

Evaluation of the SEBAL for estimating actual evapotranspiration in the area of the Gareh Bygone plain floodwater spreading project

Hamid Hosseinimarandi¹, Mojtaba Pakparvar², Mirmasoud Khairkhah Zarkesh³

¹ Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Fars Agricultural Research, Education and Extension Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

² Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Fars Agricultural Research, Education and Extension Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

³ Associate Professor, Hydrology and Water Resources Development Department, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Extended Abstract

Introduction

Accurate estimation of actual evapotranspiration (ET_a) is essential for sustainable water resource management, particularly in arid and semi-arid regions. This study employed the SEBAL model in conjunction with Landsat 8 and 9 satellite imagery to estimate ET_a in the Gareh Bygone Plain, Fars Province, during 2018–2021. The model integrated corrected satellite data and meteorological inputs to compute essential components of the surface energy balance, including net radiation, soil heat flux, and latent heat flux. Calibration was enhanced by incorporating wind speed data, which improved the model's accuracy. ET_a values varied seasonally, ranging from 0.8 to 3.2 mm/day in colder months and 1.8 to 6.5 mm/day during warmer periods. The model's results were validated against the FAO Penman-Monteith reference ET and field measurements, confirming strong agreement. Crop coefficient (K_c) estimates highlighted significant variability based on vegetation type and growth stages. The complementary use of the SEBS model yielded ET_a estimations with a low error margin (3–5%), further confirming the reliability of remote sensing-based approaches. These findings support the application of calibrated satellite models and localized parameters in optimizing irrigation strategies and addressing water scarcity in semi-arid environments. Accurate estimation of actual evapotranspiration (ET_a) is crucial for water resource management and evaluating the efficiency of artificial recharge projects in arid regions. Traditional methods relying on point-based measurements often fail to represent large-scale and heterogeneous areas. Remote sensing technologies, utilizing satellite data and surface energy balance models such as SEBAL, enable precise estimation of ET_a and crop coefficients (K_c) over extensive spatial and temporal scales. This study aimed to assess the water consumption of various vegetation covers and the effectiveness of the flood spreading system in the Gareh Bygone plain, Fars Province, by developing improved models and analyzing the spatiotemporal distribution of ET_a .

Materials and Methods

This study was conducted in the Gareh Bygone plain, as part of a national project assessing the impact of flood spreading stations on the Kosar aquifer. The area features an arid climate, an average annual precipitation of 229 mm, and a geology comprising limestone, marl, and conglomerates. Satellite data from Landsat 8 and 9, processed with geometric, radiometric, and atmospheric corrections, served as input for the SEBAL model. This model estimates actual evapotranspiration by integrating satellite imagery and meteorological data using the surface energy balance equation. Vegetation indices such as NDVI and SAVI, surface albedo, surface temperature, and other surface energy parameters were used in ET_a estimation. Model results were validated with field measurements, including reference evapotranspiration, soil water balance, and estimates of return flow.

Results and Discussion

Satellite imagery from Landsat 8 Level 2, covering 2018–2021, was used to derive ET_a maps via the SEBAL model. Due to data acquisition limitations in certain provinces, temporal coverage was incomplete. The SEBAL model, calibrated with meteorological data and incorporating wind speed as a parameter, showed good performance in estimating ET_a , particularly in the Gareh Bygone plain. The comparison of SEBAL-derived ET_a values with FAO Penman-Monteith reference estimates, using a crop coefficient ($K_c=1.05$), demonstrated the model's reasonable accuracy. ET_a values ranged from 0.8 to 3.2 mm/day during the cold season and from 1.8 to 6.5 mm/day in the warm season, reflecting a seasonal pattern consistent with the region's climatic conditions. These results highlight the importance of using satellite data and optimizing model parameters for more accurate ET_a estimation. Analysis of SEBAL model results revealed seasonal fluctuations in ET_a influenced by

temperature, solar radiation, and vegetation cover. ET_a values ranged from 0.8 to 6.5 mm/day, peaking during the warm season. The crop coefficient (K_c) was closely linked to vegetation type and growth stage, emphasizing the need to consider these differences in water management. Field measurements of soil (moisture, texture, bulk density) in the Gareh Bygone plain indicated a progressive increase in water infiltration depth and return flow volume during the irrigation season. The comparison of SEBS model-derived ET_a with field data confirmed the high accuracy of the SEBS model (error margin of 3–5%), demonstrating its superiority over traditional methods and its effectiveness for agricultural water resource management in semi-arid regions.

Conclusion

This study demonstrated the strong capability of the SEBAL model, utilizing Landsat 8 imagery, to estimate actual evapotranspiration (ET_a), which closely matched seasonal variations in temperature, solar radiation, and vegetation cover. Incorporating wind speed into the model improved accuracy. The crop coefficient (K_c) highlighted species-specific and phenological differences. Field data confirmed the significance of soil properties and water management. The SEBS model provided high ET_a accuracy (3–5% error). These findings emphasize the role of satellite-based models and local parameters in sustainable water resource management and addressing water scarcity challenges in semi-arid regions.

Keywords: Meteorological data, remote sensing, field measurements, soil water balance, wet pixels

Article Type: Case Study

Acknowledgement

This is a sincere expression of gratitude to all colleagues and experts in the remote sensing and water sciences fields who have assisted in data collection, satellite imagery processing, and result analysis for this research. We also appreciate the financial support and facilities provided by the Soil and Watershed Conservation Research Institute and the Agricultural and Natural Resources Research and Training Center of Fars. Without their cooperation and support, this research would not have reached this level of accuracy and quality.

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

The datasets used in this study are available from the corresponding author upon reasonable request

Authors' contribution

Hamid Hosseinimarand: Conceptualization, methodology, writing–original draft; **Mojtaba Pakparvar:** Data curation, satellite image processing, formal analysis; **Mirmasoud Khairkhah Zarkesh:** Manuscript editing, supervision

*Corresponding Author, E-mail: hhmarand@gmail.com

Citation: Hosseinimarandi, H., Pakparvar, M. and Khairkhah Zarkesh, M. (2025). Evaluation of the SEBAL for Estimating Actual Evapotranspiration in the Area of the Gareh Bygone Plain Floodwater Spreading Project. *Water and Soil Management and Modelling*, 5(3), 261-276.
doi: 10.22098/mmws.2025.17580.1607

Received: 01 June 2025, Received in revised form: 28 June 2025, Accepted: 28 June 2025, Published online: 23 September 2025.

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 3, pp. 261-276.
Publisher: University of Mohaghegh Ardabili© Author(s)





ارزیابی و واسنجی مدل SEBAL برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی در محدوده پروژه پخش سیلاب دشت گربایگان

حمید حسینی مرندي^{۱*}، مجتبی پاکپور^۲، میرمسعود خیرخواه زرکش^۳

^۱ استادیار، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران

^۲ دانشیار، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران

^۳ دانشیار، بخش هیدرولوژی و توسعه منابع آب، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

چکیده

برآورد دقیق تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) نقش مهمی در مدیریت بهینه منابع آب، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک ایفا می کند. در این پژوهش با بهره گیری از مدل بیان انرژی سطحی SEBAL و تصاویر ماهواره ای لندست ۸ و ۹، میزان ET_a در دشت گربایگان استان فارس طی سال های ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۰ برآورد و تحلیل شد. منطقه مورد مطالعه، بخشی از دشت گربایگان و در محدوده پروژه پخش سیلاب (ایستگاه آبخیزداری) کوثر است؛ که دارای اقلیم خشک است. تصاویر ماهواره ای پس از تصحیحات هندسی، رادیومتریکی و اتمسفری، به همراه داده های هواشناسی برای تغذیه مدل SEBAL به کار گرفته شد. این مدل با استفاده از معادله بیان انرژی و شاخص های گیاهی مانند NDVI و SAVI، مقدار تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) را در مقیاس مکانی دشت گربایگان (حدود ۱۲۵ کیلومتر مربع) و در بازه زمانی فصل زراعی بهار و تابستان ۱۴۰۲، با استفاده از تصاویر چندزمانه Landsat 8، محاسبه کرد. نتایج مدل با داده های میدانی شامل تبخیر-تعرق مرجع، بیان آب خاک و حجم آب برگشتی مقایسه و اعتبارسنجی شد. مقدار ET_a در فصل سرد بین ۰/۸ تا ۳/۲ میلی متر در روز و در فصل گرم بین ۱/۸ تا ۵/۶ میلی متر در روز متغیر بود. همچنین، اعمال پارامتر سرعت باد موجب افزایش دقت مدل شد، به گونه ای که مقدار ضریب تعیین (R^2) بین ET_a مدل شده و داده مرجع از ۰/۶۸ به ۰/۷۹ افزایش یافت. بررسی ضریب گیاهی (K_c) نشان داد که نوع پوشش گیاهی و مراحل رشدی آن، نقش مهمی در تغییرات ET_a دارد. نتایج این پژوهش، کارایی بالای مدل سنجش از دور و داده های محلی را در برآورد دقیق ET_a و پشتیبانی از مدیریت پایدار منابع آب در مناطق خشک و نیمه خشک تأیید می کند. استفاده از مدل سیبال در توسعه سامانه های مدیریتی برای پایش تبخیر-تعرق و اجرای آبیاری دقیق، زمینه ساز بهینه سازی مصرف آب در مناطق خشک و دارای محدودیت داده های زمینی خواهد بود.

واژه های کلیدی: داده های هواشناسی، سنجش از دور، اندازه گیری میدانی، بیان آب خاک، پیکسل

نوع مقاله: مطالعه موردی

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

استناد: حسینی مرندي، حمید، پاکپور، مجتبی، و خیرخواه زرکش، میرمسعود (۱۴۰۴)، ارزیابی و واسنجی مدل SEBAL برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی در محدوده پروژه پخش سیلاب دشت گربایگان، مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۵(۳)، ۲۶۱-۲۷۶.
doi: 10.22098/mmws.2025.17580.1607

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱



مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۳، صفحه ۲۶۱ تا ۲۷۶.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

۱- مقدمه

برآورد دقیق تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) برای محاسبهٔ بیلان آب و ارزیابی اثربخشی طرح‌های تغذیهٔ مصنوعی، به‌ویژه در مناطق خشک، ضروری است. در این مناطق، ET_a سهم قابل توجهی در چرخهٔ هیدرولوژیکی داشته و تحت تأثیر عوامل محیطی، در مقیاس‌های فصلی و منطقه‌ای، تغییرات قابل توجهی را نشان می‌دهد. روش‌های سنتی برآورد تبخیر-تعرق، که مبتنی بر اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای متغیرهای هواشناسی هستند، توانایی بازنمایی دقیق مناطق وسیع را ندارند (Allen et al. 2011). پیچیدگی‌های پوشش زمین، توپوگرافی، و دینامیک انتقال حرارت، تعمیم این اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای را به مقیاس‌های بزرگتر دشوار می‌سازد (Su et al., 2008). عوامل متعددی همچون اقلیم، نوع پوشش گیاهی، مدیریت اراضی، کیفیت خاک و آب، توپوگرافی، تابش خورشیدی و شرایط فیزیولوژیکی گیاه بر تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) تأثیرگذارند. هرچند طی نزدیک به یک قرن، روش‌های مختلفی برای برآورد ET_a ارائه شده است؛ اغلب این روش‌ها بر اساس محاسبهٔ تبخیر-تعرق مرجع (ET_o) از داده‌های هواشناسی و تخمین ضرایب گیاهی (K_c) عمل می‌کنند. این روش‌ها معمولاً نتایج نقطه‌ای با خطای بالا تولید می‌کنند، به‌ویژه زمانی که تنوع در پوشش گیاهی و ویژگی‌های سطح زمین به‌طور کامل لحاظ نمی‌شود (Liu et al., 2014).

تبخیر-تعرق، فرآیندی پیچیده و غیرخطی است که تحت تأثیر متقابل عوامل مختلفی از جمله شرایط اقلیمی، ویژگی‌های خاک و نوع پوشش گیاهی قرار دارد. مدل‌های ریاضی که همهٔ این عوامل را در نظر بگیرند، معمولاً به داده‌های گسترده و دقیق نیاز دارند و با منابع متعددی از خطا مواجه هستند. در دهه‌های اخیر، روش‌های مبتنی بر توازن انرژی سطحی، مانند الگوریتم سیبال، به‌عنوان رویکردهایی دقیق‌تر برای برآورد ET_a مطرح شده‌اند (Mao et al., 2019; Rawat et al., 2019). این مدل‌ها از داده‌های سنجش از دور برای محاسبهٔ مؤلفه‌های بیلان انرژی (از جمله تشعشع خالص، شار گرمای محسوس، شار گرمای نهان و شار گرمای خاک) در مقیاس پیکسلی استفاده می‌کنند (Bastiaanssen, 2000). فناوری‌های سنجش از دور علاوه بر تخمین ET_a ، امکان ترسیم نقشه‌های پراکنش مکانی و زمانی آن را فراهم می‌کنند. از مهم‌ترین مزایای این فناوری‌ها می‌توان به استخراج هم‌زمان پارامترهای کلیدی نظیر دمای سطح زمین، ضریب آلودگی، و شاخص‌های گیاهی اشاره کرد که این روش را از

نظر اقتصادی نیز مقرون به‌صرفه می‌سازد (Norman et al., 1995). با این وجود، الگوریتم‌های کلاسیک سنجش از دور معمولاً برای مناطق وسیع و ناهمگن از دقت کافی برخوردار نیستند، بنابراین بهره‌گیری از مدل‌های پیشرفته‌تر الزامی است.

هدف اصلی این پژوهش، برآورد میزان آب مصرفی پوشش‌های گیاهی مختلف در دشت گریباگان (استان فارس) با هدف ارزیابی کارایی سامانهٔ پخش سیلاب در بهبود بهره‌وری منابع آب منطقه است. سایر اهداف این پژوهش شامل توسعهٔ یک مدل بیلان انرژی کالیبره‌شده برای منطقه، برآورد تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) و ضریب گیاهی (K_c) برای پوشش‌های مختلف، و همچنین تخمین مصرف سالانهٔ آب توسط این پوشش‌ها است.

پیشینهٔ پژوهش سنجش از دور به‌عنوان یک فناوری پیشرفته در برآورد تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) در مقیاس‌های وسیع، کارایی بالایی دارد و مطالعات مختلف، دقت این روش را در ارزیابی ET_a تأیید کرده‌اند (Bastiaanssen et al. 1998; Bastiaanssen et al., 2009; Wang et al., 2005). الگوریتم‌هایی مانند سیبال^۱، اس-سبس^۲، سبس^۳ و تی سبی^۴ برای این منظور توسعه یافته‌اند (Raeesi et al., 2025). از میان آن‌ها، مدل METRIC با دقت بالا و انطباق قابل توجه با اندازه‌گیری‌های زمینی، به‌ویژه در پوشش‌های گیاهی مختلف، مورد توجه قرار گرفته است (Mokhtari et al., 2013; Tasumi, 2019). تبخیر-تعرق به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های مهم چرخهٔ هیدرولوژیکی و معادلات بیلان انرژی سطح زمین، متأثر از عوامل اقلیمی، خصوصیات خاک، و نوع پوشش گیاهی است که پیچیدگی‌های محاسباتی را به‌همراه دارد (Yang et al., 2018; Mandal et al. 2023). در سال‌های اخیر، مدل سیبال به‌عنوان یکی از الگوریتم‌های مؤثر در برآورد تبخیر-تعرق واقعی، به‌ویژه در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، مورد استفاده گسترده قرار گرفته است. برای نمونه، مطالعه‌ای در دشت فریمان خراسان رضوی نشان داد که این مدل با دقت بالا ($R^2=0.96$) و ($RMSE \approx 0.5$ میلی‌متر در روز) قادر به تخمین ET_a در شرایط متنوع کاربری اراضی است (Salari et al., 2023). همچنین، در حوضهٔ سد خسیوه در غرب ایران مقدار ضریب تعیین مدل برابر با ۰/۸۶ و شاخص توافق ویلما (d)^۵ برابر با ۰/۹۲ به‌دست آمده که بیانگر دقت و کارایی بالای مدل در تخمین تبخیر-تعرق روزانه است (Rostamizad et al., 2024). افزون بر این، در سطح جهانی، توسعهٔ نسخه‌های خودکار الگوریتم سیبال نظیرجی سیبال^۶ مبتنی بر موتور گوگل ارث^۷، موجب تسهیل پایش بلندمدت

^۵ شاخص ویلما (d) میزان تطابق بین داده‌های مشاهده‌شده و مدل‌شده را از ۰ تا ۱ نشان می‌دهد.

^۶ geeSEBAL

^۷ Google Earth Engine

^۱ SEBAL

^۲ S-SEBI

^۳ SEBS

^۴ T-SEBI

مدیریت منابع آب در مناطق خشک متمرکز بوده‌اند. بسیاری از پژوهش‌ها به بررسی و تخمین مصرف آب گیاهان مختلف با استفاده از مدل سیبال پرداخته‌اند (Emadzadeh et al., 2007; Omidvar et al., 2013; Tofigh et al., 2020; Zare et al., 2020). تعدادی از مطالعات نیز به مقایسه دقت مدل سیبال با سایر الگوریتم‌های تخمین تبخیر-تعرق (ET) و ارزیابی عملکرد آن‌ها در شرایط مختلف آب و هوایی ایران اختصاص داشته است (Emadzadeh et al., 2007; Omidvar et al., 2013; Ghorbani et al., 2015; Mahmudzadeh and Anvari, 2021). یافته‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های سنجش از دور مانند سیبال می‌توانند نقش مهمی در مدیریت بهینه منابع آب و بهبود بهره‌وری کشاورزی در مناطق خشک ایفا کنند (Zare et al., 2020). با توجه به این پیشرفت‌ها و اهمیت کار در منطقه نیمه‌خشک جنوب شرقی فارس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی دقت و کارآمدی مدل سیبال در منطقه گربایگان فسا، با در نظر گرفتن چالش‌ها و محدودیت‌های خاص آن انجام شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

مطالعه حاضر در محدوده ایستگاه پخش سیلاب بر آبخوان کوثر در دشت گربایگان استان فارس انجام شده است (شکل ۱). دشت گربایگان با وسعت تقریبی ۱۹۲ کیلومتر مربع، رواناب‌های حاصل از بارش آبخیزهای کوه گر، چاه‌قوچ و گهراب که در بالادست قرار گرفته‌اند را به وسیله خشک‌رودهای بیشه زرد و چاه قوچ دریافت می‌کند. این منطقه در زاگرس چین خورده واقع شده و ساختار زمین‌شناسی آن شامل سنگ‌های آهکی، مارن و کنگلومرا است. بر اساس آمار ۲۵ ساله ایستگاه هواشناسی کوثر (۱۳۷۵-۱۴۰۰)، میانگین بارندگی سالانه منطقه حدود ۲۲۹/۲ میلی‌متر بوده که بیش‌ترین مقدار آن در دی‌ماه (۵۵/۱ میلی‌متر) و کم‌ترین آن در تیرماه (صفر میلی‌متر) ثبت شده است. میانگین دمای سالانه حداکثر مطلق ۴۶ درجه سانتی‌گراد و حداقل مطلق ۸/۵- درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. رطوبت نسبی به‌طور متوسط ۴۳ درصد و تعداد روزهای یخبندان سالانه ۲۷ روز است. بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دوماستن، منطقه در زمره اقلیم‌های خشک قرار می‌گیرد. بافت خاک سطحی عمدتاً شنی-لومی است.

کاربری غالب اراضی منطقه مرتعی و کشاورزی و سطوح کمی (کم‌تر از ۲۰۰۰ هکتار) نیز اراضی جنگلی دست کاشت مربوط به طرح ملی پخش سیلاب است. سه روستای بیشه‌زرد، رحیم‌آباد و چاه‌دولت با جمعیتی حدود ۲۱۴۶ نفر بهره‌برداران اصلی منطقه هستند. منابع اصلی تأمین آب سطحی در این منطقه، سیلاب‌ها هستند. عمق سطح آب

ET_a و گسترش کاربرد مدل در مناطق ناهمگن و فاقد داده زمینی شده است (Yousefi et al., 2022). بهره‌گیری از مدل‌های مبتنی بر بیلان انرژی سطحی، توسط پژوهشگرانی که در تدوین روش مرجع فائو-۵۶ مشارکت داشتند؛ صورت گرفته و کارکرد آن‌ها از مقبولیت جهانی برخوردار است. این مدل‌ها، اغلب توانسته‌اند با دقت قابل قبول و با نیاز کمی به داده‌های میدانی، ET_a را تخمین بزنند (yang, 2022). البته در برخی پژوهش‌های مناطق مختلف، عملکرد مدل‌های مورد استفاده تا حدودی متفاوت گزارش شده است. در مطالعه‌ای در منطقه ریاض عربستان، مدل‌های مبتنی بر بیلان انرژی سطحی با داده‌های واقعی مقایسه شده‌اند و عملکرد مدل متریک نسبت به سایر مدل‌ها مناسب‌تر گزارش شده است (Zare Khurmiri et al., 2021). (Alazba, et al., 2024). نشان داده‌اند که مدل سیبال توانایی قابل‌توجهی در تخمین دقیق تبخیر-تعرق در دوره‌های فنولوژیکی محصولات مختلف، از جمله پسته دارد. مطالعه‌ای در دشت اردبیل، نشان می‌دهد که الگوریتم‌های مبتنی بر بیلان انرژی سطحی مانند سیبال و متریک در برآورد تبخیر و تعرق واقعی عملکرد مناسبی داشته‌اند؛ به‌عنوان مثال، سیبال با $R^2=0.97$ بیش‌ترین دقت را داشته و پس از آن مدل متریک قرار گرفته است (Fakhar and Kavyani, 2024). به‌طور کلی، این مطالعات بر اهمیت واسنجی منطقه‌ای مدل سیبال و قابلیت آن در ارزیابی عملکرد طرح‌های پخش سیلاب و بهینه‌سازی مدیریت منابع آب تأکید دارند (Bastiaanssen et al., 2005; Allen et al., 2011; Rawat et al., 2019). روش‌های سنتی مبتنی بر داده‌های نقطه‌ای، نماینده مناطق وسیع نیستند و دقت لازم را ندارند. در مقابل، استفاده از داده‌های سنجش از دور، امکان استخراج هم‌زمان پارامترهای کلیدی مانند دمای سطح، ضریب آلبیدو و شاخص‌های گیاهی را فراهم می‌کند و مدل‌های بیلان انرژی سطحی، دقت بالاتری در تخمین ET_a و توزیع مکانی آن ارائه می‌دهند.

در میان روش‌های مبتنی بر بیلان انرژی، اگرچه روش نسبت بوون^۱ از نظر مفهومی ساده است؛ اما به دلیل وابستگی بالا به داده‌های دقیق میدانی، در مقیاس‌های منطقه‌ای دقت لازم را ندارد. از این‌رو، مدل سیبال که بر پایه تصاویر ماهواره‌ای و برآورد مؤلفه‌های بیلان انرژی توسعه یافته است، به دلیل دقت بالا و قابلیت اجرا در مقیاس‌های وسیع، در این مطالعه انتخاب شده است (Bastiaanssen et al., 2005; Allen et al., 2007).

در ایران، مدل‌های توازن انرژی، به‌ویژه مدل سیبال، به‌طور گسترده‌ای در پژوهش‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مطالعات عمدتاً بر آب مصرفی گیاهان، مقایسه دقت الگوریتم‌ها و

¹ Bowen Ratio

زیرزمینی بین ۱۲ تا ۴۰ متر متغیر است و کیفیت آب تحت تأثیر ترکیبات سولفات کلسیم و منیزیم قرار دارد (Eilami et al., 2024). پروژه مشهور پخش سیلاب گرایگان (ایستگاه آبخوانداری کوثر) با قدمت بیش از ۴۰ سال در این دشت اجرا شده است (شکل ۱).

۲-۲- روش بیلان انرژی برای برآورد تبخیر-تعرق (ET)

در این مطالعه، تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از روش بیلان انرژی و بر اساس رابطی ۱ تعریف و محاسبه می شود (Bastiaanssen et al., 1998). در رابطه، R_n تابش خالص سطح زمین، G شار گرمای ذخیره شده در خاک، H شار گرمای محسوس انتقال یافته به هوا و λE انرژی نهان تبخیر-تعرق واقعی است.

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

۲-۳- داده های ماهواره ای و پردازش اولیه

برای تخمین تبخیر-تعرق واقعی از مدل سیبال، تصاویر ماهواره ای از سنجنده های لندست^۱ و ۹ مورد استفاده قرار گرفتند. این تصاویر شامل ۹ باند بازتابی و ۲ باند حرارتی هستند. جدول ۱ مشخصات فنی داده های ماهواره ای و مراحل پردازش اولیه را به صورت خلاصه نشان می دهد. پردازش های اولیه شامل حذف ابر، تصحیح جو، کالیبراسیون رادیومتری (تبدیل اعداد دیجیتالی (دی.ان)^۲ به بازتاب سطحی و دمای واقعی و تصحیح هندسی با استفاده از نقاط کنترل زمینی است. در ادامه، تصحیحات سنجنده و تصحیح اتمسفری نیز برای افزایش دقت داده ها اعمال شد. مدل سیبال با استفاده از این تصاویر و داده های هواشناسی (دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، تابش خورشیدی) و همچنین نقشه های کاربری اراضی اجرا شد و نقشه های مکانی-زمانی تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) در منطقه مورد مطالعه تولید شد.

۲-۴- اجرای مدل سیبال برای تخمین تبخیر-تعرق

مدل سیبال^۳ بر اساس معادله بیلان انرژی سطح زمین، تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) را با استفاده از تصاویر ماهواره ای و داده های هواشناسی محاسبه می کند (Bastiaanssen et al., 2005; Allen et al., 2007). ورودی های مدل شامل، تصاویر ماهواره ای پردازش شده، داده های هواشناسی روزانه و ساعتی (مانند سرعت باد، دما، رطوبت نسبی و تابش خورشیدی)، نقشه های کاربری اراضی و پوشش گیاهی هستند. مراحل اصلی مدل شامل محاسبه پارامترهای انرژی سطحی مانند تابش خالص، دمای سطح، شار گرمای محسوس و نهان و سپس برآورد مکانی-زمانی ET_a برای

منطقه مورد مطالعه است. مراحل کلیدی پردازش داده ها نیز شامل، تبدیل مقادیر دیجیتالی به رادیانس، تبدیل رادیانس به بازتاب سطحی، استخراج دمای سطحی از باندهای حرارتی هستند. تصحیح اتمسفری برای حذف اثرات جذب و پراکنش جو (شامل جذب توسط اکسیژن، ازن، بخار آب و گازهای دیگر و تصحیح پراکنش به روش هایی همچون تفریق جسم سیاه و جابجایی هیستوگرام) انجام می شود. داده های ماهواره ای به کار رفته در این پژوهش از نوع خروجی سطح ۲ لندست ۸ بود که به لحاظ هندسی و نیز اتمسفری توسط مرجع ناسا مورد تصحیحات قرار گرفته و در واقع ارقام پیکسل های آن بازتاب سطح زمین^۴ است.

۲-۵- استفاده از ضرایب گیاهی و مراحل رشد گیاهان

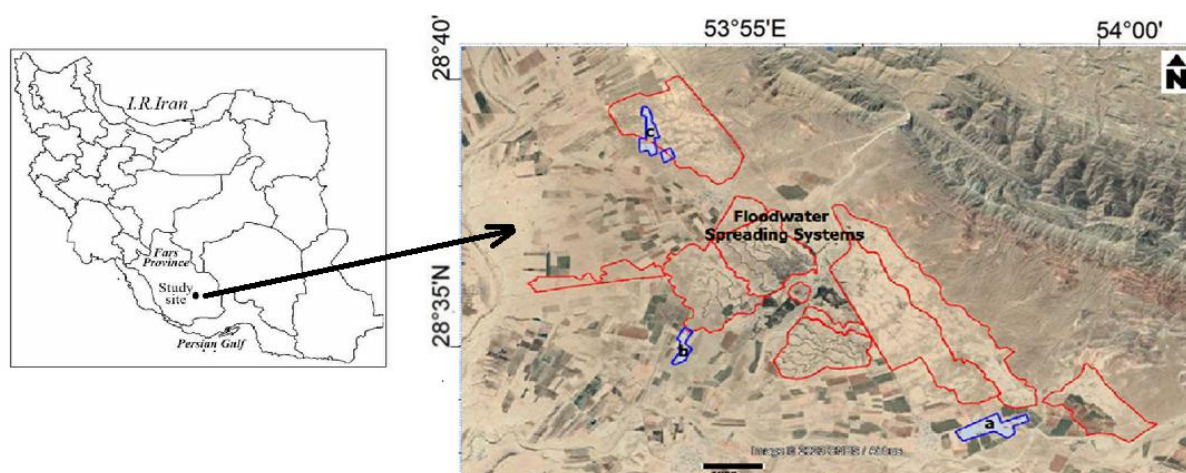
در این پژوهش، سه مزرعه با کشت های متفاوت شامل گندم، جو و چغندر قند پاییزه مورد بررسی قرار گرفتند. برای تحلیل دقیق تر تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) و اعتبارسنجی نتایج الگوریتم سیبال، مراحل رشد گیاهان و ضرایب گیاهی (K_c) مربوط به هر مرحله در نظر گرفته شد. برای محصولات گندم و جو، مراحل رشد شامل مرحله آغازین، مرحله توسعه، مرحله میانی فصل و مرحله پایانی فصل رشد، مطابق با دستورالعمل های ارائه شده توسط سازمان فائو (Allen et al., 1998) تقسیم بندی شد. همچنین برای چغندر قند پاییزه، مراحل رشد شامل استقرار اولیه، رشد برگ ساز، توسعه ریشه و رسیدگی در نظر گرفته شد. مقادیر K_c متناظر با هر یک از این مراحل از جداول استاندارد FAO استخراج شد و با توجه به تاریخ کاشت، طول دوره رشد و شرایط اقلیمی منطقه، به صورت مرحله ای اعمال شد. به طور کلی الگوریتم سیبال نیاز به وارد کردن مستقیم K_c ندارد، چراکه بر اساس توازن انرژی سطح و استفاده از دمای سطحی و شاخص های پوشش گیاهی از تصاویر ماهواره ای، میزان تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) را بدون بهره گیری از ضرایب تجربی محاسبه می کند (Bastiaanssen et al., 1998; Allen et al., 2007). با این حال، برای صحت سنجی نتایج مدل و بررسی همخوانی مقادیر محاسبه شده با داده های میدانی و روش های مرسوم، از ضرایب گیاهی و مراحل رشد به عنوان معیار مقایسه استفاده شد. در نهایت، تبخیر-تعرق واقعی محاسبه شده توسط سیبال برای هر گیاه و هر مزرعه، بر مبنای تصاویر ماهواره ای و تاریخ های برداشت، با مصرف واقعی آب اندازه گیری شده در مزرعه مقایسه شد تا دقت مدل در تخمین نیاز آبی محصولات مورد ارزیابی قرار گیرد.

⁴at surface reflectance

¹ Landsat 8 and 9

²DN (Digital Numbers)

³ Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه و مزارع منتخب (a)، (b) و (c) و شبکه پخش سیلاب در دشت گربایگان (محدوده‌های بسته با خطوط قرمز)

Figure 1- Location of the study area and selected farms (a), (b), and (c), along with flood spreading networks in the Garbayegan Plain (areas delineated by red lines)

جدول ۱. مشخصات تصاویر ماهواره‌ای و مراحل پردازش اولیه

Table 1. Satellite Image Specifications and Initial Processing Steps

Feature	Description
Satellites used	Landsat 8 and Landsat 9
Data types	Reflective (9 bands), Thermal (2 bands)
Spatial resolution	Reflective: 30 m, Panchromatic: 15 m, Thermal: 100 m
Revisit period	Every 16 days
Image acquisition period	October 2018 to March 2022
Image acquisition timing	Synchronized with key growth stages of wheat, barley, alfalfa, citrus, and date palm in Garbayegan
Pre-processing steps	Cloud removal, atmospheric correction, radiometric calibration, geometric correction using ground control points
Secondary corrections	Sensor error correction, conversion of DN to surface reflectance and land surface temperature, atmospheric correction
Supplementary data	Temperature, relative humidity, wind, radiation, land use map
Model used	SEBAL for estimating ETa

۲-۶- اندازه‌گیری‌های میدانی

سه مزرعه از مزارع کشاورزان محلی با شرایط زراعی و کشت‌های متفاوت و متداول منطقه انتخاب شدند. مزرعه a (اراضی آقای ببراز اسعده)، شامل دو بخش کشت جو و گندم بود. آبیاری با استفاده از دو حلقه چاه تلمبه انجام شد. سطح زیر کشت جو برابر با ۳۵۱۳۶ مترمربع بود و حجم کل آب مصرفی برای این کشت از هر دو چاه ۱۹۰۹۴ متر مکعب گزارش شد، که معادل ۵۴۳۴ متر مکعب در هکتار است. همچنین، کشت گندم در مساحتی برابر با ۱۷۱۵۲۹ مترمربع انجام شد و حجم کل آب برداشت شده برای این کشت ۱۵۸۰۱۰ متر مکعب بود که معادل ۹۲۱۲ متر مکعب در هکتار است. مزرعه b (اراضی آقای کوهزاد ارجمندی)، این مزرعه به مساحت ۸۶۱۱۷۵ مترمربع به کشت چغندر قند پاییزه اختصاص داشت. آبیاری از طریق یک حلقه چاه کم‌عمق انجام شد و حجم کل آب مصرفی برابر با ۹۲۴۴۲ متر مکعب بود، که مصرفی معادل ۱۰۷۳۴ متر مکعب در هکتار را نشان می‌دهد.

مزرعه c (اراضی آقای کیامرث نکوئیان)، اراضی این مزرعه به مساحت ۱۶۳۳۱۵ هکتار زیر کشت گندم قرار داشت. حجم کل آب مصرفی در این مزرعه برای کشت گندم ۱۸۸۹۴۱ متر مکعب بود که معادل ۱۲۴۶۰ متر مکعب در هکتار برآورد شد. آبیاری این مزرعه از طریق چاه بهره‌برداری کم‌عمق منطقه انجام شد و اطلاعات مربوط به حجم آب مصرفی در هر نوبت آبیاری به‌طور دقیق ثبت شد. به‌منظور اعتبارسنجی مدل سیبال و بررسی دقیق‌تر مؤلفه‌های تبخیر-تعرق، مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌های میدانی در اراضی زراعی دشت گربایگان صورت گرفت. این اندازه‌گیری‌ها در سه مرحله زمانی مختلف شامل پس از آبیاری اول، میانه فصل، و پایان فصل آبیاری انجام شدند. در هر مرحله، درصد رطوبت حجمی خاک در عمق‌های مختلف از سطح تا عمق بیشینه نفوذ آب اندازه‌گیری شد. به‌منظور بررسی تغییرات مکانی، مختصات جغرافیایی هر نقطه نمونه‌برداری با دقت ثبت شد.

می‌شود. شاخص سطح برگ، نسبت سطح برگ گیاهان به سطح زمین اشغال شده است و در مدل سیبال از طریق شاخص پوشش گیاهی اصلاح شده خاک^۵ تخمین زده می‌شود. محاسبه شاخص سطح برگ با استفاده از رابطه‌ای که توسط Bastiaanssen (1998) پیشنهاد شده، انجام می‌گیرد (رابطه ۳).

$$LAI = \frac{\ln(0.69 - SAVI)}{0.59 \times 0.91} \quad (3)$$

مقدار شاخص پوشش گیاهی اصلاح شده خاک نیز طبق رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$SAVI = \frac{(1 + L)(\rho NIR - \rho Red)}{L + (\rho NIR + \rho Red)} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، L ضریب اصلاح خاک بوده و برابر ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود (Tasumi, 2019). در این مدل، برای SAVI = 0.69 مقدار LAI حداکثر ۰/۶ و برای SAVI کمتر از ۰/۱، مقدار LAI صفر در نظر گرفته می‌شود. هرچند امکان تصحیح LAI بر اساس شرایط محلی خاک و پوشش گیاهی وجود دارد، اما تأثیر این عامل در نتایج مدل سیبال ناچیز گزارش شده است (Allen et al., 2007).

۲-۸- تعیین ضرایب معادله اختلاف دمای سطح (dT)

برای تعیین ضرایب ثابت معادله اختلاف دمای سطح، دمای سطح دو نقطه سرد و گرم با اصلاح ارتفاع محاسبه و سپس ضرایب a و b استخراج شدند. این ضرایب در محاسبه شار گرمای نهان (LE) و در نهایت تبخیر-تعرق واقعی نقش حیاتی دارند. تقسیم‌بندی فصلی مورد استفاده در این پژوهش بر اساس میانگین بلندمدت دما و بارش منطقه دشت گریبان انجام شده است. با توجه به داده‌های اقلیمی موجود، فصل سرد به دوره‌ای اطلاق می‌شود که از آذر تا اسفند ماه ادامه داشته و با کاهش محسوس دما و کاهش نیاز آب کشاورزی در منطقه همراه است. فصل گرم نیز از بهمن تا مهر تعیین شده است، که با افزایش دما و افزایش نیاز آبی گیاهان مصادف است. این تقسیم‌بندی با الگوهای اقلیمی غالب در منطقه و تقویم زراعی کشاورزان محلی تطابق داشته و مبنای تعیین فصل‌های گرم و سرد قرار گرفته است.

۲-۹- برآورد میزان تبخیر-تعرق واقعی (ET_a)

شار گرمای نهان (LE) از معادله انرژی زمین محاسبه و سپس با استفاده از کسری تبخیری (EF) و داده‌های تابش خالص روزانه به مقدار تبخیر-تعرق واقعی روزانه تبدیل شدند. اصلاح

عمق نفوذ آب پس از هر نوبت آبیاری با استفاده از آگر و بررسی تغییرات رطوبتی خاک تعیین شد. همچنین برای محاسبه میزان آب مصرفی، حجم آب آبیاری در هر مزرعه به صورت جداگانه ثبت شد. اندازه‌گیری آب برگشتی از دشوارترین بخش‌های معادله بیلان آب خاک است که دقت بالا معمولاً نیازمند لایسیمتر وزنی است. در مزارع بزرگ، با آگاهی از ابعاد و انجام نمونه‌برداری میدانی می‌توان برآورد مناسبی داشت. در این مطالعه، پیش از آبیاری و در خاک خشک، در سه نقطه مزرعه نمونه‌برداری تا عمق ۱۵۰ سانتی‌متر با دو تکرار انجام و رطوبت وزنی و چگالی خاک اندازه‌گیری شد. یک روز قبل از هر آبیاری، عمق نفوذ رطوبت به صورت چشمی در همان نقاط تعیین شد. همچنین، عمق تجمع ریشه در هر نمونه‌برداری ثبت شد. پس از آخرین آبیاری، نمونه‌برداری مجدد تا عمق نفوذ رطوبت با فواصل ۳۰ سانتی‌متر انجام و پارامترهای بافت و رطوبت وزنی در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد تا برآورد مناسبی از آب برگشتی فراهم شود. در این راستا، بخش مویینه‌ای که در محدوده عمق ۱۴۹ تا ۱۵۵ سانتی‌متر قرار داشت، به عنوان آب برگشتی در نظر گرفته نشد. برای تبدیل تغییرات درصد رطوبت به مقدار آب موجود در خاک، اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری خاک^۱ در نقاط مختلف انجام پذیرفت. همچنین به منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی خاک، از یکی از نمونه‌ها، درصد ماسه، سیلت و رس استخراج و نوع بافت خاک تعیین شد. داده‌های هواشناسی شامل دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشیدی نیز از ایستگاه محلی (ایستگاه سینوپتیک فسا و بارانسنجی کوثر) استخراج شده و به عنوان داده‌های ورودی مدل سیبال مورد استفاده قرار گرفتند.

برای تعیین میزان آب مصرفی در مزارع، دبی لحظه‌ای خروجی از چاه‌ها (Q) به روش حجمی و به لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری و میانگین سه تکرار ثبت شد. با ثبت مدت زمان هر نوبت آبیاری (H) به ساعت، تعداد دفعات آبیاری (t) و مساحت مزرعه (A) به هکتار، حجم آب مصرفی (I) به مترمکعب بر هکتار، طبق رابطه ۲ محاسبه شد.

$$I = \sum_{i=1}^t \left(\frac{Q_i \times H_i \times 3600}{A \times 1000} \right) \quad (2)$$

۲-۷- پارامترهای کلیدی مدل سیبال

مدل سیبال برای تخمین تبخیر-تعرق واقعی، از مجموعه‌ای از پارامترهای بیوفیزیکی و ترمودینامیکی استفاده می‌کند. این پارامترها شامل آلبیدو (سپیدایی) سطح، دمای سطح زمین^۲، گسیلندگی سطح^۳ که بر اساس شاخص سطح برگ^۴ برآورد

⁴ LAI
⁵ SAVI

¹ Bulk Density
² LST
³ Emissivity

پارامترهای جوی مانند سرعت باد برای افزایش دقت مدل انجام شده است.

۲-۱۰- اعتبارسنجی مدل و اندازه‌گیری‌های میدانی

اعتبارسنجی مدل سیبال از طریق مقایسه ET_a به‌دست آمده با تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_o) و همچنین محاسبهٔ بیلان آب خاک انجام شده است. در این مطالعه برای بررسی تغییرات رطوبت خاک و تخمین دقیق‌تر تبخیر-تعرق، از معادلهٔ بیلان آب خاک استفاده شد (رابطهٔ ۵)، که در آن ΔS تغییرات ذخیره رطوبت در ناحیه ریشه گیاه (میلی‌متر)، P بارش (میلی‌متر)، I : آبیاری (میلی‌متر)، ET_a : تبخیر-تعرق واقعی (میلی‌متر)، D زهکش عمقی یا نفوذ عمقی (میلی‌متر)، و R رواناب سطحی (میلی‌متر) است؛ استفاده شد.

۲-۱۱- برآورد آب مصرفی اراضی کشاورزی

اراضی کشاورزی از طریق تحلیل ان.دی.وی.آی^۱ و تعیین حد آستانه (بین ۰/۲۳ تا ۰/۳) بر اساس تصاویر ماهواره‌ای تفکیک شدند. پیکسل با ان.دی.وی.آی بالاتر از این حد به‌عنوان اراضی تحت کشت شناسایی و میزان مصرف آب بر اساس ضرب ان.دی.وی.آی در مساحت هر پیکسل و تبدیل واحدها محاسبه شد. مصرف آب روزانه با میان‌یابی خطی بین تاریخ‌های مختلف برآورد شده و مجموع آن برای کل سال آبی گزارش شده است (Thenkabail et al., 2007; Senay et al., 2011).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اجرای مدل سیبال و واسنجی

مقدار تبخیر-تعرق واقعی برآوردی (ET_a) با استفاده از مدل سیبال و تبخیر-تعرق مرجع (ET_o) با استفاده از معادلهٔ فائو-پنمن-مانتیس حاصل شد. در بسیاری از پژوهش‌ها از مدل فائو-پنمن-مانتیس برای برآورد ET_o به‌عنوان داده‌های مشاهداتی، در مناطقی که داده‌های برداشت شده کمی دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرد (Jabloun and Sahli, 2008; Landaras et al., 2008; Maeda et al., 2011; El Tahir et al., 2012). در این بررسی، با توجه به فقدان داده‌های مشاهده‌ای زمینی برای ET_a ، از مقدار ET_o محاسبه‌شده با معادله فائو-پنمن-مانتیس صرفاً به‌عنوان مرجع تحلیلی و مقایسه‌ای برای بررسی رفتار نسبی مدل سیبال استفاده شد. این انتخاب مبتنی بر اعتبار علمی گسترده و کارایی اثبات‌شده معادلهٔ فائو-پنمن-مانتیس در شرایط اقلیمی و جغرافیایی متنوع بوده است (Gong et al., 2006; Nandagiri and Kovoov, 2006; Estevez et al. 2010;

Pereira et al. 2015). شایان ذکر است که مدل سیبال مستقل از معادلهٔ مذکور بوده و بر پایهٔ معادلهٔ توازن انرژی سطح و الگوریتم‌های سنجش از دور عمل می‌کند. در این مدل، تبخیر-تعرق واقعی از رابطهٔ ۵ محاسبه می‌شود؛ که در آن، ET_a (تبخیر-تعرق واقعی)، R_n (تشعشع خالص)، G (شار حرارت خاک)، H (شار حرارت محسوس) و λ (گرمای نهان تبخیر) هستند.

$$ET_a = \frac{R_n - G - H}{\lambda} \quad (5)$$

مقادیر ET_a مدل برای پیکسل مرتبط با محدوده‌های آبی در تمام بازه زمانی استخراج و با مقادیر ET_o محاسبه شده توسط روش فائو-پنمن-مانتیس مبتنی بر داده‌های هواشناسی مقایسه شد. ضریب گیاهی (K_c) برای این نواحی برابر ۱/۰۵ مطابق با مراحل میانی رشد گیاهان مورد بررسی شامل گندم، جو و چغندرقد در نظر گرفته شد؛ که انحرافات از این مقدار می‌تواند نشانگر خطاهای مدل باشد (Allen et al., 1998). در فرآیند واسنجی مدل سیبال با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای دورهٔ پاییز ۱۳۹۸ تا پایان تابستان ۱۴۰۰، با مقایسهٔ نتایج مدل با داده‌های مصرف واقعی آب در مزارع، پارامتر سرعت باد به مدل افزوده شد. نتایج نشان داد که وارد کردن این پارامتر، دقت برآورد تبخیر-تعرق را به‌ویژه در اقلیم خشک دشت گربایگان به‌طور قابل توجهی افزایش داد.

۳-۲- اعتبارسنجی مدل و تحلیل نقشهٔ تبخیر-تعرق

برای ارزیابی دقت مدل سیبال پس از مرحلهٔ واسنجی، فرایند اعتبارسنجی با استفاده از داده‌های واقعی مزرعه‌ای انجام شد. این اعتبارسنجی مبتنی بر روش بیلان آب خاک بوده و اطلاعات آن از سه مزرعه منتخب در دشت گربایگان طی دورهٔ زمانی ۹ آبان ۱۳۹۷ تا ۲۳ خرداد ۱۳۹۸ گردآوری شده است. در این راستا، داده‌هایی نظیر دبی آب ورودی به مزرعه، حجم آب مصرفی در طول دورهٔ زراعی، و پارامترهای فیزیکی خاک شامل بافت، رطوبت حجمی، جرم مخصوص ظاهری و عمق نفوذ مؤثر آب استخراج شد. نقشهٔ ان.دی.وی.آی تهیه شده در شکل ۳ نمایش داده شده است. با توجه به این نقشه و همچنین ارقام ان.دی.وی.آی آستانه در نظر گرفته شده برای زمان‌های مختلف مورد نظر (با توجه به شناختی که از کشت و محصولات منطقه وجود دارد) که رقمی متغیر بین ۰/۲۳ تا ۰/۳ بود، با تکیه بر اعتمادپذیری نتایج مدل واسنجی شده سیبال مقدار مصرف آب اراضی تحت کشت در محدوده‌ای از دشت گربایگان که تحت تأثیر پخش سیلاب قرار دارد محاسبه شده است. نتایج محاسبات مصرف آب در مزارع نمونه بر اساس مدل سیبال در جدول ۲ درج شده‌است.

¹NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

جدول ۲. خلاصه نتایج محاسبات مصرف آب در اثر تبخیر-تعرق بر اساس نتایج مدل SEBAL در مزارع نمونه

Table 2. The results of calculations of water consumption due to evaporation-transpiration based on the results of the SEBAL model in sample farms

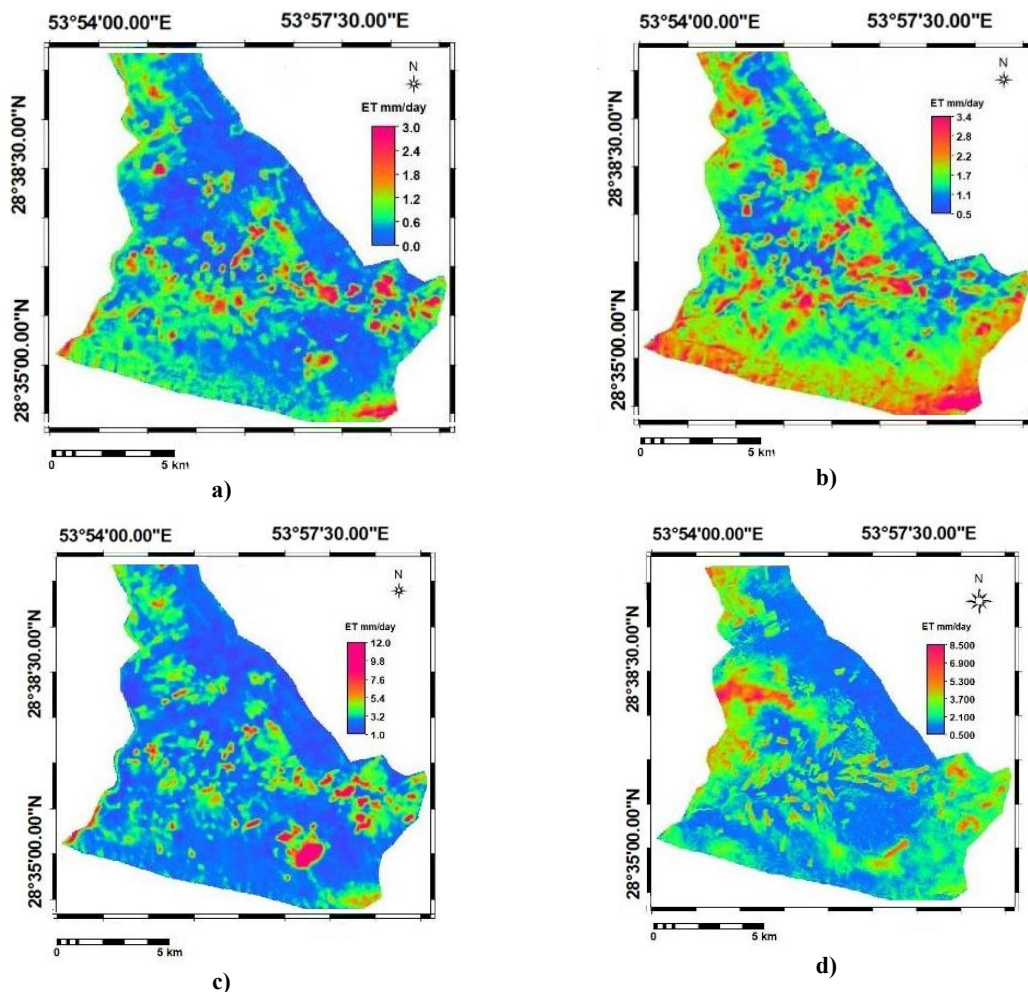
Volume ETa (m ³)	Area (m ²)	Sum ETa (m)	Sum ETa (mm)	Number of Days	Average ETa (mm/day)
122605	151633	0.808	808.57	225	3.6

تحلیل نتایج نشان داد که وارد نمودن پارامتر سرعت باد به مدل، نقش کلیدی در بهبود دقت تخمین تبخیر-تعرق ایفا می‌کند. واسنجی مدل سیبال با لحاظ کردن اثر سرعت باد، دقت تخمین تبخیر-تعرق واقعی را به میزان ۱۱ درصد افزایش داد. این یافته‌ها اهمیت استفاده از داده‌های جامع و بهینه‌سازی پارامترهای مدل برای برآورد دقیق تر ET_a را تأیید می‌نماید. تحلیل داده‌های تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) حاصل از مدل سیبال در این مطالعه، نشان‌دهنده فصلی معنادار در میزان تبخیر-تعرق منطقه مورد بررسی است. در فصل زمستان، مقادیر ET_a بین ۰/۸ تا ۳/۲ میلی‌متر بر روز کاهش یافته که این افت عمدتاً ناشی از کاهش دمای هوا، تابش خورشیدی و فعالیت متابولیکی پوشش گیاهی است (Allen et al., 1998; Mahmoudi et al., 2014). این شرایط منجر به کاهش تبخیر سطحی و تعرق گیاهی شده و لزوم بازنگری در مدیریت منابع آب در فصول سرد را یادآور می‌شود. اهمیت اندازه‌گیری دقیق ET_a در اینجاست که بیانگر نزدیک‌ترین مقدار به مصرف واقعی آب توسط گیاهان است، به‌ویژه زمانی که این داده‌ها در گستره مکانی و زمانی متنوع و برای گونه‌های مختلف پوشش گیاهی در دسترس باشند (Pakparvar et al., 2014). با شروع فصل گرم، افزایش دما و شدت تابش منجر به افزایش معنادار ET_a شده و مقدار آن در برخی مناطق به بیشینه حدود ۶/۵ میلی‌متر بر روز رسیده است. این افزایش نه تنها ناشی از شرایط اقلیمی است، بلکه ناشی از رشد فعال پوشش گیاهی، طولانی‌تر شدن روزها و افزایش فعالیت فتوسنتزی نیز هست (Allen et al., 1998; Pereira et al., 2015; Piri and Poozan., 2019). مقایسه نتایج مدل با داده‌های میدانی هواشناسی، هماهنگی قابل توجهی را نشان می‌دهد که بیانگر دقت مناسب مدل سیبال در بازسازی الگوهای زمانی-مکانی تبخیر-تعرق است. بررسی نسبت ET_a به تبخیر-تعرق مرجع (ET_o) و محاسبه ضریب تبخیر-تعرق (K_c) بیانگر تفاوت‌های قابل توجه در مصرف آب بسته به نوع پوشش گیاهی و کاربری اراضی است. گونه‌هایی با برگ‌بندی متراکم‌تر و دوره رشد فعال‌تر، ضریب K_c بالاتری داشته و این موضوع ضرورت توجه به ویژگی‌های گونه‌ای و مراحل فنولوژیک در مدل‌سازی مصرف آب را برجسته می‌سازد.

به‌منظور محاسبه تبخیر-تعرق واقعی مشاهده‌ای (ET_{a_obs})، ابتدا آب برگشتی (عمق نفوذیافته) با توجه به مشخصات فیزیکی خاک و رفتار آبیاری مزرعه محاسبه شد. سپس مقدار ET_a واقعی مشاهده شده با کسر آب برگشتی از کل آب ورودی به مزرعه به‌دست آمد. بر این اساس، میزان ET_a مشاهده‌ای برابر با ۱۱۷۷۱ مترمکعب برآورد شد. این مقدار با خروجی مدل سیبال، که برای همان بازه زمانی و موقعیت مکانی برابر با ۱۲۲۶۰۵ مترمکعب بود، مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل، مقدار ET_a را حدود ۴ درصد بیش برآورد کرده است. این میزان خطا در محدوده قابل قبول برای مدل‌های تبخیر-تعرق ارزیابی شده و بیانگر دقت مناسب الگوریتم سیبال برای شرایط اقلیمی و زراعی منطقه مورد مطالعه است. همچنین، در گام بعدی، با استفاده از مدل واسنجی شده، نقشه‌های ET_a برای ۸۱ تصویر ماهواره‌ای تولید و تحلیل شدند. برآوردهای به‌دست آمده از مدل برای سال‌های ۹۷-۹۸، ۹۸-۹۹ و ۹۹-۱۴۰۰ با روند بارندگی ثبت شده در ایستگاه تحقیقات آبخوانداری کوثر (واقع در دشت گربایگان) مطابقت داشت. این همخوانی نشان داد که این الگوریتم نه تنها دارای دقت کافی در سطح پیکسل است، بلکه در تحلیل روندهای زمانی مصرف آب نیز از عملکرد مناسبی برخوردار است. برای تولید نقشه‌های نهایی تبخیر-تعرق با استفاده از مدل سیبال، نقشه‌های اولیه در محیط نرم‌افزار انوی^۱ ایجاد شد. با فراهم شدن داده‌های مورد نیاز، مدل در حالت واسنجی شده اجرا و نقشه‌های ET_a مربوط به تاریخ‌های فصل گرم و سرد استخراج شد (شکل ۲).

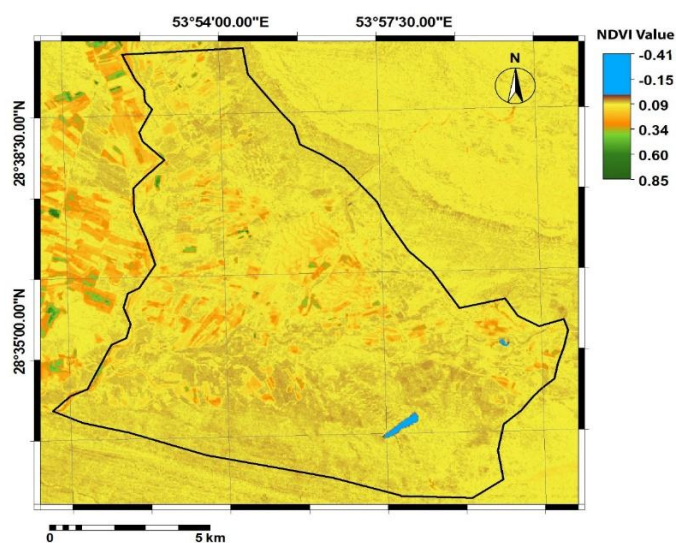
در نقشه‌های ارائه شده (شکل ۲)، مشاهده می‌شود که مقادیر ET_a در فصل سرد (برای مثال، دی‌ماه) به‌طور متوسط بین ۰/۸ تا ۳/۲ میلی‌متر در روز بوده، در حالی که در فصل گرم (برای مثال، اردیبهشت‌ماه) این مقادیر به ۰/۸ تا ۶/۵ میلی‌متر در روز افزایش می‌یابد. این تغییرات فصلی در مقادیر ET_a با تغییرات دما و نیاز آبی گیاهان در طول سال همخوانی داشته و نشان‌دهنده دقت و اعتبار نتایج مدل سیبال در این منطقه است. مقادیر ET_a در فصل سرد بین ۰/۸ تا ۳/۲ میلی‌متر در روز و در فصل گرم بین ۱/۸ تا ۶/۵ میلی‌متر در روز متغیر بود. کم‌ترین مقدار تبخیر-تعرق مربوط به دی‌ماه و بیش‌ترین مقدار به اردیبهشت‌ماه اختصاص داشت که بیانگر الگوی فصلی منطقی و منطبق با شرایط اقلیمی منطقه است.

¹ENVI (Environment for Visualizing Images)



شکل ۲- نقشه تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) دشت گربایگان با استفاده از مدل سیبال [(A: 09/10/2019), (B: 10/01/2021), (C: 03/21/2020), (D: 12/21/2021)] و C (۱۳۹۹ / ۱۲ / ۲۱) و D (۱۴۰۰ / ۱۲ / ۲۱)

Figure ۲: Evapotranspiration map of the Gareh Bygone Plain using the SEBAL model [(A: 09/10/2019), (B: 10/01/2021), (C: 03/21/2020), (D: 12/21/2021)]



شکل ۳. نقشه NDVI تولید شده از تصویر لندست ۸ مربوط به تاریخ ۱۸ مارس ۲۰۱۹، همراه با کاربری‌های اصلی زمین (دشت گربایگان)

Figure 3. NDVI map generated from the Landsat 8 image dated March 18, 2019, showing the main land uses (Gareh Bygone Plain)

همین مدل، تبخیر-تعرق پسته در دوره‌های مختلف فنولوژیکی محاسبه و با روش استاندارد فائو ۵۶ مقایسه شده است. نتایج حاکی از تطابق بالا بین دو روش بوده و این موضوع نه تنها اعتبار مدل سیبال را تقویت می‌کند، بلکه نشان می‌دهد که این مدل قابلیت تعمیم‌پذیری به سایر گونه‌های بومی نیمه‌خشک مانند پسته را دارد. این مسئله، اهمیت استفاده از مدل‌های ماهواره‌ای در ارزیابی منابع آبی منطقه گربایگان و گونه‌های بومی آن را دوچندان می‌سازد.

جدول ۳. تعیین عمق نفوذ آب در انتهای هر دور آبیاری با استفاده از آگر

Table 3. Determining the depth of water penetration at the end of each round of irrigation using agar

Row	Measurement stage	Depth of penetration (cm)		
		Farm (c)	Farm (b)	Farm (a)
1	After the first irrigation	84	32	79
2	After the second irrigation	139	49	163
3	After the third irrigation	156	76	168
4	After the fourth irrigation	161	98	173
5	After the fifth irrigation	179	142	182
6	After the sixth irrigation	185	164	194
7	After the seventh irrigation	193	186	208
8	After the eighth irrigation	213	213	214
9	After the ninth irrigation	221	231	----
10	After the tenth irrigation	234	----	----
11	After the eleventh irrigation	238	----	----

۴- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر نشان داد که مدل سیبال با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ توانایی خوبی در تخمین تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) در منطقه خشک گربایگان دارد. نوسانات فصلی ET_a با تغییرات دما، تابش خورشیدی و فعالیت پوشش گیاهی هماهنگی قابل توجهی دارد؛ به طوری که مقادیر ET_a در فصل سرد (دی تا اسفند) کمتر و در فصل گرم (فروردین تا مهر) به بیشینه خود می‌رسد. این الگوی فصلی با شرایط اقلیمی خشک منطقه همخوانی دارد و اهمیت در نظر گرفتن تغییرات زمانی و مکانی در برآورد تبخیر-تعرق را تأیید می‌کند. یکی از یافته‌های مهم این پژوهش، نقش کلیدی پارامتر سرعت باد در افزایش دقت مدل سیبال بود. افزودن این پارامتر به مدل باعث شد تخمین‌های تبخیر-تعرق واقعی به نحو محسوسی به مقادیر مرجع نزدیک‌تر شود. هم‌چنین،

این امر به‌ویژه در منطقه گربایگان، که با محدودیت منابع آبی مواجه است، می‌تواند برای بهینه‌سازی الگوهای آبیاری و کاهش تلفات آبی بسیار مؤثر باشد.

از منظر کاربردی، نتایج این مطالعه تأیید می‌کند که مدل سیبال، به‌واسطه حساسیت به پارامترهای اقلیمی و فیزیولوژیک، ابزاری قابل اعتماد برای پایش پیوسته و دقیق تبخیر-تعرق در اقلیم خشک حوضه گربایگان به‌شمار می‌رود. چنین مدل‌هایی می‌توانند نقش مهمی در تدوین سیاست‌های مقابله با بحران آب، توسعه کشاورزی پایدار، و برنامه‌ریزی منابع طبیعی ایفا کنند. در این مطالعه، وضعیت رطوبت خاک در اراضی کشاورزی دشت گربایگان در سه مقطع زمانی، پس از نخستین آبیاری، میانه فصل، و پایان فصل آبیاری اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که درصد رطوبت خاک پس از آبیاری به‌طور معنی‌داری افزایش یافته و این تغییرات با افزایش عمق نمونه‌برداری تنوع بیش‌تری می‌یابد. مقادیر جرم مخصوص ظاهری خاک در بازه $1/49$ تا $1/71$ گرم بر سانتی‌متر مکعب قرار داشت؛ که حاکی از تراکم نسبی خاک و تأثیر آن در ذخیره‌سازی و انتقال رطوبت است. هم‌چنین، اندازه‌گیری عمق نفوذ آب با استفاده از آگر، روندی افزایشی را در طول فصل آبیاری نشان داد؛ به طوری که این عمق از حدود 32 سانتی‌متر پس از نخستین آبیاری به بیش از 230 سانتی‌متر در پایان یازدهمین دوره رسید (جدول ۳). ثبت موقعیت‌های جغرافیایی نمونه‌برداری، امکان تحلیل فضایی دقیق‌تری از تغییرات رطوبتی را فراهم نمود. در یکی از نمونه‌ها، بافت خاک با درصد بالای ماسه (بیش از 50 درصد) به‌صورت شنی لومی تشخیص داده شد که نشان‌دهنده نفوذپذیری بالا و ظرفیت پایین نگهداشت رطوبت در این خاک‌ها است. ویژگی‌ای که در تحلیل رفتار رطوبتی خاک منطقه گربایگان نیز مؤثر است.

عمق برگشت موئینه‌ای، بر اساس منابع مرجع، در بازه 149 تا 155 سانتی‌متر در نظر گرفته شد (Lu et al. 2013; Liu et al. 2014). این آب به‌عنوان آب برگشتی تلقی نمی‌شود و در محاسبه حجم آب برگشتی، از تغییرات درصد رطوبت خاک نسبت به خاک خشک و جرم مخصوص ظاهری استفاده شد. نتایج نشان داد که حجم آب برگشتی در طی 11 دوره آبیاری روند افزایشی دارد و در پایان فصل به مقدار قابل توجهی می‌رسد؛ موضوعی که در مدیریت بهره‌بردارانه منابع آبی منطقه نقش مهمی ایفا می‌کند. شایان ذکر است که اگرچه گیاه پسته مستقیماً مورد نظر این پژوهش نبوده است، اما برای پشتیبانی از استدلال‌ها در خصوص کارایی مدل سیبال در تحلیل تبخیر-تعرق، از نتایج مطالعه Zare Khourmiri et al. (2021) استفاده شده است. در آن پژوهش، با استفاده از

همچنین از حمایت‌های مالی و تسهیلات فراهم شده توسط پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس سپاسگزاریم. بدون همکاری و پشتیبانی ایشان، انجام این پژوهش به این سطح از دقت و کیفیت میسر نمی‌شد.

تضاد منافع نویسندگان

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

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

حمید حسینی مرندي: طراحی مفهومی، روش‌شناسی، نگارش پیشنهاد اولیه؛ مجتبی پاک‌پرور: گردآوری داده‌ها، پردازش تصاویر ماهواره‌ای، تحلیل نتایج؛ میرمسعود خیرخواه زركش: ویرایش مقاله، نظارت

منابع:

- امیدوار، جواد، نوری، سمیرا، داوری، کامران، و فریدحسینی، علیرضا (۱۳۹۲). برآورد تبخیر و تعرق واقعی مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از دو الگوریتم سبال و متریک. *مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۳ (۱۲)، ۱۱-۲۲.
- ایلامی، بهمن، پاک‌پرور، مجتبی، حسینی مرندي، حمید، جوکار، لادن، روستا، محمدجواد، رهبر، غلامرضا، سررشته‌داری، امیر، سلیمان‌پور، سید مسعود، قهاری، غلامرضا، کریم‌زادگان، حسن، کریمی، عبدالحمید، کوثر، سید آهنگ، کمالی، کوروش، محمدنیا، مهرداد، مرتضوی جهرمی، سید مرتضی، مصباح، سید حمید، نجابت، مسعود، نکوئیان، غلامعلی، هاشمی، حسین (۱۴۰۳). درس‌هایی از نیم سده پژوهش‌های آبخیزداری با گسترش سیلاب. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ۲۴۰ صفحه.
- پیری، حلیمه و پوزن، محمد طاهر (۱۳۹۸). ارزیابی ۲۴ مدل تبخیر و تعرق گیاه مرجع در اقلیم‌های مختلف ایران. *کوهپایه‌های ایران*، ۶ (۳)، ۱۰۶-۱۱۶. doi: 10.22059/ije.2019.277302.1065
- رستمی زاد، قباد، پاک‌پرور، مجتبی، عبدی نژاد، پرویز، عبداللهی، زهرا و خلفی، جعفر (۱۴۰۳). برآورد مقدار تبخیر-تعرق محدوده متأثر از عرصه پخش سیلاب با استفاده از الگوریتم متریک. *مهندسی مدیریت آبخیز*، ۱۶ (۱)، ۱۵۴-۱۶۹. doi:10.22092/ijwmse.2023.361980.2016
- ریسی، مریم، حق‌زاده، علی، نوذری، حامد، و زینی‌وند، حسین (۱۴۰۴). برآورد تبخیر _ تعرق واقعی کشت آبی و باغات دشت نهاوند با

تحلیل ضریب تبخیر-تعرق (Kc) نشان داد که تفاوت‌های گونه‌ای و مرحله رشدی پوشش گیاهی تأثیر قابل‌توجهی بر مصرف آب دارند، که این نکته برای بهینه‌سازی برنامه‌های آبیاری و مدیریت منابع آب حیاتی است. بررسی‌های میدانی نیز تأیید کرد که تغییرات درصد رطوبت خاک و عمق نفوذ آب پس از هر دوره آبیاری، با توجه به ویژگی‌های بافت خاک (شنی لومی و نفوذپذیری بالا) نقش مهمی در چرخه آب منطقه دارند. این پژوهش، کارایی مدل‌های ماهواره‌ای پیشرفته را نسبت به روش‌های سنتی مانند معادله فائو-پنمن-مانتیس نشان می‌دهد. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل سیبال با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور و پارامترهای محلی، توانایی مناسبی در برآورد دقیق تبخیر-تعرق واقعی در مناطق خشک دارد. با توجه به ساختار انعطاف‌پذیر مدل و قابلیت انطباق آن با شرایط محیطی متنوع، می‌توان استفاده از سیبال را در سایر اقلیم‌ها نیز توصیه نمود، به‌ویژه در مناطقی که با محدودیت داده‌های زمینی مواجه‌اند. البته استفاده دقیق از این مدل در هر منطقه مستلزم انتخاب مناسب پیکسل‌های سرد و گرم و تنظیم پارامترهای محلی است. در مجموع، مدل سیبال می‌تواند ابزار مؤثری برای پایش و مدیریت بهینه منابع آب در شرایط اقلیمی مختلف فراهم سازد.

۵-پیشنهاده‌ها

در ارتباط با محدودیت‌ها و همچنین کاربرد و بهبود نتایج پژوهش، پیشنهادها زیر ارائه می‌شود. امکاناتی از جمله لایسمتر و برج‌های اندازه‌گیری شارهای سطحی، به‌منظور ارزیابی روش‌های موجود برآورد تبخیر-تعرق واقعی مبتنی بر تکنیک سنجش از دور در منطقه (با توجه به وجود ایستگاه تحقیقات آبخیزداری کوثر) تأسیس شود. ایستگاه هواشناسی خودکار مجهز به ارسال اینترنتی در منطقه ایجاد و برنامه‌ریزی لازم برای استفاده از داده‌های هواشناسی ساعتی و حتی الامکان بازه‌های زمانی کوتاه‌تر، برای بهبود نتایج انجام شود. به‌منظور بهبود قدرت تفکیک زمانی نقشه‌های تبخیر-تعرق حاصل از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده لندست ۱۶ روزه، پیشنهاد می‌شود از تصاویر سنجنده‌هایی با بازه زمانی کوتاه‌تر مانند مودیس و روش‌های ریز مقیاس کردن استفاده شود. برای تکمیل این پژوهش در فازهای بعدی، اندازه‌گیری میزان ورودی و خروجی آب به شبکه‌های پخش سیلاب، برای تعیین میزان سالانه تغذیه به سفره لازم است.

سپاسگزاری

بدینوسیله از تمامی همکاران و کارشناسان حوزه سنجش از دور و علوم آب که در مراحل جمع‌آوری داده‌ها، پردازش تصاویر ماهواره‌ای و تحلیل نتایج، این پژوهش را همراهی و یاری نمودند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

- عمادزاده، مریم (۱۳۸۶). کاربرد سنجش از دور در تخمین کارایی آب در مقیاس حوضه‌ای (مطالعه موردی در زیر حوضه قره سو)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران. ۱۳۵ صفحه.
- فخار، محدثه سادات و کاویانی، عباس (۱۴۰۳). برآورد تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از داده‌های سنجش از دور به منظور بهبود مدیریت منابع آب. *مدیریت آب و آبیاری*، ۱۴(۳)، ۶۲۹-۶۴۸. doi: 10.22059/jwim.2024.369438.1123
- قربانی، اردوان، فرامرزی، محمد، کرمی، جلال، غلامی، نبی الله و سبحانی، بهروز (۱۳۹۴). ارزیابی مقایسه‌ای الگوریتم‌های سیبال و متریک در برآورد تبخیر-تعرق: مطالعه موردی شهرستان ملایر. *برنامه‌ریزی و آمایش فضا*، ۱۹(۲)، ۱۸۴-۱۵۳
- محمود زاده، الهام، انوری، صدیقه (۱۴۰۰). تحلیل حساسیت الگوریتم SEBAL در برآورد نیاز آبی محصولات زراعی. *پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز*، ۱۲(۲۴)، ۲۱۷-۲۲۷. doi: 10.52547/jwmr.12.24.217
- استفاده از الگوریتم SEBAL، *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۱۵(۱)، ۲۳۰-۲۳۳. doi:10.22098/mmws.2024.15091.1462
- زارع خورمیزی، هادی، علی طولی و غفاریان المیری، حمیدرضا (۱۴۰۰). برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سیبال (SEBAL) و مقایسه آن با تبخیر و تعرق استاندارد فائو ۵۶ بهبود یافته با رابطه NDVI-KC. *سنجش از دور و GIS/ایران*، ۱۳(۳)، ۹۲-۱۰۳. doi:10.52547/gisj.13.3.73
- زارع خورمیزی، هادی، و غفاریان المیری، حمیدرضا (۱۳۹۹). بررسی اثر ارتفاع و دما در فرایندهای فنولوژی گیاهان، با استفاده از تجزیه و تحلیل هارمونیک سری زمانی NDVI سنجنده MODIS مطالعه موردی: شیرکوه استان یزد. *سنجش از دور و GIS/ایران*، ۱۲(۳)، ۱-۲۲. doi: 10.52547/gisj.12.3.1
- سالاری، حامد، کاشکی، عبدالرضا، کرمی، مختار و زندی، رحمان (۱۴۰۲). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر نیاز آبی محصول پنبه در استان خراسان رضوی. *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۱۴(۵۳)، ۱۶۳-۱۷۲.
- resources management under actual field conditions. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 131(1), 85-93. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(85)
- Eilami, B., Ghahari, Gh., Hashemi, H., Hosseinimarandi, H., Jowkar, L., Kamali, K., Karimi, A., Karimzadegan, H., Kowsar, S.A., Mohammadnia, M., Mesbah, S.H., Mortazavi Jahromi, S.M., Nejabat, M., Nekooeian, Gh., Pakparvar, M., Rahbar, Gh., Rosta, M.J., Sarshetehdari, A., and Soleimanpour, S.M. (2024). Lessons learn from fifty years of floodwater spreading studies for aquifer management. Soil Conservation and Watershed Management Institute. Tehran. 240 p. [In Persian].
- El Tahir, M. E. H., Wenzhong, W., Xu, C.-Y., Youjing, Z., and Singh, V. P. (2012). Comparison of Methods for Estimation of Regional Actual Evapotranspiration in Data Scarce Regions: Blue Nile Region, Eastern Sudan. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17 (4), 477-487. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000429
- Emadzadeh, M. (2007). Application of remote sensing in estimating water use efficiency at the watershed scale (Case study in the Qareh Su watershed). Master's thesis, Sharif University of Technology, Tehran. 135p. [In Persian].
- Estevez, E., Cabrera, M. C., Fernández-Vera, J. R., Hernandez-Moreno, J. M., Mendoza-Grimón, V., and Palacios-Díaz, M. P. (2010). Twenty-five years using reclaimed water to irrigate a golf course in Gran Canaria. *Journal of Agricultural Research*, 8(S2), 95-101. doi:10.5424/sjar/201008S2-1353
- Fakhar, M. S., and Kavyani, A. (2024). Estimation of actual evapotranspiration using remote sensing data for improved water management.
- Alazba, A. A., Shakir, A. S., & Al-Ghobari, H. M. (2024). Evaluation of surface energy balance models for estimating actual evapotranspiration in an arid region. *Earth Systems and Environment*, 8(4), 563-576. doi:10.1007/s41748-023-00379-z
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Rome: FAO.
- Allen, R., G. M. Tasumi and R. Trezza, (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-model. *ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133: 380-394. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380)
- Allen, R. G., L. S. Pereira, T. A. Howell and M. E. Jensen, (2011). Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management* 98: 899-920 doi:10.1016/j.agwat.2010.12.015
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., and Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212-213, 198-212. doi:10.1016/S0022-1694(98)00253-4
- Bastiaanssen, W. G. M. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229, 87-100. doi:10.1016/S0022-1694(99)00202-4
- Bastiaanssen, W. G. M., Noordman, E. J. M., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B. P., and Allen, R. G. (2005). SEBAL model with remotely sensed data to improve water-

- Journal of Water and Irrigation Management*, 14(3), 629-648. doi:10.22059/jwim.2024.369438.1123 [In Persian].
- Ghorbani, A., Faramarzi, M., Karami, J., Gholami, N., and Sobhani, B. (2015). Comparative evaluation of SEBAL and METRIC algorithms for evapotranspiration estimation: A case study of Malayer County. *Spatial Planning and Development*, 19(2), 153-184. <https://civilica.com/doc/2151258> [In Persian].
- Gong, L., Xu, C., Chen, D., Halldin, S., & Chen, Y. D. (2006). Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *Journal of Hydrology*, 329(3-4), 620-629. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.03.027
- Jabloun, M., and Sahli, A. (2008). Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data: Application to Tunisia. *Agricultural Water Management*, 95(6), 707-715. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.01.009>
- Landeras, G., Ortiz-Barredo, A., and López, J. J. (2008). Comparison of artificial neural network models and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the Basque Country (Northern Spain). *Agricultural Water Management*, 95(5), 553-565. doi:10.1016/j.agwat.2007.12.011
- Liu Q, Yasufuku N, Miao J, and Ren J. (2014). An approach for quick estimation of maximum height of capillary rise: *Soils and Foundations*, 54(6), 1241-1245. doi:10.1016/j.sandf.2014.11.017
- Lu, J., Z.-L. Li, R. Tang, B.-H. Tang, H. (2013). Evaluating the SEBS-estimated evaporative fraction from MODIS data for a complex underlying surface. *Hydrological Processes*, 27: 3139-3149. doi:10.1002/hyp.9440
- Maeda, E. E., Wiberg, D. A., and Pellikka, P. K. E. (2011). Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenya. *Applied Geography*, 31 (1), 251-258 doi: 10.1016/j.apgeog.2010.05.011.
- Mahmudzadeh, E., & Anvari, S. (2021). Sensitivity Analysis of SEBAL Algorithm for Estimating Agricultural Irrigation Requirements. *Watershed Manage Res.* 12(24), 217-227 doi:10.52547/jwmr.12.24.217 [In Persian].
- Mandal, N., & Chanda, K. (2023). Performance of machine learning algorithms for multi-step ahead prediction of reference evapotranspiration across various agro-climatic zones and cropping seasons. *Journal of Hydrology*, 13(3), 73-92. doi:10.52547/gisj.13.3.73
- Mao, D., He, X., Wang, Z., Tian, Y., Xiang, H., Yu, H. (2019). Diverse policies leading to contrasting impacts on land cover and ecosystem services in Northeast China. *Journal of Cleaner Production*, 212, 260-271.
- Mokhtari, M. H., B. Ahmad, H. Hoveidi and I. Busu, (2013). Sensitivity Analysis of METRIC-Based Evapotranspiration Algorithm. *International Journal of Environmental Research*, 7: 407-422. doi: 10.22059/ijer.2013.620
- Nandagiri, L., & Koor, G. M. (2006). Performance Evaluation of Reference Evapotranspiration Equations across a Range of Indian Climates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(3), 238-252. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2006)132:3(238)
- Norman, J. M., Kustas, W. P., and Humes, K. S. (1995). Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77(3-4), 263-293 doi:10.1016/0168-1923(95)02265-Y
- Omidvar, J., Nouri, S., Davari, K., and Farid-Hosseini, A. R. (2013). Estimating actual evapotranspiration using satellite imagery with SEBAL and METRIC algorithms. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 3(12), 11-22 [In Persian]. doi: 73522_d9eb17f9dfdd75ee47804d2c5a6e681a.
- Pakparvar, M., W. Cornelis, L. S. Pereira, D. Gabriels, H. Hosseinimarandi et al., (2014). Remote sensing estimation of actual evapotranspiration and crop coefficients for a multiple land use arid landscape of southern Iran with limited available data. *J. of Hydroinformatics* 16: 1441-1460. doi:org/10.2166/hydro.2014.140
- Pereira, L. S., R. Allen, M. Smith and D. Raes, (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management*, 147: 4-20 doi:10.1016/j.agwat.2014.07.031.
- Piri, H., and Poozan, M. (2019). Evaluation of 24 models of reference evapotranspiration in different climates of Iran. *Journal of Ecohydrology*, 6(3), 611-622. doi: 10.22059/ije.2019.277302.1065 [In Persian].
- Raeesi, M., Haghighizadeh, A., Nozari, H., Vazinivand, H. (2025). Estimating actual evapotranspiration of irrigated crops and orchards in Nahavand city using the SEBAL algorithm. *Modeling and Management of Water and Soil*, 5(1), 213-230. doi:10.22098/mmws.2024.15091.1462 [In Persian].
- Rawat, K. S., Singh, S. K., Bala, A., and Szabó, S. (2019). Estimation of crop evapotranspiration through spatial distributed crop coefficient in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 216, 1-10.

- Rostamizad, G. , Pakparvar, M. , abdinejhad, P. , Abdollahi, Z. and khalafi, J. (2024). Estimating the amount of evapotranspiration in the area affected by flood spreading using METRIC algorithm. *Watershed Engineering and Management*, 16(1), 154-169. doi: 10.22092/ijwmse.2023.361980.2016 [In Persian].
- Salari, H., Kashki, A., Karami, M and Zandi, R. (2023). Evaluation of climate change impacts on water requirement of cotton crop in Razavi Khorasan Province. *Journal of Climatology Research*, 14(53), 163–172 https://clima.irimo.ir/article_۱۸۰۱۳۱ [In Persian].
- Senay, G. B., Budde, M. E., and Verdin, J. P. (2011). Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather data: A case study of the conterminous United States. *Journal of the American Water Resources Association*, 47(3), 606–617. doi:10.1111/j.1752-1688.2011.00553.x
- Su, Z., W. Timmermans, A. Gieske, L. Jia, J. A. Elbers et al., (2008). Quantification of land–atmosphere exchanges of water, energy and carbon dioxide in space and time over the heterogeneous Barrax site. *International Journal of Remote Sensing*, 29: 5215-5235. doi:10.1080/01431160802326099
- Tasumi M, (2019). Estimating evapotranspiration using METRIC model and Landsat data for better understandings of regional hydrology in the western Urmia Lake Basin: *Agricultural Water Management*, 226,. 105805 doi:10.1016/j.agwat.2019.105805
- Thenkabail, P. S., Smith, R. B., and De Pauw, E. (2007). Hyperspectral narrowband and multispectral broadband indices for remote sensing of crop evapotranspiration and its components: Transpiration and soil evaporation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143(3–4), 131–145. doi:10.1016/j.agrformet.2006.12.003
- Tofigh, S., Rahimi, D., and Zakerinejad, R. (2020). A comparison of actual evapotranspiration estimates based on remote sensing approaches with a classical climate data driven method. *Acta Universitatis Carolinae Geographica*, 55(2), 1-18. doi:10.14712/23361980.2020.12
- Wang, J., Sammis, T. W., and Gutschick, V. P. (2009). Sensitivity analysis of the surface energy balance algorithm for land (SEBAL). *Transactions of the ASABE*, 52(5).
- Yang, Y., Zhou, X., Yang, Y., Bi, S., Yang, X., and 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
- Yang , Y. (2022). Evaluation of SEBAL model for estimating actual evapotranspiration using remote sensing data in arid regions. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 25, 100692.
- Yousefi, E., Sayadi, M.S., Chamanehpour, E. (2022). Google Earth Engine platform to calculate the hydrometeorology and hydrological water balance of wetlands in arid areas and predict future changes. *Journal of Aplide Research in Water and Watershed*, 9 (2022) 52-68
- Zare khormizie, H., Tavili, A., Ghafarian Malmiri, H. R. (2021). Estimating actual evapotranspiration using the SEBAL algorithm and comparing it to the improved FAO 56 standardized evapotranspiration with the NDVI-KC relationship. *Remote Sensing and GIS of Iran*, 13(3), 73-92. doi:10.52547/gisj.13.3.73 [In Persian].
- ZareKhurmizie, A., and Ghafarian Malmiri, H. R. (2020). Effect of height and temperature on plant phenological processes using harmonic analysis of MODIS NDVI time series (Case study: Shirkouh, Yazd province). *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 12(3), 1–22. doi: 10.52547/gisj.12.3.1 [In Persian].