

تصحیح روش بیلان انرژی تاریخی مخزن سد ساوه (الغدیر) با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی

امین حسنی (کاوناس ارشد)

مسعود تجریشی* (دانشیار)

احمد ابریشم‌چی (استاد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی عمران شریف
دربی ۲-۱۴۹، شماره ۱، ص. ۱۱۵-۱۲۷

در این تحقیق میزان تبخیر سالانه و ماهانه از دریاچه‌ی سد ساوه (الغدیر) با روش بیلان انرژی (BREB) و به مدت ۱۴ سال (۱۳۸۷-۱۳۷۴) مورد تخمین قرار گرفته است. همچنین، به منظور ارزیابی داده‌های دریافتی از ایستگاه مجاور سد (ایستگاه بند شاه عباسی) و حاصل از معادله‌های تجربی، به مدت ۴ ماه در سال ۱۳۸۷ (از ابتدای تیرماه تا انتهای مهرماه) بازه‌ی که تقریباً عمده تبخیر سالانه اتفاق می‌افتد اقدام به استقرار مستقیم دستگاه‌ها و حس‌گرهای دقیق بر روی دریاچه جهت برداشت موازی این داده‌ها شده است. در ادامه، با برقراری ارتباط میان این داده‌های میدانی و داده‌های حاصل از ایستگاه هواشناسی مجاور سد، تمامی داده‌های مورد مطالعه‌ی ۱۴ سال تصحیح و بازسازی شدند و روش بیلان انرژی مجدداً با استفاده از این داده‌ها مدل‌سازی شد. براساس تحلیل حساسیت صورت‌گرفته بر روی نتایج روش بیلان انرژی تصحیح شده (MBREB) می‌توان گفت که میزان تبخیر نسبت به پارامترهایی از قبیل تشعشع اتمسفریک، تشعشع خورشیدی، تشعشع موج بلند بازگشتی، درجه حرارت هوا و سطح آب بسیار حساس است و به تغییرات انرژی ذخیره‌شده در حجم آبی، تشعشعات موج کوتاه و بلند بازگشتی، نسبت باون و فشار اتمسفریک کمیته‌ی حساسیت را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: تبخیر از سطوح آزاد آبی، روش بیلان انرژی، سد ساوه، ایستگاه هواشناسی خودکاد.

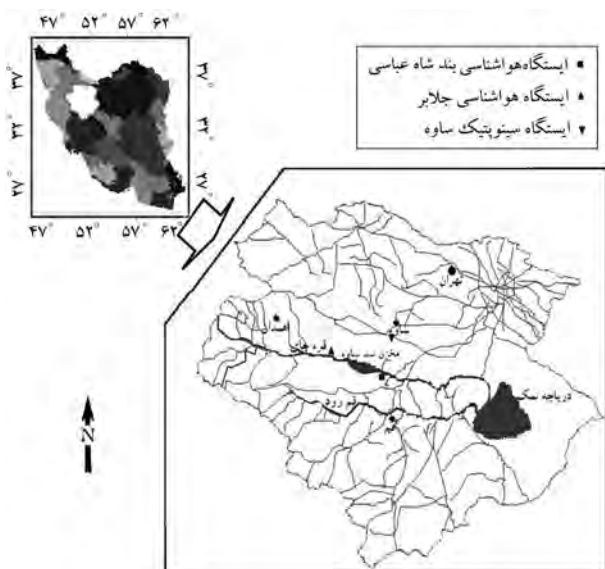
مقدمه

مشکل ایجادشده توسط تلفات آب ذخیره‌شده در دریاچه‌ها و مخازن برای مصارف آبیاری و خانگی توسط تبخیر در ماه‌های فصل تابستان محسوس و چالش‌برانگیز است. با تخمین دقیق میزان تبخیر از سطوح آزاد آبی می‌توان با تحلیل حساسیت تبخیر نسبت به هر یک از پارامترهای مؤثر بر میزان آن به راه‌های کاهش میزان تبخیر اندیشید و از مقدار آب صرفه‌جویی شده، استفاده‌ی مفید کرد. در اغلب موارد، به منظور تخمین دقیق میزان تبخیر حضور دستگاه‌ها و ادوات پیشرفته برای اندازه‌گیری پارامترهای مورد نیاز و دقیق مورد احتیاج است و پیشنهاد می‌شود این دستگاه‌ها تا حد امکان بیانگر و نماینده‌ی شرایط واقعی محیط آبی باشند. با این حال، فقط در تعداد اندکی از مطالعات، ایستگاه اندازه‌گیری توسط شناور در دریاچه مستقر شده است، که این محل مناسب‌ترین محل برای جمع‌آوری داده‌های اقلیمی برای تخمین تبخیر است.^[۱] تخمین تبخیر با استفاده از روش بیلان انرژی به‌منزله‌ی یکی از دقیق‌ترین روش‌ها به‌منظور پایش طولانی‌مدت و پیوسته‌ی میزان تبخیر است.^[۲] این روش از زمانی که Schmidt آن را در سال ۱۹۱۵ ارائه

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۱/۱۱/۱۳۸۹، اصلاحیه ۲۵/۰۵/۱۳۹۰، پذیرش ۱۹/۰۶/۱۳۹۰.

aminh85@yahoo.com
tajrishy@sharif.edu
abrisham@sharif.edu



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه.

متغیر است. در شکل ۱، موقعیت مخزن سد ساوه (الغدیر) نشان داده شده است.

مواد و روش‌های مورد استفاده

به‌طور کلی، بیلان انرژی یک حجم آبی، که انتقال انرژی خالص ورودی و خروجی را به تغییرات ذخیره‌ی انرژی مرتبط می‌سازد، به‌صورت رابطه‌ی ۱ بیان می‌شود:^[۱]

$$Q_s - Q_r + Q_a - Q_{ar} - Q_{bs} + Q_v - Q_e - Q_h - Q_w + Q_b = Q_x \quad (1)$$

در این رابطه، Q_s تشعشع موج کوتاه ورودی، Q_r تشعشع موج کوتاه بازگشتی، Q_a تشعشع موج بلند ورودی، Q_{ar} تشعشع موج بلند بازگشتی، Q_{bs} تشعشع موج بلند گسیل‌شده از حجم آب، Q_v انرژی خالص همرفت‌یافته به حجم آب، Q_e انرژی استفاده‌شده برای فرایند تبخیر، Q_h انرژی گسیل‌شده از آب به‌صورت گرمای ظاهری، Q_w انرژی همرفت‌یافته از حجم آبی توسط آب تبخیرشده، Q_b حرارت منتقل‌شده از رسوبات بستر دریاچه به آب و Q_x تغییر در محتوای انرژی حجم آبی هستند و همگی برحسب وات بر متر مربع ($W.m^{-2}$) بیان می‌شوند. از این میان سه پارامتر Q_h ، Q_e و Q_w مستقیماً محاسبه نمی‌شوند و می‌توان آن‌ها را با استفاده از رابطه‌های ۲ الی ۴ و به‌منزله‌ی تابعی از میزان تبخیر تعیین کرد:^[۵]

$$Q_e = \rho E_{eb} L \quad (2)$$

$$Q_h = R Q_e \quad (3)$$

$$Q_w = \rho c E_{eb} (T_e - T_b) \quad (4)$$

در این روابط، ρ چگالی آب تبخیرشده برحسب کیلوگرم بر مترمکعب، E_{eb} میزان تبخیر حاصل از روش بیلان انرژی برحسب سانتی‌متر در روز، L گرمای نهان تبخیر آب ($J.Kg^{-1}$)، R نسبت باون (بدون بعد)، c گرمای مخصوص آب (برحسب $J.Kg^{-1}.^{\circ}K^{-1}$)، T_e درجه‌ی حرارت آب تبخیرشده که برابر با درجه‌ی حرارت سطح آب (T_o) فرض می‌شود (برحسب درجه‌ی سلسیوس) و T_b درجه‌ی حرارت

مطالعه‌ی مفصلی در سال ۲۰۰۵ شامل تحلیل ۱۰ ساله به‌صورت تغییرات فصلی، برون فصلی و درون سالی بر روی میزان تبخیر دریاچه‌ی Sparkling واقع در شمال ایالات متحده‌ی امریکا انجام شد که بعد از انجام آن بیان شد که روش بیلان انرژی بهترین روش موجود برای تخمین میزان تبخیر از سطوح آزاد آبی است.^[۶]

به‌عنوان یک تحقیق و مطالعه‌ی طولانی‌مدت در سال ۲۰۰۷ برای هیدرولوژی دریاچه‌ی میرو، در شش فصل آبی و برای ۳۷ ماه به مقایسه‌ی ۱۵ روش متفاوت تبخیر با روش بیلان انرژی به‌عنوان روش استاندارد پرداختند. این مطالعه‌ی شش‌ساله این فرصت را در اختیار قرار داد تا روش‌های تخمین تبخیر که ارزش‌تراست و به نیروی انسانی کمتری احتیاج دارند، بسته به اطلاعات و منابع در دسترس برای دریاچه‌ی موردنظر، شناسایی شوند.^[۷]

متأسفانه، در کشور ما با وجود اهمیت و ارزش فوق‌العاده‌ی منابع و مخازن آبی تاکنون مطالعه‌ی دقیق میزان تلفات تبخیر از سطوح آزاد آبی با استفاده از روش بیلان انرژی انجام نشده است. در حالی‌که با وجود پیشرفت‌های چشم‌گیر در عرصه‌ی فناوری حس‌گرها و همچنین با بهره‌گیری از تجربیات پژوهشگران دیگر می‌توان به‌طور دقیق و مورد اطمینان بیشتری به محاسبه‌ی میزان نسبت باون، که تغییرات سریع‌گردان درجه‌ی حرارت و فشار بخار بر روی سطح آب به شدت آن را متأثر می‌سازد، اقدام کرد. همچنین، می‌توان با انجام مقایسه‌ی میان روش‌های تجربی مختلف با نتایج یک روش استاندارد دقیق همانند روش بیلان انرژی عدم قطعیت‌های مربوط را ارزیابی و حذف کرد. بنابراین، درک و توسعه‌ی روش‌های دقیق همانند بیلان انرژی برای دامنه‌ی وسیعی از شرایط اقلیمی و موقعیت‌های جغرافیایی مطلوب به‌نظر می‌رسد. بدین منظور در مطالعه‌ی حاضر با استفاده از داده‌های موجود و در مواردی استفاده از روابط تجربی، روش بیلان انرژی جهت تخمین میزان تبخیر از مخزن سد ساوه (الغدیر) بین سال‌های ۱۳۸۶-۱۳۷۴ به‌کار گرفته شده است.

شرایط اقلیمی و موقعیت جغرافیایی محدوده‌ی مطالعات

دریاچه‌ی سد ساوه (الغدیر) در دره‌ی وفرقان، حدود ۲۵ کیلومتری جنوب غربی شهر ساوه با طول و عرض جغرافیایی به‌ترتیب ۵۰ درجه و ۳۱ دقیقه و ۳۵ درجه و ۱۰ دقیقه، بر روی رودخانه‌ی قره‌جای ایجاد شده است. سطح حوضه‌ی آبریز این سد ۱۷۸۰۰ کیلومتر مربع است و محل احداث سد ۲۶۰ کیلومتر از سرچشمه‌ی رودخانه‌ی قره‌جای فاصله دارد. دریاچه‌ی این سد در رقوم پر حدود ۹ کیلومتر مربع مساحت و در رقوم بستر ۱۰۸۰ متر از سطح آب‌های آزاد ارتفاع دارد. ایستگاه تبخیرسنجی بند شاه‌عباسی با ارتفاع ۱۰۸۰ متر از سطح آب‌های آزاد دقیقاً در مجاورت مخزن سد ساوه واقع شده است. این ایستگاه در سال ۱۹۶۷ میلادی (۱۳۴۵ شمسی) تأسیس شده است و از همان زمان داده‌های اقلیمی از جمله درجه‌ی حرارت بیشینه، کمینه، خشک و مرطوب، رطوبت نسبی، سرعت باد، بارندگی و تبخیر از تشتک کلاس A را ثبت و گزارش می‌کند. براساس سیستم اقلیمی دومازن اصلاح‌شده، محدوده‌ی ایستگاه بند شاه‌عباسی دارای اقلیم خشک و در سیستم طبقه‌بندی سیلیانینف، که براساس ضریب هیدرومتریک انجام می‌شود، اقلیم خشک معتدل دارد.^[۸] میانگین بارندگی منطقه بین سال‌های ۱۳۸۶-۱۳۷۴ برابر ۲۳۰ میلی‌متر و درجه‌ی حرارت ماهانه‌ی میانگین آن بین ۴/۹ درجه‌ی سانتی‌گراد در دی ماه و ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در ماه مرداد

انتهای مهرماه سال ۱۳۸۷ با دستگاه ایستگاه هواشناسی خودکار و مستقر روی دریاچه اندازه‌گیری شد، که نمودار مقایسه‌ی میان این دو سری داده در شکل ۲ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در برخی روزها تفاوت نسبتاً زیادی میان دو سری داده موجود است. در هر صورت همان‌طور که بیان شد، داده‌های درجه حرارت هوای دریافتی از بند شاه‌عباسی فقط دو بار در روز ثبت و میانگین‌گیری می‌شوند که با توجه به شرایط اقلیمی منطقه‌ی مورد مطالعه و نوسانات محسوس درجه حرارت در طول روز، درجه حرارت گزارش شده تا حدودی با درجه حرارت ثبت شده توسط ایستگاه هواشناسی خودکار که در هر ثانیه اندازه‌گیری و میانگین‌گیری روزانه می‌شود، از نظر دقت متفاوت خواهد بود.

همچنین، به‌منظور بازبینی داده‌های دریافتی رطوبت نسبی هوا از ایستگاه بند شاه‌عباسی، با دستگاه ایستگاه هواشناسی خودکار و مستقر روی دریاچه به‌صورت همزمان داده‌های روزانه‌ی این پارامتر با دقت بالا و به‌مدت ۴ ماه از ابتدای تیرماه تا انتهای مهرماه سال ۱۳۸۷ اندازه‌گیری شد، که نمودار مقایسه‌ی میان این دو سری داده در شکل ۳ ارائه شده است. تفاوت مربوط به داده‌های رطوبت نسبی میان اندازه‌گیری‌های صورت‌گرفته در ایستگاه بند شاه‌عباسی و ایستگاه خودکار تا ۱۰٪ نیز می‌رسد، که دلیل این امر را می‌توان در دو موضوع جستجو کرد. اول اینکه داده‌های رطوبت نسبی دریافتی از ایستگاه بند شاه‌عباسی از طریق جدول‌های مربوط با به‌کار بستن داده‌های درجه حرارت دماسنج‌های تر و خشک حاصل شده است که این امر باعث بروز خطای قابل ملاحظه‌ی خواهد شد و دوم اینکه ایستگاه خودکار مورداستفاده دقیقاً بر روی دریاچه مستقر است و داده‌های رطوبت نسبی حاصل

پایه‌ی اختیاری که اغلب برابر با صفر فرض می‌شود. به این ترتیب، برای محاسبه‌ی میزان تبخیر با استفاده از روش بیلان انرژی برای یک بازه‌ی زمانی معین معادله‌ی ۱ به‌صورت معادله‌ی ۵ در خواهد آمد: [۵]

$$E_{eb} = \frac{Q_s - Q_r + Q_a - Q_{ar} - Q_{bs} + Q_v + Q_b - Q_x}{L(1 + R) + T} \quad (5)$$

مؤلفه‌های بیلان انرژی و کیفیت داده‌ها

تقریباً تمامی داده‌های تاریخی موردنیاز این تحقیق به‌صورت روزانه از ایستگاه بند شاه‌عباسی و تعداد اندکی (همانند تعداد ساعات واقعی روشنایی روز و درجه‌ی حرارت نقطه‌ی شبنم) نیز از ایستگاه سینوپتیک ساوه تهیه شده‌اند و همچنین از این داده‌ها با استفاده از روابط تجربی معتبر موجود برای محاسبه‌ی داده‌های روزانه‌ی تشعشع خورشیدی و تشعشع اتمسفریک استفاده شده است. برای ارزیابی این داده‌ها، یک ایستگاه مجهز هواشناسی نیز در محل سد به مدت ۴ ماه (از ابتدای تیرماه تا انتهای مهرماه سال ۱۳۸۷) مستقر شد که در جدول ۱ مشخصات این دستگاه‌ها و حس‌گرها ارائه شده است. همچنین، در مدت مطالعه‌ی ۴ ماهه از آنجا که دستگاه اندازه‌گیری مدت زمان روشنایی روز در اختیار نبود، داده‌های روزانه مربوط به این پارامتر از ایستگاه سینوپتیک ساوه دریافت شده است. در جدول ۲ نیز مختصراً نحوه و محل برداشت داده‌های موردنیاز ارائه شده است.

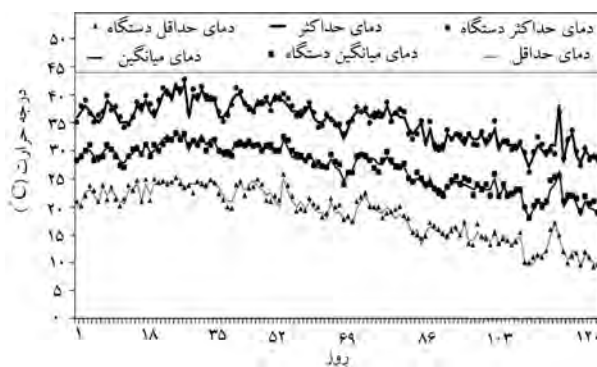
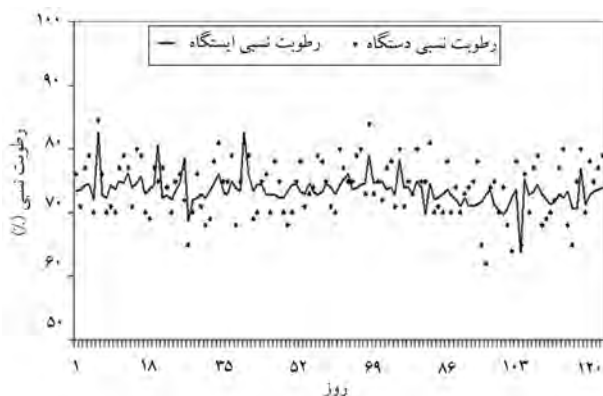
به‌منظور ارزیابی داده‌های دریافتی از ایستگاه بند شاه‌عباسی، همزمان داده‌های روزانه‌ی درجه‌ی حرارت هوا با دقت بالا و به‌مدت ۴ ماه از ابتدای تیرماه تا

جدول ۱. مشخصات دستگاه‌ها و حس‌گرهای دقیق مستقر در محل دریاچه‌ی سد ساوه.

نام دستگاه	محل استقرار یا استفاده	ارتفاع نصب یا استفاده	نوع استفاده	بازه‌ی زمانی اندازه‌گیری
دستگاه اندازه‌گیری تشعشع خالص مدل CNR ₁ (Kipp & Zonen)	ایستگاه هواشناسی بند شاه‌عباسی (۵۰۰ متری شمال مخزن)	در ارتفاع حدود ۱٫۵ متر از سطح زمین	تشعشع خالص (تشعشع کل) در سطح زمین	ثبت در هر دقیقه و سپس محاسبه‌ی مقادیر ساعتی و روزانه
دستگاه ثبت داده مدل Solrad (Kipp & Zonen)	ایستگاه هواشناسی بند شاه‌عباسی (۵۰۰ متری شمال مخزن)	—	ثبت داده‌های دستگاه اندازه‌گیری تشعشع خالص	پردازش داده‌ها در بازه‌های اندک (هر ۲ ثانیه)
دستگاه اندازه‌گیری نمک محلول و نمک‌های محلول و درجه‌ی حرارت (Hatch)	در چند نقطه از مخزن سد ساوه	از سطح آب تا عمق ۲۰ متری و در بازه‌های ۵-۲ متری	اندازه‌گیری مقدار نمک محلول در آب دریاچه	هفتگی و میانگین‌گیری ماهانه
درجه حرارت	در چند نقطه از مخزن سد ساوه	از سطح آب تا عمق ۲۰ متری و در بازه‌های ۵-۲ متری	اندازه‌گیری درجه حرارت سطح آب و پروفیل حرارتی دریاچه	اندازه‌گیری روزانه درجه‌ی حرارت سطح آب و هفتگی پروفیل حرارتی
ثبت داده Babuc ABC	روی مخزن سد ساوه	—	ثبت داده‌های مربوط به سنسورهای ایستگاه هواشناسی خودکار	توانایی برنامه‌ریزی در بازه‌های یک دقیقه‌ی تا ۲۴ ساعت
ایستگاه هواشناسی خودکار (Lastem)	روی مخزن سد ساوه	ارتفاع ۲ متری	اندازه‌گیری سرعت و جهت باد	اندازه‌گیری دقیقه‌ی و میانگین‌گیری روزانه
فشارسنج	روی مخزن سد ساوه	ارتفاع ۲ متری	اندازه‌گیری فشار اتمسفریک منطقه	اندازه‌گیری دقیقه‌ی و میانگین‌گیری روزانه
دماسنج و رطوبت سنج	روی مخزن سد ساوه	ارتفاع ۲ متری	اندازه‌گیری درجه‌ی حرارت میانگین، کمینه، بیشینه و رطوبت نسبی هوا	اندازه‌گیری دقیقه‌ی و میانگین‌گیری روزانه

جدول ۲. مشخصات داده‌های ثبت شده توسط دستگاه‌های دقیق مستقر در محل دریاچه‌ی سد ساوه.

پارامتر	بازه‌ی اندازه‌گیری		محل یا نحوه‌ی اندازه‌گیری	
	داده‌های طولانی مدت	داده‌های ۴ ماهه	داده‌های طولانی مدت	داده‌های ۴ ماهه
درجه‌ی حرارت و رطوبت نسبی هوا	۲ بار در روز و میانگین‌گیری روزانه	هر ثانیه یک بار و میانگین‌گیری روزانه	ایستگاه هواشناسی خودکار موجود در ساحل دریاچه‌ی سد	ایستگاه هواشناسی خودکار موجود در ساحل دریاچه‌ی سد
فشار اتمسفریک	—	هر ثانیه یک بار و میانگین‌گیری روزانه	استفاده از روابط تجربی	ایستگاه هواشناسی موجود در ساحل دریاچه‌ی سد
سرعت باد	۲ بار در روز و میانگین‌گیری روزانه	هر ثانیه یک بار و میانگین‌گیری روزانه	ایستگاه بند شاه‌عباسی	ایستگاه هواشناسی خودکار موجود در ساحل دریاچه‌ی سد
تشعشعات	روزانه	هر دقیقه یک بار و میانگین‌گیری روزانه	استفاده از روابط تجربی	دستگاه‌های اندازه‌گیری تشعشعات مستقر در ایستگاه بند شاه‌عباسی
پروفیل حرارتی دریاچه	دوهفتگی	دوهفتگی	استفاده از دماسنج‌های موجود در بدنه‌ی سد	استفاده از دماسنج و عملیات میدانی
درجه‌ی حرارت سطح آب دریاچه	دو هفتگی و سپس بازسازی با استفاده از داده‌های روزانه درجه حرارت هوا	روزانه	استفاده از دماسنج‌های موجود در بدنه سد	استفاده از دماسنج و عملیات میدانی
کل نمک محلول (TDS)	ماهانه	دوهفتگی	در محل ورودی آب رودخانه‌ی قره‌چای به مخزن	هم‌زمان با اندازه‌گیری پروفیل حرارتی دریاچه در هر عمق این پارامتر قرانت و سپس میانگین‌گیری می‌شد
ساعات روشنایی روز	روزانه	روزانه	ایستگاه سینوپتیک ساوه	ایستگاه سینوپتیک ساوه



شکل ۳. مقایسه‌ی تغییرات روزانه‌ی رطوبت نسبی هوا با استفاده از داده‌های ایستگاه بند شاه‌عباسی و دستگاه خودکار (تیر لغایت مهر ۱۳۸۷).

شکل ۲. تغییرات روزانه‌ی داده‌های درجه حرارت میانگین، بیشینه و کمینه‌ی هوا برای داده‌های ۴ ماهه‌ی بند شاه‌عباسی و ایستگاه هواشناسی خودکار (تیر لغایت مهر ۱۳۸۷).

و جلوگیری از انتقال بخار آب حاصل از فرایند تبخیر از اطراف دستگاه و یا برعکس اجتماع بخار آب در اطراف آن است.

ثبت مقدار فشار اتمسفریک در ایستگاه بند شاه‌عباسی صورت نمی‌گیرد و این پارامتر در محل سد ساوه با استفاده از فرمول تجربی و با به‌کار بستن ارتفاع محل دریاچه از سطح آب‌های آزاد (رقوم سطح آب دریاچه‌ی سد ساوه در بازه‌ی زمانی سال‌های ۱۳۷۴-۱۳۸۷ به‌طور متوسط ۱۱۳۱ متر از آب‌های آزاد بوده است) به‌طور

از آن با حس‌گر دقیق و با در نظر گرفتن تأثیرات مستقیم آب دریاچه جمع‌آوری شده است. در اینجا ذکر این نکته ضروری است که به دلیل ناهمواری ساحل دریاچه، ایستگاه هواشناسی خودکار مورد استفاده برای اندازه‌گیری پارامترهای اقلیمی در کنار بدنه‌ی سد مستقر شد که این امر می‌تواند باعث ایجاد خطا در ثبت برخی داده‌ها از قبیل رطوبت نسبی شود. علت این موضوع ممانعت بدنه‌ی سد از آزاد بودن شرایط جوی اطراف دستگاه و حذف مقداری از بادهای وزیده شده از آن سوی بدنه‌ی سد

انجام شده با کارشناسان بخش تشعشعات سازمان هواشناسی کشور این نتیجه حاصل شد که در کشور فقط در ایستگاه‌های سینوپتیک اندازه‌گیری تشعشعات بسیار اندکی صورت می‌گیرد، که با توجه به پراکندگی، ناقص و دور از واقعیت بودن، به این داده‌های اندک نیز نمی‌توان تکیه و اعتماد کرد. از سوی دیگر، فاصله‌ی این ایستگاه‌ها تا محل سد ساوه (الغدیر) نسبتاً زیاد است 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 کردن داده‌های مربوط به این دو پارامتر از معادلات تجربی موجود استفاده شد. مقدار تشعشع خورشیدی ورودی (Q_s) را می‌توان با استفاده از ساعات روشنایی روز در منطقه و با فرمول آنگستروم به صورت رابطه‌ی ۶ تعیین کرد: [۹]

$$Q_s = (a + b \frac{n}{N}) Q_0 \quad (6)$$

که در آن، n/N نسبت ساعات روشنایی روز واقعی به تئوری، Q_0 تشعشع خورشیدی بخش خارجی جو ($W.m^{-2}$)، a و b ضرایبی وابسته به موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه هستند. براساس مطالعه‌های انجام شده برای منطقه‌ی دشت ساوه مقادیر این دو پارامتر به صورت $a = 0.728$ و $b = 0.74$ در نظر گرفته می‌شود. [۱۰] مقادیر واقعی ساعات روشنایی روز (n) به صورت روزانه از ایستگاه سینوپتیک ساوه حاصل شد و برای محاسبه‌ی مقادیر N و Q_0 از معادله‌های زنجیره‌ی که از موقعیت جغرافیایی و روز مشخص سال استفاده می‌کنند، بهره گرفته شد. [۱۱]

حال با مشخص بودن میزان پارامترهای Q_s ، n/N و a و b در هر روز از سال می‌توان با استفاده از معادله‌ی ۶ مقدار تشعشع خورشیدی ورودی (Q_s) را برای آن روز خاص از سال تعیین کرد. تشعشع موج کوتاه بازگشتی از سطح آب (Q_r) نیز به صورت رابطه‌ی ۷ حاصل می‌شود:

$$Q_r = a_s Q_s \quad (7)$$

که در این رابطه، a_s قابلیت انعکاس تشعشع موج کوتاه آب و معمولاً برابر با 0.07 فرض می‌شود. به منظور تعیین میزان تشعشع اتمسفریک ورودی (Q_a) نیز می‌توان از معادله‌ی ۸ استفاده کرد:

$$Q_a = \varepsilon_a \sigma (T_a + 273)^4 \quad (8)$$

که در این معادله، σ ثابت استفان-بولتزمن ($5.67 \times 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-2}$)، ε_a قابلیت انتشار جو و T_a درجه‌ی حرارت هوا برحسب درجه‌ی کلوین هستند. معادلات فراوانی برای محاسبه‌ی مقدار ε_a موجود است که معمولاً همگی براساس فشار بخار، درجه‌ی حرارت هوا و میزان ابرینگی هستند. در این تحقیق از اطلاعات گرافنی فرموله شده به صورت رابطه‌های ۹ و ۱۰ استفاده شده است: [۱۲، ۱۳]

$$\varepsilon_a = 0.87 - \frac{n}{N} (0.175 - 29.92 \times 10^{-2} e_d) + 2.693 \times 10^{-2} e_d \quad (9)$$

برای $n/N \leq 0.4$

$$\varepsilon_a = 0.84 - \frac{n}{N} (0.1 - 9.973 \times 10^{-2} e_d) + 3.491 \times 10^{-2} e_d \quad (10)$$

برای $n/N \geq 0.4$

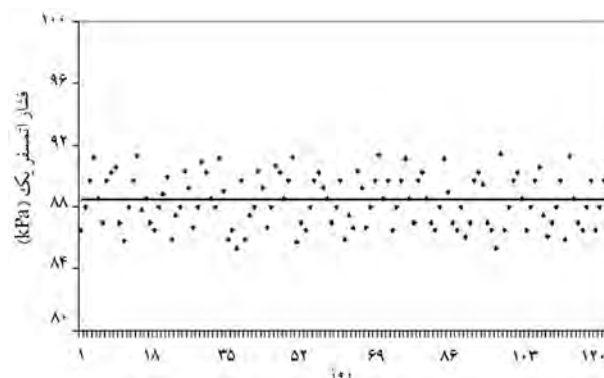
این معادله‌ها اثرات فشار بخار و مقدار ابرینگی را با یکدیگر ترکیب می‌کنند و برای شرایط هوای ابری و غیرابری نتایج مناسبی به دست می‌دهند. [۱۱] تشعشع موج بلند بازگشتی از سطح آب (Q_{ar}) به صورت رابطه‌ی ۱۱ حاصل می‌شود:

$$Q_{ar} = a_a Q_a \quad (11)$$

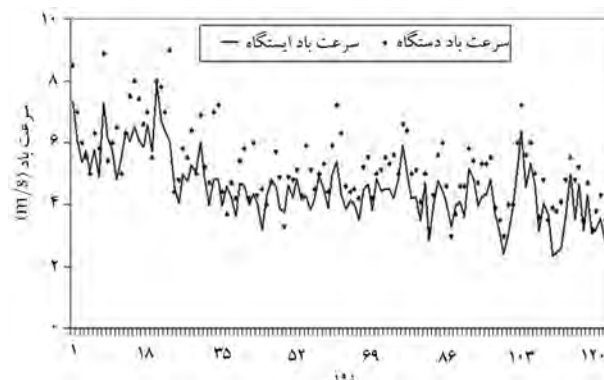
متوسط 88.74 KPa در نظر گرفته شده است. به منظور ارزیابی استفاده از این کمیت فشار در معادله‌های مورداستفاده، در مدت ۴ ماه در سال ۱۳۸۷ (ابتدای تیر تا انتهای مهر) اندازه‌گیری‌هایی به صورت روزانه در ایستگاه هواشناسی خودکار انجام شده است که با توجه به شکل ۴، در صورت عدم وجود اندازه‌گیری‌های مناسب میدانی می‌توان با دقت مناسب از فرمول تجربی مذکور استفاده کرد.

همچنین، در شکل ۵ نمودار مقایسه‌ی سرعت باد میان اندازه‌گیری‌های انجام شده روی دریاچه در ایستگاه هواشناسی خودکار و داده‌های ایستگاه بند شاه‌عباسی ارائه شده است. براساس این شکل می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های موجود در ایستگاه‌های بند شاه‌عباسی معمولاً مقدار سرعت باد را نسبت به محل دریاچه و محل استقرار ایستگاه خودکار دست‌پایین ارائه می‌دهد. علت این موضوع را می‌توان در وضعیت توپوگرافی محل قرارگیری سد جستجو کرد که این شرایط علاوه بر سرعت باد بر روی پارامترهایی از قبیل رطوبت نسبی نیز مؤثر خواهد بود. داده‌های غالب منطقه در جهت غربی و جنوب غربی هستند، که این موضوع با اندازه‌گیری‌های انجام شده با ایستگاه خودکار تأیید شد (در مدت مطالعه‌ی ۴ ماهه، بیش از ۷۵٪ داده‌های وزیده شده در محل سد ساوه از جنوب و جنوب غربی صورت گرفت) و توپوگرافی محل دریاچه‌ی سد ساوه به صورتی است که باعث می‌شود داده‌های غالب وزیده شده از جانب غرب و جنوب غربی با هدایت به داخل دره‌ی موجود در پیشانی دریاچه سرعتی دوچندان یابند و سپس به سمت دریاچه حرکت کنند.

برای محاسبه‌ی میزان تبخیر از سطوح آزاد آبی با استفاده از روش بیلان انرژی به داده‌های تشعشع خورشیدی و اتمسفریک احتیاج است. متأسفانه، براساس مذاکره‌های



شکل ۴. نمودار تغییرات روزانه‌ی فشار اتمسفریک هوا با استفاده از دستگاه خودکار واقع در دریاچه (تیر لغایت مهر ۱۳۸۷).



شکل ۵. نمودار مقایسه‌ی تغییرات روزانه‌ی سرعت باد با استفاده از داده‌های ایستگاه هواشناسی بند شاه‌عباسی و دستگاه خودکار (تیر لغایت مهر ۱۳۸۷).

که در این رابطه، a_α قابلیت انعکاس تشعشع موج بلند سطح آب است و معمولاً برابر با 0.3 فرض می‌شود.^[۱۴] تشعشع موج بلند گسیل شده از حجم آب (Q_{bs}) از همان فرمول استفاده شده برای محاسبه مقدار Q_α تبعیت می‌کند، با این تفاوت که در اینجا درجه‌ی حرارت هوا با درجه‌ی حرارت سطح آب (T_s) جایگزین می‌شود و قابلیت انتشار در عدد $\varepsilon_b = 0.97$ ثابت می‌شود.^[۱۵]

بنابراین، براساس معادلات و توضیحات ذکرشده‌ی مقادیر روزانه‌ی تاریخی هر یک از پارامترهای موردنظر در بازه‌ی زمانی سال‌های $1374-1387$ محاسبه شدند. به‌منظور ارزیابی صحت محاسبه‌های انجام‌شده توسط معادلات تجربی مورد استفاده، مقادیر تشعشعات ذکرشده در فصل تابستان سال 1387 توسط تشعشع سنج‌های دقیق به‌صورت روزانه اندازه‌گیری و ثبت شدند که نمودار مقایسه‌ی میان این دو سری داده در شکل ۶ نمایش داده شده است. با توجه به این نمودار می‌توان گفت، در صورت نبود دستگاه‌های دقیق اندازه‌گیری، می‌توان به‌طور تقریبی و با دقت قابل قبول از معادلات مذکور برای تخمین این داده‌ها بهره گرفت. ضرایب آلبدوی موج کوتاه و موج بلند نیز برای مدت ۴ ماه با توجه به نتایج نسبت تشعشعات بازتابیده شده به تشعشعات خروجی ثبت شده با دستگاه تشعشع سنج محاسبه شد که در شکل ۷ تفاوت روزانه‌ی این ضرایب با مقادیر ثابت استفاده شده در معادلات انگستروم (ضریب آلبدوی 0.3 برای موج بلند و ضریب آلبدوی 0.7 برای موج کوتاه) نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان گفت که به جز روزهای اندکی از دوره‌ی ۴ ماهه‌ی مورد مطالعه، ضرایب حاصل از دستگاه تفاوت چندانی زیادی با ضرایب ذکرشده توسط مراجع نداشته و استفاده از ضرایب ثابت برای تمامی

روزهای سال خلال چندانی در نتایج محاسبه‌های بیلان انرژی مخزن ایجاد نخواهد کرد.

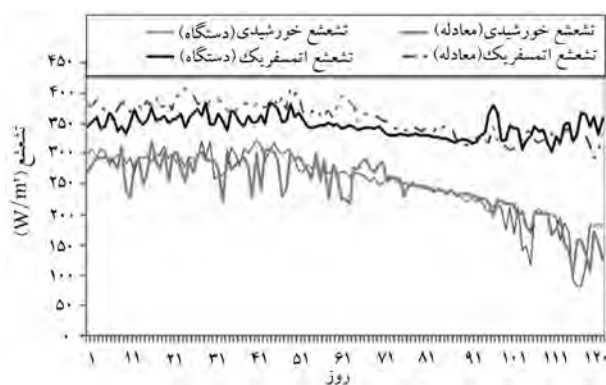
برای محاسبه‌ی مقدار انرژی ذخیره شده در حجم آبی (Q_x) نیز می‌توان از رابطه‌ی ۱۲ استفاده کرد:

$$Q_x = \frac{\rho \cdot c}{a_s} \sum_z \frac{\Delta T(z)}{\Delta t} \cdot a(z) \cdot \Delta z \quad (12)$$

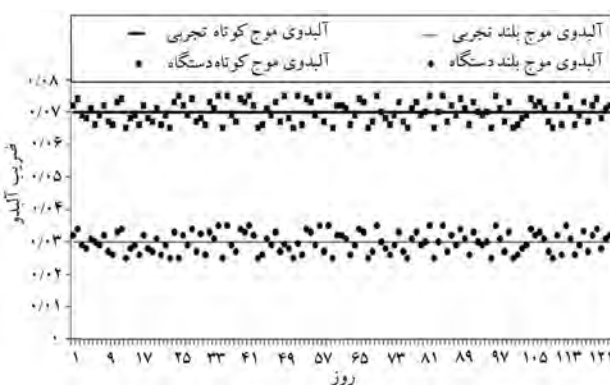
که در این رابطه، a_s مساحت متوسط سطح دریاچه در بازه‌ی زمانی موردنظر، $\Delta T(z) = T_{t+v}(z) - T_{t-v}(z)$ تغییرات درجه‌ی حرارت میانگین دریاچه در عمق z ، Δt بازه‌ی زمانی برحسب ثانیه، $a(z)$ مساحت دریاچه در عمق z و ضخامت هر لایه است. بنابراین، به‌منظور تعیین داده‌های تاریخی انرژی ذخیره شده در دریاچه (Q_x) به منحنی ارتفاع - سطح - حجم (نقشه‌ی فراسنجی) دریاچه و همچنین درجه‌ی حرارت روزانه‌ی سطح آب و ساختار حرارتی (پروفیل حرارتی) دریاچه احتیاج است. برای حل این مشکل و تأمین داده‌های روزانه‌ی درجه حرارت سطح آب، بررسی داده‌های موجود و مرتبط با پارامتر مورد نیاز انجام شد. از آنجا که اندازه‌گیری‌های بسیار اندک و پراکنده برای این داده فقط برای سال 1376 موجود بود، داده‌های اندازه‌گیری شده دماسنج‌های موجود در بدنه‌ی سد مورد توجه قرار گرفتند. دماسنج‌های موجود در بدنه‌ی سد در بلوک‌های مختلف در چند ردیف و ارتفاع واقع شده‌اند. همچنین، ضخامت بتن روی این دماسنج‌ها متفاوت است و نزدیک‌ترین دماسنج به آب مخزن در عمق حدود $20-10$ سانتی‌متری بتن قرار دارد. با مقایسه‌ی این داده‌ها با داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی پراکنده در سال 1376 و همچنین اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در سال 1387 (از ابتدای تیر الی انتهای مهر در بازه‌های دو هفته‌گی با نمونه‌گیری از آب دریاچه در اعماق مختلف، داده‌های پارامتر درجه‌ی حرارت و لایه‌بندی حرارتی دریاچه ثبت شد و درجه حرارت سطح آب دریاچه در چند نوبت در هر روز قرائت شد) مشاهده شد که تفاوت این دو مقدار در بیشتر 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 کرد (شکل‌های ۸ و ۹).

با توجه به شکل ۸، برای تمامی پروفیل‌های حرارتی مخزن اندازه‌گیری شده در بازه‌های دو هفته‌گی در فصل تابستان سال 1387 تقریباً از عمق 20 متری سطح آب به پائین تغییرات درجه حرارت محسوس نبوده و بسیار اندک است و در نتیجه می‌توان گفت که آب مخزن تبدلات انرژی قابل ملاحظه‌ی با بستر نخواهد داشت. بنابراین، فرض صرف نظر کردن مؤلفه‌ی تبدلات انرژی بستر در معادله‌ی بیلان انرژی خطای زیادی در نتایج این روش ایجاد نخواهد کرد. بر این اساس، مقادیر مربوط به Q_b و Q_s اغلب بسیار کوچک است و معمولاً در مطالعات بیلان انرژی با دقت مناسب در نظر گرفته نمی‌شوند.

بعد از انجام این مطابقت، داده‌های تقریباً دو هفته‌گی ساختار حرارتی و روزانه‌ی درجه حرارت سطح آب حاصل شد، و محدود روزهایی از 14 سال دوره‌ی آماری که در آن‌ها داده‌های درجه حرارت روزانه‌ی سطح آب توسط دماسنج بدنه‌ی سد ثبت نشده و دارای گپ آماری بود، با برقراری یک رابطه‌ی ریاضی میان داده‌های درجه حرارت سطح آب و درجه حرارت هوا در همان روزها بررسی و تغییرات این دو پارامتر در مدت مورد مطالعه با هم مقایسه، و سپس داده‌های درجه حرارت سطح آب به‌صورت روزانه بازسازی شدند. همچنین با استفاده از همین روش ساختار حرارتی دریاچه، در بازه‌های زمانی، میانگین دو هفته‌گی به‌منظور استفاده از روش بیلان انرژی از داده‌های قرائت شده‌ی دماسنج‌های موجود



شکل ۶. تغییرات تشعشعات موج کوتاه و بلند با استفاده از روابط تجربی و اندازه‌گیری‌های میدانی با دستگاه تشعشع سنج (تیر لغایت مهر 1387).



شکل ۷. تغییرات ضرایب آلبدوی موج کوتاه و بلند حاصل از دستگاه تشعشع سنج (تیر لغایت مهر 1387).

معادله‌ی ۱۳ بهره گرفت: [۱۶]

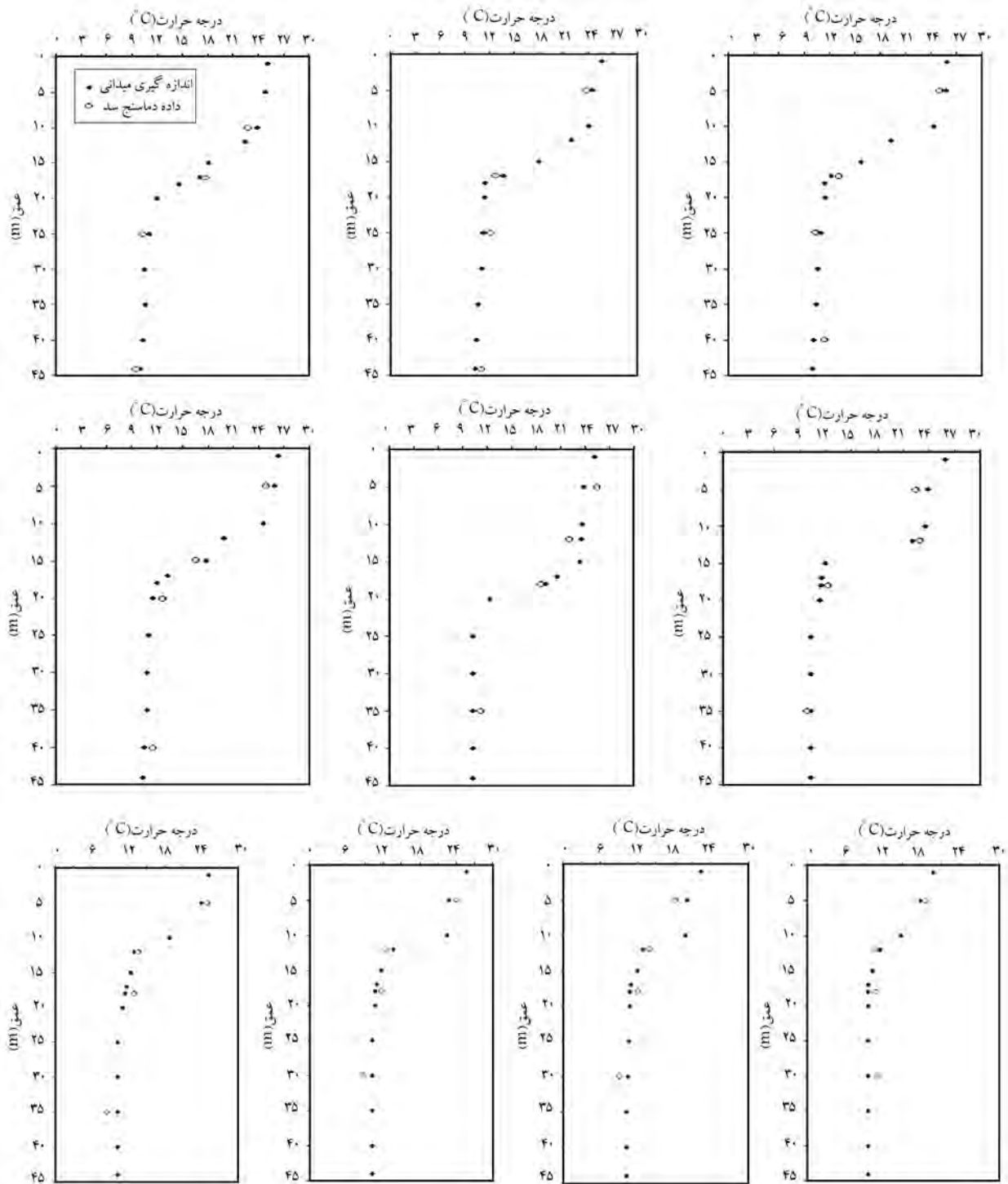
$$L = 2,75 - 0,70024T \quad (13)$$

همچنین، برای تعیین نسبت باون (R) از معادله‌ی ۱۴ می‌توان استفاده کرد: [۱]

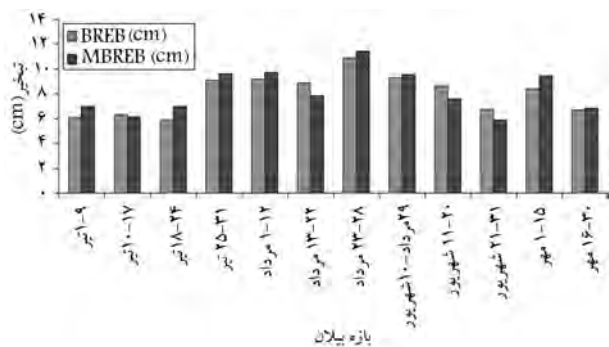
$$R = \frac{0,61P}{100} \left(\frac{T_s - T_a}{e_s - e_a} \right) \quad (14)$$

در نقاط مختلف بدنه‌ی سد استخراج شد. به این ترتیب، بازه‌های موردنظر برای استفاده از روش بیلان انرژی همان بازه‌هایی که پروفیل حرارتی موجود بود، در نظر گرفته شد و دوره‌ی مطالعاتی ۱۴ ساله به ۵۹۳ بازه‌ی بیلان انرژی تقسیم شد.

برای تعیین مقدار گرمای نهان تبخیر (L) بر حسب ژول بر کیلوگرم می‌توان از



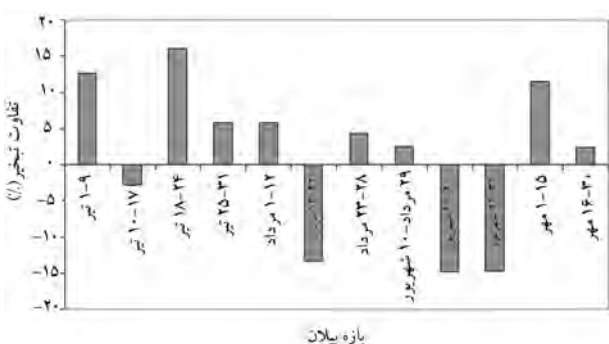
شکل ۸. نمودار مقایسه‌ی اندازه‌گیری میدانی پروفیل حرارتی و داده‌های دماسنج‌های موجود در بدنه‌ی سد (تیر لغایت مهر ۱۳۸۷).



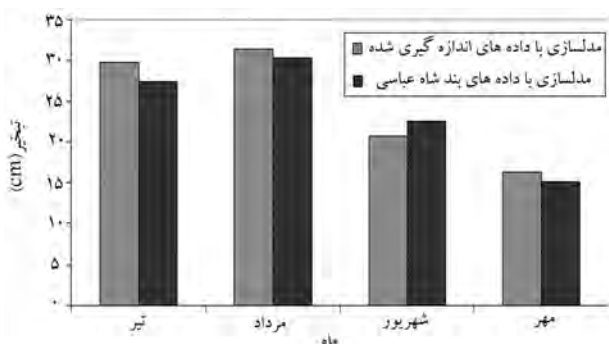
شکل ۱۰. مقایسه‌ی نتایج تخمین تبخیر به روش بیلان انرژی با استفاده از داده‌های ایستگاه بند شاه‌عباسی و ایستگاه هواشناسی خودکار (تیر لغایت مهر ۱۳۸۷).

و تصحیح شده است را با نام اختصاری MBREB نشان خواهیم داد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، این ۴ ماه به ۱۲ بازه‌ی بیلان انرژی تقسیم شده است و برای ۸ بازه، مقادیر MBREB بیش از نتایج BREB است و بیشترین تفاوت در میان این دو مقدار در بازه‌ی زمانی ۱۸-۲۴ تیرماه برابر با ۱۱/۲ میلی‌متر و کمترین تفاوت در بازه‌ی زمانی ۱۶-۳۰ مهرماه برابر با ۱/۷ میلی‌متر است.

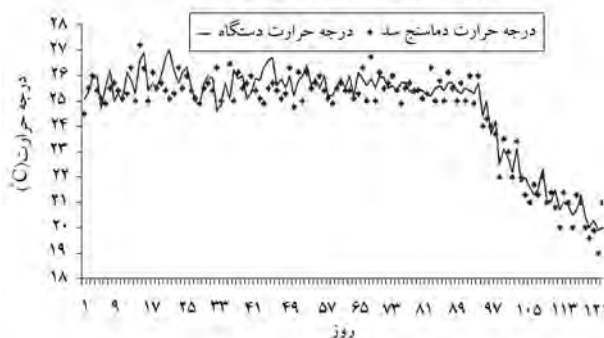
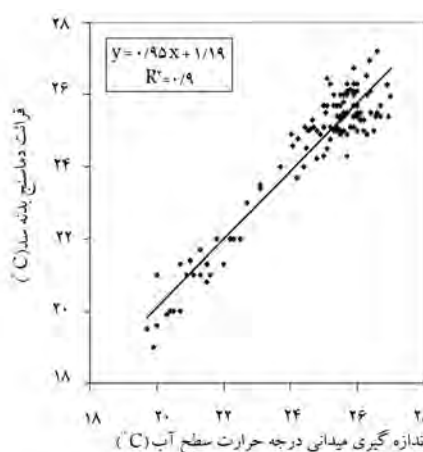
بر اساس شکل ۱۱ نیز می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین تفاوت نتایج مدل‌سازی روش بیلان انرژی با استفاده از داده‌های بند شاه‌عباسی با مدل‌سازی این روش با استفاده از داده‌های میدانی اندازه‌گیری شده برای بازه‌های زمانی در نظر گرفته شده در مدت ۴ ماه مطالعه‌ی میدانی در حدود ۱۵٪ و کمترین مقدار آن در حدود ۳٪ بوده است. بر اساس شکل ۱۲ بیشینه‌ی تفاوت ایجاد شده‌ی میزان تبخیر از مخزن سد ساوه میان نتایج با استفاده از دو سری داده در تیرماه با حدود ۳ سانتی‌متر و کمینه‌ی مقدار



شکل ۱۱. درصد تفاوت تبخیر مدل‌سازی روش بیلان انرژی با استفاده از داده‌های ایستگاه هواشناسی خودکار و ایستگاه بند شاه‌عباسی (تیر لغایت مهر ۱۳۸۷).



شکل ۱۲. مقایسه‌ی نتایج تبخیر ماهانه‌ی روش بیلان انرژی با استفاده از داده‌های ایستگاه بند شاه‌عباسی و ایستگاه هواشناسی خودکار (تیر لغایت مهر ۱۳۸۷).



شکل ۹. نمودار مقایسه‌ی اندازه‌گیری میدانی درجه حرارت سطح آب و دمای دماسنج‌های بدنه‌ی سد (تیر لغایت مهر ۱۳۸۷).

که در آن، P فشار جو (KPa)، e_0 فشار بخار اشباع در درجه حرارت سطح آب (KPa)، e_a فشار بخار در درجه حرارت هوا (KPa)، و عدد ۱۰۰ فاکتور تبدیل فشار به کیلو پاسکال است.

تصحیح نتایج روش بیلان انرژی با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی

همان‌طور که اشاره شد، در این تحقیق به منظور ارزیابی داده‌های مورد استفاده که از ایستگاه هواشناسی بند شاه‌عباسی و یا در مواردی با استفاده از معادلات تجربی حاصل شده‌اند، یک ایستگاه هواشناسی شامل تجهیزات و حسگرهای با دقت بالا در محل سد ساوه مستقر شد و داده‌های این دستگاه‌ها به مدت ۴ ماه در سال ۱۳۸۷ (از ابتدای تیرماه تا انتهای مهرماه) جمع‌آوری و با داده‌های موازی حاصل از ایستگاه هواشناسی مقایسه شد. لازم به ذکر است که حدود نیمی از تبخیر سالانه از مخزن در فصل تابستان و فقط ۱۰٪ از آن در فصل زمستان صورت می‌گیرد. همچنین، به منظور تصحیح خطاهای احتمالی به‌وجودآمده در نتایج روش بیلان انرژی که با استفاده از داده‌های ایستگاه هواشناسی بند شاه‌عباسی حاصل شده بود، این روش بار دیگر با استفاده از داده‌های جدید جمع‌آوری شده از ایستگاه تحقیقاتی مورد استفاده مدل‌سازی شد و نتایج حاصل از این روش به صورت بازه‌های بیلان انرژی برابر و موازی در مدت ۴ ماه با یکدیگر مقایسه شدند که نتایج در شکل ۱۰ ارائه شده است. در ادامه، نتایج روش بیلان انرژی که با استفاده از نتایج ایستگاه هواشناسی بند شاه‌عباسی حاصل شده است را با نام BREB و نتایج این روش که با استفاده از داده‌های ایستگاه تحقیقاتی مستقر بر روی دریاچه‌ی سد محاسبه

تفاوت در فصل مرداد با حدود ۱ سانتی متر است. همچنین، مجموع تفاوت تبخیر محاسبه شده با استفاده از دو سری داده با روش بیلان انرژی برابر با ۷/۵ سانتی متر در طی ۴ ماه است.

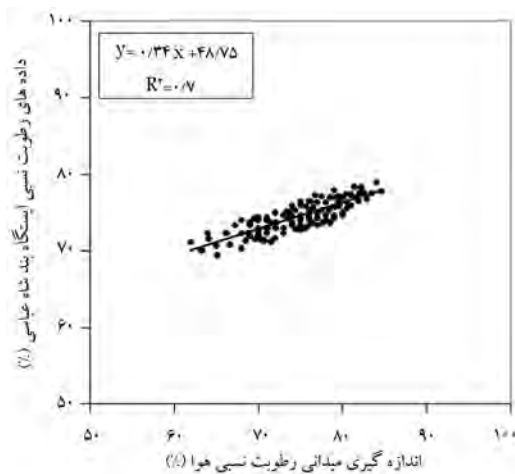
حال به منظور تصحیح نتایج ۱۴ ساله روش بیلان انرژی باید ارتباطی میان داده‌های اندازه‌گیری شده میدانی در این مدت ۴ ماه با داده‌های موجود موازی ایستگاه بند شاه عباسی ایجاد کرد و با استفاده از رابطه حاصل برای هر پارامتر به تصحیح و بازسازی داده‌های تاریخی ۱۴ ساله ایستگاه بند شاه عباسی پرداخت. در این رابطه، همان‌طور که بیان شد، داده‌های درجه حرارت هوا و سطح آب دو سری داده برای مدت انجام عملیات میدانی بسیار به یکدیگر نزدیک بودند که ضریب همبستگی‌های ۰/۹۷ و ۰/۹۱ دلیل مناسبی برای دقت بالای معادلات حاصل از برقراری این ارتباط است (شکل‌های ۱۳ و ۱۴).

از طرفی همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی رطوبت نسبی و سرعت باد در ایستگاه بند شاه عباسی تقریباً تفاوت محسوسی با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی این پارامترها با استفاده از ایستگاه هواشناسی خودکار واقع بر روی دریاچه سد ساوه دارند که پراکنندگی زیاد و ضرایب همبستگی نسبتاً کوچک

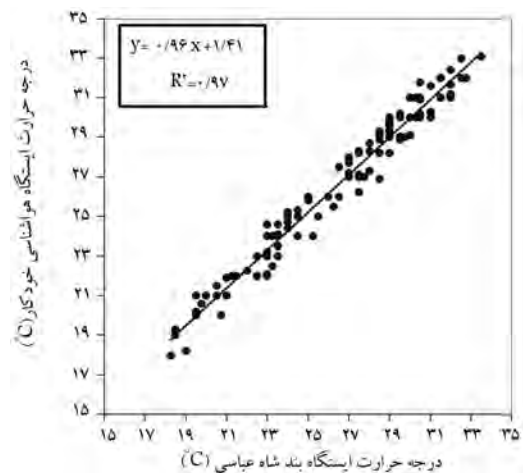
نسبت به ضرایب حاصل برای درجه حرارت هوا و سطح آب دریاچه، شاهدهی بر این مدعا است (شکل‌های ۱۵ و ۱۶). در هر صورت، از ضرایب همبستگی ۰/۷ و ۰/۸۱ با درصدی خطا به منظور بازسازی داده‌های تاریخی موجود استفاده شد.

همچنین، برای استفاده از روش بیلان انرژی به داده‌های روزانه‌ی تشعشعات خورشیدی و اتمسفریک نیز احتیاج است که باید ارتباطی میان اندازه‌گیری‌های میدانی با استفاده از تشعشع‌سنج‌های مستقر در ایستگاه بند شاه عباسی و نتایج حاصل از استفاده از معادلات تجربی برقرار کرد (شکل‌های ۱۷ و ۱۸).

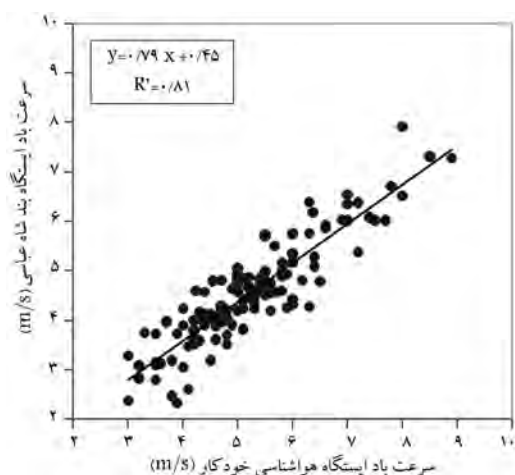
ضرایب همبستگی معادلات برقرار شده برای این دو پارامتر همان‌طور که در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ مشاهده می‌شود، به ترتیب برابر با ۰/۷۱ و ۰/۷۲ است که نشان‌دهنده‌ی دقت نسبتاً مناسب این معادلات به منظور بازسازی داده‌های تاریخی است. بعد از بازسازی داده‌های تاریخی و تصحیح آن‌ها با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی میدانی، نتایج بیلان انرژی برای ۱۴ سال آماری بازسازی و تصحیح شدند که تفاوت نتایج بیلان انرژی حاصل از داده‌های بند شاه عباسی (BREB) و بیلان انرژی تصحیح شده با استفاده از داده‌های میدانی (MBREB) برحسب میلیون مترمکعب تبخیر برای ماه‌های سال در شکل ۱۹ ارائه شده است. در اینجا



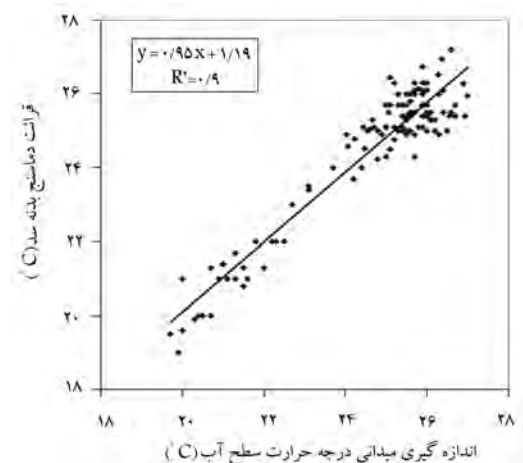
شکل ۱۵. رابطه‌ی برقرار شده میان داده‌های روزانه‌ی رطوبت نسبی هوای ایستگاه بند شاه عباسی و ایستگاه خودکار طی ۴ ماه عملیات میدانی.



شکل ۱۳. رابطه‌ی برقرار شده میان داده‌های روزانه‌ی درجه حرارت هوای ایستگاه بند شاه عباسی و ایستگاه خودکار طی ۴ ماه عملیات میدانی.



شکل ۱۶. رابطه‌ی برقرار شده میان داده‌های سرعت باد ایستگاه بند شاه عباسی و ایستگاه خودکار طی ۴ ماه عملیات میدانی.

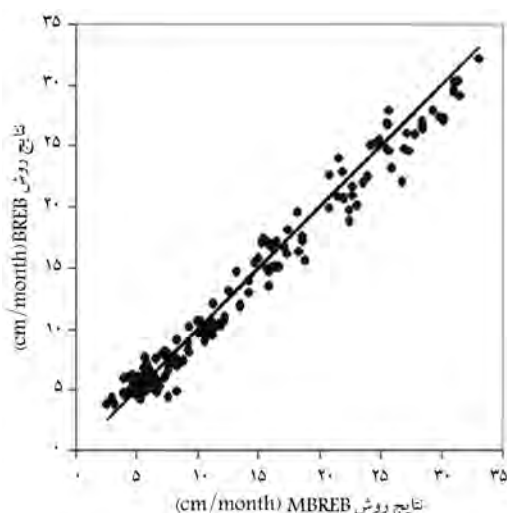


شکل ۱۴. رابطه‌ی برقرار شده میان داده‌های روزانه‌ی درجه حرارت سطح آب و دماسنج‌های بدنه‌ی سد و اندازه‌گیری‌های میدانی طی ۴ ماه.

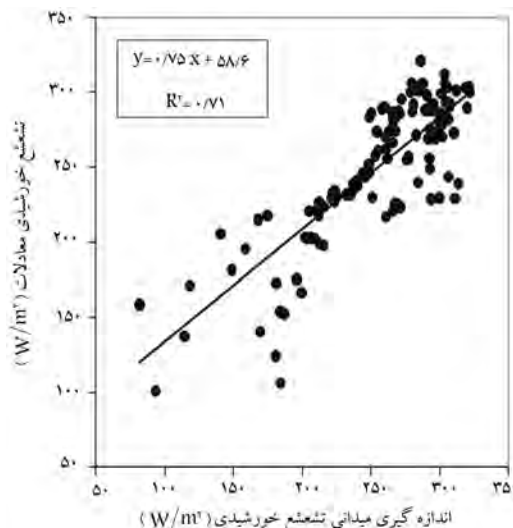
ذکر این نکته ضروری است که اندازه‌گیری میدانی پارامترهای شاخص در تخمین میزان تبخیر مخزن سد ساوه فقط به مدت ۴ ماه (تیرمهر ۱۳۸۷) انجام شده است و بازسازی داده‌های تاریخی ۱۴ ساله ایستگاه بند شاه‌عباسی با استفاده از این داده‌های میدانی فقط می‌تواند برای همین ۴ ماه در هر سال دقت مناسبی داشته باشد، زیرا همان‌طور که می‌دانیم رفتار ترمودینامیکی مخزن در فصل‌های مختلف سال بسیار متغیر و متفاوت بوده است و به‌طور کلی مخزن در فصل‌های گرم سال از محیط پیرامون خود انرژی دریافت می‌کند و برعکس در فصل‌های سرد سال این انرژی دریافتی را به محیط اطراف باز پس می‌دهد. بنابراین، نتایج تصحیح‌شده فقط برای ۴ ماه ذکر شده مستند هستند و برای ماه‌های دیگر سال مقادیری تخمینی و همراه با خطای محتمل خواهند بود که از طریق انجام اندازه‌گیری‌های میدانی در مابقی ماه‌های سال و بازسازی داده‌های آن ماه‌ها با داده‌های اندازه‌گیری‌شده می‌توان مجدداً مدل‌سازی بیلان انرژی را برای این ماه‌های باقیمانده انجام داد و بهبود نتایج را شاهد بود.

با توجه به شکل ۲۰ می‌توان گفت که در صورت استفاده از داده‌های بند شاه‌عباسی به‌منظور مدل‌سازی با روش بیلان انرژی در بیشتر ماه‌های مورد مطالعه آماری میزان تبخیر حاصل کمتر از شرایطی خواهد بود که در مدل‌سازی از داده‌های تصحیح‌شده با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی استفاده می‌شود. علاوه بر این، می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از نتایج بیلان انرژی (BREB) در این ۱۶۳ ماه مطالعه تقریباً حجمی معادل ۸۳/۷ میلیون مترمکعب و با استفاده از نتایج بیلان انرژی تصحیح‌شده (MBREB) این حجم معادل با ۸۷/۰ میلیون مترمکعب بوده است که این موضوع اهمیت تبخیر از مخزن سد ساوه را نشان می‌دهد.

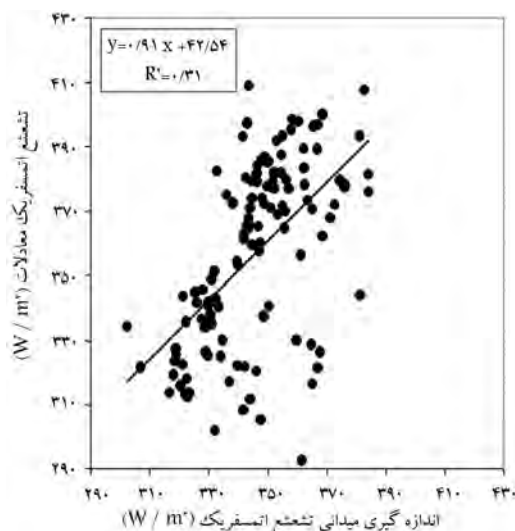
در هر صورت به‌منظور انجام برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب منطقه باید از نتایج MBREB بهره گرفته شود که با توجه به این موضوع اختلاف حدود ۳/۳ میلیون مترمکعبی میان نتایج حاصل اهمیت زیادی در تحلیل‌ها خواهد داشت. حال با تصحیح نتایج روش بیلان انرژی ماهانه برای ۱۴ سال آماری می‌توان گفت که نتایج نسبتاً دقیقی از شرایط تبخیر از مخزن سد ساوه حاصل شده است و با توجه به این نتایج می‌توان با استفاده از داده‌های ماهانه، داده‌های ساده‌ی



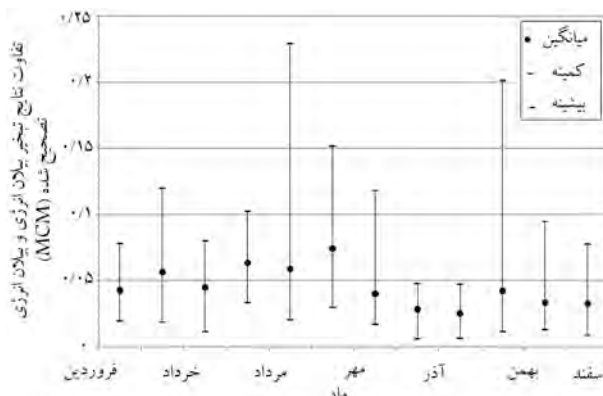
شکل ۲۰. مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی تخمین تبخیر ماهانه به روش بیلان انرژی با استفاده از داده‌های ایستگاه بند شاه‌عباسی و داده‌های تصحیح‌شده برحسب سانتی‌متر در ماه برای دوره‌ی ۱۴ ساله‌ی آماری.



شکل ۱۷. رابطه‌ی برقرارشده میان داده‌های تشعشع خورشیدی حاصل از معادلات تجربی و تشعشع سنخ طی ۴ ماه عملیات میدانی.



شکل ۱۸. رابطه‌ی برقرارشده میان داده‌های تشعشع اتمسفریک حاصل از معادلات تجربی و تشعشع سنخ طی ۴ ماه عملیات میدانی.



شکل ۱۹. تفاوت نتایج بیلان انرژی حاصل از داده‌های بند شاه‌عباسی (BREB) و بیلان انرژی تصحیح‌شده با استفاده از داده‌های میدانی (MBREB) برحسب میلیون مترمکعب تبخیر برای ماه‌های سال در ۱۴ سال آماری.

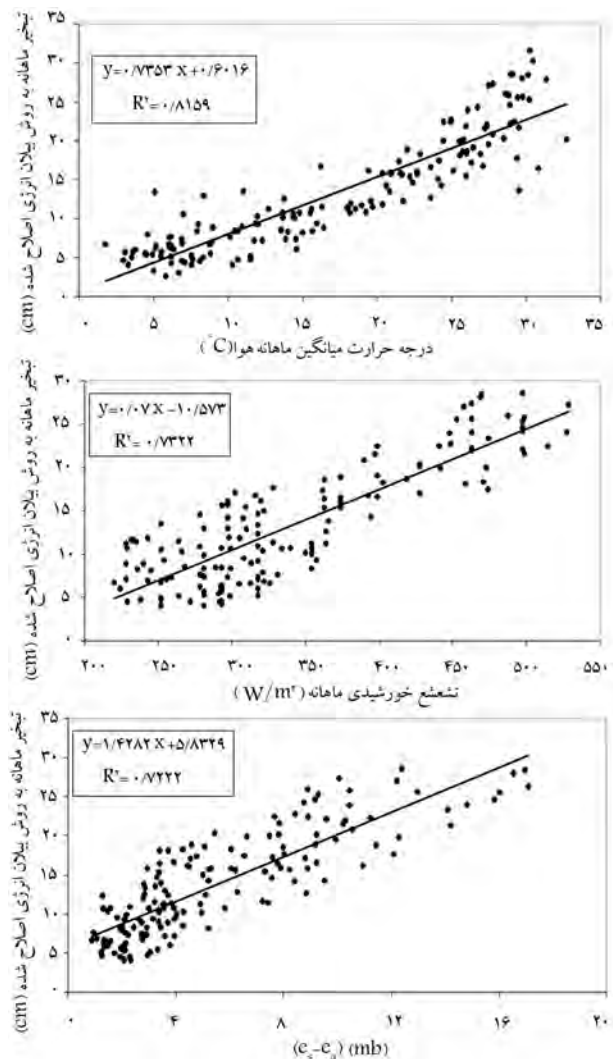
جدول ۳. تحلیل حساسیت صورت گرفته بر روی پارامترهای مؤثر بر نتایج روش بیلان انرژی تصحیح شده.

پارامتر	درصد خطا به ازای تغییر ۱۰٪ در مقدار هر پارامتر		
	تبخیر	تبخیر	تبخیر
	میانگین	کمینه	بیشینه
Q_s (تشنش خورشیدی موج کوتاه ورودی)	۱۱٫۹	۱۴٫۴	۶٫۹
Q_r (تشنش خورشیدی موج کوتاه منعکس شده)	۰٫۹	۱٫۱	۰٫۵
Q_a (تشنش اتمسفریک موج بلند ورودی)	۲۳٫۸	۲۲٫۹	۱۵٫۷
Q_{ar} (تشنش اتمسفریک موج بلند منعکس شده)	۰٫۸	۰٫۷۵	۰٫۵
Q_{bs} (تشنش اتمسفریک موج بلند منتشر شده از سطح آب)	۱۷٫۲	۱۴٫۷	۱۰٫۱
Q_x (تغییر در میزان حرارت ذخیره شده در حجم آب)	۸٫۲	۹٫۴	۵٫۱
T_a (درجه حرارت هوا)	۱۹٫۲	۱۶٫۸	۲۸٫۳
T_0 (درجه حرارت سطح آب)	۱۸٫۶	۱۲٫۴	۲۱٫۸
R (نسبت باون)	۱٫۳	۴٫۱	۶٫۴
P (فشار اتمسفریک)	۰٫۳	۱٫۲	۰٫۷
RH (رطوبت نسبی)	۸٫۳	۱۸٫۲	۱۱٫۷

مورد استفاده توسعه داده شد. بر این اساس و با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳ می توان گفت، میزان تبخیر نسبت به پارامترهایی از قبیل تشنش اتمسفریک، تشنش خورشیدی، تشنش موج بلند بازگشتی و درجه حرارت هوا و سطح آب بسیار حساس است و تغییرات ۱۰ درصدی در سایر پارامترها تغییر محسوس بر روی میزان تبخیر از سد ساوه ایجاد نخواهد کرد. همچنین، نتایج به پارامترهایی از قبیل تغییرات انرژی ذخیره شده در حجم آبی، تشنشات موج کوتاه و بلند بازگشتی، نسبت باون و فشار اتمسفریک کمینه حساسیت را نشان می دهد.

از آنجا که پارامتر سرعت باد مستقیماً در معادلات مربوط به روش بیلان انرژی وارد نمی شود، به منظور ارزیابی تأثیرات این پارامتر بر روی میزان تبخیر از سطح آزاد آب دریاچه ی سد ساوه، تحلیل حساسیت بر روی روشی که در تحلیل ها نزدیک ترین نتایج را نسبت به روش بیلان انرژی اصلاح شده نشان داد و از طرفی در معادله ی مربوط به آن پارامتر سرعت باد دخیل است، استفاده شد. براساس تحلیل های انجام شده، معادله ی پنمن بهترین مطابقت را با نتایج روش MBREB دارد و بنابراین از این روش به منظور انجام تحلیل حساسیت پارامتر سرعت باد استفاده شد. بر این اساس می توان گفت، با تغییر ۱۰ درصدی (کاهش و افزایش) در میزان سرعت باد در میزان تبخیر حاصل از این روش به طور متوسط ۱۱٪ خطا ایجاد می شود که به این ترتیب نیز می توان گفت که نتایج تبخیر حاصل برای مخزن سد ساوه نسبتاً به داده های سرعت باد حساس است و این امر لزوم اندازه گیری دقیق این پارامتر را نشان می دهد.

با توجه به تحلیل حساسیت صورت گرفته می توان ایستگاه تحقیقاتی مناسب



شکل ۲۱. برقراری رابطه میان نتایج تبخیر ماهانه به روش بیلان انرژی تصحیح شده و پارامترهای اقلیمی.

همانند درجه حرارت میانگین هوا، تشنش خورشیدی و کمبود فشار بخار در منطقه ی مورد مطالعه $(e_s - e_a)$ رابطه ی ساده یی میان آن ها برقرار کرد. براساس نتایج شکل ۲۱ می توان نتیجه گرفت که در صورت در دسترس بودن داده های درجه حرارت میانگین هوا می توان با استفاده از معادله ی برزش داده شده با دقت بسیار مناسب میزان تبخیر قابل قبولی برای دریاچه ی سد ساوه به دست آورد و از نظر اولویت در ردی بعدی داده های کمبود فشار بخار در منطقه ی مورد مطالعه و سپس داده های تشنش خورشیدی قرار دارند.

تحلیل حساسیت بر روی نتایج روش بیلان انرژی تصحیح شده

به منظور تعیین اهمیت هر یک از پارامترهای اقلیمی، آزمون تحلیل حساسیت بر روی مؤلفه های بیلان انرژی تصحیح شده صورت گرفت. مدل با توجه به افزایش و کاهش ۱۰ درصدی در هر یک از این پارامترها و ثابت نگه داشتن سایر پارامترها برای درصد خطای ایجاد شده در محاسبات میانگین، کمینه و بیشینه ی میزان تبخیر در سال

به منظور انجام تحقیقات هر چه دقیق تر تخمین تبخیر از دریاچه سد ساوه ارائه کرد. بر این اساس می توان به منظور اندازه گیری پارامترهای کم اهمیت تر در تحلیل حساسیت انجام گرفته بنا بر دقت مورد نیاز تحقیق از معادلات تجربی و یا حتی از داده های موجود در ایستگاه های هواشناسی بند شاه عباسی و ایستگاه های دورتر همانند ایستگاه سینوپتیک ساوه بهره گرفت. اما در این میان به منظور اهمیت برخی پارامترها و به منظور اندازه گیری هر چه دقیق تر آن ها، باید مستقیماً یک ایستگاه تحقیقاتی بر روی دریاچه مستقر شود.

نتیجه گیری

در این تحقیق میزان تبخیر سالانه و ماهانه از دریاچه سد ساوه (الغدیر) با روش بیلان انرژی (BREB) و به مدت ۱۴ سال (۱۳۷۴-۱۳۸۷) مورد تخمین قرار گرفته است. همچنین، به منظور ارزیابی داده های دریافتی از ایستگاه مجاور دریاچه سد (ایستگاه بند شاه عباسی) و حاصل از معادلات تجربی، به مدت ۴ ماه در سال ۱۳۸۷ (ابتدای تیر تا انتهای مهر) اقدام به استقرار مستقیم دستگاه ها و حسگرهای دقیق جهت برداشت موازی این داده ها شده است. در ادامه با برقراری ارتباط میان داده های میدانی و داده های حاصل از ایستگاه مجاور سد، تمامی داده های مورد مطالعه ۱۴ سال گذشته تصحیح و بازسازی شدند و روش بیلان انرژی مجدداً مدل سازی شد. به طور خلاصه می توان نتایج به دست آمده از تحلیل های صورت گرفته در این تحقیق را به منظور برآورد تبخیر از مخزن سد ساوه به این شرح بیان کرد:

۱. این ۴ ماه به ۱۲ بازه ی بیلان انرژی تقسیم شده است و برای ۸ بازه، مقادیر نتایج روش بیلان انرژی که با استفاده از داده های ایستگاه تحقیقاتی مستقر بر روی دریاچه سد محاسبه و تصحیح شده است (MBREB)، بیش از نتایج این

روش که با استفاده از نتایج ایستگاه هواشناسی بند شاه عباسی حاصل شده است (BREB)، و بیشترین تفاوت در میان این دو مقدار در بازه ی زمانی ۱۸-۲۴ تیرماه برابر با ۱/۱۲ سانتی متر و کمترین تفاوت در بازه ی زمانی ۱۶-۳۰ مهرماه برابر با ۰/۱۷ سانتی متر است. همچنین، بیشترین تفاوت نتایج برای بازه های زمانی در نظر گرفته شده در مدت ۴ ماه مطالعه ی میدانی در حدود ۱/۱۵ و کمترین مقدار آن در حدود ۰/۳ بوده است. بیشینه ی تفاوت ایجاد شده میان نتایج با استفاده از دو سری داده نیز در تیرماه با حدود ۳ سانتی متر و کمینه ی مقدار تفاوت در فصل مرداد با حدود ۱ سانتی متر بوده و مجموع تفاوت تبخیر محاسبه شده با استفاده از دو سری داده با روش بیلان انرژی برابر با ۷/۵ سانتی متر است.

۲. میزان تبخیر با روش بیلان انرژی تصحیح شده با استفاده از داده های حاصل از اندازه گیری میدانی برای دوره ی مطالعاتی ۱۴ ساله دارای میانگین حدود ۱۶۲ سانتی متر است، در حالی که قبل از تصحیح برای این روش حدود ۱۵۶ سانتی متر بوده است. علاوه بر این، با استفاده از نتایج بیلان انرژی (BREB) در این ۱۶۳ ماه مطالعه تقریباً حجمی معادل ۸۳/۷ میلیون مترمکعب و با استفاده از نتایج بیلان انرژی تصحیح شده (MBREB) این حجم معادل با ۸۷/۰ میلیون مترمکعب بوده است.

۳. بر اساس تحلیل حساسیت انجام شده بر روی مؤلفه های بیلان انرژی تصحیح شده، میزان تبخیر نسبت به پارامترهایی از قبیل تشعشع اتمسفریک، تشعشع خورشیدی، تشعشع موج بلند بازگشتی و درجه حرارت هوا و سطح آب بسیار حساس است و تغییرات در سایر پارامترها، تغییر محسوسی بر روی میزان تبخیر از سد ساوه ایجاد نخواهد کرد. همچنین، نتایج به پارامترهایی از قبیل تغییرات انرژی ذخیره شده در حجم آبی، تشعشعات موج کوتاه و بلند بازگشتی، نسبت باون و فشار اتمسفریک کمینه ی حساسیت را نشان می دهد.

پانویس

1. Mirror

منابع (References)

- Tanny, J.; Cohen, S.; Assouline, S.; Lange, F.; Grava, A.; Berger, D.; Teltch, B. and Parlange, M.B. "Evaporation from a small water reservoir: Direct measurements and estimates", *Journal of Hydrology*, **351**, pp. 218-229 (2008).
- Gianniou, S.K. and Antonopoulos, V.Z. "Evaporation and energy budget in Lake Vegoritis, Greece", *Journal of Hydrology*, **351** (3), pp. 212-223 (2007).
- Dos Reis, R.J. and Dias, N.L. "Multi-season evaporation: energy-budget estimates and CRLE model assessment with limited meteorological observations", *Journal of Hydrology*, **208**(3), pp. 135-147 (1998).
- Vallet-Coulomb, C.; legesse, D.; Gasse, F.; Travi, Y. and Chernet, T. "Lake evaporation estimates in tropical Africa (Lake Ziway, Ethiopia)", *Journal of Hydrology*, pp.1-8 **254**(4) (2001).
- Winter, T.C.; Buso, D.C.; Rosenberry, D.O.; Likens, G.E.; Sturrock, A.M.J. and Mau, D.P. "Evaporation determined by the energy budget method for Mirror Lake, New Hampshire", *Limnology and Oceanography*, **48**(3), pp. 995-1009 (2003).
- Lenters, J.D.; Kratz, T.K. and Bowser, C.J. "Effects of climate variability on lake evaporation: Results from a long-term energy budget study of Sparkling Lake, northern Wisconsin (USA)", *Journal of Hydrology*, **308**, pp. 168-195 (2005).
- Rosenberry, D.O.; Winter, T.C.; Buso, D.C. and Likens, G.E. "Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the Northeastern USA", *Journal of Hydrology*, **340**(3-4), pp. 149-166 (2007).
- Jamab Consulting Engineers, Iran's Water master Plan, Salt Lake Watershed (In Persain)(1998).

9. Allen, R.; Pereira, L.; Raes, D. and Smith, M. "Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements", *FAO Irrigation and Drainage Paper*, **56**, FAO, Rome, Italy, pp. 300 (1998).
10. Kamali, G. and A. Moradi. "Solar radiation, principles and application in agriculture and new energies" Iran Meteorological Research Center publication (In Persian)(2004).
11. Kotsopoulos, S. and Babajimopoulos, C. "Analytical estimation of modified Penman equation parameters", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **123**(4), pp. 253-256 (1997).
12. Huaxia, Y. "Long-term study of lake evaporation and evaluation of seven estimation methods: Results from Dickie Lake, South-Central Ontario, Canada", *Journal of Water Resource and Protection*, (2), pp.59-77 (2009).
13. Henderson-Sellers, B. "Calculating the surface energy balance for lake and reservoir modeling: A review", *Reviews of Geophysics*, **24**(3), pp. 625-649 (1986).
14. Assouline, S.; Tyler, S.W.; Tanny, J.; Cohen, S.; Bou-Zeid, E.; Parlange, M.B. and Katul, G.G. "Evaporation from three water bodies of different sizes and climates: Measurements and scaling analysis", *Advances in Water Resources*, **31**(1), pp. 160-172 (2008).
15. Delclaux, F.; Coudrain, A. and Condom, T. "Evaporation estimation on Lake Titicaca: A synthesis review and modeling", *Hydrological Processes*, **21**, pp. 1664-1677 (2007).
16. Keskin, M.E. and Terzi, O. "Evaporation estimation models for Lake Egirdir, Turkey", *Hydrological Processes*, **20**, pp. 2381-2391 (2006).

EVAPORATION STUDY OF SAVEH DAM RESERVOIR USING MODIFIED ENERGY BUDGET METHOD

A. Hassani

aminh85@yahoo.com

M. Tajrishy (corresponding author)

tajrishy@sharif.edu

A. Abrishamchi

abrisham@sharif.edu

Department of Civil Engineering
Sharif University of Technology

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 29, Issue 1, Page 115-127, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 31 January 2011; received in revised form 16 August 2011; accepted 10 September 2011.

Abstract

Evaporation is generally regarded as the most significant contributor to water loss from reservoirs in semi-arid regions of the world, such as Iran, and a precise estimate of this parameter is increasingly required for several agency functions, particularly water agencies. Monthly summer evaporation from the Saveh Dam reservoir, which accounts for around 50% of yearly water loss, was determined using the Bowen Ratio Energy Budget (BREB) method, and then compared and verified by results obtained by an automatic weather station and net radiometer placed near the dam reservoir site.

In order to assess the data obtained from the adjacent weather station of the reservoir (Shah Abbasi weather station) and experimental equations, an automatic weather station (AWS) and a net radiometer were located near the reservoir for collecting parallel data, during four months of 2008 (July-October). With these data, all Shah Abbasi weather station data have been adjusted and the BREB method was modeled again for all of the study period. These four months were divided into 12 energy budget intervals, and, for two thirds of them, the modified BREB results (MBREB) were larger than BREB. Furthermore, the largest difference between them occurred from the 9th to the 15th of July, with 11.2 mm, and there was at least 1.7 mm difference for the 8th to the 22nd of October interval. The maximum and minimum differences between results of evaporation using these two sets of data for these four months of field study were 15 and 3 percent, respectively, and the total evaporation difference was equal to 75 mm. Also, the yearly average BREB evaporation rate, using field study data (MBREB), was equal to 1620 mm, and the result was 1560 mm with Shah Abbasi station data. In addition, the accumulated volume of evaporation rate using field study data (MBREB) was equal to 83.7 MCM and the result was 87.0 MCM with Shah Abbasi station data

for these 163 months. A sensitivity analysis for MBREB results showed that parameters, such as longwave and shortwave radiation, reflected longwave radiation from the water surface, air temperature, and water surface temperature variations have large effects on evaporation rates from this small reservoir. However, changes in stored energy in reservoir water, reflected longwave and shortwave radiation, Bowen Ratio and atmospheric pressure, caused small sensitivity in MBREB evaporation rates. Results of this study could explain the importance and sensible contribution of evaporation rates as a fundamental parameter in the hydrological cycle of lake ecosystems in the arid regions of Iran.

Key Words: free water surface evaporation, energy budget method, automatic weather station saveh reservoir or saveh dam.