

برآورد تبخیر از سطح آزاد دریاچه سد زاینده‌رود با استفاده از سبال و مقایسه با روش‌های تجربی

سیدامید میرمحمدصادقی^۱ - مهدی قبادی نیا^{۲*} - محمدحسن رحیمیان^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۰۸

چکیده

در سال‌های اخیر با توجه به بروز مشکلات کم‌آبی و خشک‌سالی در اکثر نقاط کشور، تبخیر سطحی از مخازن سدها، دریاچه‌ها و سایر سطوح آبی به‌عنوان یکی از محل‌های هدررفت آب، مورد توجه قرار گرفته و لذا، برآورد دقیق‌تر حجم تبخیر صورت گرفته از این سطوح و راهکارهای کاهش آن از اهمیت زیادی برخوردار شده است. در پژوهش حاضر، مخزن و دریاچه سد زاینده‌رود با مساحت ۵۴ کیلومتر مربع انتخاب و برای تخمین تبخیر آب از این مخزن، روش‌های مختلف تجربی شامل روش‌های مایر، ماریانو، شاهتین، هنرف، ایوانف، تیچومیروف و روش سازمان عمران اراضی آمریکا مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین، الگوریتم بیلان انرژی سطحی (سبال) روی هشت تصویر ماهواره لندست در ماه‌های خرداد تا شهریور سال ۱۳۹۶ برای برآورد تبخیر از دریاچه سد پیاده‌سازی گردید. به منظور ارزیابی دقت روش‌های مختلف، نتایج به‌دست آمده در هر روش با اندازه‌گیری‌های تشت تبخیر در محوطه سد مقایسه شد. نتایج حاصل نشان داد که هیچ یک از روش‌های تجربی، همبستگی مناسب و قابل قبولی با اندازه‌گیری‌های تبخیر در محل ندارند. در مقابل، روش سبال علاوه بر نمایش توزیع مکانی تبخیر در سطح مخزن، دارای ضرایب تبیین، RMSE و MAE به ترتیب ۰/۲۸ و ۰/۳۱ میلی‌متر بر روز بوده که نشان‌دهنده دقت بالای این روش در تخمین تبخیر آب نسبت به فرمول‌های تجربی در برآورد حجم تبخیر سطحی آب از مخازن است. همچنین، با توجه به درصد بالای خطای برآورد تبخیر در روش‌های تجربی، واسنجی ضرایب و پارامترهای آنها نسبت به شرایط اقلیمی مختلف، ضروری خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: بیلان انرژی، پیکره‌های آبی، ماهواره لندست ۸، مخزن سد

مقدمه

به‌عنوان پارامتر تعیین‌کننده در معادله بیلان آب، نقش مهمی در راستای برنامه‌ریزی، بهره‌برداری و تخصیص منابع آب در شرایط بحران کم‌آبی کنونی دارد و اندازه‌گیری صحیح آن در پیکره‌های بزرگ آبی باعث بهبود دقت تعیین حبابه می‌شود. روش‌های تجربی محاسبه تبخیر از سطوح آزاد آب علاوه بر این که نیاز به داده‌های هواشناسی متعدد دارند، تبخیر را به صورت نقطه‌ای برآورد کرده و قابل تعمیم به سطوح وسیع نیستند (۲). روش بیلان آب نیز علاوه بر وقت‌گیر بودن، برای اجرا در سطوح وسیع دریاچه‌های سد بسیار پرهزینه بوده که عملاً نمی‌تواند الزامات مطالعات کوتاه مدت را برآورده سازد (۳). در سال‌های اخیر و با پیشرفت سنجنده‌های ماهواره‌ای و روش‌های سنجنش از دور، استفاده از تصاویر تهیه شده توسط این سنجنده‌ها در تعیین میزان تبخیر - تعرق بسیار مورد توجه قرار گرفته است. روش‌های مبتنی بر سنجنش از دور می‌توانند تبخیر - تعرق را در مقیاس پیکسل در پیکسل برای دوره‌های زمانی کوتاه در یک سطح فضایی بزرگ فراهم کنند. با استفاده از روش‌ها و الگوریتم‌های

مدیریت منابع آب بخشی از برنامه‌ریزی توسعه کشورها بوده و هر کشوری بر مبنای میزان منابع آب در دسترس، استراتژی و برنامه خاصی را برای بهره‌برداری بهینه آنها اجرا می‌نماید. با توجه به محدودیت منابع آب در اقلیم خشک و نیمه خشک کشور ایران، هرگونه برنامه‌ریزی برای تخصیص آب به کشاورزی، صنعت و شرب بایستی بر مبنای پایداری و تداوم منابع آبی صورت گیرد (۱). تبخیر

۱ و ۲ - به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد و استادیار، گروه آبیاری-زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

* - نویسنده مسئول: (Email: mahdi.ghobadi@gmail.com)

۳ - استادیار، مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران

مختلفی که مبتنی بر بیلان انرژی هستند، مؤلفه‌های مختلف بیلان در مقیاس منطقه‌ای و با کم‌ترین داده‌های زمینی محاسبه می‌شود که ارتباط بین تشعشعات دریافتی توسط ماهواره‌ها از سطح زمین در باند-های مختلف و همچنین تفاوت هیدرولوژیکی سطوح مختلف، اساس روابط در این الگوریتم‌ها است (۴).

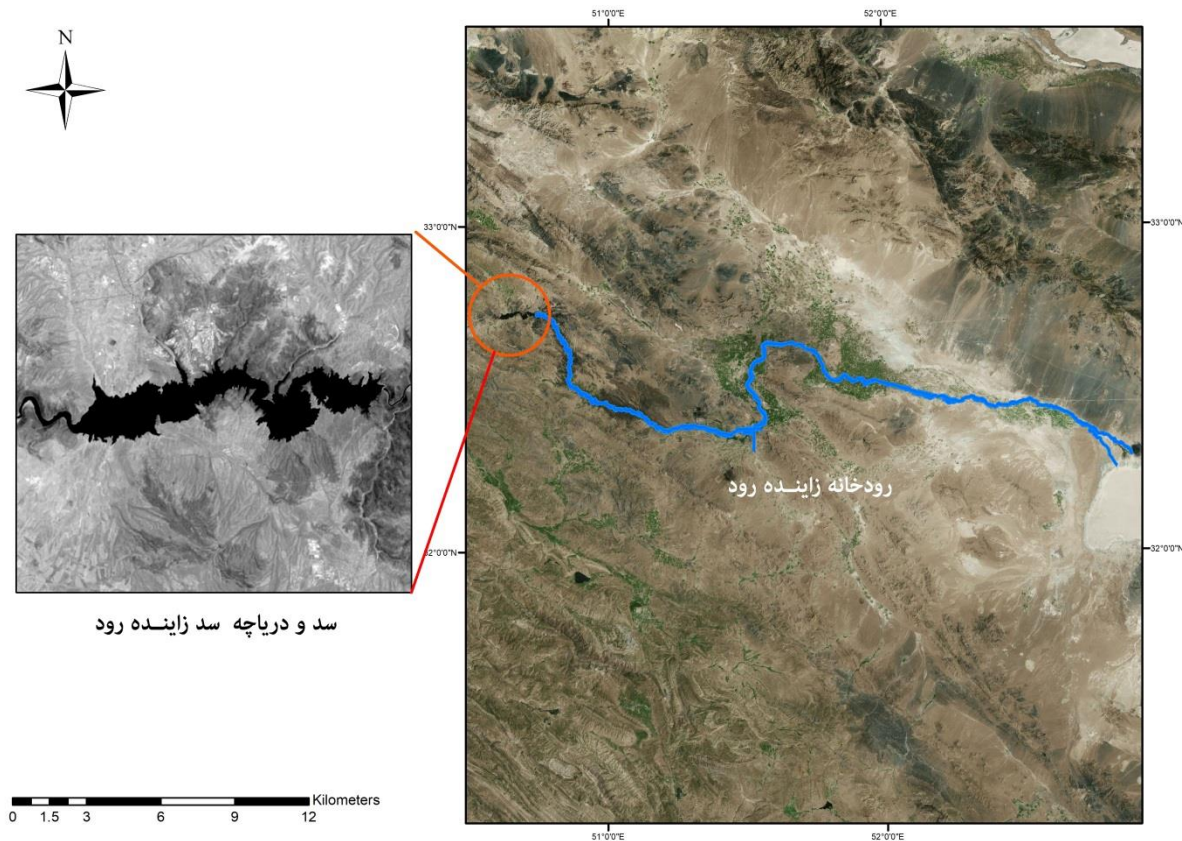
پژوهش‌گران مختلفی انواع روش‌های محاسبه تبخیر از سطح آزاد آب را مورد ارزیابی قرار دادند. در این میان، الگوریتم بیلان انرژی سطح زمین (SEBAL) با استفاده از داده‌های سنجنش از دور برای اولین بار توسط باستیانس و همکاران (۵) برای برآورد تبخیر-تعرق از سطح پوشش گیاهی ارائه شد. این الگوریتم از جمله روش‌های تک منبعی است که تبخیر را بر اساس تعادل انرژی در سطح هر پیکسل از یک تصویر ماهواره‌ای محاسبه می‌نماید (۶). پژوهش‌های بسیاری کارایی روش سبال را برای برآورد تبخیر-تعرق مناطق کشاورزی تایید نموده‌اند، اما این روش برای پهنه‌های آبی نیز قابلیت پیاده‌سازی دارد (۷). زمانی و رحیم زادگان (۷) از الگوریتم سبال و سه تصویر Landsat TM جهت پهنه‌بندی تبخیر از پشت دریاچه سد امیر کبیر کرج استفاده نمودند. مقدار تبخیر روزانه از کل سطح دریاچه در تاریخ‌های منتخب در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده از تشت تبخیر نشان دهنده خطای کمتر از ۰/۵ میلی‌متر بر روز بوده است. همچنین نتایج نشان دهنده افزایش تبخیر از سطح مخزن سد در مناطق کم عمق به سمت مناطق عمیق‌تر بود که این مورد می‌تواند نشان دهنده کارایی نامناسب روش‌های نقطه‌ای اندازه‌گیری باشد. باقری و همکاران (۸) از الگوریتم سبال و ۷ تصویر ماهواره لندست ۸ برای محاسبه تبخیر از سطح دریاچه ارومیه به صورت تبخیر از آب شیرین (E_f) و تبخیر از آب شور (E_s) استفاده کردند. مقایسه مقادیر محاسبه شده و مقادیر اندازه‌گیری شده توسط ایستگاه‌های اندازه‌گیری اطراف دریاچه حاکی از تطابق مطلوب داده‌های برآورد شده است. ضریب تبیین ۰/۸۳ و ۰/۸۴ برای E_f و E_s میان داده‌های مشاهده شده و برآورد شده نیز حاکی از دقت مطلوب روش سبال در محاسبه تبخیر از سطوح آزاد آب است. سالیفو و همکاران (۹) از الگوریتم سبال و شش تصویر ماهواره لندست طی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۸ برای برآورد تبخیر-تعرق از سطوح مختلف استفاده کردند. نتایج پژوهش نشان داده است که ضریب خطای مقادیر برآورد شده به روش سبال نسبت به مقادیر مشاهده‌ای برای پیکره‌های آبی و مزارع غرقابی از سایر کاربری‌های اراضی کمتر بوده است. همچنین سیما و تجربی (۱۰) تبخیر از سطح دریاچه ارومیه را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مودیس طی ۷ ماه در سال ۲۰۱۰ محاسبه کرده و با استفاده از اندازه‌گیری‌های زمینی به اعتبارسنجی مدل پرداخته‌اند. اعتبارسنجی داده‌های سطح آب با استفاده از داده‌های دمای سطح

اندازه‌گیری شده در مرکز تحقیقات آرتیمیا صورت گرفته و برای اندازه‌گیری تابش طول موج کوتاه، یک دستگاه تشعشع‌سنج در ایستگاه تحقیقاتی سازمان هواشناسی ارومیه نصب و مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. مقایسه خطای برآورد نتایج این پژوهش با سایر مطالعات نشان داده است که می‌توان از این روش در برنامه‌ریزی بهتر منابع آب حوضه آبریز و احیای دریاچه بهره جست. اکبر زاده و همکاران (۲) از ۱۲ تصویر ماهواره مودیس و الگوریتم سبال برای محاسبه تبخیر از مخازن مصنوعی آب شیرین چاه نیمه‌ها واقع در شرق کشور استفاده نمودند و از روش تشت تبخیر نیز به عنوان روش مرجع برای ارزیابی نتایج بهره جستند. ضریب همبستگی ۰/۷۴، میانگین درصد خطای کل ۱۴/۵ و RMSE مقادیر روزانه بین ۱۵ تا ۲۵ درصد نشان دهنده این است که روش سبال ابزار قابل قبولی جهت برآورد تبخیر سطوح پیکره‌های آبی است و نتایج به دست آمده می‌تواند مبنای تصمیم‌های برنامه‌ریزی و مدیریت یکپارچه قرار گیرد. همچنین نجف‌وند دریگوندی و اسلامی (۱۱) به مقایسه روش‌های تجربی برآورد تبخیر از سطح آزاد آب دریاچه سد دز پرداختند و عملکرد روش‌های تجربی به وسیله تشت تبخیر و دو آماره R^2 و RMSE مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داده است روش مایر نسبت به سایر روش‌های تجربی از دقت بالاتری برخوردار است و روش تیچومبروف، فاقد اعتبار لازم است. سایر روش‌های تجربی دارای دقت متوسط برای برآورد تبخیر از سطح آزاد دریاچه سد بوده‌اند. پژوهش حاضر با استفاده از الگوریتم سبال، میزان تبخیر از دریاچه سد زاینده‌رود را با توجه به مؤلفه‌های اصلی معادله بیلان انرژی، برآورد می‌نماید. ضمن اینکه دقت این روش و هفت روش تجربی نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده تشت تبخیر مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دریاچه سد زاینده‌رود با حجم ۱۴۷۰ میلیون متر مکعب و مساحت ۵۴ کیلومتر مربع در ۱۱۰ کیلومتری شمال غربی شهر اصفهان و در طرفین مرز سیاسی استان‌های اصفهان و چهارمحال و بختیاری در شرق رشته کوه‌های زاگرس واقع شده است (۱). تخصیص آب این سد به مصارف گوناگون، لزوم برنامه‌ریزی تضمین‌کننده پایداری این منبع بزرگ آبی را بیش از پیش نموده است و به همین منظور تبخیر به عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل هدررفت آب در این دریاچه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. شکل ۱ موقعیت سد و دریاچه سد زاینده‌رود را نشان داده است.



شکل ۱- موقعیت رودخانه و دریاچه سد زاینده رود

Figure 1- The Location of River and Dam Lake of Zayande Rood

جدول ۱- تصاویر ماهواره ای مورد استفاده در پژوهش

Table 1- Corresponding Satellite images of the study

شماره Number	تاریخ شمسی Persian Calendar	تاریخ میلادی Georgian Calendar Date	روز جولیوسی Julian day
1	۱ خرداد ۱۳۹۶	22-May-2017	142
2	۱۷ خرداد ۱۳۹۶	7-June-2017	158
3	۲ تیر ۱۳۹۶	23-June-2017	174
4	۱۸ تیر ۱۳۹۶	9-July-2017	190
5	۳ مرداد ۱۳۹۶	25-july-2017	206
6	۱۹ مرداد ۱۳۹۶	10-August-2017	222
7	۴ شهریور ۱۳۹۶	26-August-2017	238
8	۲۰ شهریور ۱۳۹۶	11-September-2017	254

مرجع، روش محاسبه تبخیر از سد زاینده رود را مورد ارزیابی قرار دهد. با توجه به منابع، تبخیر از تشت برای تبدیل به تبخیر از سطح آزاد دریاچه باید در ضریبی ضرب شود که برای هر ماه متفاوت است. بنابراین برای تصاویر مورد نظر مطابق با ماه های میلادی، ضرایب ۰/۷۴، ۰/۷۷، ۰/۷۷ و ۰/۷۷ برای تبدیل تبخیر از تشت به تبخیر از سطح آزاد در نظر گرفته شده است (۱۲).

گردآوری داده ها

در پژوهش حاضر از هشت تصویر ماهواره لندست ۸ مربوط به ماه های خرداد تا شهریور سال ۱۳۹۶ استفاده شده است. جدول ۱ تاریخ و شماره روز از سال را برای هر یک از تصاویر نشان داده است. همچنین داده های اندازه گیری شده دما، تبخیر از تشت، سرعت باد و بارش در ایستگاه تبخیرسنجی سد زاینده رود واقع در ضلع جنوبی سد برای تاریخ های ذکر شده جمع آوری شده است تا به عنوان روش

الگوریتم سبال

سبال یک الگوریتم پردازش تصویر است که تبخیر-تعرق واقعی را برای هر پیکسل در زمان تصویر برداری محاسبه می‌کند. معادله کلی الگوریتم بیلان انرژی به صورت زیر است:

$$R_n = G + H + \lambda ET \quad (1)$$

در این رابطه: R_n : شار تابشی خالص^۱ بر حسب $(\frac{W}{m^2})$; λET : مقدار شار گرمایی نهان در لحظه عبور ماهواره بر حسب $(\frac{W}{m^2})$; H : شار گرمایی محسوس هوا^۲ بر حسب $(\frac{W}{m^2})$; G : شار گرمایی خاک بر حسب $(\frac{W}{m^2})$ است. شار تابشی خالص محاسبه جبری مابین تمامی تابش‌های ورودی و بازتابش خروجی از سطح می‌باشد. تابش طول موج کوتاه به عنوان تابعی از آلبیدوی سطح و تابش طول موج بلند از تفاضل میان طول موج بلند ورودی و خروجی بدست می‌آید (۱۳).

$$R_n = (1 - \alpha)R_{gl} + R_{lt} - R_{lf} - (1 - \epsilon_0)R_{ll} \quad (2)$$

R_n : شار تابشی خالص، R_{gl} : تابش موج کوتاه ورودی بر حسب وات بر متر مربع، R_{lt} : تابش موج بلند ورودی بر حسب وات بر متر مربع، R_{lf} : تابش موج بلند خروجی بر حسب وات بر متر مربع، ϵ_0 : گسیلندگی سطحی و α : آلبیدوی سطحی که نسبتی از تشعشع تابیده شده خورشیدی است که به سطح زمین برخورد کرده و بازتابیده می‌شود. مقادیر آلبیدوی سطحی برای آب بسته به زاویه تابش خورشید بین ۰/۲۵ تا ۰/۳۴۸ تغییر می‌کند (۱۰). تابش موج کوتاه ورودی بخشی از تابش خورشید است که به صورت خالص وارد سطح زمین می‌شود. این تابش مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود (۱۳).

$$R_{gl} = G_{sc} \times \cos \theta \times d_r \times \tau_{sw} \quad (3)$$

در رابطه فوق: G_{sc} : ثابت خورشیدی (W/m^2) ; $\cos \theta$: کسینوس زاویه ورودی تابش خورشید بر حسب رادیان، d_r : معکوس فاصله نسبی زمین و خورشید. τ_{sw} : قابلیت انتقال اتمسفری که مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود (۱۳).

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} \times Z \quad (4)$$

Z : ارتفاع از سطح دریا می‌باشد که معمولا معادل ارتفاع ایستگاه هواشناسی در نظر گرفته می‌شود.

شار گرمایی خاک (G) میزان ذخیره گرمایی خاک در نتیجه گرادیان دمایی مابین سطح خاک و لایه‌های پایین‌تر می‌باشد. تشعشع

خورشید در طول روز سبب گرم شدن زمین و خاک می‌شود. جریان گرمایی به اعماق نیمرخ خاک، به تغییرات درجه حرارت، ظرفیت گرمایی خاک و ضریب هدایت گرمایی خاک بستگی دارد که می‌توان این پارامتر را با استفاده از شاخص‌های گیاهی^۳، تشعشع خالص، دمای سطح زمین و آلبیدوی سطح نیز مطابق رابطه پیشنهادی باستینسن (۲۰۰۰) محاسبه نمود (۵).

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2)(1 - NDVI^4) \quad (5)$$

دمای سطح زمین تابعی از انرژی خالص در سطح زمین است که به مقدار انرژی رسیده به سطح زمین، گسیلندگی سطحی، رطوبت و جریان هوای اتمسفر بستگی دارد (۴). در تصاویر ماهواره‌ای که باندهای حرارتی دارند، سنجنده‌های فرورسرخ می‌توانند در محدوده‌های طیفی مناسب، حرارت تابشی سطح زمین را دریافت و به صورت تصاویر رقومی ذخیره و به زمین مخابره کنند (۸).

$$T_s = \frac{K_2}{\ln((K_1/L_\lambda)+1)} \quad (6)$$

مقادیر K_1 و K_2 برای باند ۱۰ به ترتیب برابر ۷۷۴/۸۸ و ۱۳۳۱/۰۲۱ و برای باند ۱۱ برابر ۴۸۰/۸۸ و ۱۲۰۱/۱۴۴۲ هستند و دمای سطح زمین بر حسب درجه کلوین است.

$$L_\lambda = M_L Q_{CAL} + A_L \quad (7)$$

در رابطه فوق: L_λ : بازتاب طیفی بر حسب وات بر مترمربع بر سرادیان بر میکرومتر، M_L : عامل تغییر مقیاس ضرب شونده، Q_{CAL} : باند مورد نظر و A_L : عامل تغییر مقیاس اضافه شونده است. شار گرمای محسوس (H) میزان تلفات انرژی از خاک از طریق همرفت و فرآیند انتشار در نتیجه اختلاف دمایی مابین سطح و پایین‌ترین لایه جو می‌باشد. این پارامتر باتوجه به چندین فاکتور نظیر دمای سطحی و سرعت باد، زبری سطح^۴ و اختلاف دمای سطح زمین با هوای اطراف سطح زمین و از طریق رابطه زیر تعیین می‌شود (۱۴).

$$H = \frac{(\rho \times C_p \times dT)}{t_{ah}} \quad (8)$$

در رابطه فوق: ρ : چگالی هوا بر حسب $(\frac{Kg}{m^3})$; C_p : گرمای ویژه هوا برابر ۱۰۰۴ $\frac{J}{Kg/K}$; dT : اختلاف دما بین دو ارتفاع Z_1 و Z_2 بر حسب (K)، t_{ah} : مقاومت آیرودینامیکی در برابر انتقال گرما بر حسب $(\frac{s}{m})$ است. شار گرمای محسوس تابعی از گرادیان حرارتی، زبری سطح و سرعت باد است. برای محاسبه شار گرمای محسوس، اختلاف دمای نزدیک سطح زمین برای هر پیکسل بایستی مشخص شود.

3- Vegetation Index
4- Surface Roughness

1- Net Radiation Flux
2- Sensible Heat Flux to the Air

سطح است در هنگامی که شرایط رطوبتی هوا با شرایط زمین در حالت توازن باشد. مقدار ET_p ، تبخیر-تعرق با استفاده از داده‌های هواشناسی در زمان عبور ماهواره است. مقادیر $ET_p F$ در محدوده صفر تا یک تغییر می‌کنند. در یک پیکسل کاملاً خشک، هر دو مقدار $ET_p F$ و ET برابر صفر هستند.

از آن جا که مقادیر تبخیر روزانه نسبت به مقادیر لحظه‌ای پرکاربردتر است، مقادیر لحظه‌ای بدست آمده توسط سبال در زمان گذر ماهواره، بایستی به مقادیر روزانه تبدیل شوند. در نهایت مقدار ET_{24} مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$ET_{24} = ET_p F \times ET_{p-24} \quad (12)$$

ET_{p-24} : بیست و چهار ساعت تجمعی در روز تصویر ماهواره‌ای است.

روش‌های تجربی محاسبه تبخیر از سطح مخزن سد

تاکنون روش‌های زیادی برای برآورد تبخیر در نقاط مختلف جهان ارائه شده است که در پژوهش حاضر ۷ روش تجربی انتخاب شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند و نتایج آنها به همراه روش سبال با داده‌های اندازه‌گیری شده تحت تبخیر مستقر در دریاچه سد مقایسه شده است. معادلات این روابط تجربی در جدول ۲ ارائه شده است.

در این روابط E تبخیر از سطح آزاد آب بر حسب میلی‌متر بر روز، U_2 و U_{10} سرعت باد در ارتفاع ۲ و ۱۰ متری از سطح زمین بر حسب متر بر ثانیه، e_s و e_a به ترتیب فشار بخار اشباع و فشار واقعی بخار آب در هوا بر حسب میلی‌متر جیوه، RH میانگین رطوبت نسبی هوا بر حسب درصد و C ضریبی است که برای دریاچه‌های عمیق ۰/۳۶ و برای دریاچه‌های کم‌عمق ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود (۱،۲).

الگوریتم سبال dT را برای هر پیکسل با فرض رابطه خطی بین dT و T محاسبه می‌کند (۵).

$$dT = b + aT_s \quad (9)$$

در این معادله a و b ثابت‌هایی هستند که با توجه به پیکسل‌های سرد و گرم محاسبه می‌شوند. بدین منظور دو پیکسل آستانه انتخاب می‌شوند. یکی از این پیکسل‌ها که پیکسل سرد نامیده می‌شود، مربوط به منطقه‌ای کاملاً پوشیده از گیاه و خوب آبیاری شده است که دمای سطح زمین در این پیکسل نزدیک به دمای هواست و تبخیر تعرقی معادل تبخیر-تعرق مرجع دارد. دارا بودن بیشترین شاخص پوشش گیاهی NDVI، کمترین آلبدو و دمای سطحی از ویژگی‌های پیکسل سرد محسوب می‌شود. پیکسل دوم که پیکسل گرم نامیده می‌شود، زمین کشاورزی بدون پوشش گیاهی و خشک می‌باشد. فرض به کار رفته در مورد پیکسل گرم این است که هیچ گرمای نهانی را منتشر نمی‌کند. به عبارتی دیگر مقدار تبخیر-تعرق آن نزدیک به صفر است (۱۵).

شار گرمای نهان (λET) از طریق تفاضل جبری معادله توازن انرژی و به‌عنوان جزء باقیمانده این معادله، قابل محاسبه است. سپس تبخیر-تعرق لحظه‌ای از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$ET_{int} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (10)$$

کسر تبخیر-تعرق مرجع به صورت نسبت تبخیر-تعرق لحظه‌ای محاسبه شده برای هر پیکسل به تبخیر-تعرق محاسبه شده توسط داده‌های هواشناسی تعریف می‌شود.

$$ET_p F = \frac{ET_{int}}{ET_p} \quad (11)$$

نسبت تبخیر لحظه‌ای بیان‌کننده نسبتی از مقدار واقعی نیاز تبخیر

جدول ۲- روابط تجربی برآورد میزان تبخیر از سطح آزاد

Table 2- Empirical Methods of Evaporation Estimation from Free Water Surface

نام رابطه The name of Empirical Methods	معادله رابطه The Equation of Empirical Methods
مایر Mayer	$E = \left(1 + \frac{U_2}{16}\right) \cdot C \cdot (e_s - e_a)$
مارسیانو Marciano	$E = 0.03U_2(e_s - e_a)$
شاهتین Shahtin	$E = (0.116 + 0.017U_2)(e_s - e_a)$
هنفر Henfer	$E = 0.028U_2(e_s - e_a)$
ایوانف Ivanov	$E = 0.0018(T + 25)^2(100 - RH)$
تیچومیروف Tikhomirov	$E = (e_s - e_a)(15 + 3U_{10})$
سازمان عمران اراضی آمریکا USBR	$E = 0.833(4.57T + 43.3)$

مقایسه و ارزیابی نتایج

نتایج و بحث

همان گونه که در بخش قبل بیان شد، به منظور محاسبه تبخیر به روش سیال پارامترهای گوناگونی باید تعیین شوند. در گام اول مقادیر آلیبدوی سطحی، دمای سطحی و شار تابشی خالص محاسبه شده‌اند و مطابق جدول ۳ ارائه گردیده‌اند. بیشترین مقدار دمای سطح زمین مربوط به تاریخ ۹۶/۰۴/۱۸ است که با داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی سد نیز تطابق دارد. دمای هوا اندازه‌گیری شده در این تاریخ برابر ۳۰/۵ درجه کلون است که نسبت به سایر تاریخ‌ها، بیشینه مقدار بوده است.

بیشترین مقدار شار تابشی خالص مربوط به تصویر تاریخ ۹۶/۰۶/۲۰ که کمترین مقدار آلیبدوی سطحی نیز در این تاریخ اتفاق افتاده است. علت افت در مقدار آلیبدو در این تاریخ نسبت به سایر تصاویر این است که در تصویر تاریخ ۲۰ شهریور سطح آب سد به دلیل برداشت در طول فصل کشت افت کرده و لذا جذب تشعشعات ورودی به حداکثر مقدار خود رسیده است و مقدار آلیبدو افزایش پیدا کرده است. مقادیر آلیبدوی سطحی سطح آزاد آب در حالت بیشینه، کمینه و میانگین، در محدوده اعداد مرجع الگوریتم سیال قرار دارند و از این روی دقت نتایج حاصل مورد تایید قرار گرفته است. مقادیر تبخیر از سطح دریاچه در گام بعدی بر اساس معادله اصلی بیلان انرژی محاسبه شده است. در جدول (۴) مقادیر تبخیر محاسبه شده به روش سیال، روش تشت تبخیر و روش‌های تجربی محاسبه تبخیر از سطح مخزن سد مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. همان گونه که در جدول (۴) مشخص است از میان روش‌های مورد بررسی، روش‌های تجربی ماریانو، شاهتین، هنفر و USBR نسبت به تشت تبخیر کم‌برآوردی زیادی داشته‌اند که در عمل استفاده از این روش‌ها را در محاسبات مهندسی در شرایط این سد با تردید مواجه می‌سازد. روش‌های تجربی مایر، ایوانف و تیچومیروف و روش سیال نتایج نزدیک‌تری به تشت تبخیر داشته‌اند. مقدار بیشینه تبخیر محاسبه شده با الگوریتم سیال برابر ۱۴/۱۳ میلی‌متر بر روز است که در روش تشت تبخیر این مقدار برابر ۱۴ میلی‌متر بر روز برآورد شده است. روش تیچومیروف بیشترین میزان تبخیر از سطح آزاد آب را معادل ۱۵/۶ میلی‌متر بر روز برآورد کرده است. بیشترین تبخیر از سطح دریاچه سد به کمک روش سیال در تاریخ ۹۶/۰۵/۰۳ و با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده تشت تبخیر در تاریخ ۹۶/۰۴/۱۸ اتفاق افتاده است. از مهم‌ترین عواملی که موجب این اختلاف بوده‌اند می‌توان به این اشاره کرد که داده‌های مربوط به تشت تبخیر نقطه‌ای بوده و در عین حال روش سیال تبخیر را برای سطح بزرگی محاسبه کرده است که علاوه بر آب، شامل خاک، سنگ و اندکی پوشش گیاهی است که بر نتایج تأثیر گذاشته است.

همواره به منظور بررسی و ارزیابی کارایی مدل و مقایسه آن با داده‌های مشاهده‌ای یا داده‌های واقعی، از شاخص‌های متفاوتی استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر نیز به منظور ارزیابی مقادیر حاصل از الگوریتم سیال و مقایسه مقادیر آن با مقادیر تبخیر محاسباتی به روش‌های تجربی و همچنین مقایسه نتایج سیال با آمار مشاهداتی تبخیر از تشت ایستگاه سد زاینده‌رود، از پنج شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE)، میانگین خطای مطلق^۲ (MAE)، ضریب تبیین (R²)، کارایی مدل‌سازی^۳ و ضریب جرم باقی‌مانده^۴ استفاده شده است. روابط (۱۳) تا (۱۷) نحوه محاسبه این شاخص‌های آماری را نشان داده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (13)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (14)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})(y_i - \bar{y})]}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \times \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (15)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (16)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n \hat{y}_i}{\sum_{i=1}^n y_i} \quad (17)$$

در این روابط \hat{y}_i : مقدار برآورد شده از مدل، \bar{y}_i : میانگین مقادیر برآورد شده از مدل، y_i : مقدار مشاهده شده یا مقدار واقعی، \bar{y}_i : میانگین مقادیر مشاهده شده و n : اندازه نمونه است. هرچه مقادیر شاخص‌های خطاسنجی به صفر و مقدار ضریب تبیین به یک نزدیک تر باشند، نشان دهنده عملکرد بهتر مدل به کار گرفته شده است. ضریب تبیین درجه هم‌خطی بودن بین داده‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده را نشان می‌دهد در حالی که میانگین خطای مطلق و ریشه میانگین مربعات خطا به ترتیب درجه اریب بودن و درجه دقت برآورد را نشان می‌دهند. آماره EF مقادیر پیش‌بینی را با میانگین اندازه‌گیری‌ها مقایسه می‌کند. آماره CRM تمایل مدل را برای برآورد بیش از حد و یا کمتر از حد در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد. حداقل مقدار ME، RMSE صفر و حداکثر EF برابر یک می‌باشد. اگر تمام مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی باهم برابر شوند، مقدار عددی آماره‌های MAE، RMSE برابر صفر و مقدار EF یک خواهد شد. (۱۶).

1- Root Mean Square Error

2- Mean Absolute Error

3- Modelling efficiency

4- Coefficient of Residual Mass

جدول ۳- مقادیر آلبیدوی سطحی، دمای سطحی و میانگین شار تابشی خالص برای تصاویر ماهواره‌ای
Table 3- Albedo, Surface Temperature and Average of Net Radiation Flux Values for Each Satellite images

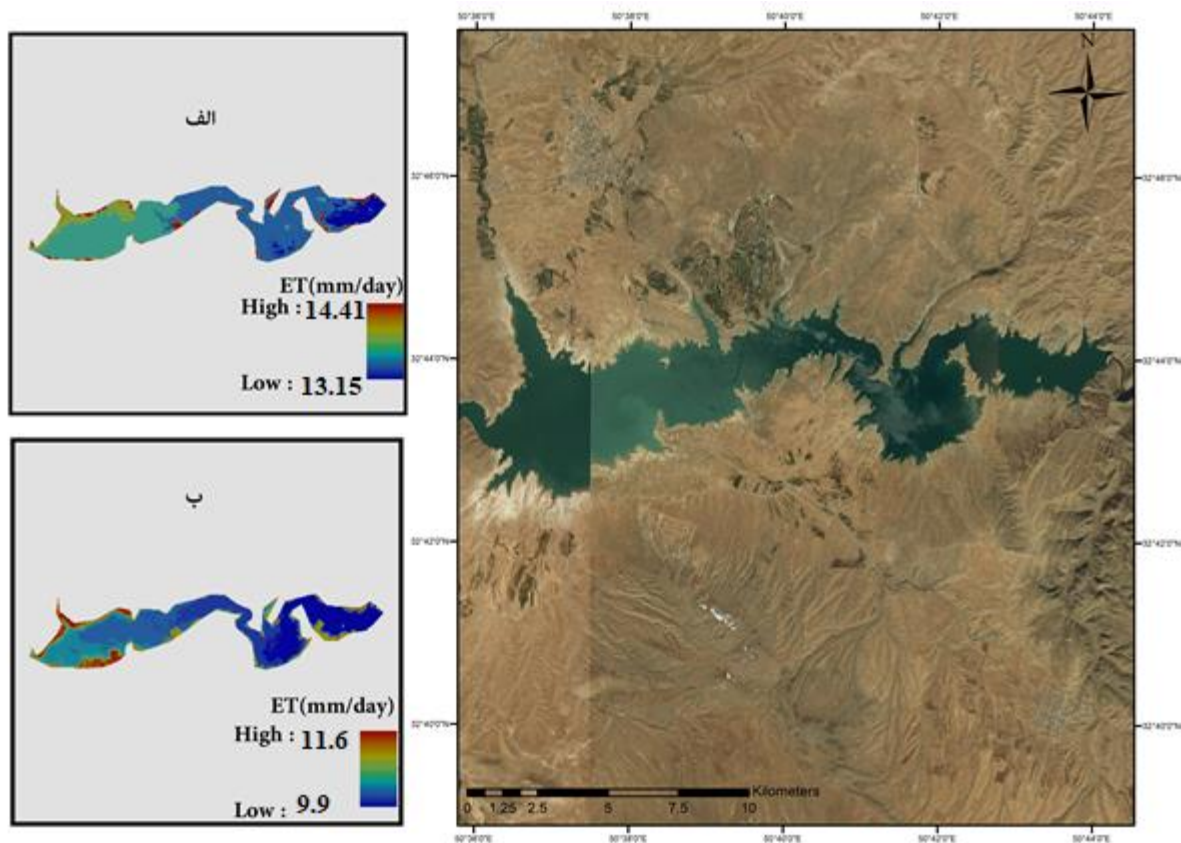
تاریخ تصویر Date of Images	میانگین شار تابشی خالص Average of Net Radiation Flux ($\frac{W}{m^2}$)	دمای سطح زمین (کلوین) Land Surface Temperature (k)			آلبیدوی سطحی Surface Albedo		
		میانگین Average	حداقل Minimum	حداکثر Maximum	میانگین Average	حداقل Minimum	حداکثر Maximum
		22/05/2017	491.55	296.45	294.2	316.7	0.291
07/06/2017	489.2	298.65	294.8	317.3	0.288	0.201	0.298
23/06/2017	486	299.8	297.8	321	0.292	0.207	0.308
09/07/2017	480.3	301.6	298.45	322.3	0.287	0.206	0.303
25/07/2017	497	299.5	297.5	319.2	0.279	0.211	0.291
10/08/2017	476.3	298.9	297.5	318.75	0.295	0.224	0.321
26/08/2017	494.7	299.95	297.45	317.8	0.282	0.184	0.311
11/09/2017	505.2	298.5	295.85	315.7	0.272	0.198	0.291

جدول ۴- مقادیر تبخیر محاسبه شده به روش سبال، روش‌های تجربی و تبخیر اندازه‌گیری شده توسط تشت تبخیر
Table 4- Evaporation Values by SEBAL, Empirical Methods and Corresponding Pan

تاریخ تصویر Date of images	تبخیر از تشت Corresponding pan evaporation (mm/day)	الگوریتم سبال SEBAL (mm/day)	سازمان عمران USBR	روش‌های تجربی Empirical methods (mm/day)					
				تبخیر میروف Tikhomirov	ایوانف Ivanov	هنفر Henfer	شاهتین Shahtin	مارسیانو Marciano	مایر Mayer
07/06/2017	10.5	11.95	4	14	9.9	3.8	3.8	4.1	10.7
23/06/2017	11.8	12.22	4.25	13.7	10	3.4	3.67	3.6	10.8
09/07/2017	14	13.52	4.3	15.15	9.85	3.75	4	4	11.9
25/07/2017	13.1	14.13	4.3	12.3	9.9	2.7	3.25	2.9	9.9
10/08/2017	13.1	13.33	4.3	11	9.5	2.4	2.9	2.6	8.9
26/08/2017	10.9	11.63	3.9	10.65	8.6	2.45	2.85	2.6	8.5
11/09/2017	9.2	10.4	3.95	10.8	8.9	2.45	2.85	2.6	8.7

مقدار تبخیر بیشتری را شامل شده است. همچنین اثر واحه‌ای^۱ مربوط به نواحی مرزی دریاچه سد و ورودی انرژی اراضی اطراف به سطح آب نیز باعث افزایش تبخیر در قسمت ورودی دریاچه سد شده است. جدول ۵ آماره‌های ارزیابی روش‌های مورد بررسی را نسبت به اندازه‌گیری‌های تشت تبخیر نشان داده است. ضریب همبستگی میان داده‌های اندازه‌گیری شده تشت تبخیر و داده‌های مدل‌سازی شده به روش سبال در حدود ۸۹ درصد است که نشان از همبستگی مناسب سبال با روش مرجع دارد. همچنین پایین بودن درصد خطای مدل‌سازی تبخیر روزانه نیز مؤید نتایج قابل قبول مدل سبال است. جدول ۵ نشان داده است که هیچ یک از روش‌های تجربی همبستگی مناسبی با داده‌های تشت تبخیر نداشته و درصد خطای آنها در برآورد میزان تبخیر از سطح بالا بوده است و نتایج قابل قبولی حاصل نشده است.

همچنین در روش سبال تشعشع ورودی به عنوان یک عامل مستقیم در محاسبات وارد شده است که این مسئله در روش تشت در نظر گرفته نمی‌شود. کاهش و یا افزایش سطح آب دریاچه در تاریخ‌های مختلف بسته به میزان حبابه کشاورزان در ماه‌های مختلف نیز، عامل دیگری است که در محاسبات مدل سبال وارد شده است و با توجه به ثابت بودن تعداد پیکسل‌ها در همه تصاویر، بر میزان شار تابشی خالص، آلبیدوی سطحی و حتی شاخص‌های گیاهی تأثیرگذار بوده است. کمینه مقدار تبخیر در تاریخ ۲۰ شهریور اتفاق افتاده است که کمترین دما و آلبیدوی سطحی نیز مربوط به این تاریخ است. شکل ۲ تغییرات مکانی تبخیر برآورد شده به روش سبال از سطح دریاچه سد را در زمان حداکثر و حداقل تبخیر نشان داده است. همان‌گونه که در شکل ۲ مشخص است نواحی پشت سد قوسی که دارای سطح کمتر و عمق بیشتری هستند، مقدار تبخیر کمتری دارند و قسمت ورودی دریاچه سد که دارای عرض زیاد و عمق کمتر است،



شکل ۲- الف: تبخیر بیشینه در تاریخ ۹۶/۰۵/۰۳، ب: تبخیر کمینه در تاریخ ۹۶/۰۶/۲۰
 Figure 2- a: Maximum Evaporation in 25 July, 2017, b: Minimum Evaporation in 11 September, 2017

جدول ۵- آماره‌های ارزیابی نسبت مدل‌های برآورد تبخیر از سطح آزاد
 Table 5- Evaluation parameters for Evaporation Estimation Models

آماره ارزیابی	سازمان عمران USBR	تیچومیروف Tikhomirov	ایوانف Ivanov	هنفر Henfer	شاهتین Shahtin	مارسیانو Marciano	مایر Mayer	سبال SEBAL
RMSE (mm/day)	0.98	0.27	0.55	1	1	1	0.5	0.28
MAE (mm/day)	0.98	0.42	0.56	1	0.98	1	0.51	0.31
R ²	0.26	0.17	0.18	0.05	0.14	0.05	0.22	0.88
EF	0.01	0.26	0.17	0.01	0.09	0.011	0.18	0.76
CRM	0.2	-0.05	0.20	0.75	0.72	0.73	0.17	-0.05

داده‌های تشت تبخیر کم برآورد کرده‌اند. با توجه به نتایج حاصل و همچنین آماره‌های ارزیابی مدل، روش‌های تیچومیروف، مایر و سبال نزدیک‌ترین نتایج را به اندازه‌گیری‌های تشت تبخیر داشته‌اند که از میان این سه روش، روش سبال نتایج قابل قبول‌تری ارائه نموده است. روش سبال با کارایی مدل‌سازی ۷۶ درصد، مقادیر را تا حد ۵ درصد نسبت به مقادیر تشت تبخیر، بیشتر برآورد نموده است که نشان از دقت قابل قبول این مدل در برآورد تبخیر از سطح آزاد است.

هیچ یک از مدل‌ها کارایی مناسبی نداشته و همچنین دقت برآورد مناسبی ندارند. این موضوع بیانگر این است که کلیه ضرایب و پارامترهای روش‌های تجربی نیازمند واسنجی با توجه به شرایط اقلیمی هر منطقه است. البته باید توجه داشت که شاید یکی از دلایل کاهش ضریب تبیین، تعداد کم داده‌های مورد محاسبه برای این روش‌ها بوده است. همچنین بر اساس آماره جرم باقی‌مانده، همه این روش‌ها به جز روش تیچومروف، مقادیر تبخیر از سطح آزاد را نسبت به

جدول ۶- برآورد حجم تبخیر سالیانه از دریاچه سد زاینده‌رود
Table 6- Estimation of monthly evaporation volume from dam lake of Zayande rood

تاریخ تصویر Date of images	حجم تبخیر ماهیانه به روش سبال (میلیون متر مکعب در ماه) Monthly evaporation volume by SEBAL (MCM)	حجم تبخیر ماهیانه با استفاده از تشت تبخیر (میلیون متر مکعب در ماه) Monthly evaporation volume using corresponding Pan (MCM)
22/05/2017	20.8	19.76
07/06/2017	19.34	17
23/06/2017	19.78	19.1
09/07/2017	21.9	22.68
25/07/2017	22.88	21.22
10/08/2017	21.6	21.22
26/08/2017	18.86	17.64
11/09/2017	16.84	14.9

روش‌های تجربی کم‌برآوردی زیادی داشته‌اند و نتایج آنها در برآورد میزان تبخیر در شرایط دریاچه سد زاینده‌رود نمی‌تواند مورد استناد قرار گیرد. با توجه به داده‌های مورد بررسی، روش‌های تجربی همبستگی مناسبی با داده‌های تشت تبخیر نداشته و همچنین خطای برآورد آنها نیز زیاد است. حجم تبخیر محاسبه شده با استفاده از روش سبال و روش تشت تبخیر، در حدود ۶ درصد حجم مخزن سد زاینده رود و معادل ۸۰ میلیون متر مکعب در ماه‌های خرداد تا شهریور بوده است که این حجم در همین ماه‌ها، معادل دبی ۷/۵ متر مکعب در ثانیه بوده است که می‌توانست برای زیر کشت رفتن اراضی پایین دست سد در قسمت‌های غربی استان اصفهان (حدود ۴۰۰۰ هکتار) مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین، استفاده از روش سبال می‌تواند از طریق بهبود نرخ برآورد تبخیر، به محاسبه دقیق بیلان هیدرولوژیکی دریاچه کمک شایان توجهی نماید تا مدیریت تخصیص آب سد به‌خصوص در ماه‌های پرمصرف سال به‌درستی صورت گیرد. مقایسه نتایج پژوهش حاضر با پژوهش‌های باقری و همکاران (۷) و زمانی و رحیم زادگان (۸) حاکی از این است که مقادیر محاسبه شده به کمک الگوریتم سبال نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده تشت تبخیر دارای دقت قابل قبولی است و مزیت این الگوریتم این است که برای کل سطح آزاد آب تبخیر را محاسبه می‌نماید؛ در حالی که سایر روش‌ها نقطه‌ای هستند و قابل تعمیم به کل منطقه نمی‌باشند. همچنین توزیع مکانی تبخیر در منطقه مورد مطالعه نیز به کمک الگوریتم سبال امکان‌پذیر است.

بنابراین بر اساس نتایج حاصل از سبال و همچنین اندازه‌گیری‌های زمینی، حجم تلفات تبخیر آب از دریاچه سد زاینده‌رود مطابق جدول ۶ محاسبه و ارائه گردیده است. بدین منظور تصویر ماهواره‌ای اول هر ماه به‌عنوان نماینده ۱۵ روز اول و تصویر دوم به‌عنوان نماینده نیمه دوم ماه در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که در جدول ۶ مشخص است بیشترین حجم تلفات تبخیر ماهیانه برآورد شده به کمک هر دو روش، مربوط به مرداد ماه است که در روش سبال ۲۲/۲۴ و در روش تشت تبخیر ۲۱/۲۲ میلیون متر مکعب در ماه برآورد شده است.

بیشینه و کمینه مقدار تبخیر در دریاچه سد به مساحت ۵۴ کیلومتر مربع با کمک الگوریتم سبال مربوط به تصاویر ۰۳/۰۵/۹۶ و ۲۰/۰۶/۹۶ معادل ۱۴/۱۳ و ۱۰/۴ میلی‌متر بر روز بوده است. میانگین خطای مقادیر برآورد شده نسبت به اعداد اندازه‌گیری شده تشت تبخیر در حدود ۶ درصد بوده است و ضریب همبستگی ۸۹ درصد نیز بیانگر کارایی الگوریتم سبال در برآورد تبخیر از مخزن سد بوده است. همچنین بر اساس نتایج حاصل، مقدار تبخیر در نواحی مختلف سد متغیر بوده و در نواحی پشت سد قوسی که دارای سطح کمتر و عمق بیشتری هستند، مقدار تبخیر کمتر و قست ورودی دریاچه سد که دارای عرض زیاد و عمق کمتر است، مقدار تبخیر بیشتری را شامل شده است که این موضوع یکی از مزیت‌های اصلی روش سبال نسبت به سایر روش‌های اندازه‌گیری تبخیر است. بررسی پارامترهای ارزیابی روش‌های تجربی نشان داده است که روش تیچومپروف نتایج قابل قبول تری نسبت به سایر روش‌های تجربی داشته است. سایر

منابع

- 1- Emami Heidari H., Jafari H., and Karami H. 2014. The role of agricultural management for continuous flood in Zayandeh Rood river. *Journal of Water and Soil* 28: 1095- 1106. (In Persian)
- 2- Akbar Zadeh H., Haghigatjo P., and Bagheri M.H. 2015. Estimation of evaporation throughout SEBAL algorithm and remote sensing data. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 9: 510-521. (In Persian)
- 3- Bala A., Rawat K., Misra A.K., and Srivastava A. 2016. Assessment and validation of evapotranspiration using SEBAL algorithm and Lysimeter data of IARI agricultural farm. *Geocarto International* 31: 1-26.

- 4- Dong Q. 2018. Study on the Crop Irrigation Water Requirement Based on Cropwat in Jinghuiqu Irrigation Area. *Material Science and Engineering* 394: 22-37.
- 5- Bastiaansen W.G.M., Menenti M., Feddes R.A., and Holtslag A.A.M. 2000. A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL). *Journal of Hydrology* 64: 198-213.
- 6- Ebrahim M., and Abu- Mallouh H. 2018. Estimate Land Surface Temperature in Relation to Land Use Types and Geological Formations Using Spectral Remote Sensing Data in Northeast Jordan. *Journal of Geology* 8: 174-185.
- 7- Zamani S., and Rahimzadegan M. 2018. Calculation and Evaluation of Evaporation in Fresh Water Lakes with SEBAL Algorithm 27: 57-69. (In Persian with English abstract)
- 8- Bagheri M.H., Morid S., and Arshad S. 2017. Application of Remotely- Sensed Data to estimate A Water Budget for Data- Scarce Endorheic Basins: A Case Study of Lake Urmia Basin. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 45: 101-112.
- 9- Salifu T., Agyare W., Baffour N., Mensah E., and Ofori E. 2011. Estimating Actual Evapotranspiration using the SEBAL Model for the Atankwidi and Afram Catchments in Ghana. *International Journal of Applied Agricultural Research* 6: 177-193.
- 10- Sima S., and Tajrishi M. 2015. Estimation of Urmia Lake Evapotranspiration Using Remote Sensing Data. *Iran- Water Resources Research* 11: 32-48. (In Persian with English abstract)
- 11- Najafvand Derikvandi M., and Islami H. 2016. Empirical methods Comparison of estimation evaporation From Free Water Surface (Case Study: Dez Regulatory Dam). *Journal of Water Engineering* 4: 65- 73.
- 12- Alizadeh A. 2015. *Applied Hydrology*. University of Mashhad, Mashhad.
- 13- Faris Beg A.A., Al-Sulttani A., Ochtyra A., and Markinkowska A. 2016. Estimation of evapotranspiration using SEBAL algorithm and Landsat-8 data-A case study:Tatra Mountains Region. *Journal of Geological Resource and Engineering* 6: 257-270.
- 14- Jana C., Rawat M., Sena D.R., Alam N.M., Mandal U., and Mishra P.K. 2016. Application of SEBAL Model to Estimate Evapotranspiration in Doon Valley, India. *Indian Journal of Soil Conservation*, 44:191-197.
- 15- Schirmbeck J., Fontana D., Roberti R., and Schirmbeck L. 2017. Energy Balance from Images in Humid Climate – SEBAL and METRIC. *Agrometeoros Journal* 25: 383-393.
- 16- Suleiman A.A., Bali K.M., and Kleissi A. 2009. Comparison of ALARM and SEBAL Evapotranspiration of Irrigated Alfalfa. *Journal of Hydrometeorology* 35:411-424.

Estimation of Evaporation from Zayandeh Rood Dam Lake Using SEBAL

S.O. Mirmohammad Sadeghi¹- M. Ghobadina^{2*}- M.H. Rahimian³

Received: 25-02-2019

Accepted: 30-09-2019

Introduction: Agriculture management practice plays a vital role in reducing the use of limited water resources in arid and semi-arid regions which could result in their sustainability. Proper management of these resources requires accurate information of component of the water budget. Recently, due to the problems of water deficit and drought in most parts of the country, evaporation of reservoirs of dams, lakes and other water bodies as one of the water losses has been considered and therefore, a more accurate estimation of evaporation rate from these water bodies and its reduction strategies have become very important. Evaporation which is the most important water output from terminal lakes plays a significant role in the lakes water balance. It can also vary chemical compositions of lakes. Conventional techniques of Evaporation Estimation likely entail substantial observation errors during bad weather and other conditions. These methods, therefore, cannot represent large-scale terrestrial evaporation. Remote sensing methods for calculating evaporation were used. However, remote sensing data combined with some meteorological data provide a means to estimate regional evaporation, given the advances in remote sensing technology. Some land surface variables, such as surface albedo, surface emissivity, and land surface temperature, can be estimated directly by remote sensing data. Then Evaporation can be estimated by a set of equations hierarchically, which converts spectral radiances derived from satellites or airplanes images. One of the models based on remotely sensed data is the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) model, in which the land surface temperature, albedo, emissivity, and normalized difference vegetation index (NDVI) are of significance to estimating Evaporation.

Materials and Methods: In the present research, Zayandeh Rood dam reservoir and its lake with area of 54 square kilometer were selected to estimate the evaporation from this reservoir. Various empirical methods including Mayer, Marciano, Shahtin, Henfer, Ivanov, Tikhomirov and USBR were used. Also Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) was implemented on 8 satellite images of Landsat 8 from June to September 2017. For this purpose, the main components of the energy balance equation, including net radiation flux, soil heat flux and sensible heat flux to the air for each image, have been calculated and the instantaneous evapotranspiration flux for each pixel is estimated as the residual energy balance equation. To improve the non-dependency on ground data, a general equation was therefore used. The Net Radiation is the electromagnetic balance of all incoming and outgoing fluxes reaching and leaving a flat surface. The amount of shortwave radiation ($RS\downarrow$) that remains available at the surface is a function of the surface albedo (α). Surface albedo is a reflection coefficient defined as the ratio of the reflected radiant flux to the incident radiant flux over the solar spectrum. It was calculated using satellite image information on spectral radiance for each satellite and the incoming shortwave radiation ($RS\downarrow$) was computed using the solar constant, the solar incidence angle, a relative earth-sun distance, and a computed atmospheric transmissivity. The incoming long wave radiation ($RL\downarrow$) was computed using a modified Stefan-Boltzmann equation with atmospheric transmissivity and a selected surface reference temperature. Outgoing long wave radiation ($RL\uparrow$) was computed using the Stefan-Boltzmann equation with a calculated surface emissivity and surface temperature. Surface temperatures were computed from satellite image information on thermal radiance. The surface emissivity is the ratio of the actual radiation emitted by a surface to that emitted by a black body at the same surface temperature. Soil heat flux was empirically calculated using vegetation indices, surface temperature, and surface albedo. Sensible heat flux was computed using wind speed observations, estimated surface roughness, and surface to air temperature differences. Sensible heat flux is the part of internal energy of a substance that is proportional to the substance's temperature.

Results and Discussion: Accordingly, the SEBAL model in the study area has the maximum and minimum daily evapotranspiration in the pictures of June 25 and September 11, equal to 14.13 and 10.4 mm/day. The results evaluate with the corresponding pan evaporate measurements on reservoir bank. The results showed that none of the empirical methods including Mayer, Marciano, Shahtin, Henfer, Ivanov, Tikhomirov and USBR

1 and 2- Former M.Sc. Student and Assistant Professor of Drainage and Irrigation Engineering, University of Shahre kord, Shahre kord

(*- Corresponding Author Email :mahdi.ghobadi@gmail.com)

3- Assistant Professor, National Salinity Research Center, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran

have been able to have acceptable correlation with the reference method. In contrast, SEBAL method in addition to display spatial distribution of evaporation in the reservoir has an R-square coefficient of 0.88, RMSE and MAE with 0.28 and 0.31 respectively, which shows high accuracy of the results of modeling rather than empirical methods. Also according to the high error percent of empirical methods, it would be necessary to calibrate coefficients and parameters relative to different climatic conditions. Alternatively, this algorithm can be used to replace time-consuming and costly methods of calculating evapotranspiration at different surfaces.

Keywords: Dam reservoir, Energy balance, Landsat 8, Water bodies