

تبخیر از دریاچه‌ها و مخازن سدها: تحلیل حساسیت و رتبه‌بندی روش‌های موجود

میثم مجیدی^{*۱} - امین علیزاده^۲ - مجید وظیفه دوست^۳ - علیرضا فریدحسینی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۲/۰۷

چکیده

پیچیدگی فرایند تبخیر از پیکره‌های آبی مانند دریاچه‌ها و مخازن سدها، کمبود اطلاعات کافی و معتبر مورد نیاز و از طرفی عدم اتکاء مدیریت این منابع و مخازن به داده‌های زمانی و مکانی دقیق‌تر، موجب کند شدن پیشرفت‌های تحقیقاتی و کاربردی در این زمینه نسبت به سایر مولفه‌های هیدرولوژیکی شده است. مدیریت و بهره‌برداری از ذخایر سدها به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک نیاز به برآوردهای مطمئن‌تری از تبخیر دارد. این وضعیت در شرایطی مانند سد دوستی که منبع استراتژیک تامین بخش وسیعی از آب شرب مشهد نیز می‌باشد، اهمیتی دوچندان می‌یابد. تحقیق حاضر با هدف ارزیابی جامع روش‌های برآورد تبخیر از سطح آب و مقایسه آن‌ها با بیلان انرژی دریاچه سد دوستی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده، انجام پذیرفت. به منظور بررسی رفتار روش‌های مختلف ضمن مقایسات سالانه، ماهانه و روزانه، تحلیل حساسیت این مدل‌ها به داده‌های ورودی به منظور سنجش پایداری برآوردهای حاصل از هر روش نیز انجام پذیرفت. در نهایت ۱۹ روش برآورد تبخیر بر اساس بیلان انرژی دریاچه به لحاظ دقت برآوردها رتبه‌بندی گردیدند. بر اساس نتایج حاصل شده، روش‌های جنسن - هیز، مککینک، دبروین و پنمن، با مقادیر RMSD به ترتیب برابر با ۱/۳۴، ۱/۶۲ و ۱/۶۵ میلی‌متر بر روز نتایج مطلوب‌تری نسبت به سایر روش‌ها حاصل نمودند. در این میان، روش‌های جنسن - هیز و مککینک، به دلیل سادگی، دقت مطلوب، داده‌های ورودی اندک و حساسیت کمتر به این داده‌ها، گزینه‌های مناسب‌تر و مقرون به صرفه‌ای برای برآورد تبخیر از دریاچه سد دوستی هستند.

واژه‌های کلیدی: بیلان انرژی، تحلیل حساسیت، روش‌های برآورد تبخیر، سد دوستی

مقدمه

یکی از اساسی‌ترین اجزاء هیدرولوژیک، مورد توجه محققین و دست‌اندرکاران بخش آب قرار گیرد. البته تحقیقات در این زمینه در چند مورد به صورت پراکنده انجام شده است (۵، ۲۴ و ۴۶)، اما بدیهی است مطالعات مذکور به دلیل عدم انسجام و تداوم، نتوانسته است مدیریت منابع آب جایگاه واقعی خود را بیابد. عدم وجود تجهیزات اولیه اندازه‌گیری اجزاء بیلان آبی و حتی هواشناسی در اغلب دریاچه‌ها و مخازن کشور و در نتیجه عدم وجود اطلاعات کافی و مناسب در این مورد، شاهدی بر این مدعاست.

عمدتاً برآوردهای تبخیر در دریاچه‌ها و مخازن سدها بر داده‌های حاصل از تشت متکی است؛ این در حالی است که عدم قطعیت در این داده‌ها مورد تاکید بسیاری از محققان است (۵۵). برآورد تبخیر از دریاچه‌ها و مخازن سدها، به دلیل عوامل مختلف تأثیرگذار بر آن، فرایند پیچیده‌ای می‌باشد. اصولاً شدت تبخیر از پیکره‌های آبی بیشتر با انرژی در دسترس و مورد نیاز تبخیر و امکان پخشیدگی بخار آب به اتمسفر کنترل می‌گردد. روش‌های مختلفی بر اساس در نظر گرفتن عوامل مختلف موثر بر تبخیر، جهت برآورد آن توسعه داده شده است. این روش‌ها در چندین گروه مختلف قابل تقسیم‌بندی هستند که

در اغلب مناطق خشک و نیمه‌خشک، بررسی‌ها نشان داده است که حجم قابل توجهی از ذخیره آب پشت سدها به‌صورت تبخیر تلف شده و از دسترس خارج می‌گردد (۶۲). سد دوستی که با هدف تامین بخش عمده‌ای از آب شرب شهر مشهد به‌عنوان دومین کلان‌شهر کشور و نیز تامین مصارف کشاورزی احداث گردیده است، در مرز مشترک ایران و ترکمنستان واقع شده و بهره‌برداری بهینه آب استحصالی آن، از اهمیت بسیاری برخوردار است. هرچند تحقیقات متعددی در مورد بهینه‌سازی مصرف آب کشاورزی و برآوردهای تبخیر - تعرق گیاهان در این راستا در کشور انجام شده است (۲، ۳، ۳۲، ۳۳، ۵۰ و ۶۸)، اما به نظر نمی‌رسد هنوز مدیریت منابع آب در کشور آنقدر رشد کرده باشد که تبخیر از پیکره‌های آبی نیز به‌عنوان

۱، ۲ و ۴ - به ترتیب دانش‌آموخته دکتری، استاد و استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
*نویسنده مسئول: (Email: maysam.majidi@gmail.com)
۳ - استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه گیلان

روش‌های برآورد تبخیر تعیین نمودند. به‌طور کلی تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده است، منجر به تولید نتایجی شده است که اغلب وابسته به شرایط محدوده مورد مطالعه و نوع اطلاعات موجود و یا اندازه‌گیری شده می‌باشد لذا نیاز به بررسی این روش‌ها برای مناطق مختلف با شرایط اقلیمی و فیزیکی متفاوت، لزوماً منجر به نتایج مشابه نمی‌گردد. از این رو شناسایی این روش‌ها و بررسی رفتار آنها برای منطقه‌ای مانند دریاچه سد دوستی، می‌تواند نتایج سودمندی به‌همراه داشته باشد. از طرفی با توجه به کمبود شدید اطلاعات و داده‌های معتبر جهت برآورد نسبتاً دقیق تبخیر در اغلب دریاچه‌ها و سدهای ایران، جای خالی تحقیقات جامعی که با اندازه‌گیری‌های منظم و مورد نیاز روش‌های مناسب به این منظور را ارزیابی و جهت کاربرد در شرایط مشابه توصیه نماید، احساس می‌گردد. از این رو تحقیق حاضر کوششی است در جهت برآورد تبخیر از دریاچه سد دوستی و تکمیل فرایند ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر از دریاچه‌ها و مخازن سدها برای شرایط اقلیمی محدوده مورد مطالعه. در واقع حصول برآوردهای قابل اطمینان از تبخیر در جهت مدیریت صحیح منابع آبی و توصیه روش‌های مناسب بر اساس رهیافت‌های علمی حاصل از این تحقیق، به عنوان الگو جهت دستیابی به این مهم در سایر دریاچه‌ها و مخازن سدهای کشور، از مهم‌ترین اهداف نویسندگان این مقاله است.

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی و جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز

تحقیق حاضر بر روی دریاچه سد دوستی واقع در مرز ایران و ترکمنستان انجام پذیرفت. سد دوستی یکی از مهم‌ترین منابع تامین آب به‌ویژه آب شرب شهر مشهد محسوب می‌گردد. از آنجا که این سد در منطقه‌ای نسبتاً خشک ایران قرار گرفته است، تبخیر از آن اهمیت خاصی داشته و با توجه محدودیت داده‌های مورد نیاز، یکی از مهم‌ترین چالش‌های آن به شمار می‌آید. سد دوستی با ارتفاع حدود ۷۸ متر، ظرفیت ۱۲۵۰ میلیون مترمکعب و مساحت حدود ۳۵ کیلومتر مربع جزو بزرگ‌ترین مخازن سدهای ایران است. این سد که تامین کننده آب شرب و کشاورزی برای هر دو کشور ایران و ترکمنستان است، در منطقه‌ای قرار گرفته است که متوسط دمای هوا در آن در حدود ۱۷/۹ درجه سلسیوس، متوسط رطوبت نسبی ۴۷/۷ درصد و متوسط بارش سالانه در آن ۱۸۷/۳۷ میلی‌متر می‌باشد. داده‌های هواشناسی روزانه شامل حداقل و حداکثر دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد، دمای نقطه شبنم، فشار هوا، بارش و تبخیر از تشتت برای دریاچه این سد، از ایستگاه مستقر در محل سد و نیز پل خاتون جمع‌آوری گردیده است. به منظور تکمیل اطلاعات مورد نیاز این تحقیق، اندازه‌گیری‌های میدانی دمای آب هر ۱۶ روز یک بار در

برخی از آنها عبارتند از روش‌های مبتنی بر بیلان انرژی (۴۴)، روش‌های تابش - دما (۶۶)، ضرایب تشت تبخیر، روش‌های ترکیبی و روش‌های انتقال جرم موسوم به روش‌های آئرودینامیک (۵۳). به طور مثال گروه‌های مذکور شامل معادلاتی می‌شوند که توسط پنمن (۴۱)، مککینک (۳۴)، هامون (۲۱ و ۲۲)، جنسن - هیز (۲۷)، استفن - استوارت (۵۶)، پریستلی - تیلر (۴۲)، دیروین - کیجمن (۱۷) و بروتسرت - استریکر (۱۰) توسعه داده شده‌اند. حسب دقت و سادگی، معادلات مذکور، مورد استفاده گسترده‌ای تاکنون قرار گرفته‌اند. روش‌های مختلف برآورد تبخیر از سطوح آبی و یا سطوح زمین به طور کلی به دلیل اساس این روش‌ها و عوامل موثر بر آنها، برای شرایط مختلف اقلیمی و محیطی ارزیابی می‌گردند و بدیهی است تغییر در شرایط کاربرد این روش‌ها، نتایج حاصل را نیز تغییر داده و برتری هر روش نسبت به آن شرایط مشخص می‌گردد. از جمله مطالعات جامع و بارزی که در این زمینه انجام شده است را می‌توان تحقیقات دیروین و استریکر (۱۵)، لنترز و همکاران (۲۹)، روزنبری و همکاران (۴۴)، گالو الویرا و همکاران (۲۰)، مک جانن و همکاران (۳۵)، مجیدی و علیزاده (۳۳) و مجیدی و همکاران (۳۲) نام برد. همان‌طور که در بررسی‌ها و ارزیابی روش‌های برآورد تبخیر - تعرق، عمدتاً روش استاندارد روش پنمن - مانیت در نظر گرفته می‌شود (۳۲)، برای برآورد تبخیر از پیکره‌های آبی روش مینا، بیلان انرژی دریاچه و یا مخزن سد مورد نظر می‌باشد (۲۹ و ۴۴). وینتر و همکاران (۶۵) یازده روش شناخته شده برآورد تبخیر را برای دریاچه ویلیامز با کمک روش بیلان انرژی مورد مقایسه و ارزیابی قرار دادند و نشان دادند که برای منطقه مذکور، روش‌های پنمن، دیروین - کیجمن و ماکینک مناسب‌ترین نتایج را حاصل نمودند. راسموسن و همکاران (۴۳) نیز هفت روش مختلف برآورد تبخیر را برای مدل‌سازی حرارتی دریاچه مورد استفاده قرار دادند. سین و زو (۵۳) سیزده رابطه انتقال جرم را با داده‌های تشت تبخیر مقایسه کردند. ارزیابی هفت روش برآورد تبخیر توسط ابته (۱) تایید کرد که مدل‌های ساده که صرفاً متکی بر داده‌های تابش خورشیدی و دمای هوا هستند، توانسته‌اند نتایج بهتری نسبت به روش‌های ترکیبی پنمن و پریستلی - تیلر که داده‌های متعددی نیز نیاز دارند، حاصل نمایند. در تحقیق دیگری چهار روش پریستلی - تیلر، دیروین - کیجمن، پاپاداکیس و پنمن توسط مسنر و النیج (۳۸) بر اساس نتایج بیلان انرژی مورد مقایسه قرار گرفتند که پریستلی - تیلر مناسب‌ترین روش شناخته شد. دلکلاز و همکاران (۱۸) پنج روش تبخیر ماهانه را مورد بررسی و مقایسه قرار دادند که بهترین نتایج در تحقیق آنها از روش مککینک حاصل گردید. در مطالعه کامل تری که توسط روزنبری و همکاران (۴۴) انجام شد، پانزده روش مختلف مورد بررسی قرار گرفت. آنها بر اساس مقایسات و ارزیابی‌هایی که بر پایه روش بیلان انرژی انجام دادند، برای یک منطقه کوهستانی روش‌های ترکیبی را مناسب‌ترین

و به جای آن ضریب اصلاحی α را قرار داد. این رابطه عبارت است از:

$$E = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n - N}{\lambda} \quad (3)$$

برای سطوح بزرگ آب، ضریب اصلاحی مذکور معادل ۱/۲۶ تخمین زده شده است (۱۷، ۵۸ و ۵۹).
دبروین (۱۶) رابطه زیر را از ترکیب معادلات پنمن و پریستلی - تیلر برای برآورد تبخیر به دست آورد که بدین طریق عبارت مربوط به انرژی حذف شده است:

$$E = \frac{\alpha}{\alpha - 1} \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u) (e_a^* - e) \quad (4)$$

به کمک این رهیافت، دبروین توانست عبارات مربوط به تابش خالص و ذخیره حرارتی دریاچه و یا مخزن را که اغلب غیرقابل دسترس بوده و یا اندازه گیری دقیق آن هزینه های بسیاری در بر دارد، از رابطه خود حذف نماید. نتایج مدل وی در مقایسه با روش بیلان انرژی دقت قابل توجهی داشته است (۱۶).

دبروین و کیچمن (۱۷) بر اساس رابطه پریستلی - تیلر معادله ذیل را ارائه نمودند:

$$E = \frac{\Delta}{0.85\Delta + 0.63\gamma} \frac{R_n - N}{\lambda} \quad (5)$$

بروتسرت و استریکر (۱۰) یک مدل همرفتی - خشکی توسعه دادند که در آن تابع سرعت باد جایگزین عبارت انتقال بخار آئرو دینامیک در معادله پنمن شده است. همچنین آن ها با به کار بردن رابطه تبخیر تعادلی پریستلی - تیلر، در نهایت رابطه ذیل را برای برآورد تبخیر ارائه نمودند:

$$E = (2\alpha - 1) \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n - N}{\lambda} - \lambda \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u) (e_a^* - e) \quad (6)$$

روش های تابش - دما

این گروه از روابط که اغلب مبنای تجربی دارند، در عین سادگی و اندک پارامترهای ورودی مورد نیاز، دقت آنها بسته به شرایط محل مورد مطالعه متفاوت است. با توجه به اینکه در اغلب دریاچه ها و مخازن موجود در کشور، وجود اطلاعات جامع و منظمی که امکان کاربرد روابط پیچیده تر را فراهم نماید، میسر نیست، روابط تجربی و به ویژه روش های تابش - دما در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفت که بدین طریق امکان کاربرد آن در مناطق مشابه نیز مورد بررسی قرار گیرد.

استوارت و رز (۵۸) شکل جدیدی از رابطه پریستلی - تیلر ارائه نمودند که در آن با استفاده از یک تابع خطی تابش خورشیدی ورودی، پارامترهای مربوط به تابش خالص و ذخیره حرارتی دریاچه را

اعماق مختلف و در چندین نقطه در طول حدود ۳۵ کیلومتر دریاچه سد دوستی انجام پذیرفت.

تئوری

روش بیلان انرژی نسبت باون

روش اساسی که عمدتاً به منظور برآورد تبخیر مورد استفاده قرار می گیرد روش بیلان انرژی نسبت باون است که در آن شار گرمای نهان تبخیر با اندازه گیری و یا تخمین سایر اجزاء بیلان انرژی به دست می آید (۲۹، ۴۴، ۴۹، ۵۴، ۵۵ و ۶۴). در این روش شدت تبخیر با استفاده از رابطه ذیل محاسبه می گردد (۹، ۱۹ و ۵۲):

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

که در آن E : شدت تبخیر (m s^{-1}); R_n : تابش خالص (W m^{-2}); N : تغییر در ذخیره حرارتی آب (W m^{-2}); λ : گرمای نهان تبخیر (J kg^{-1}); c : گرمای ویژه آب ($\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); T_s : دمای سطح آب ($^\circ\text{C}$); و β : نسبت باون (بدون بعد) می باشد.

روش بیلان انرژی نسبت باون، اغلب به عنوان روش مرجع جهت مقایسه و ارزیابی سایر روش ها مورد استفاده قرار می گیرد (۶، ۲۶، ۲۹ و ۴۴). محدودیت این روش نیاز به داده های ورودی متعددی است که در اغلب دریاچه ها و مخازن سدها در دسترس نیست. برای افزایش دقت روش بیلان انرژی، اندازه گیری های دمای سطح و عمق آب و اطلاعات هواشناسی که مبین وضعیت سطح دریاچه باشد، ضروری است (۴، ۶ و ۶۰). بنابراین همانطور که قبلاً مطرح گردید، در این تحقیق داده های مورد نیاز از دریاچه سد دوستی (در نقاط و اعماق مختلف) اندازه گیری شد.

روش های ترکیبی

پنمن (۴۱ و ۴۰) با ترکیب تئوری بیلان انرژی و انتقال جرم، توانست نیاز به داده های دمای سطح آب را مرتفع سازد و رابطه زیر را برای تبخیر از سطوح آزاد آبی ارائه نماید:

$$E = \frac{\Delta R_n}{\lambda(\Delta + \gamma)} + \frac{\gamma f(u)(e_a^* - e)}{\Delta + \gamma} \quad (2)$$

که در آن، Δ : شیب منحنی فشار بخار ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); γ : ضریب رطوبتی ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); e_a^* : فشار بخار اشباع (kPa); e : فشار بخار در متوسط دمای هوا (kPa) و $f(u)$: تابع سرعت باد می باشد.

موفقیت روش پنمن در بسیاری از نقاط مختلف دنیا، به دلیل اساس فیزیکی این روش می باشد (۳۰).

پریستلی - تیلر (۴۲) فرم ساده تری از معادله ترکیبی پنمن را پیشنهاد نمود که در آن از اجزاء مقاومت آئرو دینامیک چشم پوشی نمود

$$E = 3.623A_s^{-0.066}u(e_s - e_a) \quad (۱۲)$$

در توسعه این روابط، فرض اساسی این بوده است که وابستگی معکوس بین ضریب انتقال جرم و اندازه سطح آب، اثرات کاهش فرایند انتقال آشفته روی سطح صاف آب را منعکس می‌کند (۵۱). فرم دیگری از روابط انتقال جرم که در دهه اخیر کاربرد گسترده داشته است، با استفاده تابع اصلاح شده سرعت باد مک‌میلان (۳۶) برای اندازه سطح آب بوده است که به شکل زیر بیان می‌شود (۶۱):

$$E = (5 \times 10^6 \times A_s^{-1})^{0.05} (3.6 + 2.5u_3)(e_s - e_a) \quad (۱۳)$$

در این رابطه u_3 : سرعت باد در ارتفاع سه متری بالای سطح آب است.

ریان - هرلمن (۴۵) نیز رابطه‌ای را بر اساس تئوری دالتون به منظور برآورد تبخیر از پیکره‌های آبی ارائه نمود (۴۳) که به شکل زیر شناخته می‌شود:

$$E = \lambda^{-1} \left[2.7(T_w - T_a)^{1/3} + 3.1u \right] (e_s - e_a) \quad (۱۴)$$

روش‌های دما - طول روز

بالانی (۷) روش خود را بر اساس ایجاد همبستگی بین داده‌های تبخیر ماهانه و متوسط دمای هوا و درصد زمانی از ساعات روشنایی روز توسعه داد. رابطه وی بعد از اصلاح توسط کریدل (۴۸)، به شکل زیر برای برآورد تبخیر از سطوح آب ارائه گردید:

$$E = 25.4(0.0173T_a - 0.314)T_a \frac{D}{D_{TA}} \quad (۱۵)$$

که در آن D : ساعات روشنایی روز و D_{TA} کل ساعات روشنایی سالانه می‌باشد.

هامون (۲۲) معادله ساده‌ای برای برآورد تبخیر بر اساس ارتباط بین تبخیر - تعرق پتانسیل، حداکثر انرژی تابشی ورودی و ظرفیت نگهداری رطوبت هوا توسعه داد. این روش به دلیل سادگی معمولاً برای برآورد تبخیر از دریاچه‌ها و یا تبخیر پتانسیل در مقیاس حوضه به کار می‌رود (۶۷). شکل معمول رابطه هامون به صورت زیر به کار می‌رود:

$$E = 4.95 \times 10^{-2} \exp(0.062T_a) \quad (۱۶)$$

شکل دیگری از رابطه هامون نیز به صورت مورد استفاده قرار گرفته است (۳۱):

$$E = 35.755D \left(\frac{e_a^*}{T_a + 273.3} \right) \quad (۱۷)$$

که در آن D : ساعات روشنایی روز است. رابطه هامون به شکل زیر نیز اصلاح و مورد استفاده قرار می‌گیرد (۶۷):

جایگزین نمودند. ضرایب تجربی تابع مذکور با استفاده از تحلیل رگرسیونی بدست آمده بود و لذا مخصوص دریاچه مورد مطالعه تعیین گردید. رابطه استخراجی آنها مشابه معادله منتسب به مک‌کینک (۳۴) بود که وی برای برآورد تبخیر از یک سطح کاملاً مرطوب توسعه داده بود:

$$E = 52.6 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda} - 0.12 \quad (۷)$$

جنسن - هیز (۲۷) یک روش تجربی مبتنی بر رابطه تابش - دما با تبخیر روزانه به شکل زیر ارائه نمود:

$$E = 0.03523R_s (0.014T_a - 0.37) \quad (۸)$$

استفن و استوارت (۵۶) نیز یک روش برآورد تبخیر مبتنی بر تابش که بر اساس متوسط ماهانه دمای هوا اصلاح شده بود، ارائه نمودند. آنها روش پیشنهادی خود را به عنوان روش معادل کسری تبخیر تابش خورشیدی نام‌گذاری نمودند. روش پیشنهادی آن‌ها اساساً مشابه روش جنسن - هیز است که به شکل زیر ارائه شده است:

$$E = 0.03495(0.0082T_a - 0.19)R_s \quad (۹)$$

روش‌های دالتون

از قدیمی ترین روش‌های برآورد تبخیر از سطوح آزاد آب که به دلیل سادگی و دقت قابل قبول در حال حاضر نیز مورد علاقه و کاربرد گسترده‌ای نیز قرار دارد، روش‌های انتقال جرم می‌باشد (۱۴). این روش‌ها بر پایه قانون دالتون بنا شده‌اند. هریک (۲۳) رابطه‌ای مبتنی بر تئوری دالتون و انتقال جرم برای تبخیر از مخازن سدها توسعه داد که به شکل زیر است:

$$E = Cu (e_s - e_a) \quad (۱۰)$$

که در این رابطه e_a و e_s به ترتیب فشار بخار اشباع و واقعی در دمای هوا و دمای سطح آب و C ضریب انتقال جرم است. در روش انتقال جرم پس از اینکه یک بار ضریب C تعیین شد، برآورد تبخیر به سادگی قابل انجام است. یافتن یک مقدار ثابت برای این ضریب که قابلیت کاربرد برای تمامی پیکره‌های آبی را داشته باشد، تقریباً غیرممکن است؛ هرچند تلاش‌های متعددی به منظور تولید یک مقدار عمومی برای این ضریب انجام شده است. هریک (۲۳) تابعی برای ضریب C پیشنهاد نمود که در آن سطح آب دریاچه یا مخزن (A_s) عامل موثری است. بر اساس آنچه گذشت یک رابطه انتقال جرم به شکل زیر ارائه شده است (۵۱):

$$E = 2.909A_s^{-0.05}u(e_s - e_a) \quad (۱۱)$$

رابطه دیگری نیز که توسط شاتلورس (۵۱) بر اساس تحقیقات بروتسرت و یو (۱۱) ارائه گردید، به شرح ذیل است:

باون و E_{eq} : مقادیر برآورد شده تبخیر با سایر روش‌های مورد استفاده در این تحقیق در مقیاس‌های زمانی ماهانه و روزانه می‌باشد. قابل توجه است که رتبه‌بندی روش‌ها بر اساس این معیار صورت گرفته است.

نتایج و بحث

دما و تابش دریاچه

همانطور که در قسمت مواد و روش‌ها بیان شد، دمای سطح و عمق آب دریاچه سد دوستی در فواصل زمانی ۱۶ روزه و در نقاط مختلف در طول دریاچه سد اندازه‌گیری گردید که میانگین پروفیل دمای آب در این دریاچه در نمودار شکل ۱ برای نمونه در چهار ماه در فصول مختلف ارائه گردیده است. تغییرات دمای آب از سطح به عمق در طول دوره اندازه‌گیری به طور متوسط روندی کاهشی دارد که این روند در فصول گرم سال شدیدتر بوده و در زمستان روند یکنواخت‌تری نشان می‌دهد. آنچه از نتایج این اندازه‌گیری مشخص است، ظاهراً گرم شدن هوا در فصول گرم سال، تا عمق حدود ۲۰ متری از سطح آب را بیشتر تحت تاثیر قرار می‌دهد و تغییرات دمای اعماق بیشتر در این فصل‌ها 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 ذخیره حرارتی دریاچه را فراهم می‌نماید.

$$E = 13.97 \frac{SVD}{100} \left(\frac{D}{12} \right)^2 \quad (18)$$

که در آن چگالی بخار اشباع (SVD) در متوسط دمای هوا نیز به کار رفته است.

روش‌های دمایی

پاپاداکیس (۳۹) نیز برای برآورد تبخیر رابطه‌ای ارائه کرد که جزو روش‌های دمایی شناخته می‌شود. در این روش، شارهای گرمایی دریاچه با اختلاف بین فشار بخار اشباع در بالای سطح آب به ازای حداقل و حداکثر دمای هوا، جایگزین گردیده است. به این طریق در این روش صرفاً اطلاع از حداقل و حداکثر دمای هوا مورد نیاز است:

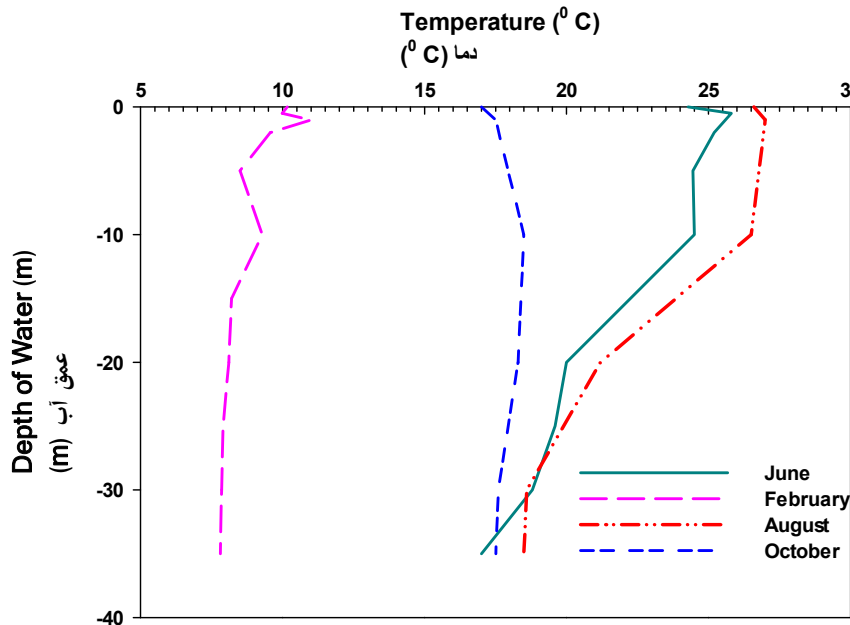
$$E = 0.5625 \left[e_{a,max}^* \times 10^{-2} - (e_{a,min}^* \times 10^{-2} - 2) \right] \quad (19)$$

ارزیابی

روش‌های مورد استفاده جهت برآورد تبخیر در این تحقیق، با استفاده از شاخص میانگین مجذور مربعات اختلاف (RMSD) در مقایسه با روش بیلان انرژی در مقیاس‌های زمانی ماهانه و روزانه مورد ارزیابی قرار گرفتند. این شاخص توسط رابطه زیر قابل محاسبه است (۳۲):

$$RMSD = \left[1 / M \sum_{i=1}^M (E_{BREB,i} - E_{eq,i})^2 \right]^{0.5} \quad (20)$$

در این رابطه E_{BREB} : مقادیر برآورد تبخیر به روش بیلان انرژی نسبت



شکل ۱- مقادیر اندازه‌گیری شده نیمرخ حرارتی دریاچه سد دوستی طی سال آبی ۹۱-۱۳۹۰
Figure 1- Average measured thermal profile data on February, June, August and October, 2011-2012

در شکل ۲، تغییرات دمای سطح آب و نیز دمای هوا طی سال ۹۱-۱۳۹۰ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که عمده‌تاً در تابستان دمای هوا بیشتر از دمای سطح آب و در زمستان برعکس آن اتفاق افتاده است. بنابراین انتظار می‌رود شدت تبخیر از دریاچه متناسب با این تغییرات در تابستان اندکی کمتر از حد مورد انتظار و در زمستان کمی بیشتر باشد به طوری که با افزایش عمق، به دلیل ذخیره حرارتی، حداکثر تبخیر مورد انتظار ممکن است با تاخیر نسبت به حداکثر دما اتفاق بیافتد. همچنین از شکل ۲ می‌توان چنین نتیجه گرفت که چون دماهای اندازه‌گیری شده، روند مشابهی را طی می‌کنند، لذا همبستگی بین آنها می‌تواند برای تخمین روزانه دمای آب برای برآوردهای روزانه تبخیر مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به آنچه در مواد و روش‌ها مطرح شد، در برخی روش‌ها که برآورد تبخیر روزانه مد نظر است، نیاز به داده‌های روزانه دمای آب نیز وجود دارد.

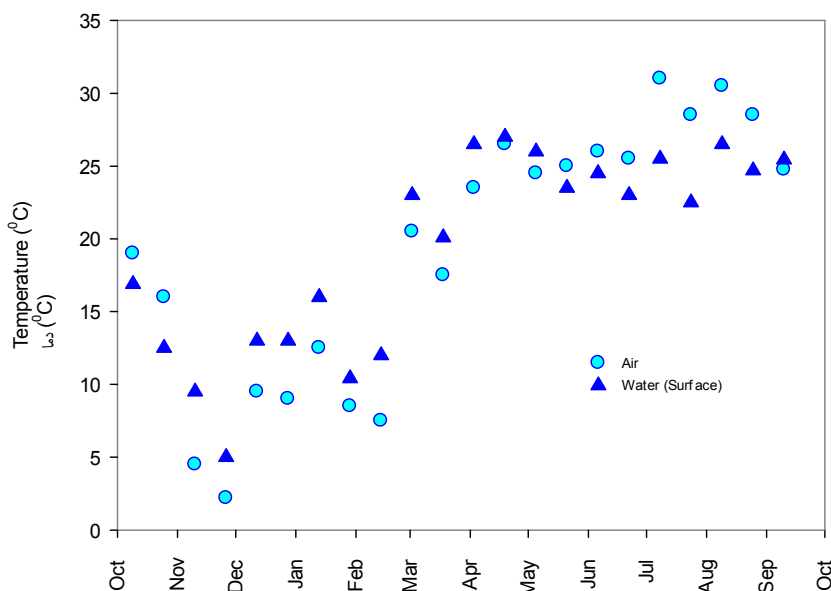
به این منظور برای بازسازی داده‌های روزانه دمای آب، تلاش شد رابطه‌ای بین دمای هوا و دمای آب (۱۶ روزه‌ها) برقرار شود. برای دستیابی به رابطه‌ای مناسب، چندین مدل رگرسیونی بین داده‌های دمای آب و دماهای حداقل، میانگین و حداکثر هوا در روزهای اندازه‌گیری برقرار شده و مورد ارزیابی قرار گیرد (شکل ۳). مناسب‌ترین رابطه رگرسیونی بین دمای سطح آب و متوسط دمای هوا با ضریب تعیین ۰/۸۰۹ حاصل گردید. لذا برای بازسازی دماهای روزانه سطح آب از رابطه رگرسیونی حاصل بر اساس دمای هوا استفاده شد. این فرایند برای دماهای اعماق آب نیز به کار برده شد تا تخمینی از دماهای

عمق به منظور برآوردهای ذخیره حرارتی روزانه نیز حاصل گردد. شکل ۴ ارتباط بین دمای اعماق آب و دمای هوا را نشان می‌دهد. مقادیر تابش خالص نیز برای دریاچه سد دوستی با استفاده از ساعات آفتابی و الگوریتم‌های معمول بر پایه تابش‌های طول موج کوتاه و بلند ورودی و خروجی با فرض ضریب بازتابش انرژی (آلبدو) ۰/۰۷ برای سطح آب برآورد گردید (۱۳) که نتایج آن در شکل ۵ ارائه شده است.

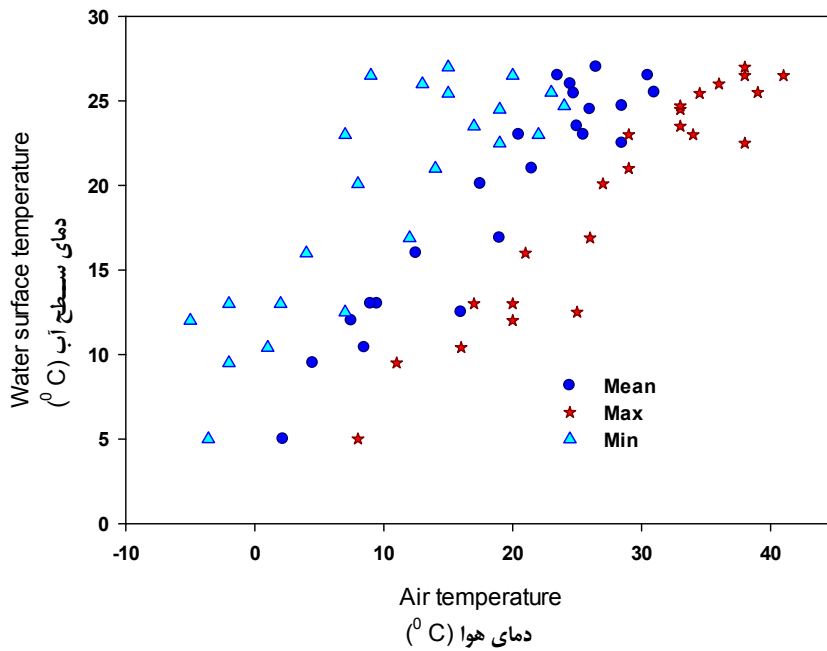
برآوردهای تبخیر

روند تغییرات تابش خالص که تا حدی با افزایش و کاهش دمای هوا نیز متناسب است، در این شکل مشخص است. ذکر این نکته ضروری است که هرچند میزان تابش خالص دریافتی سطح آب نسبت به سطوح خاک و گیاهی بیشتر است، اما شار حرارتی که صرف گرم کردن اعماق آب شده و به صورت ذخیره حرارتی در می‌آید، در مورد آب به مراتب نیز بیشتر بوده و در حقیقت بخش مهمی از بیلان انرژی دریاچه را تشکیل می‌دهد. این ذخیره حرارتی در زمان‌های طولانی تری آزاد می‌شود و به همین دلیل است که حداکثر شدت تبخیر مورد انتظار در زمان حداکثر تابش خالص لزوماً اتفاق نمی‌افتد (۴۴ و ۶۷).

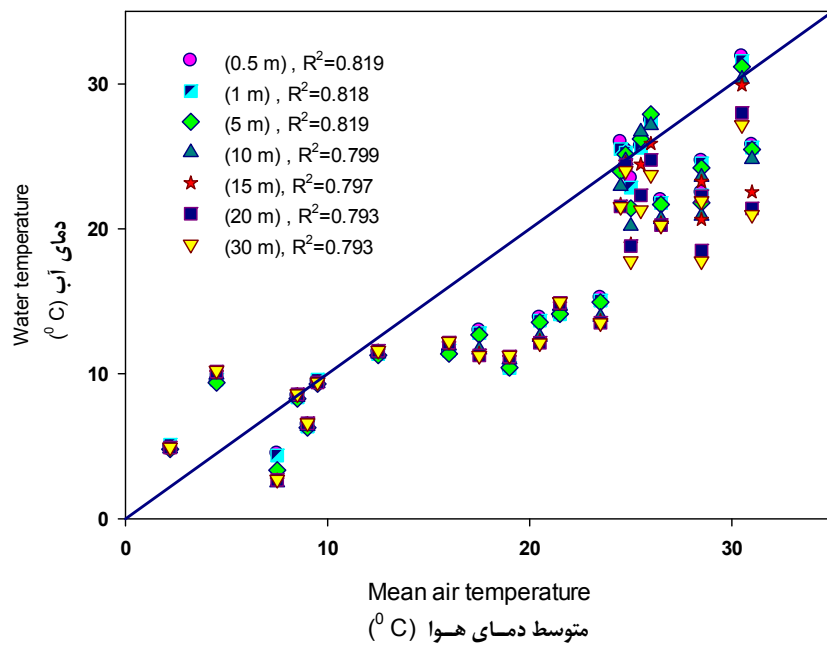
نتایج حاصل از روش بیلان انرژی در برآورد تبخیر با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و نیز داده‌های بازسازی شده روزانه در طی سال ۹۱-۱۳۹۰ در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است.



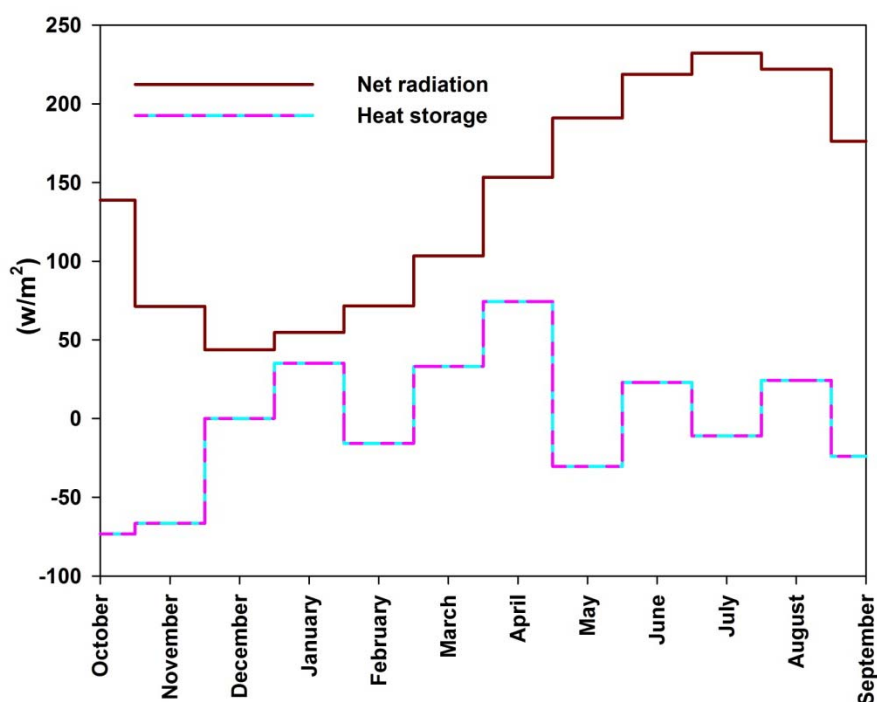
شکل ۲- مقادیر اندازه‌گیری شده دمای هوا و سطح آب (متوسط ماهانه) طی سال آبی ۹۰-۱۳۹۱
Figure 2- Measured water surface and air temperatures, during 2011-2012



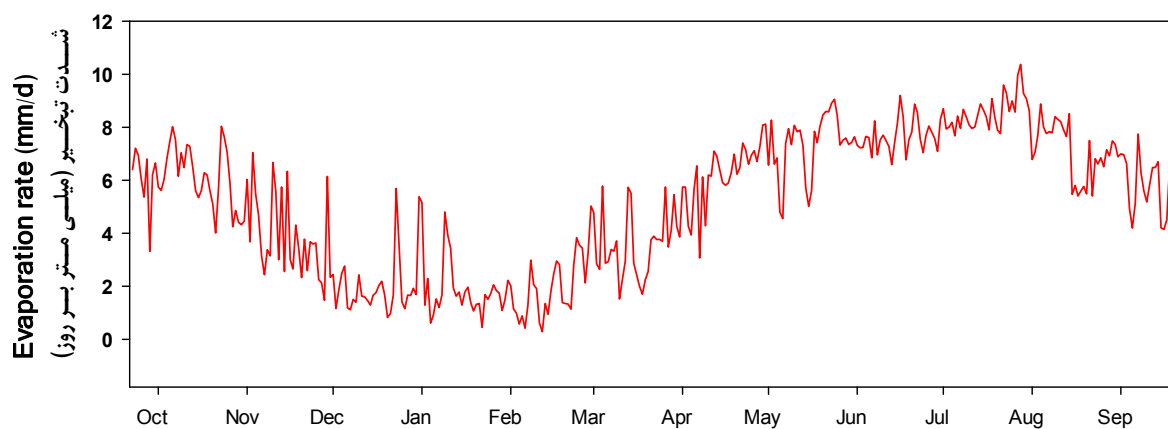
شکل ۳- ارتباط بین مقادیر اندازه‌گیری شده دمای سطح آب و مقادیر حداقل، متوسط و حداکثر دمای هوا طی سال آبی ۱۳۹۰-۹۱
 Figure 3- Relationship between water surface temperature and air temperature, during 2011-2012



شکل ۴- تحلیل رگرسیونی بین مقادیر اندازه‌گیری شده نیمرخ حرارتی آب و متوسط دمای هوا طی سال آبی ۱۳۹۰-۹۱
 Figure 4- Regression analyses between water temperature profile and the mean air temperature, during 2011-2012



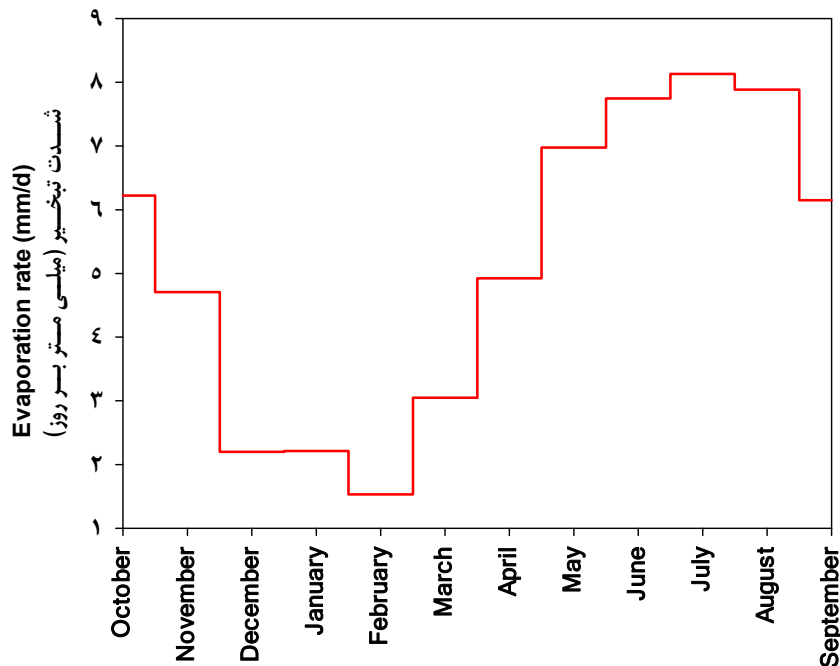
شکل ۵- تغییرات مقادیر محاسبه شده تابش خالص و ذخیره حرارتی دریاچه طی سال آبی ۹۱-۱۳۹۰
Figure 5- Variation of net radiation and heat storage for water surface, during 2011 to 2012



شکل ۶- مقادیر شدت تبخیر روزانه حاصل از بیلان انرژی دریاچه با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری و بازسازی شده طی سال آبی ۹۱-۱۳۹۰
Figure 6- Daily evaporation rate (mm d^{-1}) from Doosti dam reservoir determined by BREB method using reconstructed and measured data respectively, during 2011-2012

دارای خطا خواهد بود، اما دقت مطلوب این نتایج را می‌توان در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده تایید نمود. به طوری که در شکل ۷، روند تغییرات شدت تبخیر که به صورت متوسط ماهیانه و بر اساس داده‌های اندازه‌گیری ارائه شده است نیز تطابق مطلوبی با نتایج روزانه نشان می‌دهد.

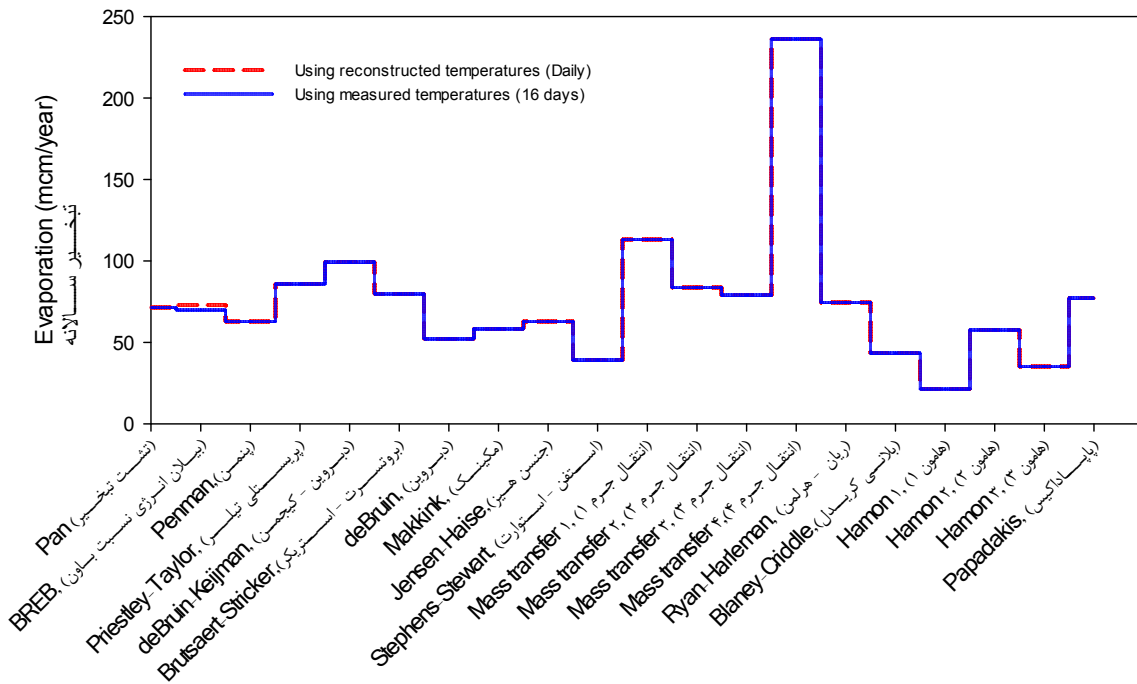
نتایج روزانه تبخیر از دریاچه سد دوستی به روش بیلان انرژی حاکی از وجود روندی نسبتاً مشابه نسبت به تغییرات دما و تابش در طول سال مورد نظر می‌باشد. حداکثر شدت تبخیر روزانه در حدود $10/37$ میلی‌متر در روز در مرداد ماه و حداقل آن در بهمن‌ماه معادل $0/24$ میلی‌متر در روز مشاهده می‌شود. بدیهی است نتایج تبخیر روزانه به دلیل استفاده از داده‌های بازسازی شده دمای آب، احتمالاً



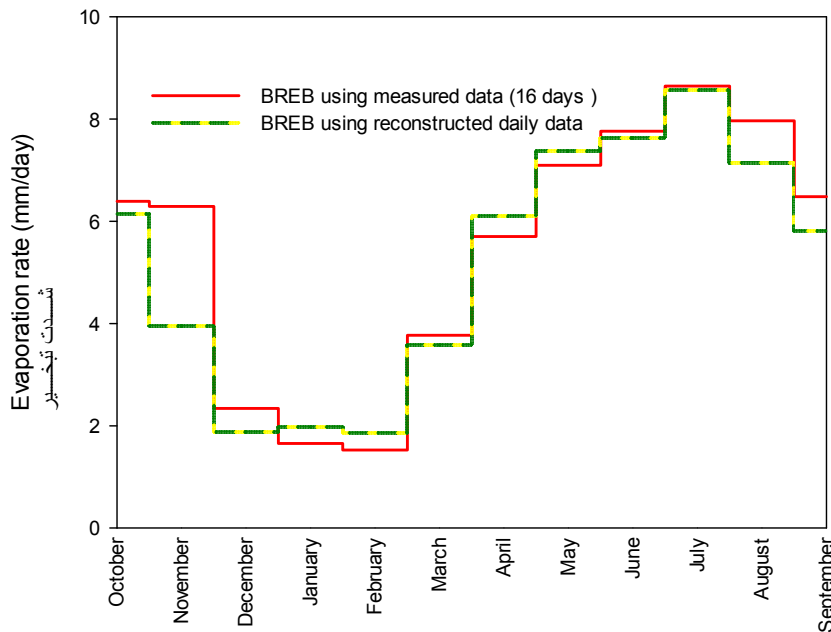
شکل ۷- مقادیر شدت تبخیر ماهانه حاصل از بیلان انرژی دریاچه با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده طی سال آبی ۱۳۹۰-۹۱
Figure 7- Monthly evaporation rate (mm d^{-1}) from Doosti dam reservoir determined by BREB method using measured data, during 2011-2012

طور دقیق‌تری بررسی شده است. بر اساس این شکل، به‌وضوح تاثیر بازسازی داده‌های روزانه دمای سطح آب بر نتایج حاصل از روش بیلان انرژی دیده می‌شود که هرچند این مقدار فقط در ماه‌های آبان و آذر قابل توجه است ولی در بقیه ماه‌های سال تقریباً این اختلاف اندک است. در واقع بازسازی داده‌های روزانه و برآورد تبخیر با استفاده از این داده‌ها نکته قابل توجه این نتایج است که امکان بازسازی داده‌های دمای سطح آب در دوره‌های دورتر و بلندمدت گذشته و آینده جهت بررسی‌های تبخیر را نیز فراهم می‌نماید. نکته قابل توجه دیگر، تطابق نسبی مطلوب بین روش‌های مختلف مورد استفاده در این تحقیق در برآورد تبخیر سالانه نسبت به روش بیلان انرژی است. البته بیش‌برآوردهای روش‌های دالتون (رابطه ۱۳ و ۱۰)، دبروین - کیچمن و پریستلی - تیلر و کم برآوردهای روش‌های هامون (رابطه ۱۶ و ۱۸)، استفن - استوارت، دبروین و مککینک در مقیاس سالانه تا حدی مشهود است. بدیهی است بررسی دقت روش‌ها در مقیاس‌های زمانی کوچک‌تر یعنی ماهیانه و روزانه، تصویر شفاف‌تری از عملکرد مدل‌ها را ارائه می‌دهد که در ادامه به این موضوع پرداخته شده است.

با این حال در این تحقیق سعی شده است مقایسات و نتایج، بیشتر بر اساس متوسط ماهیانه شدت تبخیر حاصل از مقادیر اندازه‌گیری شده صورت گیرد که از صحت و سقم بالاتری برخوردار است. مجموع تبخیر سالانه از دریاچه سد دوستی به روش بیلان انرژی در سال آبی ۱۳۹۰-۹۱ حدود ۶۹/۹ میلیون مترمکعب برآورد گردید که حجم قابل توجهی از تلفات آبی در این دریاچه را نشان می‌دهد. این مقدار تبخیر که از این منبع مهم و استراتژیک آب شرب اتفاق می‌افتد، تقریباً بیش از ۶۰ درصد حجم آبی است که در این سال به منظور مصرف شرب مشهد اختصاص داده شده است. بدیهی است مدیریت آب در این دریاچه با توجه به وضعیت بحرانی آب در دشت‌های استان خراسان رضوی به‌ویژه شهر مشهد، توجه بیشتری می‌طلبد. برآوردهای سالانه تبخیر حاصل از سایر روش‌ها نیز در شکل ۸ ارائه شده است. در نگاه اول آنچه از این شکل می‌توان نتیجه گرفت، تاثیر تخمین داده‌های روزانه دمای آب در مقایسه با نتایج حاصل از اندازه‌گیری این داده‌ها می‌باشد که همانطور که انتظار می‌رفت با توجه به رابطه رگرسیونی نسبتاً مطلوب مورد استفاده، دقت قابل قبولی حاصل نموده است. بازسازی داده‌های روزانه بیشترین تاثیر را بر دقت روش بیلان انرژی داشته است. این اثر در شکل ۹ به



شکل ۸- مقادیر تبخیر سالانه از دریاچه سد دوستی حاصل از روش‌های مختلف مورد استفاده در سال آبی ۹۱-۱۳۹۰
 Figure 8- Annual evaporation (mcm) from Doosti dam reservoir, during 2011-2012



شکل ۹- مقایسه برآوردهای شدت تبخیر (mm d^{-1}) حاصل از بیلان انرژی دریاچه با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده و بازسازی شده طی سال آبی ۹۱-۱۳۹۰

Figure 9- Comparison of monthly evaporation rate (mm d^{-1}) from Doosti dam reservoir determined by BREB method using measured and estimated daily temperatures, during 2011-2012

تحلیل حساسیت

تفاوت بین بیشترین و کمترین برآوردهای شدت تبخیر حاصل از روش‌های مورد استفاده در این تحقیق در حدود ۱۶ میلی‌متر در روز است که بروز این خطا در برخی روش‌های یاد شده دور از واقعیت است زیرا در تمامی روش‌ها، فرضیات و ضرایبی به کار رفته است که یا نیاز به واسنجی داشته و یا تخمین آن‌ها تا حدی مشکل است. از طرفی عدم قطعیت در داده‌ها و پارامترهای ورودی در بسیاری از موارد تقریباً ناشناخته است (۶۳). با این حال هم‌نواپی نتایج و تفسیر رفتار روش‌های مختلف مورد استفاده، از طریق تحلیل حساسیت این روش‌ها به پارامترهای ورودی قابل بحث است. در اینجا نتایج تاثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر برآوردهای تبخیر حاصل از روش‌های مختلف با اعمال تغییرات در حدود $\pm 10\%$ درصد مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد تا به نحوی با این تحلیل حساسیت، رفتار این مدل‌ها بهتر شناسایی گردد.

تابش

داده‌های ساعات آفتابی که مرتبط با برآورد تابش خورشیدی به عنوان منبع انرژی تبخیر می‌گردند، بی تردید از مهم‌ترین عوامل موثر بر تبخیر می‌باشند. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که روش‌های برآورد تبخیر هامون (روابط ۱۶ و ۱۷)، بیشترین حساسیت را نسبت به داده‌های تابش خورشیدی دارند به طوری که $\pm 10\%$ درصد تغییرات در این پارامتر، سبب خطایی در حدود ۱۷- تا ۲۱+ درصد در برآوردهای شدت تبخیر می‌گردد. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که اعمال $\pm 10\%$ درصد تغییرات در تابش خورشیدی، منجر به خطای $\pm 10/5\%$ درصد در برآورد شدت تبخیر حاصل از روش بروتسرت - استریکر می‌گردد. مقادیر شدت تبخیر حاصل از روش‌های پرستلی - تیلر، دبروین - کیچمن، بیلان انرژی و پنمن، خطایی معادل $\pm 8\%$ درصد و برآوردهای شدت تبخیر روش‌های مکینک، جنسن - هیز و استفن - استوارت، خطایی معادل $\pm 6\%$ درصد نسبت به تغییرات تابش خورشیدی نشان دادند. عمدتاً عدم قطعیت در داده‌های تابش خورشیدی و ساعات آفتابی، مربوط به تجهیزات اندازه‌گیری این پارامتر می‌باشد.

دمای هوا

تقریباً اغلب روش‌های برآورد تبخیر نسبتاً به داده‌های دمای هوا حساس می‌باشند. در این میان روش بیلان انرژی بیشترین حساسیت را نسبت به این پارامتر دارا می‌باشد. در این روش، دمای هوا در محاسبه تابش طول موج بلند و نسبت باون نقش موثری دارد که اثرات آن در نتایج شدت تبخیر حاصل از این روش، مشهود است. روش‌های پایاداکیس، دبروین و رایان - هرلمن نیز پس از روش بیلان

انرژی، به ترتیب بیشترین حساسیت را نسبت به دمای هوا داشتند. در اینجا نیز $\pm 10\%$ درصد تغییرات در دمای هوا اعمال گردید که طی آن شدت تبخیر حاصل از روش‌های فوق به ترتیب خطایی در حدود $\pm 31\%$ ، $\pm 20\%$ و $\pm 18\%$ و $\pm 16\%$ درصد نشان داد.

روش پایاداکیس وابسته به حداقل و حداکثر دمای هوا می‌باشد که این مقادیر در برآورد فشار بخار مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجا که تغییرات $\pm 10\%$ درصد در هر دو مقدار فوق اعمال گردیده است، بدیهی است این روش نیز حساسیت نسبتاً بالایی به مقادیر دمای هوا داشته باشد. علاوه بر آن، در سایر روش‌های مذکور، دمای هوا یا مستقیماً مورد استفاده قرار می‌گیرد (روش ریان - هرلمن) و یا این داده در محاسبه شیب فشار بخار اشباع و کمبود فشار بخار به کار رفته است (روش دبروین)، بنابراین وابستگی و حساسیت این روش‌ها نیز نسبت به دمای هوا زیاد است. این در حالی است که در روش هامون (روابط ۱۷ و ۱۸)، کمترین حساسیت نسبت به دمای هوا دیده می‌شود به طوری که خطای $\pm 10\%$ درصد در این پارامتر، برآوردهای شدت تبخیر حاصل از این روابط را $\pm 0/7\%$ درصد تغییر می‌دهد.

سرعت باد

بدون شک سرعت باد به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، یکی از عوامل مهم در برآورد تبخیر محسوب می‌گردد (۳۲). اما همچون سایر عوامل، در برخی روش‌ها دقت در داده‌های سرعت باد، سبب بروز رفتارهای مختلفی به لحاظ دقت در نتایج شدت تبخیر خواهد شد که در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق، خطای $\pm 10\%$ درصد در داده سرعت باد به عنوان یک پارامتر ورودی، اثرات قابل توجهی در دقت نتایج شدت تبخیر حاصل از روش‌های دالتون (انتقال جرم و ریان - هرلمن) و نیز تا حدی در روش‌های ترکیبی (دبروین و بروتسرت - استریکر) ایجاد می‌نماید. تغییرات $\pm 10\%$ درصد در سرعت باد، سبب بروز خطای $\pm 10\%$ و $\pm 7\%$ درصد به ترتیب در روش‌های دالتون و دبروین گشته است. روش پنمن با خطایی در حدود $\pm 0/2\%$ درصد در برآوردهای شدت تبخیر، کمترین حساسیت به داده‌های سرعت باد را دارا می‌باشد.

دمای سطح آب

یکی دیگر از عوامل موثر بر تبخیر از سطوح آب، دمای سطح آب است. در برخی روش‌های برآورد تبخیر این عامل مورد توجه قرار گرفته و از آن برای برآوردها استفاده شده است. دمای سطح آب در روش بیلان انرژی در محاسبه نسبت باون، فشار بخار اشباع در دمای سطح آب (همانند روش‌های دالتون) و برآورد تابش طول موج بلند (همانند روش‌های ترکیبی) به کار می‌رود. البته دمای سطح آب در

در مجموع روش بیلان انرژی حساس‌ترین روش نسبت به پارامترهای ورودی است. روش‌های پروتسرت - استریکر و هامون (رابطه ۱۶)، پس از روش بیلان انرژی، به لحاظ حساسیت نسبت به داده‌های ورودی، در جایگاه‌های بعدی قرار می‌گیرند. کمترین حساسیت نسبت به داده‌های ورودی در روش‌های تابش - دما (مککینک، جنسن - هیز و استفن - استوارت) دیده می‌شود. در سوی دیگر پارامترهای دمای هوا و سطح آب، بیشترین تاثیر در دقت برآوردهای شدت تبخیر حاصل از روش‌های مختلف را داشته و اغلب روش‌ها به این داده‌ها حساسیت نسبتاً زیادی نشان دادند. بدیهی است برآورد تبخیر از دریاچه‌ها و مخازن سدها، با استفاده از روش‌هایی که اولاً داده‌های ورودی اندکی لازم داشته باشند و ثانیاً حساسیت آن‌ها به داده‌های ورودی کم باشد، به‌ویژه در شرایطی که داده‌های کامل و نسبتاً دقیق در دسترس نباشد، بیشتر مورد توجه و کاربرد قرار می‌گیرد.

مقایسه با دمای اعماق، به منظور برآورد ذخیره حرارتی دریاچه و یا مخزن نیز به کار می‌رود. بررسی‌ها نشان داد که تمامی روابط انتقال جرم مورد استفاده در این تحقیق بیشترین حساسیت را نسبت به داده‌های دمای سطح آب دارا می‌باشند. خطای حاصل از $\pm 10\%$ درصد تغییرات دمای سطح آب در برآورد شدت تبخیر حاصل از روش‌های انتقال جرم، در حدود $\pm 17\%$ درصد برآورد گردید. خطای ناشی از تغییرات دمای سطح آب در نتایج حاصل از روش‌های پروتسرت - استریکر، بیلان انرژی، پریستلی - تیلر، دبروین - کیچمن و پنمن، به ترتیب برابر با $\pm 10\%$ ، $\pm 7/8$ ، $\pm 7/9$ و $\pm 7/6$ درصد مشاهده شد.

عملکرد روش‌ها

تحلیل حساسیت روش‌های برآورد تبخیر نسبت به داده‌های ورودی، طبق آنچه در جدول ۱ ارائه گردیده است، مشخص نمود که

جدول ۱- تحلیل حساسیت روش‌های مختلف برآورد تبخیر از سطوح آبی به داده‌های ورودی

Table 1- Range of variation (%) in evaporation estimates resulting from error in the input parameters

روش‌های برآورد تبخیر Methods	تابش Radiation	دمای هوا Air temperature	دمای سطح آب Water surface temperature	سرعت باد Wind speed	خطای تجمعی Cumulated error	
گروه بیلان انرژی Energy Balance	بیلان انرژی نسبت باون (BREB)	8.86	1.88	19.75	-	30.49
گروه ترکیبی Combination	پنمن Penman	8.82	12.07	7.76	0.03	28.68
	پریستلی - تیلر Priestley-Taylor	8.86	12.04	7.79	-	28.69
	دبروین - کیچمن deBruin-Keijman	8.86	12.03	7.79	-	28.68
	بروتسرت - استریکر Brutsaert-Stricker	11.54	9.67	10.15	2.43	33.79
	دبروین deBruin	-	19.87	-	7.34	27.21
گروه تابش - دما Radiation - Temperature	مککینک Makkink	6.30	-	-	-	6.30
	جنسن - هیز Jensen-Haise	6.28	8.74	-	-	15.02
	استفنز - استوارت Stephens-Stewart	6.28	8.14	-	-	14.42
گروه دالتون Dalton	انتقال جرم Mass transfer	-	-	18.05	10	28.05
	انتقال جرم Mass transfer	-	-	18.05	10	28.05
	انتقال جرم Mass transfer	-	-	18.05	10	28.05
	رایان - هرلمن Ryan-Harleman	-	17.43	2.04	10.05	29.52
گروه دما - طول روز Temperature - Day length	بلانی - کریدل Blaney-Criddle	10.00	13.24	-	-	23.24
	هامون Hamon	21.00	14.26	-	-	35.26
	هامون Hamon	21.00	0.72	-	-	21.72
	هامون Hamon	10.00	0.72	13.64	-	24.36
گروه دمایی Temperature	پاپاداکیس Papadakis	-	21.91	-	-	21.91

با وسعت دریاچه نمی‌تواند این تاخیر زمانی را جبران نماید. در واقع این مطلب پذیرفته شده است که ضریب تشت تبخیر به این دلیل سالیانه استفاده می‌شود که در مقیاس سالیانه تغییرات ذخیره حرارتی دریاچه تقریباً صفر در نظر گرفته می‌شود (۶۰، ۶۴ و ۶۵). به نظر می‌رسد نتایج ماهانه حاصل از تشت تبخیر با اصلاح ضریب تشت تا حدی قابل بهبود باشد.

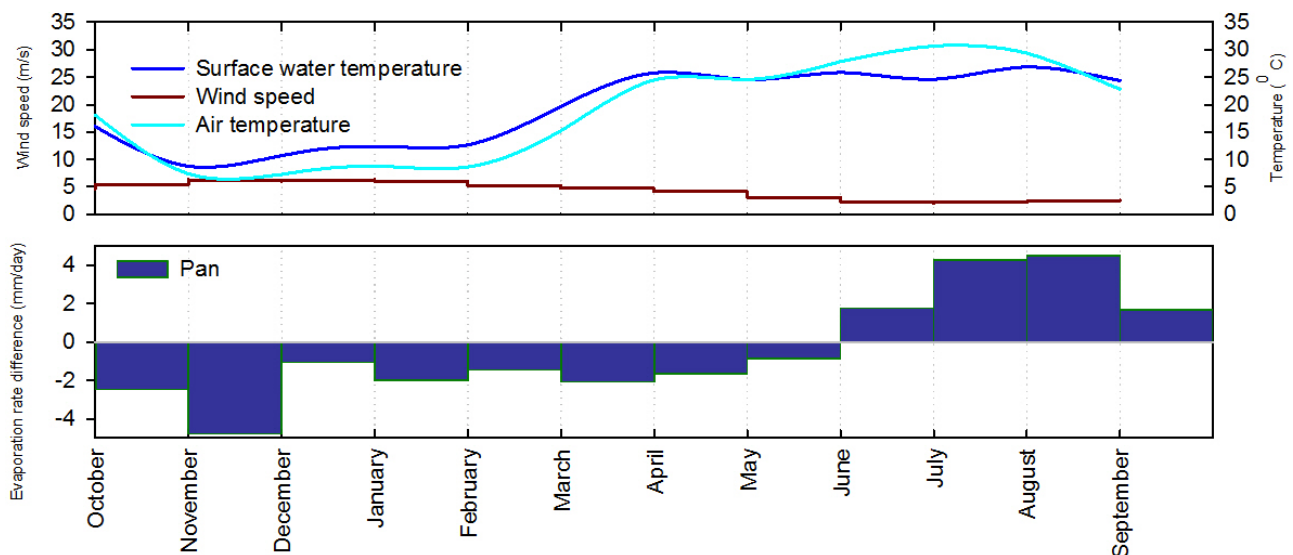
روش‌های ترکیبی

در مقایسه سالیانه، عملکرد اغلب مدل‌ها به‌ویژه روش‌های ترکیبی برآورد تبخیر، مطلوب به نظر می‌رسید. در مقایسه ماهیانه و بررسی روش‌های مذکور در شکل ۱۱، اختلاف بین برآوردهای هر کدام از روش‌های این گروه، با روش بیلان انرژی نشان داده شده است. در مورد این روش‌ها نیز بیش‌برآورد در ماه‌های گرم و کم‌برآورد در ماه‌های سرد سال دیده می‌شود. البته روش دبروین تقریباً همواره مقادیر تبخیر را کم‌برآورد می‌نماید. روزنبری و همکاران (۴۴) نشان دادند که روش‌های ترکیبی نسبت به افزایش یا کاهش سرعت باد حساس هستند. آن‌ها تاکید کردند که کاهش سرعت باد تا حد زیادی کاهش شدید برآورد تبخیر به‌ویژه در روش دبروین را توجیه می‌کند. در این گروه روش‌های دبروین و پنمن با کمترین اختلاف نسبت به بیلان انرژی، مناسب‌ترین برآوردهای تبخیر را تولید نمودند.

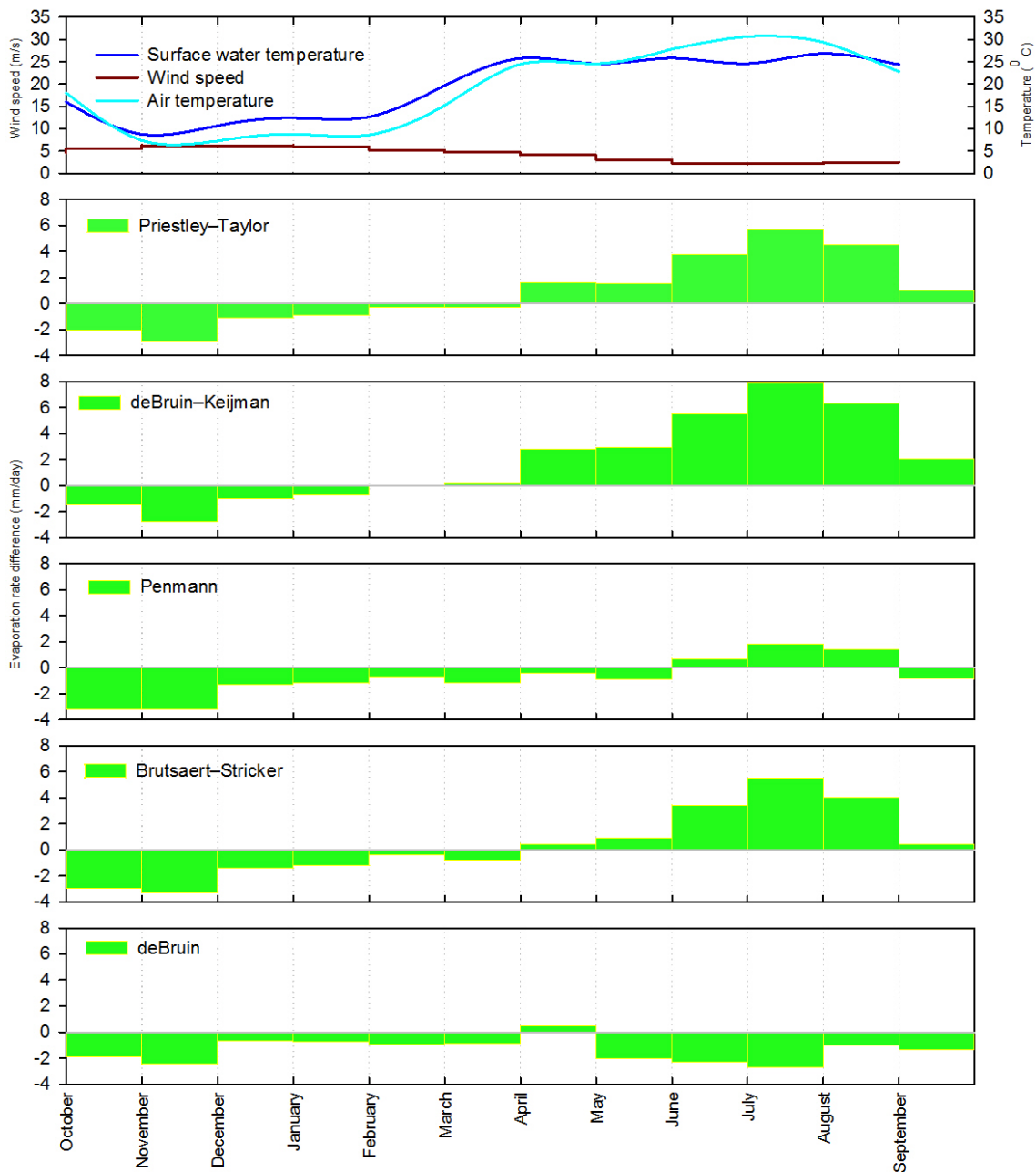
چنان‌چه روش‌های با خصوصیات فوق، نتایج نسبتاً دقیقی تولید نماید، می‌تواند به‌عنوان مطلوب‌ترین روش‌های برآورد تبخیر از پیکره‌های آبی، مورد استفاده قرار گیرد. در این راستا بررسی جامع روش‌های متداول برآورد تبخیر از دریاچه با توجه به صحت این مدل‌ها و در مقایسه با بیلان انرژی دریاچه در مقیاس ماهانه، در این بخش به تفکیک ارائه گردیده است تا بدین طریق، پس از انجام تحلیل حساسیت، عملکرد روش‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد.

تشت تبخیر

تفاوت مقادیر شدت تبخیر حاصل از تشت با بیلان انرژی دریاچه در شکل ۱۰ ارائه شده است. معمولاً ضریب تشت ۰/۷ برای برآورد تبخیر از دریاچه سد دوستی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که میزان تبخیر حاصل از تشت در ماه‌های سرد کمتر از برآوردهای بیلان انرژی و در ماه‌های گرم سال، بیشتر بوده است. بیش‌برآورد تشت تبخیر با افزایش دمای هوا به بیش از حدود ۲۵ درجه سلسیوس، افزایش بیشتری نیز می‌یابد. بیش‌برآورد مقادیر تبخیر از تشت به حدود ۴ و کم‌برآورد آن به حدود ۴/۵ میلی‌متر در روز می‌رسد. به این نکته باید توجه شود که ضریب تشت ممکن است با زمان تغییر نماید که این تغییرات ناشی از ذخیره حرارتی است که در دریاچه اتفاق می‌افتد اما تشت تبخیر به دلیل کوچک بودن در مقایسه



شکل ۱۰- بررسی تفاوت بین مقادیر شدت تبخیر حاصل از تشت و بیلان انرژی دریاچه طی سال آبی ۹۱-۱۳۹۰
Figure 10- Differences between pan and BREB-determined evaporation rate, during 2011-2012



شکل ۱۱- بررسی تفاوت بین مقادیر شدت تبخیر حاصل از روش‌های ترکیبی با بیلان انرژی دریاچه طی سال آبی ۹۱-۱۳۹۰
 Figure 11- Differences between combination methods and BREB-determined evaporation rate, during 2011-2012

نتایج تحلیل حساسیت نیز به‌خوبی مشاهده گردید.

روش‌های تابش - دما

روش‌های این گروه اغلب تبخیر را نسبت به روش بیلان انرژی، کم‌برآورد می‌کنند. این اختلاف بیشتر به دلیل وجود ضرایبی است که در این روش‌ها به کار برده شده است و بدیهی است این ضرایب

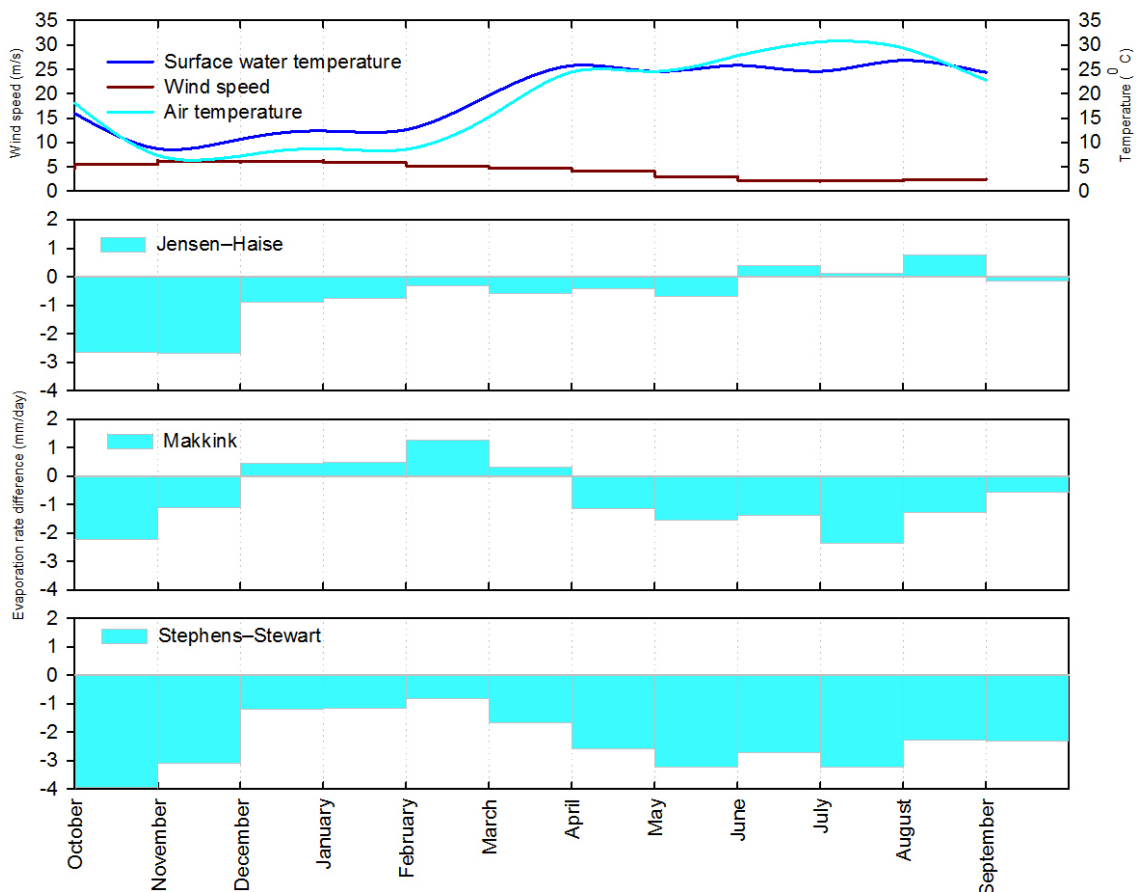
علاوه بر این نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که وقوع حداکثر بیش‌برآوردها و کم‌برآوردها، در زمان‌هایی اتفاق افتاده است که به ترتیب دمای هوا و آب در بالاترین و پایین‌ترین مقدار خود قرار گرفته است. در حقیقت آنچه در این تحقیق و برای دریاچه سد دوستی قابل مشاهده است، تأثیر قابل توجه تغییرات دمای هوا و آب، بر دقت برآوردهای تبخیر با استفاده از روش‌های ترکیبی است. این موضوع در

این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. از آنجا که روش انتقال جرم نیاز به یک ضریب تجربی با واسنجی محلی دارد (۴۴)، برخی ضرایب و توابع موجود مربوط به ضریب فوق در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. رفتارهای متفاوت روابط مختلف انتقال جرم در این تحقیق نیز به همین تنوع ضرایب مرتبط می‌گردد. البته روش ریان - هرلمن نیاز به واسنجی نداشته و محدودیتی به این لحاظ متوجه آن نیست. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین بیش‌برآوردهای شدت تبخیر حاصل از روش‌های این گروه اغلب زمان‌هایی رخ داده است که اختلاف مقادیر دماهای هوا و سطح آب کم بوده است. این رخداد وقتی با کاهش سرعت باد همراه می‌شود، سبب بروز بیش برآوردهای قابل توجهی در نتایج آن می‌گردد (شکل ۱۳).

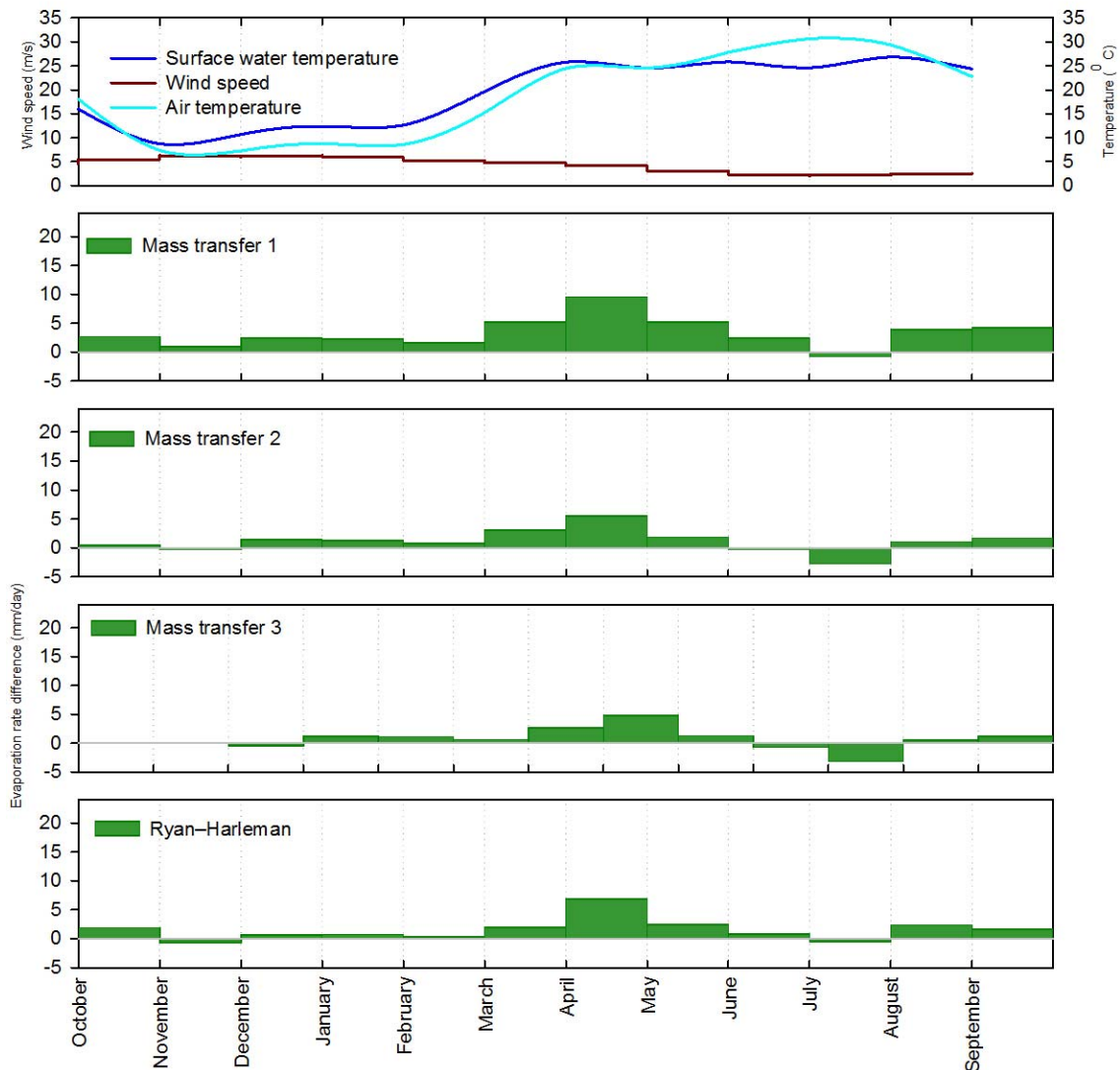
نسبت به تغییرات شرایط دمایی و تابشی، حساس هستند (۴۴). نکته جالب در مورد روش‌های تابش - دما این است که علی‌رغم در نظر نگرفتن ذخیره حرارتی دریاچه، نتایج حاصل از آنها تطابق نسبتاً مطلوبی با روش بیلان انرژی دارد. همانطور که دیده می‌شود بیشترین اختلاف بین نتایج روش‌های جنسن - هیز و مککینک با روش بیلان انرژی در حدود ۲ میلی‌متر در روز است (شکل ۱۲). داده‌های ورودی اندک، حساسیت نسبتاً پایین به داده‌های ورودی و دقت قابل قبول این دو روش از بزرگ‌ترین مزایای آنها محسوب می‌شود، زیرا کاربرد آنها برای مناطق مشابه که فاقد اطلاعات اندازه‌گیری شده و در دسترس هستند، می‌تواند مفید باشد. نتایج روش استفن - استوارت تقریباً نسبت به سایر روش‌های این گروه ضعیف‌تر به نظر می‌رسد و اصلاح ضرایب آن شاید بتواند در بهبود نتایج حاصل موثر باشد.

روش‌های دالتون

دو روش انتقال جرم و ریان - هرلمن مبتنی بر تئوری دالتون در



شکل ۱۲- بررسی تفاوت بین مقادیر شدت تبخیر حاصل از روش‌های تابش - دما با بیلان انرژی دریاچه طی سال آبی ۱۳۹۰-۹۱
 Figure 12- Differences between Solar radiation-temperature methods and BREB-determined evaporation rate, during 2011-2012



شکل ۱۳- بررسی تفاوت بین مقادیر شدت تبخیر حاصل از روش‌های دالتون با بیلان انرژی دریاچه طی سال آبی ۱۳۹۰-۹۱
 Figure 13- Differences between Dalton methods and BREB-determined evaporation rate, during 2011-2012

(شکل ۱۴).

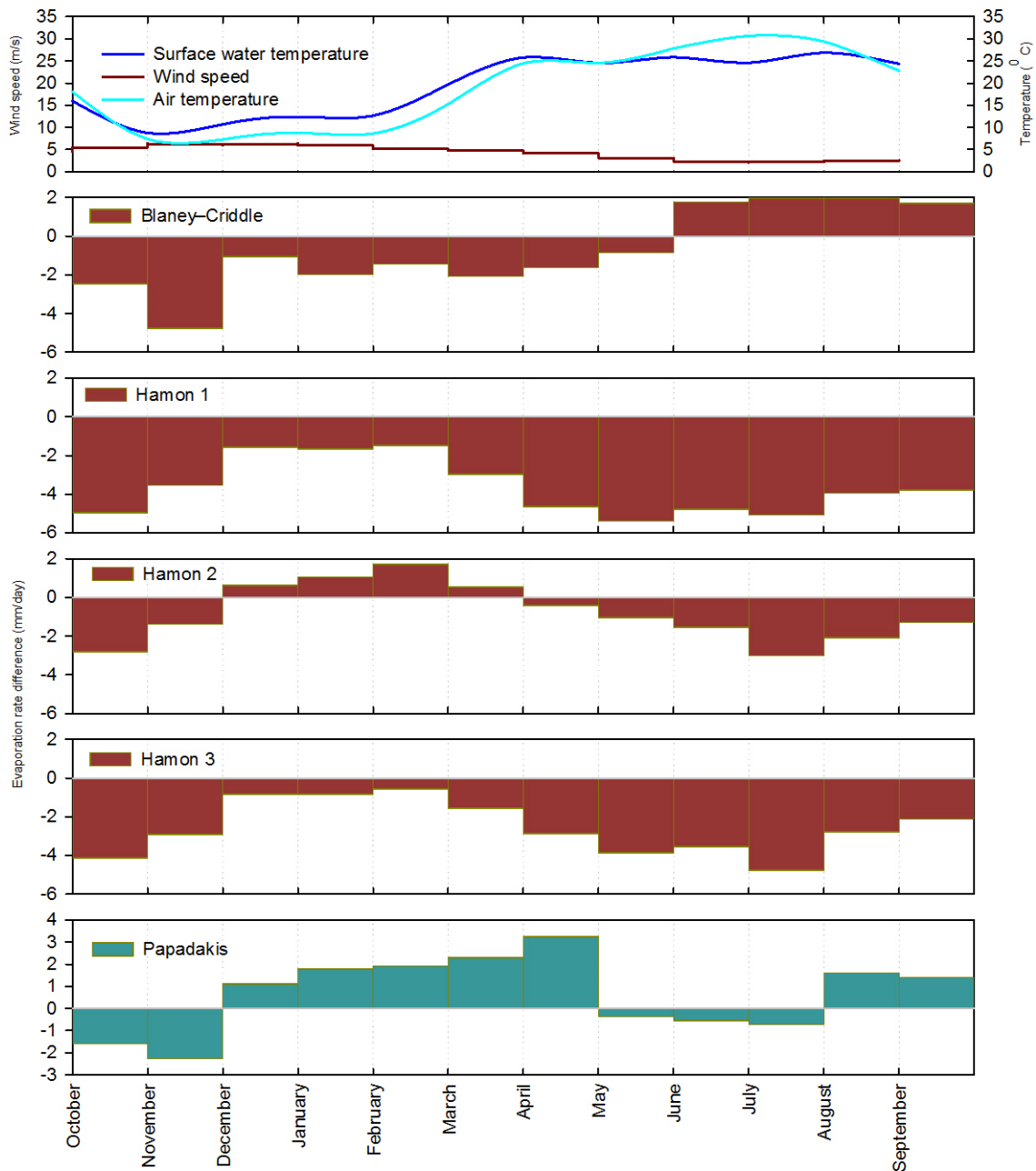
مقادیر شدت تبخیر در این روش‌ها با افزایش دمای هوا و طول روز افزایش می‌یابد. در این گروه، روش هامون (رابطه ۱۷) نتایج بهتری حاصل نموده است.

روش پایاداکیس نیز که یک روش صرفاً دمایی است، در ماه‌های مختلف رفتارهای مختلفی دارد به طوری که به وضوح نمی‌تواند بیش برآورد یا کم‌برآورد نمودن این روش را پیش‌بینی نمود. اما با توجه به این که در این روش از دماهای حداقل و حداکثر هوا استفاده می‌شود، به نظر می‌رسد اختلاف بین دماهای مذکور، سبب بروز خطا در برآوردهای تبخیر می‌گردد. در این روش بیش برآوردها و کم‌برآوردهای تبخیر از حد ± 4 میلی‌متر بر روز تجاوز کرده است.

به نظر می‌رسد برای شرایط منطقه ضرایب مورد استفاده روش‌های انتقال جرم، علی‌رغم استفاده از انواع مختلف آن، باز هم نیاز به واسنجی داشته باشند. البته بیش برآوردهایی که در روش ریان - هرلمن نیز دیده می‌شود، تا حدی تصدیق می‌کند که به طور کلی روش‌های این گروه برای شرایط دریاچه سد دوستی با خطاهایی همراه می‌باشند. در مجموع در این گروه روش انتقال جرم با رابطه ۱۲ نتایج مطلوب‌تری نسبت به سایرین حاصل نموده است.

روش‌های دما - طول روز

هر دو روش بلانی - کریدل و هامون در این گروه، در اغلب ماه‌های سال شدت تبخیر از دریاچه سد دوستی را کم‌برآورد نموده‌اند



شکل ۱۴- بررسی تفاوت بین مقادیر شدت تبخیر حاصل از روش‌های دما - طول روز با بیلان انرژی دریاچه طی سال آبی ۹۱-۱۳۹۰
 Figure 14- Differences between temperature and temperature-day length group methods with BREB-determined evaporation rate, during 2011-2012

به صورت کمی گزارش شود. لذا به منظور ارزیابی دقیق‌تر این روش‌ها از شاخص RMSD استفاده گردید و بر اساس آن، روش‌های مورد استفاده به لحاظ دقت در برآورد شدت تبخیر، رتبه‌بندی شدند. رتبه‌بندی روش‌ها برای مقادیر روزانه و ماهانه تبخیر انجام گردید. نتایج رتبه‌بندی در جدول ۲ ارائه شده است.

رتبه‌بندی روش‌ها

تاکنون روش‌های مورد استفاده برای برآورد تبخیر از دریاچه سد دوستی در مقیاس‌های زمانی سالانه و ماهانه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. واضح است که اختلاف در برآوردها و پراکنش وقوع آن‌ها در صورتی به درستی قابل تشخیص است که خطاهای مذکور

جدول ۲- رتبه‌بندی روش‌های برآورد تبخیر از دریاچه سد دوستی بر اساس مقادیر روزانه و ماهانه شدت تبخیر طی سال آبی ۱۳۹۰-۹۱
Table 2- RMSD (mm d⁻¹) and ranking of evaporation equation methods at daily and monthly scales based on BREB method

روش‌های برآورد تبخیر Methods	ماهانه Monthly		روزانه Daily		
	RMSD	رتبه‌بندی Rank	RMSD	رتبه‌بندی Rank	
	پنمن Penman	1.65	4	2.00	3
گروه ترکیبی Combination	پریستلی - تیلر Priestley-Taylor	2.70	13	2.99	10
	دبروین - کیجمن deBruin-Keijman	3.71	16	3.97	16
	بروتسرت - استریکر Brutsaert-Stricker	2.63	12	2.95	9
	دبروین deBruin	1.62	3	2.13	5
گروه تابش - دما Radiation - Temperature	مکیکنک Makkink	1.34	2	1.70	2
	جنسن - هیز Jensen-Haise	1.21	1	1.59	1
	استفنز - استوارت Stephens-Stewart	2.53	11	2.74	8
گروه دالتون Dalton	انتقال جرم Mass transfer	4.16	18	5.47	18
	انتقال جرم Mass transfer	2.21	8	3.51	14
	انتقال جرم Mass transfer	1.98	7	3.27	12
	رایان - هرلمن Ryan-Harleman	2.42	10	3.54	15
گروه دما - طول روز Temperature - Day length	بلانی - کریدل Blaney-Cridle	2.21	9	2.46	6
	هامون (رابطه ۱۶)	۳/۸۹	۱۷	۴/۰۵	۱۷
	هامون (رابطه ۱۷)	۱/۶۶	۵	۲/۰۶	۴
گروه دمایی Temperature	هامون (رابطه ۱۸)	۲/۸۹	۱۵	۳/۱۴	۱۱
	پاپاداکیس	۱/۷۶	۶	۲/۵۲	۷
Pan	تشت تبخیر	۲/۷۱	۱۴	۳/۴۳	۱۳

محدودیت اطلاعات مواجه هستیم، زیاد مطلوب نخواهد بود. در رتبه‌های بعدی روش‌های دما - طول روز قرار گرفته‌اند که این نیز جزو نتایج قابل توجه این تحقیق است. به هر حال سادگی این روش‌ها و داده‌های ورودی اندک مورد نیاز در آن‌ها، حصول نتایج نسبتاً دقیق، به‌ویژه برای شرایط کشور ما به لحاظ کمبود داده‌های در دسترس و معتبر، بسیار حائز اهمیت است. روش‌های دالتون علی‌رغم نیاز به واسنجی و نیز بیش‌برآوردهایی که در اغلب زمان‌های سال در شدت تبخیر حاصل نموده‌اند، تقریباً عملکرد مطلوبی داشته و در دسته روش‌های با دقت متوسط قرار می‌گیرند. در حقیقت عملکرد متفاوت روش‌های انتقال جرم، با توجه به تفاوت در ضرایب آن‌ها، کاملاً مشهود است. جالب اینکه ضریب انتقال جرم با رابطه ۱۲، برای شرایط سد دوستی تا حدی مناسب بوده و بهتر است در صورت امکان، احتمالاً اصلاح این ضریب دقت این روش را به شدت بالا خواهد برد. ضعف روش‌های پریستلی - تیلر و دبروین - کیجمن، احتمالاً نشان از عدم تناسب ضرایب به کار رفته در آن‌ها به جای اجزاء آئرودینامیک، برای منطقه مورد مطالعه است. نکته جالب تشابه نسبی این دو روش و نیز تشابه در نتایج حاصل از آن‌ها است. قابل توجه است که بر اساس نتایج تحقیق، قابلیت اعتماد به برآوردهای تبخیر حاصل از

همان‌طور که مشاهده می‌گردد، روش‌های جنسن - هیز و مکیکنک (گروه تابش - دما) و نیز روش‌های دبروین و پنمن (ترکیبی)، هم در مقیاس روزانه و هم ماهانه، به ترتیب در جایگاه‌های اول تا چهارم مناسب‌ترین روش‌های برآورد تبخیر از دریاچه سد دوستی به لحاظ دقت قرار گرفته‌اند. برتری روش‌های تابش - دما در اینجا نشان می‌دهد که تاثیر عوامل مختلفی که بر تبخیر آب از دریاچه موثر هستند، در پارامترهای دما و تابش به‌خوبی دیده می‌شوند. در حقیقت در منطقه مورد مطالعه، نقش این دو پارامتر، بسیار پررنگ‌تر از سایر پارامترهای موثر بر تبخیر است. از طرفی با توجه به اینکه اندازه‌گیری دمای هوا و برآورد تابش خورشیدی، جزو در دسترس‌ترین و آسان‌ترین اطلاعات در اکثر مناطق می‌باشد، برتری روش‌های تابش - دما در برآورد تبخیر، نویدی است برای امکان کاربرد گسترده این روش‌ها در مناطق مشابه. در سوی دیگر دقت مطلوب روش دبروین که نیازی به برآورد ذخیره حرارتی دریاچه ندارد، نیز قابل تامل است. روش پنمن نیز همانطور که انتظار می‌رفت، دقت مطلوبی در برآورد تبخیر از دریاچه داشت. هرچند بدیهی است پیچیدگی دو روش مذکور و نیاز به داده‌های ورودی بیشتر، در مقایسه با روش‌های جنسن - هیز و مکیکنک، به‌ویژه در شرایطی که با

مرحله بعد در مقیاس ماهانه و در نهایت روزانه مقیاسات ادامه یافت تا در نهایت تصویر روشنی از رفتار مدل‌های مختلف برآورد تخییر از دریاچه‌ها و مخازن سدها ایجاد گردد. در مقیاس سالانه علی‌رغم وجود برخی بیش‌برآوردها و کم‌برآوردها، اغلب روش‌ها عملکرد مطلوبی نشان دادند. اما در مقیاس ماهانه رفتار مدل‌های مورد استفاده، با بررسی تفاوت آن‌ها با بیلان انرژی دریاچه، تا حدی شفاف‌تر بررسی گردید و طی آن مشخص شد که در گروه تابش - دما، روش‌های جنسن - هیز و مکینک، در گروه ترکیبی، روش‌های دبروین و پنمن و در گروه دما - طول روز، روش‌های هامون (با رابطه ۱۷) و بلانی - کریدل عملکرد مطلوبی داشتند. قابل توجه است که تفاوت زیاد برآوردهای تشت تخییر با بیلان انرژی در مقیاس ماهانه نشان داد که کاربرد آن در مقیاس‌های کوچک‌تر از سال، نتایج قابل اعتماد تولید نمی‌نماید. در مرحله بعدی ارزیابی‌ها در مقیاس روزانه و با رتبه‌بندی روش‌ها بر اساس شاخص ارزیابی انجام پذیرفت. رتبه‌بندی روش‌های مورد استفاده در این تحقیق نیز نشان از برتری روش‌های جنسن - هیز، مکینک، دبروین، پنمن، هامون و بلانی - کریدل داشت. این نتیجه به‌ویژه این‌که روش‌های تابش - دما، پارامترهای ورودی اندک نیاز دارند که این پارامترها براحتی قابل دسترس نیز هستند، بسیار قابل توجه است. در حقیقت این دو روش با توجه به سادگی و دقت مطلوب، نسبت به روش‌های پیچیده برآورد تخییر ارجح بوده و به نظر می‌رسد کاربرد آن‌ها در سایر پیکره‌های آبی با شرایط مشابه دریاچه سد دوستی نیز، قابلیت اعتمادپذیری بیشتری نسبت به داده‌های تشت تخییر دارد. روش‌های انتقال جرم نیز در صورت اصلاح و واسنجی محلی، می‌توانند به منظور برآورد تخییر مناسب باشند. در مجموع اغلب روش‌های مورد استفاده در این تحقیق در مقیاس‌های زمانی بزرگ‌تر دقت بهتری در برآورد شدت تخییر نشان دادند.

سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت سازمان آب منطقه‌ای خراسان رضوی انجام پذیرفت که بدین وسیله قدردانی می‌گردد.

تشت، به‌ویژه در مقیاس روزانه و ماهانه، اندک بوده و در کاربری‌های دقیق‌تر و برنامه‌ریزی‌های زمانی کوچک‌تر از سالانه، قابلیت کاربرد ندارد.

رتبه‌بندی روش‌ها همچنین نشان می‌دهد که اصولاً برآوردهای تخییر با استفاده از روش‌های مختلف در مقیاس زمانی ماهانه، دقت مطلوب‌تری نسبت به مقادیر روزانه دارد. البته نباید تاثیر بازسازی داده‌های روزانه را بر این موضوع نادیده گرفت هرچند همانطور که قبلاً نیز بررسی گردید، بازسازی داده‌های روزانه بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در بازه‌های ۱۶ روزه، تاثیر اندکی بر دقت مدل‌ها داشت.

نتیجه گیری کلی

برآورد اجزاء بیلان انرژی دریاچه سد دوستی که به منظور برآورد تخییر و با استفاده از اندازه‌گیری برخی پارامترهای موثر در طول دریاچه سد طی سال آبی ۹۱-۱۳۹۰ انجام پذیرفت، به عنوان اساس مقایسه و ارزیابی برخی روش‌های متداول برآورد تخییر مورد استفاده قرار گرفت. این در حالی است که به دلیل فقدان اطلاعات مربوط به اجزاء بیلان انرژی در بسیاری از دریاچه‌ها و مخازن موجود در کشور، امکان تعیین تخییر به این طریق اغلب ممکن نیست. بدیهی است شرایط کنونی کشور به لحاظ منابع آبی و مدیریت حساس این منابع در وضعیت فعلی، محکوم به تکیه بر جزئیات دقیق‌تری از وضعیت مولفه‌های بیلان آب است تا بهره‌برداری از منابع آب و تخصیص آن بیشتر از پیش، سمت و سویی بهینه داشته باشد. با هدف توسعه و پیشرفت دانش تخییر از سطوح آب و و برداشتن گامی هر چند کوچک در این زمینه، در تحقیق حاضر تلاش گردید با ارزیابی و مقایسه روش‌های مختلف و معمول برآورد تخییر از پیکره‌های آبی، روش‌هایی که دقت مطلوبی دارند، به‌ویژه در شرایط محدودیت داده شناسایی و جهت کاربرد در شرایط مشابه توصیه گردند. به این منظور مقایسه و ارزیابی‌ها ابتدا در مقیاس زمانی سالانه انجام پذیرفت، سپس روش‌های مختلف به لحاظ حساسیت به داده‌های ورودی مورد تحلیل قرار گرفت تا به این طریق روش‌های پایدارتر شناسایی گردد. در

منابع

- 1- Abtew W. 2001. Evaporation estimation for Lake Okeechobee in South Florida. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 127, 140-147.
- 2- Alizadeh A., Izady A., Davary K., Ziaei A.N., Akhavan S., and Hamidi Z. 2013. Estimation of Actual Evapotranspiration at Regional - Annual scale using SWAT. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 7:243-258. (in Persian with English abstract).
- 3- Alizadeh A., Khanjani M.J., Taraz H., Rahnavard M.R. 2006. The study of the effects of temperature data corrections on the accuracy of evaporation and perspiration calculations. *Journal Of Geography and Regional Development Research Journal*, 6:91-100. (in Persian with English abstract).
- 4- Anderson E.R. 1954. Energy-budget studies. In: *Water Loss Investigations: Lake Hefner Studies*. U.S. Geological Survey Professional Paper (269), 71-119.

- 5- Arasteh P.D., Tajrishy M., Mirlatifi M., and Saghafian B. 2005. Statistical model of free water surface evaporation using the volume balance method in Chahnimeh reservoir, Sistan-Iran. *Pajouhesh & Sazandegi*, 68:2-14. (in Persian with English abstract).
- 6- Assouline S., and Mahrer Y. 1993. Evaporation from Lake Kinneret: 1 Eddy correlation system measurements and energy budget estimates. *Water Resources Research*, 29, 901-910.
- 7- Blaney H.F., and Criddle W.D. 1950. 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 pp.
- 8- Bowen I.S. 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review*. 27, 779-787.
- 9- Brutsaert W. 1982. *Evaporation Into the Atmosphere: Theory, History and Applications*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.
- 10- Brutsaert W., and Stricker H. 1979. An Advection-Aridity Approach to Estimate Actual Regional Evapotranspiration. *Water Resources Research*. 15 (2), 443-450.
- 11- Brutsaert W., and Yu S.L. 1968. Mass transfer aspects of pan evaporation. *Journal of Applied Meteorology*. 7, 563-566.
- 12- Calder I.R., and Neal C. 1984. Evaporation from saline lakes: a combination equation approach. *Hydrological Sciences Journal*, 29(1), 89-97.
- 13- Cogley J.G. 1979. The albedo of water as a function of latitude. *Monthly Weather Review*, 107, 775-781.
- 14- Dalton J. 1802. 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 Literary and Philosophical Society*. 5-11, 535-602.
- 15- De Bruin H.A.R., and Stricker J.N.M. 2000. Evaporation of grass under non-restricted soil moisture conditions, *Hydrological Sciences Journal*, 45(3), 391-406.
- 16- De Bruin H.A.R. 1978. A simple model for shallow lake evaporation. *Journal of Applied Meteorology*. 17, 1132-1134.
- 17- De Bruin H.A.R., and Keijman J.Q. 1979. The Priestley-Taylor evaporation model applied to a large shallow lake in the Netherlands. *Journal of Applied Meteorology*. 18, 898-903.
- 18- Delclaux F., Coudrain A., and Condom T. 2007. Evaporation estimation on Lake Titicaca: a synthesis review and modelling. *Hydrological Processes*, 21, 1664-1677.
- 19- dos Reis R.J., and Dias N.L. 1998. Multi-season lake evaporation: energy-budget estimates and CRLE model assessment with limited meteorological observations. *Journal of Hydrology*. 208, 135-147.
- 20- Gallego-Elvira B., et al. 2010. Energy balance and evaporation loss of an agricultural reservoir in a semi-arid climate (south-eastern Spain), *Hydrological Processes*. 24, 758-766
- 21- Hamon W.R. 1961. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Hydraulics Division of the American Society of Civil Engineers*. 87(HY3), 107-120.
- 22- Hamon W.R. 1963. Computation of direct runoff amounts from storm rainfall. *International Association of Scientific Hydrology Publication*. 63, 52-62.
- 23- Harbeck G.E. 1962. A practical field technique for measuring reservoir evaporation utilizing mass-transfer theory. USGS Professional Paper 272-E, 101-105. US Geological Survey.
- 24- Hassani A., Tajrishy M. and Abrishamchi A. "Evaporation Study of Saveh Dam Reservoir Using Modified Energy Budget Method". *Sharif Civil Engineering Journal*. 29:115-127. (in Persian with English abstract)
- 25- Henderson-Sellers B. 1986. Calculating the surface-energy balance for lake and reservoir modeling - a review. *Reviews of Geophysics*. 24, 625-649.
- 26- Hoy R.D., and Stephens S.K. 1977. Field study of evaporation, Research Project 6815. Canberra, A.C.T., Australian Water Resources Council, Department of Natural Resources.
- 27- Jensen M.E., and Haise H.R. 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering Division ASCE*. 89, 15-41.
- 28- Keskin M.E., and Terzi O. 2006. Evaporation estimation models for Lake Egirdir, Turkey. *Hydrological Processes*, 20, 2381-2391.
- 29- Lenters J.D., Kratz T.K., and Bowser C.J. 2005. Effects of climate variability on lake evaporation: results from a long-term energy budget study of Sparkling Lake, northern Wisconsin (USA). *Journal of Hydrology*. 308, 168-195.
- 30- Linacre E.T. 1993. Data-sparse estimation of lake evaporation, using a simplified Penman equation. *Agricultural and Forest Meteorology*. 64, 237-256.
- 31- Lu J.B., Sun G., McNulty S.G. and Amatya D.M. 2005. A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States. *American Water Resources Association*. 41(3), 621-633.
- 32- Majidi M., Alizadeh A., and Kaffi M. 2011. Estimation of plant transpiration by leaf temperature measurement. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 5:145-157. (in Persian with English abstract)

- 33- Majidi M., and Alizadeh A. 2012. "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*. 25:1503-1519. (in Persian with English abstract)
- 34- Makkink G.F. 1957. Ekzameno de la formulo de Penman. Netherlands. *Journal of Agricultural Science*. 5, 290-305.
- 35- McJannet D.L., Webster I.T., and Cook F.J. 2012. An area-dependent wind function for estimating open water evaporation using landbased meteorological data. *Environmental Modelling & Software*. 31, 76-83.
- 36- McMahon T.A., Peel M.C., Lowe L., Srikanthan R., McVicar T.R. 2013. Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*. 17, 1331-1363.
- 37- McMillan W. 1973 Cooling from open water surfaces. Final Report: Part 1; Lake Trawsfynydd cooling investigation. NW/SSD/RR/1204/73, pp.1-55.
- 38- Mosner M.S., and Aulenbach B.T. 2003. Comparison of methods used to estimate lake evaporation for a water budget of Lake Seminole, southwestern Georgia and northwestern Florida. in Proceedings of the 2003 Georgia Water Resources Conference, Athens, Georgia, USA.
- 39- Papadakis J. 1961. Climatic tables for the world. Buenos Aires, (Original not seen, cited in Grassi, 1964).
- 40- Penman H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society. A193, 120-145.
- 41- Penman H.L. 1963. Vegetation and Hydrology. Tech. Comm. No. 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England, 125 pp.
- 42- Priestley C.H.B., and Taylor R.J. 1972. On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*. 100, 81-92.
- 43- Rasmussen A.H., Hondzo M., and Stefan H.G. 1995. A test of several evaporation equations for water temperature simulations in lakes. *Water Resources Bulletin*. 31 (6), 1023-1028.
- 44- Rosenberry D.O., Winter T.C., Buso D.C., and Likens G.E. 2007. Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA, *Journal of Hydrology*. 340, 149-166.
- 45- Ryan P.J., and Harleman D.R.F. 1973. An Analytical and Experimental Study of Transient Cooling Pond Behavior," R.M. Parsons Laboratory, Technical Report No. 161, MIT.
- 46- Saadatkhah N., Sarang S.A., Tajrishi M., Abrishamchi A. 2002. Evaluation of Chahnimeh Reservoirs Evaporation. *Journal of Water & Wastewater*. 40:12-24. (in Persian with English abstract)
- 47- Sadek M.F., Shahin M.M., and Stigter C.L. 1997. Evaporation from the reservoir of the High Aswan Dam, Egypt: A new comparison of relevant methods with limited data. *Theoretical and Applied Climatology*. 56, 57-66.
- 48- Schertzer W.M., and Taylor B. 2008. Report to the Okanagan Water Supply and Demand Study on Lake Evaporation: Assessment of the Capability to Compute Lake Evaporation from Lake Okanagan and its Mainstem Lakes using the Existing Database (Draft Report). Prepared for the Okanagan basin Water Board.
- 49- Sene K.J., Gash J.H., and McNeil D.D. 1991. Evaporation from a tropical lake: comparison of theory with direct measurements. *Journal of Hydrology*. 127, 193-217.
- 50- Sharifan H., Ghahreman B., Alizadeh A. and Mirlatifi S.M. 2006. Comparison of the different method of estimated reference evapotranspiration (compound and temperature) with standard method and analysis of aridity effects. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*. 13(1):19-31. (in Persian with English abstract)
- 51- Shuttleworth W.J. 1993. Evaporation. In: Maidment, D.R., (ed.) *Handbook of Hydrology*, New York: McGraw-Hill, 4.1-4.53.
- 52- Simon E., Mero and F. 1985. A simplified procedure for the evaluation of the Lake Kinneret evaporation. *Journal of Hydrology*. 78, 291-304.
- 53- Singh V.P., and Xu C.Y. 1997. Evaluation and generalization of 13 mass-transfer equations for determining free water evaporation. *Hydrological Processes*, 11, 311- 323.
- 54- Stannard D.I., and Rosenberry D.O. 1991. A comparison of short-term measurements of lake evaporation using eddy correlation and energy budget methods. *Journal of Hydrology*. 122, 15-22.
- 55- Stauffer R.E. 1991. Testing lake energy budget models under varying atmospheric stability conditions. *Journal of Hydrology*. 128, 115-135.
- 56- Stephens J.C., and Stewart E.H. 1963. 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
- 57- Stets E.G., Striegl R.G., Aiken G.R., Rosenberry D.O., and Winter T.C. 2009. Hydrologic support of carbon dioxide flux revealed by wholelake carbon budgets. *Journal of Geophysical Research*. 114, G01008.
- 58- Stewart R.B., and Rouse W.R. 1976. A simple method for determining the evaporation from shallow lakes and ponds. *Water Resources Research*. 12, 623-628.
- 59- Stewart R.B., and Ruose W.R. 1977. Substantiation of the priestley-taylor parameter $\alpha = 1.26$ for potential evaporation in high latitudes. *Journal of Applied Meteorology*. 16, 649-650.

- 60- Sturrock A.M., Winter T.C., and Rosenberry D.O. 1992. Energy budget evaporation from Williams Lake – a closed lake in North Central Minnesota. *Water Resources Research*. 28, 1605–1617.
- 61- Sweers H.E. 1976. Anomogram to estimate the heat–exchange coefficient at the air–water interface as a function of wind speed and temperature; a critical survey of some literature. *Journal of Hydrology*. 30, 375–401.
- 62- Torres E.A., and Calera A. 2010. Bare soil evaporation under high evaporation demand: a proposed modification to the FAO–56 model. *Hydrological Sciences Journal*. 55(3), 303–315.
- 63- Vallet Coulomb C., Legesse D., Gasse F., Travi Y. and Chernet T. 2001. Lake evaporation estimates in tropical Africa (Lake Ziway, Ethiopia). *Journal of Hydrology*, 245: 1 –18.
- 64- Winter T.C., Buso D.C., Rosenberry D.O., Likens G.E., Sturrock A.M. Jr., Mau D.P. 2003. Evaporation determined by the energy budget method for Mirror Lake, New Hampshire. *Limnology and Oceanography*, 48 (3), 995–1009.
- 65- Winter T.C., Rosenberry D.O., and Sturrock A.M. 1995. Evaluation of 11 equations for determining evaporation for a small lake in the north central United States. *Water Resources Research*. 31 (4), 983–993.
- 66- Xu C.Y., and Singh V.P. 2000. Evaluation and generalization of radiation–based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes*. 14, 339–349.
- 67- Yao H., and Creed I.F. 2005. Determining spatially–distributed annual water balances for ungauged locations on Shikoku Island, Japan: a comparison of two interpolators. *Hydrological Sciences Journal*, 50, 245–263.
- 68- Zareabayneh H., Varkeshi M.B., Sabziparvar A.A., Marofi S., and Ghasemi A. 2011. Evaluation of Different Reference Evapotranspiration Methods and their Zonings in Iran. *Physical Geography Research Quarterly*. 42:95-109. (in Persian with English abstract)



Lake and Reservoir Evaporation Estimation: Sensitivity Analysis and Ranking Existing Methods

M. Majidi^{1*} - A. Alizadeh² - M. VazifeDoust³ - A. Farid⁴

Received: 11-03-2014

Accepted: 27-04-2015

Introduction: Water when harvested is commonly stored in dams, but approximately up to half of it may be lost due to evaporation leading to a huge waste of our resources. Estimating evaporation from lakes and reservoirs is not a simple task as there are a number of factors that can affect the evaporation rate, notably the climate and physiography of the water body and its surroundings. Several methods are currently used to predict evaporation from meteorological data in open water reservoirs. Based on the accuracy and simplicity of the application, each of these methods has advantages and disadvantages. Although evaporation pan method is well known to have significant uncertainties both in magnitude and timing, it is extensively used in Iran because of its simplicity. Evaporation pan provides a measurement of the combined effect of temperature, humidity, wind speed and solar radiation on the evaporation. However, they may not be adequate for the reservoir operations/development and water accounting strategies for managing drinking water in arid and semi-arid conditions which require accurate evaporation estimates. However, there has not been a consensus on which methods were better to employ due to the lack of important long-term measured data such as temperature profile, radiation and heat fluxes in most lakes and reservoirs in Iran. Consequently, we initiated this research to find the best cost-effective evaporation method with possibly fewer data requirements in our study area, i.e. the Doosti dam reservoir which is located in a semi-arid region of Iran.

Materials and Methods: Our study site was the Doosti dam reservoir located between Iran and Turkmenistan borders, which was constructed by the Ministry of Water and Land Reclamation of the Republic of Turkmenistan and the Khorasan Razavi Regional Water Board of the Islamic Republic of Iran. Meteorological data including maximum and minimum air temperature and evaporation from class A pan were acquired from the Doosti Dam weather station. Relative humidity, wind speed, atmospheric pressure and precipitation were acquired from the Pol-Khatoon weather station. Dew point temperature and sunshine data were collected from the Sarakhs weather station. Lake area was estimated from hypsometric curve in relation to lake level data. Temperature measurements were often performed in 16-day periods or biweekly from September 2011 to September 2012. Temperature profile of the lake (required for lake evaporation estimation) was measured at different points of the reservoir using a portable multi-meter. The eighteen existing methods were compared and ranked based on Bowen ratio energy balance method (BREB).

Results and Discussion: The estimated annual evaporation values by all of the applied methods in this study, ranged from 21 to 113mcm (million cubic meters). BREB annual evaporation obtained value was equal to 69.86mcm and evaporation rate averaged 5.47mm d-1 during the study period. According to the results, there is a relatively large difference between the obtained evaporation values from the adopted methods. The sensitivity analysis of evaporation methods for some input parameters indicated that the Hamon method (Eq. 16) was the most sensitive to the input parameters followed by the Brutsaert-Stricker and BREB, and radiation-temperature methods (Makkink, Jensen-Haise and Stephen-Stewart) had the least sensitivity to input data. Besides, the air temperature, solar radiation (sunshine data), water surface temperature and wind speed data had the most effect on lake evaporation estimations, respectively. Finally, all evaporation estimation methods in this study have been ranked based on RMSD values. On a daily basis, the Jensen-Haise and the Makkink (solar radiation, temperature group), Penman (Combination group) and Hamon (temperature, day length group) methods had a relatively reasonable performance. As the results on a monthly scale, the Jensen-Haise and Makkink produced the most accurate evaporation estimations even by the limited measurements of the input data.

Conclusion: This study was carried out with the objective of estimating evaporation from the Doosti dam reservoir, and comparison and evaluation of conventional method to find the most accurate method(s) for limited data conditions. These examinations recognized the Jensen-Haise, Makkink, Hamon (Eq. 17), Penman and

1,2,4- PhD Graduated, Professor and Assistant Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Respectively

(*- Corresponding Author Email: maysam.majidi@gmail.com)

2 Assistant Professor, Water Engineering Department, Guilan University

deBruin methods as the most consistent methods with the monthly rate of BREB evaporation estimates. The results showed that radiation-temperature methods (Jensen-Haise and Makkink) have appropriate accuracy especially on a monthly basis. Also deBruin, Penman (combination group), Hamon and Papadakis (temperature group) methods produced relatively accurate results. The results revealed that it is necessary to calibrate and adjust some evaporation estimation methods for the Doosti dam reservoir. According to the required input data, sensitivity and accuracy of these methods, it can be concluded that Jensen-Haise and Makkink were the most appropriate methods for estimating the lake evaporation in this region especially when measured data were not available.

Keywords: Doosti dam reservoir, Energy balance, Lake evaporation, Sensitivity analysis