

## Research Paper

**Assessment of Actual Evapotranspiration (ALARM) under SSP Scenarios and Its Impact on Soil Salinity (Case Study: Ahar Chay Watershed)**Mehdi Asadi<sup>1</sup> 1- Assistant Professor, Department of Geography Education, Farhangian University, Tehran, Iran. [Asadi.m@cfu.ac.ir](mailto:Asadi.m@cfu.ac.ir)

## Keywords

**Evapotranspiration, ALARM, Remote Sensing, Watershed, Ahar Chai.****Received: 2024/12/04****Accepted: 2025/01/21****Published: 2025/07/21**

## A B S T R A C T

**Introduction**

Climate change affects the rate of evapotranspiration, a vital element of the hydrological cycle, through which more than two-thirds of the world's precipitation is lost. Evapotranspiration and its accurate estimation are crucial for understanding the hydrological water balance, rainfall-runoff modeling, water balance, irrigation planning, agrometeorology, ecosystem modeling, water resources planning, and management, especially in drylands, where access to water is a major challenge. Evapotranspiration is also crucial for deficit irrigation planning and is highly influential in determining the suitability of crops for cultivation in a specific climate and crop type. However, since measuring it with the items mentioned above, such as a lysimeter, is very time-consuming and expensive, traditional methods are more suitable for potential evapotranspiration, the main goal of the present study is to evaluate actual evapotranspiration using the ALARM method and to examine and predict it under SSP scenarios in the future period in the Ahar Chay watershed area, which is considered one of the important agricultural areas in the northwest region of the country. Also, in this study, data obtained from remote sensing (ALARM) were used as basic data for predicting the future using SSP scenarios and were examined for the first time in Iran, which is considered an innovation of the present study.

**Methodology**

In this study, Landsat sensor images related to row 168 and pass 33 were utilized. [Earthexplorer.usgs.gov](https://earthexplorer.usgs.gov) website. Ground data, including hourly minimum and maximum temperatures, humidity, wind speed, dew point temperature, and solar radiation, used in the ALARM algorithm and the Penman-Monteith FAO and Torrence-White models, were obtained from the National Meteorological Organization.

\*Corresponding Author: Mehdi Asadi E-mail: [Asadi.m@cfu.ac.ir](mailto:Asadi.m@cfu.ac.ir)How to cite this article: Asadi, Mehdi. (2023). Assessment of Actual Evapotranspiration (ALARM) under SSP Scenarios and Its Impact on Soil Salinity (Case Study: Ahar Chay Watershed). *Hydrogeomorphology*, 12(43): 125 – 141 .DOI: [10.22034/hyd.2025.64820.1769](https://doi.org/10.22034/hyd.2025.64820.1769)

Copyright: © by the authors

Publisher: University of Tabriz

## Results and Discussion

After preparing the desired images, the actual evapotranspiration values for the reference plant were first calculated using the ALARM method and used as the reference evapotranspiration base data to predict the future period of Ahar Chai based on the SSP1.2.6, SSP3.7.0, and SSP5.8.5 scenarios. Based on the results (given the coldness of the region and thus, low evapotranspiration, as well as the need for cloud-free images to assess evapotranspiration with the ALARM method, only images from the first half of the year were reviewed.), the highest actual evapotranspiration for the reference plant was in July 2022, with a numerical value of 159.3 mm; the lowest was in April 2019, with a numerical value of 69.7 mm. Also, in the Penman-Monteith and Hargreaves-Samani methods, the highest evapotranspiration rate of the reference plant is in July 2022, with numerical values of 160.9 and 162.1 mm, respectively, and the lowest is in April 2019, with numerical values of 71.3 and 71.2 mm, respectively. According to Figure 2, the southeastern regions of the study area have higher evapotranspiration rates than other regions due to high vegetation cover and consequently high humidity and river branches. To assess the simulations' accuracy based on the models in Table 6, we used the RMSE and MSE indices. As can be seen, the RMSE and MSE values for evapotranspiration in all the models studied were below 2.867, and the lowest RMSE and MSE values were for the ACCESS-CM2 model, with numerical values of 0.198 and 0.165, respectively, in the SSP1.2.6 scenario, which indicates high simulation accuracy. It is also worth noting that the models studied did not perform very well in evaluating the evapotranspiration parameter in the SSP5.8.5 scenario, and the RMSE and MSE values in all models were above 1, with the highest in the UKESM1-0-LL model, with numerical values of 2.867 and 2.735, respectively.

## Conclusions

Considering the importance of estimating evapotranspiration in agricultural studies and water resources management, especially under climate change conditions, in this study, the ALARM method (base data) and UKESM1-0-LL, INM-CM5-0, CanESM5, BCC-ESM1, and ACCESS-CM2 models from the CMIP6 report were used to predict the amount of evapotranspiration in the Ahar Chay watershed. Based on the results obtained, the highest actual evapotranspiration for the reference plant was in July 2022 with a numerical value of 159.3 mm, and the lowest was in April 2019 with a numerical value of 69.7 mm. Also, in the Penman-Monteith and Hargreaves-Samani methods, the highest evapotranspiration rate of the reference plant was in July 2022 with numerical values of 160.9 and 162.1 mm, and the lowest was in April 2019 with numerical values of 71.3 and 71.2 mm, respectively. Additionally, the southeastern regions of the study area, due to the high vegetation cover and consequently the presence of high humidity and river branches, have higher evapotranspiration rates than other regions. The results also showed that the ALARM method has the highest correlation ( $R^{20.915}$ ) and the lowest error rate RMSE 1.493 and MSE 1.232 mm) with the Penman-Monteith method. The RMSE and MSE values for evapotranspiration in all the climate change models studied are below 2.867, and the lowest RMSE and MSE values are for the ACCESS-CM2 model with numerical values of 0.198 and 0.165, respectively, in the SSP1.2.6 scenario, which indicates high simulation accuracy. It is also worth noting that the models studied did not perform very well in evaluating the evapotranspiration parameter in the SSP5.8.5 scenario, and the RMSE and MSE values in all models are above 1, with the highest in the UKESM1-0-LL model with numerical values of 2.867 and 2.735, respectively.



# ارزیابی تبخیر و تعرق واقعی (ALARM) تحت سناریوهای SSP و تاثیر آن بر شوری خاک (مطالعه موردی: حوضه آبریز اهر چای)



۱- مهدی اسدی

۱- استادیار، گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران. [Asadi.m@cfu.ac.ir](mailto:Asadi.m@cfu.ac.ir)

## کلیدواژه‌ها

تبخیر و تعرق، ALARM،  
سنجش از دور، حوضه آبریز، اهر  
چای.

## چکیده

در پژوهش حاضر با استفاده روش ALARM (مدل تحلیل رادیومتر اتمسفر-زمینی) و مدل‌های UKESM1-0-LL، ACCESS-CM2 و BCC-ESM1، CanESM5، INM-CM5-0، سناریوهای SSP (سناریوهای SSP1.2.6 و SSP3.7.0 و SSP5.8.5) به پیش‌بینی مقدار تبخیر و تعرق در حوضه آبریز اهر چای پرداخته شد. همچنین نتایج حاصل از روش ALARM با روش‌های پنمن ماتیت فائو و تورنت وایت مقایسه گردید. برای این منظور از ۷۲ تصویر سنجنده لندست ۸ OLI مربوط به ردیف ۱۶۸ و گذر ۳۳ استفاده شده است. نتایج نشان داد که روش ALARM بیشترین میزان همبستگی ( $R^2 = 0.915$ ) و کمترین میزان خطا (RMSE  $1/493$  و MSE  $1/232$  میلی‌متر) را با روش پنمن ماتیت دارا می‌باشد. مقادیر RMSE و MSE مربوط به تبخیر و تعرق در تمامی مدل‌های مورد بررسی زیر  $2/867$  بوده و کمترین میزان RMSE و MSE مربوط به مدل ACCESS-CM2 به ترتیب با مقادیر عددی  $0/198$  و  $0/165$  در سناریوی SSP1.2.6 می‌باشد. همچنین قابل ذکر است که مدل‌های مورد بررسی در ارزیابی پارامتر تبخیر و تعرق در سناریوی SSP5.8.5 زیاد خوب عمل نکرده و مقادیر RMSE و MSE در تمامی مدل‌ها بالای ۱ بوده که این میزان در SSP5.8.5 در مدل UKESM1-0-LL به ترتیب با مقادیر عددی  $2/867$  و  $2/735$  دارای بالاترین میزان تبخیر و تعرق هستند. همچنین میزان شوری خیلی زیاد خاک براساس شاخص‌های NDSI و  $SI_1$  از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۴ بترتیب حدود  $6613/81$  و  $6296/81$  هکتار افزوده شده است که با روند افزایشی تبخیر و تعرق در سناریوهای اقلیمی نیز همبستگی  $0/987$  دارد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۴  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۲  
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

ارجاع به این مقاله: اسدی، مهدی (۱۴۰۴). ارزیابی تبخیر و تعرق واقعی (ALARM) تحت سناریوهای SSP و تاثیر آن بر شوری خاک (مطالعه موردی: حوضه آبریز اهر چای). هیدروژئومورفولوژی، ۱۲(۴۳): ۱۲۵-۱۴۱.

\*نویسنده مسئول: مهدی اسدی  
رایانامه: [Asadi.m@cfu.ac.ir](mailto:Asadi.m@cfu.ac.ir)

شناسه دیجیتال مقاله DOI: 10.22034/hyd.2025.64820.1769



Copyright: ©2025 by the authors

Publisher: University of Tabriz

## مقدمه

تغییر اقلیم بر میزان تبخیر و تعرق یکی از عناصر حیاتی چرخه هیدرولوژیکی است و بیش از دوسوم بارندگی جهان از طریق آن از دسترس خارج می‌شود، تاثیر می‌گذارد (گائو<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۸؛ سلام و اسلام<sup>۲</sup>، ۲۰۲۰؛ واله جونیور<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۲۱؛ آل حسنی و شهید<sup>۴</sup>، ۲۰۲۴). تبخیر و تعرق و تخمین دقیق آن برای درک تعادل هیدرولوژیکی آب، مدل بارش-رواناب، تعادل آب، برنامه‌ریزی آبیاری، هواشناسی کشاورزی، مدل‌سازی اکوسیستم، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب به‌ویژه در اراضی خشک، که دسترسی به آب چالش بزرگی محسوب می‌شود، بسیار مهم است (شیری<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۴؛ خیانگ<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۶؛ جرین<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین تبخیر و تعرق برای برنامه‌ریزی کم آبیاری حیاتی است و بسیار در تعیین تناسب محصولات کشاورزی برای کشت در یک آب‌وهوای خاص و نوع محصول تأثیرگذار است (اسلام و همکاران، ۲۰۱۹؛ آلام<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۲۴). روش‌های مرسوم اندازه‌گیری تبخیر و تعرق از سطح زمین (نسبت باون، همبستگی ادی و لایسیمتر) برای کاربرد پیوسته در فاصله‌های مناسب در منطقه، بسیار پرهزینه و وقت‌گیر است. همچنین این اندازه‌گیری‌ها نقطه‌ای بوده و به خاطر شرایط متغیر آب و هوایی و طبیعت پویای فرایند انتقال آب - گرما، قابل‌تعمیم به حوضه‌های بزرگ نمی‌باشند (لی<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۱۸؛ چیا<sup>۱۰</sup> و همکاران، ۲۰۲۰؛ الف و ب؛ نبوی پلسری<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۱).

در حال حاضر، روش‌های سنجش‌ازدوری راه‌حل مناسبی برای به دست آوردن متغیرهای مختلف در مقیاس‌های زمانی و مکانی موردنیاز به‌منظور برآورد تبخیر و تعرق هستند (سانتوس<sup>۱۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۹). دراین‌بین ALARM<sup>۱۳</sup> یکی از الگوریتم‌های سنجش‌ازدور می‌باشد که تبخیر و تعرق گیاه را بر اساس تعادل لحظه‌ای انرژی در سطح هر پیکسل از یک تصویر ماهواره‌ای محاسبه می‌نماید. تاکنون مطالعات متعددی جهت بررسی کارایی روش ALARM در تبخیر و تعرق واقعی در مناطق وسیع در دنیا انجام گردیده که عبارت‌اند از:

سلیمان<sup>۱۴</sup> و همکاران (۲۰۰۹) به مقایسه روش‌های ALARM و SEBAL در برآورد تبخیر و تعرق یونجه پرداختند. نتایج اولیه نشان می‌دهد که عملکرد ALARM-D و SEBAL در تخمین ساعتی تبخیر و تعرق مرجع قابل‌قبول بوده و در کل ALARM-D بهتر از SEBAL میزان تبخیر و تعرق روزانه را تخمین زد. سلیمان و آل باکری<sup>۱۵</sup> (۲۰۱۱) با استفاده از روش ALARM و دمای بی‌بعد به ارزیابی تبخیر و تعرق واقعی روزانه پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش میزان رطوبت خاک میزان تبخیر و تعرق ارزیابی شده به‌وسیله ALARM نیز افزایش می‌یابد. اوانه و سلیمان<sup>۱۶</sup> (۲۰۱۸) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به مقایسه عملکرد ALARM و SEBAL به تخمین ET واقعی روزانه پرداختند. نتایج نشان داد که ALARM تخمین‌های تبخیر و تعرق معقولی را نسبت به برآوردهای به‌دست‌آمده از SEBAL یا SEBAL اصلاح‌شده ارائه می‌کند. اسدی و ولیزاده کامران (۲۰۲۲) به مقایسه الگوریتم‌های SEBAL، METRIC و ALARM برای تخمین تبخیر و تعرق واقعی محصول گندم پرداختند. نتایج نشان داد که در بین روش‌های بررسی‌شده، روش SEBAL کمترین میزان خطا (۰/۶۳۳) و بیشترین همبستگی (۰/۹۳۰۷) و پس‌از آن روش‌های METRIC و ALARM با کمترین خطا (به ترتیب ۰/۷۶۱ و ۰/۸۵۵) و بیشترین همبستگی (به ترتیب ۰/۹۰۵۷ و ۰/۸۷۰۹) را در مقایسه با داده‌های لایسیمتر بود. آلكودا<sup>۱۷</sup> و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از روش ALARM به ارزیابی تبخیر و تعرق خرما در اردن پرداختند. نتایج نشان داد که بین خروجی‌های تبخیر و تعرق حاصل از روش ALARM و پنمن مانیتیت تطابق (همبستگی ۰/۸۴) خوبی وجود دارد. در داخل کشور ایران تا لحظه نگارش این مقاله با استفاده از روش ALARM تبخیر و تعرق مورد ارزیابی قرار نگرفته یا حداقل نگارندگان آن را شناسایی نکردند اما بااین‌حال مطالعاتی با استفاده از الگوریتم SEBAL صورت گرفته که به دو مورد از آن‌ها اشاره می‌گردد: اسدی و همکاران (۱۳۹۹) در نیمه شمالی استان اردبیل با استفاده از روش سبال کوهستانی به برآورد میزان تبخیر و تعرق واقعی گیاه نخود پرداختند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده سطوح آبی با مقدار ۹/۶۱ و ۹/۵۰ میلی‌متر در روز دارای بیشترین و اراضی شهری و بایر با مقدار میانگین ۲/۸۴۵ و ۲/۰۸ میلی‌متر در روز به ترتیب در روش‌های سبال و

- 1 . Gao
- 2 . Salam and Islam
- 3 . Valle Júnior
- 4 . Al-Hasani and Shahid
- 5 . Shiri
- 6 . Xing

- 7 . Jerin
- 8 . Alam
- 9 . Li
- 10 . Chia
- 11 . Nabavi-Pelesaraei
- 12 . Santos

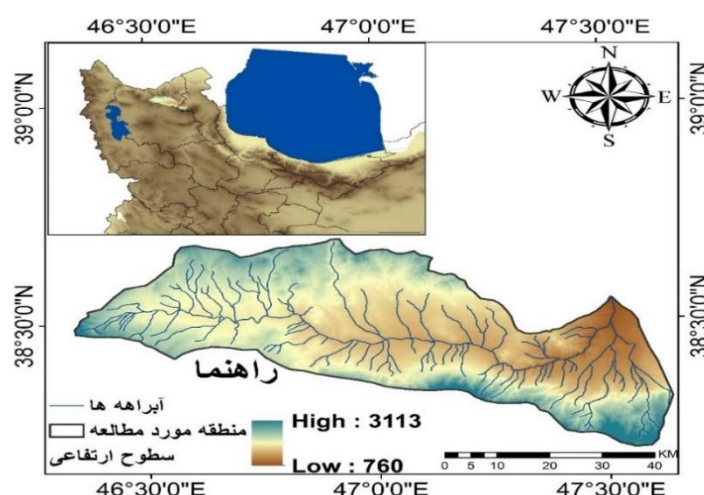
- 13 . Analytical Land Atmosphere Radiometer Model
- 14 . Suleiman
- 15 . Suleiman and Al-Bakri
- 16 . Owaneh and Suleiman
- 17 . Alqudah

سبال کوهستانی دارای کمترین میزان تبخیر و تعرق واقعی ۲۴ ساعته می‌باشند. همچنین میزان نیاز آبی محصول نخود نیز به ترتیب ۷/۱۴ و ۶/۷۰ میلی‌متر در روز برای روش‌های سبال و سبال کوهستانی برآورد گردید و با روش پنمن مانیتث با مقدار ۶/۳۲ میلی‌متر در روز مقایسه شد که دارای میانگین تفاضل مطلق (MAD) ۰/۶۰ می‌باشد. گل ریحان و همکاران (۱۴۰۲) در شهرستان اهر با استفاده از روش SEBAL به برآورد تبخیر و تعرق واقعی گیاهان مرتعی پرداختند. نتایج بیانگر آن بود که بر اساس روش سبال، محصول نعنا در دوره اولیه رشد محصول به تاریخ ۲۰۲۱/۵/۲۹ کمترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ۲/۸۴ میلی‌متر در روز و محصول یونجه نیز در دوره اولیه رشد محصول به تاریخ ۲۰۱۹/۶/۱۱ بیشترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ۳/۴۹ میلی‌متر در روز داشته است. با توجه به پیشینه تحقیق از آنجایی که تبخیر و تعرق تحت تاثیر مستقیم عناصر آب و هوایی مانند دما، رطوبت، باد و غیره است، بنابراین تغییرات اقلیمی تاثیر مستقیمی بر روی آن می‌گذارد اما از آنجاکه اندازه‌گیری آن با موارد یادشده در بالا مانند لایسیمتر بسیار زمان‌بر و پرهزینه است و روش‌های سنتی نیز بیشتر برای تبخیر و تعریق پتانسیل مناسب است؛ لذا هدف اصلی پژوهش حاضر ارزیابی تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از روش ALARM و بررسی و پیش‌بینی آن تحت سناریوهای SSP در دوره آینده در منطقه حوضه آبخیز اهر چای، می‌باشد که یکی از مناطق مهم کشاورزی در منطقه شمال غرب کشور محسوب می‌شود. همچنین در این پژوهش داده‌های حاصل از سنجش‌ازدور (ALARM) به‌عنوان داده‌های پایه برای پیش‌بینی آینده با استفاده از سناریوهای SSP قرار گرفته و برای اولین بار نیز در ایران مورد بررسی قرار گرفت که به‌عنوان نوآوری پژوهش حاضر محسوب می‌شود.

## مواد و روش

### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز اهر چای با مساحتی بالغ بر ۲۲۳۲ کیلومترمربع در شمال غرب ایران و در شرق استان آذربایجان شرقی واقع شده است (شکل ۱). حوضه آبریز مذکور در محدوده جغرافیایی ۴۶ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۳۰ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد (زین‌الدینی و همکاران، ۱۳۹۸: ۲۰۰). روند کلی اهر شرقی غربی بوده و بخش‌های وسیعی از شهرستان‌های اهر و ورزقان را در بر می‌گیرد. این حوضه با ارتفاع متوسط ۱۸۱۶ متر از سطح دریا و شیب ۱۶ درصد به‌عنوان یکی از زیر حوضه‌های حوضه آبریز ارس محسوب می‌گردد (کریمی و همکاران، ۱۳۹۸: ۴).



شکل (۱): محدود مورد مطالعه

Figure (1): The study area

### داده‌های مورد بررسی

در پژوهش حاضر از تصاویر سنجنده لندست ۸ OLI مربوط به ردیف ۱۶۸ و گذر ۳۳ استفاده شده است که از سایت Earthexplorer.usgs.gov دریافت گردیده است (جدول ۱). داده‌های زمینی (دمای حداقل و حداکثر ساعتی، رطوبت حداقل و حداقل

ساعتی، سرعت باد ساعتی، دمای نقطه شبنم و تابش خورشید) مورد استفاده در الگوریتم ALARM و مدل‌های پنمن مانیتیت فائو و تورنت وایت نیز از سازمان هواشناسی کشور دریافت گردیده است. همچنین داده‌های مربوط به سناریوهای SSP (سناریوهای SSP1.2.6 و SSP3.7.0 و SSP5.8.5) نیز از سایت <https://esgf-data.dkrz.de/search/cmip6-dkrz> دریافت گردید.

جدول (۱): تصاویر لندست ۸ مورد استفاده در پژوهش

Table (1): Landsat 8 images used in research

| ردیف | تاریخ      | ردیف | تاریخ      | ردیف | تاریخ      | ردیف | تاریخ      | ردیف | تاریخ      | ردیف | تاریخ      |
|------|------------|------|------------|------|------------|------|------------|------|------------|------|------------|
| ۱    | ۲۰۱۳/۰۴/۰۷ | ۱۳   | ۲۰۱۵/۰۴/۲۷ | ۲۵   | ۲۰۱۷/۰۴/۱۶ | ۳۷   | ۲۰۱۹/۰۴/۱۸ | ۴۹   | ۲۰۲۱/۰۴/۰۲ | ۶۱   | ۲۰۲۳/۰۴/۲۴ |
| ۲    | ۲۱۰۳/۰۵/۲۳ | ۱۴   | ۲۰۱۵/۰۵/۲۹ | ۲۶   | ۲۰۱۷/۰۵/۱۸ | ۳۸   | ۲۰۱۹/۰۵/۲۴ | ۵۰   | ۲۰۲۱/۰۵/۲۹ | ۶۲   | ۲۰۲۳/۰۵/۱۱ |
| ۳    | ۲۰۱۳/۰۶/۲۴ | ۱۵   | ۲۰۱۵/۰۶/۱۴ | ۲۷   | ۲۰۱۷/۰۶/۱۹ | ۳۹   | ۲۰۱۹/۰۶/۲۵ | ۵۱   | ۲۰۲۱/۰۶/۳۰ | ۶۳   | ۲۰۲۳/۰۶/۲۸ |
| ۴    | ۲۰۱۳/۰۷/۱۰ | ۱۶   | ۲۰۱۵/۰۷/۱۶ | ۲۸   | ۲۰۱۷/۰۷/۲۱ | ۴۰   | ۲۰۱۹/۰۷/۱۱ | ۵۲   | ۲۰۲۱/۰۷/۱۶ | ۶۴   | ۲۰۲۳/۰۷/۲۲ |
| ۵    | ۲۰۱۳/۰۸/۲۷ | ۱۷   | ۲۰۱۵/۰۸/۱۷ | ۲۹   | ۲۰۱۷/۰۸/۲۲ | ۴۱   | ۲۰۱۹/۰۸/۲۸ | ۵۳   | ۲۰۲۱/۰۸/۱۷ | ۶۵   | ۲۰۲۳/۰۸/۲۳ |
| ۶    | ۲۰۱۳/۰۹/۲۸ | ۱۸   | ۲۰۱۵/۰۹/۰۲ | ۳۰   | ۲۰۱۷/۰۹/۲۳ | ۴۲   | ۲۰۱۹/۰۹/۲۹ | ۵۴   | ۲۰۲۱/۰۹/۰۲ | ۶۶   | ۲۰۲۳/۰۹/۱۶ |
| ۷    | ۲۰۱۴/۰۴/۲۴ | ۱۹   | ۲۰۱۶/۰۴/۲۹ | ۳۱   | ۲۰۱۸/۰۴/۱۹ | ۴۳   | ۲۰۲۰/۰۴/۲۴ | ۵۵   | ۲۰۲۲/۰۴/۲۲ | ۶۷   | ۲۰۲۴/۰۴/۱۷ |
| ۸    | ۲۰۱۴/۰۵/۲۶ | ۲۰   | ۲۰۱۶/۰۵/۱۵ | ۳۲   | ۲۰۱۸/۰۵/۲۱ | ۴۴   | ۲۰۲۰/۰۵/۲۶ | ۵۶   | ۲۰۲۲/۰۵/۲۹ | ۶۸   | ۲۰۲۴/۰۵/۲۹ |
| ۹    | ۲۰۱۴/۰۶/۲۷ | ۲۱   | ۲۰۱۶/۰۶/۱۶ | ۳۳   | ۲۰۱۸/۰۶/۲۲ | ۴۵   | ۲۰۲۰/۰۶/۱۱ | ۵۷   | ۲۰۲۲/۰۶/۲۵ | ۶۹   | ۲۰۲۴/۰۶/۰۶ |
| ۱۰   | ۲۰۱۴/۰۷/۲۹ | ۲۲   | ۲۰۱۶/۰۷/۱۸ | ۳۴   | ۲۰۱۸/۰۷/۲۴ | ۴۶   | ۲۰۲۰/۰۷/۱۳ | ۵۸   | ۲۰۲۲/۰۷/۱۹ | ۷۰   | ۲۰۲۴/۰۷/۲۴ |
| ۱۱   | ۲۰۱۴/۰۸/۱۴ | ۲۳   | ۲۰۱۶/۰۸/۱۹ | ۳۵   | ۲۰۱۸/۰۸/۲۵ | ۴۷   | ۲۰۲۰/۰۸/۳۰ | ۵۹   | ۲۰۲۲/۰۸/۲۸ | ۷۱   | ۲۰۲۴/۰۸/۲۵ |
| ۱۲   | ۲۰۱۴/۰۹/۱۵ | ۲۴   | ۲۰۱۶/۰۹/۲۰ | ۳۶   | ۲۰۱۸/۰۹/۱۰ | ۴۸   | ۲۰۲۰/۰۹/۱۵ | ۶۰   | ۲۰۲۲/۰۹/۱۳ | ۷۲   | ۲۰۲۴/۰۹/۱۰ |

#### مدل ALARM

مدل ALARM برای محاسبه شار تابش خالص و شار گرمای خاک از همان روابط مربوط به روش سبال استفاده کرده می‌نماید (تفاوت اصلی روش ALARM با روش SEBAL در برآورد شار گرمای محسوس (H) می‌باشد) که در آن شار تبخیر و تعرق برای هر پیکسل تصویر، به صورت باقیمانده معادله توازن انرژی سطح محاسبه (روابط ۱ تا ۴) می‌شود (برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد روش SEBAL به اسدی و ولیزاده ۲۰۲۲، ۲۰۲۳ و اسدی و همکاران ۱۳۹۹ مراجعه گردد).

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

$$R_n = (1 - a)R_{s\downarrow} + R_{s\uparrow} - R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_a)R_{L\downarrow} \quad (2)$$

$$G = \frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{a} (0.0038a + 0.0074 a^2)(1 - 0.98NDVI^4) \quad (3)$$

$$NDVI = \frac{\rho_5 - \rho_4}{\rho_5 + \rho_4} \quad (4)$$

در معادلات فوق،  $\lambda E$  شار گرمای نهان  $(W/m^2)$ ؛  $R_n$  شار تابش خالص در سطح زمین  $(W/m^2)$ ؛  $G$  شار گرمای خاک  $(W/m^2)$  و  $H$ ، شار گرمای محسوس  $(W/m^2)$ ،  $R_{s\downarrow}$  تابش موج کوتاه ورودی  $(W/m^2)$ ،  $R_{L\downarrow}$  تابش موج بلند ورودی  $(W/m^2)$ ،  $R_{L\uparrow}$  تابش موج بلند خروجی  $(W/m^2)$ ،  $a$  آلبیدوی سطحی و  $\varepsilon_a$  توان تشعشعی سطحی باند پهن،  $T_s$  دمای سطحی  $(^\circ C)$ ،  $a$  آلبیدوی سطحی و  $NDVI$  شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی،  $\rho_5$  انعکاس طیفی باند ۵ لندست ۸ (باند مادون قرمز نزدیک) و  $\rho_4$  انعکاس طیفی باند ۴ لندست ۸ (باند قرمز) می‌باشد (آلن<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۲).

#### شار گرمای محسوس (H)

در مدل ALARM برخلاف مدل سبال برای محاسبه مقادیر شار گرمای محسوس از رویکرد متفاوتی مبتنی بر تئوری تشابه مانین ابوخوف استفاده کرده و پیکسل‌های گرم و سرد را مدنظر قرار نمی‌دهد. در حقیقت تفاوت اصلی بین مدل‌های مذکور در تخمین دمای سطحی

و طول ضریب زبری برای دمای محسوس می‌باشد. چرا که بر اساس ALARM استفاده مستقیم از دمای سطح زمین برای برآورد میزان شار گرمای محسوس برای پوشش‌های گیاهی مفید یا به عبارتی درست نمی‌باشد، چرا که دمای سطحی رادیومتریکی که از طریق تصاویر ماهواره‌ای محاسبه شده با دمای مورد نیاز برای پوشش سایبان گیاه متفاوت‌تر است که به عنوان دمای آئرودینامیک ( $T_i$ ) شناخته می‌شود. بنابراین استفاده مستقیم از دمای سطح زمین برای برآورد میزان شار گرمای محسوس می‌تواند خطاهای معناداری داشته باشد. علاوه بر این، برای پیدا کردن مقادیر دقیق  $H$  نیاز به پیدا کردن مقادیر دقیق  $Z_{oh}$  می‌باشد که وابسته به پروفیل دمای لایه سطحی اتمسفر است (رابطه ۵). از آنجایی که پروفیل دقیق دمای سطح برای پوشش گیاهی به خوبی تعریف نشده است، لذا تعیین مقادیر صحیح  $Z_{oh}$  آسان نیست. روش‌های مذکور برای حل این مشکل از دو رویکرد جداگانه استفاده می‌نمایند که در آن سبال و متریک مقدار دمای آئرودینامیک ( $T_i$ ) را از روند محاسبات حذف می‌کند و لذا نیازی به تعیین مقادیر  $Z_{oh}$  نبوده و برای به دست آوردن مقدار  $H$  با فرض رابطه خطی بین  $dt$  و دمای سطح زمین از دو پیکسل خشک و مرطوب استفاده می‌نماید. در مقابل ALARM یک رویکردی را توسعه داده که از طریق آن مقدار  $T_i$  و  $Z_{oh}$  را پیش‌بینی می‌نماید. ALARM با استفاده از اصلاح پروفیل دمای گیاهان مقدار  $T_s$  را به  $T_i$  تبدیل کرده و با در نظر گرفتن شاخص سطح برگ  $LAI$ ، ارتفاع سایبان، توزیع زاویه برگ و زاویه دید سنجنده  $Z_{oh}$  را به دست می‌آورد.

$$H = \frac{(T_s - T_a) k u_* \rho c_p}{\left[ \ln \left( \frac{z_a - d_o}{z_{oh} - d_o} \right) - \phi \left( \frac{z_a - d_o}{L} \right) \right]} \quad (5)$$

که در آن:  $T_a$ : دمای هوا در ارتفاع  $z_a$  در زیر لایه سطحی بر حسب سانتی‌گراد،  $z_{oh}$ : طول زبری اسکالر برای گرمای محسوس،  $d_o$ : ارتفاع جابجایی بر حسب متر است (سلیمان و همکاران، ۲۰۰۸). در روش ALARM شاخ و برگ گیاهان به صورت یک تابع نمای از پروفیل دما (رابطه ۶) فرض می‌گردد (سلیمان و گارگو، ۲۰۰۲).

$$T_f = T_{fg} + (T_{fh} - T_{fg}) e^{-b\zeta} \quad (6)$$

که در آن:  $T_f$ : دمای شاخ و برگ گیاهان در ارتفاع  $z$  در بالای سطح خاک،  $T_{fh}$ : دمای شاخ و برگ درختان در بالای سایبان که مقدار آن با  $T_a$ : دمای هوا در بالای سایبان برابر است ( $T_{fh} = T_a$ )،  $T_{fg}$ : وسعت تقریبی پروفیل نمایی دمای شاخ و برگ در پایین تاج پوشش گیاهی (رابطه ۷)،  $b$ : ثابت پوسیدگی،  $\zeta$ : عمق بی بعد درون سایبان که از رابطه  $\zeta = (h - z)/h$  به دست می‌آید،  $h$ : ارتفاع تاج پوشش می‌باشد.

$$T_{fg} = \frac{LST - (w \times T_{fh})}{1 - w} \quad (7)$$

که در آن:  $w$ : نشان دهنده میانگین وزنی وزن  $T_{fh}$  و وزن  $T_{fg}$  در تعیین دمای سطحی رادیومتریکی است و از طریق رابطه ۸ محاسبه می‌گردد (سلیمان و گارگو، ۲۰۰۲):

$$w = (1 - f_{soil} e^{-b}) \left( \frac{\mu_r b}{\phi'_{LAI}} + 1 \right) \quad (8)$$

که در آن:  $f_{soil}$ : کسر خاک مشاهده شده به وسیله تصاویر مادون قرمز که از طریق رابطه ۹ قابل محاسبه است،  $\mu_r$ : کسینوس زاویه سمت‌الرأس رادیومتریکی،  $\phi'$ : ضریب نشان دهنده زاویه توزیع برگ که مقدار آن برابر ۰/۵ است.

$$f_{soil} = \exp[-\phi'_{LAI} / \mu_r] \quad (9)$$

دمای سطحی رادیومتریکی اندازه‌گیری شده از سنجش‌ازدور (رابطه ۱۰)، یک میانگین وزنی از دمای سطحی در بالای سایبان و یک میانگین وزنی از دمای سطحی در پایین سایبان می‌باشد.

$$T_s = w T_{fh} + (1 - w) T_{fg} \quad (10)$$

ALARM برای به دست آوردن مقدار  $Z_{oh}$  از رابطه ۱۱ استفاده می‌نماید.

$$Z_{oh} = Z_{oh,i} \exp[k u_* \rho c_p (T_{fh} - T_{fg})(w - W)/H] \quad (11)$$

که در آن:  $W$ : ضریب وزنی که اهمیت نسبی  $T_{fh}$  و  $T_{fg}$  را در تولید شار حرارت محسوس توصیف می‌کند،  $Z_{oh,i}$ : زبری اسکالر از یک سایبان هم‌دما زمانی که  $T_{fg} = T_{fh}$  باشد و از رابطه ۱۲ محاسبه می‌گردد (اوانه و سلیمان، ۲۰۱۸):

$$Z_{oh,i} = Z_{om} \exp \left[ \frac{h}{(h-d_0)r_2} + \ln \left( \frac{h-d_0}{Z_{om}} \right) \right] \quad (12)$$

که در آن:  $Z_{om}$ : طول زبری حرکت که از رابطه  $Z_{om} = 0.018 \times LAI$  به دست می‌آید. همچنین از طریق روابط ۱۳ تا ۲۱ مقدار  $W$  محاسبه می‌گردد که در ادامه پارامترهای آن توضیح داده می‌شود (اوانه و سلیمان، ۲۰۱۸):

$$W = - \frac{(r_2+b)C_2}{[r_2(b^2+ba-C_2)]} \quad (13)$$

$$b = 0.75 \quad \text{for } LAI \geq 1.87 \quad (14)$$

$$b = 3.7 - 1.58LAI \quad \text{for } LAI < 1.87 \quad (15)$$

$$a = 0.5LAI \quad (16)$$

$$r_2 = [a - (a^2 + 4C_2)^{1/2}] / 2 \quad (17)$$

$$C_2 = 2(LAI)(C_{tf})h/[k(h-d_0)] \quad (18)$$

$$d_0: h = 0.335a \quad (19)$$

$$C_{tf} = C_L Re \times^{-m} Pr^{-n} \quad (20)$$

$$Re = u_* L_f / \nu \quad (21)$$

که در آن‌ها:  $a$ : ثابت انقراض در پروفیل استرس برش نمایی در سایبان،  $b$ : نرخ را که در آن درجه حرارت شاخ و برگ با عمق به سایبان افزایش می‌یابد، کنترل می‌کند،  $Pr$ : عدد پرندنتل،  $Re$ : عدد رینولد،  $C_{tf}$ : ضریب انتقال در معادله انتقال حجم برای عناصر شاخ و برگ است،  $\nu$ : اصطکاک جنبشی،  $L_f$ : طول مشخصه مقیاس یک برگ (سلیمان و ال باکری، ۲۰۱۱؛ لاسجدرگاه و رحیم‌زادگان، ۲۰۱۸). مدل ALARM برای برآورد مقدار  $T_i$  از رابطه ۲۲ استفاده می‌نماید که به این ترتیب مقدار  $T_s$  به  $T_i$  تبدیل می‌گردد:

$$T_i = T_s + (T_{fg} - T_{fh})(w - W) \quad (22)$$

مدل ALARM رابطه بین  $H$  و  $\Delta_T$  را تقریباً به صورت خطی (رابطه ۲۳) در نظر می‌گیرد:

$$H = (R_n - G)\Delta_T \quad (23)$$

که در آن:  $\Delta_T$ : تغییرات بدون بعد دما است که از طریق رابطه ۲۴ محاسبه می‌گردد (سلیمان و همکاران، ۲۰۰۷):

$$\Delta_T = \left( \frac{T_i - T_a}{T_{max} - T_a} \right) \quad (24)$$

بعد از به دست آوردن شار تابش خالص، شار گرمای خاک و در نهایت تغییرات بدون بعد دما می‌توان از طریق رابطه ۲۵ مقدار شار گرمای نهان ورودی به اتمسفر را محاسبه کرده و با استفاده از رابطه ۲۶ مقدار کسر تبخیر را برآورد و با جای گذاری آن در رابطه ۲۷ مقدار تبخیر-تعرق واقعی را محاسبه نمود (سلیمان و گارگو، ۲۰۰۴): برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد محاسبات ماهانه به آلن و همکاران، ۲۰۰۲ مراجعه گردد.

$$E = (R_n - G)(1 - \Delta_T) \quad (25)$$

$$EF = \frac{E}{(R_n - G)} = 1 - \Delta_T = \frac{T_{max} - T_i}{T_{max} - T_a} \quad (26)$$

$$ET = \left( \frac{EF * 3600}{\lambda} \right) * 1000 \quad (27)$$

#### - مدل پنمن-مانتیت فائو

در معادله پنمن-مانتیت فائو، گیاه مرجع، چمنزار با شرایط خاص (آلبدوی ۰/۲۳، ارتفاع ۱۲ سانتی متر و مقاومت سطحی ۷۰ s/m) تعریف می شود. همچنین گیاه یونجه با خصوصیات چمن ارتفاع بیشتر از ۰/۳ متر و سایه اندازی کامل نیز گیاه مرجع نامیده می شود. برای محاسبه  $ET_0$  روابط متعددی ارائه شده که از میان آن ها معادله پنمن-مانتیس توسط فائو برای اکثر کشورهای با اقلیم خشک و نیمه خشک من جمله ایران پیشنهاد شده است. روش پنمن-مانتیت دارای نسخه های متعددی است که از بین آن ها روش فائو-پنمن-مانتیس به عنوان یکی از معتبرترین روش ها برای تخمین  $ET_0$  مورد استفاده متخصصان قرار گرفته است (اسدی و کرمی، ۲۰۱۶). فرم کلی معادله ترکیبی پنمن-مانتیت به صورت رابطه ۲۸ است:

$$ET_0 = \left[ \frac{\Delta(R_n - G) + K_{time} \rho_a C_p \left( \frac{e_s - e_a}{r_a} \right)}{\Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \right] / \lambda \quad (28)$$

که در آن  $ET_0$ : تبخیر و تعرق مرجع برحسب  $mmd^{-1}$  یا  $mmh^{-1}$ ،  $(e_s - e_a)$ : تفاوت فشار بخار آب هوا با حالت اشباع (کمبود فشار بخار هوا) برحسب  $kPa$ ،  $e_s$ : فشار بخار آب اشباع هوا برحسب  $kPa$ ،  $e_a$ : فشار بخار آب واقعی هوا برحسب  $kPa$ ،  $\rho_a$ : چگالی میانگین هوا در فشار ثابت برحسب  $kgm^{-3}$ ،  $C_p$ : گرمای ویژه هوا برحسب  $MJkg^{-1}c^{-1}$ ،  $\Delta$ : شیب معادله دمایی فشار بخار آب اشباع برحسب  $KPa^{\circ}c^{-1}$ ،  $\gamma$ : ثابت سایکرومتری برحسب  $KPa^{\circ}c^{-1}$ ،  $r_s$ : مقاومت سطحی (حجمی) برحسب  $sm^{-1}$ ،  $r_a$ : مقاومت آئرو دینامیکی برحسب  $sm^{-1}$ ،  $\lambda$ : گرمای نهان بخار آب برحسب  $mmd^{-1}$  معادل  $86400sd^{-1}$  و برای  $ET$  برحسب  $mmh^{-1}$  معادل  $3600sh^{-1}$  می باشد.

#### روش تورنت وایت

در این روش تبخیر و تعرق پتانسیل برای هر یک از ماه های سال محاسبه می شود. اساس این روش دمای متوسط ماهانه است که برای محاسبه آن به صورت زیر عمل می شود (اسدی و کرمی، ۱۳۹۹، ۱۶۴): الف - ابتدا نمایه حرارتی ( $im$ ) برای هر یک از ماه های سال از معادله زیر محاسبه می شود.

$$im = \left( \frac{T_m}{5} \right)^{1/51} \quad (29)$$

در این معادله  $im$  نمایه حرارتی همراه و  $T_m$  متوسط دمای هوا به درجه سانتی گراد در ماه مورد نظر می باشند. این کار برای ۱۲ ماه سال انجام می گردد. در صورتی که متوسط دما در یک ماه صفر یا منفی باشد  $im$  برای آن صفر در نظر گرفته می شود. ب- نمایه حرارتی سال ( $I$ ) از جمع نمایه حرارتی ماهانه طی سال به دست می آید:

$$I = \sum_{n=1}^{12} im \quad (30)$$

ج- با داشتن نمایه حرارتی سالانه ( $I$ ) ضریب  $a$  از معادله زیر محاسبه می شود:

$$a = (6.75 \times 10^{-7}) I^3 - (7.71 \times 10^5) I^2 + (1.792 \times 10^2) I + .492 \quad (31)$$

د- با توجه به اینکه تعداد روزهای همراه و تعداد ساعات روشنایی در ماه های مختلف سال متفاوت است، لذا جهت به دست آوردن PET از ضریب اصلاحی NM که مقادیر آن برای هر ماه از جداول ویژه به دست می آید استفاده می شود (اسدی و کرمی، ۱۳۹۹، ۱۶۴).

$$PET = 16Nm \left( \frac{10T_m}{I} \right)^a \quad (32)$$

ضرایب اصلاحی مورد استفاده در منطقه مورد مطالعه به شرح جدول (۲) می‌باشد.

جدول (۲): ضریب اصلاحی مربوط به روش تورنت وایت برای منطقه مورد مطالعه

Table (2): Correction coefficient related to the Torrent-White method for the study area

| عرض جغرافیای | زانیوه | فوریه | مارس | آوریل | می   | جون  | جولای | آگوست | سپتامبر | اکتبر | نوامبر | دسامبر |
|--------------|--------|-------|------|-------|------|------|-------|-------|---------|-------|--------|--------|
| ۲۰           | ۰/۹۵   | ۰/۹۰  | ۱/۰۳ | ۱/۰۵  | ۱/۱۳ | ۱/۱۱ | ۱/۱۴  | ۱/۱۱  | ۱/۰۲    | ۱/۰۰  | ۰/۹۳   | ۰/۹۴   |
| ۳۰           | ۰/۹۰   | ۰/۸۷  | ۱/۰۳ | ۱/۰۸  | ۱/۱۸ | ۱/۱۷ | ۱/۲۰  | ۱/۱۴  | ۱/۰۳    | ۰/۹۸  | ۰/۸۹   | ۰/۸۸   |
| ۳۵           | ۰/۸۷   | ۰/۸۵  | ۱/۰۳ | ۱/۰۹  | ۱/۲۱ | ۱/۲۱ | ۱/۲۳  | ۱/۱۶  | ۱/۰۳    | ۰/۹۷  | ۰/۸۶   | ۰/۸۵   |
| ۴۰           | ۰/۸۴   | ۰/۸۳  | ۱/۰۳ | ۱/۱۱  | ۱/۲۴ | ۱/۲۵ | ۱/۲۷  | ۱/۱۸  | ۱/۰۴    | ۰/۹۶  | ۰/۸۳   | ۰/۸۱   |

#### شاخص های شوری خاک

استفاده از نسبت های باندی و انجام عملیات های جمع و یا تفریق باندی از جمله روش های پردازشی بر روی تصاویر ماهواره ای هستند که می توانند سبب بارزسازی تصاویر و تفکیک بهتر عوارض مورد بررسی بر روی تصویر شوند. بنابراین در این پژوهش از ۲ شاخص شوری خاک NDSI (Normalized Difference Salinity Index) و  $SI_1$  (Salinity Index) جهت پردازش تصویر ماهواره ای استفاده شد (اردکانی، همکاران، ۱۳۹۴؛ سلیمی و همکاران، ۱۳۹۸).

$$NDSI = \frac{RED - NIR}{RED + NIR} \quad (33)$$

$$SI_1 = \sqrt{G + R} \quad (34)$$

#### ارزیابی عملکرد مدل های مورد استفاده

برای ارزیابی عملکرد شبکه های در نظر گرفته شده از معیارهای ضریب تعیین، مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین مربعات خطا (روابط ۳۵ تا ۳۷) استفاده گردید.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_{act} - y_{est})^2}{\sum y_{act}^2 - \sum n y_{act}^2} \quad (35)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=0}^p \sum_{i=0}^n (y_{act_{ij}} - y_{est_{ij}})^2}{NP}} \quad (36)$$

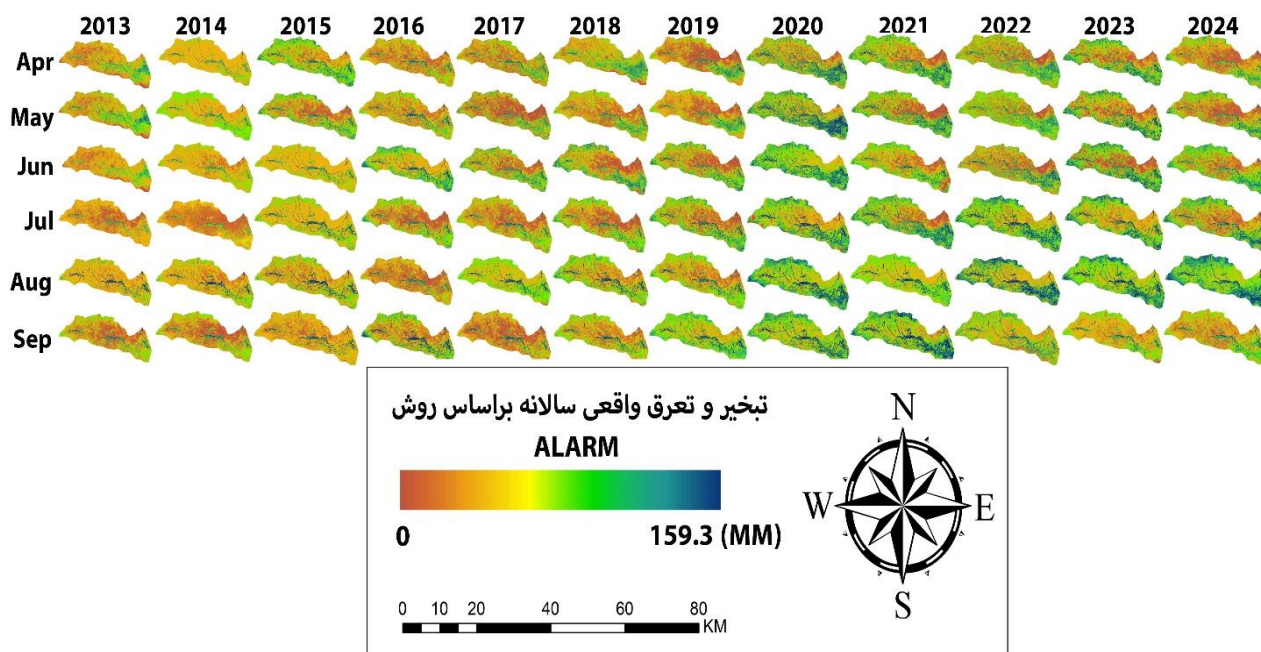
$$MSE = \frac{\sum (\hat{y}_t - y_t)^2}{N} \quad (37)$$

که در آن ها،  $y_{act}$ : مقادیر واقعی،  $\bar{y}_{est}$ : میانگین مقادیر واقعی،  $y_{ast}$ : مقادیر برآورد شده،  $\bar{y}_{est}$ : میانگین مقادیر برآورد شده،  $y_{act_{ij}}$ : مقادیر مشاهده شده برای نمونه  $i$  از تبخیر و تعرق  $j$ ،  $y_{est_{ij}}$ : مقادیر پیش بینی شده برای نمونه  $i$  از تبخیر و تعرق  $j$ ،  $n$ : تعداد داده ها،  $P$ : تعداد متغیرهای خروجی و  $N$ : تعداد نمونه ها در لایه خروجی می باشد (اسدی و کامران، ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳).

#### بحث و نتایج

بعد از تهیه و آماده سازی تصاویر مورد نظر ابتدا مقادیر تبخیر و تعرق واقعی برای گیاه مرجع با استفاده از روش ALARM محاسبه گردید (شکل ۲) و به عنوان داده های پایه تبخیر و تعرق مرجع برای پیش بینی دوره آینده اهر چای بر اساس سناریوهای SSP1.2.6 و SSP3.7.0 و SSP5.8.5 مورد استفاده گرفت (جدول ۳). بر اساس از نتایج حاصل از جدول ۳ (با توجه به سردسیر بودن منطقه و لذا پایین بودن تبخیر و تعرق و همچنین نیاز به تصاویر بدون ابر برای ارزیابی تبخیر و تعرق با روش ALARM فقط تصاویر شش ماهه اول سال مورد بررسی قرار گرفت) بیشترین میزان تبخیر و تعرق واقعی برای گیاه مرجع مربوط به ماه جولای سال ۲۰۲۲ با مقدار عددی ۱۵۹/۳ و کمترین میزان آن مربوط به ماه آوریل سال ۲۰۱۹ با مقدار عددی ۶۹/۷ میلی متر می باشد. همچنین در روش های پنمن مانیت و هارگریوز سامانی نیز به ترتیب بیشترین میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع مربوط به ماه جولای سال ۲۰۲۲ با مقادیر عددی ۱۶۰/۹ و ۱۶۲/۱ و کمترین میزان آن مربوط به ماه آوریل سال ۲۰۱۹ با مقدار عددی ۷۱/۳ و ماه آوریل سال ۲۰۲۰ با مقدار عددی ۷۱/۲ میلی متر

می‌باشد. همچنین بر اساس شکل ۲ مناطق جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه با توجه به پوشش گیاهی زیاد و در نتیجه دارا بودن رطوبت و شاخه‌های رودخانه‌ای زیاد دارای میزان تبخیر و تعرق بالاتری نسبت به سایر مناطق می‌باشد.



شکل (۲): پراکنش تبخیر و تعرق واقعی گیاه مرجع بر اساس ALARM

Figure (2): Actual evapotranspiration distribution of the reference plant based on ALARM

جدول (۳): مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع (بر حسب میلی‌متر) بر اساس روش‌های پنمن مانیتیت (P)، هارگریوز سامانی (HS) و

Table (3): Reference plant evapotranspiration values (Millimeters) based on Penman-Monteith (P), Hargreaves-Samani (HS) and ALARM (A) methods

| سپتامبر |       |       | اگوست |       |       | جولای |       |       | ژوئن  |       |       | می    |       |       | آوریل |      |      | سال     |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|---------|
| HS      | P     | A     | HS    | P     | A     | HS    | P     | A     | HS    | P     | A     | HS    | P     | A     | HS    | P    | A    |         |
| ۱۲۶/۴   | ۱۱۹/۸ | ۱۲۲/۳ | ۱۴۳/۶ | ۱۴۳/۷ | ۱۴۴/۱ | ۱۵۶/۱ | ۱۵۴/۳ | ۱۵۷/۵ | ۱۳۹/۸ | ۱۳۷/۲ | ۱۳۸/۶ | ۱۰۷/۵ | ۱۰۴/۳ | ۱۰۶/۸ | ۷۸/۷  | ۷۹/۶ | ۸۰/۱ | ۲۰۱۳    |
| ۱۲۸/۱   | ۱۳۲   | ۱۳۱/۹ | ۱۴۵/۷ | ۱۴۷/۶ | ۱۴۶/۲ | ۱۵۴/۴ | ۱۵۳/۹ | ۱۵۷/۸ | ۱۴۳/۲ | ۱۴۶/۵ | ۱۴۵/۱ | ۱۰۳/۸ | ۱۱۲/۴ | ۱۰۸/۶ | ۷۴/۳  | ۷۶/۸ | ۷۸/۴ | ۲۰۱۴    |
| ۱۱۴/۹   | ۱۱۷/۷ | ۱۱۸/۹ | ۱۴۳/۵ | ۱۴۵/۷ | ۱۴۵/۱ | ۱۴۲/۵ | ۱۴۴/۵ | ۱۴۴/۹ | ۱۳۲/۷ | ۱۳۰/۹ | ۱۳۱/۴ | ۹۸/۸  | ۹۵/۱  | ۹۶/۷  | ۷۵/۱  | ۷۵/۵ | ۷۶/۳ | ۲۰۱۵    |
| ۱۱۹/۹   | ۱۱۳/۳ | ۱۱۴/۴ | ۱۵۱/۱ | ۱۴۸/۵ | ۱۴۹/۴ | ۱۴۸/۹ | ۱۴۶/۷ | ۱۴۸/۱ | ۱۴۰/۹ | ۱۴۳/۲ | ۱۴۲/۹ | ۱۰۳/۲ | ۱۰۰/۳ | ۱۰۱/۴ | ۷۴/۴  | ۷۶/۴ | ۷۶/۱ | ۲۰۱۶    |
| ۱۲۶/۶   | ۱۲۴/۹ | ۱۲۵/۷ | ۱۴۷/۸ | ۱۴۴/۳ | ۱۴۳/۷ | ۱۴۵/۸ | ۱۴۹/۴ | ۱۵۰   | ۱۳۹/۶ | ۱۳۳/۹ | ۱۳۸/۷ | ۹۹/۶  | ۹۸/۲  | ۹۹/۱  | ۷۲/۳  | ۷۳/۲ | ۷۱/۹ | ۲۰۱۷    |
| ۱۲۹/۲   | ۱۲۷/۶ | ۱۲۸/۹ | ۱۴۳/۲ | ۱۴۵/۶ | ۱۴۶/۳ | ۱۴۶/۳ | ۱۴۹/۵ | ۱۴۸/۴ | ۱۴۷/۷ | ۱۴۹/۳ | ۱۵۱/۶ | ۹۲/۴  | ۹۵/۵  | ۹۶/۱  | ۷۳    | ۷۵/۸ | ۷۵/۲ | ۲۰۱۸    |
| ۱۲۴/۲   | ۱۲۸/۸ | ۱۲۹/۶ | ۱۴۸/۴ | ۱۴۷/۵ | ۱۴۹   | ۱۵۶/۳ | ۱۵۰/۷ | ۱۵۱/۹ | ۱۴۴/۸ | ۱۴۶/۹ | ۱۴۷/۴ | ۱۰۶/۲ | ۱۰۵/۲ | ۱۰۶/۶ | ۷۲/۹  | ۷۱/۳ | ۶۹/۷ | ۲۰۱۹    |
| ۱۱۳/۳   | ۱۲۹/۳ | ۱۳۰/۴ | ۱۴۲/۱ | ۱۴۴/۹ | ۱۴۵/۵ | ۱۴۲/۹ | ۱۴۱/۱ | ۱۴۰/۷ | ۱۴۷   | ۱۴۹/۱ | ۱۵۰   | ۸۹/۶  | ۸۶/۵  | ۸۸/۸  | ۷۱/۲  | ۷۶/۱ | ۷۴/۶ | ۲۰۲۰    |
| ۱۲۶/۱   | ۱۳۵/۶ | ۱۳۶/۲ | ۱۴۵/۳ | ۱۴۲/۸ | ۱۴۳/۷ | ۱۵۲/۹ | ۱۵۲/۴ | ۱۵۱/۶ | ۱۴۱/۷ | ۱۳۹/۹ | ۱۳۸/۹ | ۱۰۵/۳ | ۹۶/۱  | ۹۸/۹  | ۷۳/۵  | ۷۲/۶ | ۷۴/۴ | ۲۰۲۱    |
| ۱۴۹/۷   | ۱۴۵/۱ | ۱۴۴/۸ | ۱۴۹/۴ | ۱۴۷/۳ | ۱۴۶/۶ | ۱۶۲/۱ | ۱۶۰/۹ | ۱۵۹/۳ | ۱۳۳   | ۱۳۸/۵ | ۱۳۶/۹ | ۹۸    | ۱۰۰/۸ | ۱۰۰/۵ | ۷۳/۲  | ۷۴/۴ | ۷۵/۱ | ۲۰۲۲    |
| ۱۴۶/۱   | ۱۴۳/۴ | ۱۴۴   | ۱۵۲/۴ | ۱۵۰/۵ | ۱۵۰/۱ | ۱۵۸/۵ | ۱۵۶/۵ | ۱۵۷/۱ | ۱۴۰/۷ | ۱۴۵/۲ | ۱۴۵/۸ | ۹۹/۱  | ۹۹/۵  | ۱۰۰   | ۷۴/۵  | ۷۵/۳ | ۷۶   | ۲۰۲۳    |
| ۱۴۷/۶   | ۱۴۰/۴ | ۱۴۲/۸ | ۱۵۴/۳ | ۱۵۲/۱ | ۱۵۷/۳ | ۱۴۸/۶ | ۱۵۱   | ۱۵۲/۴ | ۱۵۸/۹ | ۱۵۰/۵ | ۱۵۳/۳ | ۱۰۳/۷ | ۱۰۵/۷ | ۱۰۶/۱ | ۷۹/۴  | ۷۸/۹ | ۷۹/۸ | ۲۰۲۴    |
| ۱۲۹/۳   | ۱۲۹/۸ | ۱۳۰/۸ | ۱۴۷/۲ | ۱۴۶/۷ | ۱۴۶/۶ | ۱۵۱/۳ | ۱۵۰/۹ | ۱۵۱/۶ | ۱۴۲/۵ | ۱۴۲/۶ | ۱۴۳/۴ | ۱۰۰/۶ | ۱۰۰   | ۱۰۰/۸ | ۷۴/۳  | ۷۵/۵ | ۷۵/۶ | میانگین |

در ادامه بعد از محاسبه میانگین سالانه مقادیر تبخیر و تعرق نتایج حاصل از روش ALARM با روش‌های پنمن مانیتیت فائو و هارگریوز سامانی مورد مقایسه قرار گرفتند. بر این اساس در مجموع روش ALARM بیشترین میزان همبستگی ( $R^2 = 0.915$ ) و کمترین میزان خطا ( $RMSE = 1/493$  و  $MAD = 1/232$  میلی‌متر) را با روش پنمن مانیتیت دارا می‌باشد (جدول ۴).

جدول (۴): مقایسه میزان همبستگی  $R^2$  و خطا  $RMSE$  مقادیر تبخیر و تعرق واقعی گیاه مرجع بر اساس روش‌های موردبررسی

Table (4): Comparison of  $R^2$  correlation and RMSE error of actual evapotranspiration values of the reference plant based on the methods under study

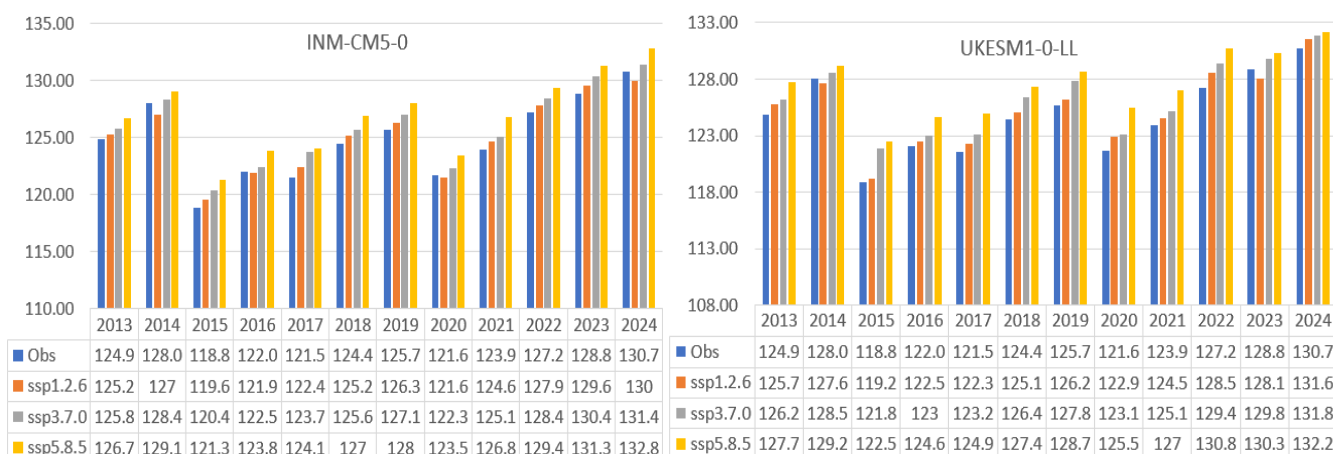
| روش هارگریوز سامانی |        |       | روش پنمن مانیتث |        |       | سال        |
|---------------------|--------|-------|-----------------|--------|-------|------------|
| $MAD$               | $RMSE$ | $R^2$ | $MAD$           | $RMSE$ | $R^2$ | اعتبارسنجی |
| ۱/۸۵۸               | ۲/۱۷۴  | ۰/۶۱۶ | ۱/۰۲۵           | ۱/۱۳۴  | ۰/۸۵۹ | آوریل      |
| ۲/۲۵۰               | ۲/۸۸۲  | ۰/۷۲۹ | ۱/۵۱۷           | ۱/۸۵۳  | ۰/۹۴۴ | می         |
| ۲/۸۵۰               | ۳/۲۰۱  | ۰/۷۹۱ | ۱/۵۰۸           | ۱/۹۴۵  | ۰/۹۲۲ | ژوئن       |
| ۲/۴۳۳               | ۲/۷۱۳  | ۰/۷۹۶ | ۱/۳۸۳           | ۱/۷۳۸  | ۰/۹۱۶ | جولای      |
| ۲/۲۰۰               | ۲/۵۴۳  | ۰/۶۰۵ | ۰/۸۹۲           | ۱/۰۰۹  | ۰/۸۵۷ | آگوست      |
| ۵/۲۵۰               | ۶/۷۹۱  | ۰/۶۷۹ | ۱/۰۶۷           | ۱/۲۸۰  | ۰/۹۹۴ | سپتامبر    |
| ۲/۸۰۷               | ۳/۳۸۴  | ۰/۷۰۳ | ۱/۲۳۲           | ۱/۴۹۳  | ۰/۹۱۵ | میانگین    |

بعد از به دست آوردن مقادیر تبخیر و تعرق بر اساس روش ALARM ابتدا برای پیش‌بینی آن برای دوره آینده، مدل‌های UKESM1-0-LL، ACCESS-CM2 و BCC-ESM1، CanESM5، INM-CM5-0، CMIP6 که بیشترین میزان همبستگی (به ترتیب ۰/۹۸۱، ۰/۹۸۷، ۰/۹۸۹، ۰/۹۷۶ و ۰/۹۹۳) را بین سایر مدل‌ها داشتند، انتخاب گردیدند. نحوه انتخاب مدل‌ها به این گونه بود که ابتدا از بین تمامی مدل‌های موجود ۳۵ مدل موجود در گزارش انتخاب و ضریب تعیین ( $r^2$ ) را با پارامتر تبخیر و تعرق در منطقه اهر مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس بین آن‌ها ۵ مدل از گزارش فاز ششم که بیشترین ضریب تعیین را داشتند انتخاب شده و مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۵). در ادامه به شبیه‌سازی و مقایسه نتایج حاصل از داده‌های مشاهداتی تبخیر و تعرق با سناریوهای ssp1.2.6، ssp3.7.0 و ssp5.8.5 پرداخته شد که نتایج حاصل از آن‌ها در اشکال ۳، ۴ و ۵ ارائه گردیده است.

جدول (۵): انتخاب برترین مدل از بین مدل‌های دارای بیشترین ضریب تعیین ( $r^2$ ) با تبخیر و تعرق حوضه آبریز اهر چای

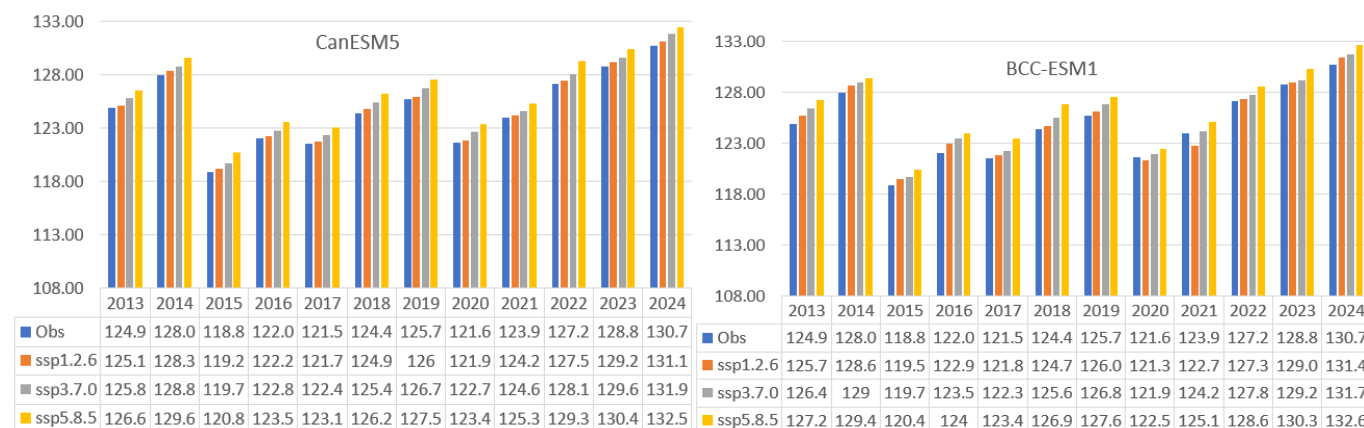
Table (5): Selection of the best model among the models with the highest coefficient of determination ( $R^2$ ) with evapotranspiration of the Ahar Chay watershed

| $R^2$ | مدل            | ردیف | $R^2$ | مدل             | ردیف | $R^2$ | مدل             | ردیف | $R^2$ | مدل         | ردیف |
|-------|----------------|------|-------|-----------------|------|-------|-----------------|------|-------|-------------|------|
| ۰/۸۵۴ | AWI-ESM-1-1-LR | ۲۸   | ۰/۹۳۸ | INM-CM4-8       | ۱۹   | ۰/۹۴۱ | MIROC6          | ۱۰   | ۰/۹۸۱ | UKESM1-0-LL | ۱    |
| ۰/۷۲۲ | CMCC-CM2-SR5   | ۲۹   | ۰/۸۷۱ | HadGEM3-GC31-LL | ۲۰   | ۰/۹۵۳ | AWI-CM-1-1-MR   | ۱۱   | ۰/۹۲۴ | TaiESM1     | ۲    |
| ۰/۷۰۸ | CMCC-CM2-HR4   | ۳۰   | ۰/۸۳۹ | HadGEM3-GC31-MM | ۲۱   | ۰/۹۴۷ | KIOST-ESM       | ۱۲   | ۰/۸۵۹ | NorCPM1     | ۳    |
| ۰/۸۶۸ | CESM2          | ۳۱   | ۰/۷۳۸ | FGOALS-f3-L     | ۲۲   | ۰/۹۵۱ | KACE-1-0-G      | ۱۳   | ۰/۸۶۶ | NorESM2-LM  | ۴    |
| ۰/۸۸۸ | CanESM5-1      | ۳۲   | ۰/۶۹۷ | CNRM-CM6-1      | ۲۳   | ۰/۹۳۲ | FGOALS-g3       | ۱۴   | ۰/۷۸۰ | NESM3       | ۵    |
| ۰/۹۳۲ | CanESM5-CanOE  | ۳۳   | ۰/۸۹۱ | ACCESS-ESM1-5   | ۲۴   | ۰/۹۵۸ | IPSL-CM5A2-INCA | ۱۵   | ۰/۹۳۵ | MRI-ESM2-0  | ۶    |
| ۰/۸۶۹ | UKESM1-0-LL    | ۳۴   | ۰/۹۹۳ | ACCESS-CM2      | ۲۵   | ۰/۹۷۶ | BCC-ESM1        | ۱۶   | ۰/۹۳۶ | MIROC-ES2L  | ۷    |
| ۰/۹۳۷ | CESM1-WACCM-SE | ۳۵   | ۰/۸۹۳ | CMCC-ESM2       | ۲۶   | ۰/۸۴۲ | BCC-CSM2-MR     | ۱۷   | ۰/۹۸۹ | CanESM5     | ۸    |
|       |                |      | ۰/۹۸۷ | INM-CM5-0       | ۲۷   | ۰/۹۴۳ | EC-Earth3       | ۱۸   | ۰/۹۱۱ | CAMS-CSM1-0 | ۹    |



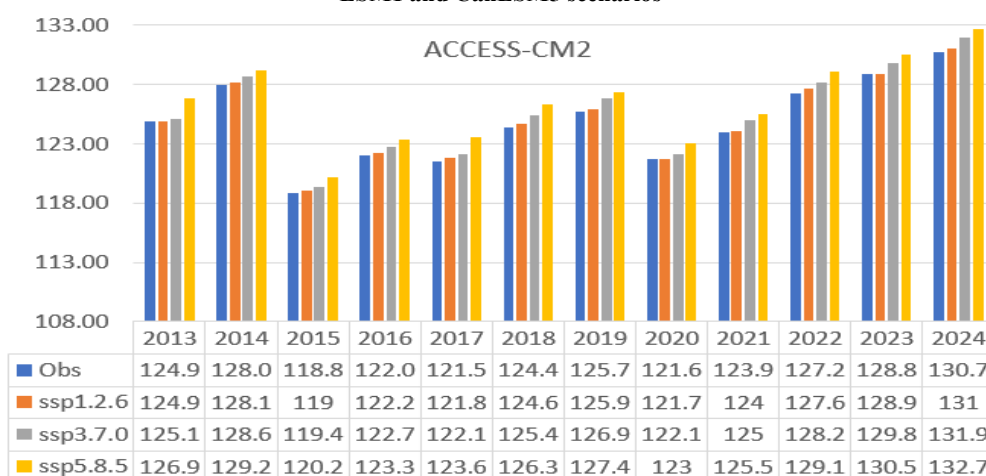
شکل (۳): میانگین متغیر تبخیر و تعرق حوضه آبریز اهر چای بر اساس دوره مشاهده‌ای و پیش‌بینی‌شده بر اساس سناریوهای INM-CM5-0 و UKESM1-0-LL

Figure (3): Average evapotranspiration variable of Ahar Chay catchment based on the observed and predicted period based on UKESM1-0-LL and INM-CM5-0 scenarios



شکل (۴): میانگین متغیر تبخیر و تعرق حوضه آبریز اهر چای بر اساس دوره مشاهده‌ای و پیش‌بینی‌شده بر اساس سناریوهای BCC-ESM1 و CanESM5

Figure (4): Average evapotranspiration variable of Ahar Chay catchment based on the observed period and predicted based on BCC-ESM1 and CanESM5 scenarios



شکل (۵): میانگین متغیر تبخیر و تعرق حوضه آبریز اهر چای بر اساس دوره مشاهده‌ای و پیش‌بینی‌شده بر اساس سناریوهای ACCESS-CM2

Figure (5): Average evapotranspiration variable of the Ahar Chay watershed based on the observed and predicted period based on ACCESS-CM2 scenarios

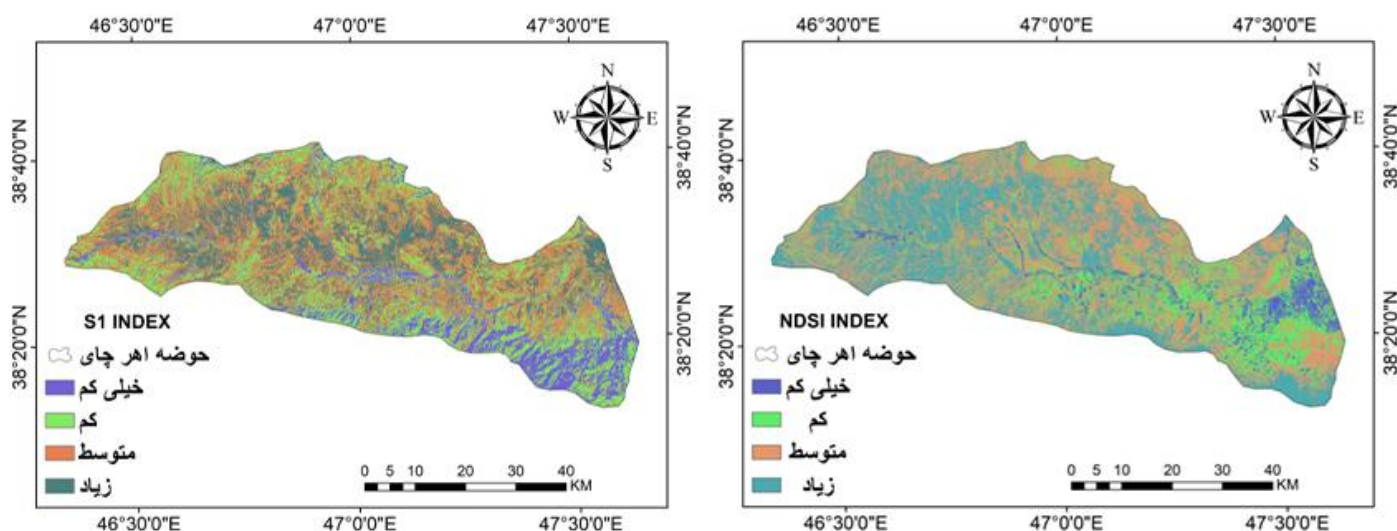
به منظور ارزیابی دقت شبیه‌سازی‌ها با استفاده از مدل‌های مذکور در جدول (۶) از شاخص‌های RMSE و MSE استفاده گردید. همان‌طور که مشاهده می‌گردد مقادیر RMSE و MSE مربوط به تبخیر و تعرق در تمامی مدل‌های مورد بررسی زیر ۲/۸۶۷ بوده و کمترین میزان RMSE و MSE مربوط به مدل ACCESS-CM2 به ترتیب با مقادیر عددی ۰/۱۹۸ و ۰/۱۶۵ در سناریوی SSP1.2.6 می‌باشد که نشان از دقت بالای شبیه‌سازی است. همچنین قابل ذکر است که مدل‌های مورد بررسی در ارزیابی پارامتر تبخیر و تعرق در سناریوی SSP5.8.5 زیاد خوب عمل نکرده و مقادیر RMSE و MSE در تمامی مدل‌ها بالای ۱ بوده که این میزان در SSP5.8.5 در مدل UKESM1-0-LL به ترتیب با مقادیر عددی ۲/۸۶۷ و ۲/۷۳۵ دارای بالاترین میزان تبخیر و تعرق هستند.

جدول (۶): مقایسه مقادیر RMSE و MSE برای مقادیر میانگین تبخیر و تعرق واقعی بر اساس سناریوهای مورد بررسی

Table (6): Comparison of RMSE and MSE values for the actual mean evapotranspiration values based on the scenarios studied

| MSE      |          |          | RMSE     |          |          | مدل         | CMIP6 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------|-------|
| ssp5.8.5 | ssp3.7.0 | ssp1.2.6 | ssp5.8.5 | ssp3.7.0 | ssp1.2.6 | سناریو      |       |
| ۲/۷۳۵    | ۱/۵۳۴    | ۰/۷۲۰    | ۲/۸۶۷    | ۱/۶۶۴    | ۰/۷۷۹    | UKESM1-0-LL |       |
| ۲/۱۵۱    | ۱/۱۰۱    | ۰/۶۱۴    | ۲/۱۹۹    | ۱/۲۱۸    | ۰/۶۶۷    | INM-CM5-0   |       |
| ۱/۶۸۰    | ۰/۸۵۶    | ۰/۵۵۹    | ۱/۷۴۳    | ۰/۹۴۹    | ۰/۶۳۵    | BCC-ESM1    |       |
| ۱/۶۸۹    | ۰/۸۸۰    | ۰/۲۸۲    | ۱/۶۹۹    | ۰/۸۹۰    | ۰/۲۹۱    | CanESM5     |       |
| ۱/۶۴۳    | ۰/۷۸۰    | ۰/۱۶۵    | ۱/۶۷۰    | ۰/۸۳۳    | ۰/۱۹۸    | ACCESS-CM2  |       |

در نهایت با استفاده از شاخص‌های NDSI و  $SI_1$  به ارزیابی تغییرات مساحت شوری خاک تحت تاثیر تغییرات تبخیر و تعرق واقعی پرداخته شد (شکل ۶). لازم به ذکر است با توجه به محدودیت صفحات تصاویر شاخص‌ها فقط در سال ۲۰۲۴ برای شاخص‌های NDSI و  $SI_1$  اضافه گردید. بر این اساس همان‌گونه که در تصاویر نیز مشخص است بر اساس شاخص‌های مذکور میزان شوری خاک در مناطق کم عمقی که تبخیر و تعرق در آن منطبق بیشتر بوده افزایش یافته است (شکل ۶).



شکل (۶): شاخص‌های NDSI و  $SI_1$  در سال ۲۰۲۴

Figure (6): NDSI and  $SI_1$  indices in 2024

همچنین در بررسی‌های آماری نیز مشخص گردید (جدول ۷) که میزان شوری خیلی زیاد خاک بر اساس شاخص NDSI از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۴ حدود ۶۶۱۳/۸۱ هکتار افزوده شده است به عبارتی سطح اراضی شور از ۱۵۰۵۹۵/۸۰ هکتار به ۱۵۷۲۰۹/۶۱ هکتار رسیده و بر اساس شاخص  $SI_1$  از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۴ حدود ۶۲۹۶/۸۱ هکتار افزوده شده است به عبارتی سطح اراضی شور از ۵۱۰۸۹/۶۹ هکتار به ۵۷۳۸۶/۳۵ که با روند افزایشی تبخیر و تعرق در سناریوهای اقلیمی نیز همبستگی ۰/۹۸۷ دارد.

جدول (۷): متوسط سطح اراضی شور منطقه مورد مطالعه از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۴ بر اساس شاخص‌های NDSI و  $SI_1$  (برحسب هکتار)  
 Table (7): Average area of saline lands from 2013 to 2024 in the study area based on the NDSI and  $SI_1$  indices (Hectares)

| سال  | شاخص NDSI | شاخص $SI_1$ | سال | شاخص NDSI | شاخص $SI_1$ | سال  | شاخص NDSI | شاخص $SI_1$ |
|------|-----------|-------------|-----|-----------|-------------|------|-----------|-------------|
| ۲۰۱۳ | الف       | ۲۰۳۰۹/۵۶    | الف | ۳۹۹۱۳/۵۱  | الف         | ۲۰۱۷ | الف       | ۲۸۲۸۷/۴۳    |
|      | ب         | ۱۱۷۳۶/۳۹    | ب   | ۹۶۲۶۰/۱۳  | ب           |      | ب         | ۱۵۶۶۸/۲۸    |
|      | ج         | ۹۷۵۲۳/۳۱    | ج   | ۱۰۲۸۹۸/۶۷ | ج           |      | ج         | ۹۴۷۲۵/۱۲    |
|      | د         | ۱۵۰۵۹۵/۸۰   | د   | ۵۱۰۸۹/۶۹  | د           |      | د         | ۱۵۱۴۸۶/۷۶   |
| ۲۰۱۴ | الف       | ۱۴۶۵۰/۳۹    | الف | ۲۱۹۵۷/۰۸  | الف         | ۲۰۱۸ | الف       | ۲۸۹۲۹/۳۵    |
|      | ب         | ۱۳۹۸۳/۰۹    | ب   | ۱۳۴۱۴۷    | ب           |      | ب         | ۲۵۸۷۱/۸۴    |
|      | ج         | ۱۱۰۸۴۳/۱۲   | ج   | ۸۱۶۶۷/۵۱  | ج           |      | ج         | ۸۳۲۹۱/۷۵    |
|      | د         | ۱۵۰۶۸۷/۹۱   | د   | ۵۲۳۹۰/۹۶  | د           |      | د         | ۱۵۲۰۸۳/۷۹   |
| ۲۰۱۵ | الف       | ۱۸۹۱۹/۹۴    | الف | ۵۰۵۵۷/۱۷  | الف         | ۲۰۱۹ | الف       | ۳۲۰۶۵/۳۴    |
|      | ب         | ۲۸۲۳۸/۵۲    | ب   | ۸۸۷۴۵/۳۸  | ب           |      | ب         | ۲۵۲۴۳/۸۱    |
|      | ج         | ۹۲۲۶۹/۷۷    | ج   | ۹۷۷۸۹/۵۹  | ج           |      | ج         | ۷۹۹۷۵/۰۱    |
|      | د         | ۱۵۰۷۳۹/۶۷   | د   | ۵۳۰۶۹/۹۳  | د           |      | د         | ۱۵۲۸۸۲/۳۲   |
| ۲۰۱۶ | الف       | ۱۸۲۲۶/۱۲    | الف | ۳۶۹۶۱/۲۳  | الف         | ۲۰۲۰ | الف       | ۳۲۸۲۰/۵۸    |
|      | ب         | ۲۷۱۲۸/۲۸    | ب   | ۸۲۷۶۶/۱۷  | ب           |      | ب         | ۲۵۰۲۵/۷۴    |
|      | ج         | ۹۴۰۷۰/۱۹    | ج   | ۲۱۰۴۴/۶۵  | ج           |      | ج         | ۷۸۴۸۶/۵۳    |
|      | د         | ۱۵۰۷۴۲/۴۲   | د   | ۵۳۰۹۱/۴۷  | د           |      | د         | ۱۵۳۸۳۱/۵۹   |
| ۲۰۲۱ | الف       | ۳۲۷۷۰/۶۴    | الف | ۱۱۱۶۵۸/۷۷ | الف         | ۲۰۲۱ | الف       | ۲۸۲۸۷/۴۳    |
|      | ب         | ۲۵۶۴۶/۰۳    | ب   | ۱۲۰۸۴۷/۵۱ | ب           |      | ب         | ۱۵۶۶۸/۲۸    |
|      | ج         | ۷۷۶۶۰/۰۱    | ج   | ۳۹۹۲/۳۸   | ج           |      | ج         | ۹۴۷۲۵/۱۲    |
|      | د         | ۱۵۴۰۸۸/۹۸   | د   | ۵۳۶۷۰/۴۴  | د           |      | د         | ۱۵۱۴۸۶/۷۶   |
| ۲۰۲۲ | الف       | ۳۲۷۷۹/۹۷    | الف | ۴۱۶۳۹/۵۹  | الف         | ۲۰۲۲ | الف       | ۲۸۹۲۹/۳۵    |
|      | ب         | ۲۴۷۴۴/۴۱    | ب   | ۹۷۳۱۴/۶۸  | ب           |      | ب         | ۲۵۸۷۱/۸۴    |
|      | ج         | ۷۷۴۷۵/۴۶    | ج   | ۹۷۱۵۳/۶۵  | ج           |      | ج         | ۸۳۲۹۱/۷۵    |
|      | د         | ۱۵۵۱۶۵/۹۵   | د   | ۵۴۰۵۶/۲۵  | د           |      | د         | ۱۵۲۰۸۳/۷۹   |
| ۲۰۲۳ | الف       | ۳۵۸۸۶/۱۰    | الف | ۳۲۹۳۹/۹۸  | الف         | ۲۰۲۳ | الف       | ۳۲۰۶۵/۳۴    |
|      | ب         | ۲۵۴۴۷/۸۶    | ب   | ۱۰۵۲۷۷/۱۱ | ب           |      | ب         | ۲۵۲۴۳/۸۱    |
|      | ج         | ۷۲۳۳۳/۲۶    | ج   | ۹۷۵۶۱/۰۴  | ج           |      | ج         | ۷۹۹۷۵/۰۱    |
|      | د         | ۱۵۶۴۹۸/۷۳   | د   | ۵۴۳۸۶/۳۹  | د           |      | د         | ۱۵۲۸۸۲/۳۲   |
| ۲۰۲۴ | الف       | ۴۰۲۵۹/۳۸    | الف | ۳۴۳۴۵/۹۸  | الف         | ۲۰۲۴ | الف       | ۳۲۸۲۰/۵۸    |
|      | ب         | ۳۵۴۲۴/۸۲    | ب   | ۹۱۶۷۷/۵۷  | ب           |      | ب         | ۲۵۰۲۵/۷۴    |
|      | ج         | ۵۷۲۷۱/۹۳    | ج   | ۱۰۸۷۸۹/۳۶ | ج           |      | ج         | ۷۸۴۸۶/۵۳    |
|      | د         | ۱۵۷۲۰۹/۶۱   | د   | ۵۵۳۴۹/۹۸  | د           |      | د         | ۱۵۳۸۳۱/۵۹   |

\*الف(کم)، ب(متوسط)، ج(زیاد)، د(خیلی زیاد)

## نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت برآورد تبخیر و تعرق در مطالعات کشاورزی و مدیریت منابع آب به‌ویژه در شرایط تغییر اقلیمی، در این پژوهش با استفاده روش ALARM (داده‌های پایه) و مدل‌های ACCESS-CM2، BCC-ESM1، CanESM5، INM-CM5-0، UKESM1-0-LL و مدل‌های CMIP6 به پیش‌بینی مقدار تبخیر و تعرق در حوضه آبریز اهر جای پرداخته شد. بر اساس از نتایج به‌دست‌آمده بیشترین میزان تبخیر و تعرق واقعی برای گیاه مرجع مربوط به ماه جولای سال ۲۰۲۲ با مقدار عددی ۱۵۹/۳ و کمترین میزان آن مربوط به ماه آوریل سال ۲۰۱۹ با مقدار عددی ۶۹/۷ میلی‌متر می‌باشد. همچنین در روش‌های پنمن مانتیث و هارگریوز سامانی نیز به ترتیب بیشترین میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع مربوط به ماه جولای سال ۲۰۲۲ با مقادیر عددی ۱۶۰/۹ و ۱۶۲/۱ و کمترین میزان آن مربوط به ماه آوریل سال ۲۰۱۹ با مقدار عددی ۷۱/۳ و ماه آوریل سال ۲۰۲۰ با مقدار عددی ۷۱/۲ میلی‌متر می‌باشد. همچنین مناطق جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه با توجه به پوشش گیاهی زیاد و در نتیجه دارا بودن رطوبت و شاخه‌های رودخانه‌ای زیاد دارای میزان تبخیر و تعرق بالاتری نسبت به سایر مناطق می‌باشد. همچنین نتایج نشان دهنده این بود که روش ALARM بیشترین میزان همبستگی ( $R^2$  ۰/۹۱۵) و کمترین میزان خطا ( $RMSE$  ۱/۴۹۳ و  $MAD$  ۱/۲۳۲ میلی‌متر) را با روش پنمن مانتیث دارا می‌باشد. مقادیر  $RMSE$  و  $MSE$  مربوط به تبخیر و تعرق در تمامی مدل‌های تغییر اقلیمی مورد بررسی زیر ۲/۸۶۷ بوده و کمترین میزان  $RMSE$  و  $MSE$  مربوط به مدل ACCESS-CM2 به ترتیب با مقادیر عددی ۰/۱۹۸ و ۰/۱۶۵ در سناریوی SSP1.2.6 می‌باشد که نشان از دقت بالای شبیه‌سازی است. همچنین قابل ذکر است که مدل‌های مورد بررسی در ارزیابی پارامتر تبخیر و تعرق در سناریوی SSP5.8.5 زیاد خوب عمل نکرده و مقادیر  $RMSE$  و  $MSE$  در تمامی مدل‌ها بالای ۱ بوده که این میزان در SSP5.8.5 در مدل UKESM1-0-LL به ترتیب با مقادیر عددی ۲/۸۶۷ و ۲/۷۳۵ دارای بالاترین میزان تبخیر و تعرق هستند. نتایج پژوهش حاضر با پژوهش‌های زیر تطابق بالایی دارد: لافونته<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی تبخیر از سطح دریاچه‌های جهان تحت تاثیر تغییر اقلیم پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که تا پایان قرن بیست و یکم (۲۰۷۰-)

<sup>1</sup>. La Fuente

(۲۰۹۹)، نرخ تبخیر سالانه دریاچه‌ها در سطح جهانی بین ۱۰ تا ۲۷ درصد بر اساس مسیرهای غلظت نمایندگی ۲.۶-۸.۵ (RCPs) افزایش خواهد یافت. یحیی<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۴) در آفریقا با استفاده از چند مجموعه مدل CMIP6 به برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل پرداختند. نتایج نشان داد که PET آینده در کل آفریقا ۰/۵ میلی‌متر در ساعت در SSP1-۲.۶ و SSP2-۴.۵ و ۰/۷ میلی‌متر در ساعت در SSP2-۸.۵ برای سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰، افزایش یابد. کریمی و همکاران (۱۴۰۲) در ایستگاه خرم آباد به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق مرجع بر اساس سناریوهای گزارش ششم تغییر اقلیم پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که به‌طور متوسط دمای حداکثر در ایستگاه خرم‌آباد تا سال ۲۱۰۰ میلادی بین ۰/۲۶ تا ۶/۳ درجه سانتی‌گراد افزایش و دمای حداقل نیز بین ۰/۳۲ تا ۴/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش نسبت به دوره پایه (۱۹۸۸-۲۰۱۴) خواهد داشت. همچنین مقدار متوسط تبخیر - تعرق مرجع در تمامی دوره‌ها نسبت به دوره پایه مشاهداتی افزایش می‌یابد. مقدار تبخیر - تعرق مرجع در آینده نزدیک بین ۴/۶۹ تا ۴/۸۲، آینده میانی بین ۴/۷ تا ۴/۹۴ و آینده دور بین ۴/۷۲ تا ۵/۰۴ (میلی‌متر در روز) متغیر خواهد بود. همچنین در بررسی‌های آماری مشخص گردید که میزان شوری خیلی زیاد خاک براساس شاخص‌های NDSI و SI<sub>1</sub> از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۴ بترتیب حدود ۶۶۱۳/۸۱ و ۶۲۹۶/۸۱ هکتار افزوده شده است که با روند افزایشی تبخیر و تعرق در سناریوهای اقلیمی نیز همبستگی ۰/۹۸۷ دارد. تحقیق حاضر با هدف ارزیابی تبخیر و تعرق واقعی و تاثیر آن بر شوری خاک تحت سناریوهای مختلف اقلیمی، کاربرد زیادی در مدیریت پایدار منابع آب و خاک دارد. با این حال، این تحقیق با محدودیت‌هایی همچون پیچیدگی فرآیندهای تبخیر و تعرق، عدم قطعیت سناریوهای SSP در داده‌های ورودی و مقیاس‌پذیری مدل‌ها مواجه است. از سوی دیگر، نتایج این تحقیق می‌تواند در توسعه مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر، ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی، بهینه‌سازی مدیریت آبیاری، مدیریت شوری خاک و تدوین سیاست‌های کشاورزی پایدار مورد استفاده قرار گیرد.

## References

- Alam, M. M., Akter, M. Y., Islam, A. R. M. T., Mallick, J., Kabir, Z., Chu, R., ... & Senapathi, V. (2024). A review of recent advances and future prospects in calculation of reference evapotranspiration in Bangladesh using soft computing models. *Journal of Environmental Management*, 351, 119714. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119714>.
- Al-Hasani, A. A. J., & Shahid, S. (2024). Assessing the effect of climate change on spatiotemporal variations in reference evapotranspiration across Iraq. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05217-w>.
- Allen, R., Waters, R., Bastiaanssen, W., Tasumi, M., & Trezza, R. (2002). *Sebal. Surface energy balance algorithms for land. Idaho implementation. Advanced Training and Users Manual*, Idaho, USA.
- Alqudah, Sh., Suleiman, A., Aljaafreh, S. (2024). Estimation of daily actual evapotranspiration for dates using the ALARM, *Journal of Southwest Jiaotong University*, 59(3), 521-531. <https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.59.3.35>.
- Ardakani, M., Mahdavi Ardakani, R., Jabali, A., & Esfandiari, M. (2015). Evaluation of soil salinity by using satellite images and statistical methods: A case study of Chah-Afzal area, Ardakan. *The Journal of Geographical Research on Desert Areas*, 3(2), 25-46 (In persian). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.2345332.1394.3.2.2.4>.
- Asadi, M., & Kamran, K. V. (2022). Comparison of SEBAL, METRIC, and ALARM algorithms for estimating actual evapotranspiration of wheat crop. *Theoretical and Applied Climatology*, 149(1), 327-337. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04026-3>.
- Asadi, M., & Kamran, K. V. (2023). Estimating selected cultivated crop water requirement-based surface energy balance algorithm. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(5), 298. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11386-1>.
- Asadi, M., & Karami, M. (2020). Estimation of evapotranspiration in Fars province using experimental indicators. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 20(56), 159-175 (In persian). <http://dx.doi.org/10.29252/jgs.20.56.159>.

<sup>1</sup>. Yahaya

- Asadi, M., Valizadeh Kamran, K., Baaghdeh, M., & Adab, H. (2020). Estimation of Actual Evapotranspiration by Mountain SEBAL Algorithm Based on Pea Plants (Case Study: Semi-Northern Half of Ardabil Province). *Hydrogeomorphology*, 7(22), 67-85 (In persian). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23833254.1399.7.22.4.8>.
- Chia, M. Y., Huang, Y. F., & Koo, C. H. (2020a). Reference evapotranspiration estimation using adaptive neuro-fuzzy inference system with limited meteorological data. In IOP conference series: Earth and environmental science (Vol. 612, No. 1, p. 012017). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/612/1/012017>.
- Chia, M. Y., Huang, Y. F., Koo, C. H., & Fung, K. F. (2020b). Recent advances in evapotranspiration estimation using artificial intelligence approaches with a focus on hybridization techniques—a review. *Agronomy*, 10(1), 101. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010101>.
- Gao, Y., Long, D., & Li, Z. L. (2008). Estimation of daily actual evapotranspiration from remotely sensed data under complex terrain over the upper Chao river basin in North China. *International Journal of Remote Sensing*, 29(11), 3295-3315. <https://doi.org/10.1080/01431160701469073>.
- Golreyhan, J., Amininia, K., & Valizadeh Kamran, K. (2023). Estimation of Actual Evapotranspiration of Pasture Plants using SEBAL Algorithm (Research-Case Study: Ahar County). *Journal of Geography and Regional Development*, 21(3), 169-197 (In persian). <https://doi.org/10.22067/jgrd.2023.82588.1291>.
- Islam, A. T., Shen, S., Yang, S., Hu, Z., & Chu, R. (2019). Assessing recent impacts of climate change on design water requirement of Boro rice season in Bangladesh. *Theoretical and Applied Climatology*, 138, 97-113. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02818-8>.
- Jerin, J. N., Islam, H. T., Islam, A. R. M. T., Shahid, S., Hu, Z., Badhan, M. A., ... & Elbeltagi, A. (2021). Spatiotemporal trends in reference evapotranspiration and its driving factors in Bangladesh. *Theoretical and Applied climatology*, 144, 793-808. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03566-4>.
- Karami, F., Bayati Khatibi, M., Kheirizadeh, M., & Mokhtari Asl, A. (2020). Evaluation of Performance of Support Vector Machine Algorithm in Landslide Susceptibility Zoning in Ahar-chai Basin. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 8(4), 1-17 (In persian). <https://doi.org/10.22067/geo.v8i4.83263>.
- Karami, M., & Asadi, M. (2016). Estimates and Zoning of reference evapotranspiration by FAO-Penman-Monteith (Case Study: North West of Iran). *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, 2(1), 210-216. <https://doi.org/10.32628/IJSRSET162119>.
- Karimi, S. R., nasrolahi, A., & iranshahi, M. (2024). Investigating the effects of climate change on reference evapotranspiration based on the SSP scenarios. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(11), 1759-1777. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.358697.669493>.
- La Fuente, S., Jennings, E., Lenters, J. D., Verburg, P., Tan, Z., Perroud, M., ... & Woolway, R. I. (2024). Ensemble modeling of global lake evaporation under climate change. *Journal of Hydrology*, 631, 130647. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130647>.
- Li, M., Chu, R., Shen, S., & Islam, A. R. M. T. (2018). Dynamic analysis of pan evaporation variations in the Huai River Basin, a climate transition zone in eastern China. *Science of the Total Environment*, 625, 496-509. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.317>.
- Losgedaragh, S. Z., & Rahimzadegan, M. (2018). Evaluation of SEBS, SEBAL, and METRIC models in estimation of the evaporation from the freshwater lakes (Case study: Amirkabir dam, Iran). *Journal of Hydrology*, 561, 523-531. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.025>.
- Nabavi-Pelesaraei, A., Saber, Z., Mostashari-Rad, F., Ghasemi-Mobtaker, H., & Chau, K. W. (2021). Coupled life cycle assessment and data envelopment analysis to optimize energy consumption and mitigate environmental impacts in agricultural production. In *Methods in sustainability science* (pp. 227-264). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823987-2.00012-X>.
- Owaneh, O. M., & Suleiman, A. A. (2018). Comparison of the Performance of ALARM and SEBAL in Estimating the Actual Daily ET from Satellite Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 144(9), 04018024. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001335](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001335).

- Salam, R., & Islam, A. R. M. T. (2020). Potential of RT, Bagging and RS ensemble learning algorithms for reference evapotranspiration prediction using climatic data-limited humid region in Bangladesh. *Journal of Hydrology*, 590, 125241. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125241>.
- Salimi, KH., Ahmadi sani, N., & Jalinejad, N. (2019). Mapping Soil Salinity Using Remote Sensing Technology (Case Study: South Lands of West Azarbaijan province). *Water and soil science (Agricultural science)*, 29(2), 115-128 (In persian).
- Santos, C., Bezerra, B., Silva, B., and Neale, C. (2009). Assessment of daily actual evapotranspiration estimated by remote sensing algorithms. *Anais XIV Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 427-434.
- Shiri, J., Sadraddini, A. A., Nazemi, A. H., Kisi, O., Landaras, G., Fard, A. F., & Marti, P. (2014). Generalizability of gene expression programming-based approaches for estimating daily reference evapotranspiration in coastal stations of Iran. *Journal of hydrology*, 508, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.034>.
- Suleiman, A. A., Bali, K. M., & Kleissl, J. (2009). Comparison of ALARM and SEBAL evapotranspiration of irrigated alfalfa. In 2009 Reno, Nevada, June 21-June 24, 2009 (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers. <https://doi.org/10.13031/2013.27033>.
- Suleiman, A., & Al-Bakri, J. (2011). Estimating actual evapotranspiration using ALARM and the dimensionless temperature. *Evapotranspiration. Croatia: InTech Publisher*, 163-194. <https://doi.org/10.5772/13918>.
- Suleiman, A., & Crago, R. (2002a). Analytical land-atmosphere radiometer model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 41(2), 177-187. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00127-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00127-2).
- Suleiman, A., & Crago, R. (2002b). Analytical land atmosphere radiometer model (ALARM) applied to a dense canopy. *Agricultural and forest meteorology*, 112(3-4), 151-159. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041%3c0177:ALARM%3e2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041%3c0177:ALARM%3e2.0.CO;2).
- Suleiman, A., & Crago, R. (2004). Hourly and daytime evapotranspiration from grassland using radiometric surface temperatures. *Agronomy Journal*, 96(2), 384-390. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.3840>.
- Suleiman, A., Al-Bakri, J., Duqqah, M., & Crago, R. (2008). Intercomparison of evapotranspiration estimates at the different ecological zones in Jordan. *Journal of Hydrometeorology*, 9(5), 903-919. <https://doi.org/10.1175/2008JHM920.1>.
- Valle Júnior, L. C. G. D., Vourlitis, G. L., Curado, L. F. A., Palácios, R. D. S., Nogueira, J. D. S., Lobo, F. D. A., ... & Rodrigues, T. R. (2021). Evaluation of FAO-56 procedures for estimating reference evapotranspiration using missing climatic data for a Brazilian tropical savanna. *Water*, 13(13), 1763. <https://doi.org/10.3390/w13131763>.
- Xing, X., Liu, Y., Yu, M., & Ma, X. (2016). Determination of dominant weather parameters on reference evapotranspiration by path analysis theory. *Computers and Electronics in Agriculture*, 120, 10-16. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.11.001>.
- Yahaya, I., Li, Z., Zhou, J., Jiang, S., Su, B., Huang, J., ... & Jiang, T. (2024). Estimations of potential evapotranspiration from CMIP6 multi-model ensemble over Africa. *Atmospheric Research*, 300, 107255. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107255>.
- Zeinadini, S., Anvari, S., & Zahmatkesh, Z. (2019). Investigation of Water Allocation Conditions in Aharchay Basin under Climate Change Impacts. *Irrigation Sciences and Engineering*, 42(4), 195-210. <https://doi.org/10.22055/jise.2018.23237.1648>.