ارزیابی کارایی مدل SEBAL در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در شرایط اقلیمی و پوشش گیاهی متفاوت

صدیقه انوری[1*] و نعمت اله کریمی[2]

۱*- نویسنده مسئول، گروه اکولوژی، پژوهشکده علوم محیطی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران s.anvari.t@kgut.ac.ir

۲- پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران.

دریافت: بازنگری: پذیرش: انتشار:

چکیده

تخمین دقیق تبخیر و تعرق (ET) نقش مهمی در مدیریت منابع آب کشاورزی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد. در این پژوهش، کارایی الگوریتم بیلان انرژی سطح زمین (SEBAL) در برآورد تبخیر و تعرق واقعی روزانه (ETa) برای دو محصول سورگوم و یونجه، به‌ترتیب در اقلیم خشک کرمان و اقلیم نیمه‌خشک اصفهان، ارزیابی شد. نوآوری اصلی این تحقیق، نه در معرفی الگوریتم SEBAL، بلکه در ارزیابی هم‌زمان عملکرد آن در اقلیم‌ها و پوشش‌های گیاهی متفاوت با بهره‌گیری از داده‌های میدانی مستقل و دقیق نهفته است؛ رویکردی که در مطالعه‌های داخلی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. برای اعتبارسنجی مدل، ETa سورگوم در کرمان با استفاده از لایسیمتر حجمی و ETa یونجه در اصفهان با بهره‌گیری از سنتیلومتر و داده‌های ایستگاه هواشناسی مجاور اندازه‌گیری گردید. سپس مقادیر برآوردشده SEBAL با داده‌های اندازه‌گیری شده، مقایسه گردید. نتایج نشان داد مدل SEBAL در هر دو منطقه عملکردی قابل‌قبول داشته و همبستگی مناسبی با داده‌های لایسیمتری و سنتیلومتری برقرار کرده است؛ به‌طوری‌که در کرمان ضریب تعیین ۰/۷۱ و خطاهای RMSE= ۱/۳۲ و MAE= ۱/۱ (میلی‌متر بر روز) ثبت شدند. در اصفهان نیز با وجود افزایش اندکی خطا (RMSE = 1.54 mm/day)، ضریب تعیین بالاتر (۰/۸۱) بیانگر دقت بهتر مدل بود. در مجموع، نتایج کمی نشان می‌دهد که SEBAL قادر است برآوردهای نسبتاً دقیقی از ETa ارائه دهد و می‌تواند در مدیریت عملی منابع آب در نواحی خشک و نیمه‌خشک به‌طور مؤثر به کار گرفته شود.

کلید واژه‌ها: تخمین تبخیر و تعرق، لایسیمتر، سنتیلومتر، سورگوم، یونجه، اقلیم خشک و نیمه‌خشک.

مقدمه

افزایش تقاضا برای غذا و محصولات کشاورزی باعث شده بیش از ۹۰ درصد منابع آبی کشور به بخش کشاورزی اختصاص یابد (FAO, 2008). طبق آمار بانک مرکزی در سال ۱۳۹۲، کشاورزی حدود نه درصد تولید ناخالص داخلی ایران را تشکیل می‌دهد. یکی از راه‌های مؤثر برای مقابله با کم‌آبی، برآورد دقیق نیاز آبی محصولات از طریق شاخص تبخیر و تعرق (Evapotranspiration) است که نقش مهمی در مدیریت بهینه مصرف آب، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، دارد (Anvari et al. 2017; Eslami et al., 2022; Mohammadi et al., 2024). روش‌های برآورد ET در سه گروه اصلی تقسیم می‌شوند: روش‌های مستقیم، غیرمستقیم (تجربی) و مبتنی بر سنجش از دور (Remote Sensing) در روش‌های مستقیم مانند استفاده از لایسیمتر، تشت تبخیر و سنتیلومتر (Scintillometer) ET به‌صورت نقطه‌ای اندازه‌گیری می‌شود، اما این روش‌ها برای مقیاس‌های وسیع و زمان‌های طولانی هزینه‌بر و زمان‌بر بوده و به‌دلیل تغییرپذیری شرایط اقلیمی، قابلیت تعمیم محدودی دارند. (Allen et al., 2011; Meijninger and De Bruin, 2000; Liu et al., 2013).

روش‌های غیرمستقیم (تجربی) بر پایه داده‌های هواشناسی و اقلیمی بنا شده‌اند و روابطی مانند Thornthwaite (1948)، Blaney و Criddle (1950)، Makkink (1957)، Turc (1961)، Priestley و Taylor (1972)، Hargreaves و Samani (1985) و فائو–پنمن–مانتیث (Allen et al., 1998) را شامل می‌شوند. در دو دهه اخیر، روش‌های مبتنی بر RS با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (Satellite images) توسعه یافته، که عمدتاً بر پایه موازنه انرژی سطحی بوده و امکان برآورد ET در مقیاس‌های زمانی و مکانی گسترده را در مناطق مختلفی از جمله دلتا نیل، ایران و ایالات متحده و غیره فراهم کرده‌اند (Bastiaanssen et al., 1998; Elnmer et al., 2019; Mahmudzadeh and Anvari, 2021). الگوریتم Surface Energy Balance Algorithm (for Land SEBAL که نخستین بار توسط Bastiaanssen et al. (1998) معرفی شد، یکی از پرکاربردترین روش‌های RS می‌باشد. مدل METRIC (Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration) توسعه یافته توسط Allen et al. (2007) نسخه‌ای بهبود یافته از SEBAL

می‌باشد که با استفاده از کالیبراسیون داخلی، دقت بالاتری در اراضی تحت آبیاری، ارائه می‌دهد.

مدل SEBS (Surface Energy Balance System) نیز توسط Su (2002) معرفی شد که با ادغام داده‌های ماهواره‌ای (تصاویر MODIS یا Landsat) با ورودی‌های هواشناسی، ET را تخمین می‌زند. یکی از نقاط قوت کلیدی SEBS در گنجاندن صریح اصلاحات طول زبری و پایداری جوی است که مبنای فیزیکی آن را برای تخمین شارهای حرارتی آشفته و کسر تبخیر افزایش می‌دهد. مدل SSEBop (Simplified Surface Energy Balance Operational) که توسط Senay et al. (2013) پیشنهاد گردید، دارای مزایایی از جمله نیازمندی به حداقل داده‌های ورودی، داشتن ساختار ساده‌تر و مقیاس‌پذیری ذاتی برای استفاده عملیاتی می‌باشد و برای کاربردهای عملیاتی نظیر سامانه FAO-WaPOR و در طرح‌های مختلف حسابداری آب مورد استفاده قرار گرفته است (Senay et al., 2013; FAO, 2021).

مزایای مدل SEBAL در تخمین شار انرژی سطحی نسبت به سایر روش‌ها عبارتند از: حداقل وابستگی به داده‌های زمینی، عدم نیاز به دمای سطح زمین و امکان کالیبراسیون خودکار با تعیین پیکسل‌های سرد و گرم (Bastiaanssen et al., 2010). پس از کاربرد اولیه در مصر، اسپانیا و نیجریه، SEBAL با موفقیت در بیش از ۳۰ کشور با اکوسیستم‌های متنوع به‌کار گرفته شد (Timmermans et al., 2007; Teixeira et al., 2009). دقت تخمین ETa در این کشورها به‌ترتیب حدود ۸۵ درصد در مقیاس روزانه، ۹۵ درصد فصلی و ۹۶ درصد سالانه بوده است (Tang et al., 2013). همچنین، خطاهای فصلی ET مدل SEBAL تنها پنج درصد خطاهای سایر روش‌های مرسوم بود، که نشان‌دهنده کارایی و عملی بودن بالای این مدل است (Bastiaanssen et al., 2010).

نمونه‌ای از کاربرد SEBAL در تخمین ETa در مطالعه‌های مختلف نشان می‌دهند که SEBAL با استفاده از داده‌های مختلف مانند لایسیمتر، سنتیلومتر، اندازه‌گیری‌های زمینی و محصولات ماهواره‌ای اعتبارسنجی شده و برآوردهای قابل اعتمادی ارائه می‌دهد. دقت مدل تحت تأثیر نوع کاربری زمین، شرایط اقلیمی و روش‌های کمکی مدل‌سازی قرار دارد. علاوه بر این، پژوهش‌های اخیر بر اهمیت روش‌های ترکیبی و نقش کلیدی سنتیلومتری در بهبود عملکرد و صحت‌سنجی SEBAL تأکید دارند. به عنوان مثال، Rahimi et al. (2015) در حوزه آبریز تجن، با استفاده از تصاویر MODIS، SEBAL را با رابطه تجربی (FAO-Penman–Monteith) FPM مقایسه کردند و RMSE ساعتی و روزانه به‌ترتیب ۰/۰۹۱ و ۱/۴۹ میلی‌متر گزارش شد. Zheng et al. (2016) با ادغام ماژول تابش جدید در SEBAL، دقت تخمین ETa در مناطق خشک را بهبود دادند. Gao et al. (2020) با ترکیب تصاویر ماهواره‌ای چند منبعی، مجموعه داده بلندمدت روزانه ETa برای چین تولید کردند. آن‌ها برای ارزیابی عملکرد مدل، نتایج به‌دست آمده را با محصول تبخیر–تعرق MOD16 مقایسه کردند. یافته‌های پژوهش نشان داد که SEBAL در مقایسه با MOD16 عملکرد بهتری دارد و به‌ویژه در پوشش‌های جنگلی قادر است تخمین‌های واقع بینانه‌تر و دقیق‌تری ارائه دهد. در پژوهش Zheng et al. (2016) مدل SEBAL با ادغام یک ماژول تابش جدید با داده‌های MODIS بهبود بخشیده شد. این بهبود به طور قابل توجهی دقت تخمین ET را در مناطق خشک افزایش داد و عملکرد برتری نسبت به SEBAL اصلی داشته است. Zoratipour (2023) نشان دادند که SEBAL در تخمین ET گندم دقت بالاتری نسبت به SEBS دارد (RMSE کمتر و R^2 بیشتر). همچنین Barguache et al. (2024) در باغ‌های زیتون مراکش نشان دادند که SEBAL شار گرمای محسوس (H) را حدود سه درصد بیش‌برآورد و شار گرمای نهان تبخیر را تا ۱۳ درصد کمتر برآورد می‌کند. این نتایج با استفاده از اندازه‌گیری‌های دقیق اسینتیلومترهای نوری–مایکروویو (Optical-Microwave Scintillometers) مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است.

در این پژوهش، هدف اصلی ارزیابی دقت و کارایی الگوریتم SEBAL در برآورد تبخیر و تعرق واقعی (ETa) در دو اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران است. این مطالعه با تمرکز بر دو محصول سورگوم در کرمان و یونجه در اصفهان طراحی شده تا نقش تفاوت‌های اقلیمی و نوع پوشش گیاهی در عملکرد مدل به‌صورت نظام‌مند بررسی شود. برای این منظور، خروجی‌های مدل SEBAL با داده‌های مشاهده‌ای حاصل از لایسیمتر حجمی در کرمان و سنتیلومتر در اصفهان مقایسه شده است تا میزان تطابق، دقت و خطای مدل در شرایط متفاوت ارزیابی گردد. در نهایت، برای اعتبارسنجی مدل و ارزیابی جامع عملکرد آن، از شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) استفاده شده است. به‌طور خلاصه، نوآوری پژوهش حاضر نه در معرفی الگوریتم SEBAL، بلکه در ارزیابی تطبیقی عملکرد این الگوریتم، تحت دو اقلیم خشک و نیمه‌خشک و برای دو نوع پوشش گیاهی متفاوت (سورگوم و یونجه) با استفاده از داده‌های میدانی مستقل و دقیق شامل لایسیمتر حجمی و سنتیلومتر نهفته است؛ رویکردی که در مطالعه‌های داخلی کمتر به‌صورت هم‌زمان مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از اندازه‌گیری‌های مستقیم ETa به‌عنوان داده مرجع، از دیگر نقاط قوت مطالعه محسوب می‌شود و دقت بالای اعتبارسنجی نتایج را تضمین می‌کند. با توجه به ثبات ساختار الگوریتم SEBAL، انتخاب سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ تأثیری بر اعتبار علمی نتایج ندارد و یافته‌ها همچنان از نظر کاربردی برای مدیریت منابع آب کشاورزی در شرایط کم‌آبی کنونی ایران قابل استفاده هستند.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی در کرمان

مزرعه تحقیقاتی دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته در محدوده استان کرمان و بخشی از شهر ماهان می‌باشد که برای کشت سورگوم و برآورد میزان ETa مطابق شکل (۱) مورد استفاده قرار گرفته است. حداقل و حداکثر دما در این منطقه به‌ترتیب ۷- و ۳۹/۶ درجه سانتی‌گراد و ارتفاع از سطح دریا در آن ۱۹۱۰ متر می‌باشد. همچنین از نظر تقسیم-بندی اقلیمی، این شهر جز مناطق خشک محسوب می‌شود (Mahmudzadeh and Anvari, 2021a, b).

مشخصات داده‌های هواشناسی و تصاویر ماهواره‌ای

در این پژوهش، الگوریتم SEBAL برای برآورد ETa محصول سورگوم طی دوره ۲۰۱۸/۰۷/۲۰ تا ۲۰۱۸/۰۹/۰۷ به‌کار گرفته شد. برای این منظور از هشت تصویر بدون ابر ماهواره لندست هشت (سنجنده‌های OLI و TIRS استخراج شده از آرشیو پایگاه USGS) و داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک کرمان (شامل دمای حداقل و حداکثر، سرعت باد در ارتفاع دو متر، دمای نقطه شبنم، ساعات آفتابی و دمای خشک) استفاده گردید.

برای اجرای الگوریتم SEBAL، در طول دوره رشد سورگوم، جمعاً هشت تصویر بدون ابر، برای تاریخ‌های ۲۰ و ۲۷ ژوئیه، ۳، ۱۰، ۱۷، ۲۴ و ۳۱ ماه آگوست و هفت سپتامبر در سال ۲۰۱۸ استفاده شد. قابلیت تفکیک زمانی تصاویر ماهواره لندست هشت، ۱۶ روز بوده که با توجه به موقعیت مزرعه پژوهشی در محل قرارگیری همپوشانی تصاویر، این زمان به نصف کاهش یافته و هر هشت روز یک تصویر برای منطقه مطالعاتی موجود بود. به‌دلیل وجود اثرات اتمسفری و در نتیجه غیر واقعی بودن انعکاس سطحی، با استفاده از الگوریتم FLAASH (First-Principles Atmospheric correctionion) تصحیح اتمسفری بر روی تصاویر سنجنده OLI انجام شد. الگوریتم FLAASH برای تصحیح جزئی اثرات اتمسفری و بازیابی انعکاس طیفی در باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک و کوتاه‌موج استفاده شد. همچنین، به‌منظور افزایش وضوح مکانی تصاویر لندست هشت، الگوریتم Gram–Schmidt Pan Sharpening به‌کار گرفته شد که با آن، اندازه پیکسل تصاویر از ۳۰ متر به ۱۵ متر بهبود یافت و کیفیت مکانی تصاویر افزایش پیدا کرد.

اندازه‌گیری‌های زمینی ETa با دستگاه لایسیمتر

در این تحقیق از داده‌های دو لایسیمتر حجمی احداث‌شده در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته استفاده شد. مطابق شکل (۲)، شعاع هر لایسیمتر ۸۰ سانتی‌متر و ارتفاع آن دو متر بوده و هر دو در عمق دو متری زمین نصب شده‌اند. در کنار هر یک از لایسیمترها، یک حلقه چاه اندازه‌گیری به عمق سه متر برای سنجش مقدار زه‌آب حفر گردید. فاصله دو لایسیمتر از یکدیگر ۳۵ متر است. پس از طراحی، ساخت و نصب تجهیزات لایسیمتر، گیاه سورگوم در داخل لایسیمترها و همچنین در زمین اطراف آن‌ها کاشته شد. با انجام آبیاری هفتگی لایسیمترها و مزرعه و همچنین اندازه‌گیری دوره‌ای رطوبت خاک و حجم زه‌آب خروجی، میزان آبی که در سطح لایسیمتر صرف ETa شده است قابل محاسبه خواهد بود.



Fig. 1- Geographic location of the research farm at the Graduate University of Advanced Technology, Kerman, and the layout of the installed lysimeters.

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی مزرعه تحقیقاتی دانشگاه تحصیلات تکمیلی و فناوری پیشرفته و جانمایی لایسیمترهای نصب‌شده

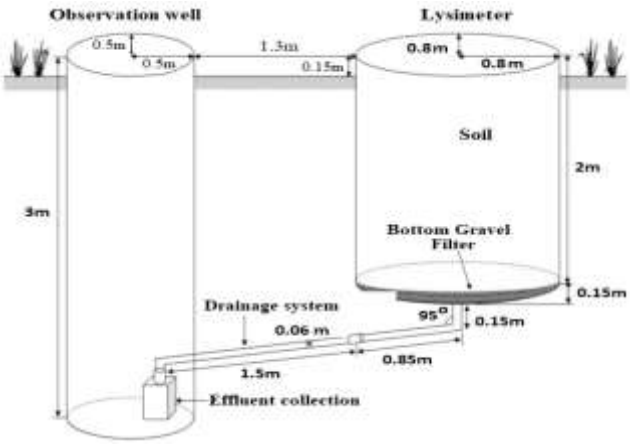


Fig. 2– Schematic design of the volumetric lysimeter installed at the research far

شکل ۲- طرح شماتیک لایسیمتر حجمی تعبیه شده در مزرعه تحقیقاتی



Fig. 2-b- The lysimeter's drainage system and bottom filter

شکل ۲-ب- نحوه زه‌کشی و فیلترگذاری کف لایسیمتر



Fig. 2-a– Lysimeter installation setup.

شکل ۲- الف- نحوه قرارگیری لایسیمتر



Fig. 2-d- View of a sorghum-planted field.

شکل ۲-د- نمایی از مزرعه کشت شده با سورگوم



Fig. 2-c- Locations of the lysimeter and observation well

شکل ۲-ج- نمای کلی موقعیت لایسیمتر و چاه مشاهداتی



Fig. 2-f- Effluent collection from the lysimeter.

شکل ۲-و- جمع آوری زه‌آب خروجی از لایسیمتر



Fig. 2-e- Field operations related to crop irrigation.

شکل ۲-ه- عملیات آبیاری محصول

در شکل‌های (۲- الف) و (۲-ب)، نحوه قرارگیری لایسیمتر در چاه‌ها و ساختار زهکش کف آن نشان داده شده است. زهکش شامل یک لایه قلوه‌سنگ در کف، ۱۵ سانتی‌متر شن نخودی و یک لایه شن ریز روی آن است. شکل‌های (۲-ج) و (۲-د) به‌ترتیب نمای کلی موقعیت لایسیمتر با چاه‌های مشاهداتی و مزرعه کشت‌شده با سورگوم را نمایش می‌دهند. دوره آبیاری سورگوم به صورت هفتگی صورت گرفت. برای اندازه‌گیری رطوبت خاک قبل از آبیاری هر هفته سه نمونه از خاک مزرعه برداشت می‌شد و در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه، رطوبت نمونه‌های برداشت شده از خاک با استفاده از دستگاه رطوبت-سنج و روش وزنی محاسبه شده است. همچنین، مطابق مراحل رشد سورگوم و نیز مشورت با کشاورزان بومی منطقه، در هر هفته مقدار مشخصی آب به لایسیمتر داده شده و در انتهای هفته زه‌آب خروجی از دستگاه مطابق شکل‌های (۲-ه) و (۲-و) اندازه‌گیری و ثبت گردیده است. برای محاسبه ETa از معادله بیلان رطوبت خاک در مزرعه مطابق رابطه (۱) استفاده شده است. همچنین عمق ریشه گیاه در طول دوره رشد از رابطه (۲) قابل محاسبه است:

$$ETa_t = SM_t \times Root_t + IR_t + P_t - DP_t + SM' \times (Root_{t+1} - Root_t) - SM_{t+1} \times Root_{t+1} \quad (۱)$$

$$Root_t = 10 \times (r + Root_max\,(0.5 + 0.5 \times \sin(3.03 \times \frac{t}{G} - 1.47)) \quad (۲)$$

در این روابط، ETa_t = تبخیر و تعرق واقعی در طول دوره مورد نظر، $Root_t$ = عمق ریشه گیاه کاشته شده در لایسیمتر، IR= بارندگی به میلی‌متر در طول دوره، P_t = آب ورودی به لایسیمتر و DP_t = زه‌آب خروجی از آن، $Root_t$ = عمق ریشه (میلی‌متر)، r = عمق کاشت بذر گیاه (میلی‌متر)، Root_max = حداکثر عمق ریشه گیاه(میلی‌متر)، t = تعداد روز گذشته از کاشت گیاه،G = تعداد روز تا پایان دوره کشت، می‌باشند.

منطقه مطالعاتی اصفهان

دومین منطقه مطالعاتی در پژوهش حاضر، مزرعه‌ای ۱۵ هکتاری از مجتمع کشت و صنعت بهاران در شهرستان خوراسگان (استان اصفهان) انجام شد. مختصات جغرافیایی آن ۵۱ درجه و ۴۶ دقیقه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۱۴ دقیقه عرض شمالی و ارتفاع ۱۵۵۴ متر از سطح دریا می‌باشد. اقلیم این منطقه نیمه‌خشک است؛ میانگین دمای تابستان حدود ۳۰ و دمای زمستان نزدیک به سه درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه حدود ۱۲۰ میلی‌متر گزارش شده است (Alimohammad Nejad et al., 2018). شکل (۳) موقعیت جغرافیایی این منطقه در استان اصفهان و نیز شمای کلی دستگاه سنتیلومتر را نشان می‌دهد.

اندازه‌گیری‌های زمینی با دستگاه سنتیلومتر (BLS900 LAS)

در دومین منطقه مطالعاتی واقع در استان اصفهان، از دستگاه سنتیلومتر (Large Aperture Scintillometer, LAS, model BLS900) برای اندازه‌گیری مستقیم شار حرارتی محسوس (H) و برآورد ETa یونجه استفاده شد. عملکرد این دستگاه مبتنی بر نظریه شباهت Monin-Obukhov بوده و با تحلیل نوسانات سیگنال نوری ارسالی، میزان تلاطم جو را ارزیابی می‌کند. یکی از مزایای برجسته LAS، قابلیت اندازه‌گیری ETa در سطح نسبتاً گسترده‌ای از مزرعه است. همچنین، این ابزار را می‌توان به‌عنوان بخشی از سامانه‌های هواشناسی کشاورزی به‌کار گرفت (Rahimpour et al., 2018; Alimohammad Nejad et al., 2018).
فاصله بین سنسور گیرنده و فرستنده LAS در مزرعه یونجه دشت بهاران ۲۵۰ متر تعیین شد. پس از نصب دستگاه، داده‌برداری روزانه از ETa یونجه در بازه زمانی خرداد تا شهریور ۱۳۹۵ (مطابق با ۲۸ ژوئن تا یک سپتامبر ۲۰۱۶) انجام گرفت. لازم بذکر است که داده‌های هواشناسی مورد نیاز در این تحقیق، شامل دمای هوا، فشار، سرعت باد و رطوبت نسبی نیز از ایستگاه خودکار نصب‌شده در مزرعه به‌دست آمده است.

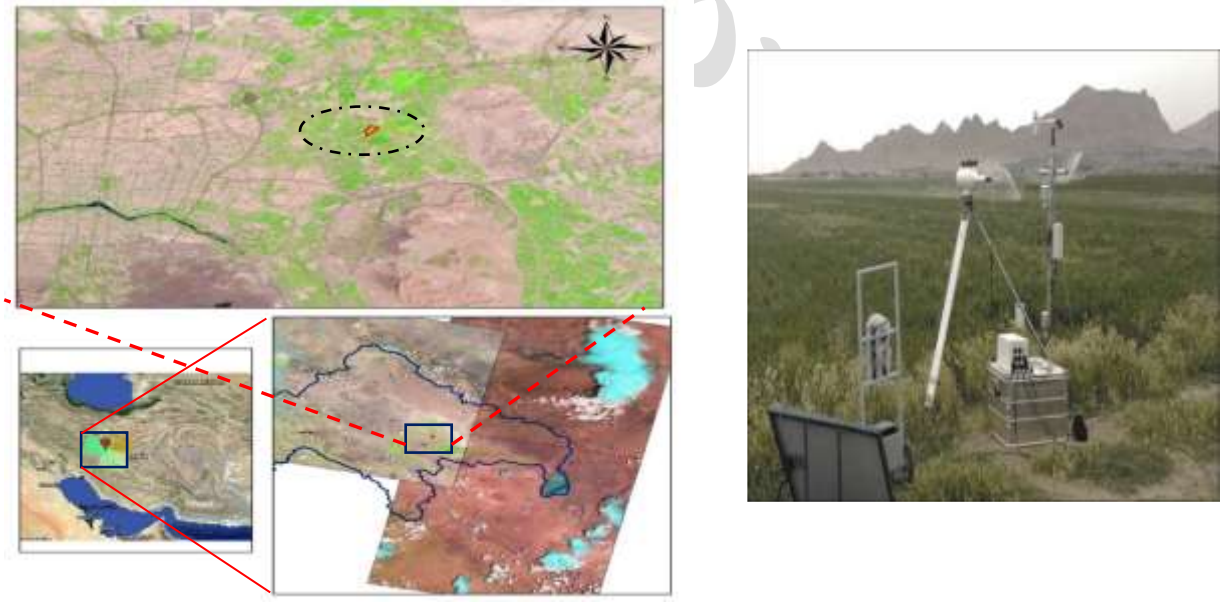
مشخصات داده‌های هواشناسی و تصاویر ماهواره‌ای در منطقه اصفهان

برای منطقه دشت بهاران در استان اصفهان، تعداد هفت تصویر ماهواره‌ای از آرشیو لندست هشت با فاصله زمانی ۱۶ روزه در ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور سال ۱۳۹۵ (مطابق با ژوئن تا سپتامبر ۲۰۱۶ میلادی) از وب سایت USGS دریافت و پردازش شد. با توجه به موقعیت جغرافیایی مزرعه دشت بهاران که در ناحیه هم‌پوشانی مسیرهای عبور ماهواره قرار دارد، فاصله زمانی بین تصاویر به‌طور مؤثر به نصف کاهش یافته و در نتیجه، مجموعاً ۱۴ تصویر قابل استفاده برای این منطقه فراهم گردیده است. انتخاب تصاویر Landsat-8 به‌دلیل قدرت تفکیک مکانی مناسب (۳۰ تا ۱۰۰ متر) برای مطالعه‌های سطح زمین صورت گرفت. در مرحله پردازش، تصحیحات رادیومتریک برای هر باند به‌منظور تبدیل داده‌های خام به بازتاب سطحی انجام شد و ضرایب مربوطه مطابق با دستورالعمل‌های USGS اعمال گردید. همچنین داده‌های هواشناسی شامل دما، فشار، سرعت باد و رطوبت نسبی از ایستگاه خودکار نصب‌شده در مزرعه جمع‌آوری شد تا در محاسبات مدل SEBAL مورد استفاده قرار گیرد.

الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین (SEBAL)

الگوریتم SEBAL با تکیه بر معادلات بیلان انرژی سطح زمین و ترکیبی از روابط فیزیکی و تجربی و با استفاده از حداقل داده‌های زمینی، ETa را برآورد می‌کند. معادلات اصلی آن در جدول (۱) ارائه شده است. در رابطه (۳)، شار گرمای نهان(λET) به‌عنوان باقی‌مانده انرژی از اختلاف بین تابش خالص(Rn)، شار گرمای خاک(G) و شار گرمای محسوس(H) محاسبه می‌شود. Rn بیان کننده میزان انرژی تابشی واقعی موجود در سطح زمین است که مطابق رابطه (۴) از اختلاف بین میزان تابش ورودی و خروجی از سطح زمین محاسبه می‌شود. اجزای این رابطه، آلبیدوی سطحی(α) ، تابش موج کوتاه در محدوده ۰/۳ تا۳ میکرومتر($R_s\downarrow$)، تابش طول موج بلند ورودی و خروجی در محدوده سه تا ۱۰۰ میکرومتر ($Rl\downarrow, Rl\uparrow$) و گسیل‌مندی سطحی(εo) می‌باشد. لازم به‌ذکر است که همه تابش‌های نامبرده بر حسب وات بر متر مربع می‌باشند. شار گرمای خاک (G) فاکتور مهم دیگری در معادله بیلان انرژی بوده و عبارت است از میزان ذخیره گرمای داخل خاک و پوشش گیاهی در اثر هدایت مولکولی. در SEBAL، G به‌صورت تابعی از Rn، دمای سطح (Ts) بر حسب درجه کلوین و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) تخمین زده می‌شود. برای سطوح با پوشش گیاهی متراکم، معمولاً نسبت G/Rn بین ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ در نظر گرفته می‌شود.

شار گرمای محسوس(H) عبارتست از میزان هدر رفت گرما به هوا به وسیله همرفت و به طور خلاصه هدایت مولکولی در اثر اختلاف دما. برای محاسبه H از رابطه (۶) که رابطه انتقال آیرودینامیکی است، دو پیکسل سرد(Cold Pixel) و گرم(Hot Pixel) مورد نیاز است. پارامترهای رابطه (۶) شامل چگالی هوا(ρ)، گرمای ویژه(Cp)، اختلاف دما(dT) بین دو ارتفاع(z_1 و z_2) و مقاومت آیرودینامیکی(rah) هستند. انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم یکی از مراحل کلیدی و حساس در الگوریتم SEBAL محسوب می‌شود، زیرا این پیکسل‌ها مبنای کالیبراسیون H و تعیین اختلاف دمای آیرودینامیکی(dT) می‌باشند. پیکسل گرم(HP) نماینده شرایط حداقل یا صفر ET بوده و معمولاً دارای ویژگی‌هایی از قبیل سطح کاملاً خشک و بدون پوشش گیاهی، NDVI بسیار پایین یا نزدیک به صفر، Ts بسیار بالا نسبت به نقاط اطراف، نبود اثر آبیاری یا رطوبت سطحی و فرض شار گرمای نهان ناچیز($LE\approx 0$) می‌باشد. با این شرایط، HP اغلب شامل اراضی بایر، شوره‌زار یا سطوح سنگی می‌شود.



(b) (a)

Fig. 3- (a) Schematic view of the scintillometer device; (b) Spatial location of the study farm and the Zaindroud Basin within the Landsat-8 satellite coverage area.

شکل۳- الف) نمای دستگاه سنتیلومتر؛ ب) موقعیت مزرعه مطالعاتی در کشور و حوضه زایندرود در مناطق دید ماهواره8 ndsat

جدول ۱- لیست معادلات حاکم بر الگوریتم SEBAL

Table 1. Key equations underlying the SEBAL algorithm.

Variable	No.	Formula
Latent Heat Flux (λET)	(3)	$\lambda ET = R_n - G - H$
Net Radiation Flux (Rn)	(4)	$R_n = (1-\alpha) \times R_S \downarrow + R_L \downarrow - R_L \uparrow - (1-\varepsilon o) \times R_L \downarrow$
Soil Heat Flux (G)	(5)	$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha}(0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2)(1 - 0.98NDVI^4)$
Sensible Heat Flux (H)	(6)	$H = \frac{\rho C_p \, dT}{r_{ah}}$
Ground temperature difference (dT)	(7)	$dT = aTs + b$
Instantaneous Evapotranspiration (ETinst)	(8)	$ETinst = 3600 * \frac{\lambda ET}{\lambda \rho W}$
Entire day Evapotranspiration (ET24)	(9)	$ET24 = ET_{rF} \times ET_r - 24$

پیکسل سرد(CP) نمایانگر سطحی با پوشش گیاهی متراکم، رطوبت کافی و تبخیر و تعرق حداکثری است. در این پژوهش، پیکسل سرد از میان نواحی زراعی سالم و یکنواخت انتخاب شد که دارای ویژگی‌هایی از قبیل مقادیر بالای NDVI (بیش از ۰/۷۵)، حداقل Ts در تصویر، فاصله مناسب از لبه مزارع و نواحی ناهمگن، فرض H نزدیک به صفر (H≈0) و ET معادل تبخیر و تعرق مرجع در لحظه تصویر. در SEBAL فرض می‌شود که رابطه‌ای خطی بین اختلاف دمای نزدیک سطح (dT) و دمای سطح زمین (Ts) مطابق رابطه (۷) برقرار است. در این رابطه، ضرایب a و b با استفاده از شرایط حدی تبخیر در دو پیکسل مرجع (گرم و سرد) تعیین می‌شوند. پس از محاسبه R_n، G و H، مقدار λET لحظه‌ای و در نهایت مقدار ET لحظه‌ای (ETinst) مطابق رابطه (۸) محاسبه می‌شود. در ادامه، با استفاده از رابطه (۹) مقدار ETinst با استفاده از کسر ET مرجع (ET_{rF}) به مقدار روزانه تبدیل می‌شود. در این رابطه λ گرمای نهان بخار آب (J/kg) و ρ_w چگالی آب (معادل ۱۰۰۰Kg/m^3) می‌باشد(Bastiaanssen et al., 1998; Bastiaanssen et al., 2005).

نتایج و بحث

در این بخش، ابتدا نتایج تبخیر–تعرق واقعی (ETa) محاسبه‌شده توسط الگوریتم SEBAL در دو اقلیم متفاوت ایران– خشک (کرمان، محصول سورگوم) و نیمه‌خشک (اصفهان، محصول یونجه)– ارائه می‌شود. همچنین، برای ارزیابی دقت مدل، خروجی‌های SEBAL با داده‌های مشاهداتی حاصل از دو روش معتبر اندازه‌گیری، شامل لایسیمتر حجمی در کرمان و سنتیلومتر در اصفهان، مقایسه شده است تا میزان انطباق و خطای مدل تعیین گردد. برای منطقه مطالعاتی استان کرمان، ETa محصول سورگوم با الگوریتم SEBAL در دوره رشد محصول از ۲۰ جولای تا هفت سپتامبر سال ۲۰۱۸ محاسبه شد. در این بازه زمانی از تصاویر بدون ابر ماهواره لندست هشت (سنجنده‌های OLI و TIRS) و داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک فرودگاه کرمان استفاده گردید. به منظور حذف اثرات اتمسفری و افزایش دقت بازتاب سطحی، تصحیح اتمسفری تصاویر با استفاده از الگوریتم FLAASH انجام شد. تعداد ساعات آفتابی روزانه به‌طور معمول بیش از هشت ساعت بود که امکان اطمینان از کیفیت تصاویر و کاهش خطای مدل را فراهم می‌کرد.

در ادامه، کارایی الگوریتم SEBAL در تخمین ETa برای دو محصول یونجه در اقلیم نیمه‌خشک اصفهان و سورگوم در اقلیم خشک کرمان، به همراه ارزیابی دقت نتایج از طریق مقایسه با داده‌های میدانی سنتیلومتر و لایسیمتر، در شکل (۴) ارائه شده است. شایان ذکر است دقت مدل در دو منطقه مطالعاتی، بر اساس معیارهای آماری ضریب تعیین(R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) ارزیابی شد. مطابق شکل (۴) نتایج نمودار سمت چپ (کرمان) بیانگر آن است که مدل SEBAL با ضریب تعیین R^2=0.71 و مقادیر خطای RMSE= 1.32 mm/day و MAE=1.1 mm/day توانسته است برآوردی نسبتاً قابل قبول از ETa ارائه دهد.

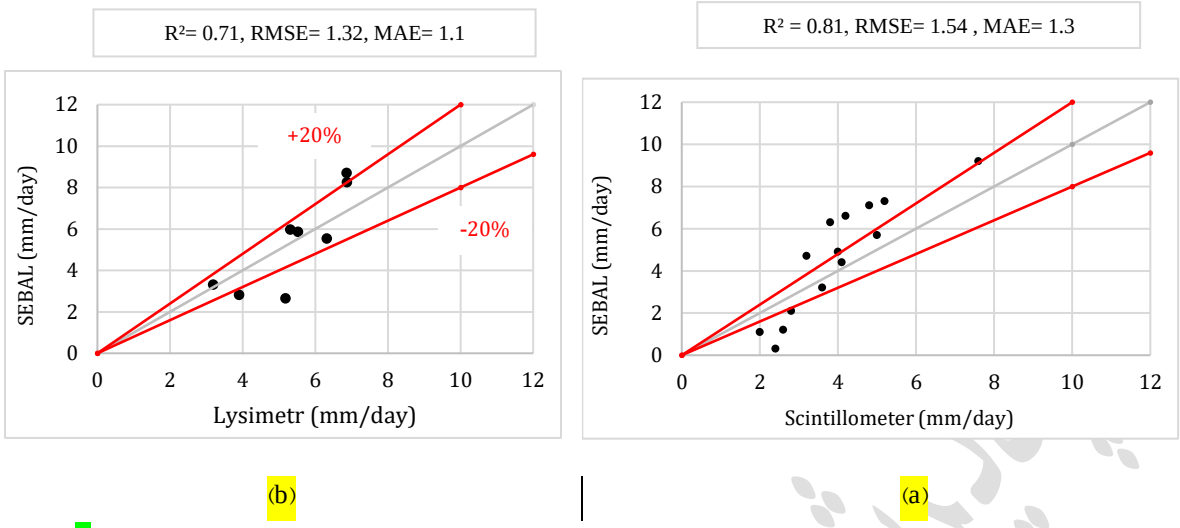
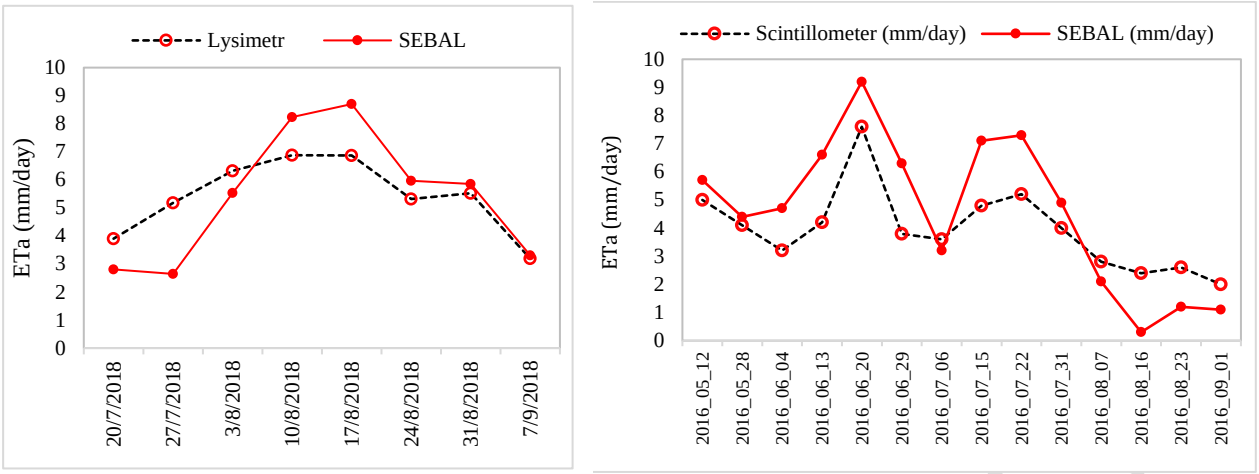


Fig. 4– Comparison of SEBAL estimates and observed field data (scintillometer in Isfahan and lysimeter in Kerman), showing an error band of ±20%.

شکل ٤– مقایسه برآورد SEBAL و داده‌های میدانی (الف: سنتیلومتر در اصفهان و ب: لایسیمتر در کرمان) همراه با باند خطای ٢٠٪±

بیشتر نقاط در محدوده انحراف ٢٠٪ ± از خط ١:١ قرار دارند که حاکی از انطباق قابل قبول مدل با واقعیت است، هرچند در شدت‌های بالاتر ETa، تمایل جزئی به بیش‌برآوردی مشاهده می‌شود. در مقابل، نمودار سمت راست (اصفهان) با ضریب تعیین R^2=0.81 حاکی از همبستگی قوی‌تر بین برآوردهای SEBAL و داده‌های سنتیلومتر است، اگرچه خطای RMSE نسبت به کرمان کمی بیشتر بوده (1.54 mm/day). پراکنش نقاط نشان می‌دهد که SEBAL در مقادیر پایین ETa عملکرد دقیق‌تری دارد و در مقادیر بالاتر اندکی کم‌برآوردی مشاهده می‌شود. همچنین اختلاف در ضرایب تعیین در دو منطقه، علاوه بر تفاوت‌های اقلیمی و نوع محصول، قویاً می‌تواند به دقت ذاتی بالاتر دستگاه سنتیلومتر در اندازه‌گیری ETa نسبت داده شود. همچنین، لایسیمتر به دلیل فرایند پیچیده‌تر ساخت و اندازه‌گیری‌های میدانی، بیشتر مستعد خطاهای انسانی و سیستماتیک است، که این امر منجر به انحراف بیشتر در داده‌های مشاهده‌ای آن و در نتیجه، کاهش ظاهری دقت مدل در فرآیند اعتبارسنجی می‌شود. بنابراین، ضریب R^2 بالاتر سنتیلومتر، معیار قابل اعتمادتری از عملکرد قوی مدل SEBAL در مناطق مطالعه شده ارائه می‌دهد. نمودارهای سری زمانی در شکل (۵)، روند تغییرات ETa برآورد شده توسط مدل SEBAL را در مقایسه با اندازه‌گیری‌های میدانی (الف) سنتیلومتر و (ب) لایسیمتر نشان می‌دهند.

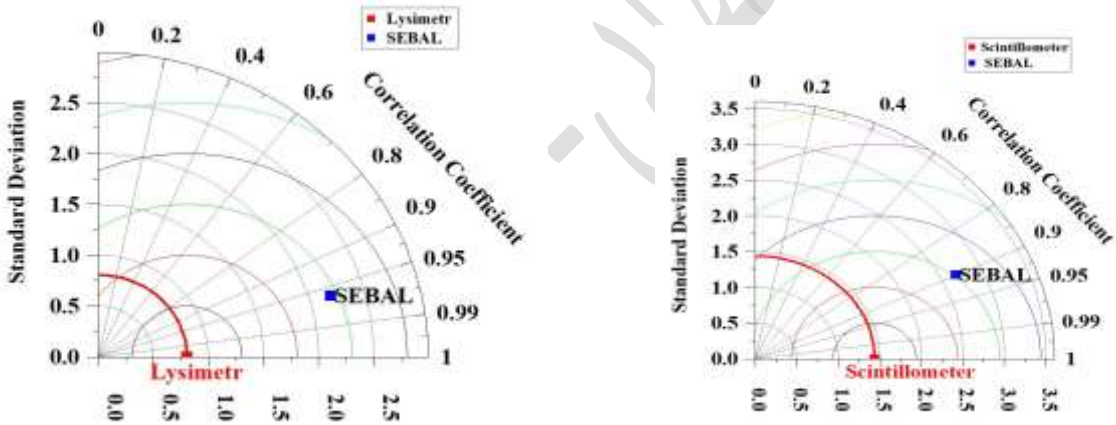
در هر دو نمودار، خط سیاه مربوط به داده‌های اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر و سینتیلومتری است که با نقاط قرمز نمایانگر داده‌های SEBAL مقایسه شده‌اند. در نمودار (الف) (مقایسه با سنتیلومتر در اصفهان)، هرچند روند کلی نوسانات با داده‌های سنتیلومتر مطابقت دارد، اما مدل SEBAL در اکثر پیک‌های مشاهده‌شده (مانند تاریخ‌های ١٣ و ٢٩ ژوئن و ٢٢ ژوئیه) تمایل به بیش‌برآوردی ETa را نشان می‌دهد. در نمودار (ب) (مقایسه با لایسیمتر در کرمان)، تطابق روندی بین مدل SEBAL و لایسیمتر بیشتر است، به ویژه در دوره‌ی اوج ETa در آگوست ٢٠١٨، اما SEBAL در پیک اصلی (١٧ آگوست) نیز کمی بیش‌برآورد را نشان می‌دهد. با این حال، در دوره‌ی افت (اواخر آگوست تا سپتامبر)، مدل SEBAL تطابق بهتری با داده‌های لایسیمتر پیدا می‌کند. در مجموع، مدل SEBAL در هر دو مورد، به خوبی نوسانات فصلی و اوج‌های ETa را دنبال می‌کند، اما در مقایسه با سنتیلومتر، شدت نوسانات را به شکل برجسته‌تری نشان داده و به طور کلی تمایل به برآوردهای بالاتری دارد. در اقلیم خشک کرمان، پراکندگی بیشتر داده‌ها و فاصله از خط ١:١ نشان می‌دهد که نوسانات شدید دما، خشکی سطح خاک و شارهای گرمایی سبب افزایش حساسیت و کاهش دقت SEBAL شده‌اند. همچنین، دقت کمتر لایسیمتر و خطاهای ناشی از ساخت و بهره‌برداری آن می‌تواند اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و مدل را افزایش دهد. در مقابل، در اقلیم نیمه‌خشک اصفهان، داده‌ها همبستگی بیشتری با خط ١:١ دارند. شرایط رطوبتی پایدارتر، حساسیت کمتر یونجه به تغییرات حرارتی و استفاده از سنتیلومترکه دقت بالاتری نسبت به لایسیمتر دارد، موجب شده‌اند SEBAL در اصفهان عملکرد دقیق‌تری ارائه دهد.



(a) (b)

Fig. 5- Comparison of ET_a time series estimated by the SEBAL model with field data (a: Lysimeter in Kerman; b: Scintillometer in Isfahan).

شکل ۵- مقایسه سری‌های زمانی ETa برآورد شده با مدل SEBAL با داده‌های میدانی (الف: لایسیمتر در کرمان؛ ب: سنتیلومتر در اصفهان)



(a) (b)

Fig. 6- Taylor diagram for evaluating SEBAL-estimated ETa for alfalfa and sorghum in comparison with observed field data (a: Scintillometer in Isfahan; b: Lysimeter in Kerman).

شکل ٦- دیاگرام تیلور مقایسه عملکرد مدل SEBAL با داده‌های میدانی یونجه (الف:سنتیلومتر، اصفهان) و سورگوم (ب: لایسیمتر، کرمان)

نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم SEBAL در هر دو منطقه، با تکیه بر داده‌های متنوع، عملکردی موفقی در برآورد ETa داشته است. با این حال، در برخی مقاطع، تفاوت‌هایی میان خروجی‌های SEBAL و اندازه‌گیری‌های لایسیمتر و سینتیلومتر دیده می‌شود؛ تفاوت‌هایی که می‌توانند از شرایط متفاوت اقلیمی، نوع پوشش گیاهی، ویژگی‌های محیطی هر منطقه و حتی دقت ابزارهای سنجش که برای اعتبارسنجی مدل استفاده می‌شوند، ناشی شده باشند. به‌طور کلی، توانمندی SEBAL در بازتولید دقیق ETa، آن را به ابزاری ارزشمند برای بهینه‌سازی مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی کشاورزی در این مناطق تبدیل می‌کند.

نمودار تیلور برای ارزیابی عملکرد الگوریتم SEBAL در برآورد ETa برای هر دو منطقه، بر اساس داده‌های لایسیمتر و سنتیلومتر در فصل رشد سورگوم و یونجه در شکل (۶) ارائه شده است. این نمودار، شامل سه شاخص آماری کلیدی: شامل انحراف معیار (Standard

(Deviation)، ضریب همبستگی (R) و ریشه میانگین مربعات خطای مرکزی (Centered RMSD) است. نزدیک‌تر بودن مدل به داده‌های مشاهده‌شده نشان‌دهنده دقت بالاتر آن است. در نمودار (الف) (مقایسه با داده‌های سنتیلومتر برای یونجه در اصفهان)، نقطه SEBAL به نقطه مرجع (سنتیلومتر) نزدیک است. این نزدیکی نشان‌دهنده یک ضریب همبستگی بالا (حدود R~ 0.94)، انحراف معیار (SD) نزدیک به داده‌های مرجع (حدود ۱/۲ میلی‌متر در روز) و خطای CRMSD پایین است. این نتایج به طور قاطع تأیید می‌کنند که مدل SEBAL در اقلیم نیمه‌خشک و برای محصول یونجه، دقت و عملکردی خوب و قابل اعتماد از خود نشان داده است. در مقابل، در نمودار (ب) (مقایسه با داده‌های لایسیمتر برای سورگوم در کرمان)، اگرچه مدل همچنان دارای همبستگی مناسبی (حدود R ~0.84) است، اما فاصله آن از نقطه مرجع بیشتر است. این فاصله نشان‌دهنده انحراف معیار بالاتر برای مدل نسبت به لایسیمتر (حدود دو میلی‌متر در روز در مقابل ۰/۵ میلی‌متر در روز برای لایسیمتر) و خطای بزرگتر است. این تفاوت در دقت، نه تنها به‌دلیل تفاوت در اقلیم خشک‌تر کرمان، بلکه احتمالاً به دلیل خطاهای ذاتی و سیستماتیک لایسیمتر در اندازه‌گیری‌های میدانی است که باعث می‌شود SEBAL تطابق کمتری با این معیار اندازه‌گیری نشان دهد و به همین دلیل، عملکرد آن در نمودار (الف) قابل قبول‌تر تلقی می‌شود.

الگوی زمانی-مکانی تغییرات دمای سطحی، شاخص پوشش گیاهی و مقادیر ETa

با توجه به نتایج دقیق‌تر به‌دست آمده از اندازه‌گیری‌های سنتیلومتر، در ادامه خروجی‌های مدل SEBAL شامل دمای سطحی (Ts)، شاخص پوشش گیاهی (NDVI) و مقادیر ETa روزانه (میلی‌متر) در سه تاریخ ۱۲ می، ۲۰ ژوئن و ۱۸ آگوست ۲۰۱۶ برای مزرعه بهاران به ترتیب در شکل‌های (۷) ، (۸) و (۹) ارائه شده است. مطابق شکل (۷)، در تاریخ ۱۲ می ۲۰۱۶ که تقریباً مصادف با اوایل فصل رشد یونجه است، پوشش گیاهی از وضعیت نسبتاً مناسبی برخوردار بوده و تغییرات NDVI در بازه ۰/۲۹۸ تا ۰/۷۴ بیانگر تراکم متوسط تا بالای پوشش گیاهی می‌باشد. در اواسط دوره رشد (۲۰ ژوئن)، مقادیر NDVI به بیشینه خود (۰/۷۵۵) رسیده است که نشان‌دهنده اوج رشد گیاه و بیشترین فعالیت فتوسنتزی می‌باشد. غالب بودن رنگ سبز تیره در نقشه این دوره با افزایش مقادیر ETa نشان داده شده در شکل (۹) هم‌خوانی دارد.

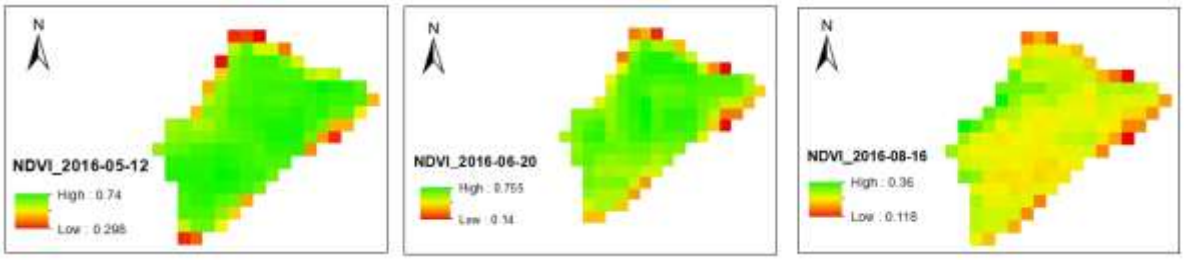


Fig. 7- Spatial changes of vegetation index (NDVI) across three periods: May 12, 2016; June 20, 2016; and August 18, 2016 in Baharan farm.

شکل ۷- تغییرات پوشش گیاهی با استفاده از شاخص NDVI در سه بازه زمانی سال 2016-05-12، 2016-06-20 و 2016-08-18 در مزرعه بهاران

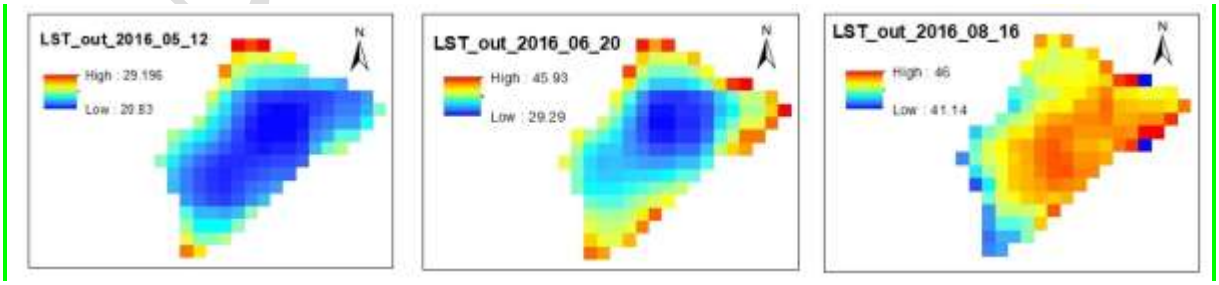


Fig. 8- Spatial changes of surface temperature (TS) across three periods: May 12, 2016; June 20, 2016; and August 18, 2016 in Baharan farm.

شکل ۸- تغییرات TS در سه بازه زمانی سال ۲۰۱۶-۰۵-۱۲، ۲۰۱۶-۰۶-۲۰و۲۰۱۶-۰۸-۱۸ در مزرعه بهاران

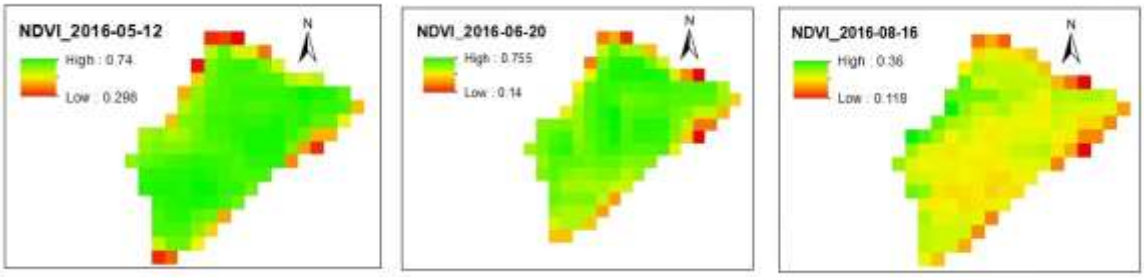


Fig. 9- Spatial variations in daily ETa across three periods: May 12, 2016; June 20, 2016; and August 18, 2016 in Baharan farm

شکل ۹- تغییرات ETa روزانه در سه بازه زمانی سال ۲۰۱۶-۰۵-۱۲، ۲۰۱۶-۰۶-۲۰ و۲۰۱۶ -۰۸-۱۸ در مزرعه بهاران

همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، در ماه‌های می و ژوئن که بخش عمده‌ای از مزرعه بهاران بیشترین تراکم پوشش گیاهی و مقادیر بالای شاخص NDVI را تجربه می‌کند، به‌دلیل رطوبت مناسب خاک و فعالیت بالای پوشش گیاهی، بخش وسیع‌تری از مزرعه مقادیر کمتری از TS را نشان می‌دهد. در نتیجه، الگوی تغییرات مکانی–زمانی ETa در این مزرعه تا حد زیادی با تغییرات NDVI منطبق بوده و این امر متأثر از مراحل رشد گیاه یونجه و برنامه آبیاری می‌باشد. در اواخر دوره رشد (ماه‌های آگوست و سپتامبر)، با کاهش تدریجی پوشش گیاهی به‌دلیل شرایط آبیاری، افت رطوبت خاک و ورود به فصل برداشت، تغییرات مکانی NDVI کاهش یافته و اختلاف بین مقادیر حداقل و حداکثر ETa در تاریخ ۲۰۱۶/۰۸/۱۶ به حدود ۱/۶ میلی‌متر در روز می‌رسد. در این دوره، به‌واسطه کاهش پوشش گیاهی، دمای سطح زمین همچنان در مقادیر بالا باقی مانده و نقش مؤثری در تشدید روند کاهشی ETa ایفا می‌کند. این روابط بیانگر اهمیت هم‌زمان بررسی دمای سطح زمین و پوشش گیاهی در مدل‌سازی تبخیر و تعرق واقعی، به‌ویژه در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، می‌باشد.

نتیجه‌گیری

فرآیند تبخیر و تعرق (ET) نقش کلیدی در معادلات بیلان آب دارد و اندازه‌گیری دقیق آن در حوضه‌های آبی برای مدیریت بهینه منابع آب به‌ویژه در بخش کشاورزی، ضروری است. در این تحقیق، عملکرد الگوریتم SEBAL برای تخمین ET واقعی روزانه (ETa) در دو اقلیم خشک کرمان (سورگوم) و نیمه‌خشک اصفهان (یونجه) ارزیابی شد. اندازه‌گیری‌های میدانی با استفاده از لایسیمتر حجمی در کرمان و سینتیلومتر در اصفهان انجام و با مقادیر تخمینی SEBAL مقایسه شد. نتایج نشان داد SEBAL در هر دو منطقه دقت قابل قبولی دارد؛ به‌طوری‌که در کرمان ضریب تعیین ۰/۷۱ با خطاهای ۱/۳۲ و ۱/۱ میلی‌متر در روز (RMSE و MAE) و در اصفهان ضریب تعیین بالاتر ۰/۸۱ با RMSE برابر ۱/۵۴ میلی‌متر در روز به دست آمد. به‌طور کلی، یافته‌ها بیانگر توان مناسب SEBAL در برآورد ETa و کاربرد مؤثر آن در مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. بررسی نقشه‌های شاخص پوشش گیاهی(NDVI) ، دمای سطح زمین (TS) و تبخیر و تعرق واقعی (ETa) استخراج‌شده از مدل SEBAL در سه تاریخ ۱۲ می، ۲۰ ژوئن و ۱۸ آگوست ۲۰۱۶، بیانگر تغییرات معنی‌دار فصلی در وضعیت پوشش گیاهی و تبادل انرژی سطحی در مزرعه بهاران است. نتایج NDVI نشان می‌دهد که در ماه‌های می و ژوئن، مقادیر این شاخص نسبتاً بالا و یکنواخت است که بیانگر رشد فعال و تراکم مناسب پوشش گیاهی می‌باشد. بیشینه NDVIدر ماه ژوئن مشاهده شد که با مرحله اوج رشد رویشی گیاهان همخوانی دارد. در مقابل، در ماه آگوست کاهش قابل توجه NDVI مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از برداشت محصول و یا بروز تنش آبی باشد. این الگو با چرخه فنولوژیکی محصولات کشاورزی سازگار است(Zhang et al., 2003) . تحلیل نقشه‌های TS نشان داد که در دوره‌هایی با NDVI بالاتر، دمای سطح کمتر است، در حالی که در ماه آگوست همزمان با کاهش پوشش گیاهی، بیشترین مقادیرTS مشاهده می‌شود. این رابطه معکوس بین NDVI وTS ناشی از اثر خنک‌کنندگی پوشش گیاهی از طریق فرآیند تبخیر و تعرق و سایه‌اندازی است(Weng et al., 2004) .

الگوی مکانی–زمانی ETa به‌دست‌آمده از مدل SEBAL همبستگی بالایی با NDVI و رابطه معکوس با TS نشان می‌دهد. بیشترین مقدار ETa در ماه ژوئن رخ داده است که هم‌زمان با بیشینه NDVI و شرایط مناسب رطوبتی می‌باشد و بیانگر مصرف بالای آب توسط گیاه در دوره رشد حداکثری است. در مقابل، حداقل ETa در ماه آگوست مشاهده شد که نشان‌دهنده کاهش فعالیت فیزیولوژیکی گیاه و احتمال بروز تنش آبی است. این نتایج کارایی مدل SEBAL در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس مزرعه را تأیید می‌کند (Bastiaanssen et al., 1998; Allen et al., 2007). در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که ترکیب شاخص‌های NDVI، TS و

ETaمی‌تواند ابزار مؤثری برای پایش وضعیت پوشش گیاهی، شناسایی تنش آبی و بهبود مدیریت آبیاری در مناطق کشاورزی به‌ویژه در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک باشد.

به‌طور خلاصه، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که الگوریتم SEBAL قادر است تغییرات ETa را در دو اقلیم خشک و نیمه‌خشک به‌خوبی بازتاب دهد و برآوردهای قابل قبولی برای محصولات سورگوم و یونجه ارائه کند. با این حال، دقت مدل به ویژگی‌های گیاهی، شرایط اقلیمی و کیفیت داده‌های میدانی – اعم از لایسیمتر در کرمان و سنتیلومتر در اصفهان– وابسته است. بنابراین، کاربرد مؤثر SEBAL در مدیریت منابع آب کشاورزی کشور مستلزم کالیبراسیون محلی و اعتبارسنجی مداوم است. اختلافات مشاهده‌شده میان مدل و اندازه‌گیری‌ها نیز می‌تواند مبنایی برای ارتقای الگوریتم و توسعه نسخه‌های سازگار با شرایط ایران فراهم کند.

تقدیر و تشکر

این پژوهش توسط بنیاد ملی علوم ایران (INSF) تحت شماره کمک هزینه ۹۸۰۱۵۲۰۲ و نیز پژوهشگاه علوم و فناوری پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران تحت شماره کمک هزینه ۹۹/۱۶۰۱ حمایت شد.

نویسندگان صمیمانه از حمایت‌های ارائه‌شده که امکان انجام این تحقیق را فراهم کرد، سپاسگزاری می‌کنند.

تضاد منافع

نویسندگان این مقاله اعلام میدارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگا ن

نویسنده اول: صدیقه انوری، گردآوری داده‌ها، روش‌شناسی، تحلیل داده‌ها و نگارش پیش‌نویس اولیه، پاسخ به داوران، ویرایش نسخه نهایی. **نویسنده دوم:** نعمت‌اله کریمی: جمع‌آوری داده‌ها، اجرای مدل، بازبینی و ویرایش متن.

References

1- Alimohammad Nejad, R., Mirlatifi, S.M. and Karimi, N., 2018. Estimate actual evapotranspiration by SEBS algorithm and comparison with actual measured values by scintillometer. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *12*(4), pp.850-861. (In Persian).

2- Allen, R.G., Pereira, L.S., Howell, T.A. and Jensen, M.E., 2011. Evapotranspiration information reporting: II. Recommended documentation. *Agricultural Water Management*, *98*(6), pp.921-929.

3- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, *300*(9), p.D05109.

4- Allen, R.G., Tasumi, M. and Trezza, R., 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *Journal of irrigation and drainage engineering*, *133*(4), pp.380-394.

5- Anvari, S., Mousavi, S.J. and Morid, S., 2017. Stochastic dynamic programming-based approach for optimal irrigation scheduling under restricted water availability conditions. *Irrigation and Drainage*, *66*(4), pp.492-500.

6- FAO (2008) Food and agriculture organization of the United Nations. *Aquastat Database from Water Report* 34:220-232.

7- Barguache, H., Ezzahar, J., Hakim Kharrou, M., Khabba, S., Elfarkh, J., Laalyej, A., Er-Raki, S. and Chehbouni, A., 2024. Quantifying Olive Tree Evapotranspiration in Semi-Arid Regions through Remote Sensing-Based SEBAL Model: Validation with Optical-Microwave Scintillometer. *European Geosciences Union General Assembly 2024 (EGU24)*, p.17321.

8- Bastiaanssen, W.G., Noordman, E.J.M., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B.P. and 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), pp.85-93.

9- Bastiaanssen, W.G., Menenti, M., Feddes, R.A. and Holtslag, A.A.M., 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of hydrology*, *212*, pp.198-212.

10- Bastiaanssen, W., Thoreson, B., Clark, B. and Davids, G., 2010. Discussion of "Application of SEBAL model for mapping evapotranspiration and estimating surface energy fluxes in south-central Nebraska" by Ramesh K. Singh, Ayse Irmak, Suat Irmak, and Derrel L. Martin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *136*(4), pp.282-283.

11- Blaney, H.F. and Criddle, W.D., 1950. *Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data* (Vol. 96). Washington, DC: US Soil Conservation Service.

12- Elnmer, A., Khadr, M., Kanae, S. and Tawfik, A., 2019. Mapping daily and seasonally evapotranspiration using remote sensing techniques over the Nile delta. *Agricultural Water Management*, *213*, pp.682-692. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.11.009SpringerLink

13- Eslami, A., Anvari, S., Karimi, N. and Mohamadi, S., 2022. Application of pixel-based and object-based approaches for LULC mapping in Jiroft region, SE Iran. *ECOPERSIA*, *10*(1), pp.71-83.

14- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2021. *WaPOR, remote sensing for water productivity*. Retrieved from https://wapor.apps.fao.org/home/WAPOR_2/1.

15- Gao, X., Sun, M., Luan, Q., Zhao, X., Wang, J., He, G. and Zhao, Y., 2020. The spatial and temporal evolution of the actual evapotranspiration based on the remote sensing method in the Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, *708*, p.135111.

16- Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, *1*(2), pp.96-99.

17- Liu, S.M., Xu, Z.W., Zhu, Z.L., Jia, Z.Z. and Zhu, M.J., 2013. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China. *Journal of Hydrology*, *487*, pp.24-38.

18- Mahmudzadeh, E. and Anvari, S., 2021a. Verification of Estimated Evapotranspiration by Surface Energy Balance Algorithm for Land and the information of OLI and TIRS sensors. *Watershed Engineering and Management*, *13*(1), pp.150-159 (In Persian), DOI: 10.22092/ijwmse.2020.128678.1745

19- Mahmudzadeh, E. and Anvari, S., 2021b. Sensitivity Analysis of SEBAL Algorithm for Estimating Agricultural Irrigation Requiremants. *Journal of Watershed Management Research*, *12*(24), pp.217-227. (In Persian).

20- Makkink, G.F., 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institution of Water Engineerrs*, *11*, pp.277-288.

21- Meijninger, W.M.L. and De Bruin, H.A.R., 2000. The sensible heat fluxes over irrigated areas in western Turkey determined with a large aperture scintillometer. *Journal of Hydrology*, *229*(1-2), pp.42-49.

22- Mohammadi, T., Moghaddasi, M., Anvari, S. and Aziz, R., 2024. Estimation of non-stationary return levels of extreme temperature by CMIP6 models. Water Practice & Technology, 19(2), pp.594-610.

23- Priestley, C.H.B. and Taylor, R.J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly weather review*, *100*(2), pp.81-92.

24- Rahimi, S., Gholami Sefidkouhi, M.A., Raeini-Sarjaz, M. and Valipour, M., 2015. Estimation of actual evapotranspiration by using MODIS images (a case study: Tajan catchment). *Archives of Agronomy and Soil Science*, *61*(5), pp.695-709.

25- Rahimpour, M., Karimi, N., Rouzbahani, R. and Eftekhari, M., 2018. Validation and calibration of FAO WaPOR product (actual evapotranspiration) in Iran using in-situ measurements. *Iran-Water Resources Research*, *14*(2), pp.254-263. (In Persian).

26- Senay, G.B., Bohms, S., Singh, R.K., Gowda, P.H., Velpuri, N.M., Alemu, H. and Verdin, J.P., 2013. Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather datasets: A new parameterization for the SSEB approach. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, *49*(3), pp.577-591.

27- Su, Z., 2002. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and earth system sciences*, *6*(1), pp.85-100.

28. Tang, R., Li, Z.L., Chen, K.S., Jia, Y., Li, C. and Sun, X., 2013. Spatial-scale effect on the SEBAL model for evapotranspiration estimation using remote sensing data. *Agricultural and forest meteorology*, *174*, pp.28-42.

29. Teixeira, A.D.C., Bastiaanssen, W.G., Ahmad, M. and Bos, M.G., 2009. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil: Part A: Calibration and validation. *Agricultural and forest meteorology*, *149*(3-4), pp.462-476.

30. Timmermans, W.J., Kustas, W.P., Anderson, M.C. and French, A.N., 2007. An intercomparison of the surface energy balance algorithm for land (SEBAL) and the two-source energy balance (TSEB) modeling schemes. *Remote Sensing of Environment*, *108*(4), pp.369-384.

31. Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, *38*(1), pp.55-94.

32. Turc, L., 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Ann. Agron.*, *12*, pp.13-49.

33. Weng, Q., Lu, D. and Schubring, J., 2004. Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote sensing of Environment*, *89*(4), pp.467-483.

34. Zhang, X., Friedl, M.A., Schaaf, C.B., Strahler, A.H., Hodges, J.C., Gao, F., Reed, B.C. and Huete, A., 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote sensing of environment*, *84*(3), pp.471-475.

35. Zheng, C., Wang, Q. and Li, P., 2016. Coupling SEBAL with a new radiation module and MODIS products for better estimation of evapotranspiration. *Hydrological Sciences Journal*, *61*(8), pp.1535-1547.

36. Zoratipour, E., Mohammadi, A.S. and Zoratipour, A., 2023. Evaluation of SEBS and SEBAL algorithms for estimating wheat evapotranspiration (case study: central areas of Khuzestan province). *Applied Water Science*, *13*(6), p.137.

EXTENDED ABSTRACT

Performance Evaluation of the SEBAL Algorithm for Estimating Actual Evapotranspiration under Diverse Climatic and Vegetation Conditions

S. Anvari [1*] and N. Karimi [2]

1- Corresponding Author, Ph.D, Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Science, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran (s.anvari@kgut.ac.ir).*

2- Ph.D, Department of Water Resources Study and Research, Water Research Institute, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received:
Revised:
Accepted:
Available online:

Keywords:
Evapotranspiration, lysimeter, scintillometer, sorghum, alfalfa, arid and semi-arid climate.

TO CITE THIS ARTICLE:

Abstract

Accurate estimation of evapotranspiration (ET) plays a crucial role in agricultural water-resources management, particularly in arid and semi-arid regions. In this study, the performance of the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) in estimating daily actual evapotranspiration (ETa) was evaluated for two crops—sorghum in the arid climate of Kerman and alfalfa in the semi-arid climate of Isfahan. For model validation, ETa of sorghum in Kerman was measured using a volumetric lysimeter, while ETa of alfalfa in Isfahan was obtained from a scintillometer along with data from a nearby meteorological station. The SEBAL-estimated values were then compared with the observed measurements. The main innovation of this research lies not in introducing the SEBAL algorithm, but in simultaneously evaluating its performance across different climates and types of vegetation using independent and accurate field data—an approach that has received comparatively little attention in domestic studies. The results indicated that SEBAL performed satisfactorily in both regions and showed good agreement with lysimetric and scintillometric data. In Kerman, a coefficient of determination of 0.71 and errors of RMSE = 1.32 mm/day and MAE =1.1 mm/day were recorded. In Isfahan, despite a slightly higher error (RMSE =1.54 mm/day), the higher coefficient of determination (0.81) reflected better model accuracy. Overall, the quantitative results demonstrate that SEBAL is capable of providing reasonably accurate estimates of ETa and can be effectively utilized for practical water-resource management in arid and semi-arid areas.

Introduction

Growing demand for food and agricultural products has placed substantial pressure on water resources in Iran, where over 90% of available water is used in the agricultural sector. Consequently, accurate estimation of evapotranspiration (ET) is vital for improving water management, particularly in arid and semi-arid regions (Eslami et al., 2022). Although direct measurement techniques such as lysimeters, evaporation pans, and scintillometers provide reliable point-based ET data, they are expensive, labor-intensive, and unsuitable for large-scale applications. Remote sensing–based surface energy balance models, including SEBAL, METRIC, SEBS, and SSEBop, have therefore become valuable alternatives, enabling regional ET estimation with minimal ground data requirements. Among these, SEBAL has been widely adopted in more than 30 countries and has consistently demonstrated high accuracy across daily to annual temporal scales, with strong agreement reported between SEBAL estimates and lysimetric or scintillometric observations (Bastiaanssen et al., 1998; Rahimpour et al., 2018; Zoratipour et al., 2023). Nonetheless, model performance may vary depending on environmental

factors such as climate, land cover, and auxiliary inputs. This study evaluates the accuracy and efficiency of the SEBAL algorithm in estimating actual ET (ETa) under two contrasting climate conditions in central Iran. Using sorghum fields in Kerman (arid climate) and alfalfa fields in Isfahan (semi-arid climate), SEBAL-derived ETa estimates are validated against ground measurements from a volumetric lysimeter and a scintillometer. Statistical indicators including R^2, RMSE, and MAE are used to assess model performance across different vegetation types and climatic settings.

Materials and methods

Study Area in Kerman, Satellite Data, and Lysimeter ETa Measurements

The study was conducted at the experimental farm of the Graduate University of Advanced Technology in Kerman Province, near the city of Mahan. The site, located at an elevation of 1910m, is characterized by an arid climate with temperatures ranging from –7°C to 39.6°C. SEBAL was applied to estimate sorghum ETa between July 20 and September 7, 2018, using seven cloud-free Landsat-8 (OLI/TIRS) images and meteorological data from the Kerman synoptic station, including air temperature, wind speed, dew point, sunshine duration, and dry-bulb temperature(Mahmudzadeh and Anvari, 2021b). Because the farm lies within the overlap of Landsat-8 paths, the effective revisit time was reduced to eight days. Ground-based ETa measurements were obtained from two volumetric lysimeters (80 cm radius, 2 m height) installed at a depth of 2 m, each accompanied by a 3-m observation well for drainage measurement. Sorghum was planted both inside the lysimeters and in the surrounding field, and weekly irrigation along with periodic measurements of soil moisture and drainage volume enabled calculation of lysimeter-based ETa.

Study Area in Isfahan, Satellite Imagery, and Scintillometer Measurements

The second study area was a 15-hectare alfalfa farm in the Baharan Agro-Industrial Complex, Isfahan Province, located at 1554 m elevation in a semi-arid climate (Rahimpour et al., 2018; Alimohammad Nejad et al., 2018). A Large Aperture Scintillometer (LAS) with a 250-m path was used to directly measure sensible heat flux and estimate ETa, based on Monin–Obukhov similarity theory. Daily ETa measurements were collected from June 28 to September 1, 2016, alongside meteorological data (temperature, pressure, wind speed, and humidity) from an on-site automatic weather station. Six Landsat-8 images with 16-day intervals were also acquired to support field-scale ET estimation, chosen for their suitable spatial resolution (15–100 m).

Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)

The SEBAL algorithm estimates actual evapotranspiration (ETa) using surface energy balance equations with minimal ground data. Latent heat flux (λET) is computed as the residual of net radiation minus soil and sensible heat fluxes. Surface albedo, temperature (Ts), and vegetation index (NDVI) are calculated, with cold and warm reference pixels defining end-member conditions. Sensible heat flux (H) is first determined for these reference pixels and then extended to all pixels using air density, specific heat, temperature difference (ΔT), and aerodynamic resistance. ΔT is iteratively derived as a regression function of Ts. Finally, instantaneous ET is calculated and converted to daily ET using the reference ET fraction (ETrF) (Bastiaanssen et al., 2005).

Results and discussion

The SEBAL algorithm was used to estimate ETa in two contrasting climates in Iran: arid Kerman (sorghum) and semi-arid Isfahan (alfalfa). Model outputs were compared with field measurements from a volumetric lysimeter in Kerman and a scintillometer in Isfahan to evaluate accuracy. In Kerman, SEBAL showed reasonable performance with R^2 =0.71, RMSE =1.32 mm/day, and MAE =1.1 mm/day, with most points within ±20% of the 1:1 line, though slight overestimation occurred at higher ETa values. In Isfahan, a stronger correlation was observed (R^2 =0.81), despite a slightly higher RMSE (1.54 mm/day), with minor underestimation at higher ETa. Overall, SEBAL effectively estimated ETa

across both regions, with minor discrepancies attributable to climatic differences, vegetation type, environmental conditions, and instrument accuracy. These results demonstrate SEBAL's reliability as a tool for supporting water resource management and agricultural planning under diverse climatic conditions.

Conclusion

This study assessed the performance of the SEBAL model in estimating daily actual evapotranspiration (ETa) for sorghum in the arid climate of Kerman and alfalfa in the semi-arid climate of Isfahan. The results demonstrated that SEBAL provided satisfactory ETa estimates in both regions, showing good agreement with lysimeter and scintillometer measurements. Overall, model performance was influenced by both climatic conditions and the accuracy of the measurement instruments. In the semi-arid region of Isfahan, relatively stable environmental conditions and the higher precision of scintillometer data contributed to more reliable SEBAL estimates. In contrast, in the arid region of Kerman, harsher drought conditions and certain limitations of the lysimeter led to greater variability and slightly lower consistency in model outputs. These findings confirm that SEBAL can serve as an effective tool for ETa estimation across different crops and climatic conditions, while highlighting the importance of site-specific factors and instrument reliability in determining its accuracy.

Acknowledgement

This work was supported by the Iran National Science Foundation (INSF) under Grant No. 98015202 and by the Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran, under Grant No. 99/1601. The authors gratefully acknowledge their support, which made this research possible.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data Availability Statements

The datasets produced or analyzed in the course of this study can be obtained from the corresponding author upon reasonable request.

Authors' contribution

Sedigheh Anvari: Data curation, methodology, formal analysis, and writing original draft. Neahmat Karimi: Data collection, model execution, and review and editing.

References

1. Alimohammad Nejad, R., Mirlatifi, S.M. and Karimi, N., 2018. Estimate actual evapotranspiration by SEBS algorithm and comparison with actual measured values by scintillometer. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *12*(4), pp.850-861. (In Persian).

2. Bastiaanssen, W.G., Menenti, M., Feddes, R.A. and Holtslag, A.A.M., 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of hydrology*, *212*, pp.198-212.

3. Eslami, A., Anvari, S., Karimi, N. and Mohamadi, S., 2022. Application of pixel-based and object-based approaches for LULC mapping in Jiroft region, SE Iran. *ECOPERSIA*, *10*(1), pp.71-83.

4. Mahmudzadeh, E. and Anvari, S., 2021b. Sensitivity Analysis of SEBAL Algorithm for Estimating Agricultural Irrigation Requiremants. *Journal of Watershed Management Research*, *12*(24), pp.217-227. (In Persian).

5. Rahimpour, M., Karimi, N., Rouzbahani, R. and Eftekhari, M., 2018. Validation and calibration of FAO WaPOR product (actual evapotranspiration) in Iran using in-situ measurements. *Iran-Water Resources Research*, *14*(2), pp.254-263. (In Persian).

6. Zoratipour, E., Mohammadi, A.S. and Zoratipour, A., 2023. Evaluation of SEBS and SEBAL algorithms for estimating wheat evapotranspiration (case study: central areas of Khuzestan province). *Applied Water Science*, *13*(6), p.137.

پذیرش نهایی- قبل از چاپ