



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۱۲ ■ شماره ۲ ■ تابستان ۱۴۰۱

صفحه‌های ۲۹۳-۲۷۷

DOI: 10.22059/jwim.2022.338119.961

مقاله پژوهشی:

مقایسه و بررسی نقش الگوریتم‌های PYSEBAL و SEBS در برآورد تبخیر-تعرق واقعی در دشت قزوین

محدثه السادات فخر^۱، عباس کاویانی^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۲. دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۰۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۰۷

چکیده

روش‌های مختلفی به منظور پایش تبخیر-تعرق وجود دارد که به‌طور عمده به‌صورت نقطه‌ای اندازه‌گیری می‌کنند که تعمیم آن برای کل منطقه دشوار خواهد بود. سال‌های اخیر روش‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور به‌منظور برآورد تبخیر-تعرق واقعی در محدوده وسیع مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش مقدار تبخیر-تعرق واقعی به‌صورت روزانه در دشت قزوین توسط دو الگوریتم SEBS و PYSEBAL برای ۱۵ تصویر TM، ۲۲ تصویر ETM+ و ۲۴ تصویر MODIS بدون ابر و برف در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۳ میلادی استفاده شد. نتایج حاصل با داده‌های یک لایسیمتر زهکش‌دار کشت‌شده با چمن در محدوده دشت قزوین مورد مقایسه قرار گرفتند. از مقایسه خروجی‌های به‌دست‌آمده از دو الگوریتم این نتیجه به‌دست آمد که الگوریتم PYSEBAL با بهره‌گیری از جدیدترین روش‌های برآورد تبخیر-تعرق هم‌چون عدم انتخاب دو پیکسل گرم و سرد توسط کاربر و استفاده حداقلی از داده‌های زمینی توانسته است بسیاری از ضعف‌های سایر الگوریتم‌ها را پوشش دهد. به‌طوری‌که الگوریتم PYSEBAL در هر سه سنجنده MODIS، LANDSAT-ETM+ و LANDSAT-TM به‌ترتیب با مقدار RMSE برابر با ۰/۴۵، ۰/۴۶ و ۲/۰۲ میلی‌متر بر روز، و مقدار R^2 ۰/۹۶، ۰/۹۵ و ۰/۸۲ عملکرد بهتری را نسبت به الگوریتم SEBS در محدوده مورد مطالعه داشته است. در ادامه با توجه به این‌که تعیین مقدار آبی که صرف تبخیر-تعرق می‌شود از اساسی‌ترین عوامل در برنامه‌ریزی به‌منظور رسیدن به محصول بیش‌تر است، ضریب Kc می‌تواند راهنمای مناسب و سریعی در مدیریت آبیاری محسوب شود. بررسی‌های انجام‌شده بر روی گیاه چمن نشان از دقت بالای مدل PYSEBAL با مقدار ضریب همبستگی ۰/۶۸ در برآورد این ضریب داشته و در نهایت استفاده از روش‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور می‌تواند به‌عنوان جایگزینی مناسب به‌منظور جلوگیری از صرف هزینه زیاد و بهبود مدیریت آب در منطقه باشد.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم تک‌منبعی، سنجش‌ازدور، ضریب گیاهی، مدیریت آبیاری.

Comparison and study of the role of PYSEBAL and SEBS algorithms in estimating actual evapotranspiration in Qazvin plain

Mohadese Sadat Fakhari¹, Abbas Kaviani^{2*}

1. M. Sc. Student, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2. Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

Accepted: May 26, 2022

Received: January 27, 2022

Abstract

There are several methods for monitoring evapotranspiration, which are mainly measured on a point that will be difficult to generalize to the whole area. In recent years, remote sensing-based methods for estimating actual evapotranspiration have been widely considered. In this study, the amount of actual evapotranspiration per day in Qazvin plain was used by SEBS and PYSEBAL algorithms for 15 TM images, 22 ETM+ images and 24 MODIS images without clouds and snow during the years 2000 to 2003. The results were compared with a drained lysimeter planted with grass in the Qazvin plain. Comparing the outputs obtained from the two algorithms, it was concluded that the PYSEBAL algorithm, using the latest methods of estimating evapotranspiration, such as the user not selecting two hot and cold pixels and minimal use of ground data, has been able to cover many of the weaknesses of other algorithms, so that the PYSEBAL algorithm in all three MODIS sensors, LANDSAT-ETM+ and LANDSAT-TM respectively with RMSE values (0.45, 0.46 and 2.02 mm/day, and R^2 values of 0.96, 0.95 and 0.82) had better performance than SEBS algorithm in the study area. Furthermore, considering that determining the amount of water used for evapotranspiration is one of the most basic factors in planning in order to achieve more product, Kc coefficient can be considered as a suitable and fast guide in irrigation management. Studies on grass plant show the high accuracy of PYSEBAL model in estimating this coefficient. And finally, the use of remote sensing methods can be a good alternative to avoid high costs and improve water management in the region.

Keywords: Crop Coefficient, Remote Sensing, Single source algorithm, Water management.

مقدمه

با توجه به خشک‌سالی‌های ایجادشده و با ادامه رشد جمعیت و رشد اقتصادی، مواد غذایی بیش‌تری برای تولید در آینده موردنیاز است، این بدان معناست که تقاضای آب تا سال ۲۰۵۰ بیش از ۴۰ درصد رشد خواهد شد. بنابراین، در آینده نزدیک کمبود آب مسأله مهمی خواهد بود (Nazari & Fakhar, 2021). بررسی و مدیریت آب کشاورزی، به اطلاعات دقیقی از تبخیر-تعرق واقعی نیاز دارد. این اطلاعات باید دارای جزئیات مکانی کافی باشد، تا بتوان تحلیل‌ها را در سطح مزرعه و یا حوضه انجام داد (Sánchez et al., 2008). در همین راستا استفاده از فناوری سنجش‌ازدور و تصاویر ماهواره‌ای با طول‌موج‌های کوتاه و بلند یکی از راه‌کارهای مؤثر و مقرون‌به‌صرفه در برآورد میزان تبخیر-تعرق هستند (Wu et al., 2010). داده‌های سنجش‌ازدور می‌تواند یکی از بهترین روش‌ها برای برآورد دقیق تبخیر-تعرق در مناطق بزرگ باشد (Kazamias & Sapountzis, 2017). تکنیک سنجش‌ازدور، روش‌های مناسبی را برای کنترل فرایندهای سطح زمین در مناطق وسیع فراهم می‌کند. روش‌های مختلفی برای برآورد تبخیر-تعرق از قدرت تفکیک متوسط به کم برپایه داده‌های سنجش‌ازدور در طول چند دهه اخیر توسعه داده‌شده است. این روش‌ها به‌طورکلی شامل روش‌های آماری/تجربی هستند که دمای سطح زمین (LST) و یا شاخص‌های گیاهی را با اندازه‌گیری‌های تبخیر و تعرق در محل مرتبط می‌کند (Ke et al., 2016). برآورد سری زمانی تبخیر-تعرق در مقیاس منطقه‌ای به‌منظور مدل‌سازی در پایداری منابع آب زیرزمینی ضروری است (Senay et al., 2016). در سال‌های اخیر الگوریتم‌های متعددی برای برآورد تبخیر-تعرق با استفاده از سنجش‌ازدور ارائه شده است. این الگوریتم‌ها که بر رابطه بیلان انرژی استوار هستند،

روش‌های توازن انرژی سطحی، نام دارند از جمله آن‌ها می‌توان به الگوریتم‌هایی همچون SEBS^۱، SEBAL^۲ و METRIC^۳ و PYSEBAL اشاره کرد که هرکدام میزان تغییرات تبخیر-تعرق را با دقت‌های مختلفی محاسبه می‌کند (Gowda et al., 2008). هر یک از الگوریتم‌های تک‌منبعی ویژگی‌های مختص به خود را دارند، به‌طوری‌که در الگوریتم SEBAL با به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی برای تخمین بیلان انرژی در سطح، ابتدا شار گرمای تبخیر، در هر پیکسل از تصویر و به‌صورت لحظه‌ای برای زمان دریافت تصویر محاسبه می‌شود و درنهایت برای گام‌های زمانی روزانه و ماهانه تعمیم داده می‌شود (Kunstmann et al., 2018). در الگوریتم‌های تک‌منبعی، مجموعه خاک و گیاه به‌عنوان یک منبع واحد در نظر گرفته می‌شود (Nishida et al., 2003). الگوریتم بیلان انرژی با توجه به تشعشع ورودی به پوشش سطح زمین و خروجی از آن با طول‌موج کوتاه و بلند امکان محاسبه تشعشع خالص جذب‌شده توسط هر سلول (پیکسل) در سطح زمین فراهم می‌آید. این تشعشع خالص با توجه به اختلاف درجه حرارت هوا و سطح پوشش زمین، شدت و ضعف پوشش گیاهی و مقاومت آئروپدینامیکی سطح زمین به اجزای مختلف از جمله جریان گرمایی خاک، جریان گرمای محسوس و جریان گرمای نهان تبخیر تقسیم می‌شود. جریان گرمای نهان تبخیر از باقی‌مانده معادله بیلان انرژی حاصل می‌شود (Bastiaanssen, 2000). PYSEBAL نسخه‌ای از الگوریتم SEBAL است که توسط Hessels et al. (2017) توسعه‌یافته است. این الگوریتم نیاز به داده زیادی ندارد و دقت آن در بسیاری از کشورها بین به‌صورت تجربی بین ۰/۸۵ و ۰/۹۵ ارزیابی شده است (Hessels et al., 2017). PYSEBAL انتقال انرژی از تابش خورشید به انتقال آب به اتمسفر را تخمین می‌زند. این مدل پیکسل‌های سرد و

مرو دشت استان فارس، مقدار تبخیر-تعرق روزانه به روش تجربی و فرمول FAO-56 با استفاده از تصاویر LANDSAT-OLI و الگوریتم PYSEBAL مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت که نتایج حاصل با مقدار $RMSE=0.77$ میلی‌متر بر روز نشان از دقت بالای الگوریتم PYSEBAL است (Caiserman *et al.*, 2021).

در این مطالعه الگوریتم SEBS نیز مورد بررسی قرار گرفت. الگوریتم سیستم بیلان انرژی سطح (SEBS) الگوریتمی تک‌منبعی است که مقدار شار جریان آشفته اتمسفر و مقدار تبخیر سطحی را با استفاده از سنجش‌ازدور و بدون تقسیم‌بندی شار انرژی در دو بخش تبخیر از پوشش گیاهی و سطح خاک برآورد می‌کند (Su, 2002). این الگوریتم شامل ابزارهای قوی به‌منظور برآورد پارامترهای فیزیک سطحی، هم‌چون دمای سطح زمین، آلبیدو، گسیل‌مندی سطح زمین و ... است. استفاده از این الگوریتم به‌منظور برآورد تبخیر-تعرق در نقاط مختلف جهان انجام شده است. این الگوریتم از سه بخش مختلف تشکیل شده است که این بخش‌ها شامل برآورد بیلان انرژی، استخراج طول زبری به‌منظور برآورد انتقال حرارت و در نهایت استخراج پارامترهای ثابت خواهد بود. با استفاده از این سه بخش مختلف، معادله بیلان انرژی، در شرایط مرزی پیکسل‌های خشک و مرطوب محاسبه خواهد شد. در ادامه براساس این پیکسل‌ها اجزای بیلان انرژی، تبخیر نسبی، مقدار تبخیر و شار تبخیر استخراج خواهد شد. پژوهش‌های مختلفی در این زمینه انجام شده است، به‌طوری‌که Hailegiorgis (2006) در برآورد تبخیر-تعرق واقعی در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۳ میلادی در فصل تابستان، با استفاده از الگوریتم SEBS و تصاویر LANDSAT-7 و مقایسه آن با استفاده از داده‌های تبخیر-تعرق واقعی اندازه‌گیری شده به این نتیجه رسید که حتی اگر داده‌های زمینی برای اعتبارسنجی تبخیر-تعرق

گرم را به‌صورت خودکار محاسبه کرده انتخاب پیکسل‌های سرد از مزارع با پوشش گیاهی با تراکم بالا که به‌طور کامل آبیاری شده باشند، استفاده می‌شود و انتخاب پیکسل‌های گرم در مناطقی که پوشش تنک و دمای سطحی بالایی دارند انتخاب می‌شوند. از جمله ویژگی‌های الگوریتم PYSEBAL می‌توان به جداسازی تبخیر از تعرق، تخمین بیومس و رطوبت خاک نیز اشاره کرد. پژوهش‌های مختلفی در این زمینه صورت گرفته است.

در پژوهشی میزان تبخیر-تعرق در منطقه Burkina Faso به وسعت ۱۲۰۰ هکتار مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که استفاده از مدل PYSEBAL در محیط‌های نیمه‌خشک می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای توسعه استراتژی‌ها برای بهبود مدیریت آب آبیاری در کشورهایی با اقلیم خشک باشد (Sawadogo *et al.*, 2020). در آدانا ترکیه برآورد تبخیر-تعرق واقعی توسط الگوریتم PYSEBAL با استفاده از تصاویر LANDSAT-5TM مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که رابطه خوبی بین تبخیر-تعرق برآورد شده و مقدار اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر است، به‌طوری‌که ضریب همبستگی 0.73 و 0.51 $RMSE=$ میلی‌متر بر روز شد. در نتیجه، تبخیر-تعرق واقعی محصول سویا را می‌توان با دقت بالا در آدانا ترکیه تخمین زد (Sawadogo *et al.*, 2020). در پژوهشی با استفاده از تصاویر MODIS و Landsat8 و هم‌چنین با استفاده از الگوریتم PYSEBAL و MPYSEBAL اقدام به بررسی اثر این عدم قطعیت‌ها بر روی نتایج برآورد تبخیر-تعرق واقعی برای محدوده دشت ارومیه کردند. نتایج اعتبارسنجی مدل‌ها با داده‌های لایسیمتری در بازه زمانی ۲۰۱۰-۲۰۱۱ حاکی از آن بود که مدل MPYSEBAL نسبت به PYSEBAL تا ۷۰ درصد خطای کم‌تری در برآورد تبخیر-تعرق روزانه دارد (Owlia & Sima, 2021). در دشت کشاورزی شهرستان

اطمینان از برقراری تعادل انرژی سطح بسیار مهم است (Kalma et al., 2008). در پژوهشی که توسط Ma et al. (2012) صورت گرفته به بررسی مقدار تبخیر-تعرق با استفاده از مدل SEBS و ۱۶ تصویر از سنجنده LANDSAT در طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۱ برای منطقه‌ای از کشور استرالیا و مقایسه آن با استفاده از داده‌های زمینی پرداختند. برآوردهای صورت گرفته نشان از همبستگی $R^2=0.98$ داشت (Mahour et al., 2015). در پژوهشی به بررسی و برآورد تبخیر-تعرق توسط الگوریتم SEBS و با استفاده از تصاویر MODIS در یک تانگستان انگور در ایران پرداختند. نتایج حاصل از آن نشان داد که مقدار تبخیر-تعرق واقعی نزدیک به $5/71$ میلی‌متر بر روز بود (Singh & Senay, 2016). در پژوهشی، چهار الگوریتم بیلان انرژی SEBAL, METRIC, SEBS و SSEBOP با استفاده از تصاویر LANDSAT در میدوسترن غرب ایالات متحده مورد مقایسه قرار گرفت نتایج حاصل از آن نشان داد که الگوریتم METRIC و SSEBOP دارای $RMSE=0.93$ میلی‌متر بر روز شده و الگوریتم SEBS و SEBAL با خطای بیش‌تری همراه بوده است (Bansouleh et al., 2015). در تخمین تبخیر-تعرق ذرت به بررسی و مقایسه الگوریتم SEBS و SEBAL با استفاده از چهار تصویر LANDSAT-ETM+ در سال ۲۰۱۰ پرداختند و در نهایت نتایج را با استفاده از لایسیمتر مورد مقایسه قراردادند. نتایج حاصل از آن نشان داد که یک رابطه منطقی بین تبخیر-تعرق واقعی تخمین زده و برآورد شده رسیدند و بیش‌ترین تفاوت SEBAL و SEBS با لایسیمتر به ترتیب $9/79$ درصد و $4/56$ درصد تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده بود (Liaqat & Choi, 2015). با استفاده از دو الگوریتم METRIC و SEBS شار انرژی سطحی را برای اکوسیستم‌های شمال آسیا به دست آوردند. آن‌ها این پژوهش را در طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲ با استفاده از تصاویر LANDSAT انجام دادند در ادامه داده‌های حاصل از

واقعی به دست آمده از الگوریتم در دسترس نبود، نتایج به دست آمده از الگوریتم SEBS را می‌توان قابل اعتماد دانست.

در مطالعه‌ای (Mutiga et al., 2010) به منظور ارزیابی تبخیر-تعرق برآورد شده، با استفاده از الگوریتم SEBS با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش رطوبت خاک انجام دادند. براساس نتایج حاصل از آن‌ها تفاوت بین مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده بین مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده برای سویا و ذرت بین ۱۰ تا ۱۵ درصد به دست آمد. هم‌چنین نتایج آنالیز آن‌ها نشان داد دقت برآورد تبخیر تعرق ارتباط بالایی با نوع گیاه دارد، به طوری که پیش‌بینی‌های ذرت تخمین بهتری را در مقایسه با سویا نشان داد. در پژوهشی دیگر (Shan et al., 2007) به منظور برآورد تغییرات مکانی و زمانی تبخیر-تعرق واقعی در حوضه رودخانه هایه از الگوریتم سنجنش‌از دور SEBS و تصاویر سنجنده MODIS استفاده شد. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد مقادیر تبخیر-تعرق و شاخص گیاهی NDVI همبستگی بالایی داشته و دارای ارتباط مستقیم هستند، به طوری که در نواحی کوهستانی با پوشش گیاهی زیاد مقدار تبخیر-تعرق بالاتر بوده است (Hailegiorgis 2006). در پژوهشی الگوریتم SEBS به منظور ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی تبخیر-تعرق واقعی در بخش‌هایی از استان Overijssel کشور هلند با استفاده از تصاویر سنجنده LANDSAT-7-ETM+ مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش مقدار ضریب گیاهی ذرت براساس تبخیر-تعرق به دست آمده (روشی که زبری سطح براساس شاخص NDVI محاسبه می‌شود) با استفاده از الگوریتم SEBS و تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع (ET_0) به دست آمده با فرمول پنمن مانیتث محاسبه شد. نتایج مطابقت خوبی با مقدار ضریب همبستگی 0.98 را در ضریب گیاهی ارائه شده در منطقه مورد مطالعه نشان داد. در مدل SEBS مقیاس‌بندی یا کالیبراسیون H و λE برای

دریا برابر با ۱۲۹۰ متر در نظر گرفته می‌شود. میانگین دما در سال از حداکثر ۴۲ تا حداقل ۲۴ درجه سانتی‌گراد متغیر است. میانگین رطوبت نسبی سالانه طبق آمار ایستگاه سینوپتیک قزوین در سال‌های مورد مطالعه ۵۲/۹ درصد و تعداد کل ساعات آفتابی ۲۸۹۶ ساعت در سال است. دشت قزوین جز یکی از قطب‌های مهم در زمینه کشاورزی در کشور محسوب می‌شود به همین دلیل برای هدف این پژوهش انتخاب شده است.

مشخصات لایسیمتر و داده‌های هواشناسی

انجام مطالعات مبتنی بر سنجش‌ازدور مستلزم استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی است. در این مطالعه از داده‌های ثبت‌شده توسط ایستگاه سینوپتیک قزوین در سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۲ استفاده شده است، که این داده‌ها عبارتند از دمای هوا (برحسب سانتی‌گراد) به صورت دمای کمینه و بیشینه و دمای متوسط روزانه، سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری (برحسب متر بر ثانیه) که در محاسبات به ارتفاع دو متری تبدیل می‌شود و رطوبت نسبی (برحسب درصد). نقشه کاربری اراضی به منظور مشخص کردن مناطق زراعی برای انتخاب خودکار پیکسل سرد و گرم توسط الگوریتم PYSEBAL لازم است. لایسیمتر یکی از معتبرترین روش‌های اندازه‌گیری مستقیم تبخیر-تعرق است. داده‌های مرتبط با تبخیر-تعرق توسط لایسیمتر زهکش‌دار در منطقه واقع در ایستگاه تحقیقاتی آب‌و خاک اسماعیل‌آباد قزوین با ابعاد ۱×۲ و به عمق ۱/۵ متر مساحتی برابر با ۲ مترمربع را می‌پوشاند. لایسیمتر در وسط قطعه زمینی به ابعاد ۵۰×۵۰ متر (۲۵۰۰ مترمربع) نصب شد. به طوری که پوشش گیاهی در جهت شمال به جنوب و غرب به شرق حدود ۵۰ متر است. داده‌برداری از لایسیمتر براساس تبخیر-تعرق گیاه مرجع چمن در طی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۲ است و به صورت روزانه و هفتگی اجرا شده است (Ebrahimi pak, 2000).

برداشت زمینی مورد مقایسه قرار گرفت. خروجی حاصل از آن نشان داد که الگوریتم SEBS برآورد بهتری را به همراه داشته است. در پژوهشی به بررسی میزان تبخیر-تعرق با استفاده از الگوریتم SEBAL و SEBS در کشت و صنعت نیشکر امریکبیر، واقع در استان خوزستان پرداختند. در این پژوهش میزان تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از روش Priestly-Taylor محاسبه شد خروجی مدل‌ها نشان از مقدار تفاضل مطلق قابل قبولی در هر دو الگوریتم بود (Jalili et al., 2020). هدف از پژوهش حاضر بررسی مقادیر تبخیر-تعرق واقعی و ضریب گیاهی چمن کشت‌شده در لایسیمتر و مقادیر به دست آمده از دو الگوریتم SEBS و PYSEBAL در دشت قزوین است. در ادامه با توجه به اهمیت برآورد بهتر مقادیر تبخیر-تعرق به مقایسه مقادیر حاصل از سه سنجنده مورد بررسی نیز پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه و داده‌های پژوهش

استان قزوین در شمال غربی کشور قرار گرفته و کشاورزی نقش مهمی در اقتصاد استان دارد. منطقه مورد مطالعه دشت قزوین با مساحت ۵۰۶۲۱۸ هکتار محدوده مرکزی و شرق استان را تشکیل می‌دهد و از نظر محصولات کشاورزی در بین دشت‌های ایران دارای اهمیت است. این دشت در فلات مرکزی کشور و دارای آب‌وهوای نیمه‌خشک، تابستان‌های گرم و زمستان‌های نسبتاً سرد است. در این دشت ایستگاه هواشناسی سینوپتیک قزوین با آمار بلندمدت وجود دارد. با توجه به آمار بلندمدت ایستگاه سینوپتیک قزوین، در این پژوهش از داده‌های این ایستگاه استفاده شد. این ایستگاه در طول جغرافیایی ۵۰/۰۳ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶/۱۵ درجه شمالی قرار دارد. مطابق با نقشه DEM (STRM) پایین‌ترین و بالاترین نقاط ارتفاعی استان به ترتیب برابر با ۲۴۵ و ۴۱۱۹ متر می‌باشد که میانگین ارتفاع از سطح

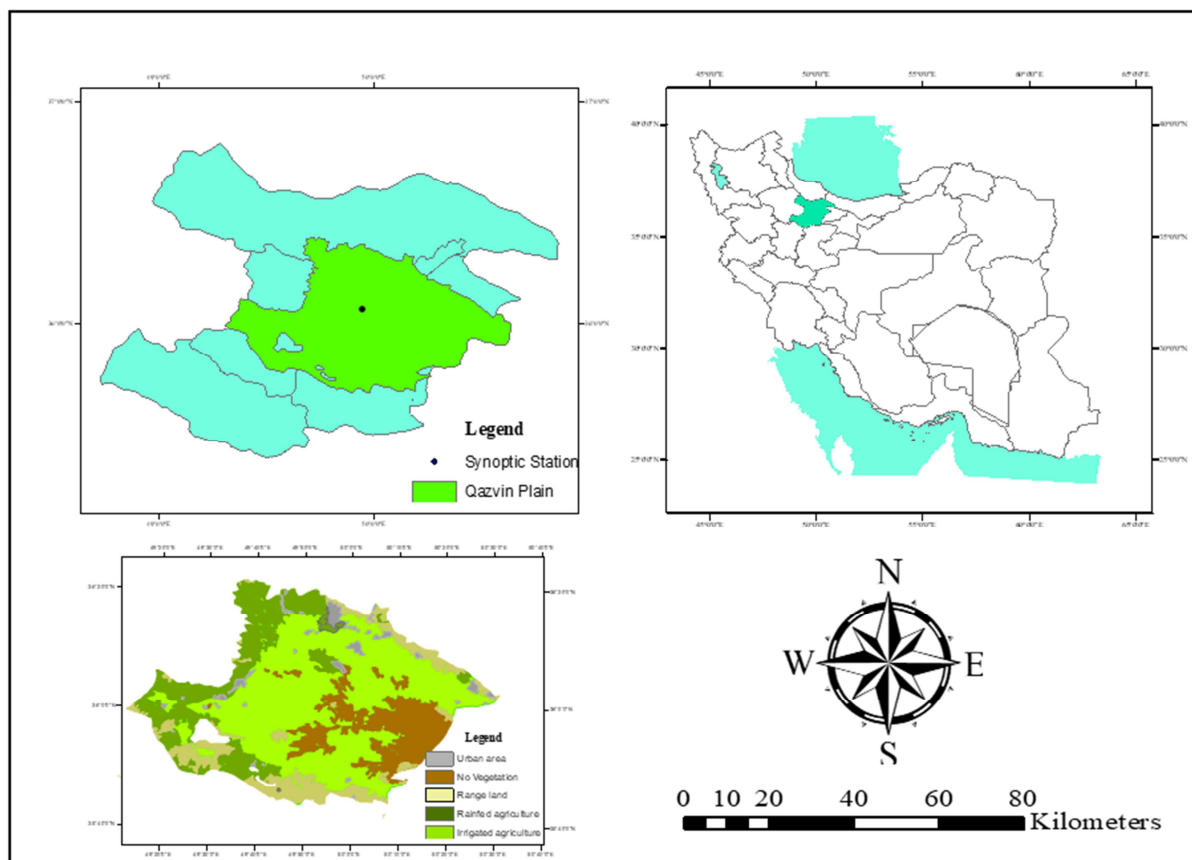


Figure 1. Geographical location of Qazvin plain and land use map of the studied area

دسترس هستند داده‌های سطح اول، داده‌های خام ماهواره‌ای هستند و داده‌های سطح دوم این محصولات هم داده‌های استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای مانند LST، NDVI و... هستند. در این پژوهش از محصول دمای سطح زمین (LST) با کد MOD11A1، شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، با کد (MOD13Q1)، هم‌چنین از محصول MOD09GA به منظور استخراج مناطق ابری و دارای گردوغبار استفاده شد که تفکیک مکانی و زمانی تمامی سنجنده‌ها در جدول (۱) اشاره شده است. برای شش‌ماه نخست سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ به‌طور معمول یک تا دو تصویر با درصد ابر کم انتخاب شده است، که تاریخ‌های مورد بررسی از سنجنده‌های مورد استفاده در شکل (۲) نمایش داده شده‌اند.

در این مطالعه از تصاویر سه سنجنده MODIS، Landsat-5-TM و Landsat-7-ETM+ استفاده شد که جزئیات آن در جدول (۱) نشان داده شده است.

سنجنده MODIS، سنجنده‌ای است که بر روی ماهواره Terra قرار داده شده است. این سنجنده در ارتفاع ۷۰۵ کیلومتری از سطح زمین و با عرض پوشش ۲۳۳۰ کیلومتر بازتاب‌های دریافت‌شده از پدیده‌های مختلف سطح زمین را در ۳۶ باند طیفی (از ۰/۴ تا ۱۴/۴ میکرومتر) متشکل از ۱۱ باند در طیف مرئی، پنج باند در طیف مادون‌قرمز نزدیک، ۱۴ باند در طیف مادون‌قرمز کوتاه و میانی و شش باند در طیف مادون‌قرمز بلند تهیه می‌کند. تصاویر سنجنده MODIS به‌عنوان محصولات MODIS در دو سطح مختلف در

Table 1. Data of input sensors along with the specifications of each of them in order to run the algorithm

Temporal resolution	Spatial resolution (m)	Sensors	Images used
-	30	SRTM	(DEM)
Daily	500	MODIS	(Albedo)
Daily	1000	MODIS	Land Surface Temperature (LST)
16 days	250	MODIS	Vegetation index (NDVI)
15 days	30	LANDSAT-TM	Bands 1 to 5 and 7
15 days	30	LANDSAT-ETM+	Bands 1 to 7

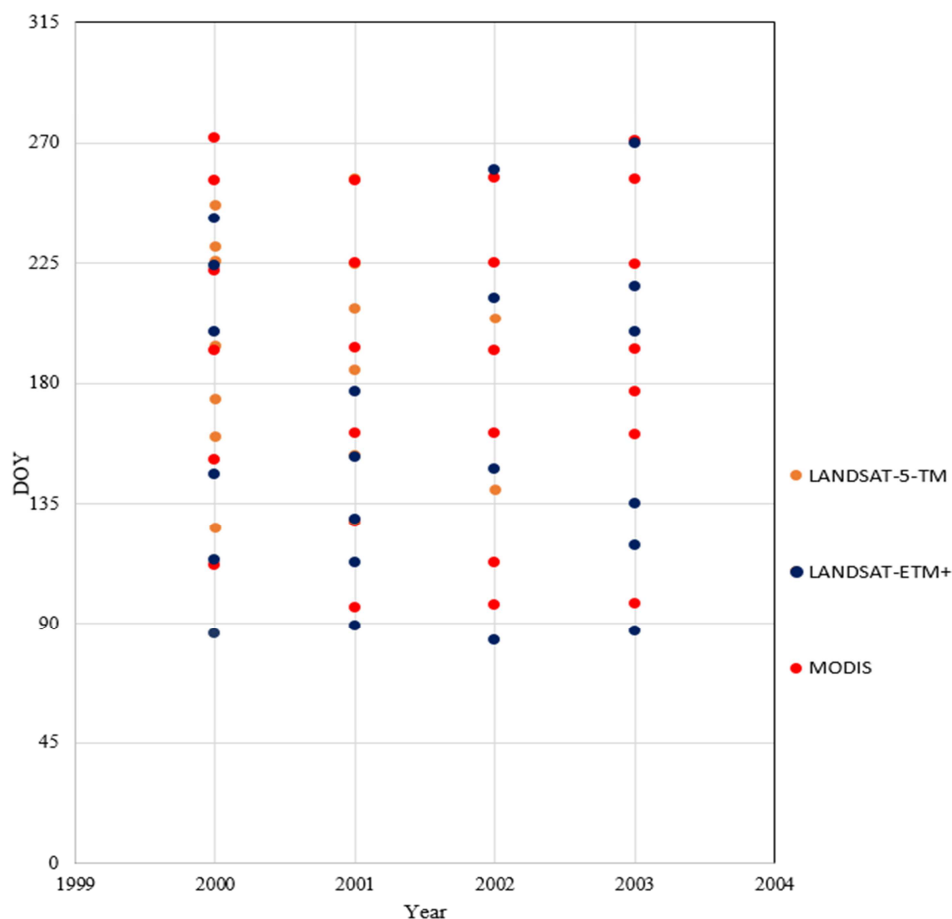


Figure 2. List of images without clouds and snow examined in each sensor

H و (W/m^2) شار گرمای محسوس (W/m^2) می‌باشد. انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم، شامل تعیین یک معیار از پیش تعیین شده است. معیارهای از پیش تعیین شده شامل دمای سطح (T_s) ، شاخص پوشش گیاهی $(NDVI)$ ، طول زبری برای انتقال مومنتوم (Z_{om}) و آلبدو سطح (α) است. مقدار R_n با کسر تمام جریان‌های تابشی خروجی از همه شارهای تابشی ورودی به صورت زیر محاسبه می‌شود.

الگوریتم PYSEBAL

اساس این الگوریتم استفاده از معادله بیلان انرژی و محاسبه مقدار شار گرمای نهان تبخیر به عنوان باقی مانده این معادله برای هر پیکسل می‌باشد.

$$\lambda ET = R_n - G - \quad (\text{رابطه ۱})$$

H در این معادله λET شار گرمای نهان تبخیر (W/m^2) ، R_n میزان تابش خالص خورشیدی (W/m^2) شار گرمای خاک

الگوریتم SEBS

الگوریتم SEBS تبخیر- تعرق واقعی را با استفاده از شار گرمای آشفته در مقیاس منطقه‌ای تخمین می‌زند و الگوریتمی قدرتمند برای تخمین تبخیر- تعرق واقعی در مقیاس محلی، حوضه‌ای با استفاده از داده‌های هواشناسی و داده‌های سنجش‌ازدور است (Su, 2002). الگوریتم SEBS به سه مجموعه داده ورودی نیاز دارد. مجموعه اول شامل پارامترهای پوشش گیاهی سنجش‌ازدور است؛ مانند آلیبدو، دمای سطح و غیره. مجموعه دوم شامل داده‌های هواشناسی مانند دمای هوا، سرعت باد، فشار بخار است. مجموعه سوم شامل پارامترهای سنجش‌ازدور، مانند تابش طول‌موج بلند و طول‌موج کوتاه ورودی است. در محاسبه مقدار شار گرمای خاک در الگوریتم SEBS از رابطه (۸) استفاده می‌شود (Su, 2002).

$$G_{SEBS} = \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$R_n \times [\Gamma_c + (1 - f_c) \times (\Gamma_s - \Gamma_c)]$$

که برای تاج‌پوشش گیاهی کامل $\Gamma_c = 0.05$ توسط

مونیتث ارائه شده است و برای خاک لخت (Daughtry et al., 1989) مقدار $\Gamma_c = 0.315$ را پیشنهاد کرد. برای

محاسبه شار گرمای محسوس در الگوریتم SEBS از تئوری مشابهت استفاده شده است. در این تئوری از چند رابطه در یک فرایند تکراری برای برآورد شار گرما محسوس استفاده می‌شود. به طوری که از میانگین سرعت باد و پروفیل دمایی در الگوریتم SEBS استفاده شده است.

$$u = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z-d_0}{z_{om}} \right) - \psi_m \left(\frac{z-d_0}{L} \right) + \psi_m \left(\frac{z_0}{L} \right) \right] \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$\theta_0 - \theta_a = \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$\frac{H}{K \times u_* \times \rho \times C_p} \left[\ln \left(\frac{z-d_0}{z_{oh}} \right) - \psi_h \left(\frac{z-d_0}{L} \right) + \psi_h \left(\frac{z_{oh}}{L} \right) \right]$$

که در آن Z ارتفاع از سطح زمین (برحسب متر)، u^*

سرعت اصطکاکی، θ_0 دمای پتانسیل در سطح زمین

(برحسب کلونین)، θ_a دمای پتانسیل هوا (برحسب

$$R_n = (1 - \alpha) R_{s\downarrow} + \left(\frac{W}{m^2} \right) \varepsilon_0 R_{L\downarrow} - \varepsilon_0 \sigma T_s^4 \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در این معادله R_s طول‌موج کوتاه ورودی (W/m^2)، $R_{L\downarrow}$ طول‌موج بلند ورودی (W/m^2)، ε_0 انتشار سطحی، σ ثابت استفان بولتزمن ($5.67 \times 10^{-8} W/m^2/K^4$) و T_s دمای سطح زمین (برحسب کلونین) است. G به عنوان کسری از R_n محاسبه می‌شود و PYSEBAL از معادله تجربی G توسعه داده شده توسط باستیانسن استفاده می‌کند (Bastiaanssen, 1995).

$$G = \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$T_{s.datum} (0.0038 + 0.007\alpha) (1 - 0.98NDVI^4) \times R_n$$

$T_{s.datum}$ دمای تصحیح شده از سطح زمین است و T_s براساس Dem منطقه موردنظر و با در نظر گرفتن شیب به دست می‌آید. یک کالیبراسیون داخلی H در PYSEBAL اعمال می‌شود، بنابراین نیازی به تصحیح اتمسفری T_s نخواهد بود. H در مدل PYSEBAL با استفاده از مقاومت آئرو دینامیکی مطابق معادله (۴) محاسبه می‌شود.

$$H = \frac{\rho \times C_p \times dT}{r_{ah}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن ρ چگالی هوا (Kg/m^3)، C_p گرمای ویژه در فشار معین [$1004 J kg^{-1} K^{-1}$]، r_{ah} مقاومت آئرو دینامیکی در برابر انتقال حرارت بین z_1 و z_2 (m/s) است. پارامتر dT اختلاف دما بین دو ارتفاع نزدیک به سطح است ($z_1 = 0.1$ m و $z_2 = 2$ m) بالای لایه کنوپی (K)، که به عنوان یک تابع خطی از دمای سطحی اصلاح شده $T_{s.datum}$ ، تخمین زده می‌شود (معادله ۵). ضرایب (a) و (b) در معادله (۵) برای پیکسل‌های سرد و گرم به صورت تکراری تعیین می‌شود؛ بنابراین برای هر تصویر ماهواره‌ای یا منطقه خاص مقداری متفاوت است.

$$dT = a + b \times T_{s.datum} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$a = \frac{dT_{hot} - dt_{cold}}{T_{s.datum.hot} - dT_{s.datum.cold}} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$b = \frac{dT_{hot} - a}{T_{s.datum.hot}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

پارامترهای هواشناسی به دست آمده از ایستگاه سینوپتیک، نزدیک به ایستگاه لایسیمتری منطقه تهیه شد. اندازه‌گیری‌ها در شش ماه نخست سال به شکل روزانه انجام گرفت.

فرایند تبخیر-تعرق براساس یک فرایند طولانی و پیچیده با استفاده از الگوریتم‌های مذکور محاسبه شد. مقدار تبخیر-تعرق واقعی در محدوده مورد مطالعه برای هر دو الگوریتم SEBS و PYSEBAL در گرم‌ترین ماه از سال ارائه شده است. نقشه‌های تهیه شده مقدار تغییرات زمانی و مکانی تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده داخل منطقه را نشان می‌دهد. از جمله تغییرات مکانی به علت تنوع در کاربری اراضی، نوع گیاه در اراضی زراعی و مرتعی و تاریخ کشت گیاه است. در این پژوهش از ۱۵ تصویر TM، ۲۲ تصویر ETM+ و ۲۴ تصویر MODIS بدون ابر و برف در طی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۲ استفاده شد که در مجموع از هر دو الگوریتم ۱۲۲ خروجی حاصل شد. نتایج آنالیز آماری مدل‌ها با استفاده از سنجنده‌های مختلف در شکل (۳) نشان داده شده است. از آنجاکه هدف از مقایسه این مدل‌های مبتنی بر سنجنش‌ازدور، تخمین تبخیر-تعرق واقعی به صورت روزانه برای برنامه‌ریزی آبیاری است، به همین منظور بین مدل‌های برآورد شده و اندازه‌گیری شده بررسی شاخص‌های آماری مورد توجه قرار گرفت. طبق نتایج آماری از بین دو الگوریتم مورد بررسی، الگوریتم PYSEBAL با کم‌ترین مقدار جذر خطای میانگین مربعات در هر سه سنجنده MODIS، ETM+ و TM (۰/۴۵، ۰/۴۶ و ۲/۰۲ میلی‌متر بر روز) به عنوان الگوریتم برتر در منطقه معرفی شده است. طبق بررسی‌های انجام شده نتایج تبخیر-تعرق سنجنده MODIS و ETM+ در هر دو الگوریتم همبستگی بالایی با مقادیر لایسیمتر دارد. در حالی که نتیجه به دست آمده در الگوریتم PYSEBAL از سنجنده TM، مقدار خطای استاندارد بالایی را توصیف می‌کند. البته می‌توان به این موضوع اشاره کرد که علت این که سنجنده TM نسبت به سنجنده ETM+ برآورد

کلوین)، Ψ_h تابع اصلاح پایداری به منظور انتقال گرمای نهان، Ψ_m تابع اصلاح پایداری به منظور انتقال مومنتوم، Z_{oh} ارتفاع زیری سطح، به منظور انتقال گرما (برحسب متر)، d_o ارتفاع جابه‌جایی است.

شاخص‌های آماری

با هدف مقایسه نتایج تبخیر-تعرق حاصل از الگوریتم PYSEBAL و SEBS با مقادیر مشاهداتی از لایسیمتر در منطقه مورد مطالعه از آماره‌هایی متداول هم‌چون میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین جذر مربعات خطا (RMSE)، خطای استاندارد (SE) خطای اریب میانگین (MBE) و ضریب همبستگی (r) استفاده شده است. مقادیر ET_L ، ET_{mod} ، $\overline{ET_L}$ و $\overline{ET_{mod}}$ به ترتیب تبخیر-تعرق تخمین زده شده با استفاده از الگوریتم‌های مورد بررسی، تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده از لایسیمتر و مقدار میانگین هر یک از مقادیر تخمین زده شده و اندازه‌گیری شده می‌باشد.

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{mod} - ET_L)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |ET_{mod} - ET_L|}{n} \quad \text{(رابطه ۱۲)}$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{mod} - ET_L)}{n} \quad \text{(رابطه ۱۳)}$$

$$SE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{mod} - ET_L)^2}{n-1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{(رابطه ۱۴)}$$

$$r = \frac{[\sum (ET_L - \overline{ET_L})(ET_{mod} - \overline{ET_{mod}})]^2}{\sqrt{\sum (ET_L - \overline{ET_L})^2 \sum (ET_{mod} - \overline{ET_{mod}})^2}} \quad \text{(رابطه ۱۵)}$$

نتایج و بحث

با توجه به این که هدف اصلی این مطالعه برآورد تبخیر-تعرق روزانه با استفاده از الگوریتم SEBS و YSEBAL در دشت قزوین است، در ابتدا یکسری از چرخه‌های محاسباتی وابسته به پارامترهای سطح زمین توسط تصاویر سه سنجنده MODIS، LANDSAT-TM و LANDSAT-ETM+ که منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهد استخراج شد.

های مشابه انجام شده می‌توان به پژوهشی که توسط Owlia & Sima (2021) در دشت ارومیه انجام شده بود اشاره کرد که نتایج حاکی از دقت بالا و قابل قبول بودن نتایج به دست آمده از سنجنده MODIS داشته است. در ترکیه (Sawadogo et al., 2020) به دقت بالای نتایج به دست آمده الگوریتم PYSEBAL و مقادیر لایسیمتر اشاره کردند که به نتایج به دست آمده از این پژوهش نزدیک بوده است.

همان‌طور که در شکل (۴) قابل مشاهده است هرچقدر به ماه‌های گرم سال نزدیک شده، مقدار تبخیر-تعرق بیش‌تر می‌شود که از جمله دلایل آن افزایش درصد پوشش گیاهی محصولات کشت شده و افزایش دمای هوا می‌باشد. در ضمن هرچقدر به فصول سرد سال نزدیک‌تر شده، تراکم پوشش گیاهی کم‌تر و در نتیجه میزان تبخیر-تعرق کاهش پیدا کرده است. با توجه به شکل (۴) می‌توان این‌گونه استنباط کرد که استفاده از الگوریتم PYSEBAL در ماه‌های گرم سال نتایج بسیار دقیق‌تری را از خود نشان می‌دهد، به طوری که طبق بررسی‌های انجام شده در ماه‌های تیر و مرداد با کم‌ترین اختلاف نسبت به داده‌های لایسیمتری بوده است که دلیل این موضوع می‌تواند وجود پوشش گیاهی متراکم‌تر در هر کدام از تاریخ‌های مورد بررسی باشد، در حالی که مدل SEBS به این صورت نبوده و تقریباً از یک‌روند ثابتی در برآورد تبخیر-تعرق برخوردار است.

در شکل (۵) نقشه تبخیر-تعرق روزانه در ماه مردادماه برای دو الگوریتم SEBS و PYSEBAL قابل ملاحظه است علت انتخاب تصاویر این ماه تراکم بیش‌تر پوشش گیاهی و مقایسه بهتر جزئیات در هر یک از الگوریتم‌هاست. همان‌طور که در شکل (۵) قابل مشاهده است تصاویر LANDSAT به دلیل قدرت تفکیک مکانی بالاتر توانسته است مرز بین اراضی کشاورزی و اراضی بایر را بهتر از تصاویر سنجنده MODIS نمایش می‌دهد. به طوری که در بررسی صورت گرفته نشان داد متوسط

ضعیف‌تری را داشته، بهبود و توان تفکیک زمینی بالاتر باند نرمال در سنجنده ETM+ است. از این رو، محتوای اطلاعاتی و نقش باند حرارتی در تکمیل اطلاعات باندهای انعکاسی بالاتر و بیش‌تر خواهد بود. نتایج شاخص‌های آماری در شکل (۳) نشان می‌دهد سنجنده TM در مدل‌های PYSEBAL و SEBS با مقدار RMSE به ترتیب (۲/۰۲ و ۱/۳۴ میلی‌متر بر روز) و مقدار ضریب تعیین (۰/۸۱ و ۰/۷۲) ضعیف‌ترین نتایج را از خود نشان داد که علت این امر را می‌توان تفاوت در زمان تصویربرداری، ارتفاع، آزمایش متفاوت خورشید و همچنین تفاوت در ضرایب کالیبراسیون دانست. سنجنده ETM+ برآورد بسیار بهتری را نسبت به سنجنده TM داشته است، به طوری که مقدار شاخص خطای استاندارد در سنجنده ETM+ در هر دو الگوریتم بررسی شده مقداری برابر با به ترتیب ۰/۱۷ و ۰/۳۰ را دارا بوده است. در حالی که در سنجنده TM در الگوریتم PYSEBAL مقداری برابر با ۲/۲۶ میلی‌متر بر روز برخوردار است. به طور کلی شاخص خطای استاندارد در دو مدل از سنجنده‌های MODIS و ETM+ مقداری کم‌تر از یک برآورد شده است که نشان دهنده نزدیک بودن و پراکندگی کم داده‌های برآورد شده نسبت به اندازه‌گیری‌های صورت گرفته از لایسیمتر است. همان‌طور که در شکل (۳) نیز نمایان است سنجنده MODIS به علت اندازه پیکسل‌ها تعداد زیادی از عوارض در یک پیکسل قرار می‌گیرند و این عدم تمایز بین عوارض بر میزان تبخیر-تعرق ثبت شده اثر خواهد گذاشت، اما باین وجود بهترین برآورد را نسبت به دو سنجنده دیگر در منطقه داشته است، به طوری که مقدار ضریب تعیین در این سنجنده در هر دو مدل PYSEBAL و SEBS به ترتیب مقداری برابر با (۰/۹۷ و ۰/۷۳) همراه بوده است. مقادیر منفی پارامتر MBE در بررسی‌های صورت گرفته از خروجی‌های به دست آمده نشان از کم‌برآورد بودن الگوریتم محاسبه شده دارد. از جمله پژوهش-

LANDSAT-ETM+ معیار این ارزیابی قرار گرفت، تفکیک مکانی بالای آن نسبت به سنجنده MODIS و بهبود و توان تفکیک زمینی بالاتر باند نرمال در سنجنده ETM+ نسبت به سنجنده TM است. زیرا استفاده از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالاتر، می‌تواند در تفکیک کاربری اراضی مؤثرتر واقع گردد و براساس پیکسل‌های شاخص اراضی مختلف را تشخیص دهد.

اختلاف میزان تبخیر-تعرق در اراضی آبی، دیم و اراضی بایر در تصاویر سنجنده MODIS نسبت به LANDSAT-ETM+ به ترتیب در الگوریتم PYSEBAL و SEBS برابر است با (۰/۲۴، ۰/۳۱ و ۰/۱۳) و (۰/۴۲، ۰/۳۶) و (۰/۱۹) و سنجنده LANDSAT-TM نسبت به LANDSAT-ETM+ برابر با (۰/۲۶، ۰/۳۲ و ۰/۱۸) و (۰/۳۱، ۰/۳۸ و ۰/۱۷) است. علت این‌که تصاویر

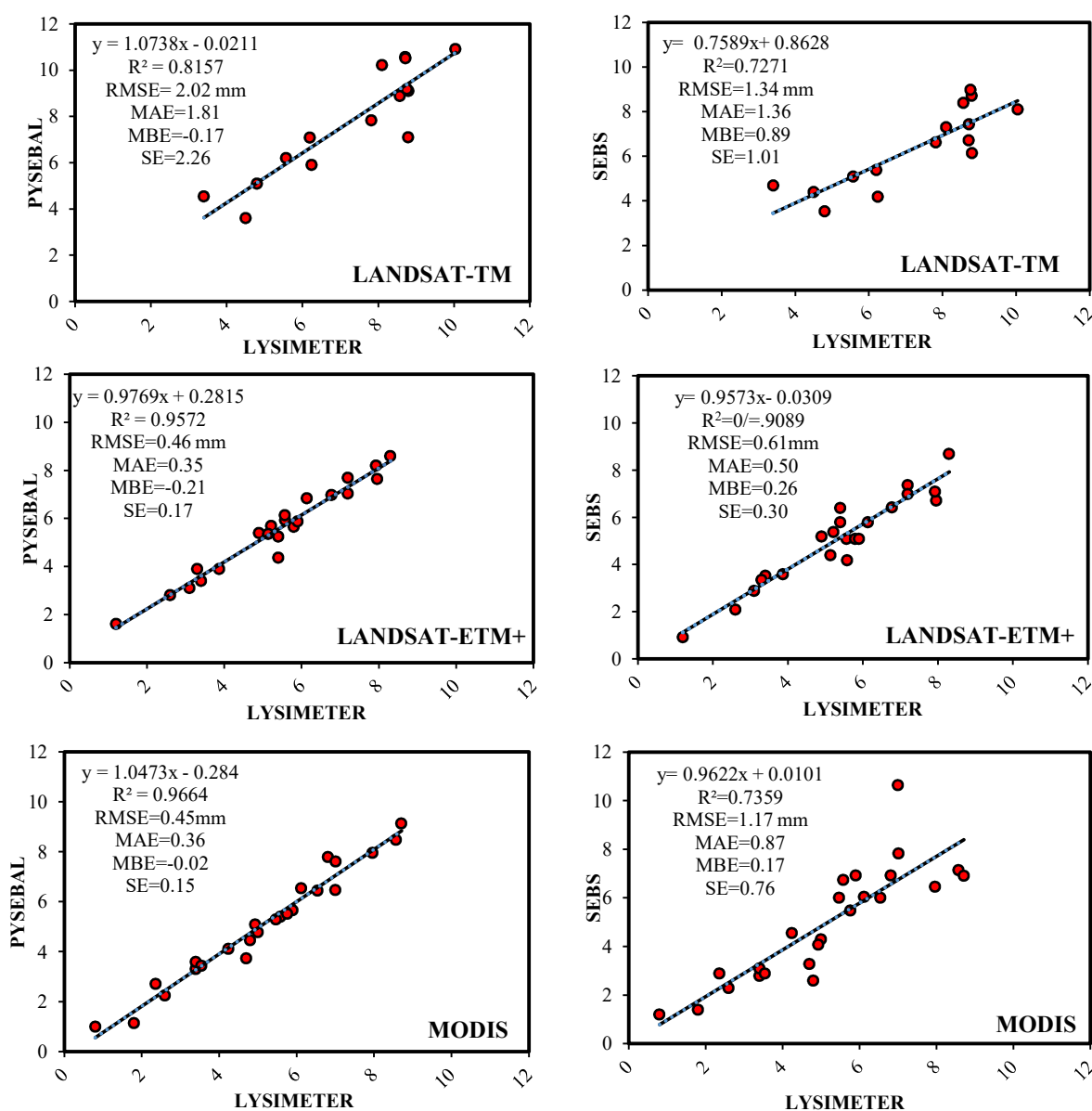


Figure 3. Comparison of Evapotranspiration Results Estimated Using SEBS and PYSEBAL Algorithms by Three Sensors

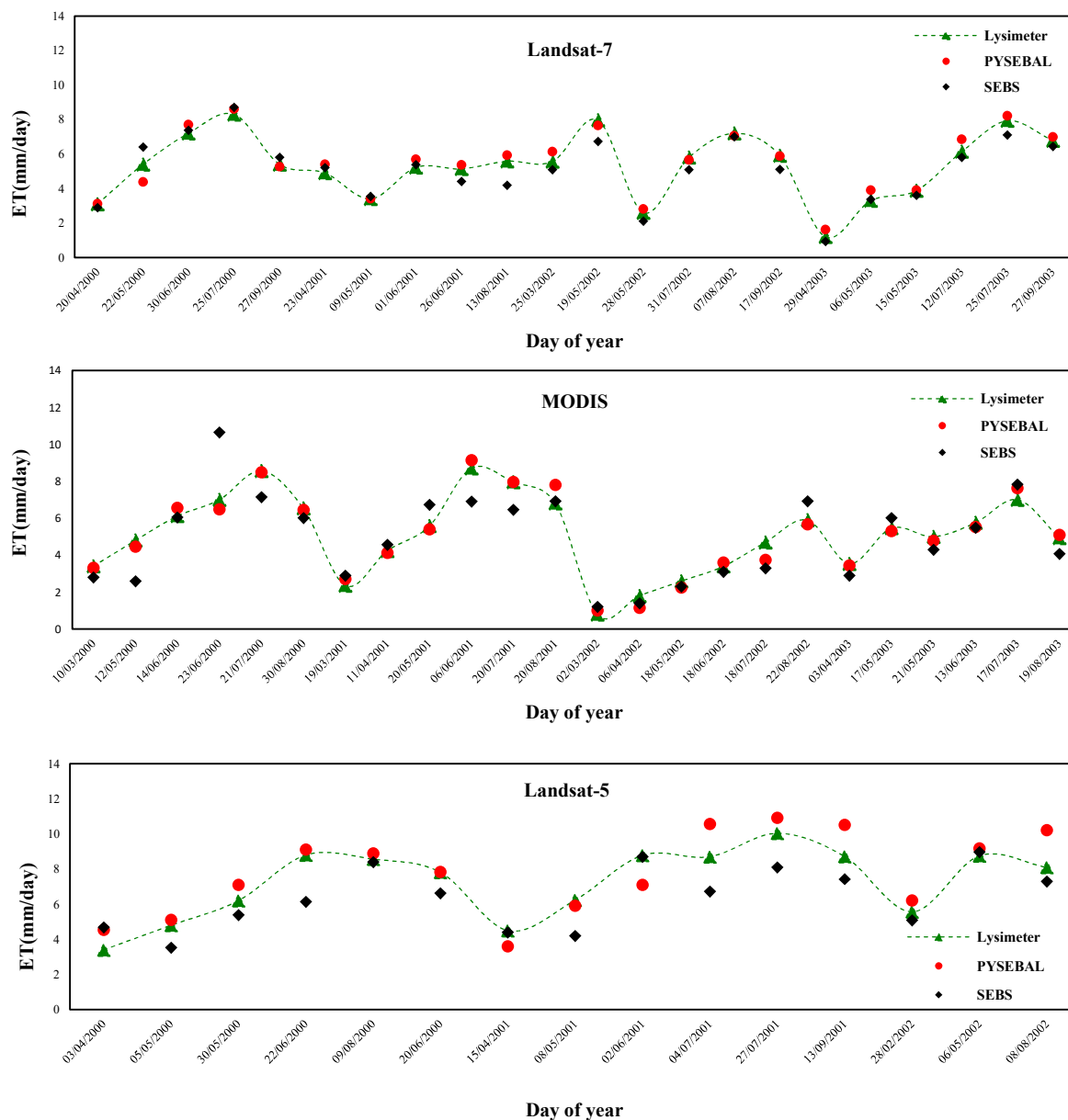


Figure 4. Estimated evapotranspiration time series using two algorithms SEBS and PYSEBAL by three sensors in Qazvin plain

کاربری مختلف عملکرد بهتر و دقت بالاتری را به همراه داشته است. مقایسه مقادیر به دست آمده با نقشه کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه نشان از این داشت که کمترین اختلاف در اراضی بایر و بیشترین اختلاف در اراضی دیم اتفاق افتاده که یکی از دلایل آن می تواند ناشی از نبود پوشش گیاهی با تراکم بالا در اراضی دیم باشد.

در پژوهشی Ramírez-Cuesta *et al.* (2019) تأثیر قدرت تفکیک مکانی در برآورد تبخیر-تعرق را منجر به تغییر در مقدار ضریب زبری، مقدار آلیدو و نوع کاربری اراضی دانست. در زمینه تأثیر قدرت تفکیک مکانی در برآورد مقدار تبخیر-تعرق بررسی ها نشان از این دارد که الگوریتم PYSEBAL در برآورد تبخیر تعرق در اراضی با

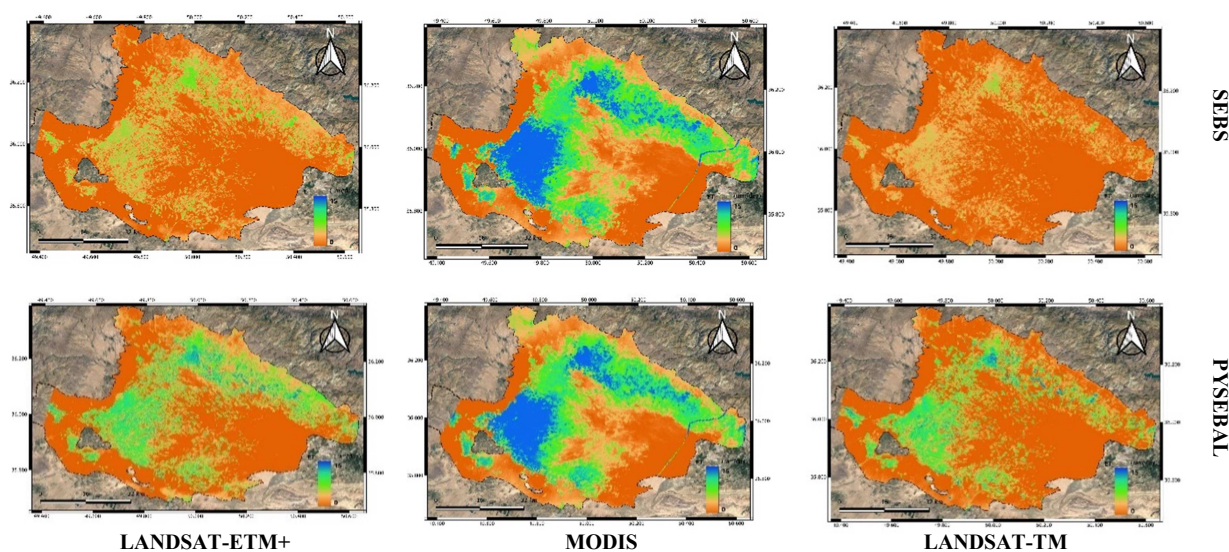


Figure 5. Actual evapotranspiration map estimated by three sensors in PYSEBAL and SEBS algorithms in August 2001.

(LAI) و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) است (Jafari Sayadi *et al.*, 2018). با توجه به این که شاخص پوشش گیاهی از طریق اندازه‌گیری‌های طیفی قابل محاسبه است و ارتباط زیادی با مقدار ضریب گیاهی دارد، بنابراین ارتباط این شاخص‌ها با یکدیگر در طول دوره رشد واقعی گیاه می‌تواند در مدیریت شبکه‌های آبیاری مؤثر واقع شود. خروجی نتایج به دست آمده از دو الگوریتم SEBS و PYSEBAL در سنجنده MODIS و مقایسه آن با مقادیر لایسیمیتری نشان داد که الگوریتم PYSEBAL و SEBS هر دو در برآورد مقدار ضریب گیاهی عملکرد مناسبی را داشته‌اند، به طوری که مطابق با جدول (۲) نتایج شاخص‌های آماری نشان داد الگوریتم PYSEBAL با مقدار $0/16$ RMSE= و مقدار همبستگی $0/68$ عملکرد بهتری را نسبت به الگوریتم SEBS داشته است و بررسی‌های انجام شده توسط شاخص توافق^۴ نیز نشان‌دهنده صحت این موضوع است. هم‌چنین در بررسی خطای استاندارد نشان داد که در هر دو الگوریتم ضریب گیاهی از پراکندگی کمی برخوردار بوده و به مقادیر مثبت شده توسط لایسیمتر نزدیک بوده است.

با توجه به این که بیشتر مؤلفه‌های موجود به منظور محاسبه مقدار ضریب گیاهی غیرمکانی بوده و غالباً با استفاده از داده‌های نقطه‌ای محاسبه و برآورد می‌شود استفاده از مقادیر توصیه شده KC می‌تواند راهنمای مناسب و سریعی در برنامه‌ریزی آبیاری محسوب شود، اما بایستی به این موضوع توجه داشت که ممکن است به لحاظ تغییرات شدید مکانی و زمانی این پارامتر مقادیر قابل توجهی خطا در محاسبه میزان آب مورد نیاز گیاه ایجاد شود. در این پژوهش به مقایسه ضریب گیاهی چمن و ضریب گیاهی به دست آمده از الگوریتم PYSEBAL و SEBS پرداخته شد. با توجه به این که ضریب گیاهی ارائه‌دهنده مجموعه‌ای از چند ویژگی هم‌چون ارتفاع گیاه، آلودگی سطح خاک و گیاه، مقاومت تاج گیاهی و تبخیر از خاک است، که گیاه مورد نظر را از چمن مرجع تفکیک می‌کند به همین منظور با توجه به این که در بازه زمانی مورد مطالعه گیاه چمن کشت شده است. لذا به بررسی مقادیر ضریب گیاهی چمن کشت شده در لایسیمتر و مقادیر به دست آمده از دو الگوریتم SEBS و PYSEBAL پرداخته شد. ضریب گیاهی تابعی از شاخص سطح برگ

مقادیر ضریب گیاهی در قسمت‌های مختلف مدیریت آبیاری اراضی استفاده می‌شود. به همین دلیل تغییرات مکانی و زمانی آن در محاسبات نیاز آبی نیز لحاظ خواهد شد به همین منظور ضریب گیاهی می‌تواند در برآورد مقدار واقعی آب مصرفی گیاه در سطح یک شبکه آبیاری بسیار مؤثر واقع شود. اگر اراضی کشاورزی در سطح وسیع از نظر منابع آب، بیماری، آفت و شوری آب آبیاری یا خاک زراعی به‌منظور دستیابی به حداکثر پتانسیل رشد و نمو محدودیت داشته باشند اثرات این محدودیت‌ها در شاخص سطح برگ، پوشش گیاهی و در نتیجه آن در برآورد ضریب گیاهی لحاظ خواهد شد. به همین دلیل در صورت عدم استفاده از سنجش‌ازدور شرایط واقعی مزرعه از نظر رشد و نمو در حد مطلوب فرض شده و مقدار ضریب گیاهی از طریق منابع موجود که برای شرایط ایده‌آل در نظر گرفته ده‌اند، استفاده خواهد شد که در صورت وجود اختلاف زیاد با مقادیر واقعی خطای قابل توجهی در محاسبه مقدار آب مصرفی خواهد شد.

Table 2. Comparison of estimated plant coefficient results using SEBS and PYSEBAL algorithms by MODIS sensor

Algorithm	RMSE	MAE	MBE	R	I _a	SE
PYSEBAL	0.16	0.10	0.03	0.68	0.60	0.03
SEBS	0.19	0.15	0.11	0.62	0.27	0.03

همان‌طور که در شکل (۶) نیز قابل‌ملاحظه است روند تغییرات ضریب تشت در ماه‌های گرم سال با توجه به این‌که پوشش گیاهی از تراکم بیش‌تری برخوردار است، افزایش یافته است. به‌طوری‌که در ماه‌های تیر و مردادماه که گیاه در بالاترین میزان تراکم پوشش گیاهی قرار گرفته است این ضریب نیز روند صعودی را به‌دنبال داشته است. یکی دیگر از عوامل قابل‌توجه در مقادیر برآوردشده ضریب Kc توسط الگوریتم SEBS می‌باشد. به‌طوری‌که بررسی‌های صورت‌گرفته نشان داد که ضریب گیاهی برآوردشده توسط این الگوریتم در اکثر ماه‌های گرم سال نسبت به ضریب برآوردشده توسط الگوریتم PYSEBAL با بیش برآورد همراه بوده است.

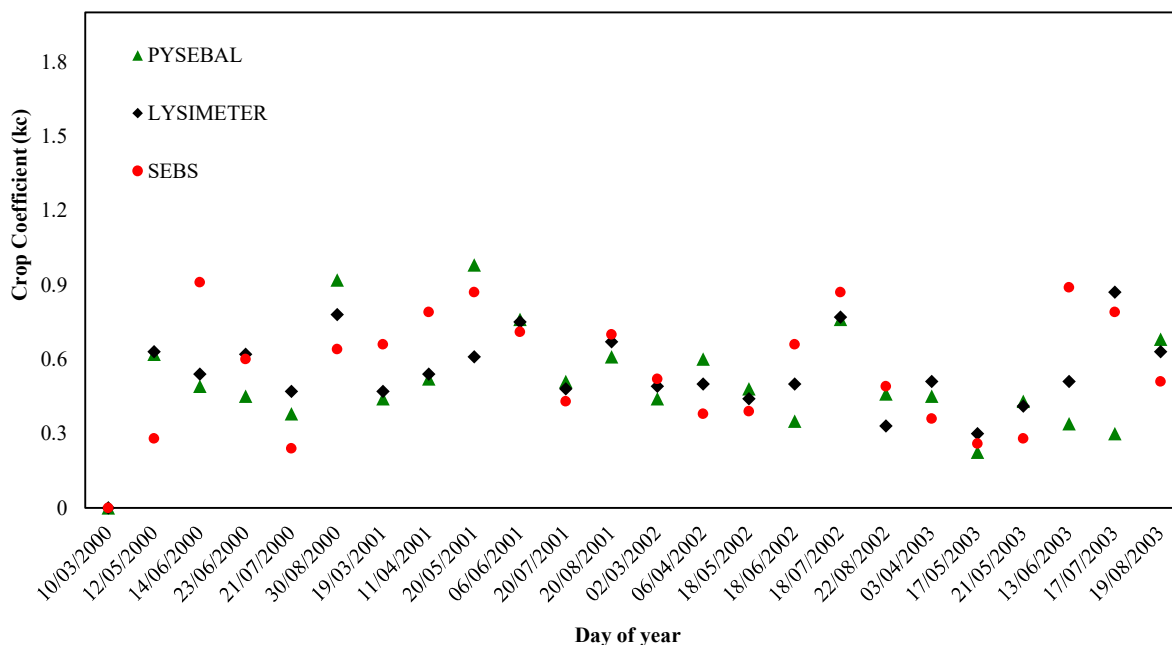


Figure 6. Investigation of values obtained from the plant coefficient by SEBS and PYSEBAL algorithms and its comparison with lysimetric data

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر در دشت قزوین صورت گرفت و از مهم‌ترین اهداف آن می‌توان به برآورد تبخیر-تعرق با استفاده از تصاویر دو الگوریتم SEBS و PYSEBAL نام برد. در مناطق زراعی با تأکید بر نحوه عملکرد دو الگوریتم و کارایی و مقایسه آن با استفاده از داده‌های لایسیمیتری صورت گرفت تا بتوان راهی در پیشبرد مدیریت منابع آب گشود. به‌طور کلی، نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که مناطق پوشش گیاهی مترکم‌تر، مقادیر تبخیر-تعرق بیشتری داشته است هم‌چنین در مقایسه دو الگوریتم به‌طور کلی الگوریتم PYSEBAL توانسته است عملکرد بهتری را نسبت به الگوریتم SEBS ایجاد نماید. زیرا در بررسی‌های صورت‌گرفته توسط سه سنجنده، سنجنده LANDSAT-ETM+ نسبت به دو سنجنده دیگر از قدرت تفکیک مکانی بالاتر و دقیق‌تری برخوردار بوده و توانسته با توجه به نقشه کاربری اراضی به میزان قابل‌قبولی در تفکیک مکانی اراضی کشاورزی موفق عمل نماید. هم‌چنین با توجه به این‌که سنجنده MODIS از لحاظ قدرت تفکیک زمانی به‌صورت روزانه می‌باشد، توانسته است دقت خوبی در برآوردهای صورت‌گرفته داشته باشد، اما در مقابل سنجنده LANDSAT-ETM+ از تفکیک مکانی مناسبی برخوردار است. لذا پیشنهاد می‌شود در صورت برآورد تبخیر-تعرق برای محدوده وسیع، سنجنده MODIS از دقت و برآورد قابل‌قبولی برخوردار است، اما در مناطقی با مقیاس کوچک به‌منظور برآورد دقیق‌تر از تلفیق تصاویر MODIS و LANDSAT استفاده شود و یا از تصاویر با تفکیک مکانی بیش‌تر به‌منظور برآورد تبخیر-تعرق در منطقه استفاده شود.

پی‌نوشت‌ها

1. Surface Energy Balance System
2. Surface Energy Balance Algorithm for Land
3. Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration
4. Index of Agreement (Ia)

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

1. Bansouleh, B. F., Karimi, A. R., & Hesadi, H. (2015). Evaluation of SEBAL and SEBS algorithms in the estimation of maize evapotranspiration. *International Journal of Plant & Soil Science*, 350-358.
2. Bastiaanssen, Wilhelmus Gerardus Maria. (1995). Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates. *Wageningen University and Research*, 271.
3. Bastiaanssen, Wim G M. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229(1-2), 87-100.
4. Caiserman, A., Amiraslani, F., & Dumas, D. (2021). Assessment of the agricultural water budget in southern Iran using Sentinel-2 to Landsat-8 datasets. *Journal of Arid Environments*, 188, 104461.
5. Daughtry, C. S. T., Biehl, L. L., & Ranson, K. J. (1989). A new technique to measure the spectral properties of conifer needles. *Remote Sensing of Environment*, 27(1), 81-91.
6. Ebrahimi pak N.A. (2000). Determination of evapotranspiration potential of reference plant (grass) by lysimeter method and comparison with experimental methods in Qazvin. Ministry of Agricultural Jihad, Agricultural Research, Education and Promotion Organization, Qazvin Agricultural and Natural Resources Research Center. (In Persian).
7. Gowda, P. H., Chavez, J. L., Colaizzi, P. D., Evett, S. R., Howell, T. A., & Tolck, J. A. (2008). ET mapping for agricultural water management: present status and challenges. *Irrigation Science*, 26(3), 223-237.
8. Hailegiorgis, W. S. (2006). Remote Sensing analysis of summer time Evapotranspiration using SEBS algorithm. *ITC, Enschede*, 130.
9. Hessels, T., van Opstal, J., Trambauer, P., Bastiaanssen, W., Faouzi, M., Mohamed, Y., & ErRaji, A. (2017). *pySEBAL Version 3.3*. 7.
10. Jafari Sayadi, F., Gholami Sefidkouhi, M. A., & Ziyaetabar Ahmadi, M. (2018). Leaf Area Index and Crop Coefficient Estimation from Operational Land Imager (OLI) Sensor Data. *Journal of Water Research in Agriculture*, 32(3), 395-404. (In Persian)

11. Jalili, J., Radmanesh, F., Naseri, A. A., Ali, A., & Zarei, H. A. (2020). Estimation of sugar cane Evapotranspiration using SEBAL and SEBS algorithms and priestly-taylor method (Case study of amir kabir cultivation and industry). *JWSS-Isfahan University of Technology*, 24(3), 17-32.
12. Kalma, J. D., McVicar, T. R., & McCabe, M. F. (2008). Estimating land surface evaporation: A review of methods using remotely sensed surface temperature data. *Surveys in Geophysics*, 29(4), 421-469.
13. Kazamias, A. P., & Sapountzis, M. (2017). Spatial and temporal assessment of potential soil erosion over Greece. *Water*, 59, 315-321.
14. Ke, Y., Im, J., Park, S., & Gong, H. (2016). Downscaling of MODIS One kilometer evapotranspiration using Landsat-8 data and machine learning approaches. *Remote Sensing*, 8(3), 215.
15. Kunstmann, H., Oluwadare, A., Okogbue, E., Akinluyi, F., Arnault, J., Tayari, S., Hingerl, L., & Bliefernicht, J. (2018). Comparison of sebal estimated heat fluxes and evapotranspiration using field and remote sensing data in the Sudanian Savanna in West Africa. *International Journal of Agriculture and Environmental Research*, 4(2), 352-374.
16. Liaquat, U. W., & Choi, M. (2015). Surface energy fluxes in the Northeast Asia ecosystem: SEBS and METRIC models using Landsat satellite images. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214, 60-79.
17. Ma, W., Hafeez, M., Rabbani, U., Ishikawa, H., & Ma, Y. (2012). Retrieved actual ET using SEBS model from Landsat-5 TM data for irrigation area of Australia. *Atmospheric Environment*, 59, 408-414.
18. Mahour, M., Stein, A., Sharifi, A., & Tolpekin, V. (2015). Integrating super resolution mapping and SEBS modeling for evapotranspiration mapping at the field scale. *Precision Agriculture*, 16(5), 571-586.
19. McMahan, T. A., Finlayson, B. L., & Peel, M. C. (2016). Historical developments of models for estimating evaporation using standard meteorological data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(6), 788-818.
20. Mutiga, J. K., Su, Z., & Woldai, T. (2010). Using satellite remote sensing to assess evapotranspiration: case study of the upper Ewaso Ng'iro North Basin, Kenya. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12, S100-S108.
21. Nazari, Bijan. Fakhar, M. S. (2021). Planning and management of greenhouse cultivation; with focusing on water management and productivity. *Imam Khomeini international university publications*. (In Persian)
22. Nishida, K., Nemani, R. R., Running, S. W., & Glassy, J. M. (2003). An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D9).
23. Owlia, A. H., & Sima, S. (2021). Uncertainties in estimation of basin-scale actual evapotranspiration using SEBAL. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(5), 1209-1221. (In Persian)
24. Ramírez-Cuesta, J. M., Allen, R. G., Zarco-Tejada, P. J., Kilic, A., Santos, C., & Lorite, I. J. (2019). Impact of the spatial resolution on the energy balance components on an open-canopy olive orchard. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74, 88-102.
25. Sánchez, J. M., Kustas, W. P., Caselles, V., & Anderson, M. C. (2008). Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations. *Remote Sensing of Environment*, 112(3), 1130-1143.
26. Sawadogo, A., Gundogdu, K. S., Traoré, F., Kouadio, L., & Hessels, T. (2020). estimating in season actual evapotranspiration over a large-scale irrigation scheme in resurcelimited conditions. *Comptes Rendus de l'Académie Bulgare Des Sciences*, 73(10).
27. Sawadogo, A., Hessels, T. İ. M., Gündoğdu, K. S., Demir, A. O., Mustafa, Ü., & Zwart, S. J. (2020). Comparative analysis of the PYSEBAL model and lysimeter for estimating actual evapotranspiration of soyabean crop in Adana, Turkey. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 5(2), 60-65.
28. Senay, G. B., Friedrichs, M., Singh, R. K., & Velpuri, N. M. (2016). Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River Basin. *Remote Sensing of Environment*, 185, 171-185.
29. Shan, X., van de Velde, R., Wen, J., He, Y., & Su, Z. (2007). Regional evapotranspiration over the Arid Inland Heihe River Basin in Northwest China, ESA's Publications Division as Special Publication SP-655. *Proceedings of the Dragon Programme Final Results*.
30. Singh, R. K., & Senay, G. B. (2016). Comparison of four different energy balance models for estimating evapotranspiration in the Midwestern United States. *Water*, 8(1), 9.
31. Su, Z. (2002). The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*,

- 6(1), 85-100.
32. Tang, R., Li, Z.-L., & Tang, B. (2010). An application of the Ts-VI triangle method with enhanced edges determination for evapotranspiration estimation from MODIS data in arid and semi-arid regions: Implementation and validation. *Remote Sensing of Environment*, 114(3), 540-551.
33. Wu, C., Cheng, C., Lo, H., & Chen, Y. (2010). Study on estimating the evapotranspiration cover coefficient for stream flow simulation through remote sensing techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(4), 225-232.