

## برآورد تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم‌های تک منبعی

### و دو منبعی در دشت قزوین

بهاره بهمن آبادی<sup>۱\*</sup>، عباس کاویانی، پیمان دانشکار آراسته و رستا نظری

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(ره)</sup>

**b.bahmanabadi@gmail.com**

استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(ره)</sup>

**abbasskaviani@gmail.com**

دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(ره)</sup>

**arasteh1348@yahoo.com**

دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(ره)</sup>

**nazarirasta@yahoo.com**

### چکیده

تبخیر-تعرق مرجع یک پدیده چند متغیره و پیچیده است که به عوامل متعددی وابسته است. دقیق‌ترین روش برآورد آن، استفاده از لایسیمتر است که مستلزم صرف وقت و هزینه زیادی است. از این رو هدف اصلی این تحقیق برآورد تبخیر-تعرق واقعی براساس الگوریتم‌های تک منبعی SEBAL و SSEB و الگوریتم دو منبعی TSEB در سه سنجنده MODIS، ETM+ و OLI & TIRS است که در سه مرحله صورت گرفته است. در برآورد تبخیر-تعرق براساس الگوریتم SEBAL شاخص تعدیل شده پوشش گیاهی (SAVI) و فاکتور تصحیح اثرات زمینه خاک (L) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است به همین منظور این شاخص به عنوان ضریب کالیبراسیون در نظر گرفته شد که با توجه به وضعیت درصد پوشش سبز روی سطح زمین انتخاب شد. نتایج حاصل از هر سه سنجنده نسبت به داده‌های لایسیمتری خطای کمتری نسبت به مقدار تبخیر-تعرق بدست آمده با فرض  $L=0/5$  داشته است ( $1/49$  mm/day،  $0/84$ ،  $1/76$  RMSE). برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از کالیبراسیون از ۳۰٪ باقیمانده داده‌های لایسیمتری استفاده شد. نتایج شاخص‌های آماری تفاوت معنی‌دار (در سطح ۹۵٪) داده‌های پیش-بینی شده را بیان می‌کند. نتیجه اینکه، با مقایسه سه الگوریتم در سه سنجنده ETM+MODIS و OLI & TIRS الگوریتم SSEB در سنجنده ETM+ در سطح معنی‌دار (۹۵٪) و با مشاهده کمترین میزان خطا ( $0/41$  mm/day RMSE) به عنوان الگوریتم برتر برای تخمین تبخیر-تعرق در دشت قزوین معرفی شد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم SEBAL، الگوریتم SSEB، الگوریتم TSEB، شاخص تعدیل شده پوشش گیاهی

۱- آدرس نویسنده مسئول: قزوین، گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره).

\* - دریافت: آذر ۱۳۹۶ و پذیرش: خرداد ۱۳۹۷

## مقدمه

تبخیر-تعرق از اجزاء چرخه هیدرولوژیکی است که تخمین درست آن در مطالعات منابع آب اهمیت زیادی دارد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). روش‌هایی که برای تخمین تبخیر-تعرق پتانسیل استفاده می‌شود در دو گروه اصلی روش‌های مستقیم و غیرمستقیم قرار می‌گیرند (علیزاده، ۱۳۸۳). معمول‌ترین روش مستقیم تعیین تبخیر-تعرق با استفاده از لایسیمتر است. با توجه به اینکه استفاده از این روش مشکل و پرهزینه می‌باشد و استخراج داده‌های تبخیر-تعرق بسیار وقت‌گیر است لذا عمومیت ندارد و جهت برآورد تبخیر-تعرق از روش‌های محاسباتی برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع استفاده می‌شود (علیزاده، ۱۳۸۵).

در این روش‌ها عوامل مختلف اقلیمی و گیاهی در نظر گرفته شده است؛ بنابراین برآوردهای به دست آمده به صورت نقطه‌ای بوده و تنها می‌توانند میزان تبخیر-تعرق را در یک نقطه و یا یک منطقه کوچک و برای زمان‌هایی مشخص تعیین کنند و برای ناحیه‌هایی وسیع‌تر عملاً قابل استفاده نیستند (علیزاده، ۱۳۸۵)؛ بنابراین لازم است از مدل‌های برآورد تبخیر-تعرق از قبیل سنجش از دور با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و حداقل استفاده از داده‌های زمینی و الگوریتم‌های متعدد، تخمین نسبتاً دقیقی از میزان تبخیر-تعرق در مناطق بسیار وسیع ارائه شود (باستیانسن و چندراپالا، ۲۰۰۳). لازم به ذکر است که تبخیر-تعرق پدیده‌ای منطقه‌ای است و نقطه‌ای نمی‌باشد بنابراین با توجه به تغییرات مکانی عوامل دخیل در تبخیر-تعرق اعم از سطح تبخیرشونده و عوامل محیطی موثر بر آن در برآورد میزان تبخیر-تعرق بایستی اقدام به مدل‌سازی توزیعی نمود (آلن و همکاران، ۲۰۰۳). فناوری سنجش از دور در مدیریت آب مصرفی گیاهان و تامین نیاز آبی آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته است تا به واسطه آن مقادیر تبخیر-تعرق واقعی گیاهان را به صورت پیوسته در مکان و تا حد زیادی پیوسته در زمان و با دقت قابل قبولی تخمین بزند (استوارت

و همکاران، ۱۹۹۹). در بین روش‌هایی که برای برآورد تبخیر-تعرق از طریق سنجش از دور وجود دارد، روش‌های بیلان انرژی بیشتر مورد توجه می‌باشند. از جمله الگوریتم‌های موجود می‌توان به الگوریتم‌های تک منبعی SEBAL، SSEB و الگوریتم دو منبعی TSEB اشاره کرد (باستیانسن، ۲۰۰۰، سنای و همکاران، ۲۰۰۷ و نورمن و کوستاس، ۱۹۹۵).

یکی از الگوریتم‌هایی که جهت برآورد تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مورد توجه بسیار قرار گرفته الگوریتم SEBAL<sup>۲</sup> می‌باشد. به منظور صحت‌یابی الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین (باستیانسن و همکاران، ۱۹۹۸b) از اطلاعات موجود تبخیر-تعرق مزارع در مقیاس بزرگ در کشورهای چین، هند، اسپانیا و پاکستان استفاده شده و اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای تبخیر-تعرق با نتایج حاصل از الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین مقایسه شد. نتایج نشان داد که در ۸۵ درصد موارد داده‌های حاصل از الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین با داده‌های مزرعه‌ای بدون هیچگونه واسنجی مطابقت داشته است. ترزا (۲۰۰۳) نیاز آبی گیاهان را در منطقه‌ای از آیداهو از داده‌های ماهواره لندست ۳<sup>۶</sup> با استفاده از الگوریتم SEBAL برآورد کرد و دقت این مدل را با داده‌های لایسیمترهای وزنی واقع در موسسه تحقیقات کشاورزی کیمبرلی آیداهو، مقایسه کرد. نتایج به این صورت بود که همبستگی بین مقادیر بدست آمده از روش SEBAL با نتایج حاصل از داده‌های لایسیمترهای وزنی اختلافی کمتر از پنج درصد را نشان داد. همچنین تحقیقاتی در زمینه ارزیابی و برآورد نیاز آبی با استفاده از داده‌های سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی و با استفاده از توسعه الگوریتم SEBAL در منطقه پیتینا-پلین ایتالیا صورت گرفته است. در این تحقیق با استفاده از طبقه‌بندی تصاویر لندست و مودیس<sup>۴</sup>، نقشه‌های توزیع مکانی تبخیر-تعرق ET<sub>C</sub> (تبخیر-تعرق واقعی گیاه) و ET<sub>O</sub> (

۴. MODIS

۲. Surface Energy Balance (SEBAL)

۳. Landsat

اختصاصی موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی واقع در کرج مورد مقایسه قرار دادند. در این تحقیق از تصاویر مودیس استفاده شد و نتایج حاکی از آن بود که الگوریتم SEBAL قادر است شار گرمای محسوس را نسبت به الگوریتم S-SEBI به مراتب بهتر برآورد نماید و بنابراین شار گرمای نهان نیز بهتر برآورد می‌گردد. سیمایی و همکاران در سال ۱۳۸۷ کارایی مدل SEBAL در تخمین تبخیر-تعرق حوضه آبخیز زنجان رود واقع در استان زنجان با استفاده از تصاویر لندست ۵ و مودیس را مورد ارزیابی قرار داد. تبخیر-تعرق روزانه برآورد شده توسط مدل SEBAL در اراضی دیم و آبی زیر کشت گندم با نتایج حاصل از دو تشت تبخیر ارزیابی شد. نتایج نشان داد تبخیر-تعرق اراضی آبی در مقایسه با اراضی دیم با دقت مطلوب‌تری برآورد می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که دقت تصاویر سنجنده لندست ۵ حدود ۲/۵ برابر بیشتر از نتایج حاصل از سنجنده مودیس می‌باشد. کاویانی و همکاران در سال ۱۳۹۲ با استفاده از الگوریتم SEBAL تصاویر مودیس مقادیر تبخیر-تعرق و ماده خشک تولیدی واقعی در دشت قزوین را محاسبه کردند. در انجام این تحقیق از پنج تصویر بدون ابر که تطابق زمانی با داده‌های لایسیمیتری دارد استفاده گردیده است. نتایج اجرای الگوریتم در هر پنج تصویر با داده‌های لایسیمیتر زهکش‌دار موجود در منطقه در هر پنج رو مورد ارزیابی قرار گرفت و دقت ۰/۸ به دست آمد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که امکان کاربرد الگوریتم SEBAL در اقلیم دشت قزوین وجود داشته و با دقت بالایی تخمین زده می‌شود.

الگوریتم S<sup>2</sup>SEB<sup>o</sup> (ساده شده بیلان انرژی) توسط سنای و همکاران در سال ۲۰۰۷ پیشنهاد شد که برخلاف الگوریتم SEBAL، محاسبه تبخیر-تعرق براساس اطلاعات هواشناسی ساده‌تری صورت می‌گرفت که بر مبنای فرضیه تغییرات خطی شار گرمایی نهان و تغییرات سطح می‌باشد. طبق گزارش سنای و همکاران (۲۰۰۷) محاسبه تبخیر-تعرق (ET) از طریق کسر تبخیر-تعرق براساس میانگین

گیاه مرجع) به صورت سالانه در نرم‌افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی بدست آمد و در نهایت نیاز آبی را برای کل سطح منطقه بدست آوردند (کاسا و همکاران، ۲۰۰۸). در ایران نیز کرباسی و همکاران در سال ۱۳۹۵ به بررسی دقت تخمین تبخیر-تعرق واقعی در مزارع یونجه و ذرت شهرستان خرم‌دره با استفاده از داده‌های سنجش از دور و داده‌های هواشناسی پرداختند که در آن الگوریتم بیلان انرژی سطح (SEBAL) در مقایسه با مدل FAO-PM56 مورد بررسی قرار گرفت که طی این بررسی، مقدار تبخیر-تعرق یونجه بیشتر و در مورد ذرت کمتر برآورد می‌کند. کاویانی و همکاران در سال ۱۳۹۰ از الگوریتم SEBAL در تخمین تبخیر-تعرق واقعی و بهره‌وری آب کشاورزی دشت قزوین استفاده کردند. نتایج حاکی از آن بود که تطبیق خوبی بین داده‌های لایسیمیتری و داده‌های واقعی وجود دارد اما مقدار CRM به دلیل بزرگتر بودن پیکسل‌ها از لایسیمیتر، در برآورد تبخیر-تعرق همواره منفی بود. ابراهیمی و یزدانی در سال ۱۳۸۹ از الگوریتم SEBAL و تصاویر ماهواره‌ای مودیس برای برآورد تبخیر-تعرق پارک ملت مشهد استفاده کردند. نتیجه حاکی از آن بود که مقادیر تبخیر-تعرق مرجع محاسبه شده توسط روش پنمن-مانتیت-فائو ۵۶ با نتایج بدست آمده از روش SEBAL اختلاف معنی‌داری داشته و دارای ضریب همبستگی ۰/۷۶۳۷ می‌باشد.

میریعقوب‌زاده و همکاران در سال ۱۳۸۸ تبخیر-تعرق حاصل از الگوریتم SEBAL و تصویر مودیس را با روش استاندارد فائو در حوزه آبخیز تمر واقع در استان گلستان مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان می‌داد که الگوریتم SEBAL قابلیت تعیین میزان تبخیر-تعرق واقعی را در سطح وسیع و بدون نیاز به تعداد زیادی از داده‌های هواشناسی را دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم SEBAL میزان تبخیر-تعرق را بین ۰/۵ تا یک میلی‌متر در روز کمتر از روش پنمن-مانتیت برآورد می‌نماید. حسن‌پور و همکاران در سال ۱۳۸۸ دو روش SEBAL و S-SEBI را در برآورد تبخیر-تعرق گیاه ذرت در مزرعه

الگوریتم بیلان انرژی دو منبعی TSEB ابتدا توسط نورمن و همکاران در سال ۱۹۹۵ پیشنهاد شد و سپس توسط کوستاس و نورمن اصلاح شد (کوستاس و نورمن، ۱۹۹۶، ۱۹۹۹، ۲۰۰۰). محققین و متخصصین زیادی اثبات کردند که این مدل برای شرایط آب و هوایی و مناطق مختلف مناسب است (لی و همکاران، ۲۰۰۵، کوستاس و اندرسون، ۲۰۰۹ و کولازی و همکاران، ۲۰۱۲)

مدل‌های دو منبعی ضمن تفکیک خاک و گیاه در سرتاسر فرآیند مدل‌سازی برخلاف مدل‌های تک منبعی از چندین مقاومت آیرودینامیکی مجزا برای خاک و گیاه استفاده می‌کنند (هانتینگفورد و همکاران، ۲۰۰۰). در بررسی‌هایی که بر روی مقایسه الگوریتم تک منبعی و دو منبعی در منطقه شمال چین انجام شد، هر دو الگوریتم نتایج قابل قبولی را نشان دادند؛ اما الگوریتم دو منبعی در مقایسه با اندازه‌گیری‌های زمینی با خطای بیشتری مواجه بود (تنگ و همکاران، ۲۰۱۲). به منظور ارزیابی مدل TSEB، کاربرد این مدل در یک منطقه خشک و نیمه خشک با استفاده از تصاویر دمای رادیومتریک، شاخص گیاهی و نقشه‌های کاربردی اراضی نتایج موفقیت آمیزی داشت (بتس و همکاران، ۱۹۹۶). در همین راستا نیز کار اصلاحی کوستاس و نورمن (۱۹۹۷) روی مدل TSEB انجام شد که برای برآورد شار گرمای محسوس و تخمین دمای خاک و دمای گیاه، پیشنهاد کردند که در صورت داشتن تصویر دمای رادیومتریک برای یک زمان مشخص و با دو زاویه تابش خورشیدی، مدل از طریق دو معادله و دو مجهول اجرا شود. آنها ضمن مقایسه نتایج خروجی مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده زمینی به این نتیجه رسیدند که چنانچه برای برآورد شار گرمای نهان از ضریب پریستلی تیلور استفاده شود نتایج بهتری حاصل می‌شود (کوستاس و نورمن، ۱۹۹۷). تیمرز و همکاران (۲۰۰۶) در تحقیقی به مقایسه الگوریتم بیلان انرژی سطح (SEBAL) و الگوریتم دو منبعی (TSEB) پرداختند و تفاوت اصلی این دو مدل را در برآورد توزیع مکانی شارهای انرژی سطح، متمایز کردن اجزای بیلان انرژی سطح برای خاک و گیاه در مدل دو منبعی و تمایز

دمای پیکسل‌های سرد و گرم انجام می‌شود. طبق گزارشات آلن و همکاران (۲۰۰۲) و سنای و همکاران (۲۰۰۷) پیکسل گرم اشاره به مناطق بدون پوشش گیاهی و یا دارای پوشش گیاهی پراکنده با مقدار ET کمتر دارد و پیکسل سرد نشان دهنده بیشترین مقدار تبخیر-تعرق در منطقه مورد مطالعه می‌باشد و باید در مناطق آبیاری شده و یا دارای پوشش گیاهی متراکم باشد. این روش همبستگی بالایی با نتایج حاصل از الگوریتم‌های SEBAL و متریک دارد. گوادا و همکاران در سال ۲۰۰۹ به بررسی الگوریتم SSEB در مقایسه با داده‌های لایسیمتری در منطقه تگزاس پرداختند. در این تحقیق الگوریتم SSEB را ساده‌ترین مدل موجود برای تخمین تبخیر-تعرق در مقیاس منطقه‌ای معرفی کرده و اذعان داشتند که روش SSEB می‌تواند برای برآورد تبخیر-تعرق استفاده شود و روش SSEB در مقایسه با دیگر روش‌هایی مانند METRIC، SEBAL و الگوریتم‌های دو منبعی عملکرد بهتری داشته است. با توجه به نیاز این الگوریتم به حداقل اطلاعات هواشناسی، نتیجه قابل قبول و دقیقی را در برآورد تبخیر-تعرق در مناطق خشک و نیمه خشک مانند تگزاس داشته است.

در ایران نیز عصاره مستقیم و همکاران در سال ۱۳۹۰ به بررسی تغییرات پوشش گیاهی مزرعه نیشکر امیرکبیر با استفاده از تکنیک سنجش از دور پرداختند که در این پژوهش برای تعیین تبخیر-تعرق مزرعه از الگوریتم SSEB استفاده شد که با بررسی روند تغییرات زمانی تبخیر-تعرق؛ تغییرات زمانی پوشش گیاهی و کاهش تراکم پوشش گیاهی را در طی سال‌های اخیر اعلام کردند. بزا در سال ۲۰۱۵ به مقایسه نتایج SEBAL و SSEB با مقدار ET بدست آمده از نسبت بوون در مزرعه آزمایشی کتان ایالت سیرا برزیل پرداختند و به این نتیجه رسیدند که نتایج حاصل از این دو الگوریتم تقریباً مشابه با یکدیگر بود و همچنین با توجه به اینکه روش SEBAL به داده‌های هواشناسی جزئی و معادلات پیچیده‌ای نیاز دارد لذا روش SSEB را روشی مناسب برای مناطقی که همه داده‌های هواشناسی در آن موجود نیست، معرفی کردند.

و بیلان‌های انرژی توسط الگوریتم‌های SEBAL و SSEB و TSEB می‌باشد. در همین راستا نتایج حاصل از این الگوریتم‌ها با مقدار تبخیر-تعرق بدست آمده از لایسمتر مقایسه شده است. علاوه بر این با توجه به اهمیت پارامتر L در برآورد شاخص SAVI در الگوریتم SEBAL، تاثیر آن بر روی دقت برآورد تبخیر-تعرق واقعی مورد توجه قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

محدوده منطقه مورد مطالعه اراضی پایین دست شبکه آبیاری قزوین می‌باشد که در فواصل جغرافیایی بین عرض شمالی ۳۶ درجه و صفر دقیقه و صفر ثانیه و طول‌های شرقی ۴۹ درجه و ۴۰ دقیقه و صفر ثانیه تا ۵۰ درجه و ۳۵ دقیقه و ۳۵ ثانیه قرار گرفته است. مساحت دشت قزوین حدود ۶۵۰۰۰ هکتار است. میانگین دمای سالانه این منطقه ۱۴/۲ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش ۳۰۱ میلی‌متر می‌باشد. براساس اقلیم‌نمای دومارتن اقلیم منطقه نیمه‌خشک محسوب می‌شود.

## اطلاعات و داده‌های مورد نیاز

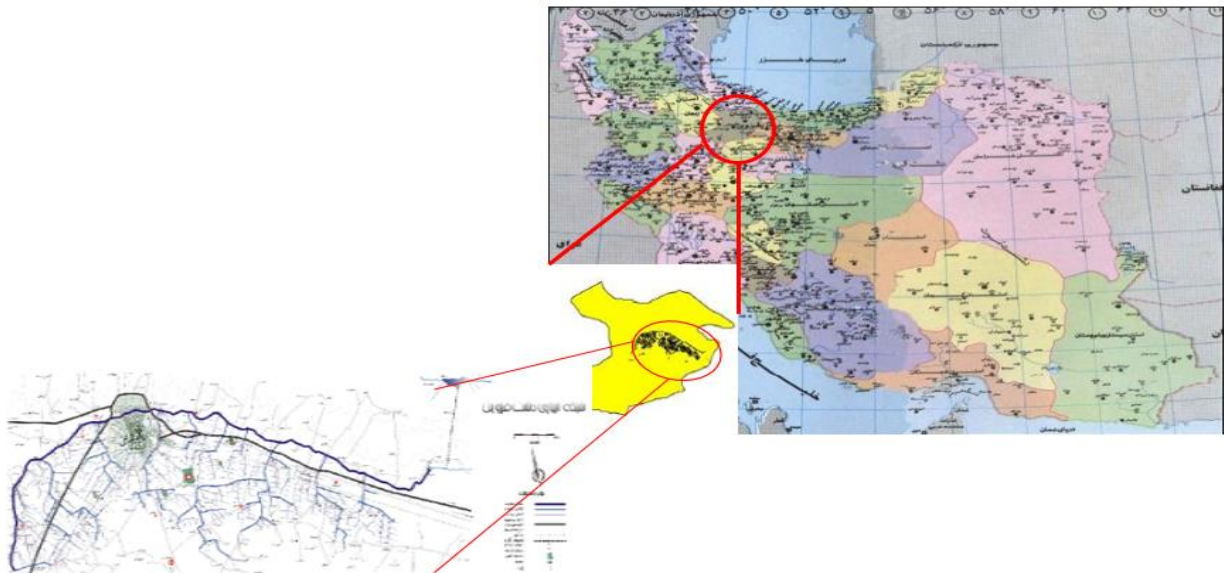
### اطلاعات هواشناسی

در این پژوهش به منظور برآورد اجرا و برآورد الگوریتم‌های بیلان انرژی از داده‌های هواشناسی از قبیل دما، سرعت باد، تابش خورشیدی، رطوبت نسبی، فشار هوا، ساعات آفتابی ایستگاه هواشناسی قزوین با موقعیت جغرافیایی عرض ۳۶ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی و طول ۵۰ درجه و ۳ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۲۷۹ متری از سطح دریا، بصورت روزانه و در بازه زمانی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۲ و ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۵ استفاده شد.

این دو الگوریتم در برآورد شار گرمای محسوس دانستند. به‌طورکلی هر دو روش در برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل در مقایسه با داده‌های مشاهداتی مزارع آزمایشی (Southern Great Plain'97) و (Momsoon'90) نتایج قابل قبولی را ارائه دادند اما در مناطقی با پوشش گیاهی پراکنده اختلاف بین داده‌های مشاهداتی و مدل TSEB بیشتر از مدل اصلاح شده SEBAL بود. کوستاس و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی عملکرد مدل دو منبعی TSEB در مناطق مختلف با پوشش‌های گیاهی متفاوت پرداختند که در آخر این مدل را برای برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل در کلیه شرایط اتمسفری و پوشش‌های گیاهی متفاوت مناسب دانستند.

فرنج و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از تصاویر ماهواره استر<sup>۶</sup> و مقایسه مقادیر مشاهداتی با نتایج حاصل از مدل‌های SEBAL و TSEB به این نتیجه رسیدند که هر دو مدل در زمینه برآورد مقادیر اجزای شار انرژی مناسب هستند و می‌توان از خطای سیستماتیک آن‌ها در مدل‌سازی صرف‌نظر کرد. به‌طورکلی این پژوهشگران در اراضی با پراکندگی پوشش گیاهی، مدل TSEB را پیشنهاد کردند. از جمله بررسی‌هایی که در مقایسه با مدل‌های سنجش از دوری تک منبعی و دو منبعی شار انرژی در برآورد تبخیر-تعرق انجام گرفت می‌توان به پژوهش باقری هارونی و همکاران (۱۳۹۱) در منطقه دشت تبریز اشاره کرد. در این تحقیق به مقایسه مدل‌های تک منبعی SEBAL و METRIC و مدل‌های دو منبعی TSEB و SETEB پرداخته شد. نتایج حاکی از عملکرد منطقی و مورد قبول کلی مدل‌ها است. در مقام مقایسه SETEB با خطای مطلق بیشتر نسبت به TSEB به ترتیب بهترین و بدترین عملکرد را داشتند. مدل‌های تک منبعی با اینکه از فرضیات پیچیده مدل‌های دو منبعی بهره‌ای نگرفته بودند، نتایج مناسبی را ارائه کرده و برای کار در سطوح بالاتر نیز توجیه دارد.

هدف اصلی این تحقیق بررسی امکان برآورد تبخیر-تعرق روزانه (ET) براساس تکنیک سنجش از دور



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

#### اطلاعات لایسیمیتری

در این تحقیق به منظور بررسی صحت و دقت برآوردهای صورت گرفته براساس الگوریتم‌های بیان انرژی از داده‌های مزرعه‌ای لایسیمتر زهکش دار به مساحت ۲ متر مربع و به عمق ۱/۵ متر، واقع در مرکز تحقیقات خاک و آب اسماعیل آباد قزوین با مختصات جغرافیایی "۲۴' ۱۵° ۳۶ شمالی و "۳۵' ۵۴° ۴۹ شرقی استفاده شد. داده برداری از لایسیمتر براساس تبخیر-تعرق گیاه مرجع چمن می‌باشد که ارتفاع آن در زمان پژوهش بین ۵ تا ۱۵ سانتی متر نگهداری می‌شد. به منظور تأثیر یکنواختی میکروکلیم و در راستای حذف اثرات حرکت افقی گرما، لایسیمتر در مرکز یک قطعه زمین به ابعاد ۵۰۴۰ مترمربع واقع شد و مساحتی حدود ۲۰۰۰ متر مربع را می‌پوشاند. داده‌های لایسیمیتری از

سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۲ به صورت روزانه و هفتگی ثبت شده است. (ابراهیمی پاک، ۱۳۸۹)

#### مشخصات سنجنده‌ها

در این تحقیق از تصاویر ماهواره‌های لندست ۸ (سنجنده OLI&TIRS) و لندست ۷ (سنجنده ETM+) و ماهواره ترا (سنجنده MODIS) استفاده شد که مشخصات عمومی آنها در جدول ۱ ارائه شده است.

در این پژوهش از تصاویر بدون ابر و روزانه استفاده شده است. از این رو تعداد و تاریخ تصاویر مورد ارزیابی بسته به شرایط آب و هوایی زمان برداشت و تاریخ گذر ماهواره از منطقه یکسان نیستند.

جدول ۱- مشخصات سنجنده‌های مورد بررسی (علوی پناه، ۱۳۹۱)

نام سنجنده	تعداد باندها	قدرت تفکیک مکانی (متر)	قدرت تفکیک زمانی (روز)
MODIS	۳۶	۲۵۰ و ۵۰۰ و ۱۰۰۰	۲
ETM+	۸	۳۰ و ۶۰ و ۱۵	۱۶
OLI & TIRS	۸	۳۰ و ۱۵ و ۱۰۰	۱۶

جدول ۲- تاریخ‌های مورد بررسی هر سه سنجنده

MODIS	ETM+	OLI & TIRS
۱۳۷۹/۲/۲۵	۱۳۷۹/۲/۴	۱۳۹۲/۰۲/۰۳
۱۳۷۹/۳/۹	۱۳۷۹/۳/۵	۱۳۹۲/۰۳/۰۴
۱۳۷۹/۳/۱۸	۱۳۷۹/۴/۲۲	۱۳۹۲/۰۴/۰۵
۱۳۷۹/۴/۳۱	۱۳۷۹/۵/۲۳	۱۳۹۲/۰۵/۰۶
۱۳۷۹/۵/۱۲	۱۳۷۹/۶/۸	۱۳۹۲/۰۶/۰۷
۱۳۷۹/۶/۲۸	۱۳۸۰/۲/۳	۱۳۹۳/۰۲/۱۵
۱۳۸۰/۲/۲۸	۱۳۸۰/۲/۱۹	۱۳۹۳/۰۳/۱۶
۱۳۸۰/۳/۱۷	۱۳۸۰/۴/۵	۱۳۹۳/۰۵/۰۲
۱۳۸۰/۴/۱۵	۱۳۸۰/۵/۲۲	۱۳۹۳/۰۵/۱۸
۱۳۸۰/۵/۱۳	۱۳۸۱/۱/۵	۱۳۹۴/۰۳/۰۳
۱۳۸۰/۶/۲	۱۳۸۱/۳/۷	۱۳۹۴/۰۴/۰۴
۱۳۸۱/۱/۲۷	۱۳۸۱/۵/۹	۱۳۹۴/۰۵/۰۵
۱۳۸۱/۲/۲۷	۱۳۸۱/۶/۲۶	۱۳۹۴/۰۵/۲۱
۱۳۸۱/۳/۲۸	۱۳۸۲/۱/۸	۱۳۹۵/۰۴/۰۶
۱۳۸۱/۴/۲۹	۱۳۸۲/۲/۹	۱۳۹۵/۰۵/۰۷
۱۳۸۱/۵/۳۰	۱۳۸۲/۲/۲۵	۱۳۹۵/۰۶/۰۵
۱۳۸۲/۱/۱۰		
۱۳۸۲/۲/۲۷		
۱۳۸۲/۳/۲۸		
۱۳۸۲/۴/۲۶		
۱۳۸۲/۵/۳۰		
۱۳۸۲/۶/۷		

که در آن:

$\alpha$  بازتابش سطح زمین (آلبیدوی سطحی)،  $R_{S\downarrow}$  تابش موج کوتاه ورودی ( $0/3$  تا  $3$  میکرومتر) ( $W/m^2$ )،  $R_{L\downarrow}$  تابش موج بلند ورودی ( $3$  تا  $100$  میکرومتر) ( $W/m^2$ )،  $R_{L\uparrow}$  تابش موج بلند خروجی ( $W/m^2$ )،  $\epsilon_0$  گسیلمندی عریض باند می‌باشد (باستیانسن، ۲۰۰۰).

شارگرمای خاک میزان ذخیره گرمای داخل خاک و پوشش گیاهی، در اثر هدایت مولکولی می‌باشد که مطابق رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2) (1 - 0.98NDVI^4) \quad (3)$$

که در آن:

$T_s$  دمای سطحی ( $^{\circ}C$ )، آلبیدوی سطحی،  $NDVI$  شاخص پوشش گیاهی و  $R_n$  تابش خالص خورشیدی می‌باشد.

در مقایسه الگوریتم‌های تک منبعی، علی‌رغم روند تکراری و پیچیده الگوریتم **SEBAL** محاسبه تبخیر و تعرق، همانطور که در فلوجارت‌ها هم مشاهده می‌شود

## معرفی الگوریتم‌های بیلان انرژی **SEBAL** و **SSEB** و **TSEB**

روش شناسی مدل‌های شار انرژی محاسبه تبخیر و تعرق واقعی به عنوان یکی از اجزای معادله بیلان انرژی می‌باشد. در الگوریتم بیلان انرژی سطح، شارگرمای نهان به مصرف تبخیر-تعرق گفته می‌شود که براساس آن باقیمانده انرژی از معادله زیر تعیین می‌گردد:

$$\lambda E = R_n - G - H \quad (1)$$

در رابطه فوق  $ET$  تبخیر-تعرق،  $\lambda$  گرمای تبخیر،  $R_n$  تابش خورشید،  $H$  شارگرمای محسوس و  $G$  شارگرمای خاک است (تمامی اجزا برحسب وات بر متر مربع می‌باشند). برای برآورد میزان تبخیر-تعرق واقعی، لازم است اجزای بیلان انرژی به‌طور جداگانه ( $R_n$  و  $G$  و  $H$ ) محاسبه شوند. تابش خالص خورشیدی براساس بقای انرژی تعیین می‌شود که مطابق آن مجموع انرژی تابشی وارد و خارج شده از سطح زمین برابر با تابش خالص است:

$$R_n = (1 - \alpha)R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\uparrow} \quad (2)$$

پیکسل در تصویر استفاده کرد. در گام دوم به محاسبه کسر تبخیر و تعرق (ETf) برای هر پیکسل طبق معادله زیر می‌پردازیم:

$$ET_f = \frac{T_H - T_X}{T_H - T_C} \quad (5)$$

که در آن:

$T_H$  و  $T_C$  میانگین دمای رادیومتریکی سطح در پیکسل‌های سرد و گرم و  $T_X$  دمای رادیومتریکی سطح در هر پیکسل تصویر است. در گام سوم، تبخیر و تعرق واقعی هر پیکسل در تصویر از معادله (۲) برآورد می‌شود:

$$ET_a = ET_f \times kET_0 \quad (6)$$

$ET_0$ : تبخیر و تعرق گیاه مرجع (mm/day) است که از معادله استاندارد تبخیر و تعرق مرجع (ASCE) محاسبه می‌شود (آلن و همکاران، ۲۰۰۵).  $k$  یک ضریب که تبخیر و تعرق مرجع گیاه چمن را به ماکزیمم مقدار تبخیر و تعرقی که گیاه با مقاومت آیرودینامیکی بالا داشته است می‌رساند سنای و همکاران در سال ۲۰۱۳ مقدار ۱/۲ را برای  $k$  پیشنهاد کردند که در این تحقیق از این مقدار استفاده شد.

همچنین در مقایسه دو الگوریتم تک منبعی SEBAL و SSEB با الگوریتم دو منبعی TSEB می‌توان به بازرترین تفاوت این دو مدل در برآورد توزیع مکانی شارهای انرژی سطح و متمایز کردن اجزای بیلان انرژی سطح برای خاک و گیاه در مدل دو منبعی و متمایز این الگوریتم در برآورد شار گرمای محسوس دانست. علاوه بر این مدل‌های دو منبعی ضمن تفکیک خاک و گیاه در سرتاسر فرآیند مدل‌سازی برخلاف مدل‌های تک منبعی از چندین مقاومت آیرودینامیکی مجزا برای خاک و گیاه استفاده می‌کنند (هانتینگفورد و همکاران، ۲۰۰۰). همچنین مدل‌های مدل دو منبعی TSEB شامل بررسی دقیق‌تر تغییرات رادیومتریکی و تبادل شار انرژی بین خاک و گیاه است که در واقع به دو منبع شار گرما و شار بخار آب در زمین‌های ناهمگن خاک و پوشش گیاهی اشاره دارد. (نورمن و همکاران، ۱۹۹۵). خاک و پوشش گیاهی می

الگوریتم SSEB به انجام محاسبات کمتری احتیاج دارد. همچنین الگوریتم SEBAL نیازمند داده‌ها و اطلاعات هواشناسی متعددی است که در الگوریتم SSEB این اطلاعات به حداقل می‌رسد. تفاوت اصلی این دو الگوریتم محاسبه کسر تبخیر تعرق و در نهایت برآورد نیاز آبی روزانه گیاه است که به توضیح آن می‌پردازیم.

در مدل SEBAL تبخیر و تعرق روزانه گیاه (mm/day) براساس کسر تبخیر و تعرق بدست می‌آید که مستلزم محاسبه تبخیر و تعرق لحظه‌ای هر پیکسل طبق معادله زیر است.

$$ET_{act} = ET_{r-24} \frac{ET_{ins}}{ET_{r-inst}} \quad (4)$$

که در آن:

$ET_{ins}$  تبخیر و تعرق لحظه‌ای (mm/hr) که با رابطه  $ET_{ins} = 3600 \times \frac{\lambda E}{\lambda}$  بدست می‌آید که  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر (j/kg) می‌باشد و  $ET_{r-inst}$  تبخیر و تعرق ساعتی گیاه مرجع برای ایستگاه هواشناسی معرف منطقه از روش پنمن مانتیت فائو محاسبه شد. در مدل SSEB محاسبه تبخیر و تعرق در ۴ مرحله صورت می‌گیرد: (۱) شناسایی پیکسل‌های سرد و گرم در تصاویر هر سنجنده. (۲) برآورد کسر تبخیر و تعرق (ETf). (۳) محاسبه تبخیر و تعرق روزانه برای هر پیکسل تصویر (۴) ارزیابی عملکرد مدل.

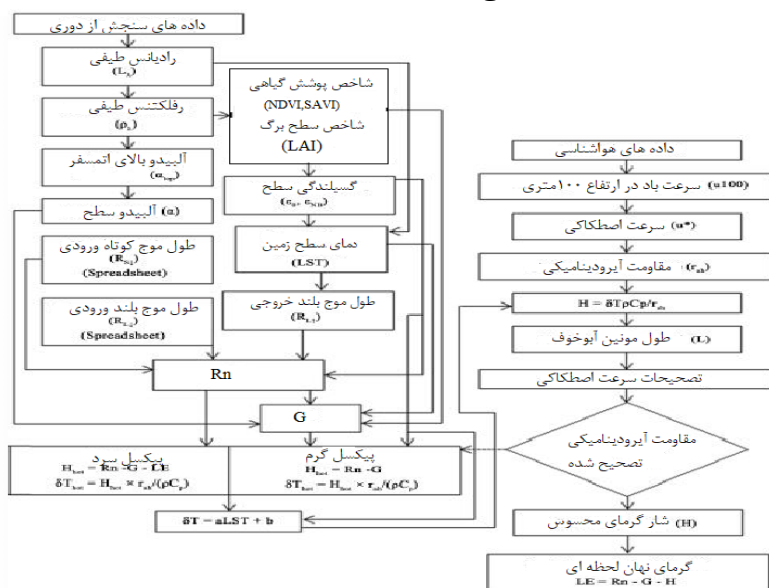
در گام اول به شناسایی سه پیکسل سرد و سه پیکسل گرم در هر تصویر از سنجنده پرداخته و سپس میانگین دمای هریک برای برآورد دمای رادیومتریکی سطح محاسبه می‌شود؛ مانند مدل SEBAL پیکسل‌های سرد از مزارع کاملاً آبیاری شده با مقدار NDVI بالا با کمترین مقدار دمای روشنایی<sup>۱۷</sup> و پیکسل گرم در تصویر از مزارع بدون پوشش گیاهی یا دارای پوشش گیاهی اندک با دمای رادیومتریکی بالا و مقدار NDVI خیلی کم انتخاب می‌شوند. با فرض اینکه پیکسل‌های سرد و گرم به ترتیب دارای کمترین و بیشترین مقدار تبخیر و تعرق در منطقه مورد مطالعه هستند، بنابراین از دمای پیکسل‌های سرد و گرم می‌توان در محاسبه کسر تبخیر و تعرق برای هر

<sup>17</sup>- Brightness temperature

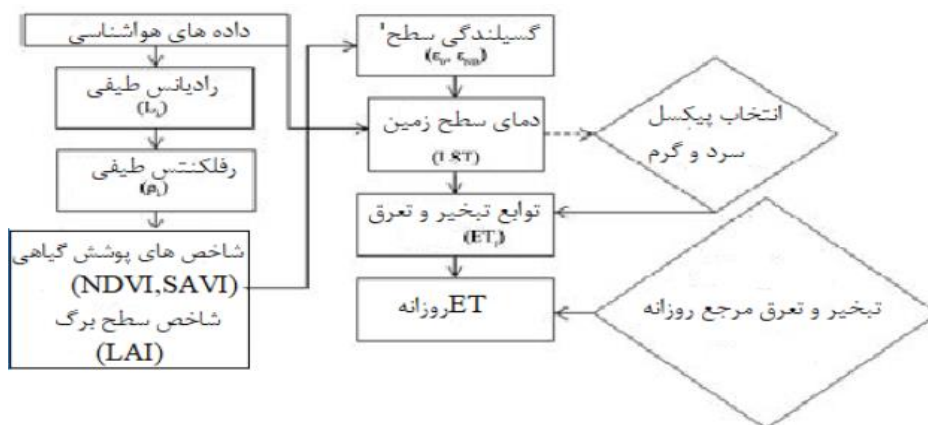


مدل دو لایه است که شار انرژی بین خاک و پوشش گیاهی تقسیم می‌شود (نورمن و همکاران، ۱۹۹۵).

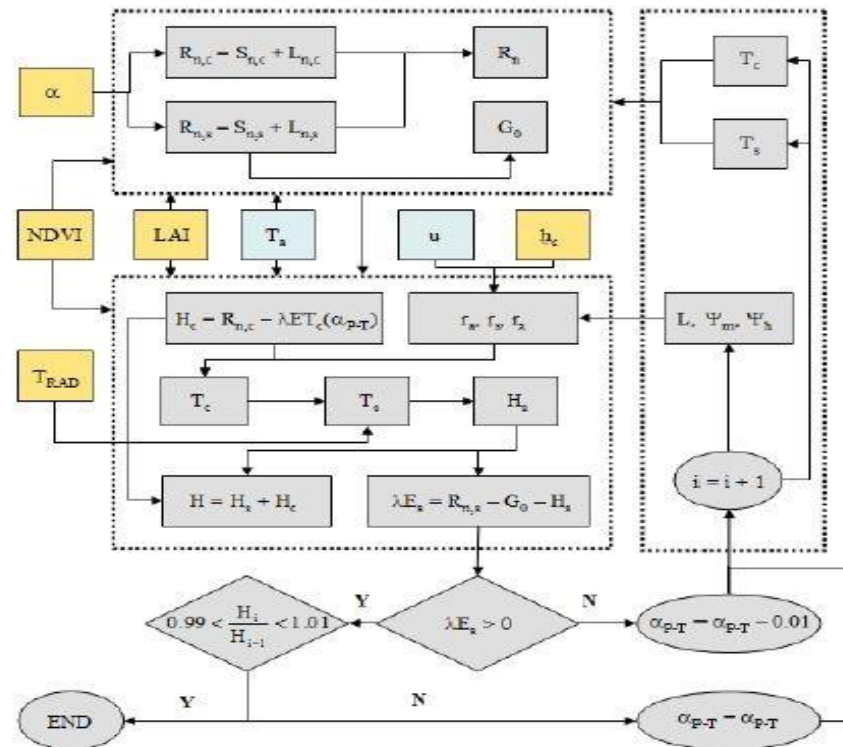
توانند تبادل انرژی و رطوبت متفاوتی با اتمسفر مجاور داشته باشند که شار انرژی این دو منبع ADDITIVE فرض می‌شود. سیستم خاک - پوشش گیاهی در واقع یک



شکل ۲- فلوجارت روند محاسبه تبخیر-تعرق با استفاده از الگوریتم SEBAL (باستیانسن و همکاران، ۲۰۰۲)



شکل ۳- فلوجارت روند محاسبه تبخیر-تعرق با استفاده از الگوریتم SSEB (سنای و همکاران، ۲۰۰۷)



شکل ۴- فلوجارت روند محاسبه تبخیر-تعرق با استفاده از الگوریتم TSEB (نورمن و همکاران، ۱۹۹۵)

$$L=1-2 \cdot a \cdot NDVI \cdot WDVI \quad (۸)$$

$$WDVI = \rho_{nir} - \gamma \rho_{red} \quad (۹)$$

ضریب  $a$  برابر  $1/6$  می‌باشد و  $WDVI^a$  (شاخص وزنی اختلاف پوشش گیاهی) از رابطه (۹) بدست می‌آید. که در آن:

$\gamma$  ضریب خط خاک (Soil Line Coefficient) است که در واقع شیب خط برازش داده شده بر نمودار طیفی باندهای مادون قرمز نزدیک و قرمز است که در نمودار شکل (۵) نشان داده شده است (Wenjing, 2006). همچنین باستانسن و همکاران در سال ۲۰۰۰ مقدار  $L=0.5$  را برای برآورد SAVI در منطقه تحقیقاتی آیداهو<sup>۹</sup> مناسب دانسته‌اند.

#### شاخص SAVI

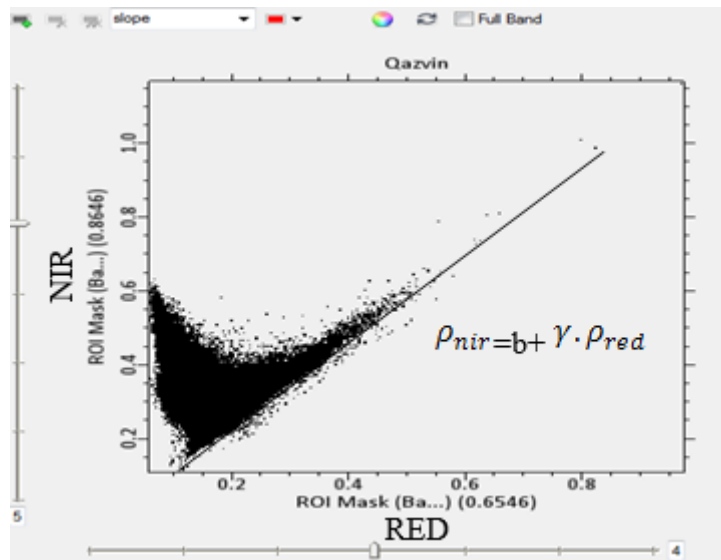
در مناطقی که پوشش گیاهی نامتراکم دارند، بازتابش نور در طیف قرمز و مادون قرمز نزدیک از سطح خاک، مقدار شاخص اختلاف نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) را تحت تاثیر قرار می‌دهد. لذا برای حذف تاثیر خاک در پس زمینه گیاه، رابطه زیر ارائه می‌شود.

$$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} (1+L) \quad (۷)$$

که  $\rho_{nir}$  باند مادون قرمز نزدیک و  $\rho_{red}$  باند قرمز می‌باشد و  $L$  فاکتور تصحیح اثرات زمینه خاکی می‌باشد که دامنه آن بین صفر برای پوشش گیاهی متراکم و یک برای خاکی که پوشش گیاهی آن صفر است متغیر بوده و می‌تواند با استفاده از اطلاعات تصاویر و روابط (۸) و (۹) محاسبه شود. (Qi et al. 1994).

<sup>۹</sup> -Idaho

<sup>۹</sup> -Weighted Difference Vegetation Index



شکل ۵- تعریف و تعیین ضریب خط خاک از ترکیب باندهای مادون قرمز و قرمز در ماهواره لندست ۸

$$r = \frac{\sum_1^N (\overline{ET(Obs)} - \overline{ET(Obs)}) (\overline{ET(Mod)} - \overline{ET(Mod)})}{\sqrt{\sum_1^N (\overline{ET(Obs)} - \overline{ET(Obs)})^2 \sum_1^N (\overline{ET(Mod)} - \overline{ET(Mod)})^2}} \quad (14)$$

که  $\overline{ET(Mod)}$  تبخیر-تعرق برآورد شده از الگوریتم‌های SEBAL و SSEB و  $\overline{ET(Obs)}$  تبخیر-تعرق مشاهداتی از لایسیمتر و یا نتایج روش تجربی هارگریوز سامانی (۱۹۸۵) و  $\overline{ET(Obs)}$  میانگین تبخیر-تعرق برآورد شده از لایسیمتر و یا نتایج روش تجربی هارگریوز سامانی (۱۹۸۵) و  $\overline{ET(Mod)}$  میانگین تبخیر-تعرق برآورد شده از الگوریتم-های SEBAL و SSEB می‌باشد.

#### نتایج و بحث

این قسمت در سه بخش ارائه شده است. در ابتدا با توجه به اهمیت و تاثیر فاکتور L در برآورد SAVI و اثر آن بر نتایج بدست آمده تبخیر-تعرق واقعی در الگوریتم SEBAL، به بررسی و واسنجی این پارامتر در منطقه دشت قزوین بر روی سه سنجنده MODIS و ETM+ و OLI&TIRS پرداخته و در نهایت به مقایسه تبخیر-تعرق بدست آمده براساس فرضیه  $L=0.5$  (باستیانسن و همکاران ۲۰۰۰) و نتایج بدست آمده براساس L واسنجی شده در منطقه پرداخته شد و در نهایت روش مناسب در برآورد L معرفی خواهد شد. در بخش دوم پس از کالیبراسیون فاکتور L در الگوریتم SEBAL و تعیین روش مناسب، اقدام به

#### شاخص‌های آماری

با هدف مقایسه نتایج حاصل از کاربرد الگوریتم‌های بیان انرژی با مقادیر مشاهداتی از لایسیمتر و روش برتر در منطقه مورد مطالعه از آماره‌هایی متداول همچون میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین جذر مربعات خطا (RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، خطای استاندارد (SE)، خطای اریب میانگین (MBE) و  $r$  ضریب همبستگی استفاده شده است. علاوه بر این موارد و با هدف بررسی یکسان بودن و هم‌قواری برآوردهای بدست آمده از الگوریتم‌های سنجنش از دوری از آزمون T-Test استفاده شد که صحت‌سنجی برای سنجنده‌های MODIS و ETM+ و OLI & TIRS در سطح معنی داری ۹۵٪ صورت گرفت تا احتمال تصادفی بودن نتایج بدست آمده بررسی گردد.

$$MAE = N^{-1} \sum_{i=1}^N (ET(Mod)_i - ET(Obs)_i) \quad (10)$$

$$MBE = N^{-1} \sum_{i=1}^N (ET(Mod)_i - ET(Obs)_i) \quad (11)$$

$$RMSE = [N^{-1} \sum_{i=1}^N (ET(Mod)_i - ET(Obs)_i)^2]^{0.5} \quad (12)$$

$$SE = (N-2)^{-1} \left[ \sum_1^N (\overline{ET(Mod)} - \overline{ET(Mod)})^2 - \frac{(\sum_1^N (\overline{ET(Obs)} - \overline{ET(Obs)}) (\overline{ET(Mod)} - \overline{ET(Mod)}))}{\sum_1^N (\overline{ET(Obs)} - \overline{ET(Obs)})} \right] \quad (13)$$

از ارائه مقادیر این فاکتور در هر سنجنده و برای تاریخ‌های مختلف خودداری شده و در نهایت نتایج بررسی‌های آماری صورت گرفته در جدول ۳ ارائه شده است.

همچنین طبق شاخص‌های آماری، سنجنده ETM+ دارای بهترین نتیجه و نزدیک‌ترین برآورد به داده‌های لایسیمیتری می‌باشد. برآوردهای صورت گرفته هم در وضعیت کالیبره از طریق پارامتر L و هم در شرایط عدم کالیبراسیون، در سطح ۹۵ درصد دارای تفاوت معنی‌داری با داده‌های لایسیمیتری هستند. نتایج حاصل از سنجنده MODIS به دلیل خطای کمتر ( $RMSE=1/13mm/day$ ) و همبستگی بالاتر ( $R=0/95$ ) نسبت به ماهواره OLI & TIRS در مقام دوم قرار دارد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که با واسنجی ضریب L برای منطقه مورد نظر می‌توان برآوردهای بدست آمده را به مقادیر واقعی تبخیر-تعرق نزدیک‌تر کرد. نتایج منفی شاخص MBE در هر سه سنجنده نشان از کم برآورد بودن الگوریتم SEBAL نسبت به داده‌های لایسیمیتری دارد که با کالیبراسیون و تصحیح ضریب L مقادیر MBE کاهش یافته است و به مقادیر واقعی نزدیک‌تر شده است. شایان ذکر است که این کم برآورد بودن بیش از حد ممکن است باعث ایجاد تنش آبی در گیاه و کاهش محصول شود؛ بنابراین باید همواره تلاش شود تا فاصله موجود بین برآوردهای سنجنش از دوری و داده‌های لایسیمیتری، با کالیبراسیون برای منطقه مورد نظر کاهش یابد.

در مرحله دوم با ۷۰ درصد از داده‌های بدست آمده از الگوریتم‌های مورد بررسی در هر سه سنجنده معادله کالیبراسیونی با بالاترین همبستگی استخراج شده و در نهایت براساس شاخص‌های آماری با ۳۰ درصد باقیمانده از داده‌های بدست آمده، معادلات مستخرج صحت سنجی شدند.

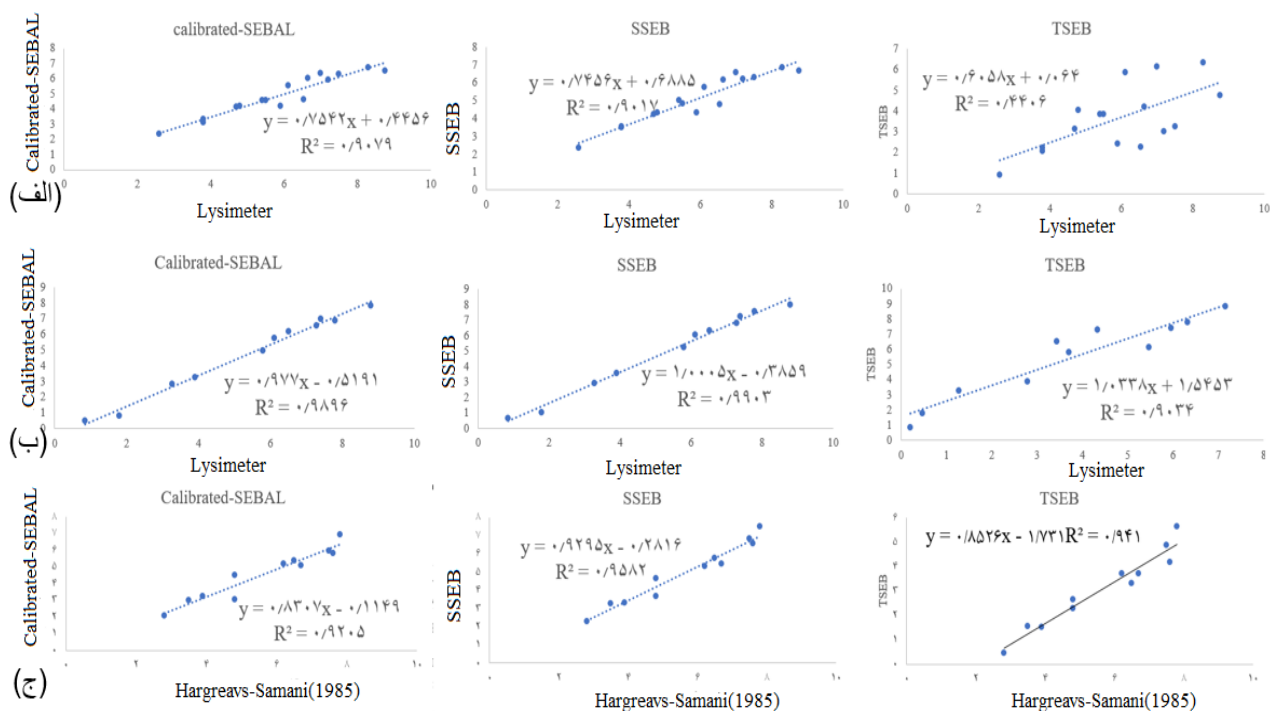
مقایسه نتایج بدست آمده از سه الگوریتم با داده‌های لایسیمیتری کرده و با ۷۰ درصد از داده‌های موجود روابط حاکم بر داده‌های لایسیمیتری و برآوردهای سنجنش از دوری مشخص شده و با ۳۰ درصد باقیمانده از داده‌ها روابط صحت‌سنجی گردیده است. در نهایت مناسب‌ترین الگوریتم بیلان انرژی و سنجنده که نتایج آن با داده‌های قابل اعتماد بیشترین انطباق را داشته‌اند معرفی خواهند شد.

براساس نتایج شاخص‌های آماری ارائه شده در جدول (۳) واسنجی ضریب L با توجه به بازتابش نور در طیف قرمز و مادون قرمز نزدیک از سطح خاک در منطقه و ماه‌های دوره کشت گیاه مرجع، میزان خطا در برآورد تبخیر-تعرق واقعی را در مقابل نتایج بدست آمده با فرضیه  $L=0/5$  (باستیانسن و همکاران، ۲۰۰۰) کاهش داده است. طبق محاسبات و تحقیقات صورت گرفته، هرچه پوشش گیاهی در منطقه متراکم‌تر باشد، مقدار ضریب L به صفر نزدیک‌تر خواهد بود و هرچه این پوشش تنک‌تر باشد این مقدار به یک نزدیک تر می‌باشد (راندیوکس و همکاران، ۱۹۹۶) که نتایج به دست آمده در این تحقیق نیز همین امر را مورد تاکید قرار می‌دهد.

بنابر تحقیقات و نتایج بدست آمده از هر سه سنجنده در دشت قزوین، در اردیبهشت ماه تراکم پوشش گیاهی کمتر از میزان تراکم در ماه تیر است که براساس تعاریف و نتایج بدست آمده مقدار L در ماه اردیبهشت بیشتر از ماه تیر بوده و به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار L را به خود اختصاص داده‌اند. مقادیر بدست آمده با توجه به بازه تعریف شده برای ضریب L صحیح می‌باشد؛ زیرا با افزایش تراکم پوشش گیاهی روی سطح زمین از تاثیر خاک در پس زمینه گیاه کاسته شده و لذا مقدار ضریب L به صفر نزدیک‌تر می‌شود. از آنجایی که در این تحقیق مقادیر فاکتور L برای هر ماه و در هر تصویر با استفاده از رابطه بین مقادیر باندهای مادون قرمز نزدیک و قرمز بدست آمده است لذا

جدول ۳- بررسی تغییرات ضریب L بر روی نتایج تبخیر-تعرق واقعی در الگوریتم *SEBAL*

سنجنده	روش	P-Value	SE (mm/day)	MBE (mm/day)	r (-)	RMSE (mm/day)	MAE (mm/day)	R2 (-)
MODIS	Calibrated-SEBAL	۰/۰۶	۰/۳۵	-۰/۹۷	۰/۹۵	۱/۱۳	۰/۹۷	۰/۹
	SEBAL	۰/۰۱	۰/۶	-۱/۲۸	۰/۹۱	۱/۴۹	۱/۲۸	۰/۸۳
ETM+	Calibrated-SEBAL	۰/۰۴۹	۰/۰۷	-۰/۶۳	۰/۹۹	۰/۶۷	۰/۶۳	۰/۹۹
	SEBAL	۰/۰۳۸	۰/۰۹	-۰/۷۹	۰/۹۹	۰/۸۴	۰/۷۹	۰/۹۸
OLI & TIRS	Calibrated-SEBAL	۰/۰۳۷	۰/۱۶	-۱/۲۵	۰/۹۶	۱/۳۵	۱/۲۵	۰/۹۲
	SEBAL	۰/۰۰۸	۰/۲۱	-۱/۶۹	۰/۹۵	۱/۷۶	۱/۶۹	۰/۹۱



شکل ۶- مقایسه مقادیر برآورد شده حاصل از اجرای الگوریتم‌های مختلف در سنجنده (الف) MODIS، (ب) ETM+ با نتایج بدست آمده از لایسیمتر و (ج) مقادیر حاصل از اجرای الگوریتم‌ها در سنجنده OLI&TIRS با نتایج بدست آمده از روش تجربی هارگریوز سامانی

برای تمامی الگوریتم‌ها به جز الگوریتم TSEB در سنجنده ETM+ (MBE=۱/۶۱) منفی بوده و این نشان از کم‌برآورد بودن داده‌های پیش‌بینی شده براساس معادلات رگرسیونی است. مقدار ضرایب کالیبراسیون و همبستگی برای هر سه الگوریتم و هر سه سنجنده نزدیک به یک بوده که به دلیل کم بودن تعداد داده‌های موجود برای صحت‌سنجی رخ داده است.

در مرحله آخر به بررسی نتایج هر سه سنجنده و معرفی سنجنده و الگوریتم برتر در منطقه پرداخته می‌شود.

طبق بررسی‌های آماری صورت گرفته در سطح ۹۹ درصد نتایج تمامی داده‌های پیش‌بینی شده براساس معادله‌های رگرسیونی در هر سه سنجنده با داده‌های بدست آمده از الگوریتم‌ها، تفاوت معنی داری دارند. همچنین میزان خطا برای الگوریتم SSEB در هر سه سنجنده کوچکتر از یک است که این نشان از برآورد مناسب و معادله رگرسیونی دقیق برای این الگوریتم می‌باشد. پس از الگوریتم SSEB، الگوریتم SEBAL کالیبره شده در منطقه دارای نتایج مناسب‌تری بوده است. همچنین مقدار MBE

در سنجنده ETM+ نیز الگوریتم TSEB دارای جذر خطای میانگین مربعات (۱/۹۳) بیشتر از یک است که نسبت به مقدار جذر خطای میانگین مربعات دو الگوریتم SEBAL و SSEB (۰/۶۷ و ۰/۴۱ میلی‌متر بر روز) بیشتر است و از نظر این معیار نسبت به داده‌های لایسیمیتری با ضعف رو به رو می‌باشد. برطبق مقادیر بدست آمده از آنالیز ارزش احتمال واریانس (P-Value)، سه الگوریتم با داده‌برداری لایسیمیتر در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار و احتمال وقوع آن به طور تصادفی بسیار اندک بوده است. از نظر سایر معیارهای واسنجی همچون میانگین خطای مطلق، خطای اریب میانگین و خطای استاندارد برای الگوریتم SSEB (به ترتیب ۰/۳۵، ۰/۳۵- و ۰/۰۱۷ میلی‌متر بر روز) برآورد شده که از نظر هر سه شاخص این الگوریتم دارای کمترین مقدار خطا نسبت به دو الگوریتم دیگر می‌باشد. همچنین با توجه به ضریب رگرسیون، الگوریتم SSEB می‌تواند پیش‌بینی و تخمین نزدیک‌تری نسبت به داده‌های لایسیمیتری داشته باشد. به طور کلی الگوریتم SSEB در این سنجنده نیز نتایج بهتر و خطای کمتری از خود نشان داد. در شکل (۸) نموداری از برآورد سه الگوریتم SEBAL، SSEB و TSEB برای سنجنده ETM+ در مقایسه با نتایج لایسیمیتری ارائه شده است.

از آنجایی که تصاویر سنجنده OLI&TIRS از فوریه سال ۲۰۱۳ در اختیار قرار دارند و از سوی دیگر در این تاریخ داده‌برداری لایسیمیتری در منطقه وجود ندارد لذا با توجه به تحقیق نظری و کاویانی (۱۳۹۵) مقادیر تبخیر-تعرق حاصل از روش هارگریوزسامانی به عنوان داده‌های قابل اعتماد برای مقایسه نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌های سه‌گانه بر روی سنجنده OLI&TIRS مورد استفاده قرار گرفته است. بر همین اساس در سنجنده OLI & TIRS نیز نتایج شاخص‌های آماری نشان می‌دهد که الگوریتم TSEB حاصل از تصاویر لندست ۸ دارای مقدار جذر خطای میانگین مربعات (۲/۷۲ میلی‌متر بر روز) بیشتری از دو الگوریتم SEBAL و SSEB (۱/۳۵ و ۰/۹۲ میلی‌متر بر روز) است. مقدار پارامتر ضریب همبستگی در

نتایج شاخص‌های آماری در جدول (۵) برای سنجنده MODIS بیانگر این مطلب است که الگوریتم TSEB با مقدار جذر خطای میانگین مربعات (۲/۴۴ میلی‌متر بر روز) بیشتر نسبت به مقدار جذر خطای میانگین مربعات دو الگوریتم SSEB و SEBAL (به ترتیب ۰/۸۷ و ۱/۱۳ میلی‌متر بر روز) از نظر این معیار با ضعف رو به رو می‌باشد. همچنین در مقایسه بین دو الگوریتم SSEB و SEBAL نیز الگوریتم SSEB خطای کمتری نسبت به SEBAL داشته است. لذا می‌توان گفت که در سنجنده MODIS الگوریتم SSEB از دقت بالاتری نسبت به الگوریتم‌های SEBAL و TSEB برخوردار است. علاوه بر این می‌توان اذعان داشت که الگوریتم SEBAL نیز دقت بهتری نسبت به الگوریتم TSEB داشته است. نتایج آنالیز واریانس سه الگوریتم با داده‌برداری لایسیمیتر در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار است. از نظر سایر معیارهای واسنجی از قبیل میانگین خطای مطلق، خطای انحراف میانگین و خطای استاندارد الگوریتم TSEB (به ترتیب ۲/۱۵، ۲/۱۵-، ۱/۵۸ میلی‌متر بر روز) نسبت به همین مقادیر در دو الگوریتم SEBAL و SSEB (به ترتیب ۰/۹۷، ۰/۹۷-، ۰/۳۵ میلی‌متر بر روز) و (به ترتیب ۰/۶۸، ۰/۶۸-، ۰/۳ میلی‌متر بر روز) با خطای بیشتری همراه است، همچنین الگوریتم SSEB نسبت به هر دو الگوریتم مذکور دارای خطای کمتری است. در بررسی شاخص ضریب همبستگی نیز الگوریتم SSEB (۰/۹۶) دارای همبستگی بالاتری نسبت به دو الگوریتم دیگر است. در نتیجه این الگوریتم برای پیش‌بینی و تخمین تبخیر-تعرق پتانسیل نسبت به داده‌های لایسیمیتری مناسب‌تر و دقیق‌تر است. به طور کلی می‌توان الگوریتم SSEB را به عنوان کم‌خطاترین الگوریتم در برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل حاصل از تصاویر سنجنده MODIS نسبت به داده‌های لایسیمیتری دانست که نتایج قابل قبول‌تری را ارائه می‌دهد. شکل (۷) روند برآورد سه الگوریتم SEBAL، SSEB و TSEB را برای سنجنده MODIS در مقایسه با نتایج لایسیمیتری نشان می‌دهد.

هستند. به‌طور کلی الگوریتم SSEB حاصل از تصاویر OLI&TIRS دقت بالاتری نسبت به دو الگوریتم دیگر دارد. شکل (۹) نمودار برآورد سه الگوریتم SEBAL، SSEB و TSEB حاصل از این تصاویر در مقایسه با نتایج روش هارگریوز سامانی (۱۹۸۵) ارائه شده است.

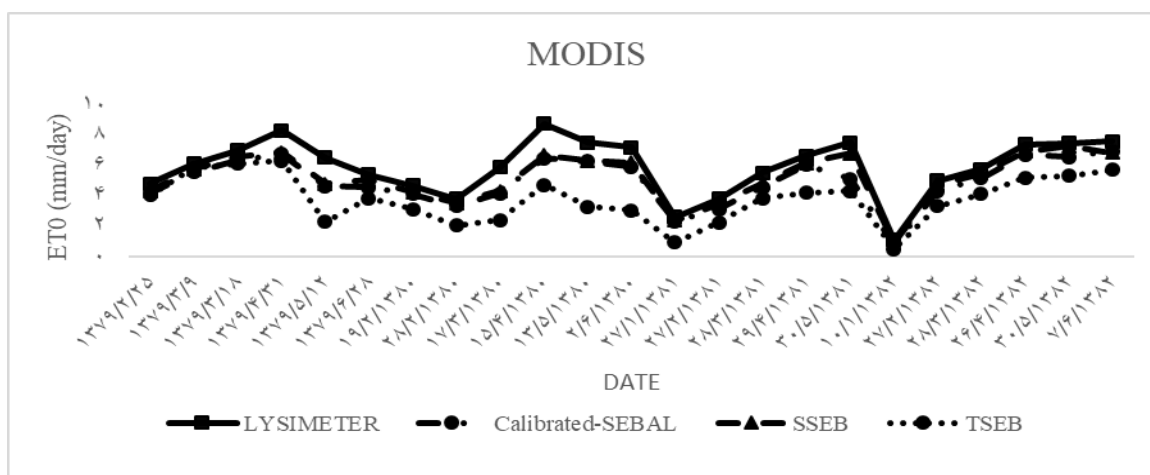
هر سه الگوریتم SEBAL، SSEB و TSEB (به ترتیب ۰/۹۶، ۰/۹۷ و ۰/۹۷) تقریباً برابر است و هر سه ضریب همبستگی بالایی را به خود اختصاص داده‌اند. طبق مقادیر بدست آمده ارزش احتمال (P-Value) اختلاف نتایج آنالیز واریانس سه الگوریتم با نتایج روش تجربی هارگریوز سامانی (۱۹۸۵) در سطح معنی داری ۹۵ درصد معنی دار

جدول ۴- صحت‌سنجی معادلات کالیبراسیون براساس شاخص‌های آماری

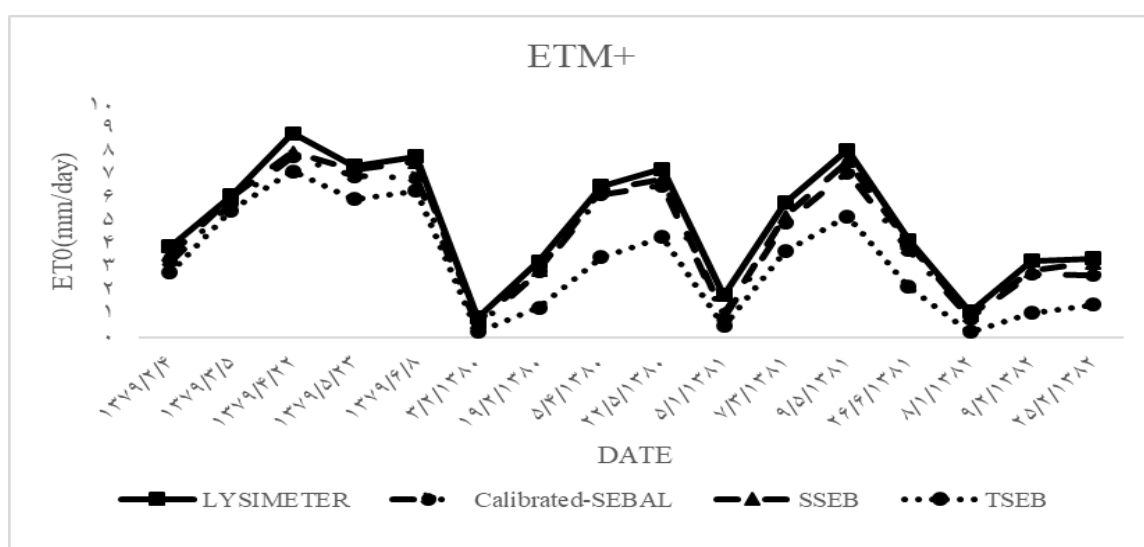
R2 (-)	MAE (MM/DAY)	RMSE (MM/DAY)	R (-)	MBE (MM/DAY)	P-VALUE	روش	سنجنده
۱	۰/۸۷	۰/۹۴	۱	-۰/۸	۰/۰۰۴	Calibrated SEBAL	MODIS
۱	۰/۳۶	۰/۹	۱	-۰/۷۲	۰/۰۰۵	SSEB	
۱	۱/۵۴	۱/۶۷	۱	-۱/۵۴	۰/۰۰۷	TSEB	
۱	۰/۵۹	۰/۵۹	۱	-۰/۵۹	۰/۰۰۶	Calibrated SEBAL	ETM+
۱	۰/۳۶	۰/۳۶	۱	-۰/۳۶	۰/۰۰۸	SSEB	
۱	۱/۶۱	۱/۶۱	۱	۱/۶۱	۰/۰۰۲	TSEB	
۱	۱/۰۸	۱/۰۹	۱	-۱/۰۸۳	۰/۰۱۳	Calibrated SEBAL	OLI & TIRS
۱	۰/۷۲	۰/۷۲	۱	-۰/۷۲	۰/۰۱۸	SSEB	
۱	۲/۳۸	۲/۳۸	۱	-۲/۳۸	۰/۰۰۱	TSEB	

جدول ۵- مقایسه نتایج تبخیر-تعرق محاسبه شده به روش الگوریتم SEBAL، SSEB و TSEB در سه سنجنده MODIS، ETM+ و OLI & TIRS نسبت به داده برداری لایسمتری

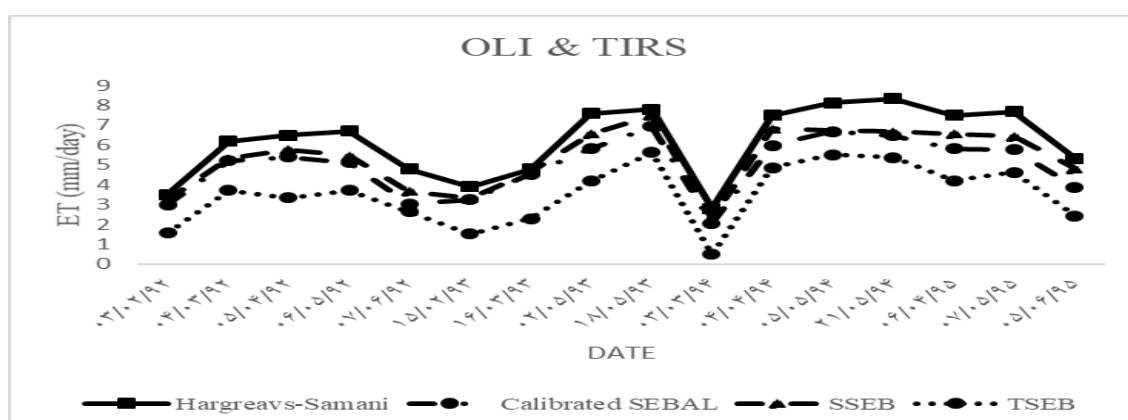
R2 (-)	MAE (MM/DAY)	RMSE (MM/DAY)	R (-)	MBE (MM/DAY)	SE (MM/DAY)	P-VALUE	روش	سنجنده
۰/۹۰	۰/۹۷	۱/۱۳	۰/۹۵	-۰/۹۷	۰/۳۵	۰/۰۰۶	Calibrated SEBAL	MODIS
۰/۹۲	۰/۶۸	۰/۸۷	۰/۹۶	-۰/۶۸	۰/۳	۰/۰۱۸	SSEB	
۰/۶	۲/۱۵	۲/۴۴	۰/۷۷	-۲/۱۵	۱/۵۸	۰/۰۰۰۱	TSEB	
۰/۹۹	۰/۶۳	۰/۶۷	۰/۹۹	-۰/۶۳	۰/۰۷	۰/۰۴۹	Calibrated SEBAL	ETM+
۰/۹۹	۰/۳۵	۰/۴۱	۰/۹۹	-۰/۳۲	۰/۰۵	۰/۰۱۷	SSEB	
۰/۹۱	۱/۷۷	۱/۹۳	۰/۹۵	-۱/۷۷	۰/۵۱	۰/۰۰۵	TSEB	
۰/۹۲	۱/۲۵	۱/۳۵	۰/۹۶	-۱/۲۵	۰/۱۶	۰/۰۲۷	Calibrated SEBAL	OLI & TIRS
۰/۹۴	۰/۸۲	۰/۹۲	۰/۹۷	-۰/۸۲	۰/۱۳	۰/۰۱۷	SSEB	
۰/۹۴	۲/۶۸	۲/۷۲	۰/۹۷	-۲/۶۸	۰/۱۳	۰/۰۰۰۰۸	TSEB	



شکل ۷- روند برآورد سه الگوریتم SEBAL، SSEB و TSEB حاصل از تصاویر MODIS در مقایسه با نتایج لایسیمتر



شکل ۸- روند برآورد سه الگوریتم SEBAL، SSEB و TSEB حاصل از تصاویر لندست ۷ در مقایسه با نتایج لایسیمتر



شکل ۹- روند برآورد سه الگوریتم SEBAL، SSEB و TSEB حاصل از تصاویر لندست ۸ در مقایسه با نتایج هارگریوز سامانی (۱۹۸۵)

هارگریوز سامانی نزدیکتر بوده و از دقت بالاتری برخوردار است.

همانطور که در سه شکل مشخص است برآوردهای بدست آمده از الگوریتم SSEB نسبت به دو الگوریتم دیگر به داده‌های لایسیمتری و نتایج روش تجربی



دقت این دو الگوریتم، الگوریتم SSEB دقت و همبستگی بالاتری داشت. همچنین تصاویر سنجنده ETM+ در ماهواره لندست ۷ به دلیل قدرت تفکیک مکانی بالاتر نتایج بهتری نشان دادند. در این تحقیق به طور کلی در هر سه سنجنده مورد بررسی الگوریتم SSEB نتایجی با دقت و همبستگی بالاتر با داده‌های لایسمتری داشت و به عنوان الگوریتم برتر برای برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع در سطح دشت قزوین توصیه می‌شود. با توجه به اینکه الگوریتم SEBAL در مقابل دو الگوریتم دیگر به داده‌های زمینی بیشتری نیاز دارد و برای دستیابی به نتیجه محاسبات پیچیده و تکراری نیاز است؛ لذا در مناطقی که دسترسی به اطلاعات هواشناسی سخت است، توصیه نمی‌شود و کاربرد روش SSEB مدنظر قرار گیرد. همچنین در الگوریتم SEBAL با توجه به اهمیت پارامتر SAVI و تاثیر المان L بر روی آن اقدام به کالیبره پارامتر L در هر سه سنجنده ETM+، MODIS و OLI & TIRS شد که در نهایت نتایج شاخص‌های آماری تاثیر مثبت کالیبراسیون این پارامتر را در نتایج نهایی برآوردهای تبخیر-تعرق تایید کردند. در بررسی خطای الگوریتم‌های تک منبعی و دومنبعی، الگوریتم دو منبعی TSEB با مقدار خطای (۲/۴۴، ۱/۹۳ و ۲/۷۲) میلی‌متر بر روز، در هر سه سنجنده مورد بررسی، عملکرد ضعیف‌تری نسبت به الگوریتم‌های تک منبعی داشته است. با توجه به اینکه در این الگوریتم، خاک و گیاه به عنوان دو منبع جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد و تمامی محاسبات در برآورد میزان تبخیر و تعرق بر این اساس صورت می‌گیرد لذا پیچیدگی و طولانی شدن اجرای مراحل این الگوریتم و همچنین الزام استفاده از داده‌های زمینی بیشتر، باعث ایجاد خطای بالاتری در این الگوریتم شده است.

به‌طور کلی مقادیر شاخص‌های آماری جدول (۳)، نشان دهنده وضعیت پذیرفتنی و عملکرد منطقی هر سه الگوریتم در زمینه برآورد تبخیر-تعرق واقعی است و خطای پایین آن‌ها مؤید همین مطلب است. دو الگوریتم SEBAL و TSEB روندی پیچیده و طولانی داشته و نیاز مبرمی به داده‌های زمینی دارند لذا امکان خطای انسانی علاوه بر خطای محاسباتی در روند اجرای آنها می‌تواند در برآورد تبخیر-تعرق مشکلاتی را ایجاد کند اما الگوریتم SSEB به دلیل کوتاه بودن روند محاسباتی، خطای کمتری داشته و با دقت بیشتری نسبت دو الگوریتم دیگر برآوردهای دقیق‌تری خواهد داشت. البته لازم به ذکر است در روند محاسبات این الگوریتم انتخاب مناسب‌ترین پیکسل سرد و گرم، در نتایج انتهایی بسیار تاثیر گذار می‌باشد. از آنجا که افزایش عملکرد گیاهان زراعی مستلزم شناخت روش‌های مدیریتی مناسب است که از جمله مهم-ترین آن‌ها روش و رژیم مناسب آبیاری است (نجفی و مداحیان ۱۳۸۲) و با توجه به اینکه کمبود آب یکی از مهم-ترین علل کاهش عملکرد گیاهان در مناطق خشک و نیمه خشک به‌شمار می‌رود (Umar, 2006 و FAO, 1998) لذا به دلیل برآورد کمتر تبخیر-تعرق در الگوریتم SEBAL امکان ایجاد تنش خشکی و کاهش محصول در دشت قزوین وجود دارد. همچنین در مقایسه عملکرد سه سنجنده می‌توان اذعان داشت که با توجه به افزایش قدرت تفکیک مکانی و بهبود وضوح تصاویر، توصیه می‌شود از سنجنده ETM+ ماهواره لندست ۷ با توجه به قدرت تفکیک مکانی بالایی که داراست، برای برآورد تبخیر و تعرق استفاده شود.

### نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهند که هر دو الگوریتم SEBAL و TSEB برآورد مناسبی در منطقه داشتند ولی در مقایسه

## فهرست منابع

۱. ابراهیمی پاک، ن. ع.، (۱۳۷۹). تعیین تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع (چمن) به روش لایسیمتر و مقایسه با روش‌های تجربی در قزوین. وزارت جهاد کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی قزوین
۲. ابراهیمی، ح. یزدانی، و (۱۳۹۰). محاسبه تبخیر-تعرق فضای سبز به روش SEBAL (مطالعه موردی: پارک ملت مشهد). مجله پژوهش‌های آب و خاک (۱۳۹۲) جلد ۲. شماره ۳.
۳. حسن‌پور، ب. میرزایی، ف. ارشد، ص و کوثری، ه. (۱۳۸۸). مقایسه الگوریتم‌های SEBAL و SSEB در برآورد تبخیر-تعرق در منطقه کرج. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). اسفند ۱۳۹۱. جلد ۲۶. ص ۱۳۷۱-۱۳۶۰
۴. سیمایی، ا. همایی، م و نوروزی ع. ا. (۱۳۹۲) ارزیابی روش‌های برآورد تبخیر-تعرق با استفاده از اطلاعات سنجنده‌های TM و MODIS. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال دوم، شماره ۴، تابستان ۱۳۹۲، ص ۲۹-۴۰.
۵. عصاره مستقیم م.، رحیمی خوب ع.، عصاره مستقیم ل. ۱۳۹۵ استفاده از الگوریتم SSEB جهت بررسی روند تغییرات پوشش گیاهی مزرعه نیشکر امیرکبیر با استفاده از تکنیک سنجنش از دور. دومین همایش ملی مقابله با بیابان‌زایی و توسعه پایدار تالاب‌های کویری ایران. ۱۴۲۹-۱۴۲۵
۶. علوی پناه، سیدکاظم. (۱۳۹۱). اصول سنجنش از دور نوین و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی. انتشارات دانشگاه تهران
۷. علیزاده، ا. ۱۳۸۵. طراحی سیستم‌های آبیاری، جلد اول، انتشارات آستان قدس رضوی، ۴۶۰ ص.
۸. علیزاده، ا.، ۱۳۸۳ اصول هیدرولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه امام رضا، چاپ هفدهم. صفحات ۴۸۹
۹. کاویانی، ع. سهرابی، ت. دانشکار آراسته، پ. (۱۳۹۲). تخمین دمای سطح زمین با استفاده از شاخص نرمال شده (NDVI) در تصاویر سنجنده‌های MODIS و ETM+. مجله هواشناسی کشاورزی. جلد ۱. شماره ۱. بهار و تابستان ۱۳۹۲. صفحه‌های ۲۵-۱۴
۱۰. کرباسی م.، مقدم م.، نیکبخت ج.، کاویانی ع. (۱۳۹۵) تخمین تبخیر-تعرق با استفاده از الگوریتم SEBAL (مطالعه موردی منطقه خرم‌دره در استان زنجان. مجله اکوهیدرولوژی. ۳(۳): ۴۳۷-۴۲۷.
۱۱. کاویانی، ع. سهرابی. ت و دانش کار آراسته. پ. (۱۳۹۰) کاربرد الگوریتم SEBAL در تخمین تبخیر - تعرق و بهره‌وری آب کشاورزی در دشت قزوین و مقایسه نتایج آن با داده‌های لایسیمتر. مجله آبیاری و زهکشی ایران، جلد ۵، شماره ۲، صفحه‌های ۱۶۵ تا ۱۷۵.
۱۲. میریعقوب زاده، م. م.، م. ر.، قنبرپور. (۱۳۸۸). بکارگیری داده‌های سنجنش از دور در برآورد دمای سطح اراضی (مطالعه موردی حوزه آبخیز وردین، آذربایجان شرقی). مجله علمی پژوهشی مرتع، ۷۳۴-۷۲۳: ۴.
13. Allen, R., Tasumi, M, Morse, A. and Trezza, R. (2003). A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. Irrigation and Drainage Systems.
14. Allen, R., Tasumi, M. and Trezza, R. (2002) SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) Advanced Training and User's Manual—Idaho Implementation, Version 1.0.
15. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, 56, Rome, Italy, 300 p

16. Bagheri H., M.H., (2012), Assessment of Remote Sensing Technique for Estimation of Water Balance Components in Basin Scale, Emphasizing on Net Groundwater Exploitation: a case study on Urmia lake basin, Master of Science Thesis, University of Tarbiat Modares, 126.
17. Bastiaanssen, W. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *J Hydrol* **229**: 87–100.
18. Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A. and Holtslag, A.A.M. (1998) A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212-213, 198-212.
19. Bastiaanssen, W.G.M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J.F., Roenink, G.J. and van der Wal, T. (1998). Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 2. Validation. *Journal of Hydrology*, 212-213, 213-229
20. Bastiaanssen, W. G. M, and Chandrapala, L. (2003). water balance variability across Sri Lanka for assessing agricultural and environmental water use. *Agric Water management* 58(2):171-191.
21. Bastiaanssen, W. G. M, and Chandrapala, L. (2003). water balance variability across Sri Lanka for assessing agricultural and environmental water use. *Agric Water management* 58(2):171-191.
22. Betts, A. K., J. H. Ball, and A. C. M. Beljaars, Comparison between the land surface response of the ECMWF model and the FIFE-(1987) data, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 119, 975-1001, 1993.
23. Bezerra, B.G., Silva, B., Santos, C., Bezerra, J. (2015). Actual Evapotranspiration Estimation Using Remote Sensing: Comparison of SEBAL and SSEB Approaches. *Advances in Remote Sensing*, Vol.4 (3), 234-247
24. Casa, R. Rossi, M. Sappa, G. Trotta, A. (2008). Assessing Crop water Demand by Remote Sensing and GIS for the Pontina Plain, Central Italy. *Water resource management*, July 2009, Vol 23, Issue 9, pp 685-1712.
25. Colaizzi, P. D., Kustas, W. P., Anderson, M. C., Agam, N., Tolck, J. A., Evett, S. R., Howell, T. A., Gowda, P. H., and O'Shaughnessy, S. A.: Two-source energy balance model estimates of evapotranspiration using component and composite surface temperatures, *Adv. Water Resour.*, 50, 134–151, doi:10.1016/j.advwatres.2012.06.004, (2012a).
26. French, A., Jacob, F., Anderson, M., Kustas, W., Timmermans, W., Gieske, A., Su, Z., Su, H., McCabe, M. and Li, F. (2005). Surface energy fluxes with the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer (ASTER) at the Iowa 2002 SMACEX site (USA). *Remote Sensing of Environment*, 99: 55-65
27. Gowda, P., Senay, G., Howell, T., Marek, T.H. (2009). Lysimetric Evaluation of Simplified surface Energy Balance Approach in the TEXAS High Plains. *Applied Engineering in agriculture*, 25(5):665-669
28. Huntingford, C., Verhoef, A. and Stewart, J. 2000. Dual versus single source models for estimating surface temperature of African savannah. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4:185-191.
29. Kustas, W. P. and Anderson, M.: Advances in thermal infrared remote sensing for land surface modeling, *Agr. Forest Meteorol.*, 149, 2071–2081, doi:10.1016/j.agrformet.2009.05.016, 2009
30. Kustas, W.P. Anderson, M.C. Cammalleri, C. Alfieri, J.G. (2013). Utility of a Thermal-base Two- source Energy Balance Model for Estimating Surface flux over Complex Landscapes. *Procedia Environmental science*. Vol. 19, 2013. Pp224-230.
31. Li, F., Kustas, W. P., Prueger, J. H., Neale, C. M., and Jackson, T.J.: Utility of remote sensing-based two-source energy balance model under low- and high-vegetation cover conditions, *J. Hydrometeorol.*, 6, 878–891, doi:10.1175/JHM464.1, 2005.
32. Norman, J.M., Kustas, W.P. and Humes, K.S. (1995). Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77: 263-293
33. Qi J, Chehbouni A., Huete A.R., Kerr Y.H., 1994. Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI). *Remote Sens Environ* 48:119-126

34. Senay, G.B., Budde, M., Verdin, J.P. and Melesse, A. (2007) A Coupled Remote Sensing and Simplified Surface Energy Balance Approach to Estimate Actual Evapotranspiration from Irrigated Fields. *Sensors*, 7, 979-1000.
35. Stewart J.L., Watts C.J., Rodriguer J.C., De Bruin H.A.R., Van De Berg A.R., and Garatuza-Payan J. 1999. Use of satellite data to estimate radiation and evaporation for Northwest Mexico. *Agricultural Water Management*, 38:181-193
36. Trezza, R. and Allen, R. (2003). Crop Water Requirement from A Remote Sensing Model for the SNAKE PLAIN AREA IN IDAHO *Geoenseñanza*, año/vol. 8,number 1 Universidad de los Andes San Cristobal, Venezuela. *GEOENSEÑANZA*, 8: 83-90
37. Wenjing L., "Sattelite based Regional-Scale Evapotranspiration in the Hebi Plain, Northeastern China" ,MSc Thesis, Geo-Information science and Earth Observation, international institute for Geo-Information science and Earth Observation Enschede , the Netherland, 2006

## Estimation of Actual Evapotranspiration Using Satellite Imageries and Single-Source and Two-Source Surface Energy Balance Algorithms in Qazvin Plain

**B. Bahmanabadi<sup>1</sup>\*, A. Kaviani, P. Daneshkararasteh and R. Nazari**

MSc graduated student of Irrigation and Drainage Dept., Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

**b.bahmanabadi@gmail.com**

Assistant Prof., Water Engineering Dept., Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

**abbaskaviani@gmail.com**

Associate Prof., Water Engineering Dept., Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

**arasteh1348@yahoo.com**

PhD. candidate in irrigation and drainage, Water Engineering Dept, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

**nazarirasta@yahoo.com**

### Abstract

Reference Evapotranspiration is a complex and multivariate phenomenon that depends on several factors and the most accurate way to estimate is lysimeter, though it is costly and time-consuming. Therefore, the main objective of this study was to estimate actual evapotranspiration based on single-source energy balance, i.e. SEBAL and SSEB, and two-source energy balance algorithm, i.e. TSEB, in three sensors MODIS, ETM+ and OLI & TIRS in three steps. In evapotranspiration estimating by SEBAL, Soil Adjusted Vegetation Index and the correction factor for soil effects (L) are particularly important. For this purpose, this index was used as calibration coefficient that is selected based on percentage of vegetation coverage. According to the results, the actual evapotranspiration with L calibrated (L=0/5) had lower error in each of the three sensors (RMSE=1/76, 0/84, and 1/49 mm/day). For verification of calibration results, 30% of the remaining lysimeter data was used. The results of the statistical indices showed significant difference between the predicted data at the 95% level and also in the predictions. Finally, by comparing the three algorithms in the three sensors i.e. MODIS, ETM +, and OLI & TIRS, SSEB algorithm in ETM + sensor was introduced as the best algorithm in Qazvin plain area, at 95% significance level and RMSE of 0/41 mm/day.

**Keywords:** SEBAL, SSEB, TSEB, SAVI, Soil Adjusted Vegetation Index

---

1 - Corresponding Author: water engineering Dept. of Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

\*- Received: December 2017 :and Accepted: May 2018