نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد۸، مرداد - شهریور ۱۳۹۳، ص. ۶۱۵-۶۰۲

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 3, Vol. 8, Jul-Agu. 2014, p. 602-615

تبخیر از دریاچه‌ها و مخازن سدها: برآوردهای بیلان انرژی، ارزیابی روش‌های تابش دما و روابط ترکیبی

میثم مجیدی[۱]، امین علیزاده[۲*]، علی‌رضا فریدحسینی[۳]، مجید وظیفه‌دوست[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۶/۲۶

چکیده

برنامه‌ریزی، مدیریت و بهره‌برداری از ذخایر سدها به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک نیاز به برآوردهای مطمئن از تبخیر دارد. این وضعیت در شرایطی مانند سد دوستی که منبع استراتژیک تأمین بخش وسیعی از آب شرب مشهد نیز می‌باشد، اهمیتی دوچندان می‌یابد. در این تحقیق تلاش شده است با استفاده از بیلان انرژی دریاچه سد دوستی، میزان تبخیر برآورد گردیده و در عین حال برخی روش‌های دمایی و ترکیبی، مورد ارزیابی قرار گیرند. به این منظور ۱۰ روش معتبر برآورد تبخیر در قالب گروه‌هایی مبتنی بر بیلان انرژی، تشت، تابش ـ دما و روش‌های ترکیبی مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به کمبود داده‌های مورد نیاز، به‌ویژه برای بیلان انرژی و برخی روش‌های منتخب، اندازه‌گیری‌های میدانی از دریاچه سد دوستی برای دوره زمانی یک‌ساله،انجام گردید. نتایج بیلان انرژی به عنوان روش استاندارد، میزان تبخیر سالانه را درحدود ۶۹/۹ میلیون مترمکعب از دریاچه سد دوستی برآورد نمود. سایر روش‌ها مقدار تبخیر سالانه رادر حدود ۳۹ تا ۹۹ میلیون مترمکعب برآورد نموده‌اند. نتایج ارزیابی شدت تبخیر حاصل از روش‌های مورد استفاده در مقیاس زمانی روزانه و ماهانه، حاکی از ضعف برخی معادلات ترکیبی و نیز داده‌های مربوط به تشت می‌باشد. از طرفی حصول نتایج نسبتاً دقیق از روش‌هایی که صرفاً تکیه بر داده‌های دمایی و یا تابشی (جنسن ـ هیز و مککینک) دارند از نتایج قابل توجه این تحقیق است؛ دقت این روش‌ها با توجه به کمبود شدید داده‌های مورد نیاز، قابل اعتماد و در دسترس در اغلب دریاچه‌ها و مخازن سدها می‌تواند در بهبود برنامه‌ریزی‌ها و مدیریت این سامانه‌های آبی، راه‌حلی نوید بخش باشد.

واژه‌های کلیدی: بیلان انرژی، روش‌های ترکیبی، روش‌های تابش ـ دما، سد دوستی

مقدمه

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 (Gokbulak and Ozhan., 2006، Martinez-Alvarez et al., 2008, Mugabe et al.,2003، Torres and Calera., 2010). سد دوستی که با هدف تأمین بخش عمده‌ای از آب شرب شهر مشهد به‌عنوان دومین کلان‌شهر کشور و نیز تأمین 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 ـ تعرق گیاهان در این راستا در کشور انجام شده است (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۳ و ۱۳۸۵ و ۱۳۹۲؛ شریفان و همکاران، ۱۳۸۵؛ زارع و همکاران، ۱۳۸۹؛ مجیدی و علیزاده، ۱۳۹۰؛ مجیدی و همکاران، ۱۳۹۱)، اما به نظر نمی‌رسد هنوز مدیریت منابع آب در کشور آنقدر رشد کرده باشد که تبخیر از پیکره‌های آبی نیز به‌عنوان 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 (سعادت‌خواه و همکاران، ۱۳۸۰؛ دانش‌کار و همکاران، ۱۳۸۴؛ حسنی و همکاران، ۱۳۹۰)، اما بدیهی است مطالعات مذکور به دلیل عدم انسجام و تداوم، نتوانسته است در 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 ادعا است. 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

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲ ـ استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۳ ـ استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۴ ـ استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه گیلان
(* ـ نویسنده مسئول: (Email: alizadeh@gmail.com

Lapworth., 1965; Winter, 1981; Stauffer., 1992;) Krabbenhoft et al., 1992). 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 مؤثر بر تبخیر، جهت برآورد آن توسعه داده شده است. این روش‌ها در چندین گروه محتلف قابل تقسیم‌بندی هستند که برخی از آن‌ها عبارتند از روش‌های مبتنی بر بیلان انرژی (Rosenberry et al., 2007)، روش‌های تابش ـ دما (Xu and Singh 2000., 2001)، ضرایب تشت تبخیر (Fu et al., 2004) و روش‌های ترکیبی (Gianniou and Antonopoulos, 2007). به طور مثال گروه‌های مذکور شامل معادلاتی می‌شوند که توسط پنمن (Penman, 1948, 1963)، مککینک (Makkink, 1957)، جنسن ـ هیز (Jensen and Haise, 1963)، استفن ـ استوارت (Stephens and Stewart, 1963)، پریستلی ـ تیلر (Priestley and Taylor, 1972)، دبروین ـ کیجمن (deBruin and Keijman, 1979) و بروتسرت ـ استریکر (Brutsaert and Stricker, 1979) توسعه داده شده‌اند. برحسب 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 مؤثر 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 deBruin and Stricker, (2000)، Lenters et al., (2005)، Rosenberry et al., (2007)، Gallego−Elvira et al., (2010)، McJannet et al., (2012)، مجیدی و علیزاده (۱۳۹۰) و مجیدی و همکاران (۱۳۹۰) نام برد. همان‌طور که در بررسی‌ها و ارزیابی روش‌های برآورد تبخیر ـ تعرق، عمدتاً روش استاندارد روش پنمن ـ مانتیث در نظر گرفته می‌شود (مجیدی و علیزاده، ۱۳۹۰؛ Allen et al., 1998)، برای برآورد تبخیر از پیکره‌های آبی روش مبنا، بیلان انرژی دریاچه و یا مخزن سد مورد نظر می‌باشد (Lenters et al., 2005; Rosenberry et al., 2007). Winter et al., (1995) یازده روش شناخته شده برآورد تبخیر را برای دریاچه ویلیلامز با کمک روش بیلان انرژی مورد مقایسه و ارزیابی قرار دادند و نشان دادند که برای منطقه مذکور، روش‌های پنمن، دبروین ـ کیجمن و مککینک مناسب‌ترین نتایج را حاصل نمودند. در مطالعه کامل‌تری که توسط روزنبری و همکاران انجام شد، پانزده روش مختلف مورد بررسی قرار گرفت (Rosenberry et al., 2007). آن‌ها بر اساس مقایسات و ارزیابی‌هایی که بر پایه روش بیلان انرژی انجام دادند، برای یک منطقه کوهستانی روش‌های ترکیبی را مناسب‌ترین 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. 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 را ارزیابی و جهت کاربرد در شرایط مشابه توصیه نماید، احساس می‌شد. 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 ایجاد چارچوبی علمی 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 تأمین آب به‌ویژه آب شرب شهر مشهد محسوب می‌گردد. از آنجا که این سد در منطقه‌ی نسبتاً خشک ایران قرار گرفته است، تبخیر از آن اهمیت خاصی داشته و با توجه به محدودیت داده‌های مورد نیاز، برآوردهای مطمئن تبخیر در مخزن این سد 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 جزء بزرگ‌ترین مخازن سدهای ایران است. این سد که تأمین 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٪ 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 تشت 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 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 به‌منظور برآورد تبخیر مورد استفاده قرار می‌گیرد روش بیلان انرژی نسبت باون است که در آن شار گرمای نهان تبخیر با اندازه‌گیری و یا تخمین سایر اجزاء بیلان انرژی به‌دست می‌آید (Winter et al., 2003, Stannard and Rosenberry 1991, Seneet al., 1991, Rosenberryet al., 2007, Stauffer 1991, Lenterset al., 2005). در این روش شدت تبخیر با استفاده از رابطه ذیل محاسبه می‌گردد (Brutsaert., 1982, Simon and Mero., 1985, dos Reis and Dias., 1998):

$$E=\frac{R_n+N}{\rho\left(\lambda(1+\beta)+cT_s\right)} \qquad (۱)$$

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 ($J\ kg^{-1}{}^{\circ}C^{-1}$)؛ T_s: دمای سطح آب ($^{\circ}C$)؛ و β: نسبت باون (بدون بعد) می‌باشد.

روش بیلان انرژی نسبت باون، اغلب به عنوان روش مرجع جهت مقایسه و ارزیابی سایر روش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Assouline and Mahrer., 1993, Hoy and Stephens., 1977, Rosenberry et al., 2007, Lenters et al., 2005, Winter et al., 2003). محدودیت این روش نیاز به داده‌های ورودی متعددی است که در اغلب دریاچه‌ها و مخازن سدها در دسترس نیست. برای افزایش دقت روش بیلان انرژی، اندازه‌گیری‌های دمای سطح و عمق آب و اطلاعات هواشناسی که مبین وضعیت سطح دریاچه باشد، ضروری است (Anderson., 1954, Assouline and Mahrer., 1993, Sturrock et al., 1992).

بنابراین همان‌طور که قبلاً مطرح گردید، در این تحقیق داده‌های مورد نیاز از دریاچه سد دوستی (در نقاط و اعماق مختلف) اندازه‌گیری شد.

روش‌های ترکیبی

Penman (1948, 1963) با ترکیب تئوری بیلان انرژی و انتقال جرم، توانست نیاز به داده‌های دمای سطح آب را مرتفع سازد و رابطه زیر را برای تبخیر از سطوح آزاد آبی ارائه نماید:

$$E=\frac{\Delta R_n}{\lambda(\Delta+\gamma)}+\frac{\gamma f(u)(e_a^*-e)}{\Delta+\gamma} \qquad (۲)$$

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

موفقیت روش پنمن در بسیاری از نقاط مختلف دنیا، به دلیل اساس فیزیکی این روش می‌باشد (Linacre., 1993).

پریستلی ـ تیلر فرم ساده‌تری از معادله ترکیبی پنمن را پیشنهاد نمود که در آن از اجزاء مقاومت آئرودینامیک چشم‌پوشی نمود و به جای آن ضریب اصلاحی α را قرار داد (Priestley and Taylor, 1972). این رابطه عبارت است از:

$$E=\alpha\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\frac{R_n-N}{\lambda} \qquad (۳)$$

برای سطوح بزرگ آب، ضریب اصلاحی مذکور معادل ۱/۲۶ تخمین زده شده است (Stewart and Rouse., 1976, Stewart and Rouse., 1977, deBruin and Keijman., 1979).

دبروین رابطه زیر را از ترکیب معادلات پنمن و پریستلی ـ تیلر برای برآورد تبخیر به‌دست آورد که بدین طریق عبارت مربوط به انرژی حذف شده است (deBruin, 1978):

$$E=\frac{\alpha}{\alpha-1}\frac{\gamma}{\Delta+\gamma}f(u)\left(e_a^*-e\right) \qquad (۴)$$

به کمک این روش، دبروین توانست عبارات مربوط به تابش خالص و ذخیره حرارتی دریاچه و یا مخزن را که اغلب غیرقابل دسترس بوده و یا اندازه‌گیری دقیق آن هزینه‌های بسیاری در بر دارد را از رابطه خود حذف نماید. نتایج مدل وی در مقایسه با روش بیلان انرژی دقت قابل توجهی داشته است (DeBruin., 1978).

دبروین و کیجمن بر اساس رابطه پریستلی ـ تیلر معادله ذیل را ارائه نمودند (deBruin and Keijman., 1979):

$$E=\frac{\Delta}{0.85\Delta+0.63\gamma}\frac{R_n-N}{\lambda} \qquad (۵)$$

بروتسرت و استریکر یک مدل همرفتی ـ خشکی را توسعه دادند که در آن تابع سرعت باد جایگزین عبارت انتقال بخار آئرودینامیک در معادله پنمن شده است. هم‌چنین آن‌ها با به کاربردن رابطه تبخیر تعادلی پریستلی ـ تیلر، در نهایت رابطه ذیل را برای برآورد تبخیر ارائه نمودند (Brutsaert and Stricker, 1979):

$$E=(2\alpha-1)\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\frac{R_n-N}{\lambda}-\lambda\frac{\gamma}{\Delta+\gamma}f(u)\left(e_a^*-e\right) \qquad (۶)$$

روش‌های تابش ـ دما

این گروه از روابط که اغلب مبنای تجربی دارند، در عین سادگی و پارامترهای ورودی مورد نیاز کم، دقت آن‌ها بسته به شرایط محل مورد مطالعه متفاوت است. با توجه به اینکه در اغلب دریاچه‌ها و مخازن موجود در کشور، وجود اطلاعات جامع و منظمی که امکان کاربرد روابط پیچیده‌تر را فراهم نماید، میسر نیست، روابط تجربی و به‌ویژه روش‌های تابش ـ 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 شکل جدیدی از رابطه پریستلی ـ 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 جایگزین نمودند (Stewart and Rouse., 1976). ضرایب تجربی تابع مذکور با استفاده از تحلیل رگرسیونی به‌دست آمده بود و لذا مخصوص دریاچه مورد مطالعه تعیین گردید. رابطه استخراجی آن‌ها مشابه معادله Makkink (1957) بود که وی برای برآورد تبخیر از یک سطح کاملاً مرطوب توسعه داده بود:

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

جنسن ـ هیز یک روش تجربی مبتنی بر رابطه تابش ـ دما با تبخیر روزانه به شکل زیر ارائه نمود (Jensen and Haise, 1963):

$$E = 0.03523R_s\left(0.014T_a - 0.37\right) \qquad (۸)$$

استفن و استوارت نیز یک روش برآورد تبخیر مبتنی بر تابش که بر اساس متوسط ماهانه دمای هوا اصلاح شده بود، ارائه نمودند (Stephens and Stewart, 1963). آن‌ها روش پیشنهادی خود را به‌عنوان روش معادل کسری تبخیر تابش خورشیدی نام‌گذاری نمودند. روش پیشنهادی آن‌ها اساساً مشابه روش جنسن ـ هیز است که به شکل زیر ارائه شده است:

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

پاپاداکیس نیز برای برآورد تبخیر رابطه‌ای ارائه کرد که جزء روش‌های دمایی شناخته می‌شود که در اینجا به همین دلیل به روش‌های تابش ـ دما افزوده می‌گردد (Papadakis, 1961). 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. لذا در این روش، صرفاً اطلاع از حداقل و حداکثر دمای هوا مورد نیاز است:

$$E = 0.5625\left[e^*_{a,\max}\times10^{-2} - \left(e^*_{a,\min}\times10^{-2} - 2\right)\right] \qquad (۱۰)$$

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 با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است (مجیدی و علیزاده، ۱۳۹۰):

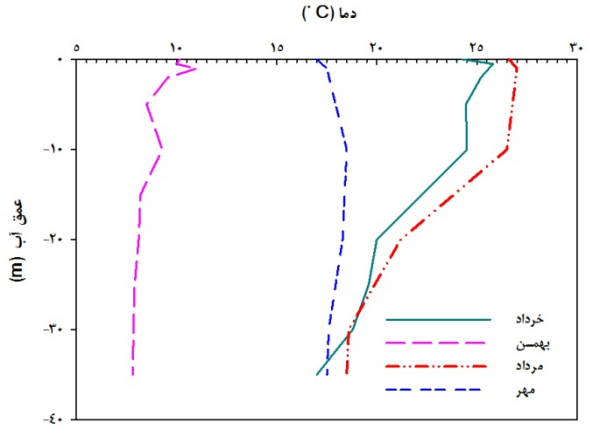
$$RMSD = \left[1/M\sum_{i=1}^{M}\left(E_{BREB,i} - E_{eq,i}\right)^2\right]^{0.5} \qquad (۱۰)$$

در این رابطه E_{BREB}: مقادیر برآورد تبخیر به روش بیلان انرژی نسبت باون و E_{eq}: مقادیر برآورد شده تبخیر با سایر روش‌های مورد استفاده در این تحقیق در مقیاس‌های زمانی ماهانه و روزانه می‌باشد.

نتایج و بحث

دما و تابش دریاچه

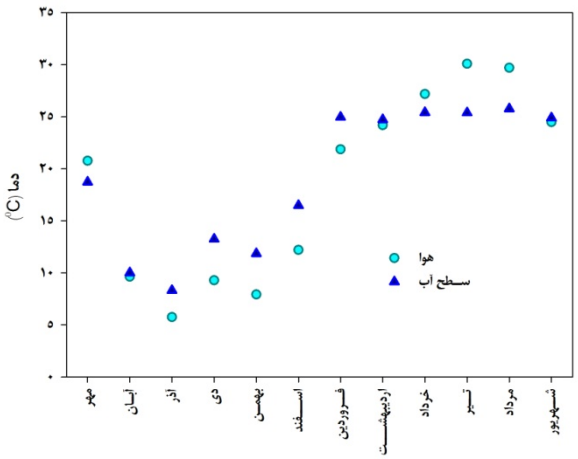
همان‌طور که در قسمت مواد و روش‌ها بیان شد، دمای سطح و عمق آب دریاچه سد دوستی در فواصل زمانی ۱۶ روزه و در نقاط مختلف در طول دریاچه سد اندازه‌گیری گردید که میانگین پروفیل دمای آب در این دریاچه در نمودار شکل ۱ برای نمونه در چهار ماه در فصول مختلف ارائه گردیده است. تغییرات دمای آب از سطح به عمق در طول دوره 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، گرم شدن هوا در فصول گرم سال، تا عمق حدود ۲۰ متری از سطح آب را بیش‌تر تحت تأثیر قرار می‌دهد و تغییرات دما در 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.



شکل ۱- مقادیر اندازه‌گیری شده نیمرخ حرارتی دریاچه سد دوستی طی سال آبی ۹۱ـ۱۳۹۰.

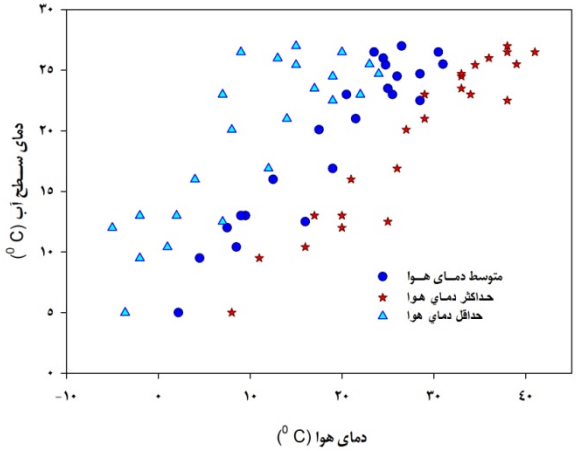
در شکل ۲، تغییرات دمای سطح آب و نیز دمای هوا طی سال ۱۳۹۱-۱۳۹۰ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که عمدتاً در تابستان دمای هوا بیش‌تر از دمای سطح آب و در زمستان برعکس آن اتفاق افتاده است. بنابراین انتظار می‌رود شدت تبخیر از دریاچه متناسب با این تغییرات در تابستان اندکی کم‌تر از حد مورد انتظار و در زمستان کمی بیش‌تر باشد به طوری‌که با افزایش عمق، به دلیل ذخیره حرارتی، حداکثر تبخیر مورد انتظار ممکن است با تاخیر نسبت به حداکثر دما اتفاق بیافتد (Mironov et al., 2003). 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.

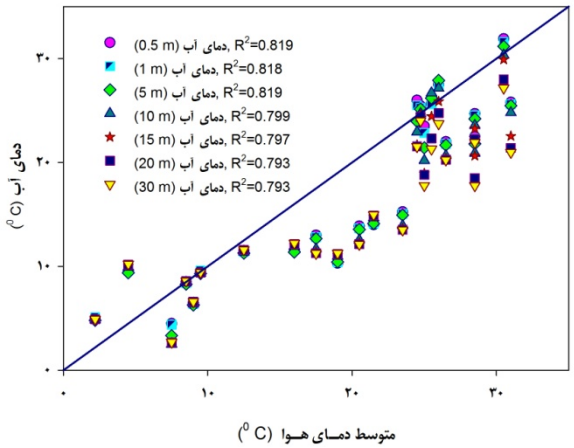


شکل ۲- مقادیر اندازه‌گیری شده دمای هوا و سطح آب (متوسط ماهانه) طی سال آبی ۹۰-۱۳۹۱.

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 رابطه‌ی مناسب، چندین مدل رگرسیونی بین داده‌ها 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 به‌کار 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.

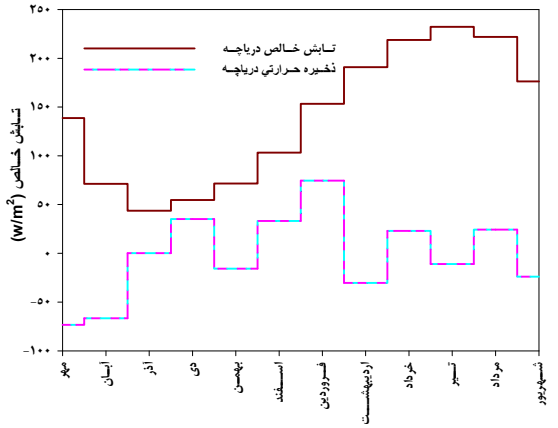


شکل ۳- ارتباط بین مقادیر اندازه‌گیری شده دمای سطح آب و مقادیر حداقل، متوسط و حداکثر دمای هوا طی سال آبی ۹۱-۱۳۹۰.



شکل ٤- تحلیل رگرسیونی بین مقادیر اندازه‌گیری شده نیمرخ حرارتی آب و متوسط دمای هوا طی سال آبی ۹۱-۱۳۹۰.

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 (Cogley., 1979) که نتایج آن در شکل ۵ ارائه شده است.



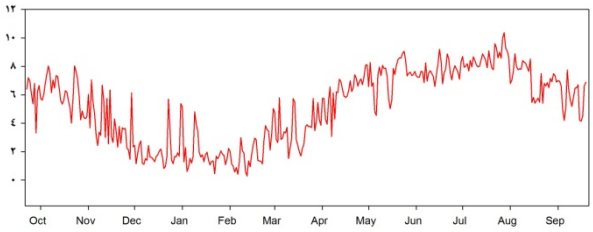
شکل ۵- تغییرات مقادیر محاسبه شده تابش خالص و ذخیره حرارتی دریاچه طی سال آبی ۹۱-۱۳۹۰.

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 به‌صورت 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 طولانی‌تری آزاد می‌شود و به همین دلیل است که حداکثر شدت

تبخیر مورد انتظار، الزاماً در زمان حداکثر تابش خالص اتفاق نمی‌افتد.

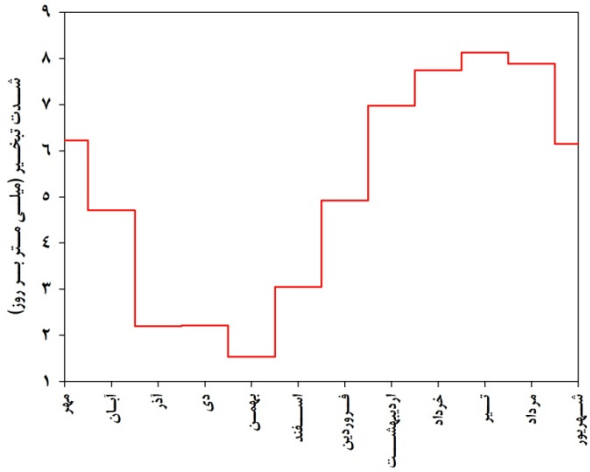
برآوردهای تبخیر

نتایج حاصل از روش بیلان انرژی در برآورد تبخیر با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و نیز داده‌های بازسازی شده روزانه در طی سال ۱۳۹۱ـ۱۳۹۰ در شکل‌های۵ و ۶ ارائه شده است.



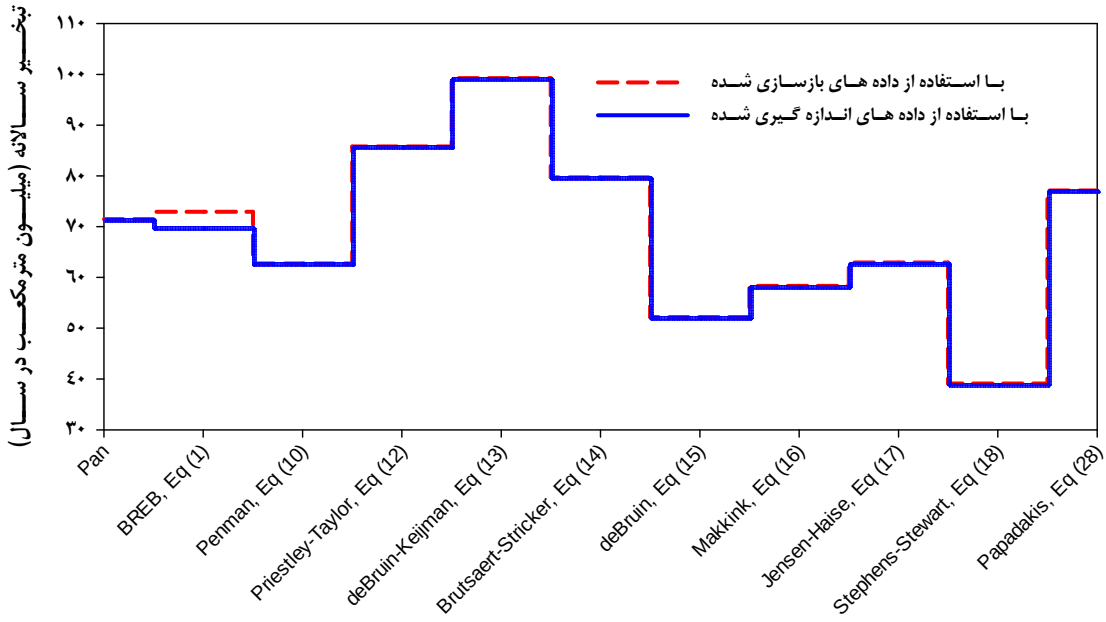
شکل ٦- مقادیر شدت تبخیر روزانه حاصل از بیلان انرژی دریاچه با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری و بازسازی شده طی سال آبی ۹۱ـ۱۳۹۰.

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 ۱۰/۳۷ میلی‌متر در روز در مرداد ماه و حداقل آن در بهمن‌ماه معادل ۰/۲۴ میلی‌متر در روز مشاهده می‌شود. بدیهی است نتایج تبخیر روزانه به دلیل استفاده از داده‌های بازسازی شده دمای آب، احتمالاً دارای خطا خواهد بود، اما دقت مطلوب این نتایج را می‌توان در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده تایید نمود. به‌طوری‌که در شکل ۷، روند تغییرات شدت تبخیر که به صورت متوسط ماهیانه و بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده ارائه شده است نیز تطابق مطلوبی با نتایج روزانه نشان می‌دهد. 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 بالاتری برخوردار است. مجموع تبخیر سالانه از دریاچه سد دوستی به روش بیلان انرژی در سال آبی ۱۳۹۱ـ۱۳۹۰ 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.

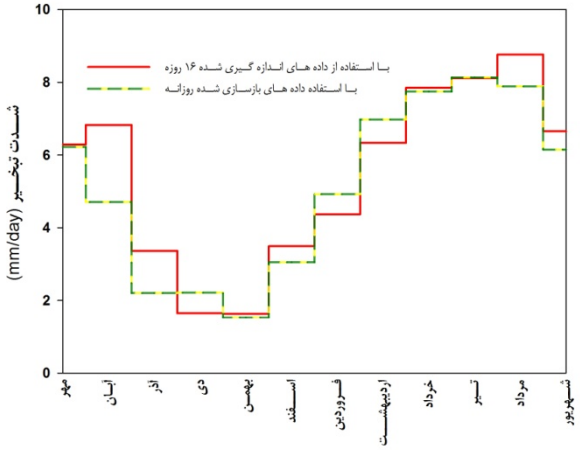


شکل ۷- مقادیر شدت تبخیر ماهانه حاصل از بیلان انرژی دریاچه با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده طی سال آبی ۹۱ـ۱۳۹۰.

در نگاه اول آنچه از این شکل می‌توان نتیجه گرفت، تأثیر 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 تأثیر را بر دقت روش بیلان انرژی داشته است. این اثر در شکل ۹ به طور دقیق‌تری بررسی شده است. بر اساس این شکل، به‌وضوح تأثیر 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 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 دبروین ـ کیجمن و پریستلی ـ تیلر و کم برآوردهای روش‌های استفن ـ استوارت، دبروین و مککینک در مقیاس سالانه تا حدی مشهود است. بدیهی است بررسی دقت روش‌ها در مقیاس‌های زمانی کوچک‌تر یعنی ماهانه و روزانه، تصویر شفاف‌تری از عملکرد مدل‌ها را ارائه می‌دهد که در ادامه به این موضوع پرداخته شده است.



شکل ۸- مقادیر تبخیر سالانه از دریاچه سد دوستی حاصل از روش‌های مختلف مورد استفاده در سال آبی ۹۱ـ۱۳۹۰.



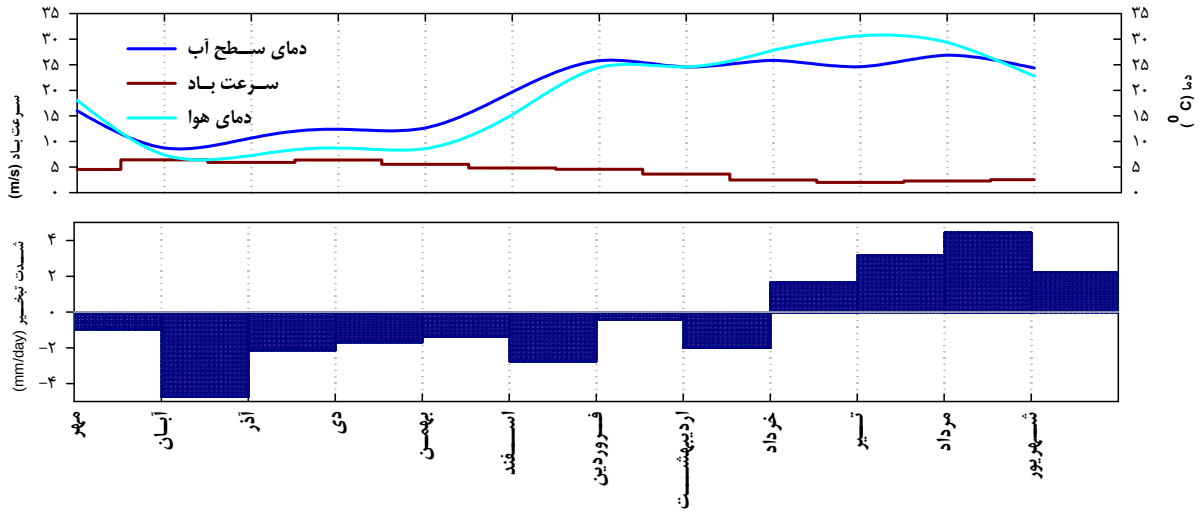
شکل ۹- مقایسه برآوردهای شدت تبخیر (mmd^{-1}) حاصل از بیلان انرژی دریاچه با اسفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده و بازسازی شده طی سال آبی ۹۱ـ۱۳۹۰.

عملکرد روش‌ها

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.

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 با وسعت دریاچه نمی‌تواند این تاخیر زمانی را جبران نماید.



شکل ۱۰- بررسی تفاوت بین مقادیر شدت تبخیر حاصل از تشت و بیلان انرژی دریاچه طی سال آبی ۹۱-۱۳۹۰.

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 (Winter, 1981). به نظر می‌رسد نتایج ماهانه حاصل از تشت تبخیر با اصلاح ضریب تشت تا حدی قابل بهبود باشد.

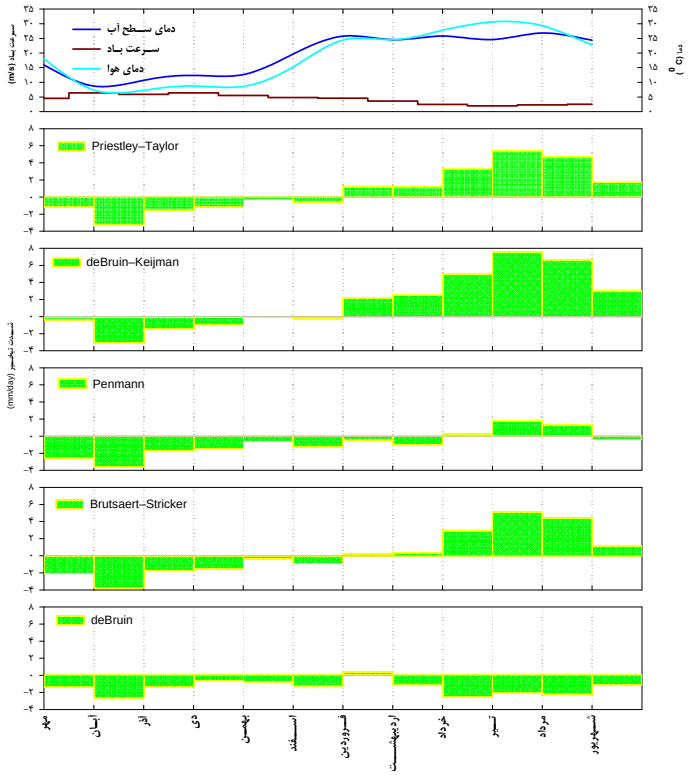
روش‌های ترکیبی

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 (۲۰۰۷) 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. 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.

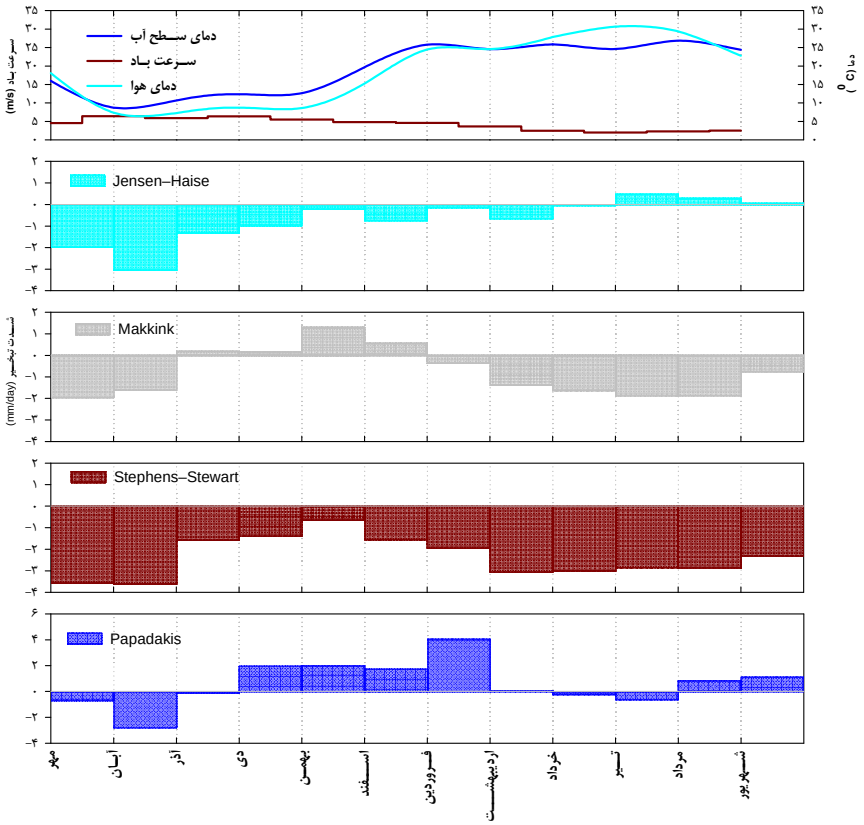
روش‌های تابش ـ دما

مطابق شکل ۱۲روش‌های 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 نسبت به تغییرات شرایط دمایی و تابشی، حساس هستند (Rosenberry et al., 2007). نکته جالب در مورد روش‌های تابش ـ 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 ـ هیز و مککینک با روش بیلان انرژی در حدود ۲ میلی‌متر در روز است. سادگی و دقت قابل قبول این دو روش از بزرگ‌ترین مزایای آن‌ها محسوب می‌شود، زیرا داده‌های ورودی کم‌تری نیاز دارند و با دقتی که از این دو روش دیده می‌شود، کاربرد آن‌ها برای مناطق مشابه که فاقد اطلاعات اندازه‌گیری شده و در دسترس هستند، می‌تواند مفید باشد. نتایج روش استفن ـ استوارت تقریباً نسبت به سایر روش‌های این گروه ضعیف‌تر به نظر می‌رسد و اصلاح ضرایب آن شاید بتواند در بهبود نتایج حاصل مؤثر باشد.

روش پاپاداکیس نیز که یک روش صرفاً دمایی است، در ماه‌های مختلف رفتارهای مختلفی دارد به‌طوری‌که به وضوح نمی‌توان بیش‌برآورد یا کم‌برآورد نمودن این روش را پیش‌بینی نمود. اما با توجه به اینکه 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 بیش‌برآوردها و کم‌برآوردهای تبخیر از حد ۴± میلی‌متر بر روز تجاوز کرده است.



شکل ۱۱- بررسی تفاوت بین مقادیر شدت تبخیر حاصل از روش‌های ترکیبی با بیلان انرژی دریاچه طی سال آبی ۹۱-۱۳۹۰.



شکل ۱۲- بررسی تفاوت بین مقادیر شدت تبخیر حاصل از روش‌های تابش ـ دما و دمایی با بیلان انرژی دریاچه طی سال آبی ۹۱-۱۳۹۰.

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 به‌صورت 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 ۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، روش‌های جنسن ـ هیز و مککینک (گروه تابش ـ 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 ـ دما در اینجا نشان می‌دهد که تأثیر عوامل مختلفی که بر تبخیر آب از دریاچه مؤثر هستند، در پارامترهای دما و تابش دیده می‌شوند. در حقیقت در منطقه مورد مطالعه، نقش این دو پارامتر، بسیار پررنگ‌تر از سایر پارامترهای مؤثر بر تبخیر است. از طرفی با توجه به اینکه اندازه‌گیری دمای هوا و برآورد تابش خورشیدی، جزء در دسترس‌ترین و آسان‌ترین اطلاعات در اکثر مناطق می‌باشد، برتری روش‌های تابش ـ دما در برآورد تبخیر، نویدی است برای امکان کاربرد گسترده این روش‌ها در مناطق مشابه. قابل توجه است که بر اساس نتایج تحقیق، قابلیت اعتماد به برآوردهای تبخیر حاصل از تشت، به‌ویژه در مقیاس روزانه و ماهانه، اندک بوده و در کاربری‌های دقیق‌تر و برنامه‌ریزی‌های زمانی کوچک‌تر از سالانه، قابلیت کاربرد ندارد. در سوی دیگر دقت مطلوب روش دبروین که نیازی به برآورد ذخیره حرارتی دریاچه ندارد، نیز قابل تأمل 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 ـ هیز و مککینک، به‌ویژه در شرایطی که با محدودیت اطلاعات مواجه هستیم، زیاد مطلوب نخواهد بود.

ضعف روش‌های پریستلی ـ تیلر و دبروین ـ 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.

نتیجه‌گیری

برآورد اجزاء بیلان انرژی دریاچه سد دوستی که به منظور برآورد تبخیر و با استفاده از اندازه‌گیری برخی پارامترهای مؤثر در طول دریاچه سد طی سال آبی ۹۱ـ۱۳۹۰ انجام پذیرفت، به عنوان اساس مقایسه و ارزیابی برخی روش‌های متداول برآورد تبخیر 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 تبخیر 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 مؤلفه‌های بیلان آب است تا بهره‌برداری از منابع آب و تخصیص آن بیش‌تر از پیش، سمت و سویی بهینه داشته باشد. با هدف تأمین گامی هر چند کوچک، در این تحقیق تلاش گردید با ارزیابی و مقایسه روش‌های ترکیبی و تابش ـ دما برآورد تبخیر از پیکره‌های آبی، روش‌هایی که در شرایط محدودیت داده، دقت مطلوبی دارند در صورت وجود، شناسایی و جهت کاربرد در شرایط مشابه توصیه گردند.

جدول۱- رتبه‌بندی روش‌های برآورد تبخیر از دریاچه سد دوستی بر اساس مقادیر روزانه و ماهانه شدت تبخیر طی سال آبی ۹۱ـ۱۳۹۰.

روش	روزانه		ماهانه	
	مقدار RMSD (میلی‌متر در روز)	رتبه	مقدار RMSD (میلی‌متر در روز)	رتبه
جنسن ـ هیز	۱/۲۱	۱	۱/۱۹	۱
مککینک	۱/۳۴	۲	۱/۳۲	۲
دبروین	۱/۶۲	۳	۱/۶۰	۳
پنمن	۱/۶۵	۴	۱/۶۵	۴
پاپاداکیس	۱/۷۶	۵	۱/۷۸	۵
استفن ـ استوارت	۲/۵۳	۶	۲/۵۳	۶
بروتسرت ـاستریکر	۲/۶۳	۷	۲/۶۰	۷
پریستلی ـ تیلر	۲/۷۰	۸	۲/۶۵	۹
تشت تبخیر	۲/۷۱	۹	۲/۶۲	۸
دبروین ـ کیجمن	۳/۷۱	۱۰	۳/۶۴	۱۰

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 ـ دما، روش‌های جنسن ـ هیز و مککینک و در گروه ترکیبی، روش‌های دبروین و پنمن عملکرد مطلوبی داشتند. قابل توجه است که برآوردهای تشت تبخیر، در مقیاس ماهانه تفاوت بسیاری با بیلان انرژی نشان داد که قابلیت کاربرد آن در مقیاس‌های زمانی کوچک‌تر از سال، قابل اعتماد نیست. سپس در مقیاس روزانه و البته هم‌چنین ماهانه، رتبه‌بندی روش‌های مورد استفاده در این تحقیق نیز نشان از برتری روش‌های جنسن ـ هیز، مککینک، دبروین و پنمن داشت. این نتیجه به‌ویژه اینکه روش‌های تابش ـ دما، پارامترهای ورودی اندک نیاز دارند که این پارامترها به‌راحتی 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 تبخیر 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 تبخیر دارد.

قدردانی

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

منابع

حسنی،ا.، تجریشی،م و ابریشم‌چی، ا.، ۱۳۹۰. تصحیح روش بیلان انرژی تاریخی مخزن سد ساوه (الغدیر) با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی. مهندسی عمران شریف. شماره ۱. ۱۲۷ ـ ۱۱۵.

دانش‌کار آراسته،پ.، تجریشی،م.، میرلطیفی،م و ثقفیان.ب. ۱۳۸۴. مدل آماری برآورد تبخیر از سطح مخزن چاه‌نیمه سیستان به روش بیلان حجمی. پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی. شماره ۶۸، ۱۴ـ ۲.

زارع ابیانه،ح.، بیات ورکشی،م.، سبزی‌پرور،ع.ا.، معروفی،ص و قاسمی،ع. ۱۳۸۹. ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر تعرق گیاه مرجع و پهنه‌بندی آن در ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. شماره ۷۴، ۱۱۰ ـ ۹۵.

سعادت‌خواه،ن.، سارنگ،س.ا.، تجریشی،م و ابریشم‌چی،ا. ۱۳۸۰. برآورد تبخیر از مخازن چاه نیمه. آب و فاضلاب. شماره ۴۰.

شریفان،ح.، قهرمان،ب.، علیزاده،ا و میرلطیفی،م. ۱۳۸۵. مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر ـ تعرق مرجع (ترکیبی و دمایی) با روش استاندارد و بررسی اثرات خشکی هوا بر آن. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. سال سیزدهم. شماره ۱.

علیزاده، ا.، ایزدی، ع.، داوری، ک.، ضیایی، ع. ن.، اخوان، س.، و ز.، حمیدی. ۱۳۹۲. برآورد تبخیر ـ تعرق واقعی در مقیاس سال ـ حوضه با استفاده از SWAT. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. شماره ۲، ۲۵۸ ـ ۲۴۳.

علیزاده،ا.، خانجانی،م.ج.، ترازح و رهنورد،م.ر. ۱۳۸۵. بررسی اثرات اصلاح داده‌های دما بر دقت محاسبات تبخیر ـ تعرق و مقایسه‌ی آن با نتایج به‌دست آمده از لایسی‌متر وزنی. مجله جغرافیا و توسعه‌ی ناحیه‌ای. شماره ۶، ۹۹ ـ ۹۱.

مجیدی،م.، علیزاده،ا و کافی،م. ۱۳۹۰. برآورد میزان تعرق گیاه با استفاده از اندازه‌گیری دمای برگ. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. جلد ۵، شماره ۱، ۱۵۷ ـ ۱۴۵.

مجیدی،م.، و ا.، علیزاده. ۱۳۹۰. بررسی تأثیر داده‌های هواشناسی غیرموجود و روش‌های تخمین آن‌ها در دقت برآورد تبخیر- تعرق مرجع و رتبه‌بندی معادلات در شرایط اقلیمی مختلف(مطالعه موردی استان‌های خراسان). نشریه آب و خاک. جلد ۲۵. شماره ۶.

Anderson,E.R. 1954. Energy−budget studies. In: Water Loss Investigations: Lake Hefner Studies. U.S. Geological Survey Professional Paper (269), 71−119.

Assouline,S and Mahrer,Y. 1993. Evaporation from Lake Kinneret: 1 Eddy correlation system measurements and energy budget estimates. Water Resour. Res. 29, 901−910.

Blaney,H.F and Criddle,W.D. 1950. Determining Water Requirements in Irrigated Areas fromClimatological Irrigation Data. Technical Paper No. 96, US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, D.C., 48 pp.

Eng., 87(HY3), 107–120.

Hamon,W.R. 1963. Computation of direct runoff amounts from storm rainfall. Int. Assoc. Sci. Hydrol. Publ., 63, 52–62.

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.

Jensen,M.E and Haise,H.R. 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. J. Irrig. Drainage Div. ASCE. 89, 15–41.

Lapworth,C.F. 1965 Evaporation from a reservoir near London. Journal of the Institution of Water Engineers, 19, 163-181.

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). J. Hydrol. 308, 168–195.

Linacre,E.T. 1993. Data−sparse estimation of lake evaporation, using a simplified Penman equation. Agric. Forest Meteor. 64, 237–256.

Makkink,G.F. 1957. Ekzameno de la formulo de Penman. Netherlands J. Agric. Sci. 5, 290–305.

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, Environ. Modell. Softw. 31, 76–83.

Papadakis,J. 1961. Climatic tables for the world. Buenos Aires, (Original not seen, cited in Grassi, 1964).

Penman,H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Royal Soc. A193, 120−145.

Penman,H.L. 1963. Vegetation and Hydrology. Tech. Comm. No. 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England, 125 pp.

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 Rev. 100, 81–92.

Bowen,I.S. 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. Physical Review. 27, 779–787.

Brutsaert,W. 1982. Evaporation Into the Atmosphere: Theory, History and Applications. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.

Brutsaert,W and Stricker,H. 1979. An Advection−Aridity Approach to Estimate Actual Regional Evapotranspiration. Water Resour. Res. 15 (2), 443–450.

Brutsaert,W and Yu,S.L. 1968. Mass transfer aspects of pan evaporation. J. Appl. Meteor. 7, 563−566.

Cogley,J.G. 1979. The albedo of water as a function of latitude. Monthly Weather Rev., 107, 775−781.

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 ofgases by heat. Mem. Manchester Liter. and Phil. Soc. 5–11, 535–602.

De Bruin,H.A.R. 1978. A simple model for shallow lake evaporation. J. Appl. Meteor. 17, 1132–1134.

De Bruin,H.A.R and Keijman,J.Q. 1979. The Priestley −Taylor evaporation model applied to a large shallow lake in the Netherlands. J. Appl. Meteor. 18, 898–903.

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.

Dos Reis,R.J and Dias,N.L. 1998. Multi−season lake evaporation: energy−budget estimates and CRLE model assessment with limited meteorological observations. J. Hydrol. 208, 135–147.

Gallego−Elvira, B., Baille, A., Mart´ın−G´orriz, B., Mart´ınez−A´ lvarez, V. 2010. Energy balance and evaporation loss of an agricultural reservoir in a semi−arid climate (south−eastern Spain), Hydrol. Process., 24, 758–766

Hamon,W.R. 1961. Estimating potential evapotranspiration.,Hyraul.D iv. Am. Soc. Civ.

Meteor. 16, 649–650.

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 Resour. Res. 28, 1605–1617.

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.

Winter, T.C., Buso, D.C., Rosenberry, D.O., Likens, G.E., Sturrock, A.M.J., Mau, D.P. 2003. Evaporation determined by the energy budget method for Mirror Lake, New Hampshire. Limnology and Oceanography, 48 (3), 995–1009.

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 Resour. Res. 31 (4), 983–993.

Winter,T.C. 1981 Uncertainties in estimating the water balance of lakes. Water Resources Bulletin, 17 , 82-115.

Xu,C.Y and Singh,V.P. 2000. Evaluation and generalization of radiation–based methods for calculating evaporation. Hydrological Processes. 14, 339–349.

Krabbenhoft,D.P., Anderson,M.P., Bowser,C.J. 1992. Estimating groundwater exchange with lakes. 1. The stable isotope mass balance method and estimating groundwater exchange with lakes. 2. Calibration of a 3-dimensional, solute transport model to a stable isotope plume-reply. Water Resources Research 28 (6), 1751–1753.

Rosenberry, D.O., Winter, T.C., Buso, D.C., Likens, G.E. 2007. Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA, J. Hydrol. 340, 149–166.Sene,K.J., Gash,J.H and McNeil,D.D. 1991. Evaporation from a tropical lake: comparison of theory with direct measurements. J. Hydrol. 127, 193–217.

Simon,E and Mero,F. 1985. A simplified procedure for the evaluation of the Lake Kinneret evaporation. J. Hydrol. 78, 291–304.

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.

Stannard,D.I and Rosenberry,D.O. 1991. A comparison of short−term measurements of lake evaporation using eddy correlation and energy budget methods. J. Hydrol. 122, 15–22.

Stauffer,R.E. 1991. Testing lake energy budget models under varying atmospheric stability conditions. J. Hydrol. 128, 115–135.

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

Stewart,R.B and Rouse,W.R. 1976. A simple method for determining the evaporation from shallow lakes and ponds. Water Resour. Res. 12, 623–628.

Stewart,R.B and Ruose,W.R. 1977. Substantiation of the priestley−taylor parameter alpha = 1.26 for potential evaporation in high latitudes. J. Appl.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 3, Vol. 8, Jul-Agu. 2014, p. 602-615

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد۸، مرداد - شهریور ۱۳۹۳، ص. ۶۱۵-۶۰۲

Lake and Reservoir Evaporation: Energy Balance Estimations, Evaluation of Combination and Radiation− Temperature Methods

M. Majidi[1], A. Alizadeh[*2], A. FaridHosseini[3], M. Vazifedoust[4]
Recived: Apr. 30, 2014 Accepted: Sep. 17, 2014

Abstract

Reservoir operations and development of new storage and water accounting strategies require more accurate evaporation estimates especially for Doosti dam reservoir as most important drinking water resource of Mashhad in arid conditions. In this study an attempt has been made to estimate evaporation from Doosti dam reservoir using combination and radiation−temperature methods based on energy balance method. For this reason, 10 evaporation estimation methods in some categories as energy balance, pan, radiation− temperature and combination group have been used. According to limited data especially for energy balance method, the field measurements of the dam were conducted for one year.The lake energy balance yields annual evaporation of 69.9 mcm. Annual evaporation estimations resulted from other methods ranged between 39 to 99 mcm. According to the assessments, evaporation values from Jensen−Haise, Makkink, Penman and deBruin methods compared most favorably with energy balance method determined values. Methods that rely only on measurement of air temperature, or air temperature and sunshine data (Jensen−Haise and Makkink), because of their simplicity, least sensitivity and high accuracy, were relatively cost−effective options for measuring evaporation at this reservoir, outperforming some methods that require measurement of a greater number of variables.

Key words: Combination methods, Doosti dam reservoir, Energy balance, Lake evaporation, Radiation - temperature

1- Ph. D student, Water Engineering Dept., Ferdowsi University of Mashhad
2- Professor, Water Engineering Dept., Ferdowsi University of Mashhad
3- Assistant professor,Water Engineering Dept., Ferdowsi University of Mashhad
4- Assistant professor,Water Engineering Dept., University of Guilan
(* Corresponding Author Email:alizadeh@gmail.com)