

کاربرد رهیافت ترکیب موازی در تصحیح روش‌های تعیین تبخیرتعرق پتانسیل بر مبنای اطلاعات مکانی و هواشناسی

لاله پرویز^{۱*}، خدیجه خانی زنگبار^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۳

چکیده

تدقیق برآوردهای تبخیرتعرق پتانسیل با روشی کارآمد به دلیل اهمیت آن در مطالعات بیلان آبی، تأمین نیاز آبی گیاهان و برنامه‌ریزی‌های مدیریتی در کشاورزی، امری ضروری است. بر این اساس هدف از پژوهش حاضر، اصلاح مقادیر تبخیرتعرق با روش‌های هارگریوز-سامانی، بلانی-کریدل ایوانف و تورنت وایت در مقیاس سالانه با استفاده از اطلاعات مختصات مکانی و داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های رامسر، کرمانشاه، همدان، سمنان، مشهد، شیراز، اردبیل، ارومیه، زنجان، یزد و رشت بوده است. روش فائو-پنمن-مانتیت به عنوان روش مبنای مقایسات در نظر گرفته شد. پایه روش‌های تصحیح براساس رگرسیون (ساده و بردار پشتیبان)، نسبتی و ساختار ترکیب موازی بود. نوع اطلاعات مکانی و هواشناسی نقش مهمی در افزایش دقت معادلات اصلاحی داشت. به عنوان نمونه، میزان واریانس خطاها در روش ایوانف اصلی با تمام داده‌ها نسبت به معادله‌ی اصلاحی رگرسیونی با حذف مولفه باد ۳۸/۱۸ درصد بیشتر بود. روش اصلاحی رگرسیون در برابر روش نسبتی دارای عملکرد بهتری بود، به طوری که میزان افزایش متوسط شاخص ویلموت برای تمامی حالت‌های ورودی از روش نسبتی به رگرسیون در روش تورنت وایت، بلانی-کریدل، ایوانف و هارگریوز-سامانی به ترتیب برابر با ۴۲/۶۷، ۵/۴۵، ۲۵ و ۳ درصد برآورد شد. رهیافت ترکیب موازی در تمامی روش‌ها باعث کاهش خطا در تعیین تبخیرتعرق نسلی شد و گزینه نهایی شامل ترکیب موازی حالت‌های بهینه رگرسیون بردار پشتیبان و رگرسیون ساده دقت معنی داری داشت. در پتا مجموع نتایج نشان داد که روش‌های تورنت وایت، بلانی-کریدل و ایوانف دارای کم برآورد و هارگریوز-سامانی دارای بیش برآورد هستند. رهیافت روش اصلاحی در افزایش دقت معادلات تبخیرتعرق پتانسیل و در نهایت برنامه‌ریزی‌های نیاز آبی براساس اطلاعات موجود دارای اهمیت و قابل توصیه است.

واژه‌های کلیدی: مختصات مکانی، اصلاحی، نسبتی، ترکیب موازی

مقدمه

بخش کشاورزی در سال‌های اخیر با چالش‌هایی برای توسعه و اعمال شیوه‌های پایدار جهت بهینه‌سازی استفاده از آب برای آبیاری مواجه است. این الزامات با توجه به وقوع چرخه‌های لانینا و النینو که به طور قابل توجهی عرضه آب (بارش) را برای کشاورزی کاهش می‌دهد، دارای

ارزش قابل توجهی است. جهت بهینه‌سازی و استفاده کارآمد از آب آبیاری باید روش‌هایی برای برآورد آب مصرفی محصولات کشاورزی اتخاذ شود. در این راستا تبخیرتعرق پتانسیل نقش اساسی دارد، زیرا که اثرات اقلیمی بر تقاضای محصول را در نظر می‌گیرد و نقش کلیدی در برنامه‌ریزی آبیاری دارد (Morales-Salinas et al., 2017). برنامه‌ریزی صحیح آبیاری یکی از راه‌های کاهش تلفات آب در مزارع است که مبنای آن برآورد دقیق نیاز آبی گیاهان می‌باشد. تبخیرتعرق یکی از اجزای اصلی چرخه هیدرولوژیکی است و تعیین دقیق آن در مطالعات بیلان آبی و مدیریت منابع آب اهمیت بالایی

^۱ دانشیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز

(* نویسنده مسئول: laleh_parviz@yahoo.com)

^۲ دانش آموخته کارشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز

نحوه ارجاع مقاله:

پرویز، ل.، خانی زنگبار، خ. ۱۴۰۴. کاربرد رهیافت ترکیب موازی در تصحیح روش‌های تعیین تبخیرتعرق پتانسیل بر مبنای اطلاعات مکانی و هواشناسی. نشریه هواشناسی کشاورزی، ۱۳(۲)، ۶۱-۷۳. DOI: 10.22125/agmj.2025.465758.1170

Parviz, L., Khani Zangbar, Kh. 2026. Application of parallel hybrid approach in correction of potential evapotranspiration estimation methods based on spatial and meteorological information. Journal of Agricultural Meteorology, 13(2), 61-73. DOI: 10.22125/agmj.2025.465758.1170

دارد. همچنین از داده‌های تبخیرتغرق می‌توان در ارزیابی دوره‌های خشک در مقیاس منطقه‌ای قاره‌ای و جهانی نیز استفاده کرد. برآورد میزان تبخیرتغرق پتانسیل یکی از موارد بسیار مهم در برنامه‌ریزی آبیاری، تعیین بودجه آب، برنامه‌ریزی امور کشاورزی و مدیریت یکپارچه سیستم‌های کشاورزی محسوب می‌شود (Khashei Siuki et al., 2017). روش‌های تعیین تبخیرتغرق را می‌توان در دو دسته مستقیم (به عنوان نمونه لایسیمتر) و غیرمستقیم (معادلات تجربی) در نظر گرفت. روش‌های غیرمستقیم به دلیل هزینه احداث اولیه لایسیمتر در منطقه وسیع از مقبولیت بالایی برخوردار هستند (Alizadeh, 2001). روش هارگریوز-سامانی با داده‌های ایستگاه هواشناسی گرگان و با ضریب تصحیح اصلاح شد که این ضریب تابعی از داده‌های هواشناسی تعریف شد. در ابتدا با داده‌های موجود معادلات استخراجی بهینه‌سازی شدند و سپس مرحله به مرحله عواملی که تأثیر کمی داشتند حذف شدند و با داده‌های باقی‌مانده، معادلات جدید بدست آمد. معادله منتخب شامل متوسط و بیشینه دما، بیشینه، کمینه و متوسط رطوبت نسبی بود (et Sharifan al., 2012). ضریب تصحیح روش هارگریوز-سامانی براساس اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی استان خراسان رضوی تعیین شد. در این حالت معادلات مختلف با استفاده از هفت معیار ارزیابی رتبه‌بندی شدند و در نهایت بهترین معادله برای هر ایستگاه استخراج شد. عوامل دخیل در معادلات اصلاحی شامل مقادیر مطلق پارامترها مانند دمای کمینه، بیشینه، میانگین رطوبت نسبی، بیشینه رطوبت نسبی و ترکیبات بدون بعد مانند نسبت کمینه رطوبت نسبی به میانگین رطوبت نسبی، بیشینه رطوبت نسبی به میانگین رطوبت نسبی بود (Ghahraman et al., 2014). کمبود ایستگاه‌های هواشناسی در مناطق مرتفع به عنوان تهدیدی در گردآوری اطلاعات و آمار می‌باشد. بنابراین در این مناطق نیاز به مدل‌هایی با تعداد داده کمتر است. با داده‌های ۲۸ ایستگاه هواشناسی که دارای ارتفاع بیشتر از ۲۰۰۰ متر بودند، مدل هارگریوز-سامانی براساس عامل ارتفاع تصحیح شد، به طوری که معادله اصلاحی در یک رابطه رگرسیونی با تابعیت ارتفاع ضرب می‌شود. براساس آماره‌های ارزیابی دقت مدل اصلاحی اثبات شد (Jalali et al., 2021). با استفاده از داده‌های ۵۱ ایستگاه هواشناسی در حوضه‌هایی از کشورهای ایتالیا و

سوئیس معادله هارگریوز-سامانی اصلاح شد. قبل از تصحیح یکسری از معادلات اصلاحی مورد بررسی قرار گرفت. در یکی از این معادلات توان اختلاف بین دمای بیشینه و کمینه ۰/۴ و حداقل مقدار در جمله آخر معادله ۲۰ در نظر گرفته شد. در معادله دیگر جزئی به معادله هارگریوز-سامانی ضرب شد که این جزء تابعی از متوسط دما و دامنه دمایی روزانه بود. در ادامه معادله نهایی اصلاحی هارگریوز-سامانی بر اساس اطلاعات و داده‌های تحقیق بدست آمده (تصحیح رگرسیونی) استفاده شد. معادله رگرسیونی تابعی از ارتفاع از سطح دریا بود. معادلات اصلاحی کاهش چشمگیری در محاسبه خطا در تخمین تبخیرتغرق را نشان دادند. به‌طور کلی این معادلات نمی‌توانند جایگزینی برای روش پنمن - مانتیث باشند، ولی در مناطقی که تنها دمای هوا به عنوان داده است، کاربرد قابل توجهی دارند (Ravazzani et al., 2012). انواع معادلات جهت اصلاح معادله هارگریوز-سامانی با استفاده از داده‌های ایستگاه گناباد در بازه زمانی ۲۲ سال مورد آزمایش قرار گرفتند. معادلاتی که در مرحله صحت‌سنجی در رتبه‌های بهتری بودند، در ابتدا معادله‌ای با متوسط دمای بیشینه و کمینه، ساعات آفتابی و بیشینه ساعت آفتابی و سپس معادله‌ای با داده‌های سرعت و دما بودند (KhasheiSiuki et al., 2017). واسنجی ماهانه معادله هارگریوز-سامانی با داده‌های ۴۰۰ ایستگاه هواشناسی در بخش‌هایی از شیلی انجام گرفت. واسنجی بر اساس محاسبه نسبت تبخیرتغرق پتانسیل حاصل از هارگریوز-سامانی و پنمن - مانتیث و رفتار مکانی متغیرهای ورودی بود. توزیع مکانی بر اساس رگرسیون وزنی جغرافیایی و کریجینگ معمولی با واریوگرام خطی به کمک مدل ارتفاعی رقومی شاتل رادار و بازتاب سطحی حاصل از MODIS بود. فرآیند واسنجی با خطای مقایسه‌ای ۵٪ در مقابل پنمن - مانتیث تایید شد (Morales-Salinas et al., 2017). با پیش‌بینی دما و داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های مختلف در مناطق آب و هوایی مختلف چین، معادله اصلاح شده تورنت وایت در برابر معادله پنمن - مانتیث ارزیابی شد. نتایج نشان دادند که عملکرد پیش‌بینی تبخیرتغرق با معادله تورنت وایت اصلاح‌شده و پیش‌بینی دما در همه ایستگاه‌ها پس از واسنجی ماهانه بهبود بیشتری یافت (Chang et al., 2019). از مدل رگرسیون خطی ماهانه برای تصحیح روش

با اقلیم‌های متنوع در نظر گرفته شدند. ایستگاه‌های رامسر، کرمانشاه، همدان، سمنان، مشهد، شیراز، اردبیل، ارومیه، زنجان، یزد و رشت به‌عنوان ایستگاه‌های مطالعاتی در نظر گرفته شدند که موقعیت شهرستان‌های مربوطه و اقلیم ایستگاه‌های مطالعاتی براساس روش دومارتن و شاخص باران مؤثر (PEI) در شکل ۱ آورده شده است. بیشینه مقدار شاخص‌ها مربوط به ایستگاه‌های رامسر، رشت و کمینه مربوط به یزد، سمنان می‌باشد. بر اساس آخرین اطلاعات علمی موجود در جهان از معادله فائو-پنمن-مانتیت به‌عنوان معادله اساسی برای تخمین تبخیر-تعرق مرجع و صحت‌سنجی سایر مدل‌ها استفاده می‌شود (Khashei Siuki et al., 2017). روش هارگریوز-سامانی از نتایج تحقیقات هارگریوز و سامانی طی سال‌های ۱۹۷۵ تا ۱۹۸۲ است. معادله هارگریوز-سامانی با استفاده از داده‌های هشت ساله دیویس کالیفرنیا تهیه شده است. مزیت این معادله سادگی آن است که نیاز به داده‌های کم و رایج در پروژه‌های منابع آب بخصوص در مناطق فاقد آمار دارد. این روش دمایی است و تأثیر عواملی مانند رطوبت نسبی، باد و شدت و مدت تابش آفتاب در آن لحاظ نشده است (Khashei Siuki et al., 2017). بلانی-کریدل: یکی از قدیمی‌ترین روش‌های تخمین تبخیرتعرق پتانسیل می‌باشد که بعداً فرمول پیشنهادی توسط پروت مورد واسنجی قرار گرفت. روش تورنت وایت: این روش نیز براساس متوسط درجه ماهانه با قالب ریاضی جدیدی استوار است. معادلات ریاضی روش‌های مختلف در جدول ۱ آورده شده است. روند انجام تحقیق در شکل ۲ نشان داده شده است.

معادلات اصلاحی تبخیرتعرق

معادلات اصلاحی در این تحقیق در مقیاس زمانی سالانه و فصلی (فصل‌هایی با توان بالای تبخیرتعرق) در حالت‌های مختلف انجام گرفت. در حالت اول رابطه رگرسیونی بین تبخیرتعرق پتانسیل فائو با روش مورد نظر تبخیرتعرق پتانسیل و اطلاعات مکانی (ارتفاع از سطح دریا و عرض جغرافیایی) و اطلاعات هواشناسی (بارندگی و سرعت باد) انجام گرفت (معادله ۱ در جدول ۲). در حالت دیگر نسبت تبخیرتعرق پتانسیل فائو به تبخیرتعرق روش مورد نظر به‌صورت تابعی از اطلاعات مکانی و هواشناسی مدلسازی شد (معادله ۲ در جدول ۲). در این معادلات P،

هارگریوز-سامانی در چین استفاده شد. برای بیشتر ایستگاه‌ها، ضریب همبستگی پنمن-مانتیت و هارگریوز-سامانی از ۰/۵ تا ۱ متغیر است. این مساله شرایط لازم را برای اصلاح رگرسیون خطی ماهانه هارگریوز-سامانی فراهم می‌سازد. تغییرات میانگین خطای مطلق قبل و بعد از تصحیح معادله برای هر سال نشان می‌دهد که طرح اتخاذ شده در این مطالعه باعث بهبود نتایج اصلاحی در پاییز، زمستان و بهار و نتایج ضعیف در طول تابستان می‌شود (Xia et al., 2020). در منطقه‌ای به وسعت ۲/۵۰۵ میلیون کیلومتر مربع شامل سودان و سودان جنوبی (حوضه‌های آبی از جمله رودخانه نیل)، معادله هارگریوز-سامانی در مقیاس سالانه و فصلی تنظیم شد. خطای مدل هارگریوز-سامانی در قالب رابطه خطی رگرسیونی با تابعیت طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی، ارتفاع و بارندگی ماهانه بیان شد. در بازه صحت‌سنجی دوره‌های مختلفی از جمله سال‌های فرد، زوج و تمام سال‌ها در نظر گرفته شدند. شاخص‌های عملگر، وابستگی معادله هارگریوز-سامانی را به داده‌های مکانی و بارندگی و دوره‌های زمانی نشان دادند (Elagib and Musa 2023). معادلاتی که برای محاسبه تبخیرتعرق پتانسیل استفاده می‌شوند، به دلیل دلیل ماهیت تجربی آن برای همه شرایط اقلیمی مناسب نیستند. همچنین معادلات تجربی با داده‌های ورودی مرتبط عدم قطعیت‌های متفاوتی را در مناطق مختلف نشان می‌دهند، بنابراین لازم است معادله مناسب هر منطقه اصلاح شود. همچنین تحقیقات انجام گرفته بیشتر متمرکز روی یک روش اصلاحی بودند که با توجه به کارایی روش‌های مختلف، اصلاح آنها منطقی بنظر می‌رسد. هدف این تحقیق اصلاح روش‌های هارگریوز-سامانی، بلانی-کریدل، ایوانف و تورنت وایت بر مبنای روش فائو-پنمن-مانتیت است. روش اصلاحی در دو گروه دسته‌بندی شد که در ابتدا براساس رابطه رگرسیونی و ضریب اصلاحی با تابعیت داده‌های هواشناسی، مکانی و سپس بر اساس ساختار ترکیب موازی گزینه‌های برتر اصلاحی بود.

مواد و روش‌ها

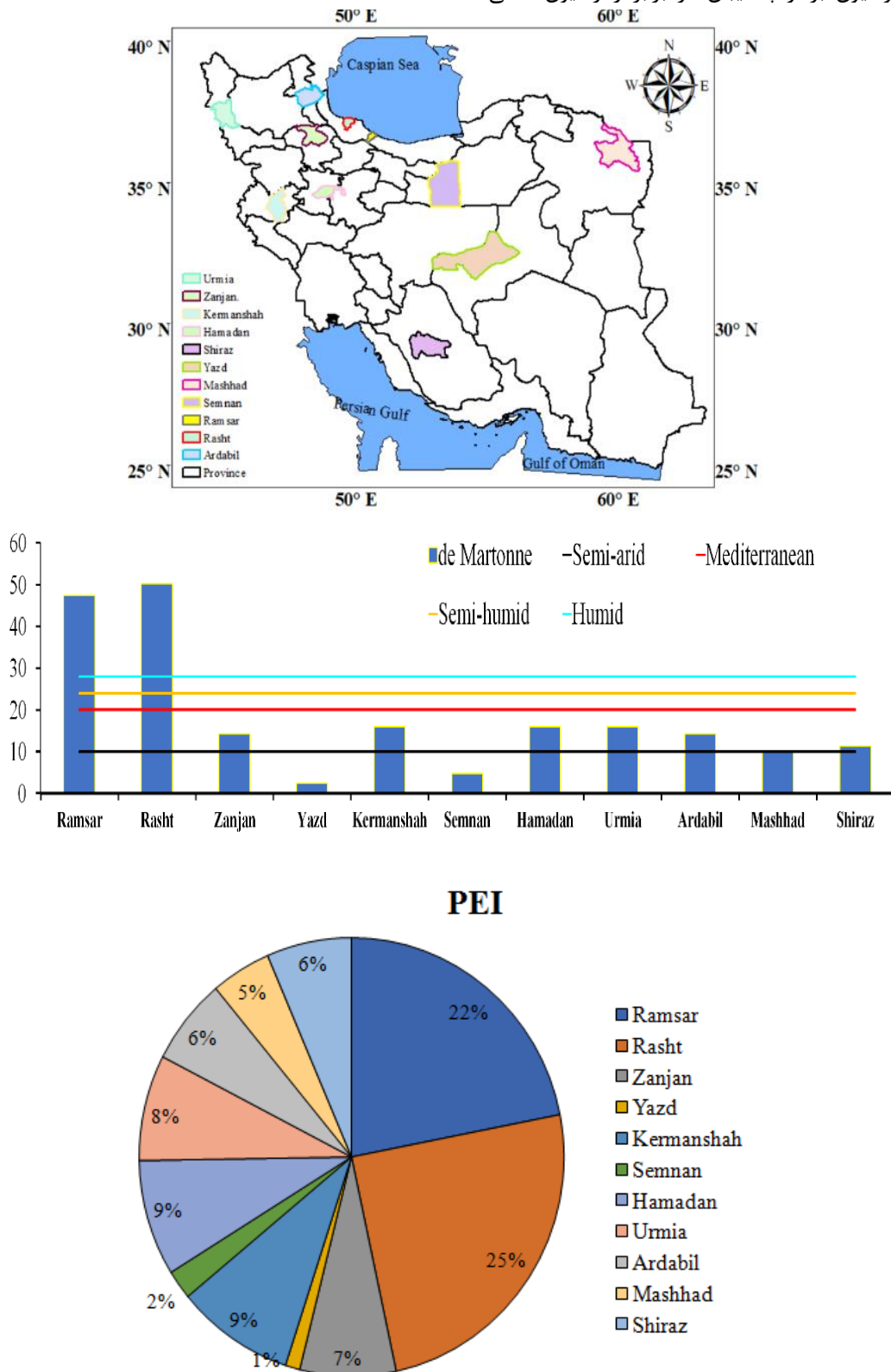
منطقه مورد مطالعه

داده‌های هواشناسی و تغییرات آنها یکی از عوامل مؤثر بر تبخیرتعرق می‌باشند، بنابراین ایستگاه‌های هواشناسی

نشریه هواشناسی کشاورزی

ارزیابی شد. در ادامه جهت افزایش دقت در معادلات اصلاحی از ساختار ترکیب موازی استفاده شد.

W، H، L به ترتیب بارندگی، سرعت باد، ارتفاع از سطح دریا و عرض جغرافیایی است. در حالت دیگر عملکرد روش رگرسیون بردار پشتیبان در برابر رگرسیون خطی



شکل ۱- موقعیت شهرستان‌های مربوط به ایستگاه‌های مطالعاتی (A) به همراه دو روش دومارتن (B) و PEI (C) تعیین اقلیم ایستگاه‌ها

Figure 1- The location of the cities related to the study stations (A) along with two methods De Martonne (B) and PEI (C) to determine the climate of the stations

جدول ۱- معادلات ریاضی روش‌های مختلف تعیین تبخیر تعرق پتانسیل به همراه پارامترهای معادله (علیزاده و همکاران ۱۴۰۱)
 Table 1- Mathematical equations of different methods of determining potential evaporation and transpiration along with the parameters of the equation (Alizadeh et al. 1401)

Method	Data and parameters	Mathematical equations
Ivanov	T :air temparture r: monthly relative humidity	$ET_0=0.0018.(2.5+T^2).(100-r)$
Torrent White	ET ₀ :Monthly evapotranspiration T _m : air temparture i _m : Monthly heat index a: correction coefficient N _m : Maximum temperature	$ET_0 = 16N_m \left(\frac{10T_m}{I}\right)^a$ $i_m = \left(\frac{T_m}{5}\right)^{1.51}$ I=sum i $a=675 \times 10^{-9}I^3 - 771 \times 10^{-7}I^2 + 675 \times 10^{-4}I + 0.492$
Hargreave-Samani	ET ₀ : potential evaporation and transpiration T _{max} : Maximum temperature T _{min} : minimum temperature T _{mean} : air temparture R _a : Incoming radiation	$ET_0=0.0023 \times (T_{mean} + 17.8) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0.5} \cdot R_a$
Belani-Criddle	ET ₀ : potential evaporation and transpiration P: coefficient related to the length of the day T: air temparture RH _{min} : minimum relative humidity Uday: wind speed n: sunshine hours N: maximum sunshine hour	$ET_0 = a + b[p \times (0.46T + 8.13)]$ $a = 0.0043(RH_{min}) - \frac{n}{N} - 1.41$ $b = 0.82 - 0.0041(RH_{min}) + 1.07 \frac{n}{N} + 0.066U - 0.006RH_{min}U$

جدول ۲- معادلات اصلاحی تبخیر تعرق پتانسیل

Table 2-corrected eqautions of potential evaporation and transpiration

Equation 1	Equation 2
$ET_{FAO} = f(ET_{IV \text{ or } BC \text{ or } HS \text{ or } TW}, P, W, H, L)$	$\frac{ET_{FAO}}{ET_{IV \text{ or } BC \text{ or } HS \text{ or } TW}} = f(P, W, H, L)$
$ET_{FAO} = f(ET_{IV \text{ or } BC \text{ or } HS \text{ or } TW}, W, H, L)$	$\frac{ET_{FAO}}{ET_{IV \text{ or } BC \text{ or } HS \text{ or } TW}} = f(ET_{IV \text{ or } BC \text{ or } HS \text{ or } TW}, W, H, L)$
$ET_{FAO} = f(ET_{IV \text{ or } BC \text{ or } HS \text{ or } TW}, P, W, H)$	$\frac{ET_{FAO}}{ET_{IV \text{ or } BC \text{ or } HS \text{ or } TW}} = f(ET_{IV \text{ or } BC \text{ or } HS \text{ or } TW}, P, W, H)$
$ET_{FAO} = f(ET_{IV \text{ or } BC \text{ or } HS \text{ or } TW}, P, H, L)$	$\frac{ET_{FAO}}{ET_{IV \text{ or } BC \text{ or } HS \text{ or } TW}} = f(ET_{IV \text{ or } BC \text{ or } HS \text{ or } TW}, P, H, L)$
$ET_{FAO} = f(ET_{IV \text{ or } BC \text{ or } HS \text{ or } TW}, P, W, L)$	$\frac{ET_{FAO}}{ET_{IV \text{ or } BC \text{ or } HS \text{ or } TW}} = f(ET_{IV \text{ or } BC \text{ or } HS \text{ or } TW}, P, W, L)$

$$f_{\text{combination}} = \psi (w_1 \hat{f}_1, w_2 \hat{f}_2, \dots, w_n \hat{f}_n) \quad (3)$$

که در آن ψ تابع ترکیبی، $w_i \hat{f}_i$ مقادیر وزنی پیش-بینی شده، n تعداد مدل‌های منفرد (Adhikari and Agrawal 2014). پس از اعمال داده‌های اصلی برای هر مدل، پیش‌بینی نهایی با ضرب هر مقدار پیش‌بینی شده در وزن‌های محاسبه شده به دست می‌آید. وزن‌ها با استفاده از روش ماتریس واریانس و کوواریانس محاسبه می‌شوند (معادلات ۴ و ۵).

ساختار ترکیب موازی

یک روش ترکیبی به نام چارچوب ترکیبی موازی معرفی شد که شامل ایجاد یک مدل ترکیبی خطی با ترکیب مقادیر پیش‌بینی مدل‌های جداگانه است (Bates and Granger 1969). در این چارچوب خروجی مدل ترکیبی خطی از پیش‌بینی مدل‌های مختلف است که با استفاده از روش‌های مختلف محاسبه وزن، وزن‌های مناسب به هر مدل اختصاص داده می‌شود. معادله اساسی ساختار ترکیب موازی از معادله ۳ بدست می‌آید.

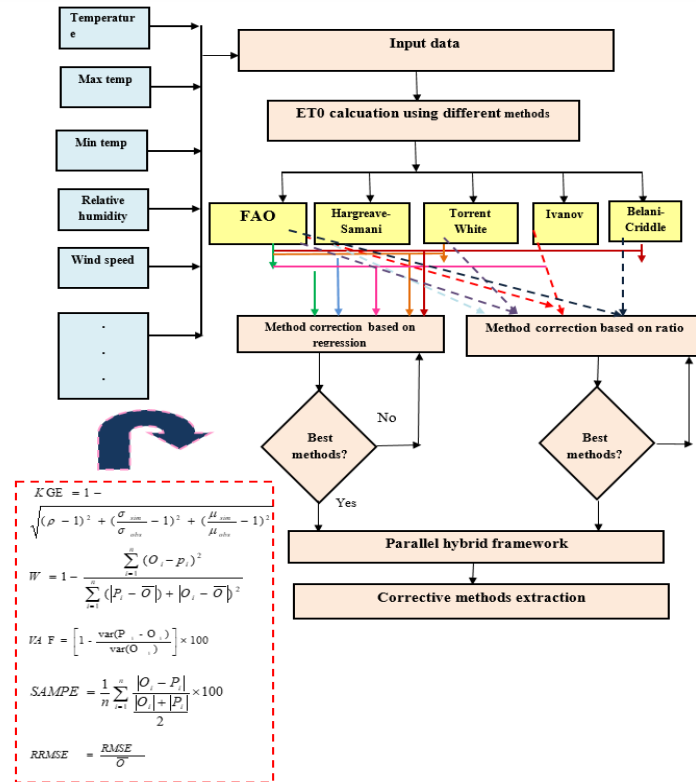
آماره‌های ارزیابی

جهت اثبات تأثیر معادلات اصلاحی در افزایش دقت تعیین تبخیرتعرق از برخی آماره‌های ارزیابی استفاده شد که معادلات استفاده شده در شکل ۲ آورده شده است.

$$w_1 = \frac{\text{var}(e_2) - \text{cov}(e_1, e_2)}{\text{var}(e_1) + \text{var}(e_2) - 2\text{cov}(e_1, e_2)} \quad (۴)$$

$$w_2 = \frac{\text{var}(e_1) - \text{cov}(e_1, e_2)}{\text{var}(e_1) + \text{var}(e_2) - 2\text{cov}(e_1, e_2)} \quad (۵)$$

که در آن e_1 و e_2 خطای مدل‌های پیش‌بینی اول و دوم، cov کوواریانس خطاهای مدل (Karthika nad) (Karthikeyan 2024).



شکل ۲- روند نمای انجام تحقیق جهت اصلاح روش های تبخیرتعرق پتانسیل

Figure 2- Flow chart of research of doing potential evapotranspiration

داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی بر میانگین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی استفاده می‌کند و مقادیر کمینه آن قابل قبول است. شاخص Willmott همان شاخص تصحیح شده شاخص همسانی است که مقادیر بالای آن به عنوان حالت بهینه در نظر گرفته می‌شود. شاخص بعدی شاخص جذر میانگین مربعات خطای نسبی است که در واقع از توان دوم اختلاف بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی استفاده می‌کند و مقادیر کمینه آن هدف است. آماره‌های استفاده شده بدون بعد می‌باشند.

نتایج و بحث

بارندگی، مجموع ساعات آفتابی، متوسط بیشینه و کمینه دمای هوا، سرعت باد و رطوبت نسبی به عنوان داده‌های ورودی روش‌های مختلف تعیین تبخیرتعرق

از نسبت واریانس اختلاف مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بدست می‌آید و حالت بهینه آن مربوط به مقادیر بالای آماره می‌باشد و آماره دیگری که تأثیر اصلاح معادلات را نشان می‌دهد مربوط به واریانس خطای روش‌های اصلاحی است که خطا در این حالت به صورت قدر مطلق اختلاف بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی تقسیم بر میانگین داده‌های مشاهداتی تعریف می‌شود. KGE^2 شاخصی است که از ضریب همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی، میانگین و انحراف معیار داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی استفاده می‌کند که مقادیر بالای آن حالت بهینه است. میانگین درصد مطلق خطای متقارن $(SMAPE)^3$ که از اختلاف قدرمطلق

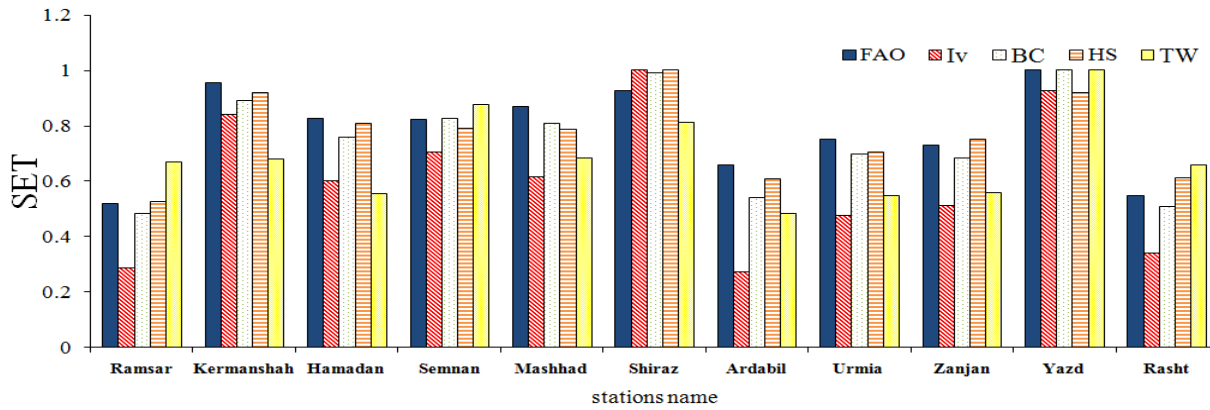
¹ values account For

² Kling-Gupta Efficiency

³ Symmetric Mean Absolute Percentage Error (SMAPE)

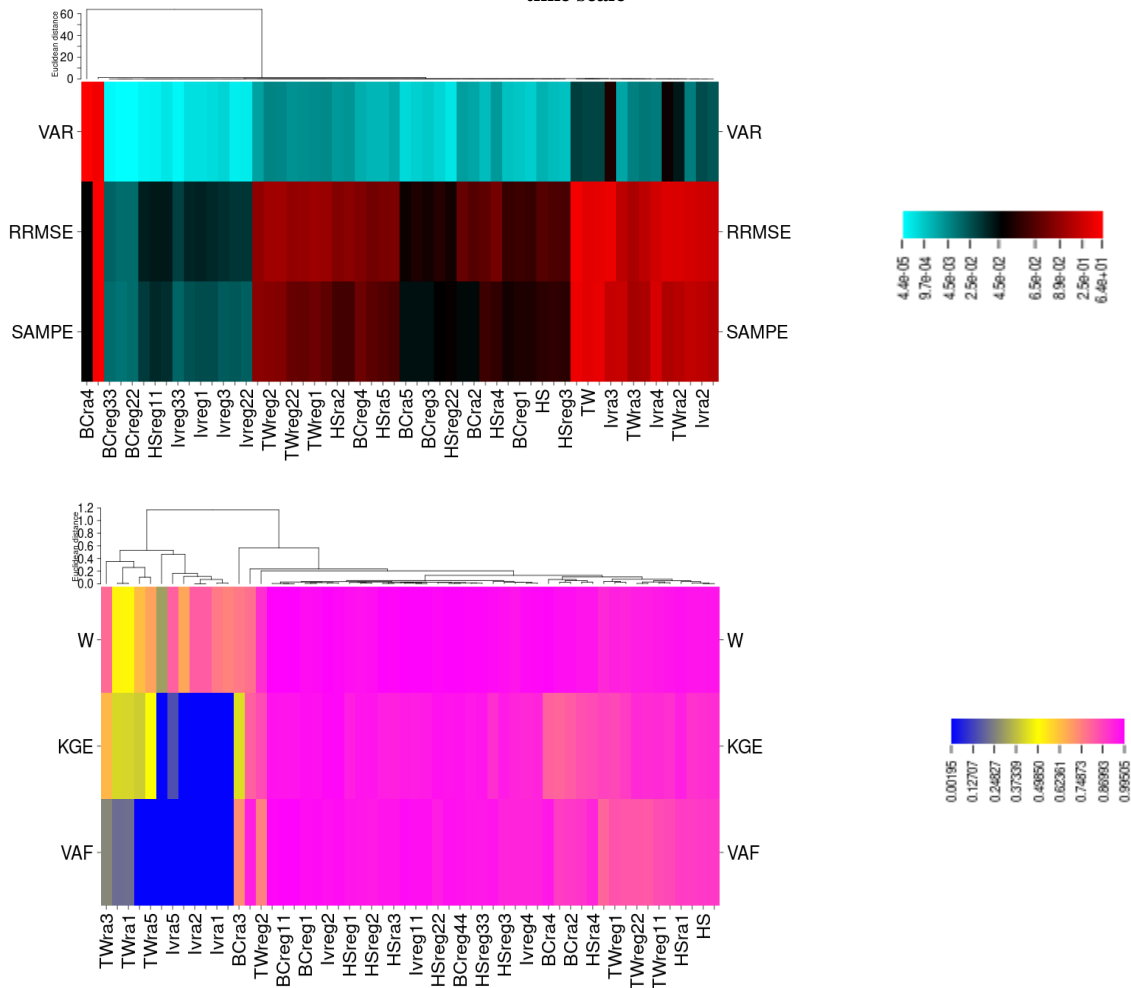
شکل ۴، روش‌های گریوز-سامانی و بلانی-کریدل دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها بودند به طوری که میزان کاهش RRMSE از روش‌های تورنت وایت، بلانی-کریدل و ایوانف به هارگریوز-سامانی به ترتیب برابر با ۸۰/۳، ۶۷/۵ و ۹۴ درصد بود. بیشینه مقدار KGE و W مربوط به روش هارگریوز-سامانی و VAF مربوط به روش بلانی-کریدل بود. روش‌های هارگریوز-سامانی و بلانی-کریدل در تحقیق Khoshsha et al., (2015) بهترین تطابق را با تبخیرتغرق مرجع حاصل از تشت تبخیر داشتند. در تحقیق Tafi et al., 2020 روش هارگریوز-سامانی در بین روش‌های مبتنی بر دما بهترین عملکرد را داشت. در حالت دیگر مقایسه بین دو حالت اصلاحی رگرسیونی و نسبتی انجام گرفت که روش رگرسیونی نسبت به نسبتی دارای عملکرد بهتری بود، به طوری که میزان کاهش RRMSE از حالت نسبتی به رگرسیون در روش‌های ایوانف، بلانی-کریدل، هارگریوز-سامانی و تورنت وایت به ترتیب برابر با ۸۷/۶۶، ۱۴/۷، ۱۴/۹۲ و ۷۲/۰۲ درصد و میزان کاهش واریانس خطاها به ترتیب برابر با ۹۸/۷۶، ۶۲/۶۹، ۸/۳۳ و ۸۴/۲۸ درصد است. با توجه به این که حالت رگرسیونی عملکرد بهتری داشت، نقش داده‌های ورودی در این حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد. اضافه کردن جزء عرض جغرافیایی نسبت به حالت بدون استفاده از عرض جغرافیایی در تمام روش‌ها توانست عملکرد روش‌ها را بهبود دهد، به طوری که میزان کاهش RRMSE از حالت بدون عرض جغرافیایی به استفاده از عرض جغرافیایی در روش‌های ایوانف، هارگریوز-سامانی، بلانی-کریدل و تورنت وایت به ترتیب برابر با ۸/۳۳، ۲۶/۳۱، ۶۷/۲۴ و ۱۲/۷۶ درصد بود. جهت بررسی بیشتر تأثیر عرض جغرافیایی در تصحیح روش‌های بکار گرفته شده مقادیر متوسط آماره‌های RRMSE-SAMPE، VAR برای رگرسیون بدون عرض جغرافیایی و با عرض جغرافیایی محاسبه شد و میزان کاهش متوسط خطا برای روش‌های ایوانف، هارگریوز-سامانی، بلانی-کریدل و تورنت وایت به ترتیب برابر با ۹/۴۵، ۲۸/۰۳، ۶۵/۸۹ و ۱۳/۷۹ درصد شد که بیشترین و کمترین کاهش مربوط به روش‌های بلانی-کریدل و ایوانف بود.

پتانسیل هستند که طول دوره آماری داده‌ها ۱۹۹۰-۲۰۲۱ بود. ۷۰:۳۰ نسبت دوره‌های واسنجی (۱۹۹۰-۲۰۱۲) و صحت‌سنجی (۲۰۱۳-۲۰۲۱) در نظر گرفته شدند. اجرای روش‌های مختلف تبخیرتغرق پتانسیل نشان داد که بیشینه مقدار تبخیرتغرق به ترتیب مربوط به روش‌های ایوانف (Iv)، هارگریوز-سامانی (HS)، فائو-پنمن-مانتیث (FAO) بلانی-کریدل (BC) و تورنت وایت (TW) می‌باشد. شکل ۳ مقادیر استاندارد شده تبخیرتغرق پتانسیل (SET) را با روش‌های مختلف و در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. براساس شکل ۳، بیشینه مقدار تبخیرتغرق پتانسیل در ایستگاه‌های رامسر، کرمانشاه، همدان، سمنان، مشهد، شیراز، اردبیل، ارومیه، زنجان، یزد و رشت مربوط به روش‌های تورنت وایت، فائو، فائو، تورنت وایت، فائو، هارگریوز-سامانی، فائو، فائو، هارگریوز-سامانی، فائو و تورنت وایت است. کمینه مقدار به ترتیب با روش ایوانف مربوط به ایستگاه‌های رامسر، رشت، اردبیل، ارومیه، زنجان، سمنان، مشهد، هارگریوز-سامانی در یزد و تورنت وایت در ایستگاه‌های کرمانشاه و همدان است. در ادامه اقدام به مقایسه روش‌های تعیین تبخیرتغرق پتانسیل با روش فائو-پنمن-مانتیث و همچنین اصلاح روش‌های تعیین تبخیرتغرق پتانسیل شد که نتایج در شکل ۴ آورده شده است. در اصلاح روش‌ها از دو نوع تحلیل استفاده شد. در ابتدا با استفاده از رابطه رگرسیونی داده‌های تبخیرتغرق فائو با روش مورد نظر همراه با داده‌های مکانی و هواشناسی مدل‌سازی شدند (پسوند reg1 شامل ارتفاع، بارندگی، باد، پسوند reg2 شامل بارندگی، باد، پسوند reg3 شامل ارتفاع، باد، پسوند reg4 شامل ارتفاع، بارندگی، پسوند reg11 شامل ارتفاع، بارندگی، باد، عرض جغرافیایی، پسوند reg22 شامل بارندگی، باد، عرض جغرافیایی، پسوند reg33 شامل ارتفاع، باد، عرض جغرافیایی، پسوند Reg44 شامل ارتفاع، بارندگی، عرض جغرافیایی) و در حالت دوم نسبت دو روش با داده‌های مکانی و هواشناسی مدل‌سازی شدند (پسوند ra1 شامل ارتفاع، بارندگی، باد، پسوند ra 2 شامل بارندگی، باد، پسوند ra 3 شامل ارتفاع، باد، پسوند ra 4 شامل ارتفاع، بارندگی، باد، پسوند ra5 شامل ارتفاع، بارندگی، باد، عرض جغرافیایی). بر اساس آماره‌های



شکل ۳- مقادیر استاندارد شده تبخیر تعرق پتانسیل ایستگاه‌های مختلف در مقیاس زمانی سالانه

Figure 3-The standardized values of potential evaporation and transpiration (SET) of different stations in the annual time scale



شکل ۴- نقشه حرارتی جهت تعیین روش برتر تعیین تبخیر تعرق پتانسیل و ارزیابی روش‌های اصلاحی (مقیاس سالانه) با آماره‌های مختلف

Figure 4-Thermal map to determine the best method for determining potential evaporation and transpiration and evaluating corrective methods (annual scale) with different criteria

باد نسبت به سایر داده‌های ورودی کمینه خطا را داشت، به طوری که میزان کاهش واریانس خطا و افزایش VAF از معادله‌ای با اطلاعات ارتفاع، عرض جغرافیایی و سرعت

در ادامه تأثیر نوع داده‌های هواشناسی در معادلات اصلاحی مورد بررسی قرار گرفت. در روش ایوانف معادله‌ای با استفاده از ارتفاع، عرض جغرافیایی و سرعت

رابطه ۵ و سپس ۱ (میزان افزایش RRMSE از رابطه ۵ به ۴ برابر با ۱۱/۱۶ درصد)، در روش تورنت وایت رابطه ۴ (میزان افزایش RRMSE از رابطه ۴ به ۲ برابر با ۱۲/۶۵ درصد). اگر نتایج بدست آمده در هر دو فصل با هم مقایسه شوند، تعداد روابطی که دارای تکرار یا فراوانی بالایی هستند مربوط به روابط ۳ و ۵ هستند که این مساله اهمیت بالای عرض جغرافیایی و سرعت باد را در روند اصلاح معادلات تبخیرتعرق نشان می‌دهد. اگر حالت بهینه آماره‌های KGE و RRMSE در نظر گرفته شوند، در فصل بهار به ترتیب روش‌های هارگریوز-سامانی و بلانی-کریدل و در فصل تابستان روش بلانی-کریدل دارای عملکرد بهتری هستند. در ادامه از جهات مختلف مقادیر شبیه‌سازی شده ارتقاء یافتند. در یک حالت بجای استفاده از رابطه رگرسیون از رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) در روند مدل‌سازی استفاده شد. در حالت دیگر از روش ترکیب موازی جهت ادغام معادلات استخراجی در دو حالت رگرسیونی (Treg) و نسبتی (Tra) استفاده شد. در حالت سوم ترکیب موازی جهت ادغام مقادیر حاصل از رگرسیون بردار پشتیبان و بهترین حالت ترکیب موازی حالت دوم استفاده شد که نتایج مقایسه حالت‌های مختلف در شکل ۵ آورده شده است. بر اساس شکل ۵، شکل باکس پلات‌ها از نظر طول میان چارکی، خطوط Whikers و میانه از خود روش به طرف روش انتهایی یا ساختار ترکیب موازی به شکل باکس پلات روش فائو-پنمن-مانتیت نزدیک می‌شود. یکسری از نتایج از نمودار جعبه‌ای قابل حصول هستند: ۱- هر دو روش اصلاحی یعنی هم رگرسیون و هم نسبتی در برابر خود روش‌ها دارای عملکرد بهتری هستند، میزان کاهش متوسط RRMSE از خود روش به روش اصلاحی رگرسیون و نسبتی در روش ایوانف ۹۶/۴۳ و ۷۵/۶۵، در روش بلانی-کریدل برابر با ۶۹/۵ و ۳۸ درصد، در روش هارگریوز-سامانی برابر با ۶۱/۱۵ و ۴/۶۱ و در روش تورنت وایت برابر با ۷۰/۶ و ۱۲/۱۲. همچنین روش رگرسیون نسبت به روش نسبتی قوی‌تر عمل کرده است. عملکرد بهتر روش‌های اصلاحی نسبت به خود روش‌ها در تحقیق Ghahreman et al., (2014)، Jalali et al., (2021) و Ravazzani et al., (2012) هم مشاهده شد که بیشتر متمرکز بر روش هارگریوز-سامانی بودند. ۲- در حالت دیگر از روش ترکیب موازی استفاده شده که باعث افزایش دقت در مقادیر شبیه‌سازی شد، به‌عنوان نمونه میزان

باد به معادله‌ای با اطلاعات ارتفاع، عرض جغرافیایی و بارندگی ۷/۳ و ۲/۱۵ درصد برآورد شد. در روش بلانی-کریدل معادله‌ای با اطلاعات عرض جغرافیایی، ارتفاع، بارندگی، سرعت باد دارای کمینه مقدار خطا بود و حذف ارتفاع از مولفه‌های ورودی تأثیر قابل توجهی در روند اصلاح معادله نداشت (میزان SAMPE با حضور ارتفاع برابر با ۰/۱۸۸ و بدون ارتفاع برابر با ۰/۱۹). در روش هارگریوز-سامانی هم معادله‌ای با اطلاعات عرض جغرافیایی، ارتفاع، بارندگی، سرعت باد دارای کمینه مقدار خطا بود و حذف مولفه بارندگی تأثیر آنچنانی در آماره و روند اصلاحی معادلات نداشت (میزان W با بارندگی و بدون بارندگی به ترتیب برابر با ۰/۹۸۸ و ۰/۹۸۲). در روش تورنت وایت معادله‌ای با داده‌های ارتفاع، باد و عرض جغرافیایی دارای کمینه مقدار خطا بود، به طوری که در همین نوع ساختار معادله در صورت جایگزینی باد با بارندگی میزان VAF، ۵ درصد کاهش و RRMSE ۲۱/۴۸ درصد افزایش داشت. تحقیقات انجام گرفته در مقیاس زمانی سالانه بود که در مقیاس فصلی (بهار و تابستان) نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج در جدول ۳ آورده شده است (رابطه ۱ شامل عرض جغرافیایی، ارتفاع، سرعت باد و بارندگی، رابطه ۲ شامل ارتفاع، سرعت باد و بارندگی، رابطه ۳ شامل عرض جغرافیایی، سرعت باد و بارندگی، رابطه ۴ شامل عرض جغرافیایی، ارتفاع و بارندگی، رابطه ۵ شامل عرض جغرافیایی، ارتفاع و سرعت باد). براساس جدول ۳، روابطی که در فصل بهار دارای عملکرد بالا هستند، در ادامه توضیح داده می‌شوند: در روش ایوانف در ابتدا رابطه‌ای با تمام اطلاعات ورودی و سپس رابطه ۳ (میزان افزایش واریانس خطاها از رابطه ۱ به ۵ برابر با ۷۴/۰۷ درصد)، در روش بلانی-کریدل رابطه‌ای با تمام اطلاعات ورودی و رابطه ۲ (میزان افزایش واریانس خطاها از رابطه ۱ به ۵ برابر با ۷۲/۳۳ درصد)، در روش هارگریوز-سامانی روابط ۳ و سپس ۵ (میزان افزایش RRMSE از رابطه ۵ به ۴ برابر با ۳۷/۱۴ درصد)، در روش تورنت وایت رابطه ۵ (میزان افزایش VAF از رابطه ۲ به ۵ برابر با ۸/۶۴ درصد)، در فصل تابستان در روش ایوانف ابتدا رابطه ۵ و سپس رابطه ۴ (میزان افزایش RRMSE از رابطه ۵ به ۲ برابر با ۳۵/۱۳ درصد)، در روش بلانی-کریدل رابطه ۳ (میزان افزایش RRMSE از رابطه ۳ به ۵ برابر با ۶/۶۶ درصد)، در روش هارگریوز-سامانی

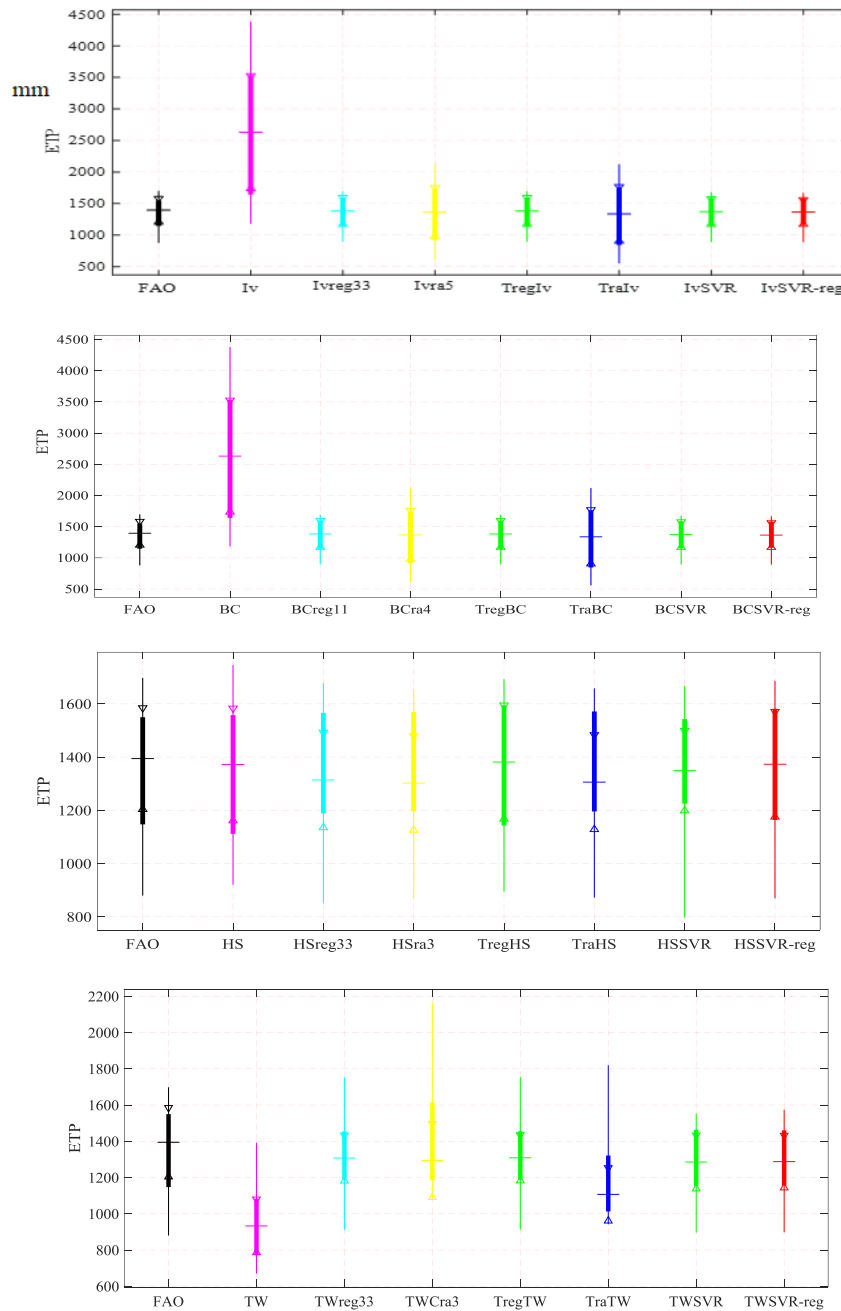
در روش‌های ایوانف، بلانی-کریدل، هارگریوز-سامانی و تورنت وایت به ترتیب برابر با ۱۵، ۶/۲۵، ۱۵/۲۱ و ۲۱/۷۳ درصد و در فصل بهار به ترتیب شامل ۱۷/۲۴، ۵، ۱۴/۲۸ و ۴ درصد بود. ۳- استفاده از روش رگرسیون بردار پشتیبان نسبت به رگرسیون دقت بالایی داشت، به‌عنوان نمونه میزان کاهش RMSE از روش اصلاحی رگرسیون به رگرسیون بردار پشتیبان در روش ایوانف و هارگریوز-سامانی به ترتیب برابر با ۱۲/۴ و ۵/۷ درصد بود.

کاهش RRMSE در روش ایوانف از روش اصلاحی نسبتی به روش ترکیب موازی برابر با ۱۴/۱۶، در روش بلانی-کریدل برابر با ۶/۵۲ درصد و میزان کاهش RRMSE روش هارگریوز- سامانی از روش اصلاحی رگرسیون به روش ترکیب موازی برابر با ۳۰/۹۵ درصد و در روش تورنت وایت ۶/۳۲ درصد بود. در مقیاس فصلی نیز روش اصلاحی نسبت به روش اصلی عملکرد روش‌ها را ارتقاء داد، به-طوری که میزان کاهش RRMSE در فصل تابستان از روش اصلاحی رگرسیون به روش ساختار ترکیب موازی

جدول ۳ - آماره‌های حاصل از اصلاح معادلات مختلف به روش رگرسیونی در مقیاس فصلی

Table 3-Criteria of corrective equations by regression methods in seasonal scale

Season	Method	Input data	RRMSE	KGE	SAMPE	var	VAF	
Spring	Ivanov	1	<u>0.029</u>	<u>0.957</u>	<u>0.02</u>	<u>0.00027</u>	<u>0.973</u>	
		2	<u>0.039</u>	<u>0.967</u>	<u>0.029</u>	<u>0.0007</u>	<u>0.953</u>	
		3	<u>0.032</u>	<u>0.969</u>	<u>0.031</u>	<u>0.00018</u>	<u>0.964</u>	
		4	<u>0.044</u>	<u>0.96</u>	<u>0.033</u>	<u>0.00075</u>	<u>0.935</u>	
		5	<u>0.03</u>	<u>0.952</u>	<u>0.02</u>	<u>0.00047</u>	<u>0.97</u>	
	Belani-Criddle	1	<u>0.02</u>	<u>0.95</u>	<u>0.016</u>	<u>0.000172</u>	<u>0.9903</u>	
		2	<u>0.019</u>	<u>0.964</u>	<u>0.0147</u>	<u>0.000213</u>	<u>0.987</u>	
		3	<u>0.023</u>	<u>0.94</u>	<u>0.018</u>	<u>0.00019</u>	<u>0.988</u>	
		4	<u>0.028</u>	<u>0.959</u>	<u>0.022</u>	<u>0.000316</u>	<u>0.972</u>	
		5	<u>0.022</u>	<u>0.969</u>	<u>0.015</u>	<u>0.00023</u>	<u>0.983</u>	
	Hargreave-Samani	1	<u>0.035</u>	<u>0.918</u>	<u>0.03</u>	<u>0.000303</u>	<u>0.959</u>	
		2	<u>0.036</u>	<u>0.914</u>	<u>0.032</u>	<u>0.0003</u>	<u>0.958</u>	
		3	<u>0.031</u>	<u>0.917</u>	<u>0.028</u>	<u>0.0002</u>	<u>0.966</u>	
		4	<u>0.048</u>	<u>0.9</u>	<u>0.039</u>	<u>0.0008</u>	<u>0.923</u>	
		5	<u>0.035</u>	<u>0.973</u>	<u>0.027</u>	<u>0.00053</u>	<u>0.964</u>	
	Torrent White	1	<u>0.062</u>	<u>0.929</u>	<u>0.053</u>	<u>0.0012</u>	<u>0.874</u>	
		2	<u>0.075</u>	<u>0.86</u>	<u>0.059</u>	<u>0.0024</u>	<u>0.81</u>	
		3	<u>0.12</u>	<u>0.52</u>	<u>0.11</u>	<u>0.00412</u>	<u>0.497</u>	
		4	<u>0.07</u>	<u>0.85</u>	<u>0.059</u>	<u>0.0029</u>	<u>0.81</u>	
		5	<u>0.061</u>	<u>0.93</u>	<u>0.052</u>	<u>0.0011</u>	<u>0.88</u>	
	Summer	Ivanov	1	<u>0.044</u>	<u>0.954</u>	<u>0.0376</u>	<u>0.0005</u>	<u>0.959</u>
			2	<u>0.05</u>	<u>0.95</u>	<u>0.0008</u>	<u>0.0008</u>	<u>0.93</u>
			3	<u>0.043</u>	<u>0.94</u>	<u>0.033</u>	<u>0.00074</u>	<u>0.96</u>
			4	<u>0.042</u>	<u>0.965</u>	<u>0.037</u>	<u>0.0004</u>	<u>0.953</u>
			5	<u>0.037</u>	<u>0.951</u>	<u>0.03</u>	<u>0.0005</u>	<u>0.962</u>
Belani-Criddle		1	<u>0.0155</u>	<u>0.966</u>	<u>0.01039</u>	<u>0.000134</u>	<u>0.9935</u>	
		2	<u>0.016</u>	<u>0.965</u>	<u>0.01078</u>	<u>0.00015</u>	<u>0.992</u>	
		3	<u>0.015</u>	<u>0.963</u>	<u>0.01085</u>	<u>0.00013</u>	<u>0.9937</u>	
		4	<u>0.027</u>	<u>0.97</u>	<u>0.022</u>	<u>0.00029</u>	<u>0.979</u>	
		5	<u>0.016</u>	<u>0.965</u>	<u>0.0142</u>	<u>0.00007</u>	<u>0.993</u>	
Hargreave-Samani		1	<u>0.046</u>	<u>0.967</u>	<u>0.0423</u>	<u>0.00059</u>	<u>0.949</u>	
		2	<u>0.047</u>	<u>0.918</u>	<u>0.0428</u>	<u>0.00078</u>	<u>0.947</u>	
		3	<u>0.054</u>	<u>0.947</u>	<u>0.046</u>	<u>0.00078</u>	<u>0.929</u>	
		4	<u>0.0478</u>	<u>0.965</u>	<u>0.0437</u>	<u>0.00065</u>	<u>0.944</u>	
		5	<u>0.043</u>	<u>0.946</u>	<u>0.035</u>	<u>0.00066</u>	<u>0.948</u>	
Torrent White		1	<u>0.092</u>	<u>0.889</u>	<u>0.08</u>	<u>0.0025</u>	<u>0.8</u>	
		2	<u>0.089</u>	<u>0.89</u>	<u>0.077</u>	<u>0.0025</u>	<u>0.8</u>	
		3	<u>0.088</u>	<u>0.89</u>	<u>0.075</u>	<u>0.0024</u>	<u>0.816</u>	
		4	<u>0.079</u>	<u>0.893</u>	<u>0.063</u>	<u>0.0024</u>	<u>0.837</u>	
		5	<u>0.086</u>	<u>0.85</u>	<u>0.07</u>	<u>0.0027</u>	<u>0.815</u>	



شکل ۵- نمودار جعبه‌ای (باکس پلات) جهت ارزیابی عملکرد معادلات مختلف تبخیر-تعرق پتانسیل و اصلاح شده آنها با روش‌های مختلف در برابر روش فائو

Figure 5- Box plots to evaluate the performance of different equations of potential evaporation and transpiration and their modifications with different methods against the FAO method

در روش ایوانف بیشینه خطا مربوط به ایستگاه شیراز و کمینه مربوط به ایستگاه کرمانشاه، در روش بلانی-کریدل بیشینه و کمینه خطا مربوط به ایستگاه‌های کرمانشاه و رشت، در روش هارگریوز-سامانی مربوط به ایستگاه‌های شیراز و زنجان، در روش تورنت وایت مربوط به ایستگاه-های کرمانشاه و اردبیل می‌باشد.

۴- در نهایت با توجه به عملکرد قوی روش رگرسیون در حالت ساده و بردار پشتیبان از ترکیب موازی این دو حالت استفاده شد میزان کاهش RMSE از روش رگرسیون بردار پشتیبان به حالت ترکیب موازی در روش-های ایوانف، بلانی- کریدل، هارگریوز سامانی و تورنت وایت به ترتیب برابر با ۲، ۲۰/۸۷، ۳۲/۲۴ و ۳ درصد بود.

نتیجه‌گیری

تبخیرتغرق پتانسیل به عنوان یک ورودی کلیدی برای مدل‌های هیدرولوژیکی است که تقاضای آب مورد نیاز را شبیه‌سازی می‌کند. بنابراین، عدم قطعیت در محاسبات تبخیرتغرق پتانسیل منجر به عدم قطعیت قابل توجهی در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی خواهد شد. در این راستا استفاده از روشی کارآمد می‌تواند سهم قابل توجهی در ارتقاء شبیه‌سازی‌ها داشته باشد. مقایسه روش‌های تعیین تبخیرتغرق پتانسیل با روش استاندارد حاکی از عملکرد بهتر روش‌های هارگریوز-سامانی و بلانی-کریدل بود که دلیل این مساله را می‌توان در ساختار ریاضی حاکم بر معادلات دانست. اصلاح معادلات با تمام روش‌های بکار گرفته مقادیر تبخیرتغرق را به مقادیر استاندارد نزدیک کرد، ولی ساختار ترکیب موازی به علت بکارگیری روش‌هایی با دقت بالا عملکرد بهتری داشت. کمینه و بیشینه مقدار تبخیرتغرق پتانسیل در روش فائو-پنمن-مانیت به ترتیب مربوط به رامسر و یزد بود که این مساله در روش اصلاحی با ساختار ترکیب موازی تمامی روش‌های تعیین تبخیرتغرق پتانسیل با استفاده از رگرسیون بردار پشتیبان حفظ شده است. داده‌های مستقل هر معادله نیز در کاهش یا افزایش دقت معادلات مهم می‌باشد، به طوری که عرض جغرافیایی و سرعت باد در معادلات اصلاحی نقش مؤثری داشتند. عملکرد روش‌های ریاضی به دلیل نوع ساختار حاکم بر آنها متفاوت است، به طوری که ایستگاه کرمانشاه در روش اصلاحی ساختار ترکیب موازی ایوانف دارای کمترین خطا و در بلانی-کریدل دارای بیشترین مقدار خطا است. به طور کلی در بین روش‌های مختلف، رشت دارای کمترین خطا و شیراز دارای بیشترین مقدار خطا است. در مقایسه عملکرد روش‌های اصلاحی در مقیاس فصلی بجز روش ایوانف در بقیه روش‌ها فصل بهار خطای کمتری نسبت به تابستان دارد. بنابراین روش‌های اصلاحی تبخیرتغرق با نیاز به تعداد کم داده‌های ورودی و دقت قابل قبول می‌توانند نقش مهمی در برنامه‌ریزی‌های منابع آبی و سیاست‌گذاری‌های کشاورزی داشته باشند.

منابع

- Adhikari, R., Agrawal R.K. 2014. Performance evaluation of weights selection schemes for
- linear 605 combination of multiple forecasts. *Artificial Intelligence Review*, 42(4):529-548.
- Alizadeh, A. 2001. Principles of applied hydrology. Astan Qods Publication. (In Farsi).
- Alizadeh, A., Kamali, G.H. A., Mousavi, F., Mousavi-Bygi, M. 2011. Weather and Climate. Ferdowsi University Press. (In Farsi).
- Bates, J. M., Granger, C. W. 1969. The combination of forecasts. *Journal of the Operational Research Society*, 20(4), 451-468.
- Chang, X., Wang, S., Gao, Z., Luo, Y. and Chen, H., 2019. Forecast of daily reference evapotranspiration using a modified daily Thornthwaite equation and temperature forecasts. *Irrigation and drainage*, 68(2), pp.297-317.
- Elagib, N.A. and Musa, A.A., 2023. Correcting Hargreaves-Samani formula using geographical coordinates and rainfall over different timescales. *Hydrological Processes*, 37(1), p.e14790.
- Ghahraman, B., Sharifan, H., Davary, K., Karimirad. 2014. Optimum correction factor for Hargreaves-Samani method for determination of reference crop evapotranspiration (case study: Khorasan Razavi province). *Iranian Journal of irrigation and drainage*. 4(7): 466-477(In Farsi).
- Karthika, D. and Karthikeyan, K., 2024. Analysis of Rainfall Prediction Using Parallel Hybrid Algorithm. *Contemporary Mathematics*, 3652-3669.
- Khoshhal, J., Zareh Abyaneh, H., Joshani, A. 2015. Evaluation of different methods of reference evaporation and transpiration estimation with the FAO evaporation pan method in the eastern and southeastern watersheds of the country. *Physical Geography Quarterly*, 8(28):1-16. (In Farsi).
- Khashei Siuki, A.K., Sarvari, F. and Bilondi, M.P., 2017. Correction and sensitivity analysis of Hargreaves-Samani model in the estimation of the reference evapotranspiration (case study: Gonabab city in Iran). *European Water*, 59: 433-439.
- Jalali, Z., Bakhtiari, B., Qaderi, K., Golestani Kermani, S. 2021. Modified Hargreaves-Samani model based on altitude in the high altitude regions of Iran. *Iran water resources research*. 17(3): 248-267. (In Farsi).
- Morales-Salinas, L., Ortega-Farías, S., Riveros-Burgos, C., Neira-Román, J., Carrasco-Benavides, M. and López-Olivari, R., 2017. Monthly calibration of Hargreaves-Samani equation using remote sensing and topoclimatology in central-southern Chile. *International Journal of Remote Sensing*, 38(24): 7497-7513.
- Morales-Salinas, L., Ortega-Farías, S., Riveros-Burgos, C., Neira-Román, J., Carrasco-

- synoptic station). *Journal of water and soil conservation*, 19(2):227-236. (In Farsi).
- Tafi, S., Baladi, A., Mohammadi, S., Pighan, K. 2020. Comparison and evaluation of estimating reference evapotranspiration methods in three general categories based on temperature, radiation and mass transfer (case study: Lorestan Province). *Journal of the Nivar*, 44(110-111):115-129. (In Farsi).
- Xia, X., Zhu, X., Pan, Y. and Zhang, J., 2020. A monthly regression correction model for the Hargreaves-Samani method in Mainland China. *Irrigation and Drainage*, 69(4): 880-890.
- Benavides, M. and López-Olivari, R., 2017. Monthly calibration of Hargreaves-Samani equation using remote sensing and topoclimatology in central-southern Chile. *International Journal of Remote Sensing*, 38(24), 7497-7513.
- Ravazzani, G., Corbari, C., Morella, S., Gianoli, P. and Mancini, M., 2012. Modified Hargreaves-Samani equation for the assessment of reference evapotranspiration in Alpine river basins. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 138(7):592-599.
- Sharifan, H.m Dehghani A.A., Karimirad, I. 2012. Correction factor for Hargreaves-Samani method to estimate ET₀ (case study: Gorgan



Application of parallel hybrid approach in correction of potential evapotranspiration estimation methods based on spatial and meteorological information

L. Parviz^{1*}, Kh. Khani Zangbar²

Received: 01/07/2024

Accepted: 03/06/2025

Abstract

Accurate estimation of potential evaporation and transpiration (ET_p) in an efficient way is quite important in water balance, crop water requirement and agricultural management studies. Therefore, the aim of this study was to improve the accuracy of several ET_p estimation equations namely Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle, Ivanov and Thornthwaite using spatial and meteorological data in Ramsar, Kermanshah, Hamedan, Semnan, Mashhad, Shiraz, Ardabil, Urmia, Zanjan, Yazd and Rasht stations, across the Iran, in seasonal and scales. The FAO-Penman-Monteith method was selected as the evaluation measure. The correction approaches were based on regression and support vector regression, relative and parallel hybrid framework. The type of spatial and meteorological variables had a significant impact on increasing the accuracy of correction equations, as an example, using a corrected regression equation eliminating of the wind component decreased the variance of errors for 38.18% comparing to original Ivanov's method with its all included variables. The regression correction method had better performance compared to the ratio method, such that the average increase of the Willmott index for all input states from the ratio method to the regression for the Thornthwaite, Blaney-Criddle, Ivanov and Hargreaves-Samani methods was equal to 42.67, 5.45, 25 and 3%, respectively. The structure of parallel hybrid framework in all methods reduced the error in determining potential evapotranspiration, and the final approach including the parallel framework of optimal modes of support vector regression and simple regression had significant accuracy. The final approach showed that Torrent White, Blaney-Criddle and Ivanov methods have underestimation and Hargreaves-Samani overestimates ET_p. The structure of the correction method has a significant importance in increasing the precision of potential evapotranspiration and water demand estimation for improved planning.

Keywords: Spatial coordinates, Correction, Ratio, Parallel hybrid



¹ Associate Professor, Faculty of Agriculture, Azarbaijan Shahid Madani University, Iran
(*Corresponding Author Email Address: laleh_parviz@yahoo.com)

² Associate Professor, Faculty of Agriculture, Azarbaijan Shahid Madani University, Iran

نحوه ارجاع مقاله:

پرویز، ل.، خانی زنگبار، خ. ۱۴۰۴. کاربرد رهیافت ترکیب موازی در تصحیح روش‌های تعیین تبخیرتعرق پتانسیل بر مبنای اطلاعات مکانی و هواشناسی. نشریه هواشناسی کشاورزی، ۱۳(۲)، ۶۱-۷۳. DOI: 10.22125/agmj.2025.465758.1170

Parviz, L., Khani Zangbar, Kh. 2026. Application of parallel hybrid approach in correction of potential evapotranspiration estimation methods based on spatial and meteorological information. Journal of Agricultural Meteorology, 13(2), 61-73. DOI: 10.22125/agmj.2025.465758.1170