

## مقایسه دو روش سنجش از دوری تک منبعی و دو منبعی برآورد تبخیر-تعرق

### واقعی روزانه ذرت در مقیاس مزرعه با استفاده از تصاویر لندست

مصیب مقبلی دامنه<sup>۱</sup>، سید حسین نژاد<sup>۲</sup>، مجتبی صادق<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
۲. استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۳. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه ایالتی بویزی، بویزی، آمریکا

#### چکیده

بهبودسازی مصرف آب آبیاری در کشاورزی را می توان یکی از مهم ترین کارهای لازم در پژوهش های مربوط به بخش کشاورزی دانست زیرا حدود ۷۰ درصد آب مصرفی جهان در این بخش مصرف می شود. با توجه به اینکه تقریباً عامل اصلی هدررفت آب در این بخش برابر است با میزان تبخیر-تعرق، بنابراین شناخت این متغیر و برآورد دقیق آن کمک زیادی به هدف اولیه که بهبودسازی مصرف آب است، می کند. در این پژوهش، استفاده از دو الگوریتم مبتنی بر داده های سنجش از دور برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی روزانه در مقیاس مزرعه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. مقادیر تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از دو الگوریتم توازن انرژی سطح زمین (SEBAL)، توازن انرژی دو منبعی (TSEB) و داده های مستخرج از تصاویر ماهواره های لندست ۷ و ۸ برآورد شد. برای صحت سنجی برآوردهای دو روش سنجش از دور، از دو روش یک جزئی و دو جزئی فانو-۵۶ به عنوان مقادیر مرجع تبخیر-تعرق واقعی، استفاده گردید. مقایسه خروجی روش های سنجش از دور با روش های فانو-۵۶ نشان داد که هر دو روش سنجش از دوری دارای خروجی های قابل اعتمادی هستند. میانگین مقدار خطای برآورد براساس دو شاخص آماری متداول ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) در مقیاس روزانه به ترتیب ۱/۵۴ و ۱/۱۱ میلی متر برای الگوریتم SEBAL و TSEB در مقایسه با روش های مرجع به دست آمد. همچنین شاخص اریبی نشان داد برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی الگوریتم SEBAL دارای کم برآورد (۰/۶۹-) و الگوریتم TSEB دارای بیش برآورد (۱/۲۴+) است. نتایج به دست آمده از تحلیل آماری در این پژوهش دقت بالاتر الگوریتم TSEB را در برآورد تبخیر-تعرق واقعی برای گیاه ذرت در مقیاس مزرعه را نشان می دهد.

کلمات کلیدی: تبخیر-تعرق واقعی، الگوریتم SEBAL، الگوریتم TSEB، سنجش از دور.

Commented [1d]: فایل مشخصات

نویسنده (گان): به صورت Word 2010 و در فایل جداگانه با ذکر اطلاعات زیر ارسال گردد.

- مرتبه علمی، گروه آموزشی، دانشکده، نام دانشگاه / مؤسسه یا محل اشتغال نویسنده یا نویسنده (گان) به فارسی و انگلیسی.

- نشانی کامل نویسنده عهده دار مکاتبات: شامل نشانی پستی، شماره تلفن، شماره دورنگار و نشانی پیام نگار (بنت الکترونیکی) به فارسی و انگلیسی.

در زیرنویس Commented [2d]:

Deleted: مهمترین

Deleted: تقریباً

Deleted: بنابراین

Deleted: سنجش از دور

Deleted: مورد بررسی

Deleted: سنجش از دور

Deleted: دو جزئی

Deleted: به عنوان

Deleted: شد

Deleted: سنجش از دور

Deleted: سنجش از دور

Deleted: قابل اعتمادی

Commented [3d]: اصلاح انواع خطاهای نگارشی با نرم افزار ویراستیار انجام گیرد

Deleted: میلیمتر

Deleted: بدست

Commented [4d]: واحد آن چیست؟ بیان شود

Deleted: بدست آمده

Deleted: آنالیز

Deleted: سنجش از دور

Deleted: ۱

Commented [5]: تقسیم‌بندی بخشها  
مقدمه،  
روش تحقیق  
نتایج،  
بحث و نتیجه‌گیری،  
کلام و تشکر

مقدمه

Comment [1]: متن اصلی

Deleted: در حالی که

Deleted: به عنوان

Deleted: بزرگترین

Deleted: انجام شده

Deleted: به صورت

Deleted: سنجش از دور

Deleted: سنجش از دور

Deleted: به صورت

Deleted: تکنولوژی

Deleted: سنجش از دور

Deleted: می باشد

Deleted: سنجش از دور

Deleted: مورد توجه

Deleted: قرار گرفته‌اند

Commented [7]: مباح انواع خطاهای نگارشی با نرم افزار

Deleted: مساله‌ای

Deleted: حل نشده

Deleted: توسعه یافته

Deleted: ؟

Deleted: سنجش از دور

Deleted: به طور کلی

Deleted: .

یکی از عواملی که توسعه کشاورزی را در مناطق با اقلیم خشک و نیمه‌خشک با محدودیت مواجه کرده است کمبود آب است **درحالی که** در کشور ایران با احتساب تلفات حدود ۷۱ درصد آب مصرفی صرف آبیاری کشاورزی می‌شود و مقدار جهانی آن حدود ۷۰ درصد است (۲۱ و ۳۳). از طرفی **تبخیر-تعرق به‌عنوان بزرگ‌ترین** عامل هدررفت آب در چرخه هیدرولوژی است (تا ۹۵ درصد بیلان آب در مناطق خشک (۳۲)، بنابراین شناخت این متغیر و برآورد آن با استفاده از روش‌های دقیق می‌تواند در ارتباط با مدیریت و برنامه‌ریزی مصرف منابع آب بسیار سودمند باشد. آنچه تاکنون از بررسی پژوهش‌های **انجام شده** در داخل و خارج از کشور می‌توان مشاهده کرد، پیدا کردن روشی که بتواند فرآیند تخمین متغیر تبخیر-تعرق را در زمان کوتاه، بدون نیاز به استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده زیاد زمینی، با هزینه اندک، **به‌صورت مکانی** و با دقت بالایی انجام دهد اهمیت بالایی داشته است. عموماً روش‌های تخمین تبخیر-تعرق در سه دسته (۱) اندازه‌گیری مستقیم میدانی با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری مانند لایسیمتر و برج‌های اندازه‌گیری شار انرژی (۲) روش‌های محاسباتی بر پایه اطلاعات هواشناسی و (۳) روش‌های بر پایه اطلاعات **سنجش از دور**، قرار می‌گیرند (۳۱). دو دسته اول به دلیل نقطه‌ای بودن و نیازمند وقت و هزینه زیاد امروزه کارکرد خود را تقریباً از دست داده‌اند و روش‌های نوین **سنجش از دور** به دلیل اینکه با هزینه کم و **به‌صورت مکانی** قابلیت انجام این کار را دارا هستند، کاربرد فراوانی یافته‌اند. از طرفی **فناوری سنجش از دور** تنها روشی است که برای نواحی فاقد آمار و مکان‌هایی که اندازه‌گیری مستقیم دشوار است کارآمد است (۲۵). در بین روش‌های **سنجش از دور** نیز، روش‌هایی که پایه فیزیکی دارند بیشتر **مورد توجه قرار گرفته‌اند** (۳۵)، اما **مسئله‌ای** که همچنان **حل نشده** و نیازمند بررسی بیشتر می‌باشد این است که در بین روش‌های سنجش از دور **توسعه یافته** کدام روش دقت بالاتر و عدم قطعیت کمتری دارد؟

روش‌های **سنجش از دور** با پایه فیزیکی برآورد تبخیر-تعرق **به‌طور کلی** به دو دسته تک منبعی و دو منبعی تقسیم می‌شوند. در روش‌های تک منبعی اجزای خاک و پوشش گیاهی با هم ترکیب شده و منبع واحدی در نظر گرفته می‌شوند در حالی که شرایط طبیعی اینگونه نیست و سطح ناهمگن زمین از ترکیب خاک و گیاه ساخته شده و دماها و مقاومت‌های آیرودینامیکی متفاوتی در ارتباط با تبادل انرژی دارند (۲۹)؛ اما روش‌های دو منبعی پارامترهای خاک و گیاه را به صورت جداگانه تحلیل می‌کنند، به این ترتیب که در تمام مراحل شبیه‌سازی از چندین مقاومت آیرودینامیکی مجزا برای خاک و گیاه و همچنین دمای مجزای خاک و پوشش گیاهی استفاده می‌کنند (۱۴).

تاکنون الگوریتم‌های فراوانی در مناطق مختلف کره زمین در اقلیم‌های متنوع و در مقیاس‌های متفاوت مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته‌اند. کارکرد این الگوریتم‌ها به دلیل تفاوت در پارامترهای ورودی و ساختار داخلی الگوریتم با هم یکسان نیست بنابراین بهترین راه برای شناسایی نقاط قدرت و ضعف آنها مقایسه است (۴). پس از بررسی‌های فراوان پژوهش‌های انجام شده، در این پژوهش تصمیم گرفته شده دو روش سنجش از دور پُر استفاده، الگوریتم توازن انرژی سطح زمین (SEBAL) و الگوریتم توازن انرژی دو

منبعی (TSEB) در مقیاس مزرعه مورد ارزیابی قرار گیرند. الگوریتم توازن انرژی سطح زمین یک روش تک منبعی پردازش تصویر برای محاسبه تبخیر-تعرق به عنوان باقی مانده بیلان انرژی سطح زمین است که توسط باستینسن (۵) توسعه یافت. این الگوریتم در بیش از ۳۰ کشور در سرتاسر دنیا به طور کاربردی استفاده شده است. الگوریتم سبال برای محاسبه اجزای معادله توازن انرژی هم در مقیاس محلی و هم در مقیاس منطقه‌ای با کمترین نیاز به داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی طراحی شده است، در واقع این الگوریتم یک حد واسط در استفاده از روابط تجربی و پارمترهای فیزیکی می‌باشد (۵). براساس نتایج اعتبارسنجی الگوریتم سبال در ۱۳ پژوهش، میزان خطا را در برآورد تبخیر-تعرق، ۵ تا ۳۳ درصد برای برآورد تبخیر-تعرق لحظه‌ای و ۲ تا ۳۹ درصد برای برآورد تبخیر-تعرق دوره‌های یک تا ده روزه گزارش کرده‌اند (۱۲). در این الگوریتم از داده‌های تصاویر دیجیتالی سنجنده هر ماهواره‌ای که تابش در محدوده‌های طول موج مرئی (قرمز، سبز و آبی)، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز حرارتی را ثبت می‌کند می‌توان استفاده کرد (۵). الگوریتم توازن انرژی دو منبعی نیز توسط نرمن و همکاران (۱۸ و ۲۳) توسعه یافت و بعداً اصلاحاتی توسط ایشان و همکارانشان روی الگوریتم اولیه انجام شد. ورودی‌های این الگوریتم شامل دمای رادیومتریک جهت‌دار همراه با زاویه دید سنجنده، جزء پوشش گیاهی، شاخص سطح برگ، ارتفاع گیاه و اندازه برگ بصورت تقریبی، تابش خورشیدی، دمای هوا و سرعت باد است. برای استخراج پارامترهای مورد نیاز در این الگوریتم از تصاویر ماهواره‌ای نیز همانند الگوریتم سبال از باندهای محدوده طول موج مرئی، مادون قرمز نزدیک و باند حرارتی استفاده می‌شود.

Deleted: از ۳۰

تاکنون پژوهش‌های فراوانی در ارتباط با دو الگوریتم مذکور در داخل و خارج از ایران انجام شده که برای ارزیابی آنها از سنجنده‌های مختلف در مقیاس‌های متفاوت استفاده شده است. به عنوان نمونه می‌توان به مواردی همچون پژوهش مرشدی و همکاران (۲۰) در دشت شهرکرد اشاره کرد که امکان استفاده از دو الگوریتم سبال و متریک را برای برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع یونجه با استفاده از داده‌های ماهواره لندست ۸ بررسی کردند. مقایسه خروجی الگوریتم‌های سنجنش از دور با برآوردهای حاصل از روش‌های ترکیبی فائو پنمن-مانتیث، هارگریوز-سامانی، بلانی کریدل و تشت تبخیر نشان داد خروجی‌های الگوریتم سبال در مقایسه با خروجی‌های الگوریتم متریک از صحت بالاتری برخوردار است. در پژوهش دیگری که بهمن‌آبادی و همکاران (۳) در دشت قزوین انجام دادند خروجی‌های سه الگوریتم سنجنش از دور SEBAL, SSEB و TSEB را با اندازه‌گیری‌های لایسیمتری و روش تجربی هارگریوز-سامانی مقایسه کردند. آن‌ها در این مطالعه از تصاویر سه سنجنده مودیس، ETM و ETM+ استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که هر سه الگوریتم دقت قابل قبولی برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی دارند. در تحقیق دیگری که دیارا و همکاران (۱۰) در حوزه مرکزی مراکش انجام دادند به این نتیجه رسیدند که الگوریتم TSEB می‌تواند تبخیر-تعرق را با دقت مناسبی تعیین کند. یانگ و همکاران (۳۴) نیز از سه نسخه الگوریتم توازن انرژی دو منبعی (TSEB) پرستلی-تیلور (TSEB-PT)، پنمن-مانتیث (TSEB-PM) و استخراج دمای سطح از کسر پوشش گیاهی (TSEB-Tc-Ts) برای بررسی دقت تبخیر-تعرق در حوضه‌ای در شمال شرق چین استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که خروجی‌های هر سه الگوریتم در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده دقت قابل قبولی دارند و تفاوت زیادی با یکدیگر ندارند.

Deleted: پیشینه پژوهشی

Deleted:

Deleted:

Commented [8]: اسلامی فارسی لازم ش.ئ: درضمن منبع علمی آن ذکر شود

Commented [9]: نام سنجنده درست نیست لندست ۷ و ETM+ و لندست OLI۸ هست لطفاً درست تر و دقیق تر بیان شود

Deleted: رزولوشن

با توجه به موارد ذکر شده از دو الگوریتم سنجش از دور تک منبعی و دو منبعی با هدف بالا بردن دقت برآورد متغیر تبخیر-تعرق در مقیاس مزرعه برای گیاه ذرت تابستانه با آخرین تغییراتی که روی این الگوریتم‌ها توسط پژوهشگران انجام شده و همچنین تغییراتی که در پژوهش حاضر انجام شده و در قسمت مواد و روش‌ها به آن اشاره شده است، به صورت گام به گام با استفاده از تصاویر با **قدرت تفکیک** بالای ماهواره‌های لندست ۷ و ۸ انجام شد. تمامی پارامترهای مورد نیاز در الگوریتم‌ها تا رسیدن به گام نهایی یعنی تبخیر-تعرق در مقیاس روزانه، برای رسیدن به بالاترین دقت، به صورت جداگانه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. همچنین برای صحت‌سنجی خروجی الگوریتم‌های سنجش از دور از دو روش استاندارد فائو ۵۶ یک جزئی و دو جزئی استفاده شد.

بنابر موارد فوق در این پژوهش اهداف زیر به ترتیب بررسی و تحلیل شد.

۱) برآورد تبخیر-تعرق واقعی گیاه ذرت با استفاده از دو روش فائو-۵۶ یک جزئی و دو جزئی

۲) برآورد تبخیر-تعرق واقعی گیاه ذرت با استفاده از داده‌های مبتنی بر سنجش از دور و دو الگوریتم تک منبعی و دو منبعی

۳) مقایسه خروجی‌های الگوریتم‌های سنجش از دور و روش‌های سنتی

### روش تحقیق

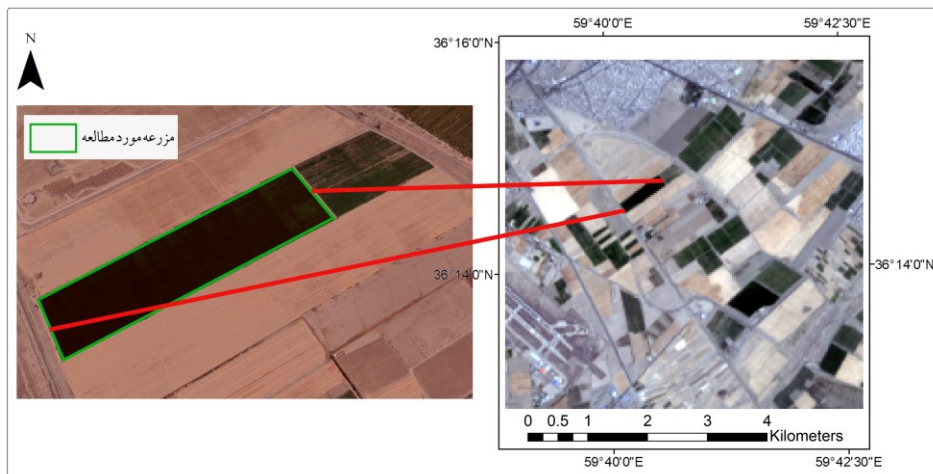
Deleted: مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر، مزرعه مورد مطالعه قطعه‌ای تحت کشت گیاه ذرت **علوفه‌ای** رقم هیدو به میزان ۴۵ کیلوگرم در هکتار که برای کاشت آن از بذرکار پنوماتیک استفاده شد، واقع در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد با سطح زیر کشت ۱۵/۵ هکتار به طول و عرض ۷۷۰ در ۲۰۱/۵ متر، در سال ۱۴۰۰ انتخاب شد. فاصله بین ردیف‌های کاشت ۷۰ و فاصله روی ردیف‌ها ۱۹ تا ۲۱ سانتی‌متر بود. آبیاری مزرعه از نوع قطره‌ای و با استفاده از نوار تیپ درزدار انجام گرفت و حجم آب آبیاری با استفاده از کنتور اندازه‌گیری شد. از آنجا که ذرت کشت شده به صورت علوفه‌ای بوده است، برداشت محصول قبل از رسیدن گیاه به مرحله پیری انجام شد تا حداکثر عملکرد در واحد سطح حاصل شود. نمایی از منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ و اطلاعات مربوط به کاشت گیاه در جدول ۱ آمده است.

نام غلمی به انگلیسی با فونت ایتالیک قید: [10] Commented شود سایر مشخصات واریته هم لازم است

Deleted: منطقه مورد مطالعه

این روش درست است؟ منبع بیان شود؟ فیلا: [11] Commented کی استفاده کرده؟



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه  
Fig 1. Study area geographical location

Formatted: Space After: 0 pt

جدول ۱. اطلاعات مربوط به تاریخ کاشت و برداشت و طول دوره‌های رشد گیاه

Table 1. Planting and harvesting dates and the length of plant growth periods information

گیاه	تاریخ کاشت	تاریخ برداشت	طول دوره رشد اولیه	طول دوره توسعه	طول دوره میانی	طول دوره پایانی
ذرت علوفه‌ای	۶ تیر ۱۴۰۰	۴ مهر ۱۴۰۰	۲۰ روز	۳۰ روز	۳۵ روز	۳۰ روز

Formatted: Space After: 0 pt

Formatted: Space After: 0 pt

اطلاعات هواشناسی مورد نیاز (دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد، تابش خورشید و دمای نقطه شبنم) در مقیاس‌های زمانی ۱۰ دقیقه‌ای و روزانه از ایستگاه خودکار هواشناسی واقع در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد در فاصله ۷۵۰ متری مزرعه ذرت و همچنین هفت تصویر ماهواره‌ای در بازه کاشت تا برداشت گیاه بدون پوشش ابر برای روش سنجش از دور استفاده شد. اطلاعات تصاویر مورد نظر در جدول ۲ آمده است. قبل از شروع پردازش تصاویر ماهواره‌ای برای الگوریتم سنجش از دور، تصحیحات اتمسفری و رادیومتریکی برای به حداقل رساندن خطاهای پردازشی روی تصاویر در نرم‌افزار انجام شد.

Deleted: داده‌های زمینی و تصاویر ماهواره‌ای

جدول ۲. تاریخ و ساعت تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده در این پژوهش

Table 2. Date and time of satellite images used in this research

تاریخ شمسی تصویر	تاریخ میلادی تصویر	ماهواره و سنجنده	لحظه گذر ماهواره به وقت محلی
۱۴۰۰/۰۵/۱۱	۲۰۲۱-۰۸-۰۲	لندست ۸، ETM+	۱۱:۰۷

Commented [۱۲]: نام سنجنده درست نیست در جدول اصلاح شود

لندست ۷، ETM+ و لندست ۸ OLI هست لطفا درست تر و دقیق تر بیان شود  
لندست ۸ دارای تصویر بردار عملیاتی زمین (OLI) و تصویر برداری گرمایی مادون قرمز زمین (TIRS) دارد!

Formatted: Space After: 0 pt

Formatted: Space After: 0 pt

۱۰:۰۷	لندست ۷، ETM	۲۰۲۱-۰۸-۱۰	۱۴۰۰/۰۵/۱۹
۱۱:۰۷	لندست ۸، ETM+	۲۰۲۱-۰۸-۱۸	۱۴۰۰/۰۵/۲۷
۱۰:۰۶	لندست ۷، ETM	۲۰۲۱-۰۸-۲۶	۱۴۰۰/۰۶/۰۴
۱۱:۰۷	لندست ۸، ETM+	۲۰۲۱-۰۹-۰۳	۱۴۰۰/۰۶/۱۲
۱۰:۰۵	لندست ۷، ETM	۲۰۲۱-۰۹-۱۱	۱۴۰۰/۰۶/۲۰
۱۱:۰۷	لندست ۸، ETM+	۲۰۲۱-۰۹-۱۹	۱۴۰۰/۰۶/۲۸

**قدرت تفکیک مکانی** ماهواره لندست ۳۰ متر و **قدرت تفکیک زمانی** آن ۱۶ روز می باشد که در این پژوهش با استفاده همزمان از دو ماهواره لندست ۷ و ۸، به ۸ روز کاهش پیدا کرد.

:Deleted رزولوشن

:Deleted رزولوشن

### الگوریتم سنجنش از دور دو منبعی توازن انرژی TSEB

الگوریتم دو منبعی توازن انرژی اولین بار توسط نرمن و همکاران (۲۲) ارائه شد و سپس اصلاحاتی توسط آنها روی الگوریتم اولیه انجام شد (۱۸ و ۲۳). ورودی های این الگوریتم شامل دمای رادیومتریک جهت دار همراه با زاویه دید سنجنده، جزء پوشش گیاهی، شاخص سطح برگ، ارتفاع گیاه و اندازه برگ بصورت تقریبی، تابش خورشیدی، دمای هوا و سرعت باد است. برای استخراج پارامترهای مورد نیاز از تصاویر ماهواره ای از باندهای محدوده طول موج مرئی (قرمز، سبز و آبی)، مادون قرمز نزدیک و باند حرارتی طیف الکترومغناطیس استفاده می شود. اساس کلیه الگوریتم های سنجنش از دور مبتنی بر توازن انرژی سطح زمین برای تخمین تبخیر-تعرق، حل معادله توازن انرژی رسیده از خورشید در سطح زمین می باشد که به شکل زیر است:

:Deleted ایشان و همکارانشان

$$R_n = G + H + \lambda ET \quad [1]$$

در رابطه فوق  $R_n$ ،  $G$ ،  $H$  و  $\lambda ET$  به ترتیب شار تابش خالص در سطح زمین، شار گرمای خاک، شار گرمای محسوس و شار گرمای نهان (همگی بر حسب  $W/m^2$ ) می باشند. برای اندازه گیری این پارامترها، الگوریتم های مختلف از روش های متفاوتی استفاده می کنند که در واقع تفاوت الگوریتم ها همین مورد است. در الگوریتم TSEB که یک روش دو منبعی است، دو جزء خاک و پوشش گیاهی برای این پارامترها بصورت جداگانه بررسی می شوند. برای تخمین واگرایی شار تابش خالص بین خاک و گیاه در این پژوهش از معادلات اصلاح شده زیر که توسط اندرسون و همکاران (۲) ارائه شده استفاده شد:

:Deleted

:Deleted

:Deleted

:Deleted

$$R_n = R_{nc} + R_{ns} \quad [2]$$

$$R_{nc} = R_n \left[ 1 - \exp\left(\frac{-k \times LAI}{\sqrt{2 \cos(\theta)}}\right) \right] \quad [3]$$

$$R_{ns} = R_n \exp\left(\frac{-k \times LAI}{\sqrt{2 \cos(\theta)}}\right) \quad [4]$$

در معادلات فوق  $R_n$  تابش خالص کل،  $R_{nc}$  تابش خالص جزء گیاه،  $R_{ns}$  تابش خالص جزء خاک،  $k$  ضریب اضمحلال،  $LAI$  شاخص سطح برگ و  $\theta$  زاویه زینتی خورشید می‌باشد. این معادلات در واقع معادلات اصلاح شده از فرمول‌های اولیه ارائه شده توسط نرمن و همکاران (۲۲) و بر اساس یافته‌های اندرسون و همکاران (۲) می‌باشند که در آن واگرایی تابش خالص تابعی از زاویه زینتی خورشید است. همچنین برای مقدار  $k$  در الگوریتم اولیه از مقادیر ثابت استفاده می‌شد که در این پژوهش برای افزایش دقت الگوریتم از رابطه ۵ ارائه شده توسط کمپبل و نرمن (۷) که مانند معادلات واگرایی تابش تابعی از زاویه زینتی خورشید می‌باشد، استفاده شد.

$$k = \frac{1}{2 \times \cos(\theta)} \quad [5]$$

مقدار شار گرمای خاک در الگوریتم TSEB فقط برای جزء خاک محاسبه می‌شود و ضریبی از شار تابش خالص خاک ( $R_{ns}$ ) می‌باشد و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$G = C_g R_{ns} \quad [6]$$

مقدار  $C_g$  در این رابطه به نوع و شرایط رطوبتی خاک و همچنین زمان روز، به دلیل تغییر شیفیت بین شار گرمای خاک ( $G$ ) و شار تابش خالص خاک ( $R_{ns}$ ) در طول یک چرخه روزانه وابسته است که مقدار آن از ۰/۲ تا ۰/۵ متغیر است (۲۷). در این پژوهش پس از بررسی حالت‌های مختلف با توجه به زمان گذر ماهواره لندست از مقدار ثابت ۰/۳۵، بر اساس پژوهش کاستاس و دوتری استفاده شد (۱۷).

شار گرمای محسوس، میزان هدر رفت گرما از طریق همرفت و هدایت مولکولی تعریف می‌شود. در الگوریتم TSEB از دو روش سری و موازی برای برآورد شار گرمای محسوس استفاده می‌شود که در این پژوهش به دلیل یکپارچگی منطقه مورد مطالعه از روش موازی استفاده شد که از روابط زیر بدست می‌آید:

$$H_c = \rho_{air} C_p \frac{T_c - T_{air}}{R_{ah}} \quad [7]$$

$$H_s = \rho_{air} C_p \frac{T_s - T_{air}}{R_{ah} + R_s} \quad [8]$$

:Deleted

واحد متریک بیان شود: [13] Commented

در این معادلات  $\rho_{air}$  چگالی هوا ( $\text{Kg/m}^3$ )،  $C_p$  گرمای ویژه هوا ( $\text{J/Kg/K}$ )،  $T_c$ ،  $T_s$  و  $T_{air}$  به ترتیب دمای خاک، دمای پوشش گیاهی و دمای هوا ( $K$ )،  $R_{sh}$  و  $R_s$  به ترتیب مقاومت آپرودینامیک به انتقال گرما از خاک و مقاومت آپرودینامیک هوا به انتقال گرما ( $s/m$ ) می‌باشند (۱۸).

الگوریتم TSEB از دمای رادیومتریک به عنوان شرایط مرزی برای برآورد شارهای انرژی استفاده می‌کند که بر اساس معادله زیر به جزء خاک و پوشش گیاهی بخش‌بندی می‌شود:

$$T_{rad}(\varphi) \approx [f_c(\varphi)T_c^4 + (1 - f_c(\varphi))T_s^4]^{\frac{1}{4}}$$

[۹]

درستی معادلات دوباره بررسی شود: [14] Commented

که در آن  $T_{rad}(\varphi)$  دمای سطح بدست آمده از سنجنده ( $K$ )،  $T_c$  و  $T_s$  به ترتیب دمای پوشش گیاهی و دمای خاک ( $K$ )،  $f_c(\varphi)$  جزء پوشش گیاهی در زاویه دید  $\varphi$  که می‌توان آن را به عنوان تابعی از شاخص سطح برگ به صورت زیر محاسبه نمود (در حالت نادیر (دید عمودی سنجنده)  $\varphi = 0$  است):

$$f_c(\varphi) = 1 - \text{Exp}\left(\frac{-0.5\Omega LAI}{\text{Cos}(\varphi)}\right) \quad [10]$$

در این معادله  $LAI$  شاخص سطح برگ و  $\Omega$  کلامپینگ فاکتور می‌باشد. کلامپینگ فاکتور ضریبی است که کاستاس و نورمن (۱۸) برای بهبود خروجی‌های الگوریتم اولیه TSEB ارائه کردند، که در واقع این ضریب تأثیر تاج پوشش گیاهی (کلامپ) روی واگرایی تابش و سرعت باد داخل توده گیاه را مشخص می‌کند. این فاکتور به ویژه در گیاهان با کشت ردیفی تأثیر فراوانی دارد. می‌توان گفت در یک گیاه با کشت ردیفی بسته به نوع و فضای گیاه، ۲۰ تا ۳۰ درصد نسبت به همان گیاه و همان زمین با کشت تصادفی تابش کمتری جذب کند (۷). با استفاده از رابطه زیر می‌توان مقدار کلامپینگ فاکتور را تخمین زد (۱۳ و ۱۶):

$$\Omega = \frac{-\text{Ln}(f_s)}{0.5LAI_{RS}} \quad [11]$$

$$f_s = (f_c \times \text{Exp}(-0.5LAI_L)) + (1 - f_c) \quad [12]$$

$$f_{c\_initial} = 1 - \text{Exp}(-0.5LAI_{RS}) \quad [13]$$

$$LAI_L = \frac{LAI_{RS}}{f_c} \quad [14]$$



در این معادلات  $f_s$  جزء پوشش خاک،  $LAI_L$  شاخص سطح برگ محلی و  $LAI_{RS}$  شاخص سطح برگ محاسبه شده با استفاده از روش‌های سنجش از دور است.

دمای سطح زمین در این پژوهش نیز با استفاده از روش ارائه شده توسط بگ و همکاران (۶) از تصاویر ماهواره‌ای استخراج شد.

$$T_s = \frac{BT}{1 + \left[ L_\lambda \times \frac{BT}{1438} \right] \times \ln(e_\lambda)} \quad [15]$$

که در آن  $T_s$  دمای سطح زمین ( $k$ )،  $BT$  دمای روشنایی سطح سنجنده،  $L_\lambda$  بازتاب باند حرارتی در بالای سطح جو و  $e_\lambda$  گسیلمندی سطح زمین است که با استفاده از روابط زیر بدست می‌آیند.

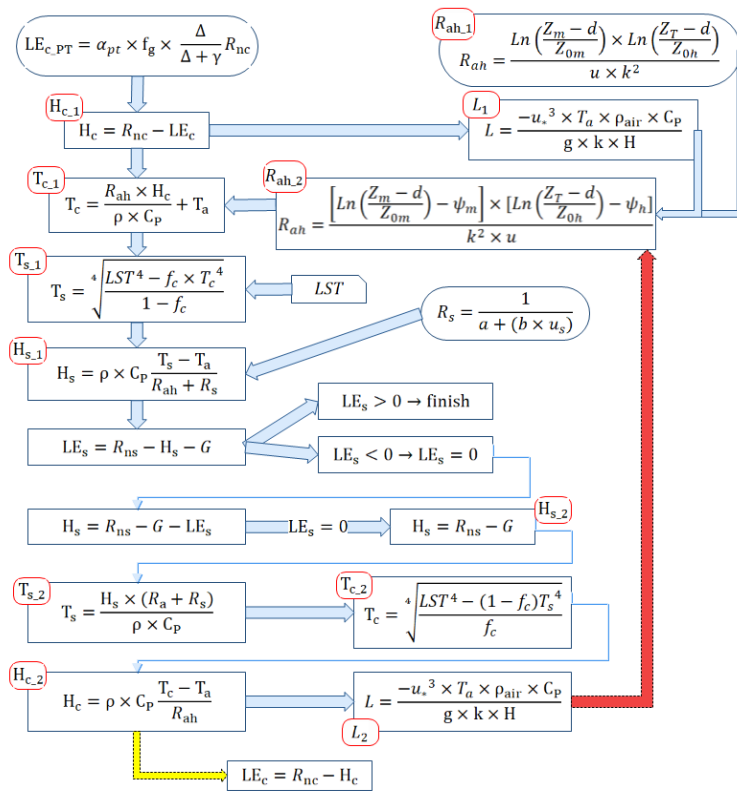
$$BT = \frac{k_2}{\ln\left(\frac{k_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad [16]$$

$$e_\lambda = \begin{cases} 0.97 \text{ if } NDVI < 0.2 \\ 0.004 \times P_v + 0.986 \text{ if } 0.2 < NDVI < 0.5 \\ 0.99 \text{ if } NDVI > 0.5 \end{cases} \quad [17]$$

$$P_v = \left( \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad [18]$$

در این روابط  $k_1$  و  $k_2$  ضرایب اصلاحی باند حرارتی سنجنده، موجود در فایل متا دیتا،  $P_v$  درصد پوشش گیاهی و  $NDVI$  شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی می‌باشند.

معمولاً پیچیده‌ترین بخش در الگوریتم‌های سنجش از دور برآورد تبخیر-تعرق، برآورد شار گرمای محسوس است. با توجه به اینکه اکثر سنجنده‌ها فقط در یک زاویه تصویر تهیه می‌کنند (در حالت عادی با داشتن دمای رادیومتریک برای دو زاویه  $\phi_1$  و  $\phi_2$  در یک زمان و رابطه واگرایی دمای رادیومتریک، می‌توان دمای خاک و پوشش گیاهی را با استفاده از دو معادله و دو مجهول بدست آورد)، برای حل معادله واگرایی دما (رابطه ۸) بر اساس الگوریتم اولیه TSEB ابتدا مقدار اولیه تعرق گیاه با استفاده از رابطه پریستلی-تیلور برآورد می‌شود و در ادامه طی یک فرآیند تکرار، تخمین اولیه اصلاح می‌شود (۲۲). این فرآیند در شکل ۲ نشان داده شده است:



شکل ۲. فرآیند برآورد تبخیر-تعرق با استفاده از الگوریتم TSEB  
 Fig 2. Evapotranspiration estimation process using TSEB algorithm

الگوریتم سنجش از دور توازن انرژی سطح زمین SEBAL یا سبال نیز همانند الگوریتم TSEB از رابطه توازن انرژی (رابطه ۱) برای بدست آوردن شار گرمای نهان استفاده می‌کند. در این الگوریتم ابتدا سه بخش شار تابش خالص، شار گرمای زمین و شار گرمای خاک تخمین زده می‌شود و در نهایت شار گرمای نهان به عنوان باقی‌مانده معادله توازن انرژی بدست می‌آید. در این پژوهش شار تابش خالص برای هر دو الگوریتم TSEB و SEBAL با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید (۳۰):

$$R_n = (1 - \alpha)R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow} \quad [19]$$

Formatted: Space After: 0 pt

Formatted: Font: (Default) +Body (Calibri), Complex Script Font: B Lotus

Deleted  
 الگوریتم

در این معادله  $\alpha$  آلیبدوی سطحی (بی بعد)،  $R_{S\downarrow}$  تابش با طول موج کوتاه (۰/۳ تا ۳ میکرومتر) رسیده به سطح زمین ( $W \cdot m^{-2}$ )،  $R_{L\downarrow}$  تابش با طول موج بلند (۳ تا ۱۰۰ میکرومتر) رسیده به سطح زمین ( $W \cdot m^{-2}$ )،  $R_{L\uparrow}$  تابش با طول موج بلند خروجی از سطح زمین ( $W \cdot m^{-2}$ ) و  $\epsilon_0$  گسیلمندی حرارتی سطحی (بی بعد) می‌باشند.

شار گرمای خاک، در الگوریتم سبال از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} [0.0032\alpha + 0.0062\alpha^2][1 - 0.978NDVI^4] \quad [20]$$

که در آن  $T_s$  دمای سطح زمین ( $^{\circ}C$ ) و  $NDVI$  شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی می‌باشد.

شار گرمای محسوس در الگوریتم SEBAL نیز مانند الگوریتم TSEB از پیچیده‌ترین و طولانی‌ترین مراحل کار می‌باشد که طی گام‌های متوالی و با سعی و خطا قابل دستیابی خواهد بود که در این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی در نرم افزار ارداس انجام شد. رابطه شار گرمای محسوس به شکل زیر است.

$$H = \frac{\rho_{air} \cdot C_p \cdot dT}{r_{ah}} \quad [21]$$

در رابطه بالا  $\rho_{air}$  چگالی هوا ( $kg \cdot m^{-3}$ ) است که تابع فشار و دمای هوا می‌باشد،  $C_p$  گرمای ویژه‌ی هوا ( $1004 J \cdot kg^{-1} K^{-1}$ )،  $dT$  اختلاف دما بین دو ارتفاع مبنا در الگوریتم سبال و  $r_{ah}$  مقاومت آیرودینامیکی در مقابل انتقال گرما ( $s \cdot m^{-1}$ ) است. در این معادله دو مجهول  $dT$  و  $r_{ah}$  وجود دارد که حل آن را دشوار می‌سازد. الگوریتم SEBAL برای غلبه بر این مشکل از دو پیکسل سرد و گرم و سرعت باد در ارتفاع معین به عنوان شرایط مرزی استفاده می‌کند. در دو پیکسل فوق می‌توان مقادیر قابل اعتمادی برای شار گرمای محسوس محاسبه نموده و به کمک آن مقادیر  $dT$  در این دو پیکسل را برآورد نمود و سپس با استفاده از یک معادله خطی به سایر پیکسل‌ها تعمیم داد. این دو پیکسل در منطقه‌ی مورد مطالعه قرار داشته و صحت نتایج تبخیر-تعرق واقعی به دست آمده از الگوریتم SEBAL تا حد زیادی به دقت در انتخاب این دو پیکسل وابسته است. جزئیات بیشتر در کتابچه راهنمای الگوریتم سبال آمده است (۳۰).

پس از برآورد پارامترهای اصلی معادله بیلان انرژی (شار تابش خالص، شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس) در هر دو الگوریتم TSEB و SEBAL مقدار شار گرمای نهن بدست می‌آید که با استفاده از روابط زیر به مقدار تبخیر-تعرق واقعی در مقیاس روزانه

می‌رسیم:

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad [22]$$

$$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad [23]$$

$$ET_{daily} = \frac{ET_{inst}}{ET_{R_{inst}}} \times ET_{R_{daily}} \quad [24]$$

در این روابط  $ET_{inst}$  مقدار تبخیر-تعرق واقعی در لحظه گذر ماهواره ( $mm \cdot hr^{-1}$ )،  $ET_{daily}$  تبخیر-تعرق واقعی روزانه ( $mm \cdot day^{-1}$ )،  $ET_{R_{inst}}$  تبخیر-تعرق لحظه‌ای گیاه مرجع می‌باشند. عدد ۳۶۰۰ برای تبدیل واحد ثانیه به ساعت است و  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر ( $J \cdot kg^{-1}$ ) می‌باشد. تبخیر-تعرق روزانه و لحظه‌ای گیاه مرجع در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار Ref-ET محاسبه شد.

برای صحت‌سنجی الگوریتم‌های سنسجش از دور از دو روش استاندارد یک جزئی و دو جزئی فائو-۵۶ به عنوان مقادیر مرجع، استفاده شد (۱). این روش‌ها در گزارش شماره ۵۶ سازمان فائو به تفصیل بیان شده‌اند، لذا در اینجا فقط به چکیده روابط اشاره می‌شود. در روش یک جزئی پس از برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع ( $ET_0$ ) و تعیین نوع گیاه برای مراحل مختلف رشد گیاه ضریبی تحت عنوان ضریب گیاهی ( $k_c$ ) تعیین می‌شود که پس از اصلاح آن برای شرایط آب و هوایی منطقه مورد مطالعه ( $k_{c_{adj}}$ ) می‌توان تبخیر-تعرق گیاه مورد نظر را برآورد کرد.

$$ET_c = k_{c_{adj}} \times ET_0 \quad [25]$$

در روش دو جزئی فائو-۵۶، در واقع ضریب گیاهی به روش یک جزئی ( $k_c$ ) به دو ضریب جداگانه برای بخش تبخیر ( $k_e$ ) و تعرق ( $k_{cb}$ ) تقسیم می‌شود:

$$ET_c = (k_{cb} + k_e) \times ET_0 \quad [26]$$

$$k_{cb_{adj}} = k_{cb(tab)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad [27]$$

$$k_e = k_r(k_{c_{max}} - k_{cb}) \leq f_{ew} k_{c_{max}} \quad [28]$$

در روابط فوق،  $k_{cb(tab)}$  ضریب گیاهی اصلاح نشده،  $u_2$  میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دومتری ( $m/s$ )،  $RH_{min}$  میانگین رطوبت نسبی حداقل روزانه (درصد) و  $h$  میانگین ارتفاع گیاه ( $m$ ) در طول مرحله میانی یا انتهایی رشد گیاه،  $k_r$  ضریب کاهش تبخیر که مقدار آن به عمق تجمع آب تبخیر شده از سطح بالای خاک بستگی دارد،  $k_{c_{max}}$  حداکثر مقدار  $k_c$  و  $f_{ew}$  که تابع روش آبیاری مزرعه می‌باشد، بخشی از خاک که مرطوب و بدون پوشش باشد (سطحی از خاک که بیشترین مقدار تبخیر اتفاق می‌افتد).

Deleted: روش یک جزئی و دو جزئی فائو پنمن-مانتیث

Commented [15]: هردو این مورد مدل است مقایسه دومدل برای صحت مورد قبول نیست

برای ارزیابی دقت الگوریتم‌های سنجش از دور مورد استفاده از تطابق دادن مقادیر برآورد شده توسط الگوریتم‌ها و مقادیر بدست آمده از روش‌های مرجع (فانو-۵۶ یک و دو جزئی) استفاده شد. برای این منظور از شاخص‌های متداول آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) استفاده شد. همچنین برای بررسی میزان کم برآوردی و بیش برآوردی الگوریتم‌ها از شاخص اریبی (bias) استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad [29]$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad [30]$$

$$bias = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad [31]$$

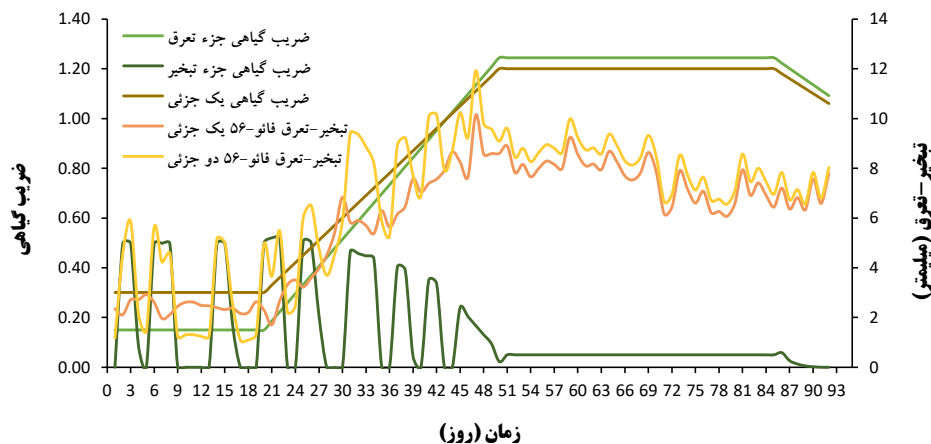
در این روابط  $P_i$  مقادیر برآورد شده با استفاده از روش سنجش از دور و  $O_i$  مقادیر مرجع برای مشخص کردن میزان دقت الگوریتم‌ها هستند.

### نتایج

در ابتدا مقادیر تبخیر-تعرق با استفاده از دو روش یک جزئی و دو جزئی فانو-۵۶ برآورد شد. بدین منظور تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه خودکار واقع در فاصله ۷۵۰ متری مزرعه مورد مطالعه و روش فانو پنمن-مانتیث برآورد شد و سپس با استفاده از ضریب گیاهی ارائه شده در نشریه فانو-۵۶ و اصلاح آن برای اقلیم منطقه، تبخیر-تعرق واقعی تخمین زده شد. روش دو جزئی فانو-۵۶ نسبت به روش یک جزئی پیچیده‌تر و دارای محاسبات ریاضی بیشتری است. از آنجایی که این روش نیازمند محاسبه بیلان آب روزانه برای لایه سطحی خاک می‌باشد، حجم آب آبیاری در روزهای آبیاری با استفاده از کنتور اندازه‌گیری شد و با استفاده از روابط ارائه شده در نشریه فانو-۵۶ این بیلان بدست آمد و در نهایت مقادیر تبخیر-تعرق برآورد شد. در شکل ۳ مقادیر ضرایب گیاهی برای هر دو روش یک جزئی و دو جزئی و مقادیر تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده با استفاده از هر دو روش فانو-۵۶ یک جزئی و دو جزئی در طول دوره رشد گیاه نشان داده شده است.

Deleted: و بحث

Deleted: روش‌های یک جزئی و دو جزئی فانو-۱۱۵۶



شکل ۳. مقادیر ضرایب گیاهی برای دو روش یک جزئی و دو جزئی و مقادیر تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده با استفاده از هر دو روش فائو-۵۶ یک جزئی و دو جزئی در طول دوره رشد گیاه

Fig 3. The values of crop coefficients for two single-kc and dual-kc FAO-56 methods and the actual evapotranspiration values estimated using both FAO-56 methods during the plant growth period

همانطور که انتظار می‌رفت، روند کلی مقادیر تبخیر-تعرق در ابتدای دوره با توجه به ضریب گیاهی اصلاح شده برای منطقه مورد مطالعه کم و با رشد و افزایش تراکم گیاه، این مقادیر به بیشینه مقدار خود رسید و سپس با افول گیاه دوباره روند کاهشی پیدا کرد. در مرحله رشد میانی گیاه که مقدار تبخیر-تعرق بیشتر دربرگیرنده جزء تعرق گیاه است دو روش کاملاً با هم منطبق هستند اما در مراحل ابتدایی و توسعه رشد گیاه که سطح بیشتری از خاک به دلیل تراکم کمتر گیاه در معرض هوا و دریافت انرژی خورشید است، مقدار تبخیر نیز قابل ملاحظه است و روش دو جزئی فائو-۵۶ که این مقدار را جداگانه برآورد می‌کند نوسانات متفاوتی با روش یک جزئی فائو-۵۶ در مقیاس روزانه دارد.

از آنجایی که برآوردهای دو روش فائو-۵۶ علاوه بر ضرایب گیاهی تابع مقدار پتانسیل تبخیر-تعرق است نوسان‌های روزانه در طول این روند مربوط به تغییرات روزانه پارامترهای هواشناسی نیز هستند که در رابطه پنمن-مانیتث برای تخمین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل استفاده می‌شود. این مقدار در واقع قدرت تبخیرکنندگی جو را نشان می‌دهد که با افزایش دمای هوا، سرعت باد، ساعات آفتابی و کاهش رطوبت نسبی، افزایش می‌یابد.

در این پژوهش همچنین ارتفاع متوسط گیاه در طول دوره فصل رشد گیاه از آنجایی که معمولاً از یک الگوی S شکل پیروی می‌کند (۲۴)، با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده ارتفاع متوسط گیاه در مراحل مختلف رشد ساخته شد و پس از برازش دادن رابطه‌ای بر آن برای کل طول دوره رشد بدست آمد (۱۵ و ۲۶).

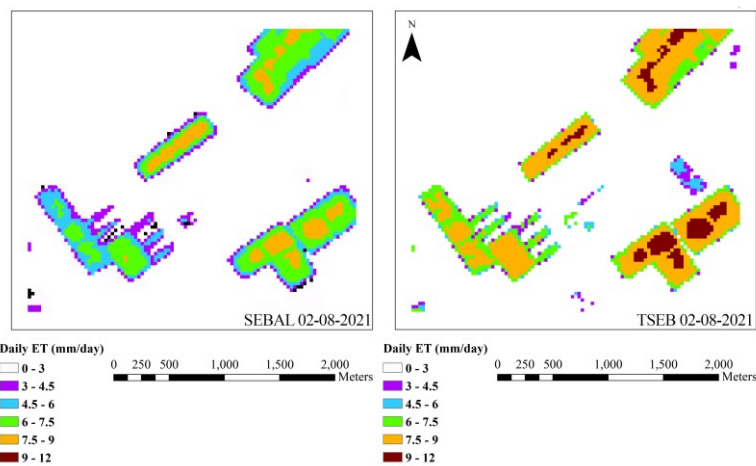
Commented [16]: رنگها تفکیک ندارد:

Formatted: Space After: 0 pt

Formatted: Space After: 0 pt

برای اجرای الگوریتم‌های سنسجش از دور در ابتدا تصاویر ماهواره‌ای از وبسایت سازمان زمین شناسی آمریکا (<https://earthexplorer.usgs.gov>) دانلود و تصحیحات اتمسفری و رادیومتریکی روی تصاویر انجام شد. در ادامه هر یک از پارامترهای لازم برای اجرای الگوریتم‌ها استخراج و در نهایت شار گرمای نهان که برابر با مقدار انرژی مصرف شده برای تبخیر-تعرق است بدست آمد. بدلیل حجم بالای تصاویر خروجی الگوریتم‌های سنسجش از دور در اینجا فقط به تصاویر مربوط به مقادیر تبخیر-تعرق واقعی در طول فصل رشد گیاه که در شکل‌های ۴ تا ۱۰ به ترتیب برای روزهای پس از کاشت گیاه نشان داده شده است، اکتفا شد.

Deleted: الگوریتم‌های TSEB و SEBAL



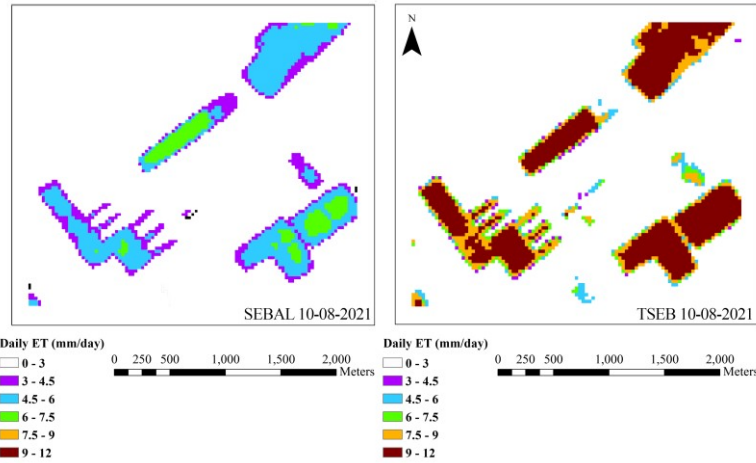
شکل ۴. تبخیر-تعرق واقعی گیاه ذرت روز ۳۷ بعد از تاریخ کاشت

Fig 4. Actual evapotranspiration of the maize on the 37th day after the planting date

Commented [17]: در سیمبولوژی اصول کارتوگرافی رعایت شود

Formatted: Space After: 0 pt

Formatted: Space After: 0 pt

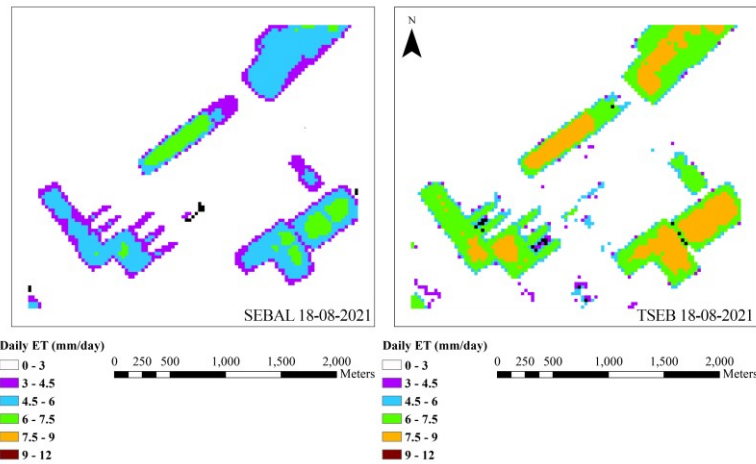


شکل ۵. تبخیر-تعرق واقعی گیاه ذرت روز ۴۵ بعد از تاریخ کاشت

Fig 5. Actual evapotranspiration of the maize on the 45th day after the planting date

Formatted: Space After: 0 pt

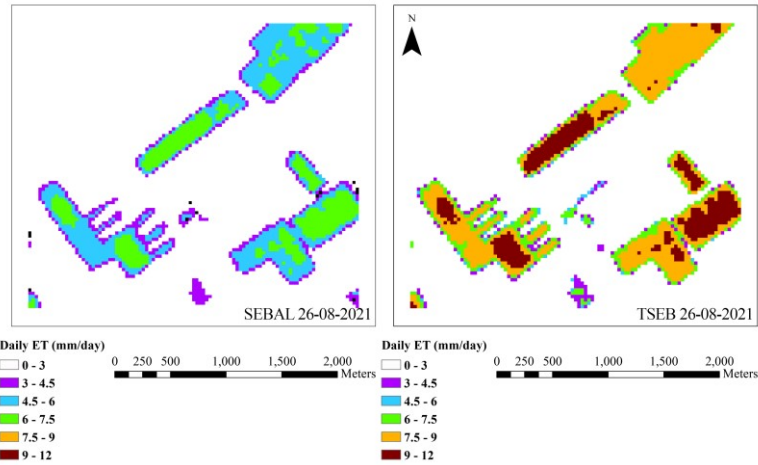
Formatted: Space After: 0 pt



شکل ۶. تبخیر-تعرق واقعی گیاه ذرت روز ۵۳ بعد از تاریخ کاشت

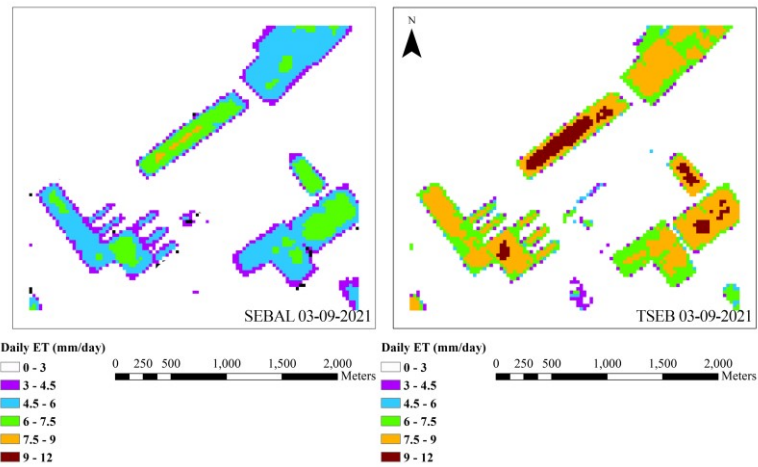
Fig 6. Actual evapotranspiration of the maize on the 53th day after the planting date





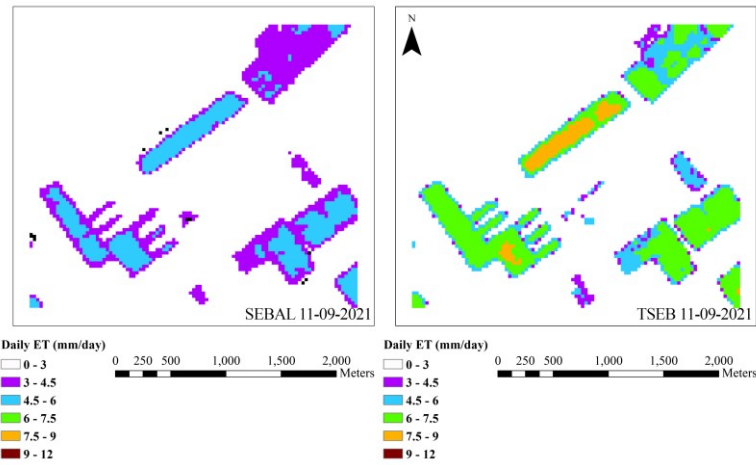
شکل ۷. تبخیر-تعرق واقعی گیاه ذرت روز ۶۱ بعد از تاریخ کاشت

Fig 7. Actual evapotranspiration of the maize on the 61th day after the planting date



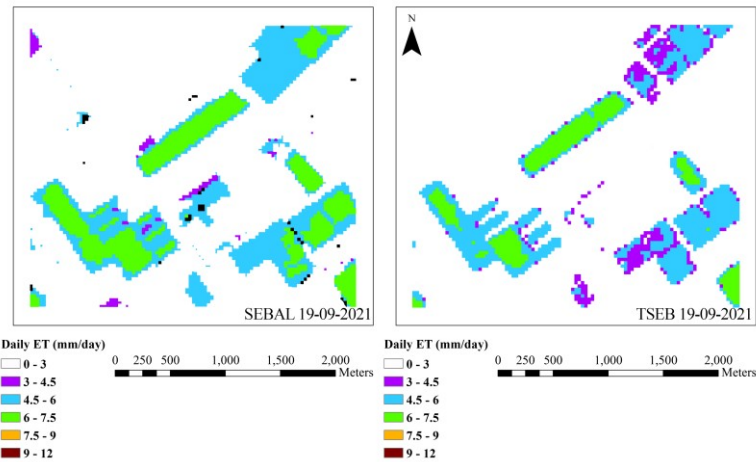
شکل ۸. تبخیر-تعرق واقعی گیاه ذرت روز ۶۹ بعد از تاریخ کاشت

Fig 8. Actual evapotranspiration of the maize on the 69th day after the planting date



شکل ۹. تبخیر-تعرق واقعی گیاه ذرت روز ۷۷ بعد از تاریخ کاشت

Fig 9. Actual evapotranspiration of the maize on the 77th day after the planting date



شکل ۱۰. تبخیر-تعرق واقعی گیاه ذرت روز ۸۵ بعد از تاریخ کاشت

Fig 10. Actual evapotranspiration of the maize on the 85th day after the planting date

همانطور که در تصاویر دیده می‌شود الگوریتم TSEB نسبت به الگوریتم SEBAL مقادیر تبخیر-تعرق را در مزرعه مورد مطالعه و به طور کلی در همه نقاط محدوده مورد مطالعه بیشتر برآورد کرده است.

نکته مهم و قابل بحث در مورد روش‌های سنسجش از دور، همانطور که در تصاویر به وضوح دیده می‌شود، برخلاف روش‌های اندازه‌گیری مستقیم و روش‌های سنتی که به صورت نقطه‌ای متغیر تبخیر-تعرق را برآورد می‌کنند، روش‌های سنسجش از دور آن را به صورت مکانی برآورد کرده و در بخش‌های مختلف مزرعه وضعیت گیاه را نشان می‌دهد و از آنجایی که تبخیر-تعرق تقریباً برابر است با بهره‌وری و سلامت گیاه، برای مدیریت بهتر و بهینه‌سازی مصرف آب آبیاری در مزرعه و در صورت لزوم امکان اتخاذ تصمیم فوری را فراهم می‌کند.

در جدول ۳ مقادیر میانگین تبخیر-تعرق بدست آمده از دو الگوریتم سنسجش از دور و همچنین مقادیر برآورد شده با استفاده از دو روش یک جزئی و دو جزئی فائو-۵۶ آمده است.

جدول ۳. مقادیر میانگین تبخیر-تعرق (میلیمتر بر روز) بدست آمده از دو الگوریتم سنسجش از دور و همچنین مقادیر برآورد شده با استفاده از دو روش یک جزئی و دو جزئی فائو-۵۶

Table 3. The average values of evapotranspiration (mm/day) obtained from two remote sensing algorithms and the values estimated using FAO-56 methods

تاریخ شمسی	تاریخ میلادی	الگوریتم SEBAL	الگوریتم TSEB	فائو-۵۶ یک جزئی	فائو-۵۶ دو جزئی
۱۴۰۰/۰۵/۱۱	۲۰۲۱-۰۸-۰۲	۷/۹۱	۸/۶۹	۶/۳	۸/۴
۱۴۰۰/۰۵/۱۹	۲۰۲۱-۰۸-۱۰	۸/۳۳	۱۱/۱	۸/۲	۱۰
۱۴۰۰/۰۵/۲۷	۲۰۲۱-۰۸-۱۸	۶/۷۷	۸/۰۴	۸/۴	۸/۸
۱۴۰۰/۰۶/۰۴	۲۰۲۱-۰۸-۲۶	۷/۱۸	۱۰/۲۲	۸/۸	۸/۷
۱۴۰۰/۰۶/۱۲	۲۰۲۱-۰۹-۰۳	۷/۴۳	۹/۲۳	۹/۴	۹/۳
۱۴۰۰/۰۶/۲۰	۲۰۲۱-۰۹-۱۱	۵/۵۲	۷/۷۹	۶/۶	۶/۷
۱۴۰۰/۰۶/۲۸	۲۰۲۱-۰۹-۱۹	۴/۸	۶/۵	۶/۸	۶/۹

در ادامه برای ارزیابی دو الگوریتم سنسجش از دور خروجی‌های آن‌ها با خروجی‌های دو روش یک و دو جزئی فائو-۵۶ در مقیاس روزانه مقایسه شد که نتایج آن در جدول ۴ آمده است.

Formatted: Space After: 0 pt

Formatted: Space After: 0 pt

جدول ۴. مقایسه خروجی روش‌های سنجش از دور با روش‌های فائو-۵۶ و آنالیز آماری

Table 4. Comparison of the output of remote sensing methods with FAO-56 methods and statistical analysis

شاخص آماری	الگوریتم SEBAL و روش	الگوریتم TSEB و روش	الگوریتم SEBAL و روش	الگوریتم TSEB و روش
	یک جزئی فائو-۵۶	یک جزئی فائو-۵۶	دو جزئی فائو-۵۶	دو جزئی فائو-۵۶
ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)	۱/۵۵	۱/۵۹	۱/۶۳	۰/۸۸
میانگین خطای مطلق (MAE)	۱/۴۳	۱/۲۴	۱/۵۵	۰/۷۴
شاخص اریبی (bias)	-۰/۹۳	+۱	-۱/۵۵	+۰/۳۹

با توجه به شاخص‌های آماری مقدار خطا، مشاهده می‌شود که الگوریتم SEBAL در مقایسه با روش یک جزئی فائو-۵۶ نسبت به الگوریتم TSEB دارای خطای کمتری است و در مقابل، الگوریتم TSEB در مقایسه با روش دو جزئی فائو-۵۶ نسبت به الگوریتم SEBAL دارای خطای کمتری است. از آنجایی که الگوریتم TSEB یک الگوریتم دومنبعی است و مانند روش دو جزئی فائو-۵۶ مقادیر تعرق و تبخیر را به صورت جداگانه برآورد می‌کند دارای اختلاف کمتر و خطای قابل قبول می‌باشد (در مقایسه با روش دو جزئی فائو-۵۶ به صورت میانگین ۹ درصد) و مدل SEBAL که مقدار تبخیر-تعرق را بصورت کلی برآورد می‌کند در مقایسه با مدل یک جزئی فائو-۵۶ با خطای میانگین ۱۸ درصد، خروجی‌های قابل قبول ارائه می‌کند. اما بطور کلی الگوریتم TSEB در این پژوهش نسبت به مدل SEBAL دارای خروجی‌های قابل اعتمادتری است.

موارد فوق را شاخص اریبی که نشان‌دهنده میزان بیش یا کم برآوردی الگوریتم است، نیز تأیید می‌کند. الگوریتم TSEB در مقایسه با هر دو روش مرجع، دارای اندکی بیش‌برآورد و الگوریتم SEBAL دارای کم‌برآورد است که دارای اریبی بیشتری نسبت به مدل TSEB است. در پژوهش‌های زیادی از جمله پژوهش فرنچ و همکاران (۹)، کلانیزی و همکاران (۱۱) و سیمنز و همکاران (۲۸) به این موضوع که الگوریتم TSEB در برآورد مقدار تبخیر-تعرق دارای بیش‌برآورد است اشاره شده است. همچنین براساس نتایج پژوهش چن و همکاران (۸) الگوریتم TSEB برای مناطق با شاخص سطح برگ بالا بسیار کاربردی و دارای مقداری بیش‌برآورد است. همچنین در مورد الگوریتم SEBAL نیز پژوهش‌های زیادی نتایج پژوهش حاضر را تأیید می‌کند. به عنوان نمونه می‌توان به پژوهش‌های لانگ و همکاران (۱۶) و خاند و همکاران (۱۹) که میزان تبخیر-تعرق گیاهان زراعی را با استفاده از تصاویر ماهواره لندست و الگوریتم SEBAL برآورد کردند و به ترتیب مقادیر ۰/۵- و ۰/۴- را برای شاخص اریبی بدست آوردند.

**بحث و نتیجه‌گیری**

Deleted: نتیجه‌گیری

Formatted: Space After: 0 pt

Formatted: Space After: 0 pt

Formatted: Line spacing: single

Formatted: Line spacing: single

Formatted: Line spacing: single

Formatted: Line spacing: single

Deleted: سنجش از دور

Deleted: دو جزئی

Deleted: به عنوان

Deleted: سنجش از دور

Deleted: دو جزئی

Deleted: دو جزئی

Deleted: به طور کلی

Deleted: قابل قبول

Deleted: سنجش از دور

Deleted: سنجش از دور

Deleted: سنجش از دور

Deleted: به صورت

Deleted: رزولوشن

Deleted: مورد استفاده

در این پژوهش برای ارزیابی دو روش تک منبعی (SEBAL) و دو منبعی (TSEB) سنجش ازدور از تصاویر دو ماهواره لندست ۷ و ۸ در مقیاس مزرعه استفاده شد. همچنین به دلیل فقدان مقدار اندازه‌گیری شده تبخیر-تعرق از مقادیر برآورد شده با استفاده از دو روش یک جزئی و دو جزئی فائو-۵۶ به عنوان مقادیر مرجع برای صحت‌سنجی روش‌های سنجش ازدور استفاده شد. نتایج آنالیز آماری نشان داد الگوریتم تک منبعی SEBAL در مقایسه با روش یک جزئی فائو-۵۶ نسبت به الگوریتم دو منبعی TSEB دارای خطای نسبی کمتری است. اما در مقایسه با روش دو جزئی فائو-۵۶ الگوریتم TSEB دقت بالاتری نشان داد. همچنین شاخص آریبی در مقایسه با هر دو روش یک و دو جزئی فائو-۵۶ نشان داد الگوریتم SEBAL دارای کم‌برآورد و الگوریتم TSEB دارای بیش‌برآورد است. به‌طور کلی مقدار خطای کلی در بازه ۸ تا حداکثر ۱۹ درصد در مقیاس روزانه بیانگر دقت قابل قبول روش‌های سنجش ازدور در این پژوهش دارد که در بین دو روش مورد ارزیابی الگوریتم TSEB با درصد خطای کمتر دارای دقت بالاتری است.

نکته حائز اهمیت در ارتباط با روش‌های سنجش ازدور این است که با توجه به اینکه روش‌های سنجش ازدور به صورت مکانی با توجه به قدرت تفکیک سنجنده مورد استفاده اطلاعات سطح مزرعه را در زمان کوتاه و با هزینه کمتر نسبت به روش‌های اندازه‌گیری مستقیم در اختیار ما قرار می‌دهند (در اینجا اطلاعات رطوبتی)، در خصوص مدیریت بهینه منابع آب و افزایش کارایی آبیاری بسیار ارزشمند هستند.

پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی برای ارزیابی دقیق‌تر روش‌های مذکور از اطلاعات اندازه‌گیری شده با استفاده از ابزارهای دقیق اندازه‌گیری مانند لایسیمتر و برج‌های اندازه‌گیری شار انرژی استفاده شود.

## References

1. Allen, Richard G., Pereira, Luis S., Raes, Dirk & Smith, M. (1998). FAO Irrigation and Drainage Paper Crop by. Irrigation and Drainage, 300(56), 300. <http://www.kimberly.uidaho.edu/water/fao56/fao56.pdf>
2. Anderson, M. C., Norman, J. M., Diak, G. R., Kustas, W. P., & Mecikalski, J. R. (1997). A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 60(2), 195–216. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00215-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00215-5)
3. Bahmanabadi, B., Kaviani, A., Daneshkar, A. P., & Nazari, R. (2019). Estimation of Actual Evapotranspiration Using Satellite Imageries and Single-Source and Two-Source Surface Energy Balance Algorithms in Qazvin Plain. *Journal of Water Research in Agriculture*, 32(2), 227-246. <https://doi.org/10.22092/jwra.2018.116961> (In Persian)
4. Bai, P. (2023). Comparison of remote sensing evapotranspiration models: Consistency, merits, and pitfalls. *Journal of Hydrology*, 617, 128856. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128856>
5. Bastiaanssen, W. G., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of hydrology*, 212, 198-212. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4)
6. Beg, A. A. F., Al-Sulttani, A. H., Ochtyra, A., Jarocińska, A., & Marcinkowska, A. (2016). Estimation of evapotranspiration using SEBAL algorithm and landsat-8 Data—a case study: Tatra Mountains region. *Journal of Geological Resource and Engineering*, 6, 257-270. <https://doi.org/10.17265/2328-2193/2016.06.002>
7. Campbell, G. S., & Norman, J. M. (2000). An Introduction to Environmental Biophysics. *Journal of Environmental Quality* 6(4). Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.2134/jeq1977.00472425000600040036x>
8. Chen, H., Huang, J. J., McBean, E., & Singh, V. P. (2021). Evaluation of alternative two-source remote sensing models in partitioning of land evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 597, 126029. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126029>
9. Colaizzi, P. D., Kustas, W. P., Anderson, M. C., Agam, N., Tolk, J. A., Evett, S. R., ... & O'Shaughnessy, S. A. (2012). Two-source energy balance model estimates of evapotranspiration using component and composite surface temperatures. *Advances in water resources*, 50, 134-151. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.06.004>
10. Diarra, A., Jarlan, L., Er-Raki, S., Le Page, M., Aouade, G., Tavernier, A., Boulet, G., Ezzahar, J., Merlin, O., & Khabba, S. (2017). Performance of the two-source energy budget (TSEB) model for the monitoring of evapotranspiration over irrigated annual crops in North Africa. *Agricultural Water Management*, 193, 71–88. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.007>
11. French, A. N., Hunsaker, D. J., Clarke, T. R., Fitzgerald, G. J., Luekett, W. E., & Pinter Jr, P. J. (2007). Energy balance estimation of evapotranspiration for wheat grown under variable management practices in central Arizona. *Transactions of the ASABE*, 50(6), 2059-2071. <https://doi.org/10.13031/2013.24108>
12. Gebremichael, M., Wang, J., & Sammis, T. W. (2010). Dependence of remote sensing evapotranspiration algorithm on spatial resolution. *Atmospheric Research*, 96(4), 489-495. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.12.003>
13. Hathaway, J. C. (2016). Integration of an unmanned aircraft system and ground-based remote sensing to estimate spatially distributed crop evapotranspiration and soil water deficit throughout the vegetation soil root zone (Doctoral dissertation, Colorado State University, Fort Collins).

14. Huntingford, C., Verhoef, A., & Stewart, J. (2000). Dual versus single source models for estimating surface temperature of African savannah. *Hydrology and Earth System Sciences* 4(1), pp. 185–191). <https://doi.org/10.5194/hess-4-185-2000>
15. Jiménez-Martínez, J., Skaggs, T. H., van Genuchten, M. T., & Candela, L. (2009). A root zone modelling approach to estimating groundwater recharge from irrigated areas. *Journal of Hydrology*, 367(1–2), 138–149. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.01.002>
16. Khand, K., Bhattarai, N., Taghvaeian, S., Wagle, P., Gowda, P. H., & Alderman, P. D. (2021). Modeling evapotranspiration of winter wheat using contextual and pixel-based surface energy balance models. *Transactions of the ASABE*, 64(2), 507-519. <https://doi.org/10.13031/trans.14087>
17. Kustas, W. P., & Daughtry, C. S. T. (1990). Estimation of the soil heat flux/net radiation ratio from spectral data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 49(3), 205–223. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(90\)90033-3](https://doi.org/10.1016/0168-1923(90)90033-3)
18. Kustas, W. P., & Norman, J. M. (1999). Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94(1), 13–29. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00005-2)
19. Long, D., & Singh, V. P. (2012). A modified surface energy balance algorithm for land (M-SEBAL) based on a trapezoidal framework. *Water Resources Research*, 48(2). <https://doi.org/10.1029/2011WR010607>
20. Morshedi A, Naderi M, Tabatabaei S H, Mohammadi J.2017. Estimation of Actual Evapotranspiration at Regional Scale using Remote sensing data in Shahrekord Plain (II) Comparing SEBAL and METRIC to Some Mathematical Models of Evapotranspiration . *Journal Water and Soil Sci (Sci. & Technol. Agric. & Natur. Resour.)*, 21 (3) :1-13. <https://doi.org/10.29252/jstnar.21.3.1> (In Persian)
21. Naseri, A., Abbasi, F., & Akbari, M. (2017). Estimating agricultural water consumption by analyzing water balance. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 18(68), 17-32. <https://doi.org/10.22092/aridse.2017.105338.1057> (In Persian)
22. Norman, J. M., Kustas, W. P., & Humes, K. S. (1995). Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77(3–4), 263–293. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02265-Y](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02265-Y)
23. Norman, J. M., Kustas, W. P., Prueger, J. H., & Diak, G. R. (2000). Surface flux estimation using radiometric temperature: A dual-temperature-difference method to minimize measurement errors. *Water Resources Research*, 36(8), 2263–2274. <https://doi.org/10.1029/2000WR900033>
24. Overman, A. R., & Scholtz III, R. V. (2002). *Mathematical models of crop growth and yield*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203909225>
25. Rango, A. (1994). Application of remote sensing methods to hydrology and water resources. *Hydrological Sciences Journal*, 39(4), 309-320. <https://doi.org/10.1080/02626669409492752>
26. Richards, F. J. (1959). A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany*, 10(2), 290–301. <https://doi.org/10.1093/jxb/10.2.290>
27. Santanello, J. A., & Friedl, M. A. (2003). Diurnal covariation in soil heat flux and net radiation. *Journal of Applied Meteorology*, 42(6), 851–862. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2003\)042<0851:DCISHF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2003)042<0851:DCISHF>2.0.CO;2)
28. Semmens, K. A., Anderson, M. C., Kustas, W. P., Gao, F., Alfieri, J. G., McKee, L., ... & Vézé, M. (2016). Monitoring daily evapotranspiration over two California vineyards using Landsat 8 in a multi-sensor data fusion approach. *Remote Sensing of Environment*, 185, 155-170. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.10.025>

29. Song, L., Liu, S., Zhang, X., Zhou, J., & Li, M. (2015). Estimating and validating soil evaporation and crop transpiration during the HiWATER-MUSOEXE. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(2), 334–338. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2339360>
30. Waters, R., Allen, R., Bastiaanssen, W., Tasumi, M., & Trezza, R. (2002). *Sebal. Surface Energy Balance Algorithms for Land. Idaho Implementation. Advanced Training and Users Manual*, Idaho, USA. <https://www.posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2016/09/MET-479-Waters-et-al-SEBAL.pdf>
31. Wei, J., Cui, Y., & Luo, Y. (2023). Rice growth period detection and paddy field evapotranspiration estimation based on an improved SEBAL model: Considering the applicable conditions of the advection equation. *Agricultural Water Management*, 278, 108141. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108141>
32. Wilcox, B. P., Seyfried, M. S., & Breshears, D. D. (2003). The water balance on rangelands. *Encyclopaedia of Water Science*, 2, 791–794. <https://doi.org/10.1081/E-EWS>
33. Wolff, W., Francisco, J. P., Flumignan, D. L., Marin, F. R., & Folegatti, M. V. (2022). Optimized algorithm for evapotranspiration retrieval via remote sensing. *Agricultural Water Management*, 262(May 2021). <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107390>
34. Yang, Y., Qiu, J., Zhang, R., Huang, S., Chen, S., Wang, H., Luo, J., & Fan, Y. (2018). Intercomparison of three two-source energy balance models for partitioning evaporation and transpiration in semiarid climates. *Remote Sensing*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/rs10071149>
35. Zhang, C., Long, D., Zhang, Y., Anderson, M. C., Kustas, W. P., & Yang, Y. (2021). A decadal (2008–2017) daily evapotranspiration data set of 1 km spatial resolution and spatial completeness across the North China Plain using TSEB and data fusion. *Remote Sensing of Environment*, 262, 112519. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112519>

## Comparison of two single-source and two-source remotely sensed methods for estimating actual daily evapotranspiration of maize using Landsat images at field scale

Mosayeb Moqbeli Damane<sup>1</sup>, Seyyed Hossein Sanaei Nejad<sup>2\*</sup>, Mojtaba Sadegh<sup>3</sup>

1. PhD. Student of Agricultural Meteorology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
2. Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Boise State University, USA

### Abstract

Optimizing irrigation in agriculture can be considered one of the most important tasks in research related to the agricultural sector because about 70 percent of the world's water consumption is consumed in this sector. Considering that almost the main factor of water wastage in this sector is equal to the rate of evapotranspiration, therefore, knowing this variable and its accurate estimation helps a lot to the primary goal, irrigation optimization. In this research, the use of two algorithms based on remote sensing data to estimate actual daily evapotranspiration at farm scale was investigated and evaluated. The actual evapotranspiration values were estimated using two remote sensing approaches, Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) and Two Source Energy Balance (TSEB), and data extracted

Deleted: ng bas

Commented [18]: ایمیل زیرنویس شود برای نویسنده مسوول  
ل  
\* Corresponding author e-mail address: sanaein@gmail.com



from Landsat 7 and 8 satellite images. To validate remote sensing methods, FAO-56 single and dual crop coefficient methods were used as reference values of actual evapotranspiration. Comparing the output of remote sensing methods with FAO-56 methods showed that both remote sensing methods have reliable output. The average error of the estimations was obtained based on two common statistical indicators, Root Mean Square Error (RMSE) and Mean Absolute Error (MAE) on the daily scale, 1.54 and 1.11 mm, respectively, for SEBAL and TSEB algorithms. Also, the bias index showed that the SEBAL algorithm has an underestimation (-0.69) and the TSEB algorithm has an overestimation (+1.24) in the estimation of actual evapotranspiration. The results obtained from the statistical analysis in this research show the higher accuracy of the TSEB algorithm in estimating the actual evapotranspiration of maize at the field scale.

**Keywords:** Actual Evapotranspiration, Remote Sensing, SEBAL Algorithm, TSEB Algorithm

Formatted: Font: Italic, Complex Script Font: Italic

## مقایسه دو روش سنجش از دور تک منبعی و دو منبعی برآورد تبخیر-تعرق واقعی روزانه ذرت در مقیاس مزرعه با استفاده از تصاویر لندست

### چکیده

طرح مسئله: بهینه‌سازی مصرف آب آبیاری در کشاورزی را می‌توان یکی از مهمترین کارهای لازم در پژوهش‌های مربوط به بخش کشاورزی دانست زیرا حدود ۷۰ درصد آب مصرفی جهان در این بخش مصرف می‌شود. با توجه به اینکه تقریباً عامل اصلی هدررفت آب در بخش کشاورزی برابر است با میزان تبخیر-تعرق، بنابراین شناخت این متغیر و برآورد دقیق آن کمک زیادی به هدف اولیه که بهینه‌سازی مصرف آب است، می‌کند.

**هدف:** آنچه تاکنون از بررسی پژوهش‌های انجام شده در داخل و خارج از کشور می‌توان مشاهده کرد، پیدا کردن روشی که بتواند فرآیند تخمین متغیر تبخیر-تعرق را در زمان کوتاه، بدون نیاز به استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده زیاد زمینی، با هزینه اندک، به صورت مکانی و با دقت بالایی انجام دهد اهمیت بالایی داشته است. عموماً روش‌های تخمین تبخیر-تعرق را می‌توان در سه دسته (۱) اندازه‌گیری مستقیم میدانی با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری مانند لایسیمتر و برج‌های اندازه‌گیری شمار انرژی (۲) روش‌های محاسباتی بر پایه اطلاعات هواشناسی و (۳) روش‌های بر پایه اطلاعات سنسجش از دور، قرار داد. دو دسته اول به دلیل نقطه‌ای بودن و نیازمند وقت و هزینه زیاد امروزه کارکرد خود را تقریباً از دست داده‌اند و روش‌های نوین سنسجش از دور به دلیل اینکه با هزینه کم و به صورت مکانی قابلیت انجام این کار را دارا هستند، کاربرد فراوانی یافته‌اند. روش‌های سنسجش از دور با پایه فیزیکی برآورد تبخیر-تعرق به طور کلی به دو دسته تک منبعی و دو منبعی تقسیم می‌شوند. در روش‌های تک منبعی اجزای خاک و پوشش گیاهی با هم ترکیب شده و منبع واحدی در نظر گرفته می‌شوند. در حالی که شرایط طبیعی اینگونه نیست و سطح ناهمگن زمین از ترکیب خاک و گیاه ساخته شده و دماها و مقاومت‌های آیرودینامیکی متفاوتی در ارتباط با تبادل انرژی دارند. اما روش‌های دومنبعی پارامترهای خاک و گیاه را به صورت جداگانه تحلیل می‌کنند، به این ترتیب که در تمام مراحل شبیه‌سازی از چندین مقاومت آیرودینامیکی مجزا برای خاک و گیاه و همچنین دمای مجزای خاک و پوشش گیاهی استفاده می‌کنند. در این پژوهش دو الگوریتم تک منبعی و دو منبعی مبتنی بر داده‌های سنسجش از دور برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی روزانه در مقیاس مزرعه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.

**روش تحقیق:** مقادیر تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از دو الگوریتم توازن انرژی سطح زمین (SEBAL)، توازن انرژی دو منبعی (TSEB) و داده‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌های لندست ۷ و ۸ در مقیاس مزرعه برای گیاه ذرت تابستانه واقع در مزرعه تحقیقات کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد با سطح زیر کشت ۱۵/۵ هکتار با آخرین تغییراتی که روی این الگوریتم‌ها توسط پژوهشگران انجام شده، برآورد شد. هر دو الگوریتم منتخب در این پژوهش با پایه فیزیکی و بر پایه معادله بیلان انرژی خورشید در سطح زمین هستند. الگوریتم SEBAL توسط باسستینسن در سال ۱۹۹۸ و الگوریتم TSEB توسط نرمن در سال ۱۹۹۵ توسعه پیدا کردند. برای این دو الگوریتم از تصاویر هر سنجنده‌ای که دارای محدوده طول موج مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز حرارتی باند الکترومغناطیس باشد، می‌توان استفاده کرد. هفت تصویر ماهواره‌ای در بازه کاشت تا برداشت گیاه (اگوست تا سپتامبر ۲۰۲۱) بدون پوشش ابر برای الگوریتم‌های سنسجش از دور انتخاب شد. **قدرت تفکیک مکانی** ماهواره لندست ۳۰ متر و **قدرت تفکیک زمانی** آن ۱۶ روز می‌باشد که در این پژوهش با استفاده همزمان از دو ماهواره لندست ۷ و ۸، به ۸ روز کاهش پیدا کرد. برای صحت‌سنجی برآوردهای دو روش سنسجش از دور، از دو روش یک جزئی و دو جزئی فائو-۵۶ به عنوان مقادیر مرجع تبخیر-تعرق واقعی، استفاده شد. از شاخص‌های آماری متداول ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و شاخص اریبی (Bias) برای آنالیز آماری خروجی الگوریتم‌های سنسجش از دور استفاده شد. اطلاعات هواشناسی مورد نیاز نیز در این پژوهش (دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد، تابش خورشید و دمای نقطه شبنم) در مقیاس‌های زمانی ۱۰ دقیقه‌ای و روزانه از ایستگاه خودکار هواشناسی واقع در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد گرفته شد.

**نتایج و بحث:** تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه خودکار واقع در فاصله ۷۵۰ متری مزرعه مورد مطالعه و روش روش فائو پنمن-مانتیت برآورد شد و سپس با استفاده از ضریب گیاهی ارائه شده در نشریه فائو-۵۶ و اصلاح آن برای اقلیم منطقه، تبخیر-تعرق واقعی تخمین زده شد. روش دو جزئی فائو-۵۶ نسبت به روش یک جزئی پیچیده‌تر و دارای محاسبات ریاضی بیشتری است. از آنجایی که این روش نیازمند محاسبه بیلان آب روزانه برای لایه سطحی خاک می‌باشد، حجم آب آبیاری در روزهای آبیاری با استفاده از کنتور اندازه‌گیری شد و با استفاده از روابط ارائه شده در نشریه فائو-۵۶ این بیلان بدست آمد و در نهایت مقادیر تبخیر-تعرق برآورد شد. برای اجرای الگوریتم‌های سنسجش از دور در ابتدا تصاویر ماهواره‌ای از وبسایت سازمان زمین شناسی آمریکا دانلود و تصحیحات اتمسفری و رادیومتریکی برای به حداقل رساندن خطاهای پردازشی روی تصاویر انجام شد. در ادامه هر یک از پارامترهای لازم برای اجرای الگوریتم‌ها استخراج و در نهایت شمار گرمای نهان که برابر با مقدار انرژی مصرف شده برای تبخیر-تعرق است بدست آمد. مقایسه خروجی روش‌های

Deleted: رزولوشن

Deleted: رزولوشن

سنجش از دور با روش‌های فائو-۵۶ نشان داد هر دو روش سنجش از دور دارای خروجی‌های قابل اعتمادی هستند. میانگین مقدار خطای برآورد براساس دو شاخص آماری متداول ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) در مقیاس روزانه به ترتیب ۱/۵۴ و ۱/۱۱ میلی‌متر برای الگوریتم SEBAL و TSEB در مقایسه با روش‌های مرجع بدست آمد. همچنین شاخص اریبی نشان داد برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی الگوریتم SEBAL دارای کم‌برآورد (۰/۶۹-) و الگوریتم TSEB دارای بیش‌برآورد (۱/۲۴+) است.

**نتیجه‌گیری:** نتایج آنالیز آماری نشان داد الگوریتم تک منبعی SEBAL در مقایسه با روش یک جزئی فائو-۵۶ نسبت به الگوریتم دو منبعی TSEB دارای خطای نسبی کمتری است. اما در مقایسه با روش دو جزئی فائو-۵۶ الگوریتم TSEB دقت بالاتری نشان داد. همچنین شاخص اریبی در مقایسه با هر دو روش یک و دو جزئی فائو-۵۶ نشان داد الگوریتم SEBAL دارای کم‌برآورد و الگوریتم TSEB دارای بیش‌برآورد است. به طور کلی مقدار خطای کلی در بازه ۸ تا حداکثر ۱۹ درصد در مقیاس روزانه بیانگر دقت قابل قبول روش‌های سنجش از دور در این پژوهش دارد که در بین دو روش مورد ارزیابی الگوریتم TSEB با درصد خطای کمتر دارای دقت بالاتری است.

**واژگان کلیدی:** تبخیر-تعرق واقعی، الگوریتم SEBAL، الگوریتم TSEB، سنجش از دور

## Comparison of two single-source and two-source remote sensing based methods for estimating actual daily evapotranspiration of maize using Landsat images at field scale

### Abstract

**Statement of the Problem:** Optimizing irrigation in agriculture can be considered one of the most important tasks in research related to the agricultural sector because about 70 percent of the world's water consumption is consumed in this sector. Considering that almost the main factor of water wastage in this sector is equal to the rate of evapotranspiration, therefore, knowing this variable and its accurate estimation helps a lot to the primary goal, irrigation optimization.

**Purpose:** What can be seen from the research conducted inside and outside the country of Iran so far is to find a method that can measure the evapotranspiration variable spatially and with high accuracy in a short time, without the need for a lot of ground-measured data and at a low cost. In general, evapotranspiration estimation methods can be classified into three categories: 1) direct field measurement using measurement tools such as lysimeters and energy flux measurement towers, 2) computational methods based on meteorological data, and 3) methods based on remote sensing data. The first two categories have almost lost their functionality due to being spot-on and requiring a lot of time and money, and modern remote sensing methods have found a lot of use because they can do this at a low cost and spatially. Physically based remote sensing methods of evapotranspiration estimation are generally divided into single-source and dual-source categories. In single-source methods, the components of soil and vegetation are combined and considered as a single source, while natural conditions are not like this and the heterogeneous surface of the earth is made of a combination of soil and vegetation and has different temperatures and aerodynamic resistances in connection with energy exchange. But two-source methods analyze the parameters of soil and vegetation separately, so that in all stages of simulation, they use several separate aerodynamic resistances for soil and vegetation, as well as separate temperature of soil and vegetation. In this research, two single-source and two-source algorithms based on remote sensing data were investigated and evaluated to estimate actual daily evapotranspiration at the farm scale.

**Methodology:** In this research actual evapotranspiration values estimated using two remote sensing based algorithms, Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) and Two Source Energy Balance (TSEB) with the latest

changes made on these algorithms by researchers. Input data extracted from Landsat 7 and 8 satellite images on the field scale for summer corn located in the agricultural research farm of Ferdowsi University of Mashhad with a cultivated area of 15.5 hectares has been used. Both algorithms selected in this research are physically based and based on the solar energy balance equation on the earth's surface. The SEBAL algorithm was developed by Bastiaanssen in 1998 and the TSEB algorithm was developed by Norman in 1995. For these two algorithms, the images of any sensor that has a visible wavelength, near infrared and thermal infrared range of the electromagnetic band can be used. Seven satellite images in the planting to harvest period (August to September 2021) without cloud cover were selected for remote sensing algorithms. The spatial resolution of Landsat satellite is 30 meters and its temporal resolution is 16 days, which in this research was reduced to 8 days by using two Landsat 7 and 8 satellites simultaneously. To validate the estimates of two remote sensing methods, two single-Kc and dual-Kc methods of FAO-56 were used as reference values of actual evapotranspiration. The common statistical indices, Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE) and Bias index were used for the statistical analysis of the output of remote sensing algorithms. The meteorological information needed in this research (air temperature, relative humidity, wind speed, solar radiation and dew point temperature) was obtained in 10-minute and daily time scales from the automatic meteorological station located in the research farm of Ferdowsi University of Mashhad.

**Results and discussion:** Reference Evapotranspiration (ET<sub>r</sub>) was estimated using the meteorological data of the automated station located 750 meters away from the studied farm and the FAO Penman-Monteith method, and then actual evapotranspiration using the crop coefficient (K<sub>c</sub>) provided in the FAO-56 publication and modifying it for the region's climate, was estimated. The FAO-56 dual-Kc method is more complicated and has more mathematical calculations than the single method. Since dual-Kc method requires the calculation of the daily water balance for the surface layer of the soil, the volume of irrigation water on irrigation days was measured using a meter and water balance was obtained using the relations provided in FAO-56 publication, and finally the evapotranspiration values was estimated. To implement remote sensing algorithms, satellite images were first downloaded from the US Geological Survey website, and atmospheric and radiometric corrections were made on the images to minimize processing errors. In the following, each of the necessary parameters for the implementation of the algorithms was extracted and finally the latent heat flux, which is equal to the amount of energy consumed for evapotranspiration, was obtained. Comparing the output of remote sensing methods with FAO-56 methods showed that both remote sensing methods have reliable outputs. The average value of the estimation error was obtained based on two statistical indicators, RMSE and MAE on a daily scale, 1.54 and 1.11 mm, respectively, for SEBAL and TSEB algorithms compared to the reference methods. Also, the Bias index showed that the SEBAL algorithm has an underestimation (-0.69) and the TSEB algorithm has an overestimation (+1.24) to estimate the actual evapotranspiration.

**Conclusion:** The results of the statistical analysis showed that SEBAL algorithm has a lower relative error between the SEBAL and TSEB algorithms compared to the FAO-56 single-Kc method. But compared to the dual-Kc method of FAO-56, the TSEB algorithm showed higher accuracy. Also, the Bias index compared to both single-Kc and dual-Kc methods of FAO-56 showed that the SEBAL algorithm has underestimation and the TSEB algorithm has overestimation. In general, the total error value in the range of 8 to 19 percent on a daily scale indicates the acceptable accuracy of the remote sensing methods in this research, and among the two evaluated methods, the TSEB algorithm with a lower percentage of error has a higher accuracy.

**Keywords:** Actual Evapotranspiration, Remote Sensing, SEBAL Algorithm, TSEB Algorithm