Пиротски зборник, бр. 51, 113-158
УДК: 51.58
DOI: 10.5937/pirotzbor2651113S

изворни рад
original paper

Jelena Svetozarević[*], Climate, Atmosphere and Water Research Institute at Bulgarian Academy of Sciences (CAWRI-BAS)
https://orcid.org/0000-0002-0861-7246

Seasonal Air Temperature Variability and Thermal Extremes in the Pirot District (Southeastern Serbia), 1961-2024

Abstract: *The paper presents and analyzes long-term changes in the seasonal characteristics of air temperature in the Pirot District (southeastern Serbia), using observations from the Babušnica, Pirot, and Dimitrovgrad meteorological stations. The analysis covers the period 1961-2024 (1961-2022 for Babušnica) and is divided into two periods. The study covers average monthly and annual temperatures, seasonal and annual temperature anomalies, linear temperature trends, and the frequency of extremely cold and extremely warm months. The results show rising temperatures at all analyzed stations across the Pirot District, reflected in higher annual and seasonal temperatures – particularly during the second observation period. Because the warmest years are concentrated in the final decade of the study period, annual temperature anomalies clearly show a shift from predominantly negative anomalies in the second half of the twentieth century to positive anomalies from the early 2000s onward. A comparison of two climatic sub-periods (1961-1992 and 1993-2024) indicates changes in the frequency of extremely warm and extremely cold months. The number of extremely warm months increased at all stations, while the number of extremely cold months decreased, especially during the summer. The greatest increase in months exceeding the high-temperature percentile threshold occurred in summer; such months were rare or virtually absent in the first period but became more frequent in the second. These results indicate a long-term positive temperature trend at the analyzed stations in the Pirot District and changes in seasonal tempera-*

* jelena.svetozarevic09@gmail.com

ture variability, reflected in both rising mean temperatures and changes in the frequency of seasonal temperature extremes.

Keywords: *air temperature, seasonal air temperature anomalies, temperature trends, thermal extremes, seasonal variability, Pirot District, Southeastern Serbia*

INTRODUCTION

Under modern climate change, mean air temperatures are clearly increasing at the global, regional, and local levels, accompanied by increasingly frequent temperature extremes and shifts in the seasonal distribution of heat (IPCC, 2021; EEA, 2024). Numerous studies show that in recent decades, the European continent has been warming faster than the global average (Copernicus, 2025; EEA, 2024; IPCC, 2021), with the Balkan Peninsula being one of the most sensitive regions, showing pronounced temperature increase trends and more frequent heat extremes (Charalampopoulos & Droulia, 2025; Malcheva, Bocheva & Chervenkov, 2022). The Copernicus 2025 report summarizes that, compared to pre-industrial levels (1850-1900), the average global temperature has risen by about 1.4 °C, according to the climate temperature indicator, which is based on the latest five-year averages. Ruml et al. (2017) show that the annual mean maximum temperature decreased during 1961-1980 and increased significantly across all stations during 1981-2010, with an average regional rate of 0.56 °C per decade. In Europe, extreme high temperatures have significantly increased, while extreme low temperatures have shown a decreasing trend (Donat et al., 2013; Morak, Hegerl & Christidis, 2013), in Croatia (Branković et al., 2013), in Bosnia (Popov, Gnjato, Trbić & Ivanišević 2018), in Montenegro (Burić, Ducić, Mihajlović, Luković & Dragojlović, 2015) and in Serbia (Malinović-Milicević, Radovanović, Stanojević & Milovanović, 2016; Ruml et al, 2017; Tošić et al., 2023; Unkašević & Tošić, 2009).

Research based on national meteorological station data shows that the most pronounced increases in average and maximum temperatures are observed in the eastern and southeastern parts of the country, while somewhat weaker trends are present in the western and mountainous areas (Tošić et al., 2023; Unkašević & Tošić, 2009). Additionally, studies conducted in Southeast Europe indicate that the overall warming trend

does not solely drive the increase in the intensity and duration of heat extremes, but also regional factors such as soil moisture deficit (Hirschi et al., 2011), anticyclonic situations, and stable air masses during the summer period (Fischer & Schär, 2010; Malcheva et al., 2022). In eastern Serbia, local morphological characteristics of basin and valley areas are of additional importance, where significant changes in the temperature regime and positive trends in seasonal and annual temperatures have been determined (Prokić, 2018; Radivojević et al., 2015).

Although individual studies on temperature extremes and trends in Serbia exist, detailed analyses of seasonal temperature anomalies at the Pirot District level remain relatively rare, indicating a need for additional local-level research. Based on an analysis of the available literature, this paper presents a new, detailed analysis of the temperature characteristics of the Pirot District, using a unique dataset from the Babušnica meteorological stations, Pirot, and Dimitrovgrad for 1961-2024, and until 2022 for Babušnica. In this context, this paper aims to analyze long-term changes in mean monthly, seasonal, and annual air temperatures, as well as corresponding temperature anomalies in the Pirot District for 1961-2024, with a special emphasis on identifying warming trends and extreme temperatures.

SCOPE OF THE STUDY AREA

The Pirot District is located in southeastern Serbia along the Serbian–Bulgarian border and is part of the Region of Southern and Eastern Serbia. The district includes the City of Pirot and the municipalities of Babušnica, Bela Palanka, and Dimitrovgrad, covering approximately 2,761 km². The Pirot District's natural geographic features significantly shape its climate. To the north, the Stara Planina massif stands out and is home to Serbia's highest peak, Midžor (2,169 m). Meanwhile, the eastern part of the district includes Mount Vidlič (Миловановић & Ристић Вакањац, 2014). The Vlaska Mountains, the Jerma Valley, and the Lužnica area form the region's southern periphery. To the west, the territory gradually slopes toward the eastern slopes of Suva Mountain and Belave. The central part of the district is occupied by the Pirot Basin, drained by the Nišava River and its local tributaries, among which the Rasnička River is particularly important. In the wider district, the Nišava drainage system is further developed by major tributaries such as the Temštica and Visočica rivers.

DATA AND METHODOLOGY

For this paper's analysis, data on average monthly temperatures from three meteorological stations in the Pirot District (Babušnica, Pirot, and Dimitrovgrad) were used. For the period from 1961 to 2024 (for the Babušnica station until 2022), seasonal and annual temperatures were calculated. Two 32-year periods were analyzed: 1961-1992 and 1993-2024 (1993-2022 for Babušnica). The study used data from the annual reports of the Republic Hydrometeorological Institute of Serbia (RHMS). For the Babušnica station, missing temperature data were determined for November 1963, January 1971, and the entire year 2020. These missing measurements were reconstructed using data from the nearby Pirot station, which showed a correlation coefficient greater than 0.85 for the respective periods. The reconstructed data were included in the further analysis. This procedure was applied to fill missing data and was not considered a formal homogenization of the time series. Detailed data necessary for formal homogenization – including information on station relocation, instrumentation, and changes in measurement practices – were not available. The meteorological stations analyzed in this study are predominantly located in the lower-elevation parts of the Pirot Basin, due to the limited availability of long-term meteorological observations in the higher mountainous areas of the Pirot District (Table 1). Seasonal mean air temperatures were calculated as the arithmetic mean of the three corresponding monthly mean air temperatures. Winter was defined as December–January–February (DJF), spring as March–April–May (MAM), summer as June–July–August (JJA), and autumn as September–October–November (SON). For seasonal classification, December is assigned to the following year's winter season. Therefore, because data for 1960 are unavailable, the winter temperature for 1961 was not used in the analysis. The 1962 winter begins in December 1961 and continues under the same method.

Table 1 Geographical location of meteorological stations in the Pirot District

Meteorological station	Latitude	Longitude	Elevation
Babušnica	43° 04’	22° 26’	495 m
Pirot	43° 09’	22° 35’	370 m
Dimitrovgrad	43° 01’	22° 45’	446 m

The study analyzes temperature anomalies using seasonal and annual mean air temperatures in the Pirot region from 1961 to 2024. Tem-

perature anomalies were calculated as deviations from the 1991-2020 reference climatological period, following the World Meteorological Organization for contemporary climate research (WMO, 2017, 2021). For each time scale (seasonal and annual), the anomaly is defined as the difference between the temperature in the observed year and the corresponding average over the reference period. Seasonal and annual temperature anomalies were obtained in this way, allowing assessment of temporal variations and long-term climate change. The calculation of temperature anomalies follows the standard definition used by the Copernicus Climate Change Service (C3S), where an anomaly is the difference between the observed value for a given period and the corresponding mean value for the selected reference period (Copernicus Climate Change Service, 2025b).

$$A_{y,s} = T_{y,s} - T_{s1991-2020}$$

where ($A_{y,s}$) is the seasonal temperature anomaly (°C) for year (y) and season (s); ($T_{y,s}$) is the mean air temperature (°C) of season (s) in year (y); and (T_s, 1991-2020) is the mean air temperature (°C) of the same season calculated for the 1991-2020 reference period.

The annual temperature anomaly was calculated using the same principle by subtracting the 1991-2020 mean annual temperature from the annual mean temperature of each year. Positive anomaly values indicate that the seasonal or annual mean temperature was higher than the corresponding 1991-2020 climatological mean, whereas negative values indicate lower temperatures.

Linear trends in mean air temperature were estimated using ordinary least squares linear regression. For each weather station and time scale, mean air temperature was the dependent variable, and calendar year was the independent variable. The linear relationship between temperature and time was expressed as:

$$T_t = a + bt$$

where (T_t) represents the mean air temperature (°C) in year (t), (a) is the regression intercept, and (b) is the regression slope. The slope coefficient represents the average annual rate of temperature change. To facilitate interpretation and comparison with climatological studies, the regression slope was converted from °C per year to °C per decade by multiplying the slope coefficient by 10. Linear regression was applied separately for the periods 1961-1992, 1993-2024, and the entire period

from 1961-2024, and the same procedure was applied to seasonal temperature anomalies and annual mean temperature series. The OLS method was used to estimate the linear trend, while Sen's estimator was applied as a robust nonparametric estimate of trend magnitude.

Trend magnitude and statistical significance were assessed using robust nonparametric methods. The magnitude was estimated by Sen's slope estimator (Sen, 1968), defined as the median of all pairwise slopes:

$$b_{Sen} = median\left(\frac{Tj - Ti}{j - i}\right), j > i$$

where Ti and Tj are annual mean temperatures in years i and j. The 95% confidence interval [CI] was calculated according to Gilbert,1987.

Statistical significance of the monotonic trend was tested using the Mann-Kendall (MK) test (Kendall, 1975; Mann, 1945). Because temperature series exhibit significant serial autocorrelation (lag-1 autocorrelation r1 = 0.62-0.71 for 1961-2024; r1 = 0.47-0.55 for 1993-2024; r1 = -0.28– -0.01 for 1961-1992), the variance of the MK statistic was corrected using the modified MK test according to Hamed & Rao, 1998:

$$Var*\ (S) = Var(S) \cdot \frac{n}{n^*}$$

where n/n* is the correction factor accounting for autocorrelation. The standardized test statistic Z_{mod} and two-sided p-value p_{mod} were used. Trends were considered statistically significant at $p_{mod}<0.05$. Microsoft Office Excel 2019 and its XLSTAT extension (https://www.xlstat.com/en) were used to analyze the data.

Extremely cold and warm months were determined for each investigated station. An extreme temperature month is defined as a month whose mean air temperature is lower (colder) than the 10th percentile or higher (warmer) than the 90th percentile of the empirical distribution of each month in the 1961-2024, while the 1991-2020 was used exclusively as the reference climatological period for calculating temperature anomalies. The 10th and 90th percentiles were calculated using the PERCENTILE.EXC function in Microsoft Excel, based on the entire available observation period for each weather station: 1961-2022 for Babušnica and 1961-2024 for Pirot and Dimitrovgrad. The percentile threshold values were calculated separately for each calendar month and each station.

The number of identified cold and warm months was summed by season and analyzed period. To enable comparison between the two observation periods, the seasonal frequency of extremely cold and warm months was expressed as a percentage of the total number of available monthly observations for the corresponding season and period. It was calculated as the number of identified extreme months divided by the total number of available monthly observations within the season (90 or 96, depending on the period), multiplied by 100. This percentile-based approach identifies months with exceptionally low or high mean temperatures relative to the empirical temperature distribution for that month over the entire study period (Copernicus Climate Change Service, 2025a; Nikolova, Leporte & Tomova, 2018).

RESULTS AND DISCUSSION

AVERAGE MONTHLY AND ANNUAL AIR TEMPERATURE

Analysis of the average monthly temperature for 1961-2024.

The comparison between the two periods indicates a general increase in mean monthly air temperatures across the study area, with the most pronounced changes occurring during the warm part of the year. The annual cycle of mean air temperature in the Pirot District shows a pronounced seasonal pattern, with the lowest temperatures in January and the highest values generally in July and August (Table 2). This annual temperature distribution is characteristic of areas with pronounced continental climate features, which prevail in the analyzed region (Milovanović, Ducić, Radovanović, & Milivojević, 2017).

Table 2 Average monthly temperature in °C for 1961-2024 registered at meteorological stations in the Pirot District (according to data from the RHMS Serbia)

Meteorological station	Period	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Babušnica	1961-1992	-1.2	0.9	5.2	10.0	14.4	17.4	19.1	19.1	15.3	10.4	5.2	0.4
	1993-2022	-0.1	2.0	5.8	11.2	16.0	19.8	21.7	21.5	16.5	11.2	6.0	1.2
Pirot	1961-1992	-0.7	1.6	5.9	10.9	15.4	18.5	20.3	20.1	16.4	11.1	5.8	1.1
	1993-2024	0.8	3.0	7.0	12.0	16.7	20.5	22.7	22.3	17.5	12.2	7.1	2.3
Dimitrovgrad	1961-1992	-1.3	0.8	4.9	10.0	14.5	17.6	19.3	19.0	15.4	10.4	5.2	0.6
	1993-2024	-0.1	1.9	5.4	10.4	15.2	19.0	21.0	20.4	15.9	10.9	6.1	1.5

Analysis of average monthly temperatures in the Pirot region for both periods (1961-1992 and 1993-2022/2024) shows that in the second observation period, an increase in monthly temperatures is observed during all months and at all analyzed stations, with the increase being most pronounced in Pirot, especially during the summer months. The warming occurs throughout the year, although it is not equally intense in each month. A comparison of both periods confirms that during the second observation period, the largest increases in average monthly temperature were recorded in August: 2.6°C in Babušnica, 2.4°C in Pirot, and 1.7°C in Dimitrovgrad. These increases, consistent with patterns observed across most of Serbia, indicate intensified summer warming (Tošić et al., 2023). Comparative analyses of 1961-1990 and 1998-2017 indicate that summer temperatures increased by more than 2 °C across most of the country (Vujadinovic Mandic et al., 2022). It is also concluded that winters have become milder and warmer than during 1961-1992, especially in January and February. For Pirot, the average January temperature has shifted from negative to positive values.

Analysis of the average annual temperature for 1961-2024.

The analysis shows that the average annual temperature in the Pirot District during the analyzed period ranged from 8.6°C (1980 – Babušnica) to 13.5°C (2024 – Pirot). The analysis of mean annual air temperature revealed statistically significant positive trends across the entire available observation period at all three stations. Sen's slope estimates were 0.39°C/decade for Babušnica, 0.43°C/decade for Pirot, and 0.26°C/decade for Dimitrovgrad (Table 3). Comparing the two periods shows a shift from predominantly negative trends during 1961-1992 to statistically significant positive trends in the second period, indicating that the warming signal was considerably more pronounced in the latter part of the observation period. During 1961-1992, all stations recorded a negative trend in mean annual temperature, with the greatest decrease at Dimitrovgrad. Unlike Babušnica and Pirot, where the negative trends were not statistically significant ($p = 0.3812$ and $p = 0.4020$), Dimitrovgrad showed a statistically significant negative trend ($p = 0.0007$). Pirot showed a positive and statistically significant trend in mean annual air temperature for 1993-2024. The linear trend value was 0.75°C/decade, while the Sen's slope was 0.79°C/decade, with a

95% confidence interval of 0.52 to 0.99°C/decade ($p < 0.001$). Figure 1 shows that Pirot stands out as the station with the most pronounced temperature rise.

Table 3 Linear trend (°C /10 years) and statistical significance of annual temperatures for 1961-2024

Stations	Period	OLS °C/10years	Sen (95% CI) °C/10years	Z_mod	p_mod
Babušnica	1961-1992	-0.07	-0.09 (-0.26–0.08)	-0.88	0.3812
	1993-2022	0.63	0.65 (0.39–0.92)	4.58	<0.001**
	1961-2022	0.39	0.40 (0.29–0.49)	4.54	<0.001**
Pirot	1961-1992	-0.06	-0.04 (-0.22–0.11)	-0.84	0.4020
	1993-2024	0.75	0.79 (0.52–0.99)	4.14	<0.001**
	1961-2024	0.43	0.44 (0.33–0.54)	4.52	<0.001**
Dimitrovgrad	1961-1992	-0.19	-0.17 (-0.33–-0.03)	-3.40	0.0007**
	1993-2024	0.56	0.64 (0.36–0.80)	3.47	0.0005**
	1961-2024	0.26	0.26 (0.16–0.35)	3.41	0.0007**

** p<0.01 significant, * p<0.05 significant; Z_mod and p_mod based on the modified Mann-Kendall test by Hamed & Rao (1998) with autocorrelation correction.

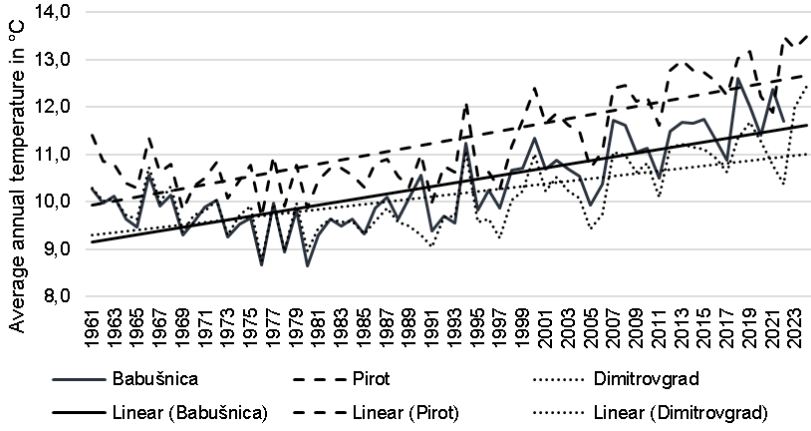


Figure 1 Average annual temperature in °C and OLS trend for 1961-2024 registered at meteorological stations in the Pirot District (according to data from the RHMS Serbia)

Analysis of the entire period shows that, at all stations, temperatures gradually increase toward the end of the period, a trend particularly noticeable after the 1990s. Even amidst short-term fluctuations, a clear

upward signal confirms the prevailing positive trend in mean annual temperatures over the entire available period. An examination of annual mean temperatures shows a clear shift from a milder regime in the early part of the period to warmer conditions in later decades. The coldest years were recorded from the mid-1960s to the mid-1980s, after which a clear temperature increase is evident at all three stations. The coldest years in the first period were 1980 for Babušnica (8.7 °C) and Pirot (9.7 °C), and 1976 for Dimitrovgrad (8.6 °C). In contrast, the highest annual temperatures occurred in the last decade, with a maximum of 13.5 °C in Pirot and values of up to 12.6 °C in Babušnica and 12.4 °C in Dimitrovgrad, respectively.

SEASONAL AND ANNUAL TEMPERATURE ANOMALIES

Analysis of seasonal anomalies

The analysis of seasonal temperature anomalies for the period 1961-2024 shows clearly defined interannual oscillations and a consistent long-term warming signal across all seasons in the Pirot District. Despite high variability in individual years, the data show a transition from dominance of negative anomalies in the first decades to increasingly frequent and intense positive departures in the most recent period.

Winter anomalies feature the greatest interannual variability and the most pronounced extremes in the entire dataset (Figure 2a). The 1961-1990 period is dominated by negative deviations, with distinctly cold winters, especially pronounced in 1963, 1981, 1992, 1993, 1999, and 2012. The coldest winter was 1985, when all three stations recorded the lowest values for the entire period (Babušnica: -2.93 °C, Pirot: -3.70 °C, and Dimitrovgrad: -3.57 °C). In the most recent period, 2017 also shows negative deviations, especially for Pirot (-2.13 °C) and Dimitrovgrad (-1.97 °C). Positive anomalies have dominated since 2000, with the extremely warm winters of the last decade particularly notable. Winters are becoming milder, and distinctly warm seasons, especially in the last decade (e.g., 2014, 2016, 2020-2024), are becoming increasingly common. This change indicates a significant decrease in the frequency of extremely cold winters and an increase in winter temperatures.

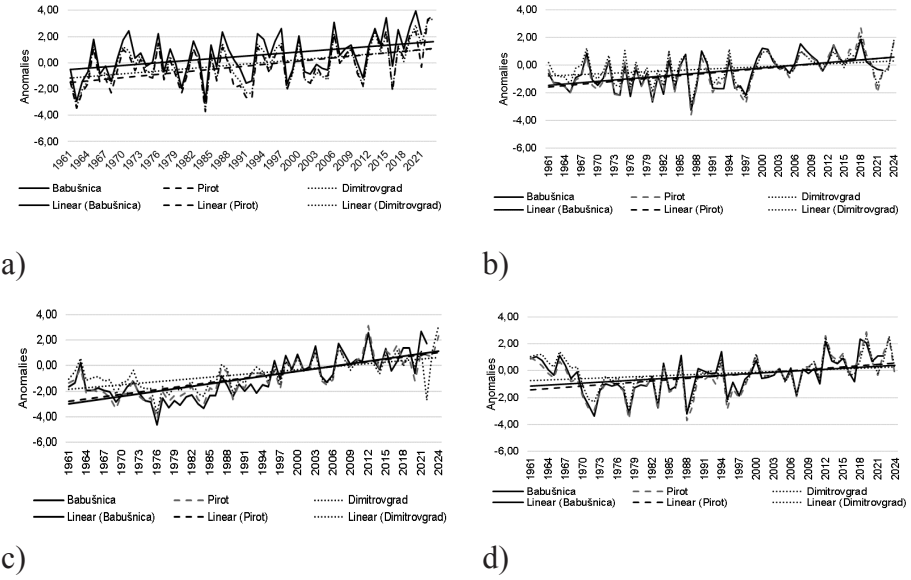


Figure 2 Seasonal temperature anomalies and OLS trend a) winter, b) spring, c) summer, and d) autumn for 1961-2022/2024 (in °C)

Spring anomalies show less variability compared to winter ones, indicating a rise in mean spring temperatures. Extremely negative values are concentrated in 1970-1990, while positive deviations intensify after 2000, with the most pronounced warm spring in 2018 (Babušnica: 1.88 °C; Pirot: 2.74 °C).

Summer anomalies are among the most important seasonal signals in the analysis, with pronounced negative departures in the first half of the observed period. During the 1970s and 1980s, very low anomaly values were recorded, including extremely cold summers such as 1976, when the deviations were most pronounced in the entire series (Babušnica: -4.63 °C; Pirot: -4.16 °C). After the 1990s, and especially after 2000, the structure of summer anomalies gradually changed. Positive deviations are becoming more frequent, and warm summers such as 2003, 2007, 2012, 2018, and 2021 indicate intensifying summer heat extremes. The largest positive summer temperature anomalies were recorded in 2012 (Babušnica: 2.57 °C, Pirot: 3.14 °C, and Dimitrovgrad: 2.53 °C). Previous studies in Serbia and the Nišava Valley also confirmed the exceptionally warm conditions this year (Prokić, 2018; Svetozarevic & Popov, 2020). In addition to 2012, 2024 also stands out as one of the warmest years in the analyzed period. Although

individual negative anomalies still occur, their frequency and intensity are decreasing, indicating a clear summer warming trend. However, despite the pronounced warming trend and prevailing positive anomalies over recent decades, a negative anomaly (-2.67°C) was recorded in Dimitrovgrad in 2022 – i.e., the temperature was lower than the climatological norm for the 1991-2020 period, representing a short-term deviation from the prevailing warming trend observed in previous years (Figure 2c).

The fall anomalies show a more uniform pattern than in other seasons, similar to spring, with a clear transition from a negative to a positive regime. The period from the 1970s to the late 1990s is dominated by negative departures, with pronounced cold autumn seasons indicating an earlier cooling in the year. The largest negative anomalies were recorded in 1971, 1972, 1978, and 1983. Furthermore, in 1988, deviations from the climatological normal reached or exceeded -3 °C. As in other seasons, a gradual transformation of the autumn thermal regime begins in the 1990s and becomes more pronounced after 2000. Positive anomalies become dominant, and the frequency of warm autumns increases, especially in the last decade.

Table 4 Linear trend (°C/10 years) and statistical significance of seasonal temperature anomalies for 1961-2024

Stations	Seasons	OLS trend °C/10years	Sen (95% CI) °C/10years	Z_mod	p_mod
Babušnica	Spring	0.32	0.31 (0.17-0.46)	3.41	0.0007**
	Summer	0.65	0.66 (0.49-0.84)	4.09	<0.001**
	Fall	0.24	0.27 (0.08-0.45)	2.04	0.0409*
	Winter	0.36	0.35 (0.12-0.57)	2.79	0.0052**
Pirot	Spring	0.33	0.33 (0.19-0.48)	3.53	0.0004**
	Summer	0.60	0.59 (0.44-0.73)	6.33	<0.001**
	Fall	0.31	0.31 (0.13-0.50)	2.62	0.0087**
	Winter	0.41	0.45 (0.22-0.64)	3.60	0.0003**
Dimitrovgrad	Spring	0.17	0.17 (0.02-0.32)	2.19	0.0285*
	Summer	0.39	0.39 (0.27-0.54)	4.23	<0.001**
	Fall	0.16	0.16 (-0.01-0.33)	1.39	0.1641
	Winter	0.35	0.36 (0.13-0.58)	2.81	0.0049**

Reference period for anomalies: 1991-2020. ** p<0.01, * p<0.05.

Trend analysis of seasonal temperature anomalies confirms a clear warming trend in the Pirot region, with consistently positive values across all measured seasons and stations (Table 4).

The greatest trend intensity was recorded during the summer period, with a maximum at the Babušnica station (0.65 °C/decade), while Pirot showed a slightly lower but still high value (0.60 °C/decade). Winter trends are also pronounced but slightly weaker, with values ranging from 0.35 to 0.41 °C/decade.

Analysis of annual anomalies

Annual anomalies show a pronounced shift at all stations between the first and second parts of the observed period. From the early 1960s to the mid-1990s, negative anomalies dominate, while after 2000, positive anomalies become increasingly frequent and intense, a trend also observed in the analysis of seasonal anomalies. Notably, during 1961-1993, almost all annual anomalies were negative (Figure 3). The only exceptions are a few years with values close to the average, but without significant positive deviations. The most pronounced negative anomalies were recorded during the 1970s and early 1980s. The year 1976 stands out in particular, during which extremely negative temperature anomalies were recorded at all analyzed stations: -2.20 °C in Babušnica, -2.11 °C in Pirot, and -1.70 °C in Dimitrovgrad. This year also featured below-average summer temperatures, indicating a pronounced cold anomaly. Besides 1976, 1969, 1978, 1980, and 1991 also stand out as among the coldest years in the observed period. Interestingly, Babušnica and Pirot recorded the largest negative anomalies, while Dimitrovgrad had somewhat milder deviations. In contrast, after 2000, positive anomalies gradually became dominant, and after 2012, almost all years were warmer than the 1991-2020 average. In 1994, more pronounced positive annual anomalies first appeared at all three stations, gradually initiating positive deviations. The last decade was significantly warmer than average, with steadily increasing anomalies, indicating a prevailing positive temperature signal in the final part of the analyzed period.

Regarding spatial differences, given the proximity of the analyzed stations, all three stations show a very similar temporal course of anomalies. The coldest and warmest years occur almost simultaneously. However, certain differences are noticeable. Pirot has the most pronounced oscillations and the largest long-term warming trend.

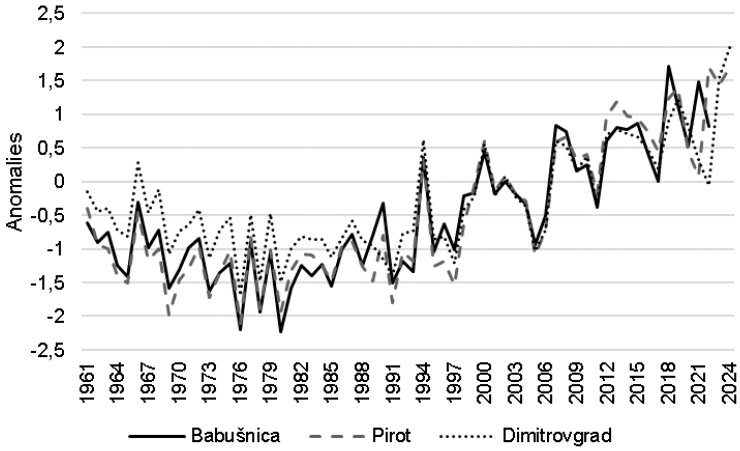


Figure 3 Annual temperature anomalies for 1961-2024 (in °C)

ANALYSIS OF EXTREMELY COLD AND EXTREMELY WARM MONTHS

By analyzing average monthly temperatures, the extremely cold and extremely warm months in each season were identified. The extremely cold months are concentrated in the first period, while the extremely warm months are in the second period, as shown by the analysis of seasonal temperature anomalies.

The comparison of frequencies was performed using comparable rates with a clearly defined denominator (total months per season) and 95% confidence intervals (Table 5). While cold extreme months significantly decreased and warm extreme months significantly increased in spring, summer and autumn at all stations, winter showed no significant change.

Table 5 Seasonal frequency of extremely cold and extremely warm months for 1961-1992 (P1) and 1993-2024/22 (P2)

Station	Season	Cold P1 % [95% CI]	Cold P2 % [95% CI]	Δ cold	Warm P1 % [95% CI]	Warm P2 % [95% CI]	Δ warm
Babušnica	(DJF)	13.5 [8.1-21.8]	8.9 [4.6-16.6]	-4.7 ns	6.3 [2.9-13.0]	11.1 [6.1-19.3]	+4.9 ns
Babušnica	(MAM)	13.5 [8.1-21.8]	3.3 [1.1-9.3]	-10.2 *	3.1 [1.1-8.8]	11.1 [6.1-19.3]	+8.0 *
Babušnica	(JJA)	16.7 [10.5-25.4]	0.0 [0.0-4.1]	-16.7 ***	0.0 [0.0-3.8]	21.1 [14.0-30.6]	+21.1 ***
Babušnica	(SON)	13.5 [8.1-21.8]	4.4 [1.7-10.9]	-9.1 *	5.2 [2.2-11.6]	13.3 [7.8-21.9]	+8.1 ns
Dimitrovgrad	(DJF)	8.3 [4.3-15.6]	8.3 [4.3-15.6]	0.0 ns	6.3 [2.9-13.0]	13.5 [8.1-21.8]	+7.3 ns

Dimitrovgrad	(MAM)	13.5 [8.1-21.8]	4.2 [1.6-10.2]	-9.4 *	3.1 [1.1-8.8]	7.3 [3.6-14.3]	+4.2 ns
Dimitrovgrad	(JJA)	19.8 [13.1-28.9]	3.1 [1.1-8.8]	-16.7 ***	0.0 [0.0-3.8]	11.5 [6.5-19.4]	+11.5 ***
Dimitrovgrad	(SON)	11.5 [6.5-19.4]	7.3 [3.6-14.3]	-4.2 ns	5.2 [2.2-11.6]	13.5 [8.1-21.8]	+8.3 *
Pirot	(DJF)	11.5 [6.5-19.4]	5.2 [2.2-11.6]	-6.3 ns	5.2 [2.2-11.6]	11.5 [6.5-19.4]	+6.3 ns
Pirot	(MAM)	11.5 [6.5-19.4]	2.1 [0.6-7.3]	-9.4 **	3.1 [1.1-8.8]	14.6 [8.9-23.0]	+11.5 **
Pirot	(JJA)	11.5 [6.5-19.4]	2.1 [0.6-7.3]	-9.4 **	1.0 [0.2-5.7]	13.5 [8.1-21.8]	+12.5 ***
Pirot	(SON)	19.8 [13.1-28.9]	6.3 [2.9-13.0]	-13.5 **	2.1 [0.6-7.3]	15.6 [9.7-24.2]	+13.5 **

ns $p>0.05$, *$p<0.05$, **$p<0.01$, ***$p<0.001$

Extremely Cold Months

As shown in Figure 4, extremely cold months were more pronounced during the first period (1961-1992) across all seasons and decreased drastically during the second period. While extremely cold months were relatively frequent in all seasons during 1961-1992, their frequency dropped sharply after 1993, particularly in summer. At the Babušnica station, the relative frequency of extremely cold months during the summer decreases from 16.7% to 0%, while during the spring, extremely cold months decrease from 13.5% to 3.3%. A similar analysis is observed in Pirot, where 11.5% of months were extremely cold during the summer in the 1961-1992 period, which decreased to 2.1% in the second observation period. During the summer period, Dimitrovgrad records the highest frequency of extremely cold months (19.8%) in the first observation period, while in the second, the frequency of months drops to 3.1%. An analysis of the autumn months of extreme cold shows that Pirot recorded the highest frequency of such months (19.8%) during the first analyzed period, while in the second, it decreased to 5.2%. Babušnica and Dimitrovgrad have a slightly lower frequency of extremely cold months, but noticeably higher than in the second observation period. In the second period, the Dimitrovgrad meteorological station records the most extremely cold months (13.5%). However, unlike in summer, the complete disappearance of cold monthly extremes was not observed, indicating that spring and autumn have retained greater natural variability.

The decrease in the frequency of extremely cold months during the second observation period coincides with rising temperature anom-

alies after the 1990s and positive seasonal trends. In other words, warming has led not only to higher average temperatures but also to a marked decrease frequency of extremely cold months, especially in the summer.

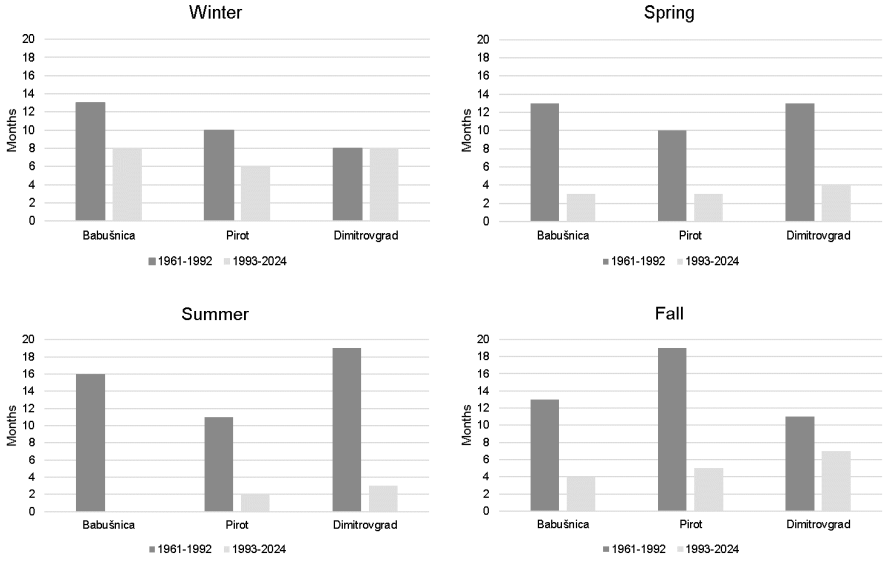


Figure 4 Frequency of extremely cold months (%) during the season (1961-2024) registered at meteorological stations in the Pirot District (according to the data of RHMS Serbia)

Extremely Warm Months

Results on extremely warm months show a clear shift in the temperature regime between the two analyzed periods. While extremely warm months were relatively rare during 1961-1992, their frequency increased markedly during 1993-2024 across all stations and seasons. In contrast to the analysis of extremely cold months – where the dominant signal was a decrease in frequency–extremely warm months show a sharp rise in occurrences, representing one of the clearest indicators of contemporary climate warming.

In the spring months, the most pronounced change is visible at Pirot, where the frequency of extremely warm months was 3.1% in the first period, while in the second period, it increased to 14.6%. A similar pattern appears in Babušnica and Dimitrovgrad, with slightly lower values.

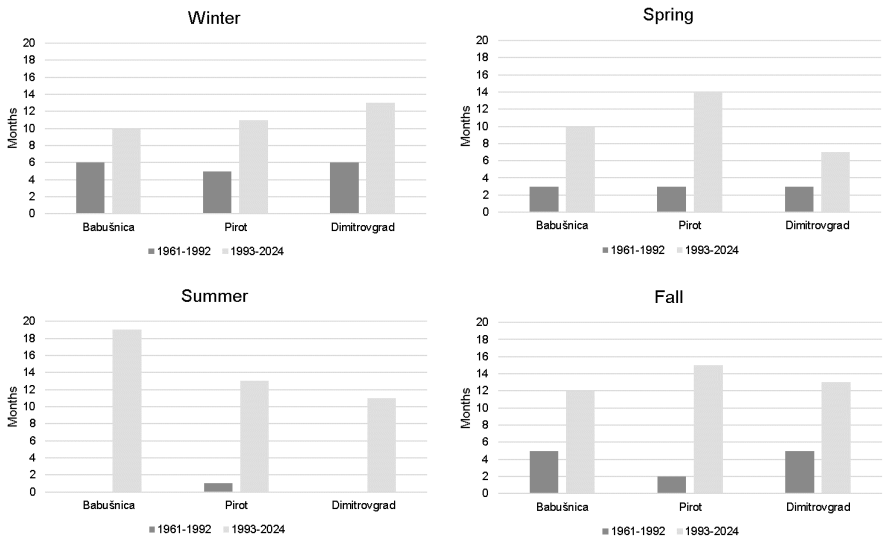


Figure 5 Frequency of extremely warm months (%) during the season (1961-2024) registered at meteorological stations in the Pirot District (according to the data of RHMS Serbia)

The greatest changes occurred in the summer months, and the first period shows practically no extremely hot summer months in the Pirot District. In Pirot, only 1.0% of summer months were extremely hot, and that was in 1991. After 1993, the Babušnica m.s. records as many as 21.1% extremely hot summer months, Pirot 13.5%, and Dimitrovgrad 11.5% (Figure 5). At the Babušnica meteorological station, extremely cold summer months are virtually absent in the second observation period (Figure 4), just as extremely hot summer months are absent in the first period (Figure 5). The results are fully consistent with the analysis of seasonal trends, which shows that the largest temperature increase occurred during summer. The increased frequency of extremely hot months indicates a shift in the temperature regime, while the direct consequences for the duration of heat waves and drought conditions would require further analysis. Autumn is a bit different. As with the other seasons, the number of extremely hot months increases during the second observation period. The largest increase in extremely hot months is recorded at the m.s. Pirot, from 2.1% in the 1961-1992 period to 15.6% in the second analyzed period. Winter analysis shows that in the 1961-1992 period, the number of extremely warm winter months was relatively low, ranging from 5.2% to 6.3% at all stations.

In the second period, this frequency increased noticeably. Pirot recorded 11.5% extremely warm months during the winter, Babušnica 11.1%, and in Dimitrovgrad as high as 13.5% (Figure 5). This increase can be linked to the winter anomaly analysis, which shows that after 2000, positive temperature deviations have dominated. At the same time, the frequency of extremely cold winter months has noticeably decreased, indicating a shift in the overall temperature distribution toward higher values. Notably, Dimitrovgrad, which generally shows the smallest annual warming trend, still recorded the highest number of extremely warm winter months, indicating that winter warming affects the entire region despite local differences.

Although all stations in the Pirot District show the same direction of change, noticeable spatial variations remain evident. Analysis of extreme months shows that Babušnica stands out for having the warmest summers. Pirot recorded the highest frequency of extremely hot months during the spring and fall, while Dimitrovgrad had the highest frequency of extremely hot months in winter.

REGIONAL INTERPRETATION AND COMPARISON WITH PREVIOUS STUDIES

The observed positive temperature anomalies in the Pirot District are consistent with previous findings for the Nišava River Valley. Prokić (2018), using observations from Dimitrovgrad, Pirot, Bela Palanka and Niš for 1960-2015, reported positive trends in both annual and seasonal mean air temperatures, confirming a persistent warming tendency in southeastern Serbia. The stronger warming observed for 1993-2024 in the present study, particularly at Pirot (0.75 °C decade^{-1}) and Babušnica (0.63 °C decade^{-1}), suggests that the warming signal has intensified in recent decades compared with the preceding period (1961-1992). Putnikovic (2025) documented substantial seasonal temperature anomalies at several Serbian stations for 1961-2010, with anomaly magnitude and sign varying considerably across seasons and atmospheric circulation types.

At the national scale, the observed changes are also consistent with the results of Tošić et al. (2023), who analyzed mean and extreme temperature indices across Serbia for 1951-2020. Their analysis showed that warming dominated over the last seven decades, with increases in

both maximum- and minimum-temperature-related indices. The study found particularly pronounced changes in warm-temperature indices, while cool days and cool nights showed decreasing trends. The results are further comparable with the findings of Ruml et al. (2017), who examined temperature extremes at 26 meteorological stations across Serbia for 1961-2010. Their analysis showed a distinct transition from weaker or negative trends during the earlier part of the record towards pronounced warming after approximately 1980. During 1981-2010, the regional trend in annual minimum temperature reached 0.48 °C decade^{-1}, while the corresponding trend in annual maximum temperature was 0.56 °C decade^{-1}. These values are comparable in magnitude with the positive trends obtained in the present study for 1993-2024, although the comparison should be interpreted with caution because Ruml et al. (2017) examined minimum and maximum temperature indices, whereas the present study focuses on mean air temperature.

The predominance of positive seasonal anomalies in recent decades is consistent with the broader warming pattern across Europe and southeastern Europe. Twardosz, Walanus & Guzik (2021), based on 210 stations across Europe for 1951-2020, found a pronounced increase in annual and seasonal air temperatures after the mid-1980s, with summer warming showing a particularly stable upward trend. A related regional comparison comes from Twardosz and Kossowska-Cezak (2021), who analyzed large-area thermal anomalies in Europe. They found that negative large-area thermal anomalies were predominantly recorded before the mid-1990s, whereas positive anomalies became considerably more frequent after 1995. Moreover, the frequency of positive anomalies increased faster than the frequency of negative anomalies decreased. This pattern closely matches the temporal evolution identified in the Pirot District, where predominantly negative anomalies characterized the earlier decades, followed by increasing dominance of positive anomalies in the twenty-first century. Malcheva et al. (2022), for example, identified substantial changes in extreme heat events across southeastern Europe, demonstrating an increasing occurrence of extreme heat conditions in the region.

Taken together, these comparisons indicate that the temperature changes observed in the Pirot District are not isolated local phenomena, but form part of a broader warming pattern documented across Serbia and Europe. At the same time, the differences in trend magnitude among

Babušnica, Pirot and Dimitrovgrad indicate that the regional warming signal is expressed with different intensity at individual stations. These spatial differences may be related to local geographical and atmospheric characteristics, including elevation, topographic setting and basin position, as well as urbanization and local atmospheric circulation. However, the present analysis alone cannot determine the relative contribution of these factors, and future studies should investigate them.

CONCLUSION

Based on the results, we conclude that the main characteristic of the observed changes is a transition from predominantly negative anomalies in the earlier decades of the study period to predominantly positive anomalies in the 21st century. Winter and summer show the greatest seasonal amplitude and the most noticeable shifts. Extremely cold months are much less common in winter, while warm extreme months are more common in summer. Spring and fall appear as transitional seasons, with a slightly smaller amplitude of change but a clear trend toward warmer conditions. Pirot shows slightly greater variability in the analyzed temperature values, while Babušnica and Dimitrovgrad are more uniform, but with the same direction of change. Analysis of annual anomalies shows that the warmest years are concentrated in the last decade of the observed period, with an overall increase in the magnitude and frequency of positive anomalies. In contrast, the coldest years were recorded during the 1970s and early 1980s.

A comparative analysis of extremely cold and extremely hot months across seasons also showed a clear shift in the temperature regime in the Pirot region. While the 1961-1992 period was characterized by extremely cold months, especially in spring and summer, after 1993 the frequency of extremely cold months sharply decreased, while the frequency of extremely hot months increased. The greatest changes occurred in summer, with an almost complete regime shift—from an absence of extremely hot months in the first period to their much greater frequency in the second. This result is fully consistent with the seasonal trend values, where summer showed the greatest warming intensity (0.65 °C/decade in Babušnica, 0.60 °C/decade in Pirot and 0.39 °C/decade in Dimitrovgrad).

Future research should further investigate the causes of the observed spatial differences in temperature trends and the occurrence of extreme-

ly hot and cold months. In particular, the role of elevation, topographic characteristics, urbanization, and local atmospheric circulation should be examined in greater detail. Such an approach could help distinguish the contribution of regional climate change from local geographical and atmospheric factors and provide a more comprehensive understanding of the spatial variability of temperature changes in the Pirot District.

REFERENCES

- Branković, Č., Cindrić, K., Gajić-Čapka, M., Güttler, I., Pandžić, K., Patarčić, M., & Zaninović, K. (2013). *Sixth national communication of the Republic of Croatia under the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC): Selected sections in Chapters 7. Climate change impacts and adaptation measures, 8*.
- Burić, D., Ducić, V., Mihajlović, J., Luković, J., & Dragojlović, J. (2015). Recent extreme air temperature changes in Montenegro. *Bulletin of the Serbian Geographical Society, 95*(4), 53-66. https://doi.org/10.2298/GSGD140626002B
- Charalampopoulos, I., & Droulia, F. (2025). Climate evolution of agricultural and natural areas in Southeastern Europe based on the Pinna, Johansson, and Kerner climate indices. *Climate, 13*(6), 121. https://doi.org/10.3390/cli13060121
- Copernicus Climate Change Service. (2025a). *About the data and methods*. Copernicus Climate Change Service. https://climate.copernicus.eu/GCH2025-about-data-and-methods
- Copernicus Climate Change Service. (2025b). *European State of the Climate 2024*. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. https://climate.copernicus.eu/esotc/2024
- Donat, M. G., Alexander, L. V., Yang, H., Durre, I., Vose, R., Dunn, R. J. H., Willett, K. M., Aguilar, E., Brunet, M., Caesar, J., Hewitson, B., Jack, C., Klein Tank, A. M. G., Kruger, A. C., Marengo, J. A., Peterson, T. C., Renom, M., Oria Rojas, C., Rusticucci, M., Salinger, J., Elrayah, A. S., Sekele, S. S., Srivastava, A. K., Trewin, B., Villarroel, C., Vincent, L. A., Zhai, P., Zhang, X., & Kitching, S. (2013). Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118*(5), 2098-2118. https://doi.org/10.1002/jgrd.50150

- European Environment Agency (2024). *European climate risk assessment* (EEA Report No. 01/2024). Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2800/204249
- Fischer, E. M., & Schär, C. (2010). Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. *Nature Geoscience, 3*(6), 398-403. https://doi.org/10.1038/ngeo866
- Gilbert, R. O. (1987). *Statistical methods for environmental pollution monitoring*, John Wiley & Sons.
- Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of hydrology*, *204*(1-4), 182-196.
- Hirschi, M., Seneviratne, S. I., Alexandrov, V., Boberg, F., Boroneant, C., Christensen, O. B., Formayer, H., Orlowsky, B., & Stepanek, P. (2011). Observational evidence for soil-moisture impact on warm extremes in southeastern Europe. *Nature Geoscience, 4*(1), 17-21. https://doi.org/10.1038/ngeo1032
- IPCC (2021). *Climate change 2021: The physical science basis: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896
- Kendall, M.G. (1975). *Rank Correlation Methods* (4th ed.), London, Charles Griffin.
- Malcheva, K., Bocheva, L., & Chervenkov, H. (2022). Spatio-temporal variation of extreme heat events in Southeastern Europe. *Atmosphere, 13*(8), 1186. https://doi.org/10.3390/atmos13081186
- Malinović-Milićević, S., Radovanović, M. M., Stanojević, G., & Milovanović, B. (2016). Recent changes in Serbian climate extreme indices from 1961 to 2010. *Theoretical and Applied Climatology, 124*(3-4), 1089-1098. https://doi.org/10.1007/s00704-015-1468-1
- Mann, H.B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, *13*, 245-259.
- Миловановић, Б., & Ристић Вакањац, В. (2014). Клима Пиротске котлине. *Пиротски зборник*, *39*, 9-20.
- Milovanović, B., Ducić, V., Radovanović, M., & Milivojević, M. (2017). Climate regionalization of Serbia according to Köppen climate classification. *Journal of the Geographical Institute "Jovan Cvijić" SASA, 67*(2), 103-114. https://doi.org/10.2298/IJGI1702103M
- Morak, S., Hegerl, G. C., & Christidis, N. (2013). Detectable changes in the frequency of temperature extremes. *Journal of Climate, 26*(5), 1561-1574. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00678

- Nikolova, N., Laporte, J., & Tomova, G. (2018). Extreme temperature months in Rila mountain, Bulgaria. *Bulletin of the Serbian geographical society*, *98*(1), 49-59.
- Popov, T., Gnjato, S., Trbić, G., & Ivanišević, M. (2018). Recent trends in extreme temperature indices in Bosnia and Herzegovina. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, 13*(1), 211-224. https://doi.org/10.26471/cjees/2018/013/019
- Prokić, M. (2018). Climate trends of temperature and precipitation in the Nišava River Valley (Serbia) for the 1960-2015 period. *Journal of the Geographical Institute "Jovan Cvijić" SASA, 68*(1), 35-50. https://doi.org/10.2298/IJGI1801035P
- Putniković, S. (2025). Influence of atmospheric circulation on seasonal temperatures in Serbia. *Atmosphere, 16*(8), 969. https://doi.org/10.3390/atmos16080969
- Radivojević, A., Martić-Bursać, N., Gocić, M., Filipović, I. M., Pavlović, M., Radovanović, M., Punisić, M. R., & Nikolić, V. (2015). Statistical analysis of temperature regime change on the example of Sokobanja Basin in Eastern Serbia. *Thermal Science, 19*(Suppl. 2), S323-S330. https://doi.org/10.2298/TSCI150119019R
- Ruml, M., Gregorić, E., Vujadinović, M., Radovanović, S., Matović, G., Vuković, A., Počuča, V., Stojičić, D., & Đurđević, V. (2017). Observed changes of temperature extremes in Serbia over the period 1961-2010. *Atmospheric Research, 183*, 26-41. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.08.013
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*, *63*(324), 1379-1389.
- Светозаревич, Й., & Попов, Х., (2020). Промени в режима на температурата на въздуха в Република Сърбия. *Сборник доклади от научни конференции „География и регионално развитие"* (pp. 176-186). Фондация „ЛОПС". (In Bulgarian)
- Tošić, I., Tošić, M., Lazić, I., Aleksandrov, N., Putniković, S., & Đurđević, V. (2023). Spatio-temporal changes in the mean and extreme temperature indices for Serbia. *International Journal of Climatology, 43*(5), 2391-2410. https://doi.org/10.1002/joc.7981
- Twardosz, R., & Kossowska-Cezak, U. (2021). Large-area thermal anomalies in Europe (1951-2018): Temporal and spatial patterns.

Atmospheric Research, 251, 105434. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105434

– Twardosz, R., Walanus, A. & Guzik, I. (2021). Warming in Europe: Recent Trends in Annual and Seasonal temperatures. *Pure Appl. Geophys*, *178*, 4021-4032. https://doi.org/10.1007/s00024-021-02860-6
– Unkašević, M., & Tošić, I. (2009). An analysis of heat waves in Serbia. *Global and Planetary Change, 65*(1-2), 17-26. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.10.009
– Vujadinović-Mandić, M., Vuković Vimić, A., Ranković-Vasić, Z., Đurović, D., Ćosić, M., Sotonica, D., Nikolić, D., & Đurđević, V. (2022). Observed changes in climate conditions and weather-related risks in fruit and grape production in Serbia. *Atmosphere, 13*(6), 948. https://doi.org/10.3390/atmos13060948
– World Meteorological Organization – WMO (2017). *WMO guidelines on the calculation of climate normals (WMO-No. 1203).*
– World Meteorological Organization – WMO (2021). *Updated 30-year reference period reflects changing climate*. 5 May 2021. Available at: https://wmo.int/media/news/updated-30-year-reference-period-reflects-changing-climate

Јелена Светозаревић, Институт за истраживање климе, атмосфере и воде, Бугарска академија наука (CAWRI-BAS)

Сезонска варијабилност температуре ваздуха и термални екстреми у Пиротском округу (југоисточна Србија), 1961-2024

***Сажетак**: У раду су представљене и анализиране дугорочне промене сезонских карактеристика температуре ваздуха у Пиротском округу (југоисточна Србија) користећи посматрања са метеоролошких станица Бабушница, Пирот и Димитровград. Анализа обухвата период 1961-2024 (1961-2022 за Бабушницу) и подељена је у два периода. Студија обухвата просечне месечне и годишње температуре, сезонске и годишње температурне аномалије, линеарне температурне трендове и учесталост екстремно хладних и екстремно топлих месеци. Резултати показују пораст температуре на свим анализираним стани-*

цама у целом Пиротском округу, што се огледа у повећању годишњих и сезонских температура на свим станицама, нарочито током другог осматрачког периода. Пошто су најтоплије године концентроване у последњој деценији истраживачког периода, годишње температурне аномалије јасно показују промену од углавном негативних аномалија током друге половине двадесетог века ка позитивним аномалијама након почетка 2000-их. Поређење два климатска подпериода (1961-1992 и 1993-2024) указује на промене у учесталости екстремно топлих и екстремно хладних месеци. Број екстремно топлих месеци повећао се на свим станицама, док је број екстремно хладних месеци смањен, посебно током лета. Током летњих месеци забележен је највећи пораст броја месеци у којима су температуре премашиле праг одређен перцентилом високих температура; такви месеци су били ретки или готово одсутни током првог периода, док су у другом периоду били учесталији. Ови резултати указују на дугорочан позитиван температурни тренд на анализираним станицама у Пиротском округу и промене у сезонској температурној варијабилности, које се огледају како у порасту средњих температура тако и у промени учесталости сезонских температурних екстрема.

***Кључне речи**: температура ваздуха, сезонске температурне аномалије ваздуха, температурни трендови, термални екстреми, сезонска варијабилност, Пиротски округ, Југоисточна Србија*

УВОД

У условима савремених климатских промена, средње температуре ваздуха јасно расту на глобалном, регионалном и локалном нивоу, уз све учесталије температурне екстреме и промене у сезонској расподели топлоте (IPCC, 2021; EEA, 2024). Бројне студије показују да се у последњим деценијама европски континент загрева брже од глобалног просека (Copernicus, 2025; EEA, 2024; IPCC, 2021), при чему је Балканско полуострво једна од најосетљивијих регија, која показује изражене трендове пораста температура и чешће екстреме топлоте – Малчева, Бочева и Червенков (Malcheva, Bocheva & Chervenkov, 2022), Чараламопулус и Дриулиа (Charalampopoulos & Droulia, 2025). Извештај Copernicus, 2025 сажето наводи да је, у поређењу са прединдустријским нивоима (1850-1900), просечна глобална температура порасла за око 1,4 °C, према индикатору климатске температуре, који се заснива на најновијим петогодишњим просецима. Румл и сар. (Ruml et al.

2017) показују да је годишња средња максимална температура показала опадајући тренд у периоду 1961-1980. и значајан пораст на свим станицама у периоду 1981-2010, са просечном регионалном стопом од 0,56 °C/деценији. У Европи су екстремне високе температуре значајно порасле, док су екстремне ниске температуре показале опадајући тренд – Донат и сар. (Donat et al., 2013), Морак, Хегерл и Кристидис (Morak, Hegerl & Christidis, 2013), у Хрватској Бранковић и сар. (Branković et al., 2013), у Босни Попов, Гњато, Трбић и Иванишевић (Popov, Gnjato, Trbic & Ivanišević, 2018), у Црној гори Бурић, Дуцић, Михајловић, Луковић и Драгојловић. (Burić, Ducić, Mihajlović, Luković & Dragojlović, 2015) и у Србији Малиновић-Милићевић, Радовановић, Станојевић и Миловановић (Malinovic-Milicevic, Stanojević & Milovanović, 2016), Румл и сар., 2017, Тошић и сар. (Tošić et al. 2023), Ункашевић и Тошић (Unkašević & Tošić, 2009).

Истраживања заснована на подацима националних метеоролошких станица показују да се најизраженија повећања просечних и максималних температура примећују у источним и југоисточним деловима земље, док су нешто слабији трендови присутни у западним и планинским подручјима – Тошић и сар. (Tošić et al. 2023), Ункашевић и Тошић (Unkašević & Tošić, 2009). Додатно, истраживања спроведена у југоисточној Европи указују да општи тренд загревања не само да покреће пораст интензитета и трајања екстремних врућина, већ и регионални фактори као што су дефицит влаге у земљишту (Hirschi et al., 2011), антициклоналне ситуације и стабилне ваздушне масе током летњег периода – Фишер и Скар (Fischer & Schär, 2010), Малчева и сар. (Malcheva et al., 2022). У источној Србији, додатни значај имају локалне морфолошке карактеристике котлинских и долинских подручја, где су утврђене значајне промене температурног режима и позитивни трендови сезонских и годишњих температура – Радивојевић и сар. (Radivojević et al., 2015), Прокић (Prokić, 2018).

Иако постоје појединачна истраживања температурних екстрема и трендова у Србији, детаљне анализе сезонских температурних аномалија на нивоу Пиротског округа су и даље релативно ретке, што указује на потребу за додатним истраживањима на локалном нивоу. На основу анализе доступне литературе, овај рад

представља нову детаљну анализу температурних карактеристика Пиротског округа, засновану на јединственом скупу података са метеоролошких станица Бабушница, Пирот и Димитровград за период 1961-2024. године, односно до 2022. године за Бабушницу. У том контексту, овај рад има за циљ да анализира дугорочне промене средњомесечних, сезонских и годишњих температура ваздуха, као и припадајуће температурне аномалије у Пиротском округу у периоду 1961-2024. године, са посебним акцентом на идентификацију трендова загревања и екстремних температура.

ОПСЕГ ПОДРУЧЈА ПРОУЧАВАЊА

Пиротски округ се налази у југоисточној Србији, дуж српско-бугарске границе, и припада Региону Јужне и Источне Србије. Округ обухвата град Пирот и општине Бабушница, Бела Паланка и Димитровград, а простире се на приближно 2.761 km². Природно-географске одлике Пиротског округа значајно утичу на његову климу. На северу се издваја масив Старе планине, који је дом највишег врха Србије – Мицор (2.169 м). Источни део округа обухвата подручје планине Видлич (Миловановић и Ристић Вакањац, 2014). Влашка планина, долина Јерме и подручје Лужнице чине јужну периферију региона. На западу, територија се постепено спушта ка источним падинама Суве планине и Белаве. Централни део округа заузима Пиротски басен, који дренирају река Нишава и њене локалне притоке, међу којима је посебно важна Расничка река. На ширем подручју округа, слив Нишаве је додатно развијен захваљујући значајним притокама као што су реке Темштица и Височица.

ПОДАЦИ И МЕТОДОЛОГИЈА

За анализу овог рада, коришћени су подаци о средњомесечним температурама са три метеоролошке станице у Пиротском округу (Бабушница, Пирот и Димитровград) за период од 1961. до 2024. године, (за станицу Бабушница до 2022. године), на основу којих су израчунате сезонске и годишње температуре. Анализирана су два периода од 32 године: 1961-1992. и 1993-2024. (односно 1993-2022. за Бабушницу). Подаци коришћени у истраживању преузети

су из годишњака Републичког хидрометеоролошког завода Србије (РХМЗ). За станицу Бабушница утврђени су недостајући подаци о температури за новембар 1963. године, јануар 1971. године и целу 2020. годину. Ова недостајућа мерења реконструисана су коришћењем података са оближње станице Пирот, која је за одговарајуће периоде показивала коефицијент корелације већи од 0,85. Реконструисани подаци укључени су у даљу анализу. Овај поступак је примењен ради попуњавања недостајућих података и не треба га сматрати формалном хомогенизацијом временске серије. Детаљни подаци неопходни за формалну хомогенизацију – укључујући информације о измештању станице, инструментацији и променама у пракси вршења мерења – нису били доступни. Метеоролошке станице анализиране у овој студији налазе се претежно у деловима Пиротске котлине на нижим надморским висинама, због ограничене доступности дугорочних метеоролошких посматрања у вишим планинским пределима Пиротског округа. (табела 1). Средње сезонске температуре ваздуха израчунате су као аритметичка средина три одговарајуће средње месечне температуре ваздуха. Зима је дефинисана као период децембар–јануар–фебруар (ДЈФ), пролеће као март–април–мај (МАМ), лето као јун–јул–август (ЈЈА), а јесен као септембар–октобар–новембар (СОН). Приликом класификације по годишњим добима, децембар је сврстан у зимску сезону наредне године. Тако да, због недоступности података за 1960. годину, зимска температура за 1961. годину није коришћена у анализи. Зима 1962. године почиње децембром 1961. године и наставља се по датој методи.

Табела 1 Географски положај метеоролошких станица у Пиротском округу

Метеоролошка станица	Географска ширина	Географска дужина	Надморска висина
Бабушница	43° 04’	22° 26’	495 m
Пирот	43° 09’	22° 35’	370 m
Димитровград	43° 01’	22° 45’	446 m

Студија анализира температурне аномалије користећи сезонске и годишње просечне ваздушне температуре у Пиротском региону од 1961. до 2024. године. Температурне аномалије су израчунате као одступања од референтног климатолошког периода 1991-2020,

пратећи Светски метеоролошки савез за савремена климатолошка истраживања (WMO, 2017, 2021). За сваку временску скалу (сезонску и годишњу), аномалија се дефинише као разлика између температуре у посматраној години и одговарајућег просека током референтног периода. Сезонске и годишње температурне аномалије добијене су на овај начин, што омогућава процену временских варијација и дугорочних климатских промена. Израчунавање температурних аномалија прати стандардну дефиницију коју користи Коперник сервис за климатске промене (C3S), према којој аномалија представља разлику између посматране вредности за дати период и одговарајуће средње вредности за изабрани референтни период (Copernicus Climate Change Service, 2025b).

$$A_{y,s} = T_{y,s} - T_{s1991-2020}$$

где је ($A_{y,s}$) сезонска аномалија температуре (°C) за годину (y) и сезону (s); ($T_{y,s}$) је средња температура ваздуха (°C) у сезони (s) у години (y); а (T_s, 1991-2020) је средња температура ваздуха (°C) исте сезоне израчуната за референтни период 1991-2020. Годишња температурна аномалија израчуната је по истом принципу, одузимањем средње годишње температуре за период 1991-2020. од средње годишње температуре сваке појединачне године. Позитивне вредности аномалија указују да је сезонска или годишња просечна температура била виша од одговарајућег климатолошког просека за период 1991-2020, док негативне вредности указују на ниже температуре.

Линеарни трендови у просечној температури ваздуха процењивани су коришћењем методе обичне линеарне регресије најмањих квадрата. За сваку метеоролошку станицу и временску скалу, средња температура ваздуха је била зависна променљива, а календарска година независна променљива. Линеарни однос између температуре и времена изражен је као:

$$T_t = a + bt$$

где (T_t) представља просечну температуру ваздуха (°C) у години (t), (a) је регресиона константа, а (b) је нагиб регресије. Коефицијент нагиба представља просечну годишњу стопу промене температуре. Да би се олакшало тумачење и упоређивање резултата са климатолошким студијама, нагиб регресије је претворен са

°C по години у °C/деценији множењем коефицијента нагиба са 10. Линеарна регресија је примењена одвојено за периоде 1961-1992, 1993-2024. и за цео период од 1961-2024. а иста процедура је примењена на сезонске температурне аномалије и годишње серије средњих температура. OLS метода коришћена је за процену линеарног тренда, док је Сенов естиматор примењен као робусна непараметарска процена величине тренда.

Величина и статистичка значајност тренда процењене су коришћењем робусних непараметарских метода. Величина је процењена помоћу Сеновог естиматора нагиба (Sen, 1968), дефинисаног као медијана свих нагиба израчунатих за све парове тачака:

$$b_{Sen} = median\left(\frac{Tj - Ti}{j - i}\right), j > i$$

где су Ti и Tj средње годишње температуре у годинама i и j. Интервал поузданости од 95 % (CI) израчунат је према раду аутора Гилберт (Gilbert, 1987).

Статистичка значајност монотоног тренда тестирана је помоћу Ман-Кендаловог (MK) теста – Ман (Mann, 1945); Кендал (Kendall, 1975). Будући да температурни низови показују значајну серијску аутокорелацију (аутокорелација са помаком 1, r1 = 0,62-0,71 за период 1961-2024; r1 = 0,47-0,55 за 1993-2024; r1 = -0,28 – -0,01 за 1961-1992), варијанса MK статистике коригована је применом модификованог MK теста према ауторима Хамед и Рао (Hamed & Rao, 1998):

$$Var*\ (S) = Var(S) \cdot \frac{n}{n^*}$$

где је n/n* фактор корекције који узима у обзир аутокорелацију. Коришћени су стандардизована тест-статистика Z_{mod} и двострана p-вредност p_{mod}. Трендови су сматрани статистички значајним при pmod < 0,05. За анализу података коришћени су Microsoft Office Excel 2019 и његова екстензија XLSTAT (https://www.xlstat.com/en).

За сваку изпитивану станицу утврђени су екстремно хладни и топли месеци. Екстремно хладни месец дефинише се као месец чија је просечна температура ваздуха нижа (хладнија) од 10. перцентиле или виша (топлија) од 90. перцентиле емпиријске расподеле сваког месеца у периоду 1961-2024. године, док је период 1991-2020. коришћен искључиво као референтни климатолошки период

за израчунавање температурних аномалија. Десети и деведесети перцентил израчунати су применом функције PERCENTILE.EXC у програму Microsoft Excel, на основу целокупног доступног периода осматрања за сваку метеоролошку станицу: 1961-2022. за Бабушницу и 1961-2024. за Пирот и Димитровград. Граничне вредности перцентила израчунате су засебно за сваки календарски месец и сваку станицу. Број идентификованих хладних и топлих месеци сумиран је према годишњим добима и анализираним периодима. Ради поређења два периода осматрања, учесталост екстремно хладних и топлих месеци по годишњим добима изражена је као проценат укупног броја доступних месечних осматрања за одговарајуће годишње доба и период. Та вредност је израчуната тако што је број идентификованих екстремних месеци подељен укупним бројем доступних месечних осматрања у оквиру годишњег доба (90 или 96, у зависности од периода), а затим помножен са 100. Овај приступ заснован на перцентилима идентификује месеце са изузетно ниским или високим средњим температурама у односу на емпиријску расподелу температура за тај месец током целокупног периода истраживања (Copernicus Climate Change Service, 2025a; Николова, Лепорте и Томова, 2018).

РЕЗУЛТАТИ

ПРОСЕЧНЕ МЕСЕЧНЕ И ГОДИШЊЕ ТЕМПЕРАТУРЕ ВАЗДУХА

Анализа средње месечне температуре за период 1961-2024. године

Упоређење ова два периода указује на општи пораст просечних месечних температура ваздуха на анализираном подручју, при чему су најуочљивије промене током топлог дела године. Годишњи ход средње температуре ваздуха у Пиротском округу показује изражен сезонски образац, са најнижим температурама у јануару и највишим вредностима углавном у јулу и августу (табела 2). Оваква годишња расподела температура карактеристична је за подручја са израженим континенталним климатским обележјима, каква преовлађују у анализираном региону (Milovanović, Ducić, Radovanović & Milivojević, 2017).

Табела 2 Средњомесечна температура у °C за период 1961-2024. године регистрована на метеоролошким станицама у Пиротском округу (по подацима РХМЗ Србије)

Метеоролошка станица	Период	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Бабушница	1961-1992	-1.2	0.9	5.2	10.0	14.4	17.4	19.1	19.1	15.3	10.4	5.2	0.4
	1993-2022	-0.1	2.0	5.8	11.2	16.0	19.8	21.7	21.5	16.5	11.2	6.0	1.2
Пирот	1961-1992	-0.7	1.6	5.9	10.9	15.4	18.5	20.3	20.1	16.4	11.1	5.8	1.1
	1993-2024	0.8	3.0	7.0	12.0	16.7	20.5	22.7	22.3	17.5	12.2	7.1	2.3
Димитровград	1961-1992	-1.3	0.8	4.9	10.0	14.5	17.6	19.3	19.0	15.4	10.4	5.2	0.6
	1993-2024	-0.1	1.9	5.4	10.4	15.2	19.0	21.0	20.4	15.9	10.9	6.1	1.5

Анализа просечних месечних температура у Пиротском округу за оба периода (1961-1992. и 1993-2022/2024) показује да се у другом осматрачком периоду примећује пораст месечних температура током свих месеци и на свим анализираним станицама, при чему је пораст најизраженији у Пироту, посебно током летњих месеци. Загревање се јавља током читаве године, али није подједнако интензивно у свим месецима. Поређење оба периода потврђује да је током другог периода посматрања највеће повећање просечне месечне температуре забележено у августу, 2,6 °C у Бабушници, 2,4 °C у Пироту и 1,7 °C у Димитровграду. Ова повећања, која су у складу са обрасцима уоченим широм већег дела Србије, указују на појачано летње загревање (Tošić et al. 2023). Поређење анализа за периоде 1961-1990. и 1998-2017. указују да су летње температуре у већини делова земље порасле за више од 2 °C (Vujadinović Mandić et al., 2022). Такође се закључује да су зиме постале блаже и топлије него током периода 1961-1992. године, посебно у јануару и фебруару. За Пирот, можемо видети да је просечна јануарска температура прешла из негативних у позитивне вредности.

Анализа средње годишње температуре за период 1961-2024 године

Анализа показује да је у Пиротском округу просечна годишња температура за анализирани период варирала од 8,6 °C (1980 – Бабушница) до 13,5 °C (2024 – Пирот). Анализа средње годишње температуре ваздуха показала је статистички значајне позитивне трендове током целокупног доступног периода осматрања на све

три станице. Процене Сеновог нагиба износиле су (0,39 °C/деценију) за Бабушницу, (0,43 °C/деценију) за Пирот и (0,26 °C/деценију) за Димитровград – табела 3.

Табела 3 Линеарни тренд (°C /10 год.) и статистичка значајност годишњих температура за период 1961-2024. године

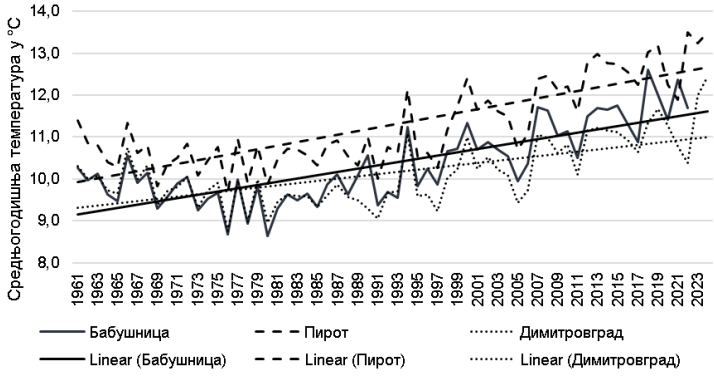
Станица	Период	OLS °C/10 год.	Sen (95% CI) °C/10 год.	Z_mod	p_mod
Бабушница	1961-1992	-0.07	-0.09 (-0.26–0.08)	-0.88	0.3812
	1993-2022	0.63	0.65 (0.39–0.92)	4.58	<0.001**
	1961-2022	0.39	0.40 (0.29–0.49)	4.54	<0.001**
Пирот	1961-1992	-0.06	-0.04 (-0.22–0.11)	-0.84	0.4020
	1993-2024	0.75	0.79 (0.52–0.99)	4.14	<0.001**
	1961-2024	0.43	0.44 (0.33–0.54)	4.52	<0.001**
Димитровград	1961-1992	-0.19	-0.17 (-0.33–-0.03)	-3.40	0.0007**
	1993-2024	0.56	0.64 (0.36–0.80)	3.47	0.0005**
	1961-2024	0.26	0.26 (0.16–0.35)	3.41	0.0007**

** p<0,01 значајан, * p<0,05 значајан; Z_mod i p_mod према модификованом Ман-Кендаловом тесту (Hamed & Rao, 1998), са корекцијом за аутокорелацију.

Поређење два периода указује на прелазак са претежно негативних трендова у периоду 1961-1992. на статистички значајне позитивне трендове у другом периоду, што показује да је сигнал загревања био знатно израженији у каснијем делу периода осматрања. У периоду 1961-1992. негативан тренд средње годишње температуре забележен је на свим станицама, при чему је највећи пад забележен у Димитровграду. За разлику од Бабушнице и Пирота, где негативни трендови нису били статистички значајни (p = 0,3812 и p = 0,4020), у Димитровграду је утврђен статистички значајан негативан тренд (p = 0,0007). Пирот је показао позитиван и статистички значајан тренд средње годишње температуре ваздуха у периоду 1993-2024. Вредност линеарног тренда износила је 0,75 °C/деценији, док је Сенов нагиб износио 0,79 °C/деценији, са 95% интервалом поузданости од 0,52 до 0,99 °C/деценији (p < 0,001). Слика 1 показује да се Пирот издваја као станица са најуочљивијим порастом температуре.

Анализа целог периода показује да се на свим станицама температуре постепено повећавају према крају периода, најзначајнији тренд који је посебно приметан након 1990-их. Чак и уз кратко-

рочне промене, очигледан растући сигнал потврђује преовлађујући позитиван тренд средње годишње температуре током целокупног доступног периода. Анализа годишњих средњих температура показује јасан помак од блажег режима у раном делу периода ка топлијим условима у каснијим деценијама. Најхладније године забележене су од средине 1960-их до средине 1980-их, након чега је евидентан јасан пораст температуре на све три станице. Најхладније године су забележене у првом периоду за Бабушницу (8,7 °C – 1980 године) и у Пироту (9,7 °C – 1980 године) и Димитровграду (8,6 °C – 1976 године). С друге стране, највише годишње температуре забележене су у последњој деценији, са максимумом од 13,5 °C у Пироту, док су у Бабушници и Димитровграду забележене вредности од 12,6 °C, односно 12,4 °C.



Слика 1 Средњогодишња температура у °C и линеарни тренд за период 1961-2024. године регистрована на метеоролошким станицама у Пиротском округу (по подацима РХМЗ Србије)

Резулта ти добијени применом Сеновог естиматора нагиба и модификованог Ман-Кендаловог теста углавном потврђују смер линеарних трендова процењених методом обичне регресије најмањих квадрата.

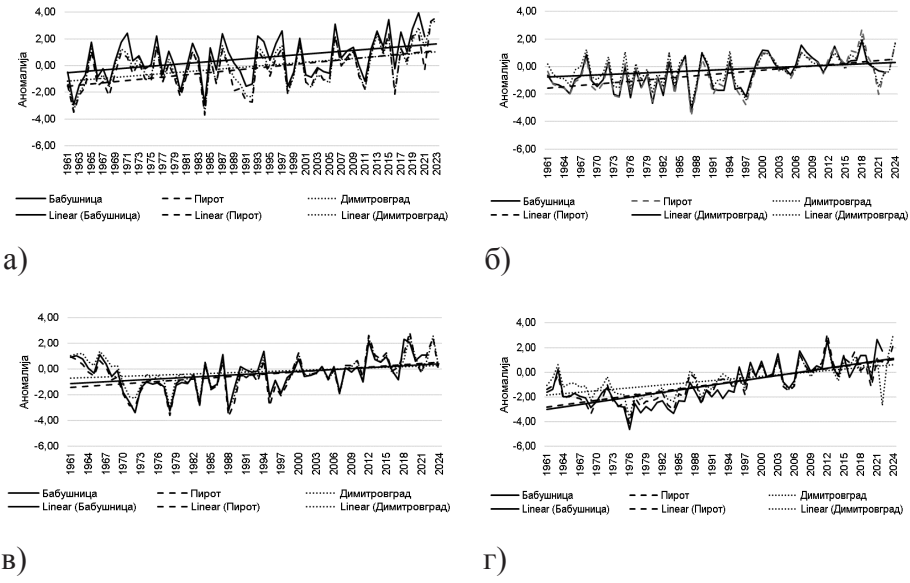
ТЕМПЕРАТУРНЕ АНОМАЛИЈЕ СЕЗОНСКИХ И ГОДИШЊИХ ВРЕДНОСТИ

Анализа сезонских аномалија

Анализа сезонских температурних аномалија за период 1961-2024. године показује јасно изражене међугодишње осцилације, али и конзистентан дугорочни сигнал загревања у свим годишњим

добима на територији Пиротског округа. Упркос великим варијацијама појединих година, подаци показују прелазак са доминације негативних аномалија у првим деценијама на све учесталија и израженија позитивна одступања у најновијем периоду.

Зимске аномалије карактерише највећа интергодишња варијабилност и најизраженији екстреми у целокупном скупу података (слика 2а). Период од 1961. године до 1990-их карактеришу негативна одступања, са изразито хладним зимама, посебно израженим 1963, 1981, 1992, 1993, 1999, 2012. године. Најхладнија зима је била 1985, када су на све три станице забележене најниже вредности за цео период (Бабушница: -2,93 °C, Пирот: -3,70 °C и Димитровград: -3,57 °C). У последњем периоду, 2017. година показује такође негативна одступања, посебно за Пирот (-2,13 °C) и Димитровград (-1,97 °C). Што се тиче позитивних аномалија, после 2000. године доминирају позитивне аномалије, при чему се посебно истичу изузетно топле зиме у последњој деценији. Зиме постају блаже, а појава изразито топлих сезона, посебно у последњој деценији (нпр. 2014, 2016, 2020-2024), све су чешћа. Ова промена указује на значајно смањење учесталости екстремно хладних зима и пораст термичког нивоа у зимском периоду.



Слика 2 Сезонске температурне аномалије и линеарни тренд а) зима, б) пролеће, в) лето и г) јесен за период 1961-2022/2024. године (у °C)

Пролећне аномалије показују мању варијабилност у односу на зимске, што указује на пораст средњих пролећних температура. Екстремно негативне вредности концентрисане су у периоду 1970-1990, док се позитивна одступања интензивирају након 2000. године, са најизраженијим топлим пролећем 2018. године (Бабушница 1,88 °C, Пирот 2,74 °C и Димитровград 2,16 °C).

Летње аномалије су међу најважнијим сезонским сигналима у анализи, са израженим негативним одступањима у првој половини посматраног периода. Током 1970-их и 1980-их година забележене су веома ниске вредности аномалија, укључујући екстремне хладне летње сезоне као што је 1976. година, када су одступања била најизраженија у целој серији (Бабушница -4,63 °C, Пирот -4,16 °C и Димитровград -3,70 °C). Након 1990-их и посебно после 2000. године, уочава се постепена промена у структури летњих аномалија. Позитивна одступања постају учесталија, а појава топлих лета, као што су 2003, 2007, 2012, 2018. и 2021. година, указује на интензивирање летњих топлотних екстрема. Највеће позитивне летње температурне аномалије забележене су 2012. године (Бабушница 2,57°C, Пирот 3,14°C и Димитровград 2,53°C). Претходне студије у Србији и долини Нишаве такође су потврдиле изузетно топле услове ове године – Светозаревић и Попов, 2020, као и Прокић (Prokić, 2018). Поред 2012. године, и 2024. се истиче као једна од најтоплијих година у анализираном периоду. Иако се појединачне негативне аномалије и даље јављају, њихова учесталост и интензитет опадају, што указује на јасан тренд летњег загревања. Међутим, и поред израженог тренда загревања и преовлађујућих позитивних аномалија током последњих деценија, у Димитровграду је 2022. године забележена негативна аномалија (-2,67°C), тј. температура нижа од климатолошке норме за период 1991-2020, што представља краткорочно одступање од преовлађујућег тренда загревања забележеног претходних година (слика 2в).

Јесење аномалије показују уједначенији образац него у другим годишњим добима, слично пролећу, уз јасан прелазак са негативног на позитиван режим. Периодом од 1970-их до краја 1990-их година доминирају негативна одступања, уз изражене хладне јесење сезоне које указују на раније захлађење у години. Највеће негативне аномалије забележене су 1971, 1972, 1978. и 1983. године.

Штавише, 1988. године, одступања од климатолошке нормале достигла су или прешла -3 °C. Као и у осталим сезонама, након 1990-их година почиње постепена трансформација јесењег термичког режима, која постаје израженија након 2000. године. Позитивне аномалије постају доминантне, а учесталост топлих јесени се повећава, посебно у последњој деценији.

Анализа тренда сезонских температурних аномалија потврђује јасан тренд загревања у пиротском региону, уз константно позитивне вредности током свих мерених сезона и на свим мерним станицама (табела 4).

Табела 4 Линеарни тренд (°C/10 год.) и статистичка значајност сезонских температурних аномалија за период 1961-2024. године

Станица	Сезона	Линеарни тренд °C/10год	Sen (95% CI) °C/10год	Z_mod	p_mod
Бабушница	Пролеће	0,32	0,31 (0,17–0,46)	3,41	0,0007**
	Лето	0,65	0,66 (0,49–0,84)	4,09	<0,001**
	Јесен	0,24	0,27 (0,08–0,45)	2,04	0,0409*
	Зима	0,36	0,35 (0,12–0,57)	2,79	0,0052**
Пирот	Пролеће	0,33	0,33 (0,19–0,48)	3,53	0,0004**
	Лето	0,60	0,59 (0,44–0,73)	6,33	<0,001**
	Јесен	0,31	0,31 (0,13–0,50)	2,62	0,0087**
	Зима	0,41	0,45 (0,22–0,64)	3,60	0,0003**
Димитровград	Пролеће	0,17	0,17 (0,02–0,32)	2,19	0,0285*
	Лето	0,39	0,39 (0,27–0,54)	4,23	<0,001**
	Јесен	0,16	0,16 (-0,01–0,33)	1,39	0,1641
	Зима	0,35	0,36 (0,13–0,58)	2,81	0,0049**

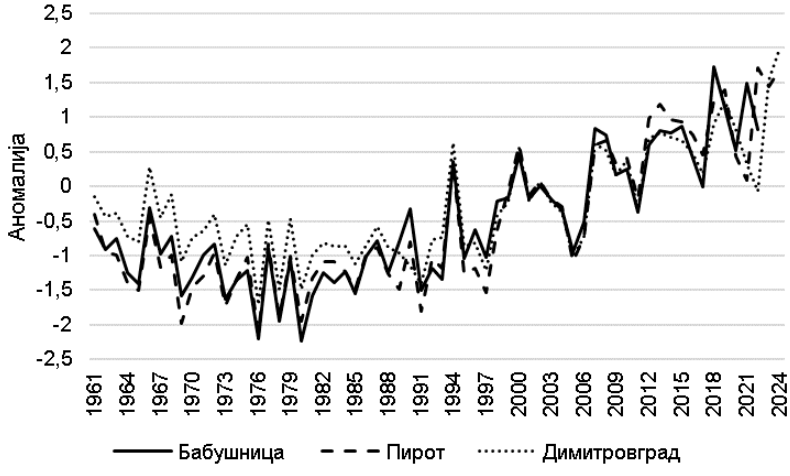
Референтни период за аномалије: 1991-2020. ** p<0,01, * p<0,05

Највећи интензитет тренда забележен је у летњем периоду, са максимумом на станици Бабушница (0,65°C/деценији), док Пирот показује нешто ниже, али и даље високе вредности (0,60°C/деценији). Зимски трендови су такође изражени, али нешто слабији, са вредностима у распону од 0,35 до 0,41°C/деценији.

Анализа годишњих аномалија

Анализа годишњих аномалија показује изражену промену на свим станицама између првог и другог дела посматраног периода. Од почетка 1960-их до средине 1990-их, доминирају негативне аномалије, док после 2000. године, позитивне аномалије постају све чешће и интензивније, што је тренд уочен и приликом анали-

зе сезонских аномалија. Посебно је важно истаћи да су у периоду 1961-1993. године готово све годишње аномалије негативне (слика 3). Једини изузетак чини неколико година са вредностима блиским просеку, али без значајних позитивних одступања. Најизраженије негативне аномалије забележене су током седамдесетих и почетком осамдесетих година. Посебно се издваја 1976. година, када су на свим анализираним станицама забележене екстремно негативне температурне аномалије: −2,20°C у Бабушници, −2,11°C у Пироту и −1,70°C у Димитровграду. Ову годину карактеришу и летње температуре испод просека, што указује на изражену хладну аномалију. Поред 1976. године, међу најхладније године у посматраном периоду издвајају се и 1969, 1978, 1980. и 1991. година. Интересантно је да су највеће негативне аномалије забележене у Бабушници и Пироту, док су у Димитровград одступања била нешо блажа. Насупрот томе, после 2000. године постепено су почеле да доминирају позитивне аномалије, а после 2012. године готово све године су биле топлије од просека за период 1991-2020. Израженије позитивне годишње аномалије први пут су се појавиле 1994. године на све три станице, постепено покрећући тренд позитивних одступања. Последња деценија је била знатно топлија од просека, уз константан пораст аномалија, што указује на преовлађујући позитиван температурни сигнал у завршном делу анализираног периода.



Слика 3 Аномалије годишњих температура за период 1961-2024. године (у °C)

Што се тиче просторних разлика, с обзиром на близину анализираних станица, све три станице показују веома сличан временски ток аномалија. Најхладнија и најтоплија година се јављају готово истовремено. Међутим, приметне су одређене разлике. Пирот има најизраженије осцилације и највећи дугорочни тренд загревања.

АНАЛИЗА ЕКСТРЕМНО ХЛАДНИХ И ЕКСТРЕМНО ТОПЛИХ МЕСЕЦИ

Анализом просечних месечних температура идентификовани су екстремно хладни и екстремно топли месеци у свакој сезони. Екстремно хладни месеци су концентрисани у првом периоду, док су екстремно топли месеци у другом периоду, што је показала анализа сезонских температурних аномалија.

Поређење учесталости извршено је коришћењем упоредивих стопа са јасно дефинисаним имениоцем (укупан број месеци по сезони) и 95% интервалима поузданости (табела 5). Док је број екстремно хладних месеци значајно опао, а број екстремно топлих месеци значајно порастао током пролећа, лета и јесени на свим станицама, зима није показала значајне промене.

Табела 5 Сезонска учесталост екстремно хладних и екстремно топлих месеци за периоде 1961-1992 (P1) и 1993-2024/22 (P2)

Станица	Сезона	Хладни P1 % [95% CI]	Хладни P1 % [95% CI]	Δ хладни	Топли P2 % [95% CI]	Топли P2 % [95% CI]	Δ топли
Бабушница	(ДЈФ)	13,5 [8,1-21,8]	8,9 [4,6-16,6]	-4,7 ns	6,3 [2,9-13,0]	11,1 [6,1-19,3]	+4,9 ns
Бабушница	(МАМ)	13,5 [8,1-21,8]	3,3 [1,1-9,3]	-10,2 *	3,1 [1,1-8,8]	11,1 [6,1-19,3]	+8,0 *
Бабушница	(ЈЈА)	16,7 [10,5-25,4]	0,0 [0,0-4,1]	-16,7 ***	0,0 [0,0-3,8]	21,1 [14,0-30,6]	+21,1 ***
Бабушница	(СОН)	13,5 [8,1-21,8]	4,4 [1,7-10,9]	-9,1 *	5,2 [2,2-11,6]	13,3 [7,8-21,9]	+8,1 ns
Димитровград	(ДЈФ)	8,3 [4,3-15,6]	8,3 [4,3-15,6]	0,0 ns	6,3 [2,9-13,0]	13,5 [8,1-21,8]	+7,3 ns
Димитровград	(МАМ)	13,5 [8,1-21,8]	4,2 [1,6-10,2]	-9,4 *	3,1 [1,1-8,8]	7,3 [3,6-14,3]	+4,2 ns
Димитровград	(ЈЈА)	19,8 [13,1-28,9]	3,1 [1,1-8,8]	-16,7 ***	0,0 [0,0-3,8]	11,5 [6,5-19,4]	+11,5 ***
Димитровград	(СОН)	11,5 [6,5-19,4]	7,3 [3,6-14,3]	-4,2 ns	5,2 [2,2-11,6]	13,5 [8,1-21,8]	+8,3 *
Пирот	(ДЈФ)	11,5 [6,5-19,4]	5,2 [2,2-11,6]	-6,3 ns	5,2 [2,2-11,6]	11,5 [6,5-19,4]	+6,3 ns
Пирот	(МАМ)	11,5 [6,5-19,4]	2,1 [0,6-7,3]	-9,4 **	3,1 [1,1-8,8]	14,6 [8,9-23,0]	+11,5 **

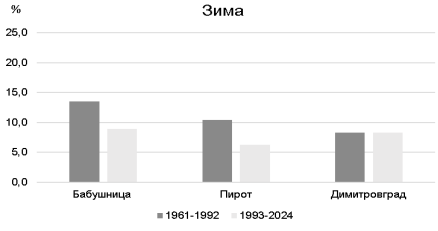
Пирот	(JJA)	11,5 [6,5-19,4]	2,1 [0,6-7,3]	-9,4 **	1,0 [0,2-5,7]	13,5 [8,1-21,8]	+12,5 ***
Пирот	(СОН)	19,8 [13,1-28,9]	6,3 [2,9-13,0]	-13,5 **	2,1 [0,6-7,3]	15,6 [9,7-24,2]	+13,5 **

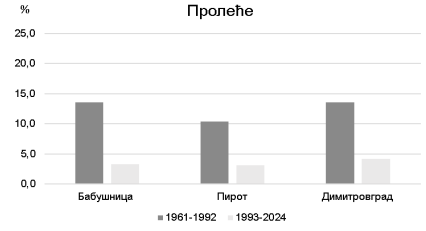
ns p>0.05, *p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

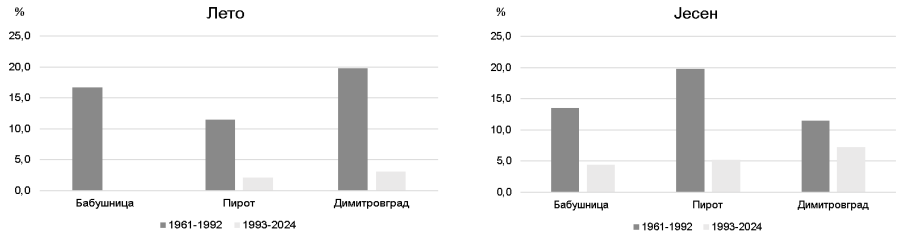
Екстремно хладни месеци

Као што можемо видети на слици 4, екстремно хладни месеци су израженији током првог периода 1961-1992. у свим годишњим добима и драстично се смањују током другог периода. Док су екстремно хладни месеци били релативно чести у свим годишњим добима током периода 1961-1992, њихова учесталост је нагло опала након 1993. године, највише лети. На станици Бабушница, релативна фреквенција екстремно хладних месеци током лета опада са 16,7% на 0%, док се током пролећа екстремно хладни месеци смањују са 13,5% на 3,3%. Слична анализа се уочава и у Пироту, где је регистровано 11,5% екстремно хладних месеци током лета у периоду 1961-1992, који у другом осматрачком периоду опадају на 2,1%. Током летњег периода, Димитровград бележи највећу учесталост екстремно хладних месеци (19,8%) у првом осматрачком периоду, док у другом учесталост месеци опада на 3,1%. Анализом јесењих екстремно хладних месеци, можемо приметити, да је у Пироту забележена највећа учесталост екстремно хладних месеци (19,8%) у току првог анализираног периода, док је у другом смањена на 5,2%. Бабушница и Димитровград имају нешто мању учесталост екстремно хладних месеци, али приметно више од другог осматрачког периода. У другом периоду, м.с. Димитровград бележи највише екстремно хладних месеци (13,5%).

Ипак, за разлику од лета, потпуно нестајање хладних месечних екстрема није забележено, што говори да су пролеће и јесен задржали већу природну варијабилност. Смањење учесталости екстремно хладних месеци током другог осматрачког периода се по-







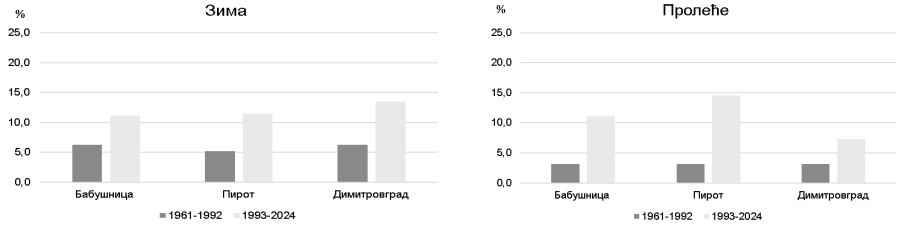
Слика 4 Учесталост екстремно хладних месеци (%) у току сезоне (1961-2024) регистровани на метеоролошким станицама у Пиротском округу (по подацима РХМЗ Србије)

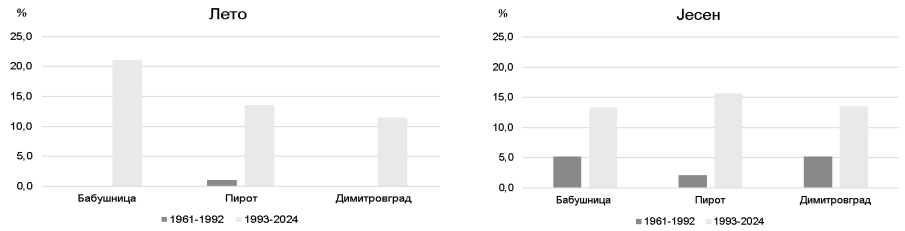
клапа са порастом температурих аномалија након 1990-их година и позитивним сезонским трендовима. Другим речима, загревање није довело само до повећања средњих температура, већ и до израженог смањења учесталости појаве екстремно хладних месеци, посебно лети.

Екстремно топли месеци

Резултати екстремно топлих месеци показују веома јасну промену температурног режима између два анализирана периода. Док су екстремно топли месеци били релативно ретки током периода 1961-1992, њихова учесталост се вишеструко повећала током периода 1993-2024. на свим станицама и у свим годишњим добима. За разлику од анализе екстремно хладних месеци, код којих је доминантан тренд био смањење учесталости, код екстремно топлих месеци уочава се нагли пораст учесталости, што представља један од најјаснијих показатеља савременог климатског загревања.

У пролећним месецима, најизраженија промена је видљива код м.с. Пирот, где је у првом периоду забележена учесталост од 3,1% екстремно топла месеца, док се у другом периоду њихова учесталост повећала на 14,6%. Сличан резултат је видљив и у Бабушници и Димитровграду, са нешто нижим вредностима.





Слика 5 Учесталост екстремно топлих месеци (%) у току сезоне (1961-2024) регистровани на метеоролошким станицама у Пиротском округу (по подацима РХМЗ Србије)

Највеће промене забележене су у летњим месецима, где је јасно видљиво да у првом периоду практично нису постојали екстремно топли месеци током лета у Пиротском округу. У Пироту је регистрована учесталост од само 1,0% екстремно топлих месец током лета и то 1991. године. Након 1993. године, м.с. Бабушница бележи чак 21,1% екстремно топлих месеци у току лета, Пирот 13,5%, а Димитровград 11,5% (слика 5). На метеоролошкој станици у Бабушници, изузетно хладни летњи месеци практично изостају у другом периоду осматрања (слика 4), баш као што у првом периоду изостају изузетно топли летњи месеци (слика 5). Резултати су у потпуности у складу са анализом сезонских трендова, која показује да је до највећег пораста температуре дошло током лета. Повећана учесталост екстремно топлих месеци указује на промену температурног режима, док би њене директне последице за трајање топлотних таласа и услове суше захтевале додатне анализе. Ситуација је нешто другачија када је реч о јесени. Као и код осталих сезона, учесталост екстремно топлих месеци расте током другог периода посматрања. Највећи пораст екстремно топлих месеци бележи м.с. Пирот, са 2,1% у периоду 1961-1992. на 15,6% у другом анализираном периоду. Анализом зиме, уочава се да је у периоду 1961-1992. број екстремно топлих месеци у оквиру зиме био релативно низак у распону од 5,2% до 6,3% случајева на свим станицама.

У другом периоду, њихова учесталост видно расте. У Пироту је регистрована учесталост од 11,5% екстремно топлих месеци током зиме, у Бабушници 11,1%, а у Димитровграду чак 13,5% (слика 5). Овај пораст можемо повезати са резултатима анализе зимских аномалија, које показују да након 2000. године доминирају позитивна

одступања температуре. Истовремено, учесталост екстремно хладних месеци у току зиме је приметно смањен, што указује на померање целокупне температурне расподеле ка вишим вредностима. Посебно је значајно што је Димитровград, који генерално показује најмањи тренд загревања на годишњем нивоу, ипак забележио највећу учесталост екстремно топлих месеци за време зиме, што указује да зимско загревање захвата читав регион без обзира на локалне разлике.

Иако све станице у Пиротском округу показују исти правац промена, приметне просторне варијације остају евидентне. Анализа екстремних месеци показује да се Бабушница истиче по томе што има најтоплија лета. Пирот је забележио највећу учесталост екстремно топлих месеци током пролећа и јесени, док Димитровград има највећу учесталост екстремно топлих месеци зими.

РЕГИОНАЛНА ИНТЕРПРЕТАЦИЈА И ПОРЕЂЕЊЕ СА ПРЕТХОДНИМ СТУДИЈАМА

Уочене позитивне температурне аномалије у Пиротском округу су у складу са претходним резултатима за долину реке Нишаве. Прокић (Prokić, 2018), користећи посматрања из Димитровграда, Пирота, Беле Паланке и Ниша за период 1960-2015, известио је о позитивним трендовима и годишњих и сезонских средњих температура ваздуха, потврђујући трајну тенденцију загревања у југоисточној Србији. Јаче загревање добијено за период 1993-2024. у овој студији, посебно у Пироту (0,75 °C декада$^{-1}$) и Бабушници (0,63 °C декада$^{-1}$), сугерише да се сигнал загревања интензивирао последњих деценија у поређењу са претходним периодом (1961-1992). Путниковић (2025) је документовала значајне сезонске температурне аномалије на неколико српских станица за период 1961-2010, при чему се величина и знак аномалија значајно разликују између годишњих доба и типова атмосферске циркулације.

На националном нивоу, уочене промене су такође у складу са резултатима Тошића и сар. (Tošić et al. 2023), који су анализирали средње и екстремне температурне индексе широм Србије за период од 1951. до 2020. године. Њихова анализа је показала да је током последњих седам деценија доминирало загревање, уз пораст индекса повезаних како са максималним, тако и са минималним

температурама. Студија је утврдила нарочито изражене промене у индексима високих температура, док су хладни дани и хладне ноћи показали тренд опадања. Резултати су даље упоредиви са налазима Румла и сар. (Ruml et al. 2017), који су испитали екстремне температуре на 26 метеоролошких станица широм Србије за период од 1961. до 2010. године. Њихова анализа је показала изразит прелаз од слабијих или негативних трендова током ранијег дела евиденције ка израженом загревању након приближно 1980. године. Током периода 1981-2010, регионални тренд годишње минималне температуре достигао је 0,48 °C деценија$^{-1}$, док је одговарајући тренд годишње максималне температуре био 0,56 °C деценија$^{-1}$. Ове вредности су упоредиве по величини са позитивним трендовима добијеним у овој студији за период 1993-2024, иако поређење треба тумачити са опрезом јер Румл и сар. (Ruml et al. 2017) су испитали минималне и максималне температурне индексе, док се ова студија фокусира на средњу температуру ваздуха.

Преовлађивање позитивних сезонских аномалија у последњим деценијама је у складу са ширим обрасцем загревања широм Европе и југоисточне Европе. Твардош, Валанус и Гузик (Twardosz, Walanus and Guzik, 2021), на основу 210 станица широм Европе за период 1951-2020, открили су изражен пораст годишњих и сезонских температура ваздуха након средине 1980-их, при чему летње загревање показује посебно стабилан тренд раста. Сродна регионална анализа представљена је у раду аутора Твардош и Косовска-Чезак (Twardosz and Kossowska-Cezak, 2021), који су проучавали термалне аномалије великих размера у Европи. Они су открили да су негативне термалне аномалије великих површина претежно забележене пре средине 1990-их, док су позитивне аномалије постале знатно чешће након 1995. године. Штавише, учесталост позитивних аномалија се повећавала брже него што се учесталост негативних аномалија смањивала. Овај образац се у великој мери поклапа са временском еволуцијом идентификованом и у Пиротском округу, где су претежно негативне аномалије карактерисале раније деценије, након чега је уследила све већа доминација позитивних аномалија у двадесет првом веку. Малчева и сар. (Malcheva et al. 2022), на пример, идентификовали су значајне промене у екстремним топлотним догађајима широм југоисточне Европе, показујући све већу појаву екстремних топлотних услова у региону.

Узета заједно, ова поређења указују да температурне промене примећене у Пиротском округу нису изоловани локални феномени, већ чине део ширег обрасца загревања документованог широм Србије и Европе. Истовремено, разлике у величини тренда између Бабушнице, Пирота и Димитровграда указују на то да је регионални сигнал загревања изражен различитим интензитетом на појединачним станицама. Ове просторне разлике могу бити повезане са локалним географским и атмосферским карактеристикама, укључујући надморску висину, топографски положај и положај басена, као и урбанизацију и локалну атмосферску циркулацију. Међутим, сама садашња анализа не може да утврди релативни допринос ових фактора и будуће студије би требало да их истраже.

ЗАКЉУЧАК

На основу свих добијених резултата закључујемо да је основна карактеристика уочених промена прелазак са претежно негативних аномалија током ранијих деценија периода истраживања на претежно позитивне аномалије у 21. веку. Зима и лето показују највећу сезонску амплитуду и најизраженије промене. Екстремно хладни месеци су много ређи зими, док су топли екстреми месеци чешћи лети. Пролеће и јесен се јављају као прелазна годишња доба, са нешто мањом амплитудом промена, али са јасним трендом ка топлијим условима. Пирот показује нешто већу варијабилност анализираних температурних вредности, док су Бабушница и Димитровград уједначенији, али са истим правцем промена. Анализа годишњих аномалија показује да су најтоплије године концентрисане у последњој деценији посматраног периода, уз свеукупни пораст интензитета и учесталости позитивних аномалија. Насупрот томе, најхладније године су забележене током 1970-их и почетком 1980-их.

Упоредном анализом екстремно хладних и екстремно топлих месеци по годишњим добима такође је показана јасна трансформација температурног режима у Пиротском округу. Док је период 1961-1992. био обележен екстремно хладним месецима, посебно у пролеће и лето, после 1993. године дошло је до наглог смањења учесталости екстремно хладних месеци и истовременог повећања

учесталости екстремно топлих. Највеће промене забележене су током лета, уз готово потпуну измену режима – од одсуства екстремно топлих месеци у првом периоду до њихове знатно веће учесталост у другом периоду. Овај резултат је у потпуности у складу са добијеним вредностима сезонских трендова, где је управо лето показало највећи интензитет загревања (0,65 °C/деценији у Бабушници, 0,60 °C/деценији у Пироту и 0,39 °C/деценији у Димитровграду).

Будућа истраживања требало би даље да истраже узроке уочених просторних разлика у температурним трендовима и појави екстремно топлих и хладних месеци. Посебно, требало би детаљније испитати улогу надморске висине, топографских карактеристика, степена урбанизације и локалне атмосферске циркулације. Такав приступ би могао помоћи у разликовању доприноса регионалних климатских промена од локалних географских и атмосферских фактора и пружити свеобухватније разумевање просторне варијабилности температурних промена у Пиротском округу.

Примљено/ Received on 10. 7. 2026.
Ревидирано/ Revised on 15. 10. 2026.
Прихваћено/ Accepted on 12. 10. 2026.

© 2026 The Authors. Published by Pirotski zbornik. This work is licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

