

مقایسه نتایج تخمین تبخیر و تفرق واقعی حاصل از الگوریتم‌های SEBS و SEBAL (مطالعه موردی: دشت قزوین)

فاطمه فیروزی نظام‌آبادی^۱، عباس کاویانی^{۲*}، مهنوش مقدسی^۳، بهاره بهمن‌آبادی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۴/۱۳

چکیده

تخمین دقیق تبخیر و تفرق واقعی گیاهان زراعی و باغی یکی از چالش‌های بزرگ در حوزه‌های بزرگ مقیاس است. معادلات زیادی برای تخمین تبخیر و تفرق وجود دارد، اما مقادیر بدست آمده از آن‌ها منحصر به موقعیت ایستگاهی است که داده‌های هواشناسی از آن تامین شده است و نتایج آن در مقیاس مکانی قابل اعتماد نیست. هدف از این تحقیق ارزیابی تخمین تبخیر و تفرق واقعی در دشت قزوین با استفاده از تصاویر سنجنده‌های MODIS و الگوریتم‌های بیان انرژی SEBS و SEBAL است. نتایج الگوریتم‌ها با داده‌برداری‌های لایسیمیتری در سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۸۱ مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج آماری نشان داد، سنجنده ETM+ در هنگام کاربرد الگوریتم SEBAL با مقدار $r=0/85$ و $RMSE=1/29$ ، $ESE=1/38$ ، $CRM=0/11$ (میلی‌متر در روز) و سنجنده MODIS در شرایطی که از الگوریتم SEBS استفاده شود با مقدار $r=0/88$ و $RMSE=1/55$ ، $ESE=1/6$ ، $CRM=0/14$ (میلی‌متر در روز) برآورد دقیق‌تری از تبخیر و تفرق را ارائه می‌کند. در ضمن الگوریتم SEBS در مقایسه با SEBAL به دلیل عدم نیاز به انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم ارجحیت دارد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم بیان انرژی، تبخیر و تفرق، ETM+، MODIS

مقدمه

تخمین دقیق نیاز آبی گیاهان براساس شرایط تغذیه‌ای خاک، وضعیت تنش‌های گیاهی و عوامل اقلیمی در ایران از اهمیت بیش‌تری برخوردار است. دقیق‌ترین روش برآورد تبخیر و تفرق استفاده از لایسیمیتر است که این روش نیازمند صرف وقت و هزینه زیادی است. علاوه بر این روش‌های مختلف تجربی برای تخمین تبخیر و تفرق وجود دارد که عوامل زیادی هم‌چون اقلیم و پارامترهای گیاهی در تخمین آن دخیل هستند. هم‌چنین روش‌های سنتی مورد استفاده به صورت نقطه‌ای بوده و تنها می‌توانند میزان تبخیر و تفرق را در یک نقطه و یا یک منطقه کوچک و برای زمان‌هایی مشخص تعیین کنند و برای ناحیه‌هایی وسیع‌تر عملاً قابل استفاده نیستند (علیزاده، ۱۳۹۵). بنابراین با توجه به تغییرات مکانی عوامل دخیل در تبخیر و تفرق اعم از سطح تبخیر شونده و عوامل محیطی موثر بر آن در برآورد میزان تبخیر و تفرق بایستی اقدام به مدل‌سازی توزیعی نمود (Allen et al., 2003). برآورد تبخیر و تفرق واقعی و پراکنش مکانی آن از مواردی است که به کمک سنجش از دور امکان‌پذیر بوده و اهمیت زیادی نسبت به روش‌های نقطه‌ای دارد و برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در سطح کلان نیز، این پراکنش بسیار مهم است (Akbari et al., 2007). با توجه به محدودیت روش‌های مستقیم و غیرمستقیم در برآورد تبخیر و تفرق، استفاده از فناوری سنجش از دور به دلیل

کشاورزی، صنعت، شرب و محیط زیست چهار مصرف کننده کلی آب در جهان می‌باشند. کاهش مقدار آب در دسترس از یک سو و مصرف بیش از ۷۰ درصد منابع آب توسط بخش کشاورزی از سوی دیگر باعث شده است تا برآورد دقیق‌تر نیاز آبی گیاهان زراعی و باغی در مقیاس وسیع مورد توجه جدی قرار گیرد. به‌طور کلی منظور از تعیین تبخیر و تفرق، مقدار آبی است که باید به یک پوشش گیاهی داده شود تا در طول دوره رویش صرف تبخیر و تفرق نموده و حداکثر مقدار محصول را تولید کند (علیقلی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۵). تعیین تبخیر و تفرق محصولات زراعی آبیاری شده برای مدیریت منابع آب در مناطقی که با کمبود آب مواجه هستند بسیار حیاتی است. از آن‌جایی که ایران بطور عام در منطقه خشک و نیمه‌خشک قرار دارد،

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

۲- استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

۳- استادیار دانشکده کشاورزی دانشگاه اراک

۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد و دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

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

رشد به $۱۵۶۳/۳$ میلی‌متر رسیده است که $۲۲/۵$ درصد نسبت به مقدار برآوردی آن افزایش دارد. در تحقیقی دیگر، سیمایی و همکاران در سال ۱۳۸۷ به کمک الگوریتم SEBAL و تصاویر لندست، به برآورد تبخیر و تعرق واقعی در بخشی از حوضه آبریز زنجان رود در استان زنجان پرداختند. تبخیر و تعرق واقعی روزانه بر مبنای SEBAL توسط مشاهدات تحت تبخیر ارزیابی شد ($RMSE=۰/۵$). نتایج آن‌ها نشان داد که تبخیر و تعرق واقعی محاسبه شده توسط الگوریتم SEBAL و تصاویر لندست ۷ از همبستگی خوبی با داده‌های زمینی برخوردار است. کاویانی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از الگوریتم SEBAL و تصاویر MODIS مقادیر تبخیر و 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 لایسیمتری دارد استفاده گردیده است. نتایج اجرای الگوریتم در هر پنج تصویر با داده‌های لایسیمتر زهکش‌دار موجود در منطقه در هر پنج روز مورد ارزیابی قرار گرفته و دقت $۰/۸$ را تولید نموده‌اند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که امکان کاربرد الگوریتم SEBAL در اقلیم دشت قزوین وجود داشته و از دقت بالایی برخوردار است.

از جمله تحقیقات انجام شده در زمینه برآوردهای الگوریتم SEBS می‌توان به تحقیقات سو در سال ۲۰۰۲ اشاره کرد که سیستم بیلان انرژی سطح SEBS را برای برآورد شارهای جریان گرما و کسر تبخیر پیشنهاد داد. الگوریتم SEBS، یا الگوریتم سیستم بیلان انرژی سطح یک مدل تک منبعی بیلان انرژی است که تبخیر و تعرق را با استفاده از داده‌های سنجنش از دور برآورد می‌کند، او از تصاویر ماهواره‌ای همراه با اطلاعات هواشناسی برای حل معادله بیلان انرژی استفاده کرد. سو برای اعتبارسنجی نتایج خود شارهای گرمای پیش‌بینی شده از مدل را با شارهای اندازه‌گیری شده در مزارع کتان، توت‌فرنگی و چمن در ایالت آریزونا مقایسه کرد (Su., 2002). این الگوریتم برای برآورد شار گرمای نهان در Tomelloso اسپانیا به کار برده شد (Jia et al., 2003). طی تحقیقی توسط یوجن ادن در هلند برای ارزیابی خشک‌سالی کشاورزی، تبخیر و تعرق واقعی را به کمک الگوریتم SEBS برای کاربری‌های کشاورزی در منطقه توئنته هلند با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS برای سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ بررسی کردند. در این مطالعه، نقشه‌های شاخص خشک‌سالی مبتنی بر تبخیر و تعرق با شاخص‌های زمینی و پوشش گیاهی مورد ارزیابی قرار گرفتند که رفتار متفاوتی در ماه‌های مختلف نشان دادند که مطابقت آن‌ها عمدتاً در طول فصل رشد نمایان بود (Ugyen Eden., 2012). در تحقیقی دیگر در منطقه Namco در جنوب شرقی چین، تبخیر و تعرق با الگوریتم SEBS و تصاویر ASTER برآورد شد و با اندازه‌گیری‌های زمینی صحت‌سنجی شد. نتایج همبستگی بالای تبخیر و تعرق برآورد شده با $RMSE=۰/۷$ میلی‌متر در روز نشان داده شد (Ma et al., 2014). در زمینه به‌کارگیری این الگوریتم در داخل

امکان برآورد مکانی اطلاعات در سطح وسیع و هم‌چنین حداقل نمودن استفاده از داده‌های هواشناسی می‌تواند کاربرد وسیعی در محاسبه تبخیر و تعرق داشته باشد. به عبارتی سنجنش از دور را می‌توان روش بدست آوردن اطلاعات مستند از یک شی یا یک پدیده، از راه دور و بدون تماس فیزیکی با آن‌ها تعریف کرد. سنجنش از دور نمونه‌ای از مشاهدات است که با استفاده از برهم‌کنش امواج الکترومغناطیسی در باندهای طیفی مختلف اجسام انجام می‌شود (مباشری، ۱۳۸۵). تکنیک سنجنش از دور روشی کارآمد برای تخمین تبخیر و تعرق است. وجود ماهواره‌های مختلف با قدرت تفکیک زمانی و مکانی متفاوت، پوشش زمانی و مکانی مناسبی را جهت استخراج و تحلیل داده‌ها فراهم نموده است. بهینه‌ترین نوع مدل‌سازی تبخیر و تعرق به کمک سنجنش از دور هنگامی صورت می‌پذیرد که اطلاعات سنجنش از دور به عنوان اطلاعات اولیه و اطلاعات ایستگاه‌های زمینی به عنوان اطلاعات ثانویه توأمان بکار روند، چرا که اطلاعات حاصل از سنجنش از دور در مکان پیوسته و در زمان گسسته است، در حالی که اطلاعات زمینی ایستگاهی در زمان پیوسته و در مکان دچار گسستگی می‌باشند. از جمله روش‌های بیلان انرژی برای برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از سنجنش از دور می‌توان به الگوریتم‌های تک منبعی SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998)، SEBS (Senay et al., 2002) (Su., 2002) و SSEB (Allen et al., 2007) (al., 2007) و TSEB (Kustas and Norman., 1997) دو منبعی (Norman et al., 1995) و STEB (Sánchez et al., 2008) اشاره کرد. الگوریتم SEBAL، یا الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین توسط باستیانسن در سال ۱۹۹۸ ارایه شد و در سال ۲۰۰۰ مجدداً به روز گردید. باستیانسن و همکاران پس از ارزیابی نتایج بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی خود به مقایسه برآوردهای صورت گرفته با اطلاعات موجود تبخیر و تعرق مزارع بزرگ پرداختند. در نهایت برآوردهای بدست آمده بدون هیچ واسنجی در ۸۵ درصد مواقع با داده‌های مزارع مطابقت داشته است (Bastiaanssen et al., 1998). دقت این مدل در مقیاس مزرعه‌ای ۸۵ درصد برای یک روز، ۹۵ درصد برای یک فصل و در مقیاس حوزه‌ای و سالانه ۹۶ درصد تخمین زده شده است (Bastiaanssen et al., 2005) ابراهیمی و یزدانی در سال ۱۳۹۲ طی تحقیقی، از الگوریتم SEBAL و تصاویر ماهواره‌ای MODIS برای برآورد تبخیر و تعرق پارک ملت مشهد استفاده کردند. نتیجه حاکی از آن بود که مقادیر تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده توسط روش پنمن - مانیتث - فائو ۵۶ با روش SEBAL معنی‌دار بوده و دارای ضریب همبستگی $۰/۷۶۳۷$ می‌باشد. تبخیر و تعرق برآورد شده به ازای هر مترمربع در پایان فصل رشد به میزان $۱۲۱۰/۶$ میلی‌متر می‌رسد. در مقابل مقادیر تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده توسط روش پنمن - مانیتث - فائو ۵۶ در انتهای فصل

در مجموعه شبکه آبیاری این منطقه، برآورد تبخیر و تعرق واقعی باید مورد مطالعه قرار گیرد. الگوی کلی کشت در محدوده مورد مطالعه به صورت ۵۰ درصد کشت پاییزه است که بیش تر گندم و جو را شامل می‌شود.

برای تعیین نوع اقلیم منطقه از اقلیم نامی دومارتن^۱ استفاده شد. ابتدا با استفاده از فرمول زیر ضریب دومارتن محاسبه شده و سپس مطابق با جدول ۱ نوع اقلیم منطقه مورد مطالعه مشخص گردید. همچنین میانگین دمای سالانه این منطقه ۱۴/۲ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش ۲۸۰ میلی‌متر می‌باشد.

$$I = \frac{P}{T+10} \quad (1)$$

که در آن P: متوسط بارندگی سالیانه (میلی‌متر)، T: متوسط دمای سالانه (دجه سانتی‌گراد)، I: ضریب دومارتن (Tabari et al., 2014)

داده‌های هواشناسی و لایسیمتری

دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، ساعات آفتابی، دمای سطح خاک، تابش خورشیدی از جمله داده‌های هواشناسی مورد نیاز هستند که از ایستگاه هواشناسی با موقعیت جغرافیایی عرض ۳۶° ۱۵' درجه شمالی و طول ۵۰° ۰۳' درجه شرقی و ارتفاع ۱۲۷۹ متری از سطح دریا در بازه زمانی سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۸۲ استفاده شدند. داده‌های مزرعه‌ای از لایسیمتری به مساحت ۲ مترمربع و به عمق ۱/۵ متر، واقع در مرکز تحقیقات آب و خاک اسماعیل‌آباد قزوین با مختصات جغرافیایی ۳۶° ۱۵' ۲۳" درجه شمالی و ۴۹° ۵۴' ۳۵" شرقی به دست آمد. داده‌برداری‌های لایسیمتری براساس تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن می‌باشد که ارتفاع آن در زمان پژوهش بین ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر نگهداری شد و از پنجم فروردین‌ماه سال ۱۳۸۰ آغاز و به‌صورت روزانه و هفتگی تا تاریخ ۱۲۶م اسفندماه سال ۱۳۸۲ ادامه یافت (ابراهیمی پاک، ۱۳۸۰).

تصاویر ماهواره‌ای و نرم‌افزارهای مورد استفاده

در این تحقیق به منظور برآورد تبخیر و تعرق در بازه زمانی مطابق با داده‌برداری‌های لایسیمتری از تصاویر بدون ابر سنجد MODIS ماهواره Terra و سنجد ETM+ ماهواره Landsat7 استفاده شده است.

اجزای معادله بیلان انرژی در الگوریتم‌های SEBS و SEBAL
بطور کلی در الگوریتم‌های SEBS و SEBAL، تبخیر و تعرق در تصاویر ماهواره‌ای با بکارگیری بیلان انرژی در سطح تعیین می‌شود. جایی که انرژی مصرف شده توسط ET^۲ به عنوان باقی‌مانده از معادله شار انرژی جریان سطحی محاسبه می‌شود (Bastiaanssen et al., 2000)

کشور، حیدرآباد و همکاران در سال ۱۳۹۲ تبخیر و تعرق واقعی را در دوره زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۱ با استفاده از الگوریتم SEBS و تصاویر لندست ۵ در یزد محاسبه نموده و نتایج را با داده‌های تشت تبخیر و معادله فائو-پنمن-مانتیت مقایسه نمودند. نتایج ضریب همبستگی نشان داد که تبخیر و تعرق برآورد شده با الگوریتم SEBS با مقادیر محاسبه شده توسط روش پنمن-مانتیت از اختلاف معنی‌داری برخوردارند اما همبستگی قوی مشاهده نمی‌شود. ضیایی و همکاران (۱۳۹۳) برای برآورد تبخیر ماهانه از سطح دریاچه ارومیه، دو الگوریتم SEBS و SEBAL را مورد مطالعه قرار دادند. در این راستا، از تصاویر سنجد MODIS برای ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۸ استفاده کردند. ارزیابی نتایج این دو الگوریتم از طریق داده‌های تشت تبخیر ایستگاه هواشناسی ارومیه صورت گرفت. نتایج برای هر دو الگوریتم قابل قبول بود. ولی الگوریتم SEBAL علی‌رغم سادگی، از دقت بالاتری نسبت به الگوریتم SEBAL برخوردار بود. باباجعفری و همکاران در سال ۱۳۹۴ به ارزیابی الگوریتم SEBS در برآورد تبخیر و تعرق واقعی به‌صورت ماهانه برای کاربری‌های کشاورزی فاریاب طی دوره زمانی ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۲ براساس سنجد AVHRR ماهواره NOAA در منطقه آخوله واقع در دشت تبریز پرداختند که در نهایت مقایسه نتایج حاصل از این الگوریتم با مقادیر مشاهداتی، نشان از دقت مناسب (با ضریب تبیین ۰/۸) و میانگین جذر خطای مربعات ۹/۶۴ برای کاربری‌های کشت آبی دارد.

در همین راستا در پژوهش حاضر تلاش می‌شود با بکارگیری از الگوریتم SEBAL و SEBS بر روی تصاویر سنجد‌های ETM+ و MODIS در منطقه دشت قزوین میزان دقت و عملکرد الگوریتم‌های مذکور ارزیابی و مقادیر تبخیر و تعرق واقعی با بکارگیری فن سنجد از دور برآورد گردیده و در نهایت الگوریتم برتر معرفی شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

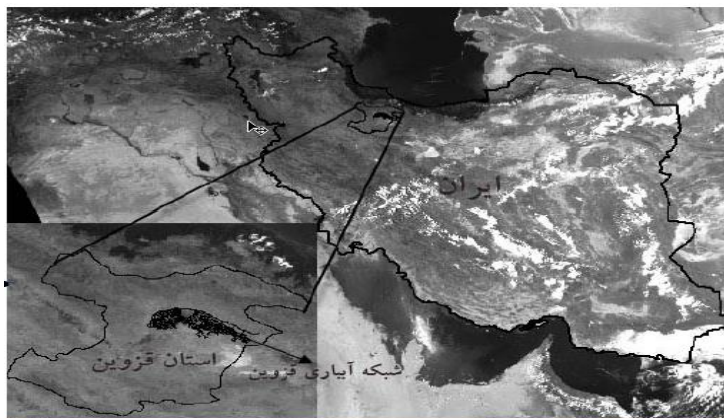
محدوده مورد مطالعه اراضی پایین دست شبکه آبیاری دشت قزوین می‌باشد که در فاصله ۱۵۰ کیلومتری غرب پایتخت و در فواصل جغرافیایی بین عرض‌های جغرافیایی شمالی ۳۶° ۰۰' ۲۰" تا ۳۶° ۰۰' ۰۰" و طول‌های جغرافیایی شرقی ۴۹° ۴۰' ۰۰" تا ۴۹° ۳۵' ۲۵" قرار گرفته است (شکل ۱). جایگاه دشت حاصلخیز قزوین در تامین امنیت غذایی کشور و همچنین قدمت این منطقه در کشت محصولات استراتژیک، اقلیم مناسب، قرار گرفتن در مرکز کشور و نزدیکی به پایتخت همواره مورد توجه کشاورزان بوده است و دشت قزوین را به قطب اقتصادی و کشاورزی تبدیل کرده است. با توجه به اهمیت تامین نیاز آبی در دشت قزوین و برنامه‌ریزی و مدیریت آبیاری

1- De Martonne

2- Evapotranspiration

جدول ۱- طبقه‌بندی اقلیم‌نمای دومارتن (Tabari et al., 2014)

نوع اقلیم	خشک	نیمه خشک	مدیترانه‌ای	نیمه مرطوب	مرطوب	بسیار مرطوب
محدوده ضریب خشکی دومارتن	< ۱۰	۱۰ - ۱۹/۹	۲۰ - ۲۳/۹	۲۴ - ۲۷/۹	۲۸ - ۳۴/۹	> ۳۵



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه

جدول ۲- تاریخ تصاویر مورد بررسی MODIS (منبع سایت earth explorer)

ردیف	تاریخ (شمسی)	روز (ژولوس)	ساعت عبور ماهواره (گرینویچ)	ساعت عبور محلی
۱	۱۳۸۱/۳/۷	۱۴۸	۷/۳۰	۱۲
۲	۱۳۸۱/۳/۹	۱۵۰	۷/۲۰	۱۱/۵۰
۳	۱۳۸۱/۳/۲۷	۱۶۸	۷/۰۵	۱۱/۳۵
۴	۱۳۸۱/۴/۴	۱۷۶	۷/۵۵	۱۲/۲۵
۵	۱۳۸۱/۴/۱۷	۱۸۹	۷/۲۵	۱۱/۵۵
۶	۱۳۸۱/۴/۲۴	۱۹۶	۷/۳۰	۱۲
۷	۱۳۸۱/۵/۹	۲۱۲	۷/۳۰	۱۲
۸	۱۳۸۱/۵/۲۸	۲۳۱	۸	۱۲/۳۰
۹	۱۳۸۱/۶/۲۱	۲۵۵	۷/۱۰	۱۱/۴۰
۱۰	۱۳۸۱/۷/۶	۲۷۱	۷/۱۰	۱۱/۴۰

جدول ۳- تاریخ‌های مورد بررسی تصاویر ETM+ (منبع سایت earth explorer)

ردیف	تاریخ (میلادی)	روز (ژولوس)	ساعت عبور ماهواره (گرینویچ)	ساعت عبور محلی
۱	۱۳۸۰/۲/۳	۱۱۳	۷/۰۴	۱۱/۳۴
۲	۱۳۸۰/۲/۱۹	۱۲۹	۷/۰۴	۱۱/۳۴
۳	۱۳۸۰/۴/۵	۱۷۷	۷/۰۳	۱۱/۳۳
۴	۱۳۸۰/۵/۲۲	۲۲۵	۷/۰۳	۱۱/۳۳
۵	۱۳۸۱/۳/۷	۱۴۸	۷/۰۲	۱۱/۳۲
۶	۱۳۸۱/۵/۹	۲۱۲	۷/۰۲	۱۱/۳۲
۷	۱۳۸۱/۶/۲۶	۲۶۰	۷/۰۲	۱۱/۳۲
۸	۱۳۸۱/۸/۱۳	۳۰۸	۷/۰۲	۱۱/۳۲

جدول ۴- مشخصات سنجنده‌های مورد بررسی (منبع سایت earth explorer)

نام سنجنده	تعداد باند	قدرت تفکیک مکانی (m)	قدرت تفکیک زمانی (day)
Modis	۲-۱	۲۵۰	
	۷-۳	۵۰۰	۲
	۳۶-۸	۱۰۰	
ETM+	۷ و ۵-۱	۳۰	
	۶	۶۰	۱۶
	۸	۱۵	

معادله تجربی شماره ۵ در سال ۲۰۰۰ ارائه کرد (رابطه ۵).

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} \times [0.0032 \times \alpha + 0.0062 \times \alpha^2] \times [1 - 0.97 \times NDVI^2] \quad (5)$$

که در آن T_s دمای سطحی بر حسب درجه سانتی‌گراد، α آلبیدوی سطحی و NDVI شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده می‌باشد.

شار گرمای محسوس (H)

شار گرمای محسوس عبارت از میزان هدر رفت گرما به هوا به وسیله همرفت و هدایت مولکولی به علت اختلاف دما است که با استفاده از معادله ۶ برای انتقال گرما محاسبه می‌شود:

$$H = \frac{\rho_{air} \cdot C_p \cdot dT}{r_{ah}} \quad (6)$$

که در آن ρ_{air} چگالی هوا (kg/m^3)، C_p گرمای ویژه هوا ($1.004 J/kg/K$)، dT اختلاف دمای بین دو ارتفاع (K) و r_{ah} مقاومت آیرودینامیکی برای انتقال گرما (s/m) می‌باشد. H تابعی از گرادین دما، زبری سطح و سرعت باد است.

پیکسل‌های سرد و گرم

مدل SEBAL از دو پیکسل شاخص برای مشخص کردن شرایط مرزی در معادله بیلان انرژی استفاده می‌کند. 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. انتخاب این دو پیکسل به مهارت و تمرین نیاز دارد و همچنین در مدل SEBAL کیفیت محاسبات ET به انتخاب دقیق این دو پیکسل وابسته است (Bastiaanssen et al., 2000).

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (2)$$

در این معادله λE شار گرمای نهان (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 ($\frac{W}{m^2}$) می‌باشد.

تابش خالص خورشیدی (R_n)

تابش خالص خورشیدی بر اساس بقای انرژی تعیین می‌شود که مطابق آن مجموع انرژی تابشی وارد و خارج شده از سطح زمین برابر با تابش خالص است:

$$R_n = (1 - \alpha) R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0) R_{L\downarrow} \quad (3)$$

که در آن α 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)، ϵ_0 گسیل‌مندی عریض باند می‌باشد (Bastiaanssen., 2000).

شار گرمای خاک (G)

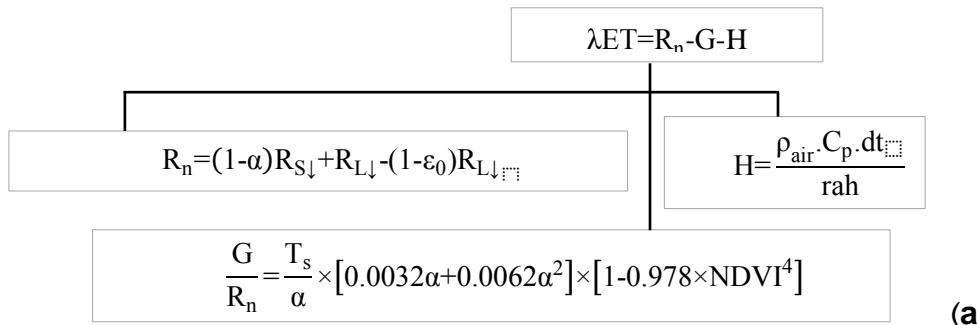
شار حرارتی خاک از رابطه ۴ به دست می‌آید.

$$G_0 = \lambda_s \frac{dT}{dz} \quad (4)$$

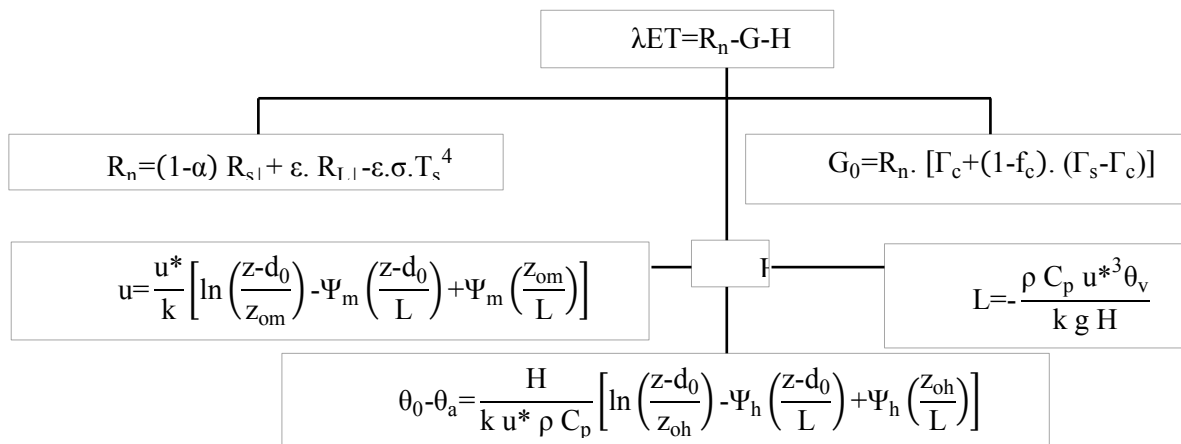
در این معادله λ_s هدایت حرارتی خاک، dT اختلاف حرارت بین T_0 و T_1 ، dz اختلاف عمق بین z_0 و z_1 می‌باشد.

معادله فوق در الگوریتم SEBAL قابل استفاده نمی‌باشد، چون معمولاً اطلاعاتی از T_1 و λ_s در دست نمی‌باشد. بنابراین باستیانسن نسبت $\frac{G}{R_n}$ را برای نیمه روز (با توجه به این که شار گرمای خاک میزان ذخیره گرمای داخل خاک و پوشش گیاهی، در اثر هدایت مولکولی می‌باشد و در نیمه روز این مقدار ذخیره گرما به حداکثر می‌رسد بنابراین نسبت $\frac{G}{R_n}$ را برای نیمه روز محاسبه می‌شود) با استفاده از

- 1- Actual net radiation flux at the surface
- 2- Sensible heat flux



شکل ۲- فلوجارت معادله بیلان انرژی در الگوریتم SEBAL



شکل ۳- فلوجارت معادله بیلان انرژی در الگوریتم SEBS

NDVI به عنوان شاخص SAVI (Bastiaanssen et al., 2000) اصلاح شده برای مناطق با پوشش گیاهی کم توسعه داده شده است که از رابطه ۸ قابل محاسبه می‌باشد.

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

که L فاکتور تصحیح اثرات زمینه خاکی می‌باشد که بین صفر برای پوشش گیاهی بسیار زیاد و یک برای پوشش گیاهی بسیار کم قرار می‌گیرد و می‌تواند با یک معادله به شکل رابطه ۹ بدست آید.

که ضریب a برابر ۱/۶ و WDVI^۳ از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود.

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

که در آن γ ضریب خط خاک (Soil Line Coefficient) است و از نمودار شکل ۴ بدست می‌آید (Wenging., 2006)

پارامترها و ضرایب مشترک در الگوریتم‌ها شاخص NDVI

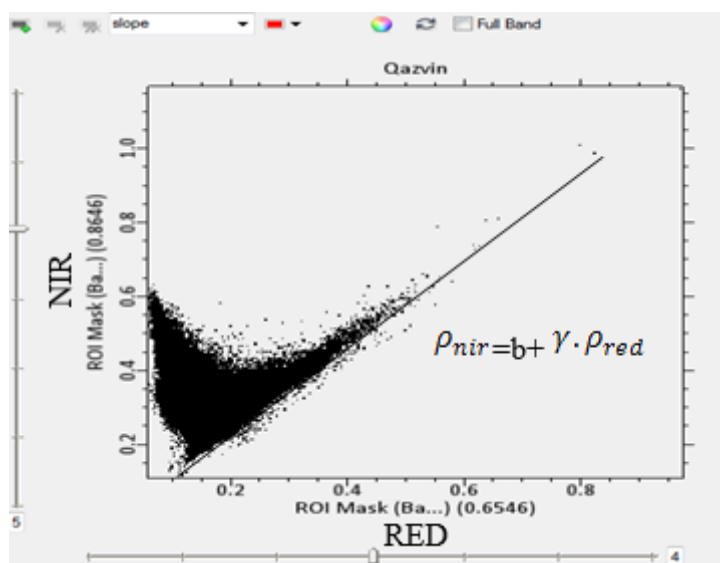
NDVI معمول‌ترین شاخص توصیف کننده پوشش گیاهی است که از بکارگیری باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک تصاویر ماهواره‌ای بدست می‌آید و از رابطه ۷ محاسبه می‌شود (Bastiaanssen et al., 2000)

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

که ρ_{RED} و ρ_{NIR} بازتابش‌های اندازه‌گیری شده به ترتیب مربوط به باندهای مادون قرمز نزدیک و قرمز می‌باشد.

شاخص SAVI

در مناطقی که با کمبود پوشش گیاهی مواجه می‌باشند، بازتابش نور در طیف مادون قرمز و مادون قرمز نزدیک از سطح خاک، می‌تواند مقدار شاخص پوشش گیاهی را تحت تاثیر قرار دهد



شکل ۴ - تعریف و تعیین ضریب خط خاک از ترکیب باندهای مادون قرمز و قرمز

جدول ۵- روند محاسباتی گسیل‌مندی سطح (Bastiaanssen et al., 2000)

NDVI ≥ 0	LAI < 3	$\epsilon_0 = 0.95 + 0.01LAI$
	LAI > 3	$\epsilon_0 = 0.98$
NDVI ≤ 0	برای آب و برف	$\epsilon_0 = 0.98$

آلبدوی سطح α

آلبدو به عنوان نسبت تابش منعکس شده از سطح به تابش ورودی تعریف می‌شود. وقتی یک شی بیش تر نوری که به آن تابیده می‌شود را بازتاب می‌کند روشن است و آلبدوی آن بالاست. اما وقتی جسمی بیش تر نوری که به آن تابیده می‌شود را جذب می‌کند آن جسم تیره است و آلبدوی آن پایین است. آلبدو بسته به نوع گیاه، کیفیت و عمق آب، نوع خاک و حتی برای یک گیاه در دوران مختلف رشد متفاوت است (Jensen et al., 1998). آلبدوی سطحی با تصحیح مقدار α_{TOA} برای اثرات شفافیت جوی و از طریق رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود.

$$\alpha = \frac{\alpha_{ToA} - \alpha_{path_radiance}}{\tau_{sw}^2} \quad (12)$$

که در آن α_{toa} آلبدوی بالای جو، $\alpha_{path-radiance}$ آلبدوی ناشی از رادیانس مسیر و در واقع میانگین بخشی از رادیانس فرودی خورشیدی برای تمام باندهاست که قبل از رسیدن به سطح زمین به سمت سنجنده پراکنده شده است (Bastiaanssen et al., 2000) مقدار آن بین ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۴ است و τ_{sw} شفافیت جوی می‌باشد. آلبدوی بالای جو از رابطه ۱۳ محاسبه می‌شود:

$$\alpha_{toa} = \sum (\omega_i \times \rho_i) \quad (13)$$

در این پژوهش از مقدار $L=0/5$ استفاده شده است. در مقالات برای زمین‌هایی با پوشش گیاهی متوسط مقدار $L=0/5$ پیشنهاد شده است (Allen et al., 2002).

شاخص سطح برگ LAI^1

شاخص سطح برگ نشان دهنده مقاومت تاج پوشش گیاهی است و به صورت نسبت مساحت کل برگ‌های گیاه به سطح زمین پوشانده شده توسط آن گیاه تعریف می‌شود. LAI از رابطه ۱۱ بدست می‌آید (Bastiaanssen., 2000).

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

حداکثر مقدار LAI برابر ۶ می‌باشد که با مقدار حداکثر $SAVI=0/687$ انطباق دارد. بدین معنا که تا موقعی که $SAVI$ برابر با $0/687$ شود، LAI افزایش می‌یابد و پس از آن با افزایش $SAVI$ تغییر محسوسی در مقدار LAI مشاهده نمی‌شود (Wenging., 2006)

گسیل‌مندی سطح ϵ_0

گسیل‌مندی سطحی به صورت نسبت انرژی گرمایی تابیده شده به وسیله سطح به انرژی گرمایی تابیده شده به وسیله جسم سیاه در همان دما تعریف می‌شود.

گیاهی مانع از بازتابش امواج از سطح خاک شده و در نهایت میزان شار گرمای خاک کاهش می‌یابد (شکل ۶-ا) و (۶-ب) تا شکل ۹-ا) و (۹-ب). از طرف دیگر این عامل رابطه مستقیمی با تراکم پوشش گیاهی و شاخص NDVI داشته است. بنابراین در روند برآورد تبخیر و تعرق واقعی و در انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم اهمیت ویژه‌ای دارند. پس از محاسبه شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس، نقشه‌های تبخیر و تعرق تولید شده که هر کدام حاصل نقشه‌های بدست آمده از موارد مختلف هم‌چون شاخص سطح برگ، دمای سطح زمین، NDVI و ... می‌باشد که در شکل‌های (۱۰-ا) و (۱۰-ب) برای سنجنده MODIS و (۱۱-ا) و (۱۱-ب) برای سنجنده لندست ۷ آورده شده است. در بررسی‌های انجام شده بر اساس شاخص‌های آماری در جدول ۶ مقایسه نتایج تبخیر و تعرق محاسبه شده برای سنجنده MODIS نشان داد، الگوریتم SEBS با مقدار $r=0/884$ هم‌بستگی بیش‌تری نسبت به الگوریتم SEBAL با مقدار $0/65$ در محاسبه تبخیر و تعرق دارد. RMSE برای الگوریتم SEBS برابر با $1/55$ میلی‌متر در روز و برای SEBAL برابر با $2/31$ میلی‌متر در روز است که نشان می‌دهد الگوریتم SEBS برآورد دقیق‌تری نسبت به الگوریتم SEBAL از تبخیر و تعرق دارد. مقدار CRM برای روش SEBS مقدار $0/136$ - میلی‌متر در روز است که مقدار منفی آن نشان از بیش برآورد کردن این الگوریتم نسبت به داده‌های لایسیمتر است. در بررسی مقدار این شاخص آماری برای برآوردهای بدست آمده از الگوریتم SEBAL مقدار CRM برابر با $0/319$ میلی‌متر در روز است که مثبت بودن این شاخص، نشان از کم برآورد کردن مقدار تبخیر و تعرق نسبت به داده‌های لایسیمتر است. مقدار MBE برای SEBAL با مقدار $1/939$ - میلی‌متر در روز تأیید کننده کم برآورد شدن تبخیر و تعرق توسط الگوریتم و مقدار مثبت $0/827$ میلی‌متر در روز برای SEBS، تأیید کننده بیش برآورد تبخیر و تعرق نسبت به لایسیمتر است. کم‌ترین خطای استاندارد ESE با مقدار $1/633$ میلی‌متر در روز مربوط به الگوریتم SEBS است. با توجه به آزمون یک‌طرفه ANOVA و مقدار P-VALUE که در جدول ۶ آورده شده است برای تصاویر سنجنده MODIS می‌توان نتیجه گرفت که نتایج الگوریتم SEBS با نتایج لایسیمتری در سطح 95% اختلاف معنی‌داری داشته و برآورد دقیق‌تری از تبخیر و تعرق نسبت به الگوریتم SEBAL دارد.

که در آن ρ_i بازتابندگی هر باند و ω_i ضریب وزنی برای هر باند است.

معیارهای آماری واسنجی (شاخص‌های خطاسنجی)

در این پژوهش برای ارزیابی کارایی روش SEBAL و SEBS در مقابل داده‌برداری‌های زمینی لایسیمتر در برآورد تبخیر و تعرق دشت قزوین از شش آماره خطاسنجی استفاده گردید. رابطه‌های (۱۳ تا ۱۸) مربوط به این آماره‌ها می‌باشد (Gervasio et al., 2008)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (E_{si} - E_{oi})^2}{n-1}} \quad (13)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n ABS(E_{si} - E_{oi})}{n} \quad (14)$$

$$ESE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (E_{si} - E_{oi})^2}{n-1} \right)^{0.5} \quad (15)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (E_{si} - E_{oi})}{n} \quad (16)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (E_{oi} - \bar{E}_o) (E_{si} - \bar{E}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_{oi} - \bar{E}_o)^2 \sum_{i=1}^n (E_{si} - \bar{E}_s)^2}} \quad (17)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n E_{oi} - \sum_{i=1}^n E_{si}}{\sum_{i=1}^n E_{oi}} \quad (18)$$

که در آن‌ها، RMSE، جذر خطای میانگین مربعات (mm/day)، MAE، میانگین خطای مطلق (mm/day)، MBE، خطای اریب میانگین (mm/day)، r ضریب همبستگی (-)، ESE: خطای استاندارد (mm/day)، CRM، ضریب جرم باقی‌مانده (mm/day)، مقادیر E_{si} و E_{oi} به ترتیب مقدار برآورد شده، شاهدو میانگین این دو مقدار می‌باشد که واحد آن‌ها میلی‌متر بر روز و n : تعداد داده‌ها می‌باشد.

نتایج و بحث

از آن‌جا که شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس دو عامل اصلی در معادله بیلان انرژی و در نهایت برآورد تبخیر و تعرق هستند بنابراین ابتدا به بررسی این دو عامل پرداخته شده است. نقشه‌های شار گرمای خاک تولید شده بیانگر این موضوع است که با افزایش پوشش گیاهی در نهایت با افزایش شاخص NDVI مقدار شار گرمای خاک کاهش یافته است و این موضوع موید این مطلب است که در دوره کشت (فصل رشد) در دشت قزوین و به دلیل تراکم پوشش

جدول ۶- مقایسه نتایج تبخیر و تعرق محاسبه شده برای سنجنده MODIS

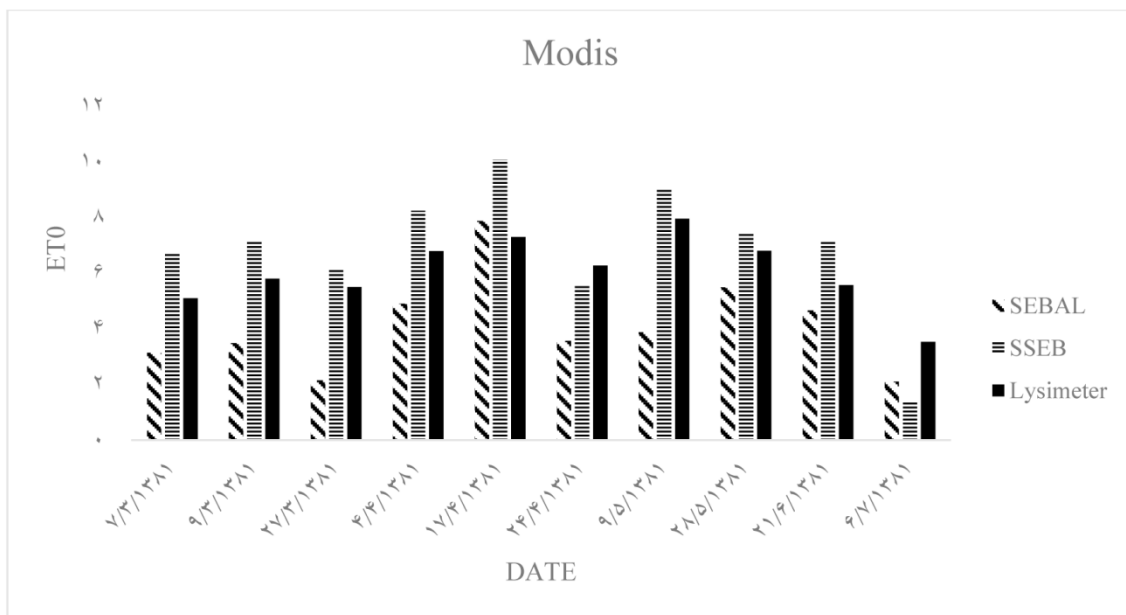
RMSE (mm/day)	MBE (mm/day)	R (mm/day)	ESE (mm/day)	MAE (mm/day)	CRM (mm/day)	P- VALUE	
۱/۵۴۹	۰/۸۲۷	-۰/۸۸۳	۱/۶۳۳	۱/۴۰۵	-۰/۱۳۶	۰/۰۳۴	SEBS
۲/۳۰۱	۱/۹۳۹-	-۰/۶۵۳	۲/۴۲۶	۲/۰۵۵	-۰/۳۱۹	۰/۰۰۹	SEBAL

جدول ۷- جدول پارامترهای آماری برای ماهواره landsat7

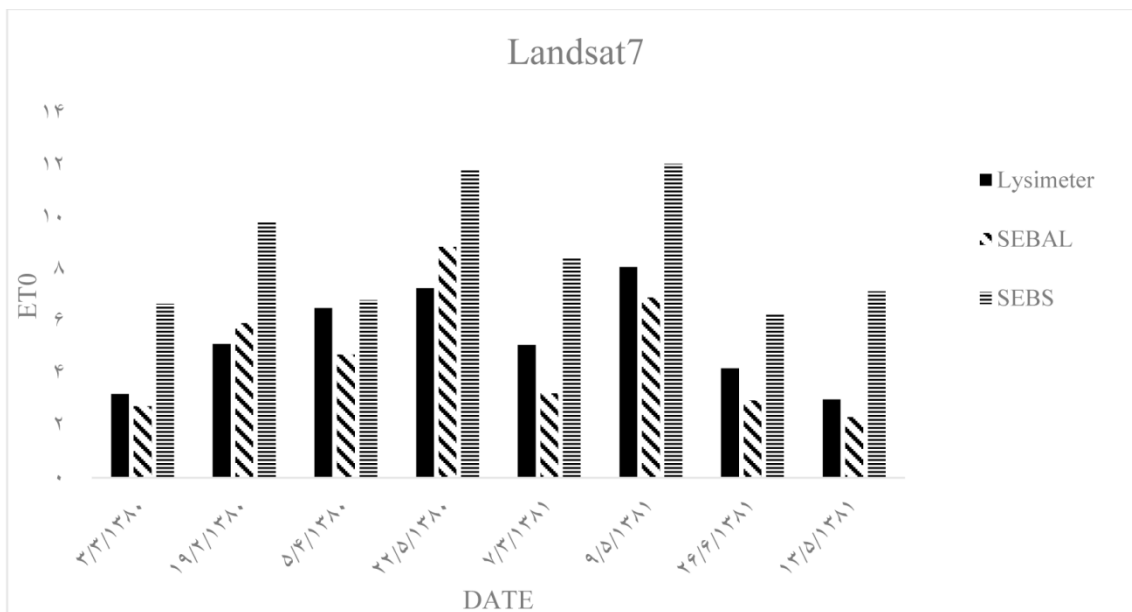
RMSE (mm/day)	MBE (mm/day)	R (mm/day)	ESE (mm/day)	MAE (mm/day)	CRM (mm/day)	P- VALUE	
۳/۶۰۵	۳/۳۳۳	۰/۷۷۶	۳/۸۵۴	۳/۳۳۳	۰/۶۲۶-	۰/۰۰۶	SEBS
۱/۲۹۴	۰/۶۰۰-	۰/۸۵۴	۱/۳۸۳	۱/۱۹۹	۰/۱۱۲	۰/۰۵	SEBAL

با توجه به این که فاصله زیادی از صفر ندارد؛ برآورد بهتری را نسبت به الگوریتم SEBS برای ماهواره landsat7 نشان می‌دهد. مقدار MBE برای SEBAL با مقدار ۰/۶- میلی‌متر در روز تأیید کننده کم برآورد شدن تبخیر و تعرق توسط الگوریتم و مقدار مثبت ۳/۳۳ برای SEBS، تأیید کننده بیش برآورد تبخیر و تعرق نسبت به لایسیمتر است. کم‌ترین خطای استاندارد ESE با مقدار ۱/۳۸ میلی‌متر در روز مربوط به الگوریتم SEBAL است. از بررسی نتایج آنالیز واریانس الگوریتم SEBAL با داده‌برداری لایسیمتر براساس تصاویر ماهواره landsat7 براساس مقدار P-VALUE بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت در سطح ۹۵٪ برآوردهای بدست آمده از الگوریتم SEBAL دارای اختلاف معنی‌داری با داده‌های لایسیمتری بوده و برآورد دقیق‌تری از تبخیر و تعرق نسبت به الگوریتم SEBS دارد.

هم‌چنین طبق بررسی‌های صورت گرفته براساس شاخص‌های آماری در جدول ۷ در مقایسه برآورد تبخیر و تعرق براساس هر دو الگوریتم مورد بررسی در سنجنده ETM+، الگوریتم SEBAL با مقدار t برابر با ۰/۸۵۴ همبستگی بیش‌تری نسبت به الگوریتم SEBS با مقدار ۰/۷۷۶ میلی‌متر در روز برای تصویر ماهواره landsat7 در محاسبه تبخیر و تعرق دارد. RMSE برای الگوریتم SEBAL برابر با ۱/۲۹۴ میلی‌متر در روز و برای SEBS برابر با ۳/۶۰۵ میلی‌متر در روز است که نشان می‌دهد الگوریتم SEBAL برآورد دقیق‌تری نسبت به الگوریتم SEBS از تبخیر و تعرق دارد. مقدار CRM برای روش SEBS مقدار ۰/۶۲۶- میلی‌متر در روز است که مقدار منفی آن نشان بیش برآورد کردن الگوریتم نسبت به داده‌های لایسیمتر است و برای روش SEBAL این مقدار برابر با ۰/۱۱۲ است نشان دهنده کم برآورد کردن مقدار تبخیر و تعرق نسبت به داده‌های لایسیمتر دارد و



شکل ۵-ا

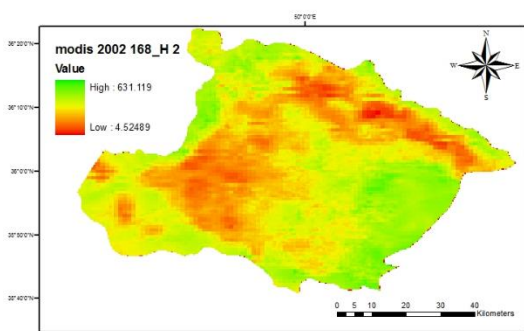


شکل ۵-ب

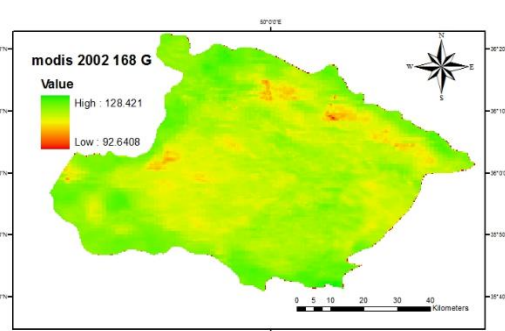
شکل ۵-ا- روند برآورد تبخیر و تعرق به روش SEBAL و SEBS سنجنده MODIS و مقایسه با داده‌های لایسیمتر
 شکل ۵-ب- روند برآورد تبخیر و تعرق به روش SEBAL و SEBS ماهواره Landsat7 و مقایسه با داده‌های لایسیمتر

پیکسل سائزهای سنجنده MODIS و در نتیجه دشواری در انتخاب دقیق پیکسل‌های سرد و گرم می‌تواند دلیل دیگری برای برتری کارایی الگوریتم SEBS در تصاویر سنجنده MODIS باشد. در مورد تصاویر Landsat 7 در اجرای این الگوریتم‌ها می‌توان گفت چون در این تصاویر مشکل خطا در انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم به دلیل اندازه بزرگ‌تر ابعاد پیکسل در این تصاویر کم‌تر می‌شود الگوریتم SEBAL توانسته برآورد دقیق‌تری نسبت به الگوریتم SEBS نشان دهد (شکل ۵-ب). در مورد تصاویر با وضوح تصویر بالاتر برای این منطقه بهتر است از الگوریتم SEBAL استفاده شود.

نتایج بدست آمده از تصاویر سنجنده‌ها و الگوریتم‌های ذکر شده در شکل‌های (۵-ا) و (۵-ب) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود و طبق نتایج آماری بدست آمده از تصاویر سنجنده MODIS، برآوردهای محاسبه شده براساس الگوریتم SEBS به نتایج لایسیمتری نزدیک‌تر بود. هم‌چنین نتایج شاخص‌های آماری موجود در جدول ۶ تایید کننده این مطلب می‌باشند. علت برتری الگوریتم SEBS در برآورد تبخیر و تعرق به کمک سنجنده MODIS را می‌توان به عدم نیاز به انتخاب پیکسل سرد و گرم در این الگوریتم نسبت به الگوریتم SEBAL دانست، هم‌چنین با توجه به اندازه

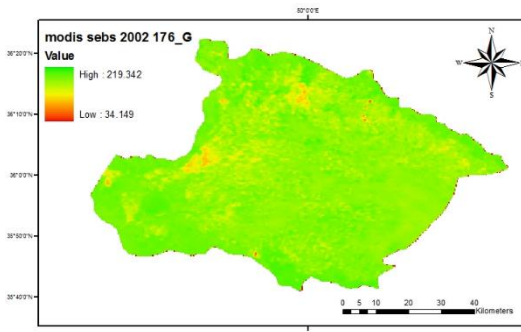


شکل ۶-ب

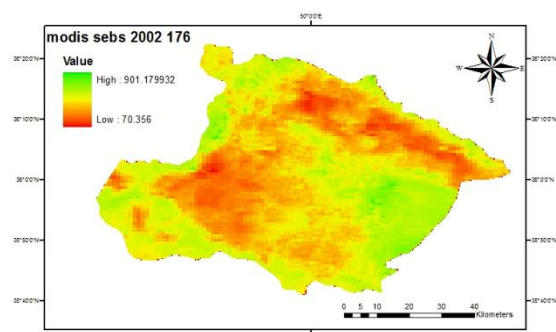


شکل ۶-ا

شکل ۶-ا- نمونه نقشه شار گرمای خاک بدست آمده با استفاده از الگوریتم SEBAL در ماهواره MODIS (۸۱/۳/۲۷)
 شکل ۶-ب- نمونه نقشه شار گرمای محسوس بدست آمده با استفاده از الگوریتم SEBAL در ماهواره MODIS (۸۱/۳/۲۷)

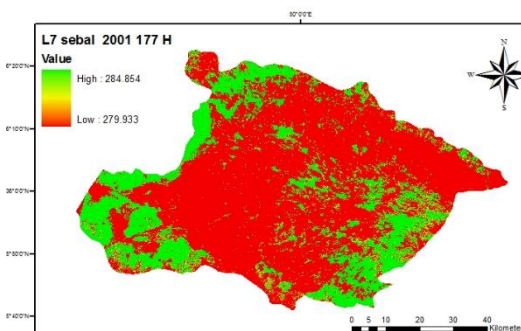


شکل ۷-ب

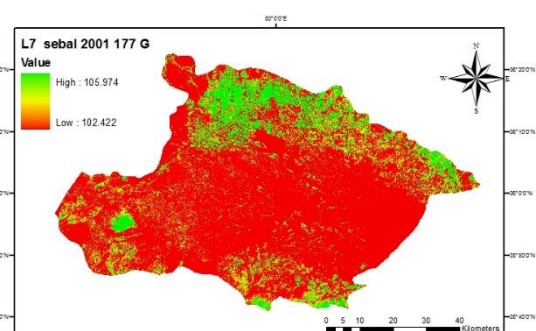


شکل ۷-آ

شکل ۷-آ- نمونه نقشه شار گرمای خاک بدست آمده با استفاده از الگوریتم SEBS در ماهواره MODIS (۱۳۸۱/۴/۴)
 شکل ۷-ب- نمونه نقشه شار گرمای محسوس بدست آمده با استفاده از الگوریتم SEBS در ماهواره MODIS (۱۳۸۱/۴/۴)

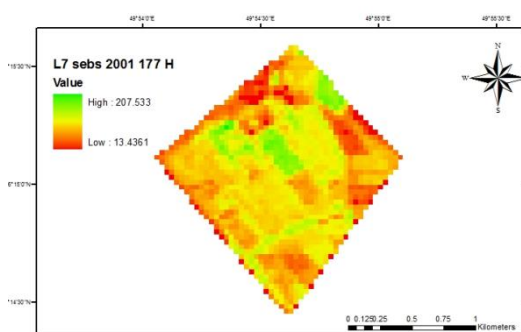


شکل ۸-ب

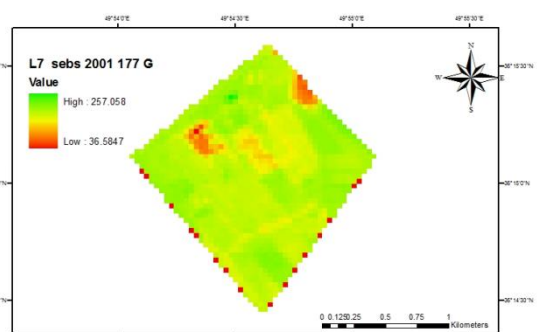


شکل ۸-آ

شکل ۸-آ- نمونه نقشه شار گرمای خاک بدست آمده با استفاده از الگوریتم SEBAL در ماهواره لندست ۷ (۱۳۸۰/۴/۵)
 شکل ۸-ب- نمونه نقشه شار گرمای محسوس بدست آمده با استفاده از الگوریتم SEBAL در ماهواره لندست ۷ (۱۳۸۰/۴/۵)



شکل ۹-ب

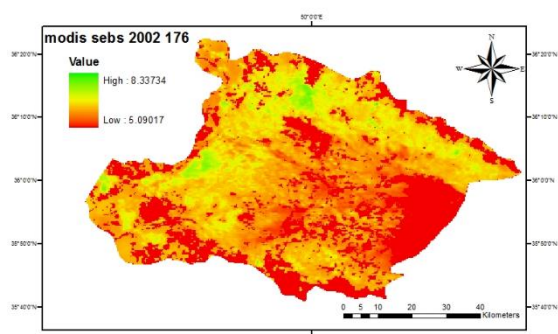


شکل ۹-آ

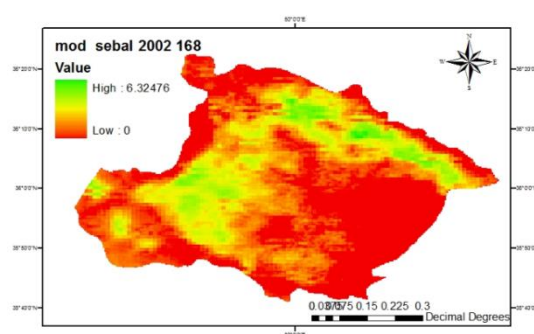
شکل ۹-آ- نمونه نقشه شار گرمای خاک بدست آمده با استفاده از الگوریتم SEBS در ماهواره لندست ۷ (۱۳۸۰/۴/۵)
 شکل ۹-ب- نمونه نقشه شار گرمای محسوس بدست آمده با استفاده از الگوریتم SEBS در ماهواره لندست ۷ (۱۳۸۰/۴/۵)

محسوس با افزایش میزان NDVI و در نهایت تراکم پوشش گیاهی میزان بازتابش از سطح گیاه افزایش یافته و شار گرمای محسوس افزایش یافته است.

طبق نتایج بدست آمده از ترکیب رنگ کاذب در هر دو سنجنده برای نمونه نقشه‌های شار گرمای خاک در مناطقی با تراکم پوشش گیاهی کم‌تر به دلیل افزایش میزان بازتاب از سطح خاک مقدار شار گرمای خاک افزایش یافته است. در نمونه نقشه‌های شار گرمای

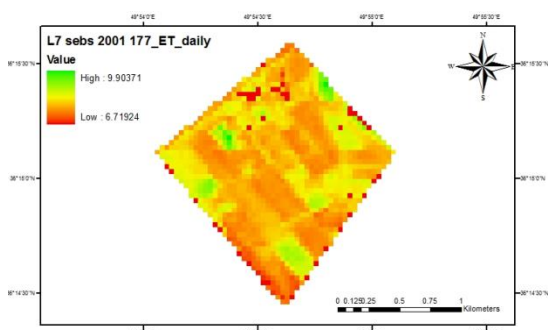


شکل ۱۰-ب

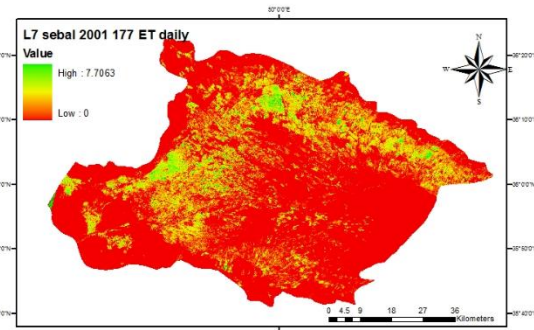


شکل ۱۰-آ

شکل ۱۰-آ- نمونه نقشه تبخیر و تعرق بدست آمده با استفاده از الگوریتم SEBAL و تصویر MODIS (۱۳۸۰/۴/۴) شکل ۱۰-ب- نمونه نقشه تبخیر و تعرق بدست آمده با استفاده از الگوریتم SEBS و تصویر MODIS (۱۳۸۰/۴/۴)



شکل ۱۱-ب



شکل ۱۱-آ

شکل ۱۱-آ- نمونه نقشه تبخیر و تعرق بدست آمده با استفاده از الگوریتم SEBAL و تصویر ETM+ (۱۳۸۰/۴/۵) شکل ۱۱-ب- نمونه نقشه تبخیر و تعرق بدست آمده با استفاده از الگوریتم SEBS و تصویر ETM+ (۱۳۸۰/۴/۵)

ارزیابی نتایج الگوریتم SEBS با دو نقطه زمینی براساس شاخص‌های آماری نشان داد که الگوریتم SEBS عملکرد خوبی در سطح زمین و آب دارد.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر سعی شده است با توجه به شرایط بحرانی و کم‌آبی موجود، با تخمین نیاز آبی که یکی از مهم‌ترین فاکتورها برای مدیریت بهینه آب تلقی می‌شود به برآورد هرچه دقیق‌تر این عامل مهم پرداخته شود و همچنین فن‌سنجش از دور برای برآورد این عامل با صرف هزینه و زمان کم و از فاصله دور مورد ارزیابی قرار گیرد. از بین روش‌های مطرح در زمینه استفاده از سنسجش از راه دور، روش‌های بیان انرژی سطحی برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی بیش‌تر استفاده شده است. در این تحقیق دو الگوریتم SEBAL و SEBS بر روی تصاویر ماهواره landsat7 و سنسجند MODIS مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی دقت این روش‌ها، نتایج حاصل از

براساس معادله بیان انرژی و پس از محاسبه شار گرمای محسوس و شار گرمای خاک، میزان تبخیر و تعرق برآورد شد که براساس نقشه‌های ارایه شده برای هر دو الگوریتم در هر دو سنسجند مورد ارزیابی قرار گرفت. براساس نتایج بدست آمده به دلیل اهمیت انتخاب پیکسل سرد و گرم در برآورد مقدار تبخیر و تعرق الگوریتم SEBAL در سنسجند ETM+ این الگوریتم نتایج قابل‌قبولی را از خود ارایه داده است و این می‌تواند به دلیل وضوح تصویر و افزایش قدرت مکانی این سنسجند نسبت به سنسجند MODIS باشد. فرهادی بانسوله و همکاران در سال ۱۳۹۰ در مقایسه‌ای که بر روی دو الگوریتم SEBAL و SEBS براساس تصاویر Landsat TM در کرمانشاه انجام دادند، نشان دادند که هر دو الگوریتم تطابق خوبی با نتایج لایسیمیتری داشته و حداکثر تفاوت تبخیر و تعرق محاسبه شده با الگوریتم‌های SEBAL و SEBS در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده به ترتیب حدود ۹/۷۹ و ۴/۵۶ بوده است. همچنین در بررسی محمد ابراهیم و همکاران (۱۳۹۶) در برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS در منطقه دشت سیستان نیز مقایسه و

دشت قزوین و مقایسه نتایج آن با داده‌های لایسیمتر. مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۵. ۲: ۱۶۵ - ۱۷۵.

مباشری، م. ۱۳۸۵. مبانی فیزیک در سنجش از دور و فناوری ماهواره-ای، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصرالدین طوسی.

محمد ابراهیم، م.، محمدرضاپور، ا.، اکبرزاده، ه.، سه‌قلعه، م. ۱۳۹۶. ارزیابی مدل SEBS در برآورد تبخیر - تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS در مقیاس منطقه‌ای (مطالعه موردی: دشت سیستان). مجله اکوهیدرولوژی. ۴. ۴: ۱۱۴۱ - ۱۱۵۰.

Akbari, M., Toomanian, N., Droogers, P., Bastiaanssen, W.G.M., Gieske, A. Monitoring irrigation performance in Esfahan, Iran using NOAA satellite imagery. 2007. Agricultural water management. 88: 99-109.

Allen, R., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R.A. 2003. Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. Journal of Irrigation and Drainage Systems. 19: 251-268

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. 4: 380-394

Bastiaanssen W., "SEBAL -based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey", 2000, Journal of hydrology, 229: 87-100

Bastiaanssen, W.G.M., Noordman, E.J.M., Pelgrum, H., David, G., Thoreson, B.P and Allen, R.G. 2005. (SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water Resources Management under Actual Field Conditions. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 131.1: 85-93.

Bastiaanssen, W.G.M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J.F., Roerink van der Wal, G.J.T. 1998. A remote sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) Validation. Journal of Hydrology. 212-213: 213-229

Gervasio Pineiroa, G., Perelman, S., Guerschman, J.P and Paruelo, J.M. 2008. How to evaluate models: Observed vs. predicted or predicted vs. observed? ecological modeling. 216: 316-322. Comparison

<https://earthexplorer.usgs.gov/>

Jia, L., Su, Z.h., Hurk, B., Menenti, M. 2003. Estimation sensible heat flux using the Surface Energy Balance System (SEBS) and ASTER measurement. Physics and Chemistry of the Earth. 28: 75-88

Kustas, W.P and Norman, J.M. 1997. A two-source approach for estimating turbulent fluxes using multiple angle thermal infrared observations. Water

ماهواره های landsat7 و سنجنده MODIS از داده‌های لایسیمتر استفاده شد. برای سنجنده MODIS الگوریتم SEBS و برای ماهواره landsat7 الگوریتم SEBAL نتایج قابل قبول تری از برآورد تبخیر و تعرق ارایه دادند. چون انتخاب پیکسل سرد و گرم در الگوریتم SEBAL تاثیر بسیار زیادی در نتیجه بدست آمده دارد و تصویر سنجنده MODIS از وضوح بالایی برخوردار نیست؛ بنابراین الگوریتم SEBAL نسبت به الگوریتم SEBS در این ماهواره دقت کمتری دارد. از بین تصاویر ماهواره‌ای مورد بررسی؛ تصویر landsat7 برای برآورد تبخیر و تعرق به کمک الگوریتم SEBAL نسبت به سنجنده MODIS برتری دارد و برای برآورد تبخیر و تعرق به کمک الگوریتم SEBS تصویر سنجنده MODIS پیشنهاد می‌شود.

منابع

ابراهیمی، ح.، یزدانی، و. ۱۳۹۲. محاسبه تبخیر و تعرق فضای سبز به روش سبال (مطالعه موردی: پارک ملت مشهد). نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۰. ۳: ۱۳۱-۱۵۱

باباجعفری، ح.، پایمرد، ش.، مقدسی، م.، باقری، م. ح. ۱۳۹۴. ارزیابی الگوریتم SEBS در برآورد تبخیر و تعرق واقعی براساس تصاویر سنجنده AVHRR ماهواره NOAA (مطالعه موردی دشت تبریز). نشریه پژوهش‌های کاربردی علوم آب. ۱. ۲: ۱-۱۰.

سیمایی، ا.، همایی، م.، نوروزی، ع. ۱۳۹۲. ارزیابی مدل SEBAL برای برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از اطلاعات سنجنده‌های TM و MODIS. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۲. ۴: ۲۹-۴۰

ضیایی، ر.، مقدسی، م. ۱۳۹۳. ارزیابی تبخیر و تعرق برآورد شده از سطوح آزاد آب با استفاده از الگوریتم‌های سنجش از دوری SEBS و SEBAL در منطقه مطالعاتی دریاچه ارومیه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد.

علیزاده، ا. طراحی سیستم‌های آبیاری زهکشی. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع). مشهد

علیقلی‌نیات، رسولی‌مجدن، رضایی، ح.، جباری، آ. ۱۳۹۵. کاربرد شبکه عصبی در پیش‌بینی تبخیر و تعرق با حداقل داده‌های هواشناسی. مجله محیط زیست و مهندسی آب. ۲. ۲: ۱۲۲-۱۳۴.

فرهادی بانسوله، ب.، کریمی، ع.، حسادی، ه. ۱۳۹۵. برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبس و تصاویر لندست در ماهیدشت. نشریه آب و خاک (علوم صنایع کشاورزی). ۳۰. ۳: ۷۶-۷۱.

کاوایی، ع.، سهرابی، ت و دانش کار آراسته، پ. ۱۳۹۰. کاربرد الگوریتم SEBAL در تخمین تبخیر - تعرق و بهره‌وری آب کشاورزی در

- Tabari,H., Hosseinizadeh Talae,P., Mousavi Nadoushani,S.S., Willems,P. 2014. A survey of temperature and precipitation based aridity indices in Iran. *Quaternary International*. 345: 158-166.
- Ugyen Eden. 2012. Drought Assessment Evapotranspiration Mapping in Twente, the Netherlands. MSc Thesis. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation.
- Ma,W., Ma,Y., Ishikawa,H. 2014. Evaluation of the SEBS for upscaling the evapotranspiration based on in-situ observations over the Tibetan Plateau. *Atmospheric Research*. 138:91-97
- Wenjing,L. 2006. 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.
- Resources Research. 33: 1495-1508
- 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
- Sánchez,J., Kustas,W., Caselles,V and Anderson,M. 2008. Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations. *Remote Sensing of Environment*. 112: 1130-1143
- Senay,G.B., Bohms,S., Singh,R.K., Gowada,P.H., Velpuri,N.M. 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
- Su,Z. 2002. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and earth system science*. 6.1:85-99.

Comparison Result of Evaluating Actual Evapotranspiration of Crops and Orchards by SEBS and SEBAL Algorithms (Case study: Qazvin plain)

F. firuzi Nezam abadi¹, A. kaviani^{2*}, M. Moghaddasi³, B. Bahmanabadi⁴

Recived: May.18, 2018

Accepted: Jul.04, 2018

Abstract

The precise estimation of actual evapotranspiration of crops and orchards is one of the major challenges in large scale area but the values obtained are limited to the position of the metrological station and the results are not reliable. The purpose of this research is to evaluate the estimation of evapotranspiration in Qazvin plain by using Modis and ETM+ imageries and Energy balance Algorithms. The result of algorithms were evaluated with lysimetric data in 2001 and 2002. The statistical results showed that the ETM+ sensor provides more accurate estimation of evapotranspiration when using SEBAL algorithm with ($r=0/85$, $RMSE=1/29$, $ESE=0/11$) mm/day and SEBS algorithms in MODIS imageries with ($r=0/88$, $RMSE=1/55$, $CRM=0/14$ and $ESE=1/6$) mm/day would have more accurate results. Meanwhile, the SEBS algorithm is more preferable to the SEBAL algorithm because this algorithm doesn't need to choose hot and cold pixels.

Keyword: Energy Balance algorithms, ETM+, Evapotranspiration, Modis

1- M.Sc. Graduated Student of Irrigation and Drainage of Water Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2- Assistant Professor of Water Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

3- Assistance Professor of Water Engineering, College of Agriculture, Arak University, Arak, Iran.

4-M.Sc. Graduated Student of Irrigation and Drainage Department. of Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

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