگذار هستند. با کمی افزایش در  $n$ ، هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک به شدت افزایش می‌یابد و بالعکس. همچنین با افزایش  $n$ ، مکش خاک در یک رطوبت خاص کاهش می‌یابد و متعاقباً اختلاف پتانسیل میان دو لایه نیز کاهش می‌یابد. این امر عاملی برای کاهش انتقال رطوبت خاک خواهد بود. در یک اختلاف رطوبت مشخص بین دو نقطه، افزایش  $n$  باعث انتقال رطوبت خیلی بیش‌تری می‌شود. فرایند شبیه‌سازی به پارامتر  $n$  حساس است و بایستی دقت زیادی در تعیین این عدد صورت گیرد. با توجه به نتایج بدست آمده، مدل با دقت بالایی پارامتر  $n$  را در مقایسه با مقادیر ارائه شده توسط بانک‌های اطلاعاتی پیش بینی نمود. معکوس پتانسیل ورود هوا به خاک ( $\alpha$ ): تغییرات مکش خاک در فرایند شبیه‌سازی بر این عامل ( $\alpha$ ) مؤثر می‌باشند. با افزایش  $\alpha$  به همان نسبت مکش خاک در رطوبت خاص کاهش می‌یابد و بالعکس. وقتی که برای انتقال رطوبت، پتانسیل دو لایه مقایسه می‌شود با کاهش  $\alpha$ ، پتانسیل هر دو لایه به نسبتی مساوی افزایش می‌یابد. در نتیجه به همان میزان اختلاف پتانسیل آن دو لایه زیاد می‌شود. بدین ترتیب با کاهش  $\alpha$  انتقال رطوبت میان دو لایه افزایش می‌یابد و دوباره به همان دلیل که در هدایت هیدرولیک اشباع ذکر شد، تأثیر پارامتر  $\alpha$  در کل فرایند شبیه‌سازی به اندازه تأثیر آن در اختلاف پتانسیل دو نقطه با رطوبت مشخص نمی‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده، مدل با دقت مناسبی پارامتر  $\alpha$  را در مقایسه با مقادیر ارائه گردیده توسط بانک‌های اطلاعاتی پیش بینی نموده است.

اعتبارسنجی مدل در محاسبه اطلاعات هواشناسی در جدول ۲ مقایسه اطلاعات هواشناسی برآورد شده توسط مدل و اعلام شده توسط اداره کل هواشناسی استان قزوین آورده شده است. جدول ۳- مقایسه اطلاعات هواشناسی برآورد شده توسط مدل و اعلام شده توسط اداره کل هواشناسی استان قزوین

اطلاعات هواشناسی	رگرسیون مجموع مربعات (SSE)	ضریب کارائی مدل (ME)	میانگین انحراف معیار (MBE)
درجه	۱/۱۲	۰/۷۸	۱/۲۱
حداقل			

$\alpha$ ،  $K_s$  و  $L$  جداگانه بررسی می‌شوند. برای اطمینان از صحت خروجی مدل، بدلیل عدم وجود بانک‌های اطلاعاتی دقیق در داخل کشور، از سه بانک اطلاعاتی در دسترس (شاپ و همکاران، ۲۰۰۱؛ رالز و همکاران، ۱۹۸۲ و مارسل و پریش، ۱۹۸۸) استفاده شد. در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ ارزیابی مشخصه‌های منحنی رطوبتی و هیدرولیکی غیر اشباع برآورد شده و ارائه شده در شهرستان‌های قزوین، آبیک و بوئین زهرا آورده شده است.

ارزیابی منحنی رطوبت و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع	ضریب تجربی تعیین کننده شکل منحنی	معکوس پتانسیل ورود هوا به خاک	درصد رطوبت در حالت اشباع	درصد رطوبت باقی مانده	بافت خاک	منطقه مورد مطالعه
۹۰۳۱۲۲	۱.۱۹۸۸	۰.۱۰۲۹	۰.۴۶۳۷	۰.۰۷۱۸	فوس زهرا	
-۰.۴۴۸۴	۰.۹۳۱۲	۰.۱۹۱۹	۰.۴۶۳۷	۰.۰۷۱۸	فوس زهرا	
۰.۳۷۱	۱.۴۷۲۳	۰.۰۱۱۱	۰.۳۹۹	۰.۰۶۶۱	Loam	Rosetta (Schaap and al.)
۰.۵	۱.۲۲	۰.۰۹	۰.۴۳۴	۰.۰۲۲۷	Loam	Rawls and al.
۰.۵	۲۴.۹۶	۱.۵۶	۰.۰۳۶	۰.۰۷۸	Loam	Carsel and al.
<b>نسبت مقدار برآورد شده مدل به مقدار اندازه گیری شده</b>						
	۰.۸۱۴	۲.۶۳۵	۱.۱۶۲	۱.۱۷۷		Rosetta (Schaap and al.)
	۰.۶۰۹	۰.۹۸۳	۱.۰۶۹	۲.۶۵۸		Rawls and al.
	۰.۳۹۸	۰.۷۶۸	۰.۸۰۵	۰.۹۲		Carsel and al.

شکل ۵- ارزیابی مشخصه‌های منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع برآورد شده و ارائه شده در شهرستان بوئین‌زهرا

ارزیابی منحنی رطوبت و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع	ضریب تجربی تعیین کننده شکل منحنی	معکوس پتانسیل ورود هوا به خاک	درصد رطوبت در حالت اشباع	درصد رطوبت باقی مانده	بافت خاک	منطقه مورد مطالعه
۳۱.۴۳۳۹	۱.۱۶۶۴	۰.۰۴۱۹	۰.۴۶۳۷	۰.۰۶۷۴	Clay Loam	آبک
-۰.۶۹۴۱	۱.۱۶۶۴	۰.۰۴۱۹	۰.۴۶۳۷	۰.۰۶۷۴	Clay Loam	آبک
-۰.۷۶۳	۱.۴۱۵۷	۰.۰۱۵۸	۰.۴۴۲	۰.۰۷۹	Clay Loam	Rosetta (Schaap and al.)
۰.۵	۵.۵۲	۱.۱۹۴	۰.۳۹	۰.۰۷۵	Clay Loam	Rawls and al.
۰.۵	۶.۲۴	۱.۳۱	۰.۰۱۹	۰.۰۹۵	Clay Loam	Carsel and al.
<b>نسبت مقدار برآورد شده مدل به مقدار اندازه گیری شده</b>						
	۰.۹۱	۰.۸۲۴	۲.۶۵۴	۰.۸۵۳		Rosetta (Schaap and al.)
	۱.۳۸۹	۰.۹۷۷	۱.۰۷۵	۰.۸۹۸		Rawls and al.
	۱.۳۸۹	۰.۸۹	۲.۲۰۷	۰.۷۰۹		Carsel and al.

شکل ۶- ارزیابی مشخصه‌های منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع برآورد شده و ارائه شده در شهرستان آبیک

ارزیابی منحنی رطوبت و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع	ضریب تجربی تعیین کننده شکل منحنی	معکوس پتانسیل ورود هوا به خاک	درصد رطوبت در حالت اشباع	درصد رطوبت باقی مانده	بافت خاک	منطقه مورد مطالعه
۲۳.۸۷۸۱	۱.۲۵۸۹	۰.۰۹۶۱	۰.۴۰۷۴	۰.۰۷۷۷	Sandy Loam	فوس
-۰.۴۱۳	۱.۲۵۸۹	۰.۰۹۶۱	۰.۴۰۷۴	۰.۰۷۷۷	Sandy Loam	فوس
-۰.۸۶۱	۱.۴۴۸۷	۰.۰۲۶۶	۰.۳۸۷	۰.۰۳۹	Sandy Loam	Rosetta (Schaap and al.)
۰.۵	۶۲.۱۶	۰.۳۶۸	۰.۴۱۲	۰.۰۹۱	Sandy Loam	Rawls and al.
۰.۵	۱۰۶.۱	۱.۸۹	۰.۰۷۵	۰.۰۶۵	Sandy Loam	Carsel and al.
<b>نسبت مقدار برآورد شده مدل به مقدار اندازه گیری شده</b>						
	۰.۶۲۴	۰.۸۶۹	۱.۷۳۴	۱.۹۹۱		Rosetta (Schaap and al.)
	۰.۳۸۴	۰.۹۵۲	۰.۶۷۸	۰.۸۹۸		Rawls and al.
	۰.۸۳	۰.۶۶۶	۰.۶۱۵	۰.۹۹۴		Carsel and al.

شکل ۷- ارزیابی مشخصه‌های منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع برآورد شده و ارائه شده در شهرستان قزوین

از نتایج بدست آمده نسبت مقدار محاسبه شده بر مقدار مشاهداتی ( $R'$ )، مشخص می‌گردد که درصد رطوبت باقیمانده ( $\theta_r$ )، درصد رطوبت در حالت اشباع ( $\theta_s$ )، معکوس پتانسیل ورود هوا به خاک ( $\alpha$ )، ضریب تجربی تعیین کننده شکل منحنی ( $n$ )، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ( $K_s$ ) و پارامتر تجربی (ضریب اعوجاج) ( $L$ ) محاسبه شده در مقایسه با مقدار بانک‌های اطلاعاتی نزدیک بوده که این نشان دهنده دقت مدل در پیش بینی پارامترها می‌باشد. هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ( $K_s$ ): زمانی که  $K_s$ ، در صورت وجود اختلاف پتانسیل میان اعماق مختلف خاک، زیاد می‌شود، انتقال رطوبت نیز میان دو لایه زیاد است. اما پس از مدتی که رطوبت انتقال پیدا کرد و رطوبت خاک به تعادل نزدیک شد، اختلاف پتانسیل میان نقاط خاک

بودن آن نشان دهنده بالا بودن دقت مدل در پیش بینی اطلاعات هواشناسی است.

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از اعتبار سنجی مدل در برآورد رطوبت خاک نشان داد که مدل قادر به برآورد مقدار رطوبت خاک با دقت قابل قبول است. پایین بودن درصد ضریب تغییرات (حداقل ۱۳/۷ و حداکثر ۲۲/۴۳)، نزدیک بودن ضریب کارایی مدل به عدد ۱، پایین بودن میانگین درصد انحراف نسبی (حداقل ۱۲/۳ و حداکثر ۱۸/۳۹)، بالا بودن ضریب تبیین مدل (۸۱ تا ۸۸ درصد) گواه این امر می باشد. همچنین اعتبارسنجی مدل در شبیه سازی منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع با مقادیر بانک‌های اطلاعاتی موجود، مبین دقت مدل در پیش بینی پارامترها می باشد. بعلاوه اعتبارسنجی مدل در محاسبه اطلاعات هواشناسی نیز گویای عملکرد خوب مدل در برآورد متغیرهای مربوطه می باشد. با توجه به نتایج بدست آمده، می توان از این مدل با دقت بالایی در تعیین احتمال روزهای کاری عملیات خاک ورزی بهره برداری نمود.

حرارت	حداکثر	۰/۲۶	۰/۹	-۰/۰۶
رطوبت نسبی	حداقل	۱/۸۳	۰/۵۶	۳/۲۳
	حداکثر	۱/۵۸	۰/۸۱	-۲/۴۲
بارندگی		۰/۷۵	۰/۶۹	۰/۵۵
ساعات آفتابی		۱/۱	۰/۷۵	۱/۱۶
سرعت باد		۰/۷۹	-۰/۲	-۰/۶

نتایج نشان می دهد، مقدار میانگین انحراف معیار (MBE) در حداکثر درجه حرارت، حداکثر رطوبت نسبی و سرعت باد، منفی بوده، که نشان دهنده کم برآوردی مدل است. در سایر موارد مثبت بوده که نشان دهنده بیش برآوردی مدل می باشد. با توجه به اینکه این مقادیر نزدیک به صفر هستند، نشان دهنده برآورد خوب مدل بوده و انحراف بسیار کمی در آن مشاهده می شود.

مقدار کارایی مدل (ME) که نشان دهنده کیفیت و چگونگی برازش داده های مشاهده ای و برآورد شده می باشد بین ۰/۲- تا ۰/۹ متغیر است. با توجه به نزدیک بودن مقادیر کارایی مدل به عدد ۱، برازش مطلوبی بین مقادیر رطوبت اندازه گیری شده و برآورد شده وجود دارد. این نتیجه حاکی از دقت بالای مدل در برآورد اطلاعات هواشناسی می باشد.

مقدار رگرسیون مجموع مربعات مربع (SSE) بین ۰/۲۶ تا ۱/۸۳ است که نشان دهنده کم بودن میزان خطاهای تصادفی می باشد. ضمناً پایین

#### منابع

- آمارنامه کشاورزی سال ۱۴۰۱ (جلد اول: محصولات زراعی)، ۱۴۰۲. معاونت آمار مرکز آمار، فناوری اطلاعات و ارتباطات، معاونت برنامه ریزی اقتصادی، وزارت جهاد کشاورزی.
- کمالی، غ.، و همکاران، ۱۳۸۹. بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر هواشناسی در تعیین زمان عملیات سمپاشی علف های هرز مزارع نیشکر هفت تپه، مجله ی جغرافیا و توسعه ی ناحیه ای، شماره ۱۵، ص ۲۴۷-۲۶۵.
- کوثری مقدم، ا.، و همکاران، ۱۳۹۵. پیش بینی روزهای کاری برای عملیات خاک ورزی ثانویه و کاشت پاییزه، نشریه ماشین های کشاورزی، جلد ۶، شماره ۲، ص ۵۳۷-۵۴۶.
- نشاط، ع.، صدقی، ح.، برآورد میزان رواناب با استفاده از روش سازمان حفاظت خاک (SCS) و مدل HEC-HMS در حوضه آبخیز باغ ملک- استان خوزستان، مجله علمی-پژوهشی علوم کشاورزی، سال دوازدهم، شماره ۴، ص ۷۸۷-۷۹۹.
- نشاط، ع.، و همکاران، ۱۳۸۵. برآورد تبخیر غیرماندگار از سطح خاک بدون پوشش توسط مدل LEACHM و مقایسه نتایج با مدل بیلان آب، مجله علوم کشاورزی، سال دوازدهم، شماره ۲، ص ۳۱۳-۳۲۸.
- Ahaneku, I. E., Onwualu, A. P. ۲۰۰۷. Predicting suitable field workdays for soil tillage in north central Nigeria, Nigeian Journal of Technology, Vol. ۲۶ (۱), P. ۸۱-۸۸.
- Aydin, M., et al. ۲۰۰۵. Test of a simple model for estimating evaporation from bare soils in different environments, Ecological Modelling, Vol. ۱۸۲, P. ۹۱-۱۰۵.
- Babeir, A. S., et al. ۱۹۸۶. Predicting field tractability with a simulation model, Transactions of the ASAE, Vol. ۲۹ (۶), P. ۱۵۲۰-۱۵۲۵.
- Carsel, R.F., Parrish. R.S. ۱۹۸۸. Developing joint probability distribution of soil water retention characteristics, Water Resour. Res, Vol. ۲۴, P.۷۵۵,۷۶۹.
- Cooper, G., et al. ۱۹۹۷. The influence of a changed climate on soil workability and available workdays in Scotland, J. agric. Engng Res, Vol. ۶۸, P. ۲۵۳-۲۶۹.
- Khani.M., et al. ۲۰۱۱. Verification and Sensitivity Analysis of a Model for Determination of Probability of a Working Day for Tillage, International Agrophysics, Vol. ۲۵, P. ۲۷-۳۵.
- Rawls, W. J., et al. ۱۹۸۲. Estimation of soil water properties, Trans. ASAE, Vol. ۲۵, P.۱۳۱۶-۱۳۲۰.
- Richards, L. A. ۱۹۳۱. Capillary conduction of liquids through porous media, Physics, I, P.۳۱۸-۳۳۳.

- Rotz, C. A., Harrigan, T.M. ۲۰۰۵. Predicting suitable days for field machinery operations in a whole Farm simulation, Applied Engineering in Agriculture, Vol. ۲۱(۴), P. ۵۶۳-۵۷۱.
- Rounsevell, M. D. A., Jones, R. J. A. ۱۹۹۳. A soil and agroclimatic model for estimating machinery workdays: the basic model and climatic sensitivity, Soil and Tillage Research, Vol. ۲۶, P. ۱۷۹-۱۹۱.
- Schaap Marcel. G., et al. ۲۰۰۱. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions, J. Hydrol, Vol. ۲۵۱, P. ۱۶۳-۱۷۶.
- Simalenga, T. E., Have, H. ۱۹۹۲. Estimation of soil tillage workdays in a semi-arid area, Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. ۵۱, P. ۸۱-۸۹.
- Van Genuchten, M. Th. ۱۹۸۰. A closed form equation predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of America, Vol. ۴۴, P. ۸۹۲-۸۹۸.
- Witney, B. D., et al. ۱۹۸۲. A simulation model for predicting soil moisture status, Soil & Tillage Research, Vol. ۲, P. ۶۷-۸۰.

## Model Validation for determining the probability of suitable working days in tillage operations (case study: Qazvin province)

Roohollah Yousefi<sup>۱</sup> ; Alireza Allameh<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran.

<sup>۲</sup> Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran.

### Introduction

The most important factor in timely tillage operations is the estimation of the number of working days. Probability of working days (PWD) is the ratio of workable days to days available during the working season for the desired operation. The PWD is used in some relationships in agricultural mechanization and is one of the effective factors in calculating the optimal size of the required machines, the farm capacity of the existing machines as well as the cost of timeliness. Therefore, for each day or each time period, the possibility of performing the operation is checked separately.

There are usually two methods for determining the probability of a working day which are statistics from real conditions and estimation of the feasibility of operations in the past years.

Sometimes the weather conditions indirectly prevent the operation. Soil moisture content is one of the most important factors for most agricultural operations but it cannot be directly extracted from meteorological data. Therefore, it should be initially estimated by practical methods and then the feasibility of the operation determined by comparing the moisture obtained with suitable moisture conditions. A soil water balance model is needed to determine soil moisture content. In these models, by considering the humidity in a day or a period of time and also by calculating the inputs and outputs of water to the soil profile, they determine the amount of humidity for the next time step. To calculate the possibility of working day, daily soil moisture prediction models are often used which are based on long-term meteorological data and soil characteristics of the region. Estimating the number of working days is one of the effective factors in calculating the optimal size of required machines, the farm capacity of existing machines, as well as the cost of timeliness. The purpose of this study is to validate the proposed model to determine the probability of suitable working days for tillage operation.

### Methodology

Qazvin province, with an area of ۱۵۸۰۵ square kilometers, having ۴۸۸ thousand hectares of agricultural land possesses more than three percent of Iran's total production. The total cultivated area of agricultural crops is roughly ۲۵۹,۰۸۸ hectares from which ۵۶,۵۷% is irrigated and the rest designated to rainfed. Climatic conditions and soil moisture content are key factors in the production of agricultural products. Due to the difficulty and high costs of measuring meteorological parameters and soil moisture content in different conditions, models have been proposed for estimating them in the last few decades. Recent models require input data for implementation including meteorological variables (such as rainfall, air temperature and humidity, wind speed and radiation), soil physical properties, soil moisture content and plant residues. The difficulty of field measurement and their time-consuming nature has led to the expansion of the design and application of these models. To determine the probability of working days, a model is needed that can estimate the moisture regime of bare soil in different years and determine the possibility of working in a day by determining the soil moisture content in different layers and comparing it with the humidity limits. Then, by adding up the working days, the number and probability of working days would be determined. To determine the probability of suitable working days for tillage operations, a model was designed by the Delphi software. Also, this model could be used to estimate evaporation, run-off, soil moisture content in other regions providing that those variables were available. After dividing the soil into several layers, this model estimates soil moisture content in different time steps. In this way, having the initial soil moisture content for whole soil profile and using meteorological data and soil properties, input (rain, deep infiltration) and output (evaporation, run-off), the moisture of each soil layer is computed and

then added to the initial moisture. This cycle continues repeatedly and soil moisture content is determined in each time step and in each day. In this model, according to meteorological data and soil surface wetness, evaporation from the soil surface is calculated and it is subtracted from the wetness of the surface layers from which evaporation takes place. Moisture transfer between soil layers is estimated according to the total suction difference (sum of suction and gravity) between two layers and water conductivity in the soil (hydraulic conductivity). As a result, the input and output of each soil layer is specified in each stage, and according to the initial moisture of that layer at the beginning of the stage, the moisture at the end of the stage is determined and used as the initial moisture in the second stage of simulation. The wetness of each layer in each day is determined by averaging the time steps during the working hours of that day. By comparing soil moisture content with workability limits, the possibility of working on that day is determined. By adding up working days, the number and probability of working days is determined. Conclusion To check the validity of the model, it is necessary to compare its results with real measurements. For this purpose, the average standard deviation, the coefficient of variation, the average percentage of relative deviation, the regression of the sum of squares and the coefficient of determination were determined as the main indicators of model validation. The measured and estimated humidity are very close to each other in most places. The average value of the standard deviation in the cities of Buin Zahra and Abyek showed the underestimation of the model and in the city of Qazvin it showed the overestimation of the model. In general, the deviation from the observed values is very small. Since this value tends to zero, it indicates a good estimation of the model and very little deviation is observed in it. Considering that the percentage of coefficient of variation in the studied cities is low, it shows the high accuracy of the model in estimating soil moisture content. The efficiency value of the model, which shows the quality and how to fit the observed and estimated data, varies from  $-0.12$  to  $-0.47$ . Due to the closeness of the model efficiency values to the number  $1$ , there is a good fit between the measured and estimated moisture values which indicates the high accuracy of the model in estimating soil moisture content. The results obtained from calculating the average percentage of relative deviation show the acceptable fit of the data obtained from the model and the model can be used to measure the amount of soil moisture content. The regression value of the sum of squares squares (SSE) in the fitting process should be as low as possible, because it indicates the amount of random errors. The results obtained for the regression of the sum of squares squares show the high accuracy of the model. The coefficient of determination of the model in three cities ranges from  $0.81$  to  $0.88$ , which indicates the probability of correlation between two categories of data in the future. About  $81-88\%$  of the variance is shared between the estimated value and the measured value. In the process of fitting the moisture curve and unsaturated hydraulic conductivity in the designed model, the variables are investigated separately. To ensure the validity of the output of the model, three available databases were used (Shapp et al., 2001; Rawls et al., 1982 and Marcel and Parrish, 1988). From the obtained results, the ratio of the calculated value to the observed one, it is realized that the percentage of remained moisture, the percentage of moisture in the saturated state, the inverse of the potential of air entering the soil, the experimental coefficient that determines the shape of the curve, the hydraulic conductivity of saturated soil and the calculated experimental parameter (tortuosity coefficient) are close to the value of the databases, which indicates the accuracy of the model in predicting the parameters. The results show that the mean value of the bias deviation (MBE) in the maximum temperature, maximum relative humidity and wind speed was negative, which indicates the underestimation of the model. In other cases, it is positive which indicates overestimation of the model. Considering that these values are close to zero, it confirms a good estimate of the model and very small deviation is observed. The model efficiency (ME) value, which indicates the quality and how to fit the observed and estimated data, varies between  $-0.2$  and  $0.9$ . Due to the closeness of the model efficiency values to the number  $1$ , there is a good fit between the measured and estimated moisture values. This result indicates the high accuracy of the model in estimating meteorological data. The regression value of the sum of squares squares (SSE) is between  $0.26$  and  $1.83$ , which indicates the low amount of random errors. In addition, its lower level indicates the high accuracy of the model in predicting meteorological data. According to the results, this model can be used with high accuracy in determining the probability of working days of tillage operations.

Keywords

Model; Probable Working Days; Soil moisture content; Tillage; Validity