



## Evaluation of Evapotranspiration Rate and Water Productivity Based on FAO WaPOR Database in Qazvin Plain

M.S. Fakhar<sup>1</sup>, A. Kaviani<sup>2\*</sup>

Received: 19-03-2023

Revised: 20-05-2023

Accepted: 29-05-2023

Available Online: 06-06-2023

### How to cite this article:

Fakhar, M.S., & Kaviani, A. (2023). Evaluation of evapotranspiration rate and water productivity based on FAO WaPOR database in Qazvin plain. *Journal of Water and Soil*, 37(3), 487-502. (In Persian with English abstract).  
<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.81695.1267>

### Introduction

Achieving food security in the future with sustainable use of water resources will be a big challenge for the current and future generations. Population increase, economic growth and climate change intensify the pressure on existing resources. Agriculture is a key consumer of water, and it is necessary to closely monitor water productivity for it and explore opportunities to increase its productivity. Systematic monitoring of water productivity through the use of remote sensing techniques can help identifying the gaps in water productivity and evaluate appropriate solutions to address these gaps.

### Materials and Methods

Qazvin plain is known as a hub of modern agriculture by providing about 5% of the country's agricultural products. Therefore, estimating water demand and water productivity in agricultural management in the region is considered important and necessary. In order to monitor water productivity through access to various data across Africa and the Middle East, the WaPOR database provides the possibility to examine the rate of evapotranspiration, biomass and gross and net biomass volume productivity based on the land use map in the period of years 2009 to 2021. In this database, it is possible to check the mentioned items at three levels with different spatial resolution, which according to the scope of the study, it is possible to check values with a spatial resolution of 250(m). In order to determine the efficiency and accuracy of the land cover classification map of the WaPOR database, the results obtained are examined and compared with the Dynamic World model, which represents a global model with high accuracy. For this purpose, the latest land use map related to 2021 Using the WaPOR database and Dynamic World in the GEE system, it was prepared and based on the classification of the region in order to check the accuracy of the user map of the WaPOR database and to determine the percentage of each class compared to each other. Finally, all estimable indicators were calculated and checked by the WaPOR database during the years 2009 to 2022.

### Results and Discussion

The amount of evapotranspiration of the plants covered by the irrigation network in the period of 2009 to 2016 has been associated with a relatively stable trend, but this trend has decreased in 2017 onwards, which is one of the reasons for the decrease in the amount of evapotranspiration in this the period of time and can refer to the lack of water available to the plant due to the limited water resources in recent years. The investigation of the total amount of biomass in different lands shows that during the years 2009 to 2022, this index has been accompanied by a gradual increase in all uses, so that the amount of TBP index in 2020 was 17% more than in 2009. It shows the amount of biomass in different lands. The amount of biomass in the lands covered by the water network is 5

1 and 2- Ph.D Student and Associate Professor of Water Science and Engineering Department, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: [kaviani@eng.ikiu.ac.ir](mailto:kaviani@eng.ikiu.ac.ir))

DOI: [10.22067/jsw.2023.81695.1267](https://doi.org/10.22067/jsw.2023.81695.1267)

to 6 times higher than that of the rainfed lands. Among the influential parameters in estimating the TBP index, we can mention the amount of evaporation, transpiration, and transpiration, the increase or decrease of each of these parameters will have a significant impact on the estimated amount of biomass. The results showed that the amount of biomass production in the areas covered by the irrigation network largely depends on the high transpiration rate in these areas. From the beginning of 2009 to 2016, the gross amount of biomass water in the lands covered by the irrigation network has been accompanied by an increase, but in 2017, drastic changes in the process of underground changes will decrease the area of the lands covered by the network and many of these lands. It has been turned into fallow and rainfed lands. The analysis of NBWP index also showed that the amount of net productivity in rainfed lands is strongly dependent on the annual increase rate, and much of the crop yield in rainfed lands is dependent on the amount received. Among the influential parameters in estimating the total amount of biomass, we can mention the amount of evaporation, transpiration and transpiration, the increase or decrease of each of these parameters will have a significant impact on the amount of estimated biomass.

## Conclusion

WaPOR database data can play an important role in estimating the rate of delayed transpiration and parameters related to water productivity in the region due to its ten-day spatial resolution and the absence of data gaps. In general, the WaPOR database can be used as a guide in the reliable determination of evapotranspiration values and planning related to water resources in the agricultural sector.

**Keywords:** Agricultural water consumption, Biomass, GEE, Remote sensing, Water management

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۲، ص. ۴۸۷-۵۰۲

## ارزیابی میزان تبخیر-تعرق و بهره‌وری آب بر اساس پایگاه داده WaPOR فائو در دشت قزوین

محدثه السادات فخار<sup>۱</sup> - عباس کاویانی<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۸

### چکیده

دستیابی به امنیت غذایی در آینده با استفاده پایدار از منابع آب، چالشی بزرگ برای نسل فعلی و آینده خواهد بود. افزایش جمعیت، رشد اقتصادی و تغییرات آب و هوا، همگی بر افزایش فشار بر منابع موجود می‌افزایند. کشاورزی یک مصرف‌کننده کلیدی آب است و نظارت دقیق بر بهره‌وری آب در کشاورزی و بررسی فرصت‌ها برای افزایش بهره‌وری آن ضروری است. پایش سیستماتیک بهره‌وری آب از طریق استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدور می‌تواند به شناسایی شکاف‌های بهره‌وری آب و ارزیابی راه‌حل‌های مناسب برای رفع این شکاف‌ها کمک کند. دشت قزوین با تأمین حدود ۵ درصد محصولات کشاورزی مورد نیاز کشور به‌عنوان قطب کشاورزی مدرن شناخته شده است. در این پژوهش با استفاده از پایگاه داده WaPOR به ارزیابی مقادیر تبخیر-تعرق، میزان زیست‌توده و بهره‌وری حجم آب ناخالص و خالص زیست‌توده بر اساس نقشه کاربری اراضی در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۱ پرداخته شد. نتایج نشان داد مقادیر تبخیر-تعرق گیاهان تحت پوشش شبکه آبیاری در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۶ با روند نسبتاً پایداری همراه بوده اما این روند پایدار در سال ۲۰۱۷ به بعد با کاهش روبه‌رو شده است که از جمله دلایل کاهش میزان تبخیر-تعرق در این بازه زمانی می‌توان به کمبود آب در دسترس گیاه با توجه به منابع محدود آب در طی سال‌های اخیر اشاره کرد. بررسی روند میزان کل زیست‌توده در اراضی مختلف نشان می‌دهد در طی سال‌های مورد مطالعه این شاخص در تمامی کاربری‌ها با افزایش تدریجی همراه شده است. به طوری که میزان شاخص کل تولید بیومس (TBP) در سال ۲۰۲۰ به میزان ۱۷ درصد بیشتر از سال ۲۰۰۹ است. میزان ناخالص حجم آب زیست‌توده از ابتدای سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۱۶ در اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری با میزان افزایشی همراه بوده است اما از سال ۲۰۱۷ روند تغییرات دمایی و افت شدید تراز آب زیرزمینی باعث کاهش سطح اراضی تحت پوشش شبکه شده و بسیاری از این اراضی به اراضی آیش و دیم تبدیل شده‌اند. بررسی شاخص بهره‌وری خالص آب زیست‌توده (NBWP) نیز نشان داد میزان بهره‌وری خالص در اراضی دیم به شدت به میزان بارش سالانه وابسته است و بخش زیادی از عملکرد محصول در اراضی دیم وابسته به میزان بارش دریافتی است. از جمله پارامترهای تأثیرگذار در برآورد مقدار کل زیست‌توده می‌توان به مقدار، تبخیر، تعرق و برآب اشاره کرد که افزایشی یا کاهش بود هر یک از این پارامترها تأثیر به‌سزایی در مقدار زیست‌توده برآورد شده خواهد داشت. به‌طور کلی پایگاه داده WaPOR می‌تواند به‌عنوان یک راهنما در تعیین قابل‌اطمینان مقادیر تبخیر-تعرق و برنامه‌ریزی مرتبط با منابع آب در بخش کشاورزی، مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: آب مصرفی کشاورزی، زیست‌توده، سنجش‌ازدور، مدیریت آب، GEE

### مقدمه

توسط برگ از سیستم ریشه خارج می‌شود (Katul et al., 2012).  
تبخیر-تعرق یک عامل کلیدی در چرخه هیدرولوژیکی است زیرا  
مکانیسم و انرژی مورد نیاز برای انتقال آب ذخیره‌شده در سیستم خاک

تبخیر-تعرق (ET) فرآیندی است که شامل تبخیر از سطح، مانند  
آب‌های آزاد، خاک و پوشش گیاهی و تعرق به‌عنوان آبی است که عمدتاً

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(۶)</sup>، قزوین، ایران

\*- نویسنده مسئول: (Email: [kaviani@eng.ikiu.ac.ir](mailto:kaviani@eng.ikiu.ac.ir))

در سطح جهانی برای تخمین مقادیر ET در مقیاس‌های منطقه‌ای و میانی در سطح زمین است، زیرا این رویکرد مستقیماً تشعشعات سطحی و اجزای بیلان انرژی سطحی را به هم مرتبط می‌کند (Karishma *et al.*, 2022). در طول ۳۰ سال گذشته، استفاده ترکیبی از داده‌های سنجش از دور ماهواره‌ای و حسگرهای نوری و حرارتی مادون قرمز پیشرفت قابل توجهی در برآورد ET ارائه کرده است (Liou and Kar, 2014). یکی از معروف‌ترین الگوریتم‌ها به‌منظور محاسبه تبخیر-تعرق الگوریتم SEBAL<sup>۳</sup> است (Baastiansen *et al.*, 1998). در طی سال‌های متوالی الگوریتم‌های مختلفی همچون SEBS<sup>۴</sup> (Su, 2002)، METRIC<sup>۵</sup> (Allen, 2007) و PySEBAL (Hessels *et al.*, 2017) به‌منظور محاسبه تبخیر-تعرق توسعه پیدا کرده است. پیش تبخیر-تعرق در سراسر جهان با استفاده از روش‌های مختلف انجام شده است (Oberg and Meless, 2006). سازمان FAO در سال‌های اخیر سیستمی را با نام سیستم بهره‌وری دسترسی آزاد به آب را در مناطقی همچون آفریقا و خاورمیانه که با بحران آب روبه‌رو هستند ایجاد کرده است (Fakhar and Kaviani, 2022). 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 در طی سال‌های ۲۰۰۹ تاکنون ارائه می‌دهد که معادلات و نحوه محاسبات میزان تبخیر-تعرق در پژوهشی توسط بستیان سن و همکاران 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 یک لایه از داده‌های ورودی در نظر می‌گیرد. پژوهش‌های مختلفی در این زمینه انجام شده است به‌طوری‌که باریده و همکاران (Barideh *et al.*, 2022) در پژوهشی به برآورد تبخیر - تعرق واقعی با مدل جهانی WaPOR و مقایسه آن با معادله پنمن مانیتیت در حوضه دریاچه ارومیه طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ پرداخت. نتایج نشان از دقت بالای این مدل جهانی با داده‌های حاصله از معادله داشته است. با توجه به وجود داده‌های پیوسته این مدل و همپوشانی جهانی آن در پژوهشی (Blatchford *et al.*, 2020) به ارزیابی محصول تبخیر-تعرق 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 مدل WaPOR در مقیاس نقطه‌ای در مقایسه با اطلاعات حاصل از ایستگاه‌ها ۰/۷۱ و مقدار ریشه میانگین مربع خطا ۱/۲ میلی‌متر در روز گزارش شد. در نهایت با توجه به اینکه WaPOR یک مجموعه داده دسترسی باز بوده و تقریباً مقادیری نزدیک به زمان

- اتمسفر و تبدیل به بخار آب را توصیف می‌کند (Liu *et al.*, 2019). در زمینه وسیع‌تر کشاورزی آبی حدود ۷۰ درصد از برداشت آب شیرین را تشکیل می‌دهد و این یک مشکل جدی است که توجه متخصصان علوم آب را به خود جلب کرده است (FAO, 2021). در سطح جهانی، حدود دوسوم از بارش از طریق تبخیر و تعرق (ET) به جو بازمی‌گردد (Coenders-Gerrits *et al.*, 2014)، که شامل تبخیر از خاک و سطوح مرطوب پوشش گیاهی و تعرق از طریق برگ‌های گیاه است. بر اساس گزارش‌های سازمان فائو، حدود ۷۰ درصد از آب مصرفی جهان در کشاورزی، ۱۹ درصد در صنعت و ۱۱ درصد در شهرها مصرف می‌شود. که بخش وسیعی از آب در بخش کشاورزی از طریق تبخیر از دسترس گیاه خارج می‌شود (Golian *et al.*, 2019). برآورد کل ET از سطح زمین با استفاده از مدل‌های مختلف از ۵۰ تا ۸۰ کیلومتر مکعب بر سال متغیر است (Jiménez *et al.*, 2011). اهمیت تبخیر-تعرق از زمان پیدایش علم سنجش‌ازدور در زمینه‌های کاربردی مانند برنامه‌ریزی و مدیریت آبیاری در مقیاس‌های مختلف مشهود بوده است (Idso *et al.*, 1975). اندازه‌گیری تبخیر-تعرق به‌صورت میدانی و با استفاده از ابزار دقیق همچون روش نسبت بوون<sup>۱</sup>، روش ادی کواریانس<sup>۲</sup>، لایسیمتر و غیره مزیت تعیین مستقیم مقدار تبخیر-تعرق را برای یک مکان اندازه‌گیری ارائه می‌کند (Cuxart and Boone, 2020). یک روش رایج به‌منظور تخمین تبخیر-تعرق نقطه‌ای استفاده از معادله پنمن مانیتیت است که از متغیرهای پیش شده مانند رطوبت هوا، دمای هوای اندازه‌گیری شده توسط ایستگاه‌های هواشناسی استفاده می‌کند که توسط فائو پیشنهاد شده است (Allen *et al.*, 1998; Paredes and Pereira, 2019). به‌کارگیری این روش‌های نقطه‌ای دشوار، هزینه‌بر و نصب، نگهداری و بهره‌برداری از آن‌ها وقت‌گیر است و به دلیل تغییرات پویا و منطقه‌ای تبخیر-تعرق قابل‌تعمیم در سطوح وسیع نیستند؛ بنابراین با توجه به تغییرات مکانی عوامل دخیل در تبخیر-تعرق، این روش‌ها برای اندازه‌گیری‌های معمول در سطح وسیع چندان مناسب نیستند (Pereira *et al.*, 2021). در یک منطقه مرطوب میزان تبخیر-تعرق سالانه می‌تواند به‌اندازه نیمی از بارندگی منطقه باشد درحالی‌که برای مناطق خشک و نیمه‌خشک، مقدار تبخیر-تعرق تقریباً معادل کل بارندگی سالانه است (Engman and Gurney, 1991). به‌طور خلاصه، حتی اگر بتوان تخمین‌های تبخیر-تعرق دقیقی را برای یک ناحیه با استفاده از ابزارهای زمینی به دست آورد، این مقادیر به دلیل ناهمگونی معمول چشم‌انداز و پیچیدگی فرایندهای هیدرولوژیکی در مقیاس‌های بزرگ‌تر مفید نیستند (Yang *et al.*, 2022). فناوری سنجش‌ازدور ابزاری سازگار و مقرون‌به‌صرفه

4- Surface Energy Balance System

5 - Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration

1- Bowen ratio technique

2- Eddy covariance

3- Surface Energy Balance Algorithm for Land

است (Hedayati and Kakavand, 2012)

### پایگاه WaPOR

پایگاه اطلاعاتی<sup>۱</sup> WaPOR این قابلیت را دارد که مقادیر تبخیر، تعرق، تبخیر-تعرق واقعی، تبخیر-تعرق مرجع، بارش، زیست‌توده، بهره‌وری خاص آب زیست‌توده، بهره‌وری ناخالص آب زیست‌توده و نقشه طبقه‌بندی اراضی را برای نظارت بر بهره‌وری آب از طریق دسترسی به داده‌های مختلف در سراسر آفریقا و خاورمیانه ارائه دهد. مقدار تبخیر-تعرق سامانه WaPOR از طریق الگوریتم ETLook که یک الگوریتم دو منبعی (Bastiaanssen et al., 2012) است، به‌منظور برآورد تبخیر-تعرق استفاده می‌شود. در الگوریتم ETLook مقادیر تبخیر از سطح خاک، آب و گیاه با استفاده از رابطه ۱ و مقدار تعرق از روزنه گیاه از رابطه ۲ محاسبه می‌شود. مقادیر حاصل از پایگاه اطلاعاتی WaPOR از سال ۲۰۰۹ در دوره‌های دوازده روزه، ماهانه و فصلی است. این پایگاه داده‌ها را در سه سطح قاره‌ای (تفکیک مکانی ۲۵۰ متر)، که شامل آفریقا و خاورمیانه بوده و در سطح یک قرار می‌گیرد، سطح دو (تفکیک مکانی ۱۰۰ متر) شامل ۲۱ کشور و ۴ حوزه رودخانه و سطح سوم شامل هشت منطقه آبیاری که دارای تفکیک مکانی ۳۰ متر است، ارائه می‌دهد.

واقعی قاره‌ای را ارائه می‌دهد، در نتیجه این نتایج می‌تواند امیدوارکننده باشد. رحیم پور و همکاران (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 سال‌های اخیر با توجه به پدیده تغییر اقلیم کاربری اراضی نیز تغییر کرده و بسیاری از اراضی کشاورزی به اراضی بایر و بدون پوشش گیاهی و یا به کاربری شهری تبدیل شده است. در همین راستا کاربری اراضی دائماً در حال تغییر بوده بنابراین در پژوهش براون و همکاران (Brown et al., 2022) به تهیه نقشه کاربری اراضی با قدرت تفکیک مکانی ده متری با استفاده از تصاویر ماهواره Sentinel-2 پرداختند که نتایج حاصله از دقت مناسبی برای تهیه نقشه کاربری در نقاط مختلف جهان داشته است. پایگاه داده WaPOR شامل چندین مؤلفه داده مربوط به بهره‌وری آب، تولید زیست‌توده، تبخیر-تعرق و پوشش زمین و همچنین چندین لایه داده تکمیلی است (FAO, 2020) که اطلاعات ارزشمندی را در اختیار محققان به‌منظور ارزیابی و مدیریت مصرف آب در مناطق مختلف از جمله کشاورزی قرار می‌دهد. به همین منظور هدف از این پژوهش تهیه نقشه کاربری اراضی با قدرت تفکیک مکانی ده متری و بررسی مقادیر تبخیر-تعرق مدل WaPOR و بهره‌وری آب با استفاده از این مدل جهانی است.

## مواد و روش‌ها

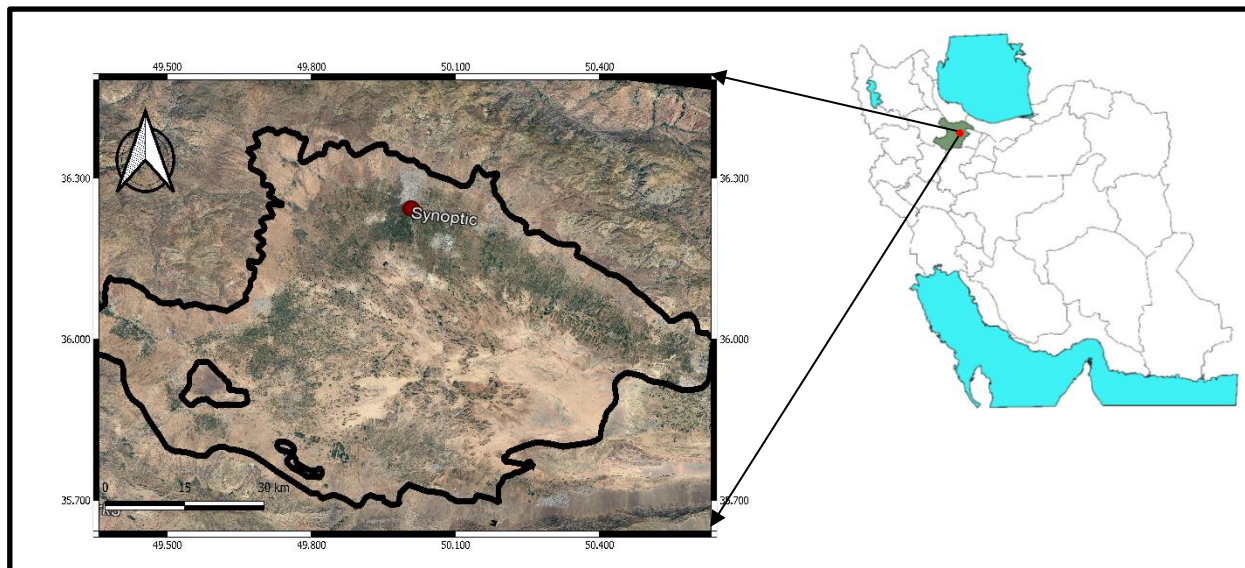
### منطقه مطالعه و داده‌های هواشناسی

منطقه مورد مطالعه از نظر تقسیمات کشوری در بخشی از استان قزوین و در حدود ۱۵۰ کیلومتری شمال غرب تهران قرار دارد (شکل ۱). دشت قزوین با مساحتی حدود ۵۰۶۲۱۸ هکتار در محدوده‌ی طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۵ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه ۲۵ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۵ دقیقه شمالی قرار دارد (Mohammadi et al., 2011). حداکثر ارتفاع این منطقه برابر ۲۹۷۱ متر و حداقل آن ۱۱۰۰ متر از سطح دریا می‌باشد. در این دشت ایستگاه هواشناسی سینوپتیک قزوین با آمار بلندمدت وجود دارد. با توجه به آمار بلندمدت ایستگاه سینوپتیک قزوین، در این تحقیق از داده‌های دما و بارش این ایستگاه استفاده شد. دشت قزوین یکی از دشت‌های حوضه آبریز دریاچه نمک و بزرگ‌ترین دشت آن محسوب شده و بیشترین سطح زیر کشت انواع محصولات را در میان دشت‌های این حوضه آبریز دارد. از نظر آب و هوایی منطقه مورد مطالعه در اقلیم سرد و نیمه‌خشک قرار می‌گیرد که متوسط بارش سالیانه در منطقه تقریباً ۳۱۰ میلی‌متر

1- Water Productivity through Open access of Remotely sensed derived data

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

$$T = \frac{\Delta(R_{n,canopy} - G) + \rho C_p \left( \frac{\Delta_e}{r_{a,canopy}} \right)}{\Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_{canopy}}{r_{a,canopy}} \right)} \quad (2)$$



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت قزوین در محدوده مورد مطالعه  
Figure 1- Geographical location of Qazvin Plain in the study area

طی فرآیندی که پس از قطع بارش آغاز می‌شود و با استفاده از انرژی که برای تعرق در دسترس نیست، مستقیماً از برگ‌ها تبخیر می‌شود. در جدول ۱ به شرح مختصری از سنجنده‌های مورد استفاده در پایگاه WaPOR اشاره شده است.

پارامترهای معادلات فوق در ادامه تشریح می‌شود. برای محاسبه تعرق همراه با مورد توجه قرار دادن خاک، با دقت در محتوای رطوبت خاک زیرزمینی یا ناحیه توسعه ریشه، محاسبات انجام می‌شود. درحالی که برای به دست آوردن مقدار تبخیر، ارتباط با خاک از طریق رطوبت خاک سطحی مدنظر قرار می‌گیرد. آب نگهداری شده در پوشش گیاهی،

جدول ۱- شرح مختصری از سنجنده‌های مورد استفاده در پایگاه WaPOR برای سطح یک (FAO, 2020)

Table 1- A brief description of the sensors used in the WaPOR portal for level 1 (FAO, 2020)

اجزای داده L1 L1 data component	اجزای داده ورودی Input data components	سنسور Sensor	داده‌های محصول و پروداکت‌ها Data product
	بارش Precipitation		CHIRPS v2, CHIRPS
	آلبیدوی سطح Surface albedo	MODIS	MOD09GA, MOD09GQ
Evaporation, Transpiration, Interception تبخیر، تعرق، برگات	داده‌های هواشناسی شامل دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و فشار هوا Weather data (temp, specific humidity, wind speed, air pressure) شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی NDVI	MERRA/ GEOS-5	
	تنش رطوبتی خاک Soil moisture stress	MODIS	MOD09GQ
	تابش خورشیدی Solar radiation		SRTM
	نقشه کاربری اراضی Land cover map		Based on Copernicus land cover map, 2015



آب نگهداری شده توسط پوشش گیاهی تابعی از LAI و بارش (P) است که به صورت زیر بیان می‌شود.

$$I_{mm} = 0.2I_{lai} \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{C_{veg} P}{0.2I_{lai}}}\right) \quad (8)$$

آب نگهداری شده توسط پوشش گیاهی به مقدار کمی بارندگی وابسته است به طوری که با افزایش بارندگی، کسر مهارشده به سرعت کاهش می‌یابد. در نتیجه حداکثر آب نگهداری شده توسط LAI تعیین می‌شود.

$$I = I_{mm} \frac{\lambda}{86400} \quad (9)$$

که در آن  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر می‌باشد ( $J kg^{-1}$ ). تابش خالص موج بلند  $L^*$ ، یعنی تفاوت بین تابش موج بلند ورودی و خروجی، که با استفاده از فرمول شرح داده شده در گزارش فائو شماره ۵۶ محاسبه می‌شود (Allen et al., 1998). این پارامتر تابعی از دمای هوا ( $T_a$ )، فشار بخار واقعی ( $e_a$ ) و قابلیت انتقال ( $\tau$ ) است. همان‌طور که در بالا نشان داده شد، تبخیر و تعرق کل با جمع تبخیر خاک و تعرق تاج پوشش محاسبه شده از معادله پنمن-مونتیت و آب نگهداری شده توسط پوشش گیاهی به دست می‌آید.

### شار حرارتی خاک (G)

شار حرارتی خاک G برای محاسبه تبخیر از سطح خاک مورد نیاز است که بر اساس گزارش فائو شماره ۵۶ محاسبه شده است.

$$G = \frac{\sqrt{2} A_{t,year} k \sin\left(\frac{2\pi J}{\rho} - \frac{\pi}{4}\right)}{Z_d} \cdot \exp(-aL_{lai}) \quad (10)$$

$A_{t,year}$ : دمای سالانه هوا در سال در دامنه

$k$ : هدایت حرارتی خاک [ $W m^{-1} K^{-1}$ ]

$J$ : روز ژولیبوسی

$p$ : تعداد روزهای سال [-]

$Z_d$ : کاهش عمق (m)

$I_{lai}$ : شاخص سطح برگ

$a$ : ضریب خاموشی نور برای تشعشع خالص [-]

کاهش عمق ( $Z_d$ ) و هدایت حرارتی خاک ( $k$ ) به خصوصیات خاک بستگی دارد. معمولاً این موارد به عنوان ثابت در نظر گرفته می‌شوند. دامنه دمای سالانه هوا از داده‌های اقلیمی به دست می‌آید.

### تشعشع خالص (Rn)

تابش خالص (Rn) انرژی موجود در سطح زمین را نشان می‌دهد که می‌توان آن را با تعادل تشعشع توصیف کرد:

$$Rn = (1 - \alpha_o)Rs - L^* - I \quad (3)$$

که در آن  $\alpha_o$  آلبیدوی سطحی [-] است،  $Rs$  تابش خورشیدی ورودی [ $W m^{-2}$ ] $L^*$  تابش خالص موج بلند [ $W m^{-2}$ ] $I$  نشان‌دهنده اتلاف انرژی به دلیل تلفات رهگیری است [ $W m^{-2}$ ]. تشعشع خالص برای خاک و تاج پوشش متفاوت است. شاخص سطح برگ، به منظور اندازه‌گیری تراکم تاج پوشش، در راستای جدا کردن تشعشعات خالص به تشعشع خالص خاک و تشعشع خالص تاج پوشش استفاده می‌شود. افزایش در شاخص سطح برگ منجر به کاهش نمایی در کسر تشعشع موجود برای خاک می‌شود. این تقسیم با استفاده از قانون بیر (که تضعیف نور را از طریق یک ماده توصیف می‌کند) محاسبه می‌شود، که منجر به توصیف معادلات زیر از خاک و تشعشع خالص تاج پوشش می‌شود:

$$Rn_{soil} = Rn \cdot \exp(-aI_{lai}) \quad (4)$$

$$Rn_{canopy} = Rn(1 - \exp(-aI_{lai})) \quad (5)$$

$a$  ضریب خاموشی نور برای تابش خالص است. (-)

شاخص سطح برگ ( $I_{lai}$ )، برابر با صفر نشان‌دهنده عدم وجود پوشش گیاهی است، شاخص سطح برگ بزرگ‌تر از صفر نشان‌دهنده وجود برگ‌های سبز است. شاخص  $NDVI$   $I_{ndvi}$  (-) برای استخراج  $I_{LAI}$  استفاده می‌شود این کار در دو مرحله انجام شده است. ابتدا از  $NDVI$  برای محاسبه پوشش گیاهی  $C_{veg}$  استفاده می‌شود که متعاقباً به شاخص سطح برگ تبدیل می‌شود. دو معادله زیر این تبدیل را برای محدوده خاصی از مقدار  $NDVI$  توصیف می‌کند.

$$C_{veg} = 0 \quad I_{ndvi} \leq 0.125$$

$$C_{veg} = 1 - \left(\frac{0.8 - I_{ndvi}}{0.8 - 0.125}\right)^{0.7} \quad 0.125 < I_{ndvi} < 0.8$$

$$C_{veg} = 1 \quad I_{ndvi} \geq 0.8 \quad (6)$$

مرحله دوم تبدیل پوشش گیاهی به شاخص سطح برگ  $I_{lai}$  بر اساس رابطه زیر است.

$$I_{lai} = 0 \quad I_{ndvi} \leq 0.125$$

$$I_{lai} = \left(\frac{\ln(-(C_{veg} - 1))}{-0.45}\right)^{0.7} \quad 0.125 < I_{ndvi} < 0.795$$

$$I_{lai} = 7.63 \quad I_{ndvi} \geq 0.795 \quad (7)$$

این رابطه با استفاده از تعداد زیادی از توابع LAI گردآوری شده (Carlson and Ripley 1997; Duchemin et al., 2006). رابطه بالا نشان‌دهنده میانگین این روابط گردآوری شده است.

## بهره‌وری آب

## نتایج و بحث

به منظور بررسی میزان بهره‌وری آب، بهره‌وری ناخالص (GBWP) و بهره‌وری خالص آب زیست‌توده (NBWP) در دشت قزوین، از روابط ۱۱ و ۱۲ استفاده شده است. بهره‌وری ناخالص آب زیست‌توده، مقدار خروجی (تولید زیست‌توده) را در رابطه با حجم کل آب مصرف شده در یک دوره معین بیان می‌کند.

$$GBWP = \frac{TBP}{E + T + I} \quad (11)$$

که در آن TBP کل تولید بیومس برحسب kg/ha است، E تبخیر، T تعرق و I آب نگهداری شده توسط پوشش گیاهی است و واحد تمامی آن‌ها برحسب میلی‌متر است. داده‌های مطرح شده برای محاسبه GBWP استفاده می‌شود: TBP، E، T، I به طوری که اگر بر اساس گام زمانی فصلی محاسبه شود. بهره‌وری خالص آب زیست‌توده، مقدار خروجی (تولید کل زیست‌توده) را در رابطه با حجم آب مصرفی مفید (از طریق تعرق تاج پوشش) در سال و در نتیجه نسبت تبخیر خاک بیان می‌کند. برخلاف بهره‌وری ناخالص آب، بهره‌وری خالص آب به‌ویژه در نظارت بر چگونگی استفاده مؤثر پوشش گیاهی (و مهم‌تر از آن، محصولات) از آب برای توسعه زیست‌توده (و در نتیجه عملکرد) مفید است.

$$NBWP = \frac{TBP}{T} \quad (12)$$

که در آن TBP کل تولید بیومس برحسب کیلوگرم در هکتار و T تعرق برحسب میلی‌متر است.

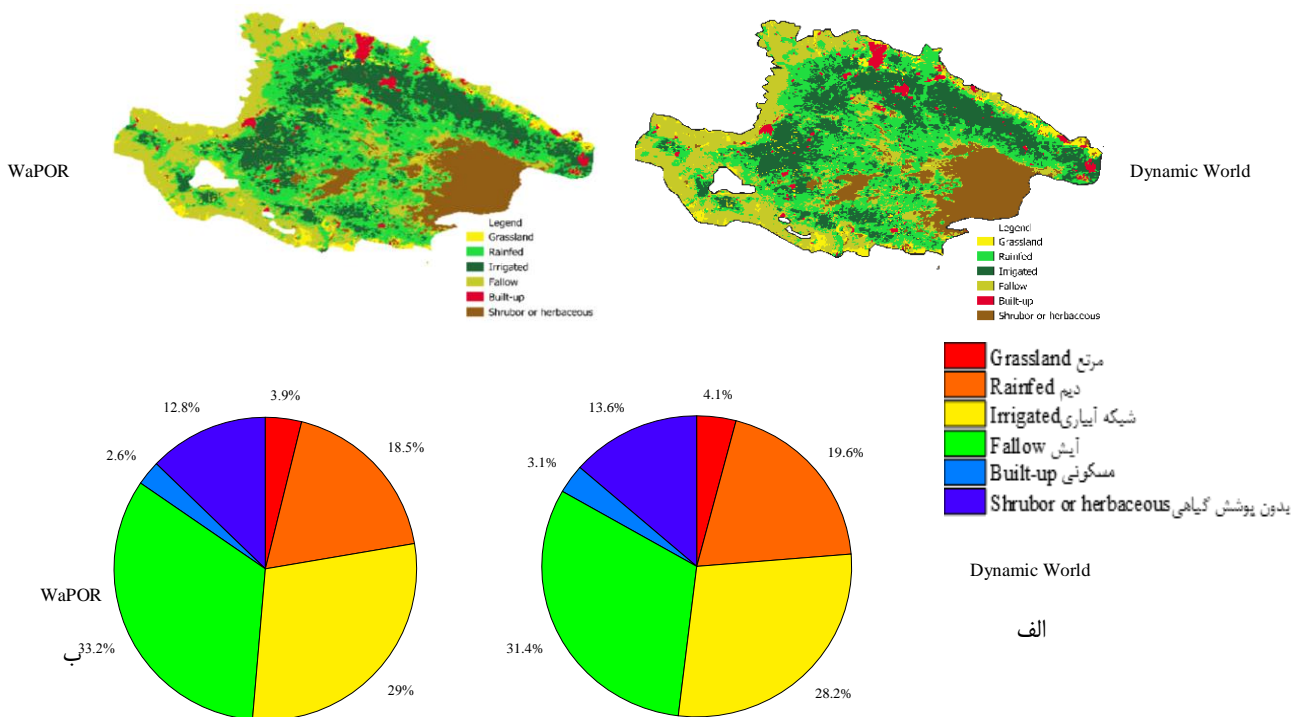
## طبقه‌بندی کاربری اراضی

با توجه به این که دشت قزوین به‌عنوان قطب کشاورزی مدرن در ایران محسوب می‌شود می‌تواند با مدیریت راهبردی بررسی و مدیریت مصرف آب و بهره‌وری آب و محصول در بهبود و توسعه کشاورزی کمک شایانی کند. لذا به‌منظور بررسی و برآورد بهره‌وری در منطقه در ابتدا لازم است که نقشه کاربری اراضی منطقه با دقت بالا تهیه شود. با توجه به هزینه زیاد و زمان‌بر بودن تهیه نقشه کاربری به‌صورت زمینی، در حال حاضر یکی از جدیدترین روش‌های تهیه نقشه کاربری اراضی مدل Dynamic World است که نقشه کاربری اراضی با قدرت تفکیک مکانی ده متر را تهیه می‌کند (Brown et al., 2022). پایگاه‌های مختلفی امکان تهیه نقشه کاربری اراضی را دارند. پایگاه اطلاعاتی WaPOR نیز این ویژگی را دارد که نقشه کاربری اراضی ۲۳ کلاس را در سطح یک ارائه دهد.

به منظور تعیین کارایی و دقت نقشه طبقه‌بندی پوشش اراضی پایگاه WaPOR به بررسی و مقایسه نتایج حاصله با مدل Dynamic World که معرف یک مدل جهانی با دقت بالا است پرداخته می‌شود. به همین منظور آخرین نقشه کاربری اراضی که مربوط به سال ۲۰۲۱ است، با استفاده از پایگاه WaPOR و Dynamic World در سامانه GEE<sup>۱</sup> تهیه و بر اساس کلاس‌بندی منطقه به‌منظور بررسی دقت نقشه کاربری پایگاه WaPOR و تعیین درصد هر کلاس با یکدیگر مقایسه گردید. با توجه به منطقه مورد مطالعه و عدم وجود ۲۳ کلاس در منطقه بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، طبقه‌بندی در ۶ کلاس امکان‌پذیر و قابل مقایسه بود. نتایج به‌دست‌آمده از هر دو مدل در شکل ۲ نشان می‌دهد که طبقه‌بندی انجام‌شده در منطقه از دقت مناسبی برخوردار بوده و توانسته است تا حد زیادی به‌درستی پراکندگی انواع پوشش گیاهی در منطقه را پوشش دهد. به طوری که هر چه تراکم پوشش گیاهی در منطقه کمتر باشد درصد دقت برآوردی بیشتر است، به طوری که در مناطق بدون پوشش و مناطق علفزار درصد همپوشانی به نسبت بالایی را در دو مدل نسبت به یکدیگر داشته‌اند و هرچه تنوع پوشش گیاهی در منطقه بیشتر باشد از میزان این درصد همپوشانی کاسته خواهد شد.

در ادامه به‌منظور بررسی میزان تبخیر-تعرق و بهره‌وری آب در منطقه، در ابتدا لازم است به بررسی تغییرات کاربری اراضی در یک بازه زمانی بلندمدت ۱۳ ساله پرداخته شود. همان‌طور که در شکل (۳ الف) نیز ملاحظه می‌شود، روند تغییرات در تعدادی از مناطق همچون اراضی بدون پوشش شامل منطقه شوره‌زار با تغییرات زیادی همراه نیست، که البته این مورد شامل سازه‌های ساخته‌شده نیز می‌شود. اما مابقی مناطق با تغییراتی همراه است. به طوری که درصد اراضی زراعی تحت پوشش شبکه آبیاری از ۲۹ به ۲۲ درصد کاهش داشته است. درصد اراضی آیش نیز از ۳۳ به ۲۴ درصد کاهش داشته است. از طرفی سطح وسیعی از منطقه که تحت پوشش شبکه آبیاری است به اراضی دیم تبدیل شده و سطح زیر کشت اراضی دیم از ۱۸ درصد به ۳۳ درصد افزایش داشته است. همچنین با توجه به شکل (۳-ب) نیز ملاحظه می‌شود که علاوه بر اراضی تحت شبکه و اراضی آیش، اراضی مرتع به اراضی تحت پوشش دیم تبدیل شده است. از جمله دلایل این افزایش را می‌توان به تغییر اقلیم در منطقه، کمبود منابع آب در منطقه، افت شدید سطح آب زیرزمینی و سیاست‌گذاری در خودکفایی تولید گندم دانست که کشاورز به ناچار سطح وسیعی از اراضی خود را به اراضی کشت دیم اختصاص می‌دهد. گندم جزء یکی از محصولات استراتژیک در کشور محسوب می‌شود. در همین راستا بیشتر اراضی آبی و دیم بر اساس مشاهدات میدانی به کشت گندم در منطقه اختصاص داده شده است، که به سبب آن استفاده بی‌رویه از منابع آبی بدون نوآوری‌های فنی در کشت و مدیریت آبیاری در واحد سطح موجب کاهش بهره‌وری محصول و آب خواهد شد.



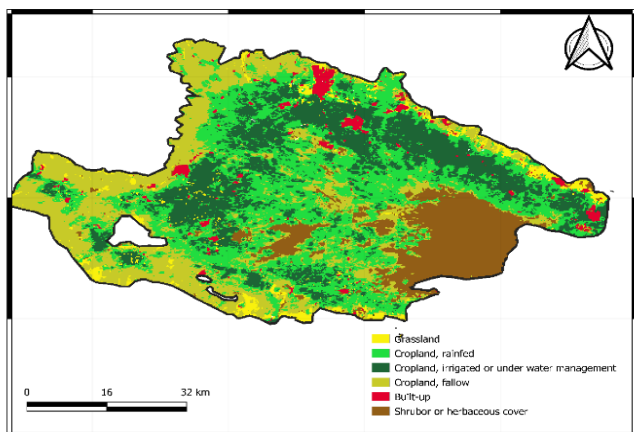


شکل ۲- مقایسه درصد کاربری اراضی بر اساس آخرین کلاس‌بندی منطقه در مدل Dynamic World (الف) و WaPOR (ب) در سال ۲۰۲۱  
 Figure 2- Comparison of the percentage of land use based on the latest classification of the region in the Dynamic World (a) and WaPOR models (b) in 2021

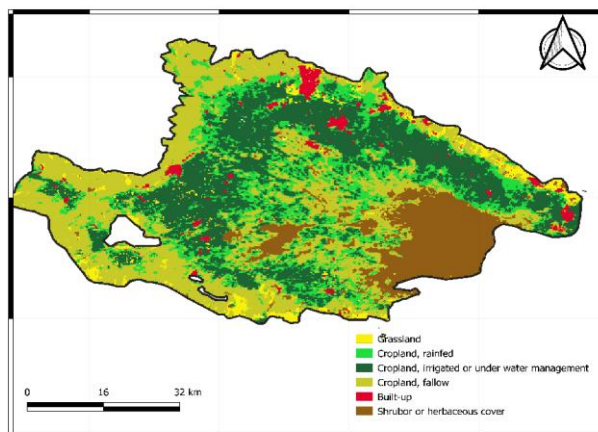
### بررسی تبخیر-تعرق

برنامه‌ریزی و مدیریت آب به عوامل مختلفی بستگی دارد. بنابراین در ادامه به بررسی میزان تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از داده‌های WaPOR پرداخته می‌شود. برای بررسی دقیق‌تر سعی شد میزان تبخیر-تعرق واقعی در کلاس‌های کاربری مختلف برآورد و بررسی شود.

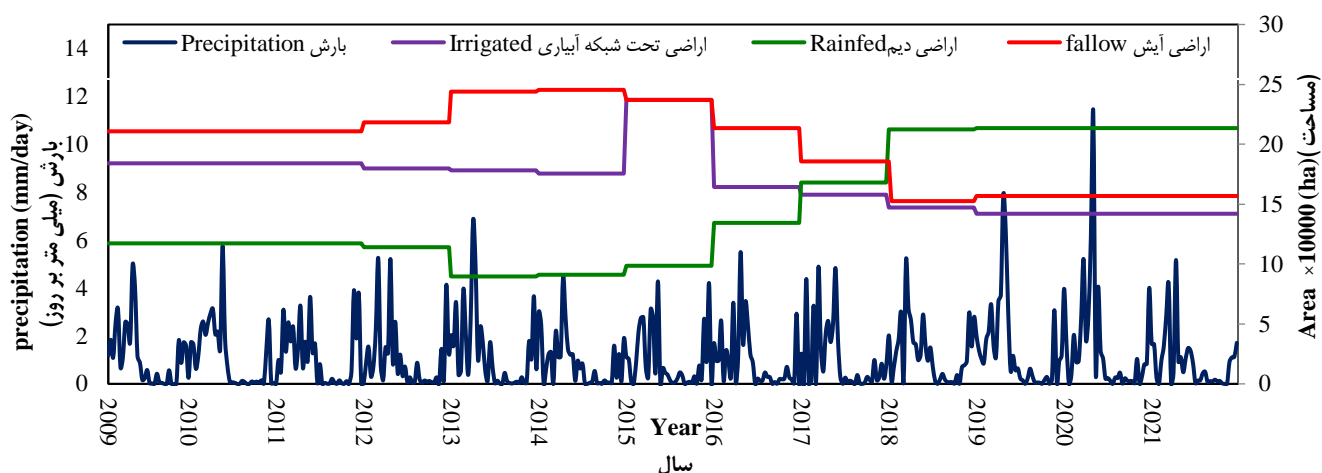
در ادامه روند تغییرات مساحت اراضی مختلف کشاورزی نشان می‌دهد طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳ میزان سطح زیر کشت اراضی تحت شبکه آبیاری و اراضی آیش هر یک به ترتیب نسبت به اراضی دیم حدود ۴۰ و ۴۵ درصد بیشتر شده و همین عامل باعث افزایش مصرف آب و برداشت بیشتر از آب‌های سطحی و زیرزمینی شده است. این در حالی است که هیچ‌گونه افزایشی در منابع آبی دشت در این بازه زمانی به لحاظ میزان بارش مشاهده نمی‌شود. این روند در سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۸ با اندکی تفاوت همراه بوده و با کاهش منابع آبی، سطح بیشتری از اراضی به آیش تغییر کاربری داده شده است. اما روند منابع آبی همچنان با کاهش همراه بوده و مقدار زیادی از منابع آب زیرزمینی مصرف شده است. (Ahmadi, 2022) در پژوهشی به بررسی سناریو-های مختلف در زمینه کاهش منابع آبی در دشت قزوین پرداخت، که نتایج نشان داد ذخیره آب زیرزمینی با روند رو به کاهش همراه بوده و بیشترین افت بین سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ با افت تقریبی ۴۰۰ میلیون مترمکعب همراه بوده است. اما با توجه به افزایش جمعیت و نیاز روزافزون به تأمین مواد غذایی سطح اراضی دیم با افزایش پله‌ای و متناوب همراه شده است.



۲۰۲۱  
2021



۲۰۰۹  
2009  
الف



ب)

شکل ۳- الف) نقشه کاربری اراضی و ب) روند تغییرات مساحت اراضی در طی سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۲۱ در دشت قزوین با استفاده از پایگاه WaPOR

Figure 3- a) Land use map and b) the trend of land area changes during 2009 and 2021 in Qazvin plain using WaPOR database

سال ۲۰۱۷ به بعد با کاهش روبه‌رو شده است که یکی از دلایل کاهش میزان تبخیر-تعرق در این بازه زمانی را می‌توان به کمبود آب در دسترس گیاه با توجه به منابع محدود آب در طی سال‌های اخیر اشاره نمود. تأثیر پوشش گیاهی و میزان شاخص سطح برگ در تعیین میزان تبخیر-تعرق از اهمیت بالایی برخوردار است، به طوری که در مناطق علفزار و مراتع به دلیل وجود پوشش گیاهی پراکنده مقدار تبخیر-تعرق تا میزان ۵۰ درصد کمتر از اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری است. میزان تغییرات تبخیر-تعرق در اراضی آیش به دلیل عدم وجود پوشش گیاهی به شدت پایین است. در بعضی مناطق علت کاهش ممکن است

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود علت نوسان زیاد در مقادیر تبخیر-تعرق برآورد شده در بازه‌های زمانی مختلف را می‌توان ناشی از تراکم پوشش گیاهی و کم شدن اراضی تحت کشت در بعضی از فصول سال دانست. به طور کلی، حجم بالای تبخیر-تعرق شامل مناطقی است که تحت پوشش شبکه آبیاری قرار دارد که در زمانی که پوشش سبز در بیشترین میزان خود قرار دارد، این مقدار به طور میانگین بین ۵ تا ۶ میلی‌متر در روز می‌رسد. در شکل ۴ مقادیر تبخیر-تعرق گیاهان تحت پوشش شبکه آبیاری در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۶ با روند نسبتاً پایداری همراه بوده است، اما این روند پایدار در

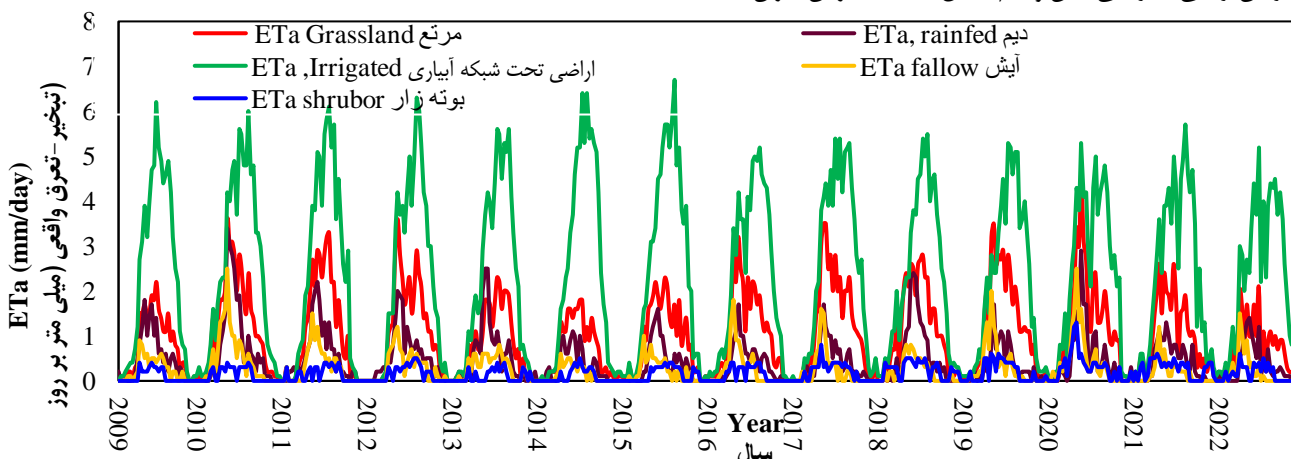
حجم آب زیست‌توده نیز با تغییر مواجه شده و مقدار آن در اراضی دیم در طی سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ با افزایش به نسبت قابل‌ملاحظه‌ای روبه‌رو شده است. یکی دیگر از دلایل این‌که میزان زیست‌توده در اراضی دیم با افزایش قابل‌ملاحظه‌ای روبه‌رو بوده است، به انتخاب محصول متناسب با وضعیت بارش در منطقه و استفاده حداکثری از میزان بارش دریافتی به واسطه فرآیند فتوسنتز در گیاه و ماکریم راندمان تبدیل انرژی خورشیدی وابسته بوده است.

در شکل ۶ میانگین سالانه مقادیر و بهره‌وری خالص آب زیست‌توده (NBWP) نشان می‌دهد که دامنه تغییرات در طی سال‌های مختلف متفاوت است. اما بررسی میانگین مقادیر بهره‌وری خالص آب زیست‌توده در اراضی تحت شبکه در طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲ حدود ۲/۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. این میزان در اراضی دیم برابر با ۲/۱۳ کیلوگرم بر مترمکعب است. میزان بهره‌وری خالص در اراضی دیم به شدت به میزان بارش سالانه وابسته است و بخش زیادی از عملکرد محصول در اراضی دیم وابسته به میزان بارش دریافتی است. همان‌طور که در شکل ۶ قابل‌ملاحظه است، در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۷ نسبت میانگین بارش سالانه با کاهش روبه‌رو است. بنابراین بهره‌وری خالص آب زیست‌توده نیز در این اراضی به نسبت میزان بارش، با کاهش روبه‌رو شده است. اما این کاهش بارش تأثیر زیادی در اراضی تحت شبکه آبیاری نداشته است. افزایش مصرف آب در مرحله میانی رشد محصول، باعث افزایش عملکرد محصول می‌شود، از این‌رو اطمینان از تأمین آب کافی در فاز میانی، برای دستیابی به بهره‌وری بالا بسیار مهم است (Chai et al., 2022).

به دلیل استفاده از انواع مالچ در اراضی آیش باشد به‌طوری‌که اثر لایه مالچ سطحی بر کاهش تبخیر می‌تواند ناشی از تغییر در مقدار انتقال گرما به سطح خاک و برعکس، تغییر قدرت جذب انرژی خورشید و کاهش نیروهای موینگی خاک و در نتیجه نرسیدن آب به سطح خاک باشد (Hallett, 2008). مناطق شوره‌زار دشت قزوین نیز به دلیل عدم وجود پوشش گیاهی مقادیر تبخیر-تعرق نزدیک به صفر را دارد.

### بهره‌وری آب محصول

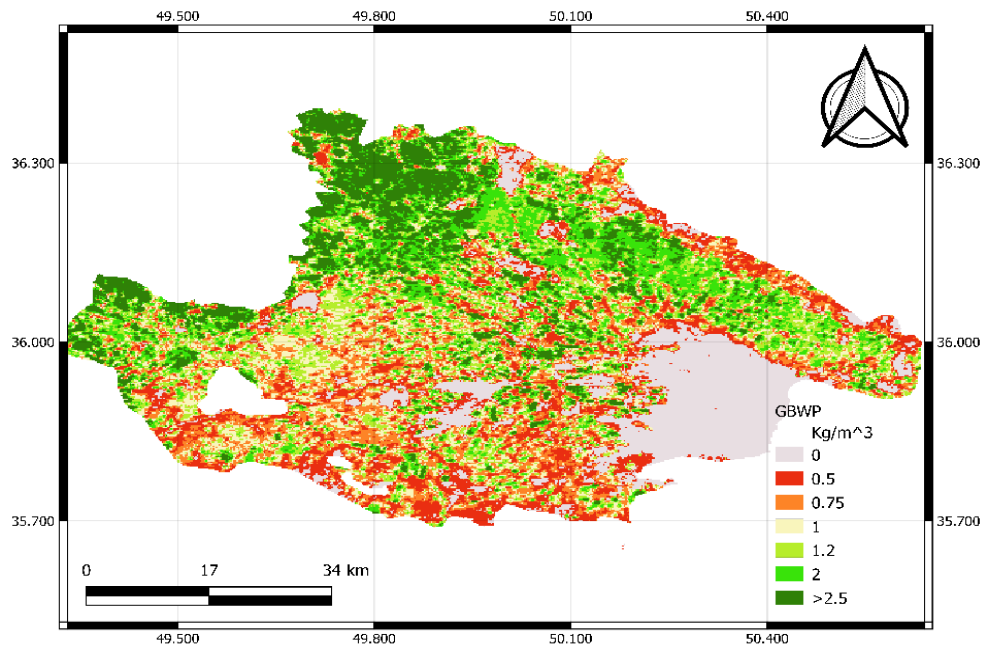
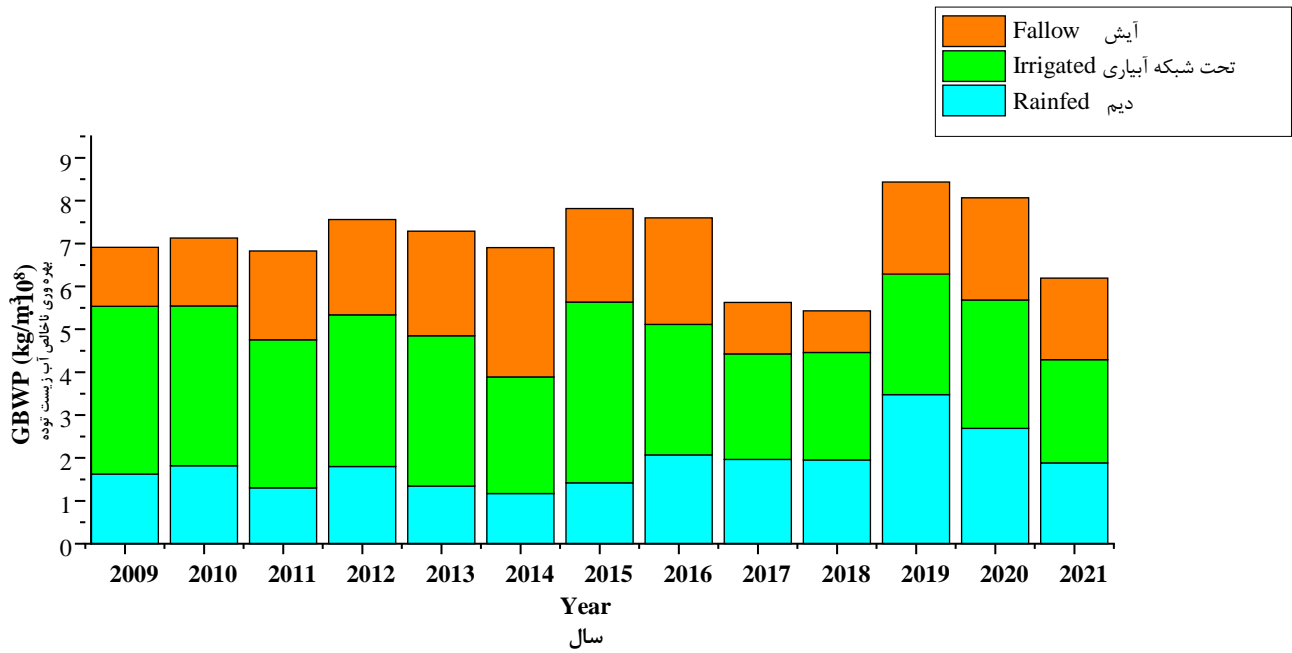
مدیریت مصرف در بهره‌برداری از منابع آب، یک مسیر مستقیم به‌منظور افزایش ارزش محصولات تولید شده توسط آب است، که با مفهوم بهره‌وری آب شناخته می‌شود. شاخص GBWP، مقدار خروجی (تولید زیست‌توده) را در رابطه با حجم کل آب مصرف‌شده در یک دوره معین بیان می‌کند (FAO, 2016). این شاخص شناختی را در مورد تأثیر گسترش پوشش گیاهی بر میزان آب مصرفی در نتیجه بر بیلان آب در یک حوضه معین ارائه می‌دهد. شکل (۵-الف) به برآورد میزان حجم آب زیست‌توده بر اساس نقشه کاربری و مقدار عددی هر پیکسل پرداخته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بیشترین میزان حجم آب زیست‌توده به کلاس تحت پوشش شبکه آبیاری اختصاص دارد و از جمله دلایل آن را می‌توان به وجود برنامه‌ریزی معین در آبیاری و در نتیجه برداشت محصول با تراکم و بهره‌وری بالاتر نسبت داد. به‌طور کلی میزان ناخالص حجم آب زیست‌توده از ابتدای سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۱۶ در اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری با افزایش همراه بوده است. اما از سال ۲۰۱۷ روند تغییرات دمایی و افت شدید تراز سطح آب زیرزمینی باعث کاهش مساحت اراضی تحت پوشش شبکه شده و بسیاری از این اراضی به اراضی آیش و دیم تبدیل شده‌اند. بنابراین میزان



شکل ۴- برآورد میزان تبخیر-تعرق واقعی روزانه در اراضی با کاربری مختلف در طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲.

Figure 4- Estimation of actual daily evapotranspiration in lands with different uses during the years 2009 to 2022

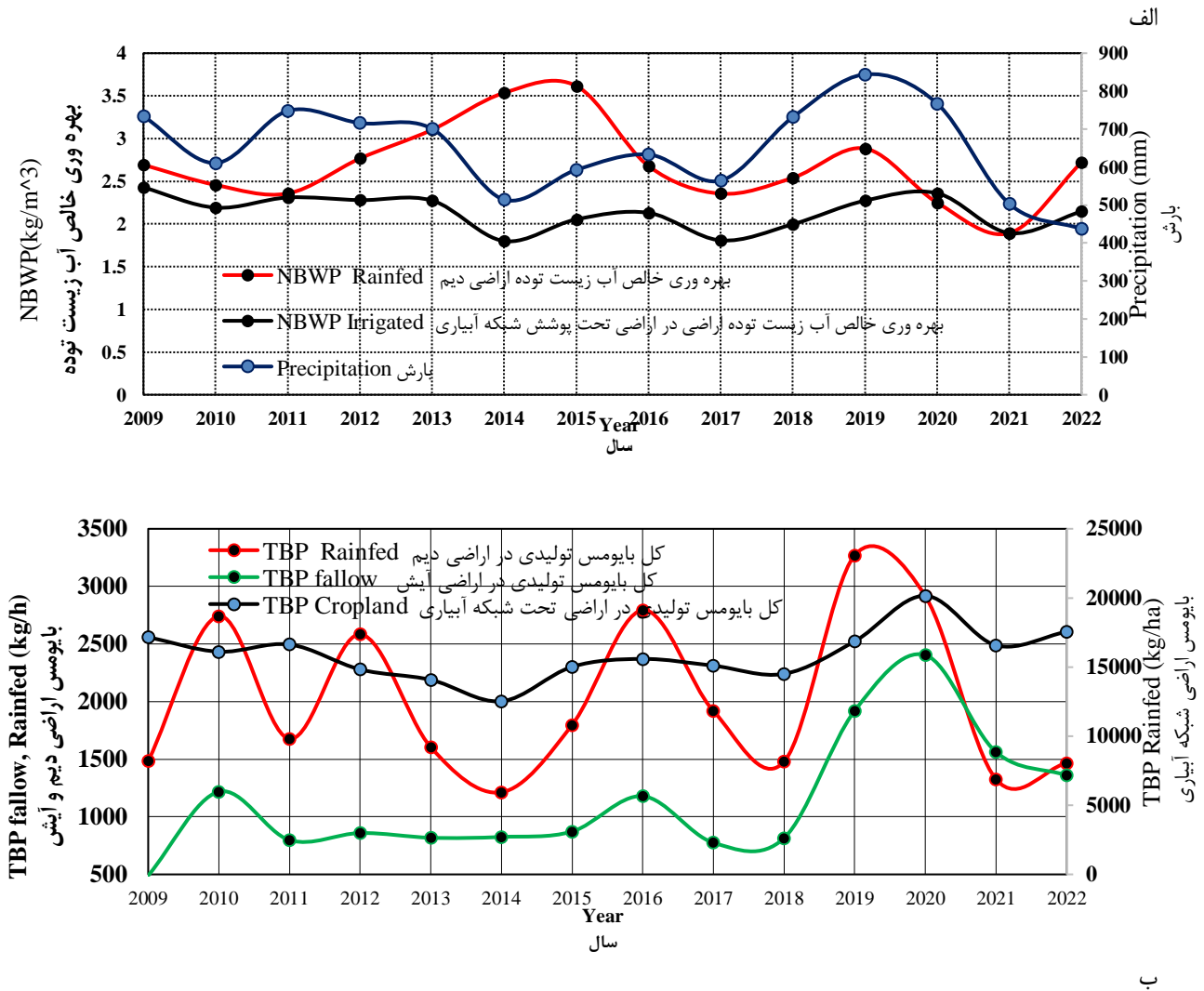
(الف)



(ب)

شکل ۵- الف) بهره‌وری ناخالص حجم آب زیست‌توده (GBWP) بر اساس کاربری اراضی در طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۱. ب) نقشه بهره‌وری ناخالص حجم آب زیست‌توده در سال ۲۰۲۱

Figure 5- a) gross biomass water productivity volume based on land use during the years 2009 to 2021. b) map of gross biomass water productivity in 2021



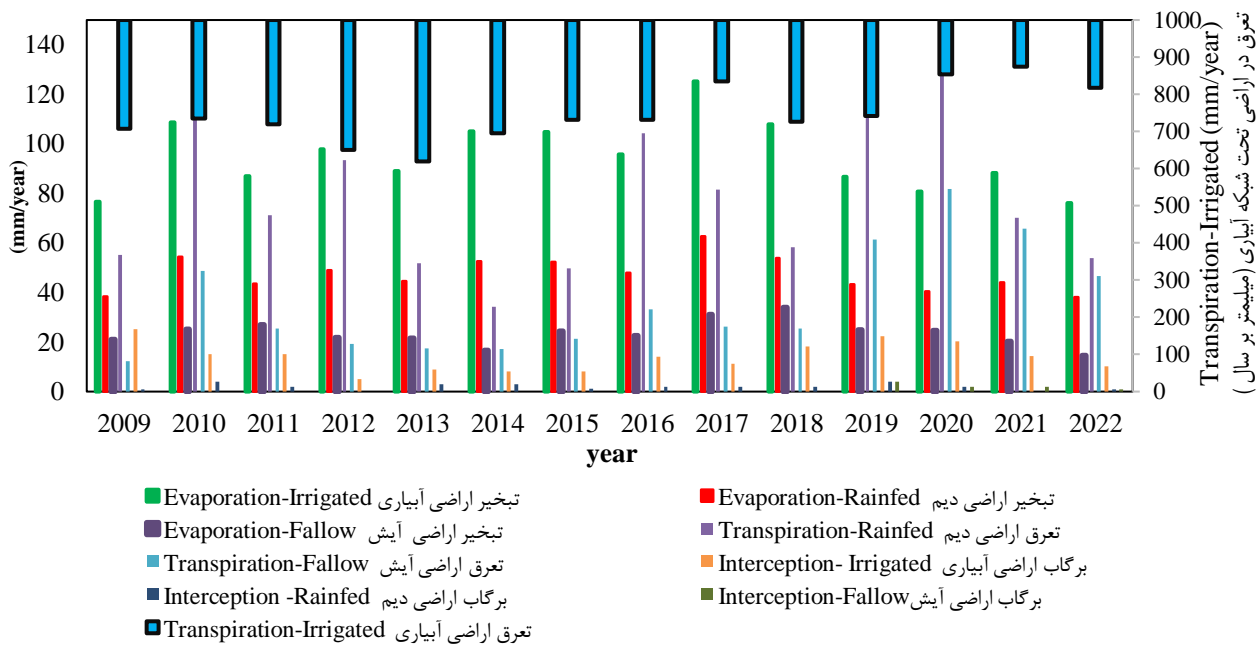
شکل ۶- میانگین سالانه NBWP و TBP در اراضی مختلف در طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲  
Figure 6- Average annual NBWP and TBP in different lands during the years 2009 to 2022

مناطق بستگی دارد. زیرا بر اساس نتایج به دست آمده از شکل ۷ میزان تعرق در این مناطق هشت الی نه برابر تعرق در اراضی دیم است و این میزان در اراضی آیش با مقدار کاهشی بیشتری همراه بوده است. مقدار بالای تعرق در اراضی تحت پوشش شبکه به دلیل افزایش سطح زیر کشت و تراکم کشت در این مناطق است که منجر به افزایش مصرف آب در این اراضی می‌شود. در مقایسه میزان زیست‌توده و مقادیر هر یک از پارامترهای تبخیر، تعرق و برگاب نشان می‌دهد که هر چه میزان تبخیر و تعرق افزایش داشته باشد، میزان زیست‌توده نیز با افزایش همراه خواهد شد. به طوری که در سال ۲۰۲۰ میزان زیست‌توده در اراضی تحت شبکه آبیاری به طور میانگین برابر با ۲۰۱۵۶ کیلوگرم بر هکتار است که میزان میانگین سالانه تعرق ناشی از اراضی تحت شبکه در این سال برابر ۸۵۴ میلی‌متر است.

شکل (۶-ب) بررسی روند میزان کل زیست‌توده در اراضی مختلف را نشان می‌دهد. در طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲ این شاخص در تمامی کاربری‌ها با افزایش تدریجی همراه شده است. به طوری که میزان شاخص TBP در سال ۲۰۲۰ به میزان ۱۷ درصد بیشتر از سال ۲۰۰۹ است. میزان زیست‌توده در اراضی مختلف نشان می‌دهد که میزان زیست‌توده در اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری به میزان ۵ تا ۶ برابر بیشتر از اراضی دیم است. از جمله پارامترهای تأثیرگذار در برآورد شاخص TBP می‌توان به مقدار تبخیر، تعرق و برگاب اشاره کرد، که افزایش یا کاهشی بودن هر یک از این پارامترها تأثیر بسزایی در مقدار زیست‌توده برآورد شده خواهد داشت. بنابراین به منظور بررسی دقیق‌تر به برآورد میزان تبخیر، تعرق و برگاب در بازه زمانی مورد مطالعه پرداخته شد. نتایج به دست آمده نشان داد که مقدار تولید زیست‌توده در مناطق تحت پوشش شبکه آبیاری تا حد زیادی به میزان تعرق بالا در این

خواهد شد. اما در اراضی دیم به دلیل تنش آبی، تولید محصول با محدودیت روبه‌رو خواهد شد. با توجه به این که پارامترهای مختلفی در برآورد میزان تبخیر-تعرق و میزان زیست‌توده تأثیرگذار هستند. در ادامه در شکل ۸ به بررسی میزان همبستگی هر یک از پارامترها و شاخص‌های مختلف پرداخته می‌شود. ماتریس همبستگی نتایج به دست آمده از هر یک از این شاخص‌ها و پارامترهای بررسی شده، نشان داد که پارامترهای هواشناسی همچون دما با بارش دارای همبستگی  $-0/68$  است. پارامتر تبخیر و پارامتر تعرق با مقدار تبخیر-تعرق واقعی دارای همبستگی به ترتیب  $0/92$  و  $0/86$  است. بررسی همبستگی بین شاخص بهره‌وری خاص آب زیست‌توده (NBWP) و مقدار تعرق نشان داد که این شاخص با تعرق دارای همبستگی  $-0/73$  است. این بدان معناست که با افزایش میزان تعرق، مقدار بهره‌وری خالص آب زیست‌توده با کاهش روبه‌رو خواهد شد.

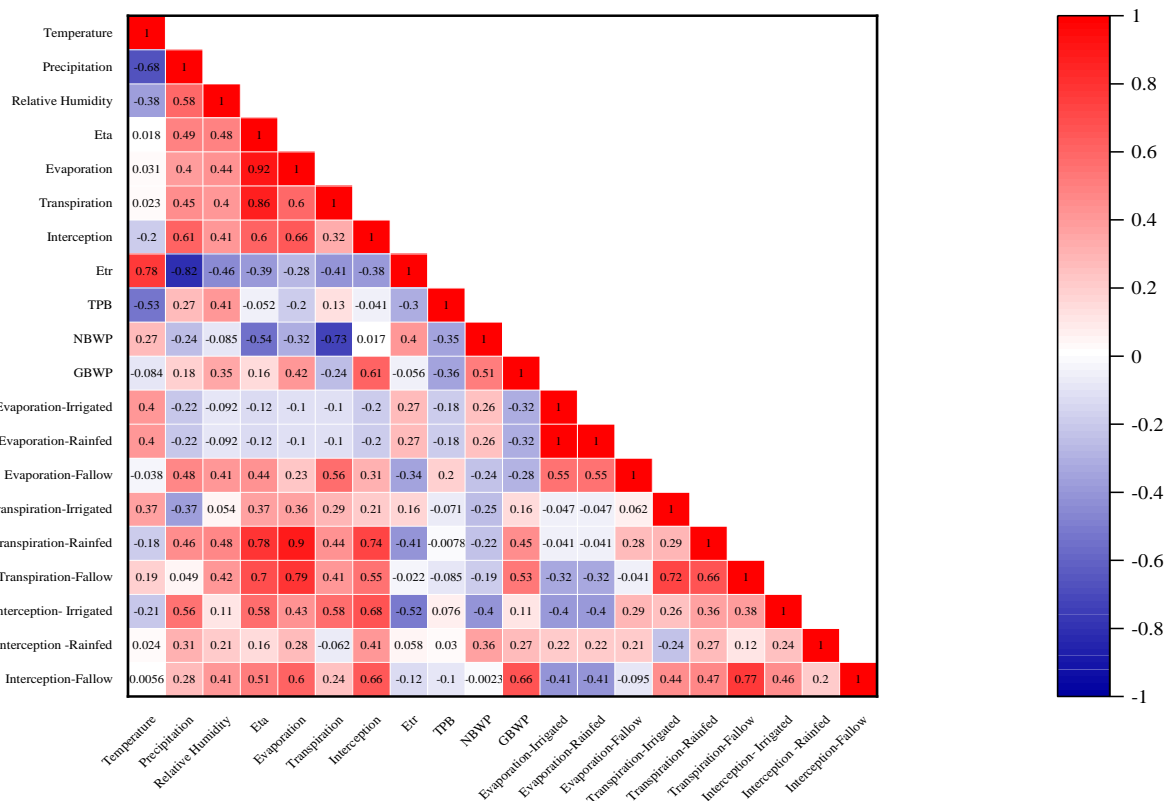
از جمله پارامترهای تأثیرگذار در برآورد تبخیر-تعرق و مقدار زیست‌توده می‌توان به برگاب اشاره نمود. مقدار برگاب به عوامل زیادی از جمله خصوصیات بارندگی یا آبیاری (شدت، مدت، اندازه قطرات و...) و خصوصیات گیاهی (نوع گیاه، مرحله رشدی، تراکم، شاخص سطح برگ و...) وابسته است (Gutezeit, 2006). بررسی مقادیر برگاب در کاربری‌های مختلف نشان می‌دهد میانگین سالانه برگاب در اراضی تحت شبکه در بازه زمانی ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۱ برابر با ۱۴ میلی‌متر در سال است درحالی که مقدار برگاب در اراضی دیم و آیش به‌طور میانگین سالانه به ترتیب برابر با  $1/94$  و  $0/64$  میلی‌متر در سال است. با توجه به این که به‌منظور برآورد مقدار برگاب از دو فاکتور شاخص سطح برگ و ظرفیت ذخیره آب در پوشش گیاهی استفاده می‌شود، بنابراین می‌توان انتظار این را داشت که مقدار برگاب در این مناطق، عدد قابل‌ملاحظه‌ای نخواهد بود. زیرا افزایش شاخص سطح برگ منجر به افزایش عملکرد محصول و در نهایت افزایش مقدار میزان زیست‌توده



شکل ۷- میانگین سالانه مقدار تبخیر، تعرق و برگاب سه سطح کاربری اراضی در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲

Figure 7- The annual average amount of evaporation, transpiration and runoff of three land use levels in the period from 2009 to 2022





شکل ۸- نمودار ماتریس همبستگی بین پارامتر و شاخص‌های مختلف برآورده شده و مقدار تبخیر-تعرق پایگاه WaPOR  
 Figure 8- Correlation matrix diagram between the parameter and various indices Estimated and the evapotranspiration value of the WaPOR database

### نتیجه‌گیری

می‌شود، در ادامه به بررسی و برآورد شاخص‌های بهره‌وری آب زیست-توده همچون GBWP و NBWP پرداخته شد. نتایج حاصل از این بررسی‌ها نشان داد که میزان GBWP از ابتدای سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۱۶ در اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری با میزان افزایشی همراه بود. اما از سال ۲۰۱۷ روند تغییرات دمایی و افت شدید تراز آب زیرزمینی باعث کاهش سطح اراضی تحت پوشش شبکه شده و بسیاری از این اراضی به اراضی آیش و دیوم تبدیل شده‌اند. بنابراین میزان حجم آب زیست‌توده نیز با تغییر مواجه شده است. بررسی شاخص NBWP نیز نشان داد که میزان بهره‌وری خالص در اراضی دیوم به شدت به میزان بارش سالانه وابسته است و بخش زیادی از عملکرد دانه در اراضی دیوم وابسته به میزان بارش دریافتی است. از جمله پارامترهای تأثیرگذار در برآورد مقدار کل زیست‌توده را می‌توان در مقدار تبخیر، تعرق و برگاب مشاهده کرد که افزایشی یا کاهش‌ی بودن هر یک از این پارامترها تأثیر بسزایی در مقدار زیست‌توده برآورد شده خواهد داشت. بنابراین داده‌های WaPOR این امکان را فراهم می‌کنند که نتایج قابل قبولی را با توجه به تراکم پوشش گیاهی مختلف در منطقه ارائه دهد. لذا پیشنهاد می‌شود که سعی شود با جمع‌آوری داده‌های زمینی همچون میزان زیست‌توده

بررسی مقدار تبخیر-تعرق و نیاز آبی از اهمیت زیادی در مدیریت و بهره‌وری آب در منطقه برخوردار است. به همین منظور برای بررسی و برآورد میزان دقیق آب مصرفی لازم است از نقشه‌های کاربری اراضی استفاده شود. با توجه به هزینه زیاد و زمان‌بر بودن تهیه نقشه کاربری به‌صورت زمینی، از نقشه کاربری اراضی پایگاه داده WaPOR که از دقت مناسبی برخوردار بود، استفاده شد. داده‌های پایگاه WaPOR به دلیل قدرت تفکیک مکانی ده روزه و عدم وجود خلأ داده‌ای، می‌تواند نقش مهمی در بررسی برآورد میزان تبخیر-تعرق و پارامترهای مرتبط با بهره‌وری آب در منطقه داشته باشد. پایگاه WaPOR امکان برآورد میزان تبخیر-تعرق را در سطح ۳ که شامل مناطقی از آفریقا و خاورمیانه است، را فراهم آورده است. در همین راستا به بررسی میزان تبخیر-تعرق واقعی بر اساس نقشه کاربری اراضی در دشت قزوین در بازه زمانی سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۱ پرداخته شد. نتایج به دست آمده با توجه نقشه طبقه‌بندی ۶ کلاسه، نشان داد که پایگاه WaPOR از دقت مناسبی در برآورد میزان تبخیر-تعرق در منطقه برخوردار است. با توجه به این که مدیریت مصرف منابع آبی موجب افزایش بهره‌وری محصول

و مقادیر تبخیر-تعرق به اعتبارسنجی و بررسی این داده‌ها با مقادیر زمینی پرداخته شود. "هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد".

## منابع

- Ahmadi, A. (2022). The effect of increasing water use efficiency on improving the status of groundwater resources using WEAP model in Qazvin Plain. *Water and Soil Management and Modelling*, 2(1), 53–62. (In Persian). <http://doi.org/10.22098/MMWS.2022.9333.1034>
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, 300(9), D05109.
- Allen, R.G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 380–394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380))
- Baastiaansen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., & Holtslag, A. (1998). AM: A remote sensing surface balance algorithm for land (SEBAL). *Journal of Hydrology*, 212–213. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4)
- Barideh, R., Veysi, S., Ebrahimipak, N., & Davatgar, N. (2022). The challenge of reference evapotranspiration between the WaPOR data set and geostatistical methods. *Irrigation and Drainage*, 71(5), 1268–1279. <https://doi.org/10.1002/ird.2738>
- 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). <https://doi.org/10.1029/2011WR010482>
- 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. <https://doi.org/10.1002/hyp.13791>
- Brown, C.F., Brumby, S.P., Guzder-Williams, B., Birch, T., Hyde, S.B., Mazzariello, J., Czerwinski, W., Pasquarella, V.J., Haertel, R., & Ilyushchenko, S. (2022). Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. *Scientific Data*, 9(1), 251. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01307-4>
- Carlson, T.N., & Ripley, D.A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62(3), 241–252. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1)
- Chai, Y., Chai, Q., Yang, C., Chen, Y., Li, R., Li, Y., Chang, L., Lan, X., Cheng, H., & Chai, S. (2022). Plastic film mulching increases yield, water productivity, and net income of rain-fed winter wheat compared with no mulching in semiarid Northwest China. *Agricultural Water Management*, 262, 107420. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107420>
- Coenders-Gerrits, A.M.J., Van der Ent, R.J., Bogaard, T.A., Wang-Erlandsson, L., Hrachowitz, M., & Savenije, H.H.G. (2014). Uncertainties in transpiration estimates. *Nature*, 506(7487), E1–E2. <https://doi.org/10.1038/nature12925>
- Cuxart, J., & Boone, A.A. (2020). Evapotranspiration over land from a boundary-layer meteorology perspective. *Boundary-Layer Meteorology*, 177(2–3), 427–459. <https://doi.org/10.1007/s10546-020-00550-9>
- Duchemin, B., Hadria, R., Erraki, S., Boulet, G., Maisongrande, P., Chehbouni, A., Escadafal, R., Ezzahar, J., Hoedjes, J.C.B., & Kharrou, M.H. (2006). Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management*, 79(1), 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.02.013>
- Engman, E.T., & Gurney, R.J. (1991). *Remote sensing in hydrology*. Chapman and Hall Ltd.
- Fakhar, M.S., & Kaviani, A. (2022). Evaluation of FAO WaPOR product and PYSEBAL algorithm in estimating The amount of water consumed. *Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN*, 2423, 7833. (In Persian). <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.341474.669242>
- FAO. (2021). The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture—Systems at Breaking Point. In *Synthesis Report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, Italy.
- FAO, 2020. WaPOR database methodology. <http://www.fao.org/in-action/remote-sensing-for-water-productivity/resources/publications/wapor-publications/en/>.
- FAO (2016). *Water Accounting and Auditing: A Sourcebook*. FAO Water Reports, no. 43.
- Golian, S., Javadian, M., & Behrangi, A. (2019). On the use of satellite, gauge, and reanalysis precipitation products for drought studies. *Environmental Research Letters*, 14(7), 75005.
- Gutezeit, B. (2006). Storage of intercepted water on vegetable plants measured by gamma scanning technique. *European Journal of Horticultural Science*, 71(1), 30.
- Hallett, P.D. (2008). A brief overview of the causes, impacts and amelioration of soil water repellency—a review. *Soil and Water Research*, 3(1), 521–528.

22. Hedayati, A., & Kakavand, R. (2012). Climatic zoning of Qazvin Province. *Nivar*, 36(77–76), 59–66. (In Persian)
23. Hessels, T., van Opstal, J., Trambauer, P., Bastiaanssen, W., Faouzi, M., Mohamed, Y., & ErRaji, A. (2017). *pySEBAL Version 3.3*. 7.
24. Idso, S.B., Jackson, R.D., & Reginato, R.J. (1975). Estimating evaporation: a technique adaptable to remote sensing. *Science*, 189(4207), 991–992. <http://doi.org/10.1126/science.189.4207.991>
25. Jiménez, C., Prigent, C., Mueller, B., Seneviratne, S.I., McCabe, M.F., Wood, E.F., Rossow, W.B., Balsamo, G., Betts, A.K., & Dirmeyer, P.A. (2011). Global intercomparison of 12 land surface heat flux estimates. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D2). <https://doi.org/10.1029/2010JD014545>
26. Karishma, C.G., Kannan, B., Nagarajan, K., Panneerselvam, S., & Pazhanivelan, S. (2022). Spatial and temporal estimation of actual evapotranspiration of lower Bhavani basin, Tamil Nadu using Surface Energy Balance Algorithm for Land Model. *Journal of Applied and Natural Science*, 14(2), 566–574. <https://doi.org/10.31018/jans.v14i2.3412>
27. Katul, G.G., Oren, R., Manzoni, S., Higgins, C., & Parlange, M.B. (2012). Evapotranspiration: a process driving mass transport and energy exchange in the soil-plant-atmosphere-climate system. *Reviews of Geophysics*, 50(3). <https://doi.org/10.1029/2011RG000366>
28. Liou, Y.-A., & Kar, S.K. (2014). Evapotranspiration estimation with remote sensing and various surface energy balance algorithms—A review. *Energies*, 7(5), 2821–2849. <https://doi.org/10.3390/en7052821>
29. Liu, Y.J., Chen, J., & Pan, T. (2019). Analysis of changes in reference evapotranspiration, pan evaporation, and actual evapotranspiration and their influencing factors in the North China Plain during 1998–2005. *Earth and Space Science*, 6(8), 1366–1377. <https://doi.org/10.1029/2019EA000626>
30. Mohammadi, M., Mohammadi Ghaleney, M., & Ebrahimi, K. (2011). Spatial and temporal variations of groundwater quality of Qazvin plain, *Water Research Iran*, 5(8), 41–51. (In Persian)
31. Oberg, J.W., & Meless, A.M. (2006). Evapotranspiration dynamics at an ecohydrological restoration site: an energy balance and remote sensing approach 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 42(3), 565–582. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2006.tb04476.x>
32. Paredes, P., & Pereira, L.S. (2019). Computing FAO56 reference grass evapotranspiration PM-ET<sub>o</sub> from temperature with focus on solar radiation. *Agricultural Water Management*, 215, 86–102. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.12.014>
33. Pereira, L.S., Paredes, P., López-Urrea, D.J., & Jovanovic, N. (2021). Updates and advances to the FAO56 crop water requirements method. *Agricultural Water Management*. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106697>
34. 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)
35. 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, 2002>
36. Yang, Y., Anderson, M., Gao, F., Xue, J., Knipper, K., & Hain, C. (2022). Improved daily evapotranspiration estimation using remotely sensed data in a data fusion system. *Remote Sensing*, 14(8), 1772. <https://doi.org/10.3390/rs14081772>