

نشریه علمی-پژوهشی

تخمین تبخیر و تعرق واقعی بر اساس الگوریتم‌های تک منبعی و دومنبعی سنجش از دوری (مطالعه موردی: برازجان)

بهاره بهمن آبادی^۱ - عباس کاویانی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۲

چکیده

شناخت و ارزیابی تبخیر و تعرق از سطوح گیاهی یک ابزار اساسی در محاسبه بیلان آب و تخمین نیاز آبی و دسترسی به آن است. در این تحقیق به منظور بررسی توزیع مکانی تبخیر و تعرق و رابطه آن با سنجش از دور در مقابل داده‌های لایسیمیتری به عنوان شاهد در منطقه برازجان واقع در استان بوشهر، ایران انجام شد. در این پژوهش از ۴۶ تصویر بدون ابر و روزانه از سنجنده MODIS، ۷ تصویر از سنجنده ETM+ و ۷ تصویر از سنجنده TM در طول فصل رشد از ماه فروردین تا شهریور در خلال سال‌های ۸۰ تا ۸۲ استفاده شده است. براساس نتایج بدست آمده از اجرای سه مدل SEBAL، SSEB و TSEB در هر سه ماهواره، سنجنده MODIS دارای کمترین میزان خطا بوده (به ترتیب برای هر سه الگوریتم RMSE=0.856, 1.385, 2.7 mm/day) و پس از آن ماهواره لندست ۷ با قدرت تفکیک مکانی بالاتر در رده دوم قرار می‌گیرد (به ترتیب برای هر سه الگوریتم RMSE=1.042, 1.56, 2.76 mm/day) و در نهایت ماهواره لندست ۵ بیشترین میزان خطا را به خود اختصاص می‌دهد (به ترتیب برای هر سه الگوریتم RMSE=1.14, 1.97, 3.06 mm/day). در بررسی وضعیت پوشش گیاهی براساس شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی، در ابتدای دوره کشت به دلیل جوانه‌زنی و تنک بودن پوشش گیاهی، این شاخص در پایین‌ترین حد خود قرار دارد و به ترتیب با افزایش دمای هوا و میزان پوشش گیاهی، این شاخص رو به افزایش است. فاکتور L اهمیت به‌سزایی در برآورد شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده برحسب خاک و در نهایت، صحت‌سنجی برآوردهای بدست آمده تبخیر و تعرق برای منطقه مورد مطالعه دارد که به پوشش منطقه وابسته است. در این تحقیق برای منطقه مورد مطالعه مقدار L=0.6 تخمین زده شد که در مقایسه با دیگر مقادیر مورد بررسی، دارای کمترین مقدار خطا بود (RMSE=0.6). الگوریتم SEBAL نسبت به سه الگوریتم دیگر به داده‌های لایسیمیتری نزدیکتر بوده و از دقت بالاتری برخوردار است. عملکرد مناسب الگوریتم SEBAL به دلیل جزئی‌نگری در فرمولاسیون و اجرای این الگوریتم بوده است. الگوریتم SSEB براساس تئوری ساده‌تر و بر مبنای انرژی حرارتی سطح زمین بوده که نسبت به الگوریتم SEBAL در رده دوم قرار می‌گیرد. الگوریتم دومنبعی ضعیف‌ترین نتایج را در میان الگوریتم‌ها از خود نشان داد. در مقایسه عملکرد تصاویر ماهواره‌ای بطور کلی سنجنده MODIS به دلیل قدرت تفکیک زمانی مناسب و تعدد تصاویر نسبت به دو سنجنده ETM+ و TM و ارائه سری زمانی بیشتر، برای برآورد تبخیر و تعرق در مقیاس منطقه‌ای مناسب می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: TSEB, SEBAL, SEBS, SAVI, NDVI

مقدمه

گیاه مترادف با برآورد مقدار نیاز آبی است که باید به یک پوشش گیاهی داده‌شود تا در زمان معین صرف تبخیر و تعرق نموده و بدون آنکه با تنش آبی مواجه شود رشد خود را تکمیل نموده و حداکثر مقدار محصول را تولید کند (۲). گیاه مرجع یک گیاه فرضی به ارتفاع ۱۲ سانتی متر، مقاومت سطحی ۷۰ ثانیه بر متر و البیدو ۰.۲۳ است (۲). لذا ضرورت تخمین دقیق نیاز آبی گیاهان براساس شرایط تغذیه ای خاک، وضعیت تنش های گیاهی و عوامل اقلیمی از اهمیت بیشتری برخوردار است. از آنجایی که این پارامتر اهمیت به‌سزایی در برنامه‌ریزی‌های توسعه آبیاری، مدیریت و برنامه‌ریزی سیستم‌های آبیاری و سایر سیستم‌های توزیع و کاربرد آب دارد از اهمیت ویژه‌ای

تبخیر و تعرق فرآیند انتقال رطوبت به محیط از سطح زمین و پوشش گیاهی است (۲۶) و یکی از متغیرهای اصلی در محاسبه بیلان آب و انرژی سطح زمین محسوب می‌شود. تخمین تبخیر و تعرق مرجع

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی و استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

*- نویسنده مسئول: ... (Email: abbasskaviani@gmail.com..)

DOI: 10.22067/jsw.v34i2.82156

الگوریتم SEBAL با تصاویر سنجنده‌های متفاوتی در مناطق مختلف دنیا بکار برده شده و یافته‌های مطلوبی ارائه کرده است (۳۶). در سال ۲۰۰۵ باستانسن، الگوریتم SEBAL را در بیش از ۳۰ کشور در مقیاس منطقه‌ای و مزرعه مورد بررسی قرار داد. دقت نتایج بدست آمده در مقایسه با اندازه‌گیری‌های روزانه، در مقیاس مزرعه ۸۵ درصد و در مقیاس محلی تا ۹۶ درصد را به نمایش گذاشت (۷). در سال ۲۰۱۲ راهوف و همکاران به بررسی مقدار تبخیر و تعرق بر اساس مدل SEBAL و تصاویر مودیس در برزیل پرداختند که در نهایت نتایج بدست آمده از SEBAL و روش همبستگی ادی برای گیاه نیشکر همبستگی ($0.76 < R^2 < 0.66$) را نشان داد و محققان دریافتند که شاخص‌های گیاهی، گرادیان دما و شار تابش خالص از مهمترین حساس‌ترین ورودی‌ها در این مدل هستند (۳۲). بیل و همکاران (۲۰۱۵) به این نتیجه رسیدند که الگوریتم SEBAL در مقایسه با داده‌های لایسمتری توانایی تخمین توزیع مکانی تبخیر و تعرق را دارد (۶). در ملایر مقادیر برآورد شده تبخیر و تعرق واقعی از روش SEBAL با رابطه پنمن مانیت-فائو مقایسه شد که نتایج نشان داد اختلاف بسیار کمی بین مقادیر وجود دارد (۳۰). عبدلی و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از تصاویر MODIS و لندست ۷ (ETM+) تبخیر و تعرق واقعی را در اراضی تحت پوشش شبکه‌های آبیاری حوضه هیدرولوژیک رودخانه زاینده‌رود برآورد نمودند که نتایج مشابهی از مدل SEBAL با معادله تجربی پنمن-مانیت حاصل شد (۱). محسنی ساروی و همکاران (۲۰۱۰) با کاربرد مدل SEBAL در برآورد تبخیر و تعرق در حوضه آبخیز طالقان با استفاده از تصاویر MODIS نتیجه گرفتند که مقادیر برآوردی با داده‌های اندازه‌گیری شده (از لایسمتری) دارای همبستگی بالایی بوده‌اند (۲۸). نوری و همکاران ۲۰۱۷ و ثنائی‌نژاد و همکاران ۲۰۱۱ با استفاده از تصاویر MODIS نتیجه گرفتند مدل SEBAL برای برآورد تبخیر و تعرق در سطح منطقه (حوضه آبخیز مشهد) مناسب می‌باشد (۳۰ و ۳۳). مباحثی و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از مدل SEBAL و تصاویر ماهواره لندست ۵ (TM) در دشت خوزستان تبخیر و تعرق واقعی را برآورد نموده و مدل SEBAL را مناسب ارزیابی کردند (۲۷).

الگوریتم تک‌منبعی دیگری که در این تحقیق به آن توجه شده است الگوریتم ساده شده بیلان انرژی (SSEB) می‌باشد. SSEB برای مطالعات منطقه‌ای و بررسی اثرات محدودیت منابع آب بر روی عملکرد گیاه بسیار کاربردی است. این روش بر مبنای فرضیه تغییرات خطی شار گرمایی نهان و تغییرات سطح می‌باشد. این روش متضمن این موضوع است که دمای سطح زمین با رطوبت خاک و بعد از آن با شارهای اتمسفر در ارتباط است (۳۴). گوادا و همکاران در سال ۲۰۰۹ به بررسی الگوریتم SSEB در مقایسه با داده‌های لایسمتری در منطقه تگزاس پرداختند. در این تحقیق SSEB را ساده‌ترین مدل

برخوردار است. بخش کشاورزی مصرف‌کننده اصلی آب در کشور است بنابراین برآورد دقیق مقدار نیاز آبی گیاهان در مقیاس وسیع مورد توجه قرار گرفته است (۱۳). پایین بودن دقت اندازه‌گیری تبخیر و تعرق از سطح آب و انواع مختلف پوشش گیاهی یک مشکل اساسی در هیدرولوژی به حساب می‌آید. روش‌ها و معادلات مختلفی در هواشناسی و هیدرولوژی برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق وجود دارد که به‌عنوان روش‌های مستقیم شناخته می‌شوند. از میان این روش‌ها لایسمتری دقیق‌ترین روش برآورد تبخیر و تعرق مرجع می‌باشد که متأسفانه استفاده از لایسمتری در مقایسه با روش‌های غیرمستقیم که بر مبنای داده‌های اقلیمی ایستگاه‌های هواشناسی می‌باشند؛ ناکارآمد محسوب می‌شود و این تنها به دلیل زمان‌بر بودن و هزینه بالای احداث لایسمتری نیست بلکه به دلیل نقطه‌ای بودن اندازه‌گیری این روش بوده و در نتیجه این روش در سطوح محلی و منطقه‌ای مطلوب نخواهد بود؛ زیرا تبخیر و تعرق تحت تاثیر شرایط رشد گیاه و مدیریت زراعی و محیط قرار دارد و این پارامترها در زمان و مکان متغیر هستند (۱۵، ۳۸ و ۴۲). روش‌های محاسباتی که می‌توان آن‌ها را جزء روش‌های غیرمستقیم دانست، بر پایه داده‌های هواشناسی استوارند و در سطح جهانی توسعه یافته‌اند و معمولاً بر اساس اصول فیزیکی، معادلات تجربی و یا ترکیبی از این دو توسعه می‌یابند (۲۵). روش‌های تجربی بر اساس آنالیزهای آماری و مشاهدات ایستگاه‌های زمینی و معمولاً برای یک منطقه یا شرایط آب‌وهوایی یا اقلیمی خاص توسعه داده می‌شوند (۱۲). از طرف دیگر، این روش‌های فیزیکی بیشتر هدفشان شبیه‌سازی اصول بنیادی مثل بیلان انرژی و انتقال جرم است. برای مثال تابش خورشیدی، رطوبت نسبی، سرعت باد از جمله پارامترهای مهم و مؤثر برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع بر اساس مدل‌های فیزیکی هستند (۲۵) و اغلب این مدل‌ها نیازمند داده‌های جزئی هواشناسی می‌باشند (۲). بنابراین بطور معمول از اینگونه مدل‌ها برای برآورد تبخیر و تعرق در مقیاس مزرعه‌ای استفاده می‌شوند و به دلیل ناهمگن بودن سطح زمین و طبیعت دینامیکی فرآیند انتقال بخار آب امکان تعمیم نتایج آن‌ها به مقیاس بزرگتر وجود ندارد (۳۶). لذا مقادیر برآورد شده به صورت نقطه‌ای بوده و پیوستگی مکانی ندارد.

تکنیک سنجش از دور به منظور برآورد تبخیر و تعرق در مقیاس مکانی گسترده پایه‌ریزی شده است. تخمین تبخیر و تعرق بر اساس الگوریتم‌های سنجش از دوری با استفاده از داده‌های سنجش از دوری برای محاسبه دمای سطح و شاخص‌های گیاهی همراه با اطلاعات هواشناسی منطقه، صورت می‌گیرد. به‌طور کلی روش‌هایی که بر اساس توازن انرژی عمل می‌کنند، به دو دسته الگوریتم‌های تک‌منبعی نظیر SEBAL، SSEB، SEBS، METRIC و الگوریتم‌های دو منبعی TSEB و SETEB طبقه‌بندی می‌شوند (۹، ۴ و ۲۹).

الگوریتم دو منبعی 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 این دو الگوریتم در برآورد شار گرمای محسوس دانستند (۴۱).

هدف از تحقیق حاضر، تخمین میزان تبخیر و تعرق واقعی در استان بوشهر-برازجان (مرکز تحقیقات کشاورزی استان بوشهر) با استفاده از الگوریتم‌های تک منبعی SEBAL، S-SEB و الگوریتم دو منبعی TSEB به صورت مکانی، مقایسه آن با داده‌های اندازه‌گیری شده لایسیمتری، محاسبه فاکتور L در برآورد شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده برحسب خاک (SAVI)، برای پوشش حوضه مربوطه و در نهایت تهیه نقشه توزیع مکانی تبخیر و تعرق واقعی در محدوده تحت تأثیر لایسیمتر موجود در استان بوشهر و بر اساس محاسبات شبکه سلولی است.

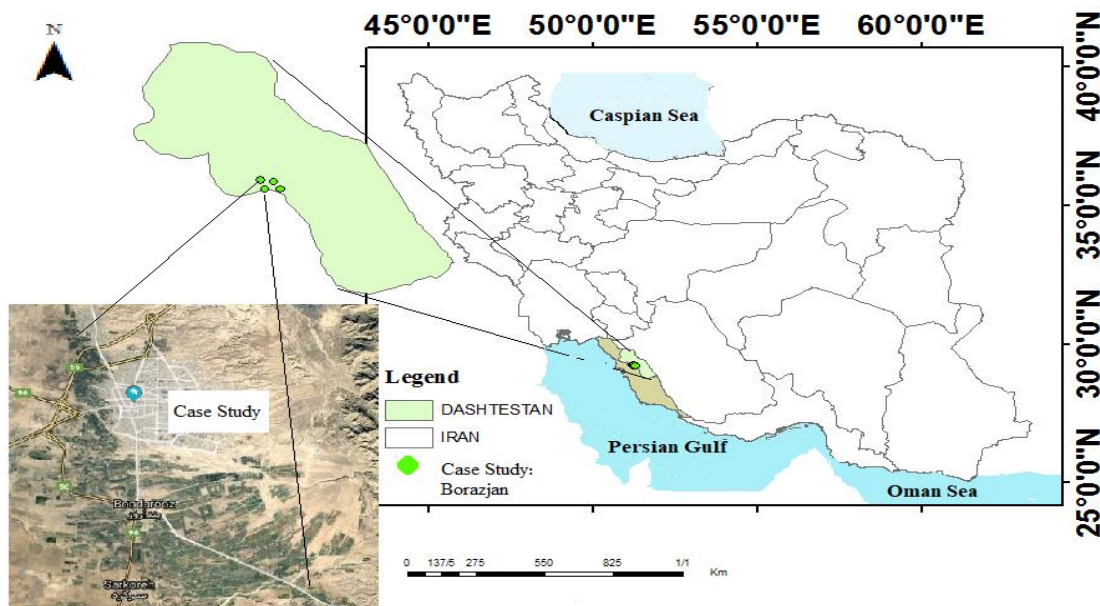
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

بوشهر یکی از استان‌های ساحلی جنوب ایران است که در موقعیت جغرافیایی ۲۷°۱۴' تا ۳۰°۱۶' شمالی و ۵۰°۰۶' تا ۵۳°۵۸' شرقی واقع شده است (شکل ۱). مساحت استان بوشهر ۲۷۶۵۳ کیلومتر مربع است که ۹۸۳ کیلومتر مرز آبی با خلیج فارس دارد. میانگین دمای سالانه منطقه ۲۵/۷ درجه سانتی‌گراد، میزان رطوبت نسبی آن بین ۷۵-۵۸ درصد و متوسط بارندگی سالانه این استان ۲۲۰ میلی‌متر است.

موجود در مقیاس منطقه‌ای معرفی کرده و اذعان داشتند که روش S-SEB می‌تواند برای برآورد تبخیر و تعرق استفاده شود و روش S-SEB در مقایسه با دیگر روش‌ها مانند SEBAL و METRIC و الگوریتم‌های دومنبعی عملکرد بهتری داشته و با توجه به نیازمندی این الگوریتم به حداقل اطلاعات هواشناسی، نتیجه قابل قبول و دقیقی را در برآورد تبخیر و تعرق در مناطق خشک و نیمه خشک مانند تگزاس ارائه کرده است (۱۷). 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 و تعرق مزرعه از الگوریتم S-SEB استفاده شد. با بررسی روند تغییرات زمانی تبخیر و تعرق، کاهش تراکم پوشش گیاهی در طی سال‌های اخیر را گزارش کردند (۵).

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 (۱۹). همچنین مدل دومنبعی TSEB بررسی دقیق‌تری از تغییرات رادیومتریکی و تبادل شار انرژی بین خاک و گیاه را مورد توجه قرار می‌دهد، که در واقع به دو منبع شار گرما و شار بخار آب در زمین‌های ناهمگن خاک و پوشش گیاهی اشاره دارد (۲۹). اما الگوریتم دومنبعی در مقایسه با اندازه‌گیری‌های زمینی با خطای بیشتری رو به رو بوده است (۳۹). مدل TSEB در یک منطقه خشک و نیمه خشک با استفاده از تصاویر دمای رادیومتریک، شاخص گیاهی و نقشه‌های کاربردی اراضی نتایج موفقیت آمیزی از خود نشان داد (۱۱). تیمرمنز و همکاران در سال ۲۰۰۶ و طی تحقیقی به مقایسه الگوریتم بیلان انرژی سطح و



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه در استان بوشهر شهرستان دشتستان

Figure 1- The geographical position of study region in Dashtestan county, Bushehr province, Iran

برای هر پیکسل طبق معادله زیر محاسبه می‌شود (۸و۴).

$$ET_f = \frac{T_H - T_x}{T_H - T_c} \quad (2)$$

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 (۴) برآورد می‌شود.

$$ET_a = ET_f \times k \times ET_0 \quad (3)$$

ET_0 : تبخیر و تعرق گیاه مرجع (mm/day) است که از معادله استاندارد تبخیر و تعرق مرجع (ASCE) محاسبه می‌شود. k ضریبی است که تبخیر و تعرق مرجع گیاه چمن را به ماکزیمم مقدار تبخیر و تعرقی که گیاه با مقاومت آیرودینامیکی بالا داشته است؛ می‌رساند. مقدار $k = 1,2$ پیشنهاد شده است که در این تحقیق نیز همین مقدار مدنظر قرار گرفته است (۳۵).

در فرآیند اجرای الگوریتم SEBAL و SSEB از دو پیکسل شاخص برای مشخص کردن شرایط مرزی در معادله بیلان انرژی استفاده می‌شود. این دو پیکسل شاخص، تحت عنوان پیکسل‌های سرد و گرم نامیده می‌شوند و در منطقه مورد مطالعه قرار دارند. پیکسل سرد از مزارع با پوشش گیاهی کامل و کاملاً آبیاری شده انتخاب می‌شود که در آن دمای سطحی و دمای هوای نزدیک به سطح برابر فرض می‌شوند و پیکسل گرم از اراضی بدون پوشش و خشک انتخاب می‌شود. در مدل SEBAL کیفیت محاسبات ET به انتخاب دقیق این دو پیکسل وابسته است (۹).

الگوریتم دو منبعی TSEB

الگوریتم بیلان انرژی دو منبعی TSEB ابتدا توسط نورمن و همکاران در سال ۱۹۹۵ پیشنهاد شد (۲۹) و سپس توسط کوستاس و نورمن اصلاح شد (۲۰، ۲۱ و ۲۲). محققین و متخصصین زیادی اثبات کردند که این مدل برای شرایط آب و هوایی و مناطق مختلف مناسب است (۱۴، ۲۲ و ۲۴).

الگوریتم TSEB از جمله الگوریتم‌های مطرح در بین مدل‌های دو منبعی است که در آن خاک و گیاه را به عنوان دو منبع جداگانه مورد بررسی قرار می‌دهد. اساس این الگوریتم در برآورد شار انرژی، معادله بیلان انرژی (معادله ۱) می‌باشد. در مدل دو منبعی مذکور، به غیر از G تمامی اجزاء معادله برای دو لایه خاک و پوشش گیاهی به صورت مجزا برآورد می‌شود. که بر این اساس روابط زیر برقرار است.

به منظور اعتبارسنجی نتایج الگوریتم‌های مورد بررسی، از مقادیر تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده دو لایسیمتر زهکش‌دار برای گیاه مرجع چمن و گوجه فرنگی به عنوان مهم‌ترین محصول زراعی منطقه، واقع در اراضی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان بوشهر واقع در ۹ کیلومتری جنوب شرق برازجان با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۱۶ دقیقه طول شرقی و عرض ۲۹ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی است (شکل ۱).

در این پژوهش از ۴۶ تصویر بدون ابر و روزانه از سنجنده MODIS، ۷ تصویر از سنجنده ETM+ و ۷ تصویر از سنجنده TM در طول فصل رشد از ماه فروردین تا شهریور از سال ۸۰ تا ۸۲ 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.

SEBAL

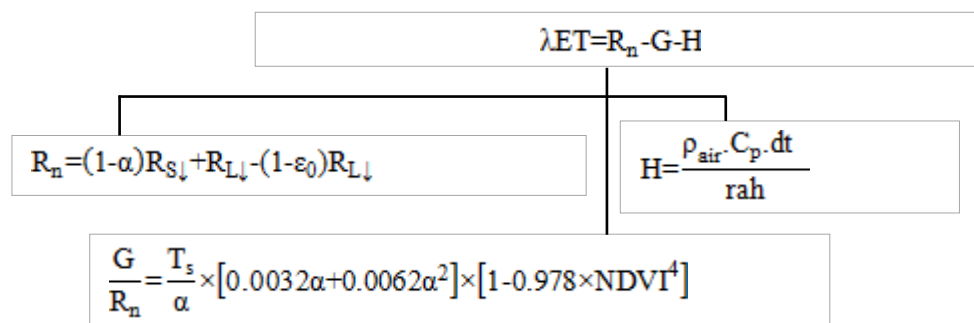
مدل SEBAL با استفاده از تصاویر دیجیتالی بدست آمده از ماهواره لندست یا دیگر حس‌گرها قادر به ثبت مقدار تابش در نواحی مرئی^۱، مادون قرمز نزدیک^۲ و مادون قرمز^۳ می‌باشد. مقدار تبخیر و تعرق (ET) در زمان عبور ماهواره برای هر پیکسل محاسبه می‌شود و فرآیند محاسبه آن براساس معادله بیلان انرژی است که در آن مقدار ET از تفاضل شار گرمایی و شار خاک از شار تابش خالص محاسبه می‌شود (۸). در شکل ۲ معادلات اصلی برآورد هر یک از اجزاء معادله ۱ نمایش داده شده است.

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

در این معادله λE شار گرمای نهان تبخیر R_n ($\frac{W}{m^2}$)، شار تابش خالص G ($\frac{W}{m^2}$)، شار گرمای خاک H ($\frac{W}{m^2}$) و شار گرمای محسوس H ($\frac{W}{m^2}$) می‌باشد.

روش اصلی در اجرای مدل SSEB (۳۴) کاربرد همزمان تبخیر و تعرق مرجع و دمای سطح است. در ابتدای کار معادله بیلان انرژی برای گیاه مرجع با استفاده از معادله استاندارد شده پنمن ماتیت (۲) با فرض پوشش گیاهی متراکم و تامین نامحدود آب محاسبه می‌شود نحوه استفاده از معادله استاندارد شده پنمن ماتیت توسط سنای و همکاران در سال ۲۰۰۸ نوشته شده است. از دمای پیکسل‌های سرد و گرم می‌توان در محاسبه کسر تبخیر و تعرق برای هر پیکسل در تصویر استفاده کرد (۳۷). کسر تبخیر و تعرق (ET_f)

- 1- Visible
- 2- Near Infrared
- 3- Infrared



شکل ۲- الگوریتم محاسباتی بیلان انرژی در الگوریتم SEBAL
Figure 2- Calculation algorithm of surface energy balance in SEBAL

است که خطوط همپوش گیاهی^۴ موازی نیستند و اینکه بطور کامل یک نقطه را پوشش نمی‌دهند. شاخص پوشش گیاهی با انعکاس خاک، یک شاخص عالی برای محیط‌های با پوشش کم می‌باشد (۱۰).

$$SAVI = \frac{P_{NIR} - P_{RED}}{P_{NIR} + P_{RED} + L} (1+L) \quad (8)$$

L فاکتور تعدیل کننده اثر خاک است. مقدار آن برای پوشش تنک برابر ۱ و برای پوشش متوسط برابر ۰.۵ و اما برای پوشش انبوه صفر و یا ۰.۲۵ در نظر گرفته می‌شود. هدف از ایجاد این شاخص، حذف اثر تیرگی خاک می‌باشد که با استفاده از اطلاعات تصاویر و روابط (۹) و (۱۰) محاسبه شود (۳۱).

$$L = 1 - 2 \cdot a \cdot NDVI \cdot WDI \quad (9)$$

$$WDI = \rho_{nir} - \gamma \rho_{red} \quad (10)$$

ضریب a برابر ۱.۶ می‌باشد و WDI^۵ از رابطه (۱۰) بدست می‌آید. در معادله ۱۰ فاکتور γ ضریب خط خاک^۶ است که در واقع شبیه خط برازش داده شده بر نمودار طیفی باندهای مادون قرمز نزدیک و قرمز است که در شکل ۳ نشان داده شده است (۴۳). برای برآورد SAVI در منطقه تحقیقاتی آیداهو مقدار $L = 0.5$ مناسب دانسته شده است (۹).

شاخص LAI برای تخمین ویژگی‌های ساختاری پوشش گیاهی نظیر شاخص سطح برگ مورد استفاده قرار می‌گیرد که یک قدم مهم در تعیین مقدار آب مصرفی در گیاهان مختلف است. این شاخص نشان‌دهنده نسبت کل برگ‌های گیاه به سطح زمین پوشانده شده توسط گیاه است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود. شاخص سطح برگ در گیاهان زراعی مختلف بین ۲ - ۵ متغیر است (۱۰).

$$LAI = \frac{-\ln\left(\frac{0.69 - SAVI}{0.59}\right)}{0.91} \quad (11)$$

$$R_n = R_{n,c} + R_{n,s} \quad (4)$$

$$H = H_c + H_s \quad (5)$$

$$LE = LE_c + LE_s \quad (6)$$

در روابط فوی اندیس‌های s و c به ترتیب نمایانگر جزء خاک (Soil) و پوشش گیاهی (Crop) هستند.

شاخص‌های گیاهی

محاسبات کلیه مدل‌های شار انرژی اعم از تک‌منبعی و دومنبعی نیازمند تعیین شاخص‌های LAI^۱، SAVI^۲، NDVI^۳ می‌باشند لذا در ادامه به توضیح آنها پرداخته شده است.

NDVI شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده، نمایه‌ای است وابسته به میزان وضعیت پوشش گیاهی که از داده‌های باندهای قرمز (RED) و مادون قرمز (PNIR) محاسبه می‌گردد. چنانچه مقادیر NDVI کمتر از ۰.۲ باشد، پیکسل به عنوان پیکسل فاقد پوشش گیاهی و یا با پوشش گیاهی خیلی کم در نظر گرفته شده است. دامنه تغییرات این شاخص بین +۱ و -۱ است. این شاخص براساس تراکم پوشش گیاهی و داده‌های باندهای قرمز و مادون قرمز محاسبه می‌شود.

$$NDVI = \frac{P_{NIR} - P_{RED}}{P_{NIR} + P_{RED}} \quad (7)$$

که در سنجنده‌های مختلف باندهای مربوط به طول موج قرمز (Pred) و مادون قرمز (Pnir) متفاوت می‌باشد.

SAVI یا شاخص تعدیل شده برحسب خاک، توسط هیوت در سال ۱۹۸۴ با هدف حداقل کردن اثرات خاک زمینه در بازتاب پوشش گیاهی پیشنهاد شد (۱۸). از دیگر دلایل استفاده از این شاخص این

4- Isovegetation

5- Weighted Difference Vegetation Index

6- Soil Line Coefficient

1- Leaf Area Index

2- Soil Adjusted Vegetation Index

3- Normalized Difference Vegetation Index

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (ET(Obs) - \overline{ET(Obs)})(ET(Mod) - \overline{ET(Mod)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (ET(Obs) - \overline{ET(Obs)})^2 \sum_{i=1}^n (ET(Mod) - \overline{ET(Mod)})^2}} \quad (16)$$

شاخص‌های آماری

با هدف مقایسه نتایج حاصل از کاربرد الگوریتم‌های بیلان انرژی با مقادیر مشاهداتی از لایسیمتر 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 ضریب همبستگی استفاده شده است. علاوه بر این موارد و با هدف بررسی یکسان بودن و هم‌قوارگی برآوردهای بدست آمده از الگوریتم‌های سنجش از دوری از آزمون T-Test استفاده شد که صحت‌سنجی برای سنجنده‌های MODIS و ETM+ و TM در سطح معنی‌داری ۹۵٪ صورت گرفت تا احتمال تصادفی بودن نتایج بدست آمده بررسی گردد.

$$MAE = N^{-1} \sum_{i=1}^n (ET(Mod)_i - ET(Obs)_i) \quad (12)$$

$$MBE = N^{-1} \sum_{i=1}^n (ET(Mod)_i - ET(Obs)_i) \quad (13)$$

$$RMSE = [N^{-1} \sum_{i=1}^n (ET(Mod)_i - ET(Obs)_i)^2]^{0.5} \quad (14)$$

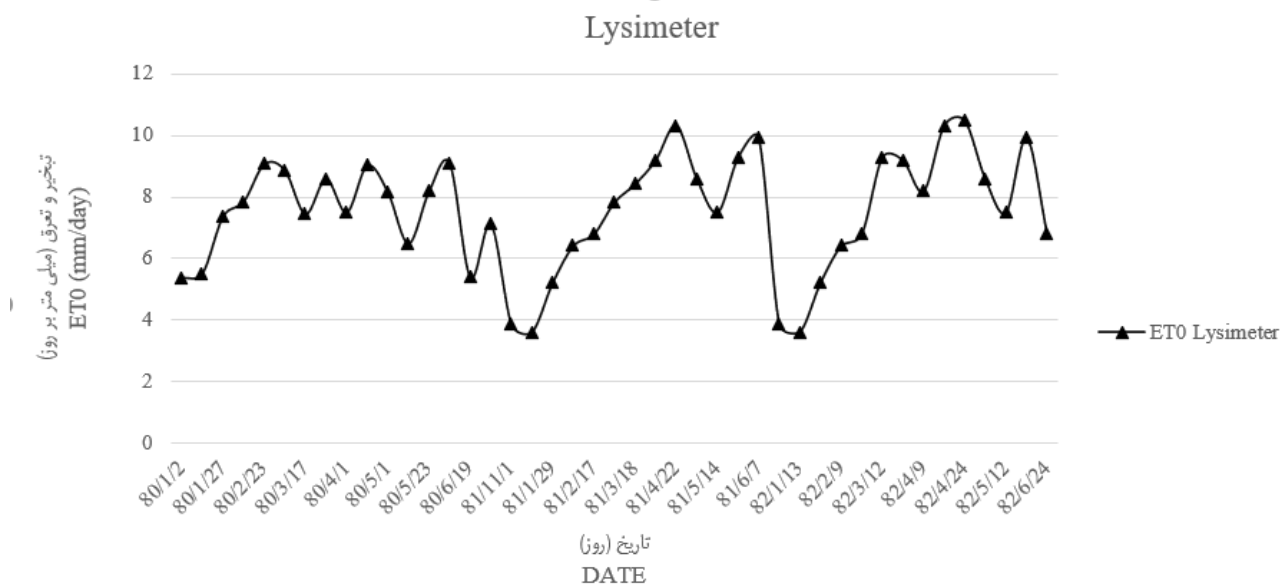
$$SE = (N-2)^{-1} \left[\sum_{i=1}^n (ET(Mod) - \overline{ET(Mod)})^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n (ET(Obs) - \overline{ET(Obs)})(ET(Mod) - \overline{ET(Mod)}))^2}{\sum_{i=1}^n (ET(Obs) - \overline{ET(Obs)})^2} \right] \quad (15)$$

که ET(Mod) تبخیر و تعرق برآورد شده از هر یک از الگوریتم‌های بیلان انرژی و ET(Obs) تبخیر و تعرق مشاهداتی از لایسیمتر، میانگین تبخیر و تعرق برآورد شده از لایسیمتر و ET(Mod) میانگین تبخیر و تعرق برآورد شده از هر یک از الگوریتم‌های بیلان انرژی می‌باشد.

نتایج و بحث

محاسبات و اندازه‌گیری‌های مربوط به لایسیمتر

اندازه‌گیری‌ها در شش ماه گرم سال به صورت روزانه و ساعتی انجام گرفت. سینوسی بودن نمودارها در هر سه سنجنده نشان‌دهنده تغییرات شبانه روزی داده‌های لایسیمتری و برآوردهای صورت گرفته را به خوبی نشان می‌دهد. بیشترین مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع در بین سال‌های مورد بررسی در ظهر روز ۲۴ تیرماه سال ۱۳۸۲ با ۱۰/۵ میلی‌متر بر روز و کمترین مقدار آن ۳/۶۲ میلی‌متر در روز برای ۱۳ فروردین ۱۳۸۲ برآورد شده است. افزایش دمای هوا در ماه نیز عامل افزایش تبخیر و تعرق شده است.



شکل ۳- تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده بوسیله لایسیمتر در مقیاس روزانه در شش ماهه ابتدای سال ۸۰-۸۲
Figure 3- The measured daily evapotranspiration by Lysimeter in six prime months of the years (2001-2003)

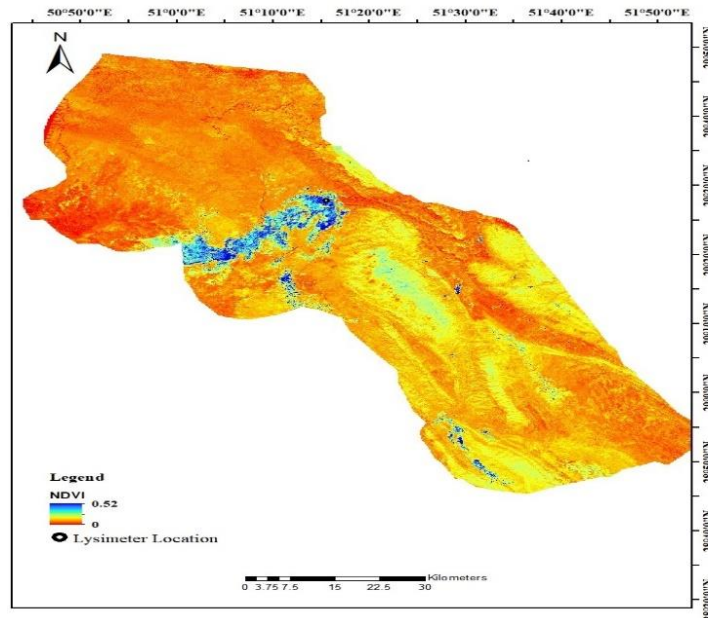
این موضوع اثبات کننده این مطلب است که با افزایش NDVI و LAI و همچنین بلوغ رسیدن گیاه در مرحله کشت، میزان تعرق از سطح افزایش یافته است.

طبق نمودارهای شکل ۶، در بررسی شاخص NDVI سنجنده MODIS به دلیل تعدد تعداد تصاویر مورد بررسی و به عبارت دیگر پیوستگی زمانی بالای این سنجنده دوره کشت گیاه مرجع در ماه‌های مورد بررسی را به خوبی نشان می‌دهد. سنجنده لندست ۷ و ۵ نیز با وجود قدرت تفکیک مکانی بالا و پیوستگی مکانی تصاویر مورد بررسی، به دلیل در دسترس نبودن همه تصاویر روزهای دوره کشت نتایج دقیقی را از خود نشان ندادند.

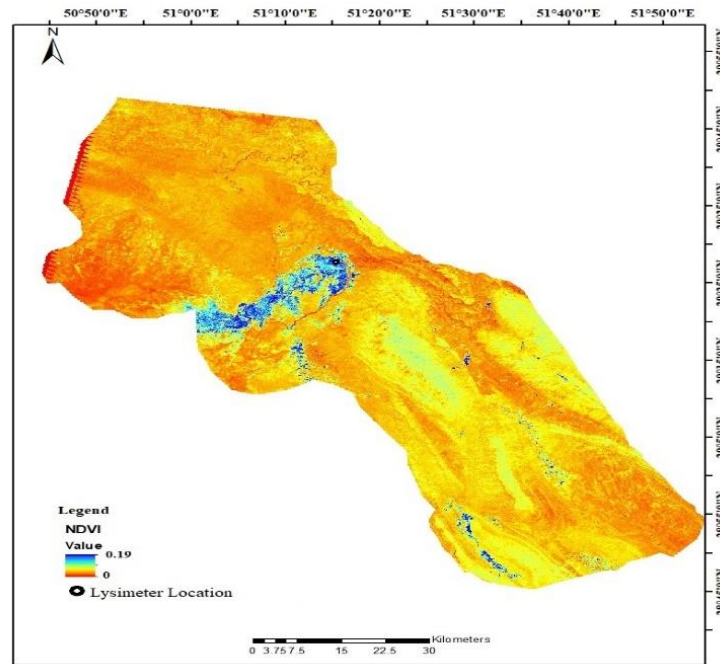
با توجه به قدرت تفکیک مکانی و پیوستگی تصاویر لندست ۷، تصاویر این سنجنده در برآورد مقدار L و در نهایت مقدار تبخیر و تعرق، مورد استفاده قرار گرفت. در ابتدای دوره کشت با توجه به تنگ بودن پوشش گیاهی و جوانه‌زنی گیاه مرجع، مقدار فاکتور L به سمت ۱ میل می‌کند و همچنان با افزایش پوشش گیاهی و به بلوغ رسیدن گیاه مرجع مقدار L کاهش یافته است. در بررسی نتایج ارائه شده در جدول ۱، نسبت مقادیر باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک با افزایش تراکم پوشش گیاهی، شیب خط برازش شده کاهش یافته و در نهایت مقدار L نیز کاهش می‌یابد.

در آغاز فصل کشت سطح خاک بدون پوشش گیاهی بوده مقدار SAVI بر اساس فاکتور L با کاهش رو به رو بوده است. همچنین کل آب تلف شده از راه تبخیر از سطح خاک می‌باشد و عوامل اقلیمی نظیر دمای هوا، درصد رطوبت نسبی، سرعت باد، ساعات آفتابی و میزان تابش خورشیدی اهمیت به‌سزایی در این مرحله داشته است. در مقابل در تیرماه زمانی که گیاه به بلوغ و رشد کامل رسیده است علاوه بر عوامل اقلیمی، عوامل گیاهی از قبیل نوع گیاه، مرحله رشد، شکل ظاهری برگ و پتانسیل آب در درون برگ نیز در میزان تبخیر و تعرق اثرگذار خواهد بود و در این مرحله با افزایش نمایه سطح برگ، نیاز آبی افزایش یافته و سهم تعرق در تبخیر و تعرق بر تبخیر پیشی گرفته و با افزایش تراکم پوشش گیاهی مقدار L روبه کاهش است و در نهایت مقدار SAVI افزایش می‌یابد.

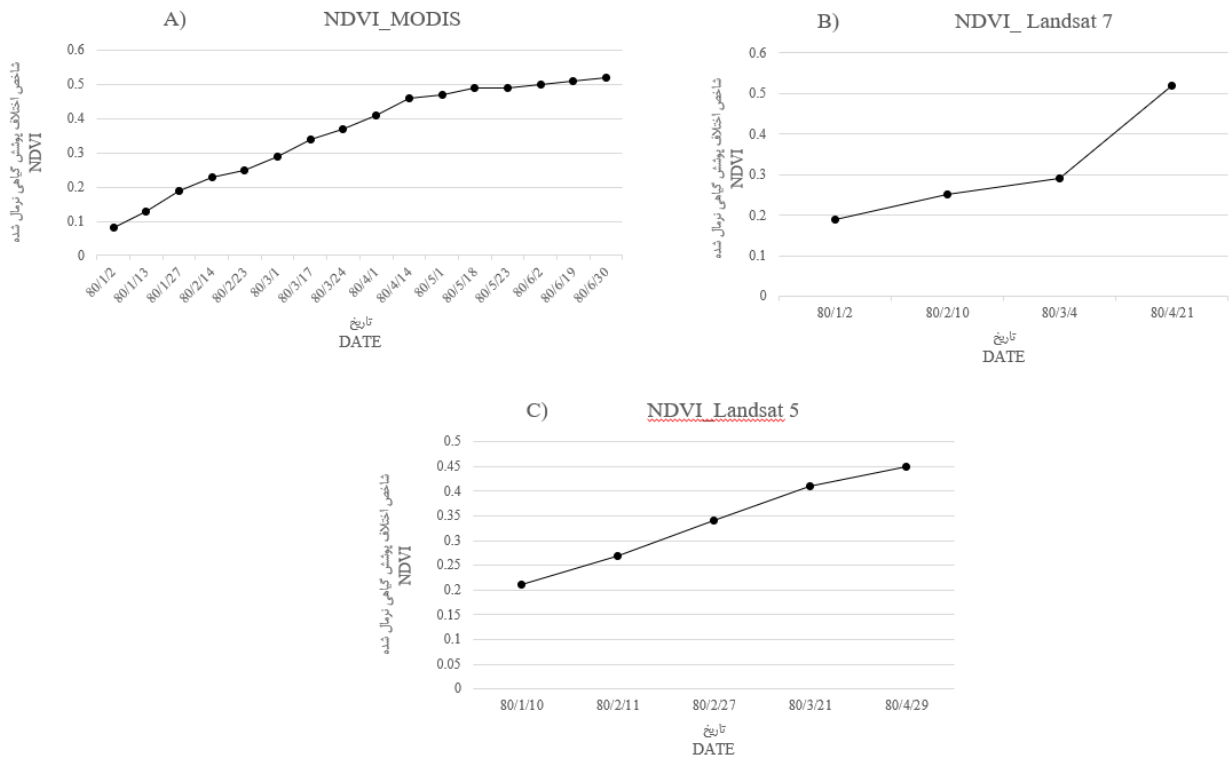
مقدار این شاخص NDVI طی دوره رشد با افزایش پوشش گیاهی سبز افزایش می‌یابد. در طی بررسی‌های سه ساله صورت گرفته بر روی لایسیمتر، مقدار تبخیر و تعرق در روز ۴ فروردین ۸۱ به کمترین مقدار خود یعنی ۹/۹ میلی‌متر بر روز، رسیده و در مقابل در روز ۲۴ مرداد ۸۲ به بیشترین مقدار خود یعنی ۳/۸۷ میلی‌متر بر روز، رسیده است. علت کاهش تبخیر و تعرق در اوایل فروردین مربوط به عدم رویش کامل گیاهان و در نتیجه کاهش شاخص پوشش گیاهی و همچنین سردی هواست. در مقایسه‌ای که بین میزان تبخیر و تعرق بدست آمده از لایسیمتر و عوامل گیاهی تاثیرگذار بر آن انجام شد نیز



شکل ۴- شاخص NDVI در ۲۱ مرداد ۸۰ در ماهواره لندست ۷
Figure 4- NDVI map on 12 August 2001 in Landsat 7 satellite



شکل ۵- شاخص NDVI در ۲ فروردین ۸۰ در ماهواره لندست ۷
Figure 5- NDVI map on 22 March 2001 in Landsat 7 satellite



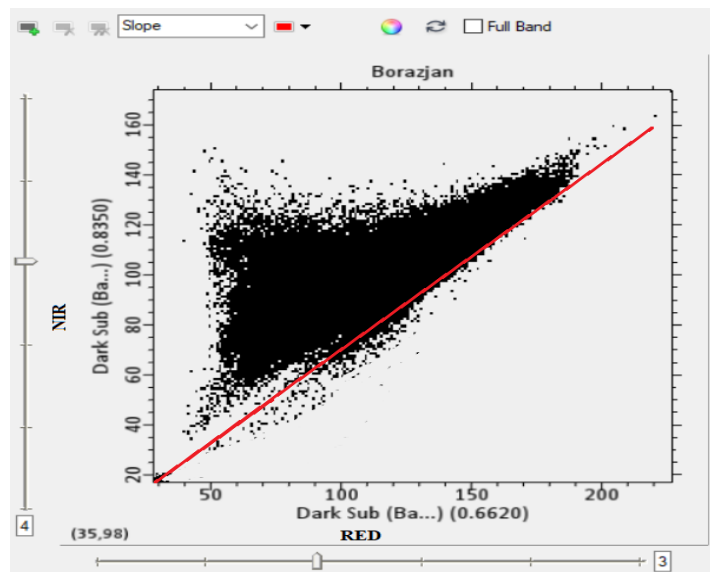
شکل ۶- نمودار مقادیر شاخص NDVI در منطقه مورد بررسی در دوره کشت در سال (۸۰، الف) سنجنده Modis، ب) سنجنده ETM+، و ج) سنجنده TM

Figure 6- NDVI diagram during growth stage on 2001, A) MODIS, B) ETM+, C) TM

جدول ۱- مقایسه نتایج تبخیر و تعرق واقعی حاصل از الگوریتم SEBAL با مقادیر متفاوتی از L در مقابل لایسیمتر

Table 1- Comparison between actual evapotranspiration of SEBAL with different amounts of L and lysimeter data

| DATE | Lysimeter (mm/day) | SEBAL | | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| | | L=0 | L=0.2 | L=0.4 | L=0.5 | L=0.6 | L=0.8 | L=1 |
| 2/1/1380 (22/3/2001) | 5.38 | 4.21 | 4.82 | 5.21 | 5.31 | 5.33 | 4.81 | 4.77 |
| 9/2/1380 (29/4/2001) | 7.86 | 5.18 | 6.27 | 6.91 | 7.34 | 7.52 | 7.23 | 7.57 |
| 3/3/1380 (24/5/2001) | 8.88 | 6.35 | 7.82 | 8.22 | 8.42 | 8.63 | 8.48 | 8.74 |
| 31/3/1380 (21/6/2001) | 8.4 | 5.71 | 5.69 | 6.77 | 7.64 | 7.82 | 7.38 | 7.50 |
| 20/4/1380 (11/7/2001) | 3.87 | 3.22 | 3.71 | 3.51 | 3.57 | 3.61 | 3.71 | 2.21 |
| 3/6/1380 (28/5/2001) | 9.3 | 7.31 | 7.36 | 8.35 | 8.79 | 8.92 | 8.50 | 8.48 |
| | RMSE | 1.53 | 1.26 | 0.97 | 0.72 | 0.60 | 0.84 | 0.94 |
| | P_value | 0.009 | 0.02 | 0.05 | 0.01 | 0.002 | 0.006 | 0.04 |



شکل ۷- تعریف و تعیین ضریب خط خاک از ترکیب باندهای مادون قرمز نزدیک و قرمز در لندست ۷ در تاریخ ۳ شهریور ۱۳۸۰

Figure 7- Determination of soil line coefficient from near infrared and red bands in Landsat 7 in 25 August 2001

جدول ۲- مقایسه نتایج تبخیر و تعرق تخمین زده شده به روش الگوریتم‌های بیلان انرژی در سه سنجنده MODIS، ETM+ و TM نسبت به داده برداری لایسیمتری

Table 2- The comparison of estimated evapotranspiration of surface energy balance algorithms in MODIS, ETM+ and TM with lysimetric data

| SENSOR | METHOD | P-VALUE | MBE(MM/DAY) | R (-) | RMSE(MM/DAY) | SE(MM/DAY) |
|--------|--------|---------|-------------|-------|--------------|------------|
| MODIS | SEBAL | 0.05 | -0.076 | 0.97 | 0.85 | 0.14 |
| | SSEB | 0.002 | -1.30 | 0.96 | 1.38 | 0.26 |
| | TSEB | 0.003 | -2.60 | 0.90 | 2.70 | 0.57 |
| ETM+ | SEBAL | 0.04 | -1.08 | 0.99 | 1.04 | 0.10 |
| | SSEB | 0.02 | -1.63 | 0.98 | 1.56 | 0.24 |
| | TSEB | 0.02 | -2.86 | 0.92 | 2.76 | 0.75 |
| TM | SEBAL | 0.03 | -1.16 | 0.97 | 1.14 | 0.28 |
| | SSEB | 0.02 | -2.13 | 0.98 | 1.97 | 0.14 |
| | TSEB | 0.009 | -3.26 | 0.94 | 3.06 | 0.28 |

L برابر با صفر بوده است، اقلیم نیمه خشک منطقه و پراکنندگی پوشش گیاهی نیز تایید کننده این موضوع است که در دوره‌ای از

کمترین مقدار RMSE برای L (برابر با ۰/۶) به میزان ۰/۶ میلی‌متر بر روز و بیشترین مقدار به میزان ۱،۵۳ میلی‌متر بر روز برای

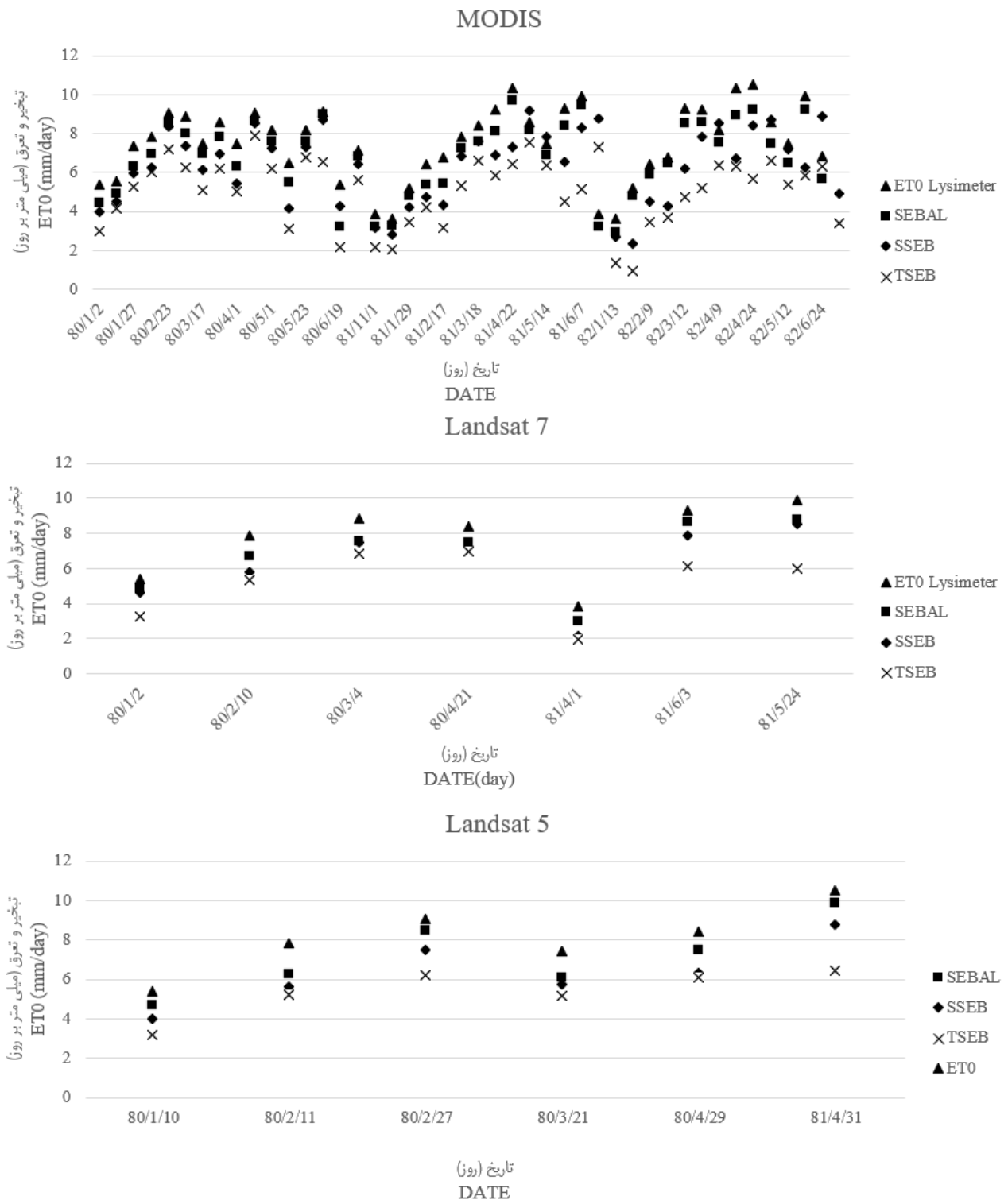
فصل کشت که گیاه به مرحله بلوغ رسیده است مقدار L افزایش یافته و در نهایت مقدار بهینه $L=0.6$ در برآورد مقدار SAVI کالیبره شده برای منطقه مورد بررسی استفاده شده است. L های بزرگ در خاک-های تیره یا پوشش گیاهی بسیار اندک دیده می‌شود.

در تاریخ مورد بررسی در شکل ۷ شیب بدست آمده برابر با 0.93 بود که با توجه به تاریخ تصویر مورد بررسی، در پایان دوره کشت و کاهش تراکم پوشش گیاهی باعث شده است که پارامتر L به سمت ۱ متمایل شود.

نتایج حاصل از مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل برآوردی از الگوریتم‌های بیلان انرژی با مقادیر اندازه گیری شده به وسیله لایسیمتر منطقه در روزهای تصویربرداری در جدول ۲ مقایسه شد. تبخیر و تعرق مرجع (ET0) برای سال‌های زراعی ۸۰-۸۲ بوسیله سه الگوریتم SEBAL، SSEB و TSEB براساس استفاده از تصاویر ماهواره‌های MODIS، Landsat7 و Landsat5 و داده‌های هواشناسی مورد نیاز محاسبه شد. به دلیل پیچیدگی محاسبه مستقیم شارهای بیلان انرژی، از لایسیمتر برای اعتبارسنجی مقدار تبخیر و تعرق محاسبه شده از داده‌های لایسیمتری استفاده شد. در بررسی‌های انجام شده بر روی الگوریتم SEBAL، در هر سه سنجنده در سطح ۹۵ درصد تمامی داده‌های برآورد شده با اندازه‌گیری‌های شاهد (لایسیمتر) تفاوت معنی‌داری دارد. میزان شاخص خطای استاندارد برای این الگوریتم کمتر از یک بوده و نشان‌دهنده نزدیک بودن و پراکندگی کم داده‌های برآورد شده نسبت به اندازه‌گیری‌های شاهد است. مقادیر منفی پارامتر MBE نیز نشان از کم برآورد بودن این الگوریتم دارد. مقدار جذر خطای میانگین مربعات در این الگوریتم، علی‌رغم بالا بودن کیفیت تصاویر و قدرت تفکیک مکانی بالایی سنجنده‌های ETM+ و TM بیشتر از یک بوده و برای MODIS مقدار 0.85 را به خود اختصاص داده است. با توجه به قدرت تفکیک زمانی پایین دو سنجنده لندست و همچنین وجود ابر و برف در تصاویر موجود و در مقابل قدرت تفکیک زمانی ماهواره MODIS نسبت به دو سنجنده دیگر و در نتیجه تعدد تصاویر مورد بررسی (۴۶ تصویر) دلیل این اتفاق را می‌توان تعدد تصاویر مورد بررسی در (TERRA) MODIS دانست. طبق نتایج آماری از میان سه الگوریتم مورد بررسی، الگوریتم SEBAL با کمترین میزان جذر خطای میانگین مربعات در هر سه سنجنده TERRA، ETM+ و TM (0.85 ، 0.74 ، 1.14 میلی‌متر بر روز) به عنوان الگوریتم برتر در منطقه معرفی شده است. طبق جدول (۲) الگوریتم SSEB در هر سه سنجنده به خصوص سنجنده‌های ETM+ و TM همبستگی بالایی با مقادیر لایسیمتری دارد. نتایج حاصل از الگوریتم دو منبعی TSEB نیز با داده‌های شاهد مورد ارزیابی قرار گرفت. تفاوت اصلی این الگوریتم با الگوریتم‌های تک منبعی در تفکیک و جداسازی میزان تبخیر از سطح خاک و تعرق از گیاه است که باعث پیچیدگی در محاسبات می‌شود. طبق

شاخص‌های آماری این الگوریتم در بین الگوریتم‌های مورد بررسی ضعیف‌ترین نتایج را از خود نشان داد که بالاترین میزان جذر خطای میانگین مربعات را در بین الگوریتم‌ها و در هر سه سنجنده MODIS، ETM+ و TM داشته است (2.7 ، 2.76 ، 3.06 میلی‌متر بر روز). مقدار MBE منفی نیز نشان از برآورد کمتر تبخیر و تعرق نسبت به اندازه‌گیری‌های شاهد است. به‌طور کلی مقادیر شاخص‌های آماری جدول ۲، نشان‌دهنده وضعیت پذیرفتنی و عملکرد منطقی هر سه الگوریتم در زمینه برآورد تبخیر و تعرق واقعی است و خطای پایین آن‌ها مؤید همین مطلب است. از آنجا که افزایش عملکرد گیاهان زراعی مستلزم شناخت روش‌های مدیریتی مناسب است که از جمله مهم‌ترین آن‌ها روش و رژیم مناسب آبیاری است و با توجه به اینکه کمبود آب یکی از مهم‌ترین علل کاهش عملکرد گیاهان در مناطق خشک و نیمه خشک به‌شمار می‌رود و لذا به دلیل برآورد کمتر تبخیر و تعرق در الگوریتم SEBAL امکان ایجاد تنش خشکی و کاهش محصول وجود دارد. همچنین در مقایسه عملکرد سه سنجنده می‌توان اذعان داشت که با توجه به افزایش قدرت تفکیک مکانی و بهبود وضوح تصاویر در ماهواره لندست، توصیه می‌شود از سنجنده ETM+ ماهواره لندست ۷ با توجه به قدرت تفکیک مکانی بالایی که داراست، برای برآورد تبخیر و تعرق استفاده شود. مقادیر تبخیر و تعرق حاصل از هر سه الگوریتم بر روی تصاویر ماهواره‌های مختلف در شکل ۸ ارائه شده است.

مطابق شکل ۸ در هر سه سنجنده، هر سه الگوریتم در حالت کلی دچار فرورآورد شده است. این خطا می‌تواند به دلیل عدم دقت کافی در برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع باشد. دلیل دیگری که می‌توان به آن اشاره کرد تأثیر رادیومتریکی پیکسل‌های مجاور پیکسل مربوط به لایسیمتر است که به دلیل تأثیر زیاد دما در برآورد تبخیر و تعرق، این عامل می‌تواند تأثیر عمده‌ای از اختلافات میان مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده را توجیه نماید. بیشترین مقدار تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده در مرداد ماه و در اواسط فصل رشد می‌باشد. همانطور که در هر سه شکل مشخص است برآوردهای بدست آمده از الگوریتم SEBAL نسبت به سه الگوریتم دیگر به داده‌های لایسیمتری نزدیکتر بوده و از دقت بالاتری برخوردار است. علت کاهش تبخیر و تعرق در اوایل فروردین مربوط به عدم رویش کامل گیاهان و در نتیجه کاهش شاخص پوشش گیاهی و همچنین سردی هواست.



شکل ۸- روند برآورد تبخیر-تعرق تخمین زده شده با مدل‌های SEBAL، SSEB و TSEB در سه سنجنده
Figure 8- Estimated evapotranspiration with SEBAL, SSEB and TSEB algorithms

همبستگی قوی داده‌های زمینی و برآوردهای بدست آمده با مقدار R^2 برابر با ۰/۹ تا ۰/۸ و همچنین عملکرد مناسب الگوریتم SEBAL

SEBAL و SSEB و یک الگوریتم دو منبعی TSEB در مرکز تحقیقات کشاورزی استان بوشهر مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت. از میان دو الگوریتم تک منبعی، از آنجا که الگوریتم SEBAL به خوبی قادر به اندازه‌گیری شاخص‌هایی همچون دمای سطحی، مقدار شار گرمای محسوس، انرژی تابشی خالص و شار گرمای خاک بوده و می‌تواند تغییرات محصول مانند شاخص سطح برگ، شاخص NDVI و تبخیر و تعرق را با تفکیک مکانی بالا تخمین بزند و همچنین براساس شاخص‌های آماری نتیجه دقیق‌تری را از خود ارائه داد و در سطح ۹۵٪ نتایج بدست آمده از این الگوریتم با اندازه‌گیری‌های لایسیمیتری تفاوت معنی‌داری نداشتند و این الگوریتم به‌عنوان الگوریتم برتر در منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. الگوریتم TSEB به دلیل محاسبات طولانی، زمان‌بر بودن نسبت به دو الگوریتم دیگر و دقت کمتری که در برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل دارد در رده سوم قرار می‌گیرد. اگر چه استفاده از نتایج این مدل برای تعیین نیاز آبی گیاهان در سطح مزرعه نیازمند کنترل‌های ایستگاهی دقیق‌تری می‌باشد. در مقایسه عملکرد تصاویر ماهواره‌ای بطور کلی سنجنده MODIS به دلیل قدرت تفکیک زمانی مناسب و تعدد تصاویر نسبت به دو سنجنده ETM+ و TM و ارائه سری زمانی بیشتر، برای برآورد تبخیر و تعرق در مقیاس منطقه‌ای مناسب می‌باشد و پس از آن سنجنده ETM+ مستقر بر روی ماهواره لندست به دلیل وضوح و قدرت تفکیک مکانی بالاتر در رده دوم قرار می‌گیرد.

سپاسگزاری

از وزارت جهاد کشاورزی به دلیل در اختیار نهادن داده‌های لایسیمیتری تقدیر و تشکر می‌شود.

به دلیل جزئی‌نگری در فرمولاسیون و اجرای این الگوریتم بوده است. فرآیند اجرای الگوریتم SEBAL بر مبنای پیچیدگی مفاهیم فیزیکی از قبیل قانون تشعشعی، تصحیحات اتمسفری بر مبنای مفاهیم خرد اقلیمی مانند تئوری مونین ابخوف، تصحیح شرایط ناپایداری اتمسفری و قانون بقاء شارهای انرژی بنا شده است (۱۶). در حالیکه الگوریتم SSEB براساس تئوری ساده‌تر و بر مبنای انرژی حرارتی سطح زمین که در ارتباط با رطوبت خاک و شارهای اتمسفری هستند عمل می‌کند (۳۴) که در نهایت نتایج بدست آمده نیز دقت مناسب این الگوریتم را متذکر شده است. تفاوت اصلی دو الگوریتم TSEB و SEBAL در برآورد توزیع مکانی شارهای انرژی سطحی، متمایز کردن اجزای بیلان انرژی سطح برای خاک و گیاه در مدل دو منبعی و تمایز این دو الگوریتم در برآورد شار گرمای محسوس دانسته شده است (۴۱). الگوریتم دوم منبعی ضعیف‌ترین نتایج را در میان الگوریتم‌ها از خود نشان داد.

نتیجه‌گیری

تخمین دقیق تبخیر و تعرق اراضی زراعی آبی برای مدیریت منابع آب در مناطقی که با کمبود آب مواجه هستند بسیار حیاتی است. برآورد تبخیر-تعرق واقعی و پراکنش مکانی آن از مواردی است که به کمک سنجنش از دور امکان‌پذیر بوده و توانمندی‌های زیادی نسبت به روش‌های نقطه‌ای دارد و برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در سطح کلان نیز؛ این پراکنش بسیار مهم است. در این تحقیق در بررسی‌هایی که بر روی فاکتور تصحیح خاک انجام شد و براساس نتایج شاخص‌های آماری و همچنین نوع و پراکنش پوشش گیاهی در منطقه مقدار مناسب فاکتور L در برآورد مقدار SAVI حدود ۰/۶ تخمین زده شد. دقت برآورد تبخیر و تعرق دو الگوریتم تک منبعی

منابع

- 1- Abdoli H., Eslamian S.S., and Abedi Koohpaei J. 2011. The use of Landsat7 satellite images and MODIS for estimating evapotranspiration through remote sensing in irrigation management. 3rd Irrigation and Drainage Network Management National Conference (IDNC201). Faculty of Irrigation Engineering, Shahid Chamran University. (In Persian with English abstract)
- 2- Allen R.G., Raes L.S., and Smith M. 1998. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy. 301 p.
- 3- Allen R.G., Tasumi M., and Trezza R. 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—model. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 133: 380–394.
- 4- Allen R.G., Tasumi M., Morse A.T., and Trezza R. 2005. A Landsat-based Energy Balance and Evapotranspiration Model in Western US Water Rights Regulation and Planning. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 19: 251–268.
- 5- Asare Mostaghim M., Rahimi Khoob A., and Asare Mostaghim L. 2011. Using SSEB Algorithm to Analyze the Process of Changes in the Amir Kabir Cane Sugar Crop Field Using Remote Sensing Techniques. Second National Conference on Combating Desertification and Sustainable Development of Iran's Kawiri Lagoon. (In Persian)
- 6- Bala A., Rawat K.S., and Misra A.K. 2015. Assessment and Validation of Evapotranspiration Using SEBAL Algorithm and Lysimeter Data of IARI Agricultural Farm. Geocarto International 739-764.

- 7- Bastiaanssen W., Noordman E., Pelgrum H., Davids G., Thoreson B., and Allen R. 2005. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131: 85–93
- 8- 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), *Journal of Hydrology* 212-213: 198-212.
- 9- Bastiaanssen W.G.M. 2000. SEBAL-Based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology* 229: 87-100.
- 10- Bastiaanssen W.G.M. 2002. SEBAL- Surface Energy Balance Algorithms For Land (Advanced Training and User's Manual). Funded by a NASA EOSDIS/Synergy grant from the Raytheon Company through The Idaho Department of Water Resources.
- 11- Betts A., Ball J., Beljaars A., Miller M., and Viterbo P.A. 1996. The land surface-atmosphere interaction: a review based on observational and global modeling perspectives. *Journal of Geophysical Research* 101: 7209–7226
- 12- Bos M.G., Kselik R.A.L., Allen R.G., and Molde D.J. 2009. *Water requirements for irrigation and the environment*. Springer, Dordrecht, ISBN 978-1-4020-8947-3
- 13- Chow V.T., Maidment D.R., and Mays L.W. 1988. *Applied Hydrology*, illustrate. ed. Mc graw-Hill Higher Education, New York, NY.
- 14- Colaizzi P.D., Kustas W.P., Anderson M.C., Agam N., Tolk J.A., Evett S.R., Howell T.A., Gowda P.H., and O'Shaughnessy S.A. 2012a. 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.
- 15- Dominique C., Bernard S., and Albert O. 2005. Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: From empirical to numerical modeling approaches. *Irrigation and Drainage Systems* 19: 223–249.
- 16- Gebremichael M., Wang J., and Sammis T.W. 2010. Dependence of Remote Sensing Evapotranspiration Algorithm on Spatial Resolution. *Atmospheric Research* 96: 489-495.
- 17- Gowda P., Senay G., Howell T., and 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.
- 18- Huete A.R., Post D.F., and Jackson R.D. 1984. Soil spectral effects and 4-space vegetation discrimination. *Journal of Remote sensing of Environment* 15: 155-165.
- 19- Huntingford C., Verhoef A., and Stewart J. 2000. Dual versus single source models for estimating surface temperature of African savannah. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences* 4: 185-191.
- 20- Kustas W.P., and Norman J.M. 1997. A two-source approach for estimating turbulent fluxes using multiple angle thermal infrared observations. *Journal of Water Resources Research* 33: 1495-1508.
- 21- Kustas W.P., and Norman J.M. 1999. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. *Agricultural and Forest Meteorology* 94: 13–25.
- 22- Kustas W.P., Anderson M.C., Cammalleri C., and Alfieri J.G. 2013. Utility of a Termalbase Two- source Energy Balance Model for Estimating Surface flux over Complex Landscapes. *Procedia Environmental Science* 19: 224-230.
- 23- Kustas W.P., and Norman J.M. 2000. A two-source energy balance approach using directional radiometric temperature observations for sparse canopy covered surfaces. *Agron. J.* 92: 847–854
- 24- Li F., Kustas W.P., Prueger J.H., Neale C.M., and Jackson T.J. 2005. Utility of remote sensing-based two-source energy balance model under low-and high-vegetation cover conditions, *Journal of Hydrometeorology* 6: 878–891, doi:10.1175/JHM464.1.
- 25- Maeda E.E., Wiberg D.A., and Pellikka P.K.E. 2011. Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenya. *Applied Geography* 31: 251-258.
- 26- Mata M.D., Salunke K.A., and PBhangale P. 2014. Evaluation of Evapotranspiration. *International Journal of Research in Engineering and Technology* 3(9): 43-47
- 27- Mobasheri M.R., Khavarian H., and Moussaoui H. 2006. Error estimates of ET from Sensible Heat in the SEBAL. National Conference on Irrigation and Drainage network management, Shahid Chamran University, Department of Water Engineering. (In Persian with English abstract)
- 28- Mohseni Saravi M., Ahmadi H., and Nosrati K. 2010. Estimation of evapotranspiration in Taleghan Basin using SEBAL. The First International Conference on Plant, Water, Soil and Weather Modeling. International center for science, high technology, environmental sciences. Shahid Bahonar University of Kerman. (In Persian with English abstract)
- 29- Norman J.M., Kustas W.P., Humes K.S. 1995. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 77: 263-293.
- 30- Nouri H., Faramarzi M., Sobhani B., and Sadeghi S.H. 2017. Estimation of Evapotranspiration based Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) using landsat 8 and Modis images. *Journal of Applied Ecology and*

- Enviromental Research 15(4): 1971-1982.
- 31- Qi J., Chehbouni A., Huete A.R., and Kerr Y.H. 1994. Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI). *Remote Sensing of Environment* 48: 119-126.
 - 32- Ruhoff A.L., Paz A.R., Collischonn W., Aragao L.E., Rocha H.R., and Malhi Y.S. 2012. A MODIS-based energy balance to estimate evapotranspiration for clear-sky days in Brazilian tropical savannas. *Remote Sensing (Basel)* 4: 703-725.
 - 33- Sanaei Nejad S.H., Noori S., and Hasheminia S.M. 2011. Estimation of Evapotranspiration Using Satellite Image Data in Mashhad area. *Journal of Water and Soil* 25(3): 540-547. (In Persian with English Abstract)
 - 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. *Journal of Sensors* 7: 979-1000.
 - 35- Senay GB., et al. 2013. Operational Evapotranspiration Mapping Using Remote Sensing and Weather Datasets: A New Parameterization for the SSEB Approach. *Journal of the American Water Resources Association* 49(3): 577-591.
 - 36- Senay M., Budde J., and Verdin. 2011. Enhancing the Simplified Surface Energy Balance (SSEB) approach for estimating landscape ET: Validation with the METRIC model. *Journal of Agricultural Water Management* 98: 606-618.
 - 37- Senay G.B., Verdin J.P., Lietzow R., and Melesse A.M. 2008. Global daily reference evapotranspiration modeling and evaluation. *Journal of the American Water Resources Association* 44: 969-979.
 - 38- Sentelhas PC., Gillespie TJ., and Santos EA. 2010. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. *Agricultural Water Management* 97: 635-644.
 - 39- Tang R., Li Z.L., and Sun X. 2013. Temporal upscaling of instantaneous evapotranspiration: An intercomparison of four methods using eddy covariance measurements and MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 138: 102-118.
 - 40- Tasumi M., Trezza R., Allen R.G., and Wright J.L. 2005. Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S. *springer. Irrigation and Drainage System* 19: 355-376.
 - 41- Timmermans W.J., Kustas W.P., Anderson M.C., and French A.N. 2007. An intercomparison of the surface energy balance algorithm for land (SEBAL) and the two-source energy balance (TSEB) modeling schemes. *Remote Sensing of Environment* 108: 369-384.
 - 42- Valipour M. 2015. Investigation of Valiantzas' evapotranspiration equation in Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 121(1): 267-278.
 - 43- Wenjing L. 2006: Satellite 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.

Comparison of Single-source and Two-source Algorithms for Estimating Evapotranspiration in Borazjan

B. Bahmanabadi¹ - A. Kaviani^{2*}

Received: 02-09-2019

Accepted: 01-02-2020

Introduction: The exact estimation of evapotranspiration has significant importance in the programming of irrigation development and other distribution systems and water usage. Since the main user of water in the country is the agriculture sector, therefore, the exact estimation of plants' water demand has been adverted extensively. The assessment methods of reference evapotranspiration are classified in two types of direct and indirect. The calculation of reference evapotranspiration in scientific and in vitro form and with high accuracy is possible by using lysimeter but in comparison to the indirect methods that are based on the climatic data of weather stations, the use of lysimeter is unfortunately inefficient. This is not just for the time consuming and high cost of lysimeter but it is for the limitation of weather stations and spottiness of the estimated values; in this way it is not possible to expand the obtained results to the large scale. Remote sensing is an authentic technique for the assessment of evapotranspiration in large scale which do not consume much time and money. The existence of different satellites by having different spatial and temporal resolution, redouble the importance and usability of this technique

Material and Methods: Actual evapotranspiration assessment in the region were done based on SEBAL, SSEB and TSEB algorithms on 46 imageries of MODIS, seven imageries of Landsat7 (ETM+) and seven imageries of Landsat5 (TM) in years of 2001-2003. Multiplicity of imageries of MODIS show the proper time resolution of this sensor and is a reason for less errors in the assessment of reference evapotranspiration. In the evaluation of the three algorithms of SEBAL, SSEB and TSEB in the three satellites.

Result and Discussion: In the evaluation of the three algorithms of SEBAL, SSEB and TSEB in the three satellites, MODIS shows the least errors (respectively, RMSE=0.856, 1.385 and 2.7 mm/day), then Landsat7 is placed in the second class by having higher spatial resolution (respectively, RMSE=1.042, 1.56 and 2.76 mm/day) and Landsat5 has the highest errors (respectively, RMSE = 1.14, 1.97 and 3.06 mm/day). NDVI was found at the lowest amount in the beginning of cultivation period because of germination and sparseness of vegetation, and increase respectively by increasing temperature and crop canopy. L factor has a significant importance in the assessment of SAVI which is related to the area crop coverage percentage. Amount of L has been estimated as L=0.6 that has the least errors in comparison to the others.

Conclusion: In this study, the proper amount for L factor in estimation of the SAVI amount was about 0.6 which was based on the investigations on soil correction factor, the results of statistical indexes and the type and dispersal of vegetation in the region. The accuracy estimation of evapotranspiration of two single-source algorithms of SEBAL and SSEB and one two-source algorithm of TSEB in Bushehr province were evaluated. SEBAL algorithm presented more exact results based on statistical indexes among two single-source algorithms and the obtained results in 95% level of this algorithm showed significant differences with lysimetric measurements. This algorithm was chosen as the premier algorithm in the region. Two-source algorithm of TSEB showed the highest amount of errors. Satellite imageries by having higher spatial resolution estimated evapotranspiration with higher accuracy, the reason of which is proper choosing of cold and hot pixels. Although, because of having proper time resolution and variation of image numbers and also presenting of more time series in comparison to ETM+ and TM, MODIS was more adverted. ETM+ which is located on Landsat satellite was lied in the second place because of its resolution and having higher spatial resolution.

Keywords: Evapotranspiration, Lysimeter, NDVI, SAVI

1 and 2- Ph.D. Student of Irrigation and Drainage and Assistant Professor of Water Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran, respectively.

(* - Corresponding Author Email: abbasskaviani@gmail.com)

DOI: 10.22067/jsw.v34i2.82156