



دانشگاه گورگان و منابع طبیعی گورگان

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و پنجم، شماره ششم، ۱۳۹۷

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2019.15383.3063

## شبیه‌سازی دمای اعماق مختلف خاک در مقیاس‌های ساعتی و روزانه با به‌کارگیری یک مدل SVAT

\*یونس خوشخو

استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه کردستان

تاریخ دریافت: ۹۷/۴/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۹/۷

### چکیده

**سابقه و هدف:** دمای خاک یک متغیر مهم و مؤثر بر فرایندهای مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک است. دمای خاک همچنین به‌طور مستقیم و غیرمستقیم روی فعالیت‌های گیاهی و بر نرخ تبادلات جرم و انرژی بین سطح خاک و اتمسفر اثر قابل‌توجهی دارد. با توجه به وجود داده‌های محدود و ناقص از دمای خاک، مدل‌سازی آن از اهمیت شایانی برخوردار است. مدل‌سازی دقیق تغییرات دمای خاک مستلزم در نظر گرفتن هم‌زمان تمامی عوامل داخلی و بیرونی مؤثر بر آن است. در این راستا مدل‌های SVAT که مبتنی بر حل معادلات توأمان انتقال گرما و رطوبت در خاک هستند از اهمیت بالا و دقت قابل‌قبولی برخوردار هستند.

**مواد و روش‌ها:** برای انجام این پژوهش، از یک مدل انتقال جرم و انرژی در سیستم خاک-گیاه-اتمسفر (SVAT) جهت شبیه‌سازی تغییرات ساعتی دمای اعماق خاک استفاده شد. یک ایستگاه سینوپتیک ایران (ایستگاه سقر) برای انجام این مطالعه انتخاب شد و بر اساس داده‌های اندازه‌گیری‌شده ویژگی‌های فیزیکی خاک در اعماق مختلف و همچنین متغیرهای مختلف هواشناسی در یک بازه زمانی چندساله، مقادیر ساعتی دمای اعماق مختلف خاک مورد شبیه‌سازی قرار گرفتند. جهت واسنجی مدل از روش بیزین با در نظر گرفتن ۱۰ پارامتر اصلی مدل و انجام ۸۰۰۰ مرتبه شبیه‌سازی بر اساس ترکیب‌های مختلف تولیدشده از مقادیر پارامترها در دامنه عدم قطعیت آن‌ها به روش تصادفی مونت‌کارلو در بازه زمانی ۲۰۰۹-۱۹۹۴ استفاده شد. سپس این مدل واسنجی‌شده در دوره آماری ۲۰۱۰-۲۰۱۴ مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. جهت سنجش عملکرد مدل نیز از سه شاخص میانگین قدر مطلق خطا، میانگین اریبی خطا و ضریب تعیین استفاده شد.

**یافته‌ها:** نتایج حاصل از واسنجی مدل با به‌کارگیری روش بیزین نشان‌دهنده تغییر ملموس در مقادیر ۱۰ پارامتر منتخب مدل در مقایسه با مقادیر پیش‌فرض آن‌ها و همچنین مطلوب بودن فرایند واسنجی بود. در دوره واسنجی، در غالب موارد مقادیر هر سه شاخص سنجش عملکرد مدل در حالت واسنجی در مقایسه با مقادیر پیش‌فرض پارامترها به‌طور نمایانی بهبود یافت. نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل نیز بیانگر عدم وجود تفاوت‌های چشم‌گیر بین شاخص‌های سنجش عملکرد مدل در دو حالت واسنجی و اعتبارسنجی و در نتیجه عملکرد قابل‌قبول مدل واسنجی

\* مسئول مکاتبه: [y.khoshkho@uok.ac.ir](mailto:y.khoshkho@uok.ac.ir)

شده جهت انجام پیش‌بینی مقادیر ساعتی دمای خاک در هر بازه زمانی دلخواه بود به گونه‌ای که برای تمامی زمان‌ها و همه اعماق خاک، ضریب تعیین بالاتر از ۰/۹ به دست آمد. با این وجود، عملکرد یکسانی از مدل برای فصول مختلف مشاهده نشد و بر اساس شاخص  $R^2$ ، پایین‌ترین عملکرد مدل در فصل زمستان و بر اساس شاخص MAE، بهترین عملکرد مدل در فصل زمستان و پایین‌ترین عملکرد آن در فصول بهار و تابستان رخ داد. نتایج همچنین نشان داد که تمایل کلی مدل برای شبیه‌سازی دمای خاک در فصول بهار و تابستان به سمت کم برآورد کردن و در فصول پاییز و زمستان به سمت بیش برآورد کردن است و نتایج حاصله در مقیاس سالانه نیز بیانگر تمایل کلی مدل به سمت کم‌برآورد کردن دمای خاک بود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی میانگین شبانه‌روزی دمای خاک نیز نشان‌دهنده مقدار خطای کم‌تر مدل جهت برآورد میانگین شبانه‌روزی دمای خاک در مقایسه با مقادیر ساعتی دمای خاک بود.

**نتیجه‌گیری:** جمع‌بندی نتایج کلی این پژوهش بیانگر آن است که اگرچه مدل SVAT مورد استفاده در این پژوهش قابلیت مناسبی جهت شبیه‌سازی مقادیر ساعتی و روزانه دمای اعماق مختلف خاک دارد اما با جمع‌آوری و دخالت دادن داده‌های بیش‌تر مانند داده‌های رطوبت خاک در فرایند واسنجی، امکان دستیابی به نتایج دقیق‌تر از مدل نیز وجود دارد. همچنین با توجه به وجود فرایندهای خاص مؤثر بر دمای خاک در دو فصل تابستان و زمستان، پیشنهاد می‌شود که فرایند واسنجی پارامترهای مدل برای این دو فصل به صورت جداگانه انجام شود.

**واژه‌های کلیدی:** ایستگاه سقر، دمای خاک، روش بیزین، مدل SVAT

#### مقدمه

سرعت و نوع واکنش‌های شیمیایی داخل خاک مانند انحلال و ترکیب کربنات‌ها و سولفات‌ها محسوب می‌شود (۹ و ۱۰). تغییرات دمای خاک معلول انتقال گرما در خاک از سطح به عمق یا برعکس است و این جریان تا زمانی که شیب دما در نیم‌رخ خاک وجود داشته باشد، ادامه می‌یابد. این تغییرات به‌طور کلی تابع دو دسته عوامل بیرونی و درونی هستند. عوامل بیرونی به نحوه تبادلات و دادوستدهای گرما و رطوبت بین سطح خاک با محیط بیرون آن (اتمسفر و پوشش خاک) مربوط می‌شود. در این میان، میزان تابش خالص رسیده به سطح زمین و نحوه تسهیم آن به مؤلفه‌های مختلف شامل گرمای محسوس، گرمای نهان و جریان گرما به داخل خاک نقشی کلیدی به عهده دارد. بر این اساس متغیرهای هواشناسی مانند شدت و مدت تابش، دمای هوا، سرعت باد و ... در نقش واداشت‌های بیرونی جزو اصلی‌ترین فاکتورهای

دمای خاک یک متغیر مهم و مؤثر بر فعالیت‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک است و بر نرخ تبادلات جرم و انرژی بین سطح خاک و اتمسفر اثر چشمگیری دارد و پارامتری مهم در نحوه تسهیم مقدار تابش خالص رسیده به سطح خاک به سه مؤلفه اصلی آن (شامل گرمای محسوس، گرمای نهان و شار گرمای خاک) است (۲ و ۶). دمای خاک به‌طور مستقیم و غیرمستقیم روی فعالیت‌های گیاهی اثر می‌گذارد. از آنجایی که حالت بهینه جذب آب توسط ریشه گیاه در دمای معینی به وقوع می‌پیوندد بنابراین دمای خاک در همه مراحل فنولوژی گیاه، میزان رشد و توسعه گیاه را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. دمای خاک همچنین بر مواد آلی خاک، ساختمان خاک، شدت فعالیت میکروبی و قابلیت جذب عناصر غذایی نیز اثرگذار بوده و عاملی تعیین‌کننده در

مکانی دلخواه حل می‌شوند. اگرچه مدل‌های SVAT مختلف به لحاظ معادلات اساسی حاکم بر سیستم، ساختارهای مشابهی دارند ولی در مواردی مانند روش برآورد ویژگی‌های گرمایی و هیدرولیکی خاک، روش مدل‌سازی برف از روش‌های متفاوتی بهره می‌گیرند و روش‌های به‌کار گرفته‌شده جهت حل معادلات نیز گاهی در این مدل‌ها متفاوت است. از مدل‌های SVAT در پژوهش‌های بین‌المللی عدیده‌ای از جمله پارک و همکاران (۲۰۱۷)، خوشخو و همکاران (۲۰۱۵)، وو و همکاران (۲۰۱۲)، ژائو و همکاران (۲۰۱۰) با دقت قابل‌قبول جهت شبیه‌سازی دمای خاک استفاده شده است (۶، ۹، ۱۲ و ۱۳). علی‌رغم اهمیت زیاد این موضوع، پژوهش‌های بسیار محدودی در این زمینه در ایران انجام شده است که در زمره مهم‌ترین این پژوهش‌ها که با به‌کارگیری مدل SVAT انجام شده‌اند می‌توان از برآورد دما و رطوبت خاک در کرج توسط نوروز ولاشیدی و همکاران (۲۰۱۲) و شبیه‌سازی دمای اعماق مختلف خاک همراه با تحلیل عدم قطعیت و تحلیل حساسیت مدل در ایستگاه همدان توسط خوشخو و همکاران (۲۰۱۳) نام برد (۵ و ۸). یکی از مسائل مهم به‌هنگام به‌کارگیری مدل‌های SVAT، واسنجی پارامترهای عدیده تجربی به‌کار رفته در این مدل‌هاست به‌گونه‌ای که نوروز ولاشیدی و همکاران (۲۰۱۲) دستیابی به نتایج با دقت بالا از مدل را منوط به انجام واسنجی پارامترهای مدل دانسته‌اند (۸). بر این اساس لازم است جهت دستیابی به دقت قابل‌قبول به‌هنگام به‌کارگیری چنین مدل‌هایی، به مسأله واسنجی پارامترهای تجربی آن توجه و تمرکز ویژه‌ای شود.

یکی از مزایای اصلی به‌کارگیری مدل‌های فیزیکی جهت شبیه‌سازی دمای اعماق خاک، امکان‌پذیر بودن برآورد دمای خاک در هر عمق دلخواه و در هر مقیاس زمانی دلخواه است. اهمیت این امر از آن‌رو

کنترل‌کننده دمای خاک به‌شمار می‌آیند. پوشش‌های مختلف خاک (گیاه، برف، خاک بدون پوشش و ...) نیز هم بر میزان انرژی خالص رسیده به سطح خاک و هم بر نحوه توزیع آن اثر می‌گذارند. عوامل درونی نیز به یک سری فرآیندهای مرتبط با چگونگی انتقال توأمان گرما و رطوبت در داخل خاک از جمله ویژگی‌های گرمایی و هیدرولیکی خاک مربوط می‌شود که این فرآیندها تعیین‌کننده نحوه توزیع انرژی گرمایی در داخل خاک هستند (۷). مدل‌سازی دقیق تغییرات دمای خاک مستلزم در نظر گرفتن هم‌زمان هر دو عوامل درونی و بیرونی است. از بین مدل‌های مختلف فیزیکی، تجربی، آماری و ... که برای شبیه‌سازی دمای خاک ارائه شده‌اند که تنها مدل‌های فیزیکی هستند که همه فاکتورها و فرایندهای مؤثر فوق را لحاظ می‌کنند. این مدل‌ها غالباً به‌عنوان یک زیرمدل کلیدی و اصلی از مدل‌های انتقال جرم و انرژی در سیستم خاک-گیاه-اتمسفر که از آن‌ها تحت عنوان کلی مدل‌های SVAT<sup>۱</sup> نام‌برده می‌شود، هستند به‌طوری‌که یکی از اصلی‌ترین اجزای هر مدل SVAT، شبیه‌سازی توأمان انتقال گرما و رطوبت در داخل خاک تحت شرایط پوشش‌های مختلف از سطح خاک است که غالباً مبتنی بر در نظر گرفتن یک پروفیل قائم و لایه‌بندی شده است که این پروفیل قائم شامل اتمسفر، پوشش گیاهی و اعماق خاک تا یک عمق مشخص است و در برخی از این مدل‌ها این پروفیل قائم تا سطح آب زیرزمینی نیز گسترش داده می‌شود (۱). شبیه‌سازی انتقال گرما در داخل این پروفیل تک‌بعدی و قائم خاک در این دسته مدل‌ها بر پایه معادله فوریه<sup>۲</sup> و شبیه‌سازی انتقال رطوبت خاک بر اساس معادله ریچاردز<sup>۳</sup> است که این دو مدل با هم به‌صورت جفت‌شده به روش‌های تحلیلی یا عددی برای مقیاس‌های زمانی و

1- Soil Vegetation Atmosphere Transfer  
2- Fourier  
3- Richards

عرض جغرافیایی  $15^{\circ} 36'$  شمالی و ارتفاع  $1522/8$  متر از سطح آزاد دریا برای انجام این پژوهش انتخاب شده است. این ایستگاه در سال ۱۹۶۱ میلادی (۱۳۳۹ شمسی) تأسیس شده است و داده‌های هواشناسی متغیرهای مختلف مثل دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و ... برای این ایستگاه در مقیاس زمانی هر سه ساعت یکبار در دسترس می‌باشد. با این وجود داده‌های نسبتاً پیوسته دمای خاک در دسترس برای این ایستگاه محدود به سال ۱۹۹۲ به بعد است که در اعماق ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری خاک و هر شبانه‌روز سه نوبت در ساعات ۳، ۹ و ۱۵ به وقت گرینویچ اندازه‌گیری شده‌اند و در برخی از سال‌ها نیز خلأهای آماری قابل توجهی در داده‌های خاک وجود دارد. جدول ۱ برخی از ویژگی‌های فیزیکی مورد نیاز و اندازه‌گیری شده جهت انجام این پژوهش شامل بافت خاک (همراه با درصد ماسه، سیلت و رس)، تخلخل و ماده آلی را در لایه‌های مختلف خاک برای ایستگاه سقز نشان می‌دهد.

است که در ایستگاه‌های هواشناسی، اندازه‌گیری‌های دمای خاک فقط در چند عمق محدود و تنها در سه نوبت در شبانه‌روز (ساعات ۳، ۹ و ۱۵ گرینویچ) انجام می‌شود و بدیهی است که این مقیاس‌های زمانی و مکانی برای مطالعات تفصیلی و دقیق که به دمای خاک در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر و در اعماق بیش‌تری نیاز است کافی نیست و بنابراین لازم است مورد مدل‌سازی قرار گیرد. افزون بر این، داده‌های دمای خاک در اکثر ایستگاه‌ها با نواقص و خلأهای آماری زیادی در گذشته همراه بوده است و طول دوره آماری موجود از این داده‌ها نیز عموماً به حدی نیست که بتوان در پژوهش‌هایی مثل انجام مطالعات مربوط به اثر تغییر اقلیم بر دمای خاک از آن‌ها استفاده کرد. بر این اساس، هدف از انجام این پژوهش شبیه‌سازی داده‌های دمای خاک در اعماق و زمان‌های مختلف است به‌گونه‌ای که امکان پر کردن خلأهای آماری و تطویل این داده‌ها برای دوره‌های آماری طولانی‌تر مهیا گردد.

### مواد و روش‌ها

**ایستگاه مورد مطالعه:** ایستگاه سینوپتیک سقز واقع در استان کردستان با طول جغرافیایی  $16^{\circ} 46'$  شرقی،

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی اندازه‌گیری شده خاک در لایه‌های مختلف در ایستگاه سینوپتیک سقز.

**Table 1. Measured soil physical properties for different layers in the Saghez synoptic station.**

عمق خاک (سانتی‌متر)	درصد ماسه	درصد سیلت	درصد رس	بافت خاک	تخلخل (درصد)	ماده آلی (درصد)
Soil depth (cm)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Soil texture	Porosity (%)	Organic matter (%)
0-5	14.2	43.8	42	رسی سیلتي Silty clay	63.2	2.28
5-10	14.2	41.8	44	رسی سیلتي Silty clay	55.7	1.66
10-20	12.2	33.8	54	رسی Clay	54.1	1.52
20-40	18	34.4	47.6	رسی Clay	52.8	1.12
40-60	14.2	33.8	52	رسی Clay	55.1	1.12
60-100	10	34.4	55.6	رسی Clay	53.9	1.03

عديده‌ای است که در ساختار معادلات به کار گرفته شده در مدل وجود دارند. داده‌های هواشناسی موردنیاز مدل شامل شدت تابش، دمای هوا، بارش، سرعت باد و رطوبت نسبی و ویژگی‌های خاک موردنیاز مدل نیز شامل منحنی مشخصه رطوبتی خاک، ضریب هدایت هیدرولیکی خاک در دو حالت اشباع و غیراشباع، ظرفیت گرمایی خاک و ضریب هدایت گرمایی خاک است که این ویژگی‌ها از برخی پارامترهای دیگر مانند درصد رس، سیلت و ماسه، تخلخل و درصد ماده آلی خاک در قالب یک سری معادلات تجربی قابل برآورد هستند. مدل برای برآورد ضریب هدایت گرمایی خاک از روش کرستن<sup>۱</sup>، برای برآورد منحنی مشخصه رطوبتی خاک از توابع بروکس-کوری<sup>۲</sup> و برای برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع از روش معلم<sup>۳</sup> بهره می‌گیرد. با توجه به این‌که در ساختار این معادلات تجربی پارامترهای تجربی زیادی نقش دارند و بسیاری از این پارامترها در یک دامنه نسبتاً گسترده‌ای دارای عدم قطعیت و تغییرپذیری هستند و مقدار مشخصی برای آن‌ها تعیین نشده است لازم است این پارامترها مورد واسنجی قرار گیرند. واسنجی این پارامترها در مدل در قالب دو دیدگاه کلی شامل دیدگاه احتمالاتی و دیدگاه فازی امکان‌پذیر است. از دیدگاه احتمالاتی، آن دسته از پارامترها و پیش‌بینی‌ها مناسب تشخیص داده می‌شوند که دارای بالاترین «احتمال وقوع» باشند. در نگرش فازی، مجموعه پارامترهای مناسب و پیش‌بینی‌های مناسب آن‌هایی هستند که بالاترین «امکان وقوع» را داشته باشند. روشی که متکی بر بیش‌ترین «احتمال وقوع» است، روش بیزین نام دارد که مبتنی بر تحلیل مونت‌کارلو زنجیره مارکف<sup>۴</sup> (MCMC) است و به

مدل SVAT مورد استفاده: مدل SVAT مورد استفاده در این پژوهش، یک مدل جفت شده انتقال توأمان گرما و رطوبت در خاک (CoupModel) است که توسط یانسن و کارلبرگ (۲۰۱۰) ارائه شده است (۳). معادله کلی انتقال گرما در خاک (رابطه ۱) و معادله کلی انتقال رطوبت در خاک (رابطه ۲) در این مدل به شرح زیر هستند:

$$\frac{\partial(CT)}{\partial t} - L_f \rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) - C_w T \frac{\partial q_w}{\partial z} - L_v \frac{\partial q_v}{\partial z} - S_h \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (k_w (\frac{d\psi}{dz} - 1)) + \frac{\partial}{\partial z} (D_v \frac{\partial C_v}{\partial z}) + S_w \quad (2)$$

که در آن،  $t$  زمان،  $z$  عمق،  $\rho$  چگالی،  $L$  گرمای نهان،  $\theta$  مقدار رطوبت حجمی خاک،  $S_h$  چاهه یا چشمه گرما در خاک،  $S_w$  چاهه یا چشمه رطوبت در خاک،  $k_w$  ضریب هدایت هیدرولیکی غیراشباع،  $\psi$  مکش ماتریک خاک،  $D_v$  و  $C_v$  به ترتیب ضریب پخش بخار آب و غلظت بخار آب در خاک و اندیس‌های  $i, v, w$  و  $f$  به ترتیب بیانگر آب مایع، بخار آب، یخ و حالت یخبندان می‌باشند. برای شبیه‌سازی توزیع زمانی و مکانی دمای خاک توسط مدل، لازم است دو معادله فوق به‌طور توأمان توسط روش‌های عددی حل شوند. حل این معادلات مستلزم انجام شبیه‌سازی فرایندهای عديده‌ای مانند ترازمندی گرما و رطوبت در سطح خاک، مدل‌سازی برف و یخبندان در خاک، برآورد برخی ویژگی‌های گرمایی و هیدرولیکی خاک (مانند منحنی مشخصه رطوبتی خاک، ضریب هدایت هیدرولیکی خاک در حالت‌های اشباع و غیراشباع، ظرفیت گرمایی خاک و ضریب هدایت گرمایی خاک) است. انجام چنین شبیه‌سازی‌هایی از یک‌سو مستلزم در دسترس بودن برخی متغیرهای ورودی شامل داده‌های هواشناسی و ویژگی‌های خاک است و از سوی دیگر مستلزم برآورد پارامترهای تجربی

- 1- Kersten
- 2- Brooks and Corey
- 3- Mualem
- 4- Monte Carlo Marcoc Chain

مقادیر در شبیه‌سازی‌های آتی مدل استفاده می‌شود. با توجه به این‌که داده‌های هواشناسی در ایستگاه‌های سینوپتیک هر سه ساعت یک‌بار اندازه‌گیری می‌شوند بر این اساس مقیاس زمانی سه‌ساعته برای انجام شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شد. برای انجام شبیه‌سازی‌ها یک نیم‌رخ قائم به ضخامت ۲۵ متر در نظر گرفته شد و این نیم‌رخ به ۲۰ لایه مختلف تقسیم شد. مدل‌سازی دما در سطح خاک و نیز مدل‌سازی تبخیر از سطح خاک با به‌کارگیری روش ترازمندی انرژی در سطح خاک به انجام رسید و جهت مدل‌سازی برف از مدل تجربی SLSM استفاده شد. برای انجام واسنجی و اعتبارسنجی مدل از داده‌های دمای خاک در عمق‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری خاک که از سال ۱۹۹۲ به بعد موجودند استفاده شد. با این‌وجود با توجه به وجود خلأهای آماری زیاد دمای خاک طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۵، انجام شبیه‌سازی‌ها از اواخر سال ۱۹۹۴ آغاز گردید و دوره ۲۰۰۹-۱۹۹۴ برای واسنجی مدل و دوره ۲۰۱۴-۲۰۱۰ جهت اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد. برای انجام این پژوهش با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار Coup، تعداد ۸۰۰۰ بردار از ترکیب‌های مختلف مقادیر ۱۰ پارامتر منتخب به روش تصادفی مونت‌کارلو انتخاب شدند و مدل در دوره واسنجی ۲۰۰۹-۱۹۹۴ به تعداد ۸۰۰۰ بار اجرا شد و با مقایسه مقادیر شبیه‌سازی‌شده دمای اعماق مختلف خاک در هر بار اجرای مدل با مقادیر مشاهداتی آن‌ها با مبنا قرار دادن معیار رسمی احتمال فوق (رابطه ۳)، تعداد ۱۰ بردار از بهترین ترکیب مقادیر پارامترها که به لحاظ معیار فوق به‌عنوان برتر و با خطای کم‌تری تشخیص داده شدند انتخاب شدند و با میانگین‌گیری کردن از این ۱۰ بردار برای تک‌تک پارامترهای منتخب، یک بردار بهینه از مقادیر واسنجی‌شده پارامترها استخراج شد و در دوره ۲۰۱۰-۲۰۱۴ مورد

روشی که بر بالاترین «امکان وقوع» تأکید دارد روش برآورد عدم قطعیت با تابع درست‌نمایی تعمیم‌یافته<sup>۱</sup> (GLUE) اطلاق می‌شود. اگرچه در هر دو روش از نمونه‌گیری تصادفی به روش مونت‌کارلو استفاده می‌شود اما تفاوت‌هایی به لحاظ نحوه تعیین مجموعه پارامترهای قابل‌پذیرش و نیز نحوه نمونه‌گیری در محدوده عدم قطعیت پارامترها بین این دو روش وجود دارد (۴). در این پژوهش از روش بیزین جهت برآورد پارامترهای مدل استفاده شده است. ابتدا تعداد ۱۰ پارامتر کلیدی و مهم در محاسبه فرآیندهای مختلف مؤثر در شبیه‌سازی دمای خاک شامل تبخیر از سطح خاک (۲ پارامتر)، میزان تابش خالص رسیده به سطح خاک (۱ پارامتر)، جریان رطوبت در خاک (۱ پارامتر)، ویژگی‌های گرمایی و هیدرولیکی خاک (۳ پارامتر) و مدل‌سازی برف (۳ پارامتر) در نظر گرفته شدند سپس از روش بیزین جهت واسنجی آن‌ها استفاده شد. بنای اصلی این روش برآورد محتمل‌ترین توزیع احتمال پارامترهای مدل با در نظر گرفتن یک معیار رسمی احتمال<sup>۲</sup> است به‌گونه‌ای که بیش‌ترین سازگاری بین خروجی‌های مدل با داده‌های مشاهداتی رخ دهد (۱۱). معیار رسمی احتمال در این روش از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{LogL} = \sum_{i=1}^n \left( -0.5 \left( \frac{O_i - S_i}{M_i} \right)^2 - 0.5 \text{Log}(2\pi) - \text{Log}(M_i) \right) \quad (3)$$

که در آن، O و S به ترتیب مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده، n تعداد داده‌های مشاهداتی، L احتمال و M انحراف معیار مقادیر خطای مدل، Log لگاریتم بر مبنای ۱۰ است. در این روش در نهایت یک بردار معین از مقادیر پارامترها به‌عنوان بردار بهینه استخراج می‌شود و این بردار پارامترها در حقیقت همان مقادیر واسنجی‌شده پارامترها هستند که از این

1- Generalized Likelihood Uncertainty Estimation  
2- Formal Likelihood Criteria

مختلف خاک در حالت استفاده از مقادیر واسنجی شده پارامترها به روش بیزین در مقایسه با استفاده از مقادیر پیش فرض پارامترها، به طور معنی داری بهبود یابد. جهت بررسی این مسأله، در جدول ۳ برای دو حالت فوق (مقادیر پیش فرض و مقادیر واسنجی شده پارامترها) عملکرد مدل در اعماق مختلف خاک با به کارگیری سه شاخص MAE، MBE و  $R^2$  به تفکیک برای سه ساعت مختلف اندازه گیری دمای خاک (۳، ۹ و ۱۵ گرینویچ) و نیز برای کل زمانها با هم برای دوره واسنجی (۲۰۰۹-۱۹۹۴) ارائه شده است. همانگونه که از این جدول پیداست در قریب به اتفاق حالات، مقادیر هر سه شاخص سنجش عملکرد مدل در حالت استفاده از مقادیر واسنجی شده پارامترها در مقایسه با استفاده از مقادیر پیش فرض پارامترها بهبود یافته است و بیانگر آن است که فرایند واسنجی پارامترهای مدل، به نحو مطلوب و مؤثری به انجام رسیده است. به عنوان نمونه برای ساعت ۳ گرینویچ در عمق ۵ سانتی متری خاک مقادیر شاخصهای MAE، MBE و  $R^2$  در حالت استفاده از مقادیر پیش فرض پارامترها به ترتیب ۲/۲۷- درجه سانتی گراد، ۲/۷۷ درجه سانتی گراد و ۰/۹۱ بوده است که پس از واسنجی مدل این مقادیر به ترتیب به ۱/۴۴- درجه سانتی گراد، ۲/۱۳ درجه سانتی گراد و ۰/۹۳ بهبود یافته است و دیده می شود که در حالت واسنجی مدل، هم شاخص MBE (که معیاری از بیش یا کم برآورد کردن مدل است) به سمت صفر متمایل تر شده است و هم شاخص MAE (که مقدار متوسط قدرمطلق مقادیر خطا را نشان می دهد) کاهش یافته و هم شاخص  $R^2$  (که بیانگر درجه قوت ارتباط کلی بین شبیه سازیهای مدل با مقادیر مشاهداتی و نحوه دنبال کردن تغییرات دمای خاک توسط مدل است) افزایش یافته است. برای سایر اعماق خاک و سایر زمانها نیز چنین بهبودی در عملکرد مدل قابل مشاهده است.

اعتبارسنجی قرار گرفت. جهت سنجش میزان خطا در این پژوهش، از سه شاخص میانگین اریبی خطا (MBE)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) استفاده شد که این شاخصها به ترتیب قادرند جنبه های مختلف خطای مدل به ترتیب شامل بیش یا کم برآورد کردن مدل، متوسط مقادیر قدرمطلق خطای قابل انتظار از مدل و درجه تطابق و تعقیب و دنبال کردن تغییرات دمای واقعی خاک توسط مدل را توصیف نمایند.

### نتایج و بحث

جدول ۲ فهرست ۱۰ پارامتر منتخب جهت واسنجی مدل همراه با فرایندهای مرتبط با آنها، دامنه عدم قطعیت، مقدار پیش فرض و مقدار واسنجی شده به روش بیزین را نشان می دهد. بر اساس این جدول دیده می شود به کارگیری روش بیزین برای تمامی پارامترها منجر به تغییر یافتن مقادیر پارامترها در حالت واسنجی شده در مقایسه با مقدار پیش فرض آنها (که یک مقدار کلی و متوسط گیری شده و غیردقیق برای جمیع شرایط است) گردیده است. جهت استخراج مقادیر واسنجی شده این پارامترها همانگونه که در بخش پیشین ذکر شد ابتدا ۸۰۰۰ بردار ترکیبی به روش تصادفی مونت کارلو در دامنه عدم قطعیت این ۱۰ پارامتر تولید شد سپس مدل برای تک تک ۸۰۰۰ بردار حاصله اجرا شد و در هر مرتبه اجرای مدل، نتایج شبیه سازی مدل با داده های مشاهداتی دمای خاک با استفاده از معیار رسمی احتمال (رابطه ۳) مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت و با جداسازی ۱۰ شبیه سازی برتر از بین ۸۰۰۰ شبیه سازی انجام شده بر اساس معیار فوق و میانگین گیری کردن از مقادیر هر پارامتر برای ۱۰ شبیه سازی مذکور، مقادیر واسنجی شده برای هر پارامتر به شرح جدول ۲ به دست آمد. انتظار بر این است که دقت مدل جهت شبیه سازی دمای اعماق

جدول ۲- مقادیر پیش فرض و واسنجی شده پارامترهای منتخب مدل.

Table 2. Default and Calibrated values of the selected model parameters.

نام پارامتر Parameter	فرایند مرتبط Related process	واحد Unit	دامنه عدم قطعیت Uncertainty range	مقدار پیش فرض Default value	مقدار واسنجی شده Calibrated value
EquilAdjustPsi	تبخیر از سطح خاک Soil evaporation	-	0 - 2	1	1.72
MaxSurfDeficit	تبخیر از سطح خاک Soil evaporation	mm	-3 - 1	-2	-2.70
DVapTortuosity	جریان بخار آب در خاک Soil water vapour flow	-	0.3 - 1	0.66	0.40
AlbedoDry	تابش خالص Net radiation	%	20 - 35	30	26.89
ClayUnFrozenC1	هدایت گرمایی خاک Soil thermal conductivity	-	0.1 - 0.2	0.13	0.17
OnlyRainPrecTemp	مدل سازی برف Snow modelling	°C	-2 - 4	2	2.00
Sensivity	هدایت هیدرولیکی خاک Soil hydraulic conductivity	-	0 - 1	0.5	0.30
ThScaleLog	هدایت گرمایی خاک Soil thermal conductivity	-	-0.5 - 0.5	0	-0.03
ZeroTemp_WaterLimit	مدل سازی برف Snow modelling	Kg.m <sup>2</sup>	1 - 10	3	6.41
AgeUpdatePrec	مدل سازی برف Snow modelling	Kg.m <sup>2</sup> day <sup>-1</sup>	0 - 10	5	8.30

از وجود تغییرات حرارتی شدیدتر در لایه‌های سطحی‌تر از یک‌سو و همچنین درگیر بودن لایه‌های سطحی خاک با فرایندهای بیش‌تری مانند تبخیر و برف در مقایسه با لایه‌های پایین‌تر باشد.

جدول ۳ همچنین بیانگر آن است که در حالت کلی، عملکرد مدل (به‌ویژه بر اساس دو شاخص MAE و R<sup>2</sup>) در اعماق پایین‌تر بهتر از لایه‌های سطحی خاک بوده است که این مسأله می‌تواند ناشی



جدول ۳- مقادیر شاخص‌های خطا در دو حالت با مقادیر پیش‌فرض و واسنجی شده پارامترها در اعماق و زمان‌های مختلف در دوره واسنجی.

**Table 3. Error indices values with default and calibrated values for different times and depths in the calibration period.**

زمان Time	شاخص Index	با مقادیر پیش‌فرض پارامترها Default value parameters					با مقادیر واسنجی شده پارامترها Calibrated value parameters				
		۵cm	۱۰cm	۲۰cm	۳۰cm	۵۰cm	۵cm	۱۰cm	۲۰cm	۳۰cm	۵۰cm
		5cm	10cm	20cm	30cm	50cm	5cm	10cm	20cm	30cm	50cm
۳ گریونوچ 3 GMT	MBE (°C)	-2.27	-0.13	-1.36	-0.37	-1.36	-1.44	0.39	-0.76	0.43	-0.36
	MAE(°C)	2.77	1.58	1.75	2.05	1.47	2.13	1.51	1.39	1.83	1.13
	R <sup>2</sup>	0.91	0.94	0.97	0.97	0.97	0.93	0.95	0.97	0.97	0.97
۹ گریونوچ 9 GMT	MBE (°C)	0.81	-1.93	-1.47	-0.85	-1.45	1.39	-0.89	-0.67	-0.16	-0.58
	MAE(°C)	2.70	2.88	1.81	2.34	1.55	2.88	2.30	1.32	1.94	1.14
	R <sup>2</sup>	0.92	0.96	0.96	0.97	0.97	0.92	0.96	0.97	0.97	0.98
۱۵ گریونوچ 15 GMT	MBE (°C)	-2.92	-2.19	-0.85	-0.35	-1.54	-1.79	-0.90	0.49	0.77	-0.66
	MAE(°C)	3.92	3.61	1.86	2.16	1.64	3.43	3.04	1.83	2.00	1.15
	R <sup>2</sup>	0.92	0.91	0.94	0.96	0.97	0.91	0.91	0.95	0.96	0.97
۳، ۹، ۱۵ گریونوچ 3, 9, 15 GMT	MBE (°C)	-1.46	-1.42	-1.23	-0.52	-1.45	-0.61	-0.47	-0.31	0.35	-0.53
	MAE(°C)	3.13	2.69	1.81	2.18	1.55	2.81	2.28	1.51	1.93	1.14
	R <sup>2</sup>	0.90	0.94	0.96	0.96	0.97	0.91	0.94	0.95	0.96	0.97

استفاده نشده بود) استفاده شد که نتایج حاصله در جدول ۴ به تفکیک برای فصول مختلف سال و نیز برای کل سال آورده شده است. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های دمای اعماق مختلف خاک در دو بازه واسنجی و اعتبارسنجی بیانگر عدم وجود تفاوت‌های چشمگیر بین مقادیر شاخص‌های سنجش عملکرد مدل در دو حالت فوق است و در برخی موارد نیز مدل در دوره اعتبارسنجی از کارایی بهتری برخوردار بوده است که نشانگر آن است که به هنگام استفاده از مدل جهت برآورد و پیش‌بینی دمای اعماق خاک در هر بازه دلخواه، دستیابی به نتایج مطلوب و قابل‌قبولی از مدل قابل‌انتظار است. ارائه نتایج مدل برای فصول مختلف به‌صورت جداگانه از آن جهت

نکته دیگری که باید مدنظر قرار گیرد این است که با توجه به این‌که نتایج حاصله در جدول ۳ مربوط به دوره واسنجی (۲۰۰۹-۱۹۹۴) بوده است و در این دوره از خود داده‌های مشاهداتی دمای خاک جهت واسنجی مدل استفاده شده است لازم است بررسی شود که آیا به‌کارگیری مدل واسنجی‌شده جهت پیش‌بینی یا برآورد دمای اعماق مختلف خاک در دوره‌های دیگری غیر از دوره واسنجی منجر به حصول نتایج مطلوبی مشابه با نتایج دوره واسنجی خواهد شد یا خیر؟ به همین جهت، از مدل واسنجی‌شده جهت شبیه‌سازی دمای اعماق مختلف خاک در دوره اعتبارسنجی ۲۰۱۴-۲۰۱۰ (که در فرایند واسنجی مدل از داده‌های این بازه زمانی

زمستان ممکن است با دقت بیشتری همراه گردد. نتایج حاصل از جدول ۴ همچنین بیانگر آن است که تمایل و جهت‌گیری کلی مدل برای شبیه‌سازی دمای اعماق خاک در فصول بهار و تابستان به سمت کم‌برآورد کردن (مقادیر منفی برای شاخص MBE) و در فصول پاییز و زمستان به سمت بیش‌برآورد کردن (مقادیر مثبت برای شاخص MBE) بوده است. این بدان معنی است که در فصول بهار و تابستان که دماهای بالا و مقادیر بالای تبخیر از سطح خاک روی می‌دهد مدل به اندازه کافی قادر به شبیه‌سازی درست مقادیر بالای دمای خاک نبوده است. چنین اتفاقی می‌تواند سرمنشأهای مختلفی از جمله وقوع خطا در شبیه‌سازی فرایندهایی مانند تبخیر و رطوبت در سطح خاک باشد. توضیح این‌که با توجه به عدم وجود داده‌های اندازه‌گیری شده تبخیر و رطوبت در سطح خاک از یک سو و نقش بسیار زیاد این داده‌ها بر تغییرات دمای خاک در فصول گرم سال، امکان وقوع خطا در این ارتباط محتمل به نظر می‌رسد و در صورتی که در کنار داده‌های دمای خاک، داده‌های تبخیر از سطح خاک و رطوبت لایه‌های مختلف خاک نیز به صورت اندازه‌گیری شده در دسترس باشند واسنجی پارامترهای مدل با دقت بالاتری قابل انجام خواهد بود و می‌توان کم‌برآورد کردن دمای خاک توسط مدل را با دخالت دادن این داده‌ها تا حدودی مرتفع نمود. نتایج مربوط به کل سال (مقیاس سالانه) نیز بیانگر آن است که مدل روی هم‌رفته تمایل به کم‌برآورد کردن دمای خاک (مقادیر منفی برای شاخص MBE) داشته است.

دارای اهمیت است که فرایندهای فیزیکی مؤثر و دخیل بر دمای خاک برای فصول مختلف یکسان نیست. به‌عنوان مثال در طی تابستان تبخیر از سطح خاک و در طی زمستان پوشش برف روی سطح خاک تأثیر شایانی بر دمای خاک می‌گذارند. نتایج حاصله برای فصول مختلف بیانگر آن است که بر اساس شاخص MAE، بهترین عملکرد مدل در فصل زمستان و پایین‌ترین عملکرد آن در فصول بهار و تابستان بوده است که نشان‌دهنده آن است که به لحاظ مقادیر مطلق خطا، کم‌ترین تفاضل بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دمای خاک در فصل زمستان و بیش‌ترین تفاضل در فصول بهار و تابستان رخ داده است اما با معیار قرار دادن شاخص  $R^2$ ، پایین‌ترین عملکرد مدل در فصل زمستان رخ داده است و نشان می‌دهد که به لحاظ تعقیب و دنبال کردن نوسانات دمای خاک، مدل عملکرد پایین‌تری در فصل زمستان در مقایسه با سایر فصول سال داشته است که وقوع این امر می‌تواند ناشی از عدم شبیه‌سازی دقیق فرایندهای مؤثر و کلیدی در فصل زمستان مانند عمق برف و شرایط یخبندان خاک توسط مدل باشد. همچنین با توجه به این‌که واسنجی پارامترهای مدل (از جمله پارامترهای مربوط به مدل‌سازی برف که در شبیه‌سازی دمای خاک در فصل زمستان خیلی مؤثر هستند) با در نظر گرفتن مقادیر مشاهداتی دمای خاک در کل سال انجام شده است، بنابراین این امکان وجود دارد که در صورتی که پارامترهای مرتبط با مدل‌سازی برف تنها با در نظر گرفتن داده‌های دمای خاک در فصل زمستان مورد واسنجی قرار بگیرند. شبیه‌سازی دمای خاک در فصل

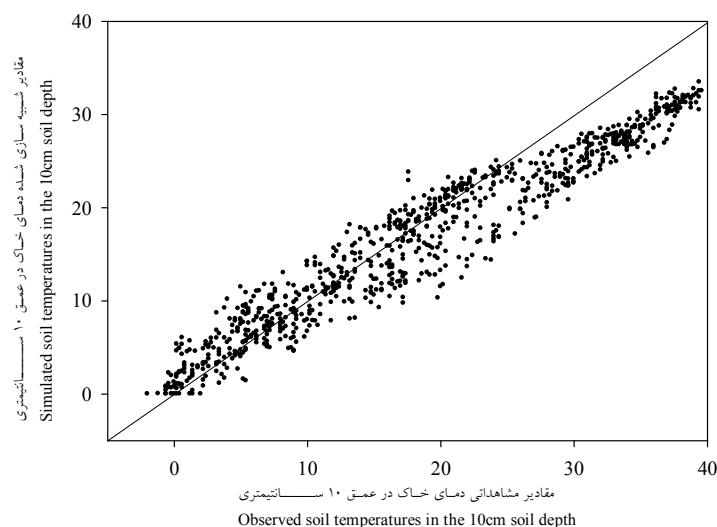
جدول ۴- مقادیر شاخص‌های خطا در مقیاس ساعتی در دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی به تفکیک برای فصول و اعماق مختلف خاک.

**Table 4. Error indices values in the hourly scale in calibration and validation periods for different soil depths and seasons.**

فصل Season	شاخص Index	دوره واسنجی Calibration Period					دوره اعتبارسنجی Validation Period				
		۵cm	۱۰cm	۲۰cm	۳۰cm	۵۰cm	۵cm	۱۰cm	۲۰cm	۳۰cm	۵۰cm
		5cm	10cm	20cm	30cm	50cm	5cm	10cm	20cm	30cm	50cm
بهار Spring	MBE (°C)	-2.16	-2.37	-1.62	-0.27	-0.92	-2.43	-2.66	-1.89	-1.74	-1.34
	MAE(°C)	3.27	2.80	1.93	2.42	1.17	3.02	3.02	2.02	1.80	1.39
	R <sup>2</sup>	0.84	0.87	0.90	0.91	0.94	0.90	0.88	0.93	0.94	0.95
تابستان Summer	MBE (°C)	-1.83	-1.58	-0.22	1.42	0.51	-2.84	-3.22	-1.54	-1.39	-0.98
	MAE(°C)	2.96	2.22	1.30	2.29	0.86	3.83	3.84	1.77	1.54	1.05
	R <sup>2</sup>	0.83	0.86	0.72	0.69	0.79	0.87	0.79	0.71	0.44	0.70
پاییز Autumn	MBE (°C)	1.31	1.51	0.50	-0.12	-0.87	1.55	1.51	0.66	-0.12	-0.63
	MAE(°C)	2.71	2.17	1.49	1.32	1.27	2.76	2.35	1.40	1.22	0.98
	R <sup>2</sup>	0.81	0.87	0.89	0.89	0.91	0.85	0.90	0.92	0.93	0.96
زمستان Winter	MBE (°C)	0.10	0.43	0.01	-0.08	-0.86	1.09	1.02	0.58	0.22	-0.16
	MAE(°C)	2.34	1.95	1.35	1.46	1.25	2.09	1.74	1.33	1.04	0.95
	R <sup>2</sup>	0.58	0.62	0.67	0.65	0.72	0.75	0.78	0.77	0.81	0.76
سالانه Annual	MBE (°C)	-0.61	-0.47	-0.31	0.35	-0.53	-0.66	-0.84	-0.55	-0.76	-0.78
	MAE(°C)	2.81	2.28	1.51	1.93	1.14	2.92	2.74	1.63	1.40	1.09
	R <sup>2</sup>	0.91	0.94	0.95	0.96	0.97	0.93	0.94	0.96	0.97	0.98

بودن مقادیر شبیه‌سازی شده به مقادیر مشاهداتی دمای خاک برای این محدوده از دماهاست اما برای مقادیر دمای خاک بیش از ۲۵ درجه سانتی‌گراد دیده می‌شود که فاصله بین نقاط از خط نیمساز به تدریج در حال افزایش یافتن بوده است و مدل به سمت کم‌برآورد کردن مقادیر مشاهداتی دمای خاک تمایل پیدا کرده است.

در شکل ۱ مقادیر ساعتی دمای خاک شبیه‌سازی شده و مشاهداتی به‌عنوان نمونه برای عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک در دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۴-۲۰۱۰) در مقیاس سالانه همراه با خط نیمساز نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تمرکز ابر نقاط برای دماهای خاک کم‌تر از ۲۵ درجه سانتی‌گراد در غالب موارد حول و حوش خط نیمساز بوده است که بیانگر نزدیک



شکل ۱- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی دمای خاک در مقیاس ساعتی در عمق ۱۰ سانتی‌متری در دوره اعتبارسنجی.

Figure 1. Comparing the simulated values and observed ones for hourly scales for 10cm soil depth in the validation period.

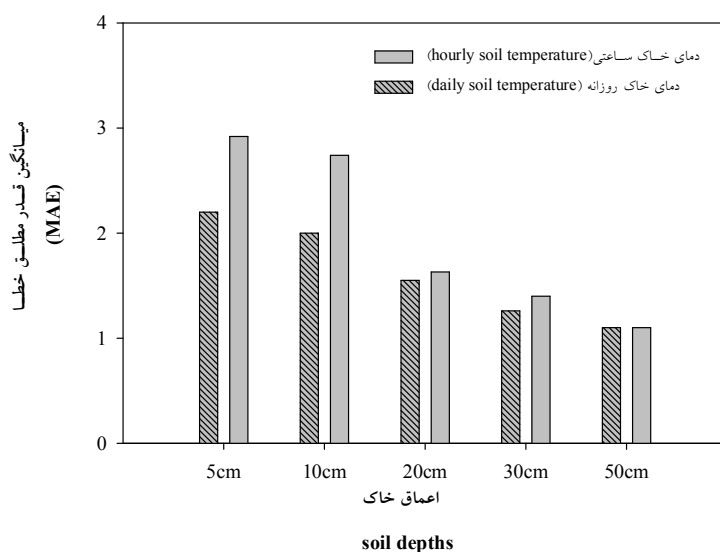
ساعتی و میانگین شبانه‌روزی دمای خاک برای دوره اعتبارسنجی در مقیاس سالانه آورده شده است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که مقدار خطای مدل جهت برآورد میانگین شبانه‌روزی دمای خاک به‌طور قابل‌توجهی کمتر از مقدار خطای مدل حاصل از برآورد مقادیر ساعتی دمای خاک بوده است و بر این اساس، در صورتی‌که از مدل مورد استفاده در این پژوهش برای برآورد میانگین شبانه‌روزی دمای خاک استفاده شود می‌توان به‌طور متوسط انتظار یک مقدار مطلق خطا در حدود ۲ درجه سانتی‌گراد و کم‌تر را برای اعماق مختلف خاک داشت.

در نهایت با توجه به اهمیت و کاربرد میانگین شبانه‌روزی دمای خاک، یک ارزیابی از عملکرد مدل جهت برآورد دمای اعماق مختلف خاک در مقیاس روزانه نیز انجام شد. جهت انجام این کار، میانگین مقادیر دمای خاک در دو ساعت ۳ و ۱۵ به‌وقت گرینویچ به‌عنوان میانگین شبانه‌روزی دمای خاک در نظر گرفته شد و مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی میانگین شبانه‌روزی دمای خاک در دوره اعتبارسنجی با هم مورد مقایسه قرار گرفتند. در جدول ۵ مقادیر شاخص‌های خطا در اعماق مختلف خاک برای میانگین شبانه‌روزی دمای خاک و در شکل ۲ مقایسه مقادیر شاخص خطای MAE برای دو حالت داده‌های

جدول ۵- مقادیر شاخص‌های خطا برای میانگین شبانه‌روزی دمای خاک در اعماق مختلف در دوره اعتبارسنجی.

Table 5. Error indices values for mean daily soil temperature at differernt depths in the validation period.

مقیاس زمانی Time scale	شاخص Index	عمق خاک Soil depth				
		۵cm	۱۰cm	۲۰cm	۳۰cm	۵۰cm
		5cm	10cm	20cm	30cm	50cm
سالانه Annual	MBE	-0.80	-0.31	-0.46	-0.57	-0.75
	MAE	2.20	2.00	1.55	1.26	1.06
	R <sup>2</sup>	0.96	0.96	0.97	0.97	0.98



شکل ۲- مقایسه مقادیر شاخص خطای MAE بر حسب درجه سانتی گراد در دو مقیاس ساعتی و روزانه در اعماق مختلف در دوره اعتبارسنجی.

Figure 2. Comparing the MAE for daily and hourly scales for different soil depths in the validation period.

روزهای گرم مانند فرایندهای تبخیر از سطح خاک و مقدار رطوبت خاک است. در نهایت با توجه به وجود خلأهای آماری زیاد در داده‌های مشاهداتی و همچنین اجتناب‌ناپذیر بودن وجود خطا در داده‌های مشاهداتی، استفاده از مدل‌های فیزیکی با دقت کافی جهت شبیه‌سازی تغییرات دمای خاک و برآورد خلأهای آماری امری ضروری است. مضافاً این‌که انجام مدل‌سازی می‌تواند در تشخیص خطاهای موجود در داده‌های اندازه‌گیری شده ابزاری بسیار کارا و مؤثر باشد.

### سپاسگزاری

این پژوهش در قالب یک طرح پژوهشی به شماره قرارداد ۱۹/۳۹۶۸۵ با معاونت پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان به انجام رسیده است و بدین‌وسیله از مساعدت‌های مالی معاونت محترم پژوهشی دانشکده کشاورزی و معاونت محترم پژوهشی دانشگاه کردستان سپاسگزاری می‌نمائیم.

### نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش از یک مدل شبیه‌سازی فرایندهای خاک- گیاه- اتمسفر (SVAT) جهت شبیه‌سازی ساعتی دمای اعماق مختلف خاک در ایستگاه سینوپتیک سقز در فصول مختلف سال بهره گرفته شد. پس از واسنجی مدل در بازه زمانی ۲۰۰۹-۱۹۹۴، مدل در بازه زمانی ۲۰۱۰-۲۰۱۴ مورد اعتبارسنجی قرار گرفت و نتایج کلی بیانگر دقت قابل قبول مدل جهت شبیه‌سازی دمای خاک بود. با این وجود، مدل در شبیه‌سازی مقادیر بالای دمای خاک در روزهای گرم سال تمایل فزاینده‌ای به کم برآورد کردن دمای خاک داشت و با توجه به متکی بودن ساختار مدل به فرایندهای انتقال توأمان گرما و رطوبت در خاک و عدم وجود داده‌های رطوبت خاک در ایستگاه مورد بررسی، ریشه‌یابی دقیق کم‌برآورد کردن مدل منوط به دست داشتن داده‌های رطوبت خاک در کنار داده‌های دمای خاک است زیرا شبیه‌سازی دقیق دمای خاک در روزهای گرم سال وابسته به شبیه‌سازی فرایندهای مهم و دخیل مؤثر بر دمای خاک در

## منابع

1. Danierhan, S., Abudu, S., and Donghai, G. 2012. Coupled GSI-SVAT model with groundwater-surface water interaction in the riparian zone of Tarim River. *J. Hydrol. Engin.* 18: 10. 1211-1218.
2. Hu, Q., and Feng, S. 2003. A daily temperature dataset and soil temperature climatology of the contiguous United States. *J. Appl. Meteor.* 42: 8. 1139-1156.
3. Jansson, P.E., and Karlberg, L. 2010. Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems. Royal Institute of Technology. Stockholm. 454p.
4. Juston, J. 2010. Water and Carbon Balance Modeling. Methods of Uncertainty Analysis. Licentiate Thesis in Land and Water Resources Engineering. KTH University. Stockholm. Sweden. 36p.
5. Khoshkhou, Y., Irannejad, P., Khalili, A., Rahimi, H., Liaghat, A., and Jansson, P.E. 2013. Calibration and Uncertainty analysis of CoupModel for simulation of soil temperature at Hamedan synoptic station. *Iran. J. Water Soil.* 27: 928-939. (In Persian)
6. Khoshkhou, Y., Jansson, P.E., Irannejad, P., Khalili, A., and Rahimi, H. 2015. Calibration of an energy balance model to simulate wintertime soil temperature, soil frost depth, and snow depth for a 14 year period in a high elevation area of Iran. *Cold Regions Science and Technology.* 119: 47-60.
7. Mojarad, F., and Sadeghi, H. 2013. Studying relationship between soil surface temperature and soil depths. *Natural Geographic Researches.* 45: 1. 110-118. (In Persian)
8. Nowrouzvelashodi, R., Ghahreman, N., and Irannejad, P. 2012. Evaluating CoupModel to estimating soil temperature and moisture with corn cover and non-cover soil. *Soil Researches (Soil and Water Science).* 26: 1. 55-66.
9. Park, S.K., Sungmin, O., and Cassardo, C. 2017. Soil temperature response in Korea to a changing climate using a land surface model. *Asia-Pacific J. Atm. Sci.* 53: 4. 457-470.
10. Ratan, Lal., and Shukla, K. 2002. Principles of Soil Physics. Marcel Dekker, Inc. New York.
11. Svensson, M., Jansson, P.E., Gustafsson, D., Kleja, D.B., Langvall, O., and Lindroth, A. 2008. Bayesian calibration of a model describing carbon, water and heat fluxes for a Swedish boreal forest stand. *Ecological Modelling.* 213: 331-344.
12. Wu, S.H., Jansson, P.E., and Kolari, P. 2012. The role of air and soil temperature in the seasonality of photosynthesis and transpiration in a boreal Scots pine ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology.* 156: 85-103.
13. Zhao, Y., Peth, S., and Horn, R. 2010. Modeling of coupled water and heat fluxes in both unfrozen and frozen soils. *World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World.* Brisbane, Australia, Pp: 55-60.



## Simulating temperature of different depths of soil in hourly and daily scales using a SVAT model

**\*Y. Khoshkhoo**

Assistant Prof., Dept. of Water Science and Engineering, University of Kurdistan

Received: 07.15.2018; Accepted: 11.28.2018

### Abstract

**Background and Objectives:** Soil temperature is an important and effective variable influencing the different biophysicochemical processes in soil. Soil temperature also has a direct and indirect impact on plant activities and has a remarkable effect on the mass and energy transfer rate between soil and atmosphere. With respect to having limited and non-complete soil temperature data, modeling the soil temperature is very important. In this context, SVAT models which are on the basis of the solving the coupled soil heat and water transfer equations have a high importance and acceptable accuracy.

**Materials and Methods:** To perform this research, a SVAT model was used to simulate the hourly soil temperature in different depths. The synoptic weather station (Saghez station) was selected to perform this research. Based on the measured data of the soil physical properties in different layers and several meteorological variables in a multi-year time period, the hourly soil temperature values were simulated in different soil depths. The Bayesian method was used to calibrate the model by considering 10 main model parameters and by performing 8000 model runs on the basis of the different combinations of the parameter values in their uncertainty range using the Monte-Carlo stochastic method in the 1994 to 2009 time period. Then, the calibrated model was validated in the 2010 to 2014 time period and to evaluate the model performance, three indices including mean absolute error (MAE), mean biased error (MBE) and coefficient of determination ( $R^2$ ) were applied.

**Results:** The bayesian calibration results showed a sensible change in the 10 selected parameter values compared to their default values with a good calibrating process. In the calibration period, the value of all of the performance indices in most cases was improved after calibration process in comparison to the default-value parameters case. The results of model validation showed non-remarkable differences between the model performance indices for two calibration and validation cases and therefore, an acceptable performance of the calibrated model can be expected to forecast the hourly soil temperature values in any desired period so that the coefficient of determination ( $R^2$ ) was obtained more than 0.9 in all of the studied times and soil depths. However, the model performance did not show a similar behavior during different seasons so that based on the  $R^2$  criterion, the lowest model performance was occurred during the winter but on the basis of the MAE criterion, the best and lowest model performance was occurred in the winter and both spring and summer seasons, respectively. The results also showed that the overall tendency of the model simulations is to underestimate the spring and summer and overestimate the autumn and winter soil temperatures and in the annual scale, an overall model underestimation can be recognized. The daily mean soil temperature simulation results showed less error values in comparison to the hourly soil temperature simulations.

---

\* Corresponding Author; Email: [y.khoshkho@uok.ac.ir](mailto:y.khoshkho@uok.ac.ir)

**Conclusion:** The overall results of this research showed that although the SVAT model used in this study is suitable for simulating hourly and daily temperature values of different depths of the soil, but by collecting and involving more data like soil moisture data in the calibration process, it is possible to achieve more accurate results than the model. Also, due to the existence of specific processes affecting soil temperature in both summer and winter, it is suggested that the calibration process of model parameters for these two seasons should be done separately.

**Keywords:** Bayesian method, Saghez station, Soil temperature, SVAT model