

برآورد تبخیر روزانه از مخزن سد با استفاده از روش بیلان انرژی و مقایسه با روابط متداول (مطالعه موردی: سد اکباتان)

مصطفی دولتی مهتاج^{۱*}، علی افروزی^۲

۱. کارشناس ارشد مهندسی عمران- آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲. دکتری مهندسی آب، کارشناس مطالعات پایه منابع آب، شرکت سهامی آب منطقه‌ای همدان، همدان

(تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۱۰/۱۱؛ تاریخ بازنگری ۱۴۰۱/۱۱/۱۱ تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۱۲/۱۲)

چکیده

تبخیر به عنوان یکی از عوامل اصلی کاهش منابع آب‌های سطحی نظیر دریاچه‌ها و مخازن سدها شناخته شده است. با توجه به تعدد مؤلفه‌های مؤثر بر تبخیر، برآورد صحیح آن همواره مورد توجه محققان حوزه هیدرولوژی بوده است. در این پژوهش ارتفاع تبخیر روزانه از سطح مخزن سد اکباتان با استفاده از روش بیلان انرژی نسبت بوئن به عنوان روش پایه، برآورد و با نتایج ۲۰ رابطه مختلف مقایسه شده است. بررسی‌ها بیانگر آن است که رابطه براتسارت- استریکر با مقادیر MAE، MSE و RMSE به ترتیب برابر با ۰/۳۶، ۰/۴۱ و ۰/۶۰ میلی‌متر بر روز و NSE و R² برابر با ۰/۹۷ و ۰/۹۸ بهترین عملکرد را در برآورد تبخیر روزانه از سطح مخزن سد اکباتان داشته است. در مقابل روابط هاربک و ریان- هارلمن موجود در گروه روابط انتقال جرم ضعیف‌ترین عملکرد را داشته‌اند. همچنین رابطه ارائه‌شده در این پژوهش برای محاسبه تبخیر از مخزن سد اکباتان با استفاده از پارامترهای آب‌وهوایی و بدون نیاز به محاسبه ذخیره حرارتی آب با مقادیر MAE، MSE و RMSE به ترتیب برابر با ۰/۸۱، ۰/۶۷ و ۰/۹۰ میلی‌متر بر روز و NSE و R² به ترتیب برابر با ۰/۹۳ و ۰/۹۴ برای داده‌های آزمایش، عملکرد مطلوبی در برآورد میزان تبخیر داشته است.

کلمات کلیدی: دریاچه، رگرسیون چندمتغیره، رتبه‌بندی روابط، روش‌های ترکیبی، سطح آزاد آب.

مقدمه

آب ذخیره‌شده در سدها از جمله منابع آبی برای تأمین آب بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب به حساب می‌آید که تبخیر یکی از عوامل کاهش میزان آن است. این موضوع در مناطق با شرایط آب‌وهوایی خشک و نیمه‌خشک اهمیت بیشتری پیدا می‌کند [۱]. تبخیر علاوه بر کاهش کمی منابع آب، باعث افت کیفی آب مخازن سدها نیز می‌شود. به همین دلیل، شناخت عوامل مؤثر بر تبخیر و برآورد صحیح آن بسیار بااهمیت است و می‌تواند به کارشناسان در اتخاذ تصمیمات بهتر در جهت مدیریت درست و بهره‌برداری بهینه از این منابع آبی کمک کند [۲ و ۳]. در این راستا روش‌های مختلفی برای برآورد تبخیر ارائه‌شده که روش تشت تبخیر یکی از آنها است. این روش به رغم محدودیت‌ها و مفروضات آن، به دلیل اندازه‌گیری مستقیم تبخیر به صورت گسترده در نواحی مختلف جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴ و ۵]. ولی در مطالعات مختلف به‌دقت پایین این روش در اندازه‌گیری تبخیر روزانه، به ویژه در مخازن عمیق، تأکید شده است [۶-۹]. به صورت کلی روش‌ها و روابط توسعه‌داده‌شده به منظور برآورد میزان تبخیر از سطوح آبی را می‌توان به پنج گروه کلی اندازه‌گیری مستقیم به کمک تشت تبخیر، بیلان آب، بیلان انرژی، روش‌های انتقال جرم و روش‌های ترکیبی تقسیم کرد [۱۰ و ۱۱]. در میان این روش‌ها، روش بیلان انرژی یکی از دقیق‌ترین روش‌ها برای برآورد میزان تبخیر از سطوح آبی است [۱۰، ۱۲-۱۴]. از جمله محدودیت‌های روش بیلان انرژی نیاز به داده‌های ورودی متعدد بوده که در اغلب مخازن و دریاچه‌ها در دسترس نیستند [۱ و ۱۵]. در روش بیلان انرژی، شار گرمای محسوس به‌آسانی قابل تعیین نیست. به همین دلیل، بوئن [۱۶] با استفاده از گرادیان دما و رطوبت نسبی، چگونگی تبدیل انرژی به گرمای محسوس را تشریح و با ارائه ضریب بوئن، روش بیلان انرژی نسبت بوئن (BREB) را برای برآورد تبخیر ارائه کرد. این روش توسط محققان مختلفی به عنوان دقیق‌ترین روش برآورد تبخیر از سطوح آزاد آب نظیر دریاچه‌ها و مخازن معرفی‌شده و به صورت گسترده از آن به عنوان روش مرجع و پایه برای مقایسه و بررسی دقت سایر روش‌ها استفاده می‌شود [۱، ۱۰، ۱۳، ۱۷-۲۲]. سپس پنمن [۲۳] رویکردهای انتقال جرم و بیلان انرژی را

با یکدیگر ترکیب و روش ترکیبی پنمن را برای برآورد تبخیر از سطح آب ارائه کرد [۱ و ۲۴]. در ادامه محققان دیگری با الهام از ایده ارائه‌شده توسط پنمن، روابط ترکیبی گوناگونی را برای برآورد تبخیر از سطوح آزاد آب ارائه کردند [۲۵-۲۹]. با توجه به نیاز روابط یادشده به داده‌های اولیه زیاد، روابط ساده‌تر دیگری توسط محققان مختلف توسعه‌داده‌شده که عمده آن‌ها روابط تجربی هستند [۳۰-۳۴].

تا کنون مطالعات متعددی به منظور شناخت روش‌های مناسب برآورد تبخیر از سطح مخازن و دریاچه‌ها در داخل [۹، ۱۳، ۲۰، ۲۲ و ۳۵] و خارج از کشور انجام شده است [۳، ۱۸، ۱۹، ۲۱ و ۳۶]. حسنی [۳۵]، مجیدی و همکاران [۹ و ۲۰] و بزرگی و همکاران [۱۳] به ترتیب تبخیر از سطح مخزن سدهای ساوه (الغدیر)، دوستی و کرخه را با استفاده از روش‌های مختلف محاسبه و با نتایج حاصل از روش بیلان انرژی نسبت بوئن مقایسه کردند. طبق مطالعات آنان برای سدهای ساوه (الغدیر) و کرخه رابطه پرستلی-تیلور و برای سد دوستی رابطه جنسن-هایز مناسب‌ترین عملکرد را در برآورد تبخیر داشته‌اند. همچنین حجتی و همکاران [۲۲] میزان تبخیر از مخزن سد علویان را با استفاده از ۳۰ رابطه مختلف محاسبه کردند. آنان با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با روش بیلان انرژی نسبت بوئن، رابطه روهور از گروه روابط مبتنی بر انتقال جرم و رابطه دبروین از گروه روابط ترکیبی را به عنوان بهترین روابط برآورد تبخیر از سطح مخزن سد علویان گزارش کردند. همچنین آنان روابطی که فقط تابعی از اختلاف فشار بخار و سرعت باد هستند (نظیر روابط روهور، دبروین و مک‌میلان) را با توجه به‌سادگی و در دسترس بودن داده‌های اولیه مورد نیاز، روش‌های جایگزین مناسبی برای برآورد میزان تبخیر از سطح مخزن سد علویان تشخیص دادند.

روزنبری و همکاران [۱۸] با استفاده از ۱۴ روش مختلف میزان تبخیر از سطح یک دریاچه کوچک (با مساحت ۰/۱۵ کیلومتر مربع) را برای یک دوره زمانی ۳۷ ماهه محاسبه کرده و نتایج به‌دست‌آمده را با نتایج روش بیلان انرژی نسبت بوئن مقایسه کردند. آنان دریافتند که مقادیر تبخیر محاسبه‌شده توسط روابط پرستلی-تیلور، دبروین-کیچمن و پنمن به نتایج روش بیلان انرژی نسبت

انجام شده و پژوهش‌های اندکی برای برآورد تبخیر روزانه صورت گرفته است. هدف از این پژوهش، برآورد میزان تبخیر واقعی در گام زمانی روزانه، بررسی و رتبه‌بندی روابط موجود و ارائه رابطه‌ای برای برآورد میزان تبخیر روزانه از سطح مخزن سد اکباتان است. برای نیل به اهداف یادشده، ابتدا به کمک روش بیلان انرژی نسبت بوئن میزان تبخیر واقعی از سطح مخزن سد اکباتان محاسبه و در ادامه با نتایج حاصل از ۲۰ رابطه مختلف مقایسه شده است. در انتها رابطه‌ای جهت برآورد تبخیر از سطح مخزن سد اکباتان ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

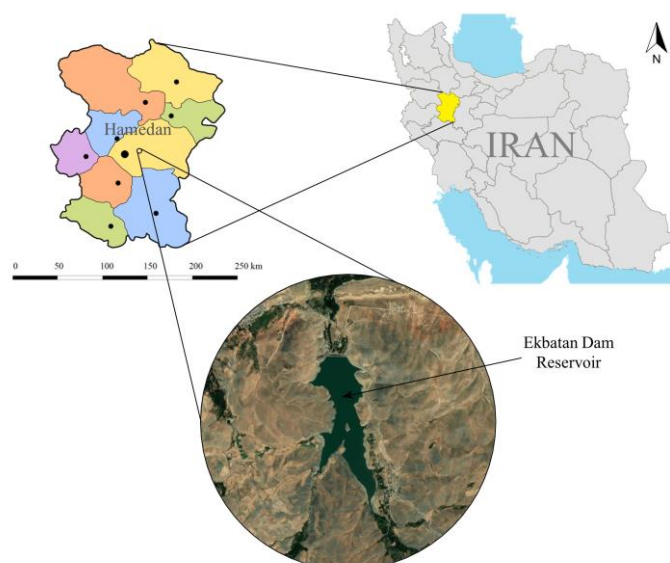
با توجه به اهمیت سد اکباتان در تأمین آب شرب شهر همدان، در این مطالعه تبخیر از این سد که یکی از عوامل اصلی تلفات آب ذخیره‌شده در پشت آن به حساب می‌آید مورد بررسی قرار گرفته است. این سد در ۱۰ کیلومتری جنوب شرقی شهر همدان و در طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۶ دقیقه شرقی و در عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی قرار گرفته است. ارتفاع این سد حدود ۷۹ متر و حجم و وسعت مخزن آن در ظرفیت کامل به ترتیب تقریباً ۳۴ میلیون متر مکعب و ۲ کیلومتر مربع است. سد اکباتان روی رودخانه آبشینه، پایین‌تر از محل اتصال رودخانه‌های یلفان و ابرو احداث شده است. همچنین مساحت حوضه آبریز آن حدود ۲۲۲ کیلومتر مربع با متوسط شیب ۲۶ درصد است. وضعیت اقلیمی منطقه ساختگاه سد بر اساس طبقه‌بندی آمبرژه به صورت سرد نیمه‌خشک با متوسط دمای هوا حدود ۱۲ درجه سانتی‌گراد و بارش سالیانه تقریباً ۳۵۴ میلی‌متر است. در شکل ۱ محدوده مطالعه‌شده و مخزن سد اکباتان نشان داده شده است.

داده‌های استفاده‌شده

داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک فرودگاه همدان و تبخیرسنجی سد اکباتان شامل دمای هوای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی، سرعت باد، تعداد ساعت‌های آفتابی، دمای آب درون مخزن و نوسانات تراز سطح آب در مخزن سد برای محاسبه میزان تبخیر در گام زمانی روزانه طی سال‌های آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ تا ۱۳۹۹-۱۴۰۰ اخذ شده‌اند.

بوئن نزدیک‌تر هستند. همچنین آنان بیان کردند که روابط مبتنی بر دما و تابش خورشیدی نتایج مناسبی را برای برآورد تبخیر در دریاچه مورد بررسی ارائه نمی‌کنند. شرتز و تیلور [۳۶] تبخیر روزانه از سطح ۶ دریاچه واقع در کشور کانادا را با استفاده از روابط مختلف محاسبه کردند. آنان دریافتند که تبخیر محاسبه‌شده توسط روابط مبتنی بر انتقال جرم نسبت به روابط موجود در سایر گروه‌ها، ارتفاع تبخیر را کمتر از میزان واقعی تخمین می‌زنند. همچنین آنان بیان کردند روابطی که شامل پارامترهای حرارتی هستند (روش بیلان انرژی و روابط ترکیبی) تبخیر در فصل تابستان را به صورت اغراق‌آمیزی بیشتر از مقدار واقعی محاسبه می‌کنند. الصواف و همکاران [۱۹] به منظور محاسبه تبخیر از سطح دریاچه ناصر واقع در کشور مصر از روش بیلان انرژی نسبت بوئن استفاده کردند. آنان با مقایسه نتایج ۶ رابطه برآورد تبخیر با روش بیلان انرژی نسبت بوئن، روش پنمن را برای گام زمانی روزانه و روابط پریستلی-تیلور و دبروین-کیچمن را برای گام زمانی ماهانه به عنوان مناسب‌ترین روش‌ها تشخیص دادند. الشزلی و همکاران [۲۱] تبخیر از سطح مخزن سد آسوان واقع در کشور مصر را با استفاده از روش بیلان آب، بیلان انرژی نسبت بوئن و ۱۵ رابطه دیگر تعیین کردند. در مطالعات آنان روابط مبتنی بر انتقال جرم بیشترین دقت را داشته‌اند. الثوف و همکاران [۳] میزان تبخیر از سطح یک مخزن کوچک واقع در کشور برزیل را با استفاده از ۱۴ روش مختلف برآورد کردند. در مطالعات ایشان رابطه لیناکر مناسب‌ترین روش برای برآورد میزان تبخیر معرفی شده است.

با توجه به بررسی مطالعات انجام‌شده در برآورد تبخیر از سطح مخازن و دریاچه‌ها، می‌توان دریافت که نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعات معمولاً به اطلاعات اولیه موجود و شرایط محیطی و اقلیمی منطقه مورد مطالعه وابسته هستند. به نحوی که نمی‌توان یک رابطه واحد را برای مناطق مختلف با شرایط اقلیمی و آب‌وهوایی متفاوت به عنوان بهترین رابطه برآورد تبخیر معرفی کرد. این موضوع اهمیت شناخت مناسب‌ترین رابطه برای برآورد تبخیر در مخزن مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همچنین تا کنون بیشتر مطالعات انجام‌شده به منظور ارزیابی روابط مختلف برآورد تبخیر از سطح مخازن در گام زمانی ماهانه



شکل ۱. موقعیت و محل مخزن سد کباتان

مقدار تابش خالص (R_n) حاصل جمع جبری تمامی تابش‌های ورودی و خروجی از سطح تبخیر بوده و با استفاده از ضریب آلبیدو مطابق رابطه ۲ قابل محاسبه است:

$$R_n = (1 - \alpha_s)R_s + (1 - \alpha_l)R_l - R_{lw} \quad (2)$$

در این رابطه α_s ضریب آلبیدو سطح آب (بین ۰/۰۴ تا ۰/۱۵) بوده و معمولاً به طور متوسط برابر با ۰/۰۷ در نظر گرفته می‌شود [۱۰، ۱۴، ۲۴، ۳۸-۴۰]. همچنین α_l ضریب آلبیدو یا ضریب بازتاب تابش با طول موج بلند بوده که برابر با ۰/۰۳ در نظر گرفته می‌شود [۳۹]. R_s تابش خورشیدی با طول موج کوتاه ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)، R_l تابش خورشیدی با طول موج بلند ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) و R_{lw} تابش با طول موج بلند ساطع شده از سطح آب ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) به دلیل گرمای آن است.

با استفاده از تعداد ساعت‌های آفتابی واقعی طی روز و به کمک معادله آنگسترم، میزان تابش با طول موج کوتاه قابل محاسبه خواهد بود [۳۹ و ۴۱]:

$$R_s = (a + b \frac{n}{m})R_a \quad (3)$$

در این رابطه a و b ضرایب تجربی وابسته به موقعیت جغرافیایی محل مورد مطالعه بوده که توسط فائو [۴۱] به ترتیب برابر با ۰/۲۵ و ۰/۵ پیشنهاد شده‌اند. همچنین n تعداد ساعت‌های آفتابی واقعی اندازه‌گیری شده طی روز (h)، m حداکثر تعداد ساعت‌های آفتابی ممکن در محل به

روش بیلان انرژی نسبت بوئن (BREB)

در روش بیلان انرژی نسبت بوئن گرمای نهان تبخیر با تعیین اجزای معادله بیلان انرژی شامل تابش خالص، انرژی ذخیره‌شده در آب درون مخزن و انرژی حرارتی محسوس محاسبه می‌شود [۲۰]. در این پژوهش برای محاسبه میزان تبخیر واقعی و مقایسه با سایر روابط از روش بیلان انرژی نسبت بوئن (رابطه ۱) استفاده شده است [۲۰ و ۲۴]:

$$E_{BREB} = \frac{R_n - N + F_p + F_{in} - F_{out} + G}{\rho_w (\lambda_w (1 + \beta) + c_w T_{ws})} \quad (1)$$

در این رابطه E_{BREB} مقدار تبخیر حاصل از روش بیلان انرژی نسبت بوئن (mm day^{-1})، R_n میزان تابش خالص ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)، N میزان انرژی ذخیره‌شده در آب مخزن ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)، F_p انرژی ورودی حاصل از بارش ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)، F_{in} و F_{out} به ترتیب انرژی ناشی از جریان‌های ورودی و خروجی ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)، G انرژی انتقالی بین آب و زمین ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)، ρ_w جرم مخصوص آب (kg m^{-3})، λ_w گرمای نهان تبخیر (MJ kg^{-1})، β ضریب بدون بعد بوئن، c_w گرمای مخصوص آب ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) و T_{ws} دمای سطح آب ($^\circ\text{C}$) است. با توجه به اثرات ناچیز انرژی‌های ناشی از بارش (F_p)، جریان‌های ورودی (F_{in}) و خروجی (F_{out}) و انرژی تبدیلی بین بدنه آبی و زمین (G) در برآورد تبخیر، از مقادیر آن‌ها صرف نظر شده است [۸، ۱۵، ۱۷، ۱۸، ۲۰ و ۲۴].

در این رابطه $\Delta T_w(t, z)$ تغییرات دمای آب در دو عمق متوالی به عنوان تابعی از زمان و عمق $(^{\circ}\text{C})$ ، A_{sm} متوسط مساحت سطح آزاد آب در گام زمانی مورد بررسی (m^2) ، Δt گام زمانی مورد بررسی، $A(t, z)$ سطح آب در عمق‌های مختلف در مخزن به عنوان تابعی از زمان و عمق (m^2) ، Δz اختلاف بین عمق‌های اندازه‌گیری (m) و n معرف تعداد لایه‌های دمایی اندازه‌گیری شده است. همچنین t و z به ترتیب معرف زمان و عمق هستند. مقدار ضریب بوئن نیز (β) با استفاده از رابطه ۹ تعیین می‌شود [۱۶، ۱۷ و ۲۰]:

$$\beta = 0.61 \frac{P}{1000} \left(\frac{T_a - T_{ws}}{e_a - e_{sw}} \right) \quad (۹)$$

در این رابطه P فشار اتمسفر (kPa) و e_{sw} فشار بخار اشباع در دمای سطح آب (kPa) است. با توجه به پیشنهادهای شرتزر و تیلور [۲۶] و جلوگیری از محاسبه مقادیر تبخیر پرت، محدودیت زیر بر ضریب بوئن محاسبه شده اعمال شده است:

$$\text{if } (\beta \leq -1 \& \beta \geq -1.5) \rightarrow \beta = -1.5 \quad (۱۰)$$

$$\text{if } (\beta \leq -0.25 \& \beta \geq -1) \rightarrow \beta = -0.25 \quad (۱۱)$$

پیرو و همکاران [۴۳] شرطی را برای صحیح بودن میزان تبخیر برآورد شده با استفاده از روش بیلان انرژی نسبت بوئن ارائه کردند. این شرط در رابطه ۱۲ آورده شده است. با توجه به این شرط، چنانچه جمله شرطی ارائه شده در گام زمانی مورد بررسی برقرار باشد، میزان تبخیر محاسبه شده صحیح بوده و در غیر این صورت، باید از تبخیر محاسبه شده توسط روش بیلان انرژی نسبت بوئن در آن گام زمانی صرف نظر شود. این شرط در مطالعات پیشین انجام شده به منظور برآورد تبخیر از سطح مخازن و دریاچه‌ها [۱۰ و ۲۲] و همچنین پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفته است.

$$\lambda_w ((e_{sw} - e_a) + \gamma (T_{ws} - T_a)) (R_n - N) > 0 \quad (۱۲)$$

روابط برآورد تبخیر

روابط مختلف برآورد تبخیر با توجه به پارامترهای ورودی مورد نیاز به گروه‌های مختلفی نظیر گروه روابط ترکیبی، تابش-دما، انتقال جرم، دمایی و دما-طول روز تقسیم می‌شوند [۱۳، ۱۸، ۲۰ و ۲۲]. در این پژوهش با استفاده از

صورت تئوری (h) و R_a میزان تابش خورشیدی در قسمت خارج از جو $(\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1})$ است.

برای محاسبه مقدار تابش با طول موج بلند (R_l) نیز از رابطه ۴ استفاده می‌شود.

$$R_l = \varepsilon_a \sigma (T_a + 273.15)^4 \quad (۴)$$

در این رابطه ε_a ضریب انتشار جو، σ ثابت اسفان-بولتزمن $(\sigma = 4.901 \times 10^{-9} \text{ MJ m}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ day}^{-1})$ و T_a متوسط دمای هوای روزانه $(^{\circ}\text{C})$ است. برای محاسبه مقدار ε_a از روابط ۵ و ۶ ارائه شده توسط هندرسون-سلرز [۴۲] استفاده شده است. در این روابط اثر فشار بخار و تعداد ساعت‌های آفتابی در نظر گرفته شده و نتایج مطلوبی برای هر دو شرایط آب‌وهوایی ابری و غیر ابری ارائه می‌کند [۱۰ و ۴۲].

$$\varepsilon_a = 0.87 - \frac{n}{m} (0.175 - 29.92 \times 10^{-4} e_a) + \quad (۵)$$

$$2.693 \times 10^{-3} e_a, \text{ for } \frac{n}{m} \leq 0.4$$

$$\varepsilon_a = 0.84 - \frac{n}{m} (0.1 - 9.973 \times 10^{-4} e_a) + \quad (۶)$$

$$3.491 \times 10^{-3} e_a, \text{ for } \frac{n}{m} \geq 0.4$$

در روابط یاد شده e_a میزان فشار بخار واقعی موجود در هوا (kPa) است.

برای محاسبه میزان تابش با طول موج بلند خروجی از سطح آب مخزن (R_{lw}) نیز از رابطه‌ای مشابه با رابطه ۴ استفاده می‌شود با این تفاوت که دمای هوا و ضریب انتشار جو به ترتیب با دمای سطح آب و ضریب انتشار آب جایگزین می‌شوند.

$$R_{lw} = \varepsilon_w \sigma (T_{ws} + 273.15)^4 \quad (۷)$$

در رابطه ۷ ε_w ضریب انتشار آب بوده که مقدار آن برابر با ۰/۹۷ در نظر گرفته می‌شود [۱۰، ۱۴، ۱۸ و ۳۹].

مقدار انرژی ذخیره شده در بدنه آبی مخزن یا دریاچه (N) نیز یکی از پارامترهای مهم و اثرگذار بر میزان تبخیر به‌ویژه در مخازن و دریاچه‌های عمیق است [۲۴]. برای محاسبه این کمیت به تغییرات دمای آب مخزن در عمق یا به بیانی پروفیل دمایی آب مخزن نیاز است و مقدار آن به کمک رابطه ۸ قابل محاسبه است [۱۰ و ۲۲]:

$$N = \frac{\rho_w c_w}{A_{sm}} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta T_w(t, z)}{\Delta t} A(t, z) \Delta z \quad (۸)$$

اشباع در دمای هوا (kPa)، RH درصد رطوبت هوا (%)، z ارتفاع محل مورد بررسی از سطح آب‌های آزاد T_d (m)، دمای آب در نقطه شبنم U_9 ($^{\circ}C$)، سرعت باد در ارتفاع ۹ متری از سطح تبخیر A_s ($m\ s^{-1}$)، مساحت سطح تبخیر یا سطح آب $U_{0.15}$ (m^2)، سرعت باد در ارتفاع ۰/۱۵ متری از سطح تبخیر $T_{a,max}$ ($m\ s^{-1}$)، حداکثر دمای هوا ($^{\circ}C$) $T_{a,min}$ ، حداقل دمای هوا ($^{\circ}C$) m_{total} مجموع سالانه حداکثر تعداد ساعت‌های آفتابی تئوری (h) و SVD چگالی بخار اشباع در دمای هوا ($g\ m^{-3}$) است.

۲۰ رابطه موجود در گروه‌های مختلف میزان تبخیر از سطح مخزن سد اکباتان محاسبه و با نتایج حاصل از روش بیلان انرژی نسبت بوئن مقایسه شده است. روابط مختلف استفاده‌شده در جدول ۱ ارائه شده‌اند. در این جدول منظور از E میزان تبخیر محاسبه‌شده به کمک هر رابطه (mm day^{-1})، Δ شیب منحنی فشار بخار ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$)، ضریب رطوبتی یا ثابت سایکرومتری ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$) U_2 ، سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح تبخیر ($m\ s^{-1}$) α ، ضریب اصلاحی رابطه پریستلی-تیلور که برابر با ۱/۲۶ است، e_{sa} فشار بخار

جدول ۱. روابط استفاده‌شده به منظور برآورد تبخیر از سطح مخزن سد اکباتان

رابطه	روش و مرجع	گروه
$E = \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \left(\frac{R_n - N}{\lambda_w \rho_w} \right) + \left(\frac{6.43 \gamma}{\Delta + \gamma} \right) \frac{(1 + 0.537 U_2)(e_{sw} - e_a)}{\lambda_w \rho_w} \right] \times 10^3$	پنمن [۳۹، ۲۳] (Penman)	تبخیر
$E = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \left(\frac{R_n - N}{\lambda_w} \right)$	پریستلی-تیلور [۳۹، ۲۵] (Priestly-Taylor)	
$E = \frac{\alpha}{\alpha - 1} \left(\frac{\gamma}{\gamma + \Delta} \right) (2.9 + 2.1 U_2) \left(\frac{e_{sa} - e_a}{\lambda_w} \right)$	دبروین [۲۶] (deBruin)	
$E = \frac{\Delta}{0.85 \Delta + 0.63 \gamma} \left(\frac{R_n - N}{\lambda_w} \right)$	دبروین-کیجمن [۲۷] (deBruin-Keijman)	
$E = (2\alpha - 1) \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \left(\frac{R_n - N}{\lambda_w} \right) - \frac{\gamma}{\gamma + \Delta} 0.26(0.5 + 0.54 U_2)(e_{sa} - e_a)$	برتسارت-استریکر [۲۸] (Brutsaert-Stricker)	
$E = \frac{\Delta}{\Delta + 0.24 \gamma} \left(\frac{R_n - N}{\lambda_w} \right)$	یانگ-رودریک [۲۹] (Yang-Roderick)	
$E = \left(0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda_w} \right) - 0.12$	مکینک [۳۹، ۳۰] (Makkink)	تبخیر
$E = 0.013 \left(\frac{T_a}{T_a + 15} \right) \left(\frac{R_s}{0.041868} + 50 \right)$, for $RH > 50\%$	تارک [۳۶، ۳۱] (Turk)	
$E = 0.013 \left(\frac{T_a}{T_a + 15} \right) \left(\frac{R_s}{0.041868} + 50 \right) \left[1 + \frac{(50 - RH)}{70} \right]$, for $RH < 50\%$		
$E = 0.03523 \frac{R_s}{0.0864} \left[0.014 \left(\frac{9}{5} T_a + 32 \right) - 0.37 \right]$	جنسن-هایز [۳۹، ۳۶] (Jensen-Haise)	
$E = 0.03495 \frac{R_s}{0.0864} \left[0.0082 \left(\frac{9}{5} T_a + 32 \right) - 0.19 \right]$	استفنز-استوارت [۳۶] (Stephens-Stewart)	
$E = (0.015 + 0.00042 T_a + 10^{-6} z) \left[0.8 \left(\frac{R_s}{0.0864} \right) - 40 + 2.5 U_2 (1 - 8.7 \times 10^{-5} z) (T_a - T_d) \right]$	لیناکر [۳۳] (Linacre)	
$E = 0.36 [7.5006(e_{sw} - e_a)] \left[1 + 3.6 \left(\frac{U_9}{16} \right) \right]$	میر [۲۲] (Meyer)	تبخیر
$E = 0.771(1.465 - 0.00549P)(0.44 + 0.26388 U_{0.15}) [10(e_{sw} - e_a)]$	روهور [۴۴، ۳۴] (Rohwer)	
$E = 2.909 A_s^{-0.05} U_2 (e_{sw} - e_a)$	هاربک [۴۵، ۲۴] (Harbeck)	
$E = \frac{[2.7(T_{ws} - T_a)^{1/3} + 3.1 U_2](e_{sw} - e_a)}{\lambda_w}$	ریان-هارلمن [۴۶، ۱۸] (Ryan-Harleman)	
$E = 0.7 [-3.5 - 0.14 T_{ws} + 0.25 T_a + 0.972 U_2 + 6.75(e_{sa} - e_a) + 0.15 n]$	پاتل-ماجماندر [۳۴] (Patel-Majumdar)	
$E = 0.0023 (T_{a,max} - T_{a,min})^{1/2} (T_a + 17.8) \frac{R_a}{2.43}$	هارگریوز-سامانی [۴۷] (Hargreaves-Samani)	تبخیر
$E = 0.006 (T_a + 25)^2 \left(\frac{100 - RH}{100} \right)$	ایوانف [۲۲] (Ivanov)	
$E = 25.4 \left[0.0173 \left(\frac{9}{5} T_a + 32 \right) - 0.314 \right] \left(\frac{9}{5} T_a + 32 \right) \frac{m}{m_{total}}$	بلانی-کریدل [۱۸] (Blaney-Cridle)	تبخیر طول روز
$E = 13.97 \left(\frac{m}{12} \right)^2 \frac{SVD}{100}$	هامون [۳۶، ۳۲] (Hamon)	

محل مورد بررسی خود تعیین شده‌اند.

معیارهای ارزیابی روابط

برای محاسبه میزان خطا و بررسی دقت و رتبه‌بندی روش‌های مورد استفاده در این پژوهش برای برآورد تبخیر از مخزن سد اکباتان، از پارامترهای آماری میانگین مربع خطا (MSE)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE)، جذر میانگین مربع خطا (RMSE)، ضریب کارایی مدل نش-ساتکلیف (NSE) و ضریب تشخیص (R^2) استفاده شده است. این پارامترها به ترتیب با استفاده از روابط (۱۳) تا (۱۶) محاسبه شده‌اند [۴۸].

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - E_{BREB,i})^2 \quad (13)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_i - E_{BREB,i}| \quad (14)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - E_{BREB,i})^2} \quad (15)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - E_{BREB,i})^2}{\sum_{i=1}^n (\overline{E_{BREB}} - E_{BREB,i})^2} \quad (16)$$

$$R^2 = \left(\frac{n \sum_{i=1}^n E_i E_{BREB,i} - \sum_{i=1}^n E_i \sum_{i=1}^n E_{BREB,i}}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n E_i^2 - (\sum_{i=1}^n E_i)^2][n \sum_{i=1}^n E_{BREB,i}^2 - (\sum_{i=1}^n E_{BREB,i})^2]}} \right)^2 \quad (17)$$

است. با توجه به این شکل با شروع فصل پاییز میزان تبخیر روندی کاهشی به خود می‌گیرد و به حداقل مقدار خود در اسفند یا فروردین ماه می‌رسد. سپس در فصل بهار دوباره روند افزایشی میزان تبخیر شروع شده و در انتهای مرداد و یا شهریور ماه به حداکثر مقدار خود رسیده است. به نحوی که حداکثر مقدار تبخیر روزانه برای هر سه سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ تا ۱۳۹۹-۱۴۰۰ به ترتیب برابر با ۱۳/۶۸، ۱۱/۸۷ و ۱۵/۰۹ میلی‌متر بر روز بوده که به ترتیب در شهریور، اواخر مرداد و شهریور مشاهده شده‌اند. همان طور که قابل انتظار است، تغییرات فصلی مقدار تبخیر از سطح مخزن سد اکباتان نشان می‌دهد میزان تبخیر در فصل تابستان بیشترین و در فصل زمستان کمترین مقدار را داشته، ولی مقدار تبخیر در فصل بهار اندکی کمتر از مقدار آن در فصل پاییز بوده است. با توجه به ذخیره حرارتی آب درون مخزن سد، بیشینه میزان

روابط ترکیبی شامل دو بخش انرژی و انتقال جرم هستند، به همین دلیل روابط موجود در این گروه برای محاسبه میزان تبخیر به داده‌های ورودی متعددی نظیر دمای هوا و سطح آب، فشار بخار اشباع و واقعی، شیب منحنی فشار بخار، سرعت باد، تابش خالص و انرژی ذخیره‌شده درون مخزن سد نیازمندند [۱۸ و ۱۹]. این در حالی است که روابط موجود در گروه روابط دمایی کمترین داده ورودی را نیاز دارد و فقط بر اساس دما و درصد رطوبت هوا میزان تبخیر را محاسبه می‌کنند. روابط موجود در گروه روابط انتقال جرم نیز معمولاً دارای ضرایبی تجربی هستند که این ضرایب بسته به

در این روابط n تعداد داده‌ها، i اندیس داده، E_i میزان تبخیر محاسبه شده توسط روابط مختلف (mm day^{-1}) و $E_{BREB,i}$ مقدار تبخیر محاسبه شده توسط روش بیلان انرژی نسبت بوئن (mm day^{-1}) است. همچنین ($\overline{E_{BREB}}$) میانگین تبخیر محاسبه شده توسط روش بیلان انرژی نسبت بوئن (mm day^{-1}) بوده که طبق رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود.

$$\overline{E_{BREB}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{BREB,i} \quad (18)$$

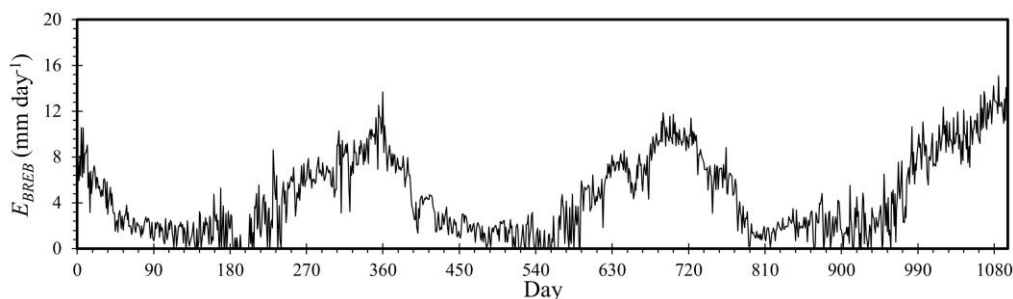
یافته‌ها

برآورد تبخیر با استفاده از روش بیلان انرژی نسبت بوئن مقدار تبخیر از سطح مخزن سد اکباتان با استفاده از روش بیلان انرژی نسبت بوئن محاسبه و تغییرات روزانه آن برای بازه زمانی مورد بررسی در این پژوهش در شکل ۲ آورده شده

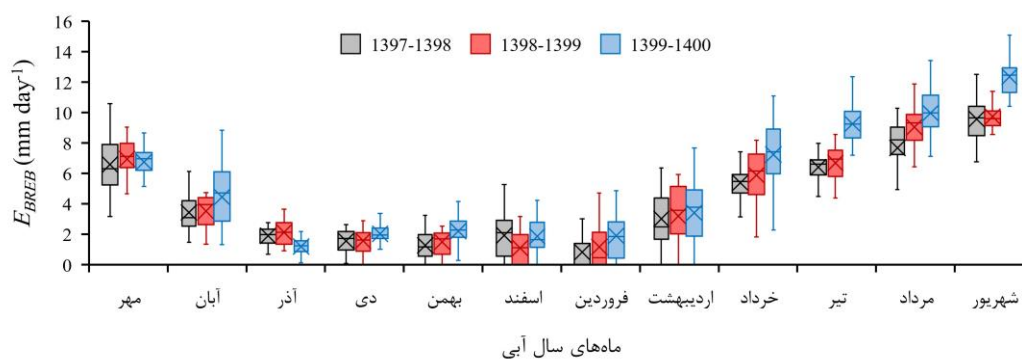
تقریباً مشابه با سال‌های آبی پیشین بوده و اختلاف میان آن‌ها اندک است. به صورت متوسط طی دوره زمانی مورد بررسی در این پژوهش، اختلاف میان بیشینه و کمینه تبخیر روزانه به‌دست‌آمده از روش بیلان انرژی نسبت بوئن ($E_{BREB,max} - E_{BREB,min}$) در اردیبهشت‌ماه با متوسط $7/42$ میلی‌متر بر روز بیشترین مقدار و در آذرماه با متوسط $2/29$ میلی‌متر بر روز کمترین مقدار را داشته است، ولی چنانچه میزان اختلاف را نسبت به متوسط تبخیر در آن ماه بسنجیم ($(E_{BREB,max} - E_{BREB,min}) / E_{BREB,mean}$)، بیشترین اختلاف در فروردین‌ماه و کمترین اختلاف در شهریورماه مشاهده شده است. این موضوع بیانگر آن است که نوسان‌های تبخیر روزانه به‌دست‌آمده از روش بیلان انرژی نسبت بوئن در فروردین‌ماه بیشترین شدت و طی فصل تابستان به‌ویژه در شهریورماه کمترین مقدار را داشته است. در مطالعات جیانیو و آنتونوپولوس [۱۰] نیز بیشترین میزان نوسان‌های تبخیر روزانه برآوردشده توسط روش بیلان انرژی در آغاز فصل بهار مشاهده شده است. این پدیده می‌تواند به دلیل تغییرات روزانه شدید پارامترهای هواشناسی نظیر درصد رطوبت، دما و ساعت‌های آفتابی در این محدوده زمانی باشد.

تبخیر با تأخیر تقریباً یک‌ماهه نسبت به بیشترین دمای هوا و تقریباً دو‌ماهه نسبت به بیشینه مقدار تابش خالص اتفاق افتاده است، چرا که بیشترین میزان تبخیر در شهریور ماه روی داده، ولی بیشینه دمای هوا و میزان تابش خالص معمولاً به‌ترتیب در ماه‌های مرداد و تیر مشاهده شده‌اند. همچنین حداقل مقدار تبخیر نیز دارای تأخیری تقریباً دو‌ماهه نسبت به کمینه دمای هوا بوده به نحوی که حداقل دمای هوا معمولاً در ماه‌های دی و بهمن مشاهده شده، ولی حداقل میزان تبخیر در اسفند یا فروردین روی داده است. این تأخیر زمانی یک تا دو ماهه در مطالعات جیانیو و آنتونوپولوس [۱۰] و حتی و همکاران [۲۲] نیز مشاهده شده است.

در شکل ۳ مقدار متوسط تبخیر ماهانه و اختلاف میان حداقل و حداکثر تبخیر روزانه طی آن ماه، برآوردشده توسط روش بیلان انرژی نسبت بوئن برای سه سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ تا ۱۳۹۸-۱۴۰۰ آورده شده است. با توجه به شکل ۳ در شش‌ماهه دوم سال آبی (از فروردین تا شهریور) متوسط تبخیر ماهانه در سال آبی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ نسبت به سال‌های آبی پیشین افزایش یافته است ولی در شش‌ماهه اول سال آبی (از مهر تا اسفند) مقدار متوسط تبخیر ماهانه

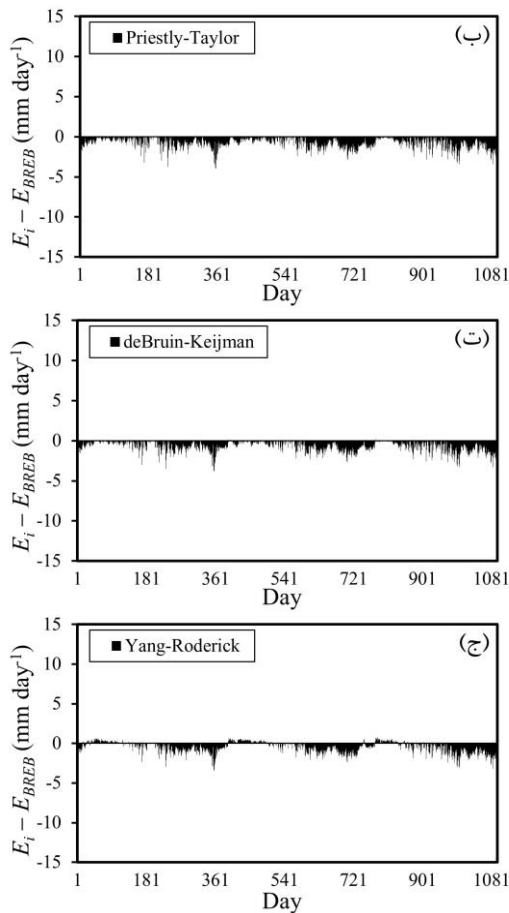


شکل ۲. میزان تبخیر روزانه از سطح مخزن سد اکباتان به‌دست‌آمده از روش بیلان انرژی نسبت بوئن



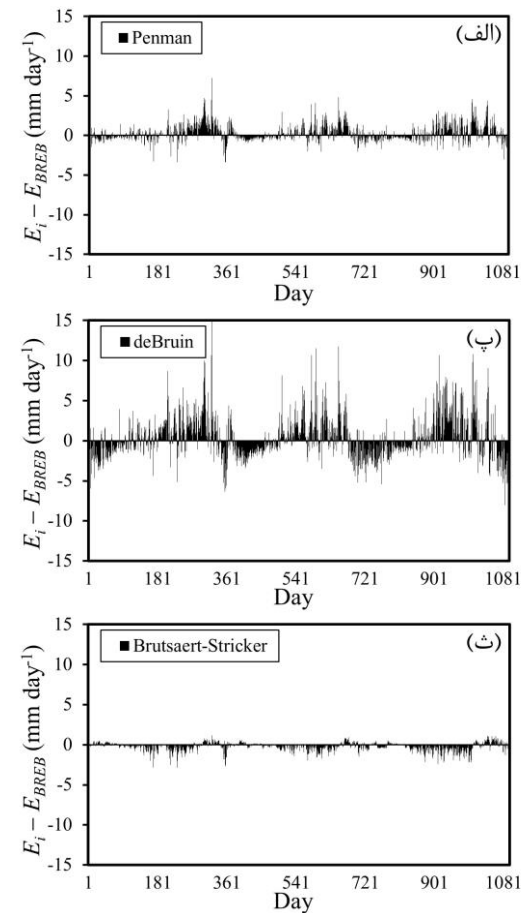
شکل ۳. اختلاف میان بیشینه و کمینه تبخیر روزانه در هر ماه و میزان متوسط تبخیر ماهانه از سطح مخزن سد اکباتان به‌دست‌آمده از روش بیلان انرژی نسبت بوئن

نسبت بوئن تخمین می‌زنند. این موضوع در مطالعات بزرگی و همکاران [۱۳] نیز گزارش شده است. همچنین روش‌های پنمن و دبروین در فصل‌های بهار و تابستان مقدار تبخیر را بیشتر و در فصل‌های پاییز و زمستان مقدار تبخیر را کمتر از روش بیلان انرژی نسبت بوئن برآورد می‌کنند. به صورت کلی روابط قرارگرفته در گروه روابط ترکیبی به غیر از روابط دبروین و پنمن عملکرد مناسب و قابل قبولی در برآورد تبخیر روزانه از سطح مخزن سد اکباتان دارند به گونه‌ای که بازه اختلاف میان مقادیر تبخیر محاسبه‌شده توسط این روابط و روش بیلان انرژی نسبت بوئن در محدوده ۴/۱- تا ۱/۲ میلی‌متر بر روز قرار دارد.



برآورد تبخیر با استفاده از روابط مختلف مقدار تبخیر روزانه از سطح مخزن سد اکباتان با استفاده از روش مختلف برآورد تبخیر (جدول ۱) محاسبه و با نتایج حاصل از روش بیلان انرژی نسبت بوئن مقایسه شده است. در شکل‌های ۴ تا ۸ اختلاف میان میزان تبخیر محاسبه‌شده توسط هر یک از این روش‌ها با مقدار تبخیر به‌دست‌آمده از روش بیلان انرژی نسبت بوئن در گام زمانی روزانه نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۴ که مربوط به گروه روابط ترکیبی برآورد تبخیر است، روابط پریستلی-تیلور و دبروین-کیچمن همواره طی سال مقدار تبخیر را کمتر از روش بیلان انرژی



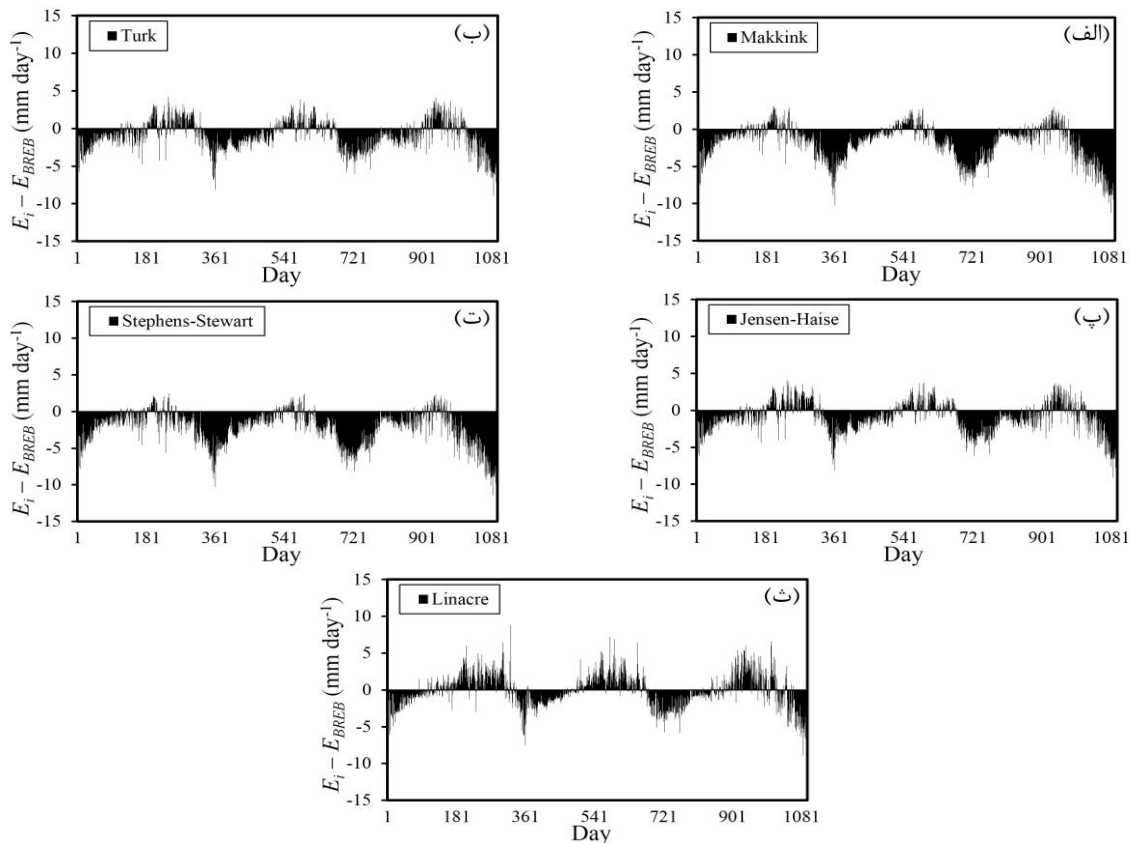
شکل ۴. اختلاف میان مقادیر تبخیر روزانه محاسبه‌شده توسط روابط موجود در گروه روابط ترکیبی با نتایج تبخیر حاصل از روش بیلان انرژی نسبت بوئن از سطح مخزن سد اکباتان برای سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۹۸ تا ۱۳۹۹-۱۴۰۰

روابط موجود در گروه روابط تابش-دما معمولاً تابعی از میزان تابش خورشیدی با طول موج کوتاه و دمای هوا بوده و میزان ذخیره حرارتی آب درون مخزن را در نظر نمی‌گیرند، مقدار تبخیر را در عموماً در فصل‌های بهار و تابستان که شدت

اختلاف میان مقادیر تبخیر روزانه محاسبه‌شده توسط روابط موجود در گروه روابط تابش-دما و میزان تبخیر حاصل از روش بیلان انرژی نسبت بوئن برای دوره زمانی مورد بررسی در این تحقیق در شکل ۵ آورده شده است. از آنجا که

اختلاف در بازه ۸/۹۴- تا ۴/۲۲ میلی متر بر روز قرار گرفته است. همچنین با توجه به شکل ۵ روابط مکینک، تارک و بهویژه رابطه استفنز- استوارت مقدار تبخیر را در بیشتر روزها و ماه های سال کمتر از مقدار حاصل از روش بیلان انرژی نسبت بوئن تخمین می زنند. نتایجی مشابه در مطالعات انجام شده توسط مجیدی و همکاران [۲۰] و بزرگی و همکاران [۱۳] گزارش شده است.

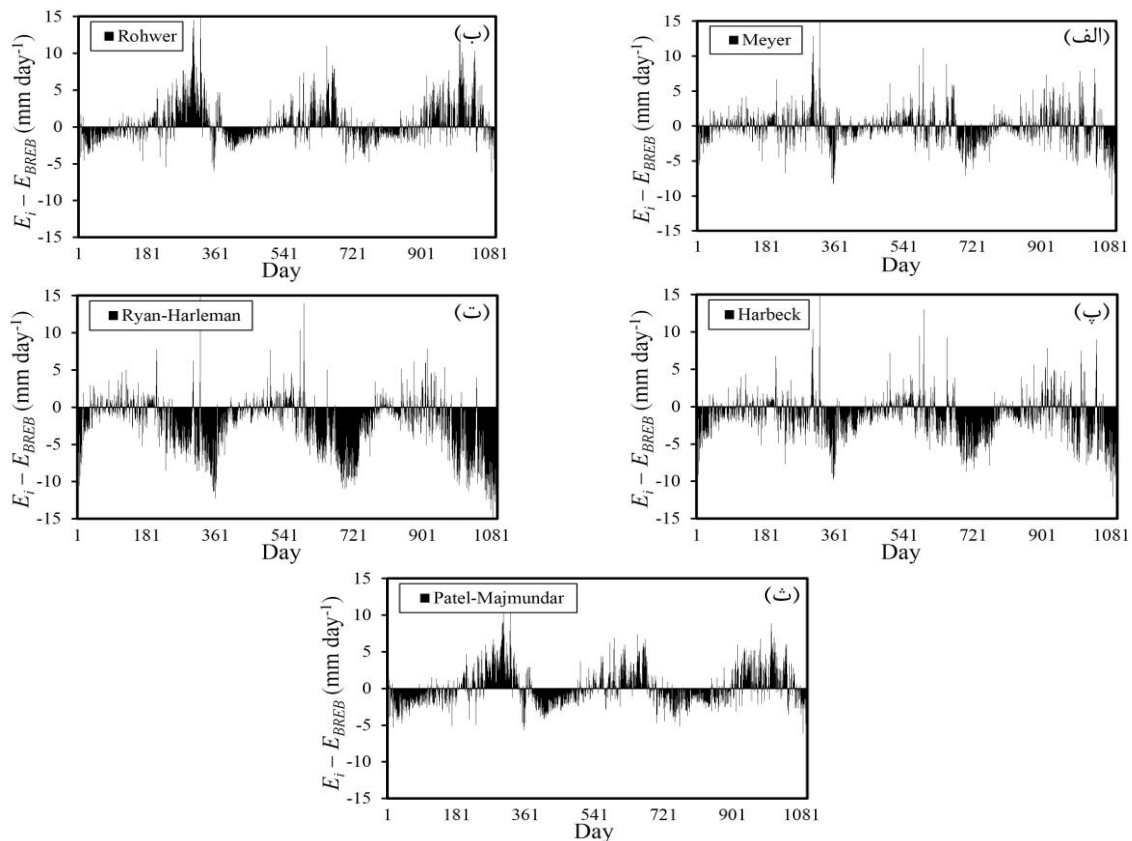
تابش و دمای هوا در آن مواقع زیاد است بیشتر از مقدار به دست آمده از روش بیلان انرژی نسبت بوئن محاسبه می کنند. این موضوع در شکل های ۵-پ و ۵-ث که مربوط به روابط جنسن- هایز و لیناگر هستند به خوبی مشخص است. در گروه روابط تابش- دما، رابطه تارک کمترین بازه اختلاف میان داده های تبخیر روزانه محاسبه شده به کمک این رابطه و روش بیلان انرژی نسبت بوئن را دارد، به نحوی که این میزان



شکل ۵. اختلاف میان مقادیر تبخیر روزانه محاسبه شده توسط روابط موجود در گروه روابط تابش- دما با نتایج تبخیر حاصل از روش بیلان انرژی نسبت بوئن از سطح مخزن سد اکباتان برای سال های آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ تا ۱۳۹۹-۱۴۰۰

هارلمن (شکل ۶-ت) نسبت به مقدار تبخیر به دست آمده از روش بیلان انرژی نسبت بوئن در بازه میان ۱۴/۹۸- تا ۲۲/۰۱ میلی متر بر روز قرار گرفته است. به این موضوع در مطالعات انجام شده توسط حجتی و همکاران [۲۲] نیز اشاره شده است. دلیل این موضوع می تواند ضرایب تجربی موجود در این گروه از روابط برآورد تبخیر باشد که برای موقعیت محلی و اقلیمی سد اکباتان هم رسایی مناسبی ندارد و سبب بروز خطاهای قابل توجهی در برآورد تبخیر روزانه می شود.

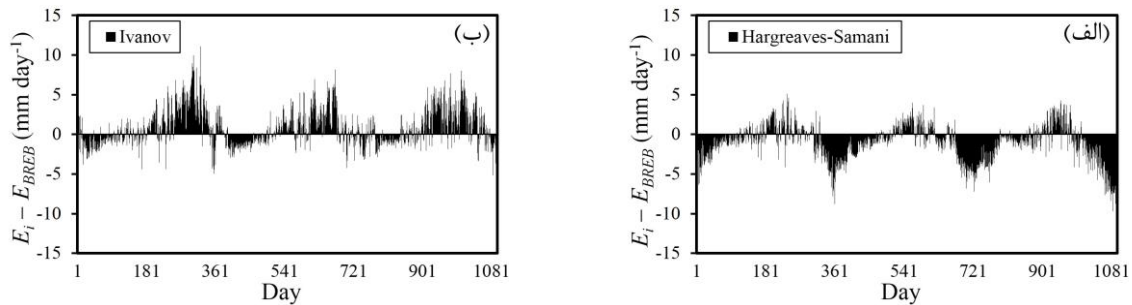
در شکل ۶ اختلاف میان تبخیر روزانه محاسبه شده توسط روابط موجود در گروه روابط انتقال جرم با مقدار تبخیر حاصل از روش بیلان انرژی نسبت بوئن نشان داده شده است. با توجه به این شکل روابط قرار گرفته در گروه روابط انتقال جرم در برآورد میزان تبخیر روزانه عملکرد مناسبی نداشته و نوسان های زیادی در نمودار اختلاف میان مقادیر محاسبه شده به کمک این روابط و روش بیلان انرژی نسبت بوئن مشاهده می شود. برای نمونه اختلاف میان تبخیر روزانه محاسبه شده به کمک رابطه ریان-



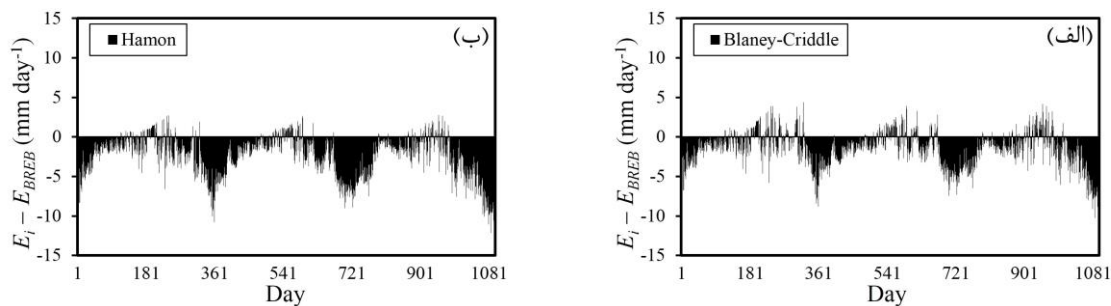
شکل ۶. اختلاف میان مقادیر تبخیر روزانه محاسبه شده توسط روابط موجود در گروه روابط انتقال جرم با نتایج تبخیر حاصل از روش بیلان انرژی نسبت بوئن از سطح مخزن سد اکباتان برای سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۹۸ تا ۱۳۹۹-۱۴۰۰

است. در شکل ۸ اختلاف میان مقادیر تبخیر روزانه محاسبه شده توسط این روابط و مقادیر تبخیر حاصل از روش بیلان انرژی نسبت بوئن برای بازه زمانی مورد بررسی در این تحقیق آورده شده است. با توجه به شکل ۸ هر دو روش بلانی- کریدل و هامون میزان تبخیر را در بیشتر روزهای سال کمتر از روش بیلان انرژی نسبت بوئن تخمین می‌زنند و تنها در روزهای اندکی در فصل بهار مقدار تبخیر را بیشتر برآورد کرده‌اند. بیشترین میزان کم تخمینی این روابط در نیمه دوم فصل تابستان مشاهده شده است، به نحوی که مقدار تبخیر محاسبه شده با استفاده از رابطه بلانی- کریدل تا ۱۰/۲۲ میلی‌متر بر روز و رابطه هامون تا ۱۲/۱۵ میلی‌متر بر روز کمتر از مقدار تبخیر حاصل از روش بیلان انرژی نسبت بوئن در همان روزها بوده است. به این موضوع در مطالعات پیشین نیز اشاره شده است [۱، ۲۰ و ۲۲]. به طور کلی روابط موجود در این گروه همانند روابط موجود در گروه‌های روابط انتقال جرم و دمایی در پیش بینی میزان تبخیر در گام زمانی روزانه ضعف‌هایی داشته و دقت مطلوبی ندارند.

گروه روابط دمایی استفاده شده در این پژوهش شامل دو رابطه هارگیوز- سامانی و ایوانف است. اختلاف میان مقادیر تبخیر روزانه محاسبه شده به کمک این دو رابطه و تبخیر حاصل از روش بیلان انرژی نسبت بوئن در شکل ۷ آورده شده است. با توجه به این شکل می‌توان مشاهده کرد که روابط موجود در گروه روابط دمایی دقت مناسبی در تخمین میزان تبخیر روزانه ندارند، ولی عملکرد آن‌ها از روابط موجود در گروه روابط انتقال جرم اندکی مناسب‌تر است. همچنین روابط موجود در این گروه معمولاً مقدار تبخیر روزانه را در فصل‌های بهار و تابستان بیشتر و در دیگر زمان‌ها کمتر از مقدار تبخیر حاصل از روش بیلان انرژی نسبت بوئن برآورد می‌کنند. از آنجا که دمای هوا پارامتر ورودی اصلی در این گروه از روابط برای محاسبه تبخیر است، به نظر می‌رسد دلیل این موضوع بیشتر بودن دمای هوا در این فصل‌ها نسبت به دیگر فصل‌ها باشد. در این پژوهش از دو رابطه بلانی- کریدل و هامون موجود در گروه روابط دما- طول روز به منظور برآورد میزان تبخیر از سطح مخزن سد اکباتان استفاده شده



شکل ۷. اختلاف میان مقادیر تبخیر روزانه محاسبه شده توسط روابط موجود در گروه روابط دمایی با نتایج تبخیر حاصل از روش بیلان انرژی نسبت بوئن از سطح مخزن سد اکباتان برای سال‌های آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ تا ۱۳۹۹-۱۴۰۰



شکل ۸. اختلاف میان مقادیر تبخیر روزانه محاسبه شده توسط روابط موجود در گروه روابط دما-طول روز با نتایج تبخیر حاصل از روش بیلان انرژی نسبت بوئن از سطح مخزن سد اکباتان برای سال‌های آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ تا ۱۳۹۹-۱۴۰۰

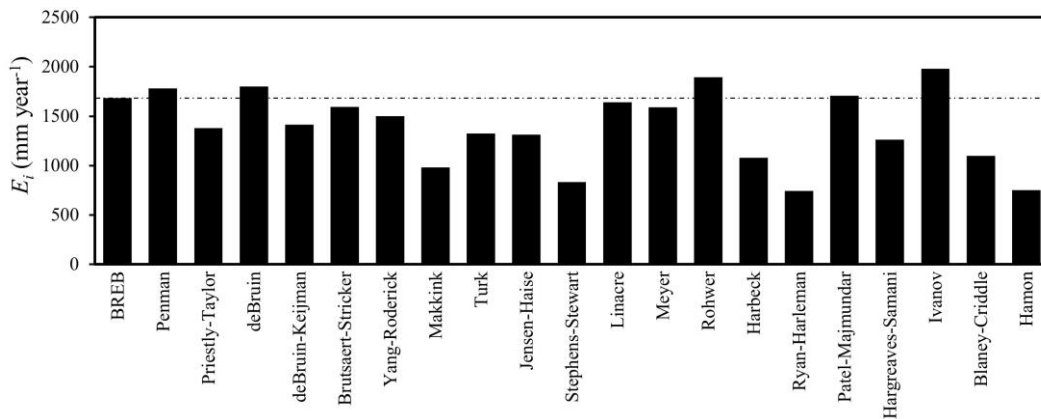
دمایی ارتفاع تبخیر سالانه را بیشتر از روش بیلان انرژی نسبت بوئن تخمین زده‌اند.

به منظور ارزیابی بهتر روابط برآورد تبخیر، شاخص درصد تغییرات نسبی بین ارتفاع تبخیر سالانه به دست آمده از روابط مختلف برآورد تبخیر و ارتفاع تبخیر حاصل از روش بیلان انرژی نسبت بوئن محاسبه شده و به صورت متوسط برای بازه زمانی مورد بررسی در این تحقیق (سال‌های آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ تا ۱۳۹۹-۱۴۰۰) در شکل ۱۰ آورده شده است.

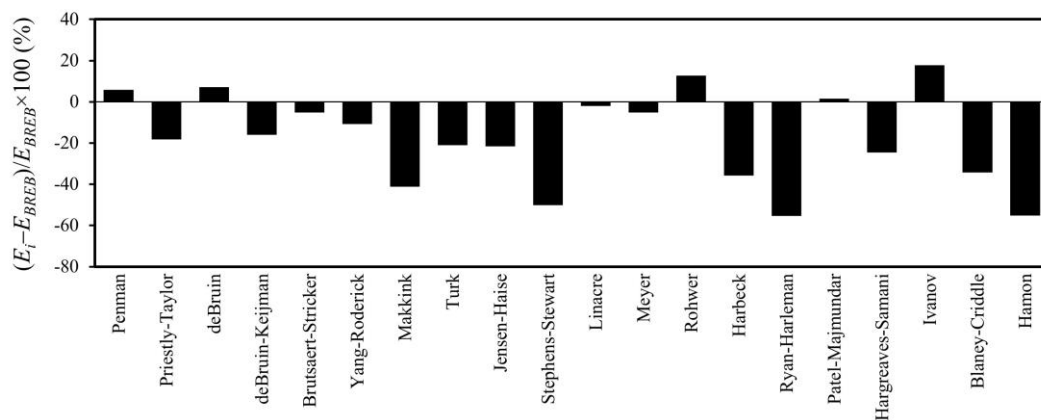
با توجه به شکل ۱۰ روابط لیناکر و پاتل-ماجماندر با درصد تغییرات کمتر از ± 5 درصد نسبت به روش بیلان انرژی نسبت بوئن روابط مناسبی برای برآورد میزان تبخیر سالانه از سطح مخزن سد اکباتان هستند. روابط پنمن، دبروین، براتسارت-استریکر و میر با داشتن درصد تغییرات نسبی در بازه ± 5 تا ± 10 درصد، نتایج نسبتاً مناسبی در تخمین میزان تبخیر سالانه ارائه می‌کنند. همچنین استفاده از روابط مکینک، استفنز-استوارت، ریان-هارلمن، بلانی-کریدل و هامون برای برآورد تبخیر سالانه از سطح مخزن سد اکباتان توصیه نمی‌شود، چرا که درصد تغییرات نسبی نتایج این روابط بیش از ± 30 درصد است.

ارزیابی روابط مختلف برآورد تبخیر

به منظور ارزیابی دقت هر یک از روابط برآورد تبخیر استفاده شده در این پژوهش برای محاسبه میزان تبخیر از سطح مخزن سد اکباتان در گام زمانی سالانه، مجموع ارتفاع سالانه تبخیر محاسبه شده توسط هر یک از این روش‌ها تعیین شده و به عنوان نمونه برای سال آبی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، رابطه هامون از گروه روابط دما-طول روز، ریان-هارلمن از گروه روابط انتقال جرم و روابط استفنز-استوارت و مکینک از گروه روابط تابش-دما مقدار تبخیر را نسبت به روش بیلان انرژی نسبت بوئن به میزان قابل ملاحظه‌ای کمتر پیش‌بینی کرده‌اند. به نحوی که ارتفاع تبخیر سالانه حاصل از روش بیلان انرژی نسبت بوئن برای سال آبی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ برابر با $1608/98$ میلی‌متر بوده است. این در حالی است که مقدار تبخیر سالانه محاسبه شده توسط روابط هامون، ریان-هارلمن، استفنز-استوارت و مکینک در این سال آبی به ترتیب برابر با $721/19$ ، $738/75$ ، $815/62$ و $971/53$ میلی‌متر است. همچنین روابط پنمن و دبروین از گروه روابط ترکیبی، روهور از گروه روابط انتقال جرم و ایوانف از گروه روابط



شکل ۹. مجموع ارتفاع تبخیر سالانه محاسبه شده توسط روش‌های مختلف از سطح مخزن سد اکباتان برای سال آبی ۱۳۹۸-۱۳۹۹



شکل ۱۰. درصد تغییرات نسبی میان ارتفاع تبخیر سالانه محاسبه شده از سطح مخزن سد اکباتان توسط روابط مختلف و نتایج تبخیر حاصل از روش بیلان انرژی نسبت به طور متوسط برای سال‌های آبی ۱۳۹۸-۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹-۱۴۰۰

داشته است. به صورت کلی در گام زمانی روزانه روابط قرار گرفته در گروه روابط ترکیبی برآورد تبخیر نسبت به سایر گروه‌ها مقدار تبخیر را با دقت بیشتری برآورد می‌کنند. به نحوی که پنج رابطه اول در برآورد تبخیر روزانه از سطح مخزن سد اکباتان (روابط براتسارت-استریکر، یانگ-رودریک، دبروین-کیچمن، پریستلی-تیلور و پنمن) در این گروه قرار دارند. به این موضوع در مطالعات روزنبری و همکاران [۱۸] و حتی و همکاران [۲۲] نیز اشاره شده است. دلیل این موضوع می‌تواند در نظر گرفتن بیشتر عوامل مؤثر بر تبخیر در برآورد میزان آن در روش‌های ترکیبی باشد. همچنین روابط قرار گرفته در گروه روابط انتقال جرم نیز کمترین توانایی را در برآورد میزان تبخیر روزانه از سطح مخزن سد اکباتان داشته‌اند.

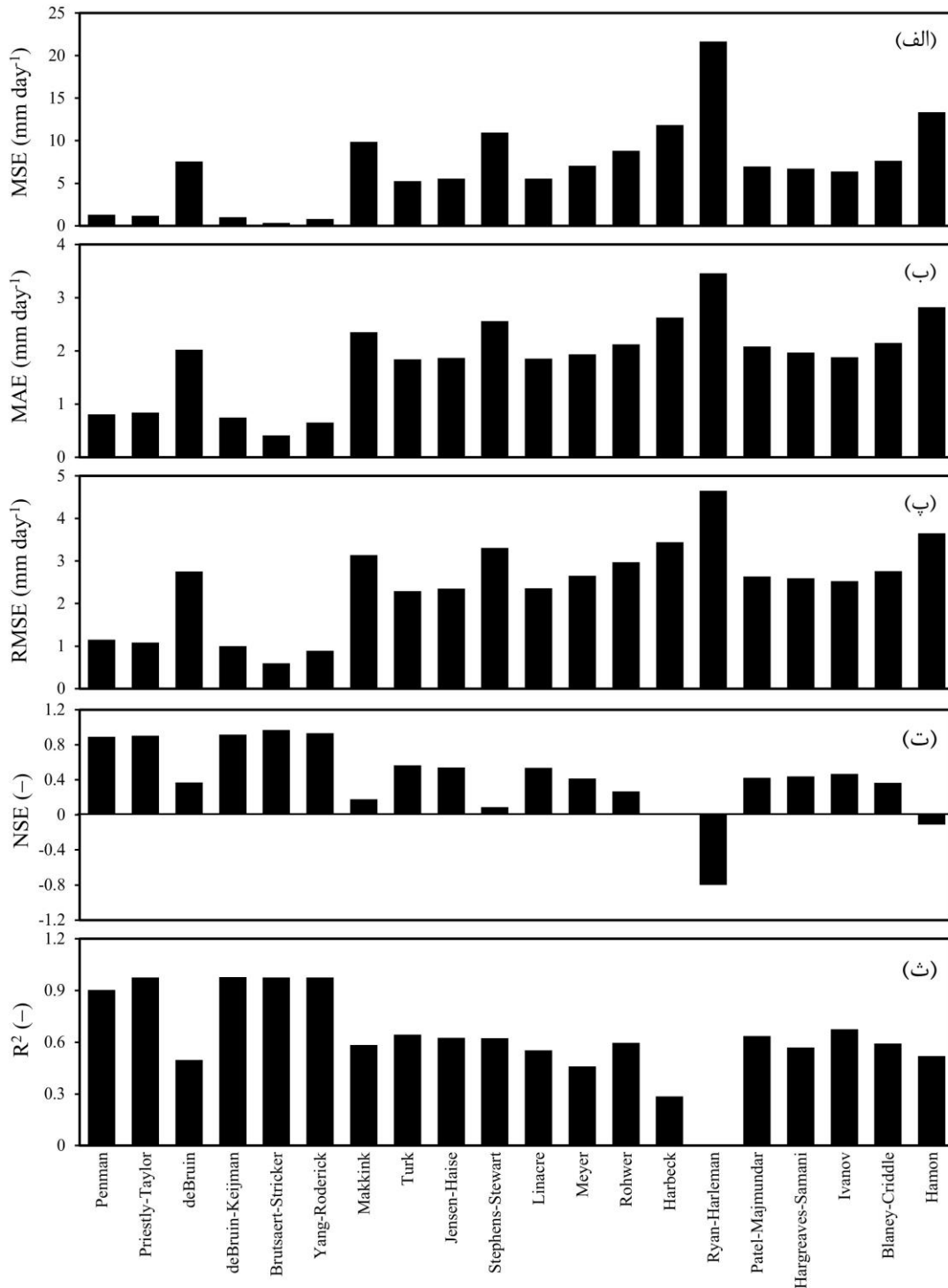
در گروه‌های روابط تابش-دما، انتقال جرم، دمایی و دما-طول روز نیز به ترتیب روابط جنسن-هایز، پاتل-ماجماندر، ایوانف و بلانی-کریدل مناسب‌ترین روش‌ها برای

برای رتبه‌بندی و ارزیابی دقت هر یک از روابط استفاده شده در این پژوهش برای برآورد میزان تبخیر از سطح مخزن سد اکباتان در گام زمانی روزانه از پنج شاخص ارزیابی R^2 ، $RMSE$ ، MAE ، MSE و NSE استفاده شده است. مقادیر این شاخص‌های آماری با استفاده از نتایج تبخیر به دست آمده از هر یک از روابط و نتایج تبخیر حاصل از روش بیلان انرژی نسبت به بون محاسبه و در شکل ۱۱ آورده شده‌اند. همچنین بر اساس این معیارها، روابط مختلف برآورد تبخیر استفاده شده برای تخمین تبخیر روزانه از سطح مخزن سد اکباتان در جدول ۲ رتبه‌بندی شده‌اند.

با توجه به نتایج به دست آمده، رابطه براتسارت-استریکر با مقادیر MSE ، MAE و $RMSE$ به ترتیب برابر با ۰/۳۶، ۰/۴۱ و ۰/۶۰ میلی متر بر روز و شاخص‌های NSE و R^2 به ترتیب برابر با ۰/۹۷ و ۰/۹۸ بیشترین دقت را در برآورد میزان تبخیر روزانه از سطح مخزن سد اکباتان

ترکیبی سه رابطه برتر با بالاترین میزان دقت و روابط هامون، هاربک و ریان- هارلمن ضعیف‌ترین روش‌ها برای برآورد تبخیر روزانه از سطح مخزن سد اکباتان هستند.

برآورد تبخیر روزانه از سطح مخزن سد اکباتان بوده‌اند. به صورت کلی، می‌توان بیان کرد که روابط براتسارت- استریکر، یانگ- رودریک و دبروین- کیچمن هر سه از گروه روابط



شکل ۱۱. معیارهای ارزیابی و عملکرد روابط مختلف در برآورد تبخیر روزانه از سطح مخزن سد اکباتان برای سال‌های آبی ۱۳۹۸-۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹-۱۴۰۰

جدول ۲. رتبه‌بندی روابط مختلف برآورد تبخیر روزانه از سطح مخزن سد اکباتان برای سال‌های آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ تا ۱۳۹۹-۱۴۰۰

رتبه‌بندی		روش و مرجع	گروه
کلی	در گروه		
۵	۵	پنمن (Penman)	ترکیبی
۴	۴	پریستلی-تیلور (Priestly-Taylor)	
۱۷	۶	دبروین (deBruin)	
۳	۳	دبروین-کیچمن (deBruin-Keijman)	
۱	۱	براتسارت-استریکر (Brutsaert-Stricker)	
۲	۲	یانگ-رودریک (Yang-Roderick)	
۱۶	۵	مکینک (Makkink)	تابش-دما
۶	۲	تارک (Turk)	
۷	۱	جنسن-هایز (Jensen-Haise)	
۱۴	۴	استفنز-استوارت (Stephens-Stewart)	
۹	۳	لیناکر (Linacre)	
۱۳	۲	میر (Meyer)	انتقال جرم
۱۵	۳	روهور (Rohwer)	
۱۹	۴	هاربک (Harbeck)	
۲۰	۵	ریان-هارلمن (Ryan-Harleman)	
۱۱	۱	پاتل-ماجماندر (Patel-Majmundar)	
۱۰	۲	هارگریوز-سامانی (Hargreaves-Samani)	دمایی
۸	۱	ایوانف (Ivanov)	
۱۲	۱	بلانی-کریدل (Blaney-Criddle)	دما-طول روز
۱۸	۲	هامون (Hamon)	

رابطه برآورد تبخیر از سطح مخزن سد اکباتان

انرژی حرارتی ذخیره‌شده در مخازن سدها و دریاچه‌ها، به‌ویژه در مخازن و دریاچه‌های عمیق، از جمله مهم‌ترین عوامل مؤثر در محاسبه میزان تبخیر از سطح آن‌ها است. برای تعیین میزان انرژی حرارتی ذخیره‌شده در آب درون مخازن نیاز به پروفیل دمایی یا تغییرات عمقی دمای آب

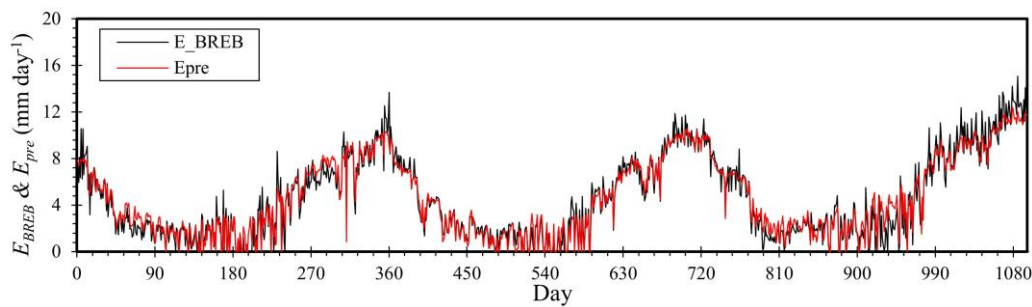
درون مخزن است. مشکل از آنجا است که اندازه‌گیری دمای عمقی آب نسبتاً سخت و هزینه‌بر بوده و در داده‌های دمای عمقی آب به‌ویژه برای گام زمانی روزانه معمولاً محدودیت‌هایی وجود دارد. به همین دلیل، در این پژوهش تلاش شده است به کمک سایر پارامترهای مؤثر بر تبخیر که داده‌های روزانه آن‌ها در محل مخزن سد اندازه‌گیری

در این رابطه منظور از E_{pre} میزان تبخیر پیش‌بینی‌شده (mm day^{-1})، d شماره روز در سال آبی که در روز اول مهرماه برابر با ۱ و در روز آخر شهریور برابر با ۳۶۵ یا ۳۶۶ است و H تراز آب درون مخزن (m) است. در شکل ۱۲ مقادیر تبخیر روزانه حاصل از روش بیلان انرژی نسبت بوئن در کنار میزان تبخیر محاسبه‌شده به کمک رابطه ۱۹ برای دوره زمانی مورد بررسی در این تحقیق آورده شده است. همچنین در شکل ۱۳ پراکندگی مقادیر تبخیر حاصل از روش بیلان انرژی نسبت بوئن و پیش‌بینی‌شده به کمک رابطه ۱۹ در کنار خط ایده‌آل $x = y$ به تفکیک برای داده‌های آموزش و آزمایش نشان داده شده است. درخور یادآوری است که مقادیر منفی تبخیر روزانه به دست آمده از رابطه ۱۹ برابر با صفر فرض شده‌اند.

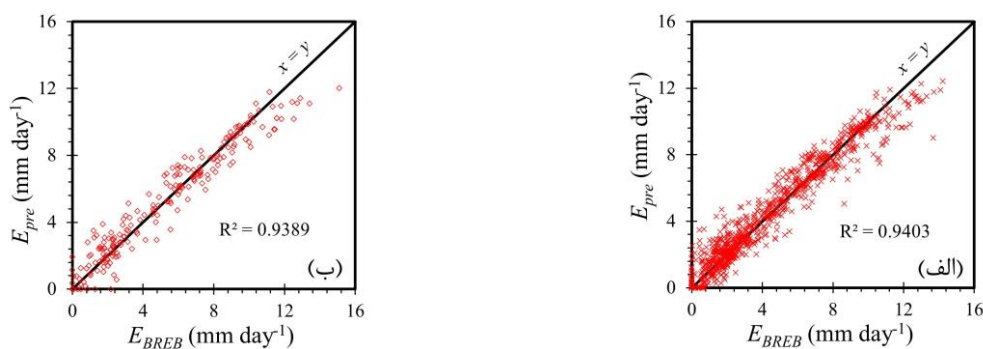
می‌شود و یا قابل محاسبه است نظیر دمای هوا و سطح آب، تعداد ساعت‌های آفتابی، اختلاف فشار بخار، سرعت باد و ... رابطه‌ای برای محاسبه میزان تبخیر روزانه مختص سد اکباتان ارائه شود. برای این منظور، از ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ایجاد رابطه و از ۲۰ درصد باقی‌مانده داده‌ها برای آزمایش رابطه استفاده شده است. در نتیجه با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره از پارامترهای مختلف مؤثر بر تبخیر، رابطه ۱۹ برای محاسبه میزان تبخیر از سطح مخزن سد اکباتان برای گام زمانی روزانه به دست آمده است.

$$E_{pre} = 229.39472 - 0.43851(T_{ws} - T_a) - 2.82978\left(\frac{n}{m}\right) - 0.33689(e_{sw} - e_a) + 0.02518\left(\frac{RH}{100}\right) + 0.10685U_2 \dots \quad (19)$$

$$- 14.00945\Delta + 0.0348IT_{a,\min} - 3.70508\text{Cos} \\ (0.01856d - 3.9143) + 0.43053R_s - 0.11709H$$



شکل ۱۲. مقایسه مقادیر تبخیر روزانه حاصل از روش بیلان انرژی نسبت بوئن در کنار میزان تبخیر روزانه محاسبه‌شده به کمک رابطه ۱۹ برای سال‌های آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ تا ۱۳۹۹-۱۴۰۰



شکل ۱۳. پراکندگی زوج مرتب‌های مقادیر تبخیر روزانه حاصل از روش بیلان انرژی نسبت بوئن و محاسبه‌شده به کمک رابطه ۱۹ در کنار خط ایده‌آل $x = y$ برای داده‌های (الف) آموزش، (ب) آزمایش

نسبت بوئن و میزان تبخیر به دست آمده از رابطه ۱۹ محاسبه شده و در جدول ۳ به تفکیک برای داده‌های آموزش و آزمایش آورده شده است. با توجه به جدول ۳ و با مقایسه آن با شکل ۱۱ می‌توان

به منظور بررسی میزان دقت و ارزیابی رابطه ارائه‌شده برای محاسبه میزان تبخیر روزانه از سطح مخزن سد اکباتان، معیارهای ارزیابی MAE ، MSE ، $RMSE$ ، NSE و R^2 میان مقادیر تبخیر روزانه حاصل از روش بیلان انرژی

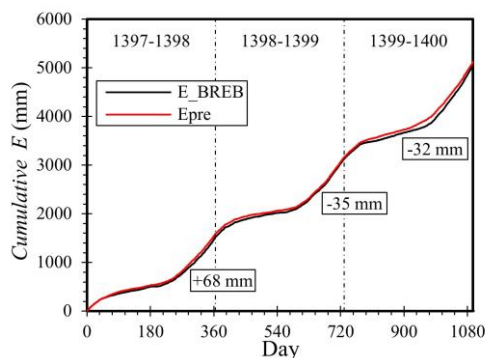
بررسی در این تحقیق نشان داده شده است. با توجه به این شکل افزایش شدت تبخیر روزانه در نیمه دوم سال آبی نسبت به نیمه اول آن با تغییر شیب به وجود آمده در این نمودار به وضوح مشخص است. مجموع تبخیر سالانه به دست آمده از روش بیلان انرژی نسبت بوئن برای سال های آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ تا ۱۳۹۹-۱۴۰۰ به ترتیب برابر با ۱۵۱۷/۹۶، ۱۶۰۸/۹۸ و ۱۹۲۶/۷۵ میلی متر بوده است. این در حالی است که رابطه ۱۹ مجموع تبخیر سالانه از سطح مخزن سد اکباتان در طول این سه سال آبی را با اختلاف هایی به ترتیب حدود +۶۸، -۳۵ و -۳۲ میلی متر تخمین زده است. این موضوع نشان دهنده آن است که رابطه ۱۹ توانایی مطلوبی در برآورد ارتفاع تبخیر سالانه از سطح مخزن سد اکباتان داشته و این مقدار را با اختلاف کمتر از ۴/۵ درصد تخمین می زند.

دریافت که رابطه ارائه شده در این پژوهش به منظور محاسبه میزان تبخیر روزانه از سطح مخزن سد اکباتان (رابطه ۱۹) بعد از روابط براتسارت- استریکر و یانگ- رودریک که در گروه روابط ترکیبی قرار دارند مناسب ترین روش برآورد میزان تبخیر روزانه از سطح مخزن سد اکباتان است. درخور یادآوری است که در گروه روابط ترکیبی از میزان ذخیره حرارتی آب درون مخزن به عنوان یک پارامتر ورودی استفاده شده، ولی در رابطه ۱۹ از این پارامتر استفاده نشده است. رابطه ۱۹ نسبت به سایر روابطی که از میزان ذخیره حرارتی مخزن به عنوان داده ورودی استفاده نمی کنند به میزان قابل ملاحظه ای عملکرد بهتر و دقت بیشتری دارد.

در شکل ۱۴ میزان تبخیر روزانه تجمعی از سطح مخزن سد اکباتان برآورد شده توسط روش بیلان انرژی نسبت بوئن و رابطه ۱۹ برای طول دوره زمانی مورد

جدول ۳. معیارهای ارزیابی و عملکرد رابطه ۱۹ برای برآورد میزان تبخیر روزانه از سطح مخزن سد اکباتان برای سال های آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ تا ۱۳۹۹-۱۴۰۰

معیار ارزیابی					گروه داده ها	رابطه
R ² (-)	NSE (-)	RMSE (mm day ⁻¹)	MAE (mm day ⁻¹)	MSE (mm day ⁻¹)		
۰/۹۴۰۳	۰/۹۳۹۲	۰/۸۴۲۴	۰/۶۰۴۲	۰/۷۰۹۷	آموزش	رابطه (۱۹)
۰/۹۳۸۹	۰/۹۳۶۲	۰/۹۰۱۱	۰/۶۶۸۲	۰/۸۱۲	آزمایش	



شکل ۱۴. مقدار تبخیر روزانه تجمعی حاصل از روش بیلان انرژی نسبت بوئن و محاسبه شده به کمک رابطه ۱۹ برای طول دوره زمانی مورد بررسی در این پژوهش

نسبت بوئن مقایسه شده است. همچنین هر یک از این روابط بر اساس دقت در برآورد میزان تبخیر روزانه رتبه بندی شده اند. در ادامه با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره رابطه ای به منظور محاسبه میزان تبخیر روزانه از سطح مخزن سد اکباتان ارائه شده است. مهم ترین نتایج حاصل از پژوهش حاضر در ادامه آورده شده است:

۱. با توجه به ذخیره حرارتی آب درون مخزن سد،

نتیجه گیری

در این پژوهش مقدار تبخیر واقعی از سطح مخزن سد اکباتان در گام زمانی روزانه طی سه سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ تا ۱۳۹۹-۱۴۰۰ با استفاده از روش بیلان انرژی نسبت بوئن برآورد و ارائه شده است. سپس با استفاده از ۲۰ رابطه مختلف میزان تبخیر روزانه از سطح مخزن سد اکباتان محاسبه و با نتایج حاصل از روش بیلان انرژی

نسبت بوئن در بازه میان $5 \pm$ تا $10 \pm$ درصد قرار داشته است. این میزان تغییرات نسبی برای روابط مکینک، استفنز- استوارت، ریان- هارلمن، بلانی- کرایدل و هامون بیش از $30 \pm$ درصد است.

۵. رابطه براتسارت- استریکر با با مقادیر MAE، MSE، RMSE به ترتیب برابر با 0.36 ، 0.41 و 0.60 میلی متر بر روز و شاخص های NSE و R^2 به ترتیب برابر با 0.97 و 0.98 بیشترین دقت را در برآورد میزان تبخیر روزانه از سطح مخزن سد اکباتان داشته است. به صورت کلی روابط براتسارت- استریکر، یانگ- رودریک و دبروین- کیچمن هر سه از گروه روابط ترکیبی سه رابطه برتر با بیشترین میزان دقت و روابط هامون، هاریک و ریان- هارلمن نامناسب ترین روش ها برای برآورد تبخیر روزانه از سطح مخزن سد اکباتان هستند.

۶. رابطه رگرسیونی ارائه شده در این پژوهش (رابطه ۱۹) توانایی مطلوبی در برآورد میزان تبخیر روزانه از سطح مخزن سد اکباتان بدون نیاز به ذخیره حرارتی آب درون مخزن سد به عنوان داده ورودی داشته است. به نحوی که برای داده های آزمایش، مقادیر شاخص های MAE، MSE، RMSE این رابطه به ترتیب برابر با 0.81 ، 0.67 و 0.90 میلی متر بر روز و شاخص های NSE و R^2 آن به ترتیب برابر با 0.93 و 0.94 بوده است. همچنین این رابطه با اختلاف کمتر از $4/5 \pm$ درصد عملکرد مناسبی در برآورد ارتفاع تبخیر سالانه از سطح مخزن سد اکباتان داشته است.

قدردانی

این پژوهش تحت حمایت شرکت سهامی آب منطقه ای همدان انجام شده است.

منابع

[1].Majidi Khalilabad M. Evaporation from lakes and reservoirs: a new approach development and application based on energy balance model and remote sensing data [PhD dissertation]. Mashhad: Ferdowsi University of Mashhad; 2015. 144 p. [Persian]

بیشینه میزان تبخیر با تأخیر تقریباً یک ماهه نسبت به بیشترین دمای هوا و تقریباً دو ماهه نسبت به بیشینه مقدار تابش خالص اتفاق افتاده است. به نحوی که بیشترین میزان تبخیر روزانه در شهریورماه روی داده، ولی بیشینه دمای هوا و میزان تابش خالص به ترتیب در ماه های مرداد و تیر مشاهده شده اند. همچنین حداقل مقدار تبخیر نیز با تأخیری تقریباً دو ماهه نسبت به کمینه دمای هوا روی داده است به نحوی که حداقل دمای هوا در ماه های دی و بهمن مشاهده شده، ولی حداقل تبخیر در ماه های اسفند و فروردین اتفاق افتاده است. علاوه بر این، شدت نوسان های تبخیر روزانه برآورد شده توسط روش بیلان انرژی نسبت بوئن در فروردین ماه بیشترین و طی فصل تابستان به ویژه در شهریورماه کمترین مقدار را داشته است.

۲. روابط پرستلی- تیلور و دبروین- کیچمن از گروه روابط ترکیبی طی سال همواره مقدار تبخیر را کمتر از روش بیلان انرژی نسبت بوئن تخمین می زنند. این در حالی است که سایر روابط موجود در گروه روابط ترکیبی به ویژه روابط پنمن و دبروین در فصل های بهار و تابستان مقدار تبخیر را بیشتر و در فصل های پاییز و زمستان مقدار تبخیر را کمتر از روش بیلان انرژی نسبت بوئن برآورد می کنند که این پدیده در بیشتر روابط موجود در گروه روابط تابش- دما و دمایی نیز مشاهده شده است.

۳. به صورت کلی روابط قرار گرفته در گروه روابط ترکیبی بهترین عملکرد را در برآورد تبخیر روزانه از سطح مخزن سد اکباتان داشته اند، ولی روابط قرار گرفته در گروه های روابط انتقال جرم، دمایی و دما- طول روز در پیش بینی میزان تبخیر در گام زمانی روزانه ضعف هایی داشته و دقت مطلوبی ندارند.

۴. در برآورد ارتفاع تبخیر سالانه از سطح مخزن سد اکباتان، روابط لیناکر و پاتل- ماجماندر با درصد تغییرات کمتر از $5 \pm$ درصد نسبت به روش بیلان انرژی نسبت بوئن بهترین عملکرد را داشته اند. همچنین درصد تغییرات نسبی روابط پنمن، دبروین، براتسارت- استریکر و میر برای برآورد ارتفاع تبخیر سالانه نسبت به روش بیلان انرژی

- [2]. Tinoco V, Willems P, Wyseure G, Cisneros F. Evaluation of reservoir operation strategies for irrigation in the Macul Basin, Ecuador. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2016;5:213–225.
- [3]. Althoff D, Rodrigues LN, DaSilva DD. Evaluating evaporation methods for estimating small reservoir water surface evaporation in the Brazilian Savannah. *Water*. 2019;11(9):1-17.
- [4]. Evans R, Murrighy E, Bastiaanssen W, Molloy R. Using satellite imagery to measure evaporation from storages. solving the great unknown in water accounting. In: *Irrigation and Drainage Conference*; 2009; Swan Hill; Australia.
- [5]. Winter TC, Rosenberry DO, Sturrock AM. Evaluation of 11 equations for determining evaporation for a small lake in the north central United States. *Water Resources Research*. 1995;31(4):983-993.
- [6]. McJannet DL, Cook FJ, Burn, S. Comparison of techniques for estimating evaporation from an irrigation water storage. *Water Resources Research*. 2013;49:1415-1428.
- [7]. Alvarez VM, Gonzalez-Real MM, Baillem A, Molina Martinez JM. A novel approach for estimating the pan coefficient of irrigation water reservoirs: Application to South Eastern Spain. *Agricultural Water Management*. 2007;92:29-40.
- [8]. Khobragabe SD, Semwal P, Kumar ARS, Nainwal HC. Pan coefficients for estimating open-water surface evaporation for a humid tropical monsoon climate region in India. *Journal of Earth System Science*. 2019;128:175(1-14).
- [9]. Majidi M, Alizadeh A, Vazifedoust M, Farid A. Lake and reservoir evaporation estimation: Sensitivity analysis and ranking existing methods. 2015;29(2):350-373. [Persian]
- [10]. Gianniou SK, Antonopoulos, VZ. Evaporation and energy in lake Vegoritis, Greece. *Journal of Hydrology*. 2007;345:212-223.
- [11]. Salas JD, Govindaraju RS, Anderson M, Arabi M, Frances F, Suarez W, et al. Introduction to hydrology. In: Wang LK, Yang CT, editor. *Handbook of environmental engineering*. New York: Springer Science+Business Media Dordrecht; 2014. 1-126.
- [12]. Hassani A, Tajrishy M, Abrishamchi A. Evaporation study of saveh dam reservoir using modified energy budget method. *Sharif Civil Engineering Journal*. 2011;29(1):115-127. [Persian]
- [13]. Bozorgi A, Bozorg-Haddad O, Sima S, Loáiciga HA. Comparison of methods to calculate evaporation from reservoirs. *International Journal of River Basin Management*. 2018;17:1-42.
- [14]. Gallego-Elvira B, Baille A, Martin-Gorriz B, Martinez-Alvarez V. Energy balance and evaporation loss of an agricultural reservoir in a semi-arid climate (south-eastern Spain). *Hydrological Processes*. 2009;24:758-766.
- [15]. Assouline S, Mahrer Y. Evaporation from lake kinneret eddy correlation system measurements and energy budget estimate. *Water Resources Research*. 1993;29(4):901-910.
- [16]. Bowen IS. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review*. 1926;27:779-787.
- [17]. Winter TC, Buso DC, Rosenberry DO, Likens GE, Sturrock AM, Mau DP. Evaporation determined by the energy-budget method for Mirror lake, New Hampshire. *Limnology and Oceanography*. 2003;48(3):995-1009.
- [18]. Rosenberry DO, Winter TC, Buso DC, Likens GE. Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA. *Journal of Hydrology*. 2007;340:149-166.
- [19]. Elsaywaf M, Willems P, Pagano A, Berlamont J. Evaporation estimates from Nasser lake, Egypt, based on three floating station data and Bowen ratio energy budget. *Theoretical and Applied Climatology*. 2010;100:439-465.
- [20]. Majidi M, Alizadeh A, Farid A, Vazifedoust M. Estimating evaporation from lakes and reservoirs under limited data condition in a semi-arid region. *Water Resource Management*. 2015;29:3711-3733.
- [21]. El-Shazli A, Hormann G, Wagner PD, Fohrer N. Comparison of water balance method and alternative evaporation methods applied to the Aswan high dam reservoir. *Journal of the Geographical Society of Berlin*. 2018;149(3):117-131.
- [22]. Hojjati E, Mahtabi G, Taran F, Kisi O. Estimating evaporation from reservoirs using energy budget and empirical methods: Alavian Dam reservoir, NW Iran. *Italian Journal of Agrometeorology*. 2020;2:19-34.
- [23]. Penman HL. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A; Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*; The Royal Society, London, UK. 1948;193:120–145.
- [24]. Finch J, Calver A. Methods for the

- quantification of evaporation from lakes. CEH Wallingford, Oxfordshire: World Meteorological Organization's Commission for Hydrology; 2008. 47 p.
- [25]. Priestley CHB, Taylor RJ. On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*. 1972;100:81-92.
- [26]. deBruin HAR. A simple model for shallow lake evaporation. *Journal of Applied Meteorology*. 1978;17:1132-134.
- [27]. deBruin HAR, Keijman JQ. The Priestley-Taylor evaporation model applied to a large shallow lake in the Netherlands. *Journal of Applied Meteorology*. 1979;18:898-903.
- [28]. Brutsaert W, Stricker H. An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration. *water resources research*. 1979;15(2):443-450.
- [29]. Yang Y, Roderick ML. Radiation, surface temperature and evaporation over wet surfaces. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2019;145(720):1118-1129.
- [30]. Makkink GF. Ekzameno de la formulo de Penman. *Netherlands Journal of Agriculture Science*. 1957;5:290-305.
- [31]. Turc L. Assessment of irrigation water needs, ET potential. *Annales Agronomiques*. 1961;12:13-49.
- [32]. Hamon WR. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Hydraulics Division. ASCE*. 1961;87(3):107-120.
- [33]. Linacre ET. Data-sparse estimation of lake evaporation, using a simplified Penman equation. *Agricultural and Forest Meteorology*. 1993;64:237-256.
- [34]. Patel JA, Majmundar BP. Development of evaporation estimation methods for a reservoir in Gujarat, India. *American Water Works Association*. 2016;108(9):489-500.
- [35]. Hassani A. Comparison of evaporation estimation methods applied to the Reservoir of Saveh (Alghadir) dam, Iran. *Iran-Water Resources Research*. 2013;9(1):15-35. [Persian]
- [36]. Shertzer WM, Taylor B. Assessment of the capability to compute evaporation from Okanagan lake, other mainstem lakes and basin lakes and reservoirs using the existing database. Canada: Okanagan Water Supply and Demand Study on Lake Evaporation; 2009. 104 p. Report No.: 08-547.
- [37]. Majidi M, Alizadeh A, Farid A, Vazifedoust M. Development and application of a new lake evaporation estimation approach based on energy balance. *Hydrology Research*. 2018;49(5):1528-1539.
- [38]. Brutsaert W. *Evaporation into the atmosphere*. Springer Science+Business Media Dordrecht; 1982. 310 p.
- [39]. Jensen ME, Allen RG. *Evaporation, evapotranspiration, and irrigation water requirements*. 2nd ed. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers (ASCE); 2016. 769 p.
- [40]. Robinson M, Ward R. *Hydrology: principles and processes*. London: IWA Publishing; 2017. 402 p.
- [41]. Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. *Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements*. Rome: Water Resources, Development and Management Service, FAO Irrigation and Drainage; 1998. 327 p. FAO Paper No.: 56.
- [42]. Henderson-Sellers B. Calculating the surface energy balance for lake and reservoir modeling: a review. *Reviews of Geophysics*. 1986;24(3):625-649.
- [43]. Payero JO, Neale CMU, Wright JL, Allen RG. Guidelines for validating Bowen ratio data. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, ASAE*. 1986;46(4):1051-1060.
- [44]. Rohwer C. *Evaporation from free water surfaces*. Washington: USDA Technical Bulletin; 1931. 107 p. No.: 271.
- [45]. Harbeck GE. *A practical field technique for measuring reservoir evaporation utilizing mass-transfer theory*. Washington: U.S. Government Printing Office; 1962. 9 p. Paper No.: 272-E.
- [46]. Ryan PJ, Harleman DRF. *An analytical and experimental study of transient cooling pond behavior*. Cambridge: Ralph M. Parsons Laboratory, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology; 1973. 442 p. Report No.: 161.
- [47]. Hargreaves GH, Samani ZA. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*. 1985;1(2):96-99.
- [48]. Chicco D, Warrens MJ, Jurman G. The coefficient of determination r-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science*. 2021;7:e623(1-24).