

ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux در برآورد تبخیر و تعرق روزانه با استفاده از داده‌های ماهواره‌ی لندست ۸

ابوالفضل دلاوری کامیاب^۱، شهرو مختاری^{۲*} و رضا جعفری‌نیا^۳

چکیده

تبخیر و تعرق، یکی از مؤلفه‌های کلیدی چرخه‌ی هیدرولوژیکی کره‌ی زمین است و برآورد دقیق آن به‌عنوان عامل مهمی در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در کشاورزی، اهمیت بسیار زیادی دارد. در چند دهه‌ی گذشته، پژوهشگران به روش‌های مبتنی بر استفاده از تصاویر ماهواره‌ای توجه کرده‌اند؛ به‌گونه‌ای که انواع روش‌های سنجش از دور را برای برآورد تبخیر و تعرق توسعه داده‌اند. در پژوهش حاضر، امکان استفاده از دو مدل مبتنی بر سنجش از دور سبال (SEBAL) و متریک (EEFLux) و مقایسه آنها در برآورد تبخیر و تعرق روزانه در مزرعه‌ی اوقاف اراک بررسی شد. با استفاده از مدل‌های SEBAL و EEFLux، شارهای سطحی برای هر پیکسل تصویر ماهواره‌ی لندست ۸ (برای ۸ تصویر در دوره‌ی فصل رویشی در مزرعه‌ی اوقاف اراک) محاسبه و مقدار تبخیر و تعرق واقعی به‌صورت باقیمانده‌ی معادله‌ی توازن انرژی در سطح برآورد شد. دقت نتایج الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux با استفاده از داده‌های لایسیمتر (برداشت‌شده در ۸ تاریخ منطبق با تاریخ تصاویر ماهواره‌ی لندست ۸) با استفاده از معیارهای RMSE، NSE، PBAIS و R^2 انجام شد. نتایج برآورد تبخیر و تعرق روزانه حاصل از الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux به این صورت بود که با شروع فصل زراعی، مقادیر تبخیر و تعرق روزانه کم بود و سپس با گذر زمان و رسیدن به میانه‌های فصل زراعی، مقدار تبخیر و تعرق به اوج خود رسید و پس از آن، مقادیر تبخیر و تعرق به‌علت کاهش دما و تغییرات پوشش ذرت در منطقه‌ی مورد مطالعه، سیر نزولی به خود گرفت. مقایسه‌ی الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux نشان داد الگوریتم SEBAL، حدود ۷/۷۱ درصد تبخیر و تعرق واقعی روزانه در محدوده‌ی مزرعه‌ی اوقاف اراک را بیشتر برآورد کرده است. نتایج ارزیابی عملکرد نشان داد RMSE، NSE، PBIAS و R^2 براساس الگوریتم SEBAL به‌ترتیب، برابر با ۰/۷۱۱، ۰/۸۰۷، ۷/۳۹۸ و ۰/۸۸۵ و برای الگوریتم EEFLux به‌ترتیب، برابر با ۱/۰۴۶، ۰/۵۸۲، ۱۵/۰۸۰ و ۰/۷۹۳ بود؛ از این‌رو، ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux با توجه به داده‌های لایسیمتر نشان داد الگوریتم SEBAL، همبستگی بیشتر و انحراف کمتر نسبت به الگوریتم EEFLux دارد. بر این اساس، الگوریتم SEBAL نسبت به الگوریتم EEFLux، نتایج بهتری ارائه داده است و الگوریتم SEBAL، دقت زیاد تصاویر را در برآورد تبخیر و تعرق نشان داد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق روزانه، سنجش از دور، لندست ۸، SEBAL و EEFLux.

ارجاع: دلاوری کامیاب ا.، مختاری ش. و جعفری‌نیا ر. ۱۴۰۰. ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux در برآورد تبخیر و تعرق روزانه با استفاده از داده‌های ماهواره‌ی لندست ۸. مجله پژوهش آب ایران. ۴۳: ۹۹-۹۹.

۱- دانشجوی دکترای گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک.
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک.
۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک.

* نویسنده مسئول: Sh-mokhtari@iau-arak.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۴

مقدمه

افزایش روزافزون جمعیت جهان و نیاز بسیار به مواد غذایی از یک سو و محدودیت منابع آب از سوی دیگر، لزوم برنامه‌ریزی برای استفاده درست‌تر از منابع آب را دوچندان می‌کند (ثنایی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۰؛ سرگزی و قویدل، ۱۳۹۶). تبخیر و تعرق (شامل تبخیر از سطح خاک و تعرق از گیاهان)، یکی از عوامل مهم در چرخه هیدرولوژی و از جمله عوامل تعیین‌کننده معادلات انرژی در سطح زمین و توازن آب است و برآورد آن در زمینه‌های مختلف علمی همچون هیدرولوژی، کشاورزی و مدیریت منابع آب ضروری است (امیدوار و همکاران، ۱۳۹۲). یکی از راه‌های رسیدن به کشاورزی پایدار، تعیین دقیق مقدار آبی که با تبخیر و تعرق مصرف می‌شود، مدیریت آن از عوامل تعیین‌کننده در برنامه‌ریزی برای رسیدن به محصول بیشتر است (میرموسوی و همکاران، ۱۳۹۱). همچنین کمی‌کردن مقادیر تبخیر و تعرق برای درک فرایندهای اصلی، شامل تغییرات فنولوژی پوشش گیاهی و بیلان آب اکوسیستم‌ها، امری ضروری است (باتارای و همکاران، ۲۰۱۷). استفاده از داده‌های میدانی برداشت‌شده برای مقایسه نتایج حاصل از مدل‌ها به کار می‌رود و کاربرد مدل در منطقه را توجیه می‌کند (هرمن و همکاران، ۲۰۱۸). با توجه به موارد گفته‌شده، از جمله نقطه‌ای بودن روش‌های معمول برآورد تبخیر و تعرق، استفاده از روش‌هایی که تبخیر و تعرق را با توجه به شرایط خاک و رطوبت و دمای هر نقطه از منطقه مشخص کند، در برنامه‌ریزی‌های کلان کاربرد دارد (باستیانسن، ۲۰۰۵)؛ بنابراین، در سطوح بسیار وسیع، مانند دشت‌ها و حوزه‌های آبخیز باید از تکنیک‌ها و مدل‌های مختلف و جدید استفاده شود (تالسمای و همکاران، ۲۰۱۸a). در بیشتر روش‌های ارائه‌شده برای تعیین میزان تبخیر و تعرق، مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع تخمین زده و با استفاده از آن، نیاز آبی گیاه مدنظر محاسبه می‌شود (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۳). کمی‌کردن تبخیر و تعرق، یکی از مسائل پیچیده در چرخه هیدرولوژی با عوامل زیاد محیطی و اقلیمی است و عملیات میدانی اندازه‌گیری تبخیر و تعرق، مانند روش بیلان آب خاک، همبستگی اددی و روش نسبت باوون، هزینه‌بر و زمان‌گیر است (دروگرس، ۲۰۰۰ و النمر و همکاران، ۲۰۱۹). علاوه بر این، روش‌های مذکور فقط برای مناطق کوچک کاربرد دارد. در چند دهه اخیر،

روش‌های مبتنی بر سنجش از دور برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی، به‌علت پیشرفت‌های زیاد در محاسبات کامپیوتری و کاربرد آن در سطوح وسیع، رشد زیادی داشته است. به داده‌های ماهواره‌ای به‌عنوان منبع اصلی اطلاعات پایه و بهنگام برای استفاده در برآورد تبخیر و تعرق و کشاورزی دقیق توجه می‌شود (لئو و کار، ۲۰۱۴؛ مرشدی و همکاران، ۱۳۹۵). از رایج‌ترین تصاویر ماهواره‌ای برای برآورد تبخیر و تعرق، تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ (با دوره بازگشت ۱۶ روزه و قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر در باندهای مرئی و ۱۰۰ متر در باندهای حرارتی) است (سینگ و همکاران، ۲۰۱۴). به‌تازگی، پژوهشگران زیادی برای برآورد تبخیر و تعرق به داده‌های سنجش از دور و الگوریتم‌ها و روش‌های مبتنی بر بیلان انرژی در سطح، توجه ویژه‌ای داشته‌اند. بر همین اساس، الگوریتم‌های گوناگونی، مانند سیال (SEBAL)، متریک (METRIC)، سبس (SEBS) و سبی (SEBI) ارائه شده است. ژو و همکاران (۲۰۱۴) مدل‌های T₃ الگوریتم سیال و کوواریانس اددی را در برآورد تبخیر و تعرق مقایسه کردند. نتایج آنها نشان داد مدل T₃ صحت و دقت بیشتری در برآورد تبخیر و تعرق داشت. سینگ و همکاران (۲۰۱۴)، تصاویر ۸ روزه مودیس را با تصاویر لندست در حوزه آبریز کلرادو در آمریکا با استفاده از روش خطی با عرض از مبدأ صفر (LinZI) برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی تلفیق کردند. نتایج آنها نشان‌دهنده همبستگی زیاد تبخیر و تعرق واقعی و برآوردشده بود. یانگ و همکاران (۲۰۱۵)، میزان تبخیر و تعرق در مزارع ذرت و گندم در فصل تابستان را در کشور چین براساس الگوریتم سیال محاسبه کردند. نتایج آنها نشان داد ارتباط زیادی بین تبخیر و تعرق با دمای سطح زمین و شاخص NDVI و بین فنولوژی گیاه در سطوح مختلف مزارع با میزان تبخیر و تعرق وجود داشت. پژوهشگران دیگری نیز در خارج از کشور با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و الگوریتم سیال، تبخیر و تعرق در سطوح مختلف را محاسبه کردند (باتود و همکاران، ۲۰۱۷؛ ناو و همکاران، ۲۰۱۸؛ ژو و همکاران، ۲۰۱۹). در داخل کشور نیز پژوهشگران زیادی، برآورد تبخیر و تعرق را با استفاده از داده‌های سنجش از دور و الگوریتم‌های کامپیوتری بررسی کردند. قربانی و همکاران (۱۳۹۴)، الگوریتم‌های سیال (SEBAL) و متریک را (EEFLux) در برآورد تبخیر و

تغییرات بارندگی سالانه از ۲۱۰ تا ۴۳۰ میلی‌متر، متغیر و میانگین دمای سالانه ۱۲/۲ سانتی‌گراد است. محصولات پاییزه (گندم و جو) به‌طور عمده به‌صورت دیم و محصولات بهاره به‌صورت آبی (ذرت) کشت می‌شود (خیراندیش، ۱۳۹۷). مزرعه اوقاف اراک در بخش مرکزی حوزه آبریز کویر اراک واقع شده و مساحتی بالغ بر ۱۳۰ هکتار را به خود اختصاص داده است. در شکل ۱، موقعیت منطقه مورد مطالعه روی نقشه ایران و استان مرکزی ارائه شده است.

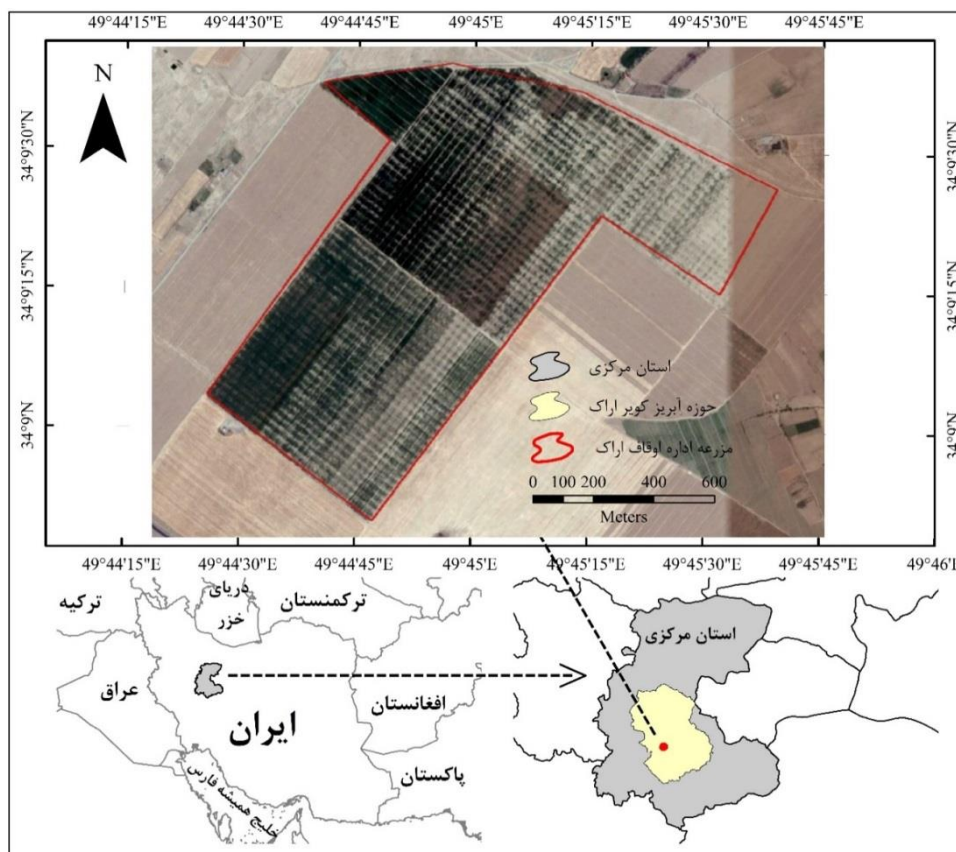
روش تحقیق

هدف پژوهش حاضر، مقایسه نتایج الگوریتم‌های SEBAL و EEFlux در برآورد تبخیر و تعرق با نتایج داده‌های به‌دست‌آمده از داده‌های زمینی (لایسیمتر) بود. در این بخش، به‌طور خلاصه، روش‌های نمونه‌گیری توضیح داده شده، معیارهای استفاده‌شده برای مقایسه نتایج SEBAL و EEFlux ارائه می‌شود. با توجه به اینکه الگوریتم‌ها و روش‌های مذکور با گذشت زمان، بهبود و تکامل یافته است، نتایج بهتر آنها با کاربردهای گوناگون در مناطق گوناگون مورد مطالعه در چندین سال گوناگون اتفاق می‌افتد و از نسخه‌های مختلف الگوریتم‌های مذکور می‌توان استفاده کرد. نسخه‌های مختلف الگوریتم‌های مذکور، شامل تفاوت در مؤلفه‌های تعادل انرژی تولیدشده است که به‌طور کلی، جزئی است؛ برای مثال، در محاسبه شار گرمای زمین و زبری آیرودینامیکی می‌توان تفاوت آنها را بیان کرد (تالسم و همکاران، ۲۰۱۸b). پژوهش حاضر، ۵ مرحله دارد که به‌ترتیب عبارت است از: ۱- بررسی‌های میدانی برای انتخاب مزرعه ذرت اراک و جمع‌آوری داده‌های زمینی؛ ۲- محاسبه تبخیر و تعرق مزارع ذرت مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری‌شده با استفاده از رابطه پنمن-مانتیس و لایسیمتر؛ ۳- برآورد تبخیر و تعرق ذرت در دوره رشد با استفاده از الگوریتم SEBAL و تصاویر ماهواره لندست ۸؛ ۴- برآورد تبخیر و تعرق ذرت در دوره رشد با استفاده از الگوریتم EEFlux و تصاویر ماهواره لندست ۸ و ۵- ارزیابی نتایج الگوریتم‌های SEBAL و EEFlux با استفاده از معیارهای ارزیابی عملکرد.

تعرق شهرستان ملایر، ارزیابی مقایسه‌ای کردند. نتایج آنها نشان داد الگوریتم سبال با میانگین تبخیر و تعرق ۶/۸۳ میلی‌متر در روز، نسبت به الگوریتم متریک با مقدار ۷/۲۱ میلی‌متر در روز، حدود ۵/۲۶ درصد تبخیر و تعرق واقعی روزانه در محدوده شهرستان ملایر را کمتر برآورد کرده است. ملک‌پور و همکاران (۱۳۹۵)، تبخیر و تعرق دشت قزوین را با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر ماهواره لندست ۵ محاسبه و نتایج را با داده‌های لایسیمتری موجود در منطقه ارزیابی کردند. نتایج، نشان‌دهنده دقت مناسب الگوریتم سبال در تخمین تبخیر و تعرق بود. فرهادی بانسوله و همکاران (۱۳۹۵)، تبخیر و تعرق واقعی ذرت در ماهی‌دشت را با استفاده از الگوریتم سبیس و تصاویر لندست ۵ در فصل رشد ذرت برآورد کردند. نتایج آنها نشان داد حداکثر اختلاف بین تبخیر و تعرق برآوردشده با الگوریتم سبیس در مزرعه ذرت و مقادیر اندازه‌گیری‌شده درون لایسیمتر ۰/۳۴ میلی‌متر در روز بود که معادل ۴/۵۶ درصد تبخیر و تعرق اندازه‌گیری‌شده در همان روز بود. از دیگر مطالعات انجام‌شده در داخل کشور به پژوهش‌های کریمی و همکاران (۱۳۹۱)، امیدوار و همکاران (۱۳۹۲)، قمرنیا و رضوانی (۱۳۹۳)، مرشدی و همکاران (۱۳۹۶a)، مرشدی و همکاران (۱۳۹۶b) و مرشدی و همکاران (۱۳۹۶c) می‌توان اشاره کرد؛ از این‌رو، در پژوهش حاضر با استفاده از تصاویر سنجنده‌های OLI و TIRS مربوط به ماهواره لندست ۸ و الگوریتم‌های سبال (SEBAL) و متریک (EEFLux)، تبخیر و تعرق از سطح مزارع ذرت علوفه‌ای در مزرعه اوقاف اراک برآورد می‌شود.

مواد و روش‌ها

براساس تقسیم‌بندی وزارت نیرو، مزرعه اوقاف اراک در حوزه آبریز کویر اراک قرار گرفته است که به‌لحاظ مورفولوژیکی، به نام دشت اراک شناخته می‌شود و بین طول‌های ۴۰' ۴۹° تا ۴۷' ۴۹° شرقی و عرض‌های ۰۷' ۳۴° تا ۱۱' ۳۴° شمالی واقع شده است که مساحتی بالغ بر ۵۵۰۰ کیلومتر مربع دارد. از نظر هیدرولوژیکی، تمامی جریانات سطحی آن به دریاچه میقان (با مساحت ۱۰۶ کیلومتر مربع) منتهی می‌شود. ارتفاع بیشینه این حوزه، ۳۱۱۸ متر؛ ارتفاع کمینه، ۱۶۶۰ متر؛ ارتفاع متوسط، ۱۹۲۶ متر و شیب متوسط سطح، ۱/۹۷ درصد است.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

گیاه ذرت از حاصل‌ضرب تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع در ضریب گیاهی محاسبه و مجموع آن برای دوره رشد برای منطقه مورد مطالعه تعیین شد؛ از این‌رو، تبخیر و تعرق واقعی در مزرعه اوقاف اراک با استفاده از داده‌های لایسیمتر و عملیات میدانی تعیین شد. دستگاه لایسیمتر برای اندازه‌گیری میزان تبخیر و تعرق به کار می‌رود (بیشتر به کمک روش محاسبه وزنی؛ زیرا دقیق‌تر است) و به درک بهتر تعادل آب کمک می‌کند. لایسیمتر، یک مخزن بزرگ و پرشده از خاک است (در پژوهش حاضر، جنس آن از فولاد بود) و حجم آن یک متر مکعب (در پژوهش حاضر) در نظر گرفته شد تا برای رویش گیاه و توسعه ریشه‌ها در زمان آبیاری، مانعی به وجود نیاید. برای نصب دستگاه لایسیمتر، ابتدا دستگاه مذکور داخل مزرعه و در عمق مناسب، جانمایی شد. خاکی که در مخزن دستگاه لایسیمتر پر شد، از خاک مزرعه مورد مطالعه بود. همچنین گیاهی که در لایسیمتر کشت شد، همان گیاه ذرت کشت‌شده در مزرعه بود. در شکل ۲، لایسیمتر مستقرشده در مزرعه ذرت اوقاف اراک نشان داده شده است.

نمونه‌برداری‌های میدانی

برای برداشت شاخص سطح برگ، از روش مستقیم (نمونه‌برداری تخریبی) در زمان گذر ماهواره لندست ۸ از منطقه مطالعاتی عملیات میدانی استفاده شد. برای این منظور، ابتدا، در مزرعه ذرت اوقاف اراک، در هر بازدید با توجه به اندازه پیکسل‌ها، پلاتی به ابعاد ۳۰ متر در ۳۰ متر از مزارع ذرت برای نمونه‌برداری برگ‌زیده شد و سپس در مرکز هر پلات، زیرپلاتی مربعی به ابعاد یک متر در یک متر انتخاب شد.

محاسبه تبخیر و تعرق واقعی

ابتدا، تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع با استفاده از روش پنمن-مانتیس (آلن و همکاران، ۲۰۱۱) با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه اراک و سپس مقادیر ضریب گیاهی (Kc) در هر بازدید برای هر مزرعه از روش شاخص سطح برگ (لی و لیون، ۲۰۰۲؛ کانگ و همکاران، ۲۰۰۳) محاسبه شد. رابطه ضریب گیاهی و شاخص سطح برگ برای ذرت در منطقه مورد مطالعه تعیین شد (بافکار و همکاران، ۱۳۹۱)؛ سپس مقدار تبخیر و تعرق واقعی



شکل ۲- لایسیمترهای مستقرشده در مزرعه ذرت اوقاف در اراک

۸ از سایت سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا (USGS) به صورت رایگان دانلود شد. ماهواره لندست ۸ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر در بخش چندطیفی (سنجنده OLI) و در بخش باندهای حرارتی با قدرت تفکیک مکانی ۶۰ متر (سنجنده TIRS) با شماره گذر ۱۶۷ و ردیف ۳۶، هر ۱۶ روز یکبار از منطقه تصویربرداری می‌کند. هر ۸ تصویر ماهواره لندست ۸ در دوره رشد گیاه ذرت در این دوره برای برآورد نیاز آبی ذرت تحلیل شد. پیش‌پردازش‌های لازم، مانند تصحیحات رادیومتریکی روی تصاویر پیش از اجرای الگوریتم سبال اعمال شد. در جدول ۱، مشخصات زمانی تصاویر مورد استفاده ماهواره لندست ۸ در منطقه اوقاف اراک ارائه شده است.

ابعاد لایسیمتر، ۱×۱ متر و به عمق ۱ متر بود. در پژوهش حاضر، با استفاده از لایسیمتر و داده‌های مشاهده‌ای، تبخیر و تعرق گیاه ذرت در مزرعه اوقاف اراک در فصل رویشی سال ۱۳۹۵ اندازه‌گیری شد. داده‌برداری‌های لایسیمتر در تاریخ‌های مختلف و منطبق بر گذر زمان عبور ماهواره لندست ۸ بر فراز منطقه مورد مطالعه بود. در جدول ۱، مشخصات زمانی تصاویر مورد استفاده ماهواره لندست ۸ در منطقه اوقاف اراک ارائه شده است.

برآورد تبخیر و تعرق ذرت در دوره رشد با استفاده

از الگوریتم SEBAL و تصاویر ماهواره لندست ۸

در این پژوهش از تصاویر ماهواره لندست ۸ مربوط به ماهواره لندست ۸ در دوره رشد گیاه ذرت (از اول خرداد تا اوایل مهر ۱۳۹۵) استفاده شد. تصاویر ماهواره لندست

جدول ۱- تصاویر مورد استفاده ماهواره لندست ۸ در منطقه اوقاف اراک

روز از سال	تاریخ تصویر	روز از سال	تاریخ تصویر
۱۶۳	۱۳۹۵/۰۳/۲۲	۲۲۷	۱۳۹۵/۰۵/۲۴
۱۷۹	۱۳۹۵/۰۴/۰۷	۲۴۳	۱۳۹۵/۰۶/۰۹
۱۹۵	۱۳۹۵/۰۴/۲۳	۲۵۹	۱۳۹۵/۰۶/۲۵
۲۱۱	۱۳۹۵/۰۵/۰۸	۲۷۵	۱۳۹۵/۰۷/۱۲

پردازش تصویر است که تبدیلات انرژی در سطح زمین و تبخیر و تعرق را به‌عنوان جزئی از بیلان انرژی در هر پیکسل محاسبه می‌کند. براساس اینکه ذخیره یا هدررفت انرژی در تاج پوشش، بسیار ناچیز است، بیلان انرژی سطحی از معادله (۱) محاسبه می‌شود.

برآورد تبخیر و تعرق ذرت در دوره رشد با استفاده

از الگوریتم SEBAL

الگوریتم SEBAL یکی از روش‌هایی است که در پژوهش‌های گوناگونی به‌طور موفقیت‌آمیزی برای برآورد نیاز آبی استفاده شده است. الگوریتم سبال، یک مدل

در اینجا، T_s ، دمای سطح برحسب درجه سانتی‌گراد است. H ، شار گرمای محسوس (با توجه به دمای سطح و سرعت باد)، زبری سطح (حاصل از شاخص‌های گیاهی) و اختلاف دمای سطح-هوا و براساس معادله (۸) محاسبه می‌شود.

$$H = (\rho \times C_p \times dT)/r_{ah} \quad (۸)$$

در اینجا، ρ و C_p ، به ترتیب مربوط به تراکم هوا و ظرفیت انتقال ویژه است. C_p برابر با $1004 \text{ J.kg}^{-1}.\text{k}^{-1}$ است. اختلاف دما (برحسب کلونین) بین نقطه Z_1 و Z_2 است. همان مقاومت آیرودینامیکی است. در پژوهش حاضر، تبخیر و تعرق لحظه‌ای و تبخیر و تعرق روزانه (۲۴ ساعته) براساس معادلات اشاره‌شده مذکور و معادلات ۹ تا ۱۱ براساس تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ محاسبه شد.

$$ET_{ins} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (۹)$$

$$ET_{rF} = \frac{ET_{ins}}{ET_r} \quad (۱۰)$$

$$ET_{24} = ET_{rF} \times ET_{r24} \quad (۱۱)$$

در اینجا، ET_{ins} تبخیر و تعرق لحظه‌ای (میلی‌متر بر ساعت) و λET و λ به ترتیب، شار گرمای نهان و گرمای نهان تبخیر است. ET_{rF} ضریب ثابت و ET_r و ET_{24} ، به ترتیب، تبخیر و تعرق مرجع و روزانه است. ET_{r24} ، مجموع مقادیر تبخیر و تعرق مرجع برای هر روز است.

برآورد تبخیر و تعرق ذرت در دوره رشد با استفاده

از الگوریتم EEFLux

الگوریتم EEFLux مدلی است که براساس توازن انرژی کامل سطح با فرایندی مبتنی بر تصویر با استفاده از روش نقشه‌برداری تبخیر و تعرق با کالیبراسیون داخلی (METRIC) تهیه شده است که از روش مشابه SEBAL در تخمین ET استفاده می‌کند (باتاریا و لئو، ۲۰۱۷). الگوریتم EEFLux، تبخیر و تعرق را با استفاده از باندهای حرارتی و انعکاسی لندست براساس تابش خالص (R_n)، شار گرمای زمین رسانا (G) و شار گرمای محسوس به هوا (H) تخمین می‌زند (ونانسیو و همکاران، ۲۰۲۰). در پژوهش حاضر، تصاویر لندست ۸ براساس الگوریتم شار تبخیر و تعرق در محیط Google Earth Engine (موتور EEFLux-METRIC) استفاده و پردازش شد. از آنجا که الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux روش‌های معمول استفاده‌شده در تخمین تبخیر و تعرق است، معادله مانده

$$\lambda ET_{inst} = R_n - G - H \quad (۱)$$

در اینجا، R_n تابش خالص (برای هر پیکسل با استفاده از آلبیدو و قابلیت انتقال حاصل از باندهای موج کوتاه و نشر موج بلند باندهای حرارتی محاسبه می‌شود)؛ G ، شار گرمای خاک (استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی محاسبه می‌شود)؛ H ، شار گرمای محسوس (با توجه به دمای سطح و سرعت باد (داده‌های زمینی)، زبری سطح (حاصل از شاخص‌های گیاهی) و اختلاف دمای سطح-هوا محاسبه می‌شود) و λLE_{inst} شار گرمای نهان است. در نهایت، تبخیر و تعرق با تقسیم ET بر گرمای نهان تبخیر (λ) به دست می‌آید که مقداری لحظه‌ای است. تبخیر و تعرق روزانه (۲۴ ساعته) با استفاده از کسر تبخیر (EF) در یک فضای پیکسل به پیکسل انجام می‌شود. همچنین، تابش خالص (R_n) با مجموع تابش موج کوتاه خالص و تابش موج بلند خالص محاسبه می‌شود:

$$R_n = (1 - \alpha)R_{sin} - R_{Lout} - (1 - \epsilon_0)R_{Lin} \quad (۲)$$

در این معادله، R_{sin} ، تشعشعات موج کوتاه ورودی (W/m^2)؛ R_{Lin} ، تشعشعات موج بلند خروجی (W/m^2)؛ α ، آلبیدو سطح (بدون بعد) و ϵ_0 ، انتشار حرارتی سطح است.

$$R_{sin} = G_{sc} \times \cos \theta \times dr \times \tau_{sw} \quad (۳)$$

$$R_{Lout} = \epsilon_0 \times \sigma \times T_s^4 \quad (۴)$$

در این معادله، G_{sc} ، ثابت خورشیدی، برابر $۱۳۶۷ \text{ (W/m}^2)$ ؛ θ ، زاویه تابش ورودی خورشید (رادیان)؛ dr ، معکوس فاصله نسبی زمین-خورشید و τ_{sw} ، قابلیت انتقال یک‌طرفه است. T_s ، دمای سطح (برحسب کلونین) در نظر گرفته شده است.

$$T_s = \frac{K_1}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB} K_1}{R_c} + 1\right)} \quad (۵)$$

$$R_{Lin} = \epsilon_a \times \sigma \times T_a^4 \quad (۶)$$

در اینجا، R_c ، رادیانس حرارتی اصلاح‌شده برحسب ($Wm^{-2}/sr/\mu m$)؛ K_1 و K_2 ، ضریب‌های ثابت برای یک تصویر لندست (در اینجا) و $a\epsilon$ و T_a به ترتیب، مربوط به تابش اتمسفری و دمای هواست. از آنجا که G ، شار گرمای خاک است، محاسبه آن با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی است. همچنین، براساس روابط بین T_s ، G/R_n و α ، NDVI براساس معادله (۷) محاسبه می‌شود.

$$G/R_n = T_s/\alpha(0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2)(1 - 0.98NDVI^4) \quad (۷)$$

قبول است. درباره PBISE نیز هرچه به صفر نزدیکتر باشد، دقت بیشتر مدل را در برآورد متغیر مدنظر نشان می‌دهد. در صورتی که مقدار این معیار به سمت مثبت میل کند، نشان می‌دهد متغیر مد نظر، بسیار کمتر از مقدار واقعی برآورد شده است. اگر این پارامتر به سمت منفی میل کند، نشان می‌دهد متغیر مد نظر، بسیار بیشتر از مقدار واقعی برآورد شده است (طائی سمیرمی و همکاران، ۱۳۹۳). گفتنی است، برای این پارامتر، آستانه خاصی در نظر گرفته نشده است. همچنین، برای ارزیابی بصری عملکرد الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux براساس تصاویر لندست با نتایج حاصل از لایسیمتر از نمودار تیلور استفاده شد (چوبین و همکاران، ۲۰۱۸).

نتایج و بحث

مقادیر متوسط تبخیر و تعرق روزانه حاصل از الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux برای هر کدام از تصاویر ماهواره لندست ۸ در شکل‌های ۳ و ۴ محدوده مورد مطالعه ارائه شده است. نقشه‌های تهیه‌شده، تغییرات زمانی و مکانی تبخیر و تعرق واقعی برآوردشده منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. تغییرات زمانی تبخیر و تعرق به علت تغییرات دمای هوا و تراکم پوشش گیاه ذرت در مزرعه اوقاف اراک است. با توجه به تقویم زراعی در زمان‌های مد نظر، محصولات ذرت تابستانه در مزرعه مورد مطالعه کشاورزی شده بود و در تصاویر ماهواره‌ای همگی تحت کشت آبی بوده و در فصل تابستان کشت شده‌اند. همانگونه که در نقشه‌های شماره ۳ و ۴ دیده می‌شود، با رفتن به سمت تاریخ بیست‌وچهارم مرداد، تبخیر و تعرق در مزرعه اوقاف اراک براساس نتایج الگوریتم SEBAL و الگوریتم EEFLux بیشتر می‌شود؛ زیرا درصد پوشش گیاهی محصول کشت‌شده و دمای هوا افزایش می‌یابد. همچنین، هرچه به این تاریخ نزدیک می‌شویم، تبخیر و تعرق در این مناطق افزایش می‌یابد. تبخیر و تعرق روزانه حاصل از الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux برای فصل زراعی مورد مطالعه در زمان برداشت هر تصویر لندست، تقریباً با نتایج یکسانی برآورد شده است؛ به این صورت که با شروع فصل زراعی، مقادیر تبخیر و تعرق روزانه کم بود و با گذر زمان و رسیدن به میانه‌های فصل زراعی، مقدار تبخیر و تعرق به اوج خود رسید و سپس، مقادیر تبخیر و تعرق به علت کاهش دما و تغییرات پوشش ذرت در منطقه

انرژی سطح باقیمانده برای هر دو به کار رفت (اولیورا و همکاران، ۲۰۲۰).

$$ET = R_n - G - H \quad (12)$$

ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux

در نهایت، برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux در برآورد تبخیر و تعرق واقعی از معیارهای RMSE، NS، PBAIS و R^2 استفاده شد. در ذیل، روابط موجود برای معیارهای مذکور ارائه شده است. برای مقادیر ضریب ناش (NSE) محدوده مقادیر بین منفی بی‌نهایت تا +۱ است و مقدار یک، بهترین عملکرد مدل را ارائه می‌دهد. آماره بایاس (Bias) به عنوان متوسط تفاضل بین مشاهدات زمینی و برآوردهای مدل تعریف می‌شود و مثبت یا منفی است. یک مقدار منفی، نشان‌دهنده برآورد کم است؛ در حالی که مقادیر مثبت، برآوردی زیاد و دقیق را نشان می‌دهد. از معیار ریشه مربعات خطا (RMSE) برای اندازه‌گیری شدت خطای کلی استفاده می‌شود. ضریب R^2 برای بررسی درجه توافق بین برآوردهای مدل و مشاهدات زمینی به کار می‌رود. مقدار آن، بین صفر و +۱ متغیر است. اگر هیچ درجه توافق ضعیف وجود نداشته باشد، R^2 نزدیک به صفر خواهد بود (چوبین و همکاران، ۲۰۱۸).

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i) * 100}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \right] \quad (13)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (14)$$

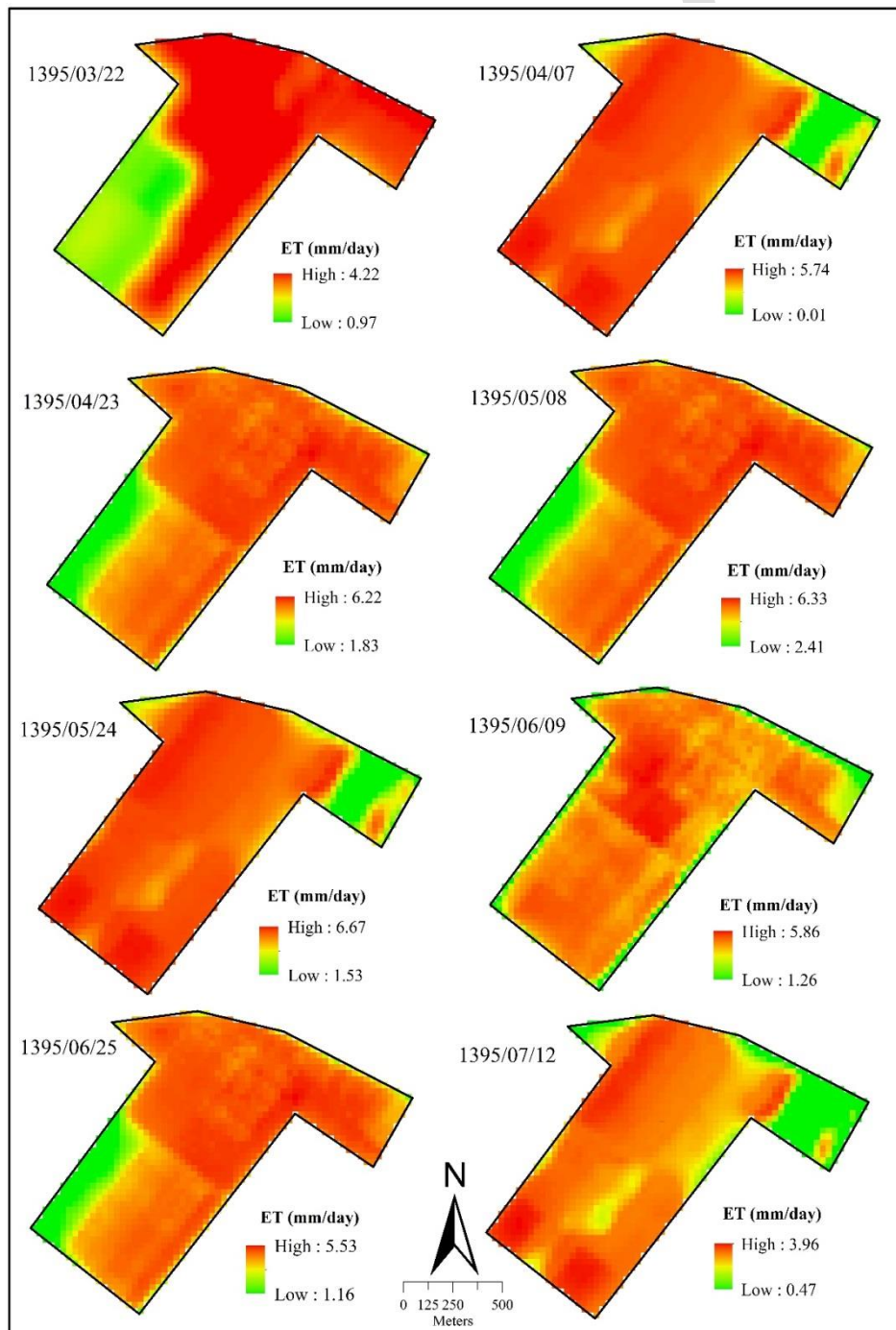
$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i) \right]^{1/2} \quad (15)$$

$$R^2 = \left[\frac{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sigma_s \times \sigma_o} \right]^2 \quad (16)$$

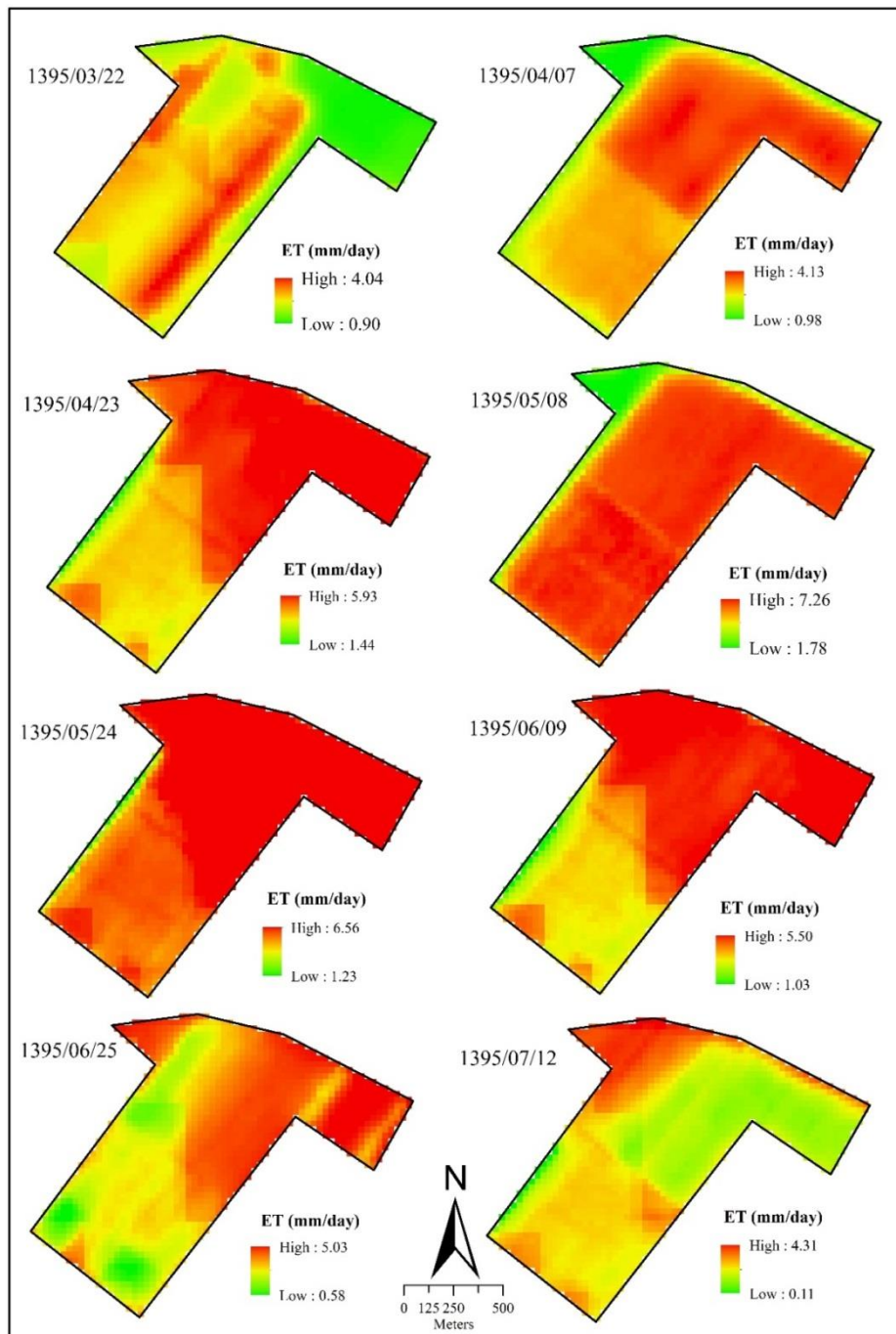
که در آن، O_i داده‌های مشاهداتی؛ S_i داده‌های برآوردشده؛ O^- و S^- میانگین داده‌های مشاهده‌شده و برآوردشده و σ واریانس است. مقادیر RMSE معرف دقت در بسیاری از روش‌های آماری است. هرچه این مقادیر به صفر نزدیکتر باشد، دقت زیاد مدل و مقدار صفر، نبود خطا در برآورد مدل را نشان می‌دهد. R^2 نشان‌دهنده ارتباط داده‌های مشاهداتی و برآوردشده است. دامنه این پارامتر بین ۰ تا ۱ است. هرچه این مقدار به ۱ نزدیکتر باشد، ارتباط محکم بین دو گروه را نشان می‌دهد. دامنه ضریب NSE بین $-\infty$ تا ۱ است. دامنه بین ۰/۵ تا ۱ قابل

از معادلات متفاوت در محاسبه ضریب شفافیت اتمسفری و شار گرمای خاک است که بخش عمده این تفاوت‌ها، اختلاف زیاد در مقادیر شار گرمای خاک محاسبه‌شده با دو روش است. همچنین، براساس نتایج، هر دو مدل، مقدار تبخیر و تعرق واقعی را متناسب با توزیع زمانی منطبق با پوشش گیاهی مزرعه ذرت برآورد می‌کند.

مورد مطالعه، سیر نزولی به خود گرفت. نتایج برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux نشان داد الگوریتم SEBAL با میانگین تبخیر و تعرق $4/57$ میلی‌متر در روز، نسبت به الگوریتم EEFLux با مقدار $4/19$ میلی‌متر در روز، حدود $7/71$ درصد تبخیر و تعرق واقعی روزانه در محدوده مزرعه اوقاف اراک را بیشتر برآورد کرده است. علت اصلی این اختلاف، استفاده



شکل ۳- تبخیر و تعرق روزانه با استفاده از الگوریتم SEBAL



شکل ۴- تبخیر و تعرق روزانه با استفاده از الگوریتم EEFLux

نتایج برآورد تبخیر و تعرق روزانه با استفاده از داده‌های لایسیمیتری

نتایج برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از داده‌های لایسیمیتری در جدول ۳ برای منطقه مورد مطالعه برای روزهای گذر ماهواره لندست ۸ ارائه شده است. همانگونه که در جدول ۳ دیده می‌شود، مقدار تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر در فصل رشد تغییر می‌کند؛ به گونه‌ای که در ابتدای فصل رویش، مقادیر روزانه

مقادیر متوسط تبخیر و تعرق روزانه حاصل از الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux برای هر کدام از تصاویر ماهواره لندست ۸ در جدول ۲ برای منطقه مورد مطالعه ارائه شده است. همانگونه که در جدول ۲ دیده می‌شود، با توجه به نتایج تبخیر و تعرق روزانه مشخص شد الگوریتم SEBAL، مقدار تبخیر و تعرق را به مقدار کمی، بیشتر از الگوریتم EEFLux برآورد کرده است.

تبخیر و تعرق کم بود؛ هرچه میانه فصل رویش نزدیک می‌شود، مقدار آن افزایش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که حداکثر مقدار آن، در هشتم مرداد (۷/۱۹ میلی‌متر در روز) اتفاق افتاده است.

جدول ۲- مقادیر متوسط تبخیر و تعرق روزانه براساس الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux

روز از سال	تاریخ تصویر	تبخیر و تعرق روزانه (میلی‌متر)		روز از سال	تاریخ تصویر	تبخیر و تعرق روزانه (میلی‌متر)	
		SEBAL	EEFLux			SEBAL	EEFLux
۱۶۳	۱۳۹۵/۰۳/۲۲	۴/۴۶	۳/۴۸	۲۲۷	۱۳۹۵/۰۵/۲۴	۶/۴۷	۶/۴۰
۱۷۹	۱۳۹۵/۰۴/۰۷	۴/۲۵	۳/۳۹	۲۴۳	۱۳۹۵/۰۶/۰۹	۴/۷۴	۴/۵۶
۱۹۵	۱۳۹۵/۰۴/۲۳	۵/۲۲	۵/۱۷	۲۵۹	۱۳۹۵/۰۶/۲۵	۳/۷۵	۳/۸۷
۲۱۱	۱۳۹۵/۰۵/۰۸	۵/۶۵	۵/۳۳	۲۷۵	۱۳۹۵/۰۷/۱۲	۲/۰۱	۱/۳۳

جدول ۳- مقادیر متوسط تبخیر و تعرق روزانه داده‌های لایسیمتر

روز از سال	تاریخ تصویر	تبخیر و تعرق روزانه (میلی‌متر)		روز از سال	تاریخ تصویر	تبخیر و تعرق روزانه (میلی‌متر)	
		لاسیمتر	لاسیمتر			لاسیمتر	لاسیمتر
۱۶۳	۱۳۹۵/۰۳/۲۲	۴/۳۹	۴/۳۹	۲۲۷	۱۳۹۵/۰۵/۲۴	۶/۹۵	۶/۹۵
۱۷۹	۱۳۹۵/۰۴/۰۷	۴/۷۲	۴/۷۲	۲۴۳	۱۳۹۵/۰۶/۰۹	۵/۶۹	۵/۶۹
۱۹۵	۱۳۹۵/۰۴/۲۳	۵/۱۸	۵/۱۸	۲۵۹	۱۳۹۵/۰۶/۲۵	۳/۲۱	۳/۲۱
۲۱۱	۱۳۹۵/۰۵/۰۸	۷/۱۹	۷/۱۹	۲۷۵	۱۳۹۵/۰۶/۱۲	۲/۱۴	۲/۱۴

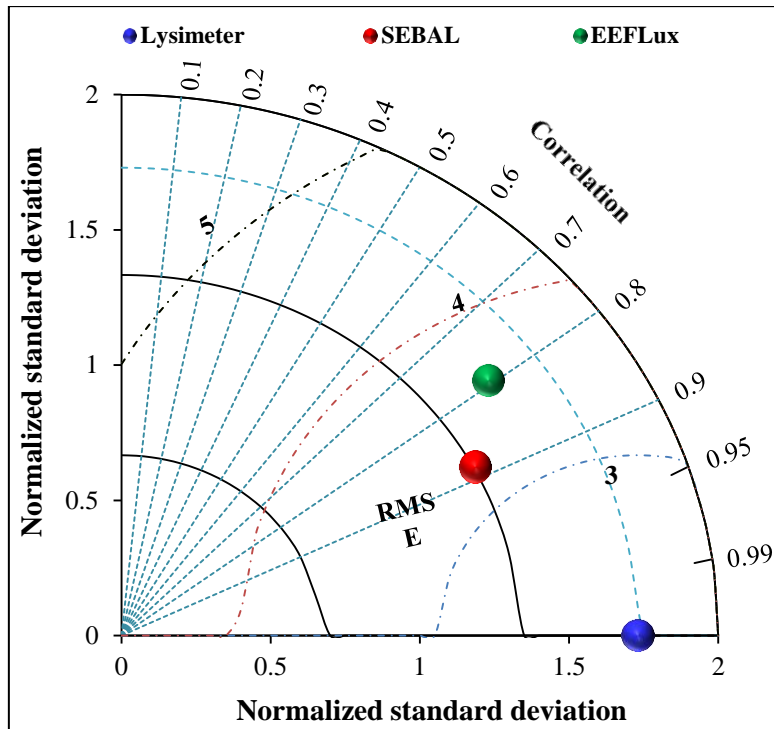
عملکردهای الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux در برآورد تبخیر و تعرق روزانه براساس تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و با توجه به داده‌های لایسیمتر در منطقه اوقاف اراک ارائه شده است. با توجه به اینکه دیاگرام تیلور براساس ترکیبی از دو معیار همبستگی و انحراف معیار رسم شده است، مشخص شد الگوریتم SEBAL همبستگی بیشتر و انحراف معیار کمتری نسبت به الگوریتم EEFLux دارد. بر این اساس، عملکرد الگوریتم SEBAL نسبت به الگوریتم EEFLux، نتایج بهتری ارائه داده است و الگوریتم SEBAL دقت زیاد تصاویر را در برآورد تبخیر و تعرق نشان می‌دهد.

با توجه به مقایسه مقادیر متوسط تبخیر و تعرق روزانه برآورد شده با استفاده از الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux براساس تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و لایسیمتر در مزرعه اوقاف اراک (جدول ۴) و براساس نتایج ارائه شده در شکل‌های ۳ و ۴ مشخص شد، برآورد تبخیر و تعرق روزانه با الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux و تصاویر ماهواره لندست ۸ براساس ارزیابی نتایج حاصل از داده‌های برداشت شده میدانی (لایسیمتر)، دقت خوبی دارد و مقدار همبستگی آنها به ترتیب، برابر با ۰/۸۵ و ۰/۷۹ برای الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux به دست آمد. در شکل ۵، گراف تیلور ارزیابی بصری مربوط به

جدول ۴- نتایج ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux براساس داده‌های لایسیمتر

معیار	SEBAL	EEFLux
RMSE	۰/۷۱۱*	۱/۰۴۶
NSE	۰/۸۰۷*	۰/۵۸۲
PBIAS	۷/۳۹۸*	۱۵/۰۸۰
R ²	۰/۸۸۵*	۰/۷۹۳

* عملکرد بهتر را نشان می‌دهد



شکل ۵- ارزیابی بصری عملکرد الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux در برآورد تبخیر و تعرق روزانه براساس لایسیمتر

داد الگوریتم SEBAL، حدود ۷/۷۱ درصد تبخیر و تعرق واقعی روزانه در محدوده مزرعه اوقاف اراک را بیشتر برآورد کرده است. ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux با توجه به داده‌های لایسیمتر نشان داد الگوریتم SEBAL همبستگی بیشتر و انحراف معیار کمتری نسبت به الگوریتم EEFLux دارد. بر این اساس، الگوریتم SEBAL نسبت به الگوریتم EEFLux نتایج بهتری ارائه داده است و الگوریتم SEBAL، دقت زیاد تصاویر را در برآورد تبخیر و تعرق نشان داد. به طور کلی، گفتنی است نتایج این پژوهش به برنامه‌ریزان مزرعه مورد مطالعه کمک می‌کند به راحتی، با تهیه تصویر برگزیده در سال‌های بعد و استخراج شاخص برتر از هر یک از مراحل تولید ذرت، عملکرد مزرعه را با دقت خوبی پیش‌بینی کنند. اکتساب این نوع اطلاعات، در پیش‌بینی تولید تخمین بیان اقتصادی مزرعه، تأثیر بسیاری دارد. بدون شک، نهادینه کردن این روش‌ها در مقیاس‌های کلان، به برنامه‌ریزان برای تنظیم بازار و واردات احتمالی محصولات کمک می‌کند. همچنین، با تهیه چنین نقشه‌هایی، میزان خلأ عملکرد احتمالی موجود در سطح مزارع را می‌توان پوشش داد و با ارائه این نقشه‌ها به مدیران زراعی، در نزدیک کردن عملکرد واقعی به سطح عملکرد مطلوب، گام مؤثری برداشت.

نتیجه‌گیری

کمی کردن تبخیر و تعرق، یکی از مسائل سخت و مسئله‌دار در چرخه هیدرولوژی با عوامل زیاد محیطی و اقلیمی است. عملیات میدانی اندازه‌گیری تبخیر و تعرق، بسیار هزینه‌بر و زمان‌گیر است. علاوه بر این، روش‌های مذکور فقط برای مناطق کوچک کاربرد دارد. در روش‌های مبتنی بر فناوری‌های نوین سنجش از دور، تکیه بر تصاویر ماهواره‌ای و استفاده از الگوریتم‌های مختلف مربوط به برآورد تبخیر و تعرق است. رویکرد ارائه‌شده در پژوهش حاضر، کاربرد الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux در برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و بررسی عملکرد آنها با استفاده از داده‌های لایسیمتر در دوره رشد در مزرعه اوقاف اراک بود. برآورد تبخیر و تعرق روزانه حاصل از الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux برای فصل زراعی مورد مطالعه، نتایج تقریباً یکسانی ارائه داد؛ به این صورت که با شروع فصل زراعی، مقادیر تبخیر و تعرق روزانه کم بود و با گذر زمان و رسیدن به میانه‌های فصل زراعی، مقدار تبخیر و تعرق به اوج خود رسید؛ سپس مقادیر تبخیر و تعرق به علت کاهش دما و تغییرات پوشش ذرت در منطقه مورد مطالعه، سیر نزولی به خود گرفت. مقایسه الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux نشان

- ۱۹(۲): ۱۵۳-۱۸۴.
۱۰. قمرنیا ه. و رضوانی س.و. ۱۳۹۳. محاسبه و پهنه‌بندی تبخیر- تعرق با استفاده از الگوریتم سبال (SEBAL) در غرب ایران (دشت میان دربند). نشریه علمی آب و خاک ایران. ۲۸(۱): ۷۲-۸۱.
 ۱۱. کریمی ع. فرهادی بانسوله ب. و حسادی ه. ۱۳۹۱. برآورد تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس منطقه‌ای با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر لندست. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۶(۴): ۳۵۳-۳۶۴.
 ۱۲. مرشدی ع. طباطبایی س. ح. و نادری م. ۱۳۹۶a. صحت‌سنجی برآورد تبخیر و تعرق از مدل‌های سبال و هارگریوز- سامانی با استفاده از داده‌های لایسیمتر. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲(۳۰): ۳۶۷-۳۷۶.
 ۱۳. مرشدی ع. نادری م. طباطبایی س. ح. و محمدی ج. ۱۳۹۶b. برآورد تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس منطقه‌ای به کمک داده‌های سنسجش از دور در دشت شهرکرد (الف) مقایسه نتایج مدل‌های SEBAL و METRIC نسبت به برخی مدل‌های ریاضی تبخیر و تعرق. نشریه علوم آب‌و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی). ۲: ۴۵-۵۵.
 ۱۴. مرشدی ع. نادری م. طباطبایی س. ح. و محمدی ج. ۱۳۹۶c. برآورد تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس منطقه‌ای به کمک داده‌های سنسجش از دور در دشت شهرکرد (ب) مقایسه نتایج مدل‌های SEBAL و METRIC نسبت به برخی مدل‌های ریاضی تبخیر و تعرق. نشریه علوم آب‌و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی). ۳: ۱-۱۴.
 ۱۵. ملک‌پور م. بابازاده ح. کاوه ح. و ابراهیمی پاک ن. ۱۳۹۵. برآورد تبخیر و تعرق واقعی و بهره‌وری آب گندم با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ در دشت قزوین. نشریه علمی- پژوهشی پژوهش آب در کشاورزی. ۴(۴): ۵۶۹-۵۸۲.
 ۱۶. میرموسوی ح. اکبری ح. پناهی ح. و اکبرزاده ی. ۱۳۹۱. واسنجی روش‌های برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع (ETO) و محاسبه نیاز آبی گیاه (ETC) زیتون در استان کرمانشاه. مجله جغرافیا و پایداری محیط. ۳: ۴۵-۶۳.
 ۱. امیدوار ج. نوری س. داوری ک. و فرید حسینی ع. ۱۳۹۲. برآورد تبخیر و تعرق واقعی مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از دو الگوریتم سبال و متریک. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران. ۳(۴): ۱۱-۲۲.
 ۲. بافکار ع. فرهادی ب. و کریمی ع. ۱۳۹۱. برآورد ضریب گیاهی ذرت دانه‌ای با استفاده از خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه (مطالعه موردی: ماهی‌دشت کرمانشاه). نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۷(۴): ۸۳۲-۸۳۸.
 ۳. ثنایی‌نژاد س. ح. نوری س. و هاشمی‌نیا، س. م. ۱۳۹۰. برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در منطقه مشهد. نشریه آب‌و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۵(۳): ۵۴۰-۵۴۷.
 ۴. خیراندیش ح. ۱۳۹۷. بررسی تغییرات منابع آب زیرزمینی اراک و پیامدهای آن. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک. ۱۰۰ صفحه.
 ۵. سرگزی ع. و قویدل م. ۱۳۹۶. برنامه‌ریزی و تخصیص بهینه منابع آب در بخش کشاورزی (مطالعه موردی: شهرستان صومعه‌سرا). تحقیقات منابع آب ایران. ۱۳(۲): ۷۴-۸۱.
 ۶. طائی سمیرمی س. مرادی ح. ر. و خداقلی م. ۱۳۹۳. شبیه‌سازی و پیش‌بینی برخی از متغیرهای اقلیمی توسط مدل چندگانه SDSM و مدل‌های گردش عمومی جو (مطالعه موردی: حوزه آبخیز بار نیشابور). فصلنامه انسان و محیط زیست. جلد ۱۲. ۲۸: ۱-۱۶.
 ۷. علیزاده ا. کمالی غ. ع. خانجانی م. ج. و رهنورد م. ر. ۱۳۸۳. ارزیابی روش‌های برآورد تبخیر- تعرق در مناطق خشک ایران. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی. ۱۹: ۹۷-۱۰۵.
 ۸. فرهادی بانسوله ب. کریمی ع. ر. و حسادی ه. ۱۳۹۵. برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبس و تصاویر لندست در ماهی‌دشت. پژوهش‌های آب‌و خاک. ۳۰(۳): ۷۰۶-۷۱۶.
 ۹. قربانی ا. فرامرزی م. کرمی ج. غلامی ن. و سبحانی ب. ۱۳۹۴. ارزیابی مقایسه‌ای الگوریتم‌های سبال و متریک در برآورد تبخیر و تعرق (مطالعه موردی: شهرستان ملایر). برنامه‌ریزی و آمایش فضا.

28. Ndou N. N. Palamuleni L. G. and Ramoelo A. 2018. Modelling depth to groundwater level using SEBAL-based dry season potential evapotranspiration in the upper Molopo River Catchment, South Africa. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 21(3): 237-248.
29. Oliveira Costa J. José J. V. Wolff W. de Oliveira N. P. R. Oliveira R.C. Ribeiro N. L. and Schlichting, A. F. 2020. Spatial variability quantification of maize water consumption based on Google EEflux tool. *Agricultural Water Management*. 232: 106037.
30. Singh R. K. Senay G. B. Velpuri N. M. Bohms S. and Verdin J. P. 2014. On the downscaling of actual evapotranspiration maps based on combination of MODIS and Landsat-based actual evapotranspiration estimates. *Remote Sensing*. 6(11): 10483-10509.
31. Talsma C. J. Good S. P. Jimenez C. Martens B. Fisher J.B. Miralles D. G. and Purdy A.J. 2018a. Partitioning of evapotranspiration in remote sensing-based models. *Agricultural and forest meteorology*. 260: 131-143.
32. Talsma C. Good S. Miralles D. Fisher J. Martens B. Jimenez C. and Purdy A. 2018b. Sensitivity of Evapotranspiration Components in Remote Sensing-Based Models. *Remote Sensing*. 10(10): 1601.
33. Venancio L. P. Eugenio F. C. Filgueiras R. França da Cunha F. Argolo dos Santos R. Ribeiro W. R. and Mantovani E. C. 2020. Mapping within field variability of soybean evapotranspiration and crop coefficient using the Earth Engine Evaporation Flux (EEFlux) application. *Plos one*. 15(7): e0235620.
34. Xu T. Guo Z. Xia Y. Ferreira V. G. Liu S. Wang K. and Zhao C. 2019. Evaluation of twelve evapotranspiration products from machine learning, remote sensing and land surface models over conterminous United States. *Journal of Hydrology*. 578: 124105.
35. Yang J.Y. Mei X. R. Huo Z. G. Yan C. R. Hui J. U. Zhao F. H. and Qin L. I. U. 2015. Water consumption in summer maize and winter wheat cropping system based on SEBAL model in Huang-Huai-Hai Plain, China. *Journal of Integrative Agriculture*. 14(10): 2065-2076.
36. Zhou X. Bi S. Yang Y. Tian F. and Ren D. 2014. Comparison of ET estimations by the three-temperature model, SEBAL model and eddy covariance observations. *Journal of hydrology*. 519: 769-776.
- Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. *Hydrological Processes*. 25(26): 4011-4027.
18. Bastiaanssen W. G. Noordman E. J. M. Pelgrum H. Davids G. Thoreson B. P. and Allen R. G. 2005. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 131(1): 85-93.
19. Battude M. Al Bitar A. Brut A. Tallec T. Huc M. Cros J. and Demarez V. 2017. Modeling water needs and total irrigation depths of maize crop in the south west of France using high spatial and temporal resolution satellite imagery. *Agricultural Water Management*. 189: 123-136.
20. Bhattarai N. Quackenbush L. J. Im J. and Shaw S. B. 2017. A new optimized algorithm for automating endmember pixel selection in the SEBAL and METRIC models. *Remote Sensing of Environment*. 196: 178-192.
21. Choubin B. Darabi H. Rahmati O. Sajedi-Hosseini F. and Kløve B. 2018. River suspended sediment modelling using the CART model: a comparative study of machine learning techniques. *Science of the Total Environment*. 615: 272-281.
22. Droogers P. 2000. Estimating actual evapotranspiration using a detailed agro-hydrological model. *Journal Hydrology*. 229: 50-58.
23. Elnmer A. Khadr M. Kanae S. and Tawfik A. 2019. Mapping daily and seasonally evapotranspiration using remote sensing techniques over the Nile delta. *Agricultural water management*. 213: 682-692.
24. Herman M. R. Nejadhasemi A. P. Abouali M. Hernandez-Suarez J. S. Daneshvar F. Zhang Z. and Sharifi A. 2018. Evaluating the role of evapotranspiration remote sensing data in improving hydrological modeling predictability. *Journal of Hydrology*. 556: 39-49.
25. Kang S. Gu B. Du T. and Zhang J. 2003. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region. *Agricultural water management*. 59(3): 239-254.
26. Li F. and Lyons T. 2002. Remote estimation of regional evapotranspiration. *Environmental Modelling and Software*. 17(1): 61-75.
27. Liou Y. A. and Kar S. K. 2014. Evapotranspiration estimation with remote sensing and various surface energy balance algorithms-A review. *Energies*. 7: 2821-2849.

Research paper

Evaluating the performance of SEBAL and EEFLux algorithms in estimating daily evapotranspiration using Landsat 8 satellite data

A. Delavari Kamyab^{1*}, Sh. Mokhtari² and R. Jafarinia³

Extended Abstract

Evapotranspiration (ET) is one of the key components of the Earth's hydrological cycle and its accurate estimation is very important in the water resources management and planning in agricultural usages. ET as a main factor in hydrological flux, links energy, carbon and water cycles, and has an important role in meteorology, hydrology and water resource management, especially in Agricultural Water Management (AWM). Precise and accurate estimation of ET is essential for the Integrated Water Resources Management (IWRM). Knowledge about ET (water consumption over the agricultural areas) plays an important role in irrigation planning and agricultural management. Quantification of water consumption in agricultural areas can be carried out using climatic and environmental variables, e.g. reference evapotranspiration (ET_o), crop coefficient (K_c) and crop evapotranspiration (ET_c).

Over the past few decades, satellite imagery based methods have come to the attention of researchers, which they have developed varieties of remote sensing methods to estimate evapotranspiration. In the present study, the Surface Energy Balance algorithm for Land (SEBAL) and Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)/Earth Engine Evapotranspiration Flux (EEFLux) algorithms were used to estimate ET for every pixel of the Landsat 8 at the Oghaf maize farm, Arak, Iran. Various observed data was used in this study. The meteorological data to calculate actual ET were obtained from Markazi Regional Water Authority (sunny hours and solar radiation at selected dates) and Arak synoptic station and the selected satellite data. Moreover, wind speed, dew point temperature and daily temperature at the corresponding dates of the Landsat 8 satellite overpass time were gathered from Iran Meteorological Organization. In order to obtain the Leaf Area Index (LAI) at the overpass time of the Landsat 8 satellite over the study area, field measurements were performed. For this purpose, based on the Landsat pixel size, plots of 30*30 m was designed for field sampling in the selected maize farmland, and a square of 1*1 m as a sub-plot was then designed in the center of each plot. The measurements were done at each date of field operation which was at the same date as the overpass time of the Landsat 8 satellite. . In order to compare the used models, some quantitative criteria were required to measure the model performance. In this study, daily ET from SEBAL and EEFLux were used to compare the relative performance of the algorithms for the eight Landsat images during the growth period. Based on commonly used statistical metrics, percent bias error (PBIAS), root mean squared error (RMSE), Nash-Sutcliffe coefficient of efficiency (NSE) and coefficient of determination (R²) criteria were used to evaluate the models. Taylor diagram was applied to provide a visual framework and graphically summarize that illustrates how closely a set of patterns matches the observed data. In this study, Taylor diagram was used for visual

1- Ph.D. Student of Water Engineering Department, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

2- Associated Professor, Department of Water Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

3- Associated Professor, Department of Water Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

* Corresponding Author: kamyab63@gmail.com

Received: 2020/07/14

Accepted: 2021/02/14

comparing Evapotranspiration derived from SEBAL and EEFLux algorithms, based on the ET obtained from Lysimeter (as reference data).

The results of estimating daily Evapotranspiration from Surface Energy Balance algorithm for Land (SEBAL) and Earth Engine Evapotranspiration Flux (EEFLux) algorithms indicated that daily ET were low at the beginning of the growing season and then came up until middle of the growing season. Then, the ET values have been decreased due to decreasing temperature as well as changes in maize cover in the study area. Comparison of SEBAL and EEFLux algorithms showed that SEBAL algorithm has estimated about 7.71% of daily ET more than EEFLux algorithm at Arak maize farm. The results of performance evaluation showed that RMSE, NSE, PBIAS and R2 were obtained 0.711, 0.807, 7.398 and 0.885, respectively based on SEBAL algorithm, and for EEFLux algorithm were equal to 1.046, 0.582, 15.080 and 0.793, respectively. The Taylor diagrams showed that the SEBAL model had a lower RMSE and higher correlation than the EEFLux model. Comparing the standard deviation of both models, it was found that the SEBAL model was more in agreement and closer to measured daily ET values than the EEFLux model. This was also observed that SEBAL has a close standard deviation to the measured data, but EEFLux model has a lower standard deviation than the measured data. This indicates that the EEFLux model cannot predict the daily ET the same as SEBAL model. According to observed data (lysimeter data), evaluating the performance of SEBAL and EEFLux algorithms showed that SEBAL algorithm had higher correlation and less standard deviation than EEFLux algorithm. Therefore, SEBAL algorithm had better estimation than the EEFLux algorithm.

Keywords: Daily evapotranspiration, Remote Sensing, Landsat images, SEBAL and EEFLux.

Citation: Delavari Kamyab A. Mokhtari Sh. and Jafarinia R. 2022. Evaluating the performance of SEBAL and EEFLux algorithms in estimating daily evapotranspiration using Landsat 8 satellite data. Iranian Water Research Journal.