

## تخمین تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از دو الگوریتم مثلثی و S-SEBI (مطالعه موردی: دشت مشهد)

مژده سلیمی فرد<sup>۱\*</sup>، سید حسین ثنائی نژاد<sup>۲</sup>، علیرضا راشکی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، هواشناسی کشاورزی، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی، مشهد.

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

۳- دانشیار، گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی، مشهد.

### چکیده

افزایش جمعیت در سراسر جهان منجر به افزایش تقاضا برای مواد غذایی و در نتیجه نیاز به تولید بیشتر محصولات کشاورزی می‌شود. با توجه به اینکه بیش از ۷۰ درصد منابع آب شیرین در بخش کشاورزی مصرف می‌شود، مدیریت صحیح و بهینه این منابع به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از جنبه‌های کلیدی در مدیریت مؤثر کشاورزی، مدیریت بهینه آبیاری است که وابسته به برآورد نیاز آبی گیاهان است. تبخیر-تعرق معیاری برای اندازه‌گیری نیاز آبی گیاهان است. اکثر روش‌های محاسبه تبخیر-تعرق واقعی به صورت تخمین نقطه‌ای هستند که در سطح حوزه و یا مناطق غیر همگن نیازمند مقیاس‌بندی مکانی هستند. در این میان، روش‌های متنوع سنجش از دوری با پیچیدگی‌های متنوع به منظور بررسی متغیر تبخیر-تعرق واقعی در سطوح منطقه‌ای وسیع بر اساس معادله بیلان انرژی و شرایط پوشش گیاهی توسعه یافته‌اند. در این مطالعه از دو الگوریتم مثلثی و بیلان انرژی ساده شده (S-SEBI) که مبتنی بر فضای مثلثی  $Ts/VI$  هستند جهت برآورد میزان تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از داده‌های سنجنده لندست ۸ در سطح دشت مشهد استفاده شد. نتایج بدست آمده از این مطالعه با داده‌های تبخیر-تعرق استاندارد مزارع گندم و ذرت مورد صحت‌سنجی قرار گرفتند. نتایج این مطالعه به طور کلی نشان داد هر دو الگوریتم مثلثی و S-SEBI به خوبی تغییرات میزان تبخیر-تعرق را که در نتیجه تغییرات میزان رطوبت خاک ایجاد می‌شود به خصوص در طی فصل رشد گیاهان شناسایی می‌کنند. نتایج صحت‌سنجی این مطالعه حاکی از خطا کمتر و صحت بیشتر الگوریتم مثلثی نسبت به الگوریتم S-SEBI بود به طوری که میزان ضریب تبیین الگوریتم مثلثی در مزارع گندم بیش از ۰/۹۰ و در مزرعه ذرت ۰/۷۷ بود. در حالی که میزان ضریب تبیین در الگوریتم S-SEBI در دو مزرعه گندم بیش از ۰/۶ و در مزرعه ذرت مشابه الگوریتم مثلثی و به میزان ۰/۷ بود.

کلید واژه‌ها: تبخیر-تعرق واقعی، الگوریتم مثلثی، الگوریتم S-SEBI، مناطق خشک و نیمه خشک.

## مقدمه

حدود ۴۱ درصد از سطح کره زمین را اراضی خشک و نیمه خشک تشکیل می‌دهند که بیش از ۳۸ درصد از جمعیت جهان در این مناطق زندگی می‌کنند (Reynolds et al. 2007). این مناطق با ویژگی‌های اقلیمی خاصی مانند بارندگی سالانه کم، رطوبت ناچیز و نوسانات دمایی شدید مواجه هستند و کمبود آب، یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های اکولوژیکی در آن‌ها به شمار می‌رود. در چنین شرایطی، مدیریت منابع آبی، به‌ویژه در بخش کشاورزی که نقش کلیدی در این مناطق دارد، اهمیت ویژه‌ای می‌یابد. یکی از مؤلفه‌های اصلی برای مدیریت منابع آبی، شناخت دقیق چرخه آب در طبیعت است. تبخیر-تعرق به‌عنوان یک بخش اساسی از این چرخه، نقش مهمی در ارتباط میان تغییرات آب، انرژی و چرخه کربن در سطح زمین ایفا می‌کند (Pourmohamad et al. 2020). کشور ایران نیز با قرار گرفتن در کمربند خشک جهانی، تنها حدود یک‌سوم بارش جهانی را دریافت می‌کند. با توجه به محدودیت بارش‌ها و اقلیم خشک و نیمه‌خشک در ایران، آبیاری به‌عنوان یکی از روش‌های برطرف‌سازی نیاز آبی گیاهان زراعی اهمیت ویژه‌ای دارد. محدودیت منابع آب و استفاده نامطلوب از آن، عامل اصلی محدودکننده توسعه کشاورزی و افزایش تولیدات غذایی در ایران است (اکبری و همکاران، ۱۳۹۰). روش‌های اندازه‌گیری تبخیر-تعرق به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. روش‌های مستقیم شامل ابزارهایی مانند لایسیمتر، برج شار ادی-کواریانس (EC)، نسبت باون (BR) و روش جریان شیره گیاهی (SF) هستند که با نصب تجهیزات در منطقه مورد مطالعه، جریان انرژی و تغییرات گرمای نهان تبخیر را ثبت می‌کنند. با این حال، به دلیل هزینه بالا، نیاز به نگهداری و محدودیت در پوشش منطقه‌ای، این روش‌ها برای مطالعات وسیع مناسب نیستند. در مقابل، روش‌های غیرمستقیم با استفاده از مؤلفه‌های فیزیکی، امکان برآورد تبخیر-تعرق را در گستره‌های وسیع با دقت قابل قبول فراهم می‌کنند (Taheri et al. 2022). از دهه ۱۹۸۰، روش‌های سنجنش از دور که بر معادلات بیلان انرژی استوارند، به‌عنوان رویکردی مقرون به‌صرفه توسعه یافتند. این روش‌ها با پوشش وسیع، توانایی محاسبه تبخیر-تعرق در مناطق ناهمگن را افزایش داده و در مقایسه با سایر روش‌های تخمینی، دقت بالاتری دارند (Zhang et al. 2016). مدل‌های سنجنش از دور مبتنی بر بیلان انرژی به دو دسته تک‌منبعی و دومنبعی تقسیم می‌شوند.

در مدل‌های تک‌منبعی، تبخیر و تعرق به‌صورت یک متغیر واحد محاسبه می‌شوند، درحالی‌که در مدل‌های دومنبعی، این دو مؤلفه به‌طور جداگانه برآورد می‌شوند (Li et al. 2009). معادله بالانس انرژی را می‌توان به‌صورت معادله (۱) نشان داد.

$$R_n = L_E + G + H \quad (1)$$

در این معادله  $L_E$  گرمای نهان تبخیر،  $R_n$  تابش خالص جذب شده توسط سطح زمین،  $H$  شار گرمای محسوس،  $G$  شار گرمای خاک هستند. واحدهای انرژی در این معادله همگی بر مبنای  $(w.m^{-2})$  هستند.

مطالعات متعددی به بررسی روش‌های مختلف تخمین تبخیر-تعرق واقعی گیاهان با استفاده از داده‌های سنجنش از دور پرداخته‌اند. راوات و همکاران (Rawat et al. 2017) تبخیر-تعرق واقعی گیاه گندم را در هندوستان با استفاده از الگوریتم سبال و روش فائو-پنمن-مانتیت تخمین زده و داده‌های خروجی را با داده‌های لایسیمتر مقایسه کردند که همبستگی ۰/۹۱ را نشان داد. مرشدی و همکاران (۱۳۹۵) نیز عملکرد دو الگوریتم سبال و متریک را در تخمین تبخیر-تعرق یونجه بررسی کرده و الگوریتم سبال را قابل‌اعتمادتر ارزیابی کردند. مقبلی و ثنائی‌نژاد (۱۳۹۷) با استفاده از روش پرستی-تیلور و داده‌های لندست ۸ در منطقه فریمان، میزان تبخیر-تعرق پتانسیل را برآورد کرده و آن را با روش فائو-پنمن-مانتیت مقایسه کردند که نتایج نشان‌دهنده همبستگی بالا، به‌ویژه در مناطق کشاورزی بود. مقبلی و همکاران (۱۴۰۱) مدل دو منبعی (TSEB) را برای برآورد تبخیر-تعرق در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی ارزیابی کردند که همبستگی بالایی ۰/۹۴ با مدل دو جزئی فائو ۵۶ را نشان داد. محمدیان و همکاران (Mohammadian et al. 2017) تبخیر-تعرق روزانه را در سد رودخانه زاینده‌رود با استفاده از الگوریتم SEBS و داده‌های لندست ۸ برای سه سال متوالی محاسبه کرده و دریافتند که این روش نسبت به مدل پنمن-مانتیت دقت بالاتری دارد. قاسمی و همکاران (۱۴۰۰) مدل متریک را برای برآورد تبخیر-تعرق گندم در مزرعه دانشگاه شیراز به کار برده و نتایج آن را با مدل AquaCrop و اسنجی کردند که مقدار خطای برابر با ۰/۱۲ را نشان داد. همچنین، سهیلی‌فر و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از الگوریتم سبال و داده‌های سنجنده مودیس، میزان تبخیر-تعرق واقعی نیشکر را در جنوب خوزستان بررسی کرده و ضریب همبستگی ۰/۷۷ را

روش‌های پرکاربرد برای محاسبه تبخیر-تعرق واقعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود. مطالعات Li et al. 2014; Hoedjes et Rasmussen et al. 2014) از جمله مطالعاتی هستند که نتایج قابل قبولی از این الگوریتم در تخمین تبخیر-تعرق واقعی در مناطق خشک و نیمه خشک ارائه می‌دهند. روئرینک و همکاران (Roerink et al. 2000) نخستین مطالعه‌ای بود که شار گرمای نهان تبخیر را با استفاده از پراکندگی فضایی دمای سطح زمین در برابر آلبیدو (به‌جای شاخص گیاهی) و با الگوریتم S-SEBI محاسبه کرد. گومز و همکاران (Gómez et al. 2005) این مفهوم را توسعه داده و مقادیر روزانه تبخیر-تعرق را تخمین زدند. کومار و همکاران (Kumar et al. 2020) نیز این الگوریتم را در مراحل مختلف رشد برنج و سیب‌زمینی با تصاویر لندست ۸ ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که S-SEBI در مرحله توسعه گیاه، که پوشش گیاهی حداکثر است، عملکرد بهتری دارد.

در این مطالعه به منظور برآورد تبخیر-تعرق واقعی در سطح دشت مشهد از دو الگوریتم مثلثی و S-SEBI استفاده شد. هدف اصلی این مطالعه، افزایش دقت مکانی و برآورد دقیق تبخیر-تعرق در مناطق با پوشش گیاهی ناهمگن، با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای با وضوح مکانی بالا و الگوریتم‌های مثلثی و S-SEBI، در مقایسه با روش‌های نقطه‌ای و تجربی است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

با توجه به هدف این مطالعه در محاسبه تبخیر-تعرق و اهمیت آن در بخش کشاورزی، منطقه مورد مطالعه باید شامل پوشش‌های طبیعی گیاهی و بخش وسیعی از اراضی کشاورزی باشد. بنابراین، دشت مشهد در استان خراسان رضوی به‌عنوان منطقه مورد مطالعه در این پژوهش انتخاب شد. با توجه به وضعیت بحرانی منابع آبی در دشت مشهد، اجرای برنامه‌های آبیاری جامع و دقیق بر اساس نیاز آبی گیاهان زراعی یکی از نیازهای اصلی بخش کشاورزی در این منطقه است. برای این منظور، دانستن میزان تبخیر-تعرق امری ضروری است. دشت مشهد با مساحت ۹۶۰۰ کیلومتر مربع در عرض‌های ۳۵ درجه ۵۹ دقیقه تا ۳۷ درجه ۳ دقیقه شمالی و طول‌های ۵۸ درجه ۲۱ دقیقه تا ۶۰ درجه طول شرقی واقع شده است. این دشت از

بین داده‌های مدل و مقادیر محاسباتی حاصل از ضریب گیاهی به‌دست آوردند. از اوایل دهه ۱۹۸۰ مطالعات گوناگونی بر روی الگوی مثلثی حاصل از نمایش دو بعدی داده‌های شاخص گیاهی (VI) در مقابل داده‌های دمای سطح زمین (LST)، به‌خصوص در مناطق با پوشش گیاهی ناهمگن، انجام شده است. هدف اصلی این مطالعات بررسی تغییرات خواص بیوفیزیکی پوشش گیاهی در پی‌سکل‌های تشکیل‌دهنده منطقه مورد مطالعه و ارتباط آنها با تخمین شار انرژی سطحی و تغییرات رطوبت سطحی خاک است. ایجاد شکل مثلثی حاصل از نمایش دو بعدی داده‌های شاخص گیاهی و دمای سطح زمین، نتیجه تغییرات دمای سطحی در واکنش به تغییرات رطوبت خاک است. این تغییرات در مناطق دارای پوشش گیاهی و در مناطق فاقد پوشش یا به اصطلاح خاک بایر متفاوت بوده و الگوهای حرارتی و رطوبتی متمایزی را نشان می‌دهد (Petropoulos et al. 2009). مدل‌های متنوعی از پراکنش مثلثی تغییرات دمای سطحی در برابر شاخص‌های گیاهی جهت برآورد شار انرژی سطحی و تغییرات رطوبت خاک توسعه یافته‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به مدل‌های زیر اشاره نمود.

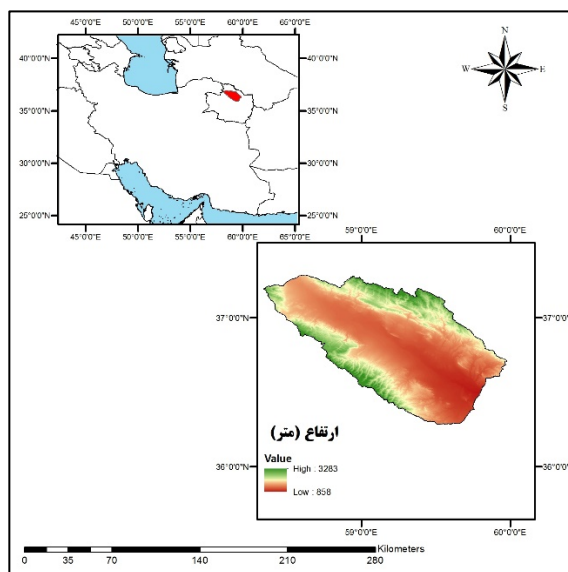
۱- الگوریتم مثلثی بر مبنای داده‌های شاخص نرمال شده گیاهی (NDVI) و دمای سطح زمین (LST).

۲- مدل بیلان انرژی ساده شده (S-SEBI) بر مبنای داده‌های آلبیدو و دمای سطح زمین (LST).

الگوریتم مثلثی از جمله روش‌های محاسبه تبخیر-تعرق است که بر مبنای رسم فضای مثلثی TS/VI استوار است. این الگوریتم برای اولین بار در مطالعه جیانگ و اسلام (Jiang & Islam. 1999) معرفی شد. آنها در این مطالعه از پراکندگی فضایی داده‌های NDVI در مقابل دمای سطح زمین و معادله ساده شده پرستلی-تیلور جهت محاسبه میزان تبخیر-تعرق در یک محیط غیرهمگن استفاده کردند. فرضیه کلیدی آن‌ها این بود که مناطق با حداکثر پتانسیل شار گرمای نهان تبخیر را می‌توان با استفاده از پیکسل‌هایی که کمترین دمای سطحی، کمترین آلبیدو و بیشترین رطوبت خاک را دارند، شناسایی کرد. مطالعات (Jiang & Islam. 2003; Venturini et al. 2004; Batra et al. 2006) به ترتیب موجب اصلاح و بهبود الگوریتم مثلثی شدند. هر یک از این مطالعات بر روی توانایی الگوریتم مثلثی در برآورد میزان تبخیر-تعرق و کاربرد آسان آن در مناطق بزرگ تاکید داشت. الگوریتم مثلثی یکی از

میلی متر و میانگین دما ۱۵/۸ درجه سلسیوس است. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی دشت مشهد را نشان می‌دهد.

شمال به رشته‌کوه‌های هزار مسجد و از جنوب به کوه‌های بینالود محدود می‌شود. ارتفاع آن بین ۸۵۰ تا ۳۲۵۰ متر متغیر است (اکبری و همکاران، ۱۳۸۸). میانگین بارندگی سالانه ۲۴۰



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی دشت مشهد و تغییرات ارتفاع این دشت بر اساس نقشه DEM ۳۰ متر.

قابل دسترس می‌باشد (Ermida et al. 2020). در این مطالعه سال ۲۰۲۰ به عنوان سال مورد مطالعه برگزیده شد. تصاویر مرتبط با ماهواره لندست ۸ در سامانه (GEE) بر اساس میزان ابرناکی جستجو و مرتب شد. تصویر ستون ۱۵۹ و ردیف ۳۵ ماهواره لندست موقعیت مکانی دشت مشهد را پوشش می‌دهد. از آنجایی که به منظور محاسبات تبخیر- تعرق داده‌های منطقه مورد مطالعه باید در یک روز برداشت شده باشند، از موزاییک کردن تصاویر به منظور پوشش کامل دشت مشهد اجتناب شد. در نهایت تعداد ۸ تصویر که دارای کمترین میزان ابرناکی در منطقه مورد مطالعه در طی فصل رشد گیاهی انتخاب شدند. جدول (۱) تاریخ تصاویر مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

#### داده‌های مورد استفاده در مطالعه

یکی از اهداف اصلی این مطالعه، تخمین دقیق تغییرات مکانی و زمانی تبخیر- تعرق در دشت مشهد با پوشش گیاهی ناهمگن است. از این رو با توجه به وسعت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه از داده‌های سنجنده لندست ۸ استفاده شد. در این مطالعه به منظور جستجو و دانلود تصاویر ماهواره‌ای از سامانه آنلاین (GEE) استفاده شد. این سامانه در واقع یک پلتفرم آنلاین است که به کاربران سنجنش‌ازدور اجازه دسترسی به حجم بالایی از داده‌ها بدون نیاز به منابع محاسباتی را می‌دهد. این سامانه بر مبنای زبان برنامه‌نویسی (JAVA) است و در آن تمامی محصولات سطح ۱ و ۲ ماهواره لندست که شامل داده‌های (TOA) و (SR) می‌شود به صورت مستقیم و آزاد

جدول ۱: تاریخ روزهای مورد مطالعه بر اساس تفکیک زمانی تصاویر لندست ۸

تاریخ تصاویر مورد مطالعه به میلادی	تاریخ تصاویر مورد مطالعه به شمسی	روز ژولیوسی
۰۸-۰۳-۲۰۲۰	۱۸-۱۲-۱۳۹۹	۶۷
۱۱-۰۵-۲۰۲۰	۲۲-۰۲-۱۳۹۹	۱۳۱
۲۷-۰۵-۲۰۲۰	۰۷-۰۳-۱۳۹۹	۱۴۷
۱۲-۰۶-۲۰۲۰	۲۳-۰۳-۱۳۹۹	۱۶۳
۲۸-۰۶-۲۰۲۰	۰۸-۰۴-۱۳۹۹	۱۷۹
۳۰-۰۷-۲۰۲۰	۰۹-۰۵-۱۳۹۹	۲۱۱
۱۵-۰۸-۲۰۲۰	۲۵-۰۵-۱۳۹۹	۲۲۷
۱۶-۰۹-۲۰۲۰	۲۶-۰۶-۱۳۹۹	۲۵۹

## الگوریتم مثلثی

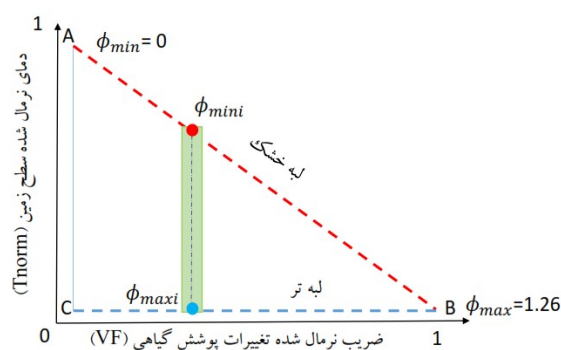
روش‌های گوناگونی بر مبنای داده‌های سنجش‌ازدور به‌منظور محاسبه میزان تبخیر - تعرق واقعی توسعه پیدا کرده است. اکثر این روش‌ها بر مبنای معادله بالانس انرژی سطحی زمین و تغییرات پوشش گیاهی سطحی هستند. در میان این روش‌ها، الگوریتم‌های مثلثی، که بر اساس نمایش دوبعدی داده‌های دمای سطح زمین (LST) در مقابل شاخص گیاهی (VI) و تشکیل الگوی مثلثی عمل می‌کنند، به‌طور گسترده در مطالعات مختلف استفاده شده‌اند. الگوریتم مثلثی بر پایه دو فرض اساسی استوار است: ۱- این الگوریتم بر پایه شناسایی لبه خشک و تر در فضای دوبعدی دمای سطحی - شاخص گیاهی استوار است. به‌منظور شناسایی دقیق این لبه‌ها نیاز است که پیکسل‌های تشکیل‌دهنده منطقه مورد مطالعه از لحاظ رطوبت خاک و وضعیت پوشش گیاهی بسیار متنوع باشند. زیرا یکسان بودن شرایط پوشش و رطوبت خاک، موجب خطا در شناسایی لبه‌های خشک و تر می‌شود. ۲- تمام پیکسل‌های تشکیل‌دهنده منطقه مورد مطالعه دارای ارتفاع یکسانی باشند. با قبول این فرض می‌توان در نظر گرفت که تغییرات دما در منطقه مورد مطالعه ناشی از وقوع پدیده تبخیر از سطح خاک به‌جای تغییرات توپوگرافی است (Carlson, 2007). روش مثلثی TS/VI بر مبنای معادله پریستلی - تیلور و بر اساس روابط فیزیکی میان پارامتر کسر تبخیر (EF) و متغیرهای سطحی مانند: دمای سطح زمین، رطوبت خاک و میزان پوشش

گیاهی استوار است (Jiang & Islam, 1999). در این الگوریتم پارامتر اثر ترکیبی ( $\phi$ ) که از طریق معادله پریستلی - تیلور محاسبه می‌شود، به‌راحتی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای محاسبه می‌گردد. پارامتر اثر ترکیبی ( $\phi$ ) در الگوریتم مثلثی به‌منظور محاسبات مرتبط با مقاومت سطحی و آیرودینامیک، گرادیان فشار بخار و رطوبت در دسترس خاک محاسبه و جایگزین می‌شود (Zhang et al. 2016). همان‌طور که قبلاً بیان شد، الگوریتم مثلثی نیز مانند سایر روش‌های سنجش‌ازدور از طریق معادله بالانس انرژی (معادله ۱)، میزان تبخیر - تعرق واقعی را محاسبه می‌کند. در این الگوریتم میزان شار گرمای نهان تبخیر از طریق معادله (۲) محاسبه می‌شود (Tang et al. 2010).

$$LE = \phi \left[ (R_n - G) \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] \quad (2)$$

در این معادله:  $\phi$ : پارامتر اثر ترکیبی (این پارامتر جایگزین مقاومت آیرودینامیک است)،  $R_n$ : میزان تابش خالص سطحی ( $W/m^2$ ),  $G$ : شار گرمای خاک ( $W/m^2$ ),  $\Delta$ : شیب فشار بخار اشباع در مقابل دمای هوا ( $kPa/C_0$ ),  $\gamma$ : ثابت سایکرومتری ( $kPa/C_0$ ).

به‌منظور محاسبه ضریب اثر ترکیبی ( $\phi$ ) ابتدا لازم است تا داده‌های شاخص گیاهی و دمای سطح زمین در یک محیط دوبعدی مطابق با شکل (۲) رسم شوند. در این مطالعه داده‌های شاخص گیاهی و دمای سطح زمین ابتدا نرمال شدند و سپس در یک نمودار دو بعدی در مقابل هم رسم شدند.



شکل ۲: نمودار شماتیک الگوریتم مثلثی که بر مبنای رسم داده‌های نرمال شده NDVI و LST در فضای دوبعدی استوار است.  $\phi_{min}$  مقدار ضریب  $\phi$  در لبه خشک و  $\phi_{max}$  مقدار ضریب  $\phi$  در لبه تر برای هر پیکسل می‌باشد.

و دمای سطح زمین در حداکثر مقدار خود قرار دارد، در حالی که در لبه تر، حداکثر پوشش گیاهی و کمترین دمای سطح

در شکل (۲) خطوط AB و CB به ترتیب لبه خشک و لبه تر را نمایش می‌دهند. در لبه خشک، میزان پوشش گیاهی صفر

با توجه به شکل (۲) این نکته قابل ذکر می‌باشد که در روش الگوریتم مثلثی، لبه تر معمولاً بر روی دمای نرمال شده صفر ( $T_{norm} = 0$ ) قرار می‌گیرد. در الگوریتم‌های سنسج‌ازدور برای جایگزینی دو پارامتر مقاومت آبرودینامیک و مقاومت پوشش گیاهی از پارامتر ترکیبی ( $\Phi$ ) استفاده می‌شود (Batra et al. 2006). جهت محاسبه پارامتر ( $\Phi$ ) ابتدا لازم است تا لبه خشک و تر در محیط دویبعدی ( $T_s/VI$ ) شناسایی شود. شناسایی دقیق این دو لبه تأثیر به سزایی در صحت محاسبات تبخیر- تعرق دارد. در این مطالعه محاسبات مرتبط با لبه خشک و تر و پارامتر ترکیبی ( $\Phi$ ) در محیط GEE انجام شد. پس از محاسبه شاخص کسر پوشش گیاهی و دمای نرمال شده سطح زمین در هر یک از تاریخ‌های مورد مطالعه، تعداد ۵۰۰۰ نقطه به صورت تصادفی در سطح منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. داده‌های شاخص گیاهی و داده‌های دمای سطح زمین ۵۰۰۰ نقطه تصادفی، در یک محیط دویبعدی که محور افقی شامل داده‌ها شاخص گیاهی و محور عمودی شامل داده‌های دمای سطح زمین بود ترسیم شدند. جهت شناسایی لبه خشک ابتدا داده‌ها شاخص ( $V_f$ ) به بازه‌هایی با طول ۰/۰۲ (با توجه به قدرت تفکیک مکانی داده‌های لندست ۸ این بازه بهترین نتیجه را در شناسایی لبه خشک داشت) تقسیم شدند و سپس در هریک از این بازه‌ها مقدار دمای حداکثر شناسایی شد. پس از شناسایی دمای حداکثر در هر یک از بازه‌های شاخص گیاهی خط رگرسیونی به دماهای حداکثر برازش داده شد. این خط رگرسیونی در محیط دویبعدی ( $T_s/VI$ ) در واقع لبه خشک می‌باشد. معادله خط رگرسیونی برازش داده شده مطابق با معادله (۵) می‌باشد (Tang et al. 2010). لبه تر نیز با توجه به مطالعه (Zhang et al. 2016) در کمترین دمای سطحی مشاهده شده و منطبق با محور افقی (X) در نظر گرفته شد.

$$T_{maxi} = a + bV_f \quad (5)$$

در معادله (۵) به ترتیب:  $T_{maxi}$ : حداکثر دمای سطحی در هر بازه شاخص کسر پوشش گیاهی،  $a, b$ : ضرایب رگرسیونی،  $V_f$ : مقادیر شاخص کسر پوشش گیاهی در بازه‌های ۰/۰۲. به منظور محاسبه پارامتر ( $\Phi$ ) برای هریک از پیکسل‌های منطقه مورد مطالعه، از دو مرحله درون‌یابی استفاده می‌شود.

زمین مشاهده می‌شود. در این حالت در لبه خشک، خاک نیازمند رطوبت است و پتانسیل تبخیر- تعرق بسیار کم است. در حالی که در لبه تر به دلیل وجود رطوبت کافی حداکثر میزان پتانسیل تبخیر- تعرق وجود دارد. در این مطالعه شاخص گیاهی مورد استفاده در الگوریتم مثلثی شاخص کسر پوشش گیاهی ( $V_f$ ) است. به منظور محاسبه این شاخص ابتدا باید مقادیر شاخص نرمال شده تغییرات گیاهی (NDVI) محاسبه شود. شاخص NDVI بر مبنای داده‌های طیفی قرمز و مادون قرمز نزدیک محاسبه می‌شود. برای محاسبه این شاخص از باندهای ۴ و ۵ ماهواره لندست ۸ که شامل باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک می‌باشد استفاده شد (Allestro, 2015). با توجه به هدف این مطالعه که محاسبه تبخیر- تعرق واقعی است، از داده‌های SR ماهواره لندست ۸ در پلتفرم GEE به منظور محاسبه شاخص NDVI استفاده شد. شاخص کسر پوشش گیاهی ( $V_f$ ) با استفاده از داده‌های شاخص NDVI مطابق با معادله (۳) محاسبه شد.

$$V_f = \left( \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad (3)$$

در معادله (۳) به ترتیب:

$V_f$ : میزان شاخص کسر پوشش گیاهی،  $NDVI$ : میزان شاخص گیاهی برای هر پیکسل،  $NDVI_{min}$ : کمترین میزان شاخص گیاهی در کل منطقه مورد مطالعه،  $NDVI_{max}$ : بیشترین میزان شاخص گیاهی در کل منطقه مورد مطالعه در این مطالعه به منظور محاسبه دمای سطح زمین از باند ۱۰ تصاویر ماهواره لندست ۸ در تاریخ‌های منتخب استفاده شد. باند ۱۰ در محدوده مادون قرمز حرارتی (با طول موج ۱۹/۶۰-۱۱/۱۰ میکرومتر) قرار دارد و این ویژگی این باند را برای اندازه‌گیری دقیق‌تر دمای سطح زمین مناسب‌تر می‌سازد. پس از محاسبه دمای سطح زمین، مقادیر این متغیر با استفاده از معادله (۴) نرمال سازی شدند (Zhang et al. 2016).

$$T_{norm} = \frac{T_s - T_{wet}}{(T_s)_{max} - T_{wet}} \quad (4)$$

در معادله (۴) به ترتیب:  $T_{norm}$ : میزان نرمال شده دمای سطح زمین برای هر پیکسل،  $T_s$ : دمای سطح زمین در هر پیکسل،  $T_{wet}$ : دمای لبه تر (کمترین میزان دما مشاهده شده در منطقه مورد مطالعه)،  $(T_s)_{max}$ : حداکثر دمای سطح زمین در کل منطقه مورد مطالعه.

ثابت سایکرومتری ۰/۰۶ در نظر گرفته شد (Gad & El-Gayar, 2010). همچنین جهت محاسبه شیب فشار بخار اشباع نیز از معادله (۱۰) استفاده شد که در آن بر اساس مطالعه (Jain & Islam, 1999) به جای دمای هوا از دمای سطح زمین استفاده شد.

(۱۰)

$$\Delta = 0.2(0.00738T_s + 0.8072)^7 - 0.000116$$

با توجه به زمان گذر ماهواره لندست ۸ از روی منطقه مورد مطالعه این پژوهش که در ساعت ۱۱ صبح می‌باشد و همچنین نتایج سایر مطالعات، می‌توان میزان پارامتر کسر تبخیر لحظه‌ای در زمان گذر ماهواره را به میانگین روزانه این پارامتر تعمیم داد (Peng et al. 2013). در نهایت در گام آخر میزان تبخیر-تعرق واقعی در هر پیکسل با استفاده از معادله (۱۱) محاسبه شد.

$$AET = [EF(R_n - G)]/L \quad (11)$$

در معادله (۱۱)، AET مقدار تبخیر-تعرق واقعی برحسب میلی‌متر در روز، EF میزان کسر از تبخیر،  $R_n$  مقدار تابش خالص روزانه برحسب وات بر مترمربع، G مقدار شار گرمای خاک روزانه برحسب مگا ژول بر مترمربع در روز و L میزان گرمای نهان تبخیر برحسب مگا ژول بر کیلوگرم است.

#### الگوریتم بیان انرژی ساده شده (S-SEBI):

این الگوریتم نیز همانند سایر مدل‌های سنجش‌ازدوری بر مبنای حل معادله بیان انرژی (SEB) استوار است. در این مدل شار حرارتی محسوس و گرمای نهان تبخیر هم‌زمان با یکدیگر و از طریق محاسبه پارامتر کسر تبخیر ( $\Lambda$ ) بدست می‌آیند. کسر تبخیر ( $\Lambda$ ) نیز با استفاده از رابطه میان دمای سطح زمین (LST) و آلبیدو در یک فضای دوبعدی (شکل ۳)، محاسبه می‌شود. این پارامتر از تغییرات دما سطحی در دو لبه خشک و تر بدست می‌آید (Rocha et al. 2020; Sobrino et al. 2020).

مرحله اول درون‌یابی، شامل محاسبه میزان حداقل پارامتر ترکیبی ( $\Phi$ ) برای هر یک از پیکسل‌ها است. در این مرحله فرض می‌شود مقادیر حداقل پارامتر به صورت رگرسیون خطی با مقادیر شاخص کسر پوشش گیاهی تغییر می‌کند. به طوری که مقدار حداقل پارامتر ( $\Phi$ ) در  $(V_f = 0, Tnorm_{max})$  برابر صفر ( $\Phi_{mini} = 0$ ) و در  $(V_f = 1, Tnorm_{min})$  برابر  $1/26$  ( $\Phi_{maxi} = 1/26$ ) در نظر گرفته می‌شود. می‌توان از معادله (۶) جهت محاسبه مقدار حداقل پارامتر ( $\Phi$ ) برای هر یک از پیکسل‌ها استفاده نمود.

$$\Phi_{mini} = 1.26V_f \quad (6)$$

پس از آن به منظور محاسبه مقدار حداکثر پارامتر ( $\Phi$ ) برای هر یک از پیکسل‌ها فرض می‌شود این مقدار در لبه تر ثابت است، در نتیجه مقدار حداکثر پارامتر ( $\Phi_{maxi}$ ) برای هر پیکسل برابر  $1/26$  مطابق با معادله (۷) در نظر گرفته می‌شود.

$$\Phi_{maxi} = \Phi_{max} = 1.26 \quad (7)$$

در مرحله دوم میان‌یابی مقدار پارامتر ( $\Phi_i$ ) برای هر یک از پیکسل‌ها با فرض اینکه مقدار پارامتر ( $\Phi$ ) به صورت خطی با کاهش دما افزایش می‌یابد، میان  $(\Phi_{maxi})$  و  $(\Phi_{mini})$  محاسبه می‌شود. برای این محاسبه از معادله (۸) استفاده می‌شود. در این معادله مقدار  $(T_{mini})$  برابر با  $(Tnorm_{min})$  در نظر گرفته می‌شود (Tang et al. 2010).

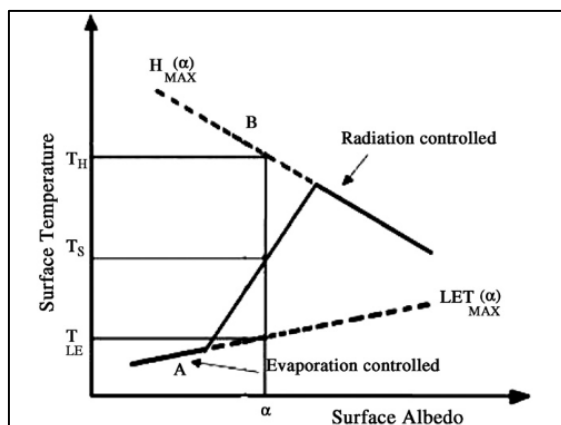
(۸)

$$\Phi_i = \frac{T_{maxi} - Tnorm_i}{T_{maxi} - T_{mini}} (\Phi_{maxi} - \Phi_{mini}) + \Phi_{mini}$$

پس از محاسبه پارامتر ترکیبی ( $\Phi$ ) در گام بعدی میزان کسر تبخیر لحظه‌ای (EF) محاسبه می‌شود. این پارامتر که به صورت نسبت شار گرمای نهان به انرژی در دسترس تعریف می‌شود از طریق معادله (۹) محاسبه می‌شود:

$$EF = \Phi \left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] \quad (9)$$

باتوجه به تغییرات اندک نسبت فشار بخار اشباع و ضریب سایکرومتری به تغییرات دمای هوا، در این مطالعه ضریب



شکل ۳: نمودار شماتیک الگوریتم S-SEBI. H میزان شار گرمای محسوس، LET میزان شار گرمای نهان تبخیر و  $\alpha$  میزان آلبیدو را نشان می‌دهد. همچنین TLE و TH به ترتیب میزان دما در لبه خشک و در لبه تر است.

خاک (در این حالت حداکثر شار گرمای نهان مشاهده می‌شود Santos et al.2010). باتوجه به شکل (۳) خط رگرسیونی برازش داده‌شده به دماهای ( $T_H$ ) برابر با لبه خشک و خط رگرسیونی برازش داده‌شده به دماهای ( $T_{LE}$ ) برابر با لبه تر تعریف می‌شود. در این مطالعه به منظور محاسبه پارامتر کسر تبخیر ابتدا لازم است تا در منطقه میزان دمای سطح زمین (LST) و آلبیدو ( $\alpha$ ) محاسبه گردد. پس از محاسبه دما و آلبیدو در تمام منطقه، به منظور شناسایی لبه خشک و تر در تصاویر مرتبط با روزهای مورد مطالعه، در محیط GEE ابتدا تعداد ۵۰۰۰ نقطه به عنوان نمونه در سطح منطقه به صورت تصادفی انتخاب شد. سپس داده‌های دمای سطحی زمین و آلبیدو در این نمونه‌ها در یک فضای دوبعدی ترسیم گردید. جهت شناسایی لبه خشک و تر ابتدا داده‌های آلبیدو باتوجه به مطالعه انجام شده (Santos et al.2010) و میزان تفکیک مکانی تصاویر لندست ۸، به فواصل ۰/۲ تقسیم و سپس در هر یک از این فواصل میزان حداکثر و حداقل داده‌های دمای سطحی مشخص گردید. مطابق شکل (۳)، لبه خشک شامل خط رگرسیونی برازش داده شده به داده‌های حداکثر دمای سطحی و لبه تر شامل خط رگرسیونی برازش داده شده به دماهای سطحی حداقل است. پس از مشخص نمودن لبه خشک و تر، به ترتیب دمای  $T_H$  بر اساس معادله رگرسیونی (۱۴) و دمای  $T_{LE}$  بر اساس معادله رگرسیونی (۱۵) محاسبه و پارامتر کسر تبخیر برای هر یک از پیکسل‌های منطقه مورد مطالعه با استفاده از معادله (۱۳) محاسبه می‌شود. در معادلات (۱۴) و (۱۵) ضرایب ( $a$ ) و ( $b$ ) به ترتیب ضرایب رگرسیونی می‌باشند.

در این الگوریتم کسر تبخیر ( $\Lambda$ ) از طریق معادله (۱۲) محاسبه می‌شود (Roerink et al.2000).

$$\Lambda = \frac{LE}{LE+H} = \frac{LE}{R_n-G} \quad (12)$$

شکل (۳) رابطه میان دمای سطح زمین و آلبیدو را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نیز مشاهده می‌شود، در بازتاب کم (آلبیدو کم) میزان دمای سطح زمین نیز تقریباً ثابت می‌باشد. این موضوع مربوط به مناطق اشباع از آب مانند سطوح آب آزاد و یا مناطق آبیاری شده است. با افزایش میزان بازتاب، میزان دمای سطحی نیز شروع به افزایش می‌کند (از نقطه A تا B). چون این افزایش دما در اثر کاهش رطوبت خاک در نتیجه کاهش تبخیر-تعرق است، این ناحیه را ناحیه کنترلی تبخیر می‌نامند. این افزایش تا نقطه B ادامه می‌یابد و پس از آن با افزایش آلبیدو دمای سطحی کاهش نشان می‌دهد. زیرا در این نقطه رطوبت خاک بسیار کم شده است و تبخیر-تعرق رخ نمی‌دهد و تمام انرژی دریافتی صرف بالا بردن گرمای محسوس محیطی می‌شود. در این نقطه افزایش آلبیدو موجب کاهش تابش خالص رسیده به سطح زمین می‌گردد و دمای سطح زمین کاهش می‌یابد. این ناحیه را ناحیه کنترل تابشی می‌نامند (Sobrinho et al.2007). بر این اساس معادله (۱۲) را می‌توان به صورت معادله (۱۳) بازنویسی نمود:

$$\Lambda = \frac{T_H-T_S}{T_H-T_{LE}} \quad (13)$$

در این معادله به ترتیب،  $T_S$  دمای سطح زمین،  $T_H$  دمای سطح زمین در شرایط خشک از لحاظ رطوبت خاک (در این حالت حداکثر شار گرمای محسوس مشاهده می‌شود).  $T_{LE}$  دمای سطح زمین در شرایط مرطوب از لحاظ رطوبت موجود در

صورت می‌گیرد (Bisht et al.2005). شار گرمای خاک و میزان گرمای نهان تبخیر نیز با استفاده از معادلات (۲۰) و (۲۱) محاسبه شد (Gad & El-Gayar.2010). در معادلات (۲۰) و (۲۱) به ترتیب  $R_n$  میزان تابش خالص روزانه برحسب وات بر مترمربع،  $\alpha$  میزان آلبیدو سطحی و  $T$  میزان میانگین دمای هوا برحسب درجه سلسیوس است.

$$G = R_n \times (LST - 273.16) \times (0.0038 + 0.0074 \cdot \alpha) \times (1 - 0.98 \times NDVI^4) \quad (20)$$

$$L = 2.51 - 2.361 \times 10^{-3} \cdot T \quad (21)$$

### صحت‌سنجی

در مطالعات تخمین تبخیر-تعرق با الگوریتم‌های سنجش از دور، صحت‌سنجی داده‌های محاسباتی از بخش‌های کلیدی محسوب می‌شود. معمولاً این داده‌ها با مشاهدات مستقیم لایسیمترها و برج‌های شار انرژی مقایسه شده و پارامترهای آماری صحت‌سنجی محاسبه می‌شوند. در مناطقی با محدودیت داده‌های میدانی، از معادلات تجربی مانند فائو-پنمن-مانتیت و هارگریوز-سامانی، مبتنی بر اطلاعات نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی، استفاده می‌شود. در صحت‌سنجی غیرمستقیم، تطبیق شرایط کشاورزی، نوع محصول، تاریخ کشت و برداشت و دوره رشد برای محاسبه دقیق ضریب گیاهی ( $K_c$ ) و تبخیر-تعرق واقعی ضروری است. در این مطالعه، از اطلاعات مزارع کشت گندم و ذرت دانشگاه فردوسی مشهد استفاده شد. این مزارع شامل چهار قطعه متصل به هم بودند؛ در قطعه اول، ذرت علوفه‌ای رقم ۷۰۴ و در سه قطعه دیگر، گندم رقم پیشگام کشت شده بود. تاریخ دقیق کشت، برداشت و دوره‌های رشد گیاهان ثبت شد. گندم اوایل مهرماه کشت و اواخر خرداد تا اوایل تیرماه برداشت شد، با دوره رشد ۲۴۰ تا ۲۵۰ روز. ذرت علوفه‌ای اوایل تیرماه کشت و اواخر مهرماه برداشت شد، با دوره رشد ۱۱۵ تا ۱۲۵ روز. به‌منظور محاسبه مقدار تبخیر-تعرق مرجع ( $ET_0$ ) در مزارع مورد مطالعه از نرم‌افزار RefET و معادله تجربی فائو-پنمن-مانتیت استفاده شد. برای محاسبه این پارامتر ابتدا متغیرهای هواشناسی مورد نیاز این نرم‌افزار از ایستگاه هواشناسی مشهد استخراج گردید. پس از محاسبه تبخیر-

$$T_H = a_H + b_H(\alpha) \quad (14)$$

$$T_{LE} = a_{LE} + b_{LE}(\alpha) \quad (15)$$

به‌منظور محاسبه تبخیر-تعرق روزانه لازم است تا پارامتر  $Cd_i$  محاسبه گردد. این پارامتر بر اساس معادله (۱۶) از نسبت میان تابش خالص لحظه‌ای و تابش خالص روزانه بدست می‌آید. بر اساس مطالعه (Santos et al.2010)، نسبت  $Cd_i$  در تمام طول روز ثابت می‌باشد.

$$Cd_i = \frac{R_{DANR}}{R_{n,over}} \quad (16)$$

به‌منظور محاسبه میزان تبخیر-تعرق روزانه بر اساس الگوریتم S-SEBI از معادله (۱۷) استفاده شد (Rocha et al.2020).

$$ET = (\Lambda Cd_i R_{DANR}) * 0.035265 \quad (17)$$

در این معادله به ترتیب:  $ET$ : میزان تبخیر-تعرق روزانه بر حسب ( $mm \cdot day^{-1}$ )،  $\Lambda$ : پارامتر کسر تبخیر،  $R_{DANR}$ : میزان تابش خالص روزانه ( $W \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$ )

با توجه به معادلات (۱۱) و (۱۷)، محاسبه تبخیر-تعرق روزانه در هر دو الگوریتم مستلزم در نظر گرفتن پارامترهای اساسی، از جمله تابش خالص روزانه، شار گرمای خاک و گرمای نهان تبخیر است. در این مطالعه، مقادیر این پارامترها با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور محاسبه شده است. میزان تابش خالص، ابتدا با استفاده از معادله (۱۸) به‌صورت لحظه‌ای در زمان گذر ماهواره محاسبه شد (da Silva et al.2016). سپس میزان تابش خالص روزانه با استفاده از معادله (۱۹) برای روزهای مورد مطالعه محاسبه شد (Bisht et al.2005).

$$R_{n,over} = (1 - \alpha)R_{SW} - R_{emi} + \epsilon_0 R_{LW} \quad (18)$$

در معادله (۱۸)،  $R_{n,over}$  میزان تابش خالص لحظه‌ای برحسب وات بر مترمربع،  $\alpha$  میزان آلبیدو سطحی،  $R_{SW}$  تابش طول‌موج کوتاه رسیده به سطح زمین برحسب وات بر مترمربع،  $R_{emi}$  تابش طول‌موج بلند خروجی از سطح زمین برحسب وات بر مترمربع،  $\epsilon_0$  گسیلمندی حرارتی سطحی و  $R_{LW}$  تابش طول‌موج بلند رسیده به سطح زمین است.

$$\frac{R_{DANR}}{R_{n,over}} = \frac{2}{\pi \sin\left[\pi\left(\frac{T-2a}{2T}\right)\right]} \quad (19)$$

در معادله (۱۹) مقدار تابش خالص روزانه برحسب وات بر مترمربع،  $T$  طول روز،  $a$  فاصله زمانی بین زمان گذر ماهواره و زمان دریافت حداکثر تابش خالص توسط سطح زمین که به‌طور معمول در ساعت ۱۲:۳۰ ظهر به‌وقت محلی

تعرق مرجع، مقادیر تبخیر- تعرق واقعی بر اساس ضرایب رشد گیاهی منفرد در هر یک از روزهای مورد مطالعه، و بر اساس معادله (۲۲) برای مزارع محاسبه شد. ضرایب رشد گیاهی بر مبنای نشریه فائو (۵۶) و طول دوره‌های مختلف رشد، تعیین گردید (جدول ۲).

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad (22)$$

جدول ۲: مراحل رشد گیاه گندم و ذرت در طی روزهای مورد مطالعه در دشت مشهد.

تاریخ میلادی	تاریخ شمسی	نوع گیاه زراعی	مرحله رشد گیاه
۲۰۲۰-۰۳-۰۸	۱۳۹۸-۱۲-۱۸	گندم پیشگام	توسعه
۲۰۲۰-۰۵-۱۱	۱۳۹۹-۰۲-۲۲	گندم پیشگام	میانی
۲۰۲۰-۰۵-۲۷	۱۳۹۹-۰۳-۰۷	گندم پیشگام	پایانی
۲۰۲۰-۰۶-۱۲	۱۳۹۹-۰۳-۲۳	گندم پیشگام	پایانی
۲۰۲۰-۰۶-۲۸	۱۳۹۹-۰۴-۰۸	ذرت علوفه‌ای	اولیه
۲۰۲۰-۰۷-۳۰	۱۳۹۹-۰۵-۰۹	ذرت علوفه‌ای	توسعه
۲۰۲۰-۰۸-۱۵	۱۳۹۹-۰۵-۲۵	ذرت علوفه‌ای	میانی
۲۰۲۰-۰۹-۱۶	۱۳۹۹-۰۶-۲۶	ذرت علوفه‌ای	پایانی

در این معادلات،  $X_{est}$ : داده‌های محاسباتی (داده‌های حاصل از الگوریتم‌های مورد مطالعه)،  $X_{obs}$ : داده‌های مشاهداتی (داده‌های حاصل از معادلات تجربی)،  $N$ : تعداد داده‌ها.

### نتایج

#### شناسایی لبه‌های خشک و تر در الگوریتم مثلثی

پس از محاسبه دمای نرمال شده سطح زمین و شاخص ( $V_f$ ) در گام بعدی تعیین لبه خشک و تر از جمله مهمترین بخش‌های محاسبات در الگوریتم مثلثی است. شکل (۴)، نمودار دوبعدی تاریخ (۲۰۲۰-۰۵-۱۱) به همراه لبه‌های خشک را نشان می‌دهد. جدول (۳)، معادلات لبه خشک در هر یک از روزهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در الگوریتم مثلثی لبه‌تر در کمترین دمای سطحی مشاهده شده و هم راستا با محور (x) است.

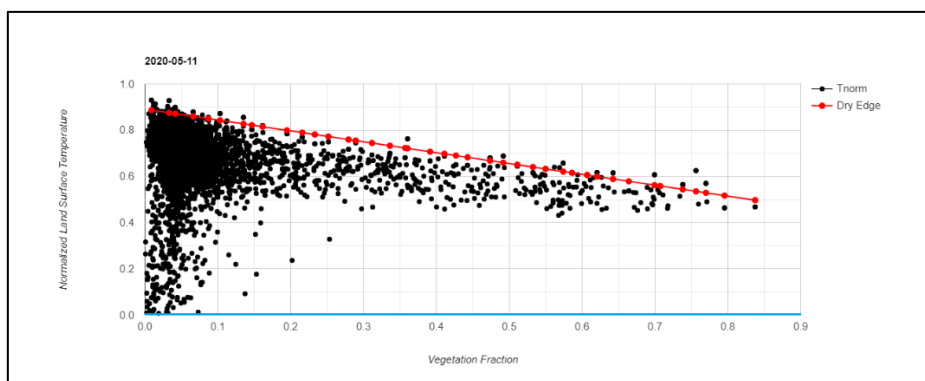
در مطالعه حاضر از پارامتر آماری ضریب تبیین ( $R^2$ ) که میزان همبستگی داده‌های مشاهداتی با داده‌های محاسباتی را نشان می‌دهد و ضرایب خطا، میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ ) و میانگین قدرمطلق خطا ( $MAE$ ) که میزان خطای داده‌های محاسباتی را نسبت به داده‌های مشاهداتی محاسبه می‌کند، استفاده شد. این ضرایب با استفاده از معادلات (۲۳)، (۲۴) و (۲۵) محاسبه می‌شوند.

(۲۳)

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^N (X_{est} - \bar{X})(X_{obs} - \bar{X})]^2}{\sum_{i=1}^N (X_{est} - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (X_{obs} - \bar{X})^2}$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (X_{est} - X_{obs})^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_{est} - X_{obs}| \quad (25)$$



شکل ۴: نمودار دو بعدی الگوریتم مثلثی در تاریخ (۲۰۲۰-۰۵-۱۱) جهت شناسایی لبه‌های خشک (خط قرمز لبه خشک شناسایی شده بر مبنای داده‌های دما و شاخص گیاهی)

جدول ۳: معادلات رگرسیونی لبه‌های خشک و ضرایب تبیین مرتبط با هر معادله در تاریخ‌های مورد مطالعه سال ۲۰۲۰.

تاریخ روزهای مورد مطالعه	معادله خط رگرسیون (لبه خشک)
۰۸-۰۳-۲۰۲۰	$T_{maxi} = -1.44 * V_f + 0.73$
۱۱-۰۵-۲۰۲۰	$T_{maxi} = -0.47 * V_f + 0.89$
۲۷-۰۵-۲۰۲۰	$T_{maxi} = -0.64 * V_f + 0.89$
۱۲-۰۶-۲۰۲۰	$T_{maxi} = -0.85 * V_f + 0.84$
۲۸-۰۶-۲۰۲۰	$T_{maxi} = -0.86 * V_f + 0.83$
۳۰-۰۷-۲۰۲۰	$T_{maxi} = -0.43 * V_f + 0.90$
۱۵-۰۸-۲۰۲۰	$T_{maxi} = -0.65 * V_f + 0.71$
۱۶-۰۹-۲۰۲۰	$T_{maxi} = -0.49 * V_f + 0.82$

تغییرات بدست آمده برای هر یک از پارامترهای تابش خالص لحظه‌ای و روزانه مشابه با نتایج مطالعات (مقبلی و ثنائی نژاد، ۱۳۹۷؛ ده‌زیاری و ثنائی نژاد، ۲۰۱۹) بود. پس از بدست آوردن پارامترهای موردنیاز معادله بیلان انرژی، میزان تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از شاخص کسر تبخیر (EF) برای منطقه مورد مطالعه محاسبه شد. شکل (۵) نتایج حاصل از محاسبه تبخیر-تعرق واقعی روزانه بر حسب میلی‌متر در روز با استفاده از الگوریتم مثلثی در سطح دشت مشهد را نشان می‌دهد.

بیشترین میزان تبخیر-تعرق واقعی در تاریخ (۱۱-۰۵-۲۰۲۰)، (۲۲ اردیبهشت‌ماه) مشاهده شد که با توجه به حداکثر سبزی‌نگی پوشش‌های گیاهی موجود در دشت مشهد، منطقی به نظر می‌رسد. کمترین میزان تبخیر-تعرق واقعی نیز در تاریخ (۱۶-۰۹-۲۰۲۰)، (۲۶ شهریورماه) مشاهده شد که با توجه به برداشت محصولات کشاورزی در سطح دشت مشهد و همچنین خشک‌بودن اراضی طبیعی می‌توان انتظار داشت کمترین میزان تبخیر-تعرق نیز مشاهده گردد. همچنین با توجه به اینکه مساحت قابل توجهی از مزارع دشت مشهد به کشت گندم اختصاص دارد (شعبانی و همکاران، ۱۳۹۲) و در اواخر شهریورماه هیچ محصول گندمی در سطح دشت مشهد مشاهده نمی‌شود، در نتیجه میزان تبخیر-تعرق در سطح دشت مشهد به‌خصوص در مناطق کشاورزی کاهش یافته است.

همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود تمامی خطوط رگرسیونی برازش داده شده به نقاط تصادفی دارای ضریب ( $R^2$ ) بالای ۰/۸۰ هستند که از لحاظ آماری مورد تایید است.

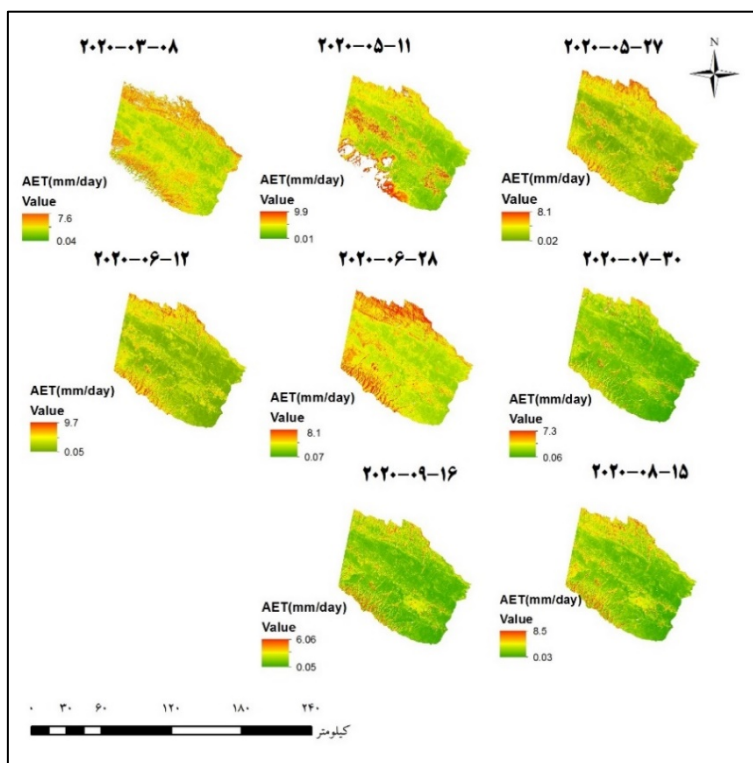
#### نتایج تبخیر-تعرق واقعی الگوریتم مثلثی

پس از تعیین لبه خشک در گام بعدی پارامتر ترکیبی ( $\phi$ ) برای هر یک از پیکسل‌های تشکیل‌دهنده دشت مشهد در طی روزهای مورد مطالعه محاسبه شد. کسرتبخیر (EF) لحظه‌ای با استفاده از پارامتر ( $\phi$ ) و ضریب سایکرومتری ( $\gamma$ ) و شیب فشار بخار اشباع ( $\Delta$ ) در سطح منطقه محاسبه شد. لحظه گذر ماهواره لندست از روی دشت مشهد در ساعت ۱۱ صبح می‌باشد، که با توجه به اینکه این لحظه بسیار نزدیک به بازه زمانی ظهر (midday time) می‌باشد، طبق مطالعات (Peng et al. 2013؛ Nichols et al. 1993)، می‌توان پارامتر لحظه‌ای (EF) را به پارامتر روزانه آن نیز تعمیم داد. با توجه به تغییرات پارامتر ترکیبی ( $\phi$ ) و رابطه مستقیم این پارامتر با کسر تبخیر (EF)، کمترین مقادیر (EF) در مناطق با پوشش گیاهی اندک و یا بدون پوشش ( $V_f = 0$ )، مشاهده شد. همچنین مناطق کشاورزی که دارای پوشش گیاهی در طی فصل رشد بودند، طبق انتظار دارای بیشترین (EF) بودند. به‌منظور محاسبه میزان تبخیر-تعرق واقعی روزانه، مقادیر تابش خالص لحظه‌ای و تابش خالص روزانه، شار گرمای خاک و گرمای نهان تبخیر نیز با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای محاسبه شد. تغییرات تابش خالص لحظه‌ای بین بازه ۱۰۰ تا ۶۵۰ وات بر مترمربع و تغییرات تابش خالص روزانه بین بازه ۸۰ تا ۴۰۰ وات بر مترمربع در دشت مشهد محاسبه شد. رنج

#### شناسایی لبه خشک و تر در الگوریتم S-SEBI

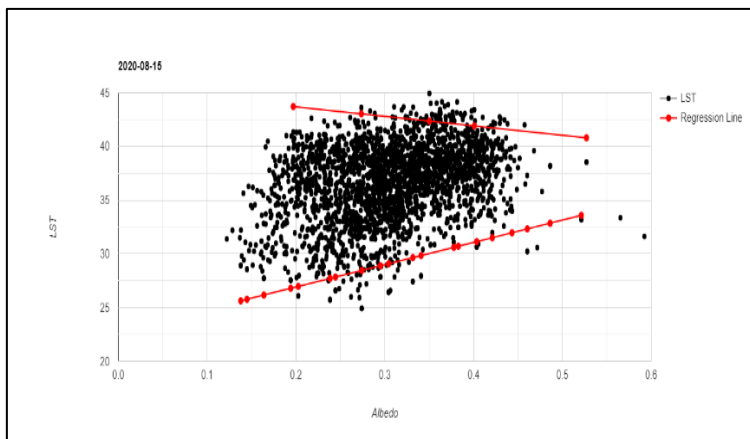
برازش داده شده به داده‌های حداکثر دمای سطحی برابر لبه خشک و خط رگرسیونی برازش داده شده به داده‌های حداقل دما برابر لبه تر است. شکل (۶)، نتایج شناسایی لبه خشک و تر را در تاریخ (۱۵-۰۸-۲۰۲۰) نشان می‌دهد. جدول (۴)، معادلات لبه خشک و تر را نشان می‌دهد.

پارامترهای مورد نیاز این الگوریتم، آلبیدو و دمای سطح زمین است. برای محاسبه تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از این الگوریتم ابتدا لازم است تا مشابه الگوریتم مثلثی لبه‌های خشک و تر شناسایی شود. شناسایی مقادیر حداکثر و حداقل دمای سطحی در بازه تغییرات مقادیر آلبیدو انجام شد و دو خط رگرسیونی به این مقادیر برازش داده شد. خط رگرسیونی



شکل ۵: میزان تبخیر-تعرق واقعی محاسبه شده با استفاده از الگوریتم مثلثی در سطح دشت مشهد در طی روزهای مورد مطالعه سال

۲۰۲۰.



شکل ۶: شناسایی لبه‌های خشک و تر در محیط دو بعدی الگوریتم S-SEBI در تاریخ (۱۵-۰۸-۲۰۲۰). (خطوط قرمز رنگ لبه خشک و تر شناسایی شده هستند. لبه خشک خط رگرسیونی برازش داده شده به دماهای حداکثر و لبه تر خط رگرسیونی برازش داده شده به دماهای حداقل)

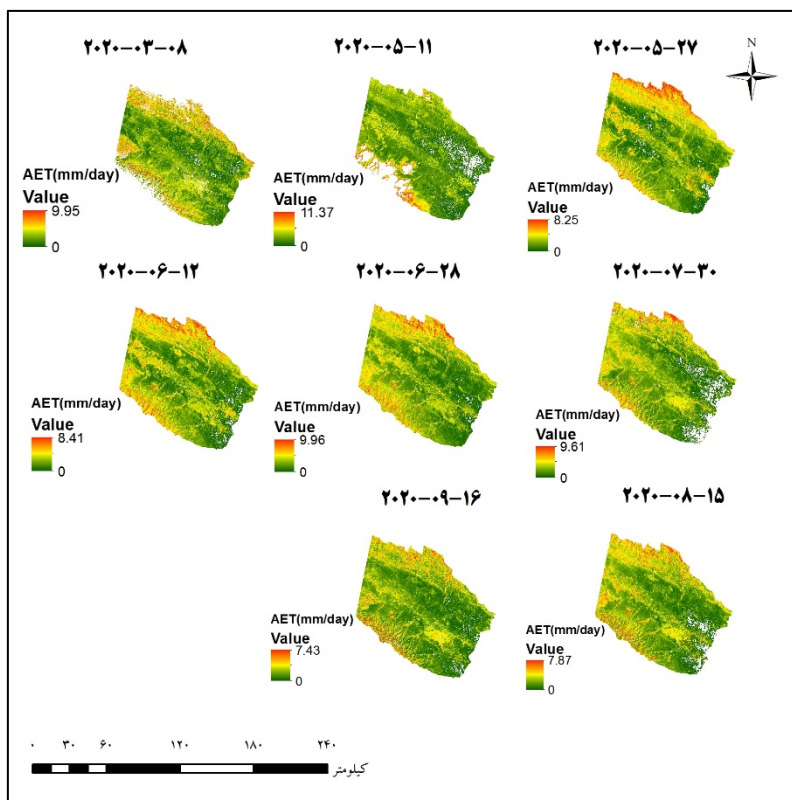
جدول ۴: معادلات رگرسیونی و ضرایب تبیین متناظر با معادلات لبه‌های خشک و تر شناسایی شده برای هر یک از روزهای مورد مطالعه.

معادله خط رگرسیون (لبه تر)	معادله خط رگرسیون (لبه خشک)	روز
$T_{LE} = 16.31 * albedo - 2.18$	$T_H = -23.38 * albedo + 24.67$	۰۸-۰۳-۲۰۲۰
$T_{LE} = 8.45 * albedo + 10.49$	$T_H = -54.73 * albedo + 53.05$	۱۱-۰۵-۲۰۲۰
$T_{LE} = 46.22 * albedo + 11.27$	$T_H = -13.13 * albedo + 46.02$	۲۷-۰۵-۲۰۲۰
$T_{LE} = 44.27 * albedo + 15.49$	$T_H = -16.79 * albedo + 51.16$	۱۲-۰۶-۲۰۲۰
$T_{LE} = 19.53 * albedo + 18.03$	$T_H = -18.99 * albedo + 48.53$	۲۸-۰۶-۲۰۲۰
$T_{LE} = 22.50 * albedo + 19.59$	$T_H = -17.60 * albedo + 48.31$	۳۰-۰۷-۲۰۲۰
$T_{LE} = 20.74 * albedo + 22.76$	$T_H = -8.82 * albedo + 45.44$	۱۵-۰۸-۲۰۲۰
$T_{LE} = 26.67 * albedo + 13.24$	$T_H = -13.76 * albedo + 41.26$	۱۶-۰۹-۲۰۲۰

برابر با میزان کسر تبخیر لحظه‌ای است، بنابراین نتایج به زمان روزانه این پارامتر تعمیم داده شد. در گام بعد نسبت  $(CD_i)$  میان تابش خالص روزانه و تابش خالص لحظه‌ای محاسبه شد. سپس میزان تبخیر-تعرق واقعی روزانه در دشت مشهد با استفاده از تابش خالص روزانه، نسبت  $(CD_i)$  و همچنین کسر تبخیر  $(\Lambda)$  محاسبه شد. شکل (۷) نتایج حاصل از تبخیر-تعرق روزانه بر حسب میلیمتر در روز را با استفاده از الگوریتم S-SEBI نشان می‌دهد.

#### نتایج تبخیر-تعرق واقعی الگوریتم S-SEBI

پس از شناسایی لبه‌های خشک و تر و محاسبه معادلات رگرسیونی این خطوط، مقدار کسر تبخیر  $(\Lambda)$  برای هر یک از پیکسل‌های تشکیل‌دهنده دشت مشهد محاسبه شد. پارامتر محاسبه شده به صورت لحظه‌ای در هنگام گذر ماهواره از روی منطقه است. به منظور محاسبه تبخیر-تعرق روزانه، پارامتر روزانه  $(\Lambda)$  احتیاج است. با توجه به مطالعه سوبرینو و همکاران (Sobrino et al. 2005)، میزان پارامتر روزانه  $(\Lambda)$



شکل ۷: تغییرات میزان تبخیر-تعرق واقعی محاسبه شده با استفاده از الگوریتم S-SEBI در دشت مشهد طی روزهای مورد مطالعه سال ۲۰۲۰.

دانشگاه فردوسی را نشان می‌دهد. آنالیز نتایج با استفاده از محاسبه پارامترهای آماری انجام شد. به منظور محاسبه پارامترهای آماری، میزان میانگین تبخیر-تعرق واقعی حاصل از الگوریتم‌های مثلثی و S-SEBI به عنوان داده‌های محاسباتی و داده‌های  $(ET_c)$  به عنوان داده‌های مشاهده‌ای در نظر گرفته شد. جدول (۶) نتایج حاصل از محاسبه پارامترهای آماری برای ۴ مزرعه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بر اساس مقایسه ضرایب همبستگی و شاخص‌های خطا، مشخص شد که الگوریتم مثلثی به‌طور کلی عملکرد دقیق‌تری نسبت به الگوریتم S-SEBI دارد. این برتری به‌ویژه در اراضی زیر کشت گندم مشهود بود، به‌طوری که میزان خطا کمتر از ۱ میلی‌متر و ضریب همبستگی بیش از ۹۰ درصد مشاهده شد. در مزرعه‌ی ذرت، نتایج حاصل از دو الگوریتم مثلثی و S-SEBI تفاوت قابل توجهی نداشت و به‌طور کلی مشابه یکدیگر بودند. در الگوریتم مثلثی، مزرعه‌ی ذرت نسبت به مزارع گندم دارای خطای محاسباتی بیشتری بود که این موضوع احتمالاً به تفاوت‌های فیزیولوژیکی و آترودینامیکی ذرت در مقایسه با گندم بازمی‌گردد. این ویژگی‌ها مستقیماً بر شکل‌گیری فضای

بر اساس الگوریتم S-SEBI، حداکثر میزان تبخیر-تعرق واقعی در تاریخ (۲۰۲۰-۰۵-۱۱) (۲۲ اردیبهشت‌ماه) و کمترین میزان تبخیر-تعرق واقعی در تاریخ (۲۰۲۰-۰۹-۱۶) (۲۶ شهریورماه) مشاهده شد. نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم S-SEBI مشابه نتایج الگوریتم مثلثی بود. در شکل (۴-۱۲) مشاهده می‌شود که الگوریتم S-SEBI نیز همچون الگوریتم مثلثی به‌خوبی قادر به شناسایی تغییرات پوشش گیاهی است. اما به نظر می‌رسد مقادیر تبخیر-تعرق واقعی بدست آمده از این الگوریتم نسبت به الگوریتم مثلثی دارای بیش‌برآورد است.

#### صحت‌سنجی نتایج الگوریتم‌های مثلثی و S-SEBI

به‌منظور صحت‌سنجی نتایج تبخیر-تعرق واقعی حاصل از هر دو الگوریتم، این نتایج با مقادیر تبخیر-تعرق استاندارد محاسبه‌شده در مزارع مورد مطالعه مقایسه شدند. جدول (۵) نتایج محاسبه میزان تبخیر-تعرق استاندارد  $(ET_c)$  در طی روزهای مورد مطالعه و مقادیر میانگین تبخیر-تعرق واقعی حاصل از دو الگوریتم مثلثی و S-SEBI در سطح مزارع

محاسبات پارامتر کسر تبخیر که نقش کلیدی در برآورد تبخیر-تعرق دارد اثرگذار هستند. با توجه به اینکه الگوریتم S-SEBI به شناسایی دو لبه‌ی شیب‌دار نیاز دارد، می‌توان گفت که این الگوریتم نسبت به الگوریتم مثلی از عدم قطعیت و خطا بالاتری برخوردار است.

مثلی داده‌ها و فرآیند شناسایی لبه خشک تأثیر می‌گذارند. به‌ویژه، مقاومت آئروینامیکی بالاتر ذرت ممکن است یکی از عوامل اصلی افزایش خطا باشد. از سوی دیگر، نحوه‌ی شناسایی لبه‌های خشک و ترکیب از منابع مهم خطا در این الگوریتم‌ها محسوب می‌شود. بر اساس مطالعه تیان و همکاران (Tian et al. 2013)، این خطاها مستقیماً بر روی

جدول ۵: مقادیر تبخیر-تعرق استاندارد ( $ET_c$ ) و تبخیر-تعرق واقعی (AET) بر حسب (میلیمتر در روز) بر اساس الگوریتم‌های مثلی و S-SEBI در مزارع مورد مطالعه گندم و ذرت در طی روزهای مورد مطالعه.

مقادیر تبخیر-تعرق واقعی (mm/day)								$ET_c$	نوع گیاه	روز
مزرعه ۴		مزرعه ۳		مزرعه ۲		مزرعه ۱				
S-SEBI	مثلی	S-SEBI	مثلی	S-SEBI	مثلی	S-SEBI	مثلی			
۴/۱	۲/۸	۴/۴	۳/۰	۴/۴	۲/۹			۲/۳۲	گندم	۶۷
۴/۹	۷/۴	۵/۰	۷/۳	۴/۸	۶/۹			۶/۸۳		۱۳۱
۵/۵	۶/۸	۵/۵	۶/۶	۵/۲	۵/۷			۵/۷۷		۱۴۷
۴/۰	۴/۴	۴/۱	۴/۵	۴/۰	۴/۳			۳/۱۱		۱۶۳
						۴/۹	۴	۵/۶۴	ذرت	۱۷۹
						۷	۵/۶	۷/۱۶		۲۱۱
						۶/۶	۷/۱	۹/۹۶		۲۲۷
						۴/۳	۴/۵	۳/۳۱		۲۵۹

جدول ۶: نتایج آماری مقایسه میزان تبخیر-تعرق واقعی حاصل از الگوریتم‌های مثلی و S-SEBI با داده‌های تبخیر-تعرق استاندارد در مزارع گندم و ذرت.

مزرعه ۴ (گندم)		مزرعه ۳ (گندم)		مزرعه ۲ (گندم)		مزرعه ۱ (ذرت)		پارامتر آماری
S-SEBI	مثلی	S-SEBI	مثلی	S-SEBI	مثلی	S-SEBI	مثلی	
۰/۶۸	۰/۹۶	۰/۶۵	۰/۹۷	۰/۵۱	۰/۹۵	۰/۷۰	۰/۷۷	$R^2$
۱/۴۰	۰/۹۰	۱/۵۰	۰/۹۱	۱/۵۷	۰/۶۶	۱/۷۸	۱/۹۱	RMSE
۱/۲۲	۰/۸۲	۱/۳۱	۰/۸۴	۱/۴۱	۰/۴۷	۱/۳۰	۱/۸۱	MAE

موضوع مرتبط با تشخیص لبه‌های خشک و تر در الگوریتم‌ها است. زیرا معادلات رگرسیونی مرتبط با لبه‌ها به طور مستقیم بر میزان پارامتر (EF) که مهم‌ترین پارامتر خروجی الگوریتم‌ها است تأثیر می‌گذارد. نتایج صحت‌سنجی بین مقادیر خروجی از الگوریتم‌ها با مقادیر تبخیر-تعرق استاندارد در مزارع مورد مطالعه نشان داد که هر دو الگوریتم روند تغییرات میزان تبخیر-تعرق واقعی را به خوبی شناسایی کرده‌اند. در صحت-سنجی انجام شده در سطح مزارع گندم و ذرت، الگوریتم مثلی دارای ضریب تبیین بیش از ۰/۹۰ در مزارع گندم و در مزرعه ذرت ۰/۷۷ بود. این در حالی است که الگوریتم S-SEBI در مزارع گندم دارای ضریب تبیین بین ۰/۵۰ تا ۰/۷۰

## نتیجه‌گیری

نتایج محاسبه الگوریتم مثلی و S-SEBI در دشت مشهد نشان داد که هر دو الگوریتم به خوبی تغییرات میزان تبخیر-تعرق را که ناشی از تغییرات پوشش گیاهی و به تبع آن تغییرات رطوبت خاک است را نشان می‌دهند. به طوری که در تصاویر تبخیر-تعرق واقعی خروجی از الگوریتم‌ها به خوبی تغییرات پوشش گیاهی مانند آنچه در داده‌ها ورودی الگوریتم‌ها مانند شاخص کسر پوشش گیاهی ( $V_f$ )، دمای-نرمال شده سطح زمین و آلبیدو مشاهده شد، قابل شناسایی بود. الگوریتم S-SEBI نسبت به الگوریتم مثلی دارای عدم قطعیت بالاتر و میزان خطا محاسباتی بیشتری بود. این

- aquifer). Soil and Water Conservation Research (Agricultural and Natural Resources Sciences), 16(4), 63–78.
- 3- Akbari, M., Seyf, Z., & Zare Abyaneh, H. (2011). Estimation of actual and potential evapotranspiration under different climatic conditions using remote sensing. Water and Soil (Agricultural Sciences and Industries), 25(4), 835–844.
  - 4- Allestro, P. D. (2015). GIS application for NDVI calculation using Landsat 8 OLI images, 10(21), 42099–42102.
  - 5- Batra, N., Islam, S., Venturini, V., Bisht, G., & Jiang, L. (2006). Estimation and comparison of evapotranspiration from MODIS and AVHRR sensors for clear sky days over the Southern Great Plains. Remote Sensing of Environment, 103(1), 1–15.
  - 6- Bisht, G., Venturini, V., Islam, S., & Jiang, L. (2005). Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. Remote Sensing of Environment, 97(1), 52–67.
  - 7- Carlson, T. (2007). An Overview of the “Triangle Method” for Estimating Surface Evapotranspiration and Soil Moisture from Satellite Imagery. Sensors, 7(8), 1612–1629.
  - 8- da Silva, Bernardo B., Braga, A. C., Braga, C. C., de Oliveira, L. M. M., Montenegro, S. M. G. L., & Barbosa Junior, B. (2016). Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 20(1), 3–8.
  - 9- Dehziari, S. A., & Sanaienejad, S. H. (2019). Energy balance quantification using Landsat 8 images and SAFER algorithm in Mashhad, Razavi, 13(1).
  - 10- Ermida, S. L., Soares, P., Mantas, V., Göttsche, F. M., & Trigo, I. F. (2020). Google earth engine open-source code for land surface temperature estimation from the landsat series. Remote Sensing, 12(9), 1–21.
  - 11- Gad, H. E., & El-Gayar, S. M. (2010). Climate parameters used to evaluate the evapotranspiration in delta central zone of Egypt. Fourteenth International Water Technology Conference, IWTC14, (February), 529–548.
  - 12- Gómez, M., Oliso, A., Sobrino, J. A., & Jacob, F. (2005). Retrieval of evapotranspiration over the Alpillis/ReSeDA experimental site using airborne POLDER sensor and a thermal camera. Remote Sensing of Environment, 96(3–4), 399–408.
  - 13- Hoedjes, J. C. B., Chehbouni, A., Jacob, F., Ezzahar, J., & Boulet, G. (2008). Deriving
- بود و در مزرعه ذرت نیز میزان ضریب تبیین ۰/۷۰ بود. ایجاد تفاوت در میزان همبستگی داده‌ها میان مزارع گندم و ذرت ناشی از تفاوت خصوصیات فیزیولوژیک گیاهان است که هر دو الگوریتم این تفاوت را به خوبی نشان دادند. نتایج دو الگوریتم مثلثی و S-SEBI در مزرعه ذرت مشابه یکدیگر بود و در مزارع گندم دارای تفاوت چشمگیر بود. مطالعه (Acharya & Sharma, 2021) به این نکته اشاره داشت که وجود لاشه گیاهی پس از برداشت محصول می‌تواند موجب بیش برآورد الگوریتم‌ها سنجش‌ازدوری شود. با توجه به فصل برداشت گیاه ذرت که در اواخر مهرماه است و در این تاریخ کلیه محصولات کشاورزی از سطح زمین جمع‌آوری می‌شوند و کمترین میزان لاشه گیاهی در سطح زمین موجود است. در الگوریتم S-SEBI که نیاز به شناسایی دو لبه خشک و تر دارد، منابع ایجادکننده خطا کمتر هستند و نتایج این الگوریتم به الگوریتم مثلثی نزدیک است. به‌طورکلی هر دو الگوریتم مثلثی و S-SEBI با حذف محاسبات پیچیده در ارتباط با مقاومت‌های آبرودینامیکی و همچنین نیازنداشتن به تصحیحات اتمسفری در تصاویر از جمله روش‌های بسیار مناسب برای به‌کارگیری در مناطق خشک و نیمه‌خشک و مناطق دارای محدودیت داده هستند. با توجه به تأثیرات توپوگرافی در تغییرات دمای سطح زمین و به تبع آن تغییرات میزان تبخیر-تعرق، توصیه می‌شود قبل از انجام محاسبات تبخیر-تعرق با استفاده از الگوریتم‌های مذکور، منطقه مورد مطالعه براساس خصوصیات توپوگرافی و ارتفاعی پهنه‌بندی شود و سپس در هر پهنه لبه‌های خشک و تر شناسایی و میزان تبخیر-تعرق واقعی محاسبه گردد. استفاده از تصاویر با وضوح مکانی بهتر باعث شناسایی هر چه بهتر میزان تغییرات پوشش گیاهی و شناسایی تغییرات رطوبت خاک می‌شود و در بهبود نتایج تبخیر-تعرق مؤثر است.

## منابع

- 1- Acharya, B., & Sharma, V. (2021). Comparison of satellite driven surface energy balance models in estimating crop evapotranspiration in semi-arid to arid intermountain region. Remote Sensing (Vol. 13).
- 2- Akbari, M., Jargah, M. R., & Madani Sadat, H. (2009). Investigation of groundwater level decline using Geographic Information System (GIS) (Case study: Mashhad Plain

- 23- Peng, J., Borsche, M., Liu, Y., & Loew, A. (2013). How representative are instantaneous evaporative fraction measurements of daytime fluxes? *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(10), 3913–3919.
- 24- Petropoulos, G., Carlson, T. N., Wooster, M. J., & Islam, S. (2009). A review of Ts/VI remote sensing-based methods for the retrieval of land surface energy fluxes and soil surface moisture. *Progress in Physical Geography*, 33(2), 224–250.
- 25- Pourmohamad, Y., Ghandehari, A., Davary, K., & Shirazi, P. (2020). Multicriteria Decision-Making Approach to Enhance Automated Anchor Pixel Selection Algorithm for Arid and Semi-Arid Regions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(11), 04020049.
- 26- Qasemi Saadatabadi, F., Zand Parssa, Sh., & Mahbod, M. (2021). Estimation of actual evapotranspiration, evapotranspiration productivity, and irrigation efficiency of wheat fields under surface and sprinkler irrigation systems using remote sensing. *Water and Soil Science*, 25(4), 205–219.
- 27- Rasmussen, M. O., Srensen, M. K., Wu, B., Yan, N., Qin, H., & Sandholt, I. (2014). Regional-scale estimation of evapotranspiration for the North China Plain using MODIS data and the triangle-approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 31(1), 143–153.
- 28- Rawat, K. S., Bala, A., Singh, S. K., & Pal, R. K. (2017). Quantification of wheat crop evapotranspiration and mapping: A case study from Bhiwani District of Haryana, India. *Agricultural Water Management*, 187, 200–209.
- 29- Reynolds, J. F., Stafford Smith, D. M., Lambin, E. F., Turner, B. L., Mortimore, M., Batterbury, S. P. J., Walker, B. (2007). *Ecology: Global desertification: Building a science for dryland development*. Science, 316(5826), 847–851.
- 30- Rocha, N. S., Käfer, P. S., Skokovic, D., Veeck, G., Diaz, L. R., Kaiser, E. A., Carvalho, C. M., Cruz, R. C., Sobrino, J. A., Roberti, D. R., & Rolim, S. B. (2020). The Influence of Land Surface Temperature in Evapotranspiration Estimated by the S-SEBI Model. *Atmosphere*, 11(10), 1059.
- 31- Roerink, G. J., Su, Z., & Menenti, M. (2000). S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(2), 147–157.
- 14- Jiang, L., & Islam, S. (2003). An intercomparison of regional latent heat flux estimation using remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 24(11), 2221–2236.
- 15- Jiang, Le, & Islam, S. (1999). A methodology for estimation of surface evapotranspiration over large areas using remote sensing observations. *Geophysical Research Letters*, 26(17), 2773.
- 16- Kumar, U., Sahoo, B., Chatterjee, C., & Raghuvanshi, N. S. (2020). Evaluation of Simplified Surface Energy Balance Index (S-SEBI) Method for Estimating Actual Evapotranspiration in Kangsabati Reservoir Command Using Landsat 8 Imagery. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48(10), 1421–1432.
- 17- Li, Z. L., Tang, R., Wan, Z., Bi, Y., Zhou, C., Tang, B., ... Zhang, X. (2009). A review of current methodologies for regional Evapotranspiration estimation from remotely sensed data. *Sensors*, 9(5), 3801–3853.
- 18- Li, Z., Jia, L., & Lu, J. (2015). On uncertainties of the Priestley-Taylor/LST-Fc feature space method to estimate evapotranspiration: Case study in an arid/semiarid region in northwest China. *Remote Sensing*, 7(1), 447–466.
- 19- Mohammadian, M., Arfania, R., & Sahour, H. (2017). Evaluation of SEBS Algorithm for Estimation of Daily Evapotranspiration Using Landsat-8 Dataset in a Semi-Arid Region of Central Iran. *Open Journal of Geology*, 07(03), 335–347.
- 20- Moqbeli Damaneh, M., & Sanaeinejad, S. H. (2018). Estimation of potential evapotranspiration in the Fariman region using the Priestley-Taylor method and remote sensing technique. *Journal of Remote Sensing and GIS in Natural Resources*, 9(3), 72–84.
- 21- Moqbeli Damaneh, M., Gholami Sharafkhaneh, M., Sanaeinejad, S. H., & Sadegh, M. (2022). Evaluation of the TSEB remote sensing model for partitioning maize evapotranspiration at the field scale under drip irrigation cultivation. *Iranian Water and Soil Research*, 53(12), 2885–2903.
- 22- Nichols, W. E., & Cuenca, R. H. (1993). Evaluation of the evaporative fraction for parameterization of the surface energy balance. *Water Resources Research*, 29(11), 3681–3690.

- evapotranspiration Estimation. Remote Sensing, 8(9).
- 32- Santos, Carlos & Bezerra, Bergson & Silva, Bernardo Barbosa & Rao, Tantravahi. (2010). Assessment of daily actual evapotranspiration with SEBAL and S-SEBI algorithms in cotton crop. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25. 383-392.
  - 33- Shabani, B., Mousavi Baygi, M., & Jabbari Noghabai, M. (2016). Prediction of changes in water requirements of some agricultural crops in the Mashhad Plain due to temperature variations. *Irrigation Science and Engineering*, 39(2), 1-13.
  - 34- Sobrino, J. A., Gómez, M., Jiménez-Muñoz, J. C., & Oliso, A. (2007). Application of a simple algorithm to estimate daily evapotranspiration from NOAA-AVHRR images for the Iberian Peninsula. *Remote Sensing of Environment*, 110(2), 139-148.
  - 35- Sobrino, J. A., Skoković, D., Suélen Käfer, P., Carlos, J., & Alves Rolim, S. B. (2020). Evapotranspiration Estimation with the S-SEBI Method from Landsat 8 Data against Lysimeter Measurements at the Barrax Site, Spain. *Remote Sensing*, 13(18), 3686.
  - 36- Sobrino, J., Gómez, M., Jiménez-Muñoz, J., Oliso, A., & Chehbouni, G. (2005). A simple algorithm to estimate evapotranspiration from DAIS data: Application to the DAISEX campaigns. *Journal of Hydrology*, 315(1-4), 117-125.
  - 37- Soheylifar, Z., Mirlatifi, S. M., Naseri, A., & Asari, M. (2013). Estimation of actual evapotranspiration of sugarcane using remote sensing data in the Mirza Kuchak Khan agro-industry fields. *Water and Soil Knowledge (Agricultural Science)*, 23(1), 151-163.
  - 38- Tang, R., Li, Z. L., & Tang, B. (2010). An application of the Ts-VI triangle method with enhanced edges determination for evapotranspiration estimation from MODIS data in arid and semi-arid regions: Implementation and validation. *Remote Sensing of Environment*, 114(3), 540-551.
  - 39- Tian, J., Su, H., Sun, X., Chen, S., He, H., & Zhao, L. (2013). Impact of the spatial domain size on the performance of the ts-vi triangle method in terrestrial evapotranspiration estimation. *Remote Sensing*, 5(4), 1998-2013.
  - 40- Venturini, V., Bisht, G., Islam, S., & Jiang, L. (2004). Comparison of evaporative fractions estimated from AVHRR and MODIS sensors over South Florida. *Remote Sensing of Environment*, 93(1-2), 77-86.
  - 41- Zhang, H., Gorelick, S. M., Avisse, N., Tilmant, A., Rajsekhar, D., & Yoon, J. (2016). A new temperature-vegetation triangle algorithm with Variable Edges (TAVE) for satellite-based actual