

تخمین مقادیر روزانه نسبت تبخیر - تعرق مرجع یونجه به چمن و تعیین سهم مؤلفه‌های آئرو دینامیکی و توازن انرژی در تبخیر - تعرق (مطالعه موردی: استان آذربایجان شرقی)

جلال شیری*^۱، یعقوب دین پژوه^۲، علی اشرف صدرالدینی^۳، امیرحسین ناظمی^۳

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۵

۱- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

۳- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: j_shiri2005@yahoo.com

چکیده

تبخیر- تعرق به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های اصلی چرخه هیدرولوژیک دارای اهمیت فراوانی در مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی آبیاری می‌باشد. امروزه به‌دلیل نبود داده‌های لایسی‌متری در بیشتر ایستگاه‌های هواشناسی، از مقادیر تبخیر- تعرق مرجع حاصل از مدل استاندارد فائو- پنمن - مونتیث 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 آذربایجان شرقی 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. در ادامه، سهم هر یک از مؤلفه‌های توازن انرژی و آئرو دینامیکی 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 یونجه و چمن، تغییرات فصلی، مؤلفه آئرو دینامیکی، مؤلفه توازن انرژی

Estimating Daily Alfalfa to Grass Reference Evapotranspiration Ratios and Determining the Aerodynamic and Energy Balance Components Contribution in Evapotranspiration (Case study: East Azerbaijan Province)

J Shiri^{1*}, Y Dinpashoh², AA Sadraddini³, AH Nazemi³

Received: 17 April 2016 Accepted: 14 January 2017

1-Assist. Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agric., University of Tabriz, Iran

2-Assoc. Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agric., University of Tabriz, Iran

3-Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agric., University of Tabriz

* Corresponding Author, Email: j_shiri2005@yahoo.com

Abstract

Evapotranspiration (ET), as 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 for 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 East Azarbayjan 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 study period. 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 the 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, Grass and alfalfa reference evapotranspiration, Seasonal variations

مقدمه

آئرو دینامیک، نسبت باون^۱ صورت پذیرد. به کارگیری لایسیمتر امکان تعیین تبخیر- تعرق را بر اساس اندازه گیری برخی از مؤلفه های بیلان آب در یک سطح گیاهی کنترل شده فراهم می آورد (آلن و همکاران ۱۹۹۸). از جمله گزینه های اقتصادی به منظور صرفه جویی در هزینه های مربوط به روش های یاد شده، استفاده از مدل های ریاضی است که از متغیرهای هواشناسی اندازه گیری شده، به عنوان متغیرهای مستقل استفاده می شود. مدل های ریاضی یاد شده مشتمل بر مدل های تجربی و

تبخیر- تعرق به فرآیندی اطلاق می شود که در آن آب از سطح خاک و گیاه به اتمسفر منتقل می شود که این امر در نتیجه تأثیر توأم تبخیر از سطح خاک و تعرق از گیاه انجام می پذیرد. تعیین مقدار تبخیر- تعرق یک مؤلفه مهم در تعیین بیلان آب و بودجه بندی آبیاری می باشد. میزان نیاز آبی گیاه می تواند به طریق مستقیم و با استفاده از تکنیک های پرهزینه هواشناسی که مبتنی بر بیلان انرژی و نیز انتقال جریان جرم بخار می باشند (روش

¹ Bowen ratio

مناسب (Kc) 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. امروزه در صورت عدم وجود داده‌های لایسی-متری در یک منطقه، مدل فائو-پنمن-مونتیت (آلن و همکاران ۱۹۹۸) به‌عنوان مدل استاندارد برای محاسبه میزان تبخیر-تفرق گیاه مرجع و نیز واسنجی سایر مدل‌های تجربی به‌کار گرفته می‌شود (ایرماک و همکاران ۲۰۰۳، شیری و همکاران ۲۰۱۴ a, b). مدل یاد شده دارای دو مزیت عمده می‌باشد (لندراس و همکاران ۲۰۰۸: ۱) از آنجا که این معادله اساس فیزیکی دارد لذا می‌توان از آن در شرایط مختلف اقلیمی و اکولوژیکی (و بدون نیاز به واسنجی منطقه‌ای) استفاده نمود. ۲) دقت و اعتبار نتایج حاصل از این معادله در شرایط مختلف اقلیمی با استفاده از آزمایش‌های لایسی-متری به اثبات رسیده است. از سوی دیگر از جمله مهم‌ترین 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. البته بایستی به این نکته نیز توجه نمود که هرچند برخی مدل‌ها به داده‌های اقلیمی کمتری نیاز دارند، ولی حذف برخی پارامترهای اساسی هواشناسی در چنین مدل‌هایی، سبب نادیده گرفته شدن سهم آن پارامترها در تبخیر-تفرق گشته و لذا از دقت نهایی مدل خواهد کاست. در مقابل، برخی مدل‌ها نظیر مدل پنمن-کیمبرلی^۳ (رایت ۱۹۹۶) نیز برای تخمین تبخیر و تفرق گیاه مرجع یونجه (ET_r) به‌کار بسته شده و دقت آن‌ها در نقاط مختلف دنیا

فیزیکی می‌باشند که مدل‌های تجربی بر مبنای توابع آماری تقریب بین مقادیر تبخیر-تفرق 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-تفرق را به‌کار می‌گیرند که این عوامل عبارتند از: ۱- مقدار انرژی لازم برای گرمای نهان تبخیر، ۲- جریان بخار آب در خارج از سطح تبخیر و ۳- تأمین بخار آب در سطح تبخیر (چاو و همکاران ۱۹۹۸). پنمن (۱۹۴۸) روش‌های توازن انرژی و انتقال جرم را ترکیب نموده و به معادله‌ای برای تخمین تبخیر از سطح آزاد آب دست یافت. با معرفی فاکتور مقاومت شبیه‌ساز مقاومت آئرودینامیکی، امکان استفاده از این معادله برای تعیین تبخیر-تفرق از سطح گیاه فراهم شد (آلن و همکاران ۱۹۹۸). در ادامه، مفهوم تبخیر-تفرق مرجع^۲ توسط محققان بسط و توسعه داده شد. طبق تعریف، شدت تبخیر-تفرق از یک سطح مرجع، که با هیچ‌گونه تنش آبی مواجه نباشد، به‌عنوان تبخیر-تفرق گیاه مرجع یا تبخیر-تفرق 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 آلبو ۰/۲۳ و مقاومت ثابت سطح سایه انداز معادل ۷۰ ثانیه بر متر) می‌باشد (دورنبوس و پروت ۱۹۷۷). 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-تفرق مرجع، پارامترهای هواشناسی می‌باشد و لذا می‌توان اظهار داشت که تبخیر-تفرق مرجع برآیندی از پارامترهای اقلیمی بوده و با معلوم بودن آمار و اطلاعات هواشناسی، می‌توان مقدار آن را محاسبه نمود. تبخیر-تفرق مرجع چمن (ET_0) به‌طور گسترده‌ای در تخمین نیاز آبی گیاهان با استفاده از ضرایب گیاهی

³ Penman-Kimberly

² Reference evapotranspiration

هوا، ساعات آفتابی، تابش کل خورشیدی و سرعت باد در مقیاس روزانه می‌باشد. طول آماری داده‌های موجود شامل ده سال [از اول ژانویه ۲۰۰۳ میلادی (۱۳۸۱ خورشیدی) تا ۳۱ دسامبر ۲۰۱۲ میلادی (۱۳۹۱ خورشیدی)] می‌باشد. در جدول ۲-۱ فهرست ایستگاه-های مورد مطالعه به همراه موقعیت جغرافیایی آن‌ها درج شده است. تغییرات ارتفاعی ایستگاه‌ها از ۷۳۶ متر (جلفا) تا ۱۵۵۰ متر (مرند) متغیر است.

مدل استاندارد فائو-پنمن-مونتیت (FAO56-PM)

فرم اصلاح شده مدل پنمن-مونتیت که توسط فائو ارائه گردیده است به صورت زیر قابل بیان است (آلن و همکاران ۱۹۹۸):

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

در رابطه اخیر، ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر بر روز)، Δ شیب تابع فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس)، R_n تابش خالص خورشیدی (مگا ژول بر متر مربع بر روز)، G چگالی شار حرارتی خاک (مگا ژول بر متر مربع بر روز)، γ ثابت سایکرومتری (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس)، T_{mean} متوسط دمای هوای (درجه سلسیوس)، U_2 متوسط سرعت باد در یک شبانه روز در ارتفاع دو متری از سطح زمین (متر بر ثانیه)، e_s فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال) و e_a نیز فشار بخار واقعی (کیلو پاسکال) می‌باشد. مقدار چگالی شار حرارتی خاک برای دوره‌های روزانه برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود (بر اساس طبیعت سامانه اقلیمی)، لیکن برای دوره‌های ماهانه و بیشتر، مقدار آن بایستی بر اساس تفاضل دمایی بین ماه‌های متوالی و ظرفیت حرارتی خاک محاسبه شود.

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. بدین ترتیب، نسبت ET_r به ET_0 برابر ضریبی 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 داشته‌اند که نمی‌توان این مقدار را یک مقدار ثابت برای تمامی شرایط اقلیمی در نظر گرفت. از آنجاکه مقادیر مقاومت روزنه‌ای^۴ (r_s) بسته به مقدار مقاومت آئرویدینامیکی برای یک گیاه (چمن یا یونجه) در اقلیم‌های مختلف، متفاوت است؛ لذا مقادیر K_r نیز بسته به شرایط اقلیمی متفاوت، متغیر خواهد بود (ایرماک و همکاران ۲۰۰۳). مطالعات متعددی تاکنون در مورد تعیین محدوده ضریب یاد شده در نقاط مختلف دنیا به انجام رسیده است. در مطالعه حاضر، مقادیر حاصل از مدل فائو-پنمن-مونتیت به عنوان مقادیر شاهد در نظر گرفته شده و در ادامه، دقت مدل پنمن-کیمبرلی (رایت ۱۹۹۶) که برای تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع یونجه (ET_r) به کار بسته می‌شود نسبت به این مدل سنجیده شده و ضرایب حاصل از نسبت ET_r به ET_0 برای هر ایستگاه حاصل خواهد شد. در نهایت، با توجه به ساختار ریاضی مدل پنمن-کیمبرلی، سهم هر یک از مؤلفه‌های آئرویدینامیکی و توازن انرژی در میزان کل تبخیر-تعرق هر ایستگاه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

مواد و روش‌ها

داده‌ها و ایستگاه‌های مورد مطالعه

در این تحقیق داده‌های مربوط به شش ایستگاه هواشناسی استان آذربایجان شرقی از سازمان هواشناسی کشور دریافت و به کار گرفته شد. داده‌های هواشناسی موجود شامل پارامترهای دمای هوا، رطوبت

⁴ Stomatal resistance

جدول ۱- مشخصات کلی ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه.

کد	ایستگاه	عرض جغرافیایی (°N)	طول جغرافیایی (°E)	ارتفاع از سطح دریا (m)	تبخیر- تعرق مرجع چمن سالانه (mm)	بارش سالانه (mm)
۱	اهر	۳۸°۲۶'	۴۷°۰۴'	۱۳۹۱	۱۲۰۵/۱۲	۲۷۸/۵۰
۲	بناب	۳۷°۲۰'	۴۶°۰۴'	۱۲۹۰	۱۲۳۱/۲۳	۲۷۴/۵۹
۳	تبریز	۳۸°۰۷'	۴۶°۱۴'	۱۳۶۴	۱۵۲۸/۵۸	۲۶۳/۰۰
۴	جلفا	۳۸°۵۶'	۴۵°۳۶'	۷۳۶	۱۴۲۸/۰۵	۲۵۷/۴۰
۵	مراغه	۳۷°۲۱'	۴۶°۱۲'	۱۳۴۴	۱۶۱۲/۹۸	۳۸۹/۱۰
۶	مرند	۳۸°۲۶'	۴۵°۴۶'	۱۵۵۰	۱۲۳۸/۴۹	۲۴۵/۱۴

تحلیل آماری

قضاوت‌های کیفی در مورد کاربرد هر مدل موضوعی است که در ارزیابی مدل‌ها لحاظ می‌گردد و معمولاً معیارهای آماری برای قضاوت کیفی استفاده می‌شوند. این معیارها روش هدفمند را برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها فراهم می‌کنند (کریمی و همکاران ۱۳۹۲). در تحقیق حاضر نیز برای بررسی و مقایسه مدل پنمن-کیمبرلی نسبت به مدل استاندارد فائو-پنمن-مونتیت از شاخص ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (شاخص پراکندگی) استفاده به عمل آمد:

$$SI = \frac{RMSE}{\overline{ET_0}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (ET_{ir} - ET_{i0})^2}{N \overline{ET_0}^2}} \quad [4]$$

در رابطه اخیر ET_r و ET_0 به ترتیب مقادیر تبخیر- تعرق محاسبه شده توسط مدل پنمن- کیمبرلی و مدل استاندارد فائو-پنمن-مونتیت، $\overline{ET_0}$ متوسط مقادیر مدل شاهد، N نمایانگر تعداد داده‌ها و i نیز گام زمانی مورد نظر می‌باشد. هرچه دقت یک مدل بیشتر باشد، مقدار این شاخص کمتر خواهد بود و برعکس.

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

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

که در آن، ET_r نشانگر تبخیر- تعرق مرجع یونجه، λ گرمای نهان ویژه تبخیر (مگاژول بر کیلوگرم)، و W_f تابع بدون بعد باد بوده و بقیه پارامترها قبلاً معرفی شده‌اند. در رابطه اخیر، حاصل جمع دو عبارت انرژی و آثرودینامیک (سرعت باد) برابر با یک معادله توازن انرژی است. حاصل جمع دو عبارت $\frac{\gamma}{\Delta + \gamma}$ و $\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$ برابر با واحد است که این دو عبارت، فاکتورهای وزن‌دهی برای ارزیابی اثرات نسبی تابع 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 و تعرق می‌پردازد و رابطه ریاضی آن به صورت زیر قابل بیان است:

$$W_f = a_w + b_w U_2 \quad [3]$$

که در آن، a_w و b_w در رابطه ضرایب تجربی هستند که تعیین‌کننده تأثیر تابع باد بر تبخیر- تعرق در دوره‌های اولیه هر سال هستند. توضیحات تکمیلی در مورد نحوه محاسبه این پارامترها در رایت و جنسن (۱۹۷۲) تشریح شده است.

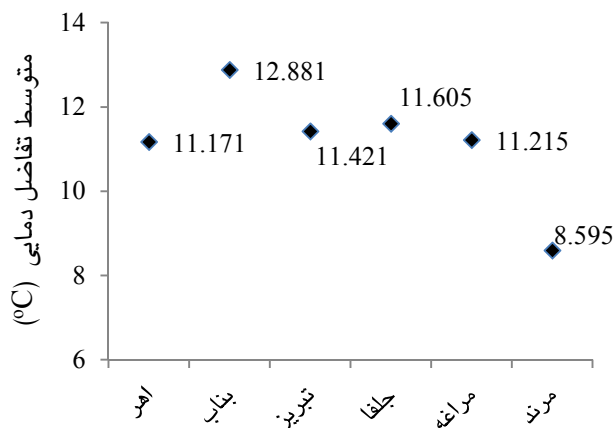
نتایج و بحث

بررسی رفتار متغیرهای هواشناسی در ایستگاه‌ها

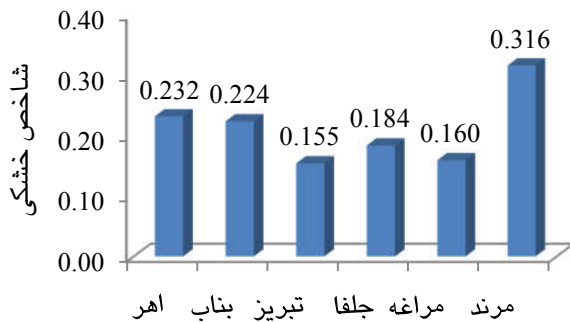
شکل ۱ تغییرات میزان سرعت باد متوسط در ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که تغییرات سرعت باد در بین ایستگاه‌ها از گستردگی نسبتاً قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. بیشترین میزان متوسط سرعت باد برای ایستگاه مراغه (کد ۵) و کمترین مقدار آن نیز برای ایستگاه بناب (کد ۲) اندازه‌گیری شده است. شکل ۲ نیز تفاضل دمایی متوسط (متوسط اختلاف بیشینه و کمینه دمای هوای روزانه، ΔT) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، ایستگاه بناب (کد ۲) بیشینه (۱۲/۸۸ درجه سلسیوس) و ایستگاه مرند، کمینه (۸/۵۹ درجه سلسیوس) تفاضل دمایی را دارا می‌باشد. ملاحظه می‌شود که بیشترین مقدار متوسط سرعت باد در این حالت، معادل بیشترین مقدار تفاضل دمایی نبوده و ایستگاه بناب، بیشترین تغییرات دمایی و کمترین مقدار متوسط سرعت باد را به خود اختصاص داده است. این در حالی است، که کمترین تغییرات دمایی (ایستگاه مرند) نیز معادل بیشترین مقدار متوسط سرعت باد نمی‌باشد و لذا نمی‌توان متوسط مقدار سرعت باد را به‌طور مستقیم به میزان تغییرات دمایی مرتبط نمود. بدین ترتیب، می‌باید به تغییرات سرعت باد و یا تغییرات تفاضل دمایی در طول دوره آماری و یا فصول سال توجه نمود. شکل ۳ مقادیر ضریب تغییرات سرعت باد و نیز تفاضل دمایی و تابش کل خورشیدی را در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. بررسی مقادیر ضریب تغییرات ارائه شده در شکل فوق حاکی از آن است که هر چند در ایستگاه بناب، مقدار متوسط سرعت باد نسبت به سایر ایستگاه‌ها کمتر است، ولی میزان تغییرات و انحراف مقادیر مشاهداتی از متوسط (معیار) به مراتب بیشتر از سایر ایستگاه‌هاست. این امر بدین معنی است که تغییرات در داخل سری زمانی مقادیر سرعت باد دارای مقدار قابل توجهی بوده و با توجه به کمتر بودن ضریب تغییرات تفاضل دمایی در این ایستگاه و نیز ثابت بودن تقریبی ضریب تغییرات تابش

کل خورشیدی در تمامی ایستگاه‌ها، این امر می‌تواند در تخمین مقادیر تبخیر-تعرق با استفاده از مدل‌های ترکیبی و یا انتقال جرم، سبب بروز خطا شود. از سوی دیگر، آن‌گونه که گذشت، ضریب تغییرات تابش کل خورشیدی در تمامی ایستگاه‌ها تقریباً بسیار نزدیک به هم و یا با هم برابر است که دلیل چنین امری را می‌توان به یکسان بودن شرایط دریافت تابش در تمامی ایستگاه‌ها و نیز عدم تفاوت بسیار زیاد در عرض جغرافیایی مرتبط نمود. از منظر تغییرات بارش سالانه، ایستگاه‌های مراغه و مرند به ترتیب دارای بیشترین (۳۸۹/۱۰ میلی‌متر) و کمترین (۲۴۵/۱۴ میلی‌متر) مقدار بارش متوسط سالانه در طی دوره مطالعاتی می‌باشند. بیشترین میزان تبخیر-تعرق سالانه (محاسبه شده توسط روش فائو) مربوط به ایستگاه مراغه (۱۶۱۲/۹۸ میلی‌متر) و کمترین مقدار نیز مربوط به ایستگاه اهر (۱۲۰۵/۱۲ میلی‌متر) می‌باشد. نسبت بارش سالانه به تبخیر-تعرق سالانه، یکی از شاخص‌های بسیار مهم در به کمیت در آوردن وضعیت اقلیمی ایستگاه از نظر خشکی و یا مرطوب بودن به‌شمار می‌رود که از آن به شاخص خشکی یاد می‌شود (شیری و همکاران ۲۰۱۳). مقادیر این شاخص برای ایستگاه‌های مطالعاتی در شکل ۴ ارائه شده است. بررسی مقادیر نشان داده شده در شکل ۴ حاکی از آن است که ایستگاه‌های تبریز، جلفا و مراغه با داشتن مقدار شاخص خشکی کمتر از ۰/۲۰ جزء مناطق خشک محسوب شده و سه ایستگاه اهر، بناب و مرند، در زمره ایستگاه‌های نیمه-خشک محسوب می‌شوند (شیری و همکاران، ۲۰۱۳). این امر می‌تواند دقت مدل‌های تخمین تبخیر-تعرق را تحت تأثیر قرار دهد، زیرا از آنجا که در ایستگاه‌های واقع در مناطق خشک، میزان تبخیر-تعرق به مراتب بیشتر است، تخمین این پارامتر در چنین ایستگاه‌هایی با دشواری مواجه خواهد بود (شیری و همکاران ۲۰۱۴). با این وجود، می‌باید بدین نکته مهم نیز توجه داشت که ارقام گزارش شده در شکل فوق، برآیندی از نسبت تغییرات دو پارامتر تبخیر-تعرق و بارش سالانه در کل دوره آماری

عموماً بر پایه متوسط دوره آماری صورت پذیرفته و بررسی داخل سالی کاربردی در این خصوص ندارد، لیکن بررسی تغییرات زمانی این شاخص در برخی موارد به تبیین عملکرد مدل‌های تجربی یا فیزیکی در برخی دوره‌های زمانی خاص و ریشه‌یابی برخی رفتارهای مدل در آن‌ها کمک شایانی خواهد نمود.



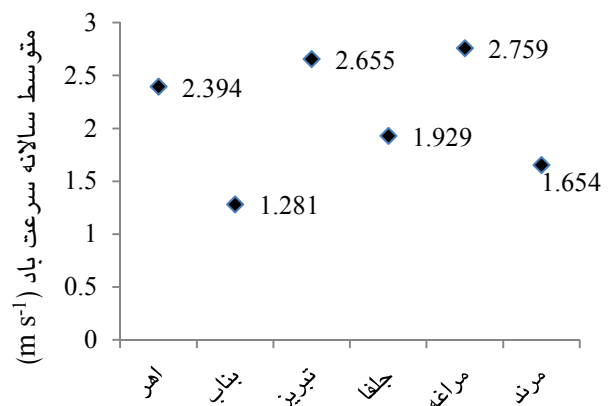
شکل ۲- متوسط تغییرات تفاضل دمایی.



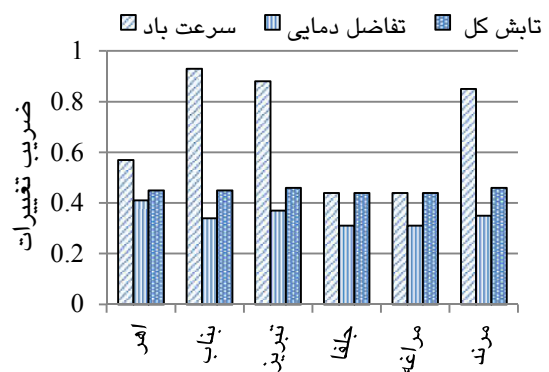
شکل ۴- شاخص خشکی ایستگاه‌ها.

سرعت باد می‌باشد به نحوی که کمترین و بیشترین مقادیر سرعت باد نیز به ترتیب برای ایستگاه‌های بناب و مراغه ثبت شده است و لذا می‌توان دریافت که مقدار ضریب K_r رفتاری معکوس مقادیر سرعت باد از خود نشان می‌دهد. همچنین بررسی این مقادیر با توجه به شاخص خشکی ایستگاه‌ها نشان می‌دهد که غیر از دو ایستگاه بناب و مرند، در بقیه ایستگاه‌ها رفتار مقادیر ضریب

مورد مطالعه بوده و لذا ممکن است در داخل سری زمانی مقادیر شاخص خشکی در سال‌های مختلف، ارقام متفاوتی نیز مشاهده شوند. بدین معنی که در برخی از سال‌ها ممکن شاخص خشکی از مقادیر متوسط یاد شده در شکل فوق به مراتب کمتر و یا بیشتر باشد. هرچند بررسی وضعیت ایستگاه با استفاده از شاخص خشکی



شکل ۱- متوسط تغییرات سرعت باد.



شکل ۳- ضریب تغییرات پارامترهای هواشناسی.

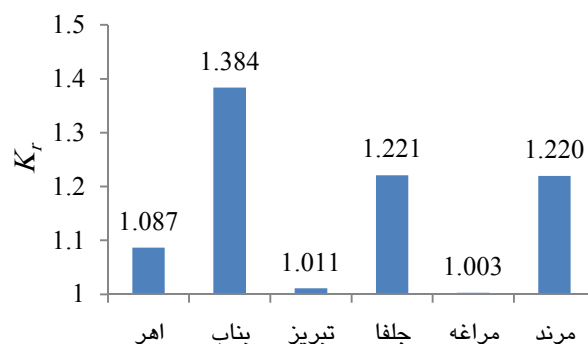
نسبت ET_r به ET_0 (ضرایب K_r)

شکل ه مقادیر ضریب K_r را برای ایستگاه‌های مطالعاتی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که بیشترین و کمترین مقادیر این ضریب به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های بناب و مراغه می‌باشند. بررسی این مقادیر با توجه به مقادیر متوسط سرعت باد ایستگاه‌ها حاکی از آن است که رفتار این ضریب، متأثر از مقادیر

این ضریب به طور قابل توجهی در بین ایستگاه‌ها متغیر بوده و مقدار آن بین $1/30$ تا $1/38$ در ایستگاه‌های خشک و نیز $1/12$ تا $1/39$ در ایستگاه‌های مرطوب متغیر است. با این وجود، مطالعه یاد شده حاکی از آن بود که دمای هوا، رطوبت و سرعت باد بالای سطح تبخیر کننده، توسط جریان بخار و تبادل انرژی سطح مورد نظر، تعدیل شده و لذا مقادیر K_r محاسبه شده عمدتاً ۵ تا ۱۰ درصد بیشتر از مقادیر واقعی آن (در سطح مزرعه) خواهد بود. لذا آنان مقادیر $1/2$ تا $1/25$ را بهتر از مقدار عمومی $1/15$ برای ایستگاه‌های مورد مطالعه خود گزارش نمودند. آنان همچنین اعلام داشتند که صرف نظر از دقت مقادیر محاسبه شده برای K_r ، تغییرات موجود در مقادیر حاصل برای این ضریب حاکی از آن است که ضریب گیاهی (به عنوان نسبت تبخیر- ترقق واقعی به تبخیر- ترقق مرجع)، برای گیاهانی که زبری سطح آن‌ها بیشتر از چمن بوده یا مقادیر r_s پایین تری دارند، با تغییر اقلیم منطقه دچار تغییر خواهد شد. اوت و همکاران (۱۹۹۸) در یک مطالعه با استفاده از داده‌های لایسی متری مربوط به چمن و یونجه دریافتند که مقدار ET_r تقریباً $1/15$ برابر بیشتر از مقدار ET_0 می‌باشد، جنسن و همکاران (۱۹۹۰) مقادیر K_r را بین $1/03$ (برای اقلیم مرطوب و آرام) تا $1/45$ (برای مناطق خشک با وزش باد شدید) گزارش نمودند. دورنبوس و پروت (۱۹۷۷) مقدار $1/15$ را برای ضریب K_r برای شرایط اقلیمی خشک (پارامترهای باد آرام تا متوسط) مناسب عنوان نمودند. ارپن‌بک (۱۹۸۱) متوسط مقدار این ضریب را برای ایستگاه‌های خشک با استفاده از داده‌های تبخیر و ترقق چمن و نیز تبخیر از سطح تشتک، در حدود $1/21$ پیشنهاد نمود. رایت (۱۹۹۶) نیز مقدار $1/20$ را برای چنین شرایط اقلیمی به دست آورد.

با بررسی مطالعات یاد شده و نیز مشاهده تغییرات ضریب K_r در طی فصول مختلف سال در یک ایستگاه، به روشنی مشخص خواهد بود که بررسی و تعیین مقدار عددی این ضریب در هر ایستگاه از الزامات اساسی به شمار می‌رود. با این وجود، از مهم‌ترین چالش‌های اساسی در این راستا، انتخاب بهترین مدل تعیین ET_r جهت حصول

K_r در برابر مقادیر شاخص خشکی، رفتار معکوسی می‌باشد. دلیل عدم وجود چنین رفتاری برای این دو ایستگاه به روشنی مشخص نمی‌باشد.



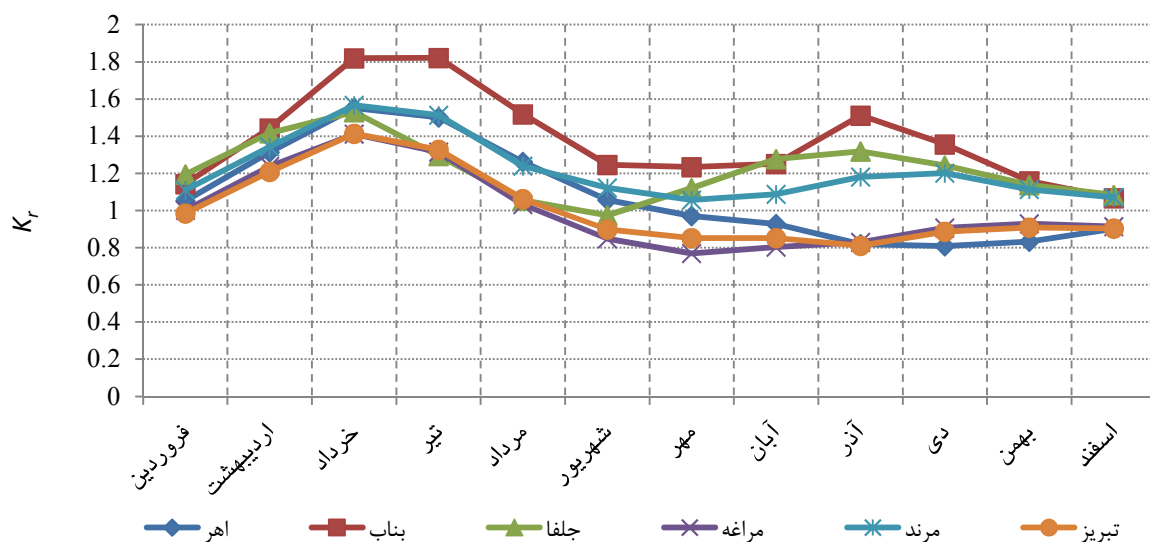
شکل ۵- مقادیر ضریب K_r ایستگاه‌ها در طی دوره آماری مورد مطالعه.

شکل ۶ نیز مقادیر متوسط ماهانه این ضریب را در ایستگاه‌های مطالعاتی نشان می‌دهد. با توجه به شکل، ضریب یاد شده در شش ماه اول سال (فصول گرم) در همه ایستگاه‌ها بیشتر از یک بوده و در شش ماه دوم نیز، در سه ایستگاه اهر، مراغه و تبریز، مقادیر کمتر از یک برای این ضریب حاصل شده است. بیشترین مقدار این ضریب عموماً در ماه‌های گرم (فاصله ماه‌های خرداد تا مرداد) حاصل شده و پس از آن، رو به کاهش گذاشته است. مقادیر نشان داده شده در شکل ۶ حاکی از آن است که نسبت ET_r به ET_0 در طول سال متغیر است و این نسبت بسته به فصل سال بیشتر یا کمتر از یک خواهد بود و این امر در تطابق با نتایج مطالعات ایرماک و همکاران (۲۰۰۳) می‌باشد. چنین تغییراتی را می‌توان ناشی از عکس‌العمل هر یک از سطوح تبخیرکننده در مقابل پدیده تبخیر دانست که در این میان، تغییر مورفولوژیکی سطح گیاه مرجع در طول سال نیز بر این امر تأثیرگذار خواهد بود (رایت ۱۹۹۶). در مطالعه مشابهی، آلن و همکاران (۱۹۹۴) با بررسی مقادیر K_r در ایستگاه‌های مختلف واقع در مناطق اقلیمی خشک و مرطوب در ایالات متحده بدین نتیجه دست یافتند که مقدار

گرم سال، تفاضل بین مقادیر یاد شده به مراتب چشم‌گیرتر است.

یک دلیل برای حصول مقادیر بیشتر برای K_r در ماه‌های سرد در ایستگاه‌ها را می‌توان وجود بادهای قوی و یا تفاضل فشار بخار بالا عنوان نمود (ایرماک و همکاران ۲۰۰۳). هرچند در مورد ایستگاه بناب، بادهای شدید (نسبت به سایر ایستگاه‌ها) برای این ایستگاه در دوره مورد مطالعه ثبت نشده ولی مقادیر تفاضل فشار بخار در برخی موارد در ماه‌های سرد سال، بسیار بالا می‌باشند. دلیل دیگری که می‌تواند چنین مقادیر بالایی را برای K_r در دوره سرد سال توجیه نماید، محاسبه ET_0 با استفاده از مدل فائو-پنمن-مونتیت 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 (r_a) دو گیاه مرجع یونجه و چمن، سبب حصول مقادیر بالاتری برای K_r خواهد گردید.

این ضریب در هر ایستگاه است. 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 به عمل آمد. از سوی دیگر بایستی توجه داشت از آنجا که در تحقیق حاضر، مقادیر اندازه‌گیری شده (لایسی‌متری) ET_r و ET_0 موجود نبودند، لذا مقادیر ضریب K_r در برخی موارد ممکن است واقعیت موجود در شرایط مزرعه‌ای را بازگو نکنند. به عنوان مثال، در ایستگاه بناب در آذر ماه، مقداری بالاتر از $1/4$ برای این ضریب حاصل شده است که مقدار آن زیاد به نظر می‌رسد. با این وجود، از آنجا که آذر ماه یکی از سردترین ماه‌های سال است، مقادیر تبخیر-تفرق چمن و یونجه در این ماه بسیار کمتر از مقادیر آن‌ها در ماه‌های گرم سال خواهند بود و حتی با وجود نسبت عددی $1/4$ بین آن‌ها، تفاضل ET_r و ET_0 برای ایستگاه بناب در آذر ماه (متوسط ده ساله) برابر با 0.213 میلی‌متر می‌باشد. ولی در مورد ماه‌های



شکل ۶- مقادیر متوسط ماهانه ضریب K_r ایستگاه‌ها.

می‌دهد که کمترین و بیشترین مقادیر شاخص پراکندگی (به ترتیب، بیشترین و کمترین دقت مدل) مربوط به ایستگاه‌های تبریز و بناب می‌باشد.

جدول ۲ مقادیر شاخص پراکندگی حاصل از مقایسه مدل پنمن-کیمبرلی با مدل استاندارد فائو-پنمن-مونتیت را نشان می‌دهد. بررسی این مقادیر نشان

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

ایستگاه	اهر	بناب	تبریز	جلفا	مراغه	مرند
SI	۰/۴۰۴	۰/۶۸۹	۰/۲۸۷	۰/۳۲۶	۰/۲۸۹	۰/۴۲۴

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

	سهم مؤلفه‌ها	اهر	بناب	تبریز	جلفا	مراغه	مرند
فروردین	آئرو دینامیکی	۰/۳۶۵	۰/۲۹۳	۰/۳۷۹	۰/۳۹۹	۰/۳۸۰	۰/۳۵۴
	توازن انرژی	۰/۶۳۵	۰/۷۰۷	۰/۶۲۱	۰/۶۰۱	۰/۶۲۰	۰/۶۴۶
اردیبهشت	آئرو دینامیکی	۰/۴۱۷	۰/۴۱۱	۰/۴۶۱	۰/۴۶۳	۰/۴۶۳	۰/۴۲۱
	توازن انرژی	۰/۵۸۳	۰/۵۸۹	۰/۵۳۹	۰/۵۳۷	۰/۵۳۷	۰/۵۷۹
خرداد	آئرو دینامیکی	۰/۵۰۵	۰/۵۴۱	۰/۵۶۸	۰/۵۵۹	۰/۵۷۱	۰/۵۱۷
	توازن انرژی	۰/۴۹۵	۰/۴۵۹	۰/۴۳۲	۰/۴۴۱	۰/۴۲۹	۰/۴۸۳
تیر	آئرو دینامیکی	۰/۵۰۷	۰/۵۷۵	۰/۵۷۴	۰/۵۶۵	۰/۵۷۳	۰/۵۳۱
	توازن انرژی	۰/۴۹۳	۰/۴۲۵	۰/۴۲۶	۰/۴۳۵	۰/۴۲۷	۰/۴۶۹
مرداد	آئرو دینامیکی	۰/۴۵۷	۰/۵۰۷	۰/۵۲۵	۰/۵۱۱	۰/۵۲۲	۰/۴۸۹
	توازن انرژی	۰/۵۴۳	۰/۴۹۳	۰/۴۷۵	۰/۴۸۹	۰/۴۷۸	۰/۵۱۱
شهریور	آئرو دینامیکی	۰/۳۵۷	۰/۳۸۲	۰/۴۲۹	۰/۴۱۳	۰/۴۳۳	۰/۳۸۶
	توازن انرژی	۰/۶۴۲	۰/۶۱۸	۰/۵۷۱	۰/۵۸۷	۰/۵۶۷	۰/۶۱۴
مهر	آئرو دینامیکی	۰/۳۶۹	۰/۳۲۶	۰/۴۱۷	۰/۳۹۶	۰/۴۲۷	۰/۳۷۳
	توازن انرژی	۰/۶۳۰	۰/۶۷۴	۰/۵۸۳	۰/۶۰۴	۰/۵۷۳	۰/۶۲۷
آبان	آئرو دینامیکی	۰/۴۳۴	۰/۳۶۸	۰/۴۴۸	۰/۴۵۴	۰/۴۴۲	۰/۴۰۸
	توازن انرژی	۰/۵۶۶	۰/۶۳۲	۰/۵۵۲	۰/۵۴۶	۰/۵۵۸	۰/۵۹۲
آذر	آئرو دینامیکی	۰/۵۷۵	۰/۴۶۵	۰/۵۳۷	۰/۵۲۷	۰/۵۲۰	۰/۴۸۸
	توازن انرژی	۰/۴۲۵	۰/۵۴۴	۰/۴۶۳	۰/۴۷۳	۰/۴۸۰	۰/۵۱۲
دی	آئرو دینامیکی	۰/۵۰۶	۰/۴۰۳	۰/۴۶۳	۰/۴۵۴	۰/۴۵۵	۰/۴۵۰
	توازن انرژی	۰/۴۹۶	۰/۵۹۷	۰/۵۳۷	۰/۵۴۵	۰/۵۴۵	۰/۵۵۰
بهمن	آئرو دینامیکی	۰/۳۸۲	۰/۳۱۵	۰/۳۶۹	۰/۳۷۹	۰/۳۶۲	۰/۳۶۲
	توازن انرژی	۰/۶۱۹	۰/۶۸۵	۰/۶۳۱	۰/۶۲۱	۰/۶۳۸	۰/۶۳۸
اسفند	آئرو دینامیکی	۰/۳۳۳	۰/۲۵۸	۰/۳۴۳	۰/۳۷۰	۰/۳۴۰	۰/۳۲۹
	توازن انرژی	۰/۶۶۷	۰/۷۴۲	۰/۶۵۷	۰/۶۳۰	۰/۶۶۰	۰/۶۷۱
متوسط کل دوره	آئرو دینامیکی	۰/۴۳۳	۰/۴۰۳	۰/۴۶۰	۰/۴۵۸	۰/۴۵۸	۰/۴۲۶
آماري	توازن انرژی	۰/۵۶۷	۰/۵۹۷	۰/۵۴۰	۰/۵۴۲	۰/۵۴۲	۰/۵۷۴
تفاضل نسبت‌ها در کل دوره		۰/۱۳۴	۰/۱۹۴	۰/۰۸۰	۰/۰۸۴	۰/۰۸۴	۰/۱۴۸

تعیین سهم مؤلفه‌های آثرودینامیکی و توازن انرژی

یکی از مزایای مدل پنمن-کیمبرلی در مقایسه با سایر مدل‌های ترکیبی در آن است که سهم هر یک از مؤلفه‌های آثرودینامیکی و توازن انرژی را می‌توان به-طور مستقیم توسط این مدل تعیین نمود. بدین ترتیب، نسبت سهم مؤلفه‌های آثرودینامیکی 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 آثرودینامیکی و توازن انرژی در طی دوره مطالعاتی نشان می‌دهد که عموماً در تمامی ایستگاه‌ها سهم مؤلفه توازن انرژی بیشتر از مؤلفه آثرودینامیکی می‌باشد. با این وجود، تفاضل نسبت این دو مؤلفه در ایستگاه‌های تبریز، جلفا و مراغه، کمتر از ۰/۱۰ می‌باشد که حاکی از نزدیک بودن سهم این دو مؤلفه در تشکیل تبخیر-تعرق مرجع در این ایستگاه‌ها می‌باشد. در ایستگاه بناب، مقدار این تفاضل بیش از سایر ایستگاه‌ها بوده و در ایستگاه‌های اهر و مرند نیز نسبت به سه ایستگاه مذکور مقدار بیشتری دارد. این امر نشان‌گر آن است که نمی‌توان از سهم عمده بخش آثرودینامیکی (جریان هوا یا همان سرعت باد) در بروز پدیده تبخیر-تعرق در این ایستگاه‌ها چشم‌پوشی نمود و لذا کاربرد مدل‌هایی نظیر پریستلی-تیلور (پریستلی و تیلور ۱۹۷۲) که اثر مؤلفه آثرودینامیکی را تنها در یک ضریب ثابت خلاصه نموده-اند، در این ایستگاه‌ها مترتب 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 خرداد ماه، در تمامی ایستگاه‌ها، سهم مؤلفه آثرودینامیکی بیشتر از مؤلفه توازن انرژی است و چنین حالتی را می‌توان برای آذر ماه نیز مشاهده نمود و لذا درجه حرارت (و ساعات روشنایی و به تبع آن میزان تابش دریافتی) در این

خصوص تأثیری از خود نشان نداده است. با این وجود، هرگونه اظهار نظر قطعی در این مورد مستلزم بررسی بیشتر و تحلیل تغییرات ساعتی متغیرها در هر ایستگاه خواهد بود که این امر می‌تواند موضوعی برای مطالعات آتی باشد.

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق کارآیی مدل پنمن-کیمبرلی در تعیین تبخیر-تعرق گیاه مرجع یونجه مورد بررسی قرار گرفته و دقت آن با مدل استاندارد فائو-پنمن-مونتیث (برای تعیین تبخیر-تعرق مرجع چمن) مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد نسبت تبخیر-تعرق مرجع یونجه به تبخیر-تعرق مرجع چمن در شش ماه اول سال (فصول گرم) در همه ایستگاه‌ها بیشتر از یک بوده و در شش ماه دوم نیز، در سه ایستگاه اهر، مراغه و تبریز، 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، سهم هر یک از مؤلفه‌های توازن انرژی و نیز آثرودینامیکی در پدیده تبخیر-تعرق مورد بررسی قرار گرفت. بررسی مقادیر نسبت مؤلفه‌های آثرودینامیکی و توازن انرژی در طی دوره مطالعاتی نشان داد که عموماً در تمامی ایستگاه‌ها سهم مؤلفه توازن انرژی بیشتر از مؤلفه آثرودینامیکی می‌باشد. با این وجود، مقدار کمی سهم مؤلفه آثرودینامیکی در تمامی ایستگاه‌ها قابل توجه بوده و نمی‌توان از سهم عمده بخش آثرودینامیکی (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.

سیاسگزاری

تبخیر و تعرق مرجع " می باشد که از محل اعتبارات پژوهشی دانشگاه تبریز اجرا گردیده است.

این مقاله مستخرج از گزارش نهایی طرح پژوهشی "بررسی ساختار مولفه‌های هواشناسی حاکم بر پدیده

منابع مورد استفاده

- کریمی س، شیری ج و ناظمی اح. ۱۳۹۲. تخمین تبخیر و تعرق روزانه گیاه مرجع با استفاده از سیستم‌های هوش مصنوعی و معادله‌های تجربی. نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۳، شماره ۲، صفحه‌های ۱۳۹ تا ۱۵۸.
- Allen RG, Smith M, Pereira LS and Perrier A, 1994. An update for the calculation of reference evapotranspiration. ICID Bulletin 43(2): 35-92.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith M, 1998. Crop evapotranspiration. Guide lines for computing crop evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper No 56. FAO, Rome.
- Chow VT, Maidment DR and Mays LW (Eds), 1998. Applied Hydrology. McGraw-Hill. NY.
- Doorenbos J and Pruitt WO, 1977. Guidelines for prediction of crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24 (revised), Rome.
- Erpenbeck JM, 1981. A methodology to estimate crop water requirements in Washington State. MS thesis, College of Engineering, Washington State Univ., Pullman, Wash.
- Evelt SR, Howell TA, Todd RW, Schneider AD and Tolk JA, 1998. Evapotranspiration of irrigated alfalfa in a semi-arid environment. ASAE Pap. No. 98-2123, American Society of Agricultural Engineering 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.
- 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, 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.