

## مقایسه و ارزیابی بیست روش تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع مبتنی بر سه دسته کلی دمای هوا، تابش خورشید و انتقال جرم در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

امید بابامیری<sup>۱\*</sup> و یعقوب دین‌پژوه<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۴/۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۲/۷)

### چکیده

هدف این مطالعه مقایسه و واسنجی تعداد ۲۰ روش مختلف تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع (ET) مبتنی بر سه روش کلی دمای هوا، تابش خورشید و انتقال جرم در حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد. برای این منظور از اطلاعات ۱۰ ایستگاه هواشناسی همدید در دوره آماری ۲۰۱۰-۱۹۸۶ استفاده شد. نتایج روش‌های مذکور با خروجی روش فائو پنمن-مانتیت (PMF-۵۶) مقایسه شد. واسنجی روش‌ها برای یکایک ایستگاه‌ها و تمام ماه‌ها و در طول دوره آماری مذکور انجام شد. ارزیابی عملکرد روش‌ها با آماره‌های  $R^2$ ، RMSE، MBE و MAE به عمل آمد. نتایج نشان داد که واسنجی روش‌ها عملکرد آنها را به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌دهد. بعد از واسنجی، از بین روش‌های بر مبنای دمای هوا، روش هارگریوز (HG) با ضریب تبیین  $R^2=0/96$ ، از بین روش‌های کلی تابش، روش دورنبوس- پروئیت (DP) با ضریب  $R^2$  معادل  $0/982$  و از بین روش‌های مبتنی بر انتقال جرم، بعد از واسنجی، روش مییر (M) با  $R^2$  معادل  $0/895$  به عنوان بهترین روش در حوضه مورد مطالعه شناخته شدند. به طور کلی، عملکرد روش‌های مبتنی بر تابش پس از واسنجی بهتر از سایر روش‌ها در این حوضه بود. بنابراین، روش DP پس از واسنجی برای تخمین ET در حوضه دریاچه ارومیه از دقت بالاتری برخوردار بوده و قابل توصیه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر- تعرق گیاه مرجع، روش پنمن-مانتیت، دمای هوا، انتقال جرم، تابش خورشید

۱. گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: obabamiri@yahoo.com

## مقدمه

تبخیر- تعرق گیاه مرجع (Evapotranspiration (ET)) یکی از مؤلفه‌های مهم سیکل هیدرولوژی است که تخمین دقیق آن برای مدیریت بهینه منابع آب لازم می‌باشد. تخمین میزان دقیق تبخیر- تعرق گیاه مرجع (ET) نه تنها در برنامه‌ریزی آبیاری و تعیین دوره آبیاری، بلکه در مطالعات مربوط به مدل‌بندی بیلان آب هر ناحیه از اهمیت فراوانی برخوردار است. افزون بر این، ET در تأمین نیاز آبی گیاهان، برنامه‌ریزی دقیق آبیاری و مطالعه بیلان آب مخازن، ضرورت دارد. تبخیر- تعرق گیاه مرجع تابعی از عوامل مختلف هواشناسی نظیر دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشیدی است. این مؤلفه در مطالعات مختلف کشاورزی از جمله طراحی سیستم‌های آبیاری و زهکشی و طراحی مخازن نقش مهمی ایفا می‌کند (۱۶). تخمین بیش از حد آب مورد نیاز گیاه، ضمن هدر دادن آب آبیاری، باعث ماندابی شدن اراضی، شستشوی مواد غذایی و آلوده نمودن منابع آب زیرزمینی می‌شود. از سوی دیگر، تخمین کمتر نیز باعث اعمال تنش خشکی به گیاه شده و به دنبال آن کاهش محصول را به همراه خواهد داشت (۲۰).

معمولاً برای اندازه‌گیری مستقیم مقدار تبخیر- تعرق از لایسیمتر استفاده می‌شود. با این حال، اندازه‌گیری ET پرهزینه بوده و نیازمند صرف وقت زیاد است که همیشه امکان‌پذیر نیست. از اینرو، در غالب موارد، برای این کار، از روش‌های غیرمستقیم که با استفاده از داده‌های اقلیمی، ET را تخمین می‌زنند، استفاده می‌شود. این روش‌ها شامل طیف وسیعی از مدل‌های ساده تجربی تا روش‌های پیچیده ترکیبی، مانند پنمن-مانتیت، که بر قوانین فیزیکی استوارند، تغییر می‌کنند. مطالعات پیشین نشان می‌دهد که مقدار تخمینی ET با استفاده از روش فائو پنمن-مانتیت، (PMF-۵۶) در اقلیم‌های مختلف به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر است (۱۰). با توجه به این که مقادیر ET حاصل از لایسیمتر در اکثر موارد قابل دسترس نیست. بنابراین، واسنجی مدل‌های تجربی

تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع با نتایج حاصل از مدل PMF-۵۶ انجام می‌گیرد (۹ و ۲۱). در اکثر مطالعات، مدل PMF-۵۶ جهت مقایسه و واسنجی مدل‌های دیگر به کار می‌رود (۱۴، ۱۷ و ۳۵).

مطالعات متعددی در زمینه واسنجی مدل‌های مختلف ET هم در ایران و هم در خارج از کشور انجام شده است. سینگ و شو (۳۳) با بررسی ۱۳ نوع مدل مختلف (هفت دسته کلی) تبخیر از سطح آزاد آب (بر مبنای انتقال جرم) در مقیاس ماهانه، مدلی که با داده‌های لایسیمتری سازگاری داشت برای منطقه‌ای در شمال غرب کانادا در چهار اقلیم انتخاب و آن را واسنجی کردند. شو و سینگ (۴۱) هشت روش تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع بر مبنای تابش را برای ایستگاه چنگینز در سوئیس انتخاب و در مقایسه با تبخیر از تشت تبخیر واسنجی کردند. شو و سینگ (۴۲) با بررسی کارایی هفت روش تخمین ET بر مبنای دمای هوا در ایستگاه دریاچه راوسون و آتیکوکان واقع در شمال غرب اونتاریو کانادا نشان دادند که روش بلانی-کریدل اصلاح شده و هارگریوز به ترتیب به عنوان بهترین روش در منطقه می‌باشند. شو و سینگ (۴۳) پنج روش تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع را از بین سه روش کلی شامل پنمن، (بر مبنای انتقال جرم)، ماک کینگ و پرستلی تیلور، (بر مبنای تابش) و هارگریوز و بلانی کریدل، (بر مبنای دمای هوا) در ایستگاه سوئیس در مقیاس ماهانه سال‌های ۱۹۹۴-۱۹۹۰ انتخاب و واسنجی کردند. رزنبری و همکاران (۳۰) دوازده مدل مختلف تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع (ET) را در منطقه داکوتای شمالی آمریکا با روش‌های مختلف مورد مقایسه قرار دادند که از بین آنها روش پرستلی تیلور (PT) نتایج دقیق‌تری را به دست داد.

ترج کوویچ و کولاکوویچ (۳۸) روش‌های مختلف تبخیر- تعرق گیاه مرجع شامل روش‌های هارگریوز (HG)، ترنت وایت (TW) Thornthwaite، تورک (T) Turc، جنسن-هیز (Jensen-Haise) و PT را بر اساس داده‌های هفت ایستگاه با آب و هوای مرطوب در مقابل روش PMF-۵۶ مقایسه و ارزیابی کردند. ژای

تعرق گیاه مرجع بسط داده شده بر مبنای دمای هوا، تابش و انتقال جرم و واسنجی آنها با توجه به نتایج روش PMF-۵۶ در حوضه آبریز دریاچه ارومیه است.

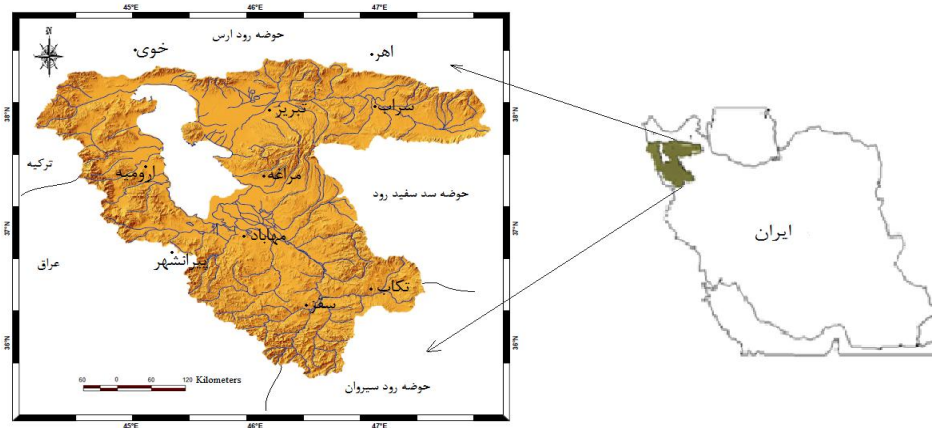
### مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه حوضه آبریز دریاچه ارومیه است. این حوضه در شمال غرب ایران بوده و دریاچه بزرگ ارومیه در این حوضه واقع شده است. این حوضه به لحاظ جغرافیایی مابین ۴۴ درجه و ۱۳ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۲۹ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. مساحت حوضه دریاچه ارومیه حدود ۵۲۷۰۰ کیلومتر مربع است که حدود ۳/۲٪ مساحت کل کشور را در بر می‌گیرد. میانگین بارش سالانه این حوضه حدود ۳۹۸ میلی‌متر است. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل میانگین، حداقل و حداکثر دمای 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 شدند. در این مطالعه، از روش‌های تجربی تخمین ET، مختلف بر مبنای دمای هوا شامل روش هارگریوز (HG)، بلانی- کریدل (BC)، TW، و لیناکر (Linacre(Lin)، بر مبنای تابش (دورنبوس-پروئیت (Doorenbos- Pruiitt(DP)، PT، Mak، JH، Tr، آبتیو (Abtew(A) و مک‌گینز- بوردن (MB) (McGuinness -Bordne) و بر مبنای انتقال جرم (روش‌های مییر (M) Meyer، دالتون (D) Dalton، روهور (R) Rohwer، پنمن (P)، بروکمپ و ونر (Brockamp and Wenner (BW) و ماهرینگر (Ma) Mahringer، ترابرت (Tr) Trabert، WMO و آلبرچت (Al) Albrecht) که به داده‌های ورودی کمتری نیاز دارند، استفاده شد. در این مطالعه، تعداد ۷ ایستگاه هواشناسی در داخل حوضه و سه ایستگاه در حاشیه بیرونی حوضه (به دلیل اهمیت اطلاعات این ایستگاه‌ها) انتخاب شدند. شکل (۱) منطقه

و همکاران (۴۴) نتایج تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع حاصل از یازده مدل تجربی را با داده‌های تبخیر از تشتک، در ده ایستگاه هواشناسی واقع در استان گانسو در شمال چین، مقایسه کردند. سنتلهاس و همکاران (۳۲) با استفاده از اطلاعات ۱۲ ایستگاه هواشناسی واقع در جنوب کانادا مدل‌های هارگریوز، تورنت وایت، پرستلی تیلور و PMF-۵۶ (زمانی که داده‌های تابش و سرعت باد در دسترس نباشد) را براساس نتایج مدل PMF-۵۶ واسنجی کردند.

طبری و همکاران (۳۴) تعداد ۳۱ مدل ET، که ۱۰ مدل آن بر مبنای انتقال جرم بود، را در ایستگاه رشت در مقایسه با روش PMF-۵۶ مقایسه کردند. جهانبخش اصل و همکاران (۱) روش‌های ترکیبی، دمایی، تابشی، همبستگی چندگانه و رطوبتی را برای ایستگاه تبریز با آمار بیست ساله تحلیل و خروجی آنها را با روش تشتک تبخیر مقایسه کردند. شریفیان و همکاران (۴) ET 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 PMF-۵۶ مقایسه کردند. رحیمی‌خوب و همکاران (۳) روش‌های تخمین ET با استفاده از حداقل داده‌های هواشناسی در منطقه خوزستان را با استفاده از معادله PMF-۵۶ مورد مقایسه قرار دادند. شهابی‌فر و همکاران (۵) هفت روش مختلف تبخیر- تعرق گیاه مرجع را با مقادیر اندازه‌گیری شده از لایسیمتر در ایستگاه تهران مقایسه کردند. دهقانی و همکاران (۲) با استفاده از داده‌های روزانه تنها ایستگاه گرگان مقادیر ET را با روش‌های PMF-۵۶، HG، T، PT و مک‌کینگ تخمین زدند. نامبردگان مدل‌ها را براساس روش استاندارد PMF-۵۶ واسنجی کردند.

با توجه به پیشینه پژوهش به نظر می‌رسد که مطالعه دقیق و به‌روز شده در زمینه واسنجی مدل‌های مختلف تبخیر-تعرق در شمال غرب ایران بر مبنای مدل PMF-۵۶ انجام نشده است. بنابراین، هدف این مطالعه مقایسه روش‌های تخمین تبخیر-



شکل ۱. نقشه منطقه مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌های انتخاب شده در حوضه دریاچه ارومیه

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

دوره آماری	نوع اقلیم	ضریب خشکی دومارتین (I)	ارتفاع از سطح دریا (m)	عرض جغرافیایی		طول جغرافیایی		نام ایستگاه
				درجه	دقیقه	درجه	دقیقه	
۱۹۸۶-۲۰۱۰	نیمه خشک	۱۲/۹۵	۱۳۹۰/۵	۳۸	۲۶	۴۷	۴	اهر
۱۹۸۶-۲۰۰۸	نیمه خشک	۱۳/۰۷	۱۱۰۳	۳۸	۳۳	۴۴	۵۸	خوی
۱۹۸۶-۲۰۰۸	نیمه خشک	۱۷/۵۲	۱۳۸۵	۳۶	۴۶	۴۵	۴۳	مهاباد
۱۹۸۶-۲۰۱۰	نیمه خشک	۱۳/۳۱	۱۴۷۷/۷	۳۷	۲۴	۴۶	۱۶	مراغه
۱۹۸۶-۲۰۰۸	نیمه خشک	۱۵/۶۴	۱۳۱۵/۹	۴۷	۳۲	۴۵	۵	ارومیه
۱۹۸۶-۲۰۰۸	نیمه خشک	۲۳/۰۱	۱۴۵۵	۳۶	۴۰	۴۵	۸	پیرانشهر
۱۹۸۶-۲۰۱۰	نیمه خشک	۱۳/۸۸	۱۶۸۲	۳۷	۵۶	۴۷	۳۲	سراب
۱۹۸۶-۲۰۰۸	نیمه خشک	۲۲/۹۷	۱۵۲۲/۸	۳۶	۱۵	۴۶	۱۶	سقز
۱۹۸۶-۲۰۰۸	نیمه خشک	۱۷/۴۲	۱۷۶۵	۳۶	۲۳	۴۷	۷	تکاب
۱۹۸۶-۲۰۱۰	نیمه خشک	۱۲/۸۶	۱۳۶۱	۳۶	۲۳	۴۶	۱۷	تبریز

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

که در آن:  $ET_0$ : تبخیر تعرق گیاه مرجع ( $mm/day^{-1}$ )،  $R_n$ : تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ( $MJ m^{-2} day^{-1}$ )،  $G$ : جریان حرارتی خاک ( $MJ m^{-2} day^{-1}$ )،  $T$ : میانگین دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین ( $^{\circ}C$ )،  $u_v$ : سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین ( $m/s$ )،  $e_s - e_a$ : کمبود فشار بخار در

مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌های منتخب را نشان می‌دهد. جدول (۱) نیز مشخصات ایستگاه‌های منتخب را ارائه می‌دهد. در این مطالعه روش PMF-۵۶ به عنوان روش مناسب برای مقایسه و واسنجی سایر مدل‌ها انتخاب گردید. علت این تصمیم این است که آلن و همکاران (۹)، مدل مذکور را به عنوان یک روش استاندارد جهانی برای تخمین  $ET_0$  در اقلیم‌های مختلف معرفی کردند.

فرم توصیه شده روش PMF-۵۶ به شرح زیر است:

جدول ۲. طبقه‌بندی اقلیمی با توجه به ضریب خشکی دوما رتن

نوع اقلیم	خشک	نیمه‌خشک	مدیترانه‌ای	نیمه‌مرطوب	مرطوب	خیلی مرطوب
محدوده ضریب خشکی	کمتر از ۱۰	۱۰ تا ۱۹/۹۹	۲۰ تا ۲۳/۹۹	۲۴ تا ۲۷/۹۹	۲۸ تا ۳۴/۹۹	بیشتر از ۳۵

جدول ۳. چهار روش انتخاب شده برای تخمین ET<sub>o</sub> بر مبنای دمای هوا در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

معادله	مرجع	روش
$ET_o = 0.0023(T_{max} - T_{min})^{1/2}(T + 17.8)R_a / \lambda$ $\lambda = 2/501 - (2/361 \times 10^{-3})T$	(۴۴)	هارگریوز (HG)
$ET_o = 0.45(0.46T_{mean} + 8/13)P$	(۴۴)	بلانی- کریدل (BC)
$ET_o = \frac{16N}{360} \left( \frac{10T}{\sum_{K=1}^{12} (0.2T)^{1.52}} \right)^{0.16} \sum_{K=1}^{12} (0.2T)^{0.54 + 0.5}$	(۳۶)	تورنت وایت (TW)
$ET_o = \frac{500T_m - 15(T - T_{dew})}{100 - L_a} \quad T_m = T + 0.006Z$		
$T_{dew} = \frac{237/3}{\frac{1}{\ln\left(\frac{RH}{100}\right)} + \frac{T}{237/3 + T} - 1}$	(۲۲)	روش لیناکر (Lin)

تابعی از عرض جغرافیایی محل و ماه مورد نظر می‌باشد و مقدار آن از جداول مرجع استخراج می‌شود،  $L_a$  عرض جغرافیایی ایستگاه برحسب درجه و  $T_{dew}$  دمای نقطه شبنم برحسب °C بوده و با توجه به مقادیر T و درصد رطوبت نسبی هوا (RH) به دست می‌آید. شکل کلی اکثر روش‌های تخمین ET<sub>o</sub> بر مبنای تابش به شرح زیر است (۱۸):

$$\lambda ET_o = C_r(wR_s) \quad \text{یا} \quad \lambda ET_o = C_r(wR_n) \quad [۴]$$

که در آن  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر،  $C_r$  ضریبی که بستگی به رطوبت نسبی و سرعت باد دارد، w ضریب وزنی دمای هوا و طول جغرافیایی و  $R_s$  تابش خالص رسیده به سطح زمین است. در این مطالعه، هفت روش تخمین ET<sub>o</sub> مبتنی بر تابش آفتاب (جدول ۴) برای مقایسه و واسنجی انتخاب گردید. در جدول (۵)،  $R_s$  تابش خالص رسیده به سطح زمین (mm/day)، RH درصد رطوبت نسبی،  $U_d$  میانگین سرعت باد روزانه (m/s)،  $e_{s,max} - e_{s,min}$  کمبود فشار بخار اشباع

ارتفاع ۲ متری (kPa)،  $\Delta$ : شیب منحنی فشار بخار ( $Kpa^{\circ}C^{-1}$ ) و  $\gamma$ : ثابت سایکرومتر ( $Kpa^{\circ}C^{-1}$ ) می‌باشد.

شکل کلی اکثر روش‌های تخمین ET<sub>o</sub> بر مبنای دمای هوا به شرح زیر است:

$$ET_o = C(T)^n \quad [۲]$$

$$ET_o = C_1 d_1 T(C_2 - C_3) \quad [۳]$$

که C و  $n^*$  ضرایب ثابت تجربی هستند که مقادیر آنها را برای هر ایستگاه با توجه به اطلاعات داده‌های مربوط به تبخیر- تعرق گیاه مرجع و دمای هوا می‌توان تخمین زد،  $d_1$  پارامتر مربوط به طول روز  $C_1, C_2, C_3$  و ثابت‌های مدل است. در این مطالعه، چهار روش تخمین ET<sub>o</sub> مبتنی بر دمای هوا برای مقایسه و واسنجی انتخاب گردید (جدول ۳). در جدول (۲)،  $T_{max}$  و  $T_{min}$  به ترتیب میانگین ماهانه دمای ماکزیمم و مینیمم (°C)،  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر ( $MJkg^{-1}$ )، P ضریب روشنایی مربوط به طول روز در ماه مشخص از سال است. این ضریب

جدول ۴. هفت روش انتخاب شده برای تخمین ET<sub>c</sub> بر مبنای تابش خورشیدی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

معادله	مرجع	روش
$a = 1/0.66 - 0/0.013RH + 0/0.45U_d - 0/0.002RH.U_d$ $ET_c = a \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) R_s - 0/3$	۱۵	دورنبوس - پروت (DP)
$ET_c = 1/26 \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) R_n / \lambda$	۲۸	پرستلی - تیلور (PT)
$ET_c = 0/61 \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) R_s / \lambda - 0/12$	۲۴	مک کینگ (Mak)
$ET_c = C_T (T - T_X) R_s$		
$C_T = \frac{1}{45 - (h/137) + (365/(e_{s,max} - e_{s,min}))}$	۱۹	جنسن - هیز (JH)
$T_X = -2/5 - 0/14(e_{s,max} - e_{s,min}) - h/15$		
$ET_c = 0/013 \frac{T}{T+15} (R_s + 50)$ برای RH $\geq 50$		
$ET_c = 0/013 \frac{T}{T+15} (R_s + 50) \left( 1 + \frac{50 - RH}{70} \right)$ برای RH $\leq 50$	۳۹	تورک (T)
$ET_c = 0/52 R_s / \lambda$	۶	آبتیو (A)
$ET_c = \{ (0/0082T - 0/19) (R_s / 1500) \} 2/54$	۲۵	مکگینز - بوردن (MB)

مرجع محاسبه شده با روش PMF-۵۶ برحسب ( $\text{mmday}^{-1}$ ) در ماه معین برای سال  $i$  ام؛  $\overline{ET_{c,m}}$  میانگین تبخیر-تعرق گیاه مرجع تخمین زده شده با یکی از روش‌های منتخب در جدول‌های (۳)، (۴) و (۵)؛  $\overline{ET_{c,FAO}}$  میانگین تبخیر-تعرق گیاه مرجع تخمین زده شده با روش PMF-۵۶. تعداد سال‌های آماری می‌باشد. در این مطالعه با برازش خط رگرسیون از مبدأ، با در نظر گرفتن مقادیر محاسبه شده با روش PMF-۵۶ به‌عنوان متغیر وابسته و مقادیر حاصل از یک روش معین به‌عنوان متغیر مستقل، شیب خط رگرسیون از مبدأ (ژای و همکاران) محاسبه شد و به‌عنوان ثابت واسنجی ( $K$ ) برای روش مورد نظر به‌دست آمد. آنگاه مقدار ضریب تبیین محاسبه شد. این کار برای یکایک ایستگاه‌ها انجام شد.

در این پژوهش برای تعیین اقلیم ایستگاه‌های منتخب از ضریب خشکی دومارتن استفاده شد. که مدل کلی آن به‌صورت زیر می‌باشد.

$$I = \frac{P}{T+10} \quad [6]$$

I: ضریب خشکی دومارتن، P: میانگین بارندگی سالانه

متناظر با حداکثر و حداقل دمای هوا در گرمترین ماه سال ( $\text{mbar}$ ) و  $h$  ارتفاع محل از سطح دریا ( $m$ ) می‌باشد. شکل کلی اکثر روش‌های تخمین ET<sub>c</sub> بر مبنای انتقال جرم به‌شرح زیر است (۳۳):

$$ET_c = C(e_s - e_a) \quad [5]$$

که در آن  $C$  ضریب ثابتی است که به سرعت باد بستگی دارد. روش‌های انتخاب شده برای تخمین ET<sub>c</sub> که بر مبنای انتقال جرم می‌باشند در جدول (۵) ارائه شده‌اند. در این جدول، کمیت  $(e_s - e_a)$  موسوم به کمبود فشار بخار اشباع بوده و  $u_2$  نیز سرعت باد در ارتفاع ۲ متری می‌باشد.

در این مطالعه ۴ معیار ارزیابی شامل  $R^2$  (ضریب تعیین)، RMSE (جذر میانگین مربعات خطا)، MBE (میانگین خطای اریب) و MAE (میانگین خطای مطلق) استفاده شده است. معادله هر کدام از این معیارها در جدول (۶) ارائه شده است. در جدول (۶)،  $ET_{c,m,i}$  مقدار تبخیر-تعرق گیاه مرجع تخمین زده شده با یکی از روش‌های دمایی برحسب ( $\text{mmday}^{-1}$ ) در ماه معین برای سال  $i$  ام؛  $ET_{c,FAO,i}$  مقدار تبخیر-تعرق گیاه

جدول ۵. روش‌های انتخاب شده برای تخمین ET بر مبنای انتقال جرم در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

ردیف	روش	مرجع	واحد ( $u_r$ )	واحد ( $e_s - e_a$ )	معادله
۱	میپر (M)	۲۶	m/s	hPa	$ET_s = (0/375 + 0/05026u_r).(e_s - e_a)$
۲	دالتون (D)	۱۳	m/s	hPa	$ET_s = (0/3648 + 0/07223u_r).(e_s - e_a)$
۳	روهور (R)	۲۹	m/s	mm Hg	$ET_s = 0/22(1 + 0/27u_r).(e_s - e_a)$
۴	پنمن (P)	۲۷	Mile/day	mm Hg	$ET_s = 0/25(1 + 0/98/100u_r).(e_s - e_a)$
۵	بروکمپ و ونز (BW)	۱۱	m/s	hPa	$ET_s = 0/523 / u_r^{0/456} .(e_s - e_a)$
۶	ماهرینگر (Ma)	۲۳	m/s	hPa	$ET_s = 0/15072 . \sqrt{3/6} u_r .(e_s - e_a)$
۷	تراپرت (Tr)	۳۷	m/s	hPa	$ET_s = 0/3075 . \sqrt{u_r} .(e_s - e_a)$
۸	WMO	۴۰	m/s	hPa	$ET_s = (0/1298 + 0/0934u_r).(e_s - e_a)$
۹	آلبرجت (Al)	۸	m/s	hPa	$ET_s = (0/1005 + 0/297u_r).(e_s - e_a)$

برحسب میلی‌متر و T: میانگین دمای هوای سالیانه برحسب سانتی‌گراد. براساس مدل دومارتن ۶ نوع آب و هوا به شرح جدول (۲) طبقه‌بندی و تعریف شده‌اند:

به منظور صحت‌سنجی روش‌ها، کل دوره آماری به دو بخش طوری تقسیم شد که قسمت اول شامل دوره آماری منهای ۵ سال آخر و قسمت دوم داده‌های ۵ سال آخر بود. آنگاه یکبار دیگر مدل‌سازی با داده‌های قسمت اول انجام شد و با توجه به ضرایب واسنجی مدل، صحت‌سنجی آن با داده‌های قسمت دوم به عمل آمد.

به عنوان بهترین روش در حوضه مورد مطالعه  $R^2 = 0/982$  شناخته شد. در مدل مذکور حد پایین  $R^2$  (۰/۹۷۰۱) مربوط به ایستگاه مراغه و همچنین حد بالای ضریب تبیین مربوط به ایستگاه ارومیه با مقدار عددی ۰/۹۹۱۴ می‌باشد. بر همین اساس نتایج روش DP در ادامه ارائه می‌شود.

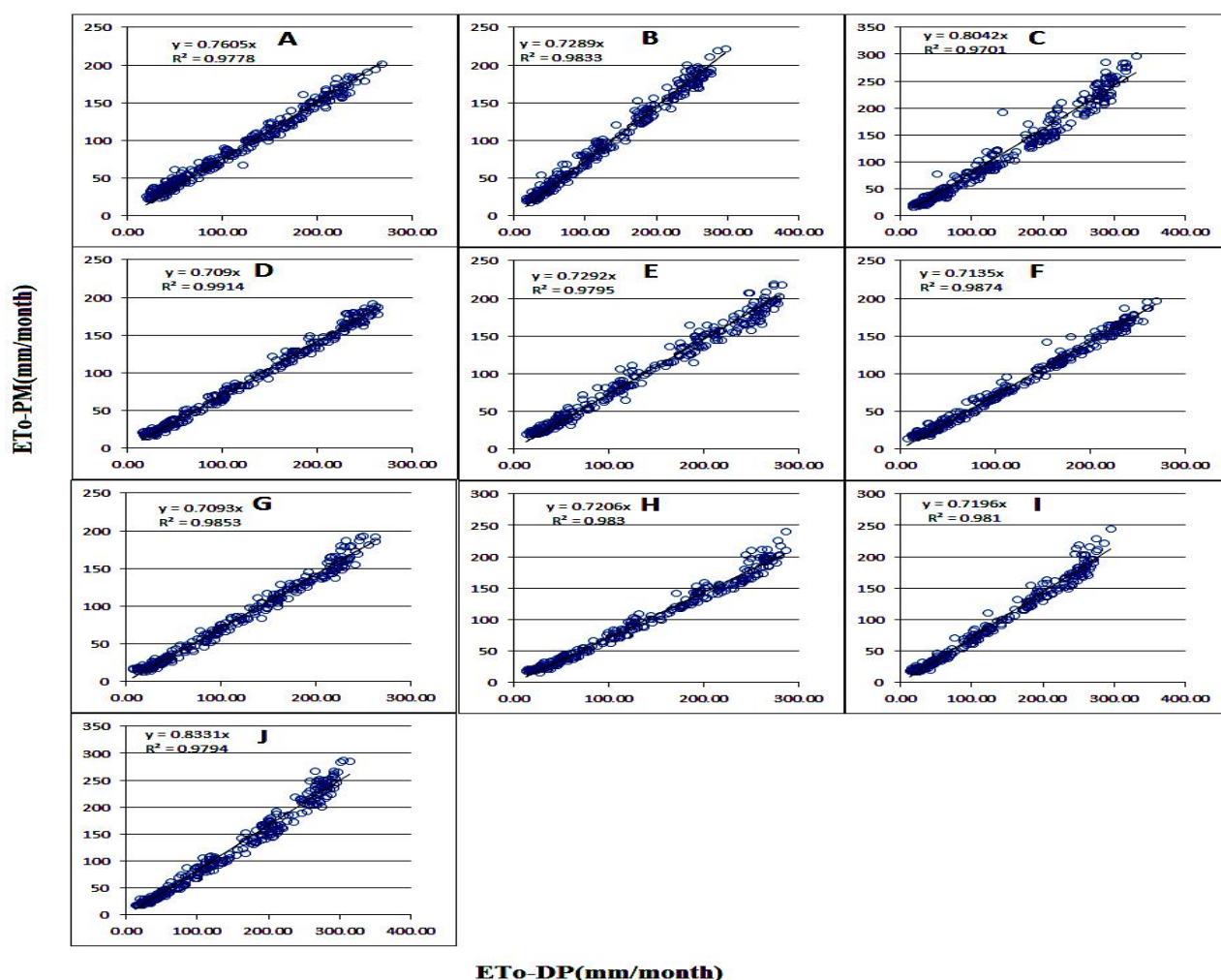
قبل از واسنجی روش‌های تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع مبتنی بر تابش، با توجه به میانه ارقام نظیر آماره  $R^2$  روش DP با میانه ضریب تبیین  $R^2 = 0/982$  به عنوان بهترین روش در حوضه مورد مطالعه شناخته شد. پس از روش DP روش‌های PT, Mak, JH, Tr, Al و MB در رده‌های بعدی قرار گرفتند. (شکل ۲) نقاط پراکنش مقادیر ET را که محور افقی آن مربوط به مدل DP و محور قائم آن مربوط به مدل PMF-۵۶ است نشان می‌دهد. به طوری که از این شکل می‌توان استنباط کرد مدل دورنبوس پرویت قبل از واسنجی مقدار ET را با دقت قابل قبول تخمین زده است. با این حال، روش مذکور در همه ایستگاه‌ها مقدار ET را بیشتر از مدل PMF-۵۶ تخمین زده است. علت آن این است که مقدار ET با روش PMF-۵۶ بین ۰/۷۰۹۰ برابر (در ایستگاه ارومیه) تا ۰/۸۳۳۱ برابر (در ایستگاه تبریز) روش نظیر DP تغییر می‌کند. جدول (۶) معیارهای

برحسب میلی‌متر و T: میانگین دمای هوای سالیانه برحسب سانتی‌گراد. براساس مدل دومارتن ۶ نوع آب و هوا به شرح جدول (۲) طبقه‌بندی و تعریف شده‌اند:

به منظور صحت‌سنجی روش‌ها، کل دوره آماری به دو بخش طوری تقسیم شد که قسمت اول شامل دوره آماری منهای ۵ سال آخر و قسمت دوم داده‌های ۵ سال آخر بود. آنگاه یکبار دیگر مدل‌سازی با داده‌های قسمت اول انجام شد و با توجه به ضرایب واسنجی مدل، صحت‌سنجی آن با داده‌های قسمت دوم به عمل آمد.

## نتایج و بحث

در این قسمت نتایج واسنجی روش‌ها به صورت دسته‌بندی شده ابتدا برای روش‌های بر مبنای درجه حرارت هوا، سپس برای روش‌های بر مبنای تابش و در خاتمه روش‌های بر مبنای انتقال جرم انجام شد. که از بین این سه دسته کلی روش‌های بر مبنای تابش به عنوان بهترین دسته کلی معرفی شد. برای هر ایستگاه مقدار ضریب تبیین به دست آمد و در بین ۱۰ ایستگاه مقدار میانه ضریب مذکور در نظر گرفته شد. از بین روش‌های بر مبنای تابش روش دورنبوس- پروت (DP) با میانه ضریب تبیین



شکل ۲. مقایسه مقادیر ET محاسبه شده با روش دورنبوس - پروئیت (DP) و PMF-۵۶ در

۱۰ ایستگاه هواشناسی حوضه آبریز دریاچه ارومیه (قبل از واسنجی)

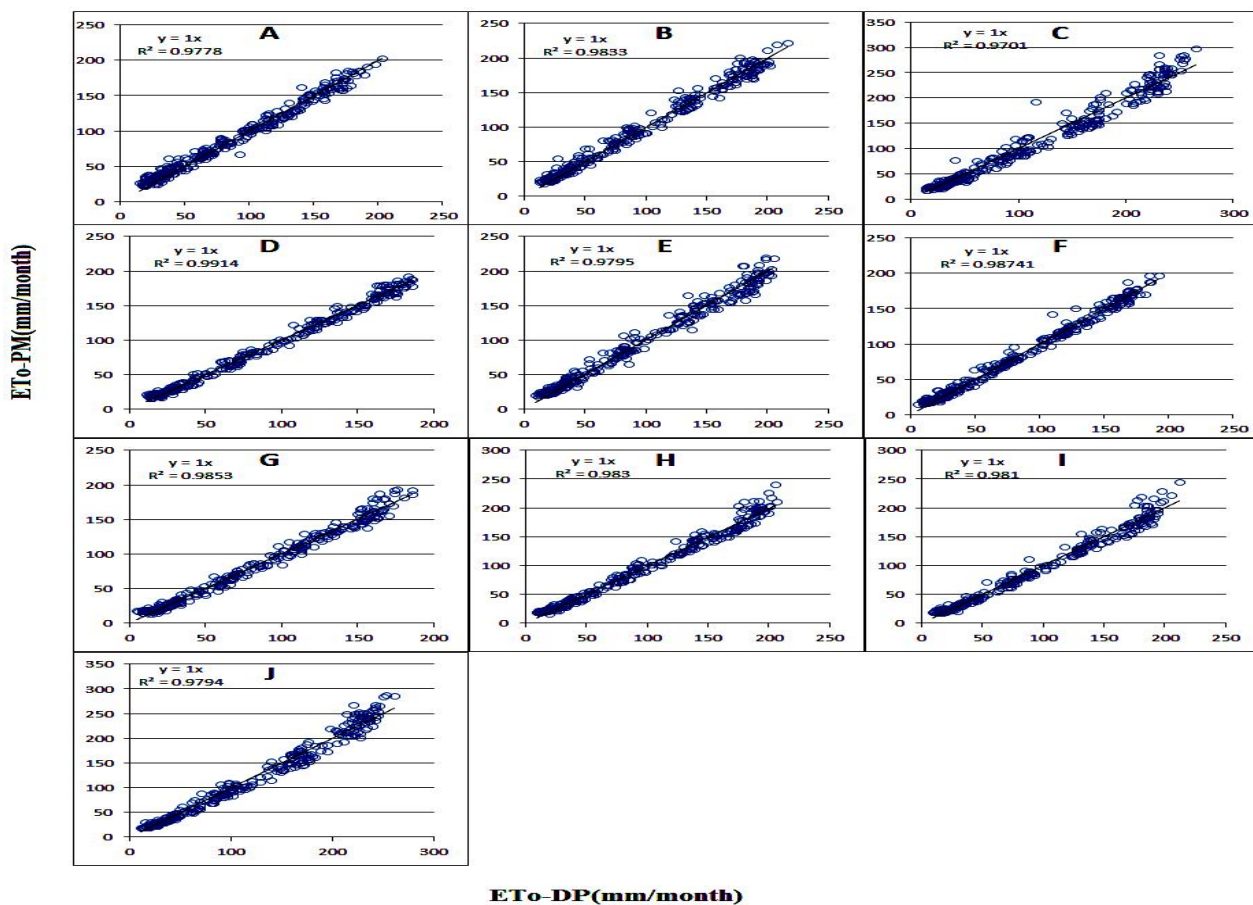
جدول ۶. آماره‌های ارزیابی عملکرد مدل‌های مورد استفاده در این مطالعه

معادله	منبع	واحد	معیار ارزیابی
$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (ET_{o,m,i} - \overline{ET_{o,m}}) \cdot (ET_{o,FAO,i} - \overline{ET_{o,FAO}}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (ET_{o,m,i} - \overline{ET_{o,m}})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (ET_{o,FAO,i} - \overline{ET_{o,FAO}})^2}$	۱۲	بی‌بعد	$R^2$
$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ET_{o,m,i} - ET_{o,FAO,i})^2}$	۳۲	میلی متر بر ماه	RMSE
$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ET_{o,m,i} - ET_{o,FAO,i})$	۳۲	میلی متر بر ماه	MBE
$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  ET_{o,m,i} - ET_{o,FAO,i} $	۳۸	میلی متر بر ماه	MAE

گرفت، مقادیر RMSE از حداقل معادل ۳۰/۱۶۴ در ایستگاه تبریز تا حداکثر ۴۵/۶۷۵ میلی متر در ماه در ایستگاه سقز تغییر

ارزیابی محاسبه شده برای تخمین ET با روش DP را قبل واسنجی نشان می‌دهد. به طوری که از جدول (۶) می‌توان نتیجه





شکل ۳. مقایسه مقادیر ET محاسبه شده با روش دورنبوس- پروئیت (DP) و PMF-۵۶ در ۱۰ ایستگاه هواشناسی حوضه آبریز دریاچه ارومیه (بعد از واسنجی) جهت مشاهده نام ایستگاه با توجه به کد ایستگاه (حروف انگلیسی) به جدول (۶) مراجعه شود

می‌کند. مقادیر MBE نیز از حداقل معادل ۲۴/۹۸۸ در ایستگاه تبریز تا حداکثر ۳۶/۵۲۷۴ میلی‌متر در ماه در ایستگاه سقز تغییر می‌کند. مقادیر MAE نیز از حداقل ۲۴/۴۶۵۳ در ایستگاه تبریز تا حداکثر ۳۶/۸۶۰۹ در ایستگاه سقز تغییر می‌کند. این نشان می‌دهد که در ایستگاه مذکور میانگین قدر مطلق انحراف مقادیر ET به دست آمده با روش DP از روش PMF-۵۶ بیشتر از سایر ایستگاه‌ها می‌باشد. حداقل مقدار  $R^2$  متعلق به ایستگاه مراغه (معادل ۰/۹۷۰۱) و حداکثر مقدار آن متعلق به ایستگاه ارومیه (معادل ۰/۹۹۱۴) می‌باشد. بررسی معنی‌داری مقادیر  $R^2$  نشان داد که همه مقادیر محاسبه شده برای  $R^2$  ایستگاه‌ها در سطح ۵٪ معنی‌دار هستند. شکل (۳) نقاط پراکنش مقادیر

ET محاسبه شده با روش DP و PMF-۵۶ را در ایستگاه‌های مورد مطالعه بعد از واسنجی نشان می‌دهد. به طوری که از شکل (۳) می‌توان استنباط کرد، پس از واسنجی، مقادیر برآورد شده با روش DP به مقادیر نظیر روش PMF-۵۶ نزدیک‌تر شد. به طوری که، پس از واسنجی ضریب زاویه خط برازش شده برای همه ایستگاه‌ها معادل واحد به دست آمده است. ضرایب تعیین ( $R^2$ ) بعد از واسنجی همان مقادیر نظیر قبل از واسنجی است. جدول (۷) معیارهای ارزیابی را در خصوص روش DP پس از واسنجی نشان می‌دهد. برای دیگر روش‌های منتخب نیز جداول مشابهی تهیه شد. به طوری که از این جدول می‌توان استنباط کرد، مقادیر RMSE

جدول ۷. معیارهای ارزیابی محاسبه شده برای تخمین ET با روش DP در ایستگاه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه (قبل از واسنجی)

MAE	MBE	RMSE	R <sup>2</sup>	کد ایستگاه	نام ایستگاه
۲۶/۷۴۷	۲۵/۱۸۴۲	۳۲/۶۸۵۰	۰/۹۷۷۸	A	اهر
۳۵/۳۷۲۵	۳۴/۹۵۸۱	۴۳/۵۸۷۹	۰/۹۸۳۳	B	مهاباد
۲۹/۸۹۰۲	۲۹/۱۳۹۶	۳۶/۴۶۰۰	۰/۹۷۰۱	C	مراغه
۳۵/۷۹۱۸	۳۵/۶۲۰۸	۴۳/۳۷۱۳	۰/۹۹۱۴	D	ارومیه
۳۴/۶۱۶۳	۳۴/۱۱۱۰	۴۳/۵۴۹۹	۰/۹۷۹۵	E	پیرانشهر
۳۳/۳۳۰۹	۳۲/۶۷۲۶	۴۰/۹۰۷۴	۰/۹۸۷۴	F	سراب
۳۳/۵۴۹۸	۳۲/۹۱۴۵	۴۰/۶۸۲۷	۰/۹۸۵۳	G	خوی
۳۶/۸۶۰۹	۳۶/۵۲۷۴	۴۵/۰۶۷۵	۰/۹۸۳۰	H	سقز
۳۶/۳۲۴۳	۳۵/۹۵۱۱	۴۴/۵۱۴۹	۰/۹۸۱۰	I	تکاب
۲۴/۴۶۵۳	۲۴/۹۸۸	۳۰/۱۶۴	۰/۹۷۹۴	J	تبریز
۳۴/۸۳۰	۳۵/۵۱۲۷	۴۲/۱۳۹۳	۰/۹۸۲۰	-	میانه (Median)

در جدول فوق واحد همه ارقام (به‌غیر از ارقام نظیر R<sup>2</sup>) میلی‌متر در ماه است.

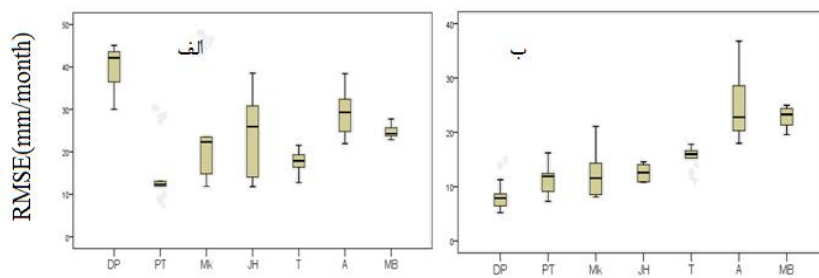
جدول ۸. معیارهای ارزیابی محاسبه شده برای تخمین ET با روش DP در ایستگاه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه (بعد از واسنجی)

MAE	MBE	RMSE	R <sup>2</sup>	کد ایستگاه	نام ایستگاه
۵/۸۵۵۷	-۲/۹۱۴	۷/۳۲۲۶	۰/۹۷۷۸	A	اهر
۶/۰۳۳۵	-۱/۴۰۳۸	۷/۶۷۸۴	۰/۹۸۳۳	B	مهاباد
۱۰/۴۲۲۵	۱/۹۸۴	۱۳/۸۲۳۲	۰/۹۷۰۱	C	مراغه
۴/۲۳۱۹	-۰/۵۴۷۱	۵/۲۱۶۵	۰/۹۹۱۴	D	ارومیه
۶/۶۰۳۳	-۱/۶۸۰۸	۸/۶۶۸۸	۰/۹۷۹۵	E	پیرانشهر
۴/۵۷۷۸	-۱/۱۵۱۳	۶/۳۴۹	۰/۹۸۷۴	F	سراب
۴/۹۸۴۰	-۰/۶۵۷۷	۶/۴۵۰۵	۰/۹۸۵۳	G	خوی
۶/۳۰۶۰	-۰/۵۸۸۲	۸/۱۰۲۰	۰/۹۸۳۰	H	سقز
۶/۰۳۳۴	-۰/۳۰۲۲	۸/۶۳۲۰	۰/۹۸۱۰	I	تکاب
۸/۵۴۴۴	۰/۸۸۷۵	۱۱/۲۷۹۲	۰/۹۷۹۴	J	تبریز
۶/۰۳۳۴	-۰/۶۲۲۹	۷/۸۹۰۲	۰/۹۸۲۰	-	میانه (Median)

در جدول فوق واحد همه ارقام (به‌غیر از ارقام نظیر R<sup>2</sup>) میلی‌متر در ماه است.

جهت مشاهده نام ایستگاه با توجه به کد ایستگاه (حروف انگلیسی) به جدول (۶) مراجعه شود. به‌عنوان مثال، مقدار آماره

و سایر آماره‌ها پس از واسنجی در تمام ایستگاه‌ها به‌طور محسوسی کاهش یافته است.



شکل ۴. نمودار باکس- ویسکر آماره RMSE برای روش‌های تخمین ET بر مبنای تابش: الف) قبل از واسنجی و ب) بعد از واسنجی

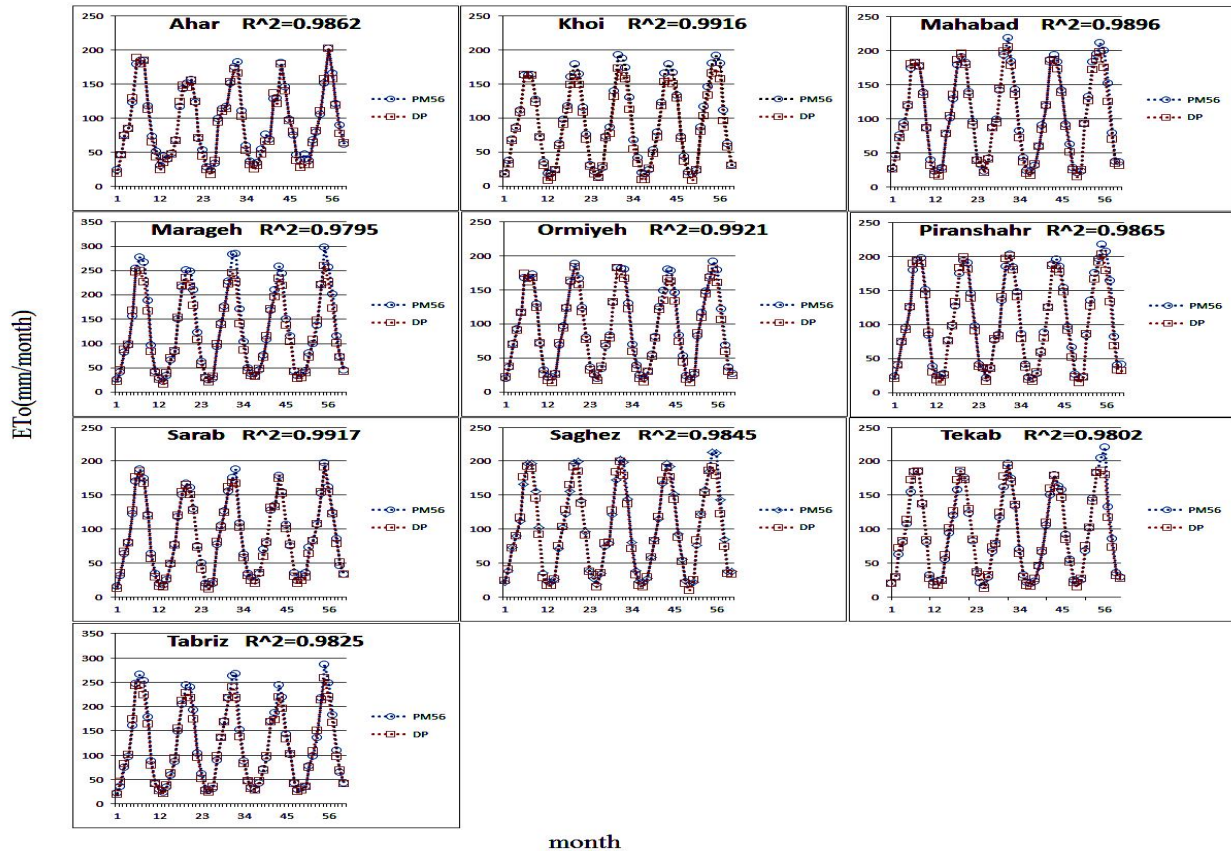
جدول ۹. ضرایب واسنجی روش‌های منتخب تخمین ET بر مبنای تابش برای تمام ماه‌های سال در تمام دوره آماری در ایستگاه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه

ایستگاه	اهر	مهاباد	مراغه	ارومیه	پیرانشهر	سراب	خوی	سقز	تکاب	تبریز
DP	۰/۷۶۰۵	۰/۷۲۸۹	۰/۸۰۴۲	۰/۷۰۹۰	۰/۷۲۹۲	۰/۷۱۳۵	۰/۷۰۳۹	۰/۷۲۰۶	۰/۷۱۹۶	۰/۸۳۳۱
PT	۱/۱۹۱	۱/۰۰۱۲	۱/۱۸۷۶	۰/۹۵۰۱	۱/۲۷۹	۰/۹۸۵۶	۰/۹۱۲۷	۱/۰۳۰۳	۱/۰۳۷۹	۱/۲۲۰۹
M	۱/۲۰۳۰	۱/۱۸۳۶	۱/۴۰۴۱	۱/۱۱۰۸	۱/۲۱۵۵	۱/۱۳۷۸	۱/۰۸۴۸	۱/۱۹۹۲	۱/۲۰۰۷	۱/۴۴۵۶
JH	۰/۹۹۲۷	۰/۸۰۰۴	۰/۹۸۱۲	۰/۸۲۱۳	۰/۸۳۵۶	۰/۸۴۵۵	۰/۷۷۸۵	۰/۷۵۸۳	۰/۷۹۸۱	۱/۰۰۱۶
T	۱/۰۷۹۰	۰/۹۱۸۳	۱/۰۶۲۹	۰/۹۸۹۵	۰/۹۴۱۱	۱/۶۳۱	۰/۹۳۰۸	۰/۹۵۳۶	۰/۹۷۳۶	۱/۱۲۳۸
A	۰/۸۸۷۶	۰/۹۱۳۴	۱/۰۹۰۹	۰/۸۳۲۵	۰/۹۳۱۵	۰/۸۲۳۹	۰/۸۲۳۹	۰/۸۸۹۸	۰/۸۷۶۸	۱/۱۱۸۶
MB	۱/۹۷	۰/۹۱۲۰	۱/۰۶۴۸	۰/۸۹۵۳	۰/۹۴۵۰	۱/۰۴۰۰	۰/۸۳۰۲	۱/۰۰۳۶	۱/۲۷۸	۱/۰۸۰۱

RMSE بعد از واسنجی برای هر یک از روش‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کرده است، به‌عبارت دیگر، واسنجی روش‌های مختلف تخمین ET بر روی دقت تخمین روش‌های مذکور بسیار مؤثر بوده است

جدول (۸) ضرایب واسنجی هفت روش تخمین ET را که مبتنی بر داده‌های تابش می‌باشند برای ده ایستگاه منتخب در حوضه دریاچه ارومیه نشان می‌دهد. به‌طوری‌که 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 را بیشتر از روش PMF-۵۶ تخمین می‌زند. در نتیجه برای بهبود عملکرد این روش لازم است مقادیر ET به ضریب واسنجی مندرج در جدول (۸) ضرب شوند. در حالی‌که روش M در

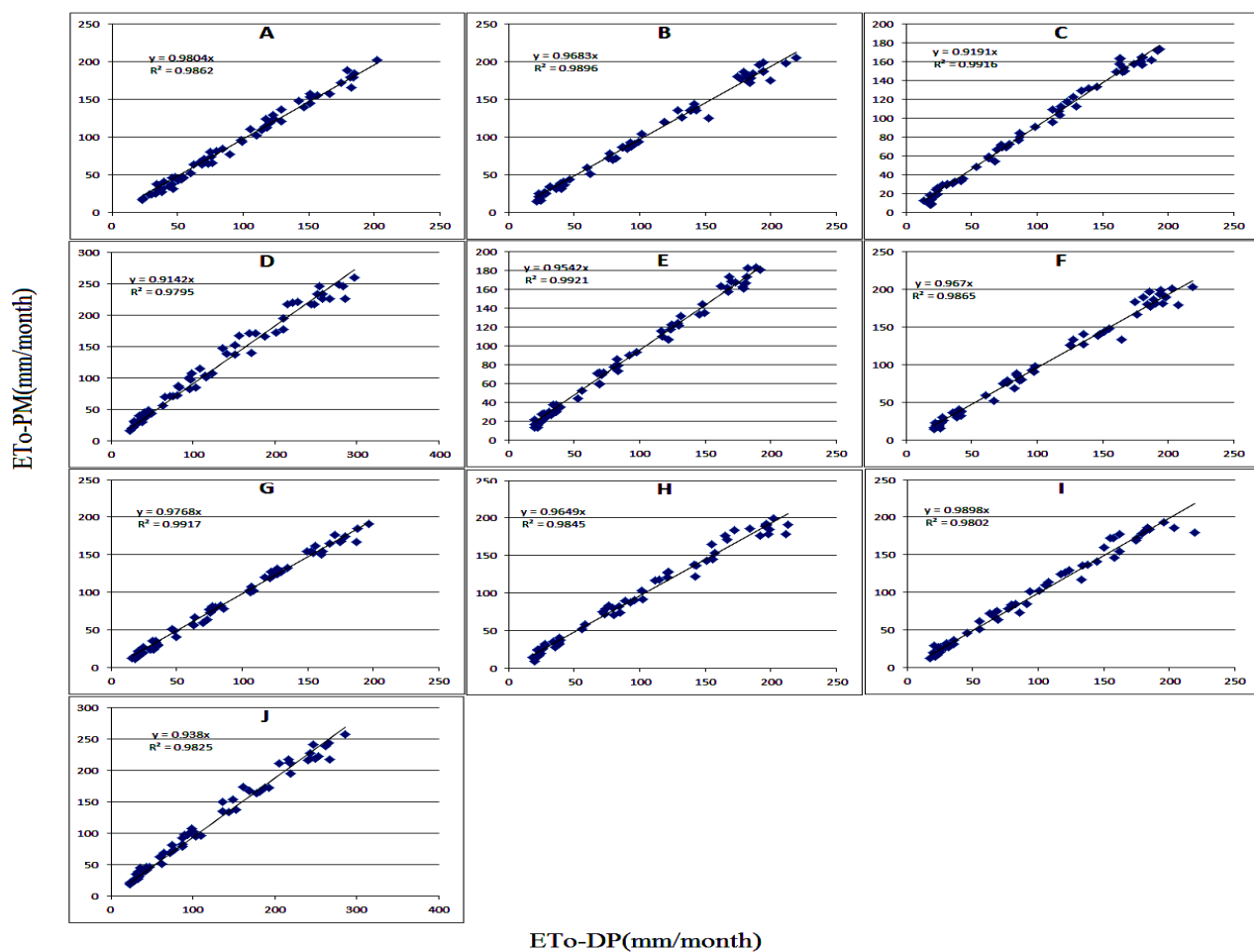
RMSE روش DP در ایستگاه ارومیه از ۴۳/۳ (قبل از واسنجی) به رقم ۵/۲ میلی‌متر در ماه (پس از واسنجی) کاهش یافته است به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد روش‌های مورد مطالعه، پس از واسنجی در مقایسه با قبل از واسنجی به‌مراتب بهبود پیدا کرده است. شکل (۴) نمودار باکس ویسکر آماره RMSE برای هفت روش تخمین ET بر مبنای تابش (DP, PT, M, JH, T, A, MB) را در مقابل روش PMF-۵۶ قبل و بعد از واسنجی نشان می‌دهد. به‌طوری‌که از این شکل می‌توان استنباط کرد، قبل از واسنجی میانه سری مربوط به ارقام RMSE از حداقل ۱۲/۳۵ (برای روش PT) تا ۴۲/۱۳ میلی‌متر در ماه (برای روش DP) تغییر می‌کند و همچنین بعد از واسنجی میانه نظیر از حداقل ۷/۸۹ (برای روش DP) تا ۲۲/۷۸ (برای روش A) تغییر می‌کند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر آماره



شکل ۵. منحنی تغییرات مقادیر ET حاصل از روش PMF-۵۶ و روش دورنبوس- پروئیت (DP) برای ۱۰ ایستگاه حوضه آبریز دریاچه ارومیه (دوره ۲۰۱۰-۲۰۰۶)

به ترتیب در رده‌های یک تا هفت قرار گرفتند. در این قسمت نیز نتایج مربوط به صحت‌سنجی روش‌ها برای ۳ گروه کلی ابتدا برای روش‌های بر مبنای درجه حرارت هوا، روش‌های بر مبنای تابش خورشیدی و بر مبنای انتقال جرم انجام شد و نتایج برای بهترین روش (DP) ارائه شد. شکل (۵) مقادیر ET حاصل از روش PMF-۵۶ و روش DP را در یک دیاگرام برای ۱۰ ایستگاه در دوره آماری (۲۰۱۰-۲۰۰۶) را نشان می‌دهد. شکل‌های مشابهی برای روش‌های دیگر تهیه شد، ولی چون میانه آماره‌های واسنجی روش‌های دیگر از گروه بر مبنای تابش کمتر از میانه نظیر روش DP بود بنابراین، شکل‌های مذکور ارائه نگردید. شکل (۶) دیاگرام نقاط پراکنش مقادیر تبخیر- تعرق گیاه مرجع واسنجی شده با روش DP و مقادیر نظیر با روش PMF-۵۶ را در دوره آماری ۲۰۱۰-۲۰۰۶

حالت عادی با توجه به دارا بودن ضرایب واسنجی بزرگ‌تر از واحد (برای همه ایستگاه‌ها) مقدار ET را کمتر از روش PMF-۵۶ تخمین می‌زند و در نتیجه برای بهبود عملکرد این روش لازم است ارقام به دست آمده با روش M به مقدار ضریب واسنجی هر ایستگاه (طبق جدول ۸) ضرب شوند. 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, M, JH, T, A, MB



شکل ۶. مقایسه مقادیر ET محاسبه شده با روش DP پس از اعمال ضرایب واسنجی و PMF-۵۶ در ایستگاه‌های هواشناسی

حوضه آبریز دریاچه ارومیه برای دوره آماری ۲۰۱۰-۲۰۰۶

جهت مشاهده نام ایستگاه، با توجه به کد ایستگاه (حروف انگلیسی) به جدول (۶) مراجعه شود

و روش تورک (مبتنی بر تابش) برای این ناحیه مناسب است. آنها پس از روش تورک روش پرستلی تیلور را برای تخمین ET ایستگاه‌های منطقه پیشنهاد کردند. احمدی و فولادمنند (۷) روش تورنت وایت را در استان فارس با توجه به خروجی روش PMF-۵۶ واسنجی نمودند آنها نشان دادند که میانه مقادیر RMSE در ۱۴ ایستگاه هواشناسی واقع در استان مذکور بین ۰/۴۳ در شهرضا تا ۰/۹۱ در بوشهر تغییر می‌کند. لازم به یادآوری است که نامبردگان مقادیر آماره مذکور را براساس ارقام ET به میلی‌متر در روز محاسبه نموده‌اند. بنابراین، چنانچه ارقام مذکور به عدد ۳۰ یا متوسط تعداد روزهای ماه ضرب گردد قابل مقایسه با نتایج تحقیق

برای همه ایستگاه‌ها نشان می‌دهد. به طوری که از این شکل می‌توان دریافت در دوره تست واسنجی روش‌ها باعث شده است که نقاط هرچه بیشتر به خط نیمساز نزدیک‌تر شوند. جهانبخش اصل و همکاران (۱) نشان دادند که در ایستگاه تبریز روش کریستین هارگریوز در ماه‌های مه، ژوئن، ژوئیه، نوامبر و دسامبر به‌عنوان بهترین روش تخمین ET است. باید توجه داشت که نامبردگان معیار مقایسه دقت روش‌ها را ارقام اندازه‌گیری شده از روش تشتک تبخیر قرار داده‌اند، بودند. ترج کوویچ و کولاکوویچ (۳۸) نشان دادند که روش هارگریوز در تخمین ET نواحی مرطوب صربستان و کرواسی مناسب نبوده

دالتون، روهور، پنمن، بروکمب-وننر، ماهرینگر، تراپرت، WMO و آلبرچت) محاسبه شد. این ۲۰ روش با روش PMF-۵۶ که به عنوان یک روش استاندارد برای تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع توصیه شده است، مقایسه و برای ده ایستگاه حوضه دریاچه ارومیه واسنجی شدند. ضرایب واسنجی برای بهترین روش هر گروه در ایستگاه‌های مختلف ارائه شد. مقایسه و ارزیابی مدل‌ها قبل و پس از واسنجی انجام گردید. کارایی روش‌ها با استفاده از معیارهای  $R^2$ ، RMSE، MBE، MAE مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که بعد از واسنجی از روش‌های مبتنی بر دمای هوا، روش هارگریوز با میانه آماره ضریب تعیین معادل ۰/۹۵۹۷ مناسب‌ترین روش تخمین ET در حوضه آبریز دریاچه ارومیه بوده و متعاقب آن روش Lin ( $R^2=0/8882$ ) نتایج دقیق‌تری ارائه کرد. روش‌های بلانی کریدل و تورنت وایت به ترتیب در رده‌های سوم و چهارم گروه دمایی قرار گرفتند. از روش‌های بر مبنای تابش روش دورنبوس و پرویت نه تنها در بین گروه تابشی مناسب‌ترین روش تخمین ET در حوضه آبریز دریاچه ارومیه بود بلکه این روش برای کل منطقه در بین ۲۰ مدل تجربی مورد مطالعه از بین ۳ گروه دمایی، تابشی و انتقال جرم به عنوان مناسب‌ترین مدل شناخته شد. مقدار ضریب تعیین روش مذکور در دامنه ۰/۹۷۰۱ برای ایستگاه مراغه و ۰/۹۹۱۴ برای ایستگاه ارومیه به دست آمد. میان آماره مذکور برای ۱۰ ایستگاه معادل ۰/۹۸۲ حاصل شد. این ارقام با توجه به تعداد مشاهدات در سطح ۱ درصد معنی‌دار بودند. پس از آن روش پرستلی تیلور با میانه آماره ضریب تعیین معادل ۰/۹۶۳۶ به عنوان دومین روش مناسب شناخته شد. روش‌های Mak، JH، Tr، Al و MB به ترتیب در رده‌های سوم تا هفتم قرار گرفتند. از روش‌های بر مبنای انتقال جرم روش مییر با میانه آماره ضریب تعیین معادل ۰/۸۹۴۵ مناسب‌ترین روش تخمین ET در حوضه آبریز دریاچه ارومیه شناخته شد، پس از آن روش دالتون با میانه آماره ضریب تعیین معادل ۰/۸۹۳۱ به عنوان دومین روش مناسب در بین روش‌های بر مبنای انتقال جرم در حوضه مذکور شناخته شد. روش‌های R،

حاضر خواهد بود. بر این اساس صرف‌نظر از منطقه مورد مطالعه عملکرد روش DP بعد از واسنجی به مراتب بهتر از روش تورنت وایت می‌باشد. خو و سینگ (۴۱) کارایی ۸ روش تخمین ET بر مبنای تابش را در ایستگاه چنگینز در سوئیس را بررسی کردند. آنها روش مکینگ و پرستلی تیلور را به ترتیب به عنوان بهترین روش معرفی کردند. روزنبری و همکاران (۳۰) نشان دادند که از بین ۱۳ روش مختلف تخمین ET روش پرستلی تیلور نتایج دقیق‌تری را در ناحیه جنوب داکوتا به دست می‌دهد. صالح و سندیل (۳۱) با مقایسه کارایی ۵ روش در بخش‌های مرکزی عربستان سعودی نشان داد که روش جنسن هیز پس از واسنجی بهترین روش برای تخمین ET است. ژای و همکاران (۴۴) مقادیر تبخیر از تشت را به عنوان مبنای صحت محاسبات در نظر گرفته و روش دورنبوس و پروت را از بین ۱۱ روش تخمین ET به عنوان مدل مناسب در شمال غرب 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 نیاز به اندازه‌گیری‌های پارامترهای متعدد هواشناسی می‌باشد. متأسفانه این داده‌ها همیشه در دسترس نیستند. برای حل این مشکل از واسنجی مدل‌های با داده سهل‌الوصول می‌توان استفاده نمود. بر این اساس، در این مطالعه با استفاده از اطلاعات آماری پارامترهای ایستگاه هواشناسی واقع در حوضه دریاچه ارومیه در دوره آماری ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۰، مقادیر ET ماهانه با روش‌های پنمن-مانتیث و ۲۰ روش تجربی (مبتنی بر درجه حرارت هوا، تابش و انتقال جرم) تخمین زده شد. ۴ روش از گروه روش‌های مبتنی بر درجه حرارت هوا (هارگریوز، تورنت-وایت، بلانی-کریدل و لاینکر)، ۷ روش از گروه روش‌های مبتنی بر تابش (دورنبوس-پرویت، پرستلی-تیلور، مکینگ، جنسن-هیز، تورک، آبتیو و مکگینز-بوردن) و ۹ روش از گروه روش‌های بر مبنای انتقال جرم (مییر،

ارومیه است. لازم است جهت مدیریت علمی آب کشاورزی در حوضه دریاچه ارومیه مقدار آب مصرفی گیاهان با توجه به نتایج مطالعه فعلی برآورد و در اختیار گیاهان قرار گیرد. افزون بر این، به منظور افزایش راندمان آبیاری لازم است نظارت مستمر بر نحوه کارکرد سیستم‌های انتقال و توزیع آب در محل توزیع یا مصرف صورت گیرد و برنامه عملی برای تغییر نوع سیستم‌های آبیاری سنتی به سیستم آبیاری مدرن توسط تصمیم گیران کشاورزی تدوین و اجرا گردد. تا بتوان حداقل امکان بخشی از بحران آب موجود در منطقه را حل نمود.

Al و WMO, Tr, Ma, BW, P به ترتیب، در رده‌های سوم تا نهم قرار گرفتند. نتایج نشان داد که استفاده از ضرایب واسنجی برای مدل‌های مورد استفاده کارایی تمام روش‌ها را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. زیرا معیارهای ارزیابی برای تمام روش‌ها پس از واسنجی به مقدار قابل توجهی بهبود پیدا کرد. به عبارت دیگر مقادیر آماره‌های RMSE, MBE و MAE پس از واسنجی کاهش یافت. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که روش دورنبوس پرویت پس از واسنجی، مناسب‌ترین روش تخمین مقدار تبخیر- تعرق گیاه مرجع در حوضه آبریز دریاچه

### منابع مورد استفاده

1. جهان بخش اصل، س.، ع. موحد دانش و ا. مولوی. ۱۳۸۰. تحلیل مدل‌های برآورد تبخیر- تعرق برای ایستگاه هواشناسی تبریز. دانش کشاورزی ۱۱(۲): ۶۵-۵۱.
2. دهقانی، ا.، م. قبائی سوق، ح. شریفیان و ن. دهقانی. ۱۳۹۰. واسنجی معادلات تجربی تبخیر- تعرق روزانه و مقایسه با شبکه عصبی مصنوعی در شرایط مختلف کمبود داده‌های هواشناسی. مجله مدیریت آب و آبیاری ۱(۱): ۵۴-۴۱.
3. رحیمی خوب، ع.، م. بهبهانی و م. نظری فر. ۱۳۸۵. بررسی استفاده از حداقل داده‌های هواشناسی در معادله پنمن-ماتیتث- مطالعه موردی استان خوزستان. مجله علوم کشاورزی ۱۲(۳): ۵۹۹-۵۹۱.
4. شریفیان، ح.، ب. قهرمان، ا. علیزاده و م. میرلطیفی. ۱۳۸۵. مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر- تعرق مرجع (ترکیبی و دمای) با روش استاندارد و بررسی اثرات خشکی هوا بر آن. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی ۱۳(۱): ۲۱-۱۰.
5. شهابی فر، م.، م. عصار، م. کوچک‌زاده و م. میرلطیفی. ۱۳۸۹. ارزیابی برخی از روش‌های محاسباتی تبخیر- تعرق گیاه مرجع چمن با استفاده از داده‌های لایسی متری در شرایط گلخانه‌ای. مجله پژوهش آب در کشاورزی ۲۴(۱): ۱۹-۱۳.
6. Abtew, W. 1996. Evapotranspiration measurement and modeling for three wetland systems in South Florida. Water Resources Bulletin 32: 465-472.
7. Ahmadi, S. H. and Fooladmand, H. R., 2008. Spatially distributed monthly reference evapotranspiration derived from the calibration of Thornthwaite equation: a case study, South of Iran. Irrig. Sci. 26(4): 303-312.
8. Albrecht, F. 1950. Die Methoden zur Bestimmung der Verdunstung der natürlichen Erdoberfläche. Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B, 2(1-2): 1-38.
9. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrig and Drain paper 56. FAO, Rome, 300(9), p. D05109.
10. Allen, R. G., J. L. Jensen Wright and R. D. Burman. 1989. Operational estimate of evapotranspiration. J. Agro. 81: 650-662.
11. Brockamp, B. and H. Wenner. 1963. Verdunstungsmessungen auf den Steiner See bei Mu"nster. Dt Gewa"sserkundl Mitt 7:149-154.
12. Dai, X., Shi, H., Li, Y., Ouyang, Z. and Z. Huo. 2009. Artificial neural network models for estimating regional reference evapotranspiration based on climate factors. Hydrolo Proc 23: 442-450.
13. Dalton, J. 1802. Experimental essays on the constitution of mixed gases; on the force of steam of vapour from waters and other liquids in different temperatures, both in a Torricellian vacuum and in air on evaporation and on the expansion of gases by heat. Mem Manch Lit Philos Soc. 5: 535-602.
14. DehghaniSanij, H., T. Yamamoto and V. Rasiah. 2004. Assessment of evapotranspiration estimation models for use in semi-arid environments. Agril. Water Manage. 64(2): 91-106.

15. Doorenbos, J and W.O. Pruitt. 1977. Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper 24, Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy.
16. Gundekar, H. G., U. M. Khodke and S. Sarkar. 2008. Evaluation of pan coefficient for reference crop evapotranspiration for semi-arid region. *Irrig. Sci.* 26: 169-175.
17. Itenfiso, D., R. L. Elliott, R. G. Allen and I. A. Walter. 2003. Comparison of some reference evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort. *J. Irrig. Drain. Eng.* 129(6): 440-448.
18. Jensen, M. E., R. D. Burman and R. G. Allen. 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. American Society of Civil Engineering Manual 70, New York.
19. Jensen, M. E. and H. R. Haise. 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, *J. Irrig. and Drain Div.* 89, pp.15-41.
20. Kochekezade, M. and A. Bahmani. 2004. Evaluating the artificial neural network reducing the need parameters to archive reference evapotranspiration. *Agr. Sci.* 11: 87-96.
21. Landeras, G., A. Ortiz-Barredo and I. J. Lopez. 2008. Comparison of artificial neural network models and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the Basque Country (northern Spain). *Agr. Water Manage.* 95:553-565.
22. Linacre, E. T. 1977. A simple formula for estimating evapotranspiration rate in various climates using temperature data alone. *Agr. Mete.* 18: 409-424.
23. Mahringer, W. 1970. Verdunstungsstudien am Neusiedler See. *Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. B.* 18:1-20.
24. Makkink, G. F. 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *J. Instit. of Water Eng.* 11: 277-288.
25. McGuinness, J. L and E. F. Bordne. 1972. A Comparison of Lysimeter-derived Potential Evapotranspiration with Computed Values. Technical Bulletin 1452, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture: Washington, DC.
26. Meyer, A. 1926. U<sup>ber</sup> einige Zusammenhänge zwischen Klima und Boden in Europa. *Chem. Erde* 2:209-347.
27. Penman, H. C. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London(A)* 193:120-145.
28. Priestley, C. H. B and R. J. Taylor. 1972. On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review* 100: 81-92.
29. Rohwer, C. 1931. Evaporation from free water surface. *USDA Tech Null* 217:1-96.
30. Rosenberry, D. O., D. O. Stannard, T. C. Winter and M. L. Martinez. 2004. Comparison of 13 equations for determining evapotranspiration from a prairie wetland, cottonwood lake area north Dakota, USA. *Wetlands* 24(3): 483-497.
31. Salih, A. M. A. and U. Sendil. 1983. Evapotranspiration under extremely arid environment. *J. of Irrig. and Drainage Eng.* 110(3): 298-303.
32. Sentelhas, P., T. Gillespie and E. A. Santos. 2010. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in southern Ontario, Canada. *Agr. Water Manage.* 97: 635-644.
33. Singh, V. P. and C. Y. Xu. 1997. Evaluation and generalization of 13 mass-transfer equations for determining free water evaporation. *Hydrological Processes* 11: 311-323
34. Tabari, H, M. E. Grismer and S. Trajkovic. 2011. Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. *Irrig. Sci.* 31(2): 107-117.
35. Temesgen, B., S. Eching, B. Davidoff and K. Frame. 2005. Comparison of some reference Evapotranspiration equations for California. *J. Irrig. Drain Eng.* 131(1): 73-84.
36. Thornthwaite, G.W. 1948. An approach toward rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38: 55-94.
37. Trabert, W. 1896. Neue Beobachtungen u<sup>ber</sup> Verdampfungsgeschwindigkeiten. *Meteorol Z.* 13: 261-263.
38. Trajkovic, S. and S. Kolakovic. 2009. Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions. *Water Resour. Manage.* 23: 3057-3067.
39. Turc, L. 1961. Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. *J. Annals of Agronomy* 12: 13-49.
40. WMO. 1966. Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration. Tech. Pap. (CIMO-Rep) 83. Genf.
41. Xu, C. Y. and V. P. Singh. 2000. Evaluation and generalization of radiation-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes* 14: 339-349.
42. Xu, C. Y., V. P. Singh. 2001. Evaluation and generalization of temperature based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes* 15: 305-319.
43. Xu, C. Y. and Singh V. P. 2002. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland. *Water Resources Manage.* 16: 197-219.
44. Zhai, L., Q. Feng, Q. Li and C. Y. Xu. 2010. Comparison and modification of equations for calculating evapotranspiration (ET) with data from Gansu province, northwest China. *Irrig. Drain.* 59: 477-490.



## Comparison and Evaluation of Twenty Methods for Estimating Reference Evapotranspiration Based on Three General Categories: Air Temperature, Solar Radiation and Mass Transfer in the Basin of Lake Urmia

O. Babamiri<sup>1\*</sup> and Y. Dinpazhoh<sup>2</sup>

(Received: June 22-2014 ; Accepted : April 26-2016)

### Abstract

The aim of this study is to compare and calibrate the 20 empirical methods of estimating evapotranspiration ( $ET_0$ ) based on three categories in monthly timescale at the Urmia Lake watershed. For this purpose, the information of 10 synoptic meteorological stations during the period of 1986-2010 was used. Results from the above mentioned methods were compared with the output of the FAO Penman-Monteith (PMF-56) method. Performance of the methods evaluated using the  $R^2$ , RMSE, MBE and MAE statistics. The best and worst methods of each category were determined for the study area. The best methods of each category were calibrated for the area under study. Results indicated that there is a significant difference between the results of selected methods of each category and the PMF-56 method. Performance of the selected methods remarkably increased after calibration. Among the temperature-based group, the HG method having the median  $R^2$  value of 0.9597 was recognized as the best method. Among the radiation-based group, the DP model was selected as the best method in the study area. Furthermore, the median of  $R^2$  values was 0.982. Finally, among the mass transfer-based group, having  $R^2=0.8945$ , the Meyer method was selected as the best method of this group for the study area. From mass transfer based group, the D method was found as the second best method in the study area. Temperature based methods and mass transfer based methods were ranked second and third, respectively. In general, it can be concluded that after calibration the DP method is suitable to estimate reference crop evapotranspiration among 20 selected methods in the Urmia Lake basin.

**Keywords:** Evapotranspiration, Mass transfer, Penman- Monteith, Radiation, Temperature, Urmia Lake

---

1. Dept. of Water Eng., Faculty of Agric. Bu Ali Sina Univ., Hamadan, Iran.

2. Dept. of Water Eng., Faculty of Agric. Tabriz Univ., Tabriz, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: [obabamiri@yahoo.com](mailto:obabamiri@yahoo.com)