

REZOLUCIJA MERENJA NIVOVA PADAVINE
U ZAVISNOSTI OD POLOŽAJA TEŽIŠTA
KLACKALICE METEOROLOŠKOG PLUVIOMETRA

M. Simić, Lj. Brajović, G. Todorović, D. Simić, V. Georgijević

Ključne reči: pluviometar, klackalica, intenzitet padavine

KRATAK SADRŽAJ

U radu je prikazan novi tip pluviometra sa klackalicom. Određen je položaj težišta klackalice kojoj je pridodat pokretni teg. Pozicija tega može da se menja duž tanke žice zanemarljive mase. Posebna odlika ovog tipa pluviometra je što se njime može obuhvatiti širi opseg intenziteta padavina sa samo jednim tipom klackalice. Takođe, moguće je održati istu ili promenjenu rezoluciju merenja i pri promeni materijala klackalice. Izvedena je matematička analiza zavisnosti zapremine vode u odeljku klackalice od ugla zakretanja, kao i vrednost odgovarajuće zapremine pri graničnom uglu.

RESOLUTION OF RAINFALL LEVEL MEASUREMENT AS A FUNCTION
OF THE METEOROLOGICAL RAINGAUGE CENTER OF GRAVITY

Keywords: raingauge, tipping bucket, rainfall intensity

ABSTRACT

The paper presents a new type of tipping bucket raingauge. The position of the center of gravity of the tipping bucket with an additional weight was determined. The position of this weight can be changed along a thin wire of negligible mass. The special feature of this type of raingauge is that it covers a wider range of rainfall intensities with one single bucket. It is possible either to maintain the same measurement resolution or to alter it by changing the material of the tipping bucket. The mathematical analysis of the water volume in one compartment of the tipping bucket as a function of the inclination angle, as well as the value of the corresponding volume for a limited angle, is presented.

UVOD

Za potrebe meteoroloških merenja razvijen je novi tip pluviometra sa klackalicom, koji ima mogućnost promene rezolucije merenja nivoa padavine. Ova promena je ostvarena primenom pokretnog tega na klackalici, koji može, po potrebi, da menja položaj njenog težišta u zavisnosti od potrebne rezolucije merenja i primenjenog materijala za izradu klackalice. Na teritoriji Novog Sada postavljeno je pet pluviometara sa elektronskim sistemom za akviziciju broja impulsa u realnom vremenu, što je podstaklo dalji razvoj pluviometara za primenu u raznim klimatskim regionima. U radu je analitički i eksperimentalno pokazana funkcionalna zavisnost zapremine vode u odeljku klackalice pri zadatim vrednostima ugla zakretanja.

DEFINISANJE NEKIH VAŽNIJIH VELIČINA OD ZNAČAJA ZA REZOLUCIJU MERENJA NIVOA PADAVINE

U ranijim radovima [1,2,3,4,5 i 6] opisan je princip rada razvijenog pluviometra sa klackalicom. Na slici 1. prikazana je principijelna skica klackalice sa levkom **L**, površine otvora **A**, i sifonom **S**. Pri prebacivanju klackalice iz jednog u drugi krajnji položaj, magnet **M** kratkotrajno zatvori radni kontakt **r**, pri čemu se generišu impulsi, koje registruje akvizicioni modul **AM** u realnom vremenu. Svaki proizvedeni pluviometar je potrebno kalibrisati u dinamičkim uslovima rada, pri različitim vrednostima intenziteta padavina. Ova kalibracija se obavlja u laboratorijskim uslovima [4]. Ako je ukupan broj impulsa **n**, dobijen pri preklapanju klackalice za ugao θ i pražnjenu zapreminu vode iz desnog ΔV_D i levog ΔV_L odeljka, tada su aritmetičke sredine zapremina istekle vode:

$$\overline{\Delta V}_D = \frac{\sum_{n=1}^{n/2} \Delta V_{nD}}{n/2}, \quad \overline{\Delta V}_L = \frac{\sum_{n=1}^{n/2} \Delta V_{nL}}{n/2},$$

dok je aritmetička sredina zapremine vode koja ističe iz svakog odeljka klackalice:

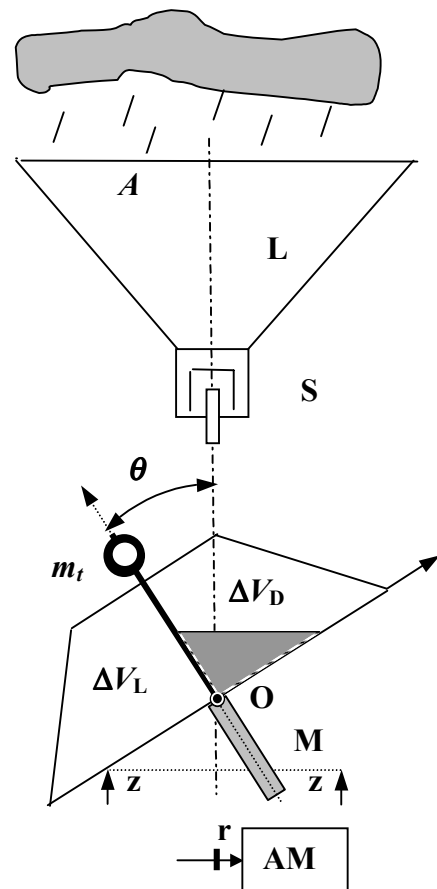
$$\overline{\Delta V} = \frac{\overline{\Delta V}_D + \overline{\Delta V}_L}{2}.$$

U cilju što jednostavnijeg merenja ukupnog nivoa padavine uvedene su i neke nove veličine [4]. Ako je dinamička zapremina vode koja ističe iz odeljka klackalice $\overline{\Delta V}$, tada se može definisati i srednja vrednost visine vodenog taloga po impulsu:

$$\overline{\Delta h} = 10 \frac{\overline{\Delta V}}{A} \text{ (mm/imp)}, \quad (1)$$

gde je $\overline{\Delta V}$ izraženo u (cm^3/imp), a A u (cm^2). Međutim, za pluviometre sa linearizovanom karakteristikom [4], moguće je odrediti i srednju vrednost visine vodenog taloga po impulsu u uslovima padavina sa promenljivim intenzitetom, pri čemu se baždarenje vrši za N merenja:

$$\overline{\Delta H} = \frac{\sum_{N=1}^N \overline{\Delta h}}{N} \text{ (mm/imp)}. \quad (2)$$



Slika 1. Blok skica pluviometra

ODREĐIVANJE POLOŽAJA TEŽIŠTA KLACKALICE

Klackalica radi u uslovima indiferentne ravnoteže, tj. položaj težišta sistema mora uvek biti iznad ose rotacije klackalice. Da bi se odredio položaj težišta, klackalicu je potrebno postaviti u vertikalni položaj, prema slici 2, pri čemu su definisane četiri karakteristične mase: m_1 -masa konusnog dela, m_2 -masa centralnog dela, m_3 -masa pregradnog zida i m_4 -masa magneteta. Položaj težišta klackalice ΔH_t je određen u radovima [1] i [6] iz jednačine sume momenata sila u odnosu na tačku rotacije O:

$$\Delta H_t = \frac{\sum_{i=1}^4 m_i g y_i}{\sum_{i=1}^4 m_i g} = \frac{2m_1 g y_{10} + 2m_2 g y_{20} + m_3 g y_{30} - m_4 g y_{40}}{2m_1 g + 2m_2 g + m_3 g + m_4 g} \quad (3)$$

Za svaki element klackalice određeni su masa i položaj težišta pojedinih elemenata. Prema jednačini (3) položaj težišta u odnosu na tačku rotacije O, tada dobija oblik:

$$\Delta H_t = \frac{2R^2 \delta \rho (0.43L_1 + 1.14L_2) + 0.9R^3 \delta' \rho - 1.57R_m^2 L_4 \rho_m}{2R\delta \rho (2L_1 + \pi L_2) + 0.5R^2 \pi \delta' \rho + R_m^2 \pi L_4 \rho_m} = \frac{C}{D} \quad (4)$$

gde su:

ρ - gustina materijala klackalice,

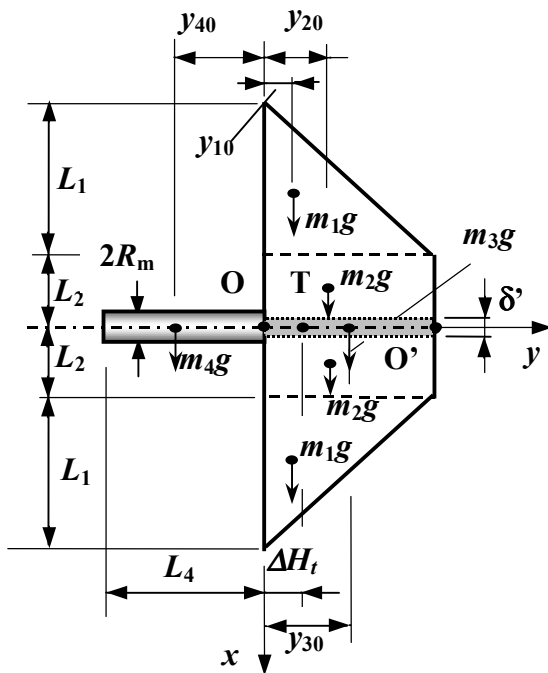
δ - debljina zida klackalice,

δ' -debljina pregradnog zida,

R_m - poluprečnik cilindra feritnog magneteta,

ρ_m -gustina feritnog magneteta,

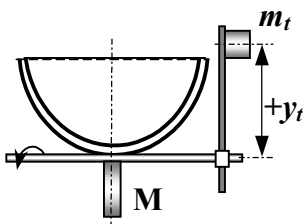
R -poluprečnik krivine odeljka klackalice.



Slika 2. Raspored masa klackalice

ANALIZA RADA KLACKALICE SA POMIČNIM TEGOM

U radovima [1, 3 i 6] analizirana je klackalica sa pomičnim tegom, koji može da menja položaj težišta klackalice. Na taj način je moguće menjati i rezoluciju merenja pluviometra. Prema slici 3., pomični teg mase m_t postavljen je na zici zanemarljive mase, na udaljenju y_t od ose rotacije. Iz momentne jednačine dobija se tada novi položaj težišta klackalice ΔH_{tt} , kao i položaj pokretnog teaga za zadatu vrednost ΔH_{tt} :

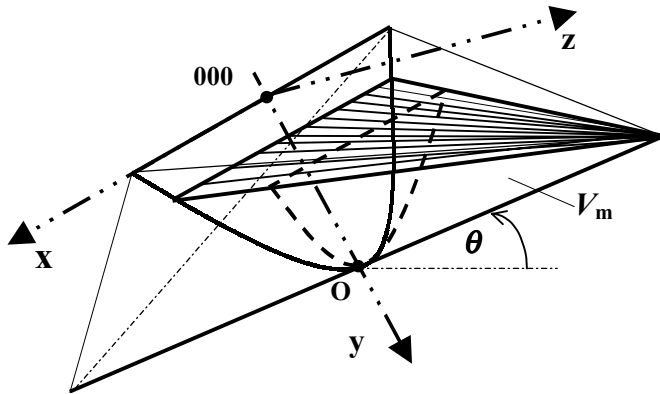


$$\Delta H_{tt} = \frac{C \pm m_t y_t}{D + m_t} \quad y_t = \frac{\Delta H_{tt} (D + m_t) - C}{m_t} \quad (5)$$

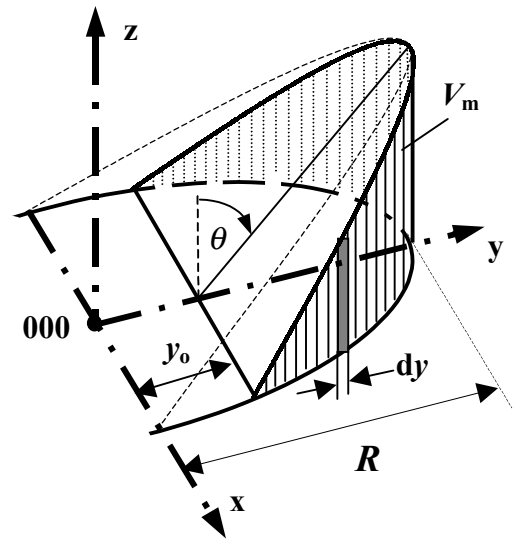
Slika 3. Klackalica sa tegom mase m_t

ODREĐIVANJE FUNKCIONALNE ZAVISNOSTI ZAPREMINE VODE U ODELJKU KLACKALICE OD UGLA ZAKRETANJA

Prinudnim i sukcesivnim zakretanjem klackalice bez pomičnog tega, za određene vrednosti ugla, može se naći funkcionalna zavisnost zapremine vode u odeljku klackalice od ugla θ . Pri graničnom uglu θ_k odeljak klackalice je ispunjen maksimalnim sadržajem vode $V_{\max}$. Pri daljem povećanju ugla θ nastaje prelivanje vode iz odeljka klackalice. Da bi se odredila zavisnost zapremine vode u odeljku klackalice V_m u funkciji ugla θ , na slici 4. je prikazan njen aksionometrijski izgled, a na slici 5. samo jedan odeljak klackalice u položaju pogodnom za matematičku analizu. Tačka **O** predstavlja osu rotacije klackalice.



Slika 4. Aksionometrijski izgled klackalice u koordinatnom sistemu xoy



Slika 5. Aksionometrijski izgled jednog odeljka klackalice u sistemu xoy

Element zapremine vode u odeljku klackalice određen je izrazom:

$$dV_m = 2x z dy,$$

dok je jednačina ravni površine vode :

$$z = y \operatorname{ctg} \theta - y_0 \operatorname{ctg} \theta,$$

gde je y_0 - udaljenje od duži, duž koje se presecaju ravan površine vode i ravan xoy, do koordinatnog početka (**000**). Kako je:

$$x^2 + y^2 = R^2 \quad \text{i} \quad dV_m = 2\sqrt{R^2 - y^2} (y \operatorname{ctg} \theta - y_0 \operatorname{ctg} \theta) dy, \quad \text{sledi:}$$

$$V_m = 2 \operatorname{ctg} \theta \int_{y_0}^R y \sqrt{R^2 - y^2} dy - 2 y_0 \operatorname{ctg} \theta \int_{y_0}^R \sqrt{R^2 - y^2} dy.$$

Integraljenjem gornjeg izraza dobija se konačan izraz za zapreminu vode u odeljku klackalice u funkciji dve varijable, ugla θ i veličine y_0 :

$$V_m = \operatorname{ctg} \theta \left[\frac{1}{3} \sqrt{R^2 - y_0^2} (y_0^2 + 2R^2) + y_0 R^2 \left(\arcsin \frac{y_0}{R} - \frac{\pi}{2} \right) \right]. \quad (6)$$

REZULTATI MERENJA

Određivanje ukupnog taloga

Za razvijeni pluviometar na Građevinskom fakultetu u Beogradu, koji ima površinu poprečnog preseka levka $A=310,24 \text{ cm}^2$, srednja vrednost visine vodenog taloga za linearizovan pluviometar, prema izrazima (1) i (2) dobija oblik:

$$\overline{\Delta H} = \frac{10 \overline{\Delta V}}{310,24} = 0,0322 \overline{\Delta V} \text{ (mm/imp)}. \quad (7)$$

U meteorološkoj praksi, za područje Jugoslavije i susednih balkanskih država, smatra se da rezolucija merenja nivoa padavine, izražena u litrima po kvadratnom metru i registrovanom impulsu, treba da se nalazi u granicama (0,2- 0,25) l/m²imp, odnosno da srednja vrednost visine vodenog taloga ima vrednost u opsegu $\overline{\Delta H} = (0,2 - 0,25) \text{ mm/imp}$. U tom slučaju, prema izrazu (7), aritmetička sredina zapremine vode koja ističe iz odeljka klackalice treba da ima vrednosti:

$$\overline{\Delta V} = \frac{\overline{\Delta H}}{0.0322} = (6,2 - 7,76) \text{ cm}^3. \quad (8)$$

Kako je prema izrazu (7) srednja vrednost visine vodenog taloga po impulsu srazmerna zapremini vode koja ističe iz odeljka klackalice, načinjena je tabela 1. koja pokazuje tu zavisnost. Za seriju razvijenih linearizovanih pluviometara za potrebe oskultacije padavina na teritoriji Novog Sada, usvojena je vrednost rezolucije merenja od $\overline{\Delta H} = 0,230 \text{ mm/imp}$, što odgovara zapremini vode od $\overline{\Delta V} = 7,14 \text{ cm}^3$. Na taj način se ukupan nivo T vodenog taloga za svaku padavinu može dobiti jednostavnim množenjem ukupnog broja registrovanih impulsa n i usvojene rezolucije merenja $\overline{\Delta H}$:

$$T = 0,230 n \text{ (mm)}. \quad (9)$$

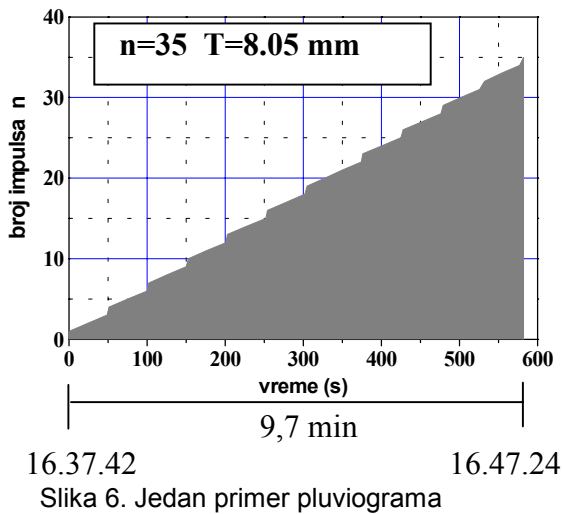
0.230 mm/imp

Tabela 1. $\overline{\Delta H} = 0.0322 \overline{\Delta V} \text{ (mm/imp)}$

$\overline{\Delta H} \text{ (mm/imp)}$	0,1	0,2	0,3	0,4
$\overline{\Delta V} \text{ (cm}^3\text{)}$	3,11	6,21	9,32	12,42

7,14 cm³

Primeru radi, iz serije meteoroloških podataka snimljenih padavina, izabrana je jedna kratkotrajna padavina u nizu padavina jednog istog dana. Osnovni podaci, dobijeni pomoću akvizicionog modula sa EEPROM memorijom, prikazani su u skraćenom obimu u tabeli 2., dok je odgovarajući pluviogram prikazan na slici 6. Za izabranu padavinu, prema izrazu (9), izračunat je ukupni nivo vodenog taloga T prema registrovanom broju impulsa n. Slobodna je procena meteorologa da iz dobijene baze podataka odredi interval pauze, kada prethodna padavina prestaje i naredna počinje. Taj se interval kreće između 5 do 30 min. Međutim, u cilju smanjenja opterećenja baterija za napajanje akvizicionog modula i uštede memorije, akvizicioni modul je programiran da se automatski postavlja u poziciju "stand by" ukoliko se između dve padavine, posle proteklih 30 minuta, ne pojavi ni jedan novi impuls. Svaki novi impuls ponovo aktivira modul.



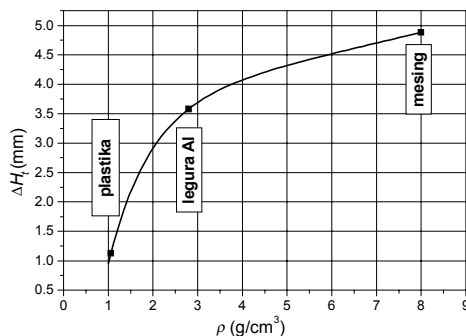
Slika 6. Jedan primer pluviograma

Tabela 2. Baza podataka

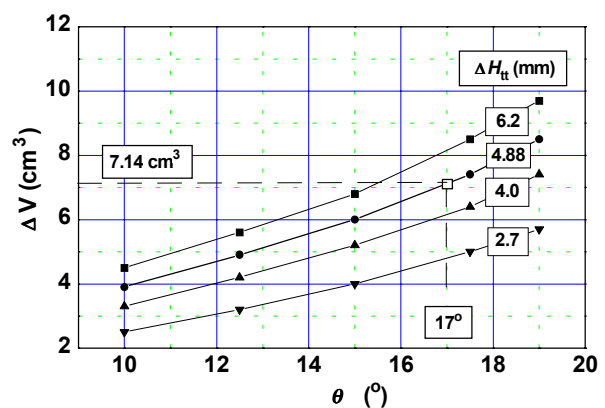
dan	vreme (čas)	broj imp.
4. maj	16.37.42	507 (1)
4. maj	16.38.06	508 (2)
4. maj	16.38.31	509 (3)
4. maj	16.38.33	510 (4)
4. maj	16.38.57	511 (5)
-	-	-
4. maj	16.46.28	537 (31)
4. maj	16.46.34	538 (32)
4. maj	16.46.55	539 (33)
4. maj	16.47.19	540 (34)
4. maj	16.47.24	541 (35)

Pogodnosti pluviometra sa klackalicom sa pomičnim tegom

Za izradu klackalice koriste se često različiti materijali. Pod uslovom da su iste dimenzije klackalice, shodno izrazu (4), položaj težišta se menja u zavisnosti od primenjenog materijala za njenu izradu. Zbog toga se menja i srednja vrednost visine vodenog taloga po impulsu. Razvijeni pluviometar ima klackalicu načinjenu od mesinga, sa položajem težišta $H_{tt} = 4,88 \text{ mm}$, pri čemu je ostvarena rezolucija merenja $\Delta H = 0,230 \text{ mm/imp.}$ U radu [6] je na osnovu izraza (4) izračunata zavisnost položaja težišta klackalice u funkciji gustine primenjenog materijala. Na slici 7. prikazan je dijagram zavisnosti položaja težišta od gustine materijala. Zapaža se znatno smanjenje visine položaja težišta pri smanjenju gustine materijala. Takođe, date su i vrednosti y_t položaja pomičnog tega, mase $m_t = 10 \text{ g}$, za klackalice načinjene od plastike i legure aluminijuma, da bi se postigli isti položaji težišta i ostvarila ista rezolucija merenja kao sa klackalicom od mesinga. Međutim, ukoliko je na zahtev meteorologa potrebno promeniti i rezoluciju merenja, tj. vrednost ΔH , tada je to moguće postići ili promenom ugla zakretanja klackalice pomoću dva zavrtnja za podešavanje z (slika 1.) ili daljim pomeranjem tega na klackalici, sve dok se ne ostvari potrebna vrednost zapremine vode prema izrazima (7) i (8). Za ovo podešavanje potrebno je obaviti kalibraciju pluviometra u laboratoriji pri dinamičkim uslovima rada. Prilikom ovog podešavanja treba voditi računa da se ne pređe granična vrednost vode u odeljku klackalice, shodno izračunatoj vrednosti prema izrazima (6) i (10).



Slika 7. Dijagram zavisnosti položaja težišta od gustine materijala klackalice.
 Za plastiku: $y_t = 8,50 \text{ mm}$, za leguru Al: $y_t = 7,65 \text{ mm}$



Slika 8. Funkcionalna zavisnost $\Delta V = f(\theta)$ pri $\Delta H_{tt} = \text{const}$

Imajući u vidu da dve veličine utiču na promenu rezolucije merenja, odnosno na zapreminu vode koja ističe iz odeljka klackalice, eksperimentalnim putem je snimljena funkcionalna zavisnost $\overline{\Delta V} = f(\theta)$ pri $\Delta H_{tt} = \text{const}$. Na slici 8. prikazana je ova zavisnost za razvijeni tip pluviometra sa pomičnim tegom. Da bi se ostvarila vrednost rezolucije merenja od $\overline{\Delta H} = 0,230 \text{ mm/imp}$, odnosno postigla zapremina vode koja ističe iz odeljka klackalice $\overline{\Delta V} = 7,14 \text{ cm}^3$, klackalicu sa položajem težišta od 4,88 mm, treba podesiti da se zakreće na obe strane za ugao $\theta = 17^\circ$. Ukoliko su potrebne dalje promene rezolucije merenja, tada je to moguće postići promenom položaja težišta klackalice ili promenom ugla θ ili promenom obe veličine.

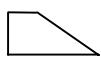
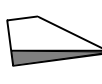
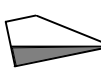
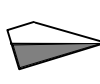
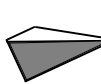
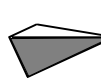
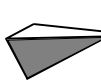
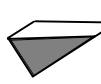
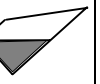
Određivanje granične vrednosti zapremine vode u odeljku klackalice

Prema izrazu (6) ugao θ je nezavisno promenljiva veličina, dok je y_0 varijabila, koja se može odrediti merenjem za nekoliko položaja klackalice, koja se prisilno drži pod različitim uglovima zakretanja. Na osnovu dobijenih vrednosti za θ i y_0 sastavljena je tabela 3. sa skicama položaja klackalice. Na slici 9. prikazan je dijagram zavisnosti zapremine vode u odeljku klackalice V_m od ugla θ , koji u ovom slučaju merenja ne zavisi od položaja težišta klackalice. Granični ugao zakretanja klackalice θ_k dobija se iz uslova $y_0=0$, te se tada iz izraza (6) može odrediti granična vrednost zapremine vode:

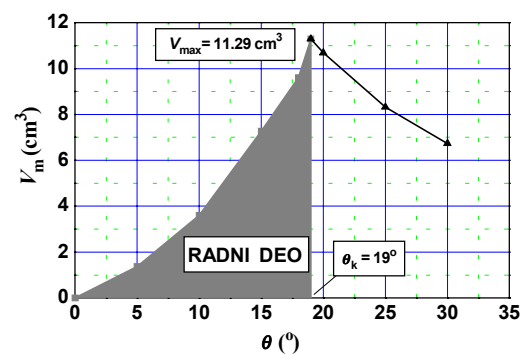
$$V_{\max} = \frac{2 R^3 \text{ctg} \theta}{3}. \quad (10)$$

Za razvijen i geometrijski definisan tip klackalice manjih dimenzija, prilagođen klimatskim uslovima balkanskog područja, sa poluprečnikom krivine klackalice $R = 1,8 \text{ cm}$, granični ugao iznosi oko $\theta_k = 19^\circ$ pri $y_0=0$, a zapremina $V_{\max}=11,29 \text{ cm}^3$. Pri većim uglovima nastaje prelivanje vode iz klackalice i na taj način smanjenje zapremine vodenog sadržaja. Stoga je "radni deo" krive sa slike 9. ograničen uglom θ_k .

Tabela 3. Zavisnost zapremine vode V_m od ugla θ i veličine y_0

Skica									
$\theta (^\circ)$	0	5	10	15	18	$\theta_k=19$	20	25	30
$y_0 (\text{cm})$	1,8	1,38	0,95	0,45	0,15	0	0	0	0
$V_m (\text{cm}^3)$	0	1,37	3,6	7,27	9,60	11,29	10,68	8,32	6,73

Za klackalice različite od usvojenog tipa, u zavisnosti od definisanih veličina R , L_1 i L_2 , na osnovu izvedenih izraza (6) i (10), može se, na opisan način, naći vrednost maksimalne zapremine vode u odeljku klackalice, pri graničnoj vrednosti ugla θ_k . Prilikom kalibracije pluviometra, pri dinamičkim uslovima rada sa promenljivim intenzitetom padavine, elemente klackalice treba tako podesiti da se nikada ne izađe iz "radnog dela" karakteristike, tj, da se ne pređe granična vrednost ugla θ_k .



Slika 9. Dijagram zavisnosti zapremine vode u odeljku nepokretne klackalice od ugla θ

ZAKLJUČAK

Serijski radovi napisanih u inostranim i domaćim časopisima ukazuju da je problematika pluviometara sa klackalicom i akvizicionim modulom dosta složena i da zahteva dugotrajna ispitivanja, merenja, prikupljanje podataka, saradnju hidrologa, meteorologa i električara. U ovom radu je po prvi put opisana dvojaka uloga uvedenog pomičnog tega na klackalici mase m_t . Pomeranjem tega duž tanke zice zanemarljive mase postignuto je da se prilikom promene materijala klackalice ostvari uvek ista rezolucija merenja $\Delta H = \text{const}$. Međutim, na zahtev meteorologa, istim pomičnim tegom moguće je izvršiti i promenu rezolucije merenja u određenim granicama. Utvrđena je i granična vrednost zapremina vode u odeljku klackalice.

LITERATURA

- [1] M. Simić, Č. Maksimović, "A Novel Type of Tipping Bucket Raingauge with Variable Center of Gravity Position", *Journal of Environmental Hydrology*, 1993., I, 25-30.
- [2] M. Simić, G. Todorović, Č. Maksimović, "A Transducer for Measurement of Atmospheric Rainfall Intensity in a Large Temperature Interval", *Termotehnika*, 1993., 1-2, 85-94.
- [3] M. Simić, G. Todorović, "Novi tip temperaturski stabilisanog pluviometra", *Racionalna potrošnja energije i ekologija*, IX Simpozijum Jugoslovenskog društva termičara, 1993., 83-84.
- [4] M. Simić, Č. Maksimović, "Effect of the Siphon Control on the Dynamic Characteristics of the Tipping Bucket Raingauge", *Hydrological Sciences Journal*, 1994., 39, 35-46.
- [5] M. Simić, Č. Maksimović, D. Simić, V. Georgijević, G. Todorović, N. Dunjić "Novi model pluviometra sa linearizovanom dinamičkom karakteristikom", XLIII ETRAN konferencija, 1999., s. 330-333.
- [6] M. Simić, G. Todorović, Lj. Brajović, V. Georgijević i D. Simić "Analiza uloge položaja težišta klackalice pluviometra", XLIV ETRAN conference, 5-8 jun, 2000, Soko Banja (Zbornik u pripremi).