

ارزیابی ۲۴ مدل تبخیر و تعرق گیاه مرجع در اقلیم‌های مختلف ایران

حلیمه پیری^{۱*}، محمدطاهر پوزن^۲

۱. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۱۱/۲۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۸/۰۳/۱۳)

چکیده

روش‌های مختلفی برای تخمین تبخیر و تعرق وجود دارد که عملکردشان در شرایط اقلیمی گوناگون، متفاوت است. هدف از تحقیق حاضر، بررسی روش‌های مختلف تبخیر و تعرق گیاه مرجع در اقلیم‌های مختلف ایران و اعتبارسنجی این روش‌ها با روش فائو-پنمن-مانتیت است. برای انجام کار از داده‌های هواشناسی ۳۰ ساله (۱۹۸۸-۲۰۱۷) نُه شهر کشور (شهرکرد، ارومیه، مشهد، زاهدان، بندرعباس، اهواز، گرگان، رشت و ساری) استفاده شد. ابتدا تبخیر و تعرق مرجع به روش فائو-پنمن-مانتیت به صورت روزانه به دست آمد. سپس، مقادیر تبخیر و تعرق مرجع با ۲۴ روش دیگر نیز محاسبه شد و با استفاده از شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، نسبت میانگین (MR) و درصد خطای تخمین (PE) با روش فائو-پنمن-مانتیت مقایسه شدند. نتایج نشان داد در اقلیم سرد و نیمه‌خشک، سرد و معتدل، گرم و خشک، سرد و خشک و گرم و مرطوب به ترتیب شامل شهرهای ارومیه، شهرکرد، زاهدان، مشهد و اهواز مدل مک‌کینگ اصلاح شده، در اقلیم گرم و مرطوب بندرعباس مدل والیانتراس و ۵ در اقلیم‌های مدیترانه‌ای، نیمه‌مرطوب و مرطوب شامل شهرهای گرگان، ساری و رشت مدل دروگرز و آلن برآورد بهتر و نزدیک‌تری به روش فائو-پنمن-مانتیت داشتند. با توجه به امتیازهای داده شده به هر روش براساس شاخص ارزیابی MAE و RMSE، مدل‌های مک‌کینگ اصلاح شده، دروگرز و آلن، والیانتراس و هارگریوز سامانی و براساس شاخص PE مدل‌های دروگرز و آلن، مک‌کینگ اصلاح شده، والیانتراس و هارگریوز سامانی به عنوان مدل برتر انتخاب شدند.

کلیدواژگان: تبخیر و تعرق، فائو-پنمن-مانتیت، مدل‌های تجربی.

مقدمه

تبخیر و تعرق گیاه مرجع یکی از مؤلفه‌های مهم چرخه هیدرولوژی است که تخمین دقیق آن برای مدیریت بهینه منابع آب لازم است. تخمین میزان دقیق تبخیر و تعرق گیاه مرجع نه تنها در برنامه‌ریزی آبیاری و تعیین دوره آبیاری بلکه در مطالعات مربوط به مدل‌سازی بیلان آب هر ناحیه اهمیت زیادی دارد. افزون بر این، تبخیر و تعرق گیاه مرجع در تأمین نیاز آبی گیاهان، برنامه‌ریزی دقیق آبیاری و مطالعه بیلان آب مخازن، ضرورت دارد. تبخیر و تعرق گیاه مرجع تابعی از عوامل مختلف هواشناسی نظیر دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشیدی است [۱]. با توجه به تأثیر عوامل مختلف در تعیین تبخیر و تعرق گیاه مرجع، برآورد دقیق این پارامتر اگر غیرممکن نباشد، کار بسیار مشکلی است. مقدار تبخیر و تعرق را می‌توان به صورت مستقیم با استفاده از لایسیمتر یا غیرمستقیم با استفاده از روابط تجربی اندازه‌گیری کرد. در روش مستقیم در واقع بخش کوچک و کنترل‌شده‌ای از مزرعه مجزا شده و میزان تبخیر و تعرق در یک دوره زمانی مستقیم اندازه‌گیری می‌شود. به این بخش کوچک که ارتباط رطوبتی با خاک اطراف ندارد، لایسیمتر گویند. لایسیمتر اندازه‌گیری نسبتاً دقیقی از میزان تبخیر و تعرق ارائه می‌دهد، اما در عمل کارگذاری آن هزینه‌های زیادی به دنبال دارد و صرفه اقتصادی آن کم است. در روش‌های غیرمستقیم از عوامل مختلف اقلیمی و گیاهی استفاده شده و از طریق ارتباط آن‌ها با تبخیر و تعرق و معادلاتی که قبلاً با روش‌های مستقیم واسنجی شده‌اند، میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع تخمین زده می‌شود. تا کنون روش‌های زیادی مبتنی بر داده‌های هواشناسی برای شرایط مختلف جغرافیایی و اقلیمی با هدف تعیین تبخیر و تعرق مرجع تدوین شده است که تفاوت عمده آنها در تعداد پارامترهای هواشناسی مورد نیاز است [۲]. این مدل‌ها در عین سادگی استفاده، دو مشکل عمده دارند: نخست اینکه این مدل‌ها عمومیت ندارند و باید برای هر منطقه واسنجی و صحت‌سنجی شوند. به بیان دیگر، در شرایط خاص توسعه یافته‌اند. دوم اینکه برخی از این مدل‌ها به اطلاعات زیادی نیاز دارند که در همه ایستگاه‌های هواشناسی، اندازه‌گیری نمی‌شوند. معمولاً در سراسر دنیا از روش فائو-پنمن-مانتیت به عنوان روش نزدیک به لایسیمتر استفاده می‌کنند و واسنجی مدل‌های تجربی تبخیر و تعرق با نتایج به دست آمده از این

مدل انجام می‌شود [۳]. در مطالعاتی که توسط محققان در نقاط مختلف جهان صورت گرفته، این مدل به عنوان دقیق‌ترین روش تحت شرایط آب‌وهوایی مختلف ارائه و معرفی شده است. همچنین، برای واسنجی مدل‌های دیگر از این مدل بهره برده شده است [۴ و ۵]. در تحقیقی که برای تعیین نیاز آبی گیاه نخود در لرستان انجام شد، از بین روش‌های تجربی ارائه شده، روش فائو-پنمن-مانتیت بیشترین نزدیکی را به داده‌های لایسیمتری داشت و به عنوان روش برتر انتخاب شد [۶]. به هر حال، برای حل مدل فائو-پنمن-مانتیت نیاز به اطلاعات زیادی است که یا در هر ایستگاه هواشناسی اندازه‌گیری نمی‌شوند، یا در بسیاری از دشت‌های در حال توسعه ایستگاه هواشناسی وجود ندارد. بنابراین، استفاده از مدل‌هایی که نیاز به اطلاعات هواشناسی کمتری دارند، برای مناطقی که کمبود یا نقص اطلاعات دارند، ضروری است. بنابراین، تحقیقات زیادی در خصوص واسنجی مدل‌های تجربی در مقایسه با نتایج مدل فائو-پنمن-مانتیت و ارائه نوعی مدل ساده با دقت قابل قبول انجام شده است. تعداد ۱۶ مدل برآورد تبخیر و تعرق با نتایج مدل فائو-پنمن-مانتیت در دره رودخانه سنگال بررسی شد [۷]. نتایج پژوهش یادشده نشان داد والیانتراس، ترابرت، رمانکو، اسکندل و ماهرینگر مدل‌های مناسبی در منطقه مطالعه شده هستند. چند مدل تبخیر و تعرق با نتایج تشت تبخیر در حوضه آبخیز شرق و جنوب شرق کشور ارزیابی شد. نتایج تحقیق یادشده نشان داد مدل هارگریوز سامانی، بلانی-کریدل و تورک مناسب‌ترین مدل‌ها در محل پژوهش‌اند [۸]. همچنین، دقت چهار مدل تبخیر و تعرق در چهار اقلیم مختلف بررسی شد و نتیجه گرفته شد که در اقلیم سرد و خشک مدل تورک و در اقلیم مرطوب و نیمه‌خشک مدل هارگریوز بهترین برآورد را از تبخیر و تعرق مرجع دارد [۹]. مهدی‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) دقت پنج مدل رابطه والیانتراس را در برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع در شمال غرب ایران بررسی کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داد رابطه والیانتراس ۲ بهترین روش در برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع در منطقه مطالعه شده است [۱۰]. تحقیقات نشان داد مدل والیانتراس عملکرد مطلوبی در مناطق ساحلی شمال ایران دارد [۱۱]. دو مدل والیانتراس با مدل فائو-پنمن-مانتیت در هشت ایستگاه در مناطق ساحلی بورکینافاسو ارزیابی شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد رابطه والیانتراس با داده‌های اقلیمی کامل تطابق خوبی با داده‌های

۰/۳۴: Cd ضریب باد برای گیاه مرجع که مقدار آن

است (s m⁻¹)

۰: C_n ضریب سایکرومتری (KPa⁰C⁻¹)

۹۰۰ است که مقدار آن مرجع گیاه مرجع که مقدار آن

(Kg⁰K KJ⁻¹ day⁻¹)

جدول ۱. روابط مربوط به ۲۴ مدل تجربی برآورد تبخیر- تعرق مرجع در اقلیم‌های مختلف ایران

معادلات	نام رابطه	شماره
$ET_0 = 0.408 \times 0.0023 Ra (T_{mean} + 17.8) (T_{max} - T_{min})^{0.5}$	هارگریوز سامانی (۱۹۸۵)	۲
$ET_0 = 0.149 R_s + 0.079 T_{mean} - 0.611$	ایرماک (۲۰۰۳)	۳
$ET_0 = 0.408 \times 0.0023 Ra (T_{mean} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.424}$	تراجکویک (۲۰۰۷)	۴
$ET_0 = 0.408 \times (0.817 + 0.00022Z) 0.0023 Ra (T_{mean} + 17.8) (T_{max} - T_{min})^{0.5}$	روضانی و همکاران (۲۰۱۲)	۵
$ET_0 = 0.408 \times 0.00193 Ra (T_{mean} + 17.8) (T_{max} - T_{min})^{0.5}$	برتی و همکاران (۲۰۱۴)	۶
$ET_0 = 16 \frac{T_{mean}}{RH}$	اسکندل (۲۰۱۴)	۷
$ET_0 = P (0.46 T_{mean} + 8.17)$	بلانی و کربدل (۱۹۷۷)	۸
$ET_0 = 0.0018 \times (T_{mean} + 25)^2 \times (100 - RH)$	روماننکو (۱۹۶۱)	۹
$ET_0 = 0.15072 \sqrt{3.6 U^2} (e_s - e_a)$	ماهرینگر (۱۹۷۰)	۱۰
$ET_0 = (0.1298 + 0.0934 U^2) (e_s - e_a)$	WMO(1960)	۱۱
$ET_0 = 0.289 R_s + 0.023 T_{mean} + 0.489$	Rn Based (2003)	۱۲
$ET_0 = 0.7 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda}$	مک‌کینگ اصلاح‌شده (۱۹۵۷)	۱۳
$ET_0 = 0.013 \left(\frac{T_{mean}}{T_{mean} + 15} \right) \left(\frac{23.88 R_s + 50}{\lambda} \right)$	تورک (۱۹۶۱)	۱۴
$ET_0 = 0.408 + 0.00193 Ra (T_{mean} + 17.8) (T_{max} - T_{min})^{0.517}$	تراپرت (۱۸۹۶)	۱۵
$ET_0 = ET_0 = -0.642 + 0.174 R_s + 0.0353 T_a$	طبری و همکاران ۱ (۲۰۱۳)	۱۶
$ET_0 = -0.478 + 0.156 R_s - 0.0112 T_{max} + 0.0733 T_{min}$	طبری و همکاران ۲ (۲۰۱۳)	۱۷
$ET_0 = 0.408 \times 0.0030 Ra (T_{mean} + 17.8) (T_{max} - T_{min})^{0.5}$	دروگرز و آلن ۱ (۲۰۰۲)	۱۸
$ET_0 = 0.408 \times 0.0025 Ra (T_{mean} + 16.8) (T_{max} - T_{min})^{0.5}$	دروگرز و آلن ۲ (۲۰۰۲)	۱۹
$ET_0 = 0.408 \times 0.0013 Ra (T_{mean} + 17) (T_{max} - T_{min} - 0.0123 \times P)^{0.76}$	دروگرز و آلن ۳ (۲۰۰۳)	۲۰
$ET_0 = 0.0393 R_s \sqrt{(T + 9.5)} - 2.4 \left(\frac{R_s}{R_a} \right)^2 - 0.024 (T + 20) \left(1 - \frac{RH}{100} \right) + 0.066 W_{aero} (T + 20) \left(1 + \frac{RH}{100} \right) U^{0.6}$	فرمول ۱ والیانتراس	۲۱
$ET_0 = 0.0393 R_s \sqrt{(T + 9.5)} - 0.19 R_s^{0.6} \varphi^{0.15} + 0.048 (T + 20) \left(1 - \frac{RH}{100} \right) U^{0.7}$	فرمول ۲ والیانتراس	۲۲
$ET_0 = 0.0393 R_s \sqrt{(T + 9.5)} - 2.4 \left(\frac{R_s}{R_a} \right)^2 - 0.024 (T + 20) \left(1 - \frac{RH}{100} \right) + 0.1 W_{aero} (T + 20) \left(1 - \frac{RH}{100} \right)$	فرمول ۳ والیانتراس	۲۳
$ET_0 = 0.0393 R_s \sqrt{(T + 9.5)} - 0.19 R_s^{0.6} \varphi^{0.15} + 0.078 (T + 20) \left(1 - \frac{RH}{100} \right)$	فرمول ۴ والیانتراس	۲۴
$ET_0 = 0.0393 R_s \sqrt{(T + 9.5)} - 0.19 R_s^{0.6} \varphi^{0.15} + 0.0061 (T + 20) (1.12 T - T_{min} - 21)^{0.7}$	فرمول ۵ والیانتراس	۲۵

$$MR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{O_i} \quad (29)$$

که در آن‌ها:

n: تعداد مشاهدات

O_i: مقدار تبخیر و تعرق واقعی محاسبه‌شده با روش

فائو - پنمن - مانیتث

P_i: مقدار تبخیر و تعرق برآوردشده با سایر روابط

تجربی

O_{av}: میانگین مقادیر تبخیر و تعرق واقعی محاسبه‌شده

با روش فائو - پنمن - مانیتث منابع

P_{av}: میانگین مقدار تبخیر و تعرق برآوردشده با سایر

روابط تجربی

در پایان، برای اینکه مشخص شود در اقلیم‌های ایران کدام روابط نتایج نزدیک‌تری به مدل فائو- پنمن- مانیتث دارند، به هر یک از مدل‌ها براساس شاخص‌های ارزیابی از ۱ تا ۲۴ نمره داده شد. سپس، مدل‌هایی که بیشترین نمره را به دست آوردند به‌عنوان مدل‌های برتر معرفی شدند.

نتایج و بحث

شاخص‌های عملکرد آماری استفاده شده برای مقایسه مقادیر حاصل از برآورد تبخیر- تعرق مرجع روزانه با استفاده از ۲۴ مدل تجربی با مقادیر به‌دست‌آمده از رابطه استاندارد فائو- پنمن- مانیتث در جدول‌های ۲ تا ۵ ارائه شده است. برای اینکه تعداد جدول‌ها کمتر شود و مقایسه راحت‌تر انجام گیرد، شهرهایی که از نظر موقعیت جغرافیایی نزدیک به هم بودند، در یک جدول قرار داده شدند.

مطابق نتایج به‌دست‌آمده از جدول‌های ۲ تا ۵، نتایج برآورد تبخیر و تعرق مرجع براساس ۲۴ روش ارائه‌شده در پژوهش حاضر برای هر نه ایستگاه در اقلیم‌های مختلف، روند تقریباً یکسانی را در میزان برآورد تبخیر و تعرق در روش‌های همسان نشان دادند. براساس شاخص‌های آماری RMSE و MAE به‌دست‌آمده در تمامی اقلیم‌ها به‌جز اقلیم مرطوب و نیمه‌مرطوب و مدیترانه‌ای شهرهای شمالی کشور، روش مک‌کینگ اصلاح‌شده به‌عنوان روش برتر انتخاب شد. در اقلیم گرم و مرطوب بندرعباس نیز مدل والیانتراس ۵ بهترین برآورد را داشت. دقت زیاد مدل والیانتراس در سه ایستگاه آدانا، ایتالیا و اسپار تا تأیید شده است [۱۴]. در نوار شمالی

در روابط ۲- ۲۵: Ra تابش فراجوی (Mj m⁻² day⁻¹), T: متوسط دمای روزانه هوا (°C), Tmax: دمای بیشینه (°C), Tmin: دمای کمینه (°C), Rs (Mj m⁻² day⁻¹), Z ارتفاع محل از سطح دریا (m), RH رطوبت نسبی (%), P: ساعت آفتابی (%), ضریب λ در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۲/۴۵ (MJ m⁻² d⁻¹), φ: عرض جغرافیایی ایستگاه مد نظر (rad) و Waero فاکتور آیرودینامیکی در محاسبه تبخیر و تعرق مرجع است که برای RH < ۰/۶۵ برابر ۱/۰۶۷ و در غیر این صورت برابر با ۰/۷۸ در نظر گرفته می‌شود. در این روابط، es و ea برحسب (Kpa) هستند به‌جز رابطه ۱۰ و ۱۵ که با واحد hpa بیان می‌شوند. ضریب ۰/۴۰۸ در روابط ۲، ۴، ۵، ۶، ۱۵، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ برای تبدیل مقادیر تابش از MJ m⁻² day⁻¹ به mm day⁻¹ در تمامی روابط مقدار ETO برحسب (mm day⁻¹) است. از آنجا که استفاده از معادله فائو- پنمن- مانیتث به داده‌های هواشناسی زیادی نیاز دارد، استفاده از روش‌های جایگزین با تعداد پارامترهای مورد نیاز کمتر و دقت قابل قبول می‌تواند در تخمین نیاز آبی گیاهان مد نظر قرار گیرد. معادلات والیانتراس که از معادله استاندارد فائو- پنمن- مانیتث مشتق شده‌اند، براساس داده‌های اقلیمی و همبستگی خوب با معادله فائو- پنمن- مانیتث توسعه داده شده‌اند.

شاخص‌های ارزیابی

برای ارزیابی روش‌های استفاده‌شده، مدل فائو- پنمن - مانیتث به‌عنوان مدل استاندارد در نظر گرفته شد و سایر مدل‌ها با این مدل مقایسه شدند. شاخص‌های آماری استفاده‌شده عبارت‌اند از: ریشه میانگین مربعات خطای^۱ (RMSE)، میانگین خطای مطلق،^۲ (MAE) درصد خطای تخمین^۳ (PE)، نسبت میانگین^۴ (MR) [۱۰].

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (26)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (27)$$

$$PE = \frac{(P_{av} - O_{av})}{O_{av}} \times 100 \quad (28)$$

1. RMSE: Root Mean Square Error
2. MAE: Mean Absolute Error
3. PE: Percentage Error of Estimation
4. MR: Mean Ratio

تراجکویک و ضعیف‌ترین مدل‌ها، هارگریوز سامانی اصلاح‌شده، ایرماک و اسکندل است [۵].
براساس مقادیر RMSE و MAE از بین روش‌های به‌کاررفته برای تعیین تبخیر و تعرق در اقلیم ارومیه بعد از مدل مک‌کینگ اصلاح‌شده مدل‌های هارگریوز سامانی، دروگرز و آلن ۱-۳ و مدل والیانتراس ۵ به‌عنوان مدل بهتر معرفی می‌شود و مدل‌های مبتنی بر انتقال جرم و تشعشع خورشیدی همچون Rn Based، WMO و تورک، مدل‌های طبری و همکاران و والیانتراس ۱ و ۲ با داشتن بیشترین مقادیر میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق به‌عنوان بدترین روش انتخاب شدند. در اقلیم شهرکرد روش دروگرز و آلن ۱-۳، هارگریوز سامانی، برتی و همکاران و ایرماک (۲۰۰۳) بعد از روش مک‌کینگ به‌عنوان روش‌های برتر انتخاب شدند. مدل‌های تورک، تراجکویک (۲۰۰۷)، Rn Based و WMO نیز بدترین برآورد را از تبخیر و تعرق مرجع نسبت به روش فائو-پنمن - مانیتیت داشتند.

کشور روش دروگرز و آلن ۱ (۲۰۰۲) از بین ۲۴ مدل انتخابی بهترین و نزدیک‌ترین برآورد تبخیر و تعرق را به روش فائو-پنمن - مانیتیت داشت. بیست مدل تبخیر و تعرق در نوار شمالی کشور شمال شهرهای گرگان، ساری و رشت با مدل فائو-پنمن - مانیتیت ارزیابی شد [۱۰]. نتایج نشان داد در اقلیم‌های مطالعه شده، مدل‌های روزانی و همکاران، برتی و همکاران، هارگریوز سامانی، اسکندل، ایرماک و همچنین مدل والیانتراس عملکرد مطلوب‌تری در برآورد تبخیر تعرق مرجع دارند، اما در این تحقیق روش دروگرز و آلن ۱ (۲۰۰۲) به‌عنوان روش برتر و سایر روش‌ها در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. علت این اختلاف شاید به دلیل کوتاه بودن دوره آماری مطالعه‌شده (۱۳۸۶-۱۳۹۵) در تحقیق یادشده [۱۰] نسبت به تحقیق حاضر (۱۳۶۷-۱۳۹۶) است. ۱۸ روش تبخیر و تعرق در شرایط آب و هوایی دشت اردبیل با روش فائو-پنمن - مانیتیت ارزیابی شد. پژوهشگران نتیجه گرفتند مناسب‌ترین مدل‌ها به ترتیب تورک، برتی و همکاران و

جدول ۲. اقلیم سرد نیمه‌خشک و سرد معتدل

شهرکرد				ارومیه				ایستگاه
RMSE	MAE	MR	PE	RMSE	MAE	MR	PE	معیار خطا
۲/۳	۱/۸	۰/۷۰	۲۷/۱	۳/۰۲	۲/۵	۰/۶۰	۳۷/۲۲	هارگریوز سامانی (۱۹۸۵)
۲/۵۳	۲/۲۴	۰/۶۶	۳۳/۲۷	۳/۲۹	۳/۰۳	۰/۵۴	۴۳/۸	ایرماک (۲۰۰۳)
۴/۲۶	۳/۴۲	۱/۳۳	۳۸/۲۵	۳/۷۱	۳/۴۹	۰/۴۷	۵۰/۸	تراجکویک (۲۰۰۷)
۲/۹۸	۲/۷۱	۰/۵۷	۴۰/۴۷	۳/۵۹	۳/۳۵	۰/۴۹	۴۸/۷	روضانی و همکاران (۲۰۱۲)
۲/۸۹	۲/۶۰	۰/۵۸	۳۸/۸۷	۳/۵۱	۳/۲۵	۰/۵۰	۴۷/۳	برتی و همکاران (۲۰۱۴)
۳/۶۱	۳/۲۴	۰/۶۵	۲۲/۷	۳/۸	۳/۳	۰/۴۶	۴۷/۳	اسکندل (۲۰۱۴)
۳/۰۴	۲/۸۵	۰/۵۷	۴۲/۶۰	۳/۲۲	۳/۰۷	۰/۵۴	۴۴/۶۴	بلانی و کریدل (۱۹۷۷)
۲/۵۱	۲/۲۰	۰/۶۸	۲۵/۲۸	۳/۳۱	۳/۰۳	۰/۵۲	۴۳/۷۴	رومانکو (۱۹۶۱)
۳/۳۸	۳/۰۷	۰/۵۱	۴۵/۵۲	۳/۳۱	۲/۹۵	۰/۵۴	۴۲/۴۴	ماهرینگر (۱۹۷۰)
۴/۹۶	۴/۸۲	۰/۲۵	۷۱/۹۷	۵/۳۹	۵/۳۱	۰/۲۰	۷۷/۲۶	WMO(1960)
۵/۳۲	۴/۶۲	۱/۶۹	۶۷/۸	۴/۵	۳/۸	۱/۴	۴۶	Rn Based (2003)
۱/۵۳	۱/۳	۰/۹۸	۲/۳۶	۱/۸	۱/۴	۰/۸۲	۱۴/۷	مک‌کینگ اصلاح‌شده
۵/۳۰	۵/۱۸	۰/۱۸	۷۷/۳۲	۵/۶	۵/۵	۰/۱۷	۸۰/۳	تورک
۲/۷۱	۲/۳۶	۰/۶۲	۳۵/۲۸	۳/۳۶	۳/۰۵	۰/۵۳	۴۴/۳۷	تراپرت ۱۸۹۶
۵/۱۳	۵	۰/۱۸	۷۴/۶۶	۵/۵	۵/۴	۰/۱۶	۷۹/۳	طبری و همکاران ۱ (۲۰۱۳)
۳/۶۰	۳/۳۹	۰/۴۷	۵۰/۵۴	۴/۱۲	۳/۹	۰/۴۱	۵۶/۹	طبری و همکاران ۲ (۲۰۱۳)
۲/۰۹	۱/۷۵	۰/۹۱	۴/۹۹	۲/۵۴	۲/۱۰	۰/۷۸	۱۸/۱۲	دروگرز و آلن ۱ (۲۰۰۲)
۲/۲۴	۱/۷۴	۰/۷۳	۲۳/۳۴	۲/۹۰	۲/۳۸	۰/۶۳	۳۳/۱۹	دروگرز و آلن ۲ (۲۰۰۲)
۲/۱۷	۱/۸۰	۰/۹۱	۴/۳۹	۲/۶۰	۲/۱۱	۰/۷۵	۲۰/۹	دروگرز و آلن ۳ (۲۰۰۳)
۳/۹۰	۳/۶۱	۰/۴۱	۵۳/۹۳	۴/۱۱	۳/۷۸	۰/۴۱	۵۵/۰۱	فرمول ۱ والیانتراس
۳/۴۵	۳/۱۷	۰/۴۸	۴۷/۳۴	۴/۱۹	۳/۹۶	۰/۳۸	۵۷/۶	فرمول ۲ والیانتراس
۲/۷۳	۲/۱۵	۰/۶۳	۳۰/۵۱	۳/۴۵	۲/۹	۰/۵۳	۴۲/۴۸	فرمول ۳ والیانتراس
۲/۸۶	۲/۴۸	۰/۵۷	۳۶/۹۴	۳/۷	۳/۴۹	۰/۴۵	۵۰/۷	فرمول ۴ والیانتراس
۲/۹۷	۲/۵۱	۱/۳۲	۳۲/۱۳	۲/۴۴	۲/۱۰	۱/۱۱	۱۳	فرمول ۵ والیانتراس

جدول ۳. اقلیم مرطوب و نیمه‌مرطوب و مدیترانه‌ای شامل شهرهای گرگان، ساری و رشت

رشت				ساری				گرگان				ایستگاه
RMSE	MAE	MR	PE	RMSE	MAE	MR	PE	RMSE	MAE	MR	PE	معیار خطا
۱/۸	۱/۵	۰/۷۸	۲۳/۷۸	۱/۸	۱/۲	۰/۴۰	۳۰	۲/۵۸	۲/۲۰	۰/۶۸	۳۰/۰۱	هارگریوز سامانی (۱۹۸۵)
۲/۳	۲	۰/۷۰	۳۳/۴۶	۲/۳۱	۱/۶۴	۰/۳۵	۴۰/۴	۳/۱۶	۲/۹۴	۰/۵۸	۴۱	ایرماک (۲۰۰۳)
۲/۶۱	۲/۲۹	۰/۶۱	۳۹/۴۰	۲/۵۰	۱/۸۳	۰/۳۲	۴۵/۰۶	۳/۴۲	۳/۲۳	۰/۵۳	۴۵/۰۴	ترانچونیک (۲۰۰۷)
۲/۵۳	۲/۲۱	۰/۶۳	۳۷/۷	۲/۴۳	۱/۷۶	۰/۳۳	۴۳/۴۳	۳/۲۹	۳/۰۷	۰/۵۵	۴۲/۸	روزانی و همکاران (۲۰۱۲)
۲/۴۵	۲/۱۳	۰/۶۴	۳۳/۶۵	۲/۳۵	۱/۷۰	۰/۳۴	۴۱/۹	۳/۱۹	۲/۹۶	۰/۵۷	۴۱/۲۷	برتی و همکاران (۲۰۱۴)
۲/۸	۲/۵	۰/۵۶	۴۳/۷	۲/۴۲	۱/۷۹	۰/۳۲	۴۴/۰۴	۳/۲۸	۳/۱۳	۰/۵۳	۴۳/۶۸	اسکندل (۲۰۱۴)
۱/۹۳	۱/۵۷	۰/۸۰	۲۴/۶۰	۱/۸۷	۱/۳۳	۰/۴۰	۳۲/۷۸	۲/۷۸	۲/۶۵	۰/۶۲	۳۶/۹۲	بلانی و کریدل (۱۹۷۷)
۳/۹۳	۳/۶۷	۰/۳۶	۶۳/۶۱	۳/۱۶	۲/۷۳	۰/۲۴	۵۸/۴۵	۳/۹۰	۳/۸۱	۰/۴۴	۵۳/۰۶	روماننکو (۱۹۶۱)
۲/۶۱	۲/۲۳	۰/۶۶	۳۶/۸۱	۱/۸۶	۱/۲۵	۰/۴۰	۳۰/۳۱	۳/۲۵	۲/۸۸	۰/۶۶	۳۰/۳۰	ماهرینگر (۱۹۷۰)
۵/۳	۵	۰/۱۲	۸۷/۵	۴/۵	۳/۴۲	۰/۰۹	۸۴/۱۵	۵/۸۶	۵/۷۸	۰/۱۷	۸۰/۴	WMO (1960)
۴/۹	۴/۶	۱/۹	۷۹/۵	۳/۵	۲/۴۵	۰/۹۷	۶۰	۴/۷	۴/۱۲	۱/۵	۵۶/۳	Rn Based (2003)
۱/۷	۱/۵	۰/۶۹	۲۶/۸	۱/۶۸	۱/۱۶	۰/۴۲	۲۸/۸۷	۲/۱۴	۱/۸	۰/۷۵	۲۳/۱	مک‌کینگ اصلاح‌شده
۴/۵	۴/۲	۰/۲۶	۷۳/۷	۴/۱۳	۳/۰۹	۰/۱۴	۷۶	۵/۵۸	۵/۴۷	۰/۲۳	۷۶/۱۴	تورک
۲/۲۸	۱/۹	۰/۶۹	۳۲/۶	۲/۲۱	۱/۵۸	۰/۳۶	۳۸	۳	۲/۷۳	۰/۶۰	۳۸	ترابرت (۱۸۹۶)
۴/۳	۴/۱	۰/۲۳	۱۷/۷۷	۳/۸۵	۲/۹۳	۰/۱۴	۷۲/۱۵	۵/۱۸	۵/۱۰	۰/۲۵	۷۱	طبری و همکاران ۱ (۲۰۱۳)
۳/۰۶	۲/۷۲	۰/۵۰	۴۷	۲/۹۰	۲/۱۴	۰/۲۸	۵۲/۶۸	۴	۳/۸	۰/۴۵	۵۳/۱۸	طبری و همکاران ۲ (۲۰۱۳)
۱/۴۱	۱/۰۹	۱/۰۱	۵/۹	۱/۲۶	۰/۷۶	۰/۵۳	۹/۷۲	۲/۰۷	۱/۷۲	۰/۸۸	۸/۷۲	دروگزر و آلن ۱ (۲۰۰۲)
۱/۷۰	۱/۳۶	۰/۸۲	۱۹/۵۱	۱/۶۹	۱/۱۳	۰/۴۳	۲۶/۸	۲/۴۱	۱/۹۹	۰/۷۱	۲۵/۹	دروگزر و آلن ۲ (۲۰۰۲)
۱/۴۷	۱/۱۷	۰/۹۰	۱۱/۳۸	۱/۴۵	۰/۹۳	۰/۴۹	۱۷/۳۸	۲/۱۸	۱/۸۴	۰/۸۵	۱۲/۶۰	دروگزر و آلن ۳ (۲۰۰۳)
۳/۰۶	۲/۷۸	۰/۴۹	۴۸	۲/۸	۲/۱	۰/۲۷	۵۲/۲۷	۳/۹۵	۳/۷۳	۰/۴۵	۵۱/۹۹	فرمول ۱ والیانتراس
۳/۵	۳/۲۸	۰/۴۲	۵۶/۸	۳/۱۸	۲/۳۷	۰/۲۳	۵۸/۴۸	۴/۱۸	۴/۰۳	۰/۴۱	۵۶/۱	فرمول ۲ والیانتراس
۲/۷۱	۲/۴۳	۰/۵۶	۴۱/۹۶	۲/۵۴	۱/۸۶	۰/۳۱	۴۵	۳/۴۶	۳/۲۰	۰/۵۲	۴۴/۵	فرمول ۳ والیانتراس
۳/۱۹	۲/۹	۰/۴۸	۵۰	۲/۸۷	۲/۱۴	۰/۲۷	۵۲/۶۸	۳/۷۶	۳/۶۰	۰/۴۷	۵۰	فرمول ۴ والیانتراس
۲/۲	۱/۸	۱/۳	۲۹	۱/۳۷	۰/۸۵	۰/۷۰	۱۴/۹۹	۲/۱۴	۱/۷۵	۱/۱۵	۱۵	فرمول ۵ والیانتراس

هارگریوز سامانی و بلانی‌کریدل، در اقلیم بندرعباس به ترتیب مدل‌های دروگزر و آلن ۱، مک‌کینگ اصلاح‌شده، اسکندل ۲۰۱۴، دروگزر و آل ۳ و ترابرت ۱۹۶۰، در اقلیم سرد و خشک مشهد مدل‌های دروگزر و آلن ۱ و ۳ و ۲، والیانتراس ۵، و هارگریوز سامانی و در اقلیم گرم و خشک زاهدان مدل‌های دروگزر و آلن ۲ و ۳ و ۱، والیانتراس ۳ و ۴ و ایرماک ۲۰۰۳ نتایج خوبی از برآورد تبخیر و تعرق داشتند. تحقیقات نشان داده است در مناطق خشک و نیمه‌خشک شرق کشور مدل هارگریوز سامانی برآورد خوبی از تبخیر و تعرق ارائه می‌دهد [۱۶]. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در اقلیم‌های مختلف مدل‌های متفاوتی برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع به‌عنوان روش برتر انتخاب شدند.

مطابق جدول ۳ براساس شاخص آماری RMSE و MAE در اقلیم گرگان مدل مک‌کینگ اصلاح‌شده، والیانتراس ۵، دروگزر و آلن ۳ و ۲ و هارگریوز سامانی بعد از روش دروگزر و آلن ۱ به‌عنوان روش برتر انتخاب شدند. در ساری روش والیانتراس ۵، دروگزر و آلن ۳، مک‌کینگ اصلاح‌شده، هارگریوز سامانی و بلانی‌کریدل و ماهرینگر با داشتن کمترین میانگین مربعات خطا بعد از روش دروگزر و آلن ۱ به‌عنوان روش برتر معرفی می‌شوند. در اقلیم رشت مدل‌های دروگزر و آلن ۳، مک‌کینگ اصلاح‌شده، هارگریوز سامانی، بلانی‌کریدل و والیانتراس ۵ انتخاب شد. مطابق جدول‌های ۴ و ۵ بر اساس شاخص آماری RMSE و MAE در اقلیم گرم و مرطوب اهواز مدل‌های مک‌کینگ اصلاح‌شده، والیانتراس ۵ و ۴، دروگزر و آلن ۳،

جدول ۴. اقلیم گرم و مرطوب شامل شهرهای اهواز و بندرعباس

بندرعباس				اهواز				ایستگاه
RMSE	MAE	MR	PE	RMSE	MAE	MR	PE	معیار خطا
۳/۴۵	۳/۲۴	۰/۶۴	۳۵	۲/۶	۲/۱	۰/۷۶	۲۰/۹	هارگریوز سامانی (۱۹۸۵)
۴/۴۶	۴/۳۷	۰/۵۲	۴۷/۳۳	۳/۴	۳/۲	۰/۵۹	۳۹/۱	ایرماک (۲۰۰۳)
۴/۵۴	۴/۴۴	۰/۵۱	۴۸	۳/۴۹	۳/۱۹	۰/۵۹	۳۷/۹	تراجکویک (۲۰۰۷)
۴/۴۵	۴/۴۳	۰/۵۲	۴۶/۹	۳/۴۲	۲/۹۷	۰/۶۲	۵۳/۳	روضانی و همکاران (۲۰۱۲)
۴/۳۳	۴/۲۰	۰/۵۴	۴۵/۷	۳/۲۴	۲/۱۳	۰/۶۴	۳۳/۶۵	برتی و همکاران (۲۰۱۴)
۲/۵۴	۲/۲۹	۰/۷۳	۲۵/۸	۸/۵۸	۶/۴۹	۱/۴۲	۵۱/۵۴	اسکندل (۲۰۱۴)
۳/۵۷	۳/۴۹	۰/۶۲	۳۷/۷۹	۲/۸۸	۲/۷۱	۰/۶۶	۳۲/۲۸	بلانی و کریدل (۱۹۷۷)
۳/۴۱	۳/۲۵	۰/۶۴	۳۵/۲۰	۴/۹۲	۴/۱۸	۱/۱۴	۴۳/۷۴	روماننکو (۱۹۶۱)
۴/۱۲	۳/۲۹	۱/۱۸	۲۱/۷۴	۶/۴۴	۴/۹۵	۱/۲۴	۳۱/۳۳	ماهرینگر (۱۹۷۰)
۴/۳۶	۳/۹۵	۰/۶۴	۳۰	۴/۳۶	۳/۹۵	۰/۶۴	۳۰	WMO (1960)
۵/۹۹	۵/۲۱	۱/۵۹	۶۱/۸	۵/۹۹	۵/۲۱	۱/۵۹	۶۱/۸	Rn Based (2003)
۲/۴۵	۲/۳۲	۰/۹۸	۲۱/۸	۲/۲۱	۱/۸۱	۰/۷۷	۲۰/۸	مک کینگ اصلاح شده
۶/۳۰	۶/۲۵	۰/۲۴	۷۴/۴۷	۶/۳۰	۶/۲۵	۰/۲۴	۷۴/۴۷	تورک
۳/۰۴	۲/۵	۰/۶۷	۲۹/۹	۳/۰۴	۲/۵	۰/۶۷	۲۹/۹	ترابرت (۱۸۹۶)
۴/۹۸	۴/۷۶	۰/۴۰	۵۶/۷	۴/۹۸	۴/۷۶	۰/۴۰	۵۶/۷	طبری و همکاران ۱ (۲۰۱۳)
۴/۵۱	۴/۴۲	۰/۴۶	۵۲/۷۰	۴/۵۱	۴/۴۲	۰/۴۶	۵۲/۷۰	طبری و همکاران ۲ (۲۰۱۳)
۲/۱۶	۱/۷	۰/۸۴	۱۵/۳۴	۲/۸۷	۲/۵۸	۰/۹۹	۳/۱۳	دروگرز و آلن ۱ (۲۰۰۲)
۳/۴۵	۳/۲۳	۰/۶۴	۳۵	۲/۵۸	۲/۱۶	۰/۸۱	۱۵/۹	دروگرز و آلن ۲ (۲۰۰۲)
۲/۶۲	۲/۲۴	۰/۷۶	۲۲/۸۸	۲/۸۹	۲/۶۰	۰/۸۶	۱۰/۴۷	دروگرز و آلن ۳ (۲۰۰۳)
۴/۶۱	۴/۴۷	۰/۵۰	۴۸/۳۹	۴/۲۵	۴/۰۶	۰/۴۹	۴۸/۳	فرمول ۱ والیانتراس
۵/۰۱	۴/۹۲	۰/۴۶	۵۳/۲۱	۳/۷۰	۳/۲۵	۰/۵۸	۳۷/۶۸	فرمول ۲ والیانتراس
۳/۹۷	۳/۸۰	۰/۵۸	۴۱/۱۳	۲/۸۰	۲/۳۱	۰/۷۶	۲۰/۴۷	فرمول ۳ والیانتراس
۴/۶۴	۴/۵۴	۰/۵۰	۴۹/۰۸	۳/۱۰	۲/۵۶	۰/۶۷	۲۹/۶	فرمول ۴ والیانتراس
۱/۳۱	۱/۱۴	۰/۹۸	۱/۸۱	۲/۷۴	۲/۲۹	۱/۱۶	۱۸/۵۵	فرمول ۵ والیانتراس

جدول ۵. اقلیم گرم و خشک و سرد و خشک

زاهدان				مشهد				ایستگاه
RMSE	MAE	MR	PE	RMSE	MAE	MR	PE	معیار خطا
۳/۶۰	۲/۱۲	۰/۷۵	۲۳	۲/۸۰	۲/۳۰	۰/۶۷	۳۰/۵۹	هارگریوز سامانی (۱۹۸۵)
۳/۰۷	۲/۸۷	۰/۶۳	۳۶/۱	۳/۲۵	۲/۹۹	۰/۵۸	۴۰/۶۸	ایرماک (۲۰۰۳)
۳/۵۲	۳/۲۱	۰/۵۸	۴۰/۴۵	۳/۶۴	۳/۳۷	۰/۵۲	۴۵/۹	تراجکویک (۲۰۰۷)
۳/۳۳	۲/۹۶	۰/۶۱	۳۷/۳۵	۳/۴۹	۳/۱۸	۰/۵۴	۴۳/۲	روضانی و همکاران (۲۰۱۲)
۳/۲۴	۲/۸۳	۰/۶۳	۳۵/۶۸	۳/۴۰	۳/۰۶	۰/۵۶	۴۱/۷	برتی و همکاران (۲۰۱۴)
۱۱/۵۴	۸/۵	۱/۷	۷۷/۶	۵/۰۲	۴/۱۹	۰/۸۲	۸/۵۷	اسکندل (۲۰۱۴)
۳/۳۰	۳/۱۱	۰/۶۰	۳۹/۳۸	۳/۲۰	۳/۰۹	۰/۵۷	۴۱/۳۸	بلانی و کریدل (۱۹۷۷)
۳/۹۴	۳/۴۱	۱/۱۰	۱۳/۲۹	۳/۳۰	۲/۹۶	۰/۷۲	۲۱/۴۰	روماننکو (۱۹۶۱)
۳/۵۷	۳/۰۸	۰/۹۹	۱۷/۷۱	۳/۳۷	۲/۹۷	۰/۷۵	۱۹/۶۳	ماهرینگر (۱۹۷۰)
۳/۹۸	۳/۴۷	۰/۵۸	۳۹/۱	۴/۸۱	۴/۵۴	۰/۳۴	۶۱/۳۹	WMO (1960)
۵/۸۷	۵/۰۶	۱/۶۲	۶۳/۶۵	۵/۱۱	۴/۲۷	۱/۵۲	۵۴	Rn Based (2003)
۱/۴۶	۱/۲۵	۰/۹۶	۲/۸۷	۱/۷۹	۱/۴۱	۰/۸۵	۱۲/۴۹	مک کینگ اصلاح شده
۵/۸۴	۵/۸۲	۰/۲۶	۷۳/۴۱	۵/۷۱	۵/۶۴	۰/۲۱	۷۶/۸۰	تورک
۳/۰۴	۲/۵۵	۰/۶۶	۳۱/۹۴	۳/۲۳	۲/۸۲	۰/۵۹	۳۸/۴۲	ترابرت (۱۸۹۶)
۵/۲۴	۵/۰۱	۰/۳۵	۶۳/۲۱	۵/۴۰	۵/۲۵	۰/۲۴	۷۱/۶۱	طبری و همکاران ۱ (۲۰۱۳)
۴/۲۶	۴/۱۳	۰/۴۷	۵۲/۰۷	۴/۲۱	۴/۰۲	۰/۴۴	۵۴/۸۰	طبری و همکاران ۲ (۲۰۱۳)
۲/۶۷	۲/۴۰	۰/۹۸	۲۰	۲/۶۱	۲/۲۳	۰/۸۷	۹/۴۷	دروگرز و آلن ۱ (۲۰۰۲)
۲/۵۹	۲/۱۰	۰/۷۹	۱۸/۸	۲/۷۹	۲/۱۶	۰/۷۰	۲۶/۶	دروگرز و آلن ۲ (۲۰۰۲)
۲/۶۳	۲/۳۶	۰/۹۸	۵۲	۲/۵۹	۲/۱۸	۰/۸۶	۱۰/۴۷	دروگرز و آلن ۳ (۲۰۰۳)
۴/۱۶	۴/۵۵	۰/۴۲	۵۷/۳۲	۴/۲۲	۳/۸۷	۰/۴۴	۵۲/۶۹	فرمول ۱ والیانتراس
۳/۱۸	۲/۶۴	۰/۶۶	۳۲/۷	۳/۸۷	۳/۵۰	۰/۴۹	۴۷/۶۶	فرمول ۲ والیانتراس
۲/۸۲	۲/۳۰	۰/۷۹	۱۸/۸۶	۳/۳۳	۲/۶۴	۰/۶۱	۳۴/۱۶	فرمول ۳ والیانتراس
۲/۸۴	۲/۲۴	۰/۷۲	۲۵/۹	۳/۴۶	۳/۰۲	۰/۵۵	۴۱/۱۱	فرمول ۴ والیانتراس
۳/۱۰	۲/۶۱	۱/۲۵	۲۶/۵۴	۲/۷۱	۲/۳۶	۱/۱۷	۱۸/۲۶	فرمول ۵ والیانتراس

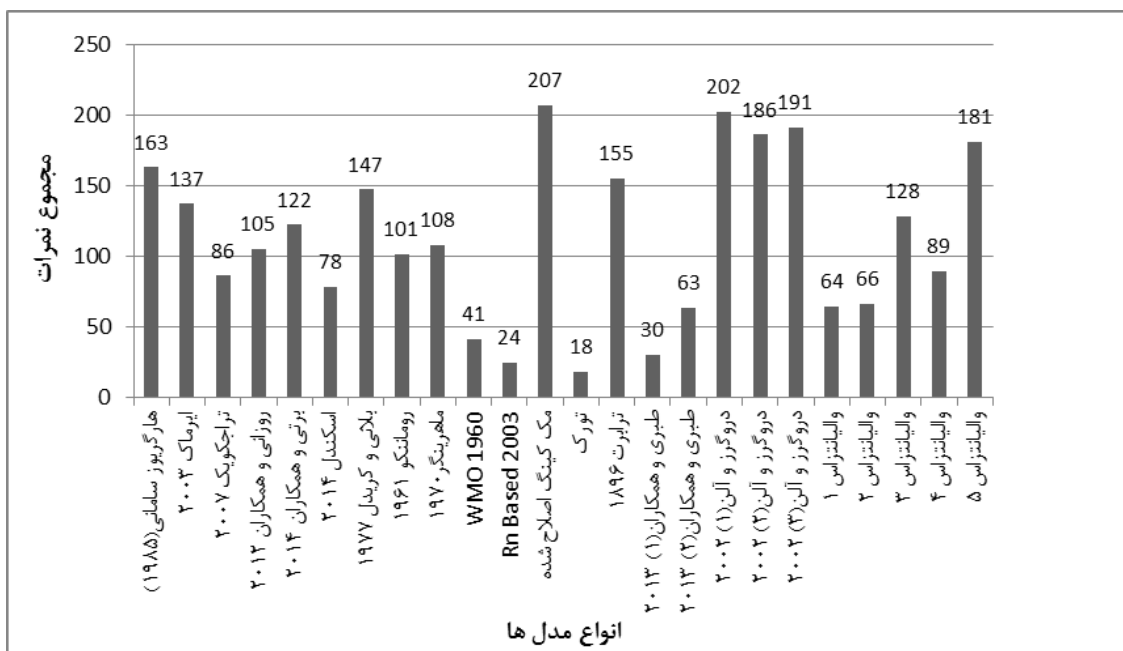
آماری نشان می‌دهد. با توجه شکل ۲ بر اساس شاخص آماري RMSE مدل مک‌کینگ اصلاح‌شده با داشتن بیشترین نمره می‌تواند برآورد بهتری از تبخیر و تعرق داشته باشد. مدل‌های درروگرز و آلن ۱، دروگرز و آلن ۳، دروگرز و آلن ۲ و والیانتراس ۵ و هارگریوز سامانی (۱۹۸۵) در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند.

براساس آماره میانگین خطای مطلق (MAE) (شکل ۳) نیز مدل مک‌کینگ اصلاح‌شده از بین مدل‌های بررسی شده بیشترین نمره (۲۰۵) را به دست آورده است. و مدل‌های درروگرز و آلن ۱، دروگرز و آلن ۲، دروگرز و آلن ۳، والیانتراس ۵ و هارگریوز سامانی (۱۹۸۵) در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. بر اساس آماره درصد خطای تخمین (PE) (شکل ۴) مدل دروگرز و آلن ۱ با مجموع ۲۰۴ نمره رتبه نخست در برآورد تبخیر و تعرق را داشت و مدل‌های مک‌کینگ اصلاح‌شده، دروگرز و آلن ۳ و ۲، والیانتراس ۵ و هارگریوز سامانی (۱۹۸۵) در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

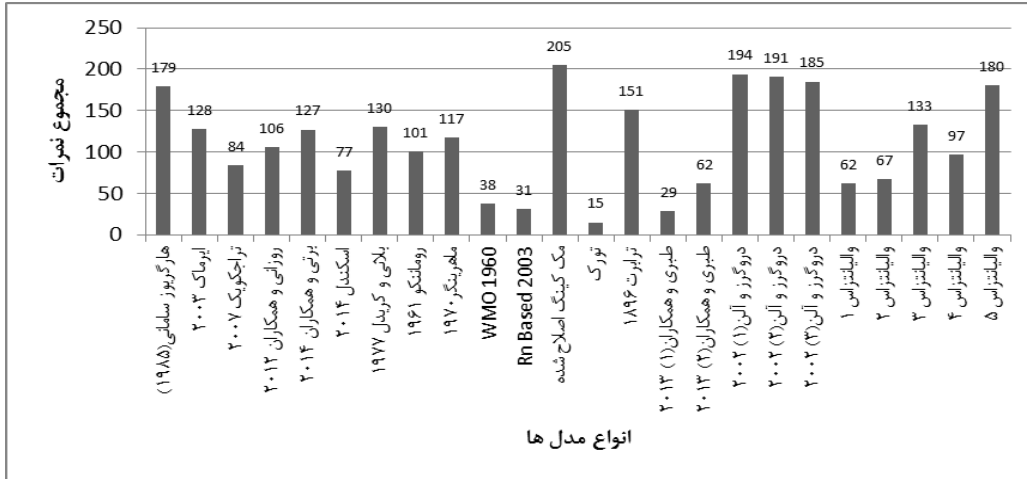
شکل ۵ نقشه پهنه‌بندی تبخیر و تعرق گیاه مرجع را با استفاده از روش کریجینگ با داده‌های مربوط به مدل برتر در هر منطقه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار تبخیر و تعرق در نواحی غربی، شمال غربی و شمال کشور کمتر و به سمت مرکز و جنوب شرق کشور افزایش می‌یابد.

شاخص MR مقادیر بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی مدل‌ها را پیش‌بینی می‌کند. هر چه مقدار این شاخص به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده برآورد خوب مدل است. مقادیر کمتر از یک، نشان‌دهنده کم‌برآوردی مدل و مقادیر بیشتر از یک، نشان‌دهنده بیش‌برآوردی مدل نسبت به مدل مبنا هستند. مقدار این شاخص برای مدل برتر در اقلیم‌های ارومیه، شهرکرد، گرگان، ساری، رشت، اهواز، بندرعباس، مشهد و زاهدان به ترتیب ۰/۸۲، ۰/۹۸، ۰/۸۸، ۰/۵۳، ۱/۰۱، ۰/۷۷، ۰/۹۸، ۰/۸۵ و ۰/۹۶ به دست آمد که نشان می‌دهد مدل‌های انتخابی در همه اقلیم‌ها به جز اقلیم رشت، مقادیر تبخیر و تعرق را نسبت به روش فائو-پنمن - مانیتث کمتر برآورد کردند. شاخص PE درصد خطای میانگین‌ها را نسبت به میانگین محاسبه‌شده توسط مدل فائو-پنمن - مانیتث نشان می‌دهد. هر چه مقدار این شاخص به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده برآورد خوب مدل نسبت به مدل مبناست. مقدار این شاخص برای مدل برتر در اقلیم‌های ارومیه، شهرکرد، گرگان، ساری، رشت، اهواز، بندرعباس، مشهد و زاهدان به ترتیب ۱۴/۷، ۲/۳۶، ۸/۷۲، ۹/۷۲، ۵/۹، ۲۰/۸، ۱/۸۱، ۱۲/۴۹ و ۲/۸۷ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده برآورد خوب مدل انتخابی برای هر منطقه است.

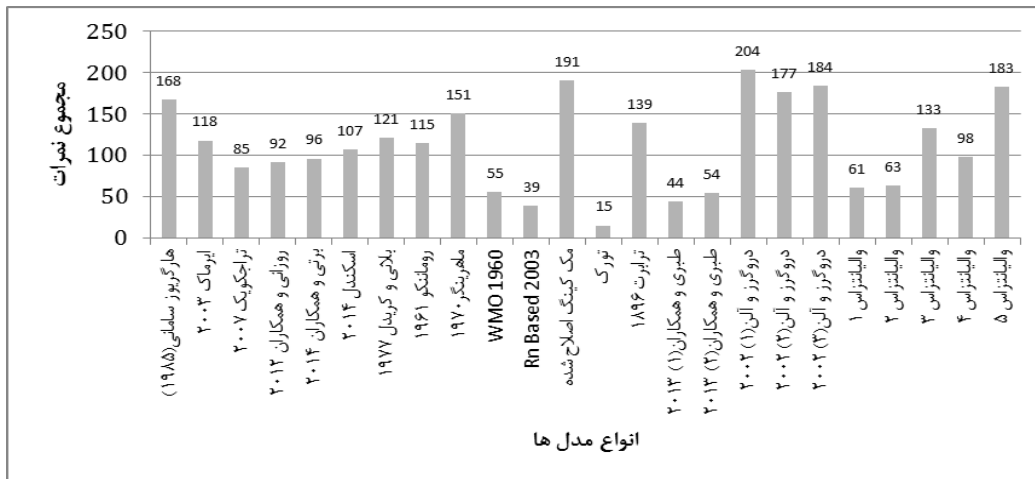
شکل‌های ۲-۴ مجموع نمره‌های داده‌شده به هر مدل را در همه اقلیم‌های مطالعه‌شده، براساس شاخص‌های



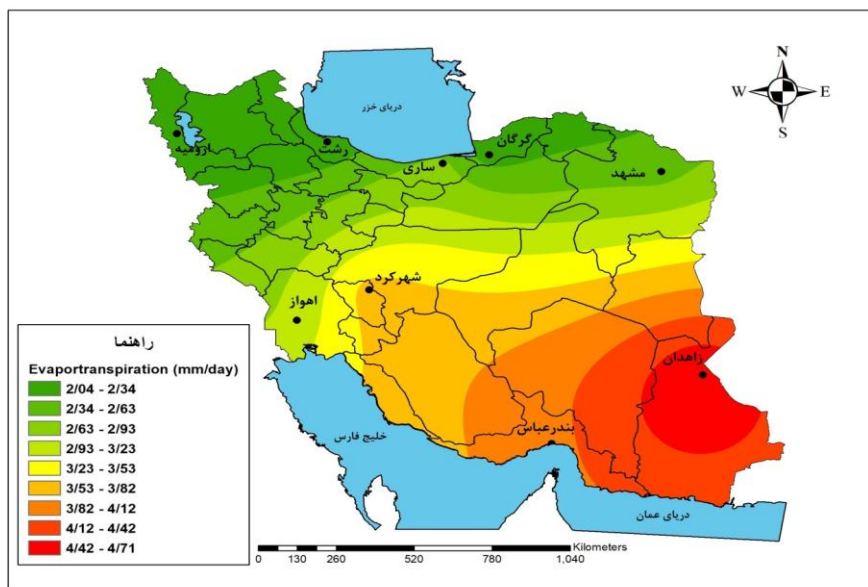
شکل ۲. رتبه‌بندی مدل‌ها براساس آماره میانگین مربعات خطا (RMSE)



شکل ۳. رتبه‌بندی مدل‌ها براساس آماره میانگین خطای مطلق (MAE)



شکل ۴. رتبه‌بندی مدل‌ها براساس آماره درصد خطای تخمین (PE)



شکل ۵. نقشه پهنه‌بندی تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از کریجینگ با داده‌های مدل‌های برتر

- climates. Water resources management, 2010; 24(10):2311-2337. [Persian]
- [4]. Azhar A.H, Perera B.J.C. Evaluation of reference evapotranspiration estimation methods under Southeast Australian conditions. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 2010; 137(5):268-279.
- [5]. Mehdi Zadeh S, Rakhshani F, Bahmanesh J, Delir Hassannia R. Analysis of the Accuracy of Five Different Models of Valiantzas's Relationship in the Estimation of Reference Evapotranspiration. Irrigation Science and Engineering, 2017; 41 (3): 132-119. [Persian]
- [6]. Namdarian K, Naseri A.A, Izadpanah Z, Maleki A. Comparison of FAO Penman-Monteith method and Class A evaporation pan with lysimetric data Estimation of evapotranspiration of chickpea in Khorramabad region, Iranian Journal of Cereals Research, 2014; 6(1):92-99. [Persian]
- [7]. Djaman K, Balde A.B, Sow A, Muller B, Irmak S, N'Diaye M.K, Manneh B, Moukoumbi Y.D, Futakuchi K, Saito K. Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under sahelian conditions in the Senegal River Valley. J. Hydrol. Region. Stud. 2015; 3: 139-159.
- [8]. Khoshhal J, Zare Abyane H, Joshani A.R, Khazaei M. Evaluation of potential Evapotranspiration methods using FAO pan method in east and southeast the Keshvar watershed. Quarterly of Natural Geographical. 2008; 8: 28. 1-16. [Persian]
- [9]. Sabziparvar A.A, Tabari H. Regional estimation of reference evapotranspiration in arid and semi-arid regions. J. Irrig. Drain. Engin. 2010; 136(10): 724-731.
- [10]. Ghorbani KH, Aligholinia, T, Rasouli Majd N. Evaluating the accuracy of the twenty experimental models of estimation of evapotranspiration of the reference plant for coastal areas in different climates. Water and soil conservation research. 2017; 25 (4): 320-307. [Persian]
- [11]. Djaman K, Irmak S, Kabenge I, Futakuchi K. Evaluation of FAO-56 penman-monteith model with limited data and the valiantzas models for estimating grass-reference evapotranspiration in Sahelian conditions. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2016; 142(11):.04016044.
- [12]. Irmak S, Irmak A, Allen R.G, Jones, J.W. Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 2003; 129(5): 336-347.

نتیجه‌گیری

برای تخمین دقیق مقدار آب مورد نیاز گیاهان، به اندازه‌گیری‌های پارامترهای متعدد هواشناسی احتیاج داریم. معمولاً، این داده‌ها همیشه در دسترس نیستند. برای حل این مشکل می‌توان از مدل‌های با داده‌های کمتر استفاده کرد که همان نتایج را ارائه می‌کند. بنابراین، در مطالعه حاضر با استفاده از اطلاعات آماری پارامترهای ایستگاه هواشناسی نه شهر کشور با اقلیم‌های مختلف آب و هوایی در دوره آماری (۱۳۶۷-۱۳۹۶) تبخیر و تعرق به روش فائو- پنمن - مانیتث به صورت روزانه محاسبه شده و با ۲۴ مدل تجربی دیگر مقایسه شد. نتایج نشان داد در اقلیم‌های ارومیه، شهرکرد، اهواز، مشهد، زاهدان مدل مک‌کینگ اصلاح‌شده، در اقلیم‌های نوار ساحلی کشور شامل گرگان، ساری و رشت مدل دروگرز و آلن ۱ و در اقلیم بندرعباس مدل والیانتراس ۵ به عنوان مدل برتر انتخاب شدند. در مجموع، با توجه به نمره‌های کسب‌شده توسط هر مدل، مدل‌های مک‌کینگ اصلاح‌شده، دروگرز و آلن ۱ و ۲ و ۳، والیانتراس ۵ و هارگریوز سامانی (۱۹۸۵) به عنوان چند مدل برتر برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع در اقلیم‌های مختلف ایران معرفی می‌شوند. روش‌های تورک، طبری و همکاران ۱ (۲۰۱۳)، Rn Based (2003) و WMO نیز بدترین برآورد را داشتند و برای اقلیم‌های مطالعه‌شده در ایران توصیه نمی‌شوند. بنابراین، با توجه به پهنای بودن کشور ایران و اقلیم‌های متفاوت آن، پیشنهاد می‌شود تبخیر و تعرق در همه اقلیم‌ها و شهرها با مدل‌های ارائه‌شده در خصوص اندازه‌گیری تبخیر و تعرق محاسبه شود و مدل‌های برتر در هر اقلیم مشخص و برای کارهای تحقیقاتی معرفی شوند.

منابع

- [1]. Gundekar H. G. Khodke U. M, Sarkar S. Evaluation of pan coefficient for reference crop evapotranspiration for semi-arid region. Irrigation Science. 2008; 26: 169-175.
- [2]. Alizadeh A, Kamali GH, Khanjani M. J. Air and Climatology. Estimation of Evapotranspiration Estimation Methods in Arid Regions of Iran, Geographical Research Magazine, 2004; 105: 73-97. [Persian]
- [3]. Tabari H. Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various

- [13]. Trajkovic S, Kolakovic S. Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions. *Water Resources Management*, 2009; 23(14) : 3057-3067.
- [14]. Kisi O. Comparison of different empirical methods for estimating daily reference evapotranspiration in Mediterranean climate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2013; 140(1), 2655-2677.
- [15]. Droogers P. Allen R.G. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems*, 2002; 16(1): 33-45.
- [16]. Rauf M, Azizi Makar J. Evaluation of Eighteen Model of Reference Evapotranspiration in Ardabil Plain. *Water and soil conservation research*. 2017; 24 (6): 240-227. [Persian]
- [17]. Temesgen B., Eching S, Davidoff B. Frame K. Comparison of some reference Evapotranspiration equations for California, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2005; 131(1): 73-84.