



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۸ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۷

صفحه‌های ۳۰۳-۳۱۹

بررسی کارایی روش‌های تجربی برآورد تبخیر- تعرق مرجع (بر پایه درجه حرارت) در اقلیم‌های مختلف (مطالعه موردی ایران)

هوشنگ قمرنیا^{۱*}، مهناز لرستانی^۲

۱. استاد، گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۰۹

تاریخ ارسال: ۱۳۹۷/۱۰/۲۳

چکیده

بررسی کارایی روش‌های تجربی برآورد تبخیر و تعرق مرجع در برآورد نیاز آبی گیاهان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا، در این مطالعه از داده‌های هواشناسی ۱۵۴ ایستگاه سینوپتیک کشور در مقطع آماری ۱۵ ساله (۱۳۷۷ تا ۱۳۹۱) استفاده شد. تبخیر- تعرق پتانسیل برای تمام ایستگاه‌های سینوپتیک کشور، با استفاده از روش‌های محاسباتی مبنی بر درجه حرارت هوا، مشتمل بر ۱۷ روش محاسبه شدند. نتایج حاصل از روش‌های مختلف با نتیجه حاصل از روش مرجع (فائو- پنمن- مانیتث) مقایسه گردیدند. بهترین و بدترین روش‌ها براساس شاخص‌های آماری مختلف، شامل ضریب رگرسیونی، جذر مربعات، متوسط خطای تخمین‌ها و معیار جاکوویدز انتخاب شدند. نتایج نشان داد، که به ترتیب برای اقلیم خشک، روش‌های هارگریوز-M4، هارگریوز، هارگریوز-M2، هارگریوز-M1، هامون ۱۹۶۱، هامون ۱۹۶۳ و هارگریوز سامانی مناسب‌ترین روش‌ها می‌باشند. برای اقلیم نیمه خشک روش‌های هارگریوز-M4، هارگریوز، هامون ۱۹۶۳ و هارگریوز سامانی مناسب‌ترین روش‌ها بودند. در اقلیم مدیترانه‌ای روش‌های هارگریوز-M4 و هارگریوز مناسب‌ترین روش‌ها بودند. در اقلیم نیمه مرطوب روش‌های هارگریوز-M4 و هارگریوز-M2 مناسب‌ترین روش‌ها برگزیده شدند. در اقلیم مرطوب نیز روش‌های هارگریوز-M4، هارگریوز-M2 و هارگریوز-M1 مناسب‌ترین روش‌ها و در اقلیم‌های بسیار مرطوب روش‌های هارگریوز-M4، هارگریوز، هارگریوز-M1 و بلانی کریدل-۴ مناسب‌ترین روش‌ها و روش چندل نامناسب‌ترین روش برای همه اقلیم‌ها بود. ضمناً مطالعات لیسیمتری انجام شده در اقلیم نیمه خشک، انتخاب بهترین و بدترین روش‌های برآورد تبخیر- تعرق مبنی بر درجه حرارت را تأیید نمودند.

کلیدواژه‌ها: تبخیر تعرق پتانسیل، داده‌های هواشناسی، شاخص‌های آماری، مطالعات لیسیمتری، اقلیم نیمه خشک.

مقدمه

کمبود منابع آب در جهان مهم‌ترین عامل محدودکننده توسعه کشاورزی می‌باشد. کشور ایران نیز از این چالش به دور نبوده و تنش‌های وارده را احساس می‌نماید. ایران با متوسط بارندگی ۱۳۱ میلی‌متر در سال آبی ۹۲-۹۳ در زمره مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان طبقه‌بندی شده است، از طرف دیگر با افزایش جمعیت کشور نیاز به تولید محصولات کشاورزی افزایش یافته و اهمیت این موضوع را می‌رساند، که باید راندمان مصرف آب را افزایش داده و این موضوع محقق نمی‌شود، جز با تعیین میزان دقیق تبخیر- تعرق پتانسیل. در طی ۵۰ سال اخیر ده‌ها روش و فرمول برای تعیین تبخیر- تعرق پتانسیل توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده و در این مدت تمامی آن‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و اصلاحات لازم بر روی آن‌ها صورت پذیرفته است (۲). سبزی پرور و طبری در طی تحقیقی با هدف ارزیابی و مقایسه مدل‌های مک‌کینگ، پرستلی تیلور و هارگریوز با مدل فائو پنمن مانیتث در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران در دوره سال‌های ۱۳۷۱ تا ۱۳۸۳ و انتخاب مدل مناسب برآورد تبخیر تعرق، و روش هارگریوز به‌عنوان مدل بهینه برای مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران معرفی گردید. نهایتاً نقشه توزیع جغرافیایی تبخیر- تعرق پتانسیل نشان داد، که این مقدار از شمال به جنوب منطقه مورد مطالعه افزایش می‌یابد (۱۷). در تحقیقی دیگر که توسط میرموسوی و همکاران واسنجی روش‌های محاسبه تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه مرجع و محاسبه نیاز آبی گیاه زیتون در استان کرمانشاه انجام شد. در نهایت، آنها به این نتیجه رسیدند، که از بین پنج روش فائو پنمن مانیتث، پنمن اصلاح‌شده، تورنت وایت، بلانی کریدل اصلاح‌شده و هارگریوز، روش فائو پنمن مانیتث برآورد دقیق‌تری از تبخیر- تعرق پتانسیل دارد. همچنین بررسی نقشه‌های

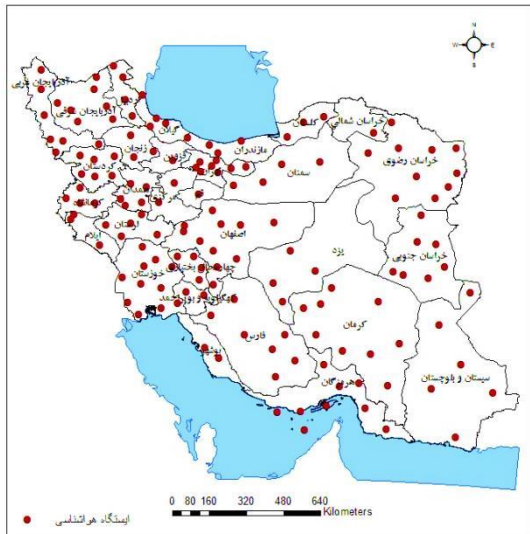
پراکندگی نیاز آبی نشان داد، که ایستگاه روانسر بیش‌ترین و ایستگاه کنگاور کم‌ترین نیاز آبی برای محصول زیتون را دارا می‌باشد (۵). علیزاده و همکاران با بررسی دقت عملکرد تعرق پتانسیل با روش‌های هارگریوز سامانی و تشتک تبخیر در خراسان پرداخته و در نهایت به این نتیجه دست یافتند، که روش تشتک تبخیر نتایج قابل قبولی در برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل دارد (۴). آثاره و داوودی در تحقیقی در شهرستان امیدیه با استفاده از داده‌های ایستگاه سینوپتیک در دوره آماری ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۳ به انتخاب مناسب‌ترین روش تعیین تبخیر- تعرق پتانسیل پرداختند، روش فائو- پنمن- مانیتث به‌عنوان روش مرجع و دقت روش‌های بلانی کریدل، تورنت وایت و هارگریوز سامانی مورد بررسی قرار گرفت، نتایج نشان داد، که روش بلانی کریدل با بیش‌ترین ضریب همبستگی و کم‌ترین میزان خطا از دقت بیش‌تری برخوردار است (۸). روشن و همکاران در مطالعه‌ای در کشور جهت برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل ضمن استفاده از روش‌های تورنت وایت، جنسن هیز، بلانی کریدل و هارگریوز در نهایت به این نتیجه رسیدند، که روش بلانی کریدل با شرایط ایران هم‌خوانی بهتری را دارا می‌باشد (۱۶). توسط بابا میری و دین‌پژوه در حوضه آبریز دریاچه ارومیه چهار روش تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع، مبتنی بر درجه حرارت مقایسه و واسنجی شد. روش‌های انتخاب‌شده هارگریوز، تورنت وایت، بلانی کریدل و لینیاکر بودند، که با روش فائو- پنمن- مانیتث مقایسه شدند. واسنجی روش‌ها در دو حالت متمایز انجام شد. در حالت اول تنها یک ضریب واسنجی برای ایستگاه‌ها تخمین زده شد. در حالت دوم ضریب واسنجی هر ایستگاه برای یک‌یک ماه‌های سال محاسبه گردید. نتایج نشان داد، که قبل از واسنجی نتایج روش‌های مختلف، اختلاف زیادی با روش فائو- پنمن- مانیتث دارد، واسنجی روش‌ها در

شد، تا تنها از روش بلانی‌کریدل استفاده شود (۳). در مطالعه‌ای در کشور تایوان، چن و همکاران به این نتیجه رسیدند، که روش پنمن مانیتث نسبت به روش‌های دیگر برآورد دقیق‌تری دارد (۱۰). راثو و همکاران در مطالعه‌ای در کارولینای شمالی آمریکا با بررسی روش‌های فائو، مدل هامون ۱۹۶۳ و مدل پریستلی تیلور۴ به این نتیجه رسیدند، که مدل پریستلی تیلور۴، نتایج بسیار دقیق‌تری از میزان تبخیر و تعرق پتانسیل را ارائه می‌دهد (۱۵). قمرنیا و همکاران در پژوهشی روش هارگریوز سامانی را توسط معادله پنمن- مانیتث برای شرایط اقلیمی مختلف در غرب ایران کالیبره نمودند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد، زمانی‌که منطقه وسیعی همراه با ایستگاه‌های هواشناسی بیش‌تری مورد استفاده قرار گرفته و حجم زیادی از داده‌ها به‌دست آید، ضریب ۰/۰۲۳ در معادله هارگریوز نیازی به تصحیح مجدد جهت کالیبره‌کردن اهداف موضعی ندارد (۱۲). افندی و آبدرابو در تحقیقی در مصر برای محاسبه تبخیر- تعرق مرجع از ۴ روش پنمن- مانیتث- فائو، بلانی‌کریدل، هارگریوز و تورنت‌وایت استفاده کردند. نتایج نشان داد، که به‌ترتیب روش‌های پنمن- مانیتث- فائو و بلانی‌کریدل بهترین روش برای برآورد تبخیر- تعرق مرجع در آب‌وهوای مصر هستند (۶).

روش‌های غیرمستقیم که براساس درجه حرارت پایه ریزی شده‌اند، دارای ۷ روش مختلف، بلانی‌کریدل، چندل، خاروفا، هارگریوز، رومانکو، لینیاکر و هامون بوده و مشتمل بر ۱۷ فرمول می‌باشند. هدف اصلی از تحقیق حاضر تعیین بهترین روش برآورد تبخیر- تعرق مرجع (پتانسیل) در بین روش‌های بر پایه دما برای اقلیم‌های مختلف کشور ایران، تهیه نقشه پهنه‌بندی تبخیر- تعرق در سراسر کشور و مشخص نمودن نقاط هم تبخیر- تعرق برای اقلیم‌های متفاوت در کشور با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS می‌باشد. در این تحقیق براساس آخرین داده‌ها

عملکرد آن‌ها بهبود قابل‌ملاحظه‌ای ایجاد کرد. هم‌چنین نتایج نشان داد، که واسنجی روش‌ها در حالت دوم مناسب‌تر از حالت اول است. بعد و قبل از واسنجی (در حالت اول) روش هارگریوز به‌عنوان بهترین روش و بعد از واسنجی (حالت دوم) روش لینیاکر به‌عنوان بهترین روش شناخته شد (۱).

فارمر و همکاران از معادله هارگریوز و هارگریوز اصلاح‌شده جهت محاسبه تبخیر- تعرق پتانسیل روزانه استفاده کرده و ضرایب این معادله را جهت کاهش ریشه دوم مربعات خطا و کاهش تفاوت میان روش محاسبه‌شده با روش فائو- پنمن- مانیتث بهینه نمودند. پس از ارزیابی زمانی و مکانی، ضعیف‌ترین نتایج در تابستان و در منطقه پولوارد به‌دست آمد. هم‌چنین نتایج نشان داد، که داده‌های روزانه از معادله هارگریوز اصلاح‌شده در سطح معنی‌دار درصد بیش‌ترین شباهت را به معادله فائو- پنمن- مانیتث دارد (۱۱). سالاریان و همکاران ضمن انجام پژوهشی در اصفهان جهت بررسی صحت شش روش تجربی محاسبه تبخیر- تعرق شامل (روش تشعشعی، فائو۲، بلانی‌کریدل- فائو، هارگریوز- سامانی، پرستیلی تیلور، مکنیگ و تورک) در مقابل روش پر کاربرد فائو- پنمن- مانیتث به کمک نرم‌افزار Ref-ET در طی آمار ۴۷ ساله برای ماه‌های سرد و گرم سال که براساس متوسط دما و به‌کمک نرم‌افزار SAS انجام دادند. نتایج نشان داد، که در اکثر موارد این معادلات برای ماه‌های سرد سال کاربرد داشته، که در آن به‌ترتیب استفاده از معادلات بلانی‌کریدل، مکنیگ، تشعشعی، هارگریوز، تورک و تیلور به‌دلیل دارا بودن ضریب تعیین تعدیل‌یافته R^2 بزرگ‌تر (نزدیک به ۱) خطای RMSE کم‌تر (نزدیک صفر) و در نتیجه نسبت $R^2/RMSE$ بیش‌تر (نزدیک ۱) جایگزین مناسبی برای معادله فائو- پنمن- مانیتث می‌باشد. برای ماه‌های گرم سال با توجه به R^2 کم و خطای RMSE زیاد، پیشنهاد



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک

در ابتدا با توجه به آخرین پارامترهای ایستگاه‌های هواشناسی و استفاده از روش دمارتن اقلیم‌های متفاوت در نقاط مختلف کشور دسته‌بندی شدند. روش‌های غیرمستقیم که براساس درجه حرارت پایه‌ریزی شده‌اند، دارای ۷ روش بلانی‌کریدل، چندل، خاروفا، هارگریوز، روماننکو، لینیاکر و هامون که مشتمل بر ۱۷ فرمول می‌باشد. در این روش‌ها از پارامترهای میانگین دما، ماکزیمم دما، مینیمم دما، درصد رطوبت نسبی، تابش خورشیدی که همگی از اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی بوده، استفاده شده است. سپس مقدار تبخیر-تعرق با استفاده از فرمول‌های براساس درجه حرارت هوا محاسبه گردید. همچنین در قسمت دوم این تحقیق با برداشت روزانه داده‌های لیسیمتری در شهر کرمانشاه با اقلیم خشک و نیمه‌خشک و مقایسه آن با مدل‌های وضع شده براساس دما جهت تعیین و مقایسه با بهترین روش برآورد تبخیر-تعرق مرجع اقدام شد. برای این منظور آزمایش‌های لیسیمتری در مزرعه تحقیقاتی گروه مهندسی آب واقع در پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی، کرمانشاه انجام گرفت، که دارای طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۹

و پارامترهای ایستگاه‌های هواشناسی و استفاده از روش دمارتن تعیین اقلیم‌های متفاوت نقاط مختلف کشور مدنظر است. هم‌چنین هدف دیگر این تحقیق در آن است، که با برداشت روزانه داده‌های لیسیمتری در شهر کرمانشاه با اقلیم نیمه‌خشک و مقایسه آن با مدل‌های وضع شده براساس دما جهت تعیین بهترین روش برآورد تبخیر-تعرق مرجع اقدام و برای اقلیم کرمانشاه (نیمه‌خشک) اقدام گردد.

مواد و روش‌ها

کشور ایران با وسعتی معادل ۱۶۴۸۰۰۰ کیلومترمربع (هفدهمین کشور جهان از نظر وسعت) در جنوب‌غربی قاره آسیا واقع شده و جزو کشورهای خاورمیانه است. ایران در نیمه جنوبی منطقه معتدل شمالی بین ۲۵ درجه و ۰۰ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۷ دقیقه عرض شمالی از خط استوا و ۴۴ درجه و ۰۲ دقیقه تا ۶۳ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار داشته و دارای ۳۱ استان و در حدود ۲۶۸ شهرستان می‌باشد. در انجام این پژوهش در ابتدا کلیه آمار ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک موجود، از سازمان هواشناسی کل کشور با طول دوره آماری از بدو تأسیس تا تاریخ ۱۳۹۳/۱۲/۲۵ اخذ گردید. با توجه به این‌که دوره‌های آماری انتخاب شده برای تمام ایستگاه‌ها می‌بایستی یکسان باشند، یعنی در آن بازه آماری ایستگاه‌ها داده‌برداری داشته باشند. پس از بررسی‌های لازم، بازه زمانی ۱۳۷۷/۱۰/۱۱ تا ۱۳۹۲/۱۰/۱۰ یعنی ۱۵ سال آماری برای کل ایستگاه‌های سینوپتیک کشور انتخاب شد. سپس خلأ آماری هر ایستگاه مشخص گردید و بازسازی آماری آن‌ها با رگرسیون‌گیری، نسبت به موقعیت ایستگاه‌های مجاور، انجام گرفت. شکل (۱) موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک انتخابی در کشور را نشان می‌دهد.

بررسی کارایی روش‌های تجربی برآورد تبخیر- تعرق مرجع (بر پایه درجه حرارت) در اقلیم‌های مختلف (مطالعه موردی ایران)

$$ET_c = I + P - D \pm \Delta S \quad (1)$$

در معادله (۱)، پارامترهای ETC: تبخیر و تعرق پتانسیل، I: عمق آب آبیاری، P: میزان بارندگی، D: میزان آب زهکشی شده و ΔS : تغییرات رطوبت خاک می‌باشند.

پهنه‌بندی اقلیمی کشور بر اساس روش دمارتن

در این روش، دما و بارش سالیانه اساس محاسبه شاخص رطوبت قرار می‌گیرند و با استفاده از این روش و بر پایه مقادیر مختلفی که برای شاخص I به دست آمده معادله (۲) و مقادیر مندرج در جدول (۱) اقلیم‌های مناطق مختلف کشور تعیین گردید.

$$I = P / (T + 10) \quad (2)$$

در معادله (۲)، P: متوسط بارندگی سالانه بر حسب میلی‌متر، T: متوسط دمای سالانه بر حسب درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

جدول ۱. تعیین اقلیم به روش دمارتن

نام اقلیم	محدوده ضریب خشکی
خشک	$I < 10$
نیمه‌خشک	$10 < I < 19.9$
مدیترانه‌ای	$20 < I < 23.9$
نیمه‌مرطوب	$24 < I < 27.9$
مرطوب	$28 < I < 34.9$
بسیار مرطوب	$I > 32$

روش فائو-پنمن-مانتیث

در این تحقیق روش پنمن-مانتیث-فائو به شرح زیر به عنوان روش مرجع و مقایسه در نظر گرفته شد (معادله ۳).

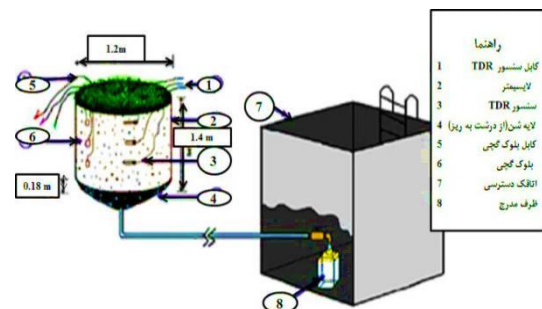
$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) U_2 (e_a - e_s)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (3)$$

که در آن، ET_o : تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه مرجع (میلی‌متر)، Δ : شیب منحنی فشار بخار نسبت به درجه حرارت (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، R_n : تابش

دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۱ دقیقه شمالی می‌باشد و در ارتفاع ۱۳۱۹ متری از سطح دریا قرار گرفته است. برای اجرای این آزمایش از ۳ دستگاه لیسیمتر استوانه‌ای زهکش‌دار با قطر ۱/۲ متر و ارتفاع ۱/۴ متر استفاده گردید. در هر سه لیسیمتر گیاه مرجع (چمن) کشت شده بود (شکل‌های ۲ و ۳).



شکل ۲. نمایی از لیسیمترهای کشت شده چمن



شکل ۳. شماتیک لیسیمتر، اجزا و اتاقلک دسترسی

جهت اندازه‌گیری دقیق محتوای آب خاک، هر ۳ لیسیمتر در سه عمق مختلف ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متری توسط سنسورهای سنجنده رطوبت (TDR) مجهز شدند. برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق گیاهی توسط لیسیمتر زهکش‌دار در دوره زمانی معین، از رابطه بیلان آبی خاک (۱) استفاده شد. در طی یک سال به صورت روزانه تبخیر- تعرق گیاه مرجع به طور مستقیم و از طریق معادله بیلان آبی معادله (۱) برآورد گردید.

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۸ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۷

شده است و در تمامی روش‌ها در طول زمان، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و اصلاحات لازم بر روی آن‌ها انجام شده است (۲). روش‌های غیرمستقیم که براساس درجه حرارت پایه‌ریزی شده‌اند، دارای ۷ روش شامل بلانی‌کریدل، چندل، خاروفا، هارگریوز، رومانکو، لینیاکر و هامون بوده، که مشتمل بر ۱۷ فرمول می‌باشند. در این روش‌ها از پارامترهای میانگین دما، ماگزیمم دما، مینیمم دما، درصد رطوبت نسبی، تابش خورشیدی و غیره استفاده شده است. در جدول (۲) کلیه روش‌های غیرمستقیم و بر پایه در حرارت به‌همراه تمامی جزئیات و پارامترهای مربوطه به‌طور کامل تشریح شده است.

خالص (مگا ژول بر مجذور متر بر ثانیه)، G: شار گرما به داخل خاک است که معمولاً صفر در نظر گرفته می‌شود، ۷: ضریب رطوبتی (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، T: توسط دمای روزانه (درجه سانتی‌گراد)، es و ea: فشار بخار اشباع و فشار واقعی بخار آب (میلی‌بار)، U2: سرعت باد در روز در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (متر بر ثانیه) می‌باشد.

روش‌های غیرمستقیم بر پایه درجه حرارت

در طی ۵۰ سال اخیر ده‌ها روش و فرمول برای تعیین تبخیر و تعرق پتانسیل توسط پژوهش‌گران مختلف ارائه

جدول ۲. روش‌های محاسباتی تبخیر- تعرق بر پایه درجه حرارت هوا

معادله	فرمول	روش
$ETO = p \times ((0.46 \times Ta) + 8)$		بلانی‌کریدل - ۱
P : ضریب مربوط به طول روز یا درصد سالانه تابش آفتاب در ماه که به‌صورت روزانه توصیف می‌شود، مقدارش ثابت است بین ۰/۲۳ تا ۰/۳۳ (متوسط ساعت‌های روشنایی هر روز در ماه مورد نظر تقسیم بر کل ساعات روشنایی سال ضرب در ۱۰۰)، Ta : متوسط درجه حرارت (درجه سانتی‌گراد). برای این‌که اثر اقلیم روی آب مورد نیاز گیاه بهتر شناخته شود، رابطه اصلاح‌شده به‌صورت زیر ارائه گردید.		
$ETO = k \times p \times ((0.46 \times Ta) + 8.13)$		بلانی‌کریدل - ۲
K : ضریب تحلیل‌رفته‌ای است که به‌کار می‌رود و به نوع گیاه، موقعیت جغرافیایی و فصل رشد بستگی دارد. مقدارش ثابت است بین ۰/۵ تا ۱/۲ است، که ۰/۵ برای درخت پرتقال و ۱/۲ برای گیاهان متراکم می‌باشد. بلانی‌کریدل در سال ۱۹۵۹ طی تحقیقاتی به این نتیجه رسیدند، که مقدار آن را ۰/۴۵ برای فصل رشد یعنی از ماه آپریل تا سپتامبر و مقدار آن را ۰/۸۵ برای فصل غیر رشد یعنی از ماه اکتبر تا مارس در نظر بگیرند. فرمول بلانی‌کریدل را به این صورت نیز اصلاح شد.		
$ETO = a + b (p (0.46 T + 8.13))$		بلانی‌کریدل - ۳
$a = 0.0043(Rhmin - (n/N) - 1.41)$ $b = 0.908 - 0.00483(Rhmin) + 0.7949 \times (n/N) + 0.0768 (\ln(U2 + 1)) \times 2 \times \ln((n/N) + 1)$		بلانی‌کریدل
a و b : ضرایب اقلیمی هستند و بستگی به رطوبت نسبی هوا، نسبت ساعت واقعی آفتاب به حداکثر ساعت آفتابی ممکن و سرعت باد در روز دارد، T : متوسط دمای ماهانه برحسب (درجه سانتی‌گراد)، $Rhmin$: رطوبت نسبی مینیمم برحسب (درصد) و $U2$: سرعت باد در ارتفاع ۲ متری برحسب (متر بر ثانیه) است (۹).		
فرمول دیگری نیز از بلانی‌کریدل اصلاح شده است که مطابق فرمول بالاست، فقط ضریب b را دورنباس و پرویت در سال ۱۹۹۲ به‌صورت زیر بیان کردند.		
$b = 0.82 - 0.0041 \times Rhmin + 1.07 \times (n/N) + 0.066 \times U2 \times 0.006 \times Rhmin \times (n/N) - 0.0006 \times Rhmin \times U2$		
$ETO = c \times (p \times ((0.46 \times Ta) + 8.13)) \times (1 + (EL/1000))$		فانو - بلانی‌کریدل ۴
EL : ارتفاع ایستگاه هواشناسی برحسب (متر)، C : فاکتور تعدیل‌کننده وابسته به حداقل رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد می‌باشد، مقدار این ضریب به‌صورت استفاده از نمودار و با توجه به مقدار $p \times ((0.46 \times T) + 8)$ به‌دست می‌آید.		

بررسی کارآیی روش‌های تجربی برآورد تبخیر- تعرق مرجع (بر پایه درجه حرارت) در اقلیم‌های مختلف (مطالعه موردی ایران)

ادامه جدول ۲. روش‌های محاسباتی تبخیر- تعرق بر پایه درجه حرارت هوا

معادله	فرمول	روش
$ETO = 0.408 \times 0.003 \times (Ta + 20) \times (TM - Tm) 0.4 \times Ra$	M1- هارگریوز	
$ETO = 0.4808 \times 0.003 \times (Ta + 20) \times (TM - Tm) 0.5 \times Ra$	M2- هارگریوز	
$ETO = 0.408 \times 0.0013 \times (Ta + 17) \times ((TM - Tm - 0.0123) \times P) 0.76 \times Ra$	M3- هارگریوز	هارگریوز
$ETO = 0.408 \times 0.0023 \times (Ta + 17.8) \times (TM - Tm) 0.424 \times Ra$	M4- هارگریوز	
$ETO = 0.0023 \times Ra \times TD 0.5 \times (Ta + 17.8)$	هارگریوز	
$ETO = 0.408 \times 0.0025 \times (Ta + 17.8) \times (TM - Tm) 0.5 \times Ra$	هارگریوز- سامانی	هارگریوز
$ETO = 0.34 \times p \times (Ta + 1.3)$	خاروفا	خاروفا
$ETO = (((500 \times Tm) / (100 - A)) + (15 \times (T - Tdew))) / (80 - T)$	لینیاکر	
$Tm = T + (0.006 \times h)$		
$Tdew = ((116.91 + 237.3) * Ln(ea)) / (16.78 - Ln(ea))$		لینیاکر
$ET = (0.0023 \times h) + (0.37 \times T) + (0.53 \times T_{min}) + (0.3 \times T_{nn})$		
$ETO = 0.55 \times D \times P$	هامون ۱۹۶۱	
$Pt = (4.95 * \exp(0.062 * Ta)) / 100$		
$D = (Sun / (n/N)) / 12$		
$ETO = 0.1651 \times Ld \times RHOSAT \times KPEC$	هامون ۱۹۶۳	هامون
$RHOSAT = (216.7 * ESAT) / (T + 273.3)$		
$ESAT = 6.108 * \exp((17.26939 * T) / (T + 273.3))$		
$ETO = 0.0018 \times (25 + Ta) 2 \times (100 - Rh)$	رومانکو	
$Rh = e^o(Ta) / e^o(Td)$		رومانکو
$ETO = (16 \times Ta) / Rh$	چندل	چندل

بهتری داشته است (۱۳). در این تحقیق براساس آمارهای یادشده، مناسب‌ترین روش برای هر ایستگاه پیشنهاد گردید و به‌عنوان روش مبنای سایر ایستگاه‌های هم‌اقلیم فاقد مقادیر لیسیمتری در نظر گرفته شد. جهت پهنه‌بندی تبخیر-تعرق سالیانه و ترسیم نقشه هم‌تبخیر-تعرق (ISOETO) با بهره‌گیری از روش Kriging در محیط نرم‌افزار Arc GIS و با استفاده از اطلاعاتی ایستگاه‌های هواشناسی و داده‌های تبخیر-تعرق مرجع سالیانه انجام شد.

نتایج

شکل (۴) نشان می‌دهد، که مساحت‌های اقلیم نیمه‌خشک در حدود ۵۸/۲۶۹۱۸۳ کیلومتر مربع (حدود ۲۱ درصد)، اقلیم خشک ۹۸/۹۶۹۶۶۸ کیلومتر مربع (حدود ۷۵/۷ درصد)، اقلیم مدیترانه‌ای ۹۶/۱۰۹۶۵ کیلومتر مربع (حدود ۰/۸ درصد)، اقلیم نیمه‌مرطوب ۳۶/۷۶۷۱ کیلومتر مربع (۰/۶ درصد)، اقلیم مرطوب ۵۷/۱۰۶۱۹ کیلومتر مربع (حدود ۰/۸ درصد) و در نهایت اقلیم بسیار مرطوب ۶۱/۱۲۷۹۴ کیلومتر مربع (حدود ۱ درصد) از مساحت کشور را شامل می‌شوند. با توجه به این دسته‌بندی قابل استنتاج است، که بیش از نیمی از ایستگاه‌های کشور در شرایط اقلیمی خشک قرار دارند، که نرخ تبخیر-تعرق در آن‌ها نیز متوسط تا زیاد است. پس از آن بیش‌ترین سهم از ایستگاه‌ها متعلق به اقلیم نیمه‌خشک است، که وضعیت آن‌ها از لحاظ تبخیر-تعرق تقریباً مشابه اقلیم خشک است. این دسته‌بندی این امر که، ایران کشوری خشک و نیمه‌خشک است، را تأیید می‌نماید. براساس شکل (۴)، نواحی جنوب، شرق و جنوب‌شرقی کشور دارای اقلیم خشک، نواحی مرکز، جنوب‌غربی و شمال‌غربی کشور دارای اقلیم نیمه‌خشک و نواحی شمال، قسمتی از مناطق شمال‌غربی و قسمتی از مرکز (مربوط به استان‌های چهارمحال و بختیاری و کهگیلویه و بویراحمد) دارای

تعیین بهترین روش برآورد تبخیر-تعرق

نتایج به‌دست‌آمده از برآوردهای تبخیر و تعرق پتانسیل حاصل از مدل‌های تجربی تحت چهار شاخص آماری با نتایج حاصله از روش مرجع (پنمن-مانتیث-فائو) مقایسه شدند. این شاخص‌ها که توسط جاکوویدز پیشنهاد گردیده است (۱۳).

عبارت بودند از: ضریب رگرسیونی (R)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، متوسط خطای تخمین‌ها (MBE) و معیار جاکوویدز (t).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} \quad (5)$$

$$MBE = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{n} \quad (6)$$

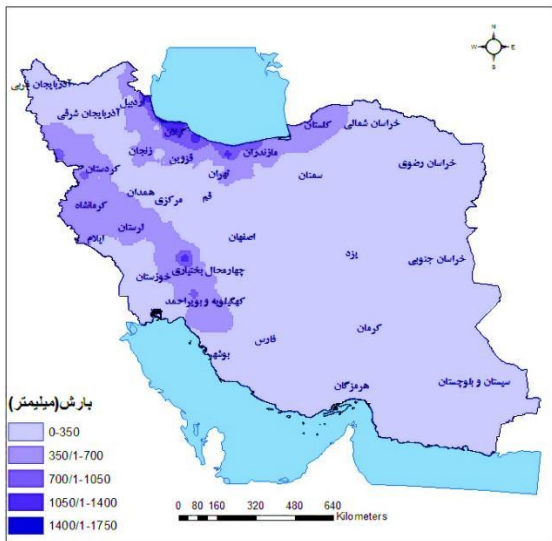
$$t = \sqrt{\frac{(n-1)MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2}} \quad (7)$$

که در آنها، X: مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر-تعرق، میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر-تعرق، Y: مقادیر برآوردشده، میانگین مقادیر برآوردشده، di: اختلاف بین مقادیر برآورد شده با مقادیر اندازه‌گیری شده و مقدار n: تعداد مشاهدات می‌باشد. هرچه مقدار RMSE و قدر مطلق MBE کوچک‌تر باشد، دقت مدل بالاتر است. مقادیر مثبت MBE نشان‌دهنده آن است، که مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل بیش‌تر از مقدار واقعی و مقادیر منفی نشان‌گر آن است که مقادیر پیش‌بینی شده از مقادیر واقعی کم‌تر می‌باشند. عملکرد هر یک از روش‌ها بر اساس مقدار t سنجیده می‌شود. هرچقدر که مقدار t پایین‌تر باشد، به معنی کمتر بودن اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده است و آن روش عملکرد

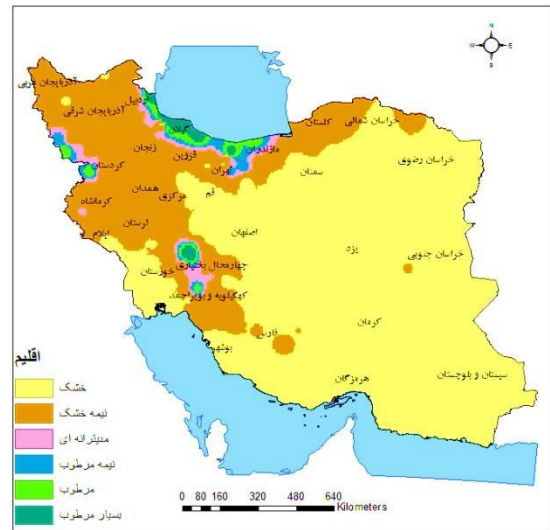
بررسی کارآیی روش‌های تجربی برآورد تبخیر- تعرق مرجع (بر پایه درجه حرارت) در اقلیم‌های مختلف (مطالعه موردی ایران)

(شکل‌های ۵، ۶ و ۷). هم‌چنان‌که شکل (۶) نشان می‌دهد، متوسط دما در این بازه زمانی در نواحی جنوب و جنوب غربی ایران بیش‌تر از مناطق دیگر و در نواحی غرب و شمال‌غربی ایران کم‌تر از نواحی دیگر است. شکل (۶) هم‌چنین نشان‌دهنده، هم‌بستگی دمایی در ناحیه جنوب، جنوب‌غربی و شمال کشور می‌باشد.

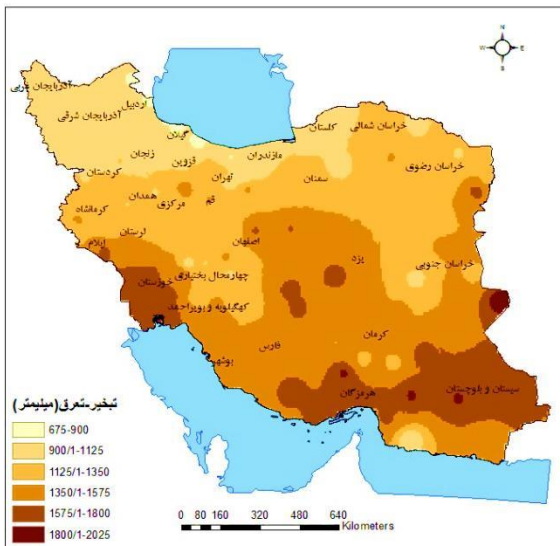
اقلیم‌های مدیترانه‌ای، نیمه‌مرطوب، مرطوب و بسیار مرطوب می‌باشند. هم‌چنین در این مطالعه با استفاده از مقادیر بارش، دما و تبخیر- تعرق به‌روش مرجع و به‌کارگیری نرم‌افزار Arc-Gis، نقشه‌های هم‌بارش، هم‌دما و تبخیر تعرق به‌روش مرجع (پنمن- مانیتث- فائو) به‌صورت سالیانه برای کل کشور ترسیم و کلاس‌بندی شد



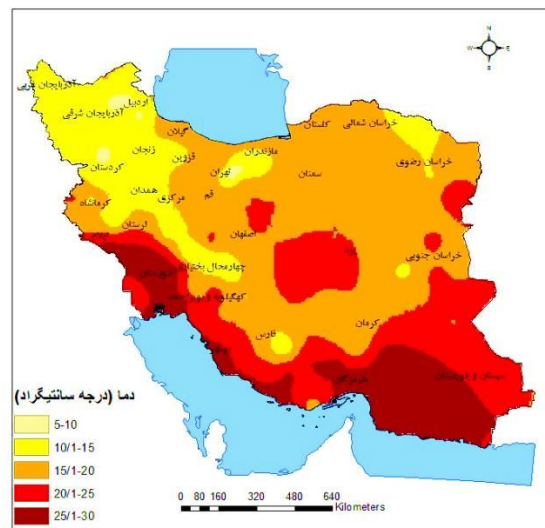
شکل ۵. پهنه‌بندی اقلیمی ایران به روش مرجع



شکل ۴. پهنه‌بندی اقلیمی ایران به روش دمارتن



شکل ۷. نقشه پهنه‌بندی تبخیر- تعرق کشور باروش مرجع



شکل ۶. نقشه هم‌دمای سالیانه کشور

درجه حرارت را با روش مرجع (فائو- پنمن- مانتیث) مقایسه نموده برای ایستگاه منتخب در شکل (۸) ارائه شده است. نتایج مندرج در جدول (۳) مربوط به ایستگاه بافت با اقلیم خشک، نشانگر آن است که از میان مدل های بررسی شده، روش هارگریوز با داشتن ضریب همبستگی ۰/۹۶، RMSE برابر ۰/۵۳ (میلی متر بر روز) و $MBE=0/22$ بهترین عملکرد را داشته اند. در این رابطه محققانی نظیر آلن و همکاران و لوپز یورا و همکاران نتایج مشابهی را گزارش کرده اند (۷ و ۱۴).

روش های بلانی کریدل-۳، بلانی کریدل-۴ و فائو بلانی کریدل نیز همبستگی بیش تری با روش مرجع ($R=0/98$) دارند، هرچند مقدار RMSE و t این روش ها بالا بوده و همین امر باعث عدم اعتماد به آنها شده است. از طرفی روش چندل نیز با داشتن ضریب همبستگی ۰/۴۸، RMSE برابر ۳/۵۵ (میلی متر بر روز) و $MBE=1/33$ بدترین عملکرد را داشته است. همان طور که شکل (۸) نشان می دهد، روش هارگریوز نزدیک ترین نمودار به نمودار روش مرجع، و نمودار روش چندل دورترین نمودار به نمودار روش مرجع را دارا می باشند. در این تحقیق برای تمام ایستگاه های سینوپتیک ایران ضمن انجام محاسبات و بررسی های آماری انجام شده در اقلیم های مختلف نتیجه کلی انتخاب بهترین و بدترین روش های تجربی برآورد تبخیر- تعرق مرجع (بر پایه درجه حرارت) در جدول (۴) آمده است. هم چنین با استفاده از مقادیر تبخیر- تعرق با بهترین روش و به کارگیری نرم افزار Arc GIS نقشه تبخیر تعرق با بهترین روش به صورت سالانه برای کشور ترسیم و کلاس بندی شده است (شکل های ۹ و ۱۰). با توجه به کلاس بندی انجام شده، به ترتیب در حدود ۲/۸، ۱۱/۲، ۲۸/۶، ۲۶/۵، ۲۱/۷ و ۹/۵ درصد از مساحت کشور، تبخیر- تعرق بین ۹۰۰-۶۷۵، ۱۱۲۵-۹۰۰، ۱۳۵۰-۱۱۲۵، ۱۵۷۵-۱۳۵۰، ۱۸۰۰-۱۵۷۵ و ۲۰۲۵-۱۸۰۰ میلی متر در روز می باشد.

همچنان که در شکل (۷) قابل مشاهده است، بیش ترین تبخیر- تعرق پتانسیل در نواحی جنوب و جنوب شرقی کشور در حدود ۲۰۲۵-۱۸۰۰ میلی متر به دست آمده است. این مقدار به سمت مرکز کشور اندکی کاهش یافته و به حدود ۱۳۵۰ میلی متر رسیده و سپس به سمت نواحی مرتفع شمال و شمال غرب به مقدار ۶۷۵ میلی متر کاهش یافته است. افزایش تبخیر- تعرق پتانسیل در عرض های جنوبی کشور می تواند، ناشی از تابش خورشید و گرمایش سطح زمین به دلیل ضعف نسبی پوشش گیاهی باشد. هم چنین در عرض های جنوبی کشور در ارتفاع از سطح دریای کم تری نسبت به نیمه بالایی واقع بوده و به این ترتیب کاهش تبخیر- تعرق در نیمه بالایی را می توان ناشی از کاهش گرادیان دما نسبت به ارتفاع دانست، که افزایش ارتفاع سبب کاهش دما و به تبع آن کاهش تبخیر- تعرق می شود. در ضمن، وجود دو رشته کوه البرز در امتداد شمال و رشته کوه زاگرس در امتداد شمال غرب و غرب کشور، در کاهش دما و افزایش رطوبت و به تبع آن کاهش تبخیر- تعرق مؤثرند (۱۸).

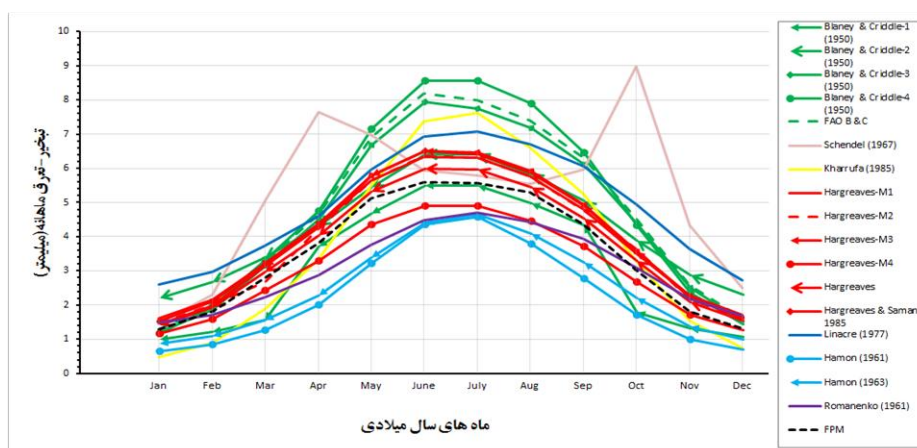
انتخاب مناسب ترین روش برآورد تبخیر- تعرق از بین روش های مختلف برآورد بر پایه درجه حرارت

برای محاسبه تبخیر- تعرق روزانه از معادلات مندرج در جدول (۲) استفاده و روش فائو- پنمن- مانتیث به عنوان روش مرجع به کار گرفته شد. برای تمام اقلیم های کشور نتایج برآورد تبخیر- تعرق روزانه به صورت کامل محاسبه گردید، با این وجود ترجیح داده شد، تا از هر اقلیم، یک ایستگاه به عنوان نمونه انتخاب و نتایج آن تفسیر گردد، که به صورت تصادفی ایستگاه بافت برای اقلیم خشک انتخاب شود. هم چنین شاخص های آماری این ایستگاه نیز برآورد گردید، جهت انتخاب بهترین و بدترین روش محاسباتی تبخیر- تعرق بر پایه درجه حرارت نتایج آماری در جدول (۳) و هم چنین نمودارهایی که ۱۷ روش بر پایه

بررسی کارایی روش‌های تجربی برآورد تبخیر-تعرق مرجع (بر پایه درجه حرارت) در اقلیم‌های مختلف (مطالعه موردی ایران)

جدول ۳. نتایج محاسبات تبخیر-تعرق و شاخص‌های آماری ایستگاه بافت (اقلیم خشک)

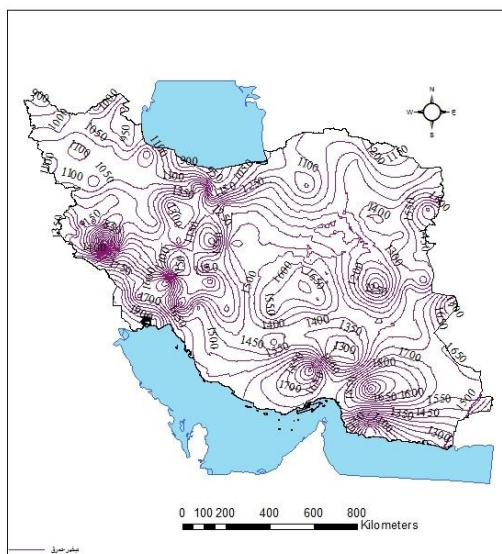
r/t	T	MBE	RMSE	R	Mean	روش‌های محاسباتی
۰/۰۲	۴۶/۲۱	-۰/۴۳	۰/۸۲	۰/۹۲	۳/۰۶	بلانی کریدل-۱
۰/۰۱	۹۵/۶۶	۰/۷۶	۰/۹۶	۰/۹۴	۴/۲۵	بلانی کریدل-۲
۰/۰۱	۸۲/۰۳	۱/۰۹	۱/۴۷	۰/۹۸	۴/۵۸	بلانی کریدل-۳
۰/۰۱	۷۹/۱۱	۱/۳۵	۱/۸۵	۰/۹۸	۴/۸۴	بلانی کریدل-۴
۰/۰۱	۸۸/۰۴	۱/۲۴	۱/۶۲	۰/۹۸	۴/۷۳	فائو پنمن مانیتث
۰/۰۱	۴۱/۳۳	۱/۷۳	۳/۵۵	۰/۴۸	۵/۲۲	چندل
۰/۰۶	۱۴/۸۶	۰/۲۴	۱/۲۰	۰/۹۳	۳/۷۳	خاروفا
۰/۰۱	۷۴/۴۹	۰/۴۹	۰/۶۹	۰/۹۶	۳/۹۸	M1 هارگریوز-
۰/۰۲	۶۱/۱۹	۰/۴۳	۰/۶۷	۰/۹۶	۳/۹۲	M2 هارگریوز-
۰/۰۲	۶۰/۴۸	۰/۴۹	۰/۷۸	۰/۹۵	۳/۹۹	M3 هارگریوز-
۰/۰۲	۵۹/۴۷	-۰/۴۴	۰/۷۰	۰/۹۶	۳/۰۶	M4 هارگریوز-
۰/۰۳	۳۳/۲۱	۰/۲۲	۰/۵۳	۰/۹۶	۳/۷۱	هارگریوز
۰/۰۱	۷۵/۹۱	۰/۵۴	۰/۷۵	۰/۹۶	۴/۰۳	هارگریوز و سامانی
۰/۰۱	۱۵۹/۲۶	۱/۳۷	۱/۵۱	۰/۹۳	۴/۸۶	لینیاکر
۰/۰۱	۱۳۲/۸۸	-۱/۲۴	۱/۴۱	۰/۹۲	۲/۲۶	هامون (۱۹۶۱)
۰/۰۱	۱۰۳/۹۶	-۰/۹۷	۱/۱۹	۰/۹۳	۲/۵۲	هامون (۱۹۶۳)
۰/۰۲	۴۰/۸۲	-۰/۴۴	۰/۹۰	۰/۹۲	۳/۰۶	روماننکو



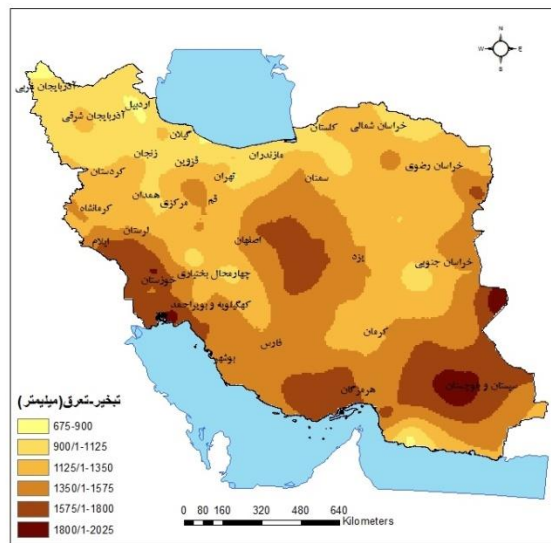
شکل ۸. نمودار تبخیر-تعرق برآوردی از روش‌های مختلف بر پایه درجه حرارت (ایستگاه بافت)

یافته است. در شکل (۱۰)، هم‌بستگی تبخیر-تعرق در نواحی مرکز، جنوب شرقی و جنوب غربی کشور دیده می‌شود. شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نیز نشانگر آن هستند، که اختلاف تبخیر-تعرق با روش مرجع و بهترین روش (بر پایه درجه حرارت) در اقلیم‌های مختلف کشور هماهنگی دارند.

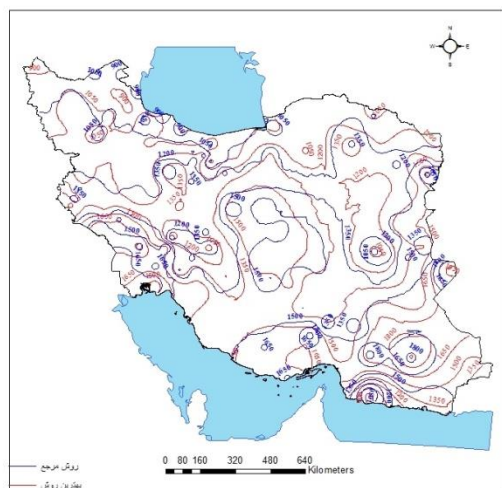
شکل (۹) نشان می‌دهد، که بیش‌ترین تبخیر-تعرق در ناحیه جنوب شرقی کشور در حدود ۲۰۲۵-۱۸۰۰ میلی‌متر است. این مقدار به سمت مرکز کشور اندکی کاهش یافته و به حدود ۱۳۵۰ میلی‌متر رسیده و سپس به سمت نواحی مرتفع شمال و شمال غرب به مقدار ۶۷۵ میلی‌متر کاهش



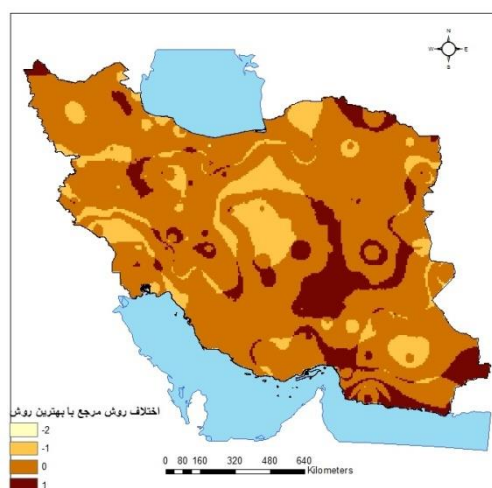
شکل ۱۰. نقشه هم تبخیر تعرق سالیانه با بهترین روش



شکل ۹. نقشه پهنه‌بندی تبخیر و تعرق با بهترین روش



شکل ۱۲. نقشه مقایسه روش مرجع با بهترین روش



شکل ۱۱. نقشه تفاوت‌های روش مرجع با بهترین روش

نتایج به‌دست‌آمده از داده‌های لیسیمتری با نتایج محاسبه‌شده، از روش‌های تجربی برآورد تبخیر- تعرق مرجع (بر پایه درجه حرارت) مقایسه‌شده و نتایج ارزیابی روش‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری معرفی‌شده مقایسه گردیده‌اند (جدول ۵). در شکل (۱۳) نیز نتایج روش‌های محاسباتی با روش مستقیم برآورد تبخیر- تعرق گیاه

نتایج لیسیمتری حاصل از برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع

جهت بررسی بیش‌تر روش‌های تجربی برآورد تبخیر- تعرق مرجع (بر پایه درجه حرارت) و تطابق آن با محاسبات انجام‌شده، در اقلیم نیمه‌خشک کرمانشاه، سه لایسیمتر تحت کشت چمن قرار گرفته و میزان تبخیر- تعرق گیاه چمن به‌طور مستقیم در طی یک‌سال

بررسی کارآیی روش‌های تجربی برآورد تبخیر- تعرق مرجع (بر پایه درجه حرارت) در اقلیم‌های مختلف (مطالعه موردی ایران)

تبخیر- تعرق مبنی بر درجه حرارت در مناطق با اقلیم نیمه‌خشک معرفی گردیده شده است، که با نتایج حاصل از آزمایش‌های لیسیمترها مطابقت دارد. همان‌طور که شکل (۱۳) نشان می‌دهد، روش‌های فائو- پنمن- مانیتث، و هارگریوز- M4 نزدیک‌ترین نمودارها به نمودار روش مرجع و نمودار روش چندل دورترین نمودار به روش مرجع است.

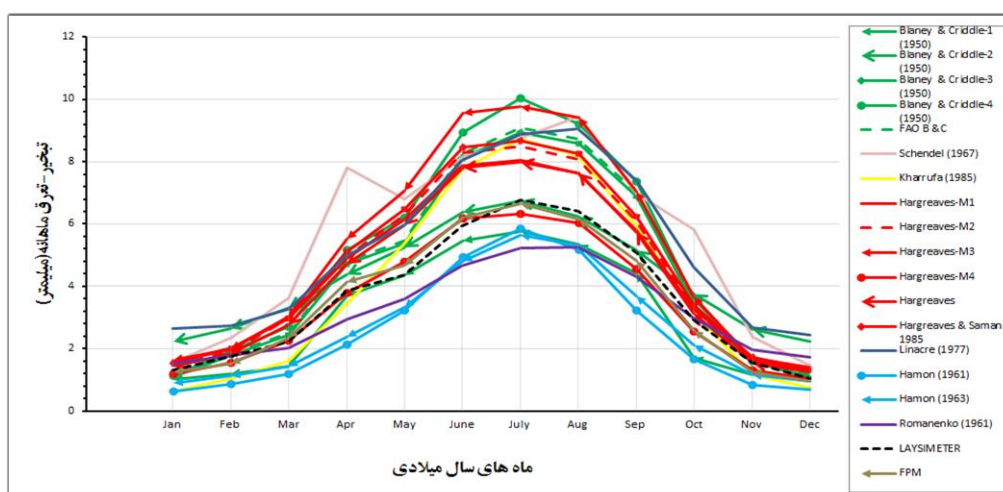
مرجع رسم و با مقایسه شده‌اند. براساس نتایج به‌دست‌آمده در طی یکسال آزمایش، روش‌های فائو- پنمن- مانیتث، و هارگریوز- M4، نزدیک‌ترین نتیجه و روش چندل نیز دورترین نتیجه را با نتایج لیسیمتری داشته‌اند. همان‌طور که در جدول (۵) نیز مشاهده شد، روش هارگریوز- M4 بهترین روش و روش چندل بدترین روش از بین روش‌های برآورد

جدول ۴. بهترین و بدترین روش‌های تجربی برآورد تبخیر- تعرق مرجع (بر پایه درجه حرارت) برای اقلیم‌های مختلف ایران

اقلیم	بهترین روش محاسباتی	داده های آماری		بدترین روش محاسباتی
		MBE (میلی‌متر بر روز)	RMSE (میلی‌متر بر روز)	
خشک	(۱) هارگریوز- M4	۰/۱۸	۰/۶۳	۰/۹۸
	(۲) هارگریوز	۰/۲۲	۰/۵۳	۰/۹۶
	(۳) هارگریوز- M1	۰/۰۹	۰/۶۷	۰/۹۸
	(۴) هارگریوز- M2	۰/۰۵	۰/۴۶	چندل
	(۵) هامون (۱۹۶۳)	۰/۱۴	۰/۹۲	۰/۹۸
	(۶) هامون (۱۹۳۱)	۰/۰۶	۰/۸۱	۰/۹۵
	(۷) هارگریوز و سامانی	۰/۰۱	۰/۵۶	۰/۹۸
	(۸) بلانی کریدل- ۱	۰/۵۱	۰/۶۵	۰/۹۷
نیمه‌خشک	(۱) هارگریوز- M4	-۰/۲۱	۰/۴۴	۰/۹۸
	(۲) هارگریوز	۰/۱۳	۰/۴۳	چندل
	(۳) هامون (۱۹۶۳)	۰/۰۲	۰/۸۶	۰/۹۸
	(۴) هارگریوز و سامانی	۰/۰۴	۰/۴۶	۰/۹۸
مدیترانه‌ای	(۱) هارگریوز- M4	۰/۲۹	۰/۵۸	چندل
	(۲) هارگریوز	۰/۰۷	۰/۵۴	۰/۹۸
نیمه‌مرطوب	(۱) هارگریوز- M4	۰/۰۱	۰/۴۶	چندل
	(۲) هارگریوز- M2	۰/۰۴	۰/۳۴	۰/۹۸
مرطوب	(۱) هارگریوز- M1	۰/۰۱	۰/۳۷	چندل
	(۲) هارگریوز	۰/۱۸	۰/۵۰	۰/۹۶
	(۳) هارگریوز- M4	۰/۰۵	۰/۳۶	۰/۹۸
بسیار مرطوب	(۱) بلانی کریدل- ۱	۰/۰۲	۰/۵۸	چندل
	(۲) هارگریوز- M4	-۰/۰۸	۰/۴۱	۰/۹۷
	(۳) هارگریوز- M11	۰/۲۳	۰/۶۲	۰/۹۴
	(۴) هارگریوز	۰/۰۸	۰/۵۴	۰/۹۵

جدول ۵. مقایسه نتایج روش‌های محاسباتی با روش مستقیم برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع

r/t	T	MBE	RMSE	R	Mean	روش‌های محاسباتی
۰/۵۷	۱/۵۶	-۰/۰۸	۱	۰/۹	۳/۶۴	روش مرجع (لیسیمتر)
۰/۰۸	۱۰/۱۱	-۰/۵۶	۱/۱۹	۰/۸۹	۳/۱۵	بلانی کریدل-۱
۰/۰۷	۱۲/۱۳	۰/۸۸	۱/۲۴	۰/۹	۴/۳۷	بلانی کریدل-۲
۰/۰۷	۱۲	۰/۸۸	۱/۶۶	۰/۹	۴/۵۹	بلانی کریدل-۳
۰/۰۶	۱۴/۶۶	۱/۲۴	۲/۰۳	۰/۹	۴/۹۴	بلانی کریدل-۴
۰/۰۷	۱۲/۸۹	۰/۹۷	۱/۷۴	۰/۹	۴/۶۸	فائو پنمن مانیتث
۰/۰۶	۱۲/۲۱	۱/۷۹	۳/۳۳	۰/۷	۵/۵۰	چندل
۰/۲	۴/۴۵	۰/۳۳	۱/۴۷	۰/۸۹	۴/۰۴	خاروفا
۰/۰۶	۱۴/۱۵	۰/۸۲	۱/۳۸	۰/۹	۴/۵۳	هارگریوز-M1
۰/۰۶	۱۴/۳۸	۰/۹۴	۱/۵۶	۰/۸۹	۴/۶۴	هارگریوز-M2
۰/۰۵	۱۶/۸۷	۱/۴۹	۲/۲۶	۰/۹	۵/۲۰	هارگریوز-M3
۰/۲۴	۳/۷۴	-۰/۱۹	۰/۹۹	۰/۹	۳/۵۲	هارگریوز-M4
۰/۰۸	۱۱/۴۲	۰/۶۸	۱/۳۳	۰/۹	۴/۴۰	هارگریوز
۰/۰۶	۱۵/۹۲	۱/۰۶	۱/۶۶	۰/۸۹	۴/۷۸	هارگریوز و سامانی
۰/۰۳	۲۵/۹۵	۱/۶۲	۲/۰۱	۰/۸۹	۵/۳۴	لینیاکر
۰/۰۴	۲۰/۶۴	-۱/۱۴	۱/۵۵	۰/۸۹	۲/۵۷	هامون (۱۹۶۱)
۰/۰۵	۱۶/۸۹	-۰/۹۳	۱/۴	۰/۸۹	۲/۷۸	هامون (۱۹۶۳)
۰/۱۱	۷/۸۳	-۰/۴۹	۱/۷۹	۰/۸۹	۳/۲۲	روماننکو



شکل ۱۳. مقایسه نتایج روش‌های محاسباتی با روش مستقیم برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۸ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۷

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از اطلاعات هواشناسی ۱۵۴ ایستگاه سینوپتیک کشور در ابتدا تبخیر و تعرق با استفاده از ۱۷ روش مشتمل بر درجه‌حرارت هوا، محاسبه شدند. نتایج حاصل از روش‌های مختلف با نتیجه حاصل از روش مرجع (فائو- پنمن- مانتیث) مقایسه گردیدند. تعداد ۱۷ معادله بر مبنای درجه حرارت هوا برای محاسبه تبخیر- تعرق مرجع با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانه برای کل کشور (ایران) و همچنین مطالعات لیسیمتری در شرایط آب و هوای نیمه‌خشک (در غرب ایران) محاسبه و بررسی و مقادیر برآوردشده، توسط این مدل‌ها با مقادیر حاصل از روش مرجع (فائو- پنمن- مانتیث) و اندازه‌گیری‌شده در لیسیمترها (در اقلیم نیمه‌خشک) مقایسه و دقت و صحت هر کدام مشخص و در نهایت روش منتخب برای هر اقلیم مشخص و پیشنهاد گردیده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، برای هر اقلیم بهترین و بدترین روش‌های برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع، به‌ترتیب اولویت ذکر گردید. ضمناً مطالعات لیسیمتری انجام‌شده در اقلیم نیمه‌خشک، انتخاب بهترین و بدترین روش‌های برآورد تبخیر- تعرق مبنی بر درجه‌حرارت را تأیید نمودند.

بررسی‌ها نشان‌گر آن است، که نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج گزارش‌شده در قسمت مقدمه و بررسی منابع توسط سایر محققان متفاوت بوده و تاکنون در هیچ تحقیق گزارش شده‌ای با این وسعت، کلیه روش‌های مبتنی بر دما مورد ارزیابی قرار نگرفته است. ضمناً این اختلافات در نتیجه گزارش‌شده با تحقیقات حاضر در این مقاله، احتمالاً می‌تواند به‌علت تفاوت در تعداد سال‌های آماری و یا تفاوت در ایستگاه‌های مورد استفاده در پژوهش‌های انجام‌شده باشد. در نهایت، نتایج حاصل از این تحقیق که ناشی از بررسی داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های سرتاسر کشور در یک دوره زمانی طولانی و قابل‌قبول است، می‌تواند مرجع مناسبی

جهت برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در مناطق مختلف با کمبود داده و وجود داده‌های کافی در اقلیم‌های مختلف بر اساس بهترین روش‌های مبتنی بر انتقال دما برای برنامه‌ریزان و مهندسين منابع آب و آبیاری باشد.

منابع

۱. بابامیری ا. و دین‌پژوه ی (۱۳۹۱) مقایسه چهار روش تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع مبتنی بر درجه حرارت هوا در حوضه آبریز دریاچه ارومیه. مجله علمی علوم کشاورزی و مهندسی آبیاری. ۳۷(۱): ۵۴-۴۳.
۲. خیرابی ج. توکلی ع. انتصاریم. و سلامت ع (۱۳۷۶) معرفی جهات نظری و کاربردی روش پنمن مانتیث و ارائه تبخیر تعرق مرجع استاندارد برای ایران. کمیته ملی آبیاری و زهکشی. ۱۶۶ صفحه.
۳. سالاریان م. نجفی م. داوری ک. اسلامیان س. س. و حیدری م (۱۳۹۲) مناسب‌ترین روش برآورد تبخیر- تعرق پتانسیل در شرایط کمبود داده‌های هواشناسی در ماه‌های گرم و سرد سال. مطالعه موردی شهرستان اصفهان. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱(۸): ۷۳-۶۲.
۴. عزیزاده ا. امیرشاهی ب. و ثنائی‌نژاد م. ح (۱۳۸۰-۱۳۷۹) بررسی دقت و عملکرد تبخیر- تعرق پتانسیل محاسبه شده به روش‌های هارگریوز- سامانی و تشتک تبخیر در ایستگاه‌های سینوپتیک استان خراسان. انیوار ۴۲ و ۴۳: ۷۰-۵۱.
۵. میرموسوی س. ح. پناهی ح. اکبری ح. و اکبرزاده ی (۱۳۹۱) واسنجی روش‌های برآورد تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه مرجع و محاسبه نیاز آبی زیتون در کرمانشاه. جغرافیا و پایداری محیط (۳): ۶۴.
6. Afandi G and Abdrabbo M (2015) Evaluation of Reference Evapotranspiration Equations under Current Climate Conditions of Egypt, Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology. 3(10): 819-825.
7. Allen RG, Pereira LS, Reas D and Smith M (1998) Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirement, FAO Irrigation and Drainage Paper (56). Rome, Italy.

8. Asareh A and Davoodi H (2015) Estimation some Estimators Evapotranspiration in Township Omidie, Jornal proficiency science and engineering water, Islamic Azad University, Ahwaz. 4(10).
9. Blaney H.F and Criddle W.D (1950) Determining water requirements in irrigated area from climatological irrigation data, US Department of Agriculture, Soil Conservation Service.
10. Jin-Fa Chen JF, Yeh HF, Lee Ch H and Lo WH (2005) Optimal Comparision of Emperical Equations for Estimating Potential Evapotranspiration in TAIWAN, XXXI IAHR Congress, Seoul, Korea.
11. Farmer W, Strzepek K, Schlosser CA, Droogers P and Gao X (2011) A Method for Calculating Reference Evapotranspiration on Daily Time Scales, MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report. (195).
12. Ghamarnia H, Jafarizade M, Meri E and Gobadei M (2013) Lysimetric Determination of (*Coriandrum sativum* L.) Water Requirement and Single and Dual Crop Coefficients in a Semiarid Climate. J. Irrig. Drain Eng.2013(139) :447-455.
13. Jacovides CP (1997) Reply to comment on Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration models, J. Agricultural water management. 3:95-97.
14. Lo'pez-Urrea R, Marti'n de Santa Olalla F, Fabeiro C and Moratalla A (2006) Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate J. agricultural water management. 85: 15-26.
15. Rao LY, Sun G, Ford CR and Vose, JM (2011) Modeling Potential Evapotranspiration of Two Forested Watersheds in the Southern APPALACHIANS, American Society of Agricultural and Biological Engineers. 54(6): 2067-2078.
16. Roshan Gh, Khosh Akhlagh F and Karimpour M (2011) Evaluate and modify the appropriate model for evapotranspiration.
17. SabziparvarA.A and Tabari H (2010) Regional estimation of reference evapotranspiration, Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 136(10): 724-731.
18. Raziiei T, DaneshkarArasteh P and Saghafian B (2005) Annual Rainfall Trend Analysis in Arid and Semi-Arid Region of Central and Eastern Iran, Water and Wastewater. 54: 73-81.



Water and Irrigation Management

(Scientific Journal of Agriculture)
(College of Abouraihan – University of Tehran)

Vol. 8 ■ No. 2 ■ Autumn & Winter 2019

Evaluating the efficiency of temperature empirical based methods for estimating evapotranspiration in different climate conditions (case study of Iran)

Houshang Ghamarnia^{1*}, Mahnaz Lorestani²

1. Professor in Department of Water Resources Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

2. Former M.Sc. Student, Department of Water Resources Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

Received: January 13, 2019

Accepted: February 28, 2019

Abstract

Evaluating the efficiency of empirical methods for determining of reference evapotranspiration is essential in order to determine plants water requirement. Therefore, in this study, the meteorological data of 154 stations around the Iran country were used during the statistical period of 15 years (1999 to 2013). Potential evapotranspiration for all synoptic stations was computed using the computational methods based on air temperature, containing 17 methods. The results of different methods were compared to the result of the reference method (FAO-Penman-Monteith). The best and worst methods were selected based on different statistical indexes including regression coefficient, squared squares, mean error estimates and Jacobis criterion. The results showed that for dry climate, Hargreaves-M4, Hargreaves, Hargreaves-M2, Hargreaves-M1, Hammon 1961, Hamon 1963 and Hargreaves Samani were the most suitable methods, respectively. For semi-arid climate, the Hargreaves-M4, Hargreaves, Hamon 1963 and Hargreaves Samani methods were the most appropriate methods. In the Mediterranean climate, the Hargreaves-M4 and Hargreaves methods were the most appropriate methods. In the semi-humid climate condition, the Hargreaves-M4 and Hargreaves-M2 were selected as the most appropriate methods. In wet climates, Hargreaves-M4, Hargreaves-M2 and Hargreaves-M1 methods were the most suitable methods and in the very humid climates, the Hargreaves-M4, Hargreaves, Hargreaves-M1 and Blanicril-4 were the most appropriate methods respectively. Moreover, the Schendel method also was selected as the worst method in all the above mentioned climates. Meanwhile, in the semi-arid climate, the lysimetric studies confirmed the selection of the best and worst methods for estimating temperature evapotranspiration.

Keywords: Lysimetric studies, Meteorological data, Potential evapotranspiration, Statistical indexes, Temperature based method.