



Comparison of evaporation estimation methods applied to the Reservoir of Saveh (Alghadir) Dam, Iran

A. Hassani^{1*}

Abstract

In this study, several precise models and methods are used for estimating annual and monthly evaporation rates for the reservoir of Saveh (Alghadir) Dam for 13 years (1995-2007). Water budget and evaporation pan, experimental methods, penman type equations, Bowen Ratio Energy Budget (BREB) method, and Complementary Relationship Lake Evaporation model (CRLE) were applied to this study. The maximum and minimum values for the mean annual evaporation rates are estimated between 145 cm (for Debruin-Keijman method) and 175 cm (CRLE model for shallow lakes). Also the long term monthly evaporation pattern from the applied methods are different from the standard method of BREB evaporation. The least difference in the mean monthly evaporation from the BREB results, are for the Mass Transfer, Papadakis, Penman, Brutsaert-Stricker, and Priestley-Taylor methods. However, only the standard deviation of Penman and Mass Transfer methods were very small and the other three methods have relatively large standard deviation from the BREB results. The qualification of the CRLE model have been rejected, and the Thornthwaite, Hamon and Ryan-Harleman methods have also large bias in mean and standard deviation for monthly evaporation rates from the BREB results.

Keywords: Evaporation estimation, Energy budget method, Free water surfaces, CRLE model.

Received: November 6, 2011

Accepted: February 19, 2013

ارزیابی روش‌های تخمین میزان تبخیر برای مخزن سد ساوه (الغدیر)

امین حسینی^{۱*}

چکیده

در این تحقیق میزان تبخیر سالانه و ماهانه از دریاچه سد ساوه (الغدیر) توسط تعدادی از روش‌ها از قبیل روش بیلان آبی و استفاده از تشتک تبخیر، روابط تجربی، روابط نوع Penman، روش بیلان انرژی (BREB) و مدل CRLE به مدت ۱۳ سال (۱۳۸۶-۱۳۷۴) برآورد گردیده است. مقادیر تبخیر سالانه روش‌های مختلف مورد استفاده از مقدار حداقل ۱۴۵ سانتی‌متر برای روش Debruin-Keijman تا مقدار حداکثر ۱۷۵ سانتی‌متر برای روش CRLE آب‌های کم عمق متغیر می‌باشد. همچنین، الگو و تفاوت میانگین بلندمدت (۱۳ ساله) ماهانه تبخیر حاصل از هر یک از روش‌های مورد استفاده در این تحقیق با نتایج روش بیلان انرژی به عنوان روش استاندارد متفاوت می‌باشد. روش‌هایی از قبیل روش Mass transfer، Penman، Debruin، Papadakis، Makkink، Priestley-Taylor دارای میانگین مقدار ماهانه تبخیر تقریباً برابر با روش BREB می‌باشند، ولی در این میان انحراف معیار روش‌های Mass transfer، Penman و Priestley-Taylor بسیار کوچک می‌باشد و روش‌های ذکر شده دیگر دارای انحراف معیار نسبتاً زیادی هستند. همچنین، علاوه بر مدل CRLE که صلاحیت آن برای محاسبه تبخیر از مخزن سد ساوه رد شد، روش‌های Hamon، Thornthwaite، Ryan-Harleman نیز دارای انحراف زیادی نسبت به روش استاندارد مورد استفاده می‌باشند.

کلمات کلیدی: تخمین تبخیر، روش بیلان انرژی، سطوح آزاد آبی، مدل CRLE.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۵ آبان ۱۳۹۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱ اسفند ۱۳۹۱

1- M.Sc Graduate of water engineering, Golestan Regional Water Co., Gorgan, Golestan, Iran, Email: aminh85@yahoo.com
*- Corresponding Author

۱- کارشناس ارشد مهندسی آب، شرکت آب منطقه‌ای گلستان، گرگان، گلستان، ایران
*- نویسنده مسئول

۱- مقدمه

به طور کلی محاسبه مستقیم تبخیر از سطح دریاچه به علت موجود نبودن دستگاه‌ها و لوازم این امر ناممکن می‌باشد (Tanny et al., 2008). همچنین، خطا در محاسبه تبخیر ممکن است بسته به روش مورد استفاده و کیفیت داده‌های مورد استفاده در محدوده وسیعی تغییر نماید (Winter, 1995). مطالعه تبخیر از سطوح آزاد آبی اغلب برای دریاچه‌های بزرگ انجام گرفته و متأسفانه مطالعات تخمین تبخیر از دریاچه‌های کوچک، به علت توجه اندک و ناکافی بودن سرمایه و حمایت مالی، به ندرت صورت گرفته است (Rosenberry et al., 2007). حداقل ۳۰ معادله جهت تعیین تبخیر و تعرق پیشنهاد گردیده که شرح کامل آنها در مقاله‌ها و کتابهای مرجع آمده است (Brutsaert et al., 1982). بسیاری از این معادله‌ها جهت استفاده در شرایط اقلیمی مشابه با محل استفاده اولیه مناسب می‌باشند (Winter et al., 1995). موجود بودن تعداد زیادی معادله برای تخمین تبخیر، دامنه وسیع داده‌های مورد نیاز و محدوده گسترده تخصص‌ها برای استفاده درست از معادله‌های مختلف، تصمیم‌گیری در مورد استفاده از مناسب‌ترین معادله برای مطالعه مشخص را برای هیدرولوژیست‌ها دشوار نموده است.

در یک مطالعه سی ماهه بیلان انرژی برای دریاچه کوچکی واقع در برزیل، توسط Dos Reis et al., (1998) انجام پذیرفت؛ دما و رطوبت هوا، سرعت و جهت باد، مدت تابش خورشید و تشعشع خورشیدی به صورت پیوسته همراه با پروفیل درجه حرارت آب دریاچه به صورت ماهانه اندازه‌گیری شدند. با استفاده از اطلاعات به دست آمده، از روش بیلان انرژی^۱ و مدل^۲ CRLE برای محاسبه میزان تبخیر از دریاچه استفاده گردید. در مطالعه Vallet-Coulomb et al., (2001) میزان تبخیر از یک دریاچه کم‌عمق در منطقه گرمسیری در آفریقا با استفاده از داده‌های هواشناسی و اقلیمی ماهانه مربوط به سه دهه گذشته انجام گرفت. در این مطالعه از سه روش بیلان انرژی، روش Penman و مدل CRLE برای تخمین تبخیر استفاده شد و در انتها حساسیت هر روش را نسبت به تغییرات متغیرهای ورودی به هر یک تحلیل نمودند تا آزمون از پایداری محاسبات نتیجه شده به دست آورند. همچنین، روش بیلان انرژی (BREB) از سوی Winter et al., (2003) برای تخمین هر چه دقیق‌تر میزان تبخیر از دریاچه‌ای کوهستانی در بازه‌های بیلان انرژی هفتگی و دوهفتگی در طی دوره‌های آزاد آبی بین سال‌های ۱۹۸۷-۱۹۸۲ انجام پذیرفت.

مطالعه مفصل ده ساله‌ای توسط Lenters et al., (2005) به صورت تغییرات فصلی، برون فصلی و درون‌سالی بر روی میزان تبخیر انجام شد. این محاسبات در دوره‌های بیلان انرژی دو هفتگی بین سال‌های ۱۹۸۹ تا ۱۹۹۸ (در طی فصول عاری از یخ) تنظیم شد. بعد از انجام این تحقیق مشخص شد که روش بیلان انرژی بهترین روش موجود برای تخمین میزان تبخیر از سطوح آزاد آبی می‌باشد (Rosenberry et al., 2007; Winter et al., 2003). به عنوان یک تحقیق و مطالعه طولانی‌مدت، Rosenberry et al., (2007) در شش فصل آبی و برای ۳۷ ماه، به مقایسه ۱۴ روش متفاوت تبخیر با روش بیلان انرژی به عنوان روش استاندارد پرداختند. این مطالعه این فرصت را در اختیار قرار داد تا روش‌های تخمین تبخیر ارزان‌تر که به نیروی انسانی کمتری نیاز دارند، بسته به اطلاعات و منابع در دسترس برای یک دریاچه مورد نظر، شناسایی گردند.

متأسفانه، تاکنون مطالعه جامع و قابل‌ذکری در خصوص انجام محاسبات تبخیر از سطوح مخازن آب شیرین کشور صورت پذیرفته است. در این تحقیق میزان تبخیر سالانه و ماهانه از دریاچه سد ساوه (الغدیر) توسط تعدادی از روش‌ها از قبیل روش بیلان آبی و استفاده از تستک تبخیر، روابط تجربی، روابط نوع Penman، روش بیلان انرژی (BREB) و مدل CRLE به مدت ۱۳ سال (۱۳۸۶-۱۳۷۴) مورد تخمین قرار گرفته و نتایج حاصل از هر یک از روش‌های مورد استفاده در این تحقیق با نتایج روش بیلان انرژی به عنوان روش استاندارد مقایسه گردیده است.

۲- شرایط اقلیمی و موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعات

دریاچه سد ساوه (الغدیر) در ۱۵۰ کیلومتری جنوب غربی تهران و ۲۵ کیلومتری جنوب غربی ساوه با طول و عرض جغرافیایی به ترتیب ۵۰ درجه و ۳۱ دقیقه و ۳۵ درجه و ۱۰ دقیقه، بر روی رودخانه قره‌چای ایجاد شده است. دریاچه در رقوم پر حدود ۹ کیلومترمربع مساحت و در رقوم بستر ۱۰۸۰ متر از سطح آبهای آزاد ارتفاع دارد. ایستگاه تبخیرسنجی بند شاه عباسی دقیقاً در مجاورت مخزن سد ساوه واقع شده و در سال ۱۹۶۷ میلادی (۱۳۴۵ شمسی) تأسیس گردیده است که از همان زمان داده‌های اقلیمی از جمله درجه حرارت، رطوبت نسبی، سرعت باد، بارندگی، و تبخیر از تستک کلاس A را ثبت و گزارش می‌نماید. بر اساس سیستم اقلیمی Domarten اصلاح شده، محدوده ایستگاه بند شاه عباسی دارای اقلیم خشک و در سیستم طبقه‌بندی Silianinov، دارای اقلیم خشک معتدل می‌باشد.

(طرح جامع آب کشور، ۱۳۷۷). میانگین بارندگی منطقه بین سال‌های ۱۳۷۴-۱۳۸۶ برابر ۲۳۰ میلی‌متر و درجه حرارت ماهانه میانگین آن بین ۴/۹ درجه سانتی‌گراد در دی ماه و ۳۰ درجه سانتی‌گراد در ماه مرداد متغیر می‌باشد. در شکل ۱ موقعیت مخزن سد ساوه (الغدير) نشان داده شده است.

۳- مواد و روش‌ها

روش‌های اندازه‌گیری و تخمین تبخیر از سطوح آزاد آبی، که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته‌اند در جدول ۱ ارائه گردیده‌اند (Rosenberry et al., 2007). به منظور استفاده از معادلات ذکر شده می‌بایستی پارامترهای مورد نیاز آنها به صورت مستقیم اندازه‌گیری گردیده و یا در صورت امکان از ایستگاه‌های هواشناسی منطقه تأمین گردند که در ادامه به نحوه فراهم آمدن این داده‌ها می‌پردازیم.

پارامترهای مورد استفاده در معادله‌های ارائه شده در جدول ۱ به شرح زیر می‌باشند.

$$\alpha = 1.26 \text{ عدد ثابت و بدون بعد}$$

δ : شیب منحنی فشار بخار اشباع-درجه حرارت میانگین هوا (Pa^0C^{-1})

γ : ثابت رطوبتی (وابسته به درجه حرارت و فشار جو) (Pa^0C^{-1})

Q_n : تشعشع خالص ($Q_s - Q_r - Q_a - Q_{ar} - Q_{bs}$) (W.m^2)

Q_s : تشعشع خورشیدی موج کوتاه ورودی (W.m^2)

Q_r : تشعشع خورشیدی موج کوتاه منعکس شده (W.m^2)

Q_b : انرژی خالص انتقال یافته از دریاچه به رسوبات بستر (W.m^2)

Q_a : تشعشع اتمسفریک موج بلند ورودی (W.m^2)

Q_v : انرژی خالص ناشی از تبدلات باران، رواناب سطحی و آب زیرزمینی با حجم آبی (W.m^2)

زیرزمینی با حجم آبی (W.m^2)

Q_{bs} : تشعشع اتمسفریک موج بلند منتشر شده از سطح آب (W.m^2)

Q_{ar} : تشعشع اتمسفریک موج بلند منعکس شده (W.m^2)

Q_x : تغییر در میزان حرارت ذخیره شده در حجم آب (W.m^2)

R : نسبت باون (بدون بعد)

C : ظرفیت گرمایی مخصوص آب (برابر با $4186 \text{ J.Kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)

L : گرمای نهان تبخیر (برای روش بیلان انرژی بر حسب J.Kg^{-1})

و برای سایر معادله‌ها بر حسب MJ.Kg^{-1})

ρ : چگالی آب (در درجه حرارت ۲۰ درجه سانتی‌گراد برابر با

$$998 \text{ Kg.m}^{-3}$$

E : میزان تبخیر صورت گرفته بر حسب m.s^{-1} برای معادله بیلان

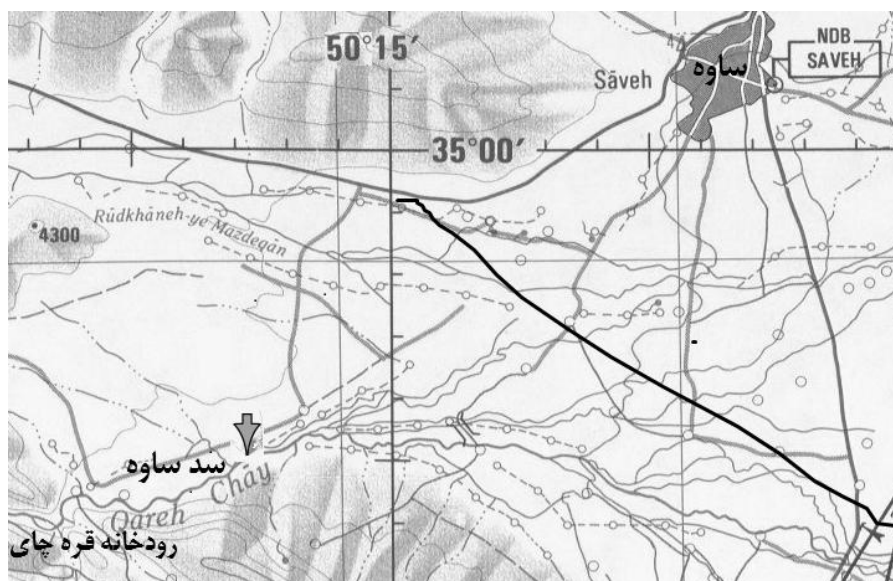
انرژی و بر حسب mm.d^{-1} برای سایر معادله‌ها

e_a : فشار بخار در درجه حرارت و رطوبت نسبی هوا (mb)

e_0 : فشار بخار اشباع در درجه حرارت سطح آب (mb)

e_s : فشار بخار اشباع در درجه حرارت هوا (mb)

U_2 : سرعت باد در ارتفاع ۲ متر از سطح زمین (m.s^{-1})



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه بر روی نقشه توپوگرافی مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰

جدول ۱- روشها و معادلات مورد استفاده در این تحقیق (Rosenberry et al., 2007)

بازه زمانی	معادله	روش
بزرگتر از ۱۰ روز	$E = \alpha \frac{s}{s+\gamma} \frac{Q_n - Q_x}{L\rho} \times 86.4$	Priestley-Taylor
روزانه	$E = \frac{s}{0.85s+0.63\gamma} \frac{(Q_n - Q_x)}{L\rho} \times 86.4$	Debruin-Keijman
بزرگتر از ۱۰ روز	$E = \left(\frac{Q_n s}{s+\gamma} + \frac{\gamma e_a}{s+\gamma} \right) / (\rho L)$	Penman
روزانه	$E = (2\alpha-1) \left(\frac{s}{s+\gamma} \right) \frac{(Q_n - Q_x)}{L\rho} \times 86.4 - \frac{\gamma}{s+\gamma} 0.26(0.5+0.54U_2)(e_s - e_a)$	Brutsaert-Stricker
بزرگتر از ۱۰ روز	$E = 1.192 \left(\frac{\alpha}{\alpha-1} \right) \left(\frac{\gamma}{s+\gamma} \right) \frac{(2.9+2.1U_2)(e_s - e_a)}{L\rho} \times 86.4$	Debruin
بزرگتر از ۵ روز	$E = (0.014T_a - 0.37)(Q_S \times 3.523 \times 10^{-2})$	Jensan-Haise
ماهانه	$E = \left((52.6 \frac{s}{s+\gamma} \frac{Q_S}{L\rho}) - 0.12 \right)$	Makkink
ماهانه	$E = (0.0082T_a - 0.19)(Q_S \times 3.495 \times 10^{-1})$	Stephens-Stewart
بسته به N	$E = N \cdot u_2 (e_0 - e_a)$	Mass transfer
روزانه	$E = \frac{(2.7(T_0 - T_a)^{0.333} + 3.1U_2)(e_0 - e_a)}{L\rho} \times 86.4$	Ryan-Harleman
ماهانه	$E = (0.0173T_a - 0.314) \times T_a \times (D \div D_{TA}) \times 25.4$	Blaney-Criddle
روزانه	$E = 0.55 \left(\frac{D}{12} \right)^2 \frac{SVD}{100} (25.4)$	Hamon
ماهانه	$E = 0.5625(e_s \max - (e_s \min - 2)) \left(\frac{10}{d} \right)$	Papadakis
ماهانه	$E = \left(1.6 \left(\frac{10T_a}{I} \right)^{6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.49} \right) \left(\frac{10}{d} \right)$	Thornthwaite
ماهانه	$E = P + (I_s - O_s) + (I_g - O_g) - T - \Delta S$	بیان آبی
ماهانه	$K_p = \frac{E}{E_p}$	تشتک تبخیر
دو هفته‌گی	$E = [(Q_s - Q_r - Q_b) + (Q_a + Q_v - Q_{bs} - Q_{ar} - Q_x)] / [\rho(L(1+R) + cT_0)]$	بیان انرژی
ماهانه	$E_T + E_{TP} = 2E_{Tw}$	مدل CRLE

T_a : درجه حرارت هوا (برای معادلات Blaney-Criddle, Stephens-Stewart و Jensan-Haise بر حسب درجه فارنهایت و برای سایر معادلات بر حسب درجه سانتی‌گراد)

T_0 : درجه حرارت سطح آب ($^{\circ}C$)

N : ضریب انتقال جرم (برای دریاچه سد ساوه برابر با ۰/۰۱۷ تخمین زده شده است)

D : تعداد ساعات روشنایی روز

D_{TA} : مقدار کل تعداد ساعات روشنایی روز سالانه برای یک موقعیت جغرافیایی خاص (برای موقعیت محدوده مورد مطالعه در عرض شمالی برابر با ۳۹۲۶ ساعت می باشد)

SVD : چگالی بخار اشباع در درجه میانگین هوا ($g \cdot m^{-3}$)

$e_s \max$: فشار بخار اشباع در درجه حرارت حداکثر روزانه هوا (Pa)

$e_s \min$: فشار بخار اشباع در درجه حرارت حداقل روزانه هوا (Pa)

d : تعداد روزهای موجود در هر ماه

I : شاخص حرارتی سالانه ($I = \sum i, i = (T_a/5)^{1.514}$)

P : میزان بارندگی صورت گرفته بر سطح دریاچه ($mm \cdot d^{-1}$)

I_s : میزان رواناب سطحی ورودی به دریاچه ($mm \cdot d^{-1}$)

O_s : میزان رواناب سطحی خروجی از دریاچه ($mm \cdot d^{-1}$)

I_g : میزان آب زیرزمینی ورودی به دریاچه ($mm \cdot d^{-1}$)

O_g : میزان میزان رواناب سطحی خروجی دریاچه از دریاچه ($mm \cdot d^{-1}$)

T : میزان تعرق صورت گرفته از گیاهان آبی موجود بر سطح دریاچه (mm.d^{-1})

ΔS : میزان تغییرات صورت گرفته در حجم آب دریاچه (mm.d^{-1})

K_p : ضریب تشتک تبخیر کلاس A (بدون بعد)

E_p : میزان تبخیر صورت گرفته از تشتک تبخیر کلاس A (mm.d^{-1})

ET : تبخیر و تعرق واقعی (mm.d^{-1})

ETP : تبخیر و تعرق پتانسیل (mm.d^{-1})

ETw : تبخیر و تعرق در شرایطی که آب به اندازه کافی در دسترس باشد (mm.d^{-1})

۴- نتایج و بحث

۴-۱- کیفیت داده ها

تقریباً تمامی داده‌های مورد نیاز این تحقیق به صورت روزانه از ایستگاه بند شاه عباسی و تعداد اندکی (مثل تعداد ساعات واقعی روشنایی روز و درجه حرارت نقطه شبنم) نیز از ایستگاه سینوپتیک ساوه تهیه و همچنین از این داده‌ها با استفاده از روابط تجربی معتبر موجود برای محاسبه نمودن داده‌های روزانه تشعشع خورشیدی و تشعشع اتمسفریک استفاده گردید. آمار مربوط به درجه حرارت هوای منطقه نشان از نوسان‌های بالای درجه حرارت منطقه تا بیش از ۵۵ درجه سانتی‌گراد در سال دارد. داده‌های رطوبت نسبی روزانه برای ۱۳ سال آماری از ایستگاه بند شاه عباسی تهیه گردیده و بر این اساس می‌توان گفت میانگین رطوبت نسبی منطقه حدود ۷۵ درصد می‌باشد. در مورد سرعت باد نکته قابل ذکر این است که بادهای غالب منطقه دارای جهت غربی و جنوب غربی می‌باشند. توپوگرافی محل دریاچه سد ساوه به صورتی است که باعث می‌گردد بادهای غالب وزیده شده از جانب غرب و جنوب غربی با هدایت شدن به داخل دره موجود در پیشانی دریاچه سرعتی دوچندان یافته و سپس به سمت دریاچه حرکت نمایند.

برای استفاده از روش بیلان آبی نیز مقادیر بارندگی روزانه (اگر چه مقدار بارش در طول این مدت بسیار اندک و تقریباً برابر با صفر بوده است) و رواناب سطحی ورودی و خروجی و تغییرات حجم آب مخزن از ایستگاه بند شاه عباسی فراهم شد. با توجه به میزان بارش بسیار اندک و تلفات تبخیر محسوس در سال‌های اخیر، تراز، سطح و حجم آب مخزن سد، روندی نزولی را در پیش گرفته است. تراز آب یک دریاچه همواره بر اساس قانون بیلان یا قانون بقای جرم، تابعی از مقادیر ورودی و خروجی به سیستم می‌باشد. بررسی مقادیر رواناب

سطحی ورودی روزانه رودخانه قره‌چای به مخزن سد و میزان کل خروجی آب از مخزن حاکی از آن است که در سال‌های شروع بهره‌برداری از سد مسئولین اقدام به آگیری مخزن نموده‌اند و در این سال‌ها تراز آب مخزن نیز بالا بوده است؛ اما در سال‌های اخیر پس از وقوع هر بارندگی و افزایش آب در مخزن، اجازه خروج آب از مخزن صادر گردیده است. بسیاری از روش‌های مورد استفاده در این تحقیق به داده‌های تشعشع خورشیدی و اتمسفریک احتیاج دارند. متأسفانه، بر اساس مذاکرات صورت گرفته با کارشناسان بخش تشعشعات سازمان هواشناسی کشور این نتیجه حاصل گردید که در کشور تنها در ایستگاه‌های سینوپتیک بسیار اندکی اندازه‌گیری تشعشعات صورت می‌گیرد، که با توجه به پراکندگی، ناقص و دور از واقعیت بودن به این داده‌های اندک نیز نمی‌توان تکیه و اعتماد نمود. از سوی دیگر فاصله این ایستگاه‌ها تا محل سد ساوه (الغدير) نسبتاً زیاد می‌باشد و استفاده از این داده‌های پراکنده و نامناسب احتمال بروز خطا در محاسبات را افزایش خواهد داد. با توجه به این موضوع، به منظور فراهم نمودن داده‌های مربوط به این دو پارامتر در این تحقیق از معادله‌های تجربی موجود استفاده گردید. مقدار تشعشع خورشیدی ورودی (Q_s) را می‌توان با استفاده از ساعات روشنایی روز در منطقه و توسط فرمول آنگستروم به صورت زیر تعیین نمود (Allen et al., 1998):

$$Q_s = (a + b \frac{n}{N}) Q_0 \quad (1)$$

n/N نسبت ساعات روشنایی روز واقعی به تئوری (حداکثر ممکن این پارامتر)، Q_0 تشعشع خورشیدی بخش خارجی جو (W.m^{-2})، و a و b ضرایبی وابسته به موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه می‌باشند. بر اساس مطالعات انجام شده در منطقه دشت ساوه، مقادیر این دو پارامتر به صورت $a = 0.28$ و $b = 0.4$ در نظر گرفته می‌شوند (Kamali et al., 2004). مقادیر واقعی ساعات روشنایی روز (n) از ایستگاه سینوپتیک ساوه حاصل شده و برای محاسبه مقادیر N و Q_0 از معادله‌ای زنجیره‌ای که از موقعیت جغرافیایی و روز مشخص سال استفاده می‌نمایند، بهره گرفته شده است (Kotsopoulos et al., 1997). در نهایت با مشخص بودن میزان پارامترهای Q_0 ، n/N ، a و b در هر روز از سال می‌توان با استفاده از معادله (۱) مقدار تشعشع خورشیدی ورودی (Q_s) را برای آن روز خاص از سال تعیین نمود (شکل ۳). تشعشع موج کوتاه بازگشتی از سطح آب (Q_r) نیز به صورت زیر حاصل می‌گردد:

$$Q_r = a_s \cdot Q_s \quad (2)$$

که در این رابطه a_s قابلیت انعکاس تشعشع موج کوتاه آب و معمولاً برابر با ۰/۰۷ فرض می‌گردد. در شکل ۳ مقادیر محاسبه شده روزانه

$$Q_x = \frac{\rho \cdot c}{a_s} \sum_z \left(\frac{\Delta T(z)}{\Delta t} \right) a(z) \cdot \Delta z \quad (7)$$

که در این رابطه \bar{a}_s مساحت متوسط سطح دریاچه در بازه زمانی مورد نظر، $\Delta T(z) = T_{t+7}(z) - T_{t-7}(z)$ تغییرات درجه حرارت میانگین دریاچه در عمق z ، Δt بازه زمانی بر حسب ثانیه، $a(z)$ مساحت دریاچه در عمق z و Δz ضخامت هر لایه می‌باشد. بنابراین، به منظور تعیین انرژی ذخیره شده در دریاچه (Q_x) به منحنی ارتفاع - سطح - حجم (نقشه فراسنجی) دریاچه و همچنین درجه حرارت روزانه سطح آب و ساختار حرارتی (پروفیل حرارتی) دریاچه احتیاج است. بر اساس آخرین عملیات میدانی صورت گرفته در سال ۱۳۸۲، منحنی فراز سنجی دریاچه موجود می‌باشد. مهم‌ترین مشکل در استفاده از بسیاری از روش‌های تخمین میزان تبخیر از جمله روش بیلان انرژی، نیاز آنها به پارامتر درجه حرارت سطح آب و ساختار حرارتی مخزن است. برای حل این مشکل و تأمین نمودن داده‌های روزانه درجه حرارت سطح آب، بررسی داده‌های موجود و مرتبط با پارامتر مورد نیاز انجام گرفت. از آنجا که اندازه‌گیری‌های بسیار اندک و پراکنده برای این داده فقط برای سال ۱۳۷۶ موجود بود، داده‌های اندازه‌گیری شده دماسنج‌های موجود در بدنه سد مورد توجه قرار گرفتند. دماسنج‌های موجود در بدنه سد در بلوک‌های مختلف در چند ردیف و ارتفاع واقع گردیده‌اند. همچنین، ضخامت بتن روی این دماسنج‌ها متفاوت می‌باشد و نزدیک‌ترین دماسنج به آب مخزن در عمق حدود ۲۰-۱۰ سانتی‌متری بتن قرار دارد. با مقایسه این داده‌ها با داده‌های اندازه‌گیری شده پراکنده سال ۱۳۷۶ و همچنین اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در سال ۱۳۸۷ (از ابتدای تیر الی انتهای مهر در بازه‌های دو هفته‌گی با نمونه‌گیری از آب دریاچه در اعماق مختلف، داده‌های پارامتر درجه حرارت و لایه‌بندی حرارتی دریاچه ثبت شد و درجه حرارت سطح آب دریاچه در چند نوبت در هر روز قرائت گردید)، مشاهده گردید که تفاوت این دو مقدار در اکثر موارد بسیار اندک بوده و با تقریب مناسب می‌توان از این داده‌ها در سال‌هایی که اندازه‌گیری صورت نگرفته است به جای داده‌های درجه حرارت سطح آب و همچنین ساختار حرارتی مخزن استفاده نمود (اشکال ۳ و ۴).

با توجه به شکل ۳، برای تمامی پروفیل‌های حرارتی مخزن اندازه‌گیری شده، در بازه‌های زمانی دو هفته‌گی در فصل تابستان در سال ۱۳۸۷ تقریباً از عمق ۲۰ متری سطح آب به پائین تغییرات درجه حرارت محسوس نبوده و بسیار اندک است و در نتیجه می‌توان گفت که آب مخزن تبادلات انرژی قابل ملاحظه‌ای با بستر نخواهد داشت. بنابراین، فرض صرف‌نظر نمودن از مؤلفه تبادلات انرژی بستر در

میزان تشعشع موج کوتاه بازگشتی از سطح آب در بازه سال‌های مورد مطالعه ارائه گردیده‌اند. به منظور تعیین میزان تشعشع اتمسفریک ورودی (Q_a) نیز می‌توان از معادله زیر استفاده نمود (Bowie et al., 1985):

$$Q_a = \varepsilon_a \sigma (T_a + 273)^4 \quad (3)$$

که در این معادله σ ثابت Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)، ε_a قابلیت انتشار جو و T_a درجه حرارت هوا بر حسب درجه کلون می‌باشند. معادلات فراوانی برای محاسبه مقدار ε_a موجود است که معمولاً همگی بر اساس فشار بخار، درجه حرارت هوا و میزان ابرینگی می‌باشند. در این تحقیق از اطلاعات گرافیکی فرموله شده به صورت زیر استفاده گردیده است (Henderson-Sellers, 1986):

$$\varepsilon_a = 0.87 - \frac{n}{N} (0.175 - 29.92 \times 10^{-4} e_d) + 2.693 \times 10^{-3} e_d \quad (4)$$

برای $n/N \leq 0.4$

$$\varepsilon_a = 0.84 - \frac{n}{N} (0.1 - 9.973 \times 10^{-4} e_d) + 3.491 \times 10^{-3} e_d \quad (5)$$

برای $n/N \geq 0.4$

معادلات بالا اثرات فشار بخار و مقدار ابرینگی را با یکدیگر ترکیب نموده و برای شرایط هوای ابری و غیر ابری نتایج مناسبی به دست می‌دهد (Henderson-Sellers, 1986). تشعشع موج بلند بازگشتی از سطح آب (Q_{ar}) به صورت زیر حاصل می‌گردد:

$$Q_{ar} = a_a \cdot Q_a \quad (6)$$

که a_a قابلیت انعکاس تشعشع موج بلند سطح آب بوده و معمولاً برابر با ۰/۰۳ فرض می‌گردد (Anderson, 1954).

تشعشع موج بلند گسیل شده از حجم آب (Q_{bs}) از همان فرمول استفاده شده برای محاسبه مقدار Q_a تبعیت می‌کند، با این تفاوت که در اینجا درجه حرارت هوا با درجه حرارت سطح آب (T_0) جایگزین می‌گردد و قابلیت انتشار در عدد $\varepsilon_b = 0.97$ ثابت می‌گردد (Bowie et al., 1985).

بر اساس معادله‌ها و توضیحات ذکر شده مقادیر روزانه پارامترهای مورد نظر محاسبه گردیدند، که مقادیر آنها برای ۱۳ سال دوره آماری مورد نظر (۱۳۸۶-۱۳۷۴) در شکل ۲ ارائه می‌گردد.

برای محاسبه مقدار انرژی ذخیره شده در حجم آبی (Q_x) نیز می‌توان به صورت زیر عمل نمود:

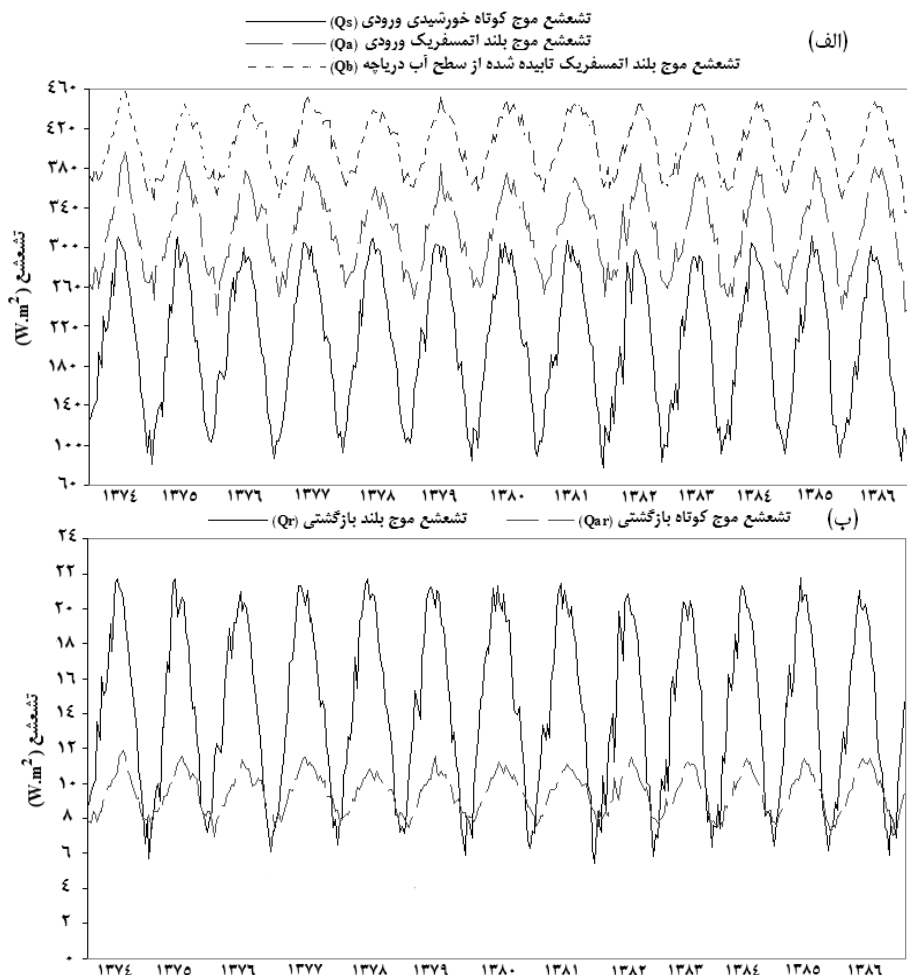
همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد، در بعضی اوقات سال ارتباط خطی مناسبی میان درجه حرارت سطح آب و درجه حرارت هوا وجود ندارد که این عدم تناسب اکثراً در هنگام اختلاط رخ داده و در این اوقات دمای تعادل میان درجه حرارت سطح آب و هوا موجود نمی‌باشد.

بنابراین، می‌توان معادله همبستگی نسبتاً پائین $0/84$ را ناشی از اختلاط در دریاچه دانست که این پدیده اغلب در منطقه در اواسط فصل پاییز رخ می‌دهد.

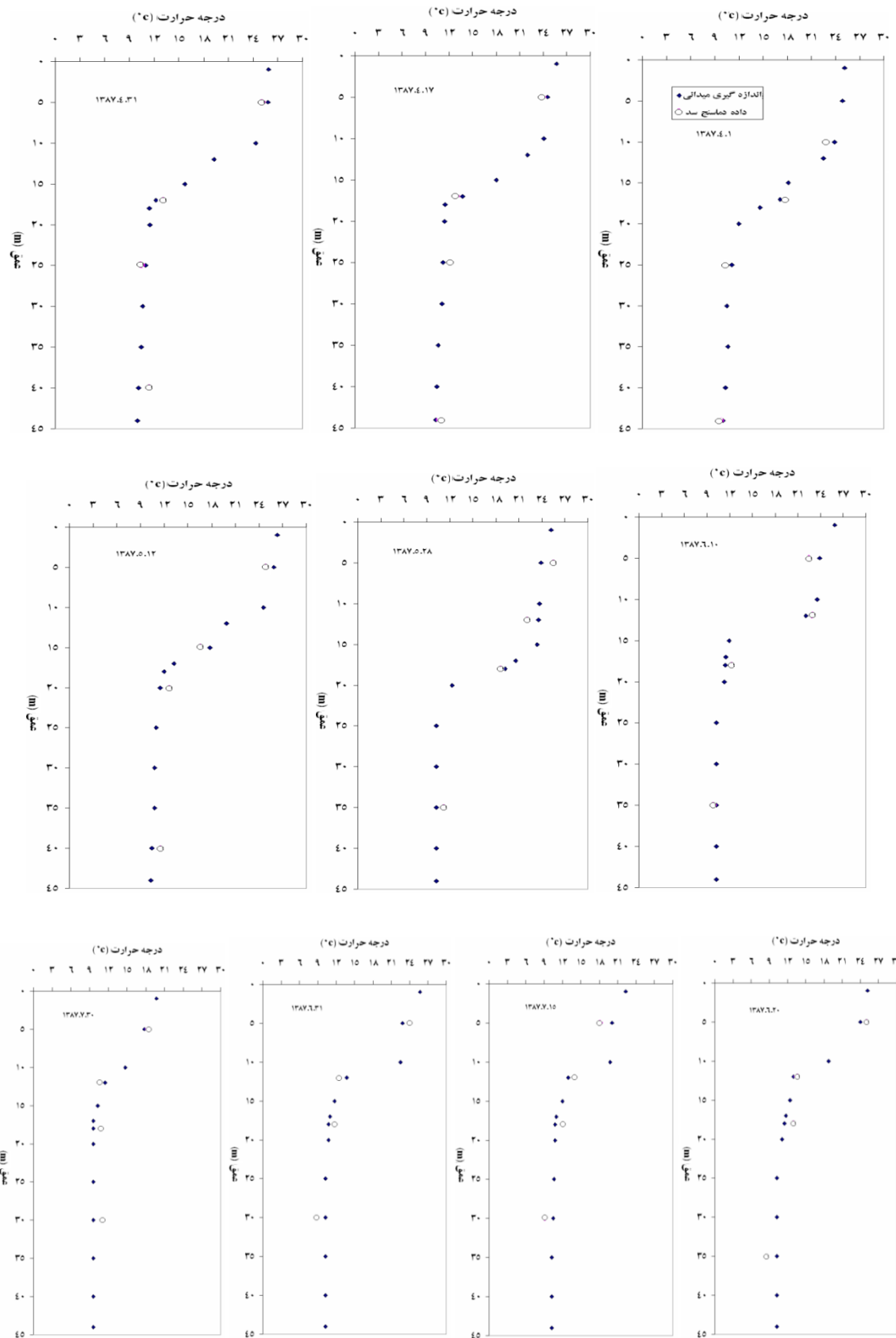
احتمالاً، با حذف داده‌های مربوط به زمان اختلاط در این رابطه ضریب همبستگی نسبت به شرایط موجود بهبود خواهد یافت.

معادله بیلان انرژی، خطای زیادی در نتایج این روش ایجاد نخواهد نمود. بر این اساس، مقادیر مربوط به Q_v و Q_b اغلب بسیار کوچک بوده و معمولاً در مطالعات بیلان انرژی با دقت مناسب در نظر گرفته نمی‌شوند.

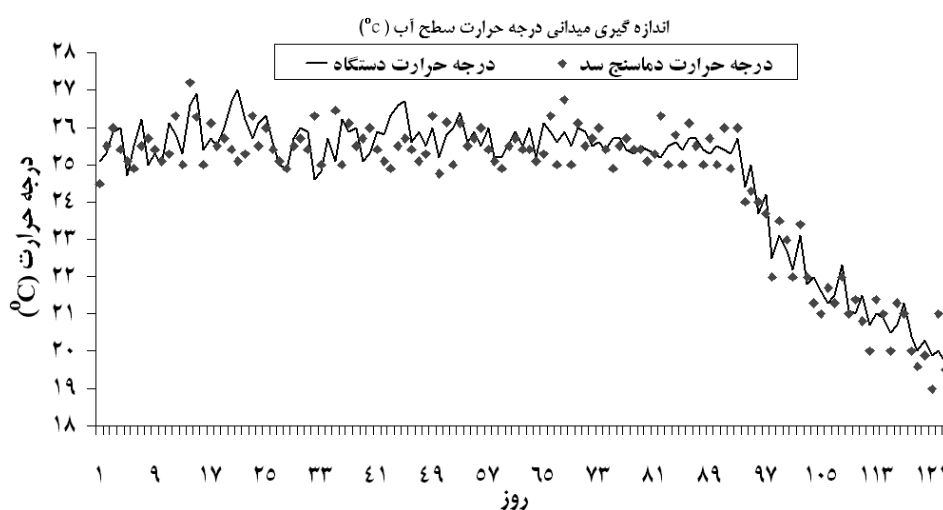
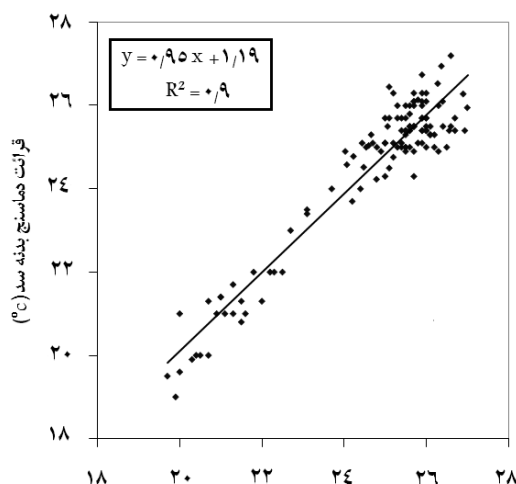
بعد از انجام این مطابقت، داده‌های تقریباً دوهفتگی ساختار حرارتی و روزانه درجه حرارت سطح آب حاصل گردید. معدود روزهایی از ۱۳ سال دوره آماری که در آنها داده‌های درجه حرارت روزانه سطح آب توسط دماسنج بدنه سد ثبت نگردیده و دارای خلاء آماری بود، با برقراری یک رابطه ریاضی میان داده‌های درجه حرارت سطح آب و درجه حرارت هوا (شکل ۵) تغییرات این دو پارامتر در طول دوره مطالعه با هم مقایسه گردید (شکل ۶) و در نهایت داده‌های درجه حرارت سطح آب به صورت روزانه بازسازی گردیدند.



شکل ۲- (الف) تشعشعات موج کوتاه و بلند ورودی (۱۳۷۴-۱۳۸۶)، (ب) تشعشعات موج کوتاه و بلند بازگشتی (۱۳۷۴-۱۳۸۶)



شکل ۳- نمودار مقایسه‌ای اندازه‌گیری میدانی پروفیل حرارتی و داده‌های دماسنج‌های موجود در بدنه سد (تیر لغایت مهر ۱۳۸۷)



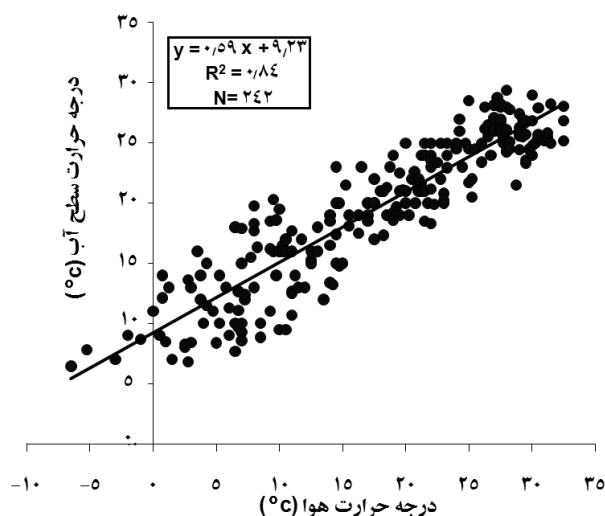
شکل ۴- نمودار مقایسه‌ای اندازه‌گیری میدانی درجه حرارت سطح آب و دمای دماسنج‌های بدنه سد (تیر لغایت مهر ۱۳۸۷)

همچنین، با استفاده از همین روش، ساختار حرارتی دریاچه در بازه‌های زمانی میانگین دو هفتگی به منظور استفاده از روش بیلان انرژی از داده‌های قرائت شده دماسنج‌های موجود در بدنه سد استخراج گردید. به این ترتیب، بازه‌های مورد نظر برای استفاده از روش بیلان انرژی همان بازه‌هایی که پروفیل حرارتی موجود بود در نظر گرفته شد و دوره مطالعاتی به ۵۹۳ بازه بیلان انرژی تقسیم گردید. جهت تعیین مقدار گرمای نهان تبخیر (L) بر حسب ژول بر کیلوگرم می‌توان از معادله زیر بهره گرفت (Orlob, 1981):

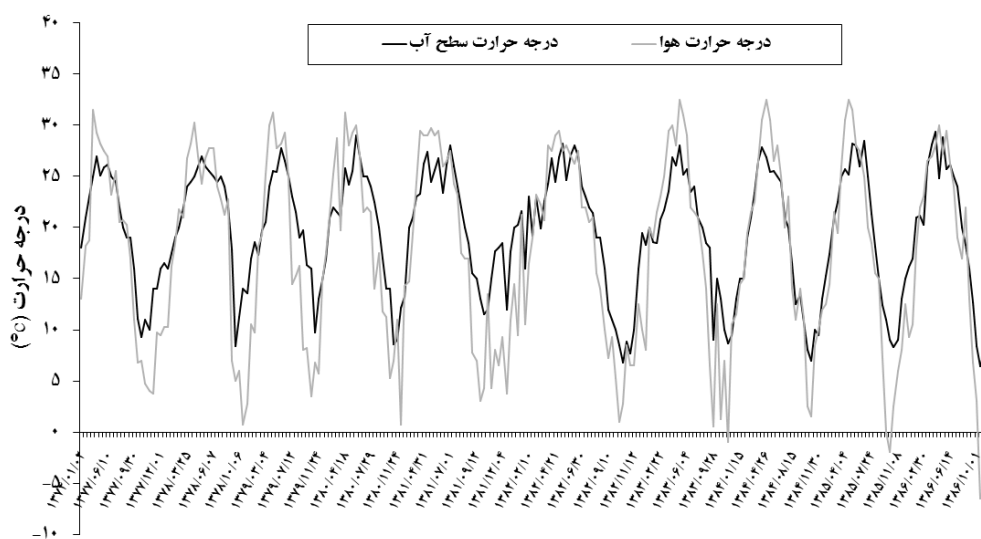
$$L = 2.5 - 0.0024T_0 \quad (8)$$

همچنین، معادله زیر برای تعیین نسبت باون (R) موجود است (Harbeck, 1958):

$$R = \frac{0.61P}{100} \left(\frac{T_0 - T_a}{e_0 - e_a} \right) \quad (9)$$



شکل ۵- نمودار ایجاد شده بین درجه حرارت سطح آب حاصل از دماسنج‌های سد و دمای هوا (۱۳۸۶-۱۳۷۴)



تاریخ شمسی

شکل ۶- تغییرات درجه حرارت سطح آب حاصل از دماسنج‌های بدنه سد و درجه حرارت هوا (۱۳۸۶-۱۳۷۴)

بر این موضوع صحنه می‌گذارد؛ به دلیل آن که با افزایش دمای هوا و سرعت باد در ماه‌های گرم، تبخیر نیز افزایش یافته است؛ حال آنکه، در فصل زمستان این دو عامل و همچنین سایر پارامترهای پراهمیت، مانند تشعشعات و سایر پارامترهای مؤثر در میزان تبخیر به حداقل خود در طول سال می‌رسند.

بر اساس شکل ۸، متوسط تبخیر سالانه تشتک در حدود ۲/۸ متر برآورد می‌گردد، لیکن این میزان نشان‌گر میزان تبخیر از مخزن سد ساوه نمی‌باشد (این تفاوت در مقدار تبخیر از اختلاف در درجه حرارت سطح آب تشتک، سرعت باد و رطوبت نسبی و همچنین ممانعت جداره‌های تشتک از برخورد مستقیم باد به سطح آب ناشی می‌گردد)؛ بلکه بایستی با یافتن یک ضریب تشتک مناسب، آمار تشتک به نحوی به تبخیر از سطح مخزن تبدیل گردند.

۴-۳- نتایج روابط تجربی

در صورت وجود آمار پارامترهای مهم هواشناسی نظیر دما، سرعت باد و رطوبت نسبی هوا، آسان‌ترین و سریع‌ترین روش برای یافتن میزان تبخیر در یک منطقه، استفاده از روابط تجربی می‌باشد. نتایج این روابط با استفاده از آمار ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه به منظور واضح بودن نرخ تبخیر به صورت میانگین ماهانه (برای ۱۳ سال آماری) محاسبه گشته و در شکل ۹ ارائه گردیده‌اند.

در روش‌های مورد استفاده در هر سال آماری از انتهای فصل زمستان و اسفند ماه تا اواسط مرداد ماه میزان تبخیر برای افزایش نشان

که در آن فشار جو e_0 (Kpa)، فشار بخار اشباع در درجه حرارت سطح آب e_a (Kpa)، فشار بخار در درجه حرارت هوا (Kpa) و عدد فاکتور تبدیل فشار به کیلو پاسکال می‌باشد.

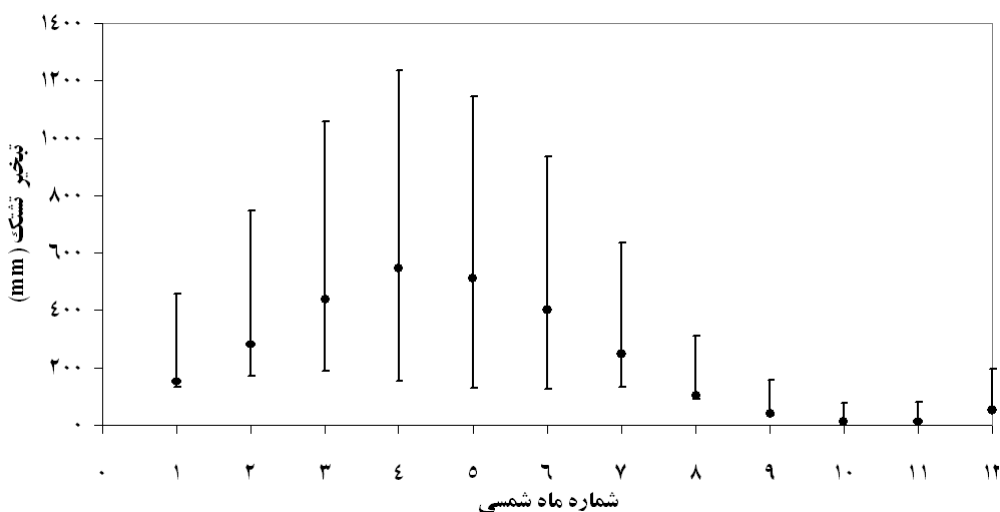
فشار اتمسفریک در محل دریاچه را نیز می‌توان توسط معادله زیر تعیین نمود (Jensen et al., 1990):

$$P = 101.3 \left[\frac{288 - 0.0065H}{288} \right]^{5.257} \quad (10)$$

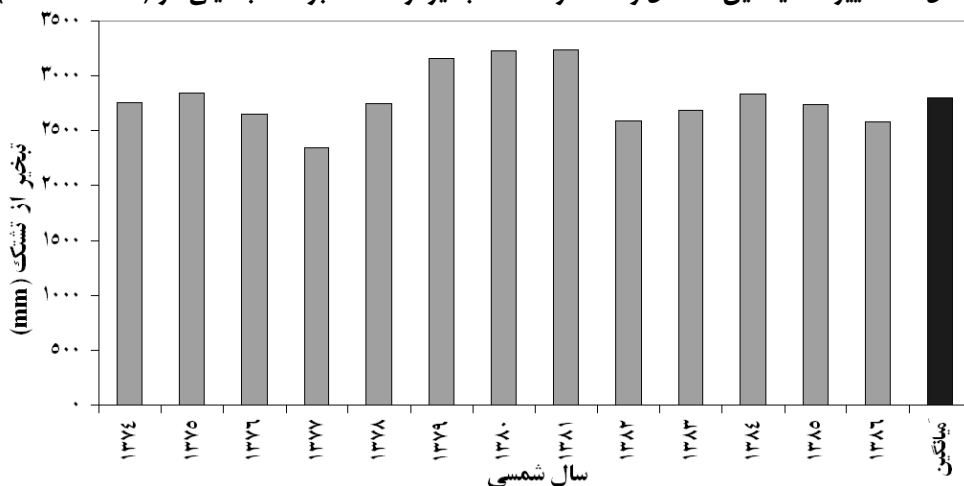
که در آن P فشار اتمسفریک (Kpa) و H ارتفاع محل از سطح دریای آزاد (m) می‌باشد. از آنجا که اندازه‌گیری‌های فشار اتمسفریک در ایستگاه بند شاه عباسی صورت نمی‌گیرد، این پارامتر در محل سد ساوه با استفاده از این فرمول تجربی و با به کار بستن ارتفاع محل دریاچه از سطح آب‌های آزاد (رقوم سطح آب دریاچه سد ساوه در بازه زمانی سال‌های ۱۳۸۶-۱۳۷۴ به‌طور متوسط ۱۱۳۱ متر از آب‌های آزاد بوده است) به‌طور متوسط ۸۸/۴ Kpa در نظر گرفته شده است.

۴-۲- تخمین تبخیر با استفاده از تشتک استاندارد کلاس A

در ایستگاه تبخیرسنجی مستقر در مجاورت سد ساوه (ایستگاه تبخیرسنجی بند شاه عباسی)، یک تشتک تبخیر کلاس A وجود دارد. استفاده از آمار این ایستگاه می‌تواند سبب دانش بیشتر درباره تبخیر منطقه گردد. بر اساس آمار و با توجه به شکل ۷، بیشترین تبخیر ماهانه در تیرماه با مقدار میانگین بلندمدت حدود ۱۸ میلی‌متر در روز و کمترین آن در بهمن ماه با مقدار میانگین بلندمدت کمتر از یک میلی‌متر در روز روی می‌دهد. توزیع پارامترهای اقلیمی دیگر نیز



شکل ۷- تغییرات میانگین، حداقل و حداکثر ماهانه تبخیر از تشتک بر حسب میلی‌متر (۱۳۸۶-۱۳۷۴)



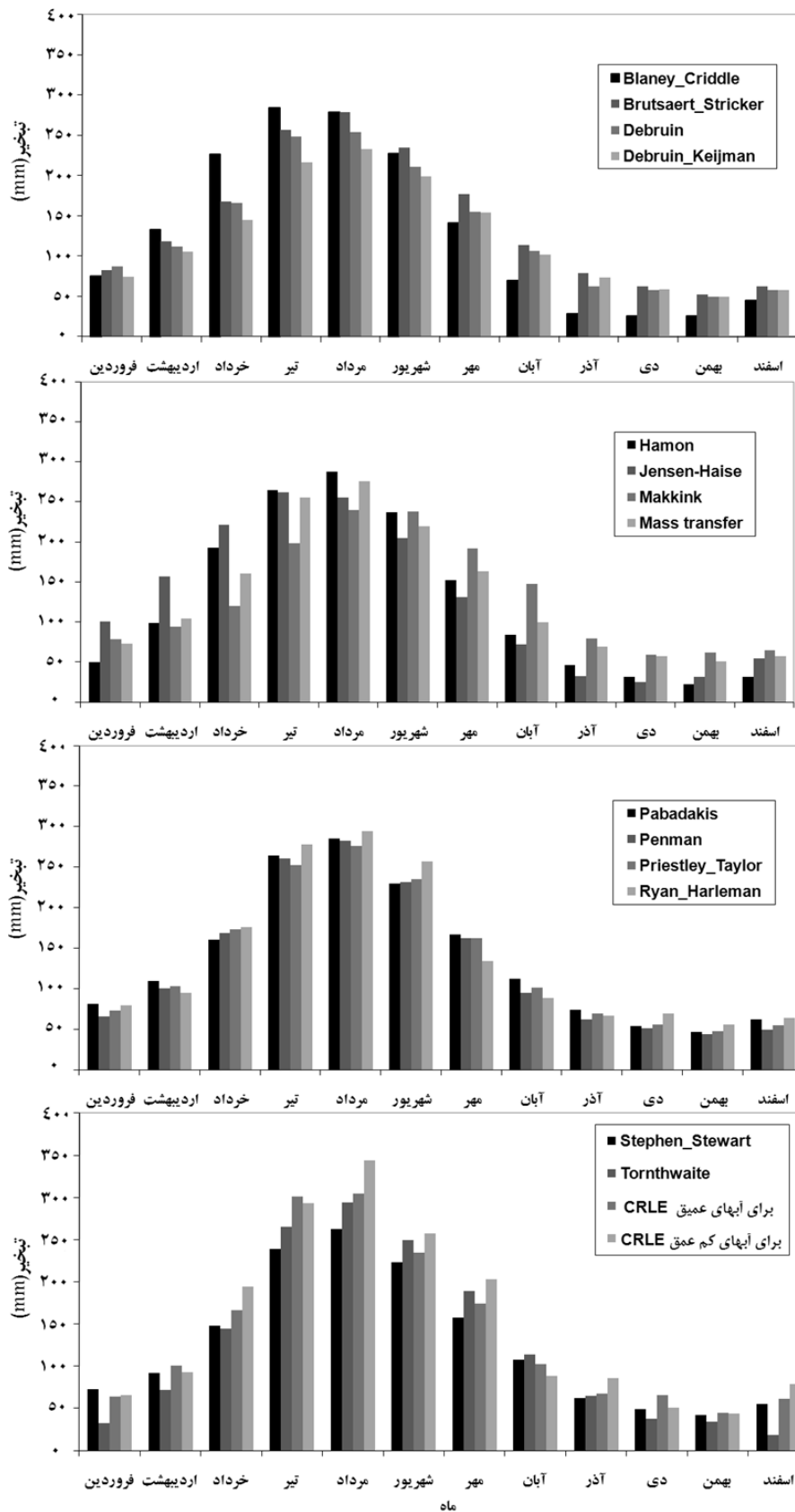
شکل ۸- تغییرات سالانه و میانگین تبخیر از تشتک ایستگاه بند شاه عباسی (mm)

بستر و کناره‌های مخزن سد ساوه نشان از وجود درز و شکاف‌هایی می‌باشد که این لایه‌ها میزان نفوذ و تراوش زیرزمینی از مخزن را محتمل می‌سازند، تا آنجا که صرف‌نظر نمودن از میزان ورودی‌ها و خروجی‌های جریانات زیرزمینی میسر نخواهد بود. اگر چه، با توجه به گذشت سالیان طولانی از بهره‌برداری از مخزن سد، رسوبات نهشته شده بر بستر مخزن تا حدی از تبادلات آب زیرزمینی کاسته‌اند. از طرفی مقدار تعرق برای سطوح آزاد آبی بدون پوشش گیاهان و جلبک‌های آبی در مقایسه با میزان تبخیر بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است. با توجه به نوسانات بسیار زیاد آب مخزن سد و سرریز مداوم آن و همین‌طور تغذیه ماهیان (مخزن سد ساوه دارای کاربری پرورش ماهی در مقیاس نسبتاً وسیع می‌باشد) از محدود گیاهان و جلبک‌های آبی موجود در سطح آب مخزن، عملاً هیچ‌گونه گیاه آبی و جلبک فرصت رشد در مخزن پیدا نخواهد نمود

می‌دهد تا اینکه بیشترین مقدار تبخیر در طول مدت مطالعه ۱۳ ساله به‌طور میانگین در مرداد ماه (با میانگین تبخیر حدود ۲۵۰ میلی‌متر) هر سال رخ می‌دهد و سپس روند کاهشی تبخیر آغاز می‌گردد و این روند در اواسط فصل زمستان و بهمن ماه (با میانگین تبخیر حدود ۴۰ میلی‌متر) به کمترین مقدار خود می‌رسد. نتایج متفاوت از روابط مختلف نشان می‌دهد که هر یک از آنها برای منطقه‌ای با شرایط اقلیمی مشخص قابل کاربرد است.

۴-۴- بیان آبی دریاچه

دانش از مقدار حجم یا ارتفاع بارش در سیستم، میزان خروجی و ورودی سطحی به سیستم، میزان نفوذ و تراوش (ورودی و خروجی زیرزمینی) و تغییرات حجم مخزن در یک دوره زمانی از ضروریات تخمین تبخیر با استفاده از این روش می‌باشد. شرایط ژئوتکنیکی



شکل ۹- تغییرات میانگین ماهانه تبخیر برای روش‌های مورد استفاده در تحقیق برای ۱۳ سال مورد مطالعه (mm)

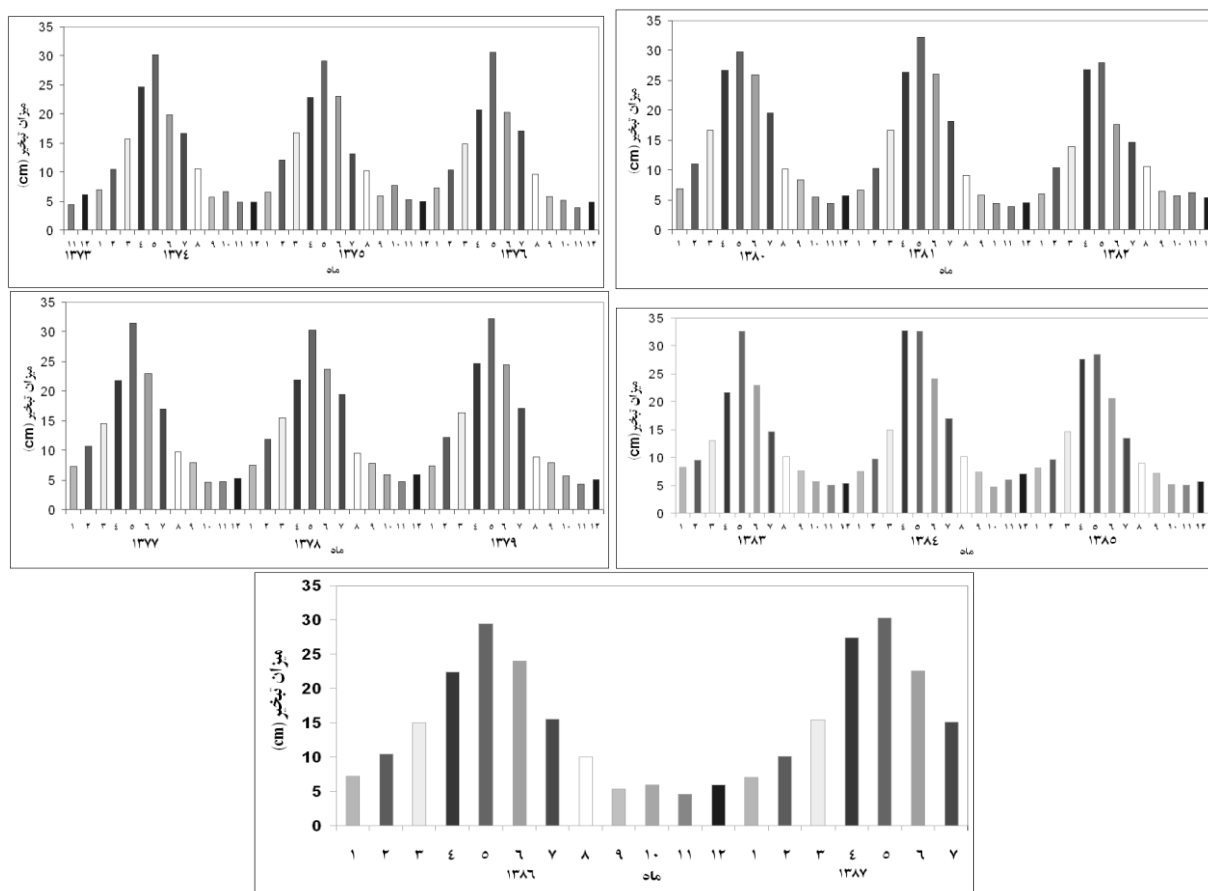
۴-۵- بیان انرژی دریاچه

همان‌طور که بیان شد، روش بیان انرژی نسبت باون (BREB) یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای تخمین میزان تبخیر از سطوح آزاد آبی است. بزرگ‌ترین ایراد این روش، احتیاج آن به داده‌های زیاد و دشوار بودن اندازه‌گیری این داده‌ها می‌باشد. در شکل ۱۰ مقادیر تبخیر ماهانه مخزن سد ساوه با استفاده از این روش بین سال‌های ۱۳۸۶-۱۳۷۴ ارائه گردیده‌اند. با توجه به این شکل می‌توان گفت که الگوی مقادیر ماهانه تبخیر از سالی به سال دیگر متغیر می‌باشد، اما در هر سال کمترین مقدار تبخیر در فصل زمستان (در بهمن ماه) رخ می‌دهد و مقادیر تا تیر ماه افزایش داشته و در ماه مرداد به مقدار پیک خود دست می‌یابد. سپس، تبخیر تا پایان فصل زمستان کاهش می‌یابد. علاوه بر این، میزان تبخیر برای ماه پیک (یعنی مردادماه) نیز از سالی به سال دیگر متفاوت است. برای مثال، بیشترین تفاوت تبخیر برای این ماه بین سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۱ برابر با ۴/۹ سانتی‌متر می‌باشد. میزان تبخیر محاسبه شده توسط روش بیان انرژی برای ۱۳ سال کامل آماری (۱۳۸۶-۱۳۷۴)، به طور میانگین از میزان حداکثر ۷۸/۱ سانتی‌متر در فصل تابستان تا میزان حداقل ۱۵/۸۵ سانتی‌متر در فصل زمستان نوسان دارد.

و میزان تعرق برابر با صفر در نظر گرفته شده است. تنها جریان ورودی سطحی به داخل مخزن، از طریق رودخانه قره‌چای صورت می‌گیرد. خروجی جریانات سطحی نیز به‌طور کلی از طریق دریاچه‌های آبگیر، دریاچه تغذیه توربین‌ها و در مواقع پرآبی از طریق سرریزها صورت می‌پذیرد. خروجی جریانات احتمالی زیرزمینی نیز نشت از بدنه سد و نشت از بستر مخزن را شامل می‌گردد. با این اوصاف می‌توان گفت، روش بیان آبی برای محاسبه میزان تبخیر برای مخزن سد ساوه در اکثر اوقات این پارامتر را با مقداری خطا به‌دست می‌دهد، که دلیل این امر وارد شدن تبادلات جریانات زیرزمینی در مقدار تبخیر می‌باشد. در جدول ۲ مقادیر ماهانه و سالانه بیان آبی مخزن برای ۱۳ سال مورد مطالعه، نمایش داده شده است. میانگین میزان تبخیر با استفاده از این روش در مدت مورد مطالعه ۱۵۵ سانتی‌متر است. در هر صورت، به منظور تصحیح نمودن نتایج این روش و تعیین نمودن سهم تبادلات آب زیرزمینی در مقادیر بیان آبی حاصل، می‌توان با استفاده از نتایج تبخیر، روش دقیقی مانند بیان انرژی و با حل معکوس بیان آبی دریاچه، این سهم را تعیین نمود. این صورت که با استفاده از میزان تبخیر محاسبه شده توسط روش بیان انرژی در معادله بیان آبی مخزن و با مشخص بودن تمامی پارامترهای دیگر بیان آبی به جز مقدار تبادلات آب زیرزمینی، می‌توان میزان این مؤلفه بیان آبی را تخمین زد.

جدول ۲- مقادیر تبخیر ماهانه و سالانه بر اساس بیان آبی مخزن سد ساوه (۱۳۸۶-۱۳۷۴) (mm)

مجموع	اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان	مهر	شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین	
۱۳۷۴	۳۰	۱۹	۳۴	۸۵	۹۰	۱۲۶	۲۳۴	۳۲۱	۳۱۹	۲۲۳	۱۰۱	۷۲	۱۳۷۴
۱۳۷۵	۴۱	۲۶	۳۹	۸۶	۷۲	۱۴۹	۱۸۵	۳۰۰	۲۴۲	۲۲۱	۸۳	۵۲	۱۳۷۵
۱۳۷۶	۴۷	۲۱	۲۶	۴۶	۸۱	۱۵۲	۱۸۷	۲۷۲	۲۴۷	۱۵۲	۱۱۴	۶۴	۱۳۷۶
۱۳۷۷	۴۱	۳۷	۲۲	۵۹	۱۰۷	۱۵۵	۲۰۷	۲۳۳	۲۹۶	۲۴۰	۱۲۴	۱۱۱	۱۳۷۷
۱۳۷۸	۶۳	۲۹	۴۶	۵۱	۶۸	۱۳۱	۱۸۹	۲۳۹	۲۵۷	۲۴۱	۱۳۵	۸۳	۱۳۷۸
۱۳۷۹	۵۴	۳۸	۳۱	۳۷	۵۱	۱۰۵	۲۰۱	۲۳۴	۲۸۰	۲۲۷	۱۷۱	۶۷	۱۳۷۹
۱۳۸۰	۵۰	۲۶	۲۳	۴۰	۶۴	۱۶۴	۲۱۲	۲۵۲	۲۸۴	۲۲۲	۱۵۷	۱۰۵	۱۳۸۰
۱۳۸۱	۵۲	۳۱	۲۶	۴۳	۷۴	۱۵۲	۲۳۱	۲۶۱	۲۷۰	۲۴۰	۱۲۲	۸۴	۱۳۸۱
۱۳۸۲	۴۷	۳۷	۲۹	۳۵	۸۲	۱۳۴	۲۲۵	۲۵۰	۲۷۴	۱۶۴	۱۲۳	۶۹	۱۳۸۲
۱۳۸۳	۵۹	۲۵	۲۰	۴۹	۸۹	۱۴۱	۲۲۱	۲۶۱	۲۴۷	۲۲۵	۱۱۰	۸۹	۱۳۸۳
۱۳۸۴	۴۱	۳۹	۲۹	۷۱	۷۸	۱۵۵	۲۲۹	۲۵۹	۲۸۷	۲۱۳	۱۲۴	۸۱	۱۳۸۴
۱۳۸۵	۵۴	۴۸	۲۳	۲۷	۶۵	۱۰۸	۲۰۹	۲۶۴	۲۹۸	۲۴۲	۱۳۴	۱۰۳	۱۳۸۵
۱۳۸۶	۵۳	۴۱	۳۴	۶۶	۷۱	۱۳۹	۲۱۰	۲۶۲	۲۵۷	۲۵۱	۱۲۹	۷۱	۱۳۸۶
میانگین	۴۹	۳۲	۲۹	۵۳	۷۷	۱۳۸	۲۱۱	۲۶۶	۲۷۴	۲۲۲	۱۲۵	۸۰	



شکل ۱۰- مقادیر تخمینی تبخیر ماهانه مخزن سد ساوه با استفاده از روش بیلان انرژی (۱۳۷۴-۱۳۸۶)

معتبرتر (نظیر بیلان انرژی) و مقایسه نتایج این روش‌ها با مقادیر حاصل از این روش دقیق است. همان‌طور که بیان گردید، از آنجایی که روش بیلان آبی برای سد ساوه دارای خطاهای احتمالی می‌باشد، به‌منظور تخمین زدن ضریب تشک تبخیر برای منطقه از نتایج روش بیلان انرژی استفاده گردید. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، مقدار میانگین تبخیر سالانه با استفاده از روش بیلان انرژی و توسط اندازه‌گیری‌های تشک تبخیر برای ۱۳ سال آماری به ترتیب ۱۵۶/۶ و ۲۸۲/۲ سانتی‌متری باشد که بدین ترتیب ضریب تشک میانگین ۰/۵۶ برای منطقه حاصل می‌گردد.

در هر صورت مطمئناً اعمال نمودن ضریب تشک تبخیر سالیانه به علت نوسان‌های بسیار بالای جوی در منطقه مورد مطالعه و امکان تغییرات بسیار زیاد این ضریب در بازه‌های فصلی و حتی ماهانه، صحیح به نظر نمی‌رسد. از طرفی، نتایج بیلان انرژی مورد استفاده برای واسنجی این ضریب از دقت نسبتاً مناسبی به منظور انجام این امر در بازه‌های ماهانه برخوردار می‌باشند.

با در نظر گرفتن میانگین سالانه تبخیر ۱۶۰/۴ سانتی‌متری برای دوره آماری می‌توان گفت حدود ۴۹٪ تبخیر سالانه از مخزن سد ساوه فقط در سه ماهه فصل تابستان و تنها حدود ۱۰٪ آن در فصل زمستان صورت می‌گیرد، که این امر نشان از وجود تابستان‌های بسیار گرم و خشک و همچنین زمستان‌های سرد و خشک دارد. همچنین، بیشترین میزان تبخیر در بازه‌های بیلان انرژی برای بازه ۱۱ مرداد-۲۷ تیر سال ۱۳۸۴ برابر با ۱۶/۹ سانتی‌متر و کمترین میزان برای بازه ۲۱ بهمن-۹ بهمن سال ۱۳۷۳ برابر با ۱/۱ سانتی‌متر رخ داده است.

۴-۶- مقایسه نتایج روش‌های مختلف با روش بیلان انرژی (BREB)

قضاوت در رابطه با اینکه کدام یک از روش‌های مورد استفاده در این تحقیق به منظور تخمین تبخیر از مخزن سد ساوه مناسب‌تر است (به عبارت دیگر شرایط کدام روش با اقلیم مخزن سد ساوه منطبق‌تر است)، منوط به تعیین میزان دقیق تبخیر با استفاده از روش‌های

جدول ۳- مقادیر تبخیر سالانه روش بیلان انرژی و تشتک تبخیر بر حسب سانتی متر (۱۳۸۶-۱۳۷۴)

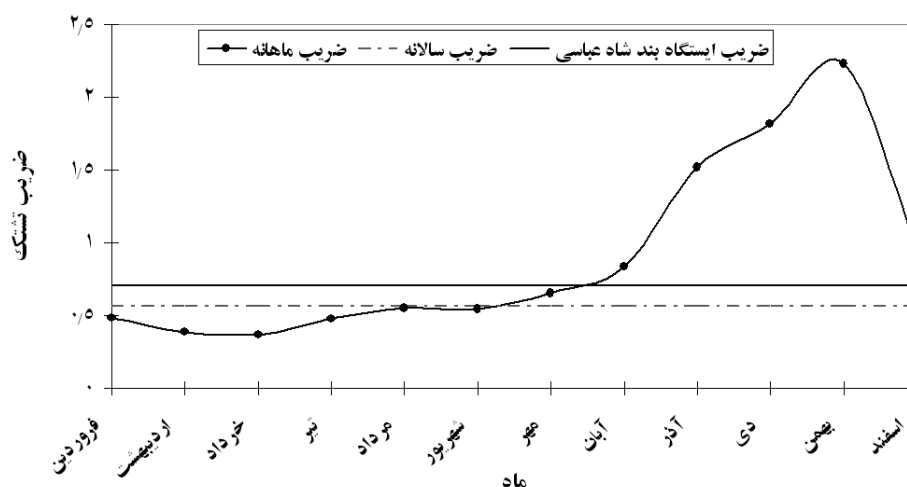
میانگین	۱۳۸۶	۱۳۸۵	۱۳۸۴	۱۳۸۳	۱۳۸۲	۱۳۸۱	۱۳۸۰	۱۳۷۹	۱۳۷۸	۱۳۷۷	۱۳۷۶	۱۳۷۵	۱۳۷۴
بیان انرژی	۱۵۶/۶	۱۵۵/۹	۱۵۷/۷	۱۵۸/۵	۱۴۷/۵	۱۵۱/۶	۱۶۸	۱۶۷/۲	۱۵۷/۹	۱۵۵	۱۵۸/۴	۱۴۵	۱۵۷/۵
تشتک تبخیر	۲۸۲/۲	۲۶۰/۵	۲۷۴/۳	۲۸۴	۲۶۹	۲۶۰	۳۲۴/۵	۳۲۲/۲	۳۱۵/۷	۲۷۵/۴	۲۳۴/۳	۲۷۰	۲۸۷
ضریب تشتک	۰/۵۶	۰/۶	۰/۵۸	۰/۵۶	۰/۵۵	۰/۵۸	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵	۰/۵۶	۰/۶۸	۰/۵۴	۰/۵۴

به عنوان روش استاندارد استفاده شده و نتایج سایر روش‌های موجود تخمین تبخیر با آن مقایسه گردیده است. بر این اساس، در این تحقیق نیز روش بیلان انرژی به عنوان روش استاندارد در نظر گرفته خواهد شد. در شکل ۱۲ مقادیر میانگین ۱۳ ساله تغییرات تبخیر سالانه برای روش‌های مختلف مورد استفاده در تحقیق و روش بیلان انرژی نمایش داده شده که بر این اساس تغییرات از مقدار حداقل ۱۴۵ سانتی‌متر (برای روش Debruin-Keijman) تا مقدار حداکثر ۱۷۵ سانتی‌متر برای روش CRL E آب‌های کم عمق صورت می‌گیرد.

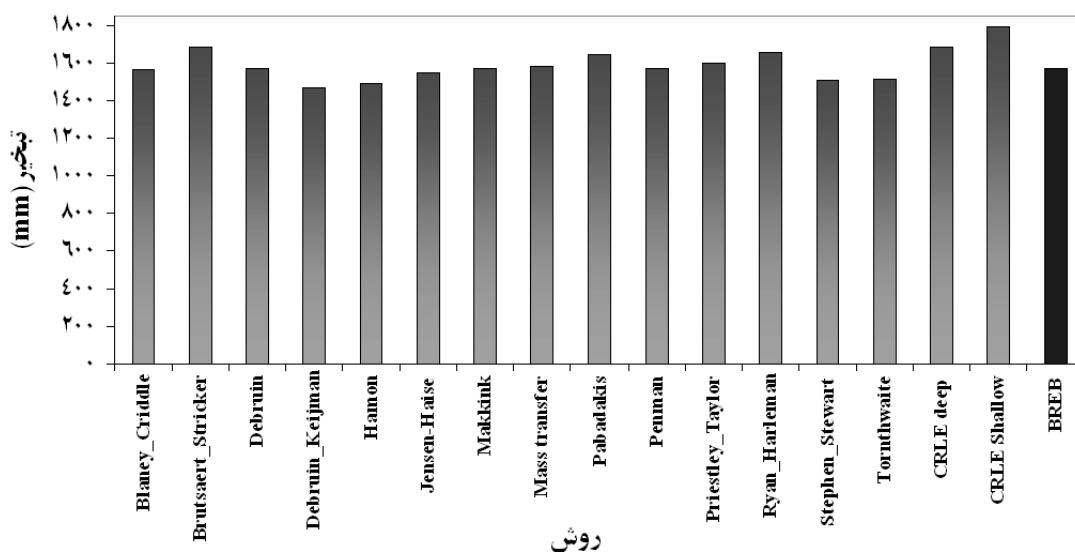
در شکل ۱۳ تفاوت میانگین بلند مدت (۱۳ ساله) ماهانه تبخیر حاصل از هر یک از روش‌های مورد استفاده در تحقیق با نتایج روش بیلان انرژی بر حسب میلی‌متر ارتفاع تبخیر صورت گرفته نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود الگو و مقدار تفاوت‌ها برای روش‌های مختلف با یکدیگر متفاوت می‌باشد. حداکثر تفاوت برای روش Blaney-Criddle در خردادماه با میانگین ۷۰ میلی‌متر و کمترین مقدار در مرداد ماه با تفاوت ۴ میلی‌متر می‌باشد و می‌توان گفت که این روش در ۶ ماهه اول سال مقادیر تبخیر را دست بالا و در ۶ ماهه دوم سال آن را دست پائین تخمین می‌زند.

بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که ضریب مورد استفاده در ایستگاه بند شاه عباسی (ضریب استاندارد ۰/۷ برای تشتک کلاس A) و همچنین ضریب میانگین سالانه حاصل در این مطالعه (ضریب ۰/۵۶) از دقت آنچنان بالایی برخوردار نبوده و بهتر آن است که با واسنجی نتایج تشتک تبخیر با نتایج بیلان انرژی به صورت ماهانه این ضریب را با دقت بیشتر و در مقیاس کوچک‌تر تخمین زد. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۱۱ استفاده از ضریب سالانه ۰/۵۶ فقط برای ۶ ماه اول سال مناسب می‌باشد و در ۶ ماه دوم سال استفاده از این ضریب نتایج نامناسب و با خطای بالا حاصل نموده و حتی در بهمن‌ماه این ضریب به حدود ۲/۲ می‌رسد که غیرمنطقی بودن این ضریب را تا حدودی می‌توان به یخ زدن‌های طولانی مدت آب تشتک تبخیر در ماه‌های سرد سال و در نتیجه کاهش مقدار تبخیر از سطح تشتک دانست. در هر صورت، می‌توان برای ۳ ماهه اول سال ضریب تشتک ۰/۵ و برای ۳ ماهه دوم سال ضریب ۰/۵۵ را پیشنهاد نمود.

روش بیلان انرژی در صورت موجود بودن داده‌های مورد نیاز آن به عنوان بهترین روش تخمین تبخیر از سطوح آزاد آبی به حساب می‌آید. همچنین، در بسیاری از مراجع و مقالات معتبر از این روش



شکل ۱۱- تغییرات میانگین ماهانه و سالانه ضریب تشتک واسنجی شده با روش بیلان انرژی و مقدار مورد استفاده در ایستگاه بند شاه عباسی (۱۳۸۶-۱۳۷۴)

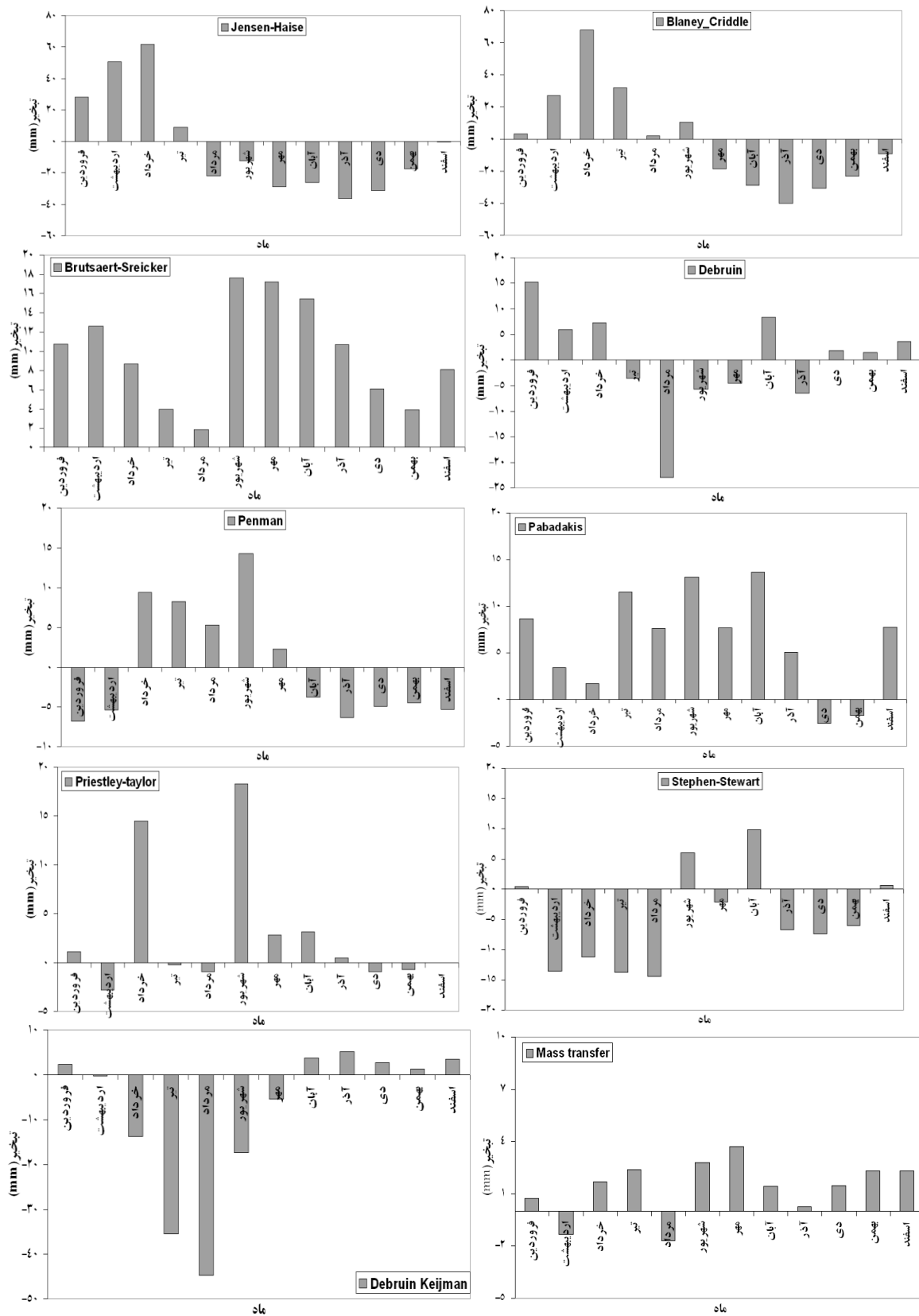


شکل ۱۲- تغییرات میانگین سالانه نتایج روش‌های مختلف مورد استفاده در تحقیق برای ۱۳ سال مورد مطالعه (۱۳۸۶-۱۳۷۴)

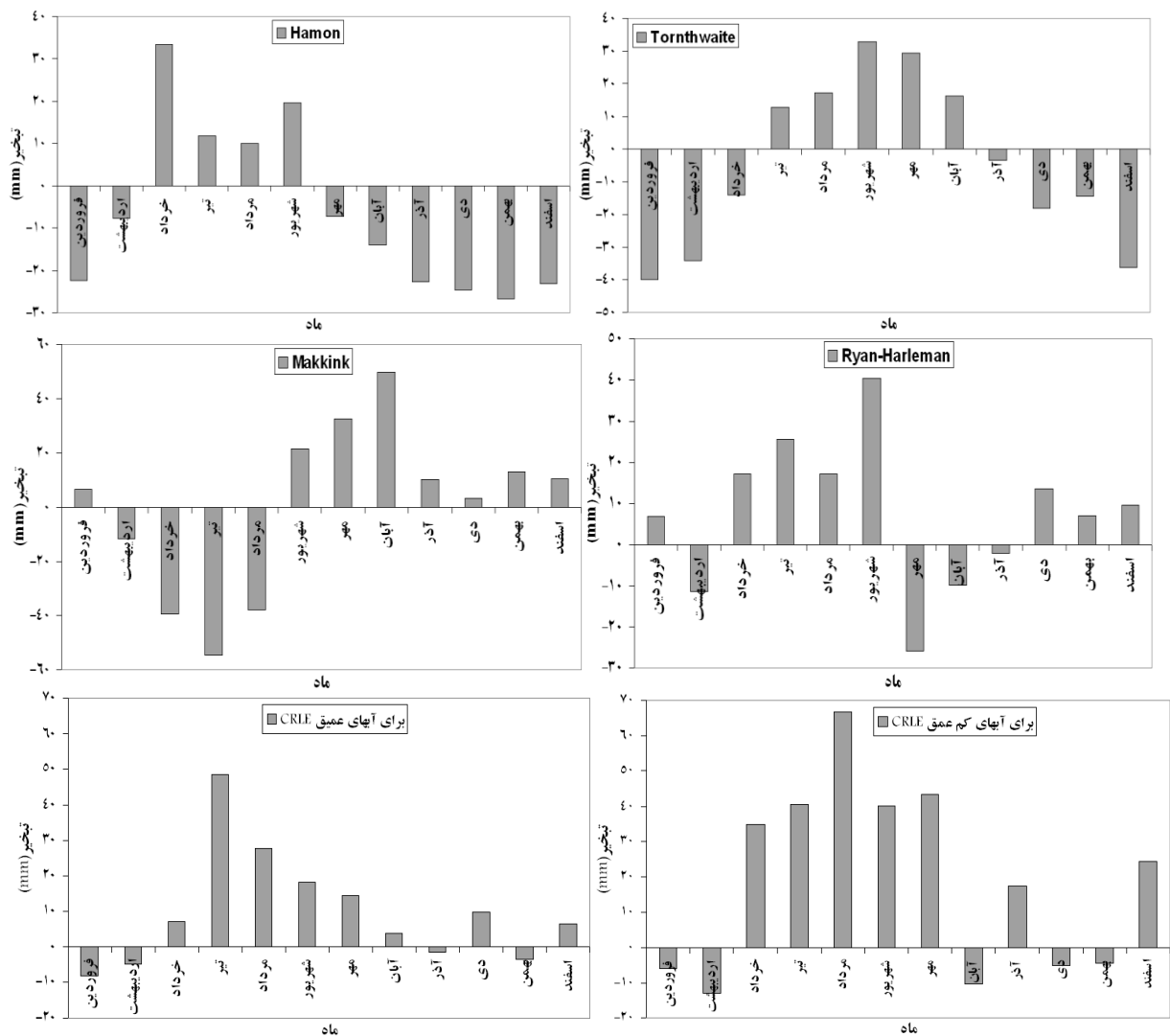
مناسبتی با روش BREB نشان می‌دهد که حداکثر این مقدار تقریباً ۳/۵ میلی‌متر در مهرماه می‌باشد. به طور کلی می‌توان گفت دو روش Pabidakis و Mass transfer به جز در ماه‌های اندک در اغلب اوقات سال میزان تبخیر را نسبت به نتایج روش BREB دست بالا تخمین می‌زند. روش Penman نیز از جمله روش‌های مناسب در مقایسه با روش BREB می‌باشد و به جز انحراف حدود ۱۵ میلی‌متری در شهریور ماه در مابقی اوقات سال مقادیر بسیار نزدیکی با نتایج روش BREB ارائه می‌دهد که این امر نتیجه استفاده از تعداد بسیار زیادی پارامتر از قبیل تشعشعات و درجه حرارت سطح آب و همچنین شباهت بسیار زیاد معادله این روش به روش بیلان انرژی می‌باشد. شاید بتوان گفت که روش Priestley-Taylor یکی از بهترین روش‌های قابل مقایسه و تطابق با روش BREB می‌باشد و همانند روش Penman تنها در دو ماه خرداد و شهریور تفاوت جزئی از خود نشان می‌دهد و در مابقی ماه‌ها دارای انحراف بسیار اندک (میانگین ۳ میلی‌متر) با نتایج روش BREB است. روش‌های Ryan-Harleman، Stephen-Stewart و Thornthwaite نیز تقریباً نتایج مناسبی در اختیار نمی‌گذارند، ولی در این میان روش دوم انحراف ماهانه کمتری از خود نشان می‌دهد و همچنین در میان این ۳ روش به جز روش سوم که هارمونی خاصی در انحرافات از خود بروز داده است (انحراف دست بالا از ابتدای تیر تا انتهای آبان)، دو روش دیگر دارای روند مشخصی در میزان انحرافات نسبت به روش BREB نمی‌باشند. در این مطالعه مدل CRLE برای مخزن سد ساوه در دو حالت با در نظر گرفتن دریاچه سد در حالت عمیق و کم عمق استفاده گردید. نتایج این مدل برای دو حالت دریاچه عمیق و کم عمق تطابق مناسبی با نتایج روش BREB نشان نمی‌دهد و استفاده

می‌توان گفت که در مقایسه با نتایج روش بیلان انرژی، روش Brutsaert-Stricker در تمام ماه‌های مورد مطالعه برآورد دست بالا از مقدار تبخیر ماهانه به دست می‌دهد و این تفاوت در ماه‌های شهریور، مهر و آبان (به ترتیب با تفاوت ۱۸، ۱۷ و ۱۶ میلی‌متر) بیشتر به چشم می‌خورد. دو روش Debruin-Keijman و Debruin روند تغییرات تفاوت تقریباً مشابهی برخوردار هستند که می‌توان علت آن را در شباهت بسیار نزدیک معادلات این دو روش جستجو نمود. به طور کلی می‌توان گفت این دو روش در ماه‌های گرم سال مقدار تبخیر را نسبت به روش بیلان انرژی دست پائین و در ماه‌های سرد سال دست بالا تخمین می‌زنند. در مورد روش Hamon تفاوت در خردادماه با مقدار حدود ۳۵ میلی‌متر بیشترین و در مهرماه با ۷ میلی‌متر کمترین مقدار را دارا است و به‌طور کلی از ابتدای مهرماه تا انتهای اردیبهشت‌ماه روش نتایج دست پائین و در مابقی ماه‌های سال مقدار تبخیر را دست بالا به دست می‌دهد. این روند هارمونیک برای دو روش Jensen-Haise و Makink نیز به چشم می‌خورد ولی با این تفاوت که برای روش اول ماه‌های دارای تخمین دست پایین از ابتدای مرداد تا انتهای اسفند و برای روش دوم از ابتدای اردیبهشت تا انتهای مردادماه می‌باشد و در مابقی ماه‌های سال مقادیر دست بالا برای دو روش حاصل می‌گردد. ضمناً، روش Jensen-Haise بعد از روش Blaney-Criddle بیشترین تفاوت در مقدار تبخیر را در خردادماه با حدود ۶۳ میلی‌متر با روش بیلان انرژی نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه ضریب روش Mass transfer با توجه به نتایج روش بیلان انرژی و انسجی شده است، نتایج این روش تطابق نسبتاً



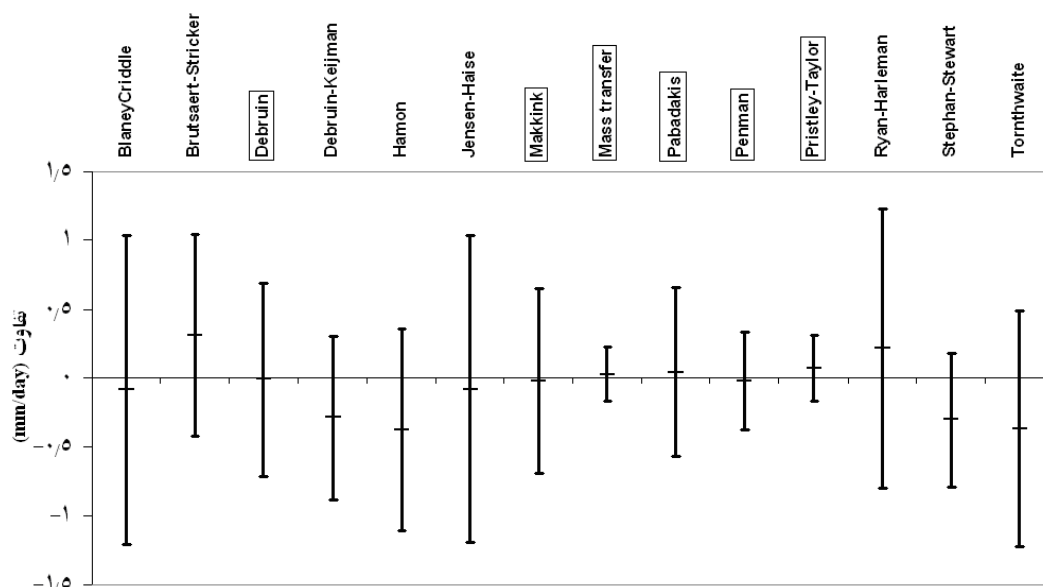
شکل ۱۳ - تفاوت تبخیر ماهانه میان روش‌های مختلف و نتایج روش بیان انرژی بر حسب میلی‌متر



شکل ۱۳- ادامه

بنابر تحلیل‌های صورت گرفته و با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۱۴ و جدول ۴، روش‌های Mass transfer, Penman, Debruin, Priestley-Taylor و Papadakis, Makkink دارای میانگین مقدار ماهانه تبخیر تقریباً برابر با روش BREB می‌باشند، ولی در این میان انحراف معیار روش‌های Penman, Mass transfer و Priestley-Taylor بسیار کوچک بوده و روش‌های ذکر شده دیگر دارای انحراف معیار نسبتاً زیادی هستند. همچنین، علاوه بر مدل CRLE که صلاحیت آن برای محاسبه تبخیر از مخزن سد ساوه رد شد، روش‌های Hamon, Thornthwaite, Ryan-Harleman و نیز دارای انحراف زیادی در مقادیر میانگین و انحراف معیار اختلاف ماهانه نسبت به روش استاندارد مورد استفاده می‌باشند.

از این مدل در مقایسه با روش‌های دیگر مورد استفاده در تحقیق در رده‌های آخر اولویت خواهد بود، ولی در کل می‌توان گفت که نتایج حاصل از مدل برای آب‌های عمیق دارای انحراف کمتری از مدل با فرض در نظر گرفتن دریاچه کم عمق نسبت به روش استاندارد مورد استفاده ارائه می‌دهد. همچنین، این دو مدل در اکثر مواقع سال به طور میانگین تخمین‌های دست بالایی نسبت به نتایج روش BREB به دست می‌دهند که حداکثر انحراف برای مدل آب‌های عمیق حدود ۴۷ میلی‌متر در تیرماه و برای مدل آب‌های کم عمق حدود ۶۸ میلی‌متر برای مردادماه می‌باشد. با توجه به این نتایج می‌توان گفت که در صورت استفاده از مدل CRLE برای دریاچه سد ساوه باید از مدل مربوط به آب‌های عمیق استفاده نمود که با توجه به شرایط مورفولوژی بستر و عمق زیاد مخزن (عمق متوسط حدود ۳۰-۲۵ متر) این نتیجه دور از انتظار نمی‌باشد.



شکل ۱۴- مقایسه میانگین و انحراف معیار ماهانه تبخیر با استفاده از روش‌های مختلف مورد استفاده در تحقیق با روش بیلان انرژی

جدول ۴- مقایسه نتایج روش‌های مورد استفاده با روش بیلان انرژی برای محاسبه تبخیر بین سال‌های ۱۳۸۶-۱۳۷۴

روش	رگرسیون در برابر بیلان انرژی (R^2)	ضریب شیب رگرسیون در برابر بیلان انرژی	نتایج در بازه ۵٪ بیلان انرژی (%)	نتایج در بازه ۱۰٪ بیلان انرژی (%)	نتایج در بازه ۱۵٪ بیلان انرژی (%)	نتایج در بازه ۲۰٪ بیلان انرژی (%)
Blaney-Criddle	۰/۸۸۸	۱/۱۵۸	۱۴/۷	۲۶/۳	۳۸/۵	۴۸/۱
Brutsaert-Stricker	۰/۹۱۹	۰/۹۵۸	۲۲/۸	۴۰/۵	۵۷	۷۲/۸
Debruin	۰/۹۲۶	۰/۹۰۵	۲۶	۴۵	۶۱/۴	۶۹/۶
Debruin-Keijman	۰/۹۷۷	۰/۸۰۱	۳۹/۲	۶۹	۸۳/۵	۹۴/۳
Hamon	۰/۹۴۳	۱/۰۹۸	۲۱/۵	۳۳/۵	۴۷/۵	۵۸/۲
Jensen-Haise	۰/۸۳۹	۰/۹۹۹	۸/۲	۱۹/۶	۳۳/۵	۴۳
Makkink	۰/۹۴۶	۰/۸۲۸	۲۰	۴۳/۷	۶۱/۴	۷۴/۷
Mass transfer	۰/۹۹۴	۰/۹۸۸	۷۸/۵	۹۱/۸	۹۶/۲	۹۸/۷
Pabadakis	۰/۹۴۶	۱	۲۲/۸	۴۳	۶۰/۱	۷۳/۴
Penman	۰/۹۸۷	۱/۰۶۴	۳۲/۹	۶۲	۹۶/۲	۹۹/۴
Pristley-Taylor	۰/۹۹۲	۱/۰۱۶	۲۵/۳	۹۰	۹۸/۷	۹۸/۷
Ryan-Harleman	۰/۹۰۲	۱/۱۳۳	۱۷/۷	۲۹/۷	۴۷/۵	۵۸/۲
Stephan-Stewart	۰/۹۶۷	۰/۹۱۱	۳۳/۵	۵۴/۴	۷۳/۴	۸۶/۱
Tornthwaite	۰/۹۴۱	۱/۱۶۳	۱۱/۴	۲۴/۱	۳۸	۴۵/۶

درصد روش استاندارد را دارد و در مورد بازه‌های ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب روش‌های Priestley-Taylor و Penman مناسب‌ترین روش‌ها می‌باشند.

براساس نتایج ارائه شده در جدول ۴، بیشترین همبستگی با روش BREB در میان روش‌های مورد استفاده برای روش‌های Mass transfer، Priestley-Taylor و Penman مشاهده می‌گردد. همچنین، روش Mass transfer بیشترین مقدار نتایج در بازه ۵

۵- نتیجه گیری

- Geological Survey Professional Paper 269, pp. 71-119.
- Bowie, G., Mills, W., Porcella, D., Campbell, C., Pagenkopf, J., Rupp, G., Johnson, K., Chan, P. and Gherini, S. (1985). Rates, constants and kinetics formulations in surface water quality modeling, EPA/600/3-85/040, Athens, USA.
- Brutsaert, W., (1982). Evaporation In to the Atmosphere: Theory, History and Applications. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.
- Dos Reis, R. and Dias, N. (1998). Multi-season lake evaporation: energy-budget estimates and CRLE model assessment with limited meteorological observations, *Journal of Hydrology*, 208, pp. 135-147.
- Harbeck, G.E. (1958). Water-loss investigations: Lake Mead Studies, U.S.G.S, pp. 100-298.
- Henderson-Sellers, B. (1986). Calculating the surface energy balance for lake and reservoir modeling: a review, *Reviews of Geophysics*, 24 (3), pp. 625-649.
- Jensen, M.E., Burman, R.D. and Allen, R.G., eds. (1990). Evapotranspiration and irrigation water requirements, A.S.C.E. Manuals and Reports on Engineering Practice, 70, 332 p.
- Kamali, G. and Moradi, A. (2004). Solar Radiation, Principles & Applications in the Agriculture and Renewable Energies, Meteorological Institute Publications (Persian).
- Kotsopoulos, S. and Babajimopoulos, C. (1997). Analytical estimation of modified Penman equation parameters, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123 (4), pp. 253-256.
- Lenters, J.D., Kratz, T.K. and Bowser, C.J. (2005), "Effect of climate variability on lake evaporation: Results from a long-term energy budget study of sparkling lake, Northern Wisconsin (USA)". *Journal of Hydrology*, 308, pp. 168-195.
- Orlob, G. (1981). Models for stratified impoundments. In: A. Biswas, Editor, Models for Water Quality Management, McGraw Hill, USA. pp. 273-313.
- Rosenberry, D.O., Winter, T.C., Buso, D.C. and Likens, G.E. (2007). Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA, *Journal of Hydrology*, 340, Pages 149-166.
- Tanny, J., Cohen, S., Assouline, S., Lange, F., Grava, A., Berger, D., Teltch, B. and Parlange, M.B. (2008). Evaporation from a small water reservoir: در این تحقیق میزان تبخیر سالانه و ماهانه از دریاچه سد ساوه (الغدیر) توسط تعدادی از روش‌ها و مدل‌های معتبر و دقیق به مدت ۱۳ سال (۱۳۸۶-۱۳۷۴) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل، میزان تبخیر متوسط سالانه توسط روش بیلان آبی را حدود ۱۵۵ سانتی‌متر به دست می‌دهد. با در نظر گرفتن میانگین سالانه تبخیر ۱۶۰/۴ سانتی‌متری برای دوره آماری توسط روش بیلان انرژی می‌توان گفت حدود ۴۹٪ تبخیر سالانه از مخزن سد ساوه فقط در سه ماهه فصل تابستان و تنها حدود ۱۰٪ آن در فصل زمستان صورت می‌گیرد. مقدار میانگین تبخیر سالانه با استفاده از روش بیلان انرژی و توسط اندازه‌گیری‌های تشتک تبخیر برای ۱۳ سال آماری به ترتیب ۱۵۶/۶ و ۲۸۲/۲ می‌باشد که بدین ترتیب ضریب تشتک میانگین ۰/۵۶ برای منطقه حاصل می‌گردد. در مورد مقادیر تبخیر سالانه روش‌های مختلف مورد استفاده در این تحقیق می‌توان گفت که برای دوره آماری ۱۳ ساله (۱۳۸۶-۱۳۷۴) تغییرات از مقدار حداقل ۱۴۵ سانتی‌متر (برای روش Debruin-Keijman) تا مقدار حداکثر ۱۷۵ سانتی‌متر برای روش CRLE آب‌های کم عمق صورت گرفته است. به طور کلی می‌توان گفت روش‌هایی از قبیل روش Priestley-Taylor دارای میانگین مقدار ماهانه تبخیر تقریباً برابر با روش BREB می‌باشند. همچنین، علاوه بر مدل CRLE که صلاحیت آن برای محاسبه تبخیر از مخزن سد ساوه رد شد، روش‌های Hamon، Thornthwaite و Ryan-Harleman نیز دارای انحراف زیادی در مقادیر میانگین و انحراف معیار اختلاف ماهانه نسبت به روش استاندارد مورد استفاده می‌باشند.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Complementary Relationship Lake Evaporation model
- 2- Bowen Ratio Energy Budget Method

۶- مراجع

مهندسين مشاور جاماب، طرح جامع آب کشور، (۱۳۷۷).

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D. and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, *FAO Irrigation and Drainage Paper*. 56, FAO, Rome, Italy, 300 pp.
- Anderson, E.R. (1954). Energy-budget studies, water-loss investigations: Lake Hefner studies, *US*

- lake in the North Central United States, *Water Resources Research*, 31 (4), pp. 983-993.
- Winter, T., Buso, D., Rosenberry, D., Likens, G., Sturrock, A. and Mau, D. (2003). Evaporation determined by the energy-budget method for Mirror Lake, New Hampshire, *Limnology and Oceanography*, 48 (3), pp. 995-1009.
- Vallet-Coulomb, C., legesse, D., Gasse, F., Travi, Y. and Chernet, T. (2001). Lake Evaporation Estimates in Tropical Africa (Lake Ziway, Ethiopia), *Journal of Hydrology*, 245, pp. 1-18.
- Winter, T.C. and Rosenberry, D.O. (1995). Evaluation of 11 equations for determining evaporation for a Direct measurements and estimates, *Journal of Hydrology*, 351, Pages 218-229.