

TENDENCIJA POVEĆANJA SREDNJE TEMPERATURE TLA U HRVATSKOJ

The Rising Tendency of Mean Soil Temperature in Croatia

DANIJELA DEREŽIĆ¹ i VIŠNJA VUČETIĆ²

¹Trepče 61, 48356 Ferdinandovac
e-mail: danijeladerezic@gmail.com

²Državni hidrometeorološki zavod, Grič 3, 10000 Zagreb
e-mail: visnja.vucetic@cirus.dhz.hr

Prihvaćeno: 11.11.2011. u konačnom obliku: 17.7.2012.

Sažetak: Klasični meteorološki instrumenti za mjerenje temperature tla su živini geotermometri. Postavljaju se u tlo na dogovorene dubine (2, 5, 10, 20, 30, 50 i 100 cm), tako da su na svim postajama standardizirana mjerenja. U ovom radu su analizirane srednje godišnje i sezonske temperature tla za različite dubine na odabranim meteorološkim postajama: Osijek, Vinkovci, Križevci, Zagreb-Maksimir, Ogulin, Gospić, Poreč, Rijeka, Rab, Knin i Dubrovnik koje raspoložuju s dugim vremenskim nizom podataka u razdoblju 1961–2009. Glavni cilj rada je bio proučiti utjecaj klimatskih promjena na temperaturu tla po dubini. Usporedba srednjih godišnjih temperatura tla između novijeg razdoblja 1981–2009. i standardnog klimatskog razdoblja 1961–1990. pokazuje na većini postaja porast temperature tla za oko 1°C na svim dubinama u posljednja tri desetljeća. Analiza linearnog trenda i Mann-Kendallovog testa potvrđuju postojanje signifikantnog pozitivnog trenda srednjih godišnjih temperatura tla u razdoblju 1961–2009. Na svim postajama posebno se ističe signifikantan porast temperature tla na dubini od 2 cm. U plićim slojevima tla do dubine 10 cm pozitivni trend iznosi od 0.2 do 0.7°C/10 god. U dubljim slojevima do dubine 100 cm taj raspon je nešto manji (0.3–0.6°C/10 god). Porastu srednje godišnje temperature tla najviše doprinosi njihovo povećanje u proljeće i ljeti što pokazuju sezonski trendovi. Izraženiji trend porasta je u gornjim slojevima. Plići slojevi tla se brže griju danju i isto tako brže hlade noću zbog male toplinske vodljivosti. Gledano tijekom godine, površinski se slojevi prije zagriju ljeti, ali brže ohlade zimi. Zbog male toplinske vodljivosti, dubinski slojevi su ljeti hladniji, a zimi topliji od površinskog sloja.

Ključne riječi: temperatura tla, linearni trend, Mann-Kendallov rang test, klimatske promjene

Abstract: Classic meteorological instruments for measuring soil temperature are mercury geothermometers. They are placed in the ground at prearranged depths (2, 5, 10, 20, 30, 50 and 100 cm), so that each station has standardized measurements. In this paper the annual and seasonal mean soil temperatures have been analyzed, at different depths for selected meteorological stations: Osijek, Vinkovci, Križevci, Zagreb-Maksimir, Ogulin, Gospić, Poreč, Rijeka, Rab, Knin and Dubrovnik, for which a long-term data series in the period 1961–2009 is available. The main aim of the paper is to study the impact of climate change on soil temperature by depth. A comparison of mean annual soil temperature between a more recent period 1981–2009 and the standard climate period 1961–1990 shows that at most stations soil temperature has increased by approximately 1°C at all depths in the last three decades. The analysis of the linear trend and the Mann-Kendall test confirm the existence of a significant positive trend of mean annual soil temperature. A significant increase in soil temperature is observed, at the depth of 2 cm in particular, at all meteorological stations in the period 1961–2009. In shallower soil layers, up to a depth of 10 cm, the positive trend is between 0.2 and 0.7°C/decade. In deeper layers, up to 100 cm, the trend is slightly less pronounced (0.3–0.6°C/decade). Seasonal trends show the greatest contributor to the increase in mean annual soil temperature is their increase in the spring and summer. A more significant trend of temperature increase is in the upper layers. The shallower soil layers are heated more quickly during the

day and cooled more quickly during the night, due to low heat conductivity. The surface layers are heated more quickly in the summer, and cooled more quickly in the winter over the period of a year. Due to low heat conductivity, the deeper layers are cooler during the summer and warmer during the winter than the surface layers.

Key words: soil temperature, linear trend, Mann-Kendall rank test, climate change

UVOD

Temperatura tla se tijekom dana izmjenjuje tako da su plići slojevi tla danju topliji, a noću hladniji (Penzar i Penzar, 2000). Toplina polako prodire do dubljih slojeva, jednako kao što se iz dubljih slojeva toplina u obliku dugovalnog zračenja širi do površine i gubi u atmosferu. Ljeti, kad su dani duži, a noći kraće, dobitak energije tijekom dana u tlo kratkovalnim zračenjem je veće od gubitaka energije. Noću nema zagrijavanja već samo dugovalnog zračenja Zemljine površine ili izjaravanja tla. Svejedno je ljeti ukupni dnevni dobitak energije veći od gubitka, a zimi je gubitak veći od primitka energije. Gledajući godišnji prosjek tlo više energije/topline gubi u obliku dugovalnog zračenja nego što prima u obliku kratkovalnog zračenja. No, usprkos tome tlo se ne hladi. Odgovorna za to je Zemljina atmosfera, koja upija dugovalno zračenje odozdo, i ponovno ga vraća prema podlozi. Dakle, izvor toplinske energije, koja zagrijava tlo, dolazi od Sunca i od atmosferskog protuzračenja. Energija Sunčevog zračenja apsorbirana u tlo pretvara se u toplinsku energiju, kojom se površinski slojevi tla griju, dok se dugovalnim zračenjem tlo hladi. Temperatura gornjeg sloja tla se mijenja tijekom dana od minimuma u rano jutro do maksimuma oko 13 h. Plići slojevi se brže zagrijevaju u odnosu na dublje. Srednja promjena temperature u vlažnom tlu je manja od srednje promjene temperature u suhom tlu, te je i izmjena topline unutar slojeva suhog tla veća. Raspon u godišnjem hodu temperature tla se smanjuje s dubinom. Ljeti su površinski slojevi topliji od dubljih slojeva tla, a zimi je temperaturni režim tla obrnut.

Na meteorološkim se postajama temperatura tla mjeri koljenastim živinim termometrima na dubinama 2, 5, 10, 20 i 30 cm, a u dublje slojeve od 50 i 100 cm postavljaju se geotermometri na izvlačenje. Na samoj površini tla je teže izmjeriti točnu temperaturu jer bi trebalo izmjeriti samo doprinos od temperature tla, a doprinos od temperature zraka zanemariti. Iz toga razloga se ta mjerenja ne obavljaju na

nultom položaju, već umjesto toga mjeri se minimalna temperatura zraka na 5 cm iznad tla i temperatura tla na dubini od 2 cm. Trenutna vrijednost temperature tla na golom tlu mjeri se tri puta na dan (7, 14 i 21 h). Najviša i najniža vrijednost temperature tla tijekom dana mjeri se ekstremnim geotermometrima. Međutim, zbog složenosti tih mjerenja, od njih se odustalo u Hrvatskoj prije 15-ak godina.

Prvi zapisi o mjerenjima temperatura tla u Hrvatskoj potječu od 1898. godine (Kaučić, 2008). Te su godine u Gospodarskom i šumarskom učilištu u Križevcima postavljena tri termometra za mjerenje temperature tla, a sljedeće godine još pet geotermometra do dubine od 2 m. Sustavno mjerenje temperature tla počinje od 1951. godine, a danas se ta mjerenja obavljaju na 55 meteoroloških postaja Državnog hidrometeorološkog zavoda. No, broj postaja koje raspolažu s dugogodišnjim mjerenjima temperature tla je manji jer su neke postaje prekinule s radom, a neka mjerenja su uspostavljena na novim lokacijama.

Temperatura tla ima posebnu važnost za sve procese koji se odvijaju u tlu. Svi fizikalno-kemijski, biokemijski i biološki procesi u tlu ovise o toplini. Toplina utječe na mogućnost klijanja, nicanja, zrenje, urod, morfologiju biljke, broj mikroorganizama u tlu, na vlažnost tla, aeraciju, zbog čega je korisna u poljoprivredi. Temperatura tla ima važnu ulogu u rješavanju teorijskih i praktičkih problema u agrometeorologiji. Međutim, još uvijek su nedovoljna istraživanja temperature tla kod nas, ali i u svijetu. Veća pozornost je posvećena vlazi u tlu nego temperaturi tla. Temperatura tla je analizirana kod nas većinom u starijim radovima (npr. Penzar, 1978; Pleško, 1987; Kaučić, 1989). Noviju analizu usporedbe srednjih mjesečnih temperatura tla u 2000. godini s višegodišnjim prosjekom dao je Kaučić (2001). Zbog toga bi istraživanje temperature tla trebalo proširiti, pri čemu bi rezultati trebali biti namijenjeni ne samo znanstvenicima već i neposrednim korisnicima poljoprivrednicima. Danas kada sve više ekstremne vremenske prili-

ke, koje su rezultat klimatskih promjena, nanose velike štete poljoprivredi i gospodarstvu, agrometeorološka istraživanja treba što više iskoristiti pri donošenju političkih i gospodarskih odluka u proizvodnji hrane. Stoga je i cilj ovog rada istražiti utjecaj klimatskih promjena na srednju godišnju i sezonsku temperaturu tla za različite dubine tla u Hrvatskoj.

2. Podaci i metode rada

Analizirane su srednje godišnje i sezonske temperature tla za različite dubine na 11 postaja: Osijek, Vinkovci, Križevci, Zagreb-Maksimir, Ogulin, Gospić, Poreč, Rijeka, Rab, Knin i Dubrovnik koje raspolažu s dugim vremenskim nizom podataka u razdoblju 1961–2009. Podaci su prikupljeni na dubinama 2, 5, 10, 20, 30, 50 i 100 cm za postaje Zagreb-Maksimir, Križevci i Gospić. Ostale postaje nemaju podatke za dubinu 100 cm, a Rab ni za dubine 30 cm i 50 cm zbog stjenovitog tla.

Nedostajući podaci mjesečnih temperatura tla su interpolirani s podacima najbliže postaje. Za postaju Zagreb-Maksimir su interpolirani pomoću podataka Križevaca i obrnuto, Osijek s Vinkovcima i obrnuto, Poreč i Rab s Rijekom, Dubrovnik s Trstenom, Gospić s Ogulinom i obrnuto, te Knin sa Sinjom. Zbog nedovoljno dugih nizova podataka, postaje Trsteno i Sinj nisu korištene za linearne trendove, već samo za interpolaciju. Nakon što su nedostajući podaci mjesečnih temperatura tla popunjeni, za svaku dubinu određene su srednje mjesečne, sezonske i godišnje temperature tla s pripadnom standardnom devijacijom, maksimalna i minimalna temperatura tla, te njihova razlika između novijeg razdoblja 1981–2009. i standardnog klimatskoga razdoblja 1961–1990.

Linearni trendovi su primijenjeni za sezonske i godišnje temperature tla za razdoblje 1961–2009. kako bi se utvrdile promjene temperature tla na različitim dubinama posljednjih pola stoljeća. Neparаметарски Mann-Kendallov rang test je rabljen za testiranje signifikantnosti linearnog trenda na razini signifikantnosti manjoj od 0.05 (Mitchell i dr, 1966).

3. REZULTATI I DISKUSIJA

3.1. Godišnji hod temperature tla

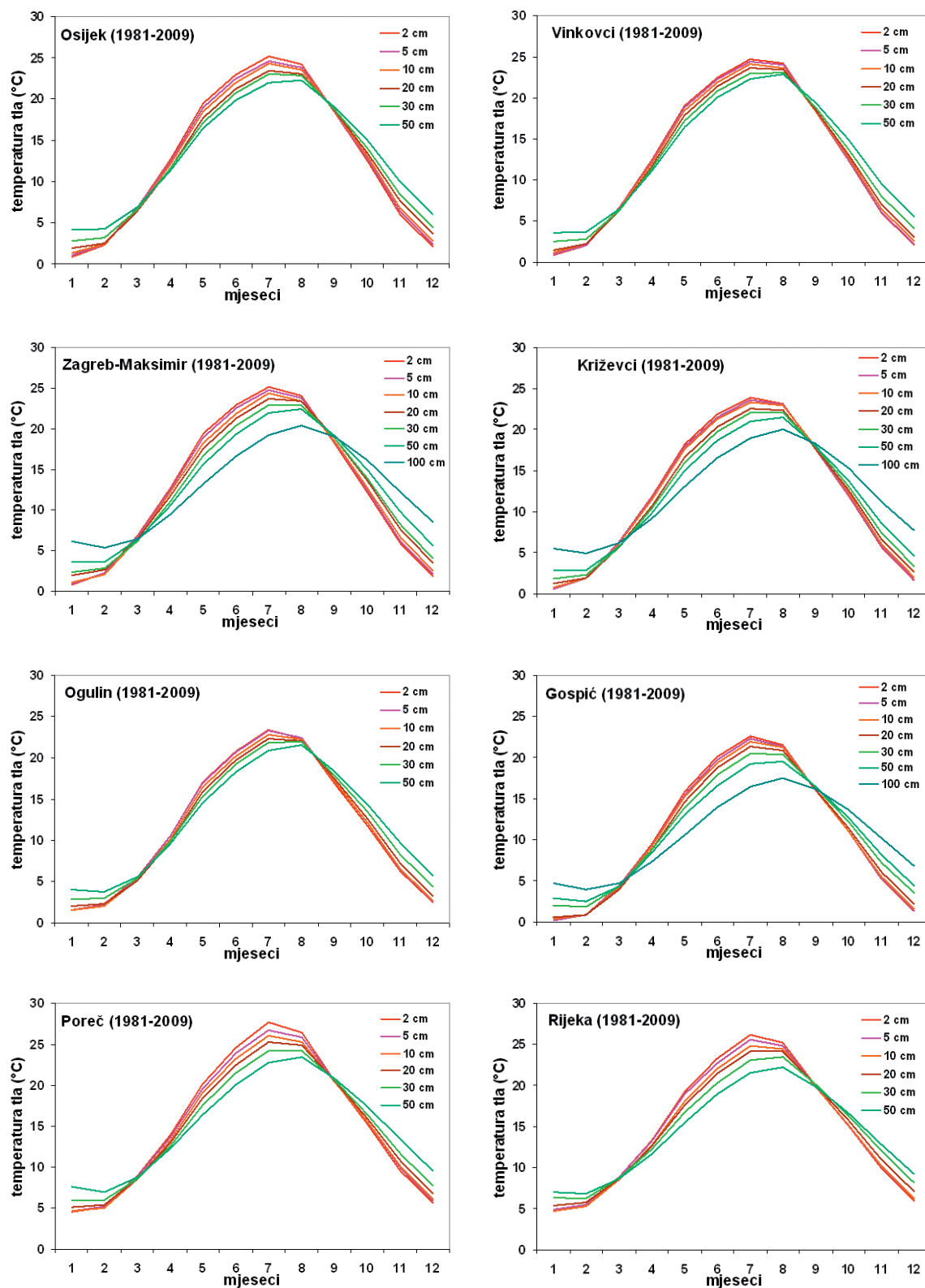
Godišnji hod mjesečnih temperatura tla na različitim dubinama prikazan je na odabranim postajama, koje pokrivaju nizinsku, gorsku i

primorsku Hrvatsku, u razdoblju 1981–2009. (slika 1). Krivulje godišnjeg hoda temperature tla po dubinama nisu simetrične jer je tlo toplije u jesen nego u proljeće. Isto tako se u godišnjem hodu uočava da su dublji slojevi tla topliji od površinskih u hladnom dijelu godine. U toplom dijelu godine situacija je obrnuta. Na svim se promatranim postajama zapaža najveća srednja mjesečna temperatura tla u srpnju do dubine 30 cm, a u dubljim slojevima do 100 cm maksimum se pomiče u kolovoz. Najniža srednja mjesečna temperatura tla u svim dubinama nastupa u siječnju. Od promatranih postaja u prosjeku tlo je najtoplije u Dubrovniku, a najhladnije u Gospiću. U Dubrovniku je prosječno 30.0°C na dubini 2 cm u srpnju, a u Gospiću 22.6°C. U siječnju je 6.5°C i 0.2°C po redu, a idući s dubinom temperatura tla raste, te na 50 cm u prosjeku iznosi 8.1°C i 2.9°C.

Najveće prosječne temperature tla na 2 cm u kontinentalnoj Hrvatskoj su između 24 i 25°C, a najmanje između 0.5 i 0.9 °C. Na dubini od 50 cm maksimalna srednja mjesečna temperatura tla je niža za 2.5–3°C nego u površinskom sloju. Za razliku od toga minimalna je srednja temperatura tla u dubljem sloju na 50 cm viša za 2.5–3°C nego u površinskom sloju. Na Jadranu su maksimalne prosječne temperature tla na 2 cm između 26°C i 30°C, a minimalne između 4.5°C i 6.5°C. Osim već spomenutog Dubrovnika, u Rabu i Poreču su isto vrlo visoke temperature tla u srpnju (prosječno 29.5°C i 27.7°C po redu). Na dubini 50 cm maksimalna srednja temperatura tla se smanjuje za 3–4°C u odnosu na plići sloj od 2 cm, a minimalna raste za 2–3°C.

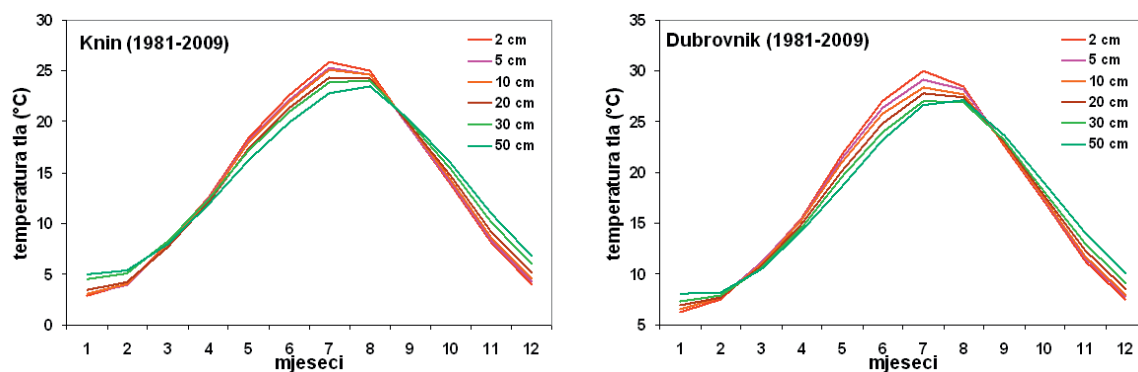
U nizinskom dijelu, srednje godišnje, sezonske i mjesečne temperature tla postupno rastu od sjeverozapadne Hrvatske prema istočnoj Slavoniji (tab. 1). Taj porast je izraženiji u dubljim slojevima tla. Tako npr. u Križevcima srednja godišnja temperatura tla na dubini 50 cm iznosi 11.8°C, a u Osijeku 13.2°C.

U gorskom dijelu prostorna razdioba prosječne temperature tla nije tako pravilna zbog složenosti reljefa tla. Temperatura tla ovisi o nadmorskoj visini, nagibu terena, izloženosti Sunčevom zračenju i strujanju zraka, vlažnosti tla, te pokrivenosti tla snježnim pokrivačem. Prema podacima postaje Ogulin srednja godišnja temperatura tla na 50 cm iznosi 12.2°C, a za Gospić 10.7°C.



Slika 1. Godišnji hodovi srednje mjesečne temperature tla za različite dubine za odabrane postaje u Hrvatskoj u razdoblju 1981–2009.

Figure 1 Annual cycles of mean monthly soil temperature for different depths at selected stations in Croatia during the period 1981–2009.



Slika 1. Nastavak.

Figure 1. Continuation.

Priobalni dio ima najviše srednje godišnje temperature tla u Hrvatskoj s time da se one povećavaju od zaleđa prema otocima kao i uzduž obale idući prema jugu. Primjerice srednja godišnje temperature tla na dubini 20 cm su vrlo slične na otoku Rabu (sjeverni Jadran) i u Dubrovniku koji je smješten na jugu Dalmacije (16.5°C i 16.8°C redom). Srednja godišnja temperatura tla se s dubinom bitno ne mijenja pa je tako za svih sedam dubina u priobalju između 14°C (zaleđe npr. Knin) i 17°C (Dubrovnik).

Usporedba srednjih godišnjih temperatura tla između najnovijeg razdoblja 1981–2009. i standardnog klimatskog razdoblja 1961–1990. na svim dubinama pokazuje porast temperature tla u posljednja tri desetljeća između 0.4°C i 1.5°C (tab. 1). Te godišnje razlike su najizraženije u Dubrovniku (0.9–1.5°C). Međutim, zbog prekida mjerenja temperature tla u Dubrovniku za vrijeme Domovinskog rata, kao i promjene lokacije mjerenja od 1998. godine, upitno je koliko su te razlike stvarne.

Vrijednosti porasta temperature tla u novijem razdoblju razlikuju se po dubinama, ali i po godišnjim dobima. U kontinentalnom i priobalnom dijelu Hrvatske na većini postaja razlika između temperature tla u posljednjem razdoblju u usporedbi sa standardnim klimatskim razdobljem najveća je u najplićim slojevima. Gledajući odstupanje po godišnjim dobima, razlike su najveće ljeti. Tada su srednje temperature tla više za 1–1.5°C na većini postaja na svim dubinama u posljednja tri desetljeća.

3.2. Trend temperature tla

Budući da su već odstupanja novijeg razdoblja sa standardnim razdobljem ukazala na porast

temperature tla po dubinama posljednja tri desetljeća, željelo se je utvrditi za odabrane postaje u Hrvatskoj postoji li signifikantno povećanje srednje godišnje i sezonske temperature tla na različitim dubinama. Analize linearnog trenda i rezultati Mann-Kendallovog testa potvrđuju signifikantni pozitivni trend srednjih godišnjih temperatura tla u razdoblju 1961–2009. (tab. 2). Na svim promatranim postajama najveći signifikantan porast srednje godišnje temperature tla uočava se na dubini od 2 cm. U plićim slojevima tla do 10 cm dubine pozitivni trend iznosi od 0.2 do 0.7°C/10 god, a u dubljim slojevima do 100 cm porast je nešto manji (0.3 i 0.6 °C/10 god). Na slici 2 prikazan je porast srednje godišnje temperature tla na različitim dubinama za postaju Zagreb-Maksimir.

Porastu srednje godišnje temperature tla najviše doprinosi njihovo povećanje u proljeće i ljeti što pokazuje signifikantni pozitivni trendovi po sezonama. Jedino u Osijeku na dubini 10 cm u proljeće i u Poreču na dubini 50 cm ljeti pozitivni trendovi nisu signifikantni na razini signifikantnosti od 0.05. Tendencija porasta sezonske temperature tla za različite dubine najmanja je zimi i u jesen u plićim slojevima tla.

Kao što je već prije spomenuto najveći porast srednje godišnje i sezonske temperature tla opažen je u Dubrovniku. No, zbog moguće nehomogenosti podataka temperature tla određeni su linearni trendovi za dva odvojena razdoblja 1961–1990. i 1998–2009. za dubine 5, 10, 20 i 30 cm (tab. 3). Na slici 3 se uočava nagli skok srednjih sezonskih i godišnje temperature tla za promatrane dubine u kraćem razdoblju.

Tablica 1. Srednje sezonske i godišnje temperature tla (SRED, °C) na dubinama 2, 5, 10, 20, 30, 50 i 100 cm za odabrane postaje u Hrvatskoj u razdoblju 1981–2009. Δ SRED (°C) su razlike srednje temperature tla između razdoblja 1981–2009. i 1961–1990. ZI – zima, PR – proljeće, LJ – ljeto, JE – jesen.

Table 1 Mean seasonal and annual soil temperature (SRED, °C) for depths 2, 5, 10, 20, 30, 50 and 100 cm at selected stations in Croatia in the period 1981–2009. Δ SRED (°C) are mean soil temperature differences between periods 1981–2009 and 1961–1990. ZI – winter, PR – spring, LJ – summer, JE – autumn.

(°C)	OSIJEK		VINKOVCI		ZAGREB-M		KRIŽEVCI		OGULIN		GOSPIĆ	
	SRED	Δ SRED	SRED	Δ SRED	SRED	Δ SRED	SRED	Δ SRED	SRED	Δ SRED	SRED	Δ SRED
Dubina 2 cm												
ZI	1.8	0.3	1.7	0.1	1.6	0.3	1.4	0.3	2.1	0.4	0.8	0.2
PR	13.0	0.6	12.6	0.5	12.9	1.1	12.1	1.0	11.0	1.0	9.9	0.9
LJ	24.1	1.4	23.8	1.2	24.0	1.4	23.0	1.2	22.2	1.5	21.4	1.5
JE	12.3	0.2	12.2	0.0	12.1	0.6	11.7	0.5	11.7	0.7	10.7	0.6
GOD	12.8	0.6	12.6	0.5	12.7	0.8	12.1	0.8	11.7	0.8	10.7	0.8
Dubina 5 cm												
ZI	2.0	0.3	1.8	0.1	1.7	0.4	1.4	0.2	2.1	0.3	0.8	0.1
PR	12.7	0.5	12.6	0.5	12.7	1.1	11.9	0.9	11.0	0.8	9.7	0.8
LJ	23.6	1.1	23.6	1.0	23.7	1.3	22.7	1.1	22.2	1.3	21.1	1.4
JE	12.5	0.3	12.3	0.0	12.3	0.6	11.9	0.5	11.9	0.6	10.8	0.6
GOD	12.7	0.5	12.5	0.4	12.6	0.8	12.0	0.7	11.8	0.8	10.6	0.7
Dubina 10 cm												
ZI	2.2	0.3	2.0	0.1	1.8	0.2	1.6	0.2	2.1	0.5	0.9	0.2
PR	12.4	0.3	12.4	0.5	12.3	0.9	11.7	0.9	10.6	0.9	9.5	1.0
LJ	23.3	0.8	23.2	0.9	23.2	1.1	22.5	1.2	21.8	1.4	20.8	1.4
JE	12.8	0.2	12.5	0.0	12.6	0.5	12.1	0.5	12.0	0.8	10.8	0.7
GOD	12.6	0.4	12.6	0.4	12.5	0.6	12.0	0.7	11.6	0.9	10.5	0.8
Dubina 20 cm												
ZI	2.7	0.6	2.3	0.2	2.7	0.3	2.0	0.3	2.5	0.4	1.2	0.1
PR	11.9	0.6	11.9	0.6	11.9	0.8	11.0	0.8	10.3	0.9	9.1	0.8
LJ	22.5	0.8	22.8	0.9	22.8	1.1	21.8	1.1	21.4	1.4	20.3	1.4
JE	13.3	0.6	12.9	0.1	13.4	0.5	12.3	0.5	12.5	0.9	11.2	0.6
GOD	12.6	0.6	12.5	0.5	12.6	0.6	11.8	0.7	11.7	0.9	10.5	0.7
Dubina 30 cm												
ZI	3.5	0.6	3.2	0.2	3.1	0.2	2.5	0.3	3.4	0.6	2.5	0.2
PR	11.8	0.6	11.6	0.7	11.3	0.7	10.7	0.7	10.2	1.1	9.0	0.7
LJ	22.2	0.9	22.3	1.0	22.1	1.0	21.3	1.0	21.0	1.4	19.6	1.2
JE	13.7	0.5	13.6	0.1	13.6	0.4	12.8	0.5	13.2	0.9	11.9	0.6
GOD	12.8	0.6	12.7	0.5	12.5	0.6	11.8	0.7	12.0	1.0	10.8	0.7
Dubina 50 cm												
ZI	4.8	0.8	4.3	0.0	4.3	0.5	3.5	0.5	4.5	1.0	3.3	0.6
PR	11.5	1.3	11.3	0.6	10.8	0.8	10.2	0.8	9.9	1.1	8.6	1.0
LJ	21.4	1.1	21.8	0.9	21.2	1.1	20.4	1.0	20.2	1.3	18.4	1.2
JE	14.7	0.8	14.7	0.4	14.6	0.7	13.4	0.6	14.2	1.1	12.5	0.9
GOD	13.2	1.2	13.0	0.4	12.8	0.8	11.9	0.7	12.2	1.1	10.7	0.9
Dubina 100 cm												
ZI					6.7	0.5	6.1	0.5			5.2	0.4
PR					9.7	0.7	9.5	0.7			7.5	0.8
LJ					18.7	1.0	18.5	0.8			16.0	1.0
JE					15.8	0.8	15.0	0.6			13.3	0.7
GOD					12.7	0.8	12.2	0.6			10.5	0.7

Tablica 1. Nastavak.

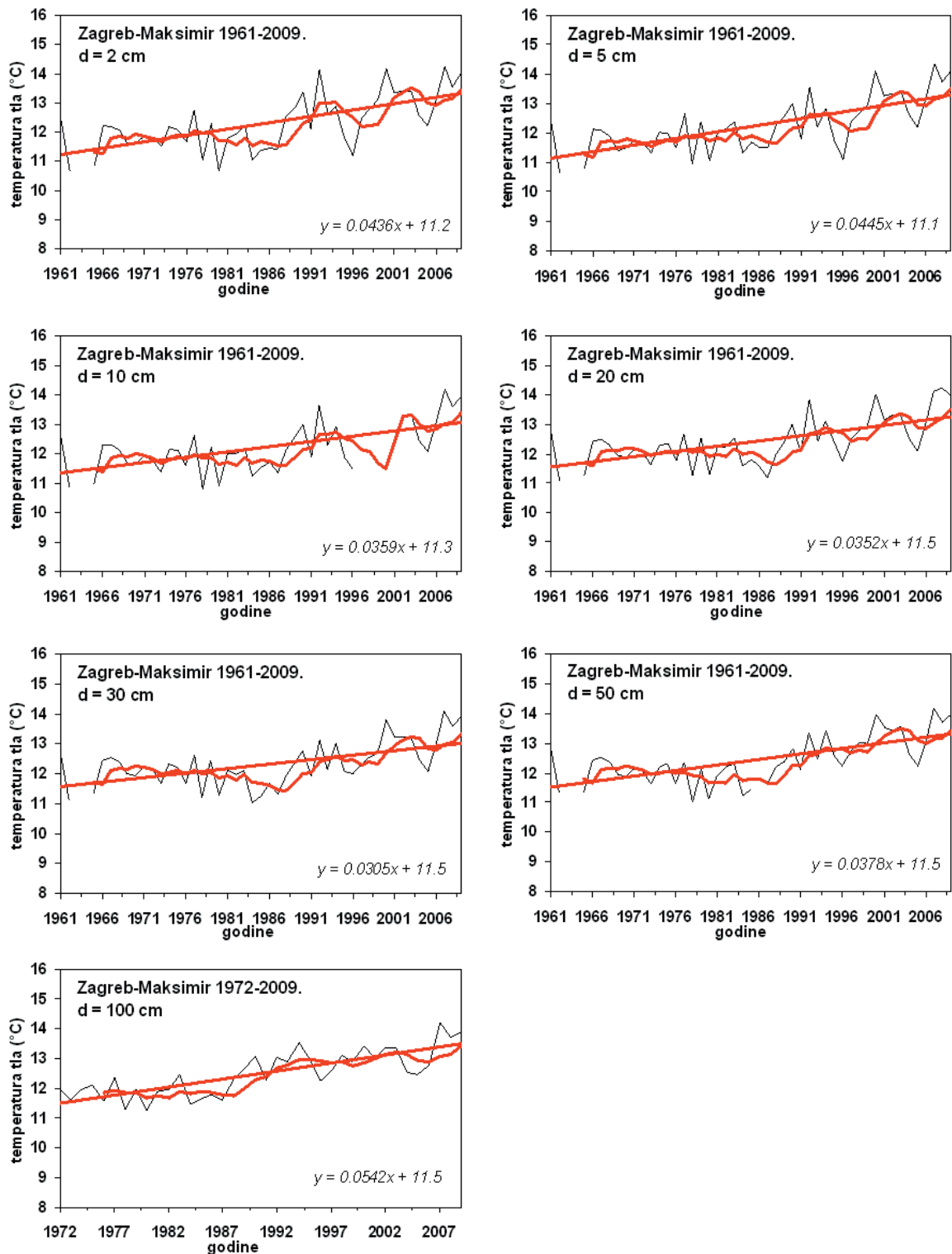
Table 1. Continuation.

(°C)	POREČ		RIJEKA		RAB		KNIN		DUBROVNIK	
	SRED	ΔSRED	SRED	ΔSRED	SRED	ΔSRED	SRED	ΔSRED	SRED	ΔSRED
Dubina 2 cm										
ZI	5.1	0.3	5.4	0.5	6.7	0.2	3.7	0.1	7.1	0.4
PR	14.3	0.6	13.8	1.2	15.9	1.0	13.0	0.6	16.1	1.5
LJ	26.2	1.4	24.9	2.3	28.0	1.5	24.5	1.4	28.4	2.3
JE	15.2	0.6	15.0	0.8	16.5	0.5	13.7	0.1	17.0	1.0
GOD	15.2	0.7	14.7	1.2	16.8	0.8	13.7	0.5	17.2	1.3
Dubina 5 cm										
ZI	5.3	0.3	5.5	0.3	6.8	0.2	3.8	0.3	7.3	0.5
PR	14.1	0.6	13.6	0.9	15.7	0.9	12.8	0.7	16.0	1.5
LJ	25.5	1.2	24.3	1.7	27.7	1.6	24.1	1.2	28.0	2.6
JE	15.4	0.6	15.0	0.6	16.5	0.4	13.9	0.3	17.2	1.0
GOD	15.0	0.7	14.6	0.9	16.7	0.7	13.6	0.6	17.1	1.4
Dubina 10 cm										
ZI	5.3	0.3	5.4	0.1	6.8	0.0	3.9	0.3	7.3	0.5
PR	13.6	0.4	13.1	0.7	15.5	0.6	12.7	0.7	15.8	1.7
LJ	24.8	0.9	23.7	1.5	27.3	1.3	23.9	1.3	27.4	2.5
JE	15.4	0.5	15.0	0.4	16.7	0.2	14.1	0.5	17.3	1.0
GOD	14.8	0.6	14.3	0.6	16.5	0.5	13.6	0.6	16.9	1.3
Dubina 20 cm										
ZI	5.8	0.3	6.1	0.1	7.2	0.3	4.2	0.2	7.7	0.4
PR	13.3	0.4	13.0	0.6	15.1	0.8	12.4	0.6	15.3	1.2
LJ	24.2	0.8	23.2	1.3	26.6	1.5	23.4	1.2	26.8	2.3
JE	15.8	0.5	15.6	0.4	17.0	0.4	14.5	0.4	17.7	0.8
GOD	14.8	0.5	14.5	0.6	16.5	0.8	13.6	0.7	16.8	1.1
Dubina 30 cm										
ZI	6.6	0.5	6.9	0.5			5.3	0.2	8.1	0.3
PR	12.9	0.6	12.6	0.6			12.5	0.5	14.8	1.0
LJ	23.3	0.8	22.3	0.8			23.0	1.2	26.1	1.9
JE	16.2	0.6	16.1	0.5			15.1	0.3	18.0	0.7
GOD	14.8	0.7	14.5	0.6			14.0	0.6	16.7	0.9
Dubina 50 cm										
ZI	8.0	0.8	7.6	1.0			5.7	-0.1	8.9	0.6
PR	12.5	0.4	11.9	0.5			11.9	0.6	14.5	1.2
LJ	22.1	0.3	20.9	0.4			22.1	1.0	25.7	2.4
JE	17.2	0.6	16.4	0.9			15.7	0.2	19.1	1.3
GOD	15.0	0.5	14.2	0.7			13.8	0.4	17.2	1.5

Tablica 2. Linearni trendovi ($^{\circ}\text{C}/10$ god) srednje sezonske i godišnje temperature tla na dubinama 2, 5, 10, 20, 30, 50 i 100 cm za odabrane postaje: Osijek (OS), Vinkovci (VI), Križevci (KR), Zagreb-Maksimir (ZGM), Ogulin (OG), Gospić (GO), Poreč (PO), Rijeka (RI), Rab (RA) i Knin (KN) u razdoblju 1961–2009. Podebljani linearni trendovi su signifikantni na razini 0.05. ZI – zima, PR – proljeće, LJ – ljeto, JE – jesen.

Table 2 Linear trends ($^{\circ}\text{C}/10$ years) of mean seasonal and annual soil temperature for depths 2, 5, 10, 20, 30, 50 and 100 cm at selected stations: Osijek (OS), Vinkovci (VI), Križevci (KR), Zagreb-Maksimir (ZGM), Ogulin (OG), Gospić (GO), Poreč (PO), Rijeka (RI), Rab (RA) and Knin (KN) in the period 1961–2009. Bold linear trends are significant at the 0.05 level. ZI – winter, PR – spring, LJ – summer, JE – autumn.

($^{\circ}\text{C}/10$ god)	OS	VI	ZGM	KR	OG	GO	PO	RI	RA	KN
Dubina 2 cm										
ZI	0.22	0.11	0.26	0.22	0.27	0.15	0.21	0.32	0.14	0.12
PR	0.38	0.27	0.57	0.52	0.52	0.51	0.37	0.71	0.44	0.39
LJ	0.71	0.52	0.67	0.56	0.70	0.73	0.68	1.30	0.64	0.80
JE	0.04	-0.10	0.24	0.18	0.33	0.27	0.22	0.35	0.16	0.07
GOD	0.35	0.22	0.44	0.39	0.43	0.45	0.37	0.67	0.35	0.33
Dubina 5 cm										
ZI	0.23	0.10	0.28	0.18	0.24	0.13	0.25	0.22	0.14	0.22
PR	0.30	0.26	0.59	0.47	0.41	0.46	0.36	0.54	0.43	0.41
LJ	0.56	0.41	0.66	0.51	0.58	0.66	0.58	0.93	0.70	0.69
JE	0.12	-0.10	0.27	0.19	0.26	0.25	0.26	0.23	0.12	0.16
GOD	0.30	0.19	0.45	0.36	0.41	0.41	0.36	0.48	0.33	0.36
Dubina 10 cm										
ZI	0.19	0.09	0.21	0.17	0.31	0.19	0.26	0.10	0.06	0.23
PR	0.23	0.31	0.49	0.49	0.51	0.51	0.28	0.41	0.34	0.45
LJ	0.41	0.43	0.54	0.54	0.64	0.67	0.43	0.80	0.62	0.70
JE	0.07	-0.08	0.23	0.19	0.36	0.30	0.20	0.13	0.06	0.22
GOD	0.23	0.21	0.36	0.37	0.51	0.46	0.29	0.36	0.25	0.39
Dubina 20 cm										
ZI	0.32	0.15	0.21	0.22	0.26	0.13	0.22	0.10	0.19	0.19
PR	0.34	0.35	0.39	0.46	0.48	0.46	0.25	0.39	0.43	0.39
LJ	0.43	0.43	0.51	0.52	0.62	0.65	0.38	0.70	0.66	0.64
JE	0.23	-0.01	0.18	0.21	0.39	0.27	0.19	0.13	0.14	0.19
GOD	0.33	0.25	0.35	0.38	0.49	0.42	0.26	0.33	0.36	0.37
Dubina 30 cm										
ZI	0.35	0.10	0.15	0.19	0.35	0.15	0.31	0.27		0.18
PR	0.36	0.39	0.38	0.41	0.56	0.42	0.36	0.34		0.35
LJ	0.47	0.50	0.51	0.49	0.66	0.58	0.41	0.47		0.62
JE	0.24	0.00	0.16	0.20	0.39	0.27	0.25	0.21		0.19
GOD	0.36	0.27	0.31	0.35	0.51	0.37	0.34	0.32		0.36
Dubina 50 cm										
ZI	0.41	0.08	0.27	0.29	0.43	0.30	0.44	0.56		0.00
PR	0.51	0.42	0.39	0.42	0.51	0.47	0.26	0.31		0.37
LJ	0.59	0.46	0.52	0.46	0.54	0.55	0.19	0.25		0.52
JE	0.39	0.11	0.29	0.23	0.38	0.37	0.23	0.39		0.09
GOD	0.50	0.28	0.38	0.37	0.51	0.46	0.26	0.37		0.24
Dubina 100 cm										
ZI			0.34	0.25		0.26				
PR			0.52	0.39		0.51				
LJ			0.74	0.49		0.62				
JE			0.57	0.34		0.42				
GOD			0.54	0.37		0.46				



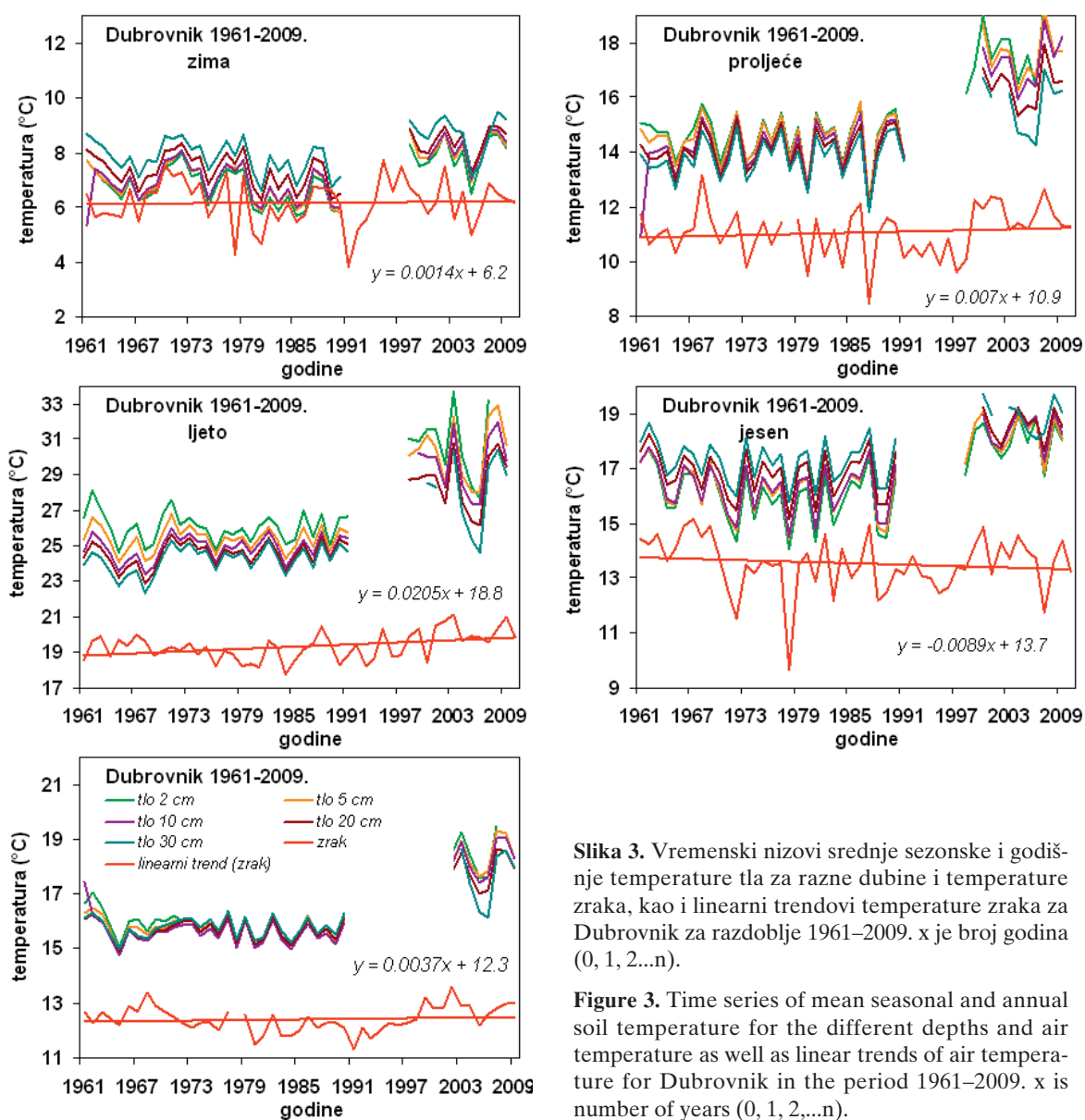
Slika 2. Linearni trend srednje godišnje temperature tla na dubinama 2, 5, 10, 20, 30, 50 i 100 cm za postaju Zagreb-Maksimir u razdoblju 1961–2009. osim za dubinu 100 cm u razdoblju 1972–2009. x je broj godina (0, 1, 2,...n).

Figure 2. Linear trends of mean annual soil temperature for depths 2, 5, 10, 20, 30, 50 and 100 cm at Zagreb-Maksimir in the period 1961–2009 except for the depth of 100 cm in the period 1972–2009. x is number of years (0, 1, 2,...n).

Tablica 3. Linearni trendovi ($^{\circ}\text{C}/10$ god) srednje sezonske i godišnje temperature tla na dubinama 5, 10, 20 i 30 cm za Dubrovnik u razdobljima 1961–1990. i 1998–2009. te temperature zraka u razdoblju 1961–2009. Po-debljani linearni trendovi su signifikantni na razini 0.05. ZI – zima, PR – proljeće, LJ – ljeto, JE – jesen.

Table 3 Linear trends ($^{\circ}\text{C}/10$ years) of mean seasonal and annual soil temperature for depths 5, 10, 20 and 30 cm for Dubrovnik in the periods 1961–1990 and 1998–2009. Bold linear trends are significant at the 0.05 level. ZI – winter, PR – spring, LJ – summer, JE – autumn.

Dubrovnik	1961–1990.	1998–2009.	1961–1990.	1998–2009.	1961–1990.	1998–2009.	1961–1990.	1998–2009.	1961–2009.
	Dubina 5 cm		Dubina 10 cm		Dubina 20 cm		Dubina 30 cm		Zrak
ZI	-0.31	0.09	-0.16	0.56	-0.28	0.18	-0.29	-0.20	0.01
PR	0.03	0.80	0.32	1.23	0.10	0.59	0.14	-0.18	0.07
LJ	-0.01	0.66	0.14	0.25	0.19	0.43	0.31	0.46	0.21
JE	-0.26	0.12	-0.23	0.00	-0.19	0.44	-0.16	-0.52	-0.09
GOD	-0.14	0.20	-0.17	0.17	-0.05	0.15	0.00	-0.35	0.04



Slika 3. Vremenski nizovi srednje sezonske i godišnje temperature tla za razne dubine i temperature zraka, kao i linearni trendovi temperature zraka za Dubrovnik za razdoblje 1961–2009. x je broj godina (0, 1, 2,...n).

Figure 3. Time series of mean seasonal and annual soil temperature for the different depths and air temperature as well as linear trends of air temperature for Dubrovnik in the period 1961–2009. x is number of years (0, 1, 2,...n).

Srednja je godišnja temperatura tla na 5 cm bila je 2000., 2003., 2007. i 2008. godine jednaka ili veća od 19.0°C što se prvi puta dogodilo od kada postoje mjerenja na toj postaji. Maksimum od 19.3°C je zabilježen 2007. godine. U tim najtoplijim godinama i dublji slojevi tla su imali velike vrijednosti srednje godišnje temperature tla. Tako je npr. na dubini 50 cm 2003. i 2007. godine bila i najveća vrijednost od 18.6°C . Takvom porastu srednje godišnje temperature tla najviše su doprinijele iznimno visoke srednje ljetne temperature tla u spomenutim godinama, koje su bile iznad 30°C do dubine 30 cm. Ljeti 2008. srednja sezonska temperatura tla od 30.4°C dosegla je dubinu do 50 cm što je još jedan rekord. Stoga u novijem razdoblju 1998–2009. linearni trendovi srednje godišnje temperature tla do 20 cm pokazuju blagi porast oko $0.2^{\circ}\text{C}/10$ god na dubrovačkom području (tab. 3). Tome najviše doprinose povećanje temperature tla u proljeće (do $1.2^{\circ}\text{C}/10$ god na dubini od 10 cm) i ljeti (do $0.7^{\circ}\text{C}/10$ god na dubini od 5 cm). Za razliku od toga u razdoblju 1961–1990. uočava se blagi pad ili bez promjene srednje godišnje temperature tla na različitim dubinama. Smanjenje temperature tla (oko $-0.3^{\circ}\text{C}/10$ god) jedino je statistički signifikantno zimi.

Postoji sumnja u ispravnost ekstremnih temperaturnih prilika tla, koje su zabilježene početkom 21. st. zbog toga što ne postoji kontinuitet mjerenja temperature tla u Dubrovniku. Stoga su analizirani linearni trendovi srednje godišnje i sezonske temperature zraka u razdoblju 1961–2009. (slika 3 i tab. 3). Važno je naglasiti da zbog različitih značajki tla i zraka, kao i različitog načina mjerenja temperature tla i zraka, one nisu izravno usporedive. Srednja godišnja temperatura zraka u Dubrovniku ne pokazuje trend ($0.04^{\circ}\text{C}/10$ god, tab. 3), kao ni sezonska zimi ($0.01^{\circ}\text{C}/10$ god) dok je u jesen trend negativan ($-0.09^{\circ}\text{C}/10$ god).

Blagi porast srednje sezonske temperature zraka primijećen je u proljeće ($0.07^{\circ}\text{C}/10$ god), a signifikantan porast ljeti ($0.21^{\circ}\text{C}/10$ god). Da bi srednja temperatura zraka porasla, prvo se mora povećati temperatura tla jer se zrak grije od podloge. Iz navedenog se jedino može zaključiti da je u proljeće i ljeti moralo doći do porasta srednje temperature tla. No, je li je iznos povećanja stvaran, teško je utvrditi.

U prilog koliko je prvo desetljeće 21. st. bilo ekstremno s obzirom na temperaturne prilike, pokazuju prve četiri najveće srednje godišnje temperature tla na dubini 5 cm (tab. 4). Svi maksimumi na promatranim postajama su upravo zabilježeni u tom razdoblju, jedino se četvrti rekord u Ogulinu odnosi na 1994. godinu. Dakle, ne može se s pouzdanošću tvrditi koliko je točni porast srednje godišnje i sezonske temperature tla u Dubrovniku. Međutim, može se jedino zaključiti da je i na tom području došlo do povećanja, makar u onim granicama kao i u ostalim dijelovima Hrvatske.

4. ZAKLJUČAK

Godišnji hod mjesečnih temperatura tla u različitim klimatskim zonama u Hrvatskoj ima maksimum u srpnju do dubine 30 cm, a na većim dubinama u kolovozu. Minimum se javlja u siječnju, a jesen je toplija od proljeća pa godišnji hod nije simetričan.

Istraživanje srednje mjesečne, sezonske i godišnje temperature tla za različite dubine do 100 cm na odabranim postajama u Hrvatskoj u razdoblju 1981–2009. pokazalo je da je došlo do porasta temperature u odnosu na standardno klimatsko razdoblje 1961–1990. Porast srednje godišnje temperature tla je između 0.4°C i 1.5°C na svim dubinama. Razlike srednje temperature tla, između ta dva razdoblja, su najveće u ljetnim mjesecima ($1-1.5^{\circ}\text{C}$). Posebno se ističu godine 2000., 2003., 2007., 2008.

Tablica 4. Četiri najveće srednje godišnje temperature tla na dubini 5 cm za odabrane postaje u Hrvatskoj u razdoblju 1961–2009.

Table 4 The four highest mean annual soil temperatures for the depth of 5 cm at selected stations in Croatia in the period 1961–2009.

Osijek	Vinkovci	Zagreb-M	Križevci	Ogulin	Gospić	Poreč	Rijeka	Rab	Knin	Dubrovnik											
god	god	god	god	god	god	god	god	god	god	god											
$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$											
2009	14.5	2008	14.4	2007	14.3	2000	13.4	2000	13.0	2000	11.9	2009	16.3	2003	16.6	2000	17.9	2000	15.2	2007	19.3
2007	14.4	2009	14.2	2000	14.1	2009	13.3	2007	12.9	2009	11.8	2008	16.1	2007	16.4	2007	17.7	2007	15.0	2008	19.2
2000	14.1	2000	14.0	2009	14.1	2008	13.3	2009	12.9	2007	11.7	2000	16.1	2008	16.2	2009	17.5	2008	15.0	2000	19.2
2008	14.1	2007	14.0	2008	13.7	2007	13.1	1994	12.7	2003	11.6	2003	16.1	2009	16.0	2001	17.5	2009	14.8	2003	19.0

i 2009. kao najtoplije godine posljednjih pet desetljeća. Primjerice, u Dubrovniku je srednja mjesečna temperatura tla u srpnju i kolovozu 2003. 2007. i 2008. godine imala u cijelom vertikalnom profilu tla do 50 cm vrijednosti iznad 30°C. Srednjak je na dubini 50 cm u srpnju iznosio 30.2°C, 30.6°C i 30.3°C te kolovozu 30.5°C, 30.7°C i 30.5°C po redu. Slične vrijednosti su zabilježene i u Makarskoj do dubine 30 cm 2003. i 2008., koja zbog kratkoće niza nije analizirana u ovom radu. Ti podaci potvrđuju vjerodostojnost dubrovačkih izmjerenih najvećih srednjih vrijednosti početkom 21. st. No, prekid i premještanje mjerenja temperature tla prije toga u Dubrovniku uzrokovalo je i moguću nehomogenost nizova temperature tla. Zbog toga nije bilo moguće odrediti linearne trendove srednje godišnje i sezonske temperature tla za cijelo promatrano razdoblje 1961–2009.

Povećanje srednje godišnje i sezonske temperature tla u razdoblju 1961–2009. je na većini odabranih postaja u Hrvatskoj signifikantno na svim dubinama. Povećanje srednje temperature tla je najizraženije u najplićem sloju na dubini 2 cm. Najveći porast temperature tla je ljeti (0.3–1.3°C/10 god), a najmanji zimi (0.1–0.3°C/10 god), a u proljeće je porast veći nego u jesen.

Analize linearnog trenda temperature tla su isto dobar pokazatelj klimatskih promjena na nekom području, ali takve analize nisu česte, kao što su analize temperature zraka. Najnovija kanadska istraživanja linearnog trenda temperature tla do 150 cm u razdoblju 1958–2008. isto pokazuju signifikantno povećanje srednje sezonske temperature tla u proljeće i ljeti (Qian i dr, 2011). Međutim, ono je manje nego kod nas i iznosi oko 0.3°C/10 god. U srednjoj godišnjoj temperaturi tla nisu primijetili signifikantno povećanje kao ni zimi. Smatraju da presudnu ulogu u povećanju srednje zimske temperature tla, a onda i srednje godišnje, ima visina snježnog pokrivača. Toplinski učinak snježnog pokrivača kao izolatora prikriva signifikantno povećanje i srednje godišnje temperature tla u Kanadi, osobito u plićim slojevima tla. Za daljnja istraživanja utjecaja klimatskih promjena na temperaturu tla kod nas potrebno bi bilo uključiti visinu snježnog pokrivača, te količinu oborine.

Zahvala: Ovo istraživanje je ostvareno u okviru znanstvenoistraživačkog projekta *Klimatske varijacije i promjene i odjek u područjima utjecaja* – 004-1193086-3035 Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske.

5. Literatura

- Kaučić, D., 1989: Karakteristike temperature tla u Hrvatskoj, *Rasprave*, **24**, 66–71.
- Kaučić, D., 2001: Anomalije temperature tla u Hrvatskoj u razdoblju ožujak – kolovoz 2000, *Šumarski list*, **5-6**, 291–297.
- Kaučić, D., 2008: Temperatura tla, poglavlje u Klimatskom atlasu Hrvatske (ur. K. Zaninović), Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb, 131–133.
- Mitchell J. M. Jr., Dzerdzeevskii B., Flohn H., Hofmeyr W. L., Lamb H. H., Rao K. H. and C. C. Wallen, 1966: Climatic Change, *WMO Technical Note*, **79**, Geneva, 58–75.
- Penzar, I., 1978: Temperatura tla. *Prilozi poznavanju vremena i klime SFRJ*, **4**, 65–95.
- Penzar I. i B. Penzar: 2000: Agrometeorologija, Školska knjiga, Zagreb, 228. str.
- Pleško, N., 1987: Klimatski odnosi temperature tla i zraka u Hrvatskoj i njihova povezanost s turbulentnim fluksevima topline, *Rasprave*, **22**, 11–17.
- Qian, B., E. G. Gregorich, S. Gameda, D. W. Hopkins and X. L. Wang, 2011: Observed soil temperature trends associated with climate change in Canada, *J. Geophys. Res.*, **116**, D02106, doi:10.1029/2010JD015012