




An integrated analysis of observed changes in hydro-climatological variables of Iran

Peyman Mahmoudi   ¹ | Abdolraoof Shahozei  ²

1. Department of Physical Geography, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

2. MSc

Article Info:

Article type:

Research Article

Date:

Received:2024.06.12

Received:2024.09.07

Accepted:2024.09.20

Keywords:

Trend, Sen's slope estimator, Potential evapotranspiration, FAO-56 Penman-Monteith method, Thiessen polygon method

Abstract: This study presents an integrated analysis of trends in key hydro-climatic variables, i.e. minimum temperature, maximum temperature, precipitation, and potential evapotranspiration (ET_o), across annual and seasonal timescales, utilizing 30 years (1986-2015) of data from 62 meteorological stations in Iran. Using Sen's slope estimator, results reveal a consistent warming trend across the country, notably a significant increase in winter temperatures, implying reduced snow-to-rain ratios and earlier snowmelt. At the national scale, the increasing trend in ET_o coupled with decreasing precipitation paints a clear picture of Iran's climate becoming drier. Spatial analysis identified Western and Northwestern Iran as "Hotspots of Change," experiencing the most pronounced temperature increases and precipitation decreases, posing threats to regional water and food security. A notable finding was the observed decreasing trend in ET_o in some southern stations, attributed to the "Evaporation Paradox," highlighting the importance of considering factors like wind speed and solar radiation. Collectively, this study provides robust evidence of escalating climatic stress on Iran's water resources and underscores the necessity for adaptive, regionally-focused management strategies for vulnerable areas.

Cite this article: Mahmoudi, P, Shahozei, A. (2024). An integrated analysis of observed changes in hydro-climatological variables of Iran. *Climat Chenge and Climat Disasters*, 3(6), 196-232.

© The Author(s).

Homepage: cccd.znu.ac.ir

Publisher: University of Zanjan.



Extended Abstract

Introduction

Climate change and anthropogenic activities have significantly altered large-scale hydrological fluxes, including precipitation, runoff, and evapotranspiration, thereby affecting the quantity and quality of surface and groundwater resources worldwide. In Iran, the drying of major water bodies such as Lakes Urmia, Maharloo, Hamoun, and Shadegan in recent decades exemplifies these devastating hydrological shifts. Global warming increases the atmosphere's moisture-holding capacity, changing precipitation and temperature patterns. Although numerous studies have investigated hydro-climatological trends in Iran, the diversity in their spatial and temporal scales has hindered a unified national conclusion. Therefore, this study pursues two main objectives: first, to update the trend analysis of key hydro-climatological variables (minimum temperature, maximum temperature, precipitation, and potential evapotranspiration), and second, to provide an integrated and simultaneous analysis of these variables across Iran's territorial scale on both annual and seasonal bases.

Data

This research utilizes meteorological data obtained from 62 synoptic stations across Iran, featuring suitable spatial distribution and a 30-year statistical period (1986–2016). Iran, dominated by arid and semi-arid climates (covering ~85% of its area) and complex topography due to the Alborz and Zagros mountain ranges, exhibits high climatic diversity. Two primary datasets were

used: a) monthly data of minimum and maximum temperatures and precipitation to generate seasonal and annual time series; b) daily data including maximum/minimum temperatures, wind speed, sunshine hours, and relative humidity to calculate potential evapotranspiration. To allocate the spatial weight of each station for national averages, the Thiessen Polygons method was employed.

Methodology

Daily Potential Evapotranspiration (ET_0) was estimated using the standard FAO-56 Penman-Monteith equation within the CropWat software environment. This method, which incorporates various meteorological variables, provides the most reliable estimation of atmospheric evaporative demand. To analyze the long-term trends of the hydro-climatological variables, the non-parametric Sen's Slope Estimator was applied. This robust method calculates the median of slopes between all sequential pairs of data points, making it highly resistant to outliers. The statistical significance of the calculated trends was evaluated at a 95% confidence level ($\alpha=0.05$).

Results

At the annual scale, results indicate a pervasive and persistent warming trend across the country. The national average maximum and minimum temperatures have significantly increased at rates of $0.06^\circ\text{C}/\text{year}$ and $0.05^\circ\text{C}/\text{year}$, respectively. Potential evapotranspiration also showed a significant increase of $8.38 \text{ mm}/\text{year}$, while national precipitation exhibited a non-significant decrease of $1.58 \text{ mm}/\text{year}$.

At the seasonal scale, the most intense changes were observed in winter. Winter maximum temperatures surged by $0.111^{\circ}\text{C}/\text{year}$, accompanied by a significant precipitation decline of $1.465\text{ mm}/\text{year}$. Spatially, the western and northwestern regions of Iran (along the Zagros Mountains) were identified as the primary hotspots of climate change, experiencing the most severe warming and precipitation reduction trends. Conversely, while 85% of the stations showed an increasing trend in ET_0 , approximately 14.5% of the stations located in southern Iran experienced a decreasing trend in evapotranspiration despite the general warming.

Discussion and Conclusion

The findings confirm that Iran's climate is distinctly transitioning toward warmer, thirstier, and slightly drier conditions. The intense winter warming carries severe hydrological consequences, specifically the reduction of the snow-to-rain ratio and the premature melting of mountain snowpacks. This disrupts the

streamflow regimes of perennial rivers and exacerbates water scarcity during the dry summer months. The concentration of extreme climatic shifts (decreased precipitation and increased temperature) in the west and northwest—traditionally the headwaters of Iran's major rivers—poses a strategic threat to national water and food security. Furthermore, the observation of the evaporation paradox in the southern regions indicates that ET_0 dynamics are not solely temperature-driven; factors such as declining wind speeds and solar radiation play crucial roles in the surface energy balance. Ultimately, this research underscores the urgent need to shift from a centralized water management approach toward regional, adaptation-based strategies tailored to the most vulnerable watersheds.

Keywords: Climate change, Hydro-climatological variables, FAO-56 Penman-Monteith, Sen's slope estimator, Evaporation paradox, Iran



تحلیل یکپارچه از تغییرات مشاهده شده در متغیرهای هیدرو-کلیماتولوژی ایران

پیمان محمودی ^۱ | عبدالرئوف شاهوزئی ^۲

۱. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲. دانش آموخته کارشناسی ارشد

اطلاعات مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ‌ها:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۳

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۱۷

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۳۰

واژگان کلیدی:

روند، تخمینگر شیب سن، تبخیر و تعرق پتانسیل، روش فائو ۵۶-پنمن-مانتیش، روش چند ضلعی تیسن

چکیده: این پژوهش، تحلیلی یکپارچه از روندهای تغییرات متغیرهای کلیدی هیدروکلیماتولوژیک - شامل دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل (ET₀)- را در مقیاس‌های زمانی سالانه و فصلی، با استفاده از داده‌های ۳۰ ساله (۱۹۸۶-۲۰۱۵) ۶۲ ایستگاه هواشناسی در ایران ارائه می‌دهد. با به کارگیری تخمینگر شیب سن، نتایج نشان‌دهنده یک روند گرمایش کلی و پایدار در سراسر کشور است؛ به‌ویژه افزایش معنادار دما در فصل زمستان که پیامدهایی نظیر کاهش نسبت بارش جامد به مایع و ذوب زودرس برف دارد. در سطح ملی، روند افزایشی ET₀ و کاهش بارش، تصویر روشنی از خشک‌تر شدن اقلیم ایران نمایان می‌سازد. تحلیل فضایی، غرب و شمال غرب ایران را به عنوان کانون اصلی تغییرات شناسایی کرد که بیشترین روند افزایشی دما و کاهش بارش را تجربه کرده و تهدیدی برای امنیت آب و غذا محسوب می‌شوند. یافته جالب توجه، مشاهده روند کاهش ET₀ در برخی مناطق نیمه جنوبی بود که به «پارادوکس تبخیر» نسبت داده شده و اهمیت در نظر گرفتن عواملی چون سرعت باد و تابش خورشیدی را برجسته می‌سازد. در مجموع، این مطالعه شواهد محکمی بر تشدید فشار اقلیمی بر منابع آب ایران ارائه داده و بر لزوم اتخاذ راهکارهای مدیریت سازگارانه و منطقه‌ای برای مناطق آسیب‌پذیر تأکید می‌کند.

استناد: محمودی، پیمان، شاهوزئی، عبدالرئوف. (۱۴۰۳). تحلیل یکپارچه از تغییرات مشاهده شده در متغیرهای هیدرو-کلیماتولوژی ایران. دگرگونی‌ها و مخاطرات آب و هوایی، ۳(۶)، ۱۹۶-۲۳۲.

© نویسندگان .

Homepage: cccd.znu.ac.ir

ناشر: دانشگاه زنجان



۱. مقدمه

Salehzadeh, 2019; Nasirian et al.,

2016) خشک شده اند. این تغییرات

هیدرولوژیکی، متاسفانه تنها محدود به

آب‌های سطحی ایران نبوده، بلکه آب‌های

زیر زمینی آن را نیز شامل شده است. به

طوری که کاهش قابل توجهی در خصوص

سطح آب های زیرزمینی در بخش های

مختلف ایران به ویژه ایران مرکزی گزارش

شده اند (Nabavi, 2018).

نتایج تحقیقات در بسیاری از نقاط جهان

نشان می‌دهند که جو گرم‌تر در افزایش

بارش‌های فرین در مقیاس‌های جهانی و

منطقه‌ای تاثیرات اساسی داشته است، زیرا

هوای گرم‌تر رطوبت بیشتری را در خود

نگه می‌دارد و رطوبت بیشتر به معنای آب

بیشتری است که می‌تواند به صورت باران

ظاهر شود (Wu and Lau, 2016;)

Groisman et al., 2010; Manton et

al., 2010; Pryor et al., 2009).

ترنبرث (۲۰۱۱) نشان داده است که به

ازای هر یک درجه سانتی‌گراد افزایش

تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی می‌توانند

الگوهای بزرگ مقیاس شارهای

هیدرولوژیکی (بارش، رواناب و تبخیر و

تعرق) را تغییر و کمیت و کیفیت آب‌های

سطحی و زیرزمینی را تحت تاثیر قرار

دهند (Moshir Panahi et al., 2020).

خشک شدن دریاچه ارومیه در شمال

غرب ایران می‌تواند نمونه‌ای مشخص از

اثرات مخرب تغییرات هیدرولوژیکی در

یک مقیاس منطقه‌ای در جهان باشد

(Khazaee et al., 2019; Chaudhari

et al., 2018; Tourian et al., 2015)

علاوه بر این، در چند دهه اخیر، بسیاری

دیگر از پهنه‌های آبی ایران، همچون

دریاچه مهارلو-بختگان در مرکز (Torabi

, 2017; Haghghi and Kløve, 2017)، دریاچه

هامون در شرق (Sharifikia, 2013)،

دریاچه شادگان در جنوب و حورالعظیم

در جنوب غرب ایران (Nasirian and

افزایش تقریباً ۰/۲ درجه سانتی‌گراد در هر دهه برای میانگین دمای حداکثر سالانه و یک افزایش تقریباً ۰/۴ درجه سانتی‌گراد در هر دهه برای میانگین دمای حداقل سالانه گزارش شده است (Mahmoudi et al., 2019).

اما گزارش‌های موجود در زمینه تحلیل روند تغییرات بلندمدت بارش در ایران نتایج یکسانی را در اختیار قرار نمی‌دهد. به طوریکه نتایج برخی از مطالعات حاکی از وجود روند افزایشی برای برخی قسمت‌های ایران (Javari, 2016) و نتایج بسیاری دیگر از مطالعات حاکی از وجود روند کاهشی برای برخی دیگر از قسمت‌های ایران بوده است (Najafi and Moazami, 2016; Soltani et al., 2012). رضیئی و همکاران (۲۰۰۵) در مطالعه‌ای با هدف بررسی روند تغییرات بلندمدت بارش‌های سالانه مناطق خشک و نیمه خشک مرکزی و شرقی ایران، از

دمای جو زمین، ظرفیت جو برای نگهداشت رطوبت در حدود ۷ درصد افزایش خواهد یافت (Trenberth, 2011). مطالعات بسیاری روند تغییرات بلندمدت متغیرهای هیدرو-اقلیم را در مقیاس‌های زمانی و فضایی مختلف در ایران مورد تحلیل قرار داده‌اند. به طوریکه بسیاری از این تحقیقات، وجود روند افزایشی هم برای دمای حداقل و هم برای دمای حداکثر را برای قسمت‌های زیادی از ایران گزارش داده‌اند (Kazemzadeh et al., 2022; Sharafi, and Mir Karim, 2020; Ahmadi et al., 2018; Ghasemi, 2015; Saboohi et al., 2012). اما این روند افزایشی برای دماهای حداکثر و حداقل یکسان نبوده و روند افزایشی دماهای حداقل تقریباً دو برابر دماهای حداکثر بوده است (Mahmoudi et al., 2019; Ghasemi, 2012; Alijani et al., 2015). به طوریکه در مقیاس سرزمینی ایران یک

داده‌های بارش سالانه ۷۹ ایستگاه همدید و اقلیم شناسی برای یک بازه زمانی ۳۶ ساله (۲۰۰۰-۱۹۶۵) بهره بردند. نتایج مطالعه این محققین نشان داد که در بیش از ۶۰ درصد از ایستگاه‌های مورد مطالعه در این قسمت از ایران هیچ گونه روند معناداری در تغییرات بلندمدت بارش‌ها مشاهده نشده است (Raziei et al., 2005). کتیرائی و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از داده های بارش روزانه ۳۸ ایستگاه همدید برای یک دوره آماری ۴۲ ساله (۲۰۰۱-۱۹۶۰)، علاوه بر روند بارش کل (سالانه و فصلی)، روند تغییرات تعداد روزهای بارانی (سالانه و فصلی)، روند میانگین بارش روزانه و همچنین روند بارش با شدت‌های مختلف را با استفاده از آزمون من-کندال مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی این محققین نشان داد که اغلب ایستگاه‌های واقع در منطقه غرب و شمال غرب دارای روند کاهشی و بیشتر ایستگاه‌های واقع در نواحی جنوبی و مرکزی ایران دارای روند افزایشی در مجموع بارش سالانه بوده اند. در مقیاس فصلی نیز روند بارش های فصل بهار در اغلب ایستگاه‌ها کاهشی و در فصل پاییز افزایشی بوده‌اند (Katiraei et al., 2007).

روند تغییرات بلندمدت تبخیر و تعرق در ایران نیز مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. به طوریکه طبری و معروفی (۲۰۱۱) روند تغییرات بلندمدت تبخیر از تشت را برای ۱۲ ایستگاه واقع در استان همدان در غرب ایران برای دوره ۲۰۰۳-۱۹۸۲ مورد تحلیل قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که در ۶۷ درصد ایستگاه ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد روند افزایشی قابل توجهی مشاهده می‌شود، به طوری که میانگین منطقه‌ای روند این ۱۲ ایستگاه در استان همدان در غرب ایران در حدود ۱۶۰ میلی‌متر در دهه بوده است (Tabari and Marofi,)

2011). سروش و همکاران (۲۰۲۰) در تحلیل روند فضایی-زمانی تبخیر و تعرق در ایران در دو مقیاس سالانه و فصلی بیان داشته‌اند که حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد ایستگاه‌های واقع در نیمه جنوبی ایران (پایین از عرض جغرافیایی ۳۲ درجه) دارای روند کاهشی معنادار و ایستگاه‌های واقع در نیمه شمالی آن (بالتر از عرض جغرافیایی ۳۲ درجه) دارای روند افزایشی در میزان تبخیر و تعرق بوده‌اند (Soroush et al., 2020). همچنین مشیر پناهی و همکاران (۲۰۲۰) روند افزایشی در تبخیر و تعرق را برای ۳۰ حوضه آبریز ایران (Moshir Panahi et al., 2020) و حسین زاده طلایی و همکاران (۲۰۱۴) روند افزایشی در تبخیر از تشت و تبخیر و تعرق مرجع را برای غرب ایران گزارش داده‌اند (Hosseinzadeh Talae et al., 2014).

همانگونه که پیشتر نیز بدان اشاره شده است مطالعات بسیاری روند تغییرات متغیرهای مختلف هیدرو-اقلیم ایران را در مقیاس‌های زمانی مختلف (ماهانه، فصلی و سالانه) و مقیاس‌های فضایی گوناگون (به طور مثال در سطح چند ایستگاه، در سطح یک استان، در سطح یک حوضه آبریز و یا در سطح کل ایران) مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج حاصل از این مطالعات با توجه به گوناگونی در مقیاس‌های زمانی و فضایی آنها، یکدست نبوده است. لذا در راستای رسیدن به یک جمع بندی نهایی از تغییرات مشاهده شده در متغیرهای هیدرو-اقلیم در مقیاس سرزمینی ایران بر اساس مطالعات انجام شده در گذشته بسیار مشکل می‌باشد. لذا این مطالعه دو هدف اصلی را دنبال می‌کند. هدف اول به روز کردن مطالعات روند تغییرات متغیرهای هیدرواقلیم (دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و تبخیر و تعرق

پتانسیل) در مقیاس سرزمینی ایران است. هدف دوم نیز تحلیل یکپارچه و همزمان روند تغییرات مهمترین متغیرهای هیدرواقليم (دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل) در مقیاس سرزمینی ایران است.

۲. داده‌ها و روش‌ها

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

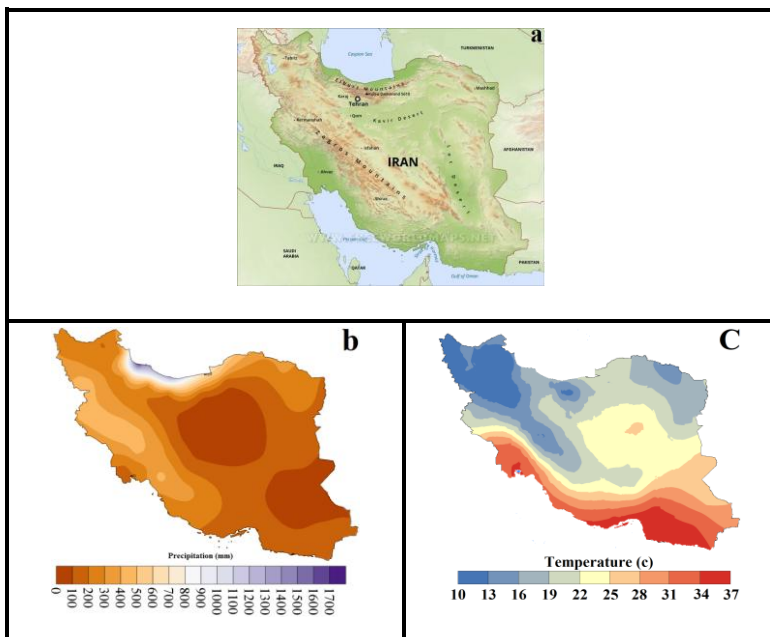
ایران، کشوری پهناور در جنوب غربی آسیا، به دلیل موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های توپوگرافیک منحصربه‌فرد خود، دارای تنوع اقلیمی چشمگیری است. این کشور عمدتاً تحت سلطه شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک قرار دارد که بر اساس طبقه‌بندی‌های اقلیمی معاصر مانند طبقه‌بندی کوپن-گایگر، حدود ۸۵ درصد از مساحت آن را در بر می‌گیرد. با این حال، وجود دو رشته‌کوه عظیم، یعنی البرز در شمال با امتداد غربی-شرقی و زاگرس در غرب با امتداد شمال‌غربی-

جنوب‌شرقی، در کنار همسایگی با پهنه‌های آبی بزرگ مانند دریای خزر در شمال و خلیج فارس و دریای عمان در جنوب، الگوهای هیدروکلیماتولوژی پیچیده و متنوعی را در سراسر کشور ایجاد کرده است (شکل ۱a). این رشته‌کوه‌ها نقش سدهای کوهستانی را ایفا کرده و ورود سامانه‌های بارشی به فلات مرکزی ایران را کنترل می‌کنند و باعث ایجاد سایه باران و تشدید خشکی در نواحی داخلی می‌شوند.

توزیع مکانی متغیرهای اقلیمی به شدت تحت تأثیر این عوامل است. میانگین بارش سالانه کشور حدود ۲۳۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر تخمین زده می‌شود که بسیار کمتر از میانگین جهانی است. این بارش دارای ناهمگونی فضایی شدیدی است؛ به طوری که از مقادیر کمتر از ۵۰ میلی‌متر در بیابان‌های مرکزی (مانند دشت لوت) تا بیش از ۱۸۰۰ میلی‌متر در سواحل جنوب

غربی دریای خزر متغیر است (شکل ۱b) سواحل جنوبی و دشتهای جنوب شرقی (Mahmoudi et al., 2021). توزیع فضایی میانگین دمای سالانه نیز تابعی از عرض جغرافیایی و ارتفاع است. به طور کلی، یک گرادیان دمایی از جنوب به شمال و از شرق به غرب وجود دارد که باعث می‌شود سردترین مناطق در شمال غرب کوهستانی و گرم‌ترین نواحی در

کشور متمرکز شوند (شکل ۱c) (Mahmoudi et al., 2021). این ویژگی‌ها ایران را به یک آزمایشگاه طبیعی ایده‌آل برای مطالعه تغییرات هیدرو-کلیماتولوژی در مناطق خشک و نیمه‌خشک تبدیل کرده است.



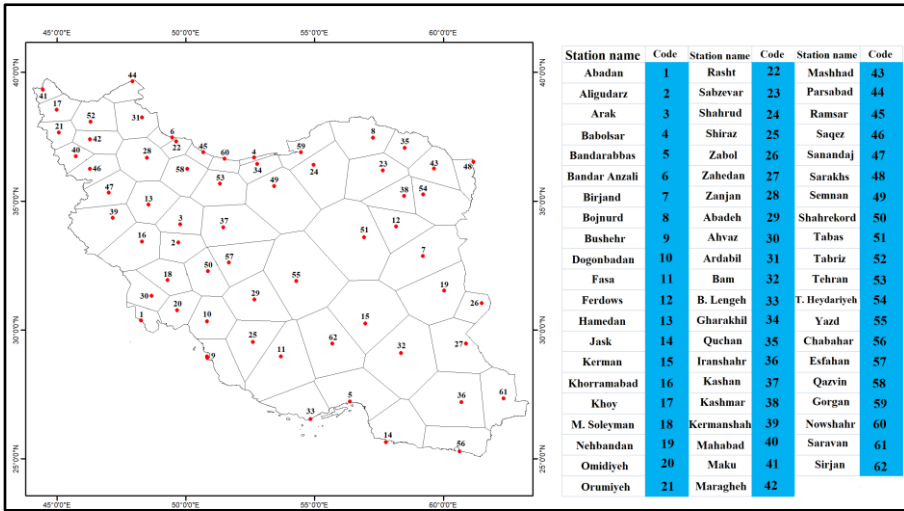
شکل ۱: (a) نقشه جغرافیای طبیعی ایران در جنوب غرب آسیا

(b) نقشه توزیع فضایی میانگین بارش سالانه (<https://www.freeworldmaps.net/asia/iran/map.html>), (c) توزیع فضایی میانگین دمای سالانه ایران (Mahmoudi et al., 2021) و (Mahmoudi et al., 2021)

۲.۲. داده‌ها

در این پژوهش از دو مجموعه داده با مقیاس‌های زمانی مختلف استفاده شد. مجموعه داده‌ای اول، داده‌های ماهانه بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر ۶۳ ایستگاه همدید بودند که از سازمان هواشناسی ایران برای یک دوره ۳۰ ساله (۱۹۸۶-۲۰۱۵) دریافت شدند. از روی داده‌های ماهانه، داده‌های فصلی و از روی داده‌های فصلی، داده‌های سالانه این سه متغیر به دست آمدند. مجموعه داده‌ای دوم نیز مربوط به داده‌های روزانه حداقل دما، حداکثر دما، سرعت باد، ساعات آفتابی و رطوبت نسبی بودند. این داده‌ها نیز برای ۶۳ ایستگاه همدید و برای یک دوره ۳۰ ساله (۱۹۸۶-۲۰۱۶) از سازمان هواشناسی ایران اخذ شدند. از این داده‌ها برای محاسبه تبخیر و تعرق

پتانسیل ایستگاه‌های مورد مطالعه استفاده شدند. علل انتخاب این ایستگاه‌ها، طول دوره آماری کافی (حداقل ۳۰ سال) و همچنین پراکنش مناسب مکانی آنها بوده است. این داده‌ها دارای آمار کامل و قابل اعتماد بودند که اندک خلأ آماری داده‌ها با استفاده از همبستگی (Asakereh, 2011) و مدل‌های رگرسیونی (Asakereh, 2011) بازسازی شدند. توزیع و پراکنش ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۲ آورده شده است. با استفاده از روش چند ضلعی تیسن (Thiessen, 1911) مساحت اختصاص داده شده به هر ایستگاه نیز مشخص شده است. در این مطالعه اساس محاسبات و تحلیل‌های صورت گرفته برای هر ایستگاه مبتنی بر این مساحت‌های به دست آمده می‌باشد (شکل ۲).



شکل ۲: پراکنش و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه و مساحت اختصاص داده شده به هر ایستگاه با استفاده از روش چند ضلعی تیسن

مانتیت که یکی از روش‌های مورد تایید سازمان خواربار و کشاورزی جهانی (فائو) می باشد به شکل معادله ۱ تعریف می شود (Moradi et al., 2015):

(۱)

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

که ETO تبخیر و تعرق سطح مرجع (میلی‌متر بر روز)، R_n تشعشع خالص در سطح زمین (مگاژول بر متر مربع بر روز)،

۲.۳. روش‌ها

۳.۲.۱. برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از روش فائو ۵۶-پنمن-مانتیت

بعد از اخذ داده های روزانه ۶۲ ایستگاه مورد مطالعه، مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل آنها در یک مقیاس روزانه با استفاده از معادله فائو ۵۶-پنمن-مانتیت و با استفاده از نرم افزار CropWat برآورد گردیدند. این معادله فائو ۵۶-پنمن-

گسترش داده شد (Sen, 1968). این روش نیز همانند بسیاری دیگر از روش-های ناپارامتریک همچون من - کندانال بر تحلیل تفاوت بین مشاهدات یک سری زمانی استوار است. این روش زمانی می تواند مورد استفاده قرار گیرد که روند موجود در سری زمانی یک روند خطی باشد. این بدان معناست که $f(t)$ در معادله ۲ برابر است با:

(۲)

$$f(t) = Qt + B$$

که Q شیب خط روند و B مقدار ضریب ثابت است.

جهت محاسبه شیب خط روند، یعنی Q ، ابتدا بایستی شیب بین هر جفت داده مشاهده‌ایی، با استفاده از معادله شماره ۳ محاسبه گردد:

(۳)

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k}$$

G شار گرما به داخل خاک (مگاژول بر متر مربع بر روز)، γ ضریب ثابت سایکرومتری (کیلوپاسکال بر سانتیگراد)، T میانگین دمای هوا (سانتی‌گراد)، u_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه)، $(e_s - e_a)$ کمبود فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)، e_s فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)، e_a فشار بخار واقعی (کیلوپاسکال)، Δ شیب منحنی تغییرات فشار بخار اشباع با دمای هوا (هکتوپاسکال بر سانتی‌گراد) می‌باشد (Moradi et al., 2015).

۳.۲.۲. روش ناپارامتریک تخمین‌گر

شیب سن

جهت تحلیل روند تغییرات بلندمدت متغیرهای هیدرو-اقلیم ایران از آزمون ناپارامتریک تخمین‌گر شیب سن بهره برده شد. این روش ابتدا توسط تیل در سال ۱۹۵۰ ارائه (Theil, 1950) و سپس توسط سن در سال ۱۹۶۸ بسط و

که $j > k$ است. در این معادله x_j و

به ترتیب داده‌های مشاهده‌ای در

زمان‌های j و k است. با اعمال این

رابطه، برای هر جفت داده مشاهده‌ای، یک

شیب بدست می‌آید. با قرار دادن این

شیب‌ها در کنار یکدیگر یک سری زمانی

از شیب‌های محاسبه شده حاصل می‌آید.

یعنی اگر n تعداد x_j در سری زمانی

وجود داشته باشد (در این تحقیق $n =$

30) ما به اندازه $N = n(n - 1)/2$

برآورد شیب (Q_i) خواهیم داشت.

در مرحله بعد، میانه سری زمانی مورد

مطالعه بایستی بدست آید. برای این کار

N تعداد از Q_i ها از کوچک به بزرگ

مرتب می‌شوند و سپس با استفاده از یکی

از معادلات زیر اقدام به تعیین میانه سری

زمانی می‌گردد. اگر تعداد مشاهدات سری

زمانی مورد مطالعه فرد باشد از معادله

شماره ۴ و اگر زوج باشد از معادله شماره

۵ استفاده می‌گردد:

$$Q = Q_{[(N+1)/2]}$$

$$Q = \frac{1}{2} = [Q_{N/2} + Q_{[(N+2)/2]}]$$

نتیجه حاصل از این معادلات، بدست

آمدن شیب خط روند (Q_{med}) است. اگر

شیب خط روند مثبت باشد حاکی از

صعودی بودن روند و اگر منفی باشد دال

بر نزولی بودن روند است.

مرحله بعد، آزمون نمودن شیب بدست

آمده در فاصله اطمینان ۹۵ درصد است.

جهت انجام این آزمون از رابطه ۶ استفاده

می‌گردد:

$$C_a = Z_{1-\alpha/2} \sqrt{\text{VAR}(S)}$$

که Z عبارت است از آماره توزیع نرمال

استاندارد در یک آزمون دو طرفه که برای

سطح اطمینان ۹۵ درصد برابر با

$Z = 1.96$ است و $\text{VAR}(S)$ نیز

واریانس پارامتر S است. جهت بدست

آوردن مقدار پارامتر S و همچنین

۹ و اگر کوچکتر از ۱۰ مورد باشند از رابطه شماره ۱۰ بهره گرفته می شود.

$$VAR(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{t=1}^m t(t-1)(2t+5)}{18}$$

$$VAR(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

که n تعداد داده‌های مشاهده‌ای، m تعداد سری‌هایی است که در آنها حداقل یک داده تکراری وجود دارد و t نیز بیانگر فراوانی داده‌های با ارزش یکسان می‌باشد.

و در نهایت حدود اعتماد بالا و پائین به کمک روابط زیر محاسبه می‌گردد:

$$\begin{cases} M_1 = \frac{n' + C_a}{2} \\ M_2 = \frac{n' - C_a}{2} \end{cases}$$

که n' تعداد شیب‌هایی است که از طریقه معادله ۵ بدست آمده است.

$VAR(S)$ مراحل زیر بایستی پیموده شود:

الف) محاسبه اختلاف بین تک تک جملات سری با همدیگر و اعمال تابع sgn و استخراج پارامتر S

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

که n تعداد مشاهدات سری (در این تحقیق برابر با ۳۸ سال)، x_j و x_k نیز به ترتیب داده‌های j ام و k ام سری می‌باشند.

ب) محاسبه تابع علامت (sgn) که به شرح ذیل قابل محاسبه است:

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

ج) محاسبه واریانس S توسط یکی از روابط زیر. اگر تعداد داده‌های سری زمانی بزرگتر از ۱۰ مورد باشند از معادله شماره

روند تغییرات بلندمدت چهار متغیر بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل، دمای حداکثر و دمای حداقل در ایران با استفاده از داده های ۶۲ ایستگاه هواشناسی در دو مقیاس سالانه و فصلی مورد تحلیل قرار گرفتند. ابتدا میانگین سرزمینی ایران برای چهار متغیر مورد مطالعه محاسبه و سری های زمانی سالانه و فصلی آنها تهیه شدند. در مقیاس سالانه مشاهده می شود که میانگین دمای حداکثر و دمای حداقل در مقیاس سرزمینی ایران دارای یک روند افزایشی هستند. مقدار شیب روند این تغییرات برای این دو متغیر تقریباً مشابه یکدیگر می باشند. مقدار شیب روند تغییرات برای دمای حداکثر ۰/۰۶ درجه سلسیوس در هر سال و برای دمای حداقل ۰/۰۵ درجه سلسیوس در هر سال می باشد. روند تغییرات این دو متغیر در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ معنادار بوده اند (شکل ۳). این افزایش دما، قاعدتاً افزایش

حال M_1 امین و M_{2+1} امین شیبها را از بین شیب های محاسبه شده استخراج می نمائیم. در صورتی که عدد صفر در دامنه بین دو شیب استخراج شده فوق قرار گیرد فرض صفر پذیرفته شده و عدم وجود روند در سری داده ها تأیید می گردد. در غیر این صورت فرض صفر رد شده و وجود روند در سطح اطمینان مورد آزمون پذیرفته می گردد.

در نهایت جهت بدست آوردن مقدار B در معادله شماره ۲، n تعداد تفاضل $x_i - Qt_i$ محاسبه می شود. سپس میانه این مقادیر، برآورد B را در اختیار می گذارد.

۳. یافته ها و نتایج

۳.۱. روند تغییرات بلندمدت بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل، دمای حداکثر و دمای حداقل در مقیاس سالانه

سرزمینی ایران عکس سه متغیر قبلی می باشد. بارش در ایران دارای یک روند کاهشی و شیب روند تغییرات آن معادل $1/58$ میلیمتر در هر سال می باشد. شیب روند تغییرات این متغیر در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ معنادار نبوده است (شکل ۳).

در تبخیر و تعرق را نیز به همراه خواهد داشت. روند تغییرات تبخیر و تعرق در مقیاس سرزمینی ایران برابر با $8/38$ میلیمتر در هر سال می باشد. همچنین این روند افزایشی در میزان تبخیر و تعرق در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ معنادار بوده است (شکل ۳). اما جهت روند تغییرات بلندمدت بارش در مقیاس



شکل ۳: روند تغییرات بلندمدت چهار متغیر (a) دمای حداکثر، (b) دمای حداقل، (c) تبخیر و تعرق پتانسیل و (d) بارش در مقیاس سرزمینی ایران برای دوره ۲۰۱۶-۱۹۸۷

در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ معنادار بوده اند به رنگ زرد مشخص شده اند. از ۶۲ ایستگاه مورد مطالعه، ۵۴ ایستگاه روند افزایشی و ۱ ایستگاه روند کاهشی دمای حداقل سالانه آنها در سطح احتمالاتی ۹۵ درصد معنادار بوده اند. غرب و شمال غرب ایران نیز در مقایسه با دیگر مناطق ایران تغییرات شدیدتری را تجربه نموده اند.

روند تغییرات بلندمدت دمای حداکثر در یک مقیاس ایستگاهی بیانگر وجود روند افزایشی برای تمامی ۶۲ ایستگاه مورد مطالعه در پهنه سرزمینی ایران است (شکل ۴c). پایین ترین شیب روند تغییرات با مقدار 0.01 درجه سانتیگراد در سال متعلق به دو ایستگاه بوشهر (کد ۹) و سیرجان (کد ۶۲) در نیمه جنوبی ایران و بالاترین آن با مقدار 0.11 درجه سانتیگراد در سال مربوط به دو ایستگاه زنجان (کد ۲۸) و مراغه (کد ۴۲) در نیمه

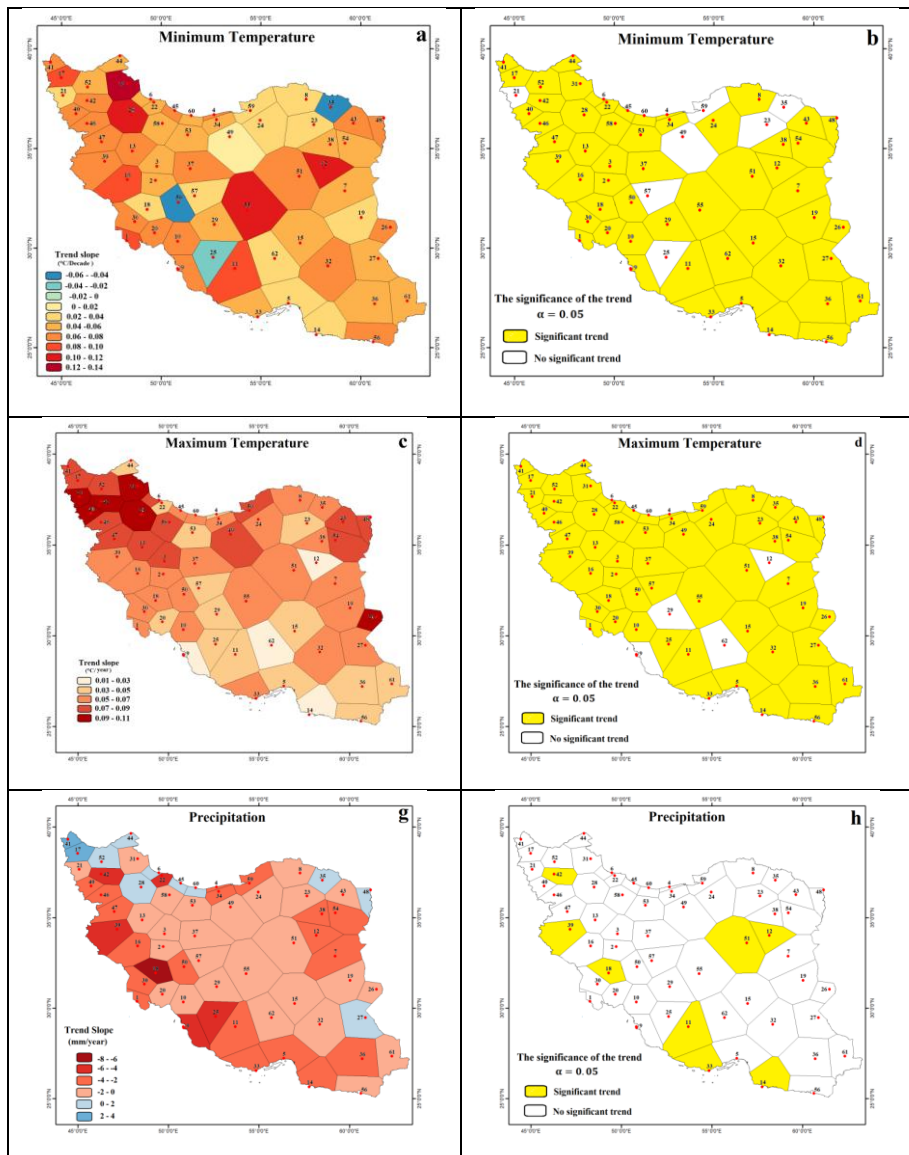
در شکل ۴ نتایج تحلیل روند تغییرات بلندمدت این چهار متغیر اقلیمی در قالب نقشه های شیب روند و معناداری روند آورده شده اند. روند تغییرات بلندمدت دمای حداقل سالانه نشان می دهند که به استثنای سه ایستگاه قوچان (کد ۳۵)، شهرکرد (کد ۵۰) و شیراز (کد ۲۵) که روند تغییرات بلندمدت آنها کاهشی بوده است بقیه ایستگاه ها روند تغییرات بلندمدت آنها افزایشی بوده است (شکل ۴a). اما شیب روند این افزایش از یک ایستگاه به ایستگاه دیگر متفاوت بوده است. پایین ترین شیب روند تغییرات افزایشی مربوط به ایستگاه سمنان (کد ۴۹) با شیب افزایشی 0.01 درجه سانتیگراد در سال و بالاترین آن مربوط به ایستگاه اردبیل (کد ۳۱) در شمال غرب ایران با شیب افزایشی 0.13 درجه سانتیگراد در سال بوده است (شکل ۴a). در شکل ۴ (b) ایستگاه های که روند آنها

شمالی ایران بوده است (شکل c۴). روند تغییرات بلندمدت دمای حداکثر سالانه ۵۸ ایستگاه از ۶۲ ایستگاه مورد مطالعه نیز در سطح $\alpha = 0.05$ معنادار بوده اند (شکل d۴). شیب روند تغییرات بلندمدت این متغیر اقلیمی به ترتیب در شمال غرب، غرب و جنوب غرب ایران شدیدتر و در جنوب و جنوب شرق ایران ملایم تر بوده است (شکل c۴).

روند تغییرات بلندمدت تبخیر و تعرق پتانسیل در ایران از الگوهای فضایی پیچیده تری در مقایسه با دیگر متغیرهای مورد مطالعه برخوردارند. پوشش گیاهی، گنجایش رطوبتی هوا، دما، سرعت باد، پوشش ابر، ترکیبات شیمیایی آب، سطح تبخیر می توانند از مهمترین عواملی باشند که بر روی میزان تبخیر و تعرق در یک منطقه اثر گذار هستند. ۱۴/۵ درصد (۹ ایستگاه) از ایستگاه های مورد مطالعه در ایران دارای روند کاهشی و ۸۵ درصد (۵۳ ایستگاه) آنها دارای روند افزایشی در میزان تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه بوده اند (شکل e۴). از ۹ ایستگاهی که روند شیب تغییرات آنها کاهشی بوده است، ایستگاه شیراز (کد ۲۵) با شیب روند تغییرات -0.68 میلیمتر در سال و ایستگاه دوگنبدان (کد ۱۰) با شیب روند تغییرات -13.76 میلیمتر در سال به ترتیب پایین ترین و بالاترین شیب روند تغییرات کاهشی را تجربه کرده اند (شکل e۴). ایستگاه های دوگنبدان (کد ۱۰) و بجنورد (کد ۸) تنها دو ایستگاهی بودند که روند تغییرات کاهشی آنها در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ معنادار بوده اند (شکل f۴). اما ایستگاه هایی که روند آنها افزایشی بوده است دامنه تغییراتی بین 0.12 میلی متر در سال (ایستگاه پارس آباد (کد ۴۴)) و 22.54 میلیمتر در سال (ایستگاه سبزوار (کد ۲۳)) داشته اند (شکل e۴). از مجموع ۵۳ ایستگاهی که

شمال شرق و جنوب شرق نیز مشاهده می‌شوند که دارای روند افزایشی در میزان بارش سالانه بوده‌اند (شکل g۴). در مجموع، ۱۱ ایستگاه از ۶۲ ایستگاه مورد مطالعه در ایران روند تغییرات بلندمدت بارش سالانه آنها افزایشی و ۵۱ ایستگاه دیگر نیز روند آنها کاهش‌ی بوده است. بالاترین مقدار روند افزایشی مربوط به ایستگاه ماکو (کد ۴۱) با $3/23$ میلیمتر در سال و بالاترین مقدار کاهش‌ی متعلق به ایستگاه مسجد سلیمان (کد ۱۸) با $-7/25$ میلیمتر در سال بوده است (شکل g۴). اما نکته بسیار مهم عدم معناداری بسیاری از روندهای کاهش‌ی یا افزایش‌ی بارش در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ در ایستگاه‌های مورد مطالعه است. از ۶۲ ایستگاه مورد مطالعه تنها ۸ ایستگاه روند آنها در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ معنادار بوده‌اند (شکل h۴).

روند تغییرات آنها افزایش‌ی بوده است ۴۱ ایستگاه آن روند تغییرات‌شان در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ معنادار بوده‌اند (شکل f۴). در یک مقیاس منطقه‌ای، غرب، شمال غرب و شمال شرق بالاترین روند تغییرات در میزان تبخیر و تعرق سالانه را داشته‌اند (شکل e۴). تحلیل روند تغییرات بلندمدت بارش‌های سالانه ایران در یک مقیاس ایستگاهی حاکی از وجود روند کاهش‌ی در بسیاری از ایستگاه‌های مورد مطالعه است. با توجه به شکل ۴g) الگوهای فضایی مشخصی در روند کاهش‌ی بارش‌های سالانه ایران قابل تشخیص است. اولین هسته کاهش‌ی بارش در غرب و جنوب غرب ایران، دومین هسته کاهش‌ی بارش در سواحل شمالی خلیج فارس و دریای عمان و سومین هسته کاهش‌ی بارش در شرق ایران مشاهده می‌شود. به صورت پراکنده نیز ایستگاه‌های در شمال غرب، شمال،



شکل ۴: توزیع فضایی مقادیر شیب روند تغییرات بلندمدت چهار متغیر اقلیمی دمای حداقل، دمای حداکثر، تبخیر و تعرق پتانسیل و بارش ایران (۲۰۱۶-۱۹۸۷) همراه با موقعیت جغرافیایی ایستگاه های دارای روند معنادار در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$

۲.۳. روند تغییرات بلندمدت بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل، دمای حداکثر و دمای حداقل در مقیاس فصلی

در مقیاس فصلی روند تغییرات بلندمدت چهار متغیر بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل، دمای حداکثر و دمای حداقل در مقیاس میانگین سرزمینی ایران و همچنین در مقیاس ایستگاهی مورد توجه قرار گرفتند. در مقیاس میانگین سرزمینی ایران، روند تغییرات بلندمدت دمای حداقل برای هر چهار فصل پاییز، زمستان، بهار و تابستان یک روند افزایشی بوده است (شکل ۵). اما شیب روند این تغییرات برای هر چهار فصل سال یکسان نبوده و از فصلی به فصل دیگر مقدار آن تفاوت داشته است. روند شیب تغییرات به ترتیب در فصل زمستان برابر با 0.074 درجه سلسیوس در سال، در فصل بهار برابر با 0.059 درجه سلسیوس در سال، در فصل تابستان

برابر با 0.044 درجه سلسیوس در سال و در فصل پاییز برابر با 0.021 درجه سلسیوس در سال بوده است (جدول ۱). شیب روند تغییرات دمای حداقل فصل زمستان، بهار و تابستان در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ معنادار و شیب روند تغییرات فصل پاییز در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ معنادار نبوده است.

دمای حداکثر نیز همچون دمای حداقل، در مقیاس سرزمینی ایران، در هر چهار فصل پاییز، زمستان، بهار و تابستان دارای روند افزایشی بوده‌اند (شکل ۵). فصل زمستان با شیب روند 0.111 درجه سانتیگراد در سال، بالاترین شیب روند تغییرات را در بین تمامی چهار فصل سال داشته است. بعد از فصل زمستان، دو فصل بهار و تابستان یا شیب روند 0.058 و 0.046 سلسیوس در سال رتبه های

بعدی را به خود اختصاص داده اند. شیب روند تغییرات این سه فصل در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ معنادار بوده اند. فصل پاییز با شیب روند تغییرات $0.18/0$ سلسیوس در سال، پایین ترین شیب روند تغییرات بلندمدت دمای حداکثر را داشته است که روند آن نیز در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ معنادار نبوده است (جدول ۱).

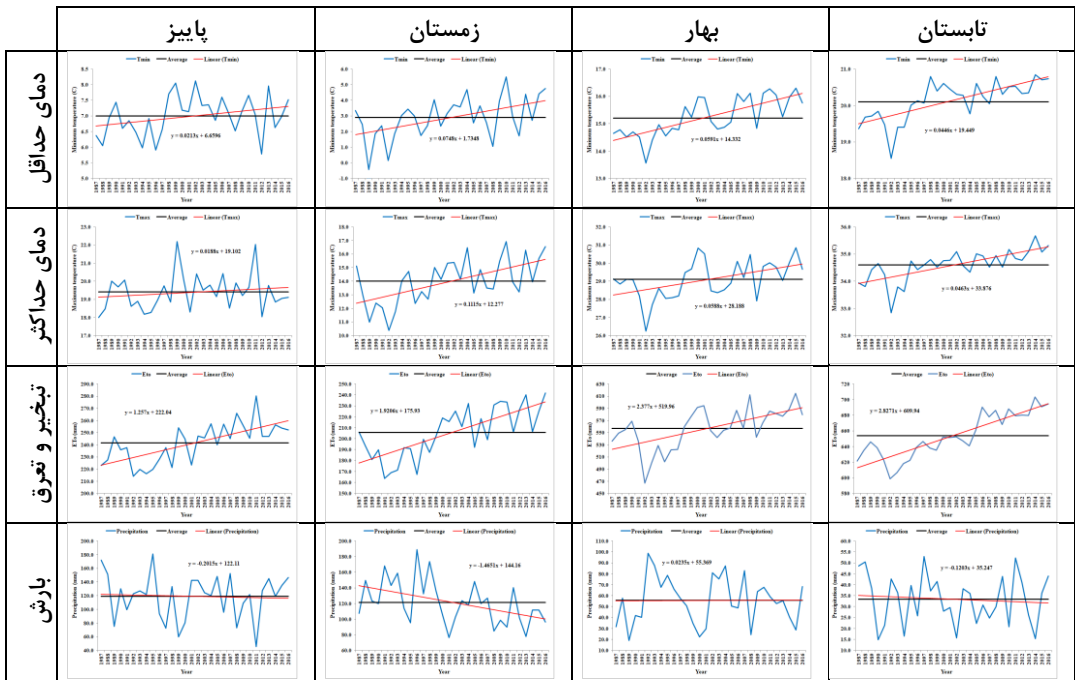
همانگونه که در شکل ۵ قابل مشاهده است روند تغییرات بلندمدت تبخیر و تعرق پتانسیل در مقیاس سرزمینی ایران در هر چهار فصل پاییز، زمستان، بهار و تابستان یک روند افزایشی است. شیب روند تغییرات این متغیر هیدرو-اقلیم در مقایسه با دیگر متغیرهای مورد مطالعه بسیار شدیدتر می باشد. فصل تابستان با شیب روند $2/827$ میلیمتر در سال و فصل پاییز با شیب روند تغییرات $1/257$ میلیمتر در سال به ترتیب بالاترین و پایین ترین مقادیر شیب روند را در این مقیاس زمانی به خود اختصاص داده اند (جدول ۱). همچنین شیب روند تغییرات بلندمدت تبخیر و تعرق پتانسیل در فصل بهار برابر با $2/277$ میلی متر در سال و در فصل زمستان نیز برابر با $1/920$ میلیمتر در سال بوده است. شیب روند تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل در هر چهار فصل پاییز، زمستان، بهار و تابستان در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ معنادار بوده است (جدول ۱).

در نهایت روند تغییرات بلندمدت بارش فصلی در مقیاس سرزمینی ایران مورد توجه قرار گرفت. روند تغییرات بلندمدت این متغیر اقلیمی بسیار متفاوت تر از دیگر متغیرهای مورد مطالعه می باشد. دلیل این تفاوت نیز مطمئناً در پیچیدگی توزیع زمانی و فضایی آن در ایران می باشد. روند تغییرات بلندمدت بارش در مقیاس سرزمینی ایران در فصول پاییز،

زمستان و تابستان کاهشی و در فصل بهار افزایشی می‌باشد (شکل ۶). در فصل زمستان، روند شیب تغییرات بلندمدت این متغیر اقلیمی برابر با $۱/۴۶۵$ - میلیمتر در سال می‌باشد که بالاترین مقدار در بین دیگر فصول می‌باشد (جدول ۱). در فصل پاییز، شیب روند کاهشی بارش برابر با $۰/۲۰۱$ - میلیمتر در سال و در فصل تابستان برابر با $۰/۱۲۰$ - میلیمتر در سال می‌باشد (جدول ۱). تنها فصلی که شیب روند تغییرات بارشی آن افزایشی بوده است فصل بهار می‌باشد که شیب روند تغییرات آن $۰/۰۲۳$ میلیمتر در سال بوده است. لازم به اشاره است که تنها شیب روند تغییرات بارش فصل زمستان در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ معنادار بوده است و در بقیه فصول شواهد کافی دال بر معناداری شیب روند تغییرات بارشی آنها مشاهده نشد (جدول ۱). تحلیل روند

دماهای حداقل ایران در یک مقیاس ایستگاهی نیز نشان می‌دهند که شیب روند تغییرات دماهای حداقل، در مقیاس ایستگاهی، در فصل زمستان، در مقایسه با سه فصل دیگر شدیدتر بوده است (شکل ۶b). در این فصل، غرب و شمال غرب ایران از مهمترین کانون های تغییرات در دماهای حداقل بوده‌اند. ایستگاه اردبیل (کد ۳۱)، در شمال غرب ایران، با شیب روند $۰/۲۵$ سلسیوس در سال، بالاترین شیب روند تغییرات را در بین ۶۲ ایستگاه مورد مطالعه داشته است (شکل ۶b). روند شیب تغییرات برای بسیاری از ایستگاه‌ها در فصل بهار، نسبتاً ملایم تر بوده‌اند. در این فصل کانون شدیدترین روند تغییرات در مقایسه با فصل زمستان از نیمه غربی به نیمه شرقی ایران انتقال داده شده‌اند (شکل ۶c).

زمستان و تابستان کاهشی و در فصل بهار افزایشی می‌باشد (شکل ۶). در فصل زمستان، روند شیب تغییرات بلندمدت این متغیر اقلیمی برابر با $۱/۴۶۵$ - میلیمتر در سال می‌باشد که بالاترین مقدار در بین دیگر فصول می‌باشد (جدول ۱). در فصل پاییز، شیب روند کاهشی بارش برابر با $۰/۲۰۱$ - میلیمتر در سال و در فصل تابستان برابر با $۰/۱۲۰$ - میلیمتر در سال می‌باشد (جدول ۱). تنها فصلی که شیب روند تغییرات بارشی آن افزایشی بوده است فصل بهار می‌باشد که شیب روند تغییرات آن $۰/۰۲۳$ میلیمتر در سال بوده است. لازم به اشاره است که تنها شیب روند تغییرات بارش فصل زمستان در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ معنادار بوده است و در بقیه فصول شواهد کافی دال بر معناداری شیب روند تغییرات بارشی آنها مشاهده نشد (جدول ۱). تحلیل روند



شکل ۵: روند تغییرات بلندمدت چهار متغیر اقلیمی دمای حداقل، دمای حداکثر، تبخیر و ترق در پتانسیل و بارش (۲۰۱۶-۱۹۸۷) در مقیاس سرزمینی ایران در مقیاس فصلی

جدول ۱: مقدار شیب روند تغییرات بلندمدت (بر حسب چهار متغیر اقلیمی دمای حداقل، دمای حداکثر، تبخیر و ترق پتانسیل و بارش (۲۰۱۶-۱۹۸۷) در مقیاس سرزمینی ایران برای فصول مختلف سال. خانه‌های سبز رنگ نشان دهنده روند تغییرات

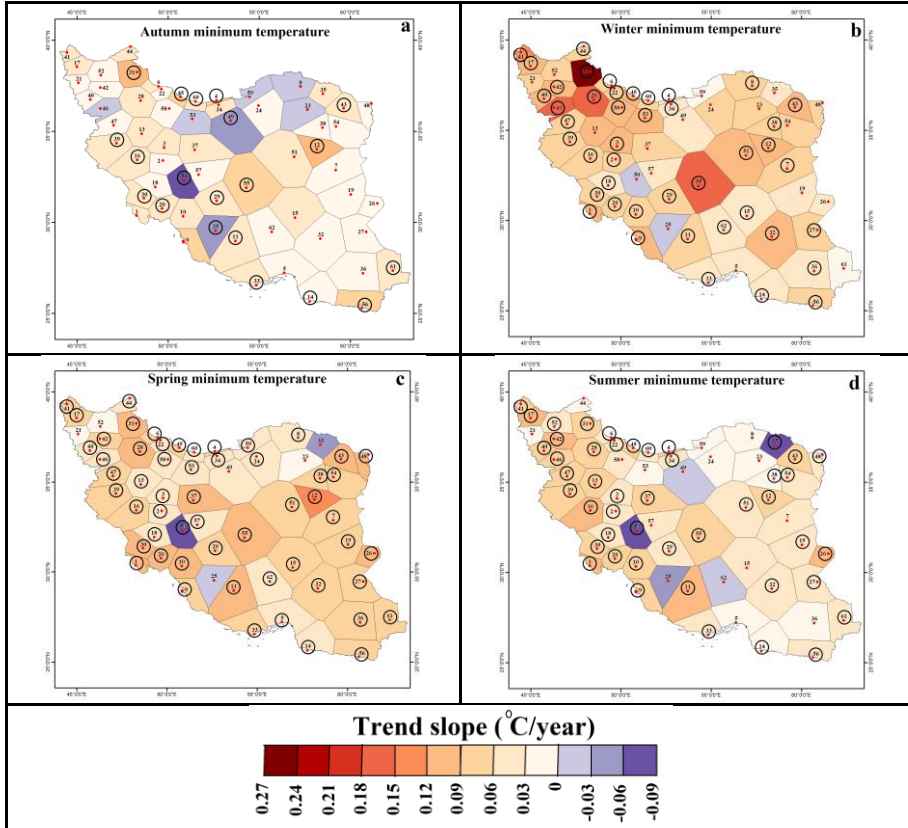
فصل	دمای حداقل	دمای حداکثر	بارش	تبخیر و ترق
پاییز	۰/۰۲۱	۰/۰۱۸	-۰/۲۰۱	۱/۲۵۷*
زمستان	۰/۰۷۴*	۰/۱۱۱*	-۱/۴۶۵*	۱/۹۲۰*
بهار	۰/۰۵۹*	۰/۰۵۸*	۰/۰۲۳	۲/۳۷۷*
تابستان	۰/۰۴۴*	۰/۰۴۶*	-۰/۱۲۰	۲/۸۲۷*

۵۶). در فصل تابستان مهمترین کانون بالاترین شیب روند تغییرات دمای حداقل فصل بهار متعلق به ایستگاه فردوس (کد ۱۲)، در شمال شرق ایران، با شیب روند ۰/۱۳ سلسیوس در سال می‌باشد (شکل

مقدار ۰/۱۱ سلسیوس در سال متعلق به ایستگاه خوی (کد ۱۷) در شمال غرب ایران بوده است (شکل ۶c). در نهایت فصل پاییز دارای کمترین تغییرات در دماهای حداقل بوده اند. با توجه به شکل ۶ (a) پایین بودن شیب روند تغییرات دماهای حداقل فصل پاییز در مقایسه با دیگر فصول مشخص است. بالاترین شیب روند تغییرات این فصل متعلق به ایستگاه اردبیل (کد ۳۱) در شمال غرب ایران بوده است که مقدار آن برابر با ۰/۱ سلسیوس در سال بوده است. معناداری شیب روند دماهای حداقل ایستگاه های مورد مطالعه در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ نیز با دایره های سیاه رنگی که به دور شماره کد ایستگاه ها قرار داده شده اند نشان داده شده اند. به ترتیب فصل بهار با ۵۶ ایستگاه، فصل تابستان با ۴۶ ایستگاه، فصل زمستان با ۴۴ ایستگاه و فصل پاییز با ۲۰ ایستگاه دارای بیشترین روندهای

معنادار در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ بوده اند (شکل ۶). روند تغییرات دماهای حداکثر فصلی ایران در یک مقیاس ایستگاهی نشان می دهند که در فصل پاییز، تغییرات قابل توجهی در دماهای حداکثر ایران قابل مشاهده نیست (شکل ۶a). بالاترین مقادیر شیب روند تغییرات در این فصل مربوط به ایستگاه های شمال غرب ایران بوده است. دو ایستگاه مراغه (کد ۴۲) و ماکو (کد ۴۱) با شیب روند ۰/۰۶۵ و ۰/۰۵۷ سلسیوس در سال بالاترین شیب روند تغییرات را به خود اختصاص داده اند. در این فصل شیب روند تغییرات بلندمدت دماهای حداکثر هیچکدام از ایستگاه های مورد مطالعه در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ معنادار نبوده اند (شکل ۶a). اما مهمترین و قابل توجه ترین تغییرات در دماهای حداکثر در فصل زمستان مشاهده شده است. در این

فصل کل ۶۲ ایستگاه مورد مطالعه دارای روند افزایشی بوده اند (شکل b۷).



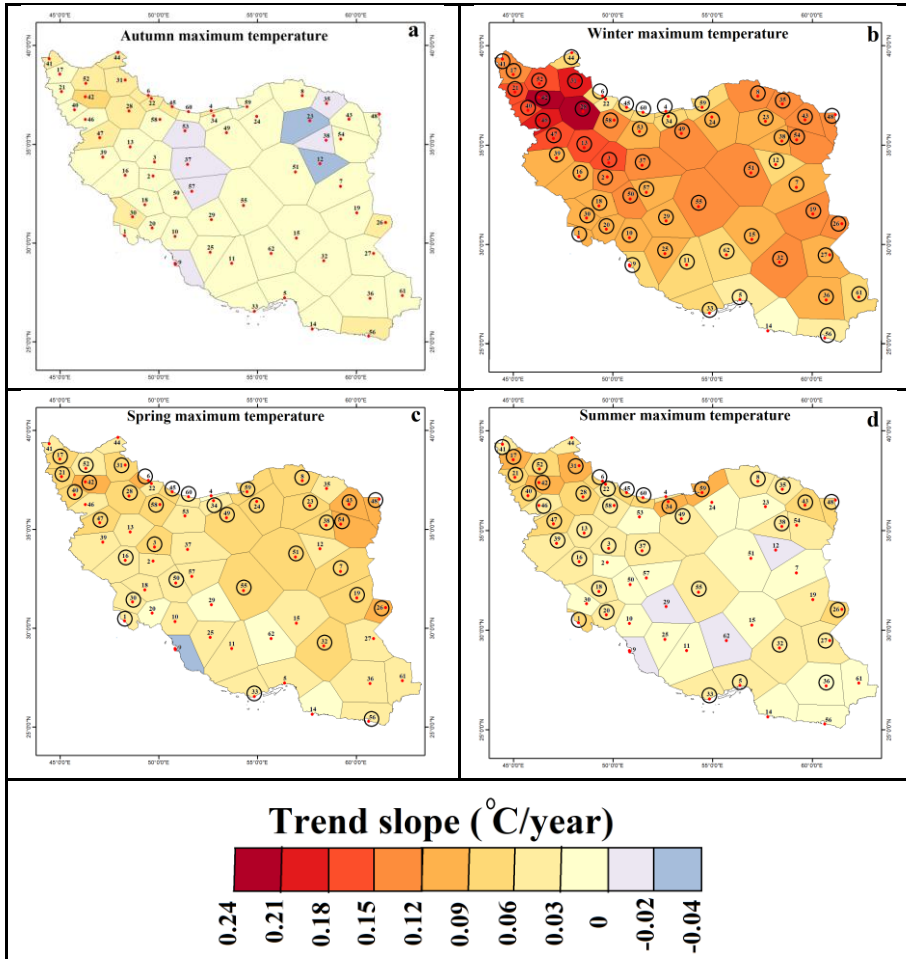
شکل ۶: توزیع فضایی مقادیر شیب روند تغییرات بلندمدت دمای حداقل ایران (۲۰۱۶-۱۹۸۷) در یک مقیاس ایستگاهی. (a) فصل پاییز، (b) فصل زمستان، (c) فصل بهار و (d) فصل تابستان. ایستگاه هایی که شیب روند آنها در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ معنادار بوده اند با دایره های سیاه رنگ مشخص شده اند.

ایستگاه های واقع در غرب و شمال غرب ایران بیشترین تغییرات در دماهای حداکثر را تجربه کرده اند. بعد از غرب و شمال غرب ایران و با یک درجه شدت کمتر، می توان تغییرات قابل توجهی در دماهای حداکثر مرکز، شمال شرق و

شیب روند تغییرات ۰/۱۱۹، ۰/۱۱۳، ۰/۱۰۸، ۰/۱۰۲ و ۰/۱۰۰ سلسیوس در سال، بالاترین شیب روند تغییرات دمای حداکثر این فصل را داشته اند (شکل ۷c). در شکل ۷c) ایستگاه‌هایی که روند تغییرات آنها در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ معنادار بوده اند با دایره های سیاه رنگی مشخص شده‌اند. در این فصل ۳۵ ایستگاه از ۶۲ ایستگاه مورد مطالعه شیب روند تغییرات آنها در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ معنادار بوده است (شکل ۷b). در نهایت روند تغییرات بلندمدت دماهای حداکثر فصل تابستان نیز مورد توجه قرار گرفتند. روند افزایشی دماهای حداکثر این فصل می‌تواند باعث تشدید شدت، مدت و فراوانی امواج گرمایی در ایران شوند. همانگونه که در شکل ۷d) قابل مشاهده است به استثنای چهار ایستگاه آباده (کد ۲۹)، بوشهر (کد ۹)، فردوس (کد ۱۲) و سیرجان (کد ۶۲) که

جنوب شرق ایران مشاهده نمود (شکل ۷b). بالاترین شیب روند تغییرات دماهای حداکثر متعلق به چهار ایستگاه زنجان با کد ۲۸ (۲۱۷/۰ سلسیوس در سال)، مراغه با کد ۴۲ (۲۱۴/۰ سلسیوس در سال)، اردبیل با کد ۳۱ (۱۹۲/۰ سلسیوس در سال) و سقز با کد ۴۶ (۱۸۷/۰ سلسیوس در سال) بوده است که همگی آنها در غرب و شمال غرب ایران استقرار داشته اند (شکل ۷b). نکته مهم در این خصوص معنادار بودن شیب روند تغییرات دمای حداکثر ۶۰ ایستگاه از ۶۲ ایستگاه مورد مطالعه در ایران بوده است (شکل ۷b). بعد از فصل زمستان، فصل بهار دومین فصلی بوده است که تغییرات در دماهای حداکثر آن به خصوص در شمال شرق، شرق و شمال غرب ایران برجسته بوده است (شکل ۷c). زابل (کد ۲۹)، مراغه (کد ۴۲)، سرخس (کد ۴۸)، تربت حیدریه (کد ۵۴) و مشهد (کد ۴۳) با

شیب روند تغییرات آنها کاهش یافته است. آنها افزایش یافته است. است، بقیه ایستگاه‌ها شیب روند تغییرات



شکل ۷: توزیع فضایی مقادیر شیب روند تغییرات بلندمدت دمای حداکثر ایران (۲۰۱۶-۱۹۸۷) در یک مقیاس ایستگاهی. (a) فصل پاییز، (b) فصل زمستان، (c) فصل بهار و (d) فصل تابستان. ایستگاه‌هایی که شیب روند آنها در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ معنادار بوده اند با دایره‌های سیاه رنگ مشخص شده‌اند.

شمال غرب و کرانه های جنوبی دریای تغییرات در دماهای حداکثر این فصل خزر (شمال ایران) از مهمترین کانون‌های بوده اند (شکل d۷). گرگان (کد ۵۹) با

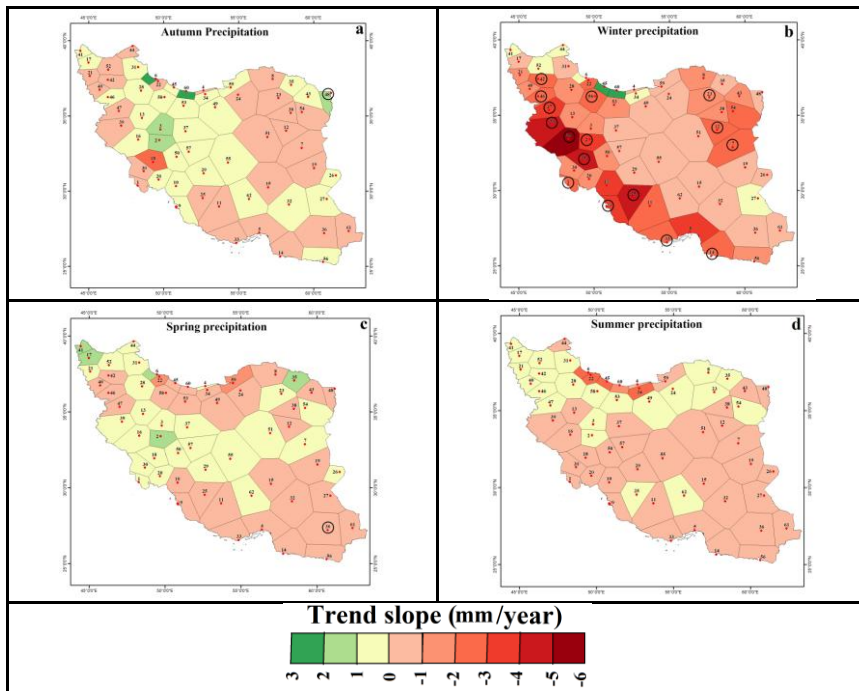
شیب روند ۰/۱۱۶ سلسیوس در سال، شدیدترین روند تغییرات افزایشی را به خود اختصاص داده بود. شیب روند تغییرات ۳۸ ایستگاه از ۶۲ ایستگاه مورد مطالعه نیز در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ معنادار بوده‌اند (شکل d۷).

تحلیل روند بارش‌های فصلی ایران در یک مقیاس ایستگاهی نشان می‌دهند که روند تغییرات بارش‌های فصل زمستان ایران در مقایسه با سه فصل دیگر سال بسیار شدیدتر است. همانگونه که در شکل ۸(b) قابل مشاهده است از ۶۲ ایستگاه مورد مطالعه ۵۴ ایستگاه در این فصل دارای روند کاهشی در مقدار بارش بوده‌اند. با توجه به نوع آرایش فضایی مقادیر شیب روند محاسبه شده برای بارش‌های این فصل، دو کانون اصلی برای روند تغییرات کاهشی قابل تشخیص است. اولین کانون مربوط به یک نوار وسیع و ممتد است که از غرب تا جنوب شرق ایران کشیده شده

است. این نوار کاملاً منطبق بر رشته کوه-های زاگرس می‌باشند. دومین کانون نیز مربوط به شمال شرق ایران است. شدت تغییرات این کانون در مقایسه با کانون اول کمتر می‌باشد (شکل b۸). ایستگاه-های خرم آباد (کد ۱۶)، کرمانشاه (کد ۳۹)، شیراز (کد ۲۵) و مسجد سلیمان (کد ۱۸) به ترتیب با ۵/۲، ۴/۷، ۴/۵ و ۴/۱ میلیمتر در سال، بالاترین مقادیر شیب روند را در این فصل به خود اختصاص داده‌اند (شکل b۸). اما لازم به اشاره است که شیب روند تمامی ایستگاه-ها در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ معنادار نبوده و تنها ۱۷ ایستگاه شیب روند آنها در سطح احتمالاتی مورد نظر معنادار بوده‌اند (شکل b۸). در سه فصل دیگر روندهای کاهشی یا افزایشی معناداری در مقادیر بارش فصلی ایران مشاهده نشد. در هر سه فصل پاییز (شکل a۸)، بهار (شکل c۸) و تابستان (شکل

اما برجسته ترین تغییرات بارشی در فصل تابستان مربوط به نوار ساحلی جنوب دریای خزر می باشد. در این قسمت از ایران بارش های فصل تابستان دارای روندهای کاهشی شدیدی در مقایسه با دیگر قسمت های ایران هستند (شکل ۸

d) بیشتر ایستگاه ها شیب روندی بین ۱ و -۱ میلی متر در سال داشته اند. در فصل تابستان ۲۸ ایستگاه شیب روند آنها صفر بوده است. فصل تابستان خشک ترین فصل ایران است و در بسیاری از ایستگاه ها در این فصل بارشی به وقوع نمی پیوندد. (d) به طوری که شیب روند ایستگاه های



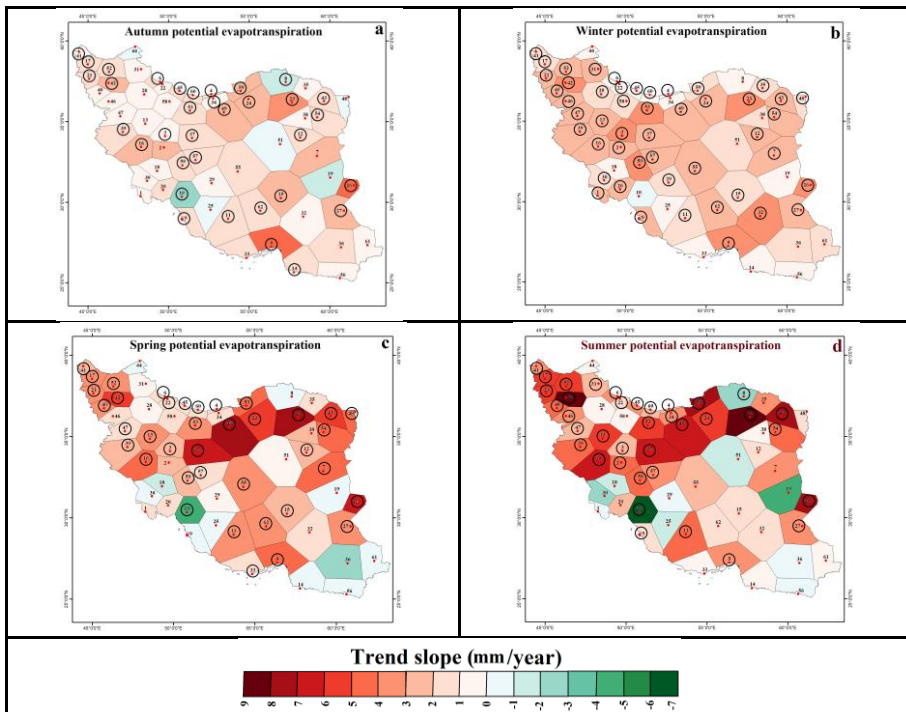
شکل ۸: توزیع فضایی مقادیر شیب روند تغییرات بلندمدت بارش فصلی ایران (۱۹۸۷-۲۰۱۶) در یک مقیاس ایستگاهی. (a) فصل پاییز، (b) فصل زمستان، (c) فصل بهار و (d) فصل تابستان. ایستگاه هایی که شیب روند آنها در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ معنادار بوده اند با دایره های سیاه رنگ مشخص شده اند.

واقع در این قسمت از ایران به ترتیب عبارتند از: ایستگاه رشت (کد ۲۲) ۲/۹۶- میلیمتر در سال، ایستگاه بندر انزلی (کد ۶) ۲/۷۰- میلیمتر در سال، ایستگاه رامسر (کد ۴۵) ۲/۰۹- میلیمتر در سال، ایستگاه قراخیل (کد ۳۴) ۲/۰۱- میلیمتر در سال، ایستگاه نوشهر (کد ۶۰) ۱/۳۱- میلیمتر در سال، ایستگاه گرگان (کد ۵۹) ۰/۶۷- میلیمتر در سال و ایستگاه بابلسر (کد ۴) ۰/۴۷- میلیمتر در سال.

روند تبخیر و تعرق پتانسیل در یک مقیاس فصلی برای ۶۲ ایستگاه مورد مطالعه در محدوده مرزهای سیاسی ایران نیز تحلیل شدند. فصل تابستان به عنوان گرم‌ترین فصل ایران قاعدتاً دارای تبخیر و تعرق پتانسیل بالایی خواهد بود. بنابراین بالاترین مقادیر شیب روند تغییرات بلندمدت این متغیر اقلیمی در این فصل مشاهده شده است. ایستگاه‌های سبزوار (کد ۲۳)، مراغه (کد ۴۲)، مشهد (کد ۴۳)، گرگان (کد ۵۹) و زابل (کد ۲۶) به ترتیب با ۸/۴۹، ۸/۴۱، ۷/۸۵، ۷/۶۴ و ۷/۴۵ میلیمتر در سال بالاترین میزان شیب روند را داشته‌اند (شکل d۹). به طور کلی از ۶۲ ایستگاه مورد مطالعه ۵۲ ایستگاه در این فصل دارای روند افزایشی بوده‌اند. روند تغییرات این متغیر اقلیمی در نیمه شمالی بسیار بیشتر از نیمه جنوبی ایران بوده است (شکل d۹). بعد از فصل تابستان، تغییرات در فصل بهار نیز قابل توجه بوده است. در این فصل همچون فصل تابستان شیب روند تغییرات در نیمه شمالی بیشتر از نیمه جنوبی ایران است. در این فصل از ۶۲ ایستگاه مورد مطالعه ۵۰ ایستگاه آن روند افزایشی داشته‌اند. ایستگاه سمنان (کد ۴۹) با ۷/۵۴ میلیمتر در سال و ایستگاه سبزوار (کد ۲۳) با ۷/۴۳ میلیمتر در سال بالاترین مقادیر شیب روند تغییرات را به خود اختصاص داده‌اند (شکل c۹). اما

تحلیل روند تغییرات در فصل زمستان
 شاید در مقایسه با دیگر فصول ایران از
 اهمیت بیشتری برخوردار باشد. دلیل این
 اهمیت در رژیم بارشی زمستانه ایران
 است. در این فصل به استثنای ایستگاه

دوگنبدان (کد ۱۰) که شیب روند
 تغییرات آن کاهشی بوده است، بقیه ۶۱
 ایستگاه مورد مطالعه دارای روند افزایشی
 بوده‌اند.



۲۰۱۶-۱۹۸۷ پرداخت. یافته‌های این مطالعه تصویری منسجم اما نگران‌کننده از تشدید فشار اقلیمی بر منابع آب کشور ترسیم می‌کند. در سطح ملی، نتایج به وضوح یک سیگنال قوی از گرمایش، شامل افزایش معنادار دمای حداقل و حداکثر و افزایش تقاضای اتمسفری برای آب، نمایان شده در افزایش معنادار ET_0 ، را در کنار یک روند کاهشی در بارش سالانه نشان می‌دهد. این ترکیب سه‌گانه -گرم‌تر، تشنه‌تر و اندکی خشک‌تر - سنگ بنای اصلی تشدید شرایط خشکی در اقلیم ایران است. یکی از یافته‌های کلیدی، گرمایش شدیدتر و نامتقارن فصل زمستان نسبت به سایر فصول، به ویژه برای دمای حداکثر (با شیب روند ۰/۱۱ سانتیگراد در سال) است. این پدیده پیامدهای هیدرولوژیکی عمیقی دارد؛ افزایش دمای زمستان به معنای کاهش نسبت بارش جامد به مایع (برف به باران)

ترتیب متعلق به ایستگاه بندرعباس (کد ۵) با ۳/۹۴ میلیمتر در سال، زابل (کد ۲۶) با ۳/۸۵ میلیمتر در سال و سبزار (کد ۲۳) با ۳/۷۱ میلیمتر در سال بوده است (شکل b۹). در نهایت در فصل پاییز کمترین تغییرات در تبخیر و تعرق پتانسیل مشاهده شد. در این فصل ۵۵ ایستگاه دارای روند افزایشی و ۷ ایستگاه نیز دارای روند کاهشی بوده‌اند. بالاترین مقدار شیب روند تغییرات مربوط به دو ایستگاه بندرعباس (کد ۵) و زابل (کد ۲۶) با مقادیر ۴/۹۱ و ۴/۲۸ میلیمتر در سال بوده است (شکل a۹).

۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش، با هدف ارائه یک تحلیل یکپارچه و به‌روز از روندهای هیدروکلیماتولوژیک ایران، به ارزیابی همزمان تغییرات دمای حداقل و حداکثر، بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل (ET_0) در مقیاس‌های سالانه و فصلی طی دوره

و تسریع فرآیند ذوب برف‌های موجود است. این امر ضمن مختل کردن رژیم هیدرولوژیک رودخانه‌های وابسته به ذوب برف، ذخیره‌سازی طبیعی آب در حوضه‌های بالادست را کاهش داده و آسیب‌پذیری کشور را در فصول گرم و خشک در برابر کمبود آب افزایش می‌دهد. تحلیل فضایی نیز یک ناهمگونی جغرافیایی بارز را آشکار ساخت؛ مناطق غرب و شمال غرب ایران، به ویژه در امتداد رشته‌کوه‌های زاگرس، به عنوان کانون اصلی تغییرات ظاهر شدند. این مناطق نه تنها شدیدترین روندهای افزایشی دما را تجربه می‌کنند، بلکه متحمل قوی‌ترین و معنادارترین روندهای کاهش بارش نیز هستند. از آنجایی که این مناطق به طور سنتی سرچشمه بسیاری از رودخانه‌های بزرگ ایران بوده‌اند، این تغییرات یک تهدید استراتژیک برای امنیت آب و غذای کشور محسوب می‌شود. علاوه بر این، یکی از یافته‌های قابل تامل این پژوهش، مشاهده روند کاهشی تبخیر و تعرق پتانسیل در برخی ایستگاه‌های نیمه جنوبی ایران بود. این پدیده که به پارادوکس تبخیر مشهور است، علی‌رغم روند گرمایش عمومی، دارای توجیه علمی است و نشان می‌دهد که ET_0 صرفاً تابعی از دما نیست. عواملی مانند کاهش سرعت باد و کاهش تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین می‌توانند اثر افزایشی دما را خنثی کنند. این یافته پیچیدگی‌های حاکم بر بیلان انرژی و آب در سطح زمین را برجسته می‌سازد و اهمیت لحاظ کردن متغیرهای چندگانه را در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی آینده گوشزد می‌کند. در نهایت، این پژوهش تأیید می‌کند که اقلیم ایران به سمت شرایطی گرم‌تر و خشک‌تر در حال حرکت است و سیاست‌گذاری‌های مدیریت منابع آب باید از رویکرد واحد

ملی به سمت راهکارهای سازگارانه و تفکیک اثرات تغییر اقلیم از عوامل انسانی منطقه‌ای، با تمرکز بر کانون‌های آسیب‌پذیری، تغییر جهت دهد. پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده به بررسی سازوکارهای فیزیکی این تغییرات و

بپردازند تا به درکی جامع‌تر از آینده هیدرولوژیکی ایران دست یابیم.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی: این پژوهش هیچ کمک مالی از سازمان‌های تأمین مالی دریافت نکرده است.
تعارض منافع: طبق اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.
برگرفته از پایان نامه: این مقاله برگرفته از پایان نامه عبدالرئوف شاهوزئی بوده است.

References

- Ahmadi, F., Tahroudi, M. N., Mirabbasi, R., Khalili, K., & Jhajharia, D. (2017). Spatiotemporal trend and abrupt change analysis of temperature in Iran. *Meteorological Applications*, 25(2), 314–321. <https://doi.org/10.1002/met.1694>.
- Alijani, B., Mahmoudi, P., Salighe, M., & Rigi Chahi, A. (2011). Study of annual maximum and minimum temperatures Changes in Iran. *Geographical Research*, 26(102), 101-122.
- Asakereh, H. 2011. *Fundamentals of Statistical Climatology*. Zanjan University Press, 469 Zanjan, Iran. (in Persian)
- Chaudhari, S., Felfelani, F., Shin, S., & Pokhrel, Y. (2018). Climate and anthropogenic contributions to the desiccation of the second largest saline lake in the twentieth century. *Journal of Hydrology*, 560, 342–353. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.03.034>.

- Ghasemi, A. R. (2015). Changes and trends in maximum, minimum and mean temperature series in Iran. *Atmospheric Science Letters*, 16(3), 366–372.
<https://doi.org/10.1002/as.12.569>.
- Groisman, P. Y., Knight, R. W., Easterling, D. R., Karl, T. R., Hegerl, G. C., & Razuvaev, V. N. (2005). Trends in intense precipitation in the climate record. *Journal of Climate*, 18(9), 1326–1350.
<https://doi.org/10.1175/JCLI3339.1>.
- Hosseinzadeh Talaei, P., Tabari, H., & Abghari, H. (2014). Pan evaporation and reference evapotranspiration trend detection in western Iran with consideration of data persistence. *Hydrology Research*, 45(2), 213–225.
<https://doi.org/10.2166/nh.2013.058>.
- Javari, M. (2016). Trend and homogeneity analysis of precipitation in Iran. *Climate*, 4(3), 44.
<https://doi.org/10.3390/cli4030044>.
- Katiraei, P., Hajam, S., & Irannezhad, P. (2007). Contribution from the variations of precipitation frequency and daily intensity to the precipitation trend in Iran over the period 1960-2001. *Journal of the Earth and Space Physics*, 33(1), 67-83.
- Kazemzadeh, M., Noori, Z., Jamali, S., & Abdi, A. M. (2022). Forty years of air temperature change over Iran reveals linear and nonlinear warming. *Journal of Meteorological Research*, 36(6), 462–477.
<https://doi.org/10.1007/s13351-022-1184-5>.
- Khazaei, B., Khatami, S., Alemohammad, S. H., Rashidi, L., Wu, C., Madani, K., Kalantari, Z., Destouni, G., & Aghakouchak, A. (2019). Climatic or regionally induced by humans? Tracing hydro-climatic and land-use changes to better understand the Lake Urmia tragedy. *Journal of Hydrology*,

- 569, 203–217.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.004>.
- Mahmoudi, P., Mohammadi, M., & Daneshmand, H. (2019). Investigating the trend of average changes of annual temperatures in Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(2), 1079–1092. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1664-4>.
 - Mahmoudi, P., Amir Jahanshahi, S., Daneshmand, N. and Rezaei, J. (2021). Spatial and temporal analysis of mean and frequency variations of dry spells in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*. 14, 478. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06861-6>
 - Manton, M. J., Della-Marta, P. M., Haylock, M. R., Hennessy, K. J., Nicholls, N., Chambers, L. E., Collins, D. A., Daw, G., Finet, A., Gunawan, D., Inape, K., Isobe, H., Kestin, T. S., Lefale, P., Leyu, C. H., Lwin, T., Maitrepierre, L., Ouprasitwong, N., Page, C. M., ... Yee, D. (2001). Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961–1998. *International Journal of Climatology*, 21(3), 269–284. <https://doi.org/10.1002/joc.610>.
 - Moradi, F., Kamali, G. and Vazifiedoust, M. (2015). Evaluation of Potential Evapotranspiration from MODIS Product Using Synoptic Stations of Zanjan Province. *Journal of Climate Research*, 1394(23), 39-48.
 - Moshir Panahi, D., Kalantari, Z., Ghajarnia, N., Seifollahi-Aghmiuni, S., & Destouni, G. (2020). Variability and change in the hydro-climate and water resources of Iran over a recent 30-year period. *Scientific Reports*, 10, 7450. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64089-y>.
 - Nabavi, E. (2018). Failed policies, falling aquifers: Unpacking groundwater

- overabstraction in Iran. *Water Alternatives*, 11(3), 699–724.
- Najafi, M. R., & Moazami, S. (2016). Trends in total precipitation and magnitude–frequency of extreme precipitation in Iran, 1969–2009. *International Journal of Climatology*, 36(4), 1863–1872. <https://doi.org/10.1002/joc.4465>.
 - Nasirian, H., & Salehzadeh, A. (2019). Effect of seasonality on the population density of wetland aquatic insects: A case study of the Hawr Al Azim and Shadegan wetlands, Iran. *Veterinary World*, 12(4), 584–592. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2019.584-592>.
 - Nasirian, H., Irvine, K. N., Sadeghi, S. M. T., Mahvi, A. H., & Nazmara, S. (2016). Assessment of bed sediment metal contamination in the Shadegan and Hawr Al Azim wetlands, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, 107. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5117-6>.
 - Pryor, S. C., Howe, J. A., & Kunkel, K. E. (2009). How spatially coherent and statistically robust are temporal changes in extreme precipitation in the contiguous USA? *International Journal of Climatology*, 29(1), 31–45. <https://doi.org/10.1002/joc.1696>.
 - Raziei, T., Daneshkar Arasteh, P., & Saghafian, B. (2005). Annual Rainfall Trend Analysis in Arid and Semi-arid Regions of Central and Eastern Iran. *Journal of Water and Wastewater*, 16(2), 73-81.
 - Saboohi, R., Soltani, S., & Khodaghali, M. (2012). Trend analysis of temperature parameters in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 109(3–4), 529–547. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0590-5>.
 - Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau.

- Journal of the American Statistical Association, 63(324), 1379-1389.
- Sharafi, S., & Mir Karim, N. (2020). Investigating trend changes of annual mean temperature and precipitation in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 759. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05695-y>.
 - Sharifikia, M. (2013). Environmental challenges and drought hazard assessment of Hamoun Desert Lake in Sistan region, Iran, based on the time series of satellite imagery. *Natural Hazards*, 65(1), 201-217. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0353-8>.
 - Soltani, S., Saboohi, R., & Yaghmaei, L. (2012). Rainfall and rainy days trend in Iran. *Climatic Change*, 110(1), 187-213. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0146-1>.
 - Soroush, F., Fathian, F., Khabisi, F. S. H., & Kahya, E. (2020). Trends in pan evaporation and climate variables in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 142(3-4), 407-432. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03262-9>.
 - Tabari, H., & Marofi, S. (2011). Changes of pan evaporation in the west of Iran. *Water Resources Management*, 25(1), 97-111. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9689-6>.
 - Theil, H. (1950) A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. *Indagationes Mathematicae*, 1(2), 85-89.
 - Thiessen, A. H. 1911. Precipitation Averages for Large Areas. *Monthly Weather Review*, 39: 1082-1084.
 - Torabi Haghighi, A., & Kløve, B. (2017). Design of environmental flow regimes to maintain lakes and wetlands in regions with high seasonal irrigation demand. *Ecological Engineering*, 100, 120-129. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.12.015>.
 - Tourian, M. J., Elmi, O., Chen, Q., Devaraju, B.,

- Roohi, Sh., & Sneeuw, N. (2015). A spaceborne multisensor approach to monitor the desiccation of Lake Urmia in Iran. *Remote Sensing of Environment*, 156, 349–360.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.10.006>.
- Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(123–138).
<https://doi.org/10.3354/cr00953>.
- Wu, H.-T. J., & Lau, W. K.-M. (2016). Detecting climate signals in precipitation extremes from TRMM (1998–2013)—Increasing contrast between wet and dry extremes during the “global warming hiatus”. *Geophysical Research Letters*, 43(3), 1340–1348.
<https://doi.org/10.1002/2015GL06737>