

Primena debeloslojnih segmentiranih termistora za merenje i analizu temperaturnog profila gornjeg sloja zemlje

STANKO O. ALEKSIĆ, Univerzitet u Kragujevcu,

Fakultet tehničkih nauka, Čačak

NEBOJŠA S. MITROVIĆ, Univerzitet u Kragujevcu,

Fakultet tehničkih nauka, Čačak

MILOLJUB D. LUKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Institut za multidisciplinarna istraživanja, Beograd

SNEŽANA G. LUKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Institut za multidisciplinarna istraživanja, Beograd

NINA N. OBRADOVIĆ, Institut tehničkih nauka SANU, Beograd

Originalni naučni rad

UDC: 621.316.825

DOI: 10.5937/tehnika1804533A

Novi senzor temperaturnog profila gornjeg sloja zemlje, formiran je kao niz od 40 termistorskih segmenata redno vezanih, kojim se meri promena temperature, u zemlji do dubine $d=550$ mm. Temperaturni senzor je višestruko zaštićen od vlage, kalibrisan na sobnoj temperaturi i postavljen u vertikalno izbušenu rupu na travnjaku. Osnovne električne karakteristike novog senzora na bazi NTC debeloslojnih segmentiranih termistora date su ukratko. Merenje temperaturnog profila gornjeg sloja zemlje u 40 tačaka vršeno je u 7 i u 14 časova od početka novembra 2017. do kraja februara 2018. godine. U tom periodu u istim terminima merena je i temperatura vazduha. Rezultati merenja temperature gornjeg sloja zemlje $T(t,z)$ prikazani su dijagramima sa dnevnim i mesečnim pregledom kao funkcija vremena t i dubine zemlje d po z -osi. Analizirana je korelacija između temperature gornjeg sloja zemlje i vazduha: promena gradijenta temperature tla i uticaj padavina na temperaturni profil. Dobijeni rezultati omogućavaju dalje proučavanje temperaturnog režima gornjeg sloja zemlje.

Ključne reči: merenje temperature, debeloslojni termistori

1. UVOD

Merenje temperature odnosi se najčešće na vazduh, vodu i površinu zemlje. Merenje temperature u domaćinstvima, u objektima od posebnog značaja, zatim u industriji, rudarstvu, saobraćaju, meteorologiji, medicini i elektronskoj opremi postalo je neophodno i stalno [1-3]. Merenje temperature tla vrši se za potrebe meteorologije, agrikulture i eksploatacije podzemne energije (toplotne pumpe). U tu svrhu se koriste termoparovi, platinski termometri i NTC termistori [4-7]. Za detaljnije merenje temperaturnog profila zemlje potrebni su nizovi termistorskih senzora raspoređeni po dubini sloja zemlje koji se meri. Ako su potrebna merenja temperature obradive površine zemlje do du-

bine 0,5 m, onda je potrebno postavljanje više termistora kako bi na različitim dubinama znali temperature u toku određenog perioda godine. Pored toga, ukoliko želimo da precizno uočimo do koje dubine zemlje po vertikalnoj osi z prodire voda usled padavina u nekom trenutku t onda senzore treba gusto rasporediti po dužini i meriti detaljno temperaturni profil sloja $T(t, z)$. Pošto tražena vrsta senzora nije komercijalno dostupna nego se pravi namenski za određenu primenu usledila je izrada novog termistorskog senzora sa debeloslojnim termistorima. Nakon toga vršena su merenja temperaturnih profila zemlje sa novim namenskim sensorom (senzorskim nizom od 40 termistorskih segmenata, ukupno deset pločica, slika 1). Analiza dobijenih rezultata data je za period od novembra 2017. do februara 2018. godine.

Adresa autora: Stanko Aleksić, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka Čačak, Čačak, Svetog Save 65

e-mail: frakulah@gmail.com

Rad primljen: 16.04.2018.

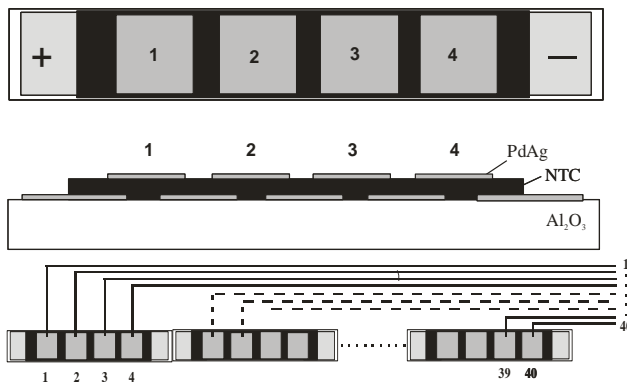
Rad prihvaćen: 29.06.2018.

2. TERMISTORSKI NIZ GST-1 PROTOPIP

Za formiranje termistorskog niza korišćena je posebna konstrukcija termistora debeloslojni segmentirani termistori (slika 1) [6].

Termistorski sloj je štampan od NTC termistorske paste sopstvene izrade, koja je razvijena u predhodnim istraživanjima [8, 9].

NTC pasta se sastojala od NiMn_2O_4 praša veličine čestice oko $0.9 \mu\text{m}$, organske smole (etilceluloze) i vezivnog stakla (borosilikati). Razvijena je kao termistorska pasta NTC3K3 2011/8 u Institutu IMSI u Beogradu.



Slika 1 - Konstrukcija NTC segmentiranih termistora: pogled odozgo i poprečni presek. PdAg elektrode (siva), NTC sloj NiMn_2O_4 (crna), Al_2O_3 podloga (bela). Veličina pločice: $50.8 \times 6.35 \times 0.5 \text{ mm}$

Sinteruje se na $850^\circ\text{C}/10 \text{ min}$ u hibridnoj konvejskoj peći. Merenjem sinterovanih uzoraka ove paste u klima komori u opsegu $10\text{-}30^\circ\text{C}$ dobijen je NTC eksponencijalni koeficijent termistora $B=3860 \text{ K}$, a temperaturni koeficijent $\alpha = -4.35 \text{ \%}/\text{K}$ je veličina koja karakteriše zavisnost električne otpornosti od temperature. Dimenzije pločice su: $50.7 \times 6.35 \times 0.5 \text{ mm}$. Svaka pločica sadrži četiri termistorska segmenta koja su optimizovana da se dobije vrednost električne DC otpornosti od $1.5\text{-}2\text{k}\Omega$ po segmentu (ćeliji) na sobnoj temperaturi.

Senzorski niz formiran je od 10 pločica (redno vezanih) za merenje temperaturnog profila u 40 tačaka/550 mm. Senzorski niz je višestruko izolovan od vlage i stavljen u metalnu cev. Sa svakog segmenta izvedena je do konektora po jedna žica. Zatim je senzor kalibrisan na sobnoj temperaturi i postavljen vertikalno u rupu izbušenu na travnjaku (slika 2).

Početni naziv ovog senzora bio je gradijentni senzor temperature tla GST-1, prototip [6]. Sva merenja promene temperature gornjeg sloja zemlje data u ovom radu dobijena su pomoću GST-1 u Beogradu na travnjaku koji se više godina ne prekopava, a sadrži većinom glinu i vrlo malo humusa.

Određivanje temperature T u nekoj mernoj tački na dubini zemlje d (z osa) vrši se preko merenja DC električne otpornosti, R debeloslojnog segmentiranog termistora između unutrašnjih elektroda (slika 1).



Slika 2 - Termistorski niz GST-1 prototip

Temperatura termistora T se izračunava preko otpornosti R korišćenjem Steinhart-Hart jednačine aproksimirane na prvi član [10]. Odakle je tražena temperatura T_1 za izmerenu otpornost R_1 termistora data kao:

$$T_1 = [B \cdot T_0 / (B + T_0 \ln \frac{R_1}{R_0})] \quad (1)$$

gde je R_0 nominalna otpornost termistora merena na sobnoj temperaturi T_0 (293.16 K).

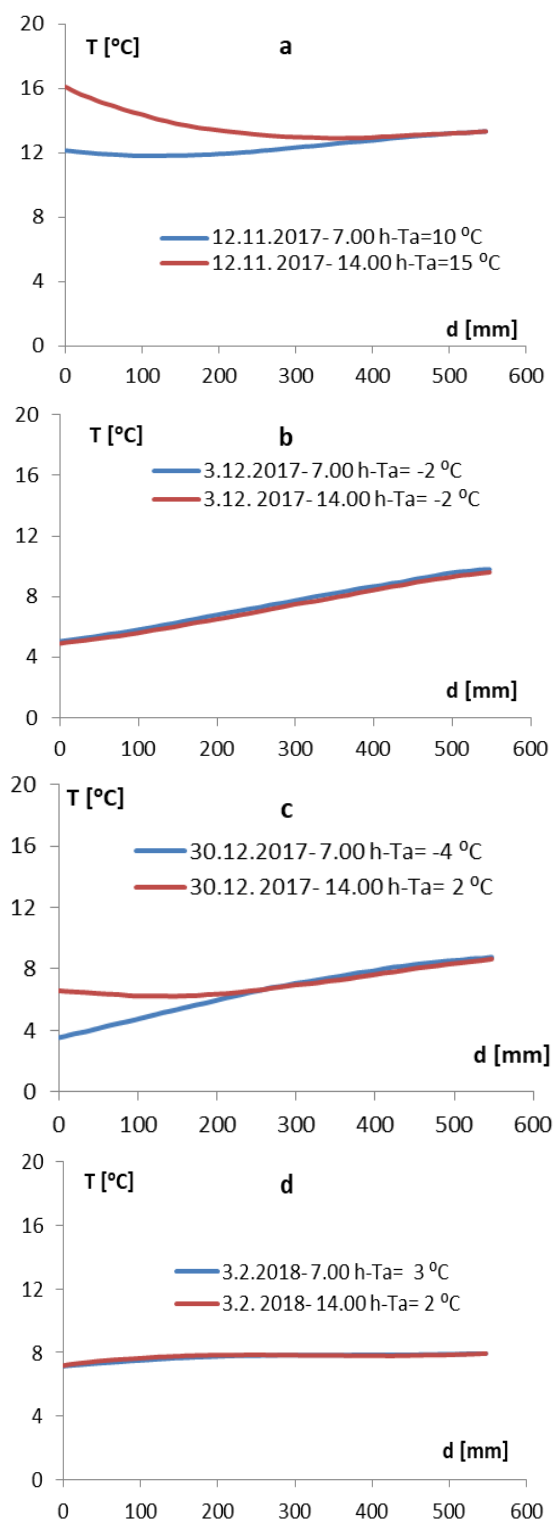
Merna nesigurnost na termistoru (određivanje temperature zemlje) je zbir odstupanja merenja DC otpornosti R digitalnim multimetrom (0.1%), kalibracije termistora R_0 (0.1%), merenja eksponencijalnog faktora NTC termistora B (0.2%) i termičkog histerezisa termistora (0.1%).

Ukupna odstupanja određivanja temperature T pomoću niza termistora (GST-1) ne prelazi 0.15°C u celom opsegu promene temperature gornjeg sloja zemlje, na osnovu proračuna merne nesigurnosti. Pre postavljanja u položaj za merenje, GST-1 je izolovan od vlage i stavljen u metalnu cev pa je zatim kalibrisan na sobnoj temperaturi u svih 40 tačaka. Merenjem otpornosti R u 40 tačaka i korišćenjem jednačine (1) dobija se 40 vrednosti temperature T odnosno temperaturni profil gornjeg sloja zemlje do dubine od 550 mm.

3. MERENJE TEMPERATURNOG PROFILA ZEMLJE POMOĆU GST-1

Dnevni temperaturni profili gornjeg sloja zemlje

Dnevni profili temperature gornjeg sloja zemlje mereni su u Beogradu od novembra 2017. do februara 2018. godine svaki dan u 7 i 14 časova pomoću GST-1 prototipa u 40 tačaka. U isto vreme merena je temperatura vazduha na 2 metra visine. Temperaturni profili gornjeg sloja zemlje koji su karakteristični po obliku dati su na slici 3 (a-d).

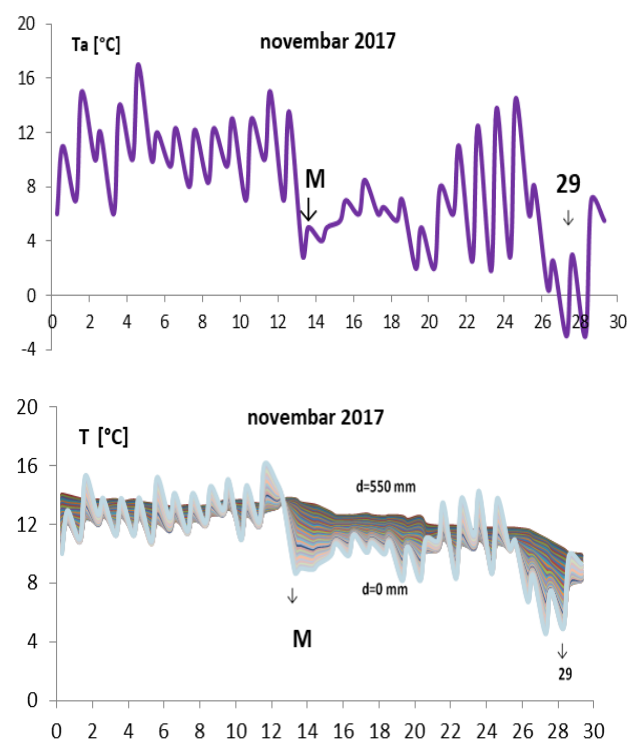


Slika 3 - Karakteristični tipovi dnevnih temperaturnih profila gornjeg sloja zemlje $T(d)$, gde je d dubina mernog mesta, a T_a temperatura vazduha: slika a-normalni profil za delimično oblačan dan, slika b-inverzni profil za oblačan dan i sneg debljine 5 cm, slika c-sedlast profil za jutarnji mraz i delimično sunčan dan, slika d-ravnotežni profil za slabu kišu pre podne

Izdvojeni su karakteristični oblici profila temperature gornjeg sloja zemlje između 120 izmerenih dnevnih profila samo kao primer u „zimskom“ periodu (kraj 2017. i početak 2018.). Merenja su vršena za klimatske uslove periferije Beograda, u zemlji koja nije prekopavana dugo vremena a čiji je sastav većinom glina sa malo humusa (travnjak koji se na zaliva).

Mesečni temperaturni profili gornjeg sloja zemlje

Koristeći temperaturne profile gornjeg sloja zemlje merene svakog dana u 7 i 14 časova u periodu od početka novembra 2017. do kraja februara 2018. godine, formirana su četiri mesečna temperaturna dijagrama koji su dati na slikama 4, 5, 6 i 7. Na istim slikama su uporedno sa temperaturama merenim u zemlji dati i dijagrami temperature vazduha (mereni na 2 m visine).

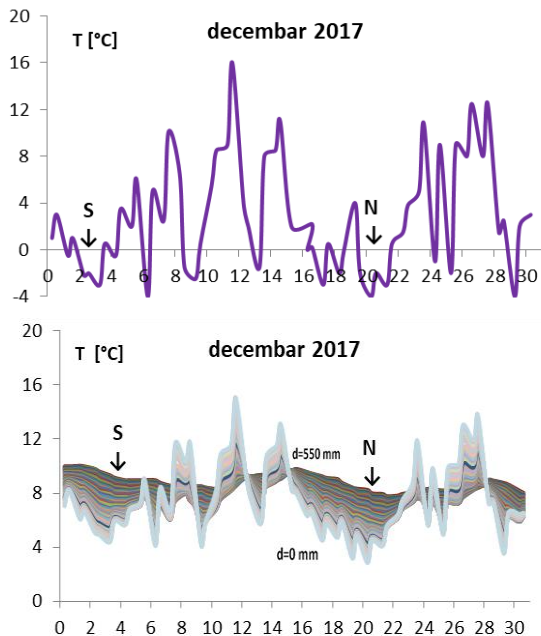


Slika 4 - Dijagram temperature vazduha T_a i gornjeg sloja zemlje T u funkciji od dubine merne tačke d (snop krivih). Mesečni dijagrami za novembar 2017.

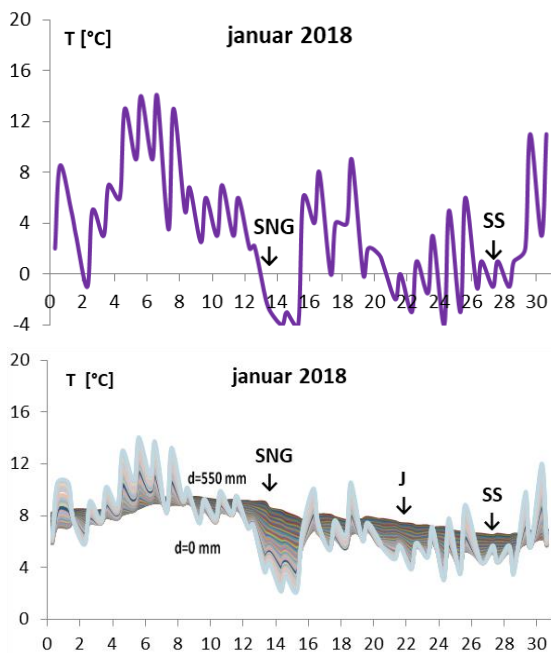
Na krivama temperature vazduha T_a i temperature zemlje T (slika 4) se vide dnevne oscilacije temperature (min/max) merene u 7 ujutru i 14 časova popodne. Na oba dijagrama su strelicama obeleženi karakteristični dani M i 29 (13. i 29. novembar, respektivno). Temperaturni dijagrami zemlje su dati u funkciji od dubine d mernog mesta (40 dijagrama): dijagram na površini zemlje je označen sa $d=0$ mm i na najvećoj dubini $d=550$ mm.

Dijagrami temperature za ostale dubine nalaze se između ova dva krajnja dijagrama (snop krivih).

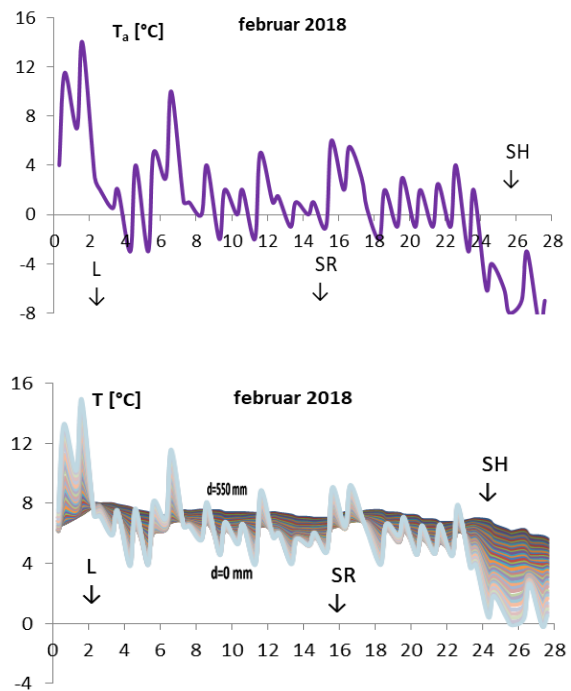
Detaljnije o tome šta se događa u karakterističnim tačkama, hladnim i toplijim periodima, padavinama i prenosu toplote i toplotnoj ravnoteži kao i vezi (korelaciji) dijagrama temperature vazduha i zemlje biće dato kasnije, pošto budu prikazani dijagrami za preostala tri meseca.



Slika 5 - Dijagram temperature vazduha T_a i gornjeg sloja zemlje T u funkciji od dubine merne tačke d (snop krivih). Mesečni dijagrami za decembar 2017.



Slika 6 - Dijagram temperature vazduha T_a i gornjeg sloja zemlje T u funkciji od dubine merne tačke d (snop krivih). Mesečni dijagrami za januar 2018.



Slika 7 - Dijagram temperature vazduha T_a i gornjeg sloja zemlje T u funkciji od dubine merne tačke d (snop krivih). Mesečni dijagrami za februar 2018.

4. DISKUSIJA DOBIJENIH REZULTATA

Termistorski senzorski niz GST-1 nastao je kao redna veza debeloslojnih segmentiranih termistora (dat naslici 1 i 2), ispunjava tražene zahteve za namenski senzor za merenje temperaturnog profila gornjeg sloja zemlje navedene u odeljku 2. Osim toga novi namenski senzor ima dugotrajnu stabilnost svojih karakteristika i meri temperaturu zemlje detaljno na svakih 12.7 mm dubine (ima 40 izvoda na 550 mm). Za merenje otpornosti termistorskih segmenata R_i ($i=1..40$) može se koristiti bilo koji DC multimetar. Za pretvaranje otpornosti R_i u temperature T_i koristi se Stainhart-Hartova jednačina (1). Pri ovim proračunima greška merenja ne prelazi 0.15°C za ceo meri opseg na osnovu proračuna merne nesigurnosti.

Temperaturni profili gornjeg sloja zemlje su pod direktnim uticajem atmosferskih prilika: temperatura vazduha, padavine, vetar, sunce/oblaci. Pored toga temperaturni profili zavise od mineralnog sastava zemlje i strukture zemlje, nagiba, podzemnih voda i vegetacije. Na primer, rastresita zemlja lako prima i otpušta vodu, dok ona koja nije prekopavana ima manju poroznost i ima drugačija svojstva i drugačiji temperaturni profil. Temperaturni profil gornjeg sloja zemlje zavisi direktno od razmene toplote između vazduha i unutrašnjih slojeva zemlje koji leže ispod gornjeg sloja zemlje čiji se temperaturni profil meri. Na dubinama od 550 mm temperatura zemlje je relativno stabilna:

leti temperatura vazduha je oko dva-tri puta veća od T_{550} temperature, a zimi je isto toliko puta temperatura vazduha manja od temperature u zemlji. Tako je u toplom periodu gradijent temperature sa dubinom sloja zemlje negativan, a kad je hladno pozitivan (slika 3a i 3b). U slučaju kad nema razmene toplote preko gornjeg sloja zemlje temperaturni profil je horizontalna linija (slika 3 d). Češće u takvim periodima kriva ima sedlast oblik (slika 3c). Svakodnevnim merenjem temperaturnih profila ujutru i posle podne dobijamo i pravac razmene toplote kroz pomenuti sloj zemlje (nagore ili nadole).

Kod mesečnih dijagrama $T(t,z)$ tokom zimskog perioda od novembra 2017. do kraja februara 2018. (slike 4-7) najčešći pravac prenosa toplotne energije je iz dubine zemlje prema površini (nagore) kroz sloj zemlje gde se meri temperaturni profil. Primeri toplotne ravnoteže kao na slici 3d na ovim dijagramima se vide kao čvorovi (na slikama 4-7): 13. novembar (M), 12, 15. i 28. decembar, 8. januar, 2. februar (L), 15. februar (SR).

U hladnijim periodima kao naprimer 13-20. novembra (M) ili u novembru (29.) imamo kišu ili košavu, a u decembru od 1. do 5. sloj snega od 5 cm, zatim je hladno 20. decembra (N), 14. januara (SNG), 27. Januara (SS) i na kraju februara (24-28.) (SH) i sneg od 20 cm. Pomenutim periodima odgovara po obliku kriva temperaturnog profila 3b i 3c (stabilno hladno vreme) - inverzija temperature. Tada je temperatura na dubini $d=550$ mm je oko $6-8$ °C a na površini $d=0$ mm oko $0-3$ °C.

U toplijim periodima zimi, najčešći oblik temperaturnog profila je kao na slici 3a i 3c (sedlast po obliku). Tada je temperatura zemlje na dubini $d=0$ mm veća od one na $d=550$ mm, ali je na polovini dubine sloja koji merimo, temperatura manja od obe temperature.

Razlog tome je kada zimi naglo otopli, poveća se temperatura vazduha, pa se površinski sloj malo zagreje, a temperature dubljeg sloja ostanu skoro iste kao što su bile pre zagrevanja vazduha jer ne stiže da se ugrije usled inercije i suviše male količine toplote koju je primio samo plići sloj zemlje.

Prikazani profili temperature tla u zimskom periodu 2017/2018. mogu se koristiti lokalno u poljoprivredi, biologiji, prognozi prizemnih temperatura vazduha i za praćenje pravca prenosa toplote u gornjem sloju zemlje.

Za dublje fizičko istraživanje toplotnih pojava i stanja u zemlji, kao što su absorpcija toplote u sloju, prenos toplote kroz sloj provođenjem i difuzijom potrebno je iz eksperimentalnih krivih (mesečni profili temperature, slike 4-7) odrediti koeficijent prenosa toplote K i toplotne difuzije D toplotni kapacitet C . To

se postiže modelovanjem tj. primenom toplotne jednačine drugog reda:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2)$$

gde je D difuziona konstanta, K koeficijent toplotne provodnosti, C toplotni kapacitet sloja i θ sadržaj vode u zemlji koji se menja sa dubinom d . Kako K, C i D zavise od sadržaja vlage θ imamo sledeću jednačinu:

$$D = \left[\frac{\partial T}{\partial t} \right] / \left[\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] = K(\theta) / C(\theta) \quad (3)$$

Primenom ovih jednačina na $T(t,z)$ dnevne profile tj. krive sa slike 3 je relativno lako odrediti jer su to glatke krive oblika polinoma drugog i trećeg reda. Međutim za profile na mesečnom nivou (slike 4-7) to nije jednostavno jer postoje velike dnevne oscilacije, relaksacije, i napred opisane nestabilnosti temperature sloja, tako da su ove krive aperiodične. Direktna primena jednačina (2) i (3) bi bila pogodna samo na delove mesečnog profila tj. u stabilnim periodima. Pored toga moglo bi se na mesečnom nivou razdvojiti jutarnji od popodnevni profila kao min. i max. mesečni temperaturni profili sloja zemlje, čime se dosta smanjuje složenost dijagrama (dnevne oscilacije). Time bi lakše dobijali "konstante" K, C i D u stabilnim periodima. U sadašnjem trenutku, kao prvoj fazi istraživanja puno modelovanje ovih krivih prevazilazi obim ovog rada jer već mesečni podaci traže namenski pisane programe za primenu jednačina (2) i (3) na 40 mernih tačaka.

5. ZAKLJUČAK

Novi senzor temperaturnog profila gornjeg sloja zemlje GST-1 kao namenski senzor omogućio je brz pristup u više tačaka merenjima temperature gornjeg sloja zemlje bez automatizacije merenja. Ovako detaljno merenje temperaturnog profila gornjeg sloja zemlje kako je urađeno pomoću prototipa GST-1, nije opisano u nama dostupnoj literaturi. Ostale prednosti ovog senzora su brzina merenja, mala greška merenja, dugotrajna stabilnost, jednostavna izrada i minijaturizacija. Osim toga moguća je dogradnja prikazanog prototipa pomoću akvizicione karte i povezivanje sa PC i programom koji omogućava automatsko prikazivanje trenutnih temperaturnih profila na zahtev ili više puta dnevno.

Do sada izmereni temperaturni profili za gornji sloj zemlje i dijagrami za temperaturu vazduha upoređeni su kvalitativno, dok je za modelovanje i određivanje toplotnih svojstava sloja razmatran samo postupak koji treba primeniti u drugoj fazi istraživanja, koja je upravo počela. Autori očekuju da će uskoro bar deo ovih merenih profila biti modelovan, a da će rezultati biti iskorišćeni u praćenju klijanja i razvoja biljaka od korena do površine. Detaljni profili temperature u

gornjem sloju zemlje mogu odmah da se koriste za praćenje razvoja mikroorganizama u zemlji. Istraživanja takođe treba nastaviti na različitim podlogama tipa livade i oranice, zatim podloge sa različitim mineralnim sastavom i različitim nagibom.

LITERATURA

- [1] J. G. Webster, H. Eren, *Measurement, Instrumentation and Sensor Handbook*, Thermal and temperature measurement, Chapter 7, 2nd edition, CRC Press pp. 65-78, 2014.
- [2] T. D. Mc Gee, *Principles and Methods of Temperature Measurement*, John Wiley, pp. 2-21, 1988.
- [3] P. R. N. Childs, J. R. Greenwood, C. A. Long, "Review of temperature measurement", *Review Scientific Instrumentation*, vol. 71, no. 8, pp. 2959-2965, 2000.
- [4] D. R. White, "Temperature errors in linearizing resistance networks for thermistors", *International Journal of Thermophysics*, vol. 36, no. 12, pp. 3404-3420, 2015.
- [5] R. E. Bentley, *Handbook of temperature measurement*, vol. 3: Theory and practice of thermoelectric thermometry. Springer-Verlag Singapore Pte. Ltd., pp. 24-36, 1998.
- [6] Snežana G. Luković, Ljiljana D. Živanov, Miloljub D. Luković, Obrad S. Aleksić, Maria V. Nikolić, "Gradijentni senzor za merenje temperature tla" XVI međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-JAHORINA, , Vol. 16 pp. 30-33, Mart 2017.
- [7] D. D. Pollock, *Thermocouples: theory and properties*, CRC Press, pp. 181- 195, 1991.
- [8] O. S. Aleksic, B. M. Radojic, R. M. Ramovic, "Modeling and simulation of NTC thick film thermistor geometries", *Microelectronics International*, vol. 24 (1), pp. 27-34, 2007.
- [9] O. S. Aleksic, P. M. Nikolic , Recent advances in NTC thick film thermistors, *Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics* Vol. 30, No 3, pp. 267 – 284, September 2017.
- [10] J. S. Steinhart, S.R. Hart, "Calibration curves for thermistors", *Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts*, vol.15 (4), pp. 497-503, 1968.

SUMMARY

APPLICATION OF THICK FILM SEGMENTED THERMISTORS FOR MEASUREMENT AND ANALYSIS OF GROUND TOP LAYER TEMPERATURE PROFILE

A new sensor for measuring ground top layer temperature profile was formed as a row of 40 thermistor segments connected in series, with which the change of temperature in the soil is measured and placed on 550 mm depth. The temperature sensor is multiple protected of humidity, calibrated on room temperature and placed vertically in the hole drilled on the lawn. The main electrical properties of the new sensor based on NTC thick film segmented thermistors are given in brief. The ground top layer temperature profile measurements were done in 40 points at 7am and 2 pm each day from the beginning of November 2017 to the end of February 2018. At the same time and in the same period of time the air temperature were measured and recorded. The results of measurements of ground top layer temperature $T(t,z)$ were given in daily and monthly diagrams as a function of time t and ground deepness d on z -axis. The correlation between ground top layer temperature profile and air temperature was analyzed: changes of ground temperature gradient and effect of precipitations on ground temperature profile. The results obtained enable study of temperature regime of ground top layer.

Key words: temperature measurement, thick film thermistors