

مقایسه نتایج الگوریتم سبال و داده‌های هواشناسی در برآورد تبخیر روزانه از سطح آزاد آب (مطالعه موردی سد سلیمان شاه)
هوشنگ قمرنیا، سعید ناصری، بهمن فرهادی بانسوله، عطا امینی و فرهنگ سرگردی

دوره ۷، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۰، صفحات ۴۹۴-۵۰۶

Vol. 7(3), Autumn 2021, 494-506

DOI: 10.22034/JEWE.2021.272172.1510

Comparison of SEBAL Algorithm and Meteorological Data Results in Estimating Daily Evaporation from Free Water Surface (Case Study of Soleimanshah Dam)

Ghamarnia, H., Nasseri, S., Farhadi Bansouleh, B., Amini, A. and Sargordi, F.



www.jewe.ir

OPEN ACCESS

ارجاع به این مقاله:

قمرنیا، ه.، ناصری، س.، فرهادی بانسوله، ب.، امینی، ع. و سرگردی، ف. (۱۴۰۰). مقایسه نتایج الگوریتم سبال و داده‌های هواشناسی در برآورد تبخیر روزانه از سطح آزاد آب (مطالعه موردی سد سلیمان شاه). محیط‌زیست و مهندسی آب، دوره ۷، شماره ۳، صفحات: ۴۹۴-۵۰۶.

Citing this paper: Ghamarnia, H., Nasseri, S., Farhadi Bansouleh, B., Amini, A. and Sargordi, F. (2021). Comparison of SEBAL algorithm and meteorological data results in estimating daily evaporation from free water surface (case study of Soleimanshah Dam). Environ. Water Eng., 7(3), 494-506. DOI: 10.22034/JEWE.2021.272172.1510

مطالعه موردی

مقایسه نتایج الگوریتم سبال و داده‌های هواشناسی در برآورد تبخیر روزانه از سطح آزاد آب (مطالعه موردی سد سلیمان شاه)

هوشنگ قمرنیا^۱، سعید ناصری^۲، بهمن فرهادی بانسوله^۳، عطا امینی^۴ و فرهنگ سرگردی^۵

^۱استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
^۲دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
^۳دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
^۴دانشیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، سنندج، ایران
^۵استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

*نویسنده مسئول: hghamarnia@razi.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۰/۰۱/۲۸]

تاریخ بازنگری: [۱۳۹۹/۱۲/۱۷]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۹/۱۱/۱۹]

چکیده

برآورد دقیق تبخیر دریاچه سدها در مدیریت آب مخزن اهمیت زیادی دارد. این عامل باعث شده است در اغلب سدها ایستگاه هواشناسی نصب شود. در ایستگاه هواشناسی میزان تبخیر از سطح دریاچه با استفاده از تشتک تبخیر اندازه‌گیری می‌شود. روش‌های سنجش‌ازدور به هزینه کمی نیاز داشته و قابل تعمیم به کل سطح منطقه هستند. در این پژوهش با استفاده ترکیبی از الگوریتم سبال و داده‌های هواشناسی و با استفاده از پنج تصویر ماهواره‌ای لندست ۸، میزان تبخیر روزانه از سطح دریاچه سلیمان شاه محاسبه شد. داده‌های هواشناسی ثبت شده در ایستگاه واقع در نزدیکی بدنه سد مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده با میزان تبخیر به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف مقایسه شد. نتایج نشان داد که از میان روش‌های ترکیبی، روش پنمن کیمبرلی ۱۹۹۶، از بین سایر روش‌ها، روش بلانی کریدل بیش‌ترین همخوانی و روش هنفر با مقادیر R^2 ، RMSE و MAE به‌ترتیب برابر ۰/۹۶، ۲/۷۸ و ۵/۶۶ کم‌ترین همخوانی را با داده‌های اندازه‌گیری شده دارند. نتایج این پژوهش می‌تواند در برآورد تبخیر در دیگر مناطق با اقلیم مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم سبال؛ بیلان انرژی؛ تشتک تبخیر؛ روش‌های ترکیبی؛ لندست ۸.



۱- مقدمه

حوضه رودخانه کیسمی واقع در جنوب فلوریدا را قبل و بعد از عملیات احیای تالاب فوق محاسبه کردند. Hassan et al. (2018) میزان تبخیر از سطح دریاچه ناصر مصر را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به دست آوردند. (Mhaweji et al. (2020) با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ به بررسی تبخیر از دریاچه کارون^۴ لبنان از سال ۱۹۸۵ تا سال ۲۰۱۸ پرداختند. آن‌ها پیش‌بینی کردند که در هر ده سال یک درجه به میانگین دما افزوده می‌شود و در سال ۲۰۳۸ میانگین تبخیر ۱/۵ برابر می‌شود.

یکی از روش‌های محاسبه تبخیر و تعرق الگوریتم سبال^۵ است. این الگوریتم بر پایه معادله بیلان انرژی استوار است. در الگوریتم سبال همچنین نیاز به محاسبه تشعشع خالص روزانه است. (Krishna et al. (2014) با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور تشعشع خالص روزانه را با استفاده از روش‌های تشعشع خالص طول موج کوتاه و بلند به دست آوردند. تشعشع خالص روزانه از مجموع تشعشع خالص طول موج‌های کوتاه و بلند به دست می‌آید.

(Losgedarag and Rahimzadegan (2018) به بررسی دقت روش‌های مختلف تخمین تبخیر از سطح دریاچه امیرکبیر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که الگوریتم سبال در برآورد تبخیر از سطح دریاچه امیرکبیر از دقت قابل قبولی برخوردار نیست. (Mohebzadeh and Fallah (2019) با مقایسه تبخیر به دست آمده از طریق الگوریتم سبال با نتایج بیلان آب در دریاچه ارومیه به این نتیجه رسیدند که الگوریتم سبال با دقت بسیار خوبی میزان تبخیر را برآورد می‌کند. Sadeghi et al. (2019) به بررسی تبخیر از دریاچه زاینده‌رود با استفاده از الگوریتم سبال پرداختند آن‌ها به این نتیجه رسیدند که الگوریتم سبال با دقت بسیار خوبی میزان تبخیر از سطح دریاچه را تخمین می‌زند. Rahimpour and Rahimzadegan (2021) به ارزیابی الگوریتم‌های سبال و SSEBop^۶ در محاسبه تبخیر دریاچه ارومیه پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که هر دو روش با دقت قابل قبولی میزان

طراحی و عملکرد مناسب سیستم‌های زهکشی، مخازن و آبیاری نیاز به محاسبه پارامترهای بیلان آب دارد که تبخیر یکی از پارامترهای مهم است (Amini et al. 2019a). تخمین میزان تبخیر از سطح گیاه، زمین و آب در مدل‌های هیدرولوژی و مدیریت منابع آب بسیار با اهمیت است. در پژوهش‌های Vicente-Serrano et al. (2014) مشخص شد که رطوبت نسبی، سرعت باد و دمای حداکثر نسبت به ساعات روشنایی و دمای حداقل از تأثیر بیشتری در برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل برخوردارند. (Mkhwanazi et al. (2015) نیز اظهار داشتند که با توجه به اینکه الگوریتم سبال فقط بر پایه بیلان انرژی بوده و تأثیر روش آئروپونامیکی را نادیده می‌گیرد، در مناطق خشک و نیمه‌خشک میزان تبخیر و تعرق را کمتر از میزان واقعی برآورد می‌کند. تأثیر زیاد رطوبت نسبی در برآورد تبخیر توسط (Althoff et Bou-Fakhreddine (2019) و (Althoff et al. (2019) نیز به اثبات رسیده است.

در میان پژوهش‌گران محیط‌زیست، این آگاهی رو به رشد است که داده‌های مکانی می‌توانند نقشی اساسی در ارزیابی شرایط بوم‌سازگان و نظارت بر تغییرات در مقیاس‌های مختلف داشته باشند (Avdan and Jovanovska 2016). معمولاً در ایستگاه‌های هواشناسی که در مجاورت سدها احداث می‌شوند از تشتک تبخیر برای اندازه‌گیری مقدار تبخیر از سطح دریاچه استفاده می‌شود؛ که فاقد دقت مناسب است. استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و اطلاعات مکانی به عنوان جایگزینی برای تشتک‌های تبخیر مطرح شده است (Abteu and Melesse (2012).

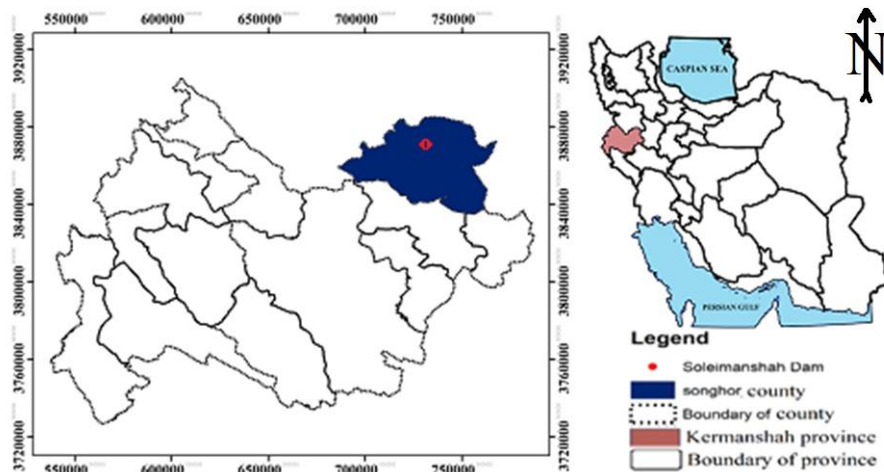
(Bastawesy et al. (2008) با بررسی روند تبخیر از دریاچه تاشکا در دشت واقع در جنوب غربی مصر با استفاده از تلفیق سنجش‌ازدور و GIS از سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۶ به این نتیجه رسیدند که حجم دریاچه به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است. (Abteu and Melesse (2012) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست^۱ و مودیس^۲ میزان تبخیر و تعرق را برای دو منطقه تالاب گلاسیال ریج^۳ واقع در شمال غربی مینوسوتا و

^۴Caroon^۵Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL)^۶operational simplified surface energy balance^۱Land Satellite (LANDSAT)^۲Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)^۳Glacial Ridge

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

سد سلیمان‌شاه در ۱۵ km شمال غرب شهر سنقر در استان کرمانشاه با طول جغرافیایی $31^{\circ} 53' 47''$ شرقی و عرض جغرافیایی $34^{\circ} 53' 31''$ شمالی و ارتفاع از سطح دریا m ۱۷۰۰ قرار دارد. این سد بر روی رودخانه گاوهرود در حوضه سیروان واقع شده است. محدوده مورد مطالعه دارای اقلیمی نیمه‌خشک با زمستان‌های سرد است. متوسط بارش در منطقه مورد مطالعه 450 mm/yr است. حجم دریاچه سد 52 Mm^3 و ارتفاع آن m ۴۴ است. هدف از احداث آن تأمین آب شرب شهر سنقر و تأمین آب کشاورزی در حدود 2740 ha است (Ab-Niroo 2004). در شکل (۱) موقعیت سد سلیمان‌شاه نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت سد سلیمان‌شاه در استان کرمانشاه

Fig. 1 Location of Suleiman Shah Dam in Kermanshah Province

باند‌های حرارتی با تفکیک مکانی بسیار خوب می‌توان دمای سطحی را با دقت بسیار خوبی تخمین زد (Amini et al., 2019b). دمای سطحی یکی از مؤلفه‌های اساسی در تخمین تبخیر و تعرق است. این ماهواره هر ۱۶ روز یک‌بار حوالی ساعت ۱۲ به وقت تهران عکس‌برداری می‌کند. برای برآورد تبخیر از دریاچه سد سلیمان‌شاه از پنج تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ با مختصات $PATH=167$ و $ROW=36$ که در تاریخ‌های ۷ تیر، ۸ مرداد، ۲۶ مهر، ۱۴ آذر و ۱۸ بهمن سال ۱۳۹۶ حوالی ساعت ۱۲ صبح عکس‌برداری شده، استفاده شد. در کلیه تصاویر دمای پیکسل سرد دمای سطح آب دریاچه و دمای پیکسل گرم دمای محل دپوی ضایعات واقع در فاصله

تبخیر را تخمین می‌زنند.

با توجه به مشکلات برآورد تبخیر از تشتک تبخیر و دقت کم آن، در این پژوهش با استفاده ترکیبی از الگوریتم سبال و داده‌های هواشناسی و با استفاده از پنج تصویر ماهواره‌ای لندست ۸، میزان تبخیر از سطح دریاچه سلیمان‌شاه محاسبه شد. نتایج به‌دست‌آمده با میزان تبخیر به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف ترکیبی برای داده‌های هواشناسی سد سلیمان‌شاه مقایسه شد. برای ارزیابی روش‌های فوق از شاخص‌های آماری R^2 ، RMSE و MAE استفاده شد.

۲-۲- داده‌ها و تصاویر مورد استفاده

برای محاسبه میزان تبخیر به داده‌های هواشناسی از جمله دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و میزان تابش خورشید نیاز است. برای ثبت این داده‌ها از ایستگاه هواشناسی خودکار واقع بر ساختمان کنترل سد سلیمان‌شاه واقع در فاصله m ۱۰۰ قسمت شرقی تاج سد در تراز ۱۷۴۰ استفاده شد. این ایستگاه داده‌های هواشناسی را به صورت مستمر هر پانزده دقیقه یک‌بار ثبت می‌کند.

ماهواره لندست ۸ دارای دو باند حرارتی و نه باند طیفی بوده که باند‌های طیفی آن تفکیک مکانی m ۱۵ تا m ۳۰ و باند‌های حرارتی آن تفکیک مکانی m ۳۰ را دارا هستند. با توجه به

$$H = 1004 \times \rho \times dT/r_{ah} \quad (۳)$$

که، چگالی هوا برحسب ρ ، g/m^3 ، dT اختلاف دمای بین دو نقطه ارتفاعی برحسب کلونین و r_{ah} مقاومت آئروپونامیکی جهت انتقال گرما است. برای تبدیل تبخیر و تعرق از واحد W/m^2 به mm/hr از رابطه (۴) استفاده شد (Waters et al. 2002).

$$ET = 3600 \times ET_a/\lambda \quad (۴)$$

که، λ گرمای نهان تبخیر برحسب J/kg و ET تبخیر و تعرق محاسبه شده به صورت لحظه‌ای در زمان گذر ماهواره برحسب mm/hr است که برای تبدیل به تبخیر و تعرق روزانه از طریق رابطه (۵) به جزء تبخیری (ET_{TrF}) تبدیل می‌شود (Waters et al. 2002).

$$ET_{TrF} = \frac{ET}{ET_o} \quad (۵)$$

که، در الگوریتم سبال میزان ET_o معادل میزان تبخیر ساعتی به دست آمده به روش پنمن مانتیس فائو ۵۶ که از نرم‌افزار ET_{REF} قابل محاسبه است، در نظر گرفته می‌شود. این ضریب تقریباً معادل ضریب گیاهی است. سپس تبخیر واقعی از حاصل ضرب ضریب فوق در تبخیر روزانه محاسبه شده از روش پنمن مانتیس فائو ۵۶، به دست می‌آید؛ اما در این مطالعه جزء تبخیری EF طبق رابطه (۶) محاسبه شد (Krishna et al. 2014).

$$EF = \frac{R_n - G}{ET} \quad (۶)$$

با فرض ثابت بودن ضریب فوق در طول روز، میزان تبخیر روزانه برحسب mm/day با استفاده از رابطه (۷) به دست می‌آید (Krishna et al. 2014).

$$ET_{24} = \frac{86400 \times EF \times (R_{n24} - G_{24})}{\lambda} \quad (۷)$$

که، مقدار G_{24} برابر صفر فرض می‌گردد (Waters et al. 2002). در این پژوهش برای محاسبه مقدار R_{n24} از الگوریتم سبال استفاده نشده است. (Krishna et al. 2014). رابطه‌هایی را برای محاسبه پارامتر فوق ارائه داده‌اند. آن‌ها بیان کردند که برای محاسبه R_{n24} دو مرحله وجود دارد، یک مرحله مربوط به محاسبه تشعشع خالص در روز و مرحله دیگر مربوط به محاسبه تشعشع خالص در شب است. از مجموع تشعشع خالص در شب و تشعشع خالص در روز، تشعشع خالص روزانه به دست می‌آید. در این پژوهش برای محاسبه مجموع تشعشع

کمتر از $100 m$ از سد انتخاب شد. متناظر با این زمان‌ها، داده‌های موردنیاز از ایستگاه هواشناسی نیز دریافت شد.

۲-۳- روش‌های برآورد تبخیر و تعرق

روش‌های مختلفی برای برآورد تبخیر و تعرق وجود دارد. این روش‌ها به دو دسته روش‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور و هواشناسی تقسیم می‌شوند. سبال یکی از روش‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور است که در این پژوهش با داده‌های هواشناسی ترکیب و مورد استفاده واقع شده است.

۲-۳-۱- الگوریتم سبال اصلاح شده

الگوریتم سبال از طریق محاسبه بیلان انرژی سطحی زمین می‌تواند میزان تبخیر و تعرق را برای مناطق مختلف محاسبه کند. در این روش اندازه‌گیری‌های موازی تقریباً حذف شده است. همچنین الگوریتم سبال به نقشه دمای سطحی خیلی دقیق و نقشه کاربری اراضی جهت ارتباط دادن دمای سطحی به تبخیر نیاز ندارد (Bastiaanssen 1995). عدم نیاز به داده‌های هواشناسی متعدد و خصوصیات سطح منطقه از مزایای این روش است که باعث شده تا به صورت وسیعی مورد استفاده قرار گیرد (Mkhwanazi et al. 2015). مقدار تبخیر و تعرق به عنوان باقیمانده معادله بیلان انرژی مطابق رابطه (۱) است (Waters et al. 2002).

$$ET_a = R_n - G - H \quad (۱)$$

که ET_a میزان تبخیر و تعرق، R_n میزان تشعشع خالص در سطح که حاصل تفاضل میزان انرژی وارد شده به سطح زمین و انرژی خارج شده از سطح زمین است، G میزان انرژی وارد شده به داخل آب دریاچه و H مقدار انرژی که صرف افزایش دمای سطح زمین می‌شود، است. مقدار R_n از رابطه (۲) به دست می‌آید (Waters et al. 2002).

$$R_n = R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + R_{l\downarrow} - R_{l\uparrow} - (1 - \epsilon_0) R_{l\downarrow} \quad (۲)$$

$R_{l\uparrow}$ امواج خروجی از سطح زمین با طول موج بلند، α ضریب آلبیدوی سطح و ϵ_0 انتشار حرارتی آب است. برای سطوح پوشیده شده با آب که مقدار $NDVI < 0$ و $\alpha < 0.47$ مقدار ϵ_0 معادل 0.985 و مقدار G معادل 50 درصد R_n در نظر گرفته می‌شود (Waters et al. 2002). مقدار انرژی که صرف افزایش دمای هوای محیط می‌شود (H) از رابطه (۳) محاسبه شد (Effendi 2012).



برای به دست آوردن میانگین تبخیرهای ساعتی و روزانه در سطح دریاچه نیاز به مشخص نمودن محدوده دریاچه است. محدوده دریاچه در روزهای مختلف به دلیل شرایط تغذیه و تخلیه متفاوت است. با استفاده از تصاویر NDVI می توان کاربری اراضی را تشخیص داد. فرمول محاسبه NDVI به شرح رابطه (۱۴) است (Waters et al. 2002).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} \quad (14)$$

که، ρ_{NIR} و ρ_{Red} به ترتیب انعکاس باندهای ۴ و ۵ تصاویر لندست ۸ هستند. بر این اساس ابتدا در محیط ARC GIS 10.3 رستری NDVI در تاریخهای مختلف به فایل های وکتوری (برداری) تبدیل شد. فایل های وکتوری NDVI به گروه های منفی و مثبت طبقه بندی شد. از آنجا که NDVI پهنه های آبی کمتر از صفر است، با انتخاب مقادیر کمتر از صفر محدوده دریاچه برای هر یک از تاریخ های فوق تهیه شد. سپس تصاویر تبخیر ساعتی و تبخیر روزانه به دست آمده از الگوریتم سبال برای محدوده دریاچه سلیمان شاه جدا شد. در نهایت فایل های رستری تبخیر ساعتی و روزانه به فایل وکتوری نقاط تبدیل شده و میانگین تبخیر از سطح دریاچه محاسبه شد.

۲-۳-۲- محاسبه تبخیر و تعرق از داده های هواشناسی

در جدول (۱) روش های مختلف برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل که بر اساس یافته های پژوهش گران مختلف بیش ترین دقت را داشته اند، به طور خلاصه ارائه شده اند (Ghamarnia et al. 1998, Allen et al. 2015). در رابطه های ارائه شده در جدول (۱)، ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع (mm/day)، E میزان تبخیر (mm/day)، $es-ea$ کمبود فشار بخار اشباع برحسب KPa، γ ثابت سایکرومتری، R_n تشعشع خالص برحسب $MJ/m^2.day$ ، Δ شیب منحنی فشار بخار برحسب $KPa/^\circ C$ ، u_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ m برحسب m/s، λ گرمای نهان تبخیر برحسب MJ/Kg ، G چگالی شار گرمای خاک برحسب $MJ/m^2.day$ ، T میانگین ماکزیمم و مینیمم درجه حرارت روزانه ($^\circ C$)، T_{max} ماکزیمم درجه حرارت روزانه ($^\circ C$)، T_{min} مینیمم درجه حرارت روزانه ($^\circ C$)، T_{mean} میانگین درجه حرارت روزانه ($^\circ C$)، RH میانگین درصد رطوبت نسبی هوا، U_{10} سرعت باد در ارتفاع ۱۰ m برحسب m/s، R_s تشعشع خورشیدی برحسب $MJ/m^2.day$ ، U_d سرعت روزانه

خالص روزانه از رابطه (۸) استفاده شد (Krishna et al. 2014).

$$R_{nd} = \frac{2R_n(t_{set} - t_{rise})}{\pi \sin[(t - t_{rise}) / (t_{set} - t_{rise}) \pi]} \quad (8)$$

که t ، t_{set} و t_{rise} به ترتیب زمان های عکس برداری، غروب و طلوع آفتاب برحسب hr است. برای محاسبه مجموع تشعشع خالص شبانه از رابطه های (۹) الی (۱۳) استفاده می شود (Krishna et al. 2014).

$$R_{nn} = R_{nnu} + R_{nnd} \quad (9)$$

$$R_{nnd} = \sum_{t_{set}}^{t_{rise}} T_a dt \quad (10)$$

$$R_{nnu} = \sum_{t_{set}}^{t_{rise}} R_1(t) dt \quad (11)$$

$$R_1(t) = 1.24 \times (e_d / T_a + 273.15)^{0.143} \quad (12)$$

$$e_d = 6.11 (7.5 \times T_a / T_a + 237.3) \quad (13)$$

که، T_a دمای ساعتی هوا در طول شبانه روز برحسب $^\circ C$ و dt فاصله زمانی معادل ۱ hr است. برای محاسبه فرمول های روش سبال از نرم افزار Erdas 2015 استفاده شد. در این نرم افزار یک روش برای محاسبات پیکسل به سادگی ساخته می شود. برای ساخت مدل هایی که به طور خودکار یک فرایند را تکرار می کنند از ابزار Model Maker استفاده می شود. بدون چنین ابزاری فرایندهای محاسبه تبخیر بسیار طولانی است و در بعضی موارد با خطا همراه است (Avdan and Jovanovska, 2016).

به منظور محاسبه تبخیر ابتدا کلیه لایه های هر کدام از تصاویر لندست ۸ در تاریخ های ۷ تیر، ۸ مرداد، ۲۶ مهر، ۱۴ آذر و ۱۸ بهمن سال ۱۳۹۶ باهم الصاق شدند. مراحل محاسباتی در الگوریتم سبال به گونه ای است که در ابتدا دمای سطحی سپس مقدار R_s و در نهایت مقدار تبخیر و تعرق محاسبه می شود. داده های الگوریتم سبال داده های مکانی است و مقایسه آن با داده های نقطه ای همواره با خطا مواجه است. برای رفع این مشکل و به منظور ارزیابی دقیق تر نتایج الگوریتم سبال، مراحل محاسباتی آن به تفکیک مورد ارزیابی قرار گرفت. دمای سطح آب و R_s در مقیاس مکانی تغییرات چندانی ندارند. بر این اساس با توجه به نزدیکی ایستگاه هواشناسی مستقر بر روی تاج سد سلیمان شاه، از داده های آن ایستگاه جهت صحت سنجی مقادیر دمای سطحی و R_s به دست آمده از الگوریتم سبال استفاده شد.



باد (m/s)، a و b در درررمول بلانی کریدل ضرایبی هستند که ساعات آفتابی حداکثر روزانه و سرعت باد روزانه بستگی دارد به درصد رطوبت نسبی مینیمم، نسبت ساعات آفتابی به p درصد ساعات روز ماهیانه هستند.

جدول ۱- روش‌های مختلف تخمین تبخیر و تعرق

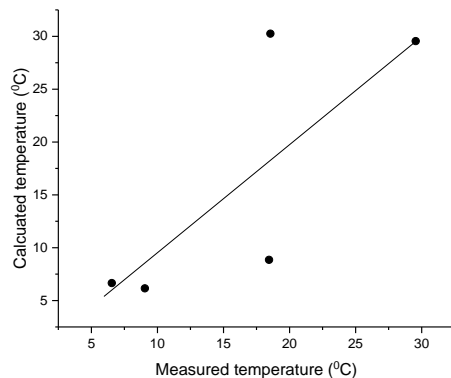
Table 1 Different reference evaporation and transpiration methods estimation

Methods	Equation
Combined Methods	
Penman (1948)	$ET_0 = \frac{((\Delta/\Delta + \gamma)(R_n - G) + K_w(\gamma/\Delta + \gamma)(a_w + b_w u_2)(e_s - e_a))}{\lambda}$ $K_w = 6.43, a_w = 1 \text{ \& } b_w = 0.537$
Kimberly Penman (1972)	$ET_0 = \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + K_w \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} (a_w + b_w u_2)(e_s - e_a) \right) / \lambda$ $K_w = 2.62, a_w = 0.75 \text{ \& } b_w = 0.993$
Kimberly Penman (1996)	$ET_0 = ((\Delta/\Delta + \gamma)(R_n - G) + K_w(\gamma/\Delta + \gamma)(a_w + b_w u_2)(e_s - e_a)) / \lambda; K_w = 2.62$ $a_w = 0.3 + 0.58 \exp([- (J - 170/45)^2]) \text{ \& }$ $b_w = 0.32 + 0.54 \exp([- (J - 228/67)^2])$
Fao 24 corrected Penman	$ET_0 = \left((\Delta/\Delta + \gamma)(R_n - G) + K_w \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} (a_w + b_w u_2)(e_s - e_a) \right) / \lambda$ $K_w = 6.43, a_w = 1 \text{ \& } b_w = 0.862$
Fao plant protection paper 17	$ET_0 = ((\Delta/\Delta + \gamma)(R_n - G) + K_w(\gamma/\Delta + \gamma)(a_w + b_w u_2)(e_s - e_a)) / \lambda, K_w = 6.43$ $a_w = 0.4 + 1.4 \exp([- (J - 173/58)^2]) \text{ \& }$ $b_w = 0.605 + 0.345 \exp([- (J - 243/80)^2])$ $ET_0 = b((\Delta/\Delta + \gamma)(R_s/2.45)) - 0.3$
Fao 24 radiation	$b = 1.066 - 0.13 \times 10^{-2} RH + 0.045 U_d - 0.2 \times 10^{-2} RH U_d - 0.315 \times 10^{-4} RH^2 - 0.11 \times 10^{-2} U_d^2$
Fao 56 Penman monteith	$ET_0 = 0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma (900/T + 273) U_2 (e_s - e_a) / \Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)$
Temperature Methods	
Hargreaves and Samani	$ET_0 = 0.0023 (T_{max} - T_{min})^{0.5} (T_{mean} + 17.8) R_a, R_a (\text{mm/day})$
Blaney-Cridde	$ET_0 = a + bp(0.46T + 8.13)$
Radiation Methods	
Makkink	$ET_0 = 0.61(\Delta/\Delta + \gamma)(R_s/2.45) - 0.12, R_s (MJm^{-2}d^{-1})$
Turc-radiation	$ET_0 = a_T (T_{mean}/T_{mean} + 15)(23.8856R_s + 50/2.45)$
Priestley and Taylor	$ET_0 = 1.26 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) (R_n - G/2.45)$
Experimental Methods	
Mayer	$E = (1 + U_2/16). C. (e_s - e_a)$
Marsiano	$E = 0.03 U_2 (e_s - e_a)$
Shahtin	$E = (0.116 + 0.017 U_2)(e_s - e_a)$
Henfer	$E = 0.028 U_2 (e_s - e_a)$
Ivanof	$E = 0.0018 (T + 25)^2 (100 - RH)$
Tichomirof	$E = (e_s - e_a)(15 + 3 U_{10})$
USBR	$E = 0.883(4.57T + 43.3)$

در روش‌های ترکیبی، دمایی و تشعشعی، مقادیر تبخیر و تعرق با استفاده از نرم‌افزار REF-ET محاسبه شد. این نرم‌افزار برای خواندن داده‌های هواشناسی از هر فایل داده منظم، طراحی شده است. نرم‌افزار REF-ET یک فایل تعریف که حاوی

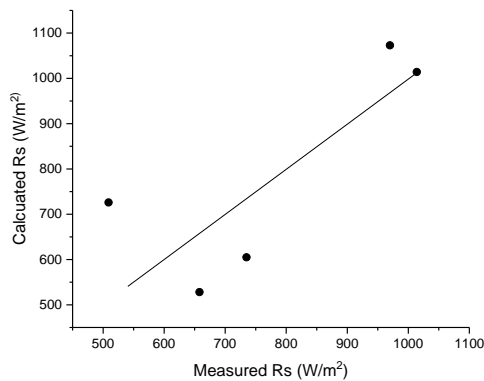


را نشان می‌دهد. مقادیر R^2 و RMSE به ترتیب معادل ۰/۶۳ و ۱۳۵ W/m^2 است.



شکل ۲- مقایسه دمای به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای با دمای هوای اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی

Fig. 2 Comparison of temperature obtained from satellite images with temperature measured at the meteorological station



شکل ۳- مقایسه مقدار RS به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای با مقدار RS اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی

Fig. 3 Comparison of RS obtained from satellite images with RS measured at meteorological station

۳-۳- مقایسه تبخیر ساعتی سبال و فائو ۵۶

به‌منظور مقایسه مقادیر تبخیر ساعتی به‌دست‌آمده از داده‌های آن ماهواره با تبخیر و تعرق به‌دست‌آمده از روش پنمن مانتیس فائو ۵۶، مقادیر تبخیر ساعتی در ساعت ۱۲ به روش پنمن مانتیس فائو ۵۶ در روزهای عکس‌برداری محاسبه شد. برای مقایسه بهتر میزان تبخیر ساعتی به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای با تبخیر ساعتی به‌دست‌آمده از روش فوق از نمودار

اطلاعاتی از قبیل شکل و ترتیب داده، واحدهای اندازه‌گیری، ارتفاع فشارسنج و حس‌گرهای دما، ارتفاع ایستگاه هواشناسی نسبت به سطح دریا، طول و عرض جغرافیایی است، را ایجاد می‌کند (Allen 2003).

۲-۴- بررسی دقت مدل‌ها

برای مقایسه روش‌های مختلف محاسبه تبخیر و تعرق با تبخیر به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای از پارامترهای آماری ضریب رگرسیون^۱ (R^2)، RMSE^۲ و MAE^۳ به شرح روابط (۱۵) تا (۱۷) استفاده شد.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=0}^n (ET_{0,m,i} - \overline{ET_{0,m}}) \times (ET_{0,RS,i} - \overline{ET_{0,RS}})]^2}{\sum_{i=0}^n (ET_{0,m,i} - \overline{ET_{0,m}})^2 \times \sum_{i=0}^n (ET_{0,RS,i} - \overline{ET_{0,RS}})^2} \quad (15)$$

$$RMSE = \sqrt{1/n \sum_{i=0}^n (ET_{0,m,i} - ET_{0,RS,i})^2} \quad (16)$$

$$MAE = 1/n \sum_{i=0}^n |ET_{0,m,i} - ET_{0,RS,i}| \quad (17)$$

در روابط بالا، $ET_{0,m,i}$ مقدار اندازه‌گیری شده، $\overline{ET_{0,m}}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده، $ET_{0,RS,i}$ مقدار پیش‌بینی شده، $\overline{ET_{0,RS}}$ میانگین مقادیر پیش‌بینی شده و n تعداد داده‌ها است.

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- دمای سطح آب

شکل (۲) میانگین دمای سطحی سطح دریاچه به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای و دمای اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی را نشان می‌دهد. شکل (۲) نشان می‌دهد که الگوریتم سبال با دقت مناسبی میزان دمای سطحی در سطح دریاچه را تخمین می‌زند. مقادیر R^2 و RMSE به ترتیب معادل ۰/۶۲ و $۷ \text{ }^\circ\text{C}$ هستند. با توجه به اینکه در سطح دریاچه دمای سطحی تقریباً برابر دمای هوا است، در مناطقی که ایستگاه هواشناسی وجود ندارد، در برآورد Rn_{24} می‌توان از این دما استفاده کرد.

۳-۲- تابش خورشیدی

شکل (۳) میزان RS به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای و RS اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی در زمان عکس‌برداری

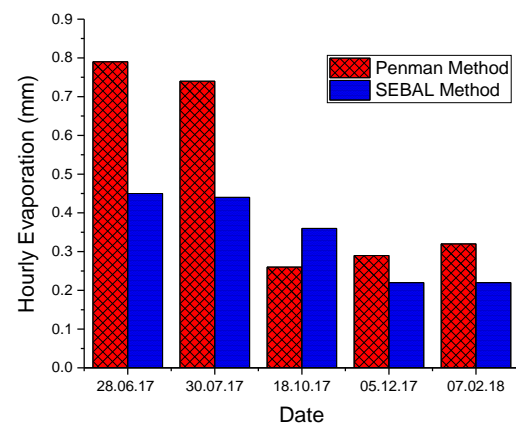
³Mean Absolute Error

¹Regression coefficient

²Root Mean Square Error



میله‌ای شکل (۴) استفاده شده است.



شکل ۴- مقایسه تبخیر ساعتی به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای با تبخیر و تعرق ساعتی به دست آمده از روش پنمن مانتیس فائو ۵۶ در سال ۱۳۹۶

Fig. 4 Comparison of hourly evaporation caused by satellite images with hourly evaporation by Penman Monteith FAO 56 method in 2017

میزان تبخیر ساعتی به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای در ماه‌های گرم سال بسیار کم‌تر از تبخیر ساعتی به دست آمده از روش پنمن مانتیس فائو ۵۶ است. دلیل آن این است که در

تجزیه و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای فقط از معادله بیلان انرژی استفاده شده و تأثیر شرایط آئرو دینامیکی نادیده گرفته می‌شود. این امر باعث می‌شود تا در مناطق خشک و نیمه خشک شرایط آئرو دینامیکی با اهمیت‌تر بوده و تصاویر ماهواره‌ای تبخیر و تعرق را کم‌تر از مقادیر واقعی برآورد نمایند.

۳-۴- تبخیر روزانه

جدول (۲) میزان تبخیر به دست آمده از روش‌های ترکیبی، تشعشعی، دمایی و تجربی معرفی شده در جدول (۱) را نشان می‌دهد. جدول (۳) مقادیر میانگین تبخیر ساعتی، تبخیر روزانه و حجم تبخیر روزانه از سطح دریاچه که بر اساس الگوریتم سبال اصلاح شده به دست آمده است را نشان می‌دهد. حجم تبخیر روزانه از حاصل ضرب میانگین تبخیر روزانه در سطح دریاچه به دست می‌آید. همان‌گونه که در جدول (۳) مشخص است بیش‌ترین میزان تبخیر روزانه مربوط به تاریخ ۷ تیر بوده است. در روش مایر محاسبات بر اساس دریاچه‌های عمیق انجام شده است. در روش فوق برای دریاچه‌های عمیق مقدار C برابر ۰/۳۶ در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۲- مقادیر تبخیر به وسیله روش‌های مختلف (mm/d) در سال ۱۳۹۶

Table 2 Evaporation (mm/d) values by different methods in 2017

Methods that are calculated by REF ET software												
Date	Fao 56PM	1996 KPen	1972 KPen	1948 KPen	Fao 24Pn	FP17 Pen	Fao 24Rd	Fao 24BC	Fao 1985 Harg	Prs- Tylr	1957 Makk	1961 Turk
28.06.17	8.47	9.25	8.24	9.47	9.74	10.1	13.3	10	7.9	8.69	7.58	14.1
30.07.17	7.32	7.98	7.25	8.14	8.29	8.73	11.6	9.64	7.19	6.99	6.55	9.73
18.10.17	3.65	5.11	5.13	3.97	4.17	4.34	5.85	3.55	2.93	2.96	3.44	4.51
05.12.17	2.42	2.91	3.14	2.54	2.84	2.62	3.86	1.56	1.34	2.16	2.54	1.82
07.02.18	1.97	3.04	3.29	2.05	2.25	2.28	2.93	1.72	1.91	1.31	1.9	1.48
February 2, 2018												
Date	Meyer	Marciano	Shahtin	Hefner	Ivanov	Tichumirov	USBR					
28.06.17	8.1	1.2	3.0	1.1	12.2	15.3	4.9					
30.07.17	9.5	1.4	3.5	1.3	12.7	18.0	4.9					
18.10.17	3.4	0.5	1.3	0.5	5.4	6.5	2.7					
05.12.17	1.2	0.2	0.5	0.2	2.0	2.3	2.0					
07.02.18	1.5	0.2	0.6	0.2	2.5	2.9	1.8					

جدول ۳- مقادیر میانگین تبخیر ساعتی و روزانه و حجم تبخیر از سطح دریاچه بر اساس الگوریتم سبال اصلاح شده

Table 3 Mean hourly and daily evaporation values and volume of evaporation by corrected SEBAL algorithm

Date	Mean hourly evaporation (mm)	Mean daily evaporation (mm)	Lake area (ha)	Volume daily evaporation (m ³)
28.06.17	0.45	10.15	459.3	46618
30.07.17	0.44	9.6	-*	36285
18.10.17	0.36	5.47	418.4	22886
05.12.17	0.22	2.94	441.4	13065
07.02.18	0.22	3.4	496.6	16884

* به دلیل پوشش ابری در برخی مناطق، امکان محاسبه دقیق مساحت دریاچه وجود نداشت.

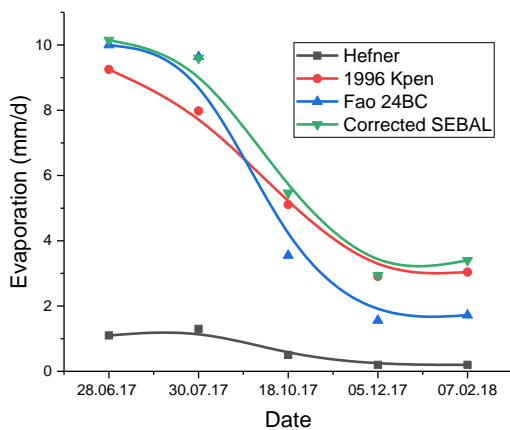
جدول ۴- مقادیر R^2 , RMSE و MAE به دست آمده از ارزیابی روش های مختلف برآورد تبخیر

Table 4 values of R^2 , RMSE and MAE resulting from the evaluation of various evaporation methods

Combined, temperature and radiation Methods												
	Fao	1996	1972	1948	Fao	FP17	Fao	Fao	1985	Prs-	1957	1961
Statistical parameter	56P	KPe	KPe	KPe	24Pn	Pen	24Rd	24B	Harg	Tylr	Mak	Turk
s	ETo	ETo	ETo	ETo	ETo	ETo	ETo	C	ETo	ETo	k	ETo
R^2	0.98	0.99	0.99	0.98	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.95	0.97	0.94
RMSE	1.65	0.86	1.37	1.17	0.99	0.82	1.73	1.303	2.10	2.01	2.119	2.07
MAE	1.55	0.66	0.98	1.08	0.86	0.70	1.38	1.038	2.06	1.89	1.914	1.62

Experimental Methods							
Statistical parameters	Meyer	Marciano	Shahtin	Hefner	Ivanov	Tichumirov	USBR
R^2	0.96	0.96	0.96	0.96	0.99	0.96	0.98
RMSE	0.78	2.75	2.19	2.78	0.79	1.99	1.56
MAE	1.57	5.61	4.56	5.66	1.42	3.13	3.07

بیشتری در برآورد تبخیر از سطح دریاچه نسبت به نتایج پژوهشگران قبلی دارد. علت آن شاید به این دلیل است که از داده های هواشناسی مطمئن تری استفاده شده است و تشعشع خالص روزانه نیز از طریق روش Krishna et al. 2014 به دست آمده است. با توجه به مناسب بودن دقت محاسبات، به نظر می رسد که تأثیر شرایط آنرودینامیکی لحاظ شده است. براین اساس دقت برآورد تبخیر در این پژوهش نسبت به نتایج پژوهش گران فوق بیش تر شده است.



شکل ۵- نمودار تبخیر روزانه به دست آمده از روش های الگوریتم سبال اصلاح شده، پنمن کیمبرلی ۱۹۹۶، بلانی کریدل و هنفر در زمان های مختلف عکس برداری

Fig. 5 Chart of evaporation calculated by the corrected SEBAL, Kimberly penman 1996, Blaney-Criddle and Henfer in the shutting date

شکل (۵) نمودار تبخیر روزانه به دست آمده از روش های الگوریتم سبال اصلاح شده، پنمن کیمبرلی ۱۹۹۶، بلانی

بنابراین با کمک تصاویر ماهواره ای و با محاسبه مساحت دریاچه می توان حجم تبخیر از سطح دریاچه را در زمان های مختلف تخمین زد و این در حالی است که سایر روش های محاسبه تبخیر و تعرق به دلیل ماهیت نقطه ای آن ها از چنین قابلیت بر خوردار نیستند. پوشش ابر یکی از منابع خطا در محاسبات تبخیر و تعرق است به طوری که عملاً در مناطق ابری امکان متمایز ساختن سطح دریاچه میسر نیست. بر این اساس برای تصویر تاریخ ۱۳۹۶/۰۵/۰۸ سعی شده تا در ابتدا با استفاده از NDVI مناطق بدون پوشش ابر مشخص گردد. این مناطق در حدود ۲۵۴ ha از سطح دریاچه را شامل می شود. سپس میانگین تبخیر ساعتی را برای سطوح بدون پوشش ابر تخمین زده شد. میزان تبخیر ساعتی در تاریخ ۳۰ جولای ۲۰۱۷ در صورت فقدان ابر معادل ۰/۴۴ mm و در صورت وجود ابر معادل ۰/۲۶ mm است؛ بنابراین می توان نتیجه گرفت که پوشش ابر میزان تبخیر ساعتی را به میزان ۴۰٪ کاهش می دهد. جدول (۴) آنالیز آماری نتایج ارزیابی جداگانه مقادیر تبخیر به دست آمده از روش های موجود نسبت به روش سبال اصلاح شده را نشان می دهد.

جدول (۴) نشان می دهد همبستگی بسیار خوبی بین روش های مختلف محاسبه تبخیر و تعرق با تصاویر ماهواره ای وجود دارد ($R^2 > 0.94$). از بین روش های فوق، روش پنمن کیمبرلی ۱۹۹۶ با R^2 و RMSE و MAE به ترتیب برابر ۰/۹۹، ۰/۱۸۶ و ۰/۶۶ از بالاترین دقت برخوردار است. نتایج این پژوهش نشان می دهد که الگوریتم سبال اصلاح شده دقت



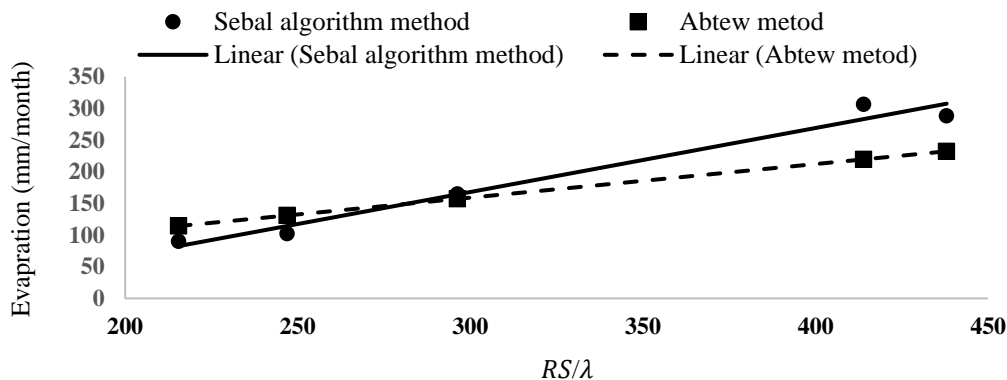
(۵) میزان تبخیر ماهیانه به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای به روش الگوریتم سبال و تبخیر به دست آمده از فرمول ارائه شده توسط Abtew and Melesse (2012) به ازای مقادیر R_s/λ در سد سلیمان شاه را نشان می‌دهد. همان گونه که در نمودار مشخص است همبستگی خوبی میان تبخیر ماهیانه از سطح دریاچه به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای و مقدار R_s/λ برای الگوریتم سبال وجود دارد ($R^2 = 0.97$). فرمول برازش شده خط رگرسیون برای الگوریتم سبال به شرح رابطه (۱۸) است.

$$E = R_s/\lambda - 135 \quad (18)$$

کریدل و هنفر در زمان‌های مختلف عکس‌برداری را نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل مشخص است، در ماه‌های گرم روش پنمن کیمبرلی ۱۹۹۶ و در ماه‌های سرد روش بلانی کریدل با روش الگوریتم سبال اصلاح شده همخوانی دارد. مقادیر تبخیر به دست آمده به روش هنفر بسیار کم است.

۳-۵- محاسبه میزان تبخیر ماهیانه به روش الگوریتم سبال اصلاح شده

با توجه به اینکه تصاویر ماهواره لندست ۸ هر ۱۶ روز یکبار عکس‌برداری می‌نمایند. امکان محاسبه روزانه R_s وجود ندارد. بنابراین با فرض ثابت بودن R_s و ET روزانه در طول ماه می‌توان برآورد ساده‌ای از ET ماهیانه را به دست آورد. شکل



شکل ۵- مقایسه میزان تبخیر ماهیانه (تبخیر روزانه $\times 30$) به دست آمده از تصاویر ماهواره بر سبال و آبتیو به ازای مقادیر R_s/λ در سد سلیمان شاه

Fig. 5 The comparison of monthly evaporation value (daily evaporation $\times 30$) obtained from satellite images by corrected Sebal and Abtio method for R_s/λ values in Soleimanshah Dam

دارد، می‌توان به تبخیر به دست آمده از داده‌های هواشناسی بیش‌تر اعتماد کرد. بر این اساس به منظور صحت سنجی، میزان تبخیر به دست آمده از روش ترکیبی سبال و داده‌های هواشناسی با میزان تبخیر به دست آمده از روش‌هایی که بیش-ترین دقت را در برآورد تبخیر دارند مقایسه شد. نتایج کلی این پژوهش به صورت زیر قابل بیان است:

۱- از بین روش‌های ترکیبی روش‌های پنمن فائو ۱۷ و پنمن کیمبرلی ۱۹۹۶ و از بین روش‌های غیر ترکیبی روش‌های بلانی کریدل و مایر از پایین‌ترین مقدار RMSE و MAE برخوردار هستند.

۲- همبستگی خوب روش الگوریتم سبال اصلاح شده و دقت بالای آن، نشان داد که این روش شرایط آئرو دینامیکی را به خوبی در نظر می‌گیرد و ضعف الگوریتم سبال را پوشش

از بیش‌تر بودن مقدار تبخیر به دست آمده از روش الگوریتم سبال در ماه‌های گرم سال نسبت به مقدار به دست آمده از روش آبتیو می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که با توجه به اینکه ایالت فلوریدا یک منطقه با اقلیم مرطوب است تأثیر شرایط آئرو دینامیکی ناچیز بوده اما در سد سلیمان شاه که دارای اقلیم نیمه خشک است شرایط آئرو دینامیکی قابل صرف نظر کردن نبوده و روش الگوریتم سبال اصلاح شده از دقت بیش‌تری برخوردار است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش میزان تبخیر از سطح دریاچه سلیمان شاه با استفاده از ترکیب الگوریتم سبال و داده‌های هواشناسی در ۵ تاریخ مختلف برآورد شد. با توجه به اینکه یک ایستگاه هواشناسی در فاصله ۱۰۰ m از دریاچه و در محل تاج سد قرار

با استفاده از عکس‌های ماهواره‌ای تبخیر از سطح دریاچه سدها و آب‌های راکد را برآورد کرد و از این طریق منابع آبی را به‌سادگی مدیریت نمود.

دسترسی به داده‌ها

بیشتر داده‌های استفاده‌شده در این پژوهش در متن مقاله ارائه شده است. داده‌های خام از طریق نویسنده مسئول قابل ارائه می‌باشد.

می‌دهد.

۳- با توجه به اینکه دما، رطوبت نسبی و سرعت باد متغیرهای اصلی در روش‌های غیرترکیبی با دقت بالا هستند، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که در مناطق مرطوب از قبیل سطح دریاچه سدها دما، رطوبت نسبی و سرعت باد از مهم‌ترین پارامترها در محاسبه تبخیر هستند.

۴- در صورت عدم دسترسی به اطلاعات هواشناسی موردنیاز،

References

- Abteu, W., and Melesse, A. (2012). Evaporation and evapotranspiration: measurements and estimations. Springer Science & Business Media.
- Ab-Niroo Consulting Engineers Company. (2004). Studies of the second phase of Soleimanshah Dam - Report on the design of the project [In Persian].
- Allen, R. (2003). REF-ET Reference evapotranspiration calculation software for FAO and ASCE standardized equations.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations 56(97): e156.
- Althoff, D., Rodrigues, L. N., da Silva, D. D. and Bazame, H. C. (2019). Improving methods for estimating small reservoir evaporation in the Brazilian Savanna. *Agri. Water Manage.* 216, 105-112.
- Ashfaque, A. (1999). Estimating lake evaporation using meteorological data and remote sensing, M.Sc. Dissertation. International Institute for Geo-information and Earth Observation (ITC).
- Amini, A., Gharibreza, M., Shahmoradi, B. and Zareie, S. (2019a). Land aptitude for horticultural crops and water requirement determination under unsustainable water resources condition. *Environ. Monit. Assess.*, 191(1) doi:10.1007/s10661-018-7125-1
- Amini, A., Kolahchi, A. A., Al-Ansari, N., Moghadam, M. K. and Mohammad, T. (2019b). Application of TRMM precipitation data to evaluate drought and its effects on water Environment and Water Engineering
- resources instability. *Appl. Sci.*, 9(24) doi:10.3390/app9245377
- Avdan, U. and Jovanovska, G. (2016). Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *J. Sens.*, 1-8. Doi: [10.1155/2016/1480307](https://doi.org/10.1155/2016/1480307)
- Bastawesy, M. A., Khalaf, F. I. and Arafat, S. M. (2008). The use of remote sensing and GIS for the estimation of water loss from Tushka lakes, southwestern desert, Egypt. *J. Africa. Earth Sci.*, 52(3), 73-80.
- Bastiaanssen, W. (1995). Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates. PhD Thesis.
- Bou-Fakhreddine, B. Mougharbel, I. Faye, A. and Pollet, Y. (2019). Estimating daily evaporation from poorly-monitored lakes using limited meteorological data: A case study within Qaraoun dam-Lebanon. *J. Environ. Manage.*, 241, 502-513.
- Effendi, I. (2012). Evapotranspiration in dry climate area: Comparing remote sensing techniques with unsaturated zone water flow simulation. M.Sc. Dissertation, University of Twente Faculty of Geo-Information and Earth Observation (ITC).
- Ghamarnia, H. Mousabeyg, F. Amiri, S. and Amirkhani, D. (2015). Evaluation of a few evapotranspiration models using lysimetric measurements in a semi-arid climate region. *Int. J. Plant Soil Sci.*, 5(2), 100-109.
- Hassan, A. Ismail, S. S. Elmoustafa, A. and Khalaf, S. (2018). Evaluating evaporation rate from High Aswan Dam reservoir using RS and GIS techniques. *Egypt. J. Remote Sens. Space*



- Sci., 21(3), 285-293.
- Krishna, S. S., Manavalan, P. and Rao, P. (2014). Estimation of net radiation using satellite based data inputs. *Int. Arch. Photogram. Remote Sens. Spatial Inform. Sci.*, 40(8), 307.
- Losgedaragh, S. Z. and Rahimzadegan, M. (2018). Evaluation of SEBS, SEBAL, and METRIC models in estimation of the evaporation from the freshwater lakes (Case study: Amirkabir dam, Iran). *J. Hydrol.*, 561, 523-531.
- Mhawej, M. Fadel, A. and G. Faour. (2020). Evaporation rates in a vital lake: a 34-year assessment for the Karaoun Lake. *Int. J. Remote Sen.*, 41, 5321-5337.
- Mkhwanazi, M. Chavez, J. L. and Andales, A. A. (2015). SEBAL-A: A remote sensing ET algorithm that accounts for advection with limited data. Part I: Development and validation. *Remote Sens.*, 7(11), 15046-15067.
- Mohebzadeh, H. and Fallah, M. (2019). Quantitative analysis of water balance components in Lake Urmia, Iran using remote sensing technology. *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.*, 13, 389-400.
- Rahimpour, M. and Rahimzadegan, M. (2021). Assessment of surface energy balance algorithm for land and operational simplified surface energy balance algorithm over freshwater and saline water bodies in Urmia Lake Basin. *Theor. Appl. Climat.*, 143, 1457-1472.
- Sadeghi, S. O. M., Ghobadinia, M. and Rahimian, M. H. (2019). Estimation of evaporation from Zayandeh Rood dam lake using SEBAL. *J. Water Soil*, 33(4), 537-548.
- Vicente-Serrano, S. M., Azorin-Molina, C., Sanchez-Lorenzo, A., Revuelto, J., Morán-Tejeda, E., López-Moreno, J. I. and Espejo, F. (2014). Sensitivity of reference evapotranspiration to changes in meteorological parameters in Spain (1961–2011). *Water Resour. Res.*, 50(11), 8458-8480.
- Waters, R., Allen, R., Bastiaanssen, W., Tasumi, M. and Trezza, R. (2002). SEBAL. Surface Energy Balance Algorithms for Land. Idaho Implementation. Advanced Training and UserManual, Idaho, USA.

Case Study

Comparison of SEBAL Algorithm and Meteorological Data Results in Estimating Daily Evaporation from Free Water Surface (Case Study of Soleimanshah Dam)

Houshang Ghamarnia¹, Saeid Nasser², Bahman Farhadi Bansouleh³, Ata Amini⁴ and Farhang Sargordi⁵

¹Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran

²PhD Scholar, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran

³Assoc. Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran

⁴Assoc. Professor, Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sanandaj, Iran

⁵Assist. Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran

*Corresponding author: hghamarnia@razi.ac.ir

Received: February 07, 2021

Revised: March 07, 2021

Accepted: April 17, 2021

Abstract

Accurate estimation of dam lake evaporation is of great importance in reservoir water management. This factor has led to the installation of meteorological stations in most dams. At the meteorological station, the rate of evaporation from the lake surface is measured using an evaporation pan. Remote sensing methods are cost effective and can be generalized to the whole area. In this study, the daily evaporation rate from the surface of Suleiman Shah Lake was calculated using a combination of SEBAL algorithm and meteorological data and using five Landsat 8 satellite images. The obtained results were compared with the evaporation rate obtained from different methods. The results showed that among the combined methods, Penman Kimberly 1996 method, among other methods, Blanche-Kridel method had the highest agreement and Hafner method had the least agreement with the measured data indicated with R^2 , RMSE and MAE equal to 0.96, 2.78 and 5.66, respectively. The results of this study can be used to estimate evaporation in other regions with similar climates.

Keywords: Combined Methods; Energy Balance; Evaporation; Evaporation Pan; Landsat 8; SEBAL Algorithm

