

## A Comprehensive Overview of Single-Source and Dual-Source Energy Balance Algorithms for Estimating Actual Evapotranspiration

M. Rezaei\*

Researcher, Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Kerman Agricultural and Natural Resource Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Kerman, Iran.

Email: maryam.rezaei@areeo.ac.ir

Received: 06-07-2024

Revised: 06-09-2024

Accepted: 14-10-2024

Available Online: 28-02-2025

## مروری جامع بر الگوریتم‌های بیلان انرژی تک‌منبعه و دو منبعه برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی

مریم رضائی

محقق بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران.

E-Mail: maryam.rezaei@areeo.ac.ir

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۳

### Abstract

Evapotranspiration estimation is one of the most important water balance components and involves various complexities. In general, energy balance models are divided into two categories: single-source and two-source models. Choosing a model to estimate ET from among the existing energy balance models is challenging because each model has strengths and limitations. The goal of the present research is to introduce and compare several evapotranspiration estimation methods, including Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) model, Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration (METRIC) model, Surface Energy Balance System (SEBS) model, Simplified Surface Energy Balance Index (S-SEBI) model, Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) model— Two- Source (soil + canopy) (TSM) model and Two-Source Time Integrated (TSTIM) model. Some advantages of the single-source energy balance model S\_SEBI include the following: It is possible to implement it using only images without the need for weather data. Therefore, if the number of meteorological stations in the area is low, this method can be utilized. No need for a land use map. One disadvantage of this model is that it can only be used in cases where atmospheric conditions across the entire image are constant. Due to the simplicity and lower complexity of the structure and assumptions of the SSEBop model, it has increased operational capability for calculating actual evapotranspiration over large areas. However, it is not recommended for regions with heterogeneous vegetation cover, mountainous areas, high albedo regions, or high levels of radiation, and in such areas, the TSEB algorithm is recommended. Due to some errors and uncertainties in these surface energy balance models, extensive studies are required to overcome these limitations.

**Keywords:** Energy Balance, Actual Evapotranspiration, Remote Sensing, Single-Source and Two-Source Models.

### چکیده

برآورد تبخیر و تعرق واقعی به عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای بیلان آب، پیچیدگی‌های زیادی دارد. به طور کلی مدل‌های بیلان انرژی به دو دسته مدل‌های تک‌منبعی و دو منبعی تقسیم می‌شوند. انتخاب یک مدل برای تخمین ET از بین مدل‌های بیلان انرژی موجود چالش‌برانگیز است، زیرا هر مدل، نقاط قوت و محدودیت‌هایی دارد. هدف از پژوهش حاضر معرفی و مقایسه تعدادی از روش‌های برآورد تبخیر و تعرق شامل الگوریتم بیلان انرژی سبال، الگوریتم پهنه‌بندی تبخیر و تعرق با واسنجی داخلی متریک، سیستم بیلان انرژی سطحی (SEBS)، الگوریتم شاخص بیلان انرژی سطح ساده‌شده، الگوریتم عملیاتی بیلان انرژی سطح ساده‌شده (SSEBop)، الگوریتم دومنبعه (خاک + تاج پوشش) و الگوریتم یکپارچه زمانی دومنبعه، است. از مزایای الگوریتم بیلان انرژی تک‌منبعه S\_SEBI می‌توان به این موارد اشاره نمود: ۱- اجرای آن تنها با استفاده از تصاویر و بدون نیاز به داده‌های هواشناسی صورت می‌گیرد. بنابراین اگر تعداد ایستگاه‌های هواشناسی در منطقه کم باشد، می‌توان از این روش بهره گرفت. ۲- نیاز به نقشه کاربری اراضی ندارد. از معایب الگوریتم این است که این روش در مواردی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد که شرایط اتمسفری در کل تصویر ثابت باشد. با توجه به پیچیدگی کمتر ساختار و فرضیات الگوریتم (SSEBop)، قابلیت عملیاتی برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی برای مناطق وسیع را دارد، ولی برای مناطق با پوشش گیاهی ناهمگن، مناطق کوهستانی، مناطق دارای آلبیدوی بالا و تابش زیاد توصیه نمی‌شود و در چنین مناطقی الگوریتم TSEB توصیه می‌شود. با توجه به برخی از خطاها و عدم قطعیت‌ها در الگوریتم‌های بیلان انرژی سطحی، لازم است مطالعات بسیاری برای غلبه بر این محدودیت‌ها انجام گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** بیلان انرژی، تبخیر و تعرق واقعی، سنجش از دور، الگوریتم‌های تک‌منبعه و دو منبعه.

پدیده تبخیر و تعرق<sup>۱</sup> (ET)، یک بخش مهم از چرخه هیدرولوژیکی است (Petković و همکاران، ۲۰۲۰) و این متغیر را می‌توان در برنامه‌ریزی پروژه‌های آبیاری، شبیه‌سازی بیلان هیدرولوژیکی، بهبود مدیریت مصرف آب و الگوریتم‌های پیش‌بینی خشکسالی استفاده نمود (Dixon و Earls، ۲۰۰۸).

با توجه به میزان کم نزولات جوی در اکثر نقاط و نیز کاهش شدید منابع آب به دلیل کاهش نزولات جوی در سال‌های اخیر و افزایش تقاضا در بخش کشاورزی، برآورد تبخیر و تعرق در مدیریت منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی در حوزه آبخیز و ارزیابی و طراحی سامانه‌های آبیاری مزرعه، به‌عنوان شاخصی مهم محسوب می‌شود. تعیین دقیق این پارامتر، نیازمند صرف زمان و هزینه زیاد است. بنابراین، استفاده از روش‌های جدید و کم‌هزینه مانند الگوریتم‌های مبتنی بر سنجش از دور برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی گیاهان در سطح منطقه‌ای و گسترده، ضروری به نظر می‌رسد (نظری و کاویانی، ۱۳۹۵).

بسیاری از روش‌های برآورد تبخیر و تعرق مبتنی بر ماهواره، میزان تبخیر و تعرق را بر اساس معادله بیلان انرژی سطحی با استفاده از تابش‌های موج کوتاه و بلند خالص در سطح پوشش گیاهی و یا خاک، میزان گرمای هدایت شده به سمت خاک و میزان گرمای انتقال یافته به هوا، محاسبه می‌نمایند (Kilic و همکاران، ۲۰۱۶). امروزه با توجه به اهمیت برآورد تبخیر و تعرق واقعی، مطالعات مختلفی در سرتاسر جهان انجام شده است، درحالی‌که فقط تعدادی از روش‌ها تغییرپذیری مکانی تبخیر و تعرق واقعی (AET)<sup>۲</sup>، را در نظر گرفته‌اند. اگرچه اخیراً پیشرفت‌های قابل توجهی در ارزیابی AET بر اساس سنجش از دور صورت گرفته است، اما هنوز شکاف‌هایی بین تحقیقات علمی و کاربرد عملی آن توسط کاربران وجود دارد. روش‌های برآورد تبخیر و تعرق واقعی مبتنی بر سنجش از دور به دو دسته مدل‌های تک منبعی و دو منبعی تقسیم می‌شوند که سطح پیچیدگی، تعداد داده‌های ورودی مورد نیاز و تعداد پارامترها در الگوریتم‌های مختلف متفاوت است. لذا دستیابی به یک الگوریتم قابل درک با پیچیدگی مناسب (نه خیلی ساده و نه خیلی پیچیده)، که بتواند رفتار الگوریتم را توضیح دهد، یک چالش آشکار محسوب می‌شود (Backx و همکاران، ۲۰۱۷) و توجه به پیچیدگی کمتر ساختار و فرضیات الگوریتم، قابلیت اجرایی برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی را برای مناطق وسیع بیشتر خواهد یافت و گزینه‌ای امیدبخش برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی در مطالعات مدیریت منابع آب است. با توجه به مسائل مطرح شده، در این تحقیق تلاش می‌شود تعدادی از روش‌های برآورد تبخیر و تعرق واقعی معرفی و مقایسه‌ای بین روش‌های مختلف صورت پذیرد و همچنین اطلاعاتی در مورد معایب و مزایای استفاده از آن‌ها در اختیار محققان قرار دهد.

مقاله حاضر بررسی و مروری جامع بر الگوریتم‌های بیلان انرژی تک منبعه و دو منبعه برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی در دنیا را نشان می‌دهد. هدف از پژوهش حاضر معرفی و مقایسه تعدادی از روش‌های برآورد تبخیر و تعرق شامل الگوریتم بیلان انرژی سبال، الگوریتم پهنه‌بندی تبخیر و تعرق با واسنجی داخلی متریک، سیستم بیلان انرژی سطحی (SEBS)<sup>۳</sup>، الگوریتم شاخص بیلان انرژی سطح ساده شده، الگوریتم دومنبعه (خاک + تاج پوشش) و الگوریتم یکپارچه زمانی دومنبعه است. با توجه به اهداف مورد نظر در این پژوهش و ماهیت مروری این مقاله، سعی گردید که در ابتدا، جستجوی وسیع مطالعاتی در منابع صورت گیرد. روش تحقیق، به صورت مروری و ابزار جمع‌آوری اطلاعات، اسناد و مدارک در ارتباط با موضوع است. در مرحله اول، معیارهای جستجو و پایگاه داده‌ها تعیین شدند و از پایگاه داده‌های Elsevier، Google Scholar، ScienceDirect و Springer استفاده شد. معیار جستجو، موضوع مقالات بود و کلمات کلیدی بکار رفته شامل «تبخیر و تعرق»، «بیلان انرژی»، «سنجش از دور»، «تک منبعه»، «دو منبعه» و ... بودند. در مرحله دوم، مقالات جستجو و دسته‌بندی شدند و مجموع مقالاتی که با هدف پژوهش حاضر همخوانی داشتند، انتخاب شده و مطالعه و بررسی شدند.

به منظور برآورد تبخیر و تعرق، روش‌های نسبتاً پیچیده بر اساس معادله بیلان انرژی سطحی<sup>۴</sup> (Mallick و همکاران، ۲۰۱۴) ایجاد شده‌اند و به آن‌ها، الگوریتم‌های سب<sup>۵</sup> گفته می‌شود (Zhang و همکاران، ۲۰۱۷). الگوریتم‌های مبتنی بر بیلان انرژی سطحی به دو قسمت الگوریتم‌های تک منبعه<sup>۶</sup> و دو منبعه<sup>۷</sup> تقسیم می‌شوند. الگوریتم‌های تک منبعه، مجموعه خاک و گیاه را به عنوان یک منبع واحد در نظر می‌گیرند و تنها از یک مقاومت آیرودینامیکی در فرآیند انتقال آب-گرمای استفاده می‌کنند.

درحالی‌که الگوریتم‌های دو منبعه ضمن تفکیک خاک و گیاه در کلیه فرایندهای الگوریتم‌سازی، از چندین مقاومت مجزا برای خاک و گیاه استفاده می‌کنند. برای شرایطی که پوشش گیاهی کم و یکنواخت در منطقه غالب باشد، ممکن است الگوریتم‌های تک منبعه مناسب باشند، اما در نواحی‌ای که پوشش گیاهی به طور پراکنده توزیع شده باشند، الگوریتم‌های دو منبعه توصیه می‌شوند (خرسند موفر و سیما، ۱۳۹۸).

الگوریتم‌های بیلان انرژی تک منبعه، شامل الگوریتم بیلان انرژی SEBAL<sup>۸</sup>، الگوریتم شاخص بیلان انرژی سطح ساده شده (S-SEBI)<sup>۹</sup> (Roerink و همکاران، ۲۰۰۰)، سیستم بیلان انرژی سطحی (SEBS) (Su، ۲۰۰۲)، الگوریتم پهنه‌بندی تبخیر و تعرق با واسنجی داخلی متریک<sup>۱۱</sup> (Allen و همکاران، ۲۰۰۷) و از جمله

$$R_n = (1 - \alpha)R_{s\downarrow} - R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (2)$$

که در آن،  $R_{s\downarrow}$  معرف تابش طول موج کوتاه ورودی ( $W/m^2$ )،  $\alpha$  آبییدوی سطحی (بدون بعد)،  $R_{L\downarrow}$  تابش طول موج بلند ورودی ( $W/m^2$ )،  $R_{L\uparrow}$  تابش طول موج بلند خروجی ( $W/m^2$ ) و  $\epsilon_0$  گسیل مندی سطحی عریض باند (بدون بعد) است (Alazba و Mahmoud، ۲۰۱۶). با فرض شرایط صاف بودن آسمان، تابش ورودی موج کوتاه<sup>۴</sup> به صورت رابطه (۳) برای زمان تصویر، محاسبه می‌گردد.

$$R_{s\downarrow} = (G_{SC} \times \cos \theta_{rel} \times \tau_{SW}) / d^2 \quad (3)$$

که در آن  $G_{SC}$  ثابت خورشیدی ( $1367 W/m^2$ )،  $\tau_{SW}$  ضریب شفافیت اتمسفری و  $d^2$  مربع فاصله نسبی زمین تا خورشید است. در هر دو الگوریتم، روش محاسبه کلیه پارامترهای ذکر شده، مشابه است. تنها اختلاف، روش برآورد مقدار ضریب شفافیت اتمسفری یا  $\tau_{SW}$  است که باعث ایجاد اختلاف در مقادیر خروجی  $R_{L\downarrow}$ ،  $R_{s\downarrow}$  و در نتیجه مقدار تابش خالص یا  $R_n$  می‌شود.

$\tau_{SW}$  در الگوریتم متریک با استفاده از تابع ارائه شده توسط Allen و همکاران (۲۰۰۵)، به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$\tau_{SW} = 0.35 + 0.627 \exp \left[ \frac{-0.00146P}{K_t \cos \theta_{hor}} - 0.075 \left( \frac{W}{\cos \theta_{hor}} \right)^{0.4} \right] \quad (4)$$

که در آن  $P$ ، فشار اتمسفر برحسب ( $kPa$ )،  $W$  آب موجود در اتمسفر ( $mm$ )،  $\theta_{hor}$  زاویه زینت خورشیدی از یک سطح افقی و  $K_t$  ضریب مه آلودگی که بدون بعد بوده است ( $0 < K_t \leq 1$ ). مقدار  $K_t = 1$  برای هوای تمیز و  $K_t = 0.5$  برای هوای غباری و بسیار آلوده در نظر گرفته می‌شود (Allen و همکاران، ۱۹۹۸).

در الگوریتم سبال،  $\tau_{SW}$  با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$\tau_{SW} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} \times z \quad (5)$$

که در آن  $z$  معرف ارتفاع ایستگاه از سطح دریا برحسب متر است. شار گرمای خاک، نرخ ذخیره گرمایی در خاک و پوشش گیاهی است. مقدار  $G$  در الگوریتم سبال، با استفاده از یک معادله تجربی و به صورت نسبت  $G/R_n$ ، به دست می‌آید.

$$G/R_n = (T_s - 273.15)(0.0038 + 0.0074\alpha)(1 - 0.98NDVI^4) \quad (6)$$

که  $T_s$  دمای سطحی ( $^{\circ}K$ ) و  $\alpha$  آبییدوی سطحی است. سپس  $G$  با ضرب کردن  $R_n$  در  $G/R_n$  محاسبه می‌شود (Allen و همکاران، ۲۰۰۷). Tasumi (۲۰۰۳) روش دیگری برای محاسبه شار گرمای خاک در الگوریتم متریک پیشنهاد نمود که معادله آن به صورت زیر است:

$$G/R_n = 0.05 + 0.18e^{(-0.521LAI)} \quad (LAI \geq 0.5) \quad (7)$$

$$G/R_n = (1.80(T_s - 273.15))/R_n + 0.084 \quad (LAI < 0.5) \quad (8)$$

که  $LAI$  شاخص سطح برگ است که برحسب مترمربع بر مترمربع، بیان می‌شود. معادلات (۷) و (۸) در آیداهو، کالیفرنیا و نیومکزیکو به کار رفته است.

نحوه محاسبه شار گرمای محسوس، در روش سبال (۱۹۹۸) و متریک متفاوت است، ولی در سبال اصلاح شده (Allen و همکاران، ۲۰۰۲)، این اختلاف وجود ندارد.

الگوریتم‌های بیلان انرژی دومنبه می‌توان به الگوریتم دومنبه (خاک + تاج پوشش)<sup>۱۲</sup> (Norman و همکاران، ۱۹۹۵) و الگوریتم یکپارچه زمانی دومنبه<sup>۱۳</sup> (Anderson و همکاران، ۱۹۹۷)، اشاره نمود. تحقیقات صورت گرفته محققین مختلف نشان می‌دهد که الگوریتم‌های بیلان انرژی مختلف، SEBS، METRIC و SEBAL، به عنوان الگوریتم‌های کارا و قابل اجرا در مقیاس‌های زمانی و مکانی شناخته شده‌اند (Choi و Liaquat، ۲۰۱۵).

#### • الگوریتم‌های بیلان انرژی تک منبعه

##### - الگوریتم بیلان انرژی سبال

الگوریتم سبال روشی است که بر پایه روابط تجربی و فیزیکی، که میزان تبخیر و تعرق واقعی را با استفاده از حداقل داده‌های زمینی برآورد می‌کند و اولین بار Bastiaanssen و همکاران (۱۹۹۸) ارائه نمودند. الگوریتم مذکور را در سال ۲۰۰۲، Allen و همکاران اصلاح نمودند. الگوریتم اصلاحی به الگوریتم توازن انرژی متریک که Allen و همکاران در ۲۰۰۷ ارائه نمودند، شباهت بسیاری دارد. دقت تبخیر و تعرق روزانه برآوردی حاصله از سبال در مقیاس میدانی، ۸۵ درصد و به صورت فصلی دقت آن به ۹۵ درصد افزایش می‌یابد. به طور کلی، استفاده از این روش برای برآورد تبخیر و تعرق در مقیاس‌های بزرگ و دوره‌های بلندمدت نتایج بهتری ارائه می‌دهد (Bastiaanssen و همکاران، ۲۰۰۵).

##### - الگوریتم متریک

الگوریتم متریک در ابتدا در سال ۲۰۰۵ توسط Allen و همکاران در یک کارگاه آموزشی برای برآورد تبخیر و تعرق به منظور مدیریت آب در ایالت‌های غربی آمریکا ارائه شد. سپس Allen و همکاران این الگوریتم را در سال ۲۰۰۷ تحت عنوان پهنه‌بندی تبخیر و تعرق با واسنجی داخلی متریک گسترش دادند.

##### - برآورد تبخیر و تعرق در الگوریتم‌های متریک و سبال

بر اساس رابطه (۱) در الگوریتم‌های متریک و سبال، انرژی مصرف شده برای ET، به صورت یک باقی‌مانده از معادله بیلان انرژی محاسبه می‌شود.

$$LE = R_n - G - H \quad (1)$$

که در این معادله،  $LE$  برابر شار گرمای نهان،  $R_n$  تابش خالص،  $G$  شار گرمای خاک و  $H$  شار گرمای محسوس است که همگی برحسب وات بر مترمربع بیان می‌شوند. الگوریتم‌های متریک و سبال در بسیاری از بخش‌های محاسباتی تبخیر و تعرق مشابه هستند و تنها در تعدادی روابط با هم تفاوت دارند. شار تابش خالص سطحی ( $R_n$ )، نمایانگر انرژی تابشی در سطح است که با کم کردن تمامی شارهای تابشی خروجی از تمامی شارهای تابشی ورودی بر اساس رابطه (۲) محاسبه می‌شود.



این الگوریتم از بیلان انرژی در دو حالت خشک و تر برای محاسبه تبخیرنسبی لحظه‌ای ( $\Lambda_r$ ) استفاده می‌کند:

$$\Lambda_r = 1 - [(H - H_{wet}) / (H_{dry} - H_{wet})] \quad (18)$$

که در آن  $H_{wet}$  شار حرارتی محسوس است ( $W m^{-2}$ ) تحت شرایط محدودکننده تر که در آن ET رخ می‌دهد و  $H_{dry}$  شار حرارتی محسوس ( $W m^{-2}$ ) در شرایط محدودکننده خشک است که در آن ET به دلیل رطوبت محدود خاک، صفر است.

$$\Lambda = (\Lambda_r \times LE_{wet}) / (R_n - G) \quad (19)$$

و در نهایت تبخیر و تعرق روزانه به صورت زیر به دست می‌آید:

$$ET_{24} = (8.64 \times 10^7 \times \Lambda \times (R_{n24} - G_{24})) / (\lambda \times \rho_w) \quad (20)$$

#### - الگوریتم (SSEB-op)

الگوریتم عملیاتی بیلان انرژی ساده شده (SSEB-op)، ارائه شده Senay و همکاران (۲۰۱۳)، تبخیر و تعرق روزانه را با استفاده از دمای سطح زمین ( $T_s$ )، دمای هوای بیشینه ( $T_a$ ) و تبخیر و تعرق مرجع ( $ET_0$ )، برآورد می‌کند. الگوریتم از فرضیات ساده کننده استفاده می‌کند و معادله بیلان انرژی را به صورت دقیق حل نمی‌کند. این فرضیات باعث می‌شود تا محاسبات در زمان نسبتاً کوتاهی انجام شود (رئیس‌ی و همکاران، ۱۴۰۲). در الگوریتم SSEBop، نسبت تبخیر و تعرق از رابطه (۲۱) به دست می‌آید.

$$ET_f = (T_h - T_s) / (T_h - T_c) \quad (21)$$

که در این رابطه،  $T_s$  دمای سطح زمین (K)،  $T_h$  دمای سطح زمین در سلول گرم (K) و  $T_c$  دمای سطح زمین در سلول سرد است.

در ادامه تبخیر و تعرق روزانه از رابطه (۲۲) برآورد می‌شود.

$$ET_{24} = ET_f \times K \times ET_0 \quad (22)$$

که در آن،  $ET_0$  تبخیر و تعرق مرجع بر حسب میلی‌متر در روز و  $K$  یک ضریب مقیاس است که نیاز است برای هر منطقه واسنجی شود و بین صفر تا یک است (Senay و همکاران، ۲۰۱۳).

#### • الگوریتم‌های بیلان انرژی دومنبه

الگوریتم TSM را Norman و همکاران (۱۹۹۵) با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور برای افزایش صحت LE، توسعه دادند. این الگوریتم هم سهم پوشش گیاهی و هم سطح خاک را در نظر می‌گیرد و شار گرمای محسوس ( $H$ ) را به عنوان جمع شار گرمای محسوس تاج پوشش ( $H_c$ ) و شار گرمای محسوس خاک ( $H_s$ )، در نظر می‌گیرد.

$$H = H_c + H_s \quad (23)$$

$$H_c = \rho_{air} \times C_p \times (T_c - T_a) / R_c \quad (24)$$

$$H_s = \rho_{air} \times C_p \times (T_s - T_a) / R_s \quad (25)$$

که در روابط بالا،  $T_s$  و  $T_c$  برابر دمای خاک و تاج پوشش،  $T_a$  دمای هوا،  $R_s$  و  $R_c$  برابر مقاومت آئرو دینامیکی خاک و تاج پوشش است.

در صورتی که بتوان دو رابطه بین بازتابش و دما را برای  $\lambda E_{max}(r_0)$  مشخص کرد، الگوریتم S-SEBI کسر تبخیری را به صورت زیر محاسبه می‌کند: برای هر سلول، بازتابش سطحی  $r_0$  و دمای سطحی  $T_0$  تعیین می‌شوند؛ جایی که دما با رطوبت خاک و با شارهای انرژی مرتبط است. به همراه دمای وابسته به بازتابش  $T_{\lambda E}$ ، که در آن  $\lambda E_{max}(r_0) = R_n - G_0$  و  $H = 0$  است و دمای وابسته به بازتابش  $T_H$ ، که در آن  $\lambda E = 0$  و  $H_{max}(r_0) = R_n - G_0$  است، کسر تبخیری به عنوان نسبت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Lambda = (T_H - T_s) / (T_H - T_{\lambda E}) \quad (14)$$

در روابط زیر،  $T_H$  و  $T_{\lambda E}$  از تصویر و با استفاده از رابطه خطی بین دما و بازتابش محاسبه می‌شود.

$$T_H = a_H + b_H r_0 \quad (15)$$

$$T_{\lambda E} = a_{\lambda E} + b_{\lambda E} r_0 \quad (16)$$

در روابط بالا،  $a_H$  و  $b_H$  ضرایب خطی هستند که شیب و عرض از مبدأ خط را تعیین می‌کنند و از داده‌های تجربی یا واسنجی به دست می‌آیند و  $r_0$  یک متغیر مستقل که ممکن است نماینده بازتابش سطح، شاخص پوشش گیاهی، یا دیگر پارامترهای سطحی باشد و  $a_{\lambda E}$  و  $b_{\lambda E}$  ضرایب خطی هستند که مشخصات خط را تعیین می‌کنند. در صورتی که شرایط اتمسفری در تصویر ثابت بوده و سلول‌های سرد و گرم کافی در طیف بازتابش وجود داشته باشند، ممکن است اجرای این الگوریتم به کمک نمودار پراکنندگی دمای سطح زمین در مقابل بازتابش صورت گیرد. همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد، در آلبیدوهای پایین، تغییرات دمای سطح زمین به ازای افزایش آلبیدو، کم است. با یافتن روابط موجود این دو حد، می‌توان کسر تبخیر و در نهایت تبخیر و تعرق را محاسبه نمود (حسن‌پور و همکاران، ۱۳۹۱).

در نهایت تبخیر و تعرق روزانه از رابطه (۱۷) حاصل می‌شود.

$$ET_{daily} = 24 \times 3600 \times (C_{di} \times \Lambda \times R_{ni} / \lambda) \quad (17)$$

که در آن،  $ET_{daily}$  تبخیر و تعرق روزانه (mm/hr)،  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر (۲،۴۵ MJ/kg) است و  $C_{di}$  از نسبت بین تابش خالص روزانه ( $R_{nd}$ ) به تابش خالص لحظه‌ای ( $R_{ni}$ ) به دست می‌آید (sobrino و همکاران، ۲۰۲۱).

#### - الگوریتم SEBS

الگوریتم SEBS را Su در سال ۱۹۹۹ ارائه نمود. این الگوریتم شامل ترکیبی از الگوریتم‌ها برای تعیین پارامترها و متغیرهایی از جمله آلبیدو، قابلیت انتشار، دمای سطح زمین و پوشش گیاهی از طریق داده‌های تابش و بازتابش است و در سال ۲۰۰۲ توسط Su بهبود پیدا کرده است.

الگوریتم SEBS یکی دیگر از الگوریتم‌های بیلان انرژی فیزیکی پایه است که نیاز به هیچ دانش قبلی در مورد شارهای حرارتی آشفته واقعی ندارد.

کسر پوشش گیاهی از رابطه (۲۶) به دست می‌آید.

$$f_c = 1 - \exp[-(0.5 \times \Omega \times LAI) / \cos \theta] \quad (26)$$

که در آن  $\Omega$  درجه انبوهی و تراکم پوشش گیاهی، LAI شاخص سطح برگ و  $\theta$  زاویه دید رادیومتر است.

بازنگری‌های زیادی در الگوریتم TSM انجام شده است. از جمله ایجاد الگوریتم یکپارچه زمانی دومنبعه (TSTIM)، توسط Anderson و همکاران (۱۹۹۷)، که این الگوریتم بعداً به نام ALEXI تغییر نام داد. مزیت الگوریتم TSTIM این است که خطای ناشی از تصحیح اتمسفری بسیار کاهش می‌یابد (Aryalekshmi و همکاران، ۲۰۲۱). یکی دیگر از نسخه‌های ساده شده TSM، الگوریتم بیلان انرژی دو منبعه ساده شده (STSEB) است که تعادلی بین تابش موج بلند و موج کوتاه ورودی و خروجی برای به دست آوردن تابش خالص اعمال می‌شود (Häusler و همکاران، ۲۰۱۸).

## نتایج و بحث

تعدادی از روش‌های تخمین تبخیر و تعرق به صورت نقطه‌ای و منطقه‌ای در بخش مواد و روش‌ها ذکر شد که در این بخش مزایا و معایب تعدادی از آن‌ها ذکر خواهد شد.

از جمله روش‌های تخمین نقطه‌ای تبخیر و تعرق واقعی می‌توان به لایسمتر اشاره نمود که دستیابی به مقدار دقیق تبخیر و تعرق از طریق روش اندازه‌گیری میدانی، توسط آن امکان‌پذیر است که استفاده از آن در عمل به دلیل هزینه‌های زیاد و دشواری کار، کاربردی نیست. علاوه بر این، روش مذکور مقادیر نقطه‌ای تبخیر و تعرق را به دست می‌دهد (Shi و همکاران، ۲۰۰۸). از این رو کاربردشان به گستره‌های کوچک محدود شده و قابلیت تعمیم به حوضه‌های بزرگ را ندارند (Lyons و Li، ۲۰۰۲).

### • مزایای الگوریتم بیلان انرژی تک منبعه S\_SEBI

۱- می‌توان تنها با استفاده از تصاویر و بدون نیاز به داده‌های هواشناسی به اجرای آن پرداخت. در نتیجه اگر تعداد ایستگاه‌های هواشناسی در منطقه کم و یا از مزرعه دور هستند و یا اطلاعات آن نادقیق است، می‌توان از این روش بهره گرفت.

۲- نیاز به نقشه کاربری اراضی ندارد.

از معایب الگوریتم این است که در مواردی می‌تواند استفاده شود که شرایط اتمسفری در کل تصویر ثابت باشد. بنابراین تنها برای مناطق کوچک قابل کاربرد است. همچنین با توجه به اینکه از چند

سلول استفاده می‌شود، باید دقت داشت که حتماً این سلول‌ها در مناطق کشاورزی باشند (حسن‌پور و همکاران، ۱۳۹۱).

• **مزایای الگوریتم عملیاتی بیلان انرژی سطح ساده شده (SSEBop)**  
یکی از ساده‌ترین الگوریتم‌های تک منبعی بیلان انرژی سطحی بر مبنای داده‌های سنجنش‌ازدور است که کارایی مناسب آن در برآورد تبخیر و تعرق واقعی نشان داده شده است. با توجه به اینکه الگوریتم (SSEBop)، نیاز به حداقل داده‌های زمینی دارد و اجرای خودکار آن آسان است، می‌تواند برای استفاده‌های عملیاتی در مدیریت آبیاری و مصارف آب در کشور توصیه شود. همچنین، با توجه به سادگی و پیچیدگی کمتر ساختار و فرضیات الگوریتم، قابلیت عملیاتی برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی برای مناطق وسیع افزایش خواهد یافت و یک گزینه امیدبخش برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی در مطالعات مدیریت منابع آب است (Dias Lopes و همکاران، ۲۰۱۹).

با این وجود، برای مناطق با پوشش گیاهی ناهمگن، مناطق کوهستانی، مناطق دارای آلبیدو بالا و تابش زیاد توصیه نمی‌شود (Senay و همکاران، ۲۰۱۷). همچنین، یکی از چالش‌های موجود در استفاده از کد اصلی الگوریتم SSEBop، برای مناطقی مانند ایران محدودیت استخراج و استفاده از داده‌های هواشناسی مورد نیاز الگوریتم از پایگاه‌های داده‌های جهانی (به علت عدم پوشش مکانی-زمانی یا محدودیت استفاده از داده‌های جهانی با قدرت تفکیک مکانی کم در مقیاس‌های محلی) است. به عنوان نمونه، پایگاه‌های داده‌های هواشناسی، مانند Daymet در مقیاس یک کیلومتری از ۱۹۵۰ تا ۲۰۲۱ (Thornton و همکاران، ۲۰۲۱) و GridMET در مقیاس چهار کیلومتری از ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۰ (Abatzoglou، ۲۰۱۳) که به عنوان ورودی در کد اولیه الگوریتم SSEBop تعریف شده است، از نظر پوشش مکانی، شامل ایران نمی‌شود.

از آنجا که دقت داده‌های ورودی، به شدت روی نتایج تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده بر پایه بیلان انرژی و سنجنش‌ازدور اثرگذار است، استفاده از داده‌های هواشناسی موجود در پایگاه‌های داده جهانی (با قدرت تفکیک مکانی پایین)، با توجه به تراکم کم ایستگاه‌های هواشناسی کشور، می‌تواند منجر به افزایش خطا در خروجی نهایی الگوریتم‌ها شود (رئیس‌ی و همکاران، ۱۴۰۲). مقایسه انواع الگوریتم‌های بیلان انرژی سطحی به نقل از Aryalekshmi و همکاران (۲۰۲۱) در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- مقایسه انواع الگوریتم‌های بیلان انرژی سطحی (Sharma و Acharya, ۲۰۲۱)

الگوریتم	فرضیات	مزایا	معایب
سیستم بیلان انرژی سطحی (SEBS)	- در حد خشک، خاک لخت و رطوبت حداقل و در نتیجه تبخیر و تعرق صفر است. - در حد مرطوب، تبخیر و تعرق بیشینه است.	- ارزیابی شار تبخیری در مقیاس منطقه‌ای - کاهش عدم قطعیت - دمای سطح زمین - دقت خوب	- به تعداد زیادی پارامتر احتیاج دارد.
الگوریتم شاخص بیلان انرژی سطح ساده شده (S-SEBI)	- برای یک آلبیدوی معین، کسر تبخیری با دمای سطح زمین رابطه خطی دارد.	- داده‌های میدانی احتیاج ندارد.	- دماهای حدی نیاز است.
الگوریتم عملیاتی بیلان انرژی سطح ساده شده (SSEB-op)	- تبخیر و تعرق در سلول گرم، صفر است. - تبخیر و تعرق در سلول سرد بیشینه است.	- اندازه‌گیری‌های زمینی نیاز نیست. - انتخاب دستی سلول گرم و سرد نیاز نیست. - هزینه کمتر دارد.	- شار حرارتی محسوس (H) را محاسبه نمی‌کند. - نمی‌توان آن را در زمین‌های با عوارض پیچیده به کار برد.
الگوریتم دومنبه خاک + تاج پوشش (TSM)	- هم سهم پوشش گیاهی و هم سطح خاک را در نظر می‌گیرد.	- عدم نیاز به تنظیمات تجربی	- داده‌های زمینی زیادی نیاز است.
الگوریتم بیلان انرژی سبال (SEBAL)	- رابطه خطی بین دمای سطح زمین (LST) و dT وجود دارد. - تبخیر و تعرق در سلول گرم، صفر است.	- داده‌های زمینی کمتری نیاز است. - تصحیح اتمسفری چندان نیاز نیست.	- بیشتر می‌توان آن را در دشت‌ها و مناطق هموار به کار برد. - انتخاب سلول‌های سرد و گرم توسط کاربر انجام می‌شود.
الگوریتم پهنه‌بندی تبخیر و تعرق با واسنجی داخلی متریک (METRIC)	- رابطه خطی بین دمای سطح زمین (LST) و dT وجود دارد. - ET <sub>RF</sub> در طول روز ثابت است. $ET_{hot}=0 / ET_{cold}=1.05 ET_r$	- داده‌های زمینی کمتری نیاز است. - این الگوریتم را می‌توان برای عوارض پیچیده‌تر استفاده کرد.	- عدم قطعیت در انتخاب سلول‌های سرد و گرم

تعداد داده‌ها است (Gocic و همکاران، ۲۰۱۶). جدول (۲)، مقایسه آماری بین تبخیر و تعرق لحظه‌ای تخمین زده شده با الگوریتم‌ها و تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده با روش نسبت باون را ارائه می‌دهند.

نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد که الگوریتم‌های بیلان انرژی به خوبی تغییرات تبخیر و تعرق لحظه‌ای را برآورد نموده‌اند. دقت این الگوریتم‌ها با  $R^2$  بین ۰/۰۶ تا ۰/۹۵ و RMSD بین ۰/۰۷ تا ۰/۱۵ میلی‌متر در ساعت بود. داده‌های تجمیع شده از سه نوع سطح پوشش گیاهی طی سه سال تحت شرایط آبیاری نشان داد که الگوریتم متریک با  $NSE = 0.9$  در تمام انواع پوشش‌های زمینی عملکرد بهتری داشت و پس از آن SEBS با  $NSE = 0.76$ ، S-SEBI با  $NSE = 0.73$  و SEBAL با  $NSE = 0.65$ ، قرار گرفتند. اگرچه تفاوت معنی‌داری بین مقادیر  $R^2$  الگوریتم‌های METRIC و SEBS در مقابل تبخیر و تعرق لحظه‌ای اندازه‌گیری شده توسط BREBS مشاهده نشد، اما  $NSE$  RMSD، و PBE الگوریتم SEBS به ترتیب ۲۷٪ بیشتر، ۱۸٪ کمتر و SEB به جز SEBS، در سال ۲۰۱۷ بر روی چغندر قند، عملکرد ضعیفی داشتند. نمودار پراکنندگی بین تبخیر و تعرق لحظه‌ای برآورد شده توسط الگوریتم و اندازه‌گیری شده توسط BREBS نشان داد که  $R^2$  برای METRIC، SEBAL، SEBS، S-SEBI و SEBS به ترتیب ۰/۷۱، ۰/۰۶، ۰/۲۱، ۰/۷۱

#### • مطالعه موردی مقایسه تبخیر و تعرق برآوردی توسط الگوریتم‌های

بیلان انرژی SEBAL، METRIC، S-SEBI و Landsat 7-ETM، از ۱۹ تصویر Landsat 8-OLI و TIRS بدون ابر برای ارزیابی و مقایسه عملکرد الگوریتم‌های SEBS، SEBAL، METRIC و S-SEBI در سه سطح رویشی (چغندر قند در سال ۲۰۱۷، لوبیا در سال ۲۰۱۸ و جو در سال ۲۰۱۹) در حوزه آبخیز بیگورن در آمریکا برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی استفاده نمودند.

ضرایب آماری تبیین ( $R^2$ )، ضریب کارایی نش ساتکلیف (NSE) و خطای جذر میانگین مربعات برای ارزیابی قابلیت الگوریتم پیشنهادی استفاده شد که معادلات آن‌ها به شرح زیر است:

$$R^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (Ob_j - \overline{Ob_j}) (Si_j - \overline{Si_j})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (Ob_j - \overline{Ob_j})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^N (Si_j - \overline{Si_j})^2}} \quad (27)$$

$$NSE = \frac{\sum_{j=1}^N (Ob_j - Si_j)^2}{(Ob_j - \overline{Ob_j})^2} \quad (28)$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (Ob_j - Si_j)^2}{N}} \quad (29)$$

که در این معادلات،  $Ob_j$  و  $Si_j$  مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده و  $\overline{Ob_j}$  و  $\overline{Si_j}$  میانگین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده و  $N$

و ۰/۲۱ و NSE به ترتیب ۰/۲، ۰/۹، ۰/۲ و ۰/۲-۰/۲ بود.

مقایسه تبخیر و تعرق لحظه‌ای برآورد شده با الگوریتم‌های SEB در سال ۲۰۱۸ بر روی سطح پوشش گیاهی لوبیای خشک نشان داد که RMSD در الگوریتم‌های SEBAL، METRIC و SEBS و S-SEBI به ترتیب ۰/۱۱، ۰/۱۴، ۰/۱۳، ۰/۰۷ میلی‌متر در ساعت بود. مشابه سال ۲۰۱۸، در سال ۲۰۱۹ نیز الگوریتم‌های METRIC و SEBS عملکرد بالاتری نسبت به SEBAL و S-SEBI داشتند.

نتایج داده‌های تلفیقی از سه سطح‌رویشی به مدت سه سال در شرایط آبیاری نشان داد که الگوریتم متریک با  $NSE = 0.9$  در تمام انواع پوشش زمین بهتر عمل کرده و به دنبال آن الگوریتم SEBS با  $NSE = 0.76$ ، و الگوریتم S-SEBI با  $NSE = 0.73$  و سبال با شاخص  $NSE = 0.65$  قرار گرفتند. شکل (۴)، شار گرمای محسوس برآوردی الگوریتم‌های بیلان انرژی را در مقابل مقادیر مشاهداتی نشان می‌دهد.

جدول ۲- مقایسه آماری بین تبخیر و تعرق لحظه‌ای تخمین زده شده با الگوریتم و اندازه‌گیری شده با روش نسبت باون برای فصل رشد در سال‌های ۲۰۱۷، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹ و (Sharma و Acharya، ۲۰۲۱)

الگوریتم	سال	سطح	تعداد تصویر ماهواره‌ای	$R^2$	RMSD ( $\text{mm h}^{-1}$ )	NSE
METRIC	۲۰۱۷	چغندر قند	۵	۰/۲۱	۰/۰۹	۰/۲۰
	۲۰۱۸	لوبیا خشک	۹	۰/۹۵	۰/۰۷	۰/۹۰
	۲۰۱۹	جو	۵	۰/۸	۰/۰۸	۰/۶۷
		داده‌های ادغام شده	۱۹	۰/۹۱	۰/۰۸	۰/۹۰
SEBAL	۲۰۱۷	چغندر قند	۵	۰/۰۶	۰/۱۴	-۰/۹۰
	۲۰۱۸	لوبیا خشک	۹	۰/۷۵	۰/۱۳	۰/۶۴
	۲۰۱۹	جو	۵	۰/۶۱	۰/۱۷	-۰/۷۵
		داده‌های ادغام شده	۱۹	۰/۶۹	۰/۱۴	۰/۶۵
SEBS	۲۰۱۷	چغندر قند	۵	۰/۷۱	۰/۰۹	۰/۱۹
	۲۰۱۸	لوبیا خشک	۹	۰/۹۰	۰/۱۴	۰/۵۳
	۲۰۱۹	جو	۵	۰/۸۰	۰/۰۹	۰/۵۷
		داده‌های ادغام شده	۱۹	۰/۸۷	۰/۱۱	۰/۷۶
S_SEBI	۲۰۱۷	چغندر قند	۵	۰/۲۱	۰/۱۱	-۰/۲۱
	۲۰۱۸	لوبیا خشک	۹	۰/۸۱	۰/۱۱	۰/۷۱
	۲۰۱۹	جو	۵	۰/۴۴	۰/۱۵	-۰/۳۸
		داده‌های ادغام شده	۱۹	۰/۷۶	۰/۱۳	۰/۷۳

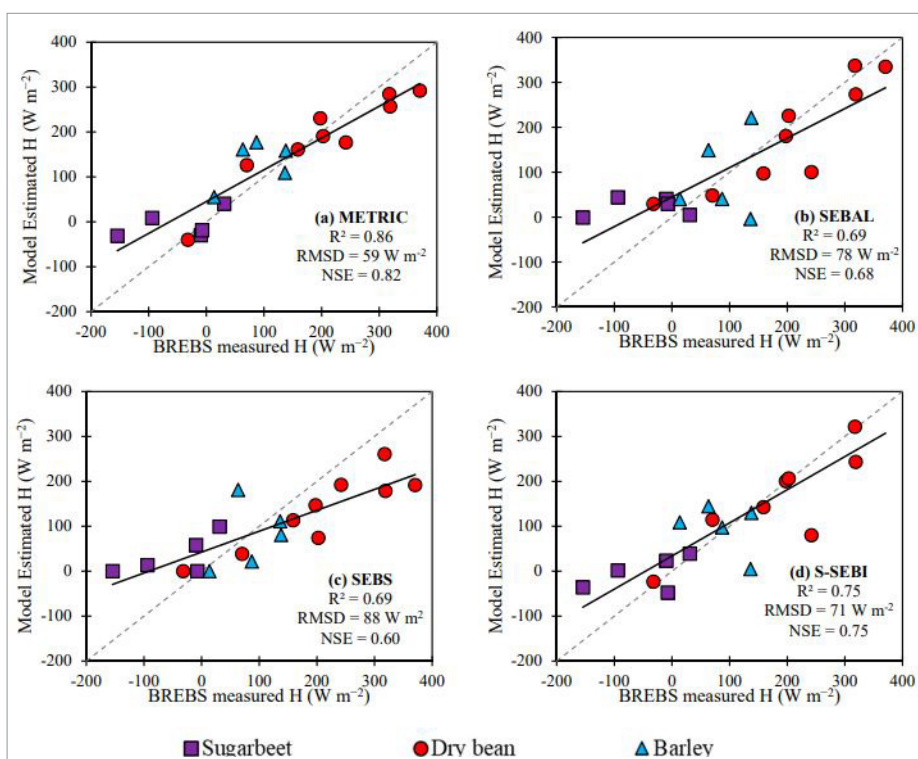
بیش برآوردی جزئی در H مشتق شده از S-SEBI در شکل (۴) نشان می‌دهد که فرض تبخیر صفر روی لبه خشک ممکن است معتبر نباشد. این واقعیت که H مشتق شده از SEBS تفاوت بیشتری با H مشاهداتی دارد را می‌توان به حساسیت الگوریتم‌های SEBS نسبت به گرادیان دما و ویژگی‌های پوشش گیاهی مرتبط دانست (Liaquat و Choi، ۲۰۱۵). به طور کلی، SEBS به سلول‌های حدی در محاسبه H نیاز ندارد و از محاسبه سلول به سلول با استفاده از روش تکراری با حل روابط برای پروفیل‌های سرعت اصطحاک‌کی و تفاوت بین دمای هوای نزدیک به سطح و دمای سطحی، استفاده می‌کند که قابلیت اطمینان آن را به دلیل عدم دقت در گرادیان دما و طول مقاومت آیرودینامیک می‌توان زیر سوال برد (Liaquat و Choi، ۲۰۱۵؛ yun و همکاران، ۲۰۱۴) و تمایل دارد که تبخیر و تعرق

لحظه‌ای را برای شرایط متراکم و کم‌رویشی به ترتیب کمتر و بیش‌ازحد تخمین بزند، که در این مطالعه نیز مشاهده شده است. این نتایج توسط Liaquat و Choi در سال ۲۰۱۵، نیز تأیید شده است. آن‌ها مشاهده کردند که اختلاف پنج درجه کلونین بین دمای مطلق و دمای رادیومتریک می‌تواند به ۱۰۷ درصد بیش برآوردی تبخیر و تعرق لحظه‌ای توسط SEBS در مقایسه با ۳ درصد بیش برآوردی در تبخیر و تعرق لحظه‌ای با استفاده از METRIC منجر گردد. دمای رادیومتریک، به دمای ظاهری یک جسم اشاره دارد که با استفاده از تابش حرارتی که از آن ساطع می‌شود، اندازه‌گیری می‌شود. دمای رادیومتریک در کاربردهای مختلفی مانند پیش‌بینی دمای سطح زمین، برآورد تبخیر و تعرق و مطالعه پدیده‌های جوی، اهمیت دارد. دمای مطلق سطح به دمای فیزیکی واقعی یک سطح



۸۱ میلی‌متر بیشتر از سال ۲۰۱۷ و میانگین دمای هوا به ترتیب ۰/۵۰ و ۰/۷۴ درجه سانتی‌گراد کمتر از سال ۲۰۱۷ بود. الگوریتم METRIC از ETrF استفاده می‌کند، درحالی‌که بقیه الگوریتم‌های SEB از  $\Lambda$  استفاده می‌کنند. مقایسه ETrF در مقابل  $\Lambda$ SEBAL، شاخص مجذور میانگین مربعات خطا را ۰/۱۸ و درصد بایاس را از ۳۷- تا ۷۲ درصد نشان داد. مقایسه مشابه بین ETrF در مقابل  $\Lambda$ S-SEBI دارای  $RMSE = 0.2$  و درصد بایاس بین ۰/۱۲ تا ۰/۶۷ درصد بود. به همین ترتیب، در مقابل  $\Lambda$ SEBS دارای  $RMSE$  برابر ۰/۱۳ و درصد بایاس بین ۰/۵۷ تا ۰/۰۹ متغیر بود (Sharma و Acharya، ۲۰۲۱).

گفته می‌شود و نشان‌دهنده انرژی جنبشی واقعی مولکول‌های سطح است. مقادیر منفی H (مشاهده‌شده در سال ۲۰۱۷) برای الگوریتم‌های بیلان انرژی و روش نسبت باون نشان‌دهنده حرکت انرژی از هوا به تاج گیاه است. مزرعه جو که قبلاً برداشت شده است و همچنین مناطق وسیعی از پوشش گیاهی طبیعی که ایستگاه را احاطه کرده است، می‌تواند منبع بالقوه گرمای فرارفتی باشد که باعث بروز مقادیر منفی H گردد. باین‌حال، در مورد تصاویر ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹، بارش بالاتر و دمای هوای پایین‌تر ممکن است اثر فرارفتی از مناطق اطراف به ایستگاه را کاهش دهد. در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹، به ترتیب میانگین بارش، ۱۹ و

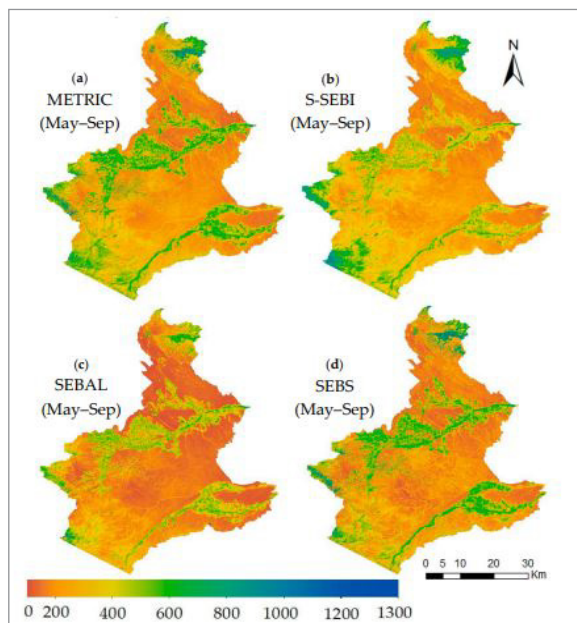


شکل ۴- مقایسه آماری بین شار گرمای محسوس تخمین زده شده با الگوریتم‌های بیلان انرژی (محور عمودی) برحسب وات بر مترمربع (a) METRIC، (b) SEBAL، (c) SEBS، (d) S-SEBI با شار گرمای محسوس اندازه‌گیری شده با روش نسبت باون (محور افقی) برای سه سطح پوششی (Sharma و Acharya، ۲۰۲۱)

فرض یک رابطه خطی بین  $T_s$  و albedo برای تعریف لبه سرد و گرم در S-SEBI، می‌تواند باعث بایاس قابل‌توجهی در تخمین نهایی H و  $ET_{inst}$  شود. باین‌حال، بایاس در  $ET_{inst}$  و H مشتق شده از SEB، نه تنها ناشی از عدم قطعیت در پارامترهای الگوریتم SEB، بلکه از خطاهای اندازه‌گیری شار نیز است (Acharya و همکاران، ۲۰۲۰). شکل (۵) عملکرد الگوریتم‌های SEB را در تخمین تبخیر و تعرق برای فصل رشد ۲۰۱۸ (از مه تا سپتامبر) در برابر شار متناظر اندازه‌گیری شده با روش نسبت باون پیش‌بینی کرد.

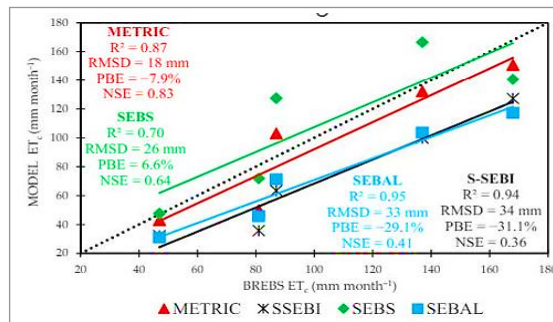
توجه به این نکته مهم است که مفروضات الگوریتم‌های مختلف، مسائل مقیاس بندی، مهارت‌های فنی کاربر و شیوه‌های مدیریتی، می‌تواند منجر به عدم قطعیت‌ها و نادرتی‌های زیادی در مقایسه الگوریتم‌های SEB شود. به‌عنوان مثال انتخاب دستی سلول‌های شاخص برای METRIC و SEBAL می‌تواند از تغییرات  $T_s$  سلول‌های سرد و گرم استفاده کند که می‌تواند منجر به بایاس قابل‌توجهی در نتایج  $ET_{inst}$  و H شود (Long و همکاران، ۲۰۱۱). به‌طور مشابه، حساسیت الگوریتم SEBS به برآورد آرویدینامیکی و زبری سطح (Byun و همکاران، ۲۰۱۴) و

بالتری را به خود اختصاص دادند. مقایسه بین الگوریتم‌های SEB نشان داد که SEBS تخمین بالاتری از تبخیر و تعرق فصلی برای همه محصولات اصلی داشت. برآوردهای فصلی SEBS به ترتیب ۲۱، ۴ و ۲۲ درصد بیشتر از METRIC، S-SEBI و SEBAL بود (شکل ۶).



شکل ۶- توزیع زمانی-مکانی تبخیر و تعرق فصلی برآوردی با الگوریتم‌های بیلان انرژی در طول فصل رشد ۲۰۱۸ (مه-سپتامبر) (a, METRIC, (b, S-SEBI (c, SEBAL, و (d, SEBS (Sharma و Acharya, ۲۰۲۱)

نوار راهنمای رنگ موجود در شکل (۶)، تغییرپذیری تبخیر و تعرق برآوردی با الگوریتم‌های مختلف را نشان می‌دهد. نتایج این پژوهش نشان داد که شارهای تخمینی در الگوریتم‌های بیلان انرژی (لحظه‌ای و دوره‌ای) تفاوت‌های قابل توجهی دارند. این تفاوت‌ها به دلیل این است که الگوریتم‌های SEB در ساختار، داده‌های ورودی و فرضیات الگوریتم‌ها با یکدیگر متفاوت هستند، که این خود به تنوع در خروجی الگوریتم‌ها منجر شده است. به عنوان مثال، الگوریتم‌های METRIC و SEBAL از روش واسنجی CIMEC در هنگام محاسبه H بهره می‌برند تا آریبی سیستماتیک در تخمین دمای سطح و بازتاب سطح را حذف کنند (Allen و همکاران، ۲۰۰۷) و از سلول‌های خشک و تر، برای واسنجی داخلی استفاده می‌شود. بنابراین، تخمین‌های نهایی تبخیر و تعرق در این الگوریتم‌ها می‌تواند دقیق باشد، حتی اگر سایر اجزای بیلان انرژی با عدم قطعیت مواجه شوند. با این حال، الگوریتم‌هایی مانند SEBS و S-SEBI تحت چنین واسنجی دقیق و ترسیم با استفاده از سلول‌های شاخص و ET<sub>r</sub> ساعتی قرار نمی‌گیرند و تبخیر و تعرق برآوردی متریک، همبستگی بهتری با مقادیر روش نسبت باون داشت. این عملکرد را می‌توان به طور مستقیم با روش واسنجی داخلی (CIMEC) انجام شده در



شکل ۵- مقایسه آماری بین تبخیر و تعرق ماهانه تخمین زده شده با الگوریتم‌های بیلان انرژی و روش نسبت باون در طول فصل رشد ۲۰۱۸ (Sharma و Acharya, ۲۰۲۱)

برای همه الگوریتم‌ها، همبستگی متوسط تا زیاد بین ET<sub>c</sub> اندازه‌گیری شده و برآورد شده با R<sup>2</sup> از ۰/۷۰ تا ۰/۹۵ و RMSD از ۱۸ میلی‌متر برای METRIC تا ۳۴ میلی‌متر برای S-SEBI مشاهده گردید (شکل ۵). به طور کلی، همه الگوریتم‌ها به جز SEBS، تبخیر و تعرق فصلی را کم برآورد کردند. با این حال، METRIC به دلیل RMSD پایین (۱۷/۶ میلی‌متر) و درصد خطای کمتر (۷/۹٪) به عنوان بهترین الگوریتم شناخته شد. تبخیر و تعرق برآوردی ماهانه در مدل متریک ماهانه بین ۳۸٪-۰ درصد (کم برآورد) در ژوئن تا ۱۸٪ (بیش برآورد) در اکتبر بود. تبخیر و تعرق ماهانه زمانی دارای بیش برآوردی و کم برآوردی تخمین زده شد که سطح خاک فاقد پوشش فعال سطح برگ بود. به طور مشابه، تخمین بیش از حد برداشت لوبیا خشک مشاهده شد (Sharma و Acharya, ۲۰۲۱).

#### مقایسه تبخیر و تعرق روزانه برآوردی الگوریتم‌های بیلان انرژی

در مطالعه Sharma و Acharya (۲۰۲۱)، برای بررسی تفاوت در الگوریتم‌های SEB برای کاربری‌های مختلف زمین، با استفاده از تغییرات مکانی تبخیر و تعرق روزانه و فصلی در طول فصل رشد سال ۲۰۱۸ انجام شد. یک تصویر در ۱۱ اوت ۲۰۱۸ از اواسط فصل رشد انتخاب شد. تنوع مکانی-زمانی در طول فصل رشد نیز تجزیه و تحلیل شد. به طور متوسط، الگوریتم متریک تبخیر و تعرق روزانه را برای زمین‌های زراعی ۴/۷ میلی‌متر در روز، SEBS، ۴/۱ میلی‌متر در روز، S-SEBI، ۳/۸ میلی‌متر در روز و SEBAL، ۴/۱ میلی‌متر در روز، تخمین زد. برای پوشش گیاهی طبیعی (جنگل، بوته‌زار، علفزار و تالاب)، میانگین تبخیر و تعرق روزانه برای همه الگوریتم‌ها به جز S-SEBI که میانگین ET<sub>24</sub> آن ۱/۶ میلی‌متر در روز بود، کمتر از یک میلی‌متر در روز بود. در مقیاس فصلی، همان‌طور که انتظار می‌رفت، زمین‌های زراعی تبخیر و تعرق بالاتری را در مقایسه با منطقه پوشش گیاهی طبیعی مشاهده کردند. به همین ترتیب، جنگل‌های سوزنی‌برگ (بالا سمت راست و پایین سمت چپ تصویر) در مقایسه با سایر انواع پوشش زمین، تبخیر و تعرق فصلی

فن‌های ترکیب داده‌ها و استفاده از روش‌های ترکیبی را می‌توان در این الگوریتم‌ها گنجانند تا عملکرد آن‌ها را بهبود بخشد، همچنین با توسعه فناوری سنجش‌ازدور، می‌تواند برآورد تبخیروتعرق واقعی افزایش یابد.

#### پی‌نوشت‌ها

- 1-Et: Evapotranspiration
- 2-AET: Actual Evapotranspiration
- 3-SEBS: Surface Energy Balance System
- 4-SSEBop:The operational Simplified Surface Energy Balance
- 5-SEB: Surface Energy Balance
- 6-SEB Models
- 7-Single Source
- 8-Two-Source
- 9-SEBAL: Surface Energy Balance Algorithm for Land
- 10-S-SEBI: Simpled Surface Energy Balance Index
- 11-METRIC:Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration
- 12-TSM: Two- Source (soil + canopy) Model
- 13-TSTIM: Two-Source Time Integrated Model
- 14-Incoming broad-band short-wave radiation
- 15-Cold Pixel
- 16-Hot Pixel

#### منابع

- حسن‌پور، بهاره، میرزایی، فرهاد، ارشد، صالح، و کوثری، هانیه. (۱۳۹۱). مقایسه الگوریتم‌های SEBAL و S-SEBI در برآورد تبخیر و تعرق در منطقه کرج. آب و خاک، ۲۶(۶)، ۱۳۶۰-۱۳۷۱. doi: [10.22067/jsw.v0i0.19247](https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.19247)
- خرسند موقر، مصطفی، و سیما، سمیه. (۱۳۹۸). مقایسه مدل‌های بیلان انرژی مبتنی بر داده‌های سنجش از دور در برآورد تبخیر از سطح دریاچه‌های شور. مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، ۷(۲)، ۱۷۵-۱۸۵. doi: [10.29252/jgit.7.2.155](https://doi.org/10.29252/jgit.7.2.155)
- رئیس‌ی، احمد، مظفری، غلامرضا، و غفاریان مالمیری، حمیدرضا. (۱۴۰۲). ارزیابی و مقایسه میزان برآورد تبخیر و تعرق گیاه گندم با استفاده از الگوریتم سیال و روش پنمن - مانیت از منطقه چاه نیمه‌های سیستان و بلوچستان. جغرافیای طبیعی، ۱۶(۶۰)، ۳۷-۱۷. doi: [20.1001.1.20085656.1402.16.60.1.0](https://doi.org/10.1001.1.20085656.1402.16.60.1.0)
- نظری، رستا، و کاویانی، عباس. (۱۳۹۵). بررسی نتایج تخمین تبخیر

الگوریتم متریک مرتبط کرد. برآوردهای تبخیروتعرق در الگوریتم SEBAL در مقایسه با METRIC کمتر بود که این موضوع ممکن است به دلیل تفاوت در (۱) انتخاب سلول سرد بین METRIC و SEBAL؛ (۲) استفاده از ETrF در مقایسه با  $\Lambda$  برای تبدیل ETinst به ET<sub>۲۴</sub> باشد (Senay و Singh، ۲۰۱۶). به همین ترتیب، همه الگوریتم‌های SEB، بیش برآوردی در تبخیروتعرق لحظه‌ای با درصد اریبی بین ۲/۲ درصد برای SEBAL تا ۱۲/۳ درصد برای SEBS داشتند.

بیش برآوردی مشابه در ETc تخمین زده شده با SEB بین ۸ تا ۳۲ درصد در مطالعه Wagle و همکاران (۲۰۱۷) مشاهده شد که عملکرد پنج الگوریتم SEB یعنی S-SEBI، SEBS، SEBAL، METRIC و SSEBop را مقایسه کردند. آن‌ها الگوریتم‌های SEBS را بر اساس چهار معیار آماری رتبه‌بندی کردند و به این نتیجه رسیدند که S-SEBI و SEBAL بهتر عمل کردند و به دنبال آن، SEBS و METRIC قرار گرفتند. مشابه این مطالعه، عملکرد بالاتر METRIC و SEBS در مطالعه Senay و Singh (۲۰۱۶) مشاهده شد.

عملکرد METRIC نیز در مقایسه با SEBS در مطالعه Liaquat و Choi (۲۰۱۵) در شمال شرق آسیا در چهار سطح‌رویشی مختلف بهتر بود. آن‌ها گزارش کردند که واسنجی داخلی در METRIC به کاهش اریبی در تصحیح اتمسفری و سایر پارامترهای ورودی کمک خواهد کرد.

#### نتیجه‌گیری

به این نکته در بخش‌های قبل اشاره شد که الگوریتم‌های تک‌منبعه و دومنبه، علاوه بر کارا بودن در برآورد تبخیروتعرق، دارای مزایا و معایبی هستند. همچنین ذکر گردید که با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و اندازه‌گیری‌های میدانی، تمام الگوریتم‌های بیلان انرژی، شار حرارتی محسوس، شار گرمای نهان و شار حرارتی خاک را تخمین می‌زنند. در مورد الگوریتم S-SEBI، اگر حداکثر و حداقل دما در دسترس باشد، نیازی به داده‌های اضافی وجود نخواهد داشت. شار گرمای محسوس و نهان در الگوریتم SEBS، با استفاده از کسر تبخیری برای هر سلول محاسبه می‌شود. در الگوریتم‌های متریک و سبال، انتخاب سلول‌های گرم و سرد برای واسنجی داخلی و برآورد شار حرارت محسوس موردنیاز است. این دو الگوریتم، پرکاربردترین الگوریتم‌های پذیرفته شده در الگوریتم‌های SEB هستند (Aryalekshmi و همکاران، ۲۰۲۱).

در مورد SEBAL، همان‌طور که قبلاً ذکر شد، نمی‌توان آن را برای مناطق کوهستانی بکار کرد و این عدم قطعیت با استفاده از الگوریتم METRIC برطرف می‌شود. با توجه به برخی از خطاها و عدم قطعیت‌ها در این الگوریتم‌های بیلان انرژی سطحی، لازم است مطالعات بسیاری برای غلبه بر این محدودیت‌ها انجام گردد.

- sensing of environment, 60(2), 195-216. doi: [10.1016/S00344257\(96\)00215-5](https://doi.org/10.1016/S00344257(96)00215-5)
- Aryalekshmi, B. N., Biradar, R. C., Chandrasekar, K., & Ahamed, J. M. (2021). Analysis of various surface energy balance models for evapotranspiration estimation using satellite data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(3), 1119-1126. doi: [10.1016/j.ejrs.2021.11.007](https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.11.007)
- Awada, H., Di Prima, S., Sirca, C., Giadrossich, F., Maras, S., Spano, D., & Pirastru, M. (2021). Daily Actual Evapotranspiration Estimation in a Mediterranean Ecosystem from Landsat Observations Using SEBAL Approach. *Forests*, 12(2), 189. doi: [10.3390/f12020189](https://doi.org/10.3390/f12020189)
- Bastiaanssen, W. G., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of hydrology*, 212, 198-212. doi: [10.1016/S00221694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S00221694(98)00253-4)
- Bastiaanssen, W. G. M., Noordman, E. J. M., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B. P., & Allen, R. G. (2005). SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 131(1), 85-93. doi: [10.1016/j.agrformet.2023.109408](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109408)
- Backx, J., Hilberath, C., Messenbock, R., Morieux, Y., & Streubel, H. (2017). Mastering complexity through simplification: Four steps to creating competitive advantage. Boston Consulting Group.
- Byun, K., Liaqat, U.W., & Choi, M. (2014). Dual-model approaches for evapotranspiration analyses over homo- and heterogeneous land surface conditions. *Agricultural and forest meteorology*, 197, 169-187. doi: [10.1016/j.agrformet.2014.07.001](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.07.001)
- Dias Lopes, J., Neiva Rodrigues, L., Acioli Imbuzeiro, H. M., & Falco Pruski, F. (2019). Performance of SSEBop model for estimating wheat actual evapotranspiration in the Brazilian Savannah region. *International Journal of Remote Sensing*, 40(18), 6930-6947. doi: [10.1080/01431161.2019.1597304](https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1597304)
- Earls, J., & Dixon, B. (2008). A comparison of SWAT model-predicted potential evapotranspiration using و تعرق گیاه مرجع چمن با استفاده از مدل‌های متریک و سبال در دشت قزوین. *پژوهش آب در کشاورزی*, ۳۰(۲)، ۱۸۷-۱۹۹. doi: [10.22092/jwra.2016.106643](https://doi.org/10.22092/jwra.2016.106643)
- Abatzoglou, J. T. (2013). Development of gridded surface meteorological data for ecological applications and modelling. *International Journal of Climatology*, 33(1), 121-131. doi: [10.1002/joc.3413](https://doi.org/10.1002/joc.3413)
- Acharya, B., Sharma, V., Heitholt, J., Tekiela, D., & Nippgen, F. (2020). Quantification and Mapping of Satellite Driven Surface Energy Balance Fluxes in Semi-Arid to Arid Inter-Mountain Region. *Remote Sensing*, 12(2), 4019. doi: [10.3390/rs12244019](https://doi.org/10.3390/rs12244019)
- Acharya, B., & Sharma, V. (2021). Comparison of satellite driven surface energy balance models in estimating crop evapotranspiration in semi-arid to arid inter-mountain region. *Remote Sensing*, 13(9), 1822. doi: [10.3390/rs13091822](https://doi.org/10.3390/rs13091822)
- Allen, R. G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, D05109.
- Allen, R. G., Morse A., & Tasumi M. (2002). Application of SEBAL for western US water rights regulation and planning. *Proceedings of the International Conference on Irrigation and Drainage, Workshop on Remote Sensing of ET for Large Regions; Montpellier, France.*
- Allen, R. G., Walter, I. A., Elliott, R. L., Howell, T. A., Itenfisu, D., Jensen, M. E., & Snyder, R. L. (2005). The ASCE standard reference evapotranspiration equation: American Society of Civil Engineers. Reston, Va. doi: [10.1061/9780784408056](https://doi.org/10.1061/9780784408056)
- Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 133(4), 380-394. doi: [10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380))
- Anderson, M. C., Norman, J. M., Diak, G. R., Kustas, W. P., & Mecikalski, J. R. (1997). A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. *Remote*

- Mallick, K., Jarvis, A. J., Boegh, E., Fisher, J. B., Drewry, D. T., Tu, K. P., ... & Niyogi, D. (2014). A Surface Temperature Initiated Closure (STIC) for surface energy balance fluxes. *Remote Sensing of Environment*, 141, 243-261. doi: [10.1016/j.rse.2013.10.022](https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.10.022)
- Norman, J. M., Kustas, W. P., & Humes, K. S. (1995). Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77(3-4), 263-293. doi: [10.1016/01681923\(95\)02265-Y](https://doi.org/10.1016/01681923(95)02265-Y)
- Petković, B., Petković, D., Kuzman, B., Milovančević, M., Wakil, K., Ho, L. S., & Jermsittiparsert, K. (2020). Neuro-fuzzy estimation of reference crop evapotranspiration by neuro fuzzy logic based on weather conditions. *Computers and electronics in Agriculture*, 173, 105358. doi: [10.1016/j.compag.2020.105358](https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105358)
- Raissi-Dehkordi, I. Sima, S., & Karimi, N. (2023). Estimation of actual evapotranspiration by neuro fuzzy logic based on weather conditions. *Computers and electronics in Agriculture*, 173, 105358. doi: [10.1016/j.compag.2020.105358](https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105358)
- Roerink, G. J., Su, Z., & Menenti, M. (2000). S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(2), 147-157. doi: [10.1016/S1464-1909\(99\)00128-8](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(99)00128-8)
- Senay, G. B., Bohms, S., Singh, R. K., Gowda, P. H., Velpuri, N. M., Alemu, H., & Verdin, J. P. (2013). Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather datasets: A new parameterization for the SSEB approach. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 49(3), 577-591. doi: [10.1111/jawr.12057](https://doi.org/10.1111/jawr.12057)
- Senay, G. B., Schauer, M., Friedrichs, M., Velpuri, N. M., & Singh, R. K. (2017). Satellite-based water use dynamics using historical Landsat data (1984–2014) in the southwestern United States. *Remote Sensing of Environment*, 202, 98-112. doi: [10.1016/j.rse.2017.05.005](https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.005)
- Singh, R.K., & Senay, G.B. (2016). Comparison of Four Different Energy Balance Models for Estimating real and modeled meteorological data. *Vadose Zone Journal*, 7(2), 570-580. doi: [10.2136/vzj2007.0012](https://doi.org/10.2136/vzj2007.0012)
- Gocic, M., Petković, D., Shamshirband, S. & Kamsin, A. (2016). Comparative analysis of reference evapotranspiration equations modelling by extreme learning machine. *Computers and Electronics in Agriculture*, 127, 56-63. doi: [10.1016/j.compag.2016.05.017](https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.05.017)
- Häusler, M., Conceição, N., Tezza, L., Sánchez, J. M., Campagnolo, M. L., Häusler, A. J., ... & Ferreira, M. I. (2018). Estimation and partitioning of actual daily evapotranspiration at an intensive olive grove using the STSEB model based on remote sensing. *Agricultural Water Management*, 201, 188-198. doi: [10.1016/j.agwat.2018.01.027](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.027)
- Kilic, A., Allen, R., Trezza, R., Ratcliffe, I., Kamble, B., Robison, C., & Ozturk, D. (2016). Sensitivity of evapotranspiration retrievals from the METRIC processing algorithm to improved radiometric resolution of Landsat 8 thermal data and to calibration bias in Landsat 7 and 8 surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 185, 198-209. doi: [10.1016/j.rse.2016.07.011](https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.07.011)
- Li, F., & Lyons, T. J. (2002). Remote estimation of regional evapotranspiration. *Environmental Modelling & Software*, 17(1), 61-75. doi: [10.1016/S13648152\(01\)00053-6](https://doi.org/10.1016/S13648152(01)00053-6)
- Liaqat, U. W., & Choi, M. (2015). Surface energy fluxes in the Northeast Asia ecosystem: SEBS and METRIC models using Landsat satellite images. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214, 60-79. doi: [10.1016/j.agrformet.2015.08.245](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.08.245)
- Long, D., Singh, V.P., & Li, Z.L. (2011). How sensitive is SEBAL to changes in input variables, domain size and satellite sensor? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116, D21107. doi: [10.1029/2011JD016542](https://doi.org/10.1029/2011JD016542)
- Mahmoud, S. H., & Alazba, A. A. (2016). A coupled remote sensing and the Surface Energy Balance based algorithms to estimate actual evapotranspiration over the western and southern regions of Saudi Arabia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 124, 269–283. doi: [10.1016/j.jseaes.2016.05.012](https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.05.012)

- ing Evapotranspiration in the Midwestern United States. *Water*, 8 (1), 9. doi: [10.3390/w8010009](https://doi.org/10.3390/w8010009)
- Shi, T. T., Guan, D. X., Wu, J. B., Wang, A. Z., Jin, C. J., & Han, S. J. (2008). Comparison of methods for estimating evapotranspiration rate of dry forest canopy: Eddy covariance, Bowen ratio energy balance, and Penman-Monteith equation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D19). doi: [10.1029/2008JD010174](https://doi.org/10.1029/2008JD010174)
- Sobrino, J. A., Souza da Rocha, N., Skoković, D., Suélen Käfer, P., López-Urrea, R., Jiménez-Muñoz, J. C., & Alves Rolim, S. B. (2021). Evapotranspiration Estimation with the S-SEBI Method from Landsat 8 Data against Lysimeter Measurements at the Bar-rax Site, Spain. *Remote Sensing*, 13(18), 3686. doi: [10.3390/rs13183686](https://doi.org/10.3390/rs13183686)
- Su, Z. (2002). The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and earth system sciences*, 6(1), 85-100. doi: [10.5194/hess-6-85-2002](https://doi.org/10.5194/hess-6-85-2002)
- Tasumi, M. (2003). Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery. ProQuest Dissertations And Theses; Thesis (Ph.D.), University of Idaho. Publication Number: AAI3080262; ISBN: 9780496281398.
- Thornton, P. E., Shrestha, R., Thornton, M., Kao, S. C., Wei, Y., & Wilson, B. E. (2021). Gridded daily weather data for North America with comprehensive uncertainty quantification. *Scientific Data*, 8(1), 190. doi: [10.1038/s41597-021-00973-0](https://doi.org/10.1038/s41597-021-00973-0)
- Wagle, P., Bhattarai, N., Gowda, P. H., & Kakani, V. G. (2017). Performance of five surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in high biomass sorghum. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*, 128, 192-203. doi: [10.1016/j.isprsjprs.2017.03.022](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.03.022)
- Zhang, B., Chen, H., Xu, D., & Li, F. (2017). Methods to estimate daily evapotranspiration from hourly evapotranspiration. *Biosystems Engineering*, 153, 129-139. doi: [10.1016/j.biosystemseng.2016.11.008](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.11.008)