نشریه هواشناسی کشاورزی
جلد ۱، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۲، ص.۲۰- ۱۱

Journal of Agricultural Meteorology
Vol. 1, No. 2, Autumn & Winter. 2013, p. 11-20

ارزیابی مدل COUP برای شبیه‌سازی عمق نفوذ یخبندان خاک در ایستگاه سینوپتیک بیجار

یونس خوشخو[۱*]، پرویز ایران‌نژاد[۲]، علی خلیلی[۳]، حسن رحیمی[۳]، عبدالمجید لیاقت[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۶/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۸

چکیده

این تحقیق با هدف ارزیابی مدل COUP برای شبیه‌سازی عمق نفوذ یخبندان خاک در ایستگاه سینوپتیک بیجار به انجام رسیده است. ابتدا با مبنا قرار دادن مقدار پیش‌فرض پارامترها مدل اجرا شد. سپس ۳۰ پارامتر مدل که ارتباط نزدیکی با عمق نفوذ یخبندان خاک داشتند انتخاب شدند و با به‌کارگیری روش برآورد عدم قطعیت درست نمایی تعمیم یافته (GLUE)، مدل مورد واسنجی قرار گرفت و شبیه‌سازی‌های آن برای دو حالت قبل و بعد از واسنجی مورد مقایسه قرار گرفتند. بازه‌های زمانی ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۹ به ترتیب برای انجام واسنجی و اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شدند. با مقایسه شبیه‌سازی‌های مدل با داده‌های اندازه‌گیری‌شده برای دمای خاک در عمق‌های ۲۰ و ۵۰ سانتی‌متری از سطح خاک و عمق نفوذ یخبندان خاک برای دو حالت قبل و بعد از واسنجی مشاهده شد که عملکرد مدل پس از اعمال واسنجی به میزان قابل توجهی بهبود یافته است. نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل نشان داد که در بیشتر موارد تطابق قابل قبولی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده وجود داشته و مدل توانسته است روند تغییرات داده‌های مشاهداتی را دنبال کند. با این وجود، تفاوت‌هایی بین داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده وجود داشت، که بخشی از آنها به دخالت ندادن داده‌های رطوبت خاک در فرآیند واسنجی مدل و بخشی دیگر به وجود عدم قطعیت در ساختار مدل و معادلات حاکم بر آن نسبت داده شد.

واژه‌های کلیدی: عمق یخبندان خاک، مدل COUP، روش GLUE، ایستگاه بیجار

مقدمه

دمای خاک در هر لحظه و چگونگی تغییرات زمانی و مکانی آن یکی از مهم‌ترین عامل‌های اثرگذار بر جهت و شدت تغییرات فرایندهای فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و میکروبیولوژیکی خاک و تبادل جرم و انرژی بین خاک و جو است (هیلل، ۱۹۹۸). هنگامی که دمای خاک به پایین‌تر از نقطه یخبندان می‌رسد، آب موجود در آن شروع به یخزدن می‌کند که به این پدیده یخبندان خاک اطلاق می‌شود. آگاهی در مورد یخبندان خاک و تعیین عمق نفوذ آن از کاربردهای وسیعی در زمینه‌های مختلف مهندسی، هیدرولوژی، بیولوژی و کشاورزی برخوردار است. از دیدگاه مهندسی، خاکی که تحت تأثیر پدیده یخبندان قرار می‌گیرد افزایش حجم پیدا کرده و متورم می‌شود که این پدیده می‌تواند سبب جابه‌جایی ذرات خاک، نشست خاک، ایجاد شکاف در سازه‌ها و خسارت به آن‌ها و اعمال خساراتی به پی سدها، بندها، پل‌ها و سایر سازه‌های عمرانی شود. لذا لازم است عمق پی چنین سازه‌هایی در یک حد مناسب و پایین‌تر از عمق نفوذ یخبندان خاک قرار گیرد (دگائتانو و ویلکس، ۲۰۰۲). از دیدگاه هیدرولوژی پیش‌بینی دقیق میزان رواناب بهاره منوط به آگاهی در مورد وقوع یا عدم وقوع یخبندان و تعیین عمق آن است. وقوع پدیده یخبندان در خاک سبب بسته‌شدن فضاهای خالی و کاهش نفوذپذیری خاک، و در پی آن بالا رفتن پتانسیل وقوع

[۱] دانشجوی دکترای هواشناسی کشاورزی، گروه آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
(* نویسنده مسئول: yoones.khoshkhoo@gmail.com)
[۲] دانشیار گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران
[۳] استاد گروه آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

رواناب می‌شود (کری و همکاران، ۱۹۷۸). از دیدگاه کشاورزی و بیولوژی، رشد و گسترش عدسک‌های یخی و حرکت آب از لایه‌های پایین‌تر به سمت جبهه یخبندان می‌تواند سبب حرکت املاح موجود در لایه‌های پایین به سمت لایه‌های سطحی و در نتیجه شور شدن لایه‌های سطحی خاک شود. تجزیه مواد آلی توسط میکرو ارگانیسم‌های خاک نیز تابعی از دمای خاک است و در خاک‌های یخزده تجزیه مواد آلی عملاً به حد صفر می‌رسد. همچنین قابلیت زیست حشرات و لاروهای پنهان شده در خاک به‌طور چشمگیری در شرایط یخبندان خاک با محدودیت مواجه می‌شود. یخبندان خاک از عوامل متعددی از جمله دمای هوا، بارندگی، پوشش سطح خاک (برف و پوشش گیاهی)، رطوبت خاک، ویژگی‌های گرمایی خاک، و شرایط هیدرولوژیکی اثر می‌پذیرد (زوو و گیو، ۲۰۰۰). همچنین سهم شار گرمای ورودی به داخل خاک از کل تابش خالص رسیده به سطح خاک به دلیل اثر قابل توجه آن بر شرایط مرزی فوقانی، عامل مهمی بر شبیه‌سازی گرما و رطوبت به داخل خاک است. مدل‌های مختلف تجربی، نیمه‌تجربی و فیزیکی برای شبیه‌سازی عمق نفوذ یخبندان خاک ارائه شده‌اند که دقت مدل‌های فیزیکی که مبتنی بر شبیه‌سازی انتقال توأمان گرما و رطوبت در خاک هستند، از مدل‌های دیگر بیشتر است. مدل COUP یکی از پرکاربردترین مدل‌های فیزیکی برای شبیه‌سازی انتقال توأمان گرما و رطوبت در خاک است که در تحقیقات متعددی از جمله گوستافسون و همکاران (۲۰۰۴) برای مدل‌سازی ترازمندی گرما و رطوبت در خاک، ملاندر و همکاران (۲۰۰۵) برای مدل‌سازی برف و دمای خاک، خارپل و همکاران (۲۰۱۰) برای شبیه‌سازی فرایندهای گرما و رطوبت در خاک تحت شرایط مختلف پوشش برف و یخبندان خاک و سیهونگ (۲۰۱۱) برای مدل‌سازی دما و رطوبت تحت شرایط یخبندان خاک به‌کار گرفته شده است. در زمره تحقیقات داخلی نوروزولاشدی و همکاران (۱۳۹۱) کارایی مدل COUP در شبیه‌سازی دما و رطوبت خاک را در اقلیم کرج برای دو حالت خاک با پوشش گیاهی ذرت و خاک بدون پوشش مورد بررسی قرار دادند و دقت قابل قبول این مدل را به‌ویژه برای پیش‌بینی دمای خاک گزارش کردند و حصول به نتایج بهتر را منوط به انجام واسنجی بیشتر مدل به‌ویژه برای رطوبت خاک دانستند. در این تحقیق کارایی مدل COUP برای شبیه‌سازی دمای خاک در فصل زمستان و عمق نفوذ یخبندان خاک در ایستگاه سینوپتیک بیجار که یکی از سردترین نقاط ایران است، مورد ارزیابی قرار گرفته و دقت شبیه‌سازی‌های مدل در دو حالت قبل و بعد از واسنجی پارامترهای آن مقایسه شده است.

مواد و روش‌ها

داده‌ها

برای انجام این تحقیق ایستگاه سینوپتیک بیجار با ارتفاع ۱۸۸۳ متر از سطح دریا که در استان کردستان واقع شده است و هر ساله تحت تأثیر یخبندان خاک قرار می‌گیرد، انتخاب شده است. داده‌های هواشناسی این ایستگاه در مقیاس زمانی هر سه ساعت یک بار از سال ۱۹۹۲ تا سال ۲۰۰۹ از سازمان هواشناسی کشور تهیه شدند و متغیرهای دمای هوا، بارش، سرعت باد، رطوبت نسبی، شدت تابش، ابرناکی و دمای عمق‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری از سطح خاک در فصل زمستان استخراج شدند. عمق نفوذ یخبندان خاک با درون‌یابی خطی از داده‌های دمای خاک در عمق‌های فوق که سه نوبت در شبانه‌روز (ساعات ۳، ۹، و ۱۵ به‌وقت گرینویچ) به ثبت رسیده‌اند، استخراج شد. بازه زمانی ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۶ برای واسنجی مدل و بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۹ برای اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد. برای تعیین ویژگی‌های خاک، یک نیمرخ قائم خاک به عمق ۱ متر در نظر گرفته شد و نمونه‌هایی به دو صورت دست خورده و دست نخورده از لایه‌های ۵-۰، ۱۰-۵، ۲۰-۱۰، ۴۰-۲۰، ۶۰-۴۰، و ۱۰۰-۶۰ سانتی‌متری از سطح خاک تهیه و برخی ویژگی‌های خاک شامل درصد رس، سیلت و شن، چگالی ظاهری خاک، درصد ماده آلی، و تخلخل خاک برای این لایه‌ها اندازه‌گیری شد که این ویژگی‌ها برای لایه‌های مختلف در جدول ۱ منعکس شده‌اند.

جدول ۱- ویژگی‌های خاک در لایه‌های مختلف در ایستگاه سینوپتیک بیجار

عمق خاک (سانتی‌متر)	درصد ماسه	درصد سیلت	بافت خاک	درصد رس	چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	تخلخل خاک (درصد)	ماده آلی (درصد)
۰-۵	۴۰	۳۶/۶	لومی	۲۳/۴	۱/۱۲	۵۴/۷۴	۰/۶۹
۵-۱۰	۴۴	۲۸/۶	لوم رسی	۲۷/۴	۱/۲۲	۵۳/۷۴	۰/۳۶
۱۰-۲۰	۴۴	۲۴/۶	لوم رسی ماسه‌ای	۳۱/۴	۱/۳۵	۴۹/۰۶	۰/۳۶
۲۰-۴۰	۳۶	۳۲/۴	لوم رسی	۳۱/۶	۱/۱۹	۵۴/۹۱	۰/۳۴
۴۰-۶۰	۲۸	۳۴/۴	لوم رسی	۳۷/۶	۱/۳	۵۰/۹۴	۰/۳۴
۶۰-۱۰۰	-	-	سنگ بستر	-	-	-	-

ساختار مدل و آماده‌سازی آن

مدل COUP نسخه به‌روز شده و پیشرفته مدل SOIL است که توسط یانسن و کارلبرگ (۲۰۰۱) با هدف برآورد شارهای قائم گرما و رطوبت در سامانه خاک - برف - گیاه - جو طراحی شده است. دو معادله دیفرانسیلی جفت‌شده برای شارهای گرما و رطوبت در خاک، هسته اصلی مدل را تشکیل می‌دهند که در آن‌ها این شارها تابع گرادیان‌های دما و پتانسیل رطوبت در خاک است. در این مدل معادله‌های حاکم به طور عددی صریح برای یک نیمرخ چند لایه‌ای در راستای قائم حل می‌شوند. دمای هوا و بارش مهم‌ترین متغیرهای هواشناسی مورد نیاز مدل هستند و رطوبت هوا، سرعت باد و ابرناکی نیز به دلیل اثر بر میزان تبخیر در درجه بعدی اهمیت قرار دارند. برای محاسبه شارهای گرما و رطوبت در مدل COUP برآورد برخی ویژگی‌های خاک نظیر منحنی مشخصه رطوبتی خاک، ضریب هدایت هیدرولیکی خاک در حالت‌های اشباع و غیر اشباع، ظرفیت گرمایی خاک و ضریب هدایت گرمایی خاک اهمیت زیادی دارند. با توجه به دشواری‌هایی که در اندازه‌گیری مستقیم این ویژگی‌ها وجود دارد به طور معمول این ویژگی‌ها با به‌کارگیری برخی روابط مبتنی بر پارامترهایی نظیر بافت خاک و چگالی ظاهری خاک که اندازه‌گیری آنها آسان‌تر است، برآورد می‌شوند. در پژوهش حاضر برای انجام شبیه‌سازی‌ها یک نیمرخ قائم خاک به ضخامت ۲۵ متر در نظر گرفته شد و این نیمرخ به ۲۰ لایه، که ضخامت لایه‌ها با افزایش عمق به‌تدریج افزایش می‌یابد، تقسیم شد.

واسنجی مدل

شبیه‌سازی دمای خاک در مدل COUP مبتنی بر شبیه‌سازی انتقال توأمان گرما و رطوبت در خاک است که مستلزم برآورد فرآیندهای متعددی از جمله تبخیر از سطح خاک، مدل‌سازی برف و برآورد ویژگی‌های گرمایی و هیدرولیکی خاک است. مدل‌سازی چنین فرآیندهایی مستلزم برآورد ضرائب تجربی متعدد، که به آن‌ها پارامترهای مدل گفته می‌شود، است. در مدل COUP به هر پارامتر یک مقدار پیش‌فرض که به نوعی معرف شرایط متوسط آن پارامتر است، اختصاص داده شده است. در این پژوهش ابتدا شبیه‌سازی‌های مدل بر اساس مقادیر پیش‌فرض پارامترها انجام شدند سپس برای دستیابی به شبیه‌سازی‌های دقیق‌تر مدل مورد واسنجی قرار گرفت. واسنجی مدل به فرآیند تعدیل پارامترهای مدل به گونه‌ای که خروجی‌های آن بیشترین تطابق را با داده‌های مشاهداتی داشته باشند، اطلاق می‌شود (جستن، ۲۰۱۰). در این مقاله از روش برآورد عدم قطعیت درست‌نمایی تعمیم یافته (GLUE) برای واسنجی مدل COUP استفاده شده است. این روش که توسط بیون و بینلی (۱۹۹۲) ارائه شده است، مبتنی بر

نمونه‌گیری تصادفی به‌روش مونت‌کارلو از فضای عدم قطعیت پارامترها است و بر پایه مفهوم همپایانی (Equifinality) بنا گذاشته شده است. بر این اساس، با توجه به برهمکنش‌های پیچیده بین پارامترهای مدل، مجموعه‌های مختلفی از اندازه پارامترها می‌توانند منجر به واکنش‌های مشابهی توسط مدل و در نتیجه خروجی مشابهی شود. تعریف یک توزیع پیشین برای پارامترهای مدل، تولید بردارهای مختلف از اندازه پارامترها در فضای عدم قطعیتشان به روش مونت کارلو، انجام شبیه‌سازی‌ها بر اساس سناریوهای تولید شده از ترکیب پارامترها، تعریف یک یا چند آماره برای سنجش عملکرد مدل و تعیین آستانه‌های قابل پذیرش آماره‌ها برای جداسازی شبیه‌سازی‌های کارآمد و ناکارآمد گام‌های اصلی در روش GLUE را تشکیل می‌دهند (بلاسونه و همکاران، ۲۰۰۸؛ استدینگر و همکاران، ۲۰۰۸). منظور از شبیه‌سازی‌های کارآمد آن دسته از شبیه‌سازی‌ها هستند که اندازه آماره‌ها در مورد آن‌ها قابل پذیرش تشخیص داده شود. واسنجی مدل با کنار گذاشتن شبیه‌سازی‌های ناکارآمد و مبنا قرار دادن شبیه‌سازی‌های کارآمد به انجام می‌رسد. در این تحقیق توزیع یکنواخت به‌عنوان توزیع پیشین پارامترها انتخاب شد و تعداد ۲۵۰۰۰ سناریو از فضای عدم قطعیت ۳۰ پارامتر که انتظار می‌رفت بیشترین تأثیر را بر شبیه‌سازی دمای خاک و عمق نفوذ یخبندان دارند، تولید شدند. جدول ۲ فهرست پارامترهای انتخاب شده همراه با دامنه عدم قطعیت و فرآیند مرتبط‌شان را نشان می‌دهد. یکی از آماره‌های مفید که در تحقیقات متعددی برای جداسازی شبیه‌سازی‌های کارآمد و ناکارآمد از آن استفاده شده است آماره کارآیی نش-ساتکلیف (Reff) است که از معادله ۱ قابل محاسبه است.

$$R_{eff} = 1 - \frac{\sigma^2_{\text{Residuals}}}{\sigma^2_{\text{Observations}}} \qquad (1)$$

که در آن صورت کسر واریانس مقادیر خطا و مخرج آن واریانس داده‌های مشاهداتی است. این آماره در بهترین حالت خود که واریانس خطا صفر باشد، مقدار ۱ را به خود اختصاص می‌دهد. در این تحقیق علاوه بر این آماره از میانگین اریبی خطا (MBE) و ضریب تبیین (R^2) نیز استفاده شده است. جداسازی شبیه‌سازی‌های کارآمد و ناکارآمد بر اساس تعریف آستانه‌هایی از هر کدام از این آماره‌ها به‌عنوان آستانه‌های قابل پذیرش صورت گرفت. برای آماره MBE، دامنه ۱- الی ۱+ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان آستانه قابل پذیرش در عمق‌های مختلف در نظر گرفته شد. برای تعریف آستانه‌های قابل پذیرش آماره‌های R^2 و Reff ابتدا توزیع احتمال تجمعی این آماره‌ها برای ۲۵۰۰۰ شبیه‌سازی انجام‌شده برای هر کدام از عمق‌ها به‌تفکیک تعیین شد. سپس برای هر عمق، مقداری از آماره که متناظر با احتمال تجمعی۹۰٪ بود استخراج و به‌عنوان حداقل اندازه قابل پذیرش آن آماره در آن عمق در نظر گرفته شد. این فرآیند برای کلیه عمق‌ها (۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر) انجام شد و برای هر عمق یک آستانه قابل پذیرش از هر کدام از این آماره‌ها که در واقع کمترین مقدار قابل پذیرش آماره بود، شناسایی شد. با اعمال آستانه‌های قابل پذیرش سه آماره فوق برای کلیه عمق‌ها، شبیه‌سازی‌هایی که مقدار این آماره‌ها برای کل عمق‌های خاک در محدوده آستانه قابل پذیرش آن‌ها قرار گرفته بود، به‌عنوان شبیه‌سازی‌های کارآمد شناخته شدند.

نظر به اینکه مفهوم همپایانی در روش GLUE به معنای هم‌رتبه قلمداد کردن کلیه شبیه‌سازی‌های کارآمد است و این شبیه‌سازی‌ها از ترکیب‌های مختلفی از اندازه پارامترها حاصل آمده‌اند، در این روش مقدار مشخصی از پارامترها به‌عنوان مقدار واسنجی‌شده تعیین نمی‌شود و به‌طور معمول پس از اجرای کل شبیه‌سازی‌های کارآمد با هم، میانه آن‌ها استخراج و مبنای انجام واسنجی مدل قرار می‌گیرد. در این تحقیق نیز از این رویکرد بهره گرفته شده است. برای اعتبارسنجی مدل نیز ابتدا مدل بر اساس مجموعه پارامترهای متناظر با شبیه‌سازی‌های کارآمد اجرا شد. سپس میانه شبیه‌سازی‌های حاصله به‌عنوان خروجی نهایی مدل در نظر گرفته شد و با داده‌های مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفت.

جدول ۲- پارامترهای انتخاب‌شده برای انجام واسنجی مدل همراه دامنه عدم قطعیت آن‌ها

توصیف پارامتر	دامنه عدم قطعیت		مقدار پیش فرض	نام پارامتر	فرایند مربوط
	کران بالا	کران پایین			
مقدار آلبدوی خاک خشک	۳۵	۲۰	۳۰	AlbedoDry	ویژگی‌های تابش
مقدار آلبدوی برف	۵۰	۳۰	۴۰	AlbSnowMin	ویژگی‌های تابش
مؤثر در محاسبه شرط مرزی پایین گرمای خاک	۱۴	۹	۱۰	TempAirMean	شرایط هواشناسی
تعدیل کننده پتانسیل رطوبت در لایه سطحی	۲	۰	۱	EquilAdjustPsi	تبخیر از سطح خاک
مؤثر در محاسبه فشار بخار لایه سطحی	-۱	-۳	-۲	MaxSurfDeficit	تبخیر از سطح خاک
مؤثر در محاسبه فشار بخار لایه سطحی	۱/۵	۰/۵	۱	MaxSurfExcess	تبخیر از سطح خاک
حد بالای مقاومت آئرودینامیکی در جو آرام	۰/۰۰۵	۰/۵e -۴	۰/۰۰۱	WindLessExchangeSoil	تبخیر از سطح خاک
مؤثر در محاسبه ضریب هدایت گرمایی خاک یخ‌نزده	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱۴۴	ClayFrozenC1	ویژگی‌های گرمایی خاک
تصحیح‌کننده هدایت گرمایی لایه سطحی خاک یخزده	۰/۹	۰/۳	۰/۹	CFrozenMaxDamp	ویژگی‌های گرمایی خاک
مؤثر در محاسبه ضریب هدایت گرمایی خاک یخ‌نزده	۰/۲	۰/۱	۰/۱۳	Clay UnFrozenC1	ویژگی‌های گرمایی خاک
تصحیح کننده هدایت گرمایی لایه سطحی خاک یخزده	۰/۳	۰/۱	۰/۲	CFrozenSurfCorr	ویژگی‌های گرمایی خاک
مؤثر در محاسبه ضریب هدایت گرمایی خاک یخزده	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳۶	ClayFrozenC3	ویژگی‌های گرمایی خاک
مؤثر در محاسبه انتقال گرما به‌صورت همرفت	۲	-۴	-۲	TempDiffPrec_Air	شار گرما در خاک
مؤثر در پخش بخار در خاک	۱	۰/۳	۰/۶۶	DVapTortuosity	جریان بخار در خاک
مؤثر در مدل‌سازی برف به‌روش تجربی	۴	-۱	۲	OnlyRainPrecTemp	مدل‌سازی برف
مؤثر در مدل‌سازی برف به‌روش تجربی	۱	-۲	۰	OnlySnowPrecTemp	مدل‌سازی برف
مؤثر در مدل‌سازی برف به‌روش تجربی	۱۵۰	۵۰	۱۰۰	DensityOfNewSnow	مدل‌سازی برف
مؤثر در مدل‌سازی برف به‌روش تجربی	۱۰	0	۵	AgeUpdatePrec	مدل‌سازی برف
مؤثر در مدل‌سازی برف به‌روش تجربی	۰/۳	۰	۰/۱	MeltCoefReFreeze	مدل‌سازی برف
مؤثر در مدل‌سازی برف به‌روش تجربی	۱۰	۱	۳	ZeroTemp_WaterLimit	مدل‌سازی برف
مؤثر در مدل‌سازی برف به‌روش تجربی	۵/۱e-۶	۰/۵e -۷	۵/۱e -۷	MeltCoefGlobRad	مدل‌سازی برف
ضریب هدایت گرمایی برف	۰/۱e-۶	۰/۱e -۷	۲/۸۶e-۶	SThermalCondCoef	مدل‌سازی برف
مؤثر در مدل‌سازی برف به‌روش تجربی	۲	۰	۰/۵	DensityCoefMass	مدل‌سازی برف
مؤثر در مدل‌سازی برف به‌روش تجربی	۴	۱	۲	MeltCoefAirTemp	مدل‌سازی برف
مؤثر در تابع نزول نقطه انجماد	۱۳	۷	۱۰	FreezepointF0	یخبندان خاک
مؤثر در محاسبه مقدار آب یخ‌نزده در خاک یخزده	۱	۰/۱	۰/۵	FreezepointFWi	یخبندان خاک
مؤثر در محاسبه هدایت هیدرولیکی خاک در جریان آهسته	۱۰	۰	۴	LowFlowCondImped	یخبندان خاک
مؤثر در محاسبه هدایت هیدرولیکی خاک در جریان سریع	۲۰	۰/۱	۵	HighFlowDampC	یخبندان خاک
مؤثر در محاسبه ضریب هدایت هیدرولیکی غیر اشباع	۰/۸	۰/۲	۰/۵	Sensivity	هیدرولیک خاک
کمینه مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی غیر اشباع	۰/۰۰۱	۰/۱e -۴	۰/۱e -۴	MinimumCondValue	هیدرولیک خاک

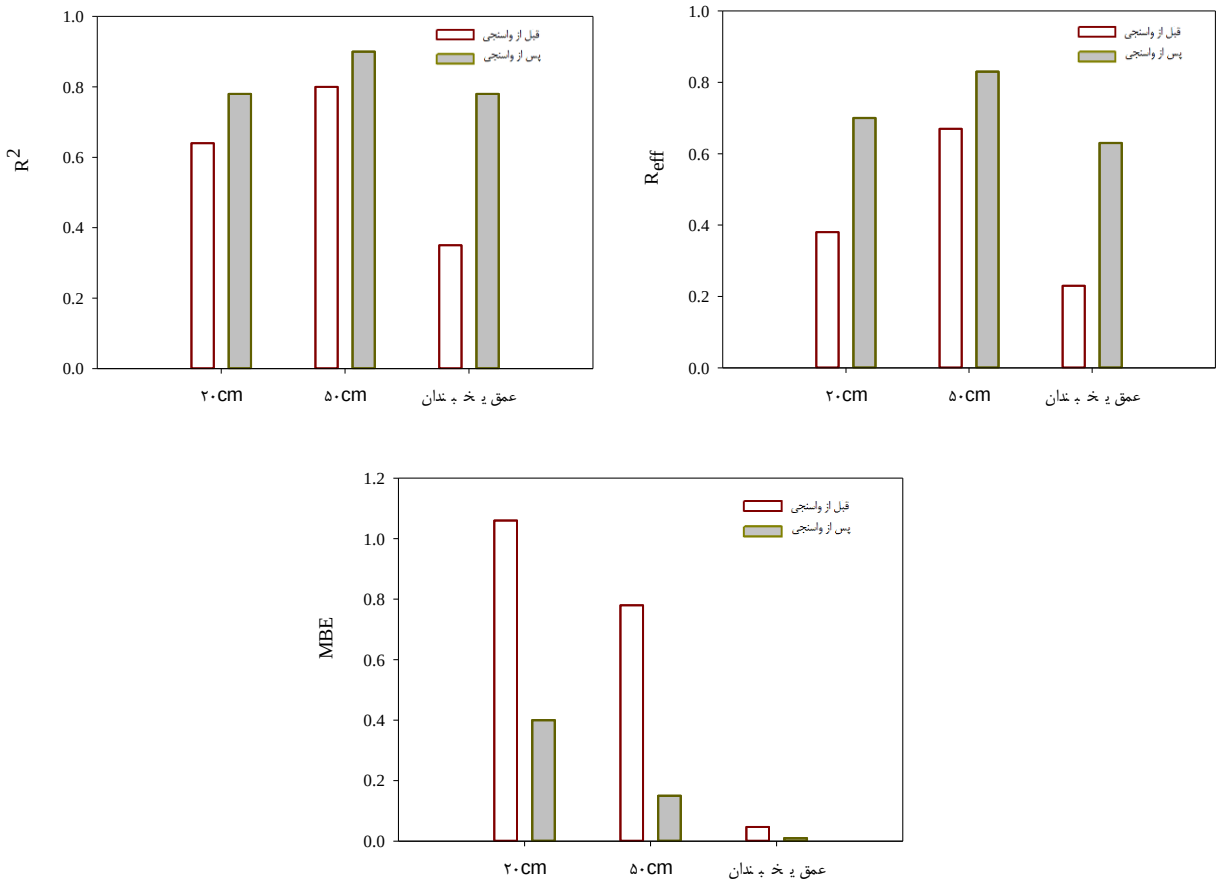
نتایج و بحث

اجرای مدل با به‌کارگیری ۲۵۰۰۰ سناریوی تولید شده از ترکیب اندازه‌های ۳۰ پارامتر منتخب منجر به حصول شبیه‌سازی‌های متفاوتی شد. با مقایسه دمای خاک شبیه‌سازی‌شده توسط هر کدام از این شبیه‌سازی‌ها با دماهای خاک اندازه‌گیری‌شده، دامنه‌ای از تغییرات برای هر کدام از آماره‌ها در هر عمق به‌دست آمد. با تعریف آستانه‌هایی برای هر کدام از آماره‌های منتخب، از بین ۲۵۰۰۰ شبیه‌سازی انجام‌شده، تعداد ۱۸۰ شبیه‌سازی به عنوان شبیه‌سازی‌های کارآمد شناسایی شدند و مبنای انجام واسنجی مدل قرار گرفتند. در جدول ۳ دامنه تغییرات آماره‌های منتخب برای کل ۲۵۰۰۰ شبیه‌سازی انجام‌شده در عمق‌های مختلف همراه با آستانه قابل پذیرش آماره‌ها نشان داده شده است.

جدول ۳- دامنه تغییرات آماره‌های مختلف برای کل شبیه‌سازی‌ها و آستانه قابل پذیرش آنها در عمق‌های مختلف

عمق خاک (سانتی‌متر)	آماره R^2		آماره R_{eff}		آماره MBE	
	دامنه تغییرات کل	آستانه قابل پذیرش	دامنه تغییرات کل	آستانه قابل پذیرش	دامنه تغییرات کل	آستانه قابل پذیرش
۵	۰/۵ _ ۰/۷	۰/۶۵	۰/۱۷ _ ۰/۶۵	۰/۵۵	-۱/۲۸ _ +۲/۲۸	-۱ _ +۱
۱۰	۰/۴۹ _ ۰/۷۴	۰/۶۸	-۰/۰۸ _ ۰/۶۶	۰/۵۵	-۱/۵۶ _ +۲/۲۷	-۱ _ +۱
۲۰	۰/۴۱ _ ۰/۸۱	۰/۷۴	-۰/۵۴ _ ۰/۷۴	۰/۶	-۲/۰۳ _ +۲/۳۴	-۱ _ +۱
۳۰	۰/۳۱ _ ۰/۸۵	۰/۷۹	-۱/۰۹ _ ۰/۷۹	۰/۶۳	-۲/۳۲ _ +۲/۶۶	-۱ _ +۱
۵۰	۰/۲۱ _ ۰/۹۱	۰/۸۶	-۱/۱۸ _ ۰/۸۷	۰/۷	-۳/۴۲ _ +۲/۲۷	-۱ _ +۱
۱۰۰	۰/۱۷ _ ۰/۹۵	۰/۸۴	-۶/۶۸ _ ۰/۹۲	۰/۷	-۳/۵۸ _ +۲/۴۹	-۱ _ +۱

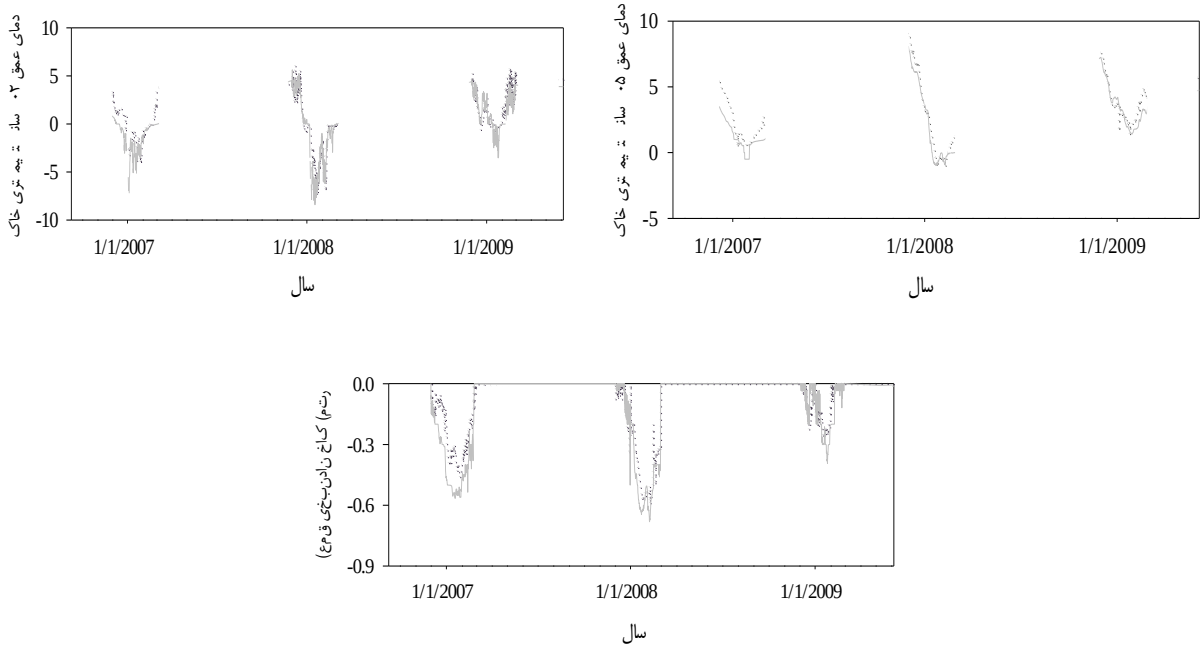
حد فوقانی آماره‌های R^2 و R_{eff} در بخش دامنه تغییرات کل در واقع معرف بهترین مقدار این آماره‌ها از بین کل ۲۵۰۰۰ شبیه‌سازی است. بر این اساس، برای ۱۸۰ شبیه‌سازی کارآمد مقدار دو آماره R^2 و R_{eff} بین آستانه قابل پذیرش آن‌ها تا حد فوقانی حاصله و برای آماره MBE برای کلیه عمق‌ها بین ۱- تا ۱+ بوده است. شبیه‌سازی‌هایی که اندازه آماره‌های آن‌ها خارج از دامنه فوق قرار گرفته باشد به‌عنوان شبیه‌سازی‌های ناکارآمد شناخته شده‌اند و در انجام واسنجی مدل دخالت داده نشده‌اند. با مبنا قرار دادن میانه ۱۸۰شبیه‌سازی کارآمد به‌عنوان معرف این شبیه‌سازی‌ها، امکان مقایسه شبیه‌سازی‌های واسنجی شده مدل با داده‌های مشاهداتی میسر شد. شکل ۱ اندازه آماره‌های مختلف برای دو حالت قبل از واسنجی (اجرای مدل با مقادیر پیش‌فرض پارامترها) و پس از واسنجی را برای دمای خاک در عمق‌های ۲۰ و ۵۰ سانتی‌متر و عمق نفوذ یخبندان نشان می‌دهد. عمق نفوذ یخبندان خاک با درون‌یابی خطی دمای عمق‌های مختلف خاک و استخراج دمای صفر درجه سانتی‌گراد حاصل آمده است. همان‌گونه که از شکل پیدا است در کلیه حالت‌ها آماره‌های به‌کار گرفته شده پس از واسنجی به‌طور چشم‌گیری بهبود یافته‌اند. این امر نشان‌دهنده اهمیت انجام واسنجی مدل برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر است.



شکل ۱- مقایسه مقدار آماره‌های R^2، R_{eff} و MBE در دو حالت قبل و بعد از واسنجی مدل برای دمای خاک در عمق‌های ۲۰ و ۵۰ سانتی‌متری و عمق نفوذ یخبندان خاک

برای اعتبارسنجی مدل، از داده‌های بازه ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۹ که در فرآیند واسنجی به‌کار گرفته نشده بودند، استفاده شد. برای این منظور با مبنا قرار دادن مجموعه پارامترهای متناظر با هر یک از شبیه‌سازی‌های کارآمد، مدل ۱۸۰ بار در بازه سه ساله فوق اجرا شد و مشابه با حالت واسنجی، میانه شبیه‌سازی‌های کارآمد استخراج و معرف آن‌ها در نظر گرفته شد. شکل ۲ میانه شبیه‌سازی‌های کارآمد و داده‌های اندازه‌گیری‌شده برای دمای خاک در فصل زمستان در عمق‌های ۲۰ و ۵۰ سانتی‌متری خاک و عمق نفوذ یخبندان خاک را نشان می‌دهد. همان‌گونه که پیدا است در حالت کلی تطابق قابل قبولی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده وجود دارد و تفاوت‌های مشاهده شده در حالت کلی چشمگیر نیست و در بیشتر موارد مدل توانسته است روند تغییرات داده‌های مشاهداتی را دنبال کند. برای مواردی که تفاوت‌هایی بین این دو وجود داشته است، در بیشتر موارد مدل دمای خاک و عمق یخبندان خاک را پایین‌تر از حد واقعی آن برآورد کرده است. در صورتی که از وجود خطاهای احتمالی در داده‌های ورودی مدل و داده‌های مشاهداتی صرف‌نظر شود، منشأ وجود تفاوت‌های بین داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده از یک سو به وجود عدم قطعیت در ساختار مدل و معادلات حاکم بر آن و از سوی دیگر به عدم واسنجی کامل پارامترهای مدل بر می‌گردد. اگرچه با مبنا قرار دادن داده‌های دمای خاک، واسنجی مدل سبب بهبود بارز عملکرد مدل نسبت به اجرای

آن با مقادیر پیش‌فرض پارامترها شد، اما واسنجی کامل مدل منوط به دخالت دادن توأمان داده‌های دمای خاک و رطوبت خاک است. زیرا به نظر می‌رسد که با در نظر گرفتن داده‌های دمای خاک به تنهایی، واسنجی برخی پارامترهای مرتبط با هیدرولیک خاک به‌خوبی انجام نشود. با توجه به نقش و اهمیت رطوبت خاک در انتقال گرما به داخل خاک، عدم واسنجی چنین پارامترهایی می‌تواند شبیه‌سازی رطوبت خاک و به‌تبع آن دقت شبیه‌سازی‌های دمای خاک را تحت تأثیر قرار دهد. درجه این تأثیر بستگی به میزان حساسیت مدل به پارامترهای مرتبط با رطوبت خاک دارد. با توجه به این‌که در انجام این تحقیق داده‌های رطوبت خاک موجود نبودند و در انجام واسنجی پارامترهای مدل دخالت داده نشدند، با فرض مطلوبیت کیفیت داده‌های مشاهداتی و داده‌های ورودی مدل، کل تفاوت‌های مشاهده شده بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده را نمی‌توان به عدم قطعیت در ساختار مدل و معادلات حاکم بر آن نسبت داد و بخشی از این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از عدم واسنجی کامل برخی پارامترهای مرتبط با رطوبت خاک باشد. لذا این امکان وجود دارد که با دخالت داده‌های رطوبت، نتایج بهتری از مدل به‌دست آید. بر این اساس، اظهار نظر در مورد این‌که چه میزان از خطا به عدم قطعیت در ساختار مدل و معادلات حاکم بر آن مربوط می‌شود، منوط به واسنجی کامل مدل و به حداقل رساندن عدم قطعیت مربوط به پارامترهای مدل است و با انجام آن این امکان فراهم می‌شود که با دید روشن‌تری نقاط ضعف و قوت مدل را بررسی کرده و فرآیندهایی که مدل در شبیه‌سازی آنها ضعف دارد را شناسایی و در جهت بهبود مدل‌سازی آنها گام برداشت.



شکل ۲- داده‌های شبیه‌سازی‌شده (خط پیوسته) و اندازه‌گیری‌شده (خط نقطه‌چین) برای دمای خاک در فصل زمستان در عمق‌های ۲۰ و ۵۰ سانتی‌متری و عمق نفوذ یخبندان خاک در بازه ۲۰۰۷ الی ۲۰۰۹

نتیجه‌گیری

به‌کارگیری روش برآورد عدم قطعیت تعمیم یافته (GLUE) برای واسنجی مدل COUP منجر به استخراج ۱۸۰ شبیه‌سازی کارآمد از بین ۲۵۰۰۰ شبیه‌سازی تولید شده از فضای عدم قطعیت ۳۰ پارامتر، که ارتباط نزدیکی با شبیه‌سازی دمای خاک در فصل زمستان و عمق نفوذ یخبندان خاک داشتند، گردید که میانه این شبیه‌سازی‌ها به‌عنوان خروجی واسنجی‌شده نهایی مدل در نظر گرفته شد.

مقایسه شبیه‌سازی‌های مدل در دو حالت قبل از واسنجی (اجرای مدل با مقادیر پیش فرض پارامترها) و بعد از واسنجی برای دمای خاک در عمق‌های ۲۰ و ۵۰ سانتی‌متری و عمق نفوذ یخبندان خاک حاکی از بهبود بارز عملکرد مدل در حالت پس از واسنجی بود. با این وجود، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی برای انجام واسنجی مدل علاوه بر دخالت دادن داده‌های دمای خاک از داده‌های رطوبت خاک نیز در صورت وجود استفاده شود و انتظار می‌رود با انجام این کار نتایج مطلوب‌تری به‌دست آید.

منابع

نوروزولاشدی، ر.، قهرمان، ن.، 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(۱): ۶۶-۵۵.

Beven, K. J., Binley, A. M. 1992. The Future of Distributed Models, Model Calibration and Uncertainty Prediction, Hydrol., Processes, 6(3): 279-298

Blasone, R. S., Vrugt, J. A., Madsen, H., Rosbjerg, D. R., Bruce A., Zyvoloski, G. A. 2008. Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) using adaptive Markov Chain Monte Carlo sampling. Advances in Water Resour., 31: 630-648.

Cary, J. W., Campbell, G. S., Papendick, R. I. 1978. Is the soil frozen or not? An algorithm using weather records. Water Resour. Res, 14(6): 1117-1122.

DeGaetano, A. T., Wilks, D. S. 2002. Extreme-value climatology of maximum soil freezing depths in contiguous United States. J. Cold Regions Eng., 16: 51-71.

Gustafsson, D., Lewan, E., Jansson, P. E. 2004. Modeling water and heat balance of the Boreal landscape-comparison of forest and arable land in Scandinavia. J. Appl. Meteorol., 43: 1750-1767.

Hillel, D. 1998. Introduction to Environmental Soil Physics, London. Elsevier Academic Press.

Jansson P. E., Karlberg, L. 2001. Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems. Dept. Of Land and Water Resource Engineering, Royal Inst. of Technology, Stockholm. 321 p.

Juston, J. 2010. Water and Carbon Balance Modeling. Methods of Uncertainty Analysis. Licentiate Thesis in Land and Water Resources Engineering. KTH University, Stockholm, Sweden.

Mellander, P. E., Laudon, H., Bishop, K . 2005. Modelling variability of snow depth sand soil temperatures in Scots pine stands. J. Agric. For. Meteorol, 133: 109-118

Sihong, Xu. 2011. Impact of cold climate on boreal ecosystem processes-exploring data and model uncertainties. Doctoral thesis in land and water resources engineering, KTH University, Stockholm, Sweden.

Stedinger, J. R., Vogel, R. M., Lee, S. U., Batchelder, R. 2008. Appraisal of the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) method, Water Resour. Res., 44:1-17.

Xarpell, L. G., Koivusalo, H., Laurén, A., Repo, T. 2010. Simulation of soil temperature and moisture under different snow and frost conditions with Coup model. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 163.

Zhou, Y., Guo, D. 2000. The zonal and regional conditions for development of frozen ground. Science Press of China, Beijing.

Journal of Agricultural Meteorology
Vol. 2, No. 1, Autumn & Winter. 2013, p. 11-20

نشریه هواشناسی کشاورزی
جلد ۲، شماره ۱، پاییز و زمستان ۱۳۹۲، ص. ۲۰- ۱۱

Evaluation of COUP Model for simulation of soil frost depth at Bijar synoptic station

Y. Khoshkhoo[1*], P. Irannejad[2], A. Khalili[1], H. Rahimi[1], A. Liaghat[1]

Received: 17 September 2013
Accepted: 27 February 2014

Abstract

The aim of this research was the evaluation of COUP Model for simulation of soil frost depth at Bijar synoptic station. The simulations were first carried out based on the default parameter values. Afterwards, 30 parameters that had a close relationship with soil frost depth were selected and calibration of the model was performed with adopting Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) method and simulations of the model for before and after calibration cases were compared. The periods of 1992-2006 and 2007-2009 were selected for model calibration and validation, respectively. On the basis of comparisons between model simulations and observations for soil temperatures at 20 and 50 cm depths and soil frost depth for before and after calibration, the results showed dramatically better performance after calibration compared with before that. The results of model validation showed a good correspondence between simulations and observations at more cases and the model simulations were able to follow observation fluctuations. However, some differences were available between simulations and observations. Some parts of differences are attributed to non-contribution of soil moisture data at calibration procedure and the other parts were attributed to uncertainties in model structure and its governing equations.

Keywords: Bijar station, COUP Model, GLUE method, Soil frost depth

[1] Irrigation and Reclamation Engineering Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran (*Corresponding author email address: yoones.khoshkhoo@gmail.com)
[2] Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran