



Evaluation of FAO Wapor Product and PYSEBAL Algorithm in Estimating the Amount of Water Consumed

Mohadese Sadat Fakhar¹, Abbas Kaviani²

1. Water Engineering Department, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. Email: www.fakhar.mohadese95@gmail.com

2. Corresponding Author, Water Engineering Department, Agricultural and natural resources Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. Email: kaviani@eng.ikiu.ac.ir, Abbasskaviani@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	<p>Evapotranspiration is an essential component of the hydrological cycle and a key element of water resources management, especially in arid and semi-arid regions. Today, remote sensing technology has made it possible to estimate evapotranspiration on a large scale, so using this technology can be considered as a promising method to reduce the spatial variation of evapotranspiration. In this study, the daily, monthly and seasonal changes of actual evapotranspiration were investigated using the global model of WaPOR product and PYSEBAL algorithm in Qazvin plain during the period from 2015 to 2021. The results obtained in this study were compared with Hargreaves and Samani evapotranspiration data, which is an accurate empirical method in the region. The mean deviation of the estimated and observed data in the daily scale in both models shows that the PYSEBAL algorithm has a more negligible difference and, in most cases, is close to the data obtained from the empirical method. While in WaPOR product, it was associated with underestimation compared to the empirical method during the almost entire period. WaPOR product was able to show the amount of seasonal evapotranspiration changes to a good extent, but it did not have good accuracy. This product had acceptable accuracy in spring and summer, but in autumn and winter, its accuracy decreases. The results showed that the WaPOR product can provide water needs for each time period, so it can play an important role in managing water resources, determining the required water consumption. PYSEBAL algorithm presented more accurate results than WaPOR product, so that the correlation coefficient values in PYSEBAL algorithm and WaPOR model are equal to 1.51 and 2.86 mm / day and the correlation coefficient values were 0.87 and 0.64, respectively. Therefore, if the studies on estimation of the amount of evapotranspiration for large areas (such as basins) and long periods are considered, the use of WaPOR products due to the lack of missing data can play a suitable role in managing water resources and water needs for the region or basin.</p>
Article history:	
Received: Apr. 11, 2022	
Revised: July. 7, 2022	
Accepted: July. 30, 2022	
Published online: Aug. 23, 2022	
Keywords: Surface Energy Balance, Real Evapotranspiration, Global Model, Remote Sensing, Water Resources Management.	
<hr/> <p>Cite this article Fakhar, M. S., & Kaviani, A. (2022). Evaluation of FAO WaPOR product and PYSEBAL algorithm in estimating The amount of water consumed. <i>Iranian Journal of Soil and Water Research</i>, 53 (6), 1359-1372.</p> <p>© The Author(s). Publisher: University of Tehran Press.</p> <p>DOI: http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.341474.669242</p> <hr/>	



ارزیابی محصول WaPOR فائو و الگوریتم PYSEBAL در تخمین مقدار نیاز آبی دشت قزوین بر اساس هوش مصنوعی

محدثه السادات فخار^۱، عباس کاویانی^{۲*}

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ع)، قزوین، ایران. ایمیل:

www.fakhar.mohadesse95@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ع)، قزوین، ایران. ایمیل:

kaviani@eng.ikiu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	تبخیر-تعرق یک جزء اساسی از چرخه هیدرولوژی و به‌عنوان یک عنصر کلیدی مدیریت منابع آب به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. امروزه فناوری سنجش‌از‌دور امکان برآورد تبخیر - تعرق در سطوح وسیع را فراهم نموده است بنابراین استفاده از این فناوری می‌تواند به‌عنوان یک روش امیدوارکننده به‌منظور کاهش تغییرات مکانی تبخیر-تعرق به شمار آید. در این پژوهش به بررسی تغییرات روزانه، ماهانه و فصلی تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از مدل جهانی محصول WaPOR و الگوریتم PYSEBAL در دشت قزوین طی بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ پرداخته شد. نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش با روش هارگریوز و سامانی که به‌عنوان روش تجربی دقیق در منطقه است مورد مقایسه قرار گرفت. بررسی انحراف میانگین مقادیر برآوردشده از مقادیر مشاهده‌شده در مقیاس روزانه در هر دو مدل نشان داد که الگوریتم PYSEBAL از اختلاف کمتری برخوردار بوده و در بیشتر مواقع به مقادیر به‌دست‌آمده از روش تجربی نزدیک‌تر بود درحالی‌که در محصول WaPOR تقریباً در تمام طول بازه مورد بررسی با کم‌برآوردی نسبت به روش تجربی همراه بود. محصول WaPOR توانست تا حد مناسبی میزان تغییرات تبخیر-تعرق فصلی را نمایش دهد اما از دقت مناسبی برخوردار نبود این محصول در فصل بهار و تابستان تا حدود مناسبی دقت قابل‌قبول داشت اما در فصل پاییز و زمستان از میزان دقت آن کاسته می‌شود. نتایج نشان داد که محصول WaPOR می‌تواند امکان تعیین نیاز آبی برای هر بازه زمانی را فراهم آورد، بنابراین می‌تواند نقش مهمی در مدیریت منابع آب، تعیین آب مصرفی موردنیاز ارائه دهد. الگوریتم PYSEBAL نتایج دقیق‌تری را نسبت به محصول WaPOR ارائه داد، به‌طوری‌که مقدار ضریب همبستگی در الگوریتم PYSEBAL و مدل WaPOR به ترتیب برابر با مقدار ۱/۵۱ و ۲/۸۶ میلی‌متر بر روز و مقدار ضریب همبستگی نیز به‌ترتیب با ۰/۸۷ و ۰/۶۴ همراه بود. بنابراین در صورتی که مطالعات برآورد مقدار تبخیر-تعرق برای مساحت‌های بزرگ (همچون حوضه) و بازه‌های زمانی بلندمدت مدنظر باشد استفاده از محصول WaPOR نیز با توجه به عدم وجود خلأ داده‌ای می‌تواند نقش مناسبی در مدیریت منابع آب و نیاز آبی منطقه یا حوضه ارائه دهد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱/۲۲	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۴/۱۶	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۵/۸	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۶/۱	
واژه‌های کلیدی: بیان انرژی سطحی، تبخیر-تعرق واقعی، سنجش از دور، مدل جهانی، مدیریت منابع آب.	

استناد: فخار، محدثه السادات؛ کاویانی، عباس (۱۴۰۱). ارزیابی محصول WaPOR فائو و الگوریتم PYSEBAL در تخمین مقدار نیاز آبی دشت قزوین بر اساس هوش

مصنوعی. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۶)، ۱۳۷۲-۱۳۵۹.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.341474.669242>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

تغییرات اقلیمی و رشد جمعیت فشار زیادی را بر منابع آب شیرین وارد کرده است (Mancosu et al., 2015). تبخیر-تعرق یک شار اصلی هیدرولوژیکی است که چرخه‌های آب و هوا و انرژی را با یکدیگر مرتبط می‌سازد و نقش مهمی در هیدرولوژی، هواشناسی و مدیریت آب کشاورزی ایفا می‌کند (Hu et al., 2018). یکی از روش‌هایی که باعث بهبود مدیریت مصرف آب و افزایش راندمان آن می‌شود، برآورد دقیق تبخیر - تعرق یا تخمین میزان آب مصرفی گیاهان است (Tang et al., 2010). تبخیر - تعرق یکی از مؤلفه‌های اصلی بیلان آبی هر منطقه و از عوامل کلیدی برای برنامه‌ریزی صحیح و مناسب آبیاری به منظور بهبود راندمان آب مصرفی، در اراضی فاریاب است (Sánchez et al., 2008). از سوی تبخیر - تعرق نقش فراوانی در اقلیم جهانی از طریق چرخه هیدرولوژی ایفا کرده و برآورد آن کاربردهای زیادی در پیش‌بینی پدیده‌هایی همچون خشک‌سالی، سیل، عملکرد محصول و تناسب کاربری اراضی دارد (Kustas & Norman, 1996). بنابراین با توجه به اهمیت فرآیند تبخیر - تعرق، لازم است این ویژگی حتی‌الامکان به‌طور دقیق مطالعه شود (Kazamias & Sapountzis, 2017). در دهه‌های اخیر روش‌ها، مدل‌های زمینی و محصولات مختلفی در مقیاس منطقه‌ای و جهانی ارائه شده است که انتظار می‌رود مشاهدات زمینی را در رابطه با متغیرها و پارامترهای سطح زمین به صورت اطلاعات پیوسته در اختیار قرار داده که برای برآوردهای تبخیر - تعرق در مقیاس‌های بزرگ ضروری هستند. با این حال بیشترین مشکلات در چرخه آب به علت فیزیک پیچیده و ناهمگونی سیمای منطقه مربوط به تبخیر - تعرق است (McCabe et al., 2016). بیشتر روش‌های اندازه‌گیری تبخیر - تعرق که برای تخمین اجرای معادله بیلان انرژی استفاده می‌شود می‌تواند برآوردهای خوبی در مقیاس محلی داشته و به دلیل متفاوت بودن سطح و منطقه نمی‌توان آنها را به مناطق وسیع تعمیم داد (Paul et al., 2013). روش‌های متعددی نیز بر مبنای فیزیک جو و هیدرولوژی برای محاسبه تبخیر - تعرق توسعه یافته که مقایسه و ارزیابی آن‌ها در تحقیقات مختلف ارائه شده است (Kustas & Norman, 1996; Lee et al., 2004). مبنای اکثر روش‌های ارائه شده بر پایه روابط بین پارامترهای هواشناسی است که با توجه به کمبود و یا نقصان داده‌های هواشناسی استفاده از این روش‌ها در عمل با محدودیت مواجه است (Ayenew, 2003). سنجش از دور با قابلیت پوشش وسیع و متناوب از سطح زمین به ابزاری قدرتمند در پایش تحقیقات زمینی و زیست‌محیطی تبدیل شده است بنابراین ویژگی‌هایی از سطح زمین همچون ضریب آلیدو، شاخص پوشش گیاهی و دمای سطح زمین در دهه‌های اخیر در مدل‌هایی که با فرآیندهای هیدرولوژیکی، هواشناسی و اکولوژیکی سروکار دارند استفاده می‌شود (Kazamias & Sapountzis, 2017). سالیان اخیر الگوریتم‌های متعددی برای برآورد تبخیر - تعرق با استفاده از سنجش از دور ارائه شده است. تمامی این مدل‌ها بر رابطه بیلان انرژی استوار هستند (Gowda et al., 2008). پژوهش‌های مختلفی برای ارزیابی هر یک از این الگوریتم‌ها انجام شده است. در همه این الگوریتم‌ها کاربر با عوامل مختلفی سعی در انتخاب پیکسل‌هایی به‌عنوان پیکسل شاخص سرد و گرم دارد (Senay et al., 2016). الگوریتم SEBAL روشی بر مبنای روابط فیزیکی و تجربی است. این الگوریتم به‌منظور محاسبه مستقیم انرژی در مقیاس منطقه‌ای و با کمترین داده‌های زمینی طراحی شده است. الگوریتم SEBAL به حضور هم‌زمان پیکسل‌های سرد و گرم در تصاویر سنجش از دوری نیاز دارد. برآورد مقادیر تبخیر - تعرق در این الگوریتم به‌صورت دستی توسط کاربر انجام می‌شود. امروزه نسخه‌های جدیدتری از الگوریتم SEBAL ایجاد شده که تمامی مراحل محاسبات به‌صورت کاملاً خودکار انجام می‌شود. یکی از این روش‌ها، الگوریتم PYSEBAL است. الگوریتم PYSEBAL نسخه‌ای از الگوریتم SEBAL در محیط پایتون است (Hessels et al., 2017). این روش برخلاف روش‌های قبلی به‌صورت کاملاً خودکار بوده و انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم به‌صورت عواملی از پیش تعیین شده و بر مبنای هوش مصنوعی است (Fakhar & Kaviani, 2022). پژوهش‌های مختلفی در این زمینه انجام شده است. به‌طوری‌که در پژوهشی (Caiserman et al., 2021) به محاسبه و ارزیابی نیاز آبی در یک دشت کشاورزی در شهرستان مرودشت استان فارس، با استفاده از داده‌های سنجش از دور و داده‌های زمینی پرداختند طبقه‌بندی مناطق برداشت محصول در این پژوهش توسط تصاویر سنتینل-۲ و شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی^۲ برآورد شد که نتایج حاصل نشان داد که ۸۵ درصد مناطق به‌درستی طبقه‌بندی شدند همچنین مقدار تبخیر - تعرق روزانه به روش تجربی و فرمول FAO-56 با استفاده از تصاویر لندست^۳ و الگوریتم PYSEBAL مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت که نتایج حاصل با خطای جذر میانگین مربعات ۰/۶۷ نشان از دقت بالای الگوریتم PYSEBAL است. با توجه به اهمیت فرآیند کالیبراسیون خودکار در الگوریتم‌های سنجش از دوری (Fakhar & Kaviani,

1 Sentinel-2

2 The normalized difference vegetation index (NDVI)

3 Landsat-OLI



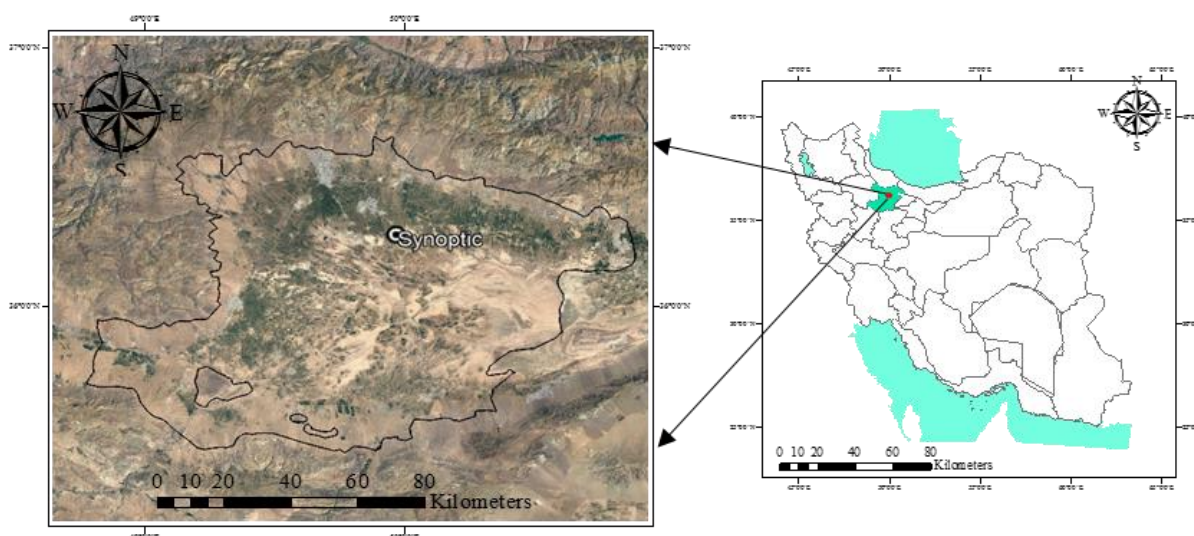
(2022) در پژوهشی دو الگوریتم SEBAL و PYSEBAL بر اساس اطلاعات سه سنجنده مادیس، لندست TM و لندست ETM+ با داده‌های لایسیمیتری مورد بررسی قرار گرفت نتایج نشان داد الگوریتم PYSEBAL در انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم از دقت بالاتری نسبت به مدل SEBAL برخوردار است و بر اساس نتایج به‌دست‌آمده الگوریتم PYSEBAL از همبستگی بالاتری برخوردار است از جمله دلایلی که این الگوریتم عملکرد بهتری داشته می‌توان به انتخاب دقیق‌تر پیکسل‌های سرد و گرم اشاره کرد. زیرا عدم وجود دقت کافی در انتخاب درست پیکسل‌ها سبب ایجاد خطا در محاسبه مقدار شار حرارت محسوس خواهد شد. از دیگر ویژگی‌های ارزشمند الگوریتم PYSEBAL می‌توان به جداسازی تبخیر از تعرق و برآورد نقشه‌های خروجی از مقدار رطوبت خاک اشاره کرد (Fakhar & Kaviani, 2022). به‌طوری‌که در پژوهشی (Kisekka et al., 2022) به مقایسه و ارزیابی اطلاعات رطوبت خاک منطقه ریشه در مقیاس مکانی - زمانی با استفاده از الگوریتم PYSEBAL و حس‌گرهای TDR نصب‌شده در یک تاکستان در طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰ پرداختند. همین‌طور در پژوهش دیگری (Xue et al., 2021) به بررسی مقادیر تبخیر-تعرق در دو باغ گردو در منطقه‌ای در کالیفرنیا با استفاده از دو الگوریتم تک منبعی PYSEBAL و SEBS پرداختند نتایج به‌دست‌آمده نشان از همبستگی بالا بین اندازه‌گیری‌های صورت گرفته و دو الگوریتم در طی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ داشت. با توجه به وجود پراکندگی در مناطق موردبررسی در فواصل زمانی کوتاه‌تر، نتیجه‌گیری بر اساس مشاهده‌های نقطه‌ای و محدود ممکن است کلیت و فراگیری لازم برای فواصل زمانی طولانی یا حدود مکانی وسیع را نداشته باشد (Majozzi et al., 2017). به همین منظور در سال‌های اخیر روش‌های سنجش‌ازدور با تجزیه و تحلیل محصولات مختلف، مقدار تبخیر - تعرق مبتنی بر مدل‌های سطح زمین و همین‌طور سامانه‌های تخمین بر اساس مشاهدات تجربی ایجاد کرده است که در مکان‌هایی با مقیاس بزرگ و با توجه به فواصل زمانی و مکانی مختلف قابل استفاده هستند. سازمان غذا و کشاورزی سازمان ملل متحد در سال‌های اخیر سیستمی را با نام سیستم بهره‌وری دسترسی آزاد به آب را در مناطقی همچون آفریقا و خاورمیانه که با بحران آب رو به رو هستند ایجاد کرده است. برآورد تبخیر - تعرق واقعی از WaPOR یکی از مهم‌ترین محصولات این سیستم است. پایگاه داده WaPOR نقشه فضایی ۱۰ روزه و سالانه با اندازه پیکسل ۲۵۰ متری توسط الگوریتم ETLook برای سال‌های ۲۰۰۹ تاکنون ارائه می‌دهد که معادلات و نحوه محاسبات میزان تبخیر - تعرق در پژوهشی توسط Bastiaanssen به تفصیل بیان شده است (Bastiaanssen et al., 2012). این مدل جهانی به‌منظور پردازش خودکار طراحی شده است زیرا این مدل رطوبت خاک را به‌عنوان یک‌لایه از داده‌های ورودی در نظر می‌گیرد (FAO, 2018). از جمله مزیت‌های پایگاه داده WaPOR امکان برآورد متغیرهای موردنظر به‌صورت واقعی، مکانی و پیوسته است. این مدل جهانی نیز از دو آستانه خشک و تر استفاده می‌کند. پژوهش‌های مختلفی در این زمینه انجام گرفته است به‌طوری‌که در پژوهشی (Rahimpour et al., 2018) به بررسی و مقایسه نتایج حاصل از پایگاه داده WaPOR با داده‌های Scintillometer حوضه آبریز زاینده‌رود پرداختند نتایج حاکی از صحت و دقت مناسب تبخیر - تعرق واقعی، محصول WaPOR فائو در مقایسه با داده‌های دستگاه Scintillometer بود. در پژوهش دیگری (Blatchford et al., 2020) به بررسی مقادیر تبخیر - تعرق واقعی با استفاده از پایگاه داده WaPOR در ۱۴ ایستگاه هواشناسی برای مناطق کشت آبی و دیم در آفریقا پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد همبستگی کلی تبخیر - تعرق واقعی حاصل از WaPOR در مقیاس نقطه‌ای در مقایسه با اطلاعات حاصل از ایستگاه‌ها ۰/۷۱ و مقدار میانگین ریشه مربع خطا ۱/۲ میلی‌متر در روز گزارش شد. دشت قزوین به عنوان قطب کشاورزی مدرن در ایران می‌تواند با مدیریت راهبردی و هوشمند کشاورزی و منابع آب به بهبود و توسعه کشاورزی استان کمک شایانی کند. با توجه به موارد مطرح‌شده هدف از این پژوهش مقایسه و ارزیابی مقادیر تبخیر - تعرق در دشت قزوین به منظور تعیین مقدار نیاز آبیاری طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ میلادی با استفاده از الگوریتم PYSEBAL و پایگاه داده WaPOR است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه و داده‌های هواشناسی

منطقه مورد مطالعه دشت قزوین با مساحت ۵۰۶۲۱۸ هکتار محدوده‌ی مرکزی و شرق استان را تشکیل می‌دهد که محدوده مورد مطالعه در شکل (۱) نمایش داده شده است. از نظر محصولات کشاورزی در بین دشت‌های ایران حائز اهمیت است. این دشت در فلات مرکزی کشور و دارای آب‌وهوای نیمه‌خشک، تابستان‌های گرم و زمستان‌های نسبتاً سرد است. در این دشت ایستگاه هواشناسی سینوپتیک قزوین با آمار بلندمدت (قزوین) وجود دارد. با توجه به آمار بلندمدت ایستگاه سینوپتیک قزوین، در این تحقیق از داده‌های این ایستگاه استفاده شد که در طول جغرافیایی $50^{\circ}03'$ درجه شرقی و عرض جغرافیایی $36^{\circ}15'$ درجه شمالی قرار دارد. انجام مطالعات مبتنی بر سنجش‌ازدور

مستلزم استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی است. در این مطالعه از داده‌های ثبت‌شده توسط ایستگاه سینوپتیک قزوین در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ استفاده شده است. این داده‌ها عبارت هستند از دمای هوا (برحسب سلسیوس) به صورت دمای کمینه و بیشینه و دمای متوسط روزانه، سرعت باد و رطوبت نسبی (برحسب درصد).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی دشت قزوین در محدوده مورد مطالعه

معرفی الگوریتم‌های مورد بررسی

الگوریتم PYSEBAL

الگوریتم PYSEBAL نسخه‌ای از الگوریتم SEBAL در محیط پایتون است (Hessels et al., 2017). در این مدل فرآیند انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم به صورت کاملاً خودکار انجام می‌شود. انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم، شامل تعیین یک معیار از پیش تعیین‌شده است. معیارهای از پیش تعیین‌شده شامل دمای سطح (Ts)، شاخص نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)، طول زبری برای انتقال مومنتوم (Zom) و آلبدو سطح (α) است. مقدار Rn با کسر تمام جریان‌های تابشی خروجی از همه شارهای تابشی ورودی از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$R_n = (1-\alpha)R_{s\downarrow} + \left(\frac{W}{m^2}\right) \varepsilon_0 R_{L\downarrow} - \varepsilon_0 \sigma T_s^4 \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این معادله Rs طول موج کوتاه ورودی (W/m²)، RL طول موج بلند ورودی (W/m²)، ε₀ انتشار سطحی، σ ثابت استفان بولتزمن (5.67 × 10⁻⁸ W/m²/K⁴) و Ts دمای سطح زمین (برحسب کلوین) است. G به عنوان کسری از Rn محاسبه می‌شود و PYSEBAL از معادله تجربی G توسعه داده شده توسط باستیانسن و رابطه ۲ محاسبه می‌شود (Bastiaanssen, 1995).

$$G = T_{s, \text{datum}} (0.0038 + 0.007\alpha) (1 - 0.98\text{NDVI}^4) \times R_n \quad (\text{رابطه ۲})$$

T_{s datum} دمای تصحیح‌شده از سطح زمین است و Ts بر اساس DEM-SRTM منطقه مورد نظر و با در نظر گرفتن شیب به دست می‌آید. یک کالیبراسیون داخلی H در PYSEBAL اعمال می‌شود بنابراین نیازی به تصحیح اتمسفری Ts نخواهد بود. H در مدل PYSEBAL با استفاده از مقاومت آئرودینامیکی از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$H = \frac{\rho \times C_p \times dT}{\Gamma_{ah}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن ρ چگالی هوا (Kg/m³)، Cp گرمای ویژه در فشار معین [1004 J kg⁻¹ k⁻¹]، Γ_{ah} مقاومت آئرودینامیکی در برابر انتقال حرارت بین z₁ و z₂ (m/s) است. پارامتر dT اختلاف دما بین دو ارتفاع نزدیک به سطح است (z₁ = 0.1 m و z₂ = 2 m) بالای لایه کنوپی (K) که به عنوان یک تابع خطی از دمای سطحی اصلاح‌شده T_{s datum}، تخمین زده می‌شود (رابطه ۴). ضرایب (a) و (b) در معادله (۴) برای پیکسل‌های سرد و گرم به صورت تکراری تعیین می‌شود؛ بنابراین برای هر تصویر ماهواره‌ای یا منطقه خاص مقداری متفاوت است.

$$dT = a + b \times T_{s, \text{datum}} \quad (\text{رابطه ۴})$$



$$a = \frac{dT_{hot}-dt_{cold}}{T_{s,datum.hot}-dT_{s,datum.cold}} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$b = \frac{dT_{hot-a}}{T_{s,datum.hot}} \quad \text{رابطه ۶}$$

الگوریتم ETLook

در الگوریتم ETLook به منظور محاسبه تبخیر - تعرق از معادله پنمن مانتیث استفاده می شود که به وسیله داده های سنجش از دوری محاسبه می شود در الگوریتم ETLook مقادیر تبخیر از سطح خاک، آب و گیاه با استفاده از رابطه ۷ و مقدار تعرق از سطح گیاه از رابطه ۸ محاسبه می شود.

$$E = \frac{\Delta(R_{n,soil} - G) + \rho C_p \left(\frac{\Delta_e}{r_{a,soil}}\right)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_{soil}}{r_{a,soil}}\right)} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$T = \frac{\Delta(R_{n,canopy} - G) + \rho C_p \left(\frac{\Delta_e}{r_{a,canopy}}\right)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_{canopy}}{r_{a,canopy}}\right)} \quad \text{رابطه ۸}$$

در این معادلات E و T به ترتیب تبخیر - تعرق هستند (Wm^{-2})، Δ (mbarK⁻¹) شیب منحنی فشار بخار است که بر اساس دمای هوا (C, Tair) و فشار بخار اشباع (mbar, es) تغییر می کند. Δ_s (mbar) کمبود فشار بخار است که از تفاوت بین مقادیر بخار اشباع و واقعی حاصل می شود Rn_{soil} و Rn_{canopy} ، به ترتیب شار تابش خالص خاک و پوشش گیاهی هستند و همچنین r_{soil} و r_{canopy} به ترتیب نشان دهنده مقاومت در برابر خاک و پوشش گیاهی هستند $r_{a,soil}$ و $r_{a,canopy}$ نماینده مقاومت آئروپونامیکی در برابر خاک و پوشش گیاهی هستند.

در این پژوهش الگوریتم PYSEBAL در محیط پایتون و با استفاده از تصاویر سنجنده مادیس که از سه محصول این سنجنده با تفکیک مکانی مختلف به منظور برآورد تبخیر - تعرق استفاده شد در ادامه اطلاعات مربوط به پایگاه داده WaPOR در محیط (GEE^۱) انجام و خروجی های مدل به صورت فایل رستری برای انجام سایر موارد استفاده شد. که در جدول (۱) مشخصاتی از محصولات به کار گرفته ارائه شده است. در نهایت پس از دریافت تصاویر مربوط به تبخیر - تعرق حاصل از دو مدل به ارزیابی و مقایسه مقادیر حاصل از این دو مدل با توجه به نقشه کاربری اراضی دشت قزوین پرداخته شد.

جدول ۱. داده های سنجنده های ورودی به همراه مشخصات هر یک از آن ها به منظور اجرای الگوریتم

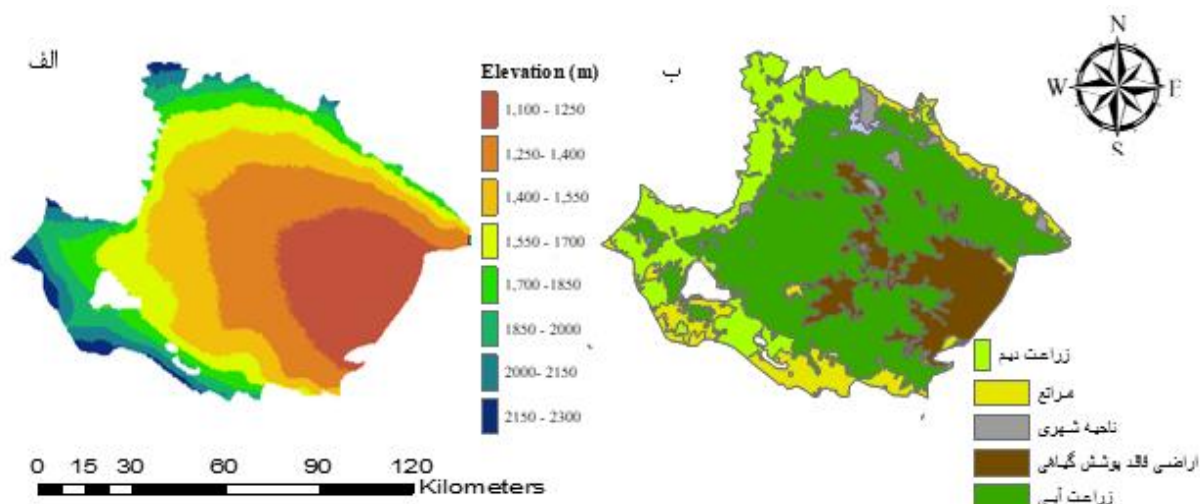
الگوریتم	تصاویر استفاده شده	سنجنده	قدرت تفکیک مکانی (متر)	قدرت تفکیک زمانی
PYSEBAL	(DEM)	SRTM	30	-
	(Albedo)	MOD09GA	500	Daily
	Land Surface Temperature (LST)	MOD11A1	1000	Daily
	Vegetation index (NDVI)	MOD13Q1	250	16 days
FAO-WaPOR	WaPOR	MODIS, AMSRE ^۲	250	10 days

کاربری اراضی

تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین به عنوان یکی از عوامل مهم و مؤثر بر تغییرات محیط زیست جهانی محسوب می شود. امروزه فناوری سنجش از دور به طور مؤثر به منظور شناسایی و تعیین مقدار تغییرات کاربری اراضی و اثرات آن بر محیط زیست استفاده می شود به همین منظور نقشه کاربری اراضی اولیه در دشت قزوین بر اساس آخرین تغییرات در سال ۱۳۹۹ تهیه شد این نقشه پنج طبقه اراضی مختلف را نشان می دهد (شکل ۲).

1 Google Earth Engine

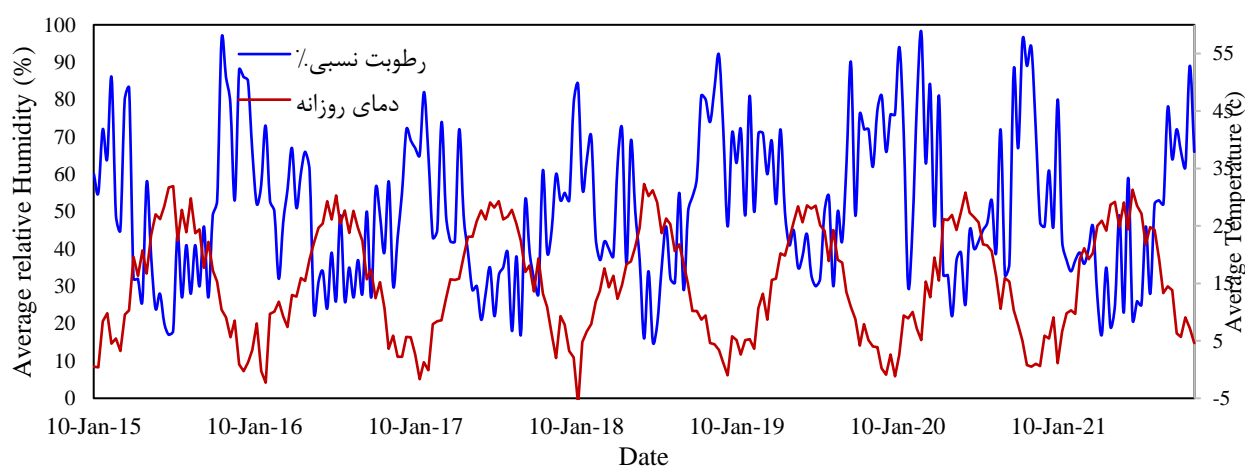
2 Advanced Microwave Scanning Radiometer



شکل ۲. نقشه طبقه‌بندی کاربری اراضی (ب) و طبقات ارتفاعی (الف) در دشت قزوین

طبق آخرین تغییرات ایجادشده، زراعت آبی با مساحتی معادل با ۲۶۱۴۱۹ هکتار بخش وسیعی از منطقه مورد مطالعه را شامل می‌شود. بعدازآن اراضی فاقد پوشش گیاهی با مساحتی شامل ۶۷۱۴۰ هکتار، اراضی دیم با ۷۸۴۷۵ هکتار و در نهایت مراتع با ۴۹۱۵۷ هکتار را شامل می‌شود.

شکل (۳) روند تغییرات دمای روزانه و مقدار رطوبت نسبی اندازه‌گیری شده در ایستگاه زمینی سینوپتیک قزوین را در این بازه هفت ساله نشان می‌دهد. متوسط دمای روزانه و رطوبت نسبی ایستگاه سینوپتیک قزوین که معرف منطقه طرح است به ترتیب برابر با ۱۵/۰۹ درجه سلسیوس و ۵۰/۷۷ درصد است که بیشترین میزان متوسط دمای روزانه در ایستگاه قزوین ۳۲/۳ درجه سلسیوس و کمترین میزان متوسط حداقل روزانه ۶/۱- درجه سلسیوس است. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است حداقل دمای روزانه در زمستان و ماه‌های دی و بهمن و حداکثر دمای هوا در تابستان و بخصوص در ماه‌های تیر و مردادماه اتفاق می‌افتد. منطقه مورد مطالعه با توجه به آمار آب و هوایی بر اساس منحنی آمبروترمیک دارای ۲۱۵ روز خشک بوده که جزء آب و هوای گرم و خشک مدیترانه‌ای است.



شکل ۳. تغییرات دمای هوا و رطوبت نسبی در ایستگاه سینوپتیک قزوین

در ادامه به منظور محاسبه تبخیر - تعرق ماهانه و سالانه بر اساس رابطه معادله (۹) با تقسیم خروجی تبخیر - تعرق واقعی ۲۴ ساعته به مقدار تبخیر - تعرق مرجع روزانه، کسر تبخیر - تعرق مرجع در زمان عبور ماهواره در روز مورد نظر به دست خواهد آمد که در الگوریتم PYSEBAL معادل ضریب گیاهی (KC) در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه تبخیر - تعرق ماهانه از رابطه (۱۱) استفاده شد که بر مبنای آن تبخیر - تعرق یک دوره زمانی از حاصل ضرب تبخیر - تعرق مرجع دوره در کسر تبخیر - تعرق محاسبه می‌شود؛ و در ادامه از حاصل جمع مقدار تبخیر-تعرق در تمامی ماه‌ها، مقدار تبخیر-تعرق سالانه محاسبه شد.



$$ET_r F = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad \text{رابطه ۹}$$

$$ET_{24} = ET_r F \times ET_{r-24} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$ET_{period} = ET_r F_{period} \sum_1^n ET_{r-24} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

اعتبارسنجی برآورد تبخیر - تعرق

با توجه به عدم در دسترس بودن داده‌های لایسیمتری در این بازه زمانی، به منظور بررسی مقادیر به دست آمده از هر یک از الگوریتم‌ها از روش تجربی (Hargreaves and Samani (1985) استفاده شد. دقت روش هارگیوز به شدت به میزان ساعات آفتابی و ابرناکی وابسته است (Farzanpour et al., 2018). در پژوهشی (Fakhar and Kaviani (2021) به بررسی روش‌های تجربی مختلف تبخیر - تعرق مرجع با استفاده از داده‌های لایسیمتری در استان قزوین پرداختند بررسی‌های انجام شده نشان داد که استفاده از این روش در منطقه مورد مطالعه با توجه به اقلیم خشک و نیمه خشک استان بسیار کارآمد است.

شاخص‌های آماری

به منظور ارزیابی مقادیر تبخیر-تعرق مدل‌سازی شده از الگوریتم PYSEBAL و محصول WaPOR با مقادیر به دست آمده از روش تجربی (Hargreaves and Samani (1985) از تعدادی شاخص‌های آماری استفاده شد که در جدول (۲) نشان داده شده است. میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین جذر مربعات خطا (RMSE)، خطای استاندارد (SE)، خطای اریب میانگین (MBE) و ضریب همبستگی استفاده شده است. ضریب همبستگی شدت رابطه و همچنین نوع رابطه را نشان می‌دهد که مقداری بین عدد (۱ و -۱) است. میانگین خطای مطلق نشان دهنده صحت مدل است و مقدار صفر آن نشان دهنده صحت ۱۰۰ درصد است به طوری که هر قدر مقدار آن از صفر فاصله داشته باشد، حاکی از کم شدن صحت مدل است. معیار ارزیابی MBE نیز بیانگر میانگین انحراف است. این معیار علاوه بر دارا بودن علامت مثبت (بیش برآوردی مدل) و یا منفی (کم برآوردی مدل)، مقدار انحراف از مقادیر مشاهده شده را نیز نشان می‌دهد. MBE برابر با صفر نشان می‌دهد که برآورد مدل مناسب بوده و در آن هیچ گونه انحرافی وجود ندارد. هر چه میانگین جذر مربعات خطا کمتر باشد نشان دهنده صحت بیشتر مدل خواهد بود. خطای استاندارد راهی برای برآورد میزان دقت احتمالی بین متغیرهای مورد بررسی است. به طوری که هر چه مقدار آن کمتر باشد، نشان دهنده صحت برآورد صورت گرفته است.

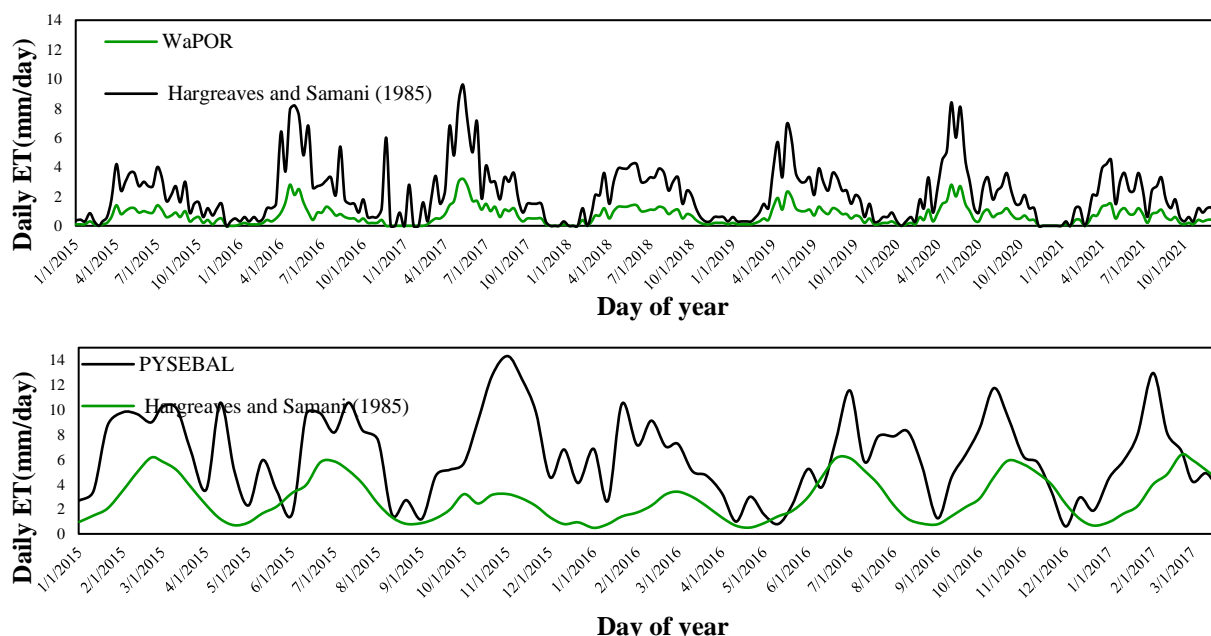
جدول ۲. شاخص‌های آماری استفاده شده در این پژوهش

معادله	شاخص آماری	شماره
$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n ET_{mod} - ET_L }{n}$	MAE	۱
$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{mod} - ET_{method})}{n}$	MBE	۲
$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{mod} - ET_{method})^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}}$	RMSE	۳
$SE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{mod} - ET_{method})^2}{n-1} \right)^{\frac{1}{2}}$	SE	۴
$r = \frac{[\sum (ET_{method} - \overline{ET_{method}})(ET_{mod} - \overline{ET_{mod}})]^2}{\sqrt{\sum (ET_{method} - \overline{ET_{method}})^2 \sum (ET_{mod} - \overline{ET_{mod}})^2}}$	r	۵

نتایج

در این پژوهش در ابتدا به بررسی مقادیر تبخیر - تعرق حاصل از روش تجربی (Hargreaves and Samani (1985) و محصول تبخیر-تعرق واقعی WaPOR و PYSEBAL پرداخته شد که نتایج حاصله از محصول WaPOR با گام زمانی ۱۰ روزه و نتایج الگوریتم PYSEBAL به صورت ماهانه در شکل (۴) نشان داده شده است که در مجموع ۲۵۲ خروجی برای محصول WaPOR و ۸۴ خروجی برای الگوریتم PYSEBAL حاصل شد. همان طور که در شکل (۴) نیز قابل ملاحظه است روند تغییرات در مقادیر تبخیر-تعرق در بازه زمانی مورد مطالعه در روش تجربی (Hargreaves and Samani (1985) و محصول WaPOR تا مقدار زیادی نزدیک بوده به طوری که

با توجه به میزان کاهشی یا افزایشی بودن مقدار تبخیر-تعرق در بازه مورد مطالعه نسبت این تغییرات در روش تجربی با نوسانات بسیار زیادی همراه بوده اما در محصول WaPOR مقدار این نوسانات از تغییرات بسیار کمتری برخوردار است. به طوری که میزان بیش‌برآوردی در مدل تجربی در بعضی از زمان‌ها گاهی تا مرز دو برابر هم نسبت به داده‌های قبل و بعد آن وجود داشته اما در محصول WaPOR نوسانات به شدت کمتر از مدل تجربی بود. در ادامه، بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد محصول WaPOR در ماه‌های می و آوریل دارای بیشترین مقدار و در ماه‌های نوامبر، دسامبر و ژانویه با کمترین مقدار همراه بوده است. با توجه به اینکه روش Hargreaves and Samani (1985) منحصراً به دما و تشعشع خالص خورشیدی وابسته است. بنابراین یکی از دلایل عدم وجود رفتاری مشابه به لحاظ روند تغییرات روزانه تبخیر - تعرق بین محصول WaPOR و الگوریتم PYSEBAL با روش Hargreaves and Samani (1985) برآورد نقطه‌ای صورت گرفته توسط روش تجربی و عدم تأثیر پارامترهایی همچون رطوبت نسبی، سرعت باد و سایر پارامترهای تشعشعی به صورت لحظه‌ای است.



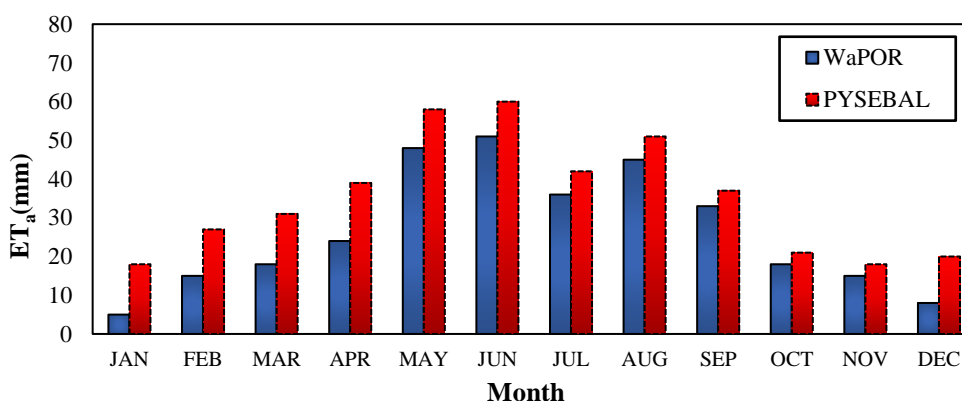
شکل ۴. مقایسه مقادیر تبخیر-تعرق روزانه روش Hargreaves and Samani (1985) با مدل‌های WaPOR و PYSEBAL در طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱

به‌طور کلی نتایج به‌دست‌آمده از مدل PYSEBAL به داده‌های روش تجربی نزدیک‌تر بوده به طوری که خروجی‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم PYSEBAL نشان می‌دهد که مقادیر تبخیر-تعرق به‌دست‌آمده در طی ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست با بیشترین مقدار همراه بوده است. بررسی مقادیر با استفاده از شاخص‌های آماری نشان می‌دهد که الگوریتم PYSEBAL با مقدار $RMSE = 1.51 \text{ mm/day}$ نسبت به مدل WaPOR عملکرد مناسب‌تری را داشته است (جدول ۳). با توجه به اینکه ریشه میانگین مربع خطا تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد به همین منظور به بررسی عواملی که این شاخص را تحت تأثیر قرار می‌دهند پرداخته می‌شود. به طوری که بررسی انحراف میانگین مقادیر برآورد شده از مقادیر مشاهده‌شده در هر دو مدل نشان می‌دهد که الگوریتم PYSEBAL از اختلاف کمتری برخوردار بوده و در بیشتر مواقع به مقادیر به‌دست‌آمده از روش تجربی نزدیک بوده است در حالی که در مدل WaPOR تقریباً در تمام طول بازه مورد بررسی با کم‌برآوردی نسبت به روش تجربی همراه بوده است. در بررسی عوامل مختلف در مدل WaPOR و الگوریتم PYSEBAL می‌توان به بررسی همبستگی وزنی با استفاده از انحراف معیار اشاره نمود. بزرگ بودن مقدار انحراف معیار نشان از این دارد که مدل یا الگوریتم نتوانسته است به خوبی الگوی نوسانات مقادیر مورد بررسی را برآورد کند و افزایش مقدار ضریب همبستگی سبب کاهش مقدار انحراف معیار در بررسی‌های انجام‌شده دارد به طوری که بررسی نتایج شاخص‌های آماری نشان می‌دهد که الگوریتم PYSEBAL نتوانسته است با مقادیر ضریب همبستگی بیشتر شرایط بهتری از برآورد را از خود داشته باشد.

جدول ۳. مقایسه شاخص‌های آماری مدل WaPOR و الگوریتم PYSEBAL

روشنی	RMSE (mm/day)	MAE (mm/day)	MBE (mm/day)	R (-)	SE (mm/day)
PYSEBAL	1.51	0.73	0.36	0.87	0.37
WAPOR	2.86	0.57	0.39	0.64	0.14

با توجه به اهمیت مقایسه مکانی تبخیر - تعرق به بررسی تغییرات ماهانه آن در طول سال ۲۰۱۸ با استفاده از الگوریتم PYSEBAL و محصول WaPOR پرداخته شد شکل (۵). نتایج به دست آمده حاکی از آن است که در هر دو مدل تغییرات تبخیر - تعرق روند زنگوله‌ای داشته به طوری که مدل WaPOR به طور کلی با کم‌برآوردی همراه بوده و تقریباً این موضوع در تمامی ماه‌های سال دیده می‌شود به طوری که هرچه به ماه‌های سرد سال نزدیک شده اختلاف این تغییرات بیشتر دیده می‌شود. به طور کلی میزان اختلاف در ماه‌های گرم که بیشترین میزان تبخیر - تعرق در آن‌ها رخ داده است به مقدار نسبتاً اندکی است و تقریباً نزدیکی مناسبی بین مقادیر PYSEBAL و WaPOR دیده شد. از جمله دلایلی که مدل WaPOR در ماه‌های سرد سال با اختلاف بیشتری همراه بوده است می‌توان به پراکندگی کم پوشش گیاهی در منطقه اشاره کرد.

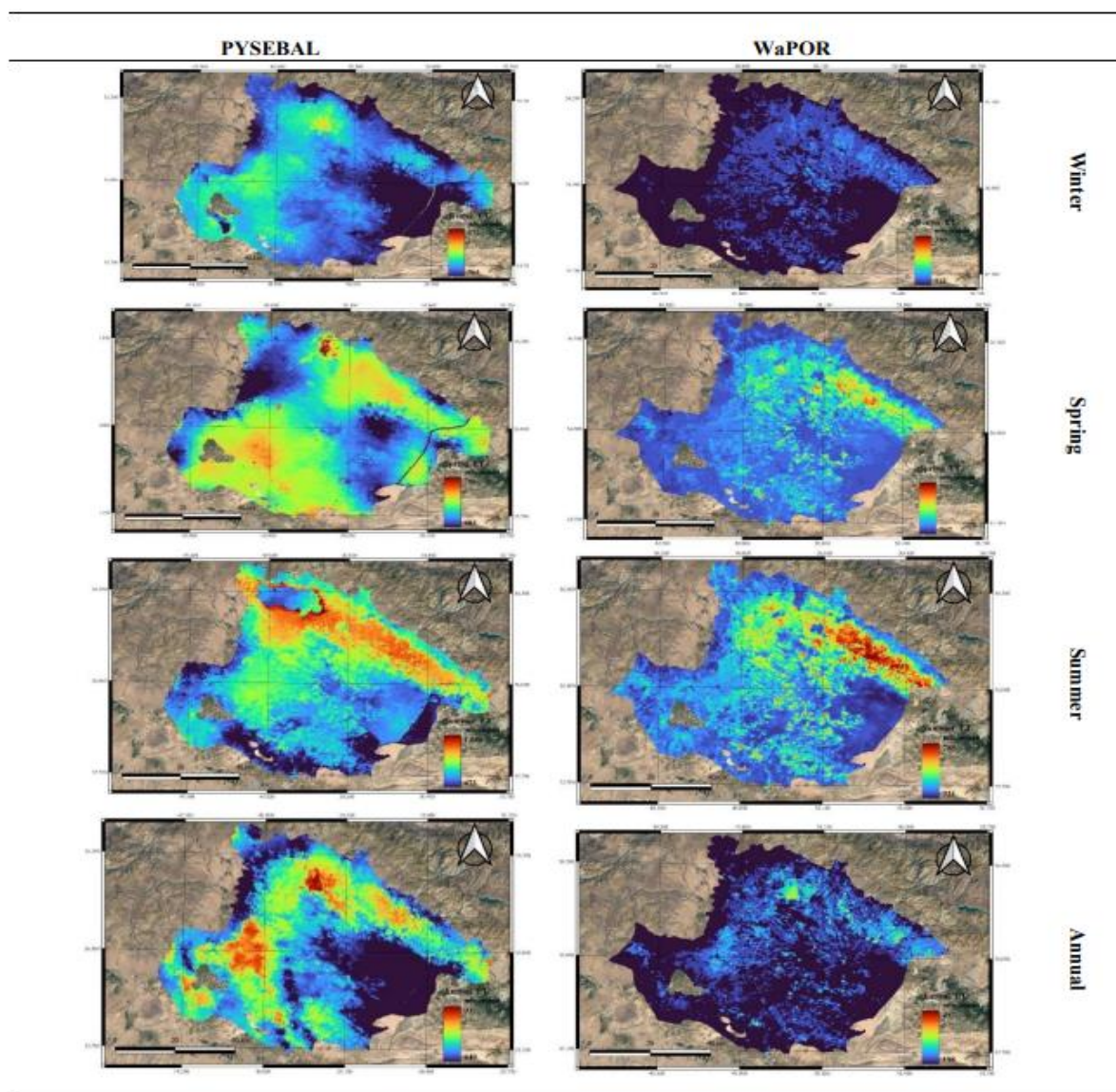


شکل ۵. مقایسه نتایج تبخیر-تعرق ماهانه محصول WaPOR و الگوریتم PYSEBAL در سال ۲۰۱۸

با توجه به اهمیت تبخیر-تعرق به مقایسه مکانی آن با استفاده از مدل و محصول بررسی شده در مقیاس فصلی پرداخته می‌شود به طوری که با تمرکز بر کاربری اراضی کشاورزی و بر اساس طبقات کاربری نقشه کاربری اراضی در سال ۲۰۲۰ انجام شد. مطابق با شکل ۶ در مدل PYSEBAL و محصول WaPOR در محدوده کاربری زراعت مقادیر تبخیر - تعرق بالاتری در این مناطق نسبت به سایر نقاط دشت صورت می‌گیرد به طور کلی در مناطق زراعت آبی که باغات نیز در این گروه از کاربری قرار می‌گیرند مقادیر تبخیر - تعرق بیشتری را نسبت به دیگر اراضی کشاورزی به علت شاخص پوشش گیاهی نرمال شده و دمای سطح پایین‌تر دارند به طوری که با توجه به نقشه تغییرات فصلی تبخیر - تعرق شکل ۶ می‌توان به راحتی مشاهده کرد که با توجه به افزایش شاخص سطح برگ و شاخص پوشش گیاهی در فصول بهار و تابستان از شمال شرق تا نواحی مرکزی دشت میزان تبخیر - تعرق با افزایش همراه هست که علت آن هم نوع کاربری اراضی در دشت است اما به طور کلی گرچه محصول WaPOR نیز توانسته است تا حد مناسبی این تغییرات را نمایش دهد اما از دقت مناسبی برخوردار نبوده به طوری این محصول در فصل بهار و تابستان تا حدود مناسبی دقت قابل قبول داشته است اما در فصل پاییز و زمستان به خوبی این جزئیات فراوان نیست.

در کاربری اراضی دیم و مراتع نیز در محصول WaPOR وضعیت تقریباً مشابهی را در مراتع نشان می‌دهد به طوری که در این مناطق تقریباً تفاوت زیادی در نقشه‌های خروجی بین مناطق ذکر شده دیده نشد؛ بنابراین این مسئله نشان‌دهنده این است که پارامترهایی همچون دمای سطح زمین و شاخص‌های مرتبط با پوشش گیاهی در برآورد میزان تبخیر - تعرق از تأثیر زیادی برخوردار هستند (Fakhar & Kaviani, 2022). الگوریتم PYSEBAL نیز در برآورد مقدار تبخیر - تعرق در مراتع وضعیتی مشابه با محصول WaPOR را داشت به طوری که در مناطق با ارتفاع کم، برآورد پایین و پراکنش تقریباً مناسبی را نشان می‌دهد. در ادامه با توجه تفاوت در مقادیر تبخیر - تعرق در ارتفاعات مختلف به بررسی میانگین تغییرات نسبی بین نقشه‌های تبخیر - تعرق محصول WaPOR و الگوریتم PYSEBAL در دشت قزوین در طی سال ۲۰۲۱ پرداخته شد (شکل ۷-الف). در این پژوهش به منظور بررسی تغییرات نسبی از رابطه (۱۳) استفاده شد.

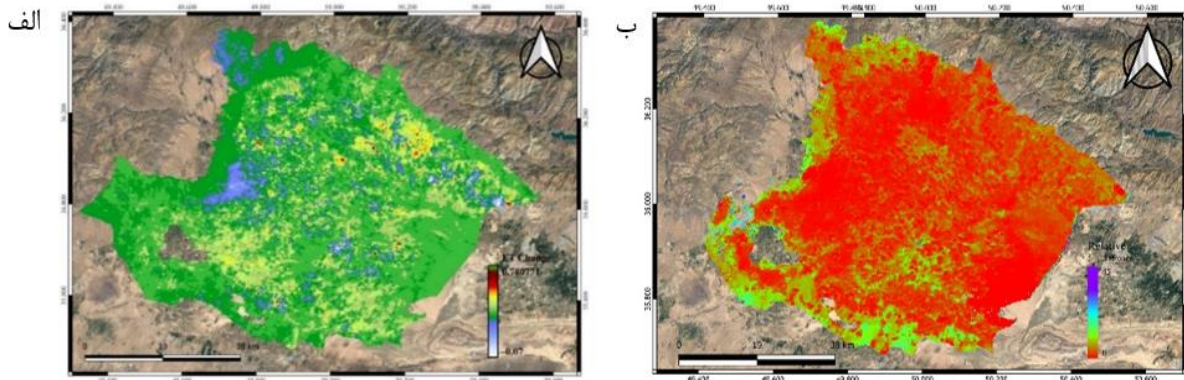
$$Relative_{difference} = \left(\frac{ET_{PYSEBAL} - ET_{WaPOR}}{ET_{WaPOR}} \right) \quad \text{رابطه (۱۲)}$$



شکل ۶. نقشه تبخیر-تعرق تغییرات فصلی با استفاده از الگوریتم PYSEBAL و WaPOR با اندازه پیکسل ۲۵۰ متری

به طور کلی با توجه به شکل (۷-ب) الگوریتم PYSEBAL نسبت به محصول WaPOR برآورد بیشتری را نشان می‌دهد به طوری که در مناطق با ارتفاع بین ۱۱۰۰ تا ۱۷۰۰ متر اختلاف کمتری نسبت به محصول WaPOR داشته است. بیشترین اختلاف نسبی مشاهده شده (۱/۲) است همچنین بیشترین اختلاف مشاهده شده در ارتفاع بین ۲۰۰۰ تا ۲۳۰۰ متر به میزان (۴/۹) ملاحظه شد. در ادامه با توجه به فواصل زمانی کوتاه محصول WaPOR و تفکیک مکانی مناسب آن به بررسی تغییرات تبخیر - تعرق در طول زمان پرداخته شد شکل (۷-الف). دو متغیر در این خروجی مورد مقایسه قرار گرفت که شامل زمان به عنوان متغیر مستقل در بازه سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ و دیگری تبخیر - تعرق به عنوان متغیر وابسته که میزان تغییرات آن در طول زمان مورد بررسی قرار گرفته شده است. به طوری که با استفاده از فرآیند رگرسیون خطی به منظور آشکارسازی تغییرات تبخیر - تعرق به صورت مکانی در طول زمان انجام می‌شود که توسط آن شدت تغییرات بررسی خواهد شد. نتایج به دست آمده نشان داد که در مناطقی همچون اراضی فاقد پوشش گیاهی و یا مناطق با پوشش گیاهی پراکنده در بازه زمانی سال‌های مورد بررسی از تغییرات اندکی برخوردار بوده و حتی در بعضی نقاط نسبت میزان تغییرات به صورت منفی ملاحظه شد در مقابل هرچه تراکم پوشش گیاهی افزایش پیدا کرده میزان این تغییرات افزایش پیدا کرده به طوری که در بعضی از نقاط دشت همچون اراضی باغی مقدار این تغییرات در ماکزیمم حالت ممکن قرار دارد. از جمله دلایل این امر می‌تواند اثرات تابش انرژی و میزان بازتاب اتفاق افتاده از پوشش گیاهی موجود در منطقه باشد از دیگر عوامل تأثیرگذار می‌توان به میزان رطوبت خاک نیز اشاره کرد به طوری که هرچه از میزان پوشش گیاهی کاسته شده است مقدار نیاز آبی گیاه کمتر شده و در نتیجه تغییرات تبخیر - تعرق نیز در حداقل ممکن

قرارگرفته در مقابل در مناطق باغی میزان تراکم پوشش گیاهی بیشتر بوده در نتیجه افزایش تراکم پوشش گیاهی موجب کاهش دمای سطح زمین شده به همین دلیل نیاز آبی گیاهان در این نقاط با افزایش همراه خواهد بود.



شکل ۷. بررسی تغییرات ET در بازه زمانی سالهای ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ توسط محصول WaPOR (الف) و بررسی تغییرات نسبی الگوریتم PYSEBAL نسبت به محصول WaPOR در سال ۲۰۲۱ (ب)

نتیجه گیری

برآورد دقیق تبخیر-تعرق اهمیت قابل توجهی در تخمین نیاز آبی گیاه در مرحله طراحی پروژه‌های آبیاری، تعیین وسعت قابل کشت، انتخاب الگوی کشت و تقویم آبیاری دارد. در تحقیق حاضر سعی شد با استفاده از الگوریتم PYSEBAL و محصول WaPOR به بررسی تعیین میزان صحت این دو مدل در برآورد نیاز آبی در مقیاس روزانه، ماهانه و فصلی پرداخته شود. برآورد الگوریتم PYSEBAL برخلاف محصول WaPOR که به صورت منطقه‌ای و جهانی در دسترس هستند به صورت آماده وجود ندارند بنابراین زمان و دشواری بیشتری برای استفاده از آن به نسبت محصول WaPOR است. در الگوریتم PYSEBAL انتخاب و دریافت تصاویر توسط کاربر انجام خواهد شد بنابراین گاهی به دلیل وجود ابرناکی امکان محاسبه مقدار نیاز آبی منطقه برای زمان خاصی فراهم نخواهد بود در مقابل محصول WaPOR با قدرت تفکیک مکانی به نسبت مناسب و همین‌طور به علت استفاده از داده‌های ماکروویو تحت تأثیر ابرناکی قرار نخواهد گرفت و این عامل می‌تواند امکان تعیین نیاز آبی برای هر بازه زمانی را فراهم آورد، بنابراین محصول WaPOR می‌تواند نقش مهمی در مدیریت منابع آب، تعیین آب مصرفی مورد نیاز ارائه دهد. در طی مطالعه‌ای که توسط (Geshnigani et al., 2021) انجام شده، داده‌های تبخیر-تعرق مرجع حاصل از محصول WaPOR را با مقادیر برآورد شده از طریق روش اصلاح‌شده هارگیوز سامانی و روش پنمن - مانتیت مقایسه کردند نتایج به دست آمده نشان داد که محصول WaPOR می‌تواند به عنوان جایگزین مناسبی برای روش هارگیوز سامانی و روش پنمن - مانتیت در مواردی که کمبود داده‌های هواشناسی وجود دارد، استفاده شود که به نتایج به دست آمده از این پژوهش نزدیک است. اما به طور کلی الگوریتم PYSEBAL نتایج دقیق‌تری را نسبت به مدل WaPOR ایجاد نمود زیرا تقریباً در تمامی زمان‌های مورد بررسی محصول WaPOR برآورد نسبتاً کمتری را در مقابل الگوریتم PYSEBAL و مدل تجربی داشته است. در بررسی میزان تبخیر - تعرق به صورت فصلی مشخص شد که بیشترین میزان تبخیر - تعرق در فصول گرم سال اتفاق خواهد افتاد به طوری که این موضوع در هر دو روش بررسی شده قابل ملاحظه است و هرچه به فصول سرد سال نزدیک شده، نسبت این اختلاف در هر دو روش مورد بررسی بیشتر خواهد بود. همچنین با توجه به نقشه کاربری اراضی بیشترین برآوردهای صورت گرفته مربوط به اراضی باغی بوده است. در نهایت با توجه به اینکه محصول WaPOR توسط الگوریتم ETLook با در نظر گرفتن مقدار رطوبت خاک به عنوان یک ورودی مقدار تبخیر - تعرق را محاسبه می‌کند بنابراین پیشنهاد می‌شود که میزان همبستگی برآوردهای تبخیر - تعرق صورت گرفته در اراضی با کاربری مختلف با میزان بارندگی ثبت شده توسط ایستگاه‌های سینوپتیک و یا مدل‌هایی که میزان بارش را در یک منطقه را برآورد می‌کنند مورد ارزیابی قرار گیرد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCE

Aynew, T. (2003). Evapotranspiration estimation using thematic mapper spectral satellite data in the

- Ethiopian rift and adjacent highlands. *Journal of Hydrology*, 279(1–4), 83–93.
- Allen, R.G. Pereira, L.S. Raes, D. Smith M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage. Paper no. 56. FAO, Rome
- Bastiaanssen, W. G. M., Cheema, M. J. M., Immerzeel, W. W., Miltenburg, I. J., & Pelgrum, H. (2012). Surface energy balance and actual evapotranspiration of the transboundary Indus Basin estimated from satellite measurements and the ETLook model. *Water Resources Research*, 48(11).
- Blatchford, M. L., Mannaerts, C. M., Njuki, S. M., Nouri, H., Zeng, Y., Pelgrum, H., Wonink, S., & Karimi, P. (2020). Evaluation of WaPOR V2 evapotranspiration products across Africa. *Hydrological Processes*, 34(15), 3200–3221.
- Caiserman, A., Amiraslani, F., & Dumas, D. (2021). Assessment of the agricultural water budget in southern Iran using Sentinel-2 to Landsat-8 datasets. *Journal of Arid Environments*, 188, 104461.
- Fakhar, M. S., & Kaviani, A. (2021). Comparison of the concepts of Potential evapotranspiration (ETp) and reference evapotranspiration (ETo) using lysimetric data in qazvin province. *Environment and Water Engineering*, 7(1), 1–16. <https://doi.org/10.22034/jewe.2021.279059.1535> (In Persian).
- Fakhar, M. S., & Kaviani, A. (2022). Estimation of actual evapotranspiration using automatic calibration in PYSEBAL and METRIC algorithms in Qazvin plain. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. (In Persian).
- Fakhar, M. S., & Kaviani, A. (2022). Estimation of Actual Evapotranspiration Based on the Latest Modified Version of the Surface Energy Balance Algorithm Using Lysimeter Data. *Iranian Irrigation and Drainage*. (In Persian).
- Geshnigani, F. S., Mirabbasi, R., & Golabi, M. R. (2021). Evaluation of FAO's WaPOR product in estimating the reference evapotranspiration for stream flow modeling. *Theoretical and Applied Climatology*, 144(1), 191–201.
- Gowda, P. H., Chavez, J. L., Colaizzi, P. D., Evett, S. R., Howell, T. A., & Tolk, J. A. (2008). ET mapping for agricultural water management: present status and challenges. *Irrigation Science*, 26(3), 223–237.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(3), 225–230.
- Hessels, T., van Opstal, J., Trambauer, P., Bastiaanssen, W., Faouzi, M., Mohamed, Y., & ErRaji, A. (2017). *pySEBAL Version 3.3*. 7.
- Hu, Y., Modat, M., Gibson, E., Li, W., Ghavami, N., Bonmati, E., Wang, G., Bandula, S., Moore, C. M., & Emberton, M. (2018). Weakly-supervised convolutional neural networks for multimodal image registration. *Medical Image Analysis*, 49, 1–13.
- Kazamias, A. P., & Sapountzis, M. (2017). Spatial and temporal assessment of potential soil erosion over Greece. *Water*, 59, 315–321.
- Kisekka, I., Peddinti, S. R., Kustas, W. P., McElrone, A. J., Bambach-Ortiz, N., McKee, L., & Bastiaanssen, W. (2022). Spatial-temporal modeling of root zone soil moisture dynamics in a vineyard using machine learning and remote sensing. *Irrigation Science*, 1–17.
- Kustas, W. P., & Norman, J. M. (1996). Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. *Hydrological Sciences Journal*, 41(4), 495–516.
- Lee, T. S., Najim, M. M. M., & Aminul, M. H. (2004). Estimating evapotranspiration of irrigated rice at the West Coast of the Peninsular of Malaysia.
- Lettenmaier, D. P., & Famiglietti, J. S. (2006). Water from on high. *Nature*, 444(7119), 562–563.
- Mancosu, N., Snyder, R. L., Kyriakakis, G., & Spano, D. (2015). Water scarcity and future challenges for food production. *Water*, 7(3), 975–992.
- Majazi, N. P., Mannaerts, C. M., Ramoelo, A., Mathieu, R., Mudau, A. E., & Verhoef, W. (2017). An intercomparison of satellite-based daily evapotranspiration estimates under different eco-climatic regions in South Africa. *Remote Sensing*, 9(4), 307.
- McCabe, M. F., Ershadi, A., Jimenez, C., Miralles, D. G., Michel, D., & Wood, E. F. (2016). The GEWEX LandFlux project: Evaluation of model evaporation using tower-based and globally gridded forcing data. *Geoscientific Model Development*, 9(1), 283–305.
- Paul, G., Gowda, P. H., Prasad, P. V. V., Howell, T. A., Staggenborg, S. A., & Neale, C. M. U. (2013). Lysimetric evaluation of SEBAL using high resolution airborne imagery from BEAREX08. *Advances in Water Resources*, 59, 157–168.
- Rahimpour, M., Karimi, N., Rouzbahani, R., & Eftekhari, M. (2018). Validation and calibration of FAO WaPOR product (actual evapotranspiration) in Iran using in-situ measurements. *Iran-Water Resources Research*, 14(2), 254–263. (In Persian)



- Sánchez, J. M., Kustas, W. P., Caselles, V., & Anderson, M. C. (2008). Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations. *Remote Sensing of Environment*, 112(3), 1130–1143.
- Senay, G. B., Friedrichs, M., Singh, R. K., & Velpuri, N. M. (2016). Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River Basin. *Remote Sensing of Environment*, 185, 171–185.
- 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.
- Xue, J., Fulton, A., & Kisekka, I. (2021). Evaluating the role of remote sensing-based energy balance models in improving site-specific irrigation management for young walnut orchards. *Agricultural Water Management*, 256, 107132.