

Analysis of Multiple Correlation, Moisture and Combined Models to Estimation of Potential Evapotranspiration of Jolfa Synoptic Station

Ahad Molavi¹ 

¹Department of Water Science and Engineering, Ta.C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Objective: The purpose of this research was to evaluate and modify the combined, multiple correlation and humidity models to estimate the potential evapotranspiration of Jolfa synoptic station based on the data of the FAO-Penman-Monteith model.
Article history: Received 30 October 2024 Revised 09 December 2024 Accepted 06 January 2025 Published online 28 June 2025	Methods: In order to estimate the potential evapotranspiration with multiple correlation models including Christiansen-Hargreaves RA, Christiansen-Hargreaves RS and combined models of Penman, Penman- Writh, Penman-Allen- Pruitt, Van Bavel and also Ivanof's moisture method, meteorological factors of Jolfa synoptic station were used. The basic model in this research was the FAO-Penman-Monteith model. To increase accuracy and expand the selection range, correlation coefficients were calculated dynamically. In this regard, linear and power equations were used to obtain fit coefficients. Visual Basic programming language was used for fit and obtaining correlation coefficients. The performance of each used model was evaluated using the coefficient of determination, RMSE, MAE, MBE, and t-test.
Keywords: Determination coefficient Potential evapotranspiration Ivanof model Fit coefficients	Results: Van Bavel and Penman-Allen- Pruitt combined models had the highest RMSE, MAE, and MBE statistical indices. Among all the models used, Ivanof's humidity model had the lowest RMSE, MAE, and MBE statistical indices with values of 51.71, 37.78, and -14.6 mm per month, respectively. Also, this model had the highest coefficient of determination and correlation coefficient. The mean difference of this model was 14.6 mm per month, which was the lowest among the models.
	Conclusions: The application of fit coefficients has significantly improved the performance of all models used in this research. The carried out investigations showed that the use of linear equations provides more acceptable results than power equations in calculating correlation coefficients. Ivanof's humidity model with a determination coefficient of 0.917 and a correlation coefficient of 0.957 had the highest value among the used models. The results showed that among all the models used, Ivanof's model has the best agreement with the data of the FAO-Penman-Monteith model providing more reliable results. Ivanof's humidity model with the application of fit coefficients and even without it, due to the accuracy in the estimation and the limitation of its necessary meteorological parameters to 2 factors of temperature and relative humidity, can be recommended for the estimation of potential evapotranspiration of Jolfa synoptic station.

*Corresponding author: E-mail: ahad.molavi@iau.ac.ir

Cite this article: Molavi, A. (2024). Analysis of Multiple Correlation, Moisture and Combined Models to Estimation of Potential Evapotranspiration of Jolfa Synoptic Station *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, <http://doi.org/10.22034/nawee.2025.486264.1113>



© The Author(s).

Publisher: Gonbad Kavous University.

DOI: <http://doi.org/10.22034/nawee.2025.486264.1113>



تحلیل روش‌های همبستگی چندگانه، رطوبتی و ترکیبی در برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل ایستگاه سینوپتیک جلفا

احمد مولوی^۱

^۱ گروه علوم و مهندسی آب، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف هدف از انجام این تحقیق ارزیابی و اصلاح مدل‌های ترکیبی، همبستگی چندگانه و رطوبتی جهت برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل ایستگاه سینوپتیک جلفا بر پایه داده‌های مدل فائو-پنمن-مونیتیت بود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷	مواد و روش‌ها جهت برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل با مدل‌های همبستگی چندگانه شامل کریستینسن-هارگریوز RA، کریستینسن-هارگریوز RS و مدل‌های ترکیبی پنمن، پنمن رایت، پنمن-آلن-پروت، وان باول و روش رطوبتی ایوانف از عوامل هواشناسی ایستگاه سینوپتیک جلفا استفاده شد. مدل مینا و پایه در تحقیق حاضر مدل فائو-پنمن-مونیتیت در نظر گرفته شد. برای بالا بردن دقت و گسترش دامنه انتخاب ضرایب همبستگی به صورت متحرک محاسبه شدند. در این راستا از معادلات خطی و توانی جهت بدست آوردن ضرایب برازش استفاده به عمل آمد. برای برازش و استخراج ضرایب همبستگی، از زبان برنامه‌نویسی ویژوال بیسیک استفاده شد. عملکرد هر مدل بکار رفته با استفاده از R^2 ، RMSE، MBE و MAE مورد ارزیابی قرار گرفت.
کلیدواژه‌ها: ضریب تبیین تبخیر و تعرق پتانسیل مدل رطوبتی ایوانف ضرایب برازش	نتایج مدل‌های ترکیبی وان باول و پنمن-آلن-پروت بیشترین شاخص‌های آماری RMSE، MAE، MBE را در بین کلیه مدل‌ها داشتند. در بین تمام مدل‌های بکار رفته، مدل رطوبتی ایوانف کمترین مقدار شاخص‌های آماری RMSE، MAE، MBE با مقادیر به ترتیب برابر با ۵۱/۷۱، ۳۷/۷۸ و ۱۴/۶- میلی‌متر در ماه را دارا بود. همچنین این مدل بالاترین ضریب تبیین و ضریب همبستگی را داشت. اختلاف میانگین این مدل ۱۴/۶ میلی‌متر در ماه بوده که کمترین میزان در بین مدل‌ها بود.
	نتیجه‌گیری اعمال ضرایب برازش، عملکرد کلیه مدل‌های بکار رفته در تحقیق حاضر را به میزان قابل توجهی بهبود بخشیده است. بررسی‌های به عمل آمده نشان داد که استفاده از معادلات خطی نتایج قابل قبول تری نسبت به معادلات توانی در محاسبه ضرایب تبیین ارائه می‌دهند. مدل رطوبتی ایوانف با ضریب تبیین ۰/۹۱۷ و ضریب همبستگی معادل برابر با ۰/۹۵۷ بیشترین مقدار را در بین مدل‌های بکار رفته دارا بود. نتایج نشان داد، مدل ایوانف بهترین تطابق و همخوانی را با داده‌های مدل F.P.M داشته و نتایج قابل اطمینان تری ارائه می‌دهد. مدل رطوبتی ایوانف با اعمال ضرایب برازش و حتی بدون آن، با توجه به دقت در برآورد و نیز محدود بودن پارامترهای لازم هواشناسی به ۲ عامل درجه حرارت و رطوبت نسبی، جهت برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل ایستگاه سینوپتیک جلفا قابل پیشنهاد است.

*نویسنده مسئول، Email : ahad.molavi@iau.ac.ir

استناد: مولوی، احد. (۱۴۰۴). تحلیل روش‌های همبستگی چندگانه، رطوبتی و ترکیبی در برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل ایستگاه سینوپتیک جلفا. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*.

رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست،

<http://doi.org/nawee.2025.486264.1113>

ناشر: دانشگاه گنبد کاووس.

© نویسندگان.



مقدمه

تبخیر و تعرق جزء کلیدی چرخه هیدرولوژیکی است و نقشی حیاتی در محیط زیست در مقیاس‌های جهانی، منطقه‌ای و محلی دارد. برآورد دقیق تبخیر و تعرق برای طراحی هیدرولوژیکی سازه‌های حفاظت از خاک و آب، برنامه‌ریزی منابع آب و طراحی سیستم آبیاری امری ضروری است (Phad et al., 2019؛ Patle and Singh 2015). برای مدیریت راندمان آب ضروری است تا نیاز آبی محصولات در طی مراحل رشدشان تخمین زده شود. به‌طورمعمول، تخمین این نیاز بر اساس داده‌های تبخیر و تعرق پتانسیل صورت می‌گیرد و باید در هر مرحله رشد یک ضریبی گیاهی (K_c) برای آن در نظر گرفته شود (Doorenbos and Pruitt, 1997). فاکتورهای متعددی در میزان تبخیر و تعرق نقش دارند که تخمین آن را در فرآیند خیلی پیچیده‌ای قرار می‌دهند. درجه حرارت، شدت و مدت تابش خورشید، رطوبت نسبی محیط، سرعت باد، نوع گیاه، رطوبت و بافت خاک از جمله عوامل مؤثر بر تبخیر و تعرق هستند. با در نظر گرفتن این شرایط، تخمین دقیق آن، کار بسیار دشواری خواهد بود (Chang et al., 2018). اندازه‌گیری مستقیم تبخیر و تعرق به دلایل مختلف زمان‌بر و پرهزینه است. در ۷۰ سال گذشته، در واقع از سال ۱۹۴۴ که روش تورنت وایت مطرح شد، به‌واسطه محدودیت‌های اندازه‌گیری مستقیم تبخیر و تعرق، بسیاری از مدل‌های تجربی برای برآورد آن ارائه شده‌اند (Tasumi, 2019). Jensen و همکاران (۱۹۹۰) ۱۹ مدل محاسبه تبخیر و تعرق بالقوه گیاه مرجع در شرایط اقلیمی مختلف را ارزیابی کردند و مدل F.P.M (فائو-پنمن-مونتیت) را دقیق‌ترین روش معرفی نمودند. در حال حاضر روش F.P.M معمول‌ترین مدل برای تخمین ETP است (Sediyama et al., 1996). این روش برای برآورد ETP نیازمند داده‌های هواشناسی زیادی است. باین‌حال ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی همیشه تجهیزات و داده‌های کافی ضروری برای اجرای مدل F.P.M را ندارند (Chiew al., 1995). به‌همین علت روش‌های دیگری برای تخمین ETP به‌کارگرفته می‌شود که بایستی قبل از به‌کارگیری این روش‌ها برای هر منطقه ارزیابی و اصلاحات لازم انجام گیرد. در تحقیقی که در مناطق مرطوب صربستان توسط Trajkovic و Kolakovic (۲۰۰۹) در خصوص ارزیابی روش‌های تخمین ETP انجام شد، مشخص شد که به‌کارگیری روش F.P.M با داده‌های محدود در قیاس با روش‌های هارگریوز و تورک تطابق مناسب‌تری با روش F.P.M با داده‌های کامل دارد. ثنایی نژاد و همکاران (۲۰۱۱) توزیع مکانی تبخیر و تعرق واقعی روزانه در زیر حوضه آبریز مشهد را با به‌کارگیری تصاویر سنجنده مودیس و با استفاده از الگوریتم توازن انرژی سطح خشکی با در نظر گرفتن تأثیر توپوگرافی مطالعه کردند. نتایج آنان گویای آن بود که الگوریتم سبال و تصاویر سنجنده مودیس تبخیر و تعرق واقعی را در مقیاس روزانه در محل مورد مطالعه به‌خوبی برآورد می‌کنند. نتایج تحقیق Salarian و همکاران (۲۰۱۴) در خصوص تعیین مناسب‌ترین مدل تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل در اصفهان بر مبنای داده‌های روش فائو-پنمن مونتیت، حاکی از آن بود که به‌ترتیب استفاده از مدل‌های بلانی کریدل، تشعشعی، هارگریوز، تورک و تیلور جایگزین مناسبی برای روش فوق هستند. Dinpazhoh و Babamiri (۲۰۱۴) پس از واسنجی مدل‌های برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل در سه دسته دمایی، تابش و انتقال جرم به این نتیجه دست یافتند که از بین مدل‌های دمایی، مدل هارگریوز با ضریب تبیین ۰/۹۶، از بین مدل‌های تابش، مدل دورنبوس-پروت با ضریب تبیین ۰/۹۸۲ و از بین مدل‌های انتقال جرم، بعد از واسنجی، مدل میبیر با ضریب تبیین معادل ۰/۸۹۵ مناسب‌ترین مدل‌ها برای منطقه مورد مطالعه هستند. Ee Hang و همکاران (۲۰۲۱) در تحقیقی برای انتخاب مناسب‌ترین مدل ETP در شبه‌جزیره مالزی، سه مدل مبتنی بر تشعشع و چهار مدل مبتنی بر دما را با مدل F.P.M مقایسه کردند. مقادیر خطای نسبی مدل تورک زیر ۰/۲ بود، در حالی که مدل‌های پرستلی-تیلور، تورنت وایت اصلاح‌شده و بلانی کریدل بالای ۰/۲ بودند، بنابراین، مدل تورک به‌عنوان بهترین مدل برای تخمین ETP در شبه‌جزیره مالزی توصیه شد. Varga و همکاران (۲۰۲۲) در ایستگاه آزمایشی اسزارواس^۱ در مجارستان روش پنمن-مونتیت را با داده‌های اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر ارزیابی کردند. هدف آن‌ها تعیین عناصر مؤثر و مهم و همچنین شناسایی عناصر دارای اهمیت کم در تبخیر و تعرق بود. نتایج دو روش باهم تطابق خوبی داشت. بررسی‌ها مشخص کرد که تشعشع و کمبود فشار بخار نقش مهمی در تعیین تبخیر و تعرق مرجع دارند. یک مورد دیگر استفاده از فرمول پنمن-مانتیت با سرعت باد ثابت و مورد دیگر نادیده

¹ Szarvas

گرفتن اطلاعات سرعت باد بود. هر دو روش بررسی شدند و روش با سرعت باد ثابت در شرایط آب و هوایی نیمه مرطوب مجارستان بهتر بود. در مطالعه‌ای که به‌وسیله Patle و همکاران (۲۰۲۳) در منطقه نیمه مرطوب از سایکیم^۱ هند انجام یافت، مقایسه رگرسیون خطی چندگانه و شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی ETP بر اساس معادله پنمن مونتیت صورت گرفت. نتایج نشان داد از بین مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی مدل ANN4 با لایه پنهان و مدل با چهار نرون، کمترین میزان RMSE با مقادیر به‌ترتیب ۰/۴۹ و ۰/۶۲ میلی‌متر در روز را دارا بودند. ضریب تبیین (R^2) این مدل‌ها نیز به‌ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۷۵ برآورد شدند. مقایسه رگرسیون خطی چندگانه و شبکه عصبی مصنوعی در شرق منطقه نیمه مرطوب نشان از برتری روش شبکه عصبی مصنوعی داشت. برای ارزیابی روش‌های برآورد تبخیر و تعرق مرجع در حوضه رودخانه گامبیا^۲ سنگال^۳ و کازامانس^۴ پژوهشی به‌وسیله Bodian و همکاران (۲۰۲۴) انجام یافت؛ نتیجه تحقیق آنان حاکی از آن بود که پس از واسنجی، روش‌های تاربرت، هارگریوز، هارگریوز-سامانی، ترجکویج^۵ و اودین^۶ معتبرترین و مناسب‌ترین روش‌ها برای تخمین تبخیر و تعرق مرجع در حوضه‌های مزبور هستند.

با توجه به مطالب ذکر شده، روش‌های برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل قبل از استفاده برای هر محلی باید مورد ارزیابی عملکرد قرار گرفته، اصلاح و محلی کردن لازم برای آن‌ها صورت گیرد؛ لذا از آنجاکه برای ایستگاه سینوپتیک جلفا استخراج ضرایب برازش و همچنین ضرایب همبستگی به‌صورت متحرک با روش‌های همبستگی چندگانه و ترکیبی و رطوبتی انجام نگرفته است، تحقیق حاضر باهدف ارزیابی عملکرد و اصلاح آن‌ها بر اساس ضرایب برازش مدل‌های همبستگی چندگانه شامل کریستینسن-هارگریوز RA، کریستینسن-هارگریوز RS و مدل‌های ترکیبی شامل پنمن، پنمن رایت، پنمن-آلن-پروت، وان باول و روش رطوبتی ایوانف برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل ایستگاه سینوپتیک جلفا بر پایه مدل فائو-پنمن-مونتیت انجام پذیرفت. در این تحقیق اصلاح و محلی نمودن مدل‌ها به‌صورت متحرک به انجام رسید که در این نوع برای ماه یا ماه‌های مورد نظر می‌توان در دامنه قابل قبول نسبت به انتخاب بالاترین ضریب همبستگی اقدام کرد.

مواد و روش‌ها

محل مورد مطالعه ایستگاه سینوپتیک جلفا واقع در شهرستان جلفا است. این ایستگاه در مختصات با طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۳۶ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۵۶ دقیقه واقع شده است و ارتفاع آن از سطح دریا ۷۳۶ متر است. شهرستان جلفا در شمال غربی استان آذربایجان شرقی به‌صورت یک نوار باریکی در مرز شمالی استان واقع شده است. این شهرستان از شمال به رودخانه ارس و جمهوری‌های ارمنستان، آذربایجان و نخجوان منتهی می‌شود و مساحت آن ۳۱/۱۶۷۰ کیلومترمربع است. اقلیم این شهرستان نیمه‌خشک و سرد است و فقط بخش کوچکی از ارتفاعات فوقانی و حاشیه رود ارس اقلیم خشک و سرد دارد. شهر جلفا در ارتفاع ۷۰۴ متری از سطح دریاهای آزاد واقع شده است و از این لحاظ در بین شهرهای استان آذربایجان شرقی کمترین ارتفاع را دارا است. شرایط کوهستانی و عرض جغرافیایی این شهرستان از عوامل سرمای قسمت اعظم این منطقه به حساب می‌آید (Khorramabadi et al., 2022). موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) ارائه شده است.

¹. sikim

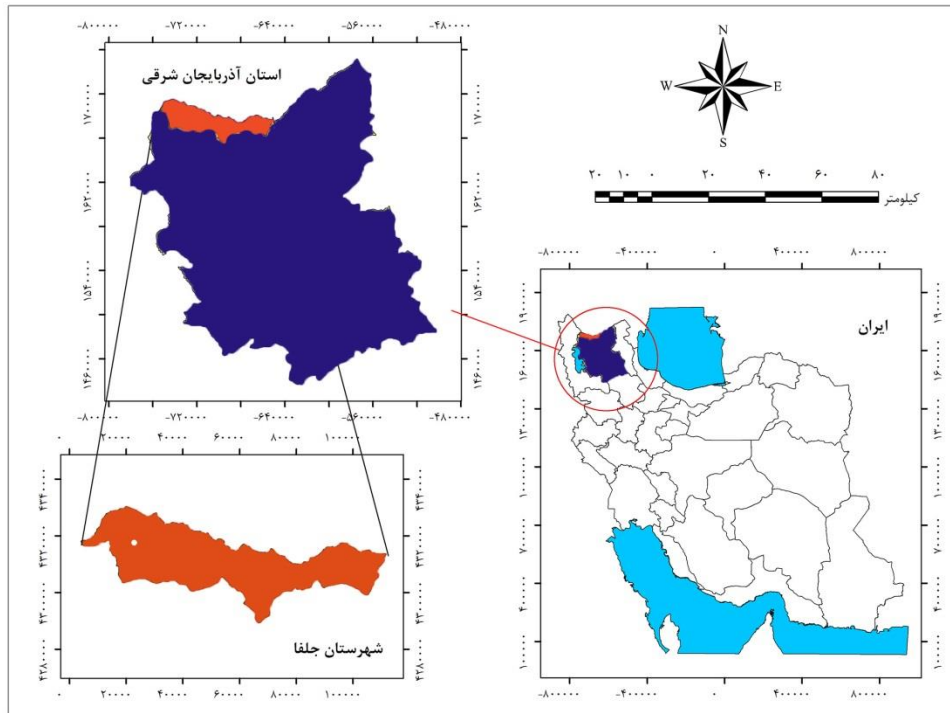
². Gambia

³. Senegal

⁴. Casamance

⁵. Trajkovic

⁶. Oudin



شکل ۱- موقعیت محل مورد مطالعه

در این تحقیق از عناصر اقلیمی فشار هوا، دمای متوسط، حداکثر و حداقل ماهانه، رطوبت نسبی متوسط، حداکثر و حداقل ماهانه، سرعت باد در ارتفاع دو متری، درصد ساعات آفتابی، تشعشع برون‌زمینی در دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۲۱ ایستگاه سینوپتیک جلفا استفاده شد. این عوامل در تخمین ETP ماهانه و اصلاح بر اساس ضرایب برازش مدل‌های همبستگی چندگانه، ترکیبی و رطوبتی استفاده شدند.

مدل‌های بکار رفته برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل

در این تحقیق از سه گروه به شرح زیر برای تخمین ETP برای ایستگاه مورد مطالعه استفاده شد.

الف- مدل‌های همبستگی چندگانه شامل کریستینسن-هارگریوز RS و کریستینسن-هارگریوز RA (Hargreaves and Christiansen, 1973)

ب- مدل‌های ترکیبی (توازن انرژی و انتقال جرم) مشتمل بر پنمن (Penman, 1948)، پنمن-رایت (Writh, 1982)، وان باول (Van Bavel, 1966) و پنمن-آلن-پروت (Allen and Pruitt, 1991)

ج- مدل رطوبتی ایوانوف (Ivanof, 1954)

در جدول (۱) روابط مدل‌های به‌کاررفته ارائه شده است.

جدول ۱- روابط مدل‌های به‌کاررفته برای تخمین تبخیر تعرق پتانسیل

مدل	رابطه
پنمن	$ETP = f \left(RH_{\max}, \frac{U_{day}}{U_{night}}, R_s, U_{day} \right) \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot f(u) \cdot \Delta e \right]$
پنمن-رایت	$ETP = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \left(\frac{15.36}{0.1L} \right) (a_w + b_w U_{2m}) (e_s - e_a)$
وان-باول	$ETP = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n + G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \left(\frac{0.622 \lambda \cdot \rho \alpha \cdot K^2}{P} \right) \frac{U_z}{[Ln(z/z_0)]}$
آن-پنمن-پروت	$ETP = C \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot f(u) \cdot \Delta e \right]$ $C = f \left(RH_{\max}, \frac{U_{day}}{U_{night}}, R_s, U_{day} \right)$
RS کریستینسن-هارگریوز	$ETP = 0.492 R_s \cdot C_{TT} \cdot C_{WT} \cdot C_{HT}$
RA کریستینسن-هارگریوز	$ETP = 0.492 R_s \cdot C_{TT} \cdot C_{WT} \cdot C_{HT}$
ایوانف	$ETP = 5.8 \times 10^{-5} (25 + T)^2 (100 - RH)$

مدل مبنا برای ارزیابی

مدل فائو-پنمن-مونیتث توسط سازمان خواربار جهانی و انجمن بین‌المللی آبیاری و زهکشی در سال ۱۹۹۱ به‌عنوان یک روش استاندارد برای تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل (ETP) و نیز برای ارزیابی عملکرد سایر روش‌ها پیشنهاد شد (Allen et al., 1998). محققان متعددی از جمله Jensen و همکاران (۱۹۹۰)، Salarian و همکاران (۲۰۱۴)، Ee Hang و همکاران (۲۰۲۱)، Patle و همکاران (۲۰۲۳) مدل فائو-پنمن-مونیتث را به‌عنوان مبنا برای بررسی کارایی سایر مدل‌های تخمین ETP در تحقیقات‌شان در نظر گرفته‌اند. در تحقیق حاضر برای ارزیابی مدل‌ها، مدل مبنا، مدل فائو-پنمن-مونیتث در نظر گرفته شد. این مدل با استفاده از عوامل هواشناسی میزان ETP را تخمین می‌زند و به‌عنوان جایگزینی مناسب برای اندازه‌گیری مستقیم تبخیر و تعرق که زمان‌بر و پرهزینه است، به‌کار می‌رود. این معادله به‌وسیله فائو مدل‌سازی ETP پیشنهاد شده است و به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سال ۱۹۹۸ مجله فنی شماره ۵۶ فائو، مبنی بر برآورد تبخیر و تعرق با تکیه بر روش پنمن-مونیتث اصلاح شده، منتشر شد که در آن گیاه مرجع فرضی یک پوشش چمن با مقاومت سطحی ثابت ۷۰ ثانیه بر متر، ضریب بازتاب معادل ۰/۲۳ و ارتفاع ۰/۱۲ متر است. تبخیر آن شباهت زیادی به تبخیر از سطح وسیع چمن سبز با رشد فعال، ارتفاع یکنواخت و دسترسی به آب کافی دارد. این رابطه به نوع گیاه، رشد گیاه و فعالیت‌های مدیریت زراعی-محیطی وابسته نبوده و تنها تحت تأثیر فاکتورهای اقلیمی بوده و به‌صورت رابطه (۲) ارائه شده است (Allen et al., 1998).

$$ETP = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، ETP تبخیر و تعرق پتانسیل ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)، T متوسط روزانه دمای ($^{\circ}\text{C}$)، R_n تابش خالص ورودی به سطح گیاه ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)، U_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)، G شار گرمایی خاک ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)، e_a فشار بخار واقعی (kPa)، e_s فشار بخار اشباع (kPa)، γ ضریب ثابت سایکرومتری ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) و Δ شیب منحنی فشار بخار ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$) هستند.

برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه با به کارگیری روابط مدل‌های همبستگی چندگانه کریستینسن-هارگریوز RA، کریستینسن-هارگریوز RS و مدل‌های ترکیبی پنمن، پنمن رایت، پنمن-آلن-پروت، وان باول و روش رطوبتی ایوانف از زبان برنامه‌نویسی ویژوال بیسیک استفاده شد.

روش برازش مدل‌ها

از طریق یک معادله ریاضی می‌توان معادله خطی و غیرخطی (توانی) تعریف کرد که رابطه دو متغیر را بیان کند، به گونه‌ای که الگوی رابطه بین دو متغیر به این معادله نزدیک باشد. این معادله مدل رگرسیون یا مدل آماری گفته می‌شود (ر ضایی و میر محمدی میبدی، ۱۴۰۱). برای تعیین ضرایب ثابت معادله برازش (ضرایب a و b در معادله خطی $y = a.x + b$ و ضرایب s و r در معادله غیرخطی $y = r.x^s$) از روش حداقل مربعات استفاده می‌شود.

در این تحقیق معادلات برازش خطی و توانی بر اساس تبخیر و تعرق پتانسیل (ETP) طبق روابط (۳) و (۴) تعریف شدند.

$$ETP_s = a.ETP_c + b \quad (3)$$

در این رابطه ETP_s تبخیر و تعرق پتانسیل حاصل از روش فائو-پنمن-مونتیث، ETP_c تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه شده با استفاده از مدل‌های ذکر شده و a و b ضرایب برازش می‌باشند. فرم معادله توانی به کاررفته به صورت رابطه (۴) است.

$$ETP_s = r.ETP_c^s \quad (4)$$

در این رابطه، s و r ضرایب برازش هستند.

برای تخمین ضرایب ثابت خط برازش داده‌های حاصل از مدل‌های همبستگی چندگانه (کریستینسن-هارگریوز RS و کریستینسن-هارگریوز RA)، مدل‌های ترکیبی توازن انرژی و انتقال جرم (پنمن، پنمن رایت، وان باول و پنمن-آلن-پروت) و مدل رطوبتی ایوانف با مدل فائو-پنمن-مونتیث که به عنوان مبنا در نظر گرفته شده است، از نرم‌افزار اکسل استفاده شد. برای بالا بردن دقت و گسترش دامنه انتخاب ضرایب همبستگی به صورت متحرک محاسبه شدند. استفاده از عبارت متحرک در این تحقیق به این مفهوم است که ابتدا فقط با در نظر گرفتن تبخیر تعرق پتانسیل ماه آوریل (یک ماه) سپس آوریل تا می (دو ماه)، بعد از آن آوریل تا ژوئن (سه ماه) و به همین ترتیب آوریل تا دسامبر (نه ماه)، ضرایب برازش و ضرایب همبستگی تخمین زده می‌شوند (سطر اول جداول). در مرحله بعد (سطر دوم جداول) با حذف آوریل محاسبات از ماه می شروع می‌شود. به این صورت که ابتدا ماه می (یک ماه) بعد ماه‌های می تا ژوئن (دو ماه) و این روند ادامه پیدا می‌کند تا جدول ضرایب همبستگی و ضرایب برازش برای تمامی ماه‌ها به صورت متحرک کامل شود (Jahanbakhsh et al., 2011).

طرز استفاده از جداول همبستگی

برای استخراج بهترین ضریب همبستگی و به دنبال آن ضرایب برازش مدل برای ماه یا ماه‌هایی که هدف محاسبه ETP با اعمال ضرایب برازش در آن ماه‌ها است، دامنه مجاز برای آن‌ها مشخص می‌شود. بر پایه بالاترین ضریب همبستگی در آن دامنه، در هر کدام از جداول (خطی یا توانی) که ضریب همبستگی در محدوده‌های مجاز مشخص شده بالا بود، ضرایب برازش S_r برای معادله توانی و ضرایب برازش a, b مربوط به معادله خطی متناظر از ردیف‌های فوقانی جدول استخراج می‌شود (جهانبخش و همکاران، ۲۰۰۱). قابلیت انتخاب بالاترین ضریب همبستگی و نیز بهینه‌ترین ضرایب برازش برای هر ماه در دامنه‌های قابل قبول در این نوع جداول را می‌توان از مزیت و حسن این روش برشمرد.

روش ارزیابی مدل‌ها

ارزیابی مدل‌ها با بررسی عملکرد آن‌ها صورت می‌گیرد. به طور معمول برای این هدف از معیارها و شاخص‌های آماری استفاده می‌شود. در این تحقیق از ۴ معیار ارزیابی عملکرد شامل جذر میانگین مربعات خطا، میانگین خطای متوسط، میانگین خطای مطلق و ضریب تبیین مطابق با روابط (۵) الی (۸) استفاده شد.

$$RMSE = \left(\sum_{i=1}^n (ETP_{C_i} - ETP_{S_i})^2 / n \right)^{1/2} \quad (5)$$

$$R^2 = \left(\sum_{i=1}^n (ETP_{S_i} - \overline{ETP_S})^2 - \sum_{i=1}^n (ETP_{C_i} - ETP_{S_i})^2 \right) \times \left(\sum_{i=1}^n (ETP_{S_i} - \overline{ETP_S})^2 \right)^{-1} \quad (6)$$

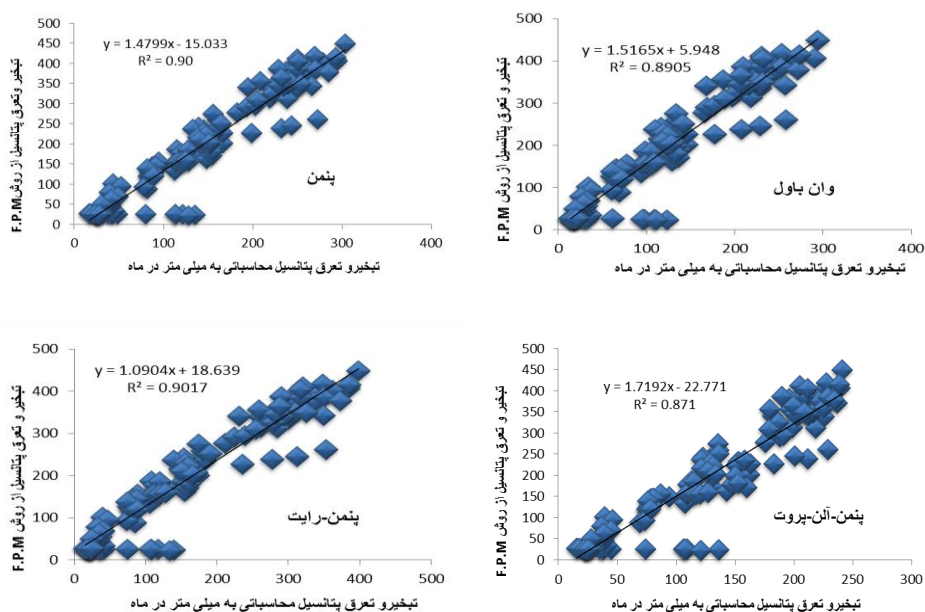
$$MBE = \left(\sum_{i=1}^n (ETP_{C_i} - ETP_{S_i}) / n \right) \quad (7)$$

$$MAE = \left(\sum_{i=1}^n |ETP_{C_i} - ETP_{S_i}| / n \right) \quad (8)$$

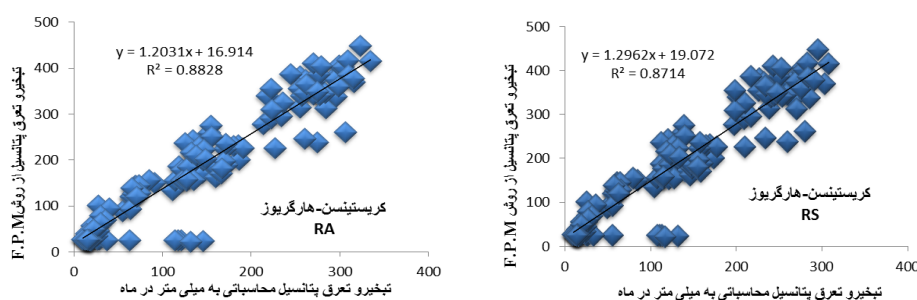
در این روابط جذر میانگین مربعات خطا، MBE، MAE، به ترتیب میانگین خطای متوسط و مطلق، R^2 ضریب تبیین، $\overline{ETP_S}$ میانگین مقادیر حاصل از روش استاندارد، ETP_S و ETP_C به ترتیب مقادیر حاصل از روش F.P.M و محاسباتی از مدل‌های دیگر ETP هستند. تمایل میزان R^2 به طرف عدد ۱ یا -۱ به مفهوم همخوانی بهتر داده‌های محاسباتی با نتایج حاصل از روش استاندارد است. همچنین هر چه قدر مقادیر RMSE، MBE و MAE کمتر باشد بر دقت بالا و تطابق بهتر نتایج مدل با نتایج مدل F.P.M دلالت خواهد داشت.

نتایج و بحث

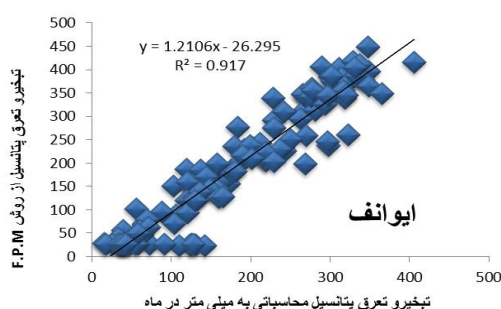
مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه برآوردشده با روش‌های مورد اشاره و مقایسه آن‌ها با نتایج به دست آمده از روش استاندارد فائو-پنمن-مونتیث در شکل‌های (۲) الی (۴) ارائه شده است.



شکل ۲. مقایسه مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه از روش‌های ترکیبی و روش فائو-پنمن-مونتیث



شکل ۳- مقایسه مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه از روش‌های همبستگی چندگانه و روش فائو- پنمن - مونتیت



شکل ۴- مقایسه مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه روش رطوبتی ایوانف و فائو- پنمن - مونتیت

در نموداری‌های شکل (۳) مقادیر ETP حاصل از مدل‌های همبستگی چندگانه کریستینسن- هارگریوز RA، کریستینسن- هارگریوز RS و ستاده‌های به‌دست‌آمده از مدل F.P.M مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که از این نمودارها مشخص است R^2 مدل‌های کریستینسن- هارگریوز RA، کریستینسن- هارگریوز RS به ترتیب $0/882$ و $0/871$ هستند که تفاوت اندکی با همدیگر دارند. مطابق نمودارهای شکل (۲) R^2 مدل‌های پنمن-رایت، پنمن، وان باول و پنمن-آلن-پروت به ترتیب $0/901$ ، $0/89$ و $0/871$ هستند که بیشترین و کمترین میزان به ترتیب مربوط به مدل‌های پنمن-رایت و پنمن-آلن-پروت هستند. R^2 مدل‌های پنمن-رایت و پنمن با اختلاف ناچیزی از هم برآورد شده‌اند. در شکل (۴) نیز که نمودار آن مربوط به مقایسه روش رطوبتی ایوانف با مدل F.P.M است، R^2 مربوط $0/917$ است که در بین کلیه روش‌های به‌کاررفته بالاترین R^2 به‌دست‌آمده است. ضریب همبستگی معادل این روش نیز برابر با مقدار $0/957$ خواهد بود که بیانگر هم‌خوانی بالای آن در برآورد ETP با ستاده‌های حاصل از مدل فائو- پنمن-مونتیت است. روش رطوبتی ایوانف یک روش بسیار ساده است که در آن برای محاسبه ETP فقط پارامترهای درجه حرارت و رطوبت نسبی موردنیاز هستند که این خود یک مزیت نسبت به روش‌های دیگر است. با بررسی نتایج به‌دست‌آمده از ضرایب تبیین محاسبه‌شده، مشخص شد که استفاده از روابط خطی کارایی بهتری نسبت به روابط توانی دارند. به‌همین خاطر در نمودارهای (۲) الی (۴) با توجه به بالا بودن ضریب همبستگی در آن‌ها فرم روابط برازش ارائه‌شده خطی هستند. با به‌کارگیری رگرسیون خطی و توانی مقادیر ETP محاسبه‌شده با مدل‌های همبستگی چندگانه، ترکیبی و رطوبتی با نتایج به‌دست‌آمده از مدل فائو- پنمن-مونتیت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. ضرایب همبستگی و همچنین ضرایب اصلاحی، جهت وسیع بودن دامنه انتخاب به‌صورت متحرک به دست آمدند. نتایج این تحلیل‌ها برای مدل ایوانف که نسبت به مدل‌های دیگر برتری داشت در جدول‌های (۲) و (۳) که حاوی مقادیر ضرایب همبستگی و ضرایب مربوط به معادله برازش هستند، ارائه‌شده‌اند.

جدول ۲- ضرایب برازش a, b و ضرایب همبستگی R_t مدل ایوانف در به کارگیری معادله خطی $ETP_s = a.ETP_c + b$

ماه	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
a									
آوریل	۰/۹	۱/۴۱	۱/۲۷	۱/۲۶	۱/۲۳	۱/۲۲	۱/۲۶	۱/۱۹	۱/۱۸
می		۱/۶۸	۱/۲۲	۱/۲۱	۱/۱۷	۱/۱۹	۱/۲۷	۱/۱۸	۱/۱۸
ژوئن			۰/۶۲	۰/۸۱	۰/۷۷	۱/۰۹	۱/۲۷	۱/۱۷	۱/۱۷
ژوئیه				۰/۴۸	۰/۵۹	۱/۲۲	۱/۳۱	۱/۱۸	۱/۱۷
اوت					۰/۶۶	۱/۲۲	۱/۲۷	۱/۱۲	۱/۱۲
سپتامبر						۰/۲۲	۱/۰۹	۰/۹۱	۰/۹۶
اکتبر							۰/۹۵	۰/۵۸	۰/۷۹
نوامبر								-۰/۱۸	۰/۶۶
دسامبر									۰/۲۲
b									
آوریل	۱۰/۳۵	-۵۹/۶	-۳۴/۲۱	-۳۰/۹۶	-۲۴/۲۴	-۲۷/۲۲	-۳۹/۳۹	-۲۱/۵۹	-۱۹/۵۹
می		-۱۰۳	-۳۷/۲۱	-۸۵/۱۴	-۲۵/۵	-۶۶/۱۷	-۴۰/۱	-۱۸/۵۱	-۱۷/۵۶
ژوئن			۱۴۶/۲	۱۰۸/۳۶	۱۱۷/۳۹	۱۱/۲۶	-۴۱/۸۴	-۱۵/۶۴	-۱۵/۸۷
ژوئیه				۲۲۶/۳۷	۱۸۱/۷۵	-۲۹/۴۸	-۵۴/۸۸	-۱۹/۵	-۱۷/۸۵
اوت					۱۴۷/۹۷	-۳۸/۴۱	-۵۲/۴۶	-۱۴/۱۱	-۱۴/۰۲
سپتامبر						۱۷۶/۰۳	-۲۴/۸۶	۸/۵۵	-۱/۰۶
اکتبر							-۱۱/۹۵	۳۶/۳۴	۹/۵۱
نوامبر								۸۳/۳۵	۱۵/۶۹
دسامبر									۱۹/۴۹
Rt									
آوریل	۰/۳۳	۰/۶۲	۰/۸۵	۰/۹	۰/۹۱	۰/۹	۰/۹۱	۰/۹۱	۰/۹۶
می		۰/۷۳	۰/۸۵	۰/۸۹	۰/۸۸	۰/۸۷	۰/۹۲	۰/۹۷	۰/۹۴
ژوئن			۰/۵۷	۰/۶۹	۰/۶۵	۰/۷۹	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۹۵
ژوئیه				۰/۴۱	۰/۴۵	۰/۸۳	۰/۹۴	۰/۹۳	۰/۹۵
اوت					۰/۴۸	۰/۸۶	۰/۹۴	۰/۹۲	۰/۹۴
سپتامبر						۰/۲۳	۰/۸۹	۰/۸۱	۰/۸۷
اکتبر							۰/۵۲	۰/۴۲	۰/۶۳
نوامبر								-۰/۰۵	۰/۲۷
دسامبر									۰/۴۲

جدول (۲) حاوی ضرایب همبستگی خطی (R_t) و همچنین ضرایب مربوط به معادلات برازش خطی (a, b) معادله $ETP_s = a.ETP_c + b$ که به صورت متحرک به دست آمده‌اند، هستند. به طوری که از جدول (۲) مشخص است، ضرایب همبستگی مدل ایوانف با مقادیر بالایی به دست آمده‌اند. به طوری که ضریب همبستگی مربوط به ماه‌های از می تا نوامبر ۰/۹۷ است.

جدول ۳- ضرایب برازش r, s و ضرایب همبستگی R_t مدل ایوانف در به کارگیری معادله توانی $ETP_a = r.ETP_c^s$

ماه	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
r									
آوریل	۰/۲۴	۲/۰۳	۱۰/۵۳	۱/۳۳	۱/۱۹	۱/۱۳	۱/۲۲	۱/۰۷	۰/۹۷
می		۰	۱/۵۵	۱/۳۳	۱/۲۱	۱/۱۹	۱/۳	۱/۰۸	۱/۱۹۷
ژوئن			۰	۰/۶۷	۰/۶۴	۰/۹۷	۱/۳۱	۱/۰۸	۰/۹۵
ژوئیه				۰	۰/۵۲	۱/۱۴	۱/۳۴	۱/۰۶	۰/۹۳
اوت					۰	۱/۱۲	۱/۳۳	۱/۰۳	۰/۹۲
سپتامبر						۰	۱/۳۱	۰/۹۶	۰/۹۲
اکتبر							۰	۰/۷۳	۰/۸۵
نوامبر								۰/۰۱	۰/۶۲
دسامبر									۰/۰۹
s									
آوریل	۳۲/۳۲	۰	۰/۰۶	۰/۱۵	۰/۳	۰/۴۱	۰/۲۵	۰/۵۷	۰/۸۳
می		۱۴۱/۳۳	۰/۰۵	۰/۱۶	۰/۳	۰/۳۳	۰/۱۸	۰/۵۶	۰/۸۵
ژوئن			۳۰۳/۰۲	۷/۸۲	۸/۸۳	۱/۳۳	۰/۱۹	۰/۵۹	۰/۸۹
ژوئیه				۳۷۷/۳۶	۱۸/۸۴	۰/۵۱	۰/۱۵	۰/۶۲	۰/۹۵
اوت					۳۵۲/۲۳	۰/۵۶	۰/۱۶	۰/۷۱	۰/۹۷
سپتامبر						۲۲۵/۶۲	۰/۱۸	۱/۰۵	۱
اکتبر							۱۰۸/۳	۲/۹۳	۱/۴۳
نوامبر								۵۲/۸	۳/۵۶
دسامبر									۱۹/۳۶
R_t									
آوریل	۰/۱۱	۰/۵	۰/۶۶	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۶۹	۰/۷۴	۰/۷۷	۰/۸۱
می		۰/۰۲	۰/۷۱	۰/۷۴	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۸	۰/۸۲	۰/۸۴
ژوئن			۰/۰۲	۰/۶۷	۰/۶۳	۰/۷۷	۰/۸۹	۰/۸۷	۰/۸۶
ژوئیه				۰/۰۱	۰/۴۲	۰/۸۴	۰/۹۰	۰/۸۶	۰/۸۵
اوت					۰/۰۱	۰/۸۵	۰/۸۸	۰/۸۴	۰/۸۴
سپتامبر						۰/۰۱	۰/۷۸	۰/۷۶	۰/۸۲
اکتبر							۰/۰۲	۰/۵۲	۰/۷۲
نوامبر								۰/۰۲	۰/۴۵
دسامبر									۰/۲۴

جدول (۳) حاوی ضرایب همبستگی توانی (R_t) و ضرایب مربوط به معادلات برازش توانی (r,s) که به صورت متحرک به دست آمده اند، هستند. همان گونه که در جدول (۳) مشهود است، بیشترین ضریب همبستگی با مقدار $0/90$ مربوط به ماه های ژوئیه تا اکتبر است. نتایج حاصل از ETP برآورد شده از مدل های مورد مطالعه با نتایج به دست آمده از مدل F.P.M در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴- مقادیر شاخص های آماری مدل های استفاده شده در تحقیق

Method	MBE mm/month	MAE mm/month	RMSE mm/month	Mean Difference	R ²
مدل های همبستگی چندگانه					
کریستینسن-هارگریوز RA	۴۹/۳۷	۵۹/۱۲	۷۱/۵۶	۴۹/۳۷	۰/۸۸۲
کریستینسن-هارگریوز RS	۶۱/۸۱	۶۹/۸۳	۸۳/۵۴	۱۹/۹۸	۰/۸۷۱
میانگین	۵۵/۵۹	۶۴/۴۷	۷۷/۵۵	۳۴/۶۷	۰/۸۷۶
مدل های ترکیبی					
پنمن	۵۵/۸۶	۶۵/۲۹	۸۰/۹۶	۵۵/۸۵	۰/۹۰۱
پنمن-رایت	۳۵/۴۴	۴۷/۱۵	۵۷/۶۱	۳۵/۴۴	۰/۹۰۲
پنمن-آلن-پروت	۷۱/۳۴	۷۹/۶۵	۹۹/۴۵	۷۱/۳۴	۰/۸۷۱
وان باول	۷۳/۱۵	۸۰/۰۵	۹۵/۱۳	۷۳/۱۵	۰/۸۹۰
میانگین	۵۸/۹۴	۶۸/۰۳	۸۳/۲۸	۵۸/۹۴	۰/۸۹۱
مدل رطوبتی					
ایوانف	-۱۴/۶۰	۳۷/۷۸	۵۱/۷۱	۱۴/۶۰	۰/۹۱۷

بر اساس جدول (۴) نتایج زیر قابل بیان هستند:

- الف- نتایج حاصل از روش های همبستگی چندگانه نشان داد دقت مدل کریستینسن-هارگریوز RA نسبت به مدل کریستینسن-هارگریوز RS با شاخص های آماری MBE ، MAE ، $RMSE$ به ترتیب $۴۹/۳۷$ و $۵۹/۸۳$ ، $۱۲/۵۶$ و $۷۱/۵۶$ میلی متر در ماه بیشتر است.
- ب- مدل رطوبتی ایوانف کمترین میزان شاخص های آماری MBE ، MAE ، $RMSE$ با مقادیر به ترتیب برابر با $mm.month^{-1}$ $۳۵/۴۴$ ، $۴۷/۱۵$ و $۵۱/۷۱$ در بین تمام مدل های بکار رفته دارا می باشد. همچنین مدل ایوانف دارای بالاترین ضریب تبیین و ضریب همبستگی با مقادیر به ترتیب $۰/۹۱۷$ و $۰/۹۵۷$ بود، اختلاف میانگین این مدل با مقدار $۱۴/۶ mm.month^{-1}$ کمترین میزان را در بین مدل ها داشت. این مقادیر حکایت از تطابق و همبستگی بالای مدل ایوانف با ستاده های مدل F.P.M دارد.
- ج- ضرایب تبیین بالای مدل های ترکیبی به خصوص مدل های پنمن-رایت و پنمن با مقادیر به ترتیب $۰/۹۰۲$ و $۰/۹۰۱$ نشان از همخوانی قابل قبول این مدل ها با مدل فائو-پنمن-مونثیت دارد. مدل پنمن-رایت بعد از روش رطوبتی ایوانف، دارای کمترین شاخص های آماری MBE ، MAE ، $RMSE$ به ترتیب $۳۵/۴۴$ و $۴۷/۱۵$ ، $۵۷/۶۱$ و $۵۱/۷۱$ میلی متر در ماه است.
- د- مدل های وان باول و پنمن-آلن-پروت بیشترین شاخص های آماری MBE ، MAE ، $RMSE$ را در بین کلیه مدل ها داشتند.

ه- اگرچه مدل‌های ترکیبی از پارامترهای هواشناسی متعددی برای محاسبه ETP استفاده می‌کنند، ولی باوجود این دقت و تطابق مدل رطوبتی ایوانف که فقط پارامترهای دما و رطوبت در آن دخیل هستند، زیاد بود.

به نظر می‌رسد شاخص اختلاف میانگین تناسب خاصی با بقیه شاخص‌های آماری نداشته و نتایج آن قابل اطمینان نیستند.

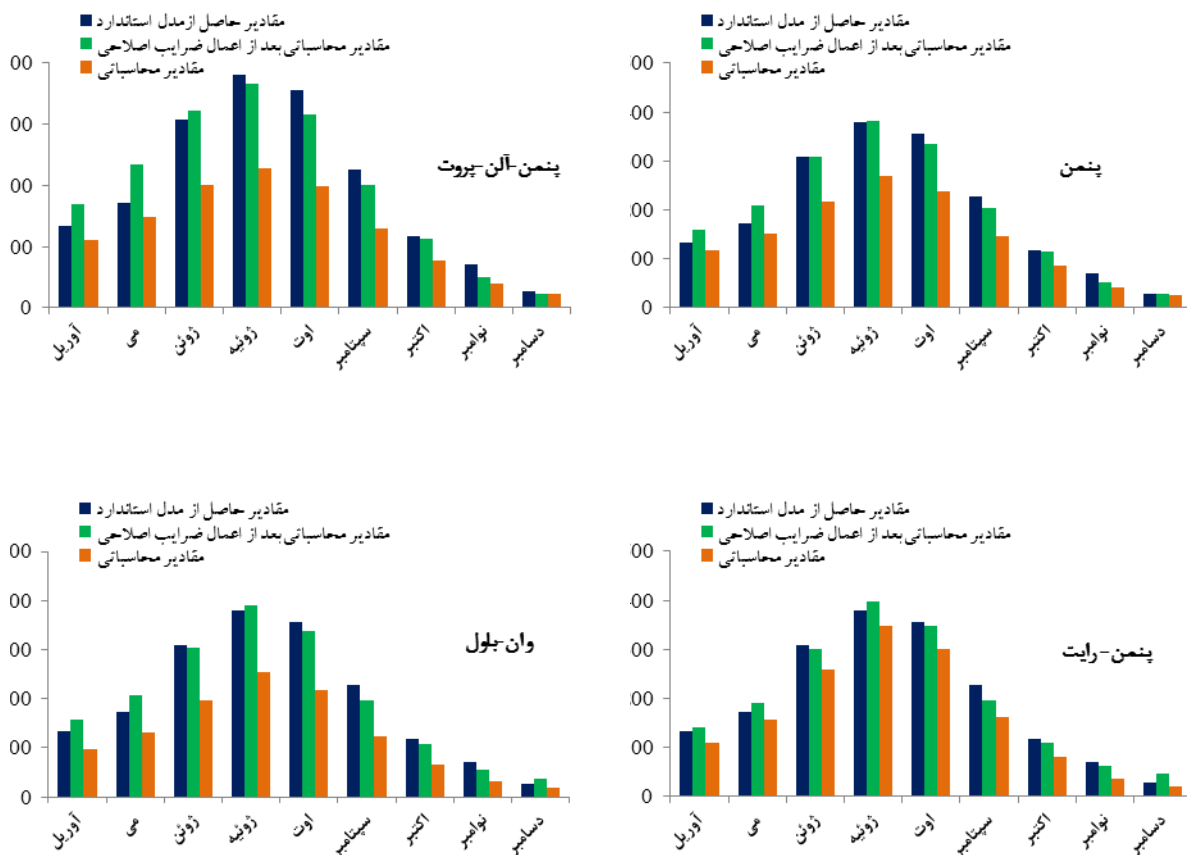
عملکرد مدل‌ها بعد از برازش

برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها پس از اعمال ضرایب برازش، شاخص‌های آماری مجدداً برای آن‌ها بررسی شد. نتایج این بررسی در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵- مقادیر شاخص‌های آماری مدل‌های استفاده شده بعد از اعمال ضرایب برازش

Method	MBE mm/month	MAE mm/month	RMSE mm/month	Mean Difference	R ²
کریستینسن-هارگریوز RA	-۰/۲۲	۳۲/۲۵	۴۹/۳۷	۰/۲۲	۰/۸۸۲
کریستینسن-هارگریوز RS	-۰/۰۳	۳۴/۶۰	۵۰/۴۲	۰/۰۳	۰/۸۷۱
میانگین	-۰/۱۲۵	۳۳/۴۲	۴۹/۸۵	۰/۱۲۵	۰/۸۷۶
پنمن	۰/۰۰۷	۲۷/۸۵	۴۵/۵۴	۰/۰۰۶	۰/۹۰۱
پنمن-رایت	۰/۰۰۰۳	۲۹/۳۷	۴۴/۷۳	۰/۰۰۰۳	۰/۹۰۲
پنمن-آلن-پروت	۰/۰۷	۳۳/۰۸	۵۰/۵۷	۰/۰۸	۰/۸۷۱
وان باول	۰/۰۰۵	۲۹/۹۱	۴۶/۸۵	۰/۰۰۵	۰/۸۹۰
میانگین	۰/۰۲	۳۰/۰۵	۴۶/۹۲	۰/۰۲	۰/۸۹۱
ایوانف	۰/۰۱	۳۱/۳۹	۴۶/۰۳	۰/۰۱	۰/۹۱۷

مقایسه مقادیر شاخص‌های آماری RMSE, MAE, MBE در جدول‌های (۴) و (۵)، گویای تأثیر مثبت اعمال ضرایب برازش بر روی عملکرد مدل‌ها است. مقادیر شاخص آماری MBE به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. بعد از اعمال ضرایب برازش در مدل‌ها، مقادیر ETP حاصل از آن‌ها (قبل و بعد از برازش) با مدل F.P.M مقایسه شدند. نتایج این مقایسه در قالب نمودارهایی به تفکیک گروه‌ها در شکل‌های (۵) تا (۷) ارائه شده است.

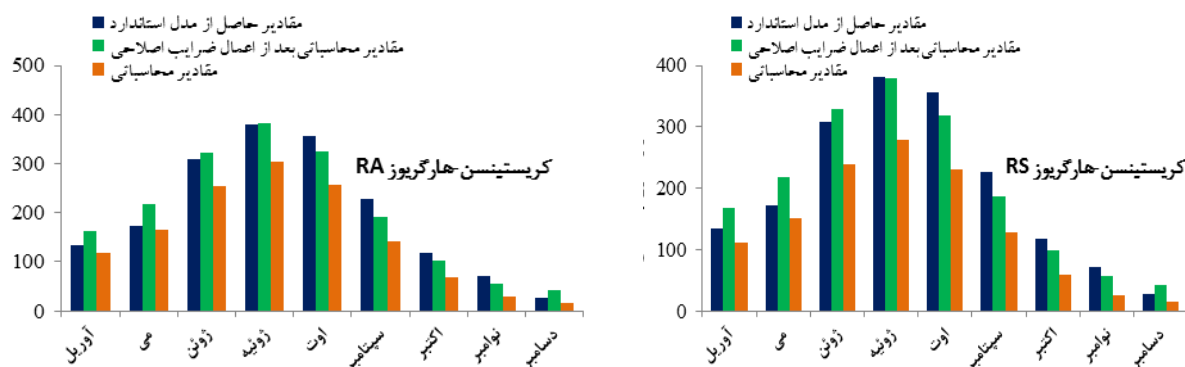


شکل ۵- مقایسه ETP ماهانه حاصل از مدل‌های ترکیبی (وان-باول، پنمن، پنمن-رایت، پنمن-آلن-پروت)

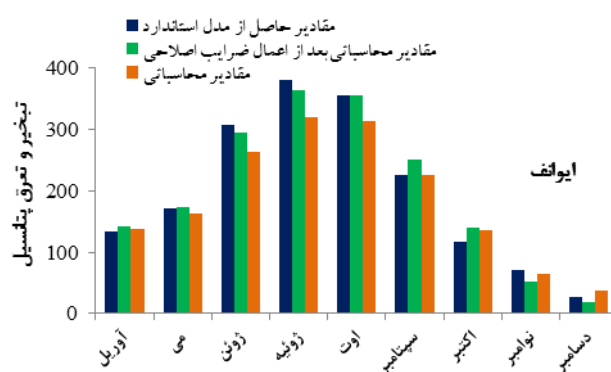
و مدل F.P.M قبل و بعد از اعمال ضرایب برازش

در شکل (۵) مقادیر ETP منتج از مدل‌های ترکیبی پنمن، وان باول، پنمن-آلن-پروت و پنمن-رایت با نتایج حاصل از روش مبنای F.P.M قبل و بعد از در نظر گرفتن ضرایب برازش مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. با عنایت به نمودارهای شکل (۵) موارد زیر قابل بیان هستند.

- الف-مقادیر برآورد شده ETP حاصل از مدل‌های ترکیبی کلیه ماه‌ها کمتر از میزان برآوردی مدل F.P.M بودند.
- ب-بعد از اعمال ضرایب برازش مدل‌های ترکیبی عملکرد آن‌ها به‌طور قابل توجهی بهبود یافته است.
- ج- بعد از اعمال ضرایب برازش، مقادیر برآوردی ETP مدل‌های پنمن، وان باول و پنمن-آلن-پروت تا ماه ژوئیه از نتایج به‌دست‌آمده از مدل F.P.M با اختلاف اندکی، بیشتر و یا برابر هستند. لیکن بعد از این ماه مقادیر ETP از مدل‌های مذکور با اختلاف ناچیزی کمتر و یا مساوی از نتایج روش F.P.M برآورد شده‌اند.
- د-در روش پنمن-رایت روند خاصی در جهت کاهش یا افزایش مقادیر برآوردی تبخیر و تعرق پتانسیل قابل تشخیص نیست.



شکل ۶- مقایسه ETP ماهانه حاصل از مدل‌های همبستگی چندگانه (RA,RS) و مدل F.P.M قبل و بعد از اعمال ضرایب برازش



شکل ۷-مقایسه ETP ماهانه حاصل از مدل رطوبتی ایوانف و مدل F.P.M قبل و بعد از اعمال ضرایب برازش

در شکل (۶) مقادیر ETP حاصل از مدل‌های همبستگی چندگانه کریستینسن-هارگریوز RA و کریستینسن-هارگریوز RS و در شکل (۷) مدل رطوبتی ایوانف با ستاده‌های حاصل از روش F.P.M قبل و بعد از اعمال ضرایب برازش مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. از نمودارهای شکل‌های (۶) و (۷) نتایج زیر قابل‌بیان هستند.

الف- مدل‌های همبستگی چندگانه در کلیه ماه‌ها، مقادیر ETP را قبل از اعمال ضرایب برازش کمتر از مدل F.P.M برآورد کرده‌اند. بعد از اعمال ضرایب برازش اختلاف بین مقادیر ETP برآورد شده از آن‌ها با مقادیر ETP مدل F.P.M کاهش یافته است.

ب- عملکرد مدل رطوبتی ایوانف حتی قبل از اعمال ضرایب برازش هم قابل توجه است. همان‌طور که از جدول (۴) نیز مشهود است، کمترین میزان مقادیر شاخص‌های آماری RMSE, MAE و MBE مربوط به این مدل است. بعد از اعمال ضرایب برازش نیز شاخص‌های آماری مذکور به میزان محسوسی مطابق جدول (۵) کاهش یافته است.

مقبولیت مدل ایوانف در تحقیقات زارع و همکاران (۱۳۸۹) و نیز جلالی کوتنایی و ناصری (۱۳۸۹) به‌عنوان یک مدل قابل اطمینان برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل مورد تأیید قرار گرفته است.

نتیجه گیری

بر پایه مطالعات بسیاری که توسط محققان مختلف در زمینه چگونگی کاربرد مدل های تخمین ETP در مناطق مختلف انجام شده، ارزیابی و اصلاح آن ها را قبل از کاربرد امری اجتناب ناپذیر ساخته است. در تحقیق حاضر مدل های برآورد ETP در سه گروه همبستگی چندگانه، ترکیبی و رطوبتی برای ایستگاه سینوپتیک جلفا، با در نظر گرفتن مدل F.P.M به عنوان مدل مبنا، ارزیابی شدند. با استفاده از مقادیر ETP حاصل از همه مدل ها، اصلاح آن ها با کاربرد روش های آماری به صورت متحرک در فرم رگرسیون های خطی و توانی به انجام رسید. مهم ترین نتایج این تحقیق را به شرح زیر می توان خلاصه نمود.

- ۱- اعمال ضرایب برازش، عملکرد کلیه مدل های بکار رفته در تحقیق حاضر را به میزان قابل توجهی بهبود بخشید.
- ۲- بررسی های به عمل آمده نشان داد که استفاده از رگرسیون خطی نتایج قابل قبول تری نسبت به رگرسیون توانی در محاسبه ضرایب تبیین ارائه می دهند.
- ۳- مدل رطوبتی ایوانف با ضریب تبیین ۰/۹۱۷ و ضریب همبستگی معادل برابر با ۰/۹۵۷ بیشترین مقدار را در بین مدل های به کار رفته دارا بود. شاخص های آماری RMSE, MAE, MBE این مدل با مقادیر به ترتیب ۵۱/۷۱، ۳۷/۷۸ و ۱۴/۶- میلی متر در ماه کمترین میزان را در بین تمام مدل های به کار رفته داشتند. نتایج فوق نشانگر تطابق و همخوانی بالای مدل رطوبتی ایوانف با داده های مدل F.P.M است. در این مدل فقط پارامترهای درجه حرارت و رطوبت نسبی برای محاسبه ETP نیاز هستند که یک مزیت نسبت به مدل های دیگر به حساب می رود. لذا مدل رطوبتی ایوانف (حتی بدون اعمال ضرایب برازش)، با توجه به دقت در برآورد و نیز محدود بودن پارامترهای لازم هواشناسی به ۲ عامل، برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل ایستگاه سینوپتیک جلفا قابل پیشنهاد است.

منابع

- بابامیری، ا.، دین پڑوه، ی. ۱۳۹۱. مقایسه چهار روش تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع مبتنی بر درجه حرارت هوا در حوضه آبریز دریاچه ارومیه. علوم و مهندسی آبیاری (مجله علمی کشاورزی)، (۱) ۳۷-۵۴.
- ثنایی نژاد، س.ح.، نوری، س.، هاشمی نیا، س.م. ۱۳۹۰. برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره ای در منطقه مشهد. نشریه آب و خاک، (۳) ۲۵-۵۴۷.
- جلالی کوتنایی، ن.، ناصری، ع.ع. ۱۳۸۹. بررسی مناسب ترین روش تعیین تبخیر و تعرق پتانسیل ETO در اراضی شالیزاری. اولین همایش ملی مدیریت منابع آب اراضی ساحل دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، گروه مهندسی آب.
- جهانبخش، س.، موحد دانش، ع.ا.، مولوی، ا. ۱۳۸۰. تحلیل مدل های برآورد تبخیر - تعرق برای ایستگاه هواشناسی تبریز، دانش کشاورزی، (۲) ۱۱-۶۵.
- خرم آبادی، ف.، حسینی، س.م.، پناهی، ع.، بافنده، ن. ۱۴۰۱. بررسی پیش بینی نوسانات امواج گرمایی در ایستگاه جلفا با استفاده از مدل های اقلیمی تحت سناریو rcp8.5. پژوهش های تغییرات آب و هوایی، (۲) ۱۰-۱۸.
- زارع ابیانه، ح.، مقدم نیا، ع.، بیات ورکشی، م.، قاسمی، ع.، شادمانی، م. ۱۳۸۹. تغییرات مکانی تبخیر از تشت و مقایسه آن با مدل های برآورد تبخیر در ایران. دانش آب و خاک، (۴) ۲۰-۶۳.

سالاریان، م.، نجفی، م.، داوری، ک.، اسلامیان، س.س.، حیدری، م. ۱۳۹۳. مناسب‌ترین روش برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در شرایط کمبود داده هواشناسی در ماه‌های گرم و سرد سال (مطالعه موردی شهرستان اصفهان). *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. ۸(۱). ۶۲-۷۳.

رضایی، ع.، میرمحمدی میبدی، س.ع. ۱۴۰۱. آمار و احتمالات. *جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان*.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration -Guidelines for computing crop water requirements-FAO. *Irrigation and drainage paper* 56. FAO, Rome, 300(9), D05109.

Allen, R.G., Pruitt, W.O. 1991. FAO-24reference evapotranspiration factors. *Journal of Irrigation and Drainage*.117(5), 758-774.

Babamiri, O. & Dinpazhoh, Y. 2014. Comparison of Four Temperature Based Reference Crop Evapotranspiration Estimation Method at Urmia Lake Basin. *Irrigation Sciences and Engineering* (Scientific Agricultural Journal). 37(1),43-54 (In Persian).

Bodian, A., Malick Ndiaye, P., Bassirou Diop, S., Diop, L., Dezetter, A., Ogilvie, A. , Djama, K. 2024. Evaluation and fit of alternative methods for estimating reference evapotranspiration in the main hydrosystems of Senegal: Senegal, Gambia and Casamance River Basins. *Proc. IAHS*, 385, 415–421.

Chang, X., Wang, S., Gao, Z., Luo, Y., Chen, H. 2018. Forecast of Daily Reference Evapotranspiration Using a Modified Daily Thornthwaite Equation and Temperature Forecasts. *Journal of Irrigation and Drainage*. 68, 297–317.

Chiew, F.H.S., Kamaladasa, N.N., Malano, H.M., McMahon, T.A. 1995. Penman-Monteith, FAO-24 reference crop evapotranspiration and class-A pan data in Australia. *Agricultural Water Management*, 28, 9-21.

Doorenbos, J. & Pruitt, W.O. 1997. Necessidade hídrica das culturas. Campina Grande: UFPB., 204p. Estudos FAO, IrrigaÁ, o.e. Drenagem, 24.

Ee Hang, G., Jing, L.N.G., Yuk, F.H., Stephen, L.S.Y. 2021. Performance of potential evapotranspiration models in Peninsular Malaysia. *Journal of Water and Climate Change*, 12 (7), 3170–3186. Doi.org/10.2166/wcc.2021.018

Hargreaves, G.H. & Christiansen, J.E. 1973. Water use, ERTS readout and climate. Dept. of Agricultural and Irrigation Engineering, Utah State University, Logan, Utah. *Annual Meeting, Rocky Mountain Region*, ASAE, Laramie, Wyoming.

Ivanof, N.N. 1954. The determination of potential evapotranspiration, *Izvest. Vsesoyuznogo. Geograf. Obs.* 86(2),189-201.

Jahanbakhsh, S., Movahed Danesh, A.A., Molavi, A. 2001. Analysis of evapotranspiration estimation models for Tabriz meteorological station. *Agricultural knowledge*. (2)11, 51-65(In Persian).

Jalali Kotnaei, N. & Naseri, A. 2010. Investigating the most appropriate method for determining potential evapotranspiration (ET₀) in paddy fields. *The First National Conference on Coastal Water Resources Management, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Water Engineering Department*(In Persian).

Jensen, M.E., Burman, R.D., Allen, R.G. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Report on Engineering Practices No. 70. *American Society of Civil Engineers*, New York, 360 pp.

Khorrabadi, F., Hosseini, S.M., Panahi, A., Bafandeh, N. 2022. Research of heat wave fluctuations in Jolfa station using climate models under the rcp8.5 scenario. *Journal of Climate Change Research*, 10(2). 1-18 (In Persian).

Patle, G.T. & Singh, D.K. 2015. Sensitivity of annual and seasonal reference crop evapotranspiration to principal climatic variables. *Journal of Earth Syst Sci*. 24(4), 81 9–828.

Patle., G.T., Mandal, B.P., Kumar, M., Jhajharia, D. 2023. Evapotranspiration Modelling using Artificial Neural Network and Multiple Linear Regression Approach in Semi-Humid Region of Sikkim. *Journal of Agricultural Engineering (India)*. 60(2),1-17.

Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water m bare soil and grass.*proc.Roy.Soc*, London, Ser,A.193, 116-140.

- Phad, S.V., Dakhore, K.K., Sayyad, R.S. 2019. Comparison of different methods for estimation of reference evapotranspiration at Parbhani, Maharashtra. *Journal of Agrometeorol*, 21 (2), 236–238.
- Rezaei, A., Mirmohammady Maibody, S.A.M. 2022. Probability and Statistics. *Isfahan. Isfahan Industrial Unit Jihad*(In Persian).
- Salarian, M., Najafi, M., Davari, K., Islamian, S., Heydari, M. 2014. The most Appropriate Method to Estimate Potential Evapotranspiration in Meteorological Data Scarce Condition in the Warm and Cold Months of the Year (Case Study of Isfahan. *Iranian Irrigation and Drainage Journal*. 8(1), 62-73(In persian).
- Sanaei Nejad, S.H., Noori, S., Hashemi nia, M. 2011. Estimation of Evapotranspiration using satellite image data in Mashhad area. *Iranian journal of Water and Soil*. 25(3),540-547(In Persian).
- Sediyama, G.C. 1996. Estimation of evapotranspiration: historical, evolutionary and critical analysis. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. v.4, 1-12.
- Tasumi, M. 2019. Estimating evapotranspiration using METRIC model and Landsat data for better understandings of regional hydrology in the western Urmia Lake Basin. *Agri. Water Manage*. 226, 1-11.
- Trajkovic, S. & Kolakovic, S. 2009. Estimating reference evapotranspiration using limited weather data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE*. 135(4): 443-449.
- Van Bavel, C.H.M. 1966. Potential evaporation: The combination concept and its experimental verification. *Water Resources Res*. 2(3), 455-467.
- Varga, H.Z., Szalka, E. , Szakal, T. 2022. Determination of Reference Evapotranspiration Using Penman-Monteith Method in Case of Missing Wind Speed Data under Subhumid Climatic Condition in Hungary. *Atmospheric and Climate Sciences*. 12(2), 235-245.
- Writh, J.L. 1982. New evapotranspiration crop coefficients. *Journal of Irrigation and Drainage*, 108(1), 57-77.
- Zare Abyaneh, H., Moghadamnia, A., Bayat Varkeshi, M., Qasemi, A., Shadmani, M. 2010. Spatial changes in evaporation from the basin and its comparison with evaporation estimation models in Iran. *Journal of Water and Soil Science*. 1(4), 54-63(In Persian).