



دوره ۳۱، شماره ۳، شماره پیاپی ۱۲۰، پاییز ۱۳۹۷، صفحات ۹۱-۱۰۷
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/WMEJ.2018.122097.1122

پژوهش‌های آبخیزداری

(پژوهش و سازندگی)

ارزیابی دقت برآورد مکانی تبخیر-تعرق با الگوریتم SEBS در منطقه‌ی کوهستانی خشک، جنوب ایران

مریم زارع

دانشجوی دکتری تخصصی علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه هرمزگان، دانشکده کشاورزی، بندرعباس، ایران
ام‌البنین بذرافشان*

(نویسنده‌ی مسئول)* استادیار دانشگاه هرمزگان، دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی، بندرعباس، ایران

مجتبی پاک‌پرور

استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران

غلامرضا قهاری

استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران

تاریخ دریافت: خرداد ۱۳۹۷ تاریخ پذیرش: آبان ۱۳۹۷

* Corresponding Email: O.bazrafshan@hormozgan.ac.ir

چکیده

مقدار واقعی تبخیر-تعرق از سطح حوضه‌ی آبخیز، یکی از عوامل اصلی در دوره‌ی آب‌شناسی و از اجزای مهم معادله‌ی تراز آب است که بخش عمده‌ای از جریان‌های خروجی حوضه یا هر مقیاس دیگری است. اندازه‌گیری مقدار واقعی تبخیر-تعرق از دشواری‌های بررسی‌های تراز آب است، چراکه به‌علت نقطه‌ای بودن اطلاعات هواشناسی و دشواری تعیین ضریب گیاهی، دقت استفاده از شبیه‌های مرسوم در برآورد پهنه‌ای تبخیر-تعرق واقعی کم است. در این پژوهش با استفاده از نه تصویر ماهواره‌ی لندست ۸، داده‌های هواشناسی ایستگاه گلستان و شبیه SEBS تبخیر-تعرق دوره‌ی زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۶ در منطقه‌ی گلستان در شمال غربی شیراز محاسبه، و نتایج آن با معادله‌ی فائو پنمن-مانتیس مقایسه شد تا درستی این شبیه در این منطقه بررسی شود. پرونده‌های تشعشع مورد نیاز SEBS با استفاده از شناسه‌ی دستوری R.sun در نرم‌افزار گراس-جی‌آی‌اس تولید، و دیگر داده‌های سنجش‌از‌دور در محیط الویس محاسبه شدند. نتایج تبخیر-تعرق به‌دست‌آمده از شبیه SEBS در مقایسه با معادله‌ی یادشده از لحاظ آماری ضریب همبستگی ۰/۹۹۳ را نشان داد. تغییرات مقادیر تبخیر-تعرق واقعی در کاربری‌های مختلف در محدوده‌ای پذیرفتنی بود. تولید اطلاعات پهنه‌ای مطمئن از تبخیر-تعرق از مزیت‌های برجسته‌ی کاربرد این شبیه در بررسی‌های آب‌شناسی حوضه است.

واژگای کلیدی: الگوریتم SEBS، تبخیر-تعرق واقعی، تصاویر لندست ۸، روندیابی مکانی

Evaluation of Spatial Evapotranspiration Estimation by the SEBS Model in a Dry Mountainous Region, Southern Iran

Maryam zare

Ph.D. Student of Watershed Management, University of Hormozgan

Omolbanin Bazrafshan*

(Corresponding Author)* Assistant Professor Agriculture engineering and natural resource, University of Hormozgan

Mojtaba Pakparvar

Assistant Professor of Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

Gholamreza Ghahari

Assistant Professor of Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

Abstract

The conventional methods for actual evapotranspiration (ET_a) estimating is not sufficiently accurate due to the point based nature of meteorological data and the difficulties related to the plant coefficient (K_c) estimation. The true rate of ET from a basin is an important factor of hydrological cycle and in the water balance equation and accounts for a huge part of out-flow of a basin or any other scale. In this study, the ET values were calculated in the region of Kelestan located in the northwest of Shiraz. The SEBS evapotranspiration model was applied and evaluated by using the Landsat 8 satellite images (nine images) and the meteorological data collected at the Kelestan Station for the period 2015–2017. Results were compared to the FAO Penman-Monteith equation to verify the accuracy of this model in the region of Kelestan. The radiation sources required for the SEBS model were produced by the R.sun module in Grass-GIS. Other remote sensing data were calculated in the Ilwis software environment. The results of evapotranspiration obtained from the SEBS model in comparison with the mentioned equation showed a correlation coefficient of 0.999, which is statistically significant. Variations of the ET_a for different landuses were within a reasonable range. The production of reliable data from evapotranspiration is one of the prominent advantages of using this model for application in hydrologic research of the basin.

Keywords: Eta, Landsat 8, SEBS model, spatial evapotranspiration

مقدمه

واقعی به عنوان روشی غیرمستقیم و جایگزین روش تراز آب در سطوح وسیع شده است. برتری مهم استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور می‌تواند در این نکته باشد که تبخیر و تعرق واقعی را می‌توان بدون نیاز به کمی کردن فرایندهای پیچیده‌ی آب‌شناسی دیگر محاسبه کرد. تبخیر و تعرق واقعی کمیتی بسیار متغیر در مکان و زمان است. به علت تغییرات گسترده‌ی مکانی، میزان بارندگی، رفتار آب‌شناسی خاک، انواع پوشش گیاهی و تراکمشان، تبخیر و تعرق واقعی در بعد مکان متغیر است (آلن و همکاران ۲۰۰۷). از طرفی هم با زمان متغیر است، زیرا که آب‌وهوا با زمان تغییر می‌کند. تصاویر ماهواره‌ای می‌توانند ابزاری مطلوب در تهیه‌ی نقشه‌ی ساختار فضایی و زمانی تبخیر و تعرق واقعی باشند، بنابراین تعیین شبیه ریاضی با در نظر گرفتن تمام عوامل مؤثر در آن، کاری مشکل، با منابع خطای فراوان و نیاز اطلاعاتی زیاد است که اندازه‌گیری مشکل و وقت‌گیری هم دارد. یکی از مطرح‌ترین روش‌های برآورد تبخیر و تعرق در دهه‌ی اخیر روش توازن کارمایه‌ی سطحی است. با استفاده از این روش مؤلفه‌های مختلف توازن کارمایه در مقیاس منطقه‌ای و با کمترین داده‌های زمینی محاسبه می‌شوند (آلن و همکاران ۲۰۰۳). به‌طور خلاصه، ارتباط بین تشعشعات دریافتی به وسیله‌ی ماهواره‌ها از سطح زمین در نوارهای انعکاسی و مادون‌قرمز حرارتی و نیز وجود اختلاف زیاد در ویژگی‌های آب‌شناسی سطح زمین، پایه و اساس معادلات در الگوریتم تراز کارمایه است. در این الگوریتم با توجه به شار ورودی به پوشش سطح زمین و خروج آن از راه طول‌موج کوتاه و بلند، امکان محاسبه‌ی تشعشع خالص جذب‌شده با هر سلول در سطح زمین فراهم می‌آید. این تشعشع با توجه به اختلاف درجه‌ی هوا و سطح پوشش زمین، شدت و ضعف پوشش گیاهی و مقاومت هواپویایی سطح زمین، به اجزای مختلف نظیر جریان گرمایی خاک، جریان گرمای محسوس و جریان گرمای نهان تبخیر تقسیم می‌شود (باستیانسن ۲۰۰۰). جریان گرمای نهان تبخیر از باقی‌مانده‌ی معادله‌ی تراز کارمایه حاصل می‌گردد (باستیانسن ۲۰۰۰). سنجش‌ازدور این توان را دارد که ضمن تخمین تبخیر و تعرق حتی توزیع مکانی آن را بررسی کند، زیرا تنها دانش و فنی است که می‌تواند عامل‌های مهمی نظیر دمای سطحی، ضریب بازتابش و شاخص گیاهی را به‌صورت منطبق یا سازگار با محیط استخراج کند و از لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است (نورمن و همکاران ۱۹۹۵). روش‌های سنجش‌ازدور بسیاری برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی وجود دارد، اما الگوریتم‌های کلاسیک سنجش‌ازدور برای مقیاس‌های متوسط و بزرگ (ماکرو) مناسب نیستند. در نتیجه استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته‌تر برای نواحی گسترده و ناهمگن با چشم‌اندازهای مختلف از لحاظ گیاه‌شناسی ضروری و اساسی است. یکی از این الگوریتم‌ها، الگوریتم SEBS^۱ (سو ۲۰۰۲؛ سو و همکاران ۲۰۰۳؛ جیا ۲۰۰۳؛ هان و یانگ ۲۰۰۴) است. مهم‌ترین

تبخیر یکی از عوامل مهم در مدیریت پیکره‌های آبی، تغییرات تراز آب در آن‌ها، و محاسبه‌ی تراز آب است، اما برآورد دقیق آن با مشکلات و پیچیدگی‌های خاصی روبه‌رو است. با توجه به محدودیت روش‌های فیزیکی و تجربی برآورد تبخیر، استفاده از فناوری سنجش‌ازدور، به دلیل امکان برآورد مکانی اطلاعات و کمینه کردن استفاده از داده‌های هواشناسی ممکن است کاربرد گسترده‌ای در محاسبه‌ی تبخیر داشته باشد. الگوریتم‌های زیادی برای برآورد تبخیر-تعرق^۱ با استفاده از فناوری سنجش‌ازدور توسعه داده شده‌اند. درباره‌ی استفاده از این الگوریتم‌ها برای برآورد تبخیر از سطوح آزاد آب^۲، مطالعاتی هرچند به‌صورت محدود صورت گرفته است؛ ولی درباره‌ی سنجش درستی آن‌ها در برآورد تبخیر از سطوح آب، پژوهش‌های کمتری به انجام رسیده است. برآورد دقیق تبخیر-تعرق مرجع در تأمین نیاز آبی گیاهان، برنامه‌ریزی آبیاری و مطالعه‌ی تراز آب مخازن ضرورت دارد. با این حال، اندازه‌گیری تبخیر-تعرق با این روش هم پرهزینه و هم نیازمند صرف وقت زیاد است. از این‌رو در بیشتر موارد برای این کار از روش‌های غیرمستقیم که شامل طیف گسترده‌ای از شبیه‌های ساده‌ی تجربی، مانند روش‌های تشعشعی، دمایی، رطوبتی و تشت تبخیر تا روش‌های پیچیده‌ی ترکیبی، مانند فائو پنمن-مانتیس است، استفاده می‌شود (طبری و همکاران ۲۰۱۳). تبخیر-تعرق سازوکاری اولیه برای انتقال آب و حرارت بین زمین و جو است. یکی از روش‌های تخمین تبخیر و تعرق، استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور است (تانگ و لی ۲۰۱۷). الگوریتم‌های زیادی برای برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از فناوری سنجش‌ازدور توسعه داده شده‌اند. به‌طور کلی دو نوع روش غیرمستقیم را می‌توان برای برآورد تبخیر و تعرق از سطح حوضه به‌کار برد. روش نخست که به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود برآورد تبخیر و تعرق واقعی از راه معادله‌ی تراز آبی است. البته دقت برآورد در این روش به‌شدت به دقت و اعتبار داده‌های بارندگی و رواناب وابسته است. جزئیات زمانی و مکانی اطلاعات ET باید کافی باشد تا بتوان تحلیل‌های صحیحی در حوضه‌ی آبخیز کرد. ET که شامل تبخیر آب از سطح خاک و تعرق پوشش گیاهی است، نشان‌دهنده‌ی روندی اساسی از چرخه‌ی آب‌شناسی و عنصری کلیدی در مدیریت منابع آب، به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (کیسی ۲۰۰۷). محاسبه‌ی تبخیر و تعرق واقعی از راه عملی و آزمایشگاهی، با دقت زیاد و با استفاده از روش‌های توزین، همبستگی تالاطمی یا روش نسبت باون امکان‌پذیر است؛ اما این روش‌ها تنها می‌توانند میزان تبخیر و تعرق واقعی را در یک نقطه یا یک منطقه‌ی کوچک تعیین کنند و برای ناحیه‌های گسترده‌تر استفاده‌کردنی نیستند (سو ۲۰۰۲). این محدودیت باعث ایجاد انگیزه در استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای تعیین تبخیر و تعرق

1 - Evapotranspiration (ET)

2 - open water evaporation

3 - Surface Energy Balance System (SEBS)

شبیه‌های تراز کارمایه‌ی سطحی که به‌گسترده‌ی استفاده و ارزیابی شده‌اند، سبی^۴ (منتتی و چودهاری ۱۹۹۳)، تی‌اس‌ام^۵ (نورمن و همکاران ۱۹۹۵؛ چهبونی و همکاران ۲۰۰۱)، سیبال^۶ (باستیانسن و همکاران ۱۹۹۸)، اس-سبی^۷ (راورینک و همکاران ۲۰۰۰)، SEBS (سو ۲۰۰۲) و متریک^۸ (آلن و همکاران ۲۰۰۷) است. امروزه استفاده از فناوری سنجش‌ازدور، با توجه به امکان برآورد مکانی اطلاعات و کمینه‌کردن داده‌های هواشناسی، کاربردگسترده‌ای در این زمینه یافته است و پژوهشگران مختلفی به آن پرداخته‌اند. آن‌ها تلاش کرده‌اند تا ضمن معرفی شبیهی برای کاربرد در یک منطقه‌ی خاص، پراکنش تبخیر و تعرق واقعی را به نقشه درآورده‌اند؛ اما واسنجی یا صحت‌سنجی شبیه در میان آن‌ها کمتر دیده می‌شود. چند مورد کار با شبیه SEBS نیز در کشور انجام شده است (بانسوله و همکاران ۲۰۱۵؛ ماهور و همکاران ۲۰۱۵). در چندسال اخیر پژوهش‌های متعددی در این زمینه انجام شده است که بیشتر این پژوهش‌ها با روش سیال و متریک صورت گرفته است و با روش SEBS پژوهش‌های کمی انجام شده است. پاک‌پرور و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از روش SEBS و تصاویر لندست ETM برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی در دشت گریایگان پژوهشی انجام دادند. ایشان با تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که شبیه R.SUN در محیط نرم‌افزاری GRASS-GIS و شبیه SEBS برای تخمین تشعشع خالص و تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس منطقه‌ای با استفاده از داده‌های هواشناسی کاربرد دارند. سپس نتایجی را که از نقشه‌های مکانی و اثرات زمانی کاربری‌های مختلف زمین با مقادیر تبخیر-تعرق مرجع حاصل از ایستگاه‌های هواشناسی به‌دست آمده بود، مقایسه کردند. نتایج به-دست‌آمده از R.SUN برای تشعشع خالص و SEBS در برآورد مکانی و زمانی تبخیر و تعرق توانایی مطلوبی را نشان دادند. سینگ و سنای (۲۰۱۵) تبخیر-تعرق واقعی را با استفاده از دو روش SEBS و متریک با به‌کارگیری تصاویر لندست مربوط به فصل رویشی محاسبه و مقایسه کردند. نتایج مستقل از هر روش نشان داد که هر دو شبیه، تنوع بیشتری در مناطق با پستی‌وبلندی پیچیده دارند، هرچند این تنوع در شبیه SEBS بیشتر است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که شبیه SEBS می‌تواند در طیف گسترده‌تری از ارتفاع به کار گرفته شود. جمع‌بندی پژوهش‌های مورد اشاره در بندهای پیشین نشان می‌دهد که تلفیق شبیه‌های زیست‌فیزیکی و سنجش‌ازدور و شبیه‌های آب‌شناسی می‌تواند تأثیر بسزایی در افزایش دقت نتایج این شبیه‌ها داشته باشد و ابزار کارآمدتری برای شبیه‌سازی اثرات اقلیمی، تغییر کاربری اراضی و پوشش گیاهی بر نظام سیلابی حوضه‌های آبخیز برای مدیریت کارآمد سیلاب است.

سنجش‌ازدور اصولاً از تراز کارمایه برای تخمین تبخیر و تعرق استفاده می‌کنند. تبخیر و تعرق یکی از مؤلفه‌های اصلی تراز آب هر منطقه و از عوامل کلیدی برای برنامه‌ریزی درست و مناسب آبیاری برای بهبود بازده آب مصرفی در زمین‌ها است (آلن و همکاران ۲۰۰۳). از طرف دیگر، تبخیر و تعرق نقش کلانی در اقلیم جهانی، از راه چرخه‌ی آب‌شناسی ایفا می‌کند و تخمین آن کاربردهای مهمی در پیش‌بینی رواناب (نورمن و کوستاس ۲۰۰۶) و طراحی نهرهای آبیاری (باستیانسن و همکاران ۲۰۰۲) دارد، و بر بلاهای طبیعی، مانند خشکسالی نیز مؤثر است (اقدسی ۲۰۱۰)؛ بنابراین با توجه به اهمیت تبخیر و تعرق لازم است این عامل تاجایی که امکان دارد، به طور دقیق برآورد شود. تبخیر و تعرق تابعی از ویژگی‌های خاک، آب‌وهوایی، کاربری اراضی، پوشش گیاهی و پستی‌وبلندی منطقه است که این در زمان و مکان متغیر اند (پارلنگ ۱۹۹۵). چن و همکاران (۲۰۱۳) ارزیابی دوگانه‌ای از SEBS با استفاده از اطلاعات سنجش‌ازدور و اطلاعات هواشناسی از آزمایش نیوار خاک انجام دادند. نتایج این واکاوی، توان زیاد پیش‌بینی شارهای گرمای سطحی با استفاده از اطلاعات سنجش‌ازدور و اطلاعات هواشناسی مؤثر را نشان داد.

الگوریتم SEBS روشی است که بر پایه‌ی روابط تجربی و فیزیکی، میزان تبخیر و تعرق واقعی را با کمترین داده‌های زمینی برآورد می‌کند. برآورد توزیع مکانی مقادیر ET برای مدیریت کشاورزی و منابع آب ضروری است (واگل و همکاران ۲۰۱۷). گیسون و همکاران (۲۰۱۳) سه تصویر ماهواره‌ی ASTER را از ماه‌های خشک برای واکاوی تغییرات در پوشش‌زمینی و تخمینی تبخیر-تعرق با استفاده از الگوریتم SEBS به‌کار بردند. نتایج نشان داد که تصاویر ASTER نمایشی خوب از تأثیر هر نوع پوشش زمینی بر تبخیر و تعرق واقعی دارند. بنابراین، مقدار تبخیر و تعرق به-ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک اهمیت بیشتری دارد. امروزه تخمین دقیق این عامل علاوه‌بر مطالعات تراز آبی و مطالعات آب‌شناسی حوضه‌های آبخیز، برای برنامه‌ریزی در مدیریت و طراحی سامانه‌های آبیاری و مدیریت منابع آب و تعیین نیاز آبی گیاهان از سوی پژوهشگران و فائو به‌کاررفته است. بنابراین مقدار تبخیر و تعرق به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک اهمیت بیشتری دارد. در این پژوهش، امکان کاربرد شبیه SEBS در شرایط خشک کوهستانی یکی از زیرحوضه‌های حوضه‌ی آبخیز مهارلو، به نام کلستان بررسی شد تا ضمن تعیین میزان درستی و اعتمادپذیری نتایج آن، روش مناسب تولید اطلاعات مکانی تبخیر-تعرق برای کاربرد در شبیه‌سازی آب‌شناسی تدوین شود. به‌این‌ترتیب قدمی در جهت افزایش دقت برآوردهای شبیه‌سازی حوضه برداشته شد. این پژوهش با درنظرگرفتن تشخیص کارایی SEBS در تعیین پراکنش مکانی و زمانی تبخیر-تعرق در منطقه‌ی کوهستانی و با هدف

4 - Surface Energy Balance Index (SEBI)

5 - Two Source energy balance Model (TSM)

6 - Surface Energy Balance of Land (SEBAL)

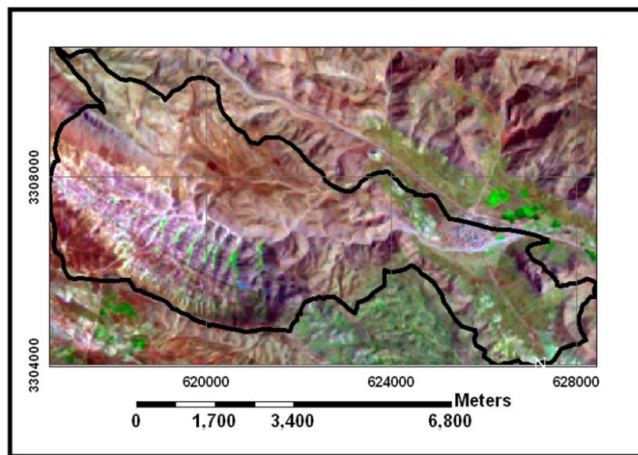
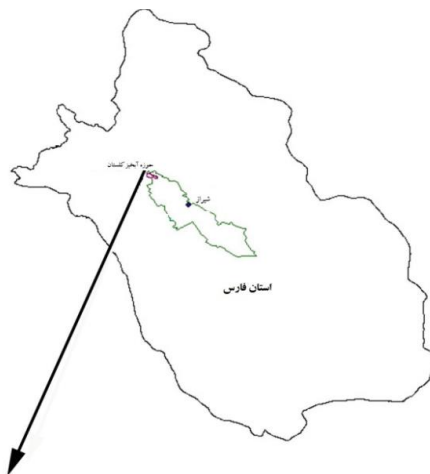
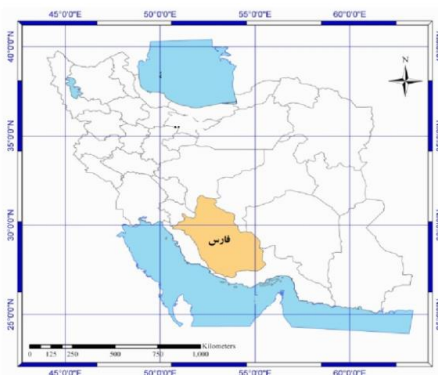
7 - Simplified-Surface Energy Balance Index (S-SEBI)

8 - Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration (METRIC)

مواد و روش ها

حوضه آبخیز کلستان با مساحت ۳۶۶۸/۸۶ هکتار در فاصله ۳۰ کیلومتری شمال غربی شیراز قرار دارد (شکل ۱).

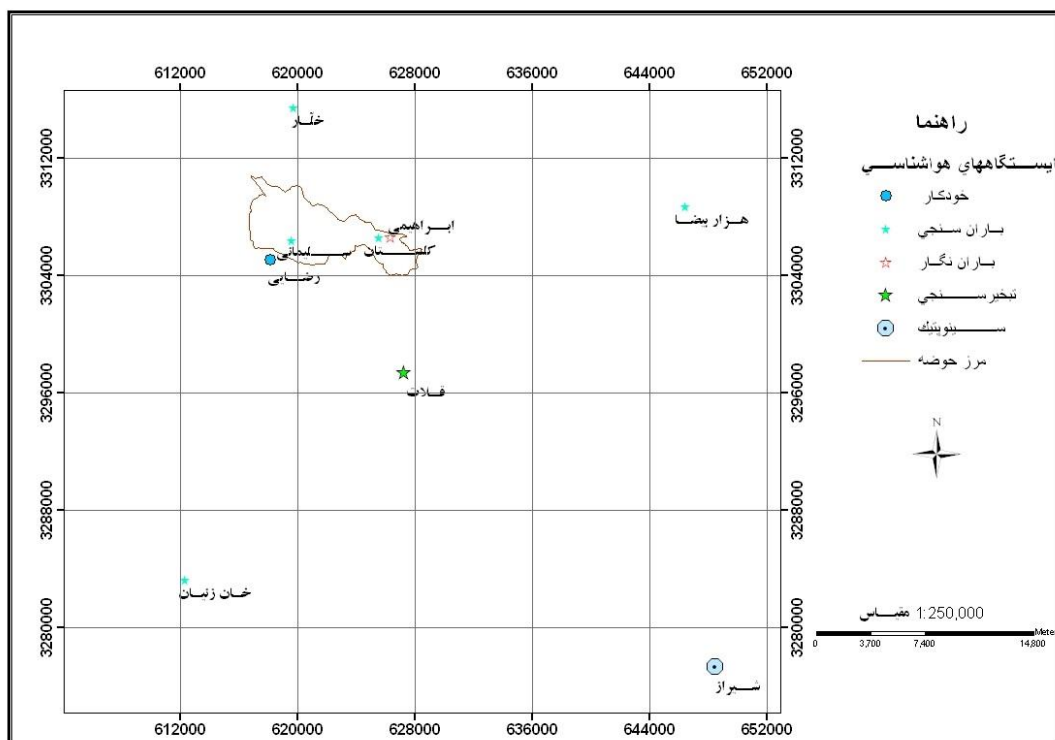
آب شناسی انجام شده است، چراکه محاسبه ی تبخیر و تعرق در شبیه های آب شناسی می تواند سبب بهبود نتایج و افزایش دقت شبیه های یاد شده شود.



شکل ۱- موقعیت حوضه آبخیز کلستان در فارس.

میانگین بیشینه ها ۲۰/۶۸ و میانگین کمینه ها ۹/۵۳، بیشینه ی مطلق ۳۹ و کمینه ی مطلق ۱۴/۵ - سانتی گراد (مصباح و همکاران ۲۰۱۴). برای ثبت داده های هواشناسی حوضه آبخیز کلستان به ویژه بارش در سه ناحیه ی حوضه، دستگاه اندازه گیری نصب شد که داده های به کاررفته در این پژوهش برای راه اندازی شبیه SEBS از این راه به دست آمد (شکل ۲).

میانگین درازمدت ۲۲ ساله ی بارش از نزدیک ترین ایستگاه باران سنجی (قلات) به حوضه ۵۴۴/۱۶ میلی متر است. میانگین رطوبت نسبی سالانه ۵۴/۹۲٪، میانگین تبخیر سالانه از سطح آزاد ۲۰۳۰ میلی متر، و میانگین ETo به روش بلانی کریدل ۱۶۶۸ میلی متر گزارش شده است. روش دومارتن اقلیم منطقه را نیمه مرطوب نشان می دهد. شاخص های حرارتی نزدیک ترین ایستگاه تبخیرسنجی (قلات) به حوضه به شرح زیر است: میانگین سالانه ۱۵/۰۸،



شکل ۲- نقشه‌ی پراکنش ایستگاه‌های هواشناسی در محدوده‌ی حوضه‌ی آبخیز کلستان در فارس.

ماهواره‌های لندست و هفتمین ماهواره‌ی است که با موفقیت در مدار قرار گرفته است. این ماهواره که در اصل LDCM نامیده می‌شود، محصول همکاری ناسا و سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) است و به نام مأموریت ادامه‌دهنده‌ی داده‌های لندست^۹ (LDCM) معرفی شده است که در ۱۱ فوریه ۲۰۱۳ به فضا پرتاب شد. لندست ۸، دو حسگر دارد: OLI (مشاهده‌ی زمینی) و TIRS (حرارتی). این دو حسگر با هم یازده نوار را تشکیل می‌دهند که هفت تا از آن‌ها با ETM+ اشتراک دارند. هشت نوار دارای تفکیک‌پذیری ۳۰ متری، نوار تمام‌رنگ ۱۵ متری و دو نوار حرارتی ۱۰۰ متری است (جدول ۱).

چون در حال حاضر، تصاویر لندست ۸ رایگان است مبنای کار گرفته شد. تصاویر مورد نیاز برای این تحقیق نه تصویر از سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۶ است. این تصاویر، نه نوار طیفی بازتابی با وضوح زمینی ۱۵ تا ۳۰ متر و دو نوار حرارتی ۱۰۰ متر دارند و در مقاطع زمانی شانزده‌روزه تکرار می‌شوند. پوشش تصویر حوضه برای تمام مقاطع زمانی در دسترس که پوشش ابری نیست، از مرجع پایگاه مشترک ناسا و انجمن زمین‌شناسی آمریکا یا USGS گرفته شد و پس از بررسی کیفیت، وارد چرخه‌ی پردازش اولیه شد. نسل جدید مجموعه‌ی ماهواره‌های لندست، ماهواره‌ی لندست ۸ است که در تاریخ ۱۱ فوریه ۲۰۱۳ پرتاب شده است. این هشتمین ماهواره از مجموعه‌ی

9- Landsat data continuity mission

جدول ۱- خصوصیات نوارهای طیفی لندست ۸.

شماره‌ی نوار	شرح نوار	محدوده‌ی طیفی (μm)	قدرت تفکیک (m)
Band 1	Coastal / Aerosol	0.433-0.453	30
Band 2	Visible blue	0.450-0.515	30
Band 3	Visible green	0.525-0.600	30
Band 4	Visible red	0.630-0.680	30
Band 5	Near-infrared	0.845-0.885	30
Band 6	Short wavelength infrared	1.560-1.660	30
Band 7	Short wavelength infrared	2.100-2.300	30
Band 8	Panchromatic	0.500-0.680	15
Band 9	Cirrus	1.360-1.390	30
Band 10	Long wavelength infrared	10.6-11.2	100
Band 11	Long wavelength infrared	11.5-12.5	100

برای تاریخ‌های خاص هر تصویر، به‌صورت روزانه از ایستگاه هواشناسی خودکار مستقر در محدوده‌ی حوضه‌ی آبخیز کستان که از پایگاه www.fieldclimate.com در دسترس است، تهیه شد. قبل از اجرای SEBS نقشه‌ی تشعشع در محیط لینوکس^{۱۱} و در نرم‌افزار گراس^{۱۲} تولید و دیگر ورودی‌های مورد نیاز، مانند بازتابش، شاخص پوشش گیاهی، شاخص سطح برگ^{۱۳}، ارتفاع پوشش گیاهی و تراکم تاج پوشش گیاهی در محیط ایلویس تهیه شد.

تشریح شبیه SEBS

SEBS الگوریتم سنجش‌ازدوری است که براساس مفهوم تراز کارمایه طراحی شده است و برای تخمین شارهای کارمایه^{۱۴} از مشاهدات طیفی ماهواره^{۱۵} و اطلاعات هواشناسی استفاده می‌کند و نیازمند سه مجموعه از داده‌های ورودی است. اولین مجموعه تولیدات پرتوسنجی ماهواره از جمله بازتابش سطحی، گسیلندگی سطحی^{۱۶} و دمای سطحی است. دومین مجموعه از محتویات اطلاعات هواشناسی است و شامل دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعت آفتابی می‌شود. سومین مجموعه از اطلاعات ورودی، شامل پوشش گیاهی جزئی، شاخص سطح برگ و ارتفاع زبری^{۱۷} است (انکو ۲۰۰۹). الگوریتم SEBS را سو (۲۰۰۲) پیشنهاد کرده است و مجموعه‌ابزاری را برای تعیین عامل‌های فیزیکی سطح زمین، مانند بازتابش، انتشار سطح، دما و پوشش گیاهی، شاخص سطح برگ و ارتفاع گیاهان دربرمی‌گیرد. در SEBS سرعت اصطکاک، شار گرمای محسوس و طول عامل ایوکوف، به‌وسیله‌ی حل معادلات غیر خطی به‌دست می‌آید. کسر تبخیر

داده‌های حاصل از سامانه‌های سنجش‌ازدور، اعم از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای حاصل از اسکنرها خطاهای گوناگونی دارند و اصولاً قبل از اینکه مورد تفسیر و تجزیه‌وتحلیل قرار گیرند، باید تصحیح شوند. این خطاها را می‌توان به دو دسته‌ی هندسی و پرتوسنجی تقسیم کرد. خطاهای هندسی، مربوط به موقعیت پدیده‌ها یا پیکسل‌ها در تصویر نسبت به دیگر پدیده‌ها و موقعیت مطلق آن‌هاست و خطای پرتوسنجی، به میزان بازتاب ثبت شده در تصویر مربوط می‌شود. یکی از نرم‌افزارهایی که به‌طور گسترده‌ای برای تصحیح هندسی و مرجع کردن زمینی تصاویر از آن استفاده می‌شود ENVI است. از آن‌جاکه تصاویر لندست ۸ سطح ۲ با دقت مناسبی زمین‌مرجع شده‌اند، نیازی به انجام تصحیح هندسی نبود. باین‌حال هشت نقطه‌ی زمینی در بازدید صحرائی برداشته و با تصویرها مقایسه شد، که انطباق کاملاً مناسبی داشتند. اولین اثر نیوار، کاهش وضوح تصویر و در نتیجه تضعیف آشکارسازی تصویر و پنهان شدن جزئیات آن است. بنابراین تمایز بین اشیا پایین می‌آید و استخراج اطلاعات مشکل خواهد شد. به‌همین دلیل در این پژوهش از تصحیح نیواری به روش جزءبه‌جزء استفاده شده است. در روش جزءبه‌جزء یا شبیه کردن نیواری، به عامل‌هایی همچون دما، رطوبت نسبی و فشار نیواری نیاز است. تصحیح جزئی نیواری به روش FLAASH^{۱۱} از نوع رادیانس و پیکسل‌به‌پیکسل انجام شد. با استفاده از تصحیح نیواری جزءبه‌جزء پس از هنجار شدن مقادیر پیکسل‌ها، بسیاری از ناهنجاری‌های تصاویر به کمترین حد ممکن کاهش یافت (لیاکات و چوی ۲۰۱۵).

برای اجرای SEBS به مجموعه‌ی از داده‌های هواشناسی مانند دما، رطوبت نسبی، ساعت آفتابی و سرعت باد نیاز است. تمام داده‌های یادشده

10 - Fast Line-of-sight-Atmospheric-Analysis of Spectral Hypercubes

11 -Linux

12 - Grass

13 - Leaf area index (LAI)

14- energy fluxes estimation

15 - satellite spectral observations

16 - surface emission

17 - roughness height

۲. شار گرمایی خاک^{۱۹}

$$G = R_n[\Gamma_v f_v + \Gamma_s(1 - f_v)]$$

که Γ_s و Γ_v به ترتیب نسبت شار گرمایی خاک لخت (۰/۳۱۵) و خاک پوشیده از پوشش گیاهی (۰/۰۵) و f_v نیز نسبتی از خاک که با گیاه پوشیده شده است (رابطه‌ی ۴).

۳. شار گرمای محسوس^{۲۰}

از حساس‌ترین و پیچیده‌ترین مؤلفه‌های شبیه است و در شبیه SEBS کامل‌تر از شبیه‌های دیگر به آن پرداخته شده است. این مؤلفه با مجموعه فرضیات و با تعیین شرایط حدی، براساس عامل‌های سرعت باد، دمای هوا و دمای سطح زمین محاسبه می‌شود و به هر پیکسل تصویر ماهواره‌ای اختصاص می‌یابد. افزون‌بر مؤلفه‌های یادشده، برای تعیین λE به دو عامل دیگر به نام Zom و do نیز که از متغیرهای آیرودینامیک اند، نیاز است که شرح اجمالی محاسبه‌ی آن‌ها شامل ارتفاع ناهمگنی برای حرکت هوا و ارتفاع تراز صفر جابه‌جایی در زیر آورده شده است.

۴. ارتفاع ناهمگنی برای حرکت هوا^{۲۱}

این عامل براساس سرعت باد و LAI براساس معادلات مفصلی که ضرایب آن را سو (۲۰۰۲) به‌طور تجربی توسعه داده است، تخمین زده می‌شود.

۵. ارتفاع تراز صفر جابه‌جایی^{۲۲}

این عامل نیز براساس ارتفاع گیاه و سرعت باد تخمین زده می‌شود.

۶. شار گرمای نهان^{۲۳}

با استفاده از مفاهیم دو حد خشک و تر مقدار نسبت تبخیری^{۲۴} (EF) محاسبه می‌شود. در حد خشک^{۲۵} فرض بر این است که خاک لخت و رطوبت خاک کمترین است؛ بنابراین تبخیر به سمت صفر میل می‌کند و گرمای محسوس برابر تشعشع منهای گرمای خاک خواهد بود (رابطه‌ی ۵):

$$\lambda E_{dry} = R_n - G_0 - H_{dry} = 0, \text{ or}$$

$$H_{dry} = R_n - G_0$$

براساس تعادل کارمایه در مولد محدودکننده انجام می‌شود و در نهایت شار گرمای آشفته با استفاده از تعادل کارمایه سطح مشخص می‌شود. در نهایت، ET روزانه با استفاده از کسر تبخیر و کارمایه‌ی در دسترس روزانه محاسبه می‌شود. کسر تبخیر در طول روز ثابت فرض می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، مدل SEBS تبخیر-تعرق واقعی را محاسبه می‌کند، درحالی‌که مدل فائو پنمن-مانتیس تبخیر و تعرق توانی را به ما می‌دهد (رابطه‌ی ۱).

$$ETa = ET_o_n \cdot Ka \cdot Ks \quad (1)$$

Ka ضریب گیاهی و Ks ضریب تنش است. مقادیر Ka و Ks در پهنه‌ی پیکر آبی ۱ در نظر گرفته شده است و در نتیجه مقدار ET_o با ETa برابر خواهد بود. بنابراین برای مقایسه‌ی نتایج مدل با واقعیت، باید منطقه‌هایی مثل استخرها و دریاچه‌ها را انتخاب کرد که پوشش آبی داشته باشند. برای برآورد ETa با استفاده از شبیه SEBS، نیاز به تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی است. سو (۲۰۰۲) اساس نظری و محاسباتی شبیه SEBS را شرح داده است:

$$LE = R_n - G - H \quad (2)$$

در معادله‌ی بالا، شار گرمای نهان، شار تابش خالص (تراز تابش موج کوتاه و بلند ورودی و خروجی در سطح زمین)، شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس است. متغیرها در رابطه‌ی ۲ برحسب وات بر مترمربع بیان می‌شوند. در این تحقیق برای انجام محاسبات مربوط به توازن کارمایه از روش‌های زیر استفاده شده است:

۱. تشعشع خالص^{۱۸}

$$R_n = (1 - \alpha)R_{swd} + \varepsilon R_{lwd} - \varepsilon \sigma T_s^4$$

که در آن α بازتابش، R_{swd} تابش ورودی موج کوتاه، R_{lwd} تابش ورودی موج بلند، T_s دمای سطح زمین، σ ثابت استفان بولتزمن و ε گسیل‌مندی است (رابطه‌ی ۳).

- 18 - Net radiation = R_n
- 19 - Soil heat flux = G
- 20 - Sensible heat flux = H
- 21 - Roughness height for momentum = Zom
- 22 - Zero plan displacement height = do
- 23 - Latent heat flux
- 24 - evaporative fraction
- 25 - dry limit

به آسانی با نگاهی به مقالات شبیه، به‌ویژه سو (۲۰۰۲) و پاک‌پرور (۲۰۱۴) انجام‌شدنی است. یک مزیت استفاده از روش تراز کارمایه نسبت به روش ET بالقوه این است که در این روش ETa سریع‌تر و براساس مقدار پوشش گیاهی محاسبه می‌شود؛ به‌طوری‌که کاهش ET که حاصل کمبود رطوبت خاک است، به‌دست می‌آید. از جمله معایب شیوهی تراز کارمایه این است که دقت محاسبه‌ی LE تنها به دقت برآورد مقادیر H، R_n و G بستگی دارد. شبیه SEBS سعی می‌کند تا بر این عیب با تمرکز بر واسنجی داخلی نه بر LE بلکه بر H، بر همه‌ی میانگین برآورد خطاها و اریبی‌ها فائق آید. در شبیه R_n SEBS با استفاده از مقادیر شار انعکاسی نوارهای انعکاسی و دمای سطحی محاسبه‌شده از نوارهای حرارتی محاسبه می‌شود. مقدار G نیز با استفاده از R_n دمای سطحی و شاخص‌های پوشش گیاهی محاسبه می‌شود و H نیز با استفاده از تصحیحات ارشمیدس، از برآورد دماهی سطحی، زبری سطح و سرعت باد به‌دست می‌آید. در این پژوهش کارایی روش SEBS در برآورد تبخیر-تعرق واقعی در محدوده‌ی کیستان بررسی شد.

جمع‌آوری داده‌های ورودی شبیه

داده‌های پوشش گیاهی ارتفاع گیاه، تراکم پوشش گیاهی و شاخص سطح برگ است. این داده‌ها را یا باید در فعالیت میدانی اندازه‌گیری کرد یا براساس معادلاتی که در شبیه SEBS تعبیه‌شده از روی شاخص NDVI^{۲۸} تعیین نمود. از آن جاکه نتایج تحلیل حساسیت شبیه نشان از حساسیت ناچیز شبیه به این عامل‌ها دارد (وندراکاست ۲۰۰۹؛ پاک‌پرور ۲۰۱۵)، نتیجه‌ی برآورد شبیه از این عامل‌ها دقت مناسبی برای هدف تعیین ET دارد. نحوه‌ی تهیه‌ی داده‌هایی که از تصاویر ماهواره‌ای گرفته می‌شود مانند بازتابش، گسیلندگی (امیشن)، NDVI و دمای سطح زمین، به‌طور مفصل در منابع علمی آمده است (سو و همکاران ۲۰۰۹؛ پاک‌پرور و همکاران ۲۰۱۴). برای برآورد عوامل کاربردی شبیه و نیز ارزیابی بهتر نتایج شبیه SEBS، با استفاده از تصویر ماهواره‌ای سال ۲۰۱۷ و بررسی‌های صحرائی، نقشه‌ی کاربردی فعلی زمین در محیط ENVI تهیه شد. برای این منظور با پیمایش گسترده‌ی زمینی، حدود صد نقطه از سطح حوضه که کاربردی‌های مختلف دارد با جی‌پی‌اس ثبت، و ۷۵ تا از آن‌ها به‌عنوان نمونه‌ی تعلیمی برای طبقه‌بندی نظارت‌شده، استفاده شد. ارزیابی صحت با کمک ۲۵ نمونه‌ی باقی‌مانده انجام شد و از میان الگوریتم‌های مختلف، بیشینه‌ی درست‌نمایی^{۲۹} دارای بیشترین درستی (۸۹٪) تشخیص داده شد. نقشه‌ی کاربردی بار دیگر در بازدید میدانی بررسی و برخی اشتباهات مرز و استناد کاربردی آن اصلاح شد.

در حد مرطوب^{۲۶} فرض بر این است که تبخیر-تعرق (گرمای نهان) بدون محدودیت و مطابق با کارمایه‌ی موجود در محیط صورت می‌گیرد. بنابراین:

$$\lambda E_{wet} = R_n - G_0 - H_{wet}, \text{ or}$$

$$H_{wet} = R_n - G_0 - \lambda E_{wet}$$

واژه‌ی نسبت تبخیری نسبی (E_{Fr})^{۲۷} وارد می‌شود (رابطه‌ی ۷):

$$E_{Fr} = \frac{\lambda E}{\lambda E_{wet}} = 1 - \frac{\lambda E_{wet} - \lambda E}{\lambda E_{wet}}$$

با جاگذاری معادلات ۵ و ۶ در رابطه‌ی ۷ این رابطه را خواهیم داشت (رابطه‌ی ۸):

$$E_{Fr} = 1 - \frac{H - H_{wet}}{H_{dry} - H_{wet}}$$

در این رابطه می‌توان H_{dry} را از رابطه‌ی ۵ محاسبه کرد. مقدار H_{wet} نیز از روی معادله‌ای ترکیبی براساس رابطه‌ی پنمن-مانتیس محاسبه می‌شود (رابطه‌ی ۹):

$$H_{wet} = \left[(R_n - G) - \frac{\rho C_p (e_s - e_a)}{r_e \gamma} \right] / \left(1 + \frac{\Delta}{\gamma} \right)$$

با محاسبه‌ی H_{wet} و H_{dry} می‌توان نسبت تبخیری را محاسبه کرد (رابطه‌ی ۱۰):

$$EF = \frac{\lambda E}{(R_n - G)} = \frac{E_{Fr} \times \lambda E_{wet}}{R_n - G} \quad (10)$$

حال که مقادیر R_n، G، E_{Fr} و λE_{wet} معلوم است با جابه‌جا کردن رابطه می‌توان مجهول یعنی λE را محاسبه کرد. اگر میانگین ۲۴ ساعته R_n (R_n) از عامل‌های روزانه‌ی هواشناسی محاسبه شود، با این آگاهی که مقدار میانگین ۲۴ ساعته‌ی G (Ḡ) نزدیک به صفر است رابطه‌ی ۱۱ را می‌توان نوشت:

$$ET_{daily} = 8.64 \times 10^7 \times EF \times \frac{\bar{R}_n - \bar{G}}{\lambda \rho w} \quad (11)$$

که در آن ET_{daily} تبخیر-تعرق واقعی به میلی‌متر در روز، λ نهان تبخیر (۵۴/۲ ژول بر کیلوگرم) و ρw جرم حجمی آب (۱۰۰۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب) است. محاسبه و ورود عامل‌های مرتبط با هواشناسی و پوشش گیاهی

26 - wet limit

27 - relative evaporative fraction

28 - Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

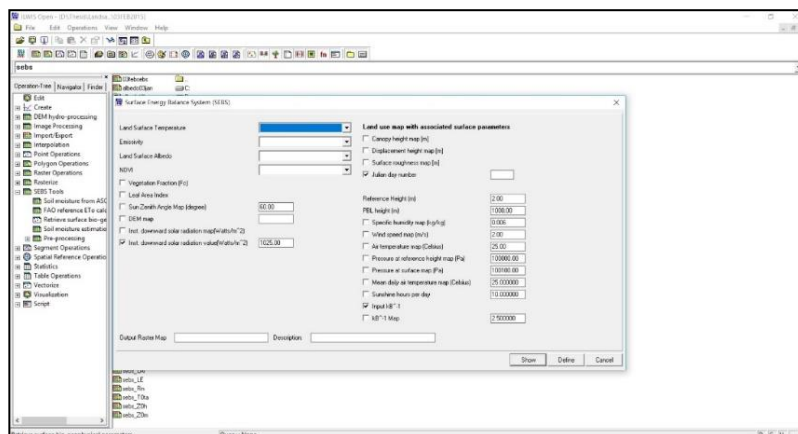
29 - Maximum likelihood

ارزیابی دقت برآورد مکانی تبخیر-تعرق با الگوریتم SEBS در...

اجرای شبیه و واسنجی آن

در این مرحله شبیه اجرا شد و در صورت نیاز تلاش شد با تغییر معادلات آن، نتایج به بیشترین انطباق با اندازه‌گیری‌ها برسد. حالت بهینه‌ی شبیه زمانی است که ارقام ETa برآوردی شبیه برای مکان‌هایی که یک محدوده‌ی آبی، مانند استخر آبیاری با ارقام محاسبه‌شده دارند، براساس روش معیار فائو پنمن

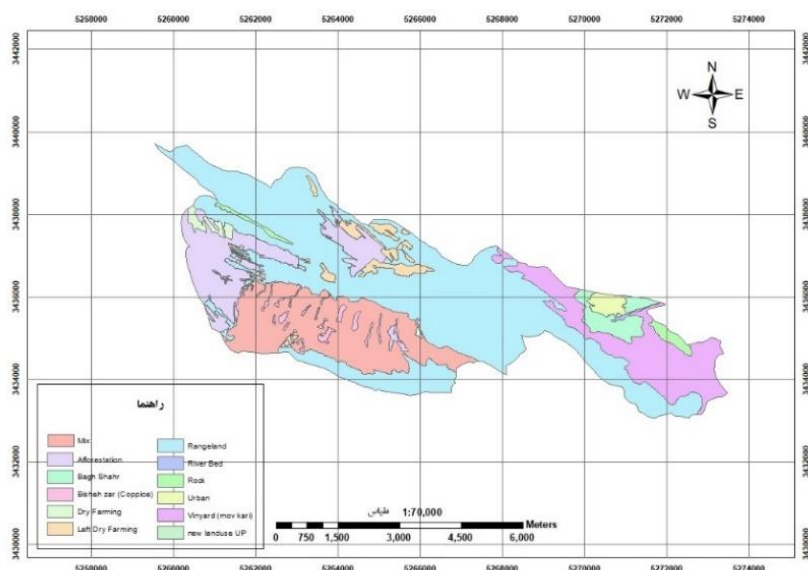
مانتیس^{۳۰} به بیشترین تشابه برسد. شکل ۳ نمایی از محیط SEBS را نشان می‌دهد. به‌دلیل دردسترس نبودن داده‌های تبخیر و تعرق واقعی (شاهد) برای مقایسه با داده‌های تبخیر و تعرق واقعی شبیه‌سازی‌شده، از مدل فائو پنمن-مانتیس، بعنوان داده‌های تبخیر-تعرق شاهد در منطقه استفاده شد.



شکل ۳- نمایی از محیط SEBS در نرم‌افزار الویس.

یک محدوده‌ی آبی در همه‌ی نقشه‌های مجموعه‌ی زمانی استخراج و به‌عنوان مجموعه‌داده‌ی برآوردی ثبت شد. مقادیر ET_o برای همان روزهای مجموعه‌ی زمانی به کمک داده‌های هواشناسی با روش معیار فائو پنمن-مانتیس نیز محاسبه شد. از آن‌جا که ضریب گیاهی KC برای محدوده‌های آبی ۱/۰۵ در نظر گرفته می‌شود (آلن ۱۹۹۸) هرگونه انحراف در این مقدار را باید در ضعف شبیه جست‌وجو کرد. این امکان در شبیه SEBS وجود دارد که با تغییر در کد برنامه و اصلاح ضرایب معادلات آن بتوان بیشترین تطابق را بین داده‌های ET_a و ET_o ایجاد کرد. بدین ترتیب شبیه برای منطقه واسنجی خواهد شد. برای ارزیابی موفقیت شبیه در برآورد تبخیر-تعرق پوشش‌های مختلف، نقاطی از نقشه‌ی خروجی شبیه که متناظر با کاربری‌های متنوع حوضه بود با کمک نقشه‌ی کاربری استخراج شد (شکل ۴). میانگین تبخیر-تعرق نقاط در هر کاربری محاسبه شد و مبنای مقایسه قرار گرفت.

دلیل سازمان فائو در انتخاب مدل فائو پنمن-مانتیس به‌عنوان روش مرجع اجراشدنی در جهان این بود که «فیزیک در همه‌جا فیزیک است». بنابراین، اگر شبیه فائو پنمن-مانتیس به‌درستی عمل کند و داده‌های آب‌وهوایی درست اندازه‌گیری شده باشند، شبیه فائو پنمن-مانتیس به‌تنهایی می‌تواند پایه‌ای برای اندازه‌گیری تبخیر-تعرق جهانی دانسته شود (پری‌یورا و همکاران ۲۰۱۵). تجزیه‌وتحلیل حساسیت‌های مختلف و مطالعات منطقه‌ای، کاربرد شبیه فائو پنمن-مانتیس را در محیط‌های متنوع تأیید می‌کند (نانداگیری و کوور ۲۰۰۶، گونگ و همکاران ۲۰۱۳، رضایی و پری‌یورا ۲۰۱۳، یه و همکاران ۲۰۰۹، استیویز و گاولان ۲۰۰۹). مدل فائو پنمن-مانتیس در بسیاری از تحقیقات برای برآورد ET_o به‌عنوان داده‌های مشاهداتی در مناطقی که داده‌های کمی برداشت شده است به‌کار می‌رود (لاندراس و همکاران ۲۰۰۸، جابلون و سهلی ۲۰۰۸، ال‌تاهیر و همکاران ۲۰۱۲، مائده و همکاران ۲۰۱۱). برای این منظور، ارقام ET_a شبیه برای پیکسل‌های



شکل ۴- نقشه کاربری فعلی زمین های حوضه کَلستان.

نتایج و بحث

خطا (RMSE) در حد $0/054$ میلی متر در روز است که در محاسبات تبخیر-تعرق کاملاً خطای ناچیزی است.

نتایج مقایسه‌ی ET_0 محاسباتی با روش فایو پنمن-مانتیس، با ET_a شبیه SEBS در جدول ۲ ارائه شده است. ریشه‌ی میانگین مربعات

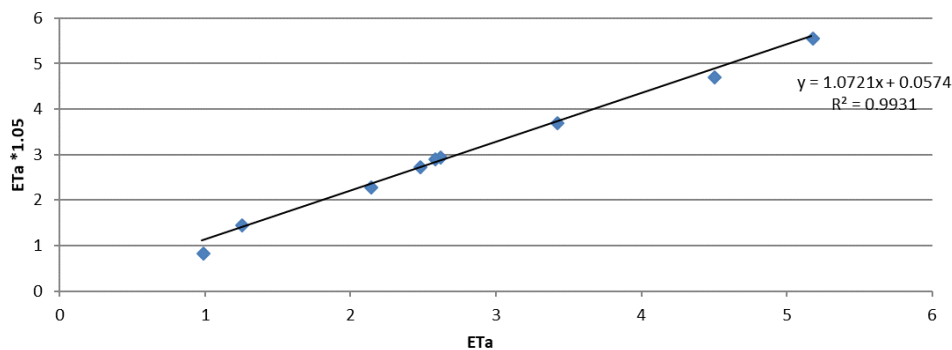
جدول ۲- مقایسه‌ی تبخیر-تعرق به دست آمده از الگوریتم SEBS و رابطه‌ی فائو پنمن-مانتیس.

تاریخ	تبخیر-تعرق واقعی (mm/day)	تبخیر-تعرق گیاه مرجع (mm/day)
۸ فروردین ۱۳۹۶	۴/۴۹	۴/۵۱
۲۴ فروردین ۱۳۹۶	۵/۱۷	۵/۳۲
۲۰ بهمن ۱۳۹۵	۲/۶۱	۲/۸۴
۶ اسفند ۱۳۹۵	۳/۴۱	۳/۵۶
۱۵ دی ۱۳۹۴	۰/۹۸	۰/۸۲
۲۸ دی ۱۳۹۳	۲/۱۳	۲/۲۱
۱۴ بهمن ۱۳۹۳	۱/۲۴	۱/۴۱
۱ بهمن ۱۳۹۴	۲/۴۷	۲/۶۳
۱۷ بهمن ۱۳۹۴	۲/۵۷	۲/۷۹
RMSE		۰/۰۵۴

یک محدوده‌ی آبی، نظیر مخزن سد یا استخرهای بزرگ آبیاری با ارقام محاسبه شده دارند، براساس روش معیار فائو پنمن-مانتیس به بیشترین تشابه برسد. برای این منظور ارقام ET_a شبیه برای پیکسل های محدوده‌ی آبی در همه‌ی نقشه‌های مجموعه‌ی زمانی استخراج، و به عنوان مجموعه‌ی داده‌ی برآوردی ثبت شد. مقادیر ET_0 برای همان روزهای مجموعه‌ی زمانی با روش معیار فائو پنمن-مانتیس نیز به کمک داده‌های هواشناسی محاسبه شد.

همبستگی نتایج شبیه SEBS با رابطه‌ی فائو پنمن-مانتیس در شکل ۵ ارائه شده است. مقایسه بین مقادیر تخمین زده شده با الگوریتم سنجش از دور سبس و تبخیر-تعرق توانی فائو پنمن-مانتیس نشان می‌دهد که بین مقادیر تخمین زده شده با این الگوریتم و روش فائو پنمن-مانتیس، ضریب R^2 نزدیک به ۱ است و همبستگی زیاد داده‌ها را نشان می‌دهد. حالت بهینه‌ی شبیه، زمانی است که ارقام ET_a برآوردی شبیه برای مکان‌هایی که

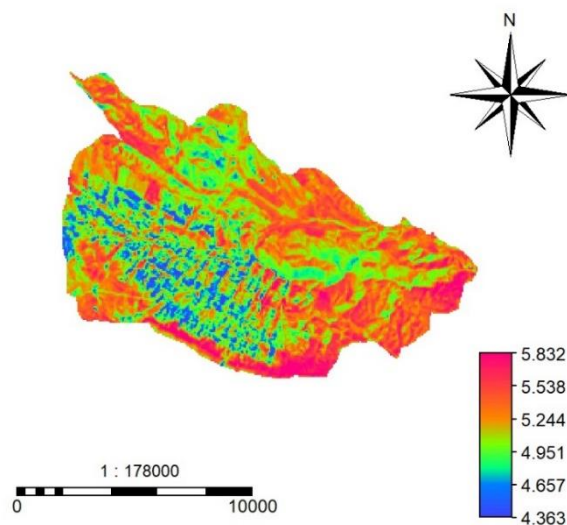
ارزیابی دقت برآورد مکانی تبخیر-تعرق با الگوریتم SEBS در...



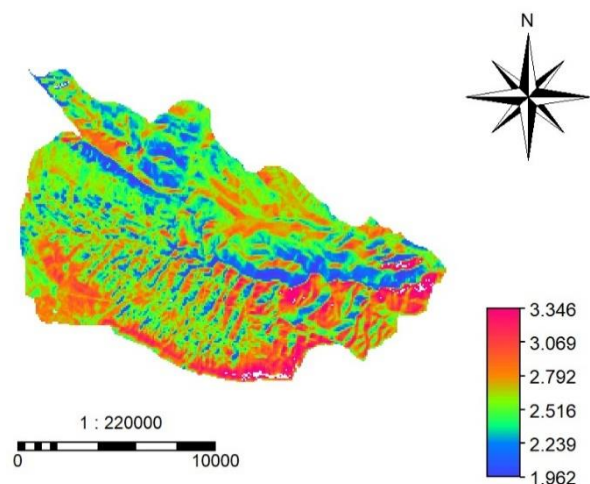
شکل ۵- مقایسه‌ای از ضریب همبستگی SEBS با رابطه‌ی فائو پنمن-مانتیس.

نتایج شبیه با داده‌های واقعی، نتایج به‌دست‌آمده مقایسه‌ی آماری شد. تبخیر-تعرق واقعی محدوده حاصل از الگوریتم SEBS برای دو تاریخ از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸، در شکل ۶ و ۷ آورده شده است. دامنه‌ی تغییرات ETa در زمان بهمن‌ماه بین ۱/۹ تا ۳/۳ و در فروردین بین ۴/۳ تا ۵/۸ میلی‌متر در روز محاسبه شده است؛ از این رو می‌توان کمیت تغییرات را نسبت به ماه سرد در قیاس با ماه معتدل منطقی دانست. نقشه‌ی ETa حاصل از SEBS برای مطالعه‌ی پراکنش مکانی تبخیر-تعرق در منطقه بسیار مفید است.

از آن‌جا که ضریب گیاهی Kc برای محدوده‌های آبی ۱ در نظر گرفته می‌شود، مقادیر ETa باید با ETo برابر باشد. هرگونه انحراف در این مقدار را باید در ضعف شبیه‌جست‌وجو کرد. این امکان در شبیه SEBS وجود دارد که با تغییر در شناسه‌ی برنامه و اصلاح ضرایب معادلات آن، بیشترین تطابق را بین داده‌های ETa و ETo ایجاد کرد. بدین ترتیب شبیه برای منطقه واسنجی شد. پاک‌پرور و همکاران (۲۰۱۴) از روشی مشابه روش این تحقیق برای برآورد تبخیر-تعرق در منطقه‌ی پخش سیلاب دشت گربایگان استان فارس استفاده کردند. به‌دلیل وجود پیکره‌ی آبی برای برداشت داده‌ها و مقایسه‌ی



شکل ۶- تبخیر-تعرق برآورده‌شده با الگوریتم SEBS در محدوده‌ی گلستان در ۲۴ فروردین ۱۳۹۶.

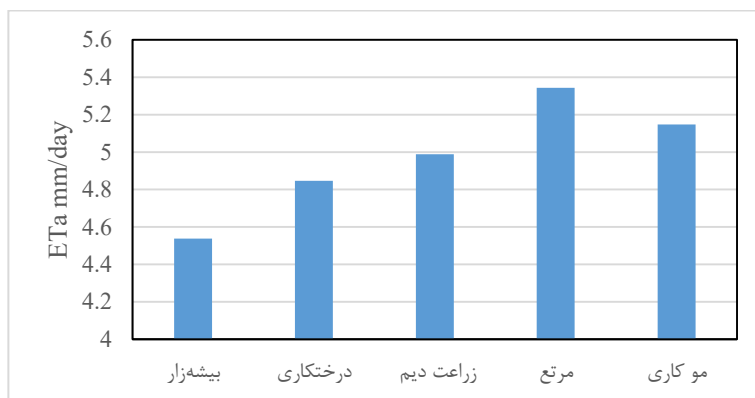


شکل ۷- تبخیر- تعرق بر آورده شده با الگوریتم SEBS در محدوده‌ی کلستان در ۲۰ بهمن ۱۳۹۵.

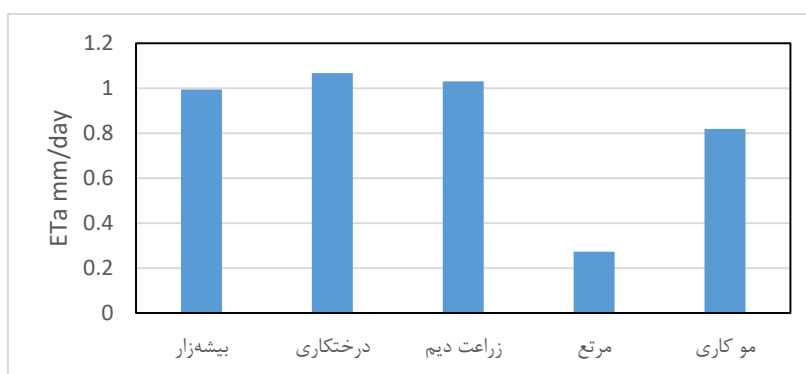
بیشه‌زار هم بیشتر است، چرا که آن‌ها در حالت بیشینه‌ی پوشش خود نیستند و تا پایان تابستان به حداکثر می‌رسند، اما مراتع در این حوضه در فروردین در بیشینه‌ی پوشش‌اند. با توجه به مقدار ارزش عددی پیکسل‌ها، همبستگی مناسبی بین کاربری‌های زمین و تبخیر-تعرق واقعی برقرار شده است، به این معنی که در مکان‌هایی که پوشش گیاهی بیشتری دارد، بیشتر گرمای محیط به جای تغییر در گرمای محسوس، صرف تبخیر-تعرق می‌شود. علت این است که در چنین مکان‌هایی به دلیل وجود آب در بافت گیاه، بخش بزرگ‌تری از کارمایه‌ی گرمایی صرف تبخیر آب از گیاه (تعرق) خواهد شد. در مناطق مرطوب، اگر گیاه هم بر سطح خاک مستقر نباشد باز رطوبت خاک بالا است و گرما همچونان صرف تبخیر از خاک می‌شود. اما در مناطق خشک با حذف گیاه، رطوبت خاک به حدی نیست که تبخیر آن سبب مصرف کارمایه‌ی گرمایی شود، در نتیجه صرف تغییر گرمای محسوس هوا می‌شود. این نتایج، با نتایج تحقیقات پاک‌پرور (۲۰۱۵)، سو و همکاران (۲۰۰۳) و انکو (۲۰۰۹) درباره‌ی دقت شبیه SEBS برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی هم‌خوانی دارد. دقت نتایج این پژوهش، نتایج هان و یانگ (۲۰۰۴) مبنی بر دقت متوسط در تخمین تبخیر-تعرق روش‌های سنجش‌ازدور در الگوهای مختلف را رد، و نتایج تحقیقات آن و همکاران (۲۰۰۳)، پاک‌پرور و همکاران (۲۰۱۴) و سینگ و سنای (۲۰۱۵) را درباره‌ی دقت روش SEBS تأیید می‌کند. براساس نتایج به‌دست‌آمده، با وجود تفاوت‌های اندک در دو روش به‌کاررفته، تبخیر-تعرق واقعی حاصل از شبیه SEBS در برابر تبخیر-تعرق توانی حاصل از معادله‌ی فایو پنمن-مانتیس برتری فراوانی داشت. این نتایج با نتایج مک‌کیپ و وود (۲۰۰۶)، وندرکاست و همکاران (۲۰۰۹) و لو و همکاران (۲۰۱۳) کاملاً مطابقت دارد.

در روش‌هایی مانند معادله‌ی فایو پنمن-مانتیس و تشتک تبخیر، اطلاعات در حد یک نقطه در ایستگاه هواشناسی است و اطلاعاتی از چگونگی پراکندگی مکانی آن و نیز میزان تبخیر-تعرق در کاربری‌های مختلف مثل کشاورزی و خاک لخت نداریم. روش‌های محاسبه‌ای مانند معادله‌ی فایو پنمن-مانتیس، تبخیر-تعرق گیاه مرجع را به‌دست می‌دهند و آگاهی کافی از تبخیر-تعرق واقعی که نشان‌دهنده‌ی تأثیر نوع گیاه و مرحله‌ی رشد آن و نیز تأثیر شرایط محیطی خاک است، نمی‌دهند. اندازه‌گیری Eta نیازمند آزمایش‌های پرهزینه و زمان‌بری است تا Ka و Ks را برای هر نوع پوشش گیاهی به‌دست آوریم؛ اما کاربرد روش‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور مانند SEBS مستقیماً عدد Eta را می‌دهند. برای بررسی ارتباط بین مقدار تبخیر-تعرق واقعی کاربری‌های مختلف زمین‌های محدوده‌ی کلستان، مقدار Eta در انواع پوشش‌های گیاهی در کاربری‌های مختلف، در دو تاریخ گرم‌ترین و سردترین دوره‌ی زمانی این پژوهش محاسبه شد (شکل ۸ و ۹). تبخیر-تعرق در نواحی با شاخص پوشش گیاهی زیاد و دمای کم، از نواحی با شاخص پوشش گیاهی کم و دمای زیاد، بیشتر است. تغییر مقدار Eta برای مرتع از کمترین در دی‌ماه، به بیشترین در فروردین‌ماه بوده است. علت این است که مراتع این حوضه در سرمای زمستانه در کمینه‌ی پوشش‌اند و در شروع بهار، سرتاسر مراتع با انواع گیاهان مرتعی، به‌ویژه علف‌های یک‌ساله پوشیده می‌شود، اما پوشش‌های گیاهی دیگر، مانند درخت‌کاری‌شده، بیشه‌زار و موکاری‌شده در دی‌ماه بیشتر از مرتع و در فروردین کمتر از آن‌اند. چون گیاهان دیم در دی‌ماه در حالت جوانه‌زنی‌اند، پوشش کشت دیم بیشتر از مرتع است، اما به‌دلیل تنوع مناسب گونه‌ای چندساله و یک‌ساله در فروردین، پوشش مرتع بهتر از زراعت دیم نشان داده می‌شود. به‌همین دلیل اعتبار Eta آن نیز بیشتر است. بنابراین، مقدار Eta زراعت دیم در فروردین از درختکاری و

ارزیابی دقت برآورد مکانی تبخیر-تعرق با الگوریتم SEBS در...



شکل ۸- نحوه‌ی برآورد ETa با شبیه SEBS در مقایسه با انواع کاربری‌های زمین در ۲۴ فروردین ۱۳۹۶.



شکل ۹- نحوه‌ی برآورد ETa با شبیه SEBS در مقایسه با انواع کاربری‌های زمین در ۱۵ دی ۱۳۹۴.

را جذب یا منعکس می‌کنند، بستگی دارد. به دلیل تفاوت موقعیت زمین نسبت به خورشید، تابش خورشیدی در عرض‌های جغرافیایی و فصل‌های متفاوت یکسان نیست. از آن‌جا که نیوار نیز مقداری کارمایه‌ی گرمایی دارد، بسته به مقدار کارمایه‌ی گرمایی که دارد در محدوده‌ی طول‌موج بلند

$(R_{L\downarrow})$ از خود کارمایه‌ی تابشی گسیل می‌کند. تابش طول‌موج بلند خروجی

$(R_{L\uparrow})$ رابطه‌ای مستقیم با دمای سطح زمین دارد. به دلیل کمتر بودن دمای سطح زمین در مناطق کشاورزی، مقدار این تابش نیز کمتر خواهد بود. تمام تابش‌هایی که به سطح زمین می‌رسند جذب زمین نمی‌شوند و بخشی از آن‌ها بسته به جنس زمین، از سطح آن منعکس و وارد نیوار می‌شوند. درصد بازتاب تابش خورشیدی توسط زمین را بازتابش می‌نامند. سپیدایی یا بازتابش، به معنی درصد بازتاب نور از سطح یک جسم است. مقادیر این کمیت بی‌بعد می‌تواند از صفر (تاریک مطلق) تا یک (روشن مطلق) تغییر کند. بازتابش را گاه با درصد و گاه با عدد اعشاری کوچک‌تر از ۱ نشان می‌دهند. امواج الکترومغناطیسی، طول‌موج کوتاه خورشیدی دارند که از سمت نیوار به سطح زمین برخورد می‌کنند و یا از پدیده عبور می‌کنند یا جذب می‌شوند یا بازتابش می‌کنند. دسته‌ی پرتو امواج بازتابش‌شده، حاوی انواع دامنه‌های طول‌موج است و سهم محدوده‌های طول‌موج در دسته‌ی پرتو متفاوت است. عواملی مانند بافت خاک، ساختمان خاک، رنگ، درصد رطوبت و ... در مقدار بازتابش مؤثر اند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

امروزه به‌طور فزاینده‌ای از شبیه‌های ریاضی به‌عنوان ابزاری مؤثر برای شبیه‌سازی و مدیریت بهینه‌ی منابع آب استفاده می‌شود. استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در محاسبه‌ی تبخیر-تعرق، کاربردهای گوناگونی همچون بررسی کارایی آب در زمین‌های کشاورزی، بررسی تراز حوضه و مدیریت توسعه‌ی آبیاری دارد. شبیه SEBS از اطلاعات تصاویر عددی جمع‌آوری‌شده به‌وسیله‌ی سنجنده‌ی استر و دیگر سنجنده‌ها (دارای تصاویری با قدرت تفکیک مکانی زیاد) که تابش مادون‌قرمز حرارتی، تابش مرئی و تابش مادون‌قرمز نزدیک را از سطح زمین ثبت می‌کنند، استفاده می‌کند. در این پژوهش سعی شد تا مقادیر تبخیر-تعرق واقعی، با استفاده از شبیه توازن کارمایه SEBS و به‌صورت پیکسل‌به‌پیکسل در زمان گرفتن تصویر ماهواره‌ای و برای هر تصویر محاسبه شود. نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق نشانگر آن است که استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم SEBS ابزار مناسبی برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی است و نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند مبنای تصمیمات برای برنامه‌ریزی و مدیریت قرار گیرد.

فرایند تبخیر-تعرق وابسته به مقدار کارمایه‌ی در دسترس است. تابش خورشیدی، بزرگ‌ترین منبع کارمایه است که مقادیر بسیار آب را از حالت مایع به بخار تبدیل می‌کند. تابش خورشیدی به سطح تبخیر، موقعیت مکانی و زمانی سطح، ضریب مه‌آلودگی و وجود ابرها که بخش عمده‌ای از تابش

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در صورت حذف پیکره‌های آبی در تصاویر سنجنده‌ی لندست ۸، همواره بین داده‌های دمای سطح زمین رابطه‌ی معکوس خطی و غیرخطی NDVI و شاخص گیاهی وجود دارد. داده‌های این پژوهش که براساس روش به‌کاررفته در مقالات معتبر دیگر انجام شده است، این مقدار از انطباق بین این دو روش را نشان داده است. ممکن است خود روش معیار فائو پنمن-مانتیس نیز خطا داشته باشد، اما با توجه به پایه‌ی فیزیکی آن و تأییدات بسیار زیادی که در جاهای مختلف دنیا از اجرای آن به‌دست آمده است، می‌تواند مبنای این قضاوت قرار گیرد. بی‌تردید اگر داده‌های لایسیمیتری در دسترس بود، با قاطعیت بیشتری قضاوت می‌شد، اما انطباق کاملی که از نتایج دو روش به‌دست آمده است به حد کافی بر درستی نتایج شبیه، به‌ویژه برای کاربردهای آب‌شناسی صحه می‌گذارد.

برای پژوهش‌های آینده پیشنهادهای زیر داده می‌شود:

۱. تأسیس امکاناتی همچون لایسیمتر و برج‌های اندازه‌گیری شارهای سطحی (فلاکس تاور یا ادی کوواریانس)، برای ارزیابی روش‌های موجود برآورد تبخیر-تعرق واقعی، مبتنی بر روش سنجش‌ازدور در منطقه.

۲. استفاده از داده‌های هواشناسی ساعتی و تاحدممکن در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر.

۳- برای بهبود قدرت تفکیک زمانی نقشه‌های تبخیر-تعرق حاصل از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده‌ی استر ۱۶ روزه، پیشنهاد می‌شود از تصاویر سنجنده‌هایی مانند مودیس با بازه‌ی زمانی کوتاه‌تر و روش‌های ریزمقیاس کردن استفاده شود.

بازتابش از دقیق‌ترین محصولات ماهواره‌ای است و به‌ویژه اگر تصحیح نیواری انجام پذیرد، با واقعیت اندازه‌گیری زمینی ارتباط بسیار نزدیکی نشان می‌دهد. هرچه مقدار بازتابش بیشتر باشد، بخش زیادتری از تابش از سطح زمین انعکاس یافته است. در نتیجه مقدار شار تابش خالص کاهش می‌یابد. شار تابش خالص، در واقع مقدار کارمایه‌ی در دست رس است که صرف گرم کردن هوا، خاک و فرایند تبخیر-تعرق می‌شود. مقدار شار تابش خالص، از توازن مؤلفه‌های طول‌موج کوتاه و بلند تابش ورودی و خروجی به‌دست می‌آید و مقدار آن به پوشش و جنس زمین در هر منطقه بستگی دارد. مناطق کشاورزی با مقدار پوشش گیاهی زیاد دارای مقادیر نسبتاً کمتر بازتابش و دما اند و شارتابش خالص در این مناطق، مقدار شایان توجهی دارد. این امر نشان می‌دهد بخش اعظم کارمایه‌ی در دست‌رس در این مناطق، صرف فرآیند تبخیر-تعرق و در نتیجه کاهش دما در این نواحی شده است.

مشکل اصلی در استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ این است که هر شانزده‌روز یک‌بار، از نقطه‌ی محل اجرای طرح عبور می‌کند و با این روش نمی‌توان برای تعداد روزهای بیشتری از دوره‌ی رشد، تبخیر-تعرق را برآورد کرد. اگر بتوان در آینده از راهی این مشکل را حل کرد، به‌طوری که بشود در هر مرحله از رشد، تصاویر بیشتری دریافت کرد، می‌توان گفت که استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با مزایایی که دارد، بهترین روش در برآورد تبخیر-تعرق واقعی در این منطقه است. دمای سطح زمین، از عامل‌های تأثیرگذار مهم در اجزای تراز آبی در سطح حوضه‌ی آبریز است. تولید نقشه‌های دمای سطح زمین نیاز به نوارهای حرارتی‌ای دارد که توان تفکیک زمینی پایین را داشته باشند یا در فواصل زمانی طولانی در اختیار پژوهشگران قرار بگیرند.

- Aghdasi F. 2010. Crop water requirement assessment and annual planning of water allocation. University of Twente Faculty of Geo-Information and Earth Observation (ITC).
- Allen RG, Tasumi M, Trezza R. 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-model. *ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(1): 380–394.
- Allen RG, Pruitt W, Businger J, Fritschen L, Jensen M. 1998. Chapter 4 “Evaporation and Transpiration” in *ASCE Handbook of Hydrology*. New York, NY, 125–252 .
- Allen RG, Morse A, Tasumi M. 2003. Application of SEBAL for western US water rights regulation and planning. Paper presented at the Proc. ICID Int. Workshop on Remote Sensing.
- Bansouleh VF, Valizadeh KH, Pirnazar M. 2015. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS: comparison between split window algorithm and SEBAL method. *Third International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment: 953503–953503–953512*.
- Bastiaanssen W. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL).: Part 2: Validation. *Journal of Hydrology*. 212(1): 213–229.
- 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, Menenti M, Feddes RA, Holtslag AAM. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212–213(2): 198–212. doi:http://dx.doi.org/10.1016/s0022-1694(98)00253-4.
- Chehbouni A, Nouvellon Y, Lhomme P, Watts C. 2001. Estimation of surface sensible heat flux using dual angle observations of radiative surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108(1): 55–65.
- Chen X, Su Z, Ma Y, Yang K, Wen J, Zhang Y. 2013. An improvement of roughness height parameterization of the Surface Energy Balance System (SEBS) over the Tibetan Plateau. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(3): 607–622.
- El Tahir M, Wenzhong W, Xu C, Youjing Z, Singh V. 2012. Comparison of methods for estimation of regional actual evapotranspiration in data scarce regions: Blue Nile Region, Eastern Sudan. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(4): 578–589. doi:http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000429.
- Enko T. 2009. Estimation of evapotranspiration from satellite remote sensing and meteorological data over the Fogera flood plain-Ethiopia, M.Sc. Thesis, ITC, Enschede, The Netherlands.
- Estévez J, Gavilán P. 2009. Sensitivity analysis of a Penman–Monteith type equation to estimate reference evapotranspiration in southern Spain. *Hydrological Processes. Evapotranspiration Equation*. American Society of Civil Engineers, Virginia, USA. 23(1): 3342–3353.
- Gong, L, Xu C, Chen D, Halldin S, Chen Y. 2006. Sensitivity of the Penman–Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *Journal of Hydrology*. 329(1): 620–629.
- Gibson L, Jarman C, Su Z, Eckardt F. 2013. Estimating evapotranspiration using remote sensing and the surface energy balance system—A South African perspective. *Water Sa*, 39(4): 477–484.
- Han H, Yang L. 2004. Evaluation of regional scale evapotranspiration using SEBS model in western Chinese Loess Plateau. *Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2004. IGARSS'04. Proceedings. 2004. IEEE International, IEEE*.
- Jia L, Su Z, van den Hurk B, Menenti M, Moene A, De Bruin H. 2003. Estimation of sensible heat flux using the Surface Energy Balance System (SEBS) and ATSR measurements. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28(1), 75–88.
- Kisi O. 2007. Eapotranspiration modelling from climatic data using a neural computing technique. *Hydrological Processes*, 21(14): 1925–1934.
- Landeras G, Ortiz-Barredo A, López J. 2008. Comparison of artificial neural network models and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the Basque Country (Northern Spain). *Agricultural Water Management*, 95(5): 553–565. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat. 2007.12.011.
- Liaqat U, Choi M. 2015. Surface energy fluxes in the Northeast Asia ecosystem: SEBS and METRIC models using Landsat satellite images. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214(1): 60–79.
- Lu J, Li Z, Tang R, Tang B H, Wu H, Yang F, Labeled J, Zhou G. 2013. Evaluating the SEBS-estimated evaporative fraction from references – 215. MODIS data for a complex underlying surface. *Hydrological Processes*, 27(1): 3139–3149.
- McCabe M, Wood E F. 2006. Scale influences on the remote estimation of evapotranspiration using multiple satellite sensors. *Remote Sensing of Environment*, 105(2): 271–285.
- Maeda E, Wiberg D, Pellikka P. 2011. Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenya. *Applied Geography*, 31(1): 251–258.
- Mahour M, Stein A, Sharifi A, Tolpekin V. 2015. Integrating

- super resolution mapping and SEBS modeling for evapotranspiration mapping at the field scale. *Precision Agriculture*, 16(5): 571–586.
- Menenti M, Choudhury B. 1993. Parameterization of land surface evapotranspiration using a location dependent potential evapotranspiration and surface temperature range. *Proceedings of Exchange Processes at the Land Surface for a Range of Space and Time Scales*, IAHS Publ, 212(1): 561–568.
- Mesbah H. 2014. Assessment of watershed management projects on flood mitigation in catchments, final report of research project, PROJECT NO: 01–22–22–8804–88001. (In Persian).
- Nandagiri L, Kovoor G. 2006. Performance evaluation of reference evapotranspiration equations across a range of Indian climates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(3): 238–249.
- Norman JM, Kuštás W, Humes K. 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.
- Norman J M, Kuštás WP, Anderson MC. 2006. Are single-source, remotesensing surface-flux models too simple. *Earth Observation for Vegetation Monitoring and Water Management*, AIP Conference.
- Pakparvar M. 2015. Evaluation of floodwater spreading for groundwater recharge in Gareh Bygone Plain, southern Iran. Soil Management Dept., Faculty of Bioscience Engineering, Ghent, Belgium, Ghent University. PhD: 252p.
- Pakparvar M, Cornelis W, Pereira LS, Gabriels D, Hosseinimrandi H, Edraki M, Kowsar SA. 2014. Remote sensing estimation of actual evapotranspiration and crop coefficients for a multiple land use arid landscape of southern Iran with limited available data. *J. of Hydroinformatics* 16(6): 1441–1460. doi:http://dx.doi.org/10.2166/hydro.2014.140.
- Parlange M. 1995. Regional scale evaporation and the atmospheric boundary layer. *Reviews of Geophysics*, 33(1): 99–124.
- Pereira LS, Allen R, Smith M, Raes D. 2015. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management Proceedings*, 147(1): 4–20.
- Raziei T, Pereira LS. 2013. Estimation of ETo with Hargreaves–Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. *Agricultural Water Management*, 121(1): 1–18. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2012.12.019.
- Roerink GJ, Su Z, Menenti M. 2000. S-Sebi: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(2): 147–157.
- Singh R, Senay G. 2015. Comparison of four different energy balance models for estimating evapotranspiration in the Midwestern United States. *Water*, 8(1): 9.
- Su z. 2002. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1): 85–99.
- Su Z, Wang Q, Matsushita B, Fukushima T, Ouyang Z, Watanabe M. 2009. Assessing relative soil moisture with remote sensing data: theory, experimental validation, and application to drought monitoring over the North China Plain. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28(1): 89–101.
- Su Z, Yacob A, Wen J, Roerink G, He Y, Gao . 2003. Assessing relative soil moisture with remote sensing data: theory, experimental validation, and application to drought monitoring over the North China Plain. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28(1), 89–101.
- Tang R, Li Z. 2017. An improved constant evaporative fraction method for estimating daily evapotranspiration from remotely sensed instantaneous observations. *Geophysical Research Letters* 44(5): 2319–2326.
- Tabari H, Grismer M, Trajkovic S. 2013. Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. *Irrigation Science*, 31(2): 107–117.
- Vander Kwast J, Timmermans W, Gieske A, Su Z, Olioso A, Jia L, Elbers J, Karssenber D, de Jong S. 2009. Evaluation of the surface energy balance system (SEBS) applied to ASTER imagery with flux-measurements at the SPARC 2004 site (Barrax, Spain). *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 13(7): 1337–1347.
- Wagle P, Bhattarai N, Gowda P, Kakani V .2017. Performance of five surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in high biomass sorghum. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 128(1): 192–20.
- Ye J, Guo A, Sun G. 2009. Statistical analysis of reference evapotranspiration on the Tibetan Plateau. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(1): 134–140.

