

توسعه معادلات تجربی تخمین ضریب تشت تبخیر در منطقه فسا

محمد جواد امیری*، مهدی بهرامی، معصومه السادات موسوی پور و علی شعبانی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۹/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۳)

چکیده

روش تشت تبخیر کلاس A یکی از روش‌های بسیار رایج تخمین تبخیر-تعرق مرجع (ET_0) است که به دلیل سادگی، هزینه به نسبت کم و توانایی تخمین تبخیر-تعرق روزانه، به طور گسترده در جهان استفاده می‌شود. در این تحقیق کارایی ۸ معادله تجربی شامل آلن و پرویت، کوئنکا، اشنایدر، اشنایدر اصلاح شده، پیریرا و همکاران، اورنگ، راگوانشی و والندر و فانو ۵۶ در برآورد ضریب تشت تبخیر کلاس A و تبخیر-تعرق گیاه مرجع در ایستگاه فسا واقع در استان فارس مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور ضریب تشت محاسبه شده از معادلات فوق با ضریب تشت اندازه‌گیری شده که از نسبت تبخیر-تعرق به دست آمده از روش فانو-پنمن-مانتیت به میزان تبخیر از تشت به دست آمد، مقایسه شد. نتایج نشان داد تمامی معادلات تجربی دارای دقت بسیار پایینی در برآورد ضریب تشت تبخیر هستند ($R^2 < 0/3$; $NRMASE > 0/25$). نتایج مقایسه بین ET_0 به دست آمده از معادلات تجربی با ET_0 به دست آمده از معادله پنمن-مانتیت-فانو نشان داد که معادله فانو ۵۶ دارای بهترین عملکرد است ($R^2 = 0/72$; $NRMASE = 0/3$). به منظور افزایش دقت معادلات تجربی ضریب تشت تبخیر، این معادلات با داده‌های هواشناسی ۸ ساله (۱۳۸۶-۱۳۹۴) ایستگاه هواشناسی فسا تصحیح شده و با داده‌های مستقل ۲ ساله (۱۳۹۴-۱۳۹۶) اعتبارسنجی شد. نتایج نشان داد که دقت همه معادلات تجربی افزایش یافته و معادله کوئنکا با $NRMASE = 0/16$ و $R^2 = 0/63$ به عنوان مناسب‌ترین معادله برای تخمین ضریب تشت و تبخیر-تعرق مرجع ($R^2 = 0/85$; $NRMASE = 0/18$) برای منطقه فسا انتخاب شد. آنالیز حساسیت نشان داد که به ترتیب داده‌های سرعت باد (U)، رطوبت نسبی (RH)، فاصله تشت از پوشش گیاهی (F)، شیب منحنی فشار بخار اشباع (Δ)، ساعت آفتابی (n)، و فشار هوا (P) بیشترین تأثیر را در تخمین ضریب تشت تبخیر دارد. با استناد به نتایج آماری و تحلیل حساسیت، معادله‌ای برای برآورد ضریب تشت در منطقه فسا و سایر مناطق دارای اقلیم یکسان با آن منطقه استخراج شد.

واژه‌های کلیدی: ضریب تشت، معادلات تجربی، آنالیز حساسیت، پنمن-مانتیت-فانو

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فسا، فسا، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mj_amiri@fasau.ac.ir

مقدمه

از نسبت آنها K_{Pan} را تعیین کرد، ولی عدم وجود ایستگاه‌های مجهز هواشناسی در بسیاری از مناطق مشکل بزرگی است (۲). روش‌های تجربی برای به‌دست آوردن ضریب تشت شامل روش‌های روش‌های ۱- آلن و پرویت (۱)، ۲- کوئکا (۷)، ۳- اشنایدر (۲۱)، ۴- اشنایدر اصلاح شده (۱۳)، ۵- پریرا و همکاران (۱۵)، ۶- اورنگ (۱۴)، ۷- راگوانشی و والندر (۱۶) و ۸- فائو (۱۸) ۵۶ است. این روابط از راه برازش یک رابطه خطی و یا غیرخطی بین متغیرهای سرعت باد، رطوبت نسبی و فاصله تشت از پوشش گیاهی به‌دست آمده‌اند (۱۱، ۱۲ و ۱۸).

شریفیان و قهرمان (۱۹) با استفاده از داده‌های تشت تبخیر ایستگاه هواشناسی گرگان، مقادیر ET_0 را محاسبه و نتایج آن را با مقادیر ET_0 روش فائو-پنمن-مانتیت مقایسه کردند. آنها با استفاده از نتایج بررسی‌های رگرسیونی و آماری به این نتیجه رسیدند که می‌توان از روش‌های اورنگ و اشنایدر اصلاح شده برای برآورد مقادیر ET_0 روزانه، از روش‌های کوئکا، اشنایدر اصلاح شده و آلن-پرویت برای برآورد مقادیر ET_0 ده روزه واز روش‌های کوئکا و اشنایدر اصلاح شده برای محاسبه ET_0 ماهانه در منطقه مطالعاتی و سایر مناطقی که دارای اقلیم مشابه هستند استفاده کرد. امیری و همکاران (۳) برای تعیین ضریب تشت تبخیر K_{Pan} در منطقه اصفهان، روش‌های مختلف تعیین ضریب تشت را مورد بررسی قرار داده و بیان کردند که بهترین روش تخمین K_{Pan} برای تخمین تبخیر-تعرق روزانه به‌ترتیب معادله پریرا و همکاران (۱۵) و دورنبوس و پرویت (۱۸) است. سبزی پرور و همکاران (۱۷) به بررسی و ارزیابی رابطه‌های تجربی ضریب تشت برای برآورد ET_0 در دو اقلیم گرم و خشک و نیمه‌خشک سرد پرداختند. در پژوهش این محققین دو رابطه اورنگ (۱۴) و راگوانشی و والندر (۱۶) به‌عنوان بهترین رابطه برای تخمین ضریب تشت در اقلیم نیمه‌خشک سرد پیشنهاد شد و روابط اشنایدر (۲۱) و اورنگ (۱۴) برای استفاده در اقلیم گرم و خشک بهترین تشخیص داده شدند. یزدانی و همکاران (۲۳) با ضرب داده‌های ۱۴ ساله تشت تبخیر ایستگاه هواشناسی آمل در مقادیر ضریب تشت محاسبه

محدودیت منابع آبی و وقوع خشکسالی‌های اخیر از مهم‌ترین عواملی است که توسعه کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک را تحت تأثیر قرار داده است، بنابراین مدیریت منابع آب در این مناطق نقش کلیدی در توسعه پایدار کشاورزی بر عهده دارد (۵). تبخیر-تعرق از عمده‌ترین اجزای چرخه هیدرولوژی است که تخمین درست آن در طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری، مطالعات منابع آب و موارد مشابه دیگر از اهمیت زیادی برخوردار است (۲). اثر متقابل پارامترهای هواشناسی از قبیل دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، تشعشع و برخی پارامترهای ناشناخته سبب شده است، روابط ارائه شده برای تخمین تبخیر-تعرق، به روابط غیرخطی و پیچیده تبدیل شوند (۲). بنابراین مدلی که بتواند با استفاده از حداقل داده‌های هواشناسی، مقدار تبخیر-تعرق را به‌صورت دقیق برآورد کند، بسیار مفید خواهد بود. تبخیر-تعرق مرجع (ET_0) را می‌توان از روی داده‌های هواشناسی محاسبه کرد. بر مبنای نتایج حاصل از اجلاس مشاوره کارشناسی در ماه مه سال ۱۹۹۰ میلادی، در حال حاضر، روش پنمن-مانتیت-فائو به‌عنوان تنها روش استاندارد برای محاسبه و تعیین تبخیر-تعرق مرجع توصیه شده است. این روش به داده‌های تابش، دمای هوا، رطوبت هوا و سرعت باد نیازمند است (۱۱، ۱۲ و ۱۸).

تبخیر-تعرق گیاه مرجع، همچنین می‌تواند بر مبنای تبخیر اندازه‌گیری شده از تشت برآورد شود. کارایی به‌کارگیری تشت در برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع به‌طور تجربی ثابت شده است (۳ و ۴). در این روش با اندازه‌گیری تبخیر از تشت و گنجاندن ضریب تجربی تشت (K_{Pan}) در آن، تبخیر به تبخیر-تعرق مرجع مرتبط می‌شود. روش تشت کلاس A یکی از روش‌های بسیار رایج است که به‌دلیل سادگی، هزینه نسبتاً کم و توانایی تخمین تبخیر-تعرق روزانه، به‌طور گسترده در جهان استفاده می‌شود (۱۱ و ۱۸). اگر چه به‌وسیله ایستگاه‌های مجهز به دستگاه‌های خودکار هواشناسی و امکانات کامپیوتری به راحتی می‌توان تبخیر از تشت و تبخیر-تعرق مرجع را محاسبه و

۱۰)، M5 (۲۲)، نروفازی (۸) و غیره برای تخمین ضریب تشت استفاده کردند. هدف کلی از این پژوهش برآورد ضریب تشت تبخیر کلاس A با استفاده از مدل‌های مختلف اصلاح شده تجربی و همچنین مقایسه و ارزیابی تبخیر- تعرق حاصل از آنها با تبخیر- تعرق پنمن مانتیث فائو است. بدین ترتیب اهداف خاص این تحقیق را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- ۱- تخمین ضریب تشت تبخیر کلاس A با استفاده از ۸ معادله تجربی و مقایسه نتایج به دست آمده با ضریب تشت اندازه‌گیری شده؛ ۲- تخمین تبخیر- تعرق مرجع با استفاده از ضریب تشت به دست آمده در بند ۱ و مقایسه نتایج با ET_0 بر اساس داده‌های مستقل؛ ۳- انجام آنالیز حساسیت داده‌های هواشناسی مؤثر بر تشت تبخیر کلاس A؛ ۴- انتخاب بهترین معادله تجربی بر اساس آنالیز حساسیت؛ ۵- تصحیح ضرایب روابط تجربی با استفاده از داده‌های هواشناسی ۸ ساله؛ و ۶- اعتبارسنجی معادلات تجربی حاصل شده بر اساس داده‌های مستقل ۲ ساله.

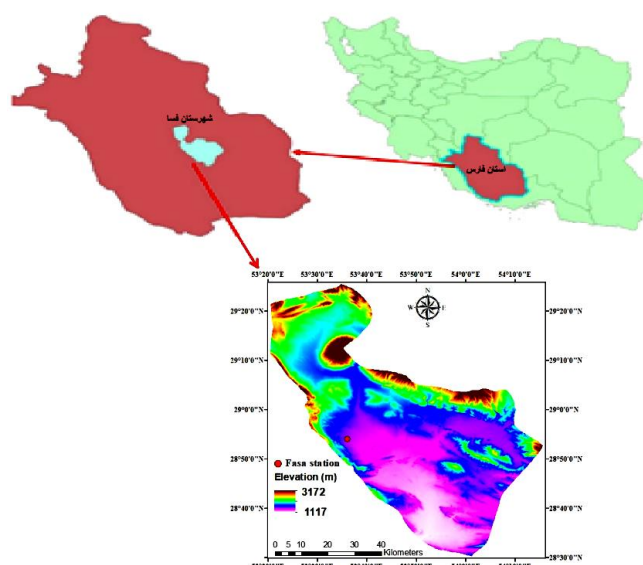
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

برای انجام این پژوهش از داده‌های هواشناسی ایستگاه هواشناسی شهرستان فسا استفاده شد (شکل ۱). این ایستگاه در ۱۰ کیلومتری جاده فسا به داراب قرار گرفته و دارای طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ۴۱ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۸ درجه و ۵۸ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۲۸۸ متر از سطح دریا است. متوسط بارندگی سالانه ۲۸۹/۹ میلی‌متر و میانگین دمای ۱۹/۳ درجه سانتی‌گراد است. داده‌های مورد استفاده شامل دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی حداقل و حداکثر، ساعات آفتابی، و میانگین سرعت باد به صورت روزانه به مدت ۱۰ سال است و بر اساس شاخص دی-مارتن دارای اقلیم خشک و نیمه خشک است. از آنجایی که رژیم بارندگی دشت فسا مدیترانه‌ای است، اکثر بارندگی در فصل زمستان اتفاق می‌افتد (۲۵). داده‌های سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری

شده بر اساس معادلات تجربی، مقادیر ET_0 را محاسبه کرده و نتایج آن را با مقادیر محاسبه شده از روش پنمن مانتیث فائو مقایسه کردند. سپس حساسیت‌های معادلات فوق را با ایجاد $\pm 10\%$ ، $\pm 20\%$ و $\pm 30\%$ درصد تغییر در پارامترهای ورودی رطوبت نسبی و سرعت باد مورد بررسی قرار دادند. این محققین گزارش دادند، برای محاسبه ET_0 روزانه از داده‌های تبخیر از تشت، به ترتیب روش‌های کوئنکا، اشنایدر، آلن و پرویت و اورنگ اولویت دارند. برای محاسبه ET_0 در دوره‌های ده روزه به ترتیب روش‌های کوئنکا، اشنایدر، آلن و پرویت و برای تعیین ET_0 ماهانه نیز به ترتیب روش‌های اشنایدر، کوئنکا و آلن و پرویت پیشنهاد شد. نتایج تحلیل حساسیت این محققین نشان داد که حساسیت روش‌های اورنگ، آلن و پرویت و اشنایدر اصلاح شده نسبت به تغییر پارامترهای ورودی کمتر از سایر روش‌هاست. با استناد به نتایج آماری و تحلیل حساسیت، روابط آلن و پرویت و اشنایدر اصلاح شده را برای برآورد ضریب تشت در منطقه آمل و سایر مناطق دارای اقلیم مشابه، مناسب‌تر تشخیص داده‌اند. شکری و همکاران (۲۰) نشان دادند که برای محاسبه ET_0 به صورت روزانه و ده روزه در منطقه اهواز بهتر است به ترتیب از معادلات آلن و پرویت و اشنایدر استفاده شود. آسچونیتیس و همکاران (۶) به بررسی ۶ معادله مختلف برآورد K_{Pan} از جمله کوئنکا، آلن و پرویت، اشنایدر، راگوانوشی و والندر، پیریرا و اورنگ برای فصل رشد تابستانه در دشت تسالونیک در یونان که دارای محیط نیمه خشک مدیترانه‌ای است پرداختند. ارزیابی معادلات ضریب تشت با دو سال داده Epan و با استفاده از ET_0 که از معادله پنمن مانتیث استاندارد به دست می‌آید، انجام شد. نتایج ایشان نشان داد که معادله کوئنکا برآورد دقیق‌تری از K_{Pan} ارائه می‌کند.

در تمامی مطالعات انجام شده، هیچ کدام از روش‌های تجربی موجود دارای دقت قابل قبولی در تخمین ضریب تشت نیستند، اگرچه مقادیر K_{Pan} به دست آمده از فرمول‌های فوق ET_0 را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی می‌کند. بدین منظور پژوهشگران مختلف از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (۹) و



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

غیرخطی زیر را پیشنهاد کردند (۱):

$$K_{pan} = 0.108 - (3.31 \times 10^{-4} U_2) + 0.0422 \ln(F) + 0.1434 \ln(RH) - [6.31 \times 10^{-4} (\ln(F))^2 \times \ln(RH)] \quad (3)$$

رابطه اشنايدر (۱۹۹۲)

اشنايدر (۱۹۹۲) معادله ديگري مبتني بر رگرسيون چندمتغيره خطي عرضه کرد که این معادله نیز در سال‌های بعد اصلاح شد (۲۱):

$$K_{pan} = 0.482 + [0.024 \ln(F)] - (3.76 \times 10^{-4} U_2) + (0.0045 RH) \quad (4)$$

رابطه اشنايدر اصلاح شده

معادله اشنايدر در سال‌های بعد به صورت زیر اصلاح شد (۱۳):

$$K_{pan} = 0.5321 - (3 \times 10^{-4} U_2) + (0.0249 \ln(F)) + (0.0025 RH) \quad (5)$$

رابطه پرييرا و همکاران (۱۹۹۵)

پرييرا و همکاران (۱۹۹۵) با توجه به مقادير سرعت باد (U_2)، شيب فشار بخار اشباع (Δ) و ثابت سايکرومتری (γ) رابطه ديگري برای برآورد ضريب تشت پیشنهاد کردند (۱۵).

اندازه گيري شده بودند که با استفاده از رابطه زیر به ارتفاع ۲ متری از سطح زمین تبدیل شدند:

$$U_2 = U_z \left(\frac{2}{z} \right)^{0.15} \quad (1)$$

در این رابطه، U_z سرعت باد در ارتفاع Z برحسب متر بر ثانیه، U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری برحسب متر بر ثانیه و Z ارتفاعی هست که سرعت باد در آن اندازه‌گیری می‌شود (۱۰ متر).

مدل های تجربی تخمین ضريب تشت تبخير

کوئنکا (۱۹۸۹)

کوئنکا به منظور برآورد ضريب تشت رابطه‌ای زیر را با توجه به مقادير میانگين رطوبت نسبی روزانه (RH)، سرعت باد (U_2) و فاصله تشت از پوشش گیاهی (F) ارائه داد (۷):

$$K_{pan} = 0.475 - (0.245 \times 10^{-3} U_2) + (0.516 \times 10^{-2} RH) + (0.118 \times 10^{-2} F) - (0.16 \times 10^{-4} RH^2) - (0.101 \times 10^{-5} F^2) - (0.8 \times 10^{-8} RH^2 U_2) - (0.1 \times 10^{-7} RH^2 F) \quad (2)$$

آلن و پروئیت (۱۹۹۱)

آلن و پروئیت (۱۹۹۱) با استفاده از متغیرهای بیان شده رابطه‌ای

کیلومتر بر روز صفر در نظر گرفته می‌شود. همچنین X_5 و X_6 به ترتیب حدود رطوبت نسبی در داخل بازه‌های ۴۰-۷۰ و بیشتر از ۷۰ درصد است. به‌طور مشابه مقدار این متغیرها نیز در صورت قرار گرفتن در بازه مربوطه، یک و در صورت کمتر از ۴۰ درصد صفر لحاظ می‌شود. X_1 نیز برابر با $\ln(F)$ در نظر گرفته می‌شود.

روش پنمن-مانتیت-فائو

پژوهش‌های انجام گرفته در نقاط مختلف جهان نشان می‌دهد که مقادیر تبخیر-تعرق برآورد شده با استفاده از رابطه پنمن-مانتیت-فائو (۱۹۹۸) نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده لایسیمتری در مقایسه با سایر روش‌ها دقیق‌تر است (۶). در این پژوهش نیز روش پنمن-مانتیت-فائو به‌عنوان روش مرجع در نظر گرفته شد که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left[\frac{900}{(T + 273)} \right] U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (10)$$

در این معادله ET_0 تبخیر-تعرق مرجع (میلی‌متر بر روز)، R_n تابش خالص ورودی به سطح گیاه (مگاژول بر مترمربع بر روز)، G شارگرمای خاک (مگاژول بر مترمربع بر روز)، T دمای هوا (درجه سلسیوس)، U_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه)، e_s فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)، e_a فشار بخار واقعی (کیلوپاسکال)، Δ شیب منحنی فشار بخار (کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس) و γ ضریب ثابت سایکرومتری (کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس)

روش تشت تبخیر

تبخیر از تشت با یک ضریب تجربی که توسط معادلات ۱ تا ۸ به دست می‌آید به تبخیر-تعرق مرجع مرتبط می‌شود (۶):

$$ET_0 = K_{pan} \times E_{pan} \quad (11)$$

که در آن ET_0 تبخیر-تعرق مرجع (میلی‌متر بر روز)، K_{pan} ضریب تشت تبخیر و E_{pan} تبخیر از تشت (میلی‌متر بر روز) است. از نسبت

$$K_{pan} = \frac{0.85 \times (\gamma + \Delta)}{[\Delta + \gamma (1 + 0.33 U_2)]} \quad (6)$$

مدل اورنگ (۱۹۹۸)

اورنگ (۱۹۹۸)، مشابه مدل اشنایدر (۱۹۹۲) با استفاده از روش رگرسیون خطی معادله زیر را عرضه کرد (۱۴):

$$K_{pan} = 0.51206 - (0.000321 U_2) + (0.002889 RH) + (0.03188 \ln(F)) - (0.000107 RH \ln(F)) \quad (7)$$

معادله فائو ۵۶

آلن و همکاران (۱۹۹۸)، رابطه زیر را برای تخمین ضریب تشت ارائه دادند (۱۸):

$$K_{pan} = 0.61 + 0.00341 RH - 0.000162 U_2 RH - 0.00000959 U_2 F + 0.0032 U_2 \ln(F) - 0.00289 U_2 \ln(86.4 U_2) - 0.0106 \ln(F) + 0.00063 [\ln(F)]^2 \ln(86.4 U_2) \quad (8)$$

در همه روابط فوق RH میانگین رطوبت نسبی (درصد)، F فاصله تشت از پوشش گیاهی (متر) و U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (کیلومتر بر روز) است، به‌جز معادله فائو که بر حسب (متر بر ثانیه) است.

مدل راگوانشی و والندر (۱۹۹۸)

راگوانشی و والندر (۱۹۹۸) با به‌کارگیری فاصله تشت از پوشش گیاهی و طبقه‌بندی سرعت باد و رطوبت نسبی، معادله زیر را به‌منظور برآورد ضریب تشت عرضه کردند (۱۶):

$$K_{pan} = 0.5944 + 0.0242 X_1 - 0.0583 X_2 - 0.1333 X_3 - 0.2083 X_4 + 0.0812 X_5 + 0.1344 X_6 \quad (9)$$

در رابطه فوق X_2 ، X_3 و X_4 به ترتیب حدود سرعت متوسط باد در داخل بازه‌های ۱۷۵-۴۲۵، ۱۷۵-۷۰۰ و ۴۲۵-۷۰۰ کیلومتر بر روز را نشان می‌دهند. مقدار این متغیرها در صورت قرار گرفتن در بازه مربوطه، برابر یک و در صورت کمتر از ۱۷۵

شاخص‌های ارزیابی

در این پژوهش، به منظور ارزیابی دقت مدل‌ها در برآورد تبخیر-تعرق مرجع و ضریب تشت تبخیر و انتخاب بهترین مدل، از شاخص‌های توافق (Agreement index) (D)، میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین مجذور مربعات خطای نرمال (NRMSE)، و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد (۱۳ و ۱۸):

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (12)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - E_i| \quad (13)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}}{\bar{O}} \times 100 \quad (14)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(E_i - \bar{E})}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2} \right]^2 \quad (15)$$

که در تمامی معادلات O_i مقادیر مشاهده شده، E_i مقادیر تخمین زده شده و \bar{O} میانگین مقادیر مشاهده شده و n تعداد داده‌ها است. هرچه NRMSE به صفر نزدیک‌تر باشد اختلاف مقادیر برآورد شده با مقادیر مشاهده شده کمتر است. اگر NRMSE کمتر از ۱۰ درصد شود دقت برآورد عالی است، بین ۲۰-۱۰ درصد برآورد خوب، بین ۳۰-۲۰ درصد برآورد مناسب و اگر NRMSE بیشتر از ۳۰ درصد شود برآورد نامناسب است. شاخص توافق عددی بین صفر و یک است که به ترتیب نشان‌دهنده عدم توافق و توافق کامل است (۱۳).

نتایج و بحث

تخمین ضریب تشت تبخیر کلاس A با استفاده از ۸ معادله تجربی و مقایسه نتایج به دست آمده با ضریب تشت مشاهده شده از معادلات تجربی شامل آلن و پرویت، اشنایدر، اشنایدر اصلاح شده، فائو ۵۶، کوئنکا، اورنگ، پیریرا و راگووانشی و والندر برای تخمین ضریب تشت استفاده شد. داده‌های هواشناسی شامل سرعت باد، رطوبت نسبی و فاصله تشت

تبخیر-تعرق مرجع پنمن-مانتیت-فائو به داده‌های تشت تبخیر، مقادیر ضریب تشت برآورد شد. داده‌های ضریب تشت تبخیر به عنوان داده‌های مرجع در نظر گرفته شدند و سایر معادلات تجربی محاسبه ضرایب تشت با آن سنجیده و اصلاح شد.

انجام آنالیز حساسیت داده‌های هواشناسی مؤثر بر ضریب تشت تبخیر کلاس A

برای انجام آنالیز حساسیت داده‌های مؤثر بر تخمین ضریب تشت از نرم‌افزار Neuro Solutions استفاده شد.

تصحیح ضرایب تجربی با استفاده از داده‌های هواشناسی ۸ ساله

کلیه معادلات تجربی بسته به خطی و غیرخطی بودن آنها در نرم افزار Minitab با روش رگرسیون گام به گام تصحیح شدند. پارامترهای مستقل در روابط تجربی به عنوان ورودی در نرم‌افزار Minitab وارد و روابط تصحیح شدند. لازم به ذکر است برای تصحیح روابط از ۸ سال داده‌های هواشناسی شهرستان فسا استفاده شد.

اعتبارسنجی معادلات تجربی ضریب تشت تبخیر بر اساس داده‌های مستقل ۲ ساله

پس از برآورد معادلات تجربی ضریب تشت تبخیر با داده‌های ۸ ساله شهرستان فسا، صحت‌سنجی این معادلات با استفاده از داده‌های ۲ ساله مستقل مورد بررسی قرار گرفت و میزان عملکرد و خطای معادلات نیز برآورد شد.

برآورد معادله ضریب تشت تبخیر با استفاده از داده‌های هواشناسی برای منطقه فسا و مناطق مشابه

با استفاده از خروجی آنالیز حساسیت، از داده‌های سرعت باد، رطوبت نسبی، ساعت آفتابی و شیب منحنی فشار بخار اشباع شهرستان فسا استفاده شد و معادله‌ای برای این منطقه و مناطق دارای آب و هوای مشابه در نرم‌افزار SPSS ایجاد شد و اعتبار این معادله مورد بررسی قرار گرفت.

معادلات بر اساس پارامترهای آماری در جدول ۲ ارائه شده است. اگرچه بر اساس شاخص‌های R^2 ، d ، MAE ، $RMSE$ معادلات تجربی تخمین ضریب تشت تبخیر با دقت قابل قبولی می‌تواند تبخیر- تعرق مرجع روزانه را تخمین بزند، ولی شاخص $NRMSE$ بیان می‌کند که در استفاده از این معادلات بایستی احتیاط کرد. مطابق با این شاخص به جز معادله فائو ۵۶ که دارای عملکرد مناسبی در تخمین تبخیر- تعرق مرجع روزانه دارد، بقیه معادلات دارای عملکرد مناسبی نیست ($NRMSE > 30\%$). در رتبه‌بندی معادلات، مدل فائو ۵۶، اشنایدر اصلاح شده، اشنایدر، کوئنکا، اورنگ، راگوانشی و والندر، آلن و پروئیت و پریرا و همکاران به ترتیب در رتبه های ۱ تا ۸ قرار می‌گیرند. در پژوهشی که توسط یزدانی و همکاران (۲۳) برای تعیین بهترین مدل محاسبه ضریب تشت تبخیر بر پایه آنالیز حساسیت انجام دادند به این نتیجه رسیدند که برای محاسبه ET_0 روزانه از داده‌های تبخیر از تشت به ترتیب روش‌های کوئنکا، اشنایدر و آلن و پروئیت مناسب هستند. با توجه به اینکه در این پژوهش از داده‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک استفاده شده و منطقه آمل دارای آب و هوای مرطوب است، می‌توان علت متفاوت بودن نتایج را به آن نسبت داد.

تصحیح ضرایب روابط تجربی و اعتبارسنجی آن‌ها

معادلات تجربی ضریب تشت تبخیر با داده‌های هواشناسی ۸ ساله (۱۳۸۶-۱۳۹۴) ایستگاه هواشناسی فسا با روش رگرسیون گام به گام تصحیح شد و نتایج آن ارائه شده است.

آلن و پروئیت

$$K_p = -0.2571 + 0.000874U + 0.0030RH + 0.1816\ln(RH) \quad (16)$$

اشنایدر

$$K_p = 0.23605 + 0.0071RH + 0.0008U \quad (17)$$

اشنایدر اصلاح شده

$$K_p = 0.23605 + 0.0071RH + 0.0008U \quad (18)$$

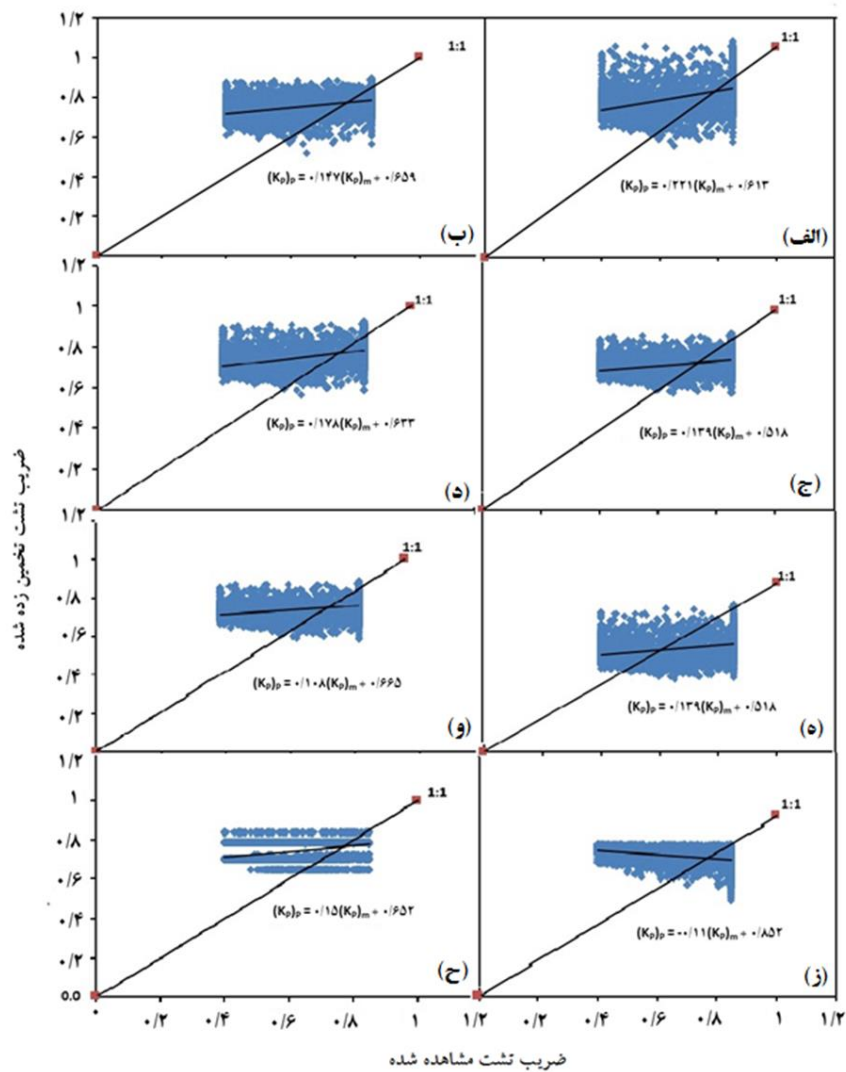
تبخیر از پوشش گیاهی به‌عنوان ورودی مدل‌ها در نظر گرفته شدند و مقدار ضریب تشت تبخیر برآورد شد. مقادیر ضرایب برآورد شده با مقادیر اندازه‌گیری شده ضریب تشت تبخیر برای تمامی معادلات در شکل ۲ ارائه شد.

همانگونه که شکل ۲ نشان می‌دهد، تخمین ضریب تشت توسط این مدل‌ها همگی از دقت کمی برخوردار بوده و رفتار تمامی این نمودارها مشابه هم است که این می‌تواند به دلیل محدودیتی باشد که این روش برای داده‌های هواشناسی نظیر سرعت باد و رطوبت نسبی در نظر می‌گیرند. همانگونه که مشاهده می‌شود ضریب تشت مشاهده شده بین ۰/۴ تا ۰/۸۵ تغییر می‌کند در حالی که تمامی معادلات این ضریب را بین ۰/۶ تا ۱ تخمین می‌زند. مقایسه بین این مدل‌ها بر اساس پارامترهای آماری در جدول ۱ ارائه شده است. همانگونه که جدول ۱ نشان می‌دهد تمامی معادلات تجربی دارای ضریب تبیین کمتر از ۰/۳ است و طبق شاخص‌های MAE ، $NRMSE$ ، d دارای عملکرد نامناسبی در تخمین ضریب تشت هستند. نتایج مشابهی توسط سنتلاس و فولگاتی (۱۸) به دست آمد.

تخمین تبخیر- تعرق مرجع با استفاده از ضریب تشت به دست آمده از معادلات تجربی و مقایسه نتایج با ET_0 بر

اساس داده‌های مستقل

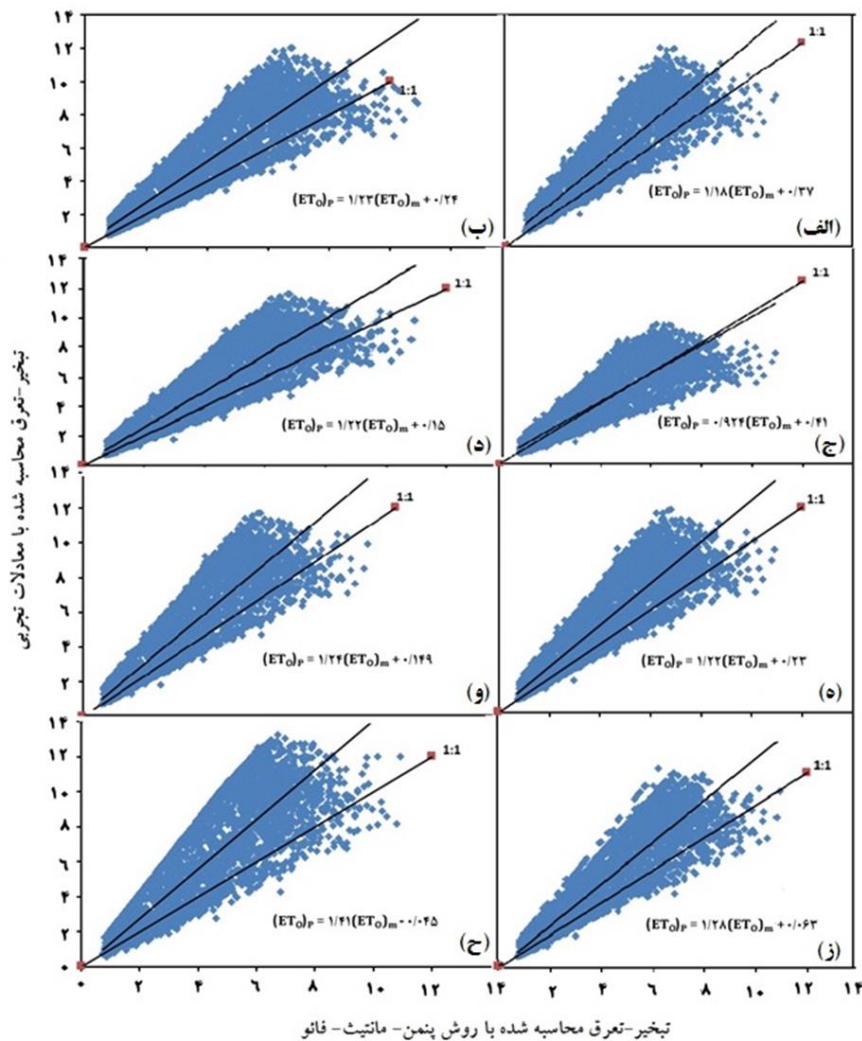
ضرایب تشت به دست آمده از معادلات تجربی در مقادیر داده‌های هواشناسی تشت تبخیر ضرب شده و تبخیر- تعرق مرجع روزانه به دست آمده با ET_0 پنمن ماتیت فائو مورد مقایسه قرار گرفت و نمودارهای آن در شکل ۳ ارائه شد. نتایج نشان داد که اگرچه معادلات تجربی ضرایب تشت تبخیر از عملکرد بالایی در تخمین ضریب مربوطه برخوردار نیستند ولی با ضرب این ضرایب در داده‌های تشت تبخیر عملکرد آنها بهبود پیدا کرده و در صورت عدم توانایی استفاده از سایر روش‌ها می‌توان از این معادلات تجربی نیز برای محاسبه ET_0 روزانه استفاده کرد. سنتلاس و فولگاتی (۱۸) و حیدری و حیدری (۱۲) نتایج مشابهی ارائه کردند. مقایسه بین این



شکل ۲. رابطه بین ضریب تشت مشاهده شده و تخمین زده شده با استفاده از: الف) معادله اشنایدر ، ب) آلن و پروئیت ، ج) اشنایدر اصلاح شده ، د) کوئنکا ، ه) فائو ۵۶ ، و) اورنگ ، ز) پیریرا و ح) راگوانشی و والندر

جدول ۱. پارامترهای آماری ۸ معادله تجربی در تخمین ضریب تشت تبخیر

روش	MAE	d	NRMSE	R ²	RMSE
آلن و پروئیت	۰/۱۶	۰/۵۵	۰/۳۱	۰/۲	۰/۲
اشنایدر	۰/۱۵	۰/۵۹	۰/۳۱	۰/۲۳	۰/۱۹
اشنایدر اصلاح شده	۰/۱۵	۰/۵۲	۰/۲۹	۰/۱۸۲	۰/۱۸
فائو ۵۶	۰/۱۴	۰/۵۱	۰/۲۶	۰/۱۱	۰/۱۷
کوئنکا	۰/۱۵	۰/۵۷	۰/۳	۰/۲۵	۰/۱۹
اورنگ	۰/۱۶	۰/۵۲	۰/۳	۰/۱۶	۰/۱۹
پیریرا	۰/۲	۰/۴	۰/۳۹	۰/۱۶	۰/۲۵
راگوانشی و والندر	۰/۱۵	۰/۵۵	۰/۳	۰/۲۸	۰/۱۹



شکل ۳. رابطه بین تبخیر- تعرق روزانه به دست آمده از روش پنمن- مانیتیت- فانو و معادلات تجربی ضریب تشت تبخیر: الف) معادله اشنایدر ، ب) آلن و پرویث ، ج) فانو ۵۶ ، د) اشنایدر اصلاح شده، ه) کوئکا، و) اورنگ، ز) راگوانشی و والندر و ح) پیریا

جدول ۲. پارامترهای آماری ۸ معادله تجربی در تخمین تبخیر- تعرق مرجع

R ²	RMSE	NRMSE	d	MAE	رتبه	روش
۰/۷۶	۱/۹۵	۰/۴۸	۰/۸۵	۱/۳۹	۷	آلن و پرویث
۰/۷۵	۱/۸۵	۰/۴۵	۰/۸۶	۱/۳۲	۳	اشنایدر
۰/۷۶	۱/۸۴	۰/۴۵	۰/۸۶	۱/۳۲	۲	اشنایدر اصلاح شده
۰/۷۲	۱/۲۳	۰/۳	۰/۹۱	۰/۹۶	۱	فانو ۵۶
۰/۷۷	۱/۸۶	۰/۴۶	۰/۸۶	۱/۳۲	۴	کوئکا
۰/۷۶	۱/۸۹	۰/۴۶	۰/۸۶	۱/۳۵	۵	اورنگ
۰/۷۲	۲/۶	۰/۶۴	۰/۷۹	۱/۸۳	۸	پیریا
۰/۷۸	۱/۹۵	۰/۴۸	۰/۸۶	۱/۳۹	۶	راگوانشی و والندر

فائو ۵۶

$$Kp = 0.137 + 0.2819U + 0.00893RH - 0.02237Ln(86.4u)U - 0.0019URH \quad (19)$$

کوئنکا

$$Kp = 0.0081 + 0.001417U + 0.015834RH - 0.000071RH^2 \quad (20)$$

اورنگ

$$Kp = 0.236 + 0.000842U + 0.00155Ln(F).RH \quad (21)$$

پریبرا

$$K_{pan} = 0.56 \times (\gamma + \Delta) / [\Delta + \gamma(1 + (-0.003U_2))] \quad (22)$$

راگوانشی و والندر

$$KP = 0.7058 - 0.05830X_1 - 0.1333X_2 + 0.08120X_4 + 0.1344X_5 \quad (23)$$

پس از تصحیح معادلات تجربی ضریب تشت تبخیر برای منطقه فسا با استفاده از داده‌های هواشناسی ۲ ساله (۱۳۹۴-۱۳۹۶) میزان اعتبار هر یک از معادلات تجربی سنجیده شد. نتایج اعتبار هر یک از معادلات در جدول ۳ نشان داده شده است. همانگونه که جدول ۱ نشان می‌دهد تمامی معادلات تجربی دارای عملکرد نامناسبی در تخمین ضریب تشت تبخیر هستند، اما پس از تصحیح معادلات برای شهرستان فسا دقت معادلات افزایش قابل توجهی یافته است (جدول ۳). بر اساس شاخص NRMSE، معادلات کوئنکا و راگوانشی و والندر دارای عملکرد خوب و معادلات آلن و پروئیت، اشنایدر، اشنایدر اصلاح شده، فائو ۵۶ و اورنگ دارای عملکرد مناسبی برای تخمین ضریب تشت تبخیر در شهرستان فسا هستند. اگرچه معادله پریبرا و همکاران بعد از اصلاح نیز همچنان دارای عملکرد نامناسبی است. بر اساس تمامی شاخص‌های آماری معادله کوئنکا اصلاح شده دارای بهترین دقت در برآورد ضریب تشت تبخیر در شهرستان فسا است. آسچونیتیس و همکاران (۶) با بررسی ۶ معادله مختلف برآورد ضریب تشت تبخیر از

جمله کوئنکا، آلن و پروئیت، اشنایدر، راگوانشی و والندر، پریبرا و اورنگ در شرایط نیمه‌خشک مدیترانه‌ای، به این نتیجه رسیدند که معادله کوئنکا برآورد دقیق‌تری از K_{Pan} ارائه می‌کند. حیدری و حیدری (۱۲) با بررسی ۷ معادله تجربی تخمین ضریب تشت در شهرستان قم به این نتیجه رسیدند که معادله کوئنکا دارای بهترین عملکرد است.

انجام آنالیز حساسیت داده‌های هواشناسی مؤثر بر تشت

تبخیر کلاس A و انتخاب بهترین معادله برای منطقه فسا

برای انجام آنالیز حساسیت از شاخص میزان تأثیر استفاده شد. این شاخص میزان تأثیر هر یک از پارامترهای هواشناسی بر تخمین ضریب تشت تبخیر را نشان می‌دهد. هر چه مقدار این شاخص بیشتر باشد اهمیت پارامتر مورد نظر در تخمین ضریب تشت بیشتر خواهد بود (۲۴):

$$II = 100 \times \left(1 - \frac{R_i}{R_{CB}} \right) \quad (24)$$

در این معادله R_i ضریب همبستگی بین داده‌های اندازه‌گیری و تخمین زده شده برای حالتی که یک متغیر حذف شود و R_{CB} ضریب همبستگی بین داده‌های اندازه‌گیری و تخمین زده شده است. برای این منظور پارامترهای هواشناسی شامل رطوبت نسبی متوسط (RH)، فاصله پوشش گیاهی از تشت تبخیر (F)، ساعت آفتابی (n)، سرعت باد (U)، فشار هوا (P) و شیب منحنی فشار بخار اشباع (Δ) به‌عنوان ورودی در نظر گرفته شد. ابتدا در نرم‌افزار Neuro Solutions بهترین ساختار برای تخمین ضریب تشت تبخیر به‌وجود آمد و سپس با حذف هر یک از ورودی‌ها، عملکرد آن پارامتر در خروجی سنجیده و نتایج در جدول ۴ ارائه شد. در این جدول شاخص II میزان تأثیر حذف هر ورودی را بر تخمین ضریب تشت نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول مشخص است با حذف سرعت باد (U) عملکرد مدل پایین می‌آید و شاخص II بیشترین مقدار را دارد درحالی که با حذف فشار هوا (P) در عملکرد مدل تفاوت قابل توجهی دیده نمی‌شود و شاخص II کمترین مقدار را دارد. به‌طور کلی این جدول نشان می‌دهد که پارامتر سرعت باد

جدول ۳. پارامترهای آماری ۸ معادله تجربی اصلاح شده در تخمین ضریب تشت تبخیر

R ²	NRMSE	d	MAE	رتبه	روش
۰/۵۴	۰/۲۲	۰/۶۴	۰/۱۴	۳	آلن و پروئیت
۰/۵۳	۰/۲۴	۰/۶۲	۰/۱۵	۵	اشنایدر
۰/۵۳	۰/۲۴	۰/۶۲	۰/۱۵	۵	اشنایدر اصلاح شده
۰/۵۵	۰/۲۲	۰/۶۳	۰/۱۴	۴	فانو ۵۶
۰/۶۳	۰/۱۶	۰/۶۸	۰/۱۲	۱	کوئیکا
۰/۵۳	۰/۲۴	۰/۶۲	۰/۱۵	۵	اورنگ
۰/۵۱	۰/۳۲	۰/۴۹	۰/۱۶	۶	پریرا
۰/۵۸	۰/۱۹	۰/۶۵	۰/۰۹	۲	راگوانشی و والندر

جدول ۴. آنالیز حساسیت پارامترهای هواشناسی در تخمین ضریب تشت تبخیر

R ²	RMSE	II	ورودی	پارامتر حذف شده
۰/۷۲	۰/۰۹	-	RH-U-n-F-P-Δ	-
۰/۶	۰/۱۱	۹/۴۱	U-n-F-P-Δ	رطوبت نسبی
۰/۴۸	۰/۱۲	۱۸/۸۲	RH -n-F-P-Δ	سرعت باد
۰/۶۳	۰/۱	۷/۰۵	RH-U-n -P-Δ	فاصله تشت از پوشش گیاهی
۰/۶۲	۰/۱	۷/۰۵	RH-U-n-F-P	شیب منحنی فشار بخار اشباع
۰/۶۸	۰/۱	۳/۵۲	RH-U-n-F -Δ	فشار هوا
۰/۶۴	۰/۱	۵/۸۸	RH-U -F-P-Δ	ساعت آفتابی

ضرایب هر متغیر ورودی برآورد و از نظر معنی داری در سطح ۵ درصد مورد بررسی قرار گرفت.

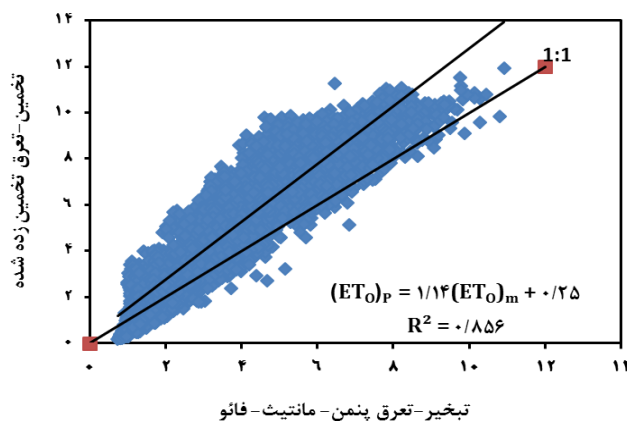
$$K_p = 0.453 + 0.001U + 0.005RH - 1.273\Delta + 0.01n + 0.02F \quad (25)$$

همانگونه که معادله ۲۴ نشان می‌دهد، پارامتر فشار هوا از مدل نهایی حذف شد. شکل ۴ نشان می‌دهد که معادله تجربی به دست آمده دارای دقت قابل قبولی در تخمین تبخیر- تعرق مرجع در شهرستان فسا و مناطق با اقلیم مشابه است ($R^2 > 0.85$). از لحاظ شاخص NRMSE، عملکرد این معادله در محدوده خوب (0.186) تقسیم‌بندی می‌شود. با توجه به نمودارها، جدول‌ها و بررسی‌های به عمل آمده می‌توان نتیجه گرفت که برای برآورد دقیق‌تر تبخیر- تعرق مرجع با استفاده از روش تشت تبخیر می‌توان دو راهکار عمده در نظر گرفت:

بیشترین تأثیر را در برآورد ضریب تشت تبخیر دارد و پس از آن به ترتیب رطوبت نسبی (RH)، فاصله تشت از پوشش گیاهی (F)، شیب منحنی فشار بخار اشباع (Δ)، ساعت آفتابی (n)، و فشار هوا (P) بیشترین تأثیر را در تخمین ضریب تشت تبخیر دارد.

انتخاب بهترین معادله تجربی برای تخمین ضریب تشت تبخیر بر اساس آنالیز حساسیت برای منطقه فسا

برای منطقه فسا و مناطق دارای اقلیم مشابه، معادله ضریب تشت تبخیر بر اساس آنالیز حساسیت برآورد شد. ورودی‌های مدل داده‌های هواشناسی شامل ساعت آفتابی، سرعت باد، رطوبت نسبی، شیب منحنی فشار بخار، فشار و فاصله تشت تبخیر از پوشش گیاهی در نظر گرفته شد. در نرم‌افزار SPSS



شکل ۴. رابطه بین تبخیر-تعرق روزانه به دست آمده از روش پنمن-مانتیت-فائو و معادلات تجربی به دست آمده در منطقه فسا

تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از یک آمار ۱۰ ساله در یک اقلیم خشک و نیمه خشک مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس با استناد به نتایج آماری و تحلیل حساسیت، معادله‌ای برای برآورد ضریب تشت در منطقه فسا و سایر مناطق دارای اقلیم یکسان با آن منطقه استخراج و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج مقایسه بین ET_0 به دست آمده از معادلات تجربی با ET_0 به دست آمده از معادله پنمن-مانتیت-فائو نشان داد که معادله فائو ۵۶ (۳/۰) $R^2 = 0/72$; $NRMASE =$ دارای بهترین عملکرد است و همچنین نتایج مقایسه بین ET_0 به دست آمده از معادلات اصلاح شده تجربی با ET_0 به دست آمده از معادله پنمن-مانتیت-فائو نشان داد که معادله کوئنکا ۱۸ (۱/۰) $R^2 = 0/85$; $NRMASE =$ دارای بیشترین دقت است. نتایج این تحقیق نشان داد که در صورت عدم دقت معادلات تجربی و همچنین عدم امکان استفاده از معادلات فیزیکی به دلیل کمبود داده‌های در دسترس، استفاده از معادله ضریب تشت توسعه داده شده برای هر منطقه می‌تواند جایگزین مناسبی برای تخمین تبخیر-تعرق مرجع باشد.

(۱) تصحیح ضرایب روابط تجربی موجود بر اساس پارامترهای هواشناسی آن منطقه و انتخاب بهترین معادله و (۲) ایجاد معادله ضریب تشت تبخیر بر اساس داده‌های هواشناسی در طول یک دوره آماری حداقل ۱۰ ساله. یزدانی و همکاران (۲۳) نشان دادند که برای محاسبه تبخیر-تعرق روزانه بهتر است به ترتیب از روش های کوئنکا، اشنایدر، آلن و پروئیت و اورنگ استفاده کرد. حیدری و حیدری (۱۲) با مقایسه ۸ مدل تجربی در برآورد تبخیر-تعرق مرجع در منطقه قم به این نتیجه رسیدند که به ترتیب معادلات کوئنکا، عبدالوهاب و اشنایدر، راگوانشی و والندر، اورنگ، اشنایدر، آلن و پروئیت و پیرا و همکاران دارای بیشترین دقت هستند. شکری و همکاران (۲۰) بیان کردند که روش آلن و پروئیت برای محاسبه ضریب تشت به صورت روزانه در شرایط اقلیمی اهواز دارای بیشترین دقت است.

نتیجه گیری

در این تحقیق کارایی روش‌های متفاوت تجربی (آلن و پروئیت (۱)، کوئنکا (۷)، اشنایدر (۲۱)، اشنایدر اصلاح شده (۱۳)، پیرا و همکاران (۱۵)، اورنگ (۱۴)، راگوانشی و والندر (۱۶) و فائو ۵۶ (۱۸)) و اصلاح آنها در برآورد ضریب تشت تبخیر و

منابع مورد استفاده

- Allen, R. G. and W. O. Pruitt. 1991. FAO-24 reference evapotranspiration factors. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 117(5): 758-773.

2. Alsumaiei, A. A. 2020. Utility of artificial neural networks in modeling pan evaporation in hyper-arid climates. *Water* 12(5): 1508.
3. Amiri, M. J., J. Abedi-Koupai and M. Khozaei. 2009. A Determination of the best class A pan coefficient for calculation of daily evapotranspiration in Isfahan region. In: 3th conference on Iran water resource management of 2009, University of Tabriz, Tabriz, Iran. (in Farsi).
4. Amiri, M. J., J. Abedi-Koupai and S. S. Eslamian. 2011. Evaluation of the performance of evaporation pans in greenhouse environment. *Journal of Soil and Plant Interactions-Isfahan University of Technology* 2(1): 63-73. (in Farsi).
5. Amiri, M. J. and S. S. Eslamian. 2010. Investigation of climate change in Iran. *Journal of Environmental Science and Technology* 3(4): 208-216. (<https://scialert.net/abstract/?doi=jest.2010.208.216>).
6. Aschonitis, V. G., V. Z. Antonopoulos and D. M. Papamichail. 2012. Evaluation of pan coefficient equations in a semi-arid Mediterranean environment using the ASCE-standardized Penman-Monteith method. *Agricultural Sciences* 3(1): 58-65. (<https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=16853>).
7. Cuenca, R. H. 1989. *Irrigation System Design: An Engineering Approach*. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
8. Diththakit, P. and C. Chinnarasri. 2011. Estimation of pan evaporation coefficient using neuro-genetic approach. *American Journal of Environmental Sciences* 7(4): 397-401.
9. Eslamian, S. and M. J. Amiri. 2011. Estimation of daily pan evaporation using adaptive neural-based fuzzy inference system. *International Journal of Hydrology Science and Technology* 1(3-4): 164-175.
10. Granata, F., R. Gargano and G. de Marinis. 2020. Artificial intelligence-based approaches to evaluate actual evapotranspiration in wetlands. *Science of The Total Environment* 703: 135653.
11. Grismer, M. E., M. Orang and S. Matyac. 2002. Pan evaporation to evapotranspiration conversion methods. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 128: 180-184.
12. Heydari, M. M. and M. Heydari. 2014. Evaluation of pan coefficient equations for estimating reference crop evapotranspiration in the arid region. *Archives of Agronomy and Soil Science* 60(5): 715-731.
13. Kumar Kar, S., A. Kumar Nema, C. D. Mishra and B. L. Sinha. 2017. Evaluation of class-A pan coefficient models for estimation of reference crop evapotranspiration for dry sub-humid climates. *Journal of Agricultural Engineering* 54(3): 67-74.
14. Orang, M. 1998. Potential accuracy of the popular non-linear regression equations for estimating pan coefficient values in the original and FAO-24 tables. Unpublished Report, California Department of Water Resources, Sacramento, California.
15. Pereira, A. R., N. A. Villa Nova, A. S. Pereira and V. A. Barbieri. 1995. A model for the class A pan coefficient. *Agricultural and Forest Meteorology* 76: 75-82.
16. Raghuvanshi, N. S. and W. W. Wallender. 1998. Converting from pan evaporation to evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 124(5): 275-277.
17. Sabziparvar, A. A., H. Tabari, A. Aeni and M. Ghafouri. 2010. Evaluation of class A pan coefficient models for estimation of reference crop evapotranspiration in cold semi-arid and warm arid climates. *Water Resources Management* 24(5): 909-920.
18. Sentelhas, P. C. and M. V. Folegatti. 2003. Class A pan coefficients (Kp) to estimate daily reference evapotranspiration (ET₀). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 7(1): 111-115.
19. Sharifan, H. and B. Ghahraman. 2006. Evaluation and comparison of estimated reference evapotranspiration from evaporation pan with ETO standard method in Gorgan. *Journal of Agricultural Science and Natural Resources* 13 (5): 1-11.
20. Shokri, S., A. R. Hooshmand and M. Ghorbani. 2017. The estimation evaporation pan coefficient for calculating reference evapotranspiration in Ahvaz. *Journal of Irrigation Science and Engineering* 40(1): 1-12 (in Farsi).
21. Snyder, R. L. 1992. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversion. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 118 (6): 977-980.
22. Taghi Sattari, M., V. Ahmadifar, R. Delirhasannia and H. Apaydin. 2021. Estimation of the pan evaporation coefficient in cold and dry climate conditions via the M5 regression tree model. *Atmosfera* 34(3): 289-300.
23. Yazdani, V., A. Liaghat, H. Noori, H. Noori and H. R. Abianeh. 2011. A Determination of the best model for calculation of pan coefficient in Amol as based on sensitivity analysis. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 42(1): 9-17. (in Farsi).
24. Yesilnacar, M. I., E. Sahinkaya and M. N. B. Ozkaya. 2008. Neural network prediction of nitrate in groundwater of Harran Plain, Turkey. *Environmental Geology* 56: 19-25.
25. Zarei, A. R. and M. Bahrami. 2016. Evaluation of quality and quantity changes of underground water in Fasa plain, Fars (2006–2013). *Iranian Journal of Irrigation Water Engineering* 6(24):103-113. (in Farsi).

The Development of Empirical Equations Estimation of Pan Evaporation Coefficient in the Fasa Region

M. J. Amiri*, M. Bahrami, M. S. Mousavi poor and A. Shabani¹

(Received: December 7-2021 ; Accepted: May 24-2022)

Abstract

Class A pan evaporation method as one of the most common methods for reference evapotranspiration (ET_0) estimation has been widely used in the world due to its simplicity, relatively low cost, and ability to estimate daily ET. In this study, the performance of 8 empirical methods consisting of Allen and Pruitt (1991), Cuenca (1989), Snyder (1992), modified Snyder, Pereira, et al. (1995), Orang (1998), Raghuwanshi and Wallender (1998), and FAO/56 were analyzed to estimate class A pan coefficient and ET_0 at Fasa synoptic station located in Fars province. The calculated pan evaporation coefficients from the above equations were compared with measured pan evaporation coefficients which were obtained from the ratio of evapotranspiration calculated by the FAO-Penman-Monteith method to the rate of evaporation from the pan. The results showed that all empirical methods did not predict pan coefficient values well ($R^2 < 0.3$ and $NRMSE > 0.25$). The comparison results between ET_0 from empirical methods and ET_0 obtained from FAO-Penman-Monteith indicated that the FAO/56 method had the best performance ($R^2 = 0.72$ and $NRMSE = 0.3$). To increase the accuracy of empirical pan coefficient equations, these equations were modified with eight years (2007-2015) of meteorological data from the Fasa synoptic station and validated using two years of independent data (2015-2017). The results showed that the accuracy of all empirical models was improved and the Cuenca equation with $NRMSE = 0.16$ and $R^2 = 0.63$ was selected as the best equation for pan coefficient estimation and ET_0 ($R^2 = 0.85$; $NRMSE = 0.18$) in Fasa region. The sensitivity analysis revealed that the estimated pan coefficient is more sensitive to wind speed, followed by relative humidity, fetch distance, the slope of the saturation vapor pressure curve, sunshine hours, and air pressure. According to statistical results and sensitivity analysis, an equation was expanded for the Fasa region and other areas with the same climate.

Keywords: Pan coefficient, Empirical equations, Sensitivity analysis, FAO Penman-Monteith.

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Fasa, Fasa, Iran.

*: Corresponding author, Email: mj_amiri@fasau.ac.ir