

مدلسازی تبخیر و تعرق بالقوه با استفاده از فرانسج های هواشناسی (مطالعه موردی: حوضه دریاچه ارومیه)

یعقوب دین پزوه^۱

سعید جهانبخش اصل^۲

لیلا موسوی جهانی^۳

چکیده

یکی از مدل‌های تخمین ET_0 که مورد قبول همه هیدرولوژیست‌ها و اقلیم‌شناسان می‌باشد، مدل فائو پنمن-مانتیس (FAO56PM) است. این مدل، علیرغم تخمین دقیق ET_0 در اقلیم‌های مختلف، محدودیت‌هایی دارد. از جمله این محدودیت‌ها نیاز به داده‌های متنوع هواشناسی از جمله تابش آفتاب، ساعات آفتابی، دمای هوا، رطوبت نسبی، دمای نقطه شبنم، سرعت باد و فشار بخار واقعی است. متأسفانه همه این پارامترهای در جمیع موارد در دسترس نیستند. بنابراین، هدف اصلی این مطالعه یافتن روشی ساده جهت تخمین ET_0 با داده‌های کم هواشناسی و دقت کافی در حوضه دریاچه ارومیه می‌باشد. برای این کار از مدل‌های هارگریوز، کیمبرلی پنمن، پریستلی تایلور و مدل‌های رگرسیونی خطی و غیرخطی استفاده شد. ارزیابی مدل‌ها با سه معیار ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) به انجام رسید. نتایج نشان داد که میانه مقادیر R^2 مدل کیمبرلی-پنمن بیش از ۰/۹۸۶ به دست آمده است. در حالی که این رقم برای مدل‌های PT و HG بترتیب معادل ۰/۹۰۲ و ۰/۴ به دست آمد. در مدل HG میانه مقادیر RMSE حدود ۰/۹ (میلیمتر بر روز) بود این رقم برای مدل‌های KPM و PT به ترتیب، حدود ۱/۳ و ۲/۱ (میلیمتر بر روز) بود. میانه آماره MAE ایستگاه‌های منتخب، برای مدل KPM از ۱ (میلی‌متر بر روز) نیز کمتر بود. این رقم در مورد مدل HG حدود ۰/۷ (میلی‌متر بر روز) و برای مدل PT بیشتر از ۱/۵ (میلی‌متر بر روز) بود. بنابراین، با توجه به معیار MAE نیز مدل HG مناسب‌تر از مدل‌های دیگر تشخیص داده شد. مدل رگرسیونی خطی با ۲ متغیر (T_{max} , Wind) دارای میانه مقادیر R^2 معادل ۰/۸۴ در بین سایر مدل‌ها مناسب‌تر و دقیق‌تر می‌باشد.

واژگان کلیدی: حوضه دریاچه ارومیه، فرانسج هواشناسی، کیمبرلی پنمن، پریستلی تایلور، هارگریوز، رگرسیون گام به گام، رگرسیون خطی چندگانه، رگرسیون غیرخطی.

مقدمه

تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع (ET_0) یکی از مولفه‌های اصلی گردش آب در طبیعت می‌باشد که تخمین دقیق آن در بیابان آب حوضه‌ها و مخازن، طراحی سیستم‌های آبیاری و زهکشی، تخمین دقیق ابعاد سازه‌های آبی ضروری می‌باشد (جهانبخش اصل و همکاران، ۱۳۹۱: ۲۵-۴۶). این موضوع به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه خشک که در آن آب برای فعالیت‌های بشر حیاتی است، از اهمیت زیادی برخوردار است. در این میان، یکی از مدل‌های استاندارد برای تخمین ET_0 ، مدل فائو پنمن-مانتیس (FAO56PM) می‌باشد. یکی از

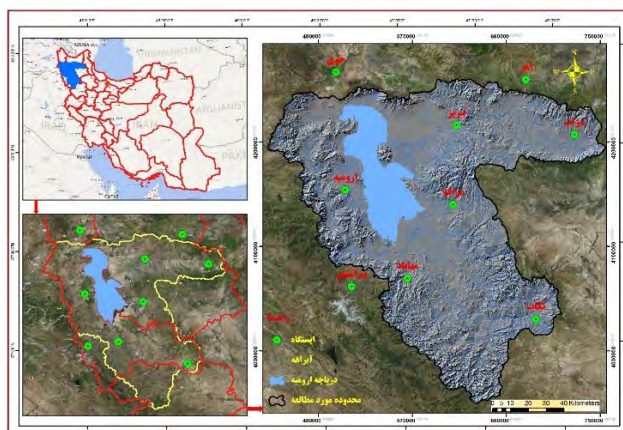
محدودیت‌های این مدل نیاز به داده‌های هواشناسی زیاد می‌باشد، که در اکثر موارد در دسترس نمی‌باشد. دانشمندان در صدد یافتن مدل‌هایی که نیاز به پارامترهای هواشناسی کمتری دارند روی آورده‌اند. در گذشته، مطالعات متعددی در زمینه کاربرد مدل‌های مختلف تجربی برای تخمین ET_0 انجام شده است. چودهوری^۱ (۱۹۹۷: ۸۱-۶۴) الگوی کلی ET_0 را بر اساس مدل FAO56PM با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و اطلاعات جمع‌آوری شده برای یک دوره ۲۴ ماهه تهیه نمود. سامنر^۲ و همکاران (۲۰۰۵: ۱۰۴-۸۱) ET_0 را در یک دوره ۱۹ ماهه در فلوریدا با استفاده از مدل‌های متکی بر داده‌های سهل‌الوصول مانند پریستلی-تیلور (PT) تخمین زدند. پایاوا و همکاران (۲۰۰۶: ۲۱۵-۲۰۱) مقادیر ET_0 را با روش FAO56PM در ۵ ایستگاه بلغارستان با پارامترهای هواشناسی کم تخمین و با نتایج مدل FAO56PM مقایسه کردند. ژای و همکاران (۲۰۱۰: ۴۹۰-۴۷۷) یازده مدل تجربی را برای تخمین ET_0 در استان کانسو واقع در چین بکار بردند. نتایج نشان داد که در ایستگاه‌هایی که مقدار $T_{mean} > 0^{\circ}C$ باشد. مدل Turk قابل کاربرد است، ولی در ایستگاه‌هایی که $T_{mean} > -3^{\circ}C$ است. مدل جنسن - هیز مناسب بود. ژانگ و همکاران (۲۰۱۹: ۵۱۱-۴۹۹) بر اساس داده‌های هواشناسی روزانه ۵۹۸ ایستگاه در چین (۲۰۱۴-۱۹۷۰) مقادیر ET_0 را با فرمول FAO56PM محاسبه نمودند. ایشان با روش رگرسیون خطی چندگانه (MLR) مقادیر ET_0 را برای ماه‌های ژوئن تا سپتامبر محاسبه و نتایج را با خروجی روش PM مقایسه کردند. در ایران خیرایی و همکاران (۱۳۷۶) ضمن تشریح روش FAO56PM براساس آمار محدود میزان تغییرات ET_0 در ۴۶ ایستگاه کشور از جمله همدان مطالعه شد. سبزی‌پرور و همکاران (۱۳۸۷: ۳۳۹-۳۲۹) چند مدل ET_0 را در اقلیم سرد نیمه‌خشک استفاده و نتایج را با مدل FAO56PM مقایسه کردند. سلطانی و همکاران (۱۳۹۱: ۱۴۹-۱۳۹) دقت مدل‌های تورک، هارگریوز (HG) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) را با مدل FAO56PM مقایسه کردند. جهانبخش و همکاران (۱۳۸۰: ۵۶-۵۱) روش‌های ترکیبی ET_0 را در ایستگاه تبریز با آمار ۲۰ ساله به کار بردند و خروجی آن‌ها را با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه کردند. در سال‌های اخیر، حوضه دریاچه ارومیه شاهد تغییرات شگرف در بیلان آب بوده، طوری که تراز آب دریاچه بطور مستمر کاهش یافته است. برای حل این مشکل باید از مصرف آب بی رویه خودداری نمود. لازمه این مهم، تخمین صحیح ET_0 برای تامین آب مصرفی گیاهان است. بنابراین، هدف اصلی این مطالعه بررسی دقت کارایی سه مدل تجربی تخمین ET_0 (شامل PT، HG، KPM) و مدل‌های MLR و رگرسیون غیرخطی چندگانه که نیاز به پارامترهای هواشناسی اندک و سهل‌الوصول دارند، در حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه، حوضه دریاچه ارومیه می‌باشد. موقعیت جغرافیایی حوضه بین 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 است. مساحت حوضه حدود ۵۱۸۷۶ کیلومتر مربع (۳/۲ درصد مساحت کشور) است (شکل ۱). داده‌ها از ادارات کل هواشناسی استان‌های مربوطه اخذ شد. آمار داده‌های ثبت شده ۹ ایستگاه هواشناسی از بدو تاسیس تا آخر سال ۲۰۱۸ استفاده شد. کیفیت داده‌ها با روش Run Test بررسی و همگنی آنها تایید شد. جدول ۱ مشخصات ایستگاه‌های منتخب در حوضه دریاچه ارومیه را نشان می‌دهد.

¹ Choudhury

² Sumner



شکل (۱). نقشه‌ی موقعیت ایستگاه‌ها و منطقه مورد مطالعه (حوضه دریاچه ارومیه).

جدول (۱). مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

ردیف	نام ایستگاه	طول جغرافیایی دقیقه درجه	عرض جغرافیایی دقیقه درجه	ارتفاع (m)	ET ₀ سالانه (میلیمتر)
۱	تبریز	۴۶ ۱۷	۳۸ ۰۷	۱۳۶۴	۱۶۰۵
۲	مراغه	۴۶ ۱۶	۳۷ ۲۴	۱۳۴۴	۱۶۲۹
۳	اهر*	۴۷ ۰۴	۳۸ ۲۶	۱۳۹۱	۱۲۲۲
۴	سراب	۴۷ ۲۳	۳۷ ۵۶	۱۶۸۲	۱۱۳۵
۵	ارومیه	۴۵ ۰۵	۳۸ ۳۳	۱۳۳۵	۱۲۷۰
۶	تکاب	۴۷ ۰۷	۳۶ ۲۳	۱۸۱۷	۱۲۳۰
۷	مهاباد	۴۵ ۴۳	۳۶ ۴۶	۱۳۵۲	۱۳۰۰
۸	پیرانشهر*	۴۵ ۰۸	۳۶ ۴۰	۱۴۴۴	۱۳۹۵
۹	خوی*	۴۴ ۵۸	۳۸ ۳۳	۱۱۰۳	۱۱۷۲

توجه: ایستگاه‌هایی با علامت ستاره در خارج از محدوده حوضه دریاچه ارومیه قرار دارند.

در این مطالعه، برای مدل‌بندی ET₀ ایستگاه‌های هواشناسی منتخب از داده‌های دمای حداکثر (t_{max})، حداقل (t_{min})، ساعات آفتابی (n)، میانگین سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری به نات (u)، میانگین رطوبت نسبی هوا (RH)، و عرض جغرافیایی ایستگاهها (Φ) استفاده شد. سرعت باد، از ارتفاع ۱۰ به ۲ متری با رابطه زیر تبدیل شد (نانداگیری و کوور، ۲۰۰۵: ۲۴۴)؛ سنتل‌هاس و همکاران، ۲۰۱۰):

$$u_2 = \frac{U_z \times 4.87}{\ln(67.8 \times Z - 5.42)} \quad (1)$$

که در آن: u_z : سرعت باد در ارتفاع Z متری ($\frac{m}{s}$)، u_2 : سرعت باد در ارتفاع ۲ متری ($\frac{m}{s}$) و Z : ارتفاع دکل بادسنج می‌باشد (دین پژوه و همکاران ۲۰۱۲: ۲۸۶-۲۶۰).

روش فائو-۵۶- پنمن مانیتیس (FAO56PM)

روش FAO56PM یکی از روش‌های دقیق برای تخمین ET₀ در همه‌ی انواع اقلیم‌ها می‌باشد. در این روش، برای محاسبه‌ی ET₀ از رابطه آلن و همکاران (۱۹۹۸: ۳۳۲) به شرح زیر استفاده شد:

$$ET_0 = \frac{0.484 \times \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (\text{mm day}^{-1}) \quad (2)$$

که در آن ET_0 تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع (میلی‌متر بر روز)، T میانگین دمای هوا ($^{\circ}C$) و سایر پارامترها در ادامه شرح داده شده است. برای محاسبه فشار بخار واقعی هوا (e_a) ابتدا فشار بخار اشباع (e_s) با توجه به رابطه زیر محاسبه شد:

$$e_s = 0.6108 \times \exp\left(\frac{17.27 \times T}{237.3 + T}\right) \quad (3)$$

که در آن T : میانگین دمای هوا ($^{\circ}C$) می‌باشد. پس از محاسبه e_s مقدار آن به RH ضرب و مقدار e_a (کیلوپاسکال) به دست آمد. برای محاسبه Δ (شیب منحنی فشار بخار اشباع تابعی از میانگین دمای هوا) از رابطه زیر بهره گرفته شد:

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(237.3 + T)^2} \quad (KPa / ^{\circ}C) \quad (4)$$

سایر پارامترهای موجود در معادله (۲) با استفاده از روابط توصیه شده در آن و همکاران (۱۹۹۸: ۳۳۹-۳۳۲) محاسبه شد. خروجی مدل FAO56PM به‌عنوان مبنای مقایسه دقت سایر روش‌ها استفاده شد.

روش هارگریوز (HG)

در روش HG برای تخمین ET_0 (mm/day) از معادله زیر استفاده شد (شاتلورث ۱۹۹۳: ۲۷-۴)

$$ET_0 = 0.0023 S_0 \times \sqrt{(T_{max} - T_{min})} \times (T_{max} - 17.8) \quad (5)$$

که در آن: S_0 : میزان تابش رسیده به بالای جو زمین ($\frac{mm}{day}$)، T_{max} ، T_{min} و T_{mean} بترتیب، حداکثر، حداقل و میانگین دمای هوای روزانه ($^{\circ}C$) می‌باشند.

روش کیمبرلی-پنمن (KPM)

فرم مدل کیمبرلی-پنمن (KPM) به‌صورت زیر است (شاتلورث ۱۹۹۳: ۲۶-۴):

$$ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \times \frac{6.43 \times W_f \times D}{\lambda} \quad (mm/day) \quad (6)$$

که در آن W_f تابعی از سرعت باد در ارتفاع ۲ متر بوده که از رابطه زیر حساب شد:

$$W_f = a_w + b_w u_2 \quad (7)$$

$$a_w = 0.4 + 1.4 \times \exp\{-[(J - 173)/58]^2\} \quad (8)$$

$$b_w = 0.605 + 0.345 \times \exp\{-[(J - 243)/80]^2\} \quad (9)$$

که در آن J شماره روز ژولیوسی و D کمبود فشار بخار اشباع یا ($e - e_s$) است.

مدل پریستلی-تایلور (PT)

فرم مدل پریستلی-تایلور (PT) به‌شرح زیر است (شاتلورث: ۱۹۹۳: ۴-۲۸)

$$ET_0 = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \quad (mmday^{-1}) \quad (10)$$

که در آن R_n : تابش خالص خورشیدی رسیده به سطح زمین ($MJ m^{-2} day^{-1}$)، G : شار گرمای خاک ($MJ m^{-2} day^{-1}$) بوده و ضریب α برای نواحی مرطوب و خشک بترتیب برابر ۱/۲۶ و ۱/۷۴ توصیه شده است. برای همه ایستگاه‌های مورد مطالعه، $\alpha = 1.74$ فرض شد.



مدل های رگرسیون چندگانه خطی (MLR)

مدل های MLR در فرم ماتریسی برای p متغیر هواشناسی به شرح زیر در نظر گرفته شد (دراپر و اسمیت ۱۹۶۶: ۱۸۵):

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (11)$$

که در آن، Y : بردار نظیر متغیر وابسته، X : ماتریس نظیر متغیرهای مستقل، β : بردار ضرایب رگرسیون، ε : بردار خطای برآزش مدل می باشد که بشرح زیر تعریف شدند:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{np} \end{bmatrix}, \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_p \end{bmatrix}, \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

مقادیر درایه های بردار $\hat{\beta}$ از رابطه زیر بدست آمد:

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1} (X'Y) \quad (13)$$

که در آن X' ترانپوز ماتریس X است. در این مطالعه، مدل های MLR با تعداد متغیرهای هواشناسی متفاوت (بین ۱ تا ۵ با ترکیبات مختلف) بسط داده شدند. معنی داری هر کدام با آزمون F در سطح ۰/۰۵ تست و مناسب ترین مدل با تعداد متغیرهای مختلف انتخاب شدند.

مدل های رگرسیونی غیرخطی

مدل های غیرخطی (با حداکثر ۵ پارامتر هواشناسی) به شرح زیر در نظر گرفته شد:

$$ET_0 = T_{max}^{Y_0} \times T_{min}^{Y_1} \times n^{Y_2} \times RH^{Y_3} \times wind^{Y_4} \quad (\text{mm day}^{-1}) \quad (14)$$

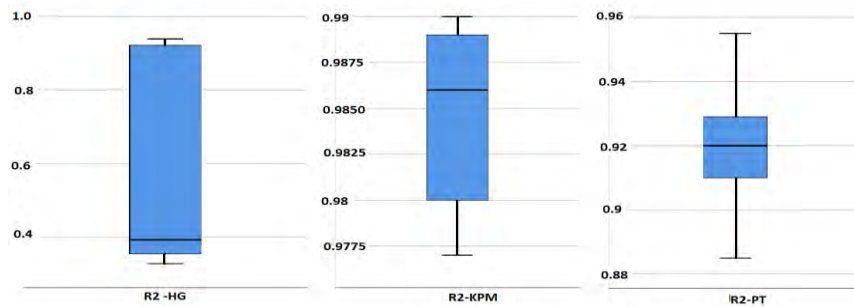
محاسبات در صفحه گسترده با نرم افزار SPSS انجام شد.

ارزیابی عملکرد مدل ها:

برای ارزیابی عملکرد مدل های تجربی و رگرسیونی (خطی و غیرخطی) از سه شاخص ضریب تعیین (R^2)، متوسط خطای مطلق (MAE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد.

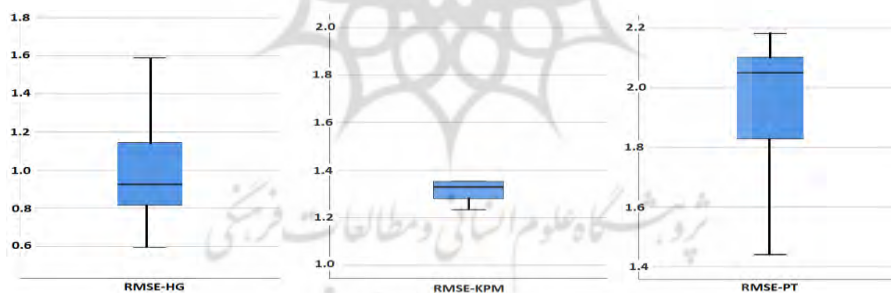
یافته ها

شکل های ۲، ۳ و ۴ بترتیب، نمودارهای باکس پلات معیارهای ارزیابی شامل ضریب تعیین، RMSE و MAE را در خصوص ۹ ایستگاه منتخب در حوضه دریاچه ارومیه برای سه مدل تجربی نشان می دهد.

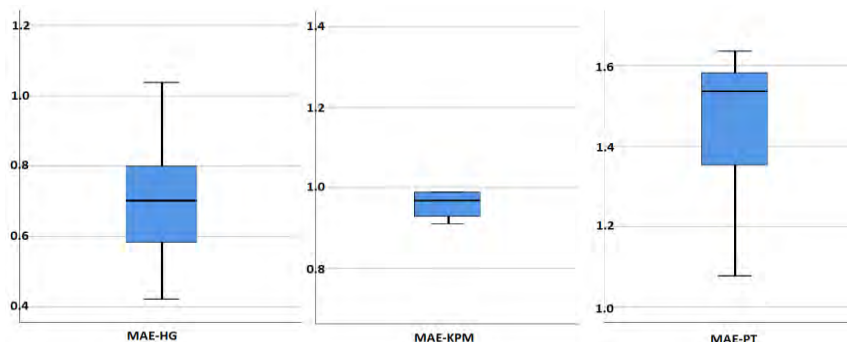


شکل (۲). باکس پلات ضرایب تعیین برای سه مدل تجربی (چپ HG، وسط KPM و راست PT)

با توجه به مقادیر میانه مقادیر R^2 از بین سه مدل تجربی، مدل KPM نتیجه خوبی ارائه داده است. طوری که میانه مقادیر R^2 مدل KPM بیش از $0/986$ به دست آمده است. در حالی که، این رقم برای مدل‌های PT و HG بترتیب، معادل $0/902$ و $0/4$ بود که کمتر از مقدار نظیر مدل KPM هستند. افزون بر این، مدل HG به جز در ۳ ایستگاه (تبریز، سراب و تکاب که R^2 بالاتر از $0/922$ داشتند) دارای آماره R^2 کمتری بودند. تنها در نظر گرفتن معیار R^2 برای تشخیص بهترین مدل منطقی نیست. بنابراین، معیارهای دیگر (RMSE و MAE) نیز در نظر گرفته شدند. در مدل HG، میانه مقادیر RMSE حدود $0/9$ (میلیمتر بر روز) بود این رقم برای مدل‌های KPM و PT بترتیب، حدود $1/3$ و $2/1$ (میلیمتر بر روز) بود (شکل ۳). این نتیجه حاکی از برتری مدل HG نسبت به دو مدل دیگر است. ضمناً بطوریکه از شکل ۴ می‌توان دید، میانه مقادیر آماره MAE ایستگاه‌های منتخب، برای مدل KPM از ۱ (میلیمتر بر روز) نیز کمتر است. این رقم در مورد مدل HG حدود $0/7$ (میلیمتر بر روز) و برای مدل PT بیشتر از $1/5$ (میلیمتر بر روز) بود. که این نتیجه نیز حاکی از برتری مدل HG نسبت به دو مدل KPM و PT دارد. با توجه به معیارهای ارزیابی از بین ۳ مدل تجربی کاندیدا، مدل HG مناسبتر از بقیه (مدل‌های KPM و PT) می‌باشد.



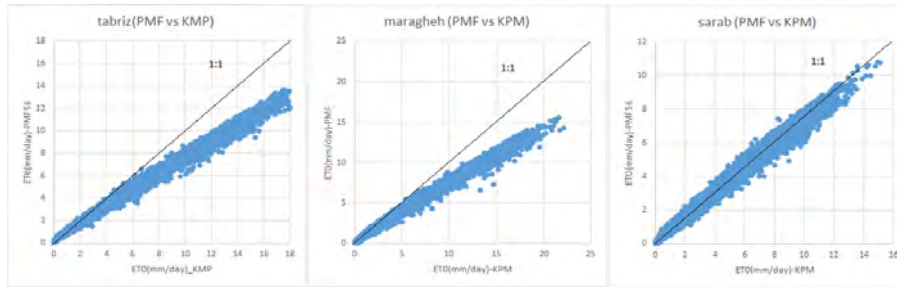
شکل (۳). باکس پلات مقادیر آماره RMSE برای سه مدل تجربی (چپ HG، وسط KPM و راست PT) بسط داده شده برای حوضه دریاچه ارومیه.



شکل (۴). نمودار باکس پلات مقادیر میانگین خطای مطلق (MAE) برای سه مدل تجربی (چپ HG، وسط KPM و راست PT) بسط داده شده برای حوضه دریاچه ارومیه.



شکل ۵ نمودار پراکنش نقاط ET_0 حاصل از مدل KPM (محور افقی) را در قبال FAO56PM (محور قائم) به عنوان نمونه برای ۳ ایستگاه تبریز، مراغه و سراب نشان می‌دهد. در هر ۳ ایستگاه، مقادیر حاصل از روش KPM بیشتر از FAO56PM بود. مشابه چنین نمودارهایی برای همه ایستگاه‌ها و مدل‌ها رسم شد (نشان داده نشدند).



شکل (۵). نقاط پراکنش ET_0 حاصل از مدل KPM در مقابل FAO56PM (چپ تبریز، وسط مراغه و راست سراب)

مدل MLR با استفاده از گزینه پیشرو برای تبریز نشان داد که در مرحله اول، تنها متغیر T_{max} برای تخمین ET_0 وارد مدل شد (R^2 معادل ۰/۸۲۱). در مرحله بعد، متغیر wind نیز به مدل وارد شد (R^2 حدود ۰/۸۷۴). در مرحله سوم، علاوه بر متغیرهای قبلی ساعات آفتابی (n) نیز به مدل اضافه شد (R^2 برابر ۰/۸۸۵). در مراحل چهارم و پنجم علاوه بر متغیرهای قبلی پارامترهای T_{min} و RH نیز به ترتیب در مدل وارد و مقدار R^2 به ترتیب به ۰/۸۹۴ و ۰/۹۰۰ ارتقا یافتند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که هر ۵ مدل قادر به تخمین ET_0 در تبریز بوده و لیکن با افزایش تعداد متغیرها، دقت برآورد تا حدودی بیشتر شد. به عنوان نمونه، فرم ریاضی مدل ساده یک پارامتری خطی (معنی‌دار در سطح ۱٪) برای تبریز به شرح زیر به دست می‌آید:

$$ET_0 = -1.184 + (0.293 \times T_{max}); \quad (R^2=0.821, n=9931) \quad (15)$$

جدول ۲ مقادیر عرض از مبدا (یا مقدار ثابت) و شیب خط برازش شده را برای مدل رگرسیون خطی ساده (با یک پارامتر) نشان می‌دهد. همه مقادیر R^2 از ۰/۷۲ بیشتر هستند که در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار بودند. مدل‌های ۳ پارامتری خطی نیز برازش شد. مثلاً برای تبریز مدل ۳ پارامتری (جدول ۴) به شرح زیر قابل ارائه است:

$$ET_0 = -2.978 + (0.231 \times T_{max}) + (0.573 \times \text{wind}) + (0.136 \times n); \quad (R^2=0.885, n=9931) \quad (17)$$

بطوریکه از جدول برمی‌آید، همه مقادیر آماره R^2 از ۰/۸ بیشتر هستند که از نظر آماری در سطح ۰/۰۱ معنی‌دارند و نسبت به مدل‌های تک پارامتری و ۲ پارامتری دقیق‌تر هستند.

جدول (۲). نتایج رگرسیون چندگانه خطی با (گزینه‌ی پیش‌رو) با یک پارامتر هواشناسی برای ایستگاه‌های منتخب

ایستگاه	پارامتر ورودی اول	مقدار ثابت	ضریب	R^2
تبریز	T_{max}	-۱/۱۸۴	۰/۲۹۳	۰/۸۲۱
مراغه	T_{max}	-۱/۴۹۳	۰/۳۰۹	۰/۸۲۲
اهر	T_{max}	-۰/۶۱۴	۰/۲۲۱	۰/۷۲۶
سراب	T_{max}	-۰/۲۶۷	۰/۲۱۰	۰/۷۶۱
ارومیه	T_{max}	-۰/۹۱۳	۰/۲۴۲	۰/۸۰۱
تکاب	T_{max}	-۰/۴۸۱	۰/۲۳۲	۰/۸۰۱
مهاباد	T_{max}	-۰/۸۴۳	۰/۲۲۶	۰/۷۴۴
پیرانشهر	T_{max}	-۰/۷۴۶	۰/۲۴۶	۰/۷۹۲
خوی	T_{max}	-۰/۸۱۲	۰/۲۱۰	۰/۷۴۲

به عنوان نمونه، مدل دو پارامتری (معنی‌دار در سطح ۱٪) برای تبریز به شرح زیر حاصل شد:

$$ET_0 = -2.455 + (0.262 \times T_{max}) + (0.561 \times \text{wind}); (R^2 = 0.874, n = 9931) \quad (۱۶)$$

در جدول ۳ مقادیر ثابت و ضرایب پارامترهای ورودی به مدل MLR را که حاوی دو پارامتر مهم هستند، نشان می‌دهد. در این جدول مقادیر ثابت و ضرایب هر یک از پارامترها به همراه مقادیر R^2 مدل MLR ارائه شده است. همه مقادیر آماره R^2 از ۰/۷۸ بیشتر هستند که از نظر آماری در سطح ۰/۰۱ معنی دارند و نسبت به مدل‌های تک پارامتری دقیق‌تر هستند.

جدول (۳). نتایج رگرسیون چندگانه خطی با دو پارامتر مهم هواشناسی (معنی‌دار) در ایستگاه‌های منتخب

ایستگاه	پارامتر ورودی اول	پارامتر ورودی دوم	مقدار ثابت	ضریب پارامتر اول	ضریب پارامتر دوم	R^2
تبریز	T_{max}	Wind	-۲/۴۵۵	۰/۲۶۲	-۰/۵۶۱	۰/۸۷۴
مراغه	T_{max}	Wind	-۲/۲۱۲	۰/۲۷۸	-۰/۴۳۸	۰/۸۶۳
اهر	T_{max}	Wind	-۱/۴۱۴	۰/۲۳۳	-۰/۲۴۶	۰/۸۰۳
سراب	T_{max}	Wind	-۰/۷۹۲	۰/۲۰۲	-۰/۲۵۶	۰/۷۹۴
ارومیه	T_{max}	Wind	-۱/۴۳۴	۰/۲۰۲	-۰/۱۵۴	۰/۸۲۴
تکاب	T_{max}	Wind	-۰/۸۵۳	۰/۲۲۲	-۰/۲۷۲	۰/۸۲۴
مهاباد	T_{max}	Wind	-۱/۶۰۰	۰/۲۲۶	-۰/۳۳۹	۰/۷۹۸
پیرانشهر	T_{max}	Wind	-۱/۳۳۹	۰/۲۴۷	-۰/۲۵۴	۰/۸۲۱
خوی	T_{max}	Wind	-۱/۱۸۱	۰/۲۰۳	-۰/۳۶۹	۰/۷۸۹

جدول (۴). نتایج رگرسیون چندگانه خطی با گزینه‌ی پیش‌رو با سه پارامتر هواشناسی (معنی‌دار) برای ایستگاه‌های منتخب

ایستگاه	پارامتر ورودی اول	پارامتر ورودی دوم	پارامتر ورودی سوم	مقدار ثابت	ضریب پارامتر اول	ضریب پارامتر دوم	ضریب پارامتر سوم	R^2
تبریز	T_{max}	Wind	N	-۲/۹۷۸	۰/۲۳۱	-۰/۵۷۳	-۰/۱۳۶	۰/۸۸۵
مراغه	T_{max}	Wind	N	-۲/۷۶۵	۰/۲۳۹	-۰/۴۶۵	-۰/۱۵۲	۰/۸۷۷
اهر	T_{max}	Wind	N	-۱/۷۶۲	۰/۲۰۷	-۰/۲۲۹	-۰/۱۱۵	۰/۸۲۴
سراب	T_{max}	Wind	N	-۱/۴۴۵	۰/۱۶۷	-۰/۲۸۵	-۰/۱۴۷	۰/۸۲۱
ارومیه	T_{max}	Wind	N	-۰/۳۹۹	۰/۰۷۸	-۰/۲۱۴	-۰/۱۴۴	۰/۸۴۳
تکاب	T_{max}	Wind	N	-۱/۵۴۶	۰/۱۸۹	-۰/۳۳۰	-۰/۱۴۲	۰/۸۴۱
مهاباد	T_{max}	Wind	N	-۲/۰۹۱	۰/۱۹۴	-۰/۳۵۲	-۰/۱۳۶	۰/۸۱۳
پیرانشهر	T_{max}	Wind	N	-۱/۹۱۱	۰/۲۰۸	-۰/۲۸۲	-۰/۱۵۶	۰/۸۴۲
خوی	T_{max}	Wind	N	-۱/۵۹۹	۰/۱۶۸	-۰/۴۰۶	-۰/۱۴۲	۰/۸۰۰

نتایج مدل بندی رگرسیون چندگانه خطی با ۴ پارامتر هواشناسی برای تخمین ET_0 در جدول ۵ نشان داده شده است. بطوریکه از جدول بر می‌آید، همه مقادیر آماره R^2 از ۰/۷۵ بیشتر هستند که از نظر آماری در سطح ۰/۰۱ معنی دارند.

جدول (۵). نتایج رگرسیون چندگانه خطی با گزینه‌ی پیش‌رو با چهار پارامتر هواشناسی (معنی‌دار) برای ایستگاه‌های منتخب

ایستگاه	پارامتر ورودی اول	پارامتر ورودی دوم	پارامتر ورودی سوم	پارامتر ورودی چهارم	مقدار ثابت	ضریب پارامتر اول	ضریب پارامتر دوم	ضریب پارامتر سوم	ضریب پارامتر چهارم	R^2
تبریز	T_{max}	Wind	N	T_{min}	-۱/۷۶۵	۰/۰۹۱	۰/۵۰۱	-۰/۱۹۶	-۰/۱۶۰	۰/۸۹۴
مراغه	T_{max}	Wind	N	T_{min}	-۱/۸۷۲	۰/۱۱۹	۰/۴۲۵	-۰/۲۰۵	-۰/۱۳۶	۰/۸۸۳
اهر	T_{max}	Wind	N	T_{min}	-۱/۰۵۱	۰/۱۰۳	۰/۱۳۲	-۰/۱۳۰	-۰/۰۱۳	۰/۷۵۹
سراب	T_{max}	Wind	N	T_{min}	-۰/۶۲۶	۰/۱۰۲	۰/۲۰۶	-۰/۱۸۷	-۰/۰۸۲	۰/۸۳۱
ارومیه	T_{max}	Wind	N	T_{min}	-۰/۸۶۸	۰/۰۶۸	۰/۲۱۱	-۰/۱۵۰	-۰/۲۹۹	۰/۸۵۷
تکاب	T_{max}	Wind	N	T_{min}	-۰/۹۷۶	۰/۱۲۹	۰/۲۸۷	-۰/۱۸۳	-۰/۰۷۸	۰/۸۴۸
مهاباد	T_{max}	Wind	N	T_{min}	-۱/۶۶۷	۰/۱۲۱	۰/۲۷۳	-۰/۱۸۴	-۰/۱۰۲	۰/۸۳۰
پیرانشهر	T_{max}	Wind	N	T_{min}	-۱/۰۶۸	۰/۱۰۱	۰/۲۳۳	-۰/۲۰۵	-۰/۱۲۸	۰/۸۵۵
خوی	T_{max}	Wind	N	T_{min}	-۰/۵۰۹	۰/۰۴۷	۰/۳۵۷	-۰/۲۰۶	-۰/۱۴۱	۰/۸۲۱



به عنوان نمونه، با توجه به جدول ۵، برای ایستگاه تبریز، مدل ۴ پارامتری MLR به شرح زیر به دست آمد:

$$ET_0 = -1.765 + (0.091 \times T_{max}) + (0.501 \times \text{wind}) + (0.196 \times n) + (0.160 \times T_{min}); \quad (18)$$

$(R^2 = 0.894, n=9931)$

در نهایت، مدل ۵ پارامتری برای ایستگاه‌ها برازش شد. جدول ۶ نتایج را برای همه ایستگاه‌ها نشان می‌دهد. مثلاً برای تبریز مدل ۵ پارامتری به شرح زیر به دست آمد:

$$ET_0 = 1.187 + (0.029 \times T_{max}) + (0.457 \times \text{wind}) + (0.162 \times n) + (0.198 \times T_{min}) + (-0.032 \times RH) \quad (19)$$

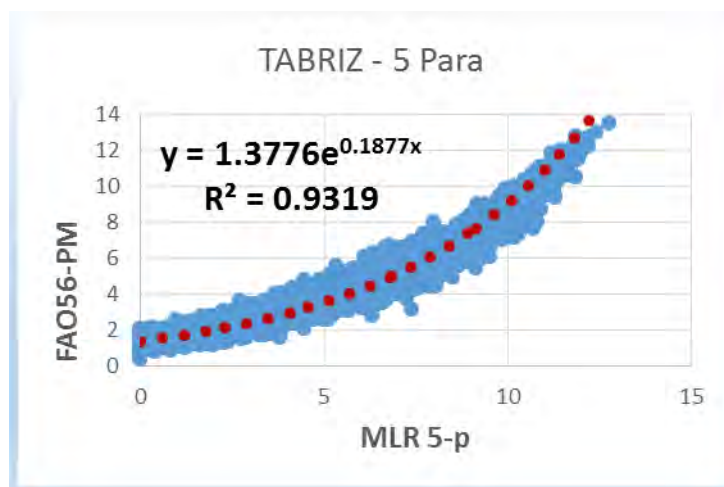
این رابطه با توجه به اینکه مقدار R^2 معادل با $0/9$ شده و دارای تعداد داده زیاد (۹۹۳۱ داده) می‌باشد در سطح $0/01$ معنی‌دار بود. R^2 همه مدل‌ها بیش از $0/76$ و معنی‌دار (در سطح $0/01$) بودند. در این جدول مقادیر ضرایب مدل ۵ پارامتری درج شده است. با توجه به جدول ۶، فرم ریاضی مدل رگرسیون خطی ۵ پارامتری برای سایر ایستگاه‌ها (مانند رابطه ۳۲ برای تبریز) قابل اشتقاق است. به طوری که اشاره شد، علاوه بر مدل رگرسیون چند متغیره خطی، مدل‌بندی غیرخطی نیز برای توصیف ET_0 فاقد عرض از مبدا (ضریب ثابت) بوده و بنابراین، سایر ضرایب مدل غیرخطی تخمین زده شدند. شکل ۶ نمودار پراکنش نقاط ET_0 روزانه را که در آن محور قائم متناظر با خروجی مدل FAO56PM و محور افقی آن متناظر با مدل رگرسیون خطی با ۵ پارامتر مهم (رابطه ۳۲) می‌باشد، نشان می‌دهد. به طوری که از این شکل می‌توان فهمید، مقادیر منحنی خروجی مدل رگرسیون خطی ۵ پارامتری تابعی از مدل FAO56PM به صورت خطی نیست.

جدول (۶). نتایج رگرسیون چندگانه‌ی خطی با گزینه‌ی پیش‌رو با پنج پارامتر هواشناسی (معنی‌دار) برای ایستگاه‌های منتخب.

ایستگاه	پارامتر ورودی اول	پارامتر ورودی دوم	پارامتر ورودی سوم	پارامتر ورودی چهارم	پارامتر ورودی پنجم	مقدار ثابت	ضریب اول	ضریب دوم	ضریب سوم	ضریب چهارم	ضریب پنجم	R^2
تبریز	T_{max}	Wind	n	T_{min}	Rh	۱/۱۸۷	۰/۰۲۹	۰/۴۵۷	۰/۱۶۲	۰/۱۹۸	-۰/۰۳۲	۰/۹۰۰
مراغه	T_{max}	Wind	n	T_{min}	Rh	-۰/۳۷۷	۰/۰۸۷	۰/۴۲۳	۰/۱۸۵	۰/۱۵۳	-۰/۰۱۷	۰/۸۸۵
اهر	T_{max}	Wind	n	T_{min}	Rh	-۱/۶۳۷	۰/۱۱۶	۰/۱۲۱	۰/۱۳۷	۰/۰۱۷	-۰/۰۵۲	۰/۷۶۰
سراب	T_{max}	Wind	n	T_{min}	Rh	۰/۹۹۸	۰/۰۷۳	۰/۱۷۰	۰/۱۸۰	۰/۱۰۳	-۰/۰۱۷	۰/۸۳۵
ارومیه	T_{max}	Wind	n	T_{min}	Rh	۱/۷۱۰	۰/۰۳۴	۰/۱۷۱	۰/۱۷۲	۰/۲۳۸	-۰/۰۲۷	۰/۸۶۴
تکاب	T_{max}	Wind	n	T_{min}	Rh	-۰/۱۱۲	۰/۱۰۷	۰/۲۷۷	۰/۱۶۸	۰/۰۹۱	-۰/۰۱۲	۰/۸۵۰
مهاباد	T_{max}	Wind	n	T_{min}	Rh	-۰/۲۴۶	۰/۰۹۱	۰/۲۴۹	۰/۱۷۳	۰/۱۱۴	-۰/۰۱۵	۰/۸۲۷
پیرانشهر	T_{max}	Wind	n	T_{min}	Rh	-۰/۵۴۳	۰/۰۷۵	۰/۱۹۳	۰/۱۷۵	۰/۱۴۰	-۰/۰۱۷	۰/۸۵۸
خوی	T_{max}	Wind	n	T_{min}	RH	-۰/۸۵۱	۰/۰۲۶	۰/۳۱۳	۰/۱۸۷	۰/۱۵۵	-۰/۰۱۵	۰/۸۲۴

بنابراین هنگام واسنجی مدل نباید از روش خطی استفاده شود. استفاده از روش رگرسیون ساده با عرض از مبدا صفر برای واسنجی مدل‌ها که در برخی مقالات (مانند بابامیری و دین‌پژوه، ۱۳۹۶: ۲۷۵ و جهانبخش اصل و همکاران، ۱۳۹۱: ۳۵) بکار برده شده احتمالاً اعتبار خوبی ندارند. می‌توان استنباط کرد که با افزایش تعداد پارامترها به مدل خطی، مقدار ضریب تعیین افزایش می‌یابد. رسم نمودار باکس پلات مقادیر R^2 برای مدل MLR با ۱، ۲، ۳... و ۵ پارامتر ورودی نشان داد که به جز مدل یک پارامتری، در سایر مدل‌ها، میانه مقادیر R^2 بیش از $0/84$ می‌باشد که حاکی از مناسب بودن مدل‌های با بیش از یک پارامتر می‌باشد. به عنوان نمونه، فرم نهایی مدل غیرخطی با بهره‌گیری از همه‌ی پنج متغیر هواشناسی، در ایستگاه تبریز، به شرح زیر است:

$$ET_0 = T_{max}^{0.313} \times T_{min}^{0.353} \times n^{0.275} \times RH^{-0.314} \times \text{wind}^{0.350} \quad (20)$$



شکل (۶). نمودار پراکنش نقاط ET_0 با پنج پارامتر ورودی در مدل رگرسیون خطی در ایستگاه تبریز

بحث

در این مطالعه از روش FAO56PM برای تخمین ET_0 در ۹ ایستگاه هواشناسی واقع در حوضه دریاچه ارومیه استفاده شد. این روش گرچه مقادیر دقیقی از ET_0 را ارائه می‌دهد ولیکن کاربرد آن در جاهایی که با محدودیت داده‌های هواشناسی مواجه است، مشکل است (ستل‌هاس و همکاران ۲۰۱۰: ۶۴۰). بنابراین، با مقایسه خروجی روش‌های تخمین ET_0 که نیاز به پارامترهای هواشناسی کمتری دارند با نتیجه روش FAO56PM می‌توان مناسب‌ترین روش را که با پارامتر کمتری نیاز دارد تعیین نمود. در این مطالعه از ۳ مدل تجربی شامل HG, KPM, PT و مدل‌های مختلف رگرسیون خطی و غیرخطی با تعداد پارامترهای متفاوت برای ایستگاه‌های حوضه دریاچه ارومیه استفاده شد و عملکرد آن‌ها با مقایسه با خروجی روش FAO56PM مقایسه گردید. خلاصه نتایج بدست آمده در خصوص مدل‌های تجربی در شکل‌های ۲ تا ۴ ارائه گردید، که معلوم شد از بین این ۳ مدل تجربی مدل HG مناسب‌تر است. این مدل فقط به داده‌های دما (حداکثر و حداقل) نیاز دارد که به آسانی قابل دسترسی می‌باشد. این نتیجه از شکل ۳ استنباط گردید مقادیر RMSE برای مدل HG بین ۰/۶ تا ۱/۶ بوده و با توجه به مطالعه ستل‌هاس و همکاران (۲۰۱۰: ۶۴۰) دارای دقت مناسبی می‌باشد زیرا نام‌برندگان برای بخش جنوبی ایالت اونتاریو واقع در کانادا مقادیر RMSE را برای روش HG مابین ۰/۷۶ تا ۱/۹۶ (میلیمتر بر روز) گزارش کرده‌اند. مقایسه نتایج با یافته‌های ژانگ و همکاران (۲۰۱۹: ۵۰۸) نشان می‌دهد که مقادیر ضریب تعیین حاصل شده در مطالعه خیلی بیشتر از مقادیر نظیر در چین می‌باشد. زیرا مقادیر ضریب همبستگی (r) در چین بین ۰/۹۰۳ تا ۰/۹۸۱ حاصل شده است.

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر از سه مدل تجربی و ۵ مدل رگرسیونی خطی و یک مدل غیرخطی به‌منظور یافتن مناسب‌ترین روش برای تخمین ET_0 استفاده شد. برای تعیین مناسب‌ترین روش با داده‌های هواشناسی کمتر، روش FAO56PM به عنوان مبنا استفاده شد. روش مذکور به عنوان یک روش استاندارد در همه‌ی اقلیم‌ها کاربرد دارد ولیکن در اکثر ایستگاه‌ها همه داده‌های مورد نیاز روش FAO56PM در دسترس نمی‌باشد، بر این اساس، مدل‌های ساده‌تر مورد آزمایش واقع شدند. در اکثر ایستگاه‌های حوضه دریاچه ارومیه، روش HG که فقط به ۲ پارامتر هواشناسی شامل حداکثر دمای هوا و حداقل دمای هوا نیاز دارد، می‌تواند به عنوان روش جایگزین استفاده شود. میان مقادیر RMSE با روش HG در حدود ۰/۹ (میلیمتر بر روز) بدست آمد که نسبت به روش PT بسیار کمتر است. همچنین از بین ۳ مدل تجربی، مدل HG دارای میان‌آماره MAE معادل ۰/۷ (میلیمتر بر روز) به عنوان مدل مناسب در نظر گرفته شد زیرا میان‌آماره MAE برای روش KPM حدود ۱ و برای روش PT بیش از ۱/۵ (میلیمتر بر روز) بدست آمد. از طرفی مقایسه نتایج MLR با تعداد پارامترهای متفاوت نشان داد که به جز رگرسیون خطی با یک پارامتر ورودی، سایر روش‌ها نتایج نسبتاً مشابهی به‌دست می‌دهند. در

مدل رگرسیون ۲ پارامتری، مهم ترین پارامترهای ورودی به ترتیب t_{max} و سرعت باد بودند. چون روند افزایشی در مقادیر ET_0 حوضه به اثبات رسیده است (بابامیری و دین پژوه، ۱۳۹۶: ۲۷۶؛ دین پژوه، ۲۰۱۱: ۴۱۶)، بنابراین، بهره گیری از نتایج این مطالعه در استفاده پایدار از آب در منطقه مفید به نظر می رسد.



منابع

- بابامیری، امید، دین‌پژوه، یعقوب (۱۳۹۶). "بررسی روند تبخیر-تعرق گیاه مرجع در حوضه‌ی آبریز دریاچه‌ی ارومیه". دانش آب و خاک، ۲۷(۱):۲۶۷-۲۷۹.
- خیرابی، جمشید، توکلی علیرضا، انتصاری محمد، سلامت علیرضا (۱۳۷۶). معرفی جهات نظری و کاربردی روش پنمن-مانتیس و ارائه تبخیر-تعرق مرجع استاندارد برای ایران. انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران ۱۶۶ صفحه.
- جهانبخش اصل، سعید، رضایی بنفشه، مجید، اسمعیل پور، مرضیه، تدینی، معصومه (۱۳۹۱). "ارزیابی مدل‌های تبخیر-تعرق پتانسیل و توزیع مکانی سالانه آن در حوضه جنوبی رود ارس". نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی (دانشگاه تبریز)، سال ۱۶، شماره ۴۰، ۴۶-۲۵.
- جهانبخش اصل، سعید، موحد دانش، علی اصغر و مولوی، احد (۱۳۸۰). "تحلیل برآورد تبخیر-تعرق برای ایستگاه هواشناسی تبریز". دانش کشاورزی، ۱۱(۲):۵۶-۵۱.
- دین‌پژوه، یعقوب، جهانبخش اصل، سعید، فروغی، معصومه "۱۳۹۷"، اثر تغییر اقلیم بر تغییرات جهشی تبخیر-تعرق پتانسیل (مطالعه موردی: شمال غرب ایران). نشریه آب و خاک، ۳۲(۳):۱۷-۶۳۲.
- سبزی‌پرور، علی‌اکبر، تفضلی، فرزین، زارع‌ایبانه، حمید، بانژاد، حسین، موسوی‌بایگی، محمد، غفوری، محمد، محسنی‌موحد، اسداله، مریانجی، زهره (۱۳۸۷). "مقایسه چند مدل برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع در یک اقلیم سرد نیمه خشک". نشریه آب و خاک، ۲۲(۲):۳۲۹-۳۳۹.
- سلطانی، اسعد، میرلطیفی، مجید، دهقانی‌سانبج، حسین (۱۳۹۱). "برآورد تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از داده‌های محدود هواشناسی در شرایط اقلیمی مختلف". نشریه آب و خاک، ۲۶(۱):۱۳۹-۱۴۹.
- Choudhury, B. (1997), Global pattern of potential evaporation calculated from the Penman-Monteith equation using satellite and assimilated data. **Remote Sensing of Environment**. 61(1):64-81.
- Dinpashoh, Y. (2012). Analysis of trends in reference crop evapotranspiration (Case study: station Hmadan). **Geographical Space**. 11(34): 260 – 286. (In Persian)
- Dinpashoh, Y, Jhajharia, D, Fakheri- Fard, A, Singh, VP, Kahya, E. (2011). Trends in reference crop evapotranspiration over Iran. **Journal of Hydrology**. 399: 422- 433.
- Nandagiri, L, and Kovoov, M. (2005). Sensitivity of the food and agriculture organization Penman-Monteith evapotranspiration estimates to alternative procedures for estimation of parameters, **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. 131 (3):238-248
- Popova, Z, Kercheva, M, Pereira, LS. (2006). Validation of the FAO methodology for computing ET₀ with limited data. Application to south Bulgaria. **Irrigation and Drainage**. 55: 201- 215.
- Sentelhas, PC, Gillespie, TJ, 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.
- Singandhupe, RB, Brahmanand, PS. (2016) Sensitivity analysis of various reference evapotranspiration (ET₀) models with FAO 56 Penman Monteith for semi-arid region of India. **International Journal of Current Science**. 19(4):62-85.
- Shuttleworth, W.J (1993) Evapotranspiration. In Hand Book of Hydrology. (Ed). Maidment DR. McGraw – Hill.
- Sumner, D, Jacobs, JM. (2005). Utility of Penman–Monteith, Priestley–Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration. **Journal of Hydrology**. 308(Issues 1–4):81-104.

- Zhai, L, Feng, QI, Li, Q, XU, C. (2010) Comparison and modification of equations for calculating evapotranspiration (ET) with data from Gansu province, Northwest China. **Irrigation and Drainage**. 59: 477- 490
- Zhang, L, Traore, S, Cui, Y, Lou, Y, Zhu, G, Liu, B, Fipps, G, Karthikeyan, R, Singh, V, (2019) Assessment of spatiotemporal variability of reference evapotranspiration and controlling climate factors over decades in china using geospatial techniques. **Agricultural Water Management**. 213:499-511

