

ارزیابی روش‌های مختلف بر آورد تبخیر تعرق گیاه مرجع و پهنه‌بندی آن در ایران

حمید زارع ایبانه* - استادیار گروه مهندسی آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا
مریم بیات ورکشی - دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آبیاری، دانشگاه بوعلی‌سینا
علی‌اکبر سبزی‌پرور - دانشیار گروه مهندسی آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا
صفر معروفی - دانشیار گروه مهندسی آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا
عادل قاسمی - دانشجوی کارشناسی ارشد رشته آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آبیاری، دانشگاه بوعلی‌سینا

پذیرش مقاله: ۱۳۸۸/۹/۲۴ تأیید مقاله: ۱۳۸۹/۸/۱

چکیده

کشور ایران دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است که ریزش‌های کم جوئی، رگبارهای شدید، وقوع جریان‌های سیلابی و تبخیر (تبخیر تعرق) زیاد از ویژگی‌های آن به شمار می‌آید. پژوهش حاضر سعی در ارزیابی و پهنه‌بندی تبخیر تعرق گیاه مرجع (ET_o) و ارائه آن در قالب نقشه‌های پهنه‌بندی و هم تبخیر تعرق (مرجع) به عنوان ابزاری اساسی برای مدیریت آب دارد. در این بررسی با گروه‌بندی مناطق هم‌اقلیم براساس اقلیم‌نمای یونسکو از میانگین‌های درازمدت متغیرهای اقلیمی ۹۱ ایستگاه هواشناسی و داده‌های لایسیتتر، برای تعیین روش مناسب تخمین ET_o استفاده شد. تبخیر تعرق گیاه مرجع بر مبنای اطلاعات اقلیمی هر یک از ایستگاه‌ها به کمک نرم‌افزار RefET به ۱۳ روش محاسبه شد. روش‌های محاسباتی شامل هفت روش ترکیبی بر پایه روش پنمن، دو روش دمایی، سه روش تشعشعی - دمایی و یک روش تشعشعی بودند. مناسب‌ترین روش محاسباتی از بین ۱۳ روش، در مقایسه با مقادیر تبخیر تعرق لایسیتتری در هر اقلیم انتخاب شد. انتخاب روش محاسباتی براساس آماره‌های ضریب تبیین (R²)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای اریبی (MBE) صورت گرفت. مقادیر RMSE، MBE و R² در ۹ ایستگاه لایسیتتری به ترتیب ۱/۱ میلی‌متر در روز، ۰/۲۳ - میلی‌متر در روز و ۰/۸۵ به دست آمد، که نشان‌دهنده دقت مناسب کار در گستره جغرافیایی کشور ایران است. در نهایت هر یک از روش‌های محاسباتی انتخاب شده، برای سایر ایستگاه‌های هم‌اقلیم فاقد مقادیر لایسیتتری مبنای بر آورد ET_o قرار گرفتند. نتایج نشان داد که روش‌های با پایه پنمن در اکثر مناطق ایران مناسب‌ترین روش برای بر آورد ET_o به‌شمار می‌آیند. در ترسیم نقشه هم‌تبخیر تعرق مرجع (ISOET_o) و پهنه‌بندی آن براساس نقشه‌های توپوگرافی رقومی شده، اطلاعات جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی و بهره‌گیری از نرم‌افزارهای GIS و Surfer براساس داده‌های تبخیر تعرق مرجع روزانه صورت گرفت. نتایج پهنه‌بندی به روش کریجینگ، نشان داد میزان ET_o در ۲۳ درصد از سطح ایران که در مناطق مرتفع شمال کشور قرار دارند، کمتر از ۴/۴۸ میلی‌متر در روز است؛ و در مقابل ۷۷ درصد از سطح کشور در پهنه ET_o بیش از این مقدار تا سقف ۱۰/۷۰ میلی‌متر در روز قرار دارد. به نظر می‌رسد که پراکنش مناسب زمانی و مکانی بارش‌های مناطق شمالی، رطوبت نسبتاً بالا و برودت هوا در کاستن از پتانسیل تبخیر تعرق این مناطق نقش اساسی دارد. در مجموع وجود بی‌نظمی و نوسانات زیاد در سری‌های زمانی بارندگی سالانه از عوامل اصلی کمبود منابع آب و به تبع آن افزایش تبخیر تعرق در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران است.

کلیدواژه‌ها: تبخیر تعرق مرجع، پنمن، پهنه‌بندی، کریجینگ، ایران.

مقدمه

یکی از راه‌های کاهش بحران آب در کشاورزی به واسطه پایین بودن راندمان مصرف آن و استفاده بیش از حد منابع موجود، مدیریت آب در تأمین نیاز آبی گیاهان زراعی است. در این زمینه تبخیر تعرق^۱، در واقع شاخص تعیین‌کننده‌ای در فرایند رشد است که معادل آب مورد نیاز گیاهان زراعی قلمداد می‌شود. به همین خاطر تخمین دقیق آن با توجه به شرایط آب‌وهوایی هر منطقه و گیاه صورت می‌گیرد. لحاظ عوامل جوئی و فیزیولوژی گیاه در فرایند تبخیر تعرق سبب پیچیدگی این فرایند و ارائه روش‌های بسیاری برای تخمین آن شده است (کوچک‌زاده و بهمن، ۱۳۸۴، ۸۸). لایسیمتر تنها روش مستقیم برآورد تبخیر تعرق است. هر چند هزینه سنگین نصب و نگهداری، استفاده از آن را مشکل ساخته است، لیکن به هر حال معتبرترین روش در واسنجی مدل‌های تبخیر تعرق است. تا کنون بیش از ۵۰ روش تخمین تبخیر تعرق گیاه مرجع^۲ (ET_0) در قالب روش‌های ترکیبی، آترودینامیک و تجربی ارائه شده است، که اغلب با توجه به داده‌های هواشناسی نتایج متفاوتی دارند (گریسمر و همکاران، ۲۰۰۲، ۱۸۰). روش مناسب تعیین ET_0 در هر منطقه بستگی به شرایط اقلیمی، داده‌های مورد نیاز و هزینه‌های مربوط به آن دارد (سبزی‌پرور و همکاران، ۱۳۸۷، ۳۲۹). سالیه و سندیل (۱۹۸۳) روش جنسن هیز را برای کالیبره کردن روابط تجربی در مناطقی با اقلیم خشک مثل عربستان سعودی مناسب دانستند.

در مطالعه‌ای دیگر، روش جنسن هیز و هارگریوز برای اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک پیشنهاد گردید (ایرماک و همکاران، ۲۰۰۳، ۳۳۶). دهقانی سانج و همکاران (۲۰۰۴) مدل پنمن مانیتیت و پنمن را به ترتیب برای یک نمونه اقلیمی نیمه‌خشک در ایران و اقلیم مرطوب در ژاپن بر مبنای مقادیر لایسیمتری معرفی کردند. تبخیر تعرق روزانه گیاه مرجع از روش‌های هارگریوز سامانی، ماکینگ، تورک و پاپاداکیس برای اقلیم‌های مختلف ایران بر اساس اقلیم‌نمای کوپن محاسبه گردید و با روش استاندارد پنمن مانیتیت فائو مقایسه شد (کوچک‌زاده و نیک‌بخت، ۱۳۸۳، ۴۳). نتایج آنان نشان داد که روش هارگریوز سامانی در اقلیم‌های خشک بیابانی، نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای؛ روش تورک در اقلیم‌های فراه‌خشک، مرطوب و خیلی مرطوب نوع (ب)؛ و روش مکینگ در اقلیم خیلی مرطوب نوع (الف) مناسب است. در مقیاس ماهانه نیز روش هارگریوز سامانی در اقلیم‌های خشک بیابانی و نیمه‌خشک؛ روش مکینگ در اقلیم‌های مدیترانه‌ای مرطوب، خیلی مرطوب نوع (الف)، خیلی مرطوب نوع (ب)؛ و روش تورک در اقلیم فراه‌خشک مناسب تشخیص داده شد. دین پژوه (۲۰۰۶) بر اساس شاخص خشکی سه روش هارگریوز سامانی، لینیاکر و ترنت وایت اصلاح شده، ET_0 در سطح ایران را مورد مطالعه قرار داد. وی برای غرب و شمال غرب کشور روش هارگریوز سامانی، برای شمال و شمال شرقی روش ترنت وایت، و در مرکز و جنوب شرق کشور روش لینیاکر را پیشنهاد کرد. در عین حال محققان زیادی روش پنمن مانیتیت را به دلیل جامع بودن آن، به عنوان روشی مناسب در بیشتر مناطق دنیا پیشنهاد داده‌اند که حاصل آن در مطالعات سان و سونگ (۲۰۰۸)، رحیمی خوب (۲۰۰۸)، گانگ و همکاران (۲۰۰۶) و دیگران منتشر شده است.

1. Evapotranspiration

2. Reference evapotranspiration

به طور کلی دقت و اعتبار هر تخمینی بستگی به کیفیت و کمیت پارامتر مورد سنجش دارد. پارامتر تبخیر تعرق تنها پارامتر قابل اندازه‌گیری (به طور مستقیم) است که اگر این کار به شکلی دقیق صورت گرفته باشد، با موضوع کیفیت داده‌ها مشکلی نخواهد داشت. از طرف دیگر، تراکم اندازه‌گیری‌ها می‌تواند بسیار مورد توجه باشد، زیرا داشتن تراکم بسیار زیاد شبکه لایسیمیتری، موجب افزایش وقت و هزینه‌های اندازه‌گیری می‌شود. به هر حال عدم تراکم لازم در اندازه‌گیری‌های لایسیمیتری، می‌تواند به فقدان اطلاعات کافی دامن زند. بنابراین هدف از انجام این تحقیق بسط و توسعه اندازه‌گیری‌های تبخیر تعرق با استفاده از روش‌های زمین‌آماری است، تا جایی که بتوان با به‌کارگیری شبکه موجود، به اندازه زیادی از میزان وقت و هزینه ایجاد شبکه‌های لایسیمیتری کاست. تحقیقات نشان داده است که تبخیر تعرق به عنوان متغیری اقلیمی، از خصوصیات منطقه‌ای و ویژگی‌های ذاتی آنها تأثیر می‌پذیرد (ماردیکیس و همکاران، ۲۰۰۵، ۲۵۲). در این گونه مطالعات اگر از آمار کلاسیک استفاده شود، برای نتیجه‌گیری بهتر و کاهش واریانس بین نمونه‌ها از روش‌های افزایش تعداد نمونه‌ها استفاده می‌شود.

روش‌های زمین‌آماری با پهنه‌بندی مناسب می‌توانند تخمین صحیحی از توزیع مکانی ET_0 را در پهنه‌ای وسیع به کمک تکنیک درون‌یابی به دست دهند (ماردیکیس و همکاران، ۲۰۰۵، ۲۵۳). کاربرد تکنیک زمین‌آمار با تأکید بر توصیف‌های کمی تنوع مکانی و ویژگی‌های اقلیمی برای درون‌یابی داده‌ها و نقشه‌سازی است. مطالعات زیادی در به‌کارگیری روش زمین‌آمار برای تخمین توزیع مکانی پارامترهای اقلیمی صورت گرفته است، که همگی در جهت تأیید توانایی و دقت آن بوده‌اند (فیلیپس و مارکس، ۱۹۹۶، ۲۱۳؛ و اشرف و همکاران، ۱۹۹۷، ۲۵۵). از آن جمله می‌توان به مطالعه ماردیکیس و همکاران (۲۰۰۵) اشاره داشت که از چهار روش مختلف درون‌یابی شامل کریجینگ معمولی و اصلاح شده، معکوس مجذور فاصله معمولی و اصلاح شده، برای پهنه‌بندی تبخیر تعرق گیاه‌مرجع مناطق مختلف یونان استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان از آن داشت که پارامتر ارتفاع در افزایش دقت پهنه‌بندی هر یک از روش‌ها نقش اساسی دارد.

ساونو و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از مدل پرستلی تیلور، موفق به تخمین تبخیر تعرق پوشش‌های جنگلی در حوضه آبریز رودخانه مکونگ^۱ (ژاپن) شدند و در نهایت آن را پهنه‌بندی کردند. نتایج آنها نشان داد که مدل به‌کار گرفته شده توانایی برآورد تبخیر تعرق در وسعت‌های زیاد با ارتفاعات مختلف از پوشش‌های جنگلی را دارد. لین و همکاران (۲۰۰۸) ضمن نشان دادن توانایی شبکه عصبی فازی در برآورد تبخیر تعرق گیاه‌مرجع در مقایسه با روش پنمن مانیت فائو ۵۶، اقدام به پهنه‌بندی آن برای حوزه رودخانه دان‌شیو^۲ (تایوان) کردند. نتایج آنان نشان داد که برآوردهای حاصل از پهنه‌بندی در مناطق فاقد اندازه‌گیری می‌تواند پذیرفتنی باشد.

هدف اصلی تحقیق، تعیین تبخیر تعرق مناطق مختلف اقلیمی در سطح کشور ایران، براساس ارقام لایسیمیتری است. هدف دیگر آن، نشان دادن پتانسیل تکنیک زمین‌آمار به عنوان روشی نو در تحقیق نیاز آبی گیاهان زراعی است.

1. Mekong Basin River
2. Dan-Shui basin

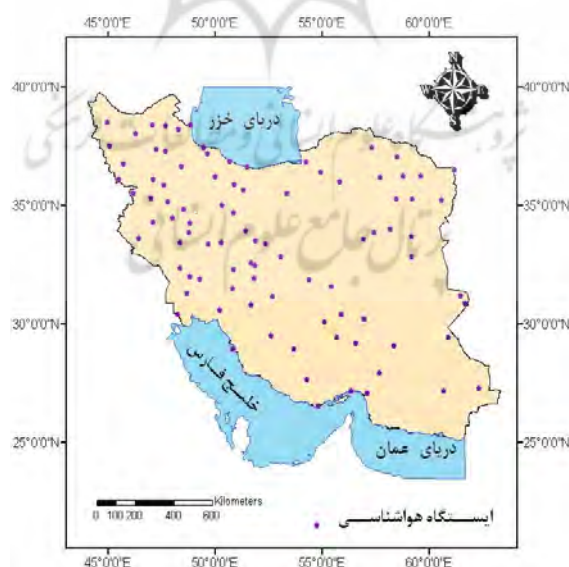
مواد و روش‌ها

ایران با وسعتی حدود ۱۶۴۸۰۰۰ کیلومترمربع و متوسط بارش سالانه ۲۴۱ میلی‌متر در نیم‌کره شمالی، در قاره آسیا و در قسمت غربی فلات ایران واقع شده است. این کشور بین دو نصف‌النهار 44° و 64° شرقی و دو مدار 25° و 40° شمالی قرار گرفته است. حدود ۹۴/۸ درصد از سطح آن، در زمره مناطق خشک و نیمه‌خشک با ریزش‌های جوئی کم و تبخیر (تبخیر تعرق) زیاد قرار دارد (غفاری و همکاران، ۱۳۸۳، ۳۲). در انجام این پژوهش، مراحل زیر برای انتخاب روش

مناسب تبخیر تعرق در هر اقلیم، تهیه نقشه پهنه‌بندی تبخیر تعرق منطقه و تعیین نقاط هم‌تبخیر تعرق انجام شد:

ابتدا آمار هواشناسی ایستگاه‌های سازمان هواشناسی با طول دوره آماری از بدو تأسیس تا سال ۲۰۰۰ میلادی انتخاب گردید. با توجه به اینکه بسیاری از متغیرهای اقلیمی دارای یک کمینه و بیشینه در طی سال‌اند؛ یعنی در نیمه اول و دوم سال رفتاری کاملاً متفاوت دارند، بنابراین در بررسی حاضر داده‌های هواشناسی به ترتیب ماه‌های سال دسته‌بندی شدند. سپس خلأ آماری هر ایستگاه مشخص گردید و بازسازی آماری آنها با رگرسیون‌گیری، نسبت به موقعیت ایستگاه‌های مجاور، انجام گرفت و ایستگاه‌های نهایی انتخاب شدند.

پس از بررسی‌های لازم، ۹۱ ایستگاه هواشناسی انتخاب گردید، که در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. تمامی ایستگاه‌ها براساس اقلیم‌نمای یونسکو در ۶ اقلیم دسته‌بندی شدند: خیلی مرطوب^۱ خنک^۲ گرم^۳ (PH-C-W)، نیمه‌خشک سرد گرم (SA-K-W)، نیمه‌خشک خنک خیلی گرم (SA-C-VW)، خشک خنک گرم (A-C-W)، خشک معتدل گرم (A-M-W) و خشک خنک خیلی گرم (A-C-VW) (غفاری و همکاران، ۱۳۸۳، ۳۱ و ۳۲). شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های انتخابی را در سطح کشور ایران نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی

۱. رژیم رطوبتی

۲. تیپ زمستانه

۳. تیپ تابستانه

در ادامه، ET_0 برای ۹۱ ایستگاه انتخابی در شبکه ایستگاه‌های سازمان هواشناسی کشور طبق روش‌های عنوان شده، در نرم‌افزار Ref-ET محاسبه شد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). نرم‌افزار مذکور در سال ۲۰۰۱ در دانشگاه آیداهو براساس دستورالعمل نشریه فائو ۵۶ (آلن و همکاران، ۱۹۹۸) تهیه شد که توانایی به‌کارگیری طیف وسیعی از داده‌های هواشناسی را، به عنوان ورودی برای محاسبه ET_0 به روش‌های مختلف، در خود دارد (فونتنت، ۲۰۰۴، ۴۰). روش‌های محاسباتی با توجه به نوع داده‌های ورودی (دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، میزان بارندگی و مختصات جغرافیایی و ارتفاع هر ایستگاه) شامل ۷ روش ترکیبی بر پایه پنمن، ۲ روش دمایی، ۳ روش ترکیبی تشعشعی - دمایی، و یک روش تشعشعی بودند.

فرض همبستگی بین تبخیر تعرق و متغیرهای هواشناسی با توجه به تحقیقات آیتک (۲۰۰۸، ۶۹۱)، کمار و همکاران (۲۰۰۲، ۲۲۴)، لین و همکاران (۲۰۰۸، ۱۰۹۱) و ادھیامبو و همکاران (۲۰۰۱، ۱۶۲۵) پذیرفته شده است. روش‌های پنمن مانیتث فائو ۵۶ (PMF56)، پنمن مانیتث فائو سازمان امریکا (PMASCE)، کیمبرلی پنمن ۱۹۹۶ (KP1996)، کیمبرلی پنمن ۱۹۷۲ (KP1972)، پنمن فائو ۲۴ (PenF24)، پنمن فائو ۱۷ (PenF17)، پنمن ۱۹۴۸ (Pen1948) در قالب روش‌های ترکیبی، دو روش هارگریوز سامانی (HgS1985) و بلانی کریدل فائو ۲۴ (BC24) به عنوان روش‌های دمایی، روش‌های ترکیبی تشعشعی - دمایی نیز شامل پریستلی تیلور (Prs-Tylr)، مکینگ (Makk 1957) و تورک (Turc 1961) در کنار روش تشعشعی فائو (RdF24) به عنوان تنها روش‌های تشعشعی بودند. با تنظیم داده‌های هواشناسی مورد نیاز برای هر یک از روش‌ها در قالب سری داده‌ها در محیط نرم‌افزار Ref-ET و اجرای آن، تبخیر تعرق به روش‌های مختلف برای هر اقلیم محاسبه شد. برای آزمون مدل‌های پیشنهادی در هر اقلیم، از یک الی دو سری اطلاعات لایسیمیتری برگرفته از منابع معتبر علمی و مراکز تحقیقاتی و آموزشی مناطق همدان، ارومیه، کرج، مشهد، کیوتراآباد (اصفهان)، کرمان، رشت، زهک (سیستان بلوچستان) و اهواز استفاده شد (قاسمی، ۱۳۸۷، ۶۳؛ شعیب و مجدزاده، ۱۳۸۷، ۴۵). محصول کشت شده در هر یک از لایسیمیترها گیاه چمن و اندازه‌گیری‌ها به صورت روزانه بود. جدول ۱ متوسط مقادیر کمینه، بیشینه، میانگین اطلاعات هواشناسی و لایسیمیتری را به تفکیک اقلیم‌بندی نشان می‌دهد.

برای ارزیابی دقت و سنجش صحت نتایج به دست آمده، معمولاً میزان تطابق بین مقادیر اندازه‌گیری از لایسیمتر و برآورد شده از روش‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. آماره‌های مشابهی برای سنجش اعتبار و درستی مدل‌ها وجود دارد که از بین آنها می‌توان به ضریب تبیین^۱ (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطاها^۲ (RMSE)، و میانگین خطای اریبی^۳ (MBE) اشاره کرد (جاکوویدز، ۱۹۹۷، ۹۶). براساس آماره‌های یاد شده، مناسب‌ترین روش در هر اقلیم پیشنهاد گردید و به عنوان روش مبنا برای سایر ایستگاه‌های هم‌اقلیم فاقد مقادیر لایسیمیتری در نظر گرفته شد.

1. Coefficient of determination
2. Root Mean Square Error
3. Mean Bias Error

جدول ۱. متوسط مقادیر پارامترهای هواشناسی ایستگاه‌های هم‌اقلیم و تبخیر تعرق گیاه مرجع لایسیمتر

اقلیم	توصیف	دما (°C)			رطوبت نسبی (درصد)		سرعت باد دو متری (ms ⁻¹)	بارندگی ماهانه (mm)	تبخیر تعرق گیاه مرجع (mmd ⁻¹)
		نقطه شبنم	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل			
SA-K-W	کمینه	-۱۶/۹	-۲۲/۲	-۱۱/۸	۸	۷	۰	۰	۰/۷۸
	بیشینه	۱۶/۳	۳۴/۸	۳۹/۸	۹۹	۹۹	۹/۵۱	۳۳۵/۴	۷/۳۶
	میانگین	۱/۳۳	۵/۹۵	۱۸/۰۲	۴۱/۶	۶۸/۹	۲/۰۹	*۳۴۵/۳۶	۴/۲۱
A-C-W	کمینه	-۱۵/۸	-۱۲/۸	-۶/۸	۳	۶	۰	۰	۳/۹۸
	بیشینه	۲۲/۵	۴۰	۴۱/۲	۹۲	۹۵	۹/۱۵	۳۹۹/۶	۱۰/۳۶
	میانگین	-۰/۴۴	۱۰/۲۵	۲۲/۶	۲۷/۴۴	۵۳/۸۵	۲/۴۵	*۱۷۱/۳۶	۷/۸۵
A-M-W	کمینه	-۱۱/۸	-۰/۷	۰/۲	۵	۸	۰/۱	۰	۲/۱۶
	بیشینه	۲۹/۵	۴۸/۵	۴۸/۵	۹۹	۹۸	۸/۱۷	۳۶۸/۴	۱۶/۴۶
	میانگین	۱۱/۶	۲۲/۹	۲۸/۰۹	۴۳/۰۴	۵۶/۲	۲/۶۷	*۲۲۶/۸	۸/۷۹
A-C-VW	کمینه	-۱۲/۱	۳/۱	-۷/۸	۱۶	۶	۰	۰	۲/۱۵
	بیشینه	۱۷/۵	۴۵	۳۰/۶	۹۵	۷۲	۲۱/۳۸	۱۰۵/۹	۱۹/۹۳
	میانگین	۲/۸	۲۷/۶	۱۳/۲	۵۲/۰۳	۲۳/۸۹	۲/۴۷	*۸۹/۶۴	۹/۴۱
SA-C-VW	کمینه	-۱۳/۳	-۳/۹	-۱۷/۲	۱۵	۶	۰	۰	۰/۴۶
	بیشینه	۲۳/۱	۴۲/۸	۲۵/۸	۹۹	۸۶	۶/۱۷	۵۱۵/۷	۸/۴۳
	میانگین	۲/۷	۲۲/۹	۸/۳	۶۷/۲	۳۳/۳	۱/۹۸	*۴۴۱/۶	۴/۱۲
PH-C-W	کمینه	-۱/۸	۳/۸	-۷/۲	۷۹	۴۴	۰	۰	۳/۴۳
	بیشینه	۲۴/۸	۳۲/۹	۲۵/۴	۱۰۰	۹۱	۴/۷	۹۶۰	۵/۶۲
	میانگین	۱۲/۸	۱۸/۹۵	۱۲/۸	۹۲/۰۶	۷۲/۸	۱/۵۷	*۱۴۷۷/۱	۴/۷۶

* بارش سالانه

داده‌های اقلیمی عمدتاً به صورت نقطه‌ای (مشاهدات ایستگاهی) اندازه‌گیری می‌شوند؛ این در حالی است که غالباً به اطلاعات در بازه یک پهنه نیاز است. طبیعت مشاهدات نقطه‌ای به گونه‌ای است که با افزایش تعداد ایستگاه‌ها، تعمیم آن به یک پهنه با خطای کمتری همراه است. به طور کلی نتایج تجزیه و تحلیل اقلیمی و موارد مشابه را زمانی می‌توان به پهنه‌های بزرگ‌تر تعمیم داد که میان‌یابی به عنوان مرحله‌ای ضروری در تبدیل داده‌های نقطه‌ای به پهنه‌ای پذیرفته شود (ماردیکیس و همکاران، ۲۰۰۵، ۲۵۳). شبکه مورد بررسی با در نظر گرفتن فواصل ۶×۶ کیلومتر، از ۴۵۷۷۸ سلول با طول و عرض مشخص تعیین شد و مقادیر تبخیر تعرق به روش کریجینگ در رئوس هر سلول برآورد گردید. انتخاب طول و عرض شبکه با توجه به آنالیز تغییرنا در محیط نرم‌افزار ArcView است (سانتیو و همکاران، ۲۰۰۸، ۲۴۹۷ و ۲۴۹۸). روش اجرایی تغییرنا با محاسبه حداقل مجموع مربع انحرافات بود (پارادواگیز کویزا و داود، ۱۹۸۸، ۲۱۵). به دیگر عبارات، ابتدا داده‌های مربوط به انحراف آماری متغیرها در فواصل و جهات متفاوت نسبت به نقطه کنترل به صورت مجموعه‌ای از فاکتورهای وزن‌دار با حداقل خطا در تخمین مقادیر نقطه‌ای تولید گردید و پس از آن اقدام به تخمین ET_o به روش کریجینگ شد. از تخمین گر کریجینگ برای برآورد تبخیر تعرق براساس مقدار محاسبه شده در نقاط با مختصات معلوم استفاده شد. کریجینگ به عنوان بهترین تخمین گر ناریب^۱ (BLUE) بر منطق میانگین متحرک وزنی

1. Best Linear Unbiased Estimator

استوار است (حبشی و همکاران، ۱۳۸۶، ۲۲-۲۴). در تخمین‌گر کریجینگ، مقادیر برآوردی تبخیر تعرق از مجموع حاصل ضرب یک فاکتور وزنی در مقادیر مشاهداتی آن با استفاده از فرمول زیر به دست می‌آید:

$$ET_o^*(x_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_i ET_o(x_i) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن $ET_o^*(x_i)$ مقدار تبخیر تعرق مورد تخمین، $ET_o(x_i)$ تبخیر تعرق نمونه i ام، و λ_i وزن یا اهمیت تبخیر تعرق وابسته به نمونه i ام و بیان‌گر اهمیت نقطه i ام در برآورد است.

از آنجا که شرط استفاده از این تخمین‌گر نرمال بودن متغیر مورد بررسی (ET_o) است، لذا از آزمون کولموگراف - اسمیرنوف^۱ برای این منظور استفاده شد. در نهایت پس از وارد کردن مشخصات ایستگاه‌ها شامل نام ایستگاه، طول و عرض جغرافیایی و تبخیر تعرق محاسباتی به محیط نرم‌افزار GIS، پهنه‌بندی انجام گرفت. گروه‌بندی ET_o در مناطق مختلف بر اساس پیشنهاد مدلی مناسب از ET_o است که در هر اقلیم براساس کمترین اختلاف با مقادیر لایسیمتری حاصل شده است.

با بررسی توزیع مکانی اطلاعات تبخیر تعرق ۹۱ ایستگاه مورد مطالعه و استفاده از مقادیر رقمی مرزها، داده‌های متغیرهای داخل مرزها به کل کشور تعمیم داده شد. ترسیم خطوط هم‌تبخیر تعرق مرجع ($ISOET_o$) در نرم‌افزار Surfer با استفاده از ترکیب داده‌ها ET_o و اطلاعات جغرافیایی هر ایستگاه انجام گرفت.

یافته‌های تحقیق

در این پژوهش تبخیر تعرق گیاه‌مرجع، از ۱۳ روش تعریف‌شده در نرم‌افزار Ref-ET برای محاسبه تبخیر تعرق گیاه‌مرجع استفاده شد. نتایج تبخیر تعرق محاسباتی از روش‌های محاسباتی مختلف در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده از لایسیمتر در اقلیم‌های متفاوت در جدول ۲ درج شده است. جدول ۲ ارزیابی از کارایی هر یک از روش‌های پیشنهادی در قالب سه پارامتر آماری نشان داده شده است. ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) مبین اختلاف بین سطوح تبخیر تعرق اندازه‌گیری شده و تخمینی، میانگین خطای ارزیابی (MBE) بیان‌گر مقادیر خطای بیش‌برآورد یا کم‌برآورد و ضریب کارایی (R^2) براساس نه ایستگاه لایسیمتری است. جدول ۲ نشان می‌دهد که روش‌های مبتنی بر مدل پنمن در ۵۵/۶ درصد از موارد به عنوان روش مطلوب در رتبه اول در مقایسه با دیگر روش‌ها قرار دارد. از دیگر نتایج جدول ۲ می‌توان به مطلوبیت هر یک از دو مدل بلانی کریدل (BC) و هارگریوز سامانی (HgS) در ۲۲/۲ درصد از موارد - از جمله برای دو منطقه همدان و ارومیه - اشاره کرد. بر مبنای داده‌های لایسیمتری، در مناطق نیمه‌خشک مانند کرج و مشهد، روش بلانی کریدل مناسب ارزیابی شد. در این خصوص فونتنت (۲۰۰۴) استفاده موفقیت‌آمیز از این روش را در مناطق خشک و نیمه‌خشک امریکا گزارش کرده است.

جدول ۲. مقادیر خطای ET_0 برآورد شده با مدل‌های مختلف در مقایسه با داده‌های لایسیمیتری

اقليم	ایستگاه‌های لایسیمیتری	R^2	RMSE (mmd^{-1})	MBE (mmd^{-1})	روش برگزیده	شکل ریاضی مدل پیشنهادی*
SA-K-W	همدان	۰/۸۶	۰/۸۳	۰/۱۲	HgS1985	$ET_{0\text{HgS}} = 0.0162 (k_T). R_A.TD^{0.5} (T + 17.8)$
	ارومیه	۰/۶۲	۱/۲۰	۰/۰۶	HgS1985	
A-C-W	کبوترآباد	۰/۸۵	۰/۸۵	-۰/۵۱	Pen1948	$ET_{0\text{Pen1948}} = \frac{\Delta R_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma}$
	کرمان	۰/۸۷	۱/۲۴	-۰/۸۴	Pen1948	
PH-C-W	رشت	۰/۷۶	۰/۴۲	۰/۰۶	PenF24	$ET_{0\text{PenF24}} = C[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} (0.27)(1 + 0.01U_{2m})(e_{sa} - e_a)]$
A-M-W	اهواز	۰/۹۳	۱/۴۳	-۰/۴۱	PMF56	$ET_{0\text{PMF56}} = \frac{0.408 (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 237} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)}$
A-C-VW	زهک	۰/۸۸	۲/۴۵	-۰/۸۷	PMF56	
SA-C-VW	کرج	۰/۹۶	۰/۰۹	-۰/۶۶	BC24	$ET_{0\text{BC24}} = a + b(p(0.46T + 8.13))$
	مشهد	۰/۹۱	۱/۳۵	۰/۹۷	BC24	
میانگین	--	۰/۸۵	۱/۱	-۰/۲۳	---	-----

برای توضیحات کامل مدل‌های پیشنهادی، ن.ک. مراجع تفضلی (۱۳۸۵) و قاسمی (۱۳۸۷).

در مجموع، یکسان بودن روش‌های برآورد تبخیر تعرق پیشنهادی برای دو منطقه مکانی متفاوت ولی هم‌اقلیم مثل همدان با ارومیه، کبوترآباد (اصفهان) با کرمان و مشهد با کرج، دلالت بر آن دارد که روش‌های پیشنهاد شده برای مناطق هم‌اقلیم صحیح است (جدول ۲).

نتایج آزمون روش‌های تبخیر تعرق برگزیده برای هر اقلیم در جدول ۲ در سایر ایستگاه‌های هم‌اقلیم طبق جدول ۱ اجرا گردیده و در جدول‌های ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ آورده شده است. نتایج این آزمون نشان می‌دهد که بیشترین مقدار تبخیر تعرق در ایستگاه‌های زهک و زابل و کمترین مقدار تبخیر تعرق در ایستگاه‌های ناحیه شمالی کشور - یعنی بندر انزلی و نوشهر و رشت - برقرار است. در مطالعات دانشکار آراسته و همکاران (۱۳۸۳) زیاد بودن تبخیر به واسطه گرم بودن هوا و وجود اثر واحای هم گزارش شده است، که هم‌سو با نتایج مطالعه حاضر است.

جدول ۳. میانگین تبخیر روزانه ایستگاه‌های با اقلیم SA-K-W (میلی متر بر روز)

ایستگاه	تبخیر تعرق (ET_0)	ایستگاه	تبخیر تعرق (ET_0)
اهر	۲/۸۴	ملایر	۳/۵۹
الیگودرز	۳/۴۳	مراغه	۳/۰۴
اردبیل	۲/۷۶	مریوان	۳/۷۱
بیجار	۳/۰۲	مشکین شهر	۲/۵۵
بجنورد	۳/۳۵	میانه	۳/۵۱
قزوین	۳/۶۹	ارومیه	۳/۰۶
قروه	۳/۱۷	سنندج	۳/۸۴
قوچان	۳/۲۹	شهرکرد	۳/۸
گلپایگان	۳/۴۸	تبریز	۳/۰۵
همدان	۳/۶۲	تکاب	۳/۱۳
خوی	۳/۲۶	زنجان	۳/۳۲
مهاباد	۳/۲۸		

جدول ۴. میانگین تبخیر روزانه ایستگاه‌های با اقلیم A-C-W (میلی‌متر بر روز)

ایستگاه	تبخیر تعرق (ET_0)	ایستگاه	تبخیر تعرق (ET_0)
آباده	۵/۷۵	نطنز	۴/۷۴
اردستان	۸	نیشابور	۴/۲۲
بافت	۵/۷۳	رفسنجان	۸/۳۳
بیارجمند	۵/۸۸	سبزوار	۶/۹۹
بیرجند	۶/۵۲	ساوه	۵/۷۶
اصفهان	۵/۵۷	سمنان	۴/۶۲
فسا	۵/۸	شهریابک	۶/۳۷
فردوس	۵/۹۲	شاه‌رضا	۵/۸۱
قائن	۵/۹۵	شاهرود	۴/۹۱
کبوترآباد (اصفهان)	۴/۶۸	سیرجان	۶/۳۱
کاشمر	۴/۲۷	تهران	۶/۰۴
کرمان	۷/۰۳	تربت جام	۷/۱۵
نائین	۶/۸۲	زاهدان	۷/۵۱

جدول ۵. میانگین تبخیر روزانه ایستگاه‌های با اقلیم A-M-W (میلی‌متر بر روز)

ایستگاه	تبخیر تعرق (ET_0)	ایستگاه	تبخیر تعرق (ET_0)
آبادان	۸/۲۹	ایران‌شهر	۷/۳
اهواز	۸/۰۵	کهنوج	۶/۹۱
بندر عباس	۵/۷۴	لار	۶/۸۹
بندر لنگه	۵/۸۴	مسجد سلیمان	۶/۹۴
بهبهان	۶/۶۵	میناب	۵/۴۵
بوشهر	۵/۲	سراوان	۸/۴۳
دزفول	۶/۸۸	شوشتر	۹/۲۵

جدول ۶. میانگین تبخیر روزانه ایستگاه‌های با اقلیم SA-C-VW (میلی‌متر بر روز)

ایستگاه	تبخیر تعرق (ET_0)	ایستگاه	تبخیر تعرق (ET_0)
بروجرد	۴/۷۳	لردگان	۷/۳
گرگان	۳/۱۶	مشهد	۶/۹۱
ایلام	۵/۰۴	سردشت	۶/۸۹
کنگاور	۴/۶۲	شیراز	۶/۹۴
کرج	۴/۸۲	تربت حیدریه	۵/۴۵
کرمانشاه	۵/۴۲	یاسوج	۸/۴۳
خرم‌آباد	۵/۳۸		

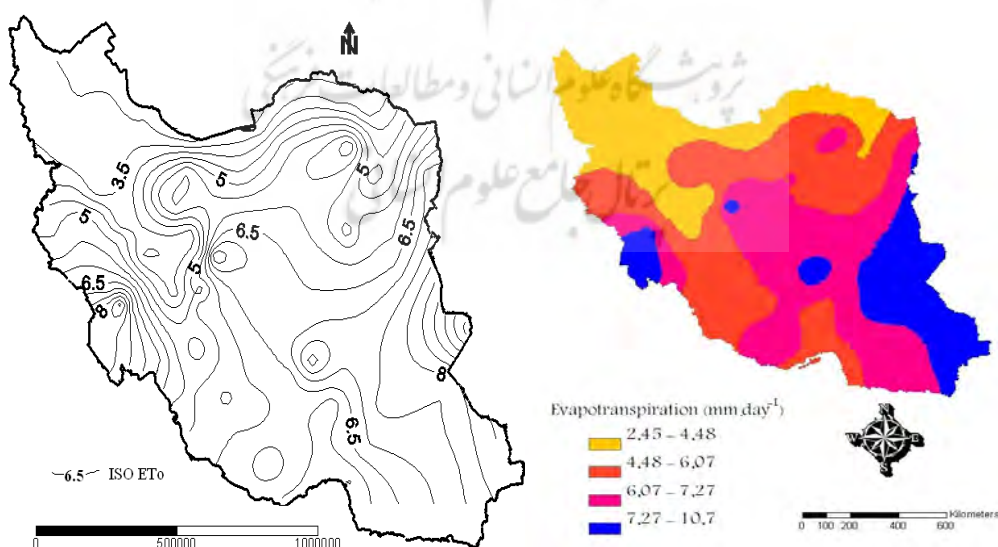
جدول ۷. میانگین تبخیر روزانه ایستگاه‌های با اقلیم A-C-VW (میلی متر بر روز)

ایستگاه	تبخیر تعرق (ET_0)	ایستگاه	تبخیر تعرق (ET_0)
بافق	۶/۴۶	سرخس	۵/۷۲
بم	۷/۶۵	طیس	۵/۷۴
بشرویہ	۴/۷۳	یزد	۶/۹۵
قم	۵/۹۹	زابل	۱۰/۳۴
کاشان	۳/۶۷	زهک	۱۰/۷۱

جدول ۸. میانگین تبخیر روزانه ایستگاه‌های با اقلیم PH-C-W (میلی متر بر روز)

ایستگاه	تبخیر تعرق (ET_0)	ایستگاه	تبخیر تعرق (ET_0)
آستارا	۲/۵۱	رامسر	۲/۵۱
بندر انزلی	۲/۴۴	رشت	۲/۹۶
نوشهر	۲/۵		

از آنجا که تبخیر تعرق متغیری است پیوسته که به موقعیت جغرافیایی نقاط ایستگاهی وابسته است، لذا دارای پراکنش مکانی است؛ و این موضوع اهمیت مدیریت مکانی تبخیر تعرق را تأیید می‌کند. با توجه به همبستگی بالای تبخیر تعرق نسبت به مکان به دلیل تفاوت‌های اقلیمی هر ناحیه با ناحیه دیگر، تهیه نقشه تبخیر تعرق با دقت مناسب براساس نتایج حاصل از روش کریجینگ انجام شد. شکل ۳ (الف) پهنه‌بندی تبخیر تعرق را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد و براساس آن نقشه هم‌تبخیر تعرق منطقه ترسیم شده است (شکل ۳ ب).



شکل ۳. الف) نقشه پهنه‌بندی تبخیر تعرق مرجع روزانه (سمت راست)؛
و ب) نقشه هم‌تبخیر تعرق مرجع روزانه ($ISOET_0$) (سمت چپ)

شکل ۳ (الف) نقشه پهنه‌بندی تبخیر تعرق را در چهار کلاس نشان می‌دهد که براساس آن، حدود ۲۳ درصد از مساحت ایران در محدوده شمال و شمال غرب کشور دارای تبخیر تعرق کمتر از ۴/۴۸ میلی‌متر در روز است. دین‌پژوه (۲۰۰۶، ۱۲۶) منطقه شمال را ناحیه‌ای مرطوب با میانگین بارش سالانه ۱۴۱۵ میلی‌متر در مقابل سایر نواحی ایران که از نظر اقلیمی خشک، نیمه‌خشک و فراخشک هستند معرفی کرده است. در کلاس چهارم تبخیر تعرق اگرچه از نظر مکانی دارای توزیع کمتر از سایر کلاس‌هاست (حدود ۱۵ درصد)، لیکن در دو بخش شرق و غرب کشور استقرار دارد که می‌تواند به واسطه تعامل عوامل مؤثر بر تبخیر تعرق و قرار گرفتن این دو ناحیه در یک گروه باشد. لذا صحت پهنه‌بندی به‌واسطه قرار گرفتن بخش اعظمی از ایران در مناطق با بارش کم، تابش زیاد و پوشش گیاهی کم تأیید می‌گردد.

پژوهشگران مختلف تلاش‌های اندکی را به‌منظور تفکیک مناطق همگون تبخیر تعرقی انجام داده‌اند. این بررسی‌ها بیشتر بر استفاده از پارامترهای هواشناسی تکیه می‌کنند (دین‌پژوه، ۲۰۰۶، ۱۲۳)، که با تعریف تبخیر تعرق، که عبارت است از تعامل مجموعه متغیرهای اقلیمی و فیزیولوژی گیاهی در طی یک یا دو فصل زراعی، منافات دارد. این منافات به خوبی در ناحیه غربی شکل ۳ (الف) مشاهده می‌شود که کلاس تبخیر تعرق آن معادل شرق کشور است. این امر به دلیل عدم دسترسی به مقادیر تبخیر تعرق واقعی در هر دو ناحیه است که لزوم اندازه‌گیری‌های لایسیمیتری در آن نواحی را نشان می‌دهد؛ زیرا برخی از متغیرهای اقلیمی و زراعی با تأثیر متقابل با سایر متغیرها، تأثیر جدی بر مجموعه تبخیر تعرق می‌گذارند.

با توجه به نقشه هم‌تبخیر تعرق روزانه (ISOET_o) در شکل ۳ (ب)، بیشترین مقدار تبخیر تعرق پتانسیل روزانه کشور در جنوب غرب و در شرق در حدود ۸-۸/۵ میلی‌متر در روز است. این مقدار به سمت مرکز کشور اندکی کاهش می‌یابد و به حدود ۶/۵ میلی‌متر می‌رسد و سپس به سمت نواحی مرتفع شمال و شمال غرب به مقدار ۳ میلی‌متر در روز کاهش می‌یابد. افزایش تبخیر تعرق پتانسیل در عرض‌های جنوبی کشور می‌تواند ناشی از تابش زیاد خورشید و گرمایش سطح زمین به دلیل ضعف نسبی پوشش گیاهی باشد. همچنین عرض‌های جنوبی کشور در ارتفاع از سطح دریای کمتری نسبت به نیمه بالایی واقع است و بدین ترتیب کاهش تبخیر تعرق در نیمه بالایی را می‌توان ناشی از کاهش گرادیان دما نسبت به ارتفاع هم دانست که افزایش ارتفاع سبب بکاهش دما و به تبع آن کاهش تبخیر تعرق می‌شود. در ضمن، وجود دو رشته‌کوه البرز در امتداد شمال و رشته‌کوه زاگرس در امتداد شمال غرب و غرب کشور، در کاهش دما و افزایش رطوبت و به تبع آن کاهش تبخیر تعرق، مؤثرند (رضیئی و همکاران، ۱۳۸۴، ۸۲). با توجه به وسعت زیاد کشور ایران و محدود بودن تعداد ایستگاه‌های لایسیمیتری، تخمین تبخیر تعرق در مدیریت آب در کشاورزی امری اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین داشتن بهترین مدل برآورد تبخیر تعرق در نقاط مختلف و درون‌یابی آن با مناسب‌ترین روش، کمک زیادی به تخمین دقیق‌تر آن در نقاط فاقد اندازه‌گیری خواهد کرد.

نتیجه‌گیری

براساس نتایج این مطالعه، روش‌های مبتنی بر مدل پنمن در ۵۶ درصد سطح ایستگاه‌های مورد مطالعه به عنوان بهترین روش برآورد ET_o شناخته شد. مطلوبیت روش پنمن را می‌توان ناشی از بیشتر بودن پارامترهای تأثیرگذار هواشناسی در

میزان تبخیر تعرق در این مدل دانست (رحیمی خوب، ۱۳۸۷، ۳۵). در این زمینه، محققان دیگر نیز دقت روش پنمن مانیت و روش‌های مبتنی بر مدل پنمن را تأیید کرده‌اند (دهقانی سانچ و همکاران، ۲۰۰۴، ۹۱؛ جنسن و همکاران، ۱۹۹۰ و فرشی و شریعتی، ۱۳۷۸). در ۲۲ درصد از ایستگاه‌ها نیز دو روش بلانی کرایدل و هارگریوز سامانی مناسب تشخیص داده شد. بررسی‌های جزئی‌تر نشان داد که توصیه دو روش مذکور برای مناطق همدان و ارومیه با نتایج دین‌پژوه (۲۰۰۶) و تفضلی (۱۳۸۵) هم‌خوانی دارد و صحت نتایج را تأیید می‌کند. واقع شدن این مناطق در ارتفاعات بالا و صاف بودن هوا با توجه به فقدان ذرات آبروسل ناشی از آلودگی کمتر هوا، موجب تأثیرپذیری تبخیر تعرق از عامل تشعشع می‌گردد که در مدل هارگریوز سامانی در نظر گرفته شده است. اهمیت پارامتر تابش برای فرایند تبخیر تعرق در مطالعات سبزی‌پرور و همکاران (۱۳۸۷) و ایروماک و همکاران (۲۰۰۳) آمده است. از طرفی، مطلوبیت روش بلانی کرایدل برای منطقه اقلیم نیم‌خشکی چون مشهد و کرج به ترتیب در مطالعات علیزاده و میرشاهی (۱۳۸۰) و نساجی زواره و صادقی‌فر (۱۳۸۶) توصیه شده است، که با نتیجه تحقیق حاضر مبنی بر توصیه یک روش دما‌منا هم‌خوانی دارد.

انتخاب روش‌های مناسب براساس اجرای مدل‌های مختلف تخمین ET_0 و مقایسه با مقادیر ET_0 ثبت شده در ایستگاه‌های لایسیمیتری صورت گرفت. نتایج پهنه‌بندی در محیط نرم‌افزار GIS به روش کریجینگ نشان داد که حدود ۲۳ درصد از سطح کشور ایران در پهنه مقادیر کم ET_0 و در مقابل ۷۷ درصد از سطح کشور با ET_0 زیادی مواجه‌اند. مناطق دارای ET_0 کمتر در نواحی کم‌ارتفاع و در دامنه‌های شمالی رشته‌کوه البرز در ناحیه جغرافیایی شمالی کشور قرار دارند. وجود رشته‌کوه البرز سبب توقف توده هوای مرطوب حاصل از دریای خزر در ناحیه شمالی کشور شده که زیاده‌ریزی و وجود جنگل‌های شمالی در کاهش تبخیر تعرق تأثیر دارند (رحیم‌زاده و خوشکام، ۱۳۸۲، ۵۵). افزون بر آن، بارش زیاد و دمای پایین نیز در تبخیر تعرق کمتر این ناحیه شمالی کشور مؤثر است (خداقلی و همکاران، ۱۳۸۵، ۴۷). در مقابل، پتانسیل تبخیر تعرق در ۷۷ درصد کشور بیش از $4/48$ میلی‌متر است که می‌تواند ناشی از کاهش پوشش گیاهی به واسطه تقلیل بارش و برودت هوا، تأثیرگذاری دیگر عوامل اقلیمی در مقدار ET_0 باشد (خداقلی و همکاران، ۱۳۸۵، ۴۷).

ترسیم نقشه‌های هم‌تبخیر تعرق مرجع ($ISOET_0$) در محیط نرم‌افزار Surfer نیز پتانسیل بیشتری از ET_0 در نیمه جنوبی کشور را در مقابل نیمه شمالی نشان داد. در این زمینه دین‌پژوه (۲۰۰۶، ۱۲۴) پتانسیل تبخیر تعرق نیمه پایینی کشور را در قیاس با نیمه بالایی کشور بیشتر برآورد کرده است. به‌علاوه، سبزی‌پرور و شتایی (۲۰۰۷) نیز روند افزایش مقدار تابش از ارتفاعات شمالی به سمت نیمه جنوبی کشور را تأیید کردند. از آنجا که پارامتر تابش خورشیدی یکی از فاکتورهای مهم و مؤثر در مقدار تبخیر تعرق است و ارتباط مستقیم با آن دارد (سبزی‌پرور و همکاران، ۱۳۸۷، ۳۲۱)، لذا نتیجه این تحقیق با مطالعه سبزی‌پرور و شتایی (۲۰۰۷) و دین‌پژوه (۲۰۰۶) هم‌خوانی دارد.

در مجموع، آب کالایی ارزشمند برای کشور ایران و به‌ویژه در مناطق دارای پتانسیل بالای ET_0 در عرصه کشاورزی و سایر بخش‌های مصرف‌کننده محسوب می‌شود. اجرای طرح‌های آبخیزداری و طرح‌های ذخیره‌سازی آب‌های سطحی با توجه به کمبود بارش و بالا بودن میانگین ET_0 ضروری به نظر می‌رسد، به‌طوری که رضی و همکاران (۱۳۸۴) وجود بی‌نظمی و نوسانات زیاد در سری‌های زمانی بارندگی سالانه را عامل اصلی کمبود منابع آب و به تبع آن افزایش تبخیر تعرق در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران دانسته‌اند.

اعمال مدیریت مناسب بهره‌برداری بر منابع آب کشور می‌تواند از فشار و شدت برداشت منابع آبی کشور بکاهد. همچنین پیشنهاد می‌شود که در مطالعات تکمیلی، ضمن افزایش تراکم ایستگاه‌های هواشناسی و بهبود شبکه لایسیمتری، استفاده از اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی حاشیه خارجی مرزهای ایران در افزایش آگاهی از متغیرهای اقلیمی در سرحدات کشور نیز در دستور کار قرار گیرد. ناکافی بودن ایستگاه‌های هواشناسی در ناحیه شمال غرب، مرکز و جنوب شرق کشور به‌خوبی مشهود است. عدم کفایت ایستگاه‌های موجود در بررسی انجام شده از سوی عزیزی و روشنی (۱۳۸۷) و رحیم‌زاده و خوشکام (۱۳۸۲) هم گزارش شده است. بدون تردید، افزایش تراکم ایستگاه‌های هواشناسی و احداث ایستگاه‌های جدید در مناطق مختلف به‌ویژه در ارتفاعات، با توجه به تغییرات شدید ET_0 با ارتفاع، باعث دقت بیشتر پهنه‌بندی‌ها خواهد شد.

منابع

- Alizadeh, A. and Mirshahi, B. 2001, **Assessment Accuracy of Hargirivz Samani and Evaporation Pan Methods in Calculated Potential Evapotranspiration in Khorasan Province Synoptic Stations**, Journal of Scientific and Technical Meteorological Organization, 42(43): 51-70.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M., 1998, **Crop Evapotranspiration, FAO Irrigation and Drainage Paper 56**. FAO, Rome, Italy, 293 pp.
- Ashraf, M., Loftisa, Jim and Hubbard, K., 1997, **Application of Geostatistics to Evaluate Partial Weather Station Networks**, Agric. Forest Meteorol. 84, 255–271.
- Azizi, Gh. and Roshani, M., 2008, **Study of Climate Change on the South Coast of the Caspian Sea with Man-Kendall Method**, Geographical Research, 40(64): 13-28.
- Aytek, A., 2008, **Co-active Neuro-fuzzy Inference System for Evapotranspiration Modeling**, Soft Computing-A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications, 13(7): 691-700.
- Daneshkar, A., Tajrishi, P., Mirlatifi, M., and Saghafian, B., 2004, **Necessity of Revision on Free Water Surface Estimation Models in Arid Areas with Regional Aadvction: Chahnimeh Reservoirs as a Case Study**, J. Agricultural Engineering Research, 5(15): 37-58.
- Dehghani sanij, H., Yamamoto, T. and Rasiah, V., 2004, **Assessment of Evapotranspiration Estimation Models for use in Semi-arid Environments**, Agricultural water management 64, 91-106.
- Dinpashoh, Y., 2006, **Study of Reference Crop Evapotranspiration in I.R. of Iran**, Agricultural Water Management 84, 123-129.
- Farshi, A. and Shariati, M., 1999, **Patterns of Water Use in Agriculture**, Water Requirements of Plants, Patterns of Cultivation and Irrigation Efficiency, 16th press, Tehran, Agricultural Education Publication.
- Fontenot, Royce Landon, 2004, **An Evaluation of Refrence Evapotranspiration Models in Louisiana**, B.S., Thesis, Louisiana State University and A&M College, Pp. 83.

- Ghafari, A., Ghasemi, V. and Depao, V., 2004, **Agricultural Climate Zone Classification with UNESCO Method**, Drought and drought, 12: 30-35.
- Ghasemi, A., 2008, **Evaluation of Garlic Evapotranspiration in Hamedan Using Empirical Models**, Artificial Neural Network Approach and Lysimeter, The thesis, submitted for the degree of Master of Science. Faculty of agriculture department of water engineering Bu Ali Sina University.
- Gong, Lebing, Xu, Chong-yu, Chen, Deliang, Halldin, Sven and Chen, Yongqin David, 2006, **Sensitivity of the Penman-Monteith Reference Evapotranspiration to Key Climatic Variables in the Changjiang (Yangtze River) Basin** Journal of Hydrology, 329: 620– 629.
- Grismer, M. ASCE, Orang, Morteza and Matyac, Scott, 2002, **Pan Evaporation to Evapotranspiration Conversion Methods**, J. Irrig. Drain. Eng, 128(3): 180–184.
- Habashi, H., Hoseini, S.M., Mohamadi, J. and Rahmani, R., 2007, **Geostatistic Applied in Forest Soil Studying Processes**, J. Agric. Sci. and Nator. Resour, 14(1): 18-27.
- Irmak, S., Irmak, A., Allen, R.G. and Jones, J.W., 2003, **Solar and Net Radiation based Equations to Estimate Reference Evapotranspiration in Humid Climates**, J. Irrig. Drain. Eng. 129(5): 336-347.
- Jacovides, C.P., 1997, **Reply to Comment on Statistical Procedures for the Evaluation of Evapotranspiration Models**, Agricultural Water management 3, 95-97.
- Jensen, M.E., Burman, R.D. and Allen, R.G., 1990, **Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements**, ASCE Manual and Report on Engineering Practice, No.70. New York.
- Khodagholi, M., Masoodian, S.A., Kaviany, M.R. and Kamaley, Gh., 2006, **A Survey of Phyto-climatology of Zayanderoud Basin**, Pajouhesh & Sazandegi, 70, 41-53.
- Kouchakzadeh, M. and Nikbakht, J., 2004, **Comparison of Different Methods to Estimate Reference Evapotranspiration in Iran Different Climate with PMFAO Standard Method**, Agricultural Sciences, 10(3): 43-57.
- Kouchakzadeh, M. and Bahmani, A., 2005, **Assessment of Artificial Neural Networks Revenue in Reducing Required Parameters for Estimation of Reference Evapotranspiration**, Journal of Agricultural sciences Islamic Azad University, No. 4: 87-97.
- Kumar Munish, Raghuwanshi N.S., Singh Rajvikram, Wallender Wesley and Pruitt W.O., 2002, **Estimating Evapotranspiration Using Artificial Neural Network**, J. Irrig Drain Eng ASCE 128(4): 224–233.
- Lin, Chih-Hsien, Chao, Cheng and Chen, Wen-Fu, 2008, **Estimation Regional Evapotranspiration by Adaptive Network-based Fuzzy Inference System for Dan-Shui Basin in Taiwan**, J. Chinese Inst. of Eng. 30(6): 1091-1096.
- Mardikis, M.G., Kalivas, D.P. and Kollias, V.J., 2005, **Comparison of Interpolation Methods for the Prediction of Reference Evapotranspiration-An Application in Greece**, Water Res. Manag. 19, 251–278.
- Nasajizavareh, M. and Sadeghifar, R., 2007, **Estimation of Reference Evapotranspiration with using Different Methods (Case study: Karaj)**, The 9th national conference of irrigation and reduce evaporation, Kerman.

- Odhiambo L.O., Yoder R.E., Yoder D.C., and Hines J.W., 2001, **Optimization of Fuzzy Evaporation Model Through Neural Training with Input-output Examples**, Trans. ASAE. 44(6): 1625-1633.
- Phillips, Donald and Marks, Danny, 1996, **Spatial Uncertainty Analysis: Propagation of Interpolation Errors in Spatially Distributed Models**, Ecol. Model. 91, 213-229.
- Rahimi Khoob, A., 2008, **Artificial Neural Network Estimation of Reference Evapotranspiration from pan Evaporation in a Semi-arid Environment**, Irrig. Sci. 27, 35-39.
- Rahimzadeh, F., and Khoshkam, M., 2003, **Moisture Series Changes in Country Synoptic Stations**, The third Regional Conference and the first Climate Change National Conference, 53-62. Isfahan University of Technology.
- Raziei, T., Daneshkar Arasteh, 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.
- Sabziparvar, A.A., Tafazoli, F., Zare Abyaneh, H., Banejad, H., Mousavi Bayegi, M., Ghafouri, M., Mohseni Movahed, A. and Maryanaji, Z., 2008, **Comparison of some Crop Reference Evapotranspiration Models in a Cold Semi-arid Climate to Optimize the use of Radiation Models**, J. Water and Soil. Agr. Sci. and Thechnology Ferdowsi University of Mashhad, 22(2): 328-340.
- Sabziparvar, A., 2008, **A Simple Formula for Estimating Global Solar Radiation in Central Arid Deserts of Iran**, J. Renewable Energy, 33(5): 1002-1010.
- Sabziparvar, A.A., and Shetaee, H., 2007, **Estimation of Global Solar Radiation in Arid and Semi-arid Climates of East and West Iran**, Energy, 32, 649-655.
- Saito, Hirotaka, Seki, Kazuhiko and Simunek, Jiri., 2008, **Geostatistical Modeling of Spatial Variability of Water Retention Curves**, Hydrology and Earth System Sciences Discuss., 5, 2491-2522.
- Salih, A.M. and Sendil, U., 1983, **Evapotranspiration under Extremely Arid Environment**, J. Irrig. Drain. Eng. 110(3): 289-303.
- Sawano, Shinji, Hotta, Norifumi, Komatsu, Hikaru, Suzuki, Masakazu and Yayama, Tomoko., 2007, **Forest Environments in the Mekong River Basin (Evaluation of Evapotranspiration in Forested Areas in the Mekong Basin Using GIS Data Analysis**, Pp: 295 (36-44).
- Shoayb, S.K. and Majdzadeh, B., 2008, **The Best Empirical Relationship Reference Plant Evapotranspiration in Comparison with Data Lysimeter in Kerman**, Water and Irrigation, 13, 43-46.
- Sun, Li and Song, Changchun, 2008, **Evapotranspiration from a Freshwater Marsh in the Sanjiang Plain**, Northeast China, Journal of Hydrology, 352, 202- 210.
- Tafazzoli, F., 2007, **Evaluation of Sensitivity of Evapotranspiration Models to Daily Solar Radiation in Semi-arid Climate of Hamedan for Optimum Use of Radiation Models**, The thesis, submitted for the degree of Master of Science, Faculty of agriculture department of water engineering Bu Ali Sina University, Pp. 96.