

توسعه و کاربرد مدل PMF56-Hybrid برای تخمین تبخیر و تعرق مرجع در حوزه آبریز دریاچه ارومیه

مهدی عرفانیان^{۱*}، سحر بابایی حصار^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۸/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۵/۱۲)

چکیده

با وجود اهمیت مسئله خشک شدن دریاچه ارومیه، انجام تحقیقات علمی و مبتنی بر اصول آبخیزداری در رابطه با آن کمتر به چشم می‌خورد. تابش خورشیدی از پارامترهای کلیدی ورودی مدل‌های تخمین نرخ تبخیر و تعرق مرجع می‌باشد، در این تحقیق، پس از ارزیابی و انتخاب بهترین مدل تخمین تابش، متوسط ماهانه نرخ تبخیر و تعرق مرجع روزانه در ۷ ایستگاه هواشناسی واقع در حوزه آبریز دریاچه ارومیه در دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۸۶ برآورد شد. مدل‌هایی که برای برآورد تابش خورشیدی مورد ارزیابی قرار گرفتند شامل مدل فیزیکی هیبرید (Hybrid)، مدل تجربی آنگستروم-پرسکات و مدل‌های اصلاح شده دانشیار و صباغ می‌باشند. برای ارزیابی مدل‌های تابش از معیارهای آماری خطا شامل ME، MAE، RMSE و MPE استفاده شد. مقدار آماره RMSE در مدل هیبرید برابر ۱/۷ مگاژول بر مترمربع در روز و در مدل‌های آنگستروم-پرسکات، اصلاح شده دانشیار و صباغ به ترتیب برابر ۲/۹، ۲/۳، ۲/۹ مگاژول بر مترمربع در روز به دست آمد. نتایج نشان دهنده کارایی بالاتر مدل هیبرید نسبت به سه مدل دیگر در مقیاس ماهانه می‌باشد. در مرحله بعد، تأثیر انتخاب مدل تابش در برآورد نرخ تبخیر و تعرق مرجع توسط مدل استاندارد پنمن-مونتیث-فائو (PMF56) مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل PMF56 با مدل هیبرید تلفیق شده و مدل جدیدی به نام PMF56-Hybrid توسعه یافت. این مدل در تخمین نرخ تبخیر و تعرق مرجع ایستگاه‌های انتخابی از کارایی بالاتری برخوردار است. نتایج نشان داد که استفاده از مدل‌های هیبرید و اصلاح شده دانشیار منجر به بهبود تخمین ET₀ شده و دارای خطای کمتری نسبت به دو مدل دیگر می‌باشند. مدل واسنجی شده آنگستروم-پرسکات، نرخ تبخیر و تعرق مرجع را ۱۹ درصد بیشتر برآورد می‌کند.

واژه‌های کلیدی: مدل هیبرید، PMF56، تابش، تبخیر و تعرق مرجع، دریاچه ارومیه

۱- گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Erfanian.ma@gmail.com

مقدمه

حدود ۷۰ درصد از متوسط بارندگی سالانه ایران در نتیجه تبخیر و تعرق از دسترس خارج می‌شود (۳). تلفات منابع آب ناشی از فرآیند تبخیر و تعرق مخصوصاً در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک ایران می‌تواند آسیب‌های جبران‌ناپذیری بر اکوسیستم آنها وارد آورد و تهدیدی جدی برای منابع آب موجود باشد. در چنین شرایطی، مطالعه بیلان آبی حوزه‌های آبخیز و به عبارتی دیگر برآورد مؤلفه‌های ورودی و خروجی این سیستم‌های هیدرولوژیکی ضروری است. تبخیر و تعرق از مهم‌ترین پارامترهای خروجی در معادله بیلان آبی است. در مقیاس بزرگ، تخمین مقدار آبی که صرف تبخیر و تعرق می‌شود به سادگی امکان‌پذیر نیست و استفاده از لایسیمتر نیز برای آورد نقطه‌ای مقدار تبخیر و تعرق واقعی توصیه می‌شود. به همین دلیل تاکنون مدل‌های مختلفی به منظور تخمین تبخیر و تعرق توسعه یافته است که در بین آنها مدل پنمن - مونتیت - فائو ۵۶ (PMF56) به عنوان مدل پرکاربرد و استاندارد توسط بسیاری از محققان مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱۹ و ۲۰). تاکنون تحقیقات متعددی در خصوص مدل‌های تخمین تابش خورشیدی و تبخیر و تعرق مرجع در ایران و خارج انجام شده است که در این جا به مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود:

سیفی و همکاران در سال ۱۳۸۹ (۵) تبخیر و تعرق مرجع را با استفاده از مدل‌های ترکیبی رگرسیونی چند گانه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی برآورد کردند و اهمیت نسبی متغیرهای مؤثر بر تبخیر و تعرق مرجع را با استفاده از تحلیل عاملی در ایستگاه کرمان ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد که شدت تابش، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی و دما در تخمین تبخیر تعرق مرجع از اهمیت بیشتری نسبت به سایر متغیرها برخوردار است. شیرمحمدی علی اکبرخانی و همکاران در سال ۱۳۸۹ (۶) برای تخمین تبخیر و تعرق مرجع گیاه چمن از روش‌های پنمن - مونتیت ASCE و پنمن - مونتیت فائو ۵۶ در شهرستان فریمان در استان خراسان رضوی استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که در طول روز تبخیر و تعرق ساعتی پنمن - مونتیت روش

ASCE بیشتر از پنمن - مونتیت فائو ۵۶ است و در شب حالت عکس رخ می‌دهد. انصاری و مرادی در سال ۱۳۸۹ میزان تأثیر پارامتر تابش در نرخ تبخیر و تعرق مرجع را پس از بررسی مدل‌های مختلف، مدل برآورد تبخیر و تعرق مرجع تنها با استفاده از داده‌های تابش خورشیدی ارائه کردند.

در این بررسی از توانمندی‌های سیستم استنتاج فازی بهره گرفته شد و نتایج حاصل با مدل‌هایی از قبیل پنمن - مونتیت فائو ۵۶ و سیمیس - پنمن به عنوان مدل‌های مبنا مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج آنها نشان داد که تابش خورشیدی مؤثرترین پارامتر در تخمین تبخیر و تعرق مرجع است و مدل فازی تنها با یک ورودی، همبستگی بالایی با مدل‌های پنمن - مونتیت فائو داشته است (۱). طبری و همکاران (۲۰) در سال ۲۰۱۲ در استان همدان برای برآورد تبخیر از تشک (Ep) با استفاده از مدل‌های مختلف شبکه عصبی مصنوعی ((Artificial Neural Network (ANN) انجام دادند، نتایج آن با مدل رگرسیونی غیرخطی چند متغیره ((MNL (Multiple Non Linear Regression) مقایسه گردید. اقلیم منطقه مورد مطالعه نیمه‌خشک بوده و بارندگی آن ۳۳۲ میلی‌متر در سال می‌باشد. با استفاده از داده‌های هواشناسی، پنج مدل چند متغیره برای تخمین تبخیر و تعرق ارائه و درجه تأثیر هر یک از این متغیرها در مقدار Ep بررسی شد. داده‌های مورد استفاده در مدل‌های معرفی شده شامل دما، تابش خورشیدی، بارش، رطوبت نسبی و سرعت باد بوده است. نتایج آنها نشان داد از بین پنج مدل مختلف شبکه عصبی مصنوعی مدل ANN با الگوریتم خطی Delta-Bar-Delta و تابع سیگموئید بهترین برآورد را از مقدار Ep دارد. هم‌چنین طبری و همکاران (۲۰۱۲) امکان برآورد تبخیر تعرق مرجع را با مدل‌های (SVM (Support Vector Machine، ANFIS، MLR و MNL با استفاده از ۶ بردار ورودی در استان همدان مورد بررسی قرار دادند. آنها نتایج این مدل‌ها را با مدل پنمن - مونتیت فائو ۵۶ (به عنوان مدل استاندارد و مبنا) مقایسه کردند. علاوه بر مدل‌های مذکور، هشت مدل مبتنی بر تابش و چهار مدل مبتنی بر دما نیز ارزیابی و با مدل پنمن مونتت فائو ۵۶ مقایسه شد.

مهم‌ترین فاکتورهای ورودی در مدل‌های مورد استفاده می‌باشد. از آن‌جا که دمای هر منطقه نیز مستقیماً متأثر از شدت تابش در آن منطقه است لذا برای برآورد نرخ تبخیر و تعرق مرجع لازم است مقدار دقیقی از پارامتر تابش موجود باشد. یکی از روش‌های اندازه‌گیری تابش خورشیدی استفاده از پیرانومتر می‌باشد که به‌علت فقدان امکانات، کاربرد آن در بسیاری از مناطق با محدودیت‌هایی روبرو است (۱۰). در سال‌های اخیر مدل‌های مختلفی برای برآورد مقدار تابش توسط افراد مختلف توسعه یافته و معرفی شده است.

یانگ و همکاران در سال ۲۰۰۱ (۲۳) مدل‌های هیبرید و آنگسترم- پرسکات در ۱۴ ایستگاه در ژاپن مورد ارزیابی قرار داده و نتیجه گرفتند که مدل هیبرید کارایی بهتری نسبت به مدل واسنجی شده آنگسترم- پرسکات دارد. به‌علاوه، یانگ و توشیو در سال ۲۰۰۵ (۲۴) با مطالعه‌ای که در تعدادی از ایستگاه‌های آمریکا، ژاپن و عربستان انجام دادند، نتیجه گرفتند که مدل هیبرید قادر است تابش خورشیدی را در مقیاس‌های روزانه و ساعتی با دقت قابل ملاحظه‌ای نسبت به مدل‌های فائو، آنگسترم- پرسکات با ضرایب جهانی (مقادیر پیش فرض) و آنگسترم- پرسکات با ضرایب منطقه‌ای (مقادیر واسنجی شده) برآورد کند. آنها کارایی بالای مدل هیبرید را به در نظر گرفتن تأثیرات مختلف اتمسفر روی تابش ورودی به سطح زمین از جمله اثر جذب و پخش اتمسفر نسبت دادند. بنابر اظهارات یانگ و همکارانش (۲۳) در مدل هیبرید سعی شده است تا در عین حفظ سادگی مدل آنگسترم، فرآیندهای فیزیکی مؤثر بر تابش خورشیدی عبور یافته از اتمسفر در فرآیند تخمین تابش لحاظ شود. تانگ و همکاران در سال ۲۰۱۰ (۲۲) کنترل کیفیت داده‌های اندازه‌گیری شده تابش را در ۹۷ ایستگاه هواشناسی موجود در چین انجام دادند و مدل هیبرید را با استفاده از داده‌های کنترل شده تابش ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد که مدل هیبرید قادر است میانگین ماهانه مقدار تابش روزانه را با دقت قابل قبولی برآورد کند.

عرفانیان و بابایی در سال ۱۳۹۰ (۷) مدل هیبرید را در

معیارهای خطایی که برای مقایسه مدل‌ها استفاده شد شامل RMSE و MAE و ضریب همبستگی R می‌باشد. نتایج نشان داد SVM و ANFIS با ورودی‌های تابش خورشیدی، دمای میانگین، رطوبت نسبی و سرعت باد بهتر از مدل‌های رگرسیونی و مدل‌های مبتنی بر داده‌های اقلیمی، تبخیر تعرق را برآورد می‌کند (۲۱).

سبزی‌پرور و همکاران در سال ۲۰۱۳ میزان تأثیر مدل آنگسترم- پرسکات را در برآورد نرخ تبخیر و تعرق در دو حالت مدل واسنجی شده و مدل پیش فرض (بدون واسنجی ضرایب a و b) مورد بررسی قرار دادند. آنها از مدل پنمن- موتیث فائو ۵۶ به عنوان روش مبنا یا استاندارد استفاده کردند. آنها پژوهش خود را در ۱۵ ایستگاه تابش‌سنجی کشور انجام دادند. نتایج نامبردگان نشان داد که واسنجی ضرایب مدل آنگسترم- پرسکات در اغلب ایستگاه‌ها می‌تواند تا حدود زیادی بر روی نتایج مدل پنمن- موتیث فائو ۵۶ اثرگذار باشد. با این حال، واسنجی مدل در تعدادی از ایستگاه‌ها با تخمین بیشتر و در تعدادی نیز با تخمین کمتر تابش روزانه همراه بوده است (۱۹). لذا توسعه و ارزیابی سایر مدل‌های برآورد مقادیر تابش روزانه و ماهانه در شرایط مختلف اقلیمی ایران و تأثیر آن روی برآورد تبخیر و تعرق مرجع به‌عنوان یک ضرورت مطرح می‌باشد (۲ و ۸).

همان‌طور که ملاحظه می‌شود مدل پنمن- موتیث فائو ۵۶ به‌عنوان یک روش استاندارد و مبنا برای برآورد نرخ تبخیر و تعرق مورد استفاده قرار گیرد. به‌عبارت دیگر به‌علت فقدان داده‌های لایسیمیتری یا داده‌های مشاهده‌ای تبخیر تعرق در بیشتر ایستگاه‌های ایران، مقادیر برآورد شده مدل پنمن- موتیث فائو ۵۶ برای ارزیابی و اعتبارسنجی سایر مدل‌ها یا روش‌های تخمین تبخیر و تعرق استفاده می‌شود. مبنای فیزیکی و سادگی مدل PMF56 موجب شده است تا هم‌چنان به‌عنوان یک روش استاندارد یا مرجع در ارزیابی و مقایسه بیشتر مدل‌ها مورد استفاده قرار گیرد (۱۹، ۲۰ و ۲۱).

تقریباً در تمامی تحقیقاتی که برای بررسی عوامل اصلی تبخیر و تعرق انجام شده است پارامتر تابش خورشیدی و دما از

هیبرید با مدل PMF56 و توسعه مدل کاراتر برای تخمین نرخ تبخیر و تعرق مرجع به نام PMF56-Hybrid در ۷ ایستگاه هواشناسی واقع در حوزه آبریز دریاچه ارومیه (دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۸۶) انجام شده است.

مواد و روش‌ها

۱. منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

حوزه آبریز دریاچه ارومیه با مساحتی بالغ بر ۵۱ هزار کیلومتر مربع، در شمال‌غربی کشور قرار گرفته است و از ۴۴/۲۲ تا ۴۷/۸۹ درجه شرقی و ۳۵/۶۷ تا ۳۸/۴۷ درجه شمالی گسترش یافته است. براساس روش کوپن این منطقه دارای اقلیم استپی نیمه‌خشک است. مقدار بارندگی متوسط منطقه حدود ۳۵۰ میلی‌متر در سال است. آمار و اطلاعات مورد نیاز این تحقیق برای دوره آماری ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۵ از سایت سازمان هواشناسی کشور تهیه شده است. در بین ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در حوزه دریاچه ارومیه تنها ۷ ایستگاه (جدول ۱) شامل ارومیه، تکاب، مهاباد، تبریز، سراب، مراغه و سقز دارای آمار روزانه هواشناسی بیشتر از ۲۰ سال هستند و پارامتر تابش روزانه خورشیدی (R_s) فقط در ۲ ایستگاه ارومیه و تبریز اندازه‌گیری می‌شود.

در اعتبارسنجی مدل‌های تخمین تبخیر و تعرق مرجع، به دلیل فقدان یا عدم وجود داده‌های روزانه و بلند مدت لایسمتری در بیشتر ایستگاه‌های سینوپتیک (همدیدی) ایران، استفاده از مقادیر برآورد شده مدل PMF56 به عنوان مدل مبنا برای ارزیابی و اعتبارسنجی سایر مدل‌ها توصیه شده است [۱۹ و ۲۱]. در تحقیق حاضر ابتدا پس از مقایسه و ارزیابی ۴ مدل تخمین تابش شامل مدل فیریکی هیبرید، مدل‌های اصلاح‌شده دانشیار، اصلاح‌شده صباغ و مدل تجربی آنگستروم-پرسکات، مناسب‌ترین مدل تابش انتخاب شد. مقادیر برآورد شده تابش توسط ۴ مدل مذکور با مقادیر مشاهده‌ای دو ایستگاه ارومیه و تبریز (بعد از کنترل کیفیت داده‌ها و حذف داده‌های مشکوک) مقایسه شد. بدین منظور از معیارهای آماری خطا استفاده شد. پس از انتخاب بهترین مدل (هیبرید) و تلفیق آن با

ایستگاه تبریز مورد ارزیابی قرار داده و پس از واسنجی ضرایب مدل برای سال ۲۰۰۵، ضرایب به دست آمده را برای سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۶ اعتبارسنجی کردند. نتایج آنها نشان داد که مدل هیبرید قادر است تابش روزانه خورشیدی را با دقت بسیار خوبی در این ایستگاه برآورد کند. آنها در یک پژوهش دیگر (۱۳۹۲) سه مدل تخمین تابش هیبرید، اصلاح‌شده دانشیار و اصلاح‌شده صباغ را مورد ارزیابی و مقایسه قرار داده و نتیجه گرفتند که مدل هیبرید، تابش را با دقت بالاتری تخمین می‌زند (۹). لذا از نتایج آن در تهیه نقشه‌های فصلی تابش برای حوزه آبخیز دریاچه ارومیه استفاده کردند (۸). سبزی‌پرور و شتایی (۱۷) در سال ۲۰۰۷ مدل تجربی تخمین تابش را که در سال ۱۹۷۸ توسط دانشیار (۱۲) ارائه شده بود با چندین مدل دیگر مقایسه کرده و کارایی مدل دانشیار را در تخمین میزان تابش در شرایط اقلیمی نیمه‌خشک غربی و شرقی کشور مورد ارزیابی قرار دادند. آنها پس از ارائه ضرایب تصحیح، نتیجه گرفتند که مدل اصلاح‌شده دانشیار کارایی بالاتری نسبت به مدل‌های صباغ، پالتریج، اصلاح‌شده صباغ و اصلاح‌شده پالتریج دارد. سبزی‌پرور (۱۶) هم‌چنین با مطالعه‌ای که در سال ۲۰۰۷ در نواحی ساحلی شمالی و جنوبی کشور انجام داد مدل اصلاح‌شده دانشیار را به عنوان مناسب‌ترین مدل در برآورد تابش خورشیدی برای این مناطق پیشنهاد کرد. بکارگیری مدل‌های دانشیار، صباغ، پالتریج، اصلاح‌شده دانشیار، اصلاح‌شده صباغ و اصلاح‌شده پالتریج، توسط سبزی‌پرور در سال ۲۰۰۸ (۱۸) در بیابان‌های خشک مرکزی کشور، نشان داد که مدل اصلاح‌شده صباغ (۱۳) نتایج بهتری را در این شرایط اقلیمی ارائه می‌کند.

مرور بر منابع نشان می‌دهد که اغلب تحقیقات انجام شده در ایران براساس مدل‌های تجربی بوده و برای برآورد نرخ تبخیر و تعرق مرجع نیز در بیشتر موارد از مقادیر پیش فرض مدل آنگستروم-پرسکات در تخمین متوسط روزانه یا ماهانه مؤلفه تابش طول موج کوتاه (R_s) در مدل PMF56 استفاده شده است. لذا تحقیق حاضر با هدف ارزیابی مدل‌های مختلف تابش، انتخاب بهترین مدل (در این جا مدل هیبرید)، تلفیق مدل

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک دارای آمار بیشتر از ۲۰ سال در حوزه دریاچه ارومیه.

ایستگاه	ارتفاع (متر)	X	*Y	بارندگی سالانه (میلی‌متر)
ارومیه	۱۳۱۶	۴۵/۰۸	۳۷/۵۳	۳۱۱/۷
تکاب	۱۷۶۵	۴۷/۱۲	۳۶/۳۸	۳۴۸/۳
مهاباد	۱۳۸۵	۴۵/۷۲	۳۶/۷۷	۴۱۳/۶
تبریز	۱۳۶۱	۴۶/۲۸	۳۸/۰۸	۲۵۰/۸
مراغه	۱۴۷۸	۴۶/۲۷	۳۷/۴۰	۳۱۳/۴
سراب	۱۶۸۲	۴۷/۵۳	۳۷/۹۳	۲۴۱/۷
سقز	۱۵۲۳	۴۶/۲۷	۳۶/۲۵	۷۴۷/۷

X و Y به ترتیب طول و عرض جغرافیایی بر حسب درجه اعشاری می‌باشد.

γ ثابت سایکومتریک (به کیلو پاسکال بر درجه سانتی‌گراد) می‌باشد [۱۰]. R_n با استفاده از رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$R_n = R_{n_s} + R_{n_l} \quad [۲]$$

R_{n_s} تابش خالص جذب‌شده طول موج کوتاه و R_{n_l} تابش خالص جذب‌شده طول موج بلند است. برای محاسبه R_{n_s} از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$R_{n_s} = R_s(1 - \alpha) \dots [۳]$$

که α آلبیدو یا ضریب انعکاس سطح بوده و برابر است با ۰/۲۳ فرض می‌شود. R_{n_l} نیز طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\left[R_{n_l} = \sigma \left[\frac{T_{\max}^4 + T_{\min}^4}{2} \right] \left(\frac{0.34 - 0.14\sqrt{e_a}}{R_{s0}} - \frac{R_s}{R_{s0}} \right) \right] \quad [۴]$$

در رابطه فوق T دمای هوا به کلین، T_{\max} و T_{\min} به ترتیب دمای حداقل و حداکثر می‌باشد. R_s مقدار مشاهده‌ای تابش است که معمولاً در ایستگاه‌های محدودی اندازه‌گیری می‌شود. در این تحقیق، کارایی چهار مدل تخمین تابش R_s مورد ارزیابی قرار گرفت. جزئیات این مدل‌ها در بخش بعدی ارائه شده است [۲].

۲.۲. مدل‌های تخمین تابش

۲.۲.۱. مدل هیبرید

این مدل در سال ۲۰۰۱ توسط یانگ و همکاران به صورت رابطه ۵ ارائه شده است [۲۳]:

مدل PMF56 در نهایت مدل جدید به نام PMF56-Hybrid توسعه یافت و با استفاده از آن، مقادیر متوسط ماهانه تبخیر و تعرق مرجع روزانه در ۷ ایستگاه انتخابی واقع در حوزه آبریز دریاچه ارومیه برآورد شد.

۲. متدولوژی

۲.۱. مدل پنمن - مونیتث فائو ۵۶ (PMF56)

نرخ تبخیر و تعرق از یک سطح مرجع به صورت ET₀ نشان داده می‌شود. سطح مرجع یک سطح فرضی از گیاهان علفی با شرایط و خصوصیات خاص است. اغلب پارامترهای مؤثر بر نرخ تبخیر و تعرق مرجع همان پارامترهای اقلیمی هستند (۷). رابطه پنمن - مونیتث فائو ۵۶ به صورت زیر ارائه شده است (۱۱):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad [۱]$$

ET₀ تبخیر تعرق مرجع (به میلی‌متر در روز)، R_n تابش خالص ورودی (به مگاژول بر مترمربع در روز)، G شار گرمایی خاک (به مگاژول بر مترمربع در روز)، T میانگین دمای هوا در ۲ متری سطح زمین (به درجه سانتی‌گراد)، u_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری سطح زمین (به متر بر ثانیه)، e_s فشار بخار اشباع (به کیلو پاسکال)، e_a فشار بخار واقعی (به کیلو پاسکال)، Δ شیب منحنی فشار بخار (به کیلو پاسکال بر درجه سانتی‌گراد) و

$$\tau_{oz} = \exp[-0.0365(ml)^{0.7136}] \quad [10]$$

در این رابطه که به منظور برآورد میزان جذب توسط لایه ازن به کار می‌رود I ضخامت لایه ازن و m ضخامت اتمسفر در محل ایستگاه است [۲۳].

۲. جذب توسط بخار آب (τ_w)

$$\tau_w = \min[1/0.909 - 0.36 \ln(mw)] \quad [11]$$

w آب قابل بارش که به صورت مقدار آب موجود در ستونی از هوا تعریف می‌شود [۲۳].

۳. جذب توسط گازهای پایدار (τ_g)

گازهای پایدار که به گازهای گلخانه‌ای نیز معروفند موجب جذب پرتوهای مادون قرمز می‌شوند:

$$\tau_g = \exp(-0.117m_c^{0.3139}) \quad [12]$$

در این رابطه m_c مقدار تصحیح شده ضخامت اتمسفر با در نظر گرفتن مقدار فشار می‌باشد [۲۳].

۴. اتلاف انرژی خورشیدی در اثر مواد آیرسل (Aerosol)

(extinction) (τ_a)

$$\tau_a = \exp \left\{ -m\beta \left[0.6777 + 0.1464(m\beta) - 0.00626(m\beta)^2 \right]^{-1/3} \right\} \quad [13]$$

β ضریب تیرگی آنگسترم (Angstrom turbidity) است [۲۳].

۵. اثر Rayleigh (τ_r)

پخش Rayleigh تابعی است از ضخامت هوا و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\tau_r = \exp[-0.08735m_c(0.547 + 0.114m_c - 0.00038m_c^2 + 4/6 \times 10^{-6} m_c^3)^{-4/0.8}] \quad [14]$$

۲.۲.۲. مدل اصلاح شده دانشیار

دانشیار براساس روش پالتریج و پروکتور [۱۳] در سال ۱۹۷۸ مدل خود را با تعیین ضریب تعدیل برای تابش پراکنده در

$$R_{est} = (a + b \frac{n}{N})I_b + (c + d \frac{n}{N})I_d \quad [5]$$

I_b و I_d به ترتیب برابر تابش مستقیم (Effective beam radiation) و تابش پراکنده (Effective diffuse radiation) بر حسب ژول بر مترمربع و $\frac{n}{N}$ شاخص پوشش ابر و a, b, c, d ضرایب مدل هیبرید است [۷ و ۸]. در محاسبه I_b و I_d از روابط ۶ و ۷ استفاده می‌شود:

$$I_b = I_0 \int_{sunrise}^{sunset} \tau_b \sinh dt \quad [6]$$

$$I_d = I_0 \int_{sunrise}^{sunset} \tau_d \sinh dt \quad [7]$$

که I_0 : ثابت خورشیدی، h زاویه ارتفاع خورشید به رادیان، τ_b : ضریب عبور اتمسفری برای تابش مستقیم (Beamtransmittance) و τ_d : ضریب عبور اتمسفری برای تابش پراکنده (Diffuse transmittance) است.

اتمافر زمین اثرات مختلف جذب و پخش بر روی تابش خورشیدی مستقیم و پراکنده دارد. این اثرات شامل موارد زیر است:

(۱) جذب توسط ازن (τ_{oz})، (۲) جذب توسط بخار آب (τ_w)، (۳) جذب توسط گازهای پایدار (τ_g)، (۴) اتلاف انرژی در اثر مواد آیرسل (τ_a) و (۵) اثر Rayleigh (τ_r). دخالت این ضرایب نشان‌دهنده ملاحظه اثرات اتمسفر در تخمین تابش می‌باشد. ضرایب عبور اتمسفریک برای تابش‌های مستقیم و غیرمستقیم (پراکنده) با استفاده از روابط ۸ و ۹ محاسبه می‌شوند:

$$\tau_b \cong 0.5 \tau_{oz} \tau_w \tau_g \tau_r \tau_a - 0.013 \quad [8]$$

$$\tau_d \cong \tau_{oz} \tau_w \tau_g (1 - \tau_r \tau_a) + 0.013 \quad [9]$$

هر یک از پارامترهای روابط ۸ و ۹ با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده در مقیاس روزانه از ایستگاههای هواشناسی شامل اطلاعات دما، رطوبت نسبی، فشار و مدت تابش، قابل برآورد می‌باشد [۲۳].

۱. جذب توسط ازن (τ_{oz})

لایه ازن، به صورت یک حفاظ باعث جذب پرتوهای مضر فرابنفش می‌شود:

۲.۲.۳. مدل اصلاح شده صباغ

مدل صباغ یک مدل تجربی بوده و در سال ۱۹۷۵ ارائه شده است (۱۵). این مدل با استفاده از پارامترهای هواشناسی شامل دما، رطوبت نسبی و ساعات نسبی روشنایی میزان تابش را برآورد می‌کند. در سال ۲۰۰۷ سبزی‌پرور مدل [۱۶] را برای شرایط مختلف اقلیمی ایران کشور تصحیح کرد و فاکتور تصحیح تغییرات فاصله زمین تا خورشید (K_E) و فاکتور تصحیح ارتفاع ($K_{alt-glob}$) را در مدل اولیه صباغ دخالت داد. مدل اصلاح شده صباغ بصورت زیر می‌باشد:

$$R_{est} = 0.06407 K_{alt-glob} K_E K_g \exp \left[L \left(\frac{n}{N} - \frac{RH^{0.333}}{100} - \frac{1}{T_{max}} \right) \right] \quad [20]$$

R_{est} تابش روزانه برآورد شده، n ساعات روشنایی واقعی، N حداکثر ساعات روشنایی ممکن، RH درصد رطوبت، T_{max} حداکثر دمای روزانه و L عرض جغرافیایی به رادیان است. در محاسبه ضرایب K_E و $K_{alt-glob}$ از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$K_E = 1 + 0.033 \cos(2\pi(DN - 0.5) / 365) \dots \dots \dots [21]$$

$$K_{alt-glob} = 1 + 0.02(h - h_{ref}) \quad [22]$$

K_g نیز فاکتور جغرافیایی بوده و از رابطه ۲۳ محاسبه می‌شود:

$$k_g = 100(\lambda N + \psi_m \cos L) \quad [23]$$

ψ_m فاکتور فصلی و λ فاکتور عرض جغرافیایی است [۱۶].

۲.۲.۴. مدل آنگستروم-پرسکات

$\frac{n}{N}$ شاخص پوشش ابر و R_a تابش فرازمینی می‌باشد (۱۳). a و b ضرایب منطقه‌ای مدل است که در این تحقیق از ضرایب واسنجی شده توسط سبزی‌پرور و همکاران (به ترتیب برای ایستگاه ارومیه ۰/۲۶ و ۰/۴۸ و تبریز ۰/۲۳ و ۰/۴۸) استفاده شد

$$R_{est} = (a + b \frac{n}{N}) R_a \quad [24]$$

نتایج و بحث

در این تحقیق ابتدا چهار مدل تخمین تابش در ۲ ایستگاه دارای

ایستگاه هواشناسی تهران ارائه کرد. مدل دانشیار توسط سبزی‌پرور در سال ۲۰۰۷ اصلاح گردید [۱۶]. ایشان پس از تعیین ضرایب اصلاحی، مدل اصلاح شده دانشیار را به صورت زیر ارائه کردند است:

$$R_{sc} = (1/01)(K_E) \{ (1 - CF)(K_{alt-dir}) \times \int_{sunrise}^{sunset} I_{dir} \cos \theta dt + (K_{alt-dif}) \int_{sunrise}^{sunset} I_{dif} dt \} \quad [15]$$

در این روابط θ زاویه زنیس و CF فاکتور ابری بودن آسمان است [۱۸]. در رابطه فوق میانگین ماهانه پوشش ابر براساس تعداد روزهای ابری در هر ماه محاسبه می‌شود. در ایستگاه‌های سینوپتیک، میزان ابرناکی آسمان هر سه ساعت یکبار در سه بازه ۰ تا ۲ اکتا، ۳ تا ۶ اکتا و ۷ تا ۸ اکتا اندازه‌گیری می‌شود:

$$CF = \frac{n_1 + 4/5 n_2 + 7/5 n_3}{\lambda(n_1 + n_2 + n_3)} \quad [16]$$

در رابطه فوق n_1 ، n_2 و n_3 فراوانی ابرناکی آسمان در سه بازه ۰ تا ۲ اکتا، ۳ تا ۶ اکتا و ۷ تا ۸ اکتا در طول یک ماه است. با استفاده از رابطه ۱۶ فاکتور ابرناکی آسمان به صورت ماهانه به دست می‌آید.

در مدل اصلاح شده دانشیار ضریب ۱/۰۱ برای تصحیح مقدار ثابت خورشیدی می‌باشد. K_E فاکتور تصحیح مربوط به تغییرات فاصله زمین تا خورشید بوده و از رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود:

$$K_E = 1 + 0.033 \cos[2\pi(DN - 0.5) / 365] \quad [17]$$

در این رابطه DN شماره روز سال میلادی می‌باشد. به عنوان مثال مقدار DN برای اول ژانویه برابر ۱ می‌باشد. در این مدل $K_{alt-dif}$ و $K_{alt-dir}$ به عنوان ضرایب تصحیح فاکتور ارتفاع براساس ارتفاع مرجع برآورد می‌شوند:

$$K_{alt-dir} = 1 + 0.07(h - h_{ref}) \quad [18]$$

$$K_{alt-dif} = 1 - 0.10(h - h_{ref}) \quad [19]$$

h ارتفاع ایستگاه به Km و h_{ref} ارتفاع مرجع (ارتفاع شهر تهران که معادل ۱/۱۹ Km می‌باشد) است.

جدول ۲. میانگین معیارهای خطا در مرحله اعتبارسنجی مدل‌های تخمین تابش در مقیاس ماهانه

مدل	MPE	RMSE	MAE	^x ME
آنگسترم- پرسکات	۷/۶	۲/۹	۲/۵	۰/۴
هیبرید	-۴/۹	۱/۷	۱/۵	-۱/۲
اصلاح‌شده دانشیار	-۴/۹	۲/۳	۲/۰	-۰/۹
اصلاح‌شده صباغ	۱۰/۸	۲/۹	۲/۵	۰/۱

ME^x، RMSE و MAE به مگاژول بر مترمربع در روز و MPE به درصد است.

جدول ۳. میانگین ماهانه تابش روزانه (MJ/m²/d) برآورد شده توسط مدل هیبرید در دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۸۶

ایستگاه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
ارومیه	۷/۶	۱۱/۲۴	۱۴/۴	۱۷/۹	۲۲/۰	۲۵/۴	۲۵/۲	۲۳/۲	۱۹/۳	۱۳/۷	۹/۵	۷/۱
تبریز	۷/۳	۱۰/۸	۱۳/۹	۱۷/۳	۲۱/۱	۲۴/۲	۲۴/۱	۲۲/۵	۲۹/۲	۱۳/۳	۹/۴	۸/۹
مهاباد	۷/۶	۱۰/۸	۱۴/۴	۱۸	۲۲/۱	۲۵/۳	۲۵/۲	۲۲/۵	۱۸/۷	۱۳/۷	۹/۶	۷/۲
مراغه	۷/۶	۱۰/۱	۱۳/۹	۱۷/۳	۲۱/۸	۲۴/۸	۲۵/۲	۲۳/۵	۱۹/۴	۱۳/۸	۹/۴	۷/۰
سقز	۷/۸	۱۱/۱	۱۴/۴	۱۸/۵	۲۲/۷	۲۵/۹	۲۵/۳	۲۳/۷	۲۰/۴	۱۴/۹	۱۰/۱	۷/۳
سراب	۷/۶	۱۰/۹	۱۳/۷	۱۷/۴	۲۱/۲	۲۴/۳	۲۴/۰	۲۲/۳	۱۹/۳	۱۳/۸	۹/۰	۶/۶
تکاب	۷/۷	۱۱/۰	۱۴/۶	۱۸/۱	۲۱/۸	۲۵/۳	۲۵/۱	۲۳/۴	۲۰/۴	۱۴/۹	۱۰/۲	۶/۸

در تحلیل کارایی بالای مدل هیبرید باید گفت چون این مدل تأثیرات فیزیکی اتمسفر شامل پخش و جذب تابش را مورد توجه قرار می‌دهد لذا نسبت به سایر مدل‌های تجربی یا رگرسیونی کارتر است.

با توجه به کارایی بالای مدل هیبرید، از آن در تخمین تابش روزانه ایستگاه‌های انتخابی در دوره آماری ۲۰ ساله (۲۰۰۵-۱۹۸۶) استفاده شد. جدول ۳ مقدار میانگین ماهانه تابش روزانه را به مگاژول بر مترمربع در روز برای هر یک از ماه‌های سال نشان می‌دهد. مطابق این جدول، حداکثر مقدار تابش در ماه ژوئن رخ می‌دهد و حداقل آن مربوط به ماه دسامبر است. ایستگاه تبریز معمولاً کمترین تابش دریافت شده را دارد و ایستگاه سراب در اغلب ماه‌های سال تابش بیشتری نسبت به سایر ایستگاه‌ها دریافت می‌کند.

در مرحله بعد، مقادیر تابش برآورد شده توسط هر یک از مدل‌های تابش به طور جداگانه در مدل پنمن-مونیتث فائو ۵۶

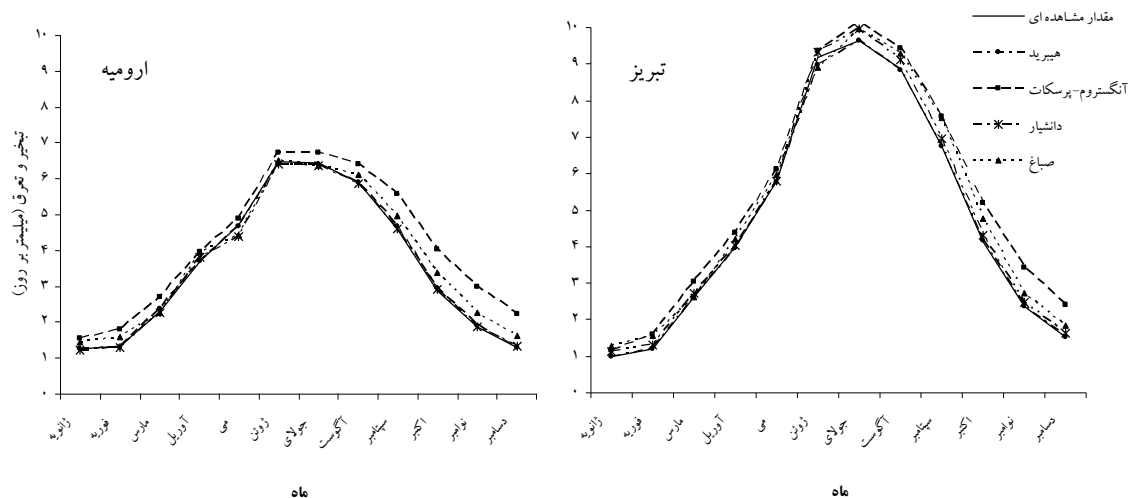
آمار روزانه تابش (ارومیه و تبریز) مورد ارزیابی قرار گرفت. برای ارزیابی مدل‌ها، از معیارهای میانگین خطا (ME)، میانگین خطای مطلق (MAE)، جذر میانگین توان دوم خطا (RMSE) و درصد میانگین خطا (MPE) استفاده شد (روابط ۱a تا ۴a پیوست). میانگین معیارهای خطا مطابق جدول ۲ محاسبه شده است.

مطابق جدول ۲ مقدار میانگین ME، MAE، RMSE و MPE در مرحله اعتبارسنجی مدل‌ها برای مدل هیبرید به ترتیب ۱/۲، ۱/۵، ۱/۷ مگاژول بر مترمربع در روز و -۴/۹ درصد می‌باشد. میانگین RMSE در مدل‌های اصلاح‌شده دانشیار و صباغ و آنگسترم-پرسکات به ترتیب ۲/۵ و ۲/۹ و ۲/۹ مگاژول بر مترمربع به دست آمده است (خطای بیشتر نسبت به مدل هیبرید). مدل اصلاح‌شده صباغ بیشترین مقدار MPE را نشان می‌دهد. این مدل، تابش روزانه را به طور میانگین ۱۰/۸ درصد بیش از مقدار واقعی برآورد کرده است.

جدول ۴. میانگین معیارهای خطا برای اعتبارسنجی مدل‌های مختلف تابش در برآورد تبخیر و تعرق

مدل	MPE	RMSE	MAE	^x ME
آنگستروم-پرسکات	۱۸/۹۷	۰/۵۹	۰/۴۹	۰/۴۹
هیبرید	۰/۱۱	۰/۰۶	۰/۰۴	-۰/۰۱
اصلاح شده دانشیار	-۰/۳۰	۰/۲۰	۰/۰۷	-۰/۰۱
اصلاح شده صباغ	۶/۰۰	۰/۲۹	۰/۲۶	۰/۱۵

ME^x، RMSE و MAE به میلی‌متر در روز و MPE به درصد است.



شکل ۱. مقایسه مقادیر برآورد شده میانگین روزانه تبخیر و تعرق مرجع در ماه‌های مختلف سال ۱۹۹۸ در ۲ ایستگاه ارومیه و تبریز توسط مدل PMF56 براساس ۴ مدل تخمین تابش و مقدار تابش روزانه مشاهده‌ای (نمودار خط چین).

نمونه نشان داده شده است. بررسی عوامل مؤثر بر تبخیر و تعرق نشان می‌دهد سرعت باد در ایستگاه تبریز تقریباً ۲ برابر سرعت آن در ایستگاه ارومیه می‌باشد سایر متغیرها در دو ایستگاه اختلاف چندانی ندارد. لذا سرعت باد به‌عنوان یکی از دلایل عمده هواشناسی، باعث افزایش نرخ تبخیر و تعرق در ایستگاه تبریز می‌باشد.

مقایسه این نمودارها بیان‌گر این موضوع است که استفاده از مدل آنگستروم-پرسکات و اسنجی شده در هر ۲ ایستگاه موجب بهبود برآورد تبخیر و تعرق بیشتر شده است. مدل اصلاح شده صباغ نیز تأثیر مشابهی بر تخمین نرخ تبخیر و تعرق دارد درحالی‌که مقادیر تبخیر و تعرق به‌دست آمده با استفاده از مدل‌های هیبرید و اصلاح شده دانشیار، انطباق بیشتری با نمودار

(رابطه ۱) قرار داده شد و با تبخیر تعرق مبتنی بر مقادیر تابش مشاهده‌ای (در ۲ ایستگاه ارومیه و تبریز) مورد مقایسه قرار گرفت تا توانایی هر یک از مدل‌ها مشخص شود. جدول ۴ مقدار خطا را برای این مرحله نشان می‌دهد. مقدار RMSE برای مدل‌های هیبرید و اصلاح شده دانشیار به‌ترتیب برابر ۰/۱ و ۰/۲ میلی‌متر بر روز می‌باشد. مدل آنگستروم-پرسکات و اسنجی شده به‌طور میانگین، مقدار تبخیر و تعرق مرجع را در ایستگاه‌های ارومیه و تبریز حدود ۱۹ درصد بیشتر برآورد می‌کند. این مدل بیشترین RMSE را نیز دارد.

در شکل ۱ تأثیر انتخاب مدل‌های مختلف تخمین تابش در مدل PMF56 در برآورد میانگین روزانه نرخ تبخیر و تعرق مرجع ماه‌های مختلف سال ۱۹۹۸ در ۲ ایستگاه مذکور به‌عنوان

جدول ۵. میانگین ماهانه تبخیر و تعرق روزانه (mm/d) برآورد شده توسط مدل PMF56-Hybrid در دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۸۶

ایستگاه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
ارومیه	۰/۸	۱/۱	۱/۹	۳/۲	۴/۲	۵/۵	۵/۷	۵/۴	۴/۳	۲/۶	۱/۴	۰/۹
تبریز	۱/۰	۱/۵	۲/۵	۳/۸	۵/۳	۷/۵	۹/۰	۸/۵	۶/۱	۳/۷	۱/۸	۱/۱
مهاباد	۰/۹	۱/۴	۲/۲	۳/۵	۴/۶	۵/۹	۵/۹	۵/۸	۴/۸	۳/۲	۱/۸	۱/۱
مراغه	۰/۹	۱/۳	۲/۲	۳/۴	۴/۸	۶/۷	۹/۰	۸/۳	۵/۸	۳/۵	۱/۶	۰/۹
سقز	۰/۸	۱/۲	۲/۱	۳/۵	۴/۶	۶/۱	۶/۹	۶/۷	۵/۴	۳/۵	۱/۷	۱/۰۰
سراب	۰/۸	۱/۱	۱/۹	۳/۱	۴/۰	۵/۴	۶/۲	۶/۰	۴/۷	۲/۹	۱/۴	۰/۹
تکاب	۰/۶	۰/۹	۱/۷	۳/۱	۴/۴	۵/۹	۶/۷	۶/۸	۵/۱	۳/۰	۱/۴	۰/۸

محسوب می‌شود اما مقدار آن در ایستگاه‌های سینوپتیک محدودی اندازه‌گیری می‌شود (۱). متأسفانه از تعداد بالغ بر ۲۰۰ ایستگاه سینوپتیک ایران، فقط در ۲۳ ایستگاه، آمار روزانه تابش ثبت و اندازه‌گیری می‌گردد. حتی در همین تعداد اندک نیز اندازه‌گیری صحیح مقدار تابش، به‌علت وجود پاره‌ای از مشکلات فنی و نقص دستگاه‌ها به درستی انجام نمی‌شود. لذا لزوم توسعه یک مدل که بتواند مقدار تابش را روزانه و ماهانه را در شرایط مختلف اقلیمی، جغرافیایی، مناطق مرتفع و اراضی پست ساحلی ایران با دقت قابل قبولی برآورد کند ضرورت دارد.

در این تحقیق، مقایسه مدل‌های مختلف تابش نشان داد که مدل فیزیکی هیبرید خطای کمتری نسبت به ۳ مدل آنگستروم-پرسکات، اصلاح شده دانشیار و اصلاح شده صباغ در ایستگاه‌های ارومیه و تبریز دارد. نتایج تحقیقات یانگ و همکاران (۲۳ و ۲۴) نیز حاکی از این است که مدل هیبرید کارایی بهتری در تخمین تابش در مقیاس‌های ساعتی، روزانه و ماهانه دارد. بابایی (۲) در یک پژوهش جامع، مدل هیبرید را در شرایط مختلف اقلیمی ایران ارزیابی کرده و نتیجه گرفت که این مدل تقریباً در تمام شرایط اقلیمی (بالاخص نواحی ساحلی شمال و جنوب ایران) دارای دقت بسیار خوبی نسبت به سایر مدل‌های پیشنهادی توسط سبزوئی‌پروور و همکاران (۱۶ و ۱۷) است. بررسی تأثیر هریک از مدل‌های تخمین تابش بر نرخ تبخیر و تعرق مرجع نشان داد که مقادیر تابش برآورد شده

تبخیر و تعرق برآورد شده مبتنی داده‌های روزانه مشاهده‌ای دارند. مخصوصاً در مورد مدل هیبرید به روشنی این انطباق قابل مشاهده است.

براساس نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، مدل هیبرید و PMF56 در محیط فرتن برنامه‌نویسی و مدل تلفیقی PMF56-Hybrid توسعه یافت. سپس با استفاده از مدل جدید، تبخیر و تعرق مرجع در ایستگاه‌های مورد مطالعه در مقیاس ماهانه برآورد شد. براساس نرخ تبخیر و تعرق مرجع در طول ۲۰ سال، کمترین میزان آن مربوط است به ماه‌های ژانویه و دسامبر و بیشترین مقدار آن به ترتیب در ماه‌های جولای، آگوست و ژوئن رخ می‌دهد که با توجه به افزایش دما و پایین بودن رطوبت نسبی جو در این ماه‌ها دور از انتظار نیست (جدول ۵). در بین ایستگاه‌ها، معمولاً کمترین میزان تبخیر و تعرق مرجع در ایستگاه ارومیه رخ می‌دهد که می‌توان آن را به رطوبت نسبی بالای جو (به‌علت نزدیکی به دریاچه ارومیه) نسبت داد. ایستگاه تبریز به‌علت دارا بودن بادهای نسبتاً شدید در اغلب ماه‌های سال بالاترین مقدار تبخیر و تعرق را دارا است.

نتیجه‌گیری

در بین پارامترهایی که بر میزان تبخیر و تعرق تأثیر دارند بجز مقدار تابش، بقیه آنها تقریباً در بیشتر ایستگاه‌های هواشناسی ایران در مقیاس روزانه اندازه‌گیری می‌شوند. مؤلفه تابش با وجود این‌که از مهم‌ترین پارامترها در هیدرولوژی و منابع آب

برخوردار است. هم‌چنین مدل هیبرید در مناطق مرتفع و اراضی پست نتایج بسیار خوبی در مقیاس روزانه و ماهانه بر خلاف نتایج محققان مذکور داشته است. برای حوزه آبریز دریاچه ارومیه، مدل هیبرید با مدل پنمن-مونیتث فائو تلفیق شده و مدل PMF56-Hybrid توسعه یافت و در نهایت میانگین ماهانه تبخیر و تعرق مرجع روزانه برای ۷ ایستگاه انتخابی در یک دوره آماری ۲۰ ساله برآورد شد. ارزیابی و اعتبارسنجی مدل هیبرید در بهبود مدل PMF56 بالاخص در مقیاس ساعتی و براساس داده‌های تبخیر و تعرق لایسمر به سایر محققان توصیه می‌شود.

توسط مدل آنگستروم-پرسکات و مدل اصلاح‌شده صباغ باعث افزایش مقدار تبخیر و تعرق می‌شود. پژوهش انجام شده اخیر توسط سبزی‌پرور و همکاران (۱۹) نشان می‌دهد که مدل واسنجی‌شده آنگستروم-پرسکات نسبت به مدل پیش فرض نتایج بهتری در تخمین تبخیر و تعرق ارائه می‌کند ولی در تعدادی از ایستگاه‌ها واسنجی مدل تأثیر معنی‌داری بر بهبود تخمین‌ها نداشته است.

نتایج بابایی (۲) نشان می‌دهد که مدل هیبرید برخلاف مدل واسنجی‌شده آنگستروم-پرسکات [۱۹] بالاخص در ایستگاه‌های ساحلی مانند رشت، بندرانزلی، رامسر از کارایی بسیار خوبی

پیوست

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)}{n} \quad [1a]$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|}{n} \quad [2a]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad [3a]$$

$$MPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - Y_i}{Y_i} \times 100 \right)}{n} \quad [4a]$$

X_i مقدار محاسبه‌ای، Y_i مقدار اندازه‌گیری شده و n تعداد داده‌ها می‌باشد.

منابع مورد استفاده

- انصاری، ح. و ح. مرادی. ۱۳۸۹. ارائه مدل فازی به‌منظور برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع ساعتی با استفاده از حداقل داده‌های هواشناسی. نشریه آب و خاک، شماره ۲، ص ۲۷۵-۲۸۶.
- بابایی، س. ۱۳۹۱. ارزیابی مدل هیبرید در برآورد تابش خورشیدی در شرایط مختلف اقلیمی ایران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه. ۹۳ ص.
- دهقانی فیروزآبادی، ن.، ن. شیخ‌علی‌شاهی. ۱۳۹۱. بررسی خشکسالی بر اساس دو شاخص آماری SPI و RDI (مطالعه موردی: ایستگاه طبس و حوضه کریت طبس). اولین همایش ملی بیابان.
- سبزی‌پرور، ع. و م. شادمانی. ۱۳۹۰. تحلیل روند تبخیر تعرق مرجع با استفاده از آزمون من-کندال و اسپیرمن در مناطق خشک

ایران. نشریه آب و خاک. ۴: ۸۳۳-۸۳۴.

۵. سیفی، ا.، م. میرلطفی و ح. ریاحی. ۱۳۸۹. توسعه مدل ترکیبی رگرسیونی چند گانه- تحلیل مؤلفه‌ها و عامل‌های اصلی (PCA - MLR) در پیش بینی تبخیر تعرق مرجع. نشریه آب و خاک. ۶: ۱۱۹۶-۱۱۸۶.
۶. شیرمحمدی علی اکبرخانی، ز.، ح. انصاری و ا. علیزاده. ۱۳۸۹. مقایسه تبخیر تعرق مرجع پنمن مانیت ASCE و پنمن - مونیت فائو ۵۶ در بازه زمانی ساعتی در ایستگاه هواشناسی فریمان. نشریه آب و خاک. ۲: ۲۸۶-۲۷۵.
۷. عرفانیان، م. و س. بابایی. ۱۳۹۰. ارزیابی مدل هیبرید در تخمین تابش روزانه خورشیدی در ایستگاه سینوپتیک تبریز. چکیده مقالات نخستین کنفرانس ملی هواشناسی و مدیریت آب، دانشگاه تهران.
۸. عرفانیان، م. و س. بابایی. ۱۳۹۱. ارزیابی مدل هیبرید در تخمین تابش خورشیدی و تهیه نقشه‌های فصلی تابش برای حوزه دریاچه ارومیه، چکیده مقالات پنجمین کنگره بین‌المللی جغرافیدانان جهان اسلام، تبریز.
۹. عرفانیان، م. و س. بابایی. ۱۳۹۲. ارزیابی مدل هیبرید در تخمین تابش خورشیدی روزانه در تعدادی از ایستگاه‌های تابش‌سنجی ایران. آب و خاک، ۲۷، شماره ۱ صفحه ۱۶۸-۱۵۸.
۱۰. علیزاده، ا. و ن. خلیلی. ۱۳۸۷. تعیین ضرایب معادله آنگستروم و توسعه یک معادله رگرسیونی برآورد تابش خورشیدی (مطالعه موردی: منطقه مشهد). آب و خاک، ۲۳، شماره ۱، صفحه ۲۳۸-۲۲۹.

11. Allen, R.G. 2006. FAO Irrigation and Drainage Paper. Utah State University. P.7.
12. Daneshyar. M. 1978. Solar radiation statistics for Iran. Solar Energy. 21: 345-349.
13. Paltridge, GW. and D. Proctor. 1976. Monthly mean solar radiation statistics for Australia. Sol Energy 18:235-43
14. Prescott, J. A. 1940. Evaporation from water surface in relation to solar radiation. Trans . Roy. Soc. Austr. 64: 114.
15. Sabbagh, A, M. Sayigh and A. El-Salam. 1975. Estimation of the total solar radiation from meteorological data. Solar Energy 19: 307-311.
16. Sabziparvar, A. 2007. General Formula for Estimation of Monthly Mean Global Solar Radiation in Different Climates on the South and North Coasts of Iran. International Journal of Photoenergy.
17. Sabziparvar, A. and H. Shetaee. 2007. Estimation of global solar radiation in arid and semi-arid climates of East and West Iran. Energy 32: 649-655.
18. Sabziparvar, A. 2008. A simple formula for estimating global solar radiation in central arid deserts of Iran, Renewable Energy 33: 1002-1010.
19. Sabziparvar, A. , R. Mousavi, S. Marofi, N. Ebrahimi Pak and M. Heidari. 2013. An Improved Estimation of the Angstrom -Prescott Radiation Coefficients for the FAO56 Penman-Monteith Evapotranspiration Method. Water Resour Manage, 27: 2839-2854
20. Tabari, T. Aeini, A. Hosseinzadeh Talaee, P and B. Shifteh Some'e. 2012a. Spatial distribution and temporal variation of reference evapotranspiration in arid and semi-arid regions of Iran. Hydrological Processes.
21. Tabari, H. and Aghajanloo, M. 2012b. Temporal pattern of aridity index in Iran with considering precipitation and evapotranspiration trends. International Journal of Climatology 26: 500-512
22. Tang, W. K. Yang. J. He and J. Qin. 2010. Quality control and estimation of global solar radiation in China, Solar Energy 84: 466-475.
23. Yang, K. W.G., Huang, and N. Tamai. 2001. A Hybrid model for estimating global solar radiation. Solar Energy. 70: 13-22.
24. Yang, K. and K. Toshio. 2005. A general model to estimate hourly and daily solar radiation for hydrological studies, Water Resources Research. 41 p.