

برآورد تبخیر تعرق گیاه مرجع با روش‌های هارگریوز سامانی و هارگریوز سامانی اصلاح شده و ارزیابی آن‌ها با استفاده از سامانه نیاز آبی گیاهان در استان کرمانشاه

مهدی جوزی^{۱*}، نیازعلی ابراهیمی‌پاک^۲، آرش تافته^۳

۱- استادیار، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران.

۲- دانشیار، بخش تحقیقات مدیریت آب در مزرعه، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

۳- استادیار، بخش تحقیقات مدیریت آب در مزرعه، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

* نویسنده مسئول: m.jovzi@areeo.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۰

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۰۶

چکیده

برآورد دقیق تبخیر تعرق مرجع در بسیاری از مطالعات مثل بیلان هیدرولوژیکی آب، طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری، شبیه‌سازی مراحل رشد و عملکرد گیاهی و برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب ضروری است. برآورد دقیق این پارامتر می‌تواند باعث مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح منابع آب باشد. هدف از انجام این مطالعه برآورد مقادیر تبخیر تعرق مرجع در ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمانشاه طی دوره آماری ۹۸-۱۳۸۹، ارزیابی روش‌های هارگریوز سامانی و هارگریوز سامانی اصلاح شده و پهنه‌بندی تبخیر تعرق مرجع در استان بود. به منظور تعیین تبخیر تعرق مرجع از روش استاندارد پنمن مونتیث فائو منتج از سامانه نیاز آبی گیاهان کشور استفاده شد. نتایج حاصل نشان داد بیشترین و کمترین تبخیر تعرق مرجع سالانه در بین ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی به ترتیب به مقدار ۱۷۷۰ و ۱۳۴۱ میلی‌متر در سال متعلق به ایستگاه‌های قصرشیرین و سرآرود بود. مهم‌ترین پارامتر مؤثر در بیشتر بودن تبخیر تعرق مرجع در ایستگاه قصرشیرین دما و سرعت باد بالا نسبت به سایر ایستگاه‌ها بود. نتایج حاصل از پهنه‌بندی تبخیر تعرق مرجع نشان داد مناطق غربی استان شدت بیشتری نسبت به مناطق شرقی دارند. ارزیابی روش‌های هارگریوز سامانی و هارگریوز سامانی اصلاح شده نشان داد میانگین آماره‌های R^2 ، RMSE و NRMSE در روش هارگریوز سامانی به ترتیب ۰/۷۸، ۰/۷۸ میلی‌متر بر روز و ۰/۱۹ به‌دست آمد. میانگین مقادیر این آماره‌ها در روش هارگریوز سامانی اصلاح شده به ترتیب ۰/۷۱، ۲/۵۹ میلی‌متر بر روز و ۰/۶۵ به‌دست آمد. بنابراین کاربرد روش هارگریوز سامانی برای محاسبه تبخیر تعرق مرجع در این استان قابل توصیه است.

واژه‌های کلیدی: پنمن مونتیث فائو، تابش خورشیدی، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی واقعی، سرعت باد.

مقدمه

نادریان‌فر و همکاران، (۱۳۹۹). کاهش بارندگی و افزایش متوسط تبخیر، میزان خشکی کشور را افزایش داده و کمبود منابع آب را به مهم‌ترین چالش بخش کشاورزی تبدیل کرده است (عزیزی زهان، ۱۳۹۵). مصرف آب در بخش کشاورزی در ایران رو به افزایش است و از ۴۴ میلیارد متر مکعب در سال ۱۳۴۰ به ۸۰ میلیارد متر مکعب در سال ۱۳۸۰ (حیدری،

یکی از مهم‌ترین اجزای چرخه هیدرولوژیکی برآورد تبخیر تعرق مرجع می‌باشد. برآورد دقیق تبخیر تعرق مرجع در بسیاری از مطالعات مثل بیلان هیدرولوژیکی آب، طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری، شبیه‌سازی مراحل رشد و عملکرد گیاهی و برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب ضروری می‌باشد

(فولادمند، ۱۳۸۹). استفاده از روش پنمن مونتیث فائو برای برآورد تبخیر تفرق مرجع مورد توجه محققین مختلف واقع شده است. به عنوان مثال Mandal Jhajharia et al. (2012) and Chanda (2023) و Hunasigi et al. (2023) در هند، Li et al. (2018)، Zhang et al. (2013) و Jiang et al. (2016) در چین، Tunali et al. (2023) در ترکیه و احمدی و رضانی اعتدالی (۱۴۰۱) و عیسی زاده و همکاران (۱۴۰۱) در ایران از این روش برای برآورد تبخیر تفرق مرجع استفاده کردند. دهقان و علیزاده (۱۳۹۱) روش های مختلف برآورد تبخیر تفرق مرجع را در خراسان رضوی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن ها نشان داد روش پنمن مونتیث فائو گزینه خوبی برای برآورد تبخیر تفرق در این استان می باشد. مدیری (۱۳۹۷) تبخیر تفرق مرجع را در ایستگاه های سینوپتیک استان تهران با استفاده از روش پنمن مونتیث فائو برآورد نمود. باب الحکمی و همکاران (۱۳۹۹) اثر تغییر اقلیم بر تبخیر تفرق مرجع در مازندران را از روش پنمن مونتیث فائو مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد در تمامی ایستگاه های هواشناسی مورد بررسی آن ها تغییر در تبخیر تفرق مرجع نسبت به دوره پایه وجود داشت.

برای حل معادله پنمن مونتیث فائو احتیاج به اطلاعات زیادی است که معمولاً در همه ایستگاه های هواشناسی اندازه گیری نمی شوند. بنابراین استفاده از روش هایی که نیاز به اطلاعات هواشناسی کمتری دارند، یک ضرورت به نظر می رسد. برای این منظور پژوهش های زیادی وجود دارد که در آن ها سعی شده در مقایسه با نتایج روش پنمن مونتیث فائو یک روش ساده با دقت قابل قبول معرفی نمایند (رئوف و عزیزی مبصر، ۱۳۹۶). در این میان روش هارگریوز سامانی روش ساده ای است که به وسیله فائو در شرایطی که امکان استفاده از روش پنمن مونتیث فائو امکان پذیر نیست توصیه شده است (Allen et al., 1998). در این روش، برآورد تبخیر تفرق مرجع براساس میانگین، حداقل و حداکثر دمای هوا و تابش فرازمینی می باشد که اطلاعات مورد نیاز آن در اکثر ایستگاه های هواشناسی وجود دارد. روش دیگر مورد استفاده در شرایط موجود بودن حداقل و حداکثر دمای هوا و تابش فرازمینی روش هارگریوز سامانی اصلاح شده است (Samani, 2000). اما برای کاربرد این دو روش در مناطق مختلف می بایست دقت آن ها مورد ارزیابی قرار

(۱۳۹۳) و به ۸۵/۶ میلیارد مترمکعب در سال های اخیر رسیده است (مظاهری و عبدالمنافی، ۱۳۹۶). در شرایط فعلی حدود ۸۸/۹ درصد از آب کشور در بخش کشاورزی مورد استفاده قرار می گیرد (مظاهری و عبدالمنافی، ۱۳۹۶) در حالی که متوسط جهانی آن ۶۹ درصد و در آسیا ۸۱ درصد است (محمدجانی و یزدانیان، ۱۳۹۳). بنابراین از آنجایی که بخش کشاورزی مصرف کننده اصلی آب در کشور است لذا با بهبود مدیریت مصرف آب در این بخش می توان به نحو قابل توجهی در مصرف آب صرفه جویی کرد (نادریان فر و همکاران، ۱۳۹۹). یکی از مهم ترین روش های بهبود مدیریت مصرف آب در مزرعه برآورد صحیح میزان تبخیر تفرق گیاه می باشد (نادریان فر و همکاران، ۱۳۹۹). همچنین تعیین تبخیر تفرق گیاهان رکن اساسی در طرح های آبیاری بوده که لازمه آن محاسبه تبخیر تفرق مرجع در هر منطقه می باشد (مدیری، ۱۳۹۷). تبخیر تفرق مرجع علاوه بر نشان دادن ویژگی های یک اقلیم، برای تعیین نیاز آبی گیاهان مختلف به کار برده می شود (موسوی بایگی و همکاران، ۱۳۸۸). روش های مختلفی برای اندازه گیری تبخیر تفرق وجود دارد که در حالت کلی به دو روش، مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می شود. روش مستقیم با استفاده از لایسیمتر انجام می شود هرچند که این روش دقیق است اما وقت گیر و هزینه بر است (López-Urrea et al., 2006). به همین دلیل استفاده از روش های غیرمستقیم که بر پایه اطلاعات تجربی، مبانی فیزیکی و ریاضی تعیین می شوند توصیه می شود. از جمله دقیق ترین روش های غیرمستقیم که مورد تأیید سازمان فائو نیز می باشد روش پنمن مونتیث فائو می باشد که در سراسر دنیا به عنوان روش استاندارد تعیین تبخیر تفرق شناخته می شود (Allen et al, 1998).

مطالعات بسیاری در رابطه با ارزیابی روش های محاسبه تبخیر تفرق مرجع در شرایط مختلف انجام شده است. در این میان روش پنمن مونتیث فائو به عنوان یک روش استاندارد و دقیق برای برآورد تبخیر تفرق مرجع در محدوده وسیعی از شرایط اقلیمی شناخته شده است (Zhao et al., 2010). صحت این روش برای بسیاری از نقاط مختلف دنیا با اقلیم های مختلف تأیید شده است (مدیری، ۱۳۹۷). براین اساس بسیاری از روش های دیگر محاسبه تبخیر تفرق مرجع براساس روش پنمن مونتیث فائو به عنوان روش استاندارد واسنجی شده اند

می‌کند. همچنین در شرایط استفاده از روش‌های مبتنی بر دما (کمبود سه پارامتر سرعت باد، ساعات آفتابی و رطوبت نسبی) روش هارگریوز سامانی نتیجه قابل قبول‌تری نسبت به سایر روش‌ها ارائه می‌دهد. نتایج پژوهش Raoof and Fujimaki (2020) در یک منطقه معتدل مرطوب غرب ژاپن نشان داد که روش هارگریوز سامانی با خطای نسبی ۲۰ درصد نسبت به روش لایسیمتری در بین روش‌های تعیین تبخیر تعرق مبتنی بر دما، عملکرد بهتری از خود نشان داد. دین‌پژوه و فروغی (۱۳۹۷) در پژوهشی تغییرات تبخیر تعرق مرجع را در شمال غربی ایران با استفاده از روش پنمن مونتیث فائو در طی سال‌های ۱۳۹۴-۱۳۵۹ بررسی کردند. در پژوهش آن‌ها تبخیر تعرق مرجع در برخی از ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک استان کرمانشاه شامل: اسلام آباد غرب، سرآرود، کنگاور و کرمانشاه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد میانگین تبخیر تعرق مرجع سالانه در دهه انتهایی پژوهش برای ایستگاه‌های ذکر شده به ترتیب ۱۴۸۷، ۱۶۷۳، ۱۳۶۳ و ۱۵۷۶ میلی‌متر به دست آمد. چکاو و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی روند زمانی تبخیر تعرق مرجع از ابتدای تأسیس ایستگاه هواشناسی مورد نظر شامل بندر انزلی، مشهد، بوشهر، زاهدان، کرمان، تبریز، کرمانشاه (ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کرمانشاه) و تهران تا سال ۲۰۱۳ میلادی را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد تبخیر تعرق مرجع در کلیه ایستگاه‌ها روند افزایشی داشت. حقی‌زاده و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی تبخیر تعرق مرجع را در برخی از ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمانشاه شامل: اسلام آباد غرب، روانسر، سرپل ذهاب، کرمانشاه و کنگاور با استفاده از مدل برنامه‌نویسی ژنتیکی با استفاده از آمار سال‌های ۱۳۷۴-۱۳۹۱ محاسبه نمودند. ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک استان کرمانشاه شامل اسلام آباد غرب، کرمانشاه، سرآرود، سرپل ذهاب، سنقر، سومار، قصر شیرین، کنگاور، گیلانغرب، جوانرود، هرسین، تازه آباد و روانسر می‌باشد. همچنان که بررسی منابع نشان می‌دهد پژوهشی که نشان دهنده‌ی محاسبه تبخیر تعرق مرجع، ارزیابی روش هارگریوز سامانی و هارگریوز سامانی اصلاح شده در همه ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک استان کرمانشاه براساس آمار سالیان اخیر باشد انجام نشده است لذا هدف از انجام این پژوهش تعیین تبخیر تعرق مرجع در ایستگاه‌های

گیرد. Trajkovic (2007) کارآیی روش هارگریوز سامانی را در مقایسه با روش پنمن مونتیث فائو در شرایط مرطوب صربستان مورد ارزیابی قرار داد و نتایج ایشان نشان داد که کارآیی این روش قابل قبول است. اما Trajkovic and Kolakovic (2009) طی پژوهشی دیگر در شرایط مرطوب صربستان روش‌های مختلف تبخیر تعرق مرجع را مورد ارزیابی قرار داد که نتایج نشان داد روش هارگریوز سامانی دارای کمترین دقت در بین روش‌های مختلف مورد بررسی بود. Tabari et al. (2013) طی پژوهشی در شرایط مرطوب و نیمه خشک ایران روش هارگریوز سامانی را به‌عنوان روشی که دارای بیشترین دقت قابل قبول است معرفی نمودند.

میرموسوی و همکاران (۱۳۹۱) در پژوهشی در پنج ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کرمانشاه، کنگاور، اسلام آباد غرب، روانسر و سرپل ذهاب تبخیر تعرق مرجع را از ابتدای تأسیس این ایستگاه‌ها تا سال ۱۳۸۴ با استفاده از روش‌های پنمن مونتیث فائو، ترنت وایت، بلانی کرایدل اصلاح شده هارگریوز و پنمن اصلاح شده محاسبه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد از بین پنج روش مورد بررسی روش پنمن مونتیث فائو برآورد دقیق‌تری از تبخیر تعرق مرجع ارائه می‌کند. زارع ابیانه و همکاران (۱۳۹۳) در تحقیقی تبخیر تعرق مرجع را در برخی از ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمانشاه شامل: کنگاور، کرمانشاه، اسلام آباد غرب، روانسر و سرپل ذهاب با استفاده از روش پنمن مونتیث فائو در طی سال‌های ۱۳۸۷-۱۳۷۶ بررسی کردند. Ghamarnia et al. (2015) مطالعه‌ای را جهت انتخاب روش مناسب برای محاسبه تبخیر تعرق مرجع در کرمانشاه طی سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۹۱ انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد بین روش‌های مختلف مورد بررسی که با روش لایسیمتر مقایسه شدند روش پنمن مونتیث فائو به‌عنوان بهترین روش معرفی شد. اخوان و همکاران (۱۳۹۷) در تحقیقی تبخیر تعرق گیاه مرجع را تحت سناریوهای کمبود داده در برخی از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک استان کرمانشاه شامل: ایستگاه‌های کرمانشاه، اسلام آباد غرب و سرپل ذهاب را طی دوره آماری ۱۳۸۳-۱۳۹۳ مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در شرایطی که سرعت باد در اختیار نباشد سناریوی درون‌یابی پارامترها و سپس محاسبه تبخیر تعرق مرجع از روش پنمن مونتیث فائو با دقت بیشتری تبخیر تعرق مرجع را برآورد

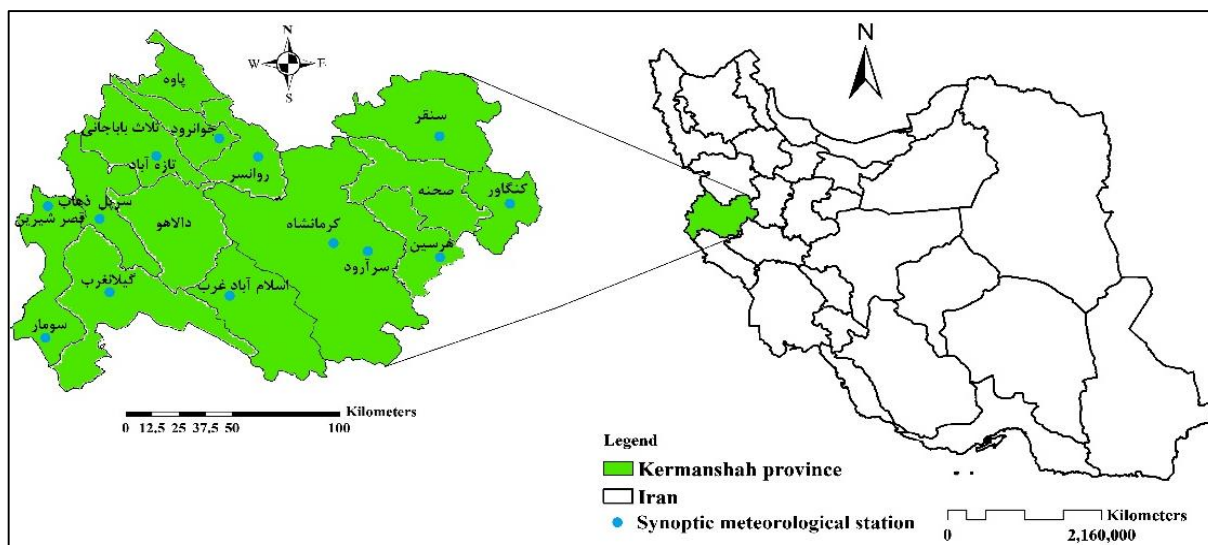
۱۴ شهرستان شامل: اسلام‌آباد غرب، پاوه، ثلاث باباجانی، جوانرود، دالاهو، روانسر، سرپل زهاب، سنقر، صحنه، قصرشیرین، کرمانشاه، کنگاور، گیلانغرب و هرسین می‌باشد (شماعی و همکاران، ۱۳۹۴). این استان حدود ۱/۵ درصد از مساحت کشور را در بر داشته و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا ۱۲۰۰ متر می‌باشد (کریمی و همکاران، ۱۳۹۸). مجموع اراضی کشاورزی در استان ۹۴۶۸۷۱ هکتار، شامل ۹۰۶۰۰۰ هکتار اراضی زراعی و ۴۰۸۷۱ هکتار اراضی باغی می‌باشد. کشت‌های غالب استان کرمانشاه شامل گندم، ذرت دانه‌ای، جو، چغندرقد، یونجه و گوجه فرنگی می‌باشد. در شکل ۱ موقعیت استان کرمانشاه و ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک نشان داده شده است.

هواشناسی سینوپتیک استان کرمانشاه، ارزیابی روش‌های هارگریز سامانی و هارگریز سامانی اصلاح شده و پهنه‌بندی تبخیر تعرق مرجع در استان می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان کرمانشاه در موقعیت جغرافیایی ۴۵ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۶ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۴۱ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی واقع شده است (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۹). این استان با مساحتی معادل ۲۴۴۳۴/۲۵ کیلومتر مربع از شمال به استان کردستان، از جنوب به استان‌های لرستان و ایلام، از شرق به استان همدان و از غرب به کشور عراق محدود است. استان کرمانشاه دارای



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک
Figure 1- Location of the study area and synoptic meteorological stations.

آفتابی واقعی در یک روز نیز به ترتیب به مقدار ۹/۱ و ۷/۰ ساعت در روز اختصاص به ایستگاه‌های سومار و هرسین داشت. بیشترین و کمترین میانگین سالانه سرعت باد به ترتیب به مقدار ۱/۸۰ و ۱/۳۴ متر بر ثانیه متعلق به ایستگاه‌های قصرشیرین و سرارود بود. بیشترین و کمترین تابش خالص سالانه نیز به ترتیب به مقدار ۸/۷۷ و ۷/۷۲ MJ m⁻² d⁻¹ اختصاص به ایستگاه‌های کنگاور و قصرشیرین داشت. بیشترین و کمترین دمای سالانه در بین ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی به ترتیب به مقدار ۲۵/۱ و ۱۳/۵ درجه سانتی‌گراد مربوط به ایستگاه‌های سومار و سنقر بود.

داده‌ها و روش محاسبه تبخیر تعرق مرجع

داده‌های هواشناسی به کار رفته در این مطالعه شامل دمای هوا، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک استان کرمانشاه براساس دوره آماری ارائه شده در جدول ۱ می‌باشد. در جدول ۲ میانگین سالانه پارامترهای هواشناسی مورد بررسی ارائه شده است. جدول ۲ نشان می‌دهد بیشترین و کمترین رطوبت نسبی سالانه در بین ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی به ترتیب به مقدار ۵۴ و ۳۵ درصد متعلق به ایستگاه‌های کنگاور و سومار بود. بیشترین و کمترین میانگین سالانه ساعات

جدول ۱- مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمانشاه.

Table 1- Geographic coordinates of synoptic stations of Kermanshah province.

Station	Longitude (°E)	Latitude (°N)	Elevation (m)	Statistical period	Climate type*
Eslamabad-e-Gharb	46.47	34.12	1350	1389-1398	Semi-arid, cold
Kermanshah	47.15	34.35	1320	1389-1398	Semi-arid, cold
Sararood	47.29	34.33	1362	1389-1398	Semi-arid, cold
Sarpol Zahab	45.87	34.45	545	1389-1398	Semi-arid, moderate
Sonqor	47.58	34.78	1700	1389-1398	Semi-arid, cold
Soomar	45.65	33.88	372	1394-1398	Semi-arid, warm
Qasr-e-Shirin	45.6	34.53	376	1389-1398	Semi-arid, warm
Kangavar	47.98	34.5	1470	1389-1398	Semi-arid, cold
Gilan Gharb	45.93	34.13	816	1389-1398	Semi-arid, moderate
Javanrud	46.5	34.77	1375	1389-1398	Mediterranean, cold
Harsin	47.55	34.27	1580	1389-1398	Semi-arid, cold
Tazeabad	46.15	34.75	1340	1394-1398	Semi-arid, cold
Ravansar	46.65	34.72	1380	1389-1398	Mediterranean, cold

Notes: *: Climate type from Modified De Martonne method.

جدول ۲- میانگین سالانه پارامترهای هواشناسی در ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمانشاه.

Table 2- Annual average of meteorological parameters in synoptic stations of Kermanshah province.

Station	RH _{mean} (%)	n (hr)	u ₂ (m s ⁻¹)	Rn (MJ m ⁻² day ⁻¹)	T _{mean} (°C)
Eslamabad-e-Gharb	51	8.3	1.54	8.67	14.4
Kermanshah	41	7.9	1.55	7.96	15.8
Sararood	46	8.2	1.34	8.31	15.2
Sarpol Zahab	47	8.2	1.45	8.40	20.8
Sonqor	51	8.3	1.53	8.65	13.5
Soomar	35	9.1	1.45	7.95	25.1
Qasr-e-Shirin	43	7.1	1.80	7.72	22.3
Kangavar	54	8.3	1.41	8.77	13.8
Gilan Gharb	44	8.3	1.60	8.45	20.7
Javanrud	45	8.1	1.44	8.29	16.3
Harsin	42	7.0	1.38	7.77	15.8
Tazeabad	44	7.9	1.47	8.09	17.7
Ravansar	46	8.1	1.42	8.36	15.7

Notes: RH_{mean}: Daily Mean Relative Humidity; n: Actual Duration of Sunshine in a Day; u₂: Wind Speed at 2 m Above Ground Surface; Rn: Net Radiation; T_{mean}: Daily Mean Air Temperature.

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

که در آن، ET_0 تبخیر تعرق مرجع $(mm \ day^{-1})$ ، R_n تابش خالص ورودی به سطح $(MJ \ m^{-2} \ d^{-1})$ ، U_2 میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع ۲ متری $(m \ s^{-1})$ ، T میانگین روزانه دمای هوا $(^{\circ}C)$ ، e_s فشار بخار اشباع (kPa) ، e_a فشار بخار واقعی (kPa) ، γ ضریب ثابت سایکرومتری $(kPa \ ^{\circ}C^{-1})$ و Δ شیب منحنی فشار بخار $(kPa \ ^{\circ}C^{-1})$ می‌باشد که از رابطه زیر به دست آمد:

$$\Delta = \frac{2504 \exp [17.27T \div (T+237.3)]}{(T+237.3)^2} \quad (2)$$

روش پنمن مونیتث فائو

برای محاسبه تبخیر تعرق مرجع از سامانه نیاز آبی گیاهان کشور استفاده شد (سامانه نیاز آبی گیاهان کشور، ۱۴۰۱). این سامانه، تبخیر تعرق مرجع را براساس روش پنمن مونیتث فائو محاسبه می‌کند. در نشریه ۵۶ فائو، این روش به عنوان بهترین روش برآورد تبخیر تعرق مرجع در مقایسه با روش‌های دیگر پیشنهاد شده است (Sumner and Jacobs, 2005). رابطه زیر روش محاسبه تبخیر تعرق پنمن مونیتث فائو را نشان می‌دهد.

روش هارگریوز سامانی

رابطه هارگریوز سامانی به منظور برآورد تبخیر تعرق مرجع براساس مقادیر اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر وزنی در دیویس کالیفرنیا به صورت زیر ارائه شده است (Hargreaves and Samani, 1985).

$$ET_o = 0.408 \times 0.0023 \times (T + 17.8) \times (T_{max} - T_{min})^{0.5} \times R_a \quad (3)$$

که در آن، ET_o تبخیر تعرق مرجع ($mm\ day^{-1}$)، R_a تابش فرازمینی ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$)، T ، T_{min} و T_{max} به ترتیب میانگین، حداکثر و حداقل دمای روزانه ($^{\circ}C$)، 0.408 ضریب تبدیل $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ به $mm\ day^{-1}$ می‌باشد.

روش هارگریوز سامانی اصلاح شده

Samani (2000) با استفاده از داده‌های تابش خورشیدی و دما در ایالات متحده، ضریبی برای معادله هارگریوز سامانی پیشنهاد کرد که به صورت تابعی از تفاوت دمای حداقل و حداکثر است و رابطه زیر را برای محاسبه تبخیر تعرق مرجع ارائه نمود.

$$ET_o = 0.408 \times 0.0135 \times K_T \times (T + 17.8) \times (T_{max} - T_{min})^{0.5} \times R_a \quad (4)$$

که در آن، K_T ضریب معادله و تابعی درجه دو از تفاوت دمای حداقل و حداکثر بوده و از رابطه زیر با استفاده از نرم افزار Excel محاسبه شد.

$$K_T = 0.00185 \times (T_{max} - T_{min})^2 - 0.0433 \times (T_{max} - T_{min}) + 0.4023 \quad (5)$$

شاخص‌های آماری

برای ارزیابی روش‌های مورد بررسی تبخیر تعرق مرجع از چهار پارامتر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE)، ضریب همبستگی (R^2) و میانگین خطا (ME) استفاده شد که از روابط زیر به دست می‌آیند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (ET_{oi}^M - ET_{oi}^{PMF})^2}{N}} \quad (6)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\overline{ET_o}^{PMF}} \quad (7)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^N (ET_{oi}^{PMF} - \overline{ET_o}^{PMF})(ET_{oi}^M - \overline{ET_o}^M))^2}{\sum_{i=1}^N (ET_{oi}^{PMF} - \overline{ET_o}^{PMF})^2 \sum_{i=1}^N (ET_{oi}^M - \overline{ET_o}^M)^2} \quad (8)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^N (ET_{oi}^M - ET_{oi}^{PMF})}{N} \quad (9)$$

که در آن‌ها ET_o^M و ET_o^{PMF} به ترتیب میانگین و تبخیر تعرق مرجع توسط روش مورد آزمون ($mm\ day^{-1}$)، ET_{oi}^{PMF} و ET_{oi}^M به ترتیب میانگین و ET_{oi}^M برآورد تبخیر تعرق مرجع توسط روش پنمن مونتیث فائو ($mm\ day^{-1}$) و N تعداد کل داده‌ها می‌باشند. لازم به ذکر است که R^2 بیانگر میزان احتمال همبستگی میان داده‌های تبخیر تعرق مرجع برآورد شده از روش‌های هارگریوز و هارگریوز سامانی اصلاح شده با داده‌های محاسباتی از روش پنمن مونتیث فائو می‌باشد. مقدار حداقل این آماره صفر و بهترین مقدار آن برابر یک است. مقادیر منفی و مثبت ME به ترتیب نشان‌دهنده کم‌برآوردی و بیش‌برآوردی روش‌های مورد بررسی نسبت به روش پنمن مونتیث فائو است. RMSE تفاوت میان داده‌های برآورد شده از روش‌های مورد بررسی با روش پنمن مونتیث فائو است. هر چه مقدار این آماره کمتر باشد یعنی نزدیک به صفر باشد روش مورد بررسی دارای دقت بالاتری در برآورد تبخیر تعرق مرجع دارند. اگر مقدار NRMSE روش مورد بررسی کمتر از ۱۰ درصد باشد کارکرد آن روش عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد باشد خوب، ۲۰ تا ۳۰ درصد باشد متوسط، و بیشتر از ۳۰ درصد ضعیف ارزیابی می‌گردد (بختیاری و همکاران، ۱۳۹۴).

تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی تبخیر تعرق مرجع

روش‌های گوناگونی برای پهنه‌بندی براساس نقاط دارای اطلاعات یک مولفه مشخص ارائه شده است که اغلب بر مبنای درونیابی هستند. از جمله مهم‌ترین روش‌های درونیابی، برقراری ارتباط بین پارامتر مورد نظر به عنوان یک متغیر وابسته با یک متغیر مستقل مانند ارتفاع است که شرط آن داشتن حداقل ارتباط و همبستگی معنی‌دار آماری است (شرقی و همکاران، ۱۳۸۹). در صورت معنی‌دار بودن رابطه بین این پارامترها، می‌توان بر مبنای متغیر مستقل که در اینجا ارتفاع است و با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM)، مقادیر تبخیر تعرق مرجع را در سایر نقاط استان تهیه نمود. در این مطالعه بر مبنای رابطه بین ارتفاع و تبخیر تعرق مرجع و معنی‌دار بودن رابطه بین آن‌ها در سطح ۱٪ (بر مبنای ضریب تشخیص بودن رابطه $R^2=0.91$) در جدول فیشر و با درجه آزادی ۱۰ یک رابطه نمایی بین پارامتر ارتفاع و تبخیر تعرق مرجع به دست آمد و سپس نقشه پهنه‌بندی آن در استان کرمانشاه تهیه شد. لازم به ذکر است کلیه عملیات مدل‌سازی و پیش‌بینی تبخیر تعرق

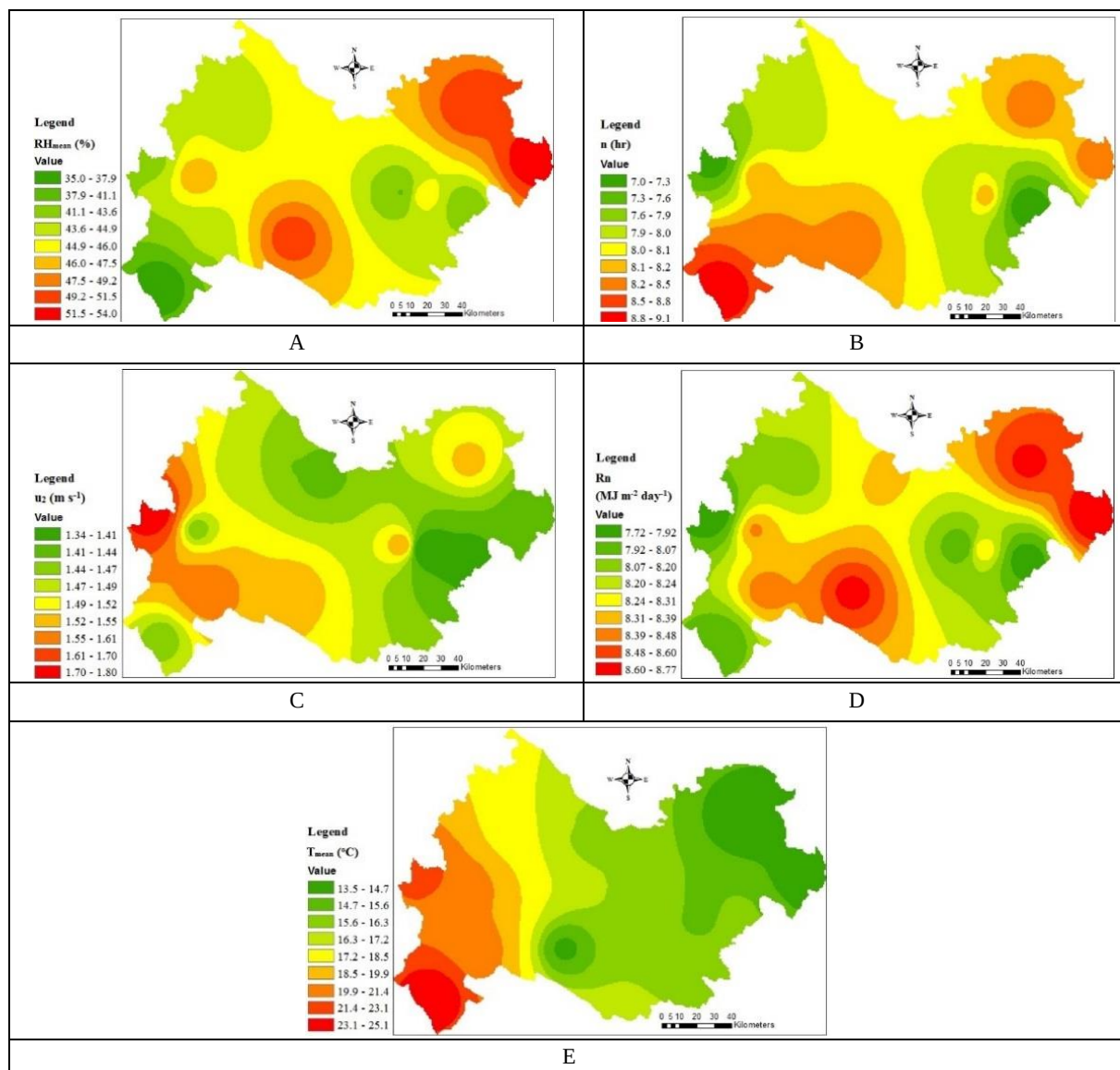
۲ نشان می‌دهد بیشترین و کمترین رطوبت نسبی سالانه به‌ترتیب در بازه ۵۱/۵-۵۴/۰ و ۳۷/۹-۳۵/۰ درصد متعلق به شرق و جنوب‌غربی استان کرمانشاه بود. کمترین و بیشترین میانگین سالانه ساعات آفتابی واقعی در یک روز نیز به‌ترتیب در بازه ۷/۰-۷/۳ و ۸/۱-۸/۹ ساعت در روز اختصاص به نواحی جنوب‌شرقی و غرب و نواحی جنوب‌غربی استان داشت.

مرجع بر اساس مدل‌های به‌دست آمده و پهنه‌بندی آن در سطح استان کرمانشاه در محیط نرم‌افزار R و با استفاده از بسته‌های نرم‌افزاری، stats، nlme، raster و sp انجام شده است (R Development Core Team, 2008).

نتایج و بحث

پارامترهای هواشناسی

در شکل ۲ پهنه‌بندی میانگین سالانه پارامترهای هواشناسی مورد بررسی در این پژوهش ارائه شده است. شکل



شکل ۲- نقشه پهنه‌بندی میانگین سالانه پارامترهای هواشناسی (A) رطوبت نسبی روزانه، (B) ساعات آفتابی واقعی روزانه، (C) سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین، (D) تابش خالص روزانه و (E) دمای روزانه در استان کرمانشاه.

Figure 2- Zoning map of annual average meteorological parameters of A) daily relative humidity, B) actual duration of sunshine in a day, C) wind speed at 2 m above ground surface, D) daily net radiation and E) daily air temperature in Kermanshah province.

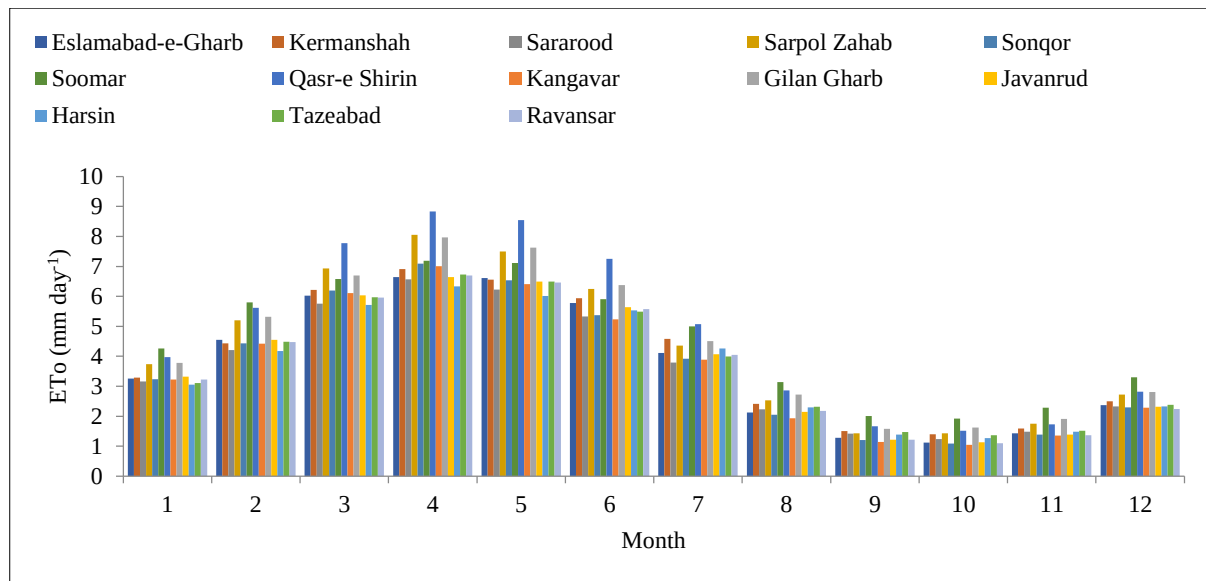
بیشترین و کمترین میانگین سالانه سرعت باد به ترتیب در بازه ۱/۸۰-۱/۷۰ و ۱/۴۱-۱/۳۴ متر بر ثانیه عمدتاً متعلق به نواحی شرق، جنوب شرقی و شمال و نواحی غرب استان بود. بیشترین و کمترین تابش خالص سالانه نیز به ترتیب در بازه ۸/۶۰-۸/۷۷ و $7/92-7/72 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ اختصاص به نواحی شرق، شمال شرقی و جنوب و نواحی غرب و جنوب شرقی استان داشت. بیشترین و کمترین میانگین دمای سالانه به ترتیب در بازه ۲۳/۱-۲۵/۱ و ۱۳/۵-۱۴/۷ درجه سانتی گراد مربوط به نواحی جنوب غربی و غرب و نواحی شرق استان بود. نواحی جنوب غربی و غرب استان کرمانشاه دارای کمترین ارتفاع و نواحی شرق استان نیز دارای بیشترین ارتفاع از سطح دریا می باشند (جدول ۱) که این امر می تواند باعث بیشتر بودن دمای هوا در نواحی جنوب غربی و غرب نسبت به مناطق شرق استان کرمانشاه باشد. نتایج پژوهش با عقیده و همکاران (۱۳۹۲) نیز نشان داد مناطق غربی استان کرمانشاه شامل ایستگاه های سومار، قصر شیرین، سرپل ذهاب و گیلانغرب دارای دمای سالانه ی بیشتری نسبت به نواحی شرقی استان بودند. ایشان دمای سالانه ی این ایستگاه ها را به ترتیب ۲۴/۳، ۲۳/۳، ۱۷ و ۱۶ درجه سانتی گراد گزارش نمود و بیان نمود که این مناطق خصوصیات مناطق نیمه خشک گرم را دارند. تفاوت دمای سالانه ی پژوهش حاضر با نتایج ایشان نشان دهنده ی تغییرات دمایی این مناطق در سالیان اخیر می باشد.

تبخیر تعرق مرجع

میانگین ده ساله تبخیر تعرق مرجع با استفاده از روش پنمن مونتیث فائو در ایستگاه های هواشناسی سینوپتیک استان کرمانشاه مستخرج از سامانه نیاز آبی گیاهان کشور (۱۴۰۱) برای ماه های مختلف سال در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج حاصل نشان داد برای تمامی ایستگاه های مورد بررسی بیشترین و کمترین تبخیر تعرق مرجع به ترتیب در تیر و دی ماه رخ داد. دامنه تغییرات تبخیر تعرق مرجع بین ۱/۰ تا ۸/۸

میلی متر بر روز به دست آمد که به ترتیب مربوط به ایستگاه کنگاور در دی ماه و ایستگاه قصر شیرین در تیرماه بود. نتایج پژوهش میرموسوی و همکاران (۱۳۹۱) نیز نشان داد مقدار تبخیر تعرق مرجع در استان کرمانشاه از ۰/۸ میلی متر بر روز در دی ماه تا ۸/۵ میلی متر در روز در تیرماه متغیر است که هم راستا با نتایج پژوهش حاضر است. بیشترین تبخیر تعرق مرجع در بین ایستگاه های هواشناسی مورد بررسی در ماه های فروردین، اردیبهشت و آبان تا اسفند به ایستگاه سومار، در ماه های خرداد تا مهر به ایستگاه قصر شیرین اختصاص داشت. کمترین تبخیر تعرق مرجع نیز در ماه های فروردین تا مرداد به ایستگاه هرسین، در ماه شهریور و آبان تا بهمن به ایستگاه کنگاور، در ماه مهر به ایستگاه سرآرود و در ماه اسفند به ایستگاه روانسر تعلق داشت. مقادیر تبخیر تعرق مرجع در ماه های اردیبهشت تا مهر در ایستگاه کرمانشاه به ترتیب ۴/۴، ۶/۲، ۶/۹، ۶/۶، ۵/۹ و ۴/۶ میلی متر به دست آمد که در این راستا نتایج تحقیقات وزیری (۱۳۷۴) با استفاده از لایسیمتر در این شهرستان نشان داد تبخیر تعرق مرجع در طی ماه های ذکر شده به ترتیب ۳/۷، ۵/۶، ۷/۶، ۸/۱، ۵/۴ و ۴/۳ میلی متر بر روز بود. همچنین نتایج ایشان در سال ۱۳۷۶ نیز نشان داد تبخیر تعرق مرجع با استفاده از لایسیمتر در این شهرستان در طی ماه های ذکر شده به ترتیب ۵/۱، ۶/۴، ۷/۱، ۷/۳، ۶/۱ و ۴/۰ میلی متر بر روز به دست آمد (وزیری، ۱۳۷۶).

در جدول ۳ مقادیر برآورد شده ی تبخیر تعرق مرجع به وسیله روش پنمن مونتیث فائو در ماه های اردیبهشت تا مهر در ایستگاه کرمانشاه با میانگین دوساله تبخیر تعرق مرجع به وسیله روش لایسیمتر توسط پژوهش وزیری (۱۳۷۴ و ۱۳۷۶) در ماه های مربوطه مقایسه شده است. نتایج حاصل نشان می دهد که مقدار آماره های R^2 ، RMSE و NRMSE به ترتیب ۰/۹۱، $0/35 \text{ mm day}^{-1}$ و ۰/۰۶ می باشد که نشان دهنده دقت عالی (۱۰٪ < NRMSE) روش پنمن مونتیث فائو در برآورد تبخیر تعرق مرجع در ایستگاه کرمانشاه می باشد.



شکل ۳- میانگین ده ساله تبخیر تعرق مرجع با استفاده از روش پنمن مونتیث فائو در ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک استان کرمانشاه برای ماه‌های مختلف سال

Figure 3- Ten-year average reference evapotranspiration using the Penman Monteith-FAO method in the synoptic meteorological stations of Kermanshah province for different months of the year.

جدول ۳- مقایسه ETo برآورد شده به وسیله روش پنمن مونتیث فائو در ایستگاه کرمانشاه با میانگین ETo اندازه‌گیری شده از روش لایسمتر در سال‌های ۱۳۷۴ و ۱۳۷۶ توسط وزیری (۱۳۷۴ و ۱۳۷۶).

Table 3- Comparison of ETo estimated by Penman Monteith-FAO method at Kermanshah station with average ETo measured by lysimeter method in 1995 and 1997 by Waziri (1995 and 1997).

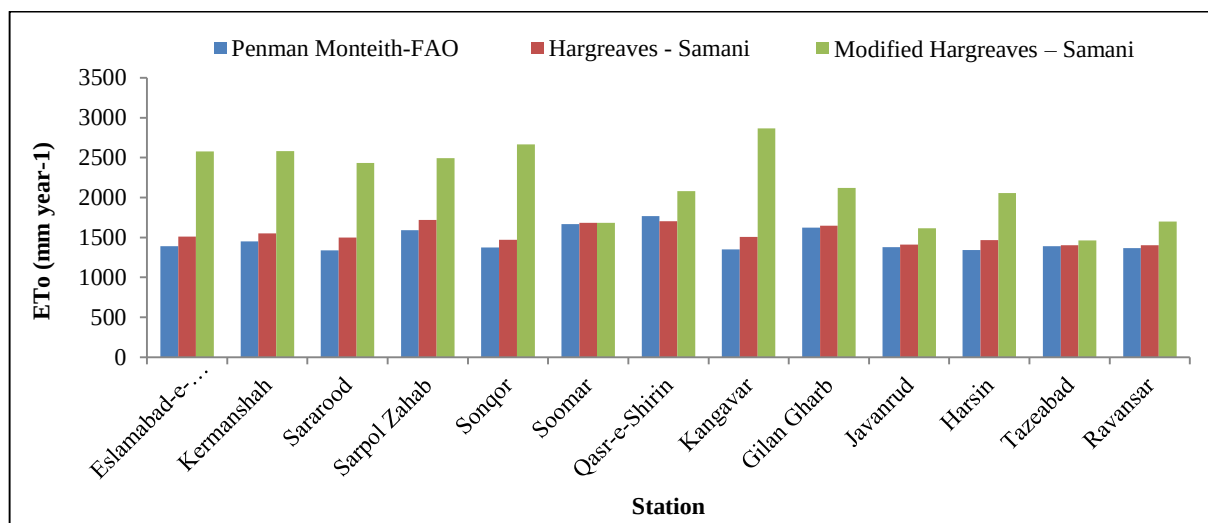
Month	ETo Mean of Lysimeter (mm day ⁻¹) *	ETo of Penman Monteith-FAO (mm day ⁻¹) **
2	4.40	4.4
3	6.00	6.2
4	7.35	6.9
5	7.70	6.6
6	5.75	5.9
7	4.15	4.6
R ²	-	0.91
ME	-	-0.13
RMSE (mm day ⁻¹)	-	0.35
NRMSE	-	0.06
Rank	-	Excellent

Notes: *: ETo from the research results of Waziri (1995 and 1997); **: ETo from the results of the present study by Penman Monteith-FAO method.

۸۱۶ متر جزء مناطق پست استان می‌باشند (جدول ۱). به همین دلیل میانگین سالانه دمای هوا در این مناطق با دامنه ۲۰/۷ تا ۲۵/۱ درجه سانتی‌گراد بیشتر از سایر مناطق استان بود. از دیگر عوامل مؤثر بر بالا بودن تبخیر تعرق مرجع سالانه در این مناطق می‌توان به سرعت بالای باد در قصرشیرین (m s⁻¹ ۱/۸) و گیلانغرب (m s⁻¹ ۱/۶) نسبت به سایر مناطق استان اشاره نمود. نتایج این پژوهش هم‌راستا با نتایج پژوهش حقی‌زاده و همکاران (۱۳۹۸) می‌باشد. پژوهش آن‌ها در برخی

در شکل ۴ میانگین سالانه تبخیر تعرق مرجع با استفاده از روش‌های پنمن مونتیث فائو، هارگریوز سامانی و هارگریوز سامانی اصلاح شده در ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی ارائه شده است. براساس نتایج این مطالعه تبخیر تعرق مرجع سالانه با استفاده از روش پنمن مونتیث فائو در ایستگاه‌های قصرشیرین، سومار، سرپل ذهاب و گیلانغرب که در مناطق غربی استان واقع شده‌اند نسبت به سایر مناطق استان بیشتر بود (شکل ۴). این مناطق از لحاظ ارتفاعی با دامنه ۳۷۲ تا

از ایستگاه‌های استان کرمانشاه نشان داد تبخیر تعرق مرجع در مناطق غربی این استان که شامل ایستگاه سرپل ذهاب بود بیشتر از سایر مناطق این استان بود. آن‌ها دلیل این امر را کاهش ارتفاع و عرض جغرافیایی و افزایش دما در مناطق غربی این استان ذکر می‌کنند.



شکل ۴- میانگین سالانه تبخیر تعرق مرجع با استفاده از روش‌های پنمن مونتیث فائو، هارگریوز سامانی و هارگریوز سامانی اصلاح شده در ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک استان کرمانشاه

Figure 4- Annual average reference evapotranspiration using Penman Monteith FAO, Hargreaves Samani and modified Hargreaves Samani methods in synoptic meteorological stations of Kermanshah province.

به‌دست آمد (جدول ۲). ایستگاه سرآرود دارای کمترین میانگین سالانه سرعت باد در بین ایستگاه‌های مختلف استان بود که کمتر بودن این پارامتر می‌تواند باعث کمتر شدن تبخیر تعرق مرجع سالانه در این ایستگاه باشد. مقایسه کلی برآورد تبخیر تعرق مرجع سالانه با استفاده از روش‌های هارگریوز سامانی و هارگریوز سامانی اصلاح شده با روش پنمن مونتیث فائو نشان می‌دهد (شکل ۴) که هر دو روش ذکر شده مقدار تبخیر تعرق مرجع سالانه را در همه ایستگاه‌ها به‌جز ایستگاه قصر شیرین بالاتر از روش مبنای پنمن مونتیث فائو برآورد می‌کند. در روش هارگریوز سامانی این تفاوت کمتر است در حالی که در روش هارگریوز سامانی اصلاح شده این تفاوت در اغلب ایستگاه‌های مورد بررسی بیشتر است. برای تعیین مقدار کمی دقت این روش‌ها در برآورد تبخیر تعرق مرجع روزانه از سه آماره R^2 ، RMSE و NRMSE استفاده شد که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است.

همچنین نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد بیشترین و کمترین تبخیر تعرق مرجع سالانه با استفاده از روش پنمن مونتیث فائو در بین همه ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی به‌ترتیب به مقدار ۱۷۷۰ و ۱۳۴۱ میلی‌متر در سال متعلق به ایستگاه‌های قصر شیرین و سرآرود بود (شکل ۴). در ایستگاه قصر شیرین میانگین سالانه پارامترهای هواشناسی دمای هوا، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی واقعی، سرعت باد و تابش خورشیدی به‌ترتیب $22/3^{\circ}\text{C}$ ، ۴۳٪، ۷/۱ hr، $1/80\text{ m s}^{-1}$ و $7/72\text{ MJ m}^{-2}\text{ day}^{-1}$ به‌دست آمد (جدول ۲). از بین این پارامترها، ایستگاه قصر شیرین دارای بیشترین میانگین سالانه سرعت باد و دومین ایستگاه دارای دمای هوای بالا بود. بر این اساس به‌نظر می‌رسد مهمترین پارامتر مؤثر در بیشتر بودن تبخیر تعرق مرجع در ایستگاه قصر شیرین دما و سرعت باد بالا نسبت به سایر ایستگاه‌ها باشد. این در حالی است که در ایستگاه سرآرود میانگین پارامترهای ذکر شده به‌ترتیب $15/2^{\circ}\text{C}$ ، ۴۶٪، ۸/۲ hr، $1/34\text{ m s}^{-1}$ و $8/31\text{ MJ m}^{-2}\text{ day}^{-1}$

جدول ۴- مقایسه ETo برآورد شده به وسیله روش هارگریوز سامانی و هارگریوز سامانی اصلاح شده با ETo برآورد شده از روش پنمن مونتیت فائو.

Table 4- Comparison of ETo estimated by Hargreaves Samani method and modified Hargreaves Samani method with ETo estimated by Penman Monteith-FAO method.

Station	Hargreaves - Samani					Modified Hargreaves – Samani				
	R ²	ME (mm day ⁻¹)	RMSE (mm day ⁻¹)	NRMSE	Rank	R ²	ME (mm day ⁻¹)	RMSE (mm day ⁻¹)	NRMSE	Rank
Eslamabad-e-Gharb	0.92	0.33	0.68	0.18	Good	0.77	3.25	2.80	0.73	Poor
Kermanshah	0.88	0.28	0.89	0.22	Medium	0.72	3.1	3.23	0.81	Poor
Sararood	0.90	0.44	0.78	0.21	Medium	0.68	3.0	3.30	0.90	Poor
Sarpol Zahab	0.91	0.35	0.81	0.19	Good	0.72	2.47	2.81	0.64	Poor
Sonqor	0.94	0.26	0.61	0.16	Good	0.74	3.53	3.43	0.91	Poor
Soomar	0.85	0.05	0.95	0.21	Medium	0.74	0.04	1.41	0.31	Poor
Qasr-e-Shirin	0.88	-0.18	0.89	0.18	Good	0.65	0.85	2.51	0.51	Poor
Kangavar	0.93	0.43	0.66	0.18	Good	0.75	4.15	3.50	0.94	Poor
Gilan Gharb	0.90	0.07	0.80	0.18	Good	0.65	1.36	2.71	0.61	Poor
Javanrud	0.91	0.09	0.68	0.18	Good	0.74	0.65	1.61	0.42	Poor
Harsin	0.87	0.34	0.89	0.24	Medium	0.59	1.96	3.25	0.88	Poor
Tazeabad	0.88	0.03	0.77	0.20	Medium	0.74	0.20	1.37	0.36	Poor
Ravansar	0.91	0.10	0.68	0.18	Good	0.73	0.92	1.79	0.48	Poor
Average	0.90	0.20	0.78	0.19	Good	0.71	1.96	2.59	0.65	Poor

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد در روش هارگریوز سامانی ایستگاه سنقر دارای بیشترین R² به مقدار ۰/۹۴ و کمترین RMSE و NRMSE به مقدار ۰/۶۱ و ۰/۱۶ و ایستگاه هرسین دارای کمترین R² به مقدار ۰/۸۷ و بالاترین RMSE و NRMSE به مقدار ۰/۸۹ و ۰/۲۴ در بین ایستگاه‌های مختلف مورد بررسی استان کرمانشاه بود. در روش هارگریوز سامانی اصلاح شده ایستگاه اسلام آباد غرب دارای بیشترین R² به مقدار ۰/۷۷ و ایستگاه سومار کمترین RMSE و NRMSE به مقدار ۱/۴۱ و ۰/۳۱ و ایستگاه هرسین دارای کمترین R² به مقدار ۰/۵۹ و ایستگاه کنگاور بالاترین RMSE و NRMSE به مقدار ۳/۵۰ و ۰/۹۴ در بین ایستگاه‌های مختلف مورد بررسی استان کرمانشاه بود. با توجه به آماره‌ی NRMSE، روش هارگریوز سامانی در برآورد تبخیر تعرق مرجع ایستگاه‌های استان کرمانشاه دارای دقت خوب تا متوسط می‌باشد (NRMSE < ۳۰٪) اما روش هارگریوز سامانی اصلاح شده دارای دقت ضعیف می‌باشد (NRMSE > ۳۰٪). نتایج تحقیقات هژبر و همکاران (۱۳۹۳) در ارومیه نیز نشان داد روش هارگریوز سامانی نسبت روش هارگریوز سامانی اصلاح شده نتایج بهتری نشان می‌دهد که موافق نتایج پژوهش حاضر می‌باشد. میانگین آماره‌های R²،

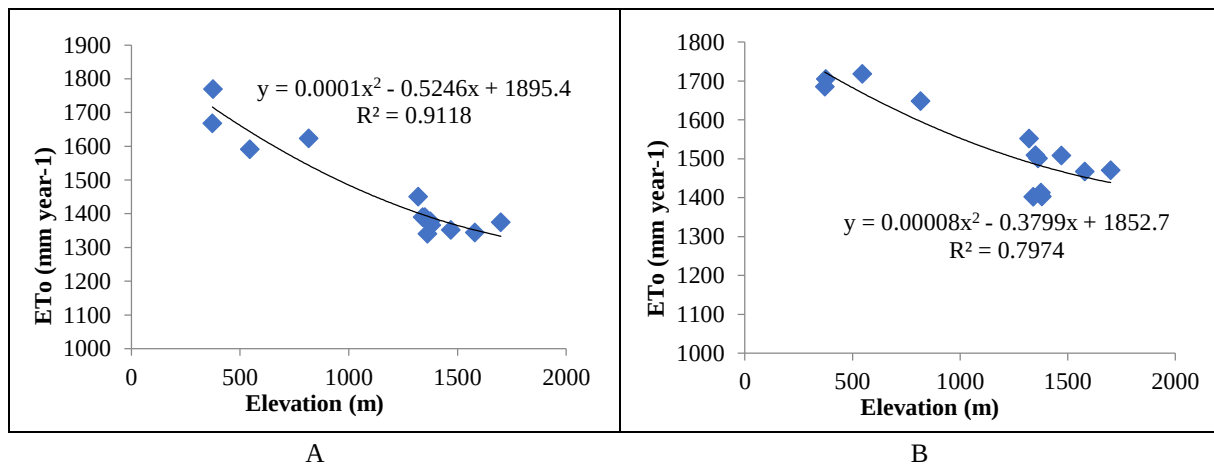
نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد در روش هارگریوز سامانی ایستگاه سنقر دارای بیشترین R² به مقدار ۰/۹۴ و کمترین RMSE و NRMSE به مقدار ۰/۶۱ و ۰/۱۶ و ایستگاه هرسین دارای کمترین R² به مقدار ۰/۸۷ و بالاترین RMSE و NRMSE به مقدار ۰/۸۹ و ۰/۲۴ در بین ایستگاه‌های مختلف مورد بررسی استان کرمانشاه بود. در روش هارگریوز سامانی اصلاح شده ایستگاه اسلام آباد غرب دارای بیشترین R² به مقدار ۰/۷۷ و ایستگاه سومار کمترین RMSE و NRMSE به مقدار ۱/۴۱ و ۰/۳۱ و ایستگاه هرسین دارای کمترین R² به مقدار ۰/۵۹ و ایستگاه کنگاور بالاترین RMSE و NRMSE به مقدار ۳/۵۰ و ۰/۹۴ در بین ایستگاه‌های مختلف مورد بررسی استان کرمانشاه بود. با توجه به آماره‌ی NRMSE، روش هارگریوز سامانی در برآورد تبخیر تعرق مرجع ایستگاه‌های استان کرمانشاه دارای دقت خوب تا متوسط می‌باشد (NRMSE < ۳۰٪) اما روش هارگریوز سامانی اصلاح شده دارای دقت ضعیف می‌باشد (NRMSE > ۳۰٪). نتایج تحقیقات هژبر و همکاران (۱۳۹۳) در ارومیه نیز نشان داد روش هارگریوز سامانی نسبت روش هارگریوز سامانی اصلاح شده نتایج بهتری نشان می‌دهد که موافق نتایج پژوهش حاضر می‌باشد. میانگین آماره‌های R²،

نقشه‌های پهنه‌بندی تبخیر تعرق مرجع

به منظور تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی تبخیر تعرق مرجع ابتدا رابطه‌ی نمایی بین پارامتر ارتفاع و تبخیر تعرق مرجع تعیین شد که نتایج آن در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج حاصل از شکل ۵ نشان می‌دهد که ضریب تشخیص (R²) رابطه‌ی بین میانگین سالانه تبخیر تعرق مرجع محاسبه شده با دو روش پنمن مونتیت فائو و هارگریوز سامانی به ترتیب ۰/۹۱ و ۰/۸ می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی همبستگی بالای تبخیر تعرق مرجع

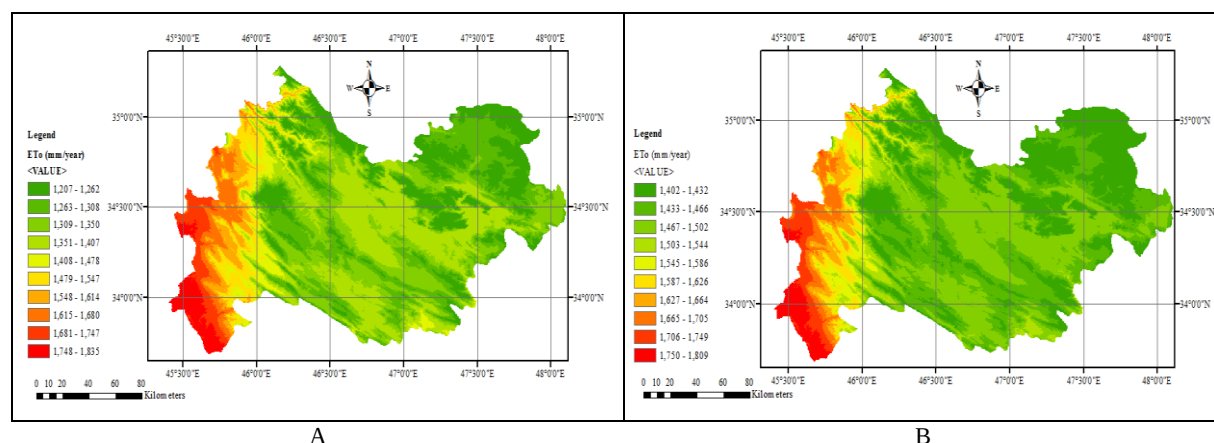
بیشترین و متوسط تبخیر تعرق مرجع سالانه با استفاده از روش هارگریوز سامانی نیز در استان کرمانشاه به ترتیب ۱۴۰۲، ۱۸۰۹ و ۱۴۹۳ میلی متر شد. همچنین نتایج نشان می دهد مناطق غرب و جنوب غربی استان شدت تبخیر تعرق مرجع بیشتری نسبت به مناطق دیگر استان دارند. این امر می تواند به علت میانگین سالانه ساعت آفتابی واقعی و دمای سالانه بیشتر و رطوبت نسبی سالانه کمتر این مناطق نسبت به سایر مناطق استان کرمانشاه، باشد (شکل ۲) که مجموع این عوامل در مناطق بیان شده باعث افزایش تبخیر تعرق مرجع شده اند.

با پارامتر ارتفاع می باشد. لذا در این مطالعه به منظور تهیه نقشه پهنه بندی تبخیر تعرق مرجع در استان کرمانشاه از روش برقراری ارتباط بین پارامتر میانگین سالانه تبخیر تعرق مرجع با ارتفاع استفاده شد. در شکل ۶ این نقشه پهنه بندی برای دو روش تعیین تبخیر تعرق مرجع که مورد تأیید این پژوهش در استان می باشد ارائه شده است. نتایج حاصل از پهنه بندی نشان داد که کمترین، بیشترین و متوسط تبخیر تعرق مرجع سالانه با استفاده از روش پنمن مونتیت فائو در استان کرمانشاه به ترتیب ۱۲۰۷، ۱۸۳۵ و ۱۳۷۵ میلی متر بود. کمترین،



شکل ۵- رابطه نمایی بین پارامتر ارتفاع و میانگین سالانه تبخیر تعرق مرجع محاسبه شده به روش، (A) پنمن مونتیت فائو، (B) هارگریوز سامانی.

Figure 5- The exponential relationship between the height parameter and average annual reference evapotranspiration calculated by the method, A) Penman Monteith-FAO, B) Hargreaves Samani.

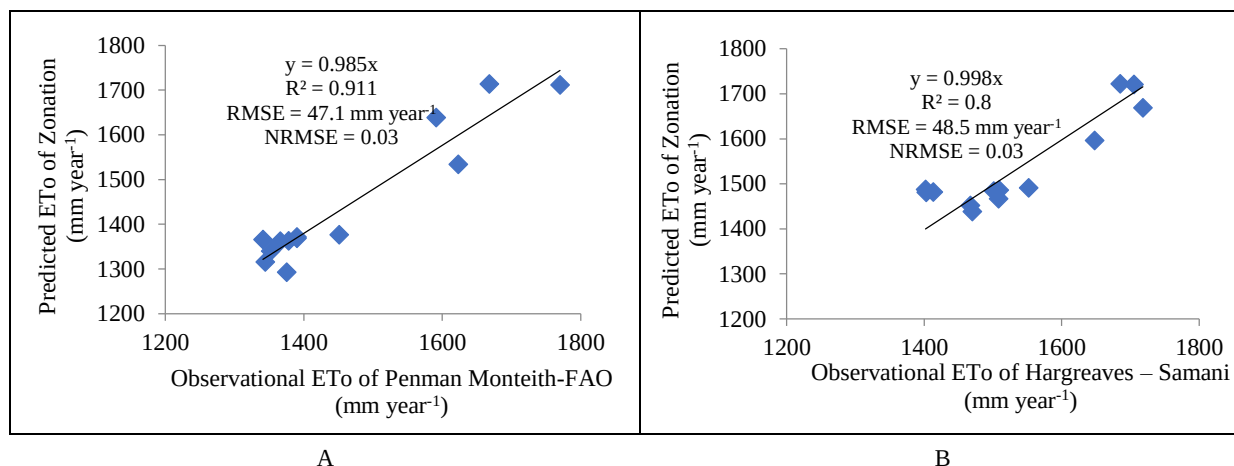


شکل ۶- نقشه پهنه بندی میانگین سالانه تبخیر تعرق مرجع محاسبه شده به روش (A) پنمن مونتیت فائو و (B) هارگریوز سامانی.

Figure 6- Zoning map of average annual reference evapotranspiration calculated by the method, A) Penman Monteith-FAO, B) Hargreaves Samani.

پهنه‌بندی تبخیر تعرق مرجع در روش پنمن مونتیث فائو به ترتیب $0/91$ ، $47/1 \text{ mm year}^{-1}$ و $0/03$ می‌باشد در حالی که مقادیر این آماره‌ها در روش هارگریوز سامانی به ترتیب $0/80$ ، $48/5 \text{ mm year}^{-1}$ و $0/03$ به دست آمد که این آماره‌ها نشان می‌دهند دقت روش پهنه‌بندی مورد استفاده برای هر دو روش تعیین تبخیر تعرق مرجع عالی ($\text{NRMSE} < 10\%$) می‌باشد.

در شکل ۷ مقادیر برآورد شده تبخیر تعرق مرجع سالانه توسط روش درون‌یابی مورد استفاده برای تهیه نقشه پهنه‌بندی و مقادیر واقعی محاسبه شده در هر یک از ایستگاه‌ها با استفاده از روش‌های پنمن مونتیث فائو و هارگریوز سامانی و همچنین خطای برآورد دو روش ارائه شده است. نتایج حاصل از شکل ۷ نشان می‌دهد مقدار آماره‌های R^2 ، RMSE و NRMSE برای



شکل ۷- مقایسه مقادیر برآورد شده تبخیر تعرق مرجع سالانه توسط روش درون‌یابی مورد استفاده در پهنه‌بندی و مقادیر واقعی محاسبه شده از روش‌های، (A پنمن مونتیث فائو و B هارگریوز سامانی).

Figure 7- Comparing the estimated values of annual reference evapotranspiration by the interpolation method used in zoning and the actual values calculated from the methods of A) Penman Monteith-FAO and B) Hargreaves Samani.

سرآرود بود. در ایستگاه قصرشیرین میانگین سالانه پارامترهای هواشناسی دمای هوا و سرعت باد بیشتر و رطوبت نسبی و ارتفاع از سطح دریای کمتری نسبت به سایر ایستگاه‌های استان داشت. در حالی که ایستگاه سرآرود دارای کمترین میانگین سالانه سرعت باد بود که کمتر بودن این پارامتر می‌تواند باعث کمتر شدن تبخیر تعرق مرجع سالانه در این ایستگاه باشد. براساس نتایج این مطالعه می‌توان اظهار داشت مهمترین پارامتر مؤثر در بیشتر بودن تبخیر تعرق مرجع در ایستگاه قصرشیرین دما و سرعت باد بالا نسبت به سایر ایستگاه‌های استان بود. برای تعیین تبخیر تعرق مرجع از روش پنمن مونتیث فائو احتیاج به داده‌های هواشناسی زیادی بود که معمولاً در همه ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری نمی‌شوند. بنابراین استفاده از روش‌هایی مثل روش هارگریوز سامانی و روش هارگریوز سامانی اصلاح شده که نیاز به اطلاعات هواشناسی بسیار کمتری دارند (شامل حداقل و حداکثر دمای هوا و تابش فرازمینی)، مورد توجه قرار گرفت. اما برای کاربرد

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تبخیر تعرق مرجع که برای تعیین نیاز آبی گیاهان مختلف به کار برده می‌شود از روش استاندارد پنمن مونتیث فائو منتج از سامانه نیاز آبی گیاهان کشور در استان کرمانشاه تعیین گردید. نتایج حاصل نشان داد تبخیر تعرق مرجع سالانه در مناطق غربی استان کرمانشاه شامل قصرشیرین، سومار، سرپل ذهاب و گیلانغرب نسبت به سایر مناطق استان بیشتر بود. این مناطق از لحاظ ارتفاعی با دامنه ۳۷۲ تا ۸۱۶ متر جزء مناطق پست استان می‌باشند. به همین دلیل میانگین سالانه دمای هوا در این مناطق بیشتر از سایر مناطق استان بود. از دیگر عوامل مؤثر بر بالا بودن تبخیر تعرق مرجع سالانه در این مناطق می‌توان به سرعت بالای باد در قصرشیرین و گیلانغرب نسبت به سایر مناطق استان اشاره کرد. همچنین بیشترین و کمترین تبخیر تعرق مرجع سالانه در بین ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی به ترتیب به مقدار ۱۷۷۰ و ۱۳۴۱ میلی‌متر در سال متعلق به ایستگاه‌های قصرشیرین و

تبریز، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان و دانشگاه علمی کاربردی شهرداری تبریز، ۲۰ اردیبهشت ۱۳۹۷، تبریز. حقی زاده، ع.، بیات، و.، ارشیا، آ.، ۱۳۹۸. برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل ایستگاه‌های سینوپتیک کرمانشاه با استفاده از مدل برنامه‌نویس ژنتیکی. فضای جغرافیایی، ۱۹ (۶۷): ۴۲-۲۹.

حیدری، ن.، ۱۳۹۳. ارزیابی شاخص بهره‌وری آب کشاورزی و عملکرد سیاست‌ها و برنامه‌های مدیریت آب کشور در این زمینه. مجلس و راهبرد، ۲۱ (۷۸): ۱۷۷-۱۹۹.

دهقان، ه.، علیزاده، ا.، ۱۳۹۱. ارزیابی و واسنجی روش‌های مختلف برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع در شرایط محدودیت داده‌های اقلیمی (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی). آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۶ (۱): ۲۳۶-۲۵۰.

دین‌پژوه، ی.، فروغی، م.، ۱۳۹۷. اثر تغییر اقلیم بر تغییرات جهشی تبخیر- تعرق پتانسیل (مطالعه موردی: شمال غرب ایران). آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۲ (۳): ۶۱۷-۶۳۲.

رئوف، م.، عزیزی‌مبصر، ج.، ۱۳۹۶. ارزیابی هجده مدل تبخیر تعرق مرجع در شرایط آب و هوایی دشت اردبیل. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۴ (۶): ۲۲۷-۲۴۱.

زارع ابیانه، ح.، سقائی، ص.، ارشاد فتح، ف.، نوذری، ح.، ۱۳۹۳. مدلسازی و پیش بینی تبخیر تعرق گیاه مرجع با سری زمانی (مطالعه موردی: استان کرمانشاه). هواشناسی کشاورزی، ۱۲ (۱): ۴۵-۵۶.

سامانه نیاز آبی گیاهان کشور، ۱۴۰۱. موسسه تحقیقات خاک و آب. <http://niwr.ir/Login.aspx>

شرقی، ط.، بری ابرقویی، ح.، اسدی، م.ا.، کوثری، م.، ۱۳۸۹. برآورد تبخیر تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش فائو-پنمن-مانتیت و پهنه‌بندی آن در استان یزد. خشک بوم، ۱۱ (۱): ۲۵-۳۳.

شماعی، ع.، رحمتی تپه رشت، ح.، حاجی تاش نالوس، ش.، کرده، ن.، ۱۳۹۴. تحلیل فضایی نظام شبکه شهری استان کرمانشاه (سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۰). آمایش محیط، ۳۱ (۳): ۵۵-۷۶.

این دو روش در مناطق مختلف می‌بایست دقت آن‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گرفت. لذا در این پژوهش ارزیابی روش‌های هارگریوز سامانی و هارگریوز سامانی اصلاح شده در برآورد تبخیر تعرق مرجع در ایستگاه‌های استان کرمانشاه نشان داد کارایی روش هارگریوز سامانی نسبت به روش هارگریوز سامانی اصلاح شده بهتر بود و دارای دقت خوب تا متوسط می‌باشد. بنابراین کاربرد این روش در شرایط نبود کامل اطلاعات هواشناسی جهت محاسبه تبخیر تعرق مرجع با استفاده از روش پنمن-مانتیت فائو در این استان قابل توصیه است.

منابع

احمدی، م.، رضانی اعتدالی، ه.، ۱۴۰۱. کاربردپذیری پایگاه بارشی GLDAS در برآورد ردپای آب سبز و آبی گندم و ذرت در دشت قزوین با استفاده از مدل Aqua Crop. هیدروژئولوژی، ۷ (۲): ۳۰-۴۲.

اخوان، س.، موسی‌بیگی، ف.، هاشمی گرمدره، س.ا.، ۱۳۹۷. برآورد تبخیر تعرق گیاه مرجع تحت سناریوهای کمبود داده (مطالعه موردی: استان کرمانشاه). مهندسی آبیاری و آب ایران، ۹ (۱): ۱۸۳-۱۹۷.

باب الحکمی، ع.، غلامی سفیدکوهی، م.ع.، عمادی، ع.ر.، ۱۳۹۹. اثر تغییر اقلیم بر تبخیر تعرق مرجع در استان مازندران. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱ (۲): ۳۸۷-۴۰۱. باعقیده، م.، انتظاری، ع.، بابایی، ی.، عباس‌نیا، م.، ۱۳۹۲. شناسایی نواحی بهینه آب و هوایی برای احیای جنگل‌های بلوط (مطالعه‌ی موردی: استان کرمانشاه). جغرافیا و پایداری محیط، ۳ (۱): ۱۲۱-۱۴۲.

بختیاری، ب.، محبی دهقانی، ع.، قادری، ک.، ۱۳۹۴. برآورد تبخیر تعرق مرجع روزانه با حداقل داده‌های هواشناسی در اقلیم‌های نیمه‌خشک منتخب ایران. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۱ (۳): ۱۳۱-۱۴۴.

چکاو، ص.، داوری، ک.، قهرمان، ب.، ۱۳۹۷. تحلیل و بررسی روند زمانی تبخیر تعرق گیاه مرجع و پارامترهای مؤثر بر آن در چند ناحیه اقلیمی در ایران. کنفرانس عمران، معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام، دانشگاه

- عزیزی زهان، ع.، ۱۳۹۵. بررسی اثر سطوح پتانسیم بر افزایش تحمل به خشکی و کارایی مصرف آب ارقام کلزا در شرایط گلخانه‌ای. گزارش نهایی سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، کرج، ۲۳ ص.
- عیسی‌زاده، م.، فاخری‌فرد، ا.، دربندی، ص.، ۱۴۰۱. توسعه شهرک‌های گلخانه‌ای و تاثیر آن بر تراز آب زیرزمینی آبخوان‌های حوضه آبریز آجی‌چای با استفاده از مدل SWAT. هیدروژئولوژی، ۷(۲): ۱۵-۲۹.
- فولادمند، ح.ر.، ۱۳۸۹. پیش‌بینی ماهانه تبخیر تعرق پتانسیل گیاه مرجع در استان فارس. دانش آب و خاک، ۲۰(۴): ۱۵۷-۱۶۹.
- کریمی، م.، شاه‌زیدی، س.، جعفری، ا.، ۱۳۹۸. بررسی تأثیر توپوگرافی بر دفاع سرزمینی مطالعه موردی: محور استراتژیک قصرشیرین-کرمانشاه. اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، ۲۸(۱۰۹): ۲۳۹-۲۵۷.
- محمدجانی، ا.، یزدانیان، ن.، ۱۳۹۳. تحلیل وضعیت بحران آب در کشور و الزامات مدیریت آن. روند، ۲۱(۶۶): ۱۱۷-۱۴۴.
- مدیری، ا.، ۱۳۹۷. برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET₀) در ایستگاه‌های سینوپتیک استان تهران. انسان و محیط زیست، ۱۶(۳): ۱۲۵-۱۳۴.
- مرکز آمار ایران، ۱۳۹۹. سال‌نامه آماری کشور ۱۳۹۷. دفتر ریاست، روابط عمومی و همکاری‌های بین‌الملل، تهران، ۹۳۰ ص.
- مظاهری، م.، عبدالمنافی، ن.، ۱۳۹۶. بررسی بحران آب و پیامدهای آن در کشور. مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، دفتر مطالعات زیربنایی (گروه آب و محیط زیست)، تهران، ۳۰ ص.
- موسوی بایگی، م.، عرفانیان، م.، سرمد، م.، ۱۳۸۸. استفاده از حداقل داده‌های هواشناسی برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع و ارائه ضرایب اصلاحی (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی). آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۳(۱): ۹۱-۹۹.
- میرموسوی، س.ح.، پناهی، ح.، اکبری، ح.، اکبرزاده، ی.، ۱۳۹۱. واسنجی روش‌های برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع (ET₀) و محاسبه‌ی نیاز آبی گیاه (ET_c) زیتون در استان کرمانشاه. جغرافیا و پایداری محیط، ۲(۲): ۴۵-۶۴.
- نادریان‌فر، ا.، دلبری، م.، افراسیاب، پ.، کهمقدم، پ.، ۱۳۹۹. مقایسه فرایندهای مختلف پهنه‌بندی تبخیر تعرق مرجع در ایران. علوم و مهندسی آبیاری، ۴۳(۳): ۳۱-۱۷.
- وزیری، ژ.، ۱۳۷۴. تعیین تبخیر تعرق گیاه مبنا (چمن) و مقایسه آن با فرمول‌های تجربی. گزارش پژوهشی بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات کشاورزی کرمانشاه، کرمانشاه، ۸۵ ص.
- وزیری، ژ.، ۱۳۷۶. تعیین تبخیر تعرق پتانسیل گیاه مرجع (چمن) و مقایسه آن با فرمول‌های تجربی. گزارش پژوهشی بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات کشاورزی کرمانشاه، کرمانشاه، ۱۲۱ ص.
- هژبر، ح.، معاضد، ه.، شکری کوچک، س.، ۱۳۹۳. برآورد تبخیر تعرق مرجع با استفاده از مدل‌های تجربی، مدل‌سازی آن با شبکه عصبی مصنوعی و مقایسه آن‌ها با داده‌های لایسمتری در ایستگاه کهریز ارومیه. مهندسی آبیاری و آب، ۴(۳): ۱۳-۲۵.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements., FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy, 300 p.
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. Applied Engineering in Agriculture, 1(2): 96-99.
- Hunasigi, P., Jedhe, S., Mane, M., Patil-Shinde, V., 2023. Multilayer perceptron neural network based models for prediction of the rainfall and reference crop evapotranspiration for sub-humid climate of Dapoli, Ratnagiri District, India. Acta Ecologica Sinica, 43(1): 154-201.
- Ghamarnia, H., Mousabeygi, F., Amiri, S., Amirkhani, D., 2015. Evaluation of a Few Evapotranspiration Models Using Lysimetric Measurements in a Semi-Arid Climate Region. International Journal of Plant & Soil Science 5(2): 100-109.

- Trajkovic, S., Kolakovic, S., 2009. Evaluation of Reference Evapotranspiration Equations Under Humid Conditions. *Water Resources Management*, 23(14): 3057–3067.
- Tunalı, U., Tüzel, I.H., Tüzel, Y., Şenol, Y., 2023. Estimation of actual crop evapotranspiration using artificial neural networks in tomato grown in closed soilless culture system. *Agricultural Water Management*, 284: 108331.
- Zhang, D., Liu, X., Hong, H., 2013. Assessing the effect of climate change on reference evapotranspiration in China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 27(8): 1871–81.
- Zhao, W., Liu, B., Zhang, Z., 2010. Water requirements of maize in the middle Heihe River basin, China. *Agricultural Water Management*, 97(2): 215–223.
- Jhajharia, D., Dinpashoh, Y., Kahya, E., Singh, V.P., Fakheri-Fard, A., 2012. Trends in reference evapotranspiration in the humid region of northeast India. *Hydrological Processes*, 26(3): 421–35.
- Jiang, C., Nie, Z., Mu, X., Wang, F., Liu, W., 2016. Potential evapotranspiration change and its attribution in the Qinling Mountains and surrounding area, China, during 1960–2012. *Journal of Water and Climate Change*, 7(3): 526–41.
- Li, Q., Wei, X., Zhang, M., Liu, W., Giles-Hansen, K., Wang, Y., 2018. The cumulative effects of forest disturbance and climate variability on streamflow components in a large forest-dominated watershed. *Journal of Hydrology*, 557: 448–59.
- López-Urrea, R., Martín de Santa Olalla, F., Fabeiro, C., Moratalla, A., 2006. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*, 85(1-2): 15–26.
- Mandal, N., Chanda, K., 2023. Performance of machine learning algorithms for multi-step ahead prediction of reference evapotranspiration across various agro-climatic zones and cropping seasons. *Journal of Hydrology*, 620: 129418.
- R Development Core Team, 2008. R: A language and environment for statistical computing, reference index version 2.7.0. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Raoof, M., Fujimaki, H., 2020. Evaluation of evapotranspiration models for model validation in a humid climate in Japan using Faba bean plant. *Mitteilungen Klosterneuburg*, 70(2): 68-80.
- Samani, Z., 2000. Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(4): 265–67.
- Sumner, D.M., Jacobs, J.M., 2005. Utility of Penman–Monteith, Priestley–Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 308 (1-4): 81–104.
- Tabari, H., Grismer, M.E., Trajkovic, S., 2013. Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. *Irrigation Science*, 31(2): 107–117.
- Trajkovic, S., 2007. Hargreaves versus Penman–Monteith under Humid Conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(1): 38–42.