



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

مصیب مقبلی دامنه^۱، سیدحسین ثنائی نژاد^{۲*}، مجتبی صادق^۳

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۹ / پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۸ / دسترسی اینترنتی: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰

چکیده

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 این بخش 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. در این پژوهش استفاده از دو الگوریتم مبتنی بر داده‌های 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 داده‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌های لندست ۷ و ۸ برآورد شد.

برای صحت‌سنجی برآوردهای دو روش سنجش از دور، از دو روش یک جزئی و دو جزئی فائو-۵۶ به عنوان مقادیر مرجع تبخیر-تعرق واقعی، استفاده شد. مقایسه خروجی روش‌های 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. نتایج بدست آمده از آنالیز آماری در این پژوهش دقت بالاتر الگوریتم TSEB را در برآورد تبخیر-تعرق واقعی برای گیاه ذرت در مقیاس مزرعه را نشان می‌دهد.

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

مصیب مقبلی دامنه^۱، سیدحسین ثنائی نژاد^{۲*} (✉)، مجتبی صادق^۳

۱- دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی

مشهد

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه ایالتی بویزی، بویزی، آمریکا

DOI:

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: sanaein@gmail.com

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 شار انرژی (۲) روش‌های محاسباتی بر پایه اطلاعات هواشناسی و (۳) روش‌های بر پایه اطلاعات سنسج 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 سنسج از دور به دلیل اینکه با هزینه کم و به صورت مکانی قابلیت انجام این کار را دارا هستند، کاربرد فراوانی یافته‌اند. روش‌های سنسج 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 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. در این پژوهش دو الگوریتم تک منبعی و دو منبعی مبتنی بر داده‌های سنسج 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 باستیناسن 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 (آگوست تا سپتامبر ۲۰۲۱) بدون پوشش ابر برای الگوریتم‌های سنسج از دور انتخاب شد. رزولوشن مکانی ماهواره لندست ۳۰ متر و رزولوشن 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 سنسج 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 سنسج 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 فائو پنمن-مانتیث 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 سنسج 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 شار گرمای نهان که برابر با مقدار انرژی مصرف شده برای تبخیر-تعرق

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-تغرق واقعی، الگوریتم SEBAL، الگوریتم TSEB، سنجش از دور

است بدست آمد. مقایسه خروجی روش‌های 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-تغرق 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

لطفاً به این مقاله استناد کنید: مقبلی دامنه، مصیب، ثنائی نژاد، سیدحسین، صادق، مجتبی. (۲۰۲۵). مقایسه دو روش سنجش از دور تک منبعی و دو منبعی برآورد تبخیر-تغرق واقعی روزانه ذرت در مقیاس مزرعه با استفاده از تصاویر لندست. نشریه سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۶(۲): ۱۵۶-۱۳۳.

مقدمه

یکی از عواملی که توسعه کشاورزی را در مناطق با اقلیم خشک و نیمه خشک با محدودیت مواجه کرده است کمبود آب است در حالی که در کشور ایران با احتساب تلفات حدود ۷۱ درصد آب مصرفی صرف آبیاری کشاورزی می شود و مقدار جهانی آن حدود ۷۰ درصد است (۲۱ و ۳۳). از طرفی تبخیر-تعرق به عنوان 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 روش های دقیق می تواند در ارتباط با مدیریت و برنامه ریزی مصرف منابع آب بسیار سودمند باشد. آنچه تاکنون از بررسی پژوهش های انجام شده در داخل و خارج از کشور می توان مشاهده کرد، پیدا کردن روشی که بتواند فرآیند تخمین متغیر تبخیر-تعرق را در زمان کوتاه، بدون نیاز به استفاده از داده های اندازه گیری شده زیاد زمینی، با هزینه اندک، به صورت مکانی و با دقت بالایی انجام دهد اهمیت بالایی داشته است. عموماً روش های تخمین تبخیر-تعرق در سه دسته ۱) اندازه گیری مستقیم میدانی با استفاده از ابزارهای اندازه گیری مانند لایسیمتر و برج های اندازه گیری شار انرژی (۲) روش های محاسباتی بر پایه اطلاعات هواشناسی و ۳) روش های بر پایه اطلاعات سنجش از دور، قرار می گیرند (۳۱). دو دسته اول به دلیل نقطه ای بودن و نیازمند وقت و هزینه زیاد امروزه کارکرد خود را تقریباً از دست داده اند و روش های نوین سنجش از دور به دلیل اینکه با هزینه کم و به صورت مکانی قابلیت انجام این کار را دارا هستند، کاربرد فراوانی یافته اند. از طرفی تکنولوژی سنجش از دور تنها روشی است که برای نواحی فاقد آمار و مکان هایی که اندازه گیری مستقیم دشوار است کارآمد می باشد (۲۵). در بین روش های سنجش از دور نیز، روش هایی که پایه فیزیکی دارند بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند (۳۵)، اما مسأله ای که همچنان حل نشده و نیازمند بررسی بیشتر می باشد این است که در بین روش های سنجش از دور توسعه یافته کدام روش دقت بالاتر و عدم قطعیت کمتری دارد؟

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

تاکنون الگوریتم های فراوانی در مناطق مختلف کره زمین در اقلیم های متنوع و در مقیاس های متفاوت مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته اند. کارکرد این الگوریتم ها 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 بررسی های فراوان پژوهش های 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 منطقه ای با کمترین نیاز به داده های اندازه گیری شده زمینی طراحی شده است، در واقع این الگوریتم یک حد واسطه در استفاده از روابط تجربی و پارامترهای فیزیکی می باشد (۵). براساس نتایج اعتبارسنجی الگوریتم سبال در ۱۳ پژوهش، میزان خطا را در برآورد تبخیر-تعرق، ۵ تا ۳۳ درصد برای برآورد تبخیر-تعرق لحظه ای 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.

پیشینه پژوهشی

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 سنجش از دور با برآوردهای حاصل از روش‌های ترکیبی فائو پنمن-مانیت، 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 سنجش از دور SEBAL، SSEB و TSEB را با اندازه‌گیری‌های لایسمتری 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-مانیت (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. 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 رزولوشن 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

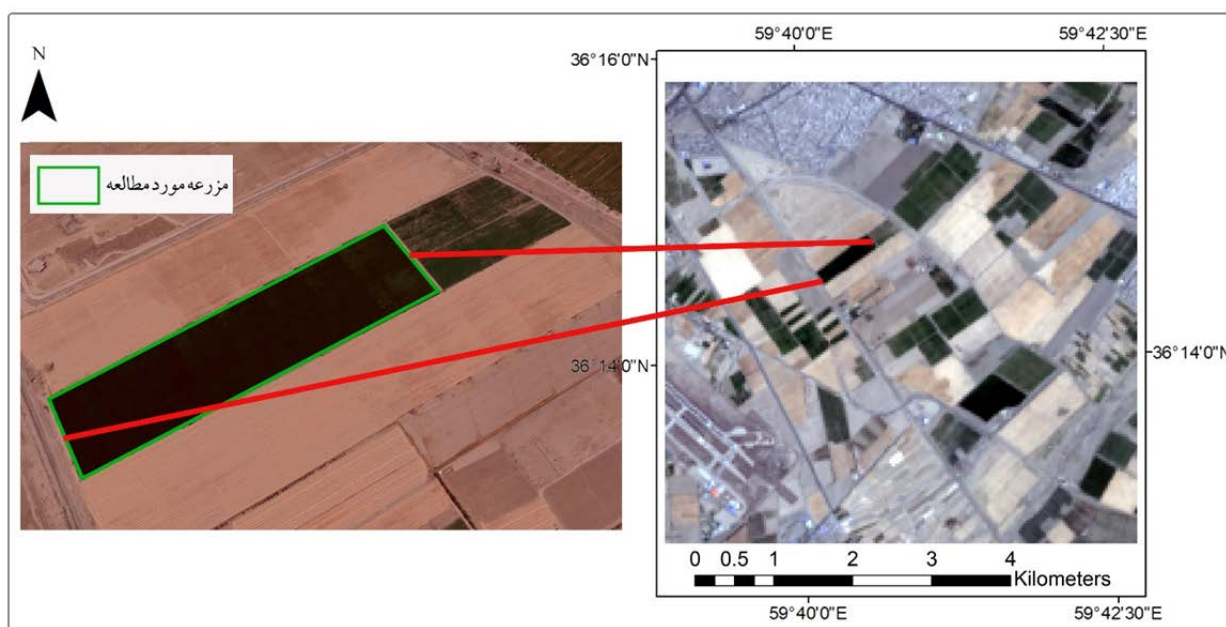
۳) مقایسه خروجی‌های الگوریتم‌های سنجش از دور و روش‌های سنتی

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

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.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Fig 1. Study area geographical location

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

داده‌های زمینی و تصاویر ماهواره‌ای

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.

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

رزولوشن مکانی ماهواره لندست ۳۰ متر و رزولوشن 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.

الگوریتم‌های سنجش از دور مبتنی بر توازن انرژی سطح زمین برای تخمین نبخیر-تعرق، حل معادله توازن انرژی رسیده از خورشید در سطح زمین می‌باشد که به شکل زیر است:

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

در رابطه فوق R_n ، G ، H و λET به ترتیب شار تابش خالص در سطح زمین، شار گرمای خاک، شار گرمای محسوس و شار گرمای نهان (همگی بر حسب W/m^2) می‌باشند. برای اندازه‌گیری این پارامترها، الگوریتم‌های مختلف از روش‌های متفاوتی استفاده می‌کنند که در واقع تفاوت الگوریتم‌ها همین مورد است. در الگوریتم TSEB که یک روش دومنبعی است، دو جزء خاک و پوشش گیاهی برای این پارامترها بصورت جداگانه بررسی می‌شوند. 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:

الگوریتم سنجش 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 ایشان و همکارانشان روی الگوریتم اولیه انجام شد (۱۸ و ۲۳). 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 از تصاویر ماهواره‌ای از باندهای محدوده طول موج مرئی (قرمز، سبز و آبی)، مادون قرمز نزدیک و باند حرارتی طیف الکترومغناطیس استفاده می‌شود. اساس کلیه

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:

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

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

در این معادلات ρ_{air} چگالی هوا (Kg/m^3)، C_p گرمای ویژه هوا ($J/Kg/K$) و T_c ، T_s و T_{air} به ترتیب دمای خاک، دمای پوشش گیاهی و دمای هوا (K)، R_{ah} و R_s به ترتیب مقاومت آیرودینامیک به انتقال گرما از خاک و مقاومت آیرودینامیک 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:

$$T_{rad}(\varphi) \approx [f_c(\varphi)T_c^4 + (1 - f_c(\varphi))T_s^4]^{\frac{1}{4}} \quad [9]$$

که در آن $T_{rad}(\varphi)$ دمای سطح بدست آمده از سنجنده T_c ، (K) و T_s به ترتیب دمای پوشش گیاهی و دمای خاک (K)، $f_c(\varphi)$ جزء پوشش گیاهی در زاویه دید φ 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):

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

در این معادله LAI شاخص سطح برگ و Ω کلامپینگ فاکتور می‌باشد. کلامپینگ فاکتور ضریبی است که کاستاس و نرمن (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

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

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

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

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 θ زاویه زنتی 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 زنتی 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 زنتی 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 شیف 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

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 سنجده، 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 ϕ_1 و ϕ_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:

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):

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

$$f_s = (f_c \times \exp(-0.5LAI_L)) + (1 - f_c) \quad [12]$$

$$f_{c_initial} = 1 - \exp(-0.5LAI_{RS}) \quad [13]$$

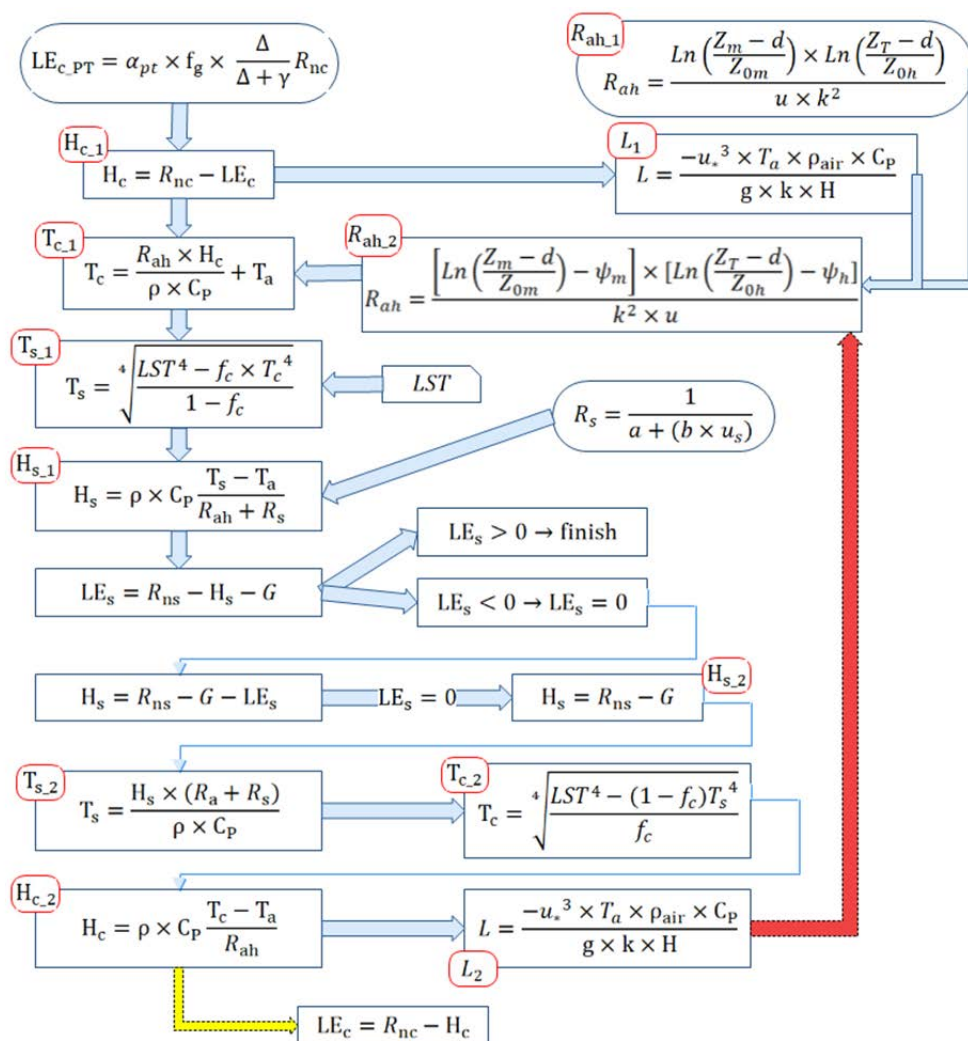
$$LAI_L = \frac{LAI_{RS}}{f_c} \quad [14]$$

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.

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

که در آن T_s دمای سطح زمین (k) ، BT دمای روشنایی سطح سنجنده، L_λ بازتاب باند حرارتی در بالای سطح جو و e_λ



شکل ۲. فرآیند برآورد تبخیر-تعرق با استفاده از الگوریتم TSEB

Fig 2. Evapotranspiration estimation process using TSEB algorithm

در این معادله α آلبیدوی سطحی (بی بعد)، R_{SL} تابش با طول موج کوتاه (0.3 تا 3 میکرومتر) رسیده به سطح زمین $R_{L\downarrow}$ ، $(W.m^{-2})$ تابش با طول موج بلند (3 تا 100 میکرومتر) رسیده به سطح زمین $R_{L\uparrow}$ ، $(W.m^{-2})$ تابش با طول موج بلند خروجی از سطح زمین ϵ_0 گسیلمندی حرارتی سطحی (بی بعد) می‌باشند.

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

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

الگوریتم سنجش از دور توازن انرژی سطح زمین SEBAL الگوریتم 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):

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

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

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

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

روش یک جزئی و دو جزئی فائو پنمن-مانتیت

برای صحت‌سنجی الگوریتم‌های سنجش 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:

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

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

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

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.

$$H = \frac{\rho_{air} C_p dT}{r_{ah}} \quad [29]$$

در رابطه بالا ρ_{air} چگالی هوا ($Kg.m^{-3}$) است که تابع فشار و دمای هوا می‌باشد، G_p گرمای ویژه‌ی هوا ($1004 J.kg^{-1}K^{-1}$)، dT اختلاف دما بین دو ارتفاع مبنا در الگوریتم سبال و r_{ah} مقاومت آیرودینامیکی در مقابل انتقال گرما ($s.m^{-1}$) است. در این معادله دو مجهول r_{ah} و dT 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 نهان بدست می‌آید که با استفاده از روابط زیر به مقدار تبخیر-تعرق واقعی در مقیاس روزانه می‌رسیم:

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad [30]$$

تعرق گیاه مرجع با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه خودکار واقع در فاصله ۷۵۰ متری مزرعه مورد مطالعه و روش فائو پنمن-مانیت 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. 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 فائو-۵۶ یک جزئی و دو جزئی در طول دوره رشد گیاه نشان داده شده است.

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-مانیت برای تخمین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل استفاده می‌شود. این مقدار در واقع قدرت تبخیرکنندگی جو را نشان می‌دهد که با

در روابط فوق، $k_{cb(tab)}$ ضریب گیاهی اصلاح نشده، u_2 میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دومتری RH_{min} ، (m/s) 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 تجمعی آب تبخیر شده از سطح بالای خاک بستگی دارد، k_{cmax} 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).

برای ارزیابی دقت الگوریتم‌های سنجش از دور مورد استفاده از تطابق دادن مقادیر برآورد شده توسط الگوریتم‌ها و مقادیر بدست آمده از روش‌های مرجع (فائو-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 و بحث

روش‌های یک جزئی و دو جزئی فائو-۵۶

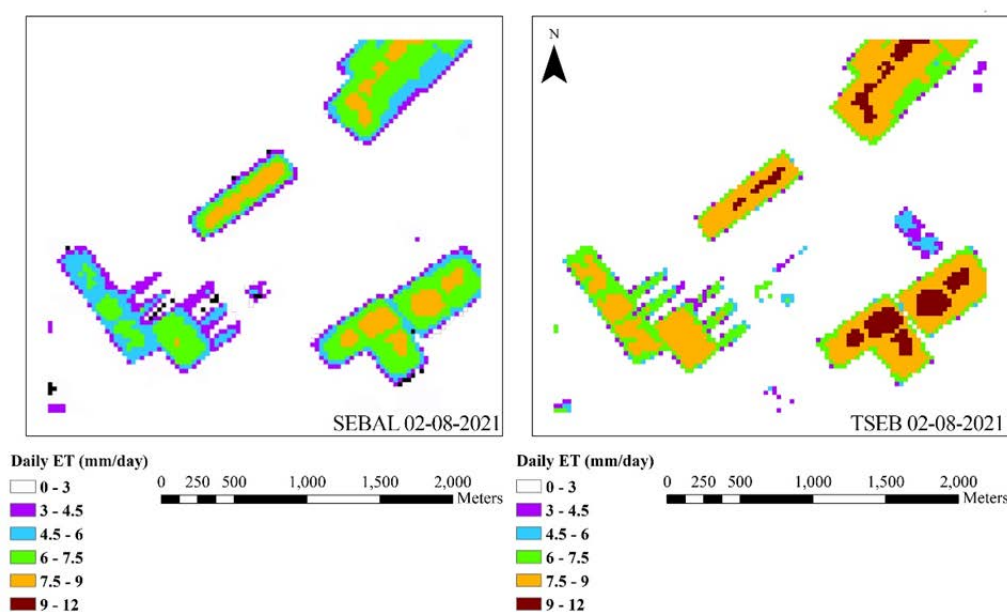
در ابتدا مقادیر تبخیر-تعرق با استفاده از دو روش یک جزئی و دو جزئی فائو-۵۶ برآورد شد. بدین منظور تبخیر-

الگوریتم‌های TSEB و SEBAL

برای اجرای الگوریتم‌های سنجش 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 سنجش 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.

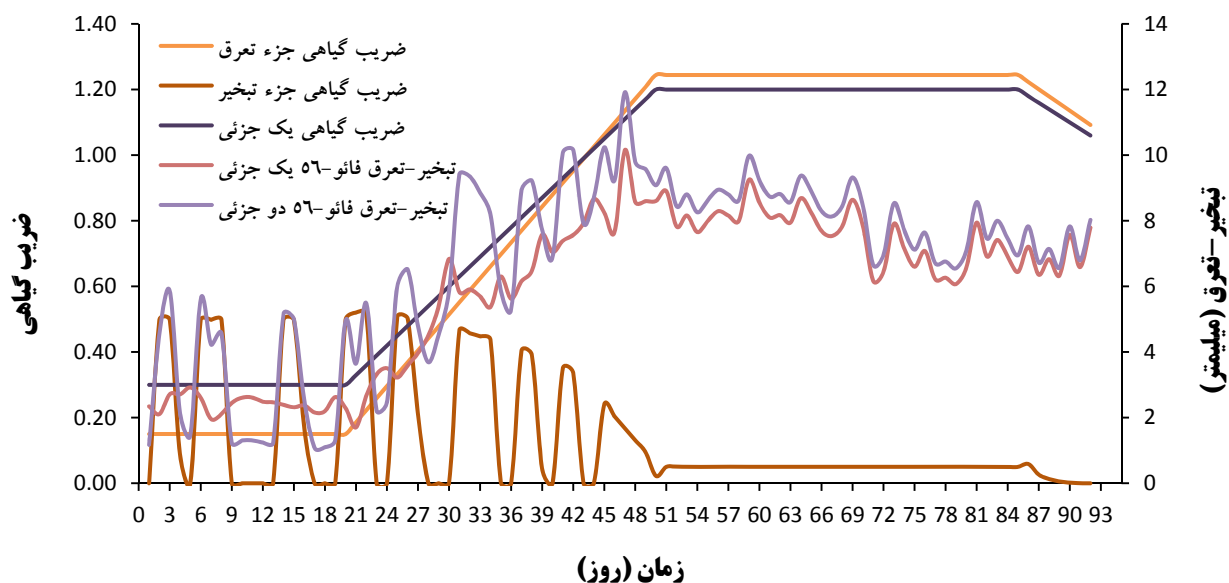
افزایش دمای هوا، سرعت باد، ساعات آفتابی و کاهش رطوبت نسبی، افزایش می‌یابد.

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).



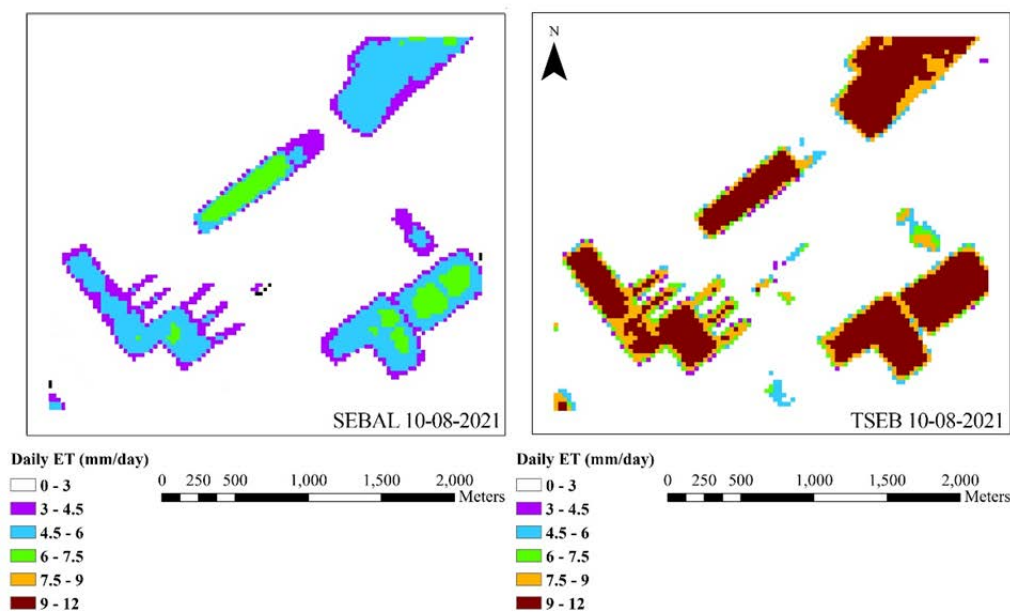
شکل ۴. تبخیر-تعرق واقعی گیاه ذرت روز ۳۷ بعد از تاریخ کاشت

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



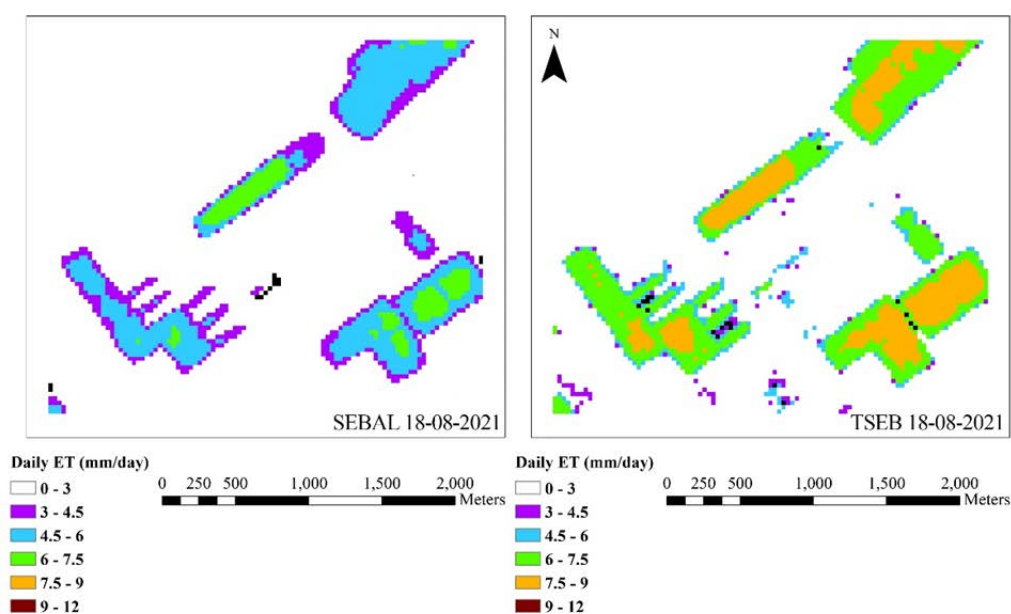
شکل ۳. مقادیر ضرایب گیاهی برای دو روش یک جزئی و دو جزئی و مقادیر تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده با استفاده از هر دو روش فائو-۵۶ یک جزئی و دو جزئی در طول دوره رشد گیاه

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



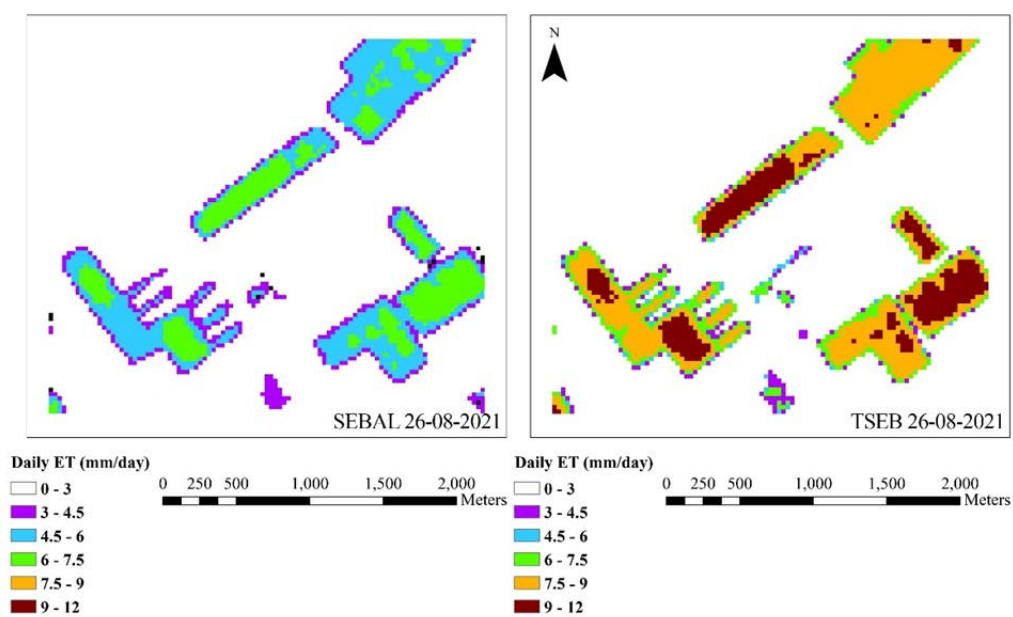
شکل ۵. تبخیر-تعرق واقعی گیاه ذرت روز ۴۵ بعد از تاریخ کاشت

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



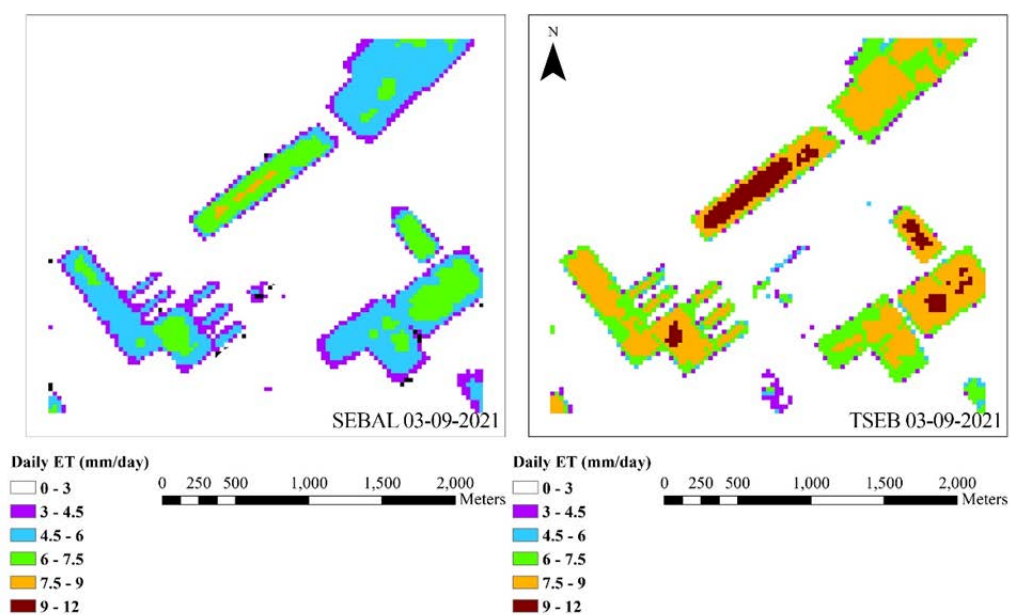
شکل ۶. تبخیر-تعرق واقعی گیاه ذرت روز ۵۳ بعد از تاریخ کاشت

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



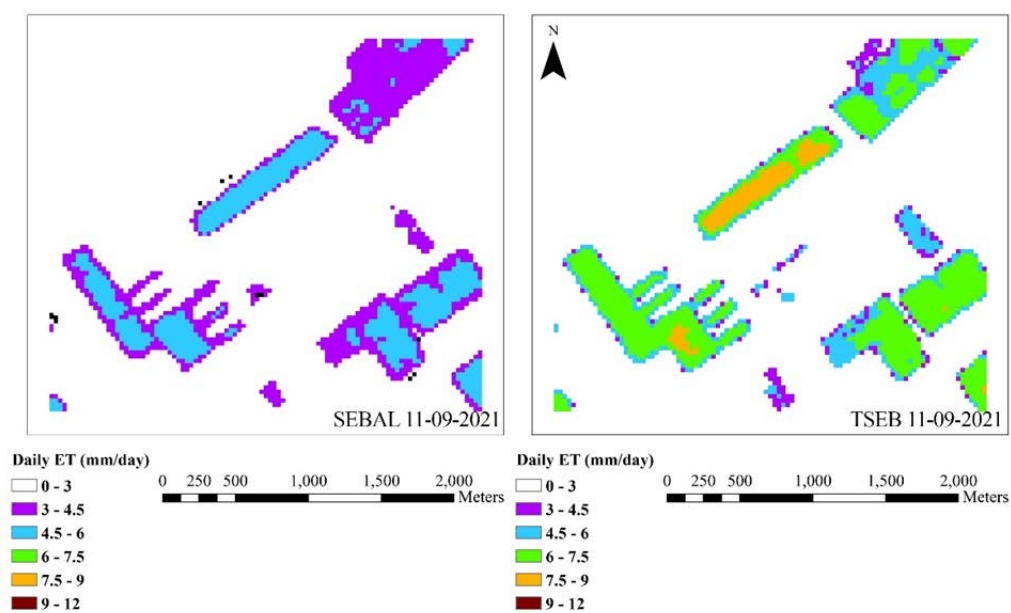
شکل ۷. تبخیر-تعرق واقعی گیاه ذرت روز ۶۱ بعد از تاریخ کاشت

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



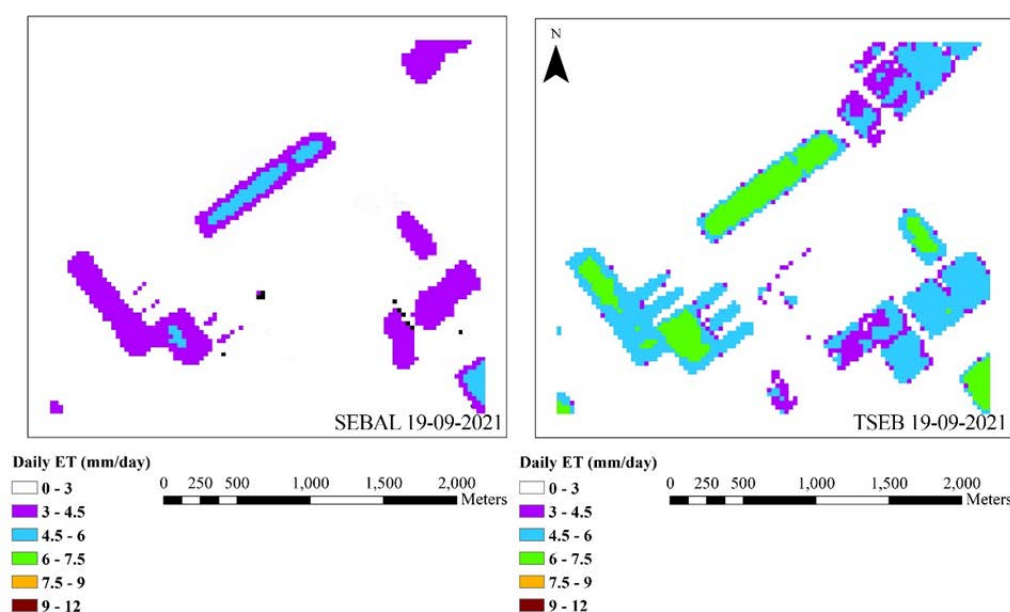
شکل ۸. تبخیر-تعرق واقعی گیاه ذرت روز ۶۹ بعد از تاریخ کاشت

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

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 سنجش از دور و همچنین مقادیر برآورد شده با استفاده از دو روش یک جزئی و دو جزئی فائو-۵۶ آمده است.

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 سنجش از دور، همانطور که در تصاویر به وضوح دیده می‌شود، برخلاف روش‌های اندازه‌گیری مستقیم و روش‌های سستی که به صورت نقطه‌ای متغیر تبخیر-تعرق را برآورد می‌کنند، روش‌های سنجش از دور آن را به صورت مکانی برآورد کرده و در

جدول ۳. مقادیر میانگین تبخیر-تعرق (میلیمتر بر روز) بدست آمده از دو الگوریتم سنجش 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

۶/۷	۶/۶	۷/۷۹	۵/۵۲	۲۰۲۱-۰۹-۱۱	۱۴۰۰/۰۶/۲۰
۶/۹	۶/۸	۶/۵	۴/۸	۲۰۲۱-۰۹-۱۹	۱۴۰۰/۰۶/۲۸

در ادامه برای ارزیابی دو الگوریتم سنجش 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.

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 یک جزئی فائو-۵۶	الگوریتم TSEB و روش یک جزئی فائو-۵۶	الگوریتم SEBAL و روش دو جزئی فائو-۵۶	الگوریتم TSEB و روش 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)، کلائیزی 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.

نتیجه گیری

در این پژوهش برای ارزیابی دو روش تک منبعی (SEBAL) و دو منبعی (TSEB) سنجش از دور 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 از دور 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 ارببی 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.

نکته حائز اهمیت در ارتباط با روش‌های سنجش از دور این است که با توجه به اینکه روش‌های سنجش از دور به صورت مکانی با توجه به رزولوشن 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 آبی 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

- 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>
- 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)
- 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)
- 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>
- 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)
- 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>
- 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>
- 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>
- Colaizzi, P. D., Kustas, W. P., Anderson, M. C., Agam, N., Tolck, 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>
- 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., Luckett, 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., ... & Vélez, 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 remote sensing based methods for estimating actual daily evapotranspiration of maize using Landsat images at field scale

Mosayeb Moqbeli Dameneh¹, Seyed Hossein Sanaeinejad^{2*}, Mojtaba Sadegh³

Received: 2022-11-20 / Accepted: 2022-12-09 / Published: 2025-03-10

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 from Landsat 7 and 8 satellite images.

Mosayeb Moqbeli Dameneh¹, Seyed Hossein Sanaeinejad² (✉), Mojtaba Sadegh³

1 - PhD Student of Agricultural Meteorology, Department of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

2 - Assoc. Prof. College of Water Engineering, Department of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

3 - Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Boise State University, USA

DOI:

e-mail: sanaein@gmail.com

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.

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_r) 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_c) 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

Please cite this article as: Moqbeli Dameneh, Mosayeb, Sanaeinejad, Seyed Hossein, Sadegh, Mojtaba. (2025). 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. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 16(2): 133-156.