



## Evaluation of triangle algorithm for estimation of actual evapotranspiration of pistachio in Kerman plain

Ameneh Mianabadi<sup>1</sup> , Mojdeh Salimifard<sup>2</sup> , Maryam Salajegheh<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran. E-mail: [ammianabadi@gmail.com](mailto:ammianabadi@gmail.com)

<sup>2</sup> Ph. D Student of Agrometeorology, Water Sciences and Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: [mozhdehsalimi18@gmail.com](mailto:mozhdehsalimi18@gmail.com)

<sup>3</sup> Ph. D Student of Agrometeorology and Expert of Meteorology of Kerman, Water Sciences and Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: [m.salajegheh@yahoo.com](mailto:m.salajegheh@yahoo.com)

### ABSTRACT

Evapotranspiration is one of the key components of water balance and irrigation planning. Thus, the accurate estimation of this component and the water consumption of plants can improve the management of water use and increase the efficiency of water consumption. Due to the limitation of tools for measuring evaporation-transpiration, remote sensing methods can be used for this purpose. In this paper, the triangular algorithm was used to estimate evapotranspiration in the Kerman Plain in the growing seasons of 2020 (1399) and 2021 (1400). The results of this method were presented as the spatial distribution map of Evapotranspiration. To validate the results of the algorithm, the actual evapotranspiration obtained using the triangular method for a pistachio orchard, which was under irrigation management, was compared to the values obtained by the FAO-56 method. The results showed that the amount of evapotranspiration for pistachio was estimated with acceptable accuracy ( $r=0.73$  and  $RMSE=1.8$ ,  $ME=-1.6$ ,  $nRMSE=0.4$ ). However, the NSE less than zero (-1.3) shows that the observed (FAO-56) mean is a better predictor than the Triangle algorithm. The values obtained from the triangular algorithm were lower than the values of FAO 56, which could be due to the uncertainty of the algorithm, uncertainty in the measured data, or due to the time difference between the date of the selected images and the date of irrigation.

**Keywords:** NDVI, Landsat, LST, Remote Sensing.

**Article Type:** Research Article

**Article history:** Received: 29 September 2023 Revised: 08 December 2023 Accepted: 28 December 2023 ePublished: 28 December 2023

### 1. Introduction

Evapotranspiration is one of the key components of water balance and irrigation planning. Thus, the accurate estimation of this component and the water consumption of plants can improve the management of water use and increase the efficiency of water consumption. Due to the limitation of tools for measuring evaporation-transpiration, remote sensing methods can be used for this purpose. There are several remote sensing algorithms for actual evaporation estimation including SEBAL, SEBS, Metric, etc. In this study we used the triangle method which only was used by Salimifard et al. (2022) in Mashhad Plain. They evaluated the results for the agricultural products, i.e., wheat and maize. The aim of this study is to evaluate the triangle method for a horticultural crop, i.e., pistachio in Kerman Plain.

### 2. Methodology

The study area is Kerman Plain in which pistachio is one of the most important agricultural products. Due to water scarcity in this plain, determining the water requirement of the crops is crucial for agricultural activities. Accordingly, it is important to have an appropriate estimation of actual evapotranspiration in the plain. In this paper, the triangular algorithm was used to estimate actual evapotranspiration in the Kerman Plain in the growing seasons of 2020 (1399) and 2021 (1400). For this purpose, the Landsat 8 satellite images with less than 10% cloudiness were used. The variables such as NDVI, LST, etc., were calculated by using the JAVA programming language in the Google Earth Engine code (GEE) system environment. The required meteorological data of Kerman station were acquired from IRIMO. The triangular algorithm is based on the two-dimensional spatial plot of normalized LST and normalized NDVI, which were calculated using bands 10, 5, and 4 of the Landsat 8 in the GEE. Estimation of the wet and dry edges was conducted by MATLAB code. The actual evapotranspiration obtained using the triangular method for a pistachio orchard, which was under irrigation management, was compared to the values obtained by the FAO-56 method. The results were evaluated by correlation coefficient ( $r$ ), Root Mean Square Error (RMSE), and Mean Error (ME).

### 3. Results and discussion

The results showed that the amount of evapotranspiration for pistachio was estimated with acceptable accuracy ( $r=0.73$  and  $RMSE=1.8$ ,  $nRMSE=0.4$ ,  $ME=-1.6$ ). However, the NSE less than zero (-1.3) shows that the observed (FAO-56) mean is a better predictor than the Triangle

---

algorithm. The values obtained from the triangular algorithm were lower than the values of FAO 56, which was in line with the results of the previous studies for both Agricultural and horticultural crops. This underestimation could be due to the uncertainty of the algorithm, uncertainty in the measured data, or due to the time difference between the date of the selected images and the date of irrigation. Moreover, inappropriate quality of water and soil in Kerman Plain and the uncertainty of plant coefficients used are among the factors that can underestimate evapotranspiration values by the algorithm.

#### 4. Conclusions

In this study, the triangular algorithm was used to estimate actual evapotranspiration in Kerman plain using remote sensing data. Actual evapotranspiration values obtained from the triangular algorithm were lower than FAO 56 values, which might be due to the uncertainty of the algorithm, uncertainty in the measured data, uncertainty of plant coefficients, or due to the time difference between the date of the selected images and the date of irrigation. To have a better evaluation of the remote sensing algorithms, it can be suggested to develop and apply a micro lysimeter in the farms and orchards, or to use the soil water balance of the farms and orchards. These may help to choose the more appropriate algorithm for the given study area, leading to providing the more proper and applicable advices for the farmers for managing the shortage of the water resources. Furthermore, it may help to update the crop coefficients which may lead to better estimation of evapotranspiration.

#### 5. References

Salimi Fard, M., Sanajnejad, S.H., & Rashki, A. (2022). Actual evapotranspiration estimation by Triangle algorithm and landsat 8 data (Case study: Mashhad plain-Khorasan Razavi province). *Journal of RS and JIS for natural Resources*, Ready to Publish. <https://doi.org/10.30495/GIRS.2022.695287>

#### 6. Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

#### 7. Acknowledgments

The authors are grateful to Dr. Ehsan Mohammadi for his guidance and providing information about the pistachio garden under study.

---

**Cite this article:** Mianabadi, A., Salimifard, M., & Salajegheh, M. (2023). Evaluation of triangle algorithm for estimation of actual evapotranspiration of pistachio in Kerman plain, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(4), 94-115. DOI: 10.22126/ATWE.2024.10064.1069

---

**Publisher:** Razi University

© The Author(s).





## ارزیابی الگوریتم مثلی برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی پسته در دشت کرمان

آمنه میان‌آبادی<sup>۱</sup>✉، مژده سلیمی‌فرد<sup>۲</sup>، مریم سلاجقه<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، استادیار گروه اکولوژی، پژوهشکده علوم محیطی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران. رایانامه: ammianabadi@gmail.com  
<sup>۲</sup> دانشجوی دکترای هواشناسی کشاورزی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: mozhdehsalimi18@gmail.com  
<sup>۳</sup> دانشجوی دکترای هواشناسی کشاورزی و کارشناس اداره کل هواشناسی کرمان، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: m.salajegheh@yahoo.com

### چکیده

تبخیر-تعرق یکی از مؤلفه‌های کلیدی بیلان آب و برنامه‌ریزی آبیاری است. بنابراین برآورد دقیق این مؤلفه می‌تواند باعث بهبود مدیریت بهره‌برداری از آب و افزایش راندمان مصرف آب شود. با توجه به محدودیت ابزار اندازه‌گیری تبخیر-تعرق، روش‌های سنجش‌ازدور می‌تواند به این منظور استفاده شود. در این مقاله از الگوریتم مثلی برای تخمین تبخیر-تعرق در دشت کرمان در فصل‌های رشد ۱۳۹۹ (۲۰۲۰) و ۱۴۰۰ (۲۰۲۱) استفاده و نتایج آن به‌صورت نقشه‌های پهنه‌بندی تبخیر-تعرق ارائه شد. برای صحت‌سنجی نتایج الگوریتم، مقدار تبخیر-تعرق واقعی به‌دست‌آمده با استفاده از روش مثلی برای یک باغ پسته که دارای شرایط مدیریت‌شده (بدون تنش) بود، با مقادیر حاصل از روش فائو ۵۶ مقایسه شد. نتایج نشان داد که مقدار تبخیر-تعرق برای این باغ پسته با دقت قابل‌قبولی تخمین زده‌شده است (ضریب همبستگی ۰/۷۳، میانگین خطا ۱/۶- میلی‌متر در روز، جذر میانگین مربعات خطا ۱/۸ میلی‌متر در روز و  $nRMSE$  برابر ۰/۴). اگرچه مقدار منفی ضریب نش-ساتکلیف (۱/۳-) نشان می‌دهد که میانگین مقادیر حاصل از فائو ۵۶ پیش‌بینی بهتری از الگوریتم مثلی ارائه می‌دهد. مقادیر به‌دست‌آمده از الگوریتم مثلی کمتر از مقادیر فائو ۵۶ بود که می‌تواند به دلیل عدم قطعیت موجود در الگوریتم، عدم قطعیت داده‌های اندازه‌گیری شده و یا اختلاف‌زمانی بین تاریخ تصاویر انتخابی و تاریخ آبیاری باشد.

**واژه‌های کلیدی:** دمای سطح زمین، سنجش‌ازدور، شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی، لندست.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۰۷ مهر ۱۴۰۲ اصلاح: ۱۷ آذر ۱۴۰۲ پذیرش: ۰۷ دی ۱۴۰۲ چاپ الکترونیکی: ۰۷ دی ۱۴۰۲

**استناد:** میان‌آبادی، آ.، سلیمی‌فرد، م.، و سلاجقه، م. (۱۴۰۲). ارزیابی الگوریتم مثلی برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی پسته در دشت کرمان، فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۳(۴)، ۹۴-۱۱۵. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2024.10064.1069



## مقدمه

آب و منابع آبی یکی از عناصر مهم در توسعه اجتماعی- اقتصادی کشورها است که با توجه به رشد جمعیت و فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی و به تبع آن افزایش تقاضا، اهمیت آن در سال‌های اخیر و به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک دوچندان شده است؛ بنابراین جهت ارزیابی منابع آب و ارائه راهکارهای مدیریتی مناسب، بررسی بیلان آب در حوضه‌های آبریز در مقیاس‌های زمانی مختلف از اهمیت بسیاری برخوردار است. در مناطق خشک به دلیل نوسانات و ناهنجاری‌های بارش، تعیین مؤلفه‌های بیلان آب به‌ویژه تبخیر- تفرق یکی از مسائل و دغدغه‌های اصلی کشاورزان و متخصصین هیدرولوژی است. از سوی دیگر با توجه به اهمیت فعالیت‌های کشاورزی و تولید غذا در مناطق خشک و نیمه‌خشک و کمبود آب که از جمله مهم‌ترین محدودیت‌های اکولوژیکی در این مناطق است، مدیریت صحیح و برداشت پایا از منابع آبی و داشتن برنامه آبیاری از اهمیت زیادی برخوردار است. روش‌های مختلفی برای تخمین میزان تبخیر-تفرق وجود دارد که به دودسته کلی روش‌های مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های مستقیم شامل اندازه‌گیری تبخیر-تفرق با استفاده از ابزاری چون تشت تبخیر، برج شار همبستگی پیچکی و لایسیمتر می‌باشند. روش‌های غیرمستقیم اغلب بر پایه داده‌های سنجش‌ازدور بوده و برخلاف روش‌های مستقیم که مقدار تبخیر-تفرق را به‌صورت نقطه‌ای ارائه می‌کنند، مقدار این متغیر را به‌صورت پهنه‌های مکانی در اختیار قرار می‌دهند.

برای تخمین تبخیر-تفرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای از الگوریتم‌های مختلفی همچون SEBI (مننتی و همکاران<sup>۱</sup>، ۱۹۹۳)، SEBAL (باستیاانسن و همکاران<sup>۲</sup>، ۱۹۹۸a,b)، S-SEBI (رورنیک و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۰۰)، SEBS (سو<sup>۴</sup>، ۲۰۰۲) و METRIC (آلن و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۰۷) به‌عنوان مدل‌های تک‌جزئی و S-TSEB (شاتلوورث و همکاران<sup>۶</sup>، ۱۹۸۵) و P-TSEB (کاستاس و همکاران<sup>۷</sup>، ۱۹۹۹؛ نورمن<sup>۸</sup> و همکاران، ۱۹۹۵) به‌عنوان مدل‌های دوجزئی استفاده می‌شود. پیش از استفاده از این مدل‌ها باید توانایی، کاربردها و محدودیت‌های آن‌ها را برای مناطق مختلف و در شرایط آب و هوایی متفاوت بررسی نمود. اگرچه بررسی‌های انجام‌شده نشان داده است که مدل‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور می‌تواند توزیع منطقی از تبخیر-تفرق در مناطق مختلف داشته باشد، اما در بعضی موارد، مقدار تبخیر-تفرق در مقیاس پیکسل دقت مناسبی را نشان نمی‌دهد (گائو<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۰۸)؛ بنابراین این الگوریتم‌ها برای هر منطقه و برای انواع کشت‌های زراعی و باغی باید مورد ارزیابی قرار گیرد.

اغلب الگوریتم‌ها و مدل‌های ارائه‌شده برای تخمین تبخیر-تفرق نیازمند داده‌های زمینی شامل دمای هوای نزدیک سطح زمین، سرعت باد، کمبود فشار بخار و ارتفاع گیاه می‌باشند که به دلیل عدم وجود داده کافی در مقیاس‌های وسیع مکانی، امکان استفاده از این الگوریتم‌ها برای تخمین پهنه مناسبی از تبخیر-تفرق با محدودیت روبه‌رو می‌شود (تانگ و همکاران<sup>۱۰</sup>، ۲۰۱۰). برای غلبه بر این محدودیت، الگوریتم‌هایی ارائه‌شده است که تنها متکی بر داده‌های ماهواره‌ای هستند. از آن جمله می‌توان به روش مثلثی Ts-VI<sup>11</sup> اشاره نمود. این روش توسط جیانگ<sup>۱۲</sup> و اسلام<sup>۱۳</sup> (۱۹۹۹، ۲۰۰۱، ۲۰۰۳) توسعه و بهبود یافت. روش مثلثی بر مبنای معادله پریستلی-تیلور و بر اساس روابط فیزیکی میان پارامتر کسر تبخیر و پارامترهای سطحی مانند دمای سطح زمین، رطوبت خاک و میزان پوشش گیاهی است (جیانگ و اسلام، ۱۹۹۹).

<sup>1</sup> Menenti et al

<sup>2</sup> Bastiaanssen et al

<sup>3</sup> Roerink et al

<sup>4</sup> Su

<sup>5</sup> Allen et al

<sup>6</sup> Shuttleworth et al

<sup>7</sup> Kustas et al

<sup>8</sup> Norman et al

<sup>9</sup> Gao et al

<sup>10</sup> Tang et al

<sup>11</sup> Surface Temperature-Vegetation Index

<sup>12</sup> Jiang

<sup>13</sup> Islam

### مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مطالعات مختلفی در سرتاسر جهان برای بررسی کاربردی بودن این روش در تخمین تبخیر-تعرق صورت گرفته است که اغلب با نتایج قابل قبولی همراه بوده‌اند. لو و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۵) از روش مثلی برای تخمین تبخیر-تعرق در امریکا استفاده و نتایج حاصل را با نتایج داده‌های به‌دست‌آمده از روش‌های مستقیم اندازه‌گیری مقایسه کردند. ضریب تبیین ۵۴/۵ تا ۶۹/۶ درصد و میانگین مربع ریشه خطا ۴۰/۳ وات بر مترمربع نشان از عملکرد قابل قبول مدل داشت. استیسن و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۸) از الگوریتم مثلی برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی در حوضه رودخانه سنگال استفاده کردند. در مقایسه با روش‌های مستقیم برای کسر تبخیر، مقادیر RMSE<sup>۳</sup> و R<sup>۲</sup> برابر ۰/۱۳ و ۰/۶۳ و برای تبخیر-تعرق RMSE و R<sup>۲</sup> به ترتیب ۴۱/۴۵ میلی‌متر و ۰/۶۶ حاصل شد. راسموسن و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۴) در شمال چین با استفاده از روش مثلی و تصاویر مودیس مقدار تبخیر-تعرق واقعی را محاسبه نمودند که در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده و سایر الگوریتم‌های سنجش‌ازدور نتایج خوبی را به همراه داشت. دتوماس و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۴) در اسپانیا الگوریتم مثلی را استفاده کرده و با حذف مناطق با ارتفاع و شیب‌های متفاوت و با در نظر گرفتن شاخص سطح برگ (LAI) به‌جای شاخص NDVI نتایج بهتری نسبت به الگوریتم اولیه به دست آوردند (R<sup>۲</sup>=0.77, RMSE=0.11 برای تصاویر لندست). ژانگ و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۶) روش مثلی را در اردن جهت تخمین تبخیر-تعرق واقعی ارائه دادند. ایشان ابتدا منطقه مورد مطالعه را بر اساس توپوگرافی منطقه به چند ناحیه ارتفاعی تقسیم نموده و سپس تبخیر-تعرق واقعی را در هر ناحیه بر اساس شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI<sup>۷</sup>) و دمای سطح زمین تخمین زدند. این روش بخش زیادی از خطاهای ناشی از تغییرات دمای سطح زمین را که ناشی از تغییرات توپوگرافی منطقه است، کاهش داد.

سان و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۰۸) روش جدیدی برای تعیین رابطه Ts-VI بر مبنای اطلاعات خاک و پوشش گیاهی پیکسل‌ها و با کمک پیکسل‌های مجاور ارائه نمودند تا بتوانند دمای پوشش گیاهی و خاک را جداگانه تخمین بزنند. ایشان این روش را در یک مزرعه در اقلیم نیمه‌خشک در شمال چین با استفاده از تصاویر مودیس ارزیابی نموده و توانستند تخمین دقیقی از دمای خاک و پوشش گیاهی فراهم کنند. وانگ و همکاران<sup>۹</sup> (۲۰۱۱) از رابطه Ts-VI و تصاویر مودیس برای تخمین رطوبت خاک استفاده کرده و شاخص کمبود آب را با آن محاسبه نمودند. نتایج آن‌ها در منطقه نیمه‌خشک آریزونا نشان از دقت قابل قبول روش مثلی در تخمین رطوبت خاک داشت. تانگ و همکاران (۲۰۱۱) در منطقه نیمه خشکی در جنوب غرب آمریکا با استفاده از تصاویر مودیس و الگوریتم مثلی به تخمین تبخیر-تعرق واقعی پرداختند. در مقایسه با داده‌های برج شار همبستگی پیچکی، نتایج به‌دست‌آمده قابل قبول بوده (RMSD=54W/m<sup>2</sup>) و به دلیل سادگی الگوریتم استفاده از آن پیشنهاد شده است، اما توصیه شده است که این الگوریتم برای هر منطقه مورد ارزیابی قرار گیرد. لی و همکاران<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۴) با استفاده از تصاویر AATSR و WiDAS با استفاده از الگوریتم مثلی تبخیر-تعرق واقعی را در منطقه نیمه خشکی در شمال چین تخمین زدند. نتایج آن‌ها نشان داد که تصاویر WiDAS-که توان تفکیک بالاتری دارند، تخمین بهتری از تبخیر-تعرق ارائه می‌دهند. همچنین در مقایسه با الگوریتم SEBI، روش مثلی تبخیر-تعرق را کمتر برآورد می‌کند. میناکاپیلی و همکاران<sup>۱۱</sup> (۲۰۱۶) در اقلیم مدیترانه‌ای سیسیل با استفاده از الگوریتم بهبودیافته مثلی و تصاویر مودیس و MSG-SEVIRI مقدار تبخیر-تعرق را تخمین زدند و در مقایسه با داده‌های برج شار همبستگی پیچکی نتایج قابل قبولی به دست آوردند. کارلسون<sup>۱۲</sup> و پتروپولوس<sup>۱۳</sup> (۲۰۱۹) روش ساده‌شده مثلی را که نیاز به داده کمتری دارد، ارائه نمودند. کوی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۲۰)

<sup>1</sup> Luo et al

<sup>2</sup> Stisen et al

<sup>3</sup> Root Mean Square Error

<sup>4</sup> Rasmussen et al

<sup>5</sup> de Tomás et al

<sup>6</sup> Zhang et al

<sup>7</sup> Normalized Difference Vegetation Index

<sup>8</sup> Sun et al

<sup>9</sup> Wang et al

<sup>10</sup> Li et al

<sup>11</sup> Minacapilli et al

<sup>12</sup> Carlson

<sup>13</sup> Petropoulos

با توجه به اینکه در برخی از روزها به دلیل وجود ابرناکی نمی‌توان مقادیر تبخیر-تعرق را داشت، با استفاده از هوش مصنوعی به پر کردن خلأ مقادیر تبخیر-تعرق با استفاده از الگوریتم مثلی پرداختند. کوی و همکاران (۲۰۲۱) با ترکیب الگوریتم مثلی و مدل شاتلوورث-والاس مقادیر تبخیر-تعرق را در منطقه آبیاری شده در حوضه "های‌هه"<sup>۲</sup> چین محاسبه کردند. مقدار RMSE در مدل ترکیبی نسبت به مدل اصلی حدود ۳۰ درصد کاهش داشت. مقدار اریبی مدل نیز از ۲۳ درصد به ۵/۵ درصد کاهش یافت. ژو و همکاران (۲۰۲۳) نیز از روش مثلی در حوضه قدم<sup>۳</sup> در فلات تبت که تعداد ایستگاه‌های بسیار کمی دارد، استفاده نموده و با تصاویر مودیس مقدار تبخیر-تعرق واقعی را برای این حوضه تخمین زدند.

در ایران الگوریتم مثلی تنها توسط سلیمی‌فرد و همکاران (۱۴۰۱) برای تخمین تبخیر-تعرق در دشت مشهد استفاده شده است که با نتایج خوبی همراه بوده است (ضرایب تبیین بالای ۷۰ درصد و RMSE حدود ۱/۵ میلی‌متر در روز).

دشت کرمان یکی از دشت‌های بحرانی کشور است که برداشت بیش‌ازحد منابع آب زیرزمینی در آن امکان فرونشست زمین در این دشت را افزایش داده است. همچنین در سال‌های اخیر به دلیل کاهش منابع آب زیرزمینی در این دشت، اغلب کشاورزان با مشکل تأمین آب برای محصولات زراعی و باغی خود روبه‌رو بوده‌اند؛ بنابراین در اغلب موارد کشاورزان مجبور به مصرف کمتر آب و کاهش حجم آبیاری زمین‌های خود شده‌اند. با توجه به این مسئله تخمین دقیق‌تر تبخیر-تعرق جهت بهره‌وری مناسب از منابع آبی موجود به‌ویژه آب‌های زیرزمینی اهمیت بیشتری می‌یابد؛ بنابراین با توجه به کمبود مطالعات موجود در زمینه کاربرد این روش در ایران، در این پژوهش از روش فوق برای تخمین تبخیر-تعرق واقعی در دشت کرمان استفاده شد. از آنجاکه در مطالعه سلیمی‌فرد و همکاران (۱۴۰۱)، ارزیابی الگوریتم برای دو محصول زراعی ذرت و گندم انجام شده است، در این مطالعه برای ارزیابی الگوریتم از یک محصول باغی استفاده شد. با توجه به اهمیت پسته به‌عنوان یکی از محصولات مهم باغی کرمان، این محصول برای ارزیابی انتخاب شد.

## روش پژوهش

### منطقه مورد مطالعه

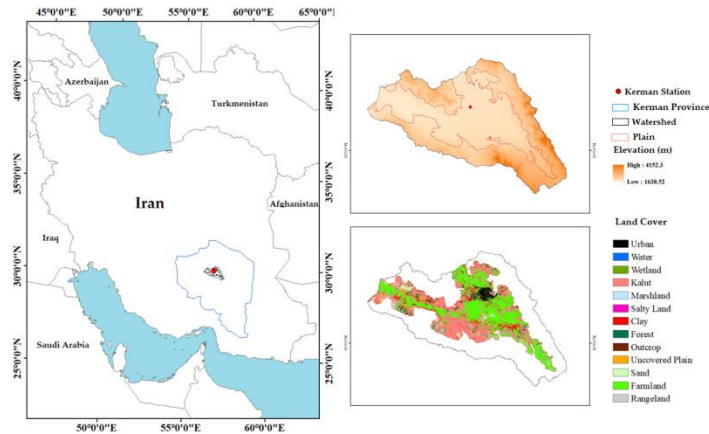
دشت کرمان با مساحتی حدود ۲۶۵۰ کیلومترمربع در حوضه آبریز کرمان در استان کرمان قرار دارد. بر اساس اطلاعات ایستگاه هواشناسی کرمان، این دشت دارای متوسط بارش سالانه ۱۳۶ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالانه ۱۶ درجه سلسیوس است (میان‌آبادی و همکاران، ۲۰۱۹). مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل سالانه در ایستگاه کرمان با استفاده از معادله هارگریوز-سامانی معادل ۲۵۶۰ میلی‌متر برآورد شده و اقلیم آن خشک است (میان‌آبادی و همکاران، ۲۰۱۹). ارتفاع دشت کرمان بین حدود ۱۶۰۰ تا ۴۱۵۰ متر متغیر است (شکل ۱). نقشه کاربری اراضی دشت کرمان با استفاده از نقشه کاربری اراضی ایران که توسط دانشگاه خواجه نصیر طوسی و با استفاده از تصاویر سنجنده سنتینل ۲<sup>۴</sup> تهیه شده است (قربانیان و همکاران، ۲۰۲۰) استخراج گردید. مطابق شکل (۱) بر اساس این طبقه‌بندی، کاربری اراضی اصلی دشت کرمان شامل اراضی کشاورزی است.

<sup>1</sup> Cui et al

<sup>2</sup> Haihe

<sup>3</sup> Qaidam

<sup>4</sup> Sentinel-2



شکل ۱. موقعیت، تغییرات ارتفاع و کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه

### تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های مورد نیاز

برای تخمین تبخیر-تعرق با استفاده از الگوریتم مثلی، در این پژوهش از تصاویر لندست ۸ که دارای توان تفکیک مکانی متوسطی است برای سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ استفاده شد. باندهای مرئی و مادون قرمز این ماهواره دارای قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و باند حرارتی آن دارای تفکیک مکانی ۱۰۰ متر است. این قدرت تفکیک مکانی مناسب می‌تواند تغییرات دمای سطح زمین را که ناشی از تغییرات پوشش گیاهی است، به خوبی نمایش دهد. برای سایر متغیرهای مورد نیاز (دمای هوا، بارش، سرعت باد، رطوبت و...) از داده‌های شبکه‌بندی شده جهانی و از ایستگاه‌های هواشناسی منطقه (ایستگاه کرمان) استفاده شد. تاریخ‌های استفاده شده در این مطالعه که بر اساس موجودیت تصاویر به‌ویژه با در نظر گرفتن شرایط ابرناکی منطقه و در طی فصل رشد انتخاب شد، در جدول (۱) ارائه شده است.

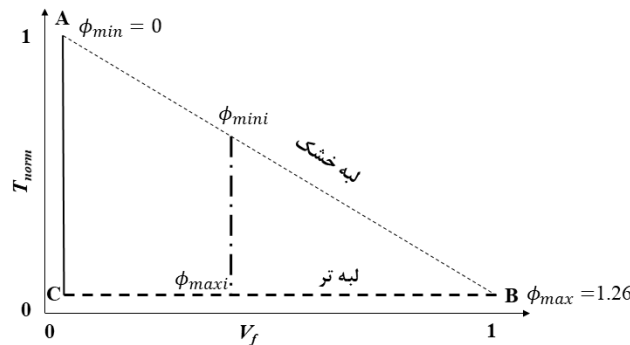
جدول ۱. تاریخ تصاویر لندست مورد استفاده در این مطالعه

شماره تصاویر	تاریخ میلادی تصویر	تاریخ شمسی تصویر
۱	۲۰۲۰/۷/۵	۱۳۹۹/۴/۱۵
۲	۲۰۲۰/۷/۲۱	۱۳۹۹/۴/۳۱
۳	۲۰۲۰/۸/۲۲	۱۳۹۹/۶/۱
۴	۲۰۲۰/۹/۷	۱۳۹۹/۶/۱۷
۵	۲۰۲۰/۹/۲۳	۱۳۹۹/۷/۲
۶	۲۰۲۱/۳/۱۸	۱۳۹۹/۱۲/۲۸
۷	۲۰۲۱/۴/۳	۱۴۰۰/۱/۱۴
۸	۲۰۲۱/۶/۶	۱۴۰۰/۳/۱۶
۹	۲۰۲۱/۶/۲۲	۱۴۰۰/۴/۱
۱۰	۲۰۲۱/۸/۹	۱۴۰۰/۵/۱۸
۱۱	۲۰۲۱/۸/۲۵	۱۴۰۰/۶/۳
۱۲	۲۰۲۱/۹/۲۶	۱۴۰۰/۷/۴



## الگوریتم مثلثی

اساس الگوریتم مثلثی پراکندگی فضایی شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) و دمای سطح زمین (LST) است. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، در نمودار حاصل از پراکنش این دو متغیر که به شکل مثلث است، دو ضلع بالایی و پایینی مثلث به ترتیب به‌عنوان لبه خشک و تر شناخته می‌شود. اجرای این الگوریتم منوط به اعمال این فرض است که تمام پیکسل‌های منطقه دارای شرایط رطوبت خاک و پوشش گیاهی متنوع و دارای ارتفاع یکسانی از سطح دریا باشند. فرض تنوع رطوبت خاک و پوشش گیاهی برای توسعه لبه خشک و تر در این الگوریتم ضروری است (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۶). فرض ارتفاع یکسان از سطح دریا باعث می‌شود که اثر تغییرات توپوگرافی بر تغییرات دمای سطح زمین حذف‌شده و تغییرات دما بر مبنای میزان تبخیر از سطح خاک در نظر گرفته شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ کارلسون، ۲۰۰۷).



شکل ۲. نمودار شماتیک الگوریتم مثلثی

در شکل (۲) خطوط AB و CB به ترتیب لبه خشک و لبه تر را نشان می‌دهد. در لبه خشک میزان پوشش گیاهی حداقل (یا صفر) و میزان دمای سطح زمین حداکثر است. در لبه تر پوشش گیاهی حداکثر و دمای سطح زمین کمترین مقدار است. در لبه تر به دلیل وجود رطوبت کافی مقدار تبخیر-تعرق حداکثر است.

اولین مرحله برای تخمین تبخیر-تعرق، محاسبه مقادیر NDVI است. این شاخص که معیاری برای میزان پوشش روی زمین و شاخصی برای سنجش خشک‌سالی است، برای سنجنده لندست با استفاده از بازتاب<sup>۱</sup> باندهای ۴ و ۵ تصاویر و به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$NDVI = \frac{b5 - b4}{b5 + b4} \quad (1)$$

پس از محاسبه شاخص، باید مقادیر به‌دست‌آمده با استفاده از رابطه زیر نرمال‌سازی شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۶):

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

در این معادله،  $V_f$  میزان کسری از پوشش گیاهی، NDVI شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی برای هر پیکسل،  $NDVI_{\min}$  حداقل مقدار NDVI و  $NDVI_{\max}$  حداکثر مقدار NDVI در کل منطقه مورد مطالعه است.

<sup>1</sup> Reflectance



پس از محاسبه و نرمال سازی NDVI، داده های دمای سطح زمین که از تصاویر باند ۱۰ لندست ۸ حاصل می شود نیز باید نرمال سازی شود. نرمال سازی دمای سطح زمین با رابطه زیر انجام می شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۶):

$$T_{norm} = \frac{T_s - T_{wet}}{(T_s)_{max} - T_{wet}} \quad (3)$$

در این معادله  $T_{norm}$  دمای نرمال شده سطح زمین برای هر پیکسل،  $T_s$  دمای سطح زمین در هر پیکسل،  $T_{wet}$  دمای لبه مرطوب و  $(T_s)_{max}$  حداکثر دمای سطح زمین در کل منطقه مورد مطالعه می باشد.

پس از محاسبه دو متغیر  $T_{norm}$  و  $V_f$  در مراحل قبلی، مقادیر این متغیرها برای کل پیکسل های موجود در تصاویر برای هر روز در برابر هم رسم شد تا شکلی مشابه شکل (۲) حاصل شده و مقدار پارامتر  $\phi$  محاسبه گردد (تانگ و همکاران، ۲۰۱۰).

$$\phi_i = \frac{T_{maxi} - T_{normi}}{T_{maxi} - T_{mini}} (\phi_{maxi} - \phi_{mini}) + \phi_{mini} \quad (4)$$

در این رابطه،  $\phi_i$  مقدار پارامتر ترکیبی برای پیکسل  $i$ ، مقدار دمای سطح زمین نرمال شده برای پیکسل  $i$ ،  $T_{normi}$  مقدار پارامتر ترکیبی برای پیکسل  $i$  در لبه مرطوب و  $\phi_{mini}$  مقدار پارامتر ترکیبی برای پیکسل  $i$  در لبه خشک است ( $\phi_{mini} = 1.26V_f$ ). برای همه پیکسل ها مقدار ثابت ۱/۲۶ است.

برای به دست آوردن  $T_{maxi}$  (دمای ماکزیمم در هر پیکسل)، بعد از رسم داده های  $T_{norm}$  و  $V_f$ ، داده های  $V_f$  به بازه هایی با فاصله ۰/۰۲ تقسیم و در هر یک از این بازه ها مقدار حداکثر دمای سطح مشخص شد. سپس بین کلیه دماهای حداکثر مشخص شده و مقدار  $V_f$  رابطه رگرسیونی خطی ساده مطابق معادله (۵) برقرار شد (تانگ و همکاران، ۲۰۱۰). در این معادله،  $T_{maxi}$  حداکثر دمای سطح برای هر بازه و  $b$  و  $a$  ضرایب رگرسیونی می باشند.

$$T_{maxi} = a * V_{fi} + b \quad (5)$$

در مرحله بعد میزان کسر تبخیر لحظه ای (EF) محاسبه می شود. این پارامتر به صورت نسبت شار گرمای نهان به انرژی در دسترس تعریف و با رابطه زیر محاسبه می شود:

$$EF = \phi \left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] \quad (6)$$

در این معادله ضریب سایکرومتری ( $\gamma$ ) برابر ۰/۰۶ و شیب فشار بخار آب اشباع ( $\Delta$ ) با استفاده از داده میانگین دمای هوا ( $T$ ) و با رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\Delta = 0.2(0.00738T + 0.8072)^7 - 0.000116 \quad (7)$$

در نهایت میزان تبخیر-تعرق واقعی (AET) در هر پیکسل با رابطه زیر محاسبه می شود:

$$AET = [EF(R_n - G)] / L \quad (8)$$

مقادیر تابش خالص ( $R_n$ )، شار گرمای خاک ( $G$ ) و میزان گرمای نهان تبخیر ( $L$ ) با استفاده از داده‌های شبکه‌بندی و داده‌های ایستگاهی و تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از روابط زیر محاسبه شد (بیشت و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۵، تیزرا و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۰۹؛ گاد و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۰؛ داسیلوا و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۱۶).

$$R_{n,over}=(1-\alpha)R_{SW}-R_{emi}+\varepsilon_0R_{LW} \quad (۹)$$

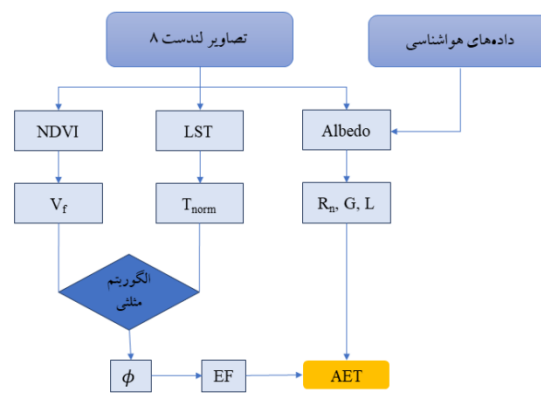
$$R_n=\frac{2R_{n,over}}{\pi \sin \left[ \pi \left( \frac{D-2a}{2D} \right) \right]} \quad (۱۰)$$

$$G=R_n \times (T_s-273.16) \times (0.0038+0.0074 \cdot \alpha) \times (1-0.98 \times NDVI^4) \quad (۱۱)$$

$$L=2.51-2.361 \times 10^{-3} \times T \quad (۱۲)$$

در روابط فوق،  $R_{n,over}$ ،  $R_{SW}$ ،  $R_{emi}$ ،  $R_{LW}$  و  $R_n$  به ترتیب میزان تابش خالص لحظه‌ای، تابش طول‌موج کوتاه رسیده به سطح زمین، تابش طول‌موج بلند خروجی از سطح زمین، تابش طول‌موج بلند رسیده به سطح زمین و تابش خالص روزانه برحسب وات بر مترمربع می‌باشد.  $\alpha$  میزان آلبیدو سطحی،  $\varepsilon_0$  گسیلمندی حرارتی سطحی،  $D$  طول روز،  $a$  فاصله زمانی بین زمان گذر ماهواره (در منطقه کرمان ساعت ۱۱/۵ صبح در تابستان و ۱۰/۵ صبح در زمستان) و زمان دریافت حداکثر تابش خالص توسط سطح زمین (ساعت ۱۲:۳۰ ظهر به وقت محلی (بیشت و همکاران، ۲۰۰۵)) و  $T$  میانگین دمای هوا برحسب درجه سلسیوس است.

تمامی مراحل انجام فرآیند تخمین تبخیر-تعرق با الگوریتم مثلی با زبان برنامه‌نویسی جاوا در محیط Google Earth Engine و تعیین لبه خشک و تر و ضرایب  $a$  و  $b$  در معادله ۵ در محیط برنامه‌نویسی MATLAB انجام شد. فلوجارت مراحل انجام الگوریتم مثلی در شکل (۳) ارائه شده است.



شکل ۳. فلوجارت مراحل انجام الگوریتم مثلی

<sup>1</sup> Bisht et al

<sup>2</sup> Teixeira et al

<sup>3</sup> Gad et al

<sup>4</sup> daSilva et al

## روش فائو ۵۶

در این مطالعه میزان صحت تخمین تبخیر-تعرق به روش مثلی برای یک باغ پسته موردبررسی قرار گرفت. به دلیل عدم وجود ابزار اندازه‌گیری مناسب برای تخمین تبخیر-تعرق، از روش فائو ۵۶ (آلن و همکاران، ۱۹۹۸) برای صحت سنجی روش استفاده شد. در این روش مقدار تبخیر-تعرق هر گیاه را می‌توان با رابطه زیر به دست آورد:

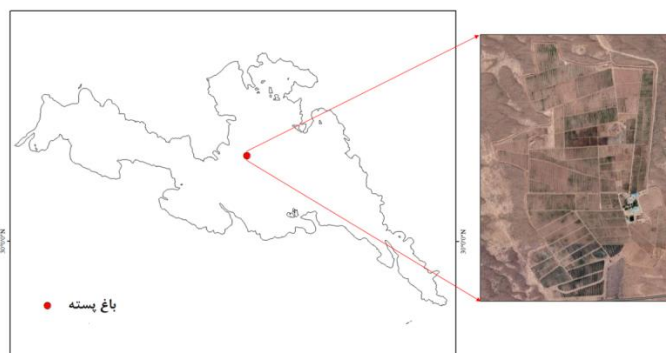
$$ET_c = K_c \times ET_o \quad (۱۳)$$

در این معادله،  $ET_c$  تبخیر-تعرق واقعی گیاه (در این مطالعه پسته)،  $K_c$  ضریب گیاهی و  $ET_o$  تبخیر-تعرق پتانسیل (مرجع) است که در این مطالعه با روش فائو-پنمن-مونتیث (آلن و همکاران، ۱۹۹۸) و با استفاده از اطلاعات ایستگاه هواشناسی کرمان برای روزهای مورد مطالعه و با نرم‌افزار REF-ET محاسبه شد (معادله (۱۴)).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273.15} U_2 (e_a - e_s)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (۱۴)$$

در این معادله  $U_2$  سرعت باد در ارتفاع ۲ متری است. مقادیر ضریب گیاهی برای همه گیاهان در گزارش فائو ۵۶ (آلن و همکاران، ۱۹۹۸) ارائه شده است. همچنین ضریب گیاهی گیاهان زراعی و باغی کشور توسط فرشی و همکاران (۱۳۷۶) نیز تخمین زده شده است که در این مطالعه از این مقادیر برای پسته استفاده شد. مقادیر ضریب گیاهی پسته در مراحل مختلف رشدی در دشت کرمان برای تاریخ‌های مورد مطالعه در جدول (۲) ارائه شده است.

برای صحت‌سنجی مقادیر تبخیر-تعرق، یک باغ پسته با شرایط مدیریتی مناسب و برنامه آبیاری مشخص انتخاب شد. موقعیت مکانی این باغ در شکل (۴) نشان داده شده است. سپس مقادیر تبخیر-تعرق به دست آمده با الگوریتم مثلی برای محل باغ با مقدار تبخیر-تعرق محاسبه شده با روش فائو ۵۶ مقایسه شد. آبیاری باغ پسته موردبررسی در سال ۱۳۹۹ در تاریخ ۲۹ فروردین آغاز شده و در شیفتهای مختلف با دور آبیاری بین ۱۹ تا ۲۲ روز انجام شده است. در سال ۱۴۰۰ اولین آبیاری در تاریخ ۸ اردیبهشت و دور آبیاری برای هر شیفته بین ۱۸ تا ۳۱ روز متغیر بوده است.



شکل ۴. موقعیت مکانی باغ پسته انتخابی (دارای مدیریت آبیاری) در دشت کرمان

جدول ۲. مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل و ضرایب گیاهی پسته برای روزهای مورد مطالعه

تاریخ تصویر (میلادی)	تبخیر-تعرق پتانسیل (میلی‌متر)	ضریب گیاهی پسته
۲۰۲۰/۷/۵	۱۲/۴	۰/۵۹
۲۰۲۰/۷/۲۱	۱۴/۷	۰/۶
۲۰۲۰/۸/۲۲	۱۰/۸	۰/۶
۲۰۲۰/۹/۷	۱۱/۴	۰/۶
۲۰۲۰/۹/۲۳	۱۰/۳	۰/۵۸
۲۰۲۱/۳/۱۸	۱۰/۸	۰/۴
۲۰۲۱/۴/۳	۱۲	۰/۴
۲۰۲۱/۶/۶	۱۰/۳	۰/۴۹
۲۰۲۱/۶/۲۲	۹/۹	۰/۵۶
۲۰۲۱/۸/۹	۹	۰/۶
۲۰۲۱/۸/۲۵	۱۰/۱	۰/۶
۲۰۲۱/۹/۲۶	۱۱/۸	۰/۵۸

### معیارهای خطا سنجی

در این مطالعه از معیارهای آماری ضریب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE)، میانگین خطا (ME) و ضریب نش-ساتکلیف (NSE) استفاده شد.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{O_i} - \overline{ET_O})(ET_{M_i} - \overline{ET_M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (ET_{O_i} - \overline{ET_O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (ET_{M_i} - \overline{ET_M})^2}} \quad (15)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{M_i} - ET_{O_i})^2}{n}} \quad (16)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{(ET_{O_{max}} - ET_{O_{min}})} \quad (17)$$

$$ME_j = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{M_i} - ET_{O_i})}{n} \quad (18)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{O_i} - ET_{M_i})^2}{\sum_{i=1}^n (ET_{O_i} - \overline{ET_O})^2} \quad (19)$$

در معادلات فوق  $ET_{Oi}$  مقادیر تبخیر-تعرق روش فائو ۵۶،  $ET_{Mi}$  مقادیر تبخیر-تعرق واقعی حاصل از الگوریتم مثلی و  $n$  تعداد روزهای موردبررسی (۱۲ روز) است.

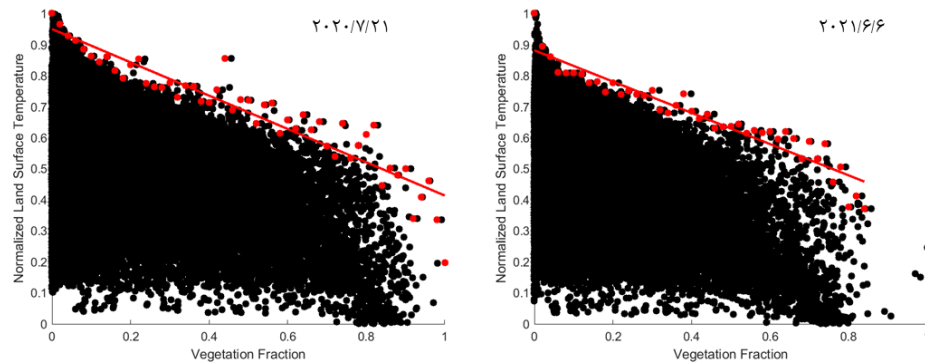
### یافته‌ها

#### تعیین ضرایب معادله لبه خشک

ضرایب معادله لبه خشک (معادله ۵) برای تاریخ‌های تعیین شده به شرح جدول (۴) به دست آمد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ضریب تبیین بالای این معادلات نشان‌دهنده رابطه قابل قبول برای تعیین لبه خشک برای تصاویر موردنظر است. در شکل (۵) نمودار دوبعدی  $T_{norm}$  در برابر  $V_f$  برای دو روز از روزهای مورد مطالعه (۲۰۲۰/۷/۲۱ و ۲۰۲۱/۶/۶) به عنوان نمونه ارائه شده است.

جدول ۴. ضرایب معادله لبه خشک برای تاریخ‌های مشخص شده

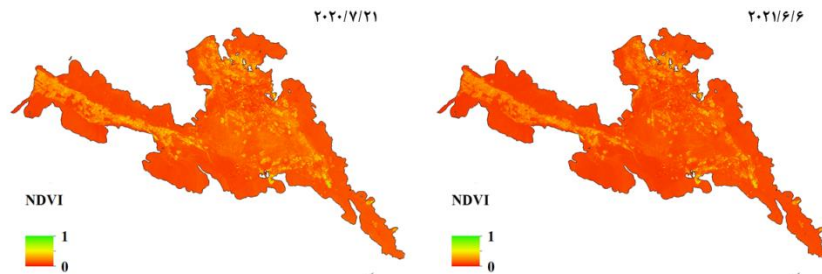
تاریخ تصویر (میلادی)	a	b	( $R^2$ ضریب تبیین)
۲۰۲۰/۷/۵	-۰/۳۳۱۵	۰/۹۱۲۷	۰/۸۴۸۲
۲۰۲۰/۷/۲۱	-۰/۵۳۶۲	۰/۹۴۹۷	۰/۸۷۸۶
۲۰۲۰/۸/۲۲	-۰/۴۵۶۱	۰/۹۱۴۳	۰/۸۶۳۶
۲۰۲۰/۹/۷	-۰/۴۴۵۴	۰/۸۸۰۰	۰/۷۲۲۲
۲۰۲۰/۹/۲۳	-۰/۴۰۳۶	۰/۸۴۴۸	۰/۸۸۴۸
۲۰۲۱/۳/۱۸	-۰/۲۴۱۵	۰/۸۹۵۰	۰/۸۵۳۸
۲۰۲۱/۴/۳	-۰/۲۱۴۶	۰/۹۳۱۳	۰/۸۷۸۰
۲۰۲۱/۶/۶	-۰/۵۰۳۲	۰/۸۸۱۱	۰/۹۰۴۲
۲۰۲۱/۶/۲۲	-۰/۵۴۹۸	۰/۹۲۳۱	۰/۸۰۴۴
۲۰۲۱/۸/۹	-۰/۵۴۲۷	۰/۹۱۳۷	۰/۹۱۳۰
۲۰۲۱/۸/۲۵	-۰/۳۸۳۲	۰/۸۱۴۶	۰/۸۹۳۲
۲۰۲۱/۹/۲۶	-۰/۴۱۴۵	۰/۹۴۰۵	۰/۸۹۴۰



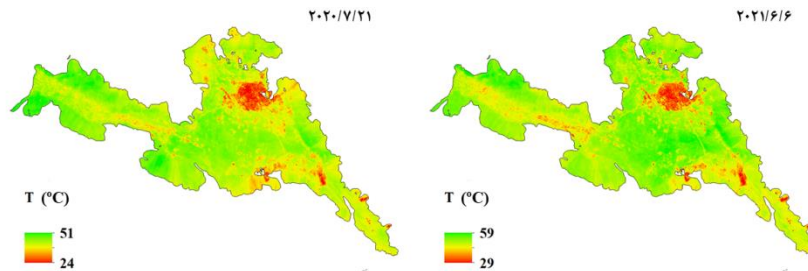
شکل ۵. نمودار دوبعدی  $T_{norm}$  در برابر  $V_f$  برای روزهای ۲۰۲۰/۷/۲۱ و ۲۰۲۱/۶/۶ (خط قرمز لبه خشک را نشان می‌دهد).

## توزیع مکانی متغیرها

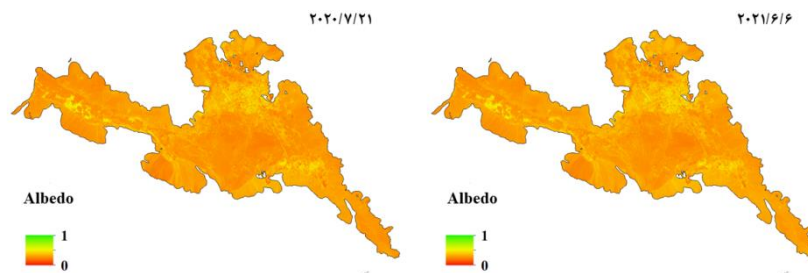
اشکال (۶) تا (۱۱) توزیع مکانی متغیرهای NDVI، دما، آلبيدو، تابش خالص، شارگرماي خاک و تبخیر-تعرق واقعي را در دشت کرمان برای تاریخ‌های ۲۰۲۰/۷/۲۱ و ۲۰۲۱/۶/۶ نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که مقادیر این متغیرها برای مناطق مختلف به‌ویژه مناطق دارای پوشش گیاهی با توزیع قابل‌قبولی تخمین زده شده است. چراکه همان‌طور که ملاحظه می‌شود تفکیک بین اراضی کشاورزی و اراضی بایر و مناطق شهری مشهود است.



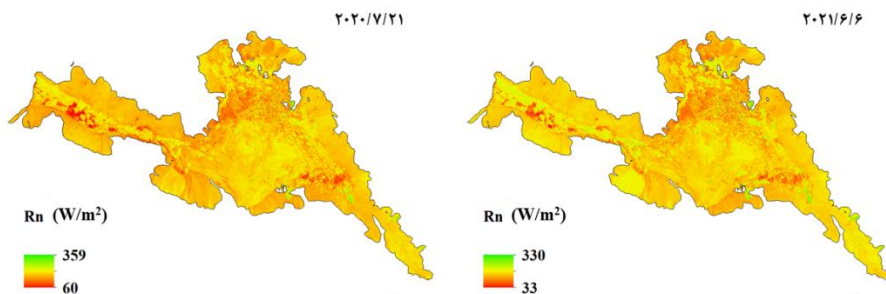
شکل ۶. توزیع مکانی NDVI برای روزهای ۲۰۲۰/۷/۲۱ و ۲۰۲۱/۶/۶



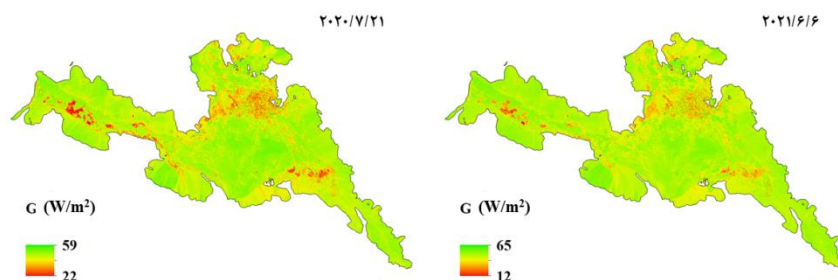
شکل ۷. توزیع مکانی دمای سطح زمین برای روزهای ۲۰۲۰/۷/۲۱ و ۲۰۲۱/۶/۶



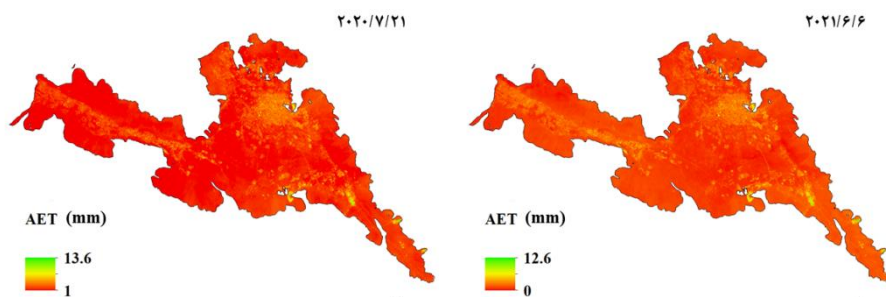
شکل ۸. توزیع مکانی آلبيدو برای روزهای ۲۰۲۰/۷/۲۱ و ۲۰۲۱/۶/۶



شکل ۹. توزیع مکانی تابش خالص برای روزهای ۲۰۲۰/۷/۲۱ و ۲۰۲۱/۶/۶



شکل ۱۰. توزیع مکانی شار گرمای خاک برای روزهای ۲۰۲۰/۷/۲۱ و ۲۰۲۱/۶/۶



شکل ۱۱. توزیع مکانی تبخیر-تعرق واقعی به دست آمده از الگوریتم مثلی برای روزهای ۲۰۲۰/۷/۲۱ و ۲۰۲۱/۶/۶

### ارزیابی نتایج تخمین تبخیر-تعرق

جدول (۵) مقدار تبخیر-تعرق را با استفاده از روش مثلی و روش فائو ۵۶ برای باغ پسته مورد بررسی نشان می‌دهد. در جدول (۶) نیز معیارهای خطا سنجی ارائه شده است. همان‌طور که در جدول دیده می‌شود، ضریب همبستگی  $0.73$  برای پسته به دست آمده است. مقادیر RMSE، nRMSE و ME نیز به ترتیب  $1/8$  میلی‌متر در روز،  $0.29$  و  $-1/6$  میلی‌متر در روز است. بر اساس مقادیر جدول (۵) الگوریتم مثلی تا حدود زیادی توانسته است روند تغییرات تبخیر-تعرق را برای پسته به خوبی تبیین کند؛ اما مقدار تبخیر-تعرق به دست آمده با الگوریتم مثلی کمتر از مقدار حاصل از روش فائو ۵۶ است. مقدار منفی ضریب نش-ساتکلیف ( $-1/3$ ) نشان از عدم قطعیت تخمین تبخیر-تعرق واقعی در الگوریتم مثلی است. باید توجه داشت که مقدار  $ET_c$  به دست آمده از رابطه فائو ۵۶ حداکثر مقدار تبخیر-تعرقی است که گیاه می‌تواند در شرایط



بدون تنش داشته باشد و در صورتی که گیاه در معرض تنش‌های مختلف از جمله تنش خشکی یا شوری قرار گیرد، مقدار تبخیر-تعرق از این مقدار کمتر خواهد شد (دستورانی و همکاران، ۱۳۹۱). اگرچه باغ انتخابی تحت مدیریت آبیاری بوده است، اما باید این نکته را در نظر گرفت که تاریخ انتخابی برای تصاویر ماهواره‌ای در اغلب موارد هم‌زمان با تاریخ آبیاری باغ فوق نبوده و بنابراین هرچه از روز آبیاری می‌گذرد، مقدار تبخیر-تعرق واقعی از مقدار حداکثر کمتر می‌شود. مطالعات گذشته در مورد پسته نیز مقادیر تبخیر-تعرق واقعی حاصل از الگوریتم‌های سنجش‌ازدور را کمتر از مقادیر فائو ۵۶ تخمین زده است (رحیم زادگان و همکاران، ۲۰۱۹؛ دستورانی و همکاران، ۱۳۹۱). به‌عنوان مثال رحیم‌زادگان و همکاران (۲۰۱۹) با مقایسه تبخیر-تعرق واقعی باغ پسته‌ای در سمنان با الگوریتم سبال و روش فائو ۵۶، مقدار RMSE را ۲/۵ میلی‌متر در روز به دست آورده‌اند. مطالعه سلیمی‌فرد و همکاران (۱۴۰۱) در مشهد نیز نشان می‌دهد که الگوریتم مثلی برای گندم و ذرت نیز مقادیر تبخیر-تعرق واقعی کمتری نسبت به روش فائو ۵۶ ارائه می‌دهد (RMSE برابر ۱/۶۷ و میانگین مطلق خطا برابر ۱/۴۸ میلی‌متر در روز). بر این اساس می‌توان گفت که عدم قطعیت الگوریتم‌های سنجش‌ازدوری تخمین تبخیر-تعرق و نیز عدم قطعیت در داده‌های اندازه‌گیری شده نیز می‌تواند عاملی برای عدم تطابق کامل این دو روش باشد.

بر اساس نظرات کارشناسان و کشاورزان محلی یکی از مشکلات عمده کشاورزی در کرمان کیفیت نامناسب آب‌و خاک به‌ویژه شوری است و بنابراین حتی اگر آبیاری کامل انجام شود و گیاه تحت تنش خشکی نباشد، کیفیت نامناسب آب‌و خاک عملکرد محصولات و تبخیر-تعرق را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در سال‌های اخیر به دلیل افت شدید منابع آب زیرزمینی و عدم دسترسی به آب کافی، کشاورزان ناچار به کم‌آبیاری باغ‌ها و مزارع خود شده‌اند. طی مصاحبه با چند باغدار و زارع در کرمان، مشخص شد که باغ‌های پسته در کرمان هر ۳۰ تا ۳۲ روز آبیاری می‌شوند؛ بنابراین در بسیاری از زمین‌های کشاورزی در دشت کرمان مقدار تبخیر-تعرق کمتر از مقادیر استاندارد است و محصولات کشاورزی تحت تنش قرار دارند. بر اساس نظرات آن‌ها به‌عنوان مثال کاهش عملکرد پسته و کوچک شدن مغز پسته‌ها و در نتیجه کاهش کیفیت آن‌ها در سال‌های اخیر به‌وضوح مشاهده می‌شود. به دلیل عدم وجود وسایل اندازه‌گیری مستقیم تبخیر-تعرق در ایران و یا هزینه‌بر بودن آن‌ها، امکان بررسی دقیق‌تر روش‌های سنجش‌ازدوری وجود ندارد؛ اما با توجه به اینکه میزان و روند تغییرات تابش خالص، شار گرمای خاک و دمای سطح زمین تخمین زده‌شده در روزهای مورد بررسی مطابق جدول (۷) در بازه قابل قبول و منطقی قرار دارد (مقبلی و همکاران، ۱۳۹۷؛ داسیلوا و همکاران، ۲۰۱۶) به نظر می‌رسد که مقادیر تبخیر-تعرق نیز می‌تواند قابل قبول باشد.

جدول ۵. مقادیر تبخیر-تعرق واقعی پسته به روش مثلی و فائو ۵۶ در دشت کرمان

تاریخ تصویر (میلادی)	تبخیر-تعرق به روش مثلی (میلی‌متر)	تبخیر-تعرق به روش فائو ۵۶ (میلی‌متر)
۲۰۲۰/۷/۵	۶	۷/۳
۲۰۲۰/۷/۲۱	۵/۶	۸/۸
۲۰۲۰/۸/۲۲	۵/۵	۶/۵
۲۰۲۰/۹/۷	۴/۸	۶/۸
۲۰۲۰/۹/۲۳	۵/۵	۶
۲۰۲۱/۳/۱۸	۲/۸	۴/۳
۲۰۲۱/۴/۳	۲/۶	۴/۸
۲۰۲۱/۶/۶	۴/۵	۵
۲۰۲۱/۶/۲۲	۴/۶	۵/۵
۲۰۲۱/۸/۹	۳/۹	۵/۴
۲۰۲۱/۸/۲۵	۴/۶	۶/۱
۲۰۲۱/۹/۲۶	۳/۹	۶/۸

جدول ۶. معیارهای خطا سنجی الگوریتم مثلثی برای باغ پسته مورد بررسی در دشت کرمان

گیاه	r	RMSE (میلی متر در روز)	nRMSE	NSE	ME (میلی متر در روز)
پسته	۰/۷۳	۱/۸	۰/۴	-۱/۳	-۱/۶

جدول ۷. مقادیر حداقل و حداکثر تابش خالص، شار گرمای خاک و دمای سطح زمین برای دشت کرمان

تاریخ تصویر (میلادی)	تابش خالص (وات بر مترمربع)		شار گرمای خاک (وات بر مترمربع)		دمای سطح زمین (درجه سلسیوس)	
	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل
۲۰۲۰/۷/۵	۵۸	۳۵۰	۲۰	۵۹	۱۴	۵۲
۲۰۲۰/۷/۲۱	۶۰	۳۵۹	۲۲	۵۹	۲۴	۵۱
۲۰۲۰/۸/۲۲	۴۸	۳۴۳	۱۹	۵۷	۲۶	۵۲
۲۰۲۰/۹/۷	۴۲	۳۵۹	۱۷	۵۰	۲۲	۵۱
۲۰۲۰/۹/۲۳	۵۰	۳۷۴	۱۴	۴۸	۱۸	۴۵
۲۰۲۱/۳/۱۸	۴۵	۳۸۷	۱۸	۴۳	۲/۵	۴۰
۲۰۲۱/۴/۳	۴۵	۳۹۴	۱۳	۴۸	-۶	۴۶
۲۰۲۱/۶/۶	۳۳	۳۳۰	۱۲	۶۵	۲۹	۵۹
۲۰۲۱/۶/۲۲	۴۰	۳۵۶	۱۰	۶۰	۲۵	۵۵
۲۰۲۱/۸/۹	۲۹	۳۵۱	۱۳	۵۸	۲۵	۵۳
۲۰۲۱/۸/۲۵	۵۵	۳۷۵	۲۰	۵۸	۲۳	۵۵
۲۰۲۱/۹/۲۶	۳۵	۳۵۸	۱۲	۵۰	۲۴	۵۰

## بحث

با توجه به اینکه دشت کرمان به دلیل برداشت بیش از حد منابع آب زیرزمینی یکی از دشتهای بحرانی کشور است، در آن امکان فرونشست زمین در این دشت را افزایش داده است. اخیراً به دلیل کاهش منابع آب زیرزمینی در این دشت، کشاورزان با مشکل تأمین آب برای محصولات زراعی و باغی خود مواجه شدند. در نتیجه کشاورزان مجبور به مصرف کمتر آب و کاهش حجم آبیاری زمینهای خود شده‌اند. با توجه به این مسئله تخمین دقیق‌تر تبخیر-تعرق جهت بهره‌وری مناسب از منابع آبی موجود به‌ویژه آبهای زیرزمینی اهمیت بیشتری می‌یابد؛ بنابراین با توجه به کمبود مطالعات موجود در زمینه کاربرد این روش در ایران، در این پژوهش از روش فوق برای تخمین تبخیر-تعرق واقعی در دشت کرمان استفاده شد. در این مطالعه برای ارزیابی الگوریتم از یک محصول باغی استفاده شد. با توجه به اهمیت پسته به‌عنوان یکی از محصولات مهم باغی کرمان، این محصول برای ارزیابی انتخاب شد.

## نتیجه‌گیری

بر اساس معیارهای خطا سنجی، الگوریتم مثلی تخمین قابل قبولی از تبخیر-تعرق واقعی ارائه داده است (ضریب همبستگی  $0/73$ ، میانگین خطا  $1/6$  - میلی‌متر در روز، جذر میانگین مربعات خطا  $1/8$  میلی‌متر در روز و  $nRMSE$  برابر  $0/29$ ). با این حال مقادیر تبخیر-تعرق واقعی به‌دست‌آمده از الگوریتم مثلی کمتر از مقادیر فائو  $56$  بود که در مطالعات پیشین نیز این کم‌بر آورد در سایر الگوریتم‌ها مشاهده شده است. باید توجه داشت که مقادیر تبخیر-تعرق فائو  $56$  حداکثر مقدار تبخیر-تعرق را برای شرایطی که گیاه تحت مدیریت مناسب قرار دارد و هیچ‌گونه تنش شوری و یا آبی ندارد، ارائه می‌دهد. عدم قطعیت در الگوریتم مثلی، عدم قطعیت داده‌های اندازه‌گیری شده، عدم تطابق تاریخ آبیاری با تاریخ تصاویر ماهواره‌ای، کیفیت نامناسب آب‌و‌خاک در دشت کرمان و عدم قطعیت ضرایب گیاهی استفاده‌شده از جمله عواملی است که می‌تواند بر کم‌بر آورد مقادیر تبخیر-تعرق توسط الگوریتم مثلی (و سایر الگوریتم‌های سنجش‌ازدوری) مؤثر باشد و پیشنهاد می‌شود که بررسی این عدم قطعیت‌ها در مطالعات آینده موردتوجه قرار گیرد.

در صورت امکان پیشنهاد می‌شود که با همکاری مراکز تحقیقاتی اقدام به تهیه و ساخت چند دستگاه میکرو لایسیمتر ساده در باغهایی که مدیریت مناسبی بر روی آنها اعمال می‌شود، شده و مقایسه بهتری بین خروجی الگوریتم‌های سنجش‌ازدوری و مقادیر واقعی تبخیر-تعرق صورت گیرد. بدین‌صورت می‌توان از الگوریتم‌های مختلف برای محاسبه تبخیر-تعرق استفاده و با مقایسه با مقادیر میکرو لایسیمتری بهترین الگوریتم را برای تخمین تبخیر-تعرق انتخاب نمود. همچنین به دست آوردن بیلان آب خاک در باغها و مزرعه‌های مورد مطالعه می‌تواند مقدار تبخیر-تعرق واقعی را به دست بدهد که با کمک آن نیز می‌توان مقدار تبخیر-تعرق روش‌های سنجش‌ازدوری را صحت‌سنجی کرد. با داشتن مقادیر دقیق تبخیر-تعرق می‌توان توصیه‌های مناسبی برای میزان آب مصرفی و بهبود عملکرد و بهره‌وری آب به‌ویژه در مناطقی که با محدودیت آب روبه‌رو هستند، ارائه نمود. همچنین می‌توان با داشتن مقدار دقیق تبخیر-تعرق در وسعت دشت، مقدار دقیق‌تری برای ضرایب گیاهی به دست آورد تا نیاز آبیاری گیاهان با دقت بیشتری تعیین شود. در حال حاضر برای طراحی‌های سیستم‌های آبیاری در باغها و مزرعه‌های مختلف از ضرایب گیاهی و نیاز خالص آبیاری به‌دست‌آمده از مطالعات قدیمی استفاده می‌شود و با توجه به شرایط تغییر اقلیم و کم‌آبی اکثر دشتهای کشور، این مقادیر دقت لازم را برای مطالعات جدید نداشته و باید به‌روز شوند.

## تقدیر و تشکر

از جناب آقای دکتر احسان محمدی بابت راهنمایی‌های ایشان و فراهم کردن اطلاعات مربوط به باغ پسته مورد مطالعه تشکر و قدردانی می‌شود.

## منابع

- دستورانی، محمدتقی، پورمحمدی، سامانه، و رحیمیان، محمدحسن. (۱۳۹۱). تخمین تبخیر-تعرق واقعی باغات پسته منطقه اردکان به کمک سنجش از دور. پژوهش آب در کشاورزی، ۲۶ (۱)، ۱۳-۱. <https://doi.org/10.22092/jwra.2012.118947>
- سلیمی فرد، مزده، ثنایی نژاد، سیدحسین، و راشکی، علیرضا. (۱۴۰۱). تخمین تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم مثلی و داده‌های لندست ۸ (مطالعه موردی: دشت مشهد- استان خراسان رضوی). سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، انتشار آنلاین، <https://doi.org/10.30495/GIRS.2022.695287>

## References

- Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Applications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 395–406. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(395\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(395))
- Allen, R., Pereira, Raes, L. D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*, FAO, Rome, Italy. <https://www.researchgate.net/publication/235704197>
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, Feddes, M., R. A. & Holtslag, A. A. M. (1998a). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212–213(1–4), 198–212. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4)
- Bastiaanssen, W. G. M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J. F., Roerink, G. J., & van der Wal, T. (1998b). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 2. Validation. *Journal of Hydrology*, 212–229. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00254-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00254-6)
- Bisht, G., Venturini, V., Islam, S., & Jiang, L. (2005). Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. *Remote Sensing of Environment*, 97(1), 52–67. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.03.014>
- Carlson, T. (2007). An Overview of the “Triangle Method” for Estimating Surface Evapotranspiration and Soil Moisture from Satellite Imagery. *Sensors*, 7(8), 1612–1629. <https://doi.org/10.3390/s7081612>
- Carlson, T.N., & Petropoulos, G.P. (2019). A new method for estimating of evapotranspiration and surface soil moisture from optical and thermal infrared measurements: the simplified triangle. *International Journal of Remote Sensing*, 40, 7716–7729. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1601288>
- Cui Y., Jia, L., & Fan, W. (2021). Estimation of actual evapotranspiration and its components in an irrigated area by integrating the Shuttleworth-Wallace and surface temperature-vegetation index schemes using the particle swarm optimization algorithm. *Agriculture and Forest Meteorology*, 307, 108488. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108488>
- Cui Y., Ma, S., Yao, Z., Chen, X., Luo, Z., Fan, W., & Hong, Y. (2020). Developing a Gap-Filling Algorithm Using DNN for the Ts-VI Triangle Model to Obtain Temporally Continuous Daily Actual Evapotranspiration in an Arid Area of China. *Remote Sensing*, 12, 1121. <https://doi.org/10.3390/rs12071121>
- DaSilva, B. B., Braga, A. C., Braga, C. C., De Oliveira, L. M. M., Montenegro, S. M. G. L., & Barbosa Junior, B. (2016). Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(1), 3–8. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n1p3-8>
- Dastoorani, M., Poormohammadi, S., & Rahimian, M. H. (2012). Estimation of Actual

- Evapotranspiration in Ardakan Pistachio Orchards Using Remote Sensing. *Journal of Water Research in Agriculture*, 26(1), 1-13. <https://doi.org/10.22092/jwra.2012.118947> [In Persian]
- De Tomás, A., Nieto, H., Guzinski, R., Salas, J., Sandholt, I., & Berliner, P. (2014). Validation and scale dependencies of the triangle method for the evaporative fraction estimation over heterogeneous areas. *Remote Sensing of Environment*, 152, 493–511. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.06.028>
- Gad, H. E., & El-Gayar, S. M. (2010). Climate parameters used to evaluate the evapotranspiration in delta central zone of Egypt. Fourteenth International Water Technology Conference, IWTC14, (February), 529–548. <https://www.researchgate.net/publication/267803552>
- Gao, Y., & Long, D. (2008). Intercomparison of remote sensing-based models for estimation of evapotranspiration and accuracy assessment based on SWAT. *Hydrological Processes*, 22(25), 4850–4869. <https://doi.org/10.1002/hyp.7104>
- Ghorbanian, A., Kakooei, M., Amani, M., Mahdavi, S., Mohammadzadeh, A., & Hasanlou, M. (2020). Improved land cover map of Iran using Sentinel imagery within Google Earth Engine and a novel automatic workflow for land cover classification using migrated training samples. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 167, 276–288. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.07.013>
- Jiang, L., & Islam, S. (1999). A methodology for estimation of surface evapotranspiration over large areas using remote sensing observations. *Geophysical Research Letters*, 26(17), 2773–2776. <https://doi.org/10.1029/1999GL006049>
- Jiang, L., & Islam, S. (2001). Estimation of surface evaporation map over Southern Great Plains using remote sensing data. *Water Resources Research*, 37(2), 329–340. <https://doi.org/10.1029/2000WR900255>
- Jiang, L., and Islam, S. (2003). An intercomparison of regional latent heat flux estimation using remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 24(11), 2221–2236. <https://doi.org/10.1080/01431160210154821>
- Kustas, W. P., & Norman, J. M. (1999). Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94(1), 13–29. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00005-2)
- Li, Z., Jia, L., & Lu, J. (2014). On Uncertainties of the Priestley-Taylor/LST-Fc Feature Space Method to Estimate Evapotranspiration: Case Study in an Arid/Semiarid Region in Northwest China. *Remote Sensing*, 7(1), 447–466. <https://doi.org/10.3390/rs70100447>
- Luo, T., Jutla, A., & Islam, S. (2015). Evapotranspiration estimation over agricultural plains using MODIS data for all sky conditions. *International Journal of Remote Sensing*, 36(5), 1235–1252. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1009648>
- Menenti, M., & Choudhury, B. (1993). Parameterization of land surface evaporation by means of location dependent potential evaporation and surface temperature range. *Proceeding*, 10A1407587, 561–568. [https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL\\_ID=201002169795909661](https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=201002169795909661)
- Mianabadi, A., Shirazi, P., Ghahraman, B., Coenders-Gerrits, A. M. J., Alizadeh, A. & Davary, K. (2019). Assessment of short- and long-term memory in trends of major climatic variables over Iran: 1966–2015. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(1–2), 677–691. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2410-z>
- Minacapilli M., Consoli, S., Vanella, D., Ciraolo, G., & Motisi, A. (2016). A time domain triangle method approach to estimate actual evapotranspiration: Application in a Mediterranean region using MODIS and MSG-SEVIRI products. *Remote Sensing of Environment*, 174, 10–23.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.018>

- Norman, J. M., Kustas, W. P., & Humes, K. S. (1995). Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77(3–4), 263–293. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02265-Y](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02265-Y)
- Rahimzadegan, M., & Janani, A. (2019). Estimating evapotranspiration of pistachio crop based on SEBAL algorithm using Landsat 8 satellite imagery. *Agricultural Water Management*, 217, 383–390. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.018>
- Rasmussen, M. O., Sørensen, M. K., Wu, B., Yan, N. Qin, H., & Sandholt, I. (2014). Regional-scale estimation of evapotranspiration for the North China Plain using MODIS data and the triangle-approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 31, 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.03.017>
- Roerink, G. J., Su, Z., & Menenti, M. (2000). S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(2), 147–157. [https://doi.org/10.1016/S1464-1909\(99\)00128-8](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(99)00128-8)
- Salimi Fard, M., Sanajnejad, S.H., & Rashki, A. (2022). Actual evapotranspiration estimation by Triangle algorithm and landsat 8 dara (Case study: Mashhad plain-Khorasan Razavi province). *Journal of RS and JIS for natural Resources*, Ready to Publish. <https://doi.org/10.30495/GIRS.2022.695287> [In Persian]
- Shuttleworth, W. J., & Wallace, J. S. (1985). Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111(469), 839–855. <https://doi.org/10.1002/qj.49711146910>
- Stisen, S., Sandholt, I., Nørgaard, A., Fensholt, R., & Jensen, K. H. (2008). Combining the triangle method with thermal inertia to estimate regional evapotranspiration — Applied to MSG-SEVIRI data in the Senegal River basin. *Remote Sensing of Environment*, 112(3), 1242–1255. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.08.013>
- Su, Z. (2002). The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1), 85–100. <https://doi.org/10.5194/hess-6-85-2002>
- Sun, Z., Wang, Q., Matsushita, B., Fukushima, T., Ouyang, Z., & Watanabe, M. (2008). A New Method to Define the VI-Ts Diagram Using Subpixel Vegetation and Soil Information: A Case Study over a Semiarid Agricultural Region in the North China Plain. *Sensors*, 8(10), 6260–6279. <https://doi.org/10.3390/s8106260>
- Tang, R., Li, Z. L., & Tang, B. (2010). An application of the Ts–VI triangle method with enhanced edges determination for evapotranspiration estimation from MODIS data in arid and semi-arid regions: Implementation and validation. *Remote Sensing of Environment*, 114(3), 540–551. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.10.012>
- Tang, R., Li, Z., & Chen, K. (2011). Validating MODIS-derived land surface evapotranspiration with in situ measurements at two AmeriFlux sites in a semiarid region. *Journal of Geophysical Research*, 116(D4), D04106. <https://doi.org/10.1029/2010JD014543>
- Teixeira, A. H. d. C., Bastiaanssen, W. G. M. Ahmad, M. D., & Bos, M. G. (2009). Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil. Part B: Application to the regional scale. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(3–4), 477–490. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.09.014>
- Wang, W., Huang, D., Wang, X. G., Liu, Y. R., & Zhou, F. (2011). Estimation of soil moisture using

- trapezoidal relationship between remotely sensed land surface temperature and vegetation index. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1699–1712. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1699-2011>
- Zhang, H., Gorelick, S., Avisse, N., Tilmant, A., Rajsekhar, D., & Yoon, J. (2016). A New Temperature-Vegetation Triangle Algorithm with Variable Edges (TAVE) for Satellite-Based Actual Evapotranspiration Estimation. *Remote Sensing*, 8(9),735. <https://doi.org/10.3390/rs8090735>
- Zhu W., Wang, Y., & Jia, S. (2023). A remote sensing-based method for daily evapotranspiration mapping and partitioning in a poorly gauged basin with arid ecosystems in the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Hydrology*, 616, 128807. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128807>