

## ارزیابی الگوریتم سبال برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از تصاویر سنجنده لندست ۸ در زمین‌های با کاربری اراضی متفاوت (مطالعه موردی: منطقه فریمان)

مصیب مقبلی دامنه<sup>۱</sup>، سید حسین ثنائی نژاد<sup>۲\*</sup>، مرتضی کفاش<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری هواشناسی، دانشگاه فردوسی مشهد

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

### چکیده

تبخیر-تعرق از اجزاء اصلی معادله بیلان آب می‌باشد که اندازه‌گیری مقادیر واقعی آن کار بسیار دشواری است. به دلیل اینکه میزان تبخیر-تعرق تابعی از توپوگرافی، اقلیم، نوع پوشش گیاهی، نوع کاربری زمین و خصوصیات خاک می‌باشد، بنابراین استفاده از مدل‌های قابل اعتمادی که بتوانند مقادیر واقعی تبخیر-تعرق را در مقیاس مکانی تخمین بزنند کمک شایانی به حل معادله بیلان آب می‌کند. هدف اصلی این پژوهش ارزیابی مدل سبال برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از روش‌های سنجنده از دوری در زمین‌های دارای کاربری اراضی متفاوت از جمله کشت آبی، کشت دیم و مراتع می‌باشد، است. در دهه‌های اخیر روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری و تخمین تبخیر-تعرق واقعی به وسیله پژوهشگران پیشنهاد شده است. از آنجاکه روش‌های مذکور عمدتاً نیازمند داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی زیادی بوده و این اندازه‌گیری‌ها به صورت نقطه‌ای می‌باشند، دارای محدودیت هستند. تکنیک سنجنده از دور برای تخمین این مولفه در سطح وسیع و در بازه زمانی کوتاه، می‌تواند کمک کننده باشد. بنابراین در این پژوهش، مقادیر تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبال و تکنیک سنجنده از دور در منطقه فریمان از توابع استان خراسان رضوی که دارای اقلیم نیمه‌خشک می‌باشد، در سال‌های ۱۳۹۳، ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ برای ۸ روز و با استفاده از تصاویر سنجنده لندست ۸، برآورد شد. با توجه به وسیع بودن منطقه مورد مطالعه و عدم امکان استفاده از وسایل اندازه‌گیری دقیق تبخیر-تعرق واقعی مانند لایسیمتر، برای صحت سنجی نتایج بدست آمده از الگوریتم سبال، از روش استاندارد فائو پنمن-مانتیت به عنوان مقادیر مرجع استفاده شد. مقایسه آماری مقادیر تبخیر-تعرق بدست آمده از الگوریتم سبال با خروجی‌های روش فائو پنمن-مانتیت به طور کلی نشان می‌دهد که ضریب تبیین، ۰/۹۶ و میانگین مربعات خطا ۰/۵ میلیمتر در روز می‌باشد. این نتایج بیانگر دقت بالای الگوریتم سبال در تخمین مقدار تبخیر-تعرق واقعی در اقلیم نیمه خشک می‌باشد.

**کلید واژه‌ها:** الگوریتم سبال، تبخیر-تعرق واقعی، خراسان رضوی، سنجنده از دور.

## مقدمه

دقیقه فراهم کند. علاوه بر این هزینه آن نسبت به روش‌های مرسوم کمتر است و تنها روشی است که برای نواحی فاقد آمار و جاهایی که اندازه‌گیری مستقیم به شدت دشوار می‌باشد کارآمد می‌باشد (رنگو، ۱۹۹۴). همچنین یکی دیگر از مزایای روش‌های سنجش از دوری برآورد تبخیر-تعرق توانایی این روش‌ها در تخمین تبخیر-تعرق بدون نیاز به اندازه‌گیری سایر اجزاء پیچیده چرخه هیدرولوژی می‌باشد (سکوندو و همکاران، ۲۰۱۹). بر اساس گزارش پژوهش‌هایی که برای ارزیابی دقت روش‌های سنجش از دوری برآورد تبخیر-تعرق در مقایسه با روش‌های سنتی برآورد تبخیر-تعرق انجام شده است، برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی در مقیاس زمانی روزانه دقت در بازه ۶۷ تا ۹۷ درصد و برای مقیاس زمانی فصلی دقت ۹۴ درصد بدست آمده است (گودا و همکاران، ۲۰۰۸؛ کریمی و باستانیسن، ۲۰۱۵).

اما هنوز سوال باقی می‌ماند که در ارتباط با این روش‌ها وجود دارد این است که توانمندی کدام مدل بیشتر است و کدام مدل می‌تواند به عنوان بهترین روش کاربردی برای مناطق مختلف انتخاب شود؟ پژوهشگران زیادی از جمله لودارا و رحیم‌زادگان (۲۰۱۸) که در رابطه با روش‌های سنجش از دوری برآورد تبخیر-تعرق تحقیق کردند، الگوریتم توازن انرژی سطح زمین ۱ (سبال) یک مدل پردازش تصویر برای محاسبه تبخیر-تعرق به عنوان باقی مانده توازن انرژی سطح است که در کشور هلند توسط باستانیسن ایجاد شد. این الگوریتم تاکنون در بیش از ۳۰ کشور در سرتاسر دنیا به طور کاربردی استفاده شده است. الگوریتم سبال برای محاسبه اجزای توازن انرژی در هر دو مقیاس محلی و منطقه‌ای با حداقل نیاز به داده‌های زمینی طراحی شده است. این مدل یک حد واسط در استفاده از روابط تجربی و پارمترهای فیزیکی می‌باشد (باستانیسن و همکاران، ۱۹۹۸). بر اساس نتایج اعتبارسنجی حاصل از ۱۳ مقاله تحقیقاتی، میزان خطا را در برآورد تبخیر-تعرق با استفاده از روش سبال، ۵ تا ۳۳ درصد برای برآورد لحظه‌ای و ۲ تا ۳۹ درصد برای برآورد دوره‌های یک تا ده روزه گزارش کرده‌اند (جبرمیشل و همکاران، ۲۰۱۰). در

تبخیر اولین فرآیندی است که به موجب آن آب از یک حوضه خارج می‌شود و تعرق فرآیندی است که به موجب آن آب از گیاهان یا هر سطح زنده‌ای که حاوی رطوبت است بیرون می‌رود. بنابراین تبخیر-تعرق که ترکیب دو فرآیند تبخیر و تعرق است یک عامل بسیار مهم در چرخه هیدرولوژی می‌باشد. تبخیر-تعرق واقعی بزرگترین شار خروجی آب از سطح زمین است و اغلب مقدار آن در نواحی نیمه خشک تقریباً برابر با مقدار بارش می‌باشد (لیو و کار، ۲۰۱۴). اندازه‌گیری مقادیر واقعی تبخیر-تعرق کار بسیار دشواری است زیرا میزان تبخیر-تعرق تابعی از توپوگرافی، اقلیم، نوع پوشش گیاهی، نوع کاربری زمین و خصوصیات خاک می‌باشد. بنابراین استفاده از مدل‌های قابل اعتمادی که بتوانند مقادیر واقعی تبخیر-تعرق را در مقیاس مکانی تخمین بزنند کمک شایانی به حل معادله بیلان آب می‌کند (کالکانو و همکاران، ۲۰۰۷). در گذشته محققین با استفاده از روش‌های مبتنی بر داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی، روش‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک و روش‌های مبتنی بر بیلان انرژی سطح و به کار بردن معادلات فیزیکی و تجربی مختلف مقادیر تبخیر-تعرق را بدست می‌آوردند. با توجه به اینکه در حوضه‌های بزرگ و غیرهمگن اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای کافی نبوده و قابل تعمیم به کل حوضه نمی‌باشد و از طرفی دلایلی وجود دارد که تعیین دقیق مقدار تبخیر-تعرق توسط روش‌های سنتی و متداول را غیر ممکن می‌سازد. برخی از این دلایل عبارتند از تنوع مکانی و زمانی، هزینه زیاد و زمان بر بودن جمع‌آوری اطلاعات زمینی، محدود بودن ایستگاه‌های هواشناسی با تجهیزات کامل و همچنین ناقص بودن آمار هواشناسی در بسیاری از مناطق. روش‌های مبتنی بر داده‌های سنجش از دور به منظور غلبه بر این مشکلات، به وجود آمده‌اند (رنگو، ۱۹۹۴). مدل‌های ماهواره‌ای برآورد تبخیر-تعرق اطلاعات مکانی-زمانی تبخیر-تعرق را از زمین‌ها، مناطق و حوضه‌ها فراهم می‌کنند. اطلاعات منحصر به فرد تولید شده با استفاده از این روش‌ها دوره جدیدی در مدیریت آب کشاورزی و محیط زیست بوجود آورده است (تاسومی و همکاران، ۲۰۱۹). تکنولوژی سنجش از دور می‌تواند یک پوشش مکانی بزرگ و پیوسته را در عرض چند

<sup>1</sup> Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)

میانگین تفاضل مطلق بین روش‌های مذکور ۰/۷ و با ضریب همبستگی ۰/۸۳ می‌باشد. خان و همکاران (۲۰۱۹) با هدف ارزیابی عملکرد محصول، در مدل‌های گیاهی از تبخیر-تعرق واقعی بدست آمده از روش‌های سنجش از دوری استفاده کردند. بدین منظور آنها از مدل متریک (مدل اصلاح شده سبال) استفاده کردند. منطقه مورد مطالعه آنها چهار سایت کشاورزی دیم همراه با پنج محصول مختلف سالانه در شرق ایالت واشنگتن بود. خروجی‌های مدل سبال با مقادیر بدست آمده از سیستم ادی‌کواریانس که در هر سایت وجود داشت مقایسه شد. نتایج بررسی یک دوره سه ساله نشان داد روش پیشنهاد شده می‌تواند تخمین‌های خوبی از تبخیر-تعرق واقعی در هر چهار سایت بدهد. میانگین خطای استاندارد خروجی‌های مدل متریک برای کل دوره در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سیستم ادی‌کواریانس ۰/۳۴ میلیمتر در روز بدست آمد. در پژوهش دیگری نوری و همکاران (۲۰۱۷) برای تعیین میزان دقت الگوریتم سبال در برآورد تبخیر-تعرق واقعی در مقایسه با روش فائو پنمن-مانتیت از تصاویر دو سنجنده لندست ۸ و مودیس در شهر ملایر استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که بین الگوریتم سبال و روش فائو پنمن-مانتیت در برآورد تبخیر-تعرق، تفاوت زیادی وجود ندارد.

با توجه به اینکه پژوهش‌های انجام شده برای ارزیابی الگوریتم سبال تاکنون برای بخش یکنواختی از زمین‌های کشاورزی انجام شده است و یا در مقیاس‌های بزرگ از سنجنده‌های با دقت مکانی پایین مانند سنجنده مودیس استفاده شده، در این پژوهش الگوریتم سبال در بخشی از زمین‌های کشاورزی منطقه فریمان با کاربری اراضی مختلف که شامل کشت دیم، کشت آبی و مراتع می‌باشد با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ اجرا شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور تمامی پارامترهای مورد نیاز در الگوریتم سبال به صورت مکانی و به صورت مجزا از تصاویر خام ماهواره لندست ۸ استخراج و سپس مورد تحلیل یکپارچه قرار گرفت.

اما هنوز سوال بازی که در ارتباط با این روش‌ها وجود دارد این است که توانمندی کدام مدل بیشتر است و کدام مدل می‌تواند به عنوان بهترین روش کاربردی برای مناطق مختلف انتخاب شود. پژوهشگران زیادی از جمله لودارا و

این الگوریتم از داده‌های تصاویر دیجیتالی جمع آوری شده توسط سنجنده هر ماهواره‌ای که تابش‌های مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز حرارتی را ثبت می‌کند می‌توان استفاده کرد. باستیانس و همکاران (۱۹۹۸) به منظور صحت‌سنجی الگوریتم سبال، نتایج برآورد تبخیر-تعرق واقعی حاصل از این الگوریتم در مقیاس‌های وسیع را با مقادیر اندازه‌گیری شده آن در کشورهای چین، هندوستان، اسپانیا و پاکستان مورد مقایسه قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در ۸۵ درصد موارد، نتایج الگوریتم سبال بدون نیاز به هیچ‌گونه واسنجی، با مقادیر اندازه‌گیری شده، هم‌خوانی داشت. تاسومی و همکاران (۲۰۰۳) نتایج تبخیر-تعرق واقعی به دست آمده از تصاویر لندست با استفاده از الگوریتم سبال را با نتایج لایسمتری در منطقه‌ی نیمه‌خشک آیداهو در فصل تابستان مورد مقایسه قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که برآوردهای تبخیر-تعرق واقعی حاصل از الگوریتم سبال با نتایج اندازه‌گیری شده توسط لایسمتر برای اراضی کشاورزی در اقلیم‌های نیمه‌خشک به خوبی منطبق است و میزان خطا کمتر از ۵ درصد می‌باشد. در پژوهشی دیگری که در منطقه‌ای به نام دره ابرو در اسپانیا صورت گرفت، تبخیر-تعرق واقعی محاسبه شده از مدل سبال طی چهار سال برای گیاه ذرت و گیاه مرجع چمن با تبخیر-تعرق واقعی اندازه‌گیری شده توسط معادله پنمن-مانتیت مقایسه شد. نتایج این پژوهش نشان داد که خطای مربوط به مدل سبال در مورد ذرت یک میلیمتر در روز و برای گیاه چمن ۰/۳ میلیمتر در روز می‌باشد (کلوسکوف و همکاران، ۲۰۰۷). بالا و همکاران (۲۰۱۶) نیز به منظور ارزیابی و صحت‌سنجی الگوریتم سبال با استفاده از داده‌های لایسمتری در زمین‌های کشاورزی موسسه تحقیقات کشاورزی هند پژوهشی انجام دادند. آنها برای این کار از ۷ تصویر سنجنده لندست ۷ استفاده کردند. نتایج آنها دقت بالای الگوریتم سبال در برآورد تبخیر-تعرق روزانه را در مقابل داده‌های لایسمتری نشان داد. بررسی‌های آماری خروجی‌هایی به قرار ذیل داشت: ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۵۱ میلیمتر در روز و میانگین قدر مطلق خطا ۰/۱۹. زمان ثانی و همکاران (۱۳۹۶) خروجی‌های تبخیر-تعرق واقعی گندم حاصل از الگوریتم سبال را با داده‌های لایسمتری در محدوده ایستگاه تحقیقاتی شهرستان حاجی‌آباد مقایسه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد

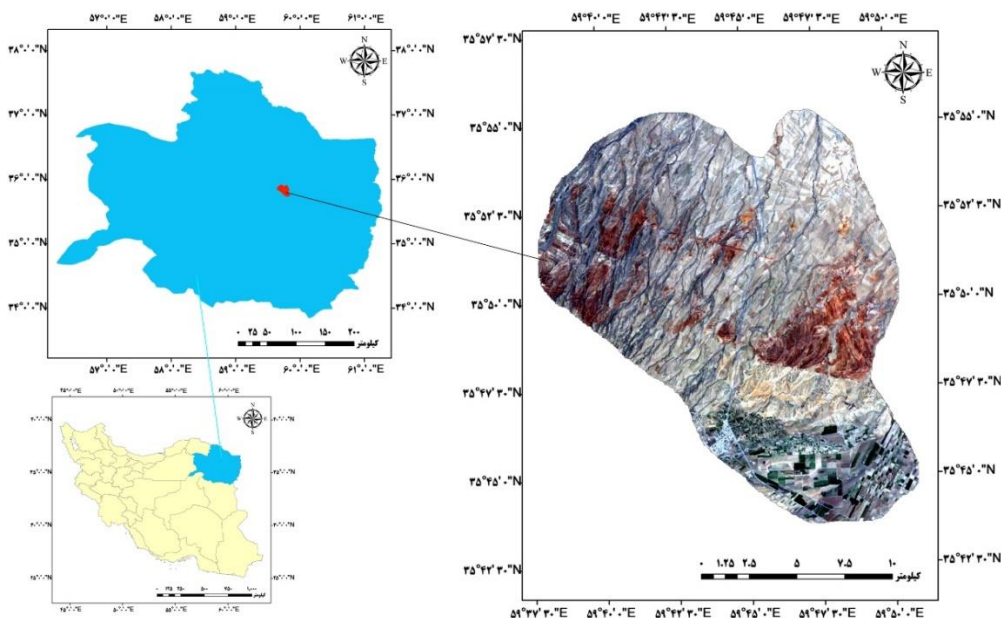
اندازه‌گیری شده توسط معادله پنمن-مانتیت مقایسه شد. نتایج این پژوهش نشان داد که خطای مربوط به مدل سبال در مورد ذرت یک میلیمتر در روز و برای گیاه چمن ۰/۳ میلیمتر در روز می‌باشد (کلوسکوف و همکاران، ۲۰۰۷). بالا و همکاران (۲۰۱۶) نیز به منظور ارزیابی و صحت‌سنجی الگوریتم سبال با استفاده از داده‌های لایسمتری در زمین‌های کشاورزی موسسه تحقیقات کشاورزی هند پژوهشی انجام دادند. آنها برای این کار از ۷ تصویر سنجنده لندست ۷ استفاده کردند. نتایج آنها دقت بالای الگوریتم سبال در برآورد تبخیر-تعرق روزانه را در مقابل داده‌های لایسمتری نشان داد. بررسی‌های آماری خروجی‌هایی به قرار ذیل داشت: ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۵۱ میلیمتر در روز و میانگین قدر مطلق خطا ۰/۱۹. زمان ثانی و همکاران (۱۳۹۶) خروجی‌های تبخیر-تعرق واقعی گندم حاصل از الگوریتم سبال را با داده‌های لایسمتری در محدوده ایستگاه تحقیقاتی شهرستان حاجی‌آباد مقایسه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد میانگین تفاضل مطلق بین روش‌های مذکور ۰/۷ و با ضریب همبستگی ۰/۸۳ می‌باشد. خان و همکاران (۲۰۱۹) با هدف ارزیابی عملکرد محصول، در مدل‌های گیاهی از تبخیر-تعرق واقعی بدست آمده از روش‌های سنجنش از دوری استفاده کردند. بدین منظور آنها از مدل متریک (مدل اصلاح شده سبال) استفاده کردند. منطقه مورد مطالعه آنها چهار سایت کشاورزی دیم همراه با پنج محصول مختلف سالانه در شرق ایالت واشنگتن بود. خروجی‌های مدل سبال با مقادیر بدست آمده از سیستم ادی‌کواریانس که در هر سایت وجود داشت مقایسه شد. نتایج بررسی یک دوره سه ساله نشان داد روش پیشنهاد شده می‌تواند تخمین‌های خوبی از تبخیر-تعرق واقعی در هر چهار سایت بدهد. میانگین خطای استاندارد خروجی‌های مدل متریک برای کل دوره در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سیستم ادی‌کواریانس ۰/۳۴ میلیمتر در روز بدست آمد. در پژوهش دیگری نوری و همکاران (۲۰۱۷) برای تعیین میزان دقت الگوریتم سبال در برآورد تبخیر-تعرق واقعی در مقایسه با روش فائو پنمن-مانتیت از تصاویر دو سنجنده لندست ۸ و مودیس در شهر ملایر استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که بین الگوریتم سبال و روش فائو پنمن-مانتیت در برآورد تبخیر-تعرق، تفاوت زیادی وجود ندارد.

رحیم‌زادگان (۲۰۱۸) که در رابطه با روش‌های سنجنش از دوری برآورد تبخیر-تعرق تحقیق کردند، الگوریتم توازن انرژی سطح زمین را پیشنهاد کردند. الگوریتم توازن انرژی سطح زمین (سبال) یک مدل پردازش تصویر برای محاسبه تبخیر-تعرق به عنوان باقی مانده توازن انرژی سطح است که در کشور هلند توسط باستینسن ایجاد شد. این الگوریتم تاکنون در بیش از ۳۰ کشور در سرتاسر دنیا به طور کاربردی استفاده شده است. الگوریتم سبال برای محاسبه اجزای توازن انرژی در هر دو مقیاس محلی و منطقه‌ای با حداقل نیاز به داده‌های زمینی طراحی شده است. این مدل یک حد واسط در استفاده از روابط تجربی و پارمترهای فیزیکی می‌باشد (باستینسن و همکاران، ۱۹۹۸). بر اساس نتایج اعتبارسنجی حاصل از ۱۳ مقاله تحقیقاتی، میزان خطا را در برآورد تبخیر-تعرق با استفاده از روش سبال، ۵ تا ۳۳ درصد برای برآورد لحظه‌ای و ۲ تا ۳۹ درصد برای برآورد دوره‌های یک تا ده روزه گزارش کرده‌اند (جبرمیشل و همکاران، ۲۰۱۰). در این الگوریتم از داده‌های تصاویر دیجیتالی جمع آوری شده توسط سنجنده هر ماهواره‌ای که تابش‌های مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز حرارتی را ثبت می‌کند می‌توان استفاده کرد. باستینسن و همکاران (۱۹۹۸) به منظور صحت‌سنجی الگوریتم سبال، نتایج برآورد تبخیر-تعرق واقعی حاصل از این الگوریتم در مقیاس‌های وسیع را با مقادیر اندازه‌گیری شده آن در کشورهای چین، هندوستان، اسپانیا و پاکستان مورد مقایسه قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که در ۸۵ درصد موارد، نتایج الگوریتم سبال بدون نیاز به هیچ‌گونه واسنجی، با مقادیر اندازه‌گیری شده، هم‌خوانی داشت. تاسومی و همکاران (۲۰۰۳) نتایج تبخیر-تعرق واقعی به دست آمده از تصاویر لندست با استفاده از الگوریتم سبال را با نتایج لایسمتری در منطقه‌ی نیمه‌خشک آیداهو در فصل تابستان مورد مقایسه قرار دادند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که برآوردهای تبخیر-تعرق واقعی حاصل از الگوریتم سبال با نتایج اندازه‌گیری شده توسط لایسمتر برای اراضی کشاورزی در اقلیم‌های نیمه‌خشک به خوبی منطبق است و میزان خطا کمتر از ۵ درصد می‌باشد. در پژوهشی دیگری که در منطقه‌ای به نام دره ابرو در اسپانیا صورت گرفت، تبخیر-تعرق واقعی محاسبه شده از مدل سبال طی چهار سال برای گیاه ذرت و گیاه مرجع چمن با تبخیر-تعرق واقعی

### مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه این پژوهش به وسعت ۲۷۳۷۱ هکتار بین عرض‌های جغرافیایی  $35^{\circ}43'$  تا  $35^{\circ}55'$  شمالی و طول‌های جغرافیایی  $59^{\circ}37'$  تا  $59^{\circ}50'$  شرقی در مجاورت شهر فرهادگرد از توابع شهرستان فریمان در استان خراسان رضوی می‌باشد. بر اساس گزارش سازمان هواشناسی استان خراسان رضوی (۱۳۹۵) و بر اساس روش دومارتن، این منطقه دارای شرایط اقلیمی نیمه‌خشک می‌باشد. مساحت زیادی از این منطقه کشت دیم (کشت غالب گندم دیم) و مراتع می‌باشد (شکل ۱).

با توجه به اینکه پژوهش‌های انجام شده برای ارزیابی الگوریتم سبال تاکنون برای بخش یکنواختی از زمین‌های کشاورزی انجام شده است و یا در مقیاس‌های بزرگ از سنجنده‌های با دقت مکانی پایین مانند سنجنده مودیس استفاده شده، در این پژوهش الگوریتم سبال در بخشی از زمین‌های کشاورزی منطقه فریمان با کاربری اراضی مختلف که شامل کشت دیم، کشت آبی و مراتع می‌باشد با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ اجرا شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور تمامی پارامترهای مورد نیاز در الگوریتم سبال به صورت مکانی و به صورت مجزا از تصاویر خام ماهواره لندست ۸ استخراج و سپس مورد تحلیل یکپارچه قرار گرفت.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

لندست ۸ در این مطالعه برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی استفاده شد، که از وب‌سایت یو اس جی اس در فرمت ژئوتیف دانلود شدند. مشخصات این تصاویر در جدول ۱ نشان داده شده است. پردازش تصاویر با استفاده از نرم افزارهای ENVI 5.3 و ERDAS IMAGINE 2014 انجام شد و نقشه‌های خروجی در محیط نرم افزار Arc GIS 10.3 تهیه شد.

داده‌های زمینی مورد استفاده در این پژوهش شامل سرعت باد، درجه حرارت خشک، رطوبت نسبی حداقل، رطوبت نسبی حداکثر، حداقل دمای هوا، حداکثر دمای هوا، ساعات آفتابی، دمای سطح زمین، تشعشع و تبخیر، از داده‌های هواشناسی ایستگاه اتوماتیک و ایستگاه سینوپتیک شهرستان فریمان واقع در  $35^{\circ}41'$  عرض شمالی و  $59^{\circ}49'$  طول شرقی، در بازه‌های زمانی ده دقیقه‌ای و روزانه برای سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ میلادی تهیه گردید. از تصاویر ماهواره

جدول ۱- مشخصات تصاویر سنجنده لندست ۸

تاریخ تصویربرداری	زمان تصویربرداری به وقت جهانی	زمان تصویربرداری به وقت محلی
-------------------	-------------------------------	------------------------------

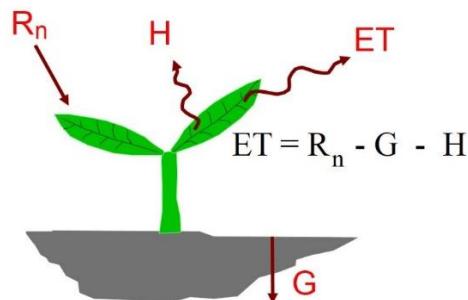
۱۰:۰۷	۶:۳۷	۱۳۹۳/۱۱/۱۸	۲۰۱۵/۰۲/۰۷
۱۱:۰۶	۶:۳۶	۱۳۹۴/۰۱/۲۳	۲۰۱۵/۰۴/۱۲
۱۱:۰۶	۶:۳۶	۱۳۹۴/۰۳/۰۹	۲۰۱۵/۰۵/۳۰
۱۱:۰۶	۶:۳۶	۱۳۹۴/۰۳/۲۵	۲۰۱۵/۰۶/۱۵
۱۰:۰۷	۶:۳۷	۱۳۹۴/۱۲/۰۷	۲۰۱۶/۰۲/۲۶
۱۱:۰۶	۶:۳۶	۱۳۹۵/۰۲/۱۱	۲۰۱۶/۰۴/۳۰
۱۱:۰۶	۶:۳۶	۱۳۹۵/۰۳/۱۲	۲۰۱۶/۰۶/۰۱
۱۱:۰۶	۶:۳۶	۱۳۹۵/۰۳/۲۸	۲۰۱۶/۰۶/۱۷

در الگوریتم سبال میزان تبخیر-تعرق واقعی به‌عنوان شار گرمای نهان با استفاده معادله توازن انرژی، در لحظه گذر ماهواره محاسبه می‌شود. این الگوریتم میزان شار تبخیر-تعرق واقعی در هر پیکسل از تصویر را به‌عنوان جمله

باقی‌مانده از معادله توازن انرژی در سطح زمین که بصورت زیر بیان می‌گردد (باستیانسن و همکاران، ۱۹۹۸)، محاسبه می‌نماید:

$$R_n = G + H + \lambda ET$$

۱



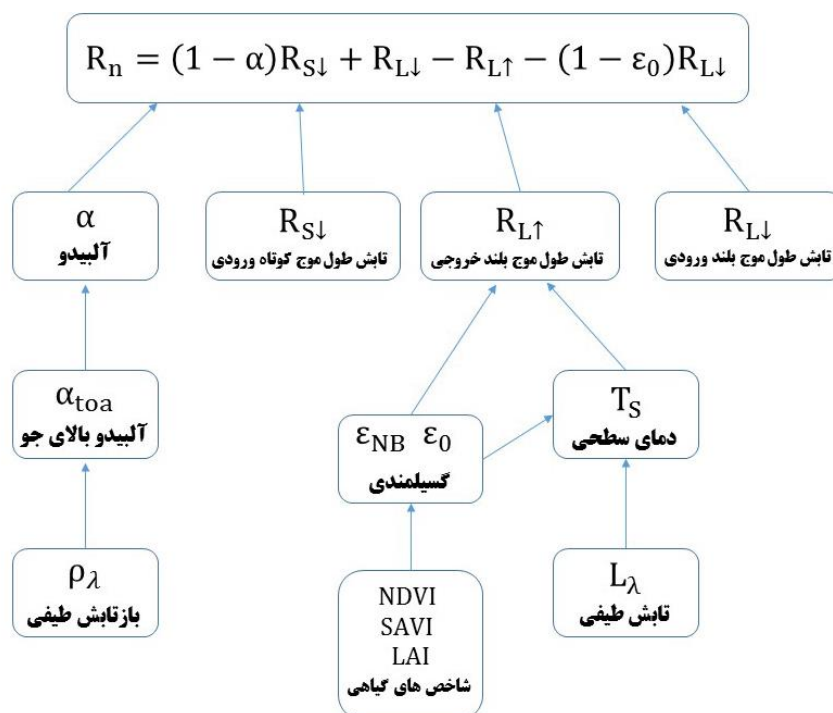
شکل ۱- مولفه‌های تاثیرگذار در معادله بیلان انرژی در سطح زمین (باستیانسن و همکاران، ۱۹۹۸)

روش انجام کار، در اینجا تنها به بخش‌های اصلی معادله اشاره می‌شود (بخش‌های مختلف مدل به تفکیک و با جزئیات در (واترز و همکاران، ۲۰۰۲) قابل دسترسی است). شار تابش خالص از جمع جبری تمام تابش‌های رسیده و خارج شده از سطح زمین بدست می‌آید:

۲

$$R_n = (1 - \alpha)R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow}$$

در این معادله  $R_n$ ,  $G$ ,  $H$  و  $\lambda ET$  به ترتیب شار تابش خالص در سطح زمین، شار گرمای خاک، شار گرمای محسوس و شار گرمای نهان (همگی بر حسب  $W.m^{-2}$ ) می‌باشند. مجهول اصلی برای مدل سبال در معادله بیلان انرژی  $\lambda ET$  می‌باشد که طی فرآیند اجرای مدل پس از بدست آوردن سه بخش، شار تابش خالص، شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس بدست می‌آید. با عنایت به پیچیده و طولانی بودن



شکل ۳- فلوجارت بکاررفته در مدل سیال برای محاسبه شار تابش خالص

مقدار ضریب  $L$  برای هر پیکسل از تصاویر سنجنده لندست ۸ با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$L = 1 - 2\gamma \text{NDVI} \times \text{WDVI} \quad 4$$

که در آن  $\gamma$  شیب خط برازش داده شده بر نمودار بازتاب طیفی باندهای مادون قرمز نزدیک و قرمز (شیب خط خاک) که به نوع خاک بستگی دارد،  $\text{NDVI}$  شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی و  $\text{WDVI}$  شاخص تفاضل وزن داده شده پوشش گیاهی است که از رابطه زیر قابل محاسبه است (بارت و همکاران ۱۹۹۳):

$$\text{WDVI} = \rho_{\text{NIR}} - \gamma \rho_{\text{R}} \quad 5$$

که در آن  $\rho_{\text{R}}$  و  $\rho_{\text{NIR}}$  به ترتیب بازتاب طیفی باندهای مادون قرمز نزدیک و قرمز می‌باشند.

شار گرمای خاک، مقدار ذخیره گرما در داخل خاک و پوشش گیاهی در اثر هدایت مولکولی است و در الگوریتم سیال از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} [0.0032\alpha + 0.0062\alpha^2][1 - 0.978\text{NDVI}^4] \quad 6$$

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

شار گرمای محسوس، میزان هدر رفت گرما به دلیل اختلاف دما بین دو ارتفاع مبنا (۰/۱ و ۲ متر) از طریق همرفت و هدایت مولکولی تعریف می‌شود که از رابطه ۷

فاکتور تصحیح اثرات زمینه خاک ( $L$ ) برای شاخص

#### SAVI

در مناطق با پوشش گیاهی ضعیف و یا مناطقی که رطوبت بالایی دارند، شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی ( $\text{NDVI}$ ) نمی‌تواند وضعیت پوشش گیاهی را به درستی نشان دهد. دلیل این امر این است که وجود خاک و رطوبت بازتابش نور در طیف‌های قرمز و مادون قرمز نزدیک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این جهت شاخص  $\text{SAVI}$  سعی در کاهش اثرات خاک سطحی بر روی شاخص  $\text{NDVI}$  دارد به گونه‌ای که اثرات رطوبت خاک در این شاخص کاهش می‌یابد. این شاخص با استفاده از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$\text{SAVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{R}}}{(\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{R}} + L)} (1 + L) \quad 3$$

با توجه به تغییرات شدید مقدار  $L$  و ارتباط آن با رطوبت و رنگ خاک (هیوت، ۱۹۸۸؛ راندو و همکاران، ۱۹۹۶) برای برآورد صحیح مقادیر تبخیر- تعرق واقعی بایستی این پارامتر برای الگوریتم سیال واسنجی شود. در روشی که توسط کوای و همکاران (۱۹۹۴) پیشنهاد شد از شیب خط رگرسیون بین بازتاب طیفی باند مادون قرمز نزدیک و باند قرمز، برای به دست آوردن ضریب  $L$  استفاده شد. برای این منظور ابتدا بین مقادیر بازتاب طیفی باند مادون قرمز نزدیک و باند قرمز رابطه رگرسیون خطی برازش داده شد. سپس

زمینی دقیق، عدم قطعیت در صحت سنجی وجود خواهد داشت (تاسومی، ۲۰۱۹). با توجه به وسیع بودن منطقه مورد مطالعه و عدم امکان استفاده از وسایل اندازه‌گیری دقیق تبخیر-تعرق واقعی مانند لایسیمتر به دلیل وجود زمین‌های با کاربری اراضی متفاوت برای صحت سنجی نتایج بدست آمده از الگوریتم سبال، از روش استاندارد فائو پنمن-ماتیت به عنوان مقادیر مرجع استفاده شد. همچنین از دو شاخص کمی ضریب تبیین ( $R^2$ ) و ریشه میانگین مربع خطاها (RMSE) برای ارزیابی نتایج بدست آمده استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad 10$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)(O_i - \bar{O}_i))^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad 11$$

در روابط فوق  $P_i$  مقادیر برآورد شده و  $O_i$  مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشند.

### نتایج و بحث

در این بخش برای اینکه شناخت بهتری از منطقه مورد مطالعه داشته باشیم تا بتوانیم درک صحیحی از پارامترهای بدست آمده از روش‌های سنجش از دوری پیدا کنیم ابتدا به شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی پرداخته شده است زیرا این شاخص به لحاظ بصری بهتر می‌تواند نمایانگر منطقه مورد مطالعه باشد. نتایج پارامترهای محاسبه شده به دلیل حجم بالای تصاویر فقط برای دو تصویر منتخب در این بخش نشان داده شده است.

#### شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی (NDVI)

مقادیر شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی نشان‌دهنده وضعیت پوشش گیاهی و تابعی از سبزیگی گیاه می‌باشد. بدین صورت که هرچه مقادیر به عدد یک نزدیک‌تر باشند نشان دهنده وضعیت بهتر و متراکم‌تر پوشش گیاهی و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد نشان دهنده وضعیت پوشش گیاهی ضعیف و خشک است. نتایج این شاخص برای دو تصویر منتخب در شکل ۵ نشان داده شده است. همانگونه که در تصاویر گویاست حداکثر مقادیر NDVI مربوط به منطقه کشت‌های آبی (جنوب منطقه مورد مطالعه) به دلیل سبزیگی بالا در اثر آبیاری می‌باشد (۰/۷۳) در تاریخ

بدست می‌آید. محاسبه این مؤلفه در معادله بیلان انرژی الگوریتم سبال، از پیچیده‌ترین و طولانی‌ترین مراحل کار می‌باشد که طی گام‌های متوالی و با سعی و خطا قابل دستیابی خواهد بود و در این مطالعه با استفاده از مدل‌سازی در نرم افزار ارداس صورت پذیرفت.

$$H = \frac{\rho_{air} C_p dT}{r_{ah}} \quad 7$$

در این رابطه  $\rho_{air}$  چگالی هوا ( $\text{Kg.m}^{-3}$ ) است که تابع فشار و دمای هوا می‌باشد،  $C_p$  گرمای ویژه هوا ( $1004 \text{ J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )،  $dT$  اختلاف دما بین دو ارتفاع مبنای و  $r_{ah}$  مقاومت آیرودینامیکی در مقابل انتقال گرما ( $\text{s.m}^{-1}$ ) است. در معادله فوق دو مجهول  $r_{ah}$  و  $dT$  وجود دارد که حل آن را دشوار می‌سازد. الگوریتم سبال برای غلبه بر این مشکل و ساده‌سازی محاسبات، از دو پیکسل سرد و گرم و سرعت باد در ارتفاع معین استفاده می‌کند. در دو پیکسل فوق می‌توان مقادیر قابل اعتمادی برای  $H$  محاسبه نموده و به کمک آن مقادیر  $dT$  در این دو پیکسل را برآورد نمود و سپس با استفاده از یک معادله خطی به سایر پیکسل‌ها تعمیم داد. این دو پیکسل در منطقه مورد مطالعه قرار داشته و صحت نتایج تبخیر-تعرق واقعی به دست آمده از الگوریتم سبال به میزان دقت در تعیین صحیح این دو پیکسل وابسته است.

در نهایت پس از برآورد پارامترهای اصلی معادله بیلان انرژی (شار تابش خالص، شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس) مقدار شار گرمای نهان بدست می‌آید که با استفاده از روابط زیر به مقدار تبخیر-تعرق واقعی می‌رسیم:

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad 8$$

$$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad 9$$

در این رابطه  $ET_{inst}$  مقدار تبخیر-تعرق واقعی در لحظه گذر ماهواره ( $\text{mm.hr}^{-1}$ ) است. عدد ۳۶۰۰ برای تبدیل واحد ثانیه به ساعت است و  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر ( $\text{J.kg}^{-1}$ ) می‌باشد.

#### صحت سنجی

صحت سنجی یکی از چالش برانگیزترین مسائل در رابطه با تخمین تبخیر-تعرق با استفاده از روش‌های سنجش از دوری می‌باشد که حتی با وجود داده‌های اندازه‌گیری شده

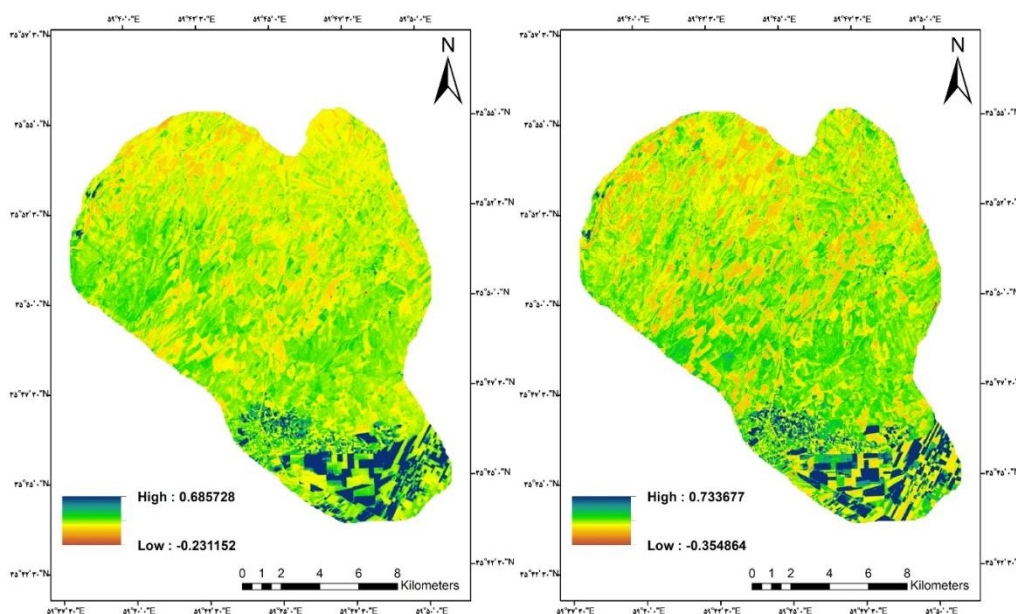


حذف شود. در این تحقیق با استفاده از روش ذکر شده در بخش مواد و روش‌ها قسمتی از تصویر که به خوبی معرف منطقه مورد مطالعه بود جدا شد و مقادیر بازتاب طیفی باند مادون قرمز در مقابل باند قرمز سنجده رسم گردید و در نهایت مقدار آن برای منطقه مورد مطالعه بدست آمد. مقادیر بازتاب طیفی باند مادون قرمز در مقابل باند قرمز در شکل ۶ برای تصویر ۱۳۹۳/۱۱/۱۸ نشان داده شده است. شیب خط برای روز فوق مقدار ۱/۲۹ بدست آمد. همچنین مقدار این پارامتر برای منطقه مورد مطالعه در روزهای مختلف در بازه ۰/۹ تا ۱ متغییر بود. مقدار پیش‌فرض ارائه شده در الگوریتم سال برای این ضریب عدد ۰/۵ می‌باشد (واترز و همکاران، ۲۰۰۲).

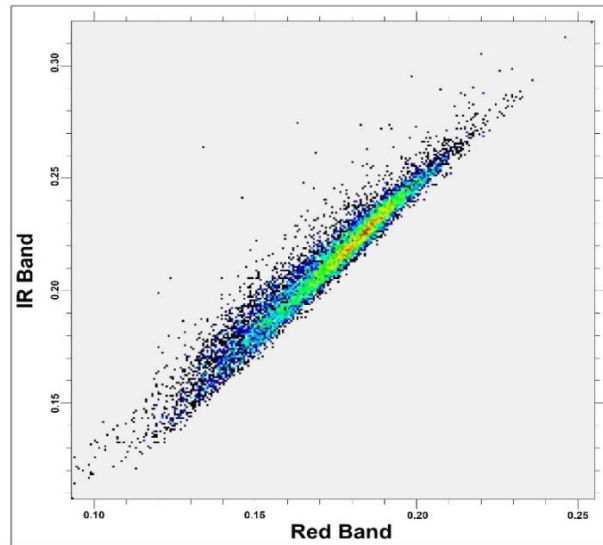
۱۳۹۵/۳/۱۲ و ۰/۶۸ در تاریخ ۱۳۹۴/۳/۹). در سایر قسمت‌های منطقه مورد مطالعه که شامل کشت دیم و مراتع می‌باشد همانطور که انتظار می‌رفت به دلیل سبزیگی پایین و حتی عاری بودن بعضی از قسمت‌ها از پوشش گیاهی مقادیر NDVI به سمت صفر میل کرده‌اند.

### واسنجی ضریب L برای شاخص SAVI در الگوریتم سیال

به کار بردن مقادیر پیش‌فرض ضریب L می‌تواند در برآورد پارامترهای معادله بیلان انرژی خطای زیادی به همراه داشته باشد. در نتیجه همانگونه که در بخش قبل ذکر شد با توجه به تغییرات شدید مقدار L بایستی این پارامتر در منطقه مورد مطالعه واسنجی شود تا اثرات زمینه‌ی خاک برای به حداقل رساندن خطا در برآورد پارامترهای معادله بیلان انرژی،



شکل ۵- نقشه مقادیر شاخص نرمال شده پوشش گیاهی. سمت راست (۱۳۹۵/۳/۱۲) و سمت چپ (۱۳۹۴/۳/۹)



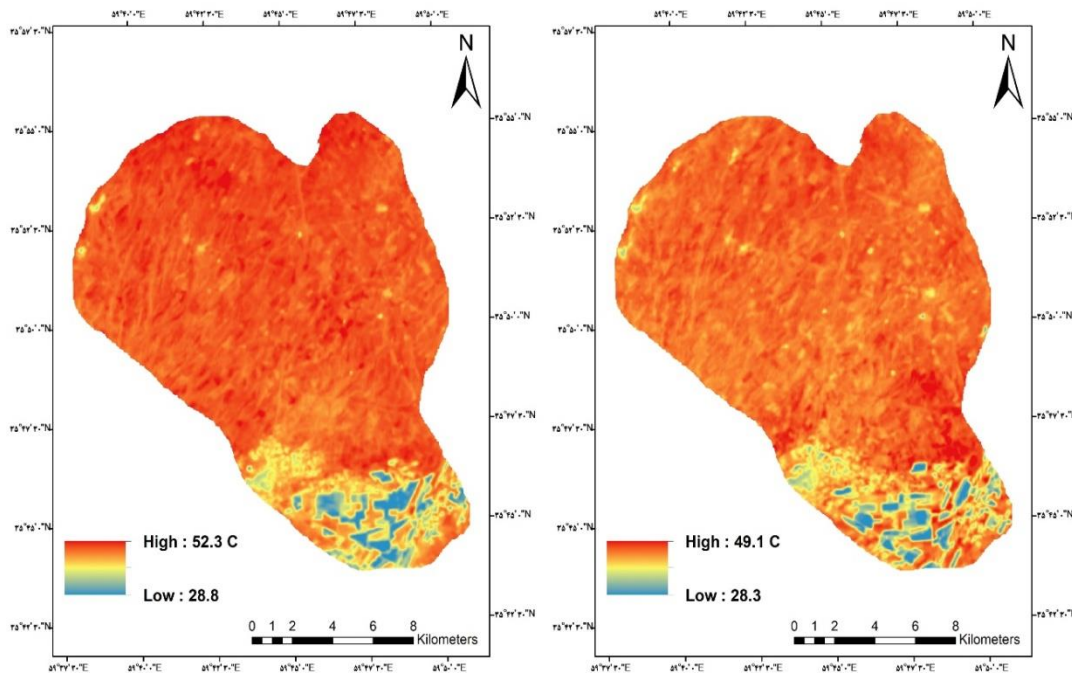
شکل ۶- رسم مقادیر بازتاب طیفی باند مادون قرمز در مقابل باند قرمز (۱۳۹۳/۱۱/۱۸)

#### دمای سطحی

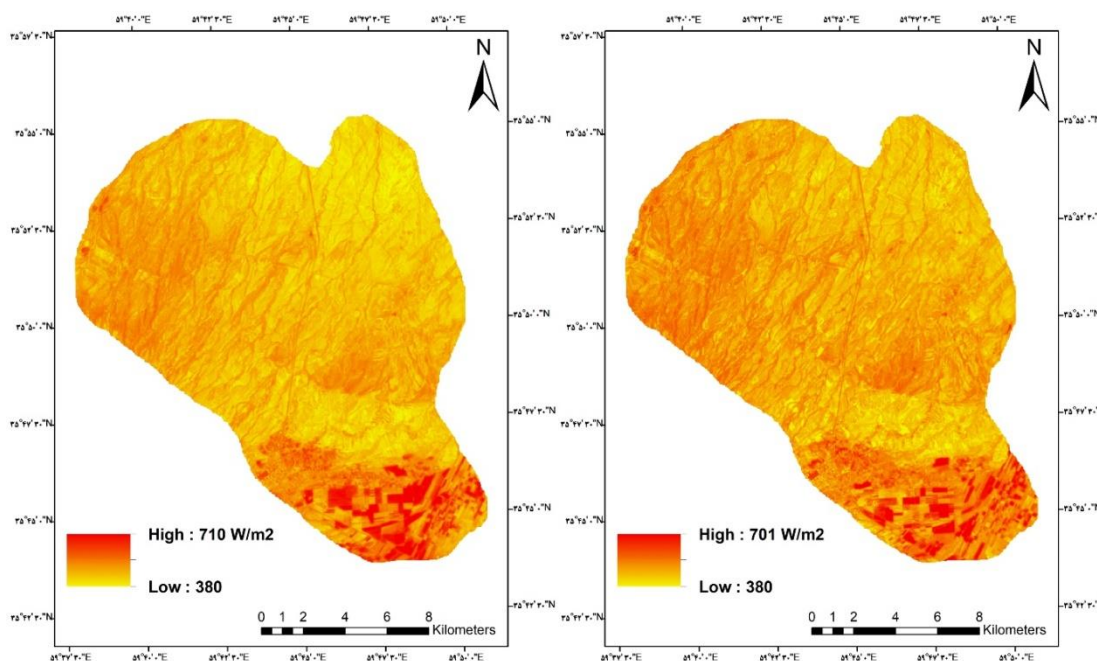
این پارامتر از مهمترین گام‌های محاسباتی الگوریتم سبال می‌باشد. در مناطقی که دارای پوشش گیاهی متراکم‌تری هستند به دلیل اینکه انرژی رسیده از خورشید بیشتر صرف تبخیر-تعرق (شار گرمای نهان) شده در نتیجه شار گرمای خاک کمتر و به دنبال آن دمای سطح زمین پایین‌تری خواهیم داشت. و برعکس آن هرچه پوشش گیاهی ما ضعیف‌تر باشد به دلیل افزایش شار گرمای خاک دماهای بالاتری خواهیم داشت که شکل ۷ این امر را به وضوح نشان می‌دهد.

#### شار تابش خالص خورشیدی

شار تابش خالص خورشیدی در واقع پس از حذف مقادیر برگشت داده شده انرژی خورشیدی مقدار خالص انرژی دریافتی که صرف تبخیر-تعرق (شار گرمای نهان)، گرم کردن زمین (شار گرمای خاک) و گرم کردن هوای بالای سطح زمین و کانوپی (شار گرمای محسوس) شده است را نشان می‌دهد. مقادیر این پارامتر در شکل ۸ برای تصاویر منتخب نشان داده شده است. از مهمترین عواملی که بر روی شار تابش خالص دریافتی در یک منطقه موثر است می‌توان به پوشش گیاهی، جنس و رطوبت خاک، عرض جغرافیایی، شیب و جهت شیب اشاره نمود. زمین‌های کشاورزی (جنوب منطقه مورد مطالعه) به دلیل مسطح بودن زمین و وجود پوشش متراکم گیاه بیشترین مقادیر این پارامتر را به خود اختصاص داده‌اند.



شکل ۷- نقشه مقادیر دمای سطح زمین (°C). سمت راست (۱۳۹۵/۳/۱۲) و سمت چپ (۱۳۹۴/۳/۹)



شکل ۸- نقشه مقادیر شار تابش خالص لحظه‌ای. سمت راست (۱۳۹۵/۳/۱۲) و سمت چپ (۱۳۹۴/۳/۹)

### شار گرمای خاک

شار گرمای خاک تابع دمای سطح زمین و همچنین جنس خاک می‌باشد. با افزایش دمای سطح زمین و در معرض قرار گرفتن سطح بیشتر، دمای زیر سطحی افزایش می‌یابد

که این امر موجب گرم شدن خاک و در نتیجه افزایش مقدار شار گرمای خاک می‌شود. کمبود یا نبود پوشش گیاهی و رطوبت باعث می‌شود انرژی رسیده از خورشید بیشتر صرف گرم کردن خاک و هوای بالای سطح شود. در شکل

اگر فرض شود که در اجرای مراحل مختلف الگوریتم سبال خطایی صورت نگرفته است، در حالت طبیعی مقادیر منفی این پارامتر را شاید بتوان به وجود پایداری جو مرتبط دانست که در چنین شرایطی گرما از هوا به سطح زمین منتقل می‌شود.

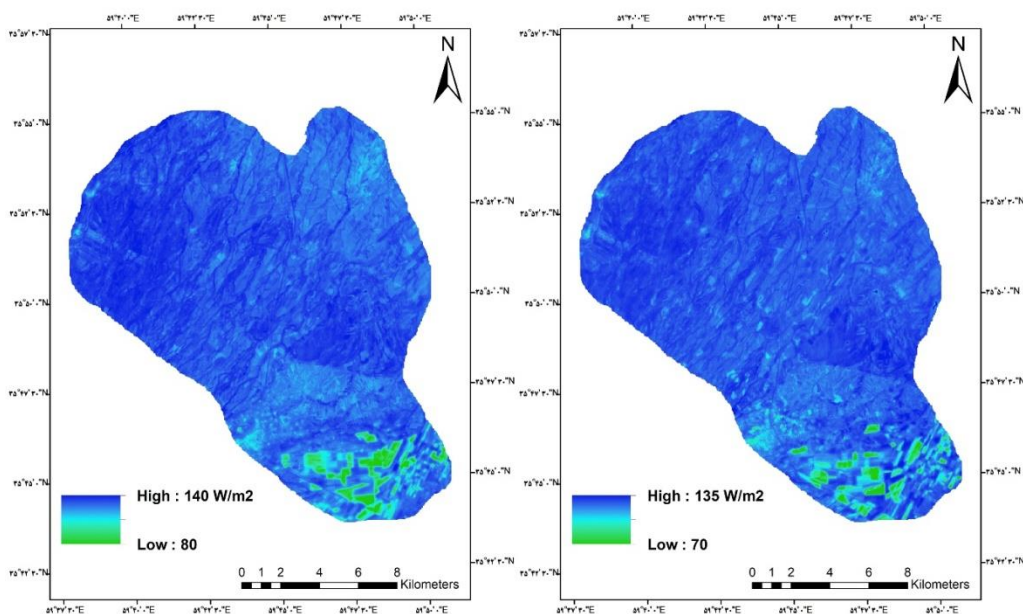
#### شار گرمای محسوس

توضیح مکانی این پارامتر در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به تعریف شار گرمای محسوس که برابر است با میزان هدر رفت گرما، این هدر رفت به واسطه اختلاف دما میان سطح زمین و هوای مجاور آن ایجاد می‌شود، بنابراین در مناطق عاری از پوشش گیاهی و آب، به دلیل اینکه تبخیر-تعرق اتفاق نمی‌افتد و در نتیجه تمام انرژی دریافتی صرف گرم کردن زمین و هوا می‌شود، شار گرمای محسوس دارای بیشترین مقادیر خود خواهد بود و بالعکس. همچنین مقادیر شار گرمای محسوس منفی مربوط به مناطقی است که دارای تبخیر-تعرق بیشتر از تبخیر-تعرق گیاه مرجع باشند (واترز و همکاران، ۲۰۰۲).

این امر به خوبی نمایان است، در مناطق کشاورزی (کشت آبی) که انرژی خورشید بیشتر صرف تبخیر-تعرق می‌شود طبیعتاً شار گرمای خاک کمتر و هرچه پوشش گیاهی ضعیف‌تر و خاک بیشتری در معرض انرژی قرار گیرد شار گرمای خاک بالاتر خواهد رفت.

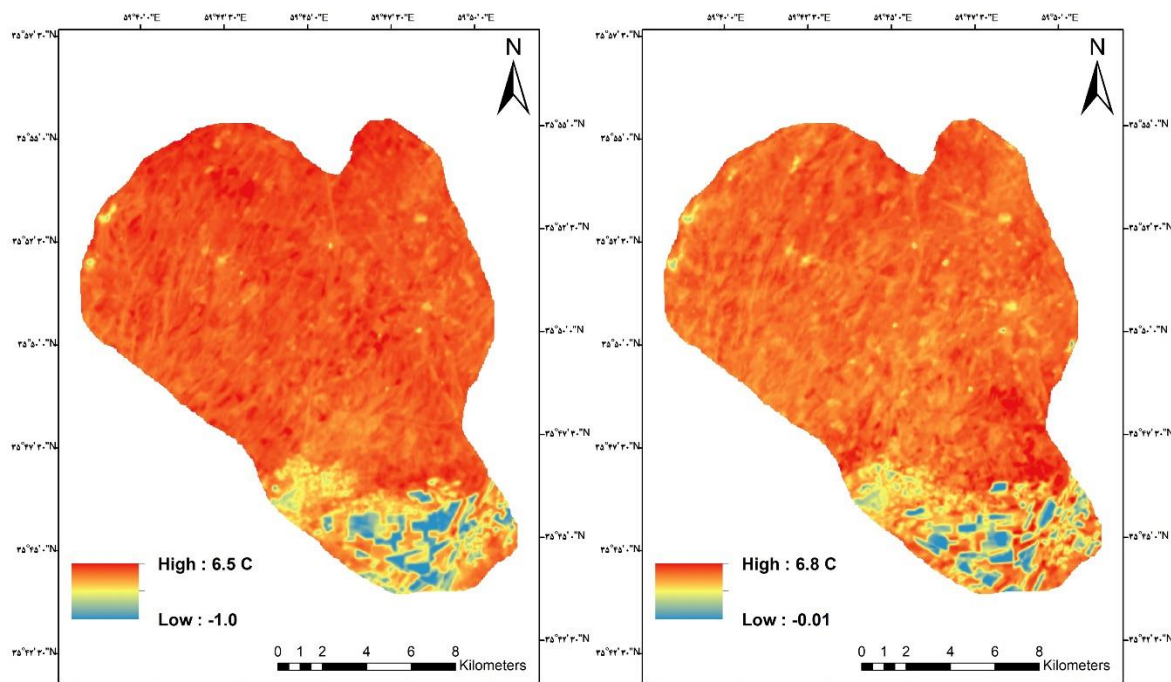
#### اختلاف دمای هوا و سطح زمین

این پارامتر یکی از مهمترین پارامترهایی است که الگوریتم سبال به کمک آن تبخیر-تعرق را تخمین می‌زند. الگوریتم سبال با استفاده از دو پیکسل سرد و گرم و رابطه خطی بین دمای هوا و اختلاف دمای هوای سطحی و دمای هوا، که در این دو پیکسل در نظر می‌گیرد، مقدار این پارامتر را در سایر پیکسل‌های تصویر شبیه‌سازی می‌کند. ضعیف بودن پوشش گیاهی باعث بالا رفتن دمای سطح خاک و در نتیجه زیاد شدن اختلاف دمای هوای بالای سطح و دمای سطح خاک می‌شود. تصاویر در رابطه با این پارامتر نیز به خوبی با دلایل مطرح شده مطابقت دارد. نتایج این پارامتر در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

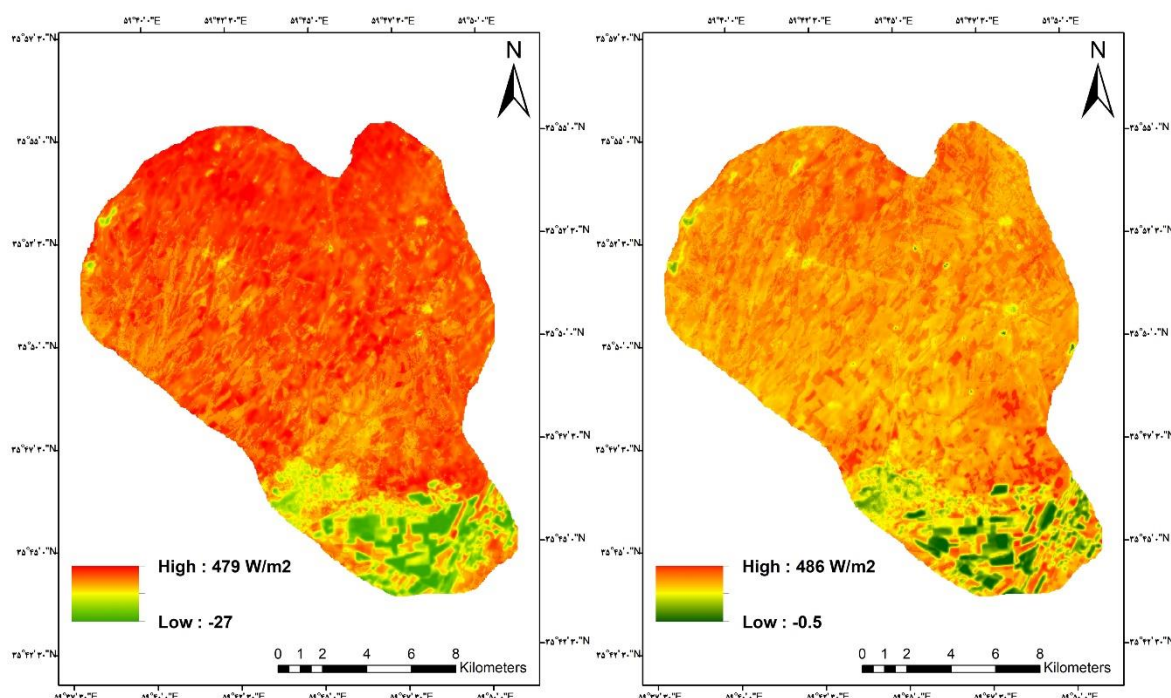


شکل ۹- نقشه مقادیر شار تابش گرمای خاک. سمت راست (۱۳۹۵/۳/۱۲) و سمت چپ (۱۳۹۴/۳/۹)





شکل ۱۰- نقشه مقادیر اختلاف دمای هوا و سطح زمین. سمت راست (۱۳۹۵/۳/۱۲) و سمت چپ (۱۳۹۴/۳/۹)



شکل ۱۱- نقشه مقادیر شار گرمای محسوس. سمت راست (۱۳۹۵/۳/۱۲) و سمت چپ (۱۳۹۴/۳/۹)

**تبخیر-تعرق واقعی روزانه**

هدف نهایی و آخرین مرحله از اجرای الگوریتم سبال یافتن مقادیر تبخیر-تعرق واقعی لحظه‌ای و تبدیل آن به تبخیر-تعرق واقعی روزانه می‌باشد. شکل ۱۲ نشان دهنده مقادیر

تبخیر-تعرق واقعی بدست آمده از الگوریتم سبال می‌باشد. همانطور که در بخش مواد و روش‌ها توضیح داده شد الگوریتم سبال بر اساس معادله توازن انرژی (معادله ۱) تبخیر-تعرق واقعی را تحت عنوان شار گرمای نهان به

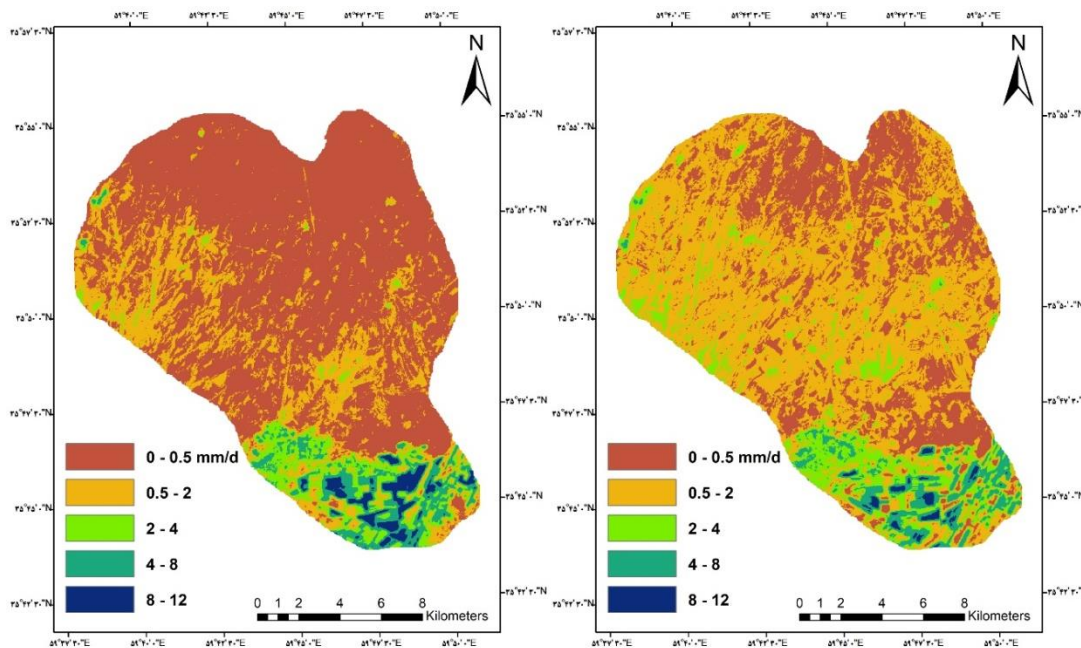
عنوان باقی مانده معادله توازن انرژی تخمین می‌زند. همانطور که تصاویر گویا می‌باشند مقادیر تبخیر-تعرق در زمین‌های کشاورزی به دلیل عدم محدودیت در منابع آبی، بیشترین مقادیر را به خود اختصاص داده‌اند ولی در زمین‌های دیم و مراتع به دلیل کمبود آب مقادیر تبخیر-تعرق کمتر می‌باشند. این موارد از مقایسه بصری تمام شارهای تابش خالص، گرمای زمین و گرمای محسوس نیز قابل درک است.

پوشش گیاهی متراکم و یکنواخت (از زمین‌های کشاورزی و همچنین زمین‌های متفاوت برای هر سال) که شرایطی نزدیک به گیاه مرجع را دارا می‌باشد، انتخاب و مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین آن با مقادیر حاصل از روش پنمن-مانتیت به عنوان روش مرجع مقایسه شد که نتایج قابل قبولی به دنبال داشت. این نتایج در جدول ۳ و شکل ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود مقادیر تبخیر-تعرق در دو روش در طول دوره مورد مطالعه بخوبی با هم مطابقت دارند.

در شکل ۱۴ نیز پراکنش مقادیر میانگین تبخیر-تعرق واقعی حاصل از الگوریتم سبال در مقابل تبخیر-تعرق مرجع نشان داده شده است که ضریب تبیین ( $R^2$ ) بدست آمده ۰/۹۶ و میانگین مربعات خطا (RMSE)، ۰/۵ میلی‌متر در روز نیز نشان دهنده دقت بالای مدل سبال در تخمین تبخیر-تعرق واقعی در این منطقه می‌باشد.

### صحت سنجی

به منظور صحت سنجی روش مذکور، با عنایت به متفاوت بودن پوشش گیاهی و به طور کلی پوشش سطح زمین در منطقه مورد مطالعه عملاً مقایسه میانگین مقادیر تبخیر-تعرق بدست آمده برای کل منطقه با مقدار تبخیر-تعرق مرجع از روش پنمن-مانتیت که شرایط خاص گیاه مرجع را دارا می‌باشد مقایسه صحیحی نیست، بنابراین بخشی از تصویر با

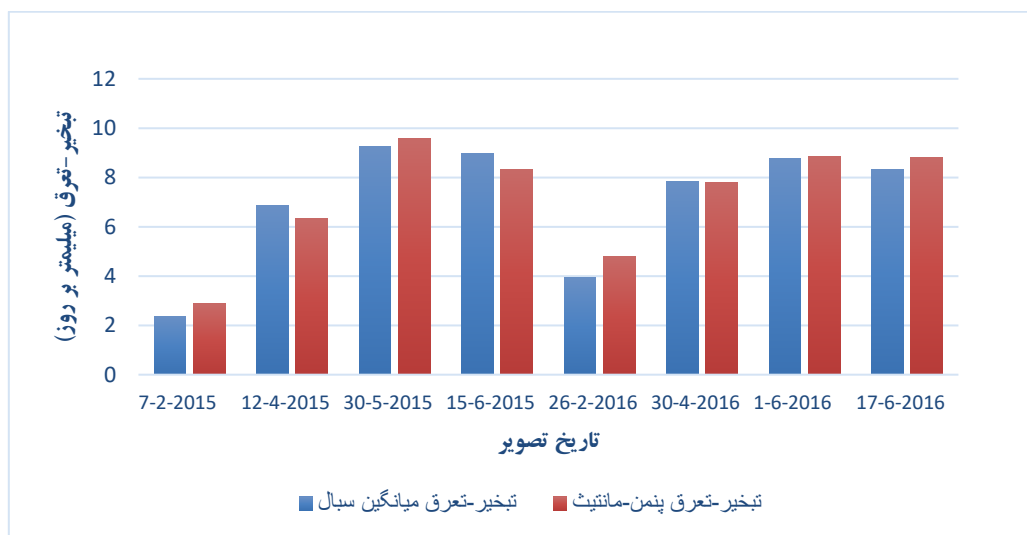


شکل ۱۲- نقشه مقادیر تبخیر-تعرق واقعی روزانه. سمت راست (۱۳۹۵/۳/۱۲) و سمت چپ (۱۳۹۴/۳/۹)

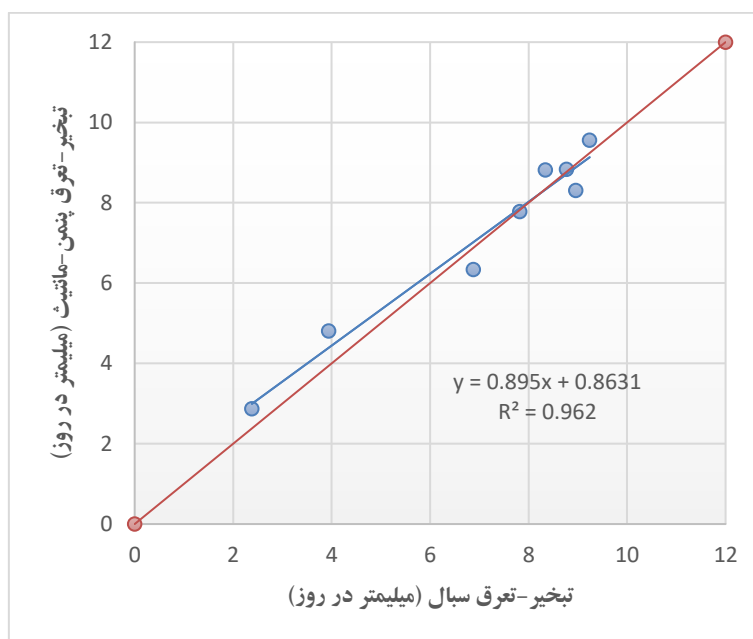
جدول ۲- مقادیر تبخیر-تعرق بدست آمده با استفاده از الگوریتم سبال و روش پنمن-مانتیت فانو (میلی‌متر در روز)

تاریخ تصویر	تبخیر-تعرق پنمن-مانتیت	میانگین مقادیر تبخیر-تعرق سبال	حداکثر مقادیر تبخیر-تعرق سبال	حداقل مقادیر تبخیر-تعرق سبال
۲۰۱۵/۰۲/۰۷	۲/۸۷	۲/۳۸۸	۳/۱۳۰	۱/۶۱۰
۱۳۹۳/۱۱/۱۸				

۵/۹۰	۷/۲۰	۶/۸۸۰	۶/۳۴	۱۳۹۴/۰۱/۲۳	۲۰۱۵/۰۴/۱۲
۸/۲۰	۹/۶۴۰	۹/۲۴۰	۹/۵۶	۱۳۹۴/۰۳/۰۹	۲۰۱۵/۰۵/۳۰
۶/۸۹۰	۹/۶۷۰	۸/۹۶۰	۸/۳۱	۱۳۹۴/۰۳/۲۵	۲۰۱۵/۰۶/۱۵
۳/۳۹	۴/۶۶۰	۳/۹۴۰	۴/۸۱	۱۳۹۴/۰۲/۰۷	۲۰۱۶/۰۲/۲۶
۶/۵۴۰	۸/۱۶۰	۷/۸۲۰	۷/۷۸	۱۳۹۵/۰۲/۱۱	۲۰۱۶/۰۴/۳۰
۷/۳۲۰	۹/۱۵۰	۸/۷۷۰	۸/۸۳	۱۳۹۵/۰۳/۱۲	۲۰۱۶/۰۶/۰۱
۷/۱۹	۸/۸۰	۸/۳۴۰	۸/۸۲	۱۳۹۵/۰۳/۲۸	۲۰۱۶/۰۶/۱۷



شکل ۱۳- مقایسه مقادیر تبخیر-تعرق بدست آمده با استفاده از الگوریتم سبال و روش پنمن-مانیت فانو



شکل ۲- مقایسه مقادیر تبخیر-تعرق بدست آمده از مدل سبال و روش پنمن-مانیت فانو

## نتیجه گیری

در این پژوهش تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ و الگوریتم سبال که یک روش سنجش از دوری مبتنی بر معادلات فیزیکی می‌باشد در بخشی از زمین‌های با کاربری اراضی مختلف در منطقه فریمان که دارای زمین‌های تحت کشت دیم، مراتع و کشت آبی بود تخمین زده شد. بدین منظور الگوریتم مذکور به صورت پارامتریک در منطقه مورد مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفت. مهمترین محدودیت این پژوهش فقدان مقادیر تبخیر-تعرق واقعی اندازه‌گیری شده برای صحت سنجی نتایج نهایی الگوریتم سبال بود که نهایتاً روش استاندارد فائو پنمن-مانتیت به عنوان روش مرجع انتخاب شد و با مقادیر متناسب با شرایط گیاه مرجع استخراج شده از تصاویر پردازش شده مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت و نتایج مطلوبی به دست آمد. در نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که میزان انحراف مقادیر بدست آمده از الگوریتم سبال در مقایسه با روش مرجع (پنمن-مانتیت) در بعضی روزها مقدار بسیار اندکی بیش برآورد و بعضی روزها کم برآورد دارد که آماره میانگین مربعات خطا ۰/۵ میلی‌متر در روز دقت بالایی مدل را نشان می‌دهد. طبیعتاً با توجه به صحت نتایج بدست آمده در بخش انتخابی تصاویر و از طرفی یکپارچه بودن پارامترهای مورد استفاده در کل تصاویر می‌توان صحت خروجی‌های نهایی را برای کل منطقه مورد مطالعه نتیجه‌گیری کرد. در نهایت با توجه به آنچه ذکر شد می‌توان عنوان کرد که الگوریتم سبال برای مناطق با کاربری اراضی مختلف که با محدودیت مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی همراه است، دارای خروجی‌های قابل اعتماد بوده و امکان استفاده را دارا می‌باشد.

## منابع

2. Bagheri, M., Morid, S., & Arshad, S. (2017). Application of Remotely-Sensed Data to Estimate a Water Budget for Data-Scarce Endorheic Basins: A Case Study of Lake Urmia basin, Iran. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 45(1), 101-112.
3. Bala, A., Rawat, K. S., Misra, A. K., & Srivastava, A. (2016). Assessment and validation of evapotranspiration using SEBAL algorithm and Lysimeter data of IARI agricultural farm, India. *Geocarto International*, 31(7), 739-764.
4. Baret, F., Jacquemoud, S., & Hanocq, J. F. (1993). The soil line concept in remote sensing. *Remote Sensing Reviews*, 7(1), 65-82.
5. Bastiaanssen, W. G., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of hydrology*, 212, 198-212.
6. Bastiaanssen, W. G. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of hydrology*, 229(1-2), 87-100.
7. Calcagno, G., Mendicino, G., Monacelli, G., Senatore, A., & Versace, P. (2007). Distributed estimation of actual evapotranspiration through remote sensing techniques. In *Methods and tools for drought analysis and management* (pp. 125-147). Springer, Dordrecht.
8. Gebremichael, M., Wang, J., & Sammis, T. W. (2010). Dependence of remote sensing evapotranspiration algorithm on spatial resolution. *Atmospheric Research*, 96(4), 489-495.
9. Gowda, P. H., Chavez, J. L., Colaizzi, P. D., Evett, S. R., Howell, T. A., & Tolck, J. (2017). Evapotranspiration estimation using remote sensing technology based on SEBAL algorithm. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 41(1), 65-76.



- evaporation from the freshwater lakes (Case study: Amirkabir dam, Iran). *Journal of Hydrology*, 561, 523-531.
17. Miryaghoubzadeh, M., Solaimani, K., Habib nejad roshan, M., Shahedi, K., Abbas pour, K., & Akhvan, S. (2012). Estimation and assessment of actual evapotranspiration using remote sensing data (Case study: Tamar basin, Golestan province, Iran). *Irrigation and Water Engineering*, 4(3), 89-102.
18. Nouri, H., Faramarzi, M., Sobhani, B., & Sadeghi, S. H. (2017). Estimation of evapotranspiration based on surface energy balance algorithm for land (SEBAL) using landsat 8 and modis images. *Applied ecology and environmental research*, 15(4), 1971-1982.
19. Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., & Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote sensing of environment*, 48(2), 119-126.
20. Rango, A. (1994). Application of remote sensing methods to hydrology and water resources. *Hydrological Sciences Journal*, 39(4), 309-320.
21. Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 55(2), 95-107.
22. Senkondo, W., Munishi, S. E., Tumbo, M., Nobert, J., & Lyon, S. W. (2019). Comparing remotely-sensed surface energy balance evapotranspiration estimates in heterogeneous and data-limited regions: A case study of Tanzania's Kilombero Valley. *Remote Sensing*, 11(11), 1289.
23. Tasumi, M., Trezza, R., Allen, R. G., & Wright, J. L. (2003, September). US A. (2008). ET mapping for agricultural water management: present status and challenges. *Irrigation science*, 26(3), 223-237.
10. Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, 25(3), 295-309.
11. Jamshidi, S., Zand-Parsa, S., Naghdyzadegan Jahromi, M., & Niyogi, D. (2019). Application of a simple Landsat-MODIS fusion model to estimate evapotranspiration over a heterogeneous sparse vegetation region. *Remote Sensing*, 11(7), 741.
12. Karimi, P., & Bastiaanssen, W. G. (2015). Spatial evapotranspiration, rainfall and land use data in water accounting—Part 1: Review of the accuracy of the remote sensing data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(1), 507-532.
13. Khan, A., Stöckle, C. O., Nelson, R. L., Peters, T., Adam, J. C., Lamb, B., ... & Waldo, S. (2019). Estimating biomass and yield using METRIC evapotranspiration and simple growth algorithms. *Agronomy Journal*, 111(2), 536-544.
14. Koloskov, G., Mukhamejanov, K., & Tanton, T. W. (2007). Monin–Obukhov length as a cornerstone of the SEBAL calculations of evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 335(1), 170-179.
15. Liou, Y. A., & Kar, S. K. (2014). Evapotranspiration estimation with remote sensing and various surface energy balance algorithms—A review. *Energies*, 7(5), 2821-2849.
16. Losgedaragh, S. Z., & Rahimzadegan, M. (2018). Evaluation of SEBS, SEBAL, and METRIC models in estimation of the

25. Tasumi, M., Moriyama, M., & Shinohara, Y. (2019). Application of GCOM-C SGLI for agricultural water management via field evapotranspiration. *Paddy and Water Environment*, 17(2), 75-82.
26. Zamansani, E., Khorani, E., Sadeghi Lari, A., & Sadidi, J. (2016). Evaluation of evapotranspiration of wheat using SEBAL algorithm (Case study: Agricultural Research Station of Haji Abad). *Physical Geography Research*, 49(4), 667-681.
- Validation tests on the SEBAL model for evapotranspiration via satellite. In 2003 ICID Workshop on Remote Sensing of ET for Large Regions (Vol. 17).
24. Tasumi, M. (2019). Estimating evapotranspiration using METRIC model and Landsat data for better understandings of regional hydrology in the western Urmia Lake Basin. *Agricultural Water Management*, 226, 105805.