

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

ابوالفضل دلاوری کامیاب<sup>۱\*</sup>، شهرو مختاری<sup>۲</sup> و رضا جعفری‌نیا<sup>۳</sup>

### چکیده

تبخیر و تعرق، یکی از مؤلفه‌های کلیدی چرخه هیدرولوژیکی کره زمین است و برآورد دقیق آن به‌عنوان عامل مهمی در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در کشاورزی، اهمیت بسیار زیادی دارد. در چند دهه گذشته، پژوهشگران به روش‌های مبتنی بر استفاده از تصاویر ماهواره‌ای توجه کرده‌اند؛ به‌گونه‌ای که انواع روش‌های سنجنش از دور را برای برآورد تبخیر و تعرق توسعه داده‌اند. در پژوهش حاضر، امکان استفاده از دو مدل مبتنی بر سنجنش از دور سیال (SEBAL) و متریک (EEFLux) و مقایسه آنها در برآورد تبخیر و تعرق روزانه در مزرعه اوقاف اراک بررسی شد. با استفاده از مدل‌های SEBAL و EEFLux، شارهای سطحی برای هر پیکسل تصویر ماهواره لندست ۸ (برای ۸ تصویر در دوره فصل رویشی در مزرعه اوقاف اراک) محاسبه و مقدار تبخیر و تعرق واقعی به‌صورت باقیمانده معادله 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 ماهواره لندست ۸) با استفاده از معیارهای RMSE، NSE، PBIAS 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 منطقه مورد مطالعه، سیر نزولی به خود گرفت. مقایسه الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux نشان داد الگوریتم SEBAL، حدود ۷/۷۱ درصد تبخیر و تعرق واقعی روزانه در محدوده مزرعه 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 معیار 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، سنجنش 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 ماهواره لندست ۸. مجله پژوهش آب ایران. ۴۳: ۲۱-۳۳.

۱- دانشجوی دکتری 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: [kamyab63@gmail.com](mailto:kamyab63@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۲۴

## 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 (باستیانس، ۲۰۰۵)؛ بنابراین، در سطوح بسیار وسیع، مانند دشت‌ها و حوزه‌های آبخیز باید از تکنیک‌ها و مدل‌های مختلف و جدید استفاده شود (تالسم 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، هزینبر 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 ماهواره 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 سبال (SEBAL)، متریک (METRIC)، سبس (SEBS) و سبی (SEBI) ارائه شده است. ژو و همکاران (۲۰۱۴) مدل‌های T۳، الگوریتم سبال و کوواریانس اددی را در برآورد تبخیر و تعرق مقایسه کردند. نتایج آنها نشان داد مدل T۳، 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 سبال 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 سبال، 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 سبال (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.

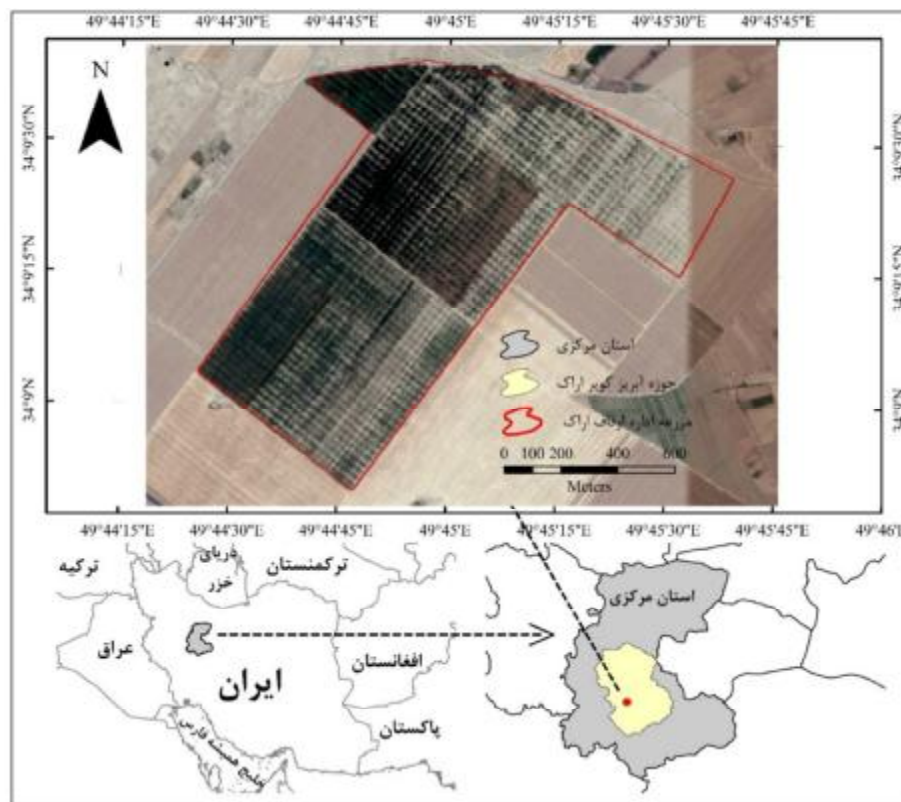
### روش تحقیق

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 سبس و تصاویر لندست ۵ در فصل رشد ذرت برآورد کردند. نتایج آنها نشان داد حداکثر اختلاف بین تبخیر و تعرق برآوردشده با الگوریتم سبس 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° تا ۴۷° ۴۹° شرقی و عرض‌های ۰۷° تا ۳۴° ۱۱° 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

### 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

گیاه ذرت از حاصل ضرب 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 پر شده 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.



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،  $\rho$  و  $C_p$ ، به ترتیب مربوط به تراکم هوا و ظرفیت انتقال ویژه است.  $C_p$  برابر با  $1.004 \text{ kJ.k}^{-1}.$  اختلاف دما (برحسب کلونین) بین نقطه  $Z_1$  و  $Z_2$  است. همان مقاومت آبرودینامیکی 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 ماهواره‌ی لندست ۸ محاسبه شد.

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

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

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

در اینجا،  $ET_{ins}$  تبخیر و تعرق لحظه‌ای (میلی‌متر بر ساعت) و  $\lambda ET$  و  $\lambda$  به ترتیب، شار گرمای نهان و گرمای نهان تبخیر است.  $ET_{TrF}$  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  $\lambda LE_{inst}$  شار گرمای نهان است. در نهایت، تبخیر و تعرق با تقسیم  $ET$  بر گرمای نهان تبخیر ( $\lambda$ ) 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 ( $W/m^2$ )؛  $\alpha$ ، آلبیدو سطح (بدون بعد) و  $\epsilon_0$ ، 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  $۱۳۶۷ \text{ (W/m}^2)$ ؛  $\theta$ ، زاویه تابش ورودی خورشید (رادیان)؛  $dr$ ، معکوس فاصله نسبی زمین-خورشید و  $\tau_{sw}$ ، 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  $G/R_n$ ،  $T_s$ ،  $\alpha$  و 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

درنهایت، برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux در برآورد تبخیر و تعرق واقعی از معیارهای NS، PBAIS، RMSE 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) به‌عنوان 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).

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

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

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

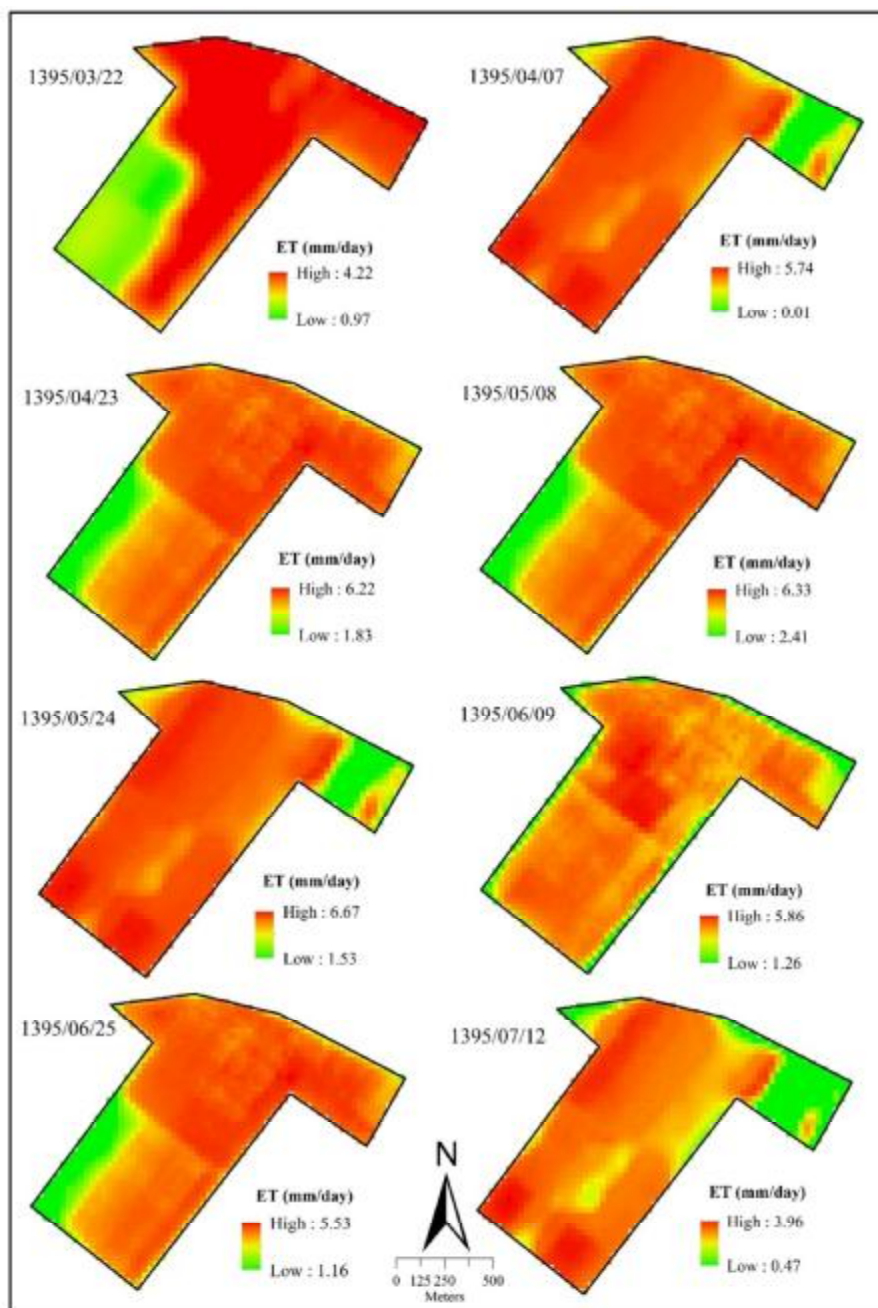
$$R^2 = \left[ \frac{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sigma_s \times \sigma_o} \right]^2 \quad (16)$$

که در آن،  $O_i$  داده‌های مشاهداتی؛  $S_i$  داده‌های برآوردشده؛  $\bar{O}$  و  $\bar{S}$  میانگین داده‌های مشاهده‌شده و برآوردشده و  $\sigma$ ، 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



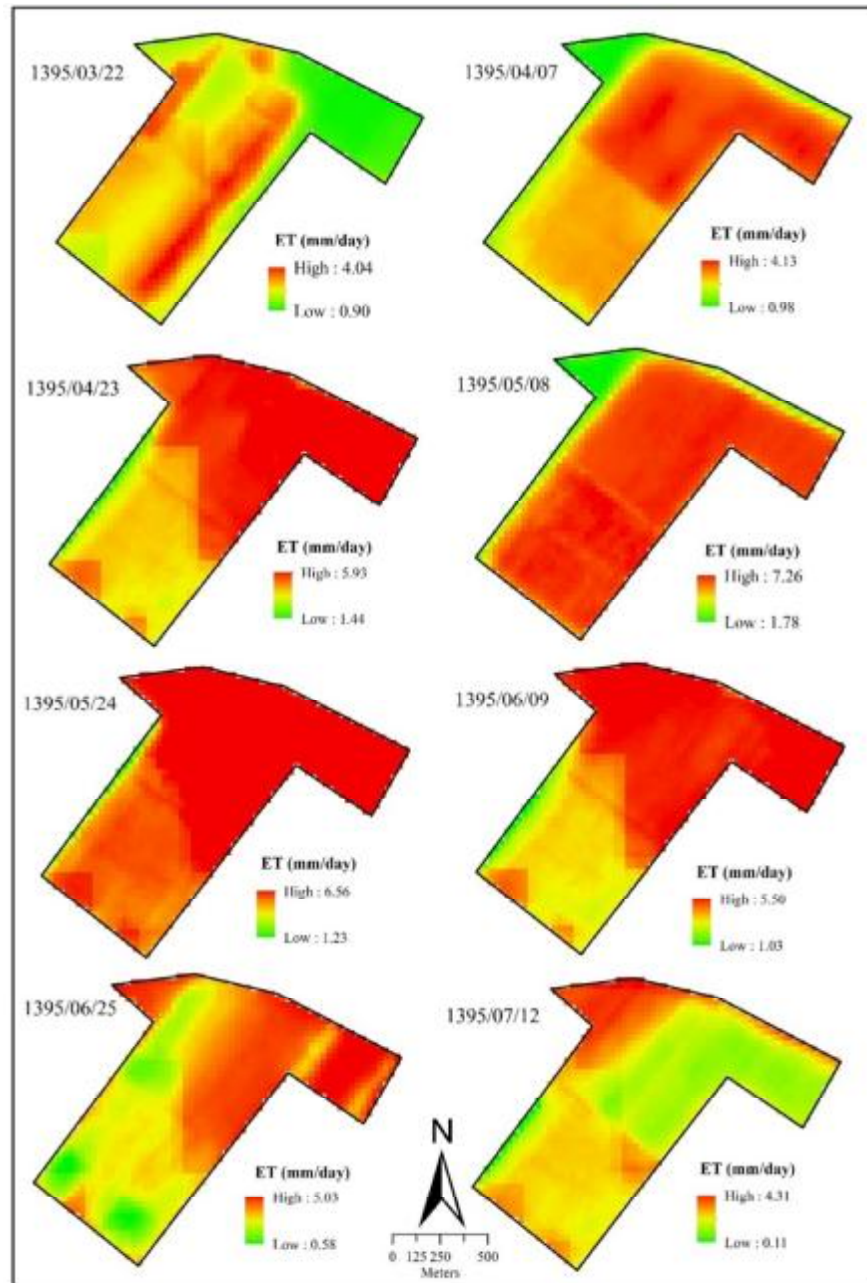
از معادلات متفاوت در محاسبه ضریب شفافیت اتمسفری و شار گرمای خاک است که بخش عمده این تفاوت‌ها، اختلاف زیاد در مقادیر شار گرمای خاک محاسبه شده با دو روش است. همچنین، براساس نتایج، هر دو مدل، مقدار تبخیر و تعرق واقعی را متناسب با توزیع زمانی منطبق با پوشش گیاهی مزرعه ذرت برآورد می‌کند.

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 ۴/۵۷ میلی‌متر در روز، نسبت به الگوریتم EEFLux با مقدار ۴/۱۹ میلی‌متر در روز، حدود ۷/۷۱ 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 اندازه‌گیری‌شده توسط لایسومتر در فصل رشد تغییر می‌کند؛ به‌گونه‌ای 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

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

جدول ۳- مقادیر متوسط تبخیر و تعرق روزانه داده‌های لایسیمتر

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

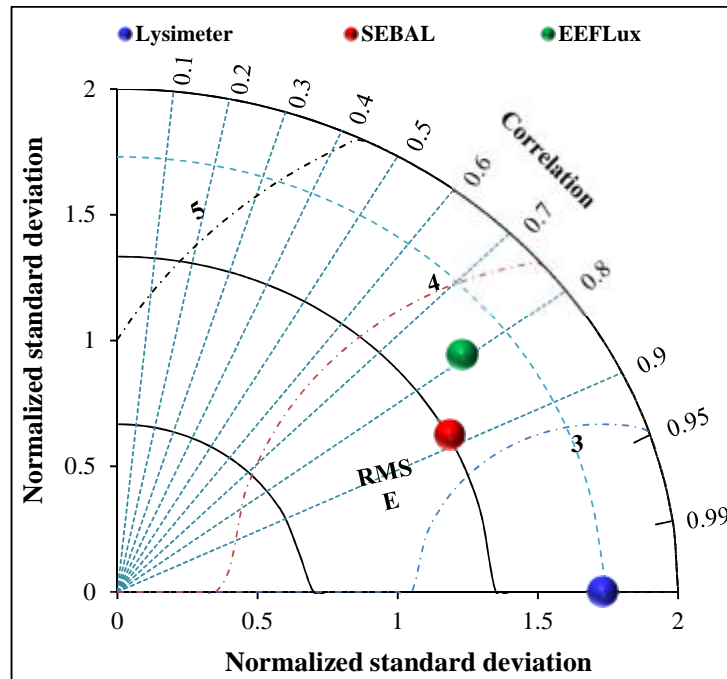
عملکردهای الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux در برآورد تبخیر و تعرق روزانه براساس تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و با توجه به داده‌های لایسیمتر در منطقه اوقاف اراک ارائه شده است. با توجه به اینکه دی‌گرام تیلور براساس ترکیبی از دو معیار همبستگی و انحراف معیار رسم شده است، مشخص شد الگوریتم SEBAL، همبستگی بیشتر و انحراف 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 برآورده 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

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

\* عملکرد بهتر را نشان می‌دهد



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

### نتیجه‌گیری

کمی‌کردن 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 به‌علت کاهش دما و تغییرات پوشش ذرت در منطقه مورد مطالعه، سیر نزولی به خود گرفت. مقایسه الگوریتم‌های SEBAL و EEFLux نشان 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. به‌طور کلی، گفتنی است نتایج این پژوهش به برنامه‌ریزان مزرعه مورد مطالعه کمک می‌کند به‌راحتی، با تهیه تصاویر 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 و تخمین بیلان اقتصادی مزرعه، تأثیر بسیاری دارد. بدون شک، نهادینه‌کردن 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 نزدیک‌کردن عملکرد واقعی به سطح عملکرد مطلوب، گام مؤثری برداشت.

## منابع

- ۱۹(۲):۱۵۳-۱۸۴.
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 ضرب 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. ثنائی‌نژاد 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 ص.
  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 محیط‌زیست. 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.
  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 لایسیتتر. 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 سنجش 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 سنجش 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 ج. 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 (ET0) و محاسبه نیاز آبی گیاه (ETC) زیتون در استان کرمانشاه. مجله جغرافیا و پایداری محیط. ۳:۴۵-۶۳.

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. 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.
32. 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.
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. Talleg 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. and 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. Nejadhashemi 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.

