

Investigating Actual Evapotranspiration in Different Land Uses in Mountainous Areas using Sebal Algorithm and a Combination of MODIS and Landsat8 Satellite Images

H. Noori ^{1*}, M. Faramari ²

¹ Associate Professor, Malayer University, Hamedan, Iran

² Assistant Professor, Malayer University, Hamedan, Iran

Abstract

Evapotranspiration is one of the most effective components of a catchment water balance in arid and semiarid regions of the world. The purpose of this study was to compare the accuracy of the estimation of actual evapotranspiration of different land uses in the surface energy balance algorithm (Sebal) Special mountainous regions of the FAO Penman-Monteith compared with the values calculated by a combination of MODIS and Landsat 8 images at the same time in Malayer city. Sebal algorithm estimates the energy component of the surface net radiation flux, soil heat flux and sensible heat flux to calculate the evapotranspiration instantly and daily. In this study, the eight images of MODIS and Landsat select from 2005 to 2013 at the same time. Meteorological data used include maximum temperature, minimum temperature, relative humidity, sunshine and wind speed were extracted during this period from Malayer synoptic station. To investigate the relationship between the amount of actual evapotranspiration and land use were used by the Zonal Statistic method. The results showed that the estimated daily average of evapotranspiration has 0.43 percent difference between FAO Penman-Monteith method and Sebal, therefore accuracy of Sebal algorithm can be acceptable. The land use map was provided by object oriented approach with 88% accuracy and kappa coefficient. The minimum and maximum amount of ETR are irrigated farming and residential. The largest standard deviation of ETR is rangeland and the lowest SD is water bodies.

Key words: Evapotranspiration, Sebal Algorithm, Landsat8, Modis, FAO Penman Monteith.

بررسی تبخیر و تعرق واقعی در کاربری‌های مختلف اراضی مناطق کوهستانی با استفاده از

الگوریتم سبال و ترکیب تصاویر ماهواره‌ای MODIS و Landsat 8

حمید نوری*، استادیار آب و هواشناسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

محمد فرامرزی، کارشناس ارشد سنجش از دور، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

وصول: ۱۳۹۳/۰۹/۲۸ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۲/۰۶، صص ۵۶-۳۹

چکیده

تبخیر و تعرق از مؤثرترین مؤلفه‌های بیلان آبی یک حوضه آبریز در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است. هدف از این پژوهش، بررسی و مقایسه دقت برآورد تبخیر و تعرق واقعی کاربری‌های مختلف اراضی به‌وسیله الگوریتم توازن انرژی در سطح زمین (سبال) و ویژه مناطق ناهموار و کوهستانی، در مقایسه با مقدار محاسبه‌شده به‌روش فائو-پنمن-مانتیت با ترکیب دو سنجنده مودیس و لندست ۸ هم‌زمان در شهرستان ملایر است. الگوریتم سبال با برآورد تمامی مؤلفه‌های انرژی در سطح زمین همچون شار تابش خالص، شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس، قادر به برآورد تبخیر و تعرق لحظه‌ای و روزانه است. در این پژوهش، از هشت تصویر سنجنده مودیس و تصویر لندست ۸ هم‌زمان، طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۳ استفاده شد. داده‌های استفاده‌شده هواشناسی شامل دمای بیشینه، دمای کمینه، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد، طی همین دوره آماری از ایستگاه سینوپتیک ملایر به دست آمد. برای بررسی ارتباط بین مقدارهای تبخیر و تعرق واقعی و کاربری اراضی در منطقه در دست مطالعه، از تابع Zonal Statistic استفاده شد. نتایج نشان داد که در برآورد تبخیر و تعرق روزانه، به‌طور میانگین ۴۳/۰ درصد اختلاف میان روش سبال و روش فائو-پنمن-مانتیت وجود دارد؛ بنابراین می‌توان تبخیر و تعرق ساعتی و روزانه را برای منطقه در دست مطالعه با دقتی مناسب برآورد کرد. همچنین، نقشه کاربری اراضی منطقه با روش شیء‌گرا با دقت ۸۸ درصد و ضریب کاپای ۰/۸۵ تهیه شد. نتایج نشان داد روش درون‌یابی پیکسل‌های مودیس با پیکسل‌های لندست برای ارزیابی کاربری غالب در پیکسل تصویر مودیس مؤثر بوده است و مقدار بیشینه تبخیر و تعرق واقعی مربوط به کاربری‌های زراعت آبی و دیم و کمترین تبخیر و تعرق مربوط به کاربری نواحی مسکونی است. کمترین انحراف معیار مربوط به مناطق آبی و بیشترین پراکنش میانگین، مربوط به کاربری مراتع است.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق، الگوریتم سبال، لندست ۸، مودیس، روش فائو-پنمن-مانتیت.

مقدمه

روش‌ها، از روابط تجربی ساده تا روش‌های فیزیکی پیچیده، متغیر هستند؛ چون اغلب آنها از اندازه‌گیری‌های (داده‌های) نقطه‌ای برای تخمین تبخیر - تعرق استفاده می‌کنند؛ بنابراین فقط مناسب مناطق محلی هستند و به دلیل طبیعت پویا و تغییرات منطقه‌ای تبخیر - تعرق، نمی‌توانند به حوضه‌های بزرگ تعمیم داده شوند (لی و لیونز،^۴ ۲۰۰۲: ۶۹). پیشرفت روزافزون تکنولوژی سنجش از دور، امکان برآورد تبخیر - تعرق واقعی و ظرفیت را، در سطح وسیعی فراهم کرده است. در پژوهش‌های بسیاری، پژوهشگران برای تخمین تبخیر - تعرق واقعی و توزیع زمانی و مکانی آن، از داده‌های ماهواره‌ای استفاده کرده‌اند. سنجش از دور، این قابلیت را دارد که ضمن تخمین مقدار تبخیر - تعرق، توزیع مکانی (فضایی) آن را نیز نشان دهد؛ زیرا تنها تکنولوژی است که شاخص‌هایی نظیر دمای سطحی، ضریب آلبیدو و شاخص گیاهی را به صورت منطبق یا سازگار با محیط استخراج می‌کند و از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه باشد (نورمن، ۱۹۹۵: ۲۶۳). در همایش کارشناسان و پژوهشگران آبیاری که در ماه مه سال ۱۹۹۰ به دست سازمان خواربار جهانی (FAO)^۵ و با همکاری کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی (ICID)^۶ و سازمان هواشناسی جهانی (WMO)^۷ برای بررسی روش‌های فائو و اصلاح و ارائه روشی دقیق برگزار شد، روش ترکیبی فائو - پنمن - ماتیت به‌عنوان یک روش استاندارد جدید برای تخمین تبخیر - تعرق پیشنهاد شد (آلن و همکاران،^۸ ۱۹۹۸:

تبخیر و تعرق جزء مهمی از بیلان آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است و برآورد صحیح آن برای مدیریت بهینه منابع آبی کشور بسیار مهم است (سپاس‌خواه، ۱۳۶۱: ۱۹). هفتاد درصد بارانی که به سطح زمین می‌رسد دوباره با فرایند تبخیر یا تعرق به جوی بازمی‌گردد. این فرایند در مناطق خشک به نود درصد هم می‌رسد. کمبود آب در بسیاری از نقاط جهان چنان ابعاد گسترده‌ای دارد که احتمال وقوع جنگ و نزاع بر سر آب، در آینده نزدیک وجود دارد (هاشمی‌نیا، ۱۳۸۷: ۴۸). به نظر می‌رسد محدودیت منابع آب و استفاده نامطلوب و غیراقتصادی از آن، عامل اصلی محدودیت توسعه کشاورزی و افزایش تولیدات غذایی در ایران است (اکبری، ۱۳۸۳: ۳۷). از طرفی تبخیر و تعرق، از طریق چرخه هیدرولوژی نقش بسزایی در اقلیم جهانی ایفا کرده است و تخمین آن، کاربردهای مهمی در پیش‌بینی رواناب، پیش‌بینی عملکرد محصول و طراحی کاربری اراضی (نورمن،^۱ ۱۹۹۶: ۲۶۳)، طراحی کانال‌های آبیاری و ابنیه‌های تقسیم آب داشته است (میکائیل و باستینس،^۲ ۲۰۰۰: ۱۹۸)؛ همچنین بر بلایای طبیعی (نظیر خشک‌سالی) مؤثر است (آگاو و همکاران،^۳ ۱۹۹۹: ۹). بنابراین با توجه به اهمیت عامل تبخیر - تعرق، این شاخص باید تا آنجا که ممکن است به‌طور دقیق برآورد شود. روش‌های زیادی برای محاسبه میزان تبخیر - تعرق در وضعیت اقلیمی و جغرافیایی مختلف با استفاده از داده‌های هواشناسی توسعه و آزمایش شده است. این

^۴ Li and Lyons, 2002:1998

^۵ Food and Agriculture Organization (FAO)

^۶ International Commission on Irrigation and Drainage (ICID)

^۷ World Meteorological Organization (WMO)

^۸ Allen et al., 1998

^۱ Norman, 1996

^۲ Michael and Bastiaanssen, 2000

^۳ Ogawa et al, 1999

تی‌سب^۹ و اس‌تی‌سب^{۱۰} اشاره کرد (نورمن و همکاران، ۱۹۹۵: ۲۶۳؛ سانچز و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۱۳۰).^{۱۱} الگوریتم سبال با تصاویر سنجنده‌های متفاوتی در مناطق مختلف دنیا اجرا شده و یافته‌های مطلوبی ارائه کرده است. تاسومی و همکاران^{۱۲} (۲۰۰۵: ۳۳۵) در آیداهو، دو الگوی توازن انرژی سبال قدیمی و متریک را با هم مقایسه کردند که نتایج آن با داده‌های لایسیمتر تطابق مناسبی دارد. چاوز و همکاران،^{۱۳} (۲۰۰۷: ۲۶۷) با استفاده از تصاویر لندست و الگوی متریک مقادیر ET روزانه با داده‌های لایسیمتری، مقایسه و میزان خطای کمتر از ۲۸ درصد را گزارش کردند. فولهز و همکاران^{۱۴} (۲۰۰۹: ۱۳۸۹) با استفاده از تصاویر لندست و الگوی توازن انرژی متریک، میزان تبخیر و تعرق در برزیل را محاسبه کردند و کارایی این الگو را در برآورد مصرف و بهبود مدیریت آب در نواحی نیمه‌خشک و تحت آبیاری شمال شرق برزیل، توصیه کردند. جنیفر و همکاران،^{۱۵} (۲۰۱۰: ۱۰۸) تبخیر و تعرق را با الگوریتم سبال و الگوی تعادل آب در همین بازه زمانی محاسبه کردند و نتایج آن را با هم مقایسه و همبستگی ۷۰ درصد را مشاهده کردند. ژوپینگ و همکاران^{۱۶} (۲۰۱۱: ۱۰۸۶) با تصاویر لندست ETM+ و الگوریتم سبال در چین، ظرفیت الگوی سبال را برای تخمین تبخیر و تعرق واقعی بیان کردند. (سان و همکاران،^{۱۷} ۲۰۱۱: ۱۰۸۶) در پژوهشی، الگوریتم سبال را با تصاویر ماهواره لندست برای برآورد تبخیر - تعرق واقعی در

۲۶). کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی و سازمان خواربار جهانی، استفاده از روش فائو - پنمن - مانتیت را به‌عنوان یک روش استاندارد برای محاسبه تبخیر - تعرق به‌وسیله داده‌های اقلیمی و ارزیابی سایر روش‌ها پیشنهاد کردند (هارگیوز،^۱ ۱۹۹۴: ۱۱۳۲). تاکنون الگوریتم‌های مختلفی برای برآورد تبخیر- تعرق به‌کمک سنجنش از دور ارائه شده است. به‌طور کلی، روش‌هایی که براساس توازن انرژی عمل می‌کنند، به دو دسته الگوهای تک‌منبعی ۲ و دو منبعی ۳ تقسیم می‌شوند. الگوهای تک‌منبعی، مجموعه خاک و گیاه را به‌عنوان یک منبع واحد با عنوان "Big-Leaf" در نظر می‌گیرند و تنها از یک مقاومت آیرودینامیکی در فرایند انتقال آب- گرما استفاده می‌کنند (نیشیدا و همکاران،^۴ ۲۰۰۳). در این الگوها فرض بر این است که تمام سطح، تحت تأثیر دما و رطوبت یکسان قرار دارد. حال آنکه روش‌های دو منبعی ضمن تفکیک خاک و گیاه در کلیه فرایند الگوسازی، برخلاف الگوهای تک‌منبعی از چندین مقاومت آیرودینامیکی مجزا برای خاک و گیاه استفاده می‌کنند (هونتینگ فورد و همکاران،^۵ ۲۰۰۰: ۱۸۵). از نمونه الگوهای مطرح در زمینه تک‌منبعی، می‌توان به الگوهای سبال و متریک^۶ و سبس^۷ اشاره کرد (باستیانسن، ۲۰۰۰: ۸۷؛ سو، ۲۰۰۲: ۸۵؛ آلن و همکاران، ۲۰۰۷: ۳۸۰؛ باستیانسن و همکاران، ۱۹۹۸: ۱۹۸)^۸ و از الگوهای دو منبعی می‌توان به الگوهای

^۹ TSEB

^{۱۰} STSEB

^{۱۱} Norman et al., 1995; Sánchez et al., 2008

^{۱۲} Tasumi et al, 2005

^{۱۳} Chavez et al

^{۱۴} Folhes et al

^{۱۵} Jeniffer Kinoti Mutiga et al, 2010

^{۱۶} Zhongping et al, 2011

^{۱۷} Sun et al., 2011

^۱ Hargreaves,

^۲ Single- Source

^۳ Two- Source

^۴ Nishida et al., 2003

^۵ Huntingford et al., 2000

^۶ METRIC

^۷ SEBS

^۸ Bastiaanssen, 2000; Su., 2002; Allen et al., 2007; Bastiaanssen et al., 1998;

برای دو سطح کشاورزی آبی و دیم تخمین زدند و نتایج را با داده‌های چهار ایستگاه لایسیمتر وزنی مقایسه و بر کارایی این الگوریتم تأکید کردند. در ایران نیز (دستورانی و همکاران، ۱۳۹۱: ۱) با استفاده از دوازده تصویر MODIS به ارزیابی الگوریتم سبال و برآورد تبخیر - تعرق واقعی گیاه باغی پسته در منطقه اردکان یزد پرداختند. یافته‌های پژوهش نشان داد که میانگین تبخیر - تعرق واقعی پسته در آن سال و در طول یک فصل کامل رشد در منطقه مطالعاتی، ۱۱۲۳ میلی‌متر بوده که در مقایسه با مقدار آب مصرفی در منطقه مطالعاتی بسیار کمتر است. این یافته‌ها، ضرورت برنامه‌ریزی به‌منظور تدوین تقویم مناسب آبیاری و توصیه عمق مناسب آبیاری باغ‌های پسته را نشان می‌دهد. با این اقدامات، ضمن افزایش بهره‌وری، از هدررفتن مقدار زیاد آب در آبیاری‌های بیش‌ازحد جلوگیری خواهد شد (سیمایی و همکاران، ۱۳۹۲: ۱).

اما مسئله جدی آن است که با توجه به تأثیر تغییرات اقلیمی بر رشد مراتع و کشاورزی ایران در دهه اخیر و ایجاد وضعیت جدید بهینه یا بحرانی برای کاربری‌های مختلف اراضی در غرب کشور و نیز کمبود امکانات مانند لایسیمترها برای محاسبه مستقیم، تبخیر و تعرق واقعی را، در کدام نوع کاربری اراضی در اقلیم کوهستانی و نیمه‌خشک این منطقه با دقت بیشتری می‌توان محاسبه کرد. هدف این پژوهش، بررسی و مقایسه دقت برآورد تبخیر - تعرق واقعی کاربری‌های مختلف اراضی، به‌وسیله الگوریتم توازن انرژی در سطح زمین (سبال) در مقایسه با میزان محاسبه‌شده به‌روش فائو - پنمن - مانیتث با ترکیب دو سنجنده Landsat و MODIS و رابطه آن با کاربری اراضی در شهرستان ملایر است.

کاربری‌های مختلف و برای حوضه دریاچه نانسی در چین اجرا کردند و نتایج مثبتی از آن گزارش دادند. (کولازی و همکاران،^۱ ۲۰۱۱: ۲۷۸۷) در پژوهشی با الگوریتم سبال و ۱۶ تصویر سنجنده TM در دشت تگزاس مقدار دمای سطحی، تابش خالص، شار گرمای خاک و تبخیر - تعرق ساعتی را محاسبه کردند. نتایج حاصل، با مقادیر اندازه‌گیری‌شده چهار لایسیمتر که در آنها گیاه پنبه در دو حالت آبیاری‌شده و تحت تنش کم‌آبی کشت‌شده، مقایسه شد. یافته‌ها، دقت بالای برآوردها را نشان داد. (راگور و همکاران،^۲ ۲۰۱۱: ۸۰۱) در مطالعه‌ای به روش‌های برآورد تبخیر - تعرق پرداختند که تنها بر پایه داده‌های سنجنش از دور ارزیابی شده بودند و به این نتیجه رسیدند که روش‌های سنجنش از دور دارای دقت متوسط در تخمین تبخیر و تعرق هستند؛ این نتایج، حاصل بررسی چند الگوی متفاوت بود. (یوتینگ و همکاران،^۳ ۲۰۱۲: ۱۱۲) با استفاده از تصاویر MODIS و الگوریتم سبال نشان دادند که تغییرپذیری درون‌سالی در تبخیر و تعرق بر زمین‌های کشاورزی، بدنه‌های آبی، جنگل‌ها و گراسلندهای آبی با تغییر در مقدار تبخیر و تعرق توجیه‌پذیر است. (گئورگ و همکاران،^۴ ۲۰۱۳: ۲۱۴) مقدار تخمینی تبخیر و تعرق و دیگر مؤلفه‌های الگوریتم سبال که با داده‌های میدانی اندازه‌گیری شده است، با چهار لایسیمتر دقیق وزنی در دو سطح کشت آبی و دیم مقایسه و به نتایج مطلوبی در استفاده از الگوریتم سبال رسیدند. (گئورگ پائول و همکاران،^۵ ۲۰۱۴: ۱۵۷) با الگوریتم سبال، مقدار تبخیر و تعرق را

¹ Colaizzi et al, 2011

² Raghuvveer

³ Yuting Yang et al, 2012

⁴ George et al, 2013

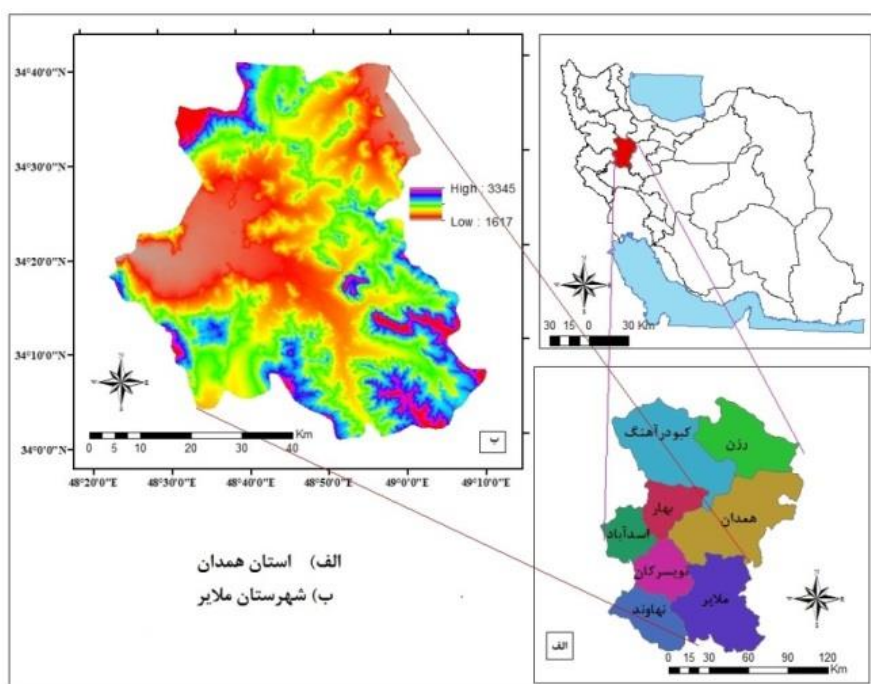
⁵ George Paul et al, 2014

مواد و روش‌ها

منطقه در دست مطالعه

شهرستان ملایر با وسعتی معادل ۳۲۰۸ کیلومتر مربع، ۱۶/۹ درصد از سطح استان همدان را به خود اختصاص داده است. تغییرات ارتفاعی این منطقه ۱۶۱۷ تا ۳۳۴۵ متر و میزان بارش سالیانه به‌طور متوسط ۳۲۵ میلی‌متر است. مقدار تبخیر

ظرفیت ۲۴ ساعته نیز معادل ۷/۵۸ میلی‌متر ثبت شده است. با توجه به اینکه مقدار بارندگی در فصل رشد گیاهان منطقه کم است و اراضی کشاورزی دچار کمبود آب هستند، در نتیجه با محاسبه تبخیر و تعرق واقعی، می‌توان میزان آب مصرفی را مدیریت کرد تا بیشترین بازده را در بخش کشاورزی داشته باشد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه در دست مطالعه

تصاویر برداری که خالی از اغتشاشات جوی بود و همچنین، به دلیل تک‌زمانه بودن تفسیر، نیازی به تصحیح اتمسفری نبوده است (سانگ و همکاران،^۱ ۲۰۰۱: ۲۰۳). لیکن با استفاده از الگوی فلاش،^۲ تصحیح اتمسفری انجام شد. در جدول ۱ مشخصات تصاویر استفاده‌شده آمده است.

انتخاب، آماده‌سازی و پیش‌پردازش تصویر

در این پژوهش، انتخاب تصویر MODIS و Landsat8 با در نظر گرفتن عواملی از جمله وضعیت زمانی (بهار)، کیفیت مطلوب، پوشش‌ندادن لکه‌های ابر و محدودیت‌های دیگر، انجام شد. هر چند که تصاویر انتخابی مربوط به سطح دو بودند و به تصحیح هندسی نیاز نداشتند، ولی با ده نقطه کنترلی GPS، قبل از استفاده کنترل شدند. با توجه به زمان

¹ Song et al. 2001

² FLAASH

جدول ۱. خصوصیات تصویر انتخاب شده

نوع تصویر	تاریخ تصویربرداری (میلادی)	تعداد باندها	نوع باند	قدرت تفکیک (متر)
MODIS	۲۰۰۵/۰۵/۱۴	۳۶	۱۹ باندها انعکاسی	۲۵۰،۵۰۰،۱۰۰۰
	۲۰۰۹/۰۵/۲		۱۷ باندها حرارتی	۱۰۰۰
Landsat8	هم‌زمان با تصاویر مودیس	۱۱	۹ باندها انعکاسی	۳۰
			۲ باندها حرارتی	۳۰

سبال در مناطق ناهموار و کوهستانی نیز به روش اضافه شد. بنابراین در این پژوهش، برای دستیابی به پراکنش مکانی تبخیر- تعرق در شهرستان ملایر، از روش سبال ویژه مناطق ناهموار و کوهستانی استفاده شد.

شار تابش خالص سطحی (R_n)

اولین مرحله به منظور حل معادله توازن انرژی سطحی در الگوریتم سبال، محاسبه شار تابش خالص سطحی (R_n) با استفاده از شارهای تابش ورودی و خروجی است (آلن و همکاران، ۲۰۰۲: ۱۵).

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

که در آن R_{S↓} تابش موج کوتاه ورودی (W/m²)، R_{L↓} تابش موج بلند ورودی (W/m²)، R_{L↑} تابش موج بلند خروجی (W/m²)، α آلبیدوی سطحی و ε₀ توان تشعشعی سطحی باندهای ۳۱ و ۳۲ سنجنده مودیس و باندهای ۱۰ و ۱۱ لندست ۸ است.

شار گرمای خاک (G)

شار گرمای خاک، میزان انتقال گرما در خاک و پوشش گیاهی بر اثر هدایت مولکولی است. از آنجا که محاسبه مستقیم مقدار شار گرمای خاک با تصاویر ماهواره‌ای مشکل است، در روش سبال، ابتدا نسبت

الگوریتم توازن انرژی سطح برای خشکی (سبال)

الگوی سبال، مقدار تبخیر و تعرق را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و حداقل داده‌های زمینی لازم، براساس معادله توازن انرژی محاسبه می‌کند. از آنجا که تصویر ماهواره‌ای تنها می‌تواند اطلاعاتی در زمان گذر ماهواره ارائه دهد، سبال می‌تواند مقدار شار تبخیر- تعرق لحظه‌ای را در زمان تصویر محاسبه کند. شار تبخیر- تعرق برای هر پیکسل تصویر، به صورت باقی‌مانده معادله توازن انرژی سطح محاسبه می‌شود (آلن و همکاران، ۲۰۰۲: ۵۱).

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

در معادله بالا، λET شار گرمای نهان (W/m²)، شار تابش خالص در سطح زمین (W/m²)، G شار گرمای خاک (W/m²) و H شار گرمای محسوس (W/m²) است.

روش سبال، اولین بار به منظور برآورد تبخیر- تعرق در مناطق هموار و نواحی کشاورزی ارائه شد (باستیانسن و همکاران، ۱۹۹۸: ۱۹۸). اما در نسخه‌ای که آلن و همکاران در سال ۲۰۰۲ ارائه دادند (آلن و همکاران، ۲۰۰۷: ۳۸۰)، تصحیح‌های لازم برای کاربرد

¹ Bastiaanssen et al., 1998

پیش‌بینی کرد و در نتیجه، برآوردی از dT داشت) و سرعت باد در ارتفاع معین استفاده می‌شود. با توجه به اینکه r_{ah} تابعی از شار گرمای محسوس است، معادله ۴ حل صریح ندارد و باید به روش چرخه‌ای حل شود. به منظور اعمال تصحیح‌های پایداری جو، از طول مانین آبخوف^۱ استفاده شد. روش سبال از دو پیکسل شاخص برای تعیین وضعیت مرزی ثابت، در معادله توازن انرژی استفاده می‌کند (آلن و همکاران، ۲۰۰۲: ۱۵). این پیکسل‌ها، که پیکسل سرد و گرم نامیده می‌شوند، باید در محدوده در دست مطالعه، در تصویر قرار داشته باشند. پیکسل سرد از منطقه کامل آبیاری شده و سرشار از پوشش گیاهی انتخاب شد که در آن دمای سطحی برابر با دمای هوای نزدیک سطح، فرض می‌شود. پیکسل گرم نیز از یک زمین کشاورزی خشک و بدون پوشش گیاهی، با فرض تبخیر-تعرق صفر، انتخاب شد. در انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم دقت زیادی صورت گرفت؛ زیرا کیفیت نتایج و محاسبات در روش سبال، وابسته به دقت در انتخاب این دو پیکسل است (همان). در انتخاب پیکسل‌های مذکور، از عواملی چون دمای سطحی، آلودگی و شاخص‌های پوشش گیاهی استفاده شد. بدین صورت که پیکسل سرد دارای دمای کم، آلودگی در حدود ۰/۲۲ تا ۰/۲۴ مطابق با زمین یونجه و مقدار NDVI بالا است و پیکسل گرم دارای دمای زیاد، آلودگی بالا مشابه با سایر زمین‌های خشک و بدون پوشش گیاهی و مقدار NDVI پایین است. در انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم دقت شد تا از انتخاب دماهای خیلی کم یا خیلی زیاد اجتناب شود. چنانچه دمای پیکسل سرد خیلی پایین انتخاب شود، مقدار تبخیر-تعرق در

G/R_n در نیمه روز، با استفاده از معادله تجربی ارائه شده از باستیانسن (۲۰۰۰) به صورت زیر محاسبه می‌شود (آلن و همکاران، ۲۰۰۲: ۱۵).

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

در معادله بالا، T_s دمای سطحی ($^{\circ}C$) و α آلودگی سطحی است. مقدار G با ضرب کردن نسبت بالا در R_n به دست می‌آید. چنانچه مقدار NDVI کمتر از صفر باشد، سطح مذکور، آب تلقی می‌شود و نسبت G/R_n برای آن برابر با ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. مناطق دارای مقدار T_s کمتر از $4^{\circ}C$ و α بیشتر از ۰/۴۵، مناطق پوشیده از برف فرض می‌شوند و نسبت G/R_n برای این مناطق نیز ۰/۵ لحاظ می‌شود.

شار گرمای محسوس (H)

شار گرمای محسوس، میزان هدررفتن گرما به هوا، به علت وجود اختلاف دما از راه همرفت و هدایت مولکولی است که با معادله زیر محاسبه می‌شود (آلن و همکاران، ۲۰۰۲: ۱۵).

$$H = \frac{\rho \cdot C_p \cdot dT}{r_{ah}} \quad (4)$$

در این معادله، ρ چگالی هوا (kg/m^3)، C_p گرمای ویژه هوا ($1004 J/Kg/K$)، dT اختلاف دما ($T_1 - T_2$) بین دو ارتفاع ($Z_1 - Z_2$) بر حسب درجه کلوین (K) و r_{ah} مقاومت آیرودینامیکی در برابر انتقال گرماست (s/m). شار گرمای محسوس تابعی از گرادیان دما، زبری سطح و سرعت باد است.

حل معادله بالا به دلیل وجود دو مجهول dT و r_{ah} مشکل است. به منظور تسهیل محاسبات، از دو پیکسل سرد و گرم (که می‌توان در آنها میزان مناسبی برای H

¹ Monin-Obukhov

که ET_{inst} مقدار تبخیر - تعرق لحظه‌ای (mm/hr)،
 λ گرمای نهان تبخیر (J/Kg) و عدد ۳۶۰۰ برای تبدیل
 زمان از ثانیه به ساعت است. مقدار λ از معادله ۶
 محاسبه‌شده است (آلن و همکاران، ۲۰۰۲: ۱۵).

$$\lambda = [2.501 - 0.00236(T_s - 273.15)] \times 10^6 \quad (6)$$

کسر تبخیر و تعرق مرجع (ET_rF)

کسر تبخیر و تعرق مرجع، به صورت نسبت تبخیر
 و تعرق لحظه‌ای (ET_{inst}) محاسبه‌شده برای هر
 پیکسل (mm/hr) به تبخیر و تعرق مرجع (ET_r)
 محاسبه‌شده از داده‌های هواشناسی (دمای بیشینه، دمای
 کمینه، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد در
 ایستگاه سینوپتیک ملایر) برای زمان تصویر (mm/hr)
 تعریف می‌شود.

$$ET_rF = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad (7)$$

ET_rF مشابه ضریب گیاهی (Kc) بوده است و
 برای برون‌یابی ET از زمان تصویر برای دوره ۲۴
 ساعته یا طولانی‌تر استفاده می‌شود. مقدار ET_rF اغلب
 بین ۰ و ۱ متغیر است؛ به طوری که در پیکسل کاملاً
 خشک مقدار $ET=0$ و $ET_rF=0$ و در پیکسل سرد در
 صورتی که در مزرعه یونجه یا ذرت کاشت شده
 باشد، ET آن تا اندازه‌ای بیشتر از ET_r است؛ بنابراین
 $ET_rF > 1$ (احتمالاً ۱/۱) می‌شود. مقادیر منفی برای
 ET_rF به علت خطاهای سیستماتیک با فرضیه‌های
 مختلف در سبال، انجام می‌شود (آلن و همکاران،
 ۲۰۰۲: ۱۵).

برای محاسبه ET_r روابط زیادی ارائه شده است که
 از میان آنها رابطه پنمن - مانیتث به وسیله فائو برای

پیکسل‌هایی که تبخیر- تعرق کامل داشته‌اند اما دمای
 بیشتری دارند، کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌شود.
 در رابطه با پیکسل گرم نیز، چنانچه دمای آن خیلی
 زیاد انتخاب شود، مقدار تبخیر - تعرق پیکسل‌های با
 دمای کمتر اما مقدار تبخیر - تعرق معادل صفر، بیشتر
 از صفر خواهد شد. با وجود یکسان‌بودن روش
 محاسبه H در هر دو روش الگوی سبال و متریک،
 به علت استفاده از مقادیر R_n و G در روند محاسبات
 H ، نتایج خروجی مقدار H نیز برای دو روش متفاوت
 خواهد بود. پس از آنکه مقدار شار گرمای محسوس
 بر اساس شرایط جوی تصحیح شد، مقدار لحظه‌ای
 شار گرمای نهان تبخیر مطابق با معادله ۱ برای هر
 پیکسل محاسبه شد.

شار گرمای نهان و تبخیر و تعرق لحظه‌ای

شار گرمای نهان، میزان هدررفت گرمای از سطح،
 به علت فرایند تبخیر - تعرق است که با استفاده از
 معادله ۱ به دست می‌آید. از آنجا که مقادیر شار تابش
 خالص (R_n)، شار گرمای محسوس (H) و شار گرمای
 خاک (G) که تاکنون به دست آمده، مقادیر لحظه‌ای و
 برای زمان گذر ماهواره هستند، مقدار شار گرمای نهان
 (λET) نیز به صورت لحظه‌ای است. λET مقداری
 است که به وسیله تصاویر ماهواره‌ای حاصل می‌شود.
 بنابراین مقدار عددی λ باید محاسبه شود تا با تقسیم
 عدد مربوط در هر پیکسل، مقدار ET حاصل شود.
 با استفاده از شار گرمای نهان لحظه‌ای، مقدار ET
 لحظه‌ای به صورت زیر محاسبه می‌شود (آلن و
 همکاران، ۲۰۰۲: ۱۵).

$$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (8)$$

ET_{24} را با فرض اینکه $ET_r F$ لحظه‌ای، مشابه با میانگین $ET_r F$ در طول ۲۴ ساعت است، محاسبه می‌کند. مقدار ET_{24} (mm/day) به صورت زیر حساب می‌شود (آلن و همکاران، ۲۰۰۲: ۱۵).

$$ET_{24} = ET_r F \times ET_r 24 \quad (8)$$

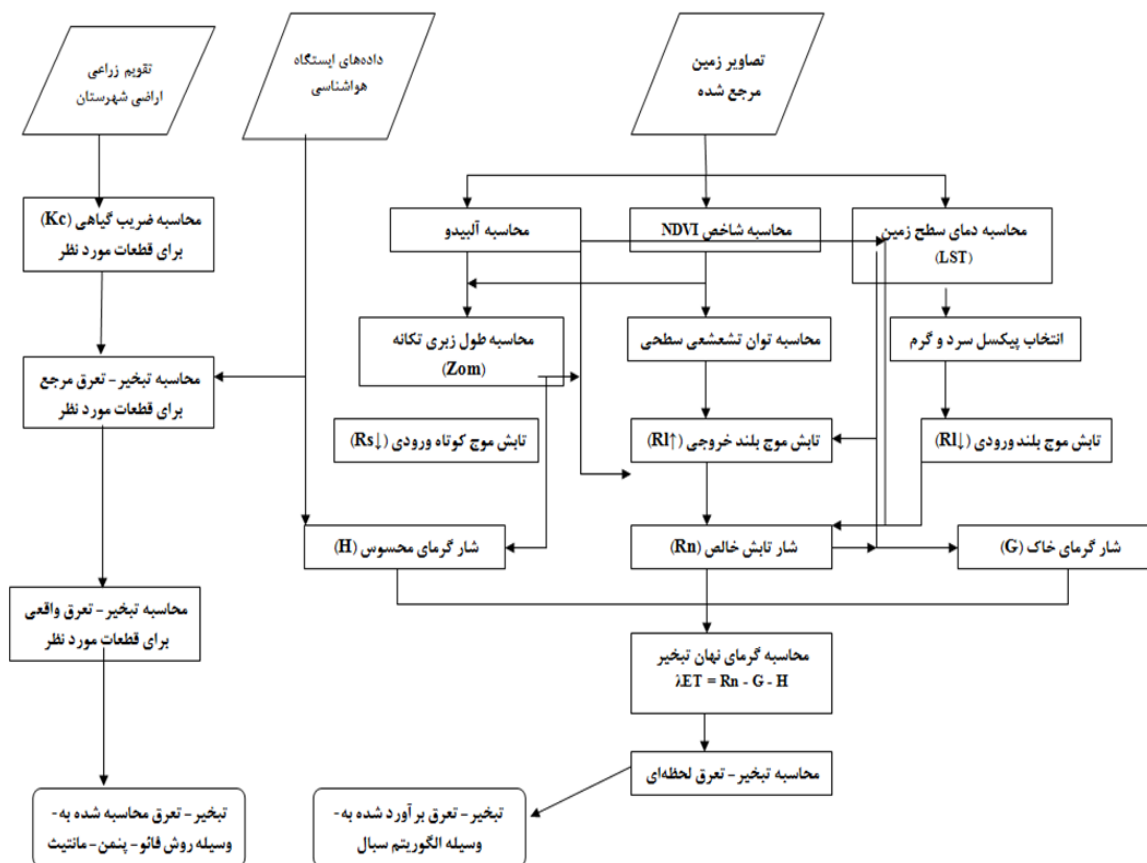
که $ET_r 24$ مجموع ET_r در طی ۲۴ ساعت برای همان روز است که با جمع کردن مقادیر ساعتی ET_r با یکدیگر در روز، گذر ماهواره به دست می‌آید.

مراحل انجام پژوهش به طور خلاصه در شکل (۲) آورده شده است.

اکثر کشورهای با اقلیم خشک و نیمه‌خشک از جمله ایران پیشنهاد شده است. روش پنمن - مانیتث دارای نسخه‌های متعددی است که از بین آنها روش فائو - پنمن - مانیتث به عنوان یکی از معتبرترین روش‌ها برای تخمین تبخیر - تعرق مرجع، برای استفاده متخصصان قرار گرفت (آلن و همکاران، ۱۹۹۸: ۲۶). بنابراین در این پژوهش، از نسخه فائو - پنمن - مانیتث ۵۶ در نرم‌افزار REF-ET به منظور محاسبه ET_r استفاده شده است.

تبخیر و تعرق ۲۴ ساعته

غالباً مقادیر روزانه تبخیر - تعرق (ET_{24}) کاربرد بیشتری نسبت به مقادیر لحظه‌ای دارند. سبال مقدار



شکل ۲. مراحل انجام پژوهش

تهیه نقشه کاربری اراضی به روش شیء‌گرا

در این مطالعه، از تصویر لندست ۸ که دقیقاً با تصاویر MODIS هم‌زمان بوده، برای تهیه نقشه کاربری اراضی شهرستان ملایر استفاده شده است؛ همچنین، نقشه کاربری اراضی با روش شیء‌گرا و الگوریتم Maximum Likelihood و با استفاده از نرم‌افزار ecognition 7.6 تهیه شد. سپس با استفاده از ماتریکس خطا و نتیجه بهترین طبقه‌بندی، ارزیابی صحت نقشه صورت گرفت.

داده‌های استفاده‌شده در این تحقیق، شامل تصاویر ماهواره لندست ۸ با شماره گذر ۱۶۶ و ردیف ۳۳ در ۸ تاریخ از سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۳ بوده است. نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱/۵۰۰۰۰، نقشه کاربری اراضی شهرستان ملایر، داده‌های به دست آمده از GPS در طی عملیات صحرایی در اراضی شهرستان ملایر و داده‌های به دست آمده از Google Earth هستند. نرم‌افزارهای ENVI 4.7، eCognition Developer، Arc GIS 10.1 و Google Earth برای تصحیح اولیه و طبقه‌بندی به کار گرفته شدند.

اولین مرحله در فرایند طبقه‌بندی شیء‌گرا، سگمنت‌سازی^۱ است (جیوئی و همکاران،^۲ ۲۰۰۸؛ فیضی‌زاده، ۱۳۸۶: ۵). نتایج نشان داد که با انتخاب شاخص‌های مقیاس، همگنی رنگ ۰/۶۵ برای تفکیک و تشخیص تصویر در سطح یک، در فرایند طبقه‌بندی، نتایج پذیرفته‌شده‌ای را به دست آورد. در این تحقیق با در نظر گرفتن شاخص‌های مناسب از جمله مقیاس و رنگ در مرحله سگمنت‌سازی، فرایند طبقه‌بندی انجام شد و ارزیابی صحت و دقت بر اساس دو روش

بهترین طبقه‌بندی^۳ (جدول ۱) و ماتریس خطای طبقه‌بندی نمونه‌ها^۴ برآورده شد (لیساند و همکاران،^۵ ۲۰۰۴: ۴۱؛ متینفر و همکاران،^۶ ۲۰۰۷: ۴۴۸).

برای بررسی وضعیت مقادیر تبخیر و تعرق واقعی در کاربری‌های اراضی مختلف در منطقه در دست مطالعه، از تابع Zonal Statistic استفاده شد. از آنجا که قدرت تفکیک مکانی تصویر MODIS در باندهای استفاده‌شده برای تبخیر و تعرق برابر با ۱۰۰۰ متر است و با این دقت مکانی قادر به تهیه نقشه کاربری اراضی مناسب برای منطقه نخواهیم بود، در این پژوهش از تصاویر لندست ۸ استفاده شد که دقیقاً هم‌زمان با تصویر MODIS گرفته شده است؛ زیرا سنجنده‌های لندست ۸ نه تنها قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متری دارند، بلکه با واقعیت زمینی نیز مطابقت بیشتری دارند. بنابراین هر پیکسل تصویر MODIS برابر با ۳۳ پیکسل تصویر لندست ۸ است که با استفاده از آن کاربری غالب، درون یک پیکسل MODIS را درون‌یابی می‌کند و بر اساس کاربری غالب، مقدار تبخیر و تعرق هر پیکسل مشخص می‌شود (<http://www.landsat.gsfc.nasa.gov> و <http://www.modis.gsfc.nasa.gov>).

$$\text{landsat pixel} = \frac{1000 \text{ m:MODIS}}{30 \text{ m:Landsat}} = 33 \text{ Pixel} \quad (9)$$

در شکل (۳)، نمونه‌ای از انتخاب یک پیکسل MODIS و جستجو در آن به وسیله لندست ۸ و جداسازی و نمایش کاربری‌های غالب در درون یک پیکسل MODIS ارائه شده است.

³ Best Classification result

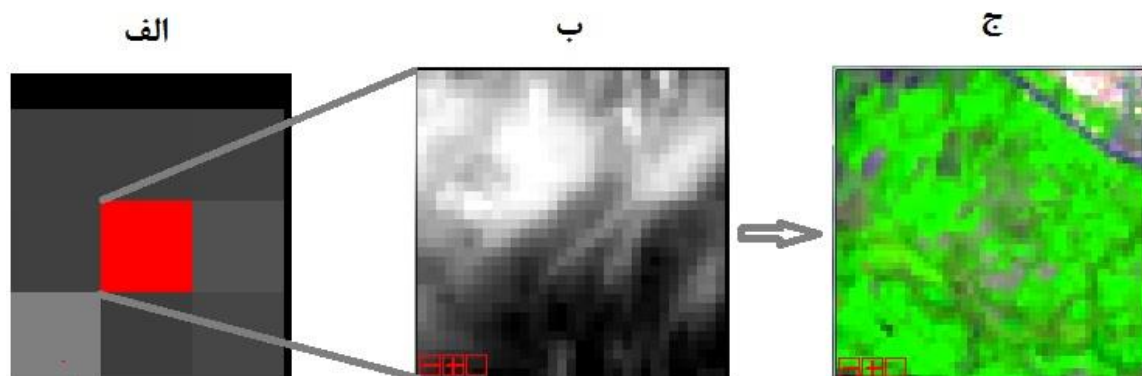
⁴ Error Matrix based on Samples

⁵ Lillesand et al

⁶ Matinfar et al

¹ Segmentation

² Jyothi et al



شکل ۳. الف) یک پیکسل تصویر MODIS؛ ب) ۱۱۰۰ پیکسل متناظر در تصویر لندست ۸؛ ج) کاربری غالب در یک پیکسل MODIS و یا ۱۱۰۰ پیکسل لندست.

نشان می‌دهند (روهاف و همکاران،^۲ ۲۰۱۲: ۷۰۳). نقشه‌های توزیع دمای سطحی، شاخص پوشش گیاهی و تبخیر و تعرق روزانه با توجه به محدودیت حجم مقاله، برای تاریخ ۲۰۱۳/۰۵/۱۴ در شکل (۳) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، توزیع تبخیر و تعرق واقعی روزانه با توجه به پوشش ناهمگون منطقه در دست مطالعه، دارای طیف وسیع و انحراف معیار زیادی است. با مقایسه نقشه‌های توزیع دمای سطحی، شاخص پوشش گیاهی و تبخیر و تعرق روزانه در شکل (۴) مشاهده می‌شود که نواحی دارای شاخص پوشش گیاهی زیاد و دمای کم نسبت به سایر نواحی که دارای شاخص پوشش گیاهی کم و دمای زیاد هستند، از میزان تبخیر و تعرق بیشتری برخوردارند (ضریب همبستگی ۹۱ درصد که در سطح ۱ درصد معنی‌دار است). همچنین، نقشه‌های دمای سطحی و میزان شاخص پوشش گیاهی دارای همبستگی معکوس هستند (ضریب همبستگی ۸۵- درصد که در سطح ۱ درصد معنی‌دار است).

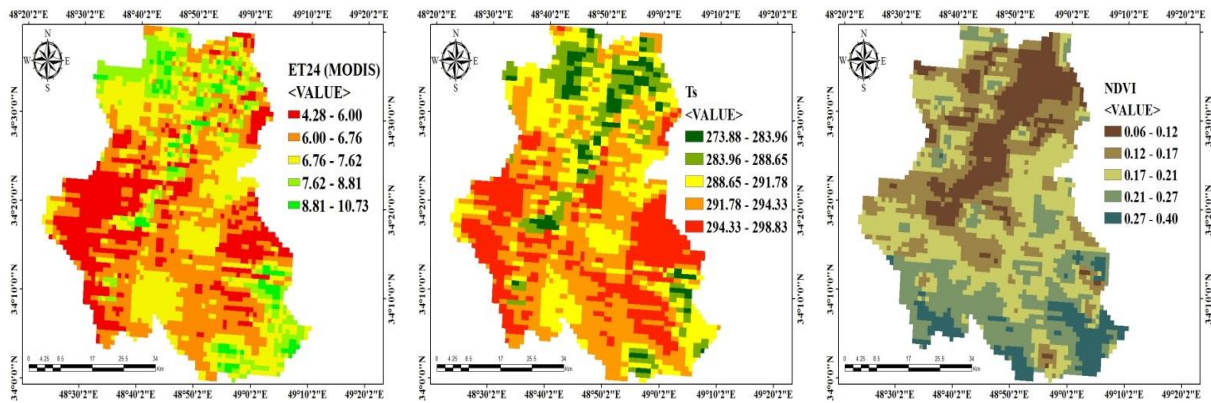
با توجه به شکل (۳)، وضعیت کاربری اراضی در یک پیکسل MODIS که به‌طور دقیق مشخص نبود با پیکسل‌های لندست درون‌یابی شده و کاربری اراضی غالب در آن پیکسل، پوشش گیاهی متراکم یا زراعت آبی انتخاب شد. با توجه به این فرایند، پیکسل‌های مربوط به هفت کاربری غالب (آب، مرتع، اراضی شور با کاربری زراعت، نواحی انسان‌ساخت، دیم‌زار، مناطق کوهستانی و سنگ‌زار و زراعت آبی) در تصویر MODIS درون‌یابی شده و میانگین، ماکزیمم، مینیمم و انحراف معیار مقدار تبخیر و تعرق برای کاربری‌های مختلف (محاسبه شده با الگوریتم سبال در تصویر MODIS) ارائه شده است.

نتایج و بحث

دمای سطحی و شاخص پوشش گیاهی،^۱ دو شاخص مهم ورودی الگوی سبال هستند. این دو شاخص که در انتخاب پیکسل‌های گرم و سرد نیز به کار می‌روند، در موقعیتی که آب و مواد غذایی به میزان کافی در دسترس باشد، همبستگی معکوس را

^۲ Ruhoff et al

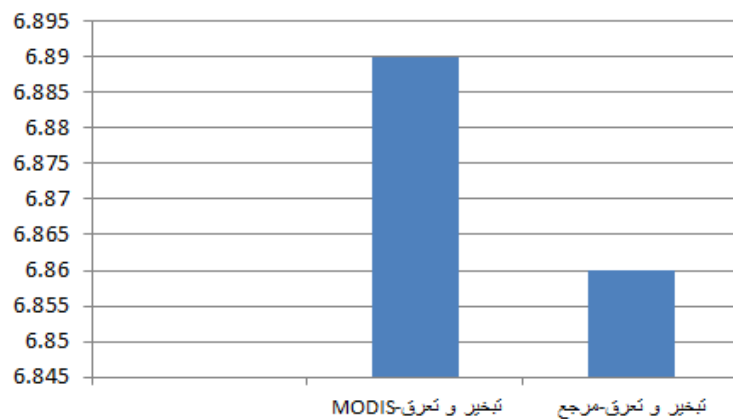
^۱ NDVI



شکل ۴. از راست به چپ به ترتیب نقشه شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، دمای سطحی (Ts) و تبخیر و تعرق (ET24)

کاربری خاص وجود داشته باشد، از این رو، این روش، مقدار تبخیر و تعرق برآورد شده برای هر پیکسل را به صورت نسبی و معادل میانگینی از کاربری‌های موجود در هر پیکسل نشان می‌دهد. در این پژوهش، برای واسنجی و صحت‌سنجی مقادیر تبخیر و تعرق محاسبه‌شده با الگوریتم سبال از مقدار تبخیر و تعرق مرجع محاسبه‌شده با روش فائو - پنمن - مانیتث استفاده شد (شکل ۵). مقایسه تبخیر و تعرق روزانه حاصل از الگوریتم سبال و روش فائو - پنمن - مانیتث، نشان می‌دهد که مقدار ET_r و مقدار ET_{SEBAL} به طور میانگین به ترتیب ۶/۸۶ و ۶/۸۹ میلی‌متر بر ساعت است. بیشترین اختلاف ۱/۰۶ درصد و کمترین اختلاف ۰/۲۴ درصد است.

با توجه به مقدار ارزش عددی پیکسل‌ها در ۳ شاخص دمای سطحی، پوشش گیاهی و تبخیر و تعرق مشخص شده است و همبستگی مناسبی میان ۳ شاخص برقرار است که نشان می‌دهد در مکان‌های با پوشش گیاهی زیاد و دمای سطحی کم مقدار تبخیر و تعرق بیشتر برآورد شده است؛ به این معنی که در مکان‌هایی که پوشش گیاهی بیشتری دارد، بیشتر گرمای محیط صرف تبخیر و تعرق شده است و وارد جو می‌شود؛ بنابراین آن منطقه دمای کمتری را نشان می‌دهد. اما با توجه به قدرت تفکیک مکانی سنجنده MODIS که برابر ۱۰۰۰ متر است، امکان وجود پیکسل‌های مخلوط نیز هست. یعنی ممکن است در یک پیکسل، کاربری‌های مختلف اراضی یا یک نوع

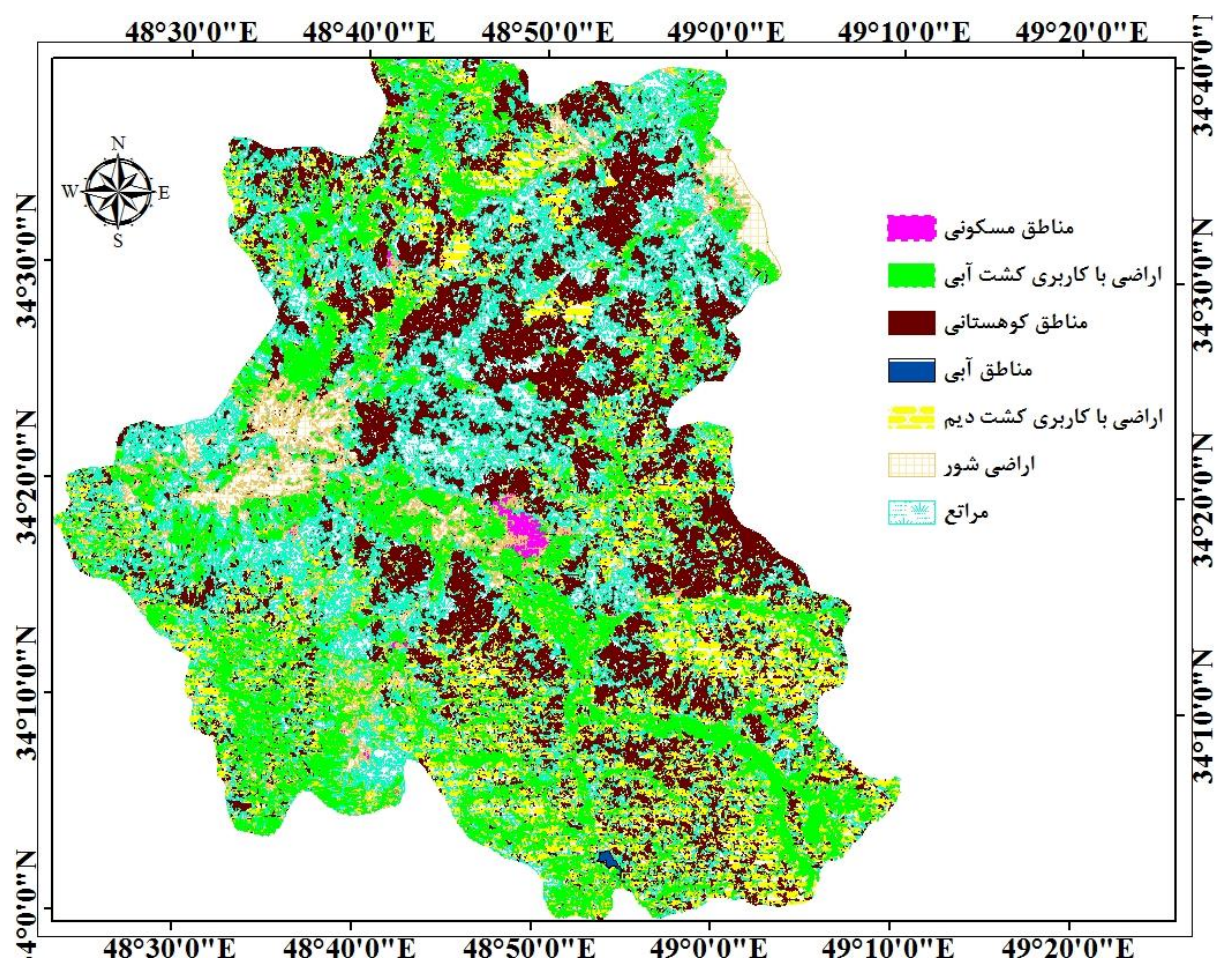


شکل ۵. نمودار مقایسه مقدار تبخیر و تعرق روزانه محاسبه‌شده با الگوریتم سبال در تصویر مودیس و روش فائو-پنمن-مانیتث

پذیرفته‌ای را با استفاده از تفسیر رقومی سنجنده بالا نشان می‌دهد. محدوده آبی با ۲۱۴۴۵۹۴ هکتار کم‌ترین مساحت و کاربری مرتع با ۸۶۳۳۳۴۸۵۸ هکتار بیشترین مساحت را دارند. با توجه به ارزیابی نقشه تهیه شده، صحت کلی ۰/۸۸ درصد و ضریب کاپا ۰/۸۵ است. در جدول‌های (۲) و (۳) ماتریس خطا و مساحت هریک از کاربری‌ها به ترتیب ارائه شده است. شکل (۶) نقشه کاربری اراضی منطقه در دست مطالعه را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۵ مشخص می‌شود مقدار تبخیر و تعرق الگوریتم سبال با استفاده از تصویر MODIS نسبت به روش شاهد اندکی انحراف دارد و در حد پذیرفته‌ای است.

همچنین، نتایج نشان داد استفاده از روش شیء‌گرا و الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه برای استخراج کاربری‌های مختلف در منطقه در دست مطالعه (آب، مرتع، اراضی شور، نواحی انسان‌ساخت، دیم‌زار، مناطق کوهستانی، زراعت آبی)، نتایج



۶. نقشه کاربری اراضی شهرستان ملایر با استفاده از تصویر لندست ۸ و روش شیء‌گرا

جدول ۲. ماتریس خطای طبقه‌بندی کاربری‌ها

نمونه‌ها	آب	اراضی شور	نواحی انسان‌ساخت	دیم	مرتع	مناطق کوهستانی	زراعت آبی	جمع کل	تولیدکننده	دقت	دقت کاربر
آب	۴۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴۰	۱	۱	۱
اراضی شور	۰	۱۸۴	۳	۰	۱	۰	۳	۱۹۱	۰/۹۲	۰/۹۶	۰/۹۶
نواحی انسان‌ساخت	۱	۲	۴۵۳	۵	۹	۰	۶	۴۷۶	۰/۹۴	۰/۹۵	۰/۹۵
دیم	۱	۱	۴	۵۴۸	۲۳	۰	۱۲	۵۸۱	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۳
مرتع	۲	۵	۸	۳۱	۴۲۱	۰	۷۳	۵۴۰	۰/۹۱	۰/۷۷	۰/۷۷
مناطق کوهستانی	۲	۰	۳۱	۱۲	۴۲	۵۰۰	۶	۵۹۳	۰/۸۵	۰/۸۳	۰/۸۳
زراعت آبی	۱	۷	۵	۲	۴	۰	۹۸۶	۱۰۰۵	۰/۹۱	۰/۹۱	۰/۹۱
جمع کل	۴۵	۱۹۸	۴۷۳	۵۸۶	۴۵۸	۵۰۰	۱۰۸۰	۲۸۴۰			

دقت کلی بر اساس نمونه‌های ثبت‌شده برای آمار توصیفی کاربری‌های استخراج‌شده در جدول (۳) کاربری‌ها ۰/۸۸ و ضریب کاپا نیز ۰/۸۵ به دست آمد. است.

جدول ۳. مساحت کلاس‌های کاربری

نوع کاربری	مساحت به هکتار	درصد نسبت به مجموع
مناطق آبی (آب)	۲۱۴/۴۵	۰/۰۰۰۶
اراضی شور	۲۲۲۴۰/۹۴	۰/۰۶
نواحی مسکونی	۷۵۸/۳۲	۰/۰۰۲
زراعت آبی	۵۹۳۰۲/۸۷	۰/۱۷
دیم‌زار	۹۱۹۶۷/۱۷	۰/۲۸
مرتع	۸۶۳۳۳/۴۸	۰/۲۶۵
مناطق کوهستانی	۶۷۷۷۹/۲۲	۰/۲۲
جمع کل مساحت‌ها	۳۳۰۶۲۳/۴۸	۱

جدول ۴. آمار تبخیر و تعرق واقعی در اراضی مختلف

کاربری اراضی	MIN (mm/day)	MAX (mm/day)	MEAN (mm/day)	STD (mm/day)
نواحی مسکونی	۵	۷/۴۲	۶/۷۹	۰/۴۴
زراعت آبی	۴/۲۸	۱۰/۶	۶/۷۲	۰/۹۲
مناطق کوهستانی و سنگ‌زار با پوشش انبوه	۴/۹۹	۱۰/۶	۶/۸۱	۰/۹۴
مناطق آبی	۷/۴۴	۸/۵	۷/۴۵	۰/۰۰۵
کشاورزی دیم	۴/۹۹	۱۰/۶	۶/۸	۰/۹۲
مناطق شور با کاربری کشتزار	۴/۸۶	۱۰/۴۸	۶/۳۴	۰/۹۳
مراتع	۴/۷۲	۱۰/۳	۶/۷۵	۰/۹۷

دقت نتایج حاصل از این پژوهش، نتایج بویینگ و همکاران (۲۰۱۲: ۱۱۲) مبنی بر دقت متوسط در تخمین تبخیر و تعرق روش‌های سنجش از دور در الگوهای مختلف را رد می‌کند. همچنین، نتایج تحقیقات گئورگ و همکاران (۲۰۱۳) و (۲۰۱۴) و دستورانی و همکاران (۱۳۹۱) و سیمایی و همکاران (۱۳۹۲) را درباره دقت روش سبال تأیید می‌کند.

نتیجه‌گیری

با توجه به اثر گرمایش جهانی و تغییر اقلیم بر رشد گیاهان، مراتع و جنگل‌ها و ایجاد وضعیت بهینه یا بحرانی جدید اقلیمی برای محصولات کشاورزی و نیز کمبود امکانات مانند لیسیمترها برای محاسبه مستقیم تبخیر و تعرق واقعی (به‌عنوان یکی از راه‌های کاهش منابع آب سطحی حوضه‌های آبخیز)، به نظر می‌رسد پیدا کردن روش‌های غیرمستقیم مانند استفاده از سنجش از دور، می‌تواند گامی سودمند و بااهمیت برای نیاز آبی محصولات کشاورزی محسوب شود. با توجه به اهمیت کشاورزی و باغداری در غرب ایران و همچنین، جایگاه ملایر در تولید انگور و کشمش ایران و جهان، تبخیر و تعرق واقعی این منطقه در دست بررسی قرار گرفت. این پژوهش به دنبال آن است که مشخص کند در کدام نوع کاربری اراضی در اقلیم کوهستانی و نیمه‌خشک این منطقه، با صحت و دقت بیشتری تبخیر و تعرق واقعی محاسبه می‌شود. هدف این پژوهش، بررسی و مقایسه دقت برآورد تبخیر و تعرق واقعی کاربری‌های مختلف اراضی، به وسیله الگوریتم توازن انرژی در سطح زمین (سبال) در مقایسه با مقادیر محاسبه‌شده به روش فائو - پنمن - مانیتث با ترکیب دو سنجنده MODIS و Landsat در شهرستان ملایر است.

نتایج نشان داد الگوریتم سبال به‌خوبی قادر به اندازه‌گیری شاخص‌هایی همچون دمای سطحی، مقدار شار گرمای محسوس، انرژی تابشی خالص و شار گرمای خاک است و برآورد مقادیر تبخیر و تعرق در سطح منطقه در مقایسه با مقدار اندازه‌گیری‌شده با روش شاهد (فائو - پنمن - مانیتث) دارای دقت مناسبی است. بنابراین مقدار تبخیر و تعرق واقعی در کاربری‌های مختلف اراضی بررسی و مقایسه شد. برای تحلیل مناسب‌تر علاوه بر میانگین، شاخص‌های آماری بیشینه، کمینه و انحراف معیار تبخیر و تعرق در اراضی مختلف محاسبه شد. نتایج نشان داد بیشترین تبخیر و تعرق میانگین مربوط به مناطق آبی و مناطق مسکونی است (که احتمالاً به دلیل وجود پیکسل بزرگ در محدوده شهری و وجود فضای سبز، دریاچه‌ها و مناطق آبی زیاد در مناطق مسکونی که به‌طور طبیعی مقدار تبخیر و تعرق را زیاد می‌کند). همچنین، بیشترین مقدار بیشینه تبخیر و تعرق مربوط به زراعت آبی، مناطق کوهستانی با پوشش گیاهی نامتراکم و کشاورزی دیم است و کمترین مقدار بیشینه تبخیر و تعرق در مناطق مسکونی مشاهده می‌شود. درباره کمینه تبخیر و تعرق برخلاف انتظار، کمترین تبخیر و تعرق متعلق به مناطق مسکونی است (به دلیل اندازه پیکسل و وجود فضای سبز و پیکره‌های آبی در این کاربری‌ها) و نیز کمینه مقدار تبخیر و تعرق برای زراعت آبی است. درخصوص انحراف معیار نکته مهم، مقدار کمینه تبخیر و تعرق واقعی در پیکسل آب است که گویای وضعیت یکنواخت تبخیر و تعرق در سطح آب است و مقدار بیشینه انحراف معیار، به کاربری مراتع مربوط است که نشان از متمرکز نبودن پوشش مراتع در سطح منطقه در دست مطالعه و پیکسل‌های تصویر است.

Land). Advanced Training and Users Manual: 12-76.

Ayewew, T. 2003. Evapotranspiration estimation thematic mapper spectral satellite data in the Ethiopian rift and adjacent highlands. *Journal of Hydrology* 279(1-4): 83-93.

Bastiaanssen, W. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229(1): 87-100.

Bastiaanssen, W. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229(1): 87-100.

Bastiaanssen, W.G.M., M. Menenti, R.A. Feddes and A.A.M. Holtslag. 1998. "A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation." *J. Hydrol.*, 212-213, 198-212.

Chavez, J.L., P.H. Gowda, S.R. Evett, P.D. Colaizzi, T.A. Howell and T. Marek. 2007. "An application of METRIC for ET mapping in the Texas high plains". December 9-11, 2007, Irrigation Association CD-ROM, San Diego, pp 268-283

Colaizzi, P.D., Gowda, P.H., Marek, T.H., Paul, G. and Howell, T.A. 2011. SEBAL for Estimating Hourly ET Fluxes over Irrigated and Dryland Cotton during BEAREX08 World Environmental and Water Resources Congress 2011 (pp. 2787-2795).

Dashtaki, S.G., Homaei, M. and Khodaverdilo, H. 2010. Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of soil data. *Soil Use and Management*, 26(1): 68-74.

Folhes, M.T., C.D. Renno and J.V. Soares. 2009. "Remote sensing for irrigation water management in the semi-arid Northeast of Brazil". *Agricultural Water Management* 96 : 1398-1408.

منابع

اکبری، محمد، (۱۳۸۳). بهبود مدیریت آبیاری مزارع با استفاده از تلفیق اطلاعات ماهواره‌ای، مزرعه‌ای و الگوی شبیه‌سازی SWAP، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

دستورانی، محمد تقی و پورمحمدی، سمانه و رحیمیان، محمدحسین، (۱۳۹۱). تخمین تبخیر- تعرق واقعی باغات پسته منطقه اردکان به کمک سنجش از دور. *مجله پژوهش آب در کشاورزی*، ۲۶ (۱): ۱-۱۲.

سیمایی، الهه و همایی، مهدی و نوروزی، علی‌اکبر، (۱۳۹۲). ارزیابی مدل SEBAL در برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از داده‌های TM و MODIS، نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال دوم، شماره چهارم صص ۳۳-۳۹.

فیضی‌زاده، بختیار و حاج میررحیمی، محمود، (۱۳۸۶). آشکارسازی تغییرات فضای سبز شهر تبریز با استفاده از روش‌های شیب‌گرا، همایش GIS شهری.

سپاه‌خواه، علیرضا، (۱۳۶۱). جمع‌آوری باران به منظور درخت‌کاری دیم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، نشریه فنی شماره ۶، صص ۱۹.

هاشمی‌نیا، مجید، (۱۳۷۸). تبخیر- تعرق و داده‌های اقلیمی. انتشارات آموزش کشاورزی، کرج.

Allen, R.G., Pereira, L., Raes, D. and Smith, M. 1998. FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations: 26-40.

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(4): 380-394.

Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R. and Bastiaanssen, W.G.M. 2002. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for

- 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(3): 263-293.
- Ogawa, S., Murakami, T., Ishitsuka, N., and Saito, G. 1999. Evapotranspiration estimates from fine-resolution NDVI. National Institute of Agro- Environmental Science (Japan).
- Paul, G., P. H. Gowda, P. V. Vara Prasad, T. A. Howell, R. M. Aiken, and C. M. U. Neale. 2014. Investigating the influence of roughness length for heat transport (zoh) on the performance of SEBAL in semi-arid irrigated and dryland agricultural systems. *Journal of Hydrology* 509:231-244.
- Paul, G., P. H. Gowda, P. V. Vara Prasad, T. A. Howell, S. A. Staggenborg, and C. M. U. Neale. 2013. Lysimetric evaluation of SEBAL using high resolution airborne imagery from BEAREX08. *Advances in Water Resources* 59:157-168.
- Raghuveer K. Vinukollu a, Eric F. Wood a, Craig R. Ferguson a, Joshua B. Fisher, 2011. Global estimates of evapotranspiration for climate studies using multi-sensor remote sensing data: Evaluation of three process-based approaches. *Remote Sensing of Environment*, 115 (2011) 801–823.
- Ruhoff, A.L., Paz, A.R., Collischonn, W., Aragao L.E.O.C., Rocha, H.R and Malhi, Y.S. 2012. A MODIS-Based Energy Balance to Estimate Evapotranspiration for Clear-Sky Days in Brazilian Tropical Savannas. *Journal of Remote Sensing*, 4: 703-725.
- 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(3): 1130-1143.
- Song, C., Woodcock, C.E., Seto, K.C., Lenney, M.P. and Macomber, S.A., 2001, Hargreaves, G.H. 1994. Defining and using reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(6): 1132-1139.
- Huntingford, C., Verhoef, A. and Stewart, J. 2000. Dual versus single source models for estimating surface temperature of African savannah. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 4(1): 185-191.
- Jyothi B. N, Babu G.R. and Murali Krishna I.V., 2008, Object Oriented and Multi-Scale Image Analysis: Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats-A Review, *Journal of Computer Science* 4 (9): 706-712.
- Kustas, W. P., Norman, J. M. 1996, Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. *Journal of Science Hydrology*, 41: 495-516.
- Li, F., Lyons, T. J. 2002, Remote estimation of regional evapotranspiration. *Environmental Modelling and Software*, 17: 61-75
- Lillesand, T.M., R.W. Kiefer and J.W. Chipman, 2004. Remote sensing and image interpretation. 5th Edn. John Wiley and Sons, Inc. USA.
- Mutiga, J., Su, Zh., Woldai, T. 2010. Using satellite remote sensing to assess evapotranspiration: Case study of the upper Ewaso Ng'iro North Basin, Kenya. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 12S (2010) S100–S108
- Matinfar. H. R, Sarmadian. F, Alavi Panah. S.K and Hech .R.J, Comparisons of Object-Oriented and Pixel-Based Classification of Land Use/Land Cover Types Based on Landsat7, Etm+ Spectral Bands (Case Study: Arid Region of Iran), *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 2 (4): 448-456, 2007, ISSN 1818-6769, © IDOSI Publications, 2007.
- Nishida, K., Nemani, R.R., Running, S.W. and Glassy, J.M. 2003. An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation. *Journal of Geophysical Research*, 108(D9): 4270.

- satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid US. *Irrigation and Drainage Systems*, 19(3): 355-376.
- Yuting, Y., Songhao, Sh., Lei, J., 2012. Remote sensing temporal and spatial patterns of evapotranspiration and the responses to water management in a large irrigation district of North China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 164: 112– 122.
- Zhongping, S., Bin, W., Wei, S., Wenming, Sh., Changzuo, W., Daian, Y., Zheng, L., 2011. Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China. *Mathematical and Computer Modelling*, 54: 1086–1092.
- Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effect. *Remote Sensing of Environment*, 75, pp. 230–244.
- Su, Z. 2002. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 6(1): 85-100.
- Sun, Z., Wei, B., Su, W., Shen, W., Wang, C., You, D. and Liu, Z. 2011. Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(3–4): 1086-1092.
- Tasumi, M., Trezza, R., Allen, R.G. and Wright, J.L. 2005. Operational aspects of