

Quantitative Assessment of Climatic Drivers Affecting Reference Evapotranspiration in Ardabil Province

Extended Abstract

Introduction

Understanding the influence of climatic parameter variability on reference evapotranspiration (ET_0) is critical for irrigation planning and agricultural water resource management. Integrating trend, sensitivity, and contribution analyses provides a robust quantitative framework for evaluating the impact of climatic variables on ET_0 , thereby enhancing the precision and reliability of the results. This study aims to quantify the impact of climatic parameter changes on ET_0 in Ardabil Province, Iran.

Materials and Methods

To achieve this objective, the following steps were undertaken:

- Monthly, seasonal, and annual time series of ET_0 and climatic parameters were analyzed for 10 synoptic stations across Ardabil Province.
- The stations included Ardabil and Namin (temperate zone); Sareyn, Khalkhal, Meshginshahr, Nir, and Firouzabad (cold zone); and Parsabad, Germe, and Bilehsavar (warm zone). These climatic zones were classified based on elevation, air pressure, and climatic variables using a hierarchical cluster analysis.
- The dataset, covering the period from 1999 to 2024, was obtained from the Soil and Water Research Institute. ET_0 was calculated using the FAO Penman–Monteith method, a globally accepted standard.
- The analyzed climatic parameters included maximum and minimum air temperature (T_{max} and T_{min}), maximum and minimum relative humidity (RH $_{max}$ and RH $_{min}$), sunshine duration (SH), and wind speed (U).
- The Modified Mann–Kendall test and Sen's slope estimator were used to detect the relative change rate (RC $_v$) in time series at confidence levels of 90%, 95%, and 99%. ET_0 sensitivity was assessed using the dimensionless relative sensitivity coefficient (S $_v$), calculated via the partial derivative method by applying a $\pm 10\%$ change to each parameter (Chu et al., 2017).
- Based on the trend and sensitivity results, the contribution rate (Con $_v$) of each climatic variable to ET_0 variations was estimated by multiplying S $_v$ by the RC $_v$ of the respective parameter, using Equations 6 to 8 (Li et al., 2017).
- Finally, trends, sensitivity coefficients, and contribution rates were systematically analyzed and compared across time scales and stations to reveal spatiotemporal patterns.

Results

- Annual ET_0 exhibited a statistically significant increasing trend at 60% of the stations across all three climatic zones, while no station showed a significant decreasing trend. The highest increases in monthly, seasonal, and annual ET_0 were observed at Firouzabad Station, with values of 4.37 mm (July), 9.59 mm (summer), and 14.48 mm annually. In contrast, the most notable decreases occurred in June and spring at Germe Station, with rates of -3.31 mm and -4.69 mm, respectively (Figure 2). Overall, the results indicated an increasing trend in ET_0 across most areas of Ardabil Province. T_{max} , T_{min} , and U showed increasing trends on both seasonal and annual time scales, while other parameters showed decreasing trends. These findings are consistent with earlier studies conducted in western regions of Iran.
- The highest annual sensitivity coefficients were observed for T_{max} (0.40), RH $_{min}$ (-0.37), RH $_{max}$ (-0.32), U (0.24), SH (0.14), and T_{min} (0.03). In general, ET_0 was more sensitive to most climatic parameters in warm regions, followed by temperate and cold zones. During summer, ET_0 was most sensitive to T_{max} and SH, whereas in autumn and winter, it was more sensitive to RH $_{max}$ and RH $_{min}$. This sensitivity was most pronounced at warm-zone stations such as Parsabad, Germe, and Bilehsavar (Figure 3).
- The contribution analysis showed that U and SH had the largest impacts on ET_0 variation, with contribution rates of 12.21% (positive) and -11.39% (negative), respectively. Annual average contributions of RH $_{max}$ and RH $_{min}$ were 2.72% and 4.53%, respectively, while T_{max} and T_{min} contributed 3.41% and 0.96%, respectively (Table 3). At the seasonal level, U showed the highest contribution to ET_0 increase during summer and winter, attributable to its high sensitivity coefficient and trend magnitude in these seasons. SH contributed most to ET_0 reduction during spring and summer, acting as a limiting factor against excessive increases in ET_0 during these periods.

Conclusion

- The concurrent increasing trends and positive sensitivity coefficients of T_{max} , U, and T_{min} , along with the decreasing trends and negative sensitivity coefficients of RH $_{min}$ and RH $_{max}$ —particularly during spring and summer—indicated a likely rise in crop water requirements in warm regions. In contrast, the decreasing trend and positive sensitivity of SH in most seasons contributed to moderating ET_0 increases.
- T_{max} , T_{min} , SH, and U were found to positively influence ET_0 , while RH $_{max}$ and RH $_{min}$ had negative effects.
- Although U and SH exhibited lower sensitivity coefficients than other variables at most stations, their contribution rates to ET_0 change were comparatively higher. This is due to their relatively steeper trend slopes. These findings highlight the importance of

quantifying the impacts of climatic variables on ET_o to support precise agricultural water management strategies. For instance, implementing windbreaks around farms and orchards could help mitigate the effect of wind speed on ET_o .

- While analyzing climatic trends at broad spatial scales remains essential, this study underscores the importance of detailed assessments at basin and provincial levels. Combining trend, sensitivity, and contribution analyses offers a comprehensive approach for understanding ET_o variability and its driving forces—crucial for the effective planning and optimization of agricultural water resources.

Keywords: Time series, trend analysis, sensitivity analysis, contribution rate.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Quantitative Assessment of Climatic Drivers Affecting Reference Evapotranspiration in Ardabil Province

Abstract

The primary objective of this study is to quantify the impact of changes in climatic parameters on reference evapotranspiration (ET_o) in Ardabil Province, Iran. To this end, monthly, seasonal, and annual time series of ET_o —calculated using the FAO Penman-Monteith equation—along with corresponding climatic variables were analyzed for ten synoptic stations across the province from 1999 to 2024. Trends and relative sensitivity coefficients for each climatic variable were computed for all time scales. The contribution rate of each parameter to variations in ET_o was then calculated by multiplying its relative rate of change by its sensitivity coefficient. Trend analysis revealed that annual ET_o showed a statistically significant increasing trend (at the 90% confidence level) at 60% of the stations, consistent with findings from previous studies conducted in other western provinces of Iran. Furthermore, increasing trends in maximum temperature (T_{max}), minimum temperature (T_{min}), and wind speed (U) were also statistically significant at both seasonal and annual scales (at the 90% confidence level). At the annual scale, the highest average sensitivity coefficients were observed for T_{max} (0.40), minimum relative humidity (RH_{min} , -0.37), maximum relative humidity (RH_{max} , -0.32), wind speed (U , 0.24), sunshine hours (SH , 0.14), and T_{min} (0.03). ET_o was found to be most sensitive to T_{max} and SH during summer, and to relative humidity during autumn and winter. Additionally, U and SH contributed most to the increase and decrease in ET_o , with respective contribution rates of 12.21% and -11.39% . The annual contribution rates of RH_{max} and RH_{min} were 2.72% and 4.53%, while those of T_{max} and T_{min} were 3.41% and 0.96%, respectively. In other words, a reduction in SH and an increase in U were the primary factors driving decreases and increases in ET_o across the Ardabil stations. These findings indicate that the differences in the contribution rates of climatic parameters to ET_o variability at each station are the result of differing sensitivity coefficients and trends across various time scales. Understanding these dynamics is essential for accurately assessing ET_o trends. While broad-scale climatic trend analyses remain important, detailed assessments at the basin and provincial levels are equally vital. Moreover, the results highlight the importance of quantifying the effects of climatic variables on ET_o to enhance the accuracy of agricultural water resource management strategies.

Keywords: Time series, trend analysis, sensitivity analysis, contribution rate.

کمّی سازی اثر پارامترهای اقلیمی بر تبخیر و تعرق مرجع در استان اردبیل

چکیده

هدف اصلی از این مطالعه، کمّی سازی اثر تغییرات پارامترهای اقلیمی بر روی ETo در استان اردبیل است. برای این منظور از سری زمانی ماهانه، فصلی و سالانه ETo (محاسبه شده بر اساس رابطه فائو پنمن مانیت) و پارامترهای اقلیمی در ۱۰ ایستگاه سینوپتیک استان اردبیل طی سال‌های ۱۳۷۸ تا ۱۴۰۲ استفاده شد. روند تغییرات و ضریب حساسیت نسبی پارامترها در هر سری زمانی محاسبه شد. از حاصل ضرب نرخ تغییرات نسبی در ضریب حساسیت هر پارامتر اقلیمی، نرخ مشارکت آن در تغییرات ETo برآورد شد. نتایج روندیابی نشان داد که روند افزایشی ETo سالانه در ۶۰ درصد از ایستگاه‌ها با سطح اطمینان ۹۰ درصد معنی‌دار بود که با نتایج سایر مطالعات در استان‌های غربی کشور مطابقت داشت. همچنین، روند افزایشی پارامترهای دمای بیشینه و کمینه و سرعت باد در مقیاس فصلی و سالانه با سطح اطمینان ۹۰ درصد معنی‌دار بود. میانگین سالانه بیش‌ترین ضریب حساسیت به ترتیب مربوط به دمای بیشینه (۰/۴۰)، رطوبت نسبی کمینه (۰/۳۷) و بیشینه (۰/۳۲)، سرعت باد (۰/۲۴)، ساعت آفتابی (۰/۱۴) و دمای کمینه (۰/۰۳) بود. مقادیر ETo بیش‌ترین ضریب حساسیت را به دمای بیشینه و ساعت آفتابی در تابستان و رطوبت نسبی در زمستان و پاییز داشتند. علاوه بر این، سرعت باد و ساعت آفتابی به ترتیب با ۱۲/۲۱ و ۱۱/۳۹- درصد بیش‌ترین نرخ مشارکت را در افزایش و کاهش ETo داشته‌اند. این مقادیر برای پارامترهای رطوبت نسبی بیشینه و کمینه به ترتیب ۲/۷۲ و ۴/۵۳ درصد دمای هوا و بیشینه و کمینه به ترتیب ۳/۴۱ و ۰/۹۶ درصد بدست آمد. به عبارت دیگر، کاهش ساعت آفتابی و افزایش سرعت باد در ایستگاه‌های استان اردبیل به ترتیب عامل اصلی کاهش و افزایش ETo بوده است. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهند که، تفاوت نرخ مشارکت پارامترها در تغییرات ETo هر ایستگاه، ناشی از تغییرات ضریب حساسیت و روند پارامترهای اقلیمی در سری‌های زمانی مختلف می‌باشد و آگاهی از این تغییرات در تحلیل روند ETo ضروری است. اگرچه بررسی تغییرات روند پارامترهای اقلیمی در مقیاس‌های بزرگتر از اهمیت بالایی برخوردار است اما تدقیق آنها در سطح حوضه‌ای و استانی نیز ضروری می‌باشد. همچنین، این نتایج اهمیت کمّی سازی اثر پارامترهای اقلیمی بر ETo را در مدیریت دقیق تر منابع آب کشاورزی نشان می‌دهند. واژگان کلیدی: سری‌های زمانی، روند تغییرات، تحلیل حساسیت، نرخ مشارکت.

مقدمه

سهم تبخیر و تعرق (ET) به‌عنوان بخشی از تلفات در بیلان هیدرولوژیکی اقلیم‌های مختلف بین ۶۰ تا ۹۵ درصد برآورد شده است (Jung et al., 2010; Kool et al., 2014). در واقع چرخه‌های انرژی، آب و کربن از طریق تبخیر و تعرق به یکدیگر مرتبط می‌شوند و بدین ترتیب نقش کلیدی در کشاورزی، هیدرولوژی، اکولوژی هر منطقه دارد (Roudier et al., 2014; Pour et al., 2020). به دلیل پیچیدگی‌هایی که در روش‌های مستقیم اندازه‌گیری ET وجود دارد، معمولاً بر اساس داده‌های هواشناسی برآورد می‌شود. برآورد تبخیر و تعرق مرجع (ETo) با استفاده از رابطه پنمن مونیت که در نشریه شماره ۵۶ فائو (FAO) با جزئیات تشریح شده برای استفاده در سرتاسر جهان توصیه شده است (Fan et al., 2016). ETo دلالت بر تبخیر و تعرق از سطح مرجع دارد که از حاصل ضرب آن و ضریب گیاهی در هر مرحله رشد، نیاز آبی گیاه محاسبه می‌شود (Allen et al., 1998). در واقع برآورد صحیح ETo از نخستین گام‌های طرح‌های مطالعاتی آبیاری و تغییرات اقلیمی است (Li et al., 2017).

مقادیر ETo تحت تأثیر پارامترهای اقلیمی تابش خورشیدی، دما، رطوبت نسبی و سرعت باد قرار دارد. تغییر هر کدام از این پارامترها در نهایت منجر به تغییرات ETo خواهد شد. نکته مهمی که وجود دارد این است که پارامترهای اقلیمی تحت تأثیر پدیده‌ی تغییرات اقلیمی مداوم در حال تغییر هستند که باعث تغییرات مداوم ETo خواهد شد. Dodgshun (2017) گزارش داد که متوسط دما از سال ۱۹۸۰ میلادی سالانه در حدود ۰/۸ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. این در حالی است که طی سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۹۰ میلادی متوسط مقادیر تابش در سطح زمین ۱۰ تا ۲۰ درصد کاهش و سرعت باد در هر دهه بعد از سال ۱۹۶۰ میلادی حدود ۰/۵ کیلومتر در ساعت

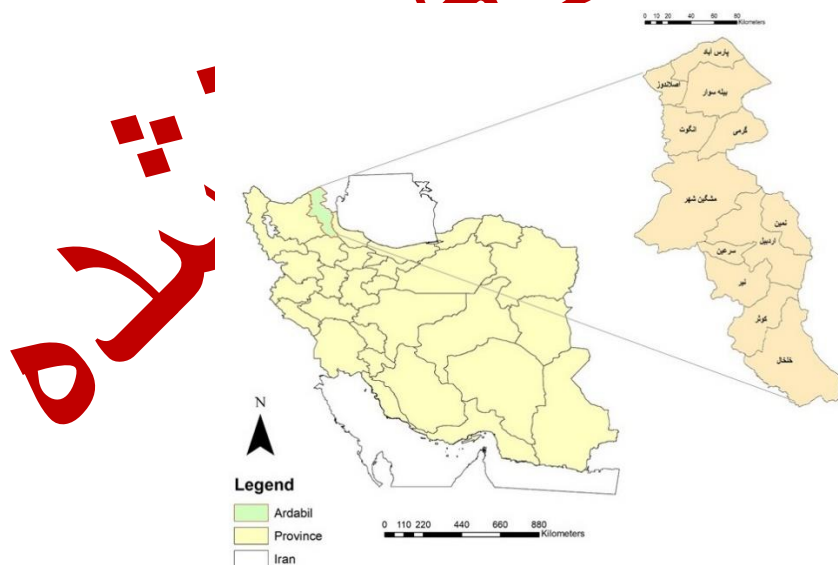
کاهش داشته است. علیرغم افزایش دمای متوسط زمین، ETo در پنجاه سال گذشته در بسیاری از مناطق کاهش داشته است که از جمله دلایل اصلی آن کاهش تابش و باد در این مناطق عنوان می‌شود (Fu et al., 2009; Pan et al., 2019). نکته مهم دیگر این است که تغییرات پارامترهای اقلیمی در نقاط مختلف جهان همسو و یکسان نیست. به‌خصوص کشوری نظیر ایران که دارای اقلیم نیمه‌خشک تا خشک است و مطالعات انجام‌شده در مورد تحلیل روند بلندمدت برخی پارامترهای اقلیمی مانند بارش (Some'e et al., 2012) و دما (Tabari and Talaee, 2011) نشان داده است که اقلیم ایران در حال تغییر است و تعیین روند ETo و تأثیر هر پارامتر اقلیمی در تغییرات آن برای شرایط اقلیمی متغیر ایران ضروری می‌باشد. اهمیت این موضوع باعث شده است که در ایران طی سال‌های اخیر نیز بیش‌تر به آن پرداخته شود. مطالعاتی نظیر Tabari et al. (2011)، دین پژوه و فروغی (۱۳۹۷)، فروغی و همکاران (۱۳۹۸)، نوروز ولاشیدی و برارخانیپور (۱۴۰۲) و جهانبخش اصل و همکاران (۱۴۰۳) به بررسی روند تغییرات ETo در دوره‌های زمانی مختلف و تعیین نقطه تغییرات ناگهانی در ایستگاه‌های هواشناسی مناطق و استان‌های کشور پرداخته‌اند.

علاوه بر بررسی روند، تحلیل حساسیت برآورد ETo نسبت به پارامترهای اقلیمی نقش مهمی در کمّی‌سازی تأثیر متغیرهای اقلیمی بر ETo دارد (Patle et al., 2020). یافته‌های مطالعات تحلیل حساسیت نشان می‌دهند که در مناطق و اقلیم‌های مختلف تأثیر پارامترهای اقلیمی بر روی ETo متفاوت می‌باشند (Gao et al. 2016). در مطالعات محدودی در سطح ایران تحلیل حساسیت ETo با استفاده از روش‌های کیفی (گرافیکی) و کمّی (ضریب حساسیت) بررسی شده است (Mosaedi et al. 2016; Sharifi and Dinpashoh 2014; Nouri et al., 2017 و مروج الاحکامی و همکاران، ۱۴۰۱). Mosaedi et al. (2016) با استفاده از یک روش گرافیکی تحلیل حساسیت ETo نسبت به پارامترهای اقلیمی گزارش دادند که رطوبت نسبی و دمای حداکثر از عوامل اقلیمی تأثیرگذار بر ETo در ایستگاه‌های مورد بررسی در ایران بوده‌اند. مروج الاحکامی و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از داده‌های اقلیمی ایستگاه‌های سینوپتیک استان یزد ضرایب حساسیت ETo را نسبت به پارامترهای هواشناسی در سری‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه تعیین کردند. نتایج بررسی منابع نشان می‌دهد که در اکثر مطالعات روندیابی و تحلیل حساسیت به طور مجزا در مناطق مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در حالی که در تعدادی مطالعات داخلی و بین‌المللی گزارش شده که با استفاده تلفیقی از نتایج روندیابی و تحلیل حساسیت می‌توان اثر کمّی ناشی از تغییر هر پارامتر را در روند ETo تعیین کرد و نتایج دقیق‌تری ارائه داد. در مطالعات (Zhang et al. 2019)، Yin et al. (2010) و Aschale et al. (2023) از تلفیق نتایج تحلیل حساسیت و شیب روند پارامترهای اقلیمی، تأثیر متغیرهای مختلف اقلیمی بر تغییرات ETo را کمّی‌سازی شد. مطالعات مشابهی نیز نشان داد که دمای متوسط در جنوب غرب چین (Liu et al. 2016) و سرعت باد در منطقه رودخانه زرد (She et al. 2017) بیش‌ترین سهم را در تغییرات ETo داشته‌اند و به نوعی متغیر کنترل‌کننده بوده‌اند. Nouri et al. (2017) سهم پارامترهای مؤثر بر روند ETo را برای برخی مناطق خشک ایران محاسبه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تغییرات سرعت باد در ۵۸/۸ درصد از ایستگاه‌ها بیش‌ترین سهم را در روند سالانه ETo داشت.

استان اردبیل به دلیل داشتن تنوع نواحی اقلیمی، از جمله قطب‌های مهم کشاورزی و دامپروری ایران است. این استان از نظر کوهساری شامل مناطق مرتفع کوهستانی، دشت‌های مرتفع و دشت‌های پست است و در سطح کشور بالاترین کاربری اراضی کشاورزی نسبت به کل سطح استان را دارد بیش از ۴۳ درصد از سطح استان را اراضی کشاورزی تشکیل می‌دهند که از شمال تا جنوب استان قرار دارند و به همین نسبت بخش زیادی از منابع آبی استان در این بخش مصرف می‌شود (سیمای کشاورزی استان اردبیل، ۱۴۰۳). تنوع اقلیمی در بین نواحی استان اردبیل باعث می‌شود که تأثیر تغییرات اقلیمی در سطح استان متفاوت با سایر استان‌ها باشد. بنابراین، مطالعاتی جامع که تحلیل دقیق‌تری از تغییرات پارامترهای اقلیمی و تأثیر آن‌ها بر ETo ارائه بدهد برای برنامه‌ریزی آبیاری و مدیریت منابع آب استان ضروری است. لذا هدف اصلی در این مطالعه، تحلیل حساسیت و روندیابی پارامترهای اقلیمی و تعیین سهم هریک از آنها در تغییرات ETo می‌باشد.

منطقه مورد مطالعه

استان اردبیل واقع در شمال غرب کشور از غرب به استان آذربایجان شرقی، از شمال و شمال شرق به کشور جمهوری آذربایجان، از شرق و جنوب شرق به استان گیلان و از جنوب به استان زنجان محدود شده است. مساحت استان اردبیل حدود ۱۸ کیلومترمربع هست که حدود ۱/۰۹ درصد از مساحت کل کشور را تشکیل می‌دهد. مجموع اراضی کشاورزی استان بیش از ۷۸۰ هزار هکتار هست که سهم تقریبی اراضی آبی، دیم و باغات به ترتیب ۲۹، ۶۶ و ۵ درصد از این مقدار است. این استان با تولید حدود چهار درصد از محصولات بخش کشاورزی باوجود حدود یک درصد از اراضی کشاورزی نقش مهمی در تولید سالانه بخش کشاورزی کشور دارد. موقعیت جغرافیایی این استان در عرض ۳۷ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۲ دقیقه نیمکره شمالی و در طول ۴۷ درجه و ۳ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۵ دقیقه طول شرقی است. این مختصات جغرافیایی حاکی از کشیدگی طولی این استان در راستای مرز شمال غربی کشور است. علاوه بر این دارای پستی و بلندی‌های زیادی است که منجر به تنوع اقلیمی قابل توجه در بین شهرستان‌ها شده است. طبق روش طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، این استان اقلیم نیمه‌خشک دارد و بر اساس روش ناحیه بندی با روش تحلیل خوشه‌ای دارای سه ناحیه گرم، معتدل و سرد است. برای این تحلیل از پارامترهای اقلیمی مربوط به پنج عامل حرارتی، فشار-بخار، بارشی، بادی-تابشی و نمناکی استفاده شده بود (فروتن و صلاحی، ۱۴۰۲). این استان دارای ده شهرستان به نام‌های اردبیل و نمین متعلق به ناحیه معتدل، سرعین، خلخال، مشگین‌شهر، نیر و کوثر (فیروز آباد) متعلق به ناحیه سرد و پارس‌آباد، گرمی و بیله‌سوار متعلق به ناحیه گرم بود که در تقسیمات کشوری اخیر دو شهرستان اصلاندوز و انگوت به ترتیب از تفکیک شهرستان‌های پارس‌آباد و گرمی ایجاد شدند. بیش‌ترین ارتفاع ایستگاه‌ها به ترتیب در نواحی سرد، معتدل و گرم قرار دارند و تنها استثناء ایستگاه فیروزآباد است که ارتفاعی کم‌تر از ایستگاه اردبیل و نمین دارد. حداقل و حداکثر میانگین سالانه بارندگی به ترتیب مربوط به ایستگاه اردبیل با ۲۵۹ میلی‌متر در سال و ایستگاه سرعین با ۳۹۰ میلی‌متر در سال است. میانگین حداقل و حداکثر دمای سالانه ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی استان به ترتیب برابر ۲۱/۴- در ایستگاه خلخال و ۳۹/۶ در ایستگاه بیله‌سوار هست. کلیه این موارد نشان می‌دهند که اردبیل یک استان درحال توسعه و با تنوع بسیار زیاد آب و هوایی است. شکل ۱ موقعیت شهرستان‌های استان اردبیل را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت استان اردبیل و شهرستان‌های آن

داده‌های اقلیمی

برای برآورد ETo در ایستگاه‌های هواشناسی از سامانه نیاز آب که توسط بخش تحقیقات مدیریت آب در مزرعه مؤسسه تحقیقات خاک و آب توسعه داده شده است، استفاده شد (مؤسسه تحقیقات خاک و آب، ۱۴۰۲). در این سامانه ETo با استفاده از بانک اطلاعات هواشناسی روزانه ایستگاه‌های هواشناسی کشور (که توسط سازمان هواشناسی جمع‌آوری شده است) و بر اساس روش پنمن مونتیث ارائه‌شده در نشریه شماره ۵۶ فائو (Allen et al., 1998) محاسبه می‌شود. داده‌های هواشناسی شامل حداقل دما (Tmin)، حداکثر دما (Tmax)، حداقل رطوبت نسبی (RHmin)، حداکثر رطوبت نسبی (RHmax)، سرعت باد (U) و ساعات آفتابی (SH) ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک منتخب استان اردبیل بر اساس دوره آماری ۱۳۷۸ تا ۱۴۰۲ بود. ایستگاه‌های نیر، نمین، فیروزآباد و گرمی در دهه ۸۰ احداث شده‌اند و از داده‌های اندازه‌گیری شده از بدو تاسیس آن‌ها تا به حال استفاده شده است. شکل و جدول ۱ به ترتیب موقعیت و مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی شهرستان‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بر اساس روش پنمن مونتیث ETo توسط رابطه (۱) برای گیاه مرجع که پوشش چمن فرضی با ارتفاع ۱۲ سانتیمتر و ضریب بازتاب تابش ۲۳ درصد است، برآورد می‌شود.

$$ET_o = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \left[\frac{900}{(T + 273)} \right] U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن، ETo تبخیر و تعرق گیاه مرجع (mm day^{-1})، Rn تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)، T متوسط دمای هوا ($^{\circ}\text{C}$)، U_2 سرعت باد در ارتفاع دومتری (ms^{-1})، es-ea کمبود فشار بخار (kPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع ($\text{KPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$)، γ ضریب ثابت سایکرومتری ($\text{KPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$) و G شار گرما ورودی به زمین ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) است.

جدول ۱. مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک مورد مطالعه استان اردبیل

ایستگاه	دوره آماری	عرض جغرافیایی ($^{\circ}\text{N}$)	طول جغرافیایی ($^{\circ}\text{E}$)	ارتفاع (m)	ناحیه اقلیمی
پارس‌آباد	۱۳۷۸-۱۴۰۲	۳۹/۶۵	۴۷/۹۲	۷۸	گرم
گرمی	۱۳۸۴-۱۴۰۲	۳۹/۰۵	۴۸/۰۶	۷۴۹	گرم
بيله سوار	۱۳۸۳-۱۴۰۲	۳۹/۳۷	۴۸/۳۲	۱۰۱	گرم
اردبیل	۱۳۷۸-۱۴۰۲	۳۸/۲۲	۴۸/۳۳	۱۳۳۵	معتدل
نمین	۱۳۸۷-۱۴۰۲	۳۸/۴۲	۴۸/۴۹	۱۴۸۰	معتدل
فیروزآباد (کوثر)	۱۳۸۵-۱۴۰۲	۳۷/۵۹	۴۸/۲۴	۱۱۷۶	سرد
نیر	۱۳۸۸-۱۴۰۲	۳۸/۰۴	۴۸/۰۳	۱۵۹۳	سرد
سرعین	۱۳۸۱-۱۴۰۲	۳۸/۱۵	۴۸/۰۸	۱۶۵۸	سرد
خلخال	۱۳۷۸-۱۴۰۲	۳۷/۶۱	۴۸/۵۴	۱۷۹۷	سرد
مشگین‌شهر	۱۳۷۸-۱۴۰۲	۳۸/۳۸	۴۷/۶۸	۱۵۶۱	سرد

روش‌های آماری

آزمون تشخیص روند من‌کندال

به منظور بررسی روند تغییرات سری‌های زمانی ETo و پارامترهای هواشناسی ماهانه، فصلی و سالانه در هر ایستگاه از آزمون من‌کندال اصلاح شده^۱ (MMK) استفاده شد. این آزمون که نسخه اصلاح شده من‌کندال اصلی است (Mann, 1945; Kendall, 1975) توسط Hamed and Rao (1998) جهت بررسی روند سری‌های زمانی که دارای خودهمبستگی هستند، طراحی گردیده است تا احتمال شناسایی نادرست روند و سطح معنی‌داری کاهش یابد. در این روش، برای محاسبه خودهمبستگی داده‌ها واریانس اصلاح‌شده $(Var(S))^*$ برای محاسبه آماره‌های آزمون MK طبق روابط زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد (Praveen et al., 2020).

$$Var(S)^* = Var(S) \times \left(\frac{n}{n^*}\right) \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$\left(\frac{n}{n^*}\right) = 1 + \left(\frac{2}{(n(n-1)(n-2))}\right) \times \sum_{k=1}^{n-1} [(n-k)(n-k-1)(n-k-2)^r \cdot k] \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$rk = \frac{\left(\frac{1}{n-k}\right) \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - x)(x_{i+k} - x)}{\left(\frac{1}{n}\right) \left(\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2\right)} \quad (\text{رابطه ۴})$$

در این روابط، $Var(S)$ واریانس آماری آزمون، $Var(S)^*$ واریانس اصلاح شده، n تعداد داده‌ها در سری زمانی، n^* تعداد داده بعد از اصلاح خودهمبستگی، n/n^* بیانگر ضریب اصلاحی برای لحاظ کردن اثر خودهمبستگی در داده‌ها است، rk ضریب خودهمبستگی در تاخیر k ام، x_i مقدار داده سری زمانی و x میانگین سری زمانی را بیان می‌کند (Nahar Jerin et al., 2021).

برآورد شیب خط روند از روش تخمین گر سن

این روش نا پارامتری توسط Sen (1968) برای برآورد شیب خط روند در سری زمانی است. در این روش برای هر دو جفت داده متوالی یک شیب محاسبه می‌شود و مجموعه این شیب‌ها یک سری زمانی تشکیل می‌دهند و میانه آن همان شیب خط روند خواهد بود.

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{X_j - X_i}{j - i} \right); \text{ for all } j > i \quad (\text{رابطه ۵})$$

در این رابطه، β شیب خط روند، X_j مقدار مشاهده j ام، X_i مقدار مشاهده i ام و j یک واحد زمانی بعد از i است. مقادیر مثبت β به معنی روند افزایشی و مقادیر منفی آن به معنی روند کاهشی سری زمانی هست.

تحلیل حساسیت (Sensitivity Analysis)

تحلیل حساسیت روشی برای ارزیابی میزان تأثیر عوامل اقلیمی مختلف بر ETo است. برای این منظور از ضریب حساسیت نسبی بدون بعد استفاده شد که نرخ تغییر ETo نسبت به تغییرات پارامترهای هواشناسی را نشان می‌دهد و به عنوان یک شاخص کمی، میزان تأثیر تغییر یک یا چند متغیر اقلیمی بر ETo را نشان می‌دهد. رابطه ضریب حساسیت نسبی به صورت زیر تعریف می‌شود (Saxton, 1975; Zhang et al., 2019):

(رابطه ۶)

$$S_v = \frac{\frac{\Delta ETo}{ETo}}{\frac{\Delta v}{v}}$$

که در آن S_v ضریب حساسیت بدون بعد متغیر اقلیمی، ETo و v به ترتیب مقادیر پایه تبخیر و تعرق مرجع و متغیر اقلیمی هستند، ΔETo میزان تغییر تبخیر و تعرق مرجع در اثر تغییر متغیر اقلیمی Δv است. در این روش، هر یک از شش پارامتر هواشناسی مورد مطالعه به طور مجزادر محدوده $\pm 10\%$ درصد تغییر داده شده و مقدار تغییر ETo و سپس ضریب حساسیت نسبی بدون بعد محاسبه شد (Chu et al., 2017). ضریب حساسیت مثبت یا منفی به این معناست که ETo با افزایش یا کاهش متغیر اقلیمی مورد نظر، به ترتیب افزایش یا کاهش می‌یابد. مقدار این ضریب نشان‌دهنده شدت حساسیت ETo نسبت به تغییرات آن متغیر است. هرچه قدرمطلق ضریب حساسیت بیش‌تر باشد، تأثیر آن متغیر اقلیمی بر ETo بیش‌تر خواهد بود. قدرمطلق ضرایب حساسیت بین صفر تا 0.5 حساسیت قابل چشم‌پوشی، بین 0.5 تا 0.7 حساسیت متوسط، بین 0.7 تا 1.0 حساسیت بالا و بیش‌تر از یک را جزو حساسیت بسیار بالا طبقه‌بندی می‌کنند (Lenhart et al., 2002).

۲-۳-۴. نرخ مشارکت (Contribution rate)

تحلیل حساسیت، تأثیر عوامل اقلیمی مختلف بر ETo را نشان می‌دهد. اما برای این‌که مشخص شود هر پارامتر بر اساس روند تغییرات فصلی و سالانه، چه سهمی در تغییرات ETo داشته است از نرخ مشارکت استفاده خواهد شد. نرخ مشارکت از حاصل ضرب ضریب حساسیت هر متغیر در نرخ تغییر نسبی آن محاسبه می‌شود. برای هر منطقه در مقیاس زمانی فصلی و سالانه، سهم یک متغیر هدف در تغییرات ETo با رابطه زیر محاسبه گردید (Yin et al. 2010, Li et al. 2017a):

$$RC_v = \frac{Trend_v \times n \times 100}{|av|} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$Con_v = S_v \times RC_v \quad (\text{رابطه ۸})$$

که در آن Con_v نرخ مشارکت متغیر اقلیمی (درصد)، RC_v نرخ تغییر نسبی متغیر (درصد)، $Trend_v$ شیب خط روند سالانه متغیر (واحد پارامتر در سال)، av میانگین مقدار متغیر در دوره آماری (واحد پارامتر در سال) و n تعداد سال‌ها در دوره آماری می‌باشد. مقادیر مثبت Con_v نشان‌دهنده اثر افزایشی متغیر اقلیمی بر ETo است و در مقابل مقدار منفی نشان‌دهنده اثر کاهشی متغیر اقلیمی بر ETo است.

یافته‌های پژوهش و بحث

متوسط ETo در ایستگاه‌ها

مقادیر ETo و پارامترهای هواشناسی ایستگاه‌های استان اردبیل در بازه زمانی ۱۳۷۸ تا ۱۴۰۲ بر اساس ماه، فصل و سال در هر ایستگاه طبقه‌بندی و سری‌های زمانی مورد استفاده در آزمون‌های آماری ایجاد شدند. بیش‌ترین مقادیر میانگین ETo در طول دوره مورد مطالعه برابر با ۱۱۹۲، ۱۱۳۳ و ۱۰۷۶ میلی‌متر در سال و به ترتیب متعلق به ایستگاه‌های فیروزآباد، پارس‌آباد و بیله سوار بود. در ادامه خلخال، گرمی، اردبیل و نیر به ترتیب با ۱۰۷۵، ۱۰۲۹، ۱۰۲۴ و ۱۰۲۰ میلی‌متر قرار داشتند. کم‌ترین میانگین سالانه ETo برابر با ۹۵۳، ۱۰۰۳ و ۱۰۰۴ میلی‌متر در سال و به ترتیب متعلق به ایستگاه‌های سرعین، مشگین‌شهر و نمین بود. مقادیر ارائه‌شده با نتایج مطالعه فاضلی خیاوی و همکاران (۱۳۹۹) در ایستگاه پارس‌آباد، مطابقت دارد. در طول این دوره آماری متوسط ETo سالانه در بین ایستگاه‌های مورد

بررسی برابر ۱۰۵۱ میلی متر بود. پارس آباد ایستگاهی واقع در ناحیه گرم با کمترین ارتفاع (۷۸ متر) و با متوسط بارش ۲۷۰ میلیمتر در سال (جزو کمترین‌ها در کنار اردبیل) و متوسط دمای بیشینه ۳۹/۳ درجه سانتی‌گراد (جزو بیش‌ترین‌ها در کنار بيله‌سوار) می‌باشد. اگر چه فیروزآباد در ناحیه بندی استان در ناحیه سرد واقع شده است اما بین ایستگاه‌های واقع در این ناحیه کمترین ارتفاع را دارد (۱۱۷۶ متر) و دارای بیش‌ترین اختلاف بین متوسط دمای کمینه و بیشینه ثبت شده در بین ایستگاه‌های مورد بررسی با ۵۸ درجه سانتی‌گراد است. از طرف دیگر سرعین و مشگین‌شهر بیش‌ترین بارش‌های ثبت شده سالانه را دارند و از مناطق مرتفع در ناحیه سرد استان اردبیل می‌باشند. بررسی ماهانه و فصلی ETo نشان می‌دهند که در اکثر موارد بیش‌ترین مقدار ETo در استان اردبیل در ماه‌های تیر و مرداد و کمترین آن در ماه‌های آذر و دی رخ می‌دهد. علاوه بر این، اختلاف زیادی بین مقادیر بیش‌ترین و کمترین ETo در بین مناطق استان وجود دارد که می‌تواند ناشی از تغییرات شدید پارامترهای اقلیمی در فصل‌ها و ماه‌های مختلف می‌باشد.

روند یابی ETo و پارامترهای اقلیمی

نتایج کاربرد آزمون شیب سن و من‌کندال اصلاح شده با سطوح اطمینان ۹۰، ۹۵ و ۹۹ درصد بر روی سری‌های زمانی مورد بررسی ETo (ماهانه، فصلی و سالانه) در جدول (۲) نشان داده شده است. در کلیه ایستگاه‌ها علامت آماره‌های هر دو آزمون یکسان بودند که به این معنی است در هر دو روش روند کاهشی یا افزایشی همسو باهم برآورد شده‌اند. به ترتیب ۱۲۰، ۴۰ و ۱۰ سری زمانی ماهانه، فصلی و سالانه ETo در ۱۰ ایستگاه هواشناسی استان مورد بررسی قرار گرفتند. شکل (۲) نتایج سری زمانی فصلی و سالانه را برای ETo و پارامترهای هواشناسی را نمایش می‌دهد. روند افزایشی ETo به ترتیب در ۴۲، ۱۸ و ۶ سری‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه ایستگاه‌ها معنی‌دار بود. علاوه بر این، روند کاهشی ETo به ترتیب در ۱۰، ۳ و صفر سری زمانی ماهانه، فصلی و سالانه ایستگاه‌ها معنی‌دار بود. این نتایج نشان می‌دهد که روند سالانه ۶۰ درصد ایستگاه‌های مورد بررسی شامل اردبیل، نمین، پارس آباد، خلخال، نیر و فیروزآباد افزایشی و از لحاظ آماری معنی‌دار بود و در ۴۰ درصد ایستگاه‌ها هیچ روند معنی‌داری مشاهده نشده است. بنابراین، تغییرات ETo سالانه در هیچ ایستگاهی با روند کاهشی معنی‌دار از لحاظ آماری مواجه نبود. روند کاهشی معنی‌دار فقط در به ترتیب ۸/۳ و ۷/۵ درصد از سری‌های زمانی ماهانه و فصلی مشاهده شد. شیب تغییرات ETo سالانه در ایستگاه‌های بيله‌سوار، گرمی، مشگین‌شهر کاهشی و در سرعین افزایشی بود اما روند این تغییرات در هیچ کدام از سطوح اطمینان مذکور معنی‌دار نبود. نکته قابل توجه این است که روند افزایش معنی‌دار در هر سه ناحیه سرد و گرم و معتدل وجود داشته است. در حالی که روند کاهشی معنی‌دار فقط در سه ایستگاه گرمی (ناحیه گرم)، مشگین‌شهر و خلخال (ناحیه سرد) مشاهده شد که جزو مناطق مرتفع در نواحی گرم و سرد هستند. تغییرات روند سایر سری‌های زمانی از نظر آماری معنی‌دار نبودند. دامنه تغییرات روند ETo ماهانه از ۳/۳۱- تا ۴/۳۷ فصلی از ۴/۶۹- تا ۹/۵۹ و سالانه از ۲/۰۵ تا ۱۴/۴۸ میلی‌متر در سال متغیر بود. حداکثر مقدار روند افزایشی ETo ماهانه، فصلی و سالانه مربوط به تیرماه و فصل تابستان در فیروزآباد بود که کم ارتفاع‌ترین ایستگاه واقع در ناحیه سرد استان اردبیل است. حداکثر مقدار روند کاهشی ETo ماهانه و فصلی به ترتیب برابر ۳/۳۱-، ۴/۶۹- میلی‌متر در سال و مربوط به خردادماه، فصل بهار و ایستگاه گرمی بود که جزو ناحیه گرم استان می‌باشد.

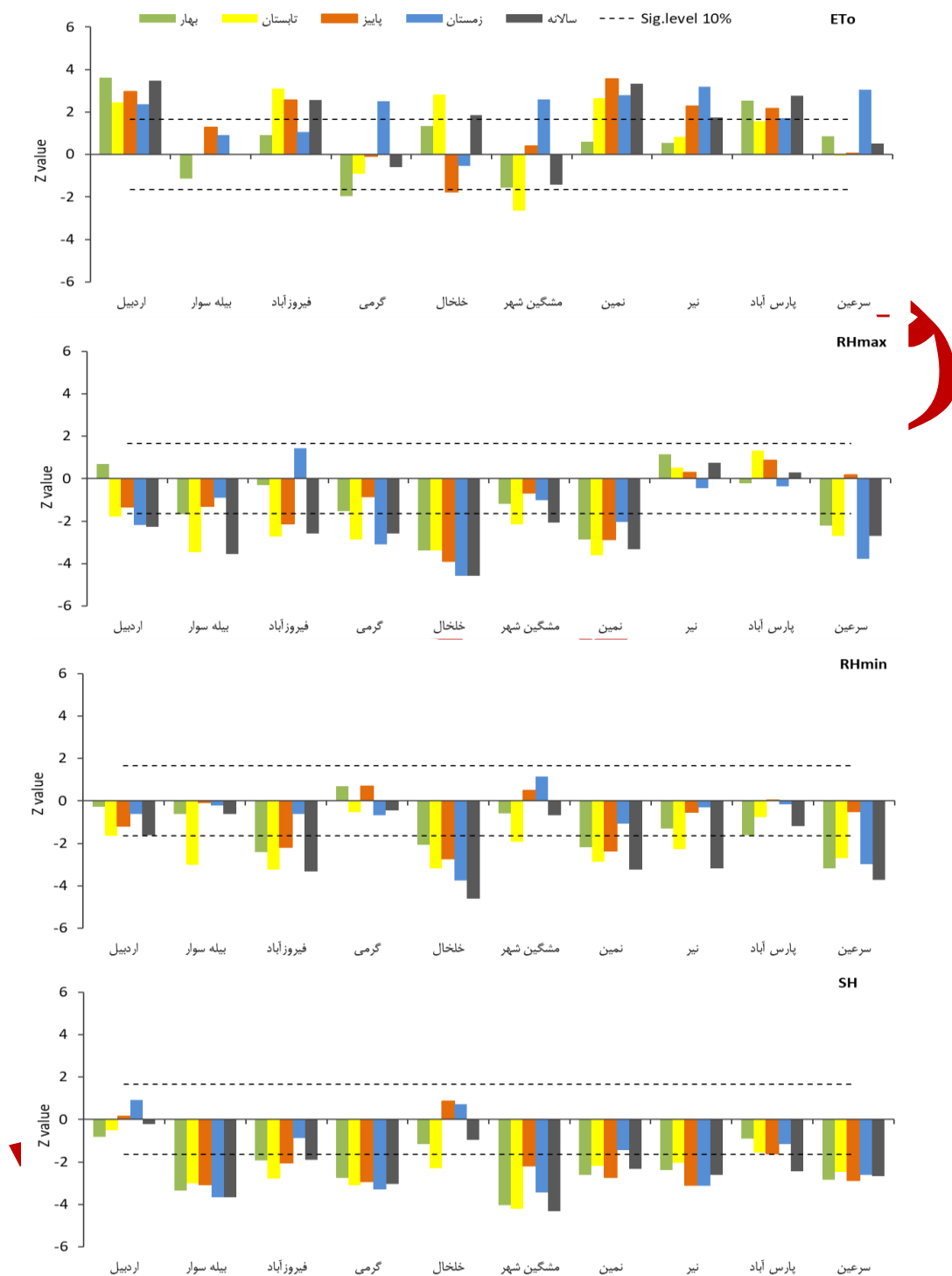
جدول ۲. نتایج آزمون سن برای سری های زمانی مورد بررسی. علامت های *، ** و *** نشان دهنده معنی داری آزمون من کندیال اصلاح شده به ترتیب با ضرایب اطمینان ۹۰، ۹۵ و ۹۹ درصد است.

سری زمانی	مهر	بارش آباد	بهار	چمن	مشتگین شهر	خانخال	چمن	فیروزآباد	نیله سوار	اردیبهشت
فروردین	۰/۸۷	۰/۵۳	۱/۵۶	۱/۰۱	-۰/۰۳	۰/۵۴	-۰/۷۷	۱/۷۱ *	-۰/۷۲	۰/۹۳ *
اردیبهشت	-۰/۰۵	۰/۹۳ **	-۰/۰۶	۰/۳۸	-۰/۷۵ **	۰/۲۷	-۱/۵۷ *	۰/۸۹	-۰/۷۱	۱/۰۷ **
خرداد	۰/۰۴	۰/۷۶ *	۰/۲۴	۰/۴۸	-۱/۳۹ **	۰/۲۶	-۳/۳۱ **	۱/۰۳	-۱/۳۸	۱/۰۳ ***
تیر	۰/۴۷	۱/۵ ***	۱/۱۶	۲/۱۲ **	-۱/۲۹ **	۱/۰۵ **	۰/۴۸	۴/۳۷ ***	۰/۹۴	۱/۳۳ ***
مرداد	-۰/۴۶	-۰/۱۷	۰/۱۹	۲/۳۴ *	-۱/۹۱ **	۰/۷۱ ***	-۱/۶	۳/۳۶ ***	۰/۳۷	۰/۴۵
شهریور	۰/۰۵	۰/۲۶	۰/۰۹	۰/۷۲	-۰/۷۶ *	۰/۳۷	-۰/۳۷	۲/۶۸ ***	۰/۵۷	۰/۷۳ ***
مهر	-۰/۷۴	۰/۰۳	۰/۵۴	۰/۱۷	-۰/۸۹ *	-۰/۵۱ **	-۱/۳۳ *	۰/۸۱ **	-۰/۰۵	۰/۴۲
آبان	۰/۳۷	۰/۵۶ **	۱/۷۴ **	۱/۱۹ *	۰/۳۴	-۰/۱۶	۰/۲۵	۰/۸۶	۰/۷۹ *	۰/۶۸ **
آذر	۰/۳۷ *	۰/۰۱	۱/۰۷ ***	۱/۰۹ ***	۰/۵۶ **	۰/۰۲	۰/۹۴ **	۰/۳۷	۰/۵۳ *	۰/۷۵ ***
دی	۰/۸۱ ***	۰/۳۱ **	۱/۷ ***	۱/۴۵ ***	۰/۱۱ ***	-۰/۰۹	۱/۱۹ ***	-۰/۰۲	۰/۷۲ ***	۰/۶۳ **
بهمن	۰/۲۵	۰/۱۷	۰/۰۸	۰/۲۶	۰/۳۴ *	-۰/۱۴	۱/۱۵	۰/۰۶	۰/۶۲	۰/۴۶ **
اسفند	۰/۳۸	-۰/۰۸	۰/۸۴ *	۰/۳۸	-۰/۰۴	.	-۰/۵۴	۰/۵۵	-۰/۰۵	۰/۴۱ *
بهار	۱/۱۲	۲/۸۱ **	۱/۰۳	۰/۵۳	۲/۳	۱/۱۵	-۴/۶۹ **	۳/۱۵	-۱/۵۶	۳/۲۹ ***
تابستان	-۰/۱۸	۱/۳۸	۲/۵۶	۳/۶۲ ***	-۲/۳۷ **	۲/۱۱ ***	-۵/۲۴	۹/۵۹ ***	-۰/۳۵	۲/۵۸ **
پاییز	۰/۰۴	۱/۰۹ **	۳/۵ **	۲/۴۵ ***	۰/۲۵	-۰/۹۳ *	-۰/۰۷	۱/۹ **	۱/۰۹	۲/۳۳ ***
زمستان	۱/۶۵ ***	۰/۸۴ *	۳/۶۳ ***	۲/۳۵ ***	۱/۶۱ ***	-۰/۱۶	۲/۱۶ **	۱	۰/۷۶	۱/۹۴ **
سالانه	۲/۶۶	۷/۰۶ ***	۱۱/۵۸ *	۸/۹ ***	-۵/۵۸	۲/۰۵	-۶/۸۸	۱۴/۴۸ **	-۱/۱	۹/۲۷ ***

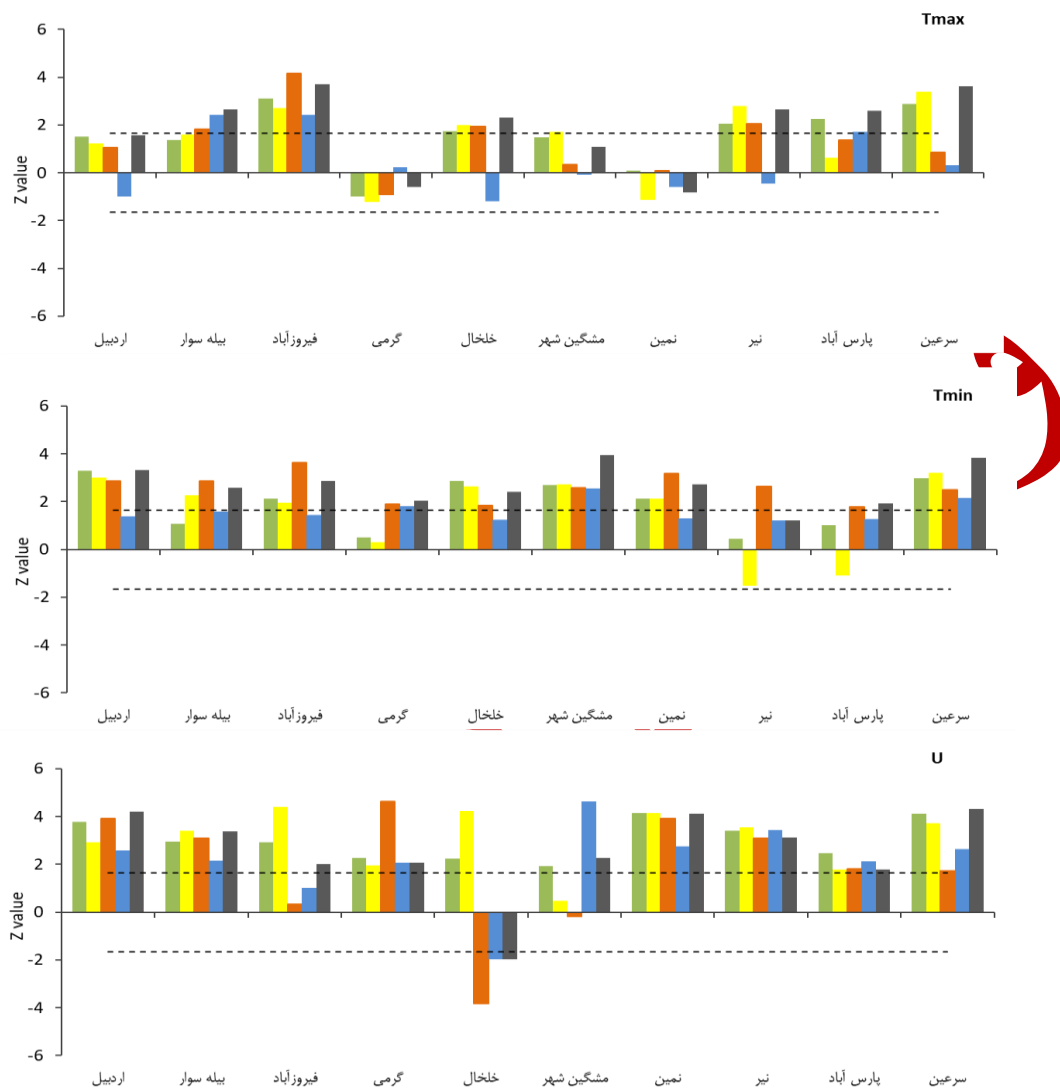
روند افزایشی ETo در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب در دو، چهار، پنج و هفت ایستگاه با سطوح اطمینان مورد بررسی معنی دار بود. روند کاهشی ETo در فصل بهار ایستگاه های گرمی، فصل تابستان مشگین شهر و فصل پاییز خلخال معنی دار بود. بنابراین، روند افزایشی ETo در ایستگاه های بیش تری در سه فصل تابستان، پاییز و زمستان در مقایسه با بهار شناسایی شد. این روند افزایشی در اکثر ایستگاه های هر سه ناحیه اقلیمی استان مشاهده می شود. همچنین، روند افزایشی و کاهشی ETo ماهانه در جدول (۲) تغییرات ایجاد شده در فصل ها را تایید می کند. نکته قابل توجهی که در سری های زمانی ماهانه و فصلی به چشم می خورد این است که در دو ایستگاه خلخال و فیروزآباد که در دو منطقه مجاور هم در ناحیه سرد استان قرار دارند، روند معکوس ETo طی ماه مهر و فصل پاییز مشاهده می شود و نظیر این شرایط در مطالعات دیگر نیز وجود داشته است. دلیل آن تفاوت روند سرعت باد در فصل پاییز برای دو ایستگاه مذکور می باشد که در شکل (۲) نمایش داده شده است. سرعت باد در فصل پاییز برای ایستگاه خلخال به طور معنی داری کاهش یافته است و همین عامل اصلی کاهش ETo در فصل پاییز این ایستگاه نسبت به ایستگاه مجاورش است. به طور کلی، در پارامترهای اقلیمی دو ایستگاه مجاور ممکن است به دلایلی نظیر تشکیل خرد اقلیم های ناشی از تغییرات کوهساری محلی و تغییر سیستم چرخش باد ایجاد شود (Tabari et al., 2011). به همین دلیل ممکن است روندهای متفاوت پارامترهای اقلیمی بعضی ماه ها در دو ایستگاه مذکور که علی رغم فاصله کم اختلاف ارتفاع بیش از ۶۰۰ متر با یکدیگر دارند مشاهده شود. تغییرات کوهساری در

قسمت‌های مختلف استان اردبیل بسیار شدید است و همین تغییرات در طول جنوب به شمال باعث ایجاد تنوع اقلیمی در سطح استان شده است.

آزمون شیب سن و من‌کندال اصلاح شده با سطوح اطمینان ۹۰، ۹۵ و ۹۹ درصد بر روی سری‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه پارامترهای هواشناسی انجام گرفت. در کلیه ایستگاه‌ها علامت آماره‌های هر دو آزمون یکسان بودند که به این معنی است در هر دو روش روند کاهشی یا افزایشی همسو باهم برآورد شده‌اند. در این بخش نیز، ۱۲۰، ۴۰ و ۱۰ سری زمانی به ترتیب برای بررسی ماهانه، فصلی و سالانه هر پارامتر در ۱۰ ایستگاه هواشناسی مورد بررسی قرار گرفتند. همانطور که در شکل (۲) مشخص شده است، شیب تغییرات پارامترهای T_{max} ، T_{min} و U همانند ETo در مقیاس فصلی و سالانه افزایشی و سایر پارامترهای شامل RH_{max} ، RH_{min} و SH کاهشی بوده است. روند تغییرات T_{max} ، T_{min} و U در مقیاس سالانه به ترتیب در شش، نه و نه ایستگاه به طور معنی داری افزایشی بوده است و تنها ایستگاهی که روند سالانه U در آن کاهشی بوده است خلخال می‌باشد. روند تغییرات RH_{max} ، RH_{min} و SH در مقیاس سالانه به ترتیب در پنج، هشت و هشت ایستگاه به طور معنی داری کاهشی بوده است. افزایش نسبی روند دما و سرعت باد و کاهش رطوبت نسبی در اکثر ایستگاه‌ها از عوامل اصلی برای افزایش روند ETo است و تنها عاملی که می‌تواند منتج به کاهش ETo شود روند کاهشی SH در اکثر ایستگاه‌ها می‌باشد. افزایش روند دما از اثرات تغییر اقلیم ناشی از گرمایش جهانی می‌باشد. در گزارش ششم هیئت بین دولتی تغییرات اقلیمی^۲ (IPCC) نیز به افزایش نسبی دمای سطح زمین در بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ میلادی (مصادف با ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹ شمسی) نسبت به دوره‌های قبلی و افزایش مخاطرات زیست‌محیطی ناشی از گرمایش جهانی اشاره شده است (رهبانی، ۱۴۰۲). افزایش سرعت باد سایر نقاط ایران طی دهه‌های اخیر در مطالعات قبلی نیز گزارش شده است (Nouri et al., 2017). همین افزایش روند دما و سرعت باد می‌تواند منجر به کاهش رطوبت نسبی شده و در نهایت موجب افزایش ETo گردد. در مقیاس فصلی نیز، میانگین T_{max} در پنج، پنج، چهار و سه تا از ایستگاه‌ها به ترتیب در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان دارای روند افزایشی معنادار بوده است. میانگین T_{min} در شش، هفت، ده و سه تا از ایستگاه‌ها به ترتیب در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان دارای روند افزایشی معنادار بوده است که نشان می‌دهد سری زمانی فصلی T_{min} در اکثر ایستگاه‌ها افزایشی بوده است. در خصوص سرعت باد، میانگین U در ده، نه، هفت و هشت تا از ایستگاه‌ها به ترتیب در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان دارای روند افزایشی معنی دار بوده است و فقط در فصل پاییز و زمستان ایستگاه خلخال روند کاهشی مشاهده گردید. روند SH در هفت، هشت، هفت و پنج ایستگاه به ترتیب در بهار، تابستان، پاییز و زمستان به طور معنی دار کاهشی بود. علاوه بر این، برای پارامترهای RH_{min} و RH_{max} روند کاهشی معنی دار در چهار ایستگاه برای بهار، هشت ایستگاه در تابستان، سه ایستگاه برای پاییز و به ترتیب دو و پنج ایستگاه در فصل زمستان ثبت شد. این نتایج به وضوح نشان می‌دهند که تغییرات فصلی و سالانه پارامترهای T_{max} ، T_{min} و U در استان اردبیل (به استثنای U در خلخال) افزایشی بوده است. در سمت مقابل، تغییرات فصلی و سالانه پارامترهای RH_{max} ، RH_{min} و SH در استان اردبیل کاهشی بوده است.



شکل ۲. مقادیر آماره Z آزمون روندیابی ETo و پارامترهای اقلیمی برای سری‌های زمانی فصلی و سالانه در ایستگاه‌های هواشناسی



ادامه شکل (۲).

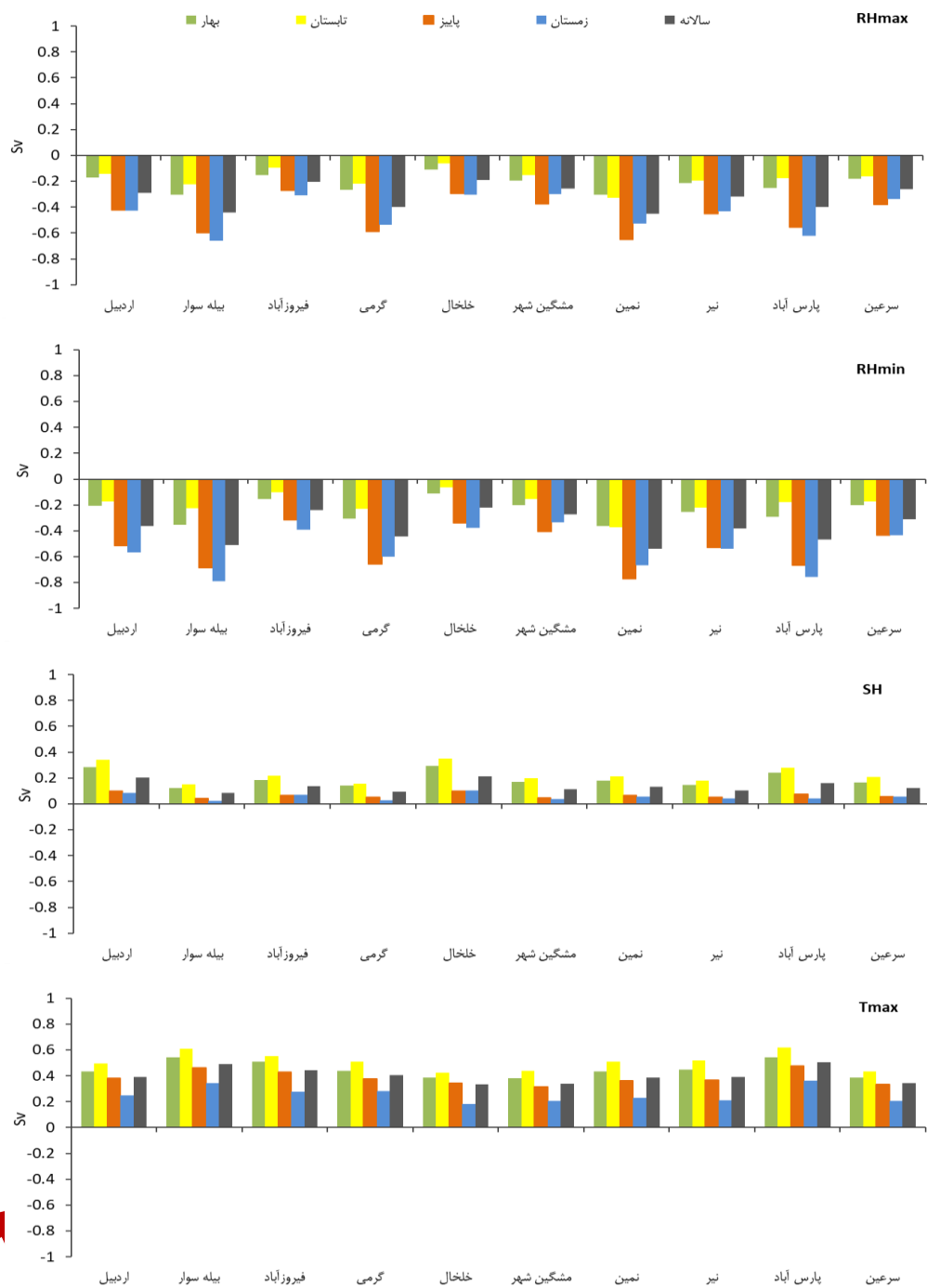
در واقع نتایج به دست آمده از بررسی تغییرات سری زمانی ETo و سایر پارامترهای اقلیمی نشان دهنده روند رو به افزایش تغییرات ETo در اکثر مناطق استان اردبیل است. از کل ۱۷۰ سری زمانی ETo که مورد بررسی قرار گرفتند ۷۹ سری زمانی دارای روند معنی دار بود که حدود ۸۰ درصد آن روند افزایشی و ۲۰ درصد آن روند کاهشی داشتند. پیش تر نتایج مطالعات Tabari et al. (2011)، فروغی و همکاران (۱۳۹۸) و جهانبخش اصل و همکاران (۱۳۹۳) نشان دادند که روند تغییرات ETo در استان های غربی کشور شامل آذربایجان شرقی و غربی، زنجان و همدان افزایشی بوده است. نتایج فاضلی خیای و همکاران (۱۳۹۹) نیز نشان داد که میانگین سالانه ETo در ایستگاه پارس آباد بر اساس سناریوهای مختلف RCPs دارای روند افزایشی حدود ۶ تا ۸/۴ درصد خواهد بود. این نتایج، افزایش معنی دار روند ETo در استان اردبیل را همانند سایر استان های غربی کشور نشان می دهد. این افزایش در اکثر ایستگاه ها طی فصول تابستان، پاییز و زمستان رخ داده است. علاوه بر این، در اکثر ایستگاه ها تغییرات فصلی و سالانه Tmax، Tmin و U افزایشی و RHmin، RHmax و SH کاهشی بوده است. افزایش روند دما و سرعت باد و کاهش رطوبت نسبی موجب افزایش ETo می شوند و در سمت

مقابل، کاهش SH می‌تواند تا حدودی عامل بازدارنده در برابر افزایش بیش از حد ETo شود. با توجه به اینکه مقادیر ETo رابطه مستقیمی با نیاز آبی گیاه دارد، می‌توان نتیجه گرفت که نیاز آبی گیاهان الگوی کشت در اکثر نقاط استان اردبیل به خصوص در فصول تابستان و پاییز و زمستان به طور معنی‌داری افزایش یافته است. در حالی‌که در فصل بهار برای گرمی، در فصل تابستان برای مشکین‌شهر و در فصل پاییز برای ایستگاه خلخال کاهشی بوده است. این نتایج در کنار مدیریت هوشمندانه آبیاری، الگوی کشت، تاریخ کشت و کاربرد رقم‌های مناسب می‌تواند نقش مؤثری در بهینه‌سازی مصرف آب در باغات و اراضی کشاورزی این مناطق گردد. همچنین، این نتایج نشان می‌دهد که برای درک بهتر بسیاری از تغییرات روند ETo باید روند پارامترهای اقلیمی مؤثر بر آن نیز بررسی و تحلیل شود.

تحلیل حساسیت ETo

شکل (۳) نتایج تحلیل حساسیت فصلی و سالانه ETo را نمایش می‌دهد. میانگین ضریب حساسیت مثبت برای متغیرهای Tmax (۰/۴۰)، Tmin (۰/۰۳)، SH (۰/۱۴) و U (۰/۲۴) نشان می‌دهد که این پارامترها بر ETo نقش مثبت و افزایشی دارد و در حالی‌که ضریب منفی برای RHmin (۰/۳۷) و RHmax (۰/۳۲) نشان‌دهنده تأثیر کاهشی آن‌ها بر ETo می‌باشد. یکی از نکاتی که در این شکل مشخص است ضریب حساسیت منفی Tmin فصل زمستان در همه ایستگاه‌ها به جز ایستگاه‌های ناحیه گرم یعنی پارس آباد، گرمی و بیله‌سوار می‌باشد. دلیل این اتفاق میانگین منفی Tmin در فصل زمستان برای ایستگاه‌های ناحیه سرد و معتدل استان است که باعث می‌شود در تحلیل حساسیت، ضرایب این پارامتر برای این ایستگاه‌ها منفی بدست بیاید. در کل، قدرمطلق ضرایب حساسیت کمتر از ۰/۰۵ بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است (Lenhart et al., 2002). تحلیل حساسیت سالانه ETo نشان می‌دهد که قدر مطلق ضریب حساسیت ETo نسبت به همه پارامترهای اقلیمی در ناحیه گرم به جز SH (که به ترتیب در نواحی معتدل و سرد بیش‌تر است) بیش‌تر از نواحی معتدل و سرد بود. همچنین قدر مطلق ضریب حساسیت ETo نسبت به همه پارامترها به جز U (که به ترتیب در نواحی گرم و سرد بیش‌تر است) در ناحیه معتدل بیش‌تر از سرد بود. به عبارت دیگر، برای اکثر پارامترهای اقلیمی قدر مطلق ضرایب حساسیت به ترتیب در نواحی گرم، معتدل و سرد بیش‌تر بود. بیش‌ترین قدرمطلق ضریب حساسیت به ترتیب مربوط به Tmax، RHmin، RHmax، U، SH و Tmin بود.

نشانده



شکل ۳. ضرایب حساسیت ETo نسبت به پارامترهای اقلیمی برای سری‌های زمانی فصلی و سالانه در ایستگاه‌های هواشناسی



ادامه شکل (۳).

نتایج تحلیل حساسیت فصلی در ایستگاه‌ها نیز نشان داد که میانگین ضریب حساسیت ET_0 نسبت به T_{max} در تابستان بیش‌ترین مقدار (۰/۵۱) و در زمستان کمترین مقدار (۰/۲۶) است و حاکی از تاثیر مثبت دما در فصول گرم‌تر می‌باشد. همین شرایط برای پارامترهای SH و T_{min} وجود داشت. برعکس آن، مقادیر میانگین ضریب حساسیت به RH_{min} و RH_{max} به ترتیب در زمستان (۰/۵۵) و پاییز (۰/۴۶) بیش‌ترین و در تابستان کمترین (۰/۱۸) بود. بیش‌ترین حساسیت به U در فصل پاییز (۰/۲۹) و کمترین آن در بهار (۰/۱۷) بود. قدر مطلق ضریب حساسیت پارامترهای اقلیمی به جز SH در اکثر فصل‌های ایستگاه‌های ناحیه گرم بیش‌تر از نواحی معتدل و سرد بود و از این نظر شبیه به رفتار ضرایب حساسیت سالانه بود. مشابه این نتایج تحلیل حساسیت در مطالعات قبلی نیز گزارش شده است (Irmak et al., 2006; Nouri et al., 2017; Monteith & Unsworth, 2013). نتایج مروج الاحکامی و همکاران (۱۴۰۱) در بررسی ضریب حساسیت ET_0 در استان یزد نیز نشان داد که در هر سه مقیاس سالانه، فصلی و ماهانه به ترتیب پارامترهای U ، T_{max} و SH به‌عنوان موثرترین پارامترها بر ET_0 بودند و RH_{min} و RH_{max} کم‌ترین تأثیر را در تغییرات ET_0 داشتند. نتایج بدست آمده از بخش تحلیل حساسیت نشان می‌دهند که، در تابستان حساسیت ET_0 به پارامترهای دمای هوا و ساعت آفتابی بیش‌تر از سایر پارامترها بوده است و بر عکس آن در زمستان و پاییز حساسیت بیش‌تری به رطوبت نسبی داشته است. شدت این حساسیت در ایستگاه‌های ناحیه گرم شامل پارس‌آباد، گرمی و بيله‌سوار بیش‌تر بوده است. ادامه روند افزایشی T_{max} ، U ، T_{min} در کنار ضریب حساسیت مثبت آن‌ها و روند کاهشی RH_{min} ، RH_{max} با ضریب حساسیت منفی، به خصوص در دو فصل بهار و تابستان، می‌تواند موجب افزایش ET_0 در نواحی گرم شود و در نهایت تامین آب برای کشت تابستانه در این نواحی را بسیار سخت خواهد کرد.

از طرف دیگر، روند کاهشی SH با ضریب حساسیت مثبت در اکثر فصل‌ها، می‌تواند عامل اصلی کاهش ETo باشد. بنابراین، برای اینکه سهم هر کدام از این پارامترها در افزایش و کاهش ETo مشخص شود باید نرخ مشارکت آن‌ها در تغییرات ETo نیز بررسی شود. این نتایج، اهمیت تحلیل حساسیت را در بررسی روند تغییرات ETo نشان می‌دهد. همچنین مشخص می‌کند خطای اندازه‌گیری کدام پارامتر اقلیمی می‌تواند تاثیر بیش‌تری در برآورد ETo داشته باشد.

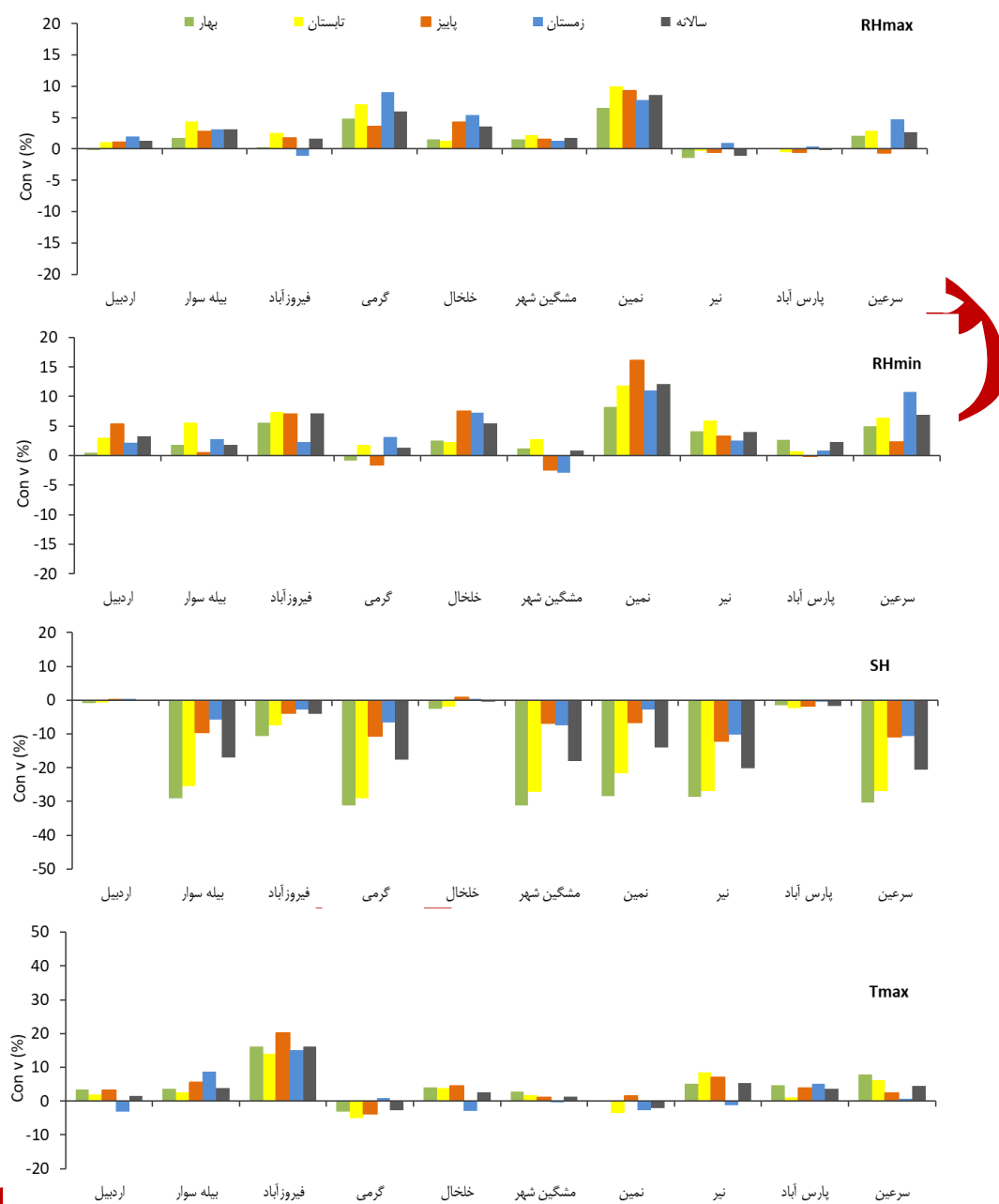
نرخ مشارکت پارامترهای اقلیمی

به منظور تعیین سهم هر متغیر اقلیمی در تغییرات ETo با استفاده از ضریب حساسیت (یا همان Sv در رابطه ۶) و نرخ تغییر نسبی (یا RCv در رابطه ۷) میزان نرخ مشارکت (یا همان Conv در رابطه ۸) بر اساس روند تغییرات محاسبه شد. طبق این روابط، افزایش و کاهش نرخ مشارکت هر پارامتر در یک سری زمانی خاص، به مقدار و جهت تغییرات ضریب حساسیت و نرخ تغییرات نسبی آن پارامتر در آن سری زمانی بستگی دارد. به همین دلیل ممکن است نتایج در ایستگاه‌ها با هم اختلاف قابل توجهی داشته باشند. میانگین سالانه نرخ مشارکت پارامترهای اقلیمی ایستگاه‌ها در جدول (۳) نشان داده شده و مشخص است که SH به میزان ۱۱/۳۹- درصد بیش‌ترین سهم را در کاهش ETo دارد. این مقادیر از ۲۰/۵۴- درصد در سرعین تا ۰/۱۸- درصد در اردبیل متغیر است و تاثیر کاهشی بر ETo در همه ایستگاه‌ها داشته است. در مقابل، U با ۱۲/۲۱ درصد بیش‌ترین سهم را در تغییرات مثبت ETo دارد. این مقادیر از ۳۱/۵۱ درصد در نیر تا ۰/۲۱- درصد در خلخال متغیر است و به جز خلخال، بر ETo سایر ایستگاه‌ها تاثیر افزایشی داشته است. میانگین سالانه نرخ مشارکت پارامترهای RHmax و RHmin به ترتیب برابر ۲/۷۲ و ۴/۵۳ درصد بود. مقادیر RHmax از ۸/۵۸ درصد در نمین تا ۱/۱۰- درصد در نیر متغیر بود و به جز پارس‌آباد و نیر در افزایش ETo سایر ایستگاه‌ها سهم داشته است. RHmin نیز از ۱۲/۰۸ درصد در نمین تا ۰/۹۱ درصد در مشگین‌شهر متغیر بود و در همه ایستگاه‌ها سهم مثبتی بر ETo داشته است. همچنین، میانگین سالانه نرخ مشارکت پارامترهای Tmax و Tmin به ترتیب برابر ۳/۴۱ و ۰/۹۶ درصد بود. مقادیر Tmax از ۱۶/۱۸ درصد در فیروزآباد تا ۲/۶۵- درصد در گرمی متغیر بود و به جز گرمی و نمین در افزایش ETo سایر ایستگاه‌ها سهم داشته است. مقادیر Tmin نیز از ۱/۵۱ تا ۰/۲۵ درصد متغیر بود و در همه ایستگاه‌ها سهم مثبتی، هرچند بسیار کم، بر ETo داشته است. این نتایج نشان می‌دهد که SH و U بیش‌ترین سهم را به ترتیب در کاهش و افزایش ETo داشته است و سایر پارامترها در اکثر ایستگاه‌ها سهم افزایشی بر روی ETo داشته‌اند. به عبارت دیگر، کاهش SH و افزایش U در ایستگاه‌های استان اردبیل به ترتیب عامل اصلی کاهش و افزایش ETo بوده است. بعد از U پارامترهای RHmin و Tmax بیش‌ترین سهم را در افزایش ETo سالانه داشتند. بنابراین، اقداماتی نظیر احداث بادشکرها، اطراف مزارع و باغات می‌تواند در کاهش ETo تاثیر داشته باشد. همان‌طور که در بخش‌های قبل نیز اشاره شد، در اینجایز مشخص است که روند کاهشی SH در استان اردبیل مانع اصلی افزایش بیش از حد ETo در اکثر ایستگاه‌های این استان بوده است.

جدول (۳). میانگین سالانه درصد نرخ مشارکت پارامترهای اقلیمی در تغییرات ETo

ایستگاه	U	Tmin	Tmax	SH	RHmin	RHmax
پارس آباد	۰/۱۶	۰/۴۰	۳/۶۰	-۱/۷۴	۲/۳۱	-۰/۲۳
گرمی	۱۳/۸۴	۰/۶۳	-۲/۶۵	-۱۷/۶۲	۱/۳۸	۵/۹۹
بيله سوار	۱۴/۷۹	۰/۸۰	۳/۷۷	-۱۷/۰۹	۱/۸۶	۳/۱۲
اردبیل	۳/۳۹	۱/۱۳	۱/۶۰	-۰/۱۸	۳/۲۲	۱/۲۹
نمین	۲۸/۰۸	۱/۵۱	-۱/۹۹	-۱۳/۹۴	۱۲/۰۸	۸/۵۸
فیروزآباد	۱۷/۱۱	۱/۳۷	۱۶/۱۸	-۴/۱۵	۷/۱۷	۱/۶۰
نیر	۳۱/۵۱	۰/۲۵	۵/۳۳	-۲۰/۱۵	۴/۰۰	-۱/۱۰
سرعین	۱۳/۱۵	۱/۱۵	۴/۴۴	-۲۰/۵۴	۶/۹۵	۲/۶۶
خلخال	-۰/۲۱	۱/۰۰	۲/۴۷	-۰/۵۲	۵/۴۲	۳/۵۸
مشگین شهر	۰/۲۶	۱/۳۵	۱/۳۷	-۱۷/۹۹	۰/۹۱	۱/۷۴

شکل (۴) نرخ مشارکت پارامترهای اقلیمی را در ایستگاه‌های هواشناسی برای سری‌های زمانی فصلی نشان می‌دهد. در مقیاس فصلی بیش‌ترین سهم پارامتر U در افزایش ETo ایستگاه‌های بيله سوار، فیروزآباد، گرمی، خلخال و نمین در فصل تابستان و برای ایستگاه‌های نیر، مشگین‌شهر، اردبیل، پارس‌آباد و سرعین در فصل زمستان بوده است و دلیل آن بیش‌تر بودن ضریب حساسیت و نرخ تغییرات U در هر دو فصل نسبت به دیگر فصول در ایستگاه‌ها بوده است. بیش‌ترین سهم پارامتر SH در کاهش ETo کلیه ایستگاه‌ها در فصل بهار و سپس تابستان اتفاق افتاده است و این یک عامل باردارنده در افزایش بیش از حد روند ETo در این دو فصل بوده است. با این وجود، روند ETo سالانه در بیش‌تر ایستگاه‌ها افزایشی بوده است. همچنین، بیش‌ترین سهم پارامتر RHmax در افزایش ETo ایستگاه‌های بيله سوار، فیروزآباد، مشگین‌شهر و نمین در فصل تابستان و برای ایستگاه‌های نیر، گرمی، اردبیل، پارس‌آباد، خلخال و سرعین در فصل زمستان بوده است. در بخش قبلی توضیح داده شد که RHmax در فصل تابستان روند کاهشی بیش‌تری نسبت به سایر فصل‌ها داشته است و در فصل زمستان قدر مطلق ضریب حساسیت بیش‌تری (منفی تر) نسبت به سایر فصل‌ها دارد. در ایستگاه‌های بيله سوار، فیروزآباد، مشگین‌شهر و نمین شیب روند کاهشی در فصل تابستان و در ایستگاه‌های نیر، گرمی، اردبیل، پارس‌آباد، خلخال و سرعین ضریب حساسیت منفی‌تر در فصل زمستان باعث شده است تا RHmax در این فصول سهم بیش‌تری در افزایش ETo داشته باشد. علاوه بر این، همان‌طور که در شکل (۴) مشخص است، پارامتر Tmin با توجه به ضرایب حساسیت و مقدار روند تغییراتش، سهم کمتری در افزایش ETo داشته است. بیش‌ترین افزایش در ایستگاه‌های اردبیل، فیروزآباد، پارس‌آباد، خلخال و نمین در فصل پاییز و برای ایستگاه‌های نیر، مشگین‌شهر، بيله سوار، گرمی و سرعین در فصل زمستان داشته است. بیش‌ترین سهم RHmin و Tmax در افزایش ETo ایستگاه‌ها در هر چهار فصل اتفاق افتاده است.



شکل ۴. نرخ مشارکت پارامترهای اقلیمی در تغییرات ETo برای سری‌های زمانی فصلی و سالانه در ایستگاه‌های هواشناسی



ادامه شکل (۴).

در مجموع، یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که تحلیل نرخ مشارکت در ایستگاه‌های مختلف جزئیات ارزشمندی را در مورد پاسخ ET_0 به روند پارامترهای اقلیمی آشکار می‌کند. همچنین، ضرایب حساسیت ET_0 به پارامترهای اقلیمی و نرخ تغییرات این پارامترها متأثر از تغییرات زمانی و مکانی است و بنابراین آگاهی از آن برای تحلیل تغییرات روند ET_0 ضروری است. علاوه بر مطالعه حاضر، تغییرات ضرایب حساسیت نسبت به زمان و مکان‌های مختلف در سایر مطالعات نیز گزارش شده است. یافته‌های (Nouri et al., 2017) نشان می‌دهد زمانی که RH بیش‌ترین ضرایب حساسیت را در مناطق ساحلی داشته است، U در ایستگاه‌های شرقی و SH در ایستگاه‌های مرکزی ایران بیش‌ترین ضریب حساسیت را به خود اختصاص داده بودند. در حالی که مروج الاحکامی و همکاران (۱۴۰۱) نشان دادند که ET_0 سالانه در اکثر ایستگاه‌های یزد بیش‌ترین حساسیت را به تغییرات U و Tmax داشته است. این ضرایب در فصل‌ها و ماه‌های مختلف با یکدیگر فرق می‌کند که نشان‌دهنده تاثیرگذاری بیش‌تر هر پارامتر در آن سری زمانی است. در نتیجه همین تغییرات S_v و RC_v است که نرخ مشارکت پارامترها در تغییر ET_0 ایستگاه‌های مختلف برای سری‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه متفاوت خواهد بود. برای مثال در این مطالعه، ضریب حساسیت به U و SH نسبت به Tmax، RHmax و RHmin کمتر بود در حالی که سهم مشارکت آن‌ها در به ترتیب افزایش و کاهش ET_0 نسبت به سایر پارامترهای بیش‌تر بود. دلیل آن این است که شیب روند تغییرات U و SH نسبت به سایر پارامترها بیش‌تر بوده است.

این یافته‌ها همچنین نشان می‌دهند که نتایج تحلیل فصلی پارامترها جزئیات دقیق‌تری از روند تغییرات ET_0 و نرخ مشارکت پارامترها نشان می‌دهد. برای مثال، در فصل بهار ایستگاه گرمی روند کاهشی داشته است که با بررسی میزان روند پارامترهای اقلیمی مشخص می‌شود روند کاهش SH در فصل بهار ایستگاه گرمی سهم بیش‌تری در این کاهش داشته است به طوری که بر سهم افزایشی U چیره شده است. مشابه همین در فصل تابستان مشگین‌شهر رخ داده است. سهم U نیز در کاهش ET_0 فصل پاییز در ایستگاه خلخال نسبت به سایر پارامترها بیش‌تر بوده که در نهایت منجر به کاهش آن شده است. از طرف دیگر، بیش‌ترین روند افزایشی ET_0 در بین

ایستگاه‌ها مربوط به فصل تابستان فیروزآباد بود که نتایج تحلیل فصلی نرخ مشارکت پارامترها نشان می‌دهد U و T_{max} به ترتیب بیش‌ترین سهم را در این تغییرات داشته‌اند.

نتایج این مطالعه حاکی از آن هست که در اثر تغییرات اقلیمی، روند ET_0 در اکثر مناطق استان اردبیل افزایشی بوده است که ضرورت دارد مطابق با زمان و مکان و دلیل این افزایش، تصمیم‌های مناسب برای بهبود مدیریت منابع آب اتخاذ شود. بدین ترتیب اهمیت تحلیل کمی اثر تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای اقلیمی بر ET_0 در مدیریت منابع آب کشاورزی نمایان می‌شود. اگرچه بررسی تغییرات روند پارامترهای اقلیمی در مقیاس‌های بزرگتر از اهمیت بالایی برخوردار است اما تدقیق آنها در سطح حوضه‌ای و استانی نیز ضروری به نظر می‌رسد. با این وجود، مطالعات مشابه در سطح منطقه‌ای یا حوضه‌های درجه یک پیشنهاد می‌شود. بررسی روند به همراه تحلیل حساسیت و نرخ مشارکت پارامترهای اقلیمی تصویر دقیق‌تری از تغییرات ET_0 در هر منطقه و دلایل اصلی بروز آن ایجاد خواهد کرد که در مدیریت کارآمدتر منابع آب کشاورزی موثر خواهد بود.

نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه کمی‌سازی اثر تغییر پارامترهای اقلیمی بر روی ET_0 در استان اردبیل بود. برای این منظور از سری زمانی ماهانه، فصلی و سالانه ET_0 و پارامترهای اقلیمی شامل T_{min} ، T_{max} ، U ، SH ، RH_{min} و RH_{max} در ۱۰ ایستگاه سینوپتیک استان استفاده شد. از حاصل ضرب نرخ تغییرات این پارامترها در ضریب حساسیت نسبی، نرخ مشارکت هر پارامترها در تغییرات ET_0 محاسبه شد. روندیابی سری‌های زمانی با روش‌های من‌کدال اصلاح شده و تخمین‌گر شیب سن انجام شد. نتایج روندیابی حاکی از افزایش تغییرات ET_0 سالانه در اکثر ایستگاه‌های استان اردبیل بود که با روند گزارش شده در سایر استان‌های غربی کشور مطابقت داشت. این تغییرات در اکثر ایستگاه‌ها طی فصول تابستان، پاییز و زمستان رخ داده است. در اکثر ایستگاه‌ها تغییرات فصلی و سالانه T_{min} ، T_{max} و U افزایشی و RH_{min} ، RH_{max} و SH کاهشی بود. این نتایج نشان می‌دهند که افزایش روند دما و سرعت باد و کاهش رطوبت نسبی موجب افزایش ET_0 شده و در سمت مقابل، کاهش SH به عنوان یک عامل بازدارنده موجب تعدیل رشد بیش از حد ET_0 بوده است. این نوسانات که در اثر پدیده تغییر اقلیم ایجاد شده است در نهایت منجر به افزایش نیاز آبی گیاهان الگوی کشت در اکثر نقاط استان به خصوص در فصول تابستان و پاییز و زمستان می‌شود. نتایج تحلیل حساسیت نیز نشان داد که برای اکثر پارامترهای اقلیمی قدر مطلق ضرایب حساسیت به ترتیب در نواحی گرم، معتدل و سرد بیش‌تر بود. بیش‌ترین قدر مطلق ضریب حساسیت مربوط به T_{max} و بعد از آن به ترتیب پارامترهای RH_{min} ، RH_{max} ، U ، SH و T_{min} در رتبه بعدی قرار داشتند. حساسیت ET_0 نسبت به تغییرات T_{max} و SH در تابستان و RH_{min} و RH_{max} در زمستان و پاییز بیش‌تر بود و تاثیر آن در ایستگاه‌های ناحیه گرم شامل پارس‌آباد، گرمی و بیله‌سوار شدیدتر بود. روند افزایشی و ضریب حساسیت مثبت T_{max} ، U ، T_{min} توأمان با روند کاهشی و ضریب حساسیت منفی RH_{min} ، RH_{max} به خصوص در دو فصل بهار و تابستان، می‌تواند باعث افزایش نیاز آبی در نواحی گرم شود. در حالی که، روند کاهشی و ضریب حساسیت مثبت SH در اکثر فصل‌ها، موجب تعدیل ET_0 می‌شود. نتایج بررسی نرخ مشارکت نیز نشان داد که، کاهش SH و افزایش U در ایستگاه‌های استان اردبیل به ترتیب عامل اصلی کاهش و افزایش ET_0 بوده است و در ادامه پارامترهای RH_{min} ، T_{max} ، RH_{max} و T_{min} به ترتیب بیش‌ترین سهم را در افزایش ET_0 سالانه داشته‌اند. دلایل تغییرات روند ET_0 در ایستگاه‌ها با استفاده از تحلیل حساسیت، نرخ تغییرات و در نهایت نرخ مشارکت پارامترهای اقلیمی در سری‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه آشکار می‌شود. بدین ترتیب، تحلیل کمی پارامترهای اقلیمی نقش و سهم هر متغیر را در نوسانات ET_0 مناطق مختلف مشخص می‌کند. از این رو، می‌توان تصمیم‌های بهتری برای مدیریت کشاورزی و منابع آب موجود اتخاذ کرد. برای مثال، اقداماتی نظیر احداث بادشکن‌های اطراف مزارع و باغات می‌تواند در کاهش تاثیر U در افزایش ET_0 موثر باشد. این یافته‌ها همچنین نشان می‌دهند که نتایج تحلیل فصلی پارامترها جزئیات دقیق‌تری از روند تغییرات ET_0 و نرخ مشارکت پارامترها نشان می‌دهد.

- جهانبخش اصل، سعید، دین پژوه، یعقوب، و آزاده قره باغ، اسما. (۱۴۰۳). بررسی اثر نسبی متغیرهای هواشناسی بر تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع در نواحی البرز جنوبی. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۱۱ (۲): ۸۳-۹۹
- جهانبخش اصل، سعید، خورشید دوست، علی محمد، میرهاشمی، حمید، خرمی، حسین، حاجلو، هایل، و تدینی، معصومه. (۱۳۹۳). روندیابی تغییرات نیاز آبی گیاه مرجع و متغیرهای هواشناختی مرتبط با آن در آذربایجان شرقی، آب و خاک، ۲۸ (۲): ۲۹۶-۳۰۶.
- سیمای کشاورزی استان اردبیل. (۱۴۰۳). بخش آمار و فناوری، معاونت برنامه ریزی و امور اقتصادی، سازمان جهاد کشاورزی استان اردبیل، دسترسی: <https://araj.ir/Portals/0/simaye%20ostan%201402%20ardabil.pdf>
- دین پژوه، یعقوب، فروغی، معصومه. (۱۳۹۷). اثر تغییر اقلیم بر تغییرات جهشی تبخیر-تعرق پتانسیل (مطالعه موردی: شمال غرب ایران)، آب و خاک، ۳۲ (۳): ۶۱۷-۶۳۲.
- رهایی، محمد صادق. (۱۴۰۲). بررسی جامع گزارش ششم تغییر اقلیم و ترسیم مسیرهای مدل سازی شده برای محدود کردن گرمایش جهانی، تاغ، ۴ (۹): ۱۶-۲۵.
- فاضلی خیابوی، عبدالرحیم، صلاحی، برومند، و گودرزی، مسعود. (۱۳۹۹). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل در دشت مغان با سناریوهای RCPs، مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۲ (۴): ۹۹۳-۹۹۷.
- فروتن، مهدی و صلاحی، برومند. (۱۴۰۲). پهنه‌بندی اقلیمی استان اردبیل با استفاده از روش‌های چند متغیره، مطالعات علوم محیط زیست، ۸ (۱): ۶۲۴۷-۶۲۳۸.
- فروغی، معصومه، دین پژوه، یعقوب، جهانبخش اصل، سعید. (۱۳۹۸). اثر تغییر اقلیم بر روند تغییرات تبخیر-تعرق گیاه مرجع در منطقه غرب ایران. پژوهش‌های اقلیم شناسی. (۳۷): ۲۱-۳۷.
- مروج الاحکامی، بیتا، ابراهیمی پاک، نیاز علی، تافه، آرمن و حسینی، سیدنگرس. (۱۴۰۱). تحلیل حساسیت تبخیر-تعرق مرجع به پارامترهای هواشناسی (مطالعه موردی: ایستگاه‌های سینوپتیک استان یزد). تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۲): ۲۸۷-۳۰۳. doi: 10.22059/ijswr.2022.338161.669199
- موسسه تحقیقات خاک و آب (۱۴۰۲). سامانه نیاز آب گیاهان. دسترسی: <http://niwr.ir/Login.aspx>
- نوروز ولاشیدی، رضا و برارخانپور احمدی، صدیقه. (۱۴۰۲). تحلیل پهنه‌بندی روند تغییرات و آشکارسازی نقطه‌ی شکست سری زمانی تبخیر-تعرق ماهانه در مازندران. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۴ (۱): ۱۵-۳۱. doi: 10.22059/ijswr.2023.346636.669382
- Agricultural landscape of Ardabil province. (2024). Statistics and Technology Department - Deputy for Planning and Economic Affairs – Agricultural-Jahad Organization of Ardabil Province. available at: <https://araj.ir/Portals/0/simaye%20ostan%201402%20ardabil.pdf>. (In Persian)
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 56, Rome, Italy.
- Aschale, T.M., Peres, D.J., Gullotta, A., Sciuto, G. and Cancelliere, A. (2023). Trend analysis and identification of the meteorological factors influencing reference evapotranspiration. *Water*, 15(3), p.470.
- Chu, R., Li, M., Shen, S., Islam, A.R.M.T., Cao, W., Tao, S. and Gao, P., (2017). Changes in reference evapotranspiration and its contributing factors in Jiangsu, a major economic and agricultural province of eastern China. *Water*, 9(7), p.486.
- Dinpazhoh, Y. and Foroughi, M. (2018). Impact of Climate Change on Sudden Changes in Potential Evapotranspiration Time Series (Case Study: NW of Iran). *Journal of Water and Soil*, 32(3), pp. 617–632. doi: 10.22067/jsw.v32i3.71351 (In Persian).
- Dodgshun, J. (2017). The stilling: global wind speeds slowing since 1960. *HORIZON: the EU Research & Innovation magazine*. <https://doi.org/https://phys.org/news/2017-10-stilling-global.html>
- Fan, J., Wu, L., Zhang, F., Xiang, Y., Zheng, J. (2016). Climate change effects on reference crop evapotranspiration across different climatic zones of China during 1956–2015. *Journal of Hydrology*. 542, 923–937. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.060>.
- Fazeli khiavi, A., Salahi, B., Goodarzi, M. (2020). 'Assessment effects of climate change on changes in potential evapotranspiration in the Moghan Plain by RCPs', *Watershed Engineering and Management*, 12(4), pp. 977-993.. doi: 10.22092/ijwmse.2019.126245.1649. (In Persian)

- Foroughi, M., Dinpashoh, Y., Jahanbakhsh Asl, S. (2020). 'Impact of Climate Change on Reference Crop Evapotranspiration Trends in the west rejoin of Iran.', *Journal of Climate Research*, 1398(37), pp. 21-37. (In Persian).
- Frotan, M., Salahi, B. (2023). 'Climatic zoning of Ardabil province using multivariate methods', *Journal of Environmental Science Studies*, 8(1), pp. 6238-6247. doi: 10.22034/jess.2022.369206.1903. (In Persian)
- Fu, G., Charles, S.P., Yu, J. (2009). A critical overview of pan evaporation trends over the last 50 years. *Climatic Change* 97, 193. doi:10.1007/s10584-009-9579-1.
- Gao Z, He J, Dong K, Bian X, Li X .(2016). Sensitivity study of reference crop evapotranspiration during growing season in the West Liao River basin, China. *Theoretical and Applied Climatology* 124:865–881
- Hamed, K.H., and Rao A.R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*. 204: 182-196.
- Irmak, S., Payero, J.O., Martin, D. L., Irmak, A., Howell, T.A. (2006). Sensitivity analyses and sensitivity coefficients of standardized daily ASCE-Penman-Monteith equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 132:564–578
- Jahanbakhsh, S., Khorshiddoust, A.M., Mirhashemi, H., Khorrami, H., and Tadayoni, M. (2014). Trending Changes of the Reference Crop Water Requirement and its Associated Meteorological Variables in East Azerbaijan. *Journal of Water and Soil*, 28(2):296-306, (In Persian)
- Jahanbakhsh, S., Dinpashoh Y, Azadeh Garebagh A. (2024). Investigation of Relative Importance of meteorological Variables on Potential Reference Crop Evapotranspiration in Southern Alborz Region Introduction. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*; 11 (2) : 5 , URL : <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-3436-en.html> (In Persian).
- Jung, M., et al. (2010). Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature* 467 (7318), 951.
- Kendall, M.G. (1975). Rank Correlation Methods, Charles Griffin, London. 272p.
- Kool, D., Agam, N., Lazarovitch, N., Heitman, J. L., Sauer, T. J., & Ben-Gal, A. (2014). A review of approaches for evapotranspiration partitioning. *Agricultural and forest meteorology*, 184, 56-70.
- Lenhart, T.; Eckhardt, K.; Fohrer, N.; Frede, H.-G. (2002). Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. Physics and Chemistry of the Earth incorporates the separate Parts A/B/C, 27, 645–654.
- Li, C., Wu, P.T., Li, X.L., Zhou, T.W., Sun, S.K., Wang, Y.B., Luan, X.B. and Yu, X. (2017). Spatial and temporal evolution of climatic factors and its impacts on potential evapotranspiration in Loess Plateau of Northern Shaanxi, China. *Science of the Total Environment*, 589, pp.165-172.
- Liu, T., Li, L., Lai, J., Liu, C., & Zhuang, W. (2016). Reference evapotranspiration change and its sensitivity to climate variables in southwest China. *Theoretical and applied climatology*, 125(3), 499-508.
- Mann H.B. (1945). Non-parametric tests against trend. *Econometrica*. 13: (3). 245-259.
- Monteith, J., Unsworth, M. (2013). Principles of environmental physics: plants, animals, and the atmosphere (Fourth Edition). Academic Press, Boston
- Mosaedi A, Sough MG, Sadeghi S-H, Mooshakhian Y, Bannayan M .(2016). Sensitivity analysis of monthly reference crop evapotranspiration trends in Iran: a qualitative approach. *Theoretical and Applied Climatology*:1-17. doi:10.1007/s00704-016-1740-y
- Moravejalahkami, B., Ebrahimipak, N., Tafteh, A., & Hosseini, S. N. (2022). Sensitivity Analysis of Reference Evapotranspiration to Meteorological Parameters (Case Study: Synoptic Stations of Yazd Province). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(2), 287-303. (In Persian).
- Nahar Jerin, J., Toulhidul Islam, H. M., Towfiqul Islam, A. R., Shahid, S., Hu, Z., Abbasi Badhan, M., Chu, R. & Elbeltagi, A. (2021). Spatiotemporal trends in reference evapotranspiration and its driving factors in Bangladesh. *Theoretical and Applied Climatology*, 144:793–808. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03566-4>
- Norooz Valashedi, R. and Bararkhanpour-Ahmadi, S. (2023). Spatial Analysis of Changes and Detection of Jump of Monthly Evapotranspiration Time Series in Mazandaran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(1), 15-31. doi: 10.22059/ijswr.2023.346636.669332. (In Persian).
- Nouri, M., Homaei, M. and Bannayan, M., (2017). Quantitative trend, sensitivity and contribution analyses of reference evapotranspiration in some arid environments under climate change. *Water resources management*, 31(7), pp.2207-2224.
- Pan, Q., Shikano, I., Hoover, K., Liu, T.-X., Felton, G.W., (2019). Enterobacter ludwigii, isolated from the gut microbiota of Helicoverpa zea, promotes tomato plant growth and yield without compromising anti-herbivore defenses. *Arthropod-Plant Interactions*. 13, 271–278. doi:10.1007/s11829-018-9634-9.

- Patle, G. T., Sengdo, D., & Tapak, M. (2020). Trends in major climatic parameters and sensitivity of evapotranspiration to climatic parameters in the eastern Himalayan region of Sikkim, India. *Journal of Water and Climate Change*, 11(2), 491-502.
- Pour, S.H., Wahab, A.K.A., Shahid, S. (2020). Spatiotemporal changes in aridity and the shift of drylands in Iran. *Atmospheric Research*. 233, 104704. <https://doi.org/doi:10.1016/j.atmosres.2019.104704>.
- Praveen B, Talukdar S, Shahfahad et al .(2020). Analyzing trend and forecasting of rainfall changes in India using non-parametrical and machine learning approaches. *Scientific Reports* 10:10342.
- Rohbani, M. S. (2024). 'A comprehensive review of the Sixth Climate Change Report and mapping of modeled pathways to limit global warming', *Tagh scientific-Extensional Journal*, 4(9), pp. 16-25. (In Persian).
- Roudier, P., Ducharne, A., Feyen, L. (2014). Climate change impacts on runoff in West Africa: a review. *Hydrology and Earth System Sciences*. 18, 2789–2801.
- Saxton, K.E.J.A.M. (1975). Sensitivity analyses of the combination evapotranspiration equation. *Agricultural Meteorology*, 15 (3), 343–353. doi:10.1016/0002-1571(75)90031-X
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficients based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379-1389.
- Sharifi A, Dinpashoh Y (2014) Sensitivity analysis of the Penman-Monteith reference crop evapotranspiration to climatic variables in Iran. *Water Resources Management* 28:5465–5476. doi:10.1007/s11269-014-0813-x
- She, D., Xia, J., and Zhang, Y.(2017). Changes in reference evapotranspiration and its driving factors in the middle reaches of Yellow River Basin, China. *Science of the Total Environment*, 607–608, 1151–1162. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.07.007
- Soil and Water Research Institute. (2023). Water Requirement System of Plants, available at: <http://niwr.ir/Login.aspx>. (In Persian).
- Some'e B.S., Ezani ,A. & Tabari, H. (2012) Spatiotemporal trends and change point of precipitation in Iran. *Atmospheric Research* .113:1–12
- Tabari, H., Marofi, S., Amini, A., Talaei, P.H. and Mohammadi K. (2011). Trend analysis of reference evapotranspiration in the western half of Iran. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(2), pp. 128–136. doi: 10.1016/j.agrformet.2010.09.009.
- Tabari, H., Talaei, P.H. (2011). Analysis of trends in temperature data in arid and semi-arid regions of Iran. *Global and Planetary Change* 79:1–10
- Yin, Y., Wu, S., Chen, G., & Dai, E. (2010). Attribution analyses of potential evapotranspiration changes in China since the 1960s. *Theoretical and applied climatology*, 101(1), 19-28..
- Zhang, T., Chen, Y. and Paw U, K.T. (2019). Quantifying the impact of climate variables on reference evapotranspiration in Pearl River Basin, China. *Hydrological Sciences Journal*, 64(16), pp.1944-1956.
- Zhang, X., Kang, S., Zhang, L. and Li, J. (2010). Spatial variation of climatology monthly crop reference evapotranspiration and sensitivity coefficients in Shiyang river basin of northwest China. *Agriculture Water Management*, 97, 1506-1516.