



جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی

سال ۲۳، پیاپی ۴۷، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۱

## تحلیل روند بلندمدت تبخیر تعرق پتانسیل در حوضه جنوبی رود ارس

مرضیه اسمعیل‌پور: دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران \*

یعقوب دین‌پژوه: استادیار اقلیم‌شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

وصول: ۱۳۹۰/۴/۲۸ پذیرش: ۱۳۹۰/۹/۲۲، صص ۲۱۰-۱۹۳

### چکیده

تبخیر-تعرق پتانسیل ( $ET_p$ ) یکی از مهمترین اجزاء چرخه هیدرولوژیکی برای برنامه‌ریزی سیستم‌های آبیاری، آماده‌سازی داده‌های ورودی برای مدل‌های هیدرولوژیکی بیلان آب و ارزیابی اثرات هیدرولوژیکی تغییر اقلیم است. در این مطالعه مقادیر  $ET_p$  با استفاده از روش بلانی-کریدل برای ۶ ایستگاه واقع در بخش جنوبی حوضه رود ارس در دوره آماری ۱۹۸۶-۲۰۰۸ محاسبه شد. افزون بر این، روند تغییرات  $ET_p$  و برخی از مهمترین متغیرهای هواشناسی موثر بر آن در دو مقیاس فصلی و سالانه تجزیه و تحلیل شد. برای این کار از آزمون ناپارامتری مان‌کنندال پس از حذف اثر خودهمبستگی داده‌ها استفاده شد. برای محاسبه شیب خط روند از روش تخمین گر Sen استفاده شد. نتایج نشان داد که روند  $ET_p$  در ایستگاه‌ها و مقیاس‌های زمانی مختلف متفاوت است. در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه خوی شدیدترین روند افزایشی معنی دار ( $P < 0.05$ ) را در مقیاس سالانه  $ET_p$  برای تجربه کرده بود. در این ایستگاه روند تغییرات حداقل رطوبت نسبی کاهشی و شدیدتر از سایر ایستگاه‌ها بود. در این ایستگاه پارامترهای مربوط به درجه حرارت هوا ( $T_{min}$ ,  $T_{max}$ ) و سرعت باد روند افزایشی نشان دادند. شیب خط روند  $ET_p$  در این ایستگاه معادل ۲۵ میلی‌متر در سال به دست آمد. روند  $ET_p$  در ایستگاه‌های ماکو و اهر نیز در مقیاس سالانه افزایشی (ولی غیر معنی دار) بود. در این ایستگاه روند نزولی رطوبت نسبی هوا تجربه شده است. روند  $ET_p$  سالانه سایر ایستگاه‌ها کاهشی (ولی غیر معنی دار) بود. در مقیاس فصلی ترکیبی از روندهای مثبت و منفی در ایستگاه‌های مورد بررسی مشاهده شده است. روند  $ET_p$  ایستگاه خوی در همه فصول سال مثبت (و در پاییز معنی دار در سطح ۰/۵٪) و در ایستگاه پارس آباد منفی (ولی غیر معنی دار) بوده است. در بین پارامترهای مورد بررسی، تعداد ساعات آفتابی در تمام ایستگاه‌ها و در دو مقیاس فصلی و سالانه دارای روند افزایشی است. حداقل، حداکثر و میانگین درجه حرارت هوا در مقیاس سالانه در همه ایستگاه‌ها روند صعودی دارد. بارش فصل پاییز در همه ایستگاه‌ها روند نزولی دارد. روند سرعت باد در همه ایستگاه‌ها (بجز جلفا و پارس آباد) در مقیاس سالانه صعودی است.

واژه‌های کلیدی: تبخیر-تعرق پتانسیل، بلانی-کریدل، روند، مان-کنندال، حوضه جنوبی رود ارس

### مقدمه

مختلف هیدرواقليمی شده و میانگین و واریانس مقادیر متغیرهای اقلیمی (مانند رطوبت نسبی، بارش، تشعشع خورشیدی و ...) را بطور معنی داری تغییر دهد. درجه حرارت هوای هوا احتمالاً یکی از مهمترین شاخص‌های مورد استفاده در تغییرات اقلیمی

یکی از موضوعات مهم جوامع بشری در قرن حاضر گرم شدن جهانی ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای و بحران منابع آب است. گرم شدن جهانی ممکن است باعث تغییرات مهمی در فرآیندهای

آبیاری محصولات زراعی و باغی و مدیریت منابع آب در هر منطقه یک پیش شرط ضروری است. مطالعات متعددی در رابطه با تغییرات  $ET_p$  در نقاط مختلف جهان انجام شده است که می‌توان به برخی موارد زیر اشاره کرد:

توماس (۱۹۹۹) روند تغییرات  $ET_p$  را در چین در دوره آماری ۱۹۹۳-۱۹۵۴ با روش پارامتری بررسی کرد. او  $ET_p$  را با روش پنمن مونتیس به دست آورد. او گرچه روند کاهش  $ET_p$  را برای کل کشور چین گزارش نموده ولی روند افزایشی  $ET_p$  را برای شمال غرب و جنوب شرق چین گزارش نمود. او عامل اصلی تغییرات  $ET_p$  را در کشور چین تعداد ساعات آفتابی گزارش کرده است.

خصوصیات تغییر  $ET_p$  با استفاده از روش پنمن مونتیس در حوضه رودخانه یانگتز توسط خو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۶) مورد بررسی قرار گرفت. ایشان نتیجه گرفتند تغییرات  $ET_p$  از لحاظ زمانی و مکانی با تغییرات تشتک تبخیر هماهنگی نشان می‌دهد. همچنین ضریب همبستگی بین تبخیر تعرق گیاه مرجع و تشتک تبخیر هم در مقیاس فصلی و هم مقیاس سالانه بالا است. کل حوضه نیز تغییرات کاهش معنی داری هم در مقادیر  $ET_p$  و هم تشتک تبخیر نشان می‌دهد.

گونگ و همکاران (۲۰۰۶) حساسیت  $ET_p$  را به متغیرهای اقلیمی در حوضه رودخانه یانگتز در دوره آماری ۴۱ ساله با استفاده از آمار ۱۵۰ ایستگاه تحلیل کردند. ایشان از روش فائو ۵۶ پنمن مونتیس برای محاسبه  $ET_p$  استفاده کردند. پارامترهای مورد استفاده ایشان شامل درجه حرارت هوای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی بود. ایشان با استفاده از

هم در مقیاس جهانی و هم مقیاس منطقه ای است. به عنوان یک نتیجه تغییرات اقلیمی ممکن است تاثیر معنی دار روی برخی از فرایندهای هیدرولوژیکی مثل رواناب، تبخیر تعرق، رطوبت خاک و آب زیرزمینی داشته باشد. تبخیر تعرق ( $ET$ ) مهمترین بخش تشکیل دهنده چرخه هیدرولوژیکی پس از بارش است و نیاز آبی گیاهان را تعیین می‌کند. هر گونه تغییر در پارامترهای اقلیمی به دلیل گرمایش جهانی تبخیر تعرق را متاثر خواهد کرد. بنا به گزارش گویال (۲۰۰۴) گرمایش جهانی احتمالی شرایط خشکی را در مناطق خشک جهان با افزایش تبخیر تعرق پتانسیل و تشدید فرایند بیابان زایی افزایش خواهد داد. فرایند  $ET$  نه تنها به میزان تابش خورشیدی، بلکه به دیگر عوامل اقلیمی مانند درجه حرارت هوای هوا، رطوبت و سرعت باد بستگی دارد. از آنجا که مقادیر تابش و دیگر پارامترهای اقلیمی از محلی به محلی دیگر و با زمان تغییر می‌یابد،  $ET$  نیز دارای تغییرات زمانی و مکانی است (علیزاده، ۲۲۱، ۱۳۸۲).

بنا به گزارش‌های علمی، متوسط درجه حرارت هوای سطح زمین طی قرن بیستم در حدود ۰/۶ درجه سانتی گراد افزایش یافته است و انتظار می‌رود این افزایش درجه حرارت هوای هوا به افزایش مقادیر تبخیر تعرق منجر شود و اتمسفر را قادر سازد تا مقادیر بیشتری از بخار آب را جا به جا کند. بنابراین گرم شدن جهانی زمین، ممکن است مولفه‌های چرخه هیدرولوژیکی را تغییر داده و منابع آب جهانی در زمان و مکان دوباره توزیع شود. این امر ممکن است موجب تشدید بیابان زایی در کشورهای خشک و نیمه خشک مثل ایران گردد (وانگ، ۲۰۰۸: ۱۳؛ طبری و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۲۸). هم چنین اطلاع از تغییرات تبخیر تعرق پتانسیل ( $ET_p$ ) برای برنامه‌ریزی دقیق

کردند. آنها نشان دادند که مقدار  $ET_p$  و  $E_{pan}$  در منطقه روند افزایشی داشته است.

دین پژوه و همکاران (۲۰۱۱) روند  $ET_p$  را در ایران در طی دوره آماری ۱۹۶۵-۲۰۰۵ با استفاده از آمار ۱۶ ایستگاه سینوپتیک در مقیاس ماهانه و فصلی مورد بررسی قرار دادند. ایشان  $ET_p$  را با استفاده از روش فائو پنمن مونتیس محاسبه کردند و با استفاده از آزمون ناپارامتریک مان کنдал و تخمین گر شیب Sen روند  $ET_p$  را مورد بررسی قرار دادند. نتیجه پژوهش ایشان نشان داد که تعداد ایستگاههای با روند افزایشی در  $ET_p$  نسبت به تعداد نظیر حاوی روند کاهشی در ایران، بیشتر است. در مقیاس زمانی ماهانه تعداد روندهای افزایشی مشاهده شده نسبت به روند کاهشی بیشتر بود.

جاجاریا و همکاران (۲۰۱۱) روند تبخیر و تعرق گیاه مرجع را در ناحیه شمال شرق هندوستان مطالعه کردند. آنها از روش مان کنдал پس از حذف اثر ضریب خودهمبستگی مرتبه اول استفاده کردند. نامبردگان با استفاده از ۲۲ سال دوره آماری و  $Et_0$  به نتایج زیر دست یافتند:  $Et_0$  فصلی در منطقه مذکور دارای روند کاهشی بود به ویژه این کاهش در فصل پیش از مونسون معنی دار بوده است. نامبردگان نتیجه گرفتند که علت کاهش  $Et_0$  در منطقه به کاهش تشعشع خورشیدی و سرعت باد مربوط بوده است.

ژانگ و همکاران (۲۰۱۱) به مقایسه تغییرات تبخیر تعرق پتانسیل بین حوضه رودخانه یلو و پیارل پرداختند. ایشان از آمار روزانه ۴۳ ایستگاه واقع در حوضه پیارل و ۶۵ ایستگاه در حوضه یلو برای تحلیل تغییرات تبخیر تعرق واقعی، تبخیر تعرق گیاه مرجع و بارش استفاده کردند. نتایج نشان دهنده کاهش تبخیر تعرق واقعی در هر دو حوضه بود. همچنین

روش تحلیل ضرایب حساسیت نتیجه گرفتند رطوبت نسبی از جمله حساس ترین متغیرهای هواشناسی در تعیین تبخیر تعرق ناحیه است.

ژانگ و همکاران (۲۰۰۹) روند تغییرات  $ET_p$  را در خطه گیگایی- تایتان (چین) در طول دوره آماری ۱۹۷۱-۲۰۰۴ بررسی کردند. آنها نشان دادند که روند کاهشی متغیر مذکور در منطقه حاکم است. نامبردگان با استفاده از مدل چند متغیره نشان دادند که مهمترین متغیر دخیل در  $ET_p$  منطقه مذکور شامل درجه حرارت هوا، رطوبت نسبی هوا، تابش آفتاب و سرعت باد است.

جاجاریا و همکاران (۲۰۰۹) روند تغییرات تبخیر از تشت را در ناحیه شمال شرق هندوستان بررسی کردند. آنها با روش های مان کنдал و پارامتری نشان دادند که  $E_{pan}$  در فصول مونسون و قبل از مونسون روند کاهشی دارد. ایشان کاهش  $E_{pan}$  را به کاهش ساعات آفتابی هوا نسبت داده اند.

ژانگ و همکاران (۲۰۱۱) تغییرات  $ET_p$  را در کشور چین با استفاده از روش پنمن مونتیس و آزمون مان کنдал مورد بررسی قرار دادند. ایشان از آمار هواشناسی ۵۹۰ ایستگاه استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که  $ET_p$  سالانه و فصلی در شرق، جنوب و شمالغرب چین تغییرات کاهشی نشان می دهد. همچنین متغیرهای متفاوت هواشناسی عامل تغییرات  $ET_p$  هستند چنانکه در شرق چین تغییرات تابش خالص و در شمال غرب چین رطوبت نسبی روی تغییرات  $ET_p$  موثر هستند.

آبتیو و همکاران (۲۰۱۱) روند تغییرات  $ET_p$  و تبخیر از تشت را در ۹ ایستگاه هواشناسی فلوریدای جنوبی و در دوره آماری ۱۹۹۲-۲۰۰۹ بررسی کرد. آنها  $ET_p$  را با روش آبتیو و پنمن مونتیس محاسبه

نشده است بنابراین، هدف این مطالعه بررسی روند تغییرات  $ET_p$  در حوضه جنوبی رود ارس با روش ناپارامتری مان کندال (با روش اصلاح شده برای کلیه ضرایب خودهمبستگی معنی دار) است.

### مواد و روش‌ها

حوضه آبریز رود ارس در ایران بین مختصات جغرافیایی  $۴۴^{\circ}۰۳'$  تا  $۴۸^{\circ}۴۱'$  طول شرقی و  $۳۷^{\circ}۴۷'$  تا  $۲۹^{\circ}۴۶'$  عرض شمالی واقع گردیده و مهمترین و پرآب ترین رودخانه منطقه مورد مطالعه بشمار می‌رود (شکل ۱). مرتفع‌ترین نقطه در این حوضه قله سبلان با  $۴۸۱۱$  متر و پست‌ترین آن با ارتفاع  $۲۰$  متر در محل خروجی رودخانه ارس واقع در مرز ایران و جمهوری آذربایجان قرار دارد. حوضه آبریز رودخانه ارس، در خاک ایران مساحتی بالغ بر  $۳۹۴۷۸$  کیلومترمربع را دارا بوده و حدود  $۸۱/۵$  درصد آن در مناطق کوهستانی و کوهپایه‌ها واقع گردیده است.  $۱۸/۵$  درصد بقیه را دشتهایی تشکیل داده اند که در همه قسمت‌های حوضه پراکنده‌اند (کیانی سفیدان جدید، ۱۳۸۴: ۱۷).

حوضه آبریز رود ارس در ایران  $۲۲$  درصد وسعت حوضه آبریز دریای خزر را تشکیل می‌دهد. وجود رشته کوه‌های البرز و باریک بودن کناره خزر در شمال ایران، سبب می‌شود که جریانهای هوای قطبی که از روی دریای خزر عبور می‌کنند، با اخذ رطوبت کافی، بارندگی قابل توجهی را در حوضه ارس، به ویژه در قسمت شرقی آن و دیگر مناطق به وجود آورند. شمال آذربایجان تا نواحی نزدیک اهر، از این موهبت بهره مند بوده ولی قسمت‌های غربی حوضه ارس از این بارندگی‌ها بی‌نصیب است بنابراین، این مناطق

قسمت‌های میانی و بالادست حوضه یلو دارای مقادیر افزایشی تبخیر تعرق گیاه مرجع بود. در حوضه رودخانه پیارل تشدید شهرنشینی و افزایش هواویزها ممکن است در تغییرات تبخیر تعرق دخیل باشد.

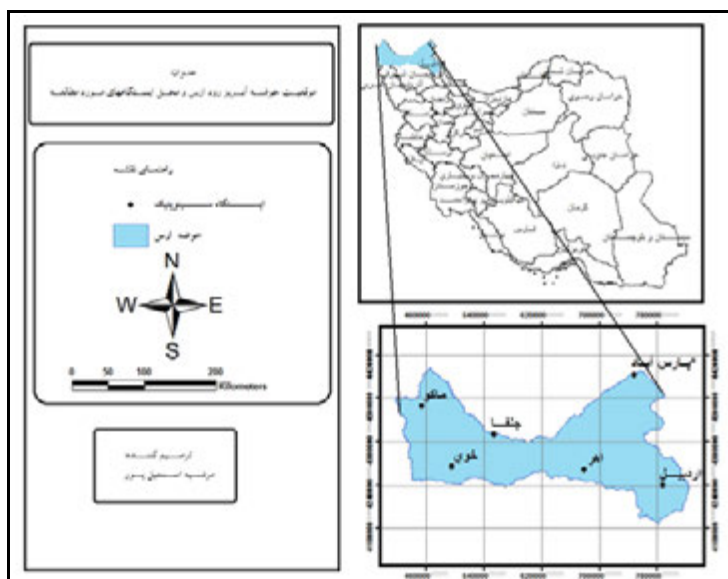
شیر غلامی و همکاران (۱۳۸۳) روند  $ET_p$  را با استفاده از آمار  $۳۴$  ایستگاه سینوپتیک در ایران مورد بررسی قرار دادند. ایشان مقدار  $ET_p$  را با استفاده از روش فائو پنمن مانیتیس محاسبه کردند و برای آزمون روند از روش کمترین مربعات و آزمون پارامتری  $t$  استفاده کردند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد  $۱۲$  درصد ایستگاه‌ها روند مثبت معنی دار،  $۲۶$  درصد منفی معنی دار و بقیه ایستگاه‌ها بدون روند هستند.

سبزی پرور و همکاران (۱۳۸۷) از آمار هواشناسی ایستگاه سینوپتیک فرودگاه همدان در دوره آماری  $۱۳۸۴-۱۳۵۰$  جهت ارزیابی حساسیت مدل‌های مختلف  $ET_p$  به سیگنال‌های تغییر اقلیم استفاده کردند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که مدل‌های مورد استفاده جهت برآورد  $ET_p$  بیشترین حساسیت را به پارامترهای تابش و درجه حرارت هوا نشان می‌دهند.

طبری و همکاران (۲۰۱۰) روند تغییرات  $ET_p$  را در  $۲۰$  ایستگاه هواشناسی در دوره  $۲۰۰۵-۱۹۶۶$  با روش مان کندال بررسی کردند. نامبردگان از روش تخمین گر سن برای برآورد شیب خط روند استفاده کردند. ایشان مقدار  $ET_o$  را با روش پنمن مونیتیس به دست آوردند. آنها نشان دادند که در  $۷۰$  درصد ایستگاه‌ها روند مثبت حاکم است. مقدار شیب خط روند بین  $۲/۳ (+)$  تا  $۱۱/۲۸ (+)$  میلیمتر در سال گزارش شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تاکنون مطالعه جامعی روی روند تغییرات  $ET_p$  در بخش‌های جنوبی حوضه رودخانه ارس در ایران انجام

دانش، ۱۳۷۳: ۱۵۵).

سرزمین‌های نسبتاً خشکی محسوب می‌شوند (موحد



شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز رود ارس و محل ایستگاههای مورد مطالعه

برای محاسبه  $ET_p$  به روش بلانی - کریدل از داده‌های ایستگاههای سینوپتیک واقع در حوضه جنوبی رود ارس در دوره آماری ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۸ (۲۳ سال) استفاده گردید. این داده‌ها شامل میانگین درجه حرارت هوا، حداقل رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی به صورت ماهانه هستند. مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است.

داده‌های مورد نیاز این مطالعه از سازمان هواشناسی ایران اخذ و برای کنترل کیفی نمودار سری زمانی داده‌ها برای یکایک پارامترها رسم گردید. در این راستا تعداد معدودی داده‌های غیر معمول که از تعداد میانگین انحراف زیادی داشتند حذف و به جای آنها میانگین دراز مدت قرار داده شد. با استفاده از آزمون Mockus کافی بودن تعداد داده‌ها بررسی و تایید شد.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه واقع در حوضه جنوبی رودخانه ارس

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m)	نوع ایستگاه	دوره آماری	میانگین بارش سالانه (میلیمتر)	درصد داده ناقص درجه حرارت هوا	نوع اقلیم
اهر	۴۷°۴۸'	۳۸°۲۶'	۱۳۹۰/۵	سینوپتیک	۱۹۸۶-۲۰۰۸	۲۸۹/۹	ندارد	BSK
اردبیل	۴۸°۱۷'	۳۸°۱۵'	۱۳۳۲	سینوپتیک	۱۹۸۶-۲۰۰۸	۲۸۲/۶	ندارد	BSK
جلفا	۴۵°۴۰'	۳۸°۴۵'	۷۳۶/۲	سینوپتیک	۱۹۸۶-۲۰۰۸	۲۰۱/۴	ندارد	BWK
خوی	۴۴°۵۸'	۳۸°۳۳'	۱۱۰۳	سینوپتیک	۱۹۸۶-۲۰۰۸	۲۵۹/۳	ندارد	BSK
ماکو	۴۴°۲۶'	۳۹°۲۰'	۱۴۱۱/۳	سینوپتیک	۱۹۸۶-۲۰۰۸	۲۹۵/۸	ندارد	BSK
پارس آباد	۴۷°۵۵'	۳۹°۳۹'	۳۱/۹	سینوپتیک	۱۹۸۶-۲۰۰۸	۲۶۵	ندارد	BSK

در این مطالعه از روش‌های زیر استفاده شده است

### روش بلانی- کریدل

روش مورد استفاده جهت برآورد  $ET_p$  روش بلانی- کریدل می باشد. علت انتخاب این روش این است که نتایج این روش در حوضه جنوبی رود ارس همبستگی زیادی با مقادیر پنمن ماننسیس و تشتک تبخیر نشان می دهد (اسمعیل پور، ۱۳۸۶). افزون بر این، فولادمند و احمدی (۲۰۰۹) نیز گزارش کرده‌اند که روش بلانی کریدل در منطقه خشک و نیمه خشک استان فارس نیز نتایج مشابه با روش پنمن موتنسیس به دست می دهد. مقادیر  $ET_p$  با استفاده از روش مذکور در مقیاس فصلی و سالانه محاسبه شد.

$$E = a_{BC} + b_{BC}f \quad (۱)$$

$$f = P(0.46T + 8.13) \quad (۲)$$

(۳)

$$a_{BC} = 0.0043RH_{\min} - \left(\frac{n}{N}\right) - 1.41$$

(۴)

$$b_{BC} = 0.82 - 0.0041(RH_{\min}) + 1.07(n/N) + 0.066(U_{day})$$

$$- 0.006(RH_{\min})\frac{n}{N} - 0.0006(RH_{\min})(U_{day})$$

که در آن:

$P$  = نسبت تعداد ساعات روشنایی واقعی روزانه به متوسط تعداد ساعات روشنایی سالانه که جدول استخراج می شود.  $T$  متوسط دمای هوا بر حسب درجه سانتیگراد،  $n$  = تعداد ساعات واقعی آفتاب،  $N$  = حداکثر ساعات ممکن تابش آفتاب که مقدار آن در هر نقطه بستگی به عرض جغرافیایی دارد.  $RH_{\min}$  = حداقل رطوبت نسبی (درصد)،  $U_{day}$  = سرعت باد در طول روز در ارتفاع ۲ متری (متر در ثانیه) (شاتلورث، ۱۹۹۳، ۱۸، ۴).

آزمون روند

معنی داری روند سریهای هواشناسی و مقادیر  $ET_p$  با استفاده از آزمون مان- کندال (MK) مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی معنی داری روند و همچنین نوع روند (کاهش یا افزایش) ابتدا نمودارهای خود همبستگی داده‌ها با استفاده از نرم افزار Minitab ترسیم و مورد بررسی واقع گردید. برای سریهای با خود همبستگی غیر معنی دار آزمون MK1 (مان کندال کلاسیک) و برای سری‌های با خودهمبستگی‌های معنی دار آزمون MK3 (مان کندال پس از حذف اثر ضریب خودهمبستگی معنی دار) مورد استفاده قرار گرفت. این دو آزمون بعداً شرح داده شده است.

### آزمون Mann-Kendall مرسوم

این روش، که فرم کلاسیک آزمون مان- کندال است در بسیاری از مطالعات مربوط به روند پارامترهای اقلیمی مورد استفاده قرار گرفته است. اگر طول سری زمانی در دوره  $n$  باشد ابتدا آماره  $S$  به شرح زیر محاسبه می شود:

(۵)

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad ; \forall (j>i)$$

در رابطه فوق  $\text{sgn}(X)$  تابع علامت بوده و به صورت زیر تعریف می شود:

$$\text{sgn}(X) = \begin{cases} 1 & \text{for } X > 0 \\ 0 & \text{for } X = 0 \\ -1 & \text{for } X < 0 \end{cases} \quad (۶)$$

$$E(s) = 0 \quad (۷)$$

(۸)

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18}$$

آماره  $Z$  مان-کندال اصلاح شده در رابطه (۷)  $V(S)$  با  $V(S)^*$  جایگزین گردید. مقدار آماره  $Z$  به دست آمده از رابطه فوق با  $Z$  استاندارد نرمال در سطح معنی داری  $\alpha$  مقایسه می گردد. بطوریکه اشاره شد چنانچه مقدار آماره  $|Z|$  مان-کندال بیشتر از ۱/۶۴۵ باشد نشان دهنده این است که روند (کاهش یا افزایش) در سطح ۱۰ درصد معنی دار است. اگر قدر مطلق آماره  $Z$  از ۱/۹۶ بیشتر باشد روند در سطح ۵ درصد و در صورتی که بیشتر از ۲/۳۳ باشد در سطح ۱ درصد معنی دار است.

در این مطالعه شیب خط روند با روش ناپارامتری تخمین گر شیب Sen،  $\beta$ ، به شرح زیر برآورد شد:

$$\beta = \text{median} \left[ \frac{X_j - X_i}{j - i} \right] \quad (\forall j > i) \quad (12)$$

مقادیر مثبت  $\beta$  نشان دهنده شیب رو به بالا و مقادیر منفی آن نشان دهنده شیب رو به پایین است (کومار و همکاران، ۲۰۰۹، ۱۷۶).

### نتایج و بحث

نتایج روند تبخیر-تعرق پتانسیل و متغیرهای هواشناسی موثر بر آن روند  $ET_p$  محاسبه شده با روش بلانی کریدل و پارامترهای موثر در آن بشرح زیر مورد بررسی قرار گرفت. آزمون روند برای سری‌هایی که فاقد  $r_k; k=1,2,\dots$  معنی دار بودند با MK1 و برای دیگر سری‌ها از روش MK3 انجام شد. نتایج مقادیر آماره  $Z$  تبخیر تعرق پتانسیل محاسبه شده و پارامترهای موثر بر آن در جداول ۲ تا ۴ آورده شده است. لازم به ذکر است در این جداول ارقام معنی دار پررنگ نشان دهنده معنی داری ۵، ۱۰ و ۱ درصد به ترتیب بدون ستاره، با یک ستاره و با دو ستاره مشخص شده‌اند. نقشه تغییرات مکانی  $ET_p$  در دوره زمانی ۲۰۰۸-۱۹۸۶ در مقیاس سالانه و فصلی در شکل ۲ نشان داده شده است.

که در آن  $t_i$  تعداد مقادیر مشابه برای مشاهده  $i$  و  $n$  تعداد داده‌ها است. در نهایت آماره آزمون مان-کندال،  $Z$ ، با توجه به مقدار  $S$  محاسبه شده به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{V(S)}} & \text{for } S > 0 \\ 0 & \text{for } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{V(S)}} & \text{for } S < 0 \end{cases} \quad (9)$$

در این مطالعه فرض صفر ( $H_0$ ) به منزله عدم وجود روند معنی دار در بین سری بوده و فرض مخالف ( $H_1$ ) به منزله وجود روند معنی دار در نظر گرفته شد.  $H_0$  پذیرفته می‌شد اگر قدر مطلق  $Z$  کوچکتر از ۱/۶۴۵ (در سطح معنی داری ۱۰٪) یا ۱/۹۶ (در سطح معنی داری ۵٪) یا ۲/۳۳ (در سطح معنی داری ۱٪) می‌شد. در غیر این صورت فرض صفر رد شده و فرض مخالف پذیرفته می‌شد.

آزمون Mann-Kendall اصلاح شده (MK3)

آزمون اصلاح شده مان-کندال توسط حامد و رائو (۱۹۹۸) ارائه و توسط کومار و همکاران (۲۰۰۹) برای تحلیل روند رودخانه‌های هند به کار رفته است. در این روش اثر همه ضرایب خود همبستگی معنی دار از داده‌ها حذف می‌شود و برای سری‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرد که ضرایب خود همبستگی آنها در یک یا چند مورد معنی دار باشند. در این روش ابتدا واریانس اصلاح شده  $V(S)^*$ ، برای محاسبه آماره مان-کندال بشرح زیر محاسبه می‌شود:

$$V(S)^* = V(S) \frac{n}{n^*} \quad (10)$$

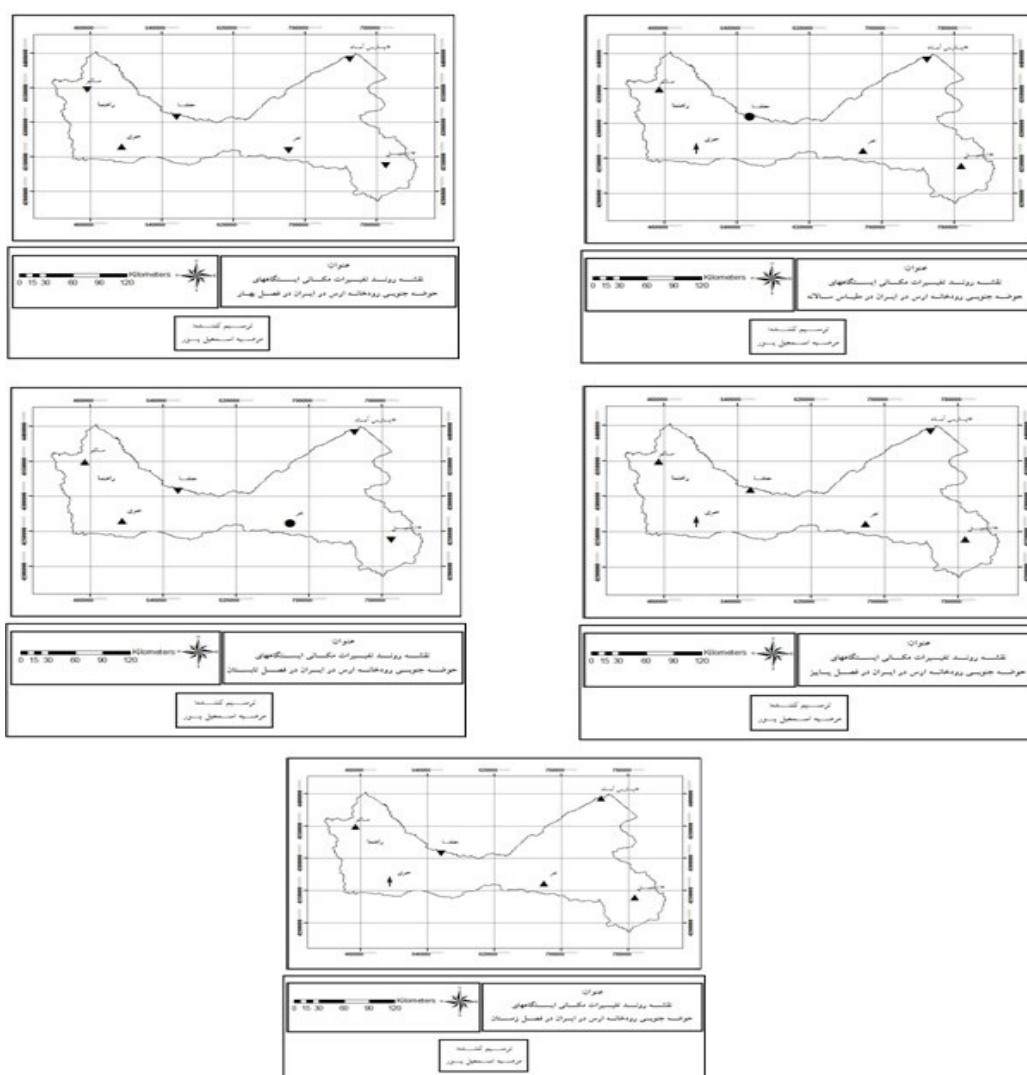
$$(11)$$

$$\frac{n}{n^*} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-1} (n-i)(n-i-1)(n-i-2)r_i$$

و  $r_i$  ضرایب خود همبستگی با تاخیر  $i$  بوده و  $V(S)$  از رابطه (۶) تخمین زده شد. برای محاسبه

مقیاس سالانه و فصلی روند افزایشی را نشان می‌دهد. با این حال روند افزایش  $T_{min}$  و  $T_{mean}$  در فصل تابستان در سطح معنی داری ۵ درصد معنی دار بود. رطوبت نسبی هوا روند کاهشی نشان می‌دهد که در فصل زمستان در سطح ۱۰ درصد و در فصل تابستان در سطح ۵ و در فصل پاییز در سطح ۱۰ درصد معنی دار بوده است.

همان طور که از جداول ۲ تا ۴ ملاحظه می‌شود از بین همه ایستگاههای مورد مطالعه، تنها ایستگاه خوی روند افزایشی معنی داری را برای متغیر  $ET_p$  سالانه نشان داده است. در ایستگاه اهر  $ET_p$  در مقیاس سالانه، زمستان و پاییز روند افزایشی غیرمعنی دار نشان می‌دهد. با این حال در اهر  $ET_p$  در فصل بهار نزولی و غیر معنی دار است در اهر هر سه متغیر مربوط به درجه حرارت هوا در ایستگاه اهر در هر دو



شکل ۲- نقشه روند تغییرات مکانی  $ET_p$  ایستگاههای حوضه جنوبی رودخانه ارس در ایران در دو مقیاس فصلی و سالانه در دوره آماری ۲۰۰۸-۱۹۸۶.



توجه: مثلث‌های رو به بالا روند افزایشی و مثلث‌های رو به پایین روند کاهش را نشان می‌دهند. علامت فلش روند معنی دار در سطح ۱۰٪ و دایره تو پر فقدان روند را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مقادیر آماره Z به دست آمده برای دو ایستگاه اهر و اردبیل

اهر اردبیل										
پاییز	تابستان	بهار	زمستان	سالانه	پاییز	تابستان	بهار	زمستان	سالانه	پارامتر
۲/۱*	۱/۵۵	۱/۵۳	۱/۷۱	۱/۷۵	-۰/۶۳	۲/۶۲**	۰	۱/۱۹	۱/۰۷	$T_{min}$
۱/۳۲	۱/۹۴*	۱/۸۲	۱/۳۵	۱/۵۶	۰/۰۸	۲/۰۷*	۰/۶۶	۱/۲۴	۱/۰۲	$T_{mean}$
۱/۲	۱/۶۹	۰/۳	۲/۲*	۱/۳۵	۱	۱/۲۵	۰/۳۲	۱/۵۶	۱/۶۷	$T_{max}$
۲/۴۸**	۱/۶۲	۰/۸۷	۱/۷۳	۱/۳۱	۲/۹۷**	۲/۱۲*	۱/۱۶	۲/۴۹**	۱/۷۲	$n$
۰/۴۲	۰/۴۸	۲/۰۳*	-۰/۶۶	۰/۵۲	-۱/۸۲	-۱/۹۶*	-۰/۱۶	-۲/۴۶**	-۱/۳۵	$RH_{min}$
۰/۲۷	-۰/۲۵	-۱/۲۵	۱/۴۸	-۰/۲۴	۱/۱۱	۰	-۰/۸۹	۱/۵۱	۰/۴۳	$ET_p$
-۰/۶۹	-۰/۶۷	-۰/۴۳	۱/۴۵	۰/۵۷	۱/۰۲	۱/۰۳	۱/۳	۱/۶۸	۱/۲۵	W.S (m/s)
-۰/۲	-۰/۳	۱/۶	۰/۲	۰/۶	-۰/۹	-۰/۳۲	۰	-۰/۲۱	-۰/۸۵	$P_r$

در این جدول ( $P_r, W.S, ET_p, RH_{min}, n, T_{max}, T_{mean}, T_{min}$ ) هوا، تعداد ساعات آفتابی، حداقل رطوبت نسبی هوا، به ترتیب نشان دهنده حداقل درجه حرارت هوا، میانگین درجه حرارت هوا، حداکثر درجه حرارت

جدول ۳- مقادیر آماره Z به دست آمده برای دو ایستگاه خوی و ماکو

خوی ماکو										
پاییز	تابستان	بهار	زمستان	سالانه	پاییز	تابستان	بهار	زمستان	سالانه	پارامتر
۰/۶۹	۲/۷۳**	۲/۳۶**	۰/۵	۱/۳	۱/۳۸	۳/۸۳**	۲/۸۱**	۰/۴۲	۲/۲۲*	$T_{min}$
۰/۷۹	۲/۰۱*	۱/۶۴	۰/۴۲	۱/۱	۰/۷۴	۱/۷۷	۲/۰۶*	۰/۶۱	۱/۴۸	$T_{mean}$
۱/۴۸	۱/۵۶	۱/۴۳	۱/۰۶	۱/۲۲	۰/۹۳	۲/۸۳**	۱/۹۳*	۱/۰۳	۱/۵۶	$T_{max}$
۲/۲۵*	۱/۳۸	۱/۳۸	۰/۲۷	۱/۴۳	۲/۱۷*	۱/۷۱	۱/۴۸	۱/۱۵	۱/۲۲	$n$
-۲/۴۱**	-۱/۹۹*	-۱/۰۶	-۱/۶۹	-۱/۲۸	-۰/۷۴	-۱/۷۶	-۱/۹۶*	-۲/۱۲*	-۲/۳۷**	$RH_{min}$
۱/۴۳	۰/۲۳	-۰/۱۶	۰/۹۵	۰/۳۲	۲/۳۲*	۱/۰۸	۱/۵۶	۱/۸۵	۲/۱۹*	$ET_p$
۰/۶۸	۱/۳۸	۱/۲۷	۲/۲۱*	۲/۰۹*	۱/۸۴	۲/۰۳*	۲/۰۸*	۱/۸۷	۱/۶۸	W.S (m/s)
-۰/۹	۱/۳۷	۰/۹۵	۱/۰۶	۰/۶۳	-۱/۲۱	۰/۹۵	۰/۷۹	-۰/۶۱	-۰/۱۱	$P_r$

در این جدول ( $P_r, W.S, ET_p, RH_{min}, n, T_{max}, T_{mean}, T_{min}$ ) ساعات آفتابی، حداقل رطوبت نسبی هوا، تبخیر تعرق پتانسیل، سرعت باد و بارش است. ترتیب نشان دهنده حداقل درجه حرارت هوا، میانگین درجه حرارت هوا، حداکثر درجه حرارت هوا، تعداد

جدول ۴- مقادیر آماره Z به دست آمده برای دو ایستگاه جلفا و پارس آباد

جلفا پارس آباد										
پارامتر	سالانه	زمستان	بهار	تابستان	پاییز	سالانه	زمستان	بهار	تابستان	پاییز
$T_{min}$	۱/۱	۰/۲	۰/۹	۲/۶**	۰	۱/۶۴	۱/۶۹	۲/۲۳*	۲/۲۳*	۱/۳۵
$T_{mean}$	۰/۲۹	-۰/۰۵	۰/۴۸	۱/۵۱	-۰/۳۴	۰/۹۳	۱/۵۹	۰/۰۵	۱/۵۱	۰/۵۸
$T_{max}$	۱	۰/۶	۰/۶	۱/۲	۰/۵	۱/۵۹	۲/۰۴*	-۰/۳۴	۰/۷۴	۱/۵۳
$n$	۱/۲	۱/۱۱	۲/۲۳*	۱/۵	۲/۳۳**	۳/۱۲**	۱/۲۷	۰/۱۱	۱/۴	۲/۷۱**
$RH_{min}$	-۰/۹۲	-۰/۹۳	-۰/۵۸	-۰/۸۵	-۰/۴	۰/۶۴	-۰/۴۸	۱/۳۵	۰/۷۷	-۰/۲۴
$ET_p$	۰	-۰/۲۶	-۰/۶	-۰/۱	۰/۴۸	-۱/۱	۰/۱۱	-۱/۴۵	-۱/۲۹	-۰/۴۸
W.S (m/s)	-۱/۴	۱/۱۵	۰/۸	۱/۴۴	-۰/۶۵	-۱/۷۸	-۰/۷۷	-۱/۱۱	-۰/۹۴	-۱/۰۳
$P_r$	۰/۸	۱/۵	۱	۱/۴	-۰/۳	-۱/۱۶	۰/۶۳	-۰/۱۱	-۰/۷۹	-۱/۱۱

در این جدول ( $P_r, W.S, ET_p, RH_{min}, n, T_{max}, T_{mean}, T_{min}$ ) به

ترتیب نشان دهنده حداقل درجه حرارت هوا، میانگین درجه حرارت هوا، حداکثر درجه حرارت هوا، تعداد ساعات آفتابی، حداقل رطوبت نسبی هوا، تبخیر تعرق پتانسیل، سرعت باد و بارش است.

گرچه در ایستگاه اهر سرعت باد در همه فصول و سال روند افزایشی نشان می‌دهد ولی روند آن تنها در فصل زمستان در سطح ۱۰ درصد معنی‌دار بود. در ایستگاه اهر ساعت آفتابی در مقیاس سالانه روند افزایشی معنی‌دار نشان می‌دهد که در سطح ۱۰ درصد معنی‌دار است. روند افزایشی فصل زمستان در سطح ۱ درصد و فصل پاییز در سطح ۱ درصد و فصل تابستان در سطح ۵ درصد معنی‌دار است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت روند افزایش  $ET_p$  معلول افزایش درجه حرارت هوا، تعداد ساعات آفتابی و سرعت باد از یک طرف و کاهش رطوبت نسبی هوا (به علت کاهش بارندگی) است.

در ایستگاه اردبیل  $ET_p$  در فصول زمستان و پاییز روند افزایشی و در مقیاس سالانه، بهار و تابستان روند کاهش نشان می‌دهد که معنی‌دار نیستند. پارامتر درجه حرارت هوا در کلیه مقیاس‌های مورد مطالعه روند افزایشی نشان می‌دهد که فصل بهار و

تابستان به ترتیب در سطح ۱۰ و ۵ درصد روند افزایشی معنی‌دار نشان می‌دهند. حداقل رطوبت نسبی در ایستگاه اردبیل غیر از فصل زمستان در بقیه مقیاس‌های مورد مطالعه روند افزایشی نشان می‌دهد که تنها روند افزایشی در فصل بهار در سطح ۵ درصد معنی‌دار است. افزایش  $RH_{min}$  می‌تواند دلیل کاهش  $ET_p$  تلقی شود. سرعت باد در ایستگاه اردبیل به استثنای مقیاس سالانه و فصل زمستان در سایر مقیاس‌های مورد مطالعه روند کاهش غیرمعنی‌دار نشان می‌دهد. پارامتر ساعات آفتابی در این ایستگاه در همه مقیاس‌های مورد مطالعه روند افزایشی نشان می‌دهد که در فصل زمستان در سطح ۱۰ درصد و در فصل پاییز در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. در اردبیل گرچه درجه حرارت هوا و سرعت باد اندکی افزایش یافته ولی چون رطوبت نسبی هوا دارای روند افزایشی (به علت بارندگی) است بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که ترکیبی از همه تغییرات پارامترهای موثر بر  $ET_p$  به شکل غیر خطی موجب کاهش مقدار  $ET_p$  در مقیاس سالانه شده است.

در ایستگاه خوی  $ET_p$  سالانه در سطح ۵ درصد روند افزایشی معنی‌دار نشان می‌دهد.  $ET_p$  فصل زمستان در سطح ۱۰ درصد و فصل پاییز در سطح ۵

مربوط به درجه حرارت هوا در ایستگاه ماکو در کلیه مقیاس‌های مورد مطالعه روند افزایشی نشان می‌دهد که روند متغیر  $T_{min}$  فصول بهار و تابستان در سطح یک درصد معنی دار است. رطوبت نسبی هوای ماکو در هر دو مقیاس فصلی و سالانه روند کاهشی نشان می‌دهد. این روند در فصل زمستان (در سطح ۱۰ درصد) و در فصول پاییز و تابستان در سطح ۱ درصد معنی دار است. سری زمانی مربوط به سرعت باد در ماکو در کلیه مقیاس‌های مورد مطالعه روند افزایشی داشته در مقیاس سالانه و در فصل زمستان در سطح ۵ درصد معنی دار است. روند افزایشی مشاهده شده در ساعات آفتابی ایستگاه ماکو تنها در فصل پاییز و در سطح ۵ درصد معنی دار است. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت افزایش دمای هوا و سرعت باد و تعداد ساعات آفتابی از یک سو و کاهش رطوبت نسبی هوای ماکو به صورت ترکیبی موجب افزایش  $ET_p$  شده است. با این حال بارش سالانه و فصلی (به جز پاییز) در ماکو دارای روند غیرمعنی دار (افزایشی) است.

در ایستگاه جلفا روند تغییرات  $ET_p$  تنها در فصل پاییز افزایشی (غیرمعنی دار) بود (جدول ۴). سایر فصول سال نیز روند کاهشی غیرمعنی دار را نشان می‌دهند. حداقل درجه حرارت هوا در ایستگاه جلفا در تمام فصول (به جز پاییز) روند افزایشی داشته است. متغیر  $T_{max}$  نیز در هر دو مقیاس زمانی دارای روند صعودی (غیرمعنی دار) است. در این ایستگاه حداقل رطوبت نسبی در کلیه مقیاس‌های مورد مطالعه روند کاهشی غیر معنی دار نشان می‌دهد. سرعت باد در این ایستگاه (به استثنای مقیاس سالانه و فصل پاییز) دارای روند کاهشی (غیر معنی دار) است.

درصد روند افزایشی معنی دار نشان می‌دهند. روند افزایشی در بقیه فصول سال در هیچ سطحی معنی دار نمی‌باشد. پارامتر میانگین درجه حرارت هوا در کلیه مقیاس‌های مورد مطالعه روند افزایشی نشان می‌دهد که فصل بهار در سطح ۵ درصد و فصل تابستان در سطح ۱۰ درصد روند افزایشی معنی دار دارند. حداقل رطوبت نسبی در کلیه مقیاس‌های مورد مطالعه روند کاهشی نشان می‌دهد که مقیاس سالانه در سطح ۱ درصد، فصول زمستان و بهار در سطح ۵ درصد و فصل تابستان در سطح ۱۰ درصد معنی دار است. روند کاهشی غیرمعنی دار در مورد رطوبت نسبی هوای فصل پاییز تجربه شده است. سرعت باد در ایستگاه خوی در هر دو مقیاس زمانی روند افزایشی را نشان می‌دهد. این روند در فصول پاییز، زمستان و مقیاس سالانه در سطح ۱۰ درصد و در فصول بهار و تابستان در سطح ۵ درصد معنی دار بود. همانگونه که از جدول ۴ می‌توان استنباط نمود در مقیاس سالانه روند  $ET_p$  ایستگاه خوی صعودی و معنی دار است. با توجه به اینکه  $RH_{min}$  این ایستگاه به طور معنی داری در سطح ۱ درصد کاهش یافته و آماره  $Z$  مان کندهال برای متغیرهای  $T_{max}$ ,  $T_{mean}$ ,  $T_{min}$  مثبت بوده و از طرفی  $n$  (تعداد ساعات آفتابی) دارای آماره  $Z$  مان کندهال مثبت می‌باشد بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که روند افزایشی  $ET_p$  سالانه خوی منطقی است. استدلال مشابهی را می‌توان برای روند افزایشی معنی دار  $ET_p$  خوی در فصول زمستان و پاییز ارائه نمود.

در ایستگاه ماکو مقادیر  $ET_p$  در مقیاس فصلی و سالانه (به استثنای فصل بهار) روند افزایشی غیرمعنی دار را نشان می‌دهد (جدول ۳). میانگین هر ۳ پارامتر

مقیاس سالانه و فصل پاییز در سطح ۱ درصد معنی دار است. بارش‌های سالانه پارس آباد روند نزولی (غیر معنی دار) داشته و در مقیاس فصلی بارندگی‌های بهار، تابستان و پاییز روند نزولی غیرمعنی دار داشته است. با این حال بارش‌های فصل زمستان پارس آباد روند صعودی غیرمعنی دار را از خود نشان داده است. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که متغیر  $ET_p$  در هر دو مقیاس فصلی و سالانه در برخی از ایستگاه‌ها روند صعودی و در برخی دیگر روند نزولی داشته است.

#### نتایج مربوط به شیب خط روند

به طوری که اشاره شد شیب خط روند ایستگاه‌های واقع در حوضه جنوبی رود ارس با استفاده از روش تخمین گر شیب Sen محاسبه شد. نتایج این محاسبات در جداول ۵ تا ۷ آورده شده است.

ساعات آفتابی جلفا در فصول بهار و پاییز به ترتیب در سطوح ۵ و ۱ درصد روند افزایشی معنی دار را نشان می‌دهد.

در ایستگاه پارس آباد روند تغییرات  $ET_p$  در مقیاس سالانه و فصلی روند کاهشی غیر معنی دار نشان می‌دهد (جدول ۴). در این ایستگاه حداقل درجه حرارت هوا در هر دو مقیاس سالانه و فصلی روند افزایشی نشان می‌دهد این روند در بهار و تابستان در سطح ۱٪ معنی دار است. حداقل رطوبت نسبی هوای پارس آباد در زمستان و پاییز روند کاهشی (غیر معنی دار) و در بهار و تابستان و نیز در مقیاس سالانه روند افزایشی است. در این ایستگاه سرعت باد روند کاهشی در همه فصول و سال تجربه شده است. این روند کاهشی در سرعت باد پارس آباد تنها در مقیاس سالانه و در سطح ۱۰ درصد معنی دار است. ساعات آفتابی در این ایستگاه در هر دو مقیاس سالانه و فصلی روند افزایشی نشان می‌دهد. این روند در

جدول ۵- مقادیر شیب خط روند حاصل از روش تخمین گر سن برای ایستگاه‌های اهر و اردبیل

اهر اردبیل										
پارامتر	سالانه	زمستان	بهار	تابستان	پاییز	سالانه	زمستان	بهار	تابستان	پاییز
$T_{min}$	۰	۰/۱	۰	۰/۱	۰	۰/۱۴	۰/۲۶	۰/۱	۰/۱	۰/۱۱
$T_{mean}$	۰	۰	۰	۰/۱	۰	۰/۱	۰/۲	۰/۱	۰/۱	۰/۱
$T_{max}$	۰/۱	۰/۱	۰	۰/۱	۰/۱	۰/۰۹	۰/۱۷	۰/۰۲	۰/۱۵	۰/۰۵
$n$	۱/۷	۱/۶	۱/۴	۱/۳	۲/۱	۱/۵	۱/۶	۰/۷	۱/۸	۳/۷
$RH_{min}$	-۰/۲	-۰/۵	۰	-۰/۲	-۰/۲	۰/۱	-۰/۱	۰/۵	۰/۱	۰/۲
$ET_p$	۲/۳۱	۱/۴	-۲/۶	۰/۱	۱/۲	-۳	۱/۴	-۴/۶	-۰/۸	۰/۶
W.S (m/s)	۰	۰/۱	۰	۰	۰	۰	۰/۱	۰	۰	۰
$P_r$	-۲/۴	-۰/۵	-۰/۸	۰	-۱/۳	۰/۳۹	۰/۲۷	۲/۰۲	-۰/۲۴	-۰/۱۲

درصد در سال،  $W.S$  متر در ثانیه در سال، ساعات آفتابی ساعت در سال و بارش میلیمتر در سال است.

توجه: واحد شیب برای  $ET_p$  میلیمتر در سال، برای  $T_{max}$ ,  $T_{mean}$ ,  $T_{min}$  درجه سانتیگراد در سال،  $RH_{min}$

جدول ۶- مقادیر شیب خط روند حاصل از روش تخمین گر سن برای ایستگاههای خوی و ماکو

خوی ماکو										
پاییز	تابستان	بهار	زمستان	سالانه	پاییز	تابستان	بهار	زمستان	سالانه	پارامتر
۰	۰/۱	۰/۱	۰		۰/۰۴	۰/۱۲	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۵	$T_{min}$
۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۱	$T_{mean}$
۰/۱	۰	۰/۱	۰	۰/۱	۰/۰۲	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۷	$T_{max}$
۱/۴۴	۰/۷۹	۱/۲۶	۰/۲۶	۰/۹۷	۱/۴	۰/۶۷	۱/۱۵	۱/۳	۱	$n$
-۰/۴۳	-۰/۲۸	-۰/۲	-۰/۳۱	-۰/۳	-۰/۱۳	-۰/۴	-۰/۳	-۰/۵	-۰/۳	$RH_{min}$
۰/۹۹	۰/۶۵	-۰/۷۷	۰/۶۷	۲/۱	۳/۸	۳/۸	۳/۰۹	۴/۳	۲۵	$ET_p$
۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	W.S (m/s)
-۱	۱/۱	۱/۲	۰/۹	۱/۶	-۱/۲۱	۰/۸	۱/۶۲	-۰/۵۸	-۰/۴۷	$P_r$

توجه: واحد شیب برای  $ET_p$  میلیمتر در سال، برای درصد در سال،  $W.S$  متر در ثانیه در سال، ساعات آفتابی ساعت در سال و بارش میلیمتر در سال است.  $RH_{min}$ ,  $T_{max}$ ,  $T_{mean}$ ,  $T_{min}$  درجه سانتیگراد در سال.

جدول ۷- مقادیر شیب خط روند حاصل از روش تخمین گر سن برای ایستگاههای جلفا و پارس آباد

جلفا پارس آباد										
پاییز	تابستان	بهار	زمستان	سالانه	پاییز	تابستان	بهار	زمستان	سالانه	پارامتر
۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۴	۰	۰/۱	۰	۰	۰	$T_{min}$
۰/۰۲	۰/۰۳	۰	۰/۰۴	۰/۰۳	-۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۳	۰	۰/۰۱	$T_{mean}$
۰/۰۵	۰/۰۲	-۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۰۴	۰	۰/۱	۰	۰	۰	$T_{max}$
۲	۱/۸	۰/۰۴	۱/۲۳	۱/۳۲	۱/۴	۱/۳۱	۱/۸۲	۱/۱۴	۱/۲۳	$n$
-۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۲۲	-۰/۱۳	۰/۰۸	-۰/۰۴	-۰/۰۶	-۰/۰۹	-۰/۲۲	۰	$RH_{min}$
-۰/۲۵	-۲/۸	-۶/۱	۰/۱۵	-۸/۴	۰/۲۹	-۰/۲۶	-۲/۶	-۰/۱۹	۰/۰۸	$ET_p$
-۰/۰۴	-۰/۰۶	-۰/۰۶	-۰/۰۴	-۰/۲	-۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	-۰/۰۴	W.S (m/s)
-۰/۹۱	-۰/۵۱	-۰/۲۲	۰/۴۳	-۲/۴۱	-۰/۵	۰/۶	۱/۳	۰/۵	۲/۵	$P_r$

روند میانگین درجه حرارت هوا در این ایستگاه در همه فصول سال به استثنای تابستان صفر است. شیب خط روند حداقل رطوبت نسبی نیز بجز فصل بهار نزولی است. سرعت باد نیز شیبی در حدود صفر دارد. تعداد ساعات آفتابی اهر شیب افزایشی معنی دار در مقیاس سالانه و فصول بهار، زمستان، تابستان و پاییز دارد. حداقل و حداکثر درجه حرارت هوا نیز شیب افزایشی غیر معنی دار نشان می دهد بارش نیز روند کاهشی نشان می دهد که در مقیاس سالانه معنی دار است. شدیدترین شیب خط روند در بارش های سالانه

توجه: واحد شیب برای  $ET_p$  میلیمتر در سال، برای درصد در سال،  $W.S$  متر در ثانیه در سال، ساعات آفتابی ساعت در سال و بارش میلیمتر در سال است. در ایستگاه اهر شیب خط روند  $ET_p$  سالانه به استثنای فصل بهار در سایر فصول افزایشی بوده ولی معنی دار نیست. بیشترین مقدار شیب خط روند کاهشی برابر با ۲/۶ میلیمتر در سال در فصل بهار و بیشترین مقدار روند افزایشی برابر با ۲/۳ میلیمتر در سال در مقیاس سالانه مشاهده شده است. شیب خط

پارامتر مربوط به درجه حرارت هوای خوی دارای شیب صعودی است. در این فصل خوی دارای شیب صعودی برای سرعت باد، بارش و تعداد ساعات آفتابی هوا بوده ولی شیب مربوط به رطوبت نسبی هوا رو به پایین است (شکل ۳).

در ایستگاه جلفا  $ET_p$  در فصول زمستان، بهار و تابستان دارای شیب خط روند نزولی می باشد. میانگین درجه حرارت هوا شیب خط روند در حدود صفر دارد. حداقل رطوبت نسبی در فصل زمستان، بهار و تابستان دارای شیب خط روند رو به پایین می باشد. سرعت باد دارای شیب در حدود صفر و تعداد ساعات آفتابی دارای شیب افزایشی می باشد. حداقل درجه حرارت هوا و حداکثر درجه حرارت هوا دارای شیب افزایشی ناچیز می باشد. بارش در ایستگاه جلفا در کلیه فصول به استثنای فصل پاییز دارای شیب خط روند صعودی است.

در ایستگاه ماکو  $ET_p$  دارای شیب خط روند صعودی در کلیه فصول و مقیاس سالانه به استثنای فصل بهار است. میانگین درجه حرارت هوا به جز فصل زمستان و پاییز دارای شیب خط روند از نوع افزایشی است. حداقل رطوبت نسبی نیز در مقیاس فصلی و سالانه دارای شیب از نوع نزولی می باشد و سرعت باد دارای شیب در حدود صفر می باشد. تعداد ساعات آفتابی نیز به استثنای فصل تابستان در سایر فصول دارای شیب افزایشی می باشد. حداقل درجه حرارت هوا در این ایستگاه دارای شیب افزایشی ناچیز می باشد. در ایستگاه ماکو عنصر بارش به استثنای فصل پاییز در سایر فصول و مقیاس سالانه دارای شیب خط روند افزایشی است.

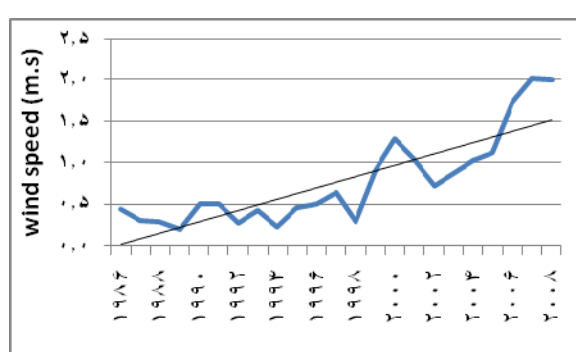
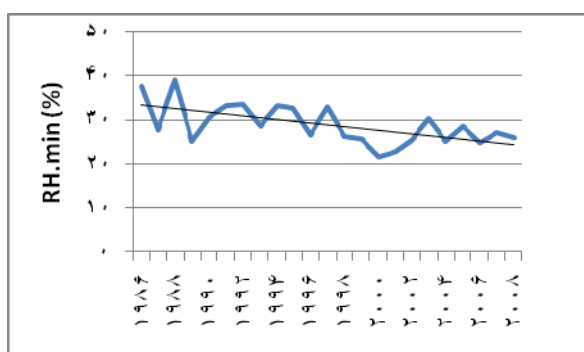
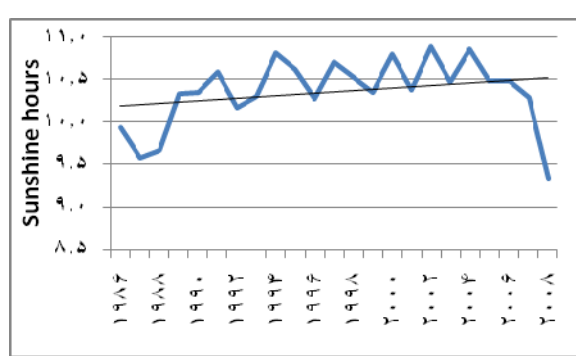
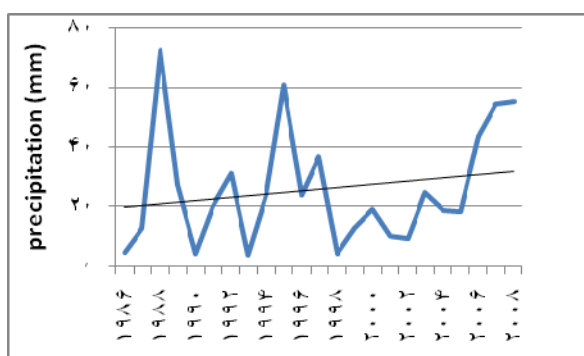
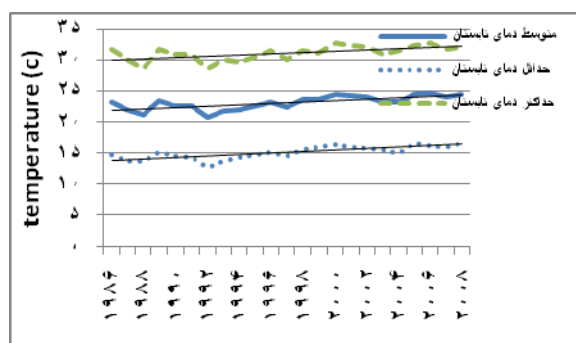
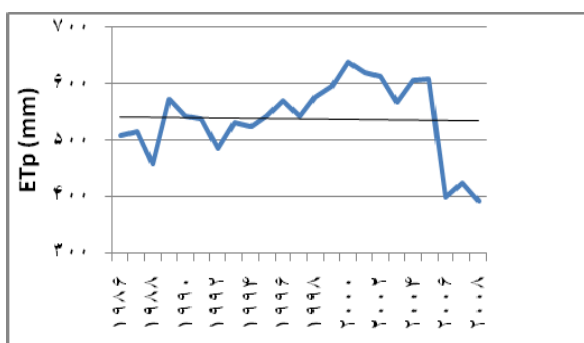
برابر با  $۲/۴$  - میلی متر در سال و در پاییز معادل  $۱/۳$  - میلی‌متر در سال است.

در ایستگاه اردبیل  $ET_p$  شیب رو به پایین چشمگیری در مقیاس فصل بهار برابر با  $۴/۶$  میلی‌متر در سال نشان می دهد. درجه حرارت هوا نیز در ایستگاه شیب افزایشی نشان می دهد. حداقل رطوبت نسبی نیز در کلیه فصول به استثنای فصل زمستان شیب خط روند افزایشی دارد. سرعت باد شیبی در حدود  $۰/۱$  در فصل زمستان نشان می دهد. تعداد ساعات آفتابی اردبیل در کلیه فصول شیب خط روند افزایشی نشان می دهد که شدیدترین شیب روند متعلق به فصل پاییز و برابر با  $۳/۷$  + میلی‌متر در سال می باشد. حداقل و حداکثر درجه حرارت هوا نیز در مقیاس فصلی و سالانه شیب خط روند افزایشی نشان می دهد. بارش نیز در ایستگاه اهر به استثنای فصل تابستان و پاییز در سایر فصول دارای شیب خط روند افزایشی است.

در ایستگاه خوی مشاهدات مربوط به  $ET_p$  دارای شیب رو به بالا می باشد که مقدار این شیب در مقیاس سالانه برابر با  $۲۵$  میلی‌متر در سال است. میانگین درجه حرارت هوا نیز دارای شیب افزایشی در فصول بهار و تابستان و مقیاس سالانه است. حداقل رطوبت نسبی در ایستگاه خوی در همه فصول و مقیاس سالانه دارای شیب خط روند از نوع کاهش‌ی است. سایر پارامترهای مورد بررسی یعنی تعداد ساعات آفتابی، حداقل درجه حرارت هوا، حداکثر درجه حرارت هوا دارای شیب خط روند صعودی هستند. بارش در ایستگاه خوی به استثنای فصل بهار و تابستان در سایر فصول و مقیاس سالانه دارای شیب خط روند نزولی می باشد. در فصل تابستان هر سه

عنصر بارش در این ایستگاه به استثنای فصل زمستان در سایر فصول دارای شیب خط روند صعودی می باشد. بیشترین شیب خط روند برابر با  $2/41$  - میلیمتر در سال است که در مقیاس سالانه مشاهده می شود. شکل ۳ نمودار سری های زمانی  $ET_p$  تابستان و متغیرهای هواشناسی موثر بر آن را در ایستگاه خوی نشان می دهد.

در ایستگاه پارس آباد  $ET_p$  در کلیه فصول و مقیاس سالانه به استثنای فصل زمستان دارای شیب خط روند از نوع نزولی است. شیب خط روند میانگین درجه حرارت هوا صفر می باشد. تعداد ساعات آفتابی نیز دارای شیب خط روند افزایشی است. حداقل و حداکثر درجه حرارت هوا در ایستگاه پارس آباد دارای شیب خط روند صعودی است.



شکل ۳- نمودار تغییرات زمانی در فصل تابستان برای متغیرهای درجه حرارت حداقل، حداکثر، متوسط هوا، تبخیر تعرق پتانسیل، بارش، ساعات آفتابی، حداقل رطوبت نسبی و سرعت باد در ایستگاه خوی (۱۹۸۶-۲۰۰۸)

ایستگاه اردبیل را که در حوضه جنوبی رود ارس واقع است از بین ۲۲ ایستگاه کشور برای مطالعه برگزیده است.

### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

بررسی روند تغییرات  $ET_p$  به عنوان یکی از اجزاء اصلی تشکیل دهنده سیکل هیدرولوژی در حوضه جنوبی رود ارس نشان داد که  $ET_p$  دارای تغییرات زمانی و مکانی زیادی در این حوضه است. همچنین روند تغییرات پارامترهای اقلیمی موثر بر  $ET_p$  با استفاده از روش مان کندال پس از اصلاح اثر ضرایب خودهمبستگی معنی دار در حوضه مذکور مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در بین ایستگاههای مورد مطالعه ایستگاه خوی دارای بیشترین روند معنی دار و از نوع افزایشی می باشد که بیشتر به دلیل افزایش معنی دار در مقادیر سرعت باد، ساعات آفتابی و کاهش معنی دار در مقادیر حداقل رطوبت نسبی می باشد. بیشترین مقدار شیب خط روند  $ET_p$  در این ایستگاه در مقیاس سالانه مشاهده شد که برابر با ۲۵ میلیمتر در سال بود. از بین ایستگاههای مورد مطالعه شدید ترین شیب روند کاهشی در مقادیر  $ET_p$  متعلق به ایستگاه پارس آباد (در مقیاس سالانه) بوده و برابر با ۸/۴ میلیمتر در سال است.

طبری و همکاران (۲۰۱۰) دامنه تغییرات  $ET_p$  سالانه را بین ۱۱/۲۸ (+) تا ۲/۳۰ (+) میلیمتر در سال گزارش کرده اند متأسفانه نامبردگان از منطقه حوضه جنوبی رودخانه ارس تنها یک ایستگاه (خوی) را در مطالعه گنجانده اند. بنابراین، با لحاظ کردن تعداد زیادی از ایستگاههای دیگر واقع در منطقه مذکور

به طوری که از شکل ۳ می‌توان استنباط کرد، روند افزایشی  $ET_p$  در ایستگاه خوی تا حدودی وجود داشته و لیکن در سالهای اخیر (۲۰۰۵ به بعد) این روند سیر نزولی داشته است. سایر نمودارها نیز شیب خط روند افزایشی به دست آمده از روش سن را تایید می کنند. به طوریکه روند کاهشی برای پارامتر حداقل رطوبت نسبی هوا از یک طرف و روند افزایشی برای سرعت باد، درجه حرارت هوا و نیز تعداد ساعات آفتابی کاملاً محسوس است. در خوی نه تنها روند  $ET_p$  در تابستان افزایش یافته بلکه تا حدودی میزان بارش فصل مذکور در این ایستگاه نیز افزایش یافته است. با این حال افزایش بارش در تابستان تا حدی نبوده است که بتواند کمبود آن را در دیگر فصول سال جبران کند.

طبری و طلائی (۲۰۱۱) شیب خط روند بارش سالانه را برای ایستگاه خوی در دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۶۶ معادل ۳/۶- میلیمتر در سال گزارش کرده است که با نتیجه حاصل از مطالعه حاضر تا حدودی همخوانی دارد. دین پژوه و همکاران (۲۰۱۱) حداکثر شیب خط روند نزولی را از بین ۱۶ ایستگاه مختلف ایران برای ایستگاه اصفهان در ماه ژوئیه و اوت معادل ۰/۸۷- میلیمتر در سال گزارش کرده است. همچنین نامبردگان حداکثر شیب خط روند صعودی را برای ایستگاه زابل در ماه آوریل به اندازه ۱/۴+ میلیمتر در سال گزارش کرده اند. قره خانی و قهرمان (۱۳۸۹) روند نزولی را در اقالیم مختلف کشور در مورد رطوبت نسبی هوا گزارش کرده است. ایشان تعداد ایستگاههای با روند نزولی برای RH را برای اردبیل در فصول بهار و زمستان و نیز مقیاس سالانه منفی و معنی دار گزارش کرده است. متأسفانه نامبرده فقط



## منابع

اسمعیل پور، مرضیه، (۱۳۸۶)، ارزیابی بیلان آب برای استفاده کشاورزی در حوضه جنوبی رود ارس، سعید جهانبخش، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته جغرافیای طبیعی، دانشگاه تبریز.

دانشور وثوق، فرزانه، دین پژوه، یعقوب و محمد تقی اعلمی، (۱۳۹۰)، تاثیر خشکسالی بر تراز آب زیرزمینی در دوهه اخیر (مطالعه موردی: دشت اردبیل)، مجله دانش آب و خاک (دانشگاه تبریز) جلد ۲۱، شماره ۲ (پذیرفته شده).

سبزی پرور، علی اکبر؛ تفضلی، فرزین؛ زارع ایبانه، حمید؛ بانزاد، حسین؛ غفوری، محمد؛ موسوی بایگی، محمد و زهره مریانجی، (۱۳۸۷)، ارزیابی حساسیت مدل‌های مختلف تبخیر-تعرق مرجع (ET<sub>o</sub>) به سیگنال‌های تغییر اقلیم در اقلیم سرد نیمه خشک همدان، علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال دوازدهم، شماره چهل و ششم، ۵۹۲-۵۸۱.

شیر غلامی، هادی؛ قهرمان، بیژن؛ علیزاده، امین و جواد بذاق جمالی، (۱۳۸۳)، بررسی روند تبخیر تعرق گیاه مرجع در ایران، پژوهشنامه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خزر، سال دوم، شماره سوم، ۲۷-۱۱. علیزاده، امین، (۱۳۸۲)، اصول هیدرولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه امام رضا، چاپ شانزدهم، مشهد، ۸۱۵ صفحه.

قره خانی، ابوذر و نوذر قهرمان، (۱۳۸۹)، بررسی روند تغییرات فصلی و سالانه رطوبت نسبی و نقطه شبنم در چند نمونه اقلیمی در ایران، نشریه آب و خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)، جلد ۲۴، شماره ۴، ۶۴۶-۶۳۶.

نتایج دقیقتری حاصل شد. در این مطالعه معلوم شد که دامنه تغییرات  $ET_p$  سالانه در حوضه جنوبی رودخانه ارس بین  $۸/۴$  (-) در ایستگاه جلفا تا  $۲۵$  (+) در سال در ایستگاه خوی تغییر می کند.

از بین پارامترهای اقلیمی که تاثیر تغییرات آنها بر  $ET_p$  مورد بررسی قرار گرفت بیشترین میزان تغییر مربوط به ساعات آفتابی فصل پاییز ایستگاه اردبیل می باشد که در حدود  $۳/۷$  ساعت در سال افزایش نشان می دهد. بیشترین میزان کاهش نیز مربوط به پارامتر بارندگی بوده که در آن بارش سالانه ایستگاه اهر و پارس آباد حدود  $۲/۴$  میلیمتر در سال کاهش داشته است. با توجه به نتایج حاصل از روند تغییرات  $ET_p$  و بارندگی سالانه می توان نتیجه گرفت که چون بارندگی ایستگاه اردبیل دارای روند افزایشی بوده ولی روند  $ET_p$  آن کاهش است بنابراین می توان نتیجه گرفت که در اردبیل شرایط برای تولید محصول دیم بهتر از گذشته می باشد با این حال در ایستگاه‌های خوی و اهر بارش سالانه دارای روند کاهش و  $ET_p$  دارای روند افزایشی است بنابراین می توان نتیجه گرفت که تولیدات دیم در این دو شهر دارای ریسک شکست بیشتر از گذشته خواهد بود. دانشور وثوق و همکاران (۱۳۹۰) نیز نتیجه گرفتند که در دشت اردبیل میزان بارندگی افزایش یافته و پایین رفتن سطح آبی زیرزمینی به علت برداشت بی رویه از آبخوان مربوط می باشد. با توجه به اهداف این مطالعه حساسیت  $ET_p$  به پارامترهای اقلیمی مورد بررسی قرار نگرفته است. مطالعه دقیق حساسیت  $ET_p$  به هر یک از متغیرهای اقلیمی در ایستگاه‌های مختلف ایران توصیه می شود.

- Kumar, S., Merwade, V., Kam, J., Thurner, K., (2009), Streamflow trends in Indiana: Effects of long term persistence, precipitation and subsurface drains, *Journal of Hydrology*, 374: 13 pages.
- Shuttleworth, W.J., (1993), Evaporation in: Maidment, D.R. "Handbook of Hydrology", McGraw-Hill. 4.1-4.53.
- Tabari, H., Marofi, S., Aeni, A., Talaei, P.H. and Mohammadi, K., (2010), Trend analysis of reference evapotranspiration in the western half of Iran. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151 (2): 9 pages.
- Tabari, H. and Talaei, P.H., (2011), Temporal variability of precipitation over Iran: 1966-2005. *Journal of Hydrology*, 396: 8 pages.
- Thomas, A., (1999), Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China. *Int. J. Climatol*, 20: 16 pages.
- Wang, Y., Jiang, T., Bothe, O., and Fraedrich, K., (2006), Changes of pan evaporation and reference evapotranspiration in the Yangtze River basin, *Theoretical and Applied Climatology*, 90 (1-2): 8 pages.
- Xu, Ch. Yu., Gong, L., Jiang T, Chen D., and Singh, V.P., (2006), Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment, *Journal of Hydrology*, 327: 13 pages.
- Zhang, X., Ren, Y., Yin, Z., Lin, Z. and Zheng, D., (2009), Spatial and temporal variation patterns of reference evapotranspiration across Qinghati- Tibetan. *J. of Geophysical Research*, 114, D15105, doi: 10.1029/2009JD011753: 14 pages.
- Zhang, X., Xu, CH., Chen, Y., Ren, L., (2011), Comparison of evapotranspiration variations between the Yellow River and Pearl River basin, China. *J. of Stoch Environ Res Risk Assess* 25, 12 pages.
- Zhang, Q., Xu, C.H.Y. and Xiaohong, C., (2011), Reference evapotranspiration changes in China: natural processes or human influences? *Theoretical and Applied Climatology*, 103, (3-4): 10 pages.
- کیانی سفیدان جدید، طاهره، (۱۳۸۴)، تحلیل سینوپتیکی بارش‌های رگباری در حوضه جنوبی رود ارس، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تبریز.
- موحد دانش، علی اصغر، (۱۳۷۳)، هیدرولوژی آب‌های سطحی ایران، انتشارات سمت، چاپ اول، تهران، ۳۷۸ صفحه.
- Abtew, W., Obeyesker, J. and Iricanin, N., (2011), Pan evaporation and potential evapotranspiration trends in South Florida. *Hydrological Processes*, 25: 11 pages.
- Dinpashoh, Y., Jhajharia, D., Fakhri-Fard A., Singh, V.P., Kahya, E., (2011), Trends in reference crop evapotranspiration over Iran, *Journal of Hydrology*, 399: 12 pages.
- Fooladmand, H.R., and Ahmadi, S.H., (2009), Monthly spatial calibration of Blaney-Cridde equation for calculating monthly  $ET_o$  in Southern Iran. *Irrigation and Drainage*, 58: 12 pages.
- Gong, L., Xu, CH., Chen, D., Halldin, S., Chen, Y., (2006), Sensivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *Journal of Hydrology*, 329: 10 pages.
- Goyal, R.K., (2004), Sensivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India), *Agricultural Water Management*, 69: 11 pages.
- Jhajharia, D., Shrivastava, S.K., Sarkar, D. and Sarkar, S., (2009), Temporal characteristics of pan evaporation trends under the humid conditions of northeast India. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149: 8 pages.
- Jhajharia, D., Dinpashoh, Y., Kahya, E., Singh, V.P., (2011), Trends in reference evapotranspiration in humid region of northeast India, *Hydrological Processes*, Doi: 10.1002/hyp.8140: 15 pages.