



Quantitative Assessment of Climatic Drivers Affecting Reference Evapotranspiration in Ardabil Province

Arash Ranjbar¹ , Niazali Ebrahimipak² 

1. Corresponding Author, Soil and water Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ardabil, Iran, Email: Arashranjbar@ut.ac.ir

2. Department of irrigation and soil physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran, Email: nebrahimipak@yahoo.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: June. 22, 2025

Revised: July. 30, 2025

Accepted: Aug. 14, 2025

Published online: Oct. 2025

Keywords:

Time series,

Trend analysis,

Sensitivity analysis,

Contribution rate.

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.

Cite this article: Ranjbar, A., Ebrahimipak, N., (2025) Quantitative Assessment of Climatic Drivers Affecting Reference Evapotranspiration in Ardabil Province, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (8), 2245-2265. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.397468.669965>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.397468.669965>



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, Germei, 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 (RCv) 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 (Conv) of each climatic variable to ET_0 variations was estimated by multiplying S_v by the RCv 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 Germei 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, Germei, 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_0 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_0 .

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_0 variability and its driving forces—crucial for the effective planning and optimization of agricultural water resources.

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.

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

آرش رنجبر^۱، نیازعلی ابراهیمی پاک^۲^۱. نویسنده مسئول، بخش خاک و آب، مرکز تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی و منابع طبیعی اردبیل، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویجکشاورزی، اردبیل، ایران. رایانامه: Arashranjbar@ut.ac.ir^۲. بخش آبیاری و فیزیک خاک، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه:nebrahimipak@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف اصلی از این مطالعه، کمی 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 مانیتث) 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 ۶ 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 ایستگاه ها با سطح اطمینان ۹۰ درصد معنی دار بود که با نتایج سایر مطالعات در استان های 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 معنی دار 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 داشته اند. 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 ایستگاه های استان اردبیل به ترتیب عامل اصلی کاهش و افزایش ETo بوده است. یافته های این مطالعه نشان می دهند که، تفاوت نرخ مشارکت پارامترها در تغییرات ETo هر ایستگاه، ناشی از تغییرات ضریب حساسیت و روند پارامترهای اقلیمی در سری های زمانی مختلف می باشد و آگاهی از این تغییرات در تحلیل روند ETo ضروری است. اگرچه بررسی تغییرات روند پارامترهای اقلیمی در مقیاس های بزرگتر از اهمیت بالایی برخوردار است اما تدقیق آنها در سطح حوضه ای و استانی نیز ضروری می باشد. همچنین، این نتایج اهمیت کمی سازی اثر پارامترهای اقلیمی بر ETo را در مدیریت دقیق تر منابع آب کشاورزی نشان می دهند.
واژه های کلیدی: سری های زمانی، روند تغییرات، تحلیل حساسیت، نرخ مشارکت.	

استناد: رنجبر، آرش، ابراهیمی پاک؛ نیازعلی، (۱۴۰۴) کمی سازی اثر پارامترهای اقلیمی بر تبخیر و تعرق مرجع در استان اردبیل، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۸)،

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران. ۲۲۴۵-۲۲۶۵. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.397468.669965>

© نویسندگان.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.397468.669965>

مقدمه

سهم تبخیر و تعرق (ET) به عنوان 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 مونتیث 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 مدام 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. به خصوص کشوری نظیر ایران که دارای اقلیم نیمه‌خشک تا خشک است و مطالعات انجام شده 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 ولاشدی و برارخانپور (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.

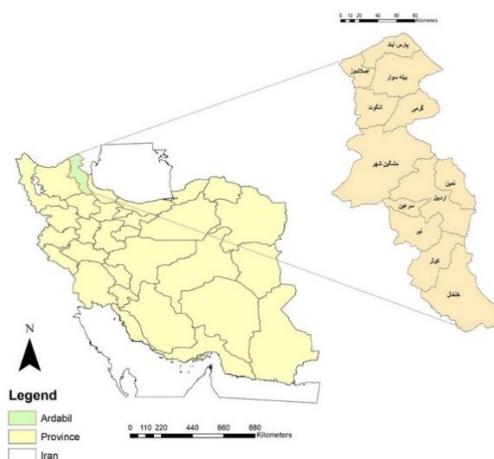
علاوه بر بررسی روند، تحلیل حساسیت برآورد ETO نسبت به پارامترهای اقلیمی نقش مهمی در کمی‌سازی تأثیر متغیرهای اقلیمی بر ETO دارد (Patle et al., 2020). یافته‌های مطالعات تحلیل حساسیت نشان می‌دهند که در مناطق و اقلیم‌های مختلف تأثیر پارامترهای اقلیمی بر روی ETO متفاوت می‌باشند (Gao et al. 2016). در مطالعات محدودی در سطح ایران تحلیل حساسیت ETO با استفاده از روش‌های کیفی (گرافیکی) و کمی (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 کمی ناشی از تغییر هر پارامتر را در روند ETO تعیین کرد و نتایج دقیق‌تری ارائه داد. در مطالعات (Yin et al. (2010، Zhang et al. (2019 و Aschale et al. (2023 از تلفیق نتایج تحلیل حساسیت و شیب روند پارامترهای اقلیمی، تأثیر متغیرهای مختلف اقلیمی بر تغییرات ETO را کمی‌سازی 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 دقیقی‌تری 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.

روش‌شناسی پژوهش

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 شهرستان-های استان اردبیل را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت استان اردبیل و شهرستان‌های آن

داده های اقلیمی

برای برآورد ETo در ایستگاه های 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 ایستگاه های هواشناسی کشور (که توسط سازمان هواشناسی جمع آوری شده است) و بر اساس روش پنمن مونیتینگ ارائه شده در نشریه شماره ۵۶ فائو (Allen et al., 1998) محاسبه می شود. داده های هواشناسی شامل حداقل دما (Tmin)، حداکثر دما (Tmax)، حداقل رطوبت نسبی (RHmin)، حداکثر رطوبت نسبی (RHmax)، سرعت باد (U) و ساعات آفتابی (SH) ایستگاه های هواشناسی سینوپتیک منتخب استان اردبیل بر اساس دوره آماری ۱۳۷۸ تا ۱۴۰۲ بود. ایستگاه های نیر، نمین، فیروزآباد و گرمی در دهه ۸۰ احداث شده اند و از داده های اندازه گیری شده از بدو تاسیس آن ها تا به حال استفاده شده است. شکل و جدول ۱ به ترتیب موقعیت و مشخصات ایستگاه های هواشناسی شهرستان های مورد مطالعه را نشان می دهد. بر اساس روش پنمن مونیتینگ ETo توسط رابطه (۱) برای گیاه مرجع که پوشش چمن فرضی با ارتفاع ۱۲ سانتیمتر و ضریب بازتاب تابش ۲۳ درصد است، برآورد می شود.

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

که در آن، ETo تبخیر و تعرق گیاه مرجع (mm day^{-1})، R_n 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 ایستگاه های هواشناسی سینوپتیک مورد مطالعه استان اردبیل

ایستگاه	دوره آماری	عرض جغرافیایی ($^{\circ}\text{N}$)	طول جغرافیایی ($^{\circ}\text{E}$)	ارتفاع (m)	ناحیه اقلیمی
پارس آباد	۱۳۷۸-۱۴۰۲	۳۹/۶۵	۴۷/۹۲	۷۸	گرم
گرمی	۱۳۸۴-۱۴۰۲	۳۹/۰۵	۴۸/۰۶	۷۴۹	گرم
بیله 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
مشگین شهر	۱۳۷۸-۱۴۰۲	۳۸/۳۸	۴۷/۶۸	۱۵۶۱	سرد

روش های آماری

آزمون تشخیص روند من کندانال

به منظور بررسی روند تغییرات سری های زمانی ETo و پارامترهای هواشناسی ماهانه، فصلی و سالانه در هر ایستگاه از آزمون من کندانال اصلاح شده^۱ (MMK) استفاده شد. این آزمون که نسخه اصلاح شده من کندانال اصلی است (Mann, 1945; Kendall, 1975) توسط Hamed and Rao (1998) جهت بررسی روند سری های زمانی که دارای خودهمبستگی هستند، طراحی گردیده است تا احتمال شناسایی نادرست روند و سطح معنی داری کاهش یابد. در این روش، برای محاسبه خودهمبستگی داده ها واریانس اصلاح شده ($\text{Var}(S)^*$) برای محاسبه آماره های آزمون MK طبق روابط زیر مورد استفاده قرار می گیرد (Praveen et al., 2020).

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

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

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

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 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.

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

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

$$S_v = \frac{\frac{\Delta ET_o}{ET_o}}{\frac{\Delta v}{v}} \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در آن S_v ضریب حساسیت بدون بعد متغیر اقلیمی، ET_o و v به ترتیب مقادیر پایه تبخیر و تعرق مرجع و متغیر اقلیمی هستند، ΔET_o 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 ET_o و سپس ضریب حساسیت نسبی بدون بعد محاسبه شد (Chu et al., 2017). ضریب حساسیت مثبت یا منفی به این معناست که ET_o با افزایش یا کاهش متغیر اقلیمی مورد نظر، به ترتیب افزایش یا کاهش می‌یابد. مقدار این ضریب نشان‌دهنده شدت حساسیت ET_o نسبت به تغییرات آن متغیر است. هرچه قدرمطلق ضریب حساسیت بیش‌تر باشد، تأثیر آن متغیر اقلیمی بر ET_o بیش‌تر خواهد بود. قدرمطلق ضرایب حساسیت بین صفر تا 0.5 حساسیت قابل چشم پوشی، بین 0.5 تا 0.7 حساسیت متوسط، بین 0.7 تا یک حساسیت بالا و بیش‌تر از یک را جزو حساسیت بسیار بالا طبقه بندی می‌کنند (Lenhart et al., 2002).

نرخ مشارکت (Contribution rate)

تحلیل حساسیت، تأثیر عوامل اقلیمی مختلف بر ET_o را نشان می‌دهد. اما برای این که مشخص شود هر پارامتر بر اساس روند تغییرات فصلی و سالانه، چه سهمی در تغییرات ET_o 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 ET_o 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 سال ها در دوره آماری می باشد. مقادیر مثبت Con_v نشان دهنده اثر افزایشی متغیر اقلیمی بر ET_0 است و در مقابل مقدار منفی نشان دهنده اثر کاهشی متغیر اقلیمی بر ET_0 است.

یافته های پژوهشی و بحث

متوسط ET_0 در ایستگاه ها

مقادیر ET_0 و پارامترهای هواشناسی ایستگاه های استان اردبیل در بازه زمانی ۱۳۷۸ تا ۱۴۰۲ بر اساس ماه، فصل و سال در هر ایستگاه طبقه بندی و سری های زمانی مورد استفاده در آزمون های آماری ایجاد شدند. بیشترین مقادیر میانگین ET_0 در طول دوره مورد مطالعه برابر با ۱۱۳۳، ۱۱۹۲ و ۱۰۷۶ میلی متر در سال و به ترتیب متعلق به ایستگاه های فیروزآباد، پارس آباد و بیله سوار بود. در ادامه خلخال، گرمی، اردبیل و نیر به ترتیب با ۱۰۷۵، ۱۰۲۹، ۱۰۲۴ و ۱۰۲۰ میلی متر قرار داشتند. کمترین میانگین سالانه ET_0 برابر با ۹۵۳، ۱۰۰۳ و ۱۰۰۴ میلی متر در سال و به ترتیب متعلق به ایستگاه های سرعین، مشگین شهر و نمین بود. مقادیر ارائه شده با نتایج مطالعه فاضلی خیاوی و همکاران (۱۳۹۹) در ایستگاه پارس آباد، مطابقت دارد. در طول این دوره آماری متوسط ET_0 سالانه در بین ایستگاه های 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 کمترین ها در کنار اردبیل) و متوسط دمای بیشینه ۳۹/۳ درجه سانتی گراد (جزو بیشترین ها در کنار بیله سوار) می باشد. اگر چه فیروزآباد در ناحیه بندی استان در ناحیه سرد واقع شده است اما بین ایستگاه های واقع در این ناحیه کمترین ارتفاع را دارد (۱۱۷۶ متر) و دارای بیشترین اختلاف بین متوسط دمای کمینه و بیشینه ثبت شده در بین ایستگاه های مورد بررسی با ۵۸ درجه سانتی گراد است. از طرف دیگر سرعین و مشگین شهر بیشترین بارش های ثبت شده سالانه را دارند و از مناطق مرتفع در ناحیه سرد استان اردبیل می باشند. بررسی ماهانه و فصلی ET_0 نشان می دهد که در اکثر موارد بیشترین مقدار ET_0 در استان اردبیل در ماه های تیر و مرداد و کمترین آن در ماه های آذر و دی رخ می دهد. علاوه بر این، اختلاف زیادی بین مقادیر بیشترین و کمترین ET_0 در بین مناطق استان وجود دارد که می تواند ناشی از تغییرات شدید پارامترهای اقلیمی در فصل ها و ماه های مختلف می باشد.

روندیابی ET_0 و پارامترهای اقلیمی

نتایج کاربرد آزمون شیب سن و من کندال اصلاح شده با سطوح اطمینان ۹۰، ۹۵ و ۹۹ درصد بر روی سری های زمانی مورد بررسی ET_0 (ماهانه، فصلی و سالانه) در جدول (۲) نشان داده شده است. در کلیه ایستگاه ها علامت آماره های هر دو آزمون یکسان بودند که به این معنی است در هر دو روش روند کاهشی یا افزایشی همسو باهم برآورد شده اند. به ترتیب ۱۲۰، ۴۰ و ۱۰ سری زمانی ماهانه، فصلی و سالانه ET_0 در ۱۰ ایستگاه هواشناسی استان مورد بررسی قرار گرفتند. شکل (۲) نتایج سری زمانی فصلی و سالانه را برای ET_0 و پارامترهای هواشناسی را نمایش می دهد. روند افزایشی ET_0 به ترتیب در ۴۲، ۱۸ و ۶ سری های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه ایستگاه ها معنی دار بود. علاوه بر این، روند کاهشی ET_0 به ترتیب در ۱۰، ۳ و صفر سری زمانی ماهانه، فصلی و سالانه ایستگاه ها معنی دار بود. این نتایج نشان می دهد که روند سالانه ۶۰ درصد ایستگاه های مورد بررسی شامل اردبیل، نمین، پارس آباد، خلخال، نیر و فیروزآباد افزایشی و از لحاظ آماری معنی دار بود و در ۴۰ درصد ایستگاه ها هیچ روند معنی داری مشاهده نشده است. بنابراین، تغییرات ET_0 سالانه در هیچ ایستگاهی با روند کاهشی معنی دار از لحاظ آماری مواجه نبود. روند کاهشی معنی دار فقط در به ترتیب ۸/۳ و ۷/۵ درصد از سری های زمانی ماهانه و فصلی مشاهده شد. شیب تغییرات ET_0 سالانه در ایستگاه های بیله سوار، گرمی، مشگین شهر کاهشی و در سرعین افزایشی بود اما روند این تغییرات در هیچ کدام از سطوح اطمینان مذکور معنی دار نبود. نکته قابل توجه این است که روند افزایش معنی دار در هر سه ناحیه سرد و گرم و معتدل وجود داشته است. در حالی که روند کاهشی معنی دار فقط در سه ایستگاه گرمی (ناحیه گرم)، مشگین شهر و خلخال (ناحیه سرد) مشاهده شد که جزو مناطق مرتفع در نواحی گرم و سرد هستند. تغییرات روند سایر سری های زمانی از نظر آماری معنی دار نبودند. دامنه تغییرات روند ET_0 ماهانه از ۳/۳۱- تا ۴/۳۷، فصلی از ۴/۶۹- تا ۹/۵۹ و سالانه از ۲/۰۵ تا ۱۴/۴۸ میلی متر در سال متغیر بود. حداکثر مقدار روند افزایشی ET_0 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 ET_0 ماهانه و فصلی به ترتیب برابر ۳/۳۱-، ۴/۶۹- میلی متر



در سال و مربوط به خردادماه، فصل بهار و ایستگاه گرمی بود که جزو ناحیه گرم استان می‌باشد.

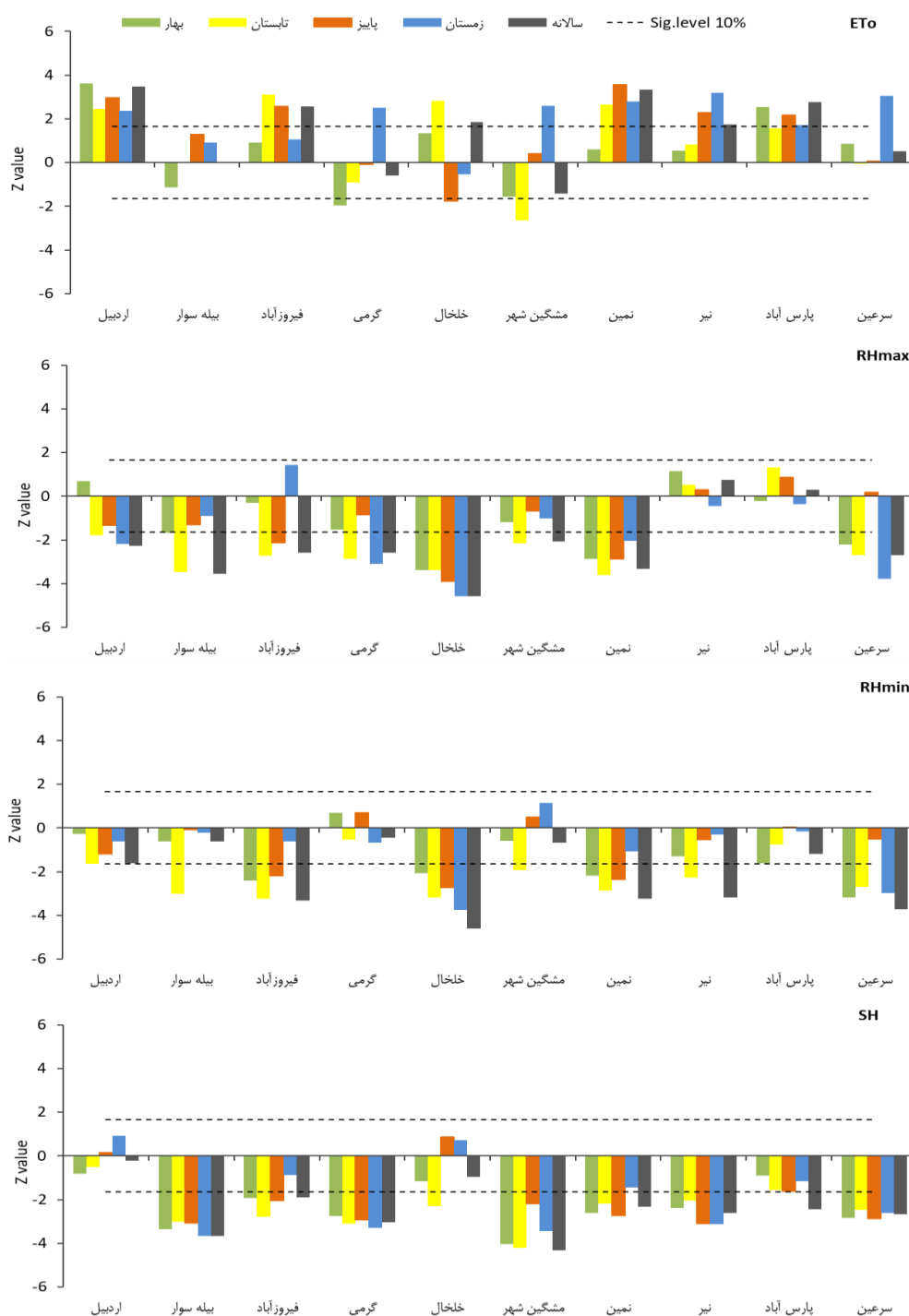
جدول ۲. نتایج آزمون سن برای سری‌های زمانی مورد بررسی. علامت‌های *، ** و *** نشان‌دهنده معنی‌داری آزمون من‌کنندال اصلاح شده به ترتیب با ضرایب اطمینان ۹۰، ۹۵ و ۹۹ درصد است.

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

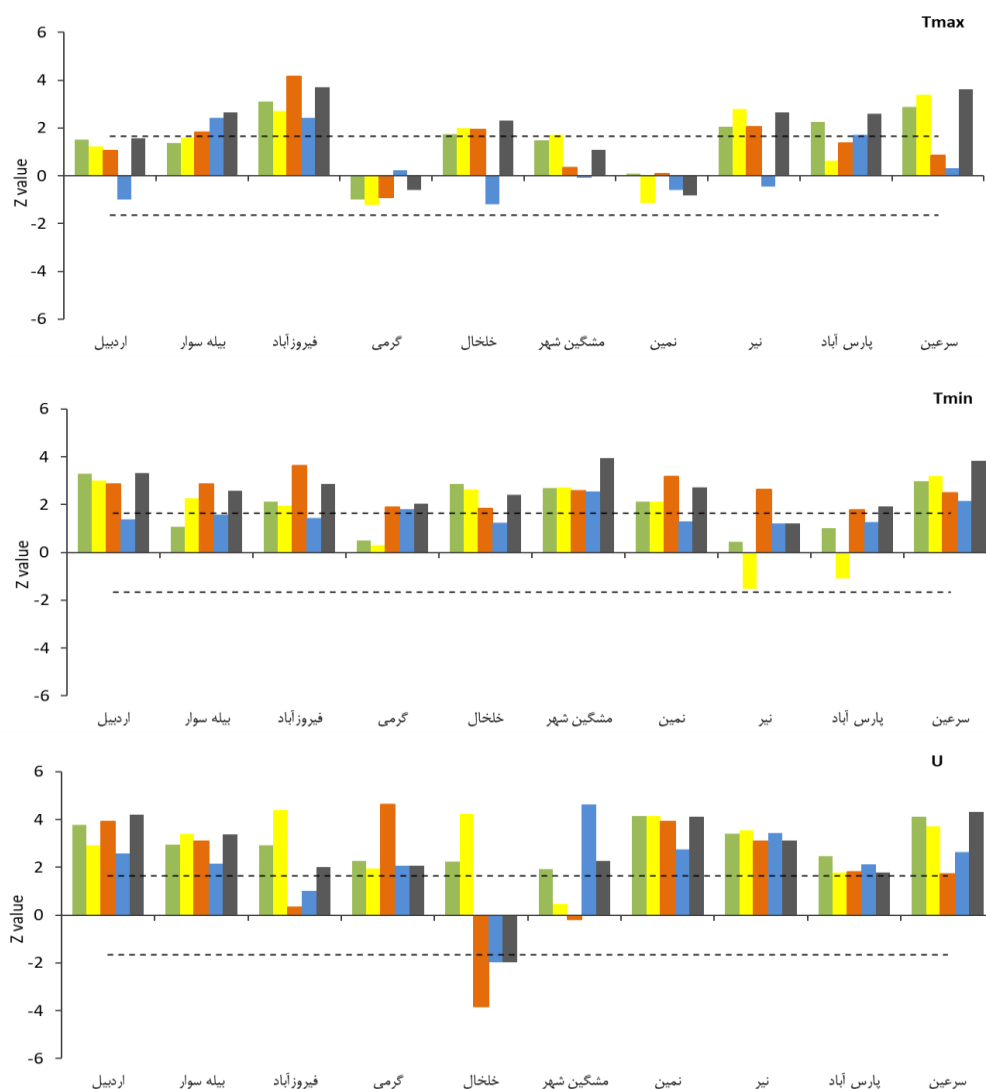
روند افزایشی ETo در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب در دو، چهار، پنج و هفت ایستگاه با سطوح اطمینان مورد بررسی معنی‌دار بود. روند کاهشی ETo در فصل بهار ایستگاه‌های گرمی، فصل تابستان مشگین‌شهر و فصل پاییز خلخال معنی‌دار بود. بنابراین، روند افزایشی ETo در ایستگاه‌های بیش‌تری در سه فصل تابستان، پاییز و زمستان در مقایسه با بهار شناسایی شد. این روند افزایشی در اکثر ایستگاه‌های هر سه ناحیه اقلیمی استان مشاهده می‌شود. همچنین، روند افزایشی و کاهشی ETo ماهانه در جدول (۲) تغییرات ایجاد شده در فصل‌ها را تایید می‌کند. نکته قابل توجهی که در سری‌های زمانی ماهانه و فصلی به چشم می‌خورد 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 می‌شود و نظیر این شرایط در مطالعات دیگر نیز وجود داشته است. دلیل آن تفاوت روند سرعت باد در فصل پاییز برای دو ایستگاه مذکور می‌باشد که در شکل (۲) نمایش داده شده است. سرعت باد در فصل پاییز برای ایستگاه خلخال به طور معنی‌داری کاهش یافته است و همین عامل اصلی کاهش ETo در فصل پاییز این ایستگاه نسبت به ایستگاه مجاورش است. به‌طور کلی، در پارامترهای اقلیمی دو ایستگاه مجاور ممکن است به دلایلی نظیر تشکیل خرد اقلیم‌های 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 ماه‌ها در دو ایستگاه مذکور که علی‌رغم 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 من‌کنندال 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_{min}، RH_{max} 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 معنی‌داری افزایشی بوده است و تنها ایستگاهی که روند سالانه U در آن کاهشی بوده است خلخال می‌باشد. روند تغییرات RH_{min}، RH_{max} 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 می تواند منتج به کاهش ETo شود روند کاهشی SH در اکثر ایستگاهها می باشد. افزایش روند دما از اثرات تغییر اقلیم ناشی از گرمایش جهانی می باشد. در گزارش ششم هیئت بین دولتی تغییرات اقلیمی^۱ (IPCC) نیز به افزایش نسبی دمای سطح زمین در بین سالهای ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ میلادی (مصادف با ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹ شمسی) نسبت به دوره های قبلی و افزایش مخاطرات زیست محیطی ناشی از گرمایش جهانی اشاره شده است (رهبانی، ۱۴۰۲). افزایش سرعت باد سایر نقاط ایران طی دهه های اخیر در مطالعات قبلی نیز گزارش شده است (Nouri et al., 2017). همین افزایش روند دما و سرعت باد می تواند منجر به کاهش رطوبت نسبی شده و در نهایت موجب افزایش ETo گردد.



شکل ۲. مقادیر آماره Z آزمون روندیابی ETo و پارامترهای اقلیمی برای سری های زمانی فصلی و سالانه در ایستگاه های هواشناسی



ادامه شکل (۲).

در مقیاس فصلی نیز، میانگین Tmax 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 Tmin 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 Tmin 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 معنی‌دار 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 معنی‌دار کاهشی بود. علاوه بر این، برای پارامترهای RHmax و RHmin روند کاهشی معنی‌دار 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 Tmax، Tmin و U در استان اردبیل (به استثنای U در خلخال) افزایشی بوده است. در سمت مقابل، تغییرات فصلی و سالانه پارامترهای RHmin، RHmax و SH در استان اردبیل کاهشی بوده است.

در واقع نتایج به دست آمده از بررسی تغییرات سری زمانی ETo و سایر پارامترهای اقلیمی نشان‌دهنده 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 معنی‌دار بود که حدود ۸۰ درصد آن روند افزایشی و ۲۰ درصد آن روند کاهشی داشتند. پیش‌تر نتایج مطالعات Tabari et al. (2011)، فروغی و همکاران (۱۳۹۸) و جهانبخش اصل و همکاران (۱۳۹۳) نشان دادند که روند تغییرات ETo در استان‌های غربی کشور شامل آذربایجان

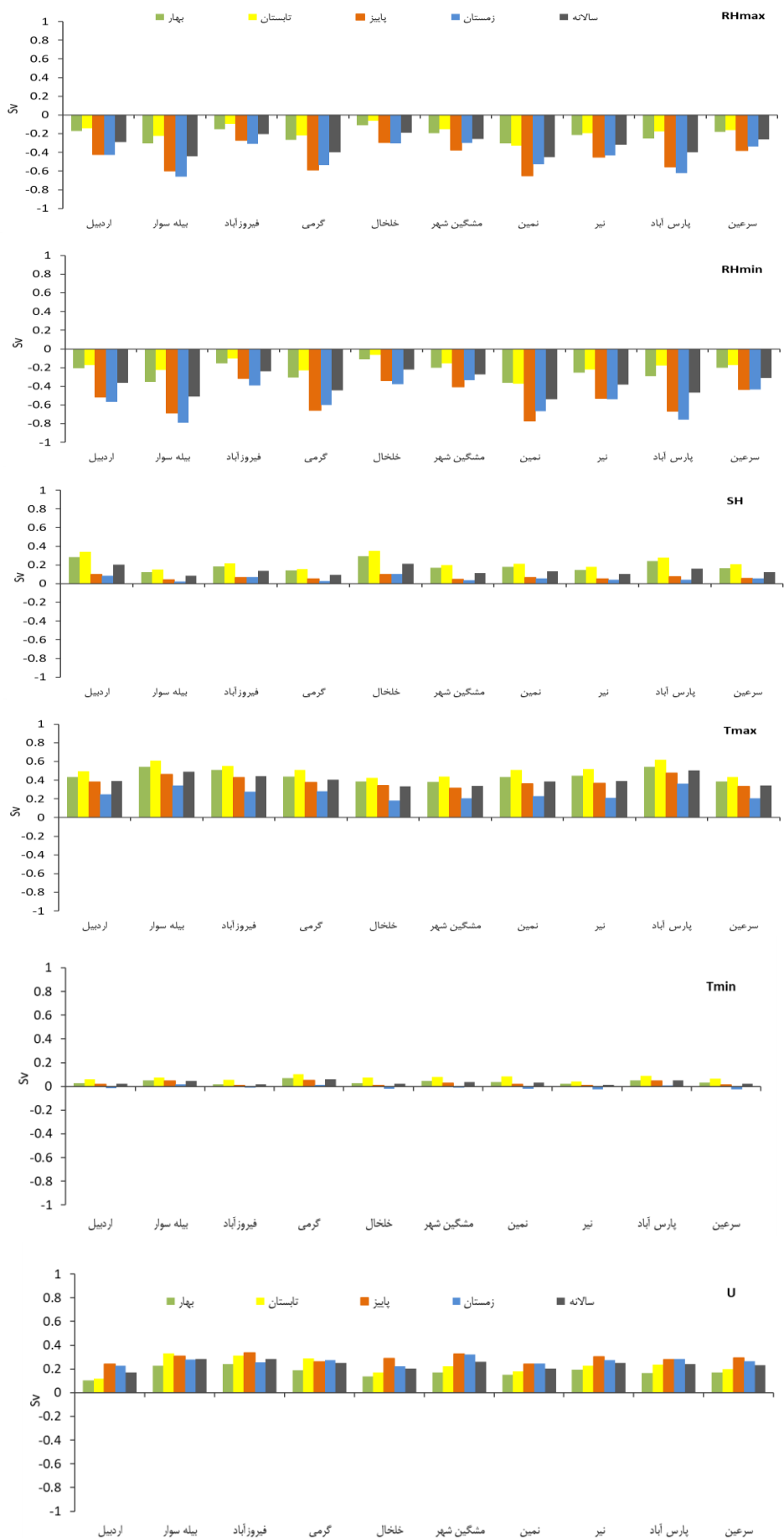
شرقی و غربی، زنجان و همدان افزایشی بوده است. نتایج فاضلی خیاوی و همکاران (۱۳۹۹) نیز نشان داد که میانگین سالانه ET_0 در ایستگاه پارس آباد بر اساس سناریوهای مختلف RCPS دارای روند افزایشی حدود ۶ تا ۸/۴ درصد خواهد بود. این نتایج، افزایش معنی دار روند ET_0 در استان اردبیل را همانند سایر استان های غربی کشور نشان می دهد. این افزایش در اکثر ایستگاه های طی فصول تابستان، پاییز و زمستان رخ داده است. علاوه بر این، در اکثر ایستگاه ها تغییرات فصلی و سالانه T_{min} ، T_{max} و U افزایشی و RH_{min} ، RH_{max} و SH کاهش یافته است. افزایش روند دما و سرعت باد و کاهش رطوبت نسبی موجب افزایش ET_0 می شوند و در سمت مقابل، کاهش SH می تواند تا حدودی عامل بازدارنده در برابر افزایش بیش از حد ET_0 شود. با توجه به اینکه مقادیر ET_0 رابطه مستقیمی با نیاز آبی گیاه دارد، می توان نتیجه گرفت که نیاز آبی گیاهان الگوی کشت در اکثر نقاط استان اردبیل به خصوص در فصول تابستان و پاییز و زمستان به طور معنی داری افزایش یافته است. در حالی که در فصل بهار برای گرمی، در فصل تابستان برای مشگین شهر و در فصل پاییز برای ایستگاه خلخال کاهش یافته است. این نتایج در کنار مدیریت هوشمندانه آبیاری، الگوی کشت، تاریخ کشت و کاربرد رقم های مناسب می تواند نقش مؤثری در بهینه سازی مصرف آب در باغات و اراضی کشاورزی این مناطق گردد. همچنین، این نتایج نشان می دهد که برای درک بهتر بسیاری از تغییرات روند ET_0 باید روند پارامترهای اقلیمی مؤثر بر آن نیز بررسی و تحلیل شود.

تحلیل حساسیت ET_0

شکل (۳) نتایج تحلیل حساسیت فصلی و سالانه ET_0 را نمایش می دهد. میانگین ضریب حساسیت مثبت برای متغیرهای T_{max} (۰/۴۰)، T_{min} (۰/۰۳)، SH (۰/۱۴) و U (۰/۲۴) نشان می دهد که این پارامترها بر ET_0 نقش مثبت و افزایشی دارد و در حالی که ضریب منفی برای RH_{min} (۰/۳۷-) و RH_{max} (۰/۳۲-) نشان دهنده تأثیر کاهشی آن ها بر ET_0 می باشد. یکی از نکاتی که در این شکل مشخص است ضریب حساسیت منفی T_{min} فصل زمستان در همه ایستگاه ها به جز ایستگاه های ناحیه گرم یعنی پارس آباد، گرمی و بیله سوار می باشد. دلیل این اتفاق میانگین منفی T_{min} در فصل زمستان برای ایستگاه های ناحیه سرد و معتدل استان است که باعث می شود در تحلیل حساسیت، ضرایب این پارامتر برای این ایستگاه ها منفی بدست بیاید. در کل، قدر مطلق ضرایب حساسیت کمتر از ۰/۰۵ بسیار ناچیز و قابل چشم پوشی است (Lenhart et al., 2002). تحلیل حساسیت سالانه ET_0 نشان می دهد که قدر مطلق ضریب حساسیت ET_0 نسبت به همه پارامترهای اقلیمی در ناحیه گرم به جز SH (که به ترتیب در نواحی معتدل و سرد بیش تر است) بیش تر از نواحی معتدل و سرد بود. همچنین قدر مطلق ضریب حساسیت ET_0 نسبت به همه پارامترها به جز U (که به ترتیب در نواحی گرم و سرد بیش تر است) در ناحیه معتدل بیش تر از سرد بود. به عبارت دیگر، برای اکثر پارامترهای اقلیمی قدر مطلق ضرایب حساسیت به ترتیب در نواحی گرم، معتدل و سرد بیش تر بود. بیش ترین قدر مطلق ضریب حساسیت به ترتیب مربوط به T_{max} ، RH_{min} ، RH_{max} ، U ، SH و T_{min} بود.

نتایج تحلیل حساسیت فصلی در ایستگاه ها نیز نشان داد که میانگین ضریب حساسیت ET_0 نسبت به T_{max} در تابستان بیش ترین مقدار (۰/۵۱) و در زمستان کمترین مقدار (۰/۲۶) است و حاکی از تأثیر مثبت دما در فصول گرم تر می باشد. 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-) بیش ترین و در تابستان کمترین (۰/۱۸-) بود. بیش ترین 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 فصل های ایستگاه های ناحیه گرم بیش تر 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 T_{max} ، U و SH به عنوان مؤثرترین 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 می دهند که، در تابستان حساسیت ET_0 به پارامترهای دمای هوا و ساعت آفتابی بیش تر از سایر پارامترها بوده است و بر عکس آن در زمستان و پاییز حساسیت بیش تری به رطوبت نسبی داشته است. شدت این حساسیت در ایستگاه های ناحیه گرم شامل پارس آباد، گرمی و بیله سوار بیش تر بوده است. ادامه روند افزایشی T_{max} ، U ، T_{min} در کنار ضریب حساسیت مثبت آن ها و روند کاهشی RH_{min} ، RH_{max} با ضریب حساسیت منفی، به خصوص در دو فصل بهار و تابستان، می تواند 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 فصل ها، می تواند عامل اصلی کاهش ET_0 باشد. بنابراین، برای اینکه سهم هر کدام از این پارامترها در افزایش و کاهش ET_0 مشخص شود باید نرخ مشارکت آن ها در تغییرات ET_0 نیز بررسی شود. این نتایج، اهمیت تحلیل حساسیت را در بررسی روند تغییرات ET_0 نشان می دهد. همچنین مشخص می کند خطای اندازه گیری کدام پارامتر اقلیمی می تواند تأثیر بیش تری در برآورد ET_0 داشته باشد.



شکل ۳. ضرایب حساسیت ET0 نسبت به پارامترهای اقلیمی برای سری‌های زمانی فصلی و سالانه در ایستگاه‌های هواشناسی

نرخ مشارکت پارامترهای اقلیمی

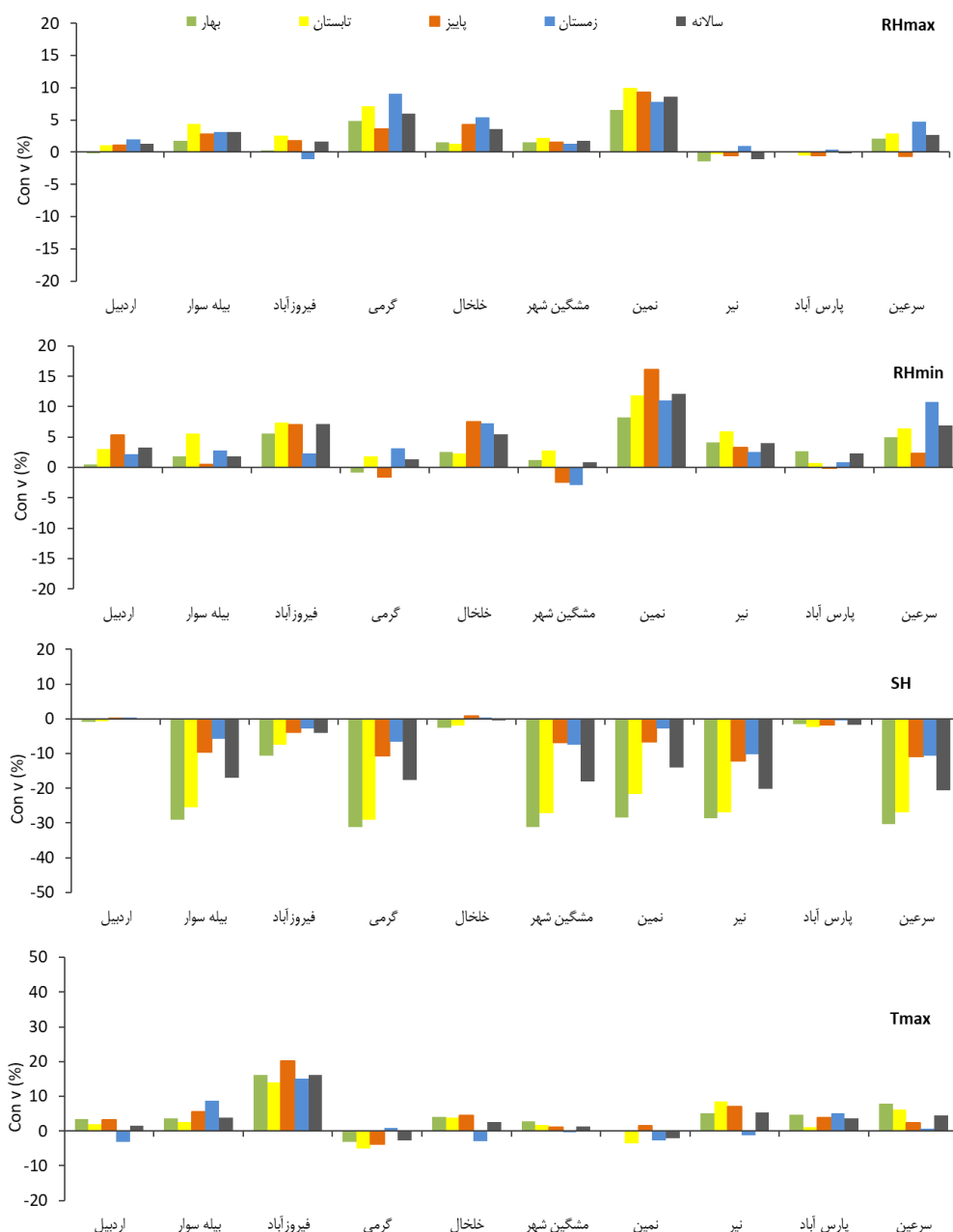
به منظور تعیین سهم هر متغیر اقلیمی در تغییرات ETo با استفاده از ضریب حساسیت (یا همان Sv در رابطه ۶) و نرخ تغییر نسبی (یا Rcv در رابطه ۷) میزان نرخ مشارکت (یا همان Conv در رابطه ۸) بر اساس روند تغییرات محاسبه شد. طبق این روابط، افزایش و کاهش نرخ مشارکت هر پارامتر در یک سری زمانی خاص، به مقدار و جهت تغییرات 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 بادشکن‌های اطراف مزارع و باغات می‌تواند در کاهش ETo تاثیر داشته باشد. همان‌طور که در بخش‌های قبل نیز اشاره شد، در اینجا نیز 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

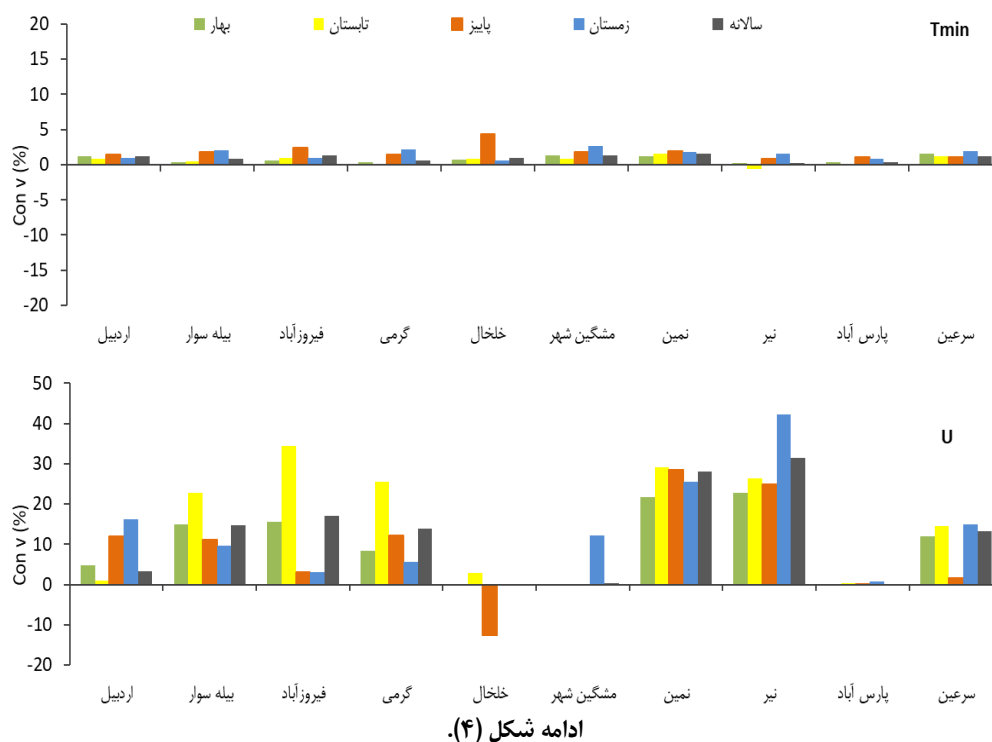
ایستگاه	U	Tmin	Tmax	SH	RHmin	RHmax
پارس‌آباد	۰/۱۶	۰/۴۰	۳/۶۰	-۱/۷۴	۲/۳۱	-۰/۲۳
گرمی	۱۳/۸۴	۰/۶۳	-۲/۶۵	-۱۷/۶۲	۱/۳۸	۵/۹۹
بيله سوار	۱۴/۷۹	۰/۸۰	۳/۷۷	-۱۷/۰۹	۱/۸۶	۳/۱۲
اردبیل	۳/۳۹	۱/۱۳	۱/۶۰	-۰/۱۸	۳/۲۲	۱/۲۹
نمین	۲۸/۰۸	۱/۵۱	-۱/۹۹	-۱۳/۹۴	۱۲/۰۸	۸/۵۸
فیروزآباد	۱۷/۱۱	۱/۳۷	۱۶/۱۸	-۴/۱۵	۷/۱۷	۱/۶۰
نیر	۳۱/۵۱	۰/۲۵	۵/۳۳	-۲۰/۱۵	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
مشگین‌شهر	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 بازدارنده 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 (منفی‌تر) نسبت به سایر فصل‌ها دارد. در ایستگاه‌های بيله‌سوار، 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، بيله‌سوار، 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 مرکز 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 T_{max} 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 T_{max} ، RH_{max} و RH_{min} 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، ET_0 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 ETo 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 ETo در استان اردبیل بود. برای این منظور از سری زمانی ماهانه، فصلی و سالانه ETo 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 ETo محاسبه شد. روندیابی سری‌های زمانی با روش‌های من‌کندال اصلاح شده و تخمین گر شیب سن انجام شد. نتایج روندیابی حاکی از افزایش تغییرات ETo 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 ETo شده و در سمت مقابل، کاهش SH به عنوان یک عامل بازدارنده موجب تعدیل رشد بیش از حد ETo 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 ETo 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 بيله‌سوار 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 ETo 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 ETo بوده است و در ادامه پارامترهای RH_{min} ، T_{max} ، RH_{max} و T_{min} به ترتیب بیش‌ترین سهم را در افزایش ETo سالانه داشته‌اند. دلایل تغییرات روند ETo 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 ETo 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 ETo موثر باشد. این یافته‌ها همچنین نشان می‌دهند که نتایج تحلیل فصلی پارامترها جزئیات دقیق‌تری از روند تغییرات ETo و نرخ مشارکت پارامترها نشان می‌دهد.

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

منابع

- 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، هابیل. و تدینی، معصومه. (۱۳۹۳). روندیابی تغییرات نیاز آبی گیاه مرجع و متغیرهای هواشناسی 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): ۶۳۳-۶۱۷.

- رهبانی، محمد صادق. (۱۴۰۲). بررسی جامع گزارش ششم تغییر اقلیم و ترسیم مسیرهای مدل‌سازی 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 آب، 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)، ۶۲۳۸-۶۲۴۷.
- 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، تافته، آرش و حسینی، سیدنرگس. (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: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.338161.66919>
<http://niwr.ir/Login.aspx>. دسترسی. سامانه نیازآب گیاهان. (۱۴۰۲).
- نوروز ولاشدی، رضا و برارخانپور احمدی، صدیقه. (۱۴۰۲). تحلیل پهنه‌ای 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.2023.346636.669332](https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.346636.669332).

REFERENCES

- 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., Touhidul 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 Lu, 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.