




Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

 [https:// doi.org/10.22067/jgrd.2023.82588.1291](https://doi.org/10.22067/jgrd.2023.82588.1291)

## **Estimation of Actual Evapotranspiration of Pasture Plants using SEBAL Algorithm (Research-Case Study: Ahar County)<sup>1</sup>**

**Jalal Golreyhan**

*PhD student of Climatology, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran*

**Karim Amininia<sup>2</sup>**

*Assistant Professor of Climatology, Department of Geography, Faculty of Humanities, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran*

**Khalil Valizadeh Kamran**

*Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Planning and Environmental Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran*

*Received: 8 June 2023*

*Revised: 9 August 2023*

*Accepted: 17 August 2023*

### **Abstract**

This study tried to calculate the actual evapotranspiration rate of thyme, mint, and alfalfa pastures using the SEBAL method in the Ahar region, which is located in the south of Arsbaran forests and has numerous pastures of different species. For this purpose, 6 Landsat-8 satellite images (between 2017 and 2020), belong to early and late period of growth, were used. The results were compared with the findings obtained by Penman-Monteith method. The results showed that, based on the SEBAL method, the mint crop had the lowest rate of evapotranspiration in the initial period of crop growth on 2021/5/29, with a numerical value of 2.84 mm per day, and the alfalfa crop also in the initial crop growth period on 2019/6/11 had the highest rate of evapotranspiration with a numerical value of 3.49 mm per day. Moreover, in the final period of growth in the SEBAL method, the mint crop on 2018/8/28 had the lowest rate of evapotranspiration with a numerical value of 6.18 mm per day, and the thyme crop had the highest

---

1. This article is an extract of PhD dissertation entitled Transpiration and Determining the Water required for Pasture Plants of Ahar County Using SEBAL and Satellite Image Processing, defended at Islamic Azad University, Ahar Branch, Ahar, Iran.


2. Corresponding author. Email: karimamininia@gmail.com

evapotranspiration rate in the final product growth period on 2022/7/19, with a numerical value of 7.41 mm per day. Finally, based on the comparisons made between the studied methods in the early and late periods of growth in terms of square-mean error, mean absolute deviation, and coefficient of determination, it can be concluded that the SEBAL method compared to the Penman-Monteith method has an acceptable error rate (RMSE of 0.717, MAD of 0.658, and the coefficient of determination of 0.84 mm per day).

**Keywords:** Evapotranspiration, SEBAL, Pasture, Water requirement, Ahar County.



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

 <https://doi.org/10.22067/jgrd.2023.82588.1291>

مقاله پژوهشی-مطالعه موردی

مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، سال بیست و یکم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، شماره پیاپی ۴۴

## برآورد تبخیر و تعرق واقعی گیاهان مرتعی با الگوریتم SEBAL

(مطالعه موردی: شهرستان اهر)<sup>۱</sup>

جلال گل ریحان (دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران)

[jalalgolreyhan150@gmail.com](mailto:jalalgolreyhan150@gmail.com)

کریم امینی‌نیا (استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر،

ایران، نویسنده مسئول)

[karimaminini@gmail.com](mailto:karimaminini@gmail.com)

خلیل ولیزاده کامران (استاد، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز،

تبریز، ایران)

[valizadeh@tabrizu.ac.ir](mailto:valizadeh@tabrizu.ac.ir)

صص ۱۹۷ - ۱۶۹

### چکیده

در این پژوهش سعی شد در منطقه اهر که جنوب جنگل‌های ارسباران قرار گرفته و دارای مراتع بی‌شماری از گونه‌های مختلف است، میزان تبخیر و تعرق واقعی مراتع آویشن، نعناع و یونجه با استفاده از روش SEBAL محاسبه شود. برای این کار از ۶ تصویر ماهواره لندست ۸ بین سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ که در دوره اولیه و پایانی رشد قرار داشتند، استفاده شد و نتایج با روش پنمن مانیتث مقایسه شد. نتایج بیانگر

---

<sup>۱</sup> این مقاله برگرفته از رساله دکتری نویسنده اول با عنوان «برآورد تبخیر و تعرق واقعی و تعیین نیاز آبی گیاهان مرتعی با الگوریتم SEBAL و پردازش تصاویر ماهواره ای در شهرستان اهر است که در دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر انجام شد.

آن بود که براساس روش سبال، محصول نعنا در دوره اولیه رشد محصول به تاریخ ۲۰۲۱/۵/۲۹ کمترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ۲/۸۴ میلی‌متر در روز و محصول یونجه نیز در دوره اولیه رشد محصول به تاریخ ۲۰۱۹/۶/۱۱ بیشترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ۳/۴۹ میلی‌متر در روز داشته است. همچنین در دوره پایانی رشد در روش سبال، محصول نعنا در تاریخ ۲۰۱۸/۸/۲۸ کمترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ۶/۱۸ میلی‌متر در روز و محصول آویشن نیز در دوره پایانی رشد محصول به تاریخ ۲۰۲۲/۷/۱۹ بیشترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ۷/۴۱ میلی‌متر در روز داشته است. در نهایت براساس مقایسه‌های انجام گرفته، میان روش‌های مورد مطالعه در دوره اولیه و پایانی رشد از نظر مجذور میانگین مربعات خطا، میانگین انحراف مطلق و ضریب تعیین، می‌توان چنین نتیجه گرفت که روش سبال در مقایسه با روش پنمن مانیتث دارای میزان خطا با RMSE برابر با ۰/۷۱۷، MAD برابر با ۰/۶۵۸ و ضریب تعیین ۰/۸۴ میلی‌متر در روز بوده که قابل قبول است.

کلیدواژه‌ها: تبخیر و تعرق، SEBAL، مرتع، نیاز آبی، شهرستان اهر.

#### ۱. مقدمه

شهرستان اهر به‌عنوان مرکز منطقه ارسباران (نام محلی قره داغ)، به دلیل پوشش گیاهی متنوع منطقه مناسبی برای مطالعه گیاهان مرتعی است؛ از این رو برآورد دقیق تبخیر و تعرق نقش مهمی در تعیین کمیت تعادل آب در حوزه آبخیز و برنامه‌ریزی و مدیریت بهتر منابع آب دارد. کمی‌سازی دقیق تبخیر و تعرق در نیاز آبی کشاورزی برای بهینه‌سازی تولید محصول، برنامه‌ریزی برای تخصیص آب، مدیریت آبیاری، ارزیابی اثرات تغییر کاربری زمین بر عملکرد آب، توسعه بهترین شیوه‌های مدیریتی برای به حداقل رساندن تخریب آب‌های سطحی و زیرزمینی و ارزیابی اثرات استفاده از زمین و شیوه‌های مدیریت بر منابع آب و کیفیت محیط‌زیست، حیاتی است. به‌طور کلی، روش‌های برآورد تبخیر و تعرق را می‌توان به سه بخش اصلی تقسیم کرد: (۱) مشاهدات میدانی با تجهیزات ثابت؛ مانند لایسیمتر، برج‌های

جریان و سینتیلومترهای دهانه بزرگ (لاگ و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۳، لوئی و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۲۰، والیام کوننات<sup>۳</sup>، ۲۰۱۸)؛ (۲) روش‌های محاسبه مبتنی بر آب و هوا (آلن و همکاران<sup>۴</sup>، ۱۹۹۸؛ هوو و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۰۹؛ کوئی و همکاران<sup>۶</sup>، ۲۰۱۹)؛ (۳) مدل‌های تبخیر و تعرق مبتنی بر سنجش از دور (لاپلت و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۲۱). در بین روش‌های اشاره‌شده روش مشاهده میدانی می‌تواند در صورتی که به‌صورت پیوسته مشاهده شود و تغییرات سری زمانی ارائه دهد، دقیق‌ترین میزان تبخیر و تعرق را ارائه دهد؛ با این حال، این روش در مقیاس میدانی عمل کرده و قادر به ارائه اطلاعات دقیق منطقه‌ای نیست. روش مبتنی بر آب و هوا که توسط مبنای نظری قوی پشتیبانی می‌شود، می‌تواند تبخیر و تعرق در مقیاس بزرگ را زمانی که اطلاعات آب و هوا و گیاه در دسترس باشد، تخمین بزند. متأسفانه این روش دارای محدودیت‌هایی در تخمین تبخیر و تعرق برای مناطقی است که داده‌های اولیه کافی یا سایر معیارها ندارند و پیش‌بینی مرحله محصول خاص یک کار چالش‌برانگیز در مقیاس بزرگ است (آلن و همکاران<sup>۸</sup>، ۲۰۰۷، مک‌شانه و همکاران<sup>۹</sup>، ۲۰۱۷)؛ بنابراین در نهایت با توجه به چالش‌های موجود در زمینه تخمین تبخیر و تعرق در مناطق بزرگ، بسیاری از صاحب‌نظران روش‌های سنجش از دوری را پیشنهاد کردند که یکی از این روش‌ها مدل سبال است که به ورودی کمی از داده‌های زمینی برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی در هر پیکسل نیاز دارد و می‌تواند تبخیر و تعرق واقعی را برای مناطق بزرگ تخمین بزند؛ بر همین اساس پژوهش‌های زیادی در این زمینه در ایران و جهان انجام شده است که در ادامه به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌شود.

یانگ و همکاران<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۸) در شمال غرب چین به ارزیابی راندمان ذخیره آب با استفاده از الگوریتم سبال پرداختند. آن‌ها این نتیجه رسیدند که بهترین راه مدیریت آب در مناطق

1. Lage
2. Liu
3. Valayamkunnath
4. Allen
5. Hu
6. Qiu
7. Laipelt
8. Allen
9. McShane
10. Yang

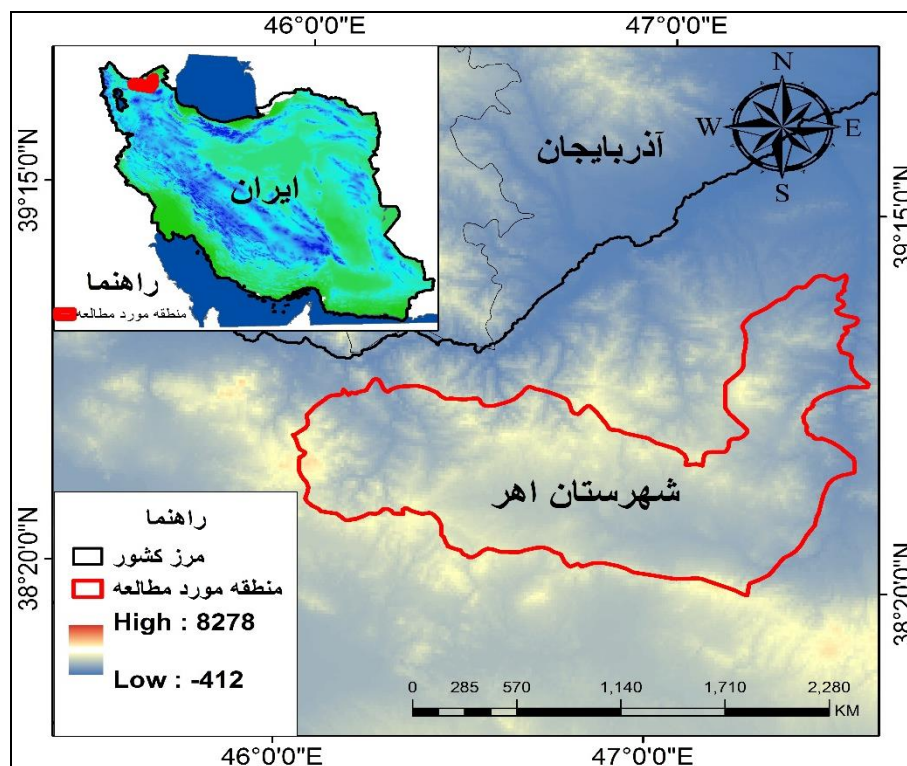
خشک کشور چین افزایش بهره‌وری آب و همچنین کنترل و محدودسازی احیا بی‌رویه مزارع کشاورزی است. سیلوا و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۸) به برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از روش سبال و تصاویر لندست ۸ پرداختند. آن‌ها در این پژوهش مقادیر برآوردی تبخیر و تعرق از روش سبال را با روش پنمن مانیتث فائو مقایسه کردند که میزان اختلاف آن‌ها کمتر از ۱ میلی‌متر در روز بود. اسدی و همکاران (۲۰۲۰) به برآورد میزان تبخیر و تعرق واقعی گیاه نخود با استفاده از الگوریتم سبال کوهستانی پرداختند. براساس نتایج، سطوح آبی با مقدار ۹/۶۱ و ۹/۵۰ میلی‌متر در روز دارای بیشترین و اراضی شهری و بایر با مقدار میانگین ۲/۸۴۵ و ۲/۰۸ میلی‌متر در روز به ترتیب در روش‌های سبال و سبال کوهستانی دارای کمترین میزان تبخیر و تعرق واقعی ۲۴ ساعته هستند. میزان نیاز آبی محصول نخود نیز به ترتیب ۷/۱۴ و ۶/۷۰ میلی‌متر در روز برای روش‌های سبال و سبال کوهستانی برآورد شد و با روش پنمن مانیتث با مقدار ۶/۳۲ میلی‌متر در روز مقایسه شد که دارای میانگین تفاضل مطلق ۰/۶۰ است. اسدی و کامران (۲۰۲۲) برای ارزیابی تبخیر و تعرق واقعی گندم از روش‌های سنجش از دوری و تصاویر لندست در پارس‌آباد مغان استفاده کردند. نتایج نشان داد که بیشترین میزان تبخیر و تعرق واقعی محصول گندم در طول دوره توسعه مربوط به سال ۱۳۹۷ (۷/۸۶ میلی‌متر در روز) در روش آلام و کمترین میزان در دوره اواسط رشد مربوط به سال ۱۳۹۶ (۰/۳۲ میلی‌متر در روز) در روش متریک است. اسدی و کامران (۲۰۲۳) براساس الگوریتم تعادل انرژی به برآورد نیاز آبی محصولات انتخاب‌شده در نیمه شمالی استان اردبیل پرداختند. در این پژوهش، از تصاویر لندست ۷ و ۸ و روش‌های سبال و سبس برای برآورد نیازی آبی محصولاتی مانند گندم، جو، یونجه، عدس و نخود استفاده شد. نتایج نشان داد که محصول گندم در سال ۲۰۱۸ با مقدار عددی ۱/۵۲ میلی‌متر در روز در روش سبال و ۱/۰۹ میلی‌متر در روش سبس کمترین میزان و محصول عدس در سال ۲۰۱۳ با مقدار عددی ۷/۸۶ و ۸/۱۴ میلی‌متر در روز بیشترین میزان تبخیر و تعرق را در بین محصولات بررسی شده داشتند. با توجه به سوابق پژوهش و پیامدهای مهمی که تغییرات تبخیر و تعرق کاربری‌ها و محصولات در چرخه هیدرولوژی و در چرخه زندگی انسان دارد، هدف اصلی پژوهش حاضر، برآورد

تبخیر و تعرق واقعی گیاهان مرتعی در شهرستان اهر با الگوریتم SEBAL است که برای توسعه پایدار و حفاظت از مراتع منطقه مذکور اهمیت دارد و نیاز است که با آگاهی از میزان تبخیر و تعرق واقعی آن و مدیریت صحیح منابع آبی از نابودی گیاهان مرتعی منطقه جلوگیری شود.

## ۲. روش‌شناسی تحقیق

### ۲.۱. منطقه مورد مطالعه

شهرستان اهر با اقلیمی نیمه‌خشک و سرد و با مساحتی بالغ بر  $3073/93$  کیلومترمربع در شمال استان آذربایجان شرقی و شمال غرب کشور ایران قرار دارد. این شهرستان از نظر مختصات جغرافیایی بین عرض جغرافیایی  $38$  درجه و  $18$  دقیقه تا  $39$  درجه  $6$  دقیقه شمالی و طول جغرافیایی  $45$  درجه  $59$  دقیقه تا  $47$  درجه و  $34$  دقیقه طول شرقی قرار گرفته است. شهرستان اهر از سمت جنوب به شهرستان هریس، از شمال به شهرستان کلیبر، از سمت غرب به شهرستان ورزقان و از سمت شرق به استان اردبیل محدود می‌شود.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۲

## ۲.۲. تصاویر ماهواره‌ای

در این پژوهش برای تخمین تبخیر و تعرق واقعی گیاهان مرتعی مانند آویشن، نعناع و یونجه (دلیل استفاده از گیاهان مطروحه سطح زیر کشت بالا و کسرت استفاده آن در منطقه است) از تصاویر لندست ۸ OLI در ردیف ۰۳۳ و قطعه ۱۶۸ با زمان گذر ۰۷:۳۲ دقیقه که در بین سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۲ قرار داشت و بدون ابر بودند (برای منطقه مورد مطالعه) استفاده شد. مشخصات تصاویر استفاده شده در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین از داده‌های هواشناسی دمای حداقل، دمای حداکثر، دمای نقطه شبنم، سرعت باد و ساعات آفتابی نیز که برگرفته از ایستگاه اهر بود، استفاده شد که مشخصات آن در جدول ۲ برای سال‌های مورد بررسی ارائه شده است.



## جدول ۱. تصاویر لندست ۸ مورد استفاده

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۲

ردیف	سال	ماه و روز	سنجنده
۱	۲۰۱۷	۲۲ اگوست	لندست ۸
۲	۲۰۱۸	۲۸ اگوست	لندست ۸
۳	۲۰۱۹	۱۱ ژوئن	لندست ۸
۴	۲۰۲۰	۲ ژوئن	لندست ۸
۵	۲۰۲۱	۲۹ می	لندست ۸
۶	۲۰۲۲	۱۸ جولای	لندست ۸

## جدول ۲. مشخصات هوای ایستگاه اهر

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۲

ردیف	سال	ماه و روز	دمای حداقل	دمای حداکثر	دمای نقطه شبنم	سرعت باد	ساعات آفتابی
۱	۲۰۱۷	۲۲ اگوست	۱۱/۶	۲۴/۷	۱۲/۱	۷/۹	۲۶۸/۳
۲	۲۰۱۸	۲۸ اگوست	۱۱/۳	۲۵/۱	۱۲/۳	۸/۱	۲۵۵/۹
۳	۲۰۱۹	۱۱ ژوئن	۹/۲	۲۳/۲	۱۰/۴	۷/۲	۲۹۲/۷
۵	۲۰۲۰	۲ ژوئن	۹	۲۴	۱۰/۲	۷/۶	۲۹۹/۴
۶	۲۰۲۱	۲۹ می	۶	۱۹/۷	۶/۸	۶/۹	۲۴۳/۶
۷	۲۰۲۲	۱۸ جولای	۱۰/۷	۲۵	۱۲/۸	۸	۲۸۵/۶

۲.۳. الگوریتم تعادل انرژی<sup>۱</sup>

الگوریتم‌های تعادل انرژی مانند SEBAL روش‌هایی هستند که براساس روابط فیزیکی و تجربی، مقدار تبخیر و تعرق لحظه‌ای و روزانه محصول را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و میزان کم داده‌های مشاهداتی زمینی برآورد می‌کنند (باستیانسن و همکاران، ۱۹۹۸؛ سو، ۲۰۰۲، اووانه و سلیمان<sup>۲</sup>، ۲۰۱۸). برای برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از روش SEBAL ابتدا روابط ریاضی موردنیاز برای انجام تجزیه و تحلیل‌هایی مانند بازتابندگی<sup>۳</sup>، شاخص‌های پوشش

1. Surface Energy Balance Algorithm

2. Owaneh and Suleiman

3. Reflectance

گیاهی<sup>۱</sup>، گسیلمندی<sup>۲</sup>، آلبیدوی سطحی<sup>۳</sup>، دمای سطحی<sup>۴</sup>، شار تابش<sup>۵</sup>، شار گرمای خاک<sup>۶</sup>، شار گرمای محسوس<sup>۷</sup>، شار گرمای نهان<sup>۸</sup> و غیره شناسایی شد و در نهایت به محاسبه شار لحظه‌ای<sup>۹</sup> و مقدار روزانه تبخیر و تعرق<sup>۱۰</sup> مبادرت شد که در ادامه به بررسی و تشریح آن‌ها پرداخته می‌شود.

## ۲.۴. روش شناسی الگوریتم سبال

### ۲.۴.۱. تصحیحات اتمسفری

انجام تصحیحات اتمسفری در سنجش از دور بسته به اهداف پژوهش برای انجام تجزیه و تحلیل‌ها بسیار مهم و ضروری است. درکل می‌توان بیان کرد که برای اهدافی چون شناسایی کاربری‌های زمین که تصاویر دارای پیکسل‌های مشابه هستند، به استفاده از تصحیحات اتمسفری نیاز نیست (مادر و تسو<sup>۱۱</sup>، ۲۰۱۶، ۱۱).

در روش سبال برای برآورد میزان بازتابندگی زمین از تصاویر ماهواره‌ای ابتدا از تبدیل مقادیر پیکسل<sup>۱۲</sup> به رادیانس طیفی (رابطه ۱) استفاده می‌کنند (آلن و همکاران، ۲۰۰۲؛ اسدی و همکاران، ۱۳۹۹):

$$L_{\lambda} = (M_L \cdot Q_{cal}) + A_L \quad \text{رابطه (۱)}$$

1. Vegetation index
2. Emissivity
3. Surface albedo
4. Surface temperature
5. Net radiations
6. Soil heat flux
7. Sensible heat flux
8. Latent heat flux
9. Instantaneous flux
10. Daily evapotranspiration
11. Mather & Tso
12. Pixel value

که در آن،  $L\lambda$ : رادیانس طیفی برای هر باند برحسب  $(W/m^2 \cdot S \cdot \mu m)$ ،  $M_L$ : فاکتور ضریب اصلاحی چندگانه باند مخصوص،  $Q_{cal}$ : مقادیر پیکسل استاندارد تولیدشده،  $A_I$ : فاکتور ضریب اصلاحی افزایشی باند مخصوص است. در ادامه برای محاسبه بازتابندگی سیاره‌ای<sup>۱</sup> براساس تابش طیفی از رابطه ۲ استفاده می‌شود (کوسا<sup>۲</sup>، ۲۰۱۱، ص. ۲۱۴):

رابطه (۲)

$$P\lambda = \frac{\pi \cdot L\lambda}{ESUN\lambda \cdot \cos\theta \cdot dr}$$

که در آن،  $P\lambda$ : بازتابندگی سیاره‌ای،  $\pi$ : برابر است با عدد ۳/۱۴،  $ESUN\lambda$ : میانگین تابش طیفی خورشید برای باندهای مختلف،  $\cos\theta$ : زاویه ارتفاع خورشیدی و  $dr$ : معکوس مجذور فاصله تقریبی خورشید تا زمین است که مقدار آن از رابطه ۳ به دست می‌آید:

$$dr = 1 + 0.033 \cdot \cos \left[ \text{Julian day} \frac{2\pi}{365} \right] \quad \text{رابطه (۳)}$$

#### ۲.۴.۲. محاسبه مقادیر مربوط به آلبیدوی سطحی

اگر نقش تبخیر و تعرق در کاهش دمای سطحی نادیده گرفته شود، در آن صورت دمای سطحی تنها با افزایش آلبیدو کاهش خواهد یافت (باستیانس و همکاران، ۱۹۹۸)؛ بنابراین دمای سطحی یکی از پارامترهای مهم در برآورد میزان تبخیر و تعرق است که با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود (اسدی و همکاران، ۱۳۹۹):

$$r_0 = \frac{r_p - r_a}{\tau_{sw}^2} \quad \text{رابطه (۴)}$$

1. Planetary reflectance

2. Kosa

که در آن،  $T_0$ : آلبیدوی سطحی،  $T_a$ : میانگین خطای محاسباتی حاصل از بازتابندگی سیاره‌ای است که در ابتدا مقدار آن بین ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۴ درصد در نظر گرفته می‌شد (باستیانسن و همکاران، ۱۹۹۸)؛  $T_p$ : مقدار آلبیدوی حاصل از ضرایب وزنی و بازتابندگی سیاره‌ای در بالای اتمسفر و  $T_{sw}$ : ضریب شفافیت جوی است (مراجعه شود به آلن و همکاران، ۲۰۰۲).

### ۲. ۴. ۳. محاسبات مربوط به گسیلمندی و دمای سطح زمین

دمای سطح زمین یک پارامتر بسیار مهم در بسیاری از ویژگی‌های سیستم زمین مانند تقسیم بودجه انرژی سطحی، پایداری استاتیکی، شدت آشفستگی در لایه مرزی اتمسفری و تبخیر و تعرق و غیره است (امیدوار و همکاران، ۲۰۱۸؛ دی ارلانو و همکاران، ۲۰۱۵). در روش سبال برای محاسبه میزان دمای سطح زمین از رابطه ۵ استفاده می‌شود (جنانو و همکاران، ۲۰۱۷):

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB} K_1}{R_C} + 1\right)} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن،  $K_2$  and  $K_1$ : ضرایب ثابت برحسب  $(W/m^2 \cdot S \cdot \mu m)$  برای تصاویر لندست است،  $\epsilon_{NB}$ : گسیلمندی در باند حرارتی نسبتاً باریک و  $R_C$ : تابش گرمایی تصحیح شده از سطح برحسب  $(W/m^2 \cdot S \cdot \mu m)$  است.

در مدل سبال برای محاسبه گسیلمندی (گسیلمندی از باند حرارتی با پهنای باریک یا  $\epsilon_{NB}$ ، و گسیلمندی از باند حرارتی پهن  $\epsilon$ ) نیاز است که میزان شاخص‌های پوشش گیاهی و شاخص سطح برگ<sup>۳</sup> منطقه از طریق روابط ۶، ۷ و ۸ سنجیده شود (دو و همکاران، ۲۰۱۳؛ آلن و همکاران، ۲۰۰۷؛ ولیزاده کامران و اسدی، ۱۴۰۲):

1. De Arellano
2. Genanu
3. Leaf Index
4. Du

$$NDVI = \frac{Near-Infrared Band - Red Band}{Near-Infrared Band + Red Band} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$SAVI = \frac{(Near-Infrared Band - Red Band) \cdot (1+L)}{Near-Infrared Band + Red Band} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$LAI = - \left( \ln \left( \frac{0.69 - SAVI}{0.59} \right) / 0.91 \right) \quad \text{رابطه (۸)}$$

که در آن‌ها، *Near - Infrared Band*: باند مادون قرمز، *Red Band*: باند قرمز و *L*: فاکتور تصحیح‌کننده اثرات خاک است.

#### ۲.۴.۴. محاسبات مربوط به تابش خورشید

سبال یک روش سنجش از دوری است که در سال‌های اخیر به‌طور فزاینده‌ای برای محاسبه میزان تبخیر و تعرق استفاده می‌شود. روش مذکور به‌طور درخور توجهی به توازن انرژی ترمودینامیکی بین فرایندهای رخ داده در سطح زمین و جو وابسته است که به آن توازن انرژی سطحی گفته می‌شود. در نهایت، سبال با برقراری توازن انرژی بین پدیده‌های سطحی و جوی شار گرمای نهان را برای برآورد مقدار تبخیر و تعرق واقعی روزانه به دست می‌آورد که از طریق رابطه ۹ بیان می‌شود (مخوانازی و همکاران، ۲۰۱۵):

$$LE = Q^* - G - H \quad \text{رابطه (۹)}$$

که در آن، *LE*: شار گرمای نهان برحسب  $(W/m^2)$ ، *Q\**: شار تابش برحسب  $(W/m^2)$ ، *G*: شار گرمای خاک برحسب  $(W/m^2)$  و *H*: شار گرمای محسوس برحسب  $(W/m^2)$  است.

منظور از شار تابش خالص همان مقدار تابش موجود در سطح است که از طریق تفاضل حاصله از میزان تابش‌های ورودی و خروجی از رابطه ۱۰ بیان می‌شود:

$$Q^* = (1 - r_0).K \downarrow - L \downarrow - L \uparrow - (1 - \varepsilon_0).L \downarrow \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

که در آن،  $K \downarrow$ : تابش ورودی موج کوتاه خورشید برحسب  $(W/m^2)$ ،  $L \downarrow$ : تابش طول موج بلند ورودی به سطح برحسب  $(W/m^2)$  و  $L \uparrow$ : تابش طول موج بلند خروجی از سطح برحسب  $(W/m^2)$  است (مراجعه شود به آلن و همکاران، ۲۰۰۲).

#### ۲. ۴. ۵. محاسبات مربوط به شار گرمای خاک

شار گرمای خاک عمدتاً به وسیله گردایان حرارتی بسیار پویا در زمان و مکان در خاک سطحی هدایت می‌شود (سینگ و همکاران، ۲۰۰۸) که شکل ریاضی آن در رابطه ۱۱ بیان شده است:

رابطه (۱۱)

$$\frac{G}{Q^*} = T_s - 237.15/r_0 \cdot \{0.0038.r_0 + 0.007 * r_0^2\} \cdot \{1 - 0.98.(NDVI^4)\}$$

که در آن،  $\frac{G}{Q^*}$ : کسر شار تابش خالص و شار گرمای خاک،  $T_s$ : دمای هوای سطح زمین برحسب کلوین و  $r_0$ : آلیبدوی سطحی است.

#### ۲. ۴. ۶. محاسبات مربوط به شار گرمای محسوس

شار حرارت محسوس عبارت است از میزان هدر رفت گرما به وسیله هدایت یا انتقال گرما به هوا یا محیط پیرامون به علت گردایان دمایی (اوبرگ و ملسس، ۲۰۰۶). محاسبات مربوط به شار گرمای محسوس به دلیل دو مجهوله بودن (اختلاف دما، مقاومت آیرودینامیک برای انتقال گرما) مشکل‌ترین بخش الگوریتم سبال است و از رابطه ۱۲ برآورد می‌شود (کاستا و همکاران، ۲۰۱۹، ص. ۹۵):

1. Singh
2. Oberg & Meless
3. Temperature difference
4. Aerodynamic resistance to heat transport
5. Costa

$$H = \rho \cdot C_p \cdot \left( \frac{a + (b \cdot Ts)}{ra_h} \right) \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

که در آن،  $H$ : شار گرمای محسوس،  $\rho$ : تراکم هوا برحسب  $(kg/m^3)$ ،  $C_p$ : گرمای ویژه هوا در فشار ثابت که برابر است با  $1004 J/kg/K$ ،  $a + b$ : ضرایب تجربی تعیین شده از طریق یک کالیبراسیون داخلی برای هر تصویر ماهواره‌ای. این بخش از طریق انتخاب پیکسل‌های گرم (پیکسل خشک) و سرد (پیکسل مرطوب) تعیین می‌شود و بسیار حساس است؛ چراکه به‌طور مستقیم بر نتایج محاسبات مربوط به بخش شار گرمای محسوس و همچنین میزان تبخیر و تعرق تأثیر است و  $ra_h$ : مقاومت آیرودینامیکی به انتقال گرما برحسب  $(s/m^{-1})$  است. براساس روش سبال، محاسبات مربوط به مقاومت آیرودینامیکی انتقال دما ابتدا باید با شرایط اتمسفری خنثی صورت پذیرند تا بدین صورت مقدار اولیه شار گرمای محسوس محاسبه شود. سپس با استفاده از محاسبه طول پایداری مونین-ابوخوف<sup>۱</sup> ( $L$ ) و انجام تکرار در روند محاسبات مقادیر شار گرمای اصلاحی برای همه پیکسل‌ها محاسبه شوند. در آن صورت برای محاسبه سرعت اصطکاک  $(u^*)$  خواهیم داشت:

$$u^* = u_{200} \times 0.41 / \ln \left( \frac{200}{z_{om}} \right) - \Psi_{m(200m)} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

و در نهایت برای محاسبه مقاومت آیرودینامیکی به انتقال گرما خواهیم داشت:

$$ra_h = \ln \left( \frac{z_2}{z_1} \right) - \Psi_{h(z_2)} + \Psi_{h(z_1)} / u^* \times 0.41 \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

که در آن،  $\Psi_{m(200m)}$ : پایداری اصلاح شده برای انتقال حرکت در ۲۰۰ متر،  $\Psi_{h(z_1)}$ : پایداری اصلاح شده برای انتقال گرما در ارتفاع یک متر و  $\Psi_{h(z_2)}$ : پایداری اصلاح شده برای

1. Monin-Obukhov length

انتقال گرما در ارتفاع دو متر است (برای کسب اطلاعات بیشتر به آلن و همکاران، ۲۰۰۲ مراجعه شود).

#### ۲.۴.۷. محاسبات مربوط به تبخیر و تعرق لحظه‌ای

تبخیر و تعرق لحظه‌ای عبارت است از مقادیر لحظه‌ای تبخیر و تعرق در برابر عمق تبخیر و تعرق که از رابطه ۱۵ محاسبه می‌شود (جنانو و همکاران، ۲۰۱۷):

$$ET_{inst} = 3600 \times \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

که در آن،  $ET_{inst}$ : تبخیر و تعرق لحظه‌ای برحسب (mm/hr) است و 3600: برای تبدیل ثانیه به ساعت استفاده می‌شود.

#### ۲.۴.۸. محاسبات مربوط به کسر تبخیر و تعرق مرجع

کسر تبخیر و تعرق مرجع طبق تعریف عبارت است از حاصل تقسیم میزان تبخیر و تعرق لحظه‌ای بر تبخیر و تعرق مرجع که از رابطه ۱۶ محاسبه می‌شود (محمود و آرزابا، ۲۰۱۶):

$$ET_{rF} = ET_{inst} / ET_r \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

که در آن،  $ET_{rF}$ : کسر تبخیر و تعرق مرجع، میزان کسر مذکور معمولاً بین صفر تا ۱ است، اما در زمین‌هایی همراه با کشت یونجه تا ۱/۱ نیز افزایش می‌یابد و  $ET_r$ : تبخیر و تعرق مرجع به دست آمده از نرم‌افزار REF-ET در زمان عبور ماهواره از روی منطقه مورد مطالعه برحسب (mm/hr) است.

#### ۲.۴.۹. محاسبات مربوط به تبخیر و تعرق ۲۴ ساعته یا روزانه



به دست آوردن میزان تبخیر و تعرق روزانه معمولاً مفیدتر از در اختیار داشتن تبخیر و تعرق لحظه‌ای خواهد بود؛ چراکه بیشتر برنامه‌ریزی‌ها روی آن انجام می‌پذیرد؛ بنابراین برای محاسبه تبخیر و تعرق روزانه از حاصل ضرب کسر تبخیر و تعرق مرجع با مجموع ۲۴ ساعته تبخیر و تعرق مرجع براساس رابطه ۱۷ استفاده می‌شود (آل‌زیاد و همکاران، ۲۰۱۶):

$$ET_{24} = ET_r F \times ET_{r-24} \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

که در آن،  $ET_{r-24}$ : مجموع ۲۴ ساعته تبخیر و تعرق مرجع برحسب  $(mm/day)$  و  $ET_{24}$ : میزان تبخیر و تعرق روزانه برحسب  $(mm/day)$  است.

#### ۲. ۴. ۱۰. مدل پنمن مانتیث

یکی از روش‌هایی که توسط سازمان فائو به‌عنوان روشی استاندارد برای برآورد میزان تبخیر و تعرق مرجع و مقایسه مقادیر آن با سایر روش‌ها توصیه شده است، روش پنمن مانتیث فائو است (آلن و همکاران، ۱۹۹۸) که پنمن در سال ۱۹۴۸ ارائه کرد. سپس در سال ۱۹۶۵ مانتیث در آن تغییراتی ایجاد کرد که بعدها به‌عنوان رابطه پنمن مانتیث مطرح شد (زوتارلی و همکاران، ۲۰۱۰، ۲)؛ بنابراین در این پژوهش به‌عنوان مبنای ارزیابی و مقایسه استفاده شد. معادله مذکور به‌صورت رابطه (۱۸) است:

$$ET_0 = \frac{0.408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \times \frac{900}{T_a + 273} U_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 U_2)} \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

که در آن،  $ET_0$ : تبخیر و تعرق گیاه مرجع برحسب  $(mm/d^{-1})$ ،  $T_a$ : دمای هوا برحسب  $(^{\circ}C)$ ،  $U_2$ : سرعت باد در ارتفاع ۲ متری  $(m/s)$ ،  $R_n$ : تابش خالص در سطح زمین برحسب  $(MJ/m^{-2}/d^{-1})$ ،  $G$ : شار گرمای خاک برحسب  $(MJ/m^{-2}/d^{-1})$ ،  $e_s$ : فشار بخار آب اشباع،  $e_a$ : فشار بخار واقعی،  $e_s - e_a$ : کمبود فشار بخار اشباع هوا  $(Kpa)$ ،  $\Delta$ : شیب منحنی فشار بخار اشباع با دما  $(KpaC^{-1})$  و  $\gamma$ : ثابت سایکرومتر  $(KpaC^{-1})$  است (کرمی و اسدی، ۲۰۱۶؛ اسدی و کرمی، ۲۰۲۰).

#### ۲. ۴. ۱۱. ارزیابی مدل SEBAL

در این پژوهش برای ارزیابی کارایی روش SEBAL در مقابل روش پنمن مانیت فائو در برآورد نیاز آبی گیاهان مرتعی در شهرستان اهر از معیارهای ضریب تعیین ( $R^2$ ) و مجذور میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> (RMSE) استفاده شد. رابطه‌های مربوط به این آماره‌ها به صورت زیر است (زهو<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۴):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{si} - E_{oi})^2}{n}} \times 100 \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (E_{si} - \bar{E})) (E_{oi} - \bar{E}_{oi})}{(\sum_{i=1}^n (E_{si} - \bar{E}))^2 (E_{oi} - \bar{E}_{oi})^2} \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

که در آن‌ها، مقادیر  $E_{si}$ ،  $E_{oi}$  و  $\bar{E}$  به ترتیب مربوط به تبخیر و تعرق برآوردی توسط روش پنمن مانیت فائو و روش SEBAL و میانگین مقادیر است.

### ۳. یافته‌های تحقیق

#### ۳.۱. پراکنش تبخیر و تعرق در منطقه مورد مطالعه

طبق تعریف روش سبال با برقراری توازن انرژی بین پدیده‌های سطحی و جوی، شار گرمای نهان را برای برآورد مقدار تبخیر و تعرق واقعی روزانه به دست می‌آورند (مخوانازی و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۵، ص. ۱۵۰۴۸) که مقادیر برخی پارامترهای آن‌ها مانند شار تابش خالص، شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس در جدول ۲ برای روش سبال ارائه شده است.

جدول ۲ نشان‌دهنده مقادیر شار تابش خالص، شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس در پیکسل‌های گرم و سرد در تاریخ‌های بررسی‌شده در منطقه مورد مطالعه است؛ بر این اساس، مناطقی که دارای پوشش گیاهی و جنگلی هستند، به دلیل وجود رطوبت و ظرفیت گرمایی زیاد و به نوبه آن ذخیره گرمایی بیشتر، دارای مقادیر بیشتری از تابش خالص در مقایسه با مناطق خشک و بایر هستند. با توجه به جدول مذکور، مقادیر حداقل و حداکثر

1. Root Mean Square Error

2. Zhou

3. Mkhwanazi

انتخابی شار تابش خالص در پیکسل سرد به ترتیب مربوط به تاریخ‌های ۲۰۲۱/۵/۲۹ با مقدار عددی ۲۰۱/۶۴، ۲۰۲۲/۷/۱۹ با مقدار عددی ۴۶۲/۱۱ وات بر مترمربع و مقادیر انتخابی پیکسل گرم به ترتیب مربوط به تاریخ‌های ۲۰۲۱/۵/۲۹ با مقدار عددی ۳۸۸/۶۳ و ۲۰۲۲/۷/۱۹ با مقدار عددی ۵۹۰/۴۵ وات بر مترمربع است. همان‌گونه که گفته شد، دلیل زیادبودن میزان شار تابش خالص در پیکسل سرد در مقایسه با پیکسل گرم، زیادبودن میزان رطوبت است. همچنین براساس جدول ۲، مقادیر حداقل و حداکثر انتخابی شار گرمای خاک در پیکسل سرد به ترتیب مربوط به تاریخ‌های ۲۰۲۱/۵/۲۹ با مقدار عددی ۳۷/۶۵، ۲۰۱۷/۸/۲۲ با مقدار عددی ۵۹/۴۴ و مقادیر انتخابی پیکسل گرم به ترتیب مربوط به تاریخ‌های ۲۰۲۱/۵/۲۹ با مقدار عددی ۸۰/۳۹ و ۲۰۲۲/۷/۱۹ با مقدار عددی ۱۱۱/۲۳ است. پایین بودن میزان شار گرمای خاک در پیکسل‌های سرد در مقایسه با پیکسل گرم به دلیل وجود پوشش گیاهی و رطوبت در پیکسل سرد است که باعث می‌شود اختلاف دما در سطح خاک با مقطع پایینی آن کمتر باشد؛ در نتیجه شار گرمای خاک در پیکسل سرد تغییرات کمتری را در مقایسه با پیکسل گرم داشته باشد. در مجموع، مقادیر شار گرمای خاک در هنگام گرمایش خاک مثبت و در هنگام سرد شدن خاک منفی است؛ بنابراین هنگام برآورد میزان تبخیر و تعرق مقادیر حاصل از آن یا به شار تابش خالص افزوده شده یا از آن کم می‌شود.

جدول ۳. مقادیر تابش خالص در پیکسل‌های سرد و گرم برای تصاویر بررسی شده در منطقه مورد مطالعه

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۲

شار گرمای محسوس		شار گرمای خاک		شار تابش خالص		تاریخ تصویر بررسی شده
پیکسل گرم	پیکسل سرد	پیکسل گرم	پیکسل سرد	پیکسل گرم	پیکسل سرد	
۲/۵۱	۰/۱۵	۹۹/۴۷	۵۹/۴۴	۴۷۰/۱۳	۳۶۴/۷۲	۲۰۱۷/۸/۲۲
۳/۷۴	۰/۰۱	۹۸/۱۸	۴۸/۱۱	۴۹۶/۹۶	۳۴۵/۲۰	۲۰۱۸/۸/۲۸
۲/۸۰	۱/۰۷	۱۰۵/۷۶	۴۴/۵۷	۴۷۰/۲۵	۲۹۷/۵۲	۲۰۱۹/۶/۱۱
۳/۴۰	۰/۱۲	۱۰۲/۴۸	۴۳/۱۱	۳۹۸/۰۲	۲۰۵/۷۰	۲۰۲۰/۶/۲
۲/۶۳	۰/۰۹	۸۰/۳۹	۳۷/۶۵	۳۸۸/۶۳	۲۰۱/۶۴	۲۰۲۱/۵/۲۹
۴/۱۲	۱/۱۴	۱۱۱/۲۳	۵۴/۳۲	۵۹۰/۴۵	۴۶۲/۱۱	۲۰۲۲/۷/۱۹

## ۲.۳. تبخیر تعرق ۲۴ ساعته یا روزانه

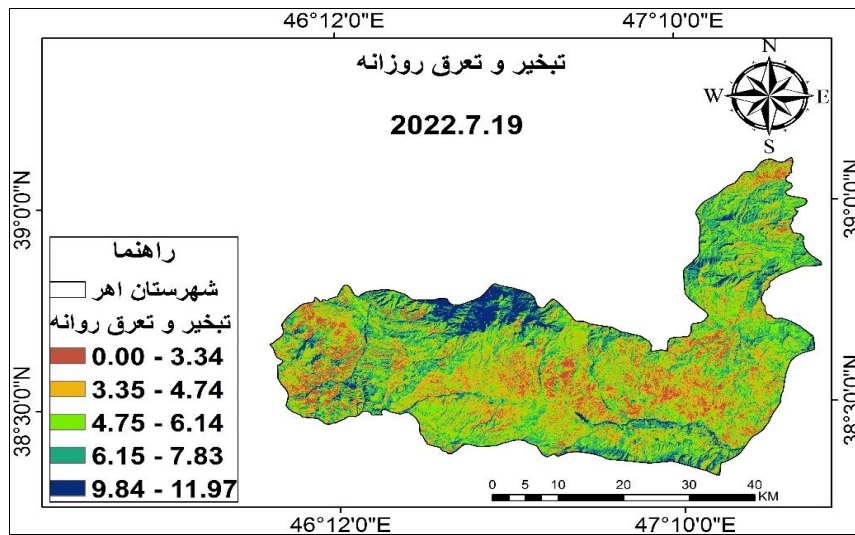
در روش سبال بعد از انجام محاسبات مربوط به شار تابش خالص، شار گرمای خاک، شار گرمای محسوس و گرمای نهان تبخیر (۱) می‌توان به ترتیب با استفاده از روابط ۱۳ و ۱۷ میزان شار گرمای نهان و تبخیر و تعرق لحظه‌ای را به دست آورد. سپس با استفاده از نرم‌افزار Ref\_ET میزان کسر تبخیر و تعرق مرجع برای زمان عبور ماهواره و کل روز یا همان ۲۴ ساعت محاسبه شد و در روابط ۱۶ و ۱۷ قرار داده شد و میزان تبخیر و تعرق ۲۴ ساعته یا روزانه به دست آورده شد. جدول ۴ نشان‌دهنده مقادیر حداقل و حداکثر تبخیر و تعرق روزانه در تاریخ‌های بررسی شده در منطقه مورد مطالعه است. براساس جدول ۴، در روش سبال بیشترین میزان تبخیر و تعرق مربوط به تاریخ ۲۰۲۲/۷/۱۹ با مقدار عددی ۱۱/۹۷ میلی‌متر در روز است که با توجه به قرار داشتن در تیر ماه منطقی به نظر می‌رسد. همچنین از آنجاکه تبخیر و تعرق واقعی سنجش شده است، مقادیر حداقل تبخیر و تعرق نیز صفر است؛ چراکه تبخیر و تعرق واقعی از دو حالت خارج نیست: وجود تبخیر و تعرق و نبود تبخیر و تعرق.

جدول ۴. مقادیر توزیع مکانی روزانه حداقل و حداکثر تبخیر و تعرق روزانه برای تصاویر بررسی شده

برحسب میلی‌متر در منطقه مورد مطالعه

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۲

تاریخ تصویر بررسی شده	حداقل تبخیر و تعرق روزانه	حداکثر تبخیر و تعرق روزانه
۲۰۱۷/۸/۲۲	۰/۰۰	۱۰/۴۲
۲۰۱۸/۸/۲۸	۰/۰۰	۱۰/۰۶
۲۰۱۹/۶/۱۱	۰/۰۰	۹/۱۲
۲۰۲۰/۶/۲	۰/۰۰	۸/۹۷
۲۰۲۱/۵/۲۹	۰/۰۰	۷/۸۹
۲۰۲۲/۷/۱۹	۰/۰۰	۱۱/۹۷



شکل ۲. نقشه حداکثر تبخیر و تعرق برآوردی در تاریخ ۲۰۲۲/۷/۱۹

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۲

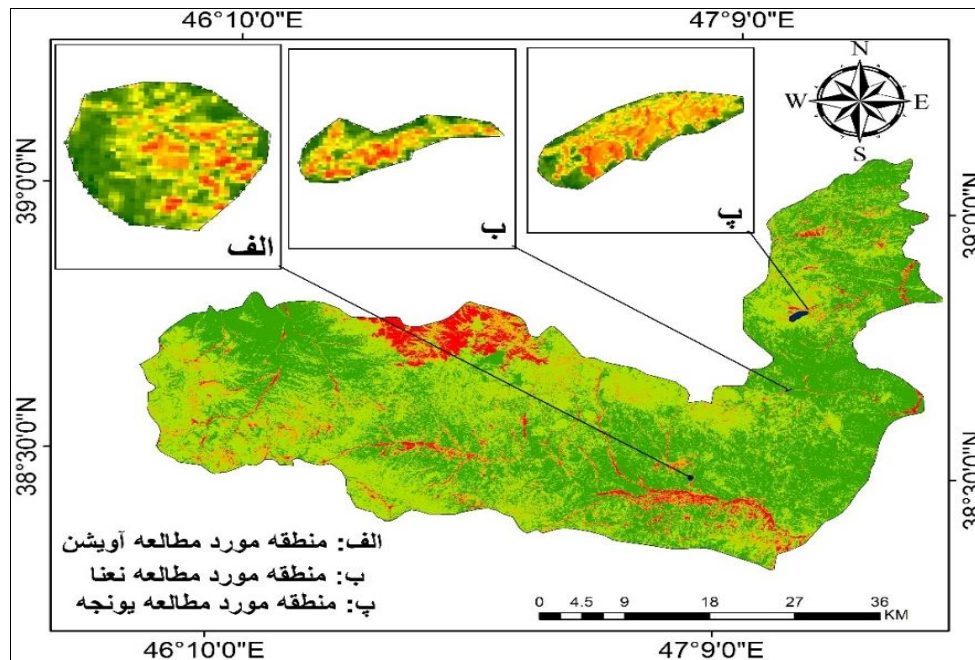
### ۳.۳. ارزیابی و مقایسه مقادیر تبخیر و تعرق بر اساس روش‌های بررسی شده

با محاسبه مقادیر تبخیر و تعرق بر اساس روش‌های سبال و پنمن مانیتث و اعمال ضرایب گیاهی (جدول ۴) محصولات بررسی شده (آویشن، نعناع و یونجه)، می‌توان آن‌ها را با یکدیگر مقایسه کرد (شکل ۳ نشان‌دهنده مراتع بررسی شده است). هر چند در پژوهش حاضر از داده‌های لایسیمیتری به دلایل زیر استفاده نشد که عبارت‌اند از: ۱- نبود لایسیمتر یا غیرفعال بودن آن در منطقه مورد مطالعه، ۲- هزینه زیاد کاشت لایسیمتر و زمان‌بر بودن آن برای استخراج نتایج موردنیاز (روهف و همکاران، ۲۰۱۲، ص. ۷۰۴؛ کوندو و همکاران، ۲۰۱۸، ص. ۲) و ۳- مغایرت با ماهیت سنجش از دوری پژوهش (هاوسلر و همکاران، ۲۰۱۸، ص. ۳)؛ درحالی‌که در پژوهش حاضر سعی شده است که با استفاده از روش دور سنجی میزان تبخیر و تعرق برآورد شود. در جهان پژوهش‌های زیادی انجام یافته یا در حال انجام است که در آن‌ها از لایسیمتر استفاده نشده (اسدی و کامران، ۲۰۲۲؛ اسدی و کامران، ۲۰۲۳؛ روات و

1. Ruhoff
2. Kundu
3. Häusler

همکاران، ۲۰۱۹؛ النمر و همکاران، ۲۰۱۹ و غیره.) و برای صحت‌سنجی و مقایسه مقادیر به‌دست‌آمده از روش سبال، از روش پنمن مانیتث استفاده شده است. براساس روش سبال، محصول نعنا در دوره اولیه رشد محصول به تاریخ ۲۰۲۱/۵/۲۹ کمترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ۲/۸۴ میلی‌متر در روز و محصول یونجه نیز در دوره اولیه رشد محصول به تاریخ ۲۰۱۹/۶/۱۱ بیشترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ۳/۴۹ میلی‌متر در روز داشته است. همچنین در دوره اولیه رشد محصول براساس روش پنمن مانیتث کمترین میزان تبخیر و تعرق در تاریخ ۲۰۱۹/۶/۱۱ با مقدار عددی ۳/۱۷ میلی‌متر در روز مربوط به محصول یونجه و بیشترین میزان تبخیر و تعرق نیز مربوط به محصول آویشن در تاریخ ۲۰۲۰/۶/۲ با مقدار عددی ۴/۰۲ میلی‌متر در روز است (جدول ۵).

همچنین در دوره پایانی رشد در روش سبال محصول نعنا در تاریخ ۲۰۱۸/۸/۲۸ کمترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ۶/۱۸ میلی‌متر در روز و محصول آویشن نیز در دوره پایانی رشد محصول به تاریخ ۲۰۲۲/۷/۱۹ بیشترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ۷/۴۱ میلی‌متر در روز داشته است. همچنین در دوره پایانی رشد محصول براساس روش پنمن مانیتث کمترین میزان تبخیر و تعرق در تاریخ ۲۰۱۷/۸/۲۲ با مقدار عددی ۵/۴۹ میلی‌متر در روز مربوط به محصول یونجه و بیشترین میزان تبخیر و تعرق نیز مربوط به محصول آویشن در تاریخ ۲۰۲۲/۷/۱۹ با مقدار عددی ۷/۳۴ میلی‌متر در روز است (جدول ۶).



شکل ۳. مزارع نمونه بررسی شده در منطقه مورد مطالعه

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۲

جدول ۵. ضرایب گیاهی استفاده شده در پژوهش (برگرفته شده از سایت فانو<sup>۱</sup>)

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۲

نام محصول	مرحله اولیه	مرحله پایانی
آویشن	۰/۳۳	۰/۹۹
یونجه	۰/۳۰	۰/۹۰
نعنا	۰/۴۰	۰/۹۵

1. [Http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.jpg](http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.jpg)

جدول ۶. مقادیر برآوردی نیاز آبی مراتع بررسی شده برحسب میلی‌متر در دوره اولیه رشد  
 مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۲

مدل محصول	تاریخ تصویر در دوره اولیه رشد	سبال	پنمن مانتیث
آویشن	۲۰۲۰/۶/۲	۳/۳۲	۴/۰۲
یونجه	۲۰۱۹/۶/۱۱	۳/۴۹	۳/۱۷
نعنا	۲۰۲۱/۵/۲۹	۲/۸۴	۳/۹۱

جدول ۷. مقادیر برآوردی نیاز آبی مراتع بررسی شده برحسب میلی‌متر در دوره پایانی رشد  
 مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۲

مدل محصول	تاریخ تصویر در دوره پایانی رشد	سبال	پنمن مانتیث
آویشن	۲۰۲۲/۷/۱۹	۷/۴۱	۷/۳۴
یونجه	۲۰۱۷/۸/۲۲	۶/۳۷	۵/۴۹
نعنا	۲۰۱۸/۸/۲۸	۶/۱۸	۷/۰۹

### ۳.۴. اعتبارسنجی مقادیر برآوردی تبخیر و تعرق

در این بخش، با استفاده از روش‌های آماری ضریب تعیین ( $R^2$ )، مجذور میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> (RMSE) و میانگین انحراف مطلق<sup>۲</sup> (MAD) روش‌های مورد مطالعه از نظر کارایی با یکدیگر مقایسه شده و ضریب تعیین و خطاهای موجود مشخص شدند.

بر اساس جدول ۷ که نشان‌دهنده مقایسه‌های میان روش‌های مورد مطالعه در دوره‌های اولیه و پایانی رشد از نظر مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین انحراف مطلق است، کمترین میزان RMSE و MAD بر پایه روش سبال در مجموع در دوره‌های اولیه و پایانی رشد در مقایسه با روش پنمن مانتیث مربوط به محصول آویشن به ترتیب با مقدار عددی ۰/۴۹۷ و ۰/۳۸۵ است و بیشترین میزان RMSE و MAD بر پایه روش سبال در مقایسه با روش پنمن مانتیث به ترتیب مربوط به محصول نعنا با مقدار عددی ۰/۹۹۳ و ۰/۹۹۰ است. در

1. Root Mean Square Error  
 2. Mean Absolute Deviation



حالت کلی با میانگین گیری از ضرایب خطا، از جداول مطرح شده می توان نتیجه گرفت که روش سبال در مقایسه با روش پنمن مانتیث دارای میزان خطا با RMSE برابر با ۰/۷۱۷ و MAD برابر با ۰/۶۵۸ است (جدول ۷).

همچنین بعد از محاسبه مقادیر خطای محصولات مورد مطالعه براساس روش های بررسی شده با یکدیگر، در ادامه سعی شد با استفاده از روش های آماری ضریب تعیین، مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین انحراف مطلق و براساس جداول ۵ و ۶، مقادیر خطا و ضریب تعیین (جدول ۷) بین روش های مورد مطالعه نیز بررسی شود؛ بر این اساس، ضریب تعیین به دست آمده بین روش سبال و روش پنمن مانتیث ۰/۸۴ میلی متر در روز بوده که قابل قبول است. نتایج این بخش از تحقیق با نتایج پژوهش سهیلی فر و همکاران (۱۳۹۲) که با استفاده از مدل سبال به محاسبه تبخیر و تعرق نیشکر در اراضی کشت و صنعت نیشکر میرزا کوچک خان پرداخته بودند، تطابق دارد؛ چراکه میزان ضریب تعیین بین روش سبال و پنمن مانتیث در آن حدود ۰/۷۷ بوده که نسبتاً قابل قبول است.

جدول ۸. مقایسه های میان روش های مورد مطالعه بر پایه روش سبال در میانگین دوره های اولیه و پایانی

رشد از نظر مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین انحراف مطلق

مأخذ: یافته های پژوهش، ۱۴۰۲

ضریب تعیین بین روش سبال و پنمن مانتیث	پنمن مانتیث		محصول
	RMSE	MAD	
$r^2$			
-----	۰/۴۹۷	۰/۳۸۵	آویشن
	۰/۶۶۲	۰/۶۰۰	یونجه
	۰/۹۹۳	۰/۹۹۰	نعنا
۰/۸۴	۰/۷۱۷	۰/۶۵۸	میانگین

نتایج پژوهش حاضر با پژوهش‌های زیر همخوانی دارد: مخوانازی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۵) به برآورد نیاز آبی سه محصول لوبیا، گندم و ذرت با روش‌های سبال و سبال A پرداختند. براساس نتایج، میزان RMSE آن‌ها در مقایسه میان لوبیا و گندم با روش سبال A ۰/۸۲ و در مقایسه با روش سبال ۱/۹۷ بود. ما و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۲) با استفاده از الگوریتم سبس و تصاویر ماهواره لندست ۵ میزان نیاز آبی محصولات همچون گندم و برنج را با RMSE برابر ۰/۷۴ نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده ارزیابی کردند.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با استفاده از روش سنجش از دوری سبال، مقادیر تبخیر و تعرق واقعی گیاهان مرتعی همچون آویشن، نعنای و یونجه در شهرستان اهر به دست آمد. نتایج پژوهش به دلیل نبود لایسیمتر در منطقه مورد مطالعه با نتایج حاصل از روش پنمن مانیتیت مقایسه شد. نتایج بیانگر آن بود که براساس روش سبال، محصول نعنای در دوره اولیه رشد محصول به تاریخ ۲۰۲۱/۵/۲۹ کمترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ۲/۸۴ میلی‌متر در روز و محصول یونجه نیز در دوره اولیه رشد محصول به تاریخ ۲۰۱۹/۶/۱۱ بیشترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ۳/۴۹ میلی‌متر در روز داشته است. همچنین در دوره اولیه رشد محصول براساس روش پنمن مانیتیت، کمترین میزان تبخیر و تعرق در تاریخ ۲۰۱۹/۶/۱۱ با مقدار عددی ۳/۱۷ میلی‌متر در روز مربوط به محصول یونجه و بیشترین میزان تبخیر و تعرق مربوط به محصول آویشن در تاریخ ۲۰۲۰/۶/۲ با مقدار عددی ۴/۰۲ میلی‌متر در روز است.

در دوره پایانی رشد در روش سبال محصول نعنای در تاریخ ۲۰۱۸/۸/۲۸ کمترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ۶/۱۸ میلی‌متر در روز و محصول آویشن نیز در دوره پایانی رشد محصول به تاریخ ۲۰۲۲/۷/۱۹ بیشترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ۷/۴۱ میلی‌متر در روز داشته است. همچنین در دوره پایانی رشد محصول براساس روش پنمن مانیتیت، کمترین میزان تبخیر و تعرق در تاریخ ۲۰۱۷/۸/۲۲ با مقدار عددی ۵/۴۹ میلی‌متر در

1. Mkhwanazi

2. Ma

روز مربوط به محصول یونجه و بیشترین میزان تبخیر و تعرق نیز مربوط به محصول آویشن در تاریخ ۲۰۲۲/۷/۱۹ با مقدار عددی ۷/۳۴ میلی‌متر در روز است. همان‌گونه که مشاهده شد، میزان تبخیر و تعرق گیاهان بررسی‌شده در دوره آغازین رشد کمتر از دوره پایانی رشد است که می‌توان دلیل آن را در افزایش اندازه گیاهان که سطح برخورد بیشتری با نور آفتاب دانست و همچنین افزایش ساعات آفتابی و در نتیجه تابش بیشتر خورشید در دوره پایانی رشد دانست. همچنین همان‌گونه که از نتایج پیداست، گیاه نعنای تبخیر کمتری به خود اختصاص داده است که می‌توان در برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب و آبیاری محصول و کشت انبوه و اقتصادی‌تر آن استفاده کرد.

بر اساس مقایسه‌های میان روش‌های مورد مطالعه در دوره اولیه و پایانی رشد از نظر مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین انحراف مطلق، کمترین میزان  $RMSE$  و  $MAD$  بر پایه روش سبال، در مجموع در دوره اولیه و پایانی رشد در مقایسه با روش پنمن مانیتث مربوط به محصول آویشن به ترتیب با مقدار عددی ۰/۴۹۷ و ۰/۳۸۵ است و بیشترین میزان  $RMSE$  و  $MAD$  بر پایه روش سبال در مقایسه با روش پنمن مانیتث به ترتیب مربوط به محصول نعنای با مقدار عددی ۰/۹۹۳ و ۰/۹۹۰ است. در حالت کلی با میانگین‌گیری از ضرایب خطا، از جداول مطرح‌شده می‌توان نتیجه گرفت که روش سبال در مقایسه با روش پنمن مانیتث دارای میزان خطا با  $RMSE$  برابر با ۰/۷۱۷ و  $MAD$  برابر با ۰/۶۵۸ است؛ بنابراین با توجه به نتایج حاصل از پژوهش حاضر می‌توان با تکیه بر روش‌های سنجش از دوری مانند سبال و استفاده حداقلی از داده‌های زمینی، نیاز آبی مراتع مهم و ضروری را با دقت قابل‌قبولی برآورد کرد و ضمن اصلاح و مدیریت کشت و آبیاری مراتع، با سیاست‌گذاری درست و شناسایی مراتعی که نیاز آبی کمی دارند، حداکثر بهره‌برداری را از منابع آبی کرد تا بدین ترتیب در منطقه و کشور کم‌آبی چون ایران با تهدیدهای جدی‌تری از نظر منابع آبی مواجه نشد.

## کتابنامه

۱. اسدی، م.، باعقیده، م.، ولیزاده کامران، خ.، و ادب، ح. (۱۳۹۹). ارزیابی همبستگی پوشش گیاهی با دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (مطالعه موردی: استان اردبیل). پژوهش‌های محیط‌زیست، ۱۱(۲۲)، ۸۷-۹۸.
۲. اسدی، م.، ولیزاده کامران، خ.، باعقیده، م.، و ادب، ح. (۱۳۹۹). برآورد میزان تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبال کوهستانی بر پایه گیاه نخود (مطالعه موردی: نیمه شمالی استان اردبیل). هیدروژئومورفولوژی، ۷(۲۲)، ۶۷-۸۵.
۳. اسدی، م.، ولیزاده کامران، خ.، باعقیده، م.، و ادب، ح. (۱۳۹۹). مقایسه و تخمین سپیدایی سطوح مختلف کاربری اراضی با استفاده از روش سبال و متریک. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۰(۵۹)، ۱۵۷-۱۷۱.
۴. سهیلی‌فر، ز.، میرلطیفی، س. م.، ناصری، عب. ع.، و عصار، م. (۱۳۹۲). برآورد تبخیر و تعرق واقعی نیشکر با استفاده از داده‌های سنجش از دور در اراضی کشت و صنعت نیشکر میرزا کوچک خان. نشریه دانش آب و خاک، ۲۳(۱)، ۱۶۳-۱۵۱.
۵. ولیزاده کامران، خ.، و اسدی، م. (۱۴۰۲). برآورد سطح زیرکشت گندم با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ (مطالعه موردی: نیمه شمالی استان اردبیل). فضای جغرافیایی، ۲۳(۸۱)، ۵۹-۴۵.
6. Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 380-394.
7. Allen, R., Waters, R., Tasumi, M., Trezza, R., & Bastianssen, W. (2002). *SEBAL (surface energy balance algorithms for land)- Advanced training and user's manual*, version 1.0.
8. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (Eds.). (1998). FAO Irrigation and Drainage. No. Paper 56.
9. Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) model. *Journal of Irrigation Drainage Engineering*, 133, 380-394.
10. Al Zayed, I. S., Elagib, N. A., Ribbe, L., & Heinrich, J. (2016). Satellite-based evapotranspiration over Gezira Irrigation Scheme, Sudan: A comparative study. *Agricultural Water Management*, 177, 66-76.

11. Asadi, M., & Karami, M. (2020). Estimation of evapotranspiration in Fars province using experimental indicators. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 20(56), 159-175.
12. Asadi, M., & Kamran, K. V. (2022). Comparison of SEBAL, METRIC, and ALARM algorithms for estimating actual evapotranspiration of wheat crop. *Theoretical and Applied Climatology*, 149(1-2), 327-337.
13. Asadi, M., & Kamran, K. V. (2023). Estimating selected cultivated crop water requirement-based surface energy balance algorithm. *Arabian Journal of Geosciences*, 16, 298.
14. Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). *Journal of Hydrology*, (212–213), 198–212.
15. Costa, J. D. O., Coelho, R. D., Wolff, W., José, J. V., Folegatti, M. V., & Ferraz, S. F. D. B. (2019). Spatial variability of coffee plant water consumption based on the SEBAL algorithm. *Scientia Agricola*, 76(2), 93-101.
16. de Arellano, J. V.-G., Van Heerwaarden, C. C., Van Stratum, B. J. H., & Van Den Dries, K. (2015). *Atmospheric boundary layer: Integrating air chemistry and land interactions*. New York: Cambridge University Press.
17. Du, J., Song, K., Wang, Z., Zhang, B., & Liu, D. (2013). Evapotranspiration estimation based on MODIS products and surface energy balance algorithms for land (SEBAL) model in Sanjiang Plain, Northeast China. *Chinese Geographical Science*, 23(1), 73-91.
18. Elnmer, A., Khadr, M., Kanae, S., & Tawfik, A. (2019). Mapping daily and seasonally evapotranspiration using remote sensing techniques over the Nile delta. *Agricultural Water Management*, 213, 682-692.
19. Genanu, M., Alamirew, T., Senay, G., & Gebremichael, M. (2017). Remote sensing based estimation of evapo-transpiration using selected algorithms: The case of Wonji Shoa Sugar Cane Estate, Ethiopia. *Preprints*, 2016080098.
20. Hu, Z., Yu, G., Zhou, Y., Sun, X., Li, Y., Shi, P., ..., & Li, S., (2009). Partitioning of evapotranspiration and its controls in four grassland ecosystems: Application of a two-source model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1410–1420.
21. Karami, M., & Asadi, M. (2016). Estimates and zoning of reference evapotranspiration by FAO-penman-monteith (Case study: North West of Iran). *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, 2(1), 210-216.
22. Kosa, P. (2011). The effect of temperature on actual evapotranspiration based on Landsat 5 TM satellite imagery. In L. Labedzki (Ed.), *Evapotranspiration*. DOI: 10.5772/14012/
23. Kundu, S., Mondal, A., Khare, D., Hain, C., & Lakshmi, V. (2018). Projecting climate and land use change impacts on actual evapotranspiration for the Narmada River Basin in central India in the future. *Remote Sensing*, 10(4), 578.

24. Lage, M., Bamouh, A., Karrou, M., & El Mourid, M. (2003). Estimation of rice evapotranspiration using a microlysimeter technique and comparison with FAO Penman-Monteith and Pan evaporation methods under Moroccan conditions. *Agronomie*, 23, 625–631.
25. Laipelt, L., Henrique Bloedow Kayser, R., Santos Fleischmann, A., Ruhoff, A., Bastiaanssen, W., Erickson, T. A., & Melton, F. (2021). Long-term monitoring of evapotranspiration using the SEBAL algorithm and google earth engine cloud computing. *Remote Sensing*, 178, 81–96.
26. Liu, X., Xu, J., Wang, W., Lv, Y., & Li, Y. (2020). Modeling rice evapotranspiration under water-saving irrigation condition: Improved canopy-resistance-based. *Journal of Hydrology*, 590, 125435
27. Ma, W., Hafeez, M., Rabbani, U., Ishikawa, H., & Ma, Y. (2012). Retrieved actual ET using SEBS model from Landsat-5 TM data for irrigation area of Australia. *Atmospheric Environment*, 59, 408-414.
28. Mahmoud, S. H., & Alazba, A. A. (2016). A coupled remote sensing and the Surface Energy Balance based algorithms to estimate actual evapotranspiration over the western and southern regions of Saudi Arabia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 124, 269-283.
29. Mather, P., & Tso, B. (2016). *Classification methods for remotely sensed data*. Florida: CRC Press.
30. McShane, R. R., Driscoll, K. P., & Sando, R. (2017). *A review of surface energy balance models for estimating actual evapotranspiration with remote sensing at high spatiotemporal resolution over large extents*. Scientific Investigations Report, Series Number 2017-5087.
31. Mkhwanazi, M., Chávez, J. L., & Andales, A. A. (2015). SEBAL-A: A remote sensing ET algorithm that accounts for advection with limited data. Part I: Development and validation. *Remote Sensing*, 7(11), 15046-15067.
32. Oberg, J. W., & Meless, A. M. (2006). Evapotranspiration dynamics at an ecohydrological restoration site: an energy balance and remote sensing approach. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 42(3), 565-582.
33. Omidvar, H., Song, J., Yang, J., Arwatz, G., Wang, Z.H., Hultmark, M., Kaloush, K., & Bou-Zeid, E. (2018). Rapid modification of urban land surface temperature during rainfall. *Water Resources Research*, 54(7), 4245-4264.
34. Owaneh, O. M., & Suleiman, A. A. (2018). Comparison of the performance of ALARM and SEBAL in estimating the actual daily ET from Satellite data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 144(9), 04018024.
35. Qiu, R., Liu, C., Cui, N., Wu, Y., Wang, Z., & Li, G. (2019). Evapotranspiration estimation using a modified Priestley-Taylor model in a rice-wheat rotation system. *Agricultural Water Management*, 224, 105755.
36. Rawat, K. S., Singh, S. K., Bala, A., & Szabó, S. (2019). Estimation of crop evapotranspiration through spatial distributed crop coefficient in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 213, 922-933.

37. Ruhoff, A. L., Paz, A. R., Collischonn, W., Aragao, L. E. O. C., Rocha, H. R., & Malhi, Y. S. (2012). A MODIS-based energy balance to estimate evapotranspiration for clear-sky days Brazilian tropical savannas. *Remote Sensing Journal*, 4, 703-725.
38. Silva, B. B. D., Mercante, E., Boas, M. A. V., Wrublack, S. C., & Oldoni, L. V., (2018). Satellite-based ET estimation using Landsat 8 images and SEBAL model. *Revista Ciência Agronômica*, 49(2), 221-227.
39. Singh, R. K., Irmak, A., Irmak, S., & Martin, D. L. (2008). Application of SEBAL model for mapping evapotranspiration and estimating surface energy fluxes in south-central Nebraska. *Journal of irrigation and Drainage Engineering*, 134(3), 273-285.
40. Su, Z. (2002). The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1), 85-100.
41. Valayamkunnath, P., Sridhar, V., Zhao, W., & Allen, R. G. (2018). Intercomparison of surface energy fluxes, soil moisture, and evapotranspiration from eddy covariance, largeaperture scintillometer, and modeling across three ecosystems in a semiarid climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248, 22-47.
42. Yang, Y., Zhou, X., Yang, Y., Bi, S., Yang, X., & Li Liu, D., (2018). Evaluating water-saving efficiency of plastic mulching in Northwest China using remote sensing and SEBAL. *Agricultural Water Management*, 209, 240-248.
43. Zhou, X., Bi, S., Yang, Y., Tian, F., & Ren, D. (2014). Comparison of ET estimations by the three-temperature model, SEBAL model and eddy covariance observations. *Journal of Hydrology*, 519, 769-776.
44. Zotarelli, L., Dukes, M. D., Romero, C. C., Migliaccio, K. W., & Morgan, K. T. (2010). *Step by step calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method)*. Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida.