

واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل COUP برای شبیه‌سازی دمای خاک در ایستگاه سینوپتیک

همدان

یونس خوشخو^{*۱} - پرویز ایران نژاد^۲ - علی خلیلی^۳ - حسن رحیمی^۴ - عبدالمجید لیاقت^۵ - پراریک جانسن^۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۹/۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۷/۷

چکیده

در این پژوهش واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل COUP با هدف شبیه‌سازی دمای خاک در مقیاس زمانی سه‌ساعته برای ایستگاه سینوپتیک همدان انجام شده است. برای این منظور از روش برآورد عدم قطعیت درست‌نمایی تعمیم یافته (GLUE) استفاده شده است. ۲۲ پارامتر که ارتباط نزدیکی با شبیه‌سازی دمای خاک دارند، انتخاب گردیدند و با انجام نمونه‌گیری‌های تصادفی به روش مونت کارلو از فضای عدم قطعیت آنها، ۲۵۰۰ سناریو از ترکیب مقدار پارامترها تولید و شبیه‌سازی‌های مدل بر اساس آن‌ها انجام شد. برای جداسازی شبیه‌سازی‌های کارآمد و ناکارآمد از یکدیگر سه شاخص نش - ساتکلیف، میانگین اریبی خطا، و ریشه میانگین مربعات خطا در نظر گرفته شدند و آستانه‌های قابل پذیرش برای هر شاخص تعریف گردید. با اعمال آستانه‌های قابل پذیرش، تعداد ۲۵۳ شبیه‌سازی به‌عنوان شبیه‌سازی‌های کارآمد شناسایی شدند و مبنای انجام واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل قرار گرفتند. بر مبنای توزیع پسین پارامترها، تعدادی از پارامترها به‌عنوان پارامترهای حساس شناخته شدند. واسنجی مدل بر اساس میانه شبیه‌سازی‌های کارآمد و تحلیل عدم قطعیت بر مبنای کران‌های عدم قطعیت ۵٪ و ۹۵٪ خطای مربوط به شبیه‌سازی‌های کارآمد انجام شد. نتایج حاکی از بهبود قابل توجه در عملکرد مدل پس از انجام واسنجی در مقایسه با حالت اجرای مدل با مقادیر پیش‌فرض پارامترها بود. همچنین، نتایج حاصل از تحلیل عدم قطعیت نشان داد که به‌کارگیری روش GLUE در بیشتر موارد منجر به کاهش عدم قطعیت مربوط به پارامترهای مدل گردید و باقی‌مانده اختلافات بین مقادیر شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهداتی به سایر منابع عدم قطعیت نسبت داده شد.

واژه‌های کلیدی: مدل COUP، واسنجی، عدم قطعیت، روش GLUE، همدان

مقدمه

ضریب هدایت گرمایی اثر می‌پذیرد (۱۰). با این وجود، شبیه‌سازی دقیق‌تر تراز گرمای خاک مستلزم در نظر گرفتن فرایندهای انتقال رطوبت به شکل‌های آب مایع و بخار آب در خاک نیز می‌باشد (۲۷). انتقال رطوبت در شکل‌های مایع و بخار با جابه‌جایی گرما در خاک همراه است. همچنین، تغییرات رطوبت خاک سبب ایجاد تغییراتی در ویژگی‌های گرمایی خاک می‌شود که در پی آن انتقال گرما در خاک نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. به‌طور ویژه در مورد خاک‌هایی که در طی فصل سرد سال دچار یخبندان می‌شوند، در نظر گرفتن توأمان فرایندهای گرما و رطوبت با توجه به اثراتی که پدیده یخبندان خاک بر پتانسیل رطوبتی خاک دارد، دارای اهمیت بیشتری است (۲۲). فیلیپ و دفریس (۲۵) یک نظریه برای انتقال توأمان گرما و رطوبت در محیط‌های متخلخل ارائه کردند. این نظریه توسط پژوهشگرانی مانند سافو کلیوس (۲۹)، میلی (۲۰)، و پاسرات (۲۴) تعدیل شده و در شبیه‌سازی انتقال توأمان گرما و رطوبت در مدل‌هایی نظیر SiSPAT

دمای خاک در هر لحظه و چگونگی تغییرات زمانی و مکانی آن یکی از مهم‌ترین عامل‌های اثرگذار بر جهت و شدت تغییرات فرایندهای فیزیکی خاک و تبادل جرم و انرژی بین خاک و جو است (۹). دمای خاک از یک‌سو به 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 وابسته است و از سوی دیگر از ویژگی‌های گرمایی خاک نظیر ظرفیت گرمایی و

۱، ۳، ۴ و ۵- به ترتیب دانشجوی دکتری و استادان گروه آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

*- نویسنده مسئول: (Email: younes.khoshkhoo@gmail.com)

۲- دانشیار گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

۶- استاد گروه مهندسی منابع آب و خاک، دانشگاه KTH سوئد

سناریو، و در نهایت تحلیل توزیع خروجی را به‌عنوان چهار گام اساسی در تحلیل عدم قطعیت ذکر کرده‌اند. روش‌های متعددی توسط وراگت (۳۳) برای تحلیل عدم قطعیت ارائه شده‌اند که از میان آن‌ها روش برآورد عدم قطعیت درست‌نمایی تعمیم یافته^۱ (GLUE) ارائه شده توسط بیون و بینلی (۳) و روش کلاسیک بی‌زین مبتنی بر زنجیره مارکف مونت کارلو (MCMC^۲) که از تئوری معروف بیز (۳) استخراج شده است، از اهمیت و کاربرد بیشتری برخوردار هستند (۵، ۲۳، ۳۲ و ۳۵). اگر چه هر دو جزو روش‌های مونت کارلو به حساب می‌آیند، اما دارای تفاوت‌هایی اساسی در نحوه تعیین مجموعه مقادیر پارامترهای قابل پذیرش و نیز الگوریتم نمونه‌گیری از فضای عدم قطعیت پارامترها هستند (۱۷). استدینگر و همکاران (۳۱) گزارش کرده‌اند که از زمان ارائه روش GLUE در سال ۱۹۹۲ تا سال ۲۰۰۸، در بیش از ۵۰۰ تحقیق از این روش برای تحلیل عدم قطعیت استفاده شده است. بیون (۴) با مبنا قرار دادن برهمکنش‌های پیچیده بین پارامترهای مدل و رفتار غیرخطی مدل‌های محیطی این نکته را مورد تأکید قرار داده است که در حالت وجود عدم قطعیت در داده‌های ورودی، پارامترها، و ساختار مدل، مجموعه‌های متعددی از مقادیر پارامترها می‌توانند منجر به حصول رفتار مشابهی توسط مدل گردند و این مفهوم را "همپایانی"^۳ نامیده است. در تحقیق حاضر واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل COUP با استفاده از روش GLUE برای شبیه‌سازی دمای سه‌ساعته اعماق خاک در ایستگاه سینوپتیک همدان انجام شده است. انجام واسنجی منتهی به تعدیل مقدار پارامترهای مدل و در پی آن بهبود نتایج مدل می‌گردد. با انجام تحلیل عدم قطعیت می‌توان برای کاهش عدم قطعیت پارامترهای مدل تلاش کرد و در پی آن عدم قطعیت پارامترهای مدل را از سایر منابع عدم قطعیت جدا نمود و میزان قابلیت اعتماد به شبیه‌سازی‌های مدل را سنجید.

مواد و روش‌ها

توصیف مدل COUP و آماده‌سازی آن

دو معادله دیفرانسیلی جفت‌شده برای جریان‌های گرما و رطوبت در خاک، هسته اصلی مدل را تشکیل می‌دهند که منشأ وقوع این جریان‌ها وجود گرادبان‌های دما و پتانسیل رطوبت در خاک می‌باشد (۱۹). محاسبات مربوط به جریان گرما بر اساس قانون فوریه و معادلات تراز انرژی در سطح خاک و محاسبه جریان رطوبت در خاک بر اساس معادله ریچاردز (۲۶) استوار است. طبق قانون پایستگی انرژی، تابش خالص رسیده به سطح خاک را می‌توان معادل مجموع

(۶) SHAW (۷)، SOIL (۱۱) و COUP (۱۲ و ۱۳) به‌کار گرفته شده است. مدل COUP، که از توسعه تدریجی مدل SOIL پدید آمده است، با هدف برآورد شارهای قائم گرما و رطوبت در سامانه خاک - برف - گیاه - جو طراحی شده است. مدل COUP در تحقیقات متعددی از جمله گوستافسون و همکاران (۸) برای مدل‌سازی تراز گرما و رطوبت در خاک، ملاندر و همکاران (۱۹) برای مدل‌سازی برف و دمای خاک، و یانسن و همکاران (۱۴) برای مدل‌سازی تراز گرما به‌کار گرفته شده است. در زمره تحقیقات داخلی نیز نوروز ولاشندی و همکاران (۱) برای برآورد دما و رطوبت خاک در اقلیم کرج برای دو حالت خاک با پوشش گیاهی ذرت و خاک بدون پوشش، مدل COUP را استفاده و قابلیت مطلوب آن را گزارش کردند اما حصول به نتایج دقیق‌تر به ویژه برای رطوبت خاک را منوط به واسنجی بیشتر مدل دانستند. شبیه‌سازی انتقال توأمان گرما و رطوبت در خاک مستلزم برآورد فرایندهای متعددی است که در بین آن‌ها می‌توان از برآورد تبخیر از سطح خاک، مدل‌سازی برف، و برآورد ویژگی‌های گرمایی و هیدرولیکی خاک نام برد. مدل‌سازی چنین فرایندهایی امری ساده نیست و مستلزم برآورد ضرایب تجربی متعددی، که به آن‌ها پارامترهای مدل گفته می‌شود، است. مقدار یک پارامتر در طی فرایند شبیه‌سازی ثابت بوده و نسبت به زمان تغییر نمی‌کند. در مدل COUP نیز، مانند بسیاری مدل‌های دیگر، پارامترهای متعددی وجود دارند که مقدار ثابت و دقیقی برای آن‌ها تعریف نشده است. این امر از یک سو به تغییرپذیری و گاهی ناکافی بودن داده‌های موجود برای برآورد آن‌ها مربوط می‌شود و از سوی دیگر مقدار برخی پارامترها می‌تواند به‌طور طبیعی از موقعیتی به موقعیت دیگر تغییر کند (۳۴). با این وجود، به‌طور معمول به هر پارامتر یک مقدار پیش‌فرض که به‌نوعی معرف شرایط متوسط آن پارامتر است، اختصاص داده می‌شود که برای حصول به دقت بالاتر، مقدار پیش‌فرض پارامترها با انجام واسنجی مدل تعدیل می‌شود. وجود عدم قطعیت در پارامترهای مدل یکی از منابع اصلی و مهم عدم قطعیت مدل‌های محیطی است و بخشی از تفاوت‌های بین خروجی‌های مدل و مقادیر مشاهداتی را می‌توان این عدم قطعیت نسبت داد. واسنجی مدل به فرایند تعدیل پارامترهای مدل به گونه‌ای که خروجی‌های مدل بیشترین تطابق را با داده‌های مشاهداتی داشته باشند، گفته می‌شود (۱۷). وجود عدم قطعیت در پارامترهای مدل تنها منبع عدم قطعیت مدل نیست و وجود عدم قطعیت در ساختار و معادلات حاکم بر مدل، داده‌های مشاهداتی، و داده‌های ورودی مدل از دیگر منابع عدم قطعیت مدل محسوب می‌شوند. بر این اساس، بیون (۴) انجام تحلیل عدم قطعیت را امری ضروری و لاینفک در کلیه کاربردهای مدل‌سازی فرایندهای محیطی دانسته است. والچ و همکاران (۳۴) تعریف توزیع عامل‌های ورودی غیرقطعی، تولید N سناریو برای عامل‌های ورودی، محاسبه خروجی مدل برای هر

1- Generalized Likelihood Uncertainty Estimation
2- Markov Chain Monte Carlo
3- Equifinality

اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک، یک نیمرخ قائم خاک به عمق ۱ متر در نظر گرفته شد و نمونه‌گیری‌هایی به دو صورت دست‌خورده و دست-نخورده برای لایه‌های ۰-۵، ۵-۱۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰ و ۶۰-۱۰۰ سانتی‌متری از سطح خاک تهیه گردید. ویژگی‌های مختلف خاک شامل درصد رس، سیلت، و شن، جرم مخصوص ظاهری، درصد ماده آلی، و رطوبت اشباع حجمی برای هر کدام از این لایه‌ها اندازه‌گیری شد. بافت خاک در لایه ۰-۵ سانتی‌متر لومی و در لایه‌های پایین‌تر لومرسی‌شنی بود. برای اعماق مختلف جرم مخصوص ظاهری بین ۱/۴۶ تا ۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب، درصد ماده آلی بین ۰/۲۴ تا ۰/۷۲، و رطوبت اشباع حجمی بین ۳۵/۸۵ تا ۵۰/۲ درصد بود. این ویژگی‌ها در مدل‌سازی اجزای مختلف، به‌ویژه برآورد منحنی مشخصه رطوبتی خاک، هدایت هیدرولیکی غیر اشباع، و ویژگی‌های گرمایی خاک که اندازه‌گیری آن‌ها هزینه‌بر، وقت‌گیر و گاه‌آ پیچیده است، کاربرد دارند.

روش GLUE

روش GLUE برای تحلیل عدم قطعیت بر پایه انجام نمونه‌گیری تصادفی به‌روش مونت کارلو در فضای عدم قطعیت پارامترها است. شبیه‌سازی‌های مدل بر اساس ترکیب‌های گوناگون مقادیر پارامترها انجام می‌شود، و با به‌کار بردن آستانه‌های شاخص‌های مختلف سنجش عملکرد مدل، شبیه‌سازی‌های کارآمد و ناکارآمد از هم جدا می‌شوند (۵). منظور از شبیه‌سازی‌های کارآمد آن دسته از شبیه‌سازی‌ها هستند که مقدار شاخص‌ها در مورد آن‌ها قابل پذیرش تشخیص داده شود. یکی از شاخص‌های بسیار مفید و فراگیر شاخص کارایی نش- ساتکلیف (R_{eff}) است. در این تحقیق علاوه بر این شاخص از میانگین اریبی خطا (MBE) و ریشه میانگین توان دوم خطاها (RMSE) نیز استفاده شد. در جدول ۱ فرمول محاسبه این شاخص‌ها، حالت ایده‌آل و آستانه قابل پذیرش تعریف شده برای آن‌ها آورده شده است. تنها آن دسته از شبیه‌سازی‌ها کارآمد شناخته شدند که مقادیر این شاخص‌ها برای همه عمق‌های خاک (۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر) در محدوده آستانه‌های قابل پذیرش آن‌ها قرار گرفته باشد.

با توجه به این که روش GLUE در انتخاب شاخص‌های سنجش عملکرد مدل و نیز تعریف آستانه‌های قابل پذیرش انعطاف‌پذیری بالایی دارد، یک روش معمول برای تعریف آستانه‌های قابل پذیرش، در نظر گرفتن درصدی از کل شبیه‌سازی‌ها به‌عنوان شبیه‌سازی‌های کارآمد است (۶).

شارهای گرمای نهان، گرمای محسوس، و گرما به داخل خاک در نظر گرفت که برآورد سهم هر یک از این شارها با روش تکرار که مبتنی بر تغییر مداوم دمای سطح خاک تا بسته‌شدن معادله تراز انرژی سطح است، صورت می‌گیرد. ساختار مدل مبتنی بر در نظر گرفتن یک نیمرخ تک‌بعدی و قائم خاک و تقسیم‌بندی آن به چندین لایه و اعمال معادلات حاکم برای هر لایه و حل آنها به روش عددی صریح می‌باشد. مدل، قابلیت شبیه‌سازی فرایندهای گرما و رطوبت در مقیاس‌های مختلف دقیقه‌ای، ساعتی، و روزانه را دارد. شارها در لایه‌های مرزی بین خاک و جو تحت کنترل متغیرهای هواشناسی است که بارندگی و دمای هوا مهم‌ترین آنها هستند و رطوبت هوا، سرعت باد و ابرناکی نیز به دلیل اثر بر میزان تبخیر اهمیت دارند (۱۲). برخی ویژگی‌های خاک مانند منحنی مشخصه رطوبتی خاک، هدایت هیدرولیکی غیر اشباع، ظرفیت گرمایی، و ضریب هدایت گرمایی خاک نیز بر جریان‌ها گرما و رطوبت در بین لایه‌های خاک اثر می‌گذارند و بایستی اندازه‌گیری و یا به نحو مطلوبی برآورد شوند. مهم‌ترین اجزای مدل که ارتباط تنگاتنگی با شبیه‌سازی دمای خاک دارند شامل مدل‌سازی تراز انرژی در سطح خاک، مدل‌سازی برف، فرایندهای مرتبط با تابش، و ویژگی‌های گرمایی و هیدرولیکی خاک می‌باشند که برخی از مهم‌ترین پارامترهای مربوط با آن‌ها در بخش واستحی و عدم قطعیت مورد توجه قرار گرفته‌اند. مدل برای برآورد ضریب هدایت گرمایی از روش ارائه شده توسط کرستن (۱۸) بهره می‌گیرد. همچنین، برای برآورد منحنی مشخصه رطوبتی خاک از توابع بروکس-کوری، برای هدایت هیدرولیکی غیر اشباع از روش معلم (۲۱)، و برای مدل‌سازی برف از روش تجربی ارائه شده توسط استاهلی و یانسن (۳۰) استفاده شده است. گام زمانی به‌کار گرفته شده برای انجام شبیه‌سازی‌ها ۳ ساعت است. برای انجام شبیه‌سازی‌ها، یک نیمرخ خاک به ضخامت ۲۵ متر به ۲۰ لایه تقسیم شده است، به‌گونه‌ای که ضخامت لایه‌ها با افزایش عمق به تدریج افزایش می‌یابد. در نظر گرفتن نیمرخ خاک با ضخامت زیاد با هدف به‌حداقل رساندن اثر انتقال گرما از عمق‌های پایین به لایه‌های سطحی‌تر (از سطح خاک تا عمق ۱ متر) که شبیه‌سازی‌های مدل برای آن‌ها انجام شده است، صورت گرفت.

ایستگاه مورد مطالعه و تهیه داده‌های مورد نیاز

ایستگاه انتخابی برای انجام مطالعه ایستگاه سینوپتیک همدان بود. داده‌های هواشناسی مورد نیاز مدل در مقیاس زمانی سه‌ساعته و داده‌های دمای خاک سه نوبت در شبانه روز (ساعات ۳، ۹، و ۱۵ به‌وقت گرینویچ) که برای اعماق ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌تری از سطح خاک به ثبت رسیده‌اند، در بازه زمانی ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۶ از سازمان هواشناسی کشور تهیه شدند. معیارهای کنترل کیفی ارائه شده توسط هو و فنگ (۱۰) بر روی این داده‌ها اعمال و داده‌هایی که اشتباه تشخیص داده شدند، کنار گذاشته شدند. برای

جدول ۱- شاخص‌های به کار گرفته شده و آستانه قابل پذیرش تعریف شده برای آن‌ها

شاخص	فرمول محاسبه	تعریف نمادها	ایده‌آل	آستانه‌های قابل پذیرش
MBE	$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i - O_i)}{n}$	C_i : مقادیر محاسباتی	صفر	± 0.75 °C
RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - O_i)^2}{n}}$	O_i : مقادیر مشاهداتی n : تعداد کل مشاهدات	صفر	بین کمترین مقدار بدست آمده و ۰/۵ درجه سانتیگراد بیشتر از آن
Reff	$R_{eff} = 1 - \frac{\sigma_{Residuals}^2}{\sigma_{Observations}^2}$	صورت کسر: واریانس خطاها مخرج کسر: واریانس داده‌های مشاهداتی	یک	بین بیشترین مقدار بدست آمده و ۰/۹۵ بیشتر مقدار

یک سری زمانی از این میانه‌ها بدست آمد و مبنای انجام مقایسات با داده‌های مشاهداتی قرار گرفت. تحلیل عدم قطعیت مدل نیز با در نظر گرفتن همه شبیه‌سازی‌های کارآمد با هم و استخراج کران‌های ۵٪ و ۹۵٪ خطای آنها به‌عنوان کران‌های پایین و بالای عدم قطعیت شبیه‌سازی‌ها به‌انجام رسید.

انتخاب پارامترها برای واسنجی و عدم قطعیت

نظر به این که مدل COUP پارامترهای زیادی دارد و در نظر گرفتن همه این پارامترها برای انجام واسنجی و تحلیل عدم قطعیت ناممکن است، در این پژوهش ۲۲ پارامتر که بسیاری از آن‌ها در پژوهش‌های پیشین از جمله آلوناس و یانسن (۲)، سیهونگ (۲۸)، و یانسن (۱۶) به‌عنوان پارامترهای مؤثر تشخیص داده شده‌اند، انتخاب گردیدند و سایر پارامترهای مدل در مقادیر پیش‌فرضشان نگه داشته شدند. این پارامترها و دامنه عدم قطعیت انتخاب شده برای آن‌ها همراه با توصیف مختصری از هر پارامتر در جدول ۲ آورده شده است. همان‌گونه که از جدول بر می‌آید، در انتخاب پارامترها برای واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل سعی بر آن بوده است تا فرایندهای مختلفی که بر شبیه‌سازی دمای خاک مؤثرند، مد نظر قرار گیرند.

نتایج و بحث

توزیع پسین پارامترها و حساسیت مدل

به کار بردن آستانه‌های قابل پذیرش شاخص‌ها برای همه عمق‌های خاک منجر به شناسایی ۲۵۳ شبیه‌سازی کارآمد (حدود ۱٪ کل شبیه‌سازی‌ها) شد. توزیع تجمعی پسین ۲۲ پارامتر انتخاب شده بر اساس ۲۵۳ شبیه‌سازی کارآمد، در کنار توزیع یکنواخت پیشین آن‌ها در شکل ۱ آورده شده است. توزیع پسین هر پارامتر نمایانگر رفتار آن پارامتر در دامنه عدم قطعیتش پس از به‌کاربردن شبیه‌سازی‌های کارآمد است. شکل ۱ نشان می‌دهد که پارامترهای مختلف رفتارهای متفاوتی دارند. بزرگ‌تر بودن مقدار انحراف توزیع پسین یک پارامتر از توزیع یکنواخت پیشین آن نشانگر حساسیت بالاتر مدل نسبت به آن پارامتر است.

در این تحقیق آستانه‌های قابل پذیرش شاخص‌ها به گونه‌ای انتخاب شدند که در نهایت حدود ۱٪ از کل شبیه‌سازی‌ها به‌عنوان شبیه‌سازی‌های کارآمد استخراج شوند. برای تولید ترکیب‌های گوناگون از مقادیر ۲۲ پارامتر منتخب، ۲۵۰۰۰ نمونه از دامنه عدم قطعیت این پارامترها به روش تصادفی مونت کارلو گرفته شد و بر اساس ۲۵۰۰۰ سناریوی تولید شده از مقدار پارامترها، شبیه‌سازی‌های مدل انجام شد. نظر به اینکه هر چه تعداد سناریوها بیشتر باشد در واقع حالت‌های ممکن بیشتری از ترکیب مقادیر پارامترهای مختلف در دامنه عدم قطعیتشان ایجاد می‌شوند، تعداد نمونه‌گیری‌ها زیاد در نظر گرفته شدند. برای انجام نمونه‌گیری تصادفی از فضای عدم قطعیت پارامترها، به‌طور معمول یک توزیع اولیه نظیر توزیع یکنواخت، توزیع نرمال و ... که نوعی وزن‌دهی به احتمال انتخاب یک مقدار مشخص در دامنه عدم قطعیت پارامتر است، در نظر گرفته می‌شود که به آن توزیع پیشین پارامترها گفته می‌شود. در این تحقیق توزیع یکنواخت که در آن احتمال انتخاب هر مقداری در دامنه عدم قطعیتش یکسان است، به‌عنوان توزیع پیشین پارامترها در نظر گرفته شد. با اعمال آستانه‌های قابل پذیرش شاخص‌های به کار گرفته شده بر روی کل شبیه‌سازی‌ها، شبیه‌سازی‌های کارآمد مشخص شدند. با توجه به اینکه هر کدام از شبیه‌سازی‌های کارآمد با اجرای مدل بر اساس ترکیب معینی از مقدار پارامترها حاصل آمده است، لذا برای هر کدام از پارامترها به تعداد شبیه‌سازی‌های کارآمد مجموعه‌ای از مقادیر حاصل می‌آید که در صورتی که توزیع فراوانی این مقادیر برای هر کدام از پارامترها ترسیم گردد، به توزیع فراوانی حاصله توزیع پسین گفته می‌شود. هر چه تفاوت توزیع پسین یک پارامتر از توزیع پیشین آن بیش‌تر باشد، حساسیت مدل نسبت به تغییرات آن پارامتر بالاتر است. با توجه به مفهوم همپایانی در روش GLUE که بر اساس آن همه شبیه‌سازی‌های کارآمد یکسان و هم‌رتبه در نظر گرفته می‌شوند، میانه این شبیه‌سازی‌ها استخراج شد و مبنای انجام واسنجی مدل و تعدیل مقدار پارامترها قرار گرفت. برای این منظور برای هر گام زمانی معین، میانه کل شبیه‌سازی‌های کارآمد در آن گام استخراج شد و با کنار هم قرار دادن میانه‌های استخراج شده در گام‌های زمانی مختلف،

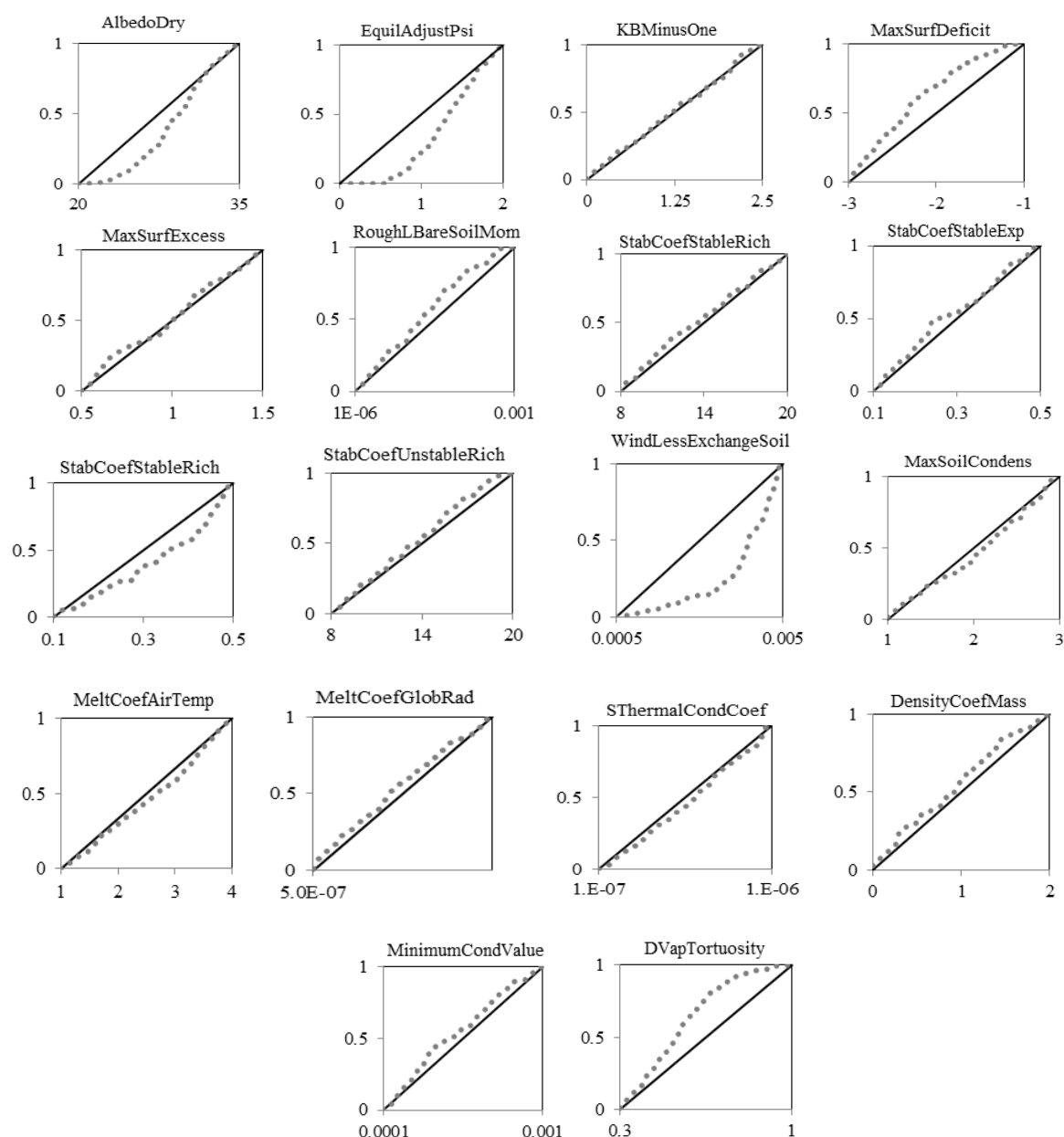
جدول ۲- پارامترهای انتخاب شده و دامنه عدم قطعیت آن‌ها برای واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل COUP

فرایند مربوط	نام پارامتر	دامنه عدم قطعیت		تعریف پارامتر
		کران پایین	کران بالا	
تابش خالص	AlbedoDry	20	35	مقدار آلبدوی خاک خشک
تبخیر از سطح خاک	EquilAdjustPsi	0	2	تعدیل کننده پتانسیل رطوبت در لایه سطحی
تبخیر از سطح خاک	KBMinusOne	0	2.5	تعدیل کننده رابطه طول زبری سطح برای تکانه و گرما
تبخیر از سطح خاک	MaxSurfDeficit	-3	-1	پارامتر مؤثر در محاسبه فشار بخار لایه سطحی
تبخیر از سطح خاک	MaxSurfExcess	0.5	1.5	پارامتر مؤثر در محاسبه فشار بخار لایه سطحی
تبخیر از سطح خاک	RoughLBareSoilMom	1.0e-6	0.001	طول زبری خاک لخت برای مومنتم
تبخیر از سطح خاک	StabCoefStableExp	0.1	0.5	پارامتر مؤثر در پایداری جو به‌روش عدد ریچاردسون
تبخیر از سطح خاک	StabCoefStableRich	8	20	پارامتر مؤثر در پایداری جو به‌روش عدد ریچاردسون
تبخیر از سطح خاک	StabCoefUnstableExp	0.1	0.5	پارامتر مؤثر در پایداری جو به‌روش عدد ریچاردسون
تبخیر از سطح خاک	StabCoefUnstableRich	8	20	پارامتر مؤثر در پایداری جو به‌روش عدد ریچاردسون
تبخیر از سطح خاک	WindLessExchangeSoil	5.0e-4	0.005	حد بالایی مقاومت آنرویدینامیکی در جو آرام
تبخیر از سطح خاک	MaxSoilCondens	1	3	محدود کننده بیشینه تبخیر از سطح خاک
مدل‌سازی برف	MeltCoefGlobRad	5.0e-7	1.5e-6	پارامتر مؤثر در مدل‌سازی برف به‌روش تجربی
مدل‌سازی برف	SThermalCondCoef	1.0e-7	1.0e-6	ضریب هدایت گرمایی برف
مدل‌سازی برف	DensityCoefMass	0	2	پارامتر مؤثر در مدل‌سازی برف به‌روش تجربی
مدل‌سازی برف	MeltCoefAirTemp	1	4	پارامتر مؤثر در مدل‌سازی برف به‌روش تجربی
یخبندان خاک	FreezepointF0	7	13	پارامتر مؤثر در تابع نزول نقطه انجماد
ویژگی‌های گرمایی خاک	ClayUnFrozenC1	0.1	0.2	پارامتر مؤثر در محاسبه ضریب هدایت گرمایی خاک یخ‌زده
ویژگی‌های گرمایی خاک	CFrozenSurfCorr	0.1	0.3	پارامتر مؤثر در تابع میرش سطح یخبندان
ویژگی‌های گرمایی خاک	ClayFrozenC3	0.003	0.0045	پارامتر مؤثر در محاسبه ضریب هدایت گرمایی خاک یخ‌زده
هیدرولیک خاک	MinimumCondValue	1.0e-04	0.001	کمینه مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی غیر اشباع
جریان بخار در خاک	DVapTortuosity	0.3	1	پارامتر مؤثر در پخش بخار در خاک

تحلیل عدم قطعیت و واسنجی مدل

از ۲۵۳ شبیه‌سازی کارآمد برای تحلیل عدم قطعیت مدل استفاده شد. برای هر کدام از عمق‌ها، با محاسبه تفاضل دمای خاک مشاهده شده از مقدار شبیه‌سازی‌شده توسط هر کدام از شبیه‌سازی‌های کارآمد، میزان خطا برای هر کدام از این شبیه‌سازی‌ها استخراج شد و کل خطای حاصل از ۲۵۳ شبیه‌سازی کارآمد به‌عنوان عدم قطعیت ناشی از پارامترهای مدل در نظر گرفته شد که در شکل ۲ کران‌های عدم قطعیت ۵٪ و ۹۵٪ این خطاها برای عمق‌های ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متری خاک آورده شده است. همان‌گونه که از شکل پیداست فاصله حد پایین و حد بالا در حالت کلی کم است، یعنی با به‌کارگیری روش GLUE، عدم قطعیت ناشی از پارامترهای مدل کاهش یافته است. برای حالت‌هایی که هر دو کران بالاتر یا پایین‌تر از صفر بوده‌اند، بدان معنا است که داده‌های مشاهداتی خارج از حدود اطمینان شبیه‌سازی‌های کارآمد قرار داشته‌اند. این امر می‌تواند ناشی از سایر منشأهای عدم قطعیت، مانند عدم قطعیت در ساختار و معادلات حاکم بر مدل و نیز وجود خطاهایی در داده‌های ورودی و یا داده‌های مشاهداتی ناشی از خطاهای دیدبانی، خطا در ثبت داده‌ها و ... باشد.

پارامترهایی که توزیع پسین آن‌ها تفاوت چشمگیری با توزیع پیشین‌شان داشت شامل MaxSurfDeficit, EquilAdjustPsi, WindLessExchangeSoil StabCoefUnstableExp, (مربوط به برآورد تبخیر از سطح خاک)، ClayUnFrozenC1 (مرتبط با ویژگی‌های گرمایی خاک)، AlbedoDry (مرتبط با برآورد تابش خالص)، و DVapTortuosity (مرتبط با برآورد جریان بخار در خاک) بودند. به دیگر سخن، حساسیت مدل COUP برای شبیه‌سازی دمای خاک به تغییر این پارامترها در دامنه عدم قطعیتشان بالا بود. مدل به تغییر برخی پارامترها حساسیت به نسبت کمتری داشت، و نسبت به برخی پارامترهای دیگر مانند KBMinusOne و StabCoefStableRich حساسیت چندانی از خود نشان نداد. بر این اساس، با توجه به اثرگذاری بالایی برخی از پارامترها بر خروجی‌های مدل، انجام واسنجی مدل ضروری به‌نظر می‌رسد. حساسیت مدل به پارامترها بدان معنا است که وجود عدم قطعیت در پارامترهای مدل می‌تواند منشأ بخش مهمی از عدم قطعیت نتایج مدل باشد. از این رو، تلاش برای کاهش عدم قطعیت این پارامترها می‌تواند گام مهمی در کاهش عدم قطعیت کل مدل باشد.



شکل ۱- توزیع تجمعی پارامترهای انتخاب شده (نقطه چین‌ها توزیع پسین و خط کشیده توزیع پیشین پارامترها هستند)

رسیده است که نمونه بارز آن در دماهای نزدیک به صفر رخ داده است. چنین امری می‌تواند مرتبط با وجود عدم قطعیت بالا در مدل-سازی ذوب برف و فرایندهای مرتبط با آن باشد که در صورت صادق بودن چنین فرضیه‌ای، تلاش برای شبیه‌سازی دقیق‌تر چنین فرآیندهایی با به‌کارگیری روش‌هایی مناسب‌تر ضروری به نظر می‌رسد. با نگاهی کلی به شکل ۳، تفاضل کران‌های عدم قطعیت پایین و بالا در حالت کلی یک روند صعودی را با افزایش دما نشان

برای ارائه یک تحلیل تفصیلی‌تر از عدم قطعیت پارامترهای مدل، تفاضل دو کران مذکور محاسبه و تغییرات آن بر حسب دمای خاک ترسیم شد که شکل ۳ این تغییرات را برای عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک به‌عنوان نمونه نشان می‌دهد.

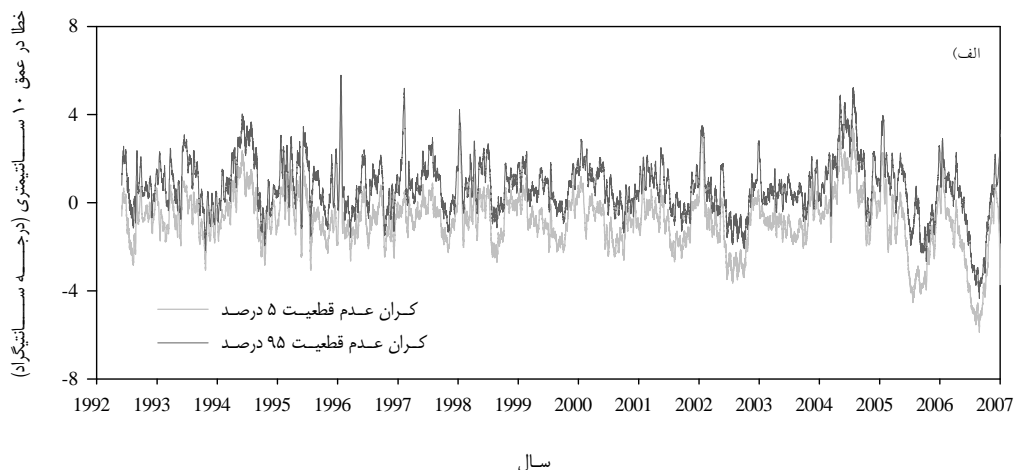
همان‌گونه که پیداست در بیشتر موارد این تفاضل مابین صفر الی ۲ درجه سانتی‌گراد بوده که دامنه نسبتاً کوچکی به نظر می‌رسد. با این حال، در موارد معدودی این تفاضل به بالای ۴ درجه سانتی‌گراد هم

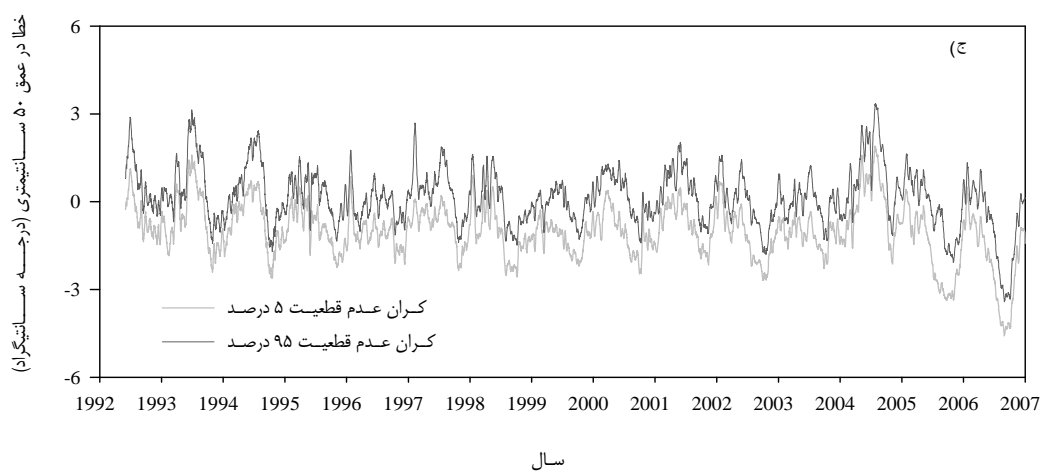
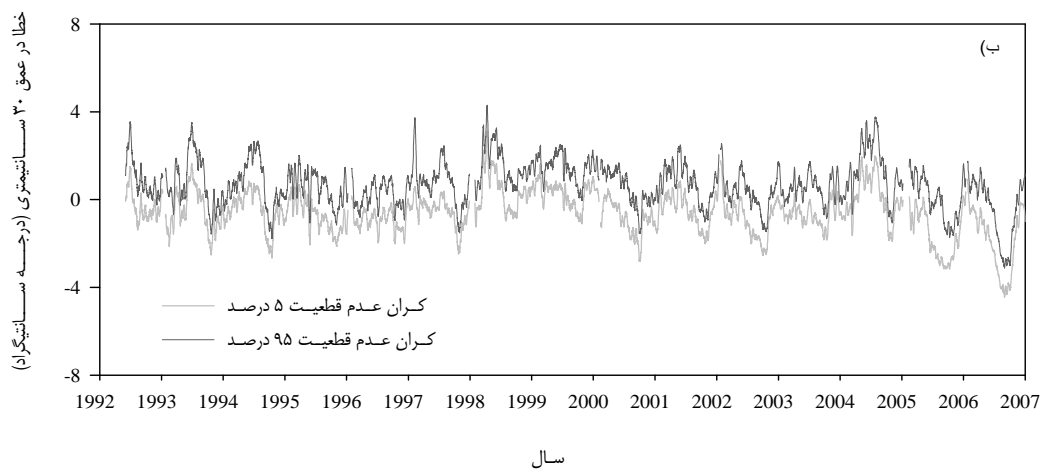
اجرای مدل با مقادیر پیش‌فرض پارامترها، حالت اجرای مدل با پارامترهای کالیبره‌شده، و نیز کم‌ترین و بیش‌ترین مقادیر شاخص‌ها برای کل شبیه‌سازی‌ها (۲۵۰۰۰ عدد) در جدول ۴ آورده شده است. همان‌گونه که از جدول پیداست دامنه بین کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار هر شاخص در بسیاری از حالات دامنه نسبتاً وسیعی بوده و مقدار شاخص در حالت اجرای مدل با مقادیر پیش‌فرض پارامترها در تمامی حالت‌ها مابین حدود پایین و بالای شاخص‌ها قرار گرفته است. با مقایسه مقدار هر شاخص در حالت مقادیر پیش‌فرض پارامترها با بهترین مقدار حاصله (حد بالا در شاخص R_{eff} ، حد پایین در شاخص $RMSE$ ، و نزدیک به صفر بودن شاخص MBE) می‌توان ایده‌ای مشخص از حداکثر بهبود قابل انتظار در عملکرد مدل به‌دست آورد. مقایسه مقادیر شاخص‌ها برای حالت پس از واسنجی مدل با حالت پیش‌فرض پارامترها نشان می‌دهد که عملکرد مدل پس از واسنجی به‌طرز قابل توجهی بهبود یافته است که این بهبود در عمق‌های پایین‌تر چشمگیرتر از لایه‌های سطحی‌تر بوده است. مقایسه حالت پس از واسنجی با بهترین مقدار حاصله از شاخص‌ها نیز حاکی از اختلاف خیلی کم مقادیر شاخص‌ها در این دو حالت بوده و واسنجی مدل به بهترین حالتی که از مدل می‌توان انتظار داشت تا حد زیادی نزدیک شده است. به لحاظ بررسی نحوه رفتار مدل در اعماق مختلف، عملکرد کلی مدل در لایه‌های سطحی‌تر به‌ویژه عمق ۵ سانتیمتری که در آن فرایندهای مؤثر بر انتقال گرما و رطوبت خاک در معرض تغییرات شدیدتری هستند، مطلوبیت کمتری در مقایسه با اعماق پایین‌تر نشان داده است.

می‌دهد. به بیانی دیگر، عدم قطعیت مربوط به پارامترهای مدل به استثنای مواردی، از زمستان به تابستان به تدریج افزایش می‌یابد. بالا بودن دامنه عدم قطعیت در تابستان می‌تواند با فرآیندهای غالب این فصل از جمله تبخیر بالا از سطح خاک بدلیل گرمای زیاد که بر روی ترازمندی انرژی در سطح خاک و به تبع آن میزان شار گرمای ورودی به داخل خاک اثر می‌گذارد، مرتبط باشد. بر این اساس، یک راهکار برای کاهش عدم قطعیت پارامترها در فصل تابستان، می‌تواند بررسی تفصیلی و دقیق فرآیندهای مهم در این فصل و شناسایی پارامترهای مؤثر و اضافه کردن آن‌ها به مجموعه پارامترهای در نظر گرفته شده برای تحلیل عدم قطعیت باشد. نظر به اینکه مفهوم همپایانی در روش $GLUE$ به معنای هم‌رتبه قلمداد کردن کلیه شبیه‌سازی‌های کارآمد می‌باشد، میانه این شبیه‌سازی‌ها به‌عنوان معرف کل آنها و مبنای جهت انجام واسنجی و تصحیح مقدار پارامترهای مدل در نظر گرفته شد. با توجه به این که میانه شبیه‌سازی‌های کارآمد متعلق به یک شبیه‌سازی مشخص و مجموعه مشخصی از پارامترها نیست، برای نسبت دادن یک مجموعه پارامتر به آن، میانه تک‌تک پارامترها برای شبیه‌سازی‌های کارآمد محاسبه گردید و بر اساس آنها شبیه‌سازی‌های مدل انجام شد و مشاهده شد که بین شبیه‌سازی‌های مبتنی بر میانه پارامترها و میانه شبیه‌سازی‌های کارآمد تفاوت بسیار ناچیزی وجود داشت. بر این اساس، میانه پارامترهای شبیه‌سازی‌های کارآمد به‌عنوان مقدار پارامترهای واسنجی شده در نظر گرفته شدند. جدول ۳ مقادیر پارامترهای واسنجی شده و مقدار پیش‌فرض پارامترها را نشان می‌دهد.

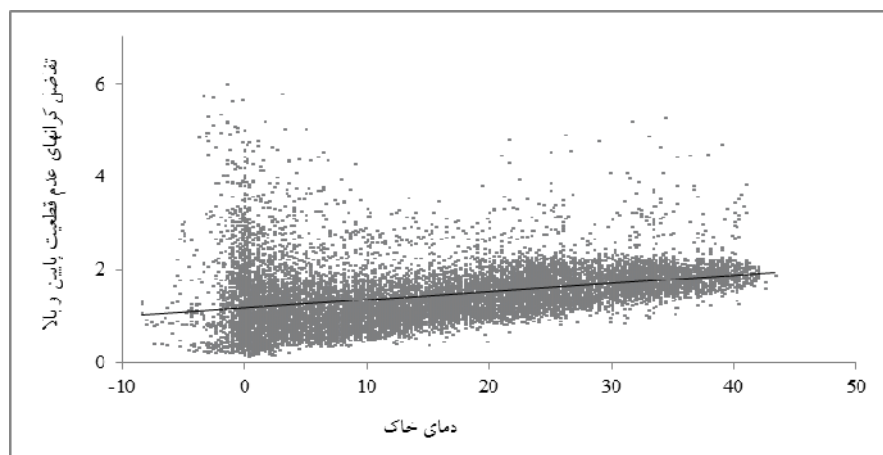
شاخص‌های عملکرد مدل

مقدار شاخص‌های عملکرد در اعماق مختلف خاک برای حالت





شکل ۲- کران‌های عدم قطعیت ۵٪ و ۹۵٪ خطای مربوط به شبیه‌سازی‌های کارآمد در عمق‌های الف) ۱۰، ب) ۳۰، و ج) ۵۰ سانتی‌متری خاک



شکل ۳- تفاضل کران‌های پایین و بالا کران‌های عدم قطعیت ۵٪ و ۹۵٪ شبیه‌سازی‌های کارآمد در عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک در دماهای مختلف

جدول ۳- مقادیر واسنجی شده و مقادیر پیش فرض پارامترهای انتخاب شده

پارامتر	مقدار واسنجی شده	مقدار پیش فرض	نام پارامتر	مقدار پیش فرض	مقدار واسنجی شده
AlbedoDry	29.6	30	MaxSoilCondens	2	2.13
EquilAdjustPsi	1.33	1	MeltCoefGlobRad	1.5×10^{-7}	8.8×10^{-7}
KBMinusOne	1.21	0	SThermalCondCoef	2.86×10^{-6}	4.2×10^{-7}
MaxSurfDeficit	-2.3	-2	DensityCoefMass	0.5	0.96
MaxSurfExcess	0.98	1	MeltCoefAirTemp	2	2.65
RoughLBareSoilMom	0.00001	0.001	FreezepointF0	10	10.26
StabCoefStableExp	0.27	0.333	ClayUnFrozenC1	0.13	0.15
StabCoefStableRich	13.7	16	CFrozenSurfCorr	0.2	0.25
StabCoefUnstableExp	0.38	0.333	ClayFrozenC3	0.0036	0.0038
StabCoefUnstableRich	14.3	16	MinimumCondValue	1.0×10^{-4}	1.25×10^{-4}
WindLessExchangeSoil	0.0031	0.001	DVapTortuosity	0.66	0.53

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های به کار گرفته شده برای اجرای مدل با مقادیر پیش فرض پارامترها و حدود پایین و بالای آنها برای کل شبیه‌سازی‌ها

شاخص	حالت اجرای مدل	عمق خاک (سانتیمتر)					
		۵	۱۰	۲۰	۳۰	۵۰	۱۰۰
MBE	با مقادیر پیش فرض پارامترها	-۰/۷۲	-۱/۲۵	-۱/۰۴	-۱	-۱/۵۷	-۱/۶۵
	کل شبیه‌سازی‌ها (حد پایین)	-۲/۸۱	-۴/۴	-۴	-۴/۵۶	-۶/۳۵	-۸/۲۶
	کل شبیه‌سازی‌ها (حد بالا)	۵/۲۲	۴/۱۴	۴/۲۶	۴/۱۵	۳/۶۹	۳/۵۹
	پس از اعمال واسنجی	۰/۵۴	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۰۸	-۰/۵۵	-۰/۷۴
RMSE	با مقادیر پیش فرض پارامترها	۳/۴۸	۲/۸۶	۲/۰۵	۱/۷۴	۲/۰۱	۲/۰۶
	کل شبیه‌سازی‌ها (حد پایین)	۳/۰۸	۲/۰۳	۱/۳۷	۱/۱۴	۰/۸۹	۰/۷۷
	کل شبیه‌سازی‌ها (حد بالا)	۸/۱۵	۶/۵۱	۵/۳۳	۵/۶۴	۷/۵۸	۹/۹
	پس از اعمال واسنجی	۳/۳۳	۲/۱۶	۱/۵۱	۱/۳۱	۱/۲۵	۱/۱
R _{eff}	با مقادیر پیش فرض پارامترها	۰/۹۲۶	۰/۹۴۳	۰/۹۶	۰/۹۶۷	۰/۹۴۶	۰/۹۲۱
	کل شبیه‌سازی‌ها (حد پایین)	۰/۵۹۷	۰/۷	۰/۷۳	۰/۶۵۶	۰/۲۴	-۰/۷۹
	کل شبیه‌سازی‌ها (حد بالا)	۰/۹۴۲	۰/۹۷۵	۰/۹۸۲	۰/۹۸۵	۰/۹۸۹	۰/۹۸۹
	پس از اعمال واسنجی	۰/۹۳۲	۰/۹۶۷	۰/۹۷۸	۰/۹۸۱	۰/۹۷۹	۰/۹۷۷

نتیجه‌گیری

مفید جهت برنامه‌ریزی برای تعیین متغیرهایی که اندازه‌گیری آنها می‌تواند به تعیین دقیق‌تر این پارامترها و ارتقاء شبیه‌سازی‌های مدل بیانجامد، باشد. واسنجی مدل و تعدیل مقادیر پارامترها که با مبنا قرار دادن میانه شبیه‌سازی‌های کارآمد به انجام رسید منجر به بهبود قابل توجه عملکرد مدل در مقایسه با اجرای مدل با مقادیر پیش فرض پارامترها گردید. با در نظر گرفتن کران‌های ۵٪ و ۹۵٪ شبیه‌سازی‌های کارآمد به‌عنوان کران‌های پایین و بالای عدم قطعیت، نتایج حاصله نشان داد که به‌کارگیری روش GLUE و اعمال شاخص‌های به‌کار گرفته شده منجر به کاهش عدم قطعیت پارامترهای مدل گردیده است. کاهش عدم قطعیت پارامترهای مدل و جداسازی آن از سایر منابع عدم قطعیت به این امکان را می‌دهد تا درک دقیق‌تری از ساختار مدل و فرآیندها و معادلات به‌کار گرفته شده به‌دست آید و در جهت بهبود آنها گام‌هایی برداشته شود.

تولید ۲۵۰۰ سناریو از دامنه عدم قطعیت ۲۲ پارامتر مؤثر بر شبیه‌سازی دمای خاک در مدل COUP با استفاده از روش GLUE و اعمال آستانه‌های قابل پذیرش شاخص‌های مختلف بر روی کل شبیه‌سازی‌های حاصله منجر به استخراج ۲۵۳ شبیه‌سازی کارآمد گردید که بیشترین تطابق بین خروجی‌های مدل با داده‌های مشاهداتی را داشتند. شاخص‌های عملکرد به‌کار گرفته شده به گونه‌ای در نظر گرفته شده بودند که جنبه‌های مختلفی از اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی را تحت پوشش قرار دهند. با استخراج توزیع تجمعی پسین پارامترهای متناظر با شبیه‌سازی‌های کارآمد و مقایسه آن با توزیع یکنواخت پیشین، تعدادی از پارامترها به‌عنوان پارامترهای حساس و مؤثر بر شبیه‌سازی دمای خاک شناخته شدند که این مسأله لزوم انجام واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل را آشکارتر نمود. همچنین شناسایی پارامترهای حساس مدل ابزاری

مساعدهت‌های مالی معاونت‌های محترم پژوهشی دانشگاه تهران و پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج و نیز همکاری گروه مهندسی منابع آب و خاک دانشگاه KTH تقدیر و تشکر می‌نمایند.

این تحقیق با همکاری مشترک دانشگاه تهران و دانشگاه KTH سوئد به انجام رسیده است. نگارندگان نخست بدین وسیله از

منابع

- ۱- نوروزولاشدی ر، قهرمان ن. و ایران نژاد پ. ۱۳۹۱. ارزیابی مدل شبیه سازی (COUP) جهت برآورد رطوبت و دمای خاک با پوشش گیاهی ذرت و خاک بدون پوشش. دوفصلنامه پژوهشهای خاک (علوم خاک و آب)، ۲۶: ۵۵-۶۶.
- 2- Alvenas G. and Jansson P.E. 1997. Model for evaporation, moisture and temperature of bare soil: calibration and sensitivity analysis. *Agriculture and Forest Meteorology*, 88:47-56.
- 3- Bayes T. 1763. An Essay towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 53: 370-418.
- 4- Beven K.J. and Binley A.M. 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction, *Hydrological Processes*, 6:279-298.
- 5- Beven K.J. 2006. A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of Hydrology*, 320:18-36.
- 6- Blasone R.S., Vrugt J.A., Madsen H., Rosbjerg D.R., Bruce A., and Zylvoloski G.A. 2008. Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) using adaptive Markov Chain Monte Carlo sampling. *Advances in Water Resources*, 31:630-648.
- 7- Braud I., Dantas-Antonino M., Vauclin J.L., and Ruelle P. 1995. A simple soil-plant-atmosphere transfer model (SiSPAT) development and field verification, *Journal of Hydrol*, 166:213-250.
- 8- Flerchinger G.N., and Saxton K.E. 1989. Simultaneous heat and water model of a freezing snow-residue-soil system I. Theory and development. *Trans. Amer. Soc. of Agric. Engr*, 32:565-571.
- 9- Gustafsson D., Lewan E., and Jansson P.E. 2004. Modeling water and heat balance of the Boreal landscape-comparison of forest and arable land in Scandinavia. *Journal of Applied Meteorology*, 43:1750-1767.
- 10- Hillel D. 1998. *Introduction to Environmental Soil Physics*, London: Elsevier Academic Press.
- 11- Hu Q., and Feng S. 2003. A daily temperature dataset and soil temperature climatology of the contiguous United States. *J. Appl. Meteor*, 42:1139-1156.
- 12- Jansson P.E. 1998. Simulation model for soil water and heat conditions. Description of the SOIL model. Division of Agricultural Hydrotechnics Communications 98. Department of Soil Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, 81pp.
- 13- Jansson P.E., and Moon D. 2001. A Coupled model of water, heat and mass transfer using object orientation to improve flexibility and functionality. *Environmental Modelling & Software*, 16:37-46.
- 14- Jansson P.E., and Karlberg L. 2004. Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere system. Dept. of Civil and Environmental Engineering Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden.
- 15- Jansson C., Almkvist E., and Jansson P.E. 2006. Heat balance of an asphalt surface: observations and physically-based simulations. *Meteorological Applications*, 13:203-21.
- 16- Jansson P.E. 2012. Eneregy balance Tutorial of COUP model. KTH University, Stockholm. <ftp://www.lwr.kth.se/CoupModel/Tutorials/Ebal.pdf>
- 17- Juston J. 2010. Water and Carbon Balance Modeling: Methods of Uncertainty Analysis. Licentiate Thesis in Land and Water Resources Engineering. KTH university, Stockholm, Sweden.
- 18- Kersten M.S. 1949. Laboratory research for the determination of the thermal properties of soils. ACFEL Tech. Rep. 23. University of Minnesota, Minneapolis.
- 19- Mellander P.E., Laudon H., and Bishop K. 2005. Modelling variability of snow depth sand soil temperatures in Scotspinestands. *Agriculture and Forest Meteorology*, 133:109-118.
- 20- Milly P.C.D. 1984. A simulation analysis of thermal effects on evaporation from Soil. *Water Resources Research*, 20:1087-1099.
- 21- Mualem Y. 1976. A new model predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12:513-522.
- 22- Nagare R.M. 2011. Coupled heat and water transfer in frozen organic soils. A P.h.D Thesis at University of Western Ontario, Canada.
- 23- Oijn M., Cameron D.R., Butterbach-Bahl K., Farahbakhshzad N., Jansson P.E., Kiese R., Rahn K.H., Werner C., and Yeluripati J.B. 2011. A Bayesian Framework for Model Calibration, Comparison and Analysis: Application to Four Models for the Biogeochemistry of a Norway Spruce Forest: *Agriculture and Forest Meteorology*, 151:1605-1621.
- 24- Passerat S.A., Bruckler L., Thony J.S., and Vauclin M. 1989. Numerical modeling of coupled heat and water

- flows during drying in a stratified bare soil--comparison with field observations, *Journal of Hydrology*, 105:109-138.
- 25- Philip J.R., de Vries D.A. 1957. Moisture movement in porous materials under temperature gradients, *Eos Trans. AGU*, 38:222-232.
- 26- Richards L.A. 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics*, 1:318-333
- 27- Schelde K., Thomsen A., Heidmann T., Schjønning P., Jansson P.E. 1998. Diurnal fluctuations of water and heat flows in a bare soil. *Water Resources Research*, 34:2919-2929.
- 28- Sihong W.U. 2011. Impact of cold climate on boreal ecosystem processes: exploring data and model uncertainties. PhD thesis at KTH university, Stockholm, Sweden.
- 29- Sophocleous M. 1979. Analysis of water and heat flow in unsaturated-saturated porous media, *Water Resources Research*, 15:1195-1206.
- 30- Stahli M., and Jansson P.E. 1998. Test of two SVAT snow sub models during different winter conditions. *Agriculture and Forest Meteorology*, 92:29-41.
- 31- Stedinger J.R., Vogel R.M., Lee S.U., and Batchelder R. 2008. Appraisal of the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) method, *Water Resour. Res.*, 44, 1-17
- 32- 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
- 33- Vrugt J.A. 2004. Towards improved treatment of parameter uncertainty in hydrologic modeling. Thesis of Amsterdam, The Netherlands, ISBN: 90-76894-46-9.
- 34- Wallach D., Makowski D., and Jones J. 2006. Working with dynamic crop models. Evaluation, Analysis, Parameterization and applications. Elsevier, Amsterdam.
- 35- Xiaoli J., Xu C., Zhang Q., and Singh V.P. 2010. Parameter and modeling uncertainty simulated by GLUE and a formal Bayesian method for a conceptual hydrological model. *Journal of Hydrology* , 383:147-155.



Calibration and Uncertainty Analysis of COUP Model for Simulation of Soil Temperature at Hamedan Synoptic Station*

Y. Khoshkhoo^{1*} - P. Irannejad² - A. Khalili³ - H. Rahimi⁴ - A. Liaghat⁵ - P. Erik Jansson³

Received:27-11-2012

Accepted:29-09-2013

Abstract

In this research calibration and uncertainty analysis of COUP model with focus on soil temperature simulation for 3-hours time scale have been performed for Hamedan synoptic station. The Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) was used for this object. In order to simulate the soil temperature, 22 parameters were chosen and by using the Monte Carlo stochastic sampling method from the uncertainty space of the parameters, 25000 scenarios were produced and model simulations were implemented. For separate behavioral and non-behavioral simulations, 3 criteria including Nash-Sutcliff, Mean Bias Error, and Root Mean Square Error were considered and acceptable thresholds for each criterion were defined. With applying the acceptable thresholds, 253 behavioral simulations were detected and used for calibration and uncertainty analysis of the model. Based on posterior parameter distributions some parameters were recognized as sensitive parameters. The median of behavioral simulations was considered for model calibration and the uncertainty analysis of the model was performed based on 90% confidence levels of behavioral simulation errors. The results showed that calibration of model has considerably improved the performance of the model in comparison to default parameter values. In addition, the uncertainty analysis showed that the uncertainty of parameters has been considerably decreased at most cases with application of GLUE method. Other differences between simulated and observed values were attributed to other sources of model uncertainty.

Keywords: COUP model, Calibration, Uncertainty analysis, GLUE method, Hamedan

1,3,4,5- PhD Student and Professors, Irrigation and Reclamation Engineering Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, Respectively

(* - Corresponding Author Email: younes.khoshkhoo@gmail.com)

2- Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

6- Professor, Land and Water Resources Engineering, KTH University, Stockholm, Sweden