



دانشگاه گواران و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و پنجم، شماره چهارم، ۱۳۹۷

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2018.14361.2910

ارزیابی دقت بیست مدل تجربی بر آورد تبخیر- تعرق مرجع مناطق ساحلی در اقلیم‌های مختلف

*خلیل قربانی^۱، توحید علیقلی‌نیا^۲ و نگار رسولی‌مجد^۳

^۱دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب،

^۲دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

تاریخ دریافت: ۹۶/۹/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۳/۲۹

چکیده

سابقه و هدف: دقیق‌ترین روش برآورد تبخیر- تعرق، استفاده از لایسیمتر وزنی است، اما از آن‌جا که احداث این نوع لایسیمتر هزینه بسیار زیادی را به همراه دارد، بیش‌تر از روش‌های تجربی برای برآورد تبخیر- تعرق استفاده می‌شود و نتایج آن با روش مرجع برآورد تبخیر- تعرق (فائو پنمن- مانیتث) مقایسه می‌شود. بنابراین هدف اصلی پژوهش حاضر، مقایسه دقت ۲۰ مدل تجربی برآورد تبخیر- تعرق مرجع و ارائه بهترین روش تجربی در شهرستان‌های رشت، ساری و گرگان در شمال ایران و در نوار ساحلی دریای خزر می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، مطالعه تطبیقی بین روش فائو پنمن- مانیتث با ۲۰ روش تجربی برآورد تبخیر- تعرق پتانسیل در یک دوره زمانی ۱۰ ساله از سال ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۵ در ایستگاه‌های رشت، ساری و گرگان در نوار ساحلی دریای خزر صورت گرفت. ایستگاه‌ها به دلیل تنوع اقلیمی از اقلیم مرطوب تا مدیترانه‌ای انتخاب شدند. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای میانگین (MAE) و درصد خطای تخمین (PE) برای ارزیابی دقت این روش‌ها مورد استفاده قرار گرفتند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد مقادیر روزانه تبخیر- تعرق به‌دست آمده از روش روزانی به مقادیر به‌دست آمده با روش فائو پنمن- مانیتث نزدیک‌تر بود به‌طوری‌که برای مدل مذکور مقادیر شاخص‌های RMSE، MAE و PE به‌ترتیب با ۰/۷۷، ۰/۵۴ میلی‌متر بر روز و ۲۱/۶۰٪ در ایستگاه رشت، ۰/۸، ۰/۳۹- میلی‌متر بر روز و ۹/۴۰٪ در ایستگاه ساری و ۰/۹۹، ۰/۴۲- میلی‌متر بر روز و ۹/۸۸٪ در ایستگاه گرگان، به‌دست آمدند. همچنین نتایج بیانگر عملکرد پایین مدل رومانکو می‌باشد. در مجموع در اقلیم‌های مورد مطالعه، مدل‌های روزانی و همکاران، برتی و همکاران، هارگریوزسامانی، اسکندل، ایرماک و همچنین مدل والیتزانس عملکرد مطلوب‌تری در برآورد تبخیر تعرق مرجع داشتند.

* مسئول مکاتبه: ghorbani.khalil@yahoo.com

نتیجه‌گیری: این مطالعه نشان داد که دقت مدل‌ها در برآورد تبخیر-تعرق نسبت به مدل مینا (فائو پنمن-مانتیت) در ایستگاه رشت بیش از ساری و در ایستگاه ساری بیش از گرگان می‌یابد. در بین معادلات مورد بررسی، معادلات بر پایه انتقال جرم مانند ترابرت و ماهرینگر، دارای عملکرد نسبی نامطلوبی در بین مناطق ساحلی می‌باشند. بنابراین در هنگام استفاده از مدل‌های تجربی و کاربرد آن‌ها در برآورد تبخیر-تعرق باید به این نکته توجه کرد که این مدل‌ها در شرایط اقلیمی متفاوت می‌توانند نتایج متغیری از خود نشان دهند و الزاماً هیچ مدلی به‌طور قطعی نمی‌تواند به‌عنوان مبنای در تمامی مناطق ساحلی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر-تعرق مرجع، روش‌های تجربی، فائو-پنمن-مانتیت، مناطق ساحلی

مقدمه

تبخیر-تعرق یکی از مهم‌ترین پارامترها برای بررسی پدیده‌های هیدرولوژیک بوده که می‌تواند به‌عنوان یک عامل مؤثر در مدیریت آب کشاورزی مطرح شود. آب آبیاری معمولاً توسط تبخیر-تعرق گیاه مرجع و ضریب گیاهی مربوطه تحت شرایط مختلف (شرایط آب و هوایی، طول دوره رشد و شرایط آبیاری) به‌دست می‌آید (۷). طی نیم‌قرن اخیر روش‌های تجربی زیادی توسط پژوهشگران برای برآورد ET_0 در سراسر جهان ارائه شده است. این روش‌ها در پنج گروه فائو-پنمن-مانتیت (۱)، دمایی (۱۲) و تابشی، انتقال جرم و تشتک تبخیر طبقه‌بندی می‌شوند (۳۱).

دقیق‌ترین روش برآورد تبخیر-تعرق، استفاده از لایسیمتر وزنی است، اما از آن‌جا که احداث این نوع لایسیمتر هزینه بسیار زیادی را به همراه دارد و از طرفی آمار این روش معمولاً در اختیار نمی‌باشد، بیش‌تر از روش‌های تجربی برای برآورد تبخیر-تعرق و از روش استاندارد برای مقایسه نتایج با آن استفاده می‌شود. مطالعاتی که توسط پژوهشگران در نقاط مختلف جهان صورت گرفته، مدل فائو-پنمن-مانتیت را به‌عنوان دقیق‌ترین روش در مقایسه با

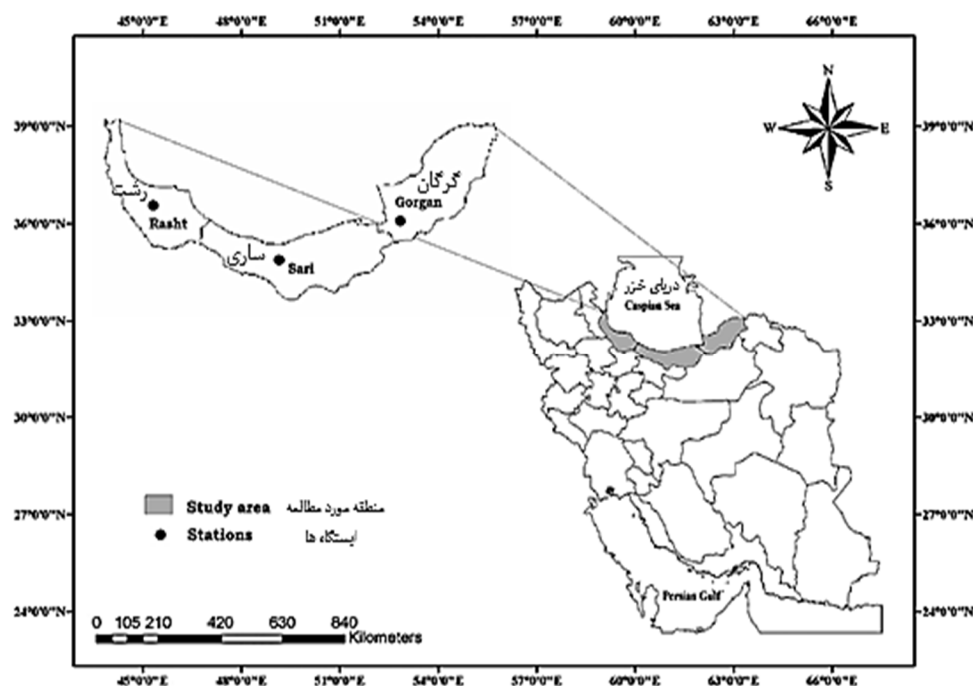
داده‌های اندازه‌گیری شده لایسیمتری تحت شرایط آب و هوایی مختلف ارائه و معرفی نموده‌اند (۱۳، ۱۵، ۲۰ و ۴). این روش در ایران نیز توسط پژوهشگرانی چون ضیاء تباراحمدی (۱۳۷۴) برای ترسیم خطوط هم تبخیر-تعرق پتانسیل ماهانه و سالانه در مازندران و نیکبخت و همکاران (۱۳۸۰) برای مقایسه آن با چند روش دیگر برآورد ET_0 در ایستگاه سینوپتیک مهرآباد تهران و شریفان و همکاران (۱۳۸۴) به‌منظور مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر-تعرق مرجع (ترکیبی و دمایی) با روش استاندارد و بررسی اثرات خشکی هوا بر آن مورد استفاده قرار گرفته است (۴۲، ۲۵ و ۳۲). علیزاده و همکاران (۱۳۸۰) دقت برآورد مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل در استان خراسان را با روش‌های هارگریوز-سامانی و تشتک تبخیر محاسبه کرده و به این نتیجه رسیدند که روش تشتک تبخیر علی‌رغم این‌که تابع داده‌های متعدد هواشناسی است، نتایج قابل‌قبولی در برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل ندارد (۳). تراجکوویچ و کولاکوویچ (۲۰۰۹) گزارش کردند که معادله پایه پنمن می‌تواند جایگزین مناسبی برای معادله فائو-پنمن-مانتیت در منطقه نای سدر (صربستان) باشد (۳۸). مارتینز و تپادیا (۲۰۱۰) معادله تورک را که در آن تبخیر-تعرق مرجع

هدف اصلی پژوهش حاضر، مقایسه دقت ۲۰ مدل تجربی برآورد تبخیر- تعرق مرجع و ارائه بهترین روش تجربی در شهرستان‌های رشت، ساری و گرگان در شمال ایران و در نوار ساحلی دریای خزر می‌باشد به نحوی که نتایج حاصل با آنچه از روش مینا و استاندارد فائو- پنمن- ماتیت به دست آمده، بیشترین تطابق را داشته باشد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از داده‌های ثبت شده پارامترهای هواشناسی سه ایستگاه سینوپتیک رشت، ساری و گرگان استفاده شد. دلیل انتخاب سه ایستگاه مذکور، وجود اقلیم‌های متفاوت در هر سه ایستگاه ساحلی (اقلیم مرطوب در ایستگاه رشت، اقلیم نیمه مرطوب در ایستگاه ساری و اقلیم مدیترانه‌ای در ایستگاه گرگان) بوده که این موضوع به اهمیت پژوهش در بررسی کارایی روش‌های تجربی برآورد تبخیر و تعرق در مناطق ساحلی می‌افزاید. متوسط پارامترهای روزانه هواشناسی در دوره آماری ۱۰ ساله (۱۳۸۶ تا ۱۳۹۵) برای محاسبه مقادیر تبخیر- تعرق مرجع مورد استفاده قرار گرفت. شایان ذکر است که مقادیر کمبود فشار بخار اشباع از اختلاف مابین مقادیر فشار بخار واقعی و فشار بخار اشباع محاسبه گردیده است. همچنین به دلیل عدم موجود بودن داده‌های تابش خورشیدی روزانه در ایستگاه مورد مطالعه، از رابطه آنگستروم- پرسکات جهت تخمین تابش خورشیدی استفاده گردید. شکل ۱، موقعیت محدوده مورد مطالعه و ایستگاه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد.

با استفاده از سه پارامتر دمای کمینه، دمای بیشینه و تابش خورشیدی محاسبه می‌شود برای فلوریدا آمریکا پیشنهاد کردند (۲۲). ایرماک و همکاران (۲۰۰۳) و یودر و همکاران (۲۰۰۵) معادله تورک را در شرایط محدود بودن داده‌های هواشناسی برای به دست آوردن تبخیر- تعرق مرجع در جنوب شرقی ایالات متحده آمریکا پیشنهاد کردند (۱۴ و ۴۱). جنسن و همکاران (۱۹۹۰) در بررسی ۲۰ مدل تجربی برآورد تبخیر- تعرق مرجع نشان دادند که مدل تورک بعد از معادله فائو- پنمن- ماتیت در ردیف دوم از نظر دقیق‌ترین رابطه قرار گرفت (۱۷). طبری (۲۰۱۰) بیان کرد مدل تورک بهترین مدل در اقلیم‌های مرطوب و سرد و خشک و همچنین مدل هارگریوز دقیق‌ترین مدل در اقلیم‌های مرطوب و نیمه خشک می‌باشد (۳۳). دژامان و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی ۱۶ مدل تجربی برآورد تبخیر- تعرق مرجع در حوضه رودخانه والی سنگال پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل‌های هارگریوز، هارگریوز اصلاح شده، روضانی و تراجکویچ مقدار تبخیر- تعرق مرجع را بیش‌تر از مدل استاندارد برآورد کرده و مدل‌های مک‌کینک هنسن، اودین و تورک مقدار تبخیر- تعرق مرجع را کم‌تر از مقادیر به دست آمده از رابطه استاندارد فائو- پنمن- ماتیت برآورد کردند (۹). از سایر پژوهش‌هایی که در این زمینه انجام گرفته است، می‌توان به پژوهش‌های گورکا لندراس و همکاران (۲۰۱۸)، ژاویر آلمورکس و همکاران (۲۰۱۸) و علی مختاری و همکاران (۲۰۱۸) اشاره کرد (۴، ۱۹ و ۲۴).



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه.

Figure 1. Location of study area.

روش استاندارد (رابطه ۱) و ۲۰ رابطه تجربی (رابطه‌های ۲ تا ۲۲) محاسبه شد (جدول ۱).

روابط تجربی برآورد تبخیر- تعرق مرجع: با استفاده از مقادیر روزانه پارامترهای هواشناسی، مقادیر ET_0 روزانه با روش‌های فائو- پنمن- مانیتث به‌عنوان

فائو- پنمن- مانیتث (آلن و همکاران، ۱۹۹۸) (۱)

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

کمبود فشار بخار اشباع Δ (KPa)، شیب منحنی فشار بخار اشباع γ (KPa °C⁻¹)، ضریب ثابت سایکرومتری $C_n = 9.00$ (KPa °C⁻¹)، ضریب مرجع برای باد $C_d = 0.34$ (Kg °K Kj⁻¹ day⁻¹) و ضریب باد برای گیاه مرجع (s⁻¹).

که در آن، ET_0 تبخیر- تعرق مرجع (mm day⁻¹)، R_n تابش خالص ورودی به سطح گیاه (MJ m⁻² day⁻¹)، G شار گرمای خاک (MJ m⁻² day⁻¹)، T_{mean} میانگین روزانه دمای هوا (°C)، U_2 میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری (m s⁻¹)، e_a فشار بخار اشباع (KPa)، e_d فشار بخار واقعی (KPa)، $e_a - e_d$

جدول ۱- روابط مربوط به بیست مدل تجربی برآورد تبخیر- تعرق مناطق ساحلی.

Table 1. Equations of twenty Empirical Models in Estimating Coastal Regions Reference Evapotranspiration.

| معادلات Equations | شماره Number | نام رابطه Name of equation |
|--|-----------------|--|
| $ET_o = 0.408 \times 0.00193 R_a(T_{mean} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.517}$ | 2 | ترابرت (۱۸۹۶) (۳۶) Trabert (1896) method |
| $ET_o = 0.0018 (T_{mean} + 25)^2(100 - RH)$ | 3 | روماننکو (۱۹۶۱) (۲۹) Romanenko (1961) |
| $ET_o = 0.15072 \sqrt{3.6u} (e_s - e_a)$ | 4 | ماهرینگر (۱۹۷۰) (۲۰) Mahringer (1970) |
| $ET_o = \frac{\left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 6.43(1.0 + 0.53u_2)(e_s - e_a) \right]}{\lambda}$ | 5 | روش ترکیبی پنمن (۱۹۶۳) (۲۷) Penman (1948) combination method |
| $ET_o = 16 \frac{T_{mean}}{RH}$ | 6 | اسکندل (۱۹۶۷) (۳۱) Schendel (1967) |
| $ET_o = 0.7 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda}$ | 7 | مک‌کینک (۱۹۵۷): اصلاح شده توسط هنسن (۱۹۸۴) (۲۱ و ۱۲) Makkink (1967) modified Hansen (1984) |
| $ET_o = 0.408 \times 0.0023 R_a(T_{mean} + 17.8) (T_{max} - T_{min})^{0.5}$ | 8 | هارگریوز-سامانی (۱۹۸۵) (۱۳) Hargreaves and Samani (1985) |
| $ET_o = 0.408 \times 0.0030 R_a(T_{mean} + 20)(T_{max} - T_{min})^{0.4}$ | 9 | دروگرز و آلن ۱ (۲۰۰۲) (۱۰) Droogers and Allen 1 (2002) |
| $ET_o = 0.408 \times 0.0025 R_a(T_{mean} + 16.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5}$ | 10 | دروگرز و آلن ۲ (۲۰۰۲) (۱۰) Droogers and Allen 2 (2002) |
| $ET_o = 0.408 \times 0.0013 R_a(T_{mean} + 17)(T_{max} - T_{min} - 0.0123P)^{0.76}$ | 11 | دروگرز و آلن ۳ (۲۰۰۲) (۹) Droogers and Allen 3 (2002) |
| $ET_o = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda} - 0.12$ | 12 | مک‌کینک (۱۹۵۷): ارائه شده توسط آلن (۲۰۰۳) (۲۰ و ۲) Makkink (1957) method described by Allen (2003) |
| $ET_o = -0.611 + 0.149R_s + 0.079T_a$ | 13 | ایرماک و همکاران (۲۰۰۳) (۱۴) Imak et al. (2003) |
| $ET_o = 4.5 \left[1 + \left(\frac{T_{mean}}{25} \right) \right]^2 \left(1 - \frac{e_a}{e_s} \right)$ | 14 | روماننکو (۱۹۶۱): اصلاح شده توسط اودین و همکاران (۲۰۰۵) (۲۹ و ۲۶) Romanenko's equation (1961) modified by Oudin et al., 2005 |
| $ET_o = 0.408 \times 0.0023 R_a(T_{mean} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.424}$ | 15 | تراجکویچ (۲۰۰۷) (۳۷) Trajkovic (2007) |
| $ET_o = -0.642 + 0.174R_s + 0.0353T_a$ | 16 | طبری و همکاران ۱ (۲۰۱۳) (۳۴) Tabari et al. 1 (2013) |
| $ET_o = -0.478 + 0.156R_s - 0.0112T_{max} + 0.0733T_{min}$ | 17 | طبری و همکاران ۲ (۲۰۱۳) (۳۴) Tabari et al. 2 (2013) |
| $ET_o = 0.408 \times 0.0023 R_a (T_{mean} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5}(0.817 + 0.00022Z)$ | 18 | روضانی و همکاران (۲۰۱۲) (۲۸) Tabari et al. 3 (2013) |
| $ET_o = 0.00668R_a((T_{mean} + 9.5)(T_{max} - T_{min}))^{0.5} - 0.0696 (T_{max} - T_{min}) - 0.024(T_{mean} + 20)(1 - RH)/100 - 0.00455R_a (T_{max} - T_{dew})^{0.5} + 0.984 (T_{mean} + 17)(1.03 + 0.00055 (T_{max} - T_{min})^2 - RH/100)$ | 19 | والیانزاس ۱ (۲۰۱۳) (۳۹) Valiantzas 1 (2013) |
| $T_{dew} = \frac{116.91 + 237.3 \ln(e_a)}{16.78 - \ln(e_a)}$ | 20 | جهت محاسبه T_{dew} موجود در رابطه (۱۹) For estimating T_{dew} in equation (19) |
| $ET_o = 0.051(1 - \alpha)R_s(T_{mean} + 9.5)^{0.5} - 2.4 \left(\frac{R_s}{R_a} \right)^2 + 0.048(T_{mean} + 20) \left(1 - \frac{RH}{100} \right) (0.5 + 0.536u_2) + 0.00012Z$ | 21 | والیانزاس ۲ (۲۰۱۳) (۳۹) Valiantzas 2 (2013) |
| $ET_o = 0.408 \times 0.00193 R_a(T_{mean} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.517}$ | 22 | برتی و همکاران (۲۰۱۴) (هارگریوز اصلاح شده) (۶) Berti et al. (2014): Modified Hargreaves |

که در آن‌ها، n تعداد مشاهدات، O_i مقدار ET_0 واقعی محاسبه شده با روش فائو-پنمن-مانتیت، P_i مقدار ET_0 برآورد شده با دیگر روابط تجربی ارائه شده در این پژوهش، O_{av} میانگین مقادیر ET_0 محاسبه شده با روش فائو-پنمن-مانتیت (متوسط O_i ها) و P_{av} میانگین مقادیر ET_0 محاسبه شده با دیگر روابط (متوسط P_i ها) می‌باشند (۵).

نتایج و بحث

مقایسه دقت معادلات برآورد تبخیر-تعرق مرجع: شاخص‌های عملکرد آماری مورد استفاده جهت مقایسه مقادیر حاصل از برآورد تبخیر-تعرق مرجع روزانه با استفاده از ۲۰ مدل تجربی با مقادیر به دست آمده از رابطه استاندارد فائو-پنمن-مانتیت در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین برای تعیین بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی مطابق آنچه که در قسمت مواد و روش‌ها ارائه گردید، در این پژوهش به بررسی کارایی و دقت ۲۰ مدل برآورد تبخیر و تعرق مرجع در سه ایستگاه ساحلی رشت، ساری و گرگان پرداخته شده است. نتایج بررسی‌ها در جدول ۲ بر اساس سه شاخص ارزیابی RMSE، MAE و PE ارائه گردیده است. همچنین شکل‌های ۲ تا ۴ نیز به صورت گرافیکی تغییرات هر سه شاخص ذکر شده را برای ۲۰ روش مورد مطالعه در ۳ ایستگاه رشت، ساری و گرگان نشان داده و مقایسه می‌کند.

در رابطه‌های ۲ تا ۲۲، e_s و e_a بر حسب KPa می‌باشند، به جز دو رابطه ۲ و ۴ که با واحد hpa بیان می‌شوند. ضریب ۰/۴۰۸ در رابطه‌های ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۵، ۱۸ و ۲۲ برای تبدیل مقادیر تابش از $MJ m^{-2} day^{-1}$ به $mm day^{-1}$ می‌باشد. در تمامی روابط به جز رابطه ۳ ($mm month^{-1}$) مقدار ET_0 بر حسب $mm day^{-1}$ می‌باشد. همچنین در رابطه ۲۱، مقدار α برابر ۰/۲۵ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

شاخص‌های ارزیابی: همچنان که پیش‌تر نیز اشاره شد رابطه فائو-پنمن-مانتیت مقدار تبخیر-تعرق مرجع را با دقت بالایی محاسبه می‌نماید. بنابراین این روش به عنوان روش استاندارد در نظر گرفته شد و مقادیر تبخیر-تعرق مرجع برآورد شده با سایر روش‌ها با روش فائو-پنمن-مانتیت توسط رگرسیون خطی مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای میانگین (ME) و درصد خطای تخمین (PE) محاسبه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. این شاخص‌ها در رابطه‌های ۲۳ تا ۲۵ ارائه شده‌اند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (23)$$

$$ME = n^{-1} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (24)$$

$$PE = \left| \frac{P_{av} - O_{av}}{O_{av}} \right| \times \%100 \quad (25)$$

جدول ۲- نتایج حاصل از ارزیابی دقت ۲۰ مدل برآورد تبخیر و تعرق مرجع.

Table 2. The results of assessment of 20 evapotranspiration models.

| گرگان Gorgan | | | ساری Sari | | | رشت Rasht | | | ایستگاه |
|-----------------|-------|-------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|--|
| RMSE | MAE | PE | RMSE | MAE | PE | RMSE | MAE | PE | معیار خطا |
| 1.28 | -0.80 | 18.75 | 1.10 | -0.76 | 18.32 | 0.56 | 0.24 | 9.63 | هارگریوز- سامانی Hargreaves-Samani |
| 1.85 | -1.37 | 32.20 | 1.75 | -1.39 | 33.51 | 0.57 | -0.17 | 6.57 | تراجکویچ Trajkovic |
| 0.99 | -0.42 | 9.88 | 0.80 | -0.39 | 9.40 | 0.77 | 0.54 | 21.60 | روضانی و همکاران Ravazzani et al. |
| 1.69 | -1.23 | 28.99 | 1.51 | -1.17 | 28.23 | 0.54 | -0.12 | 4.64 | برتی و همکاران Berti et al. |
| 1.36 | 1.01 | 23.80 | 1.30 | -0.26 | 6.30 | 1.08 | 0.78 | 30.91 | اسکندل Schende |
| 4.69 | -3.99 | 93.79 | 4.64 | -3.93 | 94.42 | 2.88 | -2.45 | 97.44 | ترابرت Trabert |
| 1.60 | -0.84 | 19.74 | 1.43 | -0.30 | 7.14 | 1.07 | -0.37 | 14.81 | پنمن Penman |
| 10.89 | 10.18 | 239.6 | 7.30 | 5.07 | 121.8 | 10.17 | 9.44 | 324.8 | روماننکو Romanenko |
| 2.25 | 1.64 | 38.55 | 1.86 | 1.30 | 31.19 | 1.13 | 0.33 | 13.03 | ایرماک و همکاران Irmak et al. |
| 4.27 | -3.65 | 85.85 | 4.27 | -3.63 | 87.28 | 2.78 | -2.37 | 94.17 | ماهرینگر Mahringer |
| 4.38 | -3.68 | 86.59 | 4.29 | -3.70 | 88.97 | 2.51 | -2.11 | 83.95 | اودین و همکاران Oudin et al. |
| 3.54 | -2.94 | 69.13 | 3.45 | -2.85 | 68.45 | 1.76 | -1.49 | 59.10 | هنسن Hansen |
| 3.83 | -3.23 | 75.92 | 3.74 | -3.14 | 75.40 | 2.02 | -1.74 | 69.12 | آلن Allen |
| 2.47 | -2.03 | 47.79 | 2.41 | -2.11 | 50.68 | 1.45 | -1.21 | 48.21 | والیانزاس ۱ Valiantzas 1 |
| 1.96 | -1.64 | 38.55 | 1.79 | -1.50 | 36.09 | 1.71 | -1.44 | 57.35 | والیانزاس ۲ Valiantzas 2 |
| 2.46 | 2.13 | 24.81 | 2.40 | 1.02 | 7.34 | 2.20 | 1.91 | 31.91 | دروگرز و آلن ۱ Droogers and Allen 1 |
| 3.40 | 3.17 | 24.92 | 3.36 | 2.56 | 7.70 | 3.21 | 3.03 | 32.00 | دروگرز و آلن ۲ Droogers and Allen 2 |
| 3.82 | 3.61 | 24.98 | 3.78 | 3.09 | 7.90 | 3.65 | 3.49 | 32.05 | دروگرز و آلن ۳ Droogers and Allen 3 |
| 3.82 | 3.31 | 39.60 | 3.49 | 3.05 | 32.25 | 2.93 | 2.40 | 14.17 | طبری و همکاران ۱ Tabari et al. 1 |
| 3.33 | 2.73 | 39.55 | 2.95 | 2.40 | 32.20 | 2.25 | 1.50 | 14.05 | طبری و همکاران ۲ Tabari et al. 2 |

گزارش نمودند (۷). دیگر معادلات انتقال جرم شامل روماننکو و روماننکو اصلاح‌شده توسط اودین و همکاران بودند. معادله روماننکو عملکرد ضعیفی در برآورد تبخیر- تعرق مرجع داشت به طوری که در مطابق هر سه شاخص ارزیابی در هر سه ایستگاه به عنوان بدترین مدل در برآورد تبخیر- تعرق در بین سایر مدل‌ها می‌باشد. این معادله در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک بهتر از اقلیم‌های مرطوب قادر به تخمین تبخیر- تعرق مرجع می‌باشد (۸). گوندالیا و دولاکیا (۲۰۱۳) در پژوهشی دقت ضعیف معادله روماننکو را در ایستگاه هواشناسی جونقباد در ایالت گوجرات هندوستان تأیید کرده بودند (۱۱). با این حال معادله اصلاح‌شده روماننکو توسط اودین و همکاران، دقت بیش‌تری نسبت به معادله اصلی روماننکو داشت. به طوری که مقادیر شاخص‌های عملکرد RMSE، ME و PE به ترتیب ۱۰/۱۷، ۹/۴۴ میلی‌متر بر روز و ۳۲۴/۸۱٪ در ایستگاه رشت، ۷/۳۰، ۵/۰۷ میلی‌متر بر روز و ۱۲۱/۸۳٪ در ایستگاه ساری و ۱۰/۱۸، ۱۰/۸۹، ۱۰/۱۸ میلی‌متر بر روز و ۲۳۹/۶٪ در ایستگاه گرگان در معادله اصلی روماننکو به ترتیب به ۲/۵۱، ۲/۱۱- میلی‌متر بر روز و ۸۳/۹۵٪ در ایستگاه رشت، ۴/۲۹، ۳/۷۰- میلی‌متر بر روز و ۸۸/۹۷٪ در ایستگاه ساری و ۴/۳۸، ۳/۶۸- میلی‌متر بر روز و ۶/۵۹٪ در ایستگاه گرگان، در فرم اصلاح‌شده آن توسط اودین و همکاران (۲۶) ارتقا یافتند.

در مقایسه مدل‌های ترکیبی نیز، دو روش پنمن و روضانی و همکاران دقت قابل‌قبول و مطلوبی را در برآورد تبخیر- تعرق در منطقه مورد مطالعه از خود نشان دادند به طوری که مدل روضانی و همکاران با مقادیر شاخص‌های عملکرد RMSE، ME و PE به ترتیب با ۰/۷۷، ۰/۵۴ میلی‌متر بر روز و ۲۱/۶۰٪

مطابق نتایج حاصل جدول ۲، نتایج حاصل از برآورد تبخیر- تعرق مرجع بر اساس ۲۰ روش ارائه شده در این پژوهش برای هر سه ایستگاه رشت، ساری و گرگان، روند تقریباً یکسانی را با اندک اختلاف در میزان برآورد تبخیر- تعرق در روش‌های همسان نشان می‌دهد. در بین روش‌های مورد بررسی، روش‌های هارگریوز، تراجوویچ، روضانی و همکاران، برتی و همکاران، اسکندل و ایرماک نسبت به سایر روش‌ها از دقت بالاتری برخوردار هستند. همچنین در مقایسه سه ایستگاه رشت، ساری و گرگان مقادیر برآورد شده از روش‌های مختلف در ایستگاه رشت نسبت به سایر ایستگاه‌ها از دقت و همبستگی بالاتری در مقایسه با روش فائو- پنمن- مانیتث برخوردار می‌باشد. هرچه از اقلیم مرطوب به سمت اقلیم مدیترانه‌ای (از سمت رشت به سمت گرگان) پیش می‌رویم، دقت مدل‌ها در برآورد تبخیر- تعرق نسبت به مدل مینا (فائو- پنمن- مانیتث) کاهش می‌یابد. در بین معادلات مورد بررسی، معادلات بر پایه انتقال جرم مانند ترابرت و ماهرینگر، دارای عملکرد نسبی نامطلوبی در بین مناطق ساحلی می‌باشند. بر اساس شاخص MAE هر دو معادله دارای کم‌برآوردی در برآورد تبخیر- تعرق مرجع بودند. نتیجه به دست آمده در عملکرد نسبی مطلوب دو روش ترابرت و ماهرینگر در منطقه ساری، در مطابقت کامل با نتایج پژوهش‌های جاکیمایکیس و همکاران (۲۰۱۳) و بوگوسکی و بندروز (۲۰۱۴) بودند. جاکیمایکیس و همکاران (۲۰۱۳) نتیجه گرفتند که مقادیر برآوردی روش ترابرت همبستگی بسیار پایینی (۰/۴۹) با مقادیر واقعی روش فائو- پنمن- مانیتث در لیتوانی داشت (۱۶). همچنین بوگوسکی و بندروز (۲۰۱۴) عملکرد ضعیف روش ماهرینگر را در کشور مجارستان

دو معادله مکینک اصلاح شده توسط هسن و آلن دارای نتایج مشابهی در برآورد تبخیر- تعرق مرجع بودند. به طوری که هر دو معادله نتایج تقریباً یکسانی را در هر سه ایستگاه از خود نشان دادند. مطابق شکل های ۲ تا ۴ نیز، نتایج حاصل از این دو مدل برای دو ایستگاه ساری و گرگان بسیار نزدیک به هم بوده که این ناشی از تأثیرپذیری مدل ها در برآورد تبخیر- تعرق مرجع از اقلیم های موجود در منطقه می باشد با این حال هر دو مدل مذکور از نظر برآورد تبخیر- تعرق و مقایسه آن با مدل مبنا دارای کم برآوردی بوده و میزان خطای آن ها در مقایسه با سایر مدل ها قابل اغماض نمی باشد. مشابه نتیجه به دست آمده، طبری (۲۰۱۰) عدم دقت بالای معادله آلن را در اقلیم های مختلف ایران مورد تأیید قرار داده بود.

در بین روش های بر پایه تابش خورشیدی (ایرماک و همکاران، طبری و همکاران ۱ و ۲) که با استفاده از رگرسیون خطی مابین پارامترهای تابش خورشیدی، متوسط دمای روزانه هوا، دمای بیشینه و کمینه روزانه و تبخیر- تعرق مرجع استخراج و ارائه شده اند، معادله ایرماک و همکاران دارای بهترین عملکرد با مقادیر شاخص های عملکرد $1/13$ ، $0/33$ میلی متر بر روز و $13/03\%$ در ایستگاه رشت، $1/86$ ، $1/30$ میلی متر بر روز و $31/19\%$ در ایستگاه ساری و $2/25$ ، $1/64$ میلی متر بر روز و $38/55\%$ در ایستگاه گرگان به ترتیب برای RMSE، ME، PE و R^2 بود.

دو معادله والیانتراس ۱ و ۲ دارای عملکرد نسبتاً مطلوب در برآورد تبخیر- تعرق مرجع در منطقه مورد مطالعه بودند. هر دو معادله دارای کم برآورد در محاسبه تبخیر- تعرق می باشند. معادله والیانتراس ۱

ایستگاه رشت، $0/8$ ، $0/39$ - میلی متر بر روز و $9/40\%$ در ایستگاه ساری و $0/99$ ، $0/42$ - میلی متر بر روز و $9/88\%$ در ایستگاه گرگان، به عنوان بهترین مدل در بین ۲۰ مدل مورد بررسی ظاهر می گردد.

معادلات بر پایه درجه حرارت شامل هارگریوز- سامانی، برتی و همکاران، روضانی و همکاران، تراجکویچ دارای کم برآوردی در برآورد تبخیر- تعرق مرجع بودند. معادله اسکندل در ایستگاه ساری دارای کم برآورد و در دو ایستگاه رشت و گرگان دارای بیش برآورد می باشد. با این حال مدل مذکور دارای دقت قابل قبولی بوده و از نظر شاخص های آماری دارای خطای کمتری نسبت در مقایسه با مدل مبنا می باشد. نتایج به دست آمده برای معادله اسکندل در منطقه ساری در لیتوانی و دوره آماری ۱۹۷۴ تا ۱۹۸۳ مشابهت دارد. به طوری که جاکیمایکیس و همکاران (۲۰۱۳) نتیجه گرفتند که کمترین اختلاف در تخمین تبخیر- تعرق مرجع، مابین مقادیر روش فائو- پنمن- ماتیت و معادله اسکندل حاصل شد. معادله دروگرز و آلن ۱ در هر سه ایستگاه دارای بیش برآورد بوده و از نظر دقت، خطای بالاتری نسبت به سایر مدل ها نشان می دهد. موهاوش (۲۰۱۱) بیان نمود که معادلات اصلاح شده هارگریوز- سامانی (همانند دروگرز و آلن ۱ و ۲) دارای دقت قابل قبولی نسبت به معادله اصلی هارگریوز می باشند (۲۳). با این حال، معادله هارگریوز- سامانی در قیاس با برخی از معادلات اصلاح شده آن شامل؛ برتی و همکاران، روضانی و همکاران، تراجکویچ و دروگرز و آلن ۳ دقت بالایی در تخمین تبخیر- تعرق مرجع داشت. مشابه نتیجه به دست آمده، سبزی پرور و طبری (۲۰۱۰) گزارش نمودند که رابطه هارگریوز- سامانی برای برآورد ET_0 در مناطق خشک و نیمه خشک شرقی کشور مناسب می باشد (۳۰).

پنمن، اسکندل و والیانتراس ۲ می‌تواند مربوط به سازگاری و هم‌خوانی اقلیم مناطق توسعه روابط با اقلیم مورد مطالعه در پژوهش حاضر و استفاده از پارامترهای بیش‌تر هواشناسی در مدل‌های مذکور باشد. همچنین نامناسب بودن رابطه رومانکو به این دلیل می‌باشد که رابطه مورد اشاره برای اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک توسعه داده شده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ضمن استفاده از ۲۰ مدل تجربی برآورد تبخیر- تعرق مرجع، به بررسی عملکرد هر یک از مدل‌ها به‌منظور ارائه بهترین مدل و دقیق‌ترین برآورد نسبت به مدل مبناء در سه ایستگاه سینوپتیک ساحلی رشت، ساری و گرگان در شمال ایران پرداخته شد. نتایج بررسی‌ها بیانگر عملکرد بالای مدل‌های روضانی و برتی و همکاران و سایر مدل‌های ترکیبی و عملکرد پایین مدل رومانکو بودند. بنابراین می‌توان گفت؛ از روش روضانی و در اولویت بعدی از سایر مدل‌های ترکیبی می‌توان به‌عنوان جایگزینی برای معادله استاندارد فائو- پنمن- مانیتث، جهت برآورد مقادیر تبخیر- تعرق مرجع در منطقه استفاده کرد. با این‌حال در استفاده از مدل‌های تجربی و کاربرد آن‌ها در برآورد تبخیر- تعرق باید به این نکته توجه کرد که این مدل‌ها در شرایط اقلیمی متفاوت می‌توانند نتایج متغیری از خود نشان دهند و الزاماً هیچ مدلی به‌طور قطعی نمی‌تواند به‌عنوان مبنا در تمامی مناطق ساحلی مورد استفاده قرار گیرد. با این‌حال پیشنهاد می‌گردد، از مدل‌های اصلاح‌شده که بتوانند دقت قابل‌قبولی را در هر اقلیمی از خود نشان دهند استفاده گردد.

برای دو ایستگاه ساری و گرگان نتایج تقریباً یکسانی را ارائه داده این در حالی است که مدل والیانتراس ۲ نتایج مشابهی را باری هر سه ایستگاه برآورد کرده است به‌طوری‌که بر اساس شاخص‌های عملکرد آماری میزان خطا در هر ایستگاه بر اساس این مدل تقریباً در یک حد بوده و کم‌تر از مدل والیانتراس ۱ می‌باشد. این نشان می‌دهد که مدل والیانتراس ۲ نسبت به برآورد تبخیر- تعرق در اقلیم‌های مختلف کارایی بهتری نسبت به مدل والیانتراس ۱ دارا می‌باشد. کیسی و زونمات- کرمانی (۲۰۱۴) در ترکیه در پژوهشی مشابه دقت بالای این رابطه را در برآورد تبخیر- تعرق مرجع تأیید کرده بودند (۱۸). همچنین ولی‌پور (۲۰۱۵) رابطه ۲۱ (مدل والیانتراس ۲) را دقیق‌ترین و مناسب‌ترین رابطه برای مناطق غربی، شرقی و شمالی ایران پیشنهاد و معرفی نمود (۴۰). نتایج مشابه در ارائه بهترین مدل تجربی برآورد تبخیر- تعرق مرجع در منطقه مرطوب ساری، در پژوهش‌های دژامان و همکاران (۲۰۱۵) نیز حاصل شده بود (۸). به‌طوری‌که ۳ مدل والیانتراس ۲، ماهرینگر و والیانتراس ۱ به‌عنوان ۳ مدل برتر از بین ۵ مدل پیشنهادی دقیق این پژوهش در مناطق ساحلی و مرطوب سنگال معرفی شده بودند.

به‌طورکلی در بررسی روش‌ها می‌توان گفت که دقت مدل‌های بر پایه انتقال جرم در برآورد تبخیر- تعرق مناطق ساحلی نسبت به سایر مدل‌ها کم‌تر بوده که این امر به‌دلیل سادگی این مدل‌ها و برآورد تبخیر- تعرق با کم‌ترین پارامتر هواشناسی در این مدل‌ها می‌باشد. دقت بالای روابط تجربی مانند روضانی، هارگرویز- سامانی، ترانکوویچ، برتی و همکاران،

منابع

1. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome. Pp: 156.
2. Allen, R.G. 2003. Crop coefficients. In: Stewart, B.A., Howell, T.A. (Eds.), Encyclopedia of Water Science. Marcel Dekker Publishers, New York. Pp: 87-90.
3. Alizadeh, A., Mahdavi, M., Enanlou, M., and Bazari, M.A. 2001. Investigation of accuracy and performance of calculated potential evapotranspiration by Hargreaves-Samani method and evaporation pan at synoptic stations of Khorasan province. *Nivar*, 42-43: 51-70. (In Persian)
4. Almorox, J., Senatore, A., and Quej, V.H. 2018. Worldwide assessment of the Penman-Monteith temperature approach for the estimation of monthly reference evapotranspiration. *Theor Appl Climatol*. 131: 693. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1996-2>.
5. Azhar, A.H., and Perera, B.J.C. 2011. Evaluation of reference evapotranspiration estimation methods under Southeast Australian Conditions. *J. Irrig. Drain. Engin.* 137: 5. 268-279.
6. Berti, A., Tardivo, G., Chiaudani, A., Rech, F., and Borin, M. 2014. Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in north-eastern Italy. *Agricultural Water Management*, 140: 20-25.
7. Bogawski, P., and Bednorz, E. 2014. Comparison and validation of selected evapotranspiration models for conditions in Poland (Central Europe). *Water Resources Management*, 28: 5021-5038.
8. Djaman, K., and Irmak, S. 2013. Actual crop evapotranspiration and alfalfa- and grass-reference crop coefficients of maize under full and limited irrigation and rainfed conditions. *J. Irrig. Drain. Engin.* 139: 6. 433-446.
9. Djaman, K., Balde, A.B., Sow, A., Muller, B., Irmak, S., N'Diaye, M.K., Manneh, B., Moukoubi, Y.D., Futakuchi, K., and Saito, K. 2015. Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under sahelian conditions in the Senegal River Valley. *J. Hydrol. Region. Stud.* 3: 139-159.
10. Droogers, P., and Allen, R.G. 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems*, 16: 1. 33-45.
11. Gundalia, M.J., and Dholakia, M.B. 2013. Dependence of evaporation on meteorological variables at daily time-scale and estimation of pan evaporation in Junagadh region. *Amer. J. Engin. Res.* 2: 10. 354-362.
12. Hansen, S. 1984. Estimation of potential and actual evapotranspiration. *Nordic Hydrology*, 15: 4-5. 205-212.
13. Hargreaves, G.H., and Samani, Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1: 2. 96-99.
14. Irmak, S., Irmak, A., Allen, R.G., and Jones, J.W. 2003. Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. *J. Irrig. Drain. Engin.* 129: 5. 336-347.
15. Jabloun, M., and Sahli, A. 2008. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data application to Tunisia. *Agricultural Water Management*, 95: 707-715.
16. Jakimavicius, D., Kriauciuniene, J., Gailiusis, B., and Sarauskiene, D. 2013. Assessment of uncertainty in estimating the evaporation from the Curonian Lagoon. *Baltica*, 26: 2. 177-186.
17. Jensen, M.E., Burman, R.D., and Allen, R.G. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. In: ASCE Manual No. 70. American Society of Civil Engineers (ASCE). New York, NY.
18. Kisi, O., and Zounemat-Kermani, M. 2014. Comparison of two different adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems in modelling daily reference evapotranspiration. *Water Resources Management*, 28: 2655-2675.
19. Landaras, G., Bekoe, E., Ampofo, J., Logah, F., Diop, M., Cisse, M., and Shiri, J. 2018. New alternatives for reference evapotranspiration estimation in West Africa using limited weather

- data and ancillary data supply strategies. *Theoretical and Applied Climatology*, 132: 3-4. 701-716.
20. Mahringer, W. 1970. Verdunstungsstudien am neusiedler See. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B*, 18: 1. 1-20.
 21. Makkink, G.F. 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *J. Inter. Water Engin.* 11: 277-288.
 22. Martinez, C.J., and Thepadia, M. 2010. Estimating reference evapotranspiration with minimum data in Florida. *J. Irrig. Drain. Engin.* 136: 7. 494-501.
 23. Mohawesh, O.E. 2011. Evaluation of evapotranspiration models for estimating daily reference evapotranspiration in arid and semiarid environments. *Plant, Soil and Environment*, 57: 4. 145-152.
 24. Mokhtari, A., Noory, H., and Vazifedoust, M. 2018. Performance of Different Surface Incoming Solar Radiation Models and Their Impacts on Reference Evapotranspiration. *Water Resour Manage.* <https://doi.org/10.1007/s11269-018-1974-9>.
 25. Nikbakht, J., Mir-latifi, S.M., and Kamali, G.A. 2001. Comparison of calculated evapotranspiration with FAO Penman-Monteith, Penman-Wright and Harmorosis Samani methods in Tehran. *J. Agric. Sci. Natur. Resour. Gorgan.* 8: 4. 3-13. (In Persian)
 26. Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andreassian, V., Anctil, F., and Loumagne, C. 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model Part 2-Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *J. Hydrol.* 303: 1-4. 290-306.
 27. Penman, L.H. 1963. *Vegetation and Hydrology. Technical Communication. No. 53. Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden. England*, 125.
 28. Ravazzani, G., Corbari, C., Morella, S., Gianoli, P., and Mancini, M. 2012. Modified Hargreaves-Samani equation for the assessment of reference evapotranspiration in Alpine River Basins. *J. Irrig. Drain. Engin.* 138: 7. 592-599.
 29. Romanenko, V.A. 1961. Computation of the autumn soil moisture using a universal relationship for a large area. In: *Proceedings, Ukrainian Hydrometeorological Research Institute, No. 3 Kiev*.
 30. Sabziparvar, A.A., and Tabari, H. 2010. Regional estimation of reference evapotranspiration in arid and semi-arid regions. *J. Irrig. Drain. Engin.* 136: 10. 724-731.
 31. Schendel, U. 1967. *Vegetations Wasserverbrauch und Wasserbedarf. Habilitation, Kiel*, 137p.
 32. Sharifan, H., Ghahreman, B., Alizadeh, A., and Mir-Latifi, S.M. 2006. Comparison of the different methods of estimated Reference Evapotranspiration (Compound and Temperature) with standard method and analysis of aridity effects. *J. Agric. Sci. Natur. Resour.* 13: 1. (In Persian)
 33. Tabari, H. 2010. Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates. *Water Resources Management*, 24: 10. 2311-2337.
 34. Tabari, H., Grismer, M., and Trajkovic, S. 2013. Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. *Irrigation Science*, 31: 2. 107-117.
 35. Thornthwaite, C.W. 1948. An approach towards a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38: 1. 55-94.
 36. Trabert, W. 1896. *Neue Beobachtungen über Verdampfungs geschwindigkeiten. Meteorologische Zeitschrift*, 13: 261-263.
 37. Trajkovic, S. 2007. Hargreaves versus Penman-Monteith under humid conditions. *J. Irrig. Drain. Engin.* 133: 1. 38-42.
 38. Trajkovic, S., and Kolakovic, S. 2009. Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions. *Water Resources Management*, 23: 14. 3057-3067.
 39. Valiantzas, D.J. 2013. Simplified forms for the standardized FAO-56 Penman-Monteith reference evapotranspiration using limited data. *J. Hydrol.* 505: 13-23.
 40. Valipour, M. 2015. Investigation of Valiantzas' evapotranspiration equation in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 121: 1. 267-278.

41. Yoder, R.E., Odhiambo, L.O., and Wright, W.C. 2005. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid southeast United States. *Applied Engineering in Agriculture*, 21: 2. 197-202.

42. Zia Tabar Ahmadi, M.K. 1995. A Study and Comparison of Methods for Calculating Potential Evapotranspiration in Mazandaran Province. *Nivar*, 28: 40-55. (In Persian)



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 25(4), 2018

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2018.14361.2910

Accuracy evaluation of twenty empirical models in estimating coastal regions reference evapotranspiration in different climate

***Kh. Ghorbani¹, T. Aligholinia² and N. Rasouli Majd³**

¹Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran, ²Ph.D. Student in Irrigation and Drainage, Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran, ³Ph.D. Student in Water Resources Engineering, Dept. of Water Engineering, Urmia University, Iran

Received: 12.15.2017; Accepted: 06.19.2018

Abstract

Background and Objectives: Measurement of evapotranspiration using weighing lysimeter is the most accurate method. However, due to the gravitational fabrication of the weighing laser, simple empirical methods are widely used for calculating potential transpiration evapotranspiration and their results were compared with reference (FAO-Penman-Monteith) method. Therefore, the main objective of this study is to compare the accuracy of 20 experimental models of reference evapotranspiration estimation and providing the best experimental method in the cities of Rasht, Sari and Gorgan in northern Iran and in the coastal strip of the Caspian Sea.

Materials and Methods: In this study a cross comparison of FAO-Penman-Monteith method and 20 empirical equations was done for calculating potential evapotranspiration in a period of 10 years from 2007 to 2016, in Rasht, Sari and Gorgan synoptic stations in coastal zone of Caspian Sea. These stations were selected for climatic variation from humid climates to Mediterranean climates. The Root mean squared error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE) and Percent error (PE) were used to measure accuracy of these methods.

Results: The results showed that daily evapotranspiration values obtained from Ravazzani method were closer to FAO-Penman-Monteith method than those of the other models. So that for the model, the measured errors involve RMSE, MAE and PE, were obtained 0.77, 0.54 (mm/day) and 21.6% for Rasht, 0.8, -0.39. (mm/day) and 9.4% for Sari and 0.99, -0.42 (mm/day) and 9.88% for Gorgan. Also, the results indicate a low performance of the Romanenko model. Overall, in all of the studied climates, the Ravazzani et al., Berti et al., Hargreaves-Sammani, Irmak et al. and Valiantzas models had better performance than other models in the estimation of reference evapotranspiration

Conclusion: The results of this study showed decrease in the accuracy of ET models compared to reference model of FAO-Penman-Monteith for moving from humid to Mediterranean climate. The mass transfer based models like Mahringer and Tabari showed relative undesirable efficiency in coastal zone. Therefore, it can be noticed that empirical equation can lead to variable efficiency in different climate.

Keywords: Coastal regions, Empirical methods, FAO-Penman-Monteith, Reference evapotranspiration

* Corresponding Author; Email: ghorbani.khalil@yahoo.com