

مقاله پژوهشی

تخمین مقادیر روزانه نسبت تبخیر - تعرق مرجع و تعیین سهم مؤلفه‌های آیرودینامیکی و توازن انرژی در تبخیر - تعرق (مطالعه موردی: استان سیستان و بلوچستان)

محمدحسین کاظمی^{۱*}، جلال شیری^۲، ابوالفضل مجنونوی هریس^۲، امیرحسین ناظمی^۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۵

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲- دانشیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳- استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Kazemi_m95@yahoo.com

چکیده

تبخیر - تعرق به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های اصلی چرخه هیدرولوژیک دارای اهمیت فراوانی در مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی آبیاری می‌باشد. امروزه به دلیل نبود داده‌های لایسیمتری در بیشتر ایستگاه‌های هواشناسی، از مقادیر تبخیر - تعرق مرجع حاصل از مدل استاندارد فائو - پنمن - مونتیت استفاده می‌شود. مدل یاد شده برای محاسبه تبخیر - تعرق گیاه مرجع چمن (ET_0) به‌کار برده می‌شود. از سوی دیگر، مدل پنمن-کیمبرلی نیز به‌طور گسترده‌ای برای محاسبه تبخیر - تعرق گیاه مرجع یونجه (ET_r) مورد استفاده قرار گرفته است. در مطالعه حاضر، داده‌های هواشناسی شش ایستگاه هواشناسی در استان سیستان و بلوچستان در یک دوره آماری ده ساله برای محاسبه ET_0 و ET_r به‌کار برده شده و سپس نسبت ET_r به ET_0 برای هر شش ایستگاه در دوره مطالعاتی محاسبه شد. مدل پنمن-کیمبرلی در ایستگاه میرجاوه بدترین نتیجه را در مقایسه با ایستگاه‌های دیگر داشته است. مقادیر ضریب نش-ساتکف برای این ایستگاه کمترین مقدار (۰/۰۷) بوده و مقادیر شاخص پراکندگی و جذر میانگین مربعات خطا برای این ایستگاه به ترتیب ۰/۴۳ و ۲/۴۸ می‌باشد که بیشترین مقدار در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه است. در ادامه، سهم هر یک از مؤلفه‌های توازن انرژی و آیرودینامیکی در میزان کل تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از مدل پنمن-کیمبرلی تعیین شد که نتایج حاصل حاکی از نقش مهم هر دو مؤلفه در فرآیند تبخیر-تعرق ایستگاه‌های مورد مطالعه بود. بر این اساس، کاربرد مدل‌های مبتنی بر تابش خورشیدی نظیر مدل پریستلی-تیلور در این ایستگاه‌ها می‌باید با احتیاط صورت پذیرد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر - تعرق مرجع، تغییرات فصلی، مؤلفه آیرودینامیکی، مؤلفه توازن انرژی

Estimating Daily Reference Evapotranspiration Ratios and Determining the Aerodynamic and Energy Balance Components Contributions in Evapotranspiration (Case study: Sistan-Va-Baluchestan Province)

MH Kazemi^{1*}, J Shiri², A Majnooni Heris², AH Nazemi³

Received: February 04, 2020 Accepted: September 02, 2020

¹M.Sc. Studen, Dept. of Water Engineering, Univ. of Tabriz, Iran

²Assoc.Prof, Dept. of Water Engineering, Univ. of Tabriz, Iran

³Prof, Dept. of Water Engineering, Univ. of Tabriz, Iran

*Corresponding, Author E-mail: Kazemi_m95@yahoo.com

Abstract

Evapotranspiration (ET), a major component of the hydrologic cycle, is important in water resources management and irrigation scheduling. Nowadays, due to the lack of the lysimetric data in weather stations, the ET values calculated by the standard FAO Penman-Monteith model (ET_0) are used as benchmark values of grass reference crop. Also, the Penman-Kimberly model is widely applied for computing the alfalfa-reference crop ET (ET_r). In the present study, the meteorological data from 6 weather stations located in the Sistan-Va-Baluchestan Province covering a period of 10 years were used to calculate the ET_0 and ET_r values. Then, the ET_r to ET_0 ratios were computed for all six stations during the studied period. The Penman-Kimberly model at Mirjavah station had the worst result compared to other stations. The NS coefficient values for this station are the lowest (0.07) and the SI and RMSE values for this station are 0.43 and 2.48, respectively, which is the highest value among the study stations. Finally, the contributions of the energy balance and aerodynamic components on the final ET values were determined using the Penman-Kimberly model, which showed the important influence of both components on the ET process. Consequently, the use of radiation-based models e.g. Priestly-Taylor model in these stations should be carried out by special care.

Keywords: Aerodynamic component, Energy balance component, Seasonal variations, reference evapotranspiration

مقدمه

صرفه‌جویی در هزینه‌های مربوط به روش‌های یادشده، استفاده از مدل‌های ریاضی است که از متغیرهای هواشناسی اندازه‌گیری شده، به عنوان متغیرهای مستقل استفاده می‌شود. مدل‌های ریاضی یاد شده مشتمل بر مدل‌های تجربی و فیزیکی می‌باشند که مدل‌های تجربی بر مبنای توابع آماری تقریب بین مقادیر تبخیر - تعرق و متغیرهای هواشناسی استوار هستند (تورنت وایت، ۱۹۴۸؛ هارگریوز و سامانی، ۱۹۸۵). مدل‌های فیزیکی نیز اصول فیزیکی موجود و مربوط به سه عامل مهم تأثیرگذار در تبخیر - تعرق را بکار می‌گیرند که این عوامل عبارت‌اند از: ۱- مقدار انرژی لازم برای گرمای نهان تبخیر، ۲- جریان بخار آب در خارج از سطح تبخیر و

تبخیر - تعرق فرایندی است که در آن آب از سطح خاک (تبخیر) و گیاه (تعرق) به اتمسفر منتقل می‌شود. تعیین مقدار تبخیر - تعرق (نیاز آبی گیاه) یک مؤلفه مهم در تعیین بیلان آب و بودجه - بندی آبیاری می‌باشد. میزان نیاز آبی گیاه می‌تواند به طریق مستقیم و با استفاده از شیوه‌های پرهزینه هواشناسی که مبتنی بر بیلان انرژی و نیز انتقال جریان جرم بخار می‌باشند (روش آنرودینامیک، نسبت باون) صورت پذیرد. به‌کارگیری لایسیمتر امکان تعیین تبخیر - تعرق را بر اساس اندازه‌گیری برخی از مؤلفه - های بیلان آب در یک سطح گیاهی کنترل شده فراهم می‌آورد (آلن و همکاران ۱۹۹۸). از جمله گزینه‌های اقتصادی به‌منظور

(K_c) مورد استفاده قرار می‌گیرد. وجود اطلاعات دقیق درباره ET_0 در موارد متعددی نظیر طراحی سامانه‌های آبیاری و مدیریت منابع آب بسیار ضروری به‌شمار می‌رود. در دهه‌های اخیر، مدل‌های مختلفی برای تخمین ET_0 ارائه شده است که صرف‌نظر از گستردگی آنها، انتخاب یک مدل مناسب برای تخمین دقیق این مؤلفه در یک منطقه امری بسیار دشوار محسوب می‌شود. بابامیری و دین‌پژوه (۲۰۱۴) چهار روش تخمین ET_0 مبتنی بر دما را در حوضه دریاچه ارومیه ارزیابی کردند که نشان‌دهنده برتری مدل هارگریوز-سامانی در قیل و بعد از واسنجی بود. همچنین بابامیری و دین‌پژوه (۲۰۱۵) به مقایسه و واسنجی نه روش مختلف تخمین ET_0 مبتنی بر انتقال جرم در مقیاس ماهانه در حوضه دریاچه ارومیه پرداختند که نتایج پژوهش آنها نشان داد روش میر و دالتون به ترتیب به عنوان بهترین مدل در حوضه مورد مطالعه بود. برخی مدل‌ها نظیر مدل پنمن-کیمبرلی (رایت ۱۹۹۶) نیز برای تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع یونجه (ET_r) به‌کار بسته شده و دقت آنها در نقاط مختلف دنیا به اثبات رسیده است (ایرماک و همکاران ۲۰۰۳). مقادیر ET_r محاسبه شده توسط مدل پنمن-کیمبرلی می‌بایست مورد تعدیل واقع شوند تا با مقادیر ET_0 قابل مقایسه باشند. بدین‌ترتیب، نسبت ET_r به ET_0 برابر ضریب نظیر K_r خواهد بود که براساس مطالعات جنسن و همکاران (۱۹۹۰) مقدار این ضریب برابر با ۱/۱۵ می‌باشد. با این وجود ایشان اعلام نموده‌اند که نمی‌توان این مقدار را یک مقدار ثابت برای تمامی شرایط اقلیمی در گرفت.

مواد و روش‌ها

داده‌ها و ایستگاه‌های مورد مطالعه

در این تحقیق داده‌های مربوط به شش ایستگاه هواشناسی استان سیستان و بلوچستان از سازمان هواشناسی کشور دریافت و به کار گرفته شد. داده‌های هواشناسی موجود شامل پارامترهای دمای هوا، رطوبت هوا، ساعات آفتابی، تابش کل خورشیدی و سرعت باد در مقیاس روزانه می‌باشد. طول آماری داده‌های موجود شامل ده سال [از اول ژانویه ۲۰۰۹ میلادی (۱۳۸۷ خورشیدی) تا ۳۱ دسامبر ۲۰۱۸ میلادی (۱۳۹۷ خورشیدی)] می‌باشد. در جدول ۱ فهرست ایستگاه‌های مورد مطالعه به همراه موقعیت جغرافیایی

۳- تأمین بخار آب در سطح تبخیر (چاو و همکاران ۱۹۹۸). امروزه در صورت عدم وجود داده‌های لایسیمیتری در یک منطقه، مدل فائو-پنمن-مونیتیت (آلن و همکاران ۱۹۹۸) به‌عنوان مدل استاندارد برای محاسبه میزان تبخیر-تعرق گیاه مرجع و نیز واسنجی سایر مدل‌های تجربی به‌کار گرفته می‌شود (ایرماک و همکاران ۲۰۰۳، شیرینی و همکاران 2014 a,b) به دلیل اینکه این معادله اساس فیزیکی دارد لذا می‌توان از آن در شرایط مختلف اقلیمی و اکولوژیکی استفاده نمود. معایب این مدل، نیاز به داده‌های اقلیمی وسیع شامل دمای هوا، رطوبت، سرعت باد و تابش خورشیدی می‌باشد؛ بنابراین، استفاده از مدل‌هایی که نیاز به داده‌های اقلیمی کمتری دارد می‌تواند یک راهکار برای حل چنین مشکلی باشد. استفاده از برخی مدل‌ها ساده شده به دلیل حذف برخی از پارامترهای مهم هواشناسی منجر به عدم برآورد دقیق تبخیر - تعرق مرجع می‌شود. به همین دلیل قبل از استفاده این مدل‌ها باید برای شرایط منطقه واسنجی شوند.

پنمن (۱۹۴۸) روش‌های توازن انرژی و انتقال جرم را ترکیب نموده و به معادله‌ای برای تخمین تبخیر از سطح آزاد آب دست‌یافت. با معرفی فاکتور مقاومت شبیه‌ساز مقاومت آیرودینامیکی، امکان استفاده از این معادله برای تعیین تبخیر - تعرق از سطح گیاه فراهم شد (آلن و همکاران ۱۹۹۸). طبق تعریف، شدت تبخیر - تعرق از یک سطح مرجع که با هیچ‌گونه تنش آبی مواجه نباشد، به‌عنوان تبخیر - تعرق گیاه مرجع یا تبخیر - تعرق مرجع نامیده شده و با علامت اختصاری ET_0 نشان داده می‌شود (آلن و همکاران ۱۹۹۸). سطح مرجع یاد شده یک سطح گیاه فرضی (با ارتفاع ۰/۱۲ متر، ضریب آلبدو ۰/۲۳ و مقاومت ثابت سطح سایه انداز معادل ۷۰ ثانیه بر متر) می‌باشد (دورنیوس و پروت ۱۹۹۷). در این مفهوم، فرض بر آن است که مقاومت یاد شده تابعی از زیست محیط غالب بر گیاه نبوده و در شرایط اقلیمی متفاوت، مقدار ثابتی دارد. تنها مؤلفه‌های مؤثر بر تبخیر-تعرق مرجع، پارامترهای هواشناسی می‌باشد و لذا می‌توان اظهار داشت که تبخیر-تعرق مرجع برآیندی از پارامترهای اقلیمی بوده و با معلوم بودن آمار و اطلاعات هواشناسی، می‌توان مقدار آن را محاسبه نمود. تبخیر-تعرق مرجع چمن (ET_0) به طور گسترده‌ای در تخمین نیاز آبی گیاهان با استفاده از ضرایب گیاهی مناسب

و بارش سالانه و مقدار تبخیر - تعرق سالانه آنها درج شده است.

مدل استاندارد (فائو - پنمن - مونتیت) PM-FAO56 فرم اصلاح شده مدل پنمن - مونتیت که توسط فائو ارائه گردیده است. به صورت زیر قابل بیان است. این مدل برای یک گیاه فرضی (شبه چمن) با ارتفاع ۰/۱۲ متر، مقاومت سطحی ثابت ۷۰ ثانیه بر متر و ضریب آلبدو ۰/۲۳ می باشد.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad [1]$$

در رابطه فوق ET_0 برحسب میلیمتر بر روز، R_n تشعشع خالص رسیده به سطح گیاه برحسب مگاژول برمتر مربع بر روز، G شار گرمای خاک برحسب مگاژول بر مترمربع بر روز، T_{mean} میانگین دمای روزانه هوا (میانگین

دمای بیشینه و کمینه) در ارتفاع دومتری برحسب درجه سانتیگراد، U_2 میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دومتری برحسب متر بر ثانیه، e_s میانگین فشار بخار اشباع دمای بیشینه و کمینه برحسب کیلوپاسکال، e_a فشار بخار واقعی برحسب کیلوپاسکال ($e_s - e_a$) کمبود فشار بخار اشباع برحسب کیلوپاسکال، Δ شیب منحنی فشار بخار برحسب کیلوپاسکال بر درجه سانتیگراد، γ ضریب ثابت سایکرومتری برحسب کیلوپاسکال بر درجه سانتیگراد. مقدار چگالی شار حرارتی خاک برای دوره های روزانه برابر با صفر در نظر گرفته می شود (بر اساس طبیعت سامانه اقلیمی)، بنابراین برای دوره های ماهانه و بیشتر، مقدار آن بایستی بر اساس تفاضل دمایی بین ماه های متوالی و ظرفیت حرارتی خاک محاسبه شود.

جدول ۱- مشخصات کلی ایستگاه های هواشناسی مورد مطالعه

عرض جغرافیایی (°N)	طول جغرافیایی (°E)	ارتفاع از سطح دریا (m)	تبخیر - تعرق مرجع سالانه (mm)	بارش سالانه (mm)	انحراف معیار بارش سالیانه	حداکثر دمای سالانه (°C)	متوسط دمای سالانه (°C)	حداقل دمای سالانه (°C)	حداکثر دمای ثبت شده (°C)	حداقل دمای ثبت شده (°C)
۲۷°۱۳'	۶۰°۴۳'	۵۹۱	۲۱۱۳/۷۵	۶۶/۶۱	۱/۶۳	۳۴/۷۲	۲۷/۶۷	۲۰/۳۲	۴۹/۱	-۰/۹
۲۵°۱۶'	۶۰°۳۹'	۸	۱۵۳۵/۹۵	۳۵/۴۰	۱/۳۴	۲۹/۶۹	۲۶/۸۳	۲۳/۹۵	۴۴/۱	۱/۱
۲۸°۱۳'	۶۱°۱۱'	۱۴۲۷	۱۸۴۸/۵۹	۹۸/۷۱	۲/۰۹	۲۸/۴۲	۲۱/۱۲	۱۳/۱	۴۲/۳	-۷/۸
۲۹°۲۸'	۶۰°۵۴'	۱۳۷۰	۲۰۵۷/۳۳	۵۴/۳۹	۱/۱۱	۲۷/۶۲	۱۹/۷۵	۱۱/۲۶	۴۳/۴	-۱۳
۲۷°۲۳'	۶۲°۱۹'	۱۱۸۲	۲۰۷۵/۰۴	۴۸/۷۷	۱/۰۱	۳۰/۱۶	۲۲/۹۳	۱۵/۱۵	۴۴/۰	-۶
۲۹°۰۱'	۶۱°۲۵'	۸۳۶	۲۱۱۱/۴۳	۲۵/۲۵	۰/۶۴	۳۱/۹۲	۲۶/۳۵	۱۶/۴	۴۷/۴	-۶/۵

مدل پنمن - کیمبرلی Kimberly-Penman

رایت و جنسن (۱۹۷۲) مدل اصلاح شده پنمن - کیمبرلی برای محاسبه تبخیر - تعرق گیاه مرجع یونجه را به صورت زیر ارائه نمودند:

$$\lambda ET_r = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 6.43 W_f (e_s - e_a) \quad [2]$$

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp \left[\frac{17.27T}{T + 237.3} \right] \right]}{(T + 237.3)^2} \quad [3]$$

که در آن، ET_r تبخیر-تعرق مرجع یونجه، λ گرمای نهان ویژه تبخیر (مگاژول بر کیلوگرم)، Δ شیب منحنی فشار بخار برحسب کیلوپاسکال بر درجه سانتیگراد که از معادله ۳ به دست می آید، T دمای هوا بر حسب درجه سلسیوس و تابع W_f بدون بعد باد بوده و بقیه پارامترها قبلاً معرفی شده اند. در این رابطه، حاصل جمع دو عبارت انرژی و آئروپنمیک (سرعت باد) برابر با یک معادله توازن انرژی است. حاصل-جمع دو عبارت $\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma}$ برابر با واحد است که این دو عبارت، فاکتورهای وزن دهی برای ارزیابی اثرات نسبی تابع

در روابط اخیر ET_r و ET_0 به ترتیب مقادیر تبخیر-تعرق محاسبه شده توسط مدل پنمن-کیمبرلی و مدل استاندارد فائو-پنمن-مونتیث، $\overline{ET_0}$ متوسط مقادیر مدل شاهد، N نمایانگر تعداد داده‌ها و \bar{X} نیز گام زمانی مورد نظر می‌باشد. هرچه NS به ۱ نزدیک و SI و $RMSE$ کمتر باشد، دقت مدل بیشتر است و برعکس.

نتایج و بحث

شکل ۱ متوسط سالانه سرعت باد در ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد و با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که تغییرات (اختلاف بیشترین و کمترین میزان متوسط سرعت باد) $0/86$ متر بر ثانیه در ایستگاه‌های مورد مطالعه است، بیشترین میزان متوسط سرعت باد را ایستگاه زاهدان با $2/54$ متر بر ثانیه و کمترین مقدار را ایستگاه ایرانشهر با $1/68$ متر بر ثانیه دارد.

شکل ۲ نیز تفاضل دمایی متوسط (متوسط اختلاف دمای بیشینه و کمینه هوای روزانه) را نشان می‌دهد که با توجه به شکل، ملاحظه می‌شود که ایستگاه چابهار کمینه ($5/74$ درجه سلسیوس) و ایستگاه خاش بیشینه ($16/36$ درجه سلسیوس) تفاضل دمایی را داراست که شکل ۵ نیز بیشینه و کمینه دمای روزانه ایستگاه خاش را نشان می‌دهد.

شکل ۳ مقادیر ضریب تغییرات تفاضل دمایی، سرعت باد و تابش کل را در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد و با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که سرعت باد تغییرات و انحراف مقادیر مشاهداتی از متوسط (معیار) در ایستگاه خاش به مراتب بیشتر از سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه است که نشان‌دهنده این است که تغییرات داخل سری زمانی مقادیر سرعت باد دارای مقدار قابل توجهی بوده همچنین با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که ضریب تغییرات تابش کل خورشیدی در ایستگاه‌ها دارای اختلاف قابل توجهی است که دلیل این امر به دلیل اختلاف در عرض جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه بوده و همچنین اینکه ایستگاه‌ها به طور یکسان تابش خورشیدی را دریافت نمی‌کنند.

در ایستگاه‌های مورد مطالعه بیشترین میزان بارش سالانه متعلق به ایستگاه خاش با $98/71$ میلی‌متر و کمترین میزان آن ایستگاه میرجاوه با $25/25$ میلی‌متر در سال می‌باشد. ایستگاه چابهار در بین شش ایستگاه مورد مطالعه دارای

دما و تابع باد در مقدار تبخیر-تعرق به‌شمار می‌روند. تابع بدون بعد باد، به تبیین اثرات باد در فرارفت انرژی محسوس و ایجاد تبخیر-تعرق می‌پردازد و رابطه ریاضی آن به صورت زیر است:

$$W_f = a_w - b_w U_2 \quad [4]$$

a_w و b_w ضرایب تجربی هستند که تاثیر عملکرد باد را در اوایل سال کاهش می‌دهند و بر پایه این فرض استوار هستند که در اوایل سال حساسیت بیشتری نسبت به اواخر سال دارند و با فرض اینکه X نمایگر عدد روز (چندمین روز از سال) باشد مقادیر این ضرایب به این شرح است (شیری: ۲۰۱۷):

$$a_w = 0.4 + 1.4 \exp \left[- \left\{ \left(\frac{X - 173}{58} \right)^2 \right\} \right] \quad [5]$$

$$b_w = 0.007 + 0.004 \exp \left[- \left\{ \left(\frac{X - 243}{80} \right)^2 \right\} \right] \quad [6]$$

بررسی کیفی در مورد کاربرد هر مدل موضوعی است که در ارزیابی مدل‌ها لحاظ می‌گردد و معمولاً معیارهای آماری برای بررسی کیفی استفاده می‌شوند. این معیارها روش هدفمند را برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها فراهم می‌کنند (کریمی و همکاران ۱۳۹۲) در این تحقیق ۳ معیار ارزیابی شامل نمایه پراکندگی (SI)، جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، و ضریب نش - ساتکیف (NS) برای بررسی دقت مدل‌ها استفاده شده که معادله هر کدام به شرح زیر است:

$$SI = \frac{RMSE}{\overline{ET_0}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ET_r - ET_0)^2}}{\overline{ET_0}} \quad [7]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ET_r - ET_0)^2} \quad [8]$$

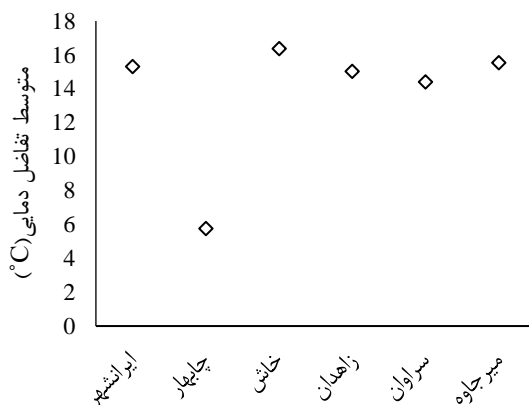
$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (ET_r - ET_0)^2}{\sum_{i=1}^N (ET_0 - \overline{ET_0})^2} \quad [9]$$

تخمین تبخیر- تعرق را تحت تأثیر قرار داده و تخمین این پارامتر را با دشواری مواجه کند (شیرینی و همکاران ۲۰۱۴). باید به این نکته هم توجه داشت که ارقام گزارش شده برای شاخص خشکی برابندی از نسبت تغییرات دو پارامتر بارش و تبخیر- تعرق سالانه در کل دوره آماری مورد مطالعه می‌باشد. فلذا ممکن است در داخل سری زمانی این ارقام متفاوت باشد یعنی به این صورت که در سال‌های مختلف مقدار این شاخص متفاوت خواهد بود. البته باید توجه داشت که بررسی وضعیت ایستگاه‌ها با استفاده از شاخص خشکی عموماً بر پایه متوسط دوره آماری انجام می‌گردد و بررسی داخل سالی در این خصوص کاربردی ندارد. شکل ۶ الگوی ماهانه سرعت باد در ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد که باتوجه به این شکل ایستگاه‌ها زاهدان در ماه‌های مختلف سال دارای باد شدیدتری است که بیشترین مقدار آن در ماه اسفند می‌باشد.

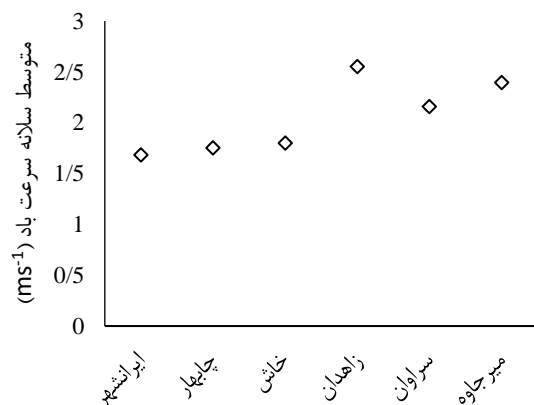
کمترین میزان تبخیر- تعرق با ۱۵۳۵/۹۵ میلیمتر در سال بوده و بیشترین میزان تبخیر- تعرق برای ایستگاه ایرانشهر با مقدار ۲۱۱۳/۷۵ میلیمتر ثبت شده است.

نسبت بارش سالانه به تبخیر- تعرق سالانه، یکی از شاخص‌های بسیار مهم برای به دست آوردن وضعیت ایستگاه‌ها از لحاظ اقلیمی (خشکی یا مرطوب بودن) می‌باشد که به شاخص خشکی معروف است (شیرینی و همکاران ۲۰۱۳). شکل ۴ مقادیر شاخص خشکی را برای ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد، بررسی مقادیر نشان داده شده در شکل ۴ حاکی از آن است که ایستگاه خاش با داشتن مقدار شاخص خشکی ۰/۰۵۳ جزء مناطق خشک و ایستگاه‌های ایرانشهر، چابهار، زاهدان، سراوان و میرجاوه در زمره ایستگاه‌های خیلی خشک قرار دارند (شیرینی ۲۰۱۹).

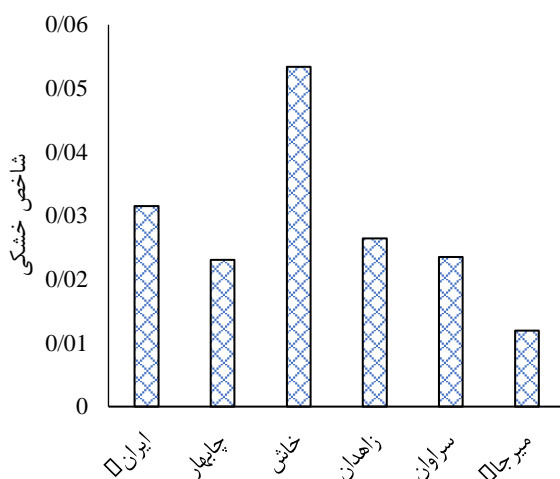
از آنجایی که در ایستگاه‌های واقع در مناطق خشک خیلی مقدار تبخیر- تعرق زیاد است، این امر می‌تواند دقت مدل‌های



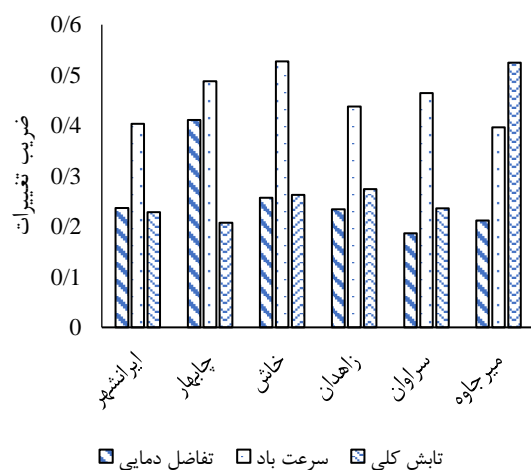
شکل ۲- متوسط تغییرات تفاضل دمایی.



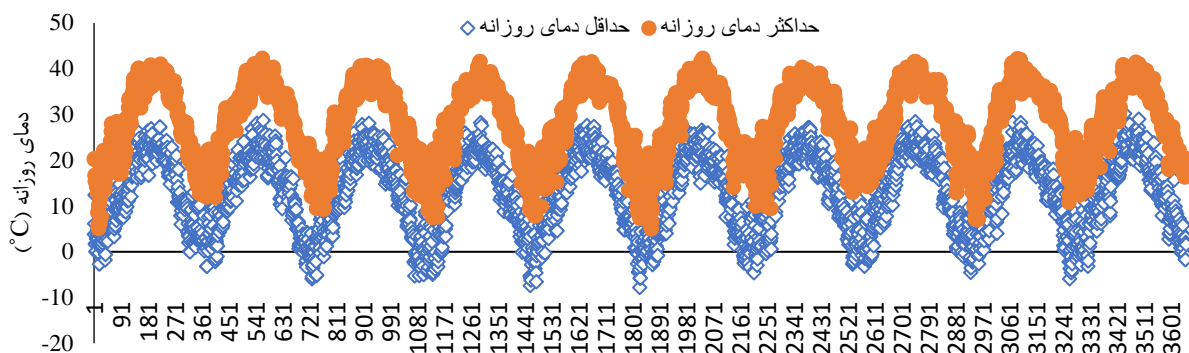
شکل ۱- متوسط تغییرات سرعت باد.



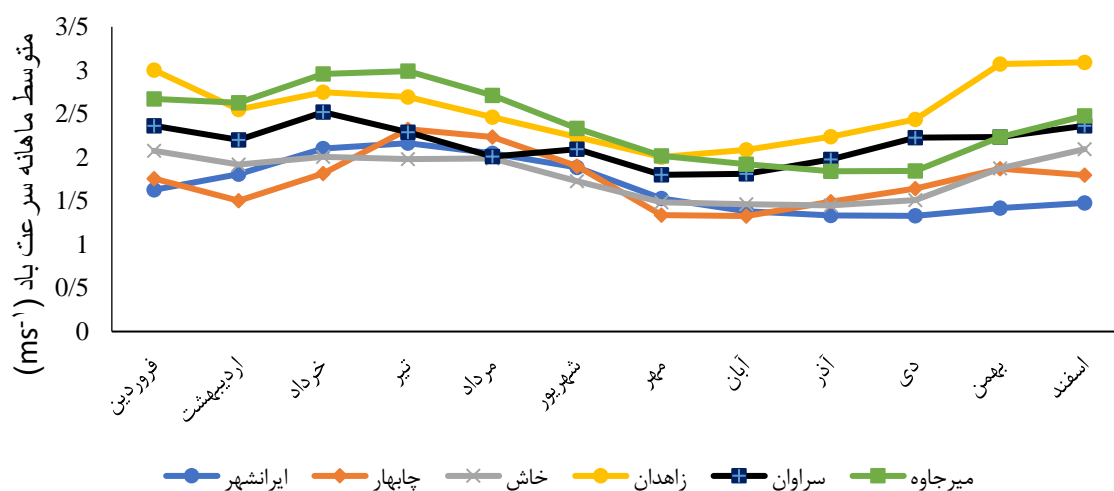
شکل ۴- شاخص خشکی ایستگاه‌ها.



شکل ۳- ضریب تغییرات پارامترهای هواشناسی.



شکل ۵- بیشینه و کمینه دمای روزانه ایستگاه خاش



شکل ۶- متوسط ماهانه سرعت باد در ایستگاه‌های مورد مطالعه.

بررسی شکل ۷ و شکل ۲ می‌توان گفت که متوسط تغییرات تفاضل دمایی با مقدار ضریب K_T رابطه عکس دارد.

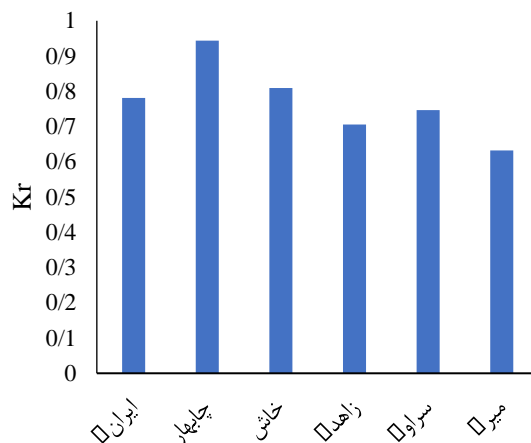
شکل ۷ مقادیر متوسط ماهانه K_T را در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد مقدار این ضریب برای فصول گرم بیشتر از فصول سرد است و بیشترین مقادیر آن برای فواصل ماه‌های اردیبهشت تا مرداد و کمترین مقادیر آن برای فواصل ماه‌های آذر تا بهمن است. در ماه‌های گرم مقدار این ضریب یا از ۱ بیشتر است و یا نزدیک به ۱ است، ولی در ماه‌های سرد سال مقدار این ضریب به مراتب کمتر از ۱ است. می‌توان چنین تغییراتی را عکس‌العمل هر یک از سطوح تبخیر کننده در مقابل پدیده تبخیر دانست که در این میان، تغییر مورفولوژیکی گیاه سطح گیاه مرجع در طول سال نیز بر این امر تاثیرگذار

نسبت ET_0 به ET_T (ضریب K_T) شکل ۷ مقادیر ضریب K_T برای ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد، با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که کمترین و بیشترین مقدار K_T به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های میرجاوه و چابهار می‌باشد. بررسی مقادیر شکل ۷ و مقدار ضریب تغییرات تابش کل و تفاضل دمایی در شکل ۳، نشان می‌دهد که ضریب K_T با ضریب تغییرات تابش کل عکس دارد و با ضریب تغییرات تفاضل دمایی رابطه مستقیم دارد. بیشترین و کمترین مقدار تغییرات تابش کل به ترتیب برای ایستگاه‌های میرجاوه (۰/۵۲) و چابهار (۰/۲) است. درحالی‌که بیشترین و کمترین مقدار ضریب K_T و ضریب تغییرات تفاضل دمایی چابهار و میرجاوه است. همچنین با

وضوح مشخص خواهد بود که بررسی و تعیین مقدار عددی این ضریب در هر ایستگاه از الزامات اساسی است. با این وجود، انتخاب بهترین مدل تعیین ET_r از مهمترین چالش‌های اساسی در این راستا، جهت بدست آوردن این ضریب در هر ایستگاه است.

خواهد بود (رایت ۱۹۹۶). یک دلیل برای حصول مقادیر بیشتر برای K_r در ماه‌های سرد در ایستگاه‌ها می‌تواند وجود بادهای قوی و یا تفاضل فشار بخار بالا باشد (ایرماک و همکاران ۲۰۰۳).

با بررسی مطالعات یاد شده و نیز مشاهده تغییرات ضریب K_r در طی فصول مختلف سال در یک ایستگاه، به

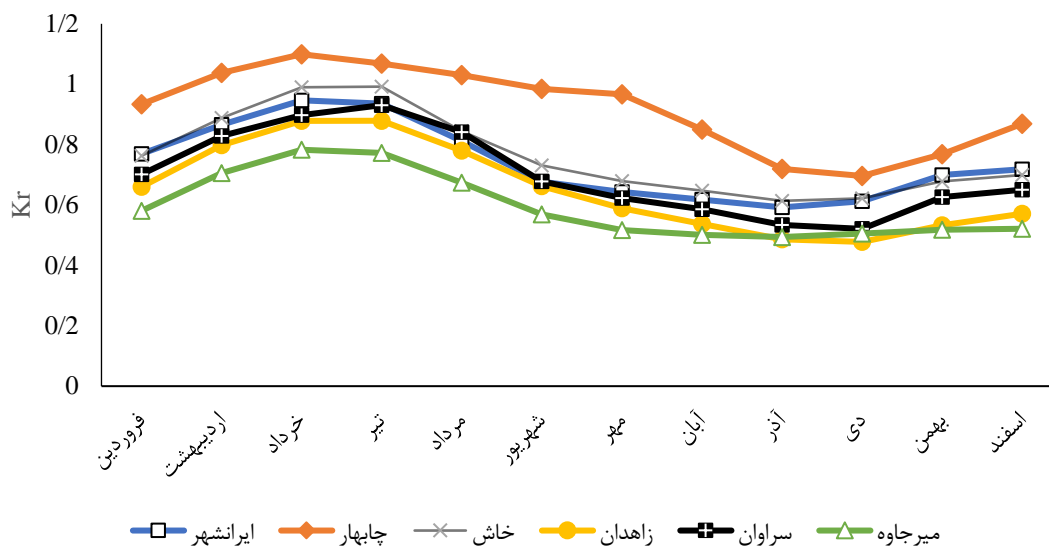


شکل ۷- مقادیر ضریب K_r ایستگاه‌ها در طی دوره آماری مورد مطالعه.

مرجع یونجه و چمن، سبب حصول مقادیر بالاتری برای K_r خواهد گردید.

جدول ۲ مقادیر شاخص پراکندگی (SI)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب نش - ساتکلف (NS) و نمایه همبستگی (R^2) حاصل از مقایسه مدل پنمن-کیمبرلی با مدل استاندارد فائو-پنمن-مونتیث را نشان می‌دهد. با بررسی مقادیر این جدول، ملاحظه می‌شود که مدل پنمن-کیمبرلی در ایستگاه میرجاوه بدترین نتیجه را در مقایسه با ایستگاه‌های دیگر داشته است. مقادیر ضریب نش-ساتکلف برای این ایستگاه کمترین مقدار (۰/۰۷) بوده و مقادیر شاخص پراکندگی و جذر میانگین مربعات خطا برای این ایستگاه بیشترین مقدار را دارد. همچنین با بررسی ضریب نش-ساتکلف در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه، می‌توان گفت که مدل پنمن-کیمبرلی در ایستگاه خاش با ضریب نش-ساتکلف ۰/۵۵ بهترین نتیجه را داده است. همچنین با بررسی مقادیر جدول ۲ و شکل ۴، ملاحظه می‌شود که مدل پنمن-کیمبرلی در ایستگاه‌هایی که شاخص خشکی آن‌ها کمتر باشد نتیجه خوبی نمی‌دهد و مقادیر شاخص خشکی با ضریب نش-ساتکلف در مقایسه مدل پنمن-کیمبرلی با مدل استاندارد فائو-پنمن-مونتیث رابطه مستقیم دارد.

بر اساس بررسی‌های به عمل آمده توسط ایرماک و همکاران (۲۰۰۳) و نیز جنسن و همکاران (۱۹۹۰) مشخص شد که مدل پنمن - کیمبرلی بهترین مدل از بین سایر مدل‌های تعیین ET_r بوده و لذا در این مطالعه نیز از این مدل جهت انجام محاسبات و تعیین ضریب K_r استفاده شد. از سوی دیگر بایستی توجه داشت از آنجا که در تحقیق حاضر، مقادیر اندازه‌گیری شده (لایسیمتری) ET_0 و ET_r موجود نبودند، فلذا ممکن است در برخی موارد مقادیر ضریب K_r واقعیت موجود در شرایط مزرعه‌های را بازگو نکنند. دلیلی که می‌تواند مقادیر بالایی را برای K_r در دوره سرد سال توجیه نماید، محاسبه ET_0 با استفاده از مدل فائو-پنمن-مونتیث می‌باشد. به بیان دیگر، از آنجا که در فصول سرد سال، مقدار تابش خالص خورشیدی (Rn) کمتر از ماه‌های گرم است، بخش اعظم تأثیر پارامترها در روش ترکیبی یاد شده، مربوط به مؤلفه آیرودینامیکی خواهد بود و لذا تفاوت بین مقادیر مقاومت آیرودینامیکی (f_a) دو گیاه



شکل ۸- مقادیر متوسط ماهانه ضریب Kr ایستگاه‌ها.

تعیین سهم مؤلفه‌های آئرو دینامیک و توازن انرژی

می‌باشد و در ایستگاه میرجاوه اختلاف این دو مؤلفه، کمترین مقدار در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه است که نشانگر نزدیکی سهم این دو مؤلفه در تشکیل تبخیر - تعرق مرجع در این ایستگاه است که این امر نشانگر آن است که نمی‌توان از سهم عمده بخش آئرو دینامیکی (جریان هوا یا همان سرعت باد) در بروز پدیده تبخیر - تعرق در این ایستگاه چشم‌پوشی نمود. فلذا کاربرد مدل‌هایی نظیر پریستلی - تیلور (پریستلی و تیلور ۱۹۷۲) که اثر مؤلفه آئرو دینامیکی را تنها در یک ضریب ثابت خلاصه نموده‌اند، در این ایستگاه باعث بروز خطای بیشتری خواهد شد. از منظر تغییرات ماهانه نسبت این مؤلفه‌ها نیز ملاحظه می‌شود که روند منظم و قابل تبیینی در این خصوص قابل حصول نیست. در تیرماه، در تمامی ایستگاه‌ها، سهم مؤلفه آئرو دینامیکی نسبت به ماه‌های دیگر سال بیشتر بوده و نزدیک به مؤلفه توازن انرژی است و برعکس در اسفندماه مؤلفه‌های آئرو دینامیکی و توازن انرژی دارای اختلاف شدیدتری نسبت به ماه‌های دیگر هستند. با این وجود هرگونه اظهار نظر در این خصوص مستلزم بررسی بیشتر و تحلیل تغییرات

یکی از مزایای مدل پنمن - کیمبرلی در مقایسه با سایر مدل‌های ترکیبی در آن است که سهم هر یک از مؤلفه‌های آئرو دینامیکی و توازن انرژی را می‌توان به طور مستقیم توسط این مدل تعیین نمود. بدین ترتیب، نسبت سهم مؤلفه‌های آئرو دینامیکی و توازن انرژی به مقدار کل تبخیر - تعرق مرجع در معادله پنمن - کیمبرلی محاسبه شده و در جدول ۳ نشان داده شدند. مقادیر مندرج در این جدول، متوسط مقادیر ماهانه نسبت‌های یاد شده و نیز متوسط این نسبت برای کل دوره آماری مورد مطالعه می‌باشد. بررسی مقادیر نسبت مؤلفه‌های آئرو دینامیکی و توازن انرژی در طی دوره مطالعاتی نشان می‌دهد که با توجه به مقادیر این جدول می‌توان گفت در تمامی ایستگاه‌ها سهم مؤلفه توازن انرژی بیشتر از مؤلفه آئرو دینامیکی می‌باشد.

با این وجود، تفاضل نسبت این دو مؤلفه در ایستگاه چابهار بیشتر از ۰/۵۰ می‌باشد که حاکی از این است که سهم مؤلفه توازن انرژی در تشکیل تبخیر - تعرق مرجع در این ایستگاه خیلی بیشتر از سهم مؤلفه آئرو دینامیکی

متغیرها در ایستگاه‌ها تحت شرایط مختلف زمانی و مکانی و اقلیمی خواهد بود که این امر می‌تواند موضوعی برای تحقیقات آتی باشد.

جدول ۲- مقادیر شاخص پراکندگی مدل پنمن - کیمبرلی در طی دوره مورد مطالعه.

کد	ایستگاه	R^2	NS	SI	RMSE (mm)
۱	ایران شهر	۰/۷۹	۰/۵۲	۰/۲۹	۱/۷۰
۲	چابهار	۰/۴۹	۰/۴۸	۰/۱۸	۰/۷۴
۳	خاش	۰/۷۴	۰/۵۵	۰/۳۰	۱/۵۰
۴	زاهدان	۰/۶۱	۰/۴۹	۰/۳۵	۱/۹۷
۵	سراوان	۰/۷۵	۰/۳۳	۰/۳۳	۱/۸۹
۶	میرجاوه	۰/۷۸	۰/۰۷	۰/۴۳	۲/۴۸

نتیجه‌گیری کلی

بودن سهم آیرودینامیکی و سهم توازن انرژی (سهم هر یک از مؤلفه‌های مذکور در تشکیل پدیده تبخیر - تعرق مورد بررسی قرار گرفت. بررسی مقادیر نسبت مؤلفه‌های آیرودینامیکی و توازن انرژی در طی دوره مطالعاتی نشان داد که عموماً در تمامی ایستگاه‌ها سهم مؤلفه توازن انرژی بیشتر از مؤلفه آیرودینامیکی می‌باشد که سهم توازن انرژی در ایستگاه چابهار که دارای متوسط تفاضل دمایی کمتری است به مراتب بیشتر از سهم آیرودینامیکی است. با این وجود، مقدار کمی سهم مؤلفه آیرودینامیکی در تمامی ایستگاه‌ها قابل توجه بوده و نمی‌توان از سهم عمده بخش آیرودینامیکی (جریان هوا یا همان سرعت باد) در بروز پدیده تبخیر - تعرق در این ایستگاه‌ها چشم‌پوشی نمود و لذا کاربرد مدل‌هایی نظیر پریستلی - تیلور در این ایستگاه‌ها می‌باید با احتیاط صورت پذیرد.

در این تحقیق کارایی مدل پنمن - کیمبرلی در تعیین تبخیر - تعرق گیاه مرجع یونجه مورد بررسی قرار گرفته و دقت آن با مدل استاندارد فائو - پنمن - مونتیت (برای تعیین تبخیر - تعرق مرجع چمن) مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد نسبت تبخیر - تعرق مرجع یونجه به تبخیر - تعرق مرجع چمن فقط در ایستگاه چابهار و آن‌هم در حدفاصل ماه‌ها اردیبهشت تا تیر بیشتر از یک بوده و در تمامی ایستگاه‌ها و در طول سال مقادیری کمتر از یک دارد. البته در مقیاس فصلی، مقدار این نسبت در طول سال و در فصل‌های مختلف بیشتر یا کمتر از یک برای ایستگاه‌های مختلف حاصل شد که چنین تغییراتی را می‌توان ناشی از عکس‌العمل هر یک از سطوح تبخیرکننده در مقابل تبخیر - تعرق دانست. در ادامه، با توجه به ساختار ریاضی مدل پنمن - کیمبرلی، (تفکیک

جدول ۳- مقادیر سهم مؤلفه‌های آبرودینامیکی و توازن انرژی در تبخیر - تعرق مرجع.

ایستگاه سهم مؤلفه‌ها	ایران‌شهر		چابهار		خاش		زاهدان		سراوان		میرجاوه	
	توازن انرژی	آبرودینامیکی	توازن انرژی	آبرودینامیکی	توازن انرژی	آبرودینامیکی	توازن انرژی	آبرودینامیکی	توازن انرژی	آبرودینامیکی	توازن انرژی	آبرودینامیکی
فروردین	۰/۷۳۷	۰/۲۶۳	۰/۸۹۴	۰/۲۲۴	۰/۷۷۶	۰/۲۳۵	۰/۷۶۵	۰/۲۴۲	۰/۷۵۸	۰/۳۱۱	۰/۶۸۹	
اردیبهشت	۰/۶۱۸	۰/۳۸۲	۰/۸۶۳	۰/۳۳۷	۰/۶۶۳	۰/۳۳۹	۰/۶۶۱	۰/۳۴۸	۰/۶۵۲	۰/۴۲۸	۰/۵۷۲	
خرداد	۰/۵۲۸	۰/۴۷۲	۰/۸۳۶	۰/۴۳۵	۰/۵۶۵	۰/۴۳۰	۰/۵۷۰	۰/۴۳۴	۰/۵۶۶	۰/۵۲۶	۰/۴۷۴	
تیر	۰/۵۲۸	۰/۴۷۲	۰/۸۳۱	۰/۴۴۱	۰/۵۵۹	۰/۴۳۶	۰/۵۶۴	۰/۴۳۶	۰/۵۶۴	۰/۵۳۴	۰/۴۶۶	
مرداد	۰/۶۰۸	۰/۳۹۲	۰/۸۸۳	۰/۳۶۶	۰/۶۳۴	۰/۳۶۰	۰/۶۴۰	۰/۳۵۸	۰/۶۴۲	۰/۴۵۱	۰/۵۴۹	
شهریور	۰/۷۰۲	۰/۲۹۸	۰/۹۲۶	۰/۲۸۲	۰/۷۱۸	۰/۲۷۹	۰/۷۲۱	۰/۲۷۶	۰/۷۲۴	۰/۳۵۱	۰/۶۴۹	
مهر	۰/۷۳۶	۰/۲۶۴	۰/۹۳۶	۰/۲۴۹	۰/۷۵۱	۰/۲۵۶	۰/۷۴۴	۰/۲۴۸	۰/۷۵۲	۰/۳۱۲	۰/۶۸۸	
آبان	۰/۷۰۶	۰/۲۹۴	۰/۸۸۶	۰/۲۶۶	۰/۷۳۴	۰/۲۷۸	۰/۷۲۲	۰/۲۶۸	۰/۷۳۲	۰/۳۲۰	۰/۶۸۰	
آذر	۰/۶۶۶	۰/۳۳۴	۰/۸۱۱	۰/۳۰۷	۰/۶۹۳	۰/۳۱۸	۰/۶۸۲	۰/۳۰۸	۰/۶۹۲	۰/۳۴۷	۰/۶۵۳	
دی	۰/۶۷۵	۰/۳۲۵	۰/۸۱۲	۰/۲۹۳	۰/۷۰۷	۰/۳۱۰	۰/۶۹۰	۰/۲۹۷	۰/۷۰۳	۰/۳۳۷	۰/۶۶۳	
بهمن	۰/۷۷۳	۰/۲۲۷	۰/۸۶۷	۰/۲۰۴	۰/۷۹۶	۰/۲۲۴	۰/۷۷۶	۰/۲۱۱	۰/۷۸۹	۰/۲۷۷	۰/۷۲۳	
اسفند	۰/۷۸۴	۰/۲۱۶	۰/۹۰۵	۰/۱۸۸	۰/۸۱۲	۰/۲۰۶	۰/۷۹۴	۰/۱۹۷	۰/۸۰۳	۰/۲۶۷	۰/۷۳۳	
متوسط کل دوره آماری	۰/۶۷۲	۰/۳۲۸	۰/۸۷۱	۰/۲۹۹	۰/۷۰۱	۰/۳۰۶	۰/۶۹۴	۰/۳۰۲	۰/۶۹۸	۰/۳۷۲	۰/۶۲۸	
تفاضل نسبت‌ها در کل دوره	۰/۳۴۳		۰/۷۴۲		۰/۴۰۱		۰/۳۸۸		۰/۳۹۶		۰/۲۵۷	

منابع مورد استفاده

- Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith M, 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper No 56. FAO, Rome.
- Babamiri O, Dinpazhoh Y. Comparison of Four Temperature Based Reference Crop Evapotranspiration Estimation Method at Urmia Lake Basin. 2014; Irrigation Sciences and Engineering (Scientific Agricultural Journal) 37(1):43-54.
- Babamiri O, Dinpazhoh Y. Comparison and calibration of nine mass transfer based reference crop evapotranspiration methods at Urmia Lake Basin. 2015; Journal of Water and Soil Conservation 21(5):135-153.
- Chow VT, Maidment DR and Mays LW (Eds), 1998. Applied Hydrology. McGraw-Hill. NY.
- Evetts SR, Howell TA, Todd RW, Schneider AD and Tolck JA, 1998. Evapotranspiration of irrigated alfalfa in a semi-arid environment. ASAE Pap. No. 98-2123, American Society of Agricultural Engineers St. Joseph, Mich.
- Hargreaves GH, and Samani ZA, 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering Agriculture 1(2): 96-99.
- Irmak S, Allen RG and Whitty EB, 2003. Daily grass and alfalfa-reference evapotranspiration estimates and alfalfa-to-grass evapotranspiration ratios in Florida. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 129(5): 360-370.
- Jensen ME, Burman RD and Allen RG, 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70, ASCE, New York.
- Karimi S, Shiri J and Nazemi AH 2013. Estimating Daily Reference Crop Evapotranspiration Using Artificial Intelligence-Based ANFIS and ANN Techniques and Empirical Models. Water and Soil Science-University of Tabriz 23(2):139-158
- Landeras G, Ortiz-Barredo A, and Lopez JJ, 2008. Comparison of artificial neural network models and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the Basque Country (Northern Spain). Agricultural Water Management 95: 553-565.
- Penman HL, 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of Royal Society, London. A: Mathematical and Physical Sciences 193(1032): 120-145.
- Priestley CHB and Taylor RJ, 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Monthly Weather Reviews 100(2): 81-92.
- Shiri J, 2019. Modeling reference evapotranspiration in island environments: assessing the practical implications. Journal of Hydrology 570: 265-280.
- Shiri J, 2017. Evaluation of FAO56-PM, empirical, semi-empirical and gene expression programming approaches for estimating daily reference evapotranspiration in hyper-arid regions of Iran. Agricultural Water Management 188: 101-114.
- Shiri J, Nazemi AH, Sadraddini AA, Landeras G, Kisi O, Marti P, 2013. Global cross-station assessment of neuro-fuzzy models for estimating daily reference evapotranspiration. Journal of Hydrology 480: 46-57.
- Shiri J, Nazemi AH, Sadraddini AA, Landeras G, Kisi O, Fakheri Fard A and Marti P, 2014a. Comparison of heuristic and empirical approaches for estimating reference evapotranspiration from limited inputs in Iran. Computers and Electronics in Agriculture 108: 230-241.
- Shiri J, Sadraddini AA, Nazemi AH, Kisi O, Landeras G, Fakheri Fard A and Marti P, 2014b. Generalizability of gene expression programming-based approaches for estimating daily reference evapotranspiration in coastal stations of Iran. Journal of Hydrology 508: 1-11.
- Thornthwaite CW, 1948. An approach toward a national classification of climate. Geographical Reviews 38(1): 55-94.
- Wright JL and Jensen ME, 1972. Peak water requirements of crops in Southern Idaho. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 96(1): 193-201.
- Wright JL, 1996. Derivation of alfalfa and grass reference evapotranspiration. C. R. Camp, E. J. Sadler, and R. E. Yoder, eds., Evapotranspiration and irrigation scheduling, Proc., Int. Conf., Irrigation Association and Int. Committee on Irrigation and Drainage, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Mich.