نشریه هواشناسی کشاورزی
(وابسته به انجمن مهندسی آبیاری و آب ایران)
جلد ۱۱، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۴۰۲، صص.۶۹-۵۱
مقاله علمی پژوهشی

Journal of Agricultural Meteorology
(Iranian Soc. of Water and Irrig. Eng.)
Vol. 11, No. 2, Autumn & Winter 2023, pp. 51-69
DOI: 10.22125/agmj.2023.368274.1142

تحلیل روند زمانی تغییرات بارش و دما در حوضه های آبریز ایران

مصطفی خورسندی [۱*]، حسین قلخانی [۲]، محمد مهدی باطنی [۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۱

چکیده

در این مطالعه، با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی وزارت نیرو به ارزیابی روند تغییرات متغیرهای بارش و دما در مقیاس حوضه‌ای در گستره ایران پرداخته شد. ابتدا داده‌های ماهانه ایستگاه‌های منتخب شامل ۴۷۶ ایستگاه اقلیم‌شناسی و ۱۱۶ ایستگاه تبخیرسنجی از مجموع ۲۱۴۲ ایستگاه اقلیم‌شناسی و ۱۲۳۰ ایستگاه تبخیرسنجی، با حداقل ۴۰ سال آمار با حداکثر ۳ ماه خلأ آماری انتخاب شد. دوره مطالعاتی سال‌های آبی ۵۴-۱۳۵۳ الی ۹۳-۱۳۹۲ می‌باشد. از آزمون من-کندال برای آشکارسازی روند این داده‌ها در هر ایستگاه استفاده شد. سپس با استفاده از روش تیسن، بارش و دمای ماهانه، فصلی و سالانه ایستگاه‌ها به سطح حوضه‌های آبریز بسط داده شد. در ادامه با توجه به بزرگی شاخص من-کندال نسبت به بازه‌های اطمینان ۹۰، ۹۵ و ۹۹ درصد، نتایج در مقیاس ایستگاه‌ها، حوضه آبریز درجه دو، درجه یک و کل کشور مورد بحث قرار گرفت. نتایج این تحقیق برای متغیر بارش حاکی از روند افزایشی در فصل پاییز برای شمال کشور (۱۳ درصد ایستگاه‌ها)، روند کاهشی در فصل زمستان برای ۳۳ درصد ایستگاه‌ها، بدون روند معنی‌دار در فصل بهار، و روند افزایشی در فصل تابستان می‌باشد. همچنین روند افزایشی در تمامی حالات برای متغیر دما مشاهده شد. با مقایسه تغییرات ۵ و ۱۰ سال انتهایی دوره مطالعاتی (منتهی به سال آبی ۹۳-۱۳۹۲) با میانگین ۴۰ ساله، کاهش بارش در اغلب مناطق کشور، توأم با افزایش میانگین دما، حاکی از کاهش منابع آبی در دسترس می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آشکارسازی روند، بارش، دما، تغییر اقلیم، ایران

مقدمه

متغیرهای اقلیمی با تغییرات خود شرایط بلندمدت اقلیمی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این اثرات هر چند که ممکن است تدریجی و کند باشند، لیکن می‌توانند پیامدهای زیادی از جمله افزایش تنش‌ها بر سامانه‌های مختلفی را در کنش با سامانه اقلیم هستند به همراه داشته باشند. به علاوه، افزایش روزافزون گازهای گلخانه‌ای در جو می‌تواند موجب تغییرات بیشتر در متغیرهای اقلیمی در دوره‌های آتی شود. به عنوان مثال، کمبود بیش از پیش بارش در کشور ما که میزان آن، کمتر از یک سوم میانگین جهانی است، می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر همه بخش‌های اقتصادی-اجتماعی گذاشته و پایداری منابع طبیعی را تهدید کند. تغییر اقلیم را می‌توان به تغییرات معنی‌دار آماری برای متوسط وضع آب و هوا در یک دوره طولانی (چند دهه و بیشتر) تعبیر کرد. این تغییرات می‌تواند در متوسط دما، بارندگی، باد، تابش یا متغیرهای مشابه دیگر باشد (Kondratyev and Kondratyev, 2004). متغیرهای اقلیمی در مقیاس زمان و مکان به دلایل زیادی تغییر می‌کنند که باید نحوه تغییرات آنها بر اساس مشاهدات و با بهره‌گیری از روش‌های آماری خاصی تعیین شود. این تغییرات تنها زمانی مؤید تغییر اقلیم است که شامل انحرافات کوتاه‌مدت از متوسط بلندمدت نباشد. تحلیل روند از جمله مهمترین روش‌های آماری است که به طور گسترده برای ارزیابی اثرات

[۱] دانشجوی دکتری، مرکز آب، زمین و محیط زیست، دانشگاه INRS، کبک، کانادا
(*نویسنده مسئول: mostafa.khorsandi@inrs.ca)

[۲] کارشناس ارشد بیلان آب، شرکت مدیریت منابع آب ایران، وزارت نیرو، ایران

[۳] پژوهشگر پسا دکتری، انستیتوی مطالعات پیشرفته (IUSS)، پاویا، ایتالیا

نحوه ارجاع مقاله:
خورسندی، م.، قلخانی، ح.، باطنی، م.ح. ۱۴۰۲. تحلیل روند زمانی تغییرات بارش و دما در حوضه های آبریز ایران. نشریه هواشناسی کشاورزی، ۱۱(۲): ۶۹-۵۱ DOI: 10.22125/agmj.2023.368274.1142

Korsandi, M., Ghalkhani, H., Bateni, M.M. 2023. Trend Analysis of Precipitation and Air Temperature in water basins of Iran. Journal of Agricultural Meteorology, 11(2): 51-69. DOI: 10.22125/agmj.2023.368274.1142

DOI: 10.22125/agmj.2023.368274.1142

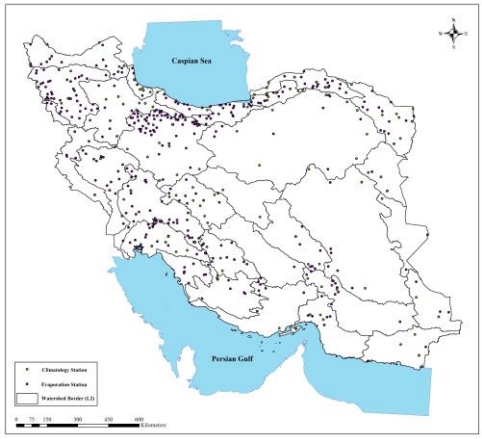
بالقوه تغییراقلیم بر روی سری‌های زمانی متغیرهای آب و هواشناسی مانند سری‌های مشاهداتی دما، بارش و جریان رودخانه در نقاط مختلف جهان توسط محققین استفاده شده است. در این میان مطالعه روند بارش و دما از رواج بیشتری برخوردار است. جهت تشخیص یا آشکارسازی روند در سری‌های زمانی متغیرهای آب و هواشناسی از آزمون‌های مختلفی استفاده می‌گردد که این آزمون‌ها به دو دسته پارامتری و ناپارامتری قابل تفکیک هستند. آزمون‌های پارامتری نسبت به آزمون‌های ناپارامتری توان بیشتری در تشخیص روند دارند اما به توزیع داده‌ها نیز حساس هستند. از طرف دیگر آزمون‌های ناپارامتری به توزیع داده‌ها و وجود داده‌های پرت حساس نیستند (Chen et al., 2007). در کشور ایران، Saboohi et al., (2012) روند بلندمدت سالانه و ماهانه میانگین بیشینه، میانگین کمینه و میانگین دما را در ۳۵ ایستگاه همدیدی بررسی کردند. در این تحقیق، اکثر ایستگاه‌ها، به‌ویژه ایستگاه‌های غرب و شرق کشور، روند مثبت معنی‌داری در سری زمانی دمای ماهانه در فصل تابستان داشتند. در مجموع حدود ۷۱ درصد، ۶۶ درصد و حدود ۴۰ درصد از ایستگاه‌ها به ترتیب دارای روند آماری معنی دار در میانگین دمای سالانه، میانگین حداقل دمای سالانه و میانگین دمای بیشینه سالانه بودند. این نتایج حاکی از آن بود که دمای ایران به ویژه در تابستان رو به افزایش است. Fathian et al., (2016) روند داده‌های سری زمانی هیدرولوژیکی و اقلیمی حوضه دریاچه ارومیه در ایران را با استفاده از آزمون من-کندال بررسی کردند. در تحقیق ایشان، شناسایی روند داده‌های هیدرولوژیکی و اقلیمی در مقیاس‌های زمانی ماهانه و سالانه برای ۲۵ ایستگاه دماسنجی، ۳۵ ایستگاه باران‌سنجی و ۳۵ ایستگاه سنجش جریان رودخانه انتخاب شده از حوضه آبریز دریاچه ارومیه انجام گرفت. نتایج نشان داد که روندهای صعودی و نزولی معنی‌دار آماری در متغیرهای هیدرولوژیکی و اقلیمی سالانه و ماهانه وجود دارد. روند صعودی غالب در متغیر دما بود در حالی که برای بارش، رفتار روند در مقیاس‌های زمانی ماهانه و سالانه متفاوت بود. Tabari et al., (2011) میانگین دمای هوا و سری زمانی بارندگی سالانه در غرب، جنوب و جنوب غرب کشور را برای دوره زمانی ۲۰۰۵-۱۹۶۶ با استفاده از داده‌های ۱۳ ایستگاه مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان‌دهنده روند گرم شدن سالانه در اکثریت ایستگاه‌ها بود ولی روند سری بارندگی در مناطق یکنواخت نبود و الگوهای مختلف افزایشی و کاهشی وجود داشت. در مطالعه دیگری، Shifteh Some'e et al., (2012) روند بارش سالانه و فصلی را در ۲۸ ایستگاه کشور بررسی کردند. برای سری بارش سالانه، تنها سه ایستگاه روند منفی آماری معنی‌دار داشت. در سری فصلی، روند منفی بارندگی بهار و زمستان در مقایسه با سایر سری‌های فصلی بیشتر بود، به طوری که در سری زمانی زمستانی پنج ایستگاه، روند منفی معنادار مشاهده شد. کاهش محسوس در بارش‌های زمستانی بیشتر در شمال ایران و همچنین سواحل دریای خزر مشاهده شد. در بارش تابستانی تنها دو ایستگاه با روند مثبت معنی‌دار در شمال شرق کشور مشاهده شد، در حالی که در بارش‌های پاییزی روند معنی‌داری مشاهده نشد. Soltani et al., (2012) روند بلندمدت سالانه و ماهانه میزان بارندگی را بر اساس داده‌های جمع آوری شده در ۳۳ ایستگاه همدیدی کشور بررسی کردند. تحلیل روند نشان داد که در اکثر ایستگاه‌های همدیدی ایران روند خطی معنی‌داری در بارندگی ماهانه وجود ندارد. بیشترین تعداد ایستگاه‌های دارای روند منفی در فروردین (۲۹ ایستگاه) و سپس در اردیبهشت (۲۱ ایستگاه) و بهمن (۲۱ ایستگاه) و با روند مثبت در آذر (۲۶ ایستگاه) و تیر (۲۴ ایستگاه) مشاهده شد. روند خطی قابل توجهی در بارندگی سالانه تنها در پنج ایستگاه مشاهده شد. Modarres and Sarhadi, (2009) تحلیل روند بارندگی سالانه را با داده‌هایی از ۱۴۵ ایستگاه اقلیم‌شناسی ایران انجام دادند. این مطالعه نشان داد که بارندگی سالانه در ۶۷ درصد ایستگاه‌ها کاهش یافته است. روند منفی بارندگی سالانه بیشتر در نواحی شمالی و شمال غربی مشاهده شد. آن‌ها ادعا کردند که روند منفی بارندگی در اکثر نقاط کشور ممکن است نشان دهنده مراحل اولیه تغییر اقلیم در ایران باشد. Tabari and Talaee, (2011) روند بارش سالانه و فصلی ۴۱ ایستگاه در ایران برای دوره زمانی ۲۰۰۵-۱۹۶۶ را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج پژوهش ایشان حاکی از روند کاهشی بارندگی سالانه در حدود ۶۰ درصد از ایستگاه‌ها بود. توزیع مکانی روندهای بارندگی سالانه نشان داد که روند منفی معنی‌دار بیشتر در شمال غرب ایران رخ داده است. در مقیاس فصلی، روند در سری زمانی

DOI: 10.22125/agmj.2023.368274.1142

بارش‌های بهاره و زمستانی عمدتاً منفی بود. هیچ روند مثبت یا منفی معنی‌داری توسط آزمون روند در بارش پاییزی تشخیص داده نشد. Salehi et al., (2020) روند بارش‌های فصلی و سالانه و نوسانات آن‌ها طی سال‌های ۲۰۱۶-۱۹۵۷ در ایران را برای داده‌های ۲۵ ایستگاه همدیدی بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که به طور کلی پس از سال ۱۹۹۰، روند نزولی قابل توجهی در بارش سالانه کل کشور رخ داده است و کاهش در بارش زمستان و افزایش بارش بهاری در برخی از ایستگاه‌ها وجود دارد. Zarenistanak et al., (2014) به تحلیل روند و تشخیص نقطه تغییر بارش سالانه و فصلی، همچنین میانگین دما در دوره زمانی ۲۰۰۷-۱۹۵۰ با داده‌های ۵۰ ایستگاه بارش و ۳۹ ایستگاه دماسنجی واقع در جنوب غرب ایران پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده برای سری‌های بارش نشان داد که اکثر ایستگاه‌ها در سری‌های سالانه و فصلی روند غیرمعنی‌داری را نشان می‌دهند. همچنین، تحلیل روند دما افزایش قابل توجهی را در فصول تابستان و بهار نشان داد. تا آنجا که نگارندگان اطلاع دارند، هر چند در بسیاری از پژوهش‌های پیشین روند بارش و دما در سراسر یا قسمت‌هایی از ایران بررسی شده است اما هیچ یک از این پژوهش‌ها از تمامی داده‌های ایستگاهی موجود بهره نگرفته است. این کمبود داده در برخی مناطق می‌تواند منجر به نتایج نادقیق در تحلیل روند زمانی بارش و دما شود. از سوی دیگر مجموعه داده‌های بارش جهانی با وضوح بالا می‌تواند تفاوت‌های قابل‌توجهی با داده‌های اندازه‌گیری شده محلی به‌ویژه برای پنجره‌های زمانی کوتاه‌تر از یک سال داشته باشد و لذا برای استفاده در مطالعات تحلیل روند مناسب نیست (Khalili and Rahimi, 2014). در پژوهش حاضر به بررسی روند دو پارامتر بارش (تجمعی ماهانه) و دما (متوسط ماهانه) با استفاده از داده‌های ۵۹۲ ایستگاه در سراسر ایران پرداخته می‌شود. استفاده از حجم عظیمی از داده‌ها با پراکنش مکانی مناسب در پژوهش حاضر می‌تواند موجب دقت و اطمینان بیشتری در نتایج برای نقاط مختلف ایران شود. پس از آن، تغییرات رخ داده در میانگین بارش و دما در گذشته، با تغییرات پیش بینی شده توسط سایر مطالعات تغییراقلیمی بر ایران مقایسه می‌شود. این مقایسه سیر تحولات سامانه اقلیم کشور را در گذر زمان و با استفاده از تمامی اطلاعات موجود نمایش می‌دهد.

مواد و روش‌ها

ایران با وسعتی در حدود ۱۶۴۸۰۰۰ کیلومتر مربع در منطقه جنوب غربی آسیا بین عرض جغرافیایی ۲۵ درجه و ۳ دقیقه شمالی و ۳۹ درجه و ۴۷ دقیقه شمالی و بین طول جغرافیایی ۴۴ درجه و ۵ دقیقه شرقی تا ۶۳ درجه و ۱۸ دقیقه شرقی قرار دارد. ایران دارای دو رشته کوه است: البرز در شمال و زاگرس در غرب که هر دوی آن ها به ترتیب با امتداد به شرق و جنوب شرق نقش مهمی در توزیع مکانی و زمانی بارش و دما دارند. در شمال غرب کشور، زمستان‌ها سرد با بارش برف سنگین و دمای منفی در ماه‌های آذر و دی است. در این منطقه، بهار و پاییز نسبتاً معتدل هستند، در حالی که فصل تابستان خشک و گرم است. در جنوب، زمستان‌ها معتدل و تابستان‌ها بسیار گرم است. آب و هوای کشور به جز نواحی ساحلی شمالی و غربی عمدتاً خشک و نیمه‌خشک می‌باشد. میانگین درازمدت (۵۳ ساله) بارندگی در ایران بر اساس ایستگاه‌های وزارت نیرو، حدود ۲۴۶ میلی‌متر است که کمتر از یک سوم میانگین جهان (۸۶۰ میلی‌متر) است. علاوه بر این، پراکنش زمانی بارش‌ها نیز عمدتاً از منظر مدیریت منابع آبی نامطلوب هستند. شکل ۱ محدوده مورد مطالعه این پژوهش را نشان می‌دهد. در این شکل پراکنش ایستگاه‌های مورد استفاده در پژوهش نیز نشان داده شده است.



شکل ۱- توزیع مکانی ایستگاه‌های مطالعاتی در کشور

Figure 1- Spatial distribution of the study stations in the country

DOI: 10.22125/agmj.2023.368274.1142

جمع‌آوری و اندازه‌گیری داده‌های مورد نیاز

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، از گروه بانک اطلاعات دفتر مطالعات پایه منابع آب، واقع در شرکت مدیریت منابع آب ایران دریافت شد. داده‌ها در مقیاس ماهانه و شامل ۲۱۴۲ ایستگاه اقلیم‌شناسی معمولی و ۱۲۳۰ ایستگاه تبخیرسنجی است که برای بررسی دو پارامتر بارش (تجمعی ماهانه) و دما (متوسط ماهانه) مورد استفاده قرار گرفت. برای بررسی تغییرات بارش و دما نیاز به انتخاب ایستگاه‌هایی است که دارای پراکنش مکانی مناسب بوده و در عین حال دارای طول دوره آماری بلندمدت باشند. خلأهای آماری در بسیاری از ایستگاه‌ها و کوتاه بودن طول دوره آماری منجر به این شد که حداکثر بتوان از ۴۷۶ ایستگاه اقلیم‌شناسی (باران‌سنجی) و ۱۱۶ ایستگاه تبخیرسنج کشور استفاده نمود. این ایستگاه‌ها دارای حداقل ۴۰ سال آمار با حداکثر سه ماه خلأ آماری هستند که بجز نواحی کویری، پوشش مناسبی در سطح کشور بوجود آورده‌اند. داده‌های اولیه به صورت ماهانه می‌باشند که سایر داده‌های مورد نیاز (بارش فصلی و سالانه) پس از حذف داده‌های پرت و پرکردن خلأهای آماری، با استفاده از داده‌های ماهانه ساخته شده است.

پر کردن خلأهای آماری

به منظور بازسازی خلأهای آماری، نیاز به منطقه‌بندی ایستگاه‌ها است که بر اساس حوضه‌های آبریز درجه دو انجام شد. کلیه ایستگاه‌ها در ۳۰ حوضه، تقسیم‌بندی شدند. در برخی حوضه‌های آبریز که ایستگاهی وجود نداشت (در داده‌های دما)، یا تعداد آن‌ها کم بود، از ایستگاه‌های همجوار در سایر حوضه‌ها استفاده شد. به منظور بازسازی داده‌های مفقوده (اشتباه/ یا برداشت نشده) روش‌های مختلفی وجود دارد. در این پژوهش از پکیج‌های Amelia، Hmisc، MI و MICE در محیط برنامه‌نویسی R استفاده شد. سپس با استفاده از داده‌های بازسازی شده، سری‌های زمانی فصلی و سالانه ساخته شدند. در آخر، بر روی سری‌های زمانی آماده شده برای هر ایستگاه، آزمون روند من-کندال انجام شد. در ادامه، این روال برای داده‌های دما انجام شد.

محاسبه روند در داده‌ها

با داشتن داده‌های بارش و دما برای ماه‌ها، فصول و سال‌های مختلف، آزمون روند برای ایستگاه‌های مختلف انجام شد. آزمون روند بر روی داده‌های تهیه شده نیز در محیط برنامه‌نویسی R صورت گرفت. بدین منظور از بسته Trend در این محیط استفاده شد. خروجی این ابزار، شاخص من-کندال (z) برای هر ایستگاه و بر اساس ۴۰ سال داده می‌باشد. تشخیص روند با توجه به بزرگی این شاخص نسبت به آستانه‌های ۱/۶۴، ۱/۹۶ و ۲/۳۳ است که به ترتیب برای بازه‌های اطمینان ۹۰، ۹۵ و ۹۹ درصد استفاده می‌شوند. در صورت مثبت بودن شاخص من-کندال روند صعودی و در صورت منفی بودن، روند داده‌ها نزولی می‌باشد. نهایتاً با داشتن شاخص‌های ماهانه، فصلی و سالانه برای داده‌های دما و بارش، نقشه‌های پراکنش و بزرگی شاخص من-کندال تهیه شد. به منظور خلاصه‌سازی نتایج، تنها نتایج فصلی و سالانه برای این دو متغیر اقلیمی ارائه می‌شود. تمامی نقشه‌های مورد نیاز در محیط ArcGIS تهیه شدند.

دسته‌بندی روندها جهت نمایش در نقشه

جهت تحلیل داده‌ها و شاخص‌ها از دو ابزار ۱) شاخص من-کندال که آزمون روند است و ۲) نمایش تغییرات فراوانی آن در دسته‌های مختلف و تحلیل بصری داده‌ها در حوضه‌های آبریز مختلف استفاده می‌شود. در محیط ArcGIS و برای لایه‌های روند، سه دسته ۱) بدون روند، ۲) افزایشی با احتمال بالای ۹۰ درصد (z>+۱/۶۴) و ۳) کاهشی با احتمال بالای ۹۰ درصد (z<-۱/۶۴) انتخاب شد. رنگ‌ها و کران‌های اختصاص یافته به این دسته‌ها به صورت جدول ۱ است. لازم به ذکر است که در نقشه‌های گزارش حاضر، صرفاً نتایج روند با سطح معنی‌داری ۰/۱ (سطح اطمینان ۹۰ درصد) ارائه شده است. بر اساس آستانه‌ها و دسته‌بندی‌های گفته شده، نقشه‌ها جهت نمایش نتایج پژوهش تولید شد. در هر نقشه، برای هر ایستگاه وجود روند یا عدم وجود آن بر اساس مرحله قبلی بیان شده است. بزرگی شعاع دایره‌ها، متناسب با مقدار شاخص z می‌باشد.

DOI: 10.22125/agmj.2023.368274.1142

همچنین برای نمایش تغییرات در مقیاس حوضه‌های آبریز، از روش میانگین وزنی و با استفاده از روش تیسن استفاده شد. به این صورت که چند ضلعی‌های تیسن با استفاده از لایه موقعیت ایستگاه‌ها ساخته شد. سپس این چند ضلعی‌ها توسط مرزهای حوضه آبریز برش خورده و از قطعات تولید شده که متعلق به حوضه‌های آبریز ۳۰ گانه‌اند، میانگین وزنی گرفته شد و میانگین بارش و دما برای حوضه‌های درجه دو محاسبه گردید. سپس با میانگین‌گیری وزنی از حوضه‌های آبریز درجه دو، متغیرهای میانگین در حوضه‌های آبریز درجه یک (۶ حوضه آبریز اصلی) محاسبه شد. برای کل کشور از میانگین‌گیری وزنی با استفاده از حوضه‌های آبریز درجه یک استفاده شد.

جدول ۱- دسته‌بندی نوع روند بر اساس نتایج تحلیل روند جهت نمایش بزرگی آن

Table 1- Classification of trend analysis results to demonstrate the magnitude and frequency

Class No.	Precipitation Colour	Temp. Colour	Upper Bound	Lower Bound
1	Red	Blue	-1.64	-∞
2	Green	Green	+1.64	-1.64
3	Blue	Red	+∞	+1.64

نمایش و تحلیل تغییرات بلندمدت در میانگین متغیرهای اقلیمی

سامانه جو کره زمین مثال بارزی از سامانه‌های آشوبناک می‌باشد (Sivakumar, 2016; Strogatz, 2014). سامانه‌های آشوبناک، به شرایط اولیه و کوچکترین تغییرات در متغیرها حساس بوده و رفتار متغیرهای لحظه‌ای سامانه قابل پیش‌بینی نمی‌باشد (Buizza, 2002). از سوی دیگر، رفتار آشوبناک در این سامانه‌ها، دارای بازه عمل محدود شبه تصادفی حول میانگین است. به این معنی که متغیرهای اقلیمی حول مقادیر میانگین به شکل شبه تصادفی نوسان می‌کنند. با میانگین‌گیری از متغیر لحظه‌ای سامانه مانند بارش و دما در بلندمدت، متغیرهای حدمرکزی حاصل می‌شوند که معمولاً رفتار منظم و فرمول‌بندی شده‌ای را نشان می‌دهند. این میانگین که متغیرهای سامانه حول آن نوسان می‌کند، ممکن است دچار تغییرات بلندمدت در اثر تنش‌های وارده به سامانه شوند که تغییر اقلیم از جمله این تنش‌ها است. برای نمایش تغییرات یک سامانه، چهار حالت توسط پژوهشگران ارائه شده است (شکل ۲) (Rockström et al., 2009; Scheffer, 2009; Scheffer and Carpenter, 2003; Scheffer et al., 2009, 2000). به منظور قضاوت آن که کدام یک از حالت‌های تغییر در مورد میانگین بارش و دما در ایران رخ داده است، نیاز به داده‌های بلندمدت اقلیمی می‌باشد. با استفاده از میانگین داده‌های ۵، ۱۰، و ۴۰ سال اخیر در مقیاس کل کشور حاصل از این تحقیق، در کنار نتایج برخی مطالعات تغییر اقلیم انجام شده در ایران مانند Rahimi et al., (2020) می‌توان حالات مختلف را ترسیم نمود که بینشی کیفی از رفتار سامانه اقلیم ایران را در آینده نمایش می‌دهد.

نتایج و بحث

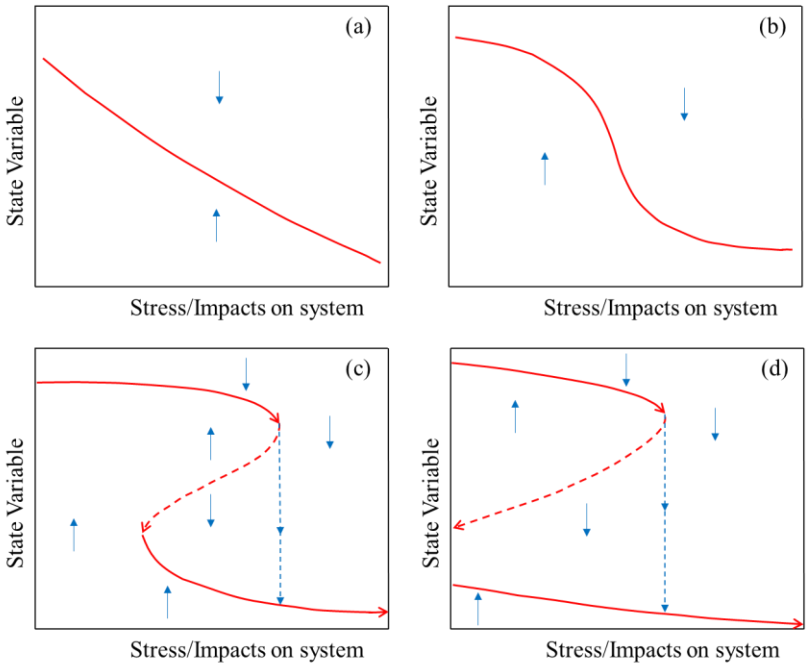
بررسی روند بارش

در شکل ۳ نتایج آزمون من-کندال برای بررسی وجود روند در سری‌های زمانی بارش فصلی (پاییزه، زمستانه، بهاره، تابستانه و سالانه) ارائه شده است. در تمامی این نقشه‌ها، ستاره‌های سبز رنگ موقعیت ایستگاه‌های اقلیم‌شناسی را نشان می‌دهند که در طول دوره زمانی مذکور، روند معنی‌داری در سری زمانی بارش آن‌ها دیده نشده است. دایره‌های آبی رنگ، موقعیت ایستگاه‌هایی را نشان می‌دهند که مقادیر بارش در آن‌ها با روند افزایشی همراه بوده است. دایره‌های قرمز رنگ نیز موقعیت ایستگاه‌هایی را نشان می‌دهند که سری زمانی بارش با کاهش محسوس مواجه بوده و یا به عبارت دیگر، روند کاهش بارش در این ایستگاه‌ها قابل توجه است.

روند بارش در سری‌های زمانی فصلی در ایستگاه‌های منتخب

در فصل پاییز، در تعدادی از حوضه‌های آبریز درجه دو، تعداد ایستگاه‌های دارای روند افزایشی نسبت به تعداد ایستگاه‌های منتخب قابل توجه می‌باشد. این حوضه‌ها عبارتند از: دق پترگان- نمکزار خواف، قره‌قوم، اترک، گرگانرود و حوضه آبریز رودخانه‌های هراز و رودخانه‌های بین هراز-قره‌سو (شمال شرق کشور تا جنوب دریای مازندران) و بخش اعظم حوضه آبریز دریاچه نمک. بافت‌نگار (هیستوگرام) ترسیم شده در شکل ۳ (a)، نمایانگر فراوانی مقادیر شاخص z آزمون من-کندال است. این بافت‌نگار نشان می‌دهد که از میان ۴۷۶

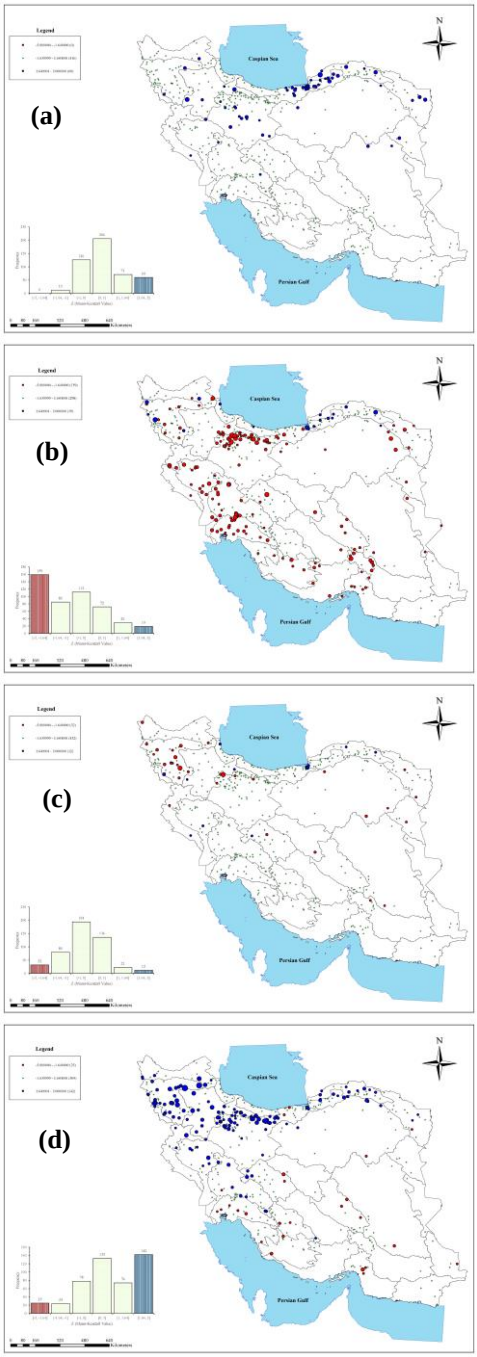
ایستگاه منتخب در کل کشور و در فصل پاییز، تعداد ۶۰ ایستگاه دارای روند افزایشی بوده و هیچ ایستگاهی با روند کاهش بارش مواجه نبوده است. شکل این بافت‌نگار و چولگی آن به سمت چپ نشان می‌دهد که فصل پاییز در حوضه‌های آبریز عنوان شده به صورت معنی‌داری نسبت به سال‌های گذشته، مرطوبتر شده است.



شکل ۲- شماتیک حالات ممکن تغییرات در وضعیت سامانه به واسطه‌ی تنش وارد شده بر سامانه (a) رفتار نسبتاً خطی، (b) رفتار غیرخطی، (c) رفتار غیرخطی به همراه نقطه‌ی عطف و (d) رفتار غیرخطی به همراه نقطه‌ی عطف و دامنه‌ی رفتار غیرخطی وسیع در سامانه. خطوط قرمز حالت تعادل سامانه را نمایش می‌دهد، فلش قرمز جهت تغییرات کلی سامانه است (که تغییرات می‌تواند به صورت کاهشی یا افزایشی باشد) و فلش‌های آبی رنگ جهت تغییر در حالت عدم تعادل سامانه را نشان می‌دهد.

Figure 2- Schematic of the possible states of changes in the state of the system due to the stress imposed on the system (a) relatively linear behavior, (b) nonlinear behavior, (c) nonlinear behavior with tipping point and (d) nonlinear behavior with tipping point together with wide range of change. The red lines show the equilibrium state of the system, the red arrow shows the direction of the overall changes of the system (the changes can be decreasing or increasing), and the blue arrows show the direction of the change in the imbalance state of the system

در شکل ۳ (b)، نتایج آزمون روند من-کندال برای سری‌های زمانی بارش متوسط زمستان نیز در ۴۷۶ ایستگاه منتخب اقلیم‌شناسی وزارت نیرو نشان داده شده است. شکل ۳ (b) نشان می‌دهد که در فصل زمستان، برخی از ایستگاه‌های واقع در حوضه آبریز قره‌سو-گرگان و تا حدودی حوضه آبریز اترک و نیز بخش غربی حوضه آبریز دریاچه ارومیه، با افزایش معنی‌دار بارش مواجه بوده‌اند. کل ایستگاه‌های با روند افزایشی، ۱۹ ایستگاه از مجموع ۴۷۶ ایستگاه می‌باشد. همچنین این شکل نشان می‌دهد که تعداد زیادی از ایستگاه‌های منتخب (۱۵۹ ایستگاه از ۴۷۶ ایستگاه) با روند معنی‌دار کاهش بارش (روند منفی بارش) روبرو شده‌اند. بزرگی آماره z آزمون من-کندال که در نقشه با دایره‌های قرمز رنگ با قطر بزرگتر (نسبت به ایستگاه‌های فاقد روند) نشان داده شده است، مؤید این مطلب است که مقادیر کاهش بارش در این فصل و در کل کشور معنی‌دار می‌باشد. بافت‌نگار ترسیم شده در نقشه مذکور، این تغییر پارامتر اقلیمی را به خوبی نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد که احجام بارش در فصل زمستان، مانند گذشته‌های دور، زیاد نیست و به صورت معنی‌داری از رطوبت این فصل کاسته شده است. شکل ۳ (c)، نتایج آزمون روند من-کندال برای سری‌های زمانی بارش متوسط بهار در ۴۷۶ ایستگاه منتخب اقلیم‌شناسی وزارت نیرو را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نتایج آزمون روند من-کندال (a) پاییز، (b) زمستان، (c) بهار، (d) تابستان برای سری‌های زمانی بارش متوسط در فصول مختلف در ۴۷۶ ایستگاه منتخب اقلیم‌شناسی وزارت نیرو

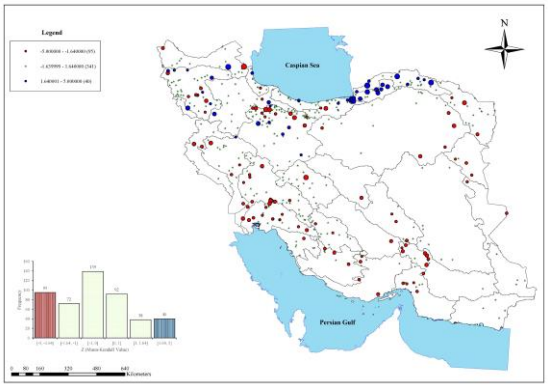
Figure 3- The results of Mann-Kendall trend test (a) Autumn, (b) Winter, (c) Spring, (d) Summer for the time series of the average precipitation of four seasons at 476 selected climatological stations of the Ministry of Energy

بافت‌نگار ترسیم شده در نقشه مذکور، کمی چولگی به سمت راست دارد. تعداد ۳۲ ایستگاه با روند کاهشی و تعداد ۱۲ ایستگاه (حدود ۴ درصد) با روند افزایشی بارش مواجه هستند. سهم حوضه آبریز دریاچه ارومیه در این خصوص از سایر حوضه‌ها بسیار بیشتر است. ایستگاه‌های واقع در حوضه مذکور از نظر میزان آماره z آزمون من-کندال بزرگتر از سایر ایستگاه‌های دارای روند هستند. هیچ ایستگاهی در این حوضه روند افزایشی بارش ندارد. در سایر مناطق کشور به صورت پراکنده ایستگاه‌هایی وجود دارند که با کاهش روند بارش همراه شده‌اند ولی ظاهراً در کل کشور به جز حوضه آبریز دریاچه ارومیه، روند کاهش بارش چندان محسوس نیست. همچنین شکل ۳ (d)، نتایج آزمون روند من-کندال برای سری‌های زمانی بارش متوسط تابستان در ۴۷۶ ایستگاه منتخب اقلیم‌شناسی وزارت نیرو را نشان می‌دهد. در فصل تابستان، تعداد زیادی از ایستگاه‌های منتخب اقلیم‌شناسی، با افزایش میزان بارش مواجه شده‌اند. تمرکز این ایستگاه‌ها در امتداد رشته‌کوه‌های البرز، در حوضه آبریز دریاچه ارومیه و تا حدودی نواحی غربی کشور می‌باشد. بافت‌نگار ترسیم شده در نقشه مذکور، به خوبی گرایش ایستگاه‌های کشور را به افزایش معنی‌دار بارش در فصل تابستان نشان می‌دهد. تعداد ۱۴۲ ایستگاه اقلیم‌شناسی منتخب (۳۰ درصد از ایستگاه‌های منتخب) دارای روند افزایشی هستند و تنها ۲۵ ایستگاه (کمتر از ۵ درصد) روند کاهشی معنی‌دار دارند.

روند بارش در سری‌های زمانی سالانه در ایستگاه‌های منتخب

در شکل ۴، نتایج آزمون روند من-کندال برای سری‌های زمانی بارش متوسط سالانه در ۴۷۶ ایستگاه منتخب اقلیم‌شناسی وزارت نیرو را نشان می‌دهد. بافت‌نگار ترسیم شده در نقشه مذکور نشان دهنده وجود چولگی به راست در شاخص z است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در ۱۹ درصد ایستگاه‌های منتخب کشور (۹۵ ایستگاه از ۴۷۶ ایستگاه)، روند کاهش بارش سالانه و در ۱۰ درصد از ایستگاه‌های منتخب (۴۰ ایستگاه) روند افزایش بارش سالانه آشکار شده است. همچنین در ۶۹ درصد از ایستگاه‌های منتخب (۳۴۱ ایستگاه)، روندی در بارش سالانه مشاهده نشده است.

DOI: 10.22125/agmj.2023.368274.1142



شکل ۴- نتایج آزمون روند من-کندال برای سری‌های زمانی بارش متوسط سالانه در ۴۷۶ ایستگاه منتخب اقلیم‌شناسی وزارت نیرو

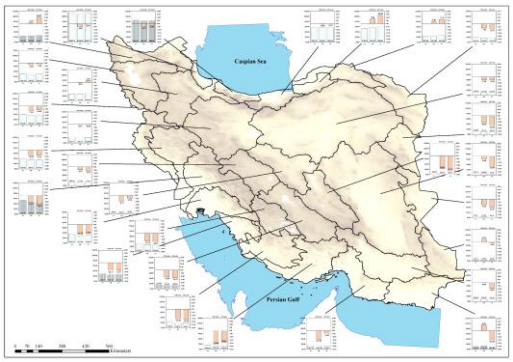
Figure 4- The results of Mann-Kendall trend test for the time series of the yearly average precipitation at 476 selected climatological stations of the Ministry of Energy

ایستگاه‌هایی که با روند افزایشی بارش سالانه مواجه بوده‌اند، اکثراً در مناطق شمالی کشور پراکنده‌اند. در خلال سال‌های مورد بررسی، در نیمه جنوبی کشور، تقریباً هیچ ایستگاهی روند افزایش بارش سالانه نداشته است. ایستگاه‌های دارای روند افزایشی در بارش سالانه، بیشتر در حوضه‌های آبریز گرگانرود و اترک و تا حدودی در حوضه آبریز دریاچه نمک (بجز در مناطق شمالی) و حواشی حوضه آبریز دریاچه ارومیه قرار دارند. در سایر حوضه‌های آبریز کشور نیز تعداد معدودی ایستگاه اقلیم‌شناسی با روند افزایش بارش مواجه بوده‌اند. به عنوان مثال در حوضه‌های آبریز کرخه، گاوخونی، کویر مرکزی، مرزی غرب، سفیدرود بزرگ و ارس، هر کدام حداکثر در دو ایستگاه روند افزایش بارش سالانه مشاهده شده است. اگر نیمه جنوبی کشور را به دو بخش شرقی و غربی تقسیم کنیم، مشاهده می‌شود که در بخش شرقی، ایستگاه‌های اقلیم‌شناسی منتخب مانند سایر مناطق کشور، متراکم نیستند. در این بخش، حوضه‌های آبریز هامون مشکیل، بلوچستان جنوبی و کویر لوت و نیمه شرقی حوضه‌های آبریز هامون جازموریان و بندرعباس-سدیج قرار گرفته‌اند. در این بخش تغییرات معنی‌داری در بارش سالانه ایستگاه‌های اقلیم‌شناسی منتخب دیده نمی‌شود. اما در بخش غربی، ایستگاه‌های اقلیم‌شناسی منتخب متراکم هستند. در تعداد زیادی از ایستگاه‌های این مناطق، کاهش بارش، روند معنی‌داری را نشان می‌دهد. روند کاهش بارش در حوضه‌های پرآبی مانند کارون بزرگ و زهره-جراحی چشمگیر بوده به صورتی که قدرمطلق آماره z آزمون من-کندال مقادیر نسبتاً بزرگی را نشان می‌دهد. در نیمه شمالی کشور، تعداد زیادی از ایستگاه‌های منتخب واقع در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه‌های البرز، دارای روند کاهشی آشکار شده در پارامتر بارش سالانه هستند. همچنین تعدادی از ایستگاه‌های منتخب در حوضه‌های آبریز قره‌قوم، دق پترگان-نمکزار خواف و حواشی شرقی کویر مرکزی نیز با کاهش معنی‌دار بارش سالانه مواجه شده‌اند. اما در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، هر سه نوع رفتار یعنی روند افزایشی، روند کاهشی و نیز بدون روند در ایستگاه‌های اقلیم‌شناسی منتخب دیده می‌شود. الگوی مشخصی برای این تغییرات و پراکندگی آن‌ها وجود ندارد. در مجموع چنین به نظر می‌رسد که روند کاهش بارش در فصل زمستان نسبت به سایر فصول محسوس‌تر است. در واقع ایستگاه‌های منتخب کشور در فصل زمستان بسیار بیشتر نسبت به سایر فصول دچار روند معنی‌دار کاهش بارش هستند. این کاهش روند بارش در زمستان، تا حدودی در فصل تابستان و فصل پاییز (فقط برای نوار شمال شرقی کشور تا جنوب دریای مازندران) جبران شده است. ظاهراً این مقادیر افزایش بارش تاثیر چندانی در کل بارش سالانه نداشته است و در کل این تغییرات موجب کاهش منابع آب تجدیدپذیر کشور شده است. در ادامه با بررسی مقادیر بارش ۵ و ۱۰ سال منتهی به سال آبی ۱۳۹۲-۹۳ و همچنین تغییرات دمایی اتفاق افتاده در سال‌های اخیر، توضیحات بیشتری ارائه خواهد شد.

بررسی تغییرات بارش در سال‌های اخیر

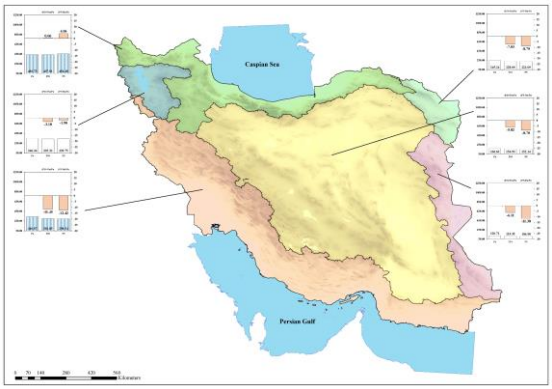
به منظور بررسی تغییرات بارش در سال‌های اخیر، سری‌های زمانی کلی بارش به سری‌های جزئی ۵ و ۱۰ سال منتهی به سال آبی ۹۳-۱۳۹۲ تقسیم شد. میانگین بارش ۵ سال انتهای سری زمانی و میانگین بارش ۱۰ سال انتهای سری زمانی محاسبه شد و نسبت تغییرات بارش این دوره‌ها به دوره درازمدت در همه ۴۷۶ ایستگاه منتخب محاسبه گردید. به دلیل حجم بالای اطلاعات، ارائه همه نتایج به صورت نقطه‌ای میسر نیست اما در ادامه اطلاعاتی به صورت

آماری از وضعیت نسبت تغییرات بارش در این دوره‌ها به درازمدت برای تمامی حوضه‌های آبریز درجه دو ارائه شده است. نکته قابل توجه در این بررسی‌ها مربوط به بارش فصل تابستان است. در ۸۰ ایستگاه، نسبت بارش ۵ سال اخیر به درازمدت برای این فصل قابل توجه نیست. همچنین در ۵۲ ایستگاه کشور، مقادیر بارش متوسط ۵ سال اخیر فصل تابستان، بیشتر از دو برابر افزایش داشته است. در مجموع، دامنه تغییرات بارش فصل تابستان در خلال ۱۰ و ۵ سال گذشته، نسبت به سایر فصول بیشتر بوده است و از نسبت حدود صفر تا بیشتر از دو برابر در تغییر بوده است. دامنه تغییرات نسبت بارش ۱۰ ساله اخیر نسبت به درازمدت در بهار و پاییز غالباً بین ۷۰ تا ۱۱۰ درصد در تغییر بوده است. در ادامه، محاسبات با در نظر گرفتن شبکه تیسن به حوضه‌های آبریز کشور تعمیم داده شده و مقادیر تغییرات بارش ۵ و ۱۰ سال اخیر به تفکیک حوضه‌های آبریز درجه دوم و درجه اول محاسبه گردید. در شکل ۵، نقشه وضعیت تغییرات بارش حوضه‌های آبریز درجه دو کشور در دوره‌های ۵ و ۱۰ سال اخیر با ترسیم نمودارهای تغییرات مذکور نشان داده شده است. همچنین تغییرات مذکور در سطح حوضه‌های آبریز درجه یک کشور نیز در شکل ۶ ارائه شده است. بر این اساس، افزایش بارش ۱۰ ساله منتهی به ۹۳-۱۳۹۲ به درازمدت تنها در ۵ حوضه آبریز درجه دو مشاهده می‌شود.



شکل ۵- مقادیر میانگین بارش ۴۰ ساله، ۱۰ ساله و ۵ ساله منتهی به دوره آماری ۹۳-۱۳۹۲ و نسبت تغییرات آن‌ها به درازمدت در حوضه‌های آبریز درجه دو کشور

Figure 5- 40-year, 10-year and 5-year average precipitation values leading to the statistical period of 2012-2013 and their long-term change ratio in the country's level 2 catchments



شکل ۶- مقادیر میانگین بارش ۴۰ ساله، ۱۰ ساله و ۵ ساله منتهی به دوره آماری ۹۳-۱۳۹۲ و نسبت تغییرات آن‌ها به درازمدت در حوضه‌های آبریز درجه یک کشور

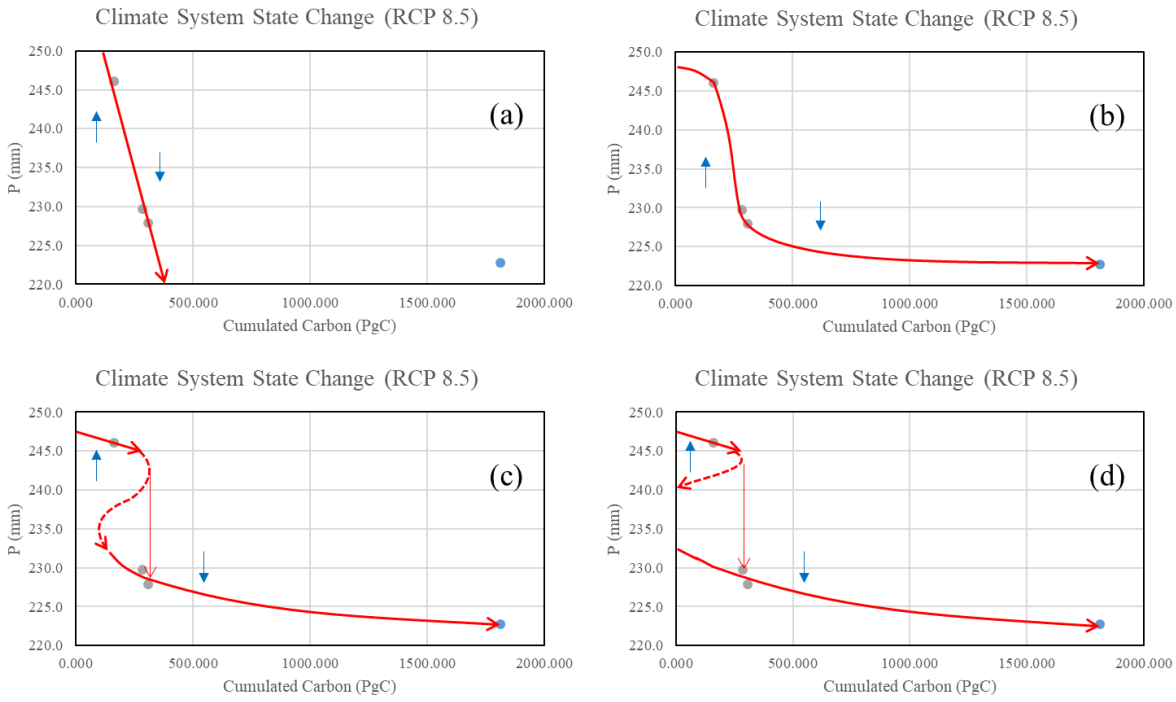
Figure 6- 40-year, 10-year and 5-year average precipitation values leading to the statistical period of 2012-2013 and their long-term change ratio in the country's level 1 catchments

این افزایش بارش در حوضه آبریز ارس به میزان ۲/۱ درصد، قره سو و گرگان ۷/۵ درصد، اترک ۳/۵ درصد، بلوچستان جنوبی ۹/۳ درصد و هامون مشکیل ۵/۱ درصد اتفاق افتاده است. همچنین افزایش بارش ۵ سال آخر نسبت به درازمدت تنها در ۴ حوضه آبریز مشاهده شده است. این افزایش بارش در حوضه‌های آبریز ارس به میزان ۱۰/۴ درصد، سفیدرود ۳/۴، قره سو و گرگان ۱۲/۹ و اترک ۶/۸ درصد اتفاق افتاده است. لازم به ذکر است در دوره ۱۰ ساله منتهی به ۹۳-۱۳۹۲ در ۲۵ حوضه آبریز، کاهش بارش مشاهده می‌شود. در ۹ حوضه آبریز درجه دو، کاهش بارش بیش از ۱۰ درصد روی داده که به ترتیب در حوضه آبریز رودخانه‌های کل و مهران و مسیل‌های جنوبی و جزایر با ۲۲ درصد، کویرهای درانجیر و ساغند با ۲۰/۶ درصد، حوضه آبریز هندیجان-جراحی با ۱۶/۴ درصد، حوضه آبریز حله با ۱۲/۸ درصد، حوضه آبریز طشک-بختگان و مهارلو با ۱۲/۷ درصد، حوضه آبریز کویر ابرقو-سیرجان با ۱۱/۲ درصد، حوضه آبریزکارون بزرگ ۱۱/۲ درصد و حوضه آبریز دق پترگان-نمکزار خواف با ۱۱ درصد اتفاق افتاده است. همچنین در دوره ۵ ساله منتهی به ۹۳-۱۳۹۲ در ۲۶ حوضه آبریز کشور نسبت به دراز مدت کاهش بارش رخ داده است. در ۱۲ حوضه آبریز میزان کاهش بارش بیش از ۱۰ درصد است که اسامی این حوضه‌ها به ترتیب کاهش بارش عبارتند از حوضه‌های آبریز کویرهای درانجیر و ساغند با ۳۰/۷

درصد، کل و مهران با ۲۴/۴ درصد، مند با ۱۹ درصد، هندیجان-جراحی با ۱۸ درصد، دق پترگان-نمکزارخواف با ۱۸ درصد، کویر لوت با ۱۶/۷ درصد، طشک-بختگان و مهارلو با ۱۶/۱ درصد، کارون بزرگ با ۱۵/۸ درصد، هامون هیرمند با ۱۵ درصد، حله با ۱۴ درصد، کویر ابرقو-سیرجان با ۱۳/۶ درصد و بلوچستان جنوبی با ۱۳/۶ درصد. به منظور بررسی کلان تغییرات بارش، احجام بارش در سطح حوضه‌های آبریز درجه یک کشور نیز محاسبه گردید. در دوره ۱۰ ساله منتهی به سال آبی ۹۳-۱۳۹۲ صرف نظر از افزایش ناچیز بارش در حوضه آبریز دریای مازندران، در مابقی حوضه‌های آبریز درجه یک، کاهش بارش اتفاق افتاده است. حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان با ۱۱/۴۵ درصد بیشترین کاهش بارش را داشته است. همچنین در دوره ۵ ساله منتهی به سال آبی ۹۳-۱۳۹۲، تنها حوضه آبریز دریای مازندران با افزایش بارش مواجه بوده است که مقدار آن حدود ۴ درصد می‌باشد. در مابقی حوضه‌های آبریز درجه یک، کاهش بارش اتفاق افتاده است که بیشترین کاهش در حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان با ۱۴ درصد رخ داده است. کاهش بارش در حوضه‌های آبریز مرزی شرق، قره قوم و فلات مرکزی نیز قابل توجه است. در مجموع، با بررسی ۴۷۶ ایستگاه اقلیم‌شناسی کشور مشخص گردید که بارش متوسط کشور در دوره ۴۰ سال منتهی به سال آبی ۱۳۹۲-۹۳ برابر ۲۴۶/۱ میلی‌متر (۳۹۹ میلیارد متر مکعب) بوده است. مقدار بارش در دوره ۱۰ سال اخیر برابر ۲۲۹/۷ میلی‌متر (۳۷۲/۷ میلیارد متر مکعب) و در دوره ۵ سال اخیر برابر ۲۲۷/۹ میلی‌متر (۳۶۹/۸ میلیارد متر مکعب) بوده است. در دوره ۱۰ سال اخیر، کشور با کاهش بارشی در حدود ۶/۷ درصد و در دوره ۵ سال اخیر با کاهشی در حدود ۷/۹ درصد مواجه بوده است.

تحلیل تغییرات بلندمدت در میانگین بارش

شکل ۷ اعداد میانگین ۵، ۱۰ و ۴۰ سال گذشته را در کنار تخمین‌های تغییرات بارش توسط Rahimi et al., (2020) برای سناریوی RCP 8.5 نمایش می‌دهد. به منظور تولید شکل ۷، از داده های تجمع کربن در جو Meinshausen et al., (2011) و تغییرات بارش متناظر با آن برای افق های ۱۴۲۰-۱۴۴۹ (2041-2070) و ۱۴۵۰-۱۴۷۹ (2071-2100) استفاده شده است. لازم به ذکر است که نتایج حاکی از عدم انطباق داده‌های مشاهداتی و سناریوی RCP 4.5 برای متغیر بارش می‌باشد. در شکل ۷، حالت a عدم تطبیق رفتار سامانه با تغییرات خطی را تایید می‌کند. همچنین، حالات b، c و d حاکی از آن است که سامانه جوی ایران، پیش‌تر تغییرات شدیدی را تجربه کرده است. این تغییرات همچنان ادامه دارند، با این تفاوت که سرعت تغییر کمتر و بدون رخداد نقطه‌ی عطف در سامانه می‌باشد. حالت b روندی پیوسته را نمایش می‌دهد در حالی که حالات c و d حاکی است که با در نظر گرفتن افق بلندمدت، نقطه عطف در سامانه جوی رخ داده است. به این معنی که تغییر رژیمی در مقدار بارش باعث کاهش ناگهانی آن، بدون تغییرات پیوسته اتفاق افتاده است. لازم به ذکر است که در تمامی حالات شکل ۷، آینده‌ی کم بارش‌تری برای سامانه اقلیمی کشور پیش‌بینی می‌شود. همان گونه که مشاهده می‌شود، میانگین‌های ۵ و ۱۰ سال اخیر، خط سیر تغییرات از میانگین ۴۰ ساله به سوی تخمین‌های ناشی از تغییر اقلیم در سناریوی RCP 8.5 را طی نموده است. در عین حال، پیش‌بینی‌های میانگین بارش تحت سناریوی RCP 4.5 منطبق با نتایج این تحقیق نمی‌باشد و احتمال وقوع این سناریوی اقلیمی کمتر است. تنوع بارندگی در مناطق مختلف ایران باعث شده است که احتمالاً میانگین کل داده‌ها، شاخص مناسبی برای بیان وضعیت کلی سامانه کشور نباشد. از این رو مطالعه‌ی حوضه‌های آبریز به صورت جداگانه توصیه می‌شود. از سوی دیگر، امکان دارد که میانگین‌های ۵ و ۱۰ سال گذشته، تخمین خوبی از میانگین سامانه نباشند. این کوتاه مدت بودن تخمین‌ها، باعث شده است که این تخمین‌ها از میانگین‌های بلندمدت در گذشته و آینده انحراف داشته باشند. با این وجود، در صورتی که میانگین‌های ۵ و ۱۰ ساله تخمین درستی از میانگین سامانه باشند، نقطه‌ی عطف در گذشته رخ داده و پیش‌بینی‌های تغییر اقلیم زودتر از زمانی که تحقیقات پیش‌بینی نمودند روی داده است.



شکل ۷- تطبیق میانگین بارش های ۵، ۱۰ و ۴۰ سال گذشته در کنار تخمین‌ها برای افق های تغییر اقلیم در سناریوی RCP 8.5 بر اساس Rahimi et al., (2020) با حالات ممکن از تغییرات سامانه بارش کشور در اثر تغییر اقلیم. نقاط خاکستری میانگین بارش کشور (۴۰، ۱۰ و ۵ ساله) برای دوره‌های ۱۳۹۲-۱۳۵۳، ۱۳۹۲-۱۳۸۳ و ۱۳۹۲-۱۳۸۸ را نمایش می‌دهد. نقاط آبی میانگین‌های بلندمدت در آینده برای بازه‌های ۱۴۴۹-۱۴۲۰، و ۱۴۷۹-۱۴۵۰ می‌باشند. خطوط قرمز حالت تعادل سامانه اقلیمی را نمایش می‌دهد، فلش قرمز جهت تغییرات کلی سامانه است.

Figure 7- Adapting the average rainfall of the last 5, 10 and 40 years along with estimates for climate change horizons for RCP 8.5 based on Rahimi et al., (2020) with possible states of changes in the country's precipitation system due to climate change. The grey dots show the country's average rainfall in the past (40, 5 and 10 years) for 1974-2013, 2004-2013 and 2009-2013 periods. The blue dots are the long-term averages for the future periods 2041-2070, and 2071-2100. The red lines show the equilibrium state of the climate system, the red arrow shows the general changes of the system, and the blue arrows show the direction of changes in the imbalance state of the system

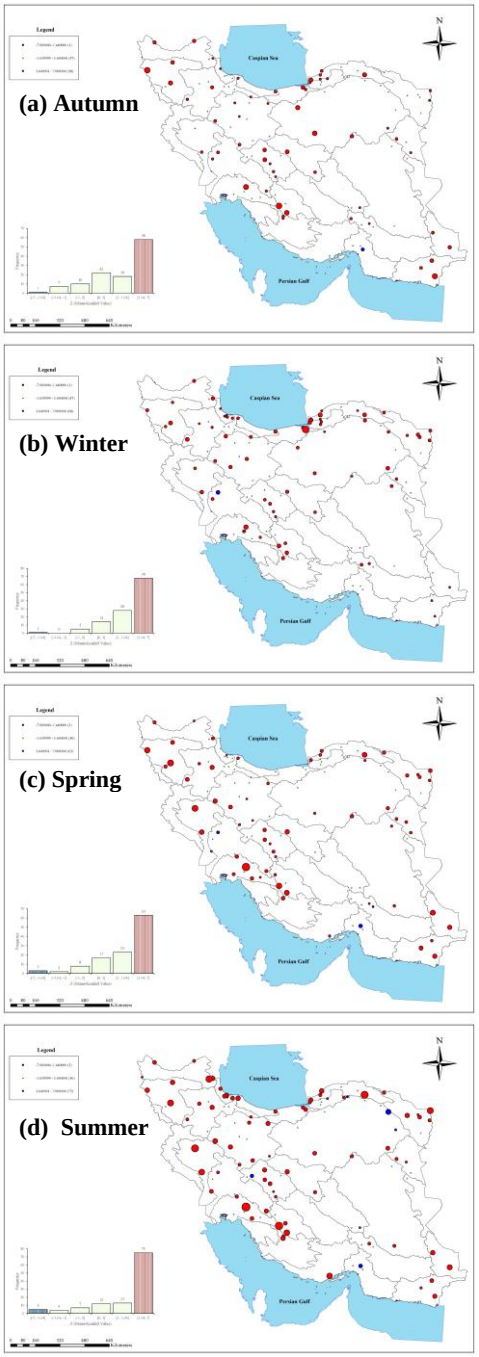
بررسی روند دمای متوسط

در شکل ۸، نتایج آزمون من-کندال برای آشکارسازی روند در سری‌های زمانی متوسط دمای فصلی (پاییزه، زمستانه، بهاره و تابستانه) ارائه شده است.

روند متوسط دما در سری‌های زمانی فصلی در ایستگاه‌های منتخب

شکل ۸ (الف)، نتایج آزمون روند من-کندال برای سری‌های زمانی متوسط دمای پاییز در ۱۱۶ ایستگاه منتخب اقلیم‌شناسی وزارت نیرو را نشان می‌دهد. در این فصل، نیمی از ایستگاه‌های منتخب با افزایش متوسط دمای در فصل پاییز مواجه بوده‌اند. در مابقی ایستگاه‌های منتخب (به جز یک ایستگاه در حوضه آبریز بندرعباس-سدیچ) روندی مشاهده نشده است. بزرگی معنی‌دار روند تغییرات دما با قطر دایره‌ها مشخص شده است. به عنوان مثال، افزایش دما در حوضه آبریز دریاچه ارومیه به نسبت حوضه آبریز کارون بیشتر است. همچنین در نقشه مذکور بافت‌نگار شاخص آماره من-کندال ترسیم شده است. این بافت‌نگار نشان می‌دهد که در فصل پاییز از میان ۱۱۶ ایستگاه منتخب کل کشور، تعداد ۵۸ ایستگاه دارای روند افزایشی و تنها یک ایستگاه منتخب با روند کاهش دمای متوسط مواجه بوده‌اند. شکل این بافت‌نگار و چولگی آن به سمت چپ نشان می‌دهد که فصل پاییز در کشور به شکل معنی‌داری نسبت به سال‌های گذشته، گرم‌تر

شده است. همچنین در شکل ۸ (ب)، نتایج آزمون روند من-کندال برای سری‌های زمانی متوسط دمای فصل زمستان در ۱۱۶ ایستگاه منتخب تبخیرسنجی وزارت نیرو نشان داده شده است. در این فصل، بیش از نیمی از ایستگاه‌های منتخب با افزایش متوسط دما در فصل زمستان مواجه بوده‌اند. در مابقی ایستگاه‌های منتخب (بجز یک ایستگاه در حوضه آبریز کارون بزرگ) روند معنی‌داری مشاهده نشده است. افزایش دما در بخش شرقی حوضه آبریز رودخانه‌های بین هراز-قره‌سو و بخش غربی حوضه آبریز اترک از اندازه بزرگی برخوردار است. برای بررسی بیشتر، بافت‌نگار شاخص آماره من-کندال نیز ترسیم شده است. این بافت‌نگار نشان می‌دهد که در فصل زمستان از میان ۱۱۶ ایستگاه منتخب کل کشور، تعداد ۶۸ ایستگاه دارای روند افزایشی و تنها یک ایستگاه منتخب با روند کاهش متوسط دمای فصل زمستان مواجه بوده‌اند. چولگی شدید این بافت‌نگار به سمت چپ بیانگر افزایش بارز متوسط دمای فصل زمستان نسبت به گذشته‌های دورتر می‌باشد. در شکل ۸ (ج)، نتایج آزمون روند من-کندال برای سری‌های زمانی متوسط دمای فصل بهار در ۱۱۶ ایستگاه منتخب تبخیرسنجی وزارت نیرو نشان داده شده است. مانند فصول پاییز و زمستان، در این فصل نیز بیش از نیمی از ایستگاه‌های منتخب با افزایش متوسط دما مواجه بوده‌اند. تنها در سه ایستگاه واقع در حوضه‌های آبریز کارون بزرگ، بندرعباس-سدیج و هامون جازموریان روندی مشاهده نشده است. از آن جایی که بزرگی معنی‌دار روند تغییرات دما با قطر دایره‌ها مشخص شده است، واضح است که در نوار غربی کشیده شده از شمال غربی تا جنوب غربی، افزایش دما شدیدتر بوده است. در نقشه مذکور بافت‌نگار شاخص آماره من-کندال نیز ترسیم شده است. این بافت‌نگار نشان می‌دهد که در فصل بهار از میان ۱۱۶ ایستگاه منتخب کل کشور، تعداد ۶۳ ایستگاه دارای روند افزایشی و تنها ۳ ایستگاه منتخب با روند کاهش متوسط دمای در فصل بهار مواجه بوده‌اند. چولگی شدید این بافت‌نگار به سمت چپ بیانگر افزایش بارز متوسط دمای فصل بهار نسبت به گذشته‌های دورتر می‌باشد.



شکل ۸- نتایج آزمون روند من-کندال برای سری‌های زمانی دمای متوسط در فصول مختلف در ۱۱۶ ایستگاه منتخب اقلیم‌شناسی وزارت نیرو

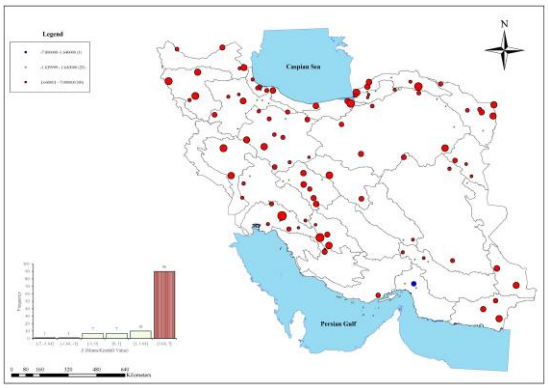
Figure 8- The results of Mann-Kendall trend test for the time series of the average temperature of four seasons at 116 selected climatological stations of the Ministry of Energy

DOI: 10.22125/agmj.2023.368274.1142

در شکل ۸ (د)، نتایج آزمون روند من-کندال برای سری‌های زمانی متوسط دمای فصل تابستان در ۱۱۶ ایستگاه منتخب تبخیرسنجی وزارت نیرو نشان داده شده است. تعداد ایستگاه‌هایی که با افزایش دما مواجه بودند به نسبت سایر فصول در فصل تابستان بیشتر شده‌اند. تنها در ۵ ایستگاه واقع در حوضه‌های آبریز گاوخونی، بندرعباس-سدیج و شرق حوضه‌های آبریز کویرمرکزی و قره‌سو و گرگانرود روندی مشاهده نشده است. در نوار غربی از شمال غربی تا جنوب غربی، افزایش دما شدیدتر بوده است. در نقشه مذکور بافت‌نگار شاخص آماره من-کندال نشان می‌دهد که در فصل تابستان از میان ۱۱۶ ایستگاه منتخب کل کشور، تعداد ۷۵ ایستگاه (حدود ۶۴ درصد) دارای روند افزایشی و تنها ۵ ایستگاه منتخب با روند کاهش متوسط دما در فصل تابستان مواجه بوده‌اند. چولگی شدید به سمت چپ بیانگر افزایش بارز متوسط دمای فصل تابستان نسبت به گذشته‌های دورتر می‌باشد.

روند متوسط دما در سری‌های زمانی سالانه در ایستگاه‌های منتخب

در شکل ۹، نتایج آزمون روند من-کندال برای سری‌های زمانی متوسط دمای سالانه در ۱۱۶ ایستگاه منتخب تبخیرسنجی وزارت نیرو نشان داده شده است.



شکل ۹- بزرگی و توزیع مکانی آماره z آزمون من-کندال در ایستگاه‌های تبخیرسنجی وزارت نیرو برای میانگین دمای سالانه

Figure 9- Magnitude and spatial distribution of the Mann-Kendall test z statistic for the evaporation stations of the Ministry of Energy for the yearly average temperature

نتایج حاصل از داده‌های سالانه ممکن است تفاوت اندکی با نتایج حاصل از داده‌های فصلی داشته باشد که به دلیل استفاده مستقیم از سری زمانی داده‌های سالانه است. تعداد ایستگاه‌هایی که با افزایش متوسط دمای سالانه مواجه بودند به نسبت فصول سال بیشتر است و به ۸۰ ایستگاه می‌رسد. این مقدار بدان معنی است که حدود ۷۰ درصد ایستگاه‌های منتخب کشور با افزایش متوسط دمای سالانه مواجه شده‌اند. تنها در ۳ ایستگاه واقع در حوضه‌های آبریز اترک، قره‌سو و گرگانرود و حوضه‌آبریز کویرمرکزی روندی مشاهده نشده است. همچنین در نقشه مذکور بافت‌نگار آماره من-کندال چولگی شدیدی به سمت چپ دارد. این موضوع بیانگر افزایش قابل ملاحظه دمای سالانه نسبت به گذشته‌های دورتر می‌باشد.

بررسی تغییرات متوسط دما در سال‌های اخیر

به منظور بررسی تغییرات متوسط دما در سال‌های اخیر، سری‌های زمانی مذکور به سری‌های جزیی ۵ و ۱۰ سال منتهی به سال آبی ۹۳-۱۳۹۲ تقسیم شد. میانگین متوسط دمای ۵ سال انتهای سری زمانی و میانگین متوسط دمای ۱۰ سال انتهای سری زمانی محاسبه شد و تغییرات متوسط دمای این دوره‌ها به دوره درازمدت در همه ۱۱۶ ایستگاه منتخب محاسبه گردید. به دلیل حجم بالای اطلاعات، ارائه همه نتایج به صورت نقطه‌ای در گزارش میسر نیست اما در ادامه اطلاعاتی به صورت آماری ارائه شده است. برای فصل پاییز و با استفاده از میانگین ۵ سال آخر در مقایسه با میانگین بلندمدت، ۵۶ ایستگاه، افزایش دمای تا ۰/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ ۲۴ ایستگاه افزایش دمای بین ۰/۵ تا ۱ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ هیچ ایستگاهی افزایش دمای بین ۱ تا ۱/۵ درجه سانتی‌گراد نداشته است؛ پنج ایستگاه افزایش دمای بین ۱/۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ هیچ ایستگاهی بین ۲ تا ۲/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش متوسط دما نداشته است و در نهایت نیز یک ایستگاه افزایش دمای بیشتر از ۲/۵ درجه و کمتر از ۳ درجه داشته است. از طرف دیگر، ۲۲ ایستگاه کاهش متوسط دمای تا ۰/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ هشت ایستگاه کاهش متوسط دمای از ۰/۵ تا ۱ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند.

DOI: 10.22125/agmj.2023.368274.1142

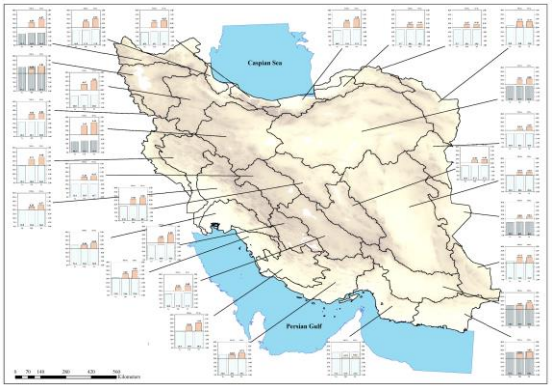
برای فصل پاییز و با استفاده از میانگین ۱۰ سال آخر در مقایسه با میانگین بلندمدت، ۵۲ ایستگاه افزایش دمای تا ۰/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ ۲۵ ایستگاه افزایش دمای بین ۰/۵ تا ۱ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ پنج ایستگاه افزایش دمای بین ۱ تا ۱/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ یک ایستگاه افزایش دمای بین ۱/۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد داشته و یک ایستگاه نیز بین ۲ تا ۲/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش متوسط دما داشته است. از طرف دیگر، ۲۶ ایستگاه کاهش متوسط دمای تا ۰/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ چهار ایستگاه کاهش متوسط دمای از ۰/۵ تا ۱ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند و دو ایستگاه نیز کاهش دمای بین ۱ تا ۱/۵ درجه سانتی‌گراد داشته است. برای فصل زمستان و با استفاده از میانگین ۵ سال آخر در مقایسه با میانگین بلندمدت، چهارده ایستگاه افزایش دمای تا ۰/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ ۲۴ ایستگاه افزایش دمای بین ۰/۵ تا ۱ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ ۲۸ ایستگاه افزایش دمای بین ۱ تا ۱/۵درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ ۲۸ ایستگاه دیگر نیز افزایش دمای بین ۱/۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ شش ایستگاه افزایش دمای بیشتر از ۲ و کمتر از ۲/۵ درجه سانتی‌گراد داشته است؛ پنج ایستگاه نیز بین ۲/۵ تا ۳ درجه سانتی‌گراد افزایش متوسط دمای ثبت نموده است و چهار ایستگاه نیز افزایش دمای بیشتر از ۳ درجه سانتی‌گراد را داشته‌اند. از طرف دیگر، سه ایستگاه کاهش متوسط دمای تا ۰/۵ درجه سانتی‌گراد و ۳ ایستگاه دیگر نیز کاهش متوسط دمای از ۰/۵ تا ۱ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند. برای فصل زمستان و با استفاده از میانگین ۱۰ سال آخر در مقایسه با میانگین بلندمدت، ۳۴ ایستگاه افزایش دمای تا ۰/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ ۴۳ ایستگاه افزایش دمای بین ۰/۵ تا ۱ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ ۲۴ ایستگاه افزایش دمای بین ۱ تا ۱/۵درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ پنج ایستگاه افزایش دمای بین ۱/۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ دو ایستگاه افزایش دمای بین ۲ تا ۲/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند و نهایتاً یک ایستگاه، افزایش دمای بین ۲/۵ تا ۳ درجه سانتی‌گراد داشته است؛ از طرف دیگر، چهار ایستگاه کاهش متوسط دمای تا ۰/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ دو ایستگاه کاهش متوسط دمای از ۰/۵ تا ۱ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ هیچ ایستگاهی کاهش دمای بین ۱ تا ۱/۵ درجه سانتی‌گراد نداشته و یک ایستگاه نیز کاهش دمای بین ۱/۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد داشته است. برای فصل بهار و با استفاده از میانگین ۵ سال آخر در مقایسه با میانگین بلندمدت، ۲۳ ایستگاه افزایش دمای تا ۰/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ ۴۳ ایستگاه افزایش دمای بین ۰/۵ تا ۱ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ ۳۰ ایستگاه افزایش دمای بین ۱ تا ۱/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ ده ایستگاه افزایش دمای بین ۱/۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ یک ایستگاه افزایش دمای بیشتر از ۲ و کمتر از ۲/۵ درجه سانتی‌گراد داشته است؛ شش ایستگاه کاهش متوسط دمای تا ۰/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ دو ایستگاه کاهش متوسط دمای از ۰/۵ تا ۱ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ یک ایستگاه نیز کاهش دمای بین ۱ تا ۱/۵ درجه سانتی‌گراد داشته است. برای فصل بهار و با استفاده از میانگین ۱۰ سال آخر در مقایسه با میانگین بلندمدت، ۳۳ ایستگاه افزایش دمای تا ۰/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ ۵۱ ایستگاه افزایش دمای بین ۰/۵ تا ۱ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ ۱۹ ایستگاه افزایش دمای بین ۱ تا ۱/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ دو ایستگاه افزایش دمای بین ۱/۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ یک ایستگاه افزایش دمای بیشتر از ۲ و کمتر از ۲/۵ درجه سانتی‌گراد داشته است؛ هفت ایستگاه کاهش متوسط دمای تا ۰/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ دو ایستگاه کاهش متوسط دمای از ۰/۵ تا ۱ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ هیچ ایستگاهی بین ۱ تا ۱/۵ درجه کاهش متوسط دمای نداشته است و یک ایستگاه نیز کاهش دمای بین ۱/۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد داشته است. برای فصل تابستان و با استفاده از میانگین ۵ سال آخر در مقایسه با میانگین بلندمدت، ۳۳ ایستگاه افزایش دمای تا ۰/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ ۳۰ ایستگاه افزایش دمای بین ۰/۵ تا ۱ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ ۲۸ ایستگاه، افزایش دمای بین ۱ تا ۱/۵درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ شش ایستگاه افزایش دمای بین ۱/۵تا ۲ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ یک ایستگاه افزایش دمای بیشتر از ۲ و کمتر از ۲/۵ درجه سانتی‌گراد داشته است و یک ایستگاه نیز بیشتر از ۳ درجه سانتی‌گراد افزایش متوسط دمای ثبت نموده است. از طرف دیگر، دوازده ایستگاه کاهش متوسط دمای تا ۰/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ سه ایستگاه کاهش متوسط دمای از ۰/۵ تا ۱ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ یک

DOI: 10.22125/agmj.2023.368274.1142

ایستگاه کاهش دمای بین ۱ تا ۱/۵ درجه سانتی‌گراد داشته و یک ایستگاه نیز کاهش متوسط دمای بین ۱/۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد داشته است. برای فصل تابستان و با استفاده از میانگین ۱۰ سال آخر در مقایسه با میانگین بلندمدت، ۴۴ ایستگاه افزایش دمای تا ۰/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ ۴۲ ایستگاه افزایش دمای بین ۰/۵ تا ۱ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ یازده ایستگاه افزایش دمای بین ۱ تا ۱/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ چهار ایستگاه افزایش دمای بین ۱/۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ از طرف دیگر، ۱۲ ایستگاه کاهش متوسط دمای تا ۰/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ دو ایستگاه کاهش متوسط دمای از ۰/۵ تا ۱ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ هیچ ایستگاهی کاهش دمای بین ۱ تا ۱/۵ درجه سانتی‌گراد نداشته و یک ایستگاه نیز کاهش متوسط دمای بین ۱/۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد داشته است. برای مقیاس سالانه و با استفاده از میانگین ۵ سال آخر در مقایسه با میانگین بلندمدت، ۳۲ ایستگاه افزایش دمای تا ۰/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ ۴۱ ایستگاه افزایش دمای بین ۰/۵ تا ۱ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ ۲۸ ایستگاه افزایش دمای بین ۱ تا ۱/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ چهار ایستگاه نیز افزایش دمای بین ۱/۵تا ۲ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ دو ایستگاه افزایش دمای بیشتر از ۲ و کمتر از ۲/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ یک ایستگاه نیز بین ۲/۵ تا ۳ درجه سانتی‌گراد افزایش متوسط دما ثبت نموده است. از طرف دیگر، شش ایستگاه کاهش متوسط دمای تا ۰/۵ درجه سانتی‌گراد، یک ایستگاه کاهش متوسط دمای بین ۰/۵ تا ۱ درجه سانتی‌گراد و یک ایستگاه دیگر نیز کاهش متوسط دمای از ۱ تا ۱/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند. برای مقیاس سالانه و با استفاده از میانگین ۱۰ سال آخر در مقایسه با میانگین بلندمدت، ۴۸ ایستگاه افزایش دمای تا ۰/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ ۴۶ ایستگاه افزایش دمای بین ۰/۵ تا ۱ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ یازده ایستگاه افزایش دمای بین ۱ تا ۱/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند؛ یک ایستگاه نیز افزایش دمای بین ۱/۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد داشته است. از طرف دیگر، هشت ایستگاه کاهش متوسط دمای تا ۰/۵ درجه سانتی‌گراد داشته‌اند و یک ایستگاه نیز کاهش متوسط دمای بین ۰/۵ تا ۱ درجه سانتی‌گراد داشته است. در ادامه، محاسبات با در نظر گرفتن شبکه تیسن به حوضه‌های آبریز کشور تعمیم داده شده و مقادیر تغییرات متوسط دمای ۵ و ۱۰ سال اخیر به تفکیک حوضه‌های آبریز درجه دو محاسبه گردید. بر این اساس، افزایش متوسط دمای ۱۰ ساله منتهی به ۹۳-۱۳۹۲ نسبت به درازمدت در حوضه آبریز دریاچه ارومیه بیشتر از یک درجه سانتی‌گراد (حدود ۱/۰۵ درجه سانتی‌گراد) بوده است. همچنین در شانزده حوضه آبریز اختلاف دما بین ۰/۵ تا ۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و در مابقی حوضه‌های آبریز (سیزده حوضه آبریز)، اختلاف دمای ۱۰ ساله اخیر با درازمدت کمتر از ۰/۵ درجه سانتی‌گراد بوده است. بر این اساس حوضه آبریز دریاچه ارومیه با افزایش ۱ درجه‌ای دما دارای بیشترین افزایش دما و در رتبه بعدی، حوضه آبریز مرزی غرب و حوضه آبریز رودخانه کرخه به ترتیب با ۰/۹ و ۰/۷ درجه سانتی‌گراد افزایش نسبت به دراز مدت قرار گرفته‌اند. کمترین افزایش دما در حوضه آبریز هامون هیرمند اتفاق افتاده است که در حدود ۰/۲ درجه می‌باشد. همچنین در خصوص بررسی تغییرات متوسط دمای در ۵ سال اخیر نسبت به دراز مدت خاطر نشان می‌سازد که متوسط دما در تمامی حوضه‌های آبریز کشور (مستخرج از ایستگاه‌های تبخیرسنجی وزارت نیرو) در ۵ سال منتهی به سال ۹۳-۱۳۹۲ نسبت به دراز مدت افزایش داشته است. دامنه تغییرات متوسط دما، از حداقل ۰/۲ درجه در حوضه آبریز بندرعباس-سدیج تا ۱/۴ درجه در حوضه آبریز دریاچه ارومیه تغییر می‌نماید. حوضه‌های آبریزی که افزایش دمای ۵ سال منتهی به ۹۳-۱۳۹۲ در آن‌ها نسبت به دراز مدت بیشتر از ۱ درجه سانتی‌گراد است به ترتیب عبارتند از دریاچه ارومیه با ۱/۴ درجه، مرزی غرب با ۱/۲ درجه، طشک-بختگان و مهارلو، مند، سفیدرود، تالش-تالاب انزلی، هراز، حله و ارس با حدود ۱ درجه سانتی‌گراد. همچنین در پانزده حوضه آبریز نیز در دوره مذکور متوسط دمای بین ۰/۵ تا ۱ درجه سانتی‌گراد افزایش داشته و تنها در شش حوضه آبریز درجه دو، متوسط دما در دوره مذکور کمتر از ۰/۵ درجه افزایش داشته است. به منظور بررسی تغییرات متوسط دما در سطح حوضه‌های آبریز درجه یک کشور، نتایج به دست آمده از حوضه‌های آبریز درجه دو به حوضه‌های آبریز درجه یک نیز تعمیم پیدا کرد. در دوره ۱۰ ساله منتهی به سال آبی ۹۳-۱۳۹۲، حوضه آبریز دریاچه ارومیه با افزایش ۱/۰۵ درجه‌ای

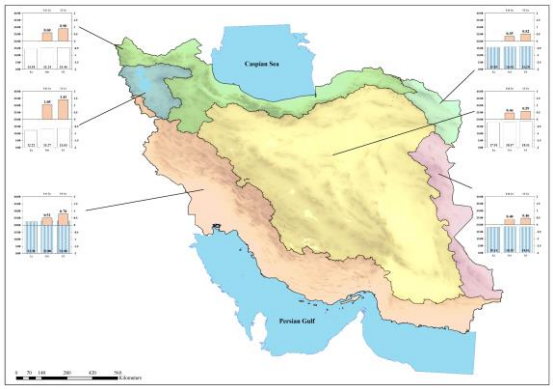
DOI: 10.22125/agmj.2023.368274.1142

متوسط دما رتبه نخست را در این بین داراست. در حوضه آبریز دریای مازندران افزایش دما در دوره مذکور در حدود ۰/۶ درجه سانتی‌گراد است. پس از آن‌ها، در حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان افزایش دما در این دوره در حدود ۰/۵ درجه سانتی‌گراد بوده است. در مابقی حوضه‌های آبریز درجه یک کشور، افزایش دما اتفاق افتاده ولی رقم آن کمتر از ۰/۵ درجه سانتی‌گراد بوده است. همچنین در دوره ۵ ساله منتهی به سال آبی ۹۳-۱۳۹۲، حوضه آبریز دریاچه ارومیه با افزایش متوسط دمای ۱/۴ درجه سانتی‌گراد نسبت به دراز مدت مواجه بوده است. در حوضه آبریز دریای مازندران افزایش دما در دوره مذکور در حدود ۰/۹ درجه سانتی‌گراد است. پس از آن‌ها، افزایش دما در دوره مذکور نسبت به درازمدت در حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان در حدود ۰/۷۸ درجه سانتی‌گراد، در حوضه آبریز فلات مرکزی ۰/۵۹ درجه سانتی‌گراد و حوضه آبریز قره‌قوم ۰/۵۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. فقط در حوضه آبریز مرزی شرق افزایش دما کمتر از ۰/۵ درجه (حدود ۰/۴۶ درجه) بوده است. نهایتاً متوسط افزایش دمای کشور در دوره ۱۰ ساله منتهی به ۹۳-۱۳۹۲ نسبت به میانگین دراز مدت در حدود ۰/۵ درجه سانتی‌گراد و در دوره ۵ ساله اخیر این رقم به ۰/۷ درجه سانتی‌گراد می‌رسد.



شکل ۱۰- مقادیر میانگین متوسط دمای ۴۰ ساله، ۱۰ ساله و ۵ ساله منتهی به دوره آماری ۹۳-۱۳۹۲ و تغییرات آن‌ها به درازمدت در حوضه‌های آبریز درجه دو کشور

Figure 10- 40-year, 10-year and 5-year average temperature values leading to the statistical period of 2013-2014 and their long-term changes in the country's level 2 watersheds



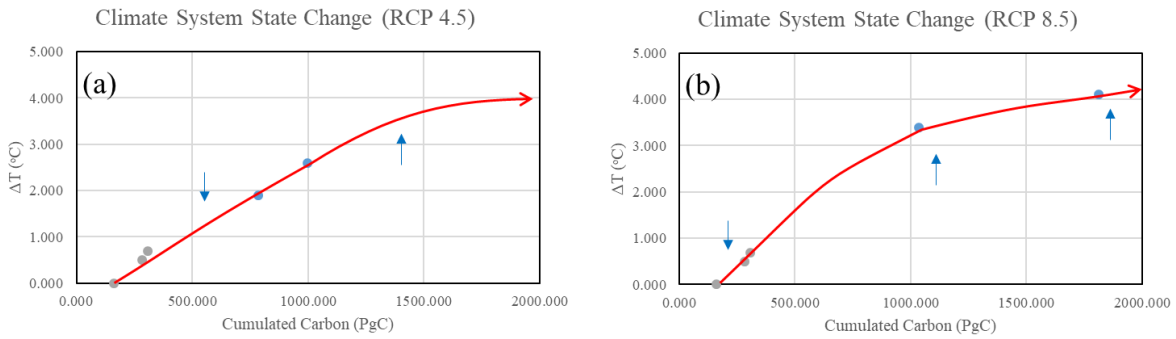
شکل ۱۱- مقادیر میانگین متوسط دمای ۴۰ ساله، ۱۰ ساله و ۵ ساله منتهی به دوره آماری ۹۳-۱۳۹۲ و تغییرات آن‌ها به درازمدت در حوضه‌های آبریز درجه یک کشور

Figure 11- 40-year, 10-year and 5-year average temperature values leading to the statistical period of 2013-2014 and their long-term changes in the country's level 1 watersheds

در شکل ۱۰ و ۱۱، وضعیت تغییرات متوسط دمای حوضه‌های آبریز کشور در دوره‌های ۵ و ۱۰ سال اخیر به ترتیب برای حوضه های آبریز درجه دو و درجه یک با ترسیم نمودارهای تغییرات مذکور نشان داده شده است. به منظور درک بیشتر تغییرات سامانه در بلندمدت، شکل ۱۲ میانگین‌های دمای کشور در افق‌های زمانی ۴۰ ساله، ۱۰ و ۵ سال اخیر در گذشته را با میانگین‌های آینده تحت سناریوهای تغییر اقلیم RCP 4.5 و RCP 8.5 نشان می‌دهد. این شکل، بهترین حالات منتخب از حالات چهارگانه را نمایش می دهد. در شکل ۱۲، حالات a، b حاکی از افزایش دمای کشور بدون رخداد نقطه عطف یا تغییرات دفعی در هر دو سناریوی RCP 4.5 و RCP 8.5 است. میانگین‌های دمای کشور برای ۵ و ۱۰ سال اخیر منتهی به سال ۱۳۹۳ منطبق بر میانگین‌های دمایی بلندمدت در گذشته و آینده رفتاری فزاینده را نمایش می‌دهند. به نظر می‌رسد سامانه اقلیمی کشور ایران، از منظر دما رفتاری مشابه برای همه‌ی نقاط را نمایش می‌دهد که تغییرات گذشته بر اساس داده‌های مشاهداتی، در انطباق با پیش‌بینی‌های اقلیمی در آینده میان و بلندمدت می‌باشد. در این پژوهش، به دلیل عدم دسترسی به ارتفاع ایستگاه‌های تبخیرسنجی، از روش تیسن برای تعمیم نتایج ایستگاهی به حوضه آبریز استفاده شد. علیرغم ساده سازی در این پژوهش و استفاده از روش تیسن، شکل ۱۲ روند پیوسته و بدون

DOI: 10.22125/agmj.2023.368274.1142

شکستگی را نمایش می‌دهد که منطبق با مطالعات تغییر اقلیم انجام شده در گذشته برای اقلیم ایران می‌باشد. مزایا و معایب روش تیسن برای دما مشابه بارش است. با این حال، دما بیشتر از بارندگی تحت تأثیر ارتفاع قرار می‌گیرد، بنابراین روش تیسن ممکن است تغییرات مکانی دما را به خوبی بارش ثبت نکند. همچنین، (تغییرات) دما معمولاً پیوسته تر و هموارتر از بارش است، بنابراین روش تیسن ممکن است ناپیوستگی های مصنوعی را در مرزهای چندضلعی ایجاد کند. لذا روش تیسن ممکن است بهترین انتخاب برای درونیابی داده های دما نباشد. توصیه می‌شود در پژوهش‌های آینده، اثر گرادیان دما در تعمیم نتایج ایستگاه به حوضه آبریز لحاظ گردد.



شکل ۱۲- بهترین تطبیق برای تغییرات میانگین دما های ۵، ۱۰ و ۴۰ سال گذشته در کنار تخمین‌ها برای افق‌های تغییر اقلیم بر اساس Rahimi et al. (2020) با حالات ممکن از تغییرات سامانه دمایی کشور در اثر تغییر اقلیم در دو سناریوی RCP 4.5 و RCP 8.5. نقاط خاکستری میانگین تغییر دمای کشور (۴۰، ۱۰ و ۵ سال گذشته) برای دو دوره‌های ۱۳۹۲-۱۳۵۳، ۱۳۹۲-۱۳۸۳ و ۱۳۹۲-۱۳۸۸ را نمایش می‌دهد. نقاط آبی میانگین‌های بلندمدت برای بازه‌های ۱۴۴۹-۱۴۲۰ و ۱۴۷۹-۱۴۵۰ می‌باشند. خطوط قرمز حالت تعادل سامانه اقلیمی را نمایش می‌دهد، فلش قرمز جهت تغییرات کلی سامانه است و فلش‌های آبی رنگ، جهت تغییر در حالت عدم تعادل سامانه را نشان می‌دهد.

Figure 12- Best agreement for the average temperature of the last 5, 10 and 40 years along with estimates for climate change horizons based on Rahimi et al. (2020) with possible states of changes in the country's average temperature change due to climate change for RCP 4.5 and 8.5 scenarios. The grey dots show the country's average temperature difference (40, 10 and 10 years in the past) for 1974-2013, 2004-2013 and 2009-2013 periods. The blue dots are the long-term averages for the periods 2041-2070, and 2071-2100 in future. The red lines show the equilibrium state of the climate system, the red arrow shows the general changes of the system, and the blue arrows show the direction of changes in the imbalance state of the system.

نتیجه‌گیری

جمع‌بندی روند بارش و دما

در فصل پاییز، روند افزایش بارش در نیمه شمالی کشور بخصوص شرق دریای مازندران (استان گلستان) مشاهده شد. در هیچ جای کشور کاهش معنی‌دار بارش در این فصل مشاهده نشد. در این فصل افزایش متوسط دما در ۵۰ درصد ایستگاه‌های منتخب کشور آشکار شد و تعداد ایستگاه‌های با روند کاهشی دما ناچیز هستند. در فصل زمستان، روند کاهش بارش در اکثر نقاط کشور بجز استان گلستان مشاهده شد. در زمستان، تعداد ایستگاه‌های با روند کاهش بارش نسبت به سایر فصول بسیار بیشتر است. ظاهراً زمستان‌های کشور به سمت کم بارشی شدید پیش می‌رود. در این فصل متوسط دما در ۵۸ درصد ایستگاه‌های منتخب کشور آشکار شد و تعداد ایستگاه‌های با روند کاهش دما ناچیز هستند. در فصل بهار، روند افزایش بارش چندان قابل توجه نیست لیکن روند کاهش بارش در حوضه آبریز دریاچه ارومیه و حوضه‌های شرقی کشور و بخش‌هایی از حوضه دریاچه نمک نگران‌کننده است. در این فصل افزایش متوسط دما در ۵۴ درصد ایستگاه‌های منتخب کشور آشکار شد و تعداد ایستگاه‌های با روند کاهش دما ناچیز هستند. در فصل تابستان، روند کاهش بارش در مرکز و نواحی جنوبی کشور مشاهده می‌شود. روند افزایش بارش در وسعت گسترده‌ای از کشور واقع در حوضه‌های آبریز واقع در شمال، شمال غربی و غرب کشور، مشاهده می‌شود. در این فصل افزایش متوسط دما در ۶۵ درصد ایستگاه‌های منتخب کشور

DOI: 10.22125/agmj.2023.368274.1142

آشکار شدند و تعداد ایستگاه‌های با روند کاهش دما نیز ناچیز هستند. در مقیاس سالانه، روند افزایش بارش در استان گلستان محرز است. به صورت پراکنده افزایش بارش در شمال غرب کشور نیز دیده می‌شود، لیکن به صورت گسترده کشور با روند محرزکاهش بارش روبرو شده است. ایستگاه‌های منتخب کشور، روند افزایش دمای سالانه را نشان می‌دهند.

جمع‌بندی تغییرات بارش و دمای سالانه

بیشترین کاهش بارش در ۵ و ۱۰ سال انتهای دوره بررسی، مربوط به حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان می‌باشد. دامنه تغییرات کاهش بارش‌های اخیر آن بین ۶ تا ۲۵ و با میانگین ۱۴ درصد است. حوضه‌های مهم کارون بزرگ با حدود ۱۵ درصد، کرخه با ۹ درصد و کل و مهران با ۲۴ درصد کاهش بارش در ۵ سال آخر مواجه بوده‌اند. کاهش بارش در شرق کشور و مرکز کشور نیز قابل توجه و در حدود ۹ تا ۱۲ درصد می‌باشد. تنها در شمال کشور روند بارش افزایشی بوده و افزایش بارش حدود ۴ درصد مشاهده می‌شود. از منظر تغییرات دمایی، در ۶۹ درصد ایستگاه‌های منتخب کشور روند افزایشی دمای متوسط سالانه مشاهده می‌شود. در ۱۰ سال اخیر نسبت به درازمدت حدود ۰/۵ درجه سانتی‌گراد و طی ۵ سال اخیر نسبت به دراز مدت حدود ۰/۷ درجه سانتی‌گراد افزایش را شاهد هستیم. در حوضه آبریز دریاچه ارومیه تغییرات دمای متوسط ۵ سال اخیر نسبت به درازمدت، زیاد و در حدود ۱/۴ درجه و ۱/۰۵ درجه در ۱۰ سال اخیر بوده است. به طور کلی می‌توان گفت کشور طی سال‌های اخیر گرم تر شده است. این افزایش دما با توجه به کاهش بارش، می‌تواند منجر به کاهش ذخیره آب سطحی، کاهش نگهداشت به شکل رطوبت خاک، افزایش تبخیر از بارش و در نهایت کاهش قابل توجه حجم آب تجدیدپذیر شده باشد. لذا، نیاز به تغییر رویکرد تصمیم‌گیران و مردم نسبت به مدیریت آب در سطح وسیع احساس می‌شود. به نظر می‌رسد با تغییر رژیم اقلیمی و منابع آب کشور، جامعه ایران نیز نیاز به تغییر رویکرد اساسی در منابع و مصارف آب خود دارد. همچنین، نتایجی که این پژوهش ارائه می‌کند، نیاز کشور به بازطراحی سامانه‌های عرضه و تقاضای آب با توجه به افزایش تقاضاها و نیز تلفات ناشی از تبخیر را برجسته می‌کند.

منابع

Buizza, R. 2002. Chaos and weather prediction January 2000. European Centre for Medium-Range Weather Meteorological Training Course Lecture Series ECMWF.

Chen, H., Guo, S., Xu, C., Singh, V.P. 2007. Historical temporal trends of hydro-climatic variables and runoff response to climate variability and their relevance in water resource management in the Hanjiang basin. Journal of Hydrology, 344(3), 171–184.

Fathian, F., Dehghan, Z., Bazrkar, M.H., Eslamian, S., 2016. Trends in hydrological and climatic variables affected by four variations of the Mann-Kendall approach in Urmia Lake basin, Iran. Hydrological Sciences Journal, 61(5), 892–904.

Khalili, A., Rahimi, J. 2014. High-resolution spatiotemporal distribution of precipitation in Iran: a comparative study with three global-precipitation datasets. Theoretical and Applied Climatology, 118(1), 211–221.

Kondratyev, K.Y., Kondratyev, K., 2004. Key Aspects of Global Climate Change. Energy and Environment. Sage Publications Ltd, 15(3), 469–503.

Meinshausen, M., Smith, S.J., Calvin, K., Daniel, J.S., Kainuma, M.L.T., Lamarque, J.F., Matsumoto, K., Montzka, S.A., Raper, S.C.B., Riahi, K., … van Vuuren, D.P.P., 2011. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. Climatic Change, 109(1), 213.

Modarres, R., Sarhadi, A., 2009. Rainfall trends analysis of Iran in the last half of the twentieth century. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 114(D3).

Rahimi, J., Laux, P., Khalili, A., 2020. Assessment of climate change over Iran: CMIP5 results and their presentation in terms of Köppen–Geiger climate zones. Theoretical and Applied Climatology, 141(1), 183–199.

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F.S., Lambin, E., Lenton, T., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., 2009. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. Ecology and society, 14(2).

Saboohi, R., Soltani, S., and Khodagholi, M., 2012. Trend analysis of temperature parameters in Iran. Theoretical and Applied Climatology, 109(3), 529–547.

Salehi, S., Dehghani, M., Mortazavi, S.M., and Singh, V.P., 2020. Trend analysis and change point detection of seasonal and annual precipitation in Iran. International Journal of Climatology, 40(1), 308–323.

Sivakumar, B., 2016. Chaos in hydrology: bridging determinism and stochasticity. Springer.
Soltani, S., Saboohi, R., Yaghmaei, L., 2012. Rainfall and rainy days trend in Iran. Climatic Change, 110(1), 187–213.
Strogatz, S.H., 2014. Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering. CRC press.
Tabari, H., Shifteh Some'e, B., Rezaeian Zadeh, M., 2011. Testing for long-term trends in climatic variables in Iran. Atmospheric Research, 100(1), 132–140.
Tabari, H., Hosseinzadeh Talaee, P., 2011. Temporal variability of precipitation over Iran: 1966–2005. Journal of Hydrology, 396(3), 313–320.
Zarenistanak, M., Dhorde, A.G., Kripalani, R.H., 2014. Trend analysis and change point detection of annual and seasonal precipitation and temperature series over southwest Iran. Journal of earth system science, 123(2), 281–295.
Scheffer, M., 2009. Critical Transitions in Nature and Society. Princeton University Press.
Scheffer, M., Bascompte, J., Brock, W.A., Brovkin, V., Carpenter, S.R., Dakos, V., Held, H., van Nes, E.H., Rietkerk, M., Sugihara, G., 2009. Early-warning signals for critical transitions. Nature, 461(7260), 53–59.
Scheffer, M., Brock, W., Westley, F., 2000. Socioeconomic Mechanisms Preventing Optimum Use of Ecosystem Services: An Interdisciplinary Theoretical Analysis. Ecosystems, 3(5), 451–471.
Scheffer, M., Carpenter, S.R., 2003. Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation. Trends in ecology & evolution, 18(12), 648–656.
Shifteh Some'e, B., Ezani, A., Tabari, H., 2012. Spatiotemporal trends and change point of precipitation in Iran. Atmospheric Research, 113, 1–12.

Journal of Agricultural Meteorology
(Iranian Soc. of Water and Irrig. Eng.)
Vol. 11, No. 2, Autumn & Winter 2023, pp. 51-69
DOI: 10.22125/agmj.2023.368274.1142

نشریه هواشناسی کشاورزی
(وابسته به انجمن مهندسی آبیاری و آب ایران)
جلد ۱۱، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۴۰۲، صص.۶۹-۵۱
مقاله علمی پژوهشی

Trend analysis of precipitation and air temperature in water basins of Iran

M. Khorsandi[1*], H. Ghalkhani [2], M.M. Bateni [3]

Received: 02/11/2022
Accepted: 01/06/2023

Abstract
In this study, the trend of precipitation and temperature variables in basin scale across Iran was evaluated using ministry of energy weather stations data. Initially, among the total 2,142 climatology and 1,230 evaporation stations corseponding data of those with a minimum of 40 years record and a maximum of 3 months of missing data were selected, resulting in 476 and 116 climatology and evaporation stations, respectively. The study period was from water year 1973-74 to 2013-14. The monthly, seasonal, and annual precipitation and temperature data of the selected stations were spatially interpolated in different catchements across the country using the Thiessen method. The Mann-Kendall test was then employed to detect trends of times series. Considering the significance levels of 90, 95, and 99 percent, the results were analyzed at each station, second-degree basin, first-degree basin, and across the entire country. The findings of this research indicate an increasing trend in autumn precipitation for the northern part of the country (13 percent of stations), a decreasing trend in winter precipitation for 33 percent of stations, no significant trend in spring precipitation, and an increasing trend in summer precipitation. Additionally, an increasing trend was observed in all temperature time series. By comparing the changes over the last 5 and 10 years of study period (ending by 2013-2014) with the long term 40-years average, a significant decrease in precipitation in most regions of the country, was observed, this accompanied by an increase in the mean temperature, suggests a substantial reduction in available water resources in study period.

Keywords: Trend Analysis, Precipitation, Temperature, Climate Change, Iran

[1] Institut national de la recherche scientifique (INRS)-Centre Eau Terre Environnement (ETE)
(*Corresponding Author Email Address: mostafa.khorsandi@inrs.ca)
[2] Senior expert in water resources, Iran Water Resources Management Company
[3] Post doctoral, University School for Advanced Studies Pavia

نحوه ارجاع مقاله:
خورسندی، م.، قلخانی، ح.، باطنی، م.ح. ۱۴۰۲. تحلیل روند زمانی تغییرات بارش و دما در حوضه های آبریز ایران. نشریه هواشناسی کشاورزی، ۱۱(۲): ۶۹-۵۱ DOI: 10.22125/agmj.2023.368274.1142

Korsandi, M., Ghalkhani, H., Bateni, M.M. 2023. Trend Analysis of Precipitation and Air Temperature in water basins of Iran. Journal of Agricultural Meteorology, 11(2): 51-69. DOI: 10.22125/agmj.2023.368274.1142