

برآورد تبخیر- تعرق واقعی گیاهان زراعی به کمک الگوریتم‌های بیلان انرژی در دشت قزوین

بهاره بهمن آبادی^۱، عباس کاویانی^{۲*}، پیمان دانشکار آراسته^۳، رستا نظری^۴

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد و دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام

خمینی (ره)، قزوین

۲. استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

۳. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

۴. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۱۱/۱۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۳/۲۵)

چکیده

تخمین دقیق تبخیر- تعرق در برنامه‌ریزی‌های توسعه آبیاری اهمیت ویژه‌ای دارد. تخمین این پارامتر به صورت پیوسته در مکان و با فواصل زمانی کوتاه، فرصت بسیار باارزشی را برای مدیریت بخش‌های مختلف شبکه‌های آبیاری فراهم می‌آورد. بنابراین، در تحقیق حاضر از داده‌های لایسومتر زهکش‌دار برای صحت‌سنجی نتایج به دست آمده از تخمین تبخیر-تعرق با استفاده از سه الگوریتم تک‌منبعی SEBAL، METRIC و SSEB و یک الگوریتم دومنبعی TSEB کمک گرفته شد. به منظور برآورد تبخیر-تعرق از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده‌های MODIS، ETM+ طی سال‌های ۱۳۷۹-۱۳۸۲ و تصاویر سنجنده OLI & TIRS طی سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۹۵ استفاده شد. به دلیل عدم تطابق زمانی تصویربرداری سنجنده OLI & TIRS با زمان داده‌برداری لایسومتر، نتایج به دست آمده از تصاویر این سنجنده با نتایج روش هارگریوز-سامانی (به عنوان روش برتر) ارزیابی شد. نتایج شاخص‌های آماری از برآوردهای به دست آمده بین الگوریتم‌های تک‌منبعی نشان داد الگوریتم SSEB با کمترین میزان جذر میانگین خطا در هر سه سنجنده MODIS، ETM+ و OLI & TIRS (میلی‌متر بر روز ۰/۸۷، ۰/۴۱ و ۰/۹۲) و همبستگی زیادی که با داده‌های لایسومتري داشت (R= ۰/۹۶، ۰/۹۹ و ۰/۹۷) به عنوان الگوریتم برتر برای تخمین تبخیر-تعرق در منطقه مطالعه شده است. با توجه به وضوح تصاویر در سنجنده‌های ETM+ و OLI & TIRS دقت نتایج تخمین تبخیر-تعرق در این دو سنجنده پذیرفته است و در نهایت سنجنده ETM+ بهترین نتایج را ارائه داد.

کلیدواژگان: الگوریتم‌های تک‌منبعی و دومنبعی، تبخیر-تعرق، تصاویر ماهواره‌ای.

مقدمه

تبخیر- تعرق یک فرایند کلیدی در بیلان آب و المان مهمی در بیلان انرژی است که برآورد دقیق آن نه تنها در مطالعات و ارزیابی منابع آب اهمیت زیادی دارد، بلکه کاربرد فراوانی در مدیریت نیاز آبی محصول، پیش‌بینی و نظارت بر خشکسالی و توسعه بهره‌برداری منابع آب دارد [۱]. دقیق‌ترین روش برآورد تبخیر- تعرق، استفاده از لایسیمتر است که این روش به صرف وقت و هزینه زیادی نیاز دارد. علاوه بر این، روش‌های مختلف تجربی برای تخمین تبخیر- تعرق وجود دارد که عوامل زیادی همچون اقلیم و پارامترهای گیاهی در تخمین آن دخیل‌اند. همچنین، روش‌های سنتی استفاده شده به صورت نقطه‌ای هستند و فقط می‌توانند میزان تبخیر- تعرق را در یک نقطه و یا یک منطقه کوچک و برای زمان‌هایی مشخص تعیین کنند و برای نواحی وسیع‌تر عملاً قابل استفاده نیستند [۲]. بنابراین، با توجه به تغییرات مکانی عوامل دخیل در تبخیر- تعرق اعم از سطح تبخیرشونده و عوامل محیطی مؤثر بر آن در برآورد میزان تبخیر- تعرق باید اقدام به مدل‌سازی توزیعی کرد [۳]. برآورد تبخیر- تعرق واقعی و پراکنش مکانی آن از مواردی است که به کمک سنجش از دور امکان‌پذیر است و اهمیت زیادی نسبت به روش‌های نقطه‌ای دارد و برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در سطح کلان نیز این پراکنش بسیار مهم است [۴]. در بین روش‌هایی که برای برآورد تبخیر- تعرق از طریق سنجش از دور وجود دارد، روش‌های «بیلان انرژی» کاربرد بیشتری دارند [۵].

به طور کلی، روش‌های مبتنی بر بیلان انرژی به دو دسته الگوریتم‌های تک‌منبعی^۱ همچون SEBAL، METRIC و SSEB و دومنبعی^۲ مانند TSEB تقسیم می‌شوند. به‌منظور صحت‌سنجی الگوریتم SEBAL، از اطلاعات موجود تبخیر- تعرق مزارع در مقیاس بزرگ در کشورهای چین، هند، اسپانیا و پاکستان استفاده شد. در نهایت، مقایسه اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای تبخیر- تعرق با نتایج به دست آمده از الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای نشان داد در ۸۵ درصد موارد داده‌های به‌دست آمده از الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین با داده‌های مزرعه‌ای بدون هیچ‌گونه واسنجی مطابقت داشته است [۶] بعدها در سال

۲۰۰۳ این الگوریتم اصلاح شد [۷]. برآورد تبخیر- تعرق روزانه در نیومکزیکو با استفاده از الگوریتم SEBAL، برای دو تصویر لندست و MODIS نشان داد، تبخیر- تعرق روزانه به‌دست‌آمده از تصویر لندست انحراف معیار بیشتر و استانداردتر از تصاویر MODIS دارد، اما متوسط مقادیر تبخیر- تعرق روزانه برای دو تصویر خیلی مشابه است که تفاوت این دو مقدار در دقت مکانی، هندسی و رادیومتریکی این دو تصویر است [۸]. نتایج تحقیقی که برای برآورد تبخیر- تعرق واقعی مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از دو الگوریتم SEBAL و METRIC در مشهد انجام شده، نشان داد الگوریتم SEBAL نسبت به الگوریتم METRIC به اندازه ۸/۹۳ درصد کمی برآورد در محاسبه تبخیر- تعرق روزانه در اراضی کشت‌شده را به دنبال داشته است [۹]. براساس نتایج برآورد نیاز آبی درختان زیتون با استفاده از داده‌های سنجش از دوری و تصاویر ماهواره‌ای در منطقه طارم استان زنجان، مقدار خطای روش SEBAL به‌دست‌آمده از تصاویر MODIS نسبت به روش پنمن مانیت ۲۲ درصد برآورد شد و به طور کلی مقادیر نتایج تخمین زده‌شده از تصاویر MODIS بیشتر از مقدار تبخیر- تعرق واقعی برآوردشده از روش پنمن مانیت است [۱۰]. از جمله پژوهش‌های انجام‌شده برای مدیریت منابع آب ایالات غربی آمریکا در زمینه الگوریتم METRIC می‌توان به برآورد تبخیر- تعرق چمن و چغندر قند با به کار بردن الگوریتم METRIC و مقایسه مقادیر لایسیمتری اشاره کرد که در آن، میزان خطا به ترتیب ۴ و ۱ درصد، برای فصل رشد، به‌دست آمد [۱۱]. طبق تحقیقات انجام‌شده در برزیل از تصاویر ماهواره لندست و الگوریتم METRIC می‌توان به‌منظور برآورد مصرف آب و بهبود مدیریت آب در نواحی نیمه‌خشک و تحت آبیاری شمال شرق برزیل استفاده کرد [۱۲]. در ایران نیز به بررسی امکان‌سنجی کارایی دو مدل SEBAL و METRIC با استفاده از تصاویر MODIS در شهرستان ملایر پرداخته شد. نتایج نشان داد الگوریتم SEBAL در مقایسه با الگوریتم METRIC حدود ۵/۲۶ درصد کمی برآورد داشته است، اما در نهایت هر دو مدل مقدار تبخیر- تعرق واقعی را متناسب با توزیع مکانی منطبق با شرایط پستی و بلندی و پوشش گیاهی شهرستان ملایر برآورد کردند [۱۳]. همچنین، تغییرات مکانی و زمانی نیاز آبی دشت قزوین با به‌کارگیری الگوریتم متریک و تصاویر ماهواره لندست ارزیابی شد و در نهایت نتایج نشان داد

1. Single Source
2. Two Source

کلیه شرایط اتمسفری و پوشش‌های گیاهی متفاوت مناسب معرفی شده است [۲۲]. از جمله بررسی‌هایی که در مقایسه با الگوریتم‌های سنجش از دوری تک‌منبعی و دومنبعی شار انرژی در برآورد تبخیر- تعرق انجام شد، می‌توان به پژوهش باقری هارونی و همکارانش در دشت تبریز اشاره کرد که در آن به مقایسه الگوریتم‌های تک‌منبعی SEBAL و METRIC و الگوریتم‌های دومنبعی TSEB و SETEB^۱ پرداخته شد و نتایج عملکرد منطقی و مورد قبول کلی الگوریتم‌ها را ارائه داد که در مقایسه، SETEB با خطای مطلق بیشتر نسبت به TSEB به ترتیب بهترین و بدترین عملکرد را داشتند. الگوریتم‌های تک‌منبعی با اینکه از فرضیات پیچیده الگوریتم‌های دومنبعی بهره‌ای ندارند، نتایج مناسبی ارائه دادند و برای کار در سطوح وسیع‌تر نیز توجیه دارند [۲۳]. آنجا که هر یک از الگوریتم‌های بیلان انرژی با فرضیاتی امکان تخمین تبخیر و تعرق را فراهم می‌سازند و از سوی دیگر، میزان اتکای هر یک از الگوریتم‌ها به داده‌های میدانی با یکدیگر متفاوت است، بنابراین در تحقیق حاضر عملکرد و دقت الگوریتم‌های تک‌منبعی SEBAL، SSEB و METRIC و الگوریتم دومنبعی TSEB برای تخمین تبخیر- تعرق در دشت قزوین بررسی و مقایسه شده است. از سوی دیگر، خصوصیات سنجنده‌های مختلف فرصت‌های متفاوتی را در کاربرد هر یک از آنها در اختیار محققان قرار می‌دهد. به همین دلیل، در تحقیق حاضر تلاش شده است تا بهترین سنجنده‌ای که امکان تخمین دقیق‌تر و مطلوب‌تر تبخیر و تعرق را در دشت قزوین فراهم می‌سازد، معرفی شود.

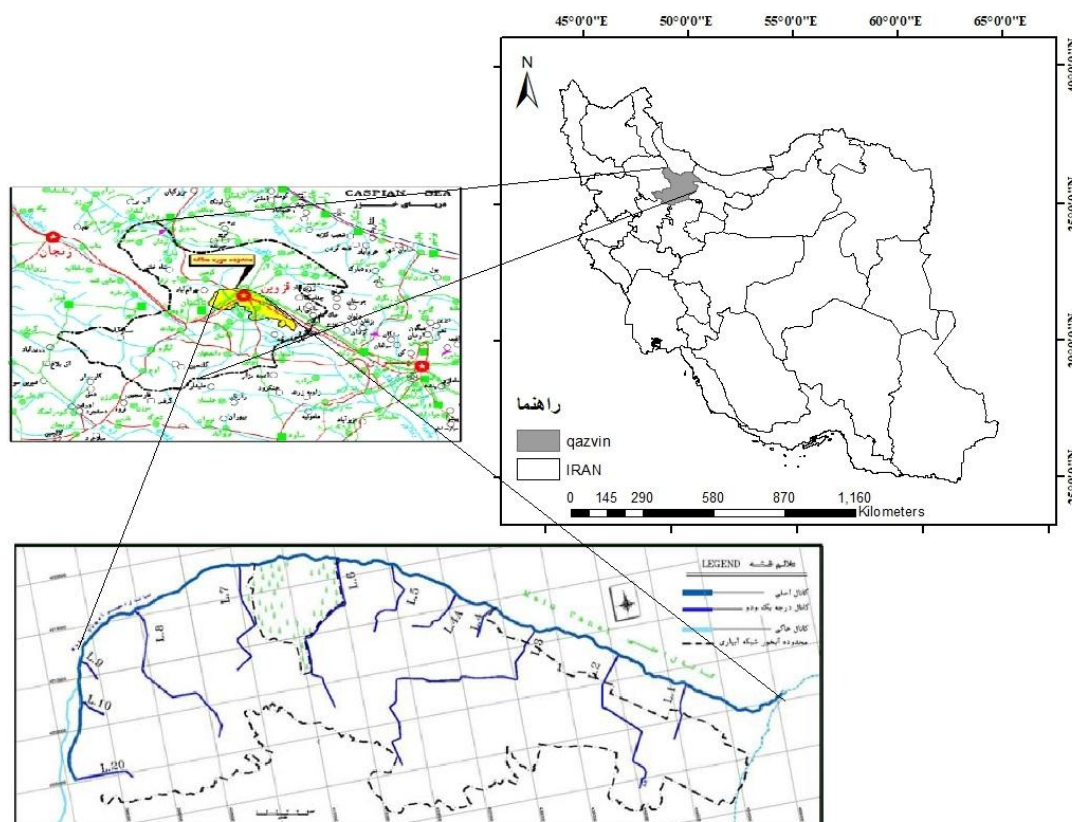
مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده و داده‌های استفاده شده

دشت قزوین به مساحت ۶۵ هزار هکتار حد فاصل طول‌های "۰۰'۰۰" تا "۰۰'۳۵" و "۰۰'۳۵" شرقی و عرض‌های جغرافیایی "۰۰'۰۰" تا "۰۰'۳۶" ، "۰۰'۳۶" شمالی بخشی از استان قزوین را شامل می‌شود. میانگین دمای سالانه این منطقه ۱۴/۲ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش ۳۰۱ میلی‌متر است. براساس اقلیم‌نمای دوارتن، اقلیم منطقه نیمه‌خشک محسوب می‌شود.

الگوریتم METRIC می‌تواند به‌عنوان یک روش کارا، دقیق و ارزان، به‌منظور برآورد مکانی و زمانی شدت تبخیر- تعرق واقعی اراضی مرتفع مناطق خشک و نیمه‌خشک استفاده شود [۱۴]. آخرین الگوریتم تک‌منبعی که در تحقیق حاضر به آن می‌پردازیم، الگوریتم ساده‌شده بیلان انرژی (SSEB) است که در سال ۲۰۰۷ توسعه داده شد. به خلاف الگوریتم SEBAL، در این الگوریتم محاسبه تبخیر- تعرق براساس اطلاعات هواشناسی ساده‌تری انجام می‌گرفت که بر مبنای فرضیه تغییرات خطی شار گرمای نهان و تغییرات سطح است. محاسبه تبخیر- تعرق (ET) از طریق کسر تبخیر- تعرق براساس میانگین دمای پیکسل‌های سرد و گرم انجام می‌شود [۱۵]. پیکسل گرم اشاره به مناطق بدون پوشش گیاهی و یا دارای پوشش گیاهی پراکنده با مقدار ET کمتر دارد و پیکسل سرد نشان‌دهنده بیشترین مقدار تبخیر- تعرق در منطقه مطالعه شده است و باید در مناطق آبیاری شده و یا پوشش گیاهی متراکم داشته باشد. این روش همبستگی زیادی با نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های SEBAL و METRIC دارد [۱۵ و ۱۶]. در مقایسه نتایج SEBAL و SSEB با مقدار ET به‌دست‌آمده از نسبت بوون در مزرعه آزمایشی کتان ایالت سیرای برزیل؛ نتایج به‌دست‌آمده 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، روش SSEB به‌عنوان روشی مناسب برای مناطقی معرفی شد که کلیه اطلاعات هواشناسی در آنجا موجود نیست [۱۷]. در ایران تغییرات پوشش گیاهی مزرعه نیشکر امیرکبیر با استفاده از تکنیک سنجش از دور بررسی شده که طی آن برای تعیین تبخیر- تعرق مزرعه از الگوریتم SSEB استفاده شد. با بررسی روند تغییرات زمانی تبخیر- تعرق، تغییرات زمانی پوشش گیاهی و کاهش تراکم پوشش گیاهی طی چندین سال به دست آمد [۱۸]. الگوریتم بیلان انرژی دومنبعی TSEB در سال ۱۹۹۵ توسعه داده شده و سپس در سال ۱۹۹۷ اصلاح شد [۱۹ و ۲۰]. در بررسی‌هایی که روی مقایسه الگوریتم تک‌منبعی و دومنبعی در شمال چین انجام گرفت، هر دو الگوریتم نتایج قابل قبولی داشتند، اما الگوریتم دومنبعی در مقایسه با اندازه‌گیری‌های زمینی با خطای بیشتری روبه‌رو بود [۲۱]. در بررسی عملکرد الگوریتم دومنبعی TSEB در مناطق مختلف با پوشش‌های گیاهی متفاوت، این الگوریتم برای برآورد تبخیر- تعرق پتانسیل در

۱. مدل سنجش از دوری که ترکیبی از مدل‌های SEBAL و TSEB است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی استان قزوین و محدوده مطالعه شده

تغییرات این شاخص بین +۱ و -۱ است. این شاخص براساس تراکم پوشش گیاهی و داده‌های باندهای قرمز و مادون قرمز محاسبه می‌شود (رابطه ۱).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (1)$$

که در سنجنده‌های مختلف باندهای مربوط به طول موج قرمز و مادون قرمز متفاوت است.

شاخص SAVI

در مناطق با پوشش گیاهی نامتراکم بازتابش نور در طیف قرمز و مادون قرمز نزدیک از سطح خاک، می‌تواند مقدار شاخص NDVI را تحت تأثیر قرار دهد. SAVI یا شاخص تعدیل خاک پوشش گیاهی به عنوان اصلاح‌کننده شاخص NDVI در مناطق با پوشش گیاهی تنک توسعه داده شده است. از اهداف شاخص یادشده، به حداقل رساندن آثار خاک در پس‌زمینه سیگنال‌های گیاهی به وسیله ترکیب کردن فاکتور تنظیم‌کننده خاک (L) با مخرج معادله NDVI است [۳۸]. از دیگر دلایل استفاده از شاخص یادشده این است که

به منظور اعتبارسنجی نتایج الگوریتم‌های بررسی شده، از مقادیر تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده لایسیمتر چمن واقع در ایستگاه اسماعیل‌آباد به طول جغرافیایی ۳۹،۵۴° و عرض جغرافیایی ۳۶،۱۵° استفاده شد. لایسیمتر از نوع زهکش‌دار با مساحت دو مترمربع و عمق دو متر در مرکز زمینی به مساحت ۲۵۰۰ مترمربع تحت کشت یکنواخت چمن قرار گرفته است [۲۴].

شاخص‌های مشترک در الگوریتم‌های چهارگانه بیلان انرژی

انرژی

شاخص NDVI

شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال‌شده، یک شاخص گرافیکی است که به مطالعه رفتار زمانی پوشش گیاهی، مدل‌سازی آب و هوایی، طبقه‌بندی پوشش گیاهی در سطح جهانی، پایش محصولات کشاورزی، مطالعات بیابان‌زدایی و خشک‌سالی، حفاظت محیط زیست، بررسی تعادل میزان انرژی و آب در سطح جهانی می‌پردازد. دامنه

آلبیدوی سطح

آلبیدوی سطح زمین، نسبت تابش منعکس شده از سطح خاک و گیاه بر تابش ورودی که بسته به نوع و تراکم گیاهی، عمق آب و نوع خاک متفاوت است. یکی از متغیرهای مهم هواشناسی در محاسبه ترازمندی تابشی سطح، نیاز آبی گیاهان و شرایط مرزی مدل‌های اقلیمی است [۳۰].

$$\alpha = \frac{\alpha_{\text{toa}} - \alpha_{\text{path, radiance}}}{\tau_{\text{sw}}^2} \quad (4)$$

الگوریتم SEBAL

الگوریتم SEBAL یا الگوریتم بیلان انرژی روی سطح زمین از پرکاربردترین و مهم‌ترین روش‌های باقی‌مانده بیلان انرژی است. این روش اندازه‌گیری باندهای مادون قرمز حرارتی، مادون قرمز نزدیک و مرئی داده‌های سنجش از دور را به عنوان ورودی مؤلفه‌های معادله بیلان انرژی در محاسبه تبخیر-تعرق ارائه می‌دهد که در واقع در روش یادشده شار گرمای نهان که به مصرف تبخیر-تعرق می‌رسد، براساس مقدار باقی‌مانده انرژی از معادله ۵ تعیین می‌شود.

$$\lambda E = R_n - G - H \quad (5)$$

در معادله یادشده λE شار گرمای نهان R_n ، $\frac{W}{m^2}$ ، شار تابش خالص G ، $\frac{W}{m^2}$ ، شار گرمای خاک H و $\frac{W}{m^2}$ و شار گرمای محسوس $\frac{W}{m^2}$ است.

METRIC

با توجه به پایه‌ریزی الگوریتم METRIC بر مبنای الگوریتم SEBAL این دو الگوریتم شباهت‌های زیادی با یکدیگر دارند (شکل ۲). بنابراین، در این قسمت به تفاوت‌های مراحل محاسباتی این دو الگوریتم اشاره می‌شود.

برآورد شار تابش خالص

در الگوریتم SEBAL ضریب شفافیت اتمسفری از رابطه ۶ به دست می‌آید که در آن Z معرف ایستگاه هواشناسی است.

$$\tau_{\text{sw}} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} \times Z \quad (6)$$

خطوط همپوش گیاهی (Isovegetation) موازی نیستند و به طور کامل یک نقطه را پوشش نمی‌دهند. شاخص پوشش گیاهی با انعکاس خاک (SAVI)، یک شاخص بسیار خوب برای محیط‌های با پوشش کم است [۲۵].

$$SAVI = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}} + L} (1 + 1) \quad (2)$$

در رابطه ۲، L معیاری برای تصحیح تأثیرات خصوصیات طیفی خاک روی بازتاب‌های طیفی تاج پوشش است [۲۶]، که مقادیر آن از صفر تا یک پیشنهاد می‌شود.

شاخص سطح برگ

تخمین ویژگی‌های ساختاری پوشش گیاهی نظیر شاخص سطح برگ یک قدم مهم در تعیین مقدار آب مصرفی در گیاهان مختلف است [۲۷]. این شاخص نشان‌دهنده نسبت کل برگ‌های گیاه به سطح زمین پوشانده شده توسط گیاه است که از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$LAI = \frac{-\left(\ln\left(\frac{0.69 - SAVI}{0.59}\right)\right)}{0.91} \quad (3)$$

شاخص سطح برگ در گیاهان مختلف بین ۲-۵ متغیر است.

گسیلمندی سطحی ϵ_0

توان تابشی یا گسیلمندی طیفی یک جسم، کمیتی وابسته به خصوصیات ذاتی و درونی، آرایش اتمی و ساختار مولکولی آن است و با نسبت تابش حرارتی یک جسم در دمای معلوم به تابش جسم سیاه هم‌دم با آن در یک طول موج معین، تعریف می‌شود [۲۸]. گسیلمندی به پارامترهای متعددی وابسته است و با ترکیبات سطحی از جمله رطوبت، زبری سطح و ابعاد ذرات تغییر می‌کند. درباره گیاهان، مساحت سطح برگ و وضعیت رشد گیاه نیز روی گسیلمندی تأثیر می‌گذارد [۲۹]. روند محاسباتی آن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. روند محاسباتی گسیلمندی سطح

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

برآورد شار گرمای خاک

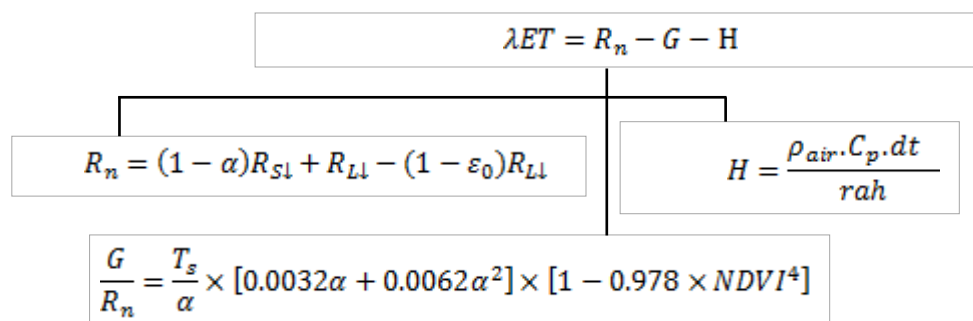
برای برآورد شار گرمای خاک از معادله تجربی ۸ استفاده می‌شود [۳۱]

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} (0.038\alpha + 0.074\alpha^2) (1 - 0.98NDVI^4) \quad (8)$$

که در آن T_s : دمای سطح زمین (K)، و α : آلبیدوی سطح (-) است. در روش METRIC شار گرمای خاک به شکل دیگری محاسبه می‌شود.

$$\frac{G}{R_n} = 0.05 + 0.18e^{-0.51LAI} \quad LAI \geq 0.5 \quad (9)$$

$$\frac{G}{R_n} = \frac{1/8(\tau_s - 273/15)}{R_n} + 0.084 \quad LAI < 0.5 \quad (10)$$



شکل ۲. الگوریتم محاسباتی بیان انرژی در الگوریتم [SEBAL] و [METRIC]

$$ET_f = \frac{T_H - T_x}{T_H - T_C} \quad (11)$$

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-تعرق واقعی هر پیکسل در تصویر از معادله ۱۲ برآورد می‌شود.

$$ET_a = ET_f \times kET \quad (12)$$

ET_0 : تبخیر-تعرق گیاه مرجع (mm/day) است که از معادله استاندارد تبخیر-تعرق مرجع (ASCE) محاسبه می‌شود [۳۲]. k یک ضریب که تبخیر-تعرق مرجع گیاه چمن را به ماکزیمم مقدار تبخیر-تعرقی که گیاه با مقاومت آیرودینامیکی بالا داشته است؛ می‌رساند. سنای و همکارانش در سال ۲۰۱۳ مقدار ۱/۲ را برای k پیشنهاد کردند که در تحقیق حاضر از این مقدار استفاده شد [۳۳].

روش استفاده‌شده برای METRIC به صورت رابطه ۷ است [۱۱]

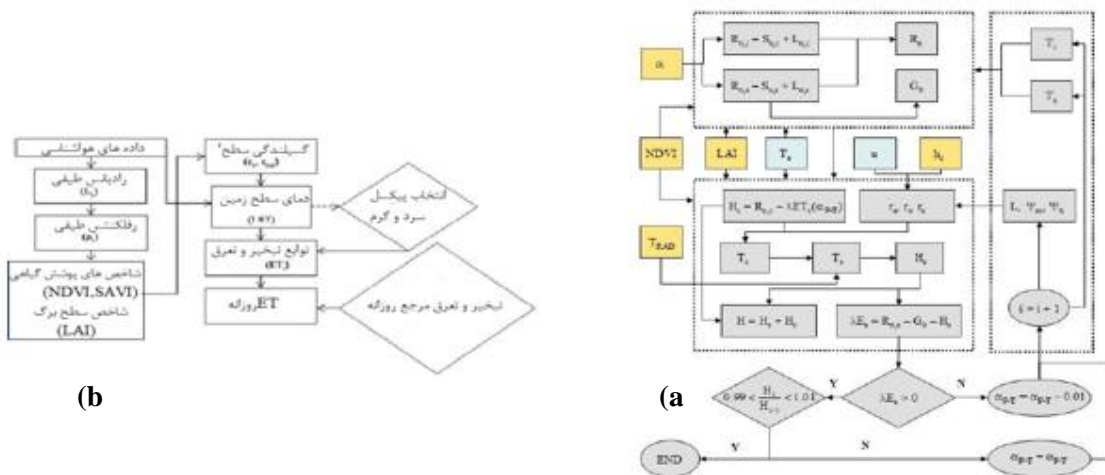
$$\tau_{sw} = 0.35 + 0.627 \times \exp\left[\frac{-0.0146p}{k_t \cos \theta_{zenit}} - 0.75 \left(\frac{W}{\cos \theta_{zenit}}\right)^{0.4}\right] \quad (7)$$

در این رابطه p فشار اتمسفر (kpa)، w آب موجود در اتمسفر (mm)، θ_{zenit} زاویه زینت خورشیدی و k_t ضریب مه‌آلودگی که برای هوای تمیز برابر با ۱ و برای هوای آلوده برابر با ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود [۲۳]

الگوریتم SSEB

مراحل انجام روش SSEB (شکل ۳) در گام نخست 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 الگوریتم SEBAL پیکسل‌های سرد از مزارع کاملاً آبیاری شده با مقدار NDVI زیاد و با کمترین مقدار دمای روشنایی^۱ و از سوی دیگر، پیکسل گرم در تصویر از مزارع بدون پوشش گیاهی یا دارای پوشش گیاهی اندک با دمای رادیومتریکی زیاد و مقدار NDVI خیلی کم انتخاب می‌شوند. با فرض اینکه پیکسل‌های سرد و گرم به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار تبخیر-تعرق را در منطقه مطالعه شده دارند، بنابراین از دمای پیکسل‌های سرد و گرم می‌توان در محاسبه کسر تبخیر-تعرق برای هر پیکسل در تصویر استفاده کرد [۱۵]. در گام دوم کسر تبخیر-تعرق (ET_f) برای هر پیکسل طبق معادله ۱۱ محاسبه می‌شود:

1. Brightness temperature



شکل ۳. فلوچارت (a) الگوریتم [۱۹TSEB] و (b) الگوریتم [۱۵SASEB]

تا ۰/۵ متغیر است [۳۵] و C_G اغلب ۰/۳۵ در نظر گرفته می‌شود [۳۴ و ۱۹].

شار گرمای نهان (H)

شار گرمای نهان مهم‌ترین و سخت‌ترین قسمت محاسبات مدل‌های تک‌منبعی و دومنبعی است که در الگوریتم TSEB نیز پیچیدگی‌های خاصی دارد. همان‌طور که قبلاً مطرح شد، شار گرمای نهان در مدل‌های دومنبعی به دو قسمت خاک و پوشش گیاهی تفکیک می‌شود. رابطه کلی محاسبه شار گرمای نهان به صورت رابطه ۱۸ است:

$$H = \rho C_p \frac{T_o - T_{air}}{R_{ah}} \quad (18)$$

که در آن T_o دمای آیرودینامیک هوا، T_{air} دمای هوا (کلوین)، ρ چگالی هوا (kg/m^3)، C_p گرمای ویژه هوا ($J/kg/K$) و R_{ah} مقاومت آیرودینامیکی هوا (S/m) است. اندازه‌گیری یا برآورد دمای آیرودینامیک، عملاً غیر ممکن و پیچیده است و به‌منظور رفع این مشکل، از دمای رادیومتریک (T_{rad}) استفاده می‌کنند که مستقیم از باندهای حرارتی تصاویر ماهواره‌ای قابل استخراج است. رابطه ۱۹ به‌منظور جداسازی شار گرمای محسوس به لایه‌های خاک و پوشش گیاهی بیان می‌شود.

$$H = H_s + H_c = \rho C_p \frac{T_c - T_{air}}{R_{ah}} + \rho C_p \frac{T_s - T_{air}}{R_a + R_s} \quad (19)$$

در رابطه یادشده R_s مقاومت آیرودینامیکی به انتقال گرمای خاک، R_a مقاومت آیرودینامیکی به انتقال گرما از بالای هوای پوشش گیاهی، T_s دمای خاک و T_c دمای پوشش گیاهی است.

الگوریتم دومنبعی TSEB

الگوریتم TSEB از جمله الگوریتم‌های مطرح در بین مدل‌های دومنبعی است که در آن خاک و گیاه را به عنوان دو منبع جداگانه بررسی می‌کند (شکل ۳). اساس این الگوریتم در برآورد شار انرژی، معادله بیلان انرژی است (رابطه ۱۳).

$$LE = R_n - G - H \quad (13)$$

در رابطه یادشده LE شار گرمای نهان، R_n تابش خالص، G شار گرمای خاک و H شار گرمای محسوس است. در مدل دومنبعی یادشده، به غیر از G، تمامی اجزای یادشده برای دو لایه خاک و پوشش گیاهی به‌صورت مجزا برآورد می‌شود [۱۹]. که بر این اساس روابط ۱۴-۱۶ برقرار است.

$$R_n = R_{n,c} + R_{n,s} \quad (14)$$

$$H = H_c + H_s \quad (15)$$

$$LE = LE_c + LE_s \quad (16)$$

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

شار گرمای خاک (G)

در الگوریتم TSEB، شار گرمای خاک ضریبی از تابش خورشیدی به خاک ($R_{n,s}$) مطابق با رابطه ۱۷ در نظر گرفته می‌شود:

$$G = C_G R_{n,s} \quad (17)$$

ضریب C_G مقدار ثابت وابسته به نوع خاک، میزان رطوبت آن و زمان گذر ماهواره است که مقدار آن بین ۰/۲

فروردین تا شهریور استفاده شده است. از این رو، تعداد و تاریخ تصاویر ارزیابی شده بسته به شرایط آب و هوایی زمان برداشت و تاریخ گذر ماهواره از منطقه یکسان نیستند.

شاخص‌های آماری

با هدف مقایسه نتایج به دست آمده از کاربرد الگوریتم‌های بیلان انرژی با مقادیر مشاهداتی از لایسیمتر و روش تجربی برتر (هارگریوز- سامانی) در منطقه مطالعه شده 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 به دست آمده از الگوریتم‌های سنجش از دوری، از آزمون T-Test استفاده شد که صحت‌سنجی برای سنجنده‌های MODIS و ETM+ و OLI & TIRS در سطح معناداری ۹۵ درصد صورت گرفت تا احتمال تصادفی بودن نتایج به دست آمده بررسی شود.

برآورد اولیه LE_c

با استفاده از معادله پریستلی- تیلور ابتدا برآورد اولیه‌ای از میزان تبخیر-تعرق از سطح پوشش گیاهی (LE_c) انجام می‌شود:

$$LE_c = \alpha_{PT} f_g \frac{S}{S + \gamma} R_{n,c} \quad (20)$$

که در آن $R_{n,c}$: تابش خالص جزء خاک و f_g : کسری از LAI است که تعرق فعال دارد [S.۳۵]: شیب منحنی فشار بخار اشباع-دما، γ : ثابت رطوبتی ($0.066 \text{ KPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) و α_{PT} : ضریب پریستلی- تیلور که برابر ۱/۳ است.

استخراج، آماده‌سازی و پردازش تصاویر

در تحقیق حاضر 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 ۲ ارائه شده است.

در پژوهش حاضر از ۲۲ تصویر بدون ابر و روزانه از ماهواره MODIS، ۱۶ تصویر از ماهواره Landsat7 و ۱۶ تصویر از ماهواره Landsat8 طی فصل رشد از ماه

جدول ۲. مشخصات سنجنده‌های بررسی شده [۳۶]

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

$$MAE = N^{-1} \sum_{i=1}^n (ET(Mod)_i - ET(Obs)_i) \quad (21)$$

$$MBE = \sum_{i=1}^n (ET(Mod)_i - ET(Obs)_i) \quad (22)$$

$$RMSE = [N^{-1} \sum_{i=1}^n (ET(Mod)_i - ET(Obs)_i)^2]^{.5} \quad (23)$$

$$SE = (N - 2)^{-1} \left[\sum_{i=1}^n (ET(Mod) - \overline{ET(Mod)})^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n (ET(Obs) - \overline{ET(Obs)})) (ET(Mod) - \overline{ET(Mod)})^2}{\sum_{i=1}^n (ET(Obs) - \overline{ET(Obs)})^2} \right] \quad (24)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (ET(Obs) - \overline{ET(Obs)}) (ET(Mod) - \overline{ET(Mod)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (ET(Obs) - \overline{ET(Obs)})^2 \sum_{i=1}^n (ET(Mod) - \overline{ET(Mod)})^2}} \quad (25)$$

مشاهده نمی‌شود؛ بنابراین، در پژوهش حاضر از معادله هارگریوز- سامانی به‌عنوان شاخص ارزیابی نتایج برآورد شده توسط ماهواره لندست ۸ استفاده شد [۳۷].

نتایج و بحث

نتایج آماره‌های به‌دست‌آمده از مقایسه تبخیر-تعرق الگوریتم‌های به‌دست‌آمده از تصاویر سنجنده‌های MODIS، ETM+ و OLI با مقادیر به‌دست‌آمده از لایسیمتر و معادله هارگریوز- سامانی در جدول ۳ ارائه شده است. همان گونه که در بخش قبل نیز توضیح داده شد، نتایج اجرای الگوریتم‌های چهارگانه بیلان انرژی روی تصاویر سنجنده‌های ETM+ و MODIS با داده‌های لایسیمتر مقایسه می‌شوند و نتایج به‌دست‌آمده از اجرای الگوریتم‌های چهارگانه روی تصاویر سنجنده OLI&TIRS با مقادیر حاصل از معادله هارگریوز- سامانی مقایسه خواهند شد. علت این امر نیز به دلیل پرتاب ماهواره لندست ۸ در سال ۲۰۱۳ است که در تاریخ یادشده لایسیمتر اطلاعاتی را جمع‌آوری نکرده است، ولی تصاویر ماهواره‌های ترا و لندست ۷ در زمانی که لایسیمتر در حال داده‌برداری بوده است، از منطقه مطالعه شده تصویر تهیه کرده‌اند. بنابراین، در پژوهش حاضر مقادیر به‌دست‌آمده از لایسیمتر و معادله هارگریوز- سامانی به‌عنوان شاهد معرفی می‌شوند.

که **ET(Mod)** تبخیر-تعرق برآورد شده از الگوریتم‌های بیلان انرژی و **ET(Obs)** تبخیر-تعرق مشاهداتی از لایسیمتر و یا نتایج روش تجربی هارگریوز- سامانی (۱۹۸۵) و **ET(Obs)** میانگین تبخیر-تعرق برآورد شده از لایسیمتر و یا نتایج روش تجربی هارگریوز- سامانی (۱۹۸۵) و **ET(Mod)** میانگین تبخیر-تعرق برآورد شده از الگوریتم‌های بیلان انرژی است.

روش‌های تجربی

در تحقیق حاضر به دلیل عدم تطابق زمانی تصویربرداری ماهواره لندست ۸ و داده‌های لایسیمتری، نتایج ماهواره لندست ۸ با روش تجربی هارگریوز- سامانی که در این منطقه کمترین مقدار خطا و بیشترین همبستگی را دارد، ارزیابی شد. به این صورت که ابتدا به بررسی و برآورد تبخیر-تعرق براساس روش‌های تجربی و داده‌های هواشناسی ایستگاه منطقه مطالعه شده پرداخته شد و در نهایت نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های تجربی برآورد تبخیر-تعرق با داده‌های لایسیمتری مقایسه شد و روش هارگریوز- سامانی بیشترین مقدار همبستگی $r=0/962$ و کمترین میزان ریشه میانگین مربعات خطا $(RMSE=0/745\text{mm/day})$ نسبت به داده‌های لایسیمتری را به همراه داشت. از سوی دیگر، در فاصله زمانی بین داده‌برداری‌های لایسیمتری تا تاریخ استفاده از تصاویر سنجنده لندست ۸ تغییری در اقلیم منطقه مطالعه شده

جدول ۳. مقایسه نتایج تبخیر-تعرق محاسبه شده به روش الگوریتم‌های بیلان انرژی در سه سنجنده MODIS، ETM+ و OLI & TIRS نسبت به داده‌برداری لایسیمتری و معادله هارگریوز- سامانی (شاهد)

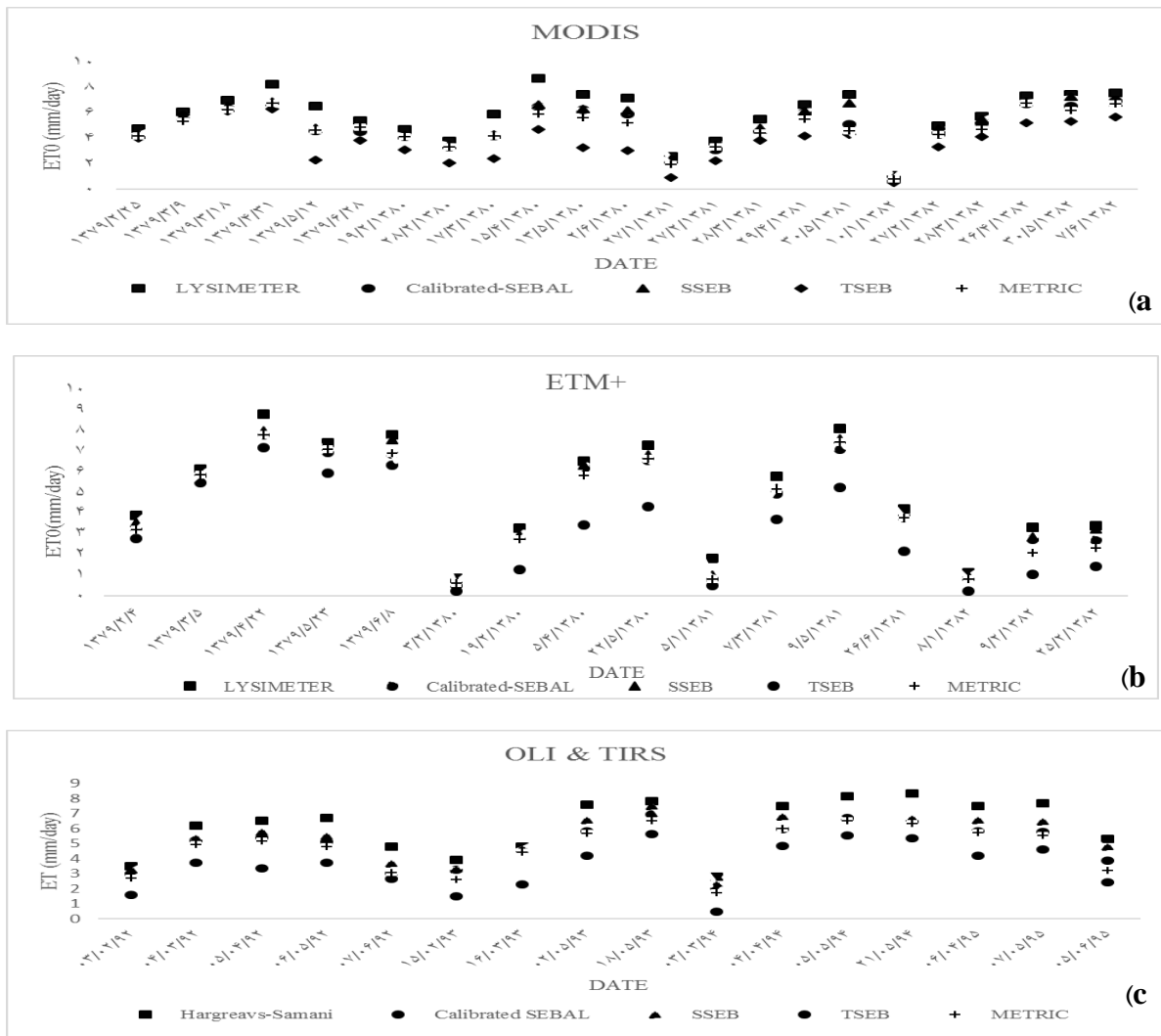
R2 (-)	MAE (mm/day)	RMSE (mm/day)	r (-)	MBE (mm/day)	SE (mm/day)	P-Value	روش	سنجنده
0/83	1/28	1/49	0/91	-1/28	0/6	0/01	SEBAL	MODIS
0/92	0/68	0/87	0/96	-0/68	0/3	0/018	SSEB	
0/6	2/15	2/44	0/77	-2/15	1/58	0/0001	TSEB	
0/86	1/145	1/355	1/92	-1/145	0/48	0/02	METRIC	
0/98	0/79	0/84	0/99	-0/79	0/09	0/038	SEBAL	ETM+
0/99	0/35	0/41	0/99	-0/32	0/05	0/017	SSEB	
0/91	1/77	1/93	0/95	-1/77	0/51	0/05	TSEB	
0/98	0/65	0/72	0/99	-0/65	0/103	0/047	METRIC	
0/91	1/69	1/76	0/95	-1/69	0/21	0/008	SEBAL	OLI & TIRS
0/94	0/82	0/92	0/97	-0/82	0/13	0/017	SSEB	
0/94	2/68	2/72	0/97	-2/68	0/13	0/00008	TSEB	
0/91	1/50	1/58	0/96	-1/50	0/17	0/015	METRIC	

میزان خطا در سنجنده ETM+ به کمترین مقدار خود می‌رسد که نشان‌دهنده دقت زیاد این الگوریتم و قدرت تفکیک مکانی و وضوح تصاویر سنجنده ETM+ ماهواره لندست ۷ است. میزان همبستگی برآوردهای صورت‌گرفته و داده‌های لایسیمتری در بالاترین حد قرار دارد. نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم دومنبعی TSEB نیز با داده‌های شاهد ارزیابی شد. تفاوت اصلی این الگوریتم با الگوریتم‌های تک‌منبعی در تفکیک و جداسازی میزان تبخیر از سطح خاک و تعرق از گیاه است که سبب پیچیدگی در محاسبات می‌شود. طبق شاخص‌های آماری، این الگوریتم در بین الگوریتم‌های بررسی شده ضعیف‌ترین نتایج را از خود نشان داد که بیشترین میزان جذر خطای میانگین مربعات را در بین الگوریتم‌ها و در هر سه سنجنده MODIS، ETM+ و OLI & TIRS داشته است (۲/۴۴، ۱/۹۳ و ۲/۷۲ میلی‌متر در روز). مقدار MBE منفی نیز نشان‌دهنده برآورد کمتر تبخیر-تعرق نسبت به اندازه‌گیری‌های شاهد است. به طور کلی، مقادیر شاخص‌های آماری جدول ۳، نشان‌دهنده وضعیت پذیرفتنی و عملکرد منطقی هر چهار الگوریتم در زمینه برآورد تبخیر-تعرق واقعی است و خطای کم آن‌ها همین مطلب را تأیید می‌کند. سه الگوریتم SEBAL و TSEB و METRIC روندی پیچیده و طولانی داشته و نیاز مبرمی به داده‌های زمینی دارند. بنابراین، 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 کوتاه‌بودن روند محاسباتی، خطای کمتری داشته و با دقت بیشتری نسبت به الگوریتم دیگر؛ برآوردهای دقیق‌تری خواهد داشت. البته، شایان یادآوری است در روند محاسبات این الگوریتم انتخاب مناسب‌ترین پیکسل سرد و گرم، در نتایج انتهایی بسیار تأثیرگذار 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 علل مهم کاهش عملکرد گیاهان در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌رود، 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 گفت که با توجه به افزایش قدرت تفکیک مکانی و بهبود وضوح

در بررسی‌های انجام‌شده روی الگوریتم SEBAL، در هر سه سنجنده در سطح ۹۹ درصد تمامی داده‌های برآورده‌شده با اندازه‌گیری‌های شاهد (لایسیمتر و معادله هارگریوز-سامانی) تفاوت معناداری دارند. میزان شاخص‌های خطای استاندارد برای این الگوریتم کمتر از یک بوده و نشان‌دهنده نزدیک‌بودن و پراکندگی کم داده‌های برآورده‌شده نسبت به اندازه‌گیری‌های شاهد است. مقادیر منفی پارامتر MBE نیز نشان‌دهنده کم‌برآورد بودن این الگوریتم است. مقدار جذر خطای میانگین مربعات در این الگوریتم در سنجنده MODIS بیشتر از یک بوده و در دو سنجنده ETM+ و OLI&TIRS کمتر از یک است، که این تفاوت می‌تواند به دلیل قدرت تفکیک مکانی بیشتر تصاویر ماهواره‌ای دو سنجنده لندست باشد که در نتیجه دقت برآوردها را بیشتر می‌کند. طبق نتایج شاخص‌های آماری از میان چهار الگوریتم بررسی شده، الگوریتم SSEB با کمترین میزان جذر خطای میانگین مربعات در هر سه سنجنده MODIS، ETM+ و OLI& TIRS (۰/۸۷، ۰/۴۱ و ۰/۹۲ میلی‌متر در روز) به عنوان الگوریتم برتر معرفی شده است. براساس نتایج ارائه‌شده در جدول ۳، الگوریتم SSEB همبستگی زیادی در هر سه سنجنده با مقادیر شاهد دارد. روند اجرای الگوریتم METRIC با روند اجرای الگوریتم SEBAL تفاوت عمده‌ای ندارد و فقط در قسمت برآورد آلبیدو و بخش‌های انتهایی برآورد جز تبخیر-تعرق از یکدیگر مجزا می‌شوند. نتایج به‌دست‌آمده از این الگوریتم شباهت‌های زیادی با الگوریتم SEBAL دارد، اما می‌توان گفت از آنجا که در الگوریتم METRIC برآورد جزئی‌تر و دقیق‌تر جزء تبخیر-تعرق صورت می‌گیرد، دقت بیشتری را در نتایج نشان دهد. الگوریتم SSEB که در واقع الگوریتم ساده‌شده بیلان انرژی است، ارزیابی آماری شد. بررسی‌های صورت‌گرفته نشان داد در هر سه سنجنده این الگوریتم نتایج مناسب با میزان خطای کم و در سطح ۹۹ درصد نتایج به‌دست‌آمده، در برابر مقادیر شاهد تفاوت معناداری دارد. طبق شاخص آماری خطای استاندارد این الگوریتم در هر سه سنجنده کمتر از یک بوده و از کلیه الگوریتم‌های بررسی شده خطای کمتری داشته است. مقدار MBE منفی در این الگوریتم نیز نشان‌دهنده کم‌برآورد بودن این الگوریتم است. همچنین، مقدار جذر خطای میانگین مربعات در الگوریتم SSEB کمتر از یک است و خطای بسیار کمی دارد. البته، این

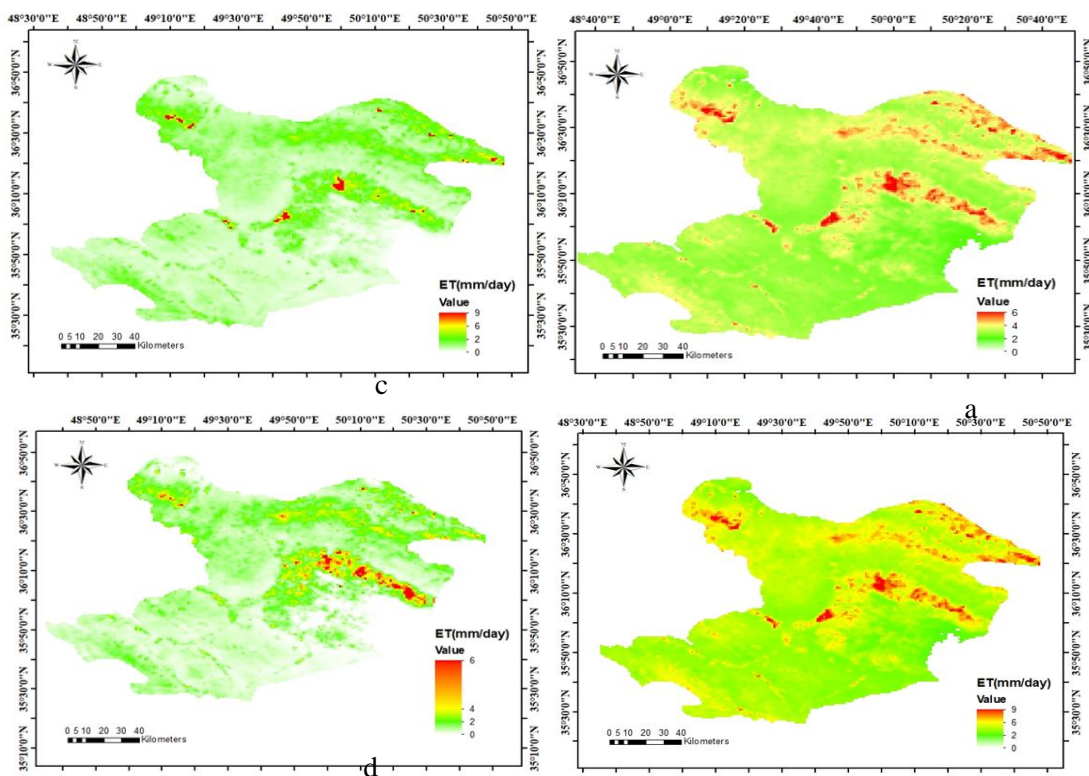
آن اشاره کرد، تأثیر رادیومتریکی پیکسل‌های مجاور پیکسل مربوط به لایسیمتر است که به دلیل تأثیر زیاد دما در برآورد تبخیر-تعرق، این عامل می‌تواند تأثیر عمده‌ای از اختلافات میان مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده توجیه کند [۱۵]. اما از نگاه کلی روند افزایشی و کاهش‌ی مقادیر تبخیر-تعرق تخمین زده شده در هر سه سنجنده و با هر چهار الگوریتم از الگوی کلی نوسانات تبخیر-تعرق شاهد تبعیت می‌کند. بیشترین مقدار تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده در مردادماه و در اواسط فصل رشد است. همان طور که در هر سه شکل مشخص است، برآوردهای به‌دست‌آمده از الگوریتم SSEB نسبت به سه الگوریتم دیگر به داده‌های لایسیمتری و نتایج روش تجربی هارگریوز-سامانی (شاهد) نزدیک‌تر است و دقت بیشتری دارد.

تصاویر در ماهواره لندست، توصیه می‌شود از سنجنده ETM+ ماهواره لندست ۷ با توجه به قدرت تفکیک مکانی زیادی که دارد، برای برآورد تبخیر-تعرق استفاده شود. مقادیر تبخیر-تعرق به‌دست‌آمده از هر چهار الگوریتم روی تصاویر ماهواره‌های مختلف، در شکل ۴ ارائه شده است. نقشه پراکنش مقادیر واقعی تبخیر-تعرق واقعی دشت که حاصل اجرای هر یک از چهار الگوریتم است نیز برای هر یک از سنجنده‌ها تهیه شده و در شکل‌های ۵ تا ۷ ارائه شده است. مطابق شکل ۴، در هر سه سنجنده، تخمین تبخیر-تعرق در هر سه الگوریتم در حالت کلی دچار فروبرآورد شده است. این خطا می‌تواند به دلیل نبود دقت کافی در برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع باشد. دلیل دیگری که می‌توان به

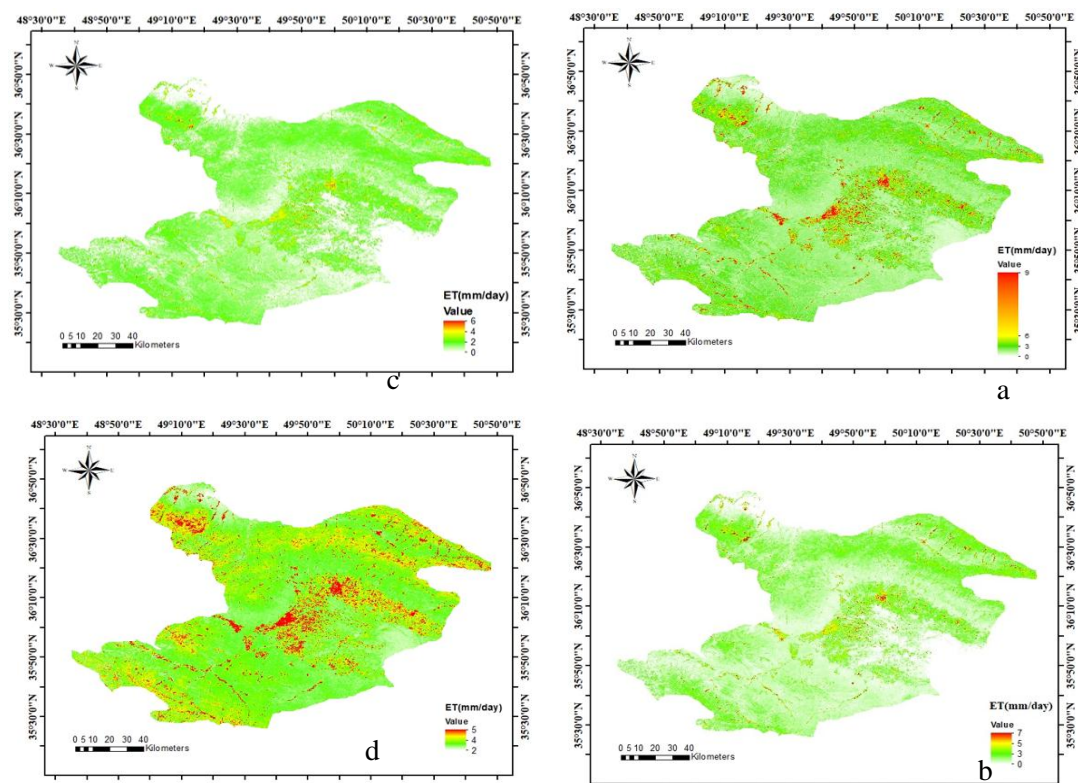


شکل ۴. روند برآورد و تغییرات مقادیر تبخیر-تعرق تخمین زده شده با مدل‌های TSEB و SSEB، METRIC، SEBAL در سه سنجنده

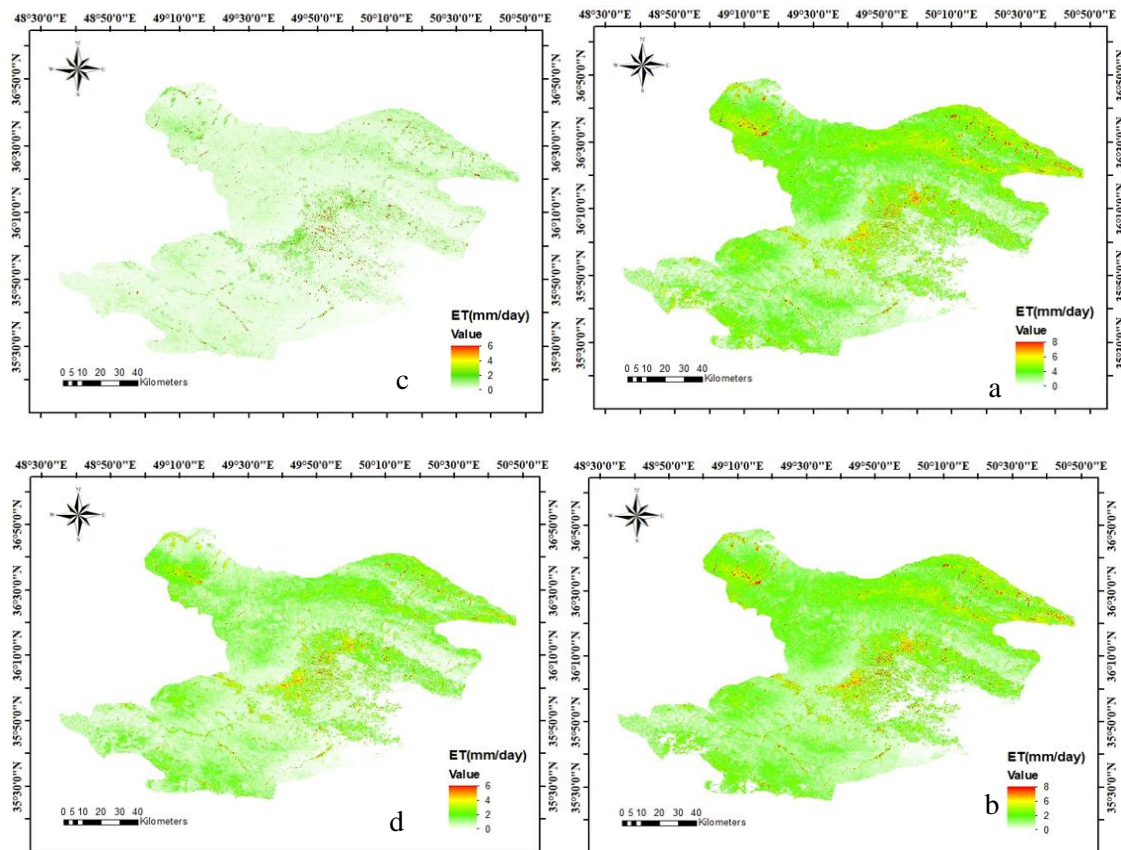
(a) MODIS (b) ETM+ (c) [OLI & TIRS]



شکل ۵. نقشه‌های تبخیر-تعرق واقعی الگوریتم‌های (a) SEBAL (b) METRIC (c) TSEB (d) SSEB در سنجنده MODIS در تاریخ ۲۰ مردادماه ۱۳۸۲ [۳۹]



شکل ۶. نقشه‌های تبخیر-تعرق واقعی الگوریتم‌های (a) SEBAL (b) METRIC (c) TSEB (d) SSEB در سنجنده ETM+ در تاریخ نهم مردادماه ۱۳۸۱ [۳۹]



شکل ۷. نقشه‌های تبخیر-تعرق واقعی الگوریتم‌های (a) SEBAL (b) METRIC (c) TSEB (d) SSEB در سنجنده OLI & TIRS در تاریخ ۱۸ مردادماه ۱۳۹۱ [۳۹]

بین الگوریتم‌های تک‌منبعی الگوریتم‌های SEBAL و METRIC به دلیل روند مشابهی که در محاسبه تبخیر-تعرق داشتند، نتایج تقریباً مشابهی داشتند که البته با توجه به شاخص‌های آماری، الگوریتم METRIC نتیجه دقیق‌تری نسبت به الگوریتم SEBAL ارائه کرد. در بین سه الگوریتم تک‌منبعی، الگوریتم SSEB که در واقع الگوریتم ساده‌شده بیلان انرژی است، طبق شاخص‌های آماری نتیجه دقیق‌تری از خود نشان داد و در سطح ۹۵ درصد نتایج به‌دست‌آمده با اندازه‌گیری‌های لایسیمیتری تفاوت معناداری داشتند و این الگوریتم به‌عنوان الگوریتم برتر در منطقه مطالعه شده انتخاب شد. الگوریتم دومنبعی TSEB نیز بیشترین مقدار خطا را در بین این الگوریتم‌ها داشت. از میان سنجنده‌های بررسی‌شده، سنجنده ETM+ در ماهواره لندست ۷ به دلیل وضوح و قدرت تفکیک مکانی بیشتری که دارد، برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی در دشت قزوین توصیه می‌شود.

دقت در شکل‌های ۵-۷ روند بهبود وضوح نقشه‌های تبخیر-تعرق را کاملاً نشان می‌دهد و طبیعی است که با افزایش قدرت تفکیک مکانی از سنجنده MODIS ماهواره ترا به سنجنده OLI & TIRS ماهواره لندست ۸، کاربرد لندست ۸ بیشتر توصیه خواهد شد. البته، نباید از نظر دور داشت که تصاویر ماهواره لندست ۸ توان تفکیک زمانی کمی داشته و در ضمن نیاز به تصحیح دارند. علاوه بر این موارد، داشتن تعداد سلول‌های بیشتر سبب می‌شود که مدت زمان اجرای عملیات در کامپیوترها طولانی‌تر شده و در پاره‌ای موارد برخی نرم‌افزارهای سنجنش از دوری توانایی اجرای الگوریتم‌های چهارگانه بیلان انرژی روی این گونه تصاویر را ندارند.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر دقت برآورد تبخیر-تعرق سه الگوریتم تک‌منبعی SEBAL، METRIC و SSEB و یک الگوریتم دومنبعی TSEB در دشت قزوین ارزیابی و بررسی شد. از

منابع

- [1]. Lingling Z, Jun X, Chng_yu X, Zhonggen W, Cangrui L. Evapotranspiration estimation methods in hydrological models. *Geogr. Sci* 2013, 23(2): 359-369
- [2]. Alizade A, *Irrigation System Design*, 1st ed. Mashhad, Emam Reza University, 2007 [In Persian]
- [3]. Allen R, Tasumi M, Morse A, Trezza R. A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. (2003). *Journal of Irrigation and Drainage Systems*.
- [4]. 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.
- [5]. Nishida K, Nemani R, Running S, Glassy J. An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation, *Journal of geophysical research Atmosphere*, (2003),. Volume 108, Issue D9
- [6]. Bastiaanssen W.G.M., Menenti M., Feddes R.A, Holtslag A.A.M, A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL), *Journal of Hydrology*, (1998) , 212-213, 198-212.
- [7]. Tasumi M, Allen R.G, Trezza R, and Wright J. L. Satellite-based energy balance to assess within population variance of crop coefficient curves. *American Society of Civil Engineers, Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2005, 131(1): 94-109.
- [8]. Hong S, Hendricjx J, Brochers B, Up-scaling of SEBAL derived evapotranspiration maps from Landsat (30 m) to MODIS (250 m) scale. *Jornal of Hydrology* (2009) , Vol 370. P 122-138.
- [9]. Omidvar J. Et al., "Evaluation and comparison of the SEBAL and METRIC Algorithms in the Estimation of Evapotranspiration", *J. Irri. Water Eng*, 2013, Yr. 3, No. 12, Pp. 12-20.. [in Persian]
- [10]. Mokhtari M. Estimation of Water Requirement of Olive Trees Using Satellite Remote Sensing Data (Case Study Tarom in Zanjan), Ms.c Thesis, University of Zanjan, 2013.[In Persian]
- [11]. Allen, R.G., M. Tasumi, and A. Morse. Satellite-based evapotranspiration by METRIC and Landsat for western states water management. US Bureau of Reclamation Evapotranspiration Workshop. 2005. Feb 8-10, Ft. Collins
- [12]. Folhes, M.T., C.D. Renno & J.V. Soares, "Remote Sensing for Irrigation Water Management in the Semi-Arid Northeast of Brazil", *Agri. Water Manag*, 2009, Vol. 96, Pp. 1398- 1408.
- [13]. Ghorbani A. Faramarzi M. Karami J. Gholami N. Sobhani B. SEBAL and METRIC evaluation in Malayer. *Humanities science portal of humanities science and cultural studies institution*. , (2016). P153-184 [in Persian].
- [14]. Marofi S. Mosavi R, Nasiri Gheidar O. Evaluation of Spatial and temporal variations of water requirement of Qazvin plain using metric algorithm and Landsat satellite images. *Quarterly journal of geographic research*, (2017), year thirty-second, number two, P80-92[in Persian].
- [15]. Senay G.B, Budde M., Verdin J.P. and Melesse A. A Coupled Remote Sensing and Simplified Surface Energy Balance Approach to Estimate Actual Evapotranspiration from Irrigated Fields, (2007) , *Sensors*, 7, 979-1000.
- [16]. Allen R., Tasumi M. and Trezza R. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) Advanced Training and User's Manual—Idaho Implementation, (2002), Version 1.0.
- [17]. Bezerra B.G, Silva B, Santos C, Bezerra J. Actual Evapotranspiration Estimation Using Remote Sensing: Comparison of SEBAL and SSEB Approaches. *Advances in Remote Sensing*, (2015). Vol.4 (3), 234-247
- [18]. Asare Mostaghim M. Rahimi Khob A. Asare Mostaghim L, Using SSEB Algorithm to study the process of vegetation changes in Amir Kabir Cane Field using Remote Sensing Technique.. (2016). *Second National Conference on Confronting Desertification and Sustainable Development of Desert Mines*. 1425-1429
- [19]. Norman J.M., Kustas W.P. Humes K.S, Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, (1995). 77: 263-293
- [20]. Kustas W.P Norman J.M. A two-source approach for estimating turbulent fluxes using multiple angle thermal infrared observations. *Water Resources Research*,. 1997, 33: 1495-1508
- [21]. Tang R, Li Z. L, Sun X. Temporal upscaling of instantaneous evapotranspiration: An intercomparison of four methods using eddy covariance measurements and MODIS data.

- Remote Sensing of Environment, (2013). 138, 102-118.
- [22]. Kustas W.P. Anderson M.C. Cammalleri C. Alfieri J.G. Utility of a Thermal-base Two-source Energy Balance Model for Estimating Surface flux over Complex Landscapes. *Procedia Environmental science*. (2013). Vol. 19, 2013. Pp224-230.
- [23]. Bagheri M.H. Et al., "Compression Remote Sensing Single Source and two Sources Models Energy Flux in the Real Evapotranspiration Estimate", *J. Rem.Sen. GIS*, 2012, Yr. 4, No. 1, Pp. 81-96,. [in Persian]
- [24]. Ebrahimi pak N.A. Determination of evapotranspiration potential of reference plant (grass) by lysimeter method and comparison with experimental methods in Qazvin. Ministry of Agricultural Jihad, Agricultural Research, Education and Promotion Organization, Qazvin Agricultural and Natural Resources Research Center [In Persian]
- [25]. Rahmani N, Shahedi K, Miryaghobzadeh M. Evaluation of vegetation indices in Remote Sensing, *Geomatic Conference*. 2011. [In Persian]
- [26]. Alavi Panah K. Principles of modern remote sensing and interpretation of satellite imageries and aerial photoes. 2nd edition, Tehran University press. 2011 [In Persian]
- [27]. Farid Hoseini A, Astarae A. Sanaee Nejad s.A, Mirhoseini Mosavi P. Estimation of Leaf Area Index using IRS satellite data in Neyshabur, *Journal of the Agriculture of Iran*. Ferdowsi University. 2012 Volume 10, Issue 3. Pages 577-582. [In Persian]
- [28]. Jensen J.R. Remote sensing of the environment: An Earth Perspective. 2000
- [29]. Gillespie A, Rokugawa S, Mastunaga T, Cothren J.S, Hook S., Kahle A. B, A Temperature and emissivity separation algorithm for advanced spaceborn thermal emission and reflection radiometer (ASTER) Images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, Vol, 36. Pp 1113-1126.
- [30]. Sabziparvar A.A, Fakhrizadeh shirazi E, Marofi S, Rezaei Y. Estimating the land surface albedo using Level1-G and CDR Landsat-7 satellite images. *Journal of Agricultural Meteorology*. 2016. Vol. 3, No. 2, Autumn & Winter 2015, pp.45-54. [In Persian]
- [31]. Bastiaanssen W.G.M., Molden D.J. Makin I.W. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural water management*, 2000, 46: 137-155
- [32]. Allen R.G, Tasumi M, Morse A, Trezza R. A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. *Irrigation and Drainage systems*, 2005.19: 251-268
- [33]. Senay GB. et al, Operational Evapotranspiration Mapping Using Remote Sensing and Weather Datasets: A New Parameterization for the SSEB Approach. *Journal of the American Water Resources Association*. (2013). Volume 49, Issue 3. Pages 577-591
- [34]. Choudhury B, Idso S, Reginato R. Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by an infrared-temperature based energy balance equation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1987., 39: 283-297.
- [35]. Santanello J.A, Friedl M. Diurnal covariation in soil heat flux and net radiation. *Journal of Applied Meteorology*. 2003 :42, 851 862.
- [36]. Alavi Panah, K. The principles of remote sensing and the interpretation of satellite images and aerial photographs. Tehran University Press. 2012 [In Persian].
- [37]. Nazari R and Kaviani A. Evaluation of Potential Evapotranspiration and Pan Evaporative Methods by Lysimeter Data in a Semiarid Climate (Case Study: Qazvin Plain). *Journal of Eco-Hydrology*., 2016, Spring 3: 19- [In Persian]
- [38]. Alavi Panah K. Principles of modern remote sensing and interpretation of satellite imageries and aerial photoes. 2nd edition, Tehran University press. 2011 [In Persian]
- [39]. <https://earthexplorer.usgs.gov/>