



Investigating the Performance of Empirical Models for Estimating Reference Plant Water Requirements in Mianeh County

Fariborz Ahmadzadeh Kaleybar¹ and Ahad Molavi^{2*}

1) Assistance Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

2) Assistance Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

*Corresponding author emails: ahad.molavi@iaut.ac.ir

Abstract:

Background and Aim: Evapotranspiration is one of the most important factors of the hydrological cycle and its estimation is essential for a wide range of research including water balance, irrigation system design and management, simulation and modeling, and water resources planning. A model should be selected that can accurately estimate evapotranspiration according to regional conditions and using minimal climatic data. The aim of this research was to investigate the efficiency of different models for estimating evapotranspiration of reference plants, considering the FAO-Penman-Monteith model as the base model, and consequently to determine the most appropriate alternative model, considering the use of minimal data at the synoptic station of Mianeh County.

Method: The study site was the Mianeh Synoptic Station. This station is located in Mianeh County. Mianeh County is located in the southeastern corner of East Azerbaijan Province. To conduct this research and estimate the evapotranspiration rate of the reference plant, several meteorological parameters such as wind speed, average percentage of sunny hours, average monthly temperature, maximum monthly temperature, minimum monthly temperature, maximum monthly relative humidity, average monthly relative humidity, minimum monthly relative humidity, air pressure, and extraterrestrial radiation of the Mianeh Synoptic Station were used. The Visual Basic programming language was used to calculate the evapotranspiration of the reference plant. To evaluate the models for calculating the evapotranspiration of the reference plant, four categories of combined models (Penman-Whith, Allen-Penman- Pruitt), radiation (Doorenbos-Pruitt and Jensen-Haise), temperature (Linacre and Hargreaves) and the Ivanof moisture model were considered. The FAO-Penman-Monteith model was considered as a standard model to evaluate the performance of other models. The efficiency of the models was evaluated using five statistical indicators: root mean square error, mean average error, mean absolute error, coefficient of determination, and Jacovides criterion.

Results: The results showed that among the combined models groups, the coefficient of determination of the Allen-Penman- Pruitt model with a value of 0.859 had a relatively good agreement compared to the Penman- Whith model. Comparison of the ETP obtained from the Allen-Penman- Pruitt model and the base model showed that most of the resulting points were above the $y=x$ line, which indicated an underestimation of this model compared to the baseline model. In the Penman-Whith method, the underestimation compared to the base model was evident in most cases with less intensity. In the radiation models category, the estimated ETP of the Jensen-Haise model had higher values than the standard model from April to August. The scatter of points in the diagram related to the Doorenbos- Pruitt model was greater than that of the Jensen-Haise method, which caused the coefficient of determination of this method to be lower than that of the Jensen-Haise method. Temperature models had the lowest average values of the statistical error indices RMSE and MAE. The highest coefficient of determination among the groups used was also related to these models. The agreement of ETPs obtained from Hargreaves and Ivanof models after applying regression coefficients with the results obtained from the standard model was greater than that of other models.

Conclusion: After applying regression coefficients in all models, the values of error indicators were significantly reduced, which indicates its positive effect on improving and increasing the performance of the models. The Hargreaves model with a correlation coefficient of 0.965 and an R/t criterion of 0.16 had the highest value among all models and had the best agreement and conformity with the base model. The Hargreaves model can be considered as a suitable alternative to the FAO-Penman-Monteith model for calculating the ETP of the Mianeh synoptic station, especially in terms of regression coefficients. Although the Ivanof moisture model had high error indicators of RMSE, MAE, MBE and the Jakovides criterion, but with a correlation coefficient of 0.963 and subsequent high agreement with the results of the standard method, this model can be recommended after the Hargreaves model by considering the regression coefficients for estimating the ETP of the Mianeh synoptic station.

Keywords : Evapotranspiration, regression coefficients, Empirical Models



شاپا چاپی: ۷۴۸۰-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۷۴۰۰-۲۲۵۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:

<https://wsrj.srbiau.ac.ir>

پست الکترونیک:

iauwsrj@srbiau.ac.ir
iauwsrj@gmail.com

سال پانزدهم

شماره ۱ (۵۷)

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۱۰/۲۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۱۲/۱۴

صفحات: ۹۳-۸۳

بررسی عملکرد مدل‌های تجربی تخمین نیاز آبی گیاه مرجع در شهرستان میانه

فریبرز احمدزاده کلپیر^۱ و احد مولوی^{۲*}

(۱) استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.
(۲) استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.
* ایمیل نویسنده مسئول: ahad.molavi@iaut.ac.ir

چکیده:

زمینه و هدف: تبخیر و تعرق یکی از عوامل بسیار مهم چرخه هیدرولوژیکی بوده و تخمین آن برای طیف وسیعی از تحقیقات از جمله بیلان آبی، طراحی و مدیریت سامانه‌های آبیاری، شبیه‌سازی و مدل‌بندی، برنامه‌ریزی منابع آب ضروری است. مدلی باید انتخاب شود که بتواند با توجه به شرایط منطقه و استفاده حداقل از داده‌های اقلیمی، تبخیر و تعرق را دقیق برآورد کند. هدف از این تحقیق، بررسی کارایی مدل‌های مختلف برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع با در نظر گرفتن مدل فائو-پنمن-مونتیث به عنوان مدل مبنا و در نتیجه تعیین مناسب‌ترین مدل جایگزین با لحاظ به کارگیری کمترین داده در ایستگاه سینوپتیک شهرستان میانه بود.

روش پژوهش: محل مورد مطالعه ایستگاه سینوپتیک میانه بود. این ایستگاه در شهرستان میانه واقع شده است. شهرستان میانه، در گوشه جنوب شرقی استان آذربایجان شرقی قرار گرفته است. برای انجام این پژوهش و برآورد میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع از پارامترهای هواشناسی متعددی از قبیل سرعت باد، متوسط در صد ساعات آفتابی، دمای متوسط ماهانه، دمای حداکثر ماهانه، دمای حداقل ماهانه، رطوبت نسبی حداکثر ماهانه، رطوبت نسبی متوسط ماهانه، رطوبت نسبی حداقل ماهانه، فشار هوا، تشعشع برون زمینی ایستگاه سینوپتیک میانه استفاده به عمل آمد. جهت محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع از زبان برنامه‌نویسی ویژوال بیسیک استفاده شد. برای ارزیابی مدل‌های محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع چهار دسته مدل‌های ترکیبی (پنمن-رایت، آلن-پنمن-پروت)، تابشی (دورنبوس-پروت و جنسن هیز)، دمایی (لیناکر و هارگریوز) و مدل رطوبتی ایوانف در نظر گرفته شدند. مدل فائو-پنمن-مونتیث به عنوان مدل استاندارد برای ارزیابی عملکرد سایر مدل‌ها در نظر گرفته شد. بررسی کارایی مدل‌ها تحت پنج شاخص آماری جذر میانگین مربعات خطا، میانگین خطای متوسط، میانگین خطای مطلق، ضریب تبیین و معیار جاکوویس انجام گردید.

یافته‌ها: نتایج نشان داد در بین دسته مدل‌های ترکیبی ضریب تبیین مدل آلن-پنمن-پروت با مقدار ۰/۸۵۹ دارای همخوانی نسبتاً خوبی در مقایسه با مدل پنمن-رایت بود. مقایسه ETP حاصل از مدل آلن-پنمن-پروت و مدل مبنا نشان داد که اکثر نقاط حاصله بالای خط $y=x$ واقع شدند که نشان از کم برآوردی این مدل نسبت به مدل مبنا می‌باشد. در مدل پنمن-رایت کم برآوردی نسبت به مدل مبنا در اکثر موارد با شدت کمتری مشهود بود. در دسته مدل‌های تابشی ETP های برآوردی مدل جنسن-هیز از آوریل تا اوت مقادیر بالایی نسبت به مدل استاندارد داشتند. پراکندگی نقاط در نمودار مربوط به مدل دورنبوس-پروت نسبت به مدل جنسن-هیز بیشتر بوده که باعث کم بودن ضریب تبیین این مدل نسبت به مدل جنسن-هیز شده است. مدل‌های دمایی کمترین مقادیر متوسط شاخص‌های آماری خطای RMSE, MAE را دارا بوده و بیشترین ضریب تبیین در بین گروه‌های بکار رفته مربوط به این مدل‌ها بود. تطابق ETP های به دست آمده از مدل‌های هارگریوز و ایوانف بعد از اعمال ضرایب رگرسیونی با نتایج حاصل از مدل استاندارد از سایر مدل‌ها بیشتر بود.

نتایج: پس از اعمال ضرایب رگرسیونی در کلیه مدل‌ها مقادیر شاخص‌های خطا به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافتند که نشان از تأثیر مثبت آن در بهبود و افزایش کارایی و عملکرد مدل‌ها دارد. مدل هارگریوز با ضریب همبستگی معادل ۰/۹۶۵ و معیار R/t برابر ۰/۱۶ بالاترین مقدار را در بین تمامی مدل‌ها، بهترین همخوانی و تطابق را با مدل مبنا داشت. می‌توان مدل هارگریوز را به‌ویژه بعد از لحاظ ضرایب رگرسیونی به عنوان یک جایگزین مناسب برای مدل فائو-پنمن-مونتیث برای محاسبه ETP ایستگاه مزبور در نظر گرفت. با وجود آنکه مدل رطوبتی ایوانف شاخص‌های خطای MAE, RMSE, MBE و معیار جاکوویس بالایی داشت، ولی با داشتن ضریب همبستگی ۰/۹۶۳ و به دنبال آن همخوانی بالا با نتایج مدل استاندارد، این مدل بعد از مدل هارگریوز با در نظر گرفتن ضرایب رگرسیونی برای تخمین ETP ایستگاه سینوپتیک میانه قابل پیشنهاد است.

کلید واژه‌ها: تبخیر و تعرق، ضرایب رگرسیون، مدل‌های تجربی

مقدمه

تبخیر و تعرق بالقوه (ETP) یک متغیر هیدرولوژیکی پیچیده است که توسط متغیرهای آب و هوایی مختلف که بر تعادل آب و انرژی و عوامل حیاتی برای نیاز آبی محصول و برنامه‌ریزی آبیاری تأثیر می‌گذارند، تعریف می‌شود (Song et al., 2019). تبخیر و تعرق یکی از مهم‌ترین اجزای چرخه هیدرولوژیکی بوده و برآورد آن برای طیف وسیعی از مطالعات از جمله بیلان آبی، طراحی و مدیریت سامانه‌های آبیاری، شبیه‌سازی، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب ضروری می‌باشد (Allen et al., 1998). مدل‌های بسیاری برای برآورد تبخیر و تعرق وجود دارد که هر کدام محدودیت‌هایی دارند. بعضی از این مدل‌ها مثل لایسیمتر، هزینه‌بر و زمان‌بر بوده و برخی دیگر مثل مدل‌های تجربی، اعتبار محلی ندارند. استفاده از مدلی که بتواند با توجه به ماهیت پیچیده این پدیده و استفاده حداقل از داده‌های اقلیمی، تبخیر و تعرق را برآورد کند لازم و ضروری به نظر می‌رسد (Khari et al., 2023). تعداد زیادی از روش‌های اصلی یا اصلاح‌شده محاسبه تبخیر و تعرق مرجع به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مدل‌ها با توجه به داده‌های مورد نیاز به مدل‌های دمایی، مدل‌های تابشی و مدل‌های ترکیبی طبقه‌بندی شده‌اند که برخی از آن‌ها جهت محاسبه تبخیر و تعرق بالقوه به تعداد ورودی کم‌نیاز دارند (Song et al., 2019). با توجه به اینکه مدل‌های تجربی بر اساس مفروضات مختلف عمل می‌کنند، ارزیابی عملکرد آن‌ها برای تعیین دقیق‌ترین مدل‌ها برای محاسبه ETo بر اساس در دسترس بودن داده‌های ورودی و شرایط آب و هوایی خاص یک منطقه ضروری است (Raja et al., 2024). رئوف و عزیز میسر (۱۳۹۶) در پژوهشی با مدل‌های دمایی، تشعشعی و ترکیبی تبخیر و تعرق بالقوه را در ایستگاه تحقیقاتی هانگار دانشگاه محقق اردبیلی واقع در شهر اردبیل برآورد و با داده‌های حاصل از لایسیمتر زهکش دار و مدل پنمن-مونیتث-فائو مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که پراکندگی نقاط اطراف خط $y=x$ زیاد بوده، به‌طوری‌که برخی از مدل‌ها بیش برآورد و در بعضی دیگر با کم برآوردی تبخیر و تعرق بالقوه را برآورد کردند. با در نظر گرفتن شاخص‌های آماری به ترتیب مدل‌های تورک، برتی و همکاران و تراجو کوپچ مناسب‌ترین مدل‌ها در مقایسه با مدل پنمن-مونیتث-فائو بودند. لانداس^۱ و همکاران (۲۰۰۸) در تحقیقی با مدل‌های متعددی تبخیر-تعرق بالقوه در شمال اسپانیا را برآورد نمودند. ایشان نتایج به‌دست‌آمده را با مدل فائو-پنمن-مونیتث که به‌عنوان مبنا در نظر گرفته بودند مورد مقایسه قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که مدل مک کینک نسبت به سایر مدل‌ها دارای کمترین خطا بوده و در مقابل مدل هارگریوز-سامانی کمترین تطابق را با مدل فائو-پنمن-مونیتث داشت. تبخیر-تعرق بالقوه در ایالت اونتاریو کانادا به‌وسیله سن‌تلهاس^۲ و

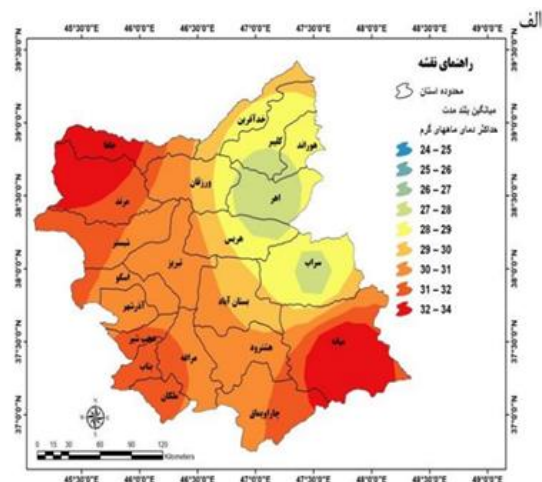
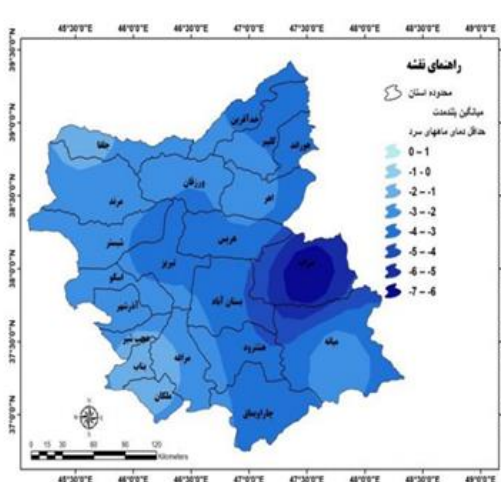
همکاران (۲۰۱۰) با چند مدل تجربی مورد محاسبه قرار گرفت. ستاده‌های حاصل را با نتایج مدل فائو-پنمن-مونیتث به‌عنوان معیار ارزیابی مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل‌های پرستلی-تیلور و هارگریوز نسبت به سایر مدل‌های بکار رفته دارای ارجحیت می‌باشند. گل ریحان و همکاران (۱۴۰۲) در منطقه اهر که جنوب جنگل‌های ارسباران واقع‌شده میزان تبخیر و تعرق مراتع آویشن، نعنای و یونجه را با استفاده از روش SEBAL محاسبه نمودند. برای این کار از ۶ تصویر ماهواره لندست ۸ استفاده نموده و نتایج به‌دست‌آمده با مدل پنمن-مونیتث مقایسه کردند. بر پایه مقایسه‌های انجام‌یافته در دوره اولیه و پایانی رشد، مقبولیت این روش را با RMSE برابر با ۰/۷۱۷، MAD برابر با ۰/۶۵۸ و ضریب تعیین ۰/۸۴ میلی‌متر در روز مورد تأیید قرار دادند. خاری و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی برای ایستگاه سینوپتیک رامهرمز تبخیر و تعرق مرجع را با مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، شبکه عصبی مصنوعی بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک (ANN+GA) و چند مدل دیگر برآورد نمودند. داده‌های به‌دست‌آمده را با نتایج حاصل از مدل استاندارد پنمن-مونیتث-فائو به‌عنوان مدل مبنا مورد مقایسه قرار دادند. نتایج بیانگر برتری مدل شبکه عصبی تلفیقی-الگوریتم ژنتیک نسبت به سایر مدل‌ها بود. همچنین ستاده‌های حاصل از سناریوهای به کار گرفته عوامل هواشناسی به‌عنوان ورودی برای مدل‌های ANN+GA و ANN نشان داد، بالاترین دقت تخمین تبخیر و تعرق بالقوه در هر دو مدل، مربوط به سناریویی با داده‌های ورودی دمای حداکثر و دمای حداقل، رطوبت نسبی حداقل، رطوبت نسبی حداکثر، ساعات آفتابی و سرعت باد بوده و کم‌ترین دقت نیز در سناریویی با تنها دو ورودی دمای حداکثر و دمای حداقل بود. طافی و همکاران (۱۴۰۰) تبخیر و تعرق بالقوه را در استان مازندران با مدل‌های دمایی، تابش، انتقال جرم و والیانتراس تخمین و با نتایج حاصل از مدل پنمن-مونیتث - فائو مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان از تخمین کم‌تر روش‌های انتقال جرم و والیانتراس نسبت به مدل پنمن-مونیتث - فائو داشت. مدل ترابرت با ضریب تبیین ۰/۸۱۲ الی ۰/۹۸۴ دقیق‌ترین و نزدیک‌ترین مدل به مدل پنمن-مونیتث - فائو تعیین گردید. آیز^۳ و همکاران (۲۰۲۱) در یک مطالعه نسبت به ارزیابی مدل‌های مختلف ML مبتنی بر شبکه‌های عصبی حافظه کوتاه‌مدت (LSTM)، رگرسیون تقویت گرادیان (GBR)، جنگل تصادفی (RF) و بردار پشتیبانی تخمین ETP با حداقل ورودی‌های آب و هوایی پرداختند. ایشان جهت ارزیابی مدل مدل فائو-پنمن-مونیتث را به‌عنوان مدل استاندارد و مبنا در نظر گرفتند. نتایج نشان داد که دقت ۹۹ درصد را می‌توان با تمام ورودی‌های اقلیمی به دست آورد، درحالی‌که دقت با داده‌های کمتر به ۸۶ درصد کاهش می‌یابد. مدل LSTM بهتر از سایر

مواد و روش‌ها

محل مورد مطالعه ایستگاه سینوپتیک میانه بود. این ایستگاه در ۴۷ درجه و ۴۲ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی در شهرستان میانه واقع شده است. ارتفاع آن از سطح دریا ۱۱۱۰ متر می‌باشد. این شهرستان، در گوشه جنوب شرقی استان آذربایجان شرقی قرار گرفته است. شهرستان میانه دورافتاده‌ترین شهر نسبت به مرکز استان بوده و شهرستان‌های هشت‌رود، بستان‌آباد و سراب در غرب و شمال آن واقع می‌باشند. شهرستان خلخال نیز در استان اردبیل همسایه شرقی شهرستان میانه به شمار می‌رود. آب‌وهوای استان آذربایجان شرقی عمدتاً سرد و خشک بوده و با توجه به تنوع توپوگرافی از اقلیم‌های متفاوتی برخوردار می‌باشد. اقلیم شهرستان میانه در قسمت میانی و جنوب شرقی آن دارای آب‌وهوای خشک و سرد بوده و در دامنه‌های پست دره قزل‌اوزن، دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد مدیترانه‌ای است. این استان از جریان‌های مرطوب دریای مدیترانه از سمت غرب و جنوب غربی متأثر شده و توده‌های هوای سرد سیبری از شمال بر اقلیم آن تأثیر می‌گذارد (راوند و همکاران ۱۴۰۱). متوسط بارندگی سالانه ۲۵۰ الی ۳۰۰ میلی‌متر و متوسط دما نیز ۱۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. متوسط دمای بلندمدت استان در دوره گرم سال بین ۲۴-۳۴ درجه سانتی‌گراد و دوره سرد سال ۰-۷ درجه سانتی‌گراد متغیر است. در شکل (۱) پهنه‌بندی متوسط دمای بلندمدت دوره گرم و سرد سال و موقعیت ایستگاه سینوپتیک میانه در استان آذربایجان شرقی ارائه شده است (پور اصغر و همکاران ۱۳۹۸). با عنایت به شکل (۱) متوسط دمای بلندمدت دوره گرم سال در شهرستان میانه در بازه ۲۹ الی ۳۴ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته که جزو شهرهای نسبتاً گرم استان به شمار می‌رود.

مدل‌های ML با تمام ترکیب‌های ورودی در هر دو ایستگاه عمل کرد. مطالعه نشان داد که حتی یک ترکیب سه پارامتری (مقادیر دما، سرعت باد و رطوبت نسبی) یا ترکیب دو پارامتری (دما و رطوبت نسبی) یا (دما و سرعت باد) نیز می‌تواند در برآورد ETP امیدوارکننده باشد. بودیان^۴ و همکاران (۲۰۲۴) تبخیر و تعرق بالقوه در حوضه رودخانه گامیبا، سنگال و کازمانس را با چند مدل تجربی برآورد نمودند. نتایج نشان داد که پس از واسنجی، مدل‌های تربت، هارگریز، هارگریز-سامانی، تراجکویچ و اودین به ترتیب نسبت به سایر مدل‌ها جایگزین بهتری جهت تخمین تبخیر و تعرق مرجع در حوضه‌های مزبور هستند. راجا^۵ و همکاران (۲۰۲۴) با مدل‌های تجربی مبتنی بر دما و تابش تبخیر و تعرق بالقوه در منطقه استوایی اوداگاماندالام تاملیل نادو، هند را برآورد و نتایج را با مشاهدات تبخیر از تشت و مدل فائو-پنمن-مونتیث ارزیابی نمودند. نتایج حاکی از آن بود که مدل‌های مبتنی بر تابش بهتر از مدل‌های مبتنی بر دما عمل کردند. این احتمالاً به دلیل رطوبت بالای منطقه مورد مطالعه در طول سال بود. همچنین مدل‌های ساده مبتنی بر دما و تابش با استفاده از حداقل اطلاعات هواشناسی برای تخمین ETo و در نتیجه یافتن کاربرد بالقوه در شیوه‌های آب کشاورزی، فرآیندهای هیدرولوژیکی و مدیریت آبیاری کافی هستند.

با توجه به آنکه مطالعه جامعی در خصوص ارزیابی عملکرد مدل‌های ترکیبی، دمایی، تابشی و رطوبتی تخمین تبخیر-تعرق بالقوه در شهرستان میانه بر پایه مدل فائو-پنمن-مونتیث انجام نشده است، لذا هدف از این تحقیق، بررسی کارایی مدل‌های مختلف برآورد تبخیر-تعرق مرجع با در نظر گرفتن مدل فائو-پنمن-مونتیث به عنوان مدل استاندارد و در نتیجه تعیین مناسب‌ترین مدل جایگزین با لحاظ به کارگیری کمترین داده در ایستگاه سینوپتیک میانه بود.



شکل ۱. نقشه متوسط دمای بلندمدت دوره گرم و سرد سال و موقعیت شهرستان میانه در استان آذربایجان شرقی

الف) دمای حداکثر در دوره گرم ب- دمای حداقل در دوره سرد سال

برای انجام این پژوهش و برآورد میزان تبخیر و تعرق مرجع از پارامترهای هواشناسی متعددی از قبیل سرعت باد، متوسط درصد ساعات آفتابی، دمای متوسط ماهانه، دمای حداکثر ماهانه، دمای حداقل ماهانه، رطوبت نسبی حداکثر ماهانه، رطوبت نسبی متوسط ماهانه، رطوبت نسبی حداقل ماهانه، فشار هوا، تشعشع برون زمینی ایستگاه سینوپتیک میانه طی سال‌های آماری ۱۹۸۹ الی ۲۰۲۱ استفاده شد. جهت محاسبه تبخیر و تعرق بالقوه از زبان برنامه‌نویسی ویژوال بیسیک استفاده به عمل آمد.

مدل‌های استفاده‌شده در تحقیق جهت برآورد ETP

در این تحقیق از چهار دسته مدل به شرح:

- (۱) مدل رطوبتی ایوانف (Ivanof, 1954)
- (۲) پنمن-رایت (Penman-Whith, 1982) و پنمن-آلن-پروت (Peman-Allen-Pruitt, 1991) به‌عنوان نماینده مدل‌های ترکیبی انتقال جرم و توازن انرژی
- (۳) هارگریوز (Hargreaves, 1989) و لیناکر (Linacre, 1977) به‌عنوان نماینده مدل‌های دمایی
- (۴) دورن‌بوس-پروت (Doorenbos – Pruitt, 1977)، جنسن-هیز (Jensen and Haise, 1963) به‌عنوان نماینده مدل‌های تابشی
- (۵) جهت تخمین ETP ایستگاه سینوپتیک میانه استفاده به عمل آمد.

مدل استاندارد و مبنا برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها در تحقیق حاضر از مدل فائو-پنمن-مونتیث به‌عنوان مدل مبنا و استاندارد برای ارزیابی سایر مدل‌های محاسبه ETP استفاده شد. روابط این مدل‌ها به‌طور خلاصه در جدول (۱) ارائه‌شده است.

شاخص‌های آماری برای تعیین مناسب‌ترین مدل

مقادیر تبخیر و تعرق بالقوه حاصل از مدل‌های فوق تحت پنج شاخص آماری RMSE (جذر میانگین مربعات خطا)، MBE (میانگین خطای متوسط)، MAE (میانگین خطای مطلق)، R^2 (ضریب تبیین) و t (معیار جاکووی‌دس (Jacovides, 1997)) با برآوردهای حاصل از مدل استاندارد فائو-پنمن-مونتیث مقایسه شدند.

$$R^2 = \left(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right)^{-1} \quad (۱)$$

$$RMSE = \left(\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n \right)^{1/2} \quad (۲)$$

$$MBE = \left(\sum_{i=1}^n (P_i - O_i) / n \right) \quad (۳)$$

$$MAE = \left(\sum_{i=1}^n |P_i - O_i| / n \right) \quad (۴)$$

$$t = \left(\frac{MBE^2 (n-1)}{(RMSE^2) - (MBE^2)} \right)^{1/2} \quad (۵)$$

جدول ۱. روابط مدل‌های بکار رفته در تحقیق

مدل	رابطه
مدل مبنا (فائو-پنمن-مونتیث)	$ETP = 1.066 - 0.001103(U_d)^2 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times R_s \right) - 0.0002RH_{average} \cdot U_d - 0.0000315(RH_{average})^2 + 0.045U_d - 0.00128RH_{average}$
دورن‌بوس-پروت	$ETP = 1.066 - 0.001103(U_d)^2 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times R_s \right) - 0.0002RH_{average} \cdot U_d - 0.0000315(RH_{average})^2 + 0.045U_d - 0.00128RH_{average}$
جنسن-هیز	$ETP = \left((38 - 2 \frac{EL}{305}) + 7.3 \frac{50}{e_2 - e_1} \right)^{-1} (T_a - 2.5 - 0.14(e_2 - e_1) - \frac{EL}{550}) R_s$
پنمن-رایت	$ETP = (R_n - G) \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} + \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \left(\frac{153.6}{L} \right) (e_s - e_a)(a_w + b_w U_{2m})$
آلن-پنمن-پروت	$ETP = C \left[(R_n - G) \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} + f(u) \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \Delta e \right], C = f \left(\frac{U_{day}}{U_{night}}, RH_{max}, R_s, U_{day} \right)$
ایوانف	$ETP = 0.000058(100 - RH)(25 + T)^2$
هارگریوز	$ETP = 0.0023R_a(17.8 + TC)IR^{0.50}$
لیناکر	$ETP = \frac{[T_C + 15(T_A - T_D)]}{80 - T_A}, T_C = \frac{700(0.006EL + T_A)}{100 - L}$

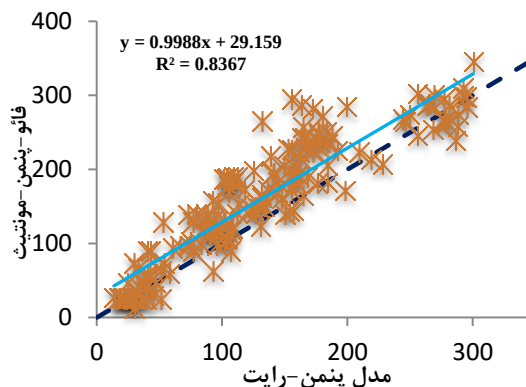
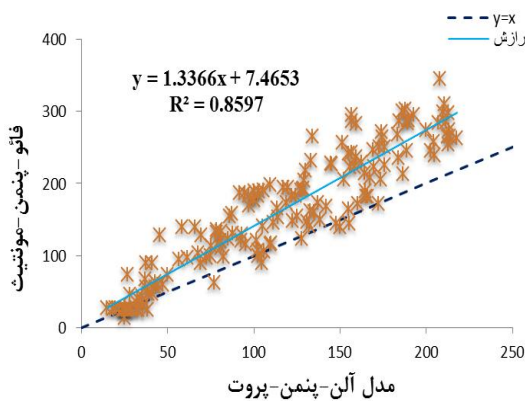
برنامه‌نویسی و ویژوال بیسیک برآورد شدند. در شکل‌های (۲) مقادیر ETP های حاصل از مدل‌های پنمن-رایت و آلن-پنمن-پروت با نتایج به‌دست‌آمده از مدل استاندارد فائو-پنمن-مونتیث (F.P.M) مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

به‌طوری‌که از نمودارهای شکل (۲) مشخص است ضریب تبیین مدل آلن-پنمن-پروت با مقدار ۰/۸۵۹ دارای همخوانی نسبتاً خوبی نسبت به مدل پنمن-رایت می‌باشد. نمودار مربوط به مدل آلن-پنمن-پروت نشان می‌دهد که در اکثر موارد نقاط حاصله بالای خط $y=x$ (یک‌به‌یک) واقع شده‌اند که نشان از کم برآوردی این مدل نسبت به مدل مبنا (فائو-پنمن-مونتیث) دارد. در مدل پنمن-رایت هم کم برآوردی نسبت به مدل مبنا در اکثر موارد مشهود است ولی کم برآوردی آن در مقایسه با مدل آلن-پنمن-پروت دارای شدت کمتری است. در شکل (۳) مقادیر ETP های حاصل از مدل‌های تابشی جنسن هیز و دورنبوس-پروت با ستاده های حاصل از مدل F.P.M مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

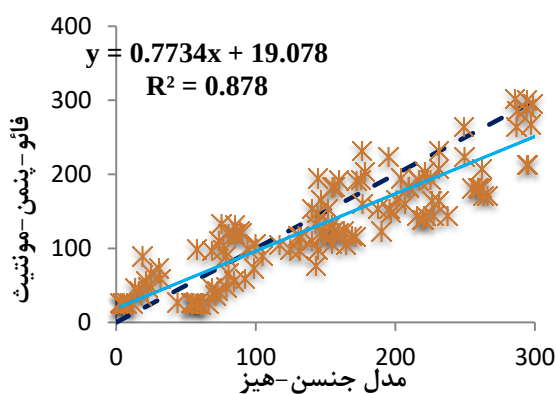
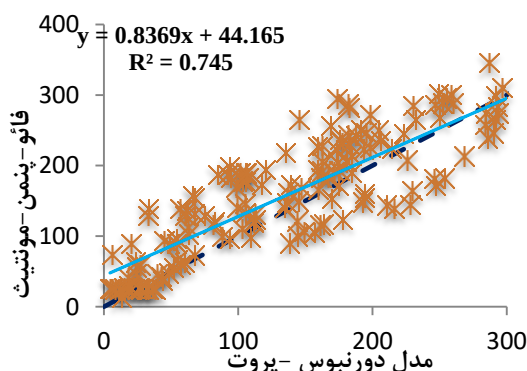
در این روابط $\bar{O}$ میانگین ETP حاصل از مدل استاندارد، n تعداد مشاهدات، O و P به ترتیب مقادیر ETP حاصل از مدل استاندارد و محاسباتی از روش‌های دیگر می‌باشند. کوچک بودن مقادیر RMSE و MAE دلالت بر دقت بالای مدل دارد. مقادیر مثبت MBE بیانگر بیشتر بودن مقادیر ETP محاسباتی حاصل از مدل‌های مختلف از مقادیر ETP حاصل از مدل استاندارد می‌باشد. همچنین مقادیر منفی MBE نشانگر آن است که ETP حاصل از مدل استاندارد دارای مقادیر بزرگ‌تری نسبت به ETP محاسباتی حاصل از مدل‌های مختلف است. مقدار t کمتر به مفهوم کمتر بودن اختلاف بین مقادیر ETP محاسباتی حاصل از مدل‌های مختلف و مقادیر ETP حاصل از مدل استاندارد بوده و آن مدل کارایی بهتری داشته است (Ghamarnia & Soultani, 2019).

نتایج و بحث

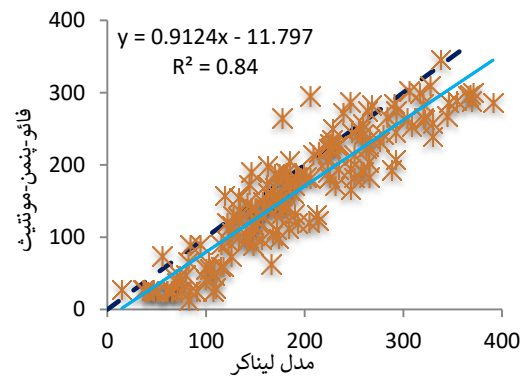
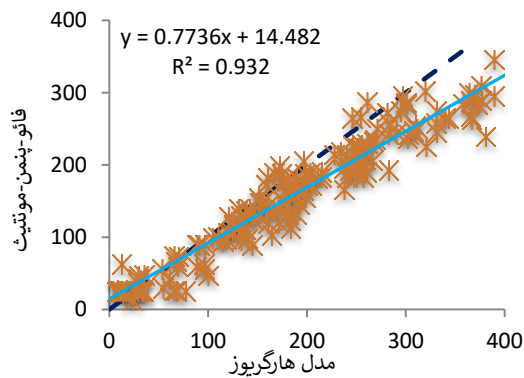
مقادیر تبخیر تعرق پتانسیل ماهانه با مدل‌های ترکیبی (پنمن-رایت، آلن-پنمن-پروت)، دمایی (لیناکر، هارگریوز)، تابشی (جنسن هیز، دورنبوس-پروت) و رطوبتی (ایوانف در محیط



شکل ۲. مقایسه تبخیر و تعرق بالقوه برآورد شده از مدل‌های پنمن-رایت و آلن-پنمن-پروت با مدل استاندارد

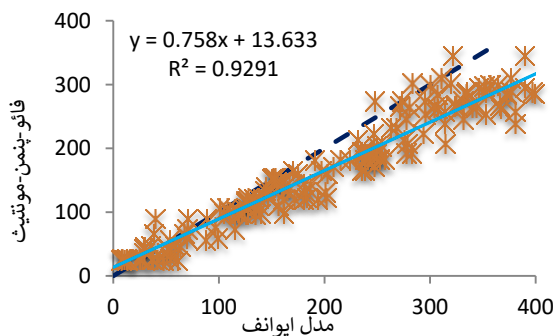


شکل ۳. مقایسه تبخیر و تعرق بالقوه برآورد شده از مدل‌های جنسن هیز و دورنبوس-پروت با مدل استاندارد



شکل ۴. مقایسه تبخیر و تعرق بالقوه برآورد شده از مدل‌های دمایی لیناگر و هارگریوز با مدل استاندارد

مقایسه مقادیر ETP های حاصل از مدل رطوبتی ایوانف با مقادیر منتج از مدل F.P.M ارائه شده است.

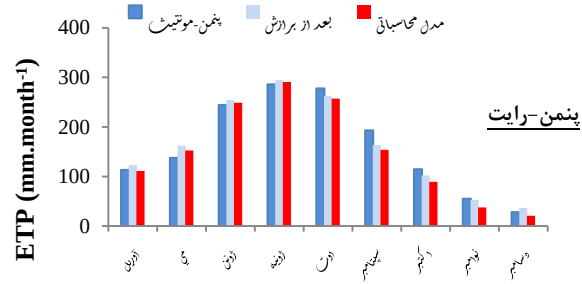
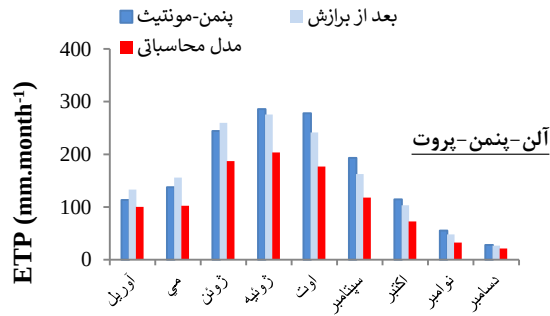


شکل ۵. مقایسه تبخیر و تعرق بالقوه برآورد شده از مدل رطوبتی ایوانف با مدل استاندارد

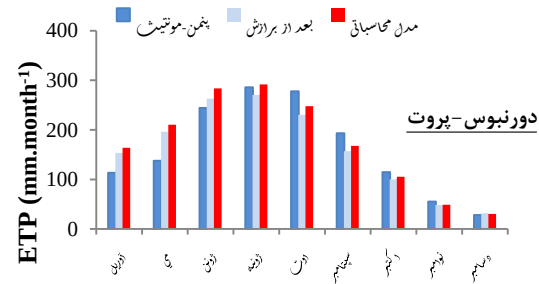
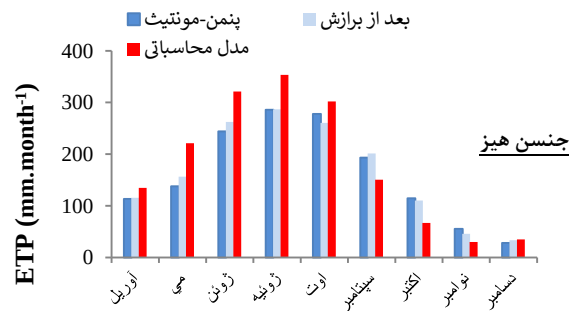
همخوانی برآوردهای ETP حاصل از مدل رطوبتی ایوانف با مقادیر حاصل از مدل استاندارد مطابق نمودار شکل (۵) با ضریب تبیین بالای ۰/۹۲۹ مشهود است. علی‌رغم آنکه اکثر نقاط زیرخط $y=x$ قرار گرفته‌اند و نسبت به مقادیر مدل استاندارد بیش برآوردی دارند ولی نقاط دارای پراکندگی کمی بوده و فاصله آن‌ها از خط مزبور چندان زیاد نیست. این مدل با توجه به ضریب تبیین بالا و عدم پراکندگی نقاط می‌تواند بعد از اعمال ضرایب رگرسیونی، جایگزین مناسبی برای مدل فائو-پنمن-مونته‌یت که داده‌های زیادی برای محاسبه تبخیر و تعرق بالقوه لازم دارد باشد. در اشکال (۶) الی (۹) مقایسه بین مقادیر متوسط تبخیر و تعرق بالقوه ماهانه حاصل از مدل‌های ترکیبی، دمایی، تابشی و رطوبتی قبل و پس از اعمال ضرایب رگرسیونی با مقادیر حاصل از مدل فائو-پنمن-مونته‌یت ارائه شده است.

در مدل‌های بکار رفته از گروه تابشی مدل جنسن هیز با ضریب تبیین ۰/۸۷۸ نسبت به مدل دورنبوس-پروت دارای همخوانی قابل‌قبول‌تری با مدل استاندارد فائو-پنمن-مونته‌یت است. طبق نمودار مدل جنسن-هیز اکثر نقاط زیرخط $y=x$ (شیب ۴۵ درجه) قرار گرفته‌اند. قرارگیری این نقاط در زیرخط مزبور حکایت از بیش برآوردی مقادیر تبخیر و تعرق بالقوه از مدل جنسن-هیز نسبت به مدل استاندارد دارد. پراکندگی نقاط در نمودار مدل دورنبوس-پروت نسبت به مدل جنسن-هیز بیشتر بوده که باعث کم بودن ضریب تبیین این مدل نسبت به مدل جنسن-هیز شده است. مقایسه مقادیر ETP های حاصل از مدل‌های دمایی لیناگر و هارگریوز با نتایج حاصل از مدل F.P.M در شکل (۴) ارائه شده است.

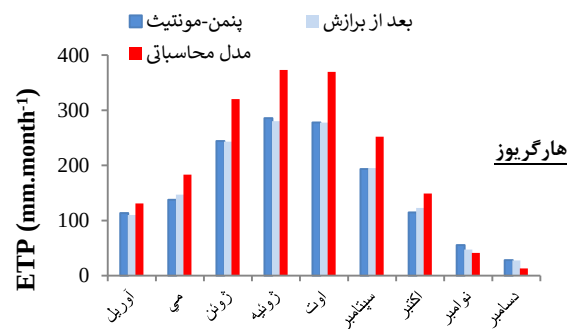
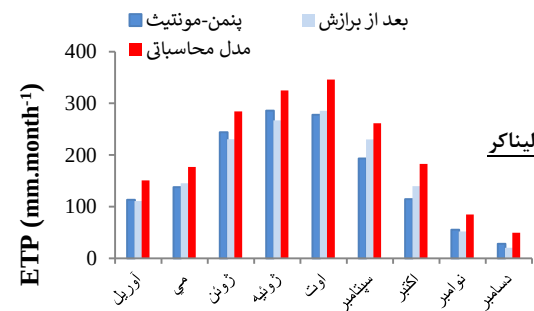
همان‌گونه که از نمودارهای شکل (۴) مشخص است پراکندگی نقاط در مدل‌های دمایی بخصوص مدل هارگریوز کمتر می‌باشد. ضریب تبیین مدل هارگریوز با مقدار ۰/۹۳۲ دلالت بر همخوانی مقادیر تبخیر و تعرق بالقوه محاسبه شده از این مدل با مدل استاندارد داشته و در بین تمامی مدل‌های بکار رفته بالاترین ضریب تبیین را داراست. در هر دو مدل بخصوص در مدل لیناگر اکثر نقاط زیرخط $y=x$ قرار گرفته‌اند که نشان از بیش برآوردی میزان تبخیر و تعرق بالقوه این مدل‌ها نسبت به برآوردهای مدل مبنا دارد. باوجود این از آنجایی که پراکندگی نقاط در مدل هارگریوز کم بوده و اکثر نقاط نزدیک خط نیمساز صفحه واقع شده‌اند می‌توان گفت علاوه بر همخوانی، تطابق این مدل با مدل استاندارد بالا است. مدل هارگریوز را با توجه به همخوانی و تطابق بالای آن با ستاده‌های منتج از مدل استاندارد فائو-پنمن-مونته‌یت می‌توان گزینه مناسبی برای محاسبه تبخیر و تعرق بالقوه منطقه در نظر گرفت. در شکل (۵)



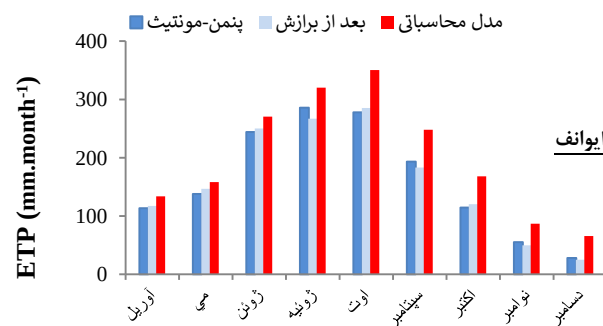
شکل ۶. مقایسه تبخیر و تعرق بالقوه حاصل از مدل‌های ترکیبی قبل و پس از به‌کارگیری ضرایب رگرسیونی با مدل استاندارد



شکل ۷. مقایسه تبخیر و تعرق بالقوه حاصل از مدل‌های تابشی قبل و پس از به‌کارگیری ضرایب رگرسیونی با مدل استاندارد



شکل ۸. مقایسه تبخیر و تعرق بالقوه حاصل از مدل‌های دمایی قبل و پس از به‌کارگیری ضرایب رگرسیونی با مدل استاندارد



شکل ۹. مقایسه تبخیر و تعرق بالقوه حاصل از مدل قبل و پس از به‌کارگیری ضرایب رگرسیونی با مدل استاندارد

شاخص‌های آماری $RMSE$, MAE , MBE , R , R/t و معیار جاکوویدس برای ارزیابی عملکرد مدل‌های بکار رفته برآورد شدند. مقادیر این شاخص‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

مطابق جدول (۲) نتایج زیر قابل ارائه می باشند:

الف- مدل های ترکیبی بیشترین مقادیر متوسط شاخص های آماری MAE , $RMSE$, MBE و معیار جاکوویدس را داشتند که نشان دهنده زیاد بودن خطای این مدل ها نسبت به سایر مدل های بکاررفته است. بطوریکه مدل ترکیبی آلن-پنمن-پروت دارای کمترین مقدار شاخص R/t با مقدار 0.059 بوده و متوسط آن نیز 0.071 است. هر چه مقدار این شاخص زیاد باشد دال بر همخوانی و تطابق بالای آن مدل با نتایج مدل استاندارد خواهد بود.

ب- علی رغم مقادیر بالای شاخص های خطای MAE , $RMSE$ مدل دورنبوس-پروت مقدار شاخص MBE این مدل کمتر برآورد شده است. دلیل آن را می توان در پراکندگی نقاط در بالا و پائین خط $y=x$ در مقایسه برآورد های ETP این مدل با مدل استاندارد عنوان نمود که با وجود ضریب همبستگی نه چندان زیاد باعث افزایش شاخص R/t به میزان 0.142 شده است.

ج- مدل های دمایی کمترین مقادیر متوسط شاخص های MAE , $RMSE$ و همچنین بالاترین ضریب همبستگی را در بین گروه های بکار رفته دارا بوده که حکایت از هم خوانی و تطابق بهتر این مدل ها با مدل مینا دارد. بطوریکه مدل هارگریوز با ضریب همبستگی 0.965 و شاخص R/t معادل با 0.16 بالاترین مقدار را در بین تمامی مدل ها داشت.

بر اساس اشکال (۶) الی (۹) که در آن‌ها مقادیر متوسط تبخیر و تعرق بالقوه ماهانه حاصل از مدل‌های ترکیبی، دمایی، تابشی و رطوبتی قبل و پس از اعمال ضرایب رگرسیونی با مقادیر حاصل از مدل فائو-پنمن-مونتیث مورد مقایسه قرار گرفته است می‌توان به نتایج زیر اشاره نمود:

الف- در مدل‌های ترکیبی در کلیه ماه‌ها مدل آلن-پنمن-پروت مقادیر ETP را از مدل استاندارد فائو-پنمن-مونتیث کمتر برآورد نموده است. بعد از اعمال ضرایب رگرسیونی مقادیر حاصل به ستاده های مدل مینا نزدیک شده و از خطای آن کاسته شده است. در مدل پنمن-رایت اختلاف مقادیر ETP با مدل استاندارد از شدت کمی برخوردار است. در بعضی ماه‌ها مثل می، ژوئن و ژوئیه بیش برآوردی و در بقیه ماه‌ها کم برآوردی نسبت به مدل استاندارد داشت.

ب- در مدل جنسن-هیز از آوریل تا اوت ETP های برآوردی دارای مقادیر بالایی نسبت به مدل استاندارد بوده و در بقیه ماه‌ها یعنی سپتامبر تا نوامبر حالت عکس حاکم می‌باشد. برآورد های ETP مدل دورنبوس-پروت نیز برای بعضی ماه‌ها مثل آوریل تا ژوئیه و دسامبر زیادتر از مدل استاندارد بوده و برای سایر ماه‌ها دارای تخمین‌های کمتری نسبت به مدل مینا است. هر دو مدل جنسن-هیز و دورنبوس-پروت که جزوه مدل‌های تابشی می‌باشند، بعد از در نظر گرفتن ضرایب رگرسیونی عملکردشان به میزان قابل توجهی بهبود یافته است.

ج- تطابق ETP های به دست آمده از مدل‌های هارگریوز و ایوانف بعد از به کارگیری و اعمال ضرایب رگرسیونی با نتایج حاصل از مدل استاندارد از سایر مدل‌ها بیشتر می‌باشد.

جدول ۲. نتایج شاخص‌های آماری برای ارزیابی عملکرد مدل‌های بکار رفته

مدل	MBE (mm.mon ⁻¹)	MAE (mm.mon ⁻¹)	RMSE (mm.mon ⁻¹)	اختلاف میانگین	R ²	R	معیار جاکوویدس (t)	R/t
تابشی								
دورنبوس-پروت	21.47	39.98	49.64	21.96	0.745	0.863	6.08	0.142
جنسن هیز	-23.36	39.12	46.46	-24.08	0.878	0.937	7.38	0.127
میانگین	-0.945	39.55	48.05	-1.06	0.811	0.9	6.73	0.134
ترکیبی								
پنمن-رایت	29.00	34.18	44.67	28.93	0.836	0.914	10.82	0.084
آلن-پنمن-پروت	46.02	47.48	59.12	46.91	0.859	0.927	15.73	0.059
میانگین	37.51	40.83	51.89	37.92	0.847	0.920	13.27	0.071
دمایی								
لیناکر	-28.35	35.92	44.60	-28.32	0.840	0.917	10.44	0.089
هارگریوز	-18.77	33.44	43.61	-19.03	0.932	0.965	6.05	0.16
میانگین	-28.31	34.68	44.105	-27.67	0.886	0.941	10.62	0.124
رطوبتی								
ایوانف	-34.19	39.04	50.40	0.963	0.929	0.963	11.71	0.082

جدول ۳. نتایج شاخص های آماری برای ارزیابی عملکرد مدل های بکار رفته بعد از اعمال ضرایب رگرسیونی

مدل	MBE (mm.mon ⁻¹)	MAE (mm.mon ⁻¹)	RMSE (mm.mon ⁻¹)	اختلاف میانگین	معیار جاکوویس (t)	R/t
تابشی						
دورنبوس-پروت	1.52	35.65	42.48	1.54	0.45	1.89
جنسن هیز	0.03	26.64	31.57	1.32	0.01	70.62
میانگین	0.77	31.145	37.02	1.43	0.23	36.25
ترکیبی						
پنمن-رایت	-0.14	27.21	33.97	-0.25	0.05	16.05
آلن-پنمن-پروت	0.520	25.73	31.492	0.52	0.21	4.41
میانگین	0.19	26.47	32.731	0.135	0.13	10.23
دمایی						
لیناگر	0.45	26.90	33.62	0.53	0.17	5.31
هارگریوز	-0.26	17.76	23.32	-0.26	0.14	6.73
میانگین	0.09	22.33	28.47	0.13	0.15	6.02
رطوبتی						
ایوانف	0.001	18.44	24.22	0.001	0.0005	1813

ضرورت دارد قبل از کاربرد آن ها در هر منطقه کارایی و عملکرد آن ها مورد بررسی واقع شود، لذا در این تحقیق برای ایستگاه سینوپتیک میانه ارزیابی عملکرد هفت مدل تخمین تبخیر و تعرق بالقوه انجام شد. نتایج بدست آمده را می توان در بند های زیر خلاصه نمود:

۱) مدل های دمایی کمترین مقادیر متوسط شاخص های آماری خطای MAE, RMSE را دارا بوده و بیشترین ضریب تبیین در بین گروه های بکار رفته مربوط به این مدل ها بود. مدل دمایی هارگریوز با ضریب همبستگی ۰/۹۶۵ و شاخص R/t معادل با ۰/۱۶ بالاترین مقدار را در بین تمامی مدل ها داشت. این مقادیر گویای هم خوانی و تطابق بهتر این مدل با نتایج حاصل از مدل استاندارد فائو-پنمن-مونتیث می باشد. لذا می توان مدل هارگریوز را به خصوص بعد از لحاظ ضرایب رگرسیونی به عنوان جایگزین مناسب برای مدل فائو-پنمن-مونتیث برای محاسبه ETP ایستگاه مزبور در نظر گرفت.

۲) علی رغم آنکه مدل رطوبتی ایوانف دارای شاخص های خطای MAE, RMSE, MBE و معیار جاکوویس بالایی بود، ولی با داشتن ضریب همبستگی ۰/۹۶۳ و به دنبال آن هم خوانی بالا با ستاده های مدل استاندارد، این مدل بعد از در نظر گرفتن ضرایب رگرسیونی برای تخمین ETP ایستگاه سینوپتیک میانه قابل پیشنهاد است. لازم به ذکر است که برآورد ETP با این مدل که تنها به دو عامل هواشناسی وابسته است، بسیار ساده می باشد.

۳) بیشترین مقادیر متوسط شاخص های خطای آماری MAE, RMSE, MBE و معیار جاکوویس مربوط به مدل های ترکیبی بودند.

د-مدل رطوبتی ایوانف با وجود بالا بودن شاخص های خطای MAE, RMSE, MBE و معیار جاکوویس، بعد از مدل هارگریوز با اختلاف خیلی اندک دارای بیشترین ضریب همبستگی معادل با ۰/۹۶۳ می باشد. این مقدار ضریب همبستگی، نشانگر هم خوانی بالای این مدل که برای محاسبه ETP فقط از به دو پارامتر هواشناسی نیاز دارد، است.

مقادیر ETP برای تمامی مدل ها بعد از اعمال ضرایب رگرسیونی در آنها مجدداً محاسبه شدند. برای ارزیابی عملکرد مدل های بعد از اعمال ضرایب رگرسیونی، مقادیر شاخص های آماری MAE, RMSE, MBE, R/t و معیار جاکوویس برآورد گردیدند که نتایج در جدول (۳) ارائه شده است.

بطوریکه از جدول (۳) مشهود است شاخص های آماری خطای MAE, RMSE, MBE معیار جاکوویس و اختلاف میانگین تمامی مدل های بکار رفته بعد از در نظر گرفتن ضرایب رگرسیونی بطور محسوسی کاهش یافته است. کاهش شاخص های مزبور نشانگر تاثیر مثبت اعمال ضرایب رگرسیونی در مدل ها در افزایش کارایی و عملکرد آنها است. مدل های هارگریوز و ایوانف به ترتیب دارای کمترین مقدار شاخص های آماری MAE, RMSE, MBE هستند. علی رغم آنکه مقدار R/t مدل جنسن هیز نسبت به اکثر مدل ها بالاست ولی دیگر شاخص های آماری آن مثل MAE, RMSE, MBE حداقل نیستند. دلیل این امر به مقدار شاخص خطای MBE (۰/۰۳ میلی متر در ماه) ارتباط پیدا می کند.

نتیجه گیری:

از آنجایی که هر کدام از مدل های تجربی برآورد تبخیر و تعرق بالقوه تحت شرایط اقلیمی و محلی به خصوصی ابداع شده اند و

۴) پس از در نظر گرفتن و اعمال ضرایب رگرسیونی در کلیه مدل‌ها مقادیر شاخص‌های خطا بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافتند که نشان از تاثیر مثبت آن در بهبود و افزایش کارایی و عملکرد مدل‌ها بود.

Reference:

- 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-24 reference evapotranspiration factors. J. Irrig. Drain. 117(5):758-774.
- Ayaz, A., Maddu, R., Kumar Singh, S., Shaik, R. (2021). Estimation of reference evapotranspiration using machine learning models with limited data. AIMS Geosciences, 7(3): 268–290.
- Bodian, A., Malick Ndiaye, P., Bassirou Diop, S., Diop, L., Dezetter, A., Ogilvie, A., Djama, K. (2024). Evaluation and calibration of alternative methods for estimating reference evapotranspiration in the main hydrosystems of Senegal: Senegal, Gambia and Casamance River Basins. Proc. IAHS, 385, 415–421.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O. (1984). Crop water requirements. FAO. Irrigation and drainage paper, 4, pp:124
- Ghamarnia, H., Soultani, N. (2019). Evaluating the Efficiency of Empirical Estimation of Reference Evapotranspiration (Pan Based Method) in Different Climate Conditions of Iran. Iran Water Resources Research, 14(4), 174-193. [in Persian]
- Golrehyani, J., Amininia, K., Valizadeh Kamran, K., (2023). Estimation of Actual Evapotranspiration of Pasture Plants using Case Study: Ahar County). Journal of Geography and Regional Development, 21(3), 169-197. [in Persian]
- Hargreaves, G.H. (1989). Accuracy of estimated reference crop evapotranspiration. J. Irrig. Drain, 115(6), 1000-1008.
- Ivanof, N.N. (1954) The determination of potential evapotranspiration, Izvest. Vsesoyuznogo. Geograf. Obs. 86(2):189-201.
- 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.
- Jacovides, C.P. (1997) Reply to comment on Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration models, J. Agricultural water management. 3:95-9.
- Khari, D., Egdemezhad, A., Ebrahimipak, N. (2023). Comparison of artificial intelligence models and experimental models in estimating reference evapotranspiration (Case study: Ramhormoz synoptic station). Water and Soil Management and Modeling, 3(2), 112-124. [in Persian]
- Landeras, G., Ortiz-Barredo, A., López, J. J. (2008). Comparison of artificial neural network models and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the Basque Country (Northern Spain). Agricultural water management, 95(5), 553-565.
- Linacre, E.T. (1977). A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. Agricultural Meteorology, 18(6): 409-424.
- Pourasghar, F., Eslahi, M., Akbarzadeh, Y. (2020). Studying of the extreme temperature events in East Azerbaijan for 1388-1428. Journal of Climatological Research, 12(48). 143-156. [in Persian]
- Raja, P., Sona, F., Surendran, U., Srinivas, C.V., Kannan, K., Madhu, M., Mahesh, P., Annepu, S. K., Ahmed, M., Chandrasekar, K., Suguna, R.A., Kumar, V., Jagadesh, M. (2024). Performance evaluation of different empirical models for reference evapotranspiration estimation over Udhagamandalam, The Nilgiris, India. Nature portfolio, 14(1), 155-171.
- Raoof, R. & Azizi Mobaser, J. (2018). Evaluation of Eighteen Reference Evapotranspiration Models under the Ardabil Climate Condition. Journal of Soil and Water Conservation Research, 24(6), 227-241. [in Persian]
- Ravand, A., Shahriar Khalidi, S., Hassanabadi, D. (2022). Predicting the effects of climate change on the comfort climate of the city of Miyane using climate models (SDSM). Applied research in geographical sciences, 21(63), 251-270. [in Persian]
- Sentelhas, P. C., Gillespie, T. J., Santos, E. A. (2010). Evaluation of FAO Penman–Monteith 22 and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. Agricultural Water Management, 97(5), 635-644.
- Song, X., Lu, F., Xiao, W., Zhu, K., Zhou, Y. Xie, Z. (2019). Performance of 12 reference evapotranspiration estimation methods compared with the Penman–Monteith method and the potential influences in northeast China. Meteorological Applications, 26(1), 83-96.
- Tafi, S., Peyghan, K., Bagheri Khaneghahi, M., Salehipour Bavarsad, T., Soltani mohamadi, A. (2021). Evaluation of fourteen methods of estimation reference evapotranspiration (Case study: Mazandaran Province). Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 15(3), 510-520. [in Persian]
- Writh, J.L. (1982). New evapotranspiration crop coefficients. J. Irrig. Drain., 108(1), 57-77.

یادداشت‌ها

- ¹ Landeras
- ² Sentelhas
- ³ Ayaz
- ⁴ Bodian
- ⁵ Raja