



## Estimation of Actual Evapotranspiration at Local Scale Using the SSEBop Model

I. Raissi-Dehkordi<sup>1</sup>, S. Sima<sup>2\*</sup>, and N. Karimi<sup>3</sup>

### Abstract

Accurate estimation of the actual evapotranspiration (ET<sub>a</sub>) and analysis of its spatiotemporal variations is crucial for irrigation water management, particularly at local and daily scales. The Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) model is among the most efficient and practical single-source surface energy balance models based on remote sensing data. Nevertheless, limited studies are made to assess the performance of this model in Iran. In this study, a modified version of SSEBop (based on the use of local weather data, automatic calculation of daily reference evapotranspiration, and variable surface albedo) was introduced and its performance was examined over a 14-ha alfalfa farmland in East Isfahan. To this end, the model was calibrated and both the intermediate model outputs (e.g., surface temperature and albedo) and the estimated actual daily evapotranspirations were validated against the in-situ ET<sub>a</sub>s obtained from a scintillometer and an adjacent automatic weather station. The results showed an acceptable performance (RMSE= 0.8 mm.day<sup>-1</sup>, r= 0.81) of the modified and locally calibrated SSEBop model for estimating daily ET<sub>a</sub> throughout the growth season. However, during and after harvesting, when the crop biomass was low (NDVI<0.4), the model failed. This study reveals the promising application of the SSEBop for operational irrigation management practices.

**Keywords:** Potential Evapotranspiration, Energy Balance, Scintillometer.

Received: June 24, 2022

Accepted: November 9, 2022

## برآورد تبخیرتعرق واقعی در مقیاس محلی با استفاده از مدل SSEBop

ایمان رئیسی دهکردی<sup>۱</sup>، سمیه سیمای<sup>۲\*</sup> و نعمت‌اله کریمی<sup>۳</sup>

### چکیده

برآورد دقیق تبخیرتعرق واقعی روزانه (ET<sub>a</sub>) و تحلیل تغییرات زمانی و مکانی آن به ویژه در مقیاس محلی برای مدیریت مصارف آب ضروری است. مدل عملیاتی بیلان انرژی سطح ساده شده (SSEBop) یکی از ساده‌ترین مدل‌های تک منبعی بیلان انرژی سطحی بر مبنای داده‌های سنجنش از دور است که کارایی مناسب آن در برآورد تبخیرتعرق واقعی نشان داده شده است. با این وجود، مطالعات محدودی در خصوص عملکرد این مدل در ایران انجام شده است. در این مطالعه، عملکرد مدل SSEBop برای تخمین تبخیرتعرق واقعی روزانه محصول یونجه در مزرعه کشت و صنعت بهاران واقع در شرق اصفهان بررسی شد. پس از کالیبراسیون پارامترهای مدل، بروزسانی کد و اعتبارسنجی خروجی‌های میانی مدل، نتایج تبخیرتعرق واقعی بدست آمده از مدل SSEBop با ET<sub>a</sub> برآورد شده با داده‌های دستگاه سنتیلومتر و یک ایستگاه هواشناسی خودکار مجاور آن در مزرعه مقایسه شد. نتایج بدست آمده، عملکرد قابل قبول مدل SSEBop را برای برآورد ET<sub>a</sub> از سطح مناطق پوشش گیاهی همگن تأیید می‌کند (RMSE= 0.8 mm.day<sup>-1</sup>, r= 0.81). اما در حین و بعد از برداشت محصول که توده گیاهی کاهش می‌یابد (NDVI<0.4) مدل عملکرد مناسبی ندارد. باتوجه به اینکه مدل 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.

**کلمات کلیدی:** تبخیرتعرق پتانسیل، بیلان انرژی، سنتیلومتر.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۴/۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۸/۱۸

1- M.Sc. Student of Water Resources Engineering and Management, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor of Water Engineering, Faculty of Civil & Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: s.sima@modares.ac.ir

3- Assistant Professor, Water Resources Studies and Research Institute, Water Research Institute, Tehran, Iran.

\*- Corresponding author

Dor: [20.1001.1.17352347.1401.18.4.3.7](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1401.18.4.3.7)

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

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

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۲ امکانپذیر است.



در مقابل، روشهای مبتنی بر سنجش از دور در برآورد تبخیر تعرق واقعی (روشهای غیرمستقیم)، پوشش مکانی وسیع تر و دوره زمانی طولانی تر و هزینه کمتری نسبت به روشهای اندازه‌گیری زمینی تبخیر تعرق واقعی (روشهای مستقیم) دارند (Bastiaanssen et al., 2005). روشهای برآورد تبخیر تعرق واقعی مبتنی بر سنجش از دور (روشهای غیرمستقیم) به دو دسته کلی تک منبعی و دو منبعی تقسیم می‌شوند (Huntingford et al., 2000)، که سطح پیچیدگی، سطح نیازمندی به داده‌های ورودی، تعداد پارامترها در مدل‌های مختلف متفاوت است. از جمله مهم‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های برآورد تبخیر تعرق واقعی تک منبعی می‌توان به S<sup>2</sup>SEBop (Senay et al., 2013)، SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998)، METRIC (Allen et al., 2007)، SEBS (Su, 2002) و دو منبعی به DisALEXI/ALEXI (Anderson et al., 1997; Norman et al., 2003) و ET Look (Pelgrum et al., 2012) اشاره نمود که بر مبنای داده‌های ماهواره‌ای و معادله بیلان انرژی سطح هستند.

مطالعات مختلفی در مورد عملکرد و کاربرد این مدل‌های در ایران صورت گرفته که بیشتر آنها بر دو مدل SEBAL و METRIC متمرکز بوده و عملکرد مدل‌های جدیدتر (مانند S<sup>2</sup>SEBop) بررسی نشده است. در مطالعه‌ای، عملکرد مدل SEBAL با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای Landsat-8 در مقایسه با داده‌های لایسیتتر (Morshedi et al., 2022). در مطالعه‌ای مشابه، به منظور ارزیابی همزمان مدل METRIC و SEBAL (با استفاده از تصاویر Landsat-7) با داده‌های اندازه‌گیری زمینی لایسیتتر، عملکرد METRIC (RMSE= 0.91 mm.day<sup>-1</sup>) از SEBAL (RMSE= 1.14) بهتر گزارش شده است. در مجموع، عدم قطعیت تبخیر تعرق واقعی برای METRIC و SEBAL به ترتیب در حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد در مقیاس زمانی روزانه و ۵ درصد در مقیاس زمانی فصلی است (Allen et al., 2011; Bastiaanssen et al., 2005; Biggs et al., 2015). همچنین، در سالهای اخیر مطالعاتی در مورد ارزیابی محصول تبخیر تعرق واقعی WaPOR که براساس مدل دو منبعی ET Look می‌باشد، صورت گرفته و استفاده از آن چندان مناسب ارزیابی نشده است (Javadian et al., 2019). با این وجود، در مطالعه‌ای دیگر، عملکرد محصول WaPOR در برآورد تبخیر تعرق واقعی گیاه یونجه در استان اصفهان در مقایسه مقادیر اندازه‌گیری زمینی سنیلومتر<sup>۳</sup> مناسب (RMSE برابر ۶ میلی‌متر در بازه ۱۰ روزه) بدست آمد (Rahimpour et al., 2018).

حجم زیادی از آب به صورت تبخیر از خاک و تعرق از پوشش گیاهی به جو منتقل می‌شود (Allen et al., 2007). بیش از ۶۰ درصد بارش رسیده به سطح زمین به شکل تبخیر تعرق<sup>۱</sup> به جو باز می‌گردد (Oki and Kanae, 2006). تبخیر تعرق چرخه آب، انرژی و کربن را به هم پیوند می‌دهد و یکی از مهمترین پیش رانهای تغییرات سیستم آب و هوایی زمین است (Alton et al., 2009; Nachabe et al., 2005). کمی‌سازی مصرف آب برای مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب مهم است. همچنین، تفاوت بین تبخیر تعرق واقعی و تبخیر تعرق پتانسیل در وضوح‌های مکانی و زمانی بالا برای کشاورزی، مدیریت منابع آب و حتی امنیت ملی به عنوان شاخصی از کمبود آب محصول مورد توجه است (Allen et al., 2007). دسترسی آسان به اطلاعات تبخیر تعرق مؤلفه اصلی برای بهبود برنامه‌های مرتبط با بودجه آب، پیشبرد استراتژی‌های مدیریت آبیاری و گسترش برنامه‌های حفاظتی پیشرو است (Melton et al., 2021). فقدان مجموعه داده‌های منسجم و دقیق تبخیر تعرق واقعی یکی از مهم‌ترین شکافهای داده‌ای برای مدیران آب می‌باشد و مانع مهمی برای تصمیم‌گیری‌های صحیح و مبتنی بر شواهد در مدیریت منابع آب است (Karimi and Bastiaanssen, 2015; Melton et al., 2021). بنابراین، درک تغییرات زمانی و مکانی تبخیر تعرق واقعی (ET<sub>a</sub>)، در مقیاس‌های مختلف برای مدیریت حوضه‌های آبریز ضروری است (Bastiaanssen et al., 2005). باتوجه به سهم قابل توجه تبخیر تعرق واقعی از بیلان آب حوضه‌های آبریز، استفاده از مدل‌های دقیق برای تخمین تبخیر تعرق توسط مهندسان و مدیران منابع آب مورد توجه بوده (Pereira et al., 2006) و یکی از حوزه‌های فعال تحقیقات کاربردی در کشاورزی و منابع آب می‌باشد (Senay et al., 2022).

علاوه بر این، در میان ۱۵ جزء اصلی بودجه آب، تبخیر تعرق بر خلاف بارش و جریان رودخانه در حالت گاز قرار دارد (Senay et al., 2014). بنابراین، سخت‌ترین جزء برای اندازه‌گیری مستقیم است (Allen et al., 2014, 2022; Senay et al., 1998) و برای اندازه‌گیری مستقیم آن، عمدتاً از اندازه‌گیری دقیق با استفاده از لایسیتتر<sup>۲</sup> (Allen et al., 1991)، یا برجهای Eddy Covariance (Baldocchi et al., 2001) استفاده می‌شود. این روشها اغلب پرهزینه بوده و نیازمند دقت و مهارت بهره‌برداران هستند (Allen et al., 1998). هرچند، این روشها در اندازه‌گیری‌های عادی کمتر قابل استفاده هستند، لیکن، در ارزیابی روشهای برآورد تبخیر تعرق واقعی برپایه سنجش از دور اهمیت زیادی دارند (Allen et al., 1998).

برآورد تبخیرتغرق واقعی ( $RMSE= 1.67 \text{ mm.day}^{-1}$ ) در مقایسه با داده‌های Eddy Covariance با چهار کاربری مختلف (علفزار/ مرتع، مرداب، مرکبات و آبهای آزاد)، در جنوب شرقی ایالات متحده آمریکا (ایالت فلوریدا) ارائه دادند. مطالعه‌ای دیگر که به منظور ارزیابی مدل SSEBop در برآورد تبخیرتغرق در مقایسه با داده‌های روش نسبت بوئن<sup>۱۴</sup> در مزرعه گندم و ذرت در دشت‌های گنگتیک (دهلی نو) با استفاده از تصاویر ماهواره‌های Landsat-7 و Landsat-8 انجام شد، سازگاری خوب ( $R^2= 0.76$  و  $RMSE= 0.48 \text{ mm.day}^{-1}$ ) مدل SSEBop را با داده‌های زمینی نشان داد (Mukherjee et al., 2021). در مطالعات مشابه، عملکرد مناسب مدل SSEBop در برآورد تبخیرتغرق واقعی ( $R^2= 0.82$  و  $RMSE= 0.89 \text{ mm.day}^{-1}$ ) در مقایسه با داده‌های روش نسبت بوئن (Lopes et al., 2019) و عملکرد رضایت‌بخش  $R= 0.94$  و  $MSE= 0.62 \text{ mm.day}^{-1}$  مدل SSEBop در برآورد تبخیرتغرق واقعی مزارع سویا و لوبیا در منطقه ساوانای برزیل گزارش شد (de Paula et al., 2019). Senay et al. (2014) با ارزیابی نتایج تبخیرتغرق واقعی بدست آمده از مدل SSEBop با استفاده از تصاویر Landsat-5 به ترتیب  $R^2= 0.89$  و  $RMSE= 1.11 \text{ mm.day}^{-1}$  و برای پیکسل آبیاری شده،  $R^2= 0.86$  و  $RMSE= 1.17 \text{ mm.day}^{-1}$  برای پیکسل خشک بدست آمد. تحقیقات بر این نکته تأکید دارند که عملکرد مدل SSEBop مانند هر مدل دیگری به کیفیت داده‌های ورودی و نحوه کالیبراسیون پارامترهای مدل بستگی دارد (Senay, 2018). با این وجود مرور ادبیات فنی نشان می‌دهد که این مدل در مناطق با شرایط اقلیمی مختلف و کاربری‌های گوناگون با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است.

با وجود کارایی مناسب مدل SSEBop در برآورد تبخیرتغرق واقعی و نیازمندی کمتر به داده‌ها برای محاسبه تبخیرتغرق واقعی نسبت به مدل‌های دیگر، مطالعات محدودی در خصوص عملکرد این مدل در ایران انجام شده است. همچنین، یکی از چالش‌های موجود در استفاده از کد اصلی مدل SSEBop (<https://github.com/Open-ET/openet-ssebop>) برای مناطقی مانند ایران محدودیت استخراج و استفاده از داده‌های هواشناسی مورد نیاز مدل از پایگاه‌های داده‌های جهانی (به علت عدم پوشش مکانی- زمانی یا محدودیت استفاده از داده‌های جهانی با قدرت تفکیک مکانی کم در مقیاسهای محلی) می‌باشد. به عنوان نمونه، پایگاه‌های داده‌های هواشناسی، مانند Daymet (Thornton et al., 2021) در مقیاس یک کیلومتری از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۲۱ و GridMET (Abatzoglou, 2013) در مقیاس چهار کیلومتری از سال ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۰، که به عنوان ورودی در کد اولیه مدل SSEBop تعریف شده است، از نظر پوشش مکانی شامل

در حالی که، داده‌های ماهواره‌ای فرصت‌های بزرگی را برای تخمین تبخیرتغرق واقعی به ارمغان می‌آورد، با چالش‌هایی مانند نیاز به توسعه الگوریتم‌های پیچیده و حجم محاسباتی زیاد داده‌های ماهواره‌ای مواجه است (Senay et al., 2022). باتوجه به این چالش‌ها، مدل عملیاتی بیلان انرژی سطح ساده شده (SSEBop) توسعه پیدا کرد. این مدل یکی از ساده‌ترین مدل‌های تک منبعی بیلان انرژی سطح بر مبنای داده‌های سنجش از دور است که برای تخمین تبخیرتغرق واقعی در مقیاس‌های مکانی مختلف کاربرد دارد. همچنین، باتوجه به سادگی و پیچیدگی کمتر ساختار و فرضیات مدل، قابلیت عملیاتی برای محاسبه تبخیرتغرق واقعی برای مناطق وسیع افزایش خواهد یافت و یک گزینه امیدبخش برای برآورد تبخیرتغرق واقعی در مطالعات مدیریت منابع آب است (de Paula et al., 2019; Lopes et al., 2019). با این وجود، مدل SSEBop برای مناطق با پوشش گیاهی ناهمگن، مناطق کوهستانی، مناطق دارای البیدو بالا و تابش زیاد توصیه نمی‌شود (Biggs et al., 2015; Senay et al., 2017, 2013). تبخیرتغرق حاصل از این مدل با استفاده از داده‌های هواشناسی جهانی شبکه Daymet (<https://daymet.ornl.gov/>) و WorldClim (<https://www.worldclim.org/>) برای آمریکای شمالی و مناطق دیگر، داده‌های ماهواره‌ای سنجنده MODIS<sup>۱۵</sup>، در مقیاس مکانی یک کیلومتر و گام زمانی ۱۰ روزه، ماهانه و فصلی برای کلیه نقاط جهان از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲ در سامانه شبکه سیستم زود هنگام قحطی (FEWS NET)<sup>۱۶</sup> که توسط سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS)<sup>۱۷</sup> توسعه داده شده است، نیز به صورت آنلاین قابل دسترس است (Senay et al., 2020).

عملکرد مناسب مدل SSEBop توسط محققان مختلف گزارش شده است. در مطالعه‌ای، عملکرد مدل SSEBop با استفاده از داده‌های ماهواره MODIS در مقیاس زمانی ماهانه در سراسر ایالات متحده با ایستگاه Eddy Covariance ارزیابی شد ( $RMSE= 88.3 \text{ mm.yr}^{-1}$  و  $R^2= 0.49$  در مقایسه با داده‌های Water balance) و نشان داده شد که عدم قطعیت کلی مدل SSEBop در نتیجه خطای ترکیبی در پارامترهای مدل و متغیرهای ورودی کمتر از ۲۰٪ است (Chen et al., 2016). Senay و Singh (2010)، همبستگی خوب مدل SSEBop براساس تصاویر Landsat در مقایسه با داده‌های Eddy Covariance ( $R^2= 0.78$  و  $\text{mean bias Error} = 10\%$ ) در منطقه کوه‌های راکی در غرب ایالات متحده گزارش کردند (Singh et al., 2013). در مقابل، Bhattarai et al. (2016) عملکرد پایین‌تری را برای SSEBop براساس تصاویر ماهواره Landsat-7 در مقایسه با چهار مدل SEBAL، SEBS، METRIC و S-SEBI<sup>۱۸</sup> در

۹۰ روز هم‌زمان با دوره رشد یونجه از تاریخ ۲۰۱۶/۰۵/۱۲ تا ۲۰۱۶/۰۹/۰۱ انجام شد (Alimohammad Nejad et al., 2018).

## ۲-۲- داده‌های مورد استفاده

برای اصلاح و ارتقای کد مدل، سپس اجرا و ارزیابی آن از داده‌های ماهواره Landsat-8 استفاده شد. مزرعه بهاران در فصل مشترک سه تصویر Landsat-8 قرار دارد و این امکان را ایجاد می‌کند که با دوره تناوب کوتاه‌تری از گذر معمول ماهواره (۱۶ روز) تقریباً هر ۸ روز، تصاویر ماهواره Landsat-8 برای مزرعه مورد مطالعه در اختیار باشد. جدول ۵، تصاویر بدون ابر مورد استفاده از ماهواره لندست ۸ برای برآورد تبخیرتعرق واقعی با استفاده از مدل SSEBop را نشان می‌دهد. از دستگاه سنتیلومتر برای اندازه‌گیری شار گرمای محسوس (H) و برآورد تبخیرتعرق واقعی با استفاده از داده‌های مکمل ایستگاه هواشناسی خودکار که در مجاورت آن قرار دارد (شکل ۱)، استفاده می‌شود (Rahimpour et al., 2018). سنتیلومتر براساس نظریه مونین- اوبخوف، پس از دریافت امواج گسیل شده از فرستنده توسط گیرنده، شدت نوسانات در واحد پردازش‌دهنده مرکزی (SPU) تحلیل کرده و می‌تواند شار گرمای محسوس (H) را محاسبه کند (Han et al., 2019; Rahimpour et al., 2018). سپس، داده‌های هواشناسی شامل فشار هوا ( $e_a$ )، دما هوا ( $T_a$ )، رطوبت نسبی (RH) و غیره به وسیله ایستگاه هواشناسی خودکار که در کنار دستگاه سنتیلومتر اندازه‌گیری شده و در نهایت میزان تبخیرتعرق واقعی اندازه‌گیری بدست می‌آید (Rahimpour et al., 2018). همچنین، یک نقطه کنترلی (Test point) در مزرعه برای بررسی عملکرد  $^{16}LST$  بدست آمده از داده‌های ماهواره‌ای در ناحیه‌ای که دارای  $^{17}NDVI$  متغیر طی دوره بررسی است، انتخاب شد (شکل ۱).

مدل SSEBop برای بدست آوردن تبخیرتعرق واقعی به داده‌های تابش خورشیدی  $R_s$  نیاز دارد، بدین منظور باتوجه به اینکه داده‌های ثبت شده در ایستگاه موجود در مزرعه بهاران (شکل ۱) امکان تفکیک تابش ثبت شده به طول موج کوتاه و بلند را ندارد، از داده‌های ساعت آفتابی در ایستگاه هواشناسی فرودگاه که در ۴۰ کیلومتر مزرعه بهاران است،  $R_s$  محاسبه شد. همچنین، برای بدست آوردن شار تابش موج کوتاه  $R_s$  از معادله معروف آنگستروم استفاده شد.

در کنار برورسانی کد، کالیبراسیون پارامترهای مدل، اجرا و اعتبارسنجی با داده‌های زمینی، داده‌های زمینی، محصولات جهانی آماده مدل SSEBop که در مقیاس یک کیلومتری و روزانه در سایت

ایران نمی‌شوند. از آنجا که دقت داده‌های ورودی، به شدت روی نتایج تبخیرتعرق واقعی برآورد شده برپایه بیلان انرژی و سنجش از دور اثرگذار است، استفاده از داده‌های هواشناسی موجود در پایگاه‌های داده جهانی (با قدرت تفکیک مکانی پایین)، باتوجه به تراکم کم ایستگاه‌های هواشناسی کشور، می‌تواند منجر به افزایش خطا در خروجی نهایی مدل‌ها شود.

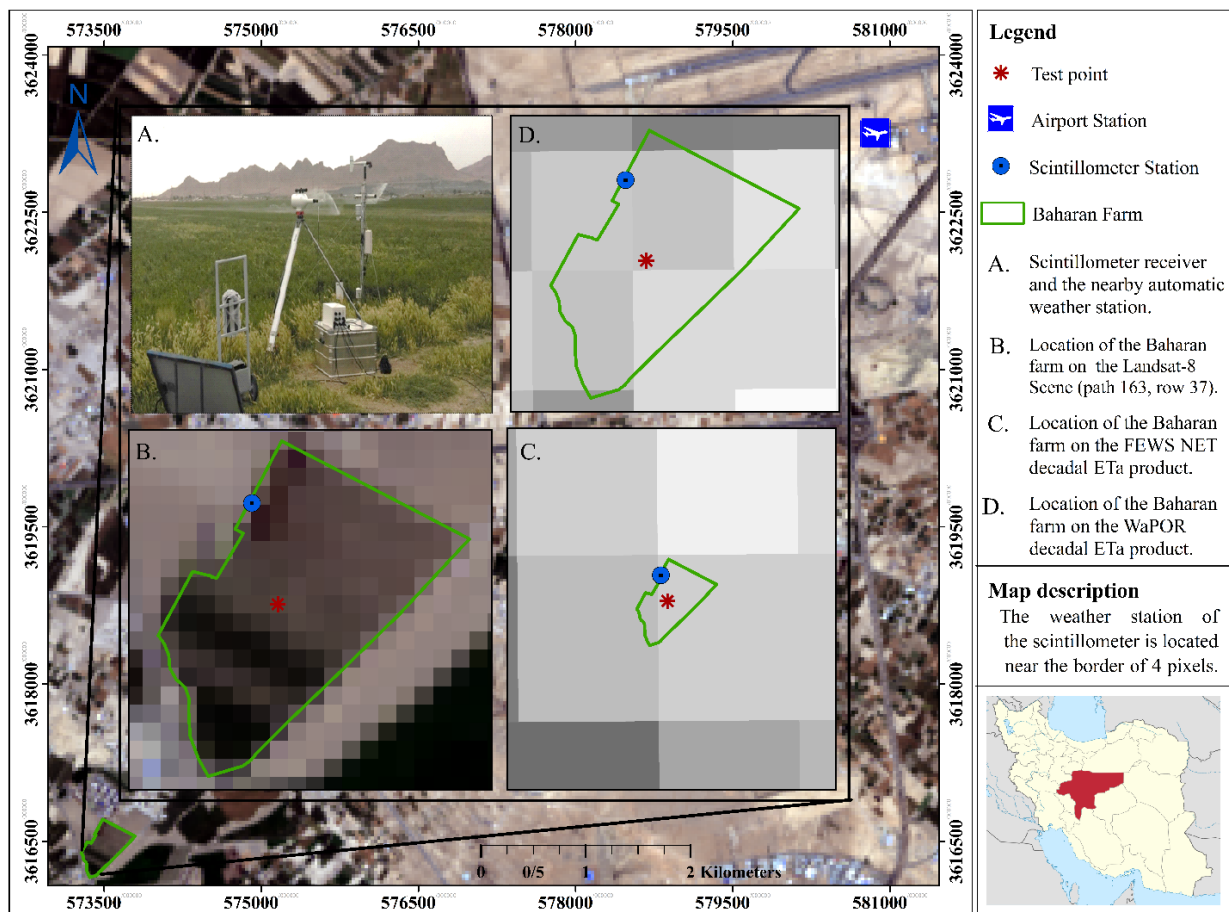
باتوجه به این موضوع، در کد اصلاح شده در این تحقیق، امکان ورود داده‌های هواشناسی مورد نیاز (بر اساس ایستگاه‌های هواشناسی محلی) توسط کاربر به کد اولیه مدل اضافه شده است. این امکان باعث می‌شود، خطای موجود در داده‌های ورودی که در نتایج نهایی مدل تأثیرگذار است، تا حد امکان کاهش یافته و تأثیر آن در ارزیابی مدل‌سازی فرآیند فیزیکی توسط مدل SSEBop به حداقل برسد (Chen et al., 2016). مطالعه پیش رو با هدف ارزیابی عملکرد مدل SSEBop در برآورد تبخیرتعرق روزانه در مقیاس محلی در یک مزرعه نمونه در اصفهان انجام شده است. در این راستا، کالیبراسیون پارامترهای مدل، برورسانی کد، اعتبارسنجی خروجی‌های میانی مدل در کنار اعتبارسنجی تبخیرتعرق واقعی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری زمینی سنتیلومتر (Wang et al., 1978) صورت گرفت، که نتایج آن در بخش‌های آتی ارائه می‌شود. علاوه بر این، در این مطالعه، اعتبارسنجی محصول جهانی آماده تبخیرتعرق مدل SSEBop که در مقیاس یک کیلومتری و روزانه در سایت FEWS NET ارائه می‌شود، برای اولین بار در کشور انجام شده و توصیه‌ها و ملاحظات مربوط به استفاده از آن در کاربردهای عملیاتی بحث شده است.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه مزرعه کشت و صنعت بهاران (شکل ۱) دارای کشت یونجه و در شرق استان اصفهان (خوراسگان) واقع شده است. این مزرعه، مساحت ۱۴ هکتار، ارتفاع ۱۵۵۴ متر از سطح دریا و شیب تقریبی ۲/۵ درصد به طرف شمال شرق دارد (Alimohammad Nejad et al., 2018).

به منظور اندازه‌گیری تبخیرتعرق واقعی یک دستگاه سنتیلومتر (LAS مدل BLS900) به همراه یک ایستگاه هواشناسی خودکار در مزرعه نصب گردید. فاصله بین سنسور گیرنده و فرستنده دستگاه سنتیلومتر (LAS) در مزرعه یونجه ۲۵۰ متر بود (شکل ۱) اندازه‌گیری شارهای انرژی مورد نیاز برای برآورد تبخیرتعرق واقعی، به صورت پیوسته طی



**Fig. 1- Baharan farm location on the Landsat-8 Scene (path 163, row 37), an example of the decadal ETa product obtained from global FEWS NET, and the scintillometer receiver location with the nearby weather station**

شکل ۱- موقعیت مزرعه بهاران در تصویر لندست ۸ (مسیر ۱۶۳، ردیف ۳۷)، نمونه‌ای از داده‌های جهانی ده روزه  $ET_a$  برگرفته شده از FEWS NET، موقعیت گیرنده سینتیلومتر همراه با ایستگاه هواشناسی خودکار مجاور آن

در مدل SSEBop تبخیرتعرق واقعی از حاصلضرب حداکثر تبخیرتعرق ( $ET_m$ ) در نسبت تبخیرتعرق بدست می‌آید (رابطه ۱).  

$$ET_a = ET_f \times ET_m \quad (1)$$

در رابطه ۱،  $ET_m$  برابر است با:

$$ET_m = k \times ET_0 \quad (2)$$

که در آن  $ET_0$  تبخیرتعرق مرجع روزانه است که براساس توصیه سازمان خوار و بار جهانی (FAO) از معادله فائو-پنمن-مانتیت محاسبه می‌شود (Allen et al., 1998). در معادله ۲،  $K$  ضریب گیاهی است که تابع نوع گیاه می‌باشد و مقدار متوسط توصیه شده برای آن برابر ۱/۲ است (Senay, 2018; Singh et al., 2013). باتوجه به اینکه محصول مورد بررسی در این مطالعه یونجه می‌باشد، مقدار این ضریب براساس توصیه فائو برابر ۱/۲ در نظر گرفته شد (Allen et al., 1998). اما، مقدار این ضریب می‌تواند بر اساس جدول ارائه شده توسط سازمان

FEWS NET (<https://earlywarning.usgs.gov/fews>) ارائه شده است (Senay et al., 2020); نیز مورد بررسی و راستی آزمایی قرار گرفت (شکل ۱).

### ۲-۳- مدل SSEBop

مدل عملیاتی بیلان انرژی سطح ساده شده (SSEBop) (Senay, 2018; Senay et al., 2013) تبخیرتعرق واقعی روزانه ( $ET_a$ ) را با استفاده از دمای سطح زمین ( $T_s$ )، حداکثر دمای هوا ( $T_a$ ) و تبخیرتعرق مرجع ( $ET_0$ ) محاسبه می‌کند. مدل SSEBop از فرضیات ساده‌کننده استفاده می‌کند و معادله بیلان انرژی را به صورت دقیق حل نمی‌کند. این فرضیات باعث می‌شود تا محاسبات در زمان نسبتاً کوتاه‌تری انجام شود. شکل ۲، فلوچارت محاسبه تبخیرتعرق واقعی را نشان می‌دهد.

**Table 1– Various ground and satellite datasets used for implementation, validation, and calibration of the SSEBop model in the study area**

جدول ۱- مجموعه داده‌های زمینی و ماهواره‌ای مختلف مورد استفاده برای اجراء، اعتبارسنجی و واسنجی مدل SSEBop در منطقه مورد مطالعه

Data type	Datasets	Spatial resolution	Temporal	Source
Satellite	Landsat-8	30m	16 days	<a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a>
	SRTM DEM	30m	-	<a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a>
In-situ	Observed data (H)	Linear (Scintillometer)	Minutes	Water Research Institute, Ministry of Energy
	Weather data ( $T_{max}$ , $T_{min}$ , $e_a$ , $u_z$ )	Point (Automatic weather station)	Minutes	
	Meteorological data (sunshine hours: n)	Point (Airport synoptic)	3-hour	Iran Meteorological organization

پس از محاسبه  $dT$  از معادله ۶ پیکسل‌های حدی گرم ( $T_h$ ) و سرد ( $T_c$ ) از معادله ۷ و ۸ محاسبه می‌شود.

$$T_c = C \cdot T_{max} \quad (7)$$

$$T_h = T_c + dT \quad (8)$$

جزئیات سایر مراحل مدل در مطالعه Senay et al. (2013) تشریح شده است. همچنین خلاصه داده‌های ورودی، لایه‌های میانی و اهداف محاسبه آنها در مدل SSEBop در جدول ۲ ارائه شده است.

در این پژوهش، از کد مدل SSEBop با استفاده از API و زبان برنامه‌نویسی Python که بر روی Google Earth Engine توسعه داده شده است، استفاده شد (<https://github.com/Open-GEE/openet-ssebop>). همچنین، چارچوب پردازش موزای GEE برای محاسبه توابع میانی و کلیدی مدل SSEBop و اتصال آنها به یکدیگر و کاهش زمان اجرا و تولید محصول تبخیرتعلق واقعی استفاده شده است. پردازش ابری SSEBop را قادر می‌سازد تا داده‌های تبخیرتعلق واقعی ۳۰ متری را در مناطق بزرگ بدون محدودیت‌های سخت‌افزاری سیستم‌های سنتی مدل‌سازی کند. با قابلیت‌های پیشرفته GEE، عملیات‌های محاسبه تبخیرتعلق در مقیاس کشور، قاره و جهان قابل محاسبه هستند (Senay et al., 2022). بنابراین، پس از بررسی و ارزیابی کد به منظور کارایی بهتر و تعمیم کاربرد کد، اصلاحات زیر در کد اصلی صورت گرفت:

❖ باتوجه به نبود داده‌های هواشناسی جهانی در پایگاه داده‌های شبکه‌ای مورد استفاده در کد اصلی برای مناطقی مانند ایران، امکان دریافت ورودی‌های مورد نیاز از داده‌های محلی (داده‌های هواشناسی) به این کد اضافه شده است. بدین منظور، از پکیج رابط برنامه‌نویسی اپلیکیشن (API) GEE که به زبان برنامه‌نویسی Python می‌باشد (<https://developers.google.com/earth->)

و تابع `ee.Image.constant` و `(engine/python-api)` که مقدار

خواربار و کشاورزی ملل متحد (Allen et al., 1998) یا سازمان‌های کشاورزی منطقه‌ای تصحیح شود.

برای تخمین  $ET_f$  از رابطه ۳ استفاده می‌شود:

$$ET_f = \frac{T_h - T_s}{T_h - T_c} \quad (3)$$

در این رابطه  $T_s$  دمای سطح زمین ( $K$ )،  $T_h$  دمای متوسط سه پیکسل گرم ( $K$ ) و  $T_c$  دمای متوسط سه پیکسل سرد ( $K$ ) می‌باشد. مدل SSEBop مقدار  $T_c$  و  $c$  را به صورت زیر تخمین می‌زند:

$$T_c = c \times T_a \quad (4)$$

ضریب اصلاحی ( $c$ )، یک ضریب است که  $T_a$  را به  $T_c$  در یک سطح با پوشش گیاهی خوب آبیاری شده مرتبط می‌کند. ضریب اصلاحی به عنوان یک میانگین فصلی برای همه پیکسل‌ها تعیین می‌شود (Senay, 2018).

$$c = \frac{T_s - cold}{T_a} \quad (5)$$

در رابطه بالا  $T_a$ ،  $T_s - cold$  حداکثر دمای هوا و مقدار  $T_s$  با محدودیت پوشش گیاهی خوب آبیاری شده ( $T_s > 270^\circ K$ ،  $NDVI > 0.7$ ) است (Senay et al., 2017). مقدار اختلاف دما ( $dT$ ) بین "پیکسل گرم" (خاک بایر) و "پیکسل سرد" (پوشش گیاهی خوب آبیاری شده) برخلاف SSEB یا مدل‌های مشابه دیگر تعادل انرژی که از مجموعه‌ای از جفت پیکسل‌های مرجع گرم و سرد استفاده می‌کنند، برای هر پیکسل محاسبه می‌شود. مقدار اختلاف دما ( $dT$ ) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

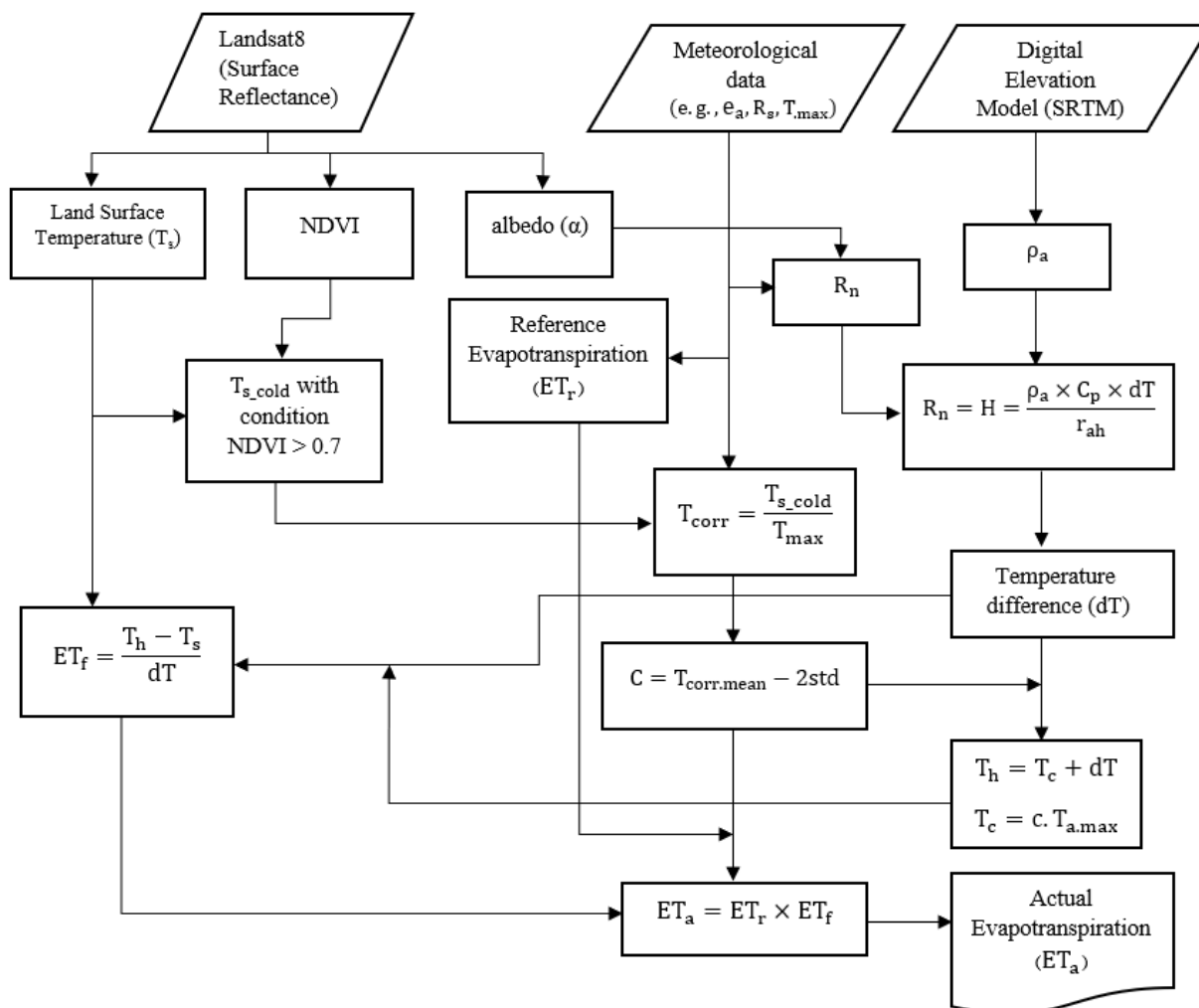
$$dT = \frac{R_n \times r_{ah}}{\rho_a \times C_p} \quad (6)$$

در این رابطه  $r_{ah}$  مقاومت آبرودینامیکی ( $110 \text{ s.m}^{-1}$ )،  $C_p$  گرمای ویژه هوا ( $1.013 \text{ Kg.KJ}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}$ )،  $\rho_a$  چگالی هوا ( $\text{Kg.m}^{-3}$ ) و  $R_n$  تابش خالص آسمان صاف ( $\text{MJ.m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ ) است (Senay et al., 2013).

**Table 2- Summary of the input data, parameters, and intermediate outputs and their purposes in the SSEBop model**

جدول ۲- خلاصه‌ای از انواع داده‌ها، پارامترها نحوه تأمین و اهداف محاسبات در مدل SSEBop

Data	Symbol	Source	Purpose	Type
Elevation	z	SRTM	Air pressure	Primary
Maximum air temperature	T <sub>max</sub>	Meteorological station	R <sub>n</sub> , T <sub>h</sub> , T <sub>c</sub> , dT	Primary
Evapotranspiration Reference	ET <sub>0</sub> , ET <sub>r</sub>	From FAO equations using Meteorological data	ET <sub>a</sub>	Primary
Shortwave radiation	R <sub>s</sub>	Meteorological data	R <sub>n</sub>	Primary
Minimum air temperature	T <sub>min</sub>	Meteorological data	e <sub>a</sub> , R <sub>nl</sub>	Primary
Land surface temperature	T <sub>s</sub>	From Landsat-8 using thermal band	ET <sub>f</sub> , ET <sub>a</sub>	Primary
Clear sky net radiation	R <sub>n</sub>	SSEBop	dT	Secondary
Temperature correction factor	c	Meteorological data & Landsat 8	T <sub>c</sub>	Secondary
Temperature difference	dT	SSEBop	dT	Secondary
NDVI	NDVI	From Landsat-8 using Near infrared & Red band's	C, T <sub>s</sub> , T <sub>c</sub>	Secondary



**Fig. 2- Flowchart the modified SSEBopmodel**

شکل ۲- فلوچارت مراحل محاسبات در مدل اصلاح شده SSEBop

ورودی برای محاسبه تبخیرتغرق مرجع روزانه اخذ می‌شود و در نهایت به نقشه‌های رستری با مقیاس مکانی یکسان با تصاویر ماهواره‌ای ورودی برای منطقه مورد مطالعه تبدیل می‌شوند. خروجی اجرای تابع، نقشه تبخیرتغرق مرجع روزانه است که در ادامه اجرای کد در محاسبات ماتریسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر این، امکان دریافت تبخیرتغرق مرجع به صورت عدد ثابت نیز به مدل اضافه شده است تا در صورتی که کاربر بخواهد محاسبات تبخیرتغرق مرجع با روشی غیر از روش ASCE انجام شود، آن را جداگانه و خارج از کد محاسبه کرده و به عنوان ورودی به مدل بدهد.

❖ در کد اصلی، بر اساس پیشنهاد (Allen et al., 1998)، مقدار ثابت  $0.23$  برای الیدو در نظر گرفته شده است. نظر به متغیر بودن الیدو با توجه به پوشش سطح، در کد اصلاح شده، امکان محاسبه الیدو به صورت متغیر بر اساس بازتاب سطحی باندهای Blue ( $\rho_{Blue}$ )، Red ( $\rho_{Red}$ )، Near Infrared ( $\rho_{NIR}$ )، ماهواره Landsat-8 ( $\rho_{SWIR1}$ ) و ( $\rho_{SWIR2}$ )، که توسط Liang برای محاسبه الیدو موج کوتاه ارائه و توسط Smith نرمال‌سازی شده است (Liang et al., 2003; Smith, 2010)، بجای مقدار ثابت پیش فرض پیشنهادی ( $0.23$ ) به این کد اضافه شد.

$$\alpha_{TOA} = \frac{0.356\rho_{Blue} + 0.130\rho_{Red} + 0.373\rho_{NIR} + 0.085\rho_{SWIR1} + 0.072\rho_{SWIR2} - 0.0018}{0.356 + 0.130 + 0.373 + 0.085 + 0.072} \quad (9)$$

ثابت را به یک تصویر در محدوده مورد نظر تبدیل می‌کند، استفاده شد. بنابراین، ابتدا داده‌های هواشناسی ایستگاه نماینده در روز موردنظر به صورت یک مقدار ثابت (توسط تابع float) دریافت می‌شود. سپس، برای ایجاد امکان سازگاری در محاسبات ماتریسی با سایر داده‌های ورودی که به صورت تصویر ماهواره‌ای است مقادیر وارد شده به فرمت یک تصویر رستری که حاوی مقدار ثابت است، تبدیل می‌شود.

❖ در کد اصلی تبخیرتغرق مرجع به عنوان یکی از داده‌های ورودی از پایگاه‌های ارائه داده‌های هواشناسی شبکه‌ای فراخوانی و استفاده می‌شود که به دلیل نبود داده‌های تبخیرتغرق مرجع برای برخی مناطق مانند ایران اجرای کد دچار اشکال می‌شود. در مدل اصلاح شده با توجه به اهمیت استفاده از داده‌های هواشناسی محلی، امکان محاسبه خودکار تبخیرتغرق مرجع در داخل کد با استفاده از داده‌های هواشناسی ورودی به منظور محاسبه یکپارچه تبخیرتغرق واقعی به مدل SSEBop اضافه شد. بدین منظور، تابع محاسبه تبخیرتغرق مرجع بر اساس روش (Allen et al., 2005) در مدل فراخوانی شده و سپس داده‌های هواشناسی مورد نیاز ( $T_{min}$ ،  $T_{max}$ ،  $e_a$  و  $u_z$  و غیره) مشابه نحوه دریافت داده‌های هواشناسی توسط مدل SSEBop به عنوان

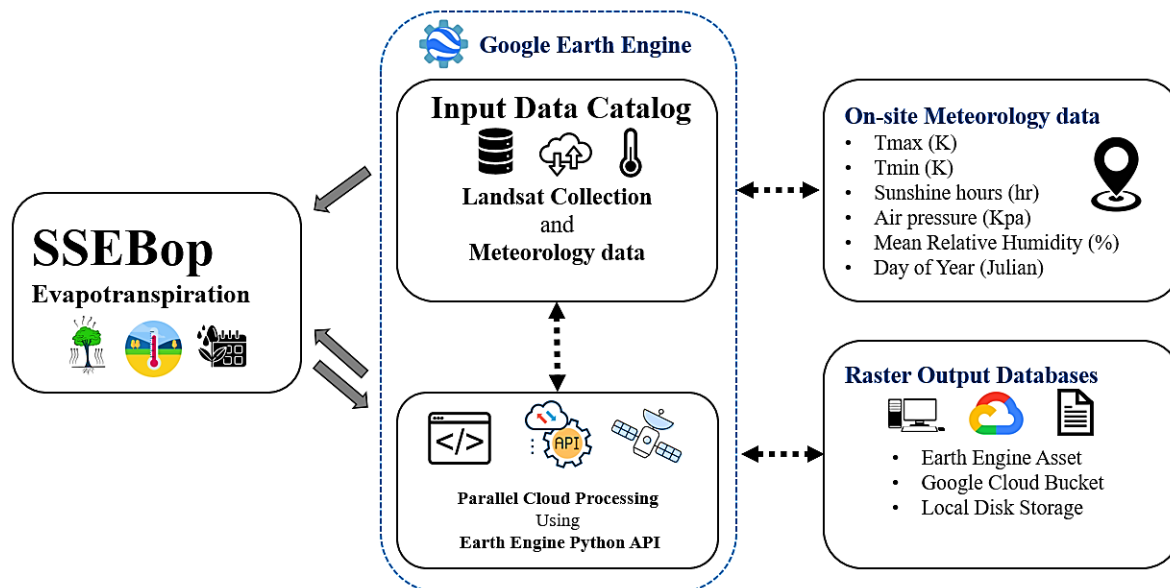


Fig. 3- Overview of the SSEBop framework in the Google Earth Engine cloud platform (Senay et al., 2022) with the new ability to be run with local data (meteorological data)

شکل ۳- نمای کلی چارچوب SSEBop در پلتفرم ابری Google Earth Engine (Senay et al., 2022) با قابلیت جدید اجرا با داده‌های محلی (داده‌های هواشناسی)



## ۲-۴- روش ارزیابی عملکرد مدل

به منظور اعتبارسنجی، میانگین تبخیرتغرق روزانه بدست آمده از مدل SSEBop با تبخیرتغرق روزانه بدست آمده از اندازه‌گیری زمینی مقایسه شد. برای مقایسه، یکبار میانگین تبخیرتغرق واقعی بدست آمده از مدل SSEBop برای پیکسل‌های واقع در شعاع ۱۲۰ متری از ایستگاه هواشناسی خودکار و فرستنده سنتیلومتر (۹ پیکسل داخل مزرعه) و یکبار هم کل محدوده مزرعه مورد مطالعه در نظر گرفته شد (شکل ۱). ارزیابی عملکرد با شاخص‌های عملکردی شامل ضریب همبستگی (r)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای انحراف (MBE)، میانگین مطلق خطا (MAE) که در جدول ۳ روابط آنها ارائه شده است، انجام شد.

## ۳- نتایج

### ۳-۱- اعتبارسنجی مدل SSEBop

معیارهای عملکردی حاصل از مقایسه نتایج بدست آمده از مدل SSEBop با داده‌های اندازه‌گیری زمینی ثبت شده توسط سنتیلومتر در جدول ۴ ارائه شده است. در این جدول، ستون‌های یک تا سه به ترتیب آماره‌های بدست آمده از مقایسه متوسط  $ET_a$  برآورد شده از مدل SSEBop برای ۹ پیکسل (شکل ۱)، متوسط  $ET_a$  برآورد شده از مدل برای کل سطح مزرعه (شکل ۱) و  $ET_a$  بدست آمده از داده‌های جهانی FEWS NET در پیکسل نظیر محل اندازه‌گیری با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سنتیلومتر را ارائه می‌دهد. چنانچه در ادامه در بخش ۳-۳ بحث خواهد شد، از ۱۲ تاریخ در دوره مورد بررسی که داده‌های همزمان زمینی و ماهواره‌ای موجود بود، ۵ تاریخ به علت بایر

بودن سطح مزرعه و ناهمگنی سطح کنار گذاشته شد و نتایج برای ۷ تاریخ که داده‌های زمینی و نتایج مدل قابل محاسبه هستند ارائه شد.

همانطور که ملاحظه می‌شود همبستگی خوبی بین مقادیر  $ET_a$  مدل SSEBop و اندازه‌گیری زمینی ( $R^2=0.76$ ) برقرار است. همچنین، میزان RMSE کمتر از ۱ میلی‌متر در روز (۰/۶۰ میلی‌متر بر روز برای میانگین نه پیکسل و ۰/۸۰ میلی‌متر بر روز برای کل مزرعه) حاکی از عملکرد مناسب مدل در برآورد الگو و مقادیر تبخیرتغرق واقعی در مقیاس مزرعه است. با افزایش محدوده مکانی مقایسه (از ۹ پیکسل اطراف محل اندازه‌گیری به کل مزرعه) به علت افزایش ناهمگنی (انحراف معیار در جدول ۴)، معیارهای عملکردی افت کمی پیدا می‌کنند.

در شکل ۴ روند تغییرات زمانی تبخیرتغرق واقعی بدست آمده از مدل SSEBop و داده‌های آماده FEWS NET در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده توسط سنتیلومتر نشان داده شده است. روند تغییرات زمانی تبخیرتغرق واقعی توسط مدل کالیبره شده SSEBop به خوبی مدل‌سازی شده است و تمامی مقدار تبخیرتغرق واقعی ( $ET_a$ ) مطابق انتظار از مقادیر تبخیرتغرق مرجع ( $ET_r$ ) کمتر است. درحالی‌که، نتایج برآورد تبخیرتغرق واقعی روزانه حاصل از مدل SSEBop در مقیاس ۱ کیلومتر مربع و با داده‌های جهانی MODIS، Daymet/WorldClim و GDAS/WorldClim که در پایگاه FEWS NET ارائه شده است (Senay et al., 2020)، الگوی تغییرات زمانی تبخیرتغرق روزانه را به درستی نشان نمی‌دهد (به عنوان مثال کم برآورد کردن تبخیرتغرق در ۱۹ ماه جولای) و تبخیرتغرق روزانه را تا یک چهارم نسبت به خروجی‌های مدل کالیبره شده

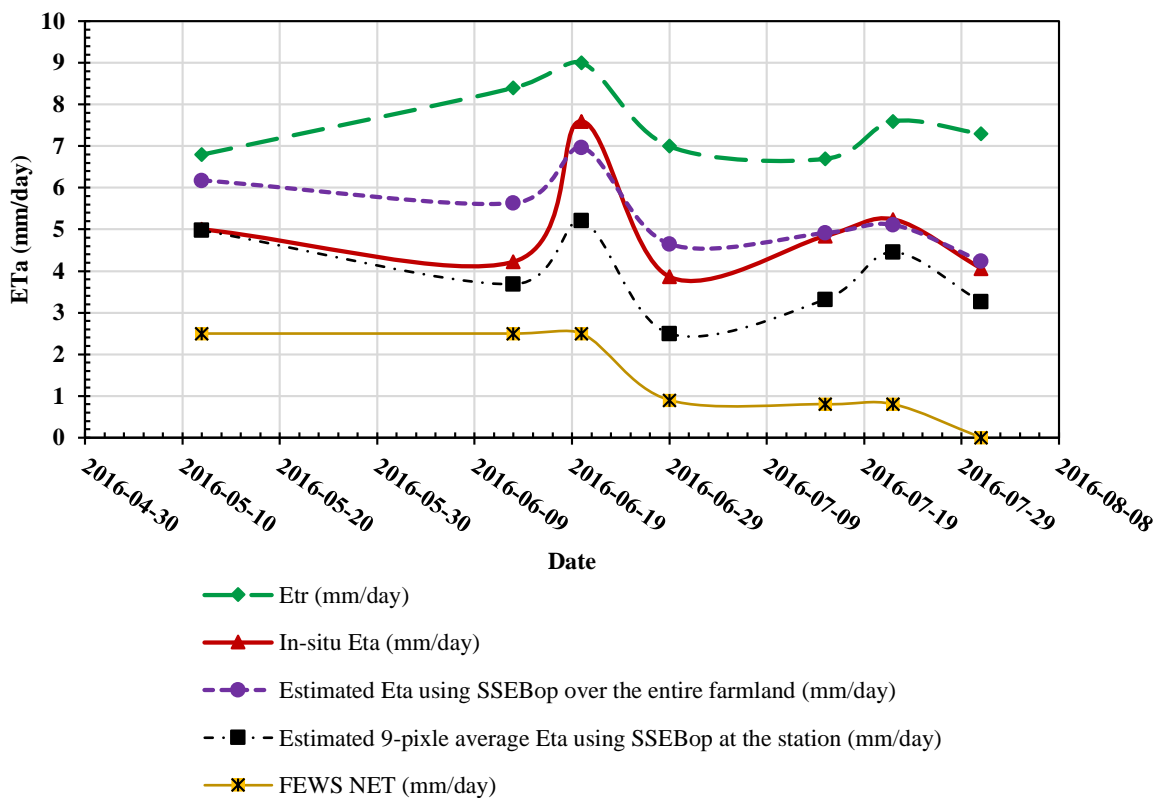
Table 3- Performance metrics used for evaluation of SSEBop derived  $ET_a$  with in situ measurements  
جدول ۳- معیارهای عملکردی مورد استفاده برای ارزیابی  $ET_a$  بدست آمده از مدل SSEBop با اندازه‌گیری‌های زمینی

S.no	Statistical equations
1	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{obs}(x_i) - ET_{est}(x_i))^2}{n}}$
2	$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{obs}(x_i) - ET_{est}(x_i))}{n}$
3	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n  ET_{obs}(x_i) - ET_{est}(x_i) }{n}$
4	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{obs}(x_i) - \overline{ET_{obs}})(ET_{est}(x_i) - \overline{ET_{est}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (ET_{obs}(x_i) - \overline{ET_{obs}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (ET_{est}(x_i) - \overline{ET_{est}})^2}}$

**Table 4- Statistical evaluation of SSEBop model-derived  $ET_a$  with in situ measurements in Baharan farmland**

جدول ۴- نتایج ارزیابی  $ET_a$  بدست آمده از مدل SSEBop با اندازه گیری زمینی در مزرعه بهاران

Statistical parameters	9-pixle average	The entire farmland	FEWS NET
RMSE (mm)	0.60	0.80	3.71
r	0.87	0.81	0.48
MAE (mm)	0.49	0.63	3.55
MBE (mm)	-0.17	-0.41	3.55
PBIAS (%)	-3%	-8%	71%
Standard deviation of SSEBop	0.23	0.30	1.40
Standard error (mm)	0.09	0.11	0.53



**Fig. 4- Temporal variation of daily  $ET_a$  obtained from SSEBop and FEWS NET compared to in-situ data**

شکل ۴- روند تغییرات زمانی داده‌های روزانه SSEBop و FEWS NET در مقایسه با داده‌های اندازه گیری زمینی

داده‌های محلی، قدرت تفکیک پایین سنجنده MODIS در قیاس با Landsat-8 و عدم انجام کالیبراسیون محلی مدل اشاره نمود.

SSEBop با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر، کمتر برآورد می‌کند، که از دلایل این امر می‌توان به استفاده از داده‌های هواشناسی شبکه‌ای جهانی (GDAS/WorldClim) در مقیاس ۱۰ کیلومتر به‌جای

### ۳-۲- ارزیابی خروجی‌های میانی مدل

سطح کاهش می‌یابد و برعکس با کاهش NDVI در اثر برداشت محصولات از تاریخ ۲۰۱۶/۰۷/۳۱ به بعد دمای سطح افزایش یافته است. وجود رابطه معکوس معنی‌دار بین NDVI و LST در شکل ۷ نشان داده شده است. بنابراین، سازگاری الگوی تغییرات زمانی دما و پوشش گیاهی سطح، تأیید می‌گردد.

متغیر dT یکی از خروجی‌های میانی مهم در مدل SSEBop است (Chen et al., 2016). با توجه به شکل ۸ و جدول ۵، مقادیر اختلاف دمای بین شرایط مرزی گرم و سرد (dT) بین ۱۱ و ۲۲ درجه کلونین متغیر است. در کد اصلی مدل SSEBop مقادیر ثابت برای حداقل و حداکثر مقدار dT در نظر گرفته شده است که برابر با ۵ و ۲۵ درجه کلونین است. بنابراین، اگر در یکی از ورودی‌های مورد نیاز مدل (مانند  $R_n$  یا  $e_a$ ) خطایی وجود داشته باشد (به دلیل عدم اندازه‌گیری مستقیم یا خطا در دستگاه اندازه‌گیری) و منجر به برآورد dT خارج از این بازه شود، مقدار ثابت ۵ برای dT کمتر از ۵ و مقدار ثابت ۲۵ برای dT بیشتر از ۲۵ در نظر گرفته می‌شود که این موضوع باعث می‌شود تا کاربر متوجه خطای موجود در داده‌های ورودی نشود، بنابراین، بررسی آن حائز اهمیت است.

در حالی که، در کد اصلی براساس پیشنهاد (Allen et al., 1998)، مقدار ثابت ۰/۲۳ برای البیدو در نظر گرفته شده است، تغییرات البیدوی محاسبه شده برای منطقه با استفاده از باندهای Blue، Red، Near Infrared (NIR)، SWIR1 و SWIR2 ماهواره Landsat-8 نسبت به مقدار ثابت در شکل ۵ مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۵، حداکثر مقدار البیدو برای مزرعه مورد مطالعه ۰/۲۶، حداقل مقدار البیدو برابر ۰/۲ و میانگین البیدو ۰/۲۴ است. بنابراین، مقدار میانگین بدست آمده با مقدار ثابت توصیه شده در کد تفاوت زیادی ندارد، اما برای مناطق غیرهمگن، ممکن است این تفاوت قابل ملاحظه باشد.

با توجه به اینکه دمای سطح زمین ( $T_s$ ) اثر مستقیم در محاسبه نسبت تبخیرتعرق ( $ET_f$ ) دارد (Mukherjee et al., 2021)، بررسی عملکرد مدل در برآورد حائز اهمیت است (رابطه ۳ و شکل ۲). به منظور ارزیابی دمای سطح برآورد شده در مدل با استفاده از باند حرارتی ماهواره Landsat-8 و سازگاری آن با تغییرات پوشش سطح، ارتباط NDVI و LST در نقطه Test point (شکل ۱) در مزرعه بررسی شد. علت انتخاب این نقطه در وسط مزرعه، دارا بودن طیف متفاوتی از مقادیر NDVI ( $0 < NDVI < 0.8$ ) در طی یکسال می‌باشد. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود مطابق انتظار، با افزایش NDVI دمای

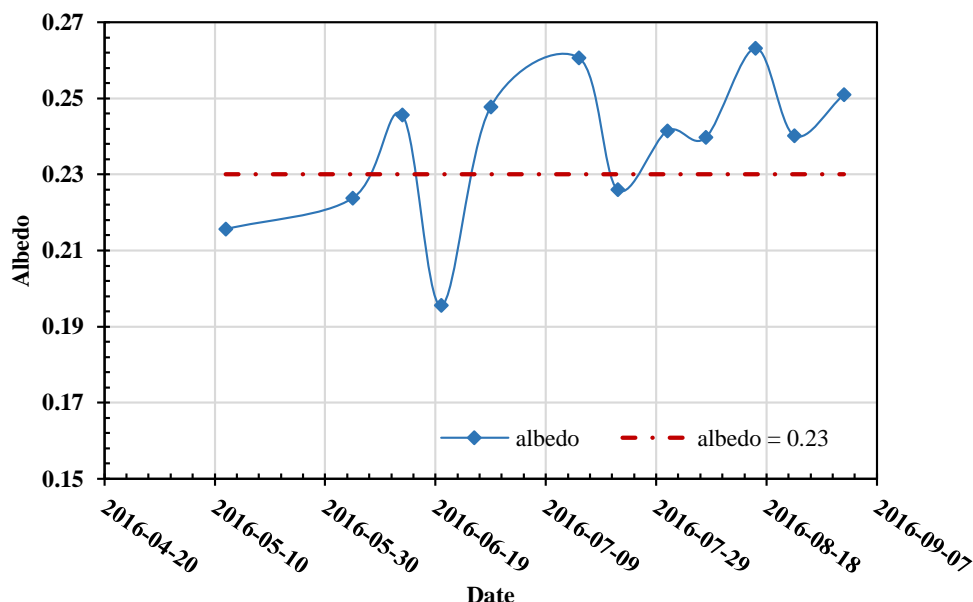


Fig. 5- Comparison of calculated albedo with Landsat-8 images and the recommended constant value of SSEBop during the study period in Baharan farm

شکل ۵- مقایسه البیدوی محاسبه شده با تصاویر Landsat-8 و مقدار ثابت توصیه شده مدل SSEBop در دوره مورد مطالعه در مزرعه بهاران

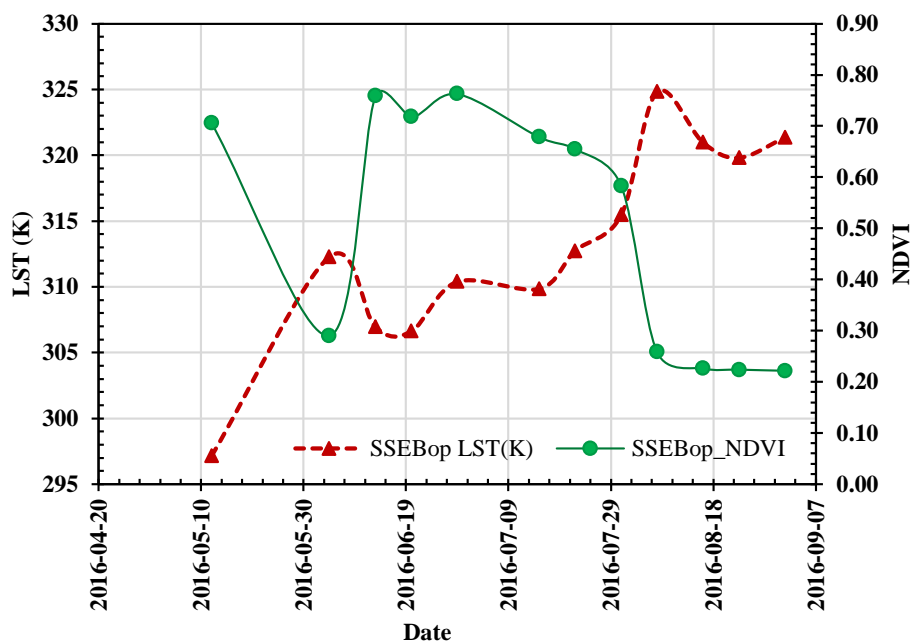


Fig. 6- Surface temperature and NDVI changes during the study period in Baharan farm  
 شکل ۶- تغییرات دمای سطح و NDVI در دوره مورد مطالعه در مزرعه بهاران

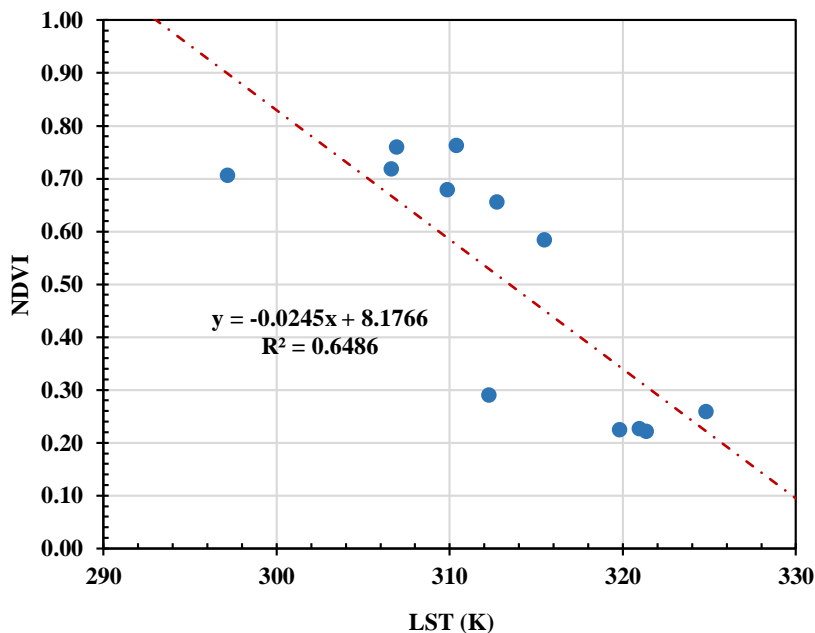


Fig. 7- Inverse correlation between NDVI and ground surface temperature during the study period in Baharan farm

شکل ۷- همبستگی معکوس بین NDVI و دمای سطح زمین در مزرعه بهاران در دوره مورد مطالعه در مزرعه بهاران

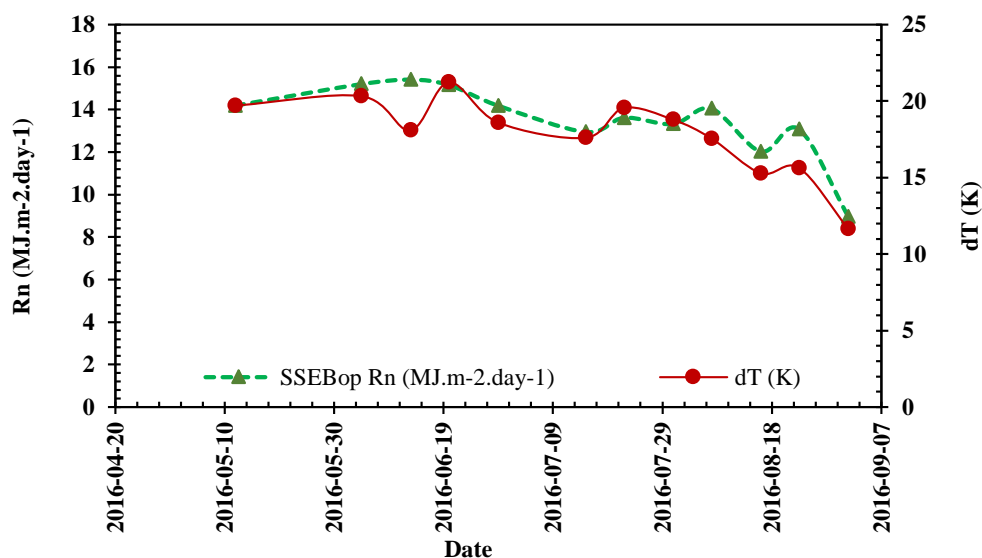


Fig. 8- Diagram of changes in temperature difference between hot and cold pixels (dT) and estimated net radiation flux (R<sub>n</sub>) during the study period in Baharan farm

شکل ۸- نمودار تغییرات اختلاف دمای پیکسل گرم و سرد (dT) و شار تابش خالص برآورد شده (R<sub>n</sub>) در دوره مورد مطالعه در مزرعه بهاران

Table 5- Summary of reference ET (ET<sub>0</sub>), maximum and minimum air temperature (T<sub>max</sub>, T<sub>min</sub>), difference temperature (dT) for the 12 Landsat-8 acquisition dates

جدول ۵- خلاصه مجموعه داده‌های تبخیر تعرق مرجع (ET<sub>0</sub>)، دمای حداکثر و حداقل هوا (T<sub>min</sub>، T<sub>max</sub>)، اختلاف دما (dT) برای ۱۲

تاریخ تصویر Landsat-8

Scene NO	Landsat-8 Date	DOY	Path, Row	ET <sub>0</sub> (mm/day)	NDVI	T <sub>max</sub> (K)	T <sub>min</sub> (K)	dT (K)
1	12/05/2016	133	163, 37	6.8	0.64	302.82	287.14	19.71
2	04/06/2016	156	164, 37	6.2	0.34	305.17	287.35	20.32
3	13/06/2016	165	163, 37	8.4	0.47	303.29	289.68	18.09
4	20/06/2016	172	164, 37	9	0.63	305.72	300.1	21.22
5	29/06/2016	181	163, 38	7	0.71	309.63	291.85	18.56
6	15/07/2016	197	163, 37	6.7	0.72	309.26	297.61	17.6
7	22/07/2016	204	164, 37	7.6	0.69	312.04	298.62	19.55
8	31/07/2016	213	163, 38	7.3	0.7	310.32	291.85	18.78
9	07/08/2016	220	164, 37	6.7	0.3	307.25	286.55	17.55
10	16/08/2016	229	163, 37	7.7	0.35	305.61	293.57	15.28
11	23/08/2016	236	164, 37	5.9	0.3	303.88	286.53	15.63
12	01/09/2016	245	164, 37	5.8	0.29	308.98	290.3	11.64

### ۳-۳- تحلیل اثر سطوح بایر و ناهمگنی در پوشش سطح

از بین تصاویر موجود که برای آنها داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی تبخیرتعلق واقعی، همزمان با داده‌های ماهواره‌ای وجود داشت، روزهایی که برداشت کامل محصول انجام شده و عملاً سطح مزرعه بایر و فاقد پوشش گیاهی بود (تاریخهای ۲۰۱۶/۰۸/۱۶، ۲۰۱۶/۰۸/۲۳، ۲۰۱۶/۰۹/۰۱ و ۲۰۱۶/۰۹/۰۹) در شکل ۹، کنار گذاشته شد. در این روزها، به دلیل یکنواخت بودن دمای سطح و NDVI در مزرعه و بروز اشکال در محاسبه دمای حدی سرد و گرم شار گرمای محسوس، خروجی توسط مدل قابل ارائه نمی‌باشد (None گزارش می‌شود)، همچنین، در این روزها (تاریخ ۲۰۱۶/۰۸/۱۶ تا ۲۰۱۶/۰۹/۰۱) خروجی‌های داده‌های آماده مدل SSEBop که در سایت FEWS NET موجود است نیز None شده است.

همچنین، زمان‌هایی که پوشش گیاهی مزرعه ناهمگن بود (تاریخ ۲۰۱۶/۰۶/۰۴ و ۲۰۱۶/۰۸/۰۷) در شکل ۹، در محاسبات برآورد تبخیرتعلق واقعی لحاظ نشد. به عنوان مثال در تاریخ ۲۰۱۶/۰۶/۰۴، مناطق دارای پوشش گیاهی در مسیر فرستنده و گیرنده سنتیلومتر قرار ندارد (شکل ۹) و این امر منجر به محاسبه شار گرمای محسوس برای زمین بایر می‌باشد که در این شرایط نماینده خوبی از متوسط شار گرمای محسوس مزرعه نیست. بنابراین، تبخیرتعلق واقعی برآورد شده با عدم قطعیت بالایی همراه خواهد بود. زیرا، تأثیر مناطق با پوشش گیاهی در شار گرمای محسوس اندازه‌گیری شده توسط سنتیلومتر لحاظ نمی‌شود.

موضوع دیگری که حایز اهمیت است، این است که متغیرهای هواشناسی کمکی مورد استفاده نظیر که در ایستگاه هواشناسی پرتابل مجاور دستگاه سنتیلومتر اندازه‌گیری می‌شوند (شکل ۹)، نماینده شرایط هواشناسی مزرعه باشند. بنابراین، لازم است که شرایط پوشش سطح در محل ایستگاه پرتابل مشابه شرایط پوشش سطح کلی مزرعه باشد. به عنوان مثال در تاریخ ۲۰۱۶/۰۸/۰۷ همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، بخشی از مناطق دارای پوشش گیاهی که هنوز

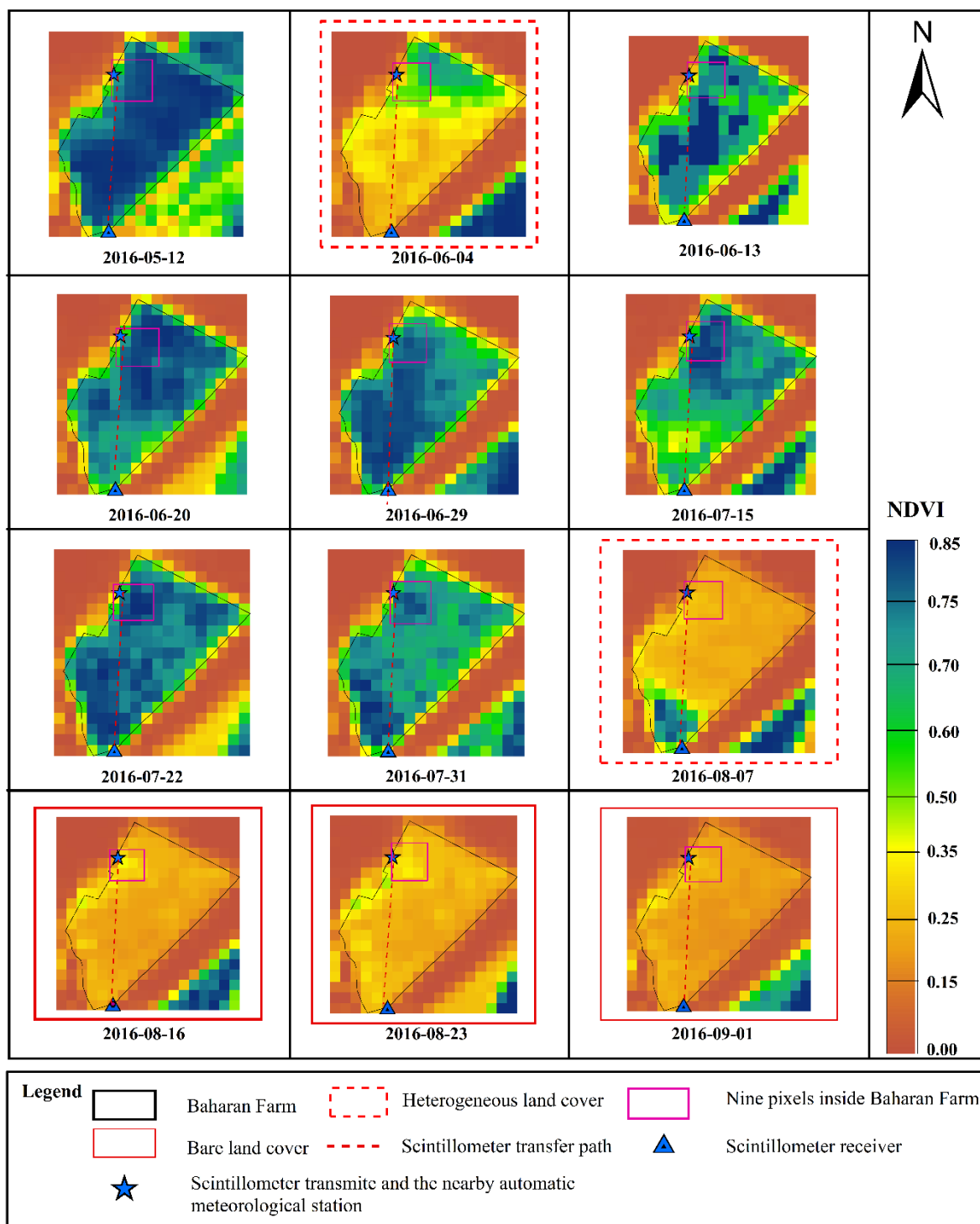
برداشت نشده‌اند (در جنوب مزرعه) در مسیر فرستنده و گیرنده دستگاه سنتیلومتر قرار دارد و شار محسوس اندازه‌گیری شده نماینده شرایط کلی مزرعه است. اما در اطراف ایستگاه هواشناسی، محدوده یکنواختی از پیکسل‌های با NDVI پایین (و دمای سطح زمین بالا) قرار گرفته اند و حداکثر دمای هوای روزانه ثبت شده در این مناطق بایر نمی‌تواند نماینده خوبی از حداکثر دمای هوای روی کل مزرعه باشد. بنابراین، به دلیل ناهمگنی در سطح مزرعه دمای ( $T_s$ ) سطح مزرعه از شرط مرزی گرم ( $T_h$ ) بیشتر شده (کسر تبخیرتعلق منفی می‌شود) و در نهایت تبخیرتعلق واقعی None گزارش می‌شود.

در نتیجه، این مطالعه ضمن تأیید نتایج مطالعه Senay در سال ۲۰۰۷ و ۲۰۱۳، استفاده از مدل SSEBop را برای مناطق با پوشش گیاهی ناهمگن و برای مناطق توصیه نمی‌کند. در مزرعه یونجه مورد بررسی، این شرایط معادل  $NDVI < 0.4$  است. اما، کارایی مدل SSEBop برای برآورد تبخیرتعلق واقعی در مزرعه مورد بررسی در زمانی که پوشش گیاهی مزرعه همگن بود تأیید شد.

### ۳-۴- الگوی مکانی و زمانی تبخیرتعلق واقعی

شکل ۱۰ تغییرات مکانی- زمانی تبخیرتعلق واقعی را برای روزهای باقیمانده (۷ روز) در طول دوره مطالعه نشان می‌دهد. میانگین تبخیرتعلق واقعی در طول دوره مورد مطالعه برابر ۵/۳۸ میلیمتر بوده و مقادیر آن بین صفر تا ۹ میلیمتر در روز متغیر است. باتوجه به شکل‌های ۹ و ۱۰، می‌توان مشاهده کرد که الگوی تغییرات مکانی زمانی تبخیرتعلق روی مزرعه تا حد زیادی منطبق با تغییرات NDVI است که خود متأثر از دوره زمانی رشد گیاه یونجه و آبیاری است.

در روز ۲۰۱۶/۰۵/۱۲ تغییرات مکانی تبخیرتعلق واقعی و NDVI در سطح مزرعه یکنواخت است و به مرور تغییرات مکانی تبخیرتعلق واقعی با توجه به شرایط آبیاری و رطوبت خاک در نواحی مرکزی و حاشیه‌ای، افزایش یافته و اختلاف حداقل و حداکثر تبخیرتعلق واقعی به ۶ میلیمتر در روز در تاریخ ۲۰۱۶/۰۶/۲۰ می‌رسد.



**Fig. 9- NDVI maps for Landsat-8 satellite overpasses during the study period in Baharan farm**  
 شکل ۹- نقشه‌های NDVI برای روزهای عبوری ماهواره Landsat-8 در طول دوره مطالعه در مزرعه بهاران

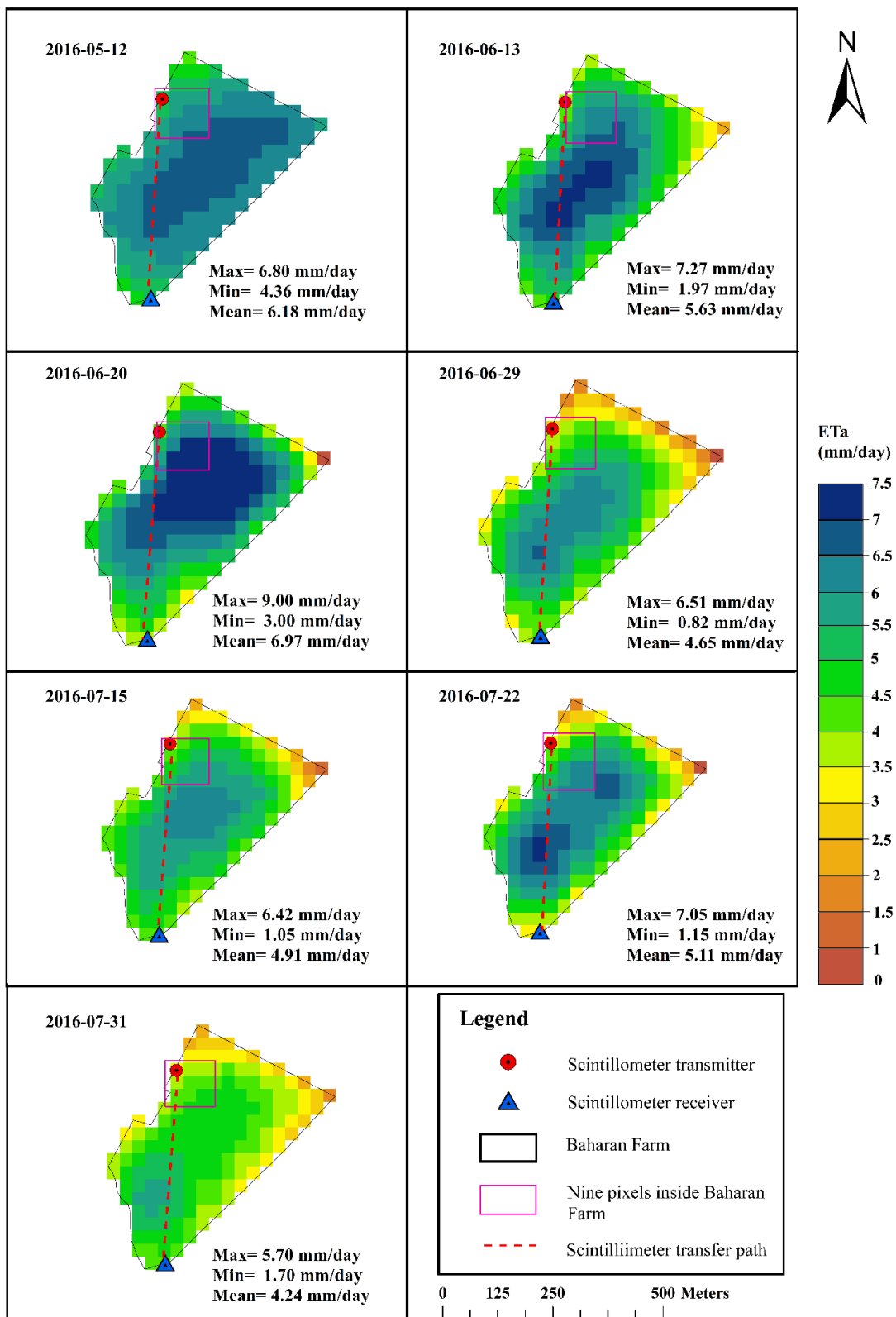


Fig. 10- Spatiotemporal variation of SSEBop actual ET (based on Landsat-8 images) during the study period in Baharan farm

شکل ۱۰- تغییرات مکانی و زمانی  $ET_a$  بدست آمده از مدل SSEBop بر مبنای داده‌های ماهواره‌ای Landsat-8 در دوره مورد

مطالعه در مزرعه بهاران



#### ۴- جمع بندی

#### پی نوشتها

- 1- Evapotranspiration
- 2- Lysimeter
- 3- The Operational Simplified Surface Energy Balance
- 4- Surface Energy Balance Algorithm for Land
- 5- Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration
- 6- Surface Energy Balance System
- 7- Atmosphere-Land Exchange Inverse
- 8- Disaggregated Atmosphere-Land Exchange Inverse
- 9- Scintillometer
- 10- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
- 11- Famine Early Warning Systems Network
- 12- United States Geological Survey
- 13- Simplified Surface Energy Balance Index
- 14- Bowen Ratio
- 15- Google Earth Engine
- 16- Land Surface Temperature
- 17- Normalized Difference Vegetation Index

این مطالعه با هدف ارزیابی عملکرد مدل عملیاتی بیلان انرژی سطح ساده شده (SSEBop) در برآورد تبخیرتغرق واقعی روزانه در مقیاس محلی در یک مزرعه نمونه در اصفهان انجام شده است. در این راستا، کالیبراسیون پارامترهای مدل، بروزرسانی کد، اعتبارسنجی خروجی‌های میانی مدل در کنار اعتبارسنجی تبخیرتغرق واقعی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری زمینی سنتیلومتر صورت گرفت.

نتایج بیانگر عملکرد رضایت بخش ( $RMSE=0.8 \text{ mm.day}^{-1}$ ) مدل اصلاح شده SSEBop بر اساس داده‌های محلی و تصاویر ماهواره‌ای Landsat-8 در مزرعه یونجه مورد بررسی بود. از این رو یافته‌های این مطالعه نتایج مطالعات پیشین (Senay et al., 2017, 2013) در خصوص کارایی مدل SSEBop در مناطق دارای پوشش گیاهی همگن را تأیید می‌کند، اما استفاده از مدل SSEBop را در مناطق با پوشش گیاهی ناهمگن (در مزرعه یونجه مورد مطالعه این شرایط معادل  $NDVI < 0.4$  است) توصیه نمی‌کند. همچنین، یافته‌های این پژوهش برتری عملکرد مدل SSEBop اصلاح شده (همراه با داده‌های هواشناسی محلی و تصاویر Landsat-8) را نسبت به نتایج تبخیرتغرق واقعی FEWS NET (با کد اصلی SSEBop و تصاویر MODIS) نشان می‌دهد.

در نهایت با توجه به سهولت استفاده از مدل SSEBop در قیاس با سایر مدل‌های بیلان انرژی مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای نظیر و نیاز به داده‌های ورودی کمتر و نیز امکان اجرای خودکار (بدون نیاز به دخالت کاربر در انتخاب پیکسل‌های حدی)، بر اساس نتایج این پژوهش، می‌توان استفاده از مدل SSEBop را برای کاربردهای عملیاتی و با دقت مناسب در مقیاس محلی برای کاربردهایی مثل مدیریت آبیاری در سطح مزرعه توصیه نمود. با این وجود همچنان نیاز به مطالعات بیشتر در خصوص اعتبارسنجی مدل در مناطق مختلف با پوشش سطح و شرایط اقلیمی مختلف احساس می‌شود.

#### ۵- تشکر و قدردانی

مؤلفین از مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو و سازمان هواشناسی که امکان دسترسی به داده‌های زمینی مورد نیاز این مطالعه را فراهم آوردند، مراتب قدردانی و سپاس خود را اعلام می‌دارند.

- Abatzoglou JT (2013) Development of gridded surface meteorological data for ecological applications and modelling. *International Journal of Climatology* 33(1):121–131
- Alimohammad Nejad R, Mirlatif 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*. MSc Student, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran 12(4):850–861
- Allen R, Irmak A, Trezza R, Hendrickx JMH, Bastiaanssen W, and Kjaersgaard J (2011) Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. *Hydrological Processes* 25(26):4011–4027
- Allen RG, Howell TA, Pruitt WO, Walter IA, and Jensen ME (1991) Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements. ASCE
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M, Anderson RG, French AN, Allen RG, Pereira LS, Raes D, and Smith M (1998) FAO irrigation and drainage paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations 56(97):e156
- Allen RG, Tasumi M, Morse A, Trezza R, Wright JL, Bastiaanssen W, Kramber W, Lorite I, Robison CW, G. AR, ... Ricardo T (2007) Satellite-based energy balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, American Society of Civil Engineers 133(4):395–406
- Allen RG, Walter IA, Elliott R, Howell TA, Itenfisu D, and Jensen ME (2005) The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Idaho. ASCE
- Alton P, Fisher R, Los S, and Williams M (2009) Simulations of global evapotranspiration using semiempirical and mechanistic schemes of plant hydrology. *Global Biogeochemical Cycles* 23(4):1–12
- Anderson MC, Norman JM, Diak GR, Kustas WP, and Mecikalski JR (1997) A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier 60(2):195–216
- Baldocchi D, Falge E, Gu L, Olson R, Hollinger D, Running S, Anthoni P, Bernhofer C, Davis K, Evans R, ... Wofsy S (2001) FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society* 82(11):2415–2434
- Bastiaanssen WGM, Noordman EJM, Pelgrum H, Davids G, Thoreson BP, and Allen RG (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
- Bastiaanssen WGM, Pelgrum H, Wang J, Ma Y, Moreno JF, Roerink GJ, and Van Der Wal T (1998) A remote sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): 2. Validation. *Journal of Hydrology* 212–213(1–4):213–229
- Bhattarai N, Shaw SB, Quackenbush LJ, Im J, and Niraula R (2016) Evaluating five remote sensing based single-source surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in a humid subtropical climate. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Elsevier B.V. 49:75–86
- Biggs TW, Petropoulos GP, Velpuri NM, Marshall M, Glenn EP, Nagler P, and Messina A (2015) Remote sensing of actual evapotranspiration from croplands. *Remote Sensing of Water Resources, Disasters, and Urban Studies* 3(December):59–99
- Chen M, Senay GB, Singh RK, and Verdin JP (2016) Uncertainty analysis of the Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) model at multiple flux tower sites ASRC InuTeq, Contractor to the U.S. Geological Survey (USGS) Earth Resources Observation USGS EROS Center / North Central Climate. *Journal of Hydrology*, Elsevier B.V
- de Paula ACP, da Silva CL, Rodrigues LN, and Scherer-Warren M (2019) Performance of the SSEBop model in the estimation of the actual evapotranspiration of soybean and bean crops. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 54(January)
- Han PF, Wang XS, and Wang JZ (2019) Using large-aperture scintillometer to estimate lake-water evaporation and heat fluxes in the Badain Jaran Desert, China. *Water (Switzerland)* 11(12)
- Huntingford C, Verhoef A, and Stewart J (2000) Dual versus single source models for estimating surface temperature of African savannah. *Hydrology and Earth System Sciences* 4(1):185–191
- Javadian M, Kordi F, and Tajrishy M (2019) Evaluation and comparison of estimation methods for actual evapotranspiration in the urmia lake basin. *Iranian Journal of Ecohydrology*, Researcher of Remote Sensing Research Center (RSRC), Sharif University of Technology, Tehran 6(1):125–136

- Karimi P and Bastiaanssen WGM (2015) Spatial evapotranspiration, rainfall and land use data in water accounting-Part 1: Review of the accuracy of the remote sensing data. *Hydrology and Earth System Sciences* 19(1):507–532
- Liang S, Shuey CJ, Russ AL, Fang H, Chen M, Walthall CL, Daughtry CST, and Hunt R (2003) Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: II. Validation. *Remote Sensing of Environment* 84(1):25–41
- Lopes JD, Rodrigues LN, Maria H, and Imbuzeiro A (2019) Performance of SSEBop model for estimating wheat actual evapotranspiration in the Brazilian Savannah region. *International Journal of Remote Sensing*, Taylor & Francis 40(18):1–18
- Melton FS, Huntington J, Grimm R, Herring J, Hall M, Rollison D, Erickson T, Allen R, Anderson M, and Fisher JB (2021) Openet: Filling a critical data gap in water management for the western united states. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, Wiley Online Library, 58(6)
- Morshedi A, Jafari H, and Onabi Milani A (2022) Estimation of actual evapotranspiration of wheat using SEBAL algorithm compared to lysimetric results under standard conditions in tabriz and karaj research stations. *Journal of Water Research in Agriculture* 36(1):21–33
- Mukherjee J, Sharma A, Dhakar R, Sehgal VK, Chakraborty D, and Das DK (2021) Estimation and validation of actual Evapotranspiration (ETa) of maize wheat cropping system using SSEBop model over IARI Research Farm, New Delhi. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, Springer India (June) 49(8):1823-1837
- Nachabe M, Shah N, Ross M, and Vomacka J (2005) Evapotranspiration of two vegetation covers in a shallow water table environment. *Soil Science Society of America Journal*, Wiley Online Library 69(2):492–499
- Norman JM, Anderson MC, Kustas WP, French AN, Mecikalski J, Torn R, Diak GR, Schmugge TJ, and Tanner BCW (2003) Remote sensing of surface energy fluxes at 101-m pixel resolutions. *Water Resources Research* 39(8)
- Oki T and Kanae S (2006) Global hydrological cycles and world water resources. *Science* 313(5790):1068-1072
- Pelgrum H, Miltenburg IJ, Cheema MJM, Klaasse A, and Bastiaanssen WGM (2012) ET Look: A novel continental evapotranspiration algorithm. *IAHS-AISH Publication* 352(February 2016):120–123
- Pereira AR, Green S, and Villa Nova NA (2006) Penman-Monteith reference evapotranspiration adapted to estimate irrigated tree transpiration. *Agricultural Water Management* 83(1–2):153–161
- 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 #S0090):249-262 (In Persian)
- Senay GB (2018) Satellite psychrometric formulation of the Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) model for quantifying and mapping evapotranspiration. *Applied Engineering in Agriculture* 34(3):555–566
- Senay GB, Bohms S, Singh RK, Gowda PH, Velpuri NM, Alemu H, and Verdin JP (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*, John Wiley & Sons, Ltd 49(3):577–591
- Senay GB, Friedrichs M, Morton C, Parrish GEL, Schauer M, Khand K, Kagone S, Boiko O, and Huntington J (2022) Mapping actual evapotranspiration using Landsat for the conterminous United States: Google Earth Engine implementation and assessment of the SSEBop model. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier Inc. 275(March):113011
- Senay GB, Gowda PH, Bohms S, Howell TA, and Friedrichs M (2014) Evaluating the SSEBop approach for evapotranspiration mapping with Landsat data using lysimetric observations in the semi-arid Texas High Plains. *Hydrology and Earth System Sciences* 11(1):723–756
- Senay GB, Kagone S, and Velpuri NM (2020) Operational global actual evapotranspiration: Development, evaluation, and dissemination. *Sensors (Switzerland)* 20(7):1–18
- Senay GB, Schauer M, Friedrichs M, Velpuri NM, and Singh RK (2017) Satellite-based water use dynamics using historical Landsat data (1984–2014) in the southwestern United States. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier Inc. 202:98–112
- Singh RK, Senay GB, Velpuri NM, Bohms S, Scott RL, and Verdin JP (2013) Actual evapotranspiration (water use) assessment of the colorado river basin at the Landsat resolution using the operational simplified surface energy balance model. *Remote Sensing* 6(1):233–256

Smith RB (2010) The heat budget of the earth's surface deduced from space. Yale University Center for Earth Observation: New Haven, CT, USA

Su Z (2002) The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. Hydrology and Earth System Sciences 6(1):85–100

Wang T, Ochs GR, and Clifford SF (1978) A saturation-resistant optical scintillometer to measure  $C_n^2$ . Journal of the Optical Society of America, OSA 68(3):334–338