

برآورد تبخیر از مخزن سد دوستی با توسعه و کاربرد روشی جدید مبتنی بر بیلان انرژی

میثم مجیدی خلیل آباد* (استادیار)

گروه سنجش از دور و علوم محطی، مرکز پژوهشی آب و محیط زیست شرق

امین علیزاده (استاد)

علی‌رضا فرید حسینی (استادیار)

گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

مجید وظیفه‌دوست (استادیار)

گروه مهندسی آب، دانشگاه گیلان

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۵ (دوره ۲-۳، شماره ۱/۳، ص ۱۰-۳)

در این پژوهش تلاش شده است تا با توسعه‌ی روشی جدید مبتنی بر بیلان انرژی، تبخیر از مخزن سد دوستی برآورده شود. به این منظور روش بیلان انرژی برای دو سطح آب (تبخیرکننده) و خاک خشک (غیر تبخیرکننده به عنوان سطح مرجع) به طور هم‌زمان حل شده است. با توجه به شرایط مشابه دو سطح، نسبت مقاومت آئرو دینامیک یکسانی برای هر دو سطح فرض شده است، که سبب تولید شکل جدیدی از معادله‌ی بیلان انرژی شده است. معادله‌ی استخراج شده بیلان انرژی آب و سطح مرجع (RWEB) مورد مقایسه با روش بیلان انرژی نسبت باون (BREB) و برآوردهای تشت تبخیر قرار گرفته است. طبق ارزیابی‌ها، نتایج روش RWEB طی سال آبی ۱۳۹۰-۹۱ رضایت‌بخش بوده است. تحلیل حساسیت روش RWEB نشان داده است که روش مذکور نسبت به دمای هوا و سطح مرجع بیشترین حساسیت را دارد و کمترین حساسیت روش نسبت به تابش خالص است.

maysam.majidi@gmail.com
alizabeth@gmail.com
afaridh@yahoo.com
majid.vazifedoust@yahoo.com

واژگان کلیدی: بیلان انرژی، تبخیر، سطح مرجع، سد دوستی.

۱. مقدمه

همواره به‌عنوان یک چالش جدی مطرح شده است.^[۲] بدون تردید تلاش‌های باون (۱۹۲۶)،^[۳] یکی از قوی‌ترین تئوری‌هایی است که به درک فیزیکی تبخیر و توسعه‌ی دانش آن کمک ویژه‌ی کرده است. وی با استفاده از گرادبان دما و رطوبت نسبی، چگونگی تبدیل انرژی در دسترس به گرمای نهان و محسوس را تشریح کرده است. بعدها پژوهشگری در سال ۱۹۴۸، تئوری مشهور خود را درخصوص برآورد تبخیر از سطوح آزاد آبی، سطح خاک و سطوح پوشش گیاهی با ترکیب مفاهیم آئرو دینامیک تبخیر و بیلان انرژی ارائه کرده است.^[۴] پس از آن تقریباً رنج وسیعی از روش‌های برآورد تبخیر توسعه داده شده است.^[۵-۱۲]

این روش‌ها عمدتاً براساس معادله‌ی بیلان انرژی و مدل انتقال جرم دالتون،^[۱۳] توسعه یافته و یا مبنای تجربی داشته‌اند.^[۱۴، ۱۵] بسته به دقت و سادگی کاربرد، روش‌های مذکور در شرایط مختلف مورد توجه قرار گرفته‌اند. برخی از این روش‌ها به‌طور جامع در شرایط مختلف و البته در پژوهش‌های اندکی مورد بررسی، مقایسه و ارزیابی قرار گرفته‌اند.^[۱۶-۱۸] در پژوهش حاضر، روشی جدید جهت برآورد تبخیر از دریاچه‌ها و مخازن سدها توسعه داده شده و با استفاده از بیلان انرژی دریاچه و نیز داده‌های تشت تبخیر مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. در روش پیشنهادی پژوهش حاضر، دست‌یابی به دقت و در عین حال سادگی و داده‌های ورودی اندک،

تبخیر از یک‌سره‌های آبی مانند دریاچه‌ها و مخازن سدها در مقایسه با سایر سطوح تبخیرکننده مانند گیاهان و خاک‌های مرطوب، تأثیر محسوس‌تری در بیلان آب و انرژی بین زمین و اتمسفر دارد. از طرفی، دانش تبخیر در طراحی و مدیریت مخازن سدها و دریاچه‌ها، عاملی اساسی محسوب می‌شود؛ چرا که میزان تبخیر بر ذخیره و بهره‌برداری بهینه از این منابع، نقش به‌سزایی دارد.^[۱] به‌دلیل پیچیدگی اندازه‌گیری مستقیم تبخیر، عمدتاً از میزان تبخیر آب از تشت در مجاورت دریاچه یا مخزن سد به عنوان معیاری جهت برآورد تبخیر از دریاچه استفاده می‌شود و با استفاده از ضرایب تشت، تبخیر از تشت به دریاچه تعمیم داده می‌شود. این در حالی است که به دلیل تفاوت شرایط محیطی تشت و دریاچه، روابط ساده و خطی بین میزان تبخیر از این دو در بسیاری از موارد به لحاظ فیزیکی معتبر نبوده است، لذا روش تشت تبخیر اغلب به ویژه در بازه‌های زمانی کوچک، با خطای زیادی همراه خواهد بود. از این رو توسعه و کاربرد روش‌های محاسبه‌ی تبخیر از دریاچه و مخازن سدها، مورد علاقه و توجه پژوهشگران در دهه‌های اخیر بوده و در عین حال به دلیل پیچیدگی ماهیت آن،

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۲/۱۶، اصلاحیه ۱۳۹۴/۲/۹، پذیرش ۱۳۹۴/۲/۲۰.

از اهداف نویسندگان بوده است. ضمن اینکه امید است با توسعه مدل جدید، مطالعات درخصوص تبخیر از بیکره‌های آبی به‌عنوان یکی از اجزاء مهم بیلان آب با جدیت بیشتری انجام شود و کمبود پژوهش‌ها در این زمینه را تا حدی جبران کند و لذا، بتواند جایگاه خود را در مدیریت منابع آب در کشور بیابد.

۲. تئوری

۲.۱. روش بیلان انرژی نسبت باون

روش اساسی که عمدتاً به‌منظور برآورد تبخیر مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش بیلان انرژی نسبت باون است، که در آن شارگرمای نهان تبخیر با اندازه‌گیری و یا تخمین سایر اجزاء بیلان انرژی به‌دست می‌آید. [۱۹-۲۲] در روش مذکور، شدت تبخیر با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود: [۲۳-۲۴]

$$E = \frac{R_n + N}{\rho(\lambda(1 + \beta) + cT_s)} \quad (1)$$

که در آن، E شدت تبخیر (m s^{-1})، R_n تابش خالص (W m^{-2})، N تغییر در ذخیره‌ی حرارتی آب (W m^{-2})، λ گرمای نهان تبخیر (J kg^{-1})، c گرمای ویژه‌ی آب ($\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)، T_s دمای سطح آب ($^\circ\text{C}$)، و β نسبت باون (بدون بُعد) است. روش بیلان انرژی نسبت باون، اغلب به‌عنوان روش مرجع جهت مقایسه و ارزیابی سایر روش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. محدودیت این روش نیاز به داده‌های ورودی متعددی است که در اغلب دریاچه‌ها و مخازن سدها در دسترس نیست، لذا برای افزایش دقت روش بیلان انرژی، اندازه‌گیری‌های دمای سطح و عمق آب و اطلاعات هواشناسی، که مبین وضعیت سطح دریاچه باشد، ضروری است. [۲۵-۲۷]

۲.۲. روش پیشنهادی

روش جدید و پیشنهادی، که در ادامه معرفی و بحث شده است، به‌طور مشابه بر پایه‌ی معادله‌ی بیلان انرژی است. روش مذکور «بیلان انرژی آب و سطح مرجع» نامیده می‌شود. عبارت مرجع در این روش مربوط می‌شود به انتخاب سطح خاک خشک در نزدیکی مخزن، که در شرایط نسبتاً مشابه مخزن قرار دارد و با توجه به خشک بودن آن، تبخیر نمی‌کند. با استفاده از تعریف سطح مرجع، معادله‌ی بیلان انرژی مخزن حل می‌شود.

بیلان انرژی برای بیکره‌های آبی (در اینجا مخزن سد دوستی) می‌تواند به‌صورت رابطه‌ی ۲ بیان شود:

$$R_{nw} = G_w + H_w + \lambda E + N \quad (2)$$

که در آن، R_{nw} تابش خالص در سطح آب، H_w شارگرمای محسوس، و G_w شار گرمایی است که به رسوبات کف مخزن منتقل و مابقی پارامترها نیز قبلاً تشریح شده است. در معادله‌ی ۲، تابش خالص از طریق برآورد تابش‌های ورودی و خروجی تخمین زده می‌شود و معمولاً از شارگرمایی مربوط به رسوبات کف مخزن صرف‌نظر می‌شود. [۲۸] شارگرمای محسوس نیز از طریق رابطه‌ی ۳ قابل محاسبه است: [۱۹]

$$H_w = \frac{\rho c_p}{r_a} (T_w - T_a) \quad (3)$$

که در آن، ρ چگالی هوا، c_p گرمای ویژه هوا در فشار ثابت، r_a مقاومت آئروپنوماتیک (s m^{-1})، T_w دمای سطح آب، و T_a دمای هوا بر حسب درجه سلسیوس است.

ضریب λ بسته به دمای سطح آب می‌تواند با استفاده از رابطه‌ی ۴ محاسبه شود:

$$\lambda = 275 - 0.7 \times 10^{-4} T_w \quad (4)$$

از طرفی معادله‌ی بیلان انرژی برای سطح خاک خشک و فاقد پوشش که تبخیر نمی‌کند (سطح مرجع)، به‌صورت رابطه‌ی ۵ نوشته می‌شود:

$$R_{ns} = G_s + H_s \quad (5)$$

که در آن، R_{ns} تابش خالص دریافتی سطح خاک خشک، G_s شارگرمایی خاک، و H_s شارگرمای محسوس از خاک به اتمسفر است. مقدار شارگرما به خاک در مقیاس روزانه معمولاً قابل صرف نظر کردن است، اما در مقیاس ماهانه با فرض ظرفیت گرمایی خاک برابر با ۲۷۱ مگاژول بر مترمکعب در درجه سلسیوس و استفاده از متوسط ماهانه دمای هوا در ماه قبل و بعد، به کمک رابطه‌ی ۶ تخمین زده می‌شود: [۳۰]

$$G_s = 0.7 \times 10^9 (T_{month, i+1} - T_{month, i-1}) \quad (6)$$

شارگرمای محسوس از خاک خشک به اتمسفر نیز با استفاده از رابطه‌ی ۷ محاسبه می‌شود:

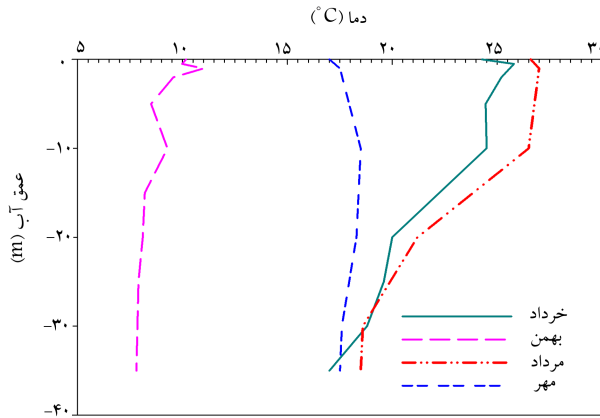
$$H_s = \frac{\rho c_p}{r_a} (T_s - T_a) \quad (7)$$

با در نظر گرفتن اینکه مقاومت آئروپنوماتیک اساساً تحت تأثیر سرعت باد قرار دارد، [۳۱] و نیز سرعت باد تقریباً بر روی مخزن و سطح خاک خشک مجاور آن مشابه است، می‌توان فرض کرد که مقاومت آئروپنوماتیک در مورد سطح آب در مخزن و سطح خاک خشک فاقد پوشش (سطح مرجع) در مجاورت مخزن تقریباً یکسان است. چنین فرضی توسط سایر پژوهشگران نیز در نظر گرفته شده است. [۳۲، ۳۳] براساس فرض مذکور و با ترکیب روابط ۲ الی ۷، میزان تبخیر از سطح آب از طریق رابطه‌ی ۸ قابل برآورد است:

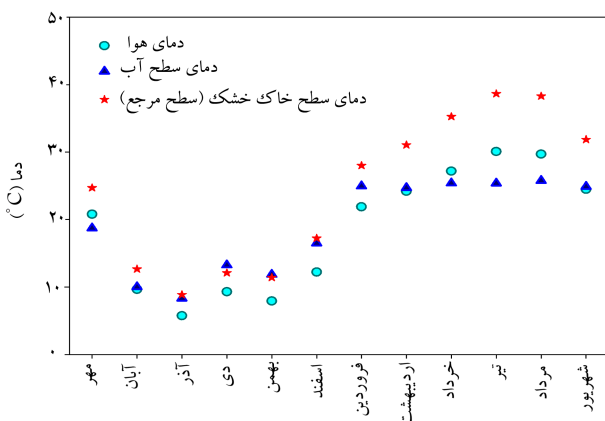
$$E = \lambda^{-1} [R_{nw} - \tau (R_{ns} - G_s) - N] \quad (8)$$

که در آن، $\tau = (T_w - T_a) / (T_s - T_a)$ پارامتری بُعد دماست. رابطه‌ی ۸، تبخیر آب از دریاچه یا مخزن سد را به‌عنوان تابعی از داده‌های در دسترس تابش خالص و دما مدل می‌کند. تابش خالص مستقیماً با اندازه‌گیری اجزاء طول موج کوتاه و بلند ورودی و خروجی اندازه‌گیری می‌شود و دماهای مورد استفاده در این رابطه (دمای هوا، سطح خاک خشک، و سطح آب) نیز به‌راحتی قابل برآورد است. توجه شود که در محاسبات روزانه همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شده است، از شارگرمای خاک چشم‌پوشی شده است، لذا، این پارامتر از رابطه‌ی ۸ حذف شده است.

همان‌طور که مشخص است، این مدل می‌تواند به‌عنوان یک روش حل معادله بیلان انرژی در نظر گرفته شود، که در آن به‌جای استفاده از ضریب نسبت باون، از پارامتری بُعد دما برای جایگزینی شارگرمای محسوس در رابطه‌ی بیلان انرژی استفاده شده است. در حقیقت مدل «بیلان انرژی آب و سطح مرجع» که از این پس به اختصار RWEB نامیده می‌شود، با تعریف خاک خشک فاقد پوشش به‌عنوان سطح مرجع، که در آن عبارت تبخیر در بیلان انرژی صفر است، و حل هم‌زمان معادله‌ی بیلان انرژی برای دو سطح آب و سطح مرجع، شکل جدیدی از بیلان انرژی مخزن حاصل شده است، که با داده‌های ورودی اندک انتظار می‌رود بتواند تبخیر از سطح آب را با دقت مطلوب برآورد کند.



شکل ۱. مقادیر اندازه‌گیری‌شده‌ی نیم‌رخ حرارتی مخزن سد دوستی طی سال آبی ۱۳۹۰-۹۱.



شکل ۲. مقادیر اندازه‌گیری‌شده‌ی دمای هوا، آب، و سطح مرجع (متوسط ماهانه) طی سال آبی ۱۳۹۰-۹۱.

به عمق در طول دوره‌ی اندازه‌گیری به‌طور متوسط روندی کاهشی دارد، که این روند در فصول گرم سال شدیدتر است و در زمستان روند یکنواخت‌تری نشان می‌دهد. آنچه از نتایج این اندازه‌گیری مشخص است، ظاهراً گرم‌شدن هوا در فصول گرم سال، عمدتاً تا عمق حدود ۲۰ متری از سطح آب را تحت تأثیر قرار می‌دهد و مقدار دما در اعماق بیشتر در این فصول تا حدی ثابت می‌ماند. لذا تغییرات دمای آب در سطح با شدت بیشتری نسبت به عمق تغییر می‌کند. قابل توجه است که اندازه‌گیری‌های دما در اعماق مختلف، امکان برآورد دقیق‌تر ذخیره‌ی حرارتی مخزن را فراهم می‌سازد. نتایج اندازه‌گیری دماهای مورد استفاده در این پژوهش شامل دمای هوا، آب، و خاک خشک (سطح مرجع) در شکل ۲ نشان داده شده است. در ماه‌های گرم سال، دمای آب اغلب کمتر از دمای هوا و در ماه‌های سرد مقدار آن بیشتر است. بنابراین ممکن است شدت تبخیر از مخزن در ماه‌های سرد تا حدی بیشتر از حد انتظار و در ماه‌های گرم کمتر برآورد شود، به‌ویژه اینکه با افزایش عمق آب، بیشینه‌ی شدت تبخیر ممکن است بسته به میزان ذخیره‌ی حرارتی مخزن در ۱ یا ۲ ماه بعد رخ دهد.^[۳۴] علاوه بر این همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، تقریباً تمامی دماهای اندازه‌گیری‌شده رفتار مشابهی در طول سال دارند و نسبتاً همبستگی مطلوبی دارند. با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری‌شده‌ی دمای هوا، سطح آب و خاک خشک، پارامتر بی‌بعد دما (τ) به‌دست آمده است. مقدار این پارامتر همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، بین حدود ۰/۵- تا ۱/۵ متغیر است و همان‌طور که در ادامه

۳. محدوده‌ی مطالعه، داده‌های موردنیاز و معیار ارزیابی

در این پژوهش مخزن سد دوستی که در مرز بین ایران و ترکمنستان ($35^{\circ}56'55''N$ و $61^{\circ}09'48''E$) و با همکاری دو کشور ساخته شده است، به‌عنوان محدوده‌ی مطالعه در نظر گرفته شده است. این سد به‌عنوان یکی از منابع تأمین آب شرب شهر مشهد و نیز مصارف کشاورزی و شرب سرخس محسوب می‌شود. از آنجا که سد دوستی در یک منطقه‌ی خشک ایران واقع شده است، تبخیر آب از آن حائز اهمیت ویژه‌ی است و نگرانی‌های عمده‌ی درخصوص تلفات آب آن از این طریق وجود دارد. ظرفیت مخزن این سد با مساحتی در حدود ۳۵ کیلومتر مربع، در حدود ۱۲۵۰ میلیون مترمکعب است، که در رقم ۴۷۳/۸ متری از دریاها آزاد قرار گرفته است. متوسط بارش سالانه در این منطقه ۱۸۷/۴ میلی‌متر و متوسط دمای هوا ۱۷/۹ درجه سلسیوس است. داده‌های هواشناسی موردنیاز در این پژوهش در مقیاس روزانه شامل کمیته و بیشینه‌ی دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد، دمای نقطه‌ی شبنم، ساعات آفتابی، فشار هوا، بارندگی، و تبخیر از تشت از اطلاعات ایستگاه خودکار مستقر در محل سد، ایستگاه پل خاتون در مجاورت محل سد، و ایستگاه سینوپتیک سرخس جمع‌آوری شده است. مساحت مخزن نیز با استفاده از منحنی هیپسومتریک و تراز سطح آب برآورد شده است. به منظور کاربرد دقیق معادله‌ی بیلان انرژی، مقایسه، و ارزیابی روش پیشنهادی این پژوهش، نیاز به داده‌های تکمیلی از دمای آب در مخزن سد بوده است، که به این منظور در بازه‌های زمانی ۱۶ روزه و به مدت ۱ سال، از طریق بازدیدهای میدانی و در طول حدود ۲۵ کیلومتر مخزن سد در چندین نقطه (عمدتاً به فاصله‌ی ۵۰۰ الی ۱۰۰۰ متر) و در اعماق مختلف (از سطح تا عمق در فواصل ۰/۸ الی ۲ متری بسته به عمق)، دمای آب با استفاده از دستگاه مولتی‌متر اندازه‌گیری شده است. همان‌طور که قبلاً تشریح شده است، در این پژوهش محدوده‌ی نسبتاً کوچکی (در حدود ۲ مترمربع) در مجاورت مخزن، که خاک خشک داشته است، به‌عنوان سطح مرجع در نظر گرفته شده و دمای سطح آن نیز در بازه‌های زمانی ۱۶ روزه توسط دماسنج مادون قرمز اندازه‌گیری شده است. جهت اطمینان از عدم مرطوب‌شدن این سطح تا اندازه‌گیری بعدی، از پوشش پلاستیکی در حد فاصل اندازه‌گیری‌ها استفاده شده است.

روش پیشنهادی این پژوهش با نتایج حاصل از بیلان انرژی نسبت باون و نیز داده‌های تشت تبخیر مستقر در محل سد مقایسه شده است. به این منظور از شاخص میانگین مجذور مربعات اختلاف RMSD استفاده شده است، که از طریق رابطه‌ی ۹ به‌دست می‌آید:

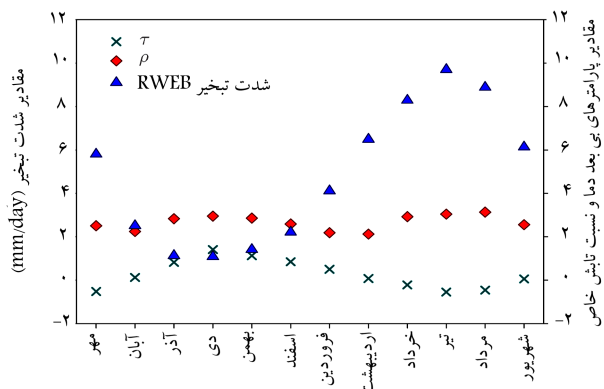
$$RMSD = \left[\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (E_{BREB,i} - E_{eq,i})^2 \right]^{0.5} \quad (9)$$

که در آن، E_{BREB} مقادیر تبخیر حاصل از روش بیلان انرژی نسبت باون، و E_{eq} مقادیر تبخیر حاصل از روش پیشنهادی این پژوهش و نیز تشت تبخیر است.

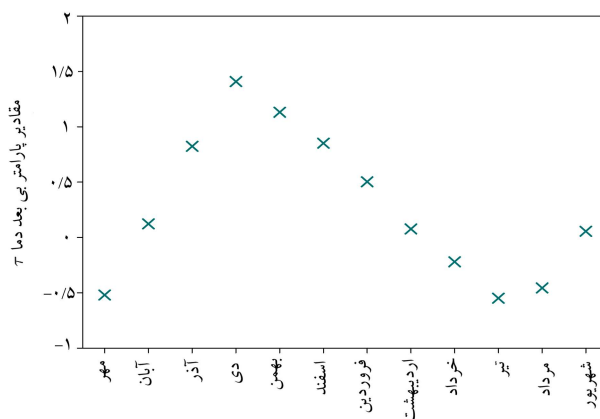
۴. نتایج و بحث

۴.۱. نیم‌رخ دما و نتایج تحلیل تابش مخزن

همان‌طور که در قسمت مواد و روش‌ها بیان شده است، دمای سطح و عمق آب مخزن سد دوستی در فواصل زمانی ۱۶ روزه و در نقاط مختلف در طول مخزن سد اندازه‌گیری شده است، که میانگین پروفیل دمای آب در این مخزن در شکل ۱ برای نمونه در ۴ ماه در فصول مختلف ارائه شده است. تغییرات دمای آب از سطح



شکل ۵. تغییرات مقادیر شدت تبخیر حاصل از روش پیشنهادی در ارتباط با تغییرات پارامترهای بی‌بعد دما τ و نسبت تابش خالص ρ طی سال آبی ۱۳۹۰-۹۱.

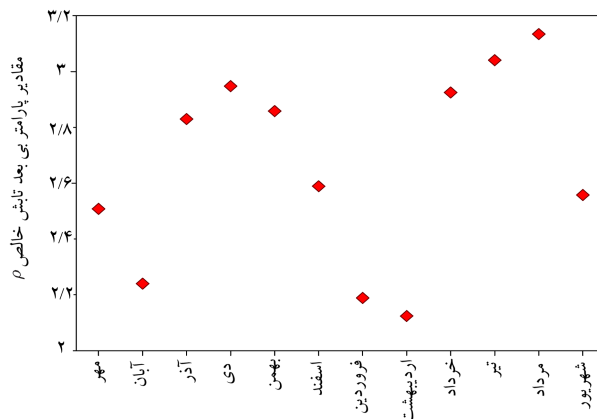


شکل ۳. تغییرات مقادیر پارامتر بی‌بعد دما τ طی سال آبی ۱۳۹۰-۹۱.

می‌شود. براساس نتایج به‌دست آمده به نظر می‌رسد روش بیلان انرژی آب و سطح مرجع بیشتر وابسته به پارامتر بی‌بعد دما τ است، تا به نسبت تابش خالص ρ . در حقیقت، در دسترس بودن داده‌های دما اهمیت ویژه‌ی در استفاده از مدل پیشنهادی دارد. این مهم شاید رهیافتی باشد که در مطالعات بعدی امکان حذف و یا جایگزینی عوامل مربوط به تابش خالص مخزن در روش پیشنهادی را فراهم کند، که می‌تواند معادله‌ی مذکور را حتی ساده‌تر کند. طبق معادله‌ی ۸ انتظار می‌رفت که رابطه‌ی معکوسی بین شدت تبخیر و مقدار پارامتر بی‌بعد دما τ وجود داشته باشد. کاربرد مدل مذکور در مخزن سد دوستی نشان داده است که بیشینه و کمینه‌ی مقدار شدت تبخیر به ترتیب در زمان وقوع کمینه و بیشینه‌ی مقدار پارامتر τ ، یعنی ماه‌های تیر و دی رخ می‌دهد. این اتفاق به‌وضوح در شکل ۵ قابل مشاهده است. بنابراین می‌توان گفت با توجه به اینکه دمای سطح مرجع (خاک خشک فاقد پوشش) همواره بیشتر از دمای هوا بوده است، عامل اصلی که پارامتر بی‌بعد دما τ و در نتیجه شدت تبخیر را تحت تأثیر قرار می‌دهد، دمای سطح آب است. البته از نقش مهم تابش و ذخیره‌ی حرارتی مخزن نمی‌توان چشم‌پوشی کرد، اما باید توجه داشت که این عوامل نیز تحت تأثیر دمای سطح آب قرار دارند.

۳.۴. مقایسه و ارزیابی برآوردهای تبخیر

مقایسه و ارزیابی چگونگی رفتار مدل پیشنهادی این پژوهش در برآورد تبخیر با روش بیلان انرژی نسبت باون (BREB) می‌تواند صحت و دقت این روش را روشن‌تر کند. شکل ۶، مقادیر شدت تبخیر حاصل از روش پیشنهادی این پژوهش را در مقایسه با روش‌های بیلان انرژی نسبت باون و داده‌های تحت تبخیر نشان می‌دهد. همان‌طور که در نگاه اول به نظر می‌رسد، برآوردهای حاصل از روش پیشنهادی تقریباً انطباق مطلوبی با روش بیلان انرژی نسبت باون دارد. در حقیقت شکل ۶ مشخص می‌کند که مدل پیشنهادی به لحاظ رفتاری در طی سال عملکرد مطلوبی داشته است. البته اندکی بیش برآورد در ماه‌های گرم سال و کم برآورد در ماه‌های سرد در روش پیشنهادی نسبت به روش بیلان انرژی نسبت باون مشاهده می‌شود. از سوی دیگر نتایج به دست آمده، مقادیر شدت تبخیر حاصل از تحت را نشان می‌دهد، که در مقیاس ماهانه به دلیل بیش برآوردها و کم برآوردهای نسبتاً قابل توجهی، دقت مطلوبی ندارد. ذکر این نکته ضروری است که اصولاً در بازه‌های زمانی کمتر از سالانه، دقت کم برآوردهای حاصل از تحت تبخیر امری پذیرفته شده است. [۳۶، ۳۷] لحاظ‌نشدن ذخیره‌ی حرارتی مخزن در مورد کاربرد تحت تبخیر عامل اصلی این خطاست. بدیهی است کوچک‌بودن سطح آن نسبت به سطح مخزن به تشدید این اختلاف منجر می‌شود. به هر حال هر چند این نتیجه بارها و بارها در پژوهش‌های



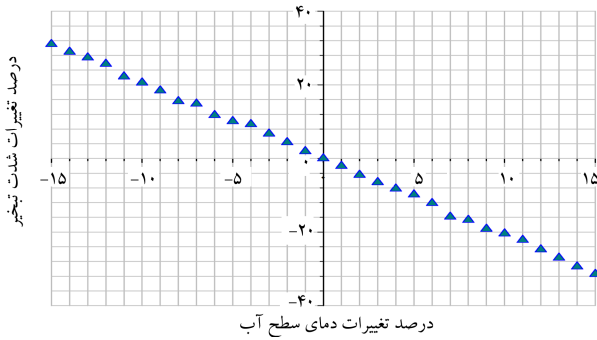
شکل ۴. تغییرات مقادیر پارامتر بی‌بعد نسبت تابش خالص ρ طی سال آبی ۱۳۹۰-۹۱.

بحث شده است، نقش مهمی در برآوردهای تبخیر با استفاده از معادله‌ی ۸ دارد. طبق شکل مذکور، رفتار پارامتر τ به لحاظ زمان وقوع بیشینه و کمینه‌ی مقدار خود، متفاوت با روند تغییرات دماهای اندازه‌گیری شده است.

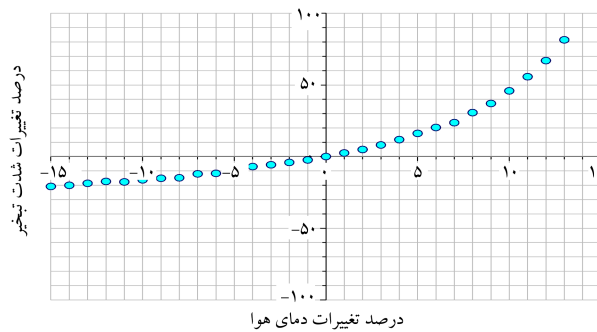
علاوه بر دماهای مذکور، براساس رابطه‌ی ۸، تابش خالص مخزن و خاک خشک فاقد پوشش (سطح مرجع) نیز جهت برآورد تبخیر به روش پیشنهادی مورد نیاز است. مقادیر تابش خالص نیز با استفاده از الگوریتم‌های موجود در محاسبه‌ی تابش طول موج کوتاه و بلند ورودی و خروجی و با فرض ضرایب آلبیدو ۰.۳۵ و ۰.۷ به ترتیب برای سطح خاک خشک و سطح آب محاسبه شده است. [۳۵] مقادیر تابش خالص برآورده شده در شکل ۴ ارائه شده است. لذا براساس نتایج، میزان انرژی تابشی دریافتی توسط پیکره‌های آبی از سطح خاک بیشتر است. بدیهی است تفاوت اصلی دو سطح در دریافت انرژی، مربوط به تفاوت در گرمای نهان تبخیر است. در روش پیشنهادی، نسبت تابش خالص دریافتی مخزن به سطح مرجع ($\rho = R_{nw}/R_{nsoil}$) نیز می‌تواند به عنوان پارامتری بی‌بعد جهت بررسی تغییرات تابش مورد توجه قرار گیرد. شکل ۵ مشخص می‌کند که تغییرات پارامتر بی‌بعد تابش خالص در حدود ۲/۱ تا ۳/۱ است.

۲.۴. برآورد تبخیر حاصل از روش پیشنهادی (RWEB)

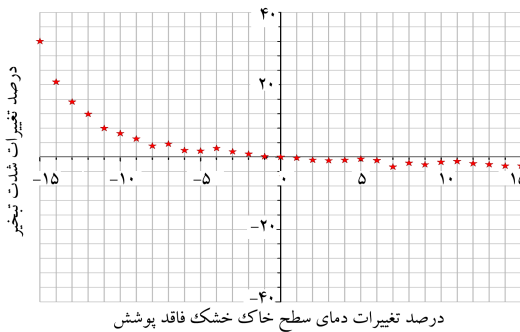
پس از جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، مقادیر شدت تبخیر در مقیاس ماهانه‌ی حاصل از روش پیشنهادی این پژوهش در شکل ۵ ارائه شده است. همچنین در شکل ۵، رفتار نتایج مدل مذکور در ارتباط با دو عامل بی‌بعد دما τ و نسبت تابش خالص ρ مشاهده



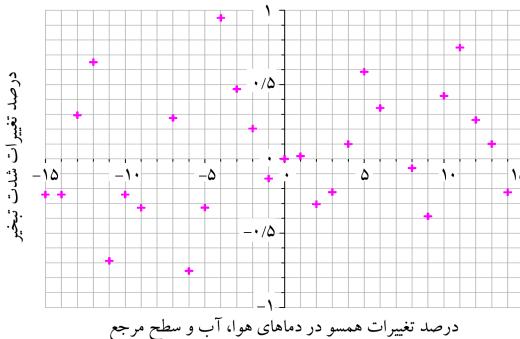
شکل ۷. حساسیت روش پیشنهادی (RWEB) به تغییرات دمای سطح آب طی سال آبی ۹۱-۱۳۹۰.



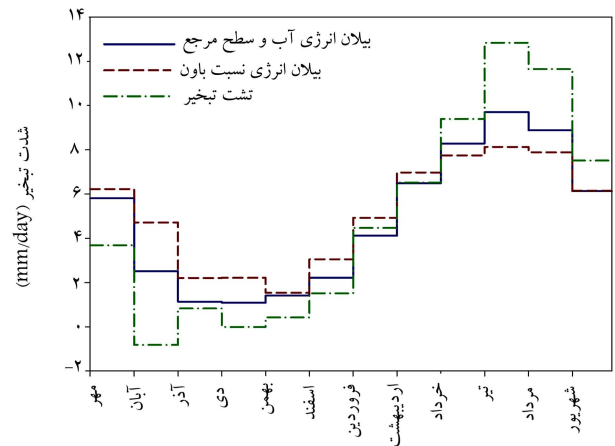
شکل ۸. حساسیت روش پیشنهادی (RWEB) به تغییرات دمای هوا طی سال آبی ۹۱-۱۳۹۰.



شکل ۹. حساسیت روش پیشنهادی (RWEB) به تغییرات دمای سطح خاک خشک (سطح مرجع) طی سال آبی ۹۱-۱۳۹۰.



شکل ۱۰. حساسیت روش پیشنهادی (RWEB) به تغییرات همسو در دماهای هوا، آب، و سطح مرجع طی سال آبی ۹۱-۱۳۹۰.



شکل ۶. مقادیر شدت تبخیر حاصل از روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های بیان انرژی نسبت باون و تشت تبخیر طی سال آبی ۹۱-۱۳۹۰.

مختلفی منعکس شده است، اما تکرار آن در این پژوهش نیز خالی از لطف نیست، که برآوردهای تبخیر حاصل از تشت تبخیر در مقیاس‌های زمانی کوتاه (کمتر از سالانه) و بالطبع در مدیریت منابع آب در شرایط امروزی، زیاد مطلوب نخواهد بود. قابل توجه است که شاخص میانگین مجذور مربعات اختلاف برای روش بیان انرژی آب و سطح مرجع و برآوردهای تشت تبخیر به ترتیب $۲٫۷$ و $۱٫۲$ میلی‌متر بر روز در ماه حاصل شده است. همان‌طور که مشهود است، مقدار RMSD برای روش پیشنهادی به مراتب مطلوب‌تر از نتایج تشت تبخیر است.

۴.۴. تحلیل حساسیت

روش پیشنهادی این پژوهش برای برآورد تبخیر، ابتدا به‌طور مجزا و براساس عوامل مؤثر در آن مورد تحلیل و درگام بعدی با روش بیان انرژی نسبت باون و نیز برآوردهای تشت تبخیر مورد مقایسه قرار گرفته است. در مجموع به نظر می‌رسد که روش پیشنهادی توانسته است تا حد مطلوبی نتایج قابل قبولی در برآورد تبخیر از مخزن سد دوستی تولید کند. در جهت تکمیل فرایند ارزیابی رفتار روش پیشنهادی، در این قسمت به تحلیل حساسیت روش مذکور به داده‌های ورودی پرداخته شده است. بنابراین مدل بیان انرژی آب و سطح مرجع (RWEB) پیشنهادی این پژوهش نسبت به تغییرات داده‌های ورودی مدل شامل: دمای هوا، آب، و سطح مرجع و نیز تابش خالص مربوط به هر کدام تحلیل شده است. تحلیل حساسیت نشان داده است که بروز خطای همسو در اندازه‌گیری دماهای مورد نیاز مدل، تغییر قابل توجهی در نتیجه‌ی مدل ایجاد نمی‌کند. اما خطا در اندازه‌گیری هر کدام از دماها به تنهایی یا در جهات مختلف نتیجه‌ی مدل را تغییر می‌دهد. طبق نتایج، مدل بیشترین حساسیت را نسبت به دمای هوا و سطح مرجع نشان داده و کمترین حساسیت مدل نسبت به داده‌های دمای آب و تابش خالص است. طبق شکل ۷، خطای اندازه‌گیری حدود $\pm ۱۵\%$ دمای آب موجب بروز خطایی در حدود $\pm ۳۱\%$ در برآورد شدت تبخیر شده است. این در حالی است که خطای $\pm ۱۵\%$ دمای هوا، تغییرات -۲۱% تا $+۸۲\%$ در شدت تبخیر را سبب شده است (شکل ۸). تغییرات $\pm ۱۵\%$ دمای سطح مرجع نیز خطایی در حدود -۳% تا $+۳۳\%$ در برآوردهای شدت تبخیر حاصل کرده است (شکل ۹). هر چند مطابق شکل ۱۰، حساسیت بسیار اندکی در روش پیشنهادی نسبت به بروز خطای همسو در داده‌های دما مشاهده می‌شود، به طوری که چنانچه هر ۳ دما به طور مشابه $\pm ۱۵\%$ تغییرات داشته باشند، خطای شدت تبخیر برآوردی، در حدود $\pm ۱\%$ خواهد بود.

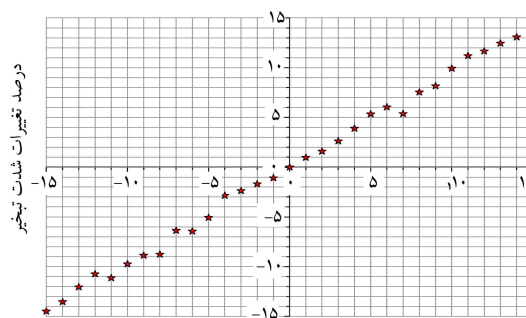
پیشنهادی ضروری باشد. در حقیقت، تخمینی از تابش خالص و نیز دمای آب و عدم وجود مقادیر اندازه‌گیری شده پارامترهای مذکور، تأثیر قابل توجهی در نتایج مدل نخواهد داشت. این نتیجه در جهت توسعه کاربردی روش پیشنهادی اهمیت ویژه‌ی دارد.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با تعریف مفهوم سطح مرجع تلاش شده است یک حل ساده و متفاوت از معادله‌ی بیلان انرژی برای برآورد تبخیر از پیکره‌های آبی (در اینجا مخزن سد دوستی) ارائه شود، که به‌عنوان روش بیلان انرژی آب و سطح مرجع نامیده شده است. این تلاش منجر به تولید معادله‌ی شده است که قادر است با داده‌های ورودی اندک، که به آسانی قابل اندازه‌گیری و یا برآورد هستند، تبخیر آب از مخزن را با دقت مطلوبی برآورد کند. اندازه‌گیری‌های میدانی در بازه‌های زمانی ۱۶ روزه و به مدت ۱ سال از مخزن سد دوستی در نقاط و اعماق مختلف، به منظور سنجش و ارزیابی روش پیشنهادی انجام شده است. نتایج بیلان انرژی نسبت باون مخزن و روش پیشنهادی تقریباً انطباق مطلوبی داشته و دقت روش پیشنهادی تا حد زیادی مناسب‌تر از برآوردهای تشت تبخیر ارزیابی شده است. وجود ۲ پارامتر بی‌بعد دما و نسبت تابش خالص در روش پیشنهادی می‌تواند قابلیت ساده‌تر شدن این معادله را نیز فراهم کند. چرا که تحلیل حساسیت روش مذکور، نشان از حساسیت بسیار اندک به داده‌های تابش و دمای سطح آب داشته است، که امکان جایگزینی و یا تخمین آنها به هر طریق را در شرایط مختلف میسر می‌سازد. از طرفی حساسیت بالای این روش با دمای هوا نیز نمی‌تواند محدودیت تلقی شود، زیرا تقریباً در تمامی مناطق، این داده اندازه‌گیری و ثبت می‌شود و این امر نیاز به دستگاه‌های خاص و پیچیده نیز ندارد. بنابراین می‌توان گفت روش پیشنهادی این پژوهش که با حل هم‌زمان معادله‌ی بیلان انرژی برای سطح تبخیرکننده (آب) و غیرتبخیرکننده (خاک خشک) توسعه و مورد کاربرد قرار گرفته است، احتمالاً با اندازه‌گیری دمای هوا و فقط تخمینی از داده‌های دمای آب و تابش خالص نیز عملکرد مطلوبی خواهد داشت. بدیهی است توسعه کاربردی روش پیشنهادی نیازمند مطالعات بیشتری در این زمینه خواهد بود، که مهم‌ترین آنها می‌تواند در راستای ساده‌سازی و کاربردهای سنجش از دور سمت و سو یابد.

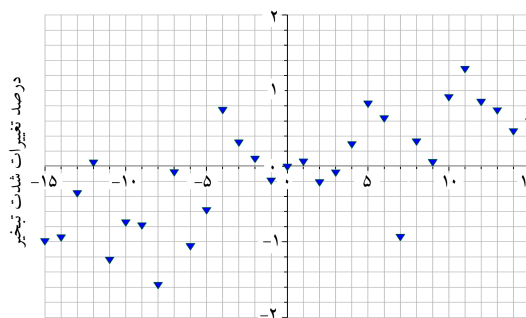
منابع (References)

1. Stets, E.G., Striegl, R.G., Aiken, G.R., Rosenberry, D.O. and Winter, T.C. "Hydrologic support of carbon dioxide flux revealed by wholelake carbon budgets", *J. Geophys. Res.*, G01008 **114**(1), pp. 1-14 (2009).
2. McMahon, T.A., Peel, M.C., Lowe, L., Srikanthan, R. and McVicar, T.R. "Estimating actual, potential, refer-



شکل ۱۱. حساسیت روش پیشنهادی (RWEB) به تغییرات تابش خالص مخزن طی سال آبی ۹۱-۱۳۹۰.

شکل ۱۱. حساسیت روش پیشنهادی (RWEB) به تغییرات تابش خالص مخزن طی سال آبی ۹۱-۱۳۹۰.



شکل ۱۲. حساسیت روش پیشنهادی (RWEB) به تغییرات تابش خالص سطح مرجع طی سال آبی ۹۱-۱۳۹۰.

شکل ۱۲. حساسیت روش پیشنهادی (RWEB) به تغییرات تابش خالص سطح مرجع طی سال آبی ۹۱-۱۳۹۰.

در سوی دیگر، تغییرات $\pm 15\%$ تابش خالص مخزن، سبب تغییرات شدت تبخیر به میزان $\pm 15\%$ شده است (شکل ۱۱). در نهایت، کمترین حساسیت مدل به داده‌های ورودی مربوط تابش خالص سطح مرجع یا همان خاک خشک، فاقد پوشش است، که خطای $\pm 15\%$ در این پارامتر سبب بروز خطای بسیار جزئی $\pm 1.7\%$ در برآوردهای شدت تبخیر شده است (شکل ۱۲).

در مجموع نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که مدل مذکور نسبت به مقادیر تابش خالص و نیز دمای آب حساسیت اندکی دارد و به نظر می‌رسد فقط اندازه‌گیری دقیق دما به ویژه دمای هوا جهت حصول نتیجه‌ی مطلوب در برآوردهای تبخیر با روش

ence crop and pan evaporation using standard meteorological data: A pragmatic synthesis", *Hydrol. Earth Sys. Sci.*, **17**(4), pp. 1331-1363 (2013).

3. Bowen, I.S. "The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface", *Physical Review*, **27**(6), pp. 779-787 (1926).
4. Penman, H.L. "Natural evaporation from open water, bare soil and grass", *Proc. Royal Soc.*, **A193**(1032), pp.

- 120-145 (1948).
5. Makkink, G.F. "Ekzameno de la formulo de Penman", *Netherlands J. Agric. Sci.*, **5**, pp. 290-305 (1957).
 6. Blaney, H.F. and Criddle, W.D., *Determining Water Requirements in Irrigated Areas from Climatological Irrigation Data*, Technical Paper No. 96, US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, D.C., 48 p. (1950).
 7. Jensen, M.E. and Haise, H.R. "Estimating evapotranspiration from solar radiation", *J. Irrig. Drainage Div.*, **89**(4), pp. 15-41 (1963).
 8. Stephens, J.C. and Stewart, E.H. "A comparison of procedures for computing evaporation and evapotranspiration", Publication 62, International Association of Scientific Hydrology, International Union of Geodynamics and Geophysics, Berkeley, CA, pp. 123-133 (1963).
 9. Hamon, W.R. "Estimating potential evapotranspiration", *Hyraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, **87**(HY3), pp. 107-120 (1961).
 10. Priestley, C.H.B. and Taylor, R.J. "On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters", *Monthly Weather Rev.*, **100**, pp. 81-92 (1972).
 11. De Bruin, H.A.R. and Keijman, J.Q. "The priestley-Taylor evaporation model applied to a large shallow lake in the Netherlands", *J. Appl. Meteor.*, **18**, pp. 898-903 (1979).
 12. Brutsaert, W. and Stricker, H. "An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration", *Water Resour. Res.*, **15**(2), pp. 443-450 (1979).
 13. Dalton, J. "Experimental essays on the constitution of mixed gases; on the force of steam or vapor from water and other liquids in different temperatures, both in a Torricellian vacuum and in air; on evaporation and on the expansion of gases by heat", *Mem. Manchester Liter. and Phil. Soc.*, pp. 535-602 (1802).
 14. Rosenberry, D.O., Winter, T.C., Buso, D.C. and Likens, G.E. "Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA", *J. Hydrol.*, **340**(3-4), pp. 149-166 (2007).
 15. Gallego-Elvira, B., Baille, A., Mart'in-G'orriz, B. and Mart'inez-A'lvarez, V. "Energy balance and evaporation loss of an agricultural reservoir in a semi-arid climate (south-eastern Spain)", *Hydrol. Process.*, **24**(6), pp. 758-766 (2010).
 16. Lenters, J.D., Kratz, T.K. and Bowser, C.J. "Effects of climate variability on lake evaporation: Results from a long-term energy budget study of Sparkling Lake, northern Wisconsin (USA)", *J. Hydrol.*, **308**(1-4), pp. 168-195 (2005).
 17. Hassani, A., Tajrishy, M. and Abrishamchi, A. "Evaporation study of savah dam reservoir using modified energy budget method", *Sharif Civil Engineering Journal*, **29**(1), pp. 115-127 (2011). (In Persian)
 18. Majidi, M. and Alizadeh, A. "Analysis of the effect of missing weather data and alternative methods to estimate the reference evapotranspiration and ranking ETo equations for different climatic conditions (case study: Khorasan Razavi provinces)", *Journal of Water and Soil*, **25**(6), pp. 1503-1519 (2012). (In Persian)
 19. Stauffer, R.E. "Testing lake energy budget models under varying atmospheric stability conditions", *J. Hydrol.*, **128**(1-4), pp. 115-135 (1991).
 20. Sene, K.J., Gash, J.H. and McNeil, D.D. "Evaporation from a tropical lake: comparison of theory with direct measurements", *J. Hydrol.*, **127**(1-4), pp. 193-217 (1991).
 21. Stannard, D.I. and Rosenberry, D.O. "A comparison of short-term measurements of lake evaporation using eddy correlation and energy budget methods", *J. Hydrol.*, **122**(1-4), pp. 15-22 (1991).
 22. Winter, T.C., Buso, D.C., Rosenberry, D.O., Likens, G.E., Sturrock, A.M.J. and Mau, D.P. "Evaporation determined by the energy budget method for Mirror Lake, New Hampshire", *Limnology and Oceanography*, **48**(3), pp. 995-1009 (2003).
 23. Simon, E. and Mero, F. "A simplified procedure for the evaluation of the Lake Kinneret evaporation", *J. of Hydrol.*, **78**(3-4), pp. 291-304 (1985).
 24. Dos Reis, R.J. and Dias, N.L. "Multi-season lake evaporation: Energy-budget estimates and CRLE model assessment with limited meteorological observations", *J. Hydrol.*, **208**(3-4), pp. 135-147 (1998).
 25. Anderson, E.R. "Energy-budget studies. In: *Water Loss Investigations: Lake Hefner Studies*, Technical Report, U.S. Geological Survey, Professional Paper, Series Number 269, 158 p. (1954).
 26. Assouline, S. and Mahrer, Y. "Evaporation from Lake Kinneret: 1. Eddy correlation system measurements and energy budget estimates", *Water Resour. Res.*, **29**, pp. 901-910 (1993).
 27. Sturrock, A.M., Winter, T.C. and Rosenberry, D.O. "Energy budget evaporation from Williams Lake - a closed lake in North Central Minnesota", *Water Resour. Res.*, **28**(6), pp. 1605-1617 (1992).
 28. Sacks, L.A., Lee, T.M. and Radell, M.J. "Comparison of energy-budget evaporation losses from two morphometrically different Florida seepage lakes", *J. Hydrol.*, **156**(1-4), pp. 311-334 (1994).
 29. Brutsaert, W., *Evaporation Into the Atmosphere: Theory, History and Applications*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht (1982).
 30. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, R. and Smith, M., *Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements*, Irrigation and Drainage Paper 56, 300 p., Rome, UN Food and Agriculture Organization (1998).
 31. Liu, S., Mao, D. and Lu, L. "Measurement and estimation of the aerodynamic resistance", *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, **3**(3), pp. 681-705 (2006).
 32. Qiu, G.Y., Yano, T. and Momii, K. "An improved methodology to measure evaporation from bare soil based on comparison of surface temperature with a dry soil surface", *J. Hydrol.*, **210**(1-4), pp. 93-105 (1998).
 33. Ben-Asher, J., Matthias, A.D. and Warrick, A.W. "Assessment of evaporation from bare soil by infrared thermometry", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **47**(2), pp. 185-191 (1983).

34. Mironov, D., Kirillin, G., Heise, E., Golosov, S., Terzhevik, A. and Zverev, I. "Parameterization of lakes in numerical models for environmental applications", *Proc. of the 7th Workshop on Physical Processes in Natural Waters*, A. Yu. Terzhevik, Ed., Northern Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Karelia, Russia, pp. 135- 143 (2003).

35. Cogley, J.G. "The albedo of water as a function of latitude", *Monthly Weather Rev.*, **107**, pp. 775-781 (1979).

36. Winter, T.C. "Uncertainties in estimating the water balance of lakes", *Water Resources Bulletin*, **17**(1), pp. 82-115 (1981).

37. Winter, T.C. and Rosenberry, D.O. "Evaluation of 11 equations for determining evaporation for a small lake in the north central United States", *Water Resources Research*, **31**, pp. 983-993 (1995).