

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

Rahman Sharifi¹, Fatemeh Barzegari Banadkooki^{2*}, Ghobad Rostamizad³

Received: 09-03-2025, Revised 08-04-2025, Accepted: 07-02-2025, Published: 09-06-2025

<https://doi.org/10.22034/19.68.5>

Extended abstract

Introduction

Water resource management in arid and semi-arid regions has consistently posed a fundamental challenge due to limited precipitation and increasing demand. In these regions, the accurate estimation of actual evapotranspiration (ET_a) plays a crucial role in the planning and optimal management of water resources, the allocation of water to various sectors (agriculture, industry, potable water), and drought management. Evapotranspiration is a complex process influenced by many factors, including climatic conditions, soil characteristics, vegetation type, and land management practices. Various models have been developed to estimate actual evapotranspiration. Ground-based models, such as lysimeter and heat flux measurements, are accurate but require expensive equipment and specialized personnel, and are typically limited to local scales. Conversely, satellite-based models offer the potential to estimate evapotranspiration on a broad scale and at a lower cost. The Surface Energy Balance System (SEBS) model is a widely used model for estimating actual evapotranspiration that operates based on the surface energy balance. Utilizing satellite and meteorological data, this model calculates sensible heat flux, latent heat flux (evapotranspiration), soil heat flux, and net radiation. The primary objective of this research is to calibrate and validate the SEBS model in the Chandab Plain of Tehran and to analyze the effects of flood spreading on the spatial distribution of evapotranspiration which is located in an arid and semi-arid region, the Chandab Plain faces water scarcity challenges. Evaluating the effects of flood spreading on evapotranspiration can contribute to a better understanding of the impacts of this method on water resource management in the region.

Materials and Methods

The study area for this research is the Chandab Plain, located in the southeastern part of Tehran. To implement the SEBS model, several datasets were utilized. Landsat 8 satellite imagery, with a spatial resolution of 30 meters, was downloaded from the United States Geological Survey (USGS) website. Prior to analysis, the imagery underwent essential pre-processing steps, including geometric and atmospheric corrections, to ensure data quality. Additionally, meteorological data—such as temperature,

1. Assistant Professor of Soil Conservation and Watershed Management Department, Tehran Agricultural and Natural Resources Research Center, AREEO, Tehran, Iran.

2. Associate Professor of Engineering Department, Payame Noor University, Tehran, Iran. Corresponding Authors: Email: Barzegari@2pnu.ac.ir.

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

humidity, wind speed, and solar radiation—were gathered from synoptic meteorological stations situated near the study area. These meteorological variables provided the necessary inputs for the SEBS model. Ground-based measurements, particularly soil moisture data collected from various locations within the Chandab Plain, were also employed to calibrate the model and evaluate its accuracy. The SEBS model was implemented using the aforementioned data. A genetic algorithm-based optimization method was employed for model calibration. In this method, the various parameters of the SEBS model were adjusted to maximize the agreement between the model output and the ground-based soil moisture data. Following model calibration, actual evapotranspiration was calculated for the entire study area using the calibrated model. To evaluate the effects of flood spreading, areas affected by flood spreading were identified using satellite imagery and field visits. Subsequently, maps of evapotranspiration in flood-affected and unaffected areas were compared. The accuracy of the SEBS model was assessed using statistical indices, including the coefficient of determination (R^2) and the mean absolute error (MAE).

Results and Discussion

The findings of this research demonstrated that the SEBS model, when subjected to precise calibration, exhibits a strong capability for accurately estimating actual evapotranspiration in the Chahdabab Plain of Tehran. A comparative analysis of evapotranspiration maps between areas influenced by flood spreading and those unaffected revealed that flood spreading significantly reduces evapotranspiration rates. On an average, flood spreading resulted in a 15% reduction in actual evapotranspiration. This decrease is mainly attributed to enhanced soil moisture content, improved physiological conditions of vegetation, and reduced water stress experienced by plants in flood-affected areas. Additionally, the results indicated that flood spreading is vital in facilitating groundwater recharge, increasing the soil's water retention capacity, and promoting healthier and more sustainable plant growth. Over time, these impacts contribute significantly to the long-term sustainability of water resources and the ecological stability of the region. The SEBS model outputs were systematically compared with field measurements to assess the accuracy of the model's predictions. Statistical indices such as the coefficient of determination (R^2) and the mean absolute error (MAE) were employed for validation. The statistical evaluation showed that the R^2 value was 0.68 and the MAE was 0.48 mm per day, indicating a satisfactory level of accuracy and validating the effectiveness of the SEBS model under the climatic conditions of the Chahdabab Plain.

Conclusion

This study demonstrates that the SEBS model can serve as an effective tool for estimating actual evapotranspiration in arid and semi-arid regions. The findings reveal that precise calibration using local data significantly enhances the model's predictive performance. These results emphasize the importance of integrating accurate climatic, topographic, and vegetation information to improve the reliability of evapotranspiration models. Furthermore, the evaluation of flood spreading impacts indicates that this technique can be adopted as an efficient strategy for water resource management. By increasing soil moisture, reducing surface temperatures, and enhancing the physiological condition of plants, flood spreading contributes to lower agricultural water consumption and improved crop yields. Additionally, this process supports groundwater recharge and facilitates the restoration of water-dependent ecosystems. The observed reduction in evapotranspiration following flood spreading interventions highlights the effectiveness of this approach in conserving water resources and promoting sustainable agricultural development. The outcomes of this research offer valuable insights for designing comprehensive water management programs in arid and semi-arid regions. Moreover, they provide practical strategies for strengthening the resilience of vulnerable ecosystems to the adverse impacts of climate change. Overall, the findings underscore the critical role of flood spreading and precise modeling techniques in advancing sustainable water and agricultural practices in water-scarce environments.

Keywords: *Water Resources Management, Remote Sensing, Evapotranspiration (ET), Hydrological Balance.*

Article Type: Research Article

Acknowledgments

The authors would like to thank all those who contributed to the development of this study.

Conflicts of Interest

The authors of this article declare that they have no conflict of interest regarding the writing and publication of the content and findings of this research.

Data Availability Statement

The data and findings of this research will be available upon request through correspondence with the corresponding author

Authors' Contributions

Rahman Sharifi: Field research, data analysis.

Fatemeh Barzegari: Manuscript writing, literature review, revision, and analysis.

Ghobad Rostamizad: Software, data analysis.

Citation: Sharifi R, Barzegari Banadkooki F, Rostamizad G. 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* 2025; 19 (68): 64-77

Iran-Watershed Management Science & Engineering, Year 2025, Vol 19, No 68, PP 64-77

Publisher: Watershed Management Society of Iran

© Author(s)



ارزیابی مدل SEBS در تخمین تبخیر و تعرق واقعی با تأکید بر مدیریت پایدار منابع آب دشت چنداب تهران

رحمان شریفی^۱، فاطمه برزگری بنادکوکي^۲، قباد رستمی زاد^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۹، تاریخ داوری: ۱۴۰۴/۰۱/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۷، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۱۹

<https://doi.org/10.22034/19.68.5>

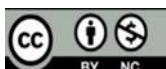
چکیده

مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک همواره به دلیل بارندگی محدود و افزایش تقاضا برای آب با چالش‌های اساسی مواجه بوده است. در این مناطق، برآورد دقیق تبخیر و تعرق واقعی (ETA) نقش حیاتی در برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه منابع آب، تخصیص آب در بخش‌های مختلف و مقابله با خشکسالی ایفا می‌کند. هدف اصلی این پژوهش، کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل SEBS برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی در دشت چنداب تهران و بررسی تأثیر پخش سیلاب بر توزیع مکانی تبخیر و تعرق است. مدل SEBS که بر اساس توازن انرژی سطح عمل می‌کند، از داده‌های ماهواره‌ای و هواشناسی برای محاسبه شار گرمای محسوس، گرمای نهان، شار گرمای خاک و تابش خالص بهره می‌برد. در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 و داده‌های هواشناسی مانند دما، رطوبت، سرعت باد و تابش خورشیدی، به همراه داده‌های رطوبت خاک از ایستگاه‌های زمینی استفاده شده است. برای کالیبراسیون مدل، از الگوریتم ژنتیک بهره گرفته شد تا تطابق بین خروجی مدل و داده‌های زمینی به حداکثر برسد. نتایج نشان داد که مدل SEBS پس از کالیبراسیون دقیق، توانایی بالایی در برآورد تبخیر و تعرق واقعی دارد. همچنین مقایسه بین نواحی تحت تأثیر پخش سیلاب و نواحی شاهد نشان داد که پخش سیلاب به‌طور میانگین باعث کاهش ۱۵ درصدی تبخیر و تعرق واقعی می‌شود. این کاهش به دلیل افزایش رطوبت خاک، بهبود وضعیت فیزیولوژیکی گیاهان و کاهش تنش آبی حاصل شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که پخش سیلاب می‌تواند راهکاری مؤثر برای افزایش ذخایر آب زیرزمینی، حفظ رطوبت خاک و ارتقای پایداری زیست‌محیطی در مناطق خشک و نیمه‌خشک باشد.

کلیدواژه‌ها: مدیریت منابع آب، سنجش از دور، تبخیر و تعرق، بیلان آبی.

نوع مقاله: پژوهشی

استناد: شریفی رحمان، برزگری بنادکوکي فاطمه، رستمی زاد قباد. ارزیابی مدل SEBS در تخمین تبخیر و تعرق واقعی با تأکید بر مدیریت پایدار منابع آب دشت چنداب تهران. علوم و مهندسی آبخیزداری ایران ۱۴۰۴؛ ۱۹(۶۸): ۶۴-۷۷
علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال ۱۴۰۴، دوره ۱۹، شماره ۶۸، صفحه ۶۴-۷۷



© نویسندگان

ناشر: انجمن آبخیزداری ایران

۱- استادیار مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان تهران، سازمان تحقیقات و آموزش و ترویج کشاورزی (تات)، ورامین، ایران.

۲- دانشیار دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. نویسنده مسئول: Email: Barzegari@pnu.ac.ir

۳- استادیار مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، سازمان تحقیقات و آموزش و ترویج کشاورزی (تات)، زنجان، ایران.

در مناطق خشک و نیمه خشک، مدیریت منابع آب چالشی جدی است. تبخیر و تعرق نیز به عنوان یکی از مهم ترین ملاک های مدیریت منابع آبی و اقلیمی از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. این فرآیند به عنوان رکن اساسی در گردش آب در اقلیم های مختلف و موازنه آب خاک و نیز به منظور افزایش بازده منابع آبی و کشاورزی مطرح می شود [۱]. شرایط اقلیمی کم باران و از طرفی بارش های ناگهانی و سیل آسا منجر به راهبردهای مدیریتی متفاوتی در مناطق خشک و نیمه خشک شده است. پخش سیلاب به عنوان یکی از این راه کارها با هدف افزایش تغذیه سفره های زیرزمینی در دشت های خشک و نیمه خشک اجرا می شود. با این حال، پرسش های مهمی درباره سهم برداشت آب توسط انواع کاربری ها و میزان تبخیر-تعرق وجود دارد که پاسخ به آن ها می تواند راهگشای مدیریت بهینه منابع آبی باشد. دشت چنداب تهران، یکی از مناطق بحرانی از نظر کاهش سطح آب های زیرزمینی، تحت تأثیر پخش سیلاب قرار دارد. در چنین مناطقی، تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) یکی از مهم ترین پارامترهای چرخه هیدرولوژی است. سهم بالای تبخیر-تعرق از کل بیلان آبی منطقه، نیاز به برآورد دقیق این پارامتر را به ویژه در شرایط کمبود منابع آبی آشکار می کند [۲]. استفاده از روش های مرسوم مانند لایسیمتر برای اندازه گیری تبخیر-تعرق در مقیاس های مکانی بزرگ به دلیل محدودیت های زمانی و اقتصادی عملی نیست [۴]. در نتیجه، نیاز به ابزارهایی برای تخمین دقیق تر تبخیر و تعرق واقعی افزایش یافته است. مطالعاتی نیز در این زمینه انجام شده که بیانگر لزوم استفاده از روش های نوین و ترکیبی در برآورد تبخیر و تعرق است. به عنوان مثال کاظمی و جعفرپور در سال ۱۴۰۳ با بهره گیری از مدل های مبتنی بر داده های ماهواره ای و تحلیل مکانی-زمانی نشان دادند که ترکیب اطلاعات سنجش از دور با داده های هواشناسی و الگوریتم های مدل سازی می تواند بر دقت نتایج بیافزاید [۱۹]. مدل $SEBS^2$ (سطح انرژی بر مبنای سنجش از دور) از جمله مدل های پیشرفته برای برآورد تبخیر و تعرق است. این مدل بر اساس توزیع انرژی در سطح زمین و با استفاده از داده های ماهواره ای توسعه یافته و در سال های اخیر به طور گسترده ای استفاده شده است [۵]. تحقیقات نشان داده اند که مدل های بیلان انرژی مانند $SEBS$ در ارائه نقشه های مکانی و زمانی دقیق از توزیع تبخیر-تعرق موفق عمل می کنند و اطلاعات ارزشمندی را برای تصمیم گیری در مورد مدیریت آب ارائه می دهند [۲]. تحقیقات مختلفی در سطح جهان به بررسی کارایی مدل $SEBS$ پرداخته اند. در مطالعه ای در حوضه رودخانه داون، مدل $SEBS$ با استفاده از داده های لندست ۸ و داده های هواشناسی برای تخمین تغییرات مکانی و زمانی تبخیر و تعرق به کار گرفته شد و دقت بالایی نشان داد [۶]. اخیراً محققین دیگری از این مدل برای تخمین تبخیر و تعرق در مقیاس های بزرگ

استفاده نمودند و تطابق نتایج مدل $SEBS$ با داده های واقعی را تأیید نمودند [۲، ۷-۱۰]. در ایران نیز کاربرد این مدل برای مناطق مختلف از جمله دشت گربایگان، نیشابور، زنجان و حوضه آبریز ارومیه بررسی شده است. در این مطالعات، اگرچه تطابق نتایج $SEBS$ با داده های واقعی تأیید شده، اما واسنجی دقیق مدل برای شرایط هر منطقه نیز توصیه شده است [۱۱-۱۳]. نتایج پژوهش های موجود تأیید می کند که مدل $SEBS$ ابزار مناسبی برای برآورد تبخیر و تعرق در مناطق مختلف است، به ویژه در مناطقی که دسترسی به داده های زمینی محدود است. با این حال، به کارگیری این مدل نیازمند دقت در تنظیم پارامترها و تحلیل داده ها است. به عنوان مثال، دقت ورودی های ماهواره ای مانند دمای سطح زمین، شاخص های پوشش گیاهی و داده های جوی بر خروجی های مدل تأثیر قابل توجهی دارد [۱۴]. به عنوان نمونه، در مناطق با تغییرات شدید زمانی یا مکانی در پارامترهای اقلیمی، مدل $SEBS$ نیازمند اصلاحات و تنظیمات بیشتری است تا بتواند دقت نتایج را تضمین کند. در همین راستا، مطالعه ای در سال ۲۰۱۹ توسط ادیب و همکاران نشان داد که تخمین تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از مدل $SEBS$ به ورودی هایی مانند دمای سطح زمین (LST^3)، شار تابشی کوتاه موج ورودی به سطح ($DSSF^4$)، پارامترهای آئرو دینامیکی، شاخص سطح برگ (LAI^5) و کسر پوشش گیاهی (FVC^6) حساس است. این مطالعه تأکید می کند که در مناطقی با تغییرات شدید در این پارامترها، تنظیمات دقیق تری برای مدل $SEBS$ مورد نیاز است تا دقت نتایج بهبود یابد [۱۵]. همچنین، پژوهشگران توصیه می کنند که برای افزایش دقت مدل، از داده های محلی تکمیلی استفاده شود و صحت سنجی نتایج مدل با داده های مشاهده ای زمینی انجام گیرد. در نهایت، مدل $SEBS$ به عنوان یک ابزار قوی در مطالعات تبخیر و تعرق پیشنهاد می شود، به شرط آنکه محدودیت ها و نیازمندی های آن مورد توجه قرار گیرد و از داده های ورودی دقیق و فرآیندهای صحت سنجی مناسب استفاده شود.

مطالعه حاضر، برای اولین بار مدل $SEBS$ را در دشت چنداب تهران واسنجی و صحت سنجی می کند و با ارائه نقشه های دقیق مکانی و زمانی، تأثیر پخش سیلاب بر توزیع تبخیر-تعرق را بررسی می کند. در همین راستا، واسنجی مدل $SEBS$ برای برآورد دقیق تبخیر-تعرق واقعی در دشت چنداب تهران، تحلیل اثرات پخش سیلاب بر تبخیر-تعرق در این منطقه و ارائه نقشه های مکانی برای مدیریت بهتر منابع آب و ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی تبخیر-تعرق هدف های مورد مطالعه بوده است.

با وجود اینکه ساختار مدل $SEBS$ در مطالعات متعددی در ایران و خارج از کشور مورد استفاده قرار گرفته، تحقیق حاضر از دو دیدگاه دارای وجه تمایز و نوآوری است. اول این که مطالعه حاضر،

3. Land Surface Temperature

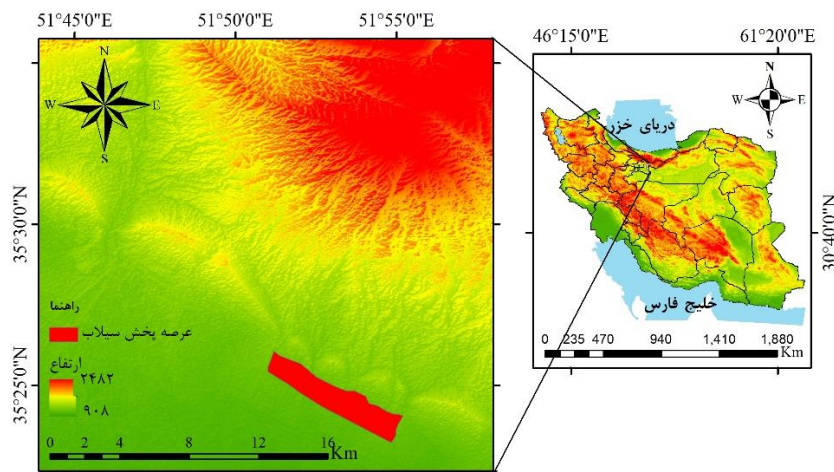
4. Downward Shortwave Surface Flux

5. Leaf Area Index

6. Fractional Vegetation Cover

1. Actual Evapotranspiration

2. Surface Energy Balance System



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در کشور و استان تهران

Fig 1. The location of the study area within the country and Tehran Province

و برخی اطلاعات مورد نیاز دیگر از ایستگاه سینوپتیک تهران که در ۷۳ کیلومتری آن قرار دارد اخذ شده است [۲۳].
مراحل انجام این پژوهش مطابق فرایند ارائه شده در شکل ۲ است.

داده‌های مورد نیاز پژوهش

داده‌های استفاده شده در این پژوهش شامل موارد زیر هستند.

تصاویر ماهواره‌ای

تصاویر لندست ۸ برای استخراج شاخص‌های گیاهی (NDVI^۱)، دمای سطح زمین (LST^۲) و آلبیدوی سطحی استفاده شدند. ماهواره لندست ۸ با داشتن دو حسگر OLF^۳ برای ثبت تصاویر در طیف مرئی و مادون قرمز نزدیک و حسگر TIRS^۴ برای ثبت تصاویر حرارتی، امکان محاسبه پارامترهای مورد نیاز برای مدل‌سازی تبخیر و تعرق را فراهم می‌سازد [۱۶]. به منظور پوشش کامل دوره ریشی کشت‌زارها و کاهش اثرات ناشی از ابر و شرایط نامساعد جوی، تعداد ۷۰ تصویر از این ماهواره با حداکثر پوشش ابر ۱۰ درصد از طریق وب‌سایت USGS انتخاب و دانلود شد. در تصاویر انتخابی، آخرین تصویر مربوط به زمان اکتبر مطابق با مهر ۱۴۰۰ بوده است. تصاویر براساس سال آبی در بازه زمانی مهر ۹۷ تا آخر شهریور ۹۸ (۲۰۱۸/۰۹/۰۱ تا ۲۰۱۹/۰۸/۳۱)، مهر ۹۸ تا آخر شهریور ۹۹ (۲۰۱۹/۰۹/۰۱ تا ۲۰۲۰/۰۸/۳۱)، مهر ۹۹ تا آخر شهریور ۱۴۰۰ (۲۰۲۰/۰۹/۰۱ تا ۲۰۲۱/۰۸/۳۱) انتخاب و بررسی تصاویر مربوطه انجام شد.

داده‌های هواشناسی

به منظور تکمیل داده‌های سنجش از دور و تأمین پارامترهای مورد نیاز مدل SEBS، از داده‌های هواشناسی ساعتی ایستگاه هواشناسی

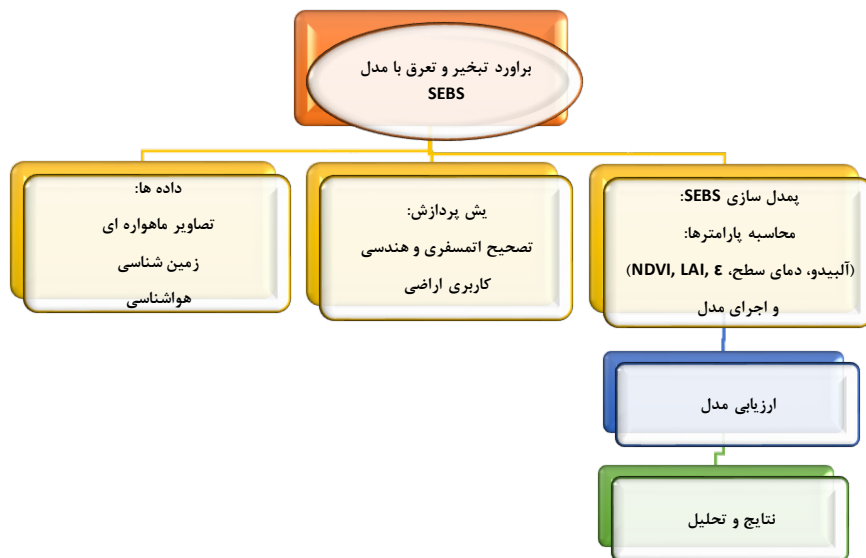
موردی خاص و کمتر بررسی شده است. منطقه دشت چنداناب در استان تهران با ویژگی‌های خاص اقلیمی، توپوگرافی و مدیریت منابع آب، تاکنون در زمینه برآورد تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از مدل SEBS به صورت هدفمند مورد بررسی قرار نگرفته است. انتخاب این منطقه به عنوان نمونه‌ای از مناطق نیمه‌خشک با منابع آبی محدود، به روشن شدن عملکرد مدل در شرایط خاص هیدرولوژیکی کمک می‌کند. نوآوری دوم مربوط به کاربرد مدل در بستر مدیریت سیلاب و بهره‌برداری از آن در تحلیل کارایی پخش سیلاب است. برخلاف برخی مطالعات که صرفاً بر ارزیابی دقت مدل SEBS تمرکز دارند، در این پژوهش تأثیر پخش سیلاب بر کاهش تبخیر-تعرق نیز تحلیل شده که به سیاست‌گذاری منابع آب کمک می‌کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه

ایستگاه پخش سیلاب چنداناب با موقعیت جغرافیایی ۲۵' و ۵۱" تا ۴۷' و ۵۲" طول شرقی و ۲۲' و ۳۵" تا ۲۹' و ۳۵" عرض شمالی، در شرق شهرستان پاکدشت قرار گرفته است (شکل ۱). این آبخوان در مساحتی حدود ۲۰۰۰ هکتار بر روی مخروط افکنه‌ای با رسوبات درشت دانه باقیمانده از جریانات رودخانه‌ای دوران چهارم تشکیل شده است. حداکثر ارتفاع حوزه آبخیز ۲۶۲۰ متر و حداقل ارتفاع در محل خروجی ۸۸۰ متر از سطح دریا است. ارتفاع متوسط حوزه ۱۴۸۸ متر است. بارش متوسط سالانه ۱۸۷ میلی‌متر و متوسط تبخیر ۲۵۰۰ میلی‌متر است. حداقل متوسط دما ۲- و حداکثر ۲۶/۱ درجه سانتی‌گراد و متوسط شیب منطقه ۵ درصد است. حوزه آبخیز چنداناب از شمال به حوضه ایوانکی و از غرب به حوضه امامک محدود شده است. در حالت وسیع‌تر، منطقه از لحاظ توپوگرافی در عرصه دشتی وسیع که متصل به کویر مرکزی است واقع شده و به همین لحاظ می‌توان آن را به عنوان دروازه ورود به کویر محسوب نمود. ایستگاه هواشناسی تبخیرسنجی در داخل محدوده پخش سیلاب قرار دارد

1. Normalized Difference Vegetation Index
2. Land Surface Temperature
3. Operational Land Imager
4. Thermal Infrared Sensor



شکل ۲- فرایند انجام تحقیق
Fig 2. Research flowchart

ب) تهیه نقشه کاربری اراضی: به منظور شناسایی و تفکیک کاربری‌های مختلف اراضی منطقه مورد مطالعه، از الگوریتم طبقه‌بندی نظارت‌شده آدر نرم‌افزار ENVI 5.3 استفاده شد. در این روش، با استفاده از نمونه‌های آموزشی جمع‌آوری شده از طریق بازدید میدانی و تصاویر با تفکیک مکانی بالا مانند تصاویر گوگل ارث، الگوهای طیفی مربوط به هر کاربری اراضی (مانند گندم، جو، اراضی بایر و ...) تعیین شدند. سپس، با استفاده از الگوریتم (MLC^4)، هر پیکسل تصویر بر اساس شباهت طیفی آن به نمونه‌های آموزشی، به یکی از کاربری‌های اراضی نسبت داده شد. دقت نقشه کاربری اراضی با استفاده از ماتریس خطا و شاخص کاپا^۵ ارزیابی شد [۲۰، ۱۸].

مدل‌سازی تبخیر و تعرق با استفاده مدل SEBS

در این پژوهش، از مدل SEBS برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی استفاده شد. این مدل با استفاده از داده‌های سنجش از دور و هواشناسی، تراز انرژی سطحی را محاسبه کرده و شار حرارتی نهان (LE^6) را به عنوان باقیمانده تراز انرژی تخمین می‌زند [۳]. مراحل کار با مدل مذکور به شرح ادامه است.

الف) محاسبه پارامترهای ورودی مدل

پارامترهای ورودی مدل SEBS شامل آلبدو (α)، دمای سطح (LST)، شاخص پوشش گیاهی ($NDVI$)، شاخص سطح برگ (LAI) و میزان گسیل‌مندی سطح (ε) با استفاده از تصاویر لندست ۸ تصحیح‌شده و با بهره‌گیری از توابع و الگوریتم‌های موجود در نرم‌افزار ENVI 5.3 محاسبه شدند. آلبدو (α): آلبدو یا بازتابندگی سطح، نسبت انرژی بازتابیده

ورامین استفاده شد. این ایستگاه به عنوان نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به منطقه مورد مطالعه انتخاب شد و داده‌های مربوط به دما (حداکثر، حداقل و میانگین)، رطوبت نسبی (حداکثر، حداقل و میانگین)، سرعت باد و تابش خورشیدی در طول دوره زمانی مورد مطالعه (۱۳۹۷ تا ۱۴۰۰) از این ایستگاه جمع‌آوری شدند.

داده‌های زمینی

ابتدا نمونه‌برداری از خاک برای تعیین بافت، رطوبت و هدایت هیدرولیکی انجام شد و سپس داده‌های حاصل از پروفیل‌های خاک در عمق‌های مختلف، برای صحت‌سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفتند.

پیش پردازش داده‌ها

به منظور افزایش دقت و قابلیت اطمینان نتایج، ابتدا داده‌های سنجش از دور و هواشناسی مورد پیش‌پردازش قرار گرفتند. این پیش‌پردازش‌ها شامل دو مرحله بودند:

الف) تصحیحات اتمسفری و هندسی: تصاویر لندست ۸ پس از دریافت و به‌منظور انطباق دقیق با سیستم تصویر و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، ابتدا تحت تصحیحات هندسی قرار گرفتند. سپس، تصحیحات اتمسفری با استفاده از الگوریتم DOS^1 و پلاگین $QUAC^2$ [۲۵، ۱۷] در نرم‌افزار ENVI 5.3 اعمال شد. الگوریتم DOS یک روش ساده و پرکاربرد برای حذف اثرات پراکنش اتمسفری است، در حالی که پلاگین $QUAC$ یک روش پیشرفته‌تر است که با استفاده از اطلاعات طیفی تصاویر، اثرات جذب و پراکنش توسط گازها و ذرات معلق در اتمسفر را تصحیح می‌کند. این تصحیحات به منظور بازیابی بازتابندگی واقعی سطح زمین و کاهش خطا در محاسبات بعدی ضروری است.

3. Supervised Classification
4. Maximum Likelihood Classifier
5. Kappa
6. Latent Heat Flux

1. Dark Object Subtraction
2. Quick Atmospheric Correction

شده از سطح به انرژی تابیده شده به سطح است و نقش مهمی در تعیین تراز انرژی سطحی ایفا می‌کند [۲۱]. در این پژوهش، آلبیدوی باند پهن با استفاده از روابط تجربی ارائه شده توسط Liang در سال ۲۰۰۱ (رابطه ۱) و با استفاده از بازتابندگی در باندهای مختلف لندست ۸ محاسبه شد [۲۲].

$$\alpha = b_2 * 0.3 + b_3 * 0.277 + b_4 * 0.233 + b_5 * 0.143 + b_6 * 0.36 + b_7 * 0.012 \quad (1)$$

که در آن α همان آلبیدو و b باندهای سنجد لندست است. دمای سطح (LST): دمای سطح زمین یکی از پارامترهای کلیدی در برآورد شار حرارتی محسوس و نهان است [۲۲، ۱۸]. دمای سطح با استفاده از باند حرارتی ۱۰ لندست ۸ و با اعمال تصحیحات مربوط به گسیل‌مندی سطح، طبق رابطه (۲) ارائه شده توسط [۲۶، ۲۰، ۱۸] محاسبه شد.

$$LST = (b_1) + \left(b_2 * \left(\frac{b_1}{14380} \right) * (a \log(b_3)) \right) \quad (2)$$

LST دمای سطح زمین، b_1 دمای درخشندگی باند حرارتی، b_2 رادیانس باند حرارتی و b_3 گسیل‌مندی است. شاخص پوشش گیاهی (NDVI): شاخص NDVI یک شاخص طیفی است که به منظور ارزیابی میزان سبزیگی و تراکم پوشش گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۶]. این شاخص با استفاده از بازتابندگی در باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک لندست ۸ محاسبه شد.

$$NDVI = \frac{(b_{NIR} - b_R)^2}{(b_{NIR} + b_R)^2} \quad (3)$$

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

شاخص سطح برگ (LAI): شاخص LAI سطح کل برگ‌های گیاهان در واحد سطح زمین را نشان می‌دهد و با فرایندهای فتوسنتز و تعرق گیاهان مرتبط است [۲۷]. LAI با استفاده از رابطه تجربی ارائه شده توسط [۲۸] و بر اساس شاخص NDVI محاسبه شد.

$$LAI = EXP((NDVI + 0.1912)/0.78) \quad (4)$$

در رابطه (۴) LAI شاخص سطح برگ و NDVI شاخص گیاهی تفاضل بهنجار است.

درصد پوشش (FC): اندازه پوشش سطح خاک است که به وسیله گیاه پوشیده شده است. به عبارتی باید تعیین شود چه درصدی از هر پیکسل به وسیله پوشش گیاهی پوشیده شده است. این پارامتر با استفاده از رابطه (۵) برآورد شد [۲۶].

$$FC = IFF(NDVI < 0.1, 0.05, 1.06 * NDVI - 0.006) \quad (5)$$

در رابطه (۵)، FC درصد پوشش گیاهی و NDVI شاخص گیاهی تفاضلی بهنجار است.

گسیل‌مندی سطح (ε): گسیل‌مندی سطح، توانایی سطح در تابش

انرژی حرارتی را نشان می‌دهد و به نوع سطح و رطوبت آن بستگی دارد [۲۹]. در این پژوهش، گسیل‌مندی سطح با استفاده از نقشه کاربری اراضی و با استفاده از مقادیر گسیل‌مندی مربوط به هر کاربری اراضی تعیین شد؛ که در رابطه (۶) ارائه شده است.

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

که LSE گسیل‌مندی و FC درصد پوشش گیاهی می‌باشد.

ب) اجرای مدل SEBS

مدل SEBS با استفاده از زبان اسکریپت‌نویسی در برنامه ILWIS و با استفاده از پارامترهای ورودی حاصل از داده‌های ماهواره‌ای و هواشناسی اجرا شد. این مدل، شار حرارتی نهان (LE) را به عنوان باقیمانده تراز انرژی سطحی با استفاده از روابط تراز انرژی محاسبه می‌کند [۲]. تراز انرژی سطحی به صورت رابطه (۷) بیان می‌شود.

$$Rn = G + H + LE \quad (7)$$

که در آن Rn (تابش خالص) یا تفاوت بین تابش ورودی و خروجی در سطح زمین (G ، (W/m^2) (شار حرارتی خاک) یا انرژی منتقل شده به خاک از طریق هدایت حرارتی (H ، (W/m^2) (شار حرارتی محسوس) یا انرژی منتقل شده به اتمسفر از طریق همرفت (LE ، (W/m^2) (شار حرارتی نهان) معادل انرژی مصرف شده در تبخیر آب از سطح زمین (W/m^2) است.

مدل SEBS با استفاده از الگوریتم‌های مختلف، هر یک از این اجزا را محاسبه کرده و در نهایت شار حرارتی نهان را به دست می‌آورد.

محاسبه اجزای تعادل انرژی در مدل SEBS

تابش خالص (Rn)

تابش خالص از تفریق تابش موج کوتاه خروجی ($\alpha RS\downarrow$) و تابش موج بلند خروجی ($\epsilon \sigma Ts^4$) از تابش موج کوتاه ورودی ($RS\downarrow$) و تابش موج بلند ورودی ($RL\downarrow$) بر اساس رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$Rn = (1 - \alpha) RS\downarrow + RL\downarrow - \epsilon \sigma Ts^4 \quad (8)$$

که در آن، $RS\downarrow$ (تابش موج کوتاه ورودی) یا تابش خورشیدی وارد شده به سطح زمین (W/m^2)، α (بازتاب سطحی) یا نسبت تابش موج کوتاه بازتاب شده به تابش موج کوتاه ورودی (بی‌بعد)، $RL\downarrow$ (تابش موج بلند ورودی از اتمسفر به سطح زمین W/m^2)، ϵ (ضریب تشعشع) یا توانایی سطح در انتشار تابش حرارتی (بی‌بعد)، σ (ثابت استفان-بولتزمن) معادل $5.67 \times 10^{-8} W/m^2/K^4$ ، Ts دمای رادیومتری سطح زمین (K) است.

شار حرارتی خاک (G)

شار حرارتی خاک به عنوان کسری از تابش خالص تخمین زده می‌شود که در رابطه (۹) بیان شده است.

$$G = C * Rn \quad (9)$$

که در آن C (ضریب شار حرارتی خاک)، ضریبی که به نوع پوشش گیاهی و رطوبت خاک بستگی دارد (بی‌بعد). مقادیر معمول برای C در محدوده ۰/۰۵ تا ۰/۴۵ قرار دارد [۳۱].

شار حرارتی محسوس (H)

مدل SEBS از رویکرد شباهت آیرودینامیکی برای محاسبه شار حرارتی محسوس استفاده می‌کند [۳۲]:

$$H = \rho * c_p (T_s - T_a) / r_{ah} \quad (10)$$

که در آن ρ چگالی هوا (kg/m^3)، c_p ظرفیت حرارتی ویژه هوا در فشار ثابت (J/kg/K)، T_a دمای هوا در ارتفاع مشخص (K)، r_{ah} مقاومت آیرودینامیکی (مقاومتی که هوا در برابر انتقال حرارت از سطح زمین به اتمسفر دارد) (s/m) است. شار حرارتی نهان (LE)

پس از محاسبه تابش خالص، شار حرارتی خاک و شار حرارتی محسوس، شار حرارتی نهان با استفاده از معادله تعادل انرژی محاسبه می‌شود (رابطه ۱۱).

$$LE = R_n - G - H \quad (11)$$

محاسبه مقاومت آیرودینامیکی (r_{ah})
مقاومت آیرودینامیکی به پایداری جوی و زبری سطح بستگی دارد و معمولاً با استفاده از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود [۳۳].

$$R_{ah} = (\ln((z - d) / z_{0m}) - \psi_h) / (u_k) \quad (12)$$

که در آن، z (ارتفاع اندازه‌گیری) یا ارتفاع اندازه‌گیری دما و سرعت باد (m)، d جابجایی صفر (m)، z_{0m} زبری آیرودینامیکی (m)، ψ_h تابع پایداری (تابعی که اثرات پایداری جوی را در نظر می‌گیرد) (بی‌بعد)، u سرعت باد در ارتفاع z (m/s)، k (ثابت فون کارمن) معادل 0.41 است.

تعیین نقاط لنگر^۱

مدل SEBS برای تعیین شار حرارتی محسوس و نهان به دو نقطه لنگر نیاز دارد، یک نقطه "گرم" (خشک) و یک نقطه "سرد" (مرطوب) در نقطه گرم فرض می‌شود که $LE = 0$ و $H = R_n - G$ و در نقطه سرد فرض می‌شود که $LE = R_n - G$ و $H = 0$

انتخاب این نقاط لنگر بر دقت نتایج مدل SEBS تأثیر به‌سزایی دارد. روش‌های مختلفی برای انتخاب این نقاط وجود دارد، از جمله استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا، داده‌های میدانی و دانش تخصصی منطقه [۳۴].

ارزیابی مدل

به منظور ارزیابی عملکرد مدل SEBS در تخمین تبخیر و تعرق واقعی، نتایج حاصل از آن با برآوردهای تبخیر و تعرق واقعی حاصل از روش بیلان آبی خاک مقایسه شد.

الف) روش بیلان آبی خاک: در این روش، تبخیر و تعرق واقعی به‌عنوان باقی‌مانده معادله بیلان آبی خاک محاسبه می‌شود (رابطه ۱۳) [۲۴، ۳۵].

$$ET_a = P + I - R - \Delta S \quad (13)$$

1. Anchor Points

که در آن P میزان بارش، I میزان آبیاری، R رواناب سطحی و ΔS تغییرات ذخیره رطوبتی خاک است. در این پژوهش، به دلیل عدم وجود رواناب سطحی قابل توجه، از این عامل صرف‌نظر شد و تغییرات ذخیره رطوبتی خاک با استفاده از نمونه‌برداری از خاک در طول دوره رویشی تعیین شد.

ب) شاخص‌های ارزیابی: برای کمی‌سازی میزان تطابق بین نتایج حاصل از مدل SEBS و روش بیلان آبی خاک، از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE^2) استفاده شد [۳۶]. این شاخص‌ها به صورت روابط ۱۴ و ۱۵ تعریف می‌شوند.

$$R^2 = \left[\frac{\sum (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum (O_i - \bar{O})^2 \sum (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad (14)$$

$$MAE = \frac{|P_i - O_i|}{n} \quad (15)$$

که در آن O_i مقادیر مشاهده شده (حاصل از روش بیلان آبی خاک)، P_i (مقادیر پیش‌بینی شده) حاصل از مدل SEBS، $\bar{O}$ میانگین مقادیر مشاهده شده، P میانگین مقادیر پیش‌بینی شده و n تعداد داده‌هاست.

نتایج

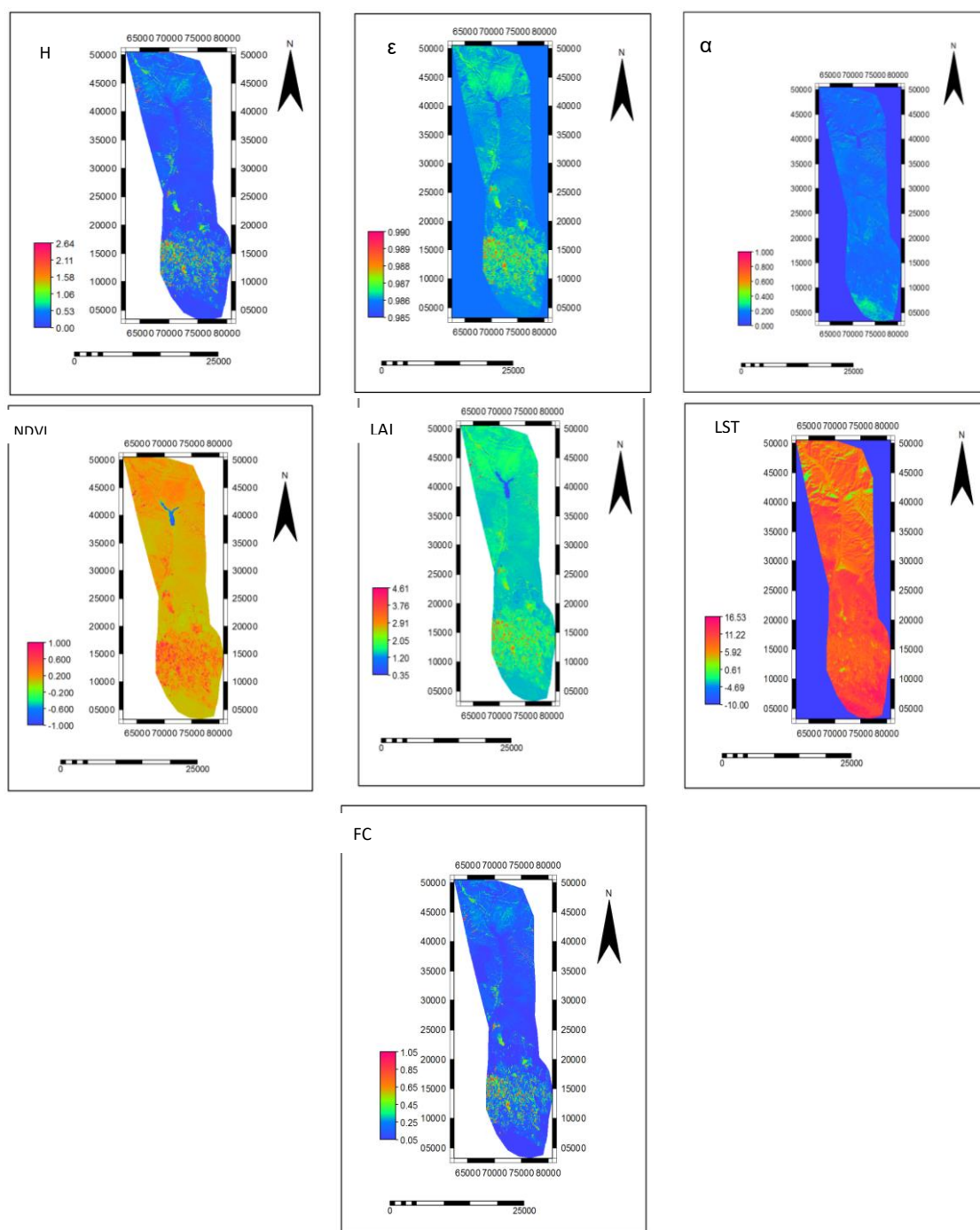
ورودی‌های لازم مدل شامل آلبیدو، دمای سطح زمین، گسیل‌مندی، شار حرارتی، شاخص سطح برگ و تاج پوشش گیاهی در محیط نرم افزار ILWIS تهیه شدند (شکل ۳).

تهیه نقشه تبخیر و تعرق روزانه با استفاده از مدل SEBS ابتدای دوره رشد (۲۰۲۰/۱۲/۲۴)

به دلیل محدودیت داده‌های ماهواره‌ای با بازه زمانی ۱۶ روزه و فقدان تصاویر مناسب در برخی از دوره‌ها به علت شرایط جوی نامساعد و ابرناکی، یک بازه زمانی دو برابر (۳۲ روزه) برای تحلیل تبخیر-تعرق در نظر گرفته شد. از آنجایی که هدف، برآورد تبخیر-تعرق واقعی در مقیاس روزانه بود، از روش تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_o) استفاده شد. به این ترتیب که ابتدا تبخیر و تعرق مرجع برای کل دوره سال آبی محاسبه شد. سپس نسبت ET_a/ET_o در دوره‌هایی که تصاویر ماهواره‌ای در دسترس بودند، تعیین و به عنوان یک عامل مقیاس‌بندی برای برآورد تبخیر و تعرق در دوره‌های فاقد تصویر مورد استفاده قرار گرفت. با تجمع مقادیر تبخیر و تعرق روزانه، میزان تبخیر-تعرق کل سال آبی برآورد شد (شکل ۴)

2. Mean Absolute Error

3. Reference Evapotranspiration Method



شکل ۳- تهیه لایه‌های ورودی مدل SEBS در ابتدای دوره رشد (۲۰۲۰/۱۲/۲۴) شامل (شار حرارتی محسوس H ، گسیبندی ϵ ، آلبیدو α ، شاخص پوشش گیاهی $NDVI$ ، شاخص سطح برگ LAI ، دمای سطح LST ، درصد پوشش گیاهی FC)

Fig 3. Preparation of input layers for the SEBS model at the beginning of the growth period (12/24/2020) including (sensible heat flux (H), emissivity (ϵ), albedo (α), Normalized Difference Vegetation Index ($NDVI$), Leaf Area Index (LAI), Land Surface Temperature (LST), and Fractional Vegetation Cover (FC))

بررسی نقشه‌ها نشان داد که توزیع تبخیر-تعرق تابعی از پوشش گیاهی، نوع خاک و شرایط توپوگرافی منطقه است. مناطقی با پوشش گیاهی متراکم‌تر دارای مقادیر بالاتری از تبخیر-تعرق بودند [۳۷، ۳۸].

اثرات پخش سیلاب

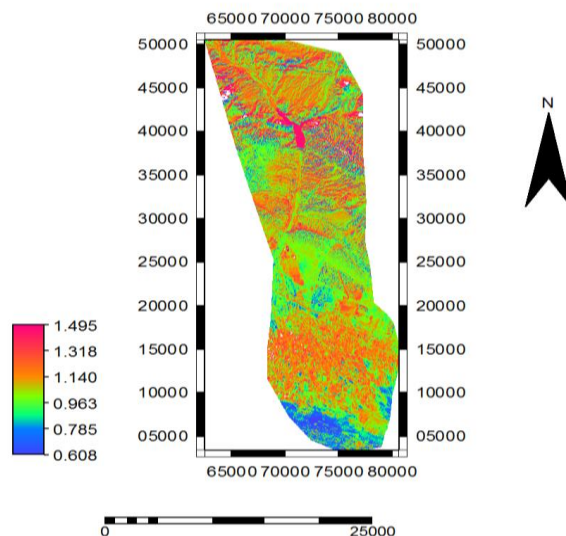
مقایسه مناطق تحت تأثیر پخش سیلاب و مناطق غیرتأثیرپذیر نشان داد که پخش سیلاب باعث کاهش میانگین تبخیر-تعرق به میزان ۱۵ درصد می‌شود. این کاهش به دلیل حفظ رطوبت خاک و افزایش تغذیه آب زیرزمینی در مناطق سیلابی بوده است. این نتایج اهمیت پخش سیلاب را به عنوان یک روش مدیریت منابع آبی برای کاهش مصرف آب در مناطق خشک تأیید می‌کند [۱۲، ۱۱].

تحلیل شاخص‌های مدل

شاخص‌های آلودگی سطحی، دمای سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) از عوامل کلیدی در عملکرد مدل SEBS بودند. به‌ویژه، افزایش NDVI منجر به افزایش تبخیر-تعرق در مناطق با پوشش گیاهی متراکم شد. [۳۹، ۲].

واسنجی مدل SEBS

به منظور ارزیابی دقت نتایج مدل، داده‌های حاصل از مدل با اندازه‌گیری‌های میدانی مقایسه شدند. در این پژوهش، تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از معادله بیلان آبی خاک (رابطه ۱۳) برآورد شد. سپس، مقدار تبخیر و تعرق حاصل از مدل SEBS با مقادیر برآورد شده از طریق معادله بیلان آبی خاک مقایسه شد. نتایج واسنجی مدل SEBS نشان داد که تطابق مناسبی بین تبخیر-تعرق برآورد شده توسط مدل و داده‌های واقعی وجود دارد (شکل ۵). میانگین خطای مطلق (MAE) برای کل منطقه 0.48 میلی‌متر در روز است که نشان‌دهنده دقت مناسب مدل در برآورد تبخیر-تعرق است. ضریب تعیین (R^2) بین داده‌های مدل و اندازه‌گیری‌های زمینی برابر با 0.78 محاسبه شد، که حاکی از ارتباط قوی میان این دو دسته داده است [۷، ۱۲].



شکل ۴- نقشه تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده با استفاده از مدل

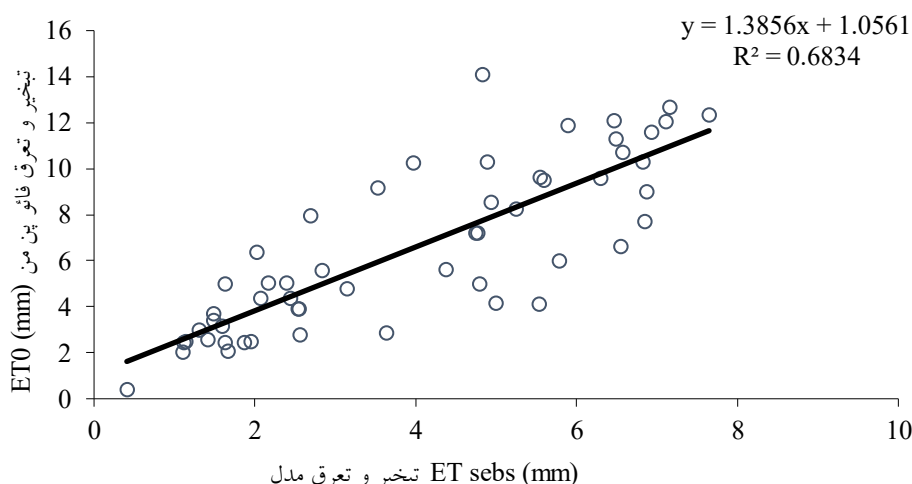
SEBS در منطقه مطالعاتی مربوط به تاریخ ۲۰۲۰/۱۲/۲۴

Fig4 . Map of actual evapotranspiration estimated using the SEBS model in the study area on 12/24/2020

همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، دامنه تغییرات تبخیر و تعرق در منطقه مورد مطالعه، به طور مستقیم با درصد پوشش گیاهی مرتبط است. به این معنا که با افزایش درصد پوشش گیاهی، میزان تبخیر-تعرق نیز افزایش می‌یابد.

تحلیل مکانی و زمانی تبخیر-تعرق

نقشه‌های مکانی تبخیر-تعرق نشان دادند که در ابتدای دوره رشد (اسفند) مقادیر تبخیر-تعرق روزانه به‌طور متوسط $1/1$ میلی‌متر است، در حالی که در اوج فصل رشد (تیرماه) این مقدار به $6/8$ میلی‌متر در روز افزایش می‌یابد.



شکل ۵- ارتباط ETo فائو پنمن-مانتیس با تبخیر و تعرق حاصل از مدل SEBS در حالت اجرای معمولی

Fig 5. Relationship between FAO Penman-Monteith ETo and SEBS model-derived ETa under standard execution

نتایج این تحقیق با یافته‌های مطالعات مشابه در ایران و سایر نقاط جهان مطابقت دارد. در مطالعه Jia و همکاران [۱۷] مدل SEBS برای تخمین تبخیر-تعرق در مناطق ناهمگن با موفقیت اجرا شد و تطابق بالایی با داده‌های زمینی نشان داد. مشابه این مطالعه، تحقیق Zhang و Huang در سال ۲۰۰۴ [۱۵] نیز نشان داد که SEBS قابلیت تفکیک مکانی و زمانی بالایی دارد.

در ایران، پژوهش امیدوار و همکاران [۲۵] در دشت‌های تحت تأثیر پخش سیلاب نیز نشان داد که مدل‌های بیلان انرژی سطحی مانند SEBS می‌توانند جایگزین روش‌های مرسوم مانند لایسینتر شوند و اطلاعات پهنه‌ای ارزشمندی ارائه دهند که در مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی منطقه‌ای کاربرد دارد.

مدل SEBS از طریق برآورد تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از روابط بیلان انرژی و استفاده از داده‌های سنجنش از دور (نظیر دمای سطح، آلودگی و پوشش گیاهی)، امکان ارائه تخمین‌هایی با دقت بالا را در شرایط متنوع اقلیمی فراهم می‌سازد [۳۰]. یکی از مزایای این مدل، اتکای آن به داده‌های رایگان ماهواره‌ای مانند MODIS و Landsat است که موجب تسهیل در مطالعات طولانی‌مدت و مقیاس‌پذیر می‌شود. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، که ویژگی‌های پوشش گیاهی و نوسانات شدید دمای از چالش‌های جدی برای برآورد ETo محسوب می‌شوند، قابلیت مدل SEBS در بازتاب دقیق تنش‌های محیطی، به‌ویژه از طریق شاخص‌هایی مانند LST و NDVI، مزیت محسوب می‌شود.

افزون بر این، در سال‌های اخیر، تلاش‌هایی برای بهبود دقت مدل SEBS از طریق تلفیق آن با داده‌های میدانی، سامانه‌های مدل‌سازی خاک-گیاه-اتمسفر و همچنین الگوریتم‌های یادگیری ماشین انجام شده است. این تلفیق‌ها به‌ویژه در شرایطی که دقت تصاویر ماهواره‌ای یا داده‌های هواشناسی پایین است، می‌تواند عدم قطعیت مدل را کاهش دهد. بنابراین، اجرای مدل SEBS در ایران با توجه به دسترسی به داده‌های بومی، تصاویر سنجنش از دور و نیز زیرساخت‌های فنی موجود، بستری مناسب برای تحقیقات پیشرفته‌تر در حوزه تبخیر-تعرق و مدیریت منابع آب فراهم می‌سازد.

البته در کنار قابلیت‌ها، این مدل دارای محدودیت‌هایی نیز هست. که کاربران مدل، قبل از اجرای آن، باید به این محدودیت‌ها آگاه باشند و در جهت کاهش تأثیرپذیری پژوهش از آن‌ها، اقدام کنند. یکی از محدودیت‌های اصلی مدل SEBS وابستگی شدید آن به دقت داده‌های ورودی، به‌ویژه تصاویر ماهواره‌ای است. این مدل برای پارامترهایی مانند دمای سطح، آلودگی و تبدلات سطحی به داده‌های بسیار دقیق نیاز دارد. در صورتی که تصاویر ماهواره‌ای با مشکلاتی مانند ابرناکی، تداخلات حرارتی یا خطاهای واسنجی همراه باشند، خروجی مدل به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. این موضوع به‌ویژه در فصول بارندگی یا در مناطقی با پوشش ابری مداوم می‌تواند چالش‌های جدی ایجاد کند.

علاوه بر این، اگرچه مدل SEBS به‌طور نظری برای کاربرد جهانی طراحی شده است، در عمل برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، نیاز به واسنجی محلی دارد. ضرایب و پارامترهای مدل باید با توجه به شرایط خاص هر منطقه، از جمله نوع خاک، پوشش گیاهی و ویژگی‌های ریزاقلیمی، تنظیم شوند. این فرآیند ممکن است نیازمند جمع‌آوری داده‌های میدانی باشد و در صورت عدم انجام آن، دقت نهایی مدل کاهش می‌یابد.

محدودیت دیگر SEBS در این است که برخی فرآیندهای هیدرولوژیکی مهم، مانند نفوذ عمقی آب به داخل خاک و جریان‌های زیرسطحی، در ساختار مدل لحاظ نشده‌اند. تمرکز اصلی مدل بر تبخیر و تعرق سطحی است و بنابراین در مناطقی با ساختار خاک پیچیده یا پوشش گیاهی متراکم، ممکن است نتایج آن دقت کافی نداشته باشد.

در نهایت، پایش پیوسته در شرایط ابری یا در مناطق کوهستانی که تغییرات توپوگرافی شدید وجود دارد، برای مدل SEBS چالش‌برانگیز است. در چنین شرایطی، امکان دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای مناسب محدود می‌شود و عملکرد مدل تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در این موارد، استفاده از روش‌های مکمل نظیر داده‌های راداری یا مدل‌های هیدرولوژیکی ترکیبی می‌تواند ضروری باشد.

در انجام این پژوهش مراحل مختلفی به شرح مواد و روش‌ها در کاهش محدودیت‌ها رعایت شد. در نهایت چنان‌که گفته شد نتایج اعتبارسنجی حاکی از عملکرد قابل اعتماد مدل در منطقه مطالعاتی است. براساس نتایج حاصل از این تحقیق می‌توان گفت پخش سیلاب علاوه بر کاهش تبخیر-تعرق، تأثیر مثبتی بر کیفیت خاک و تغذیه سفره‌های زیرزمینی دارد. نتایج این تحقیق نشان داد که در مناطق تحت تأثیر سیلاب، میزان مصرف آب گیاهان کاهش یافته و پایداری منابع آبی بهبود یافته است. این یافته‌ها با مطالعات مشابه در مناطق خشک ایران، مانند دشت نیشابور [۴۰] همخوانی دارد.

نتایج این پژوهش نشان داد که مدل SEBS ابزاری قدرتمند برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی در مناطق خشک، از جمله دشت چن‌داب تهران، به‌شمار می‌آید. واسنجی این مدل با استفاده از داده‌های محلی و تصاویر ماهواره‌ای، تطابق قابل قبولی با داده‌های واقعی نشان داد و اعتبار نتایج را تقویت کرد. همچنین یافته‌ها نشان دادند که پخش سیلاب می‌تواند نقش کلیدی در کاهش میزان تبخیر-تعرق و بهبود مدیریت منابع آب ایفا کند.

در راستای توسعه تحقیقات آتی، پیشنهاد می‌شود که دوره زمانی مطالعه گسترش یابد تا تغییرات بلندمدت تبخیر-تعرق واقعی و تأثیر سال‌هایی با شدت سیلاب متفاوت مورد بررسی قرار گیرد. همچنین مقایسه نتایج حاصل از مدل SEBS با سایر مدل‌های بیلان انرژی می‌تواند به درک بهتر عملکرد این مدل کمک کند. علاوه بر این، بررسی دقیق‌تر تأثیر پخش سیلاب بر سایر اجزای بیلان آب، نظیر نفوذ و تغذیه آبخوان، از طریق به‌کارگیری مدل‌های هیدرولوژیکی یکپارچه یا جمع‌آوری داده‌های میدانی بیشتر، می‌تواند زمینه را برای

Remote sensing of environment, 24(3), 459-479 %@ 0034-4257.

8. 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>

9. Chen, Y., Liang, S., Ma, H., Li, B., He, T., & Wang, Q. 2021. An all-sky 1 km daily land surface air temperature product over mainland China for 2003–2019 from MODIS and ancillary data. Earth System Science Data, 13(8), 4241-4261. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4241-2021>

10. 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>

11. Ghat, 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>

12. Hasmadi, M., Pakhriazad, H. Z., & Shahrin, M. F. 2009. Evaluating supervised and unsupervised techniques for land cover mapping using remote sensing data. Geografia: Malaysian Journal of Society and Space, 5(1), 1-10 %@ 2180-2491.

13. He, Z., Jia, G., Liu, Z., Zhang, Z., Yu, X., & Xiao, P. 2020. Field studies on the influence of rainfall intensity, vegetation cover and slope length on soil moisture infiltration on typical watersheds of the Loess Plateau, China. Hydrological Processes, 34(25), 4904-4919 %@ 0885-6087.

14. Healy, R. W. 2010. Estimating groundwater recharge. Cambridge university press.

15. Huang, M., & Zhang, L. 2004. Hydrological responses to conservation practices in a catchment of the Loess Plateau, China. Hydrological Processes, 18(10), 1885-1898. <https://doi.org/10.1002/hyp.1454>

16. Irons, J. R., Dwyer, J. L., & Barsi, J. A. 2012. The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission. Remote sensing of environment, 122, 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.026>

17. Jia, L., Xi, G., Liu, S., Huang, C., Yan, Y., & Liu, G. 2009. Regional estimation of daily to annual regional evapotranspiration with MODIS data in the Yellow River Delta wetland. . Hydrology and earth system sciences, 13(10), 1775-1787.

تحلیل‌های جامع‌تر فراهم آورد.

سپاسگزاری

نویسندگان از همراهی تمام کسانی که در این پروژه همکاری داشتند تشکر و قدردانی می‌کنند.

تضاد منافع نویسندگان

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

دسترسی به داده‌ها

"داده‌ها و نتایج این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در دسترس قرار خواهد گرفت."

مشارکت نویسندگان

رحمان شریفی: تحقیقات میدانی، تحلیل داده‌ها
فاطمه برزگری: نگارش مقاله، مرور منابع، بازنویسی و تحلیل
قباد رستمی زاد: نرم افزار، تحلیل داده‌ها

منابع مورد استفاده

1. Adam, E., Mutanga, O., & Rugege, D. 2010. Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: a review. Wetlands ecology and management, 18, 281-296 %@ 0923-4861.

2. Adib, A., & Mahmoodi, A. 2017. Prediction of suspended sediment load using ANN GA conjunction model with Markov chain approach at flood conditions. KSCE Journal of Civil Engineering, 21, 447-457.

3. Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. Journal of irrigation and drainage engineering, 133(4), 380-394 %@ 0733-9437.

4. Baret, F., & Guyot, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. Remote sensing of environment, 35(2-3), 161-173 %@ 0034-4257.

5. Bernstein, L. S., Jin, X., Gregor, B., & Adler-Golden, S. M. 2012. Quick atmospheric correction code: algorithm description and recent upgrades. Optical engineering, 51(11), 111719-111719 %@ 110091-113286.

6. Brutsaert, W. (2013). Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications (Vol. 1 %@ 9401714975). Springer Science & Business Media.

7. Chavez Jr, P. S. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data.

Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, 25(2), 147-157 %@ 1464-1909.

30. Rostamizad, G., Pakparvar, M., Abdinejad, P. . 2023. Evaluation and Calibration of SEBS Surface Energy Balance Model in Determining Evapotranspiration of Plains Affected by Flood Spreading (Qaracherian-Zanjan Province). Watershed Management Research, 36(3), 17-31. <https://doi.org/10.22092/WMRJ.2023.360611.1503>

31. Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA Spec. Publ, 351(1), 309.

32. Senay, G. B., Bohms, S., Singh, R. K., Gowda, P. H., Velpuri, N. M., Alemu, H., & Verdin, J. P. (2013). Operational Evapotranspiration Mapping Using Remote Sensing and Weather Datasets: A New Parameterization for the SSEB Approach. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 49(3), 577-591. <https://doi.org/10.1111/jawr.12057>

33. Su, Z. (2002). The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. Hydrology and earth system sciences, 6(1), 85-100 %@ 1607-7938.

34. Valor, E., & Caselles, V. 1996. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. Remote sensing of environment, 57(3), 167-184 %@ 0034-4257.

35. Voogt, J. A., & Oke, T. R. 2003. Thermal remote sensing of urban climates. Remote sensing of environment, 86(3), 370-384 %@ 0034-4257.

36. Watson, D. J. 1947. Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. Annals of botany, 11(41), 41-76 %@ 0305-7364.

37. Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. 2004. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. Remote sensing of environment, 89(4), 467-483 %@ 0034-4257.

38. Willmott, C. J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. Bulletin of the American Meteorological Society, 63(11), 1309-1313 %@ 0003-0007.

39. 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>

40. Yang, P., Liu, L., & Cheng, Y. 2024. Temporal and spatial characteristics of evapotranspiration in Dawen River Basin based on SEBS model.

18. Jones, H. G. 1992. Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology.

19. Kazemi M, & Jafarpour A. 20205. Multi Temporal Land use/Land cover using Spectral indices, Sentinel-2 Imagery and Migrated Training Samples in Google Earth Engine. Iranian Journal of Watershed Management. 18 (67) : 1. (In Persian).

20. Kustas, W. P., & Daughtry, C. S. T. 1990. Estimation of the soil heat flux/net radiation ratio from spectral data. Agricultural and forest meteorology, 49(3), 205-223 %@ 0168-1923.

21. Li, Z. L., Tang, R., Wan, Z., Bi, Y., Zhou, C., Tang, B., Yan, G., & Zhang, X. 2009. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data. Sensors (Basel), 9(5), 3801-3853. <https://doi.org/10.3390/s90503801>

22. Liang, S. 2001. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms. Remote sensing of environment, 76(2), 213-238 %@ 0034-4257.

23. Mahdavi Vafa, H., & Golbabaei, H. 2009. Economic and social evaluation of the Chendab aquifer in Pakdasht County from the perspective of villagers. Proceedings of the 5th National Conference on Watershed Engineering and Natural Science in Iran: Sustainable Disaster Management (In Persian).

24. Monteith, J., & Unsworth, M. 2013. Principles of environmental physics: plants, animals, and the atmosphere. Academic press.

25. Omidvar J., Davary, S. N., K, Sanaei-Nejad, H., Farid hosseini, A. 2013. Estimation of actual evapotranspiration based on satellite images using two algorithms Sebal and Metric. Scientific-Research Quarterly of Irrigation and Water Engineering, 3(12), 11-22

26. 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 %@ 1464-7141.

27. 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>

28. Parivash, P., Davari, K., Faridhosseini, A., & Majidi, M. . 2015. Estimation of actual evapotranspiration using a combination of remote sensing data and SEBAL algorithm (Case study: Neyshabur plain). Journal of Water and Soil, 29(5), 1234-1245.

29. Roerink, G. J., Su, Z., & Menenti, M. 2000. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance.