

The estimation of actual evapotranspiration of irrigated agricultural and Gardens in Nahavand County using SEBAL algorithm

Maryam Raeesi¹ , Ali Haghizadeh^{*2} , Hamed Nozari³ , Hossain Zeinivand⁴ 

¹ Ph.D. Student, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khoramabad, Iran

² Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khoramabad, Iran

³ Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

⁴ Associate Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khoramabad, Iran

Extended Abstract

Introduction

Evapotranspiration, which includes evaporation from the soil surface and transpiration from vegetation, is one of the most important factors of water loss. Also, it is one of the most effective components of the water balance in a watershed in arid and semi-arid regions of the world. Therefore, it is an important physical parameter for water resource management and determining the water requirement of plants in the agricultural sector. So far, many experimental methods have been proposed to calculate evapotranspiration. However, they are only suitable at the local scale and cannot be generalized to large areas due to regional dynamics and variations. Moreover, the accurate estimation of evapotranspiration is also very difficult and expensive. Therefore, the present study calculated the amount of evapotranspiration in the irrigated agricultural sector using Landsat 8 satellite images and the Surface Energy Balance Algorithm (SEBAL) in Nahavand County. In the SEBAL algorithm by estimating all energy components on the Earth's surface, including net radiation flux, soil heat flux, and sensible heat flux and using the energy balance equation, evapotranspiration is calculated. Remote sensing can also show the spatial distribution of evapotranspiration in addition to estimating the amount of its, because, it is the only technology that extracts factors such as surface temperature, albedo, and vegetation indices in a way compatible with the environment and is also economically affordable.

Materials and Methods

In this research, to estimate daily actual evapotranspiration of the irrigated agricultural lands and gardens of Nahavand County, an irrigated agricultural land-use map was extracted using Sentinel 2 satellite images. Then, using Landsat 8 satellite images (13 images, from April 13 to October 22 during the growth period of the irrigated crops) and Surface Energy Balance Algorithm (SEBAL), evapotranspiration maps were obtained during the irrigated crops growth period in 2021. These Landsat 8 satellite images were captured by the Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) onboard the satellites and are widely used for water resource applications. The OLI sensor has 9 bands, and the TIRS has two bands (10th and 11th thermal bands). Landsat images are taken at 16-day intervals with a spatial resolution of 30 m. In all images, the imaging time was 7:21 AM. Then, since the FAO-Penman-Monteith method is one of the most important and reliable reference methods in evapotranspiration calculations, this method was used as a basis for evaluation and comparison. Finally, to evaluate the efficiency of the SEBAL method in estimating the actual evapotranspiration of irrigated crops and gardens in Nahavand County, the Root Mean Square Errors (RMSE) function was used.

Results and Discussion

According to the results of the SEBAL algorithm, the highest mean of actual evapotranspiration occurred in the images from September 4, 2021 and August 19, 2021, which fall in the middle of the growing period of irrigated crops. In addition, the surface albedo was noted to be relatively low on these days, with high NDVI values indicating high radiation absorption by the vegetation during this period. Net solar radiation is directly influenced by the incoming longwave and shortwave radiation, both of which directly impact the surface temperature. Therefore, areas with higher surface temperatures receive higher net solar radiation. The net radiation flux has a direct relationship with NDVI, greenness, and wetness parameters and is inversely related to albedo, brightness, and surface temperature (T_s). Vegetative moisture and sensible heat flux are higher on days with high NDVI. Higher NDVI values indicate an increase in vegetation greenness; therefore, an increase in evapotranspiration is expected. The lowest mean actual evapotranspiration was observed in the northeastern part

of the study area due to a lack of sufficient surface and groundwater resources and, consequently, a reduction in agricultural lands in this region. Finally, to investigate the accuracy of the SEBAL method in calculating evapotranspiration, the results of the SEBAL method were compared with those of the FAO-Penman-Monteith method. The results showed that the SEBAL method, with RMSE 0.82, has appropriate accuracy for estimating evapotranspiration.

Conclusion

Due to population growth and water shortage, especially in the agricultural sector, researchers are looking for ways to optimize the management of available water resources. The evapotranspiration rate is one of the most important components of the global hydrological cycle and has a significant influence on the energy balance and climate. The use of indirect methods such as remote sensing can be an important step in estimating the water demand of agricultural crops, as well as planning and managing the country's water resources. Therefore, considering Nahavand County's position as the agricultural hub of Hamedan Province, this study investigated the actual evapotranspiration of the irrigated agricultural land using Landsat 8 satellite images and the SEBAL Algorithm. According to the SEBAL algorithm results, the highest mean actual evapotranspiration was observed in the southeastern and central parts of the study area. This can be attributed to the presence of the main branch of the Gamasiab River, which supports irrigated agricultural lands and gardens in this area. The final results of this research indicated the high precision of the SEBAL algorithm in estimating evapotranspiration. Thus, the high accuracy and low error rate indicate that the SEBAL method could be effectively used to estimate evapotranspiration on a regional scale over the given time period. Additionally, the results obtained from the SEBAL method assisted in understanding the spatial and temporal changes at different stages of plant growth.

Keywords: Actual Evapotranspiration, FAO-Penman-Monteith method, Remote Sensing, SEBAL algorithm,

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the Lorestan University for the support provided.

Conflicts of interest

The authors of this article declare that there is no conflict regarding the writing and publication of the contents and results of this research.

Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Maryam Raeesi: Conceptualization, software, writing-original draft preparation; **Ali Haghizadeh:** Supervision, Conceptualization, Manuscript editing, formal analysis and investigation; **Hamed Nozari:** Conceptualization, Manuscript editing; **Hossain Zainivand:** Conceptualization, Manuscript editing.

*Corresponding Author, E-mail: haghizadeh.a@lu.ac.ir

Citation: Raeesi, M., Haghizadeh, A., & Zainivand, H. (2025). The estimation of actual evapotranspiration of irrigated agricultural and Gardens in Nahavand County using SEBAL algorithm. *Water and Soil Management and Modeling*, 5(1), 213-230.

doi: 10.22098/mmws.2024.15091.1462

Received: 19 May 2024, Received in revised form: 24 June 2024, Accepted: 16 July 2024, Published online: 21 March 2025.

Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 5, No. 1, pp. 213-230

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





برآورد تبخیر-تعرق واقعی کشت آبی و باغات شهرستان نهاوند با استفاده از الگوریتم SEBAL

مریم رئیسی^۱، علی حقی‌زاده^{۲*}، حامد نوذری^۳، حسین زینی‌وند^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران

^۲ استاد، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران

^۳ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

^۴ دانشیار، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران

چکیده

تبخیر-تعرق که شامل تبخیر از سطح خاک و تعرق از پوشش گیاهی است یکی از مهم‌ترین عوامل اتلاف آب است. بنابراین، یک پارامتر فیزیکی مهم برای مدیریت منابع آب و تعیین نیاز آبی گیاه در بخش کشاورزی است. اما، از آنجایی که برآورد دقیق آن بسیار مشکل و پرهزینه است، در این مطالعه، به‌منظور برآورد تبخیر-تعرق واقعی روزانه کشت آبی و باغات شهرستان نهاوند، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و الگوریتم SEBAL، نقشه‌های تبخیر-تعرق در طول دوره رشد گیاه در دوره‌های ۱۶ روزه (۱۳ تصویر) در سال ۲۰۲۱ به‌دست آمد. بر اساس نتایج حاصل از الگوریتم SEBAL، بیش‌ترین میزان میانگین تبخیر-تعرق واقعی در تمامی تاریخ‌های مورد بررسی، مربوط به مرکز و جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه است که علت آن، قرار گرفتن این منطقه در مسیر سرشاخه اصلی رودخانه گاماسیاب و تمرکز کشت آبی و باغات در این منطقه است. کمترین میزان میانگین تبخیر-تعرق واقعی نیز مربوط به شمال شرقی شهرستان نهاوند، به‌دلیل عدم وجود منابع آبی سطحی و زیرزمینی کافی و به تبع کاهش سطح اراضی کشاورزی آبی در این منطقه است. در نهایت، به‌منظور بررسی صحت روش SEBAL در محاسبه تبخیر-تعرق، نتایج حاصل از این روش با میزان تبخیر-تعرق حاصل از روش فائو-پنمن-مانتیت، مقایسه شد. نتایج نشان داد که روش SEBAL با میزان خطای RMSE برابر ۰/۸۲ از کارایی مناسبی در برآورد تبخیر-تعرق برخوردار است و می‌تواند برای بهبود مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب و کشاورزی، تخمین رواناب و سایر اقدامات مدیریتی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم SEBAL، تبخیر-تعرق واقعی، روش فائو-پنمن-مانتیت، سنجش از دور

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: haghizadeh.a@lu.ac.ir

استناد: رئیسی، مریم، حقی‌زاده، علی، نوذری، حامد، و زینی‌وند، حسین (۱۴۰۴). برآورد تبخیر-تعرق واقعی کشت آبی و باغات شهرستان نهاوند با

استفاده از الگوریتم SEBAL. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۵(۱)، ۲۱۳-۲۳۰.

doi: 10.22098/mmws.2024.15091.1462



تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۳۰، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۰۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۶، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۱، صفحه ۲۱۳ تا ۲۳۰

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

۱- مقدمه

کشور ایران به لحاظ اقلیمی جزء کشورهای خشک و نیمه خشک جهان به شمار می‌رود، به طوری که از یک سو متوسط بارندگی سالانه آن حدود یک سوم متوسط بارندگی خشکی‌ها و کمتر از یک سوم بارندگی متوسط سالانه کره زمین است و از سوی دیگر میزان تبخیر آن حدود سه برابر تبخیر خشکی‌های زمین است (Zamansani et al., 2017). تبخیر-تعرق واقعی یکی از عوامل مهم در چرخه هیدرولوژیکی و از جمله عوامل تعیین کننده معادلات انرژی در سطح زمین و توازن آب است (Sahragard et al., 2020). از این رو واکاوی این پدیده در مواردی از قبیل برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب و کشاورزی، تعیین میزان تبخیر از مخازن آب، تخمین رواناب، محاسبه بیلان آب و مطالعات اقلیم‌شناسی دارای یک ضرورت راهبردی بوده (Soltani et al., 2012) و از مهم‌ترین پارامترهایی است که برآورد دقیق آن هنگام تعیین نیازهای آبی محصولات کشاورزی، کشاورزان را قادر می‌سازد تا برآورد صحیح تا علاوه بر جلوگیری از آلودگی‌های محیط‌زیستی منطقه، موجب صرفه‌جویی در مصرف آب، انرژی و مواد شیمیایی شود (Ajjur and Al-Ghamdi, 2021).

در طی پنجاه سال گذشته روش‌های تجربی زیادی برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی یا پتانسیل با استفاده از متغیرهای هوا و اقلیم‌شناسی توسعه یافته است. اما، با استفاده از این روش‌ها فقط می‌توان مناطق همگن اطراف ایستگاه‌های هواشناسی را ارزیابی کرد و تعمیم دادن آن به سایر نقاط مشکل است (Santos et al., 2009). سنجش از دور از جمله فناوری‌های جدیدی است که می‌توان با استفاده از آن، تبخیر-تعرق را در یک منطقه بدون نیاز به دانستن پیشینه‌ای در رابطه با شرایط خاک، محصول و نحوه مدیریت مزرعه برآورد نمود (Bastiaanssen et al., 2005). همچنین، سنجش از دور این قابلیت را دارد که ضمن تخمین مقدار تبخیر-تعرق، توزیع مکانی آن را نیز نشان دهد، زیرا، تنها فناوری است که شاخص‌هایی نظیر دمای سطحی، ضریب آلبیدو و شاخص‌های گیاهی را به صورت منطبق یا سازگار با محیط استخراج می‌کند و از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه است (Norman et al., 1995).

تاکنون الگوریتم‌های مختلفی برای برآورد تبخیر-تعرق به کمک سنجش از دور ارائه شده است. به طور کلی، روش‌هایی که بر اساس توازن انرژی عمل می‌کنند، به دو دسته تک منبعی^۱ (که در آن خاک و گیاه به صورت مجموعه واحد در نظر گرفته

می‌شوند) و دو منبعی^۲ (که در آن خاک و گیاه به صورت اجزای جدا در نظر گرفته می‌شوند) طبقه‌بندی می‌شوند؛ الگوهای تک منبعی، تنها از یک مقاومت آئرودینامیک در فرآیند انتقال آب-گرما استفاده می‌کنند. در این الگوها فرض بر این است که تمامی سطح زمین تحت تأثیر دما و رطوبت یکسان قرار می‌گیرد (Huntingford et al., 2000; Nishida et al., 2003). حال آن‌که در الگوهای دو منبعی، از چندین مقاومت مجزا برای گیاه و خاک استفاده می‌شود. بنابراین، در مناطقی که پوشش گیاهی پراکنده وجود دارد استفاده از الگوهای دو منبعی به جای الگوی تک منبعی توصیه می‌شود؛ زیرا خاک و گیاه به‌عنوان دو عنصر مجزا در نظر گرفته شده‌اند (Norman et al., 1995).

از الگوهای معروف دو منبعی می‌توان به TSEB^۳ (Kustas and Norman, 1999; Norman et al., 1999) و STSEB^۴ (Sanchez et al., 2008) و از الگوهای تک منبعی می‌توان به SEBAL^۵ (Bastiaanssen, 2000; Bastiaanssen et al., 2002)، METRIC^۶ و SEBS^۷ (Allen et al., 2007) اشاره کرد. الگوریتم SEBAL و METRIC از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌های باقیمانده بیلان انرژی برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از داده‌های سنجش از دور هستند (Yibrie et al., 2024).

الگوریتم SEBAL روشی است که بر پایه روابط تجربی و فیزیکی، میزان تبخیر-تعرق واقعی را با حداقل داده‌های زمینی برآورد می‌کند و استفاده از این روش برای برآورد تبخیر-تعرق در مقیاس‌های بزرگ و دوره‌های بلند مدت نتایج بهتری را به دست می‌دهد (Bastiaanssen et al., 2005). بنابراین، با توجه به مزایای الگوریتم SEBAL، این روش با تصاویر سنجنده‌های متفاوتی در مناطق مختلف دنیا اجرا شده و نتایج مطلوبی نیز ارائه کرده است.

(Rawat et al., 2017) به برآورد تبخیر-تعرق واقعی محصول گندم با استفاده از الگوریتم SEBAL، لایسیمتر و روش استاندارد شده پنمن مانیتیت در منطقه بیوانی در هاریانا پرداختند. ایشان نتایج به دست آمده را با استفاده از آزمون‌های سنجش عملکرد آماری مورد مقایسه و ارزیابی قرار دادند، نتایج حاصل از این مقایسه حاکی از همبستگی قابل توجه مقادیر برآورد شده با

² Two-source

³ Two-source energy balance

⁴ Simplified two-source energy balance

⁵ Surface energy balance algorithms for land

⁶ Mapping evapotranspiration at high resolution with internalized calibration

⁷ Surface energy balance system

¹ Single-source

(2013) در دشت سانجیانگ^۳ در چین انجام گرفت، با استفاده از ۱۲ تصویر سنجنده MODIS در طول ۱۸۴ روز دوره رشد از ماه می تا انتهای اکتبر و با بهره‌گیری از مدل SEBAL، میزان اختلاف ET واقعی روزانه و اندازه‌گیری انجام شده توسط روش کوواریانس ادی^۴ به صورت میانگین ۱۰/۵ درصد گزارش شد. همچنین، نتایج این مطالعه نشان از خطای ۸/۸ درصدی در مقیاس فصلی داشت.

(2018) Yang et al. به برآورد تبخیر-تعرق با استفاده از روش SEBAL و تصاویر لندست ۸ پرداختند. ایشان در این پژوهش مقادیر برآوردی تبخیر-تعرق حاصل از روش SEBAL را با روش فائو-پنمن-مانتیت مقایسه نمودند که میزان اختلاف آن‌ها کمتر از یک میلی‌متر در روز بود. Asadi and Valizadeh (2023) بر اساس الگوریتم تعادل انرژی برای برآورد نیاز آبی محصولات انتخاب شده در نیمه شمالی استان اردبیل پرداختند. در این پژوهش از تصاویر لندست ۷ و ۸ و روش‌های SEBAL و SEBS برای برآورد نیاز 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 SEBAL و ۱/۰۹ میلی‌متر در روش SEBS کمترین مقدار تبخیر-تعرق و محصول عدس در سال ۲۰۱۳ با مقدار عددی ۷/۸۶ و ۸/۱۴ میلی‌متر در روز بیشترین مقدار تبخیر-تعرق را در بین محصولات مورد بررسی داشته‌اند. در مطالعه‌ای، Saxena et al. (2024) با استفاده از الگوریتم SEBAL و تصاویر سنجنش از دوری لندست ۸ و مودیس^۵ تبخیر-تعرق واقعی منطقه راجستان غربی هند را برآورد و سپس، نتایج حاصل از آن را با نتایج حاصل از روش‌های هارگریوز^۶ و فائو-پنمن-مانتیت مقایسه نمودند. نتایج این مقایسه نشان داد که روش SEBAL از قابلیت اطمینان کافی در برآورد تبخیر-تعرق واقعی برخوردار است.

(2024) Mikaeili et al. در مطالعه‌ای در حوزه مارون در جنوب غرب ایران با استفاده از روش همسان‌سازی داده‌ها^۷ صحت روش SEBAL را در برآورد تبخیر-تعرق با در نظر گرفتن عدم قطعیت مورد بررسی قرار دادند. ایشان پس از برآورد تبخیر-تعرق، با استفاده از مدل SWAT اقدام به شبیه‌سازی عملکرد نتایج و خروجی‌های حاصل از روش SEBAL (رواناب و تبخیر-تعرق) نمودند یافته‌های این پژوهش نشان داد که استفاده از

استفاده از روش SEBAL و مقادیر اندازه‌گیری شده با استفاده از لایسیمتر ($R^2=0.91$) و روش فائو-پنمن-مانتیت^۱ ($R^2=0.85$) و (RMSE= 0.56) است. (Wagle et al. 2017) به بررسی عملکرد پنج مدل توازن انرژی سطح زمین شامل: SEBAL، METRIC، SEBS، S-SEBI و S-SEBop^۲ برای برآورد تبخیر-تعرق روزانه زیست‌توده Sorghum در فصل رشد ۲۰۱۲-۲۰۱۳ پرداختند، نتایج حاکی از آن است که الگوریتم‌های SEBAL و S-SEBI برای برآورد تبخیر-تعرق زیست توده سورگوم بهترین نتیجه را داشتند؛ در حالی که الگوریتم‌های متریک و S-SEBop عملکرد ضعیفی داشتند.

(2011) Sun et al. با استفاده از تصاویر لندست ۷ ETM+، DEM، داده‌های هواشناسی و الگوریتم SEBAL به برآورد مقدار تبخیر-تعرق در تالاب دریاچه ناسی چین پرداختند؛ ایشان نتایج حاصل از الگوریتم SEBAL را با مقادیر مشاهداتی از تشتک مقایسه نمودند، نتایج این مقایسه نشان داد که مقدار تبخیر-تعرق برآورد شده توسط روش SEBAL به خوبی با مقادیر مشاهداتی تشتک مطابقت دارد. (2014) Paul et al. با استفاده از الگوریتم SEBAL، مقدار تبخیر-تعرق را برای دو سطح کشاورزی آبی و دیم تخمین زدند و نتایج را با داده‌های چهار ایستگاه لایسیمتر وزنی مقایسه و بر کارایی این الگوریتم تاکید کردند. Karimi (2018) Torghabeh et al. در پژوهشی از الگوریتم SEBAL، برای برآورد میزان تبخیر-تعرق و آب مصرفی کشاورزی دهستان سودلانه استفاده کردند. مقایسه نتایج حاصل از این مطالعه با داده‌های زمینی، صحت بالا و کارایی الگوریتم SEBAL را در برآورد تبخیر-تعرق تأیید می‌نماید. (2017) Noori et al. در پژوهشی جهت برآورد تبخیر-تعرق در کاربری‌های مختلف شهرستان ملایر از الگوریتم SEBAL با ترکیب دو سنجنده مودیس و لندست ۸ استفاده و نتایج حاصل از آن را با مقادیر محاسبه شده با روش فائو-پنمن-مانتیت مقایسه نمودند، نتایج حاصل از این پژوهش حاکی از صحت بالای الگوریتم SEBAL در برآورد تبخیر-تعرق است. (2011) Sanaei-Nejad et al. مطالعه‌ای به منظور برآورد توزیع مکانی تبخیر-تعرق واقعی زیرحوزه آبریز مشهد از تصاویر ماهواره‌ای مودیس و الگوریتم SEBAL استفاده کردند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که تصاویر ماهواره‌ای مودیس و الگوریتم SEBAL قادر هستند مقدار تبخیر-تعرق واقعی را در مقیاس روزانه در زیر حوزه آبریز مشهد به خوبی برآورد نمایند. در مطالعه‌ای که توسط Du et al.

³ Sangiang

⁴ Eddy covariance

⁵ Moderate resolution imaging spectroradiometer

⁶ Hargreaves

⁷ Ensemble-based data assimilation

¹ FAO-Penman-Monteith

² Operational simplified surface energy balance

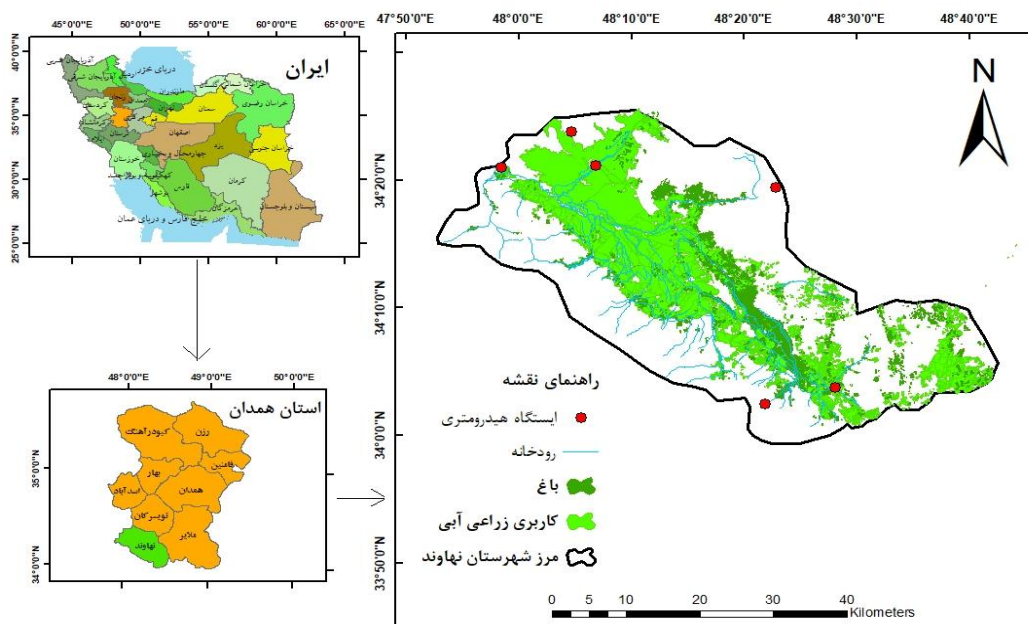
عرض‌های شمالی $33^{\circ} 00'$ تا $33^{\circ} 30'$ قرار دارد (شکل ۱). این منطقه، یکی از زیرحوضه‌های حوزه‌ی علیای کرخه محسوب می‌شود و در دامنه‌ی شمال شرقی کوه‌های گرین از سلسله ارتفاعات زاگرس قرار گرفته است. وسعت اراضی مسطح نهاوند ۶۴۴ کیلومتر مربع و بقیه اراضی که ۱۰۴۶ کیلومتر مربع (۶۰ درصد) وسعت دارند شامل ارتفاعات حاشیه‌ی شهرستان هستند. کاربری رودخانه‌ی گاماسیاب که بزرگ‌ترین رودخانه‌ی استان همدان است در این محدوده‌ی مطالعاتی جریان دارد، این رودخانه پس از دریافت سایر جریانات دیگر حوضه‌های مجاور نظیر: ملایر، اسدآباد، تویسرکان و کنگاور در محلی به نام دوآب از منطقه خارج می‌شود. شیب عمومی منطقه مورد مطالعه از جنوب شرق به طرف شمال غرب است و مرتفع‌ترین نقطه حوضه بیش از ۳۴۰۰ متر و پست‌ترین قسمت آن ۱۴۰۲ متر از سطح دریا اختلاف دارد. اقلیم غالب این منطقه نیز با استفاده از روش دومارتن از نوع مدیترانه‌ای و در روش آمبرژه، از نوع نیمه مرطوب سرد تعیین شده است. متوسط بارندگی سالانه در این منطقه ۴۵۷ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه آن نیز ۱۲/۵ درجه سانتیگراد است که بیشترین آن در ماه مرداد (با متوسط حداکثر 35°C) و کمترین آن در ماه دی (با متوسط حداقل -2°C) است. در این محدوده سه ایستگاه باران‌سنجی: وراینه، نهاوند و وسج به‌منظور کنترل کمی و کیفی منابع آب سطحی و شش ایستگاه اندازه‌گیری عناصر جوی: وراینه، نهاوند (سینوپتیک)، گوشه نهاوند، گوشه سعد و قاص، فیروزآباد و آران احداث شده است. همچنین، در این منطقه، ۹۰۰ حلقه‌ی چاه عمیق و ۳۵۸ حلقه‌ی چاه نیمه‌عمیق و ۱۳۱ قنات و ۳۳۵ چشمه وجود دارد (شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان همدان، ۱۳۸۸).

روش همسان‌سازی داده‌ها در برآورد تبخیر-تعرق با استفاده از روش SEBAL نتایج دقیق‌تر و قابل اطمینان‌تری به‌دست می‌دهد. بنابراین، با توجه به نتایج پژوهش‌های انجام شده در این راستا و اهمیت شهرستان نهاوند به‌عنوان قطب کشاورزی استان همدان و وجود مزارع و باغ‌های وسیع در این منطقه که منجر به استفاده فزاینده از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی در راستای تامین تقاضا و تشدید روند نزولی سطح آبخوان‌های این منطقه شده، تحقیق، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در این منطقه امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. از آنجایی که برآورد تبخیر-تعرق به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در مدیریت منابع آب و کشاورزی بسیار ضروری بوده و یکی از اجزای مهم بیلان آب است، لذا، برآورد دقیق آن و آب مورد نیاز گیاهان اهمیت زیادی در بهبود مدیریت مصرف آب و در نهایت افزایش راندمان آب مصرفی دارد. در همین زمینه، به روش‌هایی نیاز است که قادر به محاسبه‌ی نیاز آبی گیاهان در مقیاس وسیع بوده و نیز صحت کافی داشته باشند. بنابراین، با توجه به مزایای روش SEBAL از جمله نیاز به حداقل داده‌های زمینی و ارائه بهترین نتایج در مقیاس بزرگ، در این تحقیق، به‌منظور برآورد مقدار تبخیر-تعرق واقعی روزانه کاربری‌های کشاورزی آبی شهرستان نهاوند در سال ۲۰۲۱ از الگوریتم SEBAL و تصاویر لندست ۸ استفاده شد که برآورد آن برای دستیابی به هدف غایی توسعه پایدار و مدیریت صحیح منابع آبی منطقه بسیار حائز اهمیت است.

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

شهرستان نهاوند واقع در استان همدان با وسعت ۱۶۹۰ کیلومتر مربع است که بین طول‌های شرقی $47^{\circ} 50'$ تا $48^{\circ} 40'$ و



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی شهرستان نهاوند
Figure 1- Geographical location of Nahavand County

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

۲-۲-۱- داده‌های زمینی

داده‌های زمینی مورد استفاده در این مطالعه شامل داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک نهاوند است که شامل: حداقل دمای روزانه، حداکثر دمای روزانه، متوسط دمای هوا (درجه سانتی‌گراد)، سرعت باد (متر بر ثانیه)، رطوبت نسبی (درصد)، تعداد ساعات آفتابی (ساعت)، بارش ماهانه (میلی‌متر) است.

۲-۲-۲- داده‌های ماهواره‌ای

در این پژوهش، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ در سال ۲۰۲۱ (در هر ماه دو تصویر) که برای منطقه مورد مطالعه، بدون ابر و در ردیف ۳۶ و گذر ۱۶۶ با زمان گذر ۷:۲۱ بودند، تبخیر-تعرق واقعی روزانه کشاورزی آبی و باغات شهرستان نهاوند برآورد شد (جدول ۱).

جدول ۱- مشخصات تصاویر انتخاب شده

Table 1- Specifications of selected images

نوع تصویر	تاریخ تصویربرداری	تعداد باند	نوع باند	قدرت تفکیک (متر)
Landsat8	2021/04/13 2021/04/29	11	9 باند انعکاسی	30
	2021/05/15 2021/05/31			
	2021/06/16 2021/07/02			
	2021/07/18 2021/08/06			
	2021/08/19 2021/09/04			
	2021/09/20 2021/10/06			
2021/10/22			2 باند حرارتی	30

۲-۳- مفاهیم و روابط الگوریتم SEBAL

الگوریتم تعادل انرژی SEBAL روشی است که بر اساس روابط تجربی و فیزیکی و با استفاده از بیلان انرژی در سطح (رابطه ۱) تخمین زده می‌شود، مقدار تبخیر-تعرق لحظه‌ای و روزانه محصول را با به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای و حداقل داده‌های زمینی لازم برآورد می‌نماید (Owaneh and Suleiman, 2018). برای برآورد تبخیر-تعرق با استفاده از الگوریتم SEBAL

ابتدا روابط ریاضی مورد نیاز برای انجام تجزیه و تحلیل‌هایی مانند بازتابندگی^۱، شاخص‌های پوشش گیاهی^۲، گسیلمندی^۳، آلبیدوی سطحی^۴، دمای سطحی^۵، شار تابش^۶، شار

¹ Reflectance

² Vegetation index

³ Emissivity

⁴ Surface albedo

که در آن ρ چگالی هوا (کیلوگرم بر مترمکعب)، C_p گرمای ویژه در فشار معین (۱۰۰۴ ژول بر کیلوگرم در درجه کلوین)، dT اختلاف دمای هوای بین دو ارتفاع مشخص (طبق دستورالعمل SEBAL، ۰/۱ و ۲ در نظر گرفته شد) و r_{ah} مقاومت آئروپنایمیکی در برابر انتقال حرارت (ثانیه بر متر) است (Allen et al; 2002). حل رابطه (۴) به دلیل وجود دو پارامتر مجهول dT و r_{ah} مشکل‌ترین بخش الگوریتم SEBAL است (Costa et al., 2019). به منظور آسان نمودن این محاسبه، از دو پیکسل سرد و گرم (که در آن‌ها می‌توان H و dt را برآورد نمود) استفاده می‌شود. پیکسل سرد از مناطقی که جزء زمین‌های کشاورزی بودند و NDVI بالا (مقدار این شاخص در ماه‌های مختلف، بسته به مرحله رشد گیاه متفاوت است. اما، در این تحقیق، مقدار آن به طور میانگین ۰/۵ و در زمین‌هایی با تراکم پوشش بالاتر و در ماه‌هایی که گیاهان در میانه دوره رشد خود قرار داشتند تا ۰/۹۹ برآورد شد) LST پائین داشتند، انتخاب شد. پیکسل گرم نیز در اطراف زمین‌های کشاورزی که NDVI پائین و LST بالاتری داشتند، انتخاب شد.

۲-۷-۲- نرخ تبخیر-تعرق لحظه‌ای

تبخیر-تعرق لحظه‌ای عبارت است از مقادیر لحظه‌ای تبخیر-تعرق در برابر عمق تبخیر-تعرق که با استفاده از رابطه (۵) محاسبه شد (Genanu et al., 2017).

$$ET_{ins} = 3600 \times \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (5)$$

که در آن ET_{ins} : تبخیر - تعرق لحظه‌ای (میلی‌متر بر ساعت)، 3600: برای تبدیل ثانیه به ساعت استفاده شد. مراحل تبدیل تبخیر-تعرق لحظه‌ای به روزانه به شرح ذیل است.

۲-۷-۱- محاسبات مربوط به کسر تبخیر-تعرق

کسر تبخیر-تعرق مرجع عبارت است از حاصل تقسیم میزان تبخیر-تعرق لحظه‌ای بر تبخیر-تعرق مرجع که با استفاده از رابطه (۶) محاسبه شد.

$$ET_{rF} = \frac{ET_{ins}}{ET_r} \quad (6)$$

که در آن ET_{rF} : کسر تبخیر-تعرق مرجع (معمولاً بین ۰ تا ۱ است)، ET_r : تبخیر-تعرق مرجع حاصل از نرم افزار REF-ET در زمان عبور ماهواره از روی منطقه مورد مطالعه است (میلی‌متر بر ساعت).

گرمای خاک^۱، شار گرمای محسوس^۲، شار گرمای نهان^۳ شناسایی شده و در نهایت به محاسبه شار تبخیر-تعرق لحظه‌ای^۴ در زمان تصویر برداری و مقدار تبخیر-تعرق روزانه^۵ پرداخته شد.

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

در این رابطه λET شار گرمای نهان تبخیر-تعرق (وات بر مترمربع)، Rn شار تشعشع خالص در سطح زمین (وات بر مترمربع)، G شار گرمایی زمین (وات بر مترمربع)، H جریان گرمای محسوس به سمت جو (وات بر مترمربع) است.

۲-۴- شار تشعشع خالص در سطح زمین (Rn)

در این مرحله از روند محاسباتی الگوریتم SEBAL، شار تشعشع خالص در سطح زمین (Rn) با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد (Allen et al., 2002).

$$Rn = (1 - \alpha)Rs\downarrow + RL\downarrow - RL\uparrow - (1 - \epsilon_0)RL\downarrow \quad (2)$$

که در آن $Rs\downarrow$ تابش ورودی طول موج کوتاه، $RL\downarrow$ تابش ورودی طول موج بلند و $RL\uparrow$ تابش خروجی طول موج بلند (تمامی پارامترهای فوق بر حسب وات بر مترمربع است)، α آلبیدو و ϵ_0 گسیلمندی سطح است.

۲-۵- شار گرمایی زمین (G)

شار گرمایی زمین در واقع نرخ ذخیره حرارت در خاک و گیاه در اثر انتقال است. SEBAL ابتدا نسبت G/Rn را با استفاده از رابطه تجربی (۳) که توسط Bastiaanssen ارائه شده تخمین می‌زند (Bastiaanssen., 2000).

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

که در آن T_s دمای اصلاح نشده سطح (درجه کلوین) و $NDVI$ شاخص پوشش گیاهی است (Allen et al; 2002).

۲-۶- شار حرارتی محسوس (H)

شار حرارتی محسوس، در واقع هدرفت حرارت به هوا از طریق همرفت و انتقال است. رابطه آن به صورت ذیل است (Allen et al., 2002):

$$H = \rho \times C_p \frac{dT}{r_{ah}}$$

⁵ Surface temperature

⁶ Net radiations

¹ Soil heat flux

² Sensible heat flux

³ Latent heat flux

⁴ Momentary evapotranspiration flux

⁵ Daily evapotranspiration

⁶ Normalized Difference Vegetation Index

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (E_{Si} - \hat{E}_{0i})^2}{n}} \times 100 \quad (9)$$

در اینجا \hat{E}_{0i} مقدار تبخیر-تعرق پیش‌بینی شده توسط مدل SEBAL، E_{Si} مقدار تبخیر-تعرق مشاهده شده از ایستگاه سینوپتیک و n تعداد مشاهدات است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارتفاع تبخیر-تعرق واقعی روزانه

در این مرحله، پس از انجام محاسبات الگوریتم SEBAL، تبخیر _ تعرق واقعی روزانه کشت آبی و باغات شهرستان نهاوند برآورد شد که نتایج حاصل از آن در جدول ۲ و شکل‌های ۳ تا ۶ نشان داده شده است. مقایسه و بررسی نقشه‌های توزیع دمای سطحی، شار تابش خالص خورشیدی، شاخص پوشش گیاهی و تبخیر-تعرق واقعی روزانه نشان دادند که در هر جایی که شار تابش خورشیدی بالا باشد، شاخص پوشش گیاهی نیز بالا و دمای سطحی پائین و مقدار تبخیر-تعرق واقعی بالاتر است و بالعکس در هر مکانی که شار تابش خالص خورشیدی و پوشش گیاهی کمتر و دمای سطحی بالاتر است مقدار تبخیر-تعرق واقعی کمتر است. چرا که، شار تابش خالص خورشیدی با پارامتر NDVI رابطه مستقیم دارد (Shamloo et al., 2021). بنابراین، توزیع مکانی مقادیر تبخیر-تعرق واقعی روزانه در تمامی تصاویر به‌دست آمده نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان تبخیر-تعرق مربوط به مرکز، جنوب و جنوب شرق شهرستان نهاوند (شامل روستاهای جهان‌آباد، جعفرآباد، شعبان، مرادآباد، بابارستم، بابا قاسم، بیان، فیازمان، تازناب‌ها، کوهانی، وراینه، دهنو، دهبوره، زرامین، گیان، گیل‌آباد، ورازانه، محمدآباد، اسد آباد، توانه، حسین آباد و ...) است (شکل‌های ۳ تا ۶) که مهم‌ترین دلیل آن قرار گرفتن این منطقه در مسیر سرشاخه اصلی رودخانه گاماسیاب و تمرکز حداکثری باغات، اراضی زراعی کشت صنوبر و گسترش حداکثری کاربری کشت آبی و در نتیجه افزایش تراکم پوشش گیاهی و شاخص NDVI در این منطقه است که باعث افزایش آب مصرفی کشاورزی شده است. همچنین، کمترین میزان تبخیر-تعرق واقعی روزانه نیز مربوط به بخش‌های عمده‌ای از شمال شرقی منطقه مورد مطالعه است (شامل روستاهای وشت، گوشه بدیع الزمان، عشوند، بانسره، امیرآباد گوشه، میلاب، الوان کمر، سفیدخانی) که مهم‌ترین دلایل آن عدم وجود آب‌های سطحی و محدودیت آب زیرزمینی و در نتیجه، کاهش سطح زیر کشت کشاورزی آبی و به تبع کاهش تراکم پوشش گیاهی در این منطقه است. البته، در این مناطق به دلیل اختصاص بخش عمده کاربری-های کشاورزی به کشت دیم و وجود باغات انگور، مقدار تبخیر-

۲-۷-۲- محاسبات مربوط به تبخیر-تعرق ۲۴ ساعته یا روزانه به‌دست آوردن میزان تبخیر-تعرق روزانه معمولاً مفیدتر از در اختیار داشتن تبخیر-تعرق لحظه‌ای خواهد بود چرا که بیشتر برنامه‌ریزی‌ها روی آن انجام می‌پذیرد. لذا، تبخیر-تعرق روزانه از حاصل ضرب کسر تبخیر-تعرق مرجع با مجموع ۲۴ ساعته تبخیر-تعرق مرجع به‌دست آمده از روش فائو-پنمن-مانتیت، بر اساس رابطه (۷) محاسبه شد (Al Zayed et al., 2016).

$$ET_{24} = ET_{rF} \times ET_{r,24} \quad (7)$$

که در آن $ET_{r,24}$: مجموع ۲۴ ساعته تبخیر-تعرق مرجع (میلی‌متر بر روز)، ET_{24} : میزان تبخیر-تعرق روزانه (میلی‌متر بر روز) است.

۳-۷-۲- روش فائو-پنمن-مانتیت

یکی از روش‌هایی که توسط سازمان فائو به‌عنوان روشی استاندارد جهت برآوردن میزان تبخیر-تعرق مرجع و مقایسه مقادیر آن با سایر روش‌ها توصیه شده است روش فائو-پنمن-مانتیت است (Allen et al., 1998) که توسط پنمن در سال ۱۹۴۸ ارائه شد و سپس در سال ۱۹۶۵ مانتیت در آن تغییراتی ایجاد نمود که بعدها به‌عنوان رابطه پنمن مانتیت مطرح گشت (Zotarelli et al., 2010). لذا، در این پژوهش به‌عنوان مبنای ارزیابی و مقایسه مورد استفاده قرار گرفت (رابطه ۸):

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

که در آن ET_0 : تبخیر-تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر بر روز)، T_a : دمای هوا درجه سانتی‌گراد، U_2 : سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه)، R_n : تابش خالص در سطح زمین (مگاژول بر متر مربع بر روز)، e_s : فشار بخار اشباع، e_a : فشار بخار واقعی، $e_s - e_a$: کمبود فشار بخار اشباع هوا (کیلوپاسکال)، Δ : شیب منحنی فشار بخار اشباع با دما (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، γ : ثابت سایکرومتری (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد) است (Asadi and Karami, 2020).

۳-۸- ارزیابی مدل

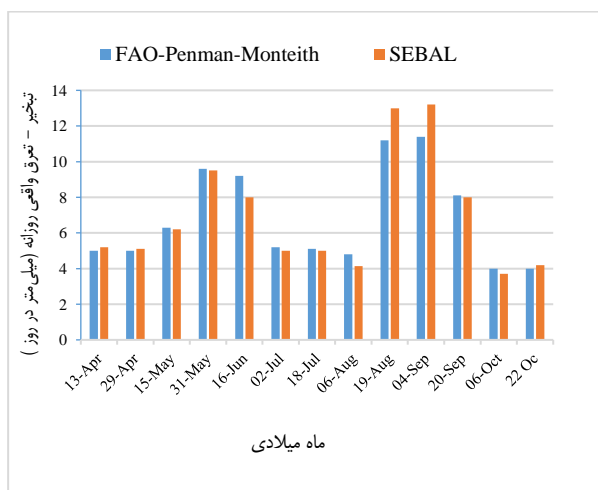
در این پژوهش برای ارزیابی کارایی روش SEBAL در برآورد تبخیر-تعرق واقعی کشت آبی و باغات شهرستان نهاوند از تابع استاندارد مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. رابطه مربوط به این روش به شرح ذیل است (Zhou et al., 2014).

جدول ۲- مقدار میانگین تبخیر-تعرق واقعی روزانه در کاربری

کشاورزی آبی شهرستان نهاوند در سال ۲۰۲۱

Table 2- The average daily actual evapotranspiration values for Irrigated agricultural land use of Nahavand County in 2021

ردیف	تاریخ تصویربرداری	میانگین تبخیر - تعرق روزانه (میلی‌متر در روز)
1	2021/04/13	5
2	2021/04/29	5.5
3	2021/05/15	6.2
4	2021/05/31	9.5
5	2021/06/16	6.4
6	2021/07/02	3.4
7	2021/07/18	4.2
8	2021/08/06	4.6
9	2021/08/19	12.3
10	2021/09/04	12.8
11	2021/09/20	8
12	2021/10/06	3.1
13	2021/10/22	4



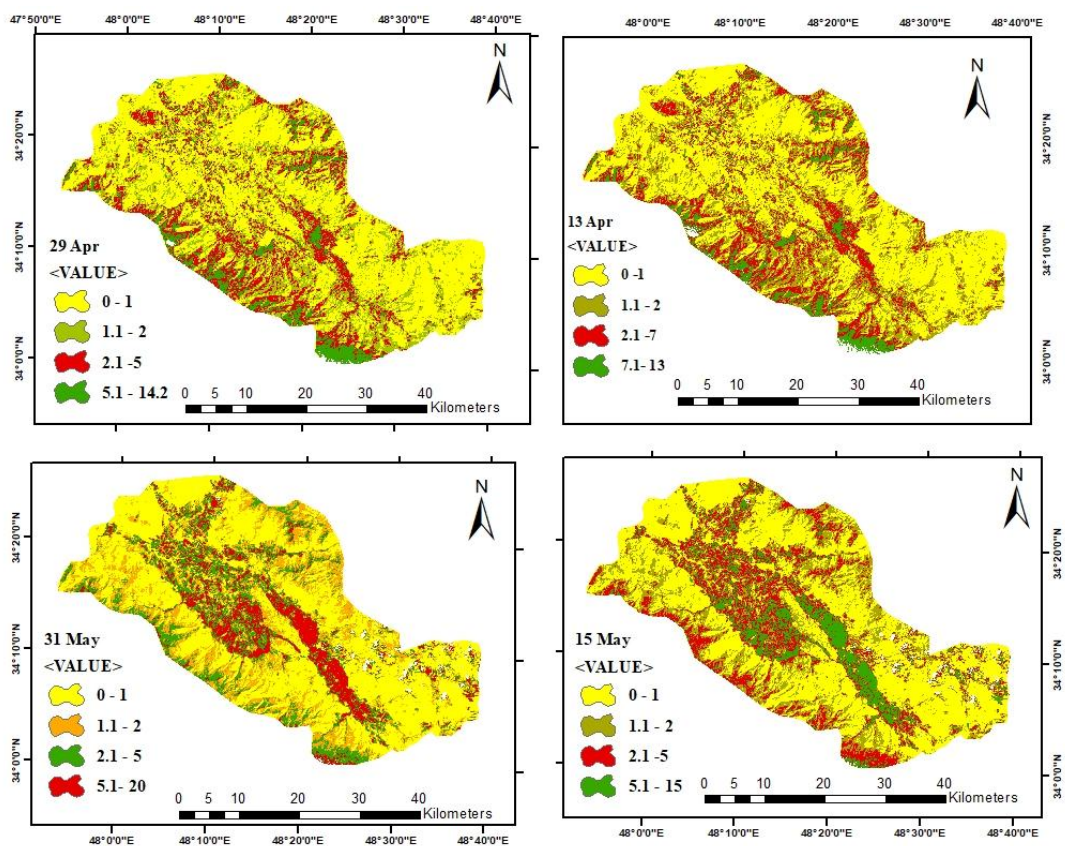
شکل ۲- مقادیر میانگین ارتفاع تبخیر-تعرق واقعی روزانه

شهرستان نهاوند در سال ۲۰۲۱

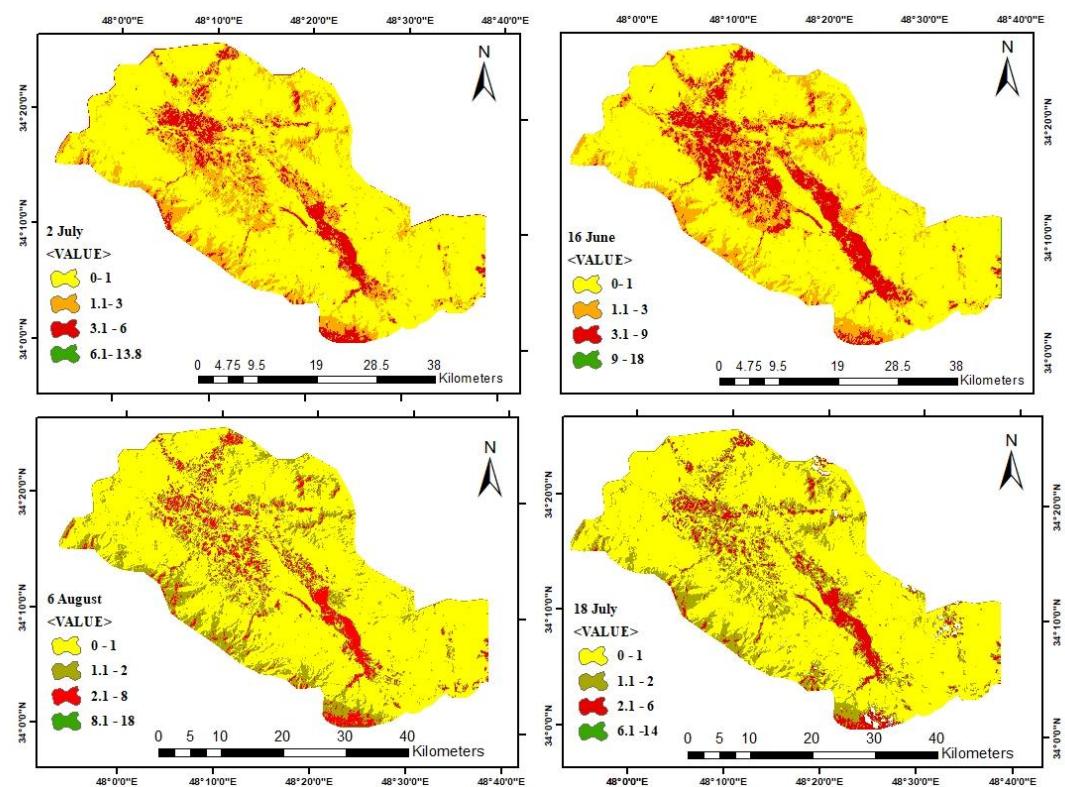
Figure 2- The average daily actual evapotranspiration height in Nahavand County in 2021

تعرق در فصل بهار بالا است که نشان می‌دهد در شمال شرق منطقه مورد مطالعه، کشت غالب، دیم بوده و تا سال ۲۰۲۱ در این بخش از منطقه تبدیل کشت دیم به آبی صورت نگرفته است.

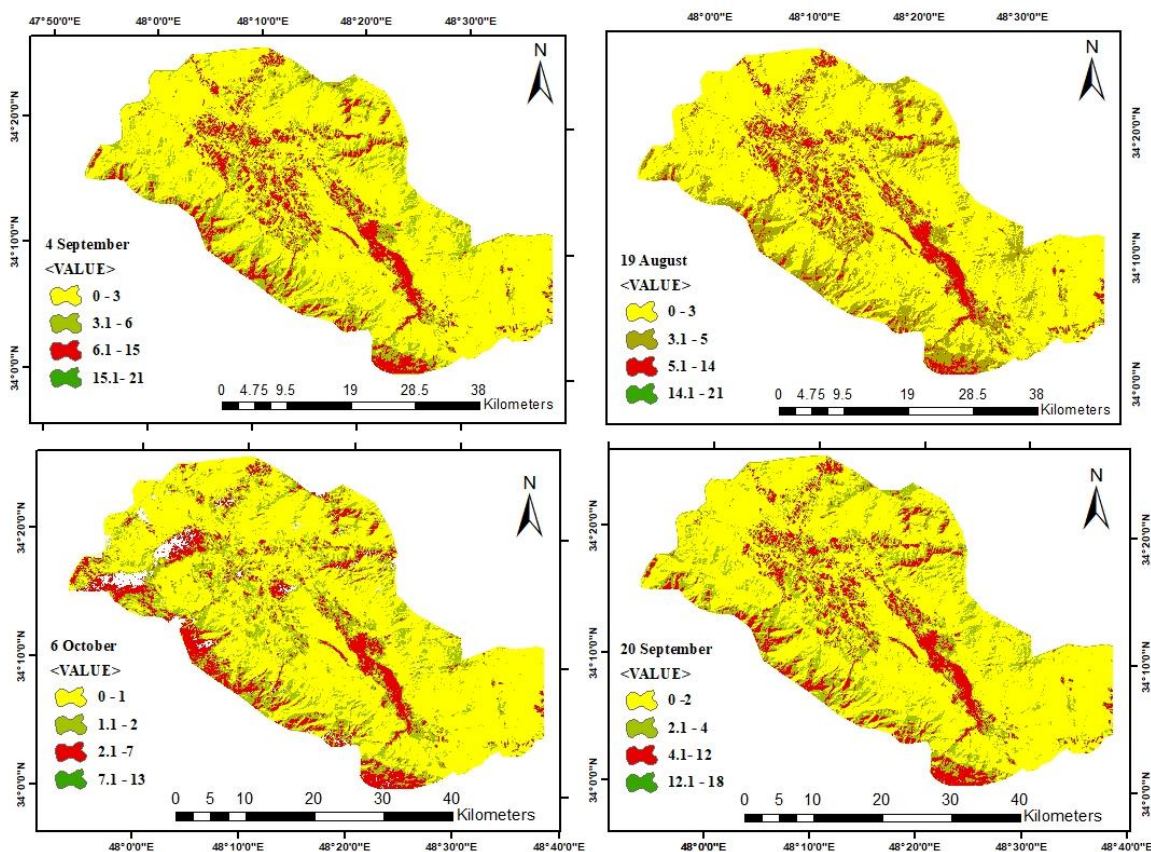
در بین تصاویر بدست آمده در ماه‌های مورد بررسی، بالاترین مقدار تبخیر-تعرق واقعی مربوط به تصویر چهارم سپتامبر با مقدار میانگین ۱۲/۸ میلی‌متر در روز (به دلیل قرار داشتن گیاهان در میانه دوره رشد، افزایش شار تابش خالص خورشیدی و افزایش شاخص NDVI) و کمترین مقدار آن، مربوط به تصویر ششم اکتبر با مقدار میانگین ۳/۱ میلی‌متر در روز (به دلیل کاهش شار تابش خالص خورشیدی، برداشت محصولات زراعی (شامل: گندم، جو، ذرت، گوجه فرنگی، خیار، آفتابگردان و ... به جزء چغندرقد و یونجه که تقریباً اواخر اکتبر برداشت می‌شوند) و کاهش شاخص NDVI است. پس از انجام محاسبات مربوط به الگوریتم SEBAL، به منظور اعتبارسنجی مقادیر تبخیر-تعرق محاسبه شده از مقادیر مرجع محاسبه شده با استفاده از روش فائو-پنمن-مانتیت استفاده شد (شکل ۲)؛ چرا که این روش یکی از مهم‌ترین روش‌های مرجع قابل اطمینان در محاسبات تبخیر-تعرق است. در نهایت، مقایسه نتایج حاصل از دو روش مذکور، نشان داد که روش SEBAL با میزان خطای RMSE ۰/۸۲ از کارایی مناسبی برای برآورد تبخیر-تعرق برخوردار است؛ که با نتایج حاصل از مطالعات Karimi Rao, Ma et al. (2023), Torghabeh et al. (2018) و Mikaeili et al. (2024), Peddinti et al. (2025) و Golreyhan et al. (2023) مبنی بر تأیید صحت روش SEBAL هم‌خوانی و تطابق دارد. لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر به دلایل: عدم وجود لایسیمتر در منطقه مورد مطالعه، هزینه بالای کاشت و استخراج نتایج حاصل از آن، از داده‌های لایسیمتری استفاده نشد. هر چند که در سطح جهان پژوهش‌های زیادی انجام گرفته و یا در حال انجام است که در آن‌ها از لایسیمتر استفاده نشده است (Asadi and Valizadeh, 2022).



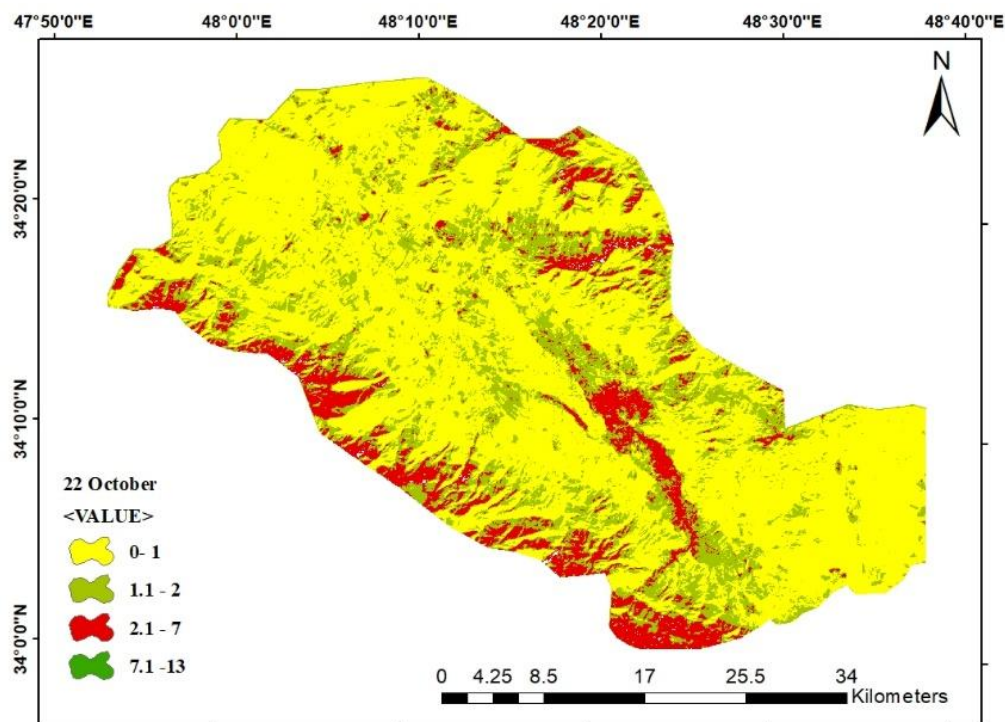
شکل ۳- نقشه ارتفاع تبخیر - تعرق روزانه شهرستان نهاوند در ۱۳ آپریل، ۲۹ آپریل، ۱۵ می و ۳۱ می ۲۰۲۱
 Figure 3- Daily actual evapotranspiration height map of Nahavand County on April 13, April 29, May 15, and May 31, 2021



شکل ۴- نقشه ارتفاع تبخیر-تعرق روزانه شهرستان نهاوند در ۱۶ ژوئن، ۲ ژوئیه، ۱۸ ژوئیه و ۶ اوت ۲۰۲۱
 Figure 4- Daily actual evapotranspiration height map of Nahavand County on June 16, July 2, July 18, and August 6, 2021



شکل ۵- نقشه ارتفاع تبخیر - تعرق روزانه شهرستان نهاوند در ۱۹ اوت، ۴ سپتامبر، ۲۰ سپتامبر و ۶ اکتبر ۲۰۲۱
 Figure 5- Daily actual evapotranspiration height map of Nahavand County on August 19, September 4, September 20, and October 6, 2021



شکل ۶- نقشه ارتفاع تبخیر - تعرق روزانه شهرستان نهاوند در ۲۲ اکتبر ۲۰۲۱
 Figure 6- Daily actual evapotranspiration height map of Nahavand County on October 22, 2021

۴- نتیجه گیری

با توجه به تأثیر گرمایش جهانی و تغییر اقلیم بر گیاهان، جنگل‌ها و مراتع، منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی و به تبع تأثیر آن بر محصولات کشاورزی و همچنین، کمبود امکانات مانند لایسیمتر به منظور محاسبه تبخیر-تعرق واقعی به عنوان یکی از پارامترهای مهم در چرخه هیدرولوژیکی، استفاده از روش‌های غیرمستقیم، مانند استفاده از سنجش از دور می‌تواند گامی مهم برای برآورد نیاز آبی محصولات کشاورزی، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب کشور باشد. بنابراین، با توجه به جایگاه شهرستان نهاوند به عنوان قطب کشاورزی استان همدان، در این پژوهش، تبخیر-تعرق واقعی اراضی کشاورزی آبی و باغات این منطقه با استفاده از الگوریتم توازن انرژی در سطح زمین (SEBAL) و تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ مورد بررسی قرار گرفت. سپس، نتایج حاصل از آن با داده‌های حاصل از روش فائو-پنمن-مانتیت مقایسه و ارزیابی شد.

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که الگوریتم SEBAL به خوبی قادر به اندازه‌گیری شاخص‌هایی همچون دمای سطحی، مقدار شار گرمای محسوس، انرژی تابشی خالص و شار گرمای خاک و تبخیر-تعرق واقعی است. به طوری که، مقایسه و ارزیابی نتایج حاصل این روش با روش فائو-پنمن-مانتیت با استفاده از تابع استاندارد RMSE خطایی معادل ۰/۸۲ را نشان داد که حاکی از صحت بالای الگوریتم SEBAL در محاسبه تبخیر-تعرق واقعی است. همچنین، نتایج نشان داد که بیشترین مقدار میانگین تبخیر-تعرق واقعی مربوط به تصاویر چهارم سپتامبر و نوزدهم اوت به ترتیب با میانگین ۱۲/۸ و ۱۲/۳ میلی‌متر در روز است (در باغات به ۲۲ میلی‌متر نیز می‌رسد). دلیل افزایش مقدار تبخیر-تعرق واقعی در این ماه‌ها، افزایش شار تابش خالص خورشیدی، افزایش تراکم پوشش گیاهی و کاهش آلودگی سطحی است. زیرا، در این زمان‌ها با توجه به افزایش شار تابش خالص خورشیدی و قرار داشتن گیاهان در میانه دوره رشد خود و افزایش تراکم پوشش گیاهی و در نتیجه مقادیر بالای NDVI (که خود نشان دهنده جذب بالای تابش توسط پوشش گیاهی است) و کاهش آلودگی سطحی، تبخیر-تعرق واقعی افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است. کمترین میزان میانگین تبخیر-تعرق نیز

مربوط به تصاویر ششم اکتبر و دوم ژوئیه با میانگین ۳/۱ و ۳/۴ میلی‌متر در روز است، که دلیل آن، کاهش شار تابش خالص خورشیدی، برداشت اکثر محصولات زراعی و کاهش شاخص NDVI در این ماه‌ها است. اما، در همین ماه‌هایی که میانگین تبخیر-تعرق در سطح کاربری‌های کشاورزی منطقه مورد مطالعه کمترین مقدار عددی را به خود اختصاص داده است.

در قسمت‌های مرکز و جنوب شرق، شمال غرب، جنوب غرب و غرب منطقه (شامل مناطقی از حومه شهرستان، روستاهای کوهانی، مرادآباد، فیازمان، شعبان، جهان‌آباد، رضی‌آباد، دهنو، دهبوره، زرامین، گره‌چغا، کنگاورکهنه، عبدالملکی، دهنو عبدالملکی، دره میرزا، شهرک سلگی، فارسبان، گنبد کبود، ازنه‌ری، کهریز، گردیان، لیلی‌یادگار، لیلان و ده موسی) به علت وجود باغات، کشت‌های چغندرقد، ذرت و آفتابگردان و در نتیجه افزایش شاخص NDVI، میزان تبخیر _ تعرق بالا بوده است (با میانگین چهار میلی‌متر در روز). لذا، با توجه به نتایج حاصل از تحقیقات مختلفی که ارزیابی کارایی روش SEBAL را در برآورد تبخیر-تعرق مورد بررسی قرار داده‌اند (به مواردی از آن‌ها نیز در این تحقیق اشاره شد) و همچنین، با توجه به نتیجه تحقیق حاضر، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از روش‌های سنجش از دوری مانند الگوریتم SEBAL، می‌توانند میزان تبخیر-تعرق واقعی کاربری‌های مختلف (کشاورزی آبی و دیم، جنگل و مرتع) را با صحت قابل قبولی برآورد نمایند و با توجه به محدودیت منابع آب کشور، در سیستم‌های مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب و کشاورزی به منظور ارائه بهترین راهکار و در نتیجه حصول عملکرد بالای محصولات به کار گرفته شوند؛ چرا که تبخیر-تعرق یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که برآورد دقیق آن هنگام تعیین نیازهای آبیاری ضروری بوده و بررسی دقیق آن کشاورزان را قادر می‌سازد تا نیازهای آبی مناسب محصولات را در نظر گرفته و علاوه بر جلوگیری از آلودگی‌های زیست محیطی منطقه، موجب صرفه‌جویی در مصرف آب، انرژی و مواد شیمیایی گردند. بنابراین، با بررسی شرایط آب و هوایی و منابع آبی و خاک هر منطقه می‌توان بهینه‌ترین الگوی کشت را برای آن منطقه تعریف نمود و علاوه بر مدیریت صحیح منابع آبی، بازدهی و عملکرد محصولات را نیز به حداکثر رسانید.

doi: 667-681
10.22059/jphgr.2018.227348.1007012
سلطانی، اسعد، میر لطیفی، سید مجید و دهقانی سانج، حسین (۱۳۹۱).
برآورد تبخیر - تعرق مرجع با استفاده از داده‌های محدوده
هواشناسی در شرایط اقلیمی مختلف. آب و خاک (علوم و صنایع
کشاورزی)، ۲۶(۱)، ۱۳۹-۱۴۹.
doi:10.22067/jsw.v0i0.13637

صحراگرد، ستاره، ناصری، عبدعلی، الباجی، محمد و کابلی زاده،
مصطفی (۱۳۹۹). برآورد تبخیر - تعرق واقعی با الگوریتم توازن
انرژی سطحی سبال و تصاویر تلفیق شده لندست ۸ و سنتینل ۲
(مطالعه موردی: کشت و صنعت نیشکر میرزا کوچک خان).
doi: ۱۵۶-۱۶۷، ۱۴(۱).
dor: 20.1001.1.20087942.1399.14.1.14.7
کریمی طریقه، حسین، کردوانی، پرویز و مهدوی، مسعود (۱۳۹۷). برآورد
آب مصرفی کشاورزی دهستان سودلانه با استفاده از الگوریتم
برآورد تبخیر - تعرق SEBAL. حفاظت منابع آب و خاک، ۸(۲)،
۱۰۵-۱۲۰. <https://civilica.com/doc/1297368>

گل ریحان، جلال، امینی‌نیا، کریم و ولیزاده کامران، خلیل (۱۴۰۲).
برآورد تبخیر - تعرق واقعی گیاهان مرتعی با الگوریتم
SEBAL (مطالعه موردی: شهرستان اهر). توسعه جغرافیا و
توسعه ناحیه‌ای، ۴۴(۳)، ۱-۲۸.
doi:10.22067/jgrd.2023.82588.1291
نوری، حمید و فرامرزی، محمد (۱۳۹۶). بررسی تبخیر - تعرق واقعی
در کاربری‌های مختلف اراضی کوهستانی با استفاده از الگوریتم
سبال و ترکیب تصاویر ماهواره‌ای MODIS و Landsat 8.
جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۶(۲)، ۳۸-۵۶.
doi:10.22108/GEP.2017.97932.0

References

- Ajjur, S.B., & Al-Ghamdi, S.G. (2021). Evapotranspiration and water availability response to climate change in the Middle East and North Africa. *Climatic Change*, 166, 28. doi: 10.1007/s10584-021-03122-z.
- 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. doi: 10.1016/j.agwat.2016.06.027.
- Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش وجود ندارد.

دسترسی به داده‌ها

امکان دسترسی به داده‌ها از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول وجود دارد.

مشارکت نویسندگان

مریم رئیس‌ی: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری، نگارش نسخه اولیه مقاله، علی حقی‌زاده: راهنمایی، مفهوم‌سازی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج، حامد نوذری: مفهوم‌سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله، حسین زینی‌وند: مفهوم‌سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله.

منابع

- ثنایی‌نژاد، سید حسین، نوری، سمیرا و هاشمی نیا، سید مجید (۱۳۹۰).
برآورد تبخیر - تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در
منطقه مشهد. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۵(۳)،
۵۴۰-۵۴۷.
doi:10.22067/jsw.v0i0.9641
- زمان‌ثانی، الناز، خورانی، اسداله، صادقی لاری، عدنان و سدیدی، جواد
(۱۳۹۶). ارزیابی برآورد تبخیر - تعرق گیاه گندم با استفاده از
الگوریتم سبال (مطالعه موردی: ایستگاه تحقیقات کشاورزی
شهرستان حاجی‌آباد). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۹(۴)،

(METRIC)—Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 380-394. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437.

- Allen, R., Waters, R., Tasumi, M., Trezza, R., & Bastianssen, W. (2002). SEBAL, Surface Energy Balance Algorithms for Land Idaho Implementation Advanced Training and User's manual. Version 1.0: 90 p.
- Allen, R.G., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. *Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 26-40.
- 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. doi: 10.29252/jgs.20.56.159.
- Asadi, M., & Valizadeh, K. (2022). Comparison of SEBAL, METRIC, and ALARM algorithms for estimating actual evapotranspiration of wheat crop. *Theoretical and Applied Climatology*, 149(1-2), 327-337. doi: 10.1007/s00704-022-04026-3.
- Asadi, M., & Valizadeh, K. (2023). Estimating selected cultivated crop water requirement based surface energy balance algorithm. *Arabian Journal of Geosciences*, 16, 298. doi: 10.1007/s12517-023-11386-1.
- Bastiaanssen, W. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229(1), 87-100. doi:10.1016/S0022-1694(99)00202-4.
- Bastiaanssen, W.G.M. (2002). SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). *Advanced Training and User Manual*, 12-76.
- Bastiaanssen, W.G.M., Noordman, E.J.M., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B.P., & Allen, R.G. (2005). SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field condition. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(1), 85-93. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(85).
- 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. doi: 10.1590/1678-992X-2017-0158.
- 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, 73-91. doi:10.1007/s11769-013-0587-8.
- 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*, 2-14. doi:10.20944/preprints201608.0098.v1.
- Golreyhan, J., Amininia, K., & Valizadeh Kamran, K. (2023). Estimation of actual evapotranspiration of pasture plants using SEBAL algorithm (Research-case study: Ahar County). *Journal of Geography and Regional Development*, 21(3), 169-197. doi: 10.22067/jgrd.2023.82588.1291 [In Persian]
- Huntingford, C., Verhoef, A., & Stewart, J. (2000). Dual versus single source models for estimating surface temperature of African savannah. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 4(1), 185-191. doi: 10.5194/hess-4-185-2000.
- Karimi Torghabeh, H., Kardavani, P., and Mahdavi, M. (2018). Estimation of water consumption in agricultural sector of Soudlانه Vill using estimation algorithm of evapotranspiration. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 2(8), 105-120. <https://civilica.com/doc/1297368>
- Kustas, W.P., & Norman, J.M. (1999). Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94, 13-29. doi:10.1016/S0168-1923(99)00005-2.
- Ma, Y., Sun, S., Li, C., Zhao, J., Li, Z. And Jia, C. (2023). Estimation of regional actual evapotranspiration based on the improved SEBAL model. *Journal of Hydrology*. 619, 129283. doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.129283.
- Mikaeili, O., & Shourian, M. (2024). Improving Evapotranspiration Estimation in SWAT-Based Hydrologic Simulation through Data Assimilation in the SEBAL Algorithm. *Water Resources Management*, 1-22. doi:10.1007/s11269-024-03854-4.
- Nishida, K., Nemani, R.R., Running, S.W., & Glassy, J.M. (2003). An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation. *Journal of Geophysical Research*, 108(D9), 4270. doi:10.1029/2002JD002062.
- Norman, J.M., Kustas, W.P., & Humes, K.S. (1995). Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77(3), 263-293. doi:10.1016/0168-1923(95)02265-Y.
- Nouri, H., & Faramarzi, M. (2017). Investigating actual evapotranspiration in different land uses in mountainous areas using SEBAL algorithm and a combination of MODIS and Landsat8 satellite images. *Geography and*

- Environmental Planning*, 28(2), 39-56. doi: 10.22108/gep.2017.97932.0 [In Persian]
- 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. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001335.
- Paul, G., Gowda, P. H., Vara Prasad, P. V., Howell, T. A., Aiken, R. M., & Neale, C. M. U. (2014). Investigating the influence of roughness length for heat transport (ZOH) on the performance of SEBAL in semi-arid irrigated and dryland agricultural systems. *Journal of Hydrology*, 509, 231-244. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.11.040.
- Rao Peddinti, S., Nicolas, F., Raij-Hoffman, L. and Kisekka, I. (2025). Evapotranspiration estimation using high-resolution aerial imagery and pySEBAL for processing tomatoes. *Irrigation Science*. 43, 51-64. doi:10.1007/s00271-024-00943-5.
- Rawat, K.S., Bala, A., Singh, S. K., & Pal, R. K. (2017). Quantification of wheat crop evapotranspiration and mapping: A case study from Bhiwani District of Haryana, India. *Agricultural Water Management*, 187, 200-209. doi:10.1016/j.agwat.2017.03.015.
- Sahragard, S., Naseri, A., Albaji, M., & Kabolizade, M. (2020). Estimation of actual evapotranspiration using SEBAL surface energy balance algorithm and fusion of Landsat8 and Sentinel2 satellite images (Case Study: Mirza Kouchak Khan Agroindustrial Company). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 14(1), 156-167. [In Persian]
- Sanaei-Nejad, S., Noori, S., & Hashemi nia, M. (2011). Estimation of evapotranspiration using satellite image data in Mashhad area. *Water and Soil*, 25(3), 540-547. doi: 10.22067/jsw.v0i0.9641 [In Persian]
- Sánchez, J. M., Scavone, G., Caselles, V., Valor, E., Copertino, V. A., & Telesca, V. (2008). Monitoring daily evapotranspiration at a regional scale from Landsat-TM and ETM+ data: Application to the Basilicata region. *Journal of Hydrology*, 351(1-2), 58-70. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.11.041
- Sanchez, J., Kustas, W., Caselles, V., & Anderson, M. (2008). Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations. *Remote Sensing of Environment*, 112, 1130-1143. doi:10.1016/j.rse.2007.07.018.
- Santos, C., Bezerra, B., Silva, B., & Neale, C. (2009). Assessment of daily actual evapotranspiration estimated by remote sensing algorithms. *Anais XIV Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil*, 427-434. <https://api.Semanticscholar.org/Corpus> ID: 174779053.
- Saxena, D., Choudhary, M., & Sharma, G. (2024). Spatiotemporal trends and evapotranspiration estimation using an improvised SEBAL convergence method for the semi-arid region of western Rajasthan, India. *AQUA Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 73(3), 407-423. doi: 10.2166/aqua.2024.220.
- Shamloo, N., Sattari, M. T., Apaydin, H., Valizadeh Kamran, Kh., & Prasad, R. (2021). Evapotranspiration estimation using SEBAL algorithm integrated with remote sensing and experimental methods. *International Journal of Digital Earth*, 1-22. doi: 10.1080/17538947.2021.1962996.
- Soltani, A., Mirlatifi, S., & Dehghanisani, H. (2012). *Water and Soil*, 26(1), 139-149. doi: 10.22067/jsw.v0i0.13637 [In Persian]
- 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 Lake Wetland of China. *Mathematical and Computer Modelling*, 54, 1086-1092. doi:10.1016/j.mcm.2010.11.039.
- 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, 192-203. doi:10.1016/j.isprsjprs.2017.03.022.
- 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. doi:10.1016/j.agwat.2018.07.011.
- Yibrie, E.A., Boteva, S., Zhang, L., & Elhag, M. (2024). Estimation of evapotranspiration based on METRIC and SEBAL model using remote sensing, near Al-Jouf, Saudi Arabia.

- Desalination and Water Treatment*, 290, 94-103. doi: 10.5004/dwt.2023.29478.
- Zamansani, E., Khorani, A., Sadeghi-e-lari, A., & Sadidi, J. (2017). Evaluation of evapotranspiration of wheat using SEBAL algorithm (Case study: Agricultural Research Station of Haji Abad). *Physical Geography Research*, 49(4), 667-681. doi: 10.22059/jphgr.2018.227348.1007012 [In Persian]
- 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. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.08.004.
- Zotarelli, L., Dukes, M. D., Romero, C. C., Migliaccio, K. W., & Morgan, K.T. (2009). Step by step calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method). *Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida*. <http://edis.ifas.ufl.edu>.