



دانشگاه گورگان
فصلنامه علمی و پژوهشی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و پنجم، شماره سوم، ۱۳۹۷

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

DOI: 10.22069/jwsc.2018.14846.2989

ارزیابی دو روش بیلان انرژی در سطح خاک و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای جهت برآورد میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک

* یونس خوشخو

استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه کردستان

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۰/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱/۲۶

چکیده

سابقه و هدف: دمای سطح خاک نقشی کلیدی در تبادل جرم و انرژی بین سطح خاک و اتمسفر ایفاء می‌کند و پارامتر ورودی مهمی برای اجرای مدل‌های برآورد بیلان‌های گرما، رطوبت و کربن در سامانه خاک - گیاه - اتمسفر و مدل‌های شبیه‌سازی وضع هوا و اقلیم در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی است و تمامی مؤلفه‌های بیلان انرژی در سطح خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. علی‌رغم اهمیت زیاد و کاربرد قابل‌توجه دمای سطح خاک، اندازه‌گیری آن فقط در ایستگاه‌های سینوپتیک و به‌طور ناقص (فقط دمای حداقل شبانه‌روزی سطح خاک) انجام می‌شود و بنابراین لازم است این متغیر مهم توسط روش‌هایی مناسب مورد شبیه‌سازی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، از دو روش بیلان انرژی در سطح خاک و تصاویر ماهواره‌ای جهت برآورد میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک در ایستگاه هواشناسی کشاورزی سرارود کرمانشاه، که در آن داده‌های دمای حداکثر و دمای حداقل شبانه‌روزی سطح خاک به ثبت رسیده‌اند، در بازه زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۴ استفاده شد. برآورد میانگین دمای شبانه‌روزی سطح خاک بر اساس تصاویر ماهواره‌ای، با مدنظر قرار دادن تصاویر سنجنده MODIS تصویربرداری شده در چهار زمان مختلف شبانه‌روز شامل ۲۲:۳۰ شب، ۱:۳۰ شب، ۱۰:۳۰ صبح و ۱۳:۳۰ ظهر و با استفاده از نرم‌افزار MRT صورت گرفت و جهت اجرای مدل بیلان انرژی در سطح خاک، از داده‌های هواشناسی دمای هوا، بارش، سرعت باد، طول ساعات آفتابی و رطوبت نسبی در مقیاس روزانه همراه با برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک به‌عنوان ورودی‌های مدل استفاده شد و در ادامه کارایی این دو روش با به‌کارگیری چند شاخص سنجش خطا مورد ارزیابی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج حاصل از به‌کارگیری تصاویر سنجنده MODIS نشان داد که از بین حالت‌های ترکیبی ممکن از دماهای سطح خاک در ۴ زمان تصویربرداری مختلف توسط این سنجنده، محاسبه میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک بر اساس میانگین‌گیری کردن از دمای سطح خاک در سه زمان ۲۲:۳۰ شب، ۱:۳۰ شب و ۱۰:۳۰ صبح بیش‌ترین تطابق را با داده‌های مشاهداتی میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک دارد و مقدار خطای مطلق و ضریب تعیین در این روش جهت برآورد میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک به‌ترتیب ۲/۱ درجه سانتی‌گراد و ۰/۹۳ به‌دست آمد. با

* مسئول مکاتبه: y.khoshkho@uok.ac.ir

به‌کارگیری مدل بیلان انرژی در سطح خاک جهت برآورد میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک نیز مقدار خطای مطلق، $1/8$ درجه سانتی‌گراد و ضریب تعیین $0/96$ به‌دست آمد. نتایج حاصل از تحلیل سری‌های فصلی نشان داد که با به‌کارگیری مدل بیلان انرژی در سطح خاک و تصاویر ماهواره‌ای، بیش‌ترین تطابق بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی به‌ترتیب طی فصول تابستان و زمستان رخ می‌دهد.

نتیجه‌گیری: نتایج کلی این پژوهش بیان‌کننده دقت قابل‌قبول و مناسب هر دو روش به‌کار گرفته شده و توصیه روش بیلان انرژی در سطح خاک به‌دلیل دقت بالاتر آن است. بر این اساس این امکان وجود دارد که از روش کلی به‌کار گرفته شده در این پژوهش برای شبیه‌سازی دمای سطح خاک در مناطق مختلف استفاده کرد و از میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک برآورد شده برای کاربردهای مختلفی از جمله به‌عنوان یک متغیر ورودی در مدل‌های شبیه‌سازی دما و رطوبت در خاک استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: بیلان انرژی، دمای سطح خاک، سرارود کرمانشاه، سنجنده MODIS

مقدمه

سطح زمین که به‌طور پیوسته با اتمسفر در تماس است به‌عنوان یک لایه مرزی نقش مهمی در مبادله شارهای مختلف فیزیکی و بیولوژیکی مانند گرما، رطوبت و دی‌اکسیدکربن در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت ایفاء می‌نماید (۶ و ۲۱). شبیه‌سازی دقیق شارهای انرژی و رطوبت بین سطح زمین و اتمسفر از جنبه‌های مختلف هیدرولوژی، کشاورزی و هواشناسی دارای اهمیت است. این شارها که به‌طور پیوسته از طریق فرایندهای مختلف فیزیکی به اتمسفر وارد می‌شوند ضمن اثر گذاشتن بر برهمکنش‌هایی که بین چرخه‌های آب و انرژی در هیدروسفر، اتمسفر و بیوسفر اتفاق می‌افتند وضع هوا و اقلیم را نیز تحت‌تأثیر قرار می‌دهند (۳۱). در این راستا، دمای سطح خاک نقشی کلیدی و مهم در میزان تبادل جرم و انرژی بین سطح خاک و اتمسفر دارد. دمای سطح خاک همچنین یک پارامتر ورودی مهم و مورد نیاز برای اجرای مدل‌های برآورد بیلان‌های گرما، رطوبت و کربن در سامانه خاک- گیاه- اتمسفر و مدل‌های شبیه‌سازی عددی وضع هوا و اقلیم در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی و عاملی کلیدی در انجام مطالعات

مربوط به اثرات تغییر اقلیم است (۱۱ و ۲۴) و تمامی مؤلفه‌های بیلان انرژی در سطح خاک شامل شار گرمای محسوس، شار گرمای نهان و شار گرما به داخل خاک را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (۱). به‌عنوان نمونه، میزان شار گرمای محسوس از سطح خاک به اتمسفر تابعی از اختلاف دمای سطح خاک با دمای هواست. ارتباط قوی بین میزان شار بخار آب از سطح خاک به اتمسفر و میزان رطوبت سطح خاک با دمای سطح خاک نیز توسط برخی پژوهشگران گزارش شده است (۲۹). در برخی پژوهش‌ها نیز دمای سطح خاک به‌عنوان یک پارامتر مؤثر و کلیدی جهت پایش و ارزیابی شرایط خشکسالی و همچنین عاملی تعیین‌کننده در برآورد تبخیر و تعرق گیاهان مدنظر قرار گرفته است (۱۲ و ۲۸). در مطالعات متعددی بر اساس دمای سطح خاک استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای، دمای هوا با استفاده از مدل‌های رگرسیونی با دقت مناسب برآورد شده است (۵، ۱۴ و ۳۰). دمای سطح خاک به‌طور قابل‌توجهی از ویژگی‌های فیزیکی و دینامیکی سطح خاک، میزان رطوبت خاک و همچنین جریان‌های جرم و انرژی که به‌طور دائم در لایه مرزی بین سطح خاک و اتمسفر روی می‌دهند اثرپذیری

پوشش گیاهی و دمای هوا است (۱۸). روش‌های مبتنی بر سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای نیز که دمای سطح خاک را با بهره‌گیری از الگوریتم‌ها و نرم‌افزارهای خاص برآورد می‌کنند دارای مزایایی از جمله پایین بودن هزینه جمع‌آوری داده‌ها، امکان برداشت داده‌های بهنگام از تمام سطح منطقه و نیاز به نیروی انسانی کم و عملیات زمینی بسیار محدود و دارای معایبی از جمله قابل استفاده نبودن در شرایط ابرناکی هستند. در بین روش‌های مذکور، در این پژوهش از یک مدل فیزیکی مبتنی بر بیلان انرژی در سطح خاک و همچنین از روش سنجش از دور با بهره‌گیری از تصاویر سنجنده MODIS جهت برآورد میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک در یک ایستگاه تحقیقاتی استفاده شده است و دقت این دو روش مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

ایستگاه مورد مطالعه: در اکثر ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک ایران، فقط به اندازه‌گیری حداقل شبانه‌روزی دمای سطح خاک اکتفاء می‌شود و این مسأله نوعی محدودیت را در انجام مطالعات مربوط به دمای سطح خاک به‌وجود آورده است. برای انجام این پژوهش، ایستگاه هواشناسی کشاورزی سرارود کرمانشاه به طول جغرافیایی $17^{\circ} 47'$ شرقی، عرض جغرافیایی $20^{\circ} 34'$ شمالی و ارتفاع $1361/7$ متر از تراز سطح دریا انتخاب شد. دلیل انتخاب این ایستگاه وجود داده‌های اندازه‌گیری شده برای دماهای حداقل و حداکثر شبانه‌روزی سطح خاک بوده است که این امکان را فراهم می‌کند که با میانگین‌گیری کردن از این دو متغیر بتوان میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک را استخراج کرد. دوره آماری مورد مطالعه، سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ بوده است و برای این بازه، علاوه بر داده‌های دمای سطح خاک، داده‌های هواشناسی شامل

دارد (۱۹) و بنابراین در مقایسه با دمای هوا از تغییرپذیری بیشتری برخوردار است. به‌طورکلی میزان دمای سطح خاک توسط فرایندهای مختلفی از جمله میزان تابش خالص دریافتی، میزان انرژی گسیل شده با طول موج بلند از سطح خاک به جو، جریانات همرفتی و فرارفتی هوا، شار گرمای محسوس بین سطح خاک و آتمسفر، میزان تبخیر در سطح خاک و همچنین میزان شار گرما به داخل خاک کنترل می‌شود (۲۷).

علی‌رغم اهمیت و کاربرد قابل‌توجه دمای سطح خاک در مباحث مختلف کشاورزی، هیدرولوژی و علوم محیطی، اندازه‌گیری آن به‌طور بسیار محدود و ناقص انجام می‌شود و در پژوهش‌های متعددی سعی شده است که دمای سطح خاک مورد شبیه‌سازی قرار گیرد. به‌طورکلی روش‌های برآورد دمای سطح خاک را می‌توان در چهار دسته کلی شامل روش‌های فیزیکی مبتنی بر بیلان انرژی در سطح خاک، روش‌های تجربی، روش‌های فیزیکی-تجربی و روش‌های مبتنی بر تکنیک سنجش از دور جای داد (۹). در مدل‌های فیزیکی مثل SHAW (۴)، COUP (۱۰) و HYDRUS (۲۶) با در نظر گرفتن انتقال توأمان گرما و رطوبت در داخل خاک، دما و رطوبت خاک در سطح خاک و اعماق آن مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد. از مدل‌های فیزیکی در پژوهش‌های متعددی از جمله بلترامی و همکاران (۳)، کلیسل و همکاران (۱۷) و هرب و همکاران (۸) جهت شبیه‌سازی دمای سطح خاک استفاده شده است. روش‌های تجربی که غالباً مبتنی بر مدل‌های رگرسیونی هستند ارتباط بین دمای سطح خاک با سایر متغیرها را مدل‌سازی می‌کنند. این روش‌ها قابل تعمیم به سایر مناطق نیستند و نتایج حاصل از آن‌ها فقط برای یک مکان خاص معتبر است. در روش‌های فیزیکی-تجربی تمرکز اصلی بر ویژگی‌های گرمایی خاک،

که در آن، r_a مقاومت آئروپونامیکی در برابر انتقال گرما یا بخار آب بین سطح خاک و جو، e_{surf} فشار بخار در سطح خاک، T_a دمای هوا و e_a فشار واقعی بخار هوا است. ρ_a جرم مخصوص هوا، c_p ظرفیت گرمایی هوا، L_v گرمای نهان تبخیر و γ ثابت سایکرومتری نیز ضرایبی با مقادیر ثابت هستند. مهم‌ترین پارامترهای مهم و تعیین‌کننده در برآورد دقیق شار گرمای نهان تبخیر، مقدار فشار بخار در سطح خاک (e_{surf}) و مقاومت آئروپونامیکی (r_a) هستند که پارامتر اخیر در محاسبه شار گرمای محسوس نیز نقش مهمی ایفاء می‌کند. فشار بخار در سطح خاک از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$e_{surf} = e_s(T_s) e^{\left(\frac{\psi M_w g e_{corr}}{R(T_s + 273.15)}\right)} \quad (4)$$

که در آن، $e_s(T_s)$ فشار بخار اشباع در دمای سطح خاک، ψ میانگین پتانسیل رطوبت خاک در سطحی‌ترین لایه خاک، g ثابت گرانش، M_w وزن مولکولی آب و R ثابت گازها است. e_{corr} یک عامل تصحیح تجربی است که برای تعدیل اختلاف پتانسیل رطوبتی موجود بین مرکز سطحی‌ترین لایه خاک و سطح خاک منظور شده است و از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$e_{corr} = 10^{(-\delta_s \psi_g)} \quad (5)$$

که در آن، ψ_g پارامتری است که شیب پتانسیل رطوبت بین سطحی‌ترین لایه و سطح خاک را کنترل می‌کند. δ_s نیز مقدار آن می‌تواند بین دو پارامتر تجربی δ_{def} و δ_{excess} تغییر کند. مقاومت آئروپونامیکی (r_a) نیز که وابسته سرعت باد، زبری سطح و پایداری جو و تابعی از عدد ریچاردسون است از رابطه زیر قابل برآورد است:

دمای هوا، بارش، سرعت باد، ابرناکی، طول ساعات آفتابی و رطوبت نسبی در مقیاس روزانه برای این ایستگاه از اداره هواشناسی کشاورزی سرارود کرمانشاه تهیه شدند. از داده‌های هواشناسی مذکور به‌عنوان ورودی مدل بیان انرژی در سطح خاک استفاده شد و از داده‌های میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک نیز جهت اعتبارسنجی نتایج حاصل از به‌کارگیری هر دو روش بیان انرژی در سطح خاک و تصاویر ماهواره‌ای استفاده به‌عمل آمد.

مدل بیان انرژی در سطح خاک: مدل بیان انرژی در سطح خاک استفاده شده در این پژوهش مدل ارائه شده توسط یانسن و آلوناس (۱۹۹۷) است که در واقع یکی از زیرمدل‌های اصلی مدل CoupModel (۱۰) است و مبتنی بر تسهیم مقدار تابش خالص رسیده به سطح خاک (R_n) به مؤلفه‌های آن شامل شار گرمای نهان تبخیر ($L_v E_s$)، شار گرمای محسوس (H_s) و شار گرما به داخل خاک (q_h) است:

$$R_n = L_v E_s + H_s + q_h \quad (1)$$

برآورد سهم هر یک از این شارها مبتنی بر تغییر پی‌درپی دمای سطح خاک (T_s) با روش تکرار تا به تعادل رسیدن معادله ترازمندی انرژی سطح صورت می‌گیرد. شارهای گرمای محسوس (H_s) و گرمای نهان تبخیر ($L_v E_s$) با به‌کارگیری روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$H_s = \rho_a c_p \frac{(T_s - T_a)}{r_a} \quad (2)$$

$$L_v E_s = \frac{\rho_a c_p (e_{surf} - e_a)}{\gamma r_a} \quad (3)$$

خاک، C ظرفیت گرمایی، L گرمای نهان، Z عمق و نمایه‌های h ، v و w به ترتیب معرف گرما، بخار و آب مایع می‌باشند. عبارت اول در سمت راست معادله بیانگر شار گرما به صورت هدایت و دو عبارت بعدی معرف شار گرما به صورت همرفت می‌باشند. ضریب هدایت گرمایی خاک نیز از رابطه زیر محاسبه شد (۱۳):

$$k_h = 0.143 \left(a_1 \log \left(\frac{\theta}{\rho_s} \right) + a_2 \right) 10^{a_3 p_s} \quad (11)$$

که در آن، a_1 ، a_2 ، a_3 ، b_1 ، b_2 ، b_3 ، b_4 ضرایب تجربی معادله، θ میزان رطوبت خاک و ρ_s چگالی ظاهری خاک خشک است. شار بخار آب در خاک و جریان رطوبت در خاک نیز از روابط زیر قابل محاسبه‌اند (۲۵):

$$q_v = -d_{vb} f_a D_o(T) \frac{dC_v}{dz} \quad (12)$$

$$q_w = -k_w \left(\frac{d\psi}{dz} - 1 \right) + q_v \quad (13)$$

که در آن، D_o ضریب پخش بخار آب در هوا در یک دمای معین، f_a درصد منافذ خاک اشغال شده توسط هوا، C_v غلظت بخار آب و d_{vb} یک پارامتر تجربی برای به حساب آوردن نسبت طول مسیر واقعی حرکت بخار آب از منافذ به مسیر مستقیم آن است (۲۲). q_w شار رطوبت، k_w ضریب هدایت هیدرولیکی غیراشباع، ψ مکش ماتریک خاک، Z عمق و q_v جریان به صورت بخار است. بر این اساس، شار رطوبت در خاک از مجموع شارهای به صورت مایع و بخار در خاک حاصل می‌آید. محاسبه ضریب هدایت هیدرولیکی غیراشباع نیز از رابطه زیر انجام می‌شود (۲۰):

$$r_a = \frac{1}{k^2 u} \ln \left(\frac{z_{ref} - d}{z_{0M}} \right) \ln \left(\frac{z_{ref} - d}{z_{0H}} \right) f(R_{ib}) \quad (6)$$

که در آن، u سرعت باد در ارتفاع مرجع z_{ref} ، d ارتفاع جابجایی صفر، R_{ib} عدد ریچاردسون، k ثابت وانکارمن و z_{0M} و z_{0H} طول‌های زبری سطح برای تکانه و گرما هستند برای سطوح مختلف (خاک لخت، برف، پوشش‌های گیاهی و ...) مقادیر مختلفی دارد و z_{0H} نیز از رابطه زیر قابل استخراج است که در آن kB^{-1} پارامتری تجربی است:

$$kB^{-1} = \ln \left(\frac{z_{0M}}{z_{0H}} \right) \quad (7)$$

که در آن، $f(R_{ib})$ که تابعی برای تعیین وضعیت پایداری جو است از رابطه زیر تعیین می‌شود که در آن $a_{ri,1}$ ، $b_{ri,1}$ ، $a_{ri,2}$ و $b_{ri,2}$ پارامترهای تجربی هستند:

$$f(R_{ib}) = \begin{cases} (1 + a_{ri,1} R_{ib})^{b_{ri,1}}, & R_{ib} > 0 \\ (1 - a_{ri,2} R_{ib})^{b_{ri,2}}, & R_{ib} \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

عدد ریچاردسون نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R_{ib} = \frac{g}{(T_a + 273.15)} \frac{(T_a - T_s)}{u^2} (z_{ref} - d) \quad (9)$$

پس از محاسبه شار گرمای محسوس و شار گرمای نهان، شار گرما به داخل خاک که مجموع شارهای به دو صورت هدایت و همرفت است از رابطه زیر به دست می‌آید (۲):

$$q_h = -k_h \frac{\partial T}{\partial z} + C_w T q_w + L_v q_v \quad (10)$$

که در آن، q شار، k ضریب هدایت گرمایی، T دمای

استفاده از تصاویر ماهواره‌ای جهت برآورد دمای سطح خاک: برای برآورد دمای سطح خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، از تصاویر روزانه سنجنده MODIS با توان تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر و توان تفکیک زمانی روزانه که بر روی دو ماهواره Aqua و Terra نصب شده است استفاده به عمل آمد. زمان عبور ماهواره Terra از روی ایستگاه مورد مطالعه حدود ۱۰:۳۰ صبح و ۲۲:۳۰ شب و زمان عبور ماهواره Aqua حدود ساعت ۱:۳۰ شب و ۱۳:۳۰ بعد از ظهر است. این تصاویر برای سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ (در مجموع ۲۹۲۰ تصویر) تهیه شدند و پس از حذف روزهای ابری، در مجموع تعداد ۱۲۴۰ تصویر (۱۷۰ روز بدون ابر در سال ۲۰۱۳ و ۱۴۰ روز بدون ابر در سال ۲۰۱۴) استخراج شدند و برای تک‌تک این روزها در این بازه زمانی، چهار دمای سطح زمین (LST) حاصل از تصویربرداری ماهواره Terra در ساعات ۱۰:۳۰ صبح ($LST_{day-terra}$) و ۲۲:۳۰ شب ($LST_{night-terra}$) و تصویربرداری ماهواره Aqua در ساعات ۱:۳۰ شب ($LST_{night-aqua}$) و ۱۳:۳۰ بعد از ظهر ($LST_{day-aqua}$) استخراج شدند. جهت استخراج دمای سطح زمین از تصاویر سنجنده MODIS، از نرم‌افزار^۲ MRT که توسط سازمان ناسا برای همین منظور طراحی شده است همراه با نرم‌افزارهای ArcGIS و IMAGINE ERDAS استفاده شد (خوشخو و همکاران، ۲۰۱۷).

معیارهای ارزیابی خطا: جهت سنجش میزان خطای حاصل از به‌کارگیری هر دو روش به‌کار گرفته شده در این پژوهش، از چهار شاخص میانگین اریبی خطا (MBE)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE)، ضریب تعیین (R^2) و ضریب کارایی نش-ساتکلیف (R_{eff}) استفاده شد. فرمول محاسباتی این شاخص‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

$$k_w = k_{mat} S_e^{(n+2+\frac{2}{\lambda})} \quad (14)$$

که در آن، k_{mat} هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع و n پارامتری تجربی است. با به‌کارگیری الگوریتم کلی فوق، خروجی‌های زیادی قابل محاسبه هستند که در پژوهش حاضر به بررسی دمای سطح خاک که جزو مهم‌ترین خروجی‌های مدل بیلان انرژی در سطح خاک است و بر تمامی مؤلفه‌های بیلان انرژی در سطح خاک اثر می‌گذارد تمرکز شده است. نظر به این‌که در مدل بیلان انرژی در سطح خاک مذکور، پارامترهای تجربی متعددی وجود دارند برای حصول به نتایج بهتر از این مدل در این پژوهش، از بین پارامترهای تجربی متعدد به‌کار رفته در مدل بیلان انرژی در سطح خاک، ابتدا بر اساس مطالعات پیشین (از جمله آلوناس و یانسن (۱۹۹۷)، گوستافسون و همکاران (۲۰۰۴)، خوشخو و همکاران (۲۰۱۵)) تعداد ۷ پارامتر به‌عنوان پارامترهای مؤثر شناسایی شدند سپس با به‌کارگیری روش برآورد عدم قطعیت درست‌نمایی تعمیم‌یافته^۱ (GLUE)، ابتدا با نمونه‌گیری تصادفی به روش مونت‌کارلو، بردارهای متعددی از مقادیر پارامترهای مدل در دامنه عدم قطعیتشان تولید شدند سپس بر اساس هر کدام از بردارهای تولیدشده از مقادیر پارامترها، مدل اجراء شد و میزان دقت هر کدام از این شبیه‌سازی‌ها با داده‌های مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفت و بر اساس جداسازی و انتخاب شبیه‌سازی‌های با دقت بالاتر و در نظر گرفتن مقدار میانگین هر کدام از پارامترهای منتخب حاصل از این شبیه‌سازی‌ها، مقدار واسنجی‌شده هر کدام از ۷ پارامتر منتخب استخراج شد.

2- MODIS Re-projection Tool

1- Gemneralized Likelihood Uncertainty Estimation

جدول ۱- شاخص‌های به کار گرفته شده جهت سنجش مقادیر خطا.

Table 1. Applied indices to measuring error values.

شاخص Index	فرمول محاسبه Formulus	مقدار بهینه optimum value
MBE	$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i - O_i)}{n}$	0
MAE	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n C_i - O_i }{n}$	0
R ²	$R^2 = \frac{(\sum (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))^2}{\sum (P_i - \bar{P})^2 \sum (O_i - \bar{O})^2}$	1
R _{eff}	$R_{eff} = 1 - \frac{\sigma_{Residuals}^2}{\sigma_{Observations}^2}$	1

دمای حداقل یا دمای حداکثر شبانه‌روزی سطح خاک نیستند بنابراین استخراج میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک بر اساس داده‌های حاصل از سنجنده MODIS با مقداری چالش همراه است. در این پژوهش، ابتدا با محاسبه میانگین دمای سطح خاک بر اساس حالت‌های ترکیبی مختلف ممکن از دماهای سطح خاک در ۴ زمان مذکور، بر اساس هر کدام از این حالت‌ها میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک محاسبه شد سپس از بین این حالت‌ها، حالتی که بیش‌ترین تطابق را با داده‌های مشاهداتی میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک داشت به‌عنوان حالت برگزیده جهت محاسبه میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک در نظر گرفته شد. جدول ۲ تعداد ۹ حالت ترکیبی مختلف (شامل ۴ حالت دوتایی، ۴ حالت سه تایی و یک حالت چهارتایی) از دماهای سطح خاک مستخرج از تصاویر سنجنده MODIS

پارامترهای به کار رفته در جدول ۱ شامل: C_i مقادیر محاسباتی، O_i مقادیر مشاهداتی، n تعداد کل مشاهدات، \bar{P} میانگین مقادیر محاسباتی \bar{O} میانگین مقادیر مشاهداتی، $\sigma_{Residuals}^2$ واریانس مقادیر خطا و $\sigma_{Observations}^2$ واریانس داده‌های مشاهداتی هستند.

نتایج و بحث

به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای: همان‌گونه که ذکر شد سنجنده MODIS که بر روی ماهواره‌های Aqua و Terra نصب شده است طی هر شبانه‌روز، ۴ نوبت در ساعات ۱۰:۳۰ صبح، ۱۳:۳۰ ظهر، ۲۲:۳۰ شب و ۱:۳۰ شب از منطقه مورد مطالعه تصویربرداری و با انجام پردازش‌هایی بر روی این تصاویر، داده‌های دمای سطح خاک استخراج می‌شوند. با توجه به این‌که هیچ‌یک از ۴ زمان مذکور، لزوماً منطبق بر زمان وقوع

۲۲:۳۰ شب، ۱:۳۰ شب و ۱۰:۳۰ صبح به دست آورد که منجر به میزان خطای مطلق حدود ۲ درجه سانتی‌گراد شده است و مقدار قابل قبولی به نظر می‌رسد. مقدار مثبت شاخص MBE نیز نشان‌دهنده آن است که تمایل کلی استفاده از روش فوق به سمت بیش برآورد کردن بوده است.

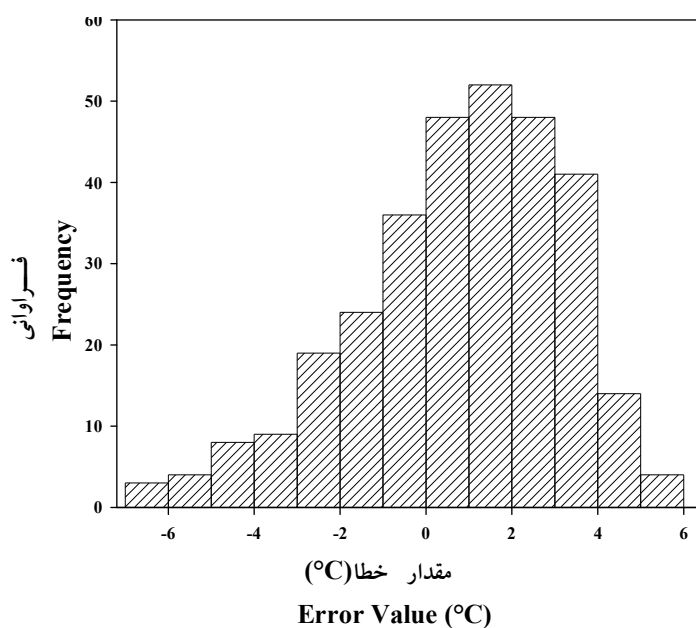
به جهت نمایش بهتر میزان خطا و مقایسه تفصیلی‌تر مقادیر محاسباتی با مقادیر مشاهداتی، هیستوگرام توزیع خطا (شکل ۱) و نیز تغییرات میانگین شبانه‌روزی دماهای سطح خاک محاسباتی و مشاهداتی در طی سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ (شکل ۲) نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل ۱ پیداست بیش‌ترین تمرکز مقادیر خطا حول و حوش صفر درجه سانتی‌گراد بوده و مقادیر حدی خطا که بیانگر بروز مقادیر خطای خیلی بزرگ باشد در این شکل به چشم نمی‌خورد که بیانگر دقت قابل قبول استفاده از تصاویر سنجنده MODIS جهت برآورد میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک است. همین نتیجه در شکل ۲ هم قابل استنباط است. با این وجود، در مواردی که به‌ویژه در فصل‌های پاییز و زمستان در هر کدام از زمان‌های تصویربرداری، شرایط ابرناکی حاکم بوده باشد و تصاویر ماهواره‌ای از منطقه مورد مطالعه در دسترس نبوده باشد در چنین مواردی، امکان به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای جهت برآورد دمای سطح خاک وجود نداشته است و این مسأله به‌عنوان یکی از محدودیت‌های اصلی استفاده از این روش مطرح است.

در چهار مختلف شبانه‌روز را همراه با مقادیر شاخص‌های سنجش خطای محاسبه شده برای دوره ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ را به تفکیک برای هر کدام از این حالت‌ها نشان می‌دهد. روال کار بدین گونه بوده است که با در نظر گرفتن هر کدام از این حالات، ابتدا میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک محاسبه شده است سپس میزان تطابق هر کدام از این حالات با داده‌های مشاهداتی میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک طی سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ بر اساس چهار شاخص MAE، MBE، R^2 و R_{eff} مورد ارزیابی قرار گرفته است. همان‌گونه که پیداست میزان شاخص MAE که نشان‌دهنده میانگین قدرمطلق مقادیر خطاست کم‌ترین مقدار را به ترتیب برای حالت ۵ (محاسبه میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک بر اساس دماهای سطح خاک در سه زمان ۲۲:۳۰ شب، ۱:۳۰ شب و ۱۰:۳۰ صبح) به میزان ۲/۱ درجه سانتی‌گراد و حالت ۸ (محاسبه میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک بر اساس دماهای سطح خاک در سه زمان ۲۲:۳۰ شب، ۱:۳۰ شب و ۱۳:۳۰ ظهر) به میزان ۲/۵ درجه سانتی‌گراد به دست داده است. بر اساس شاخص MBE نیز بهترین حالت، حالت ۵ بوده است ولی بر اساس دو شاخص R^2 و R_{eff} هر دو حالت ۵ و ۸ در یک وضعیت نسبتاً مشابه قرار داشته‌اند. بنابراین در مجموع می‌توان بهترین حالت برای استخراج میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک توسط دماهای سطح خاک مستخرج از تصاویر سنجنده MODIS را با میانگین‌گیری کردن از دمای سطح خاک در سه زمان

جدول ۲- مقادیر شاخص‌های سنجش خطا در محاسبه میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک بر اساس ترکیب LST های مختلف.

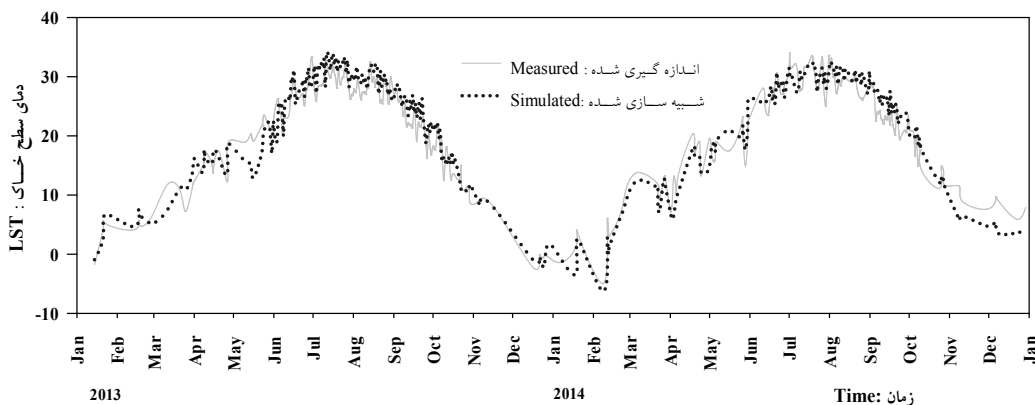
Table 2. The error evaluating indices values in calculating daily mean soil surface temperature based on the different combinations of LST.

حالت‌ها Cases	پارامترهای به‌کار گرفته شده در محاسبه میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک Applied parameters in calculating daily mean soil surface temperature	MAE (°C)	R _{eff}	MBE (°C)	R ²
1	$LST_{night-aqua} \cdot LST_{day-aqua}$	5.9	0.89	5.8	0.92
2	$LST_{night-terra} \cdot LST_{day-terra}$	6.6	0.83	6.5	0.9
3	$LST_{night-terra} \cdot LST_{day-aqua}$	8.1	0.85	8.1	0.92
4	$LST_{night-aqua} \cdot LST_{day-terra}$	4.6	0.88	4.3	0.91
5	$LST_{night-terra} \cdot LST_{night-aqua} \cdot LST_{day-terra}$	2.1	0.91	0.8	0.93
6	$LST_{day-aqua} \cdot LST_{night-aqua} \cdot LST_{day-terra}$	10.3	0.83	10.3	0.91
7	$LST_{night-terra} \cdot LST_{day-aqua} \cdot LST_{day-terra}$	11.8	0.79	11.8	0.9
8	$LST_{night-terra} \cdot LST_{day-aqua} \cdot LST_{night-aqua}$	2.5	0.92	1.8	0.94
9	$LST_{night-terra} \cdot LST_{day-aqua} \cdot LST_{night-aqua} \cdot LST_{day-terra}$	6.2	0.88	6.2	0.93



شکل ۱- هیستوگرام مقادیر خطای حاصل از برآورد میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک با به‌کارگیری تصاویر سنجنده MODIS طی بازه زمانی ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴.

Figure 1. Histogram of the error values extracted from daily mean soil surface temperature estimating using MODIS sensor images during 2013 and 2014 time period.



شکل ۲- مقادیر میانگین شبانه‌روزی دماهای سطح خاک مشاهداتی و محاسباتی با به‌کارگیری تصاویر سنجنده MODIS طی بازه زمانی ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴.

Figure 2. Estimated and Observed daily mean soil surface temperature values using MODIS sensor images during 2013 and 2014 time period.

(پارامتری مؤثر در محاسبه شار بخار آب در خاک) استفاده شد (جدول ۳) و بر اساس این مقادیر، مدل بیلان انرژی در سطح خاک برای بازه آماری ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۴ اجرا شد و با محاسبه چهار شاخص MAE، R^2 ، R_{eff} ، MBE بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک، دقت و اعتبار این مدل جهت برآورد میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک مورد ارزیابی قرار گرفت که مقادیر این شاخص‌ها به‌ترتیب برابر با $1/82$ ، $0/47$ ، $0/95$ و $0/96$ به‌دست آمدند که مقادیر قابل‌قبولی هستند و بیانگر آن است که مدل قادر بوده است میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک را با خطای مطلق کم‌تر از ۲ درجه سانتی‌گراد شبیه‌سازی نماید. با این وجود، بر خلاف روش استفاده از تصاویر ماهواره‌ای که تمایل آن به‌سمت بیش‌برآورد کردن دمای سطح خاک بود در روش بیلان انرژی مقدار منفی شاخص MBE بیانگر تمایل این مدل به‌سمت کم‌برآورد کردن دمای سطح خاک بوده است.

به‌کارگیری روش بیلان انرژی در سطح خاک: همان‌گونه که در بخش ساختار مدل بیلان انرژی در سطح خاک عنوان شد پارامترهای تجربی متعددی در این مدل حضور دارند که انتخاب مقدار مناسب برای آن‌ها، تأثیر قابل‌توجهی بر دقت نتایج حاصل از به‌کارگیری این روش دارد. در این پژوهش، جهت اجرای این مدل، از مقادیر واسنجی‌شده ۷ پارامتر مهم و مؤثر در این مدل شامل AlbedoDry (مقدار آلبیدوی خاک خشک و پارامتری مؤثر در محاسبه تابش خالص)، EquilAdjustPsi و MaxSurfDeficit (پارامترهایی مؤثر در محاسبه فشار بخار لایه سطحی برای برآورد تبخیر از سطح خاک)، WindLessExchangeSoil (بیش‌ترین مقدار مقاومت آئرو‌دینامیکی در جو آرام و پارامتری مؤثر در محاسبه تبخیر از سطح خاک)، ClayUnFrozenC1 (پارامتری مؤثر در محاسبه ضریب هدایت گرمایی خاک)، MinimumCondValue (مقدار حداقل ضریب هدایت هیدرولیکی غیراشباع و پارامتری مؤثر در انتقال رطوبت در داخل خاک) و DVapTortuosity

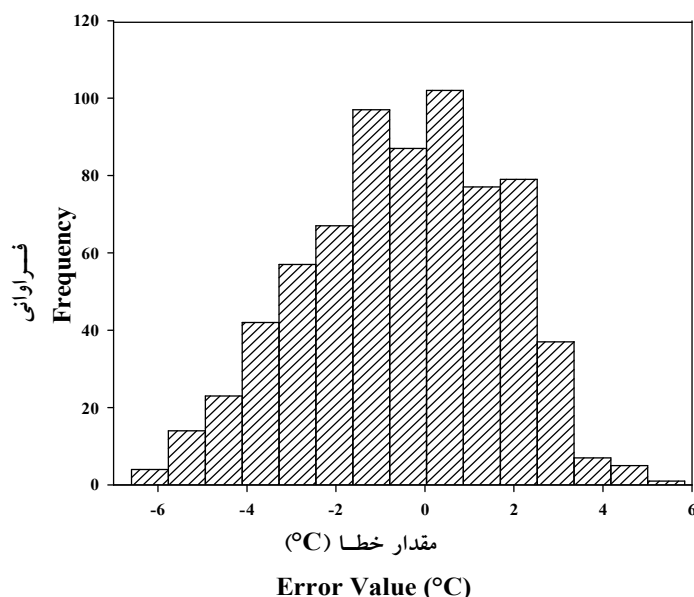
جدول ۳- مقادیر واسنجی شده چند پارامتر مهم در مدل بیلان انرژی در سطح خاک.

Table 3. Calibrated values of some important parameters in the soil surface energy balance model.

پارامتر parameter	مقدار پیش فرض default value	مقدار واسنجی شده calibrated value
AlbedoDry	30	35.2
EquilAdjustPsi	1	0.97
MaxSurfDeficit	-2	-2
WindLessExchangeSoil	0.001	0.0043
ClayUnFrozenC1	0.13	0.166
MinimumCondValue	0.0001	0.000395
DVapTortuosity	0.66	0.72

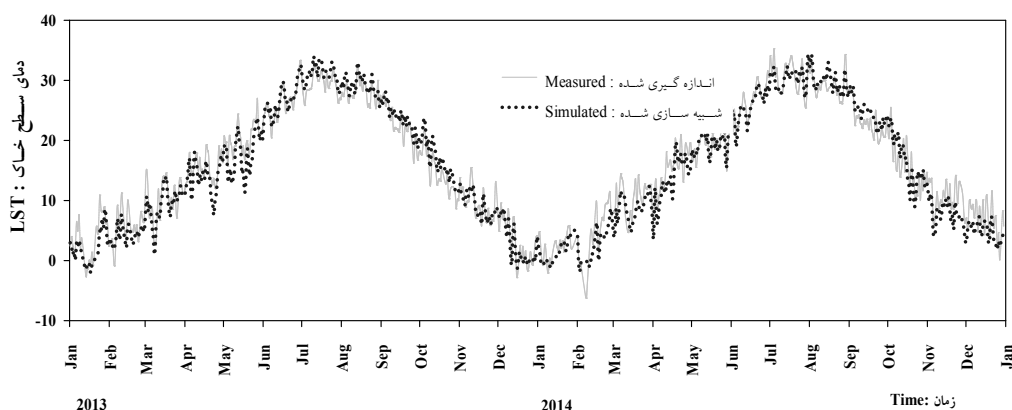
خطا و مقایسه تفصیلی تر مقادیر محاسباتی با مقادیر مشاهداتی، هیستوگرام توزیع خطا (شکل ۳) و نیز تغییرات میانگین شبانه روزی دمای سطح خاک محاسباتی و مشاهداتی طی سالهای ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ (شکل ۴) نشان داده شده است. همان گونه که از شکل ۳ پیداست بیشترین تمرکز مقادیر خطا در این حالت هم مشابه با استفاده از روش تصاویر ماهواره ای، حول و حوش صفر درجه سانتی گراد بوده است و مقادیر حدی خطا در این حالت هم رخ نداده اند که بیانگر دقت قابل قبول استفاده از روش بیلان انرژی در سطح خاک جهت برآورد میانگین شبانه روزی دمای سطح خاک است.

به جهت نمایش بهتر میزان خطا و مقایسه تفصیلی تر مقادیر محاسباتی با مقادیر مشاهداتی، هیستوگرام توزیع خطا (شکل ۳) و نیز تغییرات میانگین شبانه روزی دمای سطح خاک محاسباتی و مشاهداتی طی سالهای ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ (شکل ۴) نشان داده شده است. همان گونه که از شکل ۳ پیداست بیشترین تمرکز مقادیر خطا در این حالت هم مشابه با استفاده از روش تصاویر ماهواره ای، حول و حوش صفر درجه سانتی گراد بوده است و مقادیر حدی خطا در این حالت هم رخ نداده اند که بیانگر دقت قابل قبول استفاده از روش بیلان انرژی در سطح خاک جهت برآورد میانگین شبانه روزی دمای سطح خاک است. به جهت نمایش بهتر میزان



شکل ۳- هیستوگرام مقادیر خطای حاصل از برآورد میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک با به‌کارگیری روش بیلان انرژی در سطح خاک طی سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴.

Figure 3. Histogram of the error values extracted from soil surface temperature estimating using soil surface energy balance model during 2013 and 2014 time period.



شکل ۴- مقادیر میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک مشاهداتی و محاسباتی به روش بیلان انرژی در سطح خاک طی سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴.

Figure 4. Estimated and Observed daily mean soil surface temperature values using soil surface energy balance model during 2013 and 2014 time period.

آورده شده است. این جدول نشان می‌دهد که عملکرد مدل بیلان انرژی در سطح خاک در فصول بهار و تابستان، بهتر از فصول پاییز و زمستان بوده است به‌گونه‌ای که پایین‌ترین عملکرد (بالا‌ترین خطای مدل) در فصل زمستان رخ داده است. دلیل وقوع چنین

برای انجام یک ارزیابی واقع‌بینانه‌تر در ارتباط با سنجش دقت دو روش به‌کار گرفته شده در این پژوهش جهت شبیه‌سازی میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک، مقادیر چهار شاخص مذکور به تفکیک برای فصول مختلف نیز محاسبه شد که نتایج حاصله در جدول ۴

منفی به دست آمده در فصل زمستان به میزان ۰/۶۶- درجه سانتی گراد تأییدکننده همین موضوع می باشد. بر این اساس، خطای ناشی از شبیه سازی عمق برف در فصل زمستان، سبب اضافه شدن یک عامل اضافی طا جهت شبیه سازی دمای سطح خاک گردیده است. در روش استفاده از تصاویر ماهواره ای، کمترین مقدار خطا و بالاترین عملکرد در فصل زمستان رخ داده است. نظر به وجود شرایط ابرناکی زیاد در فصل زمستان، این نتیجه با لحاظ شدن تعداد روزهای خیلی کمتری در مقایسه با سایر فصول سال حاصل آمده است و چنین مسأله ای محتمل به نظر می رسد که در صورت دخیل بودن تعداد روزهای بیش تر، ممکن است میزان خطای حاصله نیز افزایش یابد. با لحاظ قرار دادن شاخص های مختلف خطا و مقایسه آن ها برای دو روش به کار گرفته شده در این پژوهش، می توان گفت که اگرچه هر دو روش دقت نسبتاً مناسبی جهت برآورد میانگین شبانه روزی دمای سطح خاک داشته اند اما در مجموع دقت مدل بیلان انرژی در سطح خاک بالاتر از روش استفاده از تصاویر ماهواره ای بوده است.

رخدادی می تواند با وجود برخی پدیده های خاص فصول سرد سال مانند برف و یخبندان در ارتباط باشد. به این معنی که شبیه سازی دمای سطح خاک در حضور برف و یخبندان، مقداری پیچیده تر از عدم وجود چنین پدیده هایی است و در صورتی که به عنوان مثال در شبیه سازی عمق برف خطایی توسط مدل صورت گیرد با توجه به تأثیر چشمگیر پوشش برف بر دمای سطح خاک، بدیهی است که این خطا به برآورد دمای سطح خاک نیز منتقل می گردد.

در کنار مدل بیلان انرژی در سطح خاک استفاده شده در این پژوهش، از یک مدل شبیه سازی عمق برف تک لایه (SLSM) جهت شبیه سازی عمق برف استفاده شده است و بر اساس یافته های خوشخو (۲۰۱۶)، این مدل تمایل به کم برآورد کردن عمق برف به ویژه در حالت وقوع برف های سنگین دارد. نظر به نقش عایق بودن برف در مقابل نفوذ سرما به داخل خاک، طبیعی است که در صورت کم برآورد کردن مقدار عمق برف توسط مدل، دمای سطح خاک در زیر برف، پایین تر از حالت واقعی (کم برآورد) خواهد شد. شاخص MBE

جدول ۴- مقادیر شاخص های مختلف سنجش خطا به تفکیک برای فصول مختلف با استفاده از روش های بیلان انرژی در سطح خاک و تصاویر ماهواره ای.

Table 4. Different indices values of the error measurements for different seasons using soil surface energy balance and satellite images methods.

سری زمانی Time Series	روش استفاده شده Applied method	MAE (°C)	R _{eff}	MBE (°C)	R ²
Spring	Energy balance	1.66	0.86	-1.05	0.9
	Satellite images	2.16	0.79	-0.27	0.82
Summer	Energy balance	1.56	0.85	1	0.85
	Satellite images	2.21	0.74	1.75	0.74
Autumn	Energy balance	2.06	0.8	-0.54	0.85
	Satellite images	2.1	0.81	0.15	0.87
Winter	Energy balance	2.01	0.8	-1.4	0.8
	Satellite images	1.73	0.81	-0.66	0.85
Anual	Energy balance	1.82	0.95	-0.47	0.96
	Satellite images	2.14	0.91	0.78	0.93

نتیجه‌گیری کلی

شود. بر این اساس این امکان وجود دارد که از متدولوژی کلی به‌کار گرفته شده در این پژوهش به‌ویژه مدل بیلان انرژی در سطح خاک برای شبیه‌سازی دمای سطح خاک در مناطق مختلف استفاده کرد و از میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک برآورد شده برای کاربردهای مختلفی از جمله به‌عنوان یک متغیر ورودی در مدل‌های شبیه‌سازی دما و رطوبت در خاک و نیز مدل‌های آب- هوا- محصول استفاده کرد.

سیاسگزاری

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.

در این پژوهش، برای شبیه‌سازی میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک در ایستگاه هواشناسی کشاورزی سرارود کرمانشاه از دو روش بیلان انرژی در سطح خاک و به‌کارگیری تصاویر سنجنده MODIS استفاده شد. اعتبارسنجی این دو روش بیانگر نتایج نسبتاً مطلوب هر دو روش بود اما استفاده از مدل بیلان انرژی در سطح خاک روی هم رفته منجر به خطای کم‌تر و دقت بالاتری در مقایسه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای گردید. نظر به دقت پایین‌تر مدل بیلان انرژی در سطح خاک در فصل زمستان جهت شبیه‌سازی دمای سطح خاک به‌دلیل وجود خطا در شبیه‌سازی پدیده‌های مرتبط با فصول سرد سال مانند عمق برف، پیشنهاد می‌گردد که جهت بهبود دقت مدل در فصل زمستان، در صورت وجود مستقیماً از داده‌های اندازه‌گیری شده عمق برف در داخل مدل و یا از روش‌های دقیق‌تری مانند روش مدل چند لایه (MLSM) استفاده

منابع

1. Alkhaier, F., Schotting, R.J., and Su, Z. 2009. A qualitative description of shallow groundwater effect on surface temperature of bare soil. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 13: 1749-1756.
2. Alvenas, G., and Jansson, P.E. 1997. Model for evaporation, moisture and temperature of bare soil: calibration and sensitivity analysis. *Agric. For. Meteorol.* 88: 47-56.
3. Beltrami, H., Gosselin, C., and Mareschal J.C. 2003. Ground surface temperatures in Canada: Spatial and temporal variability. *Geophysical Research Letters.* 30: 10. 1-4.
4. Flerchinger, G.N. 1991. Sensitivity of soil freezing simulated by the SHAW model. *Trans. Amer. Soc. Agric. Engr.* 34: 2381-2389.
5. Gao, Z.Q., Ning, J.C., and Gao, W. 2009. Response of land surface temperature to coastal land use/cover change by remote sensing. *Trans. CSAE.* 25: 274-281.
6. Giorgi, F., and Avissar, R. 1997. Representation of heterogeneity effects in earth system modelling: experience from land surface modeling. *Rev. Geophys.* 35: 413-437.
7. 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. *J. Appl. Meteorol.* 43: 1750-1767.
8. Herb, W.R., Janke, B., Mohseni, O., and Stefan, H.G. 2008. Ground surface temperature simulation for different land covers. *J. Hydrol.* 356: 3. 327-343.
9. Hu, G., Wu, X., Zhao, L., Li, R., Wu, T., Xie, C., and Cheng, G. 2017. An improved model for soil surface temperature from air temperature in permafrost regions of Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau of China. *Meteorology and Atmospheric Physics.* 129: 4. 441-451.
10. Jansson, P.E., and Karlberg, L. 2010. Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems. Royal Institute of Technology, Stockholm. 454p.

11. Jin, M.L., and Dickinson, R.E. 2010. Land surface skin temperature climatology: Benefits from the strengths of satellite observations. *Environ. Res. Lett.* 5: 1-13.
12. Kerridge, B.L., Hornbuckle, J.W., Christen, E.W., and Faulkner, R.D. 2013. Using soil surface temperature to assess soil evaporation in a drip irrigated vineyard. *Agricultural water management.* 116: 128-141.
13. Kersten, M.S. 1949. Laboratory research for the determination of the thermal properties of soils. ACFEL Tech. Rep. 23. University of Minnesota, Minneapolis.
14. 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.
15. Khoshkhou, Y. 2016. Simulation of the snow depth using Single Layer Snow Model (SLSM) at Saghez station. *Iran. J. Soil Water Res.* 47: 3. 517-527. (In Persian)
16. Khoshkhou, Y., Esmaili, S., and Abdollahi, M. 2017. Estimating daily and monthly air temperature parameters in the Kurdistan province using MODIS satellite images. *Iran. J. Soil Water Res.* 49: 2. 413-423. (In Persian)
17. Kleissl, J., Moreno, H., Hendrickx, J.M.H., and Simunek, J. 2007. HYDRUS simulations of soil surface temperatures. In *Proc. International Society for Optical Engineering, SPIE.* 6553: 1-12.
18. Liang, L.L., Riveros-Iregui, D.A., Emanuel, R.E., and McGlynn, B.L. 2014. A simple framework to estimate distributed soil temperature from discrete air temperature measurements in data-scarce regions. *J. Geophys. Res. Atmos.* 119: 407-417.
19. Luo, D., Jin, H., Lu, L., and Zhou, J. 2016. Spatiotemporal changes in extreme ground surface temperatures and the relationship with air temperatures in the Three-River Source Regions during 1980–2013. *Theoretical and applied climatology.* 123: 3-4. 885-897.
20. Mualem, Y. 1976. A new model predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12: 513-522.
21. Newman, G.P. 1995. Heat and Mass Transfer in Unsaturated Soils during Freezing. M.Sc. Thesis. University of Saskatchewan. Saskatoon, Canada. 212p.
22. Philip, J.R., and deVries, D.A. 1957. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Eos Trans.* 38: 2. 222-232.
23. Pielke, R.A. 2001. Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus convective rainfall. *Rev. Geophys.* 39: 151-177.
24. Qian, B.D., Gregorich, E.G., Gameda, S., Hopkins, D.W., and Wang, X.L. 2011. Observed soil temperature trends associated with climate change in Canada. *J. Geophys. Res. Atmos.* 116: 1-16.
25. Schelde, K., Thomsen, A., Heidmann, T., Schjonning, P., and Jansson, P.E. 1998. Diurnal fluctuations of water and heat flows in a bare soil. *Water Resour. Res.* 34: 2919-2929.
26. Simunek, J., Sejna, M., and VanGenuchten, M.T. 1998. The HYDRUS-1D software package for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media. Version 2.0. IGWMC-TPS-70. International Ground Water Modeling Center. Colorado School of Mines, Golden, 202p.
27. Staniec, M., and Nowak, H. 2016. The application of energy balance at the bare soil surface to predict annual soil temperature distribution. *Energy and Buildings.* 127: 56-65.
28. Sun, D., and Kafatos, M. 2007. Note on the NDVI-LST relationship and the use of temperature-related drought indices over North America. *Geophysical Research Letters*, 34, no 24.
29. Sun, Z., Wang, Q., Batkhisig, O., and Ouyang, Z. 2015. Relationship between evapotranspiration and land surface temperature under energy and water-limited conditions in dry and cold climates. *Advances in Meteorology.* 39: 1-9.
30. Xiong, J., Wu, B.F., Yan, N.N., Zeng, Y., and Liu, S.F. 2010. Estimation and validation of land surface evaporation using remote sensing and meteorological data in north China, *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sensing.* 3: 3. 337-344.
31. Yang, Y., Qiu, J., Su, H., Bai, Q., Liu, S., Li, L., and Huang, Y. 2017. A One-Source Approach for Estimating Land Surface Heat Fluxes Using Remotely Sensed Land Surface Temperature. *Remote Sensing.* 9: 1-25.



Evaluating soil surface energy balance model and satellite images to estimating mean daily soil surface temperature

*Y. Khoshkhoo

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

Received: 01.06.2018; Accepted: 04.15.2018

Abstract

Background and Objectives: Soil surface temperature has a key role in the mass and energy interchange between soil and atmosphere and it is an important input parameter for running the heat, water and carbon balance estimating models in the soil-plant-atmosphere system and weather and climate simulating models as well at the regional and global scales and the whole soil surface energy balance components are affected by soil surface temperature. Instead of the high important and remarkable application of soil surface temperature, its measurements is performed just in the synoptic meteorological stations and in an imperfect manner (just the minimum daily soil surface temperature) and so, it is essential to simulate this important variable by appropriate methods.

Materials and Methods: In this research, two methods including soil surface energy balance model and satellite images were used to estimating daily mean soil surface temperature in the Sararoud-Kermanshah agro-meteorological station which has the recorded data of both maximum and minimum soil surface temperature at the 2013 to 2014 time period. Estimating daily mean soil surface temperature based on the satellite images was performed by considering the MODIS sensor images at four different times including 22:30, 1:30; 10:30 and 13:30 using the MRT software and for running the soil surface energy balance model, the daily meteorological data including air temperature, wind speed, sunshine and relative humidity along with some soil physical properties were used as the model inputs and the efficiency of these methods was evaluated using some evaluating error indices.

Results: By applying the MODIS sensor images, the results showed that from different combination cases of soil surface temperature at the mentioned imaging times, calculating daily mean soil surface temperature based on the averaging of soil surface temperatures at 22:30, 1:30 and 10:30 times was led to gaining the highest agreement with soil surface temperature observations and the absolute error and determination coefficient of this method to estimating daily mean soil surface temperature were 2.1 °C and 0.93, respectively. Using the soil surface energy balance model to estimating daily mean soil surface temperature, the absolute error and determination coefficient were 1.8°C and 0.96, respectively. The results of the seasonal time series analysis showed that by using the soil surface energy balance model and satellite images, the highest agreement between calculated and observed values was occurred at summer and winter, respectively.

Conclusion: The overall results of this research showed reasonable and appropriate accuracy of both applied methods. However, the soil surface energy balance model is suggested because of its higher accuracy. Therefore, it is possible to adopt the applied methodology of this research to simulate the mean soil surface temperature in different regions and the estimated values of the daily mean soil surface temperature could be used to different applications such as soil temperature and moisture simulating models as an input variable.

Keywords: Energy balance, MODIS sensor, Sararoud-Kermanshah, Soil surface temperature

* Corresponding Author; Email: y.khoshkho@uok.ac.ir