

تحلیل حساسیت تبخیر و تعرق مرجع در اقلیم مرطوب حاشیه جنوبی دریای خزر

محمد نصرالهی^۱، علی اصغر ذوالفقاری^{۲*}، محمدرضا یزدانی^۳

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۴/۷)

چکیده

تغییر در متغیرهای اقلیمی مؤثر بر دسترسی به منابع آب می‌تواند نقش کلیدی در توسعه پایدار کشاورزی و محیط‌زیست داشته باشد. ET₀ پس از بارش مهمترین متغیر اثرگذار بر دسترسی به منابع آب است. بنابراین مطالعه حاضر به بررسی تغییرات زمانی و مکانی ET₀، تحلیل روند، تحلیل حساسیت و تحلیل سهم نسبی متغیرهای اقلیمی شامل ساعات آفتابی (SD)، رطوبت نسبی (RH)، سرعت باد (WS)، فشار هوا (P)، دمای حداکثر (T_{max}) و حداقل (T_{min}) برای یک دوره ۳۰ ساله (۲۰۱۷ - ۱۹۸۸) در ۷ ایستگاه سینوپتیک حاشیه جنوبی دریای خزر در مقیاس‌های زمانی مختلف می‌پردازد. توزیع مکانی ET₀ در حوزه دریای خزر نشان داد که ET₀ از غرب به شرق افزایش می‌یابد. روند تغییرات زمانی ET₀ نشان داد که در مقیاس زمانی سالانه و ماهانه شامل ماه‌های مارس، می، ژوئن، جولای، آگوست و سپتامبر تمام ایستگاه‌ها در سطح معنی داری ۵ درصد دارای روند صعودی بودند. در حالیکه نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که ET₀ بیشترین حساسیت را به متغیرهای RH، T_{max} و WS دارد، اما نتایج تحلیل نرخ سهم نسبی متغیرهای اقلیمی نشان داد که متغیرهای RH، WS و T_{min} بترتیب کنشگران اصلی ET₀ در کرانه جنوبی دریای خزر در طول ۳۰ سال گذشته هستند.

واژه‌های کلیدی: تحلیل حساسیت، نرخ سهم نسبی، اقلیم مرطوب، تبخیر و تعرق مرجع

نصرالهی م.، ذوالفقاری ع. ا.، یزدانی م. ر. ۱۴۰۱. تحلیل حساسیت تبخیر و تعرق مرجع در اقلیم مرطوب حاشیه جنوبی دریای خزر. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۰، شماره ۲. صفحه: ۷۹-۹۰.

۱- دانشجوی دکتری گروه بیابان، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان

۲- دانشیار گروه مدیریت مناطق خشک، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان

۳- دانشیار گروه بیابان، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: azolfaghari@semnan.ac.ir

مقدمه

خشک) پرداختند. نتایج نشان داد که حساسیت ET0 به سرعت باد و دمای هوا از مناطق خشک تا مرطوب کاهش می‌یابد، در حالی که حساسیت آن به ساعات آفتابی از مناطق خشک تا مرطوب افزایش یافته است. در تحقیق دیگری (Asadzadeh *et al.*, 2017) به بررسی و تحلیل حساسیت ET0 در ایستگاه‌های سینوپتیک استان کردستان پرداختند. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که در ماه‌های گرم سال متغیرهای ساعات آفتابی و حداکثر درجه حرارت مهم‌ترین متغیرهای موثر بر ET0 هستند. (Jerszurki *et al.*, 2019) در تحقیقی به ارزیابی حساسیت ET0 با معادله ASCE-Penman-Monteith تحت انواع مختلف اقلیم گرم سیری و نیمه‌گرم سیری در برزیل پرداختند. از منظر اهمیت، ET0 بیشتر به تغییرات سالانه کمبود فشار بخار (VPD)، سرعت باد (U2) و تابش خورشیدی (Rs) در تمام انواع اقلیمی حساس بود. (Kovoor & Nandagiri 2018) در تحقیقی به ارزیابی تحلیل حساسیت برآورد تبخیر و تعرق مرجع معادله FAO-56 Penman-Monteith با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو در هند پرداختند. نتایج کلی نشان داد که متغیر دما نقش اصلی را در تخمین تبخیر تعرق مرجع دارد و ارزیابی دقیق تر ET0 در مطالعه مذکور نشان داد که در منطقه مرطوب متغیر تشعشع خالص و در مناطق خشک، نیمه‌خشک و معتدل سرعت باد مهم‌ترین متغیر مؤثر بر ET0 است. (Poddar *et al.*, 2018) در تحقیقی به ارزیابی روش های ET0 (روش‌های مبتنی بر تبخیر از تشست، تابش محور، دما محور و ترکیبی) و تحلیل حساسیت متغیرهای اقلیمی در مناطق نیمه‌گرم سیری نیمه‌مرطوب هیمالیای غربی در هند پرداختند. متغیرهای تابش خورشیدی، حداکثر درجه حرارت و رطوبت نسبی بترتیب به‌عنوان حساس‌ترین متغیرها به منظور برآورد ET0 بودند.

وجود منابع آب کافی در مناطق مرطوب اطمینان خاطر برای تامین حجم مورد نیاز آب در سایر بخش ها را فراهم می‌آورد. تغییر اقلیم در این مناطق می‌تواند تاثیر نامطلوبی بر میزان حجم آب قابل استحصال در این مناطق داشته باشد. ET0 یکی از مهم‌ترین متغیرهای مؤثر بر دسترسی به منابع آب در ایران است. بنابراین

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 جلگ‌ای 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 سلسله کوه‌های البرز است که پوشیده از درختان جنگلی می‌باشد (Beik Mohammadi 2003; Javadi 1964). در کشور ایران بخش کشاورزی بیشترین سهم از آب مصرفی کل را به خود تخصیص می‌دهد (Naseri *et al.*, 2017)، با افزایش بهره‌وری و بازده در این بخش می‌توان به‌طور قابل ملاحظه‌ای در مصرف آب صرفه‌جویی کرد. از این رو برآورد دقیق میزان تبخیر و تعرق از اهمیت بالایی برخوردار است (Alizadeh *et al.*, 2001). روش‌ها و معادلات گوناگونی برای برآورد میزان تبخیر و تعرق در سراسر جهان ارائه شده است. معادله FAO-56 Penman-Monteith به‌عنوان یک معادله استاندارد ET0 توسط FAO ارائه شده است (Wang *et al.*, 2017). این معادله فیزیکی به‌صورت واضح متغیرهای اقلیمی و فیزیولوژیکی را به هم مرتبط می‌سازد. ET0 با این معادله از طریق داده‌های هواشناسی برآورد می‌گردد و از سختی اقدامات اندازه‌گیری میدانی جلوگیری می‌نماید. به همین خاطر این معادله به‌صورت گسترده در سراسر دنیا با نتایج منطقی و معتبر مورد استفاده قرار گرفته است (Gao *et al.*, 2017; Koudahe *et al.*, 2018; Kovoor & Nandagiri 2018; Nouri *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2019).

عوامل زیادی بر میزان تبخیر و تعرق تأثیر دارند که میزان تأثیر هر کدام با توجه به مکان و زمان تحت بررسی متفاوت است از این رو تحلیل حساسیت بر روی متغیرهای اقلیمی ورودی معادله FAO-56 Penman-Monteith برای اطلاع از درجه تأثیر هر متغیر بر میزان تبخیر و تعرق از اهمیت بسزایی برخوردار است. Tabari & Talaei (2014) در تحقیقی به ارزیابی حساسیت تبخیر و تعرق به تغییرات آب و هوایی در اقلیم‌های مختلف ایران (مرطوب، نیمه‌خشک سرد، نیمه‌خشک و

(e_a) ، کمبود فشار بخار اشباع (kPa)، e_a فشار بخار واقعی بصورت زیر محاسبه شد:

$$e_a = \frac{RH}{100} \times e_s \quad (2)$$

RH (%) رطوبت نسبی و e_s (kPa) تابعی از میانگین دمای روزانه ($^{\circ}\text{C}$) است:

$$e_s = \frac{0.6108 * \exp(17.27 * T)}{T + 273.3} \quad (3)$$

Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)، و γ ثابت سایکرومتری ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) است

$$\gamma = \frac{C_p P}{\epsilon \lambda} \quad (4)$$

که در آن C_p گرمای ویژه در فشار ثابت است (1.013 $10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)، ϵ نسبت وزن مولکولی بخار آب به هوای خشک است (0.622)، λ گرمای نهان تبخیر (2.45 MJ kg^{-1}) و P فشار هوا (kPa) است که تابعی از ارتفاع است:

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (5)$$

جایی که z به ارتفاع از سطح دریا (m) اشاره دارد.

آزمون من‌کندال

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

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_j^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (6)$$

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

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1, & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0, & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1, & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

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

هدف از انجام این مطالعه (۱) بررسی روند تغییرات زمانی و مکانی (ET_0)، تعیین موثرترین متغیرهای اقلیمی بر ET_0 در حاشیه جنوبی دریای خزر می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

سواحل جنوبی دریای خزر در حد فاصل $36^{\circ} 36'$ تا $27^{\circ} 27'$ عرض شمالی و $48^{\circ} 25'$ تا $56^{\circ} 20'$ طول شرقی قرار گرفته و شامل سه استان گیلان، مازندران و گلستان می‌باشد و با مساحتی بالغ بر 44950 کیلومتر مربع بین دریای خزر و رشته کوه البرز قرار گرفته است. استان‌های اردبیل در غرب و خراسان شمالی در شرق این منطقه قرار دارد. داده‌های مورد نیاز برای مطالعه روند و تحلیل حساسیت، شامل سری داده‌های ساعات آفتابی، رطوبت نسبی، سرعت باد، کمبود فشار بخار، دمای حداکثر و حداقل برای یک دوره 30 ساله (۱۹۸۸ - ۲۰۱۷) در ۷ ایستگاه سینوپتیک شمال ایران شامل رامسر، نوشهر، بابلسر، آستارا، بندر انزلی، رشت و گرگان می‌باشد.

محاسبه تبخیر و تعرق مرجع

در این تحقیق جهت برآورد ET_0 از معادله FAO-56 Penman-Monteith و تحلیل حساسیت مدل به متغیرهای ورودی برنامه کامپیوتری در محیط نرم‌افزار MATLAB نوشته شد. محاسبه ET_0 با استفاده از معادله (۱) صورت می‌پذیرد (Allen *et al.*, 1998):

$$\text{ET}_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

در این معادله: ET_0 تبخیر و تعرق مرجع (mm day^{-1})، R_n تابش خالص در سطح گیاه ($\text{MJm}^{-2} \text{ day}^{-1}$)، در این مطالعه شدت تابش محلی با توجه به زاویه بین جهت تابش خورشید و سطح جو تعیین شد. این زاویه در طول روز تغییر می‌کند و در عرض‌های مختلف و در فصول مختلف مقادیر مختلفی دارد. همچنین، شدت تابش با مدت زمان تابش آفتاب ارتباط دارد. در این مطالعه، R_n با استفاده از زاویه خورشید و داده‌های زمان آفتابی محاسبه شد (Allen *et al.*, 1998). G شار گرمایی خاک ($\text{MJm}^{-2} \text{ day}^{-1}$)، T متوسط دمای روزانه هوا در ارتفاع 2 متری ($^{\circ}\text{C}$)، u_2 سرعت باد در ارتفاع 2 متری (ms^{-1})، e_s فشار بخار اشباع (kPa)، e_a فشار بخار واقعی (kPa)، $(e_s - e_a)$

است، استفاده از مشتقات جزئی برای تحلیل حساسیت مشکل می‌باشد. در این شرایط نتایج مشتقات جزئی باید تبدیل به متغیرهای بدون بعد شوند که سبب می‌شود مقایسه بین متغیرهای مختلف اقلیمی ساده‌تر شود. در این مطالعه تحلیل حساسیت متغیرهای اقلیمی معادله FAO-56 Penman-Monteith با استفاده از معادله (۱۱) انجام شد (Beven, 1979):

$$S_{vi} = \frac{\partial ET_{ref}}{\partial V_i} \cdot \frac{V_i}{ET_{ref}} \quad (11)$$

که V_i نشان‌دهنده متغیرهای اقلیمی شامل RH، Tmax، Tmin، WS، SD می‌باشد و S_{vi} نشان‌دهنده ضریب حساسیت (بدون بعد) متغیر V_i است که نشان‌دهنده در صد تغییرات ET0 در اثر در صد تغییرات در متغیرهای اقلیمی می‌باشد. اگر $S_{vi} > 0$ باشد نشان می‌دهد که ET0 و V_i به طور همزمان کاهش یا افزایش خواهند داشت در غیر این صورت رابطه بین آنها معکوس خواهد بود. از طرف دیگر هر چه $|S_{vi}|$ بزرگتر باشد نشان‌دهنده تاثیر بیشتر آن متغیر بر ET0 است. روش ضرایب حساسیت در مقایسه با روش‌های دیگر حساسیت دقیق‌تر و با کارایی بیشتر می‌باشد. به همین علت این روش به وفور برای تحلیل حساسیت ET0 مورد استفاده قرار گرفته است (Wang *et al.*, 2017). در این مطالعه ضرایب حساسیت برای متغیرهای اقلیمی در مقیاس روزانه محاسبه شد و مقادیر فصلی و سالانه ضرایب حساسیت با استفاده از میانگین‌گیری از ضرایب روزانه تعیین شد.

تعیین سهم نسبی متغیرهای اقلیمی با استفاده از

رگرسیون خطی چندگانه

هدف اصلی استفاده از رگرسیون خطی چندگانه (MLR) تبیین رابطه بین چند متغیر مستقل یا پیش‌بینی‌کننده و یک متغیر وابسته یا معیار است (Clow, 2010). این روش مورد استفاده قرار می‌گیرد تا سهم نسبی متغیرهای اقلیمی را محاسبه نماید (Wang *et al.*, 2017). قبل از استفاده از این روش، نرمال‌سازی داده‌های اصلی و متغیرهای اقلیمی انجام می‌گردد. رابطه بین ET0 نرمال‌شده به عنوان متغیر وابسته و متغیرهای اقلیمی نرمال‌شده به عنوان پیش‌بینی‌کننده‌ها

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

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t(t-1)(2t+5)}{18} \quad (9)$$

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 پیش‌رو از این آزمون برای سطح احتمال ۹۵ در صد 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).

شیب تخمینگر سن

سن با توسعه یک سری مطالعات آماری که Thiel (1950)، به انجام رسانده بود یک روش ناپارامتری را جهت تحلیل سری‌های زمانی ارائه نمود. شیب تخمینگر سن بصورت گسترده در تحلیل روند داده‌های آب و هواشناسی استفاده می‌شود (Gocic & Trajkovic, 2013; Partal & Kahya, 2006). 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 & Slavov, 2017). اساس این روش بر محاسبه یک شیب میانه β برای سری زمانی و قضاوت نمودن در مورد معنی‌داری شیب بدست آمده در سطوح اطمینان مختلف می‌باشد:

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

که در آن β_{jk} برآوردگر شیب خط روند برای ایستگاه k ام در ماه g ام می‌باشد. مقدار مثبت β حاکی از صعودی بودن روند و مقدار منفی آن نشان‌دهنده نزولی بودن روند می‌باشد.

تحلیل حساسیت

در مدل‌ها و معادله‌های چند متغیره مانند معادله FAO-56 Penman-Monteith که متغیرهای آن دارای ابعاد مختلفی هستند و دامنه تغییر آنها با همدیگر متفاوت

۷۰۲ میلیمتر بالاترین و ایستگاه رشت با ۳۸۹ میلیمتر کمترین مقدار میانگین بلندمدت ۳۰ ساله ET₀ را دارا بودند. شکل ۲ توزیع مکانی ET₀ در کرانه جنوبی دریای خزر را نشان می‌دهد. ET₀ از غرب به شرق حوزه افزایش می‌یابد، بنابراین در شرق حوزه افزایش ET₀ از یک سو و کاهش بارندگی از سوی دیگر شرایط را به سمت خشکی پیش می‌برد که این موضوع نیازمند توجه بیشتر مسئولان و سیاستمداران حوزه منابع آب است. نتایج مطالعه Zahraei et al., (2018) نیز مؤید این موضوع می‌باشد. (Shahedi & Zarei (2011) نیز در تحقیقی به ارزیابی روش‌های برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در استان مازندران پرداختند نتایج آنها نشان داد که از شرق به غرب استان مازندران از میزان تبخیر تعرق پتانسیل کاسته شده است که نتایج ما را تأیید می‌کند.

(متغیرهای مستقل) با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه مورد تحلیل قرار گرفت. فرمول کلی رگرسیون چندگانه به شرح زیر است:

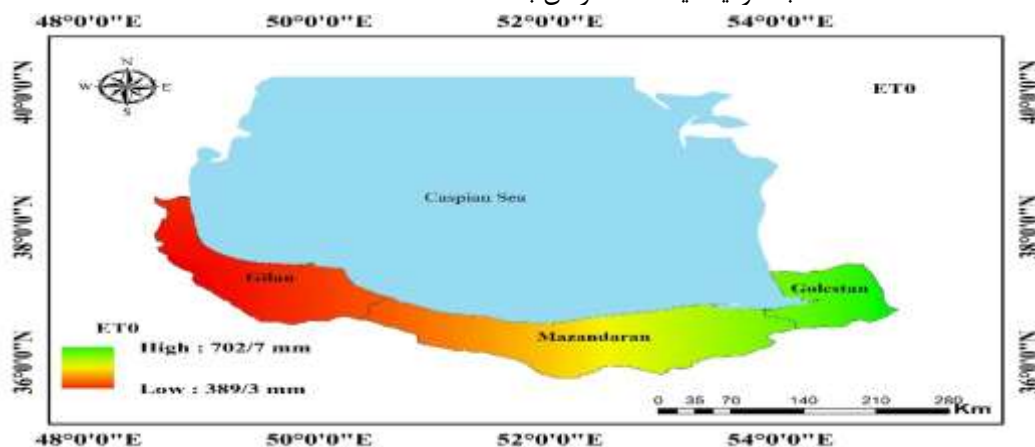
$$ET' = \sum_{i=1}^n c_i F_i + a \quad (12)$$

جایی که ET' متغیر وابسته نرمال شده ET₀ است؛ F_i پیش بینی کننده نرمال شده متغیرهای اقلیم است؛ c_i ضریب رگرسیون است؛ a ثابت رگرسیون است؛ و n تعداد متغیر مستقل است. میزان سهم نسبی هر پیش بینی F_i از رابطه زیر برآورد می‌شود (Grinsted et al., 2004):

$$\eta_i = \frac{|c_i|}{\sum_{i=1}^n |c_i|} \quad (13)$$

نتایج و بحث

ET₀ سالانه و ماهانه با استفاده از معادله FAO-56 Penman-Monteith محاسبه گردید. ایستگاه گرگان با



شکل ۲- توزیع مکانی تبخیر و تعرق مرجع در حاشیه جنوبی دریای خزر

Figure 2. Spatial distribution of reference evapotranspiration and precipitation on southern shore of Caspian Sea

به دنبال خواهد داشت که این امر مستلزم بازنگری در تقویم زمان آبیاری و کشت این محصول جهت بهره‌وری بیشتر از منابع آب موجود می‌باشد.

بررسی روند تغییرات زمانی

جدول ۱ روند تغییرات زمانی ET₀ در گام‌های زمانی ماهانه و سالانه با استفاده از دو آزمون من‌کنندال و شیب تخمینگر سن در سطح معنی‌داری ۵ درصد را نشان می‌دهد. نتایج آزمون من‌کنندال نشان می‌دهد که در مقیاس زمانی سالانه و ماهانه شامل ماه‌های مارس، می، ژوئن، جولای، آگوست و سپتامبر تمام ایستگاه‌ها در سطح معنی‌داری ۵ درصد دارای روند صعودی بودند. ۶

در مقیاس ماهانه، کمترین مقدار ET₀ در ماه ژانویه (معادل ۰/۵ میلیمتر بر روز) و بیشترین آن در ماه ژولای (معادل ۲/۴۳ میلیمتر بر روز) رخ داده است. در بررسی روند تغییرات ماهانه ET₀ در ایران نتایج مشابهی در سایر تحقیقات بدست آمده است که می‌توان به مطالعه بررسی روند تغییرات ET₀ در ایستگاه همدان توسط Dinpashoh (2011) اشاره کرد. روند تغییرات مقدار بارندگی نیز در ماه‌های می، ژوئن، ژولای و آگوست کمتر از میزان ET₀ بود. از آنجاییکه بخش زیادی از زمین‌های کشاورزی در کرانه جنوبی دریای خزر تحت کشت برنج است افزایش نیاز آبیاری در ماه‌های مذکور را

باشد. جدول ۲ مقادیر Z من کندال و شیب تخمینگر سن محاسبه شده برای متغیرهای اقلیمی در گام زمانی سالانه را نشان می‌دهد. متغیرهای Tmax و Tmin و WS در سطح معنی‌داری ۵ درصد دارای روند صعودی و RH دارای روند نزولی بود. برر سی روند ET0 در شمال ایران نشان داد که تمام ایستگاهها در شمال کشور دارای روند صعودی هستند و این روند افزایشی ET0 متاثر از کاهش رطوبت، افزایش دما و سرعت باد در این منطقه بوده است.

ایستگاه در ماههای ژانویه و اکتبر، ۵ ایستگاه در ماه دسامبر، ۴ ایستگاه در ماههای فوریه و آوریل و ۳ ایستگاه در ماه نوامبر در سطح معنی‌داری ۵ درصد دارای روند صعودی بودند. هیچگونه روند معنادار کاهش در میان ایستگاهها مشاهده نشد. در میان تمام ایستگاهها تنها یک روند کاهشی غیرمعنادار در ایستگاه رشت در ماه فوریه مشاهده گردید (جدول ۱). به نظر می‌رسد که پایین بودن روند صعودی ET0 در ماه نوامبر ناشی از افزایش زیاد رطوبت نسبی و کاهش دمای هوا در ایستگاههای مورد مطالعه در طی سه دهه مورد مطالعه

جدول ۱- مقادیر Z من کندال و شیب تخمینگر سن محاسبه شده در گامهای زمانی ماهانه و سالانه

Table 1. Calculated Mann-Kendall Z values and Sen's slope estimator in monthly and annual time scales.

Stations	trend	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
Astara	Mk	1.71	0.86	2.60*	0.75	2.96*	2.96*	3.28*	3.71*	3.18*	2.68*	1.11	2.11*	4.28*
	Q	0.19	0.09	0.44	0.17	0.55	1.14	1.27	1.50	0.68	0.32	0.13	0.20	6.61
Babolsar	Mk	2.6*	2.21*	2.53*	2.07*	2.85*	2.57*	4.00*	3.39*	3.43*	2.14*	1.36	3.00*	2.71*
	Q	0.33	0.26	0.53	0.53	0.86	1.17	1.71	1.79	1.21	0.66	0.22	0.38	9.17
B. Anzali	Mk	3.9*	2.21*	4.57*	3.50*	4.89*	6.17*	4.4**	5.67*	5.32*	4.75*	2.71*	3.28*	6.24*
	Q	0.52	0.26	0.76	0.64	1.37	2.39	2.55	2.72	1.59	0.78	0.37	0.57	14.92
Gorgan	Mk	3.5*	3.10*	3.35*	3.39*	4.82*	5.39*	4.85*	5.74*	5.39*	4.21*	3.18*	3.32*	5.64*
	Q	0.58	0.49	0.79	0.94	2.93	5.06	5.77	6.55	4.40	1.97	0.76	0.52	31.21
Noushahr	Mk	2.6*	2.46*	2.89*	1.61	3.21*	3.64*	3.75*	4.89*	4.50*	2.32*	2.85*	3.00*	4.32*
	Q	0.37	0.25	0.44	0.26	0.83	1.31	1.89	2.26	1.28	0.62	0.37	0.49	8.82
Ramsar	Mk	2.1*	1.50	2.14*	2.03*	2.71*	3.32*	2.89*	2.82*	2.71*	1.36	1.36	1.93	2.32*
	Q	0.43	0.24	0.40	0.38	0.86	1.63	1.99	2.22	1.21	0.51	0.29	0.36	9.06
Rasht	Mk	2.7*	-0.50	2.78*	1.89	3.14*	3.18*	3.43*	3.57*	2.71*	2.85*	0.14	1.03	4.39*
	Q	0.51	-0.12	0.64	0.33	0.73	1.17	1.36	1.46	0.65	0.28	0.02	0.22	7.14

Significant at 5% probability level

*معنی دار بودن در سطح ۵ درصد

افزایش ET0 را در ۳۰ ساله گذشته در شمال ایران نشان می‌دهد. در مقیاس سالانه، شیب خط سن بین اعداد ۶,۶۱ (آستارا) و ۳۱,۲۱ (گرگان) میلیمتر در سال متغیر بود. در مقیاس ماهانه، بیشترین و کمترین دامنه تغییرات شیب سن صعودی بترتیب در ماه آگوست (۱,۴۶ تا ۶,۵۵) و دسامبر (۰,۲ تا ۰,۵۷) رخ داده است.

شیب تخمینگر سن

نتایج روند شدت تغییرات ET0 بر اساس شیب تخمینگر سن در جدول ۱ نشان داده شده است. برر سی نتایج شیب خط سن نشان داد که در مقیاس سالانه و ماهانه در تمام ایستگاهها شیب خط مثبت و فقط در ماه فوریه و در ایستگاه رشت شیب خط سن منفی بود. نتایج،

جدول ۲- مقادیر Z من کندال و شیب تخمینگر سن محاسبه شده برای متغیرهای اقلیمی در گام زمانی سالانه

برای کل منطقه

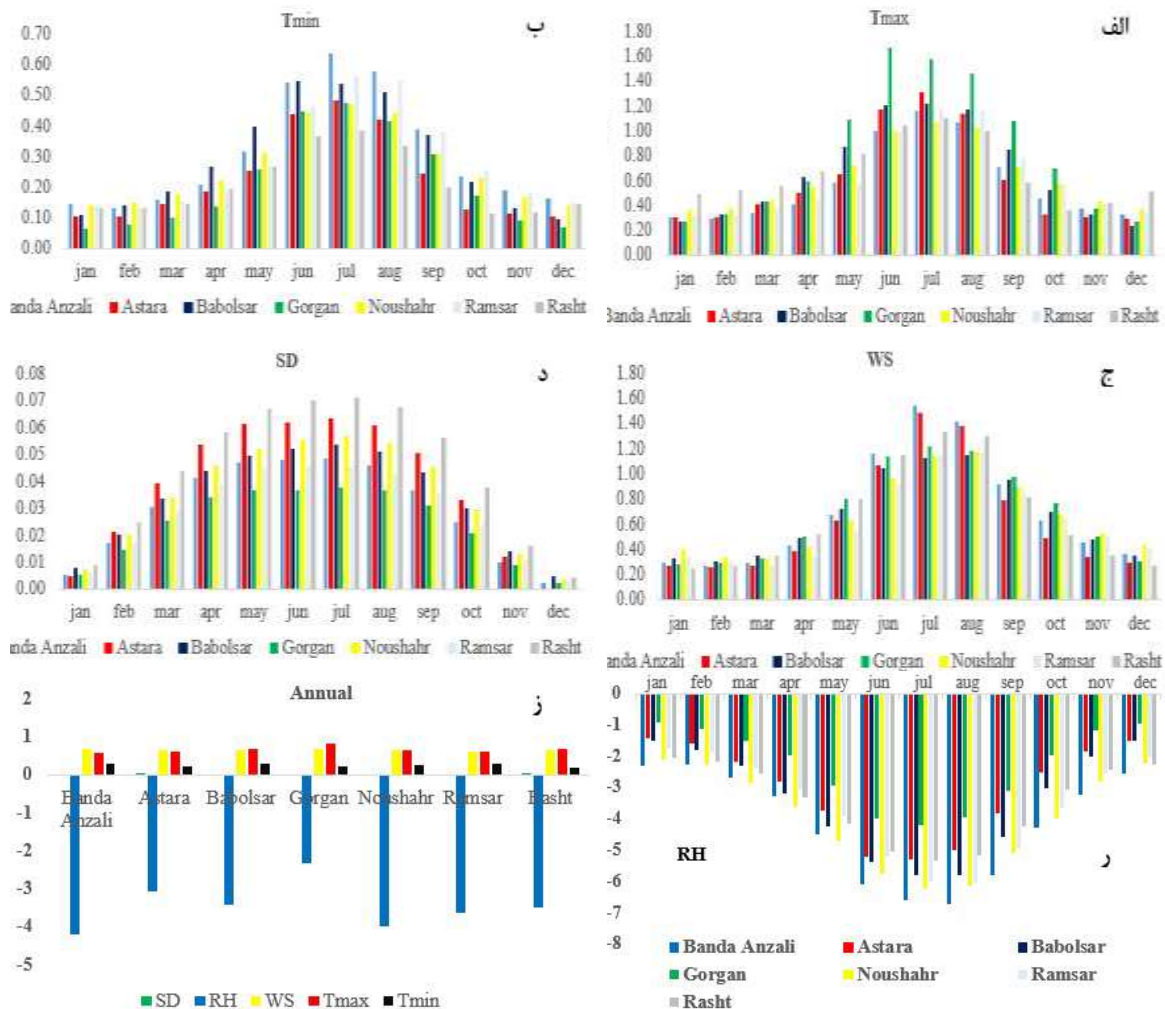
Table 2. Calculated Mann-Kendall Z values and Sen's slope estimator for climate variables annual time scale for whole study area

	trend	Tmax	Tmin	SD	P	RH	WS
Study area	Mk	3.53*	4.50*	2.60*	0.96	-3.93*	5.28*
	Q	0.04	0.04	0.02	0.01	-0.11	0.03

Significant at 5% probability level

*معنی دار بودن در سطح ۵ درصد

تحلیل حساسیت

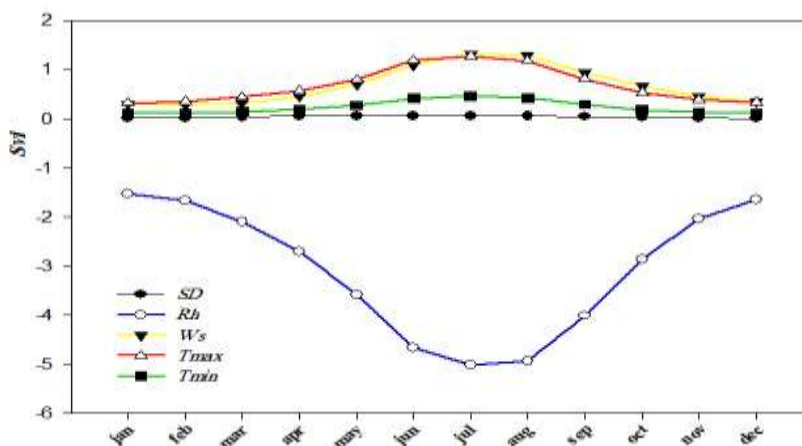


شکل ۳- ضرایب حساسیت ماهانه و سالانه ETO به تغییرات نسبی متغیرهای اقلیمی در ایستگاههای مختلف

Figure 3. ETO monthly and annual sensitivity coefficients to relative changes of climatic parameters at different stations

زمانی ماهانه برای کل منطقه را نشان می‌دهد. در مقیاس ماهانه در ۶ ماه اول سال ضریب حساسیت دمای حداکثر بیشتر از سرعت باد و در ۶ ماه دوم سال ضریب حساسیت سرعت باد بیشتر از دمای حداکثر می‌باشد. در واقع در ماههای گرم سال اثرگذاری متغیر دمای حداکثر روی ETO بیشتر از سرعت باد است و در ماههای سرد عکس این موضوع صادق است.

شکل ۳ (الف، ب، ج، د، ر) بترتیب مقادیر ضرایب حساسیت برای متغیرهای اقلیمی T_{max} ، T_{min} ، WS ، SD و RH در ایستگاههای مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در مقیاس ماهانه و در میان تمام ایستگاهها، ماههای جولای، آگوست و ژوئن بترتیب بیشترین حساسیت را به نسبت به هر ۵ متغیر اقلیمی داشتند. شکل ۴ متوسط ضرایب حساسیت هریک از ۵ متغیر اقلیمی در گام



شکل ۴- متوسط ضرایب حساسیت در کل منطقه مورد مطالعه

Figure 4. Mean sensitivity coefficients in the whole study area

یانگ تسه را مورد بررسی قرار دادند، نتایج نشان داد که ET0 بیشتر به رطوبت نسبی حساس است. Shenbin *et al.*, (2006) تغییرات عوامل موثر به ET0 در کانون رودخانه Jinghe در شمال چین را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که ET0 بیشتر به رطوبت نسبی حساس است. Wang *et al.*, (2019) بیشترین حساسیت ET0 در کل چین را به ترتیب مربوط به رطوبت نسبی، دمای حداکثر، ساعات آفتابی، سرعت باد و دمای حداقل دانستند. همچنین نتایج مطالعه ما نشان داد که ET0 کمترین حساسیت را به ساعات آفتابی در کل منطقه مورد مطالعه دارد. Tabari & Talaei (2014) به تحلیل حساسیت ET0 در اقلیم مرطوب با استفاده از سه متغیر سرعت باد، دما و ساعات آفتابی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که ET0 بیشترین حساسیت را به متغیر ساعات آفتابی در اقلیم مرطوب ایران دارد. تفاوت نتایج را شاید بتوان در تفاوت روش تحلیل حساسیت و تعداد متغیرهای پیش‌بینی دانست.

نتایج ضرایب حساسیت نشان داد که در مقیاس سالانه ET0 بیشترین حساسیت را به متغیرهای رطوبت نسبی و سرعت باد در کرانه جنوبی دریای خزر دارد. متغیرهای دمای حداقل و ساعات آفتابی کمترین تاثیر را در هر دو مقیاس سالانه و ماهانه روی ET0 داشتند. متوسط ضرایب حساسیت در مقیاس سالانه برای متغیرهای RH و WS به ترتیب برابر با $-3/44$ و $0/66$ بدست آمد. مقادیر منفی بالای ضرایب حساسیت نشان می‌دهد که افزایش رطوبت نسبی به‌طور وسیعی پتانسیل تبخیر و تعرق را کاهش می‌دهد (Gong *et al.*, 2006).

شکل ۳ (ز) متوسط ضرایب حساسیت هریک از ۵ متغیر اقلیمی در گام زمانی سالانه برای کل منطقه را نشان می‌دهد. در مقیاس سالانه و در میان تمام ایستگاه‌ها، رشت بیشترین حساسیت ($0/04$) و گرگان کمترین ضریب حساسیت ($0/02$) را به ساعات آفتابی داشتند. Tabari & Talaei (2014) نیز نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند نتایج آنها نشان داد که در حرکت از سمت مناطق خشک به مرطوب حساسیت به ساعات آفتابی بیشتر می‌شود. در بررسی ایستگاه‌ها، گرگان کمترین حساسیت ($-2/31$) و بندر انزلی بیشترین حساسیت ($-4/18$) را به رطوبت نسبی داشتند. بندر انزلی بیشترین حساسیت ($0/70$) و رامسر کمترین ضریب حساسیت ($0/62$) را به سرعت باد دارد. گرگان بیشترین حساسیت ($0/82$) و بندر انزلی کمترین ضریب حساسیت ($0/59$) را به دمای حداکثر داشت. همچنین بندر انزلی بیشترین حساسیت ($0/31$) و رشت کمترین ضریب حساسیت ($0/21$) را به دمای حداقل داشت.

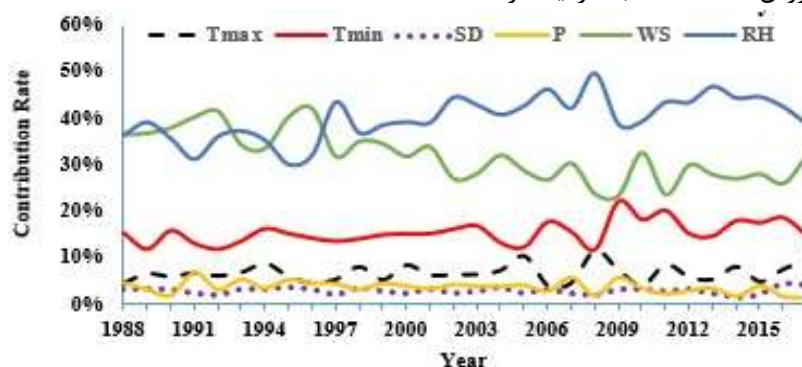
در مقیاس سالانه بترتیب رطوبت نسبی، سرعت باد، دمای حداکثر، دمای حداقل و ساعات آفتابی دارای بیشترین ضریب حساسیت بودند. مطالعات بسیاری در سرتا سر جهان مؤید تاثیر بالای متغیر رطوبت نسبی بر ET0 هستند: Mosaedi *et al.*, (2017) در تحقیقی به بررسی تحلیل حساسیت در ایستگاه انزلی پرداختند. آنها دریافتند که رطوبت نسبی و سرعت باد موثرترین متغیرهای اقلیمی بر ET0 در این ایستگاه طی سالهای ۲۰۰۳-۱۹۶۳ بود. Gong *et al.*, (2006) حساسیت عوامل هواشناسی به تغییرات ET0 در حوضه رودخانه

سه‌م نسبی متغیرهای رطوبت نسبی (۳۹/۹٪)، سرعت باد (۳۱/۸٪)، دمای حداقل (۱۵/۳٪)، دمای حداکثر (۶/۵٪)، کمبود فشار (۳/۵٪) و ساعات آفتابی (۲/۸٪) برآورد گردید. در مقیاس منطقه‌ای همچنین روند سالانه سه‌م نسبی با استفاده از آزمون من‌کنندال انجام شد که متغیرهای ساعت آفتابی، کمبود فشار و سرعت باد کاهش و سایر متغیرها شامل رطوبت نسبی، دمای حداقل و دمای حداکثر افزایشی بود (شکل ۴). روند سه‌م نسبی به استثنای متغیرهای ساعت آفتابی و دمای حداکثر برای سایر متغیرها در سطح معنی‌داری ۵ درصد معنادار بود.

Shojaei (2016) در مطالعه خود روی ایستگاه نوشهر مقادیر منفی بالای رطوبت نسبی (۳/۱۲-) را گزارش داد که نشان می‌دهد متغیر رطوبت نسبی تاثیر بسزایی در افزایش ET0 در این منطقه دارد. در مقیاس جهانی نیز Hu et al., (2018); Xu et al., (2006); Yin et al., (2010) متغیر RH را به عنوان تاثیرگذارترین متغیر بر ET0 در مناطق نیمه خشک و مرطوب چین گزارش کرده‌اند.

تحلیل سه‌م نسبی متغیرهای اقلیمی

سه‌م نسبی هر کدام از متغیرهای اقلیمی در گام زمانی سالانه با استفاده از روش MLR محاسبه گردید. درصد



شکل ۵- تکامل زمانی سه‌م نسبی متغیرهای اقلیمی روی ET0

Figure 5. Temporal evolution of relative contribution rate of climatic variables to ET0

در منطقه مطالعاتی در هر ۷ ایستگاه، مشخص شد که نقش رطوبت نسبی و سرعت باد، مهم‌تر از سایر متغیرهای اقلیمی است و تاثیرگذاری بیشتری بر تبخیر و تعرق دارد. با درک این نکته، می‌توان چنین استنباط کرد که چنانچه رطوبت نسبی کاهش یابد و یا سرعت باد در مقطع زمانی مشخصی تشدید شود، افزایش شدید در ET0 و متعاقب آن افزایش نیاز آبی گیاهان در منطقه مطالعاتی امری حتمی خواهد بود. این نکته به بازنگری در تقویم آبیاری محصولات کشاورزی در منطقه خواهد انجامید و خواهد توانست از بروز تنش آبی و کاهش احتمالی محصول جلوگیری کند. بنابراین دقت بیشتر در اندازه‌گیری این دو متغیر اقلیمی جهت ارزیابی روند تغییرات متغیرهای اقلیمی مؤثر بر ET0، می‌تواند در درک بهتر و برنامه‌ریزی کارآمدتر در استفاده بهینه از منابع آبی، به خصوص در امر کشاورزی در سطح محلی و منطقه‌ای حائز اهمیت باشد.

نتیجه‌گیری کلی

روند تغییرات ET0 در طول سه دهه اخیر در حاشیه جنوبی دریای خزر مثبت بوده است و این افزایش ET0 متاثر از کاهش رطوبت، افزایش دما و سرعت باد در این منطقه بوده است. نتایج تحلیل حساسیت متغیرهای هواشناسی روی ET0 نشان داد که ET0 در مقیاس سالانه در کرانه جنوبی دریای خزر بترتیب بیشترین حساسیت را نسبت به RH، Tmax و WS دارا می‌باشد. از آنجاییکه بیشتر بودن حساسیت ET0 به یک متغیر اقلیمی لزوماً به این معنا نیست که آن متغیر عامل افزایش یا کاهش ET0 در دوره مورد مطالعه بوده است. بنابراین تحلیل سه‌م نسبی صورت پذیرفت. نتایج تحلیل سه‌م نسبی متغیرهای اقلیمی نشان داد که متغیرهای RH، WS و Tmin بیشترین سهم را در تغییر ET0 در کرانه جنوبی دریای خزر در طول ۳۰ سال گذشته داشته‌اند.

References

- Allen RG., Pereira LS., Raes D., and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56 FAO, Rome 300:D05109
- Alizadeh A., Mirshahi B., Hasheminia M., and Sanaeinejad H. 2001. Evaluation of accuracy and performance of estimated potential evapotranspiration using Hargreaves-Samani method and evaporation pan in synoptic stations of Khorasan province, *Newar*, No. 43 and 42, pp. 70-51. (In Persian)
- Asadzadeh F., Kaki M., and Shakiba S. 2017. Trends analysis of reference evapotranspiration in the synoptic sites of Kurdistan Province Using Spearman's Test. *Iran-Water Resources Research*. Volume 13, No. 1, 256-222. (In Persian)
- Beik Mohammadi H. 2003. Attractions of ecotourism in Southern Coasts of the Caspian Sea. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data*. Volume 12. Issue 46. pp. 51-54. (In Persian)
- Beven K. 1979. A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. *Journal of Hydrology*, 44(3-4), 169-190.
- Chervenkov H., and Slavov K. 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).
- Clow D.W. 2010. Changes in the timing of snowmelt and streamflow in Colorado: a response to recent warming. *Journal of Climate*, 23: 2293–2306.
- Dinpashoh Y. 2011. Analysis of temporal trend changes of potential evapotranspiration from Reference crop (Case study: Hamedan station). 2011. *Geographical space*. Issue 34 (Ministry of Science) / ISC (27 pages 260 to 286). (In Persian)
- Gao Z., He J., Dong K., and Li X. 2017. Trends in reference evapotranspiration and their causative factors in the West Liao River basin, *China Agricultural and Forest Meteorology*. 232:106-117
- Gocic M., and 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
- Gong L., Xu C-y., Chen D., Halldin S., and Chen YD. 2006. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *Journal of Hydrology*. 329:620-629
- Grinsted A., Moore J.C., and Jevrejeva S. 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11, 561–566.
- Hajjam S., Khoshkhoo Y., and 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 Persian)
- Hu Q., Pan F., Pan X., Hu L., Wang X., Yang P., and Pan Z. 2018. Dry-wet variations and cause analysis in Northeast China at multi-time scales. *Theoretical and Applied Climatology*, 133(3), 775-786.
- Javadi MH. 1964. Buildings on the south shore of the Caspian Sea for students of architecture and social sciences. *Academic Press*, University of Tehran, 191p. (In Persian)
- Jerszurki D., de Souza JLM., and Silva LdCR. 2019. Sensitivity of ASCE-Penman-Monteith reference evapotranspiration under different climate types in Brazil. *Climate dynamics*. 53:943-956
- Kendall M. 1975. Rank Correlation Methods; Charles Griffin: London.
- Koudahe K., Djaman K., and Adewumi JK. 2018. Evaluation of the Penman-Monteith reference evapotranspiration under limited data and its sensitivity to key climatic variables under humid and semiarid conditions. *Modeling Earth Systems and Environment*. 4:1239-1257
- Kovoor GM., Nandagiri L. 2018. Sensitivity Analysis of FAO-56 Penman-Monteith Reference Evapotranspiration Estimates Using Monte Carlo Simulations. In: *Hydrologic Modeling*. Springer, pp 73-84
- Kumar M., Raghuvanshi N., and Singh R. 2011. Artificial neural networks approach in evapotranspiration modeling: a review. *Irrigation science*. 29(1): p. 11-25.
- Mann, H.B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13, 245-259.

- Mosaedi A., Sough MG., Sadeghi S.H., Mooshakhian Y., Bannayan M. 2017. Sensitivity analysis of monthly reference crop evapotranspiration trends in Iran: a qualitative approach. *Theoretical and applied climatology*. 128:857-873
- Naseri A., Abbasi F., Akbari M., 2017. Estimating agricultural water consumption by analyzing water balance. *Irrigation and drainage structures engineering research*. Volume 18, Issue 68. Pages 17-32. (In Persian)
- Nourani V., Nezamdoost N., Samadi M., Daneshvar Vousoughi, F. 2015. Wavelet-based trend analysis of hydrological processes at different timescales. *Journal of Water and Climate Change*. 6:414-435
- Nouri M, Homae M, Bannayan M. 2017. Quantitative trend, sensitivity and contribution analyses of reference evapotranspiration in some arid environments under climate change. *Water resources management*. 31:2207-2224
- Partal T, Kahya E. 2006. Trend analysis in Turkish precipitation data Hydrological Processes: *An International Journal*. 20:2011-2026
- Poddar A., Gupta P., Kumar N., Shankar V, Ojha C. 2018. Evaluation of reference evapotranspiration methods and sensitivity analysis of climatic parameters for sub-humid sub-tropical locations in western Himalayas (India). *Journal of Hydraulic Engineering*. 1-11
- Shahedi K., and Zarei M. 2011. Assessment of potential evapotranspiration estimation methods in Mazandaran Province. *Journal of Irrigation and Water Engineering*. Volume 1, Number 3. Pages 12 – 21. (In Persian)
- Shenbin C., Yunfeng L. and Thomas A. 2006. Climatic change on the Tibetan Plateau: potential evapotranspiration trends from 1961–2000. *Climatic change*, 76(3), pp.291-319.
- Shojaei, M. 2016. Sensitivity analysis of reference evapotranspiration of Penman-Monteith model using Monte Carlo method. *M.Sc. thesis*. Faculty of Kavirshenasi, Semnan university. 104p. (In Persian)
- Tabari H., and Talae PH. 2014. Sensitivity of evapotranspiration to climatic change in different climates. *Global and Planetary Change*. 23-115:16
- Thiel., H. 1950. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, Part 3. *In: Proceedings of Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen A*, pp 1397-1412
- Wang Z., Xie P., Lai C., Chen X., Wu X., Zeng Z., and Li J. 2017. Spatiotemporal variability of reference evapotranspiration and contributing climatic factors in China during 1961–2013. *Journal of Hydrology*. 544:97-108
- Wang Z., Ye A., Wang L., Liu K., and Cheng L. 2019. Spatial and temporal characteristics of reference evapotranspiration and its climatic driving factors over China from 1979–2015. *Agricultural Water Management*. 213:1096-1108 doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.12.006>
- Xu C-y., Gong L., Jiang T., Chen D., and Singh V. 2006. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. *Journal of hydrology*. 327:81-93
- Yang Y., Chen R., Song Y., Han C., Liu J., and Liu Z. 2019. Sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological factors and their elevational gradients in the Qilian Mountains, northwestern China. *Journal of Hydrology*. 568:147-159 doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.069>
- Yin Y., Wu S., Chen G., and Dai E. 2010. Attribution analyses of potential evapotranspiration changes in China since the 1960s. *Theoretical and Applied Climatology*. 101:19-28
- Zahraei, A., Khoshhal Dastjerdi, J., and Qangarmeh, A. 2018. Estimation of evaporation rate from the Caspian Sea and its temporal-spatial analysis. *Natural Geography Research*, 50(3): 425-441. (In Persian)

Sensitivity Analysis of Reference Evapotranspiration in Humid Climate of the Southern Shore of Caspian Sea

Muhammad Nasrollahi¹, Ali Asghar Zolfaghari^{2*}, Mohammad Reza Yazdani³

(Received: April 2021 Accepted: June 2021)

Abstract

Changes in climatic variables that affecting access to water can play a key role in the sustainable development of agriculture and the environment. Since ET₀ is the most important variable affecting access to water resources after rainfall. Therefore, the present study examines temporal and spatial variations of ET₀, temporal analysis of trend, sensitivity and relative contribution rate of climatic variables including Sun Duration (SD), Relative Humidity (RH), Wind Speed (WS), air pressure (P), maximum Temperature (T_{max}) and minimum Temperature (T_{min}) for a period of 30 years (1988-2017) at 7 synoptic stations on the southern shore of the Caspian Sea at different time scales. The spatial distribution of ET₀ in the Caspian Sea basin showed that ET₀ increases from west to east. The results showed that on the annual and monthly time scale including March, May, June, July, August and September, all stations had upward trend at 5% probability level of Significance. While the results of sensitivity analysis showed that ET₀ has the highest sensitivity to variables of RH, T_{max} and WS respectively, but results of relative contribution rate showed that variables of RH, WS and T_{min} are the main actors on ET₀, in the southern shore of the Caspian Sea during the last 30 years, respectively.

Keywords: Sensitivity analysis, relative contribution rate, humid climate, reference evapotranspiration

Nasrollahi M., Zolfaghari A.A., Yazdani M.R. 2022. Sensitivity analysis of reference evapotranspiration in humid climate of the southern shore of Caspian Sea. *Applied Soil Research*, 10(2): 79-90.

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

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

3. Associate Professor, Department of Desertification, Faculty of desert studies, Semnan University

* Corresponding Author Email: azolfaghari@semnan.ac.ir