

بیان انرژی و ساختار حرارتی مخازن در مناطق خشک

امین حسنی^۱، دانش آموخته کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

مسعود تجربی، دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

احمد ابریشم چی، استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۰۶/۱۸

دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۱۲/۱۲

چکیده

دانستن میزان تبخیر از سطوح آزاد آبی نظیر کانال‌ها، مخازن و دریاچه‌ها به منظور مدیریت صحیح و دقیق منابع آبی ضروری است. در این تحقیق، میزان تبخیر ماهانه با استفاده از روش بیان انرژی برای دریاچه سد ساوه (الغدیر) بین سال‌های ۱۳۸۶-۱۳۷۴ محاسبه شده است. میزان تبخیر سالانه محاسبه شده با استفاده از این روش برای این حجم آبی از میزان بیشینه ۱۷۴ سانتی‌متر در سال ۱۳۸۴ تا مقدار حداقل ۱۵۱ سانتی‌متر در سال ۱۳۷۶ نوسان نشان می‌دهد. همچنین، الگوی تغییرات مقادیر ماهانه تبخیر از سالی به سال دیگر متفاوت است، ولی به‌طور کلی می‌توان گفت که الگوی مورد انتظار به‌طور میانگین مقادیر اندک تبخیر در ماه‌های دی و بهمن و به دنبال آن افزایش تا ماه‌های خرداد و تیر است. بررسی ساختار حرارتی دریاچه سد ساوه نشان می‌دهد که شارهای انرژی ورودی و خروجی به این حجم آبی نوسانات زیادی از نظر مقدار و شدت دارا بوده، تشعشع خورشیدی و اتمسفریک ورودی و تشعشع طول موج بلند گسیل شده از آب دریاچه بزرگ‌ترین مقادیر شار انرژی تبادل برای این دریاچه کوچک و عمیق هستند.

واژه‌های کلیدی: تبخیر، تشعشع خورشیدی، سد ساوه، سطح آزاد، منابع آب

مقدمه

تلفات آب ناشی از تبخیر معمولاً یکی از بزرگ‌ترین مؤلفه‌های بیان آبی دریاچه‌ها است و با وجود اهمیت بسیار زیاد، تبخیر به ندرت با استفاده از یکی از روش‌های دقیق مورد تخمین قرار گرفته است که علت اصلی این مطلب را می‌توان در سرمایه‌گذاری مورد توجه برای تهیه دستگاه‌ها و نیروی کاری متخصص این امر جستجو نمود. به‌عنوان مثال، تخمین تبخیر با استفاده از روش بیان انرژی به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین روش‌ها به‌منظور پایش طولانی مدت و پیوسته میزان تبخیر است و با توجه به بهبود و پیشرفت در زمینه دستگاه‌ها و حس‌گرهای اندازه‌گیری دقیق در سال‌های اخیر در بسیاری از نقاط دنیا تحقیقات گسترده و طولانی مدتی به‌منظور درک بیان انرژی منابع آبی تدارک دیده شده است.

در این رابطه، Dos Reis و همکاران (۱۹۹۸) یک مطالعه ۳۰ ماهه بیان انرژی برای تبخیر دریاچه‌ای کوچک واقع در جنوب شرقی برزیل انجام دادند. در مطالعه انجام گرفته به‌وسیله Vallet-Coulomb و همکاران (۲۰۰۱) میزان تبخیر از یک دریاچه کم عمق در منطقه گرم‌سیری آفریقا با استفاده از داده‌های هواشناسی و اقلیمی ماهانه مربوط به سه دهه گذشته انجام گرفت. در این مطالعه از روش بیان انرژی برای تخمین تبخیر استفاده شد و در انتها حساسیت نتایج را نسبت به تغییرات متغیرهای ورودی تحلیل نمودند تا آزمون‌های پایداری محاسبات نتیجه شده به‌دست آورند. همچنین، اگرچه محاسبات اولیه و مقدماتی تبخیر برای دریاچه Mirror، واقع در شمال شرقی ایالات متحده آمریکا با استفاده از تشتک تبخیر صورت گرفته بود، اما روش بیان انرژی (BREB) به‌وسیله Winter (۲۰۰۳) برای تخمین

^۱ نویسنده مسئول aminh85@yahoo.com

هرچه دقیق‌تر میزان تبخیر از این دریاچه کوهستانی در بازه‌های بیلان انرژی هفتگی و دوهفتگی در طی دوره‌های آزاد آبی بین سال‌های ۱۹۸۷-۱۹۸۲ انجام پذیرفت و حساسیت روش نسبت به مؤلفه‌های دخیل در محاسبات سنجیده شد. طی تحقیقی، Lenters و همکاران (۲۰۰۵) نیز مطالعه مفصلی شامل تحلیل ۱۰ ساله به‌صورت تغییرات فصلی، برون فصلی و درون سالی بر روی میزان تبخیر دریاچه Sparkling واقع در شمال ایالات متحده آمریکا انجام دادند. 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 گزارش شد که روش بیلان انرژی بهترین روش موجود برای تخمین میزان تبخیر از سطوح آزاد آبی است. به‌عنوان یک تحقیق طولانی‌مدت به‌منظور درک هیدرولوژی دریاچه Rosenberry, Mirror و همکاران (۲۰۰۷) در شش فصل آبی و برای ۳۷ ماه به مقایسه ۱۴ روش متفاوت تخمین تبخیر با روش بیلان انرژی به‌عنوان روش استاندارد پرداختند. این مطالعه این فرصت را در اختیار قرار داد تا روش‌های تخمین تبخیر که ارزان‌تر بوده، به نیروی انسانی کم‌تری احتیاج دارند، بسته به اطلاعات و منابع در دسترس، شناسایی شوند. در تحقیق دیگری، Criado-Aldeanueva و همکاران (۲۰۱۲) نیز آمار متعدد هواشناسی را برای متعیرهای فصلی و سالانه حرارت و بیلان آبی را در دریای مدیترانه ترکیب نموده و متوسط طولانی‌مدت آن‌ها را با مقادیر مشاهده‌ای مورد مقایسه قرار دادند. متأسفانه، در ایران با وجود اهمیت و ارزش فوق‌العاده منابع و مخازن آبی تا کنون مطالعه دقیق میزان تلفات تبخیر از سطوح آزاد آبی با استفاده از روش بیلان انرژی صورت نپذیرفته است. در حالی که با وجود پیشرفت‌های چشم‌گیر در عرصه فن‌آوری حس‌گرها و همچنین با بهره‌گیری از تجربیات محققین دیگر می‌توان در این رابطه اقدام نمود. بدین‌منظور در تحقیق حاضر با استفاده از داده‌های موجود و در مواردی استفاده از روابط تجربی، روش بیلان انرژی برای تخمین میزان تبخیر از مخزن سد ساوه (الغدیر) بین سال‌های ۱۳۸۶-۱۳۷۴ به‌کار گرفته شده و با توجه به نحوه لایه‌بندی و ساختار حرارتی مخزن، سهم هر یک از شارهای انرژی در بیلان انرژی آن مشخص شده است. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند اهمیت و سهم غیر قابل انکار میزان تبخیر را به‌عنوان یک پارامتر اساسی در بیلان آبی بوم-سازگان‌های آبی در مناطق خشک و مناطق واقع در فلات مرکزی ایران نمایان سازد.

مواد و روش‌ها

براساس مطالعات طرح جامع آب کشور که در سال ۱۳۷۷ به‌وسیله شرکت مهندسی مشاور جاماب صورت پذیرفته، طول رودخانه اصلی قره‌چای تا خروجی ایستگاه عمرآباد حدود ۲۷۰ کیلومتر و ارتفاع و شیب متوسط حوضه به‌ترتیب ۱۹۲۷ متر و ۰/۶ درصد بوده، از ارتفاعات سلسله جبال زاگرس سرچشمه گرفته، پس از گذشتن از محل سد ساوه، مازاد جریان‌های سطحی خود را به‌داخل حوض سلطان (دریاچه نمک) تخلیه می‌نماید. دریاچه سد ساوه (الغدیر) در دره ورفران، در حدود ۱۵۰ کیلومتری جنوب‌غربی شهر تهران و 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 رودخانه قره‌چای ایجاد شده است. سطح حوزه آبخیز دریاچه این سد ۱۷۸۰۰ کیلومتر مربع بوده، محل احداث سد در حدود ۲۶۰ کیلومتر از سرچشمه رودخانه قره‌چای فاصله دارد.

دریاچه در رقوم پر، حدود نه 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 در سال ۱۳۴۵ دقیقاً در مجاورت مخزن سد ساوه تأسیس شده است و از همان زمان داده‌های اقلیمی از جمله درجه حرارت بیشینه، کمینه، خشک و مرطوب، رطوبت نسبی، سرعت باد، بارندگی، و تبخیر از تشتک طبقه A را ثبت و گزارش می‌نماید. بر اساس سامانه اقلیمی دومارتن اصلاح شده، محدوده این ایستگاه دارای اقلیم خشک و در سامانه طبقه‌بندی سیلیانینف دارای اقلیم خشک معتدل است. میانگین بارندگی منطقه بین سال‌های ۱۳۸۶-۱۳۷۴ 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 است. در شکل ۱ موقعیت مخزن سد ساوه (الغدیر) نشان داده شده است.

به طور کلی، بیلان انرژی یک حجم آبی که انتقال انرژی خالص ورودی و خروجی را به تغییرات ذخیره انرژی مرتبط می‌سازد، به صورت رابطه (۱) ارائه می‌شود.

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

که در آن، 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 گسیل شده از حجم آب، Q_v انرژی خالص همرفت یافته به حجم آب، Q_e انرژی استفاده شده برای فرآیند تبخیر، Q_h انرژی گسیل شده از آب به صورت گرمای ظاهری، Q_w انرژی همرفت یافته از حجم آبی به وسیله آب تبخیر شده، Q_b حرارت منتقل شده از رسوبات بستر دریاچه به آب و Q_x تغییر در محتوای انرژی حجم آبی هستند و همگی بر حسب وات بر مترمربع (Wm^{-2}) ارائه می‌شوند. از این میان سه شاخص Q_e ، Q_h ، Q_w به صورت مستقیم محاسبه نمی‌شوند و می‌توان آن‌ها را با استفاده از روابط (۲) الی (۴) و به عنوان تابعی از میزان تبخیر تعیین نمود.

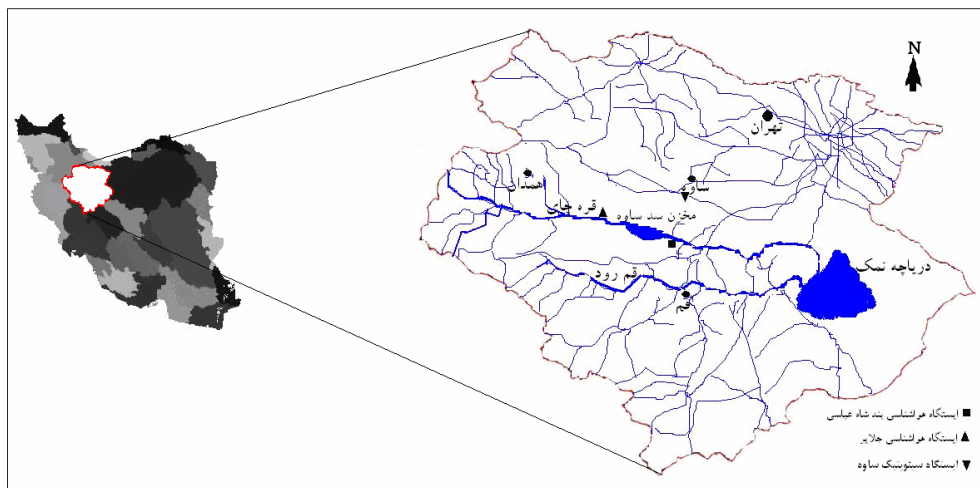
$$Q_e = \rho E_{eb} L \quad (2)$$

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

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

که در آن‌ها، ρ وزن مخصوص آب تبخیر شده (کیلوگرم بر مترمکعب)، E_{eb} میزان تبخیر حاصل از روش بیلان انرژی (سانتی‌متر در روز)، L گرمای نهان تبخیر آب (ژول بر کیلوگرم)، R نسبت باون (بدون بعد)، c گرمای مخصوص آب ($JKg^{-1}K^{-1}$)، T_e درجه حرارت آب تبخیر شده که برابر با درجه حرارت سطح آب (T_0) فرض می‌شود (درجه سلسیوس) و T_b درجه حرارت پایه اختیاری که اغلب برابر با صفر فرض می‌شود. به این ترتیب، برای محاسبه میزان تبخیر با استفاده از روش بیلان انرژی در یک بازه زمانی معین رابطه (۱) به صورت رابطه (۵) در خواهد آمد.

$$E_{eb} = \frac{Q_s - Q_r + Q_a - Q_{ar} - Q_{bs} + Q_v + Q_b - Q_x}{L(1 + R) + T_0} \quad (5)$$



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.

تقریباً تمامی داده‌های مورد نیاز این تحقیق به صورت روزانه از ایستگاه بند شاه‌عباسی و تعداد اندکی (همانند تعداد ساعات واقعی روشنایی روز و درجه حرارت نقطه شب‌نم) نیز از ایستگاه سینوتیک 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 شود. تغییرات روزانه بلند مدت درجه حرارت میانگین، رطوبت نسبی میانگین، سرعت باد متوسط و نسبت n/N ثبت شده در ایستگاه بند شاهعباسی برای دوره آماری ۱۳ ساله مورد مطالعه قرار گرفت.

براساس آمار مربوط به درجه حرارت هوا، به جز کاهش غیرعادی درجه حرارت در زمستان سال ۱۳۸۶، تقریباً تغییرات درجه حرارت روزانه در سال‌های آماری مشابه است. همچنین، بیشینه دمای منطقه در فصل تابستان سال ۱۳۷۴ به ۴۳ درجه سانتی‌گراد و کمینه درجه حرارت در زمستان سال ۱۳۸۶ به ۱۳- درجه سانتی‌گراد رسیده است که این امر نشان از نوسانات بالای درجه حرارت منطقه تا بیش از ۵۵ درجه سانتی‌گراد در سال دارد. داده‌های رطوبت نسبی روزانه برای ۱۳ سال آماری از ایستگاه بند شاهعباسی تهیه شده، بر این اساس می‌توان گفت میانگین رطوبت نسبی در منطقه حدود ۷۵ درصد است و یک افت محسوس بین سال‌های ۱۳۷۹-۱۳۷۶ با میانگین ۶۵ درصد در این شاخص مشاهده می‌شود. در مورد سرعت باد نیز در اردیبهشت‌ماه بیش‌ترین سرعت باد (میانگین هفت متر بر ثانیه) و در دی‌ماه کم‌ترین سرعت باد (میانگین دو متر بر ثانیه) مشاهده شده است. حتی سرعت باد به‌طور متوسط در اواخر اردیبهشت‌ماه به ۴۰ کیلومتر بر ساعت (۱۱ متر بر ثانیه) نیز می‌رسد.

برای محاسبه میزان تبخیر از سطوح آزاد آبی با استفاده از روش بیلان انرژی به داده‌های تشعشع خورشیدی و اتمسفریک احتیاج است. بر اساس مذاکرات صورت گرفته با کارشناسان بخش تشعشعات سازمان هواشناسی کشور این نتیجه حاصل شد که در کشور تنها در ایستگاه‌های سینوپتیک بسیار اندکی اندازه‌گیری تشعشعات صورت می‌گیرد، که با توجه به پراکنده، 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 (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، به‌منظور فراهم نمودن داده‌های مربوط به این دو شاخص در این تحقیق از معادلات تجربی موجود استفاده شد. مقدار تشعشع خورشیدی ورودی (Q_s) را می‌توان با استفاده از ساعات روشنایی روز در منطقه و با استفاده از معادله آنگستروم به‌صورت رابطه (۶) معرفی نمود.

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

که در آن، n/N نسبت ساعات روشنایی روز واقعی به تئوری، Q_0 تشعشع خورشیدی بخش خارجی جو (Wm^{-2})، و a و b ضرایبی وابسته به موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه هستند. بر اساس مطالعات انجام گرفته به‌وسیله کمالی و مرادی (۱۳۸۳)، برای منطقه دشت ساوه مقادیر این دو شاخص به‌صورت $a = 0.28$ و $b = 0.4$ در نظر گرفته می‌شود. مقادیر واقعی ساعات روشنایی روز (n) به‌صورت روزانه از ایستگاه سینوپتیک ساوه حاصل شد و برای محاسبه مقادیر N و Q_0 از معادلات زنجیره‌ای که از موقعیت جغرافیایی و روز مشخص سال استفاده می‌نمایند، بهره گرفته شده است.

حال با مشخص بودن میزان پارامترهای Q_0 ، n/N ، و a و b در هر روز از سال می‌توان با استفاده از معادله (۶) مقدار تشعشع خورشیدی ورودی (Q_s) را برای آن روز خاص از سال تعیین نمود (شکل ۵). تشعشع موج کوتاه بازگشتی از سطح آب (Q_r) نیز از رابطه (۷) حاصل می‌شود.

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

که در آن، a_s قابلیت انعکاس تشعشع موج کوتاه آب و معمولاً برابر با ۰/۰۷ فرض می‌شود. در شکل ۶ مقادیر محاسبه شده روزانه میزان تشعشع موج کوتاه بازگشتی از سطح آب در بازه سال‌های مورد مطالعه ارائه شده است. به‌منظور تعیین میزان تشعشع اتمسفریک ورودی (Q_a) نیز می‌توان از رابطه (۸) استفاده نمود.

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

که در آن، σ ثابت استفان-بولتزمن ($5/67 \times 10^{-8} Wm^{-2} \circ K^{-4}$)، ε_a قابلیت انتشار جو و T_a درجه حرارت هوا (درجه کلوین) هستند. معادلات فراوانی برای محاسبه مقدار ε_a موجود است که معمولاً همگی بر اساس فشار بخار، درجه حرارت هوا و میزان ابرناکی هستند. در این تحقیق از اطلاعات گرافیکی روابط (۹) برای $n/N \leq 0.4$ و (۱۰) برای $n/N \geq 0.4$ استفاده شده است.

$$\varepsilon_a = 0.87 - \frac{n}{N} (0.175 - 29.92 \times 10^{-4} e_a) + 2.693 \times 10^{-3} e_a \quad (9)$$

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

روابط (۹) و (۱۰) اثرات فشار بخار و مقدار ابرناکی را با یکدیگر ترکیب نموده، برای شرایط هوای ابری و غیر ابری نتایج مناسبی به دست می‌دهد. تشعشع موج بلند بازگشتی از سطح آب (Q_{ar}) نیز از رابطه (۱۱) حاصل می‌شود.

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

که در آن، a_a قابلیت انعکاس تشعشع موج بلند سطح آب بوده، معمولاً برابر با ۰/۰۳ فرض می‌شود. تشعشع موج بلند گسیل شده از حجم آب (Q_{bs}) از همان رابطه 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 می‌شود و قابلیت انتشار در عدد $\varepsilon_b = 0.97$ ثابت می‌شود. بر اساس معادلات و توضیحات ذکر شده مقادیر روزانه شاخص‌های مورد نظر محاسبه شدند، که مقادیر آن‌ها برای ۱۳ سال دوره آماری مورد نظر (۱۳۸۶-۱۳۷۴) ارائه شده است.

برای محاسبه مقدار انرژی ذخیره شده در حجم آبی (Q_x) نیز می‌توان از رابطه (۱۲) استفاده نمود.

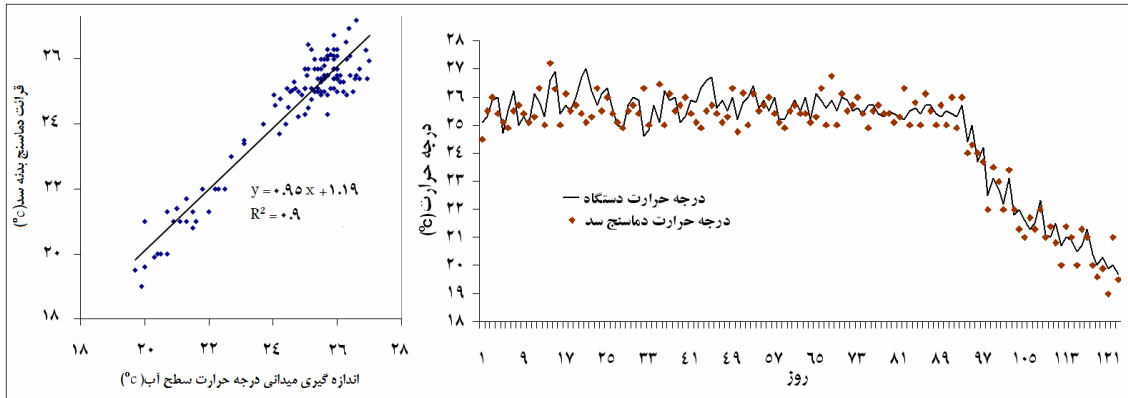
$$Q_x = \frac{\rho \cdot c}{a_s} \sum_z \left(\frac{\Delta T(z)}{\Delta t} a(z) \Delta z \right) \quad (12)$$

که در آن، a_s مساحت متوسط سطح دریاچه در بازه زمانی، $\Delta T(z) = T_{t+7}(z) - T_{t-7}(z)$ تغییرات درجه حرارت میانگین دریاچه در عمق z ، Δt بازه زمانی (ثانیه)، $a(z)$ مساحت دریاچه در عمق z و Δz ضخامت هر لایه است. بنابراین، به منظور تعیین انرژی ذخیره شده در دریاچه (Q_x) به منحنی ارتفاع-سطح-حجم (نقشه فرازسنجی) دریاچه و همچنین درجه حرارت روزانه سطح آب و ساختار حرارتی (پروفیل حرارتی) دریاچه احتیاج است. براساس آخرین عملیات میدانی سال ۱۳۸۲، منحنی فرازسنجی دریاچه در اختیار است.

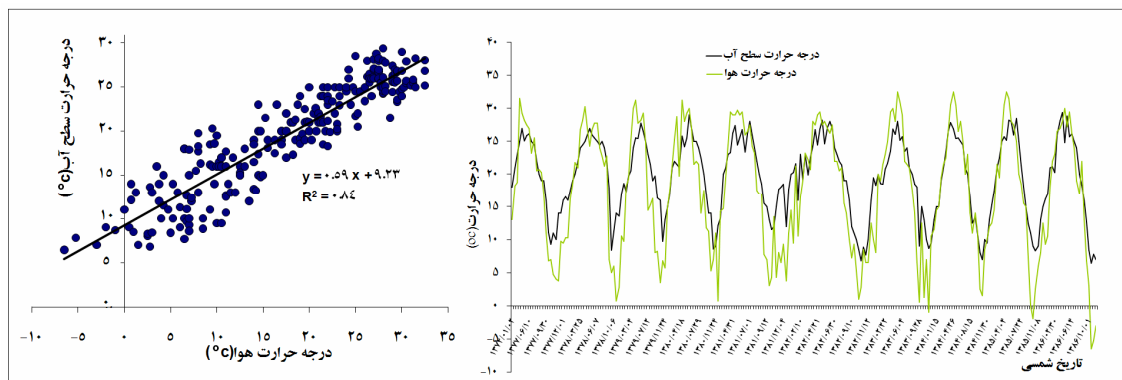
مهم‌ترین مشکل در استفاده از روش بیلان انرژی برای تخمین میزان تبخیر، نیاز آن به شاخص درجه حرارت سطح آب و ساختار حرارتی مخزن است. برای حل این مشکل و تأمین نمودن داده‌های روزانه درجه حرارت سطح آب، بررسی داده‌های موجود و مرتبط با شاخص مورد نیاز انجام گرفت. از آن‌جا که اندازه‌گیری‌های بسیار اندک و پراکنده 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 شده‌اند. همچنین، ضخامت بتن روی این دماسنج‌ها متفاوت است 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 آخر مهر در بازه‌های دو هفتگی 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 مورد قرائت قرار گرفت)، مشاهده شد که تفاوت این دو مقدار در بیش‌تر موارد بسیار اندک بوده، با تقریب مناسب می‌توان از این داده‌ها در سال‌هایی که اندازه‌گیری صورت نگرفته است به‌جای داده‌های درجه حرارت سطح آب و همچنین ساختار حرارتی مخزن استفاده نمود (شکل ۲).

برای تمامی پروفیل‌های حرارتی اندازه‌گیری شده مخزن در بازه‌های دو هفتگی فصل تابستان سال ۱۳۸۷ تقریباً از عمق ۲۰ متری سطح آب به پائین تغییرات درجه حرارت محسوس نبوده، 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 معادله بیلان انرژی خطای زیادی در نتایج این روش ایجاد نخواهد نمود. بر این اساس، مقادیر مربوط به Q_b و Q_v اغلب بسیار کوچک بوده، 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 شد، و معدود روزهایی از ۱۳ سال دوره آماری که در آن‌ها داده های درجه حرارت روزانه سطح آب به‌وسیله دماسنج بدنه سد ثبت نشده با برقراری یک رابطه ریاضی میان داده‌های درجه حرارت سطح آب و درجه حرارت هوا در همان روزها بررسی (شکل ۳) و تغییرات این دو شاخص در مدت مورد مطالعه با هم مقایسه شد. به این ترتیب، داده‌های درجه حرارت سطح آب به‌صورت روزانه بازسازی شدند.



شکل ۲- مقایسه اندازه‌گیری میدانی درجه حرارت سطح آب و دمای دماسنج‌های بدنه سد



شکل ۳- تغییرات درجه حرارت سطح آب حاصل از دماسنج‌های بدنه سد و درجه حرارت هوا (راست) و نمودار ایجاد شده بین درجه حرارت سطح آب حاصل از دماسنج‌های سد و دمای هوا (چپ)

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در بعضی اوقات سال ارتباط خطی مناسبی میان درجه حرارت سطح آب و درجه حرارت هوا وجود ندارد که این عدم تناسب مناسب بیش‌تر در هنگام اختلاط رخ داده، در این اوقات دمای تعادل میان درجه حرارت سطح آب و هوا موجود نیست. بنابراین، می‌توان معادله همبستگی نسبتاً پائین 0.84 را ناشی از صورت گرفتن اختلاط در دریاچه دانست که این پدیده در بیش‌تر اوقات در منطقه در اواسط فصل پائیز رخ می‌دهد. احتمالاً، با حذف داده‌های مربوط به زمان اختلاط در این رابطه ضریب همبستگی نسبت به شرایط موجود بهبود خواهد یافت. همچنین، با استفاده از همین روش ساختار حرارتی دریاچه در بازه‌های زمانی میانگین دو هفتگی به‌منظور استفاده از روش بیلان انرژی از داده‌های قرائت شده دماسنج‌های موجود در نقاط مختلف بدنه سد استخراج شد. 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 593 بازه بیلان انرژی تقسیم شد. برای تعیین مقدار گرمای نهان تبخیر (L) بر حسب ژول بر کیلوگرم می‌توان از رابطه (۱۳) و برای تعیین نسبت باون (R) از رابطه (۱۴) بهره گرفت.

$$L = 2.5 - 0.0024T_0 \quad (13)$$

$$R = \frac{0.61P}{100} \left(\frac{T_0 - T_a}{e_0 - e_a} \right) \quad (14)$$

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 عامل تبدیل فشار به کیلو پاسکال است. فشار اتمسفریک در محل دریاچه نیز با استفاده از معادله ارائه شده به وسیله Jensen (۱۹۹۰) از رابطه (۱۵) تعیین می‌شود.

$$P = 101.3 \left[\frac{288 - 0.0065H}{288} \right]^{5.257} \quad (15)$$

که در آن، P فشار اتمسفریک (Kpa) و H ارتفاع محل از سطح آب‌های آزاد (متر) می باشد. از آن جا که اندازه‌گیری‌های فشار اتمسفریک در ایستگاه بند شاه‌عباسی صورت نمی‌گیرد، این شاخص در محل سد ساوه با استفاده از این معادله تجربی (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 کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است.

نتایج و بحث

نتایج مطالعات بیلان انرژی به‌طور مختلف قابل ارائه است و میزان تبخیر محاسبه شده با این روش، به‌علت دقت بالا، برای انجام عملیات آماری از قبیل تحلیل حساسیت بسیار مناسب هستند. در هر صورت، بازه‌های زمانی مورد استفاده در این نوع مطالعه در سال‌های مختلف روزهای مشابهی را پوشش نمی‌دهند و به همین علت مقایسه میزان تبخیر از یک فصل به فصل دیگر یا از سالی به سال دیگر دشوار است. الگوی مقادیر ماهانه تبخیر از سالی به سال دیگر متغیر است، اما در هر سال کم‌ترین میزان تبخیر در فصل زمستان (در بهمن ماه) رخ می‌دهد و مقادیر تا تیرماه افزایش داشته، در ماه مرداد به مقدار بیشینه 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 در کل ۱۳ سال آماری، بین سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۱ برابر با ۴/۹ سانتی‌متر است.

میزان تبخیر محاسبه شده با استفاده از روش بیلان انرژی برای ۱۳ سال کامل آماری (۱۳۸۶-۱۳۷۴)، به‌طور میانگین از میزان بیشینه ۷۸/۱ سانتی‌متر در فصل تابستان تا میزان کمینه ۱۵/۸۵ سانتی‌متر در فصل زمستان نوسان دارد. با در نظر گرفتن میانگین سالانه تبخیر ۱۶۰/۴ سانتی‌متری برای دوره آماری می‌توان گفت حدود ۴۹ درصد تبخیر سالانه از مخزن سد ساوه فقط در سه ماهه فصل تابستان و تنها حدود ۱۰ درصد آن در فصل زمستان صورت می‌گیرد، که این امر نشان از وجود تابستان‌های بسیار گرم و خشک و هم‌چنین زمستان‌های سرد و خشک در منطقه دارد.

بیش‌ترین میزان تبخیر برای بازه‌های بیلان انرژی برای بازه ۱۱-مرداد الی ۲۷-تیر سال ۱۳۸۴ برابر با ۱۶/۹ سانتی‌متر و کم‌ترین میزان برای بازه ۲۱-بهمن الی ۹-بهمن سال ۱۳۷۳ برابر با ۱/۱ سانتی‌متر رخ داده است. بیش‌ترین میزان تبخیر سالانه با استفاده از روش بیلان انرژی با مقدار ۱۶۸ سانتی‌متر در سال ۱۳۸۱ و کم‌ترین آن با مقدار ۱۴۷ سانتی‌متر در سال ۱۳۷۶ رخ داده است.

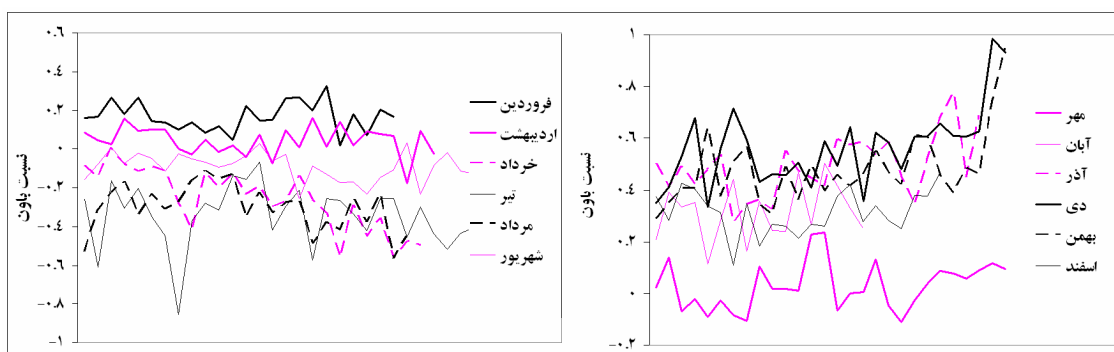
تنوع زیادی برای شارهای انرژی و تشعشعات ورودی و خروجی از نظر شدت برای دریاچه مشاهده می‌شود. بزرگ‌ترین شارهای انرژی شامل تشعشع خورشیدی ورودی، تشعشع اتمسفریک ورودی و تشعشع موج بلند گسیل شده به‌وسیله آب دریاچه به‌ترتیب با شدت میانگین حدود ۲۰۵، ۳۲۲ و ۴۰۴ وات بر مترمربع هستند.

در مقایسه، تعدادی از شارهای انرژی مانند انرژی خالص هم‌رفت یافته به حجم آب (R_s) و حرارت منتقل شده از رسوبات بستر دریاچه به آب (R_{bs}) آن‌قدر مقادیر کوچکی را به‌خود اختصاص می‌دهند که صرف‌نظر کردن از آن‌ها در معادلات بیلان انرژی در نتایج امر خلل محسوسی ایجاد نمی‌نماید و بر این اساس با توجه به موجود نبودن داده‌های مناسب از قبیل مشخصات رسوبات کف بستر و هم‌چنین وجود باران‌های بسیار اندک در منطقه، برابر بودن درجه

حرارت آب خروجی از مخزن با آب موجود در مخزن و قابل اغماض بودن تبدلات آب زیرزمینی مخزن، از وارد نمودن این دو مؤلفه در معادلات مربوط به بیلان انرژی مخزن سد ساوه صرف نظر شده است.

به طوری که تشعشع موج بلند گسیل شده با میانگینی در حدود 400 Wm^{-2} و تغییرات انرژی ذخیره شده در دریاچه با میانگین حدود 30 Wm^{-2} به ترتیب مقادیر بیشینه و کمینه را به خود اختصاص داده اند. از میان شارهای مورد مطالعه و بر اساس رابطه (۲)، انرژی استفاده شده برای فرآیند تبخیر (R_e) مستقیماً با مقدار تبخیر در بازه‌های در نظر گرفته شده بیلان انرژی در ارتباط است و با استفاده از این معادله مقادیر این شاخص برای ماه‌های مورد مطالعه محاسبه شد. بر این اساس، مقدار این شار حتی در برخی موارد به مقدار شار تشعشع خورشیدی ورودی نیز نزدیک می‌شود و بیشینه مقدار آن تا حدود 320 Wm^{-2} در فصول گرم سال نیز افزایش می‌یابد. به طور عکس، در فصول سرد سال مقدار این شاخص تا حدود 30 Wm^{-2} تنزل می‌یابد.

در شکل ۴ مقادیر محاسبه شده نسبت باون میانگین ماهانه ارائه شده است. بر این اساس، این نسبت برای شش ماهه دوم سال بیش‌تر از مقادیر موجود برای شش ماهه اول سال هستند. دلیل این امر را می‌توان در رابطه (۱۴) جستجو نمود. با توجه به این رابطه در فصول گرم سال به علت بیش‌تر بودن درجه حرارت هوا نسبت به سطح آب این نسبت اغلب مقادیر منفی و برعکس در ماه‌های سرد سال به علت بیش‌تر بودن درجه حرارت سطح آب نسبت به درجه حرارت هوا مثبت خواهد بود.



شکل ۴- مقادیر محاسبه شده میانگین طولانی مدت نسبت باون برای ماه‌های مختلف سال (۱۳۷۴-۱۳۸۶).

بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق، می‌توان جمع‌بندی زیر را از شرایط تبخیر برای دریاچه سد ساوه بین سال‌های ۱۳۷۴-۱۳۸۶ بیان نمود که پیشنهاد می‌شود از این نتایج برای دریاچه‌هایی با شرایط اقلیمی مشابه نیز استفاده شود.

۱. الگوی میزان تبخیر در طول سال‌های آماری مورد مطالعه از نظر ماهانه، فصلی و حتی سالانه از یک سال با سال دیگر از نظر اندازه متفاوت است. به طور کلی می‌توان گفت در هر سال کم‌ترین مقدار تبخیر در فصل زمستان (در بهمن ماه) رخ می‌دهد و مقادیر تا تیر ماه افزایش داشته، 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. این امر را می‌توان این گونه توجیه نمود 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 شاخص‌های پراهمیت، مانند تشعشعات، و سایر شاخص‌های مؤثر در میزان تبخیر به حداقل خود در طول سال می‌رسند. همچنین، رفتار ترمودینامیکی مخزن در فصول مختلف سال بسیار متفاوت بوده، به طور کلی مخزن در فصول گرم سال از محیط پیرامون خود انرژی دریافت نموده، در فصول سرد سال این انرژی دریافتی را به محیط اطراف باز پس می‌دهد.

۲. میزان تبخیر محاسبه شده با استفاده از روش بیلان انرژی برای ۱۳ سال کامل آماری (۱۳۷۴-۱۳۸۶)، به طور میانگین از میزان بیشینه $78/1$ سانتی‌متر در فصل تابستان تا میزان کمینه $15/85$ سانتی‌متر در فصل

زمستان نوسان دارد. با در نظر گرفتن میانگین سالانه تبخیر ۱۵۶/۶ سانتی‌متری برای دوره آماری می‌توان گفت که حدود ۴۹ درصد تبخیر سالانه از مخزن سد ساوه فقط در سه ماهه فصل تابستان و تنها حدود ۱۰ درصد آن در فصل زمستان صورت می‌گیرد و این امر نشان از وجود تابستان‌های بسیار گرم و خشک و همچنین زمستان‌های سرد و خشک منطقه دارد.

۳. به‌علت بزرگ بودن مقادیر شارهای انرژی شامل تشعشع خورشیدی ورودی، تشعشع اتمسفریک ورودی، و تشعشع موج بلند گسیل شده به‌وسیله آب دریاچه، این پارامترها باید تا حد امکان با دقت بالا و افراد متخصص محاسبه گردند که به این منظور امروزه حس‌گرها و دستگاه‌های بسیار دقیق فراهم آمده است. در مقایسه، می‌توان گفت تعدادی از شارهای انرژی مانند انرژی خالص هم‌رفت یافته به حجم آب (Q_v) و حرارت منتقل شده از رسوبات بستر دریاچه به آب (Q_b) آن قدر مقادیر کوچکی را به‌خود اختصاص می‌دهند که صرف‌نظر کردن از آن‌ها در معادلات بیلان انرژی در نتایج امر خلل محسوسی ایجاد نمی‌نماید.

۴. باید یادآور شد که بسیاری از نتایج ارائه شده در این تحقیق را نمی‌توان برای دوره‌های زمانی یک یا دو ساله تجویز نمود. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده مزیت استفاده از روش بیلان انرژی به‌صورت مطالعه طولانی‌مدت است تا بتوان درک کافی و منطقی از تغییرات در برخی از فرآیندهای طبیعی پیدا نمود. همچنین، می‌توان با در نظر گرفتن سهم شاخص‌هایی کم اهمیت مانند انرژی خالص هم‌رفت یافته به حجم آب (Q_v) و حرارت منتقل شده از رسوبات بستر دریاچه به آب (Q_b) در معادلات بیلان انرژی نقش و تأثیر آن‌ها در نتایج را تعیین و همچنین با استفاده از حس‌گرهای دقیق و عملیات میدانی به‌جای استفاده از روابط موجود بسیاری از شاخص‌های دخیل در معادلات را به‌صورت مستقیم اندازه‌گیری نمود.

منابع مورد استفاده

۱. شرکت مهندسی مشاور جاماب. ۱۳۷۷. طرح جامع آب کشور، حوزه آبریز دریاچه نمک.
۲. کمالی، غ و ا. مرادی. ۱۳۸۳. تابش خورشید، اصول و کاربردها در کشاورزی و انرژی‌های نو. انتشارات پژوهشکده هواشناسی.
3. Criado-Aldeanueva, F., F. Javier Soto-Navarro and Jesús García-Lafuente. 2012. Seasonal and interannual variability of surface heat and freshwater fluxes in the Mediterranean Sea: budgets and exchange through the Strait of Gibraltar. *International Journal of Climatology*, 32(2):286–302.
4. Dos Reis, R.J. and N.L. Dias. 1998. Multi-season evaporation: energy-budget estimates and CRLE model assessment with limited meteorological observations. *Journal of Hydrology*, 208:135-147.
5. Jensen, M.E., R.D., Burman and R.G. Allen. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. A.S.C.E. Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70, 332 p.
6. Lenters, J.D., T.K. Kratz and C.J. Bowser. 2005. Effects of climate variability on lake evaporation: results from a long-term energy budget study of Sparkling Lake. northern Wisconsin (USA). *Journal of Hydrology*, 308:168–195.
7. Rosenberry, D.O., T.C. Winter, D.C. Buso and G.E. Likens. 2007. Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the Northeastern USA. *Journal of Hydrology*, 340:149-166.
8. Vallet-Coulomb, C., D. Legesse, F. Gasse, Y. Travi and T. Chernet. 2001. Lake evaporation estimates in tropical Africa (Lake Ziway, Ethiopia). *Journal of Hydrology*, 245:1-18.
9. Winter, T.C, D.C. Buso, D.O. Rosenberry, G.E. Likens, A.M.J. Sturrock and D.P. Mau. 2003. Evaporation determined by the energy budget method for Mirror Lake, New Hampshire. *Limnology and Oceanography*, 48(3):995–1009.