Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Evaluation and Development of Hargreaves-Samani Evapotranspiration Equation Based on Humidity Conditions

Seyed Muhammadreza Tabatabaei[1] | Teymour Sohrabi[2]✉ | Alireza Mohebalhojeh[3] | Abdolhossein Hoorfar[4]

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: rezatabataba@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: myousef@ut.ac.ir
3. Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: amoheb@ut.ac.ir
4. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: hoorfar@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Nov. 28, 2021

Revised: Feb. 15, 2023

Accepted: Feb. 26, 2023

Published online: Feb. 21, 2023

Keywords:
FAO Penman-Monteith Equation,
Hargreaves-Samani Equation,
Reference Evapotranspiration,
Water-Energy Balance.

ABSTRACT

The Hargreaves-Samani method of estimating reference evapotranspiration (ETo) has been recommended by irrigation and drainage paper No.56 of the Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO) in the situations that weather data are missing. since the method requires just measured temperature, the it has been used in several studies over the past decades. FAO paper No. 56 and other investigations has mentioned that Hargreaves-Samani method is an overestimating method in humid cliamtes. Hence, the method has been calibrated for different site and situations. This issue made the purpose of the current study. In this study, the history of the development of Hargreaves-Samani method has been reviewed. Thus, an equation for adjusting humidity condition is discussed. To compare the goodness of models, ETo was calculated based on 3 different methods: 1) Hargreaves-Samani method 2) Allen modified method of Hargreaves-Samani, and 3) the modified method of Hargreaves-Samani based on relative humidity. Also ETo was calculated according to FAO Penman-Montith method as a control estimation. The values were calculated for monthly weather reports of 4,169 stations from CLIMWAT v2.0 all around the world. The results showed that the Hargreaves-Samani's method has a weakness of estimation under extreme conditions. Interestingly, the corrected method improved precision of the estimations especially in arid and semi-arid locations.

Cite this article: Tabatabaei, S. M., Sohrabi, T., Mohebalhojeh, A., & Hoorfar, A. (2023). Evaluation and Development of Hargreaves-Samani Evapotranspiration Equation Based on Humidity Conditions, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (12), 2863-2873. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.351792.669405

© The Author(s). Publisher: University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.351792.669405

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۳، شماره ۱۲ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

بررسی و توسعه معادله تبخیرتعرق هارگریوز ـ سامانی برای شرایط رطوبتی مختلف

سید محمّدرضا طباطبائی[۱] | تیمور سهرابی[۲]✉ | علیرضا محب‌الحجه[۳]| عبدالحسین هورفر[۴]

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: rezatabataba@ut.ac.ir

۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: myousef@ut.ac.ir

۳. گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: amoheb@ut.ac.ir

۴. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: hoorfar@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۲/۱

واژه‌های کلیدی:
تبخیرتعرق مرجع،
معادله فائو پنمن ـ مانتیث،
معادله هارگریوز ـ سامانی،
موازنه آب و انرژی.

چکیده

محاسبه تبخیرتعرق مرجع به عنوان جزئی از معادله پایستگی انرژی کاری بس دشوار است، از این رو محققین زیادی با ارائه روش‌های مختلف سعی در برآورد آن داشته‌اند. در این بین رابطه فائو پنمن ـ مانتیث به عنوان روشی بر مبنای فیزیک مسئله تبخیر، جایگاه ویژه‌ای در امر برآورد تبخیرتعرق دارد، اما از آنجایی که معمولا تعداد کمی از پارامترهای هواشناسی در دسترس هستند، مسئله نیازمند بودن به پارامترهای مختلف در این رابطه، استفاده از این رابطه را محدود کرده است. در نتیجه، روش‌هایی همچون روش هارگریوز ـ سامانی که نیازمند کمترین و معمول‌ترین پارامترها یعنی دما می‌باشد، برای برآورد تبخیرتعرق رواج یافته است. علی‌رغم این نقطه قوت، روش هارگریوز ـ سامانی برآوردهای مناسبی برای مناطق مرطوب ندارد.

در پژوهش حاضر با مرور تاریخچه توسعه رابطه هارگریوز ـ سامانی، روشی اصلاحی برای شرایط رطوبتی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور جامعیت بخشیدن به پژوهش، داده‌های ۴۱۶۹ ایستگاه در سطح کشورهای مختلف تهیه و روش هارگریوز ـ سامانی و دو روش اصلاح شده دیگر بر پایه آن با مقادیر تبخیرتعرق برآورد شده از روش فائو پنمن ـ مانتیث مقایسه شده‌اند.

نتایج حاصل نقاط ضعف دیگری همچون محدودیت برآورد حدود فرین تبخیرتعرق در شرایط خاص را در روش هارگریوز ـ سامانی آشکار کرد. همچنین روش اصلاحی مورد بحث در مقاله حاضر باعث بهبود آماره‌های مختلف طی گسترهٔ وسیعی از شرایط رطوبتی شد.

استناد: طباطبائی؛ سیدمحمدرضا، سهرابی؛ تیمور، محب الحجه؛ علیرضا، هورفر؛ عبدالحسین، (۱۴۰۱). بررسی و توسعه معادله تبخیرتعرق هارگریوز ـ سامانی برای شرایط رطوبتی مختلف، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۱۲)، ۲۸۶۳-۲۸۷۳. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.351792.669405

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.351792.669405

مقدمه

تبخیر و تعرق دو جزء اصلی در چرخه آب و موازنه انرژی هستند که اندازه‌گیری آنها امری دشوار و هزینه‌بر می‌باشد. از این رو پژوهشگران بسیاری در طول سالیان مختلف نسبت به ارائه روش‌های گوناگون برای برآورد میزان تبخیرتعرق در شرایط مختلف اقدام کرده و آن روش‌ها را با داده‌های تبخیرتعرق حاصل از اندازه‌گیری به روش‌های مستقیم مقایسه و واسنجی کرده‌اند.

در این بین یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌های ارائه شده برای برآورد تبخیرتعرق مرجع، استفاده از معادله فائو پنمن ـ مانتیث (Allen et al., 1998) است. این رابطه در ابتدا توسط Penman (1948) بر اساس روابط فیزیکی موازنه انرژی بیان شده است. این رابطه بعدها توسط Monteith (1965) اصلاح و تدقیق شد، و در نهایت رابطه اصلاح‌شده پنمن ـ مانتیث، توسط سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد، فائو، مورد بازبینی کلی قرار گرفت و به شکل معادله فائو پنمن ـ مانتیث ارائه شد (Allen et al., 1998).

از جمله مشکلات معادله فائو پنمن ـ مانتیث، نیاز به پارامترهای گوناگون هواشناسی برای برآورد تبخیرتعرق مرجع می‌باشد. از این رو در همان گزارش پس از بیان مفصل روش فائو پنمن ـ مانتیث و بحث درمورد اندازه‌گیری و یا برآورد هر یک از پارامترها با استفاده از دیگر داده‌های موجود، توصیه شده که از روش‌های دیگر برآورد تبخیرتعرق استفاده نشود و تا حد امکان داده‌ها با روش‌های بیان شده برآورد و از معادله فائو پنمن ـ مانتیث، مقدار تبخیرتعرق مرجع محاسبه شود. پس از بیان تمام این موارد، معادله هارگریوز یا همان معادله هارگریوز ـ سامانی به عنوان روش جایگزین برای برآورد تبخیرتعرق مرجع در شرایط عدم دسترسی به داده‌های هواشناسی ارائه شده است.

روش برآورد تبخیرتعرق مرجع هارگریوز ـ سامانی در بسیاری از مطالعات مورد استفاده قرار گرفته و در تعداد زیادی از آنها از جمله خود گزارش شماره ۵۶ فائو اشاره شده که استفاده از این روش در اقلیم‌های مرطوب منجر به بیش‌برآورد و در مکان‌های بادخیز با سرعت باد بیش از ۳ متر بر ثانیه (در تراز ۲ متر) منجر به کم‌برآورد خواهد شد. بر همین اساس پژوهش حاضر به دنبال آن است تا با بررسی علل و عوامل این موضوع و مرور تاریخچه توسعه معادله هارگریوز ـ سامانی بتواند روشی برای حل آن ارائه دهد.

ادبیات موضوع و پیشینهٔ پژوهش

در سال ۱۹۴۸ اداره احیاء اراضی ایالات متحده آمریکا از هارگریوز دعوت به عمل آورد تا بر روی ارتباط تبخیر از تشت (Epan) و تبخیرتعرق گیاهی (ETc) تحقیق و مطالعه کند. نتیجه این تحقیق ارائه مقادیر ETc ماهانه برای ۲۹ گیاه در منطقه دیویس در ایالت کالیفرنیا (Davis, California) بود (Hargreaves and Allen, 2003).

هارگریوز در سال ۱۹۷۵، با استفاده از داده‌های تبخیرتعرق اندازه‌گیری شده توسط یک لایسیمتر در بازه زمانی ۸ ساله در منطقه دیویس و ارتباط دادن آنها با پارامترهای مختلف هواشناسی، در نهایت رابطه (۱) را برای دوره‌های ۵ روزه با واریانس ۹۴٪ ارائه داد:

$$ET_o = 0.0075\, R_S\, T_F \quad \text{رابطه ۱)}$$

که در این رابطه، Rs تابش خورشیدی در سطح با واحدی برابر با واحد تبخیرتعرق و TF دما (°F) می‌باشد. این رابطه برای بازه‌های زمانی ۵ روزه تا یک ماهه ارائه شده بود (Hargreaves and Allen, 2003; Hargreaves and Samani, 1982). رابطه (۱) برای درجه سلسیوس به صورت رابطه (۲) تبدیل می‌شود:

$$ET_o = 0.0135\, R_S(T_C + 17.8) \quad \text{رابطه ۲)}$$

همان‌طور که در رابطه (۱) مشخص است، تبخیر تعرق مرجع تابعی از دمای متوسط و تابش خورشیدی است. با توجه به اینکه دمای متوسط در اغلب کشورها، حتی کشورهای در حال توسعه اندازه‌گیری می‌شود، لذا تنها جزء مجهول تابش خورشیدی خواهد بود.

Hargreaves and Samani (1982) برای تعیین این جزء، دو روش را پیشنهاد کرده‌اند. در روش اول RS به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود:

$$R_S = K_S\, R_a\, S^{\frac{1}{2}} \quad \text{رابطه ۳)}$$

در رابطه فوق Ra تابش فرازمینی با واحدی معادل واحد RS، S درصد ساعات آفتابی ممکن، و KS ضریب اصلاحی است که خود تابعی از رطوبت نسبی RH بوده و طبق رابطه (۴) بدست می‌آید:

$$K_S = 0.055 + 0.00042\,(100 - RH) \quad \text{رابطه ۴)}$$

Hargreaves (1977) به منظور به دست آوردن مقدار KS، رابطه (۲) را برای منطقه دیویس در ایالت کالیفرنیا واسنجی و مقدار KS را برای آن منطقه معادل ۰/۰۷۵ تعیین کرد، از این رو وی در مطالعات بعدی خود رابطه (۱) را به صورت ذیل بازنویسی نمود:

رابطه ۵)
$$R_S = 0.075\, R_a\, S^{\frac{1}{2}}$$

برای تعیین مقدار S در رابطه (۳)، Hargreaves and Samani (1982) رابطه ذیل را ارائه نمودند:

رابطه ۶)
$$S = KRH\,(100 - RH)^{\frac{1}{2}}$$

که در آن، مقدار KRH ضریبی است که با توجه به مقادیر محاسبه شده S و RH در محل مورد مطالعه تعیین می‌شود و برای هر منطقه باید به صورت مستقل اندازه‌گیری و تعیین شود.

روش دیگری که Hargreaves and Samani (1982) برای تعیین RS ارائه داده‌اند، استفاده از رابطه (۷) می‌باشد:

رابطه ۷)
$$R_S = K_T\, R_a\, dT^{\frac{1}{2}}$$

که در این رابطه، dT اختلاف دمای بیشینه و کمینه در بازه زمانی مورد مطالعه بر حسب درجه فارنهایت، Ra تابش فرازمینی با واحدی معادل واحد RS، و KT ضریب اختلاف دمای بیشینه و کمینه می‌باشد. برای اینکه بتوان این رابطه را برای دماهای بر حسب درجه سلسیوس استفاده کرد، باید مجذور عدد ۱/۸ را در عبارت بالا ضرب کرد. در اینجا نیز به منظور تعیین KT رابطه (۸) را داریم:

رابطه ۸)
$$K_T = 0.035\,(100 - RH)^{\frac{1}{3}}$$

در رابطه فوق، برای شرایط رطوبت نسبی کمتر از ۵۴٪، مقدار KT وابستگی معنی‌داری به RH نشان نمی‌دهد. با تبدیل رابطه (۶) بر مبنای درجه سلسیوس و ادغام آن با رابطه (۱)، رابطه (۹) حاصل می‌شود:

رابطه ۹)
$$ET_o = 0.0181\, K_T\, R_a\, dT^{\frac{1}{2}}\,(T_C + 17.8)$$

با توجه به قابل محاسبه بودن Ra، عملاً رابطه (۹) تابعی از دما (دمای بیشینه و کمینه) می‌باشد. در نتیجه تنها جزء مجهول این رابطه عبارت KT خواهد بود. مقدار KT طی دو پژوهش توسط Hargreaves et al. (1985) برای حوضه رودخانه سنگال، و Hargreaves and Samani (1985) برای لایسیمتری در دیویس واسنجی شده که به ترتیب روابط (۱۰) و (۱۱) از آنها منتج شده است.

رابطه ۱۰)
$$ET_o = 0.0022\, R_a\, dT^{\frac{1}{2}}\,(T_C + 17.8)$$

رابطه ۱۱)
$$ET_o = 0.0023\, R_a\, dT^{\frac{1}{2}}\,(T_C + 17.8)$$

نتیجه آنکه رابطه دوم به واسطه استفاده فراوان در منابع مختلف، و به طور ویژه ارائه آن در گزارش فائو ۵۶ باعث شهرت این رابطه شد. اما چون رابطه (۱۰) بر اساس داده‌های برداشت شده در منطقه دیویس واسنجی شده بود، این رابطه برای اقلیم‌های گرم و خشک برآورد مناسبی داشت، اما همان‌طور که قبلا اشاره شد، در محاسبه تبخیرتعرق مرجع در اقلیم‌های مرطوب دچار بیش‌برآورد است.

از جمله مطالعات داخلی که به این موضوع اشاره کرده‌اند می‌توان مطالعه علیزاده و همکاران (۱۳۸۰) را نام برد. در پژوهش انجام شده توسط آنها، روش هارگریوز ـ سامانی مقدار تبخیرتعرق مرجع را در مقایسه با مقادیر محاسبه شده از روش فائو پنمن ـ مانتیث ۱۲٪ بیش‌آورد نشان می‌داد. قمرنیا و یوسفوند (۱۳۹۷) نیز در مطالعه‌ای که انجام دادند، تعداد ۱۶ روش برآورد تبخیرتعرق مرجع را با روش فائو پنمن ـ مانتیث مقایسه کردند. در تحقیق ایشان نیز بیش‌برآوردی روش هارگریوز ـ سامانی در اقلیم‌های نیمه‌مرطوب، مرطوب، و بسیارمرطوب مشخص شد.

تحقیقات مشابه دیگری نیز در خارج از کشور صورت گرفته که نتایج آنها نشان‌دهنده بیش‌برآوردی روش هارگریوز ـ سامانی در مقایسه با روش و مبنای اندازه‌گیری در مناطق مرطوب بوده است. از جمله این تحقیقات می‌توان به مطالعات Jensen et al. (1990)، Amatya et al. (1995)، Itenfisu et al. (2003)، Temesgen et al. (2005) و Trajkovic (2007) اشاره کرد، که در تمامی این مطالعات به مسئله بیش‌برآوردی رابطه هارگریوز ـ سامانی در شرایط مرطوب اشاره شده است.

همچنین برخی از محققین در فعالیت‌های خود سعی در اصلاح این رابطه داشته‌اند. از آن جمله می‌توان به مطالعه شریفان و همکاران (۱۳۹۱) اشاره کرد. در مطالعه‌ای که توسط آنها صورت پذیرفت، ضریب اصلاحی به منظور تعدیل برآوردهای معادله هارگریوز ـ سامانی ارائه و بدین صورت تا حد زیادی بیش‌برآوردی این رابطه برای منطقه گرگان تعدیل شد. در مطالعه‌ای دیگر جلالی و همکاران (۱۴۰۰) به منظور بهبود برآوردهای روش هارگریوز ـ سامانی، با ارئه یک رابطه تصحیح دما نسبت به ارتفاع از سطح دریا، علمکرد این رابطه در برآورد میزان تبخیرتعرق پتانسیل را تا ۱۴٪ بهبود بخشیدند. از کارهای دیگری که در این زمینه در خارج از کشور صورت گرفته می‌توان به پژوهش‌های Allen (1993) و Droogers and Allen (2002) اشاره کرد. بنا بر مطالعه Allen (1993)، رابطه هارگریوز ـ سامانی به

صورت رابطه (۱۲) اصلاح و ارائه گردید: (Hargreaves and Allen, 2003)

$$ET_o = 0.0029\ R_a\ dT^{0.4}\ (T_C + 20)$$ رابطه ۱۲)

در اینجا صرفا ضرایب دستخوش تغییرات شده و همچنان تأثیر شرایط رطوبتی محیط در آن لحاظ نشده است.

در نهایت پس از بررسی این دسته از مطالعات صورت‌گرفته، پژوهش حاضر به دنبال آن است تا با اعمال شرایط رطوبتی در معادله هارگریوز ـ سامانی، تأثیر آن در مقدار برآوردهای تبخیرتعرق مرجع را بررسی نماید.

روش‌شناسی پژوهش

الف) ارائه رابطه تصحیح شرایط رطوبتی:

در پژوهش حاضر به منظور اعمال شرایط رطوبتی در معادله تبخیرتعرق هارگریوز ـ سامانی، ابتدا ضریب KT با استفاده از رابطه (۸) و بر مبنای رطوبت نسبی محاسبه و پس از آن با اعمال KT در رابطه (۹) مقدار تبخیرتعرق مرجع به روش هارگریوز ـ سامانی و با تأثیرپذیری از شرایط رطوبتی منطقه محاسبه خواهد شد. به منظور ارجاع راحت‌تر به این روش، عبارت Harg-Mod به نتایج حاصل از این روش اطلاق خواهد شد.

همچنین به منظور مشاهده مقایسه صورت گرفته، تبخیرتعرق مرجع به دو روش دیگر یعنی روش معروف هارگریوز ـ سامانی (رابطه ۱۰) و روش هارگریوز ـ سامانی اصلاح شده توسط Allen (۱۹۹۳) (رابطه ۱۱) محاسبه خواهد شد. به نتایج حاصل از این دو روش نیز به ترتیب با نام‌های Harg و Allen ارجاع می‌شود.

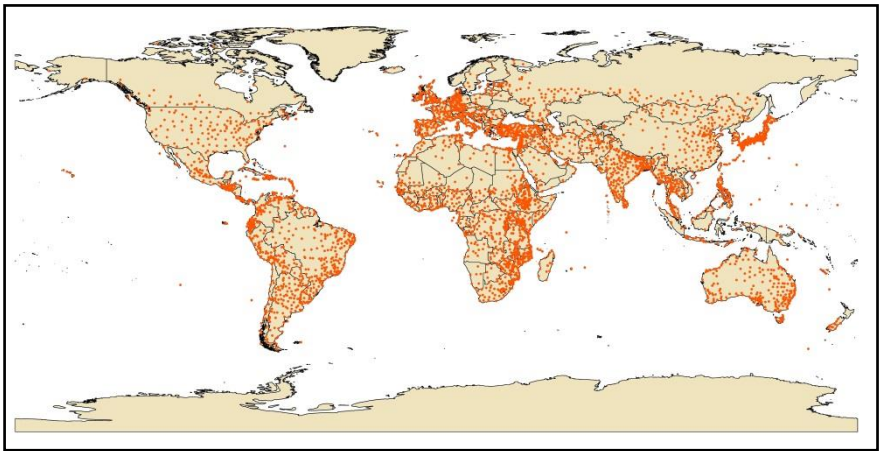
در نهایت به منظور مقایسه کلی نتایج، تبخیرتعرق مرجع به روش فائو پنمن ـ مانتیث برای تمام نقاط مورد مطالعه محاسبه و هر یک از سه روش ذکر شده با این روش مبنا مقایسه خواهند شد. رابطه (۱۳) صورت کلی روش فائو پنمن ـ مانتیث را نشان می‌دهد.

$$ET_o = \frac{0.408\ \Delta\ (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_C + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$ رابطه ۱۳)

که در رابطه فوق ETo تبخیرتعرق مرجع (mm/day)، Δ شیب نمودار فشاربخار (KPa/ºC)، Rn تابش خالص ورودی (MJ/m2.day)، G شار گرمایی زمین (MJ/m2.day)، γ ضریب سایکرومتری (KPa/ºC)، TC میانگین روزانه دمای هوا در تراز ۲ متر (ºC)، u2 میانگین روزانه سرعت باد در تراز ۲ متر (m/s)، es فشار بخار اشباع (KPa) و ea فشار بخار واقعی (KPa) می‌باشند. این معادله به تفضیل طی گزارش شماره ۵۶ بخش آبیاری و زهکشی فائو منتشر شده است (Allen et al., 1998).

ب) منطقه مورد مطالعه:

ایستگاه‌های مورد مطاله در این پژوهش تعداد ۴۱۶۹ ایستگاه موجود در نرم‌افزار CLIMWAT نسخه ۲/۰ می‌باشند. در این نرم‌افزار اطلاعات اقلیمی ماهانه شامل دمای کمینه، دمای بیشینه، رطوبت نسبی، سرعت باد، ساعات آفتابی، تابش خورشیدی و تابش فرازمینی گردآوری شده است. شکل ۱ نشان دهنده پراکندگی ایستگاه‌های مورد مطالعه در سطح کشورهای مختلف می‌باشد.



شکل ۱. پراکندگی ایستگاه‌های مورد مطالعه در سطح کشورهای مختلف (نقشه تهیه شده بر اساس داده‌های نرم‌افزار CLIMWAT 2.0)

پ) دسته‌بندی رطوبتی مناطق مورد مطالعه:

پس از محاسبه تبخیرتعرق مرجع به سه روش مورد مطالعه و نیز روش فائو پنمن ـ مانتیث به عنوان روش مبنا، مقادیر محاسبه شده با توجه به رطوبت نسبی هر ماه در هر یک از ایستگاه‌ها به سه دسته خشک و نیمه‌مرطوب ($RH \leq ٪۶۰$)، مرطوب ($٪۶۰ < RH \leq ٪۸۰$) و بسیار مرطوب ($٪۸۰ < RH$) دسته‌بندی شده و شاخص‌های آماری برای بررسی و تحلیل نتایج بدست آمده مورد استفاده قرار گرفتند.

ت) روش‌های آماری مقایسه نتایج:

شاخص‌های آماری که در این پژوهش از آنها استفاده شد عبارتند از: مقدار بیشینه (Max)، کمینه (Min)، میانگین (Avg)، ضریب همبستگی (R)، انحراف معیار (SD)، شیب خط برازش‌یافته بر داده‌ها به شرط عبور از مبدأ مختصات (S)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطای بهنجارشده (NRMSE) که تعریف ریاضی هر یک از آنها در ادامه آمده است.

$$R = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}}$$ رابطه ۱۴)

$$SD = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{N}}$$ رابطه ۱۵)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(x-y)^2}{N}}$$ رابطه ۱۶)

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{x}} \times 100$$ رابطه ۱۷)

در روابط فوق، x مقدار تبخیرتعرق محاسبه شده به روش فائو پنمن ـ مانتیث برای هر یک از ماه‌ها در هر ایستگاه، $\bar{x}$ میانگین مقادیر تبخیرتعرق محاسبه شده به روش فائو پنمن ـ مانتیث در زیردسته رطوبتی مشخص شده، y مقدار تبخیرتعرق محاسبه شده با استفاده از هر یک از سه روش مطالعه شده در هر ماه و برای هر ایستگاه، $\bar{y}$ متوسط مقادیر محاسبه شده هر یک از روش‌های مورد مطالعه در زیردسته رطوبتی مشخص شده و N تعداد داده‌های هر قسمت می‌باشد.

یافته‌های پژوهش و بحث

نتایج حاصل از این پژوهش در جدول ۱ و شکل‌های ۲ تا ۷ ارائه شده است. جدول ۱ نمایش‌دهنده نتایج آماری برای مقایسه روش‌های مورد مطالعه می‌باشد. همان‌طور که در جدول مشخص شده است، حداکثر مقدار محاسبه‌شده تبخیرتعرق مرجع با استفاده از روش PM برای هر سه دسته رطوبتی بیش از ۲۰ میلی‌متر بر روز است، حال آنکه مقادیر به‌دست آمده با استفاده از روش‌های Allen، Harg و Harg-Mod نهایتا تا ۱۰ میلی‌متر بر روز را برآورد کرده‌اند. هر چند که شرایط تبخیرتعرق شدید کمتر از ۱۰٪ مناطق مورد مطالعه را به خود اختصاص می‌دهد، با این وجود همان‌طور که مشخص است روش هارگریوز ـ سامانی توانایی خوبی در برآورد مقادیر حدی تبخیرتعرق مرجع ندارد.

نکته دیگر آنکه روش اصلاحی و مورد مطالعه یعنی Harg-Mod فقط در شرایط $RH \leq ٪۶۰$ باعث بهبود مقدار حد بالای برآورد شده و در رطوبت‌های بیش از ۶۰٪ با افزایش درصد رطوبت، مقدار بیشینه را کمتر از دو روش دیگر برآورد می‌کند.

همچنین با مقایسه مقادیر کمینه برآورد حاصل از هر سه روش مورد مطالعه، ضعف روش هارگریوز ـ سامانی در اینجا نیز نمایان می‌شود، چرا که در هر سه روش مقدار تبخیرتعرق مرجع در شرایط خاص مقداری منفی برآورد شده که عملا بی‌معنی می‌باشد.

از مقایسه مقادیر میانگین برآورد شده نیز می‌توان دریافت که هرچند روش Harg-Mod توانایی بالایی در برآورد مقادیر حدی بالا برای شرایط رطوبتی $٪۶۰ < RH$ ندارد، اما به طور متوسط نسبت به دو روش Harg و Allen برآوردهای بهتری را ارائه کرده است.

مقادیر ضرایب همبستگی، انحراف معیار و ریشه میانگین مربعات ارائه شده در جدول ۱ در شکل‌های ۳، ۵ و ۷ با استفاده از نمودار تیلور برای هر یک از دسته‌های رطوبتی با هم مقایسه شده‌اند و بحث مربوط به هر یک در همان بخش آورده شده است.

مقادیر S نیز بیانگر شیب خط برازش‌یافته بر داده‌های برآوردشده در مقایسه با مقادیر مبنا از روش PM می‌باشد. با توجه به اینکه خط برازش یافته در حالت عبور از مبدأ تعیین شده است، از این رو مقادیر شیب بدست آمده، بیانگر بیش و یا کم برآورد بودن روش مورد مطالعه می‌باشد. مقادیر مربوط به این آماره در بخش بحث شکل‌ها به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

آماره NRMSE نیز که در این مقاله ارائه شده، بیانگر نسبت خطای مدل به متوسط مقادیر مبنا می‌باشد. بر مبنای این آماره عملا روش Harg-Mod در تمام شرایط رطوبتی بهترین برآوردها را در مقایسه با میانگین مقادیر مورد انتظار ارائه داده است.

جدول ۱. مقادیر آماره‌های محاسبه شده برای هر یک از روش‌ها در هر محدوده رطوبتی

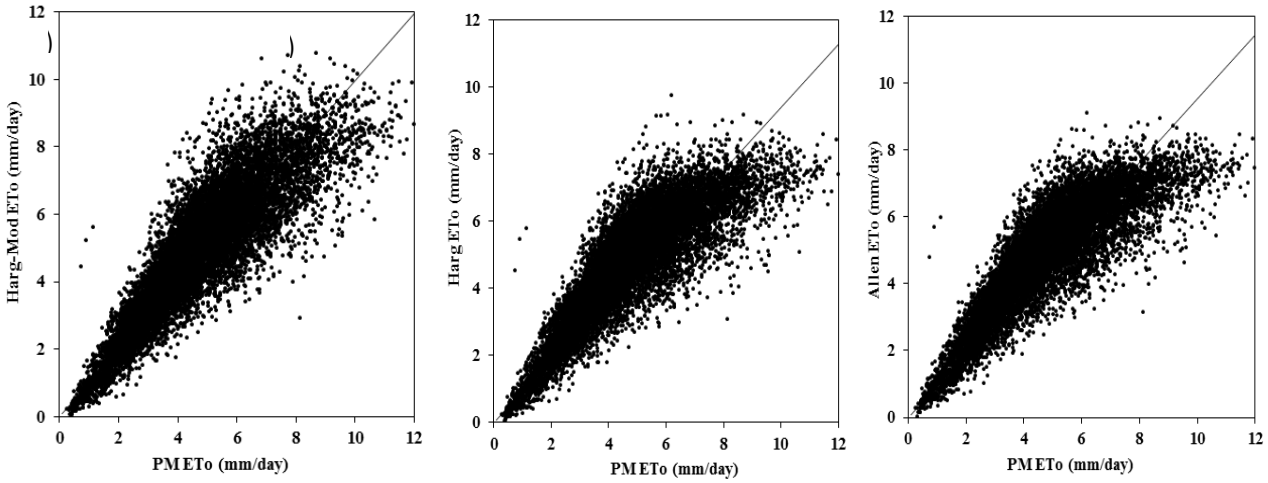
RH	روش	Max	Min	Avg	R	SD	S	RMSE	NRMSE
≤ ۶۰٪	PM	۲۷/۶۲	۰/۰۹	۴/۸۴	۱	۲/۰۰۳	۱	۰	۰
	Allen	۹/۱۱	−۰/۱۵	۴/۸۵	۰/۸۳۳	۱/۶۳۶	۰/۹۵۴	۱/۱۰۸	۲۲/۹۰
	Harg	۹/۷۶	−۰/۲۱	۴/۷۶	۰/۸۲۸	۱/۶۷۱	۰/۹۴۱	۱/۱۲۶	۲۳/۲۶
	Harg-Mod	۱۰/۷۶	−۰/۲۱	۴/۹۸	۰/۸۵۲	۱/۸۹۹	۰/۹۹۷	۱/۰۷۶	۲۲/۲۲
۶۰٪ < RH ≤ ۸۰٪	PM	۲۷/۷۶	۰/۰۲	۳/۲۴	۱	۱/۳۶۲	۱	۰	۰
	Allen	۸/۷۲	−۰/۴۳	۳/۸۱	۰/۸۵۷	۱/۵۲۹	۱/۱۴۴	۰/۹۷۴	۳۰/۰۵
	Harg	۹/۳۰	−۰/۵۴	۳/۶۲	۰/۸۴۳	۱/۵۱۲	۱/۰۸۹	۰/۹۰۲	۲۷/۸۲
	Harg-Mod	۸/۶۸	−۰/۴۲	۳/۰۴	۰/۸۴۴	۱/۳۱۰	۰/۹۱۹	۰/۷۷۴	۲۳/۸۸
۸۰٪ <	PM	۲۲/۵۲	۰	۲/۵۶	۱	۱/۳۵۱	۱	۰	۰
	Allen	۷/۷۴	−۰/۴۷	۳/۳۳	۰/۹۲۳	۱/۷۰۲	۱/۲۷۳	۱/۰۴۰	۴۰/۶۵
	Harg	۸/۱۳	−۰/۶۰	۳/۱۰	۰/۹۱۲	۱/۶۲۸	۱/۱۸۷	۰/۸۶۸	۳۳/۹۳
	Harg-Mod	۵/۹۹	−۰/۳۲	۲/۰۳	۰/۸۷۲	۱/۱۸۳	۰/۷۸۲	۰/۸۴۸	۳۳/۱۳

شکل‌های ۲ تا ۷ نتایج حاصل از پژوهش را نشان می‌دهند. این شکل‌ها به دو دسته نمودارهای ۱:۱ و نمودارهای تیلور دسته‌بندی شده و برای سه دسته رطوبتی و سه روش مورد مطالعه ارائه شده‌اند.

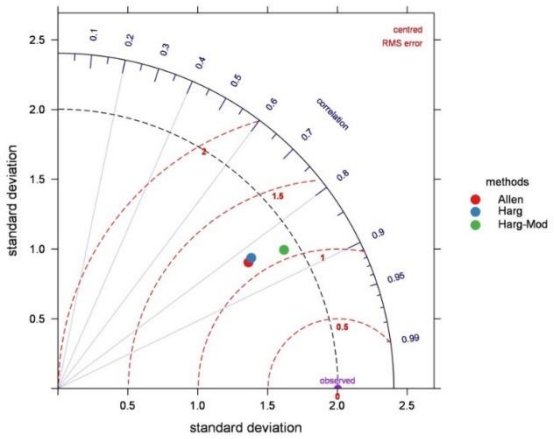
از مقایسه پنل‌های شکل ۲، می‌توان دریافت که روش Harg-Mod برای شرایط رطوبتی RH ≤ ۶۰٪ برآورد بهتری داشته است، چراکه شیب خط برازش‌یافته بر داده‌ها بسیار به خط ۱:۱ نزدیک است. این موضوع در ستون S (شیب) جدول ۱ نیز آمده است.

همچنین با مقایسه این شکل‌ها می‌توان ضعف دو روش Harg و Allen در برآورد مقادیر تبخیرتعرق بیش از ۸ میلی‌متر بر روز را مشاهده کرد، این در حالی است که روش Harg-Mod بسیار کمتر تحت تأثیر این محدودیت قرار گرفته است. از شکل ۳ نیز می‌توان دید که برآوردهای روش Harg-Mod در مقایسه با دو روش دیگر منجر به بهبود قابل توجهی شده است.

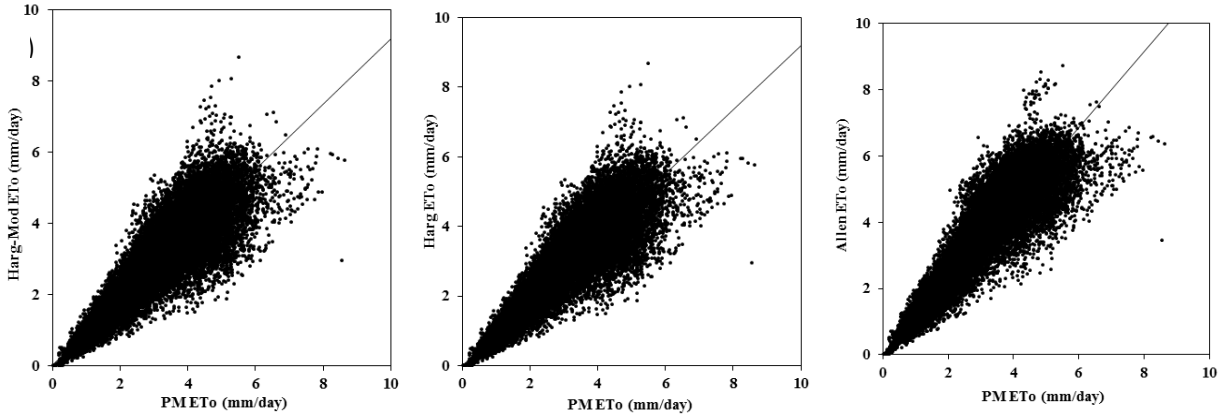
شکل‌های ۴ و ۵ مربوط به شرایط رطوبتی ۶۰٪ < RH ≤ ۸۰٪ می‌باشند. با توجه به این شکل‌ها و نیز مقادیر S از جدول ۱ روش Allen بیش‌برآورد و روش‌های Harg و Harg-Mod کم برآورد هستند. اما با این وجود در مقایسه بین دیگر پارامترهای آماری، روش Harg-Mod انحراف معیار کمتری نسبت به دو روش دیگر در مقایسه با داده‌های مبنا دارد. از این رو این روش در این شرایط رطوبتی نیز باعث بهبود برآوردها شده است.



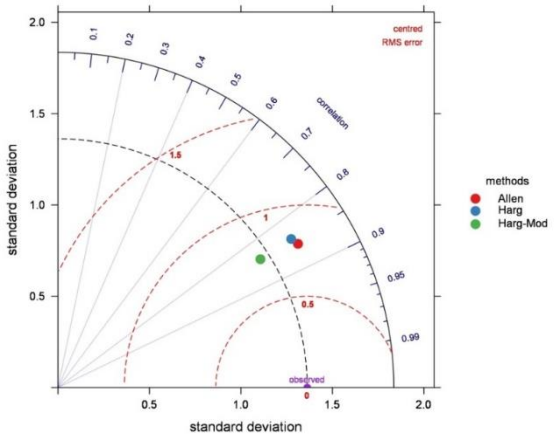
شکل ۲. برازش خطی مقادیر تبخیرتعرق مرجع برآورد شده به روش الف) Allen، ب) Harg، پ) Harg-Mod در مقایسه با مقادیر برآورد شده به روش PM برای شرایط رطوبتی RH ≤ ۶۰٪



شکل ۳. مقایسه روش‌های مورد مطالعه با استفاده از نمودار تیلور برای شرایط رطوبتی RH ≤ ۶۰٪



شکل ۴. برازش خطی مقادیر تبخیرتعرق مرجع برآورد شده به روش الف) Allen، ب) Harg، پ) Harg-Mod در مقایسه با مقادیر برآورد شده به روش PM برای شرایط رطوبتی ۶۰٪ < RH ≤ ۸۰٪

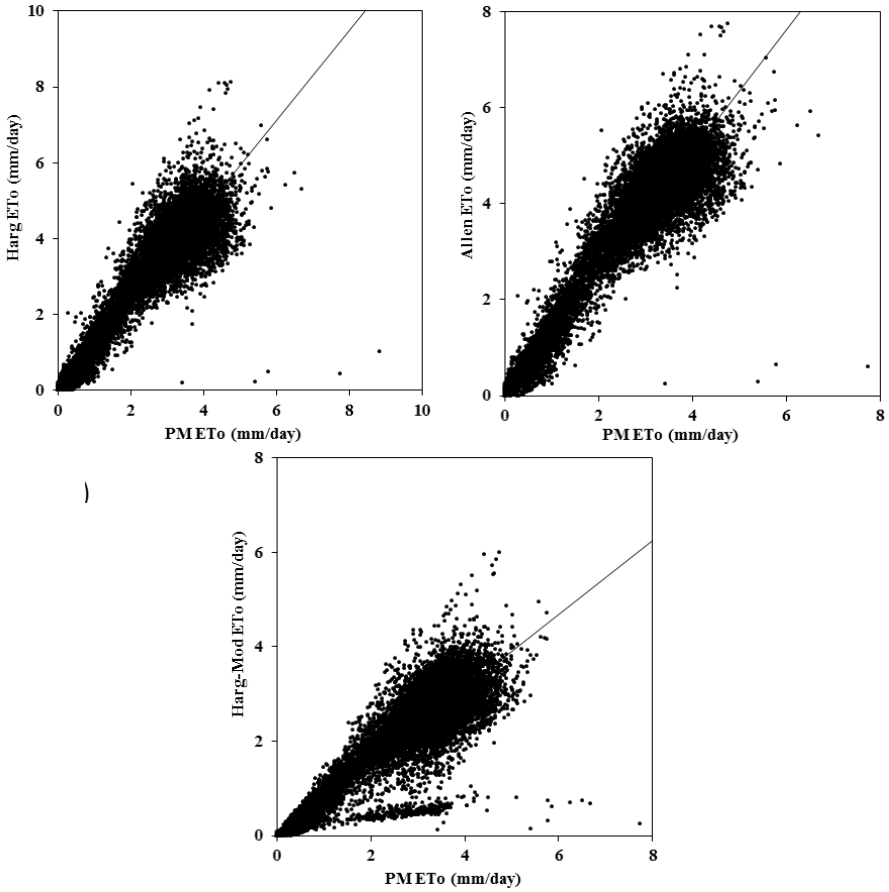


شکل ۵. مقایسه روش‌های مورد مطالعه با استفاده از نمودار تیلور برای شرایط رطوبتی ۶۰٪ < RH ≤ ۸۰٪

برای شرایط مرطوب (RH > ۸۰٪)، نتایج متناظر در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. در اینجا نیز هرچند که روش Harg-Mod برآوردهای بهتری نسبت به دو روش دیگر داشته است، اما آماره‌های دو روش دیگر نیز تقریبا به آماره‌های این روش نزدیک می‌باشند، با این اختلاف که روش Harg-Mod دچار کم برآورد می‌باشد، اما دو روش دیگر بیش‌برآورد دارند.

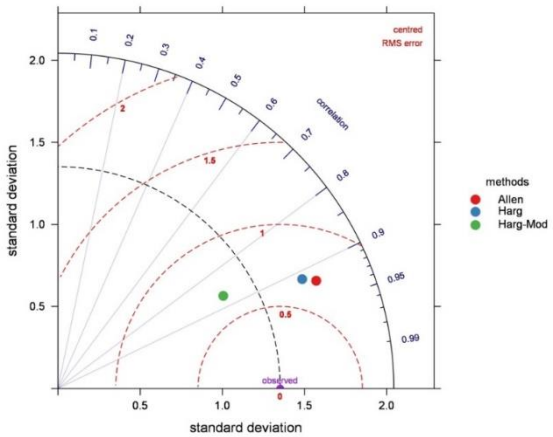
نکته قابل توجه در این شکل‌ها شاخه جدا شده از قسمت پایین شکل ۱۲ می‌باشد. این شاخه برای شرایط رطوبت نسبی ۹۹/۹٪ ایجاد شده است. این موضوع ضعف روش Harg-Mod را در چنین شرایط رطوبتی نشان می‌دهد.

)



)

شکل ۶. برازش خطی مقادیر تبخیرتعرق مرجع برآورد شده به روش الف) Allen، ب) Harg، پ) Harg-Mod در مقایسه با مقادیر برآورد شده به روش PM برای شرایط رطوبتی RH < ٪۸۰



شکل ۷. مقایسه روش‌های مورد مطالعه با استفاده از نمودار تیلور برای شرایط رطوبتی RH < ٪۸۰

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش ضعف روش هارگریوز ـ سامانی در برآورد تبخیرتعرق پتانسیل برای شرایط فرین را نشان می‌دهد. همچنین روش اصلاحی ارائه شده نشان داد، با استفاده از گستره وسیعی از داده‌های هواشناسی می‌توان روابط برآورد تبخیرتعرق را برای شرایط متنوع اقلیمی اصلاح کرد.

بر همین اساس، با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش دو نکته را می‌توان برای بهبود برآورد تبخیرتعرق مرجع در شرایط کمبود داده پیشنهاد کرد. مورد اول اینکه این پژوهش به‌خوبی نشان داد که با تغییر ضریب رطوبتی در رابطه هارگریوز ـ سامانی می‌توان نتایج

حاصل از آن را بهبود بخشید، پس می‌توان با ارائه چند ضریب برای شراط رطوبتی مختلف، صرفاً ضریب و یا ضرایب و توان‌های ارائه شده در رابطه اولیه هارگریوز ـ سامانی را تغییر داد و باعث بهبود برآوردهای حاصل از آن شد.

این موضوع دقیقاً شبیه به کاری است که توسط Allen (1993) انجام شده است. اما باید توجه داشت برخی از ضرایب در روش هارگریوز ـ سامانی نباید دستخوش تغییر شوند. مثلا مقدار ۱۷/۸ در تصحیح دما از رابطه تبدیل دمای در مقیاس درجه فارنهایت به مقیاس درجه سلسیوس ایجاد شده و اگر دقت لازم در تغییر این ضرایب اعمال نشود، ممکن است این مقدار ناآگاهانه توسط محقق تغییر داده شود، همچون کاری که توسط Allen انجام شده است.

مورد دوم نیز در رابطه با واسنجی رابطه‌ای بسته به شرایط رطوبتی و شرایط بادی مختلف برای طیف بزرگی از انواع حالت‌های ممکن می‌باشد، چراکه نقاط اصلی ضعف رابطه هارگریوز ـ سامانی، برآورد تبخیرتعرق مرجع در شرایط خاص رطوبتی و بادی می‌باشد.

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

منابع

جلالی، زهرا؛ بختیاری، بهرام؛ قادری، کورش؛ و گلستانی، سودابه. (۱۴۰۰). مدل هارگریوز ـ سامانی تعدیل یافته بر مبنای ارتفاع در مناطق مرتفع ایران .*تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۷ (۳): ۲۴۸ ـ ۲۶۷.

شریفان، حسین؛ دهقانی، امیراحمد؛ و کریمی‌راد، ایمان (۱۳۹۱). ارائه ضریب اصلاحی برای روش هارگریوز ـ سامانی به منظور برآورد تبخیر ـ تعرق گیاه مرجع (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک گرگان). *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۱۹(۳): ۲۳۵-۲۲۷.

علیزاده، امین؛ میرشاهی، بابک؛ هاشمی‌نیا، سید مجید؛ و ثنایی‌نژاد، سید حسین (۱۳۸۰). بررسی دقت و عملکرد تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه شده به روش هارگریوز – سامانی و تشتک تبخیر در ایستگاههای سینوپتیک استان خراسان. *نیوار*: ۴۲ ـ ۴۳: ۵۱ ـ ۷۰.

قمرنیا، هوشنگ؛ و یوسفوند، مریم (۱۳۹۷). مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق مرجع بر اساس روش‌های تابش خورشیدی در اقلیم‌های مختلف ایران. *مدیریت آب و آبیاری*، ۸ (۲): ۲۵۱-۲۳۷.

REFERENCES

Alizadeh, A., Mirshahi, B., Hasheminia, S. M., Sanaeinezhad, S. H. (2001). Accuracy and behavior of Hargreaves-Samani and evaporation pan methods in estimation of evapotranspiration in Khorasan. Nivar, 42-43, 51-70. (In Persian)

Allen, R. G. (1993). Evaluation of a temperature difference method forcomputing grass reference evapotranspiration. Rep. submitted to FAO, Rome. From: Hargreaves, G. H., & Allen, R. G. (2003). History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 56(97), e156.

Amatya, D. M., Skaggs, R. W., & Gregory, J. D. (1995). Comparison of methods for estimating REF-ET. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 121(6), 427-435. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1995)121:6(427)

Droogers, P., and Allen, R. G. (2002). Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. Irrigation and Drainage Systems, 16(1), 33-45. https://doi.org/10.1023/A:1015508322413

Ghamarnia, H., and Yosefvand, M. (2018). Comparison of different methods of reference evapotrantranspiration based on radiation methods in different Iran climate condition. Water and Irrigation Management, 8(2), 237-251. doi: 10.22059/jwim.2018.266842.636. (In Persian)

Hargreaves, G. H. (1977). Discussion of "Consumptive use of water and irrigation water requirements". Journal of the Irrigation and Drainage Division, 103(2), 287-290. https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001153

Hargreaves, G. H., & Allen, R. G. (2003). History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 129(1), 53-63.

Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1982). Estimating potential evapotranspiration. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 108(3), 225-230.

Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agriculture, 1(2), 96-99.

Hargreaves, G. L., Hargreaves, G. H., & Riley, J. P. (1985). Irrigation water requirements for Senegal River basin. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 111(3), 265-275. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1985)111:3(265)

Itenfisu, D., Elliott, R. L., Allen, R. G., & Walter, I. A. (2003). Comparison of reference evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 129(6), 440-448. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:6(440)

Jensen, M. E., Burman, R. D., & Allen, R. G. (1990). Evapotranspiration and irrigation water requirements: ASCE manual No. 70. New York, NY.

Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. In Symposia of the society for experimental biology (Vol. 19, pp. 205-234). Cambridge University Press (CUP) Cambridge.

Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 193(1032), 120-145.

Sharifan, H., Dehghani, A. A., & Karimirad, I. (2013). Correction factor for Hargreaves-Samani method to estimate ETo (Case study: Gorgan synoptic station). Journal of Water and Soil Conservation, 19(3), 227-235. https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222069.1391.19.3.13.8. (In Persian)

Temesgen, B., Eching, S., Davidoff, B., & Frame, K. (2005). Comparison of some reference evapotranspiration equations for California. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 131(1), 73-84. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(73)

Trajkovic, S. (2007). Hargreaves versus Penman-Monteith under humid conditions. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 133(1), 38-42. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:1(38)