

انتخاب مناسب‌ترین روش برآورد تبخیر و تعرق مرجع و پهنه‌بندی آن در استان اصفهان

عاطفه مهدوی^{۱*} و حمید زارع ایبانه^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۶/۱۹

چکیده

تبخیر و تعرق پتانسیل یکی از عوامل مهم سیکل هیدرولوژیکی است که باید در طرح‌های آبیاری، تأسیسات آبی، مطالعات زهکشی و هیدرولوژیکی برآورد شود. این عامل بیانگر میزان تلفات بالقوه از سطح خاک مرطوب و پوشش گیاهی بوده و از این رو محاسبه و برآورد آن حائز اهمیت می‌باشد. از سوی دیگر یکی از راه‌های تخمین این پارامتر در نقاط فاقد ایستگاه، استفاده از روش‌های میان‌یابی است که اگر به درستی انتخاب شوند، بر دقت و صحت این پارامتر می‌افزاید. در این تحقیق به منظور تعیین مناسب‌ترین روش تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع چمن در استان اصفهان، ۱۲ روش موجود در نرم‌افزار Ref-ET با دو سری داده لایسیمیتری بر اساس معیارهای RMSE، MBE و r مقایسه شدند. نتایج نشان داد که روش‌های پنمن ۱۹۴۸ و کیمرلی- پنمن ۱۹۹۶ مناسب‌ترین معادلات بودند. سپس ۱۰ ایستگاه سینوپتیک در منطقه مورد مطالعه انتخاب شدند و مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل در هر ایستگاه در یک دوره آماری ۱۴ ساله (۱۹۹۲-۲۰۰۵) با استفاده از روش پنمن ۱۹۴۸ محاسبه شد. به منظور انتخاب بهترین روش میان‌یابی، ۸ روش موجود در نرم‌افزار Surfure8.02 انتخاب و به روش اعتبارسنجی متقابل مقدار RMSE هر روش محاسبه گشت و مشخص شد که مدل‌های انحنای کمینه، رگرسیون چند جمله‌ای و کریجینگ کروی مناسب‌ترین روش‌های میان‌یابی در منطقه مورد مطالعه می‌باشند. در نهایت نقشه‌های پهنه‌بندی تبخیر و تعرق پتانسیل بر اساس روش پنمن ۱۹۴۸ و مدل انحنای کمینه، در استان اصفهان ترسیم شدند.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق پتانسیل، لایسیمتر، میان‌یابی، اعتبارسنجی متقابل

مقدمه

در زنجیره آب- خاک- گیاه- تمسفر^۵ (SWAP) آب مستقیماً از سطح خاک و یا توسط گیاه به داخل اتمسفر وارد می‌شود. انتقال آب از سطح خاک به هوا را تبخیر^۶ (E) و خارج شدن آن از گیاه را تعرق^۷ (T) گویند. این دو پدیده هر دو ماهیت تبخیری داشته و چون تفکیک آنها از یکدیگر امکان پذیر نمی‌باشد، مجموعاً به نام تبخیر و تعرق در نظر گرفته می‌شود. تبخیر و تعرق بستگی کامل به چگونگی شرایط آب و هوایی محیط (نظیر رطوبت نسبی، دما، شار گرمایی خاک و میزان باد) و چگونگی وضعیت ساختمان داخلی سیستم خاک و گیاه دارد. بنابراین باید سرعت تبخیر و تعرق را برای یک گیاه خاص و تحت رطوبت معین و شرایط آب و هوایی مشخص به دست آورد. مفهوم تبخیر و تعرق پتانسیل یک استاندارد مفید و قابل استفاده به عنوان مرجع برای مقایسه در اقلیم‌های با آب و هوای متفاوت، فصول متفاوت و یا در گیاهان گوناگون، اما با شرایط آب و هوایی مشخص می‌باشد. تبخیر و تعرق گیاه مرجع برای یک گیاه مشخص مانند یونجه و چمن به کار می‌رود (علیزاده، ۱۳۸۳). اثر متقابل فاکتورهای کلیماتولوژی از قبیل دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، تشعشع، نوع و مرحله رشد گیاه و

کشور ایران با متوسط بارندگی در حدود ۲۵۲ میلی‌متر جزو کشورهای خشک و نیمه‌خشک دنیا می‌باشد. بخش عمده مصرف آب یعنی بیش از ۹۴ درصد، در زمینه کشاورزی بوده و برای آبیاری درختان میوه و محصولات زراعی به کار می‌رود. لذا برای اینکه بتوان در آینده با مشکل کم‌آبی مبارزه نمود، باید آب مورد نیاز بخش کشاورزی با راندمان بالا مصرف گردد (هاشمی و همکاران، ۱۳۸۵). بدون شک موضوع آب و آبیاری به عنوان اصلی‌ترین مسئله در بخش کشاورزی ایران و بسیاری از نقاط خشک و نیمه‌خشک جهان مطرح است (رحیم‌زادگان، ۱۳۷۰). برای بهره‌برداری بهینه از منابع آب، طراحی و مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی و برنامه‌ریزی آبیاری، تعیین نیاز آبی گیاهان^۳ (CWR) و برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل^۴ (ETp) ضروری است (Lo'pez-Urrea et al., 2006).

۱- دانشجوی دکتری، آبیاری و زهکشی، دانشگاه بوعلی سینا

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا

(*- نویسنده مسئول: (Email: a_mahdavi83@yahoo.com)

3 -Crops Water Requirement

4 -Potential Evapotranspiration

5 -Soil-Water-Atmosphere-Plant

6 -Evaporation

7 -Transpiration

آزمایشات خود را در منطقه‌ای با آب و هوای نیمه‌خشک در اسپانیا و در دو دوره با تبخیر و تعرق کم و با تبخیر و تعرق زیاد در طول سال انجام دادند. در نهایت بیان کردند که روش پنمن - مانتیث - فائو ۵۶ دقیق‌ترین روش برای آب و هوای نیمه‌خشک است. بنلی و همکاران برای تعیین تبخیر و تعرق گیاه مرجع بونجه در ترکیه به مقایسه نتایج به‌دست آمده از لایسیمتر با تبخیر و تعرق محاسبه شده از رابطه‌های پنمن - مانتیث، پنمن - فائو، ماکینگ، تشت تبخیر و هارگریوز پرداختند (Benli et al., 2006). ایشان نشان دادند که رابطه‌های پنمن و ماکینگ بهترین تطبیق را با داده‌های لایسیمتر داشت. عابدی و همکاران (۱۳۸۷) مقدار ET_0 را برای گیاه چمن در سه میکرو لایسیمتر اندازه‌گیری و سپس با مقادیر ET_0 محاسباتی از روش‌های فائو - پنمن - مانتیث، ترک، هارگریوز و تشت تبخیر مقایسه گردید. نتایج حاکی از آن بود که معادله فائو - پنمن - مانتیث از دقت بیشتری و روش تشت تبخیر از دقت کمتری نسبت به سایر معادلات در تخمین تبخیر و تعرق روزانه برخوردار بود. از لحاظ رتبه‌بندی معادله ترک در رتبه دوم و معادله هارگریوز در رتبه سوم قرار گرفت. شاهدی و زارعی (۱۳۹۰) دقت روش‌های مختلف تجربی (بلانی - کریدل، تورنت وایت، پنمن و هارگریوز - سامانی) را بر اساس روش ترکیبی فائو - پنمن - مانتیث به عنوان مرجع و برای منطقه مازندران، بررسی و ارزیابی نمودند. نتایج آنها نشان داد که روش بلانی - کریدل با کمترین میزان خطای استاندارد و بیشترین میزان همبستگی با روش فائو - پنمن - مانتیث، از دقت بیشتری در برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل استان مازندران برخوردار بود.

عدم تراکم لازم در اندازه‌گیری‌های لایسیمتری، می‌تواند منجر به فقدان اطلاعات کافی شود و از طرف دیگر داشتن تراکم زیاد شبکه لایسیمتری، موجب افزایش وقت و هزینه‌های اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین می‌توان اندازه‌گیری‌های تبخیر و تعرق را با استفاده از روش‌های زمین‌آمار، بسط و توسعه داد، تا جایی که بتوان با به‌کارگیری شبکه موجود، به اندازه زیادی از میزان وقت و هزینه ایجاد شبکه‌های لایسیمتری کاست (زارع ایبانه و همکاران، ۱۳۸۹). به علت نبود امکانات جهت جمع‌آوری داده‌های هواشناسی در هر نقطه دلخواه، بهتر است از روش‌های درون‌یابی برای تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده کرد.

در تعیین ارزش یک نقطه تمامی نقاط مجاور و معلوم به‌طور یکسان و همسان مؤثر نیستند. بدین دلیل هر یک از نقاط مزبور به تناسب تاثیرشان بر ارزش نقطه مجهول، حامل وزنی خواهد بود که روش تعیین وزن، موجب تکوین روش‌های مختلفی در میان‌یابی شده است. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که روش مناسب برای میان‌یابی و برآورد یک متغیر، به نوع متغیر و عوامل منطقه‌ای تاثیرگذار بر آن، بستگی دارد و نمی‌توان روش منتخب در یک منطقه را به سایر مناطق تعمیم داد. (طباطبائی و غزالی، ۱۳۹۰). اما تشخیص

عوامل دیگر سبب شده است تا تبخیر و تعرق به صورت پدیده‌های غیرخطی و پیچیده بیان شود (شهابی‌فر، ۱۳۸۲). معادلات مختلفی برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع پیشنهاد شده است و هر کدام، از داده‌های اقلیمی متفاوت استفاده می‌کنند. به‌همین دلیل، مقادیر محاسبه شده از معادلات مختلف هماهنگ نیستند (رحیم‌زادگان، ۱۳۷۰). اغلب این روش‌ها تحت واسنجی محلی به‌دست آمده‌اند و معلوم شده که اعتبار جهانی محدودی دارند (شاهدی و زارعی، ۱۳۹۰). پس واسنجی مدل‌های تبخیر و تعرق مرجع امری ضروری و حیاتی به شمار می‌آید. یکی از روش‌های مستقیم تعیین نیاز آبی گیاهان استفاده از جعبه‌های کشت یا لایسیمتر^۱ است که دقیق‌ترین روش، جهت ارزیابی روش‌های مختلف و تعیین مناسب‌ترین روش برآورد تبخیر و تعرق در هر منطقه می‌باشد. موسوی و کریمی (۱۳۶۸) برای برآورد تبخیر و تعرق بالقوه در دشت اصفهان و همچنین تعیین بهترین روش تبخیر از آمار ایستگاه کلیماتولوژی دانشگاه صنعتی اصفهان و با به‌کارگیری نتایج آزمایش‌های پوتومتري، به‌ترتیب روش‌های ترک، بلانی - کریدل اصلاح شده، کریستین سن، هارگریوز، کریستین سن - هارگریوز، و تبخیر از تشت تبخیر با ضریب تشت را برای این منطقه پیشنهاد کردند. در این تحقیق ضریب تشت تبخیر بین ۰/۳۸ و ۱/۰۲ به دست آمد. رحیم‌زادگان (۱۳۷۰) به منظور یافتن مناسب‌ترین روش محاسبه تبخیر و تعرق در منطقه اصفهان از لایسیمتر زهکش‌دار و گیاه چمن استفاده نمود. هم‌زمان با این آزمایش، پارامترهای اقلیمی نیز در ایستگاه کلیماتولوژی دانشگاه صنعتی اصفهان اندازه‌گیری شد و تبخیر و تعرق پتانسیل برای گیاه مرجع با استفاده از روش مختلف محاسبه گردید. مقایسه نتایج نشان داد که به‌ترتیب روش‌های جنسن - هیز، کریستین سن - هارگریوز، بلانی - کریدل اصلاح شده، پنمن و ترک نسبت به روش‌های دیگر تخمین مناسب‌تری از تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع ارائه دادند. پناهی (۱۳۷۸) جهت بررسی تبخیر و تعرق پتانسیل در منطقه اصفهان چهار روش بلانی - کریدل اصلاح شده، پنمن اصلاح شده، پنمن - مانتیث و تشت تبخیر با ضریب ارایه شده توسط کانکا را به کمک آمار هواشناسی مورد مقایسه قرار داد و سپس نتایج، با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر مورد مقایسه قرار گرفت. بر اساس ارزیابی به‌عمل آمده برای منطقه، روش تشت تبخیر با ضریب کانکا در اولویت اول و روش‌های بلانی - کریدل، پنمن اصلاح شده و پنمن - مانتیث در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند.

لوپز - اورا و همکاران نتایج شش روش محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل شامل پنمن، پنمن - فائو ۲۴، پنمن - مانتیث - فائو ۵۶، بلانی - کریدل - فائو ۲۴، تشعشی فائو ۲۴ و هارگریوز را با داده‌های لایسیمتری مقایسه کردند (Lo'pez-Urrea et al., 2006). آنها

مقیاسه روش‌های درون‌یابی وزن‌دهی عکس فاصله^۲ (IDW)، اسپالین^۳، کریجینگ و کوکریجینگ در برآورد منطقه‌ای تبخیر و تعرق مرجع در استان خوزستان به این نتیجه رسید که روش کریجینگ بهترین روش درون‌یابی داده‌های تبخیر و تعرق در مقیاس ماهانه و سالانه است. ها و همکاران مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع را در دشت‌های مرتفع تگزاس بر اساس روش پنمن - مانتیت - ASCE استاندارد شده محاسبه کردند. سپس میان‌یابی مقادیر به دست آمده را با دو روش IDW و کریجینگ معمولی انجام دادند. نتایج نشان داد که روش IDW کمی بهتر از روش کریجینگ عمل کرد ولی هر دو روش در فصل تابستان که نیاز به دقت فراوان در برآورد ET دارد، ضعیف عمل کردند (Ha et al. 2011).

هدف اولی که در این تحقیق دنبال می‌شود انتخاب مناسب‌ترین روش محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع برای استان اصفهان بر اساس داده‌های مشاهده‌ای لایسیمتری و معرفی آن برای مناطق دیگر ایران با اقلیم مشابه می‌باشد. همچنین در ادامه به بررسی کارایی روش‌های مختلف میان‌یابی برای تبخیر و تعرق گیاه مرجع در استان اصفهان پرداخته می‌شود و نهایتاً مدلی مناسب برای پهنه‌بندی این پارامتر در منطقه مورد نظر پیشنهاد می‌گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق استان اصفهان می‌باشد که با وجود همسایگی با کویر، از استان‌های مستعد کشاورزی محسوب می‌شود، به طوری که در بعضی از نقاط آن مانند منطقه لنجان حتی برنج هم کشت می‌شود. این استان به علت جاری بودن رودخانه زاینده‌رود، آب و هوایی ملایم‌تر از مناطق کویری دارد. این استان با وسعتی حدود ۱۰۷۰۲۷ کیلومتر مربع در مرکز ایران و بین ۳۰° تا ۳۴° عرض شمالی و ۴۹° تا ۵۵° طول شرقی واقع شده است. میانگین درجه حرارت سالانه در شهر اصفهان ۱۶°C و متوسط بارش سالانه از ۶۸ میلی‌متر در شهر خور تا ۳۱۹ میلی‌متر در شهر داران متفاوت می‌باشد (میراباشی و همکاران، ۱۳۸۸). موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نمایش داده شده است.

داده‌های مورد استفاده

در ابتدا دو سری زمانی داده لایسیمتری مربوط به گیاه مرجع چمن، در دو نقطه کبوترآباد مربوط به سال ۲۰۰۰ میلادی و دانشگاه صنعتی اصفهان مربوط به سال ۱۹۸۹ میلادی، جمع‌آوری شد. داده‌ها حاصل اندازه‌گیری‌های روزانه از سه دستگاه لایسیمتر زهکش‌دار به

و استفاده صحیح از روش‌های مختلف درون‌یابی یا به تجربه کارشناس بستگی دارد و یا باید برای تعیین بهترین شیوه در حوضه مورد نظر، تحقیقات کاملی صورت گیرد (نکوآمال و همکاران، ۱۳۸۸). مطالعات زیادی در به‌کارگیری روش‌های مختلف، برای تخمین توزیع مکانی پارامترهای اقلیمی از جمله تبخیر و تعرق، صورت گرفته است، که همگی در جهت تأیید توانایی و دقت آنها بوده‌اند. حشمی و همکاران از داده‌های شش ایستگاه هواشناسی در یکی از دشت‌های کلرادو به منظور تخمین تبخیر و تعرق منطقه‌ای استفاده کردند. در این بررسی روش بلانی - کریدل اصلاح شده فائو برای محاسبه تبخیر و تعرق و روش معکوس مربع فاصله برای میان‌یابی استفاده شد (Hashemi et al., 1994). چین و زائو به منظور تخمین تبخیر منطقه‌ای در فلوریدا از داده‌های شبکه تبخیرسنجی و روش‌های زمین‌آماری استفاده کردند (Chin and Zhao, 1995). تخمین‌گرهای کریجینگ عادی و کریجینگ عام برای محاسبات مربوط به دو ماه جولای (معرف ماه خشک) و ژانویه (معرف ماه مرطوب) انجام و نقشه‌های هم‌واریانس ترسیم و تخمین‌گر کریجینگ عام برای منطقه مناسب‌تر شناخته شد. شهابی‌فر (۱۳۸۲) جهت تعیین نقشه‌های توزیع مکانی تبخیر و تعرق مرجع، در سطح استان تهران، با استفاده از داده‌های هواشناسی در داخل و مجاور، تبخیر و تعرق مرجع ماهیانه را به سه روش پنمن - مانتیت، هارگریوز - سامانی و تشت تبخیر محاسبه نمود و جهت میان‌یابی از دو روش کریجینگ و کوکریجینگ استفاده نمود. پیشگویی‌های حاصل از دو روش بر اساس معیار RMSE به روش اعتبارسنجی متقابل^۱ (CV) ارزیابی شد. در نهایت تبخیر و تعرق مرجع منطقه‌ای به روش هارگریوز - سامانی و تخمین‌گر زمین‌آماری کریجینگ در اولویت قرار گرفت و نقشه‌های آماری تبخیر و تعرق مرجع ترسیم شد. نوشادی و سپاسخواه (۲۰۰۵) در پژوهشی برای تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل چهار استان بوشهر، فارس، هرمزگان و کهگیلویه و بویراحمد با استفاده از روش هارگریوز سامانی، از روش‌های زمین‌آمار کریجینگ معمولی، کریجینگ باقیمانده و کوکریجینگ استفاده نمودند. ایشان نتیجه گرفتند که روش کوکریجینگ برای تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه و ماهانه به استثنای ماه‌های فروردین، اردیبهشت و شهریور مناسب است. ماردیکیس و همکاران از چهار روش مختلف درون‌یابی شامل کریجینگ معمولی و اصلاح شده، معکوس مجذور فاصله معمولی و اصلاح شده، برای پهنه‌بندی تبخیر و تعرق گیاه مرجع مناطق مختلف یونان استفاده کردند (Mardikis et al., 2005). نتایج این مطالعه نشان از آن داشت که منظور نمودن پارامتر ارتفاع در افزایش دقت پهنه‌بندی هر یک از روش‌ها نقش اساسی دارد. جامعی (۱۳۸۷) با

2 -Inverse Distance Weighted
3 -Spline

1 -Cross Validation

محاسباتی شامل پنمن-مانتیث-سازمان عمران امریکا (ASCEPM)، پنمن-مانتیث-فائو ۵۶ (FAO56PM)، کیمبرلی-پنمن ۱۹۹۶ (KP1996)، پنمن ۱۹۴۸ (Pen1948)، پنمن-فائو ۲۴ (FAO24Pen)، پنمن-فائو ۱۷ (FAO17Pen) در قالب روش‌های ترکیبی است.

همچنین دو روش هارگریوز-سامانی ۱۹۸۵ (HgS1985)، و بلانی-کریدل-فائو ۲۴ (FAO24BC)، به‌عنوان روش‌های دما مبنا به‌کار گرفته شد. از روش‌های ترکیبی تشعشی-دمایی نیز روش پرستلی-تیلور ۱۹۷۲ (Prs-Tylr)، مکینگ ۱۹۵۷ (Makk1957) و ترک ۱۹۶۱ (Turc1961) همچنین روش تشعشی فائو ۲۴ (FAO24Rd) به‌عنوان روش تشعشی، استفاده شد. توضیحات مربوط به هر روش در منبع (REF-ET for Windows ver. 2.0, 2000) به تفصیل ذکر شده است.

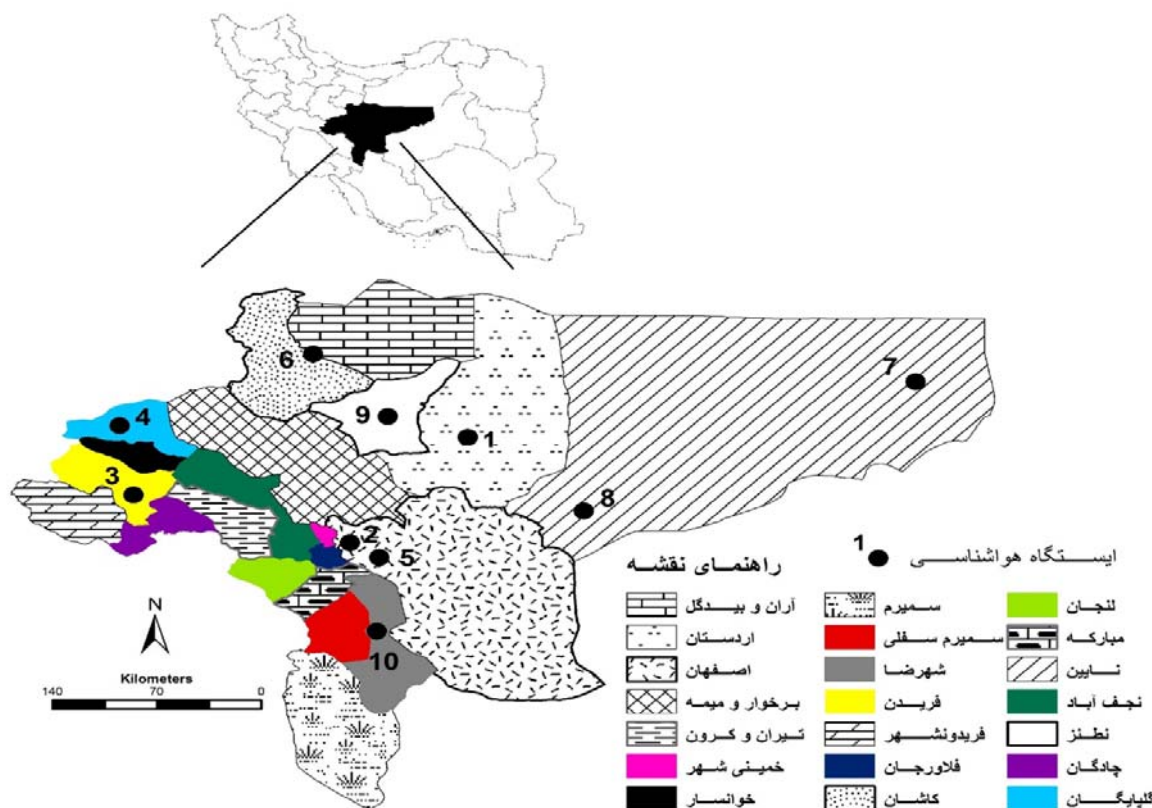
ابعاد $۱/۵ \times ۱/۵ \times ۱/۲$ متر در منطقه دانشگاه صنعتی اصفهان و $۱ \times ۲ \times ۱$ متر در منطقه کبوترآباد بودند. مقادیر تبخیر و تعرق بر اساس معادله بیلان آب (رابطه ۱) در هر لایسیمتر، به دست آمده که در جدول ۱ نشان داده شده است.

$$ET = P + I - D \pm DW \quad (1)$$

در این رابطه P مقدار نزولات جوی، I میزان آبیاری، D مقدار نفوذ عمقی که از زهکش خارج می‌شود و DW تغییرات رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه‌ها می‌باشد که همه آنها بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

روش‌های محاسباتی

با استفاده از نرم‌افزار Ref-ET و ۱۲ روش موجود در آن، مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن، بر اساس آمار هواشناسی هر دو ایستگاه و برای سال‌های مورد بررسی، محاسبه شدند. این روش‌های



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و پراکنده‌گی ایستگاه‌های سینوپتیک

جدول ۱- میانگین ماهانه تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن بر اساس داده‌های لایسیمتری (میلی‌متر بر روز)

ایستگاه لایسیمتری	آوریل	می	ژوئن	جولای	آگوست	سپتامبر
دانشگاه صنعتی اصفهان	---	۵/۵۷	۷/۵۴۹	۸/۹۵۶	۷/۷۳۷	۶/۵۸۹
کبوترآباد	۵/۹	۸/۰۷	۹/۵۳	۸/۳۳	۷/۲۳	---

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک

ردیف	نام ایستگاه	طول جغرافیایی (N)	عرض جغرافیایی (E)	ارتفاع از سطح دریا (m)
۱	اردستان	۳۳° ۲۳'	۵۲° ۲۳'	۱۲۵۲/۴
۲	اصفهان	۳۲° ۳۷'	۵۱° ۴۰'	۱۵۵۰
۳	داران	۳۲° ۵۸'	۵۰° ۲۲'	۲۲۹۰
۴	گلپایگان	۳۳° ۲۸'	۵۰° ۱۷'	۱۸۷۰
۵	کبوترآباد	۳۲° ۳۱'	۵۱° ۵۱'	۱۵۴۵
۶	کاشان	۳۳° ۵۹'	۵۱° ۲۷'	۹۸۲/۳
۷	خورویبایانک	۳۳° ۴۷'	۵۵° ۰۵'	۸۴۵
۸	نابین	۳۲° ۵۱'	۵۳° ۰۵'	۱۵۴۹
۹	نطنز	۳۳° ۳۲'	۵۱° ۵۴'	۱۶۸۴/۹
۱۰	شهرضا	۳۱° ۵۹'	۵۱° ۵۰'	۱۸۴۵/۲

روش به‌دست آمده از مرحله قبل، مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن در هر ۱۰ ایستگاه با نرم‌افزار Ref-ET محاسبه گردید. انتخاب دوره ۱۴ ساله از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۵، به‌علت پوشش‌دادن داده‌های لایسیمتری و کامل‌بودن داده‌های هواشناسی در این بازه زمانی در کلیه ایستگاه‌ها، می‌باشد. داده‌های هواشناسی مورد استفاده شامل دمای حداقل، دمای حداکثر، سرعت باد، دمای نقطه شبنم و تشعشعات خورشیدی (R_s) می‌باشد که آمار میانگین سالانه در این ۱۴ سال در هر ایستگاه سینوپتیک، در جدول ۳ مشخص شده است.

پس از برآورد نقطه‌ای تبخیر و تعرق به روش‌های محاسباتی، تبخیر و تعرق مرجع در سطح منطقه به روش میان‌یابی تخمین و در نهایت نقشه تبخیر و تعرق منطقه‌ای تهیه گردید. به‌طور کلی روش‌های درون‌یابی عبارتند از: روش‌های معین^۴ که بر اساس روابط ریاضی مستقیماً از داده‌های نقاط مجاور استفاده می‌کنند و دیگری روش‌های زمین‌آمار^۵ که بر پایه مدل‌های آماری و بر اساس همبستگی اطلاعات آماری، بین نقاط اندازه‌گیری شده رابطه برقرار می‌کنند. روش‌های میان‌یابی از هر نوع که باشند، می‌توانند به صورت معادله‌ای خطی یا غیر خطی باشند. معادله کلی میان‌یابی به‌صورت رابطه ۴ است و تفاوت روش‌های مختلف در نحوه برآورد فاکتور وزنی معادله است (طباطبائی و غزالی، ۱۳۹۰).

$$Z^*(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (4)$$

که در آن $Z^*(s_0)$ مقدار پارامتر برآورد شده در موقعیت s_0 ، $Z(s_0)$ مقدار پارامتر اندازه‌گیری شده در موقعیت s_i ، λ_i فاکتور وزنی ایستگاه در موقعیت s_i ، i معرف نقاط اندازه‌گیری و N تعداد کل ایستگاه‌هاست.

برای مقایسه معادلات برآورد تبخیر و تعرق با داده‌های لایسیمتری و نشان دادن مناسب‌ترین روش برای تخمین پارامتر تبخیر و تعرق، از سه معیار ضریب همبستگی^۱ (r)، میانگین خطای اریبی^۲ (MBE) (رابطه ۲) و جذر میانگین مربع خطاها^۳ (RMSE) رابطه ۳ استفاده گردید.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{exp} - x_p)}{n} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_p - x_{exp})^2}{n}} \quad (3)$$

در این معادلات، x_{exp} مقادیر داده‌های اندازه‌گیری شده و x_p مقادیر برآورد شده توسط مدل می‌باشند. معیار RMSE اختلاف بین پیش‌بینی‌ها را با داده‌های اندازه‌گیری شده و معیار MBE مقدار کم یا بیش برآورد بودن آنها را نشان می‌دهد و واحد آنها بر حسب واحد متغیر مورد بررسی، یعنی میلی‌متر بر روز بیان می‌شود. شاخص r نشان دهنده بخشی از تغییرات کل می‌باشد که به وسیله رابطه خطی بین دو متغیر توجیه می‌شود. مقدار r بر حسب صدم و یا درصد محاسبه می‌گردد. در بهترین حالت یعنی شرایطی که مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده با هم برابر باشند، $MBE=0$ ، $RMSE=0$ و $r=1$ خواهد بود.

سپس ۱۰ ایستگاه سینوپتیک در استان اصفهان انتخاب شدند. این ایستگاه‌ها شامل اصفهان، کبوترآباد، داران، گلپایگان، نابین، نطنز، کاشان، خورویبایانک، شهرضا و اردستان می‌باشند. در شکل ۱ پراکندگی آنها و در جدول ۲ ارتفاع از سطح دریا و مختصات جغرافیایی آنها بیان شده است. اطلاعات و آمار هواشناسی هر یک از این ایستگاه‌ها، مربوط به یک دوره ۱۴ ساله استخراج و بر پایه بهترین

- 1 -Correlation Coefficient
- 2 -Mean Bias Error
- 3 -Root Mean Square Error

4 -Deterministic
5 -Geostatistical

جدول ۳- میانگین سالانه داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک

ایستگاه	دمای حداقل (c)	دمای حداکثر (c)	دمای نقطه شبنم (c)	سرعت باد (m/s)	Rs (MJ/m ²)
اردستان	۱۲/۸۶	۲۴/۲۱	-۰/۵۳	۶/۹۸	۱۶/۵۶
اصفهان	۹/۱۰	۲۳/۴۷	-۰/۶۹	۲/۹۷	۱۸/۶۵
داران	۴/۲۶	۱۷/۰۸	-۴/۶۵	۳/۲۵	۱۷/۶۵
گلپایگان	۷/۶۸	۲۰/۲۲	-۱/۰۱	۴/۵۶	۱۷/۳۴
کیوتراآباد	۶/۴۴	۲۳/۴۲	۱/۶۵	۲/۵۱	۲۰/۳۴
کاشان	۱۱/۸۰	۲۵/۶۴	۲/۵۸	۰/۷۸	۱۸/۲۱
خورویبانک	۱۳/۴۷	۲۶/۷۸	۱/۴۴	۲/۹۶	۱۷/۷۵
ناین	۹/۵۱	۲۳/۰۶	-۱/۶۶	۶/۱۶	۱۸/۱۳
نطنز	۱۰/۴۹	۱۹/۸۷	-۱/۱۷	۳/۱۸	۱۵/۰۴
شهرضا	۶/۸۰	۲۲/۰۸	-۰/۸۴	۵/۱۳	۱۹/۴۰

مقایسه و با استفاده از معیارهای مختلف می‌توان نسبت به انتخاب بهترین روش اقدام نمود. برای بررسی خطای هر روش میان‌یابی از RMSE طبق رابطه ۳ استفاده گردید.

نتایج و بحث

آمار هواشناسی مورد نیاز در هر دو ایستگاه لایسمتری کیوتراآباد و دانشگاه صنعتی اصفهان، برای سال‌های مورد بررسی، گردآوری شدند. سپس بر اساس ۱۲ روش موجود در نرم‌افزار Ref-ET مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن برآورد شد. سپس با استفاده از معیارهای t ، MBE و RMSE میزان صحت و دقت نتایج هر یک از روش‌های محاسباتی نسبت به داده‌های لایسمتری سنجیده شد، که نتایج آن در جدول ۴، نمایش داده شده است.

بر اساس کمترین مقدار RMSE و قدرمطلق MBE و همچنین بیشترین مقدار t ، همه روش‌های محاسباتی در این جدول رتبه‌بندی شدند و در هر گروه نیز روش‌های منتخب به‌ترتیبی که ذکر شده‌اند، دارای برتری هستند. بنابراین در ایستگاه کیوتراآباد، چهار روش Pen1948، Turc1961، KP1996 و FAO24Pen به‌ترتیب کمترین خطا را داشتند. در اولویت دوم، چهار روش FAO24BC، HgS1985، ASCEPM و FAO56PM و در اولویت سوم، چهار روش FAO17Pen، FAO24Rd، Prs-Tylr و Makk1957 به‌ترتیب قرار گرفتند. با مشاهده ارقام مربوط به ایستگاه صنعتی اصفهان در جدول ۴ مشخص می‌شود که چهار روش Pen1948، KP1996، FAO56PM و ASCEPM رتبه یک را به‌خود اختصاص دادند. در حالی‌که روش‌های FAO24Pen، Turc1961، FAO24Rd و FAO24BC در جایگاه دوم قرار و چهار

در این پژوهش از هشت روش میان‌یابی در بانک اطلاعاتی نرم‌افزار Surfure8.02 شامل روش زمین آماری کریجینگ^۱، روش توان‌دهی عکس فاصله^۲، روش انحنای کمینه^۳، روش اصلاح شده شپارد^۴، روش نزدیک‌ترین همسایگی^۵، روش رگرسیون چند جمله‌ای^۶، روش توابع پایه شعاعی^۷ و روش میانگین متحرک^۸ در دسته روش‌های معین، استفاده شد. توضیحات مربوط به هر روش در منبع Golden software, 2002 آمده است.

در مرحله قبل بهترین روش محاسباتی انتخاب و مقادیر متوسط ماهانه تبخیر و تعرق گیاه مرجع در ۱۴ سال آماری محاسبه گردید. سپس با اعمال هر یک از مدل‌های فوق، میان‌یابی صورت گرفت. برای ارزیابی و تعیین بهترین مدل درون‌یابی در تعیین مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل، از فن اعتبارسنجی متقابل استفاده شد. در این فن برای هر یک از نقاط اندازه‌گیری شده می‌توان تخمین انجام داد. سپس به مقایسه مقدار مشاهده‌ای و تخمین پرداخت. بدین ترتیب که یک نقطه حذف و با استفاده از سایر نقاط و اعمال روش میان‌یابی مورد نظر، برای این نقطه تخمین صورت می‌گیرد. سپس این نقطه به محل خود برگردانده می‌شود و نقطه بعدی حذف می‌گردد. به همین ترتیب برای تمام نقاط برآورد صورت می‌گیرد. مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده،

- 1- Kriging
- 2- Inverse distance to a power
- 3- Minimum curvature
- 4- Modified Shepard's method
- 5- Nearest neighbor
- 6- Polynomial Regression
- 7- Radial basis function
- 8- Moving average

روش FAO17Pen، HgS1985، Prs-Tylr و Makk1957 رتبه سوم را کسب کردند. در ایستگاه کبوترآباد روش Pen1948 و بعد از آن Turc1961 به عنوان بهترین روش‌ها به دست آمدند. در حالی که در دانشگاه صنعتی اصفهان، روش Pen1948 در رتبه اول و روش Turc1961 در رتبه هفتم قرار گرفته است. روش ترک در اروپای غربی ارائه شده و برای رطوبت هوا اصلاح شده است و همین موضوع باعث شده است که در منطقه نسبتاً خشکی مثل کبوترآباد جواب مناسب ارائه دهد (رحیم‌زادگان، ۱۳۷۰). همچنین این روش برای شرایطی قابل استفاده است که متوسط دمای روزانه از 10°C - کمتر نباشد (REF-ET Manual, 2002). با توجه به این که استان اصفهان دارای مناطقی است که در زمستان متوسط دمای روزانه آنها به زیر 10°C - می‌رسد (مثل داران، گلپایگان و ...)، بنابراین روش Pen1948 به عنوان بهترین روش محاسباتی در کل استان انتخاب گردید. در مورد دقت روش پنمن برای منطقه اصفهان می‌توان گفت که اگر چه این روش در انگلستان با آب و هوای متفاوت از اصفهان به دست آمده ولی دقت آن به دلیل استفاده از تعداد زیادی پارامتر اقلیمی در محاسبه قابل قبول می‌باشد (رحیم‌زادگان، ۱۳۷۰). این نتیجه در راستای تحقیقات زارع ایبانه و همکاران (۱۳۸۹)، رحیم‌زادگان (۱۳۷۰) و عابدی و همکاران (۱۳۸۷) می‌باشد.

با توجه به جدول ۴، مقادیر خطای محاسبه شده در دو روش Pen1948 و KP1996 در هر دو ایستگاه، بسیار به هم نزدیک می‌باشد. چون که روش KP1996 برای عرض جغرافیایی 32° و آب و هوای خشک و نیمه خشک توسعه یافته است، در منطقه اصفهان نیز جواب‌های قابل قبولی ارائه کرده است (REF-ET Manual, 2002). در نتیجه دو روش مذکور با اختلاف جزئی به عنوان بهترین روش‌های محاسباتی در حوضه مورد مطالعه معرفی و پیشنهاد شدند. به طور کلی بر اساس جدول ۴ می‌توان مشاهده کرد که روش‌های بر پایه پنمن توانسته‌اند نتایج بهتری نسبت به سایر روش‌ها ارائه دهند. بر اساس اقلیم‌نمای یونسکو، استان اصفهان دارای سه اقلیم A-C-W (خشک خنک گرم)، A-C-VW (خشک خنک خیلی گرم) و SA-K-W (نیمه خشک سرد گرم) می‌باشد. اقلیم غالب A-C-W است که حدود ۶۵ درصد از منطقه مورد مطالعه را در بر می‌گیرد. اقلیم A-C-VW حدود ۲۵ درصد را می‌پوشاند که شامل بیابان‌های خشک است و بالاخره اقلیم SA-K-W که حدود ۱۰ درصد از کل استان اصفهان را شامل می‌شود. هر دو ایستگاه لایسیمتری مورد مطالعه، در اقلیم غالب منطقه یعنی A-C-W طبقه‌بندی می‌شوند و لذا می‌توان نتایج حاصل از دو لایسیمتر را به منطقه مورد مطالعه تعمیم داد.

جدول ۴- مقادیر محاسبه شده RMSE، MBE و r بین ۱۲ روش محاسباتی ET₀ و مقادیر لایسیمتری

دانشگاه صنعتی اصفهان				کبوترآباد			رتبه
r	MBE	RMSE	روش	r	MBE	RMSE	
-۰/۷۹	-۰/۳۶	۰/۷۸	Pen1948	۰/۹۰	۰/۴۷	۰/۸۶	Pen1948
-۰/۸۰	-۰/۵۴	۰/۹۰	KP1996	۰/۷۹	۰/۶۷	۱/۰۰	Turc1961
-۰/۸۴	-۰/۳۳	۰/۷۹	FAO56PM	۰/۷۲	۰/۶۹	۱/۰۰	KP1996
-۰/۸۰	-۰/۵۴	۱/۰۱	ASCEPM	۰/۴۱	-۰/۸۱	۱/۰۴	FAO24Pen
-۰/۶۷	-۰/۶۹	۱/۱۰	FAO24Pen	۰/۸۴	-۰/۸۱	۱/۱۰	FAO24BC
-۰/۷۹	۱/۰۶	۱/۴۷۰	Turc1961	۰/۸۷	۰/۹۴	۱/۱۳	HgS1985
-۰/۷۳	-۰/۹۵	۱/۲۳	FAO24Rd	۰/۴۷	۰/۴۳	۱/۱۵	ASCEPM
-۰/۸۱	-۱/۰۷	۱/۳۰	FAO24BC	۰/۴۸	۰/۶۰	۱/۲۱	FAO56PM
-۰/۸۳	-۱/۲۵	۱/۳۴	FAO17Pen	۰/۴۱	-۰/۵۴	۱/۲۳	FAO17Pen
-۰/۷۹	۱/۱۷	۱/۵۲	HgS1985	۰/۹۰	-۱/۴۷	۱/۵۸	FAO24Rd
-۰/۷۳	۲/۳۹	۲/۶۹	Prs-Tylr	۰/۸۹	۲/۴۳	۲/۵۱	Prs-Tylr
-۰/۹۷	۲/۸۳	۱/۱۲	Makk1957	۰/۹۲	۲/۶۳	۲/۷۴	Makk1957

رگرسیون چند جمله‌ای، کریجینگ، تواندهی عکس فاصله، میانگین متحرک، نزدیکترین همسایگی، توابع پایه شعاعی و در آخر هم روش اصلاح شده شپارد، دارای کمترین مقادیر متوسط ماهانه RMSE بودند.

در روش انحنای کمینه به دلیل اینکه مقدار خطای باقیمانده در محاسبات و تعداد تکرارها تعیین می‌شوند، می‌تواند به بهترین جواب منجر شود. در حالتی که تعداد داده‌ها ۱۰ و یا کمتر هست، روش‌های رگرسیون چند جمله‌ای و کریجینگ، سریع و دقیق خواهند بود (Golden software, 2002).

در بسیاری از پژوهش‌ها از جمله شهابی‌فر (۱۳۸۲)، نکوآمال و همکاران (۱۳۸۸)، Chin and Zhao (1995)، توانا و همکاران (۱۳۹۰)، حشمی و همکاران (۱۹۹۴) و جامعی (۱۳۸۷)، روش کریجینگ را به‌عنوان روش بهینه جهت میان‌یابی تبخیر و تعرق پتانسیل ذکر کرده‌اند. در نتایج این تحقیق روش کریجینگ، بعد از مدل انحنای کمینه و رگرسیون چند جمله‌ای (که در تحقیق‌های ذکر شده مورد بررسی قرار نگرفته‌اند) رتبه‌بندی می‌شود. لذا تطابق نتایج این مطالعه با دیگر مطالعات بیشتر روشن می‌شود. لازم به ذکر است که مدل‌های انتخابی فقط برای همان منطقه، مورد اعتماد هستند. ولی چنانچه یک مدل خاص برای چندین محل مناسب تشخیص داده شد، می‌توان نتیجه گرفت که آن مدل می‌تواند با اطمینان زیادی برای شرایط مشابه دیگر نیز مورد استفاده واقع شود (طباطبائی و غزالی، ۱۳۹۰).

با استفاده از داده‌های هواشناسی ۱۴ ساله (از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۵ میلادی) در هر یک از ۱۰ ایستگاه سینوپتیک منتخب در منطقه، مقادیر میانگین تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه بر اساس روش پنمن ۱۹۴۸ و در نرم‌افزار Ref-ET محاسبه گردید. میانگین ۱۴ ساله مقادیر ET₀ در هر ماه و در هر ایستگاه در جدول ۵ مشخص شده است.

سپس با اعمال هر کدام از مدل‌های میان‌یابی، در هر ماه به‌طور جداگانه بین داده‌های ET₀ هر ۱۰ ایستگاه سینوپتیک، میان‌یابی صورت گرفت. لازم به ذکر است که روش کریجینگ نقطه‌ای بر پایه مدل واریوگرام کروی انجام شد، چون متداول‌ترین مدلی که بیشترین کاربرد را در مطالعات زیست محیطی دارد، مدل کروی است (Webster and Oliver, 2000). از سوی دیگر تفاوت‌های میان مدل‌های مختلف روش کریجینگ بسیار کم هست، لذا با توجه به هدف این تحقیق، که انجام مقایسه کلی بین کریجینگ و سایر روش‌های میان‌یابی است، از مدل کروی بهره گرفته شد. همچنین از توان ۱ روش تواندهی عکس فاصله، استفاده شد، چون از میان توان‌های ۱ و ۲ و ۳، این توان دارای دقت بیشتری، آن هم با اختلاف ناچیزی می‌باشد (کریمی و اسلامیان، ۱۳۹۰). برای بررسی خطای هر روش میان‌یابی و انتخاب بهترین روش، از فن اعتبارسنجی متقابل استفاده شد.

نتایج مربوط به معیار RMSE مربوط به هر ماه در جدول ۶ بیان شده است. با توجه به نتایج این جدول، به ترتیب مدل انحنای کمینه،

جدول ۵- میانگین ۱۴ ساله ET₀ (میلی‌متر بر روز) در هر ماه برای ایستگاه‌های مختلف

نام ایستگاه	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Des
اردستان	۲/۳۵	۳/۷۷	۵/۳۱	۸/۵۹	۱۰/۶۲	۱۳/۳۳	۱۴/۳۹	۱۳/۸۹	۱۰/۷۰	۶/۱۱	۴/۰۹	۳/۰۴
اصفهان	۱/۷۴	۳/۰۵	۴/۵۱	۶/۳۵	۷/۳۷	۸/۳۱	۸/۱۳	۷/۳۶	۶/۱۶	۳/۱۷	۲/۴۹	۲/۳۱
داران	۱/۴۱	۱/۹۰	۲/۸۵	۴/۸۴	۶/۲۱	۷/۴۲	۷/۹۵	۷/۲۶	۶/۰۵	۳/۲۱	۲/۳۴	۲/۱۰
گلپایگان	۱/۵۸	۲/۵۲	۳/۸۱	۵/۹۸	۷/۲۹	۸/۸۵	۹/۲۰	۸/۴۷	۷/۵۱	۴/۰۶	۲/۶۳	۲/۲۰
کبوترآباد	۱/۴۷	۲/۸۵	۴/۱۰	۵/۶۶	۶/۷۹	۷/۷۵	۷/۵۹	۶/۹۱	۵/۵۲	۲/۸۷	۲/۲۲	۲/۰۷
کاشان	۱/۲۷	۲/۰۱	۳/۰۸	۴/۸۰	۵/۹۵	۶/۸۰	۶/۹۷	۶/۵۹	۵/۲۲	۲/۴۸	۱/۹۲	۱/۸۶
خور و بیابانک	۱/۸۳	۲/۹۰	۴/۴۰	۶/۷۳	۸/۱۱	۹/۶۰	۱۰/۱۶	۸/۷۶	۶/۷۳	۳/۵۲	۲/۷۴	۲/۴۲
نابین	۲/۴۲	۳/۸۶	۵/۲۱	۷/۸۲	۹/۱۳	۱۰/۷۹	۱۱/۱۸	۱۰/۵۱	۸/۷۰	۴/۹۶	۳/۹۵	۳/۲۷
نطنز	۱/۴۴	۲/۳۶	۳/۶۱	۵/۳۱	۶/۳۶	۷/۸۰	۸/۲۳	۷/۷۹	۶/۰۷	۳/۳۴	۲/۵۶	۲/۰۳
شهرضا	۲/۱۲	۳/۳۶	۴/۷۶	۶/۹۸	۸/۱۷	۹/۲۶	۹/۵۴	۸/۶۰	۷/۱۳	۴/۰۲	۲/۹۹	۲/۷۷

جدول ۶- مقادیر RMSE مربوط به هر مدل میان‌یابی

ماه	کریجینگ	تواندهی عکس فاصله	انحنای کمینه	شپارد اصلاح شده	نزدیکترین همسایگی	رگرسیون چندجمله‌ای	توابع پایه شعاعی	میانگین متحرک
Jan	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۲۴	۳/۳۹	۰/۴۳	۰/۳۰	۰/۵۴	۰/۴۵
Feb	۰/۶۱	۰/۶۰	۰/۳۷	۳/۵۴	۰/۶۵	۰/۴۷	۰/۷۴	۰/۷۴
Mar	۰/۷۸	۰/۷۵	۰/۴۶	۴/۷۱	۰/۸۲	۰/۵۹	۱/۶۴	۰/۸۷
Apr	۱/۲۱	۱/۲۱	۰/۸۳	۹/۹۱	۱/۳۵	۰/۹۷	۱/۶۴	۱/۳۱
May	۱/۳۸	۱/۴۲	۱/۰۳	۱۲/۰۳	۱/۶۳	۱/۱۹	۱/۱۸	۱/۵۲
Jun	۱/۸۰	۱/۹۰	۱/۴۳	۱۶/۹۳	۲/۱۸	۱/۶۴	۲/۲۱	۲/۰۳
July	۱/۹۹	۲/۱۴	۱/۶۳	۲۰/۱۸	۲/۴۵	۱/۸۷	۲/۳۹	۲/۲۹
Aug	۲/۰۲	۲/۱۵	۱/۷۰	۲۰/۱۸	۲/۴۷	۱/۹۳	۲/۳۷	۲/۳۵
Sept	۱/۵۴	۱/۷۰	۱/۲۵	۱۶/۲۱	۱/۹۶	۱/۵۲	۲/۰۹	۱/۸۷
Oct	۰/۹۹	۱/۱۰	۰/۸۰	۱۰/۳۱	۱/۲۵	۰/۹۹	۱/۲۸	۱/۲۳
Nov	۰/۶۶	۰/۶۹	۰/۴۷	۶/۱۱	۰/۷۵	۰/۶۰	۰/۸۰	۰/۸۳
Des	۰/۴۴	۰/۴۵	۰/۲۶	۳/۷۶	۰/۵۰	۰/۳۵	۰/۵۷	۰/۵۵
میانگین	۱/۱۵	۱/۲۱	۰/۸۷	۱۰/۶۰	۱/۳۷	۱/۰۴	۱/۴۰	۱/۳۴

مختلفی بر اساس داده‌های هواشناسی وجود دارد و از آنجایی که این داده‌ها شدیداً تابع خصوصیات مکان می‌باشند، برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از معادلات موجود تنها معرف مقدار این پارامتر در ایستگاه‌هاست. در صورتی که به منظور توسعه منابع آب برای کشاورزی لازم است مطالعاتی در مقیاس منطقه‌ای انجام پذیرد که برای دستیابی به این هدف از روش‌های میان‌یابی استفاده می‌شود.

در این تحقیق ۱۲ روش موجود در نرم‌افزار Ref-ET (پنمن-مانتیث- سازمان عمران امریکا، پنمن-مانتیث- فائو ۵۶، کیمبرلی- پنمن ۱۹۹۶، پنمن ۱۹۴۸، پنمن- فائو ۲۴، پنمن- فائو ۱۷، هارگریوز- سامانی ۱۹۸۵، بلانی- کریدل- فائو ۲۴، پرستلی- تیلور ۱۹۷۲، مکینگ ۱۹۵۷، ترک ۱۹۶۱ و تشعشی فائو ۲۴) مورد آزمون قرار گرفتند. جهت انتخاب مناسب‌ترین روش برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در استان اصفهان، از دو آزمایش لایسیمتری برای گیاه مرجع چمن (کبوترآباد مربوط به سال ۲۰۰۰ میلادی و دانشگاه صنعتی اصفهان مربوط به سال ۱۹۸۹ میلادی) استفاده شد. سپس مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از روش‌های محاسباتی و داده‌های مشاهده‌ای، بر اساس سه شاخص RMSE، MSE و R، انجام و مشخص شد که روش پنمن ۱۹۴۸ و کیمبرلی- پنمن ۱۹۹۶ بهترین روش‌ها هستند.

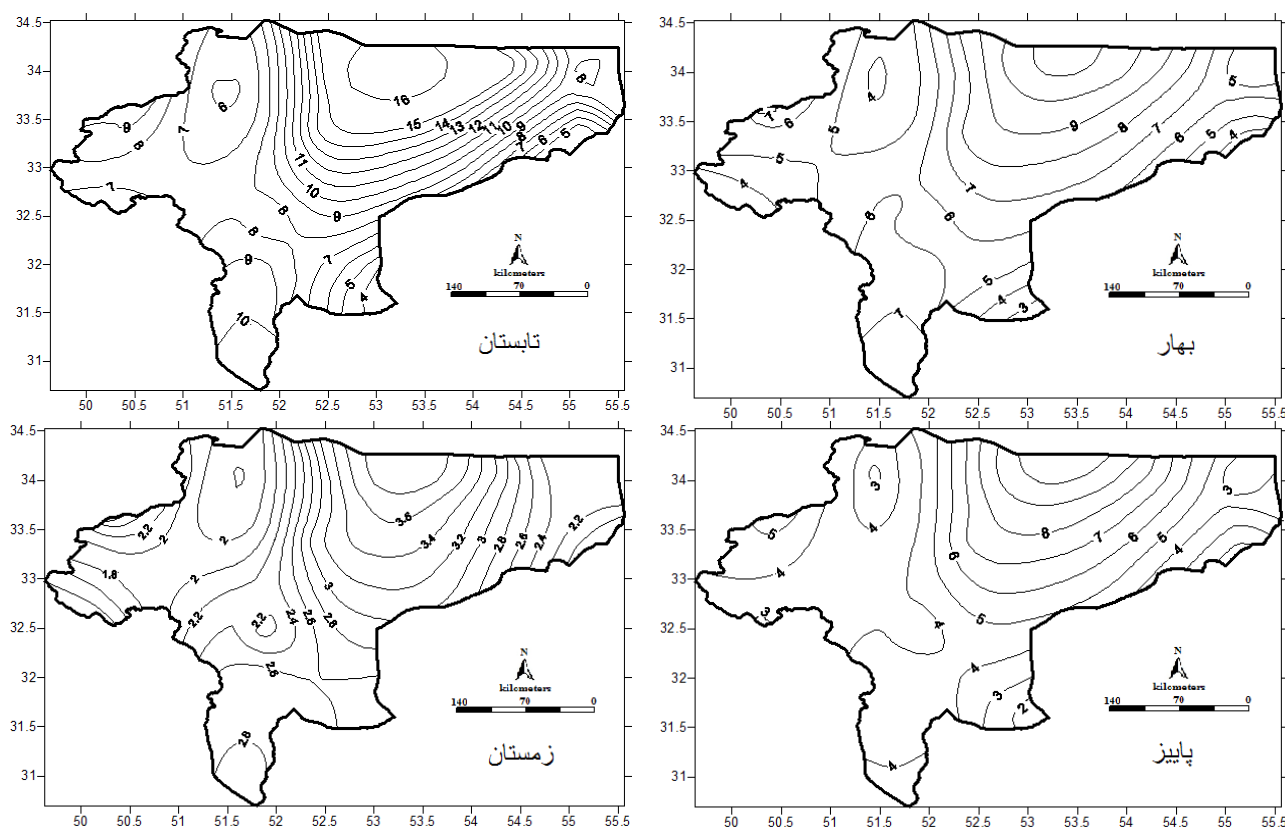
در محدوده استان اصفهان، ۱۰ ایستگاه سینوپتیک انتخاب و اطلاعات هواشناسی مورد نیاز هر کدام در یک بازه زمانی ۱۳ ساله (۱۹۹۲-۲۰۰۵) جمع‌آوری شدند. پس از آن بر اساس روش پنمن ۱۹۴۸ (نتیجه مرحله قبل) مقادیر متوسط ET₀ روزانه در ۱۲ ماه سال در هر یک از این ایستگاه‌ها محاسبه شدند.

بر اساس روش پنمن ۱۹۴۸ و همچنین مدل میان‌یابی انحنای کمینه، نقشه‌های خطوط تراز تبخیر و تعرق مرجع برای چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان در نرم‌افزار Surfur 8.02 رسم شدند (شکل ۲).

کمترین مقادیر تبخیر و تعرق به مناطق غربی، شمال غربی و جنوب استان تعلق دارد و بیشترین آنها مربوط به نواحی مرکزی و شرقی استان است که این یافته‌ها در راستای نتایج میراب باشی و همکاران (۱۳۸۸) می‌باشد. بیشترین مقدار تبخیر و تعرق مربوط به فصل تابستان، در شمال شرقی استان، معادل ۱۶ میلی‌متر در روز رخ داده است. همچنین کمترین مقادیر آن در فصل زمستان در نواحی شمال غربی معادل ۱/۴ میلی‌متر در روز می‌باشد. این نقشه‌ها می‌تواند به‌عنوان یک راهنمایی جهت مدیریت مناسب و بهینه منابع آبی در مقیاس‌های وسیع نظیر استان یا حوزه آبخیز و آن هم به صورت مکانی باشد.

نتیجه‌گیری

اطلاع از میزان تبخیر و تعرق و آب مصرفی گیاه، اساس یک برنامه‌ریزی صحیح آبیاری را تشکیل می‌دهد. اگر آبی که در اختیار گیاه قرار می‌گیرد کمتر از مقدار مورد نیاز گیاه باشد، باعث کاهش مقدار محصول و بروز مسائل دیگری در امر کشاورزی می‌گردد و اگر بیشتر از حد مورد نیاز گیاه باشد سبب اتلاف آب و ایجاد مسائلی از قبیل زهکشی می‌شود. برای تخمین تبخیر و تعرق مرجع روش‌های



شکل ۲- نقشه خطوط هم‌تراز متوسط تبخیر و تعرق مرجع روزانه در استان اصفهان

توانا، ا.، هوشمند، ع. و فتحیان، ح. ۱۳۹۰. نخستین کنفرانس ملی هواشناسی و مدیریت آب کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ۱ تا ۲ آذرماه.

جامعی، م. ۱۳۸۷. ارزیابی روش‌های درون‌یابی در برآورد منطقه‌ای تبخیر و تعرق مرجع و مقایسه با نتایج موجود حاصل از تصاویر ماهواره‌ای در دشت‌های مرکزی و شمالی خوزستان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، ۱۲۴ صفحه.

رحیم زادگان، ر. ۱۳۷۰. جستجوی روش مناسب برآورد تبخیر و تعرق در منطقه اصفهان، مجله علوم کشاورزی ایران، جلد ۲۲، شماره ۱ و ۲: ۱۰-۱.

زارع ابیانه، ح.، بیات ورکشی، م.، سبزی پرور، ع.ا.، معروفی، ص. و قاسمی، ع. ۱۳۸۹. ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع و پهنه‌بندی آن در ایران. پژوهش‌های جغرافیایی. شماره ۷۴: ۹۵-۱۱۰.

با استفاده از ۸ روش مختلف میان‌یابی در نرم‌افزار Surfire 8.02 (کریجینگ، تواندهی عکس فاصله، انحنا، کمیته، اصلاح شده شپارد، نزدیکترین همسایگی، رگرسیون چند جمله‌ای، توابع پایه شعاعی، میانگین متحرک) میان‌یابی بین مقادیر تبخیر و تعرق ۱۰ ایستگاه انجام شد. به روش اعتبارسنجی متقابل، میزان دقت هر یک از مدل‌ها بر اساس معیار RMSE محاسبه و مشخص شد که مدل‌های انحنا، کمیته، رگرسیون چند جمله‌ای و کریجینگ مناسب‌ترین روش‌های میان‌یابی در منطقه مورد مطالعه می‌باشند.

در نهایت بر اساس روش پنمن ۱۹۴۸ و همچنین مدل میان‌یابی انحنا، کمیته، نقشه‌های هم تبخیر و تعرق مرجع روزانه برای چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان در نرم‌افزار Surfire 8.02 رسم شدند. کمترین مقادیر تبخیر و تعرق در مناطق غربی، شمال غربی و جنوب استان دیده می‌شوند و بیشترین آنها مربوط به نواحی مرکزی و شرقی استان است. بیشترین مقدار تبخیر و تعرق معادل ۱۶ میلی‌متر در روز و کمترین مقدار آن برابر ۱/۴ میلی‌متر در روز می‌باشد.

منابع

پناهی، م. ۱۳۷۸. ارزیابی چند روش محاسباتی برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل. هفتمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر. دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۰ تا ۱۲ اسفندماه.

- دهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۹ تا ۲۱ بهمن ماه: ۷-۱.
- هاشمی، ا.، مصطفی‌زاده، ب. و حیدرپور، م. ۱۳۸۵. بررسی روش‌های برآورد تبخیر و تعرق برای منطقه اصفهان. دومین کنفرانس مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۳ تا ۴ بهمن ماه.
- Benli, B., Kodal, S. Ilbeyi, A. and Ustun, H. 2006. Determination of evapotranspiration and basal crop coefficient of alfalfa with a weighing lysimeter. *Agricultural Water Management* 81(3): 358-370.
- Chin, D.A. and Zhao, S. 1995. Evaluation of Evaporation-Pan Networks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 121(5): 338-346.
- Golden software, 2002. Surfer, User manual, www.goldensoftware.com
- Ha, W., Gowda, P., Oommen, T., Marek, T., Porter, D. and Howell, T. 2011. Spatial Interpolation of Daily Reference Evapotranspiration in the Texas High Plains. *World Environmental and Water Resources Congress, Bearing Knowledge for Sustainability © ASCE 2011*: 2796- 2804.
- Hashemi, M., Garcia, L.A. and Fontane, D.G. 1994. Spatial Estimation of Regional Crop Evapotranspiration, *Transaction of the ASAE*, 38(5): 1345-1351.
- 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. *Agricultural Water Management*, 85: 15-26.
- 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.
- Noshadi, M. and Sepaskhah, A. R. 2005. Application of Geostatistics for Potential Evapotranspiration estimation. *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, 29(B3): 343-355.
- REF-ET Manual, for Windows ver. 2.0, 2000, University of Idaho.
- Webster, R. and Oliver, M. 2000. *Geostatistics for Environmental Scientists*. John Wiley, Chichester, 271p.
- شاهدی، ک. و زارعی، م. ۱۳۹۰. ارزیابی روش‌های برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در استان مازندران. مهندسی آبیاری و آب، شماره ۳، سال اول: ۲۱-۱۲.
- شهابی‌فر، م. ۱۳۸۲. برآورد تبخیر و تعرق مرجع منطقه‌ای با استفاده از زمین‌آمار و سیستم اطلاعات جغرافیایی در استان تهران. رساله دکترای آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، ۲۱۴ صفحه.
- طباطبائی، س. ح. و غزالی، م. ۱۳۹۰. ارزیابی دقت روش‌های میان‌یابی در تخمین سطح ایستابی آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان‌های فارسان - جونقان و سفید دشت). مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال ۱۵، شماره ۵۷: ۲۲-۱۱.
- عابدی، ج. اسلامیان، س. و امیری، م. ج. ۱۳۸۷. مقایسه چهار روش تخمین تبخیر و تعرق سطح مرجع با داده‌های میکرولاسیمتری در منطقه اصفهان. دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۸ تا ۱۰ بهمن.
- علیزاده، ا. ۱۳۸۳. رابطه آب و خاک و گیاه. انتشارات آستان قدس رضوی. مشهد، ۴۷۰ صفحه.
- کریمی، م. و اسلامیان، س. ۱۳۹۰. ارزیابی روش‌های زمین‌آمار در تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل. نخستین کنفرانس ملی هواشناسی و مدیریت آب کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ۱ تا ۲ آذرماه.
- موسوی، ف. و کریمی، م. ۱۳۶۸. تعیین بهترین روش تبخیر و تعرق بالقوه در دشت اصفهان، مجموعه مقالات اولین کنفرانس هیدرولوژی ایران، تهران، ۳۸۹ صفحه.
- میراب‌باشی، س. م.، پورمحمدی، س. و رحیمیان، م. ح. ۱۳۸۸. پهنه‌بندی تبخیر و تعرق پتانسیل به کمک تکنیک سامانه اطلاعات مکانی (مطالعه موردی: استان اصفهان). اولین همایش ملی اصلاح الگوی مصرف با محوریت منابع طبیعی، کشاورزی و دامپزشکی، دانشگاه زابل، ۱۲ تا ۱۴ اسفندماه.
- نکوآمال، م.، بردبار، م. ه.، رنجبر، س. و رهنما، م. ب. ۱۳۸۸. مطالعه موردی و تعیین بهترین روش پهنه بندی تبخیر و تعرق در GIS.

Selection of the Most Suitable Method for Estimation and Interpolation of Potential Evapotranspiration in Isfahan Province

A.Mahdavi^{1*}, H. Zare abyaneh²

Received: Apr. 30, 2014 Accepted: Sep. 10, 2014

Abstract

The Potential Evapotranspiration (ETp) is one of the important elements in hydrologic cycle, which is required to be estimated in many fields such as irrigation projects, hydraulic structures, drainage and hydrological studies. This element represents the potential losses from the moist soil layer and the vegetation cover. Therefore, calculation and estimation of this parameter is important. In other hand, the standard interpolation methods are used for achieving evapotranspiration phenomena in points where does not have measured meteorological parameters. In Ref-ET software, the twelve methods were compared with tow lysimeter data based on RMSE, MBE and r statistical criteria in order to adopt an accurate method(s) of estimation of potential evapotranspiration for reference crop in Isfahan. The results showed that the Penman 1948 and the Kimberly- Penman 1996 methods give better estimations. Then the 10 synoptic station were selected in study area and ETp was calculated in every station in a period (1992- 2005) using Penman 1948 method. In Surfure 8.02, eight interpolation techniques were considered and the estimations of these methods were evaluated by Cross-Validation method based on RMSE index. The results indicated the Minimum curvature, the Polynomial Regression and the Kriging techniques are the most suitable ones. Finally, iso ETp maps were plotted based on Penman 1948 method and Minimum curvature technique in Isfahan province.

Key words: Potential Evapotranspiration, Lysimeter, interpolation and Cross Validation

1- PHD candidate, Irrigation and Drainage, Water engineering department, Bu Ali Sina University.

2- Assioiate Professor, Water engineering department, Bu Ali Sina University

(*- Corresponding Author Email: a_mahdavi83@yahoo.com)