

واسنجی و ارزیابی هفت روش تخمین تبخیر - تعرق گیاه مرجع مبتنی بر تابش خورشیدی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

امید بابامیری^{1*}، یعقوب دین‌پژوه² و اسماعیل اسدی³

تاریخ دریافت: 91/08/21 تاریخ پذیرش: 91/12/26

¹ کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

² دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

³ استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: pircris@yahoo.co

چکیده

هدف این مطالعه مقایسه و واسنجی هفت روش مختلف تخمین ET_0 مبتنی بر تابش خورشیدی در مقیاس ماهانه در حوضه دریاچه ارومیه می‌باشد. روش‌های انتخاب شده شامل دورنبوس - پرویت (DP)، پریستلی - تیلور (PT)، مکینگ (M)، جنسن - هیز (JH)، تورک (T)، آبتیو (A) و مکگینز - بوردن (MB) بودند. برای این منظور از اطلاعات ده ایستگاه هواشناسی سینوپتیک در دوره آماری 1986 تا 2010 استفاده شد. نتایج روش‌های مذکور با خروجی روش فائو پنمن - مانتیث (PM56) مقایسه شدند. واسنجی روش‌ها برای تمام ماه‌ها و در طول دوره آماری مذکور در ایستگاه‌ها انجام شد. ارزیابی روش‌های مورد مطالعه با آماره‌های R^2 ، RMSE، MBE، MAE و RE انجام شد. نتایج نشان داد که قبل از واسنجی، نتایج روش‌های مختلف اختلاف زیادی با نتایج نظیر روش PM56 دارند. واسنجی روش‌ها عملکرد آنها را بطور قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشید. بعد از واسنجی، روش DP به عنوان بهترین روش در حوضه مورد مطالعه شناخته شد و میانه ارقام نظیر R^2 معادل 0/982 بدست آمد. در این روش (پس از واسنجی) میانه آماره‌های MAE، MBE، RMSE و RE به ترتیب معادل 7/89، -0/62، 6/03 و 3/40- میلیمتر در ماه بدست آمد. پس از DP روش PT به عنوان دومین روش مناسب در حوضه مذکور تشخیص داده شد. روش‌های JH، M، T، A و MB، به ترتیب، در رده‌های سوم تا هفتم قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی: پنمن - مانتیث، تابش، تبخیر - تعرق، حوضه آبریز دریاچه ارومیه

Calibration and Evaluation of Seven Radiation-Based Reference Crop Evapotranspiration Methods at Urmia Lake Basin

O Babamiri^{*1}, Y Dinpashoh² and E Asadi³

Received: 11 November 2012 Accepted: 16 March 2013

¹- M.Sc student, Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz. Iran

²- Assoc. Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz. Iran

³- Assoc. Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz. Iran

*Corresponding Author Email: pircris@yahoo.co

Abstract

The aim of this study is to compare and calibrate seven different radiation-based reference crop evapotranspiration (ET_o) estimation methods in monthly time scale at Urmia Lake basin. The selected methods were Doorenbos-Pruitt (DP), Priestly-Taylor (PT), Makkink (M), Jensen-Haise (JH), Turk (T), Abtew (A) and McGuinness-Bordne (MB). For this purpose the information of ten synoptic weather stations in the period 1986-2010 was used. Results of the mentioned methods were compared with the outputs of the FAO-56 Penman-Monteith (PM56) method. Calibration of the methods were performed for every station and month in the mentioned time period. Performances of the methods were evaluated using the R^2 , RMSE, MBE, MAE and RE statistics. Results indicated that before calibration, larger biases were shown with the selected methods comparing to the PM56. Calibration of the methods considerably improved their accuracy. The DP method was recognized as the best method after calibration for the studied watershed and R^2 value of this method was 0.982. In the mentioned method (after calibration) the median values of the RMSE, MBE, MAE and RE were equal to 7.89, -0.62, 6.03 and -3.40 mm per month, respectively. The Priestly-Taylor method was selected as the second best Method. Models of M, JH, T, A and MB were ordered as the third- till seventh-rank, respectively.

Keywords: Evapotranspiration, Penman-Monteith, Radiation-based methods, Urmia Lake, Watershed

دقیق تبخیر- تعرق در تامین نیاز آبی گیاهان، برنامه ریزی آبیاری و مطالعه بیلان آب مخازن، ضرورت دارد. معمولا برای اندازه گیری تبخیر- تعرق از لایسیمتر استفاده می‌شود. با این حال اندازه‌گیری ET پر هزینه بوده و نیازمند صرف وقت زیاد است

مقدمه

تبخیر- تعرق¹ (ET) یکی از مؤلفه‌های مهم سیکل هیدرولوژی برای مدیریت بهینه منابع آب می‌باشد. برآورد

¹Evapotranspiration

(TW)، تورک⁴ (T)، جنسن- هیز⁵ (JH) و پرستلی- تیلور⁶ (PT) را بر اساس داده‌های هفت ایستگاه با آب و هوای مرطوب ارزیابی کردند. سننلهاس و همکاران (2010) با استفاده از اطلاعات 12 ایستگاه هواشناسی واقع در جنوب کانادا مدل‌های TW، HG، و PT را بر اساس نتایج مدل PM56 واسنجی کردند. ژای و همکاران (2010) نتایج تخمین تبخیر- تعرق حاصل از یازده مدل تجربی را با داده‌های تبخیر از تشنک، در ده ایستگاه هواشناسی واقع در استان گانسو در شمال چین، مقایسه کردند. ابتدا مقایسه تخمین *ETo* با استفاده از مقادیر پیش فرض برای هر یازده مدل انجام شد و سپس مقایسه بعد از واسنجی مدل‌ها تکرار شد. در ایران نیز مطالعات پراکنده‌ای در زمینه تخمین *ETo* با روش-های مختلف و مقایسه یا واسنجی آنها انجام شده است. به عنوان مثال جهانبخش اصل و همکاران (1380) روش‌های ترکیبی، دمایی، تابشی، همبستگی چندگانه و رطوبتی را برای ایستگاه تبریز با آمار بیست ساله تحلیل و خروجی آنها را با روش تشنک تبخیر مقایسه کردند. شریفیان و همکاران (1385) مقدار *ETo* منطقه گرگان را در مقیاس روزانه برآورد کردند. ایشان از مدل‌های مختلف شامل گروه مدل‌های ترکیبی (مدل‌های پنمن و پنمن اصلاح شده فائو) و دمایی (هارگریوز-سامانی و بلانی- کریدل- فائو) استفاده و نتایج را با مقادیر حاصل از PM56 در سه وضعیت متفاوت (شامل استفاده از داده‌های اصلاح نشده و داده‌های اصلاح شده در شرایط توصیه شده برای ایران و جهان) مورد

که همیشه امکان پذیر نیست. از این رو در غالب موارد، برای این کار، از روش‌های غیر مستقیم که شامل طیف وسیعی از مدل‌های ساده تجربی تا روش‌های پیچیده ترکیبی (مانند پنمن- مانتیث) است، استفاده می‌شود. مطالعات پیشین نشان می‌دهد، که مقدار تخمینی *ETo* با استفاده از روش فائو پنمن- مانتیث¹ (PM56) در اقلیم‌های مختلف به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیکتر است (آلن و همکاران 1989). با توجه به اینکه مقادیر *ETo* حاصل از لایسیمتر در اکثر موارد قابل دسترس نیست بنابراین، واسنجی مدل‌های تجربی تبخیر- تعرق با نتایج حاصل از مدل PM56 واسنجی یا مورد مقایسه قرار می‌گیرد (آلن و همکاران 1998، لانداس و همکاران 2008). در اکثر مطالعات مدل PM56 جهت مقایسه و واسنجی مدل‌های دیگر در مطالعات مختلف به کار می‌رود (آتینسیفا و همکاران 2003، دهقانی‌سانج و همکاران 2004، تمسگن و همکاران 2005). سینگ و خو (1997) با بررسی 13 نوع مدل‌های مختلف تبخیر از سطح آزاد آب (بر مبنای انتقال جرم) بهترین مدل که با داده‌های تشنک تبخیر شمال غرب کانادا سازگاری داشت، انتخاب و آن را واسنجی کردند. خو و سینگ (2000) هشت روش تخمین تبخیر- تعرق بر مبنای تابش را برای ایستگاه چنگینز در سوئیس انتخاب و در مقایسه با تبخیر از تشنک تبخیر واسنجی کردند. خو و سینگ (2002) پنج روش تخمین تبخیر- تعرق را از بین 3 روش کلی شامل: 1- بر مبنای انتقال جرم 2- بر مبنای تابش 3- بر مبنای درجه حرارت هوا انتخاب و آنها را واسنجی کردند. رزنبری و همکاران (2004) دوازده مدل مختلف تخمین تبخیر- تعرق را در منطقه داکوتای شمالی آمریکا با روش‌های مختلف مورد مقایسه قرار دادند. ترج کویک و کولاکویچ (2009) دقت روش‌های مختلف تبخیر- تعرق (شامل روش‌های هارگریوز² (HG)، ترنت وایت³

³Thornthwaite

⁴Turk

⁵Jensen-Haise

⁶Priestley-Taylor

¹Penman-Monteith

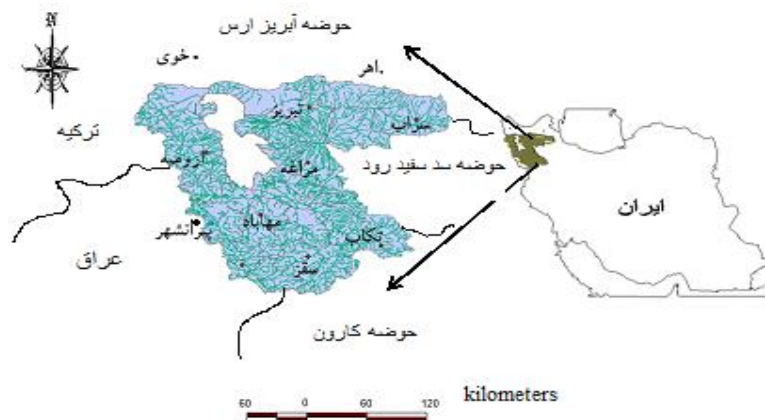
²Hargreaves

واقع شده است. مساحت حوضه دریاچه‌ی ارومیه حدود 52700 کیلومتر مربع است که حدود 3/2% مساحت کل کشور را در بر می‌گیرد. میانگین بارش سالانه این حوضه حدود 398 میلی‌متر است. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل میانگین، حداقل و حداکثر درجه حرارت هوا، میانگین رطوبت نسبی، تعداد ساعات آفتابی و سرعت باد در مقیاس ماهانه می‌باشد. داده‌ها از اداره کل سازمان هواشناسی استان‌های آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی اخذ شدند. تعداد کمی از داده‌های مذکور ناقص بودند که با روش‌های مناسب بازسازی و قبل از استفاده کنترل کیفی شده. در این مطالعه از روش‌های تجربی تخمین *ETO* مختلف بر مبنای تابش از قبیل دورنیوس- پروت (DP)، PT، M، JH، T، آبتیو (A) و مکگینز- بوردن (MB) که به داده‌های ورودی کمتری نیاز دارند، استفاده شد. همچنین برای واسنجی مدل‌ها از روش PM56 استفاده شد. در این مطالعه تعداد 8 ایستگاه در داخل حوضه و 2 ایستگاه در حاشیه بیرونی حوضه (به دلیل اهمیت اطلاعات این ایستگاه‌ها) انتخاب شدند. شکل 1 منطقه مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌های منتخب را نشان می‌دهد. جدول 1 نیز مشخصات ایستگاه‌های منتخب را ارائه می‌دهد.

مقایسه و ارزیابی قرار دادند. رحیمی خوب و همکاران (1385) روش‌های تخمین *ETO* با استفاده از حداقل داده‌های هواشناسی در منطقه خوزستان را با استفاده از معادله PM56 مورد مقایسه قرار دادند. شهابی‌فر و همکاران (1389) هفت روش مختلف تبخیر- تعرق را با مقادیر اندازه‌گیری شده از لایسیمتر در ایستگاه تهران مقایسه کردند. دهقانی و همکاران (1390) با استفاده از داده‌های روزانه تنها ایستگاه گرگان مقادیر *ETO* را با روش‌های PM56، HG، T، PT و M تخمین زدند. نامبردگان مدل‌ها را بر اساس روش استاندارد PM56 واسنجی کردند. ایشان از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) نیز برای تخمین *ETO* استفاده کردند. با توجه به پیشینه پژوهش به نظر می‌رسد مطالعه جامعی در زمینه واسنجی مدل‌های مختلف تبخیر- تعرق در شمال غرب ایران بر مبنای مدل PM56 انجام نشده است. بنابراین، هدف این مطالعه مقایسه و واسنجی روش‌های تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع بسط داده شده بر مبنای تابش با توجه به نتایج روش PM56 در حوضه دریاچه ارومیه است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه حوضه آبریز دریاچه ارومیه است. این حوضه در شمال غرب ایران بوده و مابین 44 درجه و 13 دقیقه تا 47 درجه و 53 دقیقه طول شرقی و 35 درجه و 40 دقیقه تا 38 درجه و 29 دقیقه عرض شمالی



شکل 1- منطقه مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌های انتخاب شده در حوضه دریاچه ارومیه.

متری از سطح زمین $(^{\circ}C)$ ، u_2 = سرعت باد در ارتفاع 2 متری از سطح زمین (m/s) ، $e_s - e_a$ = کمبود فشار بخار در ارتفاع 2 متری (kPa) ، Δ = شیب منحنی فشار بخار $(Kpa/^{\circ}C)$ و g = ثابت سایکرومتر $(Kpa/^{\circ}C)$ می‌باشد.

برای تخمین پارامترهای روش PM56 از فرمول‌های ارائه شده توسط آلن و همکاران، 1998 استفاده شد.

برای تبدیل سرعت باد در ارتفاع Z متری (u_z) به سرعت باد در ارتفاع 2 متری (u_2) از رابطه پیشنهادی رج کویک و کولاکویچ (2009) به شرح زیر استفاده شد.

$$u_z = \frac{4.87u_2}{\ln(67.8Z - 5.42)} \quad [2]$$

در این مطالعه روش PM56 به عنوان یک روش مبنا برای مقایسه و واسنجی سایر مدل‌های بر مبنای تابش انتخاب گردید. علت این تصمیم این است که آلن و همکاران (1998)، مدل مذکور را به عنوان یک روش استاندارد برای تخمین ET_o پیشنهاد کردند. فرم توصیه شده این مدل به شرح زیر است:

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + g \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + g(1 + 0.34u_2)} \quad [1]$$

که در آن: ET_o = تبخیر تعرق گیاه مرجع (mm/day) ، R_n = تابش خالص در سطح پوشش گیاهی $(MJ/m^2/day)$ ، G = جریان حرارتی خاک $(MJ/m^2/day)$ ، T = میانگین دمای هوا در ارتفاع 2

جدول 1- مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه در حوضه آبریز دریاچه ارومیه.

نام ایستگاه	طول جغرافیایی		عرض جغرافیایی		ارتفاع از سطح دریا (m)	دوره آماری
	دقیقه	درجه	دقیقه	درجه		
اهر	04	47	26	38	1390/5	1986-2010
خوی	58	44	33	38	1103	1986-2008
مهاباد	43	45	46	36	1385	1986-2008
مراغه	16	46	24	37	1477/7	1986-2010
ارومیه	05	45	32	37	1315/9	1986-2008
پیرانشهر	08	45	40	36	1455	1986-2008
سراب	32	47	56	37	1682	1986-2010
سقز	16	46	15	36	1522/8	1986-2008
تکاب	07	47	23	36	1765	1986-2008
تبریز	17	46	23	36	1361	1986-2010

شکل کلی اکثر روش‌های تخمین ET_o بر مبنای تابش به شرح زیر است (جنسن و همکاران 1990):

$$IET_o = C_r(wR_n) \text{ یا } IET_o = C_r(wR_s) \quad [3]$$

که در آن I گرمای نهان تبخیر، C_r ضریبی که بستگی به رطوبت نسبی و سرعت باد دارد، w ضریب وزنی دمای هوا و طول جغرافیایی می‌باشد و R_s تابش خالص رسیده به سطح زمین است. در این مطالعه هفت روش تخمین ET_o مبتنی بر تابش آفتاب (جدول 2) برای مقایسه و واسنجی انتخاب گردید. در جدول 2، R_s تابش خالص رسیده به سطح زمین (mm/day)، RH درصد رطوبت نسبی، U_d میانگین سرعت باد روزانه ($\frac{m}{s}$)، $e_{s,max} - e_{s,min}$ کمبود فشار بخار اشباع به ازای حداکثر و حداقل دمای هوا در گرمترین ماه سال ($mbar$) و h ارتفاع از سطح دریا (m) می‌باشد. در جدول 3، $ET_{om,i}$ مقدار تبخیر-تعرق تخمین زده شده با یکی از روش‌های دمایی بر حسب (mm/day) در ماه معین برای سال i ام؛ انجام شد.

مقدار تبخیر-تعرق محاسبه شده با روش PM56 بر حسب (mm/day) در ماه معین برای سال i ام؛ $ET_{o,m}$ میانگین تبخیر-تعرق تخمین زده شده با یکی از روش‌های منتخب در جدول 2؛ $ET_{o,FAO}$ میانگین تبخیر-تعرق تخمین زده شده با روش PM56؛ m تعداد سال‌های آماری می‌باشد. در این مطالعه با برازش خط رگرسیون از مبدا، با در نظر گرفتن مقادیر محاسبه شده با روش PM56 به عنوان متغیر وابسته و مقادیر حاصل از یک روش معین مبتنی بر تابش آفتاب به عنوان متغیر مستقل، شیب خط رگرسیون از مبدا (ژای و همکاران 2010) محاسبه شد و به عنوان ثابت واسنجی (K) برای روش مورد نظر بدست آمد. آنگاه مقدار ضریب تبیین محاسبه شد. این کار برای یکایک ایستگاه‌ها انجام شد.

جدول 2- هفت روش انتخاب شده برای تخمین ET_0 بر مبنای تابش خورشیدی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه.

معادله	مرجع	روش
$ET_0 = a \left(\frac{\Delta}{\Delta + g} \right) R_s - 0.3$ $a = 1.066 - 0.0013RH + 0.045U_d - 0.0002RH.U_d - 0.0000315RH^2 - 0.0011U_d^2$	دورنبوس-پروت (1977)	دورنبوس-پروت (DP)
$ET_0 = 1.26 \left(\frac{\Delta}{\Delta + g} \right) R_n / I$	پرستلی - تیلور (1972)	پرستلی - تیلور (PT)
$ET_0 = 0.61 \left(\frac{\Delta}{\Delta + g} \right) R_s / I - 0.12$	مک کینگ (1957)	مک کینگ (M)
$ET_0 = C_T (T - T_X) R_s$ $C_T = \frac{1}{45 - (h/137) + (365/(e_{s,max} - e_{s,min}))}$ $T_X = -2.5 - 0.14(e_{s,max} - e_{s,min}) - h/15$	جنسن- هیز (1963)	جنسن- هیز (JH)
$ET_0 = 0.013 \frac{T}{T+15} (R_s + 50)$ برای $RH \geq 50$	تورک (1961)	تورک (T)
$ET_0 = 0.013 \frac{T}{T+15} (R_s + 50) \left(1 + \frac{50 - RH}{70} \right)$ برای $RH \leq 50$		
$ET_0 = 0.53 R_s / I$	آبتیو (1996)	آبتیو (A)
$ET_0 = \{ (0.0082T - 0.19) (R_s / 1500) \} 2.54$	مگگینز- بوردن (1972)	مگگینز- بوردن (MB)

جدول 3- آماره‌های ارزیابی عملکرد مدل‌های مورد استفاده در این مطالعه.

معادله	منبع	واحد	معیار ارزیابی
$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=0}^n (ET_{om,i} - \overline{ET_{om}}) \cdot (ET_{o,FAO,i} - \overline{ET_{o,FAO}}) \right]^2}{\sum_{i=0}^n (ET_{om,i} - \overline{ET_{om}})^2 \cdot \sum_{i=0}^n (ET_{o,FAO,i} - \overline{ET_{o,FAO}})^2}$	دای و همکاران (2009)	بی بعد	R^2
$RMSE = \sqrt{1/n \sum_{i=0}^n (ET_{om,i} - ET_{o,FAO,i})^2}$	سنتلهاس و همکاران (2010)	mm / month	RMSE
$1/n \sum_{i=0}^n (ET_{om,i} - ET_{o,FAO,i}) MBE =$	سنتلهاس و همکاران (2010)	mm / month	MBE
$1/n \sum_{i=0}^n ET_{om,i} - ET_{o,FAO,i} MAE =$	ترج کویک و کولاکویچ (2009)	mm / month	MAE
$RE(\%) = \left(\frac{ET_{om,i} - ET_{o,FAO,i}}{ET_{o,FAO,i}} \right) * 100$	سینگ و خو (1997)	بی بعد	RE

نتایج و بحث

روش DP با میانه ضریب تبیین $R^2=0/982$ به عنوان بهترین روش در حوضه مورد مطالعه شناخته شد. پس

قبل از واسنجی روش‌های تخمین تبخیر- تعرق مبتنی بر تابش، با توجه به میانه ارقام نظیر آماره R^2

مقدار R^2 متعلق به ایستگاه مراغه (معادل 0/9701) و حداکثر مقدار آن متعلق به ایستگاه ارومیه (معادل 0/9914) می‌باشد. بررسی معنی داری مقادیر R^2 نشان داد که همه مقادیر محاسبه شده برای R^2 ایستگاه‌ها در سطح 5% معنی‌دار هستند. شکل 4 نقاط پراکنش مقادیر ETo محاسبه شده با روش DP و PM56 را در ایستگاه‌های مورد مطالعه بعد از واسنجی نشان می‌دهد. شکل‌های مشابهی برای دیگر روش‌های منتخب تهیه شد بطوریکه از شکل 4 می‌توان استنباط کرد.

پس از واسنجی، مقادیر برآورد شده با روش DP به مقادیر نظیر روش PM56 نزدیکتر شد. طوری که، پس از واسنجی شیب خط برازش شده برای همه ایستگاه‌ها معادل واحد بدست آمده است. ضرایب تبیین (R^2) بعد از واسنجی همان مقادیر نظیر قبل از واسنجی است. جدول 5 معیارهای ارزیابی را در خصوص روش DP پس از واسنجی نشان می‌دهد. برای دیگر روش‌های منتخب نیز جداول مشابهی تهیه شد.

بطوری که از این جداول می‌توان استنباط کرد مقادیر $RMSE$ و سایر آماره‌ها پس از واسنجی در تمام ایستگاه‌ها بطور محسوسی کاهش یافته است. به عنوان مثال، مقدار آماره $RMSE$ روش DP در ایستگاه ارومیه از 43/3713 (قبل از واسنجی) به رقم 5/2165 (پس از واسنجی) کاهش یافته است. بطور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد روش‌های مورد مطالعه پس از واسنجی در مقایسه با قبل از واسنجی به مراتب بهبود پیدا کرده است.

از روش DP روش‌های PT ، M ، JH ، T ، A و MB در رده‌های بعدی قرار گرفتند. شکل 2 نقاط پراکنش مقادیر ETo را که محور افقی آن مربوط به مدل DP و محور قائم آن مربوط به مدل PM56 است نشان می‌دهد. بطوریکه از این شکل می‌توان استنباط کرد مدل دورنبوس پرویت قبل از واسنجی مقدار ETo را با دقت قابل قبول تخمین زده است. با این حال، روش مذکور در همه ایستگاه‌ها مقدار ETo را بیشتر از مدل PM56 تخمین زده است. علت آن این است که مقدار ETo با روش PM56 بین 0/7090 برابر (در ایستگاه ارومیه) تا 0/8331 برابر (در ایستگاه تبریز) روش نظیر DP تغییر می‌کند. شکل 3 نمونه ای از منحنی تغییرات ETo ماهانه را برای روش PM56 و 7 روش منتخب که به طور میانگین در دوره آماری در ایستگاه اهر بدست آمده است نشان می‌دهد. به طوریکه از این شکل استنباط می‌شود در دوره گرم سال روش DP تخمین دقیق‌تری نسبت به سایر روش‌ها نشان می‌دهد. جدول 4 معیارهای ارزیابی محاسبه شده برای تخمین ETo با روش DP را قبل از واسنجی نشان می‌دهد. بطوریکه از جدول 2 می‌توان نتیجه گرفت، مقادیر $RMSE$ از حداقل معادل 30/0164 در ایستگاه تبریز تا حداکثر 45/0675 میلی‌متر در ماه در ایستگاه سقز تغییر می‌کند. مقادیر MBE نیز از حداقل معادل 24/0988 در ایستگاه تبریز تا حداکثر 36/5274 میلی‌متر در ماه در ایستگاه سقز تغییر می‌کند. مقادیر MAE نیز از حداقل 24/4653 در ایستگاه تبریز تا حداکثر 36/8609 در ایستگاه سقز تغییر می‌کند. این نشان می‌دهد که در ایستگاه مذکور میانگین قدر مطلق انحراف مقادیر ETo بدست آمده با روش DP از روش PM56 بیشتر از سایر ایستگاه‌ها می‌باشد. حداقل

جدول 4- معیارهای ارزیابی محاسبه شده برای تخمین ET_0 با روش DP در ایستگاه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه (قبل از واسنجی).

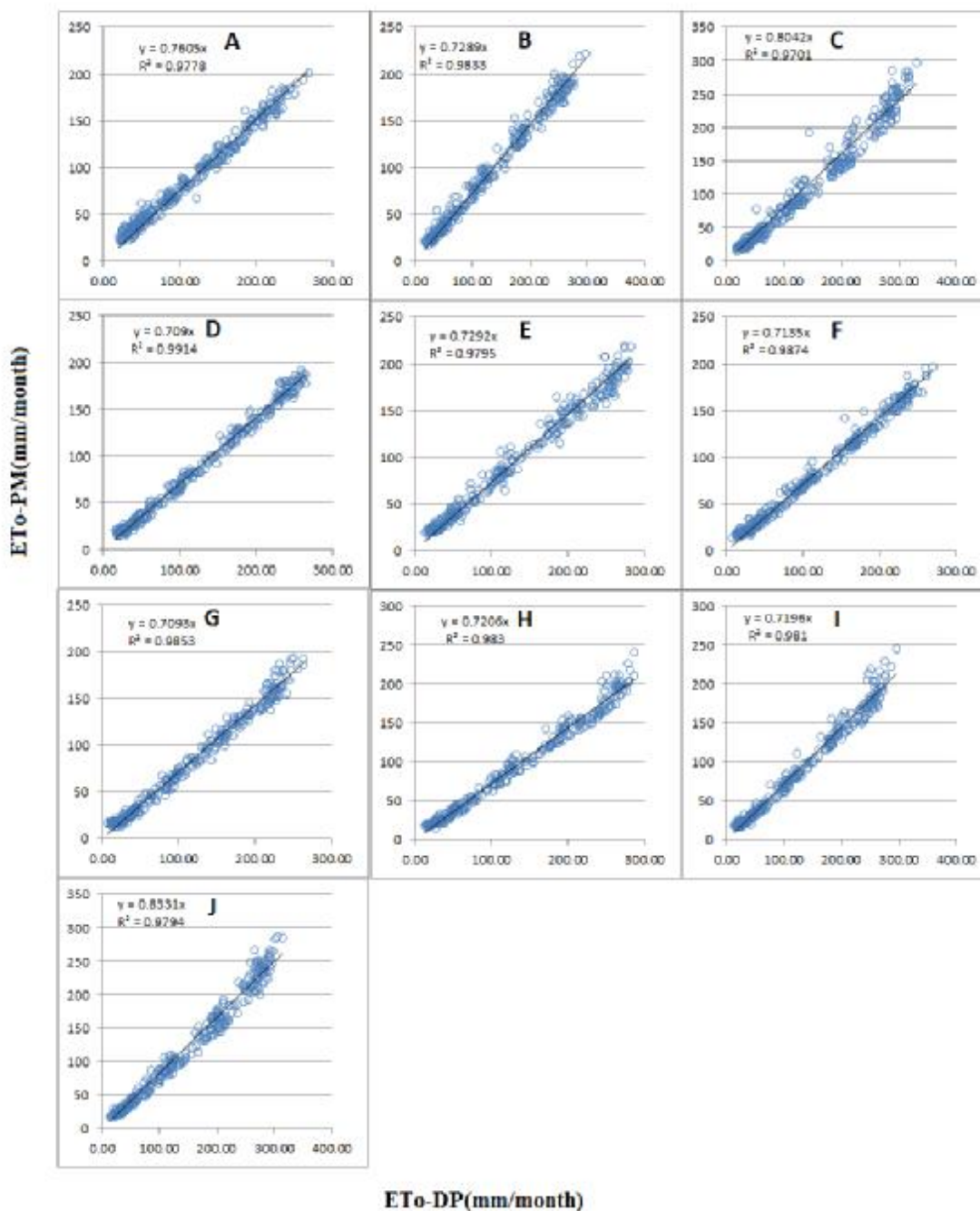
RE	MAE	MBE	RMSE	R^2	کد ایستگاه	نام ایستگاه
23/5628	26/0747	25/1842	32/6850	0/9778	A	اهر
31/6786	35/3725	34/9581	43/5879	0/9833	B	مهاباد
27/4987	29/8902	29/1396	36/4600	0/9701	C	مراغه
37/5122	35/7918	35/6208	43/3713	0/9914	D	ارومیه
29/9450	34/6163	34/1110	43/5499	0/9795	E	پیرانشهر
32/9532	33/3309	32/6726	40/9074	0/9874	F	سراب
35/7055	33/5498	32/9145	40/6827	0/9853	G	خوی
34/5297	36/8609	36/5274	45/0675	0/9830	H	سقز
35/7296	36/3243	35/9511	44/5149	0/9810	I	تکاب
21/4418	24/4653	24/0988	30/0164	0/9794	J	تبریز
32/3159	34/0830	35/5127	42/1393	0/9820	-	میانانه (Median)

توجه: در جدول فوق واحد همه ارقام (به غیر از ارقام نظیر R^2) میلیمتر در ماه است

جدول 5- معیارهای ارزیابی محاسبه شده برای تخمین ET_0 با روش DP در ایستگاه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه (بعد از واسنجی).

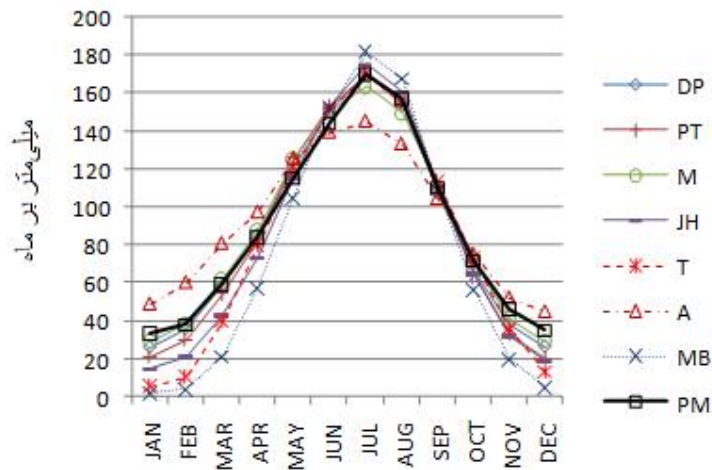
RE	MAE	MBE	RMSE	R^2	کد ایستگاه	نام ایستگاه
-6/0304	5/8557	-2/0914	7/3226	0/9778	A	اهر
-4/0194	6/0335	-1/4038	7/6784	0/9833	B	مهاباد
2/5345	10/4225	1/0984	13/8232	0/9701	C	مراغه
-2/5038	4/2319	-0/5471	5/2165	0/9914	D	ارومیه
-5/2440	6/6033	-1/6808	8/6688	0/9795	E	پیرانشهر
-5/1378	4/5778	-1/1513	6/0349	0/9874	F	سراب
-3/7440	4/9840	-0/6577	6/4505	0/9853	G	خوی
-3/0578	6/3060	-0/5882	8/1020	0/9830	H	سقز
-2/3289	6/0334	-0/3022	8/6320	0/9810	I	تکاب
1/1732	8/5444	0/8875	11/2792	0/9794	J	تبریز
-3/4009	6/0334	-0/6229	7/8902	0/9820	-	میانانه (Median)

توجه: در جدول فوق واحد همه ارقام (به غیر از ارقام نظیر R^2) میلیمتر در ماه است.

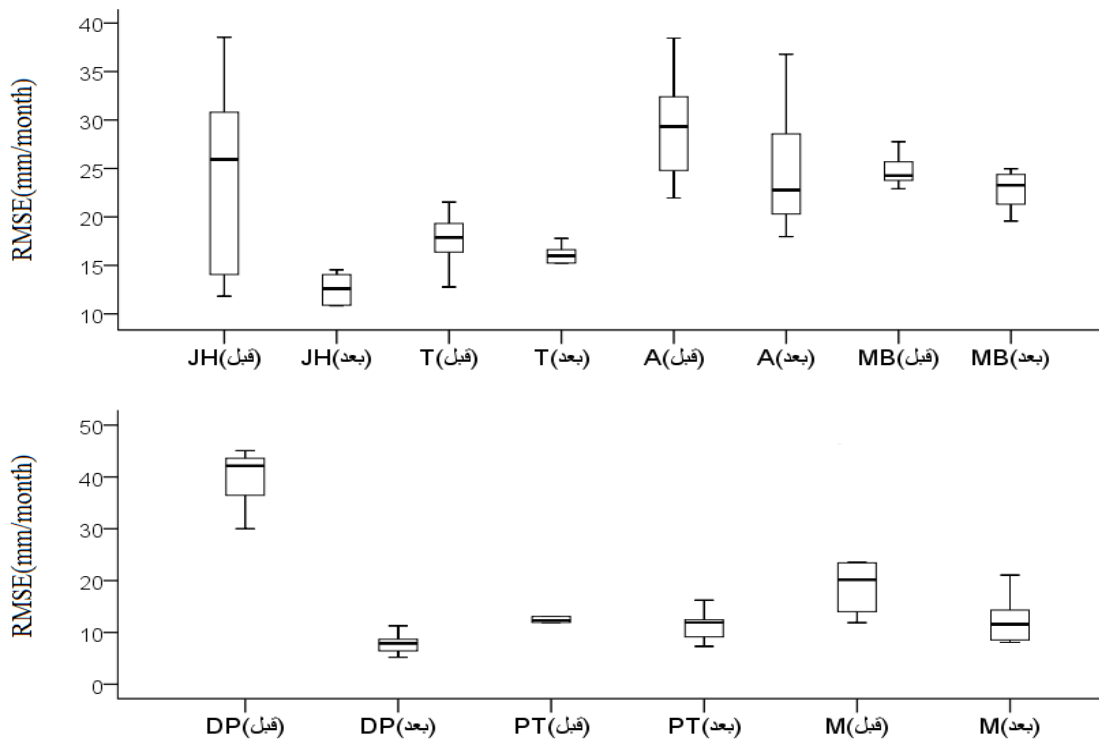


شکل 2- مقایسه مقادیر *ETo* محاسبه شده با روش دورنبوس پروت (DP) و PM56 در 10 ایستگاه هواشناسی حوضه آبریز دریاچه ارومیه (قبل از واسنجی).

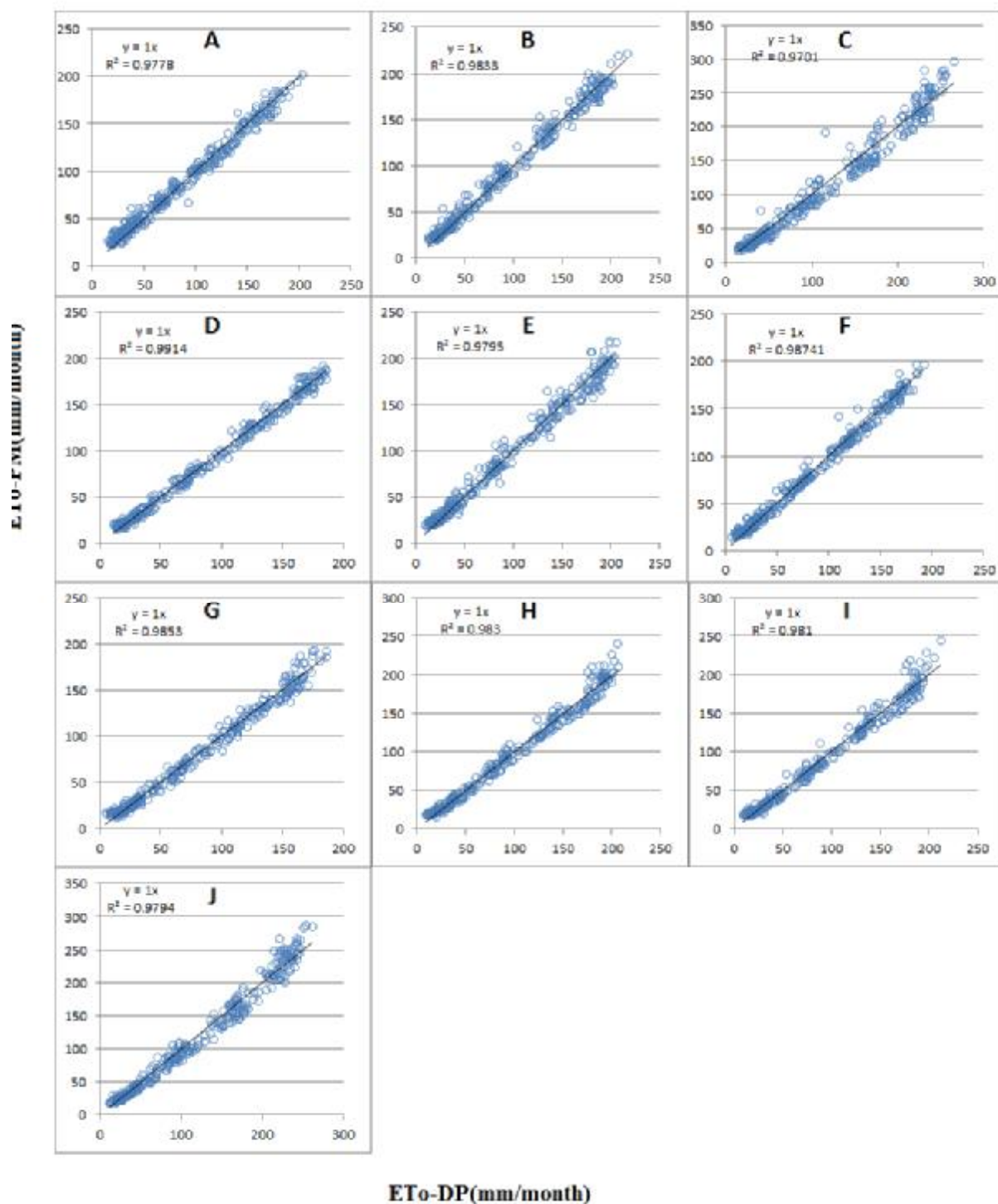
با توجه به حروف انگلیسی روی شکل نام ایستگاه در جدول 4 درج شده است.



شکل 3- میانگین مقادیر ET_0 روش PM_{56} و 7 روش منتخب پس از واسنجی (میانگین دوره آماری) در ایستگاه اهر.



شکل 5- نمودار باکس و ویسکر آماره $RMSE$ برای روش‌های تخمین ET_0 بر مبنای تابش قبل و بعد از واسنجی.



شکل 4- مقایسه مقادیر ET_0 محاسبه شده با روش دورنبوس - پروت (DP) و PM_{56} در 10 ایستگاه هواشناسی حوضه آبریز دریاچه ارومیه (بعد از واسنجی).

با توجه به حروف انگلیسی روی شکل نام ایستگاه در جدول 4 درج شده است.

می‌باشند برای ده ایستگاه منتخب در حوضه دریاچه ارومیه نشان می‌دهد. بطوریکه از این جدول می‌توان نتیجه گرفت، مقدار ضرایب واسنجی همه ایستگاه‌ها با روش DP کمتر از واحد است بنابراین، در حوضه مورد مطالعه روش مذکور در حالت عادی (قبل از واسنجی) مقدار ET_o را بیشتر از روش PM56 تخمین می‌زند. در نتیجه برای بهبود عملکرد این روش لازم است مقادیر ET_o به ضریب واسنجی مندرج در جدول 6 ضرب شوند. در حالیکه روش M در حالت عادی با توجه به دارا بودن ضرایب واسنجی بزرگتر از واحد (برای همه ایستگاه‌ها) مقدار ET_o را کمتر از روش PM56 تخمین می‌زند و در نتیجه برای بهبود عملکرد این روش لازم است ارقام بدست با روش M به مقدار ضریب واسنجی هر ایستگاه (طبق جدول 6) ضرب شوند.

شکل 5 نمودار باکس و ویسکر آماره $RMSE$ برای هفت روش تخمین ET_o بر مبنای تابش (DP, PT, M, JH, T, A و MB) را در مقابل روش PM56 قبل و بعد از واسنجی نشان می‌دهد. بطوریکه از این شکل می‌توان استنباط کرد، قبل از واسنجی میانه سری مربوط به ارقام $RMSE$ از حداقل 12/3518 (برای روش PT) تا 42/1393 (برای روش DP) تغییر می‌کند و همچنین بعد از واسنجی میانه نظیر از حداقل 7/8902 (برای روش DP) تا 22/7809 (برای روش A) تغییر می‌کند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر آماره $RMSE$ بعد از واسنجی برای هر یک از روش‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کرده است، به عبارت دیگر، واسنجی روش‌های مختلف تخمین ET_o بر روی دقت تخمین روش‌های مذکور بسیار موثر بوده است. جدول 6 ضرایب واسنجی هفت روش تخمین ET_o را که مبتنی بر داده‌های تابش

جدول 6- ضرایب واسنجی روش‌های منتخب تخمین ET_o بر مبنای تابش برای تمام ماه‌های سال در تمام دوره آماری در ایستگاه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه.

روش	ایستگاه									
	اهر	مهاباد	مراغه	ارومیه	پیرانشهر	سراب	خوی	سقز	تکاب	تبریز
DP	0/7605	0/7289	0/8042	0/7090	0/7292	0/7135	0/7039	0/7206	0/7196	0/8331
PT	1/0191	1/0012	1/1876	0/9501	1/0279	0/9856	0/9127	1/0303	1/0379	1/2209
M	1/2030	1/1836	1/4041	1/1108	1/2155	1/1378	1/0848	1/1992	1/2007	1/4456
JH	0/9927	0/8004	0/9812	0/8213	0/8356	0/8455	0/7785	0/7583	0/7981	1/0016
T	1/0790	0/9183	1/0629	0/9895	0/9411	1/0631	0/9308	0/9536	0/9736	1/1238
A	0/8876	0/9134	1/0909	0/8325	0/9315	0/8239	0/8239	0/8898	0/8768	1/1186
MB	1/0097	0/9120	1/0648	0/8953	0/9450	1/0400	0/8302	1/0036	1/0278	1/0801

مکینگ و پرستلی تیلور را به ترتیب به عنوان بهترین روش معرفی کردند. روزنبری و همکاران (2004) نشان دادند که از بین 13 روش مختلف تخمین ET_0 روش پرستلی تیلور نتایج دقیق تری را در ناحیه جنوب داکوتا بدست می‌دهد. صالح و سندیل (1983) با مقایسه کارایی 5 روش در بخش‌های مرکزی عربستان سعودی نشان داد که روش جنسن هیز پس از واسنجی بهترین روش برای تخمین ET_0 است. ژای و همکاران (2010) مقادیر تبخیر از تشنگ را به عنوان مبنای صحت محاسبات در نظر گرفته و روش دورنبوس و پروت را از بین 11 روش تخمین ET_0 به عنوان مدل مناسب در شمالغرب چین انتخاب کردند. این نتیجه با یافته‌های مطالعه حاضر در حوضه آبریز دریاچه ارومیه مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری کلی

برای تخمین دقیق مقدار آب مورد نیاز گیاهان در حوضه آبریز دریاچه ارومیه یکی از مهمترین مشکلات تخمین تبخیر-تعرق فقدان داده کامل برای روش استاندارد تخمین تبخیر-تعرق و یا عدم دسترسی به داده های اندازه گیری شده از لایسیمتر می‌باشد. تعداد ایستگاه های با داده کامل در حوضه مورد مطالعه اندک بوده و در تمام نواحی مورد کشت گیاهان زراعی تحت آبیاری داده کامل وجود ندارد. برای رفع این مشکل مطالعه حاضر به منظور یافتن مدل ساده و دقیق تخمین تبخیر-تعرق انجام شد. بر این اساس از بین 7 مدل مبتنی بر تابش یکی که بهترین نتایج را ارائه می‌کرد انتخاب و بر اساس مدل استاندارد PM56 واسنجی شد. برآورد مقایسه و ارزیابی مدل‌ها هم با ثابت‌های اصلی خود مدل‌ها و هم با ثابت‌های بدست آمده پس از واسنجی انجام گردید. کارایی این روش‌ها با استفاده از معیارهای R^2 ، RMSE، MBE، MAE و RE

سایر روش‌ها در برخی ایستگاه‌ها دارای ضریب واسنجی کمتر از واحد و در برخی ایستگاه‌ها دارای ضریب واسنجی بیشتر از واحد بود. مقایسه روش‌ها با توجه به مقادیر میانه معیارهای R^2 و RMSE دو به دو انجام شد. نتایج نشان داد که روش DP در رتبه نخست (به شرط اعمال ضریب واسنجی ایستگاه) قرار گرفت. روش‌های PT و M در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفتند. در حالت کلی، با توجه به مقادیر میانه آماره RMSE (بعد از واسنجی) روش‌های DP، PT، JH، T، A و MB به ترتیب در رده‌های یک تا هفت قرار گرفتند.

جهانبخش اصل و همکاران (1380) نشان داد که در ایستگاه تبریز روش کریستسن هارگریوز در ماه‌های مه، ژوئن، ژوئیه، نوامبر و دسامبر به عنوان بهترین روش تخمین ET_0 است. باید توجه داشت که نامبردگان معیار مقایسه دقت روش‌ها را ارقام اندازه گیری شده از روش تشنگ تبخیر قرار داده‌اند. ترج کویک و کولاکویچ (2009) نشان دادند که روش هارگریوز در تخمین ET_0 نواحی مرطوب صربستان و کرواسی مناسب نبوده و روش تورک (مبتنی بر تابش) برای این ناحیه مناسب است. آنها پس از روش تورک روش پرستلی تیلور را برای تخمین ET_0 ایستگاه‌های منطقه پیشنهاد کردند. احمدی و فولادمند (2007) روش تورنت وایت را در استان فارس با توجه به خروجی روش PM56 واسنجی نمودند آنها نشان دادند که میانه مقادیر RMSE در 14 ایستگاه هواشناسی واقع در استان مذکور بین 0/43 در شهرضا تا 0/91 در بوشهر تغییر می‌کند. لازم به یاد آوری است که نامبردگان مقادیر آماره مذکور را بر اساس ارقام ET_0 به میلی‌متر در روز محاسبه نموده‌اند. بنابراین، چنانچه ارقام مذکور به عدد 30 یا متوسط تعداد روزهای ماه ضرب گردد قابل مقایسه با نتایج تحقیق حاضر خواهد بود. بر این اساس صرف نظر از منطقه مورد مطالعه عملکرد روش DP بعد از واسنجی بمراتب بهتر از روش تورنت وایت می‌باشد. خو و سینگ (2000) کارایی 8 روش تخمین ET_0 بر مبنای تابش را در ایستگاه چنگینز در سوئیس را بررسی کردند. آنها روش

دهد. زیرا معیارهای ارزیابی برای تمام روش‌ها پس از واسنجی به مقدار قابل توجهی بهبود پیدا کرد. به عبارت دیگر مقادیر آماره‌های MAE, MBE, RMSE و RE پس از واسنجی کاهش یافت. استفاده از نتایج این مطالعه در تخمین تبخیر- تفرق ایستگاه‌های فاقد آمار کافی برای روش PM56 حوضه آبریز دریاچه ارومیه و تخمین آب مورد نیاز گیاهان کشت شده در این منطقه توصیه می‌شود. مطالعه مشابه برای دیگر حوضه‌های کشور قویا توصیه می‌شود.

مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که بعد از واسنجی روش DP ($R^2=0/982$) مناسب‌ترین روش تخمین *ETO* در حوضه آبریز دریاچه ارومیه شناخته شد. پس از آن روش PT ($R^2=0/9636$) به عنوان دومین روش مناسب شناخته شد. روش‌های A, T, JH, M و MB به ترتیب در رده‌های سوم تا هفتم قرار گرفتند. نتایج نشان داد که استفاده از ضرایب واسنجی برای مدل‌های مورد استفاده کارایی تمام روش‌ها را بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌-

منابع مورد استفاده

- جهان بخش اصل س، موحد دانش ع، مولوی و، 1380. تحلیل مدل‌های برآورد تبخیر-تفرق برای ایستگاه هواشناسی تبریز. دانش کشاورزی شماره 2، جلد 11. صفحات 51-65.
- دهقانی ا، قبائی سوق م، شریفیان ح، دهقانی ن، 1390. واسنجی معادلات تجربی تبخیر-تفرق روزانه و مقایسه با شبکه عصبی مصنوعی در شرایط مختلف کمبود داده‌های هواشناسی. مجله مدیریت آب و آبیاری، دوره 1 شماره 1. صفحات 41-54.
- رحیمی خوب ع، بهبهانی م، نظری فر م، 1385. بررسی استفاده از حداقل داده‌های هواشناسی در معادله پنمن-مانتیث-مطالعه موردی استان خوزستان. مجله علوم کشاورزی، سال 12، شماره 3. صفحات 591-599.
- شرفیان ح، قهرمان ب، علیزاده ا، میرلطیفی م، 1385. مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر-تفرق مرجع (ترکیبی و دمایی) با روش استاندارد و بررسی اثرات خشکی هوا بر آن. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، سال 13، شماره 1. صفحات 1-16.
- شهبابی فر م، عصارى م، کوچکزاده م، میرلطیفی م، 1389. ارزیابی برخی از روش‌های محاسباتی تبخیر-تفرق گیاه مرجع چمن با استفاده از داده‌های لایسیمتری در شرایط گلخانه‌ای. مجله پژوهش آب در کشاورزی، جلد 24، شماره 1. صفحات 13-19.
- Abtew W, 1996. Evapotranspiration measurement and modeling for three wetland systems in South Florida. Water Resources Bulletin 32: 465-47
- Ahmadi SH and Fooladmand HR, 2008. Spatially distributed monthly reference evapotranspiration derived from of calibration of Thornthwaite equation: a case study, south of Iran. Irrigation Science 26:303-312.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith M, 1998. Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, 1998, ISBN 92-5-104219-5.
- Allen RG, Jensen JL, Wright JL and Burman RD, 1989. Operational estimate of evapotranspiration. Agronomy Journal 81:650-662.
- Dai X, Shi H, Li Y, Ouyang Z and Huo Z, 2009. Artificial neural network models for estimating regional reference evapotranspiration based on climate factors. Hydrological Processes 23: 442-450.
- DehghaniSanij H, Yamamoto T and Rasiah V, 2004. Assessment of evapotranspiration estimation models for use in semi-arid environments. Agricultural Water Management 64(2): 91-106.
- Doorenbos J and Pruitt WO, 1977. Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper 24, Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy.

- Itenfiso D, Elliott RL, Allen RG and Walter IA, 2003. Comparison of some reference evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 129(6): 440-448.
- Jensen ME, Burman RD and Allen RG, 1990. *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. American Society of Civil Engineering Manual 70, pp:332 New York.
- Jensen ME and Haise HR, 1963. Estimation of evapotranspiration from solar radiation. *Journal of Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineering* 89: 15-41.
- Landeras G, Ortiz-Barredo A and Lopez IJ, 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.
- Makkink GF, 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institution of Water Engineers* 11: 277-288.
- McGuinness JL and Bordne EF, 1972. A Comparison of Lysimeter-derived Potential Evapotranspiration with Computed Values. Technical Bulletin 1452, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture: Washington, DC.
- Priestley CHB and Taylor RJ, 1972. On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review* 100: 81-92.
- Rosenberry DO, Stannard DO, Winter TC and Martinez ML, 2004. Comparison of 13 equations for determining evapotranspiration from a prairie wetland, Cottonwood Lake area north Dakota, USA. *Wetlands* 24 (3): 483-497.
- Sentelhas P, Gillespie T and Santos EA, 2010. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in southern Ontario, Canada. *Agricultural Water Management* 97: 635-644.
- Singh VP and Xu C_Y, 1997. Evaluation and generalization of 13 mass transfer equations for determining free water evaporation. *Hydrological Processes* 11: 311-323
- Temesgen B, Eching S, Davidoff B and Frame K, 2005. Comparison of some reference evapotranspiration equations for California *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131(1): 73-84.
- Trajkovic S and Kolakovic S, 2009. Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions. *Water Resources Management* 23:3057-3067.
- Turc L, 1961. Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. *Annals of Agronomy* 12: 13-49.
- Salih AMA and Sendil U, 1983. Evapotranspiration under extremely arid environment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 110(3): 298-303.
- Xu C-Y and Singh VP, 2000. Evaluation and generalization of radiation-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes* 14: 339-349.
- Xu C-Y and Singh VP, 2002. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland. *Water Resources Management* 16: 197-219.
- Zhai L, Feng Q, Li Q and Xu C-Y, 2010. Comparison and modification of equations for calculating evapotranspiration (ET) with data from Gansu province, northwest China. *Irrigation and Drainage* 59: 477-490.