

## بررسی تناقض تبخیر از تشت و متغیرهای اقلیمی مؤثر بر آن در نیمه غربی و مرکز ایران

محمد نصرالهی<sup>۱</sup>، علی اصغر ذوالفقاری<sup>۲\*</sup> و محمد رضا یزدانی<sup>۳</sup>

۱) دانشجوی دکتری بیابانزدایی، گروه بیابان، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

۲) دانشیار گروه مدیریت مناطق خشک، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

۳) دانشیار گروه بیابان، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

\* ایمیل نویسنده مسئول: azolfaghari@semnan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۸

### چکیده:

تبخیر به عنوان یک مؤلفه مهم و یک عامل کنترل کننده کلیدی در فرایندهای هیدرولوژیکی عمل می کند. در شرایط گرمایش جهانی، انتظار می رود تقاضای تبخیر از تشت افزایش یابد، اما کاهش در مقادیر تبخیر این فرضیه را که تغییر اقلیم سبب افزایش تبخیر می شود، را به چالش کشیده است. هدف این تحقیق بررسی وجود یا عدم وجود پدیده تناقض تبخیر و همچنین تعیین روند تغییرات تبخیر و سایر متغیرهای اقلیمی اثرگذار بر آن می باشد. برای دستیابی به هدف مذکور داده های تبخیر از تشت در مقیاس زمانی سالانه در ۵۰ ایستگاه سینوپتیک پهنه غربی و مرکز ایران با استفاده از روش های ناپارامتری من کندال و تخمینگر شیب سن مورد ارزیابی و تحلیل روند قرار گرفتند. نتایج تحلیل روند با آزمون من کندال نشان داد که تبخیر از تشت در ۱۰٪ و ۲۸٪ از ایستگاه ها در سطح معنی داری ۵٪ دارای روند بترتیب کاهشی و افزایشی بود. همچنین نتایج روندیابی میانگین دما به عنوان منبع انرژی لازم جهت انجام تبخیر نشان داد که ۹۴٪ ایستگاه ها در سطح معنی داری ۵٪ دارای روند افزایشی هستند. نتایج نشان داد که علیرغم افزایش دما در اکثر ایستگاه ها، پدیده تناقض تبخیر در ۳۸٪ ایستگاه ها اتفاق افتاده که تناقض تبخیر در ۱۰٪ ایستگاه ها در سطح معنی داری ۵٪ بوده است. بطور کلی نتایج نشان داد که در ایستگاه های دارای تناقض تبخیر معنی دار در سطح ۵٪ (دارای شیب تبخیر تشت منفی)، افزایش بیشتر دمای کمپنه نسبت به پیشینه، کاهش سرعت باد و ساعت آفتابی عوامل اصلی کنترل کننده میزان تبخیر تشت هستند. کاهش تبخیر تشت با توجه به اقلیم خشک و نیمه خشک ایران در مطالعات منابع آب و هواشناسی بسیار حائز اهمیت است. لذا نتایج این مطالعه برای مدیریت بهینه منابع آب در کشور دارای اهمیت می باشد.

**کلید واژه ها:** تناقض تبخیر؛ من کندال؛ تبخیر از تشت؛ تخمینگر شیب سن

### مقدمه

مختلف از قبیل منابع آب، اکوسیستم، کشاورزی و سلامت انسان را فراهم آورده است. گزارش شده است که در طی ۵۰ سال گذشته، دمای سطح زمین به میزان ۰/۱۳ درجه در هر دهه افزایش یافته است (IPCC, 2007). بنابراین انتظار می رود که افزایش دما در نزدیکی سطح زمین منجر به

در دهه های اخیر کره زمین با پدیده گرمایش جهانی مواجه شده است و مهمترین شاهد بر این ادعا تغییرات اقلیمی صورت گرفته در سرتاسر دنیا است. وجود این پدیده هم زمینه و هم ضرورت مطالعه در زمینه های

حوزه آبریز لیجینگ وجود دارد، که عمدتاً به دلیل کاهش ساعات آفتابی است. Roderick و Farquhar (2002) در مطالعه‌ای در نیوزلند، وجود روندی کاهشی در تبخیر از تشت به میزان دو میلی متر در سال را گزارش کردند. آنها کاهش تبخیر از تشت را ناشی از کاهش تابش خورشیدی دریافتی در سطح زمین دانستند و بیان کردند که روند تبخیر از تشت و تغییر سیکل هیدرولوژی جهانی با یکدیگر رابطه نزدیکی دارد. Jhajharia و همکاران (2009) به بررسی روند یابی تبخیر از تشت با استفاده از روش‌های پارامتری (شیب خط رگرسیون) و ناپارامتری (من‌کنال) در شمال هند پرداختند. نتایج آنها نشان از کاهش روند تبخیر از تشت در اکثر فصول موسومی داشت. Asanuma, (2004) روند تبخیر از تشت در ۱۴ ایستگاه را طی سال‌های 1965-1995 مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که تبخیر از تشت در اغلب مناطق ژاپن روند کاهشی دارد که این روند کاهشی همراه با افزایش دمای هوا و کاهش فشار بخار بود. تناقض تبخیر به طور گسترده مورد بحث و بررسی قرار گرفته است و مطالعات زیادی به این نتیجه رسیده‌اند که روند کاهش تابش خورشیدی و سرعت باد، به طور عمده موجب تناقض تبخیر می‌شود (Thomas, 2000; Wild et al., 2005; Gong et al., 2006; Xu et al., 2006; Fan and Thomas, 2013).

با توجه به اینکه مطالعه زیادی در ارتباط با بررسی پدیده تناقض تبخیر در ایران گزارش نشده است لذا هدف از انجام این تحقیق، بررسی روند تغییرات تبخیر از تشت و عوامل اقلیمی مؤثر بر آن در مقیاس زمانی سالانه در ۵۰ ایستگاه سینوپتیک ایران با استفاده از روش‌های ناپارامتری می‌باشد همچنین بررسی رخداد تناقض تبخیر در پهنه غربی و مرکز ایران نیز از دیگر اهداف این مطالعه می‌باشد.

#### مواد و روش‌ها منطقه مورد مطالعه

افزایش تبخیر و خشکی هوا گردد و این موضوع جهان را با کمبود منابع آبی مواجه خواهد ساخت. در این شرایط، بررسی سابقه تاریخی بلندمدت میزان تبخیر از تشت می‌تواند در برنامه‌ریزی هر چه بهتر منابع آب، کنترل آبیاری (تعیین میزان و فواصل زمانی آبیاری) و تولید محصولات زراعی کمک نماید (Gong et al., 2006).

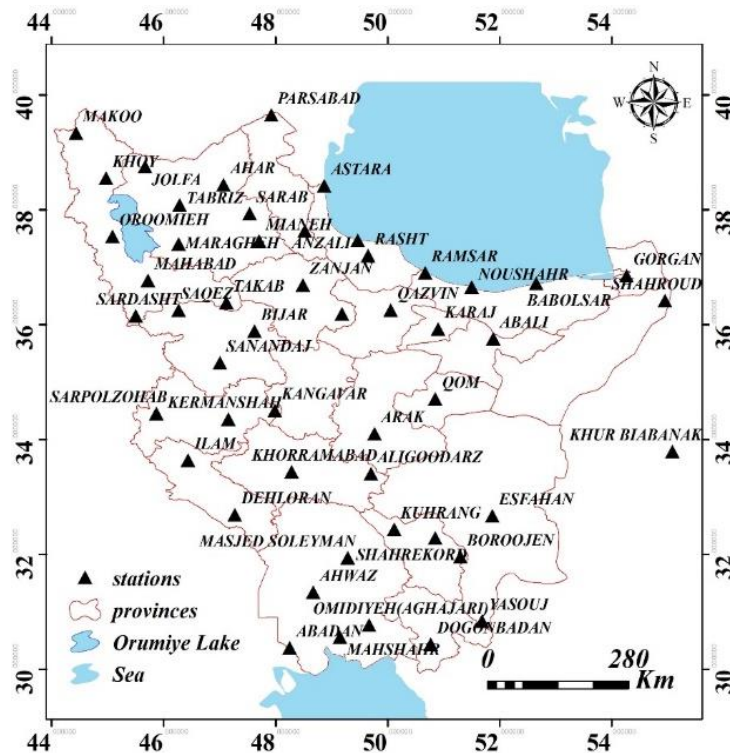
نیاز تبخیر جو که به‌وسیله تشت تبخیر اندازه‌گیری می‌شود، طی چند دهه گذشته در بسیاری از نقاط نیمکره شمالی و نیز در مناطقی از نیمکره جنوبی در استرالیا کاهش یافته است (Roderick and Farquhar, 2004). این در حالی است که بر پایه اکثر مطالعات در ایران و جهان، روند افزایشی دما به تأیید رسیده است که نوعی تناقض محسوب می‌شود. باور علمی عمومی بر آن است که این تناقض تا حد زیادی براساس رخدادهای جوی دیگر قابل توجیه است که عمدتاً، کاهش تابش رسیده به سطح زمین به دلیل افزایش غلظت هواریزها<sup>۱</sup> و ابرناکی می‌باشد. این پدیده اصطلاحاً تیرگی جهانی<sup>۲</sup> نامیده شده است (Cohen, 2001). در بسیاری از مناطق روندهای کاهشی تبخیر از تشت به طور همزمان با افزایش روند دمای هوا گزارش شده است، که به عنوان تناقض تبخیر و یکی از مسائل داغ سیستم هیدرولوژیکی مورد بحث قرار گرفته است (Huang et al., 2015). در طی چند دهه گذشته تناقض تبخیر در بسیاری از مناطق جهان مانند، چین (wang et al., 2005; Ma et al., 2012; Chen et al., 2005; Croitoru et al., 1997)، رومانی (Chattohadhyay, 1997)، استرالیا و نیوزیلند (Roderick and Farquhar, 2013)، کانادا (Burn and Hesch, 2007)، آمریکا (Golubev, 2001) و مکزیک (Ruiz-Alvarez et al., 2019) تأیید شده است.

Wang و Jiao (2018) تغییرات اقلیمی، تناقض تبخیر و تأثیر آنها روی جریان در حوزه آبریز لیجینگ را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که تناقض تبخیر در

<sup>1</sup> Aerosols

<sup>2</sup> Global dimming

به منظور انجام این تحقیق ابتدا شناسنامه اطلاعات آب و هوایی ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک مورد مطالعه از سازمان هواشناسی کشور تهیه گردید. براین اساس، تعداد



شکل ۱: موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه و توزیع مکانی ایستگاه‌های سینوپتیک

(1975) توسعه یافته است. این روش در سطح جهان بصورت گسترده برای آشکارسازی روند در تحقیقات هیدرولوژیکی و اقلیمی استفاده می‌شود. این روش حساسیت کمی به داده‌های پرت دارد. بنابراین بسیار مناسب برای تحلیل داده‌های واقعی است که از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کند (Nourani et al., 2015). مراحل محاسبه آماره این آزمون بدین صورت است که نخست با محاسبه تفاوت بین تک‌تک مشاهدات، تابع علامت (sgn) اعمال شده و پارامتر S از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_j^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

که در آن n تعداد داده‌ها و  $\text{sgn}(x_j - x_k)$  تابع علامت است که بصورت زیر تعریف می‌شود:

۵۰ ایستگاه سینوپتیک که دارای آمار نسبتاً طولانی در دوره زمانی ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۷ بودند، انتخاب گردید. شکل ۱ موقعیت مکانی این ایستگاه‌ها در کشور را نشان می‌دهد. محدوده مورد مطالعه با مساحت حدود ۴۵۳۳۸۰ هزار کیلومترمربع بین ۲۹ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۶ دقیقه عرض شمالی و ۴۴ درجه و ۳ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۱۴ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است. توزیع مناسب ایستگاه‌های سینوپتیک، اتکای زیاد کشور به کشاورزی منطقه مورد مطالعه و همچنین تراکم جمعیتی زیاد این منطقه از دلایل ضرورت و انجام تحقیق در این منطقه است.

### آزمون من‌کندال

من‌کندال یک آزمون غیرپارامتری شناخته شده است که توسط Mann (1945) معرفی شده و توسط Kendall

که در آن  $\beta_{gk}$  برآوردگر شیب خط روند برای ایستگاه  $k$ ام در ماه  $g$ ام می‌باشد. مقدار مثبت  $\beta$  حاکی از صعودی بودن روند و مقدار منفی آن نشان‌دهنده نزولی بودن روند می‌باشد.

### شاخص خشکی<sup>۱</sup>

در این مطالعه از شاخص خشکی UNEP به منظور تعیین اقلیم ایستگاه‌ها و منطقه مورد مطالعه استفاده گردید. شاخص خشکی UNEP با استفاده از رابطه (۱۱) تعیین شد.

$$AI_{UNEP} = \frac{P}{ET0} \quad (11)$$

که  $AI_{UNEP}$  شاخص خشکی،  $P$  میانگین میزان بارش سالانه و  $ET0$  متوسط تبخیر و تعرق مرجع سالانه می‌باشد. اگر  $AI < 0.03$  باشد منطقه فراخشک  $0.03 \leq AI < 0.2$ ، منطقه خشک،  $0.2 \leq AI < 0.5$ ، منطقه نیمه خشک،  $0.5 \leq AI < 0.65$  منطقه نیمه مرطوب و  $0.65 \leq AI$  منطقه مرطوب است (Maliva and Missimer 2012). اخیراً Nasrollahi et al., (2021) با استفاده از شاخص خشکی مذکور، اقلیم ایستگاه‌های منطقه‌ی مورد مطالعه را تعیین کردند. در مطالعه این محققین  $ET0$  با استفاده از روش پنمن مانتیث به صورت روزانه بدست آمد و در نهایت مقدار سالانه تبخیر و تعرق مرجع از حاصل جمع داده های روزانه تعیین شد. در این مطالعه به منظور ارزیابی نقش اقلیم در پدیده تناقض تبخیر از طبقه بندی که Nasrollahi et al., (2021) برای ایستگاه‌های این منطقه انجام دادند، استفاده شد.

### نتایج و بحث

**بررسی مقادیر تبخیر از تشت در ایستگاه‌های مورد مطالعه**  
بررسی های آماری نشان می‌دهد در شبکه ایستگاه‌های مطالعاتی، سه ایستگاه آبادان، دهلران و ماهشهر بترتیب با ۳۹۹۴، ۳۸۶۹ و ۳۸۶۶ میلیمتر در سال بیشترین و سه

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1, & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0, & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1, & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

در هر ایستگاه به تعداد ماه‌های دوره آماری پارامتر  $Z$  داریم. پارامتر  $Z$  و  $Var(S)$  به شرح زیر محاسبه می‌شوند:

$$z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}}, & \text{if } s > 0 \\ 0, & \text{if } s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{var}(s)}}, & \text{if } s < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t(t-1)(2t+5)}{18} \quad (4)$$

که در آن  $t$  تعداد داده‌های یکسان در هر دسته از داده‌های تکراری موجود در سری زمانی داده‌ها است.  $m$  نمایانگر تعداد سری‌هایی است که در آن‌ها حداقل یک داده تکراری وجود دارد. در تحقیق پیش رو از این آزمون برای سطح معنی‌داری ۵٪ استفاده شده است. در صورتی که آماره  $Z$  مثبت باشد، روند سری داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن آن، روند نزولی خواهد بود (Hajjam et al., 2017).

### تخمینگر شیب سن

Sen (1968) با توسعه یک سری مطالعات آماری که Thiel (1950)، به انجام رسانده بود یک روش ناپارامتری را برای تحلیل سری‌های زمانی ارائه نمود. تخمینگر شیب سن بصورت گسترده در تحلیل روند داده‌های آب و هواشناسی استفاده می‌شود (Gocic and Trajkovic 2013; Partal and Kahya 2006). این روش نیز همانند روش من‌کندال از تحلیل تفاوت بین مشاهدات یک سری زمانی بهره می‌گیرد. نقاط قوت روش من‌کندال را داراست. همچنین این آزمون در هنگام وجود داده‌های گمشده، به راحتی قابل استفاده است (Chervenkov and Slavov, 2017). اساس این روش بر محاسبه یک شیب میانه  $\beta$  برای سری زمانی و قضاوت نمودن در مورد معنی‌داری شیب بدست آمده در سطوح اطمینان مختلف می‌باشد:

$$\beta_{gk} = \text{Median} \left( \frac{x_{jgk} - x_{igk}}{j - i} \right) \quad \forall 1 \leq i < j \leq n \quad (10)$$

<sup>1</sup> Aridity Index

### تحلیل روند زمانی

برای بررسی روند تغییرات تبخیر از تشت ابتدا مقدار آماره‌های روش‌های من‌کنندال و تخمینگر شیب سن برای متغیرهای اقلیمی شامل ساعت آفتابی (SD)، فشار هوا (P)، رطوبت نسبی (RH)، سرعت باد (WS)، دمای بیشینه (Tmax)، کمینه (Tmin)، و میانگین (Tmean) و تبخیر از تشت (Pan (EV)) محاسبه گردید و سپس معنی‌داری این آماره‌ها در سطح ۵٪ مورد آزمون قرار گرفت. نتایج این آزمون‌ها در جداول ۲ و ۳ آمده است.

ایستگاه رشت، آستارا و بندر انزلی بترتیب با ۷۴۲، ۸۱۰ و ۸۸۴ میلیمتر در سال کمترین میانگین تبخیر از تشت را در طول دوره آماری داشته‌اند. همچنین سه ایستگاه دهلران، اهواز و امیدیه بترتیب با ۱۳۷۲، ۱۲۳۳ و ۱۰۴۰ میلیمتر در سال بیشترین و سه ایستگاه نوشهر، رامسر و تبریز بترتیب با ۲۵۲، ۳۱۰ و ۳۹۷ میلیمتر در سال کمترین دامنه تغییرات تبخیر از تشت را در طی دوره مطالعاتی دارا بودند. نتایج مربوط به سایر ایستگاه‌ها در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: میانگین و دامنه تغییرات تبخیر سالانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	تبخیر تشت	دامنه تغییرات	اقلیم	ایستگاه	تبخیر تشت	دامنه تغییرات	اقلیم
آبادان	۳۹۹۴٫۹۳	۱۰۰۱٫۳	فراخشک	مهاباد	۱۵۶۵٫۱	۷۱۵٫۱	نیمه‌خشک
آبعلی	۱۲۸۰٫۷۴	۶۱۳٫۷	نیمه‌خشک	ماهشهر	۳۸۶۶٫۶	۷۴۹٫۲	خشک
اهر	۱۶۷۰٫۱	۴۷۴٫۳	نیمه‌خشک	ماکو	۱۴۰۸٫۶	۴۸۷٫۳	نیمه‌خشک
اهواز	۳۲۷۵٫۰۳	۱۲۳۳	خشک	مراغه	۱۹۴۶٫۹	۶۹۰٫۴	خشک
الیگودرز	۲۰۳۸٫۷	۶۳۸	خشک	مسجد سلیمان	۳۲۱۰٫۳	۵۷۸٫۴	خشک
بندر انزلی	۸۸۴٫۴	۵۱۴٫۲	مرطوب	میانه	۱۹۱۶٫۶	۵۳۱٫۷	خشک
اراک	۱۹۳۴٫۸	۷۱۷٫۵	نیمه‌خشک	نوشهر	۹۸۳۰٫۸	۲۵۲٫۱	مرطوب
آستارا	۸۱۰٫۷	۵۰۰٫۵	مرطوب	امیدیه	۳۵۷۲	۱۰۴۰٫۵	خشک
بابلسر	۸۹۰٫۴	۵۰۰٫۹	مرطوب	ارومیه	۱۳۵۹٫۰۲	۴۰۳٫۲	نیمه‌خشک
بیجار	۱۹۶۷٫۹	۸۰۳٫۹	خشک	پارس‌آباد	۱۲۸۱٫۹	۶۴۳٫۳	نیمه‌خشک
بروجن	۲۰۷۲٫۱	۶۴۴٫۶	مرطوب	قزوین	۱۵۸۰٫۱	۵۳۹٫۱	نیمه‌خشک
دهلران	۳۸۶۹٫۲	۱۳۷۲٫۷	خشک	قم	۲۶۴۱٫۲	۴۶۴٫۶	خشک
دوگنبدان	۳۰۹۴٫۴	۷۷۰٫۳	خشک	رامسر	۹۳۳٫۸	۳۱۰٫۲	مرطوب
اصفهان	۲۱۴۹٫۲	۵۸۱٫۵	خشک	رشت	۷۴۲٫۴	۴۳۸٫۲	مرطوب
گرگان	۱۳۳۳٫۹	۴۷۹٫۱	مرطوب	سنندج	۱۸۹۸٫۳	۵۸۶٫۹	نیمه‌خشک
ایلام	۲۰۲۵٫۱	۶۶۸٫۲	نیمه‌خشک	سقز	۱۸۱۹٫۳	۹۶۱٫۷	نیمه‌خشک
جلفا	۲۲۷۶٫۹	۷۰۵٫۶	خشک	سراب	۱۵۲۶٫۸	۴۱۰٫۱	نیمه‌خشک
کنگاور	۱۷۰۰٫۷	۵۱۰٫۷	نیمه‌خشک	سردشت	۱۷۱۷٫۷	۸۰۲٫۷	نیمه‌خشک
کرج	۱۸۹۹٫۵	۷۰۰٫۸	خشک	سرپل ذهاب	۲۱۴۷٫۳	۶۹۹٫۹	نیمه‌خشک
کرم‌ناشاه	۱۸۹۱٫۸	۹۲۶	نیمه‌خشک	شهرکرد	۱۹۲۴٫۸	۶۷۱	نیمه‌خشک
خلخال	۱۲۵۱٫۸	۵۲۹٫۳	نیمه‌خشک	شاهرود	۱۹۷۰٫۶	۷۷۵٫۵	خشک
خرم‌آباد	۱۸۶۱٫۶	۷۴۸٫۳	نیمه‌خشک	تبریز	۲۰۰۹٫۹	۳۹۷٫۱	خشک
خرمدره	۱۶۷۰٫۷	۹۱۴٫۲	نیمه‌خشک	تکاب	۱۷۹۶٫۵	۸۴۷٫۹	نیمه‌خشک
خوی	۱۳۷۵٫۴	۵۰۳٫۴	نیمه‌خشک	یاسوج	۱۹۰۱	۸۷۴٫۳	نیمه‌مرطوب
خور و بیابانک	۲۸۱۹	۶۵۱٫۶	خشک	زنجان	۱۴۹۰٫۵	۵۴۷٫۴	نیمه‌خشک

مرطوب ۴۹۵،۵ ۱۶۵۰،۹ کوهرنگ

جدول ۲: مقادیر Z من کندانال و تخمینگر شیب سن محاسبه شده برای متغیرهای مختلف در گام زمانی سالانه

ایستگاه	تخمینگر شیب سن					من کندانال			
	تخمینگر از تیشن (Pan (EV))	تخمینگر از تیشن (Pan (EV))	دمای متوسط (T <sub>mean</sub> )	دمای کمینه (T <sub>min</sub> )	دمای بیشینه (T <sub>max</sub> )	سرعت باد (WS)	رطوبت نسبی (RH)	فشار هوا (P)	ساعت آفتابی (SD)
آبادان	۸،۸۴	۰،۷۷	۴،۷۵*	۵،۲۸*	۳،۷۵*	۰،۰۷	-۲،۳۹*	-۱،۸۶	-۰،۸۲
آبعلی	۶،۸۱	۲،۰۸*	۳،۶۴*	۲،۰۳*	۳،۶۴*	۳،۵*	-۱،۰۷	۱،۹۳	۱،۲۱
اهر	-۳،۷۴	-۱	۳،۷۱*	۳،۷۵*	۳،۳۹*	۳،۵۷*	-۲،۵*	۱،۳۶	۱،۱۸
اهواز	-۲۸،۳۷	-۴،۴۶*	۴،۰۳*	۴،۲۵*	۳،۳۹*	-۲،۱۴*	-۱،۶۱	-۱،۷۸	-۰،۶۸
الیگودرز	-۱۱،۵۲	-۲،۵۵*	۴،۰۳*	۳،۸۵*	۳،۲۵*	۲،۲۸*	۳*	۳،۳۵*	-۰،۲۱
بندر انزلی	۱۰،۷۳	۳،۰۶*	۴،۰۷*	۳،۶۸*	۴،۱۴*	۵،۱۷*	-۲،۶۴*	-۱،۶۸	۲،۱۴*
اراک	-۲،۷۳	-۱،۰۵	۳،۸۵*	۳،۴۶*	۳،۷۱*	۳،۸۲*	-۲،۷۸*	۳،۰۷*	۰،۱۴
آستارا	۱۰،۰۴	۲،۰۸*	۳،۶۴*	۳،۹۳*	۳،۲۵*	۳،۱*	-۳*	-۱،۴۳	۲،۶۸*
بابلسر	۱،۸۳	۰،۶۳	۳،۷۱*	۵،۱۷*	۲،۰۷*	۱،۶۴	-۴،۳۹*	-۱،۵۳	۳،۴۶*
بیجار	۱،۴۴	۰،۳	۴،۸۵*	۵،۲۸*	۴،۳۲*	-۱،۴۳	-۲،۳۶*	۱،۷۸	۱،۲۵
بروجن	-۴،۹	-۱،۱۴	۳،۷۵*	۴،۱*	۳،۱۸*	۱،۵۷	-۱،۹۶*	۱،۲۵	۰،۴۳
دهلران	۳۴،۸۲	۲،۶۴*	۴،۲۵*	۳،۶*	۴،۷۵*	-۰،۶۸	-۰،۶۸	-۱،۷۵	۰،۵۴
دوگنبدان	-۳،۰۵	-۰،۶۳	۴،۶*	۴،۲۵*	۳،۷۵*	-۳،۳۵*	-۱،۸۲	۲،۹۳*	۰،۱۱
اصفهان	۱۱،۵۶	۲،۳۶*	۳،۲۵*	۲*	۳،۲۵*	۲،۷۸*	-۳،۶۴*	۳،۷۵*	۲،۲۱*
گرگان	۸،۲۴	۲،۷۳*	۲،۴۶*	۰	۴،۲۸*	۶،۱۷*	۱،۱۴	۳،۶۴*	۲،۶۸*
ایلام	۴،۱۸	۱	۱،۱۱	-۲،۰۳*	۴،۷۸*	۴،۶*	۰،۱۸	۴،۲۱*	-۰،۲۹
جلفا	-۴،۶۳	-۱،۰۵	۲،۷۵*	۳،۳۹*	۲،۰۷*	۳،۳۹*	۱،۷۱	۰،۵۷	۰،۸۹
کنگاور	۲،۶۵	۰،۵۴	۴،۵*	۴،۱۴*	۳،۵۷*	۲،۲۵*	۱،۴۶	۲،۰۷*	۰،۶۸
کرج	۱۶،۴۲	۲،۹۷*	۴،۳۵*	۴،۳۵*	۴،۱۴*	۴،۲۵*	-۱،۵	۰،۹۳	۱،۱۸
کرمانشاه	-۱،۴۶	-۰،۲۱	۳،۶۴*	۴*	۲،۷۸*	۵،۲۵*	-۳،۷۵*	۴*	-۰،۶۸
خلخال	-۶،۷۹	-۱،۲۸	۵،۲۵*	۵،۳۵*	۳،۸۵*	۲،۲۵*	-۴،۲۵*	۰،۹۶	۱،۵۳
خرم‌آباد	-۱۲،۰۱	-۱،۲۸	۳،۹۳*	۳،۶*	۳،۵۷*	۱،۹۳	-۴،۴۲*	۱،۶۸	۰،۱۸
خرمدره	-۲۲،۷۷	-۲،۶۹*	۴،۶۷*	۵،۲۱*	۴،۰۷*	۰،۷۹	۰،۹۳	۲،۵۷*	۰،۶۴
خوی	۵،۵۷	۱،۶۱	۳،۷۱*	۳،۷۸*	۳،۳۲*	۴،۶*	-۰،۵۴	۰،۱۸	-۰،۱۴
خور و بیابانک	۱۲،۶۳	۲،۷۸*	۴،۱۴*	۵،۱۴*	۲،۷۱*	-۵،۰۳*	-۱،۹۳	۱،۸۲	-۰،۴۳
کوهرنگ	-۸،۷۴	-۲،۰۸*	۳،۶*	۲،۸۲*	۳،۸۵*	-۱،۷۵	-۲،۱۸*	۴،۱*	۰،۴۶
مهاباد	۱۶،۶۷	۲،۹۲*	۴،۲۵*	۳،۷۸*	۴،۲۸*	۴،۳۹*	-۳*	-۰،۱۱	۱،۶۴
ماهشهر	-۳،۰۹	-۰،۵۸	۴،۸۲*	۵،۰۷*	۴،۱۷*	-۲،۷۱*	۲،۶۸*	-۰،۹۳	-۰،۳۹
ماکو	-۳،۴۱	-۰،۵۴	۲،۸۹*	۳،۳۵*	۲،۳۶*	۴،۴۲*	-۰،۱۸	۳،۲۸*	-۰،۰۵
مراغه	-۴،۹۵	-۱،۲۴	۵،۰۳*	۳،۹۳*	۵،۲۸*	۳،۶*	-۱،۵۷	۵،۴۶*	۱،۷۱
مسجد سلیمان	۳،۵۲	۰،۶۸	۳،۷۱*	۲،۶۴*	۴،۱۴*	-۱،۶۱	-۱،۵۳	۰،۰۷	-۱،۳۶
میانه	۴،۵۶	۱،۶۶	۴،۲۵*	۴،۳۵*	۳،۸۹*	۰،۹۶	۲*	-۰،۳۹	۱،۲۸
نوشهر	۰،۲۴	۰،۲۶	۳،۸۲*	۴،۷۱*	۳،۲۸*	۰،۶۸	-۴*	-۱،۲۱	۲،۸۹*
امیدیه	۴،۷۲	۰،۶۸	۴،۵۷*	۴،۹۶*	۳*	۱،۱۸	-۰،۹۶	۰،۰۷	-۰،۶۶
ارومیه	۰،۲۴	۰،۲۱	۳،۱*	۰،۷۱*	۴،۴۲*	۵،۲۸*	-۱،۲۵	-۲،۸۵*	۱،۵
پارس‌آباد	-۱۰،۳۵	-۱،۴۷	۲،۳۹*	۳*	۱،۹۳	۰،۶۴	۲،۸۹*	-۱،۰۷	۰،۳۲

ایستگاه	من کندال									تخمینگر شیب سن	
	ساعت آفتابی (SID)	فشار هوا (P)	رطوبت نسبی (RH)	سرعت باد (WS)	دمای بیشینه (T <sub>max</sub> )	دمای کمینه (T <sub>min</sub> )	دمای متوسط (T <sub>mean</sub> )	تبخیر از تشت (Pan (EY))	تبخیر از تشت (Pan (EY))	تبخیر از تشت (Pan (EY))	
قزوین	۱	۴,۶۷*	-۰,۹۶	۲,۶*	۳,۱۸*	۴,۱*	۳,۷۵*	۱,۶۶	۸,۶۱		
قم	۰	۲,۹۶*	-۰,۱۴	۳,۰۳*	۲,۹۳*	۴,۷۵*	۴,۴۶*	-۱,۰۸	-۶,۹۳		
رامسر	۲,۶*	-۰,۲۹	-۳,۲۱*	۱,۰۳۶	۳,۶۸*	۵,۱۴*	۴,۴۶*	۲,۵۹*	۶,۴۹		
رشت	۱,۰۲۸	۰,۵۴	-۲,۲۸*	۳,۷۱*	۲,۱۴*	۳,۷۱*	۳,۰۷*	۲,۹۷*	۷,۸۶		
سندج	۲,۵۷*	۳,۳۲	-۳,۳۲*	۱,۹۶*	۵,۲۸*	۳,۳۹*	۴,۸۵*	۰,۱۶	۱,۹۵		
سقز	۲*	۱,۹۶*	-۰,۹۶	۱,۹۳	۳,۸۲*	۳,۸۲*	۴,۲۸*	۱,۲۴	۶,۰۱		
سراب	۲,۳۶*	۱,۱۱	-۱,۰۷	۴,۸۵*	۲,۶*	۳,۸۲*	۳,۵۷*	۳,۰۶*	۷,۹۶		
سردشت	۱,۰۸۲	۴,۸۵*	-۲,۰۵*	-۳,۳۵*	۳,۸۲*	۴,۷۱*	۴,۶۷*	۱,۴۲	۱۱,۴۷		
سرپل ذهاب	-۰,۰۲۵	-۳,۷۱*	-۰,۵۴	۱,۱۸	۴,۲۱*	۴,۷۵*	۴,۵۳*	۱,۳۳	۵,۴۷		
شهرکرد	۱,۰۱۱	۴,۷۸*	-۲,۱۱*	۳,۹۳*	۳*	-۱,۸۶	۰,۱۸	۱,۲۸	۷,۰۵		
شاهرود	۳,۰۱*	۴,۸۲*	۰,۷۹	۳,۸۵*	۲,۹۶*	۲,۳۲*	۲,۲۸*	۴,۹۳*	۳,۰۵۷		
تبریز	۰,۰۲۵	۱,۰۷۵	-۱,۰۷۸	۵,۰۷*	۳,۶*	۱,۴۳	۲,۵۷*	۰,۶۸	۱,۹۳		
تکاب	۰,۰۸۲	۲,۲۸*	-۱,۰۶۴	-۰,۷۵	۳,۹۳*	۳,۶۴*	۴,۳۲*	۲,۱۷*	۱۱,۲۶		
یاسوج	۲,۰۱۱*	۲,۰۷*	-۲,۱۸*	۰,۹۶	۴,۲۵*	-۱,۰۲۱	۱,۴۶	-۱,۰۸۹	-۱۰,۰۰۸		
زنجان	-۰,۰۰۵	-۰,۰۰۴	۰,۰۱۱	-۰,۰۴۶	۴,۶۷*	۵,۰۱*	۵,۱۴*	-۲,۳۱*	-۹,۰۸۹		

### بررسی متغیرهای ساعت آفتابی، فشار هوا، رطوبت نسبی و سرعت باد

نتایج روندیابی با آزمون من کندال و تخمینگر شیب سن روی متغیر ساعت آفتابی نشان می‌دهد که از مجموع ۵۰ ایستگاه ۴۴ ایستگاه (۸۸ درصد) دارای شیب افزایشی و ۶ ایستگاه (۱۲ درصد) دارای شیب کاهش می‌دهند. تعداد ۱۲ ایستگاه (۲۴ درصد) دارای روند شیب در سطح معنی‌داری ۰/۵ بودند. روند شیب کاهش در سطح معنی‌داری ۰/۵ مشاهده نگردید. نتایج روندیابی با آزمون من کندال و تخمینگر شیب سن روی متغیر فشار هوا نشان می‌دهد که از مجموع ۵۰ ایستگاه ۳۷ ایستگاه (۷۴ درصد) دارای شیب افزایشی و ۱۴ ایستگاه (۲۸ درصد) دارای شیب کاهش می‌دهند. تعداد ۲۳ ایستگاه (۴۶ درصد) دارای روند شیب در سطح معنی‌داری ۰/۵ بودند (۰/۴ و ۰/۴۲ از ایستگاه‌ها دارای روند بترتیب کاهش و افزایش هستند). نتایج روندیابی با آزمون من کندال و تخمینگر شیب سن روی متغیر رطوبت نسبی نشان می‌دهد که از مجموع ۵۰ ایستگاه ۱۱ ایستگاه (۲۲ درصد) دارای شیب افزایشی و

۳۹ ایستگاه (۷۸ درصد) دارای شیب کاهش هستند. تعداد ۲۴ ایستگاه (۴۸ درصد) دارای روند شیب در سطح معنی‌داری ۰/۵ بودند (۰/۴۰ و ۰/۱۰ از ایستگاه‌ها دارای روند بترتیب کاهش و افزایش هستند). نتایج روندیابی با آزمون من کندال و تخمینگر شیب سن روی متغیر سرعت باد نشان می‌دهد که از مجموع ۵۰ ایستگاه ۴۰ ایستگاه (۸۰ درصد) دارای شیب افزایشی و ۱۰ ایستگاه (۲۰ درصد) دارای شیب کاهش هستند. تعداد ۳۱ ایستگاه (۶۲ درصد) دارای روند شیب در سطح معنی‌داری ۰/۵ بودند (۰/۱۰ و ۰/۵۲ از ایستگاه‌ها دارای روند بترتیب کاهش و افزایش هستند).

### بررسی دمای بیشینه، کمینه و میانگین

نتایج روندیابی با آزمون من کندال و تخمینگر شیب سن روی متغیرهای دمای میانگین، کمینه و بیشینه نشان می‌دهد که ۱۰۰ درصد ایستگاه‌ها دارای شیب افزایشی برای متغیرهای دمای بیشینه و میانگین دما هستند و فقط ۳ ایستگاه (۶ درصد) دارای شیب کاهش برای دمای کمینه هستند. از میان این ۳ ایستگاه ۱ ایستگاه در سطح

درصد) و ۴۹ ایستگاه (۹۸ درصد) دارای روند شیب با سطح معنی‌داری ۵٪ بودند (Rahimzadeh et al., 2009; Fallahi et al., 2012).

معنی‌داری ۵٪ دارای روند کاهشی و ۴۵ ایستگاه (۹۰ درصد) دارای روند افزایشی معنادار بودند. برای متغیر دمای میانگین و بیشینه بترتیب تعداد ۴۷ ایستگاه (۹۴

جدول ۳: تعداد و درصد ایستگاه‌های با شیب و روند معنادار در گام زمانی سالانه برای متغیرهای اقلیمی مختلف

Pan Ev	T <sub>mean</sub>	T <sub>min</sub>	T <sub>max</sub>	WS	RH	P	SD	
۳۲	۵۰	۴۷	۵۰	۴۰	۱۱	۳۷	۴۴	تعداد ایستگاه با شیب افزایشی
۱۴	۴۷	۴۴	۴۹	۲۶	۴	۲۱	۱۲	تعداد ایستگاه با روند افزایشی در سطح ۵٪
۵	۰	۱	۰	۵	۲۰	۲	۰	تعداد ایستگاه با روند کاهشی در سطح ۵٪

دلیل افزایش تابش خورشیدی است که به نوبه خود ناشی از کاهش پوشش ابر است (Roy and Balling, 2005). بنابراین ایستگاه‌هایی که در آنها کاهش معنادار تبخیر رخ داده است مورد بررسی قرار می‌گیرند که آیا این کاهش میزان تبخیر به معنای تناقض تبخیر است و آیا با افزایش دما همراه شده است؟ شکل ۲ سری زمانی تبخیر و دما برای ۵ ایستگاهی که تناقض تبخیر در سطح معنی‌داری ۵٪ در آنها رخ داده است را نشان می‌دهد. اینکه چرا رفتاری متفاوت از تشت در این ایستگاه‌ها مشاهده می‌شود، مورد بحث قرار می‌گیرد. در ادامه بحث و تفسیر نتایج و ارزیابی داده‌ها در ایستگاه‌هایی که در آنها تناقض تبخیر به صورت معنی‌دار در آنها مشاهده شده است، ارائه می‌گردد.

#### بررسی داده‌های ایستگاه اهواز

آماره Z من‌کندال و تخمینگر شیب سن برای متغیرهای مختلف اقلیمی در ایستگاه اهواز برآورد گردید. هر سه متغیر دمای کمینه، بیشینه و میانگین دارای بزرگی شیب روند یکسان ۰/۰۶ درجه سانتیگراد در سال و آماره Z من‌کندال آن‌ها بترتیب برابر با ۴/۲۵، ۳/۳۹ و ۴/۰۳ و در سطح معنی‌داری ۵٪ هستند. این نتایج با مطالعاتی که در ارتباط با پدیده گرمایش جهانی در دهه‌های اخیر در کشور انجام شده همسو است. بزرگ‌ترین شیب روند نزولی تبخیر از تشت در میان تمام ایستگاه‌ها با مقدار ۲۸/۳۷- میلیمتر در سال متعلق به ایستگاه اهواز و در سطح معنی‌داری ۵٪ هستند ( $Z = ۴/۴۶$ ). سایر متغیرهای اقلیمی شامل ساعات آفتابی، فشار هوا، رطوبت نسبی و

#### بررسی تبخیر از تشت

نتایج روند یابی با آزمون من‌کندال و تخمینگر شیب سن روی متغیر تبخیر از تشت نشان می‌دهد که از مجموع ۵۰ ایستگاه، ۳۲ ایستگاه (۶۴ درصد) دارای شیب افزایشی و ۱۹ ایستگاه (۳۸ درصد) دارای شیب کاهشی هستند. تعداد ۱۹ ایستگاه (۳۸ درصد) دارای روند شیب در سطح معنی‌داری ۵٪ بودند بطوریکه ۵ ایستگاه (۱۰٪) و ۱۴ ایستگاه (۲۸٪) بترتیب دارای روند کاهشی و افزایشی بودند. از مجموع ۵ ایستگاه دارای روند منفی معنی‌دار در تبخیر از تشت (دارای تناقض تبخیر)، بترتیب تعداد ۲، ۲ و ۱ ایستگاه در اقلیم‌های خشک، نیمه‌خشک و مرطوب واقع شده بودند. از مجموع ۱۴ ایستگاه دارای روند مثبت معنی‌دار، تعداد ۵، ۴ و ۵ ایستگاه در اقلیم خشک، نیمه-خشک و مرطوب واقع شده بودند. در میان اقلیم‌های مختلف بیشترین درصد روند صعودی معنی‌دار در اقلیم مرطوب و حدود ۵۵ درصد بود. تحلیل روند شاخص خشکی در اقلیم‌های مختلف نشان داد که افزایش شاخص خشکی در مناطق مرطوب بیشتر از مناطق نیمه خشک و خشک است. از سوی دیگر، خشک شدن آب و هوای مرطوب شدیدتر از آب و هوای نیمه خشک بود (Nasrollahi et al., 2021). افزایش تبخیر در منطقه مورد مطالعه با همان دلایل افزایش تبخیر در مناطق دیگر نیمکره شمالی قابل توضیح است. تحقیقات انجام شده تا امروز نشان می‌دهد که دلیل اصلی افزایش تبخیر، افزایش دمای بیشینه و کاهش دمای کمینه است، این واقعیت باعث افزایش دامنه حرارتی روزانه و ظرفیت تبخیر محیط می‌شود (Jhajharia and Singh, 2011). موارد فوق به



آماره  $Z$  من‌کندال و تخمینگر شیب سن برای متغیرهای مختلف اقلیمی در ایستگاه خرم‌دره برآورد گردید. هر سه متغیر دمای کمینه، بیشینه و میانگین دارای بزرگی شیب روند یکسان  $۰/۰۸$  درجه سانتیگراد در سال و در سطح معنی‌داری  $۵\%$  هستند. بزرگی شیب روند تبخیر از تشت  $۲۲/۷۷$  - میلی‌متر در سال بود که در سطح معنی‌داری  $۵\%$  است ( $Z = ۲/۶۹$ ). سایر متغیرهای مورد بررسی دارای شیب روند مثبت اما غیرمعنادار در سطح معنی‌داری  $۵\%$  بودند به استثنای متغیر فشار هوا که دارای شیب روند  $۰/۰۲$  کیلو پاسکال در سال و در سطح معنی‌داری  $۵\%$  بود. از آنجاییکه در طول دوره آماری  $۱۹۹۳$  تا  $۲۰۱۷$  دما بطور میانگین  $۰/۰۸$  درجه سانتیگراد در سال افزایش یافته است و همزمان میزان تبخیر از تشت  $۲۲/۷۷$  - میلی‌متر در سال کاهش یافته است بنابراین پدیده تناقض تبخیر در این ایستگاه رخ داده است. وجود این پدیده را می‌توان به افزایش بیشتر دمای کمینه در مقایسه با دمای بیشینه و افزایش رطوبت نسبی نسبت داد.

#### بررسی داده‌های ایستگاه کوه‌رنگ

آماره  $Z$  من‌کندال و تخمینگر شیب سن برای متغیرهای مختلف اقلیمی در ایستگاه کوه‌رنگ برآورد گردید. هر سه متغیر دمای کمینه، بیشینه و میانگین بترتیب دارای بزرگی شیب روند  $۰/۰۵$ ،  $۰/۰۸$  و  $۰/۰۶$  درجه سانتیگراد در سال و در سطح معنی‌داری  $۵\%$  هستند. بزرگی شیب روند تبخیر از تشت  $۸/۷۴$  - میلی‌متر در سال بود که در سطح معنی‌داری  $۵\%$  است ( $Z = ۲/۰۸$ ). بزرگی شیب روند متغیرهای فشار هوا ( $۰/۰۶$  کیلو پاسکال در سال) و ساعات آفتابی مثبت بود اما فقط متغیر فشار هوا در سطح معنی‌داری  $۵\%$  بود. بزرگی شیب روند متغیرهای رطوبت نسبی ( $۰/۱۷$ -) و سرعت باد منفی بود و فقط رطوبت نسبی با مقدار  $Z$  من‌کندال  $۲/۱۸$  - در سطح معنی‌داری  $۵\%$  بود. از آنجاییکه در طول دوره آماری  $۱۹۹۳$  تا  $۲۰۱۷$  دما بطور میانگین  $۰/۰۶$  درجه سانتیگراد در سال افزایش یافته است و همزمان میزان تبخیر از تشت  $۸/۷۴$  - میلی‌متر در سال کاهش یافته است. در نتیجه پدیده تناقض تبخیر در این ایستگاه رخ

سرعت باد دارای روند نزولی بودند. بیشترین شیب روند نزولی در میان متغیرهای مذکور با سطح معنی‌داری  $۵\%$  متعلق به متغیر سرعت باد ( $۰/۰۱$  - متر بر ثانیه در سال) است. از آنجاییکه در طول دوره آماری  $۱۹۹۳$  تا  $۲۰۱۷$  دما بطور میانگین  $۰/۰۶$  درجه سانتیگراد در سال افزایش یافته است و همزمان میزان تبخیر از تشت  $۲۸/۳۷$  - میلی‌متر در سال کاهش یافته است مشخص می‌شود که پدیده تناقض تبخیر در این ایستگاه رخ داده است. وجود این پدیده را در وحله اول می‌توان به کاهش سرعت باد نسبت داد. اگرچه سایر متغیرهای اقلیمی مورد بررسی به استثنای رطوبت نسبی در جهتی رخ داده است که وضعیت را تشدید و منجر به کاهش تبخیر می‌گردند. روند کاهشی تبخیر از تشت در این ایستگاه در مطالعه Gharekhani و همکاران (2012) نیز گزارش شده و نتایج این تحقیق را تایید می‌کند.

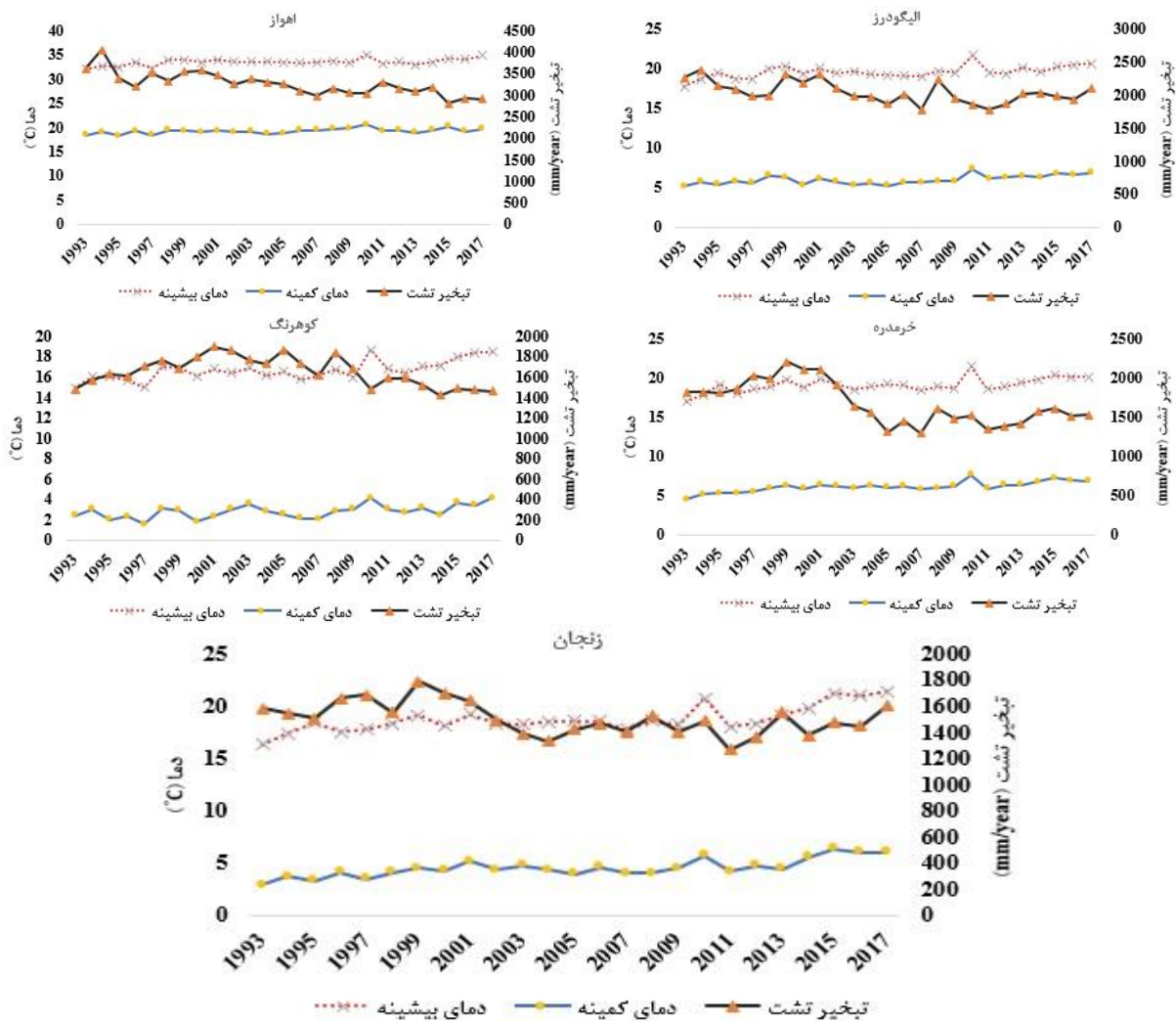
#### بررسی داده‌های ایستگاه الیگودرز

آماره  $Z$  من‌کندال و تخمینگر شیب سن برای متغیرهای مختلف اقلیمی در ایستگاه الیگودرز برآورد گردید. هر سه متغیر دمای کمینه، بیشینه و میانگین بترتیب دارای بزرگی شیب روند  $۰/۰۵$ ،  $۰/۰۶$  و  $۰/۰۵$  درجه سانتیگراد در سال و در سطح معنی‌داری  $۵\%$  هستند. بزرگی شیب روند تبخیر از تشت  $۱۱/۵۲$  - میلی‌متر در سال بود که در سطح معنی‌داری  $۵\%$  است ( $Z = ۲/۵۵$ ). بزرگی شیب روند متغیرهای فشار هوا ( $۰/۰۵$ )، رطوبت نسبی ( $۰/۱۶$ ) و سرعت باد ( $۰/۰۴$ ) مثبت بودند و آماره  $Z$  من‌کندال آن‌ها در سطح معنی‌داری  $۵\%$  هستند. فقط متغیر ساعات آفتابی دارای شیب روند منفی بسیار ناچیز بود که معنادار نبود. از آنجاییکه در طول دوره آماری  $۱۹۹۳$  تا  $۲۰۱۷$  دما بطور میانگین  $۰/۰۶$  درجه سانتیگراد در سال افزایش یافته است و همزمان میزان تبخیر از تشت  $۱۱/۵۲$  - میلی‌متر در سال کاهش یافته است در نتیجه پدیده تناقض تبخیر در این ایستگاه رخ داده است. وجود این پدیده را می‌توان به افزایش رطوبت نسبی نسبت داد.

#### بررسی داده‌های ایستگاه خرم‌دره

باد نسبت داد.

داده است. وجود این پدیده را می‌توان به کاهش سرعت



شکل ۲: سری زمانی تبخیر تشت و دما در ایستگاه‌های دارای تناقض تبخیر معنی‌دار در سطح ۰/۵٪

### بررسی داده‌های ایستگاه زنجان

آماره  $Z$  من‌کنندال و تخمینگر شیب برای متغیرهای مختلف اقلیمی در ایستگاه زنجان برآورد گردید. هر سه متغیر دمای کمینه، بیشینه و میانگین دارای بزرگی شیب روند یکسان  $۰/۱۱$  درجه سانتیگراد در سال و در سطح معنی‌داری  $۰/۵$  هستند. بزرگی شیب روند تبخیر از تشت  $۹/۸۹$  - میلیمتر در سال بود که در سطح معنی‌داری  $۰/۵$  است ( $Z = ۲/۳۱$ ). شیب روند متغیر رطوبت نسبی مثبت و متغیرهای فشار هوا و ساعات آفتابی منفی بود اما روند مثبت هیچ یک از این متغیرها در سطح معنی‌داری  $۰/۵$

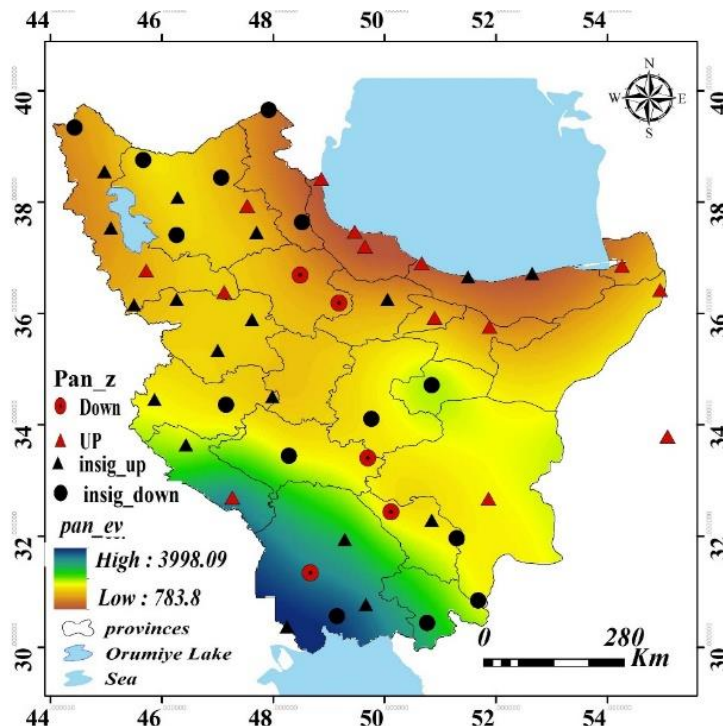
نبودند. از آنجاییکه در طول دوره آماری ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۷ دما بطور میانگین  $۰/۱۱$  درجه سانتیگراد در سال افزایش یافته است و همزمان میزان تبخیر از تشت  $۹/۸۹$  - میلیمتر در سال کاهش یافته است مشخص می‌شود که پدیده تناقض تبخیر در این ایستگاه رخ داده است. وجود این پدیده را می‌توان به افزایش بیشتر دمای کمینه در مقایسه با دمای بیشینه نسبت داد. متغیرهای ساعات آفتابی و سرعت باد نیز تغییراتی در جهت تشدید روند نزولی تبخیر داشتند هرچند این تغییرات معنادار نبود.

در طول ۲۵ سال گذشته از سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۷، روند گرم شدن آب و هوا در منطقه مورد مطالعه آشکار بود. میانگین سالانه دمای هوای ۰/۰۶ درجه سانتیگراد در هر سال افزایش می‌یابد. در طول همان دوره، تبخیر از تشت در ۳۸ درصد از ایستگاه‌ها دارای روند کاهشی است که در این میان ۱۰ درصد این روندهای کاهشی در سطح معنی‌داری ۵٪ است. بنابراین، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تناقض تبخیر در منطقه مورد مطالعه اتفاق افتاده است. عامل بروز این پدیده در ایستگاه‌های مختلف متفاوت بود. با این وجود ظهور و بروز این پدیده عمدتاً ناشی از افزایش بیشتر دمای کمینه نسبت به دمای بیشینه و کاهش سرعت باد می‌باشد. پیش ازین Cohen و همکاران (2002) و Ruiz-Alvarez و همکاران (2019) در مطالعاتی جداگانه وجود این پدیده را در اسرائیل و مکزیک مورد بررسی قرار دادند آنها بترتیب وجود این پدیده را به کاهش سرعت باد و افزایش بیشتر دمای کمینه نسبت به دمای بیشینه نسبت دادند که نتایج ما را حمایت می‌کند.

#### توزیع مکانی تبخیر از تشت

برای درک بهتر روند تغییرات مکانی تبخیر از تشت در سری زمانی سالانه روند تغییرات شبکه ایستگاه‌های مطالعاتی ترسیم گردید (شکل ۳). روند تغییرات تبخیر از تشت به گونه‌ای است که در شمال کشور (ناحیه خزری) کمترین میزان تبخیر و در بخش‌های جنوبی منطقه مورد مطالعه (استان خوزستان) بالاترین میزان تبخیر از تشت رخ داده است. نکته قابل ذکر اینکه تمرکز روندهای صعودی تبخیر از تشت در مناطق شمالی کشور قرار دارد و بالعکس تمرکز روندهای کاهشی تبخیر از تشت در مناطق جنوبی کشور قرار دارد. (شکل ۳)

سناریوی نگران‌کننده اینکه تمرکز روندهای صعودی تبخیر از تشت در مناطق شمالی کشور قرار دارد. جایی که کرانه جنوبی دریای خزر از پرباران‌ترین و سرسبزترین مناطق اقلیمی ایران است، این منطقه با وجود عرض نسبتاً کم از دو ناحیه مجزا تشکیل شده که یکی از این نواحی، ناحیه‌ای جلگه‌ای شکل است که به صورت نوار باریکی در امتداد دریا گسترش یافته که این منطقه کشتزارهای وسیع و شهرهای بزرگ را در خود جای داده است و ناحیه دیگر این کناره، منطقه کوهستانی شمال رشته کوه‌های البرز است که پوشیده از درختان جنگلی



شکل ۳: توزیع مکانی تبخیر از تشت در سطح حوزه مطالعاتی و تعیین روند تبخیر از تشت در ایستگاه‌های مختلف

تشت (دارای روند نزولی معنی‌دار) مشاهده شد که بیشتر این ایستگاه‌ها در اقلیم‌های خشک، نیمه‌خشک واقع شده بودند. در حالی که بیشتر (۵۵ درصد) ایستگاه‌های که داری روند صعودی معنی‌دار بودند، در اقلیم مرطوب قرار داشتند. لذا نتایج این مطالعه نشان داد که بسیاری از مناطق مرطوب کشور در حال تغییر اقلیم بود و خشکتر می‌شوند. در ایستگاه‌هایی که روند کاهشی در میزان تبخیر داشتند، اگر الگوی منفی تبخیر در این ایستگاه‌ها ادامه یابد، ممکن است کشاورزی دیم شرایط رطوبت خاک بهتری داشته باشد. از طرف دیگر روندهای مثبت می‌تواند تبخیر و تعرق و نیاز آبیاری محصول را در طول سال افزایش دهد. این امر می‌تواند منجر به بحرانی‌تر شدن وضعیت سفره-های دارای برداشت بی‌رویه در منطقه مورد مطالعه شود. از آنجاییکه تبخیر نقش پررنگی در هدررفت منابع آبی این منطقه دارد، نتایج این تحقیق مبنایی را برای کشاورزان و مؤسسات مسئول مدیریت منابع آب جهت تدوین استراتژی‌های سازگار/کاهش برای مقابله با تأثیر تغییرات آب و هوا بر کشاورزی فراهم می‌کند. برای ایجاد روش-های مناسب برای مقابله با سناریوهای فعلی و آینده باید

می‌باشد که در بیشتر مناطق و خصوصاً در مناطق مرکزی و شمال غرب فاصله این رشته‌کوه تا دریا از چند کیلومتر تجاوز نمی‌کند. بخش زیادی از منابع آبی کشور از طریق تبخیر و تعرق از دسترس خارج می‌گردد. این امر نشان‌دهنده اهمیت توجه بیشتر به مسأله تبخیر و تعرق در کشور است. طبق نتایج Fan و Thomas (2013) تبخیر عمدتاً به دلیل افزایش تابش خورشید، تعداد روزهای آفتابی، سرعت باد و کاهش رطوبت نسبی افزایش می‌یابد. مطالعه ما نیز نشان می‌دهد که در کرانه جنوبی دریای خزر افزایش سرعت باد و ساعات آفتابی و کاهش رطوبت نسبی همراه با افزایش دما منجر به افزایش تبخیر از تشت در طی دوره آماری شده است.

### نتیجه گیری

روند تبخیر تشت در منطقه مورد مطالعه در زمان و مکان به میزان قابل توجهی متفاوت است، این نکته نشان می‌دهد که تغییر در روند تبخیر تشت می‌تواند اثرات متفاوتی بر این منطقه داشته باشد. از مجموعه ۵۰ ایستگاه مورد مطالعه در این تحقیق در ۵ ایستگاه تناقض تبخیر از

تحقیقات در مدیریت آب کشاورزی منطقه شدت بگیرد. کارآمد برای بهینه‌سازی استفاده از آب در مناطق بحرانی خارج شدن از روشهای سنتی آبیاری می‌تواند یک روش باشد.

#### منابع مورد استفاده

- احمدی، ف.، رادمش، ف.، ۱۳۹۳. بررسی روند تغییرات متوسط دمای ماهانه و سالانه نیمه شمالی کشور در نیم قرن اخیر. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۸ (۴). ۸۶۵-۸۵۵
- قره‌خانی، ا.، قهرمان، ن.، بذرافشان، ج.، ۱۳۹۲. مطالعه روند تغییرات تبخیر از تشت در گستره اقلیمی ایران. ۲۶ (۱). ۸۷-۹۵
- Asanuma, J. and Kamimura, H. 2004. Long-term trend of pan evaporation measurements in Japan and its relevance to the variability of the hydrological cycle, online available at: [http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/\\_asanuma/publications/proc\\_e.html](http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/_asanuma/publications/proc_e.html).
- Burn, D. H. Hesch, N. M. 2007. Trends in evaporation for the Canadian Prairies," *Journal of Hydrology*, vol. 336, no. 1-2, pp.61-73.
- Chattopadhyay, N. Hulme, M. 1997. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change. *Agric For Meteorol* 87:55-73. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00006-3)
- Chen, D., Gao, G., Xu, C.-Y., Guo, J., and Ren, G. 2005. Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China, *Clim. Res.*, 28, 123-132.
- Chervenkov, Hristo, and Kiril Slavov. 2017. Theil-Sen Estimator for the Parameters of the Generalized Extreme Value Distributions: Demonstration for Meteorological Applications. *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences* 70.12.
- Cohen, S., Ianetz, A., Stanhill, G., 2002. Evaporative climate change at Bet Dagan, Israel, 1964-1998," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 111, no. 2, pp. 83-91, 2002.
- Croitoru, A.E. Piticar, A. Dragot'a, C. S. Burada, D. C. 2013. Recent changes in reference evapotranspiration in Romania. *Global and Planetary Change*, vol. 111, pp. 127-132.
- Fallah Ghalhari, GA. Khoshhal Dastjerdi, J. Habibi Nokhandan, M. 2012. Using Mann Kendal and t-test methods in identifying trends of climatic elements: a case study of northern parts of Iran. *Manag Sci Lett* 2(3):911-920
- Fan, ZX. Thomas, A. 2013. Spatiotemporal variability of reference evapotranspiration and its contributing climatic factors in Yunnan Province, SW China, 1961-2004. *Clim Chang* 116:309-325. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0479-4>
- Gocic, M. Trajkovic, S. 2013. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. *Global and Planetary Change* 100: 172-182.
- Golubev, V. S., Lawrimore, J. H., Groisman, P. Y. 2001. Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: a reassessment, *Geophysical Research Letters*, vol. 28, no. 13, pp. 2665-2668.
- Gong, L., Xu, C. Y., Chen, D., Halldin, S., & Chen, Y. D. 2006. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *Journal of Hydrology* 329(3-4): 620-629.
- Hajjam, S. Khoshkhoo, Y. Shamsoddin, R. 2004. Analysis of the trend of seasonal and annual rainfall changes in some selected stations in the central part of Iran using non-parametric methods. *Geographical Research Quarterly*. Vol, 41. No, 64. P, 153-168. [In Farsi]
- Huang, H., Han, Y., Cao, M., Song, J., Xiao, H. and Cheng, W., 2015. Spatiotemporal characteristics of evapotranspiration paradox and impact factors in China in the period of 1960-2013. *Advances in Meteorology*.
- IPCC (2007) *Climate change 2007: climate change impacts, adaptation and vulnerability*. Working Group II contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report. Summary for policymakers. Geneva, 976 pp
- Jhajharia D, Singh VP (2011) Trends in temperature, diurnal temperature range and sunshine duration in Northeast India. *Int J Climatol* 31: 1353-1367. <https://doi.org/10.1002/joc.2164>
- Jhajharia, D. Shrivastava, SK. Sarkar, D. Sarkar, S. 2009. Temporal characteristics of pan evaporation trends under the humid conditions of northeast India. *Agric For Meteorol* 149:763-770.
- Jiao, L. and Wang, D., 2018. Climate Change, the Evaporation Paradox, and Their Effects on Streamflow in Lijiang Watershed. *Polish Journal of Environmental Studies*, 27(6).
- Kendall, MG. 1975. Rank correlation measures. Charles Griffin, London

- Ma, X., Zhang, M., Wang, S., Ma, Q., Pan, S. 2012. Evaporation paradox in the YellowRiver Basin, *ActaGeographica Sinica*. 67(5): 645-656.
- Maliva R, Missimer T. 2012. Aridity and drought. In: *Arid lands water evaluation and management*. Springer, pp 21-39
- Mann H.B. 1945. Nonparametric tests against trend, *Econometrica*. 13:245-259.
- Nasrollahi, M., Zolfaghari, A. A., & Yazdani, M. R. (2021). Spatial and Temporal Properties of Reference Evapotranspiration and Its Related Climatic Parameters in the Main Agricultural Regions of Iran. *Pure and Applied Geophysics*, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02806-y>
- Nourani, V., Nezamdoost, N., Samadi, M. and Daneshvar Vousoughi, F. 2015. Wavelet-based trend analysis of hydrological processes at different timescales. *Journal of Water and Climate Change* 6(3): 414-435.
- Partal, T. Kahya, E. 2006. Trend analysis in Turkish precipitation data. *Hydrological Processes: An International Journal* 20(9): 2011-2026.
- Rahimzadeh, F. Asgari, A. Fattahi, E. 2009. Variability of extreme temperature and precipitation in Iran during recent decades. *Int J Climatol* 29:329–343.
- Roderick ML, Farquhar GD (2002) The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science* 298:1410–1411. <https://doi.org/10.1126/science.1075390-a>
- Roderick ML, Farquhar GD (2004) Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002. *Int J Climatol* 24:1077–1090. <https://doi.org/10.1002/joc.1061>
- Roderick ML, Farquhar GD (2005) Change in New Zealand pan evaporation since the 1970s. *Int J Climatol* 25:2031–2039
- Roy, SS. Balling, RC. 2005. Analysis of trends in maximum and minimum temperature, diurnal temperature range, and cloud cover over India. *Geophys Res Lett* 32. <https://doi.org/10.1029/2004GL022201>.
- Sen, Pranab Kumar (1968), "Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau", Journal of the American Statistical Association, 63 (324): 1379–1389,
- Thiel, H., 1950. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. I, II, III. *Nederl. Akad. Wetensch. Proc.* 53, pp.386-392.
- Ruiz-Alvarez, O., Singh, V. P., Enciso-Medina, J., Munster, C., Kaiser, R., Ontiveros-Capurata, R. E., ... & dos Santos, C. A. C. (2019). Spatio-temporal trends in monthly pan evaporation in Aguascalientes, Mexico. *Theoretical and Applied Climatology*, 136(1-2), 775-789.
- Thomas, A. 2000. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China, *Int. J. Clim.*, 20, 381–396, 2000.
- Wang, Z., Xie, P., Lai, C., Chen, X., Wu, X., Zeng, Z., & Li, J. (2017). Spatiotemporal variability of reference evapotranspiration and contributing climatic factors in China during 1961–2013. *Journal of Hydrology*, 544, 97-108.
- Wild, M., Gilgen, H., Roesch, A., Ohmura, A., Long, C. N., Dutton, E. G., Forgan, B., Kallis, A., Russak, V., and Tsvetkov, A. 2005. From Dimming to Brightening: Decadal Changes in Solar Radiation at Earth's Surface, *Science*, 308, 847–850.
- Xu, CY., Gong, L., Jiang, T., Chen, D., Singh, VP. 2006. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. *J Hydrol* 327:81–93.



ISSN 2251-7480

## Investigation of Pan Evaporation paradox and Climatic Parameters Affecting it in Half-West and Center of Iran

Muhammad Nasrollahi<sup>1</sup>, Ali Asghar Zolfaghari<sup>2\*</sup> and Mohammad Reza Yazdani<sup>3</sup>

1) Ph. D. Student of Desertification, Faculty of desert studies, Semnan University, Semnan, Iran.

2) Associate Professor, Department of arid land management, Faculty of desert studies, Semnan University, Semnan, Iran.

3) Associate Professor, Department of Desert, Faculty of Kavirshenasi, Semnan University, Semnan, Iran.

\*Corresponding author email: azolfaghari@semnan.ac.ir

Received: 29-05-2020 Accepted: 20-09-2021

### Abstract

Evaporation acts as an important component and a key control factor in land hydrological processes. In the context of global warming, pan evaporation demand is expected to increase, but the decrease in measured pan evaporation has challenged the hypothesis that climate change would increase evaporation. The main purposes of this study were (1) to investigate the existence of the evaporation paradox, (2) to detect the temporal trends of pan evaporation and related climatic variables on an annual time scale. In this study the data of 50 synoptic weather stations in the half-west and center of Iran were used. Non-parametric tests Mann-Kendall and Sen's slope estimator were used to discover trend through time series. Results showed that pan evaporation in 10% and 28% of stations had a significant ( $p < 0.05$ ) decreasing and increasing trend, respectively. But, trend analysis of mean temperature as a source of energy required for evaporation, indicated that 94% of the stations had increasing trend. Despite the increase in temperature in all stations, evaporation paradox has occurred in 36% of stations and only in 10% of stations evaporation paradox was significant at 5% level ( $p < 0.05$ ). Data analysis in stations that had evaporation paradox (with negative pan evaporation trend) indicated that a decrease in wind speed and sunshine duration and more increase in the minimum temperature compared to the maximum temperature, were the main climatic parameters that control the rate of pan evaporation. Pan evaporation decreasing in arid and semiarid areas of Iran is important in climatic studies. Therefore, the results of this study are important for better management of water resources in Iran.

**Keywords:** Evaporation paradox, Mann-Kendall, Pan Evaporation. Sen's slope estimator