



تأثیر تغییر متغیرهای اقلیمی بر تبخیر و تعرق پتانسیل در مناطق خشک با استفاده از زمین‌آمار (بررسی موردی: استان یزد)

الهام مهدوی نژاد^۱، سید زین العابدین حسینی^{۲*}، حسین ملکی نژاد^۳، محمد امین اسدی^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد آب‌خیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
 ۲. استادیار گروه مرتع و آب‌خیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
 ۳. دانشیار گروه مرتع و آب‌خیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
- * نویسنده مسئول: zhosseini@yazd.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۰

چکیده

در سامانه‌های آبی، بارش به عنوان ورودی و تبخیر و تعرق به عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه آب در دسترس از رابطه این دو عامل به دست می‌آید. بنابراین بعد از بارش تبخیر و تعرق مهمترین عامل چرخه هیدرولوژی است. تبخیر و تعرق تحت تاثیر متغیرهای اقلیمی همچون دما، باد، رطوبت و تابش آفتاب می‌باشد. در تحقیق حاضر، تغییرات نرخ تبخیر و تعرق پتانسیل و چگونگی تاثیرگذاری تغییرات هر یک از متغیرهای اقلیمی مؤثر شامل دما، باد، رطوبت و تابش آفتاب در این تغییرات احتمالی، مورد بررسی قرار گرفت. نخست تبخیر و تعرق دوره ۲۰۱۵-۱۹۹۹ در سطح استان یزد در ۱۴ ایستگاه هواشناسی با روش فائو-پنمن-مانتیت محاسبه شد. به دلیل کمبود داده‌های ساعاتی در تعدادی از ایستگاه‌ها، بازسازی داده‌های ناقص به روش رگرسیون طبق رابطه دما و ساعات آفتابی انجام شد. همچنین به علت عدم وجود داده‌های سرعت باد در برخی ایستگاه‌ها، بازسازی آنها با استفاده از داده‌های سایر ایستگاه‌ها به سه روش وزن معکوس فاصله، کریجینگ و کوکریجینگ انجام گرفت. بعد از محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل، داده‌های تبخیر و تعرق پتانسیل پهنه‌بندی شد و با انجام آزمون من-کندال، روند ماهانه و سالانه آنها بررسی شد. نتایج نشان داد با وجود وقوع پدیده تغییر اقلیم و افزایش دما در ۱۳ ایستگاه از ۱۴ ایستگاه مورد مطالعه، مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل در چند دهه گذشته روند کاهشی داشته است. بررسی متغیرهای مؤثر بر تبخیر و تعرق پتانسیل نشان داد که سرعت باد در چند دهه گذشته روند کاهشی داشته است و این کاهش با وجود افزایش دما موجب کاهش تبخیر و تعرق پتانسیل ۶۴/۲۸ درصد از ایستگاه‌ها شد است. روند کلی تبخیر و تعرق در این دوره ۰/۸۶- بوده که بیانگر روند کاهشی تبخیر و تعرق در سطح استان یزد می‌باشد.

واژگان کلیدی: فائو-پنمن-مانتیت؛ من-کندال؛ معکوس فاصله؛ کریجینگ

■ مقدمه

تغییر اقلیم عبارت است از تغییر رفتارهای آب و هوایی یک منطقه نسبت به رفتاری که در طول یک افق زمانی بلند مدت از اطلاعات مشاهده یا ثبت شده در آن منطقه مورد انتظار است (۱۱). استفاده بیش از حد سوخت‌های فسیلی، تغییر کاربری اراضی و افزایش جمعیت جهان و به تبع آن گسترش روزافزون فعالیت‌های صنعتی موجب شده تا پس از انقلاب صنعتی، به تدریج تغییرات مشهودی در آب و هوای کره زمین به وجود آید که بارزترین آن، افزایش متوسط دمای کره زمین، افزایش پدیده‌های آب و هوایی نظیر سیل، طوفان، تگرگ، امواج گرمایی، افزایش سطح آب دریاها، ذوب شدن یخ‌های قطبی، خشکسالی و غیره می‌باشد (۲۹). یکی از پارامترهای مهم متأثر از پدیده تغییر اقلیم، مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل است. تبخیر و تعرق پتانسیل عبارت است از تبخیر و تعرق از یک سطح نامحدود، با پوشش گیاهی علفی سبز به ارتفاع یکنواخت ۸ تا ۱۵ سانتیمتر، دارای رشد فعال و بدون کمبود آب که تمام سطح زمین را با سایه خود می‌پوشاند (۱). ۶۴ درصد بارش‌های جو به علت تبخیر و تعرق از سطح زمین است و در واقع تبخیر و تعرق مرتبط کننده سه جزء مهم زیست‌کره، هیدروسفر و اتمسفر به شمار می‌آید (۲۴).

یکی دیگر از انواع تبخیر، تبخیر از سطح تشک می‌باشد. در تبخیر از تشک، سهولت تفسیر داده‌های آن در سراسر دنیا به عنوان شاخصی برای تعیین تبخیر از دریاچه‌ها و مخازن استفاده می‌شود (۱۰). به دلیل زیاد بودن هزینه‌های تعمیر و نگهداری تشک‌ها و عدم امکان نصب آن‌ها در همه مناطق و مهم‌تر از همه برآوردهای کمتر از واقعیت تشک استفاده از روش‌های ریاضی و روابط تجربی برآورد تبخیر رواج زیادی یافته است (۲۵). لذا تاکنون مدل‌های مختلفی برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل ارائه شده است که تفاوت عمده‌ی آن‌ها در تعداد پارامترهای هواشناسی مورد نیاز می‌باشد. این مدل‌ها از معادله‌های ساده و تجربی مانند تورنت وایت و بلانی کریدل که تنها به پارامتر دمای هوا نیاز دارند تا معادله‌ی پیچیده‌تر فائو-پنمن-مانتیتکه علاوه بر متغیر دمای هوا، تابش خورشیدی، سرعت باد و رطوبت نسبی نیازمند می‌باشند متغیر است. انطباق خوب پژوهش‌های متعدد با روش فائو-

پنمن-مانتیتکه موجب شد که فائو رابطه پنمن-مانتیتکه را به عنوان روشی استاندارد برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل و ارزیابی روش‌های دیگر معرفی کند (۱۶).

پدیده تغییر اقلیم، افزایش دمای کره زمین و محدودیت منابع آبی از مهم‌ترین چالش‌های امروزه محیط زیست جهانی است. در این میان تبخیر و تعرق در اقلیم خشک و نیمه خشک دارای اهمیت است. لذا آگاهی هرچه بیشتر در زمینه روابط بین متغیرهای اقلیمی با تبخیر و تعرق کمک زیادی به متخصصان در زمینه مدیریت منابع آب منطقه به صورت فعالیت‌های آبخیزداری و عملیات کشاورزی می‌کند (۲).

به منظور تخمین داده‌ها در سطح‌های دیگر منطقه از روش‌های درون‌یابی استفاده می‌شود. درون‌یابی به فرآیندی گفته می‌شود که در آن با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده در فضای معلوم، مقادیر نقاط مجهول تخمین زده می‌شود. به طور کلی میزان صحت نتایج درون‌یابی به دقت مکانی، تعداد و توزیع نقاط معلوم و مدل مورد استفاده بستگی دارد (۱۵). روش‌های درون‌یابی در تحلیل‌های مکانی به دو دسته زمین‌آمار و قطعی تقسیم می‌شوند. روش‌های زمین‌آمار شامل کریجینگ و کوکریجینگ و روش‌های قطعی شامل معکوس فاصله (IDW^۱)، چندجمله‌ای جهانی، چند جمله‌ای محلی و توابع پایه‌ای شعاعی می‌باشند. در روش کریجینگ برای بیان تغییرات فضایی از واریوگرام استفاده می‌شود و خطای مقادیر پیش‌بینی شده را با توجه به توزیع فضایی داده‌های پیش‌بینی شده، کمینه می‌کند. نرم افزار GS+ نیز یکی از ابزارهای قوی و کارآمد در علم زمین‌آمار به ویژه در تعیین درجه اهمیت واریوگرام است. هدف اصلی از محاسبه واریوگرام این است که به‌توان تغییرپذیری متغیر را نسبت به فاصله مکانی یا زمانی شناخت (۳).

کوکریجینگ نیز روش زمین‌آماري چند متغیره‌ای است که برای برآورد همبستگی مکانی بین دو متغیر یا بیشتر به شرطی که متغیرها از لحاظ مکانی با یکدیگر همبستگی داشته باشند، مورد استفاده قرار می‌گیرد (۳). در روش IDW که در مطالعات جغرافیایی به گستردگی استفاده می‌شود، پیش‌بینی عامل وزن بر اساس فاصله نقاط از یکدیگر تعیین می‌شود و از مقادیر اندازه‌گیری شده پیرامون محل،

¹ Inverse Distance Weighted

برای پیش‌بینی مکان‌هایی که در آن داده‌های آنها اندازه‌گیری نشده است، استفاده می‌شود (۱۵). برای بررسی دقت روش‌های درون‌یابی و همچنین انتخاب بهترین روش درون‌یابی، روش‌های مختلفی وجود دارد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، روش اعتبارسنجی حذفی می‌باشد (۳).

استان یزد از نظر اقلیمی در منطقه خشک قرار گرفته است. در تابستان گرم و خشک و در زمستان‌های سرد و خشک است. خشکی اقلیمی استان یزد، دو علت اساسی و عمده دارد، اول این که روی کمربند خشک جهانی قرار دارد و دیگر آن که از دریاهای آزاد عمان و خلیج فارس و دریاچه‌های داخلی و بادهای رطوبت‌زای دریایی دور است. عامل مهم اعتدال نسبی آب و هوای یزد، که قابلیت زیست نسبتاً مناسبی به آن بخشیده است، ارتفاعاتی است که بیشتر به صورت موضعی مؤثرند و این امر موجب شده است مناطقی که در ارتفاعات بیش از ۲۵۰۰ متر قرار دارند از اعتدال و رطوبت بیشتری نسبت به دشت‌های یزد و اردکان برخوردار باشند. به همین دلیل بررسی تغییر اقلیم و اندازه‌گیری نرخ تبخیر و تعرق پتانسیل در این استان ضروری می‌باشد. همچنین به منظور آمادگی در برابر اثرات نامطلوب پدیده تغییر اقلیم و کاهش خسارت‌های ناشی از آن، بررسی روندها و تغییرات معمول در متغیرهای هواشناسی در هر منطقه ضروری است تا اینکه سیاست‌ها و برنامه‌های مناسبی برای توسعه و مدیریت منابع اتخاذ گردد.

بررسی تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق در ۲۰ ایستگاه هواشناسی کشور مصر، با بهره‌گیری از روش پنمن-مانتیتث نتایج نشان داد که به طور کلی در میانگین ۲۰ سال ایستگاه‌ها، تبخیر و تعرق تحت تغییر اقلیم افزایش یافته است (۱۳). بررسی تغییرات دراز مدت تبخیر و تعرق پتانسیل در یک دوره آماری ۵۰ ساله (۱۹۶۱-۲۰۱۰) در ایستگاه سینوپتیک سنندج با استفاده از روش فائو-پنمن-مانتیتث و برای انجام تحلیل روند برای بازه‌های زمانی مختلف به تفکیک از روش من-کندال اصلاح شده استفاده شد. نتایج حاصل از آزمون من-کندال اصلاح شده در سطح معنی‌دار ۰/۱ و ۰/۵ نشان داد که فرضیه اثر تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق پتانسیل را از سال ۱۹۸۱ به بعد برای این ایستگاه مطرح نماید (۱۴). بررسی تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل ذرت و جو در استان کرمانشاه در شرایط تغییر

اقلیم صورت گرفت که نتایج نشان داد درصد تغییرات تبخیر و تعرق گیاه بهاره ذرت در شرایط تغییر اقلیم بیشتر از گیاه پاییزه جو خواهد بود (۸). تحقیقی نیز در زمینه اثر تغییر اقلیم بر بیلان و تراز آب‌های زیرزمینی دشت رامهرمز انجام شد و با بررسی هیدروگراف واحد دشت در طی یک دوره ۱۷ ساله نتایج نشان داد که، بطور کلی روند سطح آب در این دشت نزولی است (۲۳).

در تحقیقی با استفاده از روش پنمن-مانتیتث و من-کندال تغییرات تبخیر و تعرق در کشور چین مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که تبخیر و تعرق سالانه فصلی در شرق، جنوب و شمال غربی چین تغییرات کاهشی را نشان می‌دهد (۳۰). علاوه بر این، بررسی‌های دیگری در زمینه تبخیر و تعرق و متغیرهای تاثیرگذار بر آن انجام شده که عبارتند از: شرقی و همکاران (۱۳۸۹)، دانش فراز و رزاق پور (۱۳۹۳)، دولتشاهی و همکاران (۱۳۹۳) و حلبیان و راوریان (۱۳۹۶) (۲۲، ۶، ۷ و ۱۰) که نتایج آن‌ها در زمینه‌ی تاثیر بیشتر پارامترهای ساعات آفتابی و دمای میانگین بر تبخیر و تعرق پتانسیل و روند نامشخص تبخیر و تعرق پتانسیل بوده است.

بر پایه مرور منابع، مطالعه جامعی که روند تبخیر و تعرق را در کل سطح استان یزد بررسی کند، وجود ندارد. با توجه به اهمیت سرعت باد در محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل و نقص آماری در نیمی از ایستگاه‌ها، محاسبه‌های لازم برای بازسازی داده‌های سرعت باد با استفاده از روش‌های مختلف انجام شد. تغییرات تمام پارامترهای مؤثر بر تبخیر و تعرق پتانسیل ارزیابی و رابطه آن با تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه شد. محاسبات تغییرات تبخیر و تعرق به‌صورت ماهانه و سالانه انجام شد.

هدف پژوهش حاضر، بررسی تغییر روند پارامترهای اقلیمی و شناسایی مهم‌ترین پارامتر اقلیمی مؤثر بر تغییر روند تبخیر و تعرق پتانسیل در دوره گذشته در کل استان یزد است.

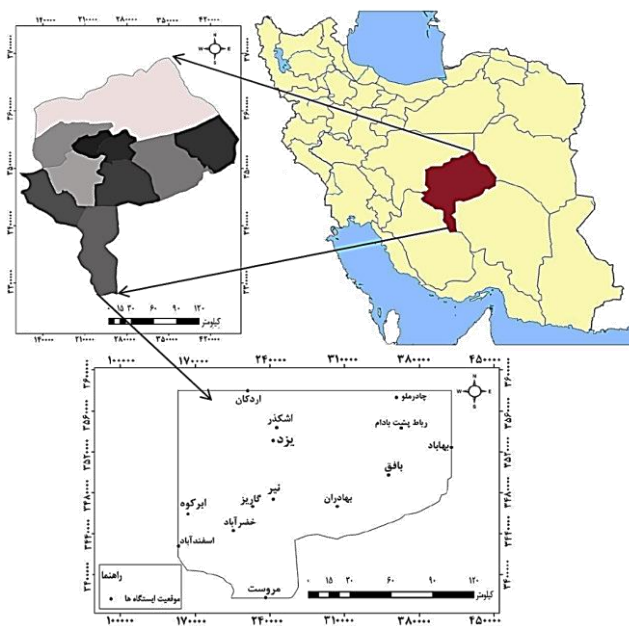
■ مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه و ایستگاه‌های مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه پهنة جغرافیایی استان یزد می‌باشد. این استان از لحاظ توپوگرافی و تغییرات ارتفاعی تنوع زیادی داشته به‌طوری که رشته کوه شیرکوه با ارتفاع ۴۰۷۵ متر

برای انجام این بررسی از دوره آماری مشترک ۱۷ ساله داده‌های کمینه و بیشینه درجه حرارت، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد ماهانه ۱۴ ایستگاه سینوپتیک و کلیماتولوژی بهره‌گیری شد. موقعیت منطقه مورد مطالعه، ایستگاه‌های مورد بررسی و مشخصات مکانی ایستگاه‌های مورد استفاده در قسمت زیر درج شده است (شکل ۱ و جدول ۱). ایستگاه نیر با ارتفاع ۲۴۷۰ متر از سطح دریا مرتفع‌ترین و ایستگاه بافق با ارتفاع ۹۵۰ متر از سطح دریا پست‌ترین ایستگاه‌های مورد مطالعه می‌باشند.

قسمت‌های مرکزی استان یزد را از بخش غربی استان که چاله ابرقو است، جدا می‌کند. از ارتفاعات دیگر به کوه خرائق با ارتفاع ۳۲۰۰ متر در مرکز استان یزد نیز می‌توان اشاره کرد. با جداسازی مناطق مرتفع از پست ملاحظه می‌شود که اراضی پست بیشتر در شمال استان و مناطق مرتفع بیشتر در جنوب و مرکز استان و به طور مساوی توزیع شده است. از لحاظ پوشش گیاهی و اراضی کشاورزی نیز باید گفت که استان یزد عموماً خشک و فاقد فعالیت‌های گسترده کشاورزی است و فقط در مناطق محدودی در سطح استان و نزدیک به محدوده‌های شهری چنین پوشش‌هایی به چشم می‌خورد.



شکل ۱. موقعیت مکانی ایستگاه‌ها

جدول ۱. ویژگی‌های جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

نام ایستگاه	طول جغرافیایی UTM	عرض جغرافیایی UTM	ارتفاع از سطح دریا (متر)
ابرکوه	۱۶۳۳۵۱/۹۳	۳۴۵۸۹۹۸/۵۳	۱۵۰۶
اردکان	۲۱۹۱۲۵/۹۷	۳۵۷۹۴۴۸/۰۵	۱۱۰۴
اسفندآباد	۱۵۴۳۸۱/۸۴	۳۴۲۷۸۲۵/۵۳	۱۴۸۵
اشکذر	۲۴۶۵۰۳/۶۲	۳۵۴۳۵۸۲/۷۱	۱۱۴۰
بافق	۳۵۱۳۷۲/۴۵	۳۴۹۷۱۶۵/۰۱	۹۵۰
بهاباد	۴۱۰۱۱۹/۵۳	۳۵۲۴۲۰۲/۷۵	۱۴۱۰
بهادران	۳۰۳۳۳۸/۴۳	۳۴۶۶۵۴۱/۴۳	۱۴۸۰
چادرملو	۳۵۸۷۴۷/۱۵	۳۵۷۲۸۲۹/۴۵	۱۴۳۰
خضرآباد	۲۰۵۸۳۵/۵۴	۳۴۴۲۹۲۶/۳۴	۱۷۳۲
رباط پشت بادام	۳۶۳۰۵۷/۸۰	۳۵۴۳۲۰۱/۸۷	۱۱۸۸
گاریز	۲۲۳۹۶۴/۰۱	۳۴۶۶۴۸۱/۳۸	۲۴۲۰
مروست	۲۳۶۰۵۸/۷۸	۳۳۷۷۴۰۷/۸۸	۱۵۴۷
نیر	۲۴۳۱۸۹/۰۲	۳۴۷۳۳۹۰/۰۲	۲۴۷۰
یزد	۲۴۳۰۲۸/۷۷	۳۵۳۰۷۲۳/۴۸	۱۲۳۰

روش تحقیق

کوکرینجینگ انجام شد سپس با استفاده از مقایسه‌ی معیار ارزیابی هر روش، بهترین روش انتخاب شد. آماره‌های تشخیص بهترین روش شامل ریشه دوم مربعات خطا و ضریب تعیین با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد (۱۸).

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

که در آن عامل: $Z^*(X_i)$ مقدار برآوردی در نقطه‌ی X_i ; $Z(X_i)$ مقدار مشاهده‌ای در نقطه X_i و n تعداد نمونه است. بهترین برآورد، شامل برآوردی است که کمترین مقدار $RMSE^1$ را دارا باشد، همچنین ضریب تعیین هر-چقدر به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده‌ی همبستگی بالا بین مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی شده می‌باشد (۱۸). باید به این نکته توجه داشت که ضریب تعیین و $RMSE$ در تمامی روش‌ها قابل برآورد است (۱۱).

در پژوهش حاضر، برای بازسازی سرعت باد با توجه به بهترین $RMSE$ و R^2 از بین روش‌های درون‌یابی قطعی، روش IDW و در مورد روش‌های زمین آماری بعد از انتخاب بهترین مدل از بین انواع مدل‌های کروی، نمایی، خطی و گوسین با استفاده از نرم‌افزار $GS+$ برای هرماه، از مدل گوسین در روش کورینجینگ استفاده گردید.

با توجه به اینکه داده‌ی سرعت باد هیچ رابطه مستقیم و قابل توجهی با داده‌های مورد استفاده در تحقیق از جمله دما، ساعات آفتابی و درصد رطوبت نسبی نداشت، به همین دلیل روش رگرسیون برای بازسازی داده‌های سرعت باد ایستگاه‌های کلیماتولوژی مناسب نبوده و از روش دقیق‌تر درون‌یابی استفاده شد.

محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل

با استفاده از داده‌های تکمیل‌شده ساعات آفتابی، سرعت باد، دمای حداقل و حداکثر و درصد رطوبت نسبی از معادله‌ی فائو-پنمن-مانتیث، تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه برای هر ایستگاه در هر سال محاسبه شد (رابطه ۳).

در اولین گام اقدام به جمع‌آوری داده‌های اقلیمی از جمله داده‌های ماهانه کمینه و بیشینه دما برحسب درجه سانتی‌گراد، میانگین سرعت باد ماهانه برحسب متر بر ثانیه، درصد رطوبت نسبی و مجموع ماهانه ساعات آفتابی ایستگاه‌های مورد مطالعه از اداره هواشناسی استان یزد شد.

بازسازی ساعات آفتابی

در مواردی که به دلیل غیبت مسئول اندازه‌گیری یا وجود نارسایی‌هایی در دستگاه اندازه‌گیری در سری داده‌های مربوط به هر ایستگاه داده‌های ناقص وجود داشت اقدام به بازسازی و تکمیل آن‌ها گردید. برای این منظور با توجه به داده‌های ساعات آفتابی ایستگاه مبنا یا مستقل و داده‌های دمای ایستگاه فاقد آمار یا وابسته، معادله و ضریب همبستگی به‌دست آمده از رابطه (۱) برای بازسازی ساعات آفتابی ایستگاه مجهول استفاده شد که این رابطه برای هر سال به صورت جداگانه به‌دست‌آمده است (۱۷). با توجه به اینکه هر ایستگاهی با ایستگاه مجاور به آن در نظر گرفته شد.

Y : ساعات آفتابی ایستگاه وابسته و X : دمای ایستگاه وابسته است

$$Y = a + bX \quad (1)$$

لازم به ذکر است با توجه به رابطه‌ی نزدیک و مستقیم دما و ساعات آفتابی، بدین منظور از روش رگرسیون بین این پارامترهای ایستگاه‌های مجاور با هم استفاده شد.

بازسازی سرعت باد

در تپژوهش حاضر، تعدادی از ایستگاه‌ها فاقد داده‌های سرعت باد ماهانه بودند، به‌همین دلیل با در اختیار داشتن داده‌های سرعت باد ماهانه ایستگاه‌های دارای آمار با روش‌های درون‌یابی اقدام به بازسازی داده‌های سرعت باد شد. ابتدا درون‌یابی به سه روش IDW ، کورینجینگ و

¹ Root Mean Square Error

یا H1 به ترتیب معادل بدون روند و وجود روند در سری زمانی داده‌های مشاهده‌ای است. از نقاط قوت این روش می‌توان به مناسب بودن کاربرد آن برای سری‌های زمانی که از توزیع آماری خاصی پیروی نمی‌کنند اشاره نمود. اثرپذیری ناچیز این روش از مقادیر حدی که در برخی از سری‌های زمانی مشاهده می‌گردند نیز از دیگر مزایای استفاده از این روش است (۲۸).

فرآیند آزمون من-کندال مورد استفاده شده بدین شرح است که ابتدا پارامتر S با استفاده از رابطه ۴ استخراج شد.

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n \text{sgn}(X_j - X_k) \quad (4)$$

که در رابطه ۴، n تعداد مشاهدات سری، X_j و X_k به ترتیب داده‌های kام و jام سری هستند. تابع علامت نیز توسط رابطه ۵ محاسبه شد.

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

سپس واریانس با استفاده از یکی از روابط ۶ یا ۷ به دست آمد.

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{t=1}^m t(t-1)(2t+5)}{18} \quad \text{اگر } n > 10 \quad (6)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad \text{اگر } n \leq 10 \quad (7)$$

که در رابطه ۶، m معرف تعداد سری‌هایی که در آن‌ها حداقل یک داده تکراری وجود دارد، و t بیانگر فراوانی داده‌های با ارزش یکسان است. سپس آماره Z از طریق رابطه (۸) محاسبه شد.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left[\frac{890}{T+273} \right] U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (3)$$

که در رابطه ۳ عامل: ET_0 تبخیر تعرق مرجع به میلیمتر در روز؛ R_n تابش خالص به مگاژول بر مترمربع در روز؛ T متوسط هوای هوا به درجه سانتی‌گراد؛ G شار گرما به داخل خاک بر حسب مگاژول بر مترمربع در روز؛ γ ضریب رطوبتی به کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد؛ Δ شیب منحنی فشار بخار به کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد؛ U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین بر حسب متر در ثانیه؛ $e_s - e_a$ کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری به کیلوپاسکال بود (۴). که هر کدام از متغیرهای فوق از فرمول‌های جداگانه‌ای برآورد شدند.

پهنه‌بندی تبخیر و تعرق با استفاده از روش‌های درون‌یابی در این پژوهش برای پهنه‌بندی مجموع سالانه تبخیر و تعرق پتانسیل نخست روش‌های IDW، کریجینگ و کوکریجینگ بررسی شدند و با توجه به R^2 بیشتر و RMSE کمتر از روش IDW و کریجینگ استفاده شد.

بررسی روند تغییرات در سری زمانی

برای تشخیص روند در سری‌های زمانی از آزمون‌های مختلفی بهره‌گیری می‌شود. این آزمون‌ها در دو گروه پارامتری و غیر پارامتری تقسیم‌بندی می‌شوند. آزمون‌های پارامتری نسبت به غیر پارامتری توان بیشتری در تشخیص روند دارا هستند و هنگام استفاده از آن‌ها بایستی داده‌ها تصادفی یا مستقل و دارای توزیع نرمال باشند. از طرفی دیگر آزمون‌های غیر پارامتری در تصادفی بودن داده‌ها قابل استفاده و به نرمال بودن داده‌ها حساس نیستند. آزمون من-کندال نمونه‌ای از آزمون غیر پارامتری است که در تحقیقات بررسی روند متغیرهای آب و هواشناسی استفاده می‌گردد (۵).

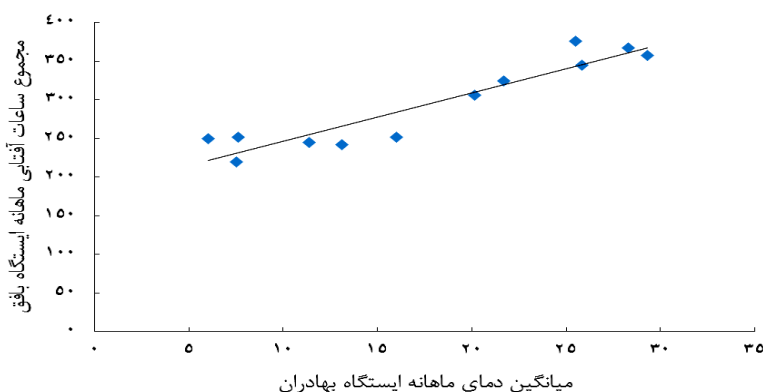
آزمون من-کندال ابتدا توسط Mann (۱۹۴۵) ارائه و سپس توسط Kendal (۱۹۷۵) توسعه یافت. از مزایای روش من-کندال می‌توان به مناسب بودن کاربرد آن برای سری‌های زمانی که از توزیع خاصی پیروی نمی‌کنند، اشاره نمود. در این آزمون فرض صفر H_0 و فرض مقابل

در تحقیق حاضر بازسازی ساعات آفتابی برای ایستگاه های اردکان، اسفندآباد، اشکذر، بهاباد، بهادران، چادرملو، خضرآباد و نیر با بکارگیری روش رگرسیون انجام شد که به دلیل حجم زیاد داده‌ها، نمونه‌ای از آن‌ها نشان داده شده است (شکل ۲ و جدول ۲).

رابطه رگرسیونی بین دمای میانگین ماهانه ایستگاه بهادران و ساعات آفتابی ماهانه ایستگاه بافق برقرار شد (شکل ۲) و با استفاده از رابطه رگرسیونی ۹ به دست آمده با جایگذاری دمای میانگین بهادران به جای x ، ساعات آفتابی ماهانه ایستگاه بهادران در سال ۲۰۰۲ محاسبه شد.

$$Y = 6/29X + 183/47 \quad R^2 = 0/88 \quad (9)$$

اطلاعات مربوط به محاسبه ساعات آفتابی ماهانه ایستگاه بهادران در سال ۲۰۰۲ به عنوان نمونه در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۲. رابطه دمای هوای ایستگاه بهادران و ساعات آفتابی ایستگاه بافق در سال ۲۰۰۲

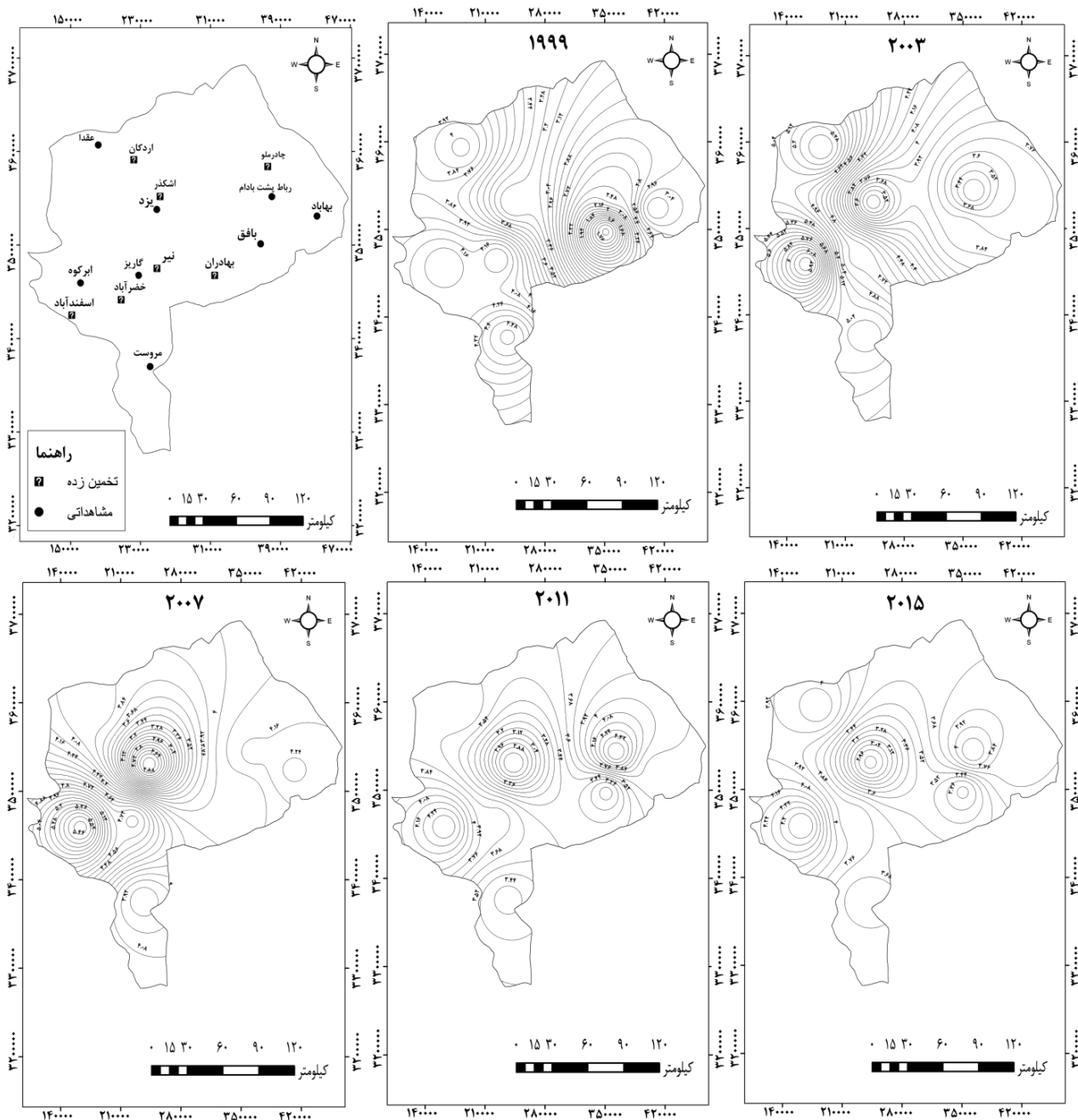
جدول ۲. بازسازی داده‌های ماهانه مجموع ساعات آفتابی ایستگاه بهادران در سال ۲۰۰۲

زمان (میلادی)	زمان (شمسی)	دمای میانگین ایستگاه بهادران در سال ۲۰۰۲	تعداد ساعات آفتابی ایستگاه بافق در سال ۲۰۰۲	تعداد ساعات آفتابی ایستگاه بهادران در سال ۲۰۰۲
ژانویه	دی	۷/۶	۲۵۱/۹	۲۳۱/۲
فوریه	بهمن	۶/۰۵	۲۴۹/۵	۲۲۱/۵
مارس	اسفند	۱۱/۴	۲۴۵/۲	۲۵۵/۱
آوریل	فروردین	۱۶	۲۵۲	۲۸۴
می	اردیبهشت	۲۱/۷	۳۲۵	۳۱۹/۹
ژوئن	خرداد	۲۵/۵	۳۷۶	۳۴۳/۸
ژوئیه	تیر	۲۹/۳	۳۵۸	۳۶۷/۷
اوت	مرداد	۲۸/۳	۳۶۷	۳۶۱/۴
سپتامبر	شهریور	۲۵/۸۵	۳۴۵	۳۴۶
اکتبر	مهر	۲۰/۱۵	۳۰۶	۳۱۰/۱
نوامبر	آبان	۱۳/۱	۲۴۲	۲۶۵/۸
دسامبر	آذر	۷/۵	۲۲۰	۲۳۰/۶

نتایج و بحث

از نتایج پهنه‌بندی سرعت باد ایستگاه‌های ابرکوه، بافق، بهاباد، رباط، گاریز، عقدا، مروست و یزد سرعت باد ایستگاه‌های اردکان، چادرملو، اشکذر، بهادران، نیر، خضراباد و اسفندآباد به دست آمد. موقعیت ایستگاه‌های مشاهداتی و تخمین زده، و فقط پهنه بندی سرعت باد برای ماه مارس که معادل ماه اسفند است در سال‌های ۱۹۹۹، ۲۰۰۳، ۲۰۰۷، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۵ میلادی در زیر نشان داده شده است (شکل ۳).

با توجه به اینکه برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل نیاز به داده‌های ماهانه بود، درون‌یابی برای داده‌های سرعت باد هر ماه جداگانه محاسبه شد و در بعضی ماه‌ها روش کریجینگ و بعضی ماه‌ها روش IDW نتیجه بهتری داشتند و RMSE آن‌ها کمتر و R^2 آن‌ها بیشتر از کوکریجینگ بودند از این دو روش برای پهنه‌بندی استفاده شد که به دلیل حجم زیاد اطلاعات مربوط به مقایسه‌ی سه روش در اینجا مقدار آن‌ها ذکر نشده است.



شکل ۳. پهنه‌بندی سرعت باد ماهیانه بر حسب متر بر ثانیه در ماه مارس سال‌های ۱۹۹۹، ۲۰۰۳، ۲۰۰۷، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۵ استان یزد

روش‌های برون‌یابی^۱ مرز پهنه بندی بر اساس موقعیت این ۱۴ ایستگاه در نظر گرفته شد. برای پهنه‌بندی تبخیر و تعرق پتانسیل در سطح استان یزد سه روش IDW، کریجینگ و کوکریجینگ بررسی شد و با مقایسه‌ی R^2 و RMSE آن‌ها با یکدیگر بهترین روش انتخاب شد (جدول ۳).

با استفاده از پهنه‌بندی‌های انجام شده در سطح استان، داده‌های سرعت باد ماهیانه بر حسب متر بر ثانیه برای هر ایستگاه فاقد آمار به‌دست آمد (شکل ۳). برای پهنه‌بندی تبخیر و تعرق پتانسیل از ۱۴ ایستگاه در سطح استان یزد استفاده شد. با توجه به عدم دقت کافی

جدول ۳. مقایسه روش‌های درون‌یابی از نظر دقت بر آورد پهنه‌بندی تبخیر و تعرق پتانسیل در استان یزد

سال	معیار ارزیابی	IDW	Kriging	Co-kriging
۱۹۹۹	RMSE	۱۴۰/۹۰	۱۵۷/۰۱	۱۸۰/۵۶
	R^2	۰/۷۰	۰/۵۸	۰/۵۶
۲۰۰۰	RMSE	۱۴۹/۹۹	۱۷۴/۳۸	۱۸۵/۲۴
	R^2	۰/۵۸	۰/۵۲	۰/۴۱
۲۰۰۱	RMSE	۱۴۸/۱۴	۱۵۸/۵۲	۱۶۰/۳۲
	R^2	۰/۸۵	۰/۷۱	۰/۶۱
۲۰۰۲	RMSE	۱۲۶/۱۳	۱۷۶/۶۸	۱۷۳/۲۹
	R^2	۰/۶۵	۰/۴۳	۰/۴۲
۲۰۰۳	RMSE	۱۴۲/۰۸	۲۰۳/۰۵	۲۰۴/۹۱
	R^2	۰/۷۳	۰/۵۲	۰/۴۹
۲۰۰۴	RMSE	۱۲۶/۴۸	۱۷۷/۷۷	۱۸۰/۰۲
	R^2	۰/۷۹	۰/۵۷	۰/۵۸
۲۰۰۵	RMSE	۱۶۱/۳۵	۱۵۳/۲۷	۱۷۹/۳۵
	R^2	۰/۵۲	۰/۶۰	۰/۴۴
۲۰۰۶	RMSE	۱۲۶/۹۹	۱۰۷/۲۴	۱۲۶/۲۳
	R^2	۰/۵۶	۰/۷۱	۰/۴۹
۲۰۰۷	RMSE	۱۲۰/۷۳	۹۵/۶۵	۱۱۰/۲۳
	R^2	۰/۴۹	۰/۵۷	۰/۵۱
۲۰۰۸	RMSE	۱۳۱/۷۸	۱۱۲/۱۴	۱۳۹/۴۹
	R^2	۰/۵۲	۰/۶۷	۰/۴۱
۲۰۰۹	RMSE	۱۵۳/۵۹	۱۶۷/۹۱	۱۶۸/۰۲
	R^2	۰/۴۶	۰/۴۱	۰/۴۲
۲۰۱۰	RMSE	۱۶۵/۷۸	۲۰۷/۸۵	۲۰۶/۵۲
	R^2	۰/۵۲	۰/۴۸	۰/۳۹
۲۰۱۱	RMSE	۱۴۶/۱۵	۱۹۸/۱۲	۱۹۸/۰۵
	R^2	۰/۶۰	۰/۵۴	۰/۵۶
۲۰۱۲	RMSE	۱۴۷/۳۷	۱۳۸/۹۶	۱۵۰/۹۲
	R^2	۰/۴۰	۰/۴۷	۰/۳۰
۲۰۱۳	RMSE	۱۲۸/۹۲	۱۲۵/۲۳	۱۳۰/۵۶
	R^2	۰/۶۷	۰/۶۸	۰/۴۲
۲۰۱۴	RMSE	۱۳۸/۷۷	۱۸۸/۰۸	۱۸۹/۲۳
	R^2	۰/۶۶	۰/۴۸	۰/۴۳
۲۰۱۵	RMSE	۱۲۹/۳۶	۱۹۲/۰۸	۱۹۲/۰۹
	R^2	۰/۷۲	۰/۶۷	۰/۵۴

^۱ Extrapolation

روند صعودی نرمالی داشته باشد، بهترین نوع واریوگرام می‌باشد (شکل ۴).

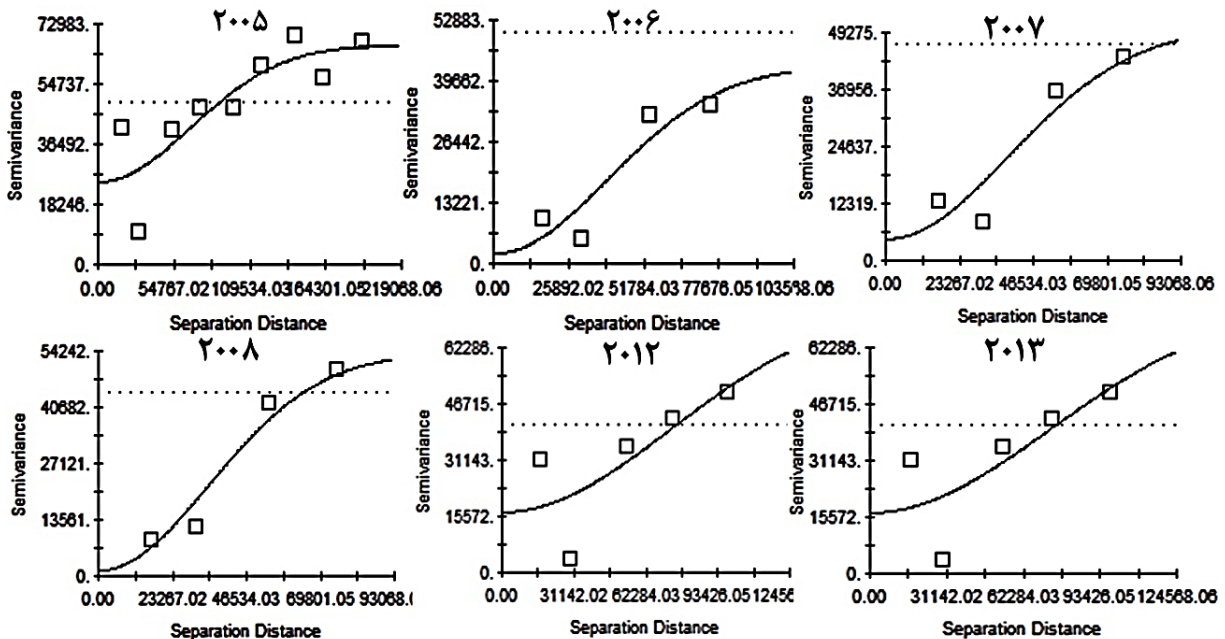
مرز و نتایج پهنه‌بندی تبخیر و تعرق پتانسیل در سال-های ۱۹۹۹، ۲۰۰۳، ۲۰۰۷، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۵ در شکل ۵ نشان داده شده است. اندازه طبعه‌بندی برای پهنه‌بندی تبخیر و تعرق پتانسیل در سطح استان، ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد و واحد آن بر حسب میلی‌متر بر سال می‌باشد. در این طول دوره آماری ۱۷ ساله کمینه مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل ۱۵۵۰ میلی‌متر در سال و بیشینه مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل ۲۴۰۰ میلی‌متر در سال بوده است.

تبخیر و تعرق پتانسیل گذشته به صورت مجموع سالانه برای سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۰۶، ۲۰۰۷، ۲۰۰۸، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ با روش کریجینگ با استفاده از مدل گوسین جواب بهتری داد، که نتایج مربوط به واریوگرام آن در جدول ۴ و شکل ۴ نشان داده شده است. ۱۱ سال دیگر با روش IDW در سطح استان یزد پهنه‌بندی شد. بهترین مدل در واریوگرام به منظور پهنه‌بندی به روش کریجینگ براساس اینکه هرچه R^2 بیشتر و RSS کمتر باشد، انتخاب می‌شود. هرچه واریوگرام از مبدا مختصات شروع شود، پراکندگی داده‌های اطراف آن بیشتر باشد و

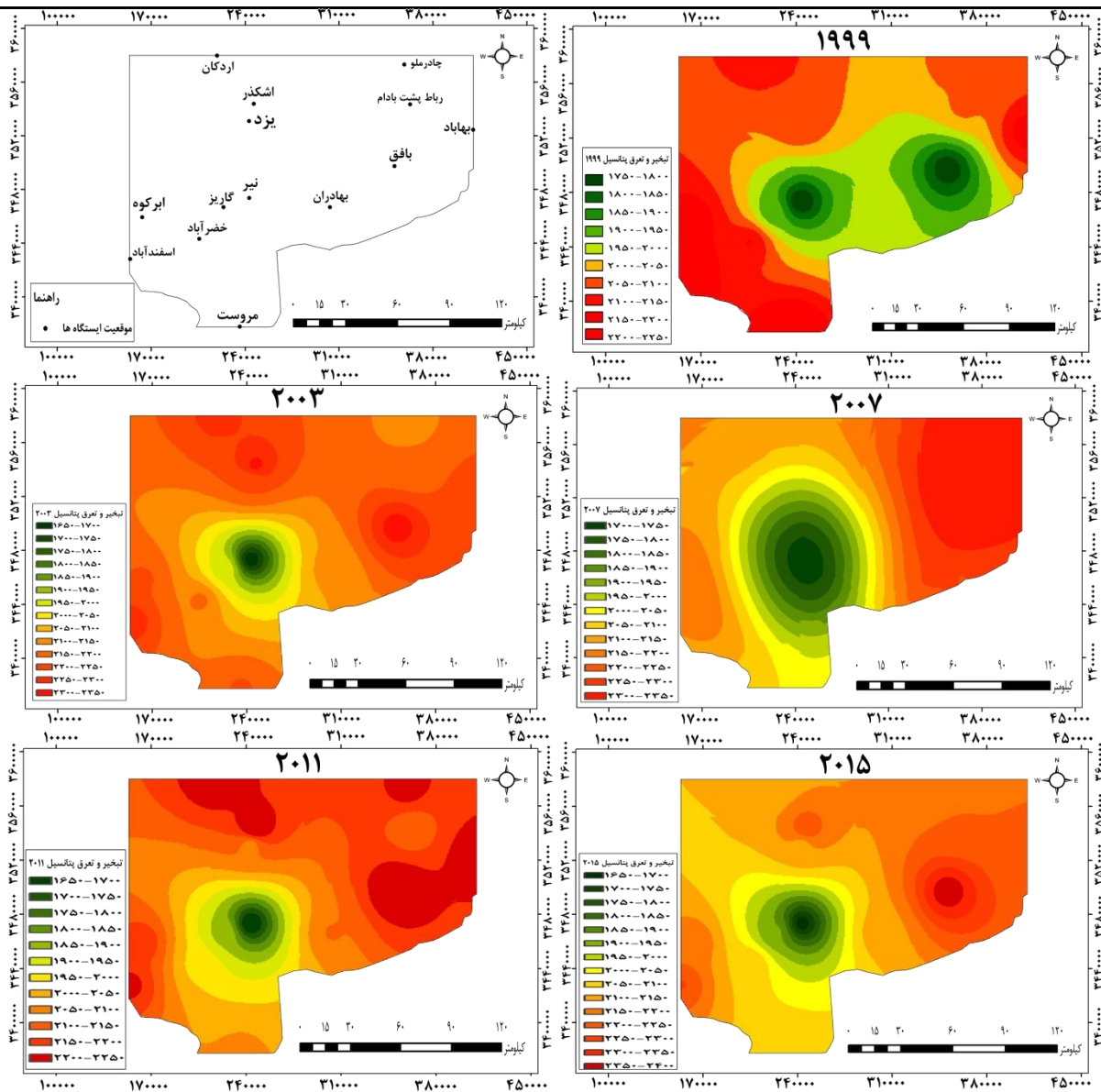
جدول ۴. مشخصات بهترین واریوگرام‌های برازش داده شده برای تبخیر و تعرق پتانسیل

مدل	RSS	R^2	A_0	C_0+C	C_0	سال
گوسی	۵/۶۱۸E+۰۸	۰/۷۱	۹۴۱۰۰	۶۶۷۷۰	۲۵۰۰۰	۲۰۰۵
گوسی	۱/۱۰۰E+۰۸	۰/۸۲	۵۵۵۰۰	۴۲۹۳۰	۲۱۰۰۰	۲۰۰۶
گوسی	۱/۱۰۳E+۰۸	۰/۸۸	۵۴۹۰۰	۵۰۳۰۰	۴۶۰۰۰	۲۰۰۷
گوسی	۳/۸۷۵E+۰۸	۰/۹۶	۴۹۲۰۰	۵۳۷۰۰	۱۳۰۰۰	۲۰۰۸
گوسی	۲/۰۷۵E+۰۸	۰/۷۹	۱۰۲۶۰۰	۷۴۵۰۰	۱۶۷۰۰	۲۰۱۲
گوسی	۲/۵۱۹E+۱۰	۰/۸۹	۴۹۷۰۰	۶۲۵۸۰	۱۰۰	۲۰۱۳

C_0 : واریانس تصادفی یا اثر قطعه‌ای، در حالت ایده آل باید صفر باشد، اما در بیشتر مواقع بزرگتر از صفر است.
 A_0 : آستانه، مقدار ثابتی که واریوگرام در دامنه تاثیر \otimes به آن می‌رسد.
 C : مولفه ساختاردار، برابر است با تفاضل مقدار آستانه و اثر قطعه‌ای.
 RSS: مجذور خطای استاندارد



شکل ۴. بهترین واریوگرام‌های برازش داده شده



شکل ۵. پهنه‌بندی تبخیر و تعرق پتانسیل بر حسب میلی‌متر در سال در قسمتی از استان یزد

وضعیت تبخیر و تعرق همانند بخش غربی بوده؛ یعنی دارای تبخیر و تعرق پتانسیل حداقل بوده‌اند اما در سال‌های بعد از آن مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل افزایش یافته تا جایی که در سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ بخش‌های شرق و جنوب شرقی استان دارای تبخیر و تعرق پتانسیل بیشینه می‌باشند.

بعد از آن برای هر کدام از متغیرهای اقلیمی ۱۷ سال گذشته از جمله دما، سرعت باد، درصد رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و در نهایت تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه شده هر ایستگاه به صورت ماهیانه، فصلی و سالانه در فایل اکسل مرتب شد و آزمون من-کندال برای بررسی روند هر کدام از آن‌ها انجام شد. به دلیل حجم زیاد نمودارها در اینجا فقط نمودارهای روند ماهانه پارامترهای دمای میانگین، سرعت باد

تبخیر و تعرق پتانسیل در بخش‌های مرتفع و کوهستانی استان شامل ارتفاعات شیرکوه و خرائق با آب و هوای سرد و مرطوب، که شامل بخش‌های مرکزی به سمت جنوب غربی می‌باشد، کمترین مقدار را دارد که با رنگ سبز نشان داده شده است. در بخش‌های شمال، شرق و غرب استان هم بیشترین مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل با رنگ قرمز نشان داده شده است. بخش‌های شمال استان یزد همان دشت یزد- اردکان را شامل می‌شود که طبیعتاً به دلیل کویری بودن و آب و هوای گرم و خشک آن منطقه و تابش شدید نور خورشید تبخیر و تعرق پتانسیل زیادی خواهد بود.

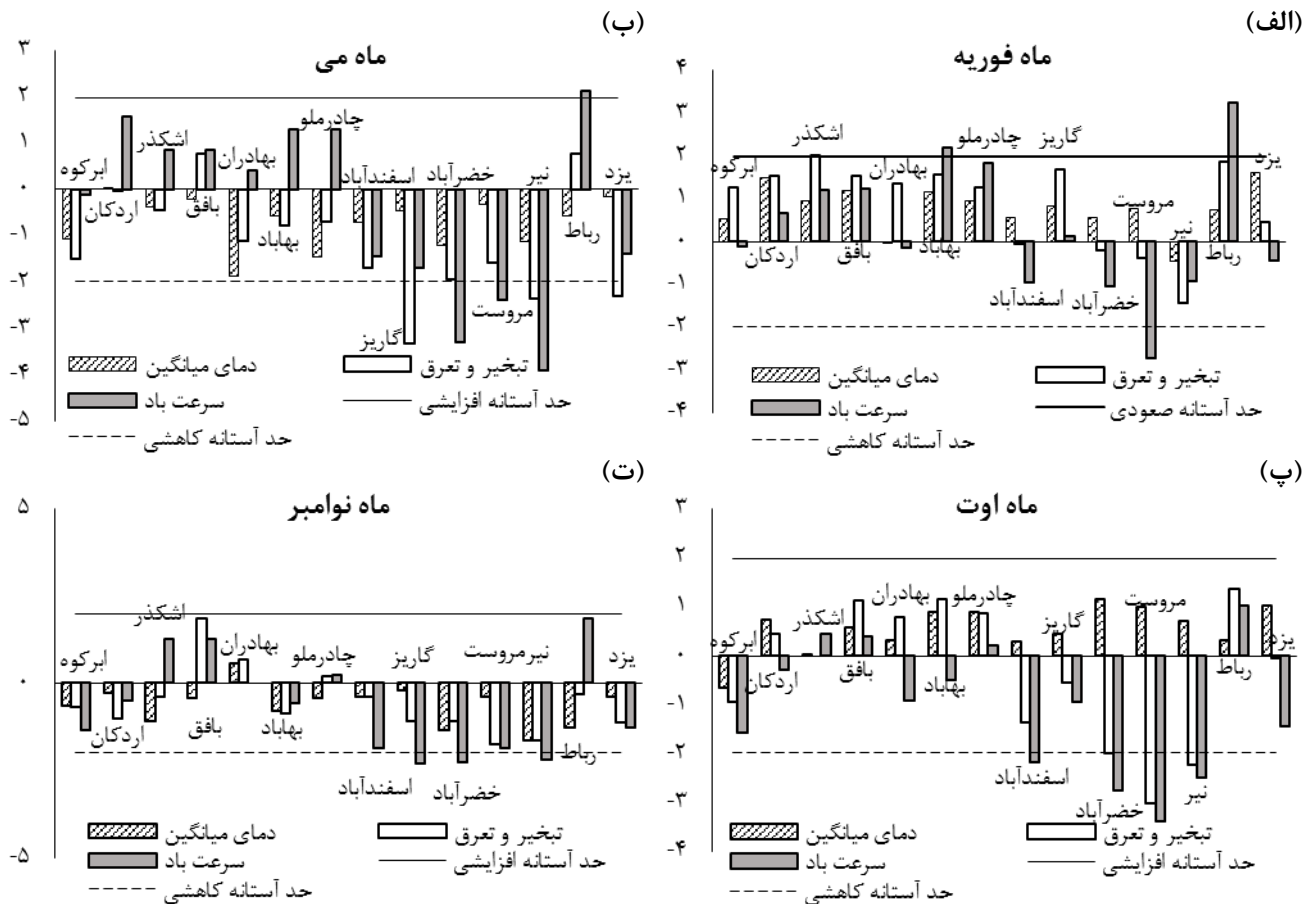
نکته‌ی قابل توجه این است که در سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۱ در بخش جنوب شرقی و تا حدودی شرق استان

در ماه اوت هم که معادل مرداد ماه است، روند کاهشی تبخیر و تعرق پتانسیل در نیمی از ایستگاه‌ها و روند افزایشی آن را در نیمی دیگر از ایستگاه‌ها مشاهده شد. در ایستگاه‌های نیر، مروست و خضرآباد روند تبخیر و تعرق پتانسیل کاهشی معنادار بوده که به دلیل کاهش معنادار سرعت باد این اتفاق رخ داده است البته لازم به ذکر است در ایستگاه‌های بخش دشتی استان مانند ایستگاه‌های بهاباد، بهادران و اردکان تاثیر افزایش دما بر تبخیر و تعرق پتانسیل بیشتر بوده است (شکل ۶، پ).

در ماه نوامبر که معادل آبان ماه است، مشاهده شد که در ۷۹ درصد ایستگاه‌ها روند تبخیر و تعرق پتانسیل در طول ۱۷ سال گذشته کاهشی بوده است. در اینجا هم اثر سرعت باد بر تبخیر و تعرق پتانسیل در ایستگاه‌های بافق، چادرملو و اثر دما بر تبخیر و تعرق پتانسیل در ایستگاه‌های بافق و اشکذر بیشتر بوده است (شکل ۶، ت).

و تبخیر و تعرق در ماه‌های فوریه، می، اوت و نوامبر (شکل ۶) و نمودارهای روند سالانه هر پارامتر (شکل ۷) نشان داده شده است. در ماه فوریه که معادل بهمن ماه است، به‌طور کلی در ۷۱ درصد ایستگاه‌ها روند افزایشی تبخیر و تعرق پتانسیل وجود دارد که اثر دما و سرعت باد هم‌راستا با افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل است اما در ایستگاه‌های مروست، خضرآباد و اسفندآباد سرعت باد کاهش و دما افزایش یافته در اینجا اثر سرعت باد بر تبخیر و تعرق پتانسیل به‌خوبی نشان داده شده است (شکل ۶، الف).

در ماه می که معادل اردیبهشت ماه است، در ۸۶ درصد ایستگاه‌ها کاهش تبخیر و تعرق پتانسیل مشاهده شد. در ایستگاه‌های بافق و رباط اثر سرعت باد بر تبخیر و تعرق پتانسیل بیشتر از دما بوده است ولی در ایستگاه‌های چادرملو، بهاباد، بهادران و اشکذر افزایش سرعت باد و کاهش دما رخ داده است که نتیجه‌ی آن کاهش تبخیر و تعرق پتانسیل بوده است (شکل ۶، ب).

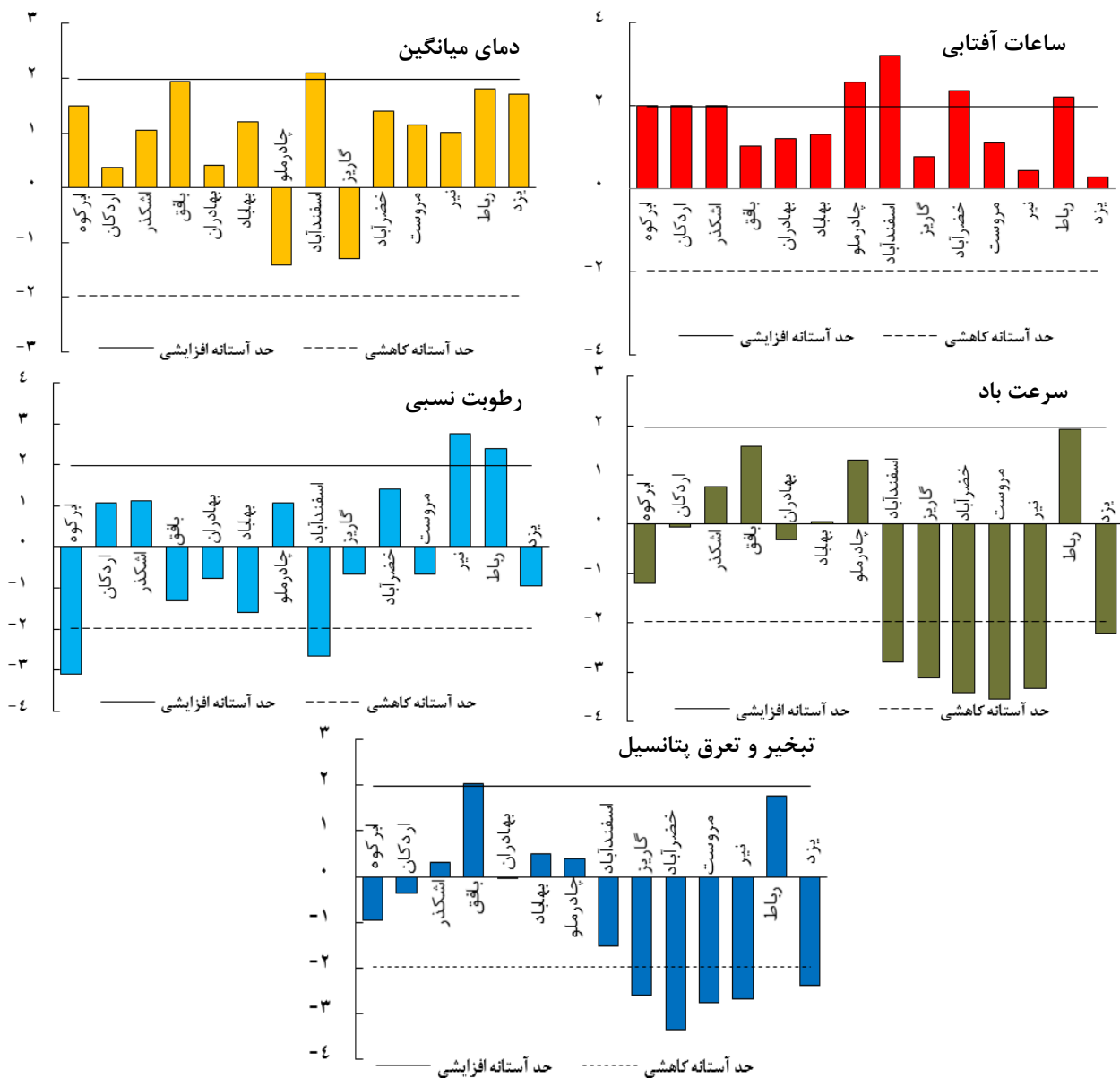


شکل ۶. روند ماهانه دمای میانگین، سرعت باد و تبخیر و تعرق پتانسیل با آزمون من-کندال در سطح اطمینان ۹۵٪ و آستانه‌های معناداری ۱/۹۶ و ۱/۹۶- در ۱۷ سال گذشته

این روند معنی‌دار بوده است. رطوبت نسبی در هشت ایستگاه‌ها روند کاهشی داشته است. سرعت باد نیز در اکثر ایستگاه‌ها روند کاهشی داشته که در ایستگاه‌های اسفندآباد، گاریز، خضرآباد، مروست، نیر و یزد روند معنی‌دار بوده است. تبخیر و تعرق پتانسیل نیز در ایستگاه‌های ابرکوه، اردکان، بهادران، اسفندآباد، گاریز، خضرآباد، مروست، نیر و یزد روند معنی‌دار بوده است. با بررسی روند هر کدام از پارامترهای اقلیمی می‌توان به این نکته پی برد که در این ایستگاه‌ها کاهش سرعت باد تاثیر زیادی بر روند کاهشی تبخیر و تعرق داشته است (شکل ۷).

با توجه به بررسی نتایج ماهانه پارامترها، هر پارامتر در ماه‌های مختلف رفتار متفاوتی نشان داده و تاثیرشان بر تبخیر و تعرق پتانسیل متفاوت بوده است. طالبی و همکاران (۱۳۸۹) نیز به بررسی روند پارامترهای اقلیمی و تبخیر و تعرق پتانسیل در سه ایستگاه طبس، مروست و پرداختند به این نتیجه رسیدند که روند افزایشی و کاهشی پارامترها در ماه‌های مختلف رفتار متفاوتی دارند (۲۶)، با نتیجه پژوهش حاضر مطابقت دارد.

دمای میانگین در تمام ایستگاه‌ها به جز گاریز روند افزایشی داشته است و در دو ایستگاه چادرملو و اسفندآباد روند معنی‌دار بود است. ساعات آفتابی نیز در همه ایستگاه‌ها روند افزایشی داشته که در نیمی از ایستگاه‌ها



شکل ۷. روند سالانه پارامترهای اقلیمی و تبخیر و تعرق پتانسیل با آزمون من-کندال در سطح اطمینان ۹۵٪ و آستانه‌های معناداری ۱/۹۶ و ۱/۹۶- در ۱۷ سال گذشته

در طول دوره آماری ۲۰۱۵-۱۹۹۹ در سطح استان یزد با بررسی پارامتر سرعت باد در تحقیق حاضر، مشاهده شد که بیشترین تاثیر را این پارامتر بر تغییر نرخ تبخیر و تعرق پتانسیل داشته است. در تمام ایستگاه‌ها رابطه تأثیر سرعت باد بر نرخ تبخیر و تعرق پتانسیل به خوبی حفظ شده است و اختلافی مشاهده نمی‌شود. به عنوان مثال، در ایستگاه گاریز با افزایش دمای میانگین و کاهش رطوبت نسبی انتظار می‌رود که تبخیر و تعرق پتانسیل در آن ایستگاه افزایش یابد اما برخلاف انتظار به دلیل تاثیر زیاد کاهش سرعت باد، تبخیر و تعرق پتانسیل کاهش پیدا کرده که به خوبی بیانگر این موضوع است که تاثیر سرعت باد نسبت به پارامترهای دما، ساعات آفتابی و رطوبت نسبی بیشتر بوده است.

به طور کلی با وجود وقوع پدیده تغییر اقلیم و افزایش دما در ۱۳ ایستگاه از ۱۴ ایستگاه مورد مطالعه، در حالی که انتظار می‌رود با افزایش مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل در چند دهه گذشته مواجه باشیم این پارامتر روند کاهشی را نشان داد. بررسی متغیرهای موثر بر تبخیر و تعرق پتانسیل نشان داد که سرعت باد در چند دهه گذشته روند کاهشی را نشان داده که این کاهش با وجود افزایش دما موجب کاهش تبخیر و تعرق پتانسیل در ۶۴/۲۸ درصد ایستگاه‌های استان یزد شده است.

این پدیده در مطالعه خشکسالی نیز بسیار حائز اهمیت است. خشکسالی زمانی اتفاق می‌افتد که آب در دسترس کاهش یابد. بنابراین عدم موازنه بین ورودی و خروجی یک سیستم آبی موجب بروز خشکسالی می‌شود. اگر بارندگی را به عنوان ورودی در نظر بگیریم، تبخیر و تعرق پتانسیل در نقش خروجی سیستم در نظر گرفته می‌شود. کاهش بارش به کمتر از حد نرمال به عنوان وقوع خشکسالی در نظر گرفته می‌شود، اما این امر زمانی صحیح است که تبخیر و تعرق کاهش نیابد. نتایج این مطالعه نشان داد که علیرغم وقوع تغییر اقلیم و افزایش دما و حتی با فرض کاهش بارش، باز هم ممکن است عوامل دیگری مانند سرعت باد با خنثی کردن اثر افزایش دما و کاهش دادن نرخ تبخیر و تعرق، در فرایند وقوع یا عدم وقوع خشکسالی نقش موثری ایفا کنند.

در ایستگاه بافق روند تبخیر و تعرق پتانسیل بصورت افزایشی معنادار و در ایستگاه رباط هم تا حدودی نزدیک به حد آستانه‌ی معناداری می‌باشد که به دلیل افزایش سرعت باد بوده است. Thomas (۲۰۰۰)، با بررسی روند تبخیر و تعرق پتانسیل یا PET برای ۶۵ ایستگاه همدیدی در کل کشور چین در طی دوره ۴۰ ساله به این نتیجه رسید که روند PET در کل کشور چین کاهشی و بر اساس مقیاس مکانی، روند افزایشی PET متعلق به شمال غرب و جنوب شرق بوده که عامل اصلی تغییرات، ساعات آفتابی بوده است (۲۷). نتیجه این پژوهش با تحقیق حاضر مطابقت ندارد.

مطالعات زیادی در این زمینه از جمله مطالعات ریاحی و همکاران (۲۰۰۷) و رودریک و همکاران (۲۰۰۷) و ۲۰۰۹ نشان داد که سرعت باد نیز یکی از دلایل مهم کاهش تبخیر و تعرق پتانسیل است (۱۹، ۲۰ و ۲۱)، که با پژوهش حاضر مطابقت دارد. در پژوهش طالبی و همکاران (۱۳۸۹) نیز، نقش دما و سرعت باد مهم‌تر از سایر پارامترهای اقلیمی ذکر شده ایت (۲۶) که با یافته های این پژوهش مطابقت دارد.

در بخش انتهایی، با استفاده از نقشه‌های پهنه‌بندی شده‌ی تبخیر و تعرق دوره ۲۰۱۵-۱۹۹۹ برای هر کدام از نقشه‌ها مقدار میانگین کل پیکسل‌ها در GIS بدست آمد و آزمون من-کندال بر روی آن‌ها انجام گرفت. طبق نتایج بدست آمده از روند کلی تبخیر و تعرق در این دوره ۰/۸۶- بوده که بیانگر روند کاهشی تبخیر و تعرق در سطح استان یزد می‌باشد.

نتیجه‌گیری

تبخیر و تعرق پتانسیل بعنوان یکی از مهمترین پارامترهای هیدرولوژیکی از دیر باز مورد توجه محققین قرار گرفته و نتایج تحلیل فرآیند این پارامتر در مدیریت منابع آب نقش اساسی دارد. از طرفی دیگر، لحاظ نکردن تاثیر تغییر اقلیم در مسائل دید نادرستی در تصمیم‌گیری‌های مدیریت منابع آب و محیط‌زیست به وجود می‌آورد، از اینرو در تحقیق حاضر سعی شد فرآیند تبخیر و تعرق پتانسیل همراه با تاثیر تغییر اقلیم بررسی شود.

بارش ها در استان به حدی بوده که این کاهش اندک احتمالی در نیاز آبی جوا بگوی آن نیست. اما برای بررسی بیشتر این موضوع پیشنهاد می شود تغییرات نرخ پوشش گیاه در مراتع طبیعی استان با استفاده از تصاویر ماهواره ای مورد بررسی قرار بگیرد و با تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل مقایسه شود. البته در این مطالعه باید به تغییرات بارش نیز همزمان توجه کرد.

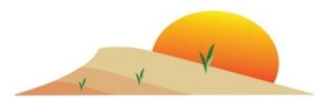
بخش اعظم آبی که گیاهان توسط ریشه های خود جذب می کنند، صرف فرایند تبخیر و تعرق می شود. از اینرو نیاز آبی گیاهان مختلف به طور مستقیم تابع تبخیر و تعرق می باشد. بنابراین تغییرات مشاهده شده در نرخ تبخیر و تعرق موجب تغییر در نیاز آبی گیاهان می شود که هم در بخش کشاورزی و هم در مورد مدیریت پوشش گیاهی در مراتع باید مدنظر قرار بگیرد. اگرچه کاهش

■ References

- 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. FAO, Rome, 300(9), D05109.
- Allen, R. G., Bastiaanssen, W., Wright, J. L., Morse, A., Tasumi, M., & Trezza, R. (2002). Evapotranspiration from satellite images for water management and hydrologic balances. In Proceedings of the 2002 ICID Conference, Montreal, Canada.
- Ahmadi Khalil Abad, M. J. (1395). *Determination of potential habitats in south of Yazd province using remote sensing techniques, geostatistics and ecological modeling*. M.Sc. Thesis. Yazd University (in Farsi).
- Azad Talatpe, N., Behmanesh, J., & Montaseri, M. (2012). Climate change study in Urmia and its effect on potential evapotranspiration. The First National Conference on Sustainable Development Strategies. In agriculture, natural resources and the environment. Tehran, Ministry of the Interior (in Farsi).
- Azad Talatpe, N., Behmanesh, J., & Montaseri, M. (2012). Prediction of Potential Evapotranspiration Using Time Series Models (Case Study: Urmia). *Water and soil research*. 213-223 (in Farsi).
- Danesh Faraz, R., & Razagh pour, H. (2014). Assessment of Climate Change Effects on Potential Evapotranspiration in West Azarbaijan Province. *Journal of Geographical Space*, Azad University of Ahar. 14 (46). 199-211 (in Farsi).
- Dolatshahi, A., Atarod, P., Sadeghi, M. M., & Zahedi Amiri, Gh. (2014). Long-term trend of climate parameters and evapotranspiration reference in the Northern Zagros area (Piranshahr), National Conference on Climate Change and Engineering for Sustainable Development of Agriculture and Natural Resources, Tehran, Tolo Farzin Science and Technology Company (in Farsi).
- Farhadi Bansoul, B., Asadi, A., & Hafez Parast Mavadat, M. (2017). Changes in evapotranspiration, corn and barley in Kermanshah province in terms of climate change. *Journal of Water and Soil Conservation Studies*, 24 (3). 185 (in Farsi).
- Goel, A. (2009). Application of SVMs Algorithms for Prediction of Evaporation in Reservoirs. World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers.
- Halbiyan, A. H., & Ravariyan, M. (2017). Investigation of potential evapotranspiration and climate parameters affecting it in Quchan city. Fourth Scientific Congress on the Development and Promotion of Agricultural Sciences, Natural Resources and Environment of Iran, Tehran, Association for the Promotion of Basic Sciences and Technologies (in Farsi).
- Hasani Pak, A. (2001). Exploration data analysis, Tehran University.

12. Karamoz, Sh. & Araghi nezhad, M. (2005). Advanced Hydrology. University of Amir Kabir (in Farsi).
13. Khalil, A. A. (2013). Effect of climate change on evapotranspiration in Egypt. *Researcher*, 5(1), 7-12.
14. Khoshkhoo, Y & Heydari, Sh. (2015). Study of long-term potential evapotranspiration changes at Sanandaj station. 6th National Conference on Water Resources Management of Iran, Kurdistan, Kurdistan University (in Farsi).
15. Madani, H. (1994). Basics of Earth Statistics. Amirkabir University of Technology. P659 (in Farsi).
16. Mohammadreza poor tabari, M., & Najafi Marghmaleki, S. (2017). Estimation of potential evapotranspiration estimation methods in Omidieh city. Fourth International Conference on Environmental Planning and Management. Tehran, Faculty of Environment, University of Tehran (in Farsi).
17. Naghdi, R., Shayannejad, M., & Sadatinejad, S. C. (2010). Comparison of Different Methods for Estimating Lost Data in the Monthly Flow of the Great Karoon Watershed. *Watershed Management Research*. 1 (1). 59-73
18. Rahim Poor, F., & Abbas Poor, R. A. (2014). The zoning of soil heavy metal contamination using kriging methods and radial base functions (Case study: Harris County). *Sepehr Geographical Information & Journalism Quarterly*. 23 (91). 55-67.
19. Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., & Rafaj, P. (2011). RCP 8.5— A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109(1-2), 33.
20. Roderick, M. L., Rotstayn, L. D., Farquhar, G. D., & Hobbins, M. T. (2007). On the attribution of changing pan evaporation. *Geophysical research letters*, 34(17).
21. Roderick, M. L., Hobbins, M. T., & Farquhar, G. D. (2009). Pan evaporation trends and the terrestrial water balance. II. Energy balance and interpretation. *Geography Compass*, 3(2), 761-780.
22. Sharghi, T., Barry Abargouei, H., Asadi, M. A., & Kowsari, M. R. (2010). Estimation of evapotranspiration of reference plant using FAO-Penman-Monteith method and its zoning in Yazd province. *Khshkbvm*. 25-33 (in Farsi).
23. Soleimani, F., Kalahchi, A., & Arsham, A. (2017). Investigating the effect of climate change on balance and groundwater levels in Ramhormoz Plain. *Journal of Watershed Extension and Development*, 5 (17). 19 (in Farsi).
24. Su, H., Wood, E. F., Wojcik, R., & McCabe, M. (2006). Sensitivity analysis of regional scale evapotranspiration predictions to the forcing data. In AGU Spring Meeting Abstracts.
25. Sudheer, K. P. (2000). Modeling hydrological processes using neural computing technique. PhD thesis, Indian nstitute of Technology, Dehli.
26. Talebi, A., Poor Mohammadi, S., & Rahimiyani, M. H (2010). Investigating the Factors Affecting Reference Evapotranspiration Using Sensitivity Analysis of the FAO Penman-Monteith Equation Case study: Yazd, Tabas and Marvast station (in Farsi).
27. Thomas, A. (2000). Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China. *International Journal of Climatology*, 20(4), 381-396.
28. Turgay, P., & Ercan, K. (2005): Trend Analysis in Turkish Precipitation Data. Hydrological Processes Published Online in Wiley Inter Science (www.Interscience.wiley.com).

29. Vinnikov, K. Y., Grody, N. C., Robock, A., Stouffer, R. J., Jones, P. D., & Goldberg, M. D. (2006). Temperature trends at the surface and in the troposphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D3).
30. Zhang, Q., Xu, C. Y., & Chen, X. (2011). Reference evapotranspiration changes in China: natural processes or human influences?. *Theoretical and Applied Climatology*, 103(3-4), 479-488.



Study of Effect of Climate Change on Potential Evapotranspiration in Arid Areas Using Geostatistics (Case Study: Yazd Province)

E. Mahdavi Nezhad ¹, S. Z. Hosseini ^{2*}, H. Maleki Nezhad ³, M.A. Asadi²

1. M.Sc Student of Watershed Management, Yazd University, Yazd, Iran.

2. Assistant Professor, Yazd University, Yazd, Iran.

3. Associate Professor, Yazd University, Yazd, Iran.

* Corresponding Author: zhosseini@yazd.ac.ir

Received date: 20/02/2018

Accepted date: 11/07/2018

Abstract

In water systems, precipitation is considered as input and evaporation as the output of the system. Water availability can be estimated from the relationship between these two factors. Therefore, evapotranspiration is the most important factor after precipitation in hydrological cycle. Evapotranspiration is influenced by climatic parameters such as temperature, wind, humidity and sunshine hours. In this research, changes in PET and effective climatic parameters, influencing on PET changes including temperature, wind, humidity, and solar radiation were investigated. For this purpose, PET in 14 weather stations of Yazd province were calculated using the FAO-Penman-Monteith method. Due to the lack of sunshine hours data in some stations, regeneration of the incomplete data was done by using regression method. Due to the lack of wind speed data at some stations, their reconstruction by using data from other stations was done by applying three methods of Inverse Distance Weighted, Kriging and Cokriging. After calculating potential evapotranspiration, PET data were zoned and their monthly and annual trends tested by Mann-Kendall test. Despite occurrence of climate change and increasing of temperature in 13 stations out of the 14 stations, it is expected an increase in potential evapotranspiration in past few decades, while, there is a decreasing trend in PET. Investigating on the effective parameters in potential evapotranspiration showed that wind speed has declined in the last few decades, and despite of an increase in temperature, potential evapotranspiration rate reduces in 64.3% of the stations. General trend of evapotranspiration was -0.86 in this period, which indicates a decrease in evapotranspiration in the Yazd province.

Keywords: FAO-Penman-Monteith; Man-Kendal test; Inverse Distance Weighted; Kriging