



مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مادان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی

ارزیابی و واسنجی مدل بیلان انرژی سطحی سبسی در تعیین تبخیر-تعرق دشت‌های متأثر از پخش سیلاب (قره‌چریان - استان زنجان)

قباد رستمی‌زاد^{۱*}، مجتبی پاک‌پرور^۲، پرویز عبدی‌نژاد^۳

- ۱ و ۳ - استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زنجان، ایران
- ۲ - استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

تبخیر و تعرق، تعادل آب و انرژی خاک را که عمدتاً در مدل‌های گردش عمومی و مدل‌سازی آب و هوا استفاده می‌شود، هدایت می‌کند. در نتیجه، پیش‌بینی جریان آب رود، پیش‌بینی عملکرد محصول، سامانه‌های مدیریت آبیاری، کیفیت آب رود یا دریاچه همگی به سطوح تبخیر و تعرق بستگی دارند. به این دلیل، برآورد دقیق بیلان آب ضروری است. برآوردهای بهتر و دقیق تبخیر-تعرق امکان برنامه‌ریزی مؤثر آبیاری و استفاده بهینه از آب را برای سایر اهداف کشاورزی فراهم می‌کند. هدف این پژوهش ارزیابی و واسنجی مدل بیلان انرژی سطحی سبسی در تعیین تبخیر-تعرق در دشت سهرین - قره‌چریان در فاصله‌ی ۳۰ کیلومتر و در شمال غرب شهر زنجان می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش به‌منظور تعیین تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از مدل بیلان انرژی و سنجش‌ازدور سبسی در دشت سهرین-قره‌چریان، تعداد ۱۷ تصویر لندست هشت، همراه با داده‌های هواشناسی ایستگاه همدید فرودگاه زنجان بررسی شد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Rostamizad60@gmail.com

استناد: رستمی‌زاد، ق، پاک‌پرور، م، عبدی‌نژاد، پ. ۱۴۰۲. ارزیابی و واسنجی مدل بیلان انرژی سطحی سبسی در تعیین تبخیر-تعرق دشت‌های متأثر از پخش سیلاب (قره‌چریان - استان زنجان). پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۶ (۳): ۱۷-۳۱.

شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2023.360611.1503

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۰۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۸، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۲، دوره‌ی ۳۶، شماره‌ی ۴، شماره‌ی پیاپی ۱۴۱، زمستان ۱۴۰۲، صفحه‌های ۱۷ تا ۳۱

©نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



همچنین با کمک مدل سبب، تبخیر-تعرق مزرعه‌ی کشت گندم با مساحت پنج هکتار در دوره‌ی زمانی ۱۳۹۹/۷/۱ تا ۱۴۰۰/۰۶/۳۱ محاسبه و اعتبارسنجی شد. برای این منظور ورودی‌های مورد نیاز مدل سبب شامل آلبیدو، دمای سطح زمین، گسیلمندی، NDVI، شاخص پوشش گیاهی، شاخص سطح برگ، بلندی پوشش گیاهی، تراکم تاج پوشش گیاهی که در محیط نرم افزار ایلویس تهیه شد. داده‌های بده و حجم آب مصرفی با استفاده از مدل بیلان آب خاک نیز تعیین شد.

نتایج و بحث

بر اساس نتایج این پژوهش تبخیر و تعرق به‌دست آمده از مدل بیلان آب خاک ۲۴۱۱۵ مترمکعب و تبخیر و تعرق به‌دست آمده از مدل سبب ۲۸۷۵۰ مترمکعب با خطای ۱۶/۱۲٪ برآورد شد. همچنین نتایج به‌دست آمده از مدل سبب با تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از چهار شاخص ضریب تبیین (R^2)، ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE) و میانگین اریبی خطا (MBE) واسنجی شد که اندازه‌های این چهار شاخص به‌ترتیب ۰/۸۴۴، ۱/۰۶، ۱/۱۲ و ۰/۲۵ محاسبه شد، که این نتایج نشان دادند دستورالعمل سبب برای برآورد ETa در منطقه‌ی مطالعه‌شده دقت کافی داشت.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بنابراین بر اساس نتایج این پژوهش می‌توان گفت که استفاده از تصویرهای ماهواره‌ای در برآورد تبخیر-تعرق واقعی، در مقایسه با روش برداشت میدانی قابل اتکا است و با توجه به مشکلات روش‌های بیلان رطوبتی (مانند نقطه‌ای بودن، زمان‌بر بودن، هزینه زیاد، نیاز به ابزار دقیق و تقریباً نبود امکان استفاده از لایسیمتر) و مزایای استفاده از تصویرهای ماهواره (تحت پوشش دادن سطح گسترده‌ای از مزارع یا باغ‌ها، ارزان و سریع بودن) در برآورد تبخیر-تعرق می‌توان با پذیرفتن خطای کم نتایج قابل قبولی به‌دست آورد.

واژگان کلیدی: تصویرهای ماهواره، دشت سهرین، سنجش‌ازدور، مدل بیلان آب خاک

مقدمه

برای برآورد ET خصوصاً در مناطق گسترده استفاده از سنجش‌ازدور است. با استفاده از دستورالعمل‌های سنجش‌ازدور مربوط به ET، در مدیریت منابع آب می‌توان گام بزرگی برداشت. یکی از این دستورالعمل‌ها، دستورالعمل سبب^۱، (سو ۲۰۰۲؛ سو و همکاران ۲۰۰۵؛ جیا ۲۰۱۳) است. امروزه فن‌های جدید سنجش‌ازدور مانند سبب توسعه داده شده‌اند تا بتوان ET را در مقیاس گسترده و برای مناطق ناهمگن برآورد کرد (سو و همکاران ۲۰۱۱).

مطالعات پرشماری پیرامون کار با مدل سبب در داخل و خارج از کشور انجام شده است. در منطقه‌ی شریف‌آباد قزوین ماهور و همکاران (۲۰۱۵) اندازه‌ی تبخیر و تعرق را با استفاده از دستورالعمل سبب برآورد کردند و نتایج را با اندازه‌های تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ETO) مقایسه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که دستورالعمل سبب دقت قابل قبولی برای برآورد تبخیر و تعرق دارد. نتایج پژوهش بوالحسنی و همکاران (۲۰۲۲) در آبخیز بختگان-مهارلو در استان فارس نشان داد که اندازه‌های تبخیر و تعرق به‌دست‌آمده از روش توازن انرژی با اندازه‌ی میانگین تفاضل مطلق (MAD) ۰/۴۹ و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ۰/۶۲، در مقایسه با روش فائو پنمن مانیتث، بیان‌گر عملکرد قابل قبول و منطقی مدل در برآورد تبخیر و تعرق بود. در دشت قزوین اندازه‌ی

تبخیر و تعرق^۱ (ET) یک پدیده‌ی غیرخطی و پیچیده است، به عامل‌های اقلیمی، خاکی و گیاهی مختلف بستگی دارد؛ بنابراین تعیین یک مدل ریاضی برای آن با در نظر گرفتن تمام عامل‌های مؤثر بر آن، کاری مشکل با منابع خطای قابل توجه است و به اطلاعات زیادی نیاز دارد که اندازه‌گیری آنها مشکل و وقت‌گیر است. در دهه‌ی اخیر یکی از مطرح‌ترین روش‌های برآورد ET، روش توازن انرژی سطحی است. در این روش، مؤلفه‌های مختلف توازن انرژی در مقیاس منطقه‌ای و با کمترین داده‌های زمینی محاسبه می‌شود. به‌طور خلاصه ارتباط بین تشعشعات دریافتی به‌وسیله‌ی ماهواره‌ها از سطح زمین در باندهای مرئی و مادون‌قرمز حرارتی و نیز وجود اختلاف زیاد در ویژگی‌های آب‌شناختی (هیدرولوژیک) سطح زمین، پایه و اساس معادله‌ها در دستورالعمل بیلان انرژی است (قهاری و پاک‌پرور ۲۰۲۱). در این دستورالعمل با توجه به شار ورودی به سطح زمین و خروج آن از راه طول موج کوتاه و بلند، امکان محاسبه تشعشع خالص جذب شده به‌وسیله‌ی هر سلول در سطح زمین فراهم می‌شود. این تشعشع با توجه به اختلاف درجه‌ی هوا و سطح زمین، شدت و ضعف پوشش گیاهی و مقاومت هوا پویایی (آبرودینامیکی) سطح زمین به اجزا مختلف مانند جریان گرمایی خاک، جریان گرمای محسوس و جریان گرمای نهان تبخیر تقسیم می‌شود. یکی از روش‌های جدید

1 - Evapotranspiration

2 - Surface Energy Balance System

شده داشت. در آبخیز آبیام‌مانیامه در زیمابوه تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از مدل سبب محاسبه شد و نتایج آن با اندازه‌های ظرفیت مقایسه شد (واسوکا و همکاران ۲۰۱۱). نتایج این پژوهش نشان داد که اختلاف اندازه‌ها به‌طور متوسط ثابت بوده است. سینگ و سنی (۲۰۱۵) تبخیر-تعرق واقعی را با استفاده از دو روش سبب و متریک با به‌کارگیری تصویرهای لندست فصل رویشی محاسبه کردند و نتایج را با هم مقایسه کردند. یافته‌های آنها نشان داد که مدل سبب می‌تواند در طیف گسترده‌تری از بلندی به‌کار گرفته شود. در جنوب ایتالیا نیسا و همکاران (۲۰۲۱) مدل‌های سبب، متریک و مدل آب برای برآورد تبخیر و تعرق روزانه‌ی یک زمین زراعی با سه گیاه رازیانه، ذرت و گندم سیاه بررسی کردند. نتایج این پژوهش حاکی از آن بود که مدل سبب دقت بیشتری در مقایسه با سایر مدل‌ها داشت.

پژوهش‌ها نشان می‌دهد که سنجش‌ازدور و تصویرهای ماهواره‌ای برای استخراج اندازه‌ی تبخیر و تعرق واقعی قابلیت زیادی دارند و در سراسر جهان به‌وسیله‌ی پژوهشگران استفاده شده‌اند. با توجه به اهمیت و ضرورت برآورد تبخیر و تعرق واقعی در دشت‌های متأثر از پخش سیلاب (خصوصاً پخش سیلاب بر آبخوان دشت سهرین-قره‌چریان)، در این پژوهش تلاش شد تا ضمن گسترش سال‌های بررسی و کاربرد آن در منطقه‌ی مطالعه شده بتوان به برآورد تبخیر و تعرق واقعی رسید و به مناطق با شرایط مشابه تعمیم داد.

مواد و روش

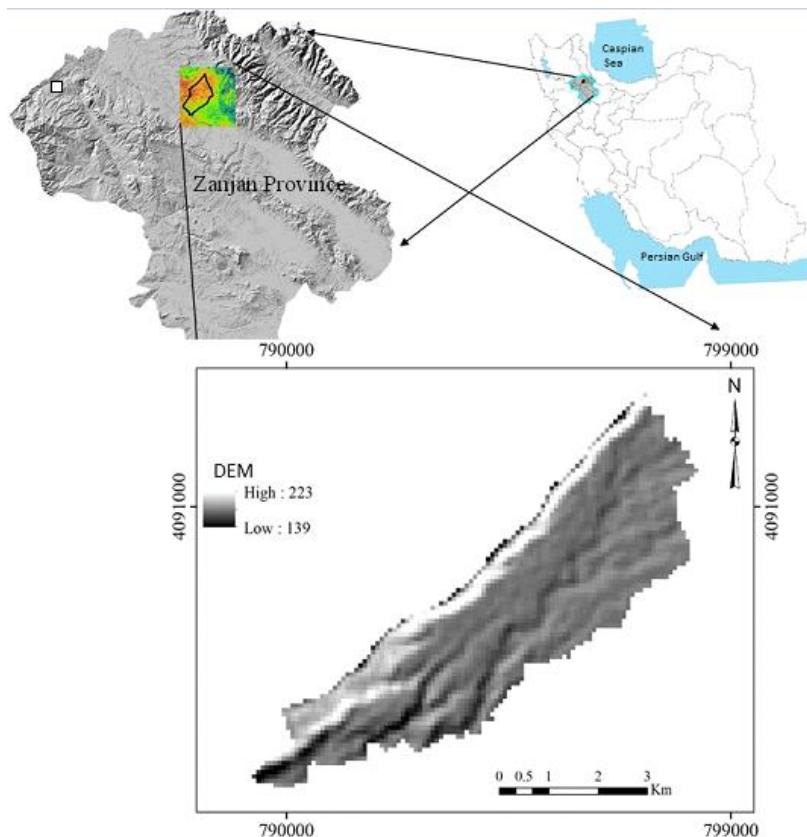
موقعیت منطقه‌ی مطالعه‌شده

ایستگاه تحقیقاتی و آبخوانداری قره‌چریان با فاصله‌ی ۳۰ کیلومتری در شمال‌غربی شهر زنجان در دشت سهرین-قره‌چریان است. این ایستگاه در سال ۱۳۷۵ در زمینی با مساحت ۴۱۵ هکتار احداث شد که حدود ۲۱۵ هکتار از آن برای پخش سیلاب و تغذیه‌ی آبخوان استفاده شده است. آب‌دهی متوسط سالانه‌ی رود قره-چریان که سیلاب ورودی به ایستگاه از آن انحراف داده می‌شود، ۳۷/۵۶۲ لیتر در ثانیه است. شروع آبیگری از اسفندماه آغاز می‌شود و با توجه به ظرفیت بارندگی منطقه و ایجاد رواناب‌ها تا اواخر خردادماه ادامه می‌یابد. حداکثر آب‌دهی رود در ماه‌های فروردین (۳۸/۲۴۵۴ لیتر در ثانیه) و اردیبهشت (۱۶۵۱ لیتر در ثانیه) است که بیش‌ترین حجم آب انحراف داده شده به ایستگاه نیز در این ماه‌ها می‌باشد. براساس داده‌های ثبت‌شده به‌وسیله‌ی ایستگاه آب‌سنجی در ورودی ایستگاه تا تاریخ ۳۰ فروردین ۱۴۰۰ بیش از ۲۲ میلیون مترمکعب آب به عرصه‌ی پخش سیلاب وارد شده است. با توجه به نفوذپذیری زیاد رسوبات عرصه پخش سیلاب ایستگاه و شرایط جوی و تبخیر و تعرق بسیار کم منطقه، از این اندازه حجم آبیگری، حداقل ۶/۵ میلیون مترمکعب آب در سفره‌ی

تبخیر و تعرق با استفاده از دو دستورالعمل سبب و پای‌سیبال برآورد شد (فخار و کاویانی ۲۰۲۲). نتایج این دو دستورالعمل با داده‌های به‌دست آمده از لایسیمتر زهکش‌دار کشت شده با چمن مقایسه شد که نتایج بیان‌گر دقت بیشتر دستورالعمل پای‌سیبال در مقایسه با دستورالعمل سبب بود. در جنوب‌شرق استان فارس در منطقه‌ی گربایگان پژوهشگران مدل سبب را با استفاده از داده‌های زمینی واسنجی کردند و ضمن پیشنهاد معادله‌ای جدید برای عامل ورودی شدت باد و بهترین شیوه‌ی چینش ورودی‌ها، نتایج آن را به حداکثر تطابق با واقعیت رساندند (پاک‌پرور و همکاران ۲۰۱۴). در ماهیدشت اندازه‌ی تبخیر و تعرق با کمک دستورالعمل سبب و تصویرهای ماهواره لندست برآورد شد. نتایج این بررسی نشان داد تبخیر و تعرق محاسبه شده در هر چهار تاریخ ۱/۰۲ تا ۱/۲۲ بود که با تبخیر و تعرق محاسبه شده با مدل پنمن مانیتث فائو همبستگی زیادی داشت (فرهادی‌بانسوله و همکاران ۲۰۱۶). در دشت ابراهیم آباد مهریز-یزد دقت سه مدل سبال، سبب و متریک در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در بازه‌ی زمانی ۱۳۹۳-۱۳۹۴ و ۱۳۹۷-۱۳۹۸ از ۱۹ تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ برای آبخیز میانکوه بررسی شد (پابنده ۲۰۲۱). نتایج این بررسی نشان داد مدل سبب تبخیر و تعرق روزانه را در مقایسه با تبخیر و تعرق بالقوه دیگر مدل‌ها بهتر ارزیابی کرده است. با به‌کارگیری دستورالعمل سبب و با استفاده از تصویرهای سنجنده‌ی نووا برای ماه‌های مه تا آگوست سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۰۹، تبخیر و تعرق واقعی به‌شکل ماهانه برای کاربری‌های کشاورزی در آبخیز دریچه‌ی ارومیه برآورد شد (باباجعفری و همکاران ۲۰۱۸). نتایج به‌دست آمده از این دستورالعمل با نیاز خالص آب آبیاری مقایسه شد. نتایج پژوهش با ضریب تبیین ۰/۸۵، دقت مناسب مدل را برای برآورد تبخیر و تعرق کاربری‌های کشاورزی آبی در آبخیز دریچه‌ی ارومیه نشان داد. در بخش‌هایی از استان اوریجسل کشور هلند برای ارزیابی تغییرات زمانی و مکانی تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصویرهای لندست ۷ دستورالعمل سبب استفاده شد (هیل گورگیس ۲۰۰۶). نتایج بیان‌گر تفاوت آشکار (۲۰ تا ۱۰۰٪) در تبخیر و تعرق محاسبه شده بر اساس این دو روش بود. در شمال‌شرقی چین نتایج برآورد شارهای سطحی از تصویرهای مادیس ماهواره‌ی ترا و دستورالعمل سنجش‌ازدور سبب نشان داد که اندازه‌ی تبخیر و تعرق برآورد شده با دستورالعمل سبب تطابق خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده با لایسیمتر داشت (لین و همکاران ۲۰۰۶). در آبخیز میکیندو در تانزانیا تبخیر و تعرق واقعی در میان انواع پوشش‌های مختلف سطح زمین بررسی شد (محمد و همکاران ۲۰۱۰). نتایج این پژوهش نشان داد انواع مختلف کاربری زمین، اندازه‌های تبخیر و تعرق مختلفی در مقیاس زمانی روزانه و ماهانه داشتند و برآورد تبخیر و تعرق واقعی مدل سبب همبستگی خوبی با تبخیر و تعرق ظرفیت محاسبه

آبی ۱۳ روستای منتفع از آن را تأمین می کند. موقعیت مکانی منطقه‌ی مطالعه شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

آب زیرزمینی یا آبخوان منطقه ذخیره سازی می شود. این حجم آب ذخیره شده، مصرف آب کشاورزی، شرب و سایر نیازهای



شکل ۱- موقعیت منطقه‌ی مطالعه شده (تحت تأثیر پخش سیلاب بر آبخوان قره چریان).

Figure 1 - The location of the studied area (the area affected by flood spreading on the Qaracharian Aquifer).

هندسی و تشعشع سنجی روی داده‌های ماهواره‌ای انجام شد. دستورالعمل سبب به وسیله‌ی سو (۲۰۰۲) پیشنهاد شده است و شامل یک گروه ابزار برای تعیین سنج‌های فیزیکی سطح زمین مانند آلیدو، انتشار سطح، دما، پوشش گیاهی، شاخص سطح برگ و بلندی گیاهان است. در مدل سبب سرعت اصطکاک، شار گرمای محسوس و طول سنجه ایوکوف به وسیله‌ی حل معادله‌های غیرخطی به دست می‌آید و در نهایت ET روزانه با استفاده از کسر تبخیر که در طول روز ثابت فرض می‌شود و انرژی دسترس روزانه محاسبه می‌شود. در صورتی که اطلاعات گیاهی در دسترس نباشد شاخص گیاهی و NDVI به عنوان جانشین برای محاسبه‌ی سنجه استفاده می‌شود. برای برآورد ETa با استفاده از مدل سبب، نیاز به تصویرهای ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی بود. پس از انجام پردازش‌های اولیه ورودی‌های مدل سبب به شرح زیر استخراج شد:

روش پژوهش

در این پژوهش از تصویرهای ماهواره لندست ۸ استفاده شد. از مدل سبب نیز برای برآورد تغییرات زمانی و مکانی ETa استفاده شد. نوع پوشش گیاهی و بلندی آن نیز با استفاده از بازدید زمینی تعیین شد و از زبان اسکریپت‌نویسی در نرم‌افزار ایلویس ۳ برای توسعه‌ی مدل تعادل انرژی بهره‌گیری شد. افزون بر داده‌های سنجش از دور، داده‌های هواشناسی ساعتی ایستگاه همدید فرودگاه زنجان در دوره‌ی یک‌ساله (۱۳۹۹-۱۴۰۰) و نقشه‌های کاربری زمین منطقه‌ی مزبور به عنوان ورودی مدل سبب به کار گرفته شد. از آنجا که هم‌اکنون تصویرهای لندست ۸ به طور رایگان در اختیار استفاده‌کنندگان است، به عنوان مبنای به کار گرفته شد. این تصویرها ۹ باند طیفی بازتابی با وضوح زمینی ۱۵ تا ۳۰ متر و دو باند حرارتی ۱۰۰ متر داشتند و در مقاطع زمانی ۱۶ روزه، از مرجع وبسایت ناسا یا USGS دانلود شدند و پس از بررسی کیفیت وارد چرخه پردازش اولیه شدند. دو گروه مهم تصحیح‌های رایج شامل تصحیح‌های

NDVI: شاخص گیاهی تفاضلی بهنجار، b_{NIR} : باند مادون قرمز نزدیک، b_R : باند قرمز است.

شاخص سطح برگ^۹ (LAI)

برآورد ویژگی‌های ساختاری پوشش گیاهی مانند شاخص سطح برگ یک گام مهم در تعیین اندازه‌ی آب مصرفی در گیاهان مختلف است. براساس تعریف جهانی FAO شاخص سطح برگ از تقسیم سطح برگ‌های سبز به سطح زمین به‌دست می‌آید. شاخص LAI به‌طور گسترده‌ای برای استخراج مدل‌های رواناب، نفوذ، تبخیر و تعرق، فرسایش، برگاب و فتوسنتز استفاده می‌شود. شاخص سطح برگ (LAI) یکی از متغیرهای مهم در پژوهش‌های اقلیمی، بوم‌شناختی و زراعی به‌شمار می‌رود. بنابراین اندازه‌گیری دقیق شاخص سطح برگ برای درک اثر متقابل میان رشد و نمو گیاه و محیط امری ضروری است. شاخص سطح برگ با استفاده از رابطه‌ی ۴ و با استفاده از نرم افزار ایلویس برآورد شد (پاک‌پرور ۲۰۱۵).

$$LAI = EXP((NDVI + 0.1912)/0.78) \quad (۴)$$

LAI: شاخص سطح برگ، NDVI: شاخص گیاهی تفاضلی بهنجار است.

درصد پوشش

درصد پوشش، اندازه‌ی پوشش سطح خاک است که به‌وسیله‌ی گیاه پوشیده شده است. یعنی بیان‌گر آن است که چه نسبتی از هر پیکسل را پوشش گیاهی تشکیل داده است. این سنجه با استفاده از رابطه‌ی ۵ برآورد شد (پاک‌پرور ۲۰۱۵).

(۵)

$$FC = IFF(NDVI < 0.1, 0.05, 1.06 * NDVI - 0.006)$$

FC: درصد پوشش گیاهی، NDVI: شاخص گیاهی تفاضلی بهنجار است.

گسیلمندی^{۱۰}

گسیلمندی اندازه‌ی نسبی توانایی هر جسم به تاباندن انرژی در مقایسه با یک جسم سیاه در محدوده‌ی مادون قرمز است. انرژی گسیل‌شده (emitted) نشان‌دهنده‌ی اندازه‌ی حرارت جسم است به‌طوری که جسم سیاه عدد ۱ و جسم تابان روشن عدد صفر است. بیشتر پدیده‌های زنده، سطوح رنگ‌شده و رایج

آلبیدو (سپیدایی)

آلبیدو با یکپارچه کردن بازتاب‌پذیری از نماینده‌ی باندهای ماهواره محاسبه شد. برای مثال باندهای ۱ تا ۵ و ۷ سنجنده‌ی لندست، باندهای ۱ تا ۷ سنجنده‌ی مودیس و باندهای ۱ تا ۹ سنجنده‌ی استر، افزایش آلبیدو منجر به کاهش انرژی جذب‌شده به‌وسیله‌ی سطح شده است و تبخیر-تعرق کاهش می‌یابد. در این پژوهش آلبیدو با استفاده از رابطه‌ی ۱ و در محیط نرم‌افزار ENVI برآورد شد.

$$\alpha = b2 * 0.3 + b3 * 0.277 + b4 * 0.233 + b5 * 0.143 + b6 * 0.036 + b7 * 0.012 \quad (۱)$$

α : آلبیدو، b : باندهای سنجنده‌ی لندست ۸ است.

دمای سطح زمین^۴ (LST)

دمای سطح زمین عامل مهمی در تغییر جهانی آب و هوا، رشد پوشش گیاهی و یخچال‌های طبیعی است. استفاده از روش‌های دورسنجی^۵ (RS) و تصویرهای ماهواره‌ای^۶ می‌تواند برای برآورد دمای سطح زمین بسیار مفید باشند. ماهواره‌های گروه لندست و استر از جمله ماهواره‌هایی می‌باشند که می‌توان با استفاده از آن‌ها دمای سطح زمین را برآورد کرد. سنجنده یا سنسورهای این قبیل ماهواره‌ها قادرند تا طیف طول موج مادون قرمز حرارتی یا TIR^7 را اندازه‌گیری کنند. از این قابلیت برای برآورد دمای سطح زمین استفاده می‌شود. در این پژوهش دمای سطح زمین با استفاده از رابطه‌ی ۲ و در محیط نرم‌افزار ENVI برآورد شد.

(۲)

$$LST = (b1) + (b2 * (b1/14380) * (alog(b3)))$$

LST: دمای سطح زمین، $b1$: دمای درخشندگی باند حرارتی، $b2$: رادیانس باند حرارتی و $b3$: گسیلمندی است.

شاخص گیاهی تفاضلی بهنجار^۸ (NDVI)

این شاخص براساس تفاضل بهنجار شده باند مادون قرمز نزدیک از باند قرمز به‌دست می‌آید و گویای بسیار مطلوبی از درجه انبوهی و نیز شادابی گیاه روی سطح زمین است. شاخص NDVI با استفاده از رابطه‌ی ۳ و در محیط نرم‌افزار ENVI برآورد شد.

$$NDVI = \frac{(b_{NIR} - b_R)^2}{(b_{NIR} + b_R)^2} \quad (۳)$$

4 - Land Surface Temperature

5 - Remote Sensing

6 - Satellite Data Imagery

7 - Thermal Infrared

8 - Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

9 - Leaf area index (LAI)

10 Emission

$$R_n = (1 - \alpha)R_{sl} + R_{ll-} - R_{lf} - (1 - \epsilon_0)R_{ll} \quad (9)$$

R_n : شار تابش خالص (W/m^2)، α : آلبیدو، R_{sl} : تابش ورودی موج کوتاه، R_{ll} : تابش ورودی موج بلند، R_{lf} : تابش خروجی موج بلند و ϵ_0 : گسیل مندی است.

شار گرمایی خاک^{۱۵}

شار گرمای خاک با استفاده از رابطه‌ی ۱۰ محاسبه شد (سان و همکاران ۲۰۱۱).

$$\frac{G}{R_n} = \frac{(T_s - 273.15)}{a(0.0038a + 0.0074a^2)(1 - 0.98NDVI^4)} \quad (10)$$

α : آلبیدو، TS: دمای سطح (بر حسب کلونین) است. اگر مقدار NDVI کمتر از صفر باشد، سطح آب در نظر گرفته می شود و نسبت G/R_n معادل ۵/۰ در نظر گرفته می شود. به دلیل مشکل بودن برآورد مستقیم G ، اندازه‌های این سنجه به شکل نسبت G/R_n محاسبه شد و سپس با استفاده از اندازه‌های تابش خالص محاسبه شده، اندازه‌ی G به دست آمد. بسیاری از پژوهش‌ها نشان داده است که نسبت G/R_n در نیمه‌ی روز با استفاده از شاخص‌های گیاهی اندازه‌گیری شده به وسیله‌ی ماهواره مانند LAI با دقت زیاد قابل پیش‌بینی است. البته این شیوه در نواحی با تاج پوشش کم بی اعتبار است. می توان گفت علت این است که اگر خاک بدون گیاه و خشک باشد بخش بزرگی از انرژی صرف گرم کردن خاک می شود و دمای سطحی افزایش خواهد یافت. از آنجا که اندازه‌ی شار گرمای خاک تابعی از دمای سطحی می باشد با افزایش دمای سطحی خاک، تفاوت بین دمای خاک سطحی و زیرسطحی افزایش می‌یابد که این امر سبب افزایش اندازه‌ی شار گرمای خاک خواهد شد. بنابراین انتقال گرما درون خاک قسمت مهم‌تری از تابش خالص را در بر می‌گیرد.

شار گرمای محسوس^{۱۶}

شار گرمای محسوس از حساس‌ترین و پیچیده‌ترین مؤلفه‌های مدل است و می‌توان گفت که در مدل سبب به شکل کامل‌تری در مقایسه با سایر مدل‌ها به این مؤلفه توجه شده است. طی یک گروه فرضیه‌ها و با تعیین شرایط حدی، این مؤلفه براساس سنجه‌های سرعت باد، دمای هوا و دمای سطح زمین محاسبه می‌شود و به هر پیکسل تصویر ماهواره‌ای اختصاص می‌یابد. برآورد شار گرمای محسوس نیز سنجه‌های زیادی لازم دارد

در پیرامون ما گسیل مندی ۰/۹۵ دارند. گسیل مندی پدیده‌های ثبت شده در تصویرهای ماهواره‌ای را می‌توان براساس معادله‌های مختلفی محاسبه کرد. در این پژوهش گسیل مندی با استفاده از رابطه‌ی ۶ و در محیط نرم‌افزار ENVI برآورد شد.

$$LSE = (0.004 * FC) + (0.986) \quad (6)$$

LSE: گسیل مندی، FC: درصد پوشش گیاهی است.

بلندی پوشش گیاهی

بلندی متوسط پوشش گیاهی منطقه را نشان می‌دهد و از دیگر سنجه‌های ورودی به مدل سبب بود. این سنجه با استفاده از رابطه‌ی ۷ و براساس NDVI استخراج شد (پاک‌پرور ۲۰۱۵).

$$Ch = IFF(ndvi < 0.05, 0, (2.77 * ndvi - 0.13)) \quad (7)$$

Ch: بلندی پوشش گیاهی، ndvi: شاخص گیاهی تفاضلی بهنجار است.

مدل سبب

مدل سبب یک دستورالعمل سنجش‌ازدور است که براساس مفهوم بیان انرژی طراحی شده است و برای برآورد شارهای انرژی^{۱۱} از مشاهده‌های طیفی ماهواره^{۱۲} و اطلاعات هواشناسی استفاده می‌کند و نیازمند سه گروه داده‌های ورودی است. گروه اول شامل تولیدات تشعشع‌سنجی یک ماهواره مانند آلبیدوی سطحی، گسیلندگی سطحی^{۱۳} و دمای سطحی است. گروه دوم محتویات اطلاعات هواشناسی است که شامل دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد، ساعت آفتابی است. گروه سوم اطلاعات ورودی شامل پوشش گیاهی جزئی، شاخص سطح برگ و بلندی زبری^{۱۴} است (انکو ۲۰۰۹). اساس نظری و محاسبه‌ای مدل سبب، استفاده از معادله‌ی توازن انرژی (رابطه‌ی ۸) و محاسبه‌ی اندازه‌ی شار گرمای نهان تبخیر به‌عنوان باقی‌مانده‌ی این معادله برای هر پیکسل است (سو ۲۰۰۲).

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (8)$$

λET : شار گرمای نهان تبخیر (W/m^2)، R_n : شار تابش خالص، G : شار گرمای خاک و H : شار گرمای محسوس است. تشعشع خالص واقعی در سطح معرف انرژی تابشی سطحی است و با استفاده از رابطه‌ی ۹ موازنه‌ی شارهای تابشی خروجی و ورودی محاسبه می‌شود (سان و همکاران ۲۰۱۱).

11 - energy fluxes estimation

12 - satellite spectral observations

13 - surface emission

14 - roughness height

15 - soil heat flux=G

16 -sensible heat flux=H

و تعرق واقعی زمینی محاسبه شد. این سنجه با استفاده از معادله‌ی بیلان آب خاک محاسبه شد.

$$ET_a = Peff + I - RF \quad (14)$$

ETa: اندازه‌ی تبخیر-تعرق واقعی، Peff: اندازه‌ی بارندگی، I: اندازه‌ی آبیاری، RF: اندازه‌ی آب برگشتی کشاورزی است. اندازه‌ی ETa به‌دست آمده از این معادله، اندازه‌ی واقعی در نظر گرفته شد و با اندازه‌ی برآوردی مدل مقایسه شد. اندازه‌های ورودی آبیاری که در مزرعه‌ی برگزیده اندازه‌گیری شده بود نیز استفاده شد. اندازه‌ی بارش مؤثر با استفاده از رابطه‌ی ۱۵ محاسبه شد.

$$P_{eff} = 125 \frac{(125 - 0.2P)}{125} \text{ for } P \leq 250 \quad (15)$$

P_{eff}: باران مؤثر، P: اندازه‌ی باران ثبت‌شده در فصل کشت است.

بر این اساس ابتدا مزرعه‌ای با کشت گندم با مساحت پنج هکتار در بالادست عرصه‌ی پخش سیلاب بر آبخوان قره‌چریان انتخاب شد. پیش از شروع آبیاری و در حالی که خاک خشک بود، در سه نقطه‌ی مزرعه (ابتدا، وسط و انتها) در امتداد مسیر آبیاری با دو تکرار، به‌وسیله‌ی اگر از ژرفای صفر تا ۱۵۰ سانتی‌متری با فاصله‌های ۵۰ سانتی‌متر از خاک نمونه‌برداری شد و سپس اندازه‌ی رطوبت وزنی و جرم مخصوص ظاهری اندازه‌گیری شد.

در این پژوهش چون ژرفای نفوذ به‌دلیل وجود سخت کفه کمتر از ۷۰ سانتی‌متر بود در حقیقت اندازه‌ی آب برگشتی صفر بود و اندازه‌ی تبخیر و تعرق واقعی برابر مجموع آب آبیاری و بارش مؤثر برآورد شد.

نتایج و بحث

تهیه‌ی تصویرهای لازم

در این پژوهش از تصویرهای ماهواره‌ای لندست ۸ در بازه‌ی زمانی یک ساله (سال آبی ۱۳۹۹-۱۴۰۰) استفاده شد. منطقه‌ی قره‌چریان در دو ردیف و گذر ماهواره‌ی ۱۶۷۰۳۴ و ۱۶۶۰۳۵ بود. مشخصات تصویرهای گرفته‌شده مربوط به دوره‌ی آماری کشت گندم در جدول ۱ نشان داده شده است. پس از دریافت تصویرها، تصحیح‌های جوی روی آنها انجام شد. سپس با استفاده از نرم افزار ENVI و ILWIS اندازه‌های LAI، PV، Fc، NDVI، ALBEDO، بلندی گیاه، LSE و LST برای هر تصویر به‌دست آمد و نقشه‌ی آنها رسم شد.

که برخی از آنها از تصویرهای ماهواره‌ای و برخی دیگر از داده‌های هواشناسی تهیه می‌شود. یکی از مهم‌ترین سنجه‌های مؤثر بر شار گرمای محسوس، پوشش گیاهی است. با زیاد شدن پوشش گیاهی اندازه‌ی گرمای محسوس کاهش خواهد یافت. یعنی این شار در مناطقی که دمای سطحی آنها بیشتر است اندازه‌ی بیشتری دارد که در حقیقت نشان‌دهنده‌ی مناطق با پوشش گیاهی اندک است. اساس مدل سبب در چگونگی واسنجی تابع H برای هر تصویر خاص ماهواره‌ای با کاربردهای قبلی سیبال متفاوت است. در مدل سبب استفاده شده در این پژوهش اندازه‌ی H با استفاده از رابطه‌ی ۱۱ که یک تابع هواپویا است برآورد شد

$$H = \frac{\rho \cdot C_p \cdot dT}{r_{ah}} \quad (11)$$

p: چگالی هوا (kg/m³)، Cp: گرمای ویژه‌ی هوا در فشار ثابت (1004 J/kg/K)، dT: اختلاف دمای بین دو بلندی (Z₁ و Z₂) بر حسب درجه‌ی کلونین، r_{ah}: مقاومت هواپویای میان دو بلندی نزدیک سطح برای انتقال گرما (s/m) است.

با استفاده از مفاهیم دو حد خشک و تر، اندازه‌ی نسبت تبخیری^{۱۱} (EF) محاسبه می‌شود. در حد خشک فرض بر این است که خاک لخت و رطوبت آن حداقل است. بنابراین تبخیر به سمت صفر میل می‌کند. از این رو گرمای محسوس برابر تفاضل تشعشع و گرمای خاک خواهد بود با محاسبه H_{dry} و H_{wet} می‌توان نسبت تبخیری را با استفاده از رابطه‌ی ۱۲ محاسبه کرد.

$$EF = \frac{\lambda E}{(R_n - G)} = \frac{EF_r \times \lambda E_{wet}}{R_n - G} \quad (12)$$

حال که اندازه‌های R_n، G، EF_r و λE_{wet} معلوم است با جابه‌جا کردن معادله می‌توان مجهول λE را محاسبه کرد. اگر متوسط ۲۴ ساعته $\overline{R_n}$ از سنجه‌های روزانه‌ی هواشناسی محاسبه شود، با این آگاهی که اندازه‌ی متوسط ۲۴ ساعته G (\overline{G}) نیز نزدیک به صفر است، می‌توان تبخیر و تعرق روزانه با استفاده از رابطه ۱۳ برآورد شد.

ET_{daily}: تبخیر-تعرق واقعی (میلی‌متر در روز)، λ: نهان تبخیر (۵۴/۲ ژول بر کیلوگرم)، ρ_w: جرم حجمی آب (۱۰۰۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب) است.

$$ET_{daily} = 8.64 \times 10^7 \times EF \times \frac{\overline{R_n} - \overline{G}}{\lambda \rho_w} \quad (13)$$

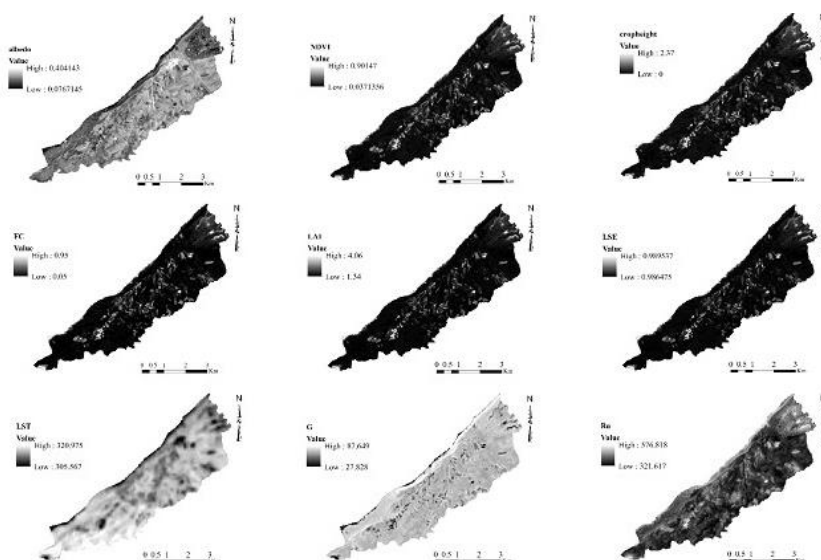
اندازه‌گیری تبخیر و تعرق با استفاده از بیلان آب خاک پس از محاسبه‌ی تبخیر و تعرق با مدل سبب، اندازه‌ی تبخیر

جدول ۱- مشخصات تصاویرهای لندست ۸ استفاده شده در محدوده مطالعه شده.

id	Solar date	AD data	Path and row	Julian day
1	1399.7.3	2020.9.24	167- 034	268
2	1399.7.19	2020.10.10	167- 034	284
3	99.7.28	2020.10.19	166- 035	293
4	99.11.11	2021.1.30	167- 034	30
5	99.11.27	2021.2.15	167- 034	46
6	99.12.29	2021.3.19	167- 034	78
7	1400.1.24	2021.4.13	166- 035	103
8	1400.1.31	2021.4.20	167- 034	110
9	1400.2.9	2021.4.29	166- 035	119
10	1400.2.25	2021.5.15	166- 035	135
11	1400.3.17	2021.6.7	167- 034	158
12	1400.4.2	2021.6.23	167- 034	174
13	1400.4.18	2021.7.9	167- 034	190
14	1400.5.3	2021.7.25	167- 034	206
15	1400.5.19	2021.8.10	167- 034	222
16	1400.6.4	2021.8.26	167- 034	238
17	1400.6.20	2021.9.11	167- 034	254

برگ^{۱۸}، بلندی پوشش گیاهی، تراکم تاج پوشش گیاهی بودند که در محیط نرم افزار ایلوپس تهیه شد (شکل ۲).

اجرای مدل سبب
ورودی های لازم مدل شامل آلبیدو، دمای سطح زمین، گسیلمندی، NDVI، شاخص پوشش گیاهی، شاخص سطح



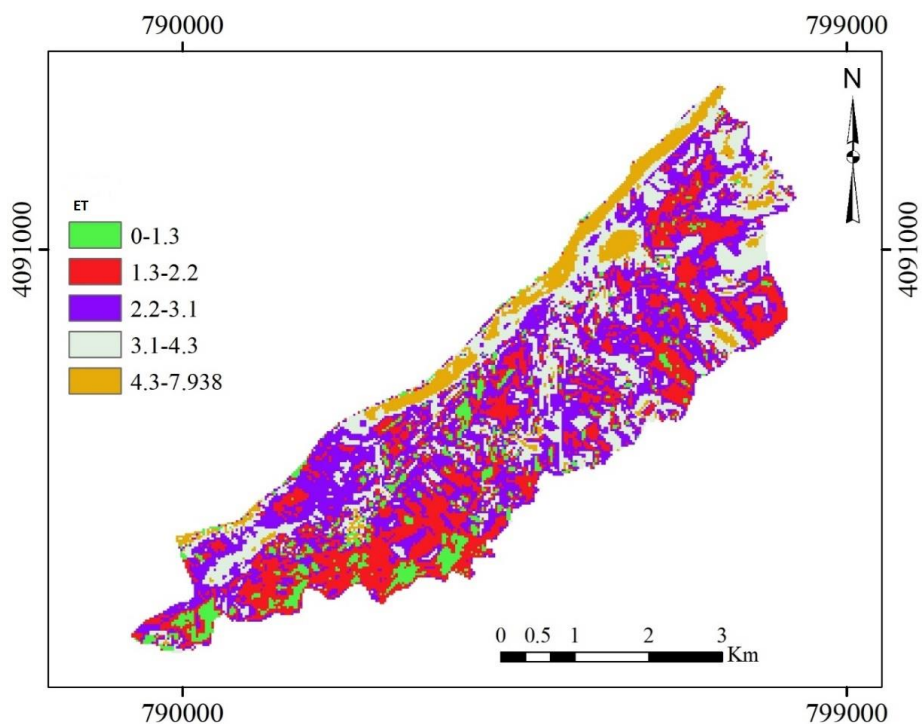
شکل ۲- تهیهی لایه های ورودی مدل سبب در تاریخ ۱۴۰۰/۴/۱۸.

Figure 2- Preparation of Sebs model input layers on 2021.7.9 date.

دوره ی سال آبی، نسبت میان ETa/ETo در مقاطع زمانی که تصویر داشتند، تعیین شد و این نسبت میان مقاطع زمانی برای تبدیل ETo به ETa استفاده شد. با تجمیع زمانی اندازه های روزانه ی ETa برای کل سال آبی محاسبه شد. با توجه به شکل ۳ دامنه ی تبخیر و تعرق در منطقه بستگی به درصد پوشش داشت. یعنی هرچه درصد پوشش گیاهی بیشتر باشد این اندازه نیز بیشتر خواهد بود. افزون بر درصد پوشش گیاهی زمان و فصل نیز بر اندازه ی

برآورد تبخیر و تعرق
از آنجا که تصویرهای ماهواره ای مربوط به مقاطع زمانی ۱۶ روزه بود و حتی در برخی از ماه ها به دلیل شرایط جوی و افزایش ابرناکی در آن تاریخ تصویر در دسترس نبود، این فاصله ی زمانی دو برابر شد. از طرف دیگر لازم بود که اندازه های تبخیر-تعرق روزهای میان این مقاطع نیز تعیین شود. به این منظور از اندازه های تبخیر-تعرق گیاه مرجع ETo استفاده شد (سو و همکاران ۲۰۰۸). با محاسبه ی این سنجه برای تمام

تبخیر و تعرق واقعی تأثیرگذار است. در این پژوهش با تبخیر و تعرق واقعی و تبخیر و تعرق در ماه‌های سرد و گرم سال برآورد اندازه‌ی تبخیر و تعرق در فصل‌های گرم اندازه‌ی تبخیر و تعرق افزایش می‌یابد.

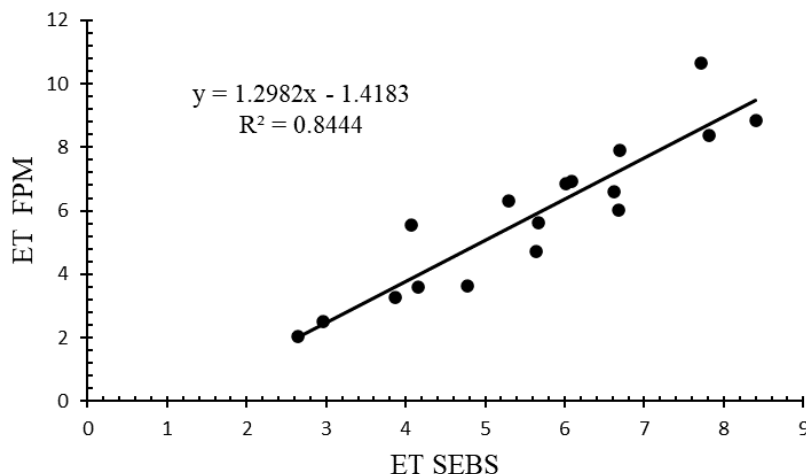


شکل ۳- نقشه‌ی تبخیر و تعرق واقعی برآوردشده با استفاده از مدل سبس در محدوده‌ی مطالعه‌شده در تاریخ ۱۴۰۰/۴/۱۸
Figure 3- Actual evapotranspiration map estimated using Sebs model of the studied area on 2021.7.9 date.

رابطه‌ی فائو پنمن مانیتیس اندازه‌گیری و میان‌یابی شد. سپس از تقسیم ET_a و ET_0 عدد واقعی ضریب گیاهی (K_c) به‌دست آمد. در ادامه با استفاده از درون‌یابی و برآورد ضریب گیاهی، تبخیر و تعرق واقعی برای کل روزهای سال برآورد شد. پس از برآورد تبخیر و تعرق متناظر مربوط به مدل سبس (ET_a) و روش پنمن مانیتیس (ET_0)، رابطه‌ی وایازی میان این دو سنجه تعیین شد که نتیجه بیان‌گر وجود ضریب تبیین زیاد ($R^2=0.844$) بین این دو بود (شکل ۴).

واسنجی مدل

برآورد تبخیر-تعرق واقعی روزانه با استفاده از دستورالعمل سبس تنها در روزهایی که تصویرهای آن گرفته شده بود، انجام شد. برای تعیین تبخیر-تعرق واقعی سایر روزها تبخیر و تعرق مرجع (ET_0) با استفاده از روش پنمن مانیتیس محاسبه شد. سپس برای روزهای متناظر تبخیر و تعرق برآوردی از مدل سبس و روش پنمن مانیتیس، ضریب گیاهی (K_c) برآورد شد. به‌این منظور اعداد میان دو عدد ET_a به‌دست آمده از تصویر ماهواره‌ای محاسبه شد و ET_0 تصویرهای مد نظر با استفاده از



شکل ۴- نمودار رابطه‌ی میان تبخیر و تعرق مرجع (ET0) و تبخیر و تعرق واقعی به‌دست آمده از مدل سبیس (ETa).

Figure 4- The relationship between reference evapotranspiration (ET0) and actual evapotranspiration resulting from Sebs model (ETa).

میانگین قدرمطلق خطا (MAE) و میانگین اریبی خطا (MBE) واسنجی شد. اندازه‌های این سه شاخص به‌ترتیب ۰/۸۴۴، ۱/۰۶، ۱/۱۲ و ۰/۲۵ محاسبه شد (جدول ۲). نتایج نشان داد که دستورالعمل سبیس برای برآورد ETa در منطقه‌ی مطالعه‌شده دقت لازم را داشت (آلن ۲۰۰۷؛ انکو ۲۰۰۹؛ پاک‌پرور ۲۰۱۵؛ مک کاب و وود ۲۰۰۶؛ وندواست و همکاران ۲۰۰۹؛ لوو و همکاران ۲۰۱۳).

مقایسه‌ی میان اندازه‌های برآورد شده به‌وسیله‌ی دستورالعمل سنجش‌ازدور سبیس و تبخیر و تعرق بالقوه فائو پنمن - مانتیث نشان داد که میان اندازه‌های برآورد شده به‌وسیله‌ی این دستورالعمل و روش فائو پنمن - مانتیث ضریب تبیین زیادی بود ($R^2=0.844$). همچنین نتایج نشان داد که مدل سبیس در برآورد تبخیر و تعرق واقعی دقت زیادی داشت. افزون بر این نتایج مدل سبیس و تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از سه شاخص آماری ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE)،

جدول ۲- محاسبه‌ی شاخص‌های آماری ارزیابی نتایج مدل سبیس.

Table 2- Calculation of statistical indicators for evaluating the results of Sebs model.

id	date	ET0 FPM	ET SEBS	R ²	MAD	MSE	RMSE
1	2020.9.24	5.55797	4.073				
2	2020.10.10	2.503595	2.959				
3	2020.10.19	3.253535	3.871				
4	2021.1.30	2.019262	2.65				
5	2021.2.15	3.592898	4.15				
6	2021.3.19	3.629282	4.77				
7	2021.4.13	6.301774	5.29				
8	2021.4.20	5.604182	5.67				
9	2021.4.29	4.698033	5.64	0.844	0.25	1.12	1.06
10	2021.5.15	6.920953	6.084				
11	2021.6.7	6.615086	6.62				
12	2021.6.23	10.64675	7.716				
13	2021.7.9	7.885473	6.696				
14	2021.7.25	8.858867	8.4				
15	2021.8.10	8.384	7.82				
16	2021.8.26	6.037106	6.67				
17	2021.9.11	6.838003	6.02				

ذکر است در منطقه‌ی مطالعه‌شده با توجه به نبود نفوذ عمقی آب آبیاری به‌دلیل وجود سخت‌کفه آهکی و نبود آب برگشتی، اندازه‌ی تبخیر و تعرق واقعی برابر با مجموع آب آبیاری و بارش مؤثر در نظر گرفته شد.

$$\text{درصدخطا} = \frac{ET_{sebs} - ET_a}{ET_{sebs}} * 100 = \frac{28750 - 24115}{28750} * 100 = 16.12$$

اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی نتایج لازم بود که با داده‌های واقعی زمینی مقایسه شوند. در این پژوهش برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی زمینی از معادله‌ی بیان آب خاک (رابطه ۱۴) استفاده شد. بر این اساس اندازه‌ی تبخیر و تعرق به‌دست آمده از مدل سبیس با تبخیر و تعرق به‌دست آمده از مدل بیان آب خاک مقایسه شد و ضریب خطا ۱۶/۱۲٪ به‌دست آمد (جدول ۳). لازم به

این درصد خطا نشان داد که دستورالعمل سبس برای برآورد ETa در منطقه‌ی مطالعه شده دقت لازم را داشت.

جدول ۳- مقایسه‌ی نتایج مدل بیلان آب خاک و مدل سبس در منطقه‌ی مطالعه شده.

Table 3- Comparing the results of Soil Water Balance model and Sebs model in the study area.

Volume of irrigation water (m ³)	Effective precipitation (m ³)	ET Water Balance model (m ³)	Evapotranspiration – Sebs model (m ³)
20165	3950	24115	28750

نتیجه‌گیری

بنابراین براساس نتایج این پژوهش می‌توان گفت که استفاده از تصویرهای ماهواره‌ای در برآورد تبخیر-تعرق واقعی، در مقایسه با روش برداشت میدانی قابل اتکا است و با توجه به مشکلات روش‌های بیلان رطوبتی (مانند نقطه‌ای بودن، زمان‌بر بودن، هزینه زیاد، آسیب دیدن درخت، نیاز به ابزار دقیق و تقریباً نبود امکان استفاده از لایسیمتر) و مزایای استفاده از تصویرهای ماهواره (تحت پوشش دادن سطح گسترده‌ای از مزارع یا باغ‌ها، ارزان و سریع بودن) در برآورد تبخیر-تعرق می‌توان با پذیرفتن خطای کم نتایج قابل قبولی به دست آورد.

با توجه به نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود از لایسیمتر و فلاکس‌تاور برای اندازه‌گیری‌های زمینی استفاده شود تا امکان واسنجی کردن سنجه‌های ورودی مدل سبس شامل آلبیدو سطحی، دمای سطحی، شارهای تابش خالص، گرمای خاک، گرمای محسوس و دیگر سنجه‌ها فراهم شود و موجب کاهش خطا در برآورد تبخیر و تعرق واقعی شود. از طرف دیگر به منظور بهبود قدرت تفکیک زمانی نقشه‌های تبخیر-تعرق به دست آمده از تصویرهای ماهواره‌ای سنجنده لندست (۱۶ روز)، پیشنهاد می‌شود از تصویرهای سنجنده‌هایی با بازه زمانی کوتاه‌تر مانند مودیس و روش‌های ریز مقیاس کردن استفاده شود.

سپاس‌گزاری

این پژوهش در قالب طرح تحقیقاتی با کد مصوب ۹۷۰۵۹۲-۰۲۶-۲۹-۴۷-۰ پژوهشکده‌ی حفاظت خاک و آبخیزداری انجام شد. نویسندگان این مقاله از دست اندرکاران به‌ویژه از پشتیبانی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، پژوهشکده‌ی حفاظت خاک و آبخیزداری و اداره کل هواشناسی استان زنجان صمیمانه قدردانی می‌کنند.

در این پژوهش سعی شد تا اندازه‌های تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از مدل توازن انرژی سبس و به شکل پیکسل به پیکسل در زمان دریافت تصویر ماهواره‌ای و برای هر تصویر محاسبه شود. هدف این پژوهش تعیین اندازه‌ی تبخیر-تعرق واقعی با کمک دستورالعمل سبس در آبخیز عرصه‌ی پخش سیلاب بر آبخیز قره-چریان استان زنجان بود که برای مدیریت بهینه‌ی منابع آب در این عرصه است. براساس نتایج و با وجود تفاوت‌های اندک در دو روش سبس و فائو پنمن مانیتیت استفاده شده، مشخص شد تبخیر-تعرق واقعی به دست آمده از مدل سبس در مقایسه با تبخیر-تعرق بالقوه به دست آمده از معادله‌ی فائو پنمن-مانتیس، تفاوت معنی‌داری نداشت و در این پژوهش مدل سبس دقت لازم برای برآورد تبخیر و تعرق را داشت. نتیجه‌ی این پژوهش نشان داد که افزون بر کارایی این دستورالعمل در مدیریت منابع آب در مقیاس آبخیز در شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک ایران می‌توان از آن در تعیین نیاز آبی محصولات مختلف تحت تنش‌های محیطی مختلف نیز بهره‌ی کافی را برد. افزون بر این مقایسه‌ی نتایج این دو روش و محاسبه‌ی میانگین ضریب تبیین، MAD، MSE و RMSE به ترتیب ۰/۸۴، ۰/۲۵، ۱/۱۲ و ۱/۰۶، میان نتایج دستورالعمل سبس و فائو پنمن مانیتیت نشان داد که دستورالعمل سبس کارایی مناسبی برای تعیین تبخیر و تعرق در منطقه‌ی مطالعه شده داشت. برای اعتبارسنجی، این نتایج با داده‌های واقعی زمینی به دست آمده از معادله‌ی بیلان آب خاک مقایسه شد. بر این اساس اندازه‌ی تبخیر و تعرق به دست آمده از مدل سبس با تبخیر و تعرق به دست آمده از مدل بیلان آب خاک مقایسه شد و ضریب خطا ۱۶/۱۲٪ به دست آمد. نتایج نشان داد که مدل سبس برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی اعتبار لازم را داشت.

فهرست منابع

- Allen RG, Pereira LS, Howell TA, Jensen ME. 2011. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*. 98 (6):899-920. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.015>.
- 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 (4):380-394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380)).
- Allen R G, Burnett B, Kramber W, Huntington J, Kjaersgaard J. 2013. Automated calibration of the METRIC-Landsat evapotranspiration process. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 49 (3):563-576. <https://doi.org/10.1111/jawr.12056>.
- Babajafari H, Paimozd S, Moghaddasi M. 2018. Estimation of actual evapotranspiration in the Urmia Lake Watershed using SEBS remote sensing algorithm and NOAA satellite images. *Iranian Journal of Ecohydrology*. 5(4):1285-1296. (In Persian). 10.22059/IJE.2018.258554.888.
- Bolhasani K, Zarei H, Taghizadeh A. 2022. Estimation and calculation of actual evapotranspiration using SEBS energy balance model and Landsat 8 Satellite imagery (Case study: Bakhtegan-Maharlo Basin). *Irrigation and Water Engineering*. 12(4): 292-309. (In Persian). 10.22125/IWE.2022.150748.
- Enku T. 2009. Estimation of evapotranspiration from satellite remote sensing and meteorological data over the Fogera Floodplain-east of Lake Tana, in northwest Ethiopia. *International Institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC), Enschede, The Netherlands, MSc. Thesis*. 101 p. <https://purl.utwente.nl/essays/93088>
- Fakhar MS, Kaviani A. 2022. Comparison and study of the role of PYSEBAL and SEBS algorithms in estimating actual evapotranspiration in Qazvin Plain. *Water and Irrigation Management*. 12(2):277-293. (In Persian). 10.22059/JWIM.2022.338119.961.
- Hailegiorgis WS. 2006. Remote sensing analysis of summer time evapotranspiration using SEBS algorithm. *International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Enschede, The Netherlands, MSc thesis*. 130 p.
- Jia D, Kaishan S, Zongming W, Bai Z, Dianwei L. 2013. Evapotranspiration estimation based on MODIS products and surface energy balance algorithms for land (SEBAL) model in Sanjiang Plain, Northeast China. *China Geographical Science*. 23(1):73-91. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11769-013-0587-8>.
- Lin W, van de Velde R, Su Z. 2006. Satellite based regional scale evapotranspiration in the Hebei Plain, Northeastern China. *Proceedings of Dragon*. 1(1):2004-2007.
- Lu J, Li ZL, Tang R, Tang BH, Wu H, Yang, F, Zhou G. 2013. Evaluating the SEBS-estimated evaporative fraction from MODIS data for a complex underlying surface. *Hydrological Processes*. 27(22): 3139-3149. <https://doi.org/10.1002/hyp.9440>
- 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. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11119-015-9395-8>.
- McCabe MF, Wood EF. 2006. Scale influences on the remote estimation of evapotranspiration using multiple satellite sensors. *Remote Sensing of Environment*. 105 (4): 271-285. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.006>.
- Mohamed A. 2010. Remote sensing based esti-

- mation of evaporation among different land cover types in the Mkindo Catchment. Upper Wami Basin-Tanzania. M.Sc. Thesis in IWRM . 65 p.
- Nisa Z, Khan MS, Govind A, Marchetti M, Lasserre B, Magliulo E, Manco A. 2021. Evaluation of SEBS, METRIC-EEFlux, and Qwater Model actual evapotranspiration for a mediterranean cropping system in southern Italy.-Agronomy.11(2): 345 p. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020345>.
- Pakparvar M, Cornelis W, Pereira LS, Gabriels D, Hosseinimarandi H. 2014. Remote sensing estimation of actual evapotranspiration and crop coefficients for a multiple land use arid landscape of southern Iran with limited available data. Journal of Hydroinformatics. 16 (6):1441-1460. <https://doi.org/10.2166/hydro.2014.140>.
- Pakparvar M. 2015 Evaluation of floodwater spreading for groundwater recharge in Gareh Bygone Plain, Southern Iran. In Soil Management Dept., Faculty of Bioscience Engineering. Ghent University, Ghent, Belgium. 252 p. <http://hdl.handle.net/1854/LU-6997248>.
- Payandeh H. 2021. Master's thesis in remote sensing and geographic information system, Yazd University. 138 p. (In Persian).
- Qahari Gh, Pakparvar M. 2021. Determining the water consumption of different types of vegetation with energy balance models and remote sensing in Dasht Garbaigan. Final Report of the Research Project. 92 p. (In Persian).
- Rwasoka D, Gumindoga W, Gwenzi J. 2011. Estimation of actual evapotranspiration using the surface energy balance system (SEBS) algorithm in the upper Manyame Catchment in Zimbabwe. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. 36(14-15):736-746 . <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.07.035>.
- Singh RK, Senay GB. 2015. Comparison of four different energy balance models for estimating evapotranspiration in the Midwestern United States. Water. 8(1): 1-19. <https://doi.org/10.3390/w8010009>.
- Su H, McCabe MF, Wood EF, Su Z, Prueger JH. 2005. Modeling evapotranspiration during SMACEX: Comparing two approaches for local-and regional-scale prediction..Journal of hydrometeorology.6(6): 910-922. <https://doi.org/10.1175/JHM466.1>.
- Su Z, Timmermans W, Gieske A, Jia L, Elbers JA. 2008. Quantification of land-atmosphere exchanges of water, energy and carbon dioxide in space and time over the heterogeneous Barrax Site. International Journal of Remote Sensing. 29 (17-18): 5215-5235. <https://doi.org/10.1080/01431160802326099>.
- Su z. 2002. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. Hydrology and Earth System Sciences. 6 (1): 85-100.
- Sun Z, Wei B, Su W, Shen W, Wang C, You D, Liu Z. 2011. Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi LakeWetland of China. Mathematical and Computer Modelling. 54 (3-4):1086-1092. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.11.039>.
- Van der Kwast J, Timmermans W, Gieske A, Su Z, Olioso A, Jia L, 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).Hydrology and Earth System Sciences,13(7): 1337-1347. <https://doi.org/10.5194/hess-13-1337-2009>.



Evaluation and Calibration of SEBS Surface Energy Balance Model in Determining Evapotranspiration of Plains Affected by Flood Spreading (Qaracherian-Zanjan Province)

Ghobad Roostamizd ^{*1}, Mojtaba Pakparvar ², Parviz Abdinejhad ³

1 and 3- Assistant Professor of Soil Conservation and Watershed Management Department, Zanjan Agricultural and Natural Resources Research Center, AREEO, Zanjan, Iran

2- Assistant Professor of Soil Conservation and Watershed Management Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research Center, AREEO, Shiraz, Iran

Extended Abstract

Introduction and Objective:

Evapotranspiration govern the water and energy balance of the soil, primarily used in general circulation models and hydrological modeling of weather conditions. Consequently, predicting river flow, forecasting crop performance, water management systems, and the quality of rivers or lakes all depend on evapotranspiration levels. Therefore, accurate estimation of water bilan is essential. Improved and precise estimations of evapotranspiration enable effective irrigation planning and optimal water usage for other agricultural purposes. The goal of this research is to evaluate and validate the surface energy balance model, SEBS, in determining evaporation-transpiration in the Sohrin-Qareh Chiran Plain, located 30 kilometers northwest of Zanjan city.

Materials and methods:

In this study, the actual evapotranspiration were determined using the SEBS energy balance model and Landsat imagery in the Sohrin-Qareh Chiran Plain. A total of 17 Landsat-8 images, along with weather data from the Zanjan airport station, were examined. Additionally, with the help of the SEBS model, the evapotranspiration of a five-hectare wheat field was calculated and validated for the time period from September 22, 2020, to September 22, 2021. The required inputs for the SEBS

Article Type: Research Article

*Corresponding Author E-mail: Roostamizad60@gmail.com

Citation: Roostamizd, GH., Pakparvar, M., Abdinejhad, P. 2023. Evaluation and calibration of SEBS surface energy balance model in determining evapotranspiration of plains affected by flood spreading (Qaracherian-Zanjan Province). *Watershed Management Research*. 36(3): 17-31.

DOI: 10.22092/WMRJ.2023.360611.1503

Received: 17 November 2022, **Received in revised form:** 25 December 2022, **Accepted:** 19 March 2023,

Published online: 22 December 2023

Watershed Management Research, VOL. 36, No.4, Ser. No: 141, Winter 2024, pp. 17-31.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center ©Author(s)



model, including albedo, land surface temperature, emissivity, NDVI, vegetation cover index, leaf area index, vegetation height, and canopy density, were prepared in the ENVI software environment. The data on precipitation and water consumption volume were also determined using the soil water balance model.

Results and discussion:

The study found that the evapotranspiration estimated by the soil water balance model was 24115 m³, while the evapotranspiration estimated by the SEBS model was 28750 m³, with a 16.12% error. Additionally, the SEBS model was calibrated using four indices - R², RMSE, MAE, and MBE - with values of 0.844, 1.06, 1.12, and 0.25, respectively. These results indicate that the SEBS algorithm is accurate enough to estimate ET_a in the study area.

Conclusion and Suggestions:

Therefore, based on the results of this research, it can be said that the use of satellite images in estimating actual evapotranspiration (ET) is reliable compared to field measurement methods. Considering the limitations of traditional moisture balance methods (such as being point-specific, time-consuming, costly, requiring precise instruments, and almost impractical with the use of lysimeters) and the advantages of utilizing satellite images (covering a wide area of farms or orchards, being cost-effective and fast), acceptable results can be achieved in estimating evapotranspiration while accepting a low margin of error.

Key words: Satellite images, Soharin plain, remote sensing, soil water balance model