



Evaluation And Calibration of The SEBS Surface Energy Balance Model in Estimating Evapotranspiration in The Ibrahim Abad Plain Affected by The Flood Water Spreading of The Mehriz Miankouh-Yazd Province

Jalal Barkhordari^{1,✉}, Mohammad Hossein Mokhtari², Hajar Payandeh³

1. Research Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research and Extension Education Organization, Yazd, Iran.
2. Associate Professor, Department of Arid and Desert Area Management, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, University of Yazd, Yazd, Iran.
3. MSc Graduated in Remote Sensing and Geographic Information Systems (RS & GIS), Department of Geography – Environmental Planning Division, Faculty of Humanities and Social Sciences, University of Yazd, Yazd, Iran.

✉Corresponding Author: j.barkhordari@areeo.ac.ir

Submit Date
05 October 2025

Revise Date
28 October 2025

Accept Date
07 December 2025

Keywords:

*Actual evapotranspiration,
Remote sensing,
Landsat 8,
SEBS,
Yazd Miankauh basin.*

Extended abstract

Introduction

Estimation of evapotranspiration is very essential as one of the effective factors in water resources and agriculture management. There are different methods for this task that are used according to the accuracy required in the estimation and the type of application.

Materials and Methods

In this research, in order to evaluate the accuracy of the SEBS model in estimating actual evapotranspiration in the period 2015-2019, daily evapotranspiration maps for the Miankauh basin were prepared from 19 Landsat 8 satellite images for the Miankauh basin using Elvis software. Using meteorological station data, reference evapotranspiration was calculated daily using the FAO Penman_Monteith method. After calculating the daily evapotranspiration for the model, potential evapotranspiration was used to evaluate the research results.

Cite this article: Barkhordari, J., Mokhtari, M.H., & Payandeh, H. (2025). Evaluation and calibration of the SEBS surface energy balance model in estimating evapotranspiration in the Ibrahim Abad plain affected by the flood water spreading of the Mehriz Miankouh-Yazd province. *Journal of Aquifer and Qanat*, 6 (2), 155-174. DOI: 10.22077/jaaq.2025.10202.1130.



Copyright: © 2025 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Results and Discussion

The evaluation of the results obtained from the SEBS model with daily evapotranspiration data (Penman _ Monteith) was measured using four indices: correlation coefficient (R^2), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAD), and Nash-Sutcliffe (NS). The values of these three indices were calculated as 0.64, 1.8, 2.4, and 0.62, respectively, which indicates the sufficient accuracy of the SEBS model for estimating real evapotranspiration in the studied area.

Conclusion

The good correlation between the Penman-Monteith empirical method and the SEBS model indicates the appropriate efficiency of the model in estimating actual evapotranspiration in the Miankouh region and similar areas. The results of the comparison of models in Mehriz County by other researchers as (Payandeh, 1400) and (Mohammad Ebrahim, 1394) in Zabol County, which considered the SEBS model to be the best model for estimating actual evapotranspiration in arid regions, largely confirms the results of this study. However, in most studies, due to the lack of lysimeter data, it is common to use formulas presented by different people, the most reliable of which is FAO Penman-Mantis. Therefore, it is necessary to correct the values obtained from the relationships with the values measured from lysimeters in order to estimate the ETo as accurately and realistically as possible.



ارزیابی و واسنجی مدل بیلان انرژی سطحی SEBS در برآورد تبخیر-تعرق دشت ابراهیم آباد متأثر از پخش سیلاب میانکوه مهریز-استان یزد

جلال برخوردار^۱✉ | محمد حسین مختاری^۲ | هاجر پاینده^۳

۱. استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی، سازمان آموزش تحقیقات و ترویج کشاورزی، یزد، ایران.
۲. دانشیار، گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، گروه جغرافیا-بخش برنامه‌ریزی محیطی، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

✉ نویسنده مسئول: J.barkhordari@areeo.ac.ir

چکیده

برآورد تبخیر و تعرق به عنوان یکی از عوامل مؤثر در مدیریت منابع آب و کشاورزی بسیار ضروری است. روش‌های مختلفی برای این کار وجود دارد که به فراخور دقت مورد نیاز در برآورد و نوع کاربرد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش به منظور ارزیابی دقت مدل سبس، در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در بازه زمانی ۲۰۱۵ لغایت ۲۰۱۹ از ۱۹ تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ برای حوضه میانکوه با استفاده از نرم‌افزار الویس، نقشه‌های روزانه تبخیر و تعرق برای حوضه میانکوه تهیه شد. با استفاده از داده‌های ایستگاه هواشناسی، تبخیر و تعرق مرجع از روش فائو پنمن مانیتیت به صورت روزانه محاسبه شد. که بعد از محاسبه میزان تبخیر و تعرق روزانه برای مدل از تبخیر و تعرق پتانسیل برای ارزیابی نتایج تحقیق استفاده شده است. ارزیابی نتایج به دست آمده از مدل سبس با داده‌های تبخیر و تعرق روزانه (پنمن مانیتیت) با استفاده از چهار شاخص ضریب همبستگی (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین قدرمطلق خطا (MAD) و نش - ساتکلیف (NS) سنجیده شد که اندازه‌های این سه شاخص به ترتیب ۰/۶۴، ۱/۸، ۲/۴ و ۰/۶۲ محاسبه شد که نشان از دقت خوب مدل سبس برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی در منطقه مطالعه شده می باشد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۱۶

کلیدواژه‌ها:

تبخیر و تعرق واقعی،

سنجش از دور،

لندست ۸،

سبس،

حوضه میانکوه یزد.

مقدمه

برآورد تبخیر و تعرق به عنوان فاکتور کلیدی در حل معادله بیلان آب و محاسبه مقدار آب مورد نیاز برای مصارف آبیاری کشاورزی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (نصرتی و همکاران، ۲۰۱۴). یکی از مهم‌ترین متغیرهای هیدرولوژیکی در زمان‌بندی آبیاری، مهیا کردن داده‌های ورودی مدل‌های هیدرولوژیکی بیلان آب (Water Balance) و محاسبه تبخیر و تعرق واقعی برای یک ناحیه یا حوضه می باشد (Gong & et al, 2006). بیلان آبی یکی از مباحث اساسی در هیدرولوژی است که امکان برآورد کمی منابع آب و تغییرات آن تحت تأثیر عوامل مختلف از جمله تغذیه توسط سدها، استحصال آب از طریق پمپاژ توسط چاه‌ها، کاهش نزولات جوی و یا افزایش تبخیر از سطح حوضه آبخیز ناشی از تغییرات اقلیمی را فراهم می‌کند (Sokolove & et al, 1974).

روش‌های مختلفی برای برآورد تبخیر و تعرق بر مبنای داده‌های هواشناسی وجود دارد (Sharafi & Samadian, 2022). Fard, (2022) دسترسی نداشتن به داده‌های لازم برای هر روش، نبود وسایل مناسب و عدم اندازه‌گیری برخی پارامترها استفاده از این روش‌ها را با مشکل روبه‌رو می‌سازد. از طرفی این روش‌ها که با داده‌های نقطه‌ای ایستگاه‌های هواشناسی تبخیر و تعرق را پیش‌بینی می‌کنند، در مقیاس وسیع کارایی لازم را ندارند (Sun & et al, 2011). از جمله روش‌های تخمین نقطه‌ای تبخیر و تعرق واقعی میتوان به لایسیمتر اشاره نمود که دستیابی به مقدار دقیق تبخیر و تعرق از طریق روش اندازه‌گیری میدانی، توسط آن امکان‌پذیر است که استفاده از آن در عمل به دلیل هزینه‌های زیاد و دشواری کار، کاربردی نیست. علاوه بر این، روش مذکور مقادیر نقطه‌ای تبخیر و تعرق را به دست می‌دهد (Shi & et al, 2008) از این رو کاربرانشان به گستره‌های کوچک محدود شده و

قابلیت تعمیم به حوضه‌های بزرگ را ندارند (Li & Lyons, 2002).

سنجش از دور این قابلیت را دارد تا مقدار تبخیر-تعرق را تخمین زده و حتی توزیع مکانی آن را مورد بررسی قرار دهد، زیرا تنها روشی است که می‌تواند پارامترهای معروفی نظیر دمای سطحی (Surface Temperature)، ضریب آلبدو (Albedo Coefficient) و شاخص پوشش گیاهی (Normalized Difference Vegetation Index) را به صورت منطبق یا سازگار با محیط فراهم کرده و همچنین از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد (Asgharzadeh et al., 2022). تاکنون روش‌ها و سنجنده‌های مختلفی برای برآورد تبخیر و تعرق در مقیاس منطقه‌ای و حتی جهانی مورد استفاده قرار گرفته است. انتخاب روش و نوع سنجنده بسته به میزان دسترسی به داده‌های مورد نیاز، دسترسی به تصاویر سنجنده‌ها، وسعت منطقه مورد مطالعه و اهداف پژوهش دارد (Omidvar & et al, 2012). با استفاده از الگوریتم‌های موجود در سنجش از دور که مربوط به تبخیر-تعرق می‌باشند، می‌توان گام بزرگی در مدیریت منابع آب برداشت (Qamarnia & et al, 2014).

تحقیقات مختلفی در سطح جهان به بررسی کارایی مدل سبب پرداخته اند. در مطالعه ای در حوضه رودخانه داون با استفاده از داده‌های لندست 8 و داده‌های هواشناسی با مدل سبب برای تخمین تغییرات مکانی و زمانی تبخیر و تعرق به کار گرفته شد و دقت بالایی نشان داد (Wang & et al, 2025). (Rostamizad & et al, 2025)، با استفاده از مدل سبب در دشت سهرین زنجان تبخیر تعرق را برآورد نمود و نتایج را رضایت بخش دانسته است. (Sharifi & et al, 2025)، در دشت چن‌داب تهران با استفاده از مدل سبب تغییرات مکانی و زمانی تبخیر تعرق را بررسی نمودند که توانایی مدل را بالا گزارش کردند.

الگوریتم سبب در اکثر نقاط دنیا با اقلیم‌های مختلف، به منظور برآورد تبخیر و تعرق و سایر شارهای آشفته

رویش در مناطق دشتی در اوایل اردیبهشت و در ارتفاعات نیمه دوم اردیبهشت و طول دوره رویش به طور متوسط ۱۵۰ روز می باشد. محل اجرای پخش سیلاب میانکوه سرچشمه چندین قنات مهم شهرستان مهریز و محمد آباد یزد می باشد (Tabatabaai, 2024). پخش سیلاب اجرا شده در ایستگاه آبخوانداری میانکوه و با وسعت ۲۷۰ هکتار با ۳ سایت اجرایی شامل سایت های فخرآباد، قنات زنبیل و تنگ لایید می باشد. اقلیم منطقه از روش دمارتن خشک می باشد. مساحت دشت محمدآباد که از قنات صادق آباد که از پخش سیلاب میانکوه متاثر می باشد، حدود ۱۲۰ هکتار وسعت دارد. ایستگاه هواشناسی سینوپتیک مهریز در ۸ کیلومتری محدوده پخش سیلاب قرار دارد.

روش تحقیق

در این پژوهش از ۱۹ تصویر ماهواره ای لندست ۸ در بازه زمانی ۲۰۱۵ لغایت ۲۰۱۹ و مدل سبیس برای تعیین تغییرات مکانی و زمانی تبخیر و تعرق واقعی در حوضه آبخیز میانکوه شهرستان مهریز استان یزد استفاده شد (شکل ۲). به منظور ارزیابی دقت مدل سبیس در برآورد تبخیر و تعرق واقعی استفاده شده و نقشه های روزانه تبخیر و تعرق برای حوضه میانکوه تهیه شده است. نوع و ارتفاع پوشش گیاهی با استفاده از بازدیدهای صحرایی مشخص و از روش نسخه نویسی (Script) در نرم افزار الویس (ILWIS) برای توسعه مدل تعادل انرژی استفاده شد. منطقه همچنین برای محاسبات مربوط به مدل سبیس از نرم افزار الویس استفاده شد. از آنجا که در حال حاضر تصاویر لندست ۸ بطور رایگان برای پژوهشگران از وب سایت ناسا (www.USGS.gov) در دسترس می باشد، استفاده گردید. همچنین از داده های ایستگاه هواشناسی سینوپتیک مهریز برپا داده های ورودی مدل و تعیین تبخیر و تعرق مرجع از روش فائو پنمن مانیت به صورت

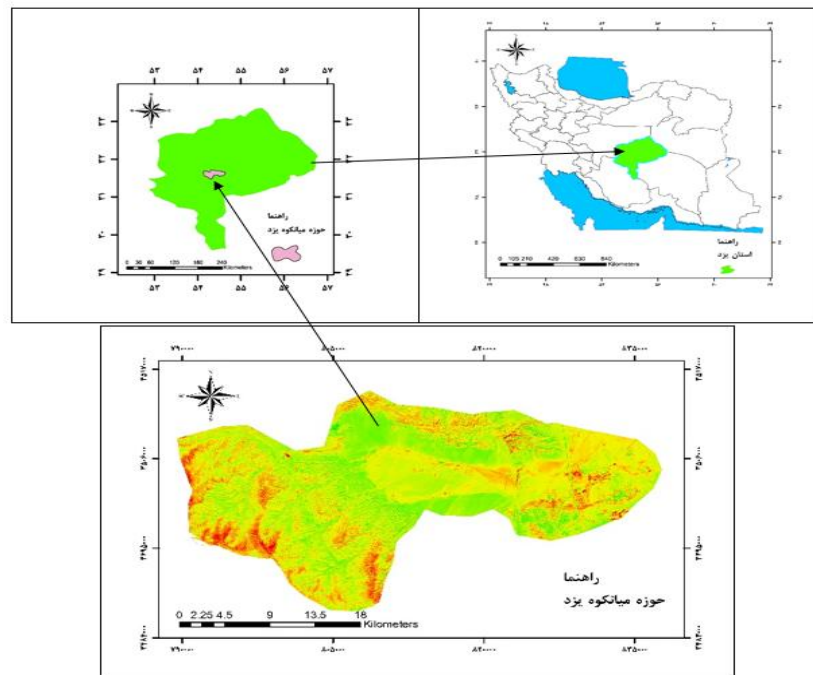
حرارتی در سطح، با استفاده از داده های سنجش از دور مورد استفاده قرار گرفته و نتایج نسبتاً رضایت بخشی را ارائه کرده است. اگرچه استفاده از نتایج این مدل برای تعیین نیاز آبی گیاهان در سطح مزرعه نیازمند کنترل های ایستگاهی دقیق تری است (Payandeh, 2021) و (Mohammad Ibrahim, 2015).

با توجه به مطالب ذکر شده تحقیقات نشان می دهد که سنجش از دور و تصاویر ماهواره ای قابلیت بالایی برای برآورد مقدار تبخیر و تعرق واقعی دارند و در سراسر جهان توسط محققین برای برآورد تبخیر و تعرق مورد استفاده قرار گرفته اند. در تحقیق حاضر تلاش شد تا برای ارزیابی و تدقیق کارهای گذشته، کارآیی و صحت مدل سنجش شده و در صورت نیاز نسبت به منطقه مورد اصلاح قرار گرفته تا در نتیجه بتوان از آن به عنوان ابزاری مطمئن در مدیریت آب دشت های تحت تأثیر پخش سیلاب استفاده نمود.

مواد روش ها

مشخصات منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز میانکوه یکی از زیرحوضه های دشت یزد اردکان می باشد. این حوضه در مختصات جغرافیایی ۳۰° ۵۴' تا ۳۱° ۲۵' طول شرقی و ۳۱° ۲۶' تا ۳۱° ۴۳' عرض شمالی در جنوب غربی استان یزد و شمال غرب شهرستان مهریز واقع شده است (شکل ۱). این حوضه دارای مساحت ۶۳۳۰۰ هکتار است که حدود ۵ درصد حوضه بزرگ دشت یزد اردکان را تشکیل می دهد. متوسط بارش سالانه آن ۲۰۵ میلیمتر می باشد. به طور کلی در منطقه رودخانه دائمی وجود نداشته و مسیل ها در اثر بارندگی های شدید حداکثر سالی چند نوبت سیلاب در آنها جاری می شود. قسمت عمده جریان در ماه های فروردین و اردیبهشت اتفاق می افتد که نشان دهنده نقش مهم ذوب برف در جریان رودخانه می باشد. شروع دوره



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه.

Fig 1. Location of The Study Area.

گیاه (یا ارتفاع زبری) می‌باشد. مجموعه دوم شامل فشار بخار، دما، رطوبت و سرعت باد در ارتفاع مرجع است. سومین مجموعه شامل تابش خورشیدی ورودی و تابش طول موج بلند ورودی که مستقیماً می‌تواند اندازه‌گیری شود یا بصورت خروجی مدل، پارامترسازی گردد (Mohammad Ibrahim, 2015).

آماده‌سازی نقشه‌های ورودی الگوریتم سبس

قبل از اجرای مدل سبس، برخی از داده‌های مورد نیاز از قبیل آلبدو (Albedo)، شاخص تفاضل نرمال شده پوشش - گیاهی و تابش خالص خورشیدی در محیط نرم‌افزار ENVI 4.8 محاسبه شده است.

شاخص سطح برگ

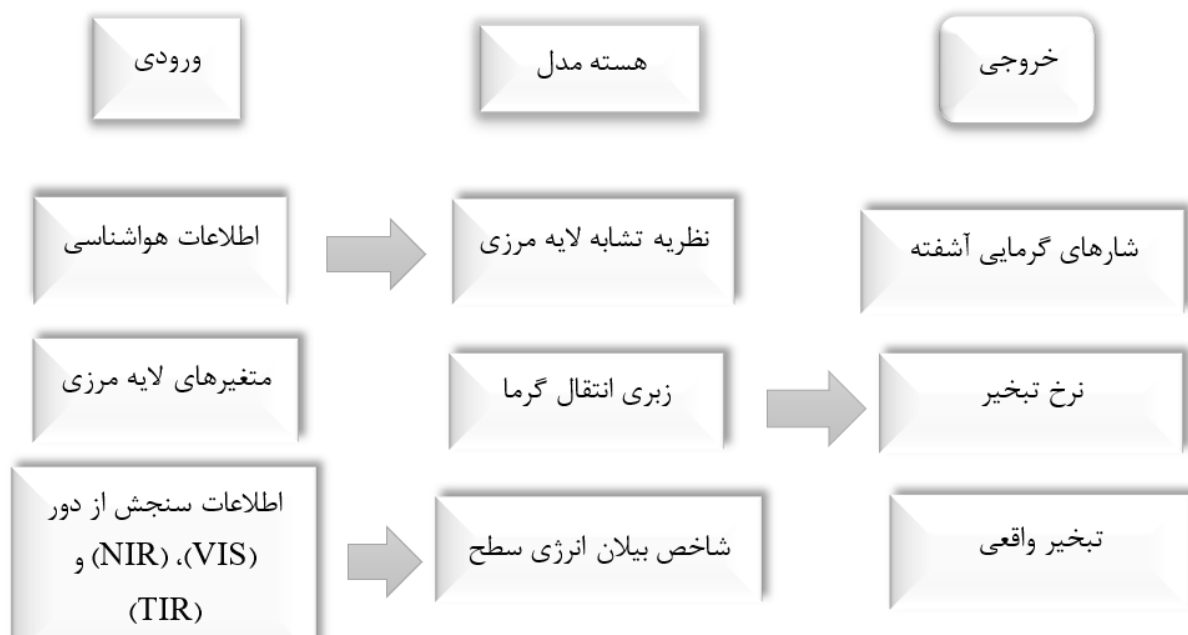
شاخص سطح برگ، بیان‌کننده سطح برگ به سطح زمین اشغال شده توسط گیاه می‌باشد. شاخص سطح برگ یکی از متغیرهای مهم در پژوهش‌های اقلیمی، بوم‌شناختی و زراعی به شمار می‌رود.

روزانه برای ارزیابی و اعتبارسنجی نتایج مدل بکار گرفته شد. به منظور صحت‌سنجی برآورد مدل سبس از چهار شاخص ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAD) و نش-ساتکلیف (NS) سنجیده شد.

شاخص کارایی نش-ساتکلیف یکی از رایج‌ترین آماره‌هایی است که برای ارزیابی مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود (Khayat et al., 2024). این شاخص حالتی استاندارد از تابع حداقل مربعات خطاها است که نسبت واریانس باقیمانده به واریانس برآوردها را نشان می‌دهد. به طور کلی اگر شاخص نش-ساتکلیف بیشتر از ۰/۷ باشد عملکرد مدل عالی، اگر بین ۰/۳ تا ۰/۷ باشد، عملکرد خوب و اگر کمتر از ۰/۳ باشد، عملکرد غیرقابل قبول فرض می‌شود (Sutcliffe and Nash, 1970).

داده‌های مورد استفاده در مدل سبس

مجموعه اول شامل آلبیدوی سطح زمین، گسیلمندی، دما، کسر پوشش گیاهی و شاخص سطح برگ LAI و ارتفاع



شکل ۲. نمودار گردش برآورد تبخیر-تعرق از مدل سبس.

Fig 2. Flowchart Showing Evaporation-Sweating From Middle Space.

$NDVI_{min}$ مربوط به مناطق لخت و عاری از پوشش گیاهی می‌باشد، که مقدار آن در مدل سبس ۰/۲ است.

گسیلمندی (Emissivity) سطح زمین (ϵ_0)

در مدل سبس، گسیلمندی سطح زمین، که توسط (Suberin&et al, 2004) ارائه گردید، به صورت ذیل محاسبه می‌گردد.

در صورتی که، خاک لخت باشد مقدار آن مطابق با توصیه مدل سبس، ۰/۲۴ است. چنانچه پوشش گیاهی متراکم باشد مقدار آن بر اساس توصیه مدل ۰/۹۹ در نظر گرفته می‌شود. اگر منطقه به شکل مجموعه‌ای از پوشش گیاهی و خاک لخت در نظر گرفته شود مقدار آن بر اساس رابطه (۳) محاسبه می‌گردد.

$$\epsilon_0 = f_c * \epsilon_v + \epsilon_s * (1 - f_c) \quad (3)$$

که در این رابطه، ϵ_s گسیلمندی خاک (که باند ۴ را در نظر می‌گیرند)، ϵ_v گسیلمندی پوشش گیاهی و f_c کسر پوشش گیاهی می‌باشد.

لذا اندازه‌گیری دقیق شاخص سطح برگ برای درک اثر متقابل میان رشد و نمو گیاه و محیط امری ضروری است (Pakparvar&et al, 2014). محاسبات شاخص سطح برگ با استفاده از رابطه (۱) و نرم‌افزار الویس محاسبه می‌گردد (Raisi&et al, 2013).

$$LAI = \left(\frac{NDVI * (NDVI + 1)}{NDVI - 1} \right)^{0.5} \quad (1)$$

کسر پوشش گیاهی (Fractional Vegetation cover)

کسر پوشش گیاهی (f_c) برای جداسازی سطوح بدون پوشش، با مناطق دارای پوشش تنک و متراکم به کار می‌رود، که در مدل سبس با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Rostamizad&et al, 2023).

$$f_c = 1 - \left(\frac{(NDVI - NDVI_{min})^2}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})^2} \right) \quad (2)$$

که در رابطه بالا، $NDVI_{max}$ مربوط به مناطق دارای پوشش متراکم که مقدار آن در مدل سبس ۰/۵ و

ارتفاع پوشش گیاهی (h)

در مدل سبس، محاسبه ارتفاع پوشش گیاهی بر اساس رابطه (۴) است (Mohammad Ibrahim, 2015).

$$h = h_{min} + \frac{h_{max} - h_{min}}{(NDVI_{veg} - NDVI_{soil})(NDVI - NDVI_{soil})} \quad (۴)$$

h_{min} کمترین ارتفاع پوشش گیاهی که بر اساس مدل سبس ۰/۰۵ در نظر گرفته می‌شود.

h_{max} بیشترین ارتفاع پوشش گیاهی است، که بر اساس مدل سبس ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود.

$NDVI_{soil}$ مربوط به خاک لخت و عاری از پوشش است، که برابر ۰/۰۵ در نظر گرفته می‌شود.

$NDVI_{veg}$ مربوط به سطوح دارای پوشش است که در فصل رویش ۰/۸ و در سایر فصل‌ها ۰/۴ در نظر گرفته می‌شود.

زبری سطحی یا طول زبری تکانه

ارتفاع زبری برای جابجایی یک ارتفاع مرجع می‌باشد و به صورت تقریبی، ارتفاعی که سیالات از حالت آشفستگی به حالت ورقه‌ای حرکت کنند، نامیده می‌شود. در مدل سبس برای محاسبه زبری سطحی از رابطه (۵) استفاده می‌گردد (Payandeh, 2021).

$$Z_{OM} = 0.005 + 0.5 * \left(\frac{NDVI}{NDVI_{max}}\right)^{2.5} \quad (۵)$$

ارتفاع زبری

ارتفاع زبری از معادله (۶) بدست می‌آید (Payandeh, 2021):

$$Z_{Oh} = \frac{Z_{om}}{\exp * KB^{-1}} \quad (۶)$$

در مدل سبس برای محاسبه ارتفاع زبری از رابطه زیر استفاده می‌شود که در این رابطه برای محاسبه پارامتر KB^{-1} از رابطه (۷) استفاده می‌شود.

$$KB^{-1} = \left(\frac{KC_d}{4 * c_t * \frac{u_*}{u * h}} \right) * fc^2 + fc^2 * fc^2 \quad (۷)$$

$$\left(\frac{k * u_* * (u * h * Z_{om}) * h}{c_t^*} \right) + KB_S^{-1} * F_S^2$$

که در این رابطه، f_c کسر پوشش گیاهی، Cd ضریب کشیدگی شاخ و برگ که مقدار آن در مدل سبس ۰/۲ در نظر گرفته می‌شود و C_t ضریب جابجایی گرمای برگ است و پارامترهای ارتفاع پوشش گیاهی و سرعت اصطکاک نیز از رابطه‌های (۸ و ۹) محاسبه می‌شود.

$$h = \frac{Z_{om}}{0.136} \quad (۷)$$

$$u = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z - d_o}{Z_{om}} \right) - \Psi_m \left(\frac{z - d_o}{L} \right) + \Psi_m \left(\frac{Z_{om}}{L} \right) \right] \quad (۸)$$

که در این معادله، Z ارتفاع مرجع بالای سطح زمین (براساس مدل سبس ده متر)، u_* سرعت اصطکاک، d_o ارتفاع جابجایی صفر، Ψ_m عمل تصحیح پایداری و جابجایی نسبی گرمای محسوس و L طول مونسین ابوخوف می‌باشد، که مراحل محاسبه‌ی آن قبلاً اشاره شد.

شار گرمای محسوس (H)

مدل سبس، یکی از الگوریتم‌های بیلان انرژی فیزیک پایه است که نیاز به هیچ دانش قبلی در مورد شارهای حرارتی آشفته واقعی ندارد. شار گرمای محسوس و نهان در الگوریتم SEBS، با استفاده از کسرتبخی برای هر سلول محاسبه می‌شود (Rezaei, 2025).

روش پنمن-مانتیت

تبخیر و تعرق از یک سطح مرجع که با کمبود آب مواجه نیست تبخیر و تعرق گیاه مرجع گفته می‌شود. در روش پنمن مانتیت گیاه مرجع یک گیاه فرضی با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر که ضریب بازتابش در آن ۲۳ درصد و مقاومت روزنه‌های آن در مقابل تعرق ۷۰ می‌باشد. معادله پنمن مانتیت به شکل رابطه (۱۴) می‌باشد (Payandeh, 2021).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + Y[890/(T + 273)]U_2(e_a - e_d)}{\Delta + Y(1 + 0.34U_2)} \quad (14)$$

که در آن ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع R_n ، (mm/day) تابش خالص خورشید در سطح پوشش گیاهی ($Mj m^{-2} d^{-1}$)، T ، متوسط دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از زمین ($^{\circ}C$)، U_2 ، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (m/s)، $e_a - e_d$ ، کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری (m/s)، Δ ، شیب منحنی فشار بخار ($KPa^{\circ}C^{-1}$) و G شار گرما به داخل خاک ($Mj m^{-2} d^{-1}$) است.

نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل داده‌ها

در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای که فاقد ابر بودند برای محاسبه تبخیر-تعرق حوضه میانکوه یزد استفاده و ۱۹ تصویر لندست ۸ در دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲). پس از دریافت تصاویر ماهواره‌ای و انجام تصحیحات جوی در محاسبات مدل مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از نرم افزار های الویس (ILWIS) و انوی (ENVI) مقادیر شاخص سطح برگ (LAI)، درصد پوشش گیاهی (FC)، PVT و آلودگی، بلندی گیاه، LSET برای هر تصویر ماهواره ای محاسبه و نقشه های ترسیم شد. از نقشه کاربری و نقشه شاخص های پوشش گیاهی و دمای سطح زمین (LST) برآورد شده تهیه شد.

جریان گرمای محسوس، توسط دو حد تر و خشک برآورد می‌شود که با استفاده از رابطه‌های (۱۰ و ۱۱) محاسبه می‌گردد.

$$H_{dry} = R_n - G \quad (10)$$

گرمای نهان تبخیر در صورت کمبود رطوبت خاک برابر صفر می‌باشد. تحت شرایط حد تر، میزان تبخیر در حد پتانسیل رخ می‌دهد و تنها با انرژی در دسترس سطح زمین محدود می‌گردد.

$$H_{wet} = R_n - G - \lambda E_{wet} \quad (11)$$

تعیین کسر تبخیر-تعرق (Y)

با توجه به معادلات و داده‌های مورد نیاز در مدل سبب می‌توان با استفاده از رابطه های (۱۲ و ۱۳) کسر تبخیر-تعرق نسبی Y_r و کسر تبخیر-تعرق Y را محاسبه نمود (Su, 2002).

$$h = \frac{Z_{om}}{0.136} \quad (12)$$

$$u = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z - d_o}{z_{om}} \right) - \Psi_m \left(\frac{z - d_o}{L} \right) + \Psi_m \left(\frac{z_{om}}{L} \right) \right] \quad (13)$$

با این فرض که مقدار تبخیر-تعرق به طور تقریبی برابر با مقدار لحظه‌ای آن است، در نتیجه مقدار تبخیر-تعرق روزانه با استفاده از رابطه ذیل محاسبه می‌گردد.

$$ET = 8.64 * 10^7 * \frac{Y * Rn_{day}}{\lambda_{pw}} \quad (13)$$

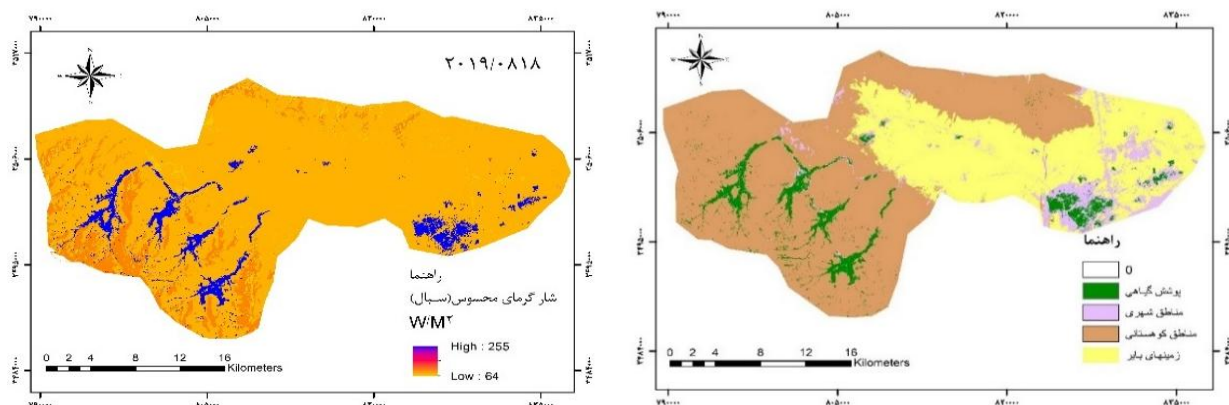
در این رابطه، ρ_w چگالی آب، Rn_{day} تابش خالص روزانه است (Peri Pashtkoohizadeh, 2015).

شد. همچنین تصاویر برای ترکیب داده‌های مختلف جهت استخراج اطلاعات بیشتر نسبت به استفاده از هر کدام به صورت منفرد تلفیق شد. با روش حداکثر احتمال (Maximum likelihood) طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای انجام شد و دلیل استفاده از این روش در طبقه‌بندی در تحقیقات دیگر نیز کمترین درصد خطا را داشته است. پدیده‌ها در ۴ کلاس به نام‌های پوشش گیاهی، مناطق شهری، مناطق کوهستانی و زمین‌های بایر طبقه‌بندی شد (Barkhordari&et al, 2005).

همچنین به مقایسه اجزای بیلان انرژی مدل سبس و ارزیابی نتایج پرداخته شد.

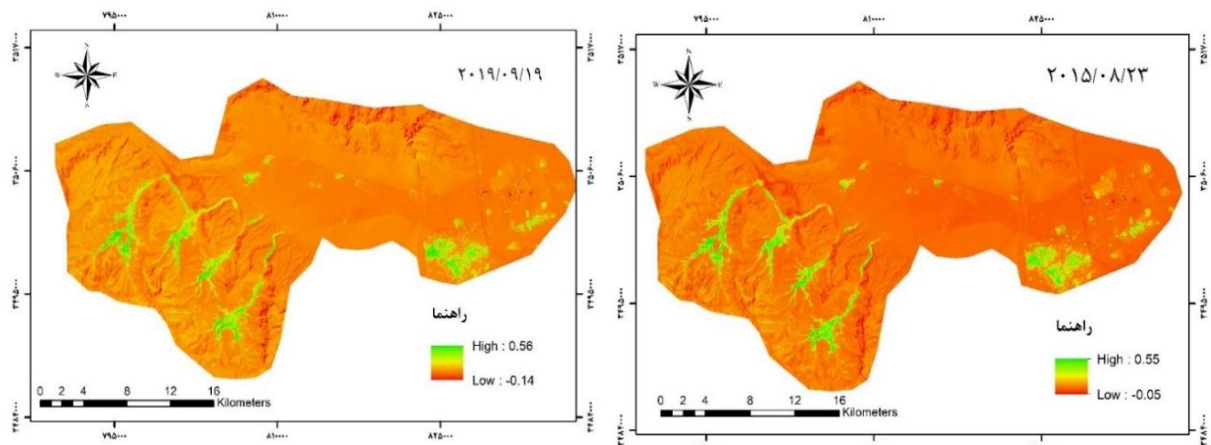
تهیه نقشه کاربری اراضی حوضه میانکوه

در این پژوهش با توجه به این‌که هدف رسیدن به راهکاری برای به دست آوردن مقدار تبخیر و تعرق در کاربری پوشش گیاهی است پس نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه تهیه شد. برای تهیه نقشه کاربری اراضی، ابتدا اقدام به انجام تصحیحات رادیومتریکی و اتمسفری شد و با ایجاد یک ترکیب رنگی کاذب به شناخت اولیه از عوارض و پدیده‌های سطح زمین پرداخته



شکل ۲. نقشه برآورد شار گرمای محسوس (H) نقشه کاربری اراضی حوضه میانکوه حاصل از روش حداکثر احتمال (LU).

Fig 2. A Perceptible Charberry Pattern (H) and A Carberry Pattern on The Lands of The Basin, Which Is More Likely to Occur (LU).



شکل ۳. مقدار شاخص پوشش گیاهی برای حوضه میانکوه یزد.

Fig 3. The INDVI Index Map for Miankoeh Yazd Basin.

بررسی قرار گرفت و مقدار NDVI برای مدل در دو تاریخ مذکور یکسان بوده است.

با توجه به شکل‌های بالا که مربوط به مقدار شاخص پوشش گیاهی حوضه میانکوه یزد می‌باشد. مقدار حداکثر پوشش گیاهی برای منطقه یکسان بوده است و کمترین مقدار شاخص پوشش گیاهی برای تاریخ ۲۰۱۹/۰۹/۱۹ بوده است. در کل می‌توان گفت پوشش گیاهی کمترین مقدار را شامل می‌شود و در نتیجه پراکنش NDVI در محدوده ۰/۰۷ خیلی ضعیف است. مقدار بالای شاخص پوشش گیاهی در مناطق متراکم از پوشش گیاهی باعث افزایش میزان تبخیر و تعرق واقعی می‌شود (Wu & et al., 2020).

برای محاسبه صحت کار ۳۲۰ نقطه از نرم‌افزار گوگل ارث برداشت شده است و سپس ضریب کاپا محاسبه شد که میزان ضریب کاپا ۰/۹۳ و میزان دقت سنجی برای محاسبه این ضریب ۹۶/۷۳ به دست آمد که نشان‌دهنده دقت بالای طبقه‌بندی می‌باشد (Ghanbari & Esmailzadeh, 2025).

برآورد شاخص پوشش گیاهی (NDVI)

الگوریتم سبس از بخش‌های مختلفی تشکیل شده‌اند و پارامترهایی نظیر شاخص پوشش گیاهی NDVI، آلبیدوی سطحی و دمای سطحی با استفاده از اطلاعات تصاویر محاسبه شد. در این پژوهش تصاویر مربوط به تاریخ ۲۰۱۵/۰۸/۲۳ و ۲۰۱۹/۰۹/۱۹ جهت بررسی شاخص پوشش گیاهی برآورد شده از طریق روش سبس مورد

جدول ۱. مقدار شاخص پوشش گیاهی مدل سبس.

Table 1. The INDVI Index Value for SEBS.

Year	2015.8.23		2019.9.19	
NDVI	max	min	max	min
Value	0.55	-0.05	0.56	-0.14

فرآیند تبخیر و تعرق وابسته به مقدار انرژی در دسترس می‌باشد. تابش خورشیدی، بزرگترین منبع انرژی است که مقادیر بسیار آب را از حالت مایع به بخار تبدیل می‌کند. تابش خورشیدی به سطح تبخیر، موقعیت مکانی و زمانی سطح، ضریب مه‌آلودگی و وجود ابرها که بخش عمده‌ای از تابش را جذب یا منعکس می‌کند وابسته است. به دلیل تفاوت موقعیت زمین نسبت به خورشید، تابش خورشیدی در عرض‌های جغرافیایی و فصل‌های متفاوت یکسان نمی‌باشد. با توجه به تاریخ این تصویر، به دلیل عمودی‌تر تابیدن خورشید در روزهای تابستان، هر واحد از سطح زمین مقدار تابش بیشتری دریافت می‌کند.

شار تابش خالص در واقع مقدار انرژی در دسترس است که صرف گرم کردن هوا، خاک و همچنین فرآیند تبخیر و

برآورد دمای سطح زمین (TS)

تصاویر و مقدار دمای سطح زمین، به صورت درجه کلوین محاسبه گردیده به تاریخ ۲۰۱۵/۰۸/۲۳ و ۲۰۱۹/۰۹/۱۹ که در شکل (۴) دیده می‌شود.

مقایسه اجزای بیلان انرژی

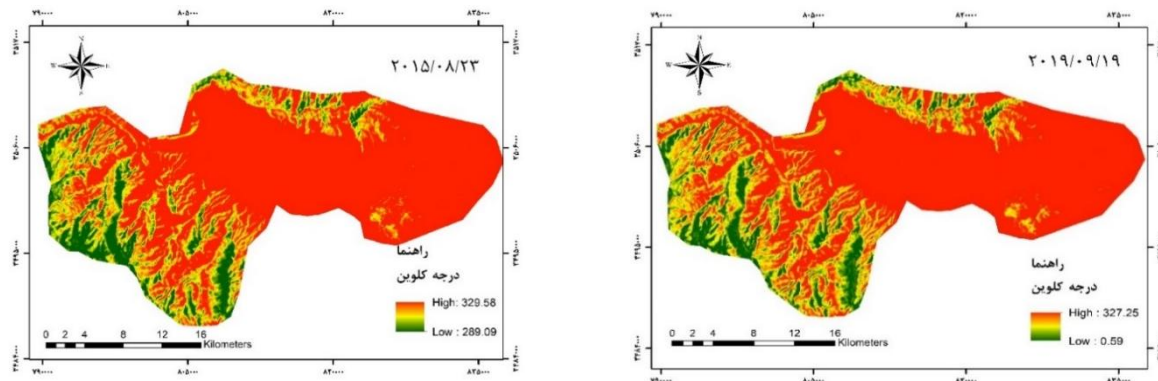
برای مقایسه اجزای بیلان انرژی تصویر مربوط به تاریخ ۲۰۱۹/۰۸/۱۸ مورد بررسی قرار گرفت.

مقادیر تابش خالص

برای برآورد تابش خالص، پارامترهایی شامل تابش طول موج کوتاه ورودی، آلبیدوی سطحی، تابش طول موج بلند خروجی، تابش طول موج بلند ورودی و گسیلمندی حرارتی سطحی با استفاده از معادله مذکور برآورد گردید.

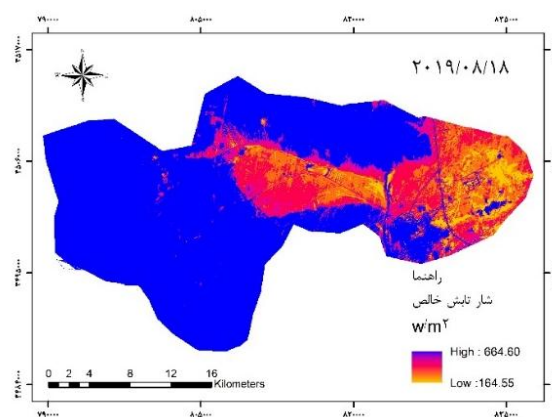
است. شکل (۵) نقشه برآورد شار تابش خالص حوضه ابخیز میانکوه را نشان میدهد.

تعرق می‌شود. مقدار تابش خالص از توازن مؤلفه‌های طول موج کوتاه و بلند تابش ورودی و خروجی به دست می‌آید و مقدار آن به پوشش و جنس زمین در هر منطقه وابسته



شکل ۴. شاخص دمای سطح زمین بر حسب درجه کلون.

Fig 4. Earth's Surface Temperature Index in Degrees Kelvin.



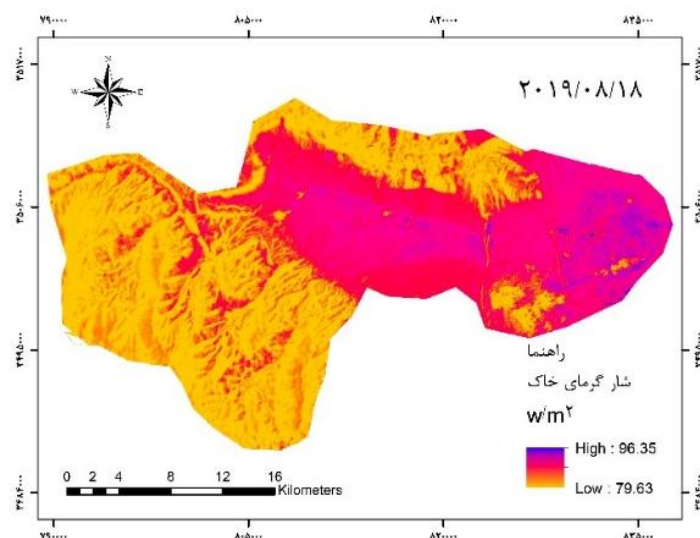
شکل ۵. نقشه برآورد شار تابش خالص.

Fig 5. Net Radiation Flux Estimation Map.

توضیح داد که اگر خاک فاقد گیاه و خشک باشد مقدار اعظم انرژی صرف گرم کردن خاک شده و دمای سطحی افزایش می‌یابد. از آنجا که مقدار شار گرمای خاک تابعی از دمای سطحی است با افزایش دمای سطحی خاک، تفاوت بین دمای سطحی و زیرسطحی افزایش می‌یابد که این امر سبب افزایش مقدار شار گرمای خاک شده و بنابراین انتقال گرما داخل خاک قسمت مهم‌تری از تابش خالص را در بر می‌گیرد. شکل (۶) نقشه برآورد شار گرمای خاک در حوضه ابخیز میانکوه را نشان می‌دهد.

مقادیر شار گرمای خاک

به دلیل دشوار بودن برآورد مستقیم مقادیر G ، مقدار این پارامتر به صورت نسبت $\frac{G}{Rn}$ محاسبه گردید و سپس با استفاده از مقادیر تابش خالص محاسبه شده، مقدار G به دست آمد. بسیاری از مطالعات نشان داده است که نسبت $\frac{G}{Rn}$ در نیمه روز با استفاده از شاخص‌های گیاهی اندازه‌گیری شده توسط ماهواره از قبیل LAI با دقت بالا قابل پیش‌بینی می‌باشد. البته این شیوه در نواحی با تاج پوشش کم فاقد اعتبار است. علت آن را می‌توان بدین صورت



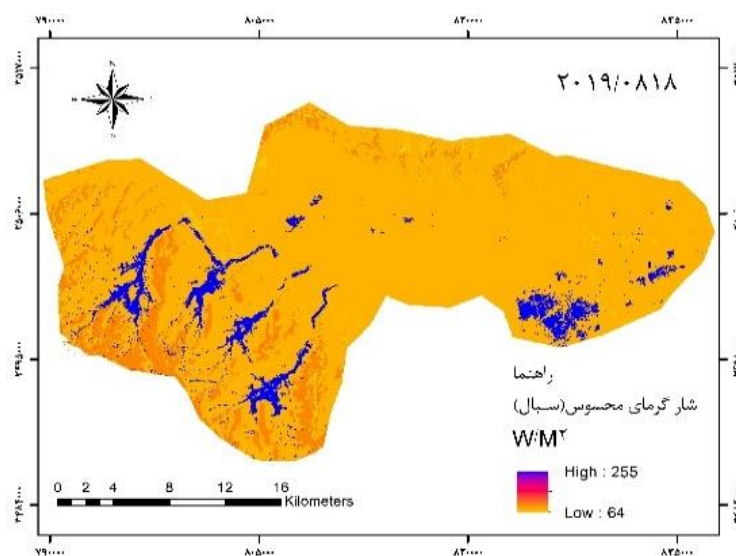
شکل ۶. نقشه برآورد شار گرمای خاک.

Fig 6. Soil Heat Flux Estimation Map.

اراضی کشاورزی) می‌توان برآورد قابل قبولی از مقدار گرمای محسوس داشت. با زیاد شدن پوشش گیاهی، مقدار گرمای محسوس کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر این شار در مناطقی که دمای سطحی آن‌ها بیشتر است مقدار بیشتری دارد که در واقع نشان‌دهنده مناطق با پوشش گیاهی اندک می‌باشد. شکل (۷) نقشه برآورد شار گرمای محسوس در حوضه آبخیز میانکوه را نشان می‌دهد.

مقادیر شار گرمای محسوس

برآورد شار گرمای محسوس نیز به پارامترهای زیادی نیاز دارد که برخی از آنها از تصاویر ماهواره‌ای و برخی دیگر از داده‌های هواشناسی قابل استحصال است. یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر شار گرمای محسوس، پوشش گیاهی است. به دلیل اینکه در نقاط فاقد پوشش گیاهی رابطه خطی بین دمای سطح زمین و اختلاف دمای سطح صادق نیست، لذا تنها در مناطق دارای پوشش گیاهی (مثل



شکل ۷. نقشه برآورد شار گرمای محسوس.

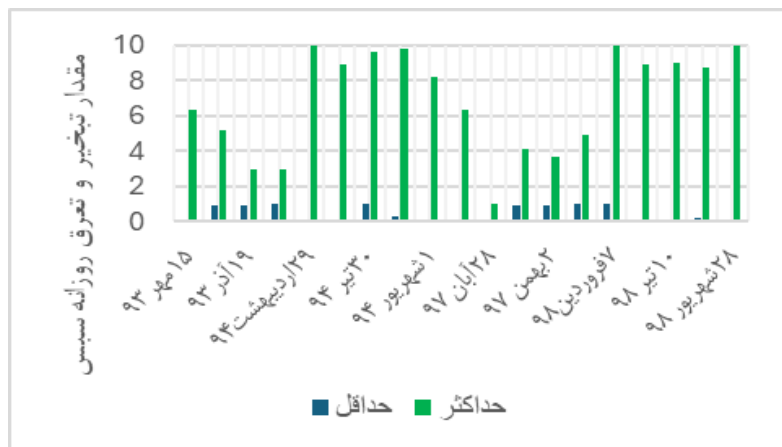
Fig 7. Sensible Heat Flux Estimation Map.

برآورد مقادیر تبخیر و تعرق (ET) به روش مدل

سبس

با بررسی میزان تبخیر-تعرق روزانه (سبس) در سال آبی ۱۳۹۳-۱۳۹۴ بیشترین میزان تبخیر-تعرق روزانه به ترتیب مربوط به ماه‌های اردیبهشت، مرداد و تیر با مقدار

عددی ۱۰، ۹/۸۲ و ۹/۶۷ میلی‌متر در روز بوده است. همچنین در سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ بیشترین میزان تبخیر-تعرق روزانه مربوط به ماه‌های فروردین، شهریور، تیر و خرداد با مقدار عددی، ۱۰، ۱۰، ۸/۹۸ و ۸/۹۲ میلی‌متر در روز بوده است (شکل ۸).

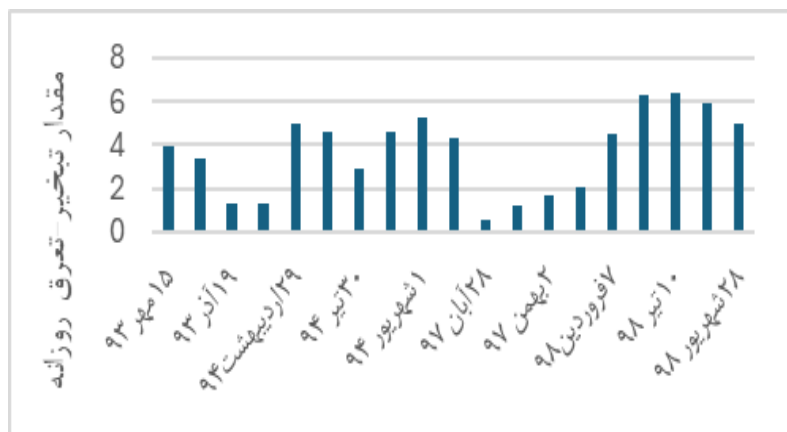


شکل ۸. نمودار حداقل و حداکثر تبخیر-تعرق روزانه (سبس).

Fig 8. Daily Minimum and Maximum Evapotranspiration Chart (SEBS).

روزانه مربوط به تیرماه و خردادماه ۱۳۹۸ با مقدار عددی ۶/۳۷ و ۶/۲۹ میلی‌متر در روز می‌باشد (شکل ۹).

با بررسی میانگین تبخیر-تعرق روزانه در دو سال آبی می‌توان به این نتیجه رسید که بیشترین میزان تبخیر-تعرق



شکل ۹. نمودار میانگین تبخیر-تعرق روزانه (سبس).

Fig 9. Average Daily Evapotranspiration Chart (SEBS).

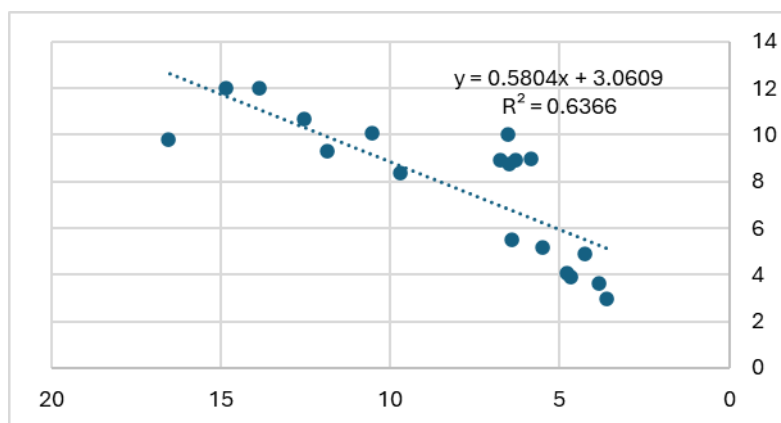
مبنای علمی برای بهینه‌سازی مدیریت منابع آب در حوضه آبخیز میانکوه فراهم می‌کند و بینش‌های جدیدی در مورد پویایی مکانی و زمانی تبخیر و تعرق و مکانیسم‌های محرک آن در منطقه ارائه می‌دهد. این نتایج

تجزیه و تحلیل فاکتورهای مؤثر بر برآورد تبخیر و تعرق واقعی توسط مدل سبس نشان داد که سرعت باد مهمترین عامل مؤثر بر تبخیر و تعرق است و پس از آن میانگین دمای سالانه و نوع زمین قرار دارند. این مطالعه

در این پژوهش برای اعتبارسنجی و ارزیابی نتایج از مقدار تبخیر-تعرق روزانه به دست آمده از روش فائو پنمن-مانتیت و محاسبه بیلان تبخیر و تعرق سطح خاک مزرعه پایین دست طرح پخش سیلاب میانکوه استفاده شده است.

با تحقیق مشابه در منطقه رودخانه داون چین با استفاده از مدل سبس همخوانی نزدیک دارد (Wang & et al, 2025).

ارزیابی و اعتبارسنجی مدل



شکل ۱۰. نمودار همبستگی تبخیر و تعرق روزانه (پنمن مانتیت) و میانگین تبخیر-تعرق روزانه

Fig 9. Correlation Diagram of Daily Evapotranspiration (Penman-Monteith) and Average Daily Evapotranspiration.

جدول ۲. مقایسه بین نتایج تبخیر-تعرق برآورد شده از روش پنمن مانتیت و تبخیر و تعرق برآورد شده مدل سبس.

Table 2. Comparison Between The Estimated Evapotranspiration Results From The Penman-Monteith Method and The Estimated Evapotranspiration From The SEBS Model.

Daily Eto (SEBS)	Daily Eto (Penman Monteith)	Image ID	Image Date
تبخیر-تعرق روزانه برآورد شده مدل سبس	تبخیر-تعرق روزانه (پنمن مانتیت)	شناسه تصویر	تاریخ تصاویر
9.31	11.86	LC81620382014280LGN00	7/10/2014
5.19	5.49	LC81620382014296LGN00	23/10/2014
3.93	4.67	LC08_L1TP_162038_20141210_20170416_01_T1	10/12/2014
2.99	3.62	LC81620382015011LGN00	11/1/2015
12.00	13.87	LC81620382015139LGN00	19/5/2015
8.94	6.74	LC08_L1TP_162038_20150604_20170406	4/6/2015
10.67	12.53	LC08_L1TP_162038_20150722_20170406	21/7/2015
9.82	16.54	LC08_L1TP_162038_20150807_20170406	7/8/2015
12.00	14.87	LC81620382015235LGN00	23/8/2015
8.35	9.70	LC08_L1TP_162038_20181002_20181010_01_T1	2/10/2018
5.50	6.40	LC08_L1TP_162038_20181119_20181129_01_T1	19/11/2018
4.09	4.79	LC08_L1TP_162038_20190122_20190205_01_T1	21/12/2018
3.62	3.86	LC08_L1TP_162038_20190223_20190308_01_T1	22/1/2019
4.88	4.25	LC08_L1TP_162038_20181221_20181227_01_T1	23/2/2019
10.10	10.53	LC08_L1TP_162038_20190327_20190404_01_T1	27/3/2019
8.92	6.29	LC08_L1TP_162038_20190615_20190620_01_T1	15/6/2019
8.98	5.83	LC08_L1TP_162038_20190701_20190706_01_T1	1/7/2019
8.74	6.50	LC08_L1TP_162038_20190818_20190902_01_T1	18/8/2019
10.00	6.52	LC08_L1TP_162038_20190919_20190919_01_RT	19/9/2019

کلیه واحدهای تبخیر و تعرق میلیمتر بر روز می باشد.

ضریب کمیت R^2 که ضریب همبستگی می‌باشد در محدوده ۱- تا ۱+ می‌باشد اگر بین روش مدل سبس، همبستگی مثبت وجود داشته باشد R^2 به ۱+ نزدیک‌تر است و اگر همبستگی ضعیف و منفی داشته باشد R به ۱- نزدیک‌تر است و هرگاه هیچ‌گونه همبستگی بین این دو تبخیر و تعرق وجود نداشته باشد R به صفر نزدیک‌تر است.

طبق نمودار شکل (۱۰) همبستگی بین تبخیر و تعرق برآورد شده سبس با تبخیر و تعرق برآورد شده (پنمن

مانتیت) با مقدار عددی ۰/۶۴ بوده است. ارزیابی نتایج به دست آمده از مدل سبس با داده‌های تبخیر و تعرق روزانه (پنمن مانتیت) با استفاده از چهار شاخص ضریب همبستگی (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدرمطلق خطا (MAD) و ساتکلیف-نش (NS) سنجیده شد که اندازه‌های این چهار شاخص به ترتیب ۰/۶۴، ۱/۸۷، ۲/۴ و ۰/۶۲ محاسبه شد که نشان از دقت خوب مدل سبس برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی در منطقه مطالعه شده می‌باشد (جدول ۳).

جدول ۳. شاخص‌های صحت‌سنجی مدل سبس در حوضه آبخیز میانکوه.

Table 3. Validation Indicators of The SEBS Model in The Miankouh Watershed.

NS	RMSE	MAD	R^2
0.62	2.4	1.87	0.64

همبستگی خوب بین روش تجربی پنمن مانتیت و مدل سبس نشان از کارایی مناسب مدل در برآورد تبخیر-تعرق واقعی در منطقه میانکوه و مناطق مشابه می‌باشد. بررسی نتایج مقایسه مدل‌ها در شهرستان مهریز توسط پاینده (Payandeh, 2021) و (Mohammad Ibrahim, 2015) در شهرستان زابل که مدل سبس را بهترین مدل برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی در منطقه خشک دانسته، تا حد زیادی نتایج این پژوهش را تایید می‌نماید.

نتیجه‌گیری

آگاهی از میزان تبخیر-تعرق واقعی (ETa) انواع پوشش گیاهی از مهم‌ترین نیازهای حل معادله بیلان آبی در ارزیابی میزان مصرف آب است. روش‌های سنتی برآورد ET متکی به اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای از عامل‌های مؤثر بوده و نتایج آن به‌درستی نمی‌تواند برای پهنه‌های وسیع نمایندگی کند (Allen et al 2011). همچنین به دلیل عدم مشابهت در پوشش زمین، پستی و بلندی و نیز بدلیل پیچیدگی در انتقال جریان گرما به خوبی قابل تعمیم به مناطق دیگر نمی‌باشد (Su, 2002).

پدیده فرارفت در مناطق خشک و نیمه خشک تاثیر شناخته شده‌ای بر افزودن به مقدار تبخیر-تعرق دارد. عامل اصلی آن خشک بودن مناطق همجوار کشتزارها و انتقال انرژی گرمایی در اثر وزش باد به کشتزارهاست و هر چه ارتفاع گیاهان بیشتر باشد اندازه این مقدار انرژی بیشتر است. از آنجا که در روش‌های رایج محاسبه ET_o به دلیل توجه صرف به مقدار انرژی گرمایی موجود در محیط، ET_o کمتر از واقعیت تخمین زده شده و این موضوع در تحقیقات متعددی به اثبات رسیده است. (Majnoni-Heris et al, 2009, wang & et al, 2025) Razzaghi, Pereira et al, 2015, Pakparvar et al, 2014 and Sepaskhah, 2012). کاربرد مدل‌های توازن انرژی سطحی همراه با سنجش از دور افزون بر امتیاز پهنه‌ای بودن که خطای تعمیم یک نقطه به پهنه وسیع را حذف نموده، این برتری را دارد که انرژی موجود در محیط را از هر منبع (تابش خورشید یا انتقال یافته با پدیده فرارفت) در نظر گرفته و معادله بیلان را بر این اساس حل می‌کند. پراکنش مختلف تاج پوشش گیاهی در کشت‌های مختلف و همچنین غیر یکنواخت بودن سطح تر شده در زمان

- Barkhordari, J., Zareh, M.M., & Khosrowshahi, M. (2005). Study of land cover changes in the watershed of Esteghlal Minab Dam using RS and GIS. *Quarterly Journal of Soil and Water Conservation*, 1 (2), 31-47. <https://www.sid.ir/paper/455128/fa>. (In Persian)
- Chen, X., Su, Z., Ma, Y., Yang, K., Wen, J., & Zhang, Y. (2013). An Improvement of Roughness Height Parameterization of the Surface Energy Balance System (SEBS) over the Tibetan Plateau. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(3), 607-622. <https://doi.org/10.1175/jamc-d-12-056.1>
- Derardja, B., Khadra, R., Abdelmoneim, A. A. A., El- Shirbeny, M. A., Valsamidis, T., De Pasquale, V., Deflorio, A.M., & Volden, E. (2024). Advancements in Remote Sensing for Evapotranspiration Estimation: A Comprehensive Review of Temperature-Based Models. *Remote Sensing*, 16(11). <https://doi.org/10.3390/rs16111927>
- Fazel Pouraghdai M.R, Malekinezhad, H., Ekhtesasi M.R, & Barkhordari, J. (2018). The Effects of Flood Spreading on Qanat Discharge using Standard Discharge Index (Case Study: Qanats of Myankoo of Mehriz). *J Watershed Manage Res*. 9(17), 235-245. <https://doi.org/10.29252/jwmr.9.17.235> (In Persian)
- Khayat, A. , Akhondi, Z. & Khozaymehnezhad, H. (2024). Evaluation of the accuracy of fuzzy neural network in estimating the discharge of Qanats in Birjand city. *Journal of Aquifer and Qanat*, 5(1), 45-58. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2025.8597.1086> (In Persian)
- Li, F., & Lyons, T. J. (2002). Remote estimation of regional evapotranspiration. *Environmental Modelling & Software*, 17(1), 61-75. [https://doi.org/10.1016/S13648152\(01\)00053-6](https://doi.org/10.1016/S13648152(01)00053-6)
- Pakparvar, M., Cornelis, W., Pereira, L.S., Gabriels, D., HosseiniMarandi, H., Edraki, M., & Kowsar, S.A. (2014). Remote sensing estimation of actual evapotranspiration and crop coefficients for a multiple land use arid landscape of southern Iran with limited available data. *Journal of Hydroinformatics*, 16 (6), 1441-1460. <https://doi.org/10.2166/hydro.2014.140>
- Pereira, L.S., Allen, R., Smith, M., & Raes, D. (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management* 147: 4-20

آبیاری از جمله عوامل ایجاد اختلاف در ارتباط ET_o با ET_c از طریق متفاوت بودن K_c است. در این زمینه نیز با توجه به تولید لایه درصد زمین پوشیده از گیاه با سنجش از دور، تنوع مکانی تاج پوشش و میزان متفاوت رطوبت مورد ملاحظه قرار می‌گیرد. استفاده از لایسیمتر به عنوان یک روش مستقیم و معتبر برآورد (ET_o) تبخیر و تعرق گیاه مرجع مطرح می‌باشد. با این حال در اکثر مطالعات به دلیل کمبود داده های لایسیمتری، استفاده از فرمول های ارائه شده توسط افراد مختلف، که معتبرترین آنها فائو پنمن-مانتیس است، رایج می باشد. لذا لازم است که جهت برآورد هر چه دقیق تر و واقعی تر (ET_o) مقادیر به دست آمده از روابط با مقادیر اندازه گیری شده از لایسیمترها اصلاح شوند.

سپاسگزاری

این پژوهش در قالب طرح تحقیقاتی با کد مصوب 01-97014-970592-026-47 پژوهشکده‌ی حفاظت خاک و آبخیزداری انجام شد. نویسندگان این مقاله از دست اندرکاران به ویژه از حمایت و پشتیبانی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان یزد، پژوهشکده‌ی حفاظت خاک و آبخیزداری و اداره کل هواشناسی استان یزد صمیمانه قدردانی می‌کنند.

منابع

- Ali Asgharzadeh, H, & Sanaie Nejad, S.H. (2006). Estimation of plant evapotranspiration using remote sensing data and geographic information system in the Tang-Knesht watershed of Kermanshah. *National Conference on Irrigation and Drainage Network Management*. (In Persian)
- Allen, R.G., M. Tasumi and A. Morse. (2011). Satellite-based evapotranspiration by METRIC and Landsat for western states water management. *US Bureau of Reclamation Evapotranspiration Workshop*, Feb 8-10, 2005, Ft. Collins. [https://doi.org/10.1061/40792\(173\)556](https://doi.org/10.1061/40792(173)556)

- Pakparvar M., Cornelis W., Pereira L S., Gabriels D., HosseiniMarandi H., Edraki M., & Kowsar S A. (2014) Remote sensing estimation of actual evapotranspiration and crop coefficients for a multiple land use arid landscape of southern Iran with limited available data. *Journal of Hydroinformatics*;16 (6):1441–1460.
- Payandeh, H. (1400). Calibration and evaluation of the Sabal, Sabs and Metric energy balance models in evapotranspiration zoning using remote sensing in the Yazd Miankouh Plain, Master's thesis in Remote Sensing and Geographic Information Systems, *Yazd University*. 138 pages. (In Persian)
- Piri Poshtkouhizadeh, H. (2015). Estimation of real evapotranspiration using SEBAL and SEBS algorithms and OLI sensor images (Dasht Naz-Sari case study). Master's thesis in agricultural meteorology, *Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources*. 124 pages. (In Persian)
- Raisi, A., Mozaffari Gh., & Ghaffarian Malmiri, H. (2013). Evaluation and comparison of wheat plant evapotranspiration estimation using the Sebal algorithm and Penman-Monteith method in the Chah Nimeh region of Sistan and Baluchestan, *Journal of Physical Geography*, Year 15, No. 60, 17-37, pp. <https://doi.org/20.1001.1.20085656.1402.16.60.1.0> (In Persian)
- Rostamizad, G., Pakparvar, M. and Abdinejhad, P. (2023). Evaluation and Calibration of SEBS Surface Energy Balance Model in Determining Evapotranspiration of Plains Affected by Flood Spreading (Qaracherian-Zanjan Watershed Management Research, 36(4), 17-31. <https://doi.org/10.22092/wmrj.2023.360611.1503> (In Persian)
- Rezaei, M. (2025). A Comprehensive Overview of Single-Source and Dual-Source Energy Balance Algorithms for Estimating Actual Evapotranspiration. *Journal of Water and Sustainable Development*, 11(4), 1-14. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v11i4.2407-1345>
- Sharifi, R., Barzegari Banadkooki, F., & Rostamizad, G. (2025). Evaluating the Efficiency of the SEBS Model in Estimating Actual Evapotranspiration: Emphasizing the Role of Flood Spreading in Sustainable Water Resources Management in the Chandab Plain, Tehran. *Jwmseir*, 19 (68), <https://doi.org/10.22034/19.68.5>
- Ghanbari, Y., & Esmaeilzadeh, H. (2025). Land Use/Land Cover Changes Detection in Cities and the Resulting Environmental Risks (Case Study: District 18 of Tehran Metropolis). *Geography and Environmental Sustainability*, 15(2), 125-141. <https://doi.org/10.22126/GES.2025.11656.2829> (In Persian)
- Ghiat, I., Mackey, H.R., & Al-Ansari, T. (2021). A Review of Evapotranspiration Measurement Models, Techniques and Methods for Open and Closed Agricultural Field Applications. *Water*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/w13182523>
- Gong, L. Xu, C.-y. Chen, D. Halldin, S. and 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), 620-629.
- Mohammad Ibrahim, Masoud. (2015). "Estimating Actual Evapotranspiration at Regional Scale Using the SEBS Model (Case Study: Sistan Plain)". Master's Thesis in Water Resources Engineering, *University of Zabol*.
- Nash, J.E. & J.V. Sutcliffe. (1970), River flow forecasting through conceptual models part I A discussion of principles, Volume 10, Issue 3, Pages 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Nisa, Z., Khan, M. S., Govind, A., Marchetti, M., Lasserre, B., Magliulo, E., & Manco, A. (2021). Evaluation of SEBS, METRIC-EEFlux, and QWaterModel Actual Evapotranspiration for a Mediterranean Cropping System in Southern Italy. *Agronomy*, 11(2), 345.
- Qamarnia, H., & Rezvani, S.V. (2014). Calculation and zoning of evapotranspiration using the SEBAL algorithm in western Iran (Mian Darband Plain), *Water and Soil*, 28(1), 81-72. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.20634> (In Persian)
- Omidvar, J., Davari, K., Arshad, S., Mousavi, Bayegi, M., Akbari, M. & Fari Hosseini, A. (2012). Estimation of Evapotranspiration Actual Using Sensor Aster and Model Metric. *Irrigation and Water Engineering*, 3(1), 38-49. (In Persian)
- Pareeth, S., & Karimi, P. (2023). Evapotranspiration estimation using Surface Energy Balance Model and medium resolution satellite data: An operational approach for continuous monitoring. *Sci Rep*, 13(1), 12026. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38563-2>

Shi, T.T., Guan, D.X., Wu, J.B., Wang, A.Z., Jin, C.J., & Han, S.J. (2008). Comparison of methods for estimating evapotranspiration rate of dry forest canopy: Eddy covariance, Bowen ratio energy balance, and Penman-Monteith equation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D19).

<https://doi.org/10.1029/2008JD010174>

Sokolov, A.A., & Chapman, T.G. (1974). Methods for water balance computations, *UNESCO Reports in Hydrology*, Paris.

Sun Z., Wei B., Su W., Shen W., Wang C., You D. and Liu Z. 2011. Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China. *Mathematical and Computer Modelling* 54: 1086–1092.

Su, Z. (2002). The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes SEBS-The Surface Energy Balance. *Hydrology and Earth System Sciences*. 6(1): 85-100.

Sharafi, M. and Samadian Fard, S. (2022). The role of kernel functions in increasing the accuracy of daily evaporation prediction in wet and dry regions of Iran. *Journal of Aquifer and Qanat*, 2(1), 147-157.

<https://doi.org/10.22077/jaaq.2022.1871> (In Persian)

Wu, B., Zhu, W., Yan, N., Xing, Q., Xu, J., Ma, Z., & Wang, L. (2020). Regional Actual Evapotranspiration Estimation with Land and Meteorological Variables Derived from Multi-Source Satellite Data. *Remote Sensing*, 12(2).

<https://doi.org/10.3390/rs12020332>

Wang, Z., Wang, Z., Song, L., & Li, T. (2025). Characterization of spatial and temporal distribution of evapotranspiration in the Dawen River Basin and analysis of driving factors. *Environmental Earth Sciences*, 84(3), 81.

<https://doi.org/10.1007/s12665-024-12078-z>

Tabatabaei, S. M. (2024). Investigating the successful methods of reviving the Qanat Through physical protection and artificial nutrition Case Study; Khamsian Qanat Ashkezar, Mazreano of Dehshir and Dihok Kharanagh. *Journal of Aquifer and Qanat*, 4(2), 67-82.

<https://doi.org/10.22077/jaaq.2024.7340.1065> (In Persian)

