

Estimation of Daily Reference Evapotranspiration Using Remote Sensing Data (Case Study: Sistan and Baluchestan Province)

Eslam galehban.¹, Saeid Hamzeh.^{2*}, Shadman Veysi.³, Seyed Kazem Alavipanah.⁴

1. M.Sc of Dep. of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran
2. Associate Prof., Dep. of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran
3. Assistant Prof., Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Tehran, Iran
4. Prof. of Dep. of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

Determination of the Crop Water Requirement (CWR) of different crops and the value of crop water consumption is one of the problems at a large scale and in real-time to the soil and water expert. The first step to compute this variable is to determine the reference evapotranspiration (ET₀). The standard method to compute this parameter is to utilize the climate data and experimental equations. The problem with classic methods is that the meteorological station isn't available in the agricultural lands and usually, we have data limitations. The optimized solution is to utilize remote sensing data. So with the combination of different datasets then the reference evapotranspiration and actual evapotranspiration will be estimated. The goal of the study is to an evaluation of open-source WaPOR and ERA5 to compute daily reference evapotranspiration based on the FAO-Penman Monthis equation at the meteorological stations of Sistan and Baluchestan province. The result has shown that the open-source dataset estimated the reference evapotranspiration as more than 80 percent accurate at the place of the meteorological station and in all of the stations RMSE was less than 2 mm per day. The accuracy assessment of results shown at different crop seasons that ET₀ in the autumn season is better than in the spring season. So that the ERA5 combined with the GLDAS Wind data has a better correlation with in situ measurement of ET₀ than to the WaPOR. All of the results shown that this dataset can be used in each place in the province to estimate ET₀.

Keywords: Reference evapotranspiration, Meteorological station, Remote sensing, WaPOR, ERA5.

* Correspondence Address: Dep. of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, P.O. Box 14155-6465, Tehran. Tel: 09128902914

Email: saeid.hamzeh@ut.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.52547/gisj.14.2.37>



سنجش از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران سال چهاردهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۱
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.14, No. 2, Summer 2022

۳۷-۵۰

مقاله پژوهشی

برآورد تبخیر و تعرق مرجع روزانه

با استفاده از داده‌های سنجش از دور (مطالعه موردی: استان سیستان و بلوچستان)

اسلام گله‌بان^۱، سعید حمزه^{۲*}، شادمان ویسی^۳، سید کاظم علوی‌پناه^۴

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲. دانشیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳. استادیار مؤسسه تحقیقات آب و خاک کشور، تهران، ایران
۴. استاد سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۲۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۲۱

چکیده

تعیین دقیق نیاز آبی محصولات گوناگون و همچنین میزان آب مصرفی در سطحی پهناور و در زمان واقعی یکی از مهم‌ترین نیازهای متخصصان آب و خاک است. پیش‌نیاز آن نیز تعیین تبخیر و تعرق مرجع است. معمولاً محاسبه این پارامتر براساس استفاده از داده‌های اقلیمی و حل معادلات تجربی انجام می‌شود، اما، به دلیل محدود بودن و توزیع نامناسب ایستگاه‌های هواشناسی، اغلب استفاده از داده‌های آنها سبب ایجاد خطا در محاسبه این پارامتر می‌شود. بهترین گزینه، به منظور برطرف کردن این محدودیت، استفاده از داده‌های سنجش از دور است. بدین منظور می‌توان از محصولات گوناگون ماهواره‌ای بهره برد و با ترکیب آنها، برای تهیه نقشه‌های به‌روز تبخیر و تعرق مرجع و واقعی اقدام کرد. از این رو تحقیق حاضر به منظور بررسی امکان استفاده از محصولات سامانه‌های WaPOR و ERA5 با هدف محاسبه میزان تبخیر و تعرق مرجع روزانه، بر مبنای روش تجربی پنمن مانیتیت و ارزیابی و صحت‌سنجی خروجی‌های آن در سطح استان سیستان و بلوچستان ایران انجام شده است. نتایج تحقیق نشان داد که سامانه‌های سنجش از دوری با دقت بالای ۸۰٪، در محل ایستگاه‌های هواشناسی، مقدار تبخیر و تعرق مرجع را برآورد کرده‌اند و در تمامی ایستگاه‌ها خطای کمتر از ۲ میلی‌متر گزارش شد. همچنین فصل زراعی پانزدهم خرداد تا پانزدهم آبان، در مقایسه با فصل زراعی اول آذر تا پانزدهم اردیبهشت، تبخیر و تعرق مرجع به‌دست‌آمده از داده‌های ماهواره‌ای همبستگی بالاتری را نشان می‌دهد. از آن جاکه مقادیر برآورد و صحت‌سنجی شده دقت مورد قبولی داشتند، در گام بعدی می‌توان، در هر نقطه از استان، از این سامانه‌ها استفاده کرد

کلیدواژه‌ها: تبخیر و تعرق مرجع، سنجش از دور، ERA5، WaPOR.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران. تلفن: ۰۹۱۲۸۹۰۲۹۱۴

۱- مقدمه

روش فائو پنمن مانیتیت استفاده کرده‌اند (Akbarinodehi, 2011; Soltani Et Al., 2012; Sharifan Et Al., 2007; Sharifan Et Al., 2009; Sharifan Et Al., 2012). بررسی‌ها نشان می‌دهد دقت برآورد تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از روش فائو پنمن مانیتیت، در مقایسه با اندازه‌گیری‌های لایسیمتری، از دیگر روابط تجربی بهتر است (Allen, 1996; Allen et al., 1990; Jensen et al., 1998). مزیت معادله پنمن مانیتیت بر روش‌های تجربی دیگر در آن است که هر دو مکانیسم انرژی و آنرودینامیک را در پدیده تبخیر در نظر می‌گیرد؛ از این رو تا کنون، به‌منظور برآورد تبخیر و تعرق مرجع، از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و معادله پنمن مانیتیت فائو استفاده شده است. اما با توجه به اینکه معمولاً ایستگاه‌های هواشناسی در فاصله محدودی از شهری و فرودگاه‌ها قرار دارند، میزان تبخیر و تعرق مرجع برآورد شده با داده‌های گردآمده برای موقعیت هر ایستگاه تناسب دارد و ممکن است با تبخیر و تعرق مرجع مناطق دیگر، از جمله مناطق کشاورزی که فاقد ایستگاه‌های هواشناسی‌اند، اختلاف داشته باشد. همین نکته، در صورت اختلاف زیاد، چه بسا به تخمین اشتباه مقدار نیاز آبی منجر شود؛ بنابراین داده‌های ماهواره‌ای، با توجه به تنوع زیاد، می‌توانند پارامترهای متفاوت مورد نیاز در محاسبه تبخیر و تعرق را همچون دما و رطوبت و تابش، محاسبه کنند و می‌توان از این داده‌ها به‌منزله جایگزین مناسب برای داده‌های ایستگاه‌های زمینی استفاده کرد زیرا تکنولوژی سنجنش از دور می‌تواند پوشش مکانی بزرگ و پیوسته‌ای را در عرض چند دقیقه فراهم کند. هزینه آن از روش‌های مرسوم کمتر است و در مورد نواحی فاقد آمار و یا در جاهایی که اندازه‌گیری دشوار است، تنها روش ممکن محسوب می‌شود (Rango, 1994). (Soltani et al., 2012)، در مطالعه‌ای، دقت معادله پنمن مانیتیت فائو را برای داده‌های نه ایستگاه،

تبخیر و تعرق مرجع یکی از فرایندهای مهم چرخه هیدرولوژی است که نقش مهمی در مطالعات کشاورزی، طرح‌های مدیریت منابع آب، طراحی شبکه‌های آبیاری و زهکشی دارد (Gundekar et al., 2008; Lopez Urrea, 2005; Snyder et al., 2006). تبخیر و تعرق مرجع عبارت است از میزان تبخیر و تعرق گیاهی فرضی، با ارتفاع ۰/۱۲ سانتی‌متر و مقاومت پوشش گیاهی ۷۰ ثانیه بر متر و ضریب آلبیدوی ۰/۲۳ (Kheirabi, 2002). در بیشتر روش‌هایی که برای محاسبه تبخیر و تعرق مطرح شده است، ابتدا مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET₀) تخمین زده می‌شود و سپس، از روی آن، تبخیر و تعرق گیاه مورد نظر به دست می‌آید. دقیق‌ترین روش اندازه‌گیری تبخیر و تعرق مرجع استفاده از لایسیمتر است اما با توجه به هزینه‌های بالای احداث آن، در عمل، نمی‌توان از آن در تمامی مناطق استفاده کرد. تا کنون روابط تجربی و نیمه‌تجربی متعددی، به‌منظور تعیین تبخیر و تعرق گیاه مرجع با استفاده از معادلات تجربی مبتنی بر یک یا چند پارامتر متفاوت هواشناسی، مانند هارگریوز، پنمن، تورنت وایت، پیشنهاد شده است. در روش‌های تجربی، تخمین تبخیر و تعرق با استفاده از روابط مبتنی بر پارامتر دما (Hargreaves & Samani, 1985) و یا تابش (Jensen, 1972; Priestley & Taylor, 1972; Haise, 1963) محاسبه می‌شود. در روش‌های ترکیبی، از ساده‌سازی معادلات فیزیکی بیلان انرژی برای سطحی فرضی در تخمین تبخیر و تعرق استفاده می‌شود (Allen, 1948; Penman, 1998). از آن‌جا که روابط تجربی اغلب به واسطه محلی نیاز دارد و کاربرد آنها در مناطق اقلیمی متفاوت، با محدودیت مواجه است، روش پنمن مانیتیت فائو تنها روش استاندارد برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع، از سوی سازمان خواربار جهانی فائو (FAO)^۱ معرفی شد (Allen et al., 1998; Allen et al., 2002). پژوهشگران بسیاری، به‌منظور ارزیابی یافته‌های تجربی خود، از

1. Food and Agriculture Organization

کمبود فشار بخار، تابش خورشیدی مجموعه داده‌های به کاررفته است. نتایج به دست آمده از داده‌های تحلیل مجدد نشان می‌دهد که این داده‌ها می‌تواند جایگزین مناسبی برای داده‌های زمینی باشد. در پژوهشی که سازمان فائو (۲۰۱۸) انجام داده، با استفاده از داده‌های تحلیل مجدد (MERRA/GEOS-5) و معادله پنمن مانیتث فائو، تبخیر و تعرق مرجع روزانه با رزولوشن ۲۰ کیلومتر برای مناطق محدودی به دست آمده است؛ بنابراین می‌توان گفت تحقیقات صورت گرفته در زمینه تبخیر و تعرق مرجع، تا کنون یا با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و یا با استفاده از لایسپومتر انجام شده است. در زمینه فناوری سنجش از دور نیز، در پژوهش‌های انجام شده در مورد تبخیر و تعرق مرجع، از پارامترهای محدود استفاده شده است که نمی‌توان در اقلیم‌های گوناگون از آن بهره برد؛ از طرفی، این تحقیقات بیشتر در زمینه تبخیر و تعرق واقعی بوده است. بدین ترتیب پژوهش پیش رو سعی دارد، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای اقلیمی ERA5 - GLDAS2.1 و سامانه WAPOR، تبخیر و تعرق مرجع را ارزیابی و نتایج را با تبخیر و تعرق مرجع ایستگاه‌های هواشناسی استان سیستان و بلوچستان مقایسه کند.

۲- مواد روش‌ها

۲-۱- موقعیت جغرافیایی

استان سیستان و بلوچستان وسعتی در حدود ۱۸۰.۷۲۶ کیلومتر مربع دارد و بین عرض جغرافیایی ۲۵ تا ۳۱ درجه عرض شمالی و ۵۸ تا ۶۳ درجه طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). هفده ایستگاه سینوپتیک مورد بررسی در استان سیستان و بلوچستان در جدول ۱ نشان داده شده است.

1. Lu
2. Xu
3. Singh
4. Oudin
5. Barik
6. Li
7. Pelosi

برآورد تبخیر و تعرق در اقلیم‌های متفاوت، با استفاده از در شرایطی که داده‌های هواشناسی محدود باشد، بررسی کردند. نتایج نشان داد که حداقل داده لازم، برای برآورد دقیق تبخیر و تعرق مرجع به روش مذکور در اقلیم‌های مرطوب و گرم و نیمه خشک، داده‌های حداکثر و حداقل دما و سرعت باد است و در اقلیم بسیار خشک نیز، حداقل داده لازم داده‌های حداکثر و حداقل دمای روزانه و سرعت باد روزانه است. لو^۱ و همکاران (۲۰۰۵)، در تحقیقی در جنوب شرق آمریکا، شش روش محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل را با هم مقایسه کردند. آنها برای این کار، سه مدل مبتنی بر دما (تورنت-ویت، هامون و هارگریوز سامانی) را با سه مدل مبتنی بر تابش (تورک، مکینک و پرستلی-تیلور) مقایسه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که سه روش پرستلی-تیلور، تورک و هامون عملکردی بهتر از دیگر روش‌ها داشتند. این روش را ژو^۲ و سینگ^۳ (۲۰۰۲) و اودین^۴ و همکاران (۲۰۰۵) نیز، با استفاده از ایستگاه‌های زمینی، بررسی و همگی آنها ثابت کردند این روش خروجی‌های معقول و مورد اعتمادی دارد. بریک^۵ (۲۰۱۴)، طی مطالعه‌ای در شمال حوزه رودخانه کلرادو، به منظور مدل‌سازی هیدرولوژیک، از روش پرستلی-تیلور و تکنیک سنجش از دور برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده کرد. لی^۶ و همکاران (۲۰۱۶) برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق پتانسیل، در منطقه‌ای خشک در شمال غرب چین، دقت شش روش متداول اندازه‌گیری تبخیر و تعرق پتانسیل (بلانی کریدل، هارگریوز، پرستلی-تیلور، دالتون، پنمن و شاتلورث) را ارزیابی کردند. نتایج کار آنها نشان داد که سه روش پنمن، شاتلورث و پرستلی-تیلور بیشترین دقت را در اندازه‌گیری دارند. در پژوهش پلوسی^۷ و همکاران (۲۰۲۰)، با استفاده از دو سری داده‌های تحلیل مجدد (UERRA MESCAN-SURFEX (UMS) و ERA5-Land (E5L)، عملکرد تبخیر و تعرق مرجع در کامپانیا (جنوب ایتالیا) طی بازه زمانی آوریل تا سپتامبر سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۸ ارزیابی شد. دما، سرعت باد،

۳- آمار و اطلاعات

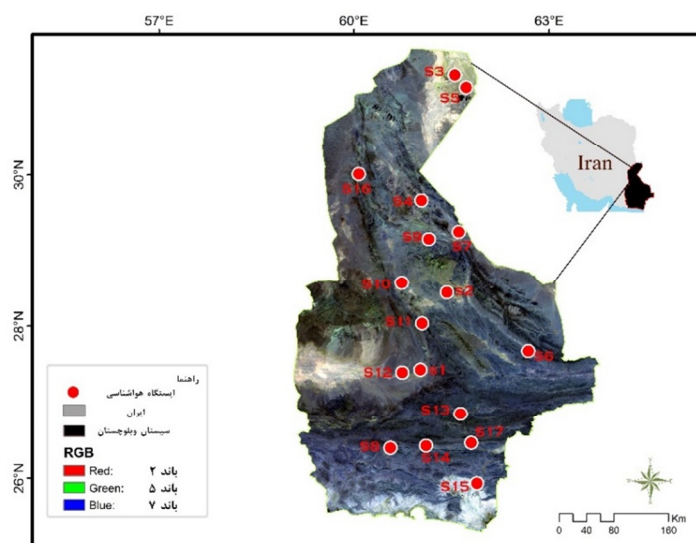
۳-۱- داده‌های زمینی

در این پژوهش، داده‌های هواشناسی مورد نیاز (دمای حداکثر، دمای حداقل، سرعت باد، ساعت آفتابی، رطوبت حداقل، رطوبت حداکثر) روزانه و از هفده ایستگاه سینوپتیک سازمان هواشناسی، واقع در استان

سیستان و بلوچستان، متعلق به سال ۲۰۱۲ (شکل ۱) جمع‌آوری شد. همچنین داده‌های هواشناسی ماهواره‌ای ERA 5 و GLDAS-2.1 به صورت روزانه و محصول تبخیر و تعرق مرجع روزانه WAPOR نیز، مربوط به منطقه مورد مطالعه، تهیه شد (جدول ۲).

جدول ۱. اسامی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد بررسی استان سیستان و بلوچستان

Station Name	Iranshahr	Khash	Zabol	Zahedan	Zahak	Saravan	Mirjaveh	Nikshahr	Junabad
Station	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Station Name	Gowhar Kuh	Karvandar	Bampour	Sarbaz	Qasr-e-qand	Bahoukalat	Nosratabad	Rasak	
Station	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های مورد بررسی در منطقه مطالعاتی

جدول ۲. داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده

Parameters used	Time period used	Temporal resolution	Spatial resolution	data type
Minimum temperature, maximum temperature, average temperature, dew point temperature	2012	Hourly	0.25 degrees	ERA 5
Wind speed	2012	Hourly (3 hours)	0.25 degrees	GLDAS 2.1
Reference Evapotranspiration product	2012	Daily	20 kilometer	WAPOR

۳-۲- داده‌های ماهواره‌ای

داده‌های جهانی تحلیل مجدد آب و هوایی و اقلیمی ERA5؛ به منزله بخشی از اجرای سرویس تغییرات آب و هوایی کوپرنیک^۱ در اروپا توسط مرکز اروپایی پیش‌بینی میان برد آب و هوا^۲ تولید شده است. اساس این داده‌ها سیستم یکپارچه پیش‌بینی^۳ است که با استفاده از قوانین فیزیک، داده‌های مدل را با داده‌های مشاهداتی در سراسر جهان، به مجموعه داده‌ای جهانی و کاملاً سازگار تبدیل می‌کند. این داده‌ها به صورت شبکه‌ای است و با قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵*۰/۲۵ درجه، از بازه زمانی ۱۹۷۹ تا اکنون در دسترس قرار دارد. در این پژوهش از پارامترهای دمای حداقل، دمای حداکثر، دمای میانگین، دمای نقطه شبنم استفاده شد (https://cds.climate.copernicus.eu). شایان ذکر است که در داده‌های تحلیل مجدد ERA5، به این علت که داده‌های سرعت باد دارای خطای نامتعارف بودند و با داده‌های باد ایستگاه‌های هواشناسی اختلاف زیادی داشتند، پارامتر باد از داده‌های شبکه‌ای^۴ دریافت و استفاده شد. این داده‌ها از سوی سازمان ناسا^۵، با رزولوشن زمانی سه‌ساعته و قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵*۰/۲۵ درجه، در دسترس قرار دارد (https://ldas.gsfc.nasa.gov).

(https://wapor.apps.fao.org/home/WAPOR).

۳-۴- مدل پنمن مانیتیت فائو

باتوجه به کاستی‌های معادله پنمن مانیتیت، سازمان خواربار کشاورزی گیاه فرضی دارای ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر و مقاومت سطحی ۷۰ ثانیه بر متر و ضریب بازتابش (آلبیدو) ۰/۲۳ را تعریف کرد که تبخیر آن شباهت بسیاری به تبخیر از سطح وسیع چمن سبز با ارتفاع یکنواخت، رشد فعال و دسترسی به آب کافی دارد و بدین ترتیب روش پنمن مانیتیت فائو را توسعه داد. معادله کاربردی برای این مدل مطابق رابطه (۱) است.

$$ETO = \frac{0.408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34 u_2)} \quad (1) \text{ رابطه}$$

در این معادله، ETO تبخیر و تعرق مرجع گیاه مرجع (mm)، Δ شیب منحنی فشار بخار به نسبت درجه حرارت (Kpa.°C-1)، Rn تابش خالص (MJ.m⁻².d⁻¹)، G شار گرما به داخل خاک است که معمولاً صفر در نظر گرفته می‌شود. همچنین γ ضریب رطوبتی (Kpa °C-1)، T متوسط دمای روزانه (°C)، es و ea به ترتیب فشار بخار اشباع و فشار واقعی بخار آب (mbar)، U2 سرعت باد در روز در ارتفاع دومتری از سطح زمین به m s-1 است.

۳-۵- آنالیز آماری

نتایج به دست آمده از برآورد تبخیر و تعرق مرجع حاصل از مدل پنمن مانیتیت فائو، با استفاده از داده‌های ایستگاه زمینی، داده‌های ERA5 و Gldas و تبخیر و تعرق مرجع Wapor با استفاده از چهار آماره خطاسنجی مقایسه

۳-۳- محصول تبخیر و تعرق مرجع WaPOR^۶

WaPOR درگاه پیش بهره‌وری آب از طریق دسترسی آزاد به داده‌های سنسجش از دور است که سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد (FAO) در سه سطح یک (۲۵۰ متر)، دو (۱۰۰ متر) و سه (۳۰ متر) آن را راه‌اندازی کرده است. محصول تبخیر و تعرق مرجع این سامانه روزانه و با قدرت تفکیک مکانی ۲۰ کیلومتر، از سال ۲۰۰۹ تا اکنون، در سطح یک در دسترس قرار دارد که با استفاده از معادله پنمن مانیتیت تولید شده است. در این پژوهش، به منظور بررسی دقت این محصول با تبخیر و تعرق مرجع تولیدی، داده‌های شبکه‌ای و زمینی به صورت روزانه و متعلق به سال ۲۰۱۲، از سامانه مورد نظر تهیه شد

1. Copernicus Climate Change Service (C3S)
2. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMW)
3. Integrated Forecasting System (IFS)
4. Global Land Data Assimilation System (GLDAS2.1)
5. National Aeronautics and Space Administration (NASA)
6. Water Productivity Open-Access Portal Uses Remote Sensing Technologies

ایستگاه‌های مورد بررسی استان سیستان و بلوچستان محاسبه شد. پس از آن، مقدار تبخیر و تعرق به دست آمده از داده‌های ERA5 - GLDAS 2.1 و تبخیر و تعرق مرجع WaPor با تبخیر و تعرق مرجع بر اساس داده‌های هواشناسی مقایسه شد.

۴- نتایج و بحث

نتایج مقایسه میزان خطای حاصل از تبخیر و تعرق مرجع روزانه ایستگاه‌های هواشناسی با تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده بر اساس داده‌های ماهواره‌ای متعلق به سال ۲۰۱۲ در جدول ۳ آمده است. بر این اساس، بیشترین مقادیر همبستگی (R^2) به تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده با استفاده از داده‌های 5 ERA-GLDAS با تبخیر و تعرق مرجع ایستگاه‌های هواشناسی زابل و زهک، به میزان ۰/۹۲، تعلق دارد. بیشترین همبستگی نیز به تبخیر و تعرق مرجع WaPor با تبخیر و تعرق مرجع ایستگاه‌های هواشناسی ایرانشهر، به میزان ۰/۸۹ بازمی‌گردد. علاوه بر این نتایج مقایسه بین تبخیر و تعرق مرجع حاصل از داده‌های ERA5-GLDAS و WaPor، در مورد پانزده ایستگاه، با تبخیر و تعرق مرجع داده‌های ایستگاه‌های زمینی نشان می‌دهد بیشترین همبستگی، به میزان ۰/۷۸، به داده‌های ERA5-GLDAS و کمترین RMSE، به میزان ۱/۶۵، به WaPor بازمی‌گردد.

شدند تا دقت تخمین ارزیابی شود. این شاخص‌ها عبارت‌اند از:

$$MAD = (\sum_{i=1}^N |ET(Obs)_i - ET(Mod)_i|) / N \quad (۲)$$

$$RMSE = \sqrt{(\sum_{i=1}^N (ET(Obs)_i - ET(Mod)_i)^2) / N} \quad (۳)$$

$$MSE = (\sum_{i=1}^N (ET(Obs)_i - ET(Mod)_i)^2) / N \quad (۴)$$

$$MAPE = \frac{(\sum_{i=1}^N \frac{|ET(Obs)_i - ET(Mod)_i|}{ET(Obs)_i})}{N} \quad (۵)$$

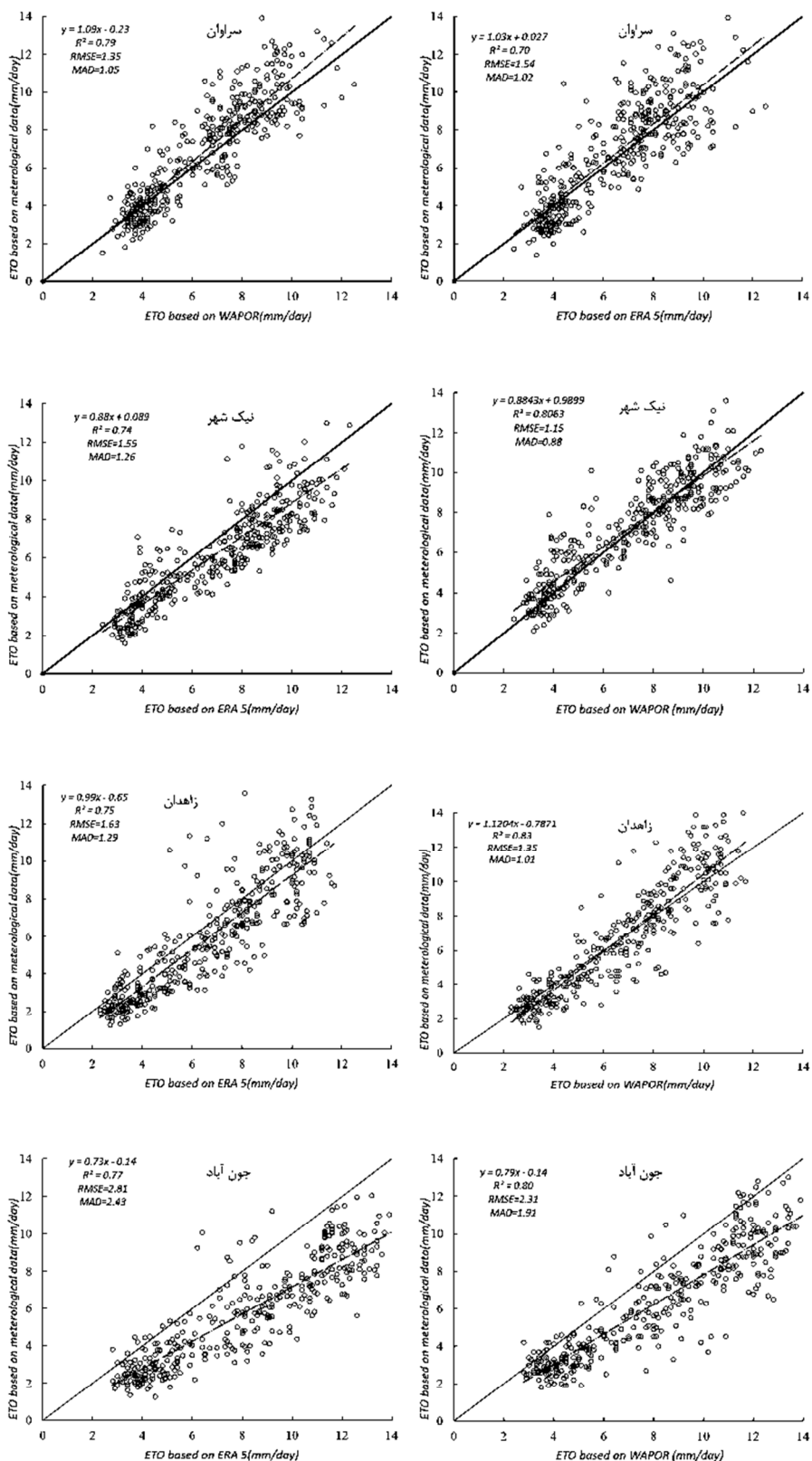
$$R^2 = \frac{(\sum (ET(Obs)_i - ET(Obs_m)_i)(ET(Mod)_i - ET(Mod_m)_i))^2}{\sum_i (ET(Obs)_i - ET(Obs_m)_i)^2 \sum_i (ET(Mod)_i - ET(Mod_m)_i)^2} \quad (۶)$$

ET(Mod) تبخیر و تعرق مرجع برآورد شده از داده‌های ERA-GLDAS و تبخیر و تعرق مرجع WAPOR و ET(Obs) تبخیر و تعرق برآورد شده از داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های زمینی است. همچنین ET(Obs_m) و ET(Mod_m) به ترتیب متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده داده‌های ماهواره‌ای و زمینی است. پس از اخذ و محاسبه داده‌های روزانه تبخیر و تعرق مرجع، با استفاده از محصولات WaPor و ERA5، با استفاده از داده‌های زمینی و داده‌های ماهواره‌ای و از طریق معادله پنمن مانیتث فائو، تبخیر و تعرق مرجع برای تمامی

جدول ۳. تفسیر آماری نتایج تبخیر و تعرق مرجع ایستگاه‌های هواشناسی با داده‌های ماهواره‌ای

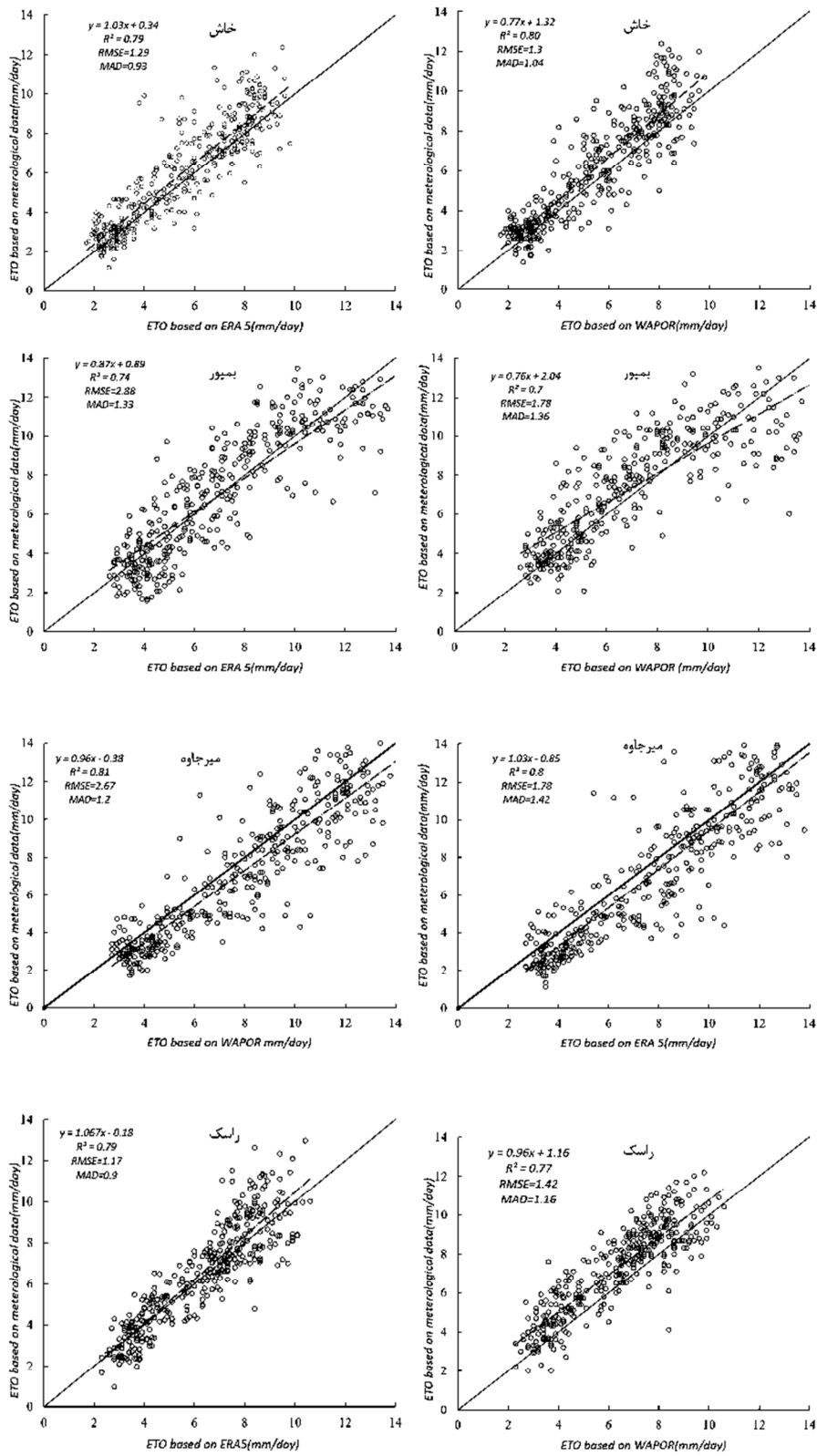
MAPE		MSE		MAD		RMSE		R ²		Location	
WAPOR	ERA5	WAPOR	ERA5	WAPOR	ERA5	WAPOR	ERA5	WAPOR	ERA5	Station Name	Station
14.74	15.46	1.38	1.45	0.89	0.95	1.17	1.2	0.83	0.89	Iranshahr	S1
20.77	18.99	1.88	1.66	1.04	0.92	1.37	1.29	0.8	0.79	Khash	S2
*	17.65	*	3.31	*	1.41	*	1.82	*	0.92	Zabol	S3
15.98	21.63	1.83	2.67	1.01	1.29	1.35	1.63	0.83	0.75	Zahedan	S4
*	20.52	*	3.89	*	1.5	*	1.97	*	0.92	Zahak	S5
16.72	19.6	1.84	2.38	1.05	1.2	1.35	1.54	0.78	0.7	Saravan	S6
17.93	20.66	2.67	3.18	1.27	1.42	1.63	1.78	0.81	0.79	Mirjaveh	S7
14.23	18.62	1.33	2.43	0.88	1.26	1.15	1.55	0.8	0.74	Nikshahr	S8
24.19*	30.75	5.35	7.9	1.91	2.43	2.31	2.81	0.8	0.77	Junabad	S9
21.91	21.23	2.99	2.7	1.38	1.26	1.72	1.64	0.7	0.71	Gowhar Kuh	S10
25.58	18.36	2.59	1.94	1.28	1.01	1.61	1.39	0.8	0.83	Karvandar	S11
20.4	20.52	3.19	2.88	1.36	1.33	1.78	1.69	0.69	0.73	Bampour	S12
23.09	27.7	6.12	7.67	2.04	2.36	2.47	2.77	0.75	0.73	Sarbaz	S13
26.68	19.05	2.69	1.91	1.32	1.03	1.64	1.38	0.78	0.71	Qasr-e-qand	S14
12.37	14.74	1.17	1.48	0.83	0.9	1.08	1.21	0.76	0.78	Bahoukalat	S15
26.8	20.97	3.92	3.99	1.53	1.61	1.98	1.99	0.83	0.79	Nosratabad	S16
20.76	15.06	2.04	1.37	1.16	0.91	1.42	1.17	0.77	0.79	Rasak	S17
19.95	20.33	2.73	3.04	1.26	1.33	1.65	1.74	0.69	0.78	All Stations	*

برآورد تبخیر و تعرق مرجع روزانه ...



شکل ۲. نمودار مقادیر همبستگی و موقعیت نقاط به نسبت خط یک به یک

اسلام گلهبان و همکاران



ادامه شکل ۲

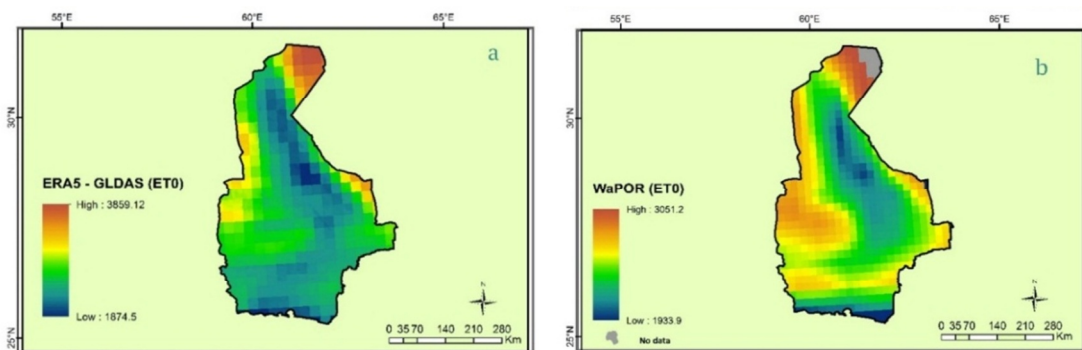
داده است (شکل ۳- b). به نظر می‌رسد یکی از دلایل کم‌تر بودن میزان حداکثر در سامانه WapOR در قیاس با مقدار بیان شده با استفاده از داده‌های تحلیل مجدد ERA5 - GLDAS این است که در چند پیکسل از بخش شمالی استان که شدت تبخیر و تعرق بالایی نیز دارند، سامانه WAPOR اطلاعاتی ارائه نداده است؛ به عبارتی چون مقادیر حداقل دو سامانه در طول یک سال، به صورت تجمعی، کمتر از ۵۰ میلی‌متر با هم اختلاف دارند، در صورت داشتن اطلاعات بخش شمالی نیز نمی‌توان اختلافی بیش از این متصور شد.

۵- ارزیابی تغییرات فصلی تبخیر و تعرق مرجع

طبق نتایج حاصل از مقایسه میزان تبخیر و تعرق مرجع فصلی بر اساس داده‌های روزانه ایستگاه‌های هواشناسی با داده‌های ماهواره‌ای، (جدول ۴) تبخیر و تعرق مرجع به دست آمده از داده‌های ERA5-GLDAS همبستگی بیشتری در مقایسه با نتیجه WAPOR، طی همه فصل‌های سال، داشته و بیشترین میزان آن در فصل تابستان برابر با ۰.۹۱ است. در فصل زراعی پانزدهم خرداد تا پانزدهم آبان نیز، در قیاس با فصل زراعی اول آذر تا پانزدهم اردیبهشت، تبخیر و تعرق مرجع حاصل از داده‌های ماهواره‌ای همبستگی بیشتری به چشم می‌خورد و همبستگی تبخیر و تعرق مرجع به دست آمده از داده‌های ERA5-GLDAS، طی فصل زراعی پانزدهم خرداد تا پانزدهم آبان، برابر با ۰.۸۶ است (جدول ۴).

همان‌طور که در مجموعه نمودارهای شکل ۲ مشاهده می‌شود، با توجه به خط یک‌به‌یک، هر دو سامانه Wapor و ERA5-GLDAS اغلب روزهای سال در بیشتر ایستگاه‌های استان سیستان و بلوچستان برآورد کمتری از مقدار تبخیر و تعرق مرجع مستخرج، با استفاده از معادله پنمن مانیتث فائو در ایستگاه‌های هواشناسی، دارند و مقادیر آماره‌های خطا نیز در حد مورد قبول و کمتر از دو میلی‌متر در روز را، در مورد هر دو سامانه در ایستگاه‌های متفاوت نشان می‌دهد؛ از این رو در گام بعدی، نقشه رستر تبخیر و تعرق مرجع تجمعی استان، در مقیاس سالیانه نشان داده شده است (شکل ۳).

نتایج حاصل از مجموع تبخیر و تعرق سالیانه، با استفاده از داده‌های ERA5 - GLDAS، نشان می‌دهد حداکثر میزان تبخیر و تعرق سالیانه در استان سیستان و بلوچستان ۳۸۵۹ میلی‌متر و بیشتر در بخش‌های شمال شرق صورت گرفته و حداقل آن ۱۸۷۴ میلی‌متر و در بخش‌های مرکزی و جنوبی اتفاق افتاده است (شکل ۳- a). مجموع تبخیر و تعرق مرجع سالیانه به دست آمده با استفاده از محصول WapOR نیز مقدار ۳۰۵۱ میلی‌متر حداکثر تبخیر و تعرق مرجع و ۱۹۳۳ میلی‌متر حداقل تبخیر و تعرق را در این استان نشان می‌دهد. همچنین حداکثر و حداقل تبخیر و تعرق مرجع حاصل از WapOR، همانند تبخیر و تعرق مرجع به دست آمده با استفاده از داده‌های ERA5-GLDAS، به ترتیب در شمال شرق و بخش‌های مرکزی- جنوبی رخ



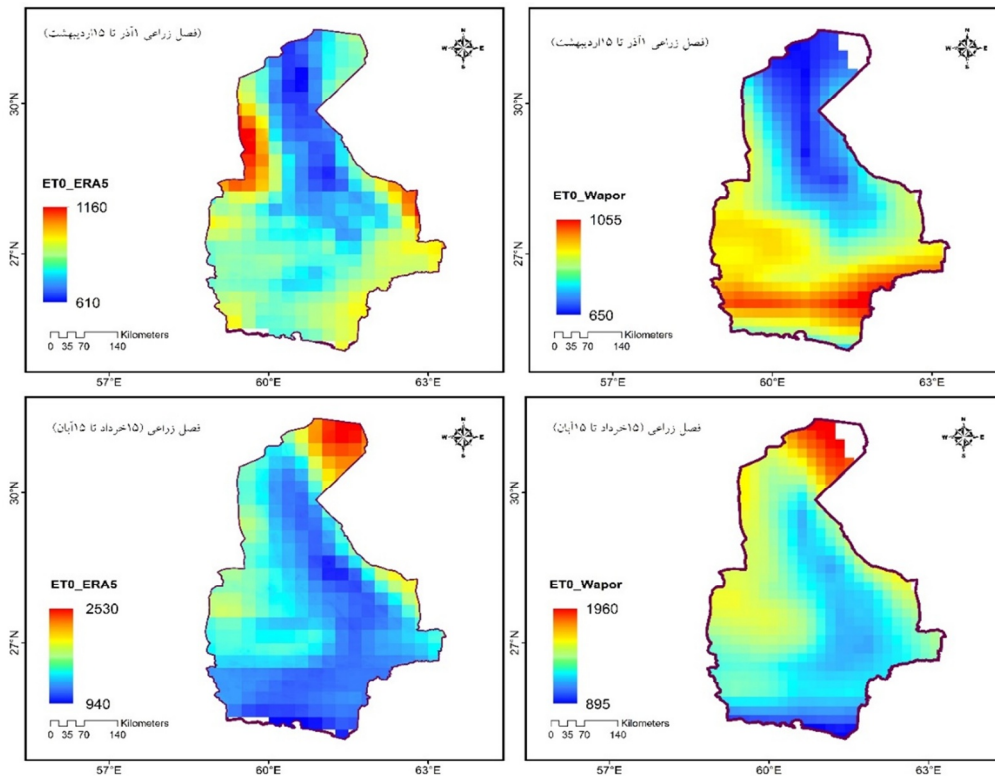
شکل ۳. مجموع تبخیر و تعرق مرجع سالیانه، با استفاده از طریق داده‌های ERA 5-GLDAS (a) و محصول WapOR (b)

اسلام گله بان و همکاران

جدول ۴. تفسیر آماری نتایج فصلی تبخیر و تعرق مرجع ایستگاه‌های هواشناسی با داده‌های ماهواره‌ای

میزان همبستگی	ضخک	زاہل	نصرت آباد	نصرت آباد	سرباز	کارواندر	گوهرکوه	راسک	میمور	چون آباد	نیک شهر	میرجاوه	سراوان	زاهدان	خاش	ایرانشهر	ایستگاه	فصل زراعی ۱۵ آذر-۱۵ اردیبهشت		فصل زراعی ۱۵ خرداد-۱۵ آبان		فصل زمستان		فصل پاییز		فصل تابستان		فصل بهار												
																		E _{t0} (ground)	E _{t0} (Era5)	Wapor	E _{t0} (ground)	E _{t0} (Era5)	Wapor	E _{t0} (ground)	E _{t0} (Era5)	Wapor	E _{t0} (ground)	E _{t0} (Era5)	Wapor	E _{t0} (ground)	E _{t0} (Era5)	Wapor	E _{t0} (ground)	E _{t0} (Era5)	Wapor	E _{t0} (ground)	E _{t0} (Era5)	Wapor	E _{t0} (ground)	E _{t0} (Era5)
	975.3	1047.0	1016.0	822.2	720.5	1030.3	694.6	753.1	802.4	794.8	940.5	888.6	938.8	776.8	778.7	664.7	813.8	E _{t0} (ground)																						
0.52	1101.2	1125.2	854.5	849.3	779.9	771.2	766.0	750.7	822.8	839.7	693.1	772.8	808.8	820.6	697.3	740.8	842.9	E _{t0} (Era5)																						
0.09	*	*	808.1	818.4	845.1	786.3	781.3	767.4	857.2	854.0	717.1	852.2	797.8	800.3	740.7	706.8	825.1	Wapor																						
	1465.3	1609.6	1068.8	659.4	718.8	1017.7	735.7	812.6	671.8	972.9	1048.4	802.8	995.4	767.1	836.0	703.6	863.3	E _{t0} (ground)																						
0.91	1585.6	1664.6	960.1	742.0	709.3	756.8	842.6	849.7	734.4	959.3	754.8	729.7	1013.3	806.6	785.1	738.9	969.2	E _{t0} (Era5)																						
0.61	*	*	982.7	723.8	804.6	772.4	866.4	877.9	792.5	936.9	851.5	835.4	984.4	858.7	918.7	803.1	884.0	Wapor																						
	523.6	622.8	530.4	467.9	368.0	604.7	385.2	376.0	440.5	454.6	565.8	492.3	513.2	450.7	438.4	363.4	464.5	E _{t0} (ground)																						
0.44	568.2	595.4	424.6	449.3	418.6	400.1	381.3	387.1	451.2	436.5	344.4	416.8	413.6	426.6	334.8	364.7	427.3	E _{t0} (Era5)																						
-0.07	*	*	431.0	503.1	493.0	452.7	450.5	430.2	515.3	509.9	386.5	496.9	430.7	453.9	398.4	384.0	481.0	Wapor																						
	316.6	362.5	423.0	377.7	333.3	473.2	289.3	304.2	370.6	394.8	405.9	384.9	398.2	374.7	353.5	271.0	356.9	E _{t0} (ground)																						
0.53	344.4	345.3	414.4	374.1	350.7	369.0	327.6	330.1	361.0	373.4	320.2	359.1	380.2	409.9	330.3	340.6	372.9	E _{t0} (Era5)																						
0.28	*	*	352.0	426.3	438.6	419.4	379.6	357.7	453.3	429.0	351.9	445.7	383.0	402.4	354.3	345.1	414.2	Wapor																						
	2132.8	2348.8	1689.7	1110.9	1115.2	1645.8	1139.5	1245.0	1116.5	1452.0	1641.7	1312.1	1556.1	1226.1	1311.2	1093.7	1349.0	E _{t0} (ground)																						
0.86	2335.0	2449.5	1452.9	1187.1	1133.8	1177.7	1288.0	1301.9	1176.4	1456.0	1152.6	1163.8	1511.1	1262.6	1183.6	1147.5	1466.7	E _{t0} (Era5)																						
0.47	*	*	1480.2	1181.7	1277.2	1216.9	1347.4	1355.4	1271.9	1466.9	1291.5	1322.0	1480.1	1334.2	1378.4	1230.4	1383.1	Wapor																						
	741.6	847.0	938.3	852.6	719.9	1036.9	671.2	696.9	827.6	828.7	908.8	871.1	893.0	807.5	768.6	622.7	790.2	E _{t0} (ground)																						
0.38	794.2	802.8	841.4	869.5	793.4	793.7	700.1	691.9	842.2	790.9	663.9	788.9	755.1	848.0	674.4	712.3	783.1	E _{t0} (Era5)																						
0.21	*	*	736.6	929.7	935.2	870.9	782.6	737.4	971.4	886.0	703.2	936.5	767.2	828.5	710.1	697.5	855.7	Wapor																						

برآورد تبخیر و تعرق مرجع روزانه ...



شکل ۴. مجموع تبخیر و تعرق مرجع فصل‌های زراعی به‌دست‌آمده از طریق داده‌های Era5-Gldas و محصول WaPOR

۶- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر به‌منظور ارزیابی صحت محصولات سنجش از دور انجام شد تا تبخیر و تعرق مرجع روزانه برآورد شود. نتایج محاسبه تبخیر و تعرق مرجع بر مبنای روش پنمن مانیت، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی سطح استان سیستان و بلوچستان نشان داد که محصولات ماهواره‌ای در این محاسبات به‌صورت روزانه، دقت بالایی دارند؛ بنابراین پیشنهاد این است که داده‌های ماهواره‌ای، به‌منظور محاسبه تبخیر و تعرق مرجع در مناطق دیگر کشور که اقلیمی متفاوت با استان سیستان و بلوچستان دارند نیز، ارزیابی شود تا بتوان به برنامه‌ای کلی و مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای دست یافت و امکان محاسبه این پارامتر مهم، در سطح کشور و به‌ویژه مناطقی که فاقد آمارهای زمینی است، فراهم باشد.

شکل ۴ مجموع تبخیر و تعرق مرجع فصل‌های زراعی به‌دست‌آمده بر اساس داده‌های ERA5-GLDAS و نیز WaPOR را نشان می‌دهد که حداکثر مقدار آن در فصل زراعی اول آذر تا پانزدهم اردیبهشت، از طریق داده‌های ERA5-GLDAS و WaPOR به‌ترتیب ۱۱۶۰ و ۱۰۵۵ میلی‌متر است. این مقدار، در فصل زراعی پانزدهم خرداد تا پانزدهم آبان نیز، به‌ترتیب ۲۵۳۰ و ۱۹۶۰ میلی‌متر است. با توجه به مقادیر تبخیر و تعرق بالا و کمبود منابع آب، پیشنهاد می‌شود در فصل زراعی تابستان (پانزدهم خرداد تا پانزدهم آبان)، در این استان کشت دوم انجام نشود و اراضی، به‌منظور حفظ منابع آب، آیش بمانند.

- Reference Crop Evapotranspiration for Semi-Arid Region**, Irrigation Science, 26, PP. 169-175.
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985, **Reference Crop Evapotranspiration from Temperature**, Applied Engineering Agriculture, 1(2), PP. 96-99.
- Jensen, M.E. & Haise, H.R., 1963, **Estimation of Evapotranspiration from Solar Radiation**, Journal of Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineering, 89, PP. 15-4.
- Jensen, M.E., Burman, R.D. & Allen, R.G., 1990, **Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements**, ASCE Manuals and Reports on Engineering, Practices NO 70, ASCE, New York.
- Khalidi, A. & Hamimed, A., 2014, **Using the Priestley-Taylor Expression for Estimating Actual Evapotranspiration from Satellite Landsat ETM+ Data**, Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 364, PP. 398-403.
- Kheirabi, J. (2002). **Comparative Study And Comparison Of Penman-Montis Method With FAO 24 Methods In Iran**. Iran: National Committee For Irrigation And Drainage Of Iran.
- Li, S., Kang, S., Zhang, L., Zhang, J., Du, T., Tong, L. & Ding, R., 2016, **Evaluation of Six Potential Evapotranspiration Models for Estimating Crop Potential and Actual Evapotranspiration in Arid Regions**, Journal of Hydrology, 543, PP. 450-461.
- Lopez-Urrea, R., Martín de Santa Olalla, F., Fabeiro, C. & Moratalla, A., 2006, **Testing Evapotranspiration Equations Using Lysimeter Observations in a Semi-Arid Climate**, Agric Water Management, 85, PP. 15-26.
- Lu, J., Sun, G., McNulty, S.G. & Amatya, D.M., 2005, **A Comparison of Six Potential Evapotranspiration Methods for Regional Use in the Southeastern United States 1**, JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 41(3), PP. 621-633.
- ۷- تقدیر و تشکر**
- نویسندگان این مقاله از اعضای هیئت علمی بخش آبیاری و فیزیک خاک مؤسسه تحقیقات آب و خاک، به دلیل در اختیار گذاشتن آمار و اطلاعات درباره استان سیستان و بلوچستان، تشکر و قدردانی می کنند.
- ۸- منابع**
- Akbarinodehi, D. (2011). **Evaluation Of Pan Coefficient For Reference Crop Evapotranspiration (Case Study In Synoptic Station-Sari)**. Journal Of Research In Crop Sciences, 2(7), 65-74. <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=205444>.
- Allen, R.G., 1996, **Assessing Integrity of Weather Data for Use in Reference Evapotranspiration Estimation**, J. Irrig and Drain. Eng, ASCE, 122(2), PP. 97-106.
- Allen, R.G., Bastiaanssen, W.G.M., Wright, J.L., Morse, M., Tasumi, R.T., 2002, **Evapotranspiration from Satellite Image for Water Management and Hydrological Balances**, Proceeding of the 2002 ICID Conference, Montreal, Canada, PP. 1-12.
- 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, Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, PP. 17-18.
- Almhab, A. & Busu, I., 2008, **Estimation of Evapotranspiration with Modified SEBAL Model Using Landsat-TM and NOAA-AVHRR Images in Aride Mountains Area**, Second Asia International Conference on Modeling & Simulation.
- Barik, M.G., 2014, **Remote Sensing-Based Estimates of Potential Evapotranspiration for Hydrologic Modeling in the Upper Colorado River Basin Region**, PhD Degree in Civil Engineering, UCLA, University of California.
- Gundekar, H.G., Khodke, U.M. & Sarkar, S., 2008, **Evaluation of Pan Coefficient for**

- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F. & Loumagne, C., 2005, **Which Potential Evapotranspiration Input for a Lumped Rainfall-Runoff Model?: Part 2-Towards a Simple and Efficient Potential Evapotranspiration Model for Rainfall-Runoff Modelling**, Journal of Hydrology, 303(1-4), PP. 290-306.
- Penman, H.L., 1948, **Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass**, Proc. Soc. London Ser., A 193, PP. 120-145.
- Priestley, C.H.B. & Taylor, R.J., 1972, **on the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters**, Monthly Weather Review, 100, PP. 81-92.
- Rango, A., 1994, **Application of Remote Sensing Methods to Hydrology and Water Resources**, Hydrological Sciences Journal, 39(4), PP. 309-320.
- Sharifan, H., & Alizadeh, A. (2009). **Study Of Temperature And Radiation Based Methods Of Estimating Maximum Evapotranspiration With Different Probabilities (Case Study Of Gorgan)**. Journal Of Water And Soil (Agricultural Sciences And Technology), 23(3), 1-9. <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=186128>.
- Sharifan, H., & Dehghani, A., & Karimirad, I. (2012). **Correction Factor For Hargreaves-Samani Method To Estimate E_t0 (Case Study: Gorgan Synoptic Station)**. Journal Of Water And Soil Conservation (Journal Of Agricultural Sciences And Natural Resources), 19(3), 227-235. <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=287888>.
- Sharifan, H., & Ghahraman, B. (2007). **Evaluation And Comparison Of Estimated Reference Evapotranspiration From Evaporation Pan With E_t0 Standard Method In Gorgan**. Journal Of Agricultural Sciences And Natural Resources, 13(5), 18-28. <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=86280>.
- Snyder, R.L., Orang, M., Matyac, S. & Grismer, M.E., 2005, **Simplified Estimation of Reference Evapotranspiration from Pan Evaporation Data in California**, J Irrigation Drain Engineering, 131(3), PP. 249-253.
- Soltani, A., & Mirlatifi, S., & Dehghani Sanji, H. (2012). **Estimating Reference Evapotranspiration Using Limited Weather Data Under Different Climatic Conditions**. Journal Of Water And Soil (Agricultural Sciences And Technology), 26(1), 139-149. <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=271066>.
- Xu, C.-Y. & Singh, V., 2002, **Cross Comparison of Empirical Equations for Calculating Potential Evapotranspiration with Data from Switzerland**, Water Resources Management, 16(3), PP. 197-219.